

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等学校机械制造技术基础理论与实践一体化课程系列教材

机械制造工艺基础

(第三版)

主编 周世权 田文峰
副主编 彭江英 罗云华
安萍 罗烈雷

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书以机械制造工艺原理、工艺方法及工艺过程为基础,以零件制造工艺设计的一般原理和步骤、零件的结构工艺性及工艺规程的制定为主线,同时拓展现代工程技术和方法的内容,将机械制造工艺的学习分为铸造工艺、锻压工艺、焊接工艺、切削加工工艺基础、表面加工方法、特种加工及材料成形、机械制造工艺规程等七大部分。除介绍基本工艺原理和方法外,本书突出了工业生产中大量应用的机械化和自动化程度较高的工艺技术;为实现技术基础课程的教学目标,还适当增加了工艺设计与半定量计算的内容,以利于提高学生分析问题和解决问题的能力;同时,简述了制造工艺规程的制定和计算机数控加工的教学内容。为便于学生学习,书中配备了相应的复习思考题。

本书是机械大类平台课程系列教材之一,是培养具有分析和解决工程实际问题能力、综合制造工艺能力和现代制造技术人才创新能力的入门教材,既可作为高等工科院校机类及近机类本(专)科各专业的“机械制造工艺基础”或“金属工艺学”技术基础课程的教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。本书配有作者制作的教学课件,任课教师若需要,可与编辑联系(Tel: 027-87548431, Email: xuzhengda@163.com)。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺基础/周世权,田文峰主编. —3 版. —武汉: 华中科技大学出版社, 2015. 11

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等学校机械制造技术基础与实践一体化课程系列教材

ISBN 978-7-5680-1398-7

I. ①机… II. ①周… ②田… III. ①机械制造工艺-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 272043 号

机械制造工艺基础(第三版)

周世权 田文峰 主编

策划编辑: 徐正达

责任编辑: 徐正达

封面设计: 原色设计

责任校对: 刘 竣

责任监印: 张正林

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)81321913

录 排: 武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷: 武汉鑫昶文化有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 19

字 数: 405 千字

版 次: 2010 年 10 月第 2 版 2016 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

定 价: 36.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前　　言

本书 2008 年入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2014 年入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,也是华中科技大学机械大类教学改革项目的成果之一。在 2014 年教育部机械基础教学指导委员会和工程训练教学指导委员会教学改革项目,以及 2015 年华中科技大学“机械制造技术基础理论与实践一体化课程建设”教学改革项目的支持下,我们按照“加强基础,重视实践,理论与实践相结合,培养创新能力”的要求,对“材料成形工艺基础”“机械制造技术基础”和“金工实习”课程的教学内容进行了较大的改革,并按新的机械大类课程体系的要求,从培养学生工程意识、基本工艺技能和综合实践能力的角度,组织了新的课程体系和教学内容,建设了理论与实践一体化课程系列教材。

《机械制造工艺基础》是一本主要研究常用工程材料坯件及机器零件的成形与制造工艺原理和综合性技术基础的教材,它是在原“金属工艺学”课程教材的基础上去粗取精、拓宽加深后形成的。它几乎涉及机器制造中的所有工程材料的成形与制造工艺,包括金属的液态成形(铸造)、塑性成形(锻压)、连接成形(焊接)、粉末冶金、注塑成形、快速成形、切削加工、电火花与线切割加工、激光加工等。

为了加强课堂教学与工程实践教学的联系与分工,对在工程实践教学中已经进行了深入学习的传统工艺,本书将不再详述;而主要论述在现代工业应用较多、有发展前景的新技术和新工艺中有一定深度的内容,并弱化了有关手工砂型铸造、自由锻、手工电弧焊、钳工与刨削加工等传统的内容,突出了机器造型、特种铸造、模锻、自动焊、数控技术、特种加工等先进技术与工艺。本书以培养学生分析零件结构工艺性和工艺设计方法的基本素质为主线,每章后面都附有难度不等的复习思考题,供学生复习使用。在本书的重点章节中,均附有综合性工艺设计作业题,与相应的计算机辅助工艺设计软件及创新实践项目配合使用,可使学生在有限的学时内自主、有效地应用教材的知识和实训中心的条件,完成综合工艺设计任务,实现理论与实践的紧密结合。本书还适当地增加了当今世界领先的数控加工和快速制造的内容,并在工艺规程中,对各种材料的成形与加

工工艺方法进行了归纳和总结,从而给学生学习后续课程、进行专业课程设计及今后的工作奠定较为扎实的工艺基础。

本书考虑了前、后相关课程的连贯与衔接,故要求学习本书之前应修完“工程制图”“基于项目的工程实践”(或“金工实习”)“工程材料”“互换性与技术测量”等课程。凡前述课程已阐述的内容,本书原则上不再赘述。

本书插图丰富、规范,各章内容的教与学都考虑了与多媒体手段相配合,内容简洁,语言精练,以适应机械大类专业教学的需要。

本书是普通高等学校本(专)科机械大类平台课程系列教材之一,是培养具有分析和解决工程实际问题能力、综合制造工艺能力和现代制造技术人才创新能力的入门教材,既可作为机械大类和机电类专业本(专)科教材,亦可供有关工程技术人员自学参考。

本书主编周世权,田文峰,副主编彭江英、罗云华、安萍、罗烈雷。参加本书编写的人员有:华中科技大学周世权(编写绪论,第3章,第5章的第5节,第6章的第1节)、田文峰(编写第7章的第1~5节)、罗云华(编写第2章的第4~6节,第6章的第2节)、安萍(编写第1章的第2、3节)、彭江英(编写第2章的第1~3节)、郎静(编写第7章的第6节),华夏学院常万顺(编写第5章的第1、2节),武汉纺织大学龚文邦(编写第1章的第1、5节),长江大学帅玉妹(编写第4章),海军工程大学孔小东(编写第5章的第3、4节),湖南文理学院罗烈雷(编写第1章的第4节)。全书由周世权统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在错误或欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2016年1月

目 录

绪论	(1)
第1章 铸造工艺	(7)
1.1 铸造工艺基础	(8)
1.1.1 合金的充型能力	(8)
1.1.2 铸件的凝固	(11)
1.1.3 铸造合金的收缩与缩孔、缩松	(12)
1.1.4 铸造应力和铸件的变形与裂纹	(15)
1.1.5 合金的偏析及铸件中的气孔	(18)
1.2 砂型铸造	(19)
1.2.1 造型材料	(20)
1.2.2 造型、制芯方法	(21)
1.2.3 铸件浇注位置和分型面的选择	(25)
1.2.4 铸造工艺参数的确定	(27)
1.2.5 铸造工艺图的绘制	(30)
1.3 特种铸造	(33)
1.3.1 熔模铸造	(33)
1.3.2 金属型铸造	(34)
1.3.3 压力铸造	(36)
1.3.4 低压铸造	(37)
1.3.5 离心铸造	(38)
1.3.6 消失模铸造	(40)
1.3.7 挤压铸造	(41)
1.4 铸件结构设计	(42)
1.4.1 铸造工艺对铸件结构的要求	(42)
1.4.2 合金铸造性能对铸件结构的要求	(45)
1.4.3 不同的铸造方法对铸件结构的要求	(48)
1.5 铸造金属材料的特性	(50)
1.5.1 铸铁及铸铁件生产	(50)
1.5.2 铸钢及铸钢件生产	(55)
1.5.3 铝、铜合金及其铸件生产	(56)
复习思考题	(58)
第2章 锻压工艺	(62)
2.1 热塑性加工基础	(62)
2.1.1 加工硬化、回复与再结晶	(63)

2.1.2	冷变形与热变形	(64)
2.1.3	锻造比和流线	(65)
2.2	金属的可锻性	(66)
2.2.1	材料性质对金属可锻性的影响	(66)
2.2.2	加工条件对金属可锻性的影响	(67)
2.3	锻造工艺	(68)
2.3.1	模锻工艺	(68)
2.3.2	锤上模锻工艺规程的制定	(77)
2.3.3	模锻成形件的结构工艺性	(80)
2.3.4	特种压力加工	(81)
2.4	冷塑性变形加工基础	(85)
2.5	冲裁工艺	(89)
2.6	成形工艺	(92)
	复习思考题	(99)
第3章	焊接工艺	(103)
3.1	概述	(103)
3.2	焊接的基本原理	(105)
3.2.1	熔焊的基本原理	(105)
3.2.2	压焊的基本原理	(113)
3.2.3	焊接缺陷	(116)
3.2.4	焊接检验	(118)
3.3	焊接工艺方法	(120)
3.3.1	熔焊工艺方法	(120)
3.3.2	压焊工艺方法	(128)
3.4	金属的焊接性	(132)
3.4.1	焊接性的概念和估算方法	(132)
3.4.2	碳钢的焊接	(133)
3.4.3	有色金属的焊接	(135)
3.4.4	异种金属的焊接	(136)
3.5	焊接结构设计	(137)
3.5.1	焊件材料和方法的选择	(137)
3.5.2	焊接接头和焊缝尺寸的设计	(138)
	复习思考题	(142)
第4章	材料切削加工基础	(146)
4.1	切削加工基本知识	(146)
4.1.1	金属切削加工的特点及应用	(146)
4.1.2	零件的加工精度和表面粗糙度	(147)

4.1.3	切削用量及选用	(151)
4.1.4	切削刀具	(153)
4.2	金属切削加工的基础理论	(160)
4.2.1	切削过程	(161)
4.2.2	积屑瘤	(162)
4.2.3	残余应力与冷硬现象	(163)
4.2.4	切削力与切削功率	(164)
4.2.5	切削热	(166)
4.2.6	切削液的作用	(167)
4.2.7	刀具的磨损与耐用度	(167)
4.2.8	材料切削加工性	(169)
4.3	切削加工的技术经济评价	(170)
复习思考题		(172)
第5章	典型表面的加工	(173)
5.1	概述	(173)
5.2	外圆表面的加工	(175)
5.2.1	外圆表面的车削	(175)
5.2.2	外圆表面的磨削	(179)
5.2.3	外圆表面的精加工及光整加工	(183)
5.3	孔加工	(186)
5.3.1	钻孔	(186)
5.3.2	扩孔和铰孔	(189)
5.3.3	镗孔	(190)
5.3.4	磨孔	(192)
5.3.5	拉削	(193)
5.3.6	孔的珩磨	(194)
5.3.7	孔的加工方法	(195)
5.4	平面加工	(197)
5.4.1	平面刨削	(197)
5.4.2	平面铣削	(199)
5.4.3	平面磨削	(200)
5.5	齿形加工	(202)
5.5.1	概述	(202)
5.5.2	铣齿	(204)
5.5.3	插齿	(206)
5.5.4	滚齿	(208)
5.5.5	齿形的光整加工方法	(211)

复习思考题	(215)
第6章 特种加工及材料成形新工艺	(216)
6.1 特种加工简介	(216)
6.1.1 电火花加工	(217)
6.1.2 超声波加工	(223)
6.1.3 激光加工	(224)
6.2 材料成形新工艺	(226)
6.2.1 粉末冶金	(226)
6.2.2 注塑工艺	(230)
6.2.3 快速成形	(233)
复习思考题	(237)
第7章 机械加工工艺规程	(238)
7.1 概述	(238)
7.1.1 生产过程与工艺过程	(238)
7.1.2 工艺过程的组成	(240)
7.1.3 生产纲领、生产类型及其工艺特征	(242)
7.2 安装与定位	(244)
7.2.1 工件的安装与基准	(244)
7.2.2 工件在夹具中的定位	(247)
7.2.3 定位基准的选择	(255)
7.3 零件加工的结构工艺性	(259)
7.4 工艺规程的编制过程	(262)
7.4.1 表面加工方法的选择	(262)
7.4.2 加工阶段的划分	(266)
7.4.3 工序的集中与分散	(267)
7.4.4 工序的安排	(267)
7.4.5 加工余量的确定	(269)
7.5 数控加工	(270)
7.5.1 数控加工的特点	(270)
7.5.2 数控加工方法	(271)
7.5.3 数控编程	(274)
7.6 典型零件的工艺规程编制举例	(276)
7.6.1 轴类零件的加工工艺	(276)
7.6.2 轮类零件的加工工艺	(281)
7.6.3 箱体类零件加工	(286)
复习思考题	(288)
参考文献	(295)



图 0-0 神舟十号载人飞船返回舱进入大气层

绪 论

1. 本课程的性质、地位和作用

“机械制造工艺基础”(fundamentals of manufacturing process)是学生学习机械制造系列课程必不可少的先修课,也是获得机械制造基本知识的技术基础课。

“机械制造工艺基础”研究产品从原材料到合格零部件或机器的制造工艺技术,实践性很强。学生在工程实践过程中通过参观典型的制造工程系统、独立的实践操作和综合项目工艺过程的训练,将有关制造工程的基本工艺理论、基本工艺知识、基本工艺方法和基本工艺实践有机结合起来,获取了丰富的感性知识;同时,将感性知识条理化,并上升为理性知识,实现认识的第一次飞跃,然后通过创新项目实践,实现从理性知识到指导实践的第二次飞跃。

高等工科院校是高级科技创新人才的摇篮,“机械制造工艺基础”课程是提供高级科技创新人才所应具备的基本知识和基本技能等综合素质的基础课程,也是机械学科大类的平台课程。

2. 本课程的内涵

制造业是贯穿我们生活所有阶段的人类活动。我们周围的一切,包括我们穿的、用的,我们居住的,甚至我们吃的大部分产品都经历了一些制造过程。manufacturing一词源于拉丁文 manu(意为“手”)和 factus(意为“制造”),其经典的定义为“货物和物品通过手工或特别机械的制作,往往具有大规模和分工作业特点”。应看到,这一定义是不完整的,但我们可以用它理解制造在人类发展中的作用。

制造工程源于机械制造工程,是一门有着悠久历史的学科,经过科学技术工作者

的长期努力,现已发展成为包括机械制造工程、航空航天工程、电子产品制造工程和化工产品制造工程等在内的现代制造工程学科。制造工程研究物质从原材料到合格产品的制造工艺过程,但我们所说的制造工程,主要指机械制造工程,即将原材料通过制造工艺变为具有一定功能的零部件或机器的过程。

制造业是国民经济的基础,它担负着向其他各部门提供工具、仪器和机械设备与技术装备的任务。据西方工业国家统计,制造业创造了 60% 的社会财富(如美国为 68%),45% 的国民经济收入是由制造业完成的。如果没有制造业提供品质优良、技术先进的装备,那么信息技术、新材料技术、海洋工程技术、生物工程技术及空间技术等新技术的发展将受到严重的制约。可以说,机械制造业的发展水平是衡量一个国家经济实力和科学技术水平的重要标志之一。

制造工程的内容主要包括材料成形和加工工艺两大部分。其中,材料成形主要是在保证性能要求的前提下,优质、低成本地获取具有一定结构和形状的毛坯或产品的制造工艺,通常将其称为热加工工艺,主要包括铸造、锻压、焊接、热处理、粉末冶金、塑料成形、陶瓷和复合材料的成形等。但其内涵远远地超过了所谓热加工的范畴。而加工工艺一般是指将材料成形所获得的毛坯,通过切除的工艺,优质、低成本地获取具有一定结构和形状、一定的精度和表面品质的产品的工艺过程,通常将其称为冷加工工艺,主要包括车削、铣削、刨削、磨削、钳工、现代计算机控制的加工(如数控机床和加工中心等)、特种加工(如超声波、电火花和激光加工等)以及快速制造。但其内涵远远地超过了所谓冷加工的范畴。

3. 本课程的特点

科学技术的发展使传统的制造工艺越来越多地受到现代制造技术的挑战,同时,现代制造技术又要以传统的制造工艺为基础,因此,本课程将以传统的制造工艺为主,以现代制造技术为辅。由于现代制造技术已经成为大中型制造类企业的主要生产技术,所以,应努力使现代制造技术的内容所占比例不断提高。为此,传统制造技术与现代制造技术的结合,构成了本课程的基本特征。

1) 传统制造技术的特征 传统制造技术 (traditional manufacturing technology) 可概括为如图 0-1 所示的基本内容。它是在总结劳动人民几千年实践的基础上发展起来的,对推动人类社会的发展与进步、人民物质生活和精神生活水平的提高发挥了十分重要的作用。我国古代在金属加工工艺方面的成就极其辉煌。在公元前 16—前 11 世纪的商朝已是青铜器的全盛时期,当时青铜冶铸技术相当精湛。在河南安阳武官村出土的司母戊大方鼎是商朝的大型铸件,鼎重 875 kg,其上花纹精致。公元前 5 世纪的春秋时期,制剑术已相当高明,1965 年在湖北省江陵县出土的越王勾践剑,说明当时已掌握了高超的锻造和热处理技术。1980 年 12 月从秦始皇陵墓陪葬坑出土的大型彩绘铜车马,结构精致,形态逼真,由三千多个零部件组成,综合了铸造、焊接、凿削、研磨、抛光及各种连接工艺。明朝宋应星编著的《天工开物》一书论述了冶铁、铸造、炼钢、锻造、焊接(锡焊和银焊)、淬火等金属成

形与改性的工艺方法,它是世界上最早的有关金属工艺的科学著作之一。这些充分反映了我国古代在金属成形工艺方面的科学技术都曾远远超过同时代的欧洲,居世界领先地位,对世界文明和人类进步作出过巨大贡献。但是,我国历史上长期的封建统治,严重地束缚了科学技术的发展,造成了我国与先进国家之间很大的差距。

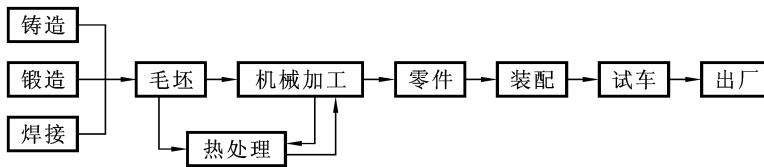


图 0-1 机械制造的工艺过程

制造技术的发展是由社会、政治、经济等多方面因素决定的,但纵观其发展历程,影响其发展最主要的因素则是技术的推动及市场的牵引。在人类历史上,一方面,科学技术的每次革命,必然引起制造技术的不断发展,也推动了制造业的发展;另一方面,人类的不断进步,人类需求的不断变化,推动了制造业的不断发展,也促进了制造技术的不断发展。近二百年来,在市场需求不断变化的驱动下,制造业的生产规模沿着“小批量→少品种大批量→多品种变批量”的道路发展;在科技高速发展的推动下,制造业的资源配置朝着“劳动密集、设备密集、信息密集、知识密集”的方向发展;与之相适应,制造技术的生产方式沿着“手工→机械化→单机自动化→刚性流水线自动化→柔性自动化→智能化”的道路发展。

传统的制造业起源于工业革命。18世纪后半叶以蒸汽机和工具机的发明为特征的产业革命,标志着制造业已完成从手工业作坊式生产到以机械加工和分工原则为中心的工厂生产的艰难转变。19世纪电气技术的发展,开辟了崭新的电气化时代,制造业也得到飞速发展,制造技术实现了批量生产、工业化规范生产的新局面。20世纪内燃机的发明,引发了制造业的革命,流水生产线和泰勒工作制得到广泛的应用。两次世界大战特别是“二战”期间,以降低成本为中心的刚性的、大批量的制造技术和生产管理有了很大的发展。可以说,这种大批量以机器制造机器的技术是传统制造技术的主要特征。所以,本课程将主要介绍自动或半自动机械制造工艺方法,这类工艺技术在当今的工业规模生产中仍然占有相当大的比重。

2) 现代制造技术的特征 所谓制造技术,是指按照人们所需的目的,运用知识和技能,利用客观物质工具使原材料变成产品的技术的总称。制造技术是制造业的支柱,是一个国家经济持续增长的根本动力。

现代制造技术(modern manufacturing technology)是传统制造技术不断吸收机械、电子、信息、材料、通信及现代管理等技术的成果,将其综合应用于产品设计、制造、检测、管理、售后服务等机械制造全过程,实现优质、高效、低耗、清洁、灵活地生产,取得理想的技术经济效果的制造技术的总称。“二战”以后的七十年来,计算机、

微电子、信息和自动化技术有了迅速发展,由此推动着制造技术朝高品质生产和柔性生产的方向发展,并在制造业中得到愈来愈广泛的应用,先后出现了数控(NC)、计算机数控(CNC)、直接数控(DNC)、柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)、计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)、计算机集成制造(CIMS)、准时化生产(JIT)、制造资源规划(MRP)、精益生产(LP)和敏捷制造(AM)等多项先进的制造技术与制造模式,使制造业正经历着一场新的技术革命(第二次工业革命)。

现代制造技术具有下列特征:

(1) 计算机技术、传感技术、自动化技术、新材料技术及管理技术等与传统制造技术相结合,使制造技术成为一个能驾驭生产过程的物质流、信息流和能量流的系统工程。

(2) 传统制造技术一般单指加工制造过程的工艺方法,而现代制造技术则贯穿了从产品设计、加工制造到产品销售及使用、维护等的全过程,成为“市场→产品设计→制造→市场”的大系统。

(3) 传统制造技术的学科、专业单一,界限分明,而现代制造技术的各学科、专业间交叉、融合,其界限逐渐淡化甚至消失。比如纳米技术就是材料、机械、电子、计算机等多学科的融合。

(4) 生产规模的扩大及最佳技术经济效果的追求,使现代制造技术比传统制造技术更加重视工程技术与经营管理的结合,更加重视制造过程组织和管理体制的简化及合理化,产生一系列技术与管理相结合的新的生产方式。

(5) 发展现代制造技术的目的在于能够实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,并取得理想的技术经济效果。

市场竞争不仅要求低成本,而且也要求能生产出世界级的、高科技含量的产品。例如,代表当今制造技术最高水平的航空发动机(其结构如图 0-2 所示),就是热和流体力学、计算机技术、新材料和先进制造工艺的完美结合。其叶片一般要求在 600 ℃以上的高温下工作,材料一般为耐热合金,采用顺序凝固和精密铸造方法成形,需要运用计算机辅助设计,并在加工中心上加工制造。这些知识将在专业课程中进一步学习。

4. 本课程的主要任务

(1) 使学生掌握主要的机械制造工艺的基本原理、主要方法和应用特点;熟悉机械零件的常用制造方法及其所用的主要设备和工具;了解新工艺、新技术、新材料在现代机械制造中的应用。

(2) 使学生对典型零件具有选择加工方法和进行工艺分析的初步能力,在主要工种方面应能独立完成典型零件的加工制造工艺过程计划的制订,并具有一定的工艺实验和工程实践的能力。

(3) 培养学生的产品品质意识和经济观念,理论联系实际、一丝不苟的作风,以及实验研究的初步能力等基本素质。

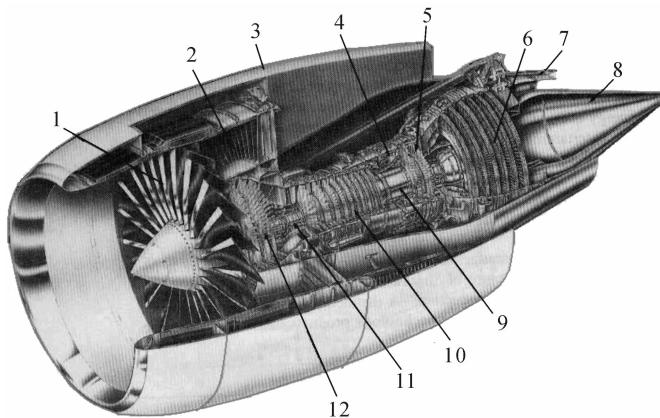


图 0-2 航空发动机的结构

1—叶片 2—风扇定子 3—扇形喷嘴 4—环形燃烧室 5—高压涡轮 6—低压涡轮
7—核心喷嘴 8—喷嘴中心体 9—高压轴 10—高压压缩器 11—低压轴 12—低压压缩器

(4) 使学生具有分析零件结构工艺性的基本能力,能够进行简单产品的结构设计和工艺设计,培养创新意识和综合能力。

本课程的主要内容为铸造工艺、锻压工艺、焊接工艺、切除加工工艺等基础工艺和产品的综合制造工艺,以及粉末冶金、塑料成形、特种加工及快速制造技术等先进工艺的基本原理和应用。

5. 本课程的教学方法

本课程的教学主要结合基于项目的工程实践,通过课堂讲授、作业和实践等方式完成。为了有效地使用本教材进行“机械制造工艺基础”课程的教学,希望注意以下几点:

(1) 教学中应结合工程实践,以掌握基本工艺原理为主。教材中的基本工艺都是在工程实践中学生亲手做过的或者现场教学看过的,因此,教师和学生都应十分注意将课程内容与实践内容紧密地联系起来,学生应在自主学习的基础上,通过教师的课堂分析,重点掌握各类工艺的基本原理。对于部分由于实习条件不够,一时难以实现的内容,可用计算机辅助教学的方式进行简单介绍。

(2) 应确实贯彻以工艺过程为主的指导思想。本教材只简单介绍设备和仪器的外部结构和主要功能,而重点介绍成形加工的工艺过程,通过制造过程中工艺参数的变化对零件品质的影响规律的分析,使学生具有对各种制造方法的工艺参数选择和技术经济性分析的基本能力。

(3) 应注意本教材与其他相关教学内容的合理安排。本教材的内容具有自身的相对独立性,但同时与其他教学环节又有一定的联系,如主要的工艺方法与《基于项目的工程实践》中的相关内容基本相同。因此,在教学中不应重复工艺操作过程,而应该将重点放在工艺原理的分析上,弥补实习中缺少的理论知识,使学生能够将感性

知识上升为理性知识,获得举一反三的教学效果。同时,还应减少重复讲授,提高教学效率。另外,有关零件结构工艺性的内容应该具有相对独立性,以工艺原理和特点为基础,以零件结构设计的合理性为目标,使学生掌握分析零件结构工艺性的原理和方法,同时具有初步的结构设计能力。

(4) 教学内容的学时分配。本教材的教学内容是按照 40 学时安排的,各学校可结合教学大纲与学校的实际情况进行适当的增减。主要内容所占学时的比例建议为:第 1 章至第 3 章占总学时的 40%,第 4 章至第 7 章占总学时的 60%。建议将实验学时以课外学分方式独立进行,或者与工程实践课程结合,内容可参考《基于项目的工程实践实操指导书》。

(5) 教材内容及特点。各章内容的组织本着循序渐进、由浅入深和减少重复的原则,力求系统化和独立性,减少过于细致的分析和相关步骤的分解,每章前都给出了重点和难点,教师应根据不同的要求,进行讲授和指定学生的自学范围及参考书。

(6) 各章末给出了案例计算和分析,其目的是为了举一反三,绝不可死记硬背,以帮助学生具体分析和解答实际问题。复习思考题是根据每章的重点和难点内容安排的,也有部分基本训练的题目,其目的是启发学生独立思考,培养分析问题、解决问题的能力,引导学生自主学习,学会查阅资料,认真进行归纳和小结,以便加深理解,从而培养实事求是的科学研究作风。

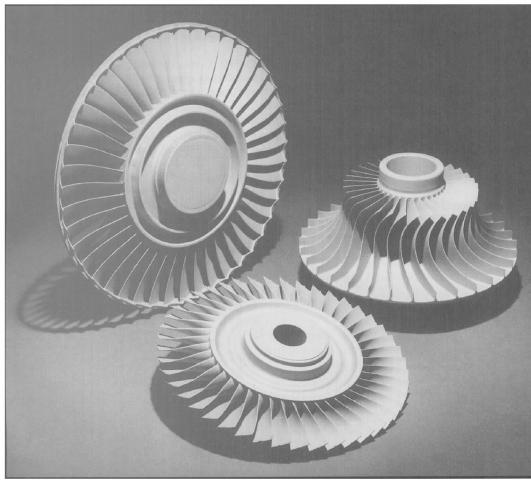


图 1-0 真空铸造的精密整体涡轮超合金铸件

第 1 章 铸造工艺

【学习指导】 学习本章前应预习《工程材料》教材中有关二元相图、凝固与结晶的内容,以及《机械制图》教材中有关三视图的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的相关工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《材料成形与机械制造技术基础——材料成形分册》教材的有关章节。

【主要内容】 铸造合金的充型能力与流动性,缩孔、缩松的产生与防止,铸造应力、变形与裂纹的产生与防止,常用造型方法,浇注位置和分型面的选择,铸造工艺图的绘制,特种铸造工艺,铸件的结构工艺性,铸件的生产及应用。

【学习重点】 铸造合金的流动性及其影响因素,顺序凝固和同时凝固的原理及应用,铸造热应力与变形的产生与防止,浇注位置和分型面的选择,铸件的外形、内腔、壁厚和壁间连接的结构设计,灰铸铁的特点及应用。

铸造(casting)是历史最为悠久的金属成形工艺,也是当今机械制造中毛坯生产的重要工艺方法。在机械制造业中,铸件的应用十分广泛。在一般机械设备中,铸件的质量往往要占机器总质量的 70%~80%,有些甚至更高。

铸造具有以下特点:

(1) 铸造是一种液态成形技术。形状十分复杂的铸件可以通过铸造生产,如带

有复杂内腔的内燃机的缸体和缸盖、机床的床身和箱体、涡轮机的机壳和涡轮等,都是采用铸造方法生产的。

(2) 铸造生产的适应范围非常广。首先,各种金属材料,如工业上常用的碳钢、合金钢、铸铁、铜合金、铝合金等,都可以通过铸造的方法制造出零件,其中应用广泛的铸铁件只能通过铸造方法获得;其次,铸件的大小几乎不限,质量从几克到几百吨,壁厚从1 mm以下到1 m以上的各种尺寸大小的零件均可通过铸造生产;再次,各种批量的零件生产,从单件生产到大量生产,铸造方法均能适应。

(3) 铸造生产的成本较低。首先,铸件的加工余量小,减少切削加工量,节省金属,从而降低了制造成本;其次,铸造过程中各项费用较低,铸件本身生产成本较低。

但是,一般来说,由于铸态金属的晶粒较为粗大,不可避免地存在一些化学成分的偏析、非金属夹杂物及缩孔或缩松等铸造缺陷,因此,铸造零件的力学性能和可靠性较锻造零件差。近几十年来,随着铸造合金和铸造工艺的发展,原来用钢材锻造的某些零件,如某些内燃机的曲轴、连杆等,现在也改用铸钢或球墨铸铁来铸造,由此大大降低生产成本,其工作的可靠性也没有受到影响。

1.1 铸造工艺基础

铸造生产过程非常复杂,影响铸件品质的因素也非常多。除铸造生产工艺外,造型材料、铸造合金、熔炼及浇注工艺等,也会对铸件品质产生重要的影响。

1.1.1 合金的充型能力

1. 合金流动性与充型能力的概念

液态合金充填型腔的过程称为充型。液态合金充满型腔,获得形状完整、轮廓清晰铸件的能力称为合金的充型能力(mold filling capacity)。合金一般是在纯液态下充满型腔的,但也有边充型边结晶的情况。在充填型腔的过程中,液态合金中形成的晶粒堵塞充型通道时,流动被迫停止。如果在型腔被充满之前液态合金就停止流动,铸件就会因“浇不足”而出现形状不完整的情况。

液态合金的充型能力首先取决于本身的流动能力,同时又与外界条件,如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素密切相关,是各种因素的综合反应。

液态合金本身的充型能力称为合金的流动性(fluidity),与合金的成分、杂质含量、物理性质和温度有关,而与外界因素无关,是表征合金铸造性能的主要方面之一。

流动性好的合金充型能力强,便于浇注出轮廓清晰、壁薄而形状复杂的铸件,同时也有利于非金属夹杂物和气体的上浮与排除,还有利于对合金冷却凝固过程所产生的收缩进行补缩。反之,流动性差的合金充型能力也较差,但可以通过外界条件的改善来提高其充型能力。

由于影响合金充型能力的因素很多,难以对各种合金在不同条件下的充型能力

进行比较,所以,常用固定条件下所测得的合金流动性来表示合金的充型能力。

2. 影响合金充型能力的主要因素

1) 合金性质 合金性质是内因,决定了合金本身的流动能力——流动性。测量流动性通常可以采用如图 1-1 所示的几种方法之一。

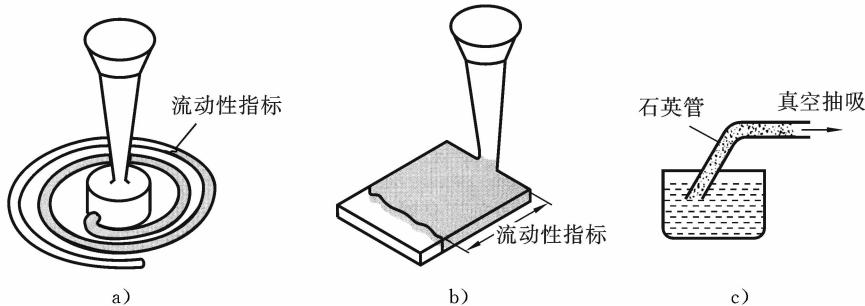


图 1-1 流动性的测量方法

a) 螺旋形试样 b) 平板试样 c) 真空吸铸

(1) 合金的成分。图 1-2 所示为 Fe-C 合金的流动性与成分的关系,可以看出,合金的流动性与其成分之间存在着一定的规律性。纯金属、共晶成分合金是在固定的温度下凝固(逐层凝固),已凝固的固体层从铸件表面逐层向中心推进,与尚未凝固的液体之间界面分明,且固体层内表面比较光滑,对液态合金的流动阻力小,故流动性最好(见图 1-3a)。其他成分的合金的凝固是在一定温度范围内进行的(糊状凝固),此时结晶在一定凝固区内同时进行,由于初生的树枝状晶体使固体层内表面粗糙,对合金液的流动阻力大,所以合金的流动性差。合金的结晶温度范围越大,同时结晶的区域也越宽,树枝状晶体也越发达,流动性也就越差(见图 1-3b)。

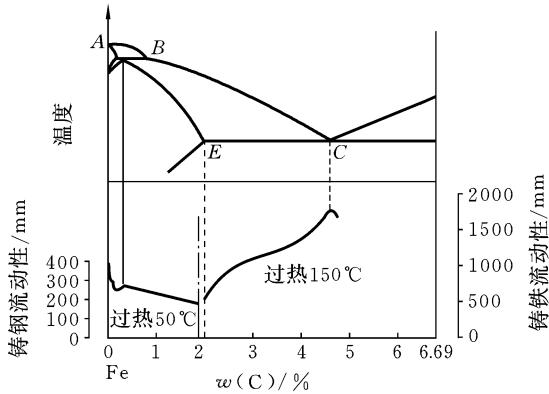


图 1-2 Fe-C 合金的流动性与成分的关系

(2) 结晶潜热(latent heat of crystallization)。结晶潜热占液态合金热量的 85%~90%,但它对不同类型合金的流动性的影响是不一样的。纯金属和共晶成分的合金在固定温度下凝固,结晶潜热的作用能够发挥,凝固过程中释放的潜热越多,

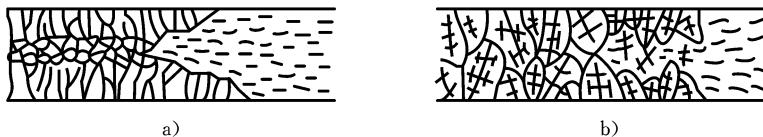


图 1-3 金属与合金的凝固与流动特性

a) 纯金属与共晶成分的合金 b) 具有较宽结晶区域的合金

流动性就越好。对于结晶温度范围较宽的合金,当固相体积达一定量(一般 20% 左右)时,晶粒就形成了网状结构而阻碍流动,大部分的潜热不能发挥作用,故潜热对流动性的影响不大。但如果初生相不是树枝状晶体形态,而是以对流动阻碍较小的块状形态析出,则由于初生相对流动阻碍较小,停止流动时固相可以达到相当多的量,潜热对流动性的影响就相当大。

2) 铸型性质 铸型的阻力影响液态合金的充型速度,铸型与合金的热交换强度影响液态合金保持流动的时间。

(1) 铸型材料。铸型材料的比热容越大,对液态合金的激冷作用越强,合金的充型能力就越差;铸型材料的导热系数越大,铸型-金属界面向外传递热量的能力就越强,对液态合金的冷却作用也就越大,合金的充型能力就越差。

(2) 铸型温度。铸型温度越高,液态合金与铸型的温差越小,热量的散失速度越小,因此合金保持流动的时间越长。生产中有时采用对铸型预热的方法以提高合金的充型能力。

(3) 铸型中的气体。在液态合金的热作用下,铸型(尤其是砂型)将产生大量的气体,如果气体不能及时排出,型腔中的气压将增大,从而对合金的充型产生阻碍。提高铸型的透气性,减少铸型的发气量,以及在远离浇口的最高部位开设出气口等,均可减少型腔中气体对充型的阻碍。

3. 浇注条件

(1) 浇注温度(pouring temperature)。浇注温度对合金的充型能力有决定性的影响。浇注温度提高,液态合金的过热度增大,保持流动的时间会延长。因此,在一定温度范围内,充型能力随温度的提高而直线上升。但温度超过某界限后,由于液态合金氧化、吸气增加,充型能力提高的幅度会越来越小。

对薄壁铸件或流动性差的合金,采用提高浇注温度的措施可以有效地防止浇不足或冷隔等铸造缺陷。但随着浇注温度的提高,铸件的一次结晶组织变得粗大,且容易产生气孔、缩孔、缩松、黏砂、裂纹等铸造缺陷,故在保证充型能力足够的前提下,浇注温度应尽量低。

(2) 充型压力。液态合金在流动方向上所受到的压力越大,充型能力就越好。如增加浇注时液态合金的静压头的方法,可改善充型能力。某些特种工艺,如压力铸造、低压铸造、离心铸造、实型负压铸造等,充型时液态合金受到的压力较大,充型能力较强。

(3) 浇注系统。浇注系统(gating system)的结构越复杂,流动的阻力就越大,液态合金在浇注系统中的散热也越大,充型能力也就下降。因此,浇注系统的结构、浇道截面的尺寸都会影响充型能力。在浇注系统中设置过滤或挡渣结构,一般均使合金的充型能力明显下降。

1.1.2 铸件的凝固

铸件的成形过程是液态合金在铸型中的凝固过程。合金的凝固方式对铸件的品质、性能及铸造工艺等都有极大的影响。

1. 铸件的凝固方式

在铸件的凝固过程中,其截面上一般存在三个区域,即固相区、凝固区和液相区,其中,对铸件品质影响较大的主要是液相和固相并存的凝固区的宽窄。铸件的凝固方式就是依据凝固区的宽窄来划分的。

(1) 逐层凝固(planar solidification)。纯金属或共晶成分合金在凝固过程中因不存在液、固并存的凝固区,故截面上外层的固体和内层的液体由一界面(凝固前沿)清楚地分开(见图 1-4a)。随着温度的下降,固体层厚度不断加大、液体层厚度不断减小,直至凝固前沿到达铸件的中心。这种凝固方式称为逐层凝固。

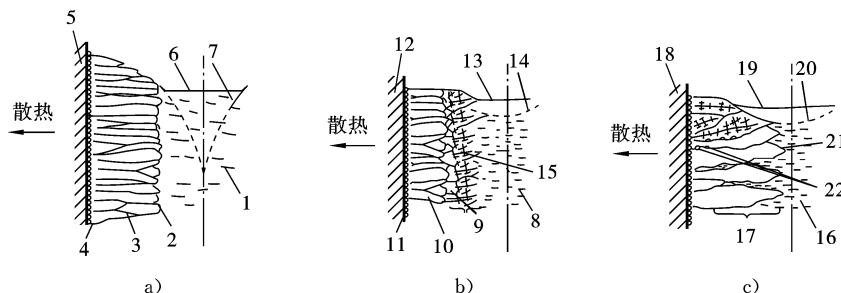


图 1-4 铸件的凝固方式

a) 逐层凝固 b) 中间凝固 c) 糊状凝固

1、8、16—熔体 2、21—凝固前沿 3、10—柱状晶 4、11—细小等轴晶 5、12、18—铸型

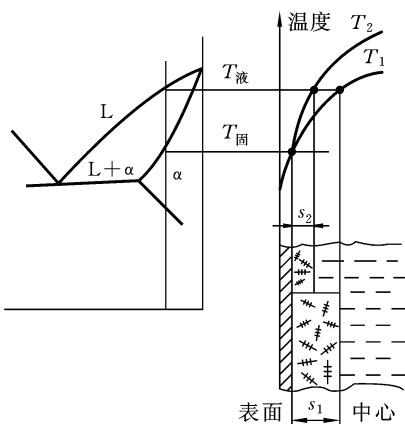
6、13、19—收缩界面 7、14、20—最终收缩界面 9、17—糊状区 15—在熔体中树枝晶 22—显微缩孔

(2) 糊状凝固(mushy solidification)。如果合金的结晶温度范围很宽,且铸件的温度分布较为平坦,则在凝固的某段时间内,铸件表面并不存在固体层,而液、固并存的凝固区贯穿整个截面(见图 1-4c)。这种凝固方式先呈糊状而后固化,故称为糊状凝固。

(3) 中间凝固(intermediate solidification)。大多数合金的凝固介于逐层凝固和糊状凝固之间(见图 1-4b),这种凝固方式称为中间凝固。

2. 影响铸件凝固方式的因素

从图 1-5 可以看出,合金的凝固方式主要受合金的结晶温度范围和凝固时铸件



截面上温度分布梯度的影响。

(1) 合金的结晶温度范围。由相图可知,合金的结晶温度范围仅与合金的化学成分有关。合金结晶温度范围愈小,凝固区域愈窄,合金愈倾向于逐层凝固。从 Fe-C 相图可知,钢的结晶温度范围随碳含量的增大而增大,因而在砂型铸造时,低碳钢近于逐层凝固方式,中碳钢为中间凝固方式,高碳钢为糊状凝固方式。

(2) 铸件的温度梯度 (temperature gradient)。在合金成分已定的情况下,合金的结晶温度范围已经确定,铸件凝固区的宽窄主要取决于内外层间的温度梯度。若铸件的温度梯度较小,如图 1-5 中的曲线 T_1 的温度梯度小于曲线 T_2 的,则 T_1 对应的凝固区较宽($s_1 > s_2$),合金倾向于糊状凝固。

图 1-5 温度梯度对凝固区域的影响

逐层凝固的合金的流动性较好,充型能力强,缩孔、缩松比较集中,便于防止,其铸造性能较好。糊状凝固的合金流动性较差,易产生浇不足、冷隔等缺陷,而且易产生缩松,难以获得组织致密的铸件。在常用合金中,灰铸铁、铝合金等倾向于逐层凝固,而球墨铸铁、锡青铜、铝铜合金等倾向于糊状凝固。

1.1.3 铸造合金的收缩和缩孔、缩松

1. 合金的收缩

液态合金注入铸型后开始凝固,直至冷却到室温的过程中,其体积和尺寸缩小的现象,称为合金的收缩 (contraction)。合金的收缩也是表征合金铸造性能的重要方面之一。许多铸造缺陷,如缩孔、缩松、变形、开裂等的产生,都与合金的收缩有关。

合金的收缩可分为以下三个阶段:

(1) 液态收缩 (liquid contraction), 即合金从浇注温度到凝固开始温度 (液相线温度) 时的收缩。

(2) 凝固收缩 (solidification contraction), 即合金在凝固阶段的收缩,即合金从液相线温度冷却至固相线温度时的收缩。对于具有结晶温度范围的合金,凝固收缩包括合金从液相线冷却到固相线所发生的收缩和合金由液体状态转变成固体状态所引起的收缩。前者与合金的结晶温度范围有关,后者一般为定值。

(3) 固态收缩 (solid contraction), 即合金从固相线温度冷却至室温时的收缩。

一般来说,凝固收缩与液态收缩是铸件产生缩孔和缩松的基本原因;而合金的固态收缩对铸件的形状和尺寸精度有直接影响,也是铸件产生铸造应力、热裂、冷裂和变形等缺陷的基本原因。

合金的总体积收缩为以上三个阶段收缩之和,它与金属本身的成分、浇注温度及相变有关。

2. 铸件中缩孔和缩松的形成

浇入铸型的液态合金在凝固过程中,如果液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补充,在铸件最后凝固部位将形成孔洞。按孔洞的大小和分布,可将其分为缩孔和缩松。

1) 缩孔 缩孔(shrinkage)是指在铸件上部或最后凝固部位出现的容积较大的孔洞。其形状极不规则,孔壁粗糙并带有枝晶状,多呈倒圆锥形。

缩孔的形成如图 1-6 所示。假设合金呈逐层凝固方式,当液态合金填满型腔后,随温度下降,合金产生液态收缩。此时,内浇道尚未凝固,型腔是充满的。当温度降到结晶温度后,紧靠铸型的合金首先凝固形成一层外壳,同时内浇道凝固(见图 1-6b)。随温度继续下降,固体层加厚。当铸型内合金的液态收缩和凝固收缩大于固态收缩时,内部剩余液体的体积变小,液面下降,在铸件上部出现空隙。由于大气压力,硬壳上部也可能向内凹陷(见图 1-6c)。继续冷却、凝固、收缩,待金属全部凝固后,在最后凝固的部位(铸件上部)形成一个倒锥形的孔洞——缩孔(见图 1-6d)。铸件完全凝固后,整个铸件还会进行固态收缩,外形尺寸进一步缩小(见图 1-6e),直至温度达到室温为止。

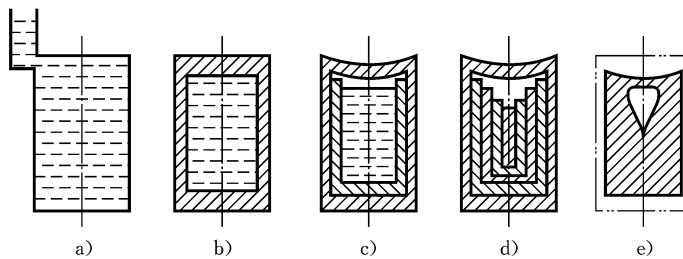


图 1-6 缩孔形成示意图

a) 充满型腔 b) 外层凝固 c) 内部金属液面下降 d) 缩孔形成 e) 外形缩小

纯金属和成分靠近共晶点的合金,在恒温或较窄的温度范围内凝固,呈逐层凝固的方式,合金流动性好,倾向于形成集中的缩孔。

2) 缩松 铸件截面上出现的分散、细小孔称为缩松(dispersed shrinkage)。缩松有时需借助放大镜才能发现。缩松形成的原因和缩孔基本相同,即铸型内合金的液态收缩和凝固收缩大于固态收缩,同时在铸件最后凝固的区域得不到补充。缩松通常发生于合金的凝固温度范围较宽、合金倾向于糊状凝固时,当枝状晶长到一定程度后,枝晶分叉间的液体被分离成彼此孤立的状态,它们继续凝固时也将产生收缩。这时铸件中心虽有液体存在,但由于枝晶的阻碍使之无法进行补缩,在凝固后的枝晶分叉间就形成许多微小孔洞。缩松一般出现在铸件壁的轴线、内浇道附近和缩

孔的下方。

缩松在铸件中或多或少都存在着,对一般铸件来说,往往不把它作为一种缺陷看待,只有当铸件要求具有好的气密性和力学性能时,才考虑消除铸件的缩松。

由以上缩孔和缩松形成过程可以得到如下规律:合金的液态收缩和凝固收缩愈大,铸件愈易形成缩孔;合金的浇注温度愈高,液态收缩愈大,愈易形成缩孔;结晶温度范围宽的合金,倾向于糊状凝固,易形成缩松;纯金属和共晶成分合金倾向于逐层凝固,易形成集中缩孔。图 1-7 是具有共晶反应的系统的成分、组织与性能间的关系示意图。从图可见,纯金属和共晶成分合金主要形成缩孔,但纯金属的屈服强度低,而断后伸长率较高。共晶成分合金屈服强度较高,而断后伸长率较低,通过球化共晶体可以提高塑性。其他成分合金形成缩松的倾向大,但屈服强度较高。

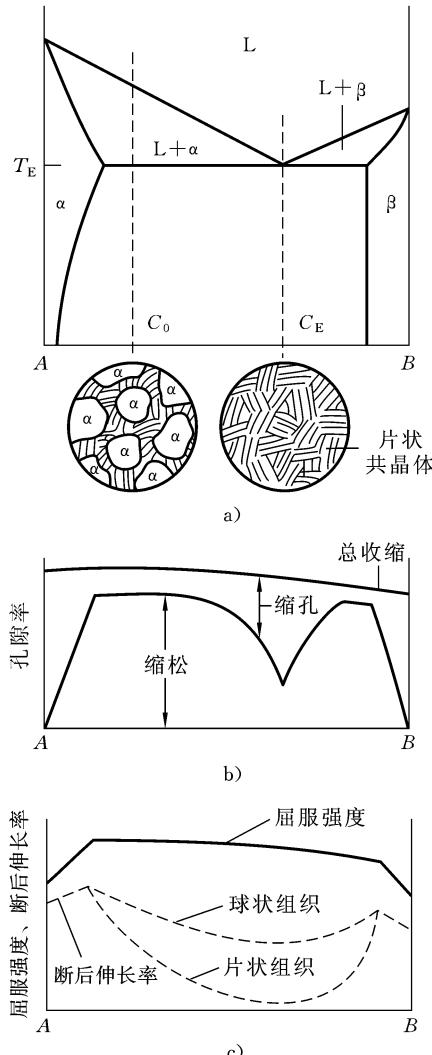


图 1-7 共晶系统成分、组织与性能间的关系

a) 共晶系统及其晶和亚共晶组织

b) 总收缩、缩孔和缩松与成分的关系

c) 组织、成分与性能间的关系

3. 铸件中缩孔和缩松的防止

缩孔和缩松使铸件受力的有效面积减小,在孔洞部位易产生应力集中使铸件的力学性能下降,而且还使铸件的气密性、物理性能和化学性能下降。缩孔与缩松严重时,铸件不得不报废,因此,生产中应采取必要的工艺措施予以防止。

防止铸件产生缩孔的根本措施是采用顺序凝固(directional solidification)工艺。所谓顺序凝固,即使铸件按规定方向从一部分到另一部分逐渐凝固的过程。在顺序凝固时,先凝固部位的收缩,由后凝固部位的金属液来补充;后凝固部位的收缩,由冒口(riser)或浇注系统的金属液来补充,这样,铸件各部分的收缩都能得到补充,而将缩孔转移到铸件多余部分的冒口或浇注系统中(见图 1-8)。切除多余部分便可得到无缩孔的致密铸件。

实现顺序凝固的措施是在铸件可能出现缩孔的厚大部位(热节)安放冒口,或者

在铸件远离内浇道、冒口的部位增设冷铁(chill)等。冒口除补缩外,有时还起排气、集渣的作用。图1-9为阶梯形铸件的顺序凝固示意图。通过从铸件的最薄部位I向最厚部位III、再到冒口的顺序凝固,防止铸件内部形成缩孔和缩松。

但对倾向于糊状凝固的合金,结晶的固体骨架较好地布满了整个铸件的截面,使冒口的补缩通道堵塞,故难以实现顺序凝固。

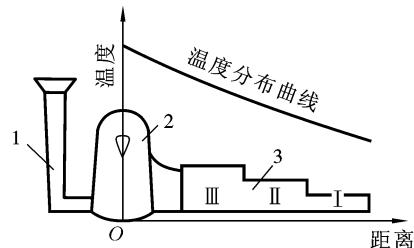


图1-8 顺序凝固示意图

1—浇注系统 2—冒口 3—铸件

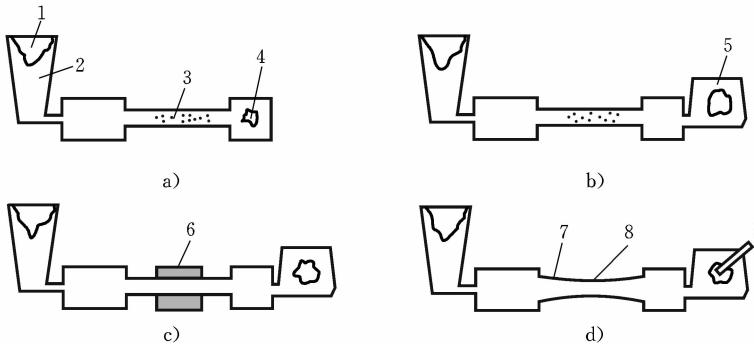


图1-9 直浇道、冒口、冷铁和铸件结构设计防止缩孔和缩松

a) 含有缩孔和缩松的铸件 b) 冒口只能防止缩孔

c) 通过冒口和冷铁防止铸件的缩孔和缩松 d) 将铸件设计为中部最薄可以防止缩孔和缩松

1—明缩孔 2—直浇道 3—缩松 4—缩孔 5—冒口

6—冷铁 7—锥度 8—最小截面 9—多孔陶瓷束

1.1.4 铸造应力和铸件的变形、裂纹

铸件在凝固之后(实际上在凝固末期,结晶骨架已开始形成)的继续冷却过程中,固态收缩若受到阻碍,铸件内部将产生应力,称之为铸造应力(internal stress)。这些应力有些一直保留到室温,称为残余应力。铸造应力是铸件产生变形和裂纹的基本原因。

1. 铸造应力的形成

铸造应力按产生的原因不同,分为热应力、机械应力和相变应力三种。铸造应力就是这三种应力之和。

1) 热应力 铸件在凝固和冷却过程中,不同部位由于不均衡的收缩而引起应力,这种应力称为热应力(thermal stress)。

现以图1-10所示的应力框铸件来说明热应力的形成过程。应力框(见图1-10b)由一根长度为L的粗杆I和两根细杆II组成。图1-10a表示了杆I和杆II的冷却曲线, $T_{\text{临}}$ 表示金属弹塑性临界温度。当铸件处于高温阶段时,两杆均处于塑性状

态,尽管杆Ⅰ和杆Ⅱ的冷却速度不同,收缩不一致,会产生应力,但铸件可以通过两杆的塑性变形使应力很快自行消失。继续冷却到 $t_1 \sim t_2$ 间,此时杆Ⅱ温度较低,已进入弹性状态(假设材料的弹性模量为 E),但杆Ⅰ仍处于塑性状态。杆Ⅱ由于冷却快,收缩大于杆Ⅰ,在横杆作用下将对杆Ⅰ产生压应力,而杆Ⅰ反过来对杆Ⅱ施以拉应力(见图 1-10c)。处于塑性状态的杆Ⅰ受压应力作用产生压缩塑性变形,使杆Ⅰ、杆Ⅱ的收缩一致,应力随之消失(见图 1-10d)。当进一步冷却到更低温度时,杆Ⅰ和杆Ⅱ均进入弹性状态,此时杆Ⅰ温度较高,冷却时还将产生较大收缩,杆Ⅱ温度较低,收缩已趋停止;在最后阶段冷却时,杆Ⅰ的收缩将受到杆Ⅱ的强烈阻碍,因此杆Ⅰ受拉,杆Ⅱ受压,到室温时形成了残余应力(见图 1-10e)。

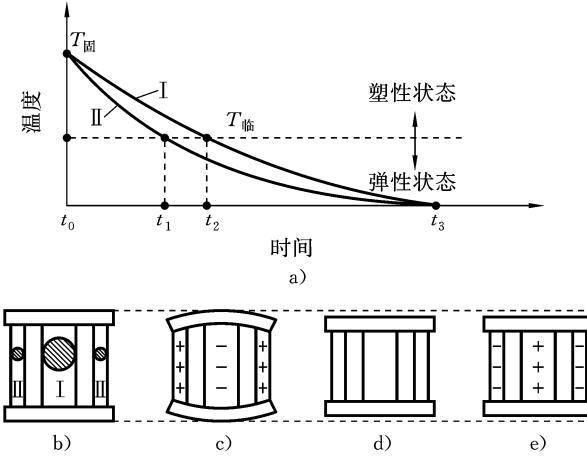


图 1-10 热应力的形成

a) 冷却曲线 b) 应力框 c) 受热变形,产生应力 d) 应力消失 e) 形成残余应力
(+表示拉应力, -表示压应力)

如果在杆Ⅰ中间标注一个平行段 L_0 ,并在 $L_0/2$ 处锯开,可以测量标注一个平行段的长度变为 L_1 。这样可以计算出热应力的大小为

$$\sigma = \frac{E(L_1 - L_0)}{2L - L_0} \quad (1-1)$$

热应力使冷却较慢的厚壁处或心部受拉,冷却较快的薄壁处或表面受压。铸件的壁厚差别愈大,合金的线收缩率或弹性模量愈大,热应力就愈大。顺序凝固时,由于铸件各部分的冷却速度不一致,产生的热应力较大,铸件容易出现变形和裂纹,生产中应加以考虑。

2) 机械应力 铸件在固态收缩时,因受到铸型、芯子、浇注系统、冒口、箱挡等外力的阻碍而产生的应力称为机械应力(mechanical stress)。一般铸件冷却到弹性状态后,收缩受阻才会产生机械应力。而且机械应力常表现为拉应力或切应力。形成应力的原因一经消除(如铸件落砂或去除浇注系统后),机械应力也就随之消失。所

以机械应力是一种临时应力。但是,在落砂前,如果铸件受到机械应力与热应力(特别是在厚壁处)的共同作用,其瞬间应力大于铸件的抗拉强度时,铸件会产生裂纹。图1-11为铸件产生收缩应力的示意图。

3) 减小和消除铸造应力的措施 铸件形状愈复杂,各部分壁厚相差愈大,冷却时温度就会愈不均匀,铸造应力也就愈大。因此,在设计铸件时应尽量使铸件形状简单、对称、壁厚均匀。

同时凝固是减小和消除铸造应力的重要工艺措施。所谓同时凝固,是指采取一些工艺措施,使铸件各部分的温差很小,几乎同时进行凝固(见图1-12)。铸件如按这种方式凝固,铸件不易产生热应力和热裂纹,变形较小,而且不必设置冒口,工艺简单,节约金属。但同时凝固的铸件中心易出现缩松,影响铸件的致密性。所以,同时凝固主要用于收缩较小的一般片墨铸铁和球墨铸铁件、壁厚均匀的薄壁铸件,以及倾向于糊状凝固的、气密性要求不高的锡青铜铸件等。

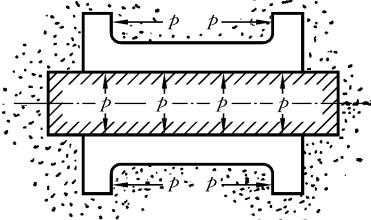


图 1-11 收缩应力的产生

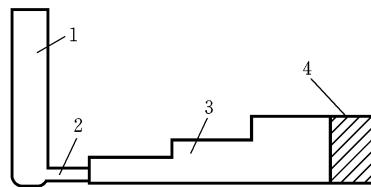


图 1-12 同时凝固示意图

1—直浇道 2—内浇道 3—铸件 4—冷铁

2. 铸件的变形及其防止

处于应力状态的铸件是不稳定的,将自发地通过变形(deformation)来减小应力,趋于稳定状态。图1-13为车床床身挠曲变形示意图,其导轨部分因较厚而受拉伸,于是朝着导轨方向产生内凹。

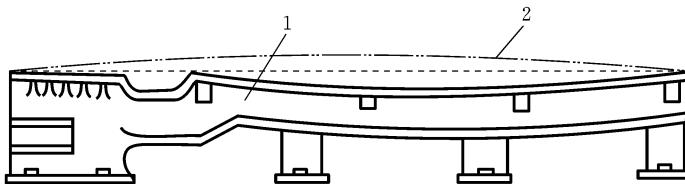


图 1-13 车床床身挠曲变形示意图

1—床身 2—反挠度

为防止铸件产生变形,除在铸件设计时尽可能使铸件的壁厚均匀、形状对称外,在铸造工艺上应采用同时凝固原则,以便冷却均匀。对于长而易变形的铸件,还可采用“反变形”工艺。反变形法是指在统计铸件变形规律的基础上,在模样上预先做出相当于铸件变形量的反挠度,以抵消铸件的变形的一种工艺。

实践证明,尽管变形后铸件的应力有所减缓,但并未彻底去除,这样的铸件经机械加工之后,由于应力的重新分布,还将缓慢地发生微量变形,零件会丧失应有的精度。为此,对于不允许发生变形的重要零件必须进行时效处理。时效处理宜在粗加工之后进行,以便将粗加工所产生的应力一并消除。

3. 铸件的裂纹及其防止

当铸造应力超过材料的抗拉强度时,铸件便产生裂纹(crack)。裂纹是一种严重的铸造缺陷,必须设法防止。裂纹按形成的温度范围分为热裂纹和冷裂纹两种。

1) 热裂纹 热裂纹(thermal crack)一般是在凝固末期,金属处于固相线附近的高温时形成的。一方面,在金属凝固末期,固体的骨架已经形成,但枝晶间仍残留少量液态合金,此时合金如果收缩,就可能将液膜拉裂,形成裂纹;另一方面,合金在固相线温度附近的强度、塑性非常低,铸件的收缩如果稍受铸型、芯子或其他因素的阻碍,产生的应力很容易超过该温度下合金的强度极限,导致铸件开裂。

热裂纹常发生在铸件的拐角处、截面厚度突变处等应力集中的部位或铸件最后凝固区的缩孔附近或尾部。裂纹往往沿晶界产生和发展,外形曲折、不规则,裂缝较宽,裂口表面氧化较严重。铸件结构不合理、合金的收缩大、型(芯)砂退让性差及铸造工艺不合理等均可能引起热裂。硫、磷降低了钢和铁的韧度,使得热裂倾向明显增大。

合理调整合金成分(如严格控制钢和铁中的硫、磷含量),合理设计铸件结构,采取同时凝固的工艺和改善型(芯)砂退让性等,都是防止热裂纹的有效措施。

2) 冷裂纹 冷裂纹(cold crack)是铸件冷却到低温处于弹性状态时,铸造应力超过合金的强度极限而产生的。冷裂纹外形常穿过晶粒,呈连续直线状。裂缝细小,宽度均匀,断口表面干净光滑,具有金属光泽或微氧化色。冷裂纹常出现在铸件受拉伸的部位,特别是内尖角、缩孔、非金属夹杂物等应力集中处。有些冷裂纹在落砂时并没有发生,但因内部已有很大的残余应力,在铸件的清理、搬运时受到震动或出砂后受到激冷才裂开。

铸件的冷裂倾向与铸造应力及合金的力学性能有密切关系。凡是使铸造应力增大的因素,都能使铸件的冷裂倾向增大;凡是使合金的强度、韧度降低的因素,也都能使铸件的冷裂倾向增大。磷增加钢的冷脆性,使钢的冲击韧度下降,而且磷含量超过0.5%(质量分数),往往有大量网状磷共晶出现,使钢的强度、韧度下降,冷裂倾向增大。钢中的硫、铬、镍等元素可提高钢的强度,但降低了钢的导热系数,加大了铸造应力,使钢的冷裂倾向增加。

1.1.5 合金的偏析和铸件中的气孔

1. 合金的偏析及其防止

铸件各部分化学成分、金相组织不一致的现象称为偏析(segregation),可分为微观偏析和宏观偏析等。偏析使铸件各部分的性能不一致,重要铸件应防止偏析。

凝固时,由于溶质元素在固液相中的重新分配及扩散,先结晶出来的枝晶的枝干和后结晶的枝叶之间成分不均匀,这一现象称为微观偏析(micro-segregation)。这种偏析出现在同一个晶粒内,又称晶内偏析,可以通过高温长时间的退火消除。

宏观偏析(macro-segregation)包括如图1-14中所示的三种形式。正偏析多出现在逐层凝固的合金中,随着凝固将低熔点组元推向中心,气体析出将加速这一过程。负偏析是具有枝晶凝固方式的合金,由于高溶质液体沿枝晶生长相反方向流回枝晶间而出现表面溶质含量高于中心的现象。密度偏析是由于凝固早期所形成的固相的漂浮或下沉,如铸铁件中的石墨漂浮、高熔点或高密度组元下沉等造成的。宏观偏析范围大,一旦产生就不能消除,只能通过采取一定的措施防止或减少它的产生。

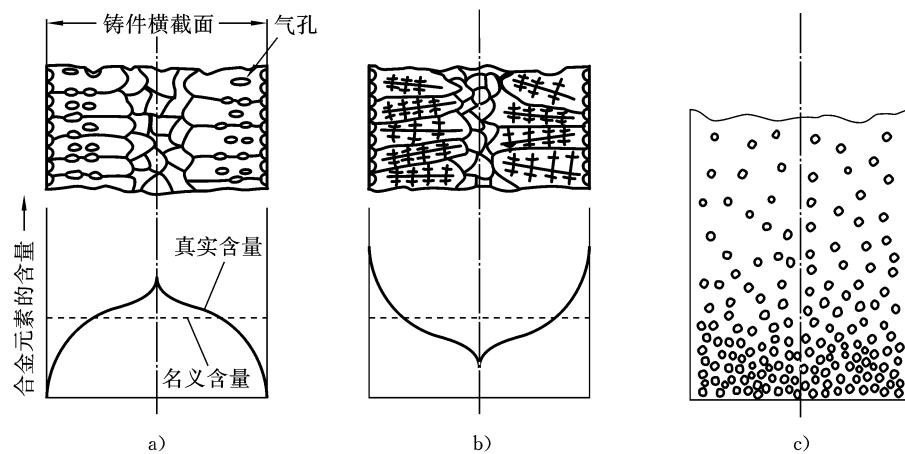


图1-14 宏观偏析的基本形式

a) 正偏析 b) 负偏析 c) 密度偏析

2. 铸件中的气孔

气孔(blowhole)是气体在铸件内形成的孔洞,表面常常比较光滑、明亮或略带氧化色,一般呈梨形、圆形、椭圆形等,是铸造生产中最常见的缺陷之一。气孔减小了合金的有效承载面积,并在气孔附近引起应力集中,降低了铸件的力学性能。同时,铸件中存在的弥散性气孔还可以促使缩松缺陷的形成,从而降低了铸件的气密性。气孔对铸件的耐蚀性和耐热性也有不利影响。

按产生的原因和来源不同,气孔可分为侵入性气孔、析出性气孔和反应性气孔。

1.2 砂型铸造

按成形工艺不同,铸造可分为砂型铸造(sand casting process)和特种铸造(special casting process)。砂型铸造的应用最为广泛。图1-15所示为砂型铸造的工艺过程:首先根据零件的形状和尺寸设计并制造出模样和芯盒,配制好型砂和芯砂,然后

造型和制芯,下芯并合型,将熔化好的金属液浇入铸型中,冷却凝固后,经落砂清理和检验即得所需铸件。

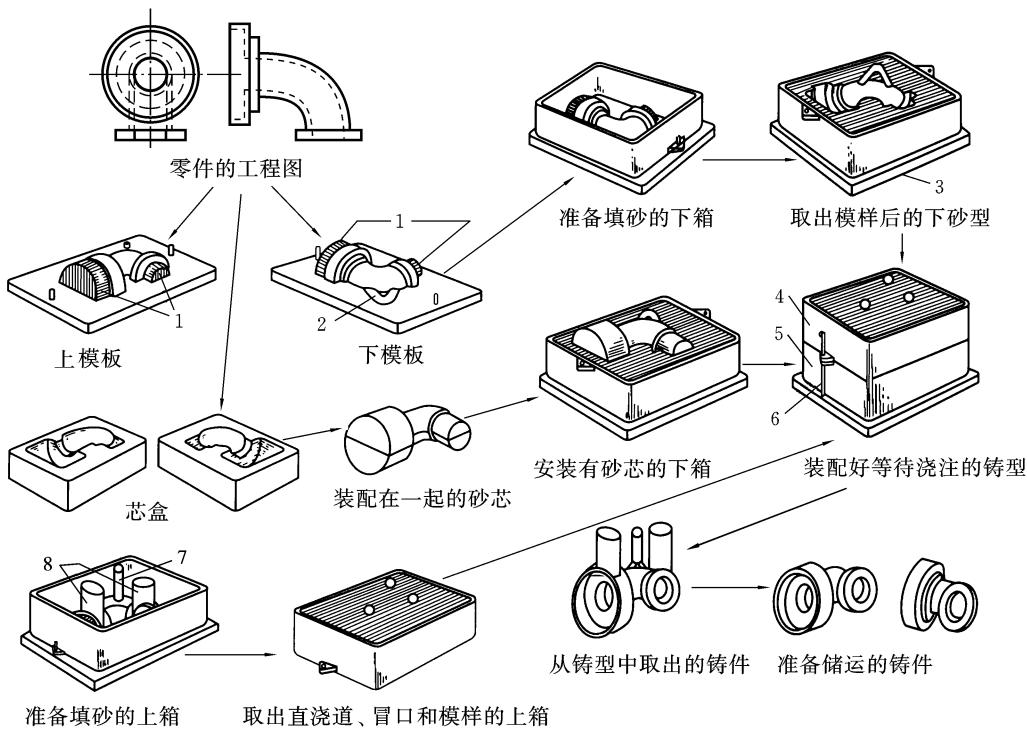


图 1-15 砂型铸造的工艺过程

1—芯头 2—浇道 3—底板 4—上箱 5—下箱 6—合箱销 7—直浇道 8—冒口

1.2.1 造型材料

型砂和芯砂由原砂、黏结剂、水及附加物(如煤粉、重油、木屑等)按一定比例混制而成,根据黏结剂的种类不同可分为黏土砂、水玻璃砂、树脂砂等。据统计,铸件废品的50%以上与造型材料有关,因此必须严格控制型(芯)砂的品质。对型砂的基本性能要求有强度、透气性、流动性、退让性等。芯砂处于金属液的包围之中,其工作条件更加恶劣,所以对芯砂的基本性能要求更高。

1. 黏土砂

以黏土作黏结剂的型(芯)砂称为黏土砂(clay-bonded sand)。常用的黏土为膨润土和高岭土。黏土在与水混合时才能发挥黏结作用,因此必须使黏土砂保持一定的水分。此外,为了防止铸件黏砂,还需在型砂中添加一定量的煤粉或其他附加物。

根据浇注时铸型的干燥情况可将其分为湿型、表干型及干型三种。湿型铸造具有生产效率高、铸件不易变形、适合大批量流水作业等优点,广泛用于中、小型铸铁件的生产,而大型复杂铸铁件则采用干型或表干型铸造。

到目前为止,黏土砂依然是铸造生产中应用最广泛的型(芯)砂,但它的流动性较差,造型时需消耗较多的紧实能量。用湿型砂生产大件,浇注时由于水分的迁移,容易在铸件的表面形成夹砂、胀砂、气孔等缺陷。而使用干型则生产周期长、铸型易变形,同时也增加能源的消耗。因此,人们研究开发了其他的铸造用黏结剂。

2. 水玻璃砂

用水玻璃作黏结剂的型(芯)砂称为水玻璃砂(sodium silicate-bonded sand)。它的硬化过程主要是化学反应的结果,并可采用多种方法使之自行硬化,属于化学硬化砂的一种。

水玻璃砂与黏土砂相比,具有型砂要求的强度高、透气性好、流动性好等特点,易于紧实,铸件缺陷少,内在品质好;造型(芯)周期短,耐火度高,适合于生产大型铸铁件及所有铸钢件。当然,水玻璃砂也存在一些缺点,如退让性差,旧砂回用较复杂等。针对这些问题,人们进行了大量的研究工作,以逐步改善水玻璃砂的应用情况。目前国内用于生产的水玻璃砂有二氧化碳硬化水玻璃砂、硅酸二钙水玻璃砂、水玻璃石灰石砂等,而其中尤以二氧化碳硬化水玻璃砂用得最多。

3. 树脂砂

以合成树脂作黏结剂的型(芯)砂称为树脂砂(resin-bonded sand)。目前国内铸造用的树脂黏结剂主要有酚醛树脂、尿醛树脂和糠醇树脂三类。但这三类树脂的性能都有一定的局限性,单一使用时不能完全满足铸造生产的要求,故常采用各种方法将它们改性,生成各种不同性能的新型树脂。

目前用树脂砂制芯(型)主要有四种方法:壳芯(型)法、热芯盒法、冷芯盒法和温芯盒法。各种方法所用的树脂及硬化形式都不一样。与湿型黏土砂相比,树脂砂型芯可直接在芯盒内硬化,且硬化反应快,不需进炉烘干,大大提高了生产效率;制芯(型)工艺过程简化,便于实现机械化和自动化;型芯硬化后取出,变形小,精度高,可制作形状复杂、尺寸精确、表面粗糙度低的型芯和铸型。

由于树脂砂对原砂的品质要求较高,树脂黏结剂的价格较高,树脂硬化时会放出有害气体,对环境有污染,所以树脂砂仅用来制作形状复杂、品质要求高的中、小型铸件的型芯及壳型(芯)。

1.2.2 造型、制芯方法

按照紧砂和起模的方法,造型、制芯可分为手工造型、制芯和机器造型、制芯两大类。手工造型、制芯主要用于单件、小批生产,机器造型、制芯主要用于成批、大量生产。

1. 手工造型、制芯

手工造型、制芯(hand molding and core-making)操作灵活,工艺装备(如模样、芯盒和砂箱等)简单,生产准备时间短,适应性强,可用于各种尺寸大小、形状不同铸件的生产。但手工造型、制芯对工人的技术水平要求高,且劳动强度大,生产效率低,铸件品质

不稳定,因此主要用于单件、小批生产。有关手工造型、制芯方法可参阅文献[1]。

2. 机器造型

机器造型(machine molding)生产效率高,铸型紧实度高而均匀,型腔轮廓清晰,铸件品质稳定,工人的劳动强度低,便于实现自动化。但机器造型设备和工艺装备费用高,生产准备时间较长,故只适用于中小型铸件的成批、大量生产。按照紧砂方式不同,机器造型可分为以下几种。

1) 震压造型 震压造型(jolt-squeeze molding)是指以压缩空气为动力进行造型的一种工艺。图 1-16 所示为震压造型工作原理。工作时,首先将压缩空气引入震实气缸,使震动活塞带动工作台震击。待砂箱底部型砂紧实后,将压缩空气通入压实气缸,使压实活塞带动工作台上升,利用压板压实型砂。紧砂过程全部完成后,压缩空气通入顶杆气缸,顶杆将砂箱顶起,完成起模过程。

震压造型机结构简单,价格低廉,但造型时噪声大,压实力较低(为 $0.15\sim0.4$ MPa),型砂紧实度不高,铸件品质和生产效率不能满足日益提高的要求,因而出现了微振压实造型机(shockless jolt squeeze molding machine),即在对型砂压实的同时进行微振,以提高铸型的紧实度。

2) 高压造型 高压造型(high pressure molding)是指利用液压系统产生很高的压力(大于 0.7 MPa)来压实砂型的一种造型工艺。图 1-17 所示为多触头高压造型工作原理,压头分成许多小压头,每个小压头是浮动的,行程可随模型高度自动调节,以使砂型各部分紧实度均匀。压实的同时还进行微振。

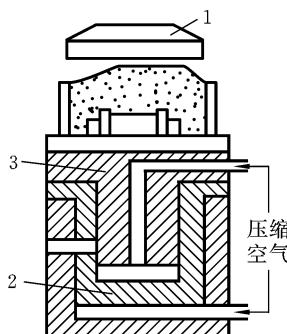


图 1-16 震压造型工作原理

1—压板 2—压实活塞 3—震动活塞

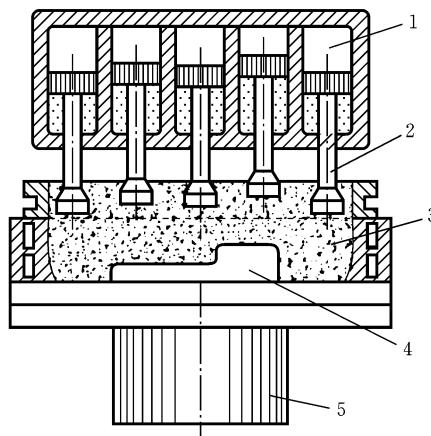


图 1-17 多触头高压造型工作原理

1—上压缸 2—上压头
3—型砂 4—模样 5—下活塞

高压微振造型机制出的砂型紧实度高,铸件尺寸精确,表面粗糙度低,噪声小,生产效率高。但高压微振造型机结构复杂,价格高昂,对工艺装备及设备维修、保养的

要求很高,仅用于大量生产的铸件,如汽车铸件等。

3) 射压造型 射压造型(shooting and squeeze molding)采用射砂和压实复合的方法紧实型砂的一种造型工艺。图1-18所示为垂直分型无箱射压造型工作原理。其特点是利用压缩空气将型砂射入型腔进行初紧实,然后压实活塞将砂型再紧实,砂型推出后,前后两砂型之间的接触面为分型面。

用射压造型方法制得的铸件尺寸精度很高,因为造型、起模及合型由同一导杆精确导向,不易产生错箱,机器结构简单,噪声小,不用砂箱,可节省大量运输设备和占地面积,生产效率高,易于实现自动化,常用于中小型铸件的大量生产。

4) 抛砂造型 抛砂造型(sand slinging molding)机是利用高速旋转的叶片将输送带输送过来的型砂高速抛下来紧实砂型的一种造型工艺,其工作原理如图1-19所示,生产率是 $10\sim30\text{ m}^3/\text{h}$ 。抛砂造型适应性强,不需要专用砂箱和模板,适用于大型铸件的单件、小批生产。

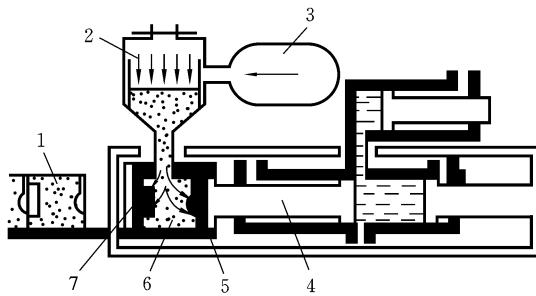


图 1-18 垂直分型射压造型工作原理

1—砂型 2—射砂筒 3—储气包 4—活塞
5—型板 B 6—造型室 7—型板 A

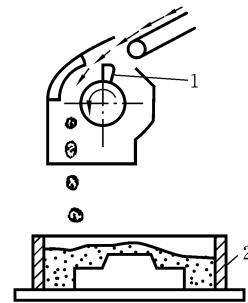


图 1-19 抛砂造型工作原理

1—抛砂头 2—砂箱

5) 气流冲击造型 气流冲击造型(air impact molding)是指利用压缩空气直接紧实型砂的一种造型工艺,其工作原理如图1-20所示。压缩空气在压力罐内由一个简单的圆盘阀所封闭(见图1-20a),打开阀门后,压缩空气突然膨胀,产生很强的冲击波,作用在松散的型砂上(见图1-20b),型砂迅速地朝模板方向运动。当受到模板的阻止时,型砂由于惯性力的作用而在几毫秒内被紧实。

气流冲击造型是20世纪80年代出现的世界先进的机器造型技术。其砂型紧实度高且分布均匀,铸件尺寸精度高,表面品质好。由于不直接用机械部件紧实型砂,因而造型机结构简单,维修方便,使用寿命长,噪声较小。气流冲击造型主要用于成批生产的汽车、拖拉机发动机缸体等铸件。

在机械化铸造车间内,都是以各种类型的造型机为核心,配以其他机械,如翻箱机、合箱机、压铁机、落砂机等辅助设备和砂处理及运输系统组成的机械化、自动化程度较高的铸造生产流水线,以提高生产效率、改善劳动条件和适应大量生产。图1-21所示为一条造型生产线,上、下箱造型机为两台微振压实造型机,该生产线的生产率

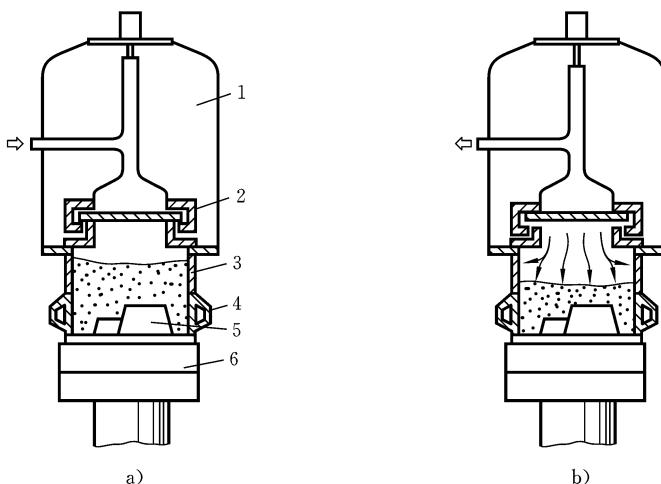


图 1-20 气流冲击造型工作原理

a) 加砂后的砂箱、填砂框升至阀口处 b) 打开阀门,冲击紧实

1—压力罐 2—圆盘阀 3—填砂框 4—砂箱 5—模板 6—工作台

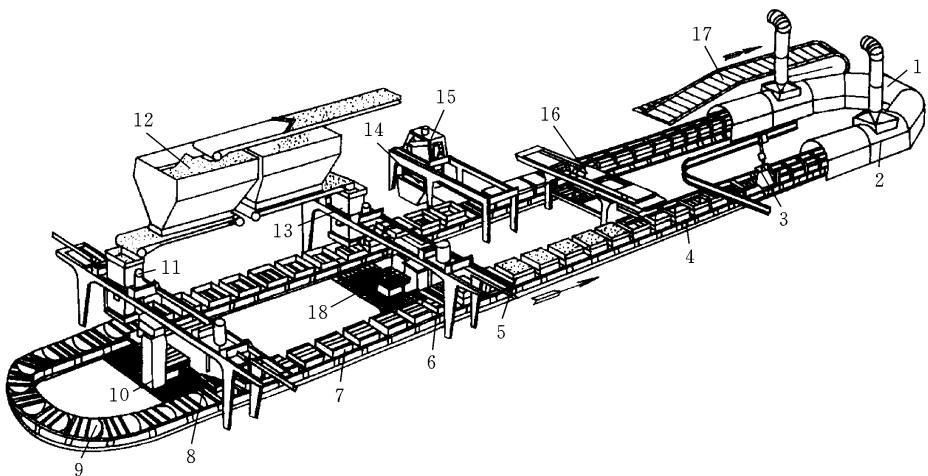


图 1-21 造型生产线

1—冷却罩 2—冷却 3—浇注 4—加压铁 5—合箱 6—合箱机 7—下芯 8—下箱翻箱、落箱机
 9—铸造输送机 10—下箱造型机 11、13—加砂机 12—型砂 14—落砂 15—插箱机
 16—压铁传送机 17—铸件输送机 18—上箱造型机

为 130~150 型/h。

6) 热芯盒法制芯 在砂型机器造型工艺中,要使用大量的砂芯。除手工制芯之外,砂芯的制造方法主要有热芯盒法(hot box process)。热芯盒法制芯使用于呋喃树脂砂,采用射芯机射砂方式填砂和紧砂。射砂紧实原理是将芯砂悬浮在压缩空气中,以高速射入芯盒中而紧实。如图 1-22 所示,打开大口径快动射砂阀,储气

包中的压缩空气进入射腔内并骤然膨胀,再通过一排排缝隙进入射砂筒内,当射砂筒内的气压达到一定值时,芯砂从射砂孔高速射进热芯盒中并得到紧实,压缩空气则从射头和芯盒的排气孔排出。

热芯盒温度为200~250℃,芯砂加热60 s后就可硬化,松开夹紧气缸,取出型芯。热芯盒树脂砂配比(质量比)为:新砂100,呋喃I型树脂2.5,固化剂(氯化铵-尿素水溶液)占树脂质量的20%。

热芯盒法制芯生产效率很高,型芯强度高,尺寸精确,表面光洁。该方法1958年问世,今天应用已相当普遍,特别是用来制造汽车、拖拉机、内燃机等各种复杂型芯,其主要缺点是加热硬化时有刺激性气味发出。

1.2.3 铸件浇注位置和分型面的选择

铸件的浇注位置(pouring position)是指浇注时铸件在铸型内所处的位置,分型面(parting face)是指两半铸型相互接触的表面。一般情况下,首先应选择浇注位置,以保证铸件的品质;然后再选择分型面,以简化造型工艺。但在生产中,有时二者会相互矛盾,必须综合分析各种方案的利弊,抓住主要矛盾,选择最佳方案。

1. 浇注位置的选择原则

(1) 铸件的重要加工面应处于型腔底面或侧面。浇注时气体、夹杂物易漂浮在金属液上部,故下部金属液比较纯净,组织比较致密。图1-23所示为床身导轨面朝下,图1-24所示为起重机卷筒内、外圆表面侧立。

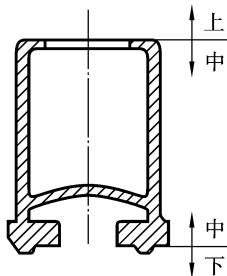


图1-23 床身(铸铁)的浇注位置

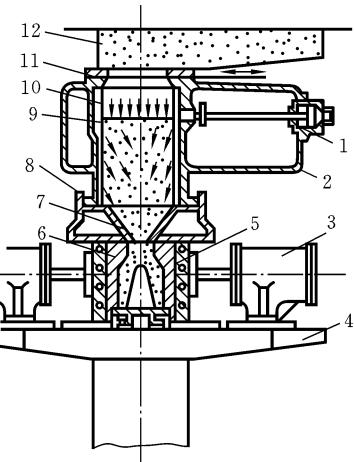


图1-22 热芯盒射芯机制芯

1—射砂阀 2—储气包 3—气缸 4—工作台
5—电热板 6—热芯盒 7—射砂孔 8—射砂头
9—射腔 10—射砂筒 11—闸板 12—砂斗

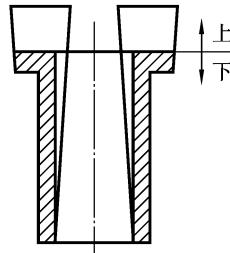


图1-24 起重机卷筒的浇注位置

(2) 铸件的大平面应尽量朝下。由于在浇注过程中金属液对型腔上表面有强烈

的热辐射,铸型因急剧热膨胀和强度下降易拱起开裂,从而形成夹砂缺陷(见图1-25a),所以大平面应朝下(见图1-25)。

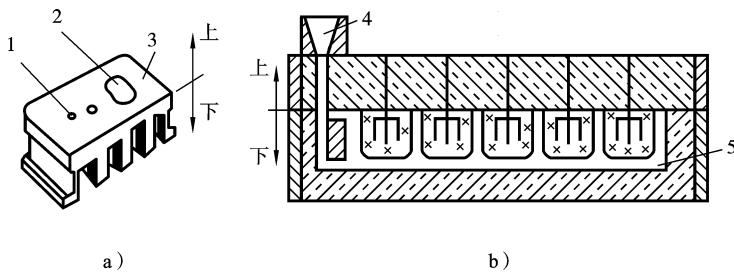


图 1-25 大平面铸件的浇注位置

a) 不合理 b) 合理

1—气孔 2—夹砂 3、5—铸件 4—浇口杯

(3) 铸件的薄壁部分应放在铸型的下部或侧面,以免产生浇不足或冷隔缺陷。

(4) 对于合金收缩大、壁厚不均匀的铸件,应将厚度大的部分朝上或置于分型面附近,以利于安放冒口对该处补缩,如图1-26所示。

2. 分型面的选择原则

(1) 应便于起模,简化造型工艺。图1-27所示的起重臂采用平面分型,可以避免挖砂造型,提高生产效率。即使采用机器造型,也可简化模板。图1-28所示的绳轮铸件在大量生产时加一个环状型芯,使三箱造型改为两箱造型,简化了操作,提高了生产效率和铸件精度,有利于采用机器造型。

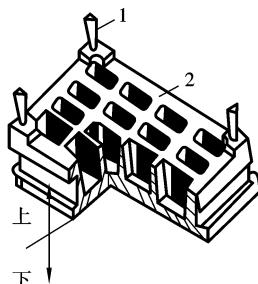


图 1-26 铸件厚大部分朝上

1—冒口 2—铸件

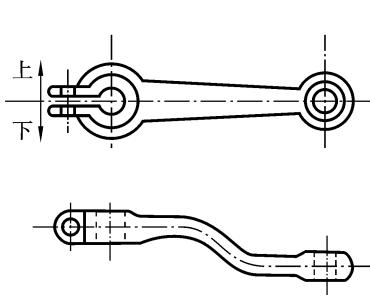


图 1-27 起重臂分型

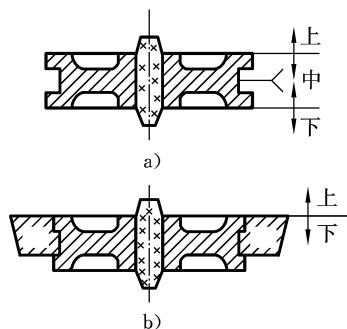


图 1-28 绳轮分型面的选择

a) 三箱造型 b) 两箱造型

(2) 尽量使铸件全部或大部分放在同一个砂箱内。图1-29所示为一床身铸件,

其顶部平面为加工基准面。其中,图a所示方案易因错型而影响铸件尺寸精度;采用图b所示方案使加工面和基准面在同一个砂箱内,既不会错型也能够保证铸件精度,适用于成批生产。

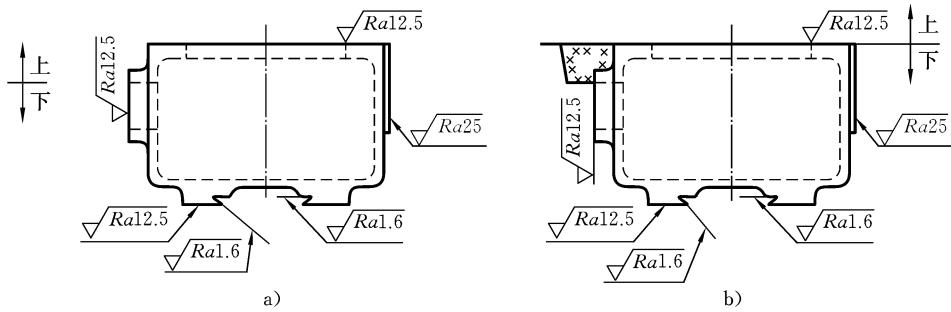


图 1-29 床身铸件

a) 不合理 b) 合理

(3) 尽量减少型芯和活块的数目。图 1-30 所示的支座有两种工艺方案:方案(1)采用分模造型,铸造时上面两孔下芯方便,底板上 4 个凸台必须采用活块,操作麻烦且容易产生错型缺陷;方案(2)采用整模造型,铸件的重要工作面朝下,有利于保证铸件的尺寸精度和表面品质,中间下一个型芯,既可成形轴孔,又避免了取活块,操作简单,适合于各种批量生产。

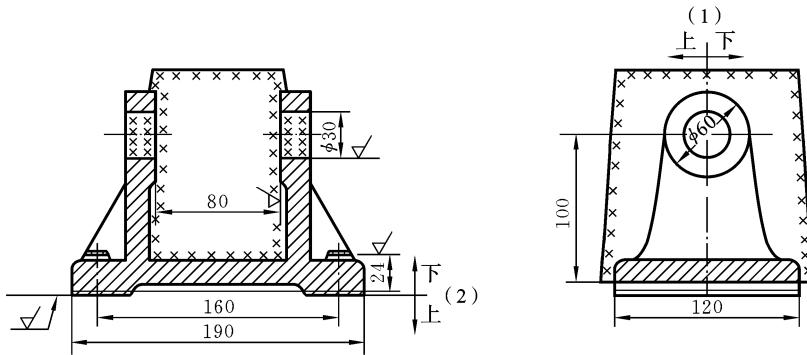


图 1-30 支座铸造工艺方案

1.2.4 铸造工艺参数的确定

铸造工艺参数是与铸造工艺过程有关的某些工艺数据,直接影响模样、芯盒的尺寸和结构。在绘制铸造工艺图时,必须合理选择,否则会影响铸件精度、生产效率和成本。主要工艺参数分述如下。

1. 铸造收缩率

由于合金的线收缩,铸件冷却后的尺寸将比型腔的尺寸小。为了保证铸件的应

有尺寸,模样和芯盒的制造尺寸应比铸件放大一个该合金的线收缩率,即铸造收缩率(casting shrinkage coefficient)。铸造收缩率 K 表达式如下:

$$K = \frac{L_{模} - L_{件}}{L_{件}} \times 100\%$$

式中 $L_{模}$ —— 模样尺寸;

$L_{件}$ —— 铸件尺寸。

铸造收缩率的大小取决于铸造合金的种类及铸件的结构、尺寸等因素,通常灰铸铁为 0.7%~1.0%,铸造碳钢为 1.3%~2.0%,铝硅合金为 0.8%~1.2%,锡青铜为 1.2%~1.4%。

2. 加工余量

加工余量(machining allowance)是指在铸件的加工面上留出的准备切削掉的金属层厚度。加工余量过大,会浪费金属和增加加工工时,加工余量过小则达不到加工要求,影响产品的品质。加工余量应根据铸造合金、造型方法、加工要求、铸件的形状和尺寸及浇注位置等来确定。铸钢件收缩大,表面粗糙,应比铸铁件的加工余量大一些;机器造型的铸件精度比手工造型的高,加工余量可小一些;铸件尺寸大,或者加工表面处于浇注时的顶面时,其加工余量就大。按照 GB/T 6414—1999 的标准,毛坯铸件的加工余量先确定加工余量等级,如表 1-1 所示,铸造方法不同和铸件材料不同,加工余量等级也不同。确定加工余量等级后再按照表 1-2 选择毛坯铸件的加工余量。

表 1-1 毛坯铸件典型的机械加工余量等级

铸造方法	要求的机械加工余量等级									
	铸件材料									
	钢	片墨铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	锌合金	轻金属合金	镍基合金	钴基合金	
手工砂型	G~K	F~H	F~H	F~H	F~H	F~H	F~H	G~K	G~K	
机器砂型和壳型	F~H	E~G	E~G	E~G	E~G	E~G	E~G	F~H	F~H	
金属型(重力和低压)	—	D~F	D~F	D~F	D~F	D~F	D~F	—	—	
压力铸造	—	—	—	—	B~D	B~D	B~D	—	—	
熔模铸造	E	E	E	—	E	—	E	E	E	

注 本标准还适用于本表未列出的由铸造厂与采购方之间协议商定的工艺和材料。

3. 起模斜度

为了方便起模,在垂直于分型面的立壁上所增加的斜度称为起模斜度(pattern draft)(见图 1-31),一般用角度 α 或宽度 a 表示。

起模斜度应根据模样高度及造型方法来确定。模样越高,斜度取值越小;内壁斜

表 1-2 要求的铸件机械加工余量(RMA)

最大尺寸		要求的机械加工余量等级									
大于	至	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
—	40	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7	1	1.1
40	63	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1.4	2
63	100	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1.4	2	2.8	4
100	160	0.3	0.4	0.5	0.8	1.1	1.5	2.2	3	4	6
160	250	0.3	0.5	0.7	1	1.4	2	2.8	4	5.5	8
250	400	0.4	0.7	0.9	1.3	1.4	2.5	3.5	5	7	10
400	630	0.5	0.8	1.1	1.5	2.2	3	4	6	9	12
630	1000	0.6	0.9	1.2	1.8	2.5	3.5	5	7	10	14
1000	1600	0.7	1	1.4	2	2.8	4	5.5	8	11	16
1600	2500	0.8	1.1	1.6	2.2	3.2	4.5	6	9	14	18
2500	4000	0.9	1.3	2.8	2.5	3.5	5	7	10	14	20
4000	6300	1	1.4	2	2.8	4	5.5	8	11	16	22
6300	10000	1.1	1.5	2.2	3	4.5	6	9	12	17	24

注 (1) 最大尺寸指最终机械加工后铸件的最大轮廓尺寸;

(2) 等级 A 和 B 仅用于特殊场合,例如:在采购方与铸造厂已就夹持面或基准面或基准目标商定模样装备、铸造工艺和机械加工工艺的成批生产情况下。

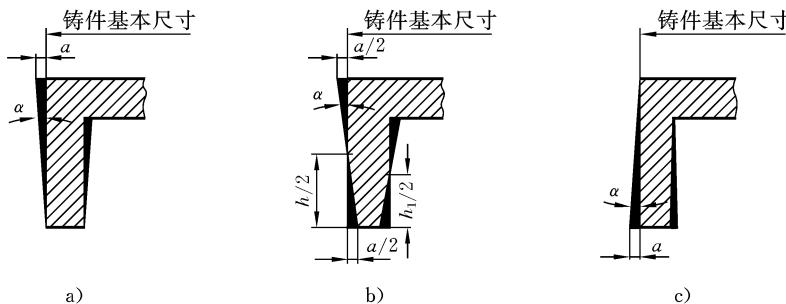


图 1-31 起模斜度的形式

a) 增加铸件厚度 b) 加减铸件厚度 c) 减少铸件厚度

度比外壁斜度大,手工造型比机器造型的斜度大。铸件外壁斜度 $\alpha=0.5^\circ\sim4^\circ$ 。

4. 铸造圆角

铸件上相邻两壁之间的交角应设计成圆角,防止在尖角处产生冲砂及裂纹等缺陷。铸造圆角半径(fillet radius)一般为相交两壁平均厚度的 $1/3\sim1/2$ 。

5. 芯头

为了保证型芯在铸型中的定位、固定和排气,在模样和型芯上都要设计出芯头(core print)。芯头与芯座之间要保证有装配用的芯头间隙,如图 1-32 所示。这些工艺参数的具体值均可在有关手册中查到。

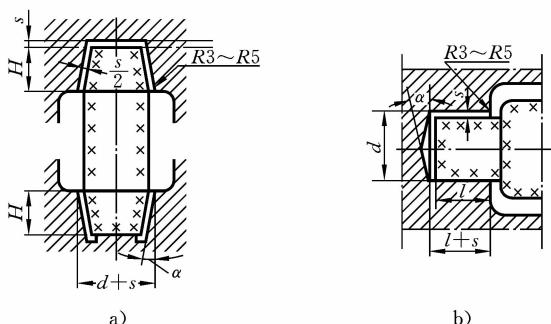


图 1-32 芯头的构造

a) 垂直芯头 b) 水平芯头

1.2.5 铸造工艺图的绘制

铸造工艺图是在零件图上用规定的符号表示铸造工艺内容的图形,是制造模样和铸型、进行生产准备和铸件检验的依据,是铸造生产的基本工艺文件。图 1-33 所示为连杆的零件图、铸造工艺图和模样图间的关系。

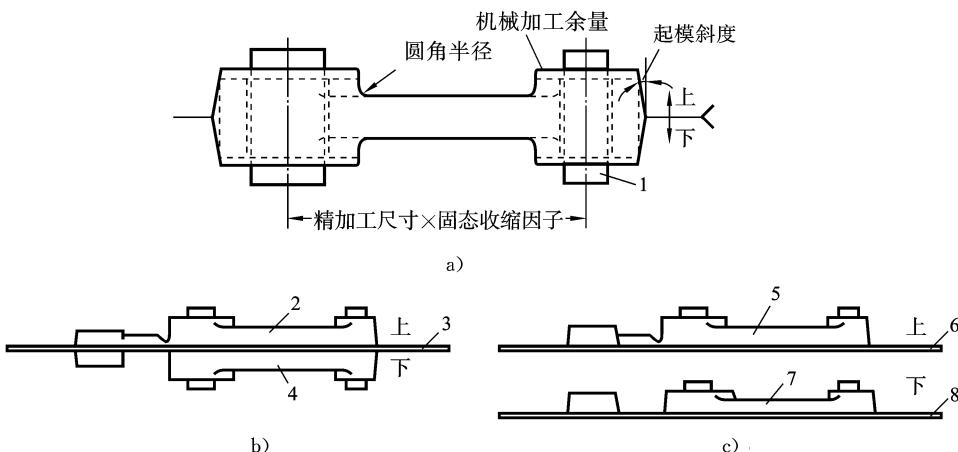


图 1-33 连杆的零件图、铸造工艺图和模样图间的关系

a) 工艺图 b) 模板与模样统一装配 c) 上、下模板和模样分装

1—芯头 2、5—上模样 3、6、8—模板 4、7—下模样

现以拖拉机前轮毂(见图 1-34)为例,说明绘制铸造工艺图的步骤。

1) 分析铸件品质要求和结构工艺性 前轮毂装于拖拉机前轮中央,和前轮一起

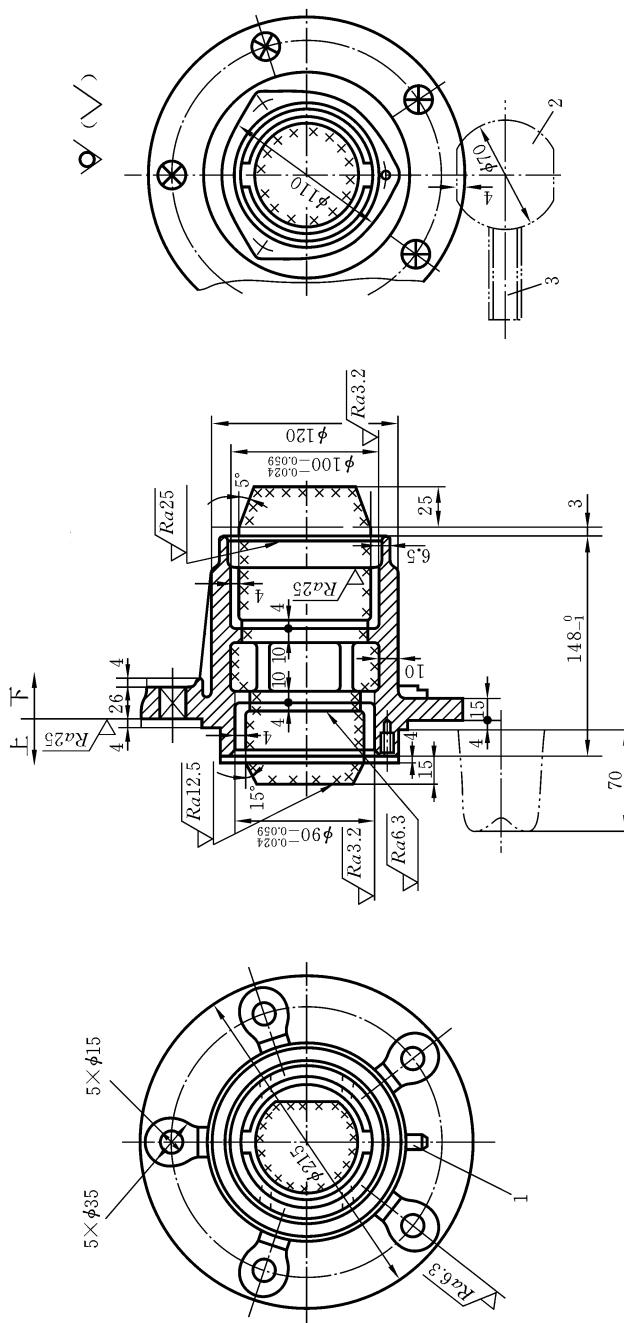


图 1-34 拖拉机前轮毂铸造工艺图

作旋转运动并支承拖拉机。两内孔 $\phi 90$ mm 和 $\phi 100$ mm 装有轴承, 是加工要求最高的表面, 不允许有任何铸造缺陷。

前轮毂结构为带法兰的圆套类零件。铸件主要壁厚为 14 mm, 法兰厚度为 19 mm。法兰和轮毂本体相交处形成厚实的热节区。法兰上 5 个直径为 35 mm、厚度为 34 mm 的凸台也是比较厚实的部分。

2) 选择造型方法 铸件质量为 13.8 kg, 材料为球墨铸铁 QT400-15, 大量生产, 故选择机器造型(芯)。若生产批量很小, 也可用手工造型(芯)。

3) 选择浇注位置和分型面 浇注有两种方案: 方案一是轮毂(轴线)呈竖直位置, 两轴承孔表面处于直立状态, 有利于金属液充型和补缩, 使铸件品质稳定; 方案二是轮毂呈水平位置, 虽方便造型和下芯, 但两轴承孔的上表面易产生气孔、渣孔、缩孔等缺陷。故方案二不合理, 应选择方案一, 并使法兰朝上。

分型面选在法兰的上平面处, 使铸件大部分位于下箱, 便于保证铸件的尺寸精度, 合型前便于检查壁厚是否均匀、型芯是否稳固, 同时使浇注位置与造型位置一致。

4) 确定工艺参数 根据铸件的品质要求和生产条件, 参照有关手册确定工艺参数如下:

- (1) 加工余量, 铸件底面为 3 m, 顶面和侧面为 4 m。
- (2) 起模斜度, 铸件外壁斜度 $\alpha = 30'$, 内壁斜度 $\alpha = 30'$ 。
- (3) 不铸出孔, 法兰上 5 个 $\phi 18$ mm 小孔与其余小螺纹孔不铸出。
- (4) 铸造收缩率取 1%。

5) 设计型芯 铸件内腔只需一个直立型芯, 为保证型芯稳固、定位准确, 型芯上下均做出芯头。

6) 设计浇注系统和冒口 (design of gating and riser system) 对于球墨铸铁件, 可以采用压边冒口, 以避免出现缩孔及缩松缺陷。压边冒口放置于轮毂上部厚实处, 压边宽度为 4 m。铁液由横浇道经过冒口进入型腔。浇注系统的组成如图 1-35 所示, 铁液经浇口杯(pouring cup) \rightarrow 直浇道(sprue) \rightarrow 横浇道(runner) \rightarrow 内浇道(ingate)进入型腔。

在重力浇注时, 浇注系统中各处的流量相等, 这样可以得到

$$A_a v_a = A_b v_b \quad (1-2)$$

式中 A_a, A_b —— a, b 处的截面面积;

v_a, v_b —— a, b 处的流体速度。

根据 Bernoulli 理论, 系统的能量应该不变。不考虑阻力能的条件下, 系统的能量主要有压力能 P , 势能 mgh , 动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 。

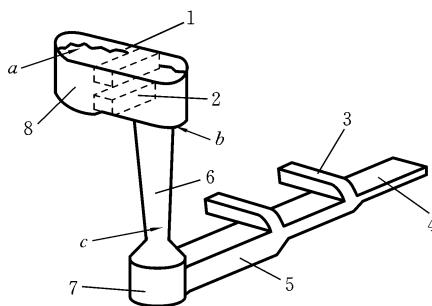


图 1-35 浇注系统的组成

- 1—过滤网
- 2—堤坝
- 3—内浇道
- 4—横浇道伸长
- 5—横浇道
- 6—直浇道
- 7—直浇道井
- 8—浇口杯

由于 a 和 b 处的能量相等, 可得

$$P_a + \frac{1}{2}\rho v_a^2 + \rho g h_a = P_b + \frac{1}{2}\rho v_b^2 + \rho g h_b \quad (1-3)$$

由方程(1-2)和方程(1-3)可以计算出各截面尺寸。设 $P_a = P_b$, $v_a = 0$, $h_a = 0$, 方程(1-3)变为

$$v_b = \sqrt{2gh_b} \quad (1-4)$$

同理可得

$$v_c = \sqrt{2gh_c} \quad (1-5)$$

这样,由方程(1-2),方程(1-4)和方程(1-5)得到

$$\frac{v_b}{v_c} = \frac{A_c}{A_b} = \sqrt{\frac{h_b}{h_c}} \quad (1-6)$$

冒口的设计可以根据凝固时间计算体积与表面积。由 Chvorinov 定律, 凝固时间为

$$t_s = k \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (1-7)$$

式中 V ——铸件或冒口体积;

A ——铸件或冒口表面积。

通过计算铸件的凝固时间,并使冒口的凝固时间大于铸件的凝固时间,可以决定冒口的大小。

7) 绘制铸造工艺图 图 1-34 为拖拉机前轮毂铸件铸造工艺图。

1.3 特种铸造

1.3.1 熔模铸造

熔模铸造(lost-wax casting, investment casting)是用易熔材料(如蜡等)制成精确的模样,在其表面涂挂耐火涂料和撒砂制成壳型,熔去模样后,型壳经过焙烧后即可浇注金属液,最后获得铸件的铸造方法。熔模铸造又称失蜡铸造或精密铸造。

1. 熔模铸造的工艺过程

熔模铸造的工艺过程如图 1-36 所示。

根据铸件制作压型,用压型制作蜡模(常用的蜡模材料体积分数为 50% 石蜡和 50% 硬脂酸),再将单个蜡模黏结在蜡制的浇注系统上,成为蜡模组,如图 1-36a 所示。

结壳脱蜡如图 1-36d 所示,将蜡模组浸泡在耐火涂料中(一般铸件用硅石粉水玻璃涂料,合金钢铸件用刚玉粉硅酸乙酯水解液涂料),将其取出并在其上撒一层硅砂,然后硬化(水玻璃涂料砂壳浸在氯化铵溶液中硬化,硅酸乙酯水解液型壳通氯气硬化),重复数次,便在蜡模表面结成所需厚度的硬壳;接着将其放入 85 °C 左右的热水

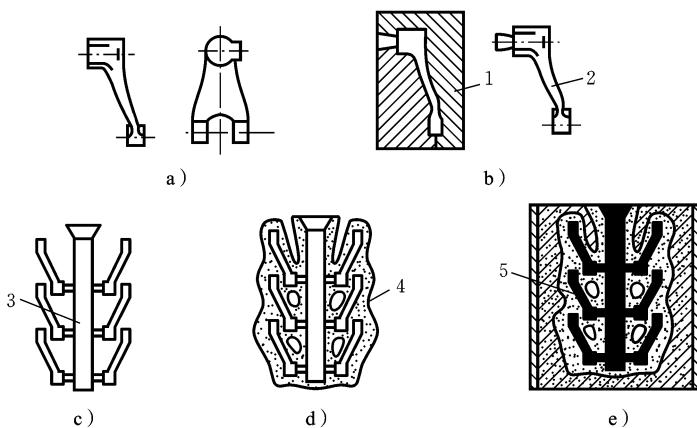


图 1-36 熔模铸造工艺过程

a) 铸件 b) 制造蜡模 c) 制造蜡模组 d) 蜡模组结壳和脱蜡 e) 浇注成形
1—压型 2—蜡模 3—浇注系统 4—型壳 5—浇入的金属

或蒸汽中,熔去蜡模组,便得到无分型面的型壳;烘干型壳中的水分后焙烧,以增加强度。

图 1-36e 所示为浇注成形。将焙烧后的型壳置入铁箱中,四周填砂,即可进行浇注,待金属冷凝后,敲掉型壳,便获得带浇注系统的一组铸件。

2. 熔模铸造的特点和适用范围

熔模铸造的特点如下:

(1) 铸件尺寸精度高(可达 CT4~CT7),表面粗糙度低($R_a = 1.6 \sim 6.3 \mu\text{m}$),可实现少无切削加工。

(2) 适合于各种合金的铸造,特别是高熔点和难以切削加工的合金,如高合金钢、耐热合金等。

(3) 可铸出形状复杂的薄壁铸件,如铸件上宽度大于 3 mm 的凹槽、直径大于 2.5 mm 的小孔均可直接铸出。

熔模铸造的缺点是工序繁多,生产周期长,铸件成本高,适用于 25 kg 以下高熔点、难以切削加工的合金铸件的大量生产。

目前该方法在航空、船舶、汽车、拖拉机、汽轮机、仪表、刀具和机床等制造行业中得到了广泛的应用。

1.3.2 金属型铸造

金属型铸造(permanent mold casting)是在重力作用下将金属液浇入金属铸型中而获得铸件的铸造方法。金属型可以反复使用,所以又称为永久型。

1. 金属型的构造及铸造工艺

金属型的材料一般采用铸铁,若浇注铝、铜等合金,要用合金铸铁或铸钢。型芯

可用金属芯或砂芯,有色金属铸件常用金属芯。

金属型按其结构可分为整体式、垂直分型式、水平分型式和复合分型式等。图1-37所示为铝活塞的金属型及金属芯,左、右半型用铰链连接以开合铸型;中间采用组合式型芯,以防止活塞内部的凸台阻碍抽芯;凸台销孔处有左、右两个型芯;铸件浇注后,及时抽去型芯,然后再将两半铸型打开,取出铸件。

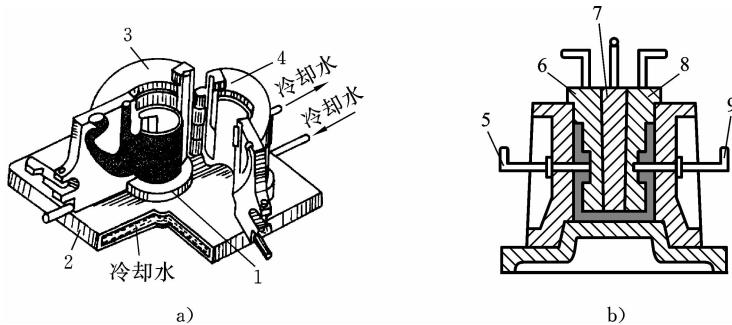


图1-37 铸造铝活塞的金属型及金属芯

a) 铰链开合式金属型 b) 组合式金属芯

1—底型 2—底板 3—左半型 4—右半型 5—左销孔型芯
6—左侧型芯 7—中间型芯 8—右侧型芯 9—右销孔型芯

金属型导热快,没有退让性和透气性,铸件易产生浇不足、冷隔等缺陷及产生内应力和变形,且铸铁件易产生白口组织。因此,浇注前要对金属型进行预热,以减缓铸型冷却速度。在连续工作中,金属型不断受到金属液的热冲击,必须对其进行冷却,以减少金属型的温差,延长其使用寿命。通常控制金属型的工作温度在120~350℃范围内。

为了降低铸件的冷却速度,防止金属液直接冲刷铸型,延长金属型的使用寿命,在型腔表面要涂敷厚度为0.2~1.0mm的耐火涂料。为了防止金属型对铸件收缩的阻碍,浇注后应尽快从铸型中抽出型芯和取出铸件。最适宜的开型时间要经过试验决定,一般中、小型铸件的出型时间为10~60s。

2. 金属型铸造的特点及应用范围

与砂型铸造相比,金属型铸造有如下优点:

(1) 铸型可连续重复使用,提高了生产效率,节约了工时、成本,减少了造型材料的消耗。

(2) 金属型尺寸稳定,表面光洁,提高了铸件的尺寸精度(CT6~CT9),降低了表面粗糙度($R_a=6.3\sim12.5\mu\text{m}$),减小了切削加工余量。

(3) 铸件冷却速度快,结晶组织致密,提高了铸件的力学性能。

(4) 金属型铸造过程中没有混砂、造型工序,劳动条件好。

但是,金属型的成本较高、制作周期长,不适合单件、小批生产,也不能生产大型铸件。金属型导热快,铸铁件容易产生白口组织,不适合铸造形状复杂的薄壁铸件。

因此,该方法主要适用于像活塞、汽缸盖、油泵壳体等形状不太复杂的铝合金中小型铸件的大量生产。

1.3.3 压力铸造

压力铸造(die casting)是将液态(或半固态)金属高速压入铸型,并在压力下结晶而获得铸件的方法,简称压铸。常用的金属压射力为 $25\sim150\text{ MPa}$,流速为 $15\sim100\text{ m/s}$,充填时间为 $0.01\sim0.2\text{ s}$ 。

1. 压力铸造工艺过程

压力铸造是在压铸机上完成的,压铸机分冷室和热室两种,其中冷室压铸机又有卧式和立式两种形式。它所用的铸型称为压型。压型是垂直分型,其半个铸型固定在定模底板上,称为定型;另外半个铸型固定在动模底板上,称为动型。压型上装有抽芯机构和顶出铸件的机构。图 1-38 所示为冷室卧式压铸机压铸过程。压铸机合型后,将金属液定量浇入压室(见图 1-38a),压射冲头以高速推进进行压铸,金属液被压入型腔并在压力下凝固(见图 1-38b)。待铸件凝固成形后动型开型左移,铸件在冲头的顶力下随动型离开定型。当动型顶杆挡板受阻时,顶杆将铸件从动型中顶出(见图 1-38c),完成一个压铸过程。

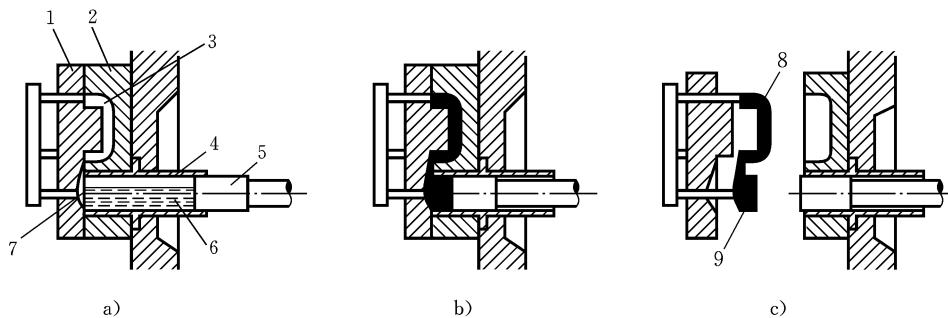


图 1-38 卧式压铸机压铸过程

a) 合型 b) 压铸 c) 开型

1—动型 2—定型 3—型腔 4—压室 5—压射冲头 6—金属液 7—浇道 8—铸件 9—余料

图 1-39 所示为热室压铸机压铸过程。其中鹅颈型注射升液缸与熔体连为一体,一次压铸后多余液体将回到熔体槽中,不存在余料。

压型是压铸的关键工艺装备,型腔的尺寸精度及表面粗糙度直接影响到铸件的尺寸精度及表面粗糙度。压铸时,型腔受到金属液的热冲击,因此压型必须用合金工具钢来制造,并要进行严格的热处理。压型工作温度应保持在 $120\sim280\text{ }^{\circ}\text{C}$,并定期喷涂涂料。

2. 压力铸造的特点及应用范围

压力铸造的优点如下:

(1) 生产效率高,生产过程易于机械化和自动化。一般冷压式压铸机平均每 8 h

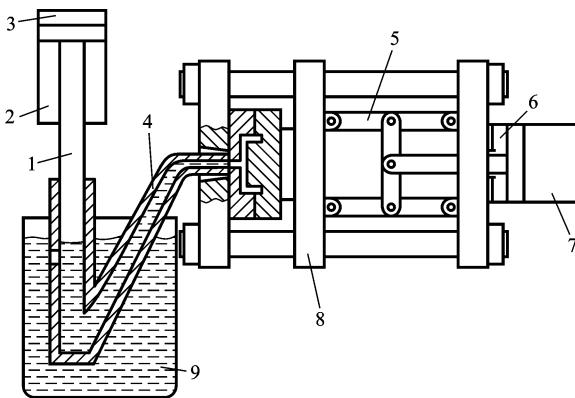


图 1-39 热室压铸机压铸过程

1—柱塞 2—上升缸 3—下压缸 4—鹅颈型升液管

5—四连杆机构 6—开模缸 7—合模缸 8—移动十字头 9—熔体

可压铸 600~700 件。

(2) 铸件品质好, 铸件精度达 CT4~CT8, 表面粗糙度 R_a 为 $0.8\sim3.2\ \mu\text{m}$, 一般压铸件可不经过机械加工而直接使用。

(3) 铸件力学性能好。它在金属型内冷却, 又在压力下结晶, 表面晶粒细小而致密, 其抗拉强度比砂型铸件提高 25%~30%。

(4) 便于采用镶嵌法铸造,实现一件多材质制造,改善铸件某些部位的性能。

但是,压铸机设备投资大,而且压型制作周期长、成本高,只有大量生产时经济上才合理;铸铁、铸钢等高熔点合金不宜压铸,因为压型难以适应而工作寿命短;由于金属液在高压、高速下充型,铸件中包含的气体很难排除,因此压铸件需要切削加工的部分加工余量尽量小,以免铸件中微小气孔暴露在零件表面上;有气孔的压铸件不能在高温下使用,也不能进行热处理,否则高温下会因气体膨胀而使铸件表面起泡或变形。

压力铸造是一种高效率的生产方法,广泛应用于汽车、拖拉机、仪器仪表、医疗器械等制造行业中,用来生产发动机汽缸体、汽缸盖、变速箱体、化油器等中小型铸件,特别是10 kg以下的低熔点合金铸件。

1.3.4 低压铸造

低压铸造(low pressure casting)是在20~70 kPa的压力下将金属液注入型腔，并在压力下凝固的铸造方法。因其压力低，故称之为低压铸造。

1. 真空和低压铸造工艺过程

图 1-40 所示为真空铸造(vacuum casting)和低压铸造。将熔炼好的金属液存放在密封的电阻坩埚炉内保温, 铸型安放在密封盖下方(见图 1-40a)或者上方(见图 1-40b), 铸型底部的浇口对准坩埚炉内的升液管并锁紧铸型。浇注时, 通过真空泵抽

真空或由进气管向炉内缓慢通入压缩空气,金属液经升液管平稳注入铸型,型腔注满后将空气压力升到规定的工作压力并保持适当时间,使金属液在压力下结晶并充分进行补缩。铸件成形后撤去坩埚炉内的压力或真空,升液管内的金属液降回到坩埚内金属液面,开启铸型,取出铸件。一般金属型采用水平分型,下半型固定在密封盖上,只需开启上半型。铸件由浇注系统进行补缩,不用冒口。每生产一个铸件,都要在型腔表面喷氧化锌涂料进行保护。

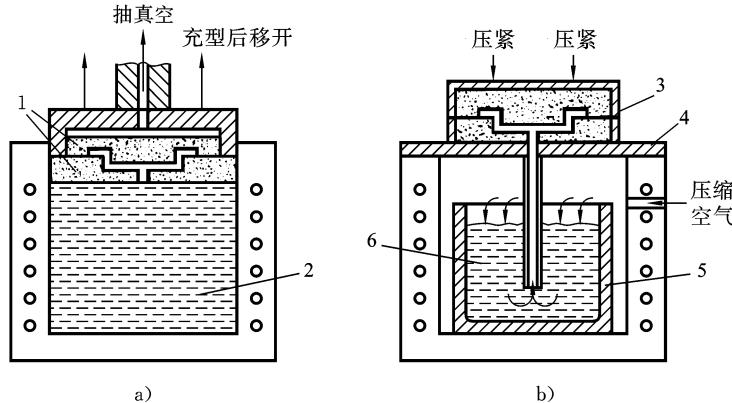


图 1-40 真空和低压铸造

a) 真空铸造 b) 低压铸造

1—铸型 2、6—熔体 3—箱体 4—盖板 5—坩埚

2. 真空和低压铸造的特点及应用范围

真空和低压铸造的主要优点如下:

- (1) 便于调节浇注压力和速度,可适应各种不同的铸型(如金属型、砂型、壳型等)。同时,充型平稳,对铸型的冲击力小,气体较易排除。
- (2) 便于实现顺序凝固,防止缩孔和缩松,尤其能有效地防止铝合金的针孔。
- (3) 铸件的表面品质高于金属型铸件的,可生产出壁厚为1.5~2 mm的薄壁铸件。
- (4) 不用冒口,金属的利用率可提高到90%~98%。

低压铸造所用设备简单、投资少,浇注系统简单,金属的利用率高,广泛应用于各生产部门。该方法常用来生产汽缸体、汽缸盖、活塞、曲轴箱、壳体等高品质铝合金、镁合金铸件;有时也用来生产铜合金件、铸铁件,如船用螺旋桨、内燃机曲轴等。

1.3.5 离心铸造

离心铸造(centrifugal casting)是将金属液浇入高速旋转(250~1500 r/min)的铸型中,使金属液在离心力作用下充填铸型并凝固成形的铸造方法。

1. 离心铸造的基本方式

离心铸造特别适用于生产圆筒形(如管、套等)铸件。为使铸型旋转,离心铸造必

须在离心铸造机上进行。根据铸型旋转轴空间位置的不同,离心铸造可分为立式和卧式两大类,如图 1-41 所示。

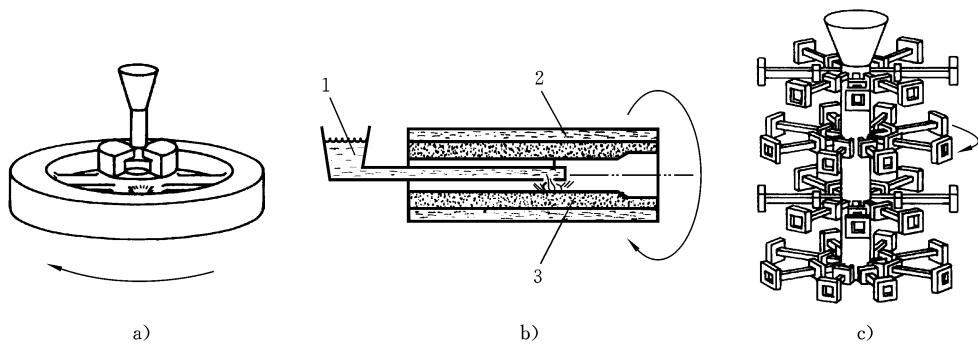


图 1-41 离心铸造

a) 立式离心铸造 b) 卧式离心铸造 c) 成形铸件

1—金属液 2—水套 3—耐火内衬

在立式离心铸造机上铸型是绕竖直轴旋转的,当浇注圆筒形铸件时(见图 1-41a),金属液并不填满型腔,而在离心力的作用下紧靠在铸型的内表面并凝固,而铸件的壁厚则取决于浇入的金属量。这种方式的特点是,铸件的自由表面(即内表面)由于重力的作用而呈抛物线状,铸件上薄下厚。显然在其他条件不变的前提下,铸件的高度越大,壁厚的差别越大。因此,该方法主要用于高度小于直径的圆环形铸件。

在卧式离心铸造机上铸型是绕水平轴旋转的(见图 1-41b)。在离心力的作用下,金属液贴在铸型内表面而形成中空铸件。这种方法铸出的圆筒形铸件无论在轴向还是径向壁厚都是相同的,因此适合于生产长度较大的管形铸件。这也是最常用的离心铸造方法。

离心铸造也可用来生产成形铸件,如图 1-41c 所示,多在立式离心铸造机上进行。铸型紧固于旋转工作台上,浇注时金属液充满铸型,故不形成自由表面。成形铸件的离心铸造虽未省去型芯,但在离心力作用下,提高了金属的充型能力,便于薄壁铸件的成形,而且浇注系统可起补缩作用,使铸件组织致密。

2. 离心铸造的特点及适用范围

离心铸造具有如下优点:

- (1) 生产圆筒形铸件时,可省去型芯、浇注系统和冒口,因而省工、省料,降低了铸件成本。
- (2) 金属结晶由外向内顺序凝固,气体和熔渣比较轻而向内部集中,铸件组织致密,极少存在缩孔、气孔、夹渣等缺陷。
- (3) 可进行双金属铸造,如在钢套上镶铸薄层铜衬制作滑动轴承等,可节省贵重材料。

用离心铸造方法生产的铸件内表面粗糙,尺寸误差大,品质差,若需切削加工,必须增大加工余量。此方法不适合铸造密度偏析大的合金(如锡青铜等)及铝、镁等轻合金铸件。

离心铸造主要用来大批生产各种铸铁和铜合金的管形、套形、环形铸件和小型成形铸件,如铸铁管、内燃机汽缸套、轴套、齿圈、双金属轴瓦和双金属轧辊等。

1.3.6 消失模铸造

用泡沫塑料制成模样,浸挂耐火涂料后放入砂箱内,填入干砂(或树脂砂,或磁丸)代替普通型砂进行造型,不取出模样,直接将金属液浇入型中的模样上,使之熔失、气化而形成铸件的方法称为消失模铸造(lost-foam casting),又称为气化模铸造(evaporative pattern casting)或实型铸造(full mold casting)。

1. 消失模铸造方法分类

按造型材料及方法的不同,消失模铸造可分为三类。

(1) 干砂负压消失模铸造。将表面涂敷耐火涂料的泡沫塑料模样放入特制的砂箱内,填入干砂,振实后在砂箱顶部覆盖一层塑料薄膜,抽真空使砂子紧固成铸型。浇注高温金属液后模样气化,并占据模样的位置而凝固成铸件。接着释放真空,干砂又恢复了流动性,翻转砂箱倒出干砂,取出铸件。其造型与浇注如图 1-42 所示。

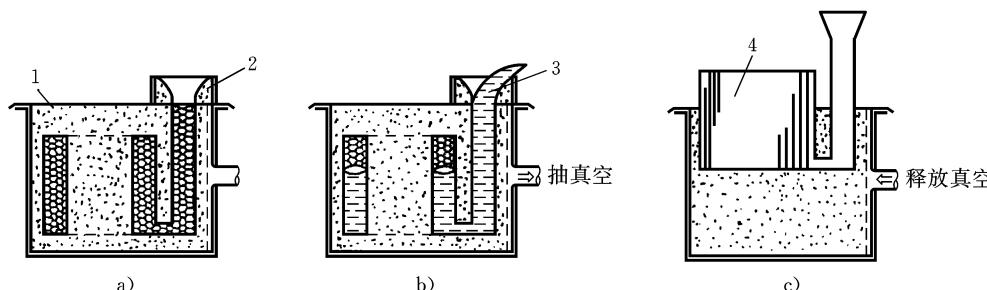


图 1-42 消失模铸造造型与浇注

1—塑料薄膜 2—浇口杯 3—金属液 4—铸件

该方法主要适用于大批生产的中小型铸件,如汽车、拖拉机、铸件管接头、耐磨件等。

(2) 树脂砂或水玻璃砂消失模铸造。其造型过程与普通砂型铸造相似,主要适用于单件、小批生产的中大型铸件,如汽车覆盖件模具、机床床身等。

(3) 磁型消失模铸造。将表面涂敷耐火涂料的泡沫塑料模样放入磁丸箱中(见图 1-43),填入磁丸,经微振紧实后置入固定的磁型机内。在强磁场的作用下,磁丸相互吸引形成强度和

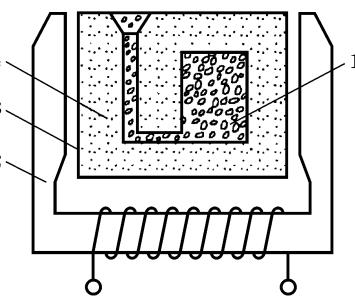


图 1-43 磁型铸造

1—模样 2—电磁铁 3—磁丸箱 4—磁丸

透气性良好的铸型,浇注后高温金属液使模样气化,并占据模样的位置而凝固成铸件。断电后磁场消失,磁丸重新恢复了流动性,卸掉磁丸即可取出铸件。此方法主要适用于中小型铸件的大量生产。

2. 消失模铸造的特点及应用范围

(1) 生产效率高。模样制作简单,无须混砂,基本不用型芯,造型简便,清理方便,铸造生产周期短。

(2) 铸件尺寸精度高。由于泡沫塑料模样的尺寸精度高,在造型过程中不存在因分模、起模、修型、下芯、合型等操作造成的尺寸偏差,因而铸件的尺寸精度高。

(3) 铸件品质好。铸件无飞边毛刺,在真空状态下浇注,表面没有皱皮,铸钢件表面增碳少。

(4) 工艺技术容易掌握,生产管理方便,易于实现机械化和绿色化生产。

消失模铸造适合于除低碳钢以外的各类合金的生产。由于泡沫塑料模样在熔失的过程中会对铸件产生增碳作用,所以不适合生产低碳钢铸件。消失模铸造技术为多品种铸件的单件、小批及大量生产,以及几何形状复杂的中小型铸件的生产,提供了一种新的、更为经济适用的生产方法。

1.3.7 挤压铸造

挤压铸造(squeezing casting)也称“液态模锻”(melt forging),是对进入挤压型腔内的液态(或半固态)的金属施加较高的机械压力,使其成形和凝固,从而获得铸件的铸造方法。

1. 挤压铸造的工艺过程

最简单的挤压铸造如图 1-44 所示。在铸型中浇入一定量的金属液,上型随即向下运动,使金属液自下而上充满型腔并凝固。挤压铸造给金属液的压力(2~10 MPa)和速度(0.1~0.4 m/s)比压力铸造的小得多,且无涡流飞溅现象,所以铸件组织致密无气孔。挤压铸造一般在液压机上或专用挤压铸造机上进行。

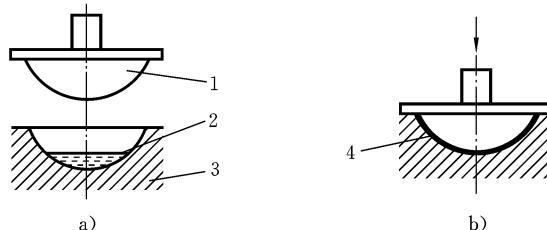


图 1-44 直接式挤压铸造

a) 浇入定量金属液 b) 上型向下挤压

1—上型 2—金属液 3—下型 4—铸件

根据挤压铸造时铸件上的受力形式及金属液充填型腔的状态,可将挤压铸造分为两大类:一类为直接式挤压铸造(型腔内加压),其特点是冲头的压力直接作用在铸

件的端部和内表面上,加压效果好,铸件局部可产生微量塑性变形组织,这种方式适合生产厚壁和形状不太复杂的铸件;另外一类为间接式挤压铸造(压室内加压),其主要特征是工件成形时所受到的压力是由压室内金属液在压(冲)头力的作用下经浇道传递到铸件上,外力并不直接作用在铸件上,不产生塑性变形组织,这种方式更加灵活适用,可生产形状更加复杂、壁厚差较大的铸件。

2. 挤压铸造的特点及应用范围

(1) 铸件组织致密,有利于防止气孔、缩松、裂纹产生,晶粒细化,可进行固溶处理。铸件的力学性能高于其他普通铸件的,接近同种合金锻件水平。

(2) 铸件有较高的尺寸精度、较低的表面粗糙度,如铝合金铸件精度可达 CT5,表面粗糙度 R_a 可达 $3.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$ 。

(3) 工艺适用性较强,适合于多种铸造合金和部分变形合金。近年来,在半固态金属成形及金属基复合材料成形方面得到了广泛应用。

(4) 工艺出品率高,便于实现机械化、自动化生产。

挤压铸造适合生产各种力学性能要求高、气密性好的厚壁铸件,如汽车铝轮毂、发动机铝活塞,铝缸体,制动器铝铸件等,不适合生产结构复杂的铸件。

1.4 铸件结构设计

设计铸件时,不仅要满足其使用性能的要求,还应符合铸造工艺和合金铸造性能对铸件结构的要求,即所谓“铸件结构工艺性”的要求。铸件结构设计 (design of casting structure) 是否合理,对铸件品质、铸造成本和生产效率有很大的影响。

1.4.1 铸造工艺对铸件结构的要求

铸件结构的设计应尽量使制模、造型、制芯、合型和清理等工序简化,提高生产效率。

1. 铸件的外形应便于取出模型

(1) 避免外部侧凹。铸件在起模方向若有侧凹,必将增加分型面的数量,使铸件容易产生错型,影响铸件的外形和尺寸精度。如图1-45a所示的端盖,上、下法兰的存在使铸件有侧凹,需要两个分型面,所以常需采用三箱造型,或者增加环状外型芯,使

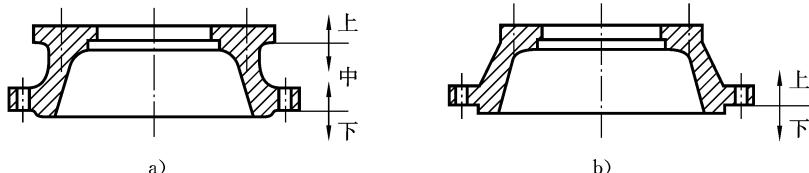


图 1-45 端盖铸件

a) 改进前 b) 改进后

造型工艺复杂。图 1-45b 所示为改进设计后,取消了上部法兰,铸件只有一个分型面,因而可以减少工时消耗,方便造型和合型工艺。特别是对于机器造型,只允许一个分型面,这种改进尤为重要。

(2) 分型面尽量平直。平直的分型面可避免操作费时的挖砂造型,在机器造型时,分型面平直可方便模板的制造。图 1-46a 所示的摇臂铸件原采用曲面分型,改为图 1-46b 所示的形状后,分型面变成平面,方便了制模和造型。

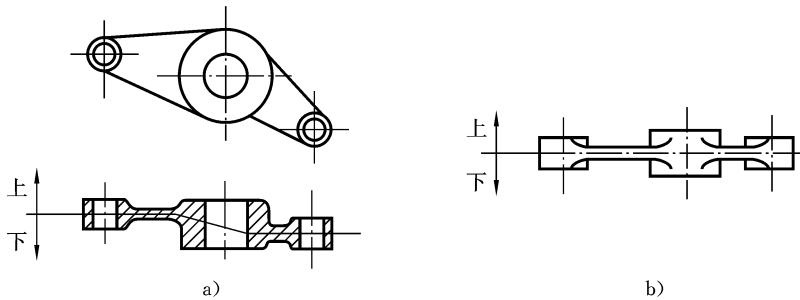


图 1-46 摆臂铸件

a) 改进前 b) 改进后

(3) 凸台、肋板的设计。设计铸件侧壁上的凸台、肋板时,要考虑到起模方便,尽量避免使用活块和型芯。如图 1-47a、c 所示的凸台均妨碍起模,应将相近的凸台连成一片,并延伸到分型面,如图 1-47b、d 所示。这样就不需要活块或型芯,便于起模。

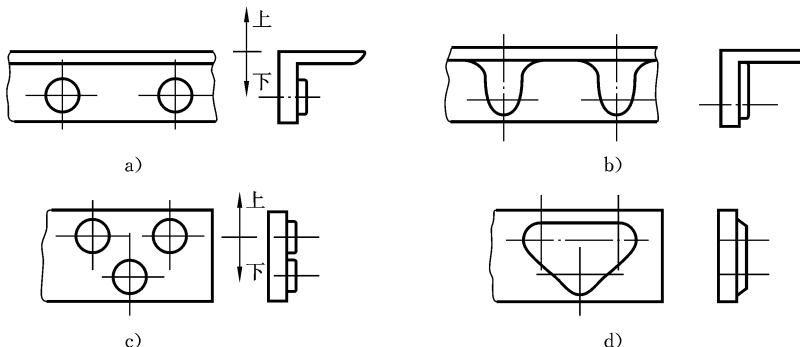


图 1-47 凸台的设计

a)、c) 改进前 b)、d) 改进后

如图 1-48 所示的汽缸套,其总长度为 200 mm,原设计其外围的散热片不便于起模(见图 1-48a),改进设计后(见图 1-48b),既满足了使用要求,又便于铸造生产。

2. 合理设计铸件的内腔

(1) 尽量避免或减少型芯。不用或少用型芯,可简化生产工艺过程,提高铸件的尺寸精度和品质。图 1-49a 所示的内腔必须使用悬臂型芯,型芯的固定、排气和出砂都很困难;而设计成如图 1-49b 所示结构可省去型芯。图 1-50a 所示的铸件内腔改为如图 1-50b 所示结构后,可利用砂型“自带型芯”形成内腔。

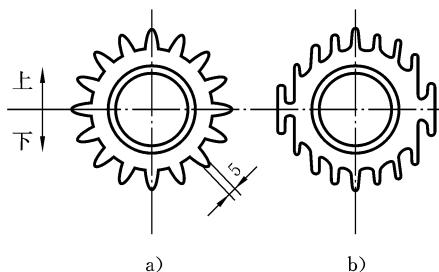


图 1-48 汽缸套散热片设计的改进

a) 改进前 b) 改进后

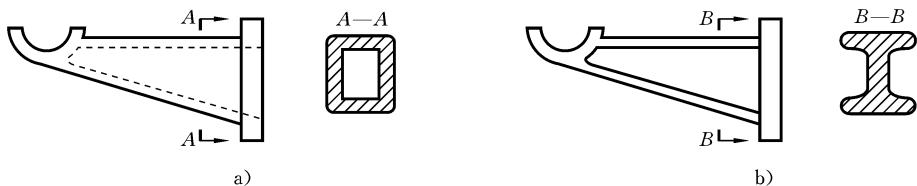


图 1-49 悬臂支架

a) 改进前 b) 改进后

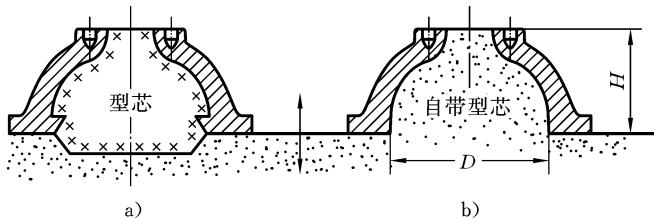


图 1-50 内腔的两种设计

a) 改进前 b) 改进后

(2) 型芯要便于固定、排气和清理。图 1-51a 所示为一轴承架, 其内腔采用两个型芯, 其中较大的呈悬臂状, 需用芯撑来固定。若改成如图 1-51b 所示的结构, 使两个型芯连为一体, 型芯就能很好地固定, 而且下芯、排气、清理都很方便。

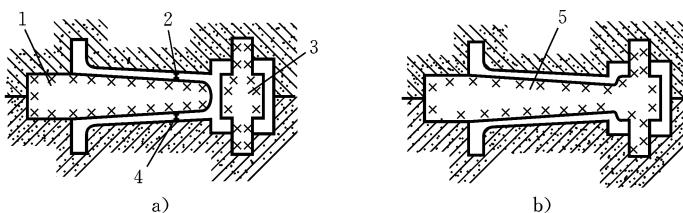


图 1-51 轴承支架结构的改进

a) 改进前 b) 改进后

1—型芯 1 2、4—芯撑 3—型芯 2 5—联体型芯

图 1-52 所示为高炉风口铸件,其中心孔为热风通道,热风通道周围是通循环水的水套夹层空间,其顶部有两个直径较小的孔作为循环水的进水孔与出水孔。原工艺如图 1-52a 所示,为了下芯方便,采用两个分型面、三箱造型,并用芯撑固定型芯。这样,下芯操作十分困难;芯撑不容易与铸件熔合,造成渗漏;型芯排气不畅,易使铸件产生气孔;型芯的清理也十分困难。改进后的工艺如图 1-52b 所示。该方案是在铸件上、下增开适当大小和数量的工艺孔,既方便下芯,也利于型芯排气和清理。但因对铸件有致密性要求,不允许有工艺孔存在,故当铸件清理后,需采取焊补等方法将工艺孔封闭,使其不渗漏。

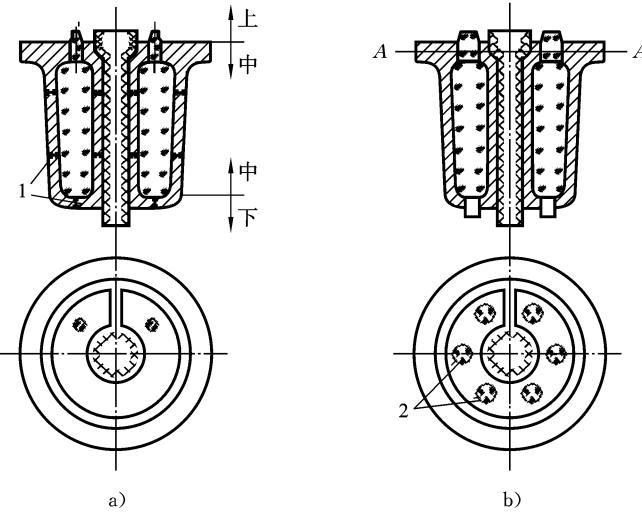


图 1-52 高炉风口铸件内腔结构的改进

a) 无工艺孔 b) 有工艺孔

1—芯撑 2—工艺孔

3. 铸件要有结构斜度

铸件上垂直于分型面的不加工表面,应设计出结构斜度,如图 1-52 所示高炉风口铸件的外形具有结构斜度,起模省力,铸件尺寸精度高。

铸件的结构斜度与起模斜度不容混淆。结构斜度是在零件的非加工面上设置的,直接标注在零件图上,且斜度值较大。起模斜度是在零件的加工面上放出的,在绘制铸造工艺图或模样图时使用。

1.4.2 合金铸造性能对铸件结构的要求

铸件结构的设计应考虑到合金的铸造性能的要求,避免产生缩孔、缩松、浇不足、变形和裂纹等铸造缺陷。

1. 合理设计铸件壁厚

不同的合金、不同的铸造条件,对合金的流动性影响很大。为了获得完整、光滑的合格铸件,铸件壁厚设计应大于该合金在一定铸造条件下所能得到的“最小壁厚”。

表 1-3 列举了在砂型铸造条件下铸件的最小壁厚。

但是,铸件壁厚也不宜太大。厚壁铸件晶粒粗大,易产生缩松、缩孔等缺陷,其承载能力并不是随截面面积增大而成比例地增加,因此壁厚应选择得当。为了保证铸件的承载能力,对强度和刚度要求较高的铸件,应根据载荷的性质和大小选择合理的截面形状,如图 1-53 所示。必要时可在薄弱部位设置加强肋,以避免厚大截面,如图 1-54 所示。

表 1-3 砂型铸造条件下铸件的最小壁厚

(mm)

铸造方法	铸件尺寸	合金种类					
		铸钢	片墨铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铝合金	铜合金
砂型铸造	<200×200	8	5~6	6	5	3	3~5
	(200×200)~(500×500)	10~12	6~10	12	8	4	6~8
	>500×500	15~20	15~20	15~20	10~12	6	10~12

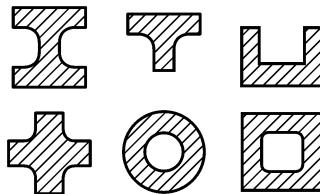


图 1-53 铸造零件常用的截面形状

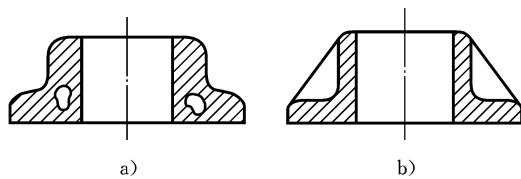


图 1-54 采用加强肋减小铸件壁厚

a) 壁厚大产生缩孔 b) 采用加强肋

2. 铸件壁厚应尽可能均匀

铸件各部分壁厚若相差过大,厚壁处易产生缩孔、缩松等缺陷。同时各部分冷却速度不同,易形成热应力,使铸件薄弱部位产生变形和裂纹。如图 1-55a 所示,铸件两旁的小孔不铸出,因壁厚过大而产生热节;改成如图 1-55b 所示结构后,可避免产生缩孔等缺陷。此外,为了有利于铸件各部分冷却速度一致,内壁厚度应比外壁厚度小一些,肋板厚度应比铸件壁厚小一些。

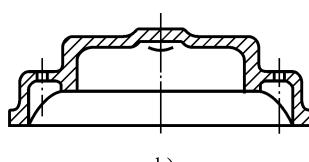
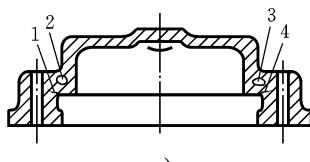


图 1-55 顶盖的设计

a) 壁厚不均 b) 壁厚均匀

1、4—裂纹 2、3—缩孔

3. 铸件壁的连接方式要合理

(1) 铸件两壁之间的连接应有结构圆角(structure fillet)。图1-56所示为不同转角处的热节和应力分布。如无圆角,直角处热节大,易产生缩孔、缩松。在内角处易产生应力集中,裂纹倾向增大;直角内角部分的砂型为尖角,浇注时容易冲垮而形成砂眼。铸造内圆角半径R取值数据可参考表1-4。

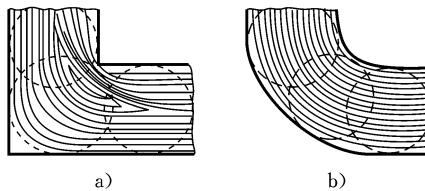


图1-56 不同转角处的热节和应力分布

a) 直角 b) 圆角

表1-4 铸件的内圆角半径R值

(mm)

$a+b$	≤ 8	$8 \sim 12$	$12 \sim 16$	$16 \sim 20$	$20 \sim 27$	$27 \sim 35$	$35 \sim 45$	$45 \sim 60$
铸铁	4	6	6	8	10	12	16	20
铸钢	6	6	8	10	12	16	20	25

注 a、b 分别为相连两铸件壁的厚度。

(2) 铸件壁要避免交叉和锐角连接。铸件壁连接时应采用图1-57a中的正确形式。当铸件两壁交叉时,采用交错接头(见图1-57b);当两壁必须锐角连接时,要采用如图1-57c所示正确的过渡方式。其主要目的都是尽可能减少铸件的热节。

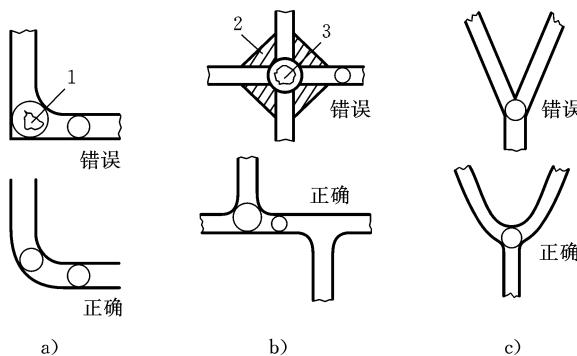


图1-57 接头结构

a) 拐角处的热节 b) 十字交叉处的热节 c) 在Y形接头中的热节

1、3—缩孔 2—外冷铁

(3) 厚壁与薄壁连接要平缓过渡。铸件壁厚不同的部分进行连接时,应力求平缓过渡,避免截面突变,以减少应力集中,防止产生裂纹。当壁厚差别较小时,可用圆角过渡;当壁厚之比差别在两倍以上时,应采用楔形过渡,如图1-58所示。

4. 避免铸件收缩受到阻碍

当铸件的收缩受到阻碍,产生的铸造内应力超过合金的强度极限时,铸件将产生

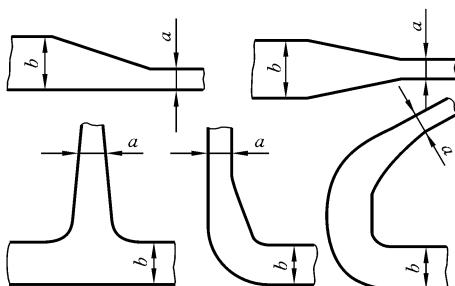


图 1-58 不同壁厚间的连接

裂纹。因此,在设计铸件时应尽量使其能自由收缩,特别是在产生内应力叠加时,应采取措施避免局部收缩阻力过大。图 1-59 所示为轮辐设计的几种情况。轮缘和轮毂较厚、轮辐较薄,铸件冷却收缩时极易产生热应力。图 1-59a 所示的轮辐结构,制作模样和造型方便,但因为轮辐对称分布且较薄,铸件冷却时收缩受阻,因而易产生裂纹。图 1-59b 所示的弯曲

轮辐和图 1-59c 所示的立体轮辐,利用了铸件的微量变形来减小内应力,是比较好的设计。图 1-60 所示的应力框壁厚不等,收缩中易导致挠曲变形。

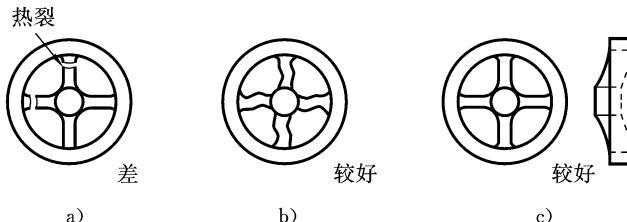


图 1-59 轮辐的设计

a) 在刚性铸型内收缩导致热裂 b) 弯曲轮辐 c) 立体轮辐

5. 避免大的水平面

图 1-61a 所示为罩壳铸件,大平面受高温金属液烘烤时间长,易产生夹砂;金属液中气孔、夹渣上浮滞留在上表面,易产生气孔、渣孔;而且大平面不利于金属液充填,易产生浇不足和冷隔。若如图 1-61b 所示倾斜式结构,则可以减少或消除上述缺陷。

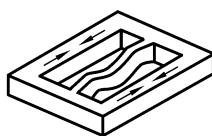


图 1-60 应力框的变形

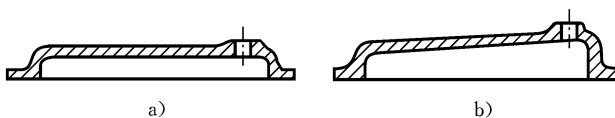


图 1-61 罩壳铸件

a) 原结构 b) 改进后的结构

1.4.3 不同的铸造方法对铸件结构的要求

不同的铸造方法对铸件结构有着不同的要求,设计铸件结构时,必须充分考虑这方面的要求。

1. 熔模铸件

(1) 便于从压型中抽出金属型芯。如图 1-62a 所示铸件的凸缘朝内,注蜡后,成

形蜡模的金属型芯无法抽出,蜡模取出困难。若改成如图 1-62b 所示的结构,把凸缘朝外就解决了这一问题。

(2) 孔、槽不应过小、过深。为了便于涂挂涂料和撒砂,孔径通常应大于 2 mm。

(3) 尽量避免大平面。熔模铸造的型壳高温强度较低,型壳易变形。为防止变形,大面积平板型壳应增设工艺孔或工艺肋,以增强型壳刚度,如图 1-63 所示。

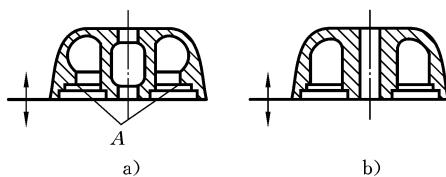


图 1-62 便于抽出蜡模型芯的设计

a) 不合理 b) 合理

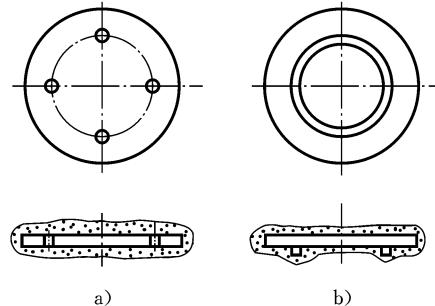


图 1-63 大平面上的工艺孔和工艺肋

a) 增设工艺孔 b) 增设工艺肋

(4) 熔模铸造工艺一般不用冷铁,少用冒口,多用直浇道直接补缩,故要求铸件壁厚均匀,或者使壁厚分布满足顺序凝固要求,不要有分散的热节。

2. 金属型铸件

(1) 金属型无退让性和溃散性,因此铸件结构一定要保证能顺利出型,其结构斜度应较砂型铸件的大。如图 1-64a 所示铸件的结构不合理,金属型芯难以抽出,应改为图 1-64b 所示的结构。

(2) 金属型导热快,为防止铸件出现浇不足、裂纹等缺陷,铸件壁厚不能过小,差别不能太大,如铝硅合金件的最小壁厚宜为 2~4 mm,铝镁合金件的宜为 3~5 mm。

(3) 为便于金属型芯的安放及抽出,铸孔的孔径不能过小、过深。通常,铝合金铸件的最小铸出孔为 8~10 mm,镁合金和锌合金铸件的均为 6~8 mm。

3. 压铸件

(1) 尽量避免侧凹、深腔。避免侧凹、深腔的目的是能顺利地将压铸件从压型中取出。图 1-65 所示为压铸件的两种设计方案。图 a 所示的结构因侧凹朝内,受到凸台而无法抽芯。改为图 b 所示的结构后,侧凹朝外,可按箭头方向抽出外型芯,铸件便可从压型内顺利取出。

(2) 壁厚要合理。在保证铸件有足够的强度和刚度的前提下,压铸件壁厚应尽可能小,而且要均匀,以减少气孔、缩孔等缺陷。

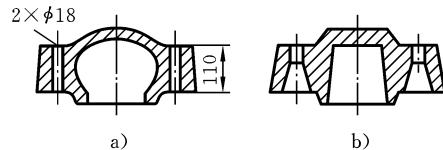


图 1-64 金属型铸件结构和抽芯的关系

a) 不合理 b) 合理

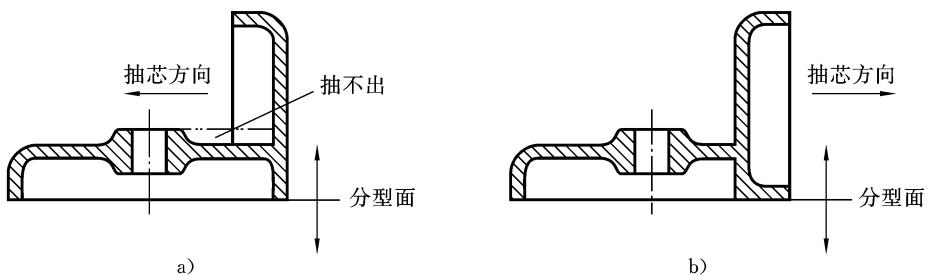


图 1-65 压铸件的两种设计方案

a) 不合理 b) 合理

(3) 注意嵌件的连接。为使压铸件中的嵌件牢固,压铸前应在与嵌件连接的铸件表面预制出凹槽、凸台或滚花,然后再进行压铸加工。

1.5 铸造金属材料的特性

几乎所有的合金都能用铸造工艺成形,但不同合金的铸造特性有一定的差异。认识不同合金的特性对铸造生产有重要意义。

1.5.1 铸铁及铸铁件生产

1. 铸铁的一般特性

1) 铸铁的特点及分类 铸铁(cast iron)是机械制造中应用最广的金属材料。据统计,一般机器中,铸铁件的质量常占机器总质量的 50% 以上。在铸造生产中,铸铁件的产量占铸件总产量的 80% 以上。

铸铁是碳含量(质量分数)大于 2.11% 的铁碳合金。工业用铸铁除含碳之外,还含有硅、锰、硫、磷等。铸铁按碳的存在形态不同,分为白口铸铁(white cast iron)、灰铸铁(gray cast iron)、麻口铸铁(mottled cast iron)。

灰铸铁根据石墨形态的不同,又可分为:① 片墨铸铁,其石墨呈片状(见图 1-66b);② 可锻铸铁,其石墨呈团絮状(见图 1-66a);③ 球墨铸铁,其石墨呈球状(见图 1-66c);④ 蠕墨铸铁,其石墨呈蠕虫状。

如果在铸铁中加入一定量的钒、钛、铬、铜等元素,可以获得具有耐热、耐蚀、耐磨等特殊性能的合金铸铁。

2) 铸铁的组织 铸铁能得到什么样的石墨形态和基体组织,主要取决于其石墨化过程。影响石墨化过程的主要因素是铸铁的成分和铸件实际冷却速度。

(1) 铸铁成分的影响。碳和硅是铸铁中能有效地促进石墨化的元素。在一定冷却条件下,碳、硅两元素共同影响着石墨化的过程,得到不同石墨形态和基体组织的铸铁(如白口铸铁、麻口铸铁、灰铸铁等)。要想得到灰铸铁件,碳、硅含量应比较高。一般铸铁件的碳含量(质量分数)为 2.8%~4.0%,硅含量(质量分数)为 1%~3%。

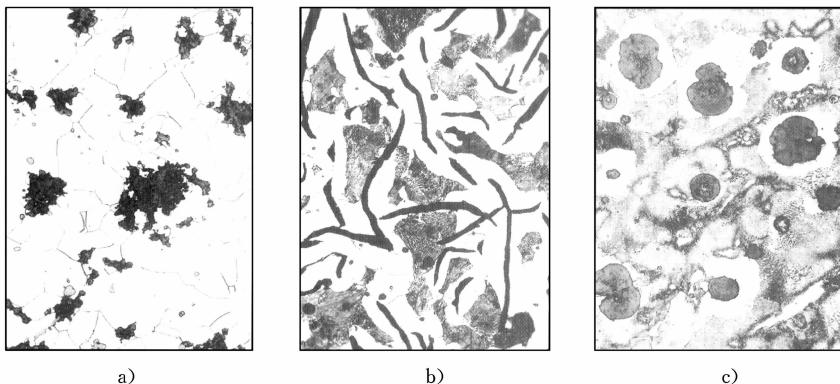


图 1-66 铸铁的石墨形态

a) 铁素体可锻铸铁 b) 50%铁素体+50%珠光体片墨铸铁 c) 50%铁素体+50%珠光体球墨铸铁

除碳、硅外,促进石墨化过程的元素还有铝、钛、镍、铜等,但其作用不如碳和硅强烈,在生产合金铸铁时,常以这些元素作为合金元素。

铸铁中的硫、锰、铬、钨、钒等碳化物形成元素都是阻碍石墨化过程的。硫不仅强烈地阻止石墨化,而且还会降低铸铁的力学性能。锰与硫易形成 MnS 进入熔渣,可削弱硫的有害作用。

(2) 冷却速度的影响。冷却速度对铸铁石墨化过程影响很大。冷却愈慢,愈有利于石墨的形成。冷却速度过快,常会使铸件产生“白口”。

2. 灰铸铁

1) 灰铸铁的化学成分、组织和性能 灰铸铁(片墨铸铁)的化学成分一般为:
 $w(C) = 2.6\% \sim 3.6\%$, $w(Si) = 1.2\% \sim 3.0\%$, $w(Mn) = 0.4\% \sim 1.2\%$, $w(S) < 0.15\%$, $w(P) < 0.15\%$ 。

灰铸铁的性能取决于基体组织和石墨的数量、形状、大小及分布状态。一般灰铸铁的化学成分和显微组织不作为验收条件,但为了达到规定的力学性能,必须以相应的化学成分和显微组织来保证。

灰铸铁的组织一般由金属基体和片状石墨组成。灰铸铁的组织结构可以视为在钢的基体(如珠光体、铁素体等)中嵌入大量石墨片。石墨是非金属相,本身的强度、韧度非常低,对基体有明显的割裂作用,石墨片的尖端容易引起应力集中。所以灰铸铁件的力学性能较差,强度仅为钢件的 20%~30%,塑性为零,韧度也极低。当基体组织相同时,其石墨越多、片越粗大,分布越不均匀,铸铁的抗拉强度和塑性就越低。由于片状石墨对灰铸铁性能的决定性影响,即使基体的组织从珠光体改变为铁素体,也只会降低强度而不会增加塑性和韧度,因此珠光体灰铸铁得到广泛应用。铸铁的抗压强度、硬度受石墨的影响较小。

石墨虽然降低了铸铁的力学性能,但却使铸铁获得了许多钢所不及的优良性能。灰铸铁具有良好的减摩与耐磨性能,常用来制造滑动轴承、轴套、涡轮、机床导轨等耐

磨的零件。铸铁的减振性很好,所以常用灰铸铁制造机器机座、床身等受压、减振的零件。铸铁的切削性能好,缺口敏感性低。灰铸铁结晶时,由于石墨析出时的体积膨胀,减小了合金的凝固收缩,故灰铸铁的收缩率小;而且,灰铸铁中石墨的膨胀,使合金具有一种“自补缩能力”,灰铸铁件的缩孔、缩松倾向小。灰铸铁熔点较低,结晶温度范围较窄,流动性好,故具有良好的铸造性能,能够铸造形状复杂的零件。

但是,铸铁属于脆性材料,锻造性能很差,不能进行压力加工。焊接时容易产生裂纹和白口组织,焊接性能也差。此外,由于热处理无法改变石墨的大小和分布,灰铸铁热处理的改性效果很差。

2) 灰铸铁的孕育 孕育处理(inoculated cast iron)是浇注前往铁液中加入一定量的孕育剂,形成外来结晶核心,促进铸铁石墨化过程,并使石墨片细小、分布均匀。生产中常用的孕育剂是硅含量(质量分数)为75%的硅铁,加入量为铁液的0.25%~0.60%(质量分数)。

孕育铸铁的组织是在致密的珠光体基体上均匀分布着细小的石墨片,其抗拉强度、硬度、耐磨性明显有所提高。但孕育铸铁中石墨仍为片状,对基体有明显的割裂作用,其塑性、韧度仍然很低,本质上仍属于片墨铸铁。

孕育铸铁的另一优点是冷却速度对组织和性能的影响较小。在厚大截面上性能均匀,比较适合制造要求较高强度、高耐磨性和高气密性的铸件,特别是厚大铸件。

3) 灰铸铁的牌号及生产特点

(1) 灰铸铁的牌号。灰铸铁的牌号是用力学性能表示的。牌号以“灰”“铁”二字汉语拼音的首字母“H”“T”与一组数字组成,数字表示单铸试棒的最小抗拉强度值(单位MPa)。灰铸铁共分为HT100、HT150、HT200、HT250、HT300、HT350六个牌号,其中,HT100为铁素体灰铸铁,HT150为珠光体+铁素体灰铸铁,HT200以上牌号为珠光体灰铸铁。

表1-5列出了不同壁厚灰铸铁件抗拉强度参考值。由表可见,选择铸铁牌号时必须考虑铸件的壁厚。例如,某铸件的壁厚40mm,要求抗拉强度为200MPa,此时,应选HT250,而不是HT200。

表1-5 不同壁厚的灰铸铁的抗拉强度 (MPa)

铸件壁厚/mm	铸铁牌号					
	HT100	HT150	HT200	HT250	HT300	HT350
2.5~10	130	175	220	270	—	—
10~20	100	145	195	240	290	340
20~30	90	130	170	220	250	290
30~50	80	120	160	200	230	260

(2) 灰铸铁的生产特点。灰铸铁大多在冲天炉中熔炼,但近年用电炉熔炼生产灰铸铁的情况日益增多。电炉熔炼温度较高,铁液纯净度较高,也有利于孕育处理,

但电炉熔炼铁液不及冲天炉熔炼铁液的石墨化能力强。低牌号灰铸铁的生产一般不需炉前处理便可直接浇注,HT200及以上牌号灰铸铁需要进行孕育处理。

灰铸铁有良好的铸造性能,流动性好,收缩率低,一般不需冒口和冷铁,可铸造较为复杂的铸件,铸造工艺较为简单。此外,灰铸铁浇注温度较低,对型砂的要求比较低。

灰铸铁件一般不需进行热处理,有必要时可进行时效处理以消除内应力。

3. 球墨铸铁

球墨铸铁(ductile iron)简称球铁,是20世纪40年代末发展起来的一种重要的铸造合金,它是通过向灰铸铁的铁液中加入一定量的球化剂(如镁、钙及稀土等)进行球化处理(spherical process),并加入少量的孕育剂以促进石墨化,在浇注后可获得具有球状石墨组织的铸铁。球墨铸铁具有优良的力学性能、切削加工性能和铸造性能,生产工艺简便,成本低廉,应用十分广泛。

1) 球墨铸铁的化学成分、组织和性能 球墨铸铁原铁液的化学成分为: $w(C)=3.6\% \sim 4.0\%$, $w(Si)=1.0\% \sim 1.3\%$, $w(Mn) < 0.6\%$, $w(S) < 0.06\%$, $w(P) < 0.08\%$ 。其特点是高碳,低硅,低锰、硫、磷。高碳是为了提高铁液的流动性,消除白口和减少缩松,使石墨球化效果好。硫与球化剂中的镁、稀土元素化合,促使球化衰退,磷可降低球墨铸铁的塑性和韧度,故应尽量减少铁液中的硫、磷含量。经过球化和孕育处理后,球墨铸铁中的硅含量增加($w(Si)=2.0\% \sim 2.8\%$),此外还有一定量的镁($w(Mg)=0.03\% \sim 0.05\%$)、稀土元素($w(RE)=0.3\% \sim 0.6\%$)残留。

球墨铸铁的铸态组织由珠光体、铁素体、球状石墨及少量自由渗碳体组成。控制化学成分,可以得到珠光体占多数的球墨铸铁(称为铸态珠光体球墨铸铁),或铁素体占多数的球墨铸铁(称为铸态铁素体球墨铸铁)。经过不同热处理,可以分别获得以珠光体、铁素体、珠光体加铁素体、贝氏体、马氏体等为基体的球墨铸铁。

球墨铸铁中,石墨呈球状,对基体的割裂作用比片状石墨大大减小。球墨铸铁的力学性能远远高出灰铸铁,接近于钢。球墨铸铁的抗拉强度一般为400~900 MPa,与碳钢相当;屈强比($R_{p0.2}/R_m$)高于碳钢;塑性($A=1\% \sim 20\%$)远远高于灰铸铁;冲击韧度高于灰铸铁,但比钢低。

球墨铸铁具有较好的工艺性能,其铸造性能优于铸钢,焊接性能、热处理性能优于灰铸铁。此外,球墨铸铁还具有良好的耐磨性、减振性和低的缺口敏感性等,这些又是钢所不及的。因此,球墨铸铁在机械制造中已广泛代替灰铸铁和可锻铸铁用来制造那些性能要求较高,特别是一些受力复杂,负荷较大的重要铸件,如内燃机车和柴油发动机曲轴、凸轮轴、活塞,汽车、拖拉机的齿轮、后桥壳、吊耳,轧钢机轧辊,水压机的工作缸、缸套、活塞等。

球墨铸铁的牌号以“球”“铁”二字的汉语拼音首字母“Q”“T”与两组数字表示,两组数字分别表示单铸试块的最小抗拉强度和最小断后伸长率。表1-6列出了常用球墨铸铁的基体组织、力学性能。

表 1-6 常用球墨铸铁的基本组织、力学性能

牌号	基体组织	力学性能(不小于)			
		R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	硬度(HBW)
QT400-18	铁素体	400	250	18	120~175
QT400-15	铁素体	400	250	15	120~175
QT450-10	铁素体	450	310	10	160~210
QT500-7	铁素体+珠光体	500	320	7	170~230
QT600-3	珠光体+铁素体	600	370	3	190~270
QT700-2	珠光体	700	420	2	225~305
QT800-2	珠光体或索氏体	800	480	2	245~335
QT900-2	回火马氏体或托氏体+索氏体	900	600	2	280~360

2) 球墨铸铁的生产 球墨铸铁比灰铸铁的生产工艺复杂,为保证球铁件的性能,需要从以下几个方面进行控制。

(1) 铁液熔炼。冲天炉和电炉均可用来熔炼生产球铁的铁液。在我国以冲天炉熔炼的生产量为大,但电炉熔炼的铁液温度高,硫含量低(冲天炉熔炼时铁液会从焦炭增硫),更容易保证球铁件的品质,因而在球铁生产中电炉的使用也越来越多。制造球墨铸铁所用的铁液碳含量要高($w(C)=3.6\% \sim 4.0\%$),为保证足够的孕育量且防止终硅含量过高,原铁液的硅含量应低一些($w(Si)=1.0\% \sim 1.3\%$),硫、磷含量要尽可能低。由于球化孕育会造成温度较大幅度的下降,为防止浇注温度过低,出炉的铁液温度必须高达1450℃以上。

(2) 球化处理和孕育处理。球化处理和孕育处理是生产球墨铸铁的关键,必须严格操作。

球化剂的作用是使石墨呈球状析出。多种元素均具有使石墨球化的作用,但以镁的作用最强。在欧美诸国多使用纯镁作球化剂,但在我国则是广泛采用稀土镁硅铁合金作为球化剂。稀土镁硅铁合金中的镁和稀土是球化元素,其质量分数均小于10%,其余为硅和铁。以稀土镁硅铁合金作球化剂,结合了我国的资源特点,其作用平稳,减少了镁的用量,还能提高球化的稳定性,改善球墨铸铁的品质。球化剂的加入量一般为铁液的1.4%~1.6%(质量分数)。

孕育剂的主要作用是促进石墨化,防止球化元素所造成的白口倾向。以往常用的孕育剂为硅含量为75%(质量分数)的硅铁,加入量为铁液的0.4%~1.0%(质量分数)。现在,各种孕育效果更好的商品孕育剂正在广泛使用。

冲入法球化处理如图1-67所示。它是将稀土镁球化剂放在浇包的堤坝内,上面铺以铁屑(或硅铁粉)和覆盖剂,上压球铁板或钢板以防球化剂上浮,并使其作用缓和。开始时,先将占浇包容量2/3左右的铁液冲入包内,使球化剂与铁液充分反应,

而后将孕育剂放在冲天炉的出铁槽内,用铁液将其冲入浇包内至浇包充满,进行孕育。球化处理的工艺方法有多种,在我国以冲入法最为常用。

(3) 铸型工艺。球墨铸铁的共晶凝固温度范围较灰铸铁宽,呈糊状凝固特征,较灰铸铁容易产生缩孔、缩松等缺陷;球铁中含有活泼的镁、稀土等元素,易与铸型反应而生成皮下气孔,也易于氧化而产生夹渣等缺陷,因此在工艺上要采取一些针对性的措施。

在热节上安置冒口、冷铁,对铸件加强补缩,可以消除缩孔。提高球铁的碳含量,同时增加铸型刚度,可以利用石墨析出而产生的自补缩来减少球铁件的缩松。降低铁液的硫含量和残留镁量,可以防止皮下气孔。此外,还应加强球化后的扒渣、浇注时的挡渣,在浇注系统中设置过滤网等措施,以防产生夹渣缺陷。

(4) 热处理。铸态的球铁多为珠光体和铁素体的混合基体,有时还有自由渗碳体,形状复杂件还存在较大的内应力,因此需要通过热处理来分解渗碳体,调整基体组织以及消除内应力。常用的热处理方法是退火和正火,分别用来生产铁素体球墨铸铁和珠光体球墨铸铁。

1.5.2 铸钢及铸钢件生产

1. 铸钢的类别和性能

铸钢(cast steel)也是一种重要的铸造合金。铸钢件的产量曾长期仅次于灰铸铁件而居第二位,后由于球墨铸铁件生产量的迅速上升而退居第三位。

铸钢的种类很多。通常是按照其化学成分分为碳钢和合金钢两大类。碳钢以碳为主要强化元素,此外,钢中还有少量的硅、锰元素及硫、磷等杂质。碳钢是最重要的铸钢类别,其产量占铸钢的一半以上。铸造碳钢依其力学性能的不同分为5个牌号,不同牌号的铸钢之间的碳含量有明显差异,如表1-7所示。

铸造合金钢是指钢中除碳以外,还有其他合金元素作为强化元素的钢。按照合金元素的质量分数,又可划分为合金元素总量低于5%的低合金钢和合金元素总量大于10%的高合金钢两类。低合金钢中的合金元素含量较少,其组织与碳钢相似,合金元素除起到固溶强化作用外,主要是提高钢的淬透性以利于进行热处理强化,其生产成本比碳钢增加不多而性能较碳钢高,其生产量迅速增加。

与铸铁相比,铸钢的力学性能较好,不仅强度较高,而且有优良的塑性和韧度,因此适合制造受力大、强度和韧度要求都较高的零件。铸钢生产较球墨铸铁生产易控制,特别是在大截面铸件或大型铸件上表现得尤其明显。此外,铸钢的焊接性能好,便于采用铸焊联合结构制造超大型构件。

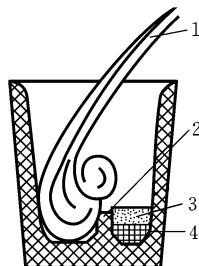


图1-67 冲入法球化处理

1—铁液 2—堤坝
3—覆盖剂、钢板 4—球化剂

表 1-7 一般工程用铸造碳钢的化学成分和力学性能

牌号	主要化学成分(质量分数) /%,不大于				力学性能(不小于)				
	C	Si	Mn	P、S	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	Z/%	KV_2 /J
ZG200-400	0.20	0.60	0.80	0.035	200	400	25	40	30
ZG230-450	0.30	0.60	0.90	0.035	230	450	22	32	25
ZG270-500	0.40	0.60	0.90	0.035	270	500	18	25	22
ZG310-570	0.50	0.60	0.90	0.035	310	570	15	21	15
ZG340-640	0.60	0.60	0.90	0.035	340	640	10	18	10

铸钢在重型机械制造中有着非常重要的地位。铸造高合金钢件广泛应用于耐磨、耐蚀、耐热等恶劣的工作环境的机械设备。

2. 铸钢件的生产

(1) 铸钢的熔炼。铸钢必须采用电炉熔炼,主要有电弧炉和感应电炉。根据炉衬材料和所用渣系的不同,又可分为酸性熔炉和碱性熔炉。碳钢和低合金钢可采用任何一种熔炉熔炼,但高合金钢只能采用碱性熔炉熔炼。

(2) 铸造工艺。铸钢的熔点高,流动性差,钢液易氧化和吸气,同时,其体积收缩率为灰铸铁的2~3倍,因此,铸钢的铸造性能较差,容易产生浇不足、气孔、缩孔、热裂、黏砂、变形等缺陷。为防止上述缺陷的产生,必须在工艺上采取相应措施。

生产铸钢件用型砂应有高的耐火度和抗黏砂性,以及高的强度、透气性和退让性。原砂通常采用颗粒较大、均匀的硅砂;为防止黏砂,型腔表面多涂以耐火度更高的涂料;生产大件时多采用干砂型或水玻璃砂快干铸型。为了提高铸型强度、退让性,型砂中常加入各种添加剂。

在浇注系统和冒口的设计上,由于铸造碳钢倾向逐层凝固,收缩大,因此多采用顺序凝固原则来设置浇注系统和冒口,以防止缩孔、缩松的出现。一般来说,铸钢件都要设置冒口,冷铁也应用较多。此外,应尽量采用形状简单、截面面积较大的底注式浇注系统,使钢液迅速、平稳地充满铸型。

(3) 热处理。铸钢的热处理通常为退火或正火。退火主要用于 $w(C) \geq 0.35\%$ 或结构特别复杂的铸钢件,这类铸件塑性差,铸造应力大,铸件易开裂。正火主要用于 $w(C) \leq 0.35\%$ 的铸钢件,这类钢件碳含量低,塑性较好,冷却时不易开裂。

1.5.3 铝、铜合金及其铸件生产

1) 铸造铝合金 铸造铝合金(casting aluminium alloy)虽然力学性能不及铸铁、铸钢,但密度低,比强度高,还具有导热性能好、表面有自生氧化膜保护等特性,应用很广泛。近年来由于节能和环保的要求,轿车朝轻量化方向发展,普遍采用铸造铝合金来制造轿车发动机、轮毂等零件,铸造铝合金的产量也迅速上升。

常用铸造铝合金按成分不同可分为铝硅合金、铝铜合金、铝镁合金和铝锌合金等,其中应用最多的是铝硅合金。

铝硅合金一般硅含量为6%~13%(质量分数,下同),是典型的共晶型合金。铝硅合金具有优良的铸造性能,如收缩率小、流动性好、气密性高和热裂倾向小等,经过变质处理之后,还具有良好的力学性能、物理性能和切削加工性能,是铸造铝合金中品种最多、用量最大的合金。铝硅合金适合生产形状复杂的薄壁件或气密性要求较高的铸件,如内燃机汽缸体、化油器、仪表外壳等。

铝铜合金的铜含量为3%~11%,铜含量大于5.5%的为共晶型合金,小于5.5%的为固溶型合金。铝铜合金具有较好的室温和高温力学性能,切削性能好,加工表面光洁,熔铸工艺较简单,但耐蚀性较差,线胀系数较大,密度较大,其中固溶型铝铜合金铸造性能较差。铝铜合金主要用作耐热和高强度铝合金。其应用仅次于铝硅合金,主要用来制造活塞、汽缸头等。

铝镁合金镁含量为4%~11%,是典型的固溶型合金。铝镁合金具有优异的耐蚀性,力学性能好,加工表面光洁美观,密度小。但铝镁合金的熔炼、铸造工艺较复杂,常用来制造水泵体、航空和车辆上的耐蚀性或装饰性部件。

铝锌合金锌含量为5%~13%,由于铝在锌中的溶解度极大,所以铝锌合金均是固溶型合金。铝锌合金的铸造工艺简单,形成气孔的敏感性小,在铸态时就具有较好的力学性能。但铝锌合金的铸造性能不好,热裂倾向大,特别是耐蚀性很差,有应力开裂倾向,所以工业中已不采用单纯的铝锌合金,现采用的是经过硅、镁等合金进行多元合金化的铝锌合金。

2) 铝合金铸件的生产 铝是活泼金属元素,熔融状态的铝极易与空气中的氧和水汽发生反应,从而造成铝液的氧化和吸气。铝氧化生成的 Al_2O_3 熔点高(2050℃),其密度比铝液稍大,呈固态夹杂物悬浮在铝液中很难清除,容易在铸件中形成夹渣。在冷却过程中,熔融铝液中析出的气体常被表面致密的 Al_2O_3 薄膜阻碍,在铸件中形成许多针孔,影响了铸件的致密性和力学性能。

为避免氧化和吸气,在熔炼时需采用密度小、熔点低的熔剂(如 NaCl 、 KCl 、 Na_3AlF_6 等)将铝液与空气隔绝,并尽量减少搅拌。在熔炼后期应对铝液进行去气精炼。精炼是向熔融铝液中通入氯气,或加六氯乙烷、氯化锌等,以在铝液内形成 Cl_2 、 AlCl_3 、 HCl 等气泡,使溶解在铝液中的氢气扩散到气泡内。这些气泡在上浮过程中,将铝液中的气体、 Al_2O_3 杂质带出液面,使铝液得到净化。

铸造铝合金熔点低,一般用坩埚炉熔炼。砂型铸造时可用细砂造型,以降低铸件表面粗糙度。为防止铝液在浇注过程中的氧化和吸气,通常采用开放式浇注系统,并多开内浇道。直浇道常为蛇形或鹅颈形,使合金液迅速平稳地充满型腔,不产生飞溅、涡流和冲击。

3) 铸造铜合金 铸造铜合金(casting copper alloy)具有较好的力学性能和耐磨性,很高的导热性和导电性,铜合金的电极电位高,在大气、海水、盐酸、磷酸溶液中均有良

好的耐蚀性,因此常用来制造船舰、化工机械、电工仪表中的重要零件及换热器等。

铸造铜合金可以分为两大类,即青铜和黄铜。铜与锌以外的元素所组成的合金统称为青铜。其中,铜和锡的合金是最古老也最重要的青铜,称为锡青铜。锡青铜具有很好的耐磨性,通常作为耐磨材料使用,有耐磨铜合金之称;锡青铜在蒸汽、海水及碱溶液中具有很好的耐蚀性,同时还具有足够的强度和一定的塑性;锡青铜的线收缩率低,不易产生缩孔,但易产生显微缩松。锡青铜适用于致密性要求不高的耐磨、耐蚀件。

黄铜是以锌为主要合金元素的铜合金。锌在铜中有很大的固溶度,随着锌含量的增加,铜合金的强度和塑性显著提高,但质量分数超过 47% 之后其力学性能显著下降,故黄铜中锌的质量分数应小于 47%。铸造黄铜除含锌外,还常含有锰、硅、铝、铅等合金元素,构成锰黄铜、铝黄铜、硅黄铜、铅黄铜等,它们被称为特殊黄铜。铸造黄铜的力学性能多比青铜好,而价格却较青铜低,常用于一般用途的轴瓦、衬套、齿轮等耐磨件和耐海水腐蚀的螺旋桨及阀门等耐蚀件。

4) 铜合金铸件的生产 铜合金通常采用坩埚炉来熔炼。铜合金在熔炼时突出的问题也是容易氧化和吸气。氧化形成的氧化亚铜(Cu_2O)因熔解在铜液内而使铜合金性能下降。为防止铜的氧化,熔化青铜时应加熔剂覆盖以使铜液与空气隔离。为去除已形成的 Cu_2O ,在出炉前需向铜液内加入质量分数 0.3%~0.6% 的磷铜来脱氧。熔炼黄铜时由于锌本身就是很好的脱氧剂,锌的蒸发也会带走铜液中的气体,所以黄铜的熔炼比较简单,不用脱氧和除气。

铜的熔点低,密度大,流动性好,砂型铸造时一般采用细颗粒黏土砂造型。铸造黄铜结晶温度范围窄,铸件易形成集中缩孔,铸造时应采用顺序凝固的原则,并设置较大冒口进行补缩。锡青铜以糊状凝固方式凝固,易产生枝晶偏析和缩松,应尽量采用同时凝固。在开设浇注系统时,应使熔融金属流动平稳,防止飞溅,常采用底注式浇注系统。

复习思考题

1. 1-1 试述铸造成形的实质及优缺点。

1. 1-2 型砂由哪些材料组成? 对其基本性能有什么要求?

1. 1-3 合金的铸造性能对铸件的品质会产生什么影响? 常用铸造合金中,哪种合金铸造性能较好,哪种较差? 为什么?

1. 1-4 某工厂铸造一批哑铃,常出现如图 1-68 所示的明缩孔,有什么措施可以防止,并使铸件的清理工作量最小?

1. 1-5 某厂自行设计了一批如图 1-69 所示的铸铁槽型梁。铸后立即进行了机械加工,使用一段时间后,在梁的长度方向上发生了弯曲变形(散热空间尺寸小于壁厚时,可以认为不能散热)。

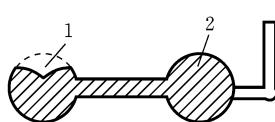


图 1-68 哑铃铸件

1—缩孔 2—铸件

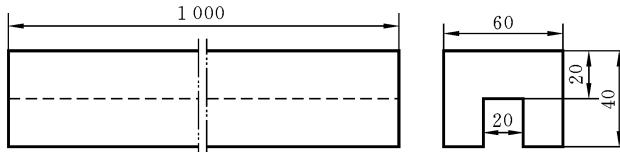


图 1-69 铸铁槽型梁

(1) 该梁壁厚均匀,为什么还会变形? 判断梁的变形方向。

(2) 有何铸造工艺措施能减小变形?

(3) 为防止铸件变形,请改进槽型梁的结构。

1.1-6 为什么说铸造是毛坯生产的重要方法? 试从铸造的特点并结合实例分析之。

1.1-7 什么是合金的充型能力? 它与合金的流动性有何关系? 不同化学成分的合金为何流动性不同? 为什么铸钢比铸铁的充型能力差?

1.1-8 既然提高浇注温度可提高合金的充型能力,为什么又要防止浇注温度过高?

1.1-9 缩孔和缩松对铸件品质有何影响? 为何缩孔比缩松较容易防止?

1.1-10 什么是顺序凝固原则? 什么是同时凝固原则? 上述两种凝固原则各适用于哪种场合?

1.1-11 某铸件时常产生裂纹缺陷,如何区分其性质? 如果属于热裂纹,应该从哪些方面寻找原因?

1.2-1 型砂由哪些材料组成? 对其基本性能有什么要求?

1.2-2 机器造型与手工造型相比具有哪些优点? 具体有哪些方法? 简述震压造型机的工作过程。

1.2-3 确定图 1-70 所示铸件的铸造工艺方案,要求如下:

(1) 按大批、大量生产条件分析最佳方案;

(2) 按所选方案绘制铸造工艺图(包括浇注位置、分型面、分模面、型芯、芯头及浇注系统等)。

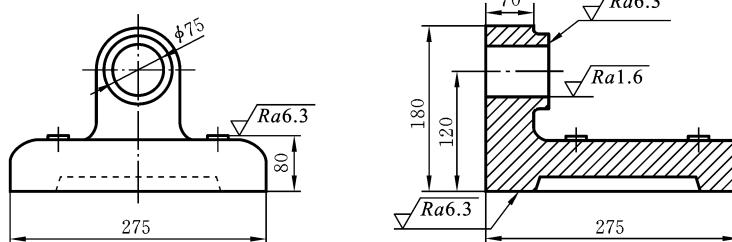


图 1-70 底座(图中次要尺寸从略)

1.2.4 通过 Chvorinov 定律帮助计算相对凝固时间, 假设铸件的体积相等, 但有不同的形状。这些形状如下:

- (1) 直径为 d 的球;
- (2) 高度与直径比 $h/d=1$ 的圆柱体;
- (3) 高度与直径比 $h/d=10$ 的圆柱体;
- (4) 边长为 a 的立方体;
- (5) 高度与边长比 $h/a=10$ 的长方体;
- (6) 厚度与边长比 $h/a=3$ 的平板。

用图表说明冒口形状的变化对凝固时间的影响, 以及设计冒口时应选择的合适形状。

1.3-1 试比较消失模铸造和熔模铸造的异同点及应用范围。

1.3-2 试比较压力铸造、低压铸造、挤压铸造三种方法的异同点及应用范围。

1.3-3 什么是离心铸造? 它在圆筒件铸造中有哪些优点? 采用离心铸造的目的是什么?

1.3-4 有下列铸件: 汽车喇叭、车床床身、汽缸套、大模数齿轮滚刀、发动机活塞、摩托车汽缸体、台式电风扇底座。在大量生产时, 采用什么材料、什么铸造方法为好? 试从铸件的使用要求、尺寸大小及结构特点等方面进行分析。

1.4-1 金属型铸造为什么要严格控制开型时间? 在铸件结构设计方面有何要求?

1.4-2 在方便铸造和易于获得合格铸件的条件下, 如图 1-71 所示的铸件结构有何值得改进之处? 怎样改进?

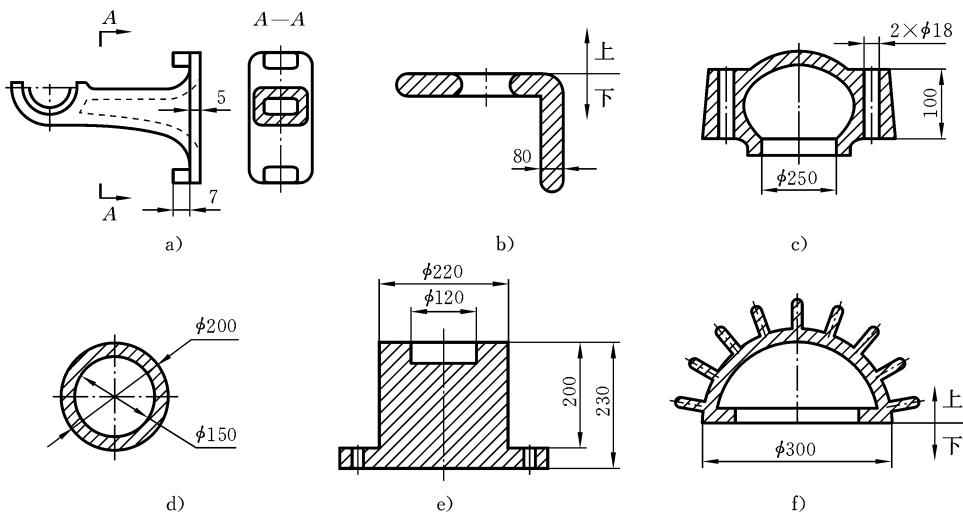


图 1-71 设计不良的铸件结构

a) 轴托架 b) 角架 c) 圆盖 d) 空心球 e) 支座 f) 压缩机缸盖

1.5-1 试从石墨的形态分析灰铸铁的力学性能特点。

1.5-2 影响铸铁石墨化的主要因素是什么？为什么铸铁的牌号不用化学成分来表示？

1.5-3 为什么说球墨铸铁是“以铁代钢”的好材料？球墨铸铁可否全部代替可锻铸铁？球墨铸铁件壁厚不均匀及截面过于厚大容易出现什么问题？

1.5-4 生产铸铁件、铸钢件和铸铝件所用的熔炉有何不同？为什么？

1.5-5 某铸件壁厚有 5 mm、20 mm、52 mm 三种，要求铸件各处的抗拉强度都能达到 150 MPa，若选用 HT150 牌号的灰铸铁浇注，能否满足其性能要求？

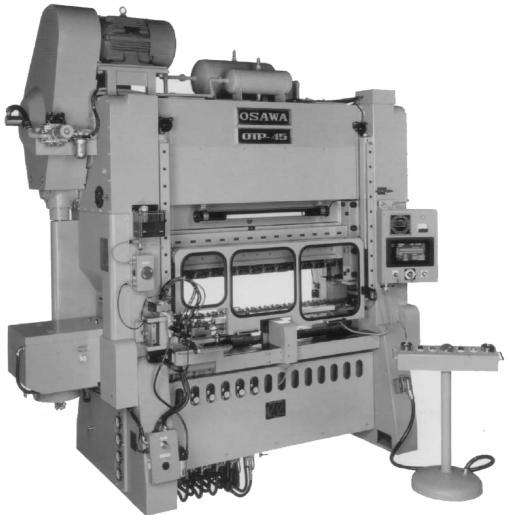


图 2-0 用于精密冲裁的数控冲床

第 2 章 锻压工艺

【学习指导】 学习本章前应预习《工程材料》教材中有关二元相图、塑性变形与再结晶的内容,以及《机械制图》教材中有关三视图的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的相关工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《基于项目的工程实践》教材中的有关章节。

【主要内容】 热塑性加工基础,金属的可锻性,锻造工艺,冷塑性加工基础,冲压工艺。

【学习重点】 加工硬化、回复与再结晶,金属的可锻性及其影响因素,锤上模锻,锤上模锻锻件图的绘制,模锻成形件的结构工艺性,间隙对冲裁件切断面品质的影响,冲裁模凸凹模刃口尺寸的确定,板料成形与拉深时的变形过程,弯曲伸长与尺寸计算,拉深系数与拉深次数的计算。

2.1 热塑性加工基础

金属材料经过压力加工之后,其内部组织发生很大变化,金属的力学性能得到改善,为压力加工方法的广泛应用奠定了基础。为了能正确选用压力加工方法、合理设

计压力加工成形的零件,必须掌握塑性变形的实质、对组织和性能的影响等内容。

在外力作用下,金属内部会产生应力。此应力迫使原子离开原来的平衡位置,使原子间的距离发生改变,使金属发生变形并引起原子位能的增高。处于高位能的原子具有返回到原来低位能平衡位置的倾向,因而当外力停止作用后,应力消失,变形也随之消失。金属的这种变形称为弹性变形。当外力增大到使金属的内应力超过该金属的屈服强度以后,外力停止作用后金属的变形也并不消失。这种变形称为塑性变形。金属塑性变形的实质是晶体内部产生滑移的结果,滑移是晶体的一部分相对另一部分沿原子排列紧密的晶面(该面称为滑移面)作相对滑动。很多晶面同时滑移累积起来就形成了滑移带,同时,晶体具有对称性,可在多方向上发生滑移。这些形成了单个晶粒或单晶体的塑性变形。通常使用的金属是由大量微小晶粒组成的多晶体。其塑性变形可以看成是由组成多晶体的许多单个晶粒产生变形(称为晶内变形)的综合效果。同时,晶粒之间也有滑动和转动(称为晶间变形)。金属的塑性变形可在不同的温度下产生。由于变形时温度不同,塑性变形将对金属组织和性能产生不同的影响。

2.1.1 加工硬化、回复与再结晶

金属在低温下进行塑性变形时,内部组织将发生以下变化:①晶粒沿变形最大的方向伸长;②晶格与晶粒均发生扭曲,产生内应力;③晶粒间产生碎晶。材料的组织为沿变形方向拉长的纤维组织(见图 2-1)。

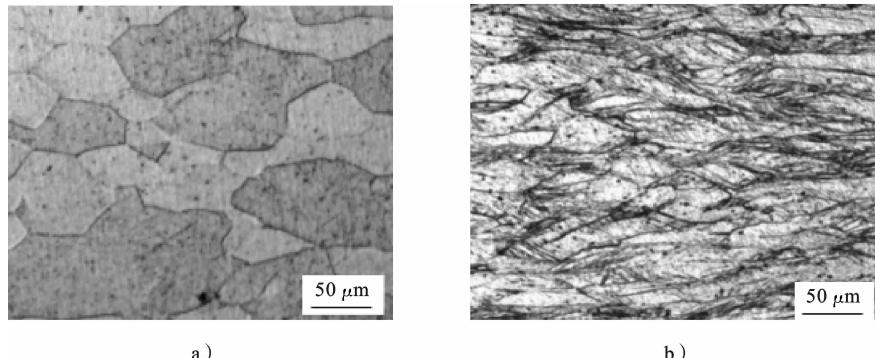


图 2-1 冷变形前后的组织形态

a) 变形前的等轴晶 b) 变形后的纤维组织

金属的力学性能随其内部组织的改变而发生明显变化。在室温时,低碳钢随变形程度增大,其强度和硬度升高,而塑性和韧度下降(见图2-2)。其原因是滑移面上的碎晶块和附近晶格的强烈扭曲,增大了滑移阻力,使继续滑移难以进行。这种随变形程度增大,原始组织(见图 2-3a)中的晶粒拉长为纤维状(见图 2-3b),强度和硬度上升而塑性下降的现象称为冷变形强化,又称加工硬化(strain hardening)。

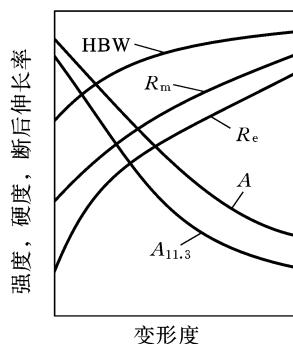


图 2-2 常温下塑性变形对低碳钢力学性能的影响

冷变形强化是一种不稳定现象,具有自发地回复到稳定状态的倾向,但在室温下不易实现。提高温度,原子获得热能,热运动加剧,使原子得以回复正常排列,消除晶格扭曲,但纤维组织并没有变化,可使加工硬化得到部分消除。这一过程称为回复(recovery)(见图 2-3c),这时的温度称为回复温度,即

$$T_{\text{回}} = (0.25 \sim 0.3) T_{\text{熔}}$$

式中 $T_{\text{回}}$ —— 金属回复温度(K);

$T_{\text{熔}}$ —— 金属熔点温度(K)。

当温度继续升高到大约该金属熔点热力学温度

的 0.4 倍时,金属原子获得更多的热能,开始以某些碎晶或杂质为核心,结晶成新的晶粒,纤维组织变为等轴晶粒,从而消除了全部加工硬化现象。这个过程称为再结晶(recrystallization)(见图 2-3d),通常把再结晶开始的温度称为再结晶温度,即

$$T_{\text{再}} = 0.4 T_{\text{熔}}$$

式中 $T_{\text{再}}$ —— 金属再结晶温度(K)。

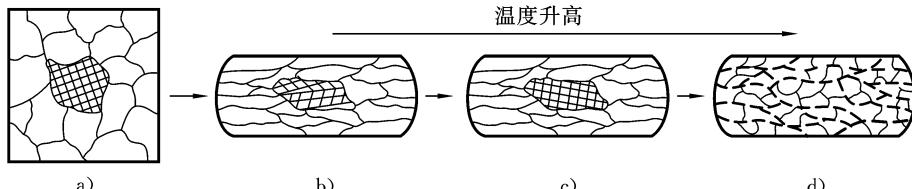


图 2-3 金属的回复和再结晶

a) 原始组织 b) 塑性变形后的组织 c) 金属回复后的组织 d) 再结晶组织

利用金属的冷变形强化可提高金属的强度和硬度,这是工业生产中强化金属材料性能的一种重要手段。在实际生产中采用冷轧、冷拔和冷挤等工艺,可提高金属制品的强度和硬度。但在压力加工中,加工硬化给金属继续塑性变形带来困难,应加以消除。在实际生产中,常采用加热的方法使金属发生再结晶,从而再次获得良好的塑性。这种工艺方法称为再结晶退火。

2.1.2 冷变形与热变形

金属在不同温度下的变形对其组织和性能的影响不同。金属在再结晶温度以下的变形称为冷变形(cold deformation),变形过程中无再结晶现象,变形后金属具有沿变形方向伸长的纤维组织和加工硬化现象。因此,变形过程中变形程度不宜过大,以避免产生破裂。冷变形加工的产品具有表面品质好、尺寸精度高、力学性能好的特点,一般不需再切削加工。在冷变形方法中,冷冲压、冷弯、冷挤、冷镦等用来使金属坯料在常温下制造成各种零件或半成品;冷轧和冷拔等用来生产小口径的薄壁管、薄

带和线材等。

金属在再结晶温度以上的变形称为热变形(hot deformation),变形后,金属具有再结晶组织而无加工硬化现象。金属只有在热变形的情况下,才能以较小的功达到较大的变形,加工尺寸较大和形状比较复杂的工件,同时获得具有力学性能好的再结晶组织。但是,由于热变形是在高温下进行的,因而金属在加热过程中表面容易形成氧化层,而且产品的尺寸精度和表面品质较低,劳动条件较差,生产效率也较低。自由锻、热模锻、热轧、热挤压等工艺都属于热变形方法。

2.1.3 锻造比和流线

金属压力加工采用的原始坯料是铸锭,其内部组织很不均匀,晶粒较粗大,并存在气孔、缩松、非金属夹杂物等缺陷。铸锭加热后经过压力加工,产生塑性变形及再结晶,从而改变了粗大、不均匀的铸态结构(见图 2-4a),获得细化了的再结晶组织。同时还可以将铸锭中的气孔、缩松等压焊在一起,使金属组织更加致密,力学性能得到很大提高。

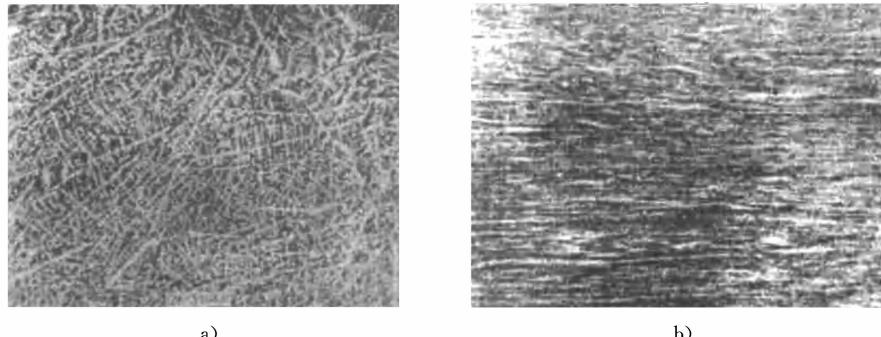


图 2-4 铸锭热变形前后的组织

a) 铸态组织 b) 变形后的组织

此外,在金属铸锭中还含有夹杂物,有塑性夹杂物,如硫化铁等,还有脆性夹杂物,如氧化物等。它们多分布在晶界上。在金属变形时,晶粒沿变形方向伸长,塑性夹杂物也随着变形一起被拉长。脆性夹杂物被打碎呈链状分布。晶粒通过再结晶过程后得到细化,而夹杂物却依然呈条状和链状被保留下来,形成了流线组织,如图 2-4b 所示。

流线(stream line)的形成使金属的力学性能呈现方向性。流线越明显,金属在纵向(平行于流线方向)上塑性和韧度提高,而在横向(垂直于流线方向)上塑性和韧度降低。变形程度越大,流线组织就越明显,力学性能的方向性也就越显著。

压力加工过程中,常用锻造比 Y (forging ratio)来表示变形程度。一般用锻造过程中典型工序的变形程度来表示,其计算公式与变形方式有关,拔长时的锻造比为

$$Y_{拔} = F_0 / F$$

镦粗时的锻造比为

$$Y_{\text{锻}} = H_0 / H$$

式中 H_0 、 F_0 ——坯料变形前的高度和横截面面积;

H 、 F ——坯料变形后的高度和横截面面积。

在一般情况下增加锻造比,可使金属组织细化,提高锻件的力学性能。但是,当锻造比过大时,金属组织的紧密程度和晶粒细化程度都已达到了极限状况,锻件的力学性能不再升高,而是增加各向异性。

流线组织的化学稳定性强,通过热处理是不能消除的,只能通过不同方向上的锻压才能改变流线组织的分布状况。由于流线组织的存在对力学性能有影响,特别是对冲击韧度的影响,因此,在设计和制造受冲击载荷的零件时,一般应遵守两条原则:①使流线分布与零件的轮廓相符合而不被切断;②使零件所受的最大拉应力与流线方向平行,最大切应力与流线方向垂直。

例如,当采用棒料直接经切削加工制造螺栓时,螺栓头部与杆部的流线被切断,不能连贯起来(见图2-5a),受力时产生的切应力顺着流线方向,故螺栓的承载能力较弱。当采用同样棒料经局部镦粗方法制造螺栓时,流线不被切断且连贯性好(见图2-5b),流线方向也较为有利,故螺栓品质较好。

图 2-5 不同工艺方法对流线组织形状的影响

- a) 切削加工制造的螺栓
b) 局部镦粗制造的螺栓

线方向也较为有利,故螺栓品质较好。

2.2 金属的可锻性

金属的可锻性(forgeability)是指用来衡量金属材料在经受压力加工时获得优质制品难易程度的工艺性能的指标。金属的可锻性好,表明该金属适合用压力加工成形;金属的可锻性差,表明该金属不适合用压力加工方法成形。可锻性的优劣是以金属的塑性和变形抗力来综合评定的。

塑性是指金属材料在外力作用下产生永久变形而不破坏其完整性的能力。金属对变形的抵抗力称为变形抗力。塑性反映了金属塑性变形的能力,而变形抗力反映了金属塑性变形的难易程度。塑性好,则金属变形不易开裂;变形抗力小,则锻压省力。两者综合起来,金属材料就具有良好的可锻性。金属的可锻性取决于材料的性质(内因)和加工条件(外因)。

2.2.1 材料性质对金属可锻性的影响

1. 化学成分的影响

不同化学成分的金属其可锻性不同。一般来说,纯金属的可锻性比合金的可锻性好。钢中合金元素含量越多,合金成分越复杂,其塑性越差,变形抗力越大。例如

纯铁、低碳钢和高合金钢,它们的可锻性是依次下降的。

2. 金属组织的影响

金属内部的组织结构不同,其可锻性有很大差别。纯金属及单相固溶体(如奥氏体)具有良好的塑性,其可锻性较好。若含有多个不同性能的组织相,则塑性较低,可锻性较差。铸态柱状组织和粗晶粒结构不如晶粒细小而又均匀的组织的可锻性好。

2.2.2 加工条件对金属可锻性的影响

金属的加工条件,一般指金属的变形温度、变形速度和变形方式等。

1. 变形温度的影响

随着温度升高,原子动能升高,易于产生滑移变形,从而提高了金属的可锻性,所以加热是压力加工成形中很重要的变形条件。

但是,加热要控制在一定范围内,若加热温度过高,则晶粒急剧长大,金属的力学性能降低,这种现象称为过热。若加热温度更高,接近熔点,晶界氧化破坏了晶粒间的结合,使金属失去塑性,坯料报废,这一现象称为过烧。金属锻造加热时允许的最高温度称为始锻温度。在锻压过程中,金属坯料温度不断降低,当温度降低到一定程度时,塑性变差,变形抗力增大,不能再锻造,否则会引起加工硬化甚至开裂,此时应停止锻造。停止锻造时的温度称为终锻温度。始锻温度与终锻温度之间的范围称为锻造温度。

2. 变形速度的影响

变形速度是指单位时间内的变形程度。它对可锻性的影响是矛盾的:一方面,随着变形速度的增大,回复和再结晶不能及时克服加工硬化现象,金属则表现出塑性下降,变形抗力增大(见图 2-6),可锻性变坏;另一方面,金属在变形过程中,消耗于塑性变形的能量有一部分转化为热能,使金属温度升高(称为热效应现象)。变形速度越大,热效应现象越明显,金属的塑性越高,变形抗力越小(图 2-6 点 A 以后),可锻性越好。但热效应现象只有在高速锤上锻造时才能实现,在一般设备上都不可能有超过点 A 的变形速度,故塑性较差的材料(如高速钢等)或大型锻件,还是应采用较小的变形速度为宜。

3. 应力状态的影响

金属在经受不同方式进行变形时,所产生的应力大小和性质(压应力或拉应力)是不同的。例如,挤压变形时(见图 2-7)为三向受压状态,而拉拔时(见图 2-8)则为两向受压、一向受拉的状态。

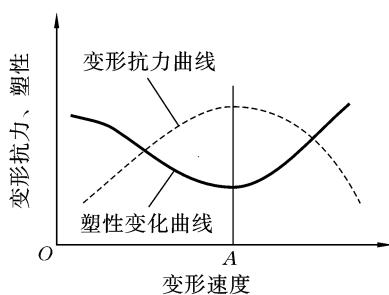


图 2-6 变形速度对塑性及变形抗力的影响

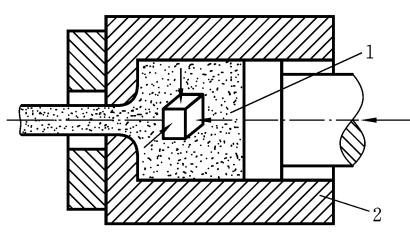


图 2-7 挤压时金属应力状态

1—坯料 2—模具

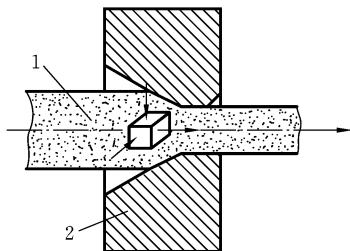


图 2-8 拉拔时金属应力状态

1—坯料 2—模具

理论和实践证明,在三向应力状态图中,压应力的数目愈多,则其塑性愈好;拉应力的数目愈多,则其塑性愈差。其理由是在金属材料的内部或多或少总是存在着微小的气孔或裂纹等缺陷,在拉应力作用下,缺陷处会产生应力集中,使得缺陷扩展甚至形成宏观裂缝,从而金属失去塑性;而压应力使金属内部原子间距减小,又不易使缺陷扩展,故金属的塑性会增高。此外,从变形抗力来分析,压应力使金属内部摩擦增大,变形抗力也随之增大。在三向受压的应力状态下进行变形时,其变形抗力较三向应力状态不同时大得多。

综上所述,影响金属塑性变形的因素是很复杂的。在压力加工中,要依据金属的本质和成形要求,力求创造有利的变形条件,充分发挥金属的塑性,降低变形抗力,降低设备吨位,减少能耗,使变形充分进行,满足优质、低耗的要求。

2.3 锻造工艺

2.3.1 模锻工艺

锻造工艺(forging process)主要分为无模自由成形(也称自由锻)和模膛塑性成形(也称模锻)。自由锻是用冲击力或压力使金属在锻造设备的上、下砧块间产生塑性变形,从而获得所需几何形状及内部品质的锻件的压力加工方法。坯料在锻造过程中,除与上、下砧块或其他辅助工具接触的部分表面外,都是自由表面,变形不受限制,故称之为自由锻。自由锻分为手工自由锻和机器自由锻两种。随着锻压技术的发展,手工锻造已被逐渐淘汰。机器锻造因其使用设备的不同,又分为锤上自由锻和液压机上自由锻。

自由锻使用的工具简单,生产准备周期短,灵活性大,所以使用范围较为广泛,特别适用于单件、小批生产,可加工锻件的质量由不及 1 kg 到 300 t,是生产大型和特大型锻件唯一的加工方法。但自由锻具有生产效率低、对操作工人的技术水平要求高、工人劳动强度大、锻件精度差、后续机械加工量大等缺点,在锻件生产中的使用受到限制。工业发达国家的中小型自由锻件占锻件总产量的比例只有 20%~40%。

模锻是使加热到锻造温度的金属坯料在模膛内一次或多次承受冲击力或压力的作用而被迫流动成形以获得锻件的压力加工方法。在变形过程中,由于模膛对金属坯料流动的限制,因而锻造终了时能得到和模膛形状相符的锻件。

与自由锻相比,模锻生产效率高,可以加工形状复杂、尺寸精确、表面光洁、加工余量小的锻件。由于模锻件纤维分布合理,所以它的强度高,耐疲劳,寿命长。但是,锻模在工作时要承受很大的冲击力和热疲劳应力,需用昂贵的模具钢制作,同时,型槽加工困难,致使锻模成本高,故只有在大量生产时经济上才合算。由于模锻是整体成形,且金属流动时与模膛之间产生很大的摩擦阻力,要求设备吨位大,所以一般仅用于锻造 150 kg 以下的中小型锻件。模锻适用于中小型锻件的成批、大量生产,在机械制造业和国防工业中得到了广泛的应用。

模锻按使用设备的不同分为胎模锻、锤上模锻、曲柄压力机上模锻、摩擦压力机上模锻、平锻机上模锻等。

1. 胎模锻

在自由锻设备上,使用可移动的模具生产锻件的方法称为胎模锻造成形,简称胎模锻(loose tooling forging)。胎模不固定在锻锤上,使用时放上去,不用时取下来。锻造时,胎模放在砧座上,将加热后的坯料放入胎模,锻制成形。也可先将坯料经过自由锻预锻成近似锻件的形状,然后用胎模锻终锻成形。

与自由锻相比,胎模锻具有较高的生产效率,锻件品质好,可节省金属材料,降低锻件成本。与固定模膛成形相比,不需要专用锻造设备,模具简单,容易制造。但是,锻件品质不如固定模膛成形的锻件品质高,工人劳动强度大,胎模寿命短,生产效率低。胎模锻只适用于小批生产,多在没有模锻设备的中小型工厂中使用。胎模锻不适当当今社会化大生产的要求,将会逐步淘汰。

2. 锤上模锻

锤上模锻(die forging by hammer)是在模锻锤上进行的模锻,由于其工艺通用性强,并能同时完成制坯工序,所以是目前最常用的模锻方法。

模锻设备有蒸汽-空气锤、无砧座锤、高速锤等。一般生产中主要使用蒸汽-空气模锻锤(见图 2-9),其工作原理与自由锻用的蒸汽-空气锤基本相同。但锤头与导轨间隙较小,且机架与砧座相连,以保证上、下模准确合拢。其吨位为 10~160 kN(1~16 t),可加工 0.5~150 kg 的锻件。高速锤具有高压气缸,以加速锤的运动速度。图 2-10 所示为高速锤的结构和工作步骤。

锤上模锻分为开式模锻和闭式模锻两类(见图 2-11)。开式模锻(open die forging)的模膛四

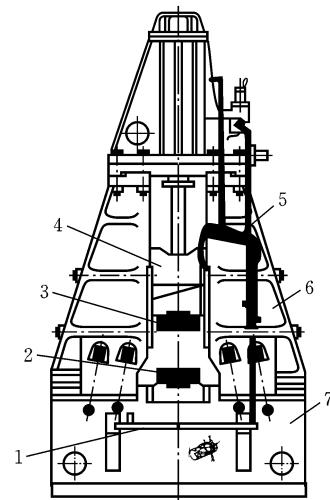


图 2-9 蒸汽-空气模锻锤

1—踏板 2—下模 3—上模 4—锤头
5—操纵机构 6—锤身 7—砧座

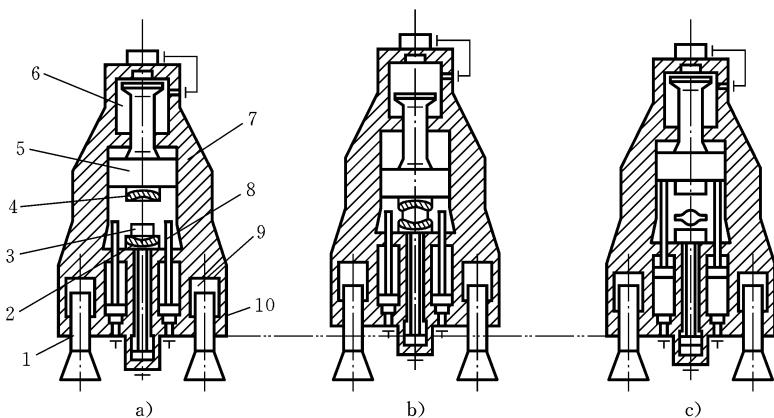


图 2-10 高速锤的结构和工作步骤

- a) 锤头提起, 放上坯料 b) 高压气缸充气, 锤头压下 c) 高压气缸排气, 锤头提起, 锻件成形
- 1—回程缸活塞 2—下模 3—坯料 4—上模 5—锤头
6—高压气缸 7—机架 8—回程杆 9—支承缸气室 10—支承缸

周有飞边槽(飞边槽可调节金属量),有利于金属充填,工艺简便,故应用广泛。无飞边槽的闭式模锻(closed die forging)虽然有利于塑性变形,且没有飞边消耗,但它依靠下料尺寸来控制工件高度,不易保证锻件精度,故应用较少。

锤上模锻用的锻模(见图 2-12)是由带有燕尾槽的上模和下模两部分组成的。下模用紧固楔铁固定在模垫上。上模用紧固楔铁固定在锤头上,随锤头一起作上下往复运动。上、下模合在一起,其中部形成完整的模膛。

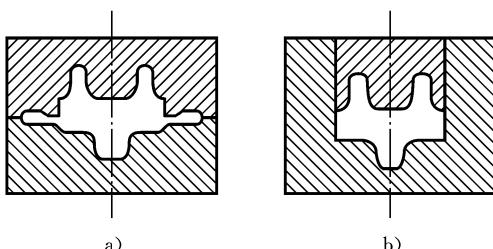


图 2-11 模锻形式

- a) 开式模锻 b) 闭式模锻

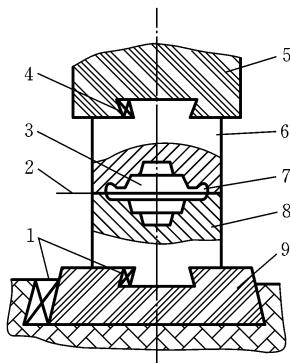


图 2-12 锤上模锻用的锻模

- 1—上紧固楔铁 2—分模面 3—模膛
4—下紧固楔铁 5—锤头 6—上模
7—飞边槽 8—下模 9—模垫

模膛根据其功用的不同可分为模锻模膛和制坯模膛两大类。

1) 模锻模膛 金属在模锻模膛(die cavity of die-forging)中发生整体变形,故作用在锻模上的抗力较大。模锻模膛又分为终锻模膛和预锻模膛两类。

(1) 终锻模膛。终锻模膛的作用是使坯料最后变形到锻件所要求的形状和尺寸,因此它的形状应与锻件的实际形状相同;只是因锻件冷却时要收缩,终锻模膛的尺寸应比锻件尺寸放大一个收缩率。钢件的收缩率取1.5%。另外,沿模膛四周设有飞边槽,用以增加金属从模膛中流出的阻力,促使金属充满模膛,同时容纳多余的金属。对于具有通孔的锻件,由于不可能靠上、下模的凸起部分把金属完全挤压掉,故终锻后在孔内留下一薄层金属,称为冲孔连皮。带有冲孔连皮及飞边的模锻件如图2-13所示。把冲孔连皮和飞边去掉后,才能得到有通孔的模锻件。

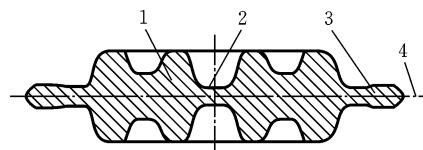


图 2-13 带有冲孔连皮及飞边的模锻件

1—锻件 2—冲孔连皮 3—飞边 4—分模面

(2) 预锻模膛。预锻模膛的作用是使坯料变形到接近于锻件的实际形状和尺寸,这样再进行终锻时,金属容易充满终锻模膛了,同时减少了终锻模膛的磨损,延长了锻模的使用寿命。预锻模膛和终锻模膛的区别是前者的圆角和斜度较大,没有飞边槽。形状简单或批量不大的模锻件可不设置预锻模膛。

2) 制坯模膛 对于形状复杂的模锻件,为了使坯料形状接近模锻件实际形状,使金属能合理分布和很好地充满模膛,就必须预先在制坯模膛内制坯。制坯模膛有以下几种:

(1) 拔长模膛。拔长模膛用来减小坯料某部分的横截面面积,以增加该部分的长度。当模锻件沿轴向横截面面积相差较大时,采用这种模膛进行拔长。拔长模膛分为开式(见图2-14a)和闭式(见图2-14b)两种,一般设在锻模的边缘。操作时,坯料除送进外还需翻转。该方法一般用于长轴类锻件制坯。

(2) 滚压模膛。滚压模膛用来减小坯料某部分的横截面面积,以增大另一部分的横截面面积,使坯料沿轴线的形状更接近于锻件。滚压模膛分为开式(见图2-15a)和闭式(见图2-15b)两种。当模锻件沿轴线的横截面面积相差不大或作修整拔长后的毛坯时,采用开式滚压模膛;当模锻件的最大和最小的横截面面积相差较大时,采用闭式滚压模膛。操作时需不断翻转坯料,但不作送进运动。该方法可用于某些变截面长轴类锻件的制坯。

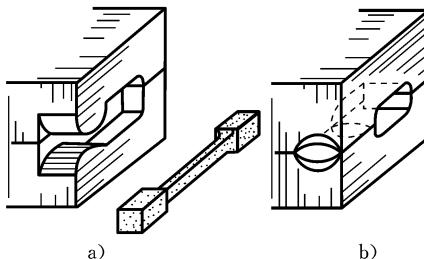


图 2-14 拔长模膛

a) 开式 b) 闭式

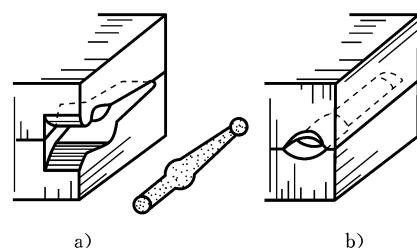


图 2-15 滚压模膛

a) 开式 b) 闭式

(3) 弯曲模膛。弯曲的杆类模锻件需用弯曲模膛(见图 2-16)来加工坯料。坯料可直接或先经其他制坯工步后放入弯曲模膛进行弯曲变形。弯曲后的坯料需翻转 90°再放入模锻模膛成形。

(4) 切断模膛。切断模膛(见图 2-17)的上模与下模的角部组成一对刃口, 用来切断金属。单件锻造时, 用它从坯料上切下锻件或从锻件上切下钳口; 多件锻造时, 用它来分离锻件。

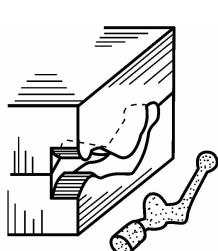


图 2-16 弯曲模膛

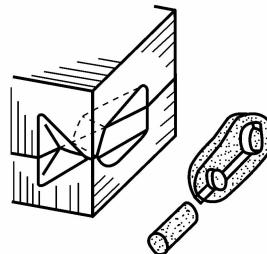


图 2-17 切断模膛

此外, 还有成形模膛、镦粗台及击扁面等制坯模膛。

根据模锻件的复杂程度不同, 所需变形的模膛数量不等, 可将锻模设计成单膛锻模或多膛锻模。单膛锻模是指在一副锻模上只具有一个终端模膛的锻模, 如齿轮坯模锻件就可将截下的圆柱形坯料, 直接放入单膛锻模中成形。多膛锻模是指在一副锻模上有两个以上模膛的锻模, 如弯曲连杆(见图 2-18)模锻件的锻模即为多膛锻模, 其锻造过程如图 2-19 所示。

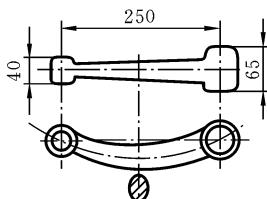


图 2-18 弯曲连杆零件图 精度锻件和某些杆类锻件的加工。

3. 摩擦压力机上模锻

摩擦压力机的工作原理如图 2-20 所示。锻模分别安装在滑块和机座上。滑块与螺杆相连, 沿导轨只能上下滑动。螺杆穿过固定在机架上的螺母, 上端装有飞轮。两个摩擦盘同装在一根轴上, 由电动机通过传动带使摩擦盘在机架上的轴承中旋转。改变操纵杆位置可使摩擦盘沿轴向窜动, 这样就会把某一个摩擦盘靠紧飞轮边缘, 借摩擦力带动飞轮转动。飞轮分别与两个摩擦盘接触就可获得不同方向的旋转, 螺杆也就随飞轮作不同方向的转动。在螺母的约束下, 螺杆的转动变为滑块的上下滑动, 实现模锻生产。

摩擦压力机上模锻(die forging of screw press)主要是靠飞轮、螺杆及滑块向下运动时所积蓄的能量来实现的。吨位为 3500 kN 的摩擦压力机使用较多, 最大吨位

锤上模锻具有设备投资较少、锻件品质较好、适应性强、可以实现多种变形工步、能锻制不同形状的锻件等优点, 在生产中得到广泛的应用。但由于锤上模锻振动大、噪声大, 完成一个变形工步往往需要经过多次锤击, 故难以实现机械化和自动化, 生产效率相对较低, 也不适合高

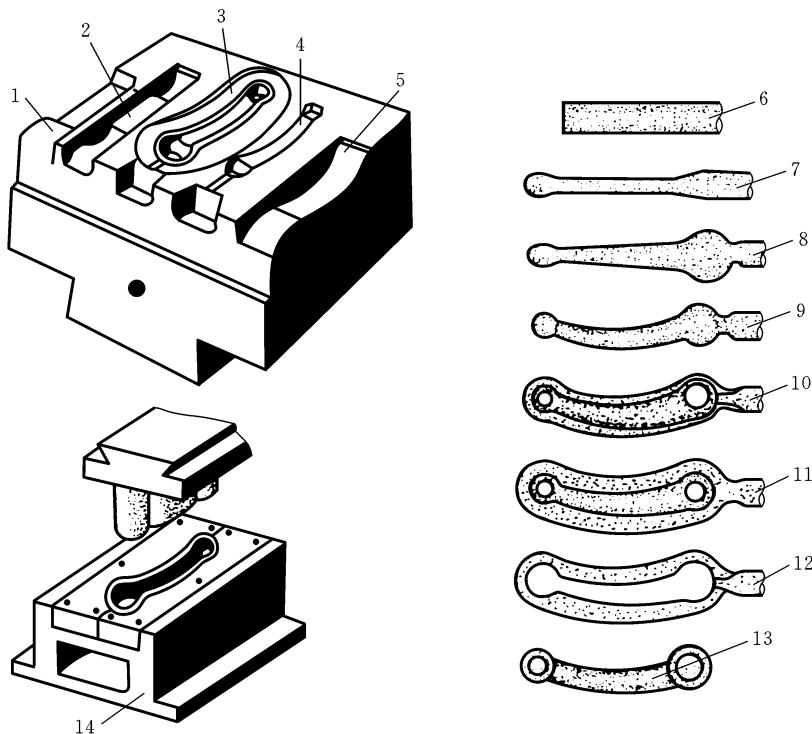


图 2-19 弯曲连杆锻造过程

1—拔长模膛 2—滚压模膛 3—终锻模膛 4—预锻模膛 5—弯曲模膛 6—原始料坯
 7—拔长 8—滚压 9—弯曲 10—预锻 11—终锻 12—飞边 13—锻件 14—一切边模

可达 10000 kN。

摩擦压力机工作过程中滑块的运动速度为 0.5~1.0 m/s, 使坯料变形具有一定的冲击作用, 且滑块行程可控, 这与模锻锤的工作过程相似。坯料变形中的抗力由机架承受, 形成封闭力系, 这也是压力机的特点。所以, 摩擦压力机具有模锻锤和压力机的双重工作特性。

摩擦压力机上模锻的特点如下:

(1) 摩擦压力机的滑块行程不固定, 并具有一定的冲击作用, 因而可实现轻打、重打, 可在一个模膛内进行多次锻打, 不仅能满足模锻各种主要成形工序的要求, 还可以进行弯曲、压印、热压、精压、切飞边、冲连皮及校正等工序。

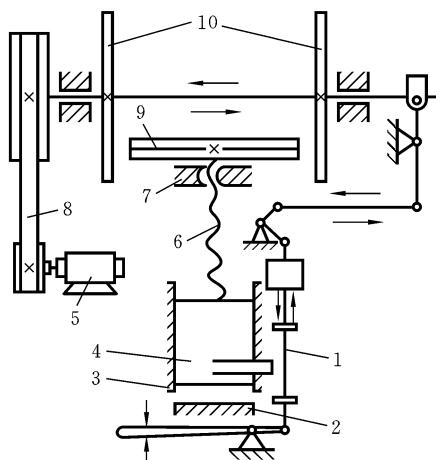


图 2-20 摩擦压力机的工作原理

1—操纵杆 2—机座 3—导轨
 4—滑块 5—电动机 6—螺杆 7—螺母
 8—传动带 9—飞轮 10—摩擦盘

(2) 由于飞轮惯性大,单位时间内的行程次数比其他设备低得多,金属变形过程中的再结晶现象可以充分进行,因而特别适合于锻造低塑性合金钢和有色金属(如铜合金)等,但其生产效率较低。

(3) 由于滑块打击速度不高,设备本身具有顶料装置,因此,生产中不仅可以使用整体式锻模,还可以采用特殊结构的组合式锻模。锻模设计和制造得以简化,可以节约材料和降低生产成本,同时可以加工形状复杂、敷料少和模锻斜度也很小的锻件,并可将轴类锻件直立起来进行局部镦锻。

(4) 摩擦压力机承受偏心载荷能力差,通常只适合用单膛锻模进行模锻。对于形状复杂的锻件,需要在自由锻设备或其他设备上制坯。

摩擦压力机上模锻适合于中小型锻件,如铆钉、螺栓、螺母、配气阀、齿轮、三通阀体等的小批和中批生产。

综上所述,摩擦压力机具有结构简单、造价低、投资少、使用维修方便、基建要求不高、工艺用途广泛等优点,所以我国中小型工厂都拥有这类设备,用它来代替模锻锤、平锻机、曲柄压力机进行模锻生产。

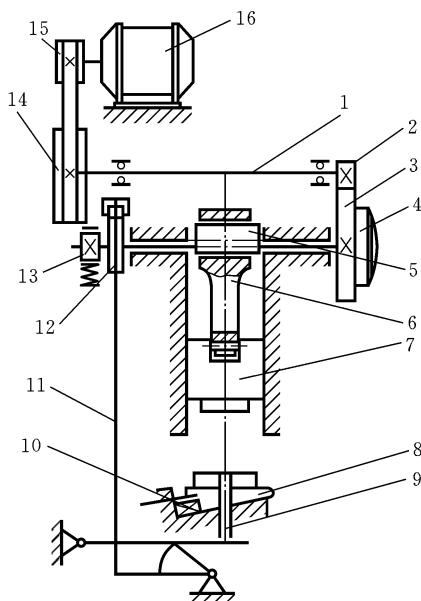


图 2-21 曲柄压力机的工作原理

1—传动轴 2—小齿轮 3—大齿轮 4—离合器

5—曲柄 6—连杆 7—滑块 8—楔形工作台

9—顶杆 10—楔铁 11—顶料连杆 12—凸轮

13—制动器 14—大带轮 15—小带轮 16—电动机

变形工步在滑块的一次行程中即可完成,并且便于实现机械化和自动化,具有很高的生产效率。

4. 曲柄压力机上模锻

曲柄压力机是一种机械式压力机,其工作原理如图 2-21 所示。当离合器处在接合状态时,电动机的转动通过小带轮、大带轮、传动轴和小齿轮、大齿轮传给曲柄,再经曲柄连杆机构使滑块作上下往复运动。离合器处在脱开状态时,大带轮(飞轮)空转,制动器使滑块停在确定的位置上。锻模分别安装在滑块和工作台上。顶杆用来从模膛中推出锻件,实现自动取件。曲柄压力机的吨位一般为 2000~120000 kN。

曲柄压力机上模锻 (die forging of crank press) 的特点如下:

(1) 曲柄压力机作用力的性质是静压力,变形抗力由机架本身承受,不传给地基,因此曲柄压力机工作时无振动,噪声小。

(2) 锻造时滑块的行程不变,每个变

(3) 滑块运动精度高,并有锻件顶出装置,因此锻件的公差、余量和模锻斜度都比锤上模锻的小。

(4) 曲柄压力机上模锻所用锻模都设计成镶块式模具(见图 2-22),这种组合模制造简单、更换容易、能节省贵重模具材料。

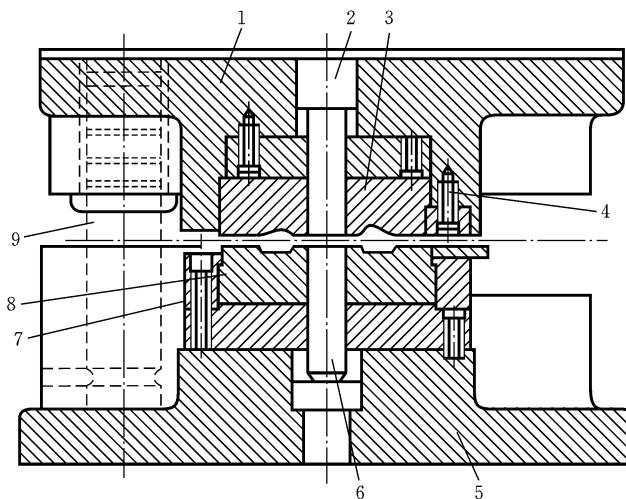


图 2-22 曲柄压力机用的锻模

1—上模板 2—上顶杆 3—镶块 4—螺栓 5—下模板 6—下顶杆 7—压板 8—镶块 9—导柱

(5) 因为滑块行程一定,坯料不论在什么模膛中都是一次成形,所以坯料表面上的氧化皮不易被清除掉,影响锻件品质。氧化问题应在加热时解决。同时,曲柄压力机上也不宜进行拔长和滚压工步。如果是横截面变化较大的长轴类锻件,可以采用周期轧制坯料或用辊锻机制坯来代替这两个工步。

综上所述,曲柄压力机上模锻具有锻件精度高、生产效率高、劳动条件好和节省金属等优点,适合于大量生产条件下加工中小型锻件。但由于曲柄压力机设备复杂、造价高,目前我国仅在大型工厂使用。

5. 平锻机上模锻

平锻机相当于卧式的曲柄压力机,它沿水平方向对坯料施加锻造压力,其工作原理如图 2-23 所示。它的锻模由固定模、活动模和固定于主滑块上的凸模组成。电动机的运动传到曲轴后,曲轴的转动推动主滑块带着凸模前后往复运动,同时驱使凸轮旋转。凸轮的旋转通过导轮使副滑块移动,并驱使活动模运动,实现锻模的闭合或开启。挡料板通过辊子与主滑块的轨道接触。当主滑块向前运动(工作行程)时,轨道斜面迫使辊子上升。带动挡料板绕其轴线转动,挡料板末端便移至一边,给凸模让出路来。

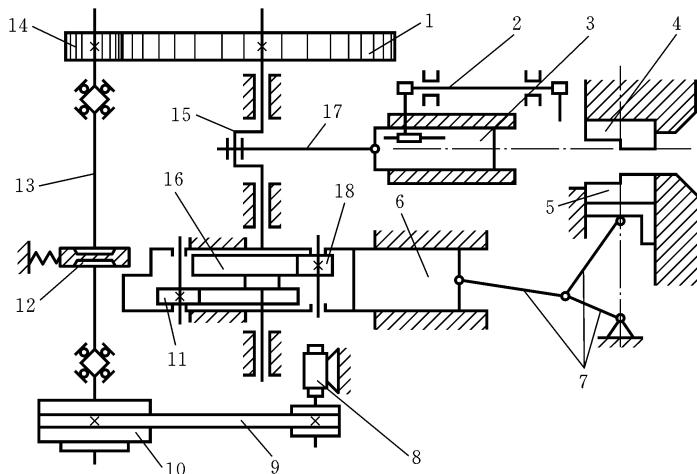


图 2-23 平锻机的工作原理

1—齿轮 2—挡料板 3—主滑块 4—固定模 5—活动模 6—副滑块
 7—连杆系统 8—电动机 9—传动带 10—带轮 11—导轮 12—制动器
 13—传动轴 14—齿轮 15—曲轴 16—凸轮 17—连杆 18—导轮

平锻机的吨位一般为 500~31500 kN, 可加工直径为 25~230 mm 的棒料。

平锻机上模锻(die forging of horizontal forging machine)具有如下特点：

(1) 坯料都是棒料或管材, 并且只进行局部(一端)加热和局部变形加工, 因此, 可以加工在立式锻压设备上不能加工的某些长杆类锻件, 也可用长棒料连续加工多个锻件。

(2) 平锻模有两个分模面, 扩大了模锻的适用范围, 可以加工锤上和曲柄压力机上无法加工的在不同方向上有凸台或凹槽的锻件。

(3) 对非回转体及中心不对称的锻件用平锻机较难锻造, 且平锻机造价较高, 超过了曲柄压力机。因此, 平锻机主要用于带凹槽、凹孔、通孔、凸缘类回转体锻件的大量生产, 最适合在平锻机上模锻的锻件是带头部的杆类和有孔(通孔或不通孔)的锻件。

常用锻造方法的综合比较如表 2-1 所示。

表 2-1 常用锻造方法的比较

锻造方法	使用设备	适用范围	生产效率	锻件精度及表面品质	模具特点	模具寿命	劳动条件	对环境影响
自由锻	空气锤、蒸汽-空气锤、水压机	小型、中型、大型锻件, 单件、小批生产	低	低	采用通用工具, 无专用模具	—	差	震动和噪声大

续表

锻造方法	使用设备	适用范围	生产效率	锻件精度及表面品质	模具特点	模具寿命	劳动条件	对环境影响
模锻	锤上模锻	蒸汽-空气锤、无砧座锤	中小型锻件,大量生产,适合锻造各种类型模锻件	高	中	锻模固定在锤头和砧座上,模膛复杂,造价高	中	差 震动和噪声大
	摩擦压力机上模锻	摩擦压力机	小型锻件,中批生产,可进行精密模锻	中	较高	一般为单膛锻模	中	好 较小
	曲柄压力机上模锻	热模锻曲柄压力机	中小型锻件,大量生产,不易进行拔长和滚压工序	高	高	组合模,有导柱、导套和顶出装置	较长	好 较小
	平锻机上模锻	平锻机	有头的杆件及有孔件,大量生产	高	高	由一个凸模和两个凹模组成,有两个分模面	较长	好 较小
	胎膜锻	空气锤、蒸汽-空气锤	中小型锻件,中批、小批生产	中	中	模具简单,且不固定在设备上,取换方便	较短	差 震动和噪声大

2.3.2 锤上模锻工艺规程的制定

锤上模锻成形的工艺过程一般为:切断毛坯→加热坯料→模锻→切除模锻件的飞边→校正锻件→锻件热处理→表面清理→检验→成堆存放。

锤上模锻成形的工艺设计包括绘制锻件图、计算坯料尺寸、确定模锻工步(选择模膛)、选择设备及安排修整工序等。其中最主要的是绘制锻件图和确定模锻工步。

1. 锻件图的绘制

锻件图(forging drawing)是设计和制造锻模、计算坯料及检查锻件的依据。绘制锻件图时应综合考虑各方面的因素。

1) 选择模锻件的分模面 分模面(parting line)是指上、下锻模在模锻件上的分界面。锻件分模面的位置选择得合适与否,关系到锻件成形、锻件出模、材料利用率等一系列问题。绘制模锻锻件图时,必须按以下原则确定分模面位置:

(1) 要保证模锻件能从模膛中取出。如图 2-24 所示的零件,若选 A—A 面为分模面,则无法从模膛中取出锻件。一般情况下,分模面应选在模锻件最大尺寸的截面上。

(2) 按选定的分模面制成锻模后,应使上、下两模沿分模面的模膛轮廓一致,以便在安装锻模和生产中容易发现错模现象,及时调整锻模位置。若选图 2-24 中的 C—C 面为分模面,就不符合此原则。

(3) 最好把分模面选在模膛深度最浅的位置处。这样可使金属很容易充满模膛, 便于取出锻件, 并有利于锻模的制造。如图 2-24 中的 B—B 面, 就不适合作为分模面。

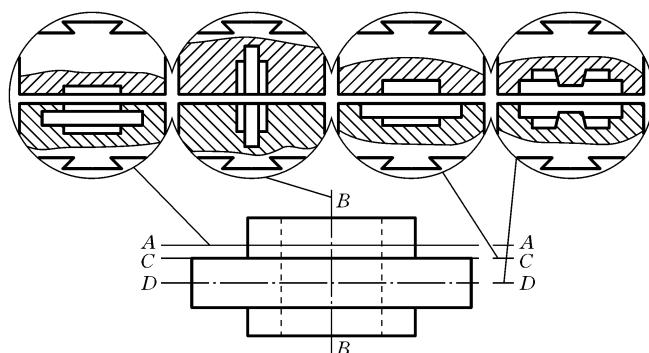


图 2-24 分模面的选择比较图

(4) 选定的分模面应使零件上所加的敷料最少。如图 2-24 中的 B—B 面被选作分模面时, 零件中间的孔锻造不出来, 其敷料最多, 既浪费金属, 降低了材料的利用率, 又增加了切削加工的工作量。所以, 该面不宜选作分模面。

(5) 最好使分模面为一个平面, 使上、下锻模的模膛深度基本一致, 差别不宜过大, 以便于制造锻模。

按上述原则综合分析, 图 2-24 中的 D—D 面是最合理的分模面。

2) 确定模锻件的机械加工余量及公差 普通模锻件是用来加工产品零件的毛坯, 所以在零件的加工表面上必须留有足够的机械加工余量 (machine allowance)。模锻件也要规定锻造公差 (forging tolerance), 以控制锻件由于上、下模没有闭合, 金属没有充满模膛, 上、下模发生错移及模膛磨损和变形等所产生的误差。模锻时金属坯料是在锻模中成形的, 因此模锻件的尺寸较精确, 其公差和余量比自由锻件小得多。余量一般为 1~4 mm, 公差一般取在 $\pm (0.3 \sim 3)$ mm 之间。

3) 标注模锻斜度 模锻件上平行于锤击方向 (垂直于分模面) 的表面必须有斜度, 以便于金属充满模膛及从模膛中取出锻件。对于锤上模锻, 模锻斜度 (draft angle) 一般为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。模锻斜度及模膛深度和宽度有关, 当模膛深度 h 与宽度 b 之比 h/b 越大时, 取较大的斜度值。如图 2-25 所示, α_2 为内壁 (即当锻件冷却时, 锻件与模壁夹紧的表面) 斜度, 其值比外壁 (即当锻件冷却时, 锻件与模壁离开的表面) 斜度 α_1 大 $2^\circ \sim 5^\circ$ 。

4) 标注模锻的圆角半径 锻件上所有面与面的相交处, 都必须采取圆角过渡 (见图 2-26)。锻件内圆角 (在模膛内是凸出部位的圆角) 的作用是减小锻造时金属流动的摩擦阻力, 避免锻件被撕裂或纤维组织被拉断, 以减少模具的磨损, 延长使用寿命。锻件外圆角 (在模膛内是凹入部位的圆角) 的作用是使金属易于充满模膛, 避免模具在热处理或锻造过程中因应力集中而导致开裂。圆角半径 (corner radii) 由下式确定:

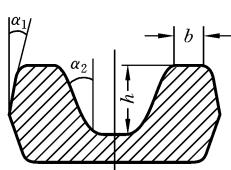


图 2-25 模锻斜度

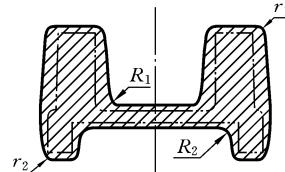


图 2-26 模锻件上的圆角半径

外圆角半径 $r = \text{加工余量} + \text{零件的圆角半径(或倒角)}$

$$\text{内圆角半径 } R = (2 \sim 3)r$$

5) 留出冲孔连皮 锤上模锻不能直接锻出通孔,孔内必须留有一定厚度的金属层,称为冲孔连皮(punching with skin),锻后在压力机上冲除。若所留连皮太薄,锤击力太大时会导致模膛凸出部位的加速磨损或压塌;若所留连皮太厚,不仅浪费金属,而且冲除连皮时会造成锻件的变形。冲孔连皮的厚度 δ 与孔径 d 有关,当 $d = 30 \sim 80 \text{ mm}$ 时, $\delta = 4 \sim 8 \text{ mm}$ 。当 $d < 25 \text{ mm}$ 或冲孔深度大于冲头直径的 3 倍时,只在冲孔处压出凹坑。

考虑以上五个问题后,便可绘出锻件图。绘制锻件图时,用粗实线表示锻件的形状,以双点画线表示零件的轮廓形状。图 2-27 所示为齿轮坯的模锻件图。分模面选在锻件高度方向的中部。零件的轮辐部分不加工,故不留加工余量。图 2-27b 中内孔中部的两条水平直线为冲孔连皮轮廓线。

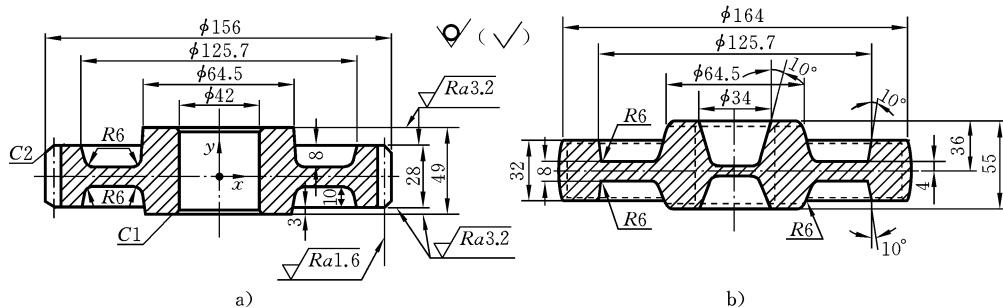


图 2-27 齿轮坯模锻件图

a) 齿轮零件图 b) 齿轮锻件图

2. 模锻工步的确定

模锻工步主要是根据锻件的形状和尺寸来确定的。模锻件按形状可分为两大类:一类是长轴类锻件,如台阶轴、曲轴、连杆、弯曲摇臂等;另一类为盘类模锻件,如齿轮、法兰等。

短轴类锻件是在分模面上的投影为圆形或长、宽尺寸相近的锻件,锻造过程中锤击方向与坯料的轴线同向。终锻时,金属沿高度、宽度及长度方向均发生流动,这类锻件的变形工步通常是镦粗制坯和终锻成形。形状简单的锻件可下料后直接终锻成形,形状复杂的锻件则要增加成形镦粗、预锻等工步。图 2-28 所示为高粱锻件的成

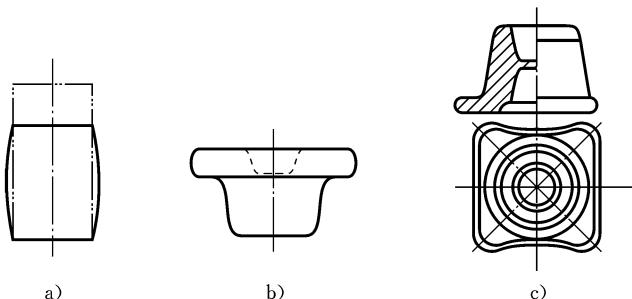


图 2-28 高速钢件的成形工艺

a) 镗粗 b) 成形镦粗 c) 终锻

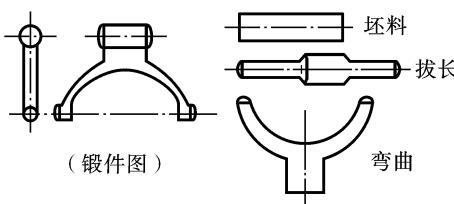


图 2-29 叉形长轴锻件的成形工艺

所示为叉形长轴锻件的成形工艺实例。

2.3.3 模锻成形件的结构工艺性

设计模锻零件时,应根据模锻特点和工艺要求,使零件结构符合下列原则,以便于模锻生产和降低成本。

(1) 模锻零件必须具有一个合理的分模面,以保证模锻件易于从锻模中取出、敷料最少,锻模容易制造。

(2) 由于模锻件尺寸精度高和表面粗糙度低,因此零件上只有与其他机件配合的表面才需进行机械加工,其他表面均应设计为非加工表面。零件上与锤击方向平行的非加工表面,应设计出模锻斜度。非加工表面所形成的角都应按模锻圆角设计。

(3) 为了使金属容易充满模膛和减少工序,零件外形力求简单、平直和对称,尽量避免零件截面间尺寸的差别过大,或具有薄壁、高肋、凸起等结构。图 2-30a 所示零件,如最小截面与最大截面之比小于 0.5 就不宜采用模锻方法制造。图 2-30b 所示零件扁而薄,模锻时薄的部分金属容易冷却,不易充满模膛。图 2-30c 所示零件有一个高而薄的凸缘,金属难以充满模膛,且使锻模制造和成形后取出锻件较为困难,应设计成如图 2-30d 所示形状,使之易于锻制成形。

(4) 在零件结构允许的条件下,设计时尽量避免有深孔或多孔结构。如图 2-31 所示零件上 4 个 $\phi 20$ mm 的孔就不能锻出,只能用机械加工成形。

(5) 模锻件的整体结构应力求简单。当整体结构在成形中需增加较多敷料时,

形工艺实例。

长轴类锻件的长度与宽度(或直径)相差较大,锻造过程中锤击方向与锻件的轴线垂直。终锻时,金属沿高度和宽度方向流动,长度方向流动不显著。这类锻件需采用拔长、滚挤等工步制坯,形状复杂的锻件要增加弯曲、成形、预锻等工步。图 2-29

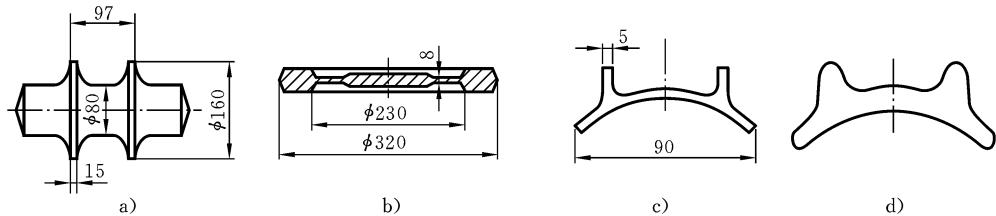


图 2-30 模锻件形状

a) 高肋 b) 薄壁 c) 凸缘 d) 改进凸缘

可采用组合工艺制作。图 2-32 所示零件先采用模锻方法单个成形,然后采用焊接工艺组合成一个整体零件。

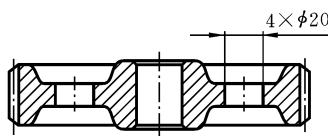


图 2-31 多孔齿轮

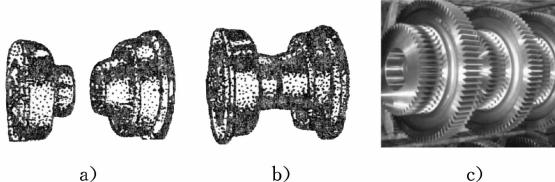


图 2-32 锻-焊结构模锻件

a) 模锻件 b) 模锻-焊接件 c) 电子束焊接的双联齿轮

2.3.4 特种压力加工

工业的不断发展,对压力加工生产提出了越来越高的要求。要求它不仅能生产各种毛坯,而且能直接生产更多的零件。为此,在传统成形工艺基础上逐渐完善和发展了许多先进的工艺,如精密模锻、零件挤压、零件轧制和超塑性成形、高能高速成形等。

压力加工先进工艺的特点是:

- (1) 尽量使锻压件的形状接近零件的实际形状,以达到少无切削加工的目的,从而节省原材料和切削加工工作量。同时,得到纤维组织合理、力学性能和使用性能好的零件。
- (2) 具有更高的生产效率。
- (3) 减小变形力,可以在较小的锻压设备上制造出大锻件。
- (4) 广泛采用电加热和少无氧化加热,提高锻件表面品质,改善劳动条件。

1. 精密模锻

精密模锻(precision die forging)是指在模锻设备上锻造形状复杂、精度高的锻件的模锻工艺。如精密模锻锥齿轮,其齿形部分可直接锻出而不必再经切削加工。模锻件尺寸精度公差等级可达 IT12~IT15,表面粗糙度 R_a 可达 $1.6\sim3.2\mu\text{m}$ 。其主要工艺特点为:

(1) 使用普通的模锻设备进行锻造,一般需采用预(粗)锻和终(精)锻两套锻模,对形状简单的锻件也可只用一套(终)锻模。预锻时应留0.1~1.2 mm的终锻余量。

(2) 模具精度对锻件精度影响很大,终锻模腔的精度一般要比锻件精度高两级。终锻模要有导柱、导套结构,以保证合模准确。为排除模腔中气体,减小金属流动阻力,在凹模上应开设排气孔。

(3) 精确计算原始坯料的尺寸,严格按坯料质量下料,否则会增大锻件尺寸公差,降低锻件精度。

(4) 细致地清理坯料表面,除净坯料表面的氧化皮、脱碳层及其他缺陷。

(5) 为提高锻件的尺寸精度和降低锻件表面粗糙度,应采用少无氧化加热法,尽量减少坯料表面形成的氧化皮。

(6) 由于精锻件一般不留或少留加工余量,其高度(厚度)、壁厚或肋宽等尺寸比一般模锻件的小,因此无论是镦粗成形、压入成形还是挤压成形,都将使变形抗力增大,尤其在室温或中温成形时,都可能使模具的强度满足不了要求。这就要求采用一些可以降低变形抗力的工艺措施,例如等温成形工艺。

(7) 模锻时要很好的润滑和冷却锻模。例如,齿形在端面、齿较高的差速锥齿轮(见图2-33)一般为钢件,变形抗力较大,故应采用高温(1000℃以上)成形。由于齿较高,仅一次模压很难获得尺寸精确的锻件,因此应先预锻,经切边和清理后再进行温精压(750~850℃)或冷精压。

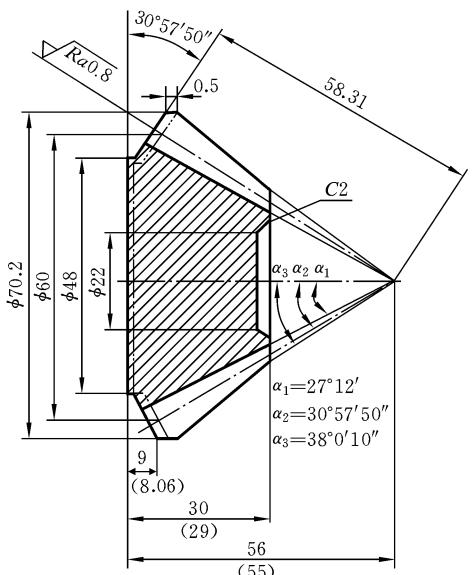
图 2-33 差速锥齿轮锻件图

2. 挤压

挤压(extrusion)是金属在三个方向的压应力作用下,从模孔中挤入或流入模腔内以获得所需形状和尺寸的制品的塑性成形工艺。在冶金厂,挤压方法通常用来生产复杂截面的型材,在机械制造厂,挤压方法广泛用来生产各种零件。

挤压可以在专用的挤压机上进行,也可以在液压机、曲柄压力机、摩擦压力机、液压螺旋压力机及高速锤上进行;对于较长零件的挤压,可以在卧式水压机上进行。采用挤压方法不但可以提高金属的塑性,生产出复杂截面形状的挤压件,而且可以提高挤压件的精度,改善挤压件的内部组织和力学性能,提高生产效率和节约金属材料等。

根据金属的流动方向与冲头运动方向的相互关系,挤压可分为正挤压、反挤压、复合挤压和径向挤压,如图2-34、图2-35、图2-36所示。



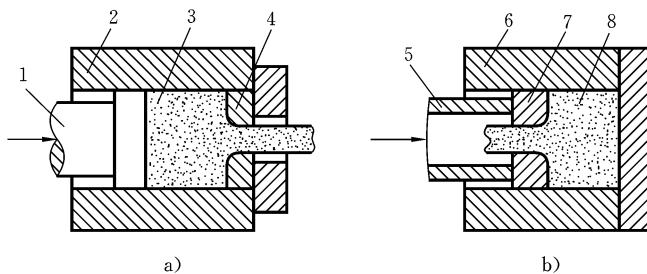


图 2-34 正挤压和反挤压

a) 正挤压 b) 反挤压
1、5—凸模 2、6—挤压筒 3、8—坯料 4、7—挤压模

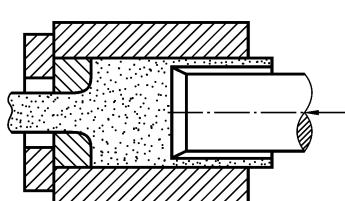


图 2-35 复合挤压

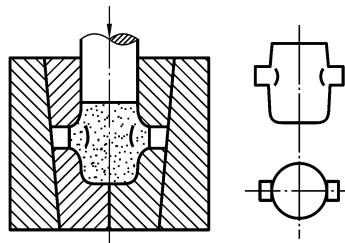


图 2-36 径向挤压

根据坯料的温度高低, 挤压可分为冷挤压、温挤压和热挤压。在精密塑性成形时, 多数情况下是采用冷挤压和温挤压。冷挤压的突出优点是尺寸精度高, 表面品质好。目前我国冷挤压件的尺寸精度公差等级可达 IT5, 表面粗糙度 R_a 可达 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。另外, 在冷挤压过程中, 金属材料的冷作硬化特性, 使得挤压件的强度与硬度有较大提高, 从而可用低强度钢代替高强度钢。图 2-37 所示的纯铁底座零件长期以来采用切削加工方法制造, 需经车削外形、钻孔、铰孔等工序, 改用冷挤压后可一次成形, 尺寸精度符合设计要求, 表面粗糙度 R_a 达 $0.8 \sim 1.4 \mu\text{m}$ 。

3. 零件的轧制

轧制方法除了用来生产型材、板材和管材外, 近年来常用来生产各种零件, 在机械制造业中得到越来越广泛的应用。零件轧制是靠轧辊连续局部滚压成形零件, 即连续局部成形, 具有生产效率高、产品品质好、工作载荷小、成本低等优点, 并可大量减少金属材料的消耗。

根据轧辊轴线与坯料轴线方向的不同, 轧制分为纵轧、横轧、斜轧等几种。

1) 纵轧 轧辊轴线与坯料轴线互相垂直的轧制方法称为纵轧, 包括各种型材轧制、辊锻轧制、辗环轧制等。

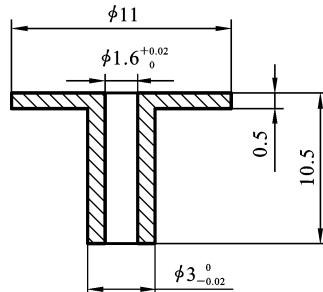


图 2-37 纯铁底座

(1) 轧锻轧制。轧锻轧制是指使坯料通过装有扇形模块的一对相对旋转的轧辊时受压而变形的生产方法(见图 2-38)。当扇形模块分开时,加热的坯料被送至挡块处,轧辊转动,将坯料夹紧并压制成形。它既可作为模锻前的制坯工序,也可直接轧锻扳手、链环、连杆、刺刀和叶片等锻件。叶片的轧锻工艺与铣削工艺相比,材料利用率可提高 4 倍,生产效率可提高 2.5 倍,而且锻件品质也提高了。

(2) 辊环轧制。辊环轧制(见图 2-39)又称为扩孔,用来扩大环形坯料的外径和内径,从而获得各种环状零件。驱动辊由电动机带动旋转,利用摩擦力使坯料在驱动辊和芯辊之间受压变形。驱动辊还可由液压缸推动作上下移动,改变着两辊间的距离,使坯料厚度逐渐变小,直径逐渐增大。导向辊用来保持坯料的正确运送。信号辊用来控制环件直径。当环坯直径达到需要值与信号辊接触时,信号辊旋转传出信号,驱动辊就停止工作。

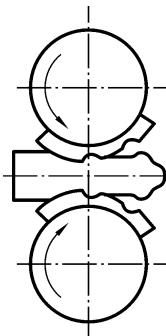


图 2-38 轧锻轧制

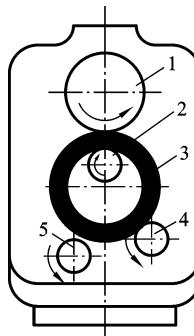


图 2-39 辊环轧制

1—驱动辊 2—芯辊 3—坯料 4—导向辊 5—信号辊

用不同形状的轧辊可生产不同截面形状的环形件,如火车轮箍、齿圈、轴承套圈及法兰等。辊环轧制生产效率很高,广泛用于批量生产。扩孔件的外径为 40 mm~5 m,宽度为 20~180 mm,质量达 6 t 或更大。

2) 横轧 轧辊轴线与坯料轴线互相平行的轧制方法称为横轧,如热轧齿轮等。

热轧齿轮是一种少无切削加工齿形的新工艺,如图 2-40 所示。齿轮坯的表层由高频感应器加热至 1000~1050 °C,然后将带齿的轧轮与齿轮坯对辗,并同时向齿轮坯作径向进给。在对辗过程中,轧轮逐渐压入齿轮坯,齿轮坯的部分金属被压成齿谷,相邻部分金属被反挤而上升形成齿顶。自由转动的从动轮可辗平齿轮外表面。在半自动热轧齿轮机上可热轧直径为 175~350 mm、模数为 10 mm 以下的直齿轮、斜齿轮和锥齿轮。齿轮精度为 8~9 级、齿面粗糙度 R_a 为 3.2 μm 。

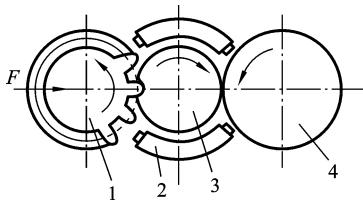


图 2-40 热轧齿轮

1—轧轮 2—高频感应器
3—齿轮坯 4—从动轮

与锻造和切削加工相比,热轧齿轮生产效率高,可节省18%~40%金属材料,齿部金属的流线与齿廓一致,流线组织完整,因而强度高、寿命长,其耐磨性和疲劳强度均可提高30%~50%。热轧适用于齿轮的专业化批量生产。精度要求较低的齿轮,热轧后可直接使用。但在多数情况下,热轧后还要进行冷精轧或切削加工,如磨齿、剃齿等。

3) 斜轧 斜轧亦称螺旋斜轧,是轧辊轴线与坯料轴线成一定角度相交的轧制方法,如周期轧制(见图2-41a)、钢球轧制(见图2-41b)等。

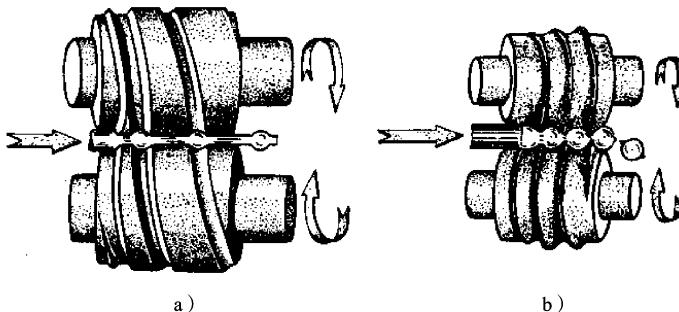


图 2-41 螺旋斜轧

a) 周期轧制 b) 钢球轧制

螺旋斜轧采用两个带有螺旋槽的轧辊,互相交叉成一定角度,并作同方向旋转,使坯料在轧辊间既绕自身轴线转动,又向前移动,与此同时受压变形获得所需产品。

螺旋斜轧钢球是使棒料在轧辊间螺旋槽里受到轧制,并被分离成单个球。轧辊每转一周即可轧制出一个钢球,轧制过程是连续的。

螺旋斜轧可以直接热轧出带螺旋线的高速钢滚刀、自行车后闸壳及冷轧丝杠等。

2.4 冷塑性变形加工基础

冷塑性变形加工(cold plastic deformation process, sheet-metal working)主要是指在再结晶温度以下的塑性变形加工工艺。板料冲压是利用冲模使板料产生分离或变形的加工方法。这种加工通常是在室温下进行的,所以又称为冷冲压。

几乎在一切制造金属成品的工业部门中,都广泛地应用着板料冲压。特别是在汽车、拖拉机、航空、电器、仪表及国防等工业中,板料冲压占有极其重要的地位。

板料冲压具有下列特点:

- (1) 可以冲压出形状复杂的零件,且废料较少;
- (2) 冲压件的形状和尺寸由冲模保证,冲压件的品质稳定,互换性较好;
- (3) 能获得质量小、材料消耗少、强度和刚度都较高的零件;
- (4) 冲压操作简便,易于实现机械化和自动化,生产效率很高,零件成本低。

但冲模制造复杂,成本高,只有在大量生产条件下,这种加工方法的优越性才能显示出来。

板料冲压所用的原材料常用的有冶金厂大量生产的轧制钢板与钢带,此外有铜合金、铝合金、钛合金及不锈钢板等。

冲压生产中常用的设备是剪床和冲床。剪床用来把板料剪切成一定宽度的条料,以供下一步的冲压工序用。冲床用来实现冲压工序,以制成所需形状和尺寸的成品零件,冲床最大吨位已达 40000 kN。

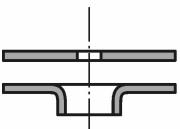
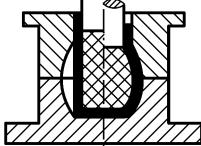
冲压生产基本工序有分离工序和成形工序两大类。分离工序是使坯料的一部分与另一部分相互分离的工序,如落料、冲孔、切断和修边。成形工序是使坯料的一部分相对于另一部分产生位移而不破坏的工序,如拉深、弯曲、翻边、胀形等。

板料冲压多用于生产一定形状和尺寸精度的薄壁立体件。此外,为提高生产效率,常常将两个以上的基本工序合并成一个工序,称为复合工序。表 2-2 列出了板料冲压的部分基本工序。

表 2-2 板料冲压的基本工序

工序性质	工序名称	工序简图	工序定义	典型零件
分离工序	落料		用模具沿封闭线冲切板料,冲下的部分为工件,其余部分为废料	
	冲孔		用模具沿封闭线冲切板材,冲下的部分是废料,其余部分为工件	
成形工序	弯曲		将板料弯成一定角度或一定形状	
	拉深		将平板坯料变成任意形状的空心件	

续表

工序性质	工序名称	工序简图	工序定义	典型零件
成形工序	翻边		将板料或工件上有孔的边缘翻成竖立边缘	
	胀形		使空心件(或管料)的一部分沿径向扩张,呈凸肚形	

1. 冲裁变形过程

冲裁过程大致可以分成三个阶段(见图 2-42)。

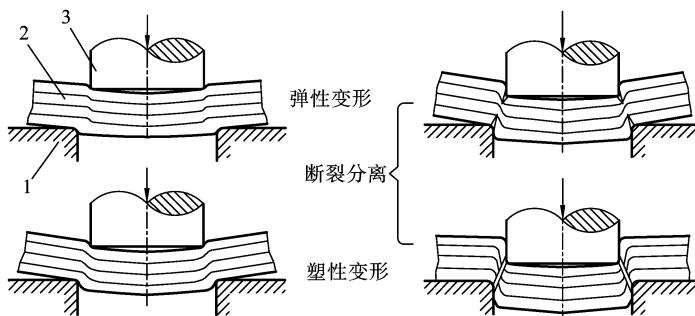


图 2-42 冲裁变形过程

(1) 弹性变形阶段。冲头(凸模)与板料接触后,使板料产生弹性压缩、拉伸与弯曲等变形,此时,板料中的内应力迅速增大,但没有超过材料的弹性极限。若卸去载荷,板料则恢复原状。

(2) 塑性变形阶段。冲头继续向下运动,板料中的内应力达到屈服点,板料金属产生塑性变形。变形达到一定程度时,位于凸、凹模刃口处的金属硬化加剧,出现微裂纹。

(3) 断裂分离阶段。冲头继续向下运动,已形成的上、下裂纹逐渐扩展。上、下裂纹相遇重合后,板料被剪断分离。

冲裁件切断面品质主要与凸凹模间隙(Z)、刃口锋利程度有关,同时也受模具结构、材料性能及板料厚度等因素的影响。

2. 间隙对切断面品质的影响

冲裁模的凸模一般都小于凹模,在凸模和凹模间存在的适当空隙称为间隙(clearance),记为 Z 。间隙对冲裁件的切断面品质有很大的影响。

从图 2-43 可以看到,当间隙过小时,上、下裂纹向内扩展时不能互相重合,将产生第二次剪切,在端面中间留下撕裂面。当间隙过大时,板料受到很大的拉伸和弯曲应力作用,冲裁件圆角和斜度加大,光亮带小,毛刺大而厚,难以去除。只有将间隙值控制在合理范围内,上、下裂纹才能互相重合,冲裁件切断面平直、光洁,品质最好。

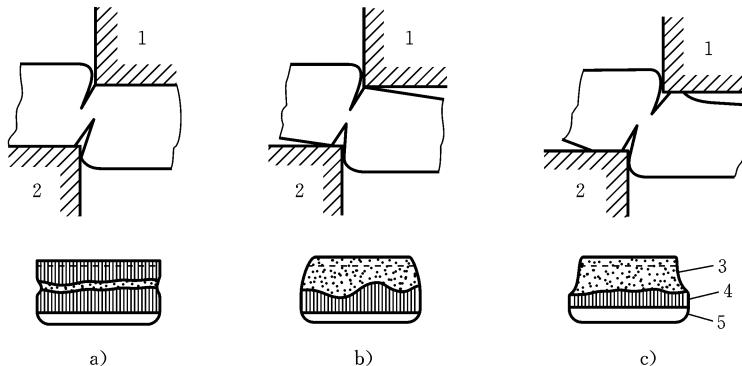


图 2-43 间隙大小对制件切断面品质的影响

a) 间隙过小 b) 间隙合适 c) 间隙过大

1—凸模 2—凹模 3—断裂带 4—光亮带 5—圆角带

此外,间隙的大小对模具的寿命、冲裁力、冲裁件的尺寸精度也有很大的影响,因此,正确选择合理的间隙对冲裁是至关重要的。

单边间隙 c 的合理数值可按以下经验公式计算:

$$c = \frac{1}{2}Z = m\delta$$

式中 δ —材料厚度(mm);

m —与材料性能及厚度有关的系数。

实际生产中,材料较薄时, m 可以选用如下数据:对于低碳钢、纯铁, $m=0.06\sim0.09$;对于铜合金、铝合金, $m=0.06\sim0.1$;对于高碳钢, $m=0.03\sim0.12$ 。

当材料厚度 $\delta>3$ mm 时,由于冲裁力较大,应适当放大系数 m 。对冲裁件断面没有特殊要求时,系数 m 可放大 1.5 倍。

3. 板料成形时的变形过程

板料成形时只允许产生弹性变形和塑性变形,不允许产生微裂纹。因此,变形中的加工硬化达到一定程度后必须进行再结晶退火。

(1) 板料的弯曲变形。图 2-44 所示为板料的 V 形弯曲(bending)。弯曲过程中,在凸模压力作用下,板料产生弯曲变形,随着凸模下降,弯曲部分的材料由弹性变

形过渡到塑性变形状态,最后将板料弯曲成与凸模尺寸形状一致的工件。

在弯曲工序中,板料弯曲部分外层受拉伸而伸长,内层受压缩而缩短,在外层外表面,拉伸应力与拉伸应变最大。当外层纤维的伸长变形超过材料性能所允许的极限时,即会造成金属破裂。板料越厚,内弯曲圆角半径越小,则拉伸应变越大,越容易弯裂。为防止弯裂,弯曲的最小圆角半径 r_{\min} 应为 $(0.25 \sim 1)\delta$ (δ 为金属板料的厚度)。材料塑性好,则弯曲圆角半径可小些。

(2) 板料的拉深变形。拉深(drawing)是利用模具使冲裁后得到的平板坯料变形成开口空心零件的工序(见图 2-45)。其变形过程为:把直径为 D 的平板坯料放在凹模上,在凸模作用下,坯料被拉入凸模和凹模的间隙中,形成空心拉深件。拉深件的底部一般不变形,只起传递拉力的作用,厚度基本不变。坯料外径 D 减去内径 d 的环形部分的金属,切向受压应力作用,径向受拉应力作用,逐步进入凸模与凹模之间的间隙,形成拉深件的直壁。直壁主要受拉应力作用,厚度有所减小。而直壁与底之间的过渡圆角部分的拉薄最严重。而拉深件的凸缘部分受切向压应力作用,厚度有所增大。如果需要拉深变形程度较大,应进行多次拉深,前一次拉深的产品(中间产品)即后一次拉深的坯料。

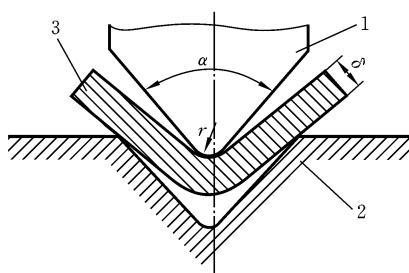


图 2-44 板料的 V 形弯曲

1—凸模 2—凹模 3—板料

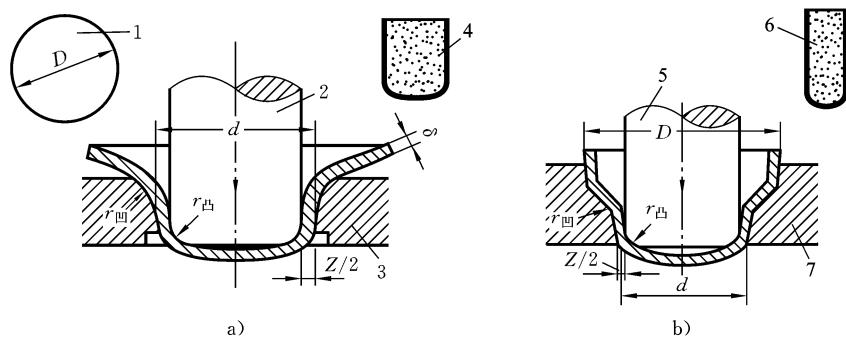


图 2-45 拉深工序

a) 第一次拉深 b) 第二次拉深

1—坯料 2、5—凸模 3、7—凹模 4—中间产品 6—成品

2.5 冲裁工艺

冲裁(blanking)是指使坯料按封闭轮廓分离的工序,包括落料和冲孔工序。落料时,冲落部分为成品,余下的为废料;而冲孔是为了获得带孔的冲裁件,冲落部分为

废料。

1. 普通冲裁

普通冲裁如图 2-46 所示。凸模和凹模的边缘都带有锋利的刃口, 当凸模向下运动压住板料时, 板料受剪切产生塑性变形, 板料即被切离, 得到平面的冲裁件。

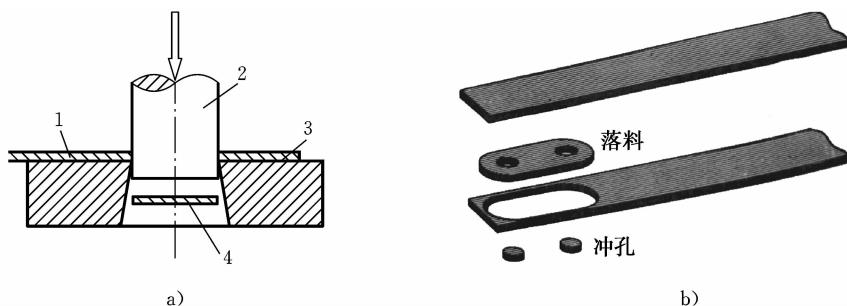


图 2-46 普通冲裁

a) 原理 b) 实例

1—板料 2—冲头 3—凹模 4—冲下部分

为了获得良好的冲裁件, 凸模、凹模之间要有合理的冲裁间隙, 冲裁模合理间隙是由凸模与凹模刃口尺寸及其公差来保证的, 因此必须正确决定冲裁模刃口尺寸。

2. 凸模与凹模刃口尺寸的确定

冲裁模合理间隙是由凸模与凹模刃口尺寸及其公差来保证的, 因此必须正确决定冲裁模刃口尺寸。

设计落料模时, 以凹模为基准, 按落料件先确定凹模刃口尺寸, 然后根据间隙确定凸模刃口尺寸, 即用缩小凸模刃口尺寸来保证间隙值。设计冲孔模时, 以凸模为基准, 按冲孔件先确定凸模刃口尺寸, 然后根据间隙确定凹模刃口尺寸, 即用扩大凹模刃口尺寸来保证间隙大小。

冲模在使用过程中凸模与凹模会有磨损, 导致落料件尺寸增大, 而冲孔件尺寸减小。为了保证零件的尺寸, 并延长模具的使用寿命, 落料时凹模刃口尺寸应靠近落料件公差范围内的最小尺寸。冲孔时, 选取凸模刃口尺寸靠近孔的公差范围内的最大尺寸。

3. 冲裁件的结构工艺性

冲裁件的设计不仅应保证具有良好的使用性能, 而且也应具有良好的工艺性能。

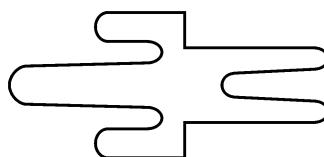


图 2-47 不合理的落料件外形

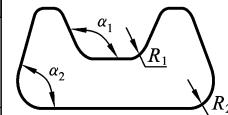
(1) 冲裁件的形状。冲裁件的形状应力求简单、对称。尽可能采用圆形或矩形等规则形状, 应避免如图 2-47 所示的长槽或细长的悬臂结构; 否则会使模具制造困难, 缩短模具使用寿命。

(2) 冲裁件的圆角。冲裁件上直线与直线、曲线与直线的交接处, 均应用适宜的圆角连接。

因为圆角可以大大减少应力集中,有效地消除冲裁模开裂现象。冲裁件的最小圆角半径如表 2-3 所示,表中 δ 为板料厚度。

表 2-3 冲裁件的最小圆角半径

工 序	圆弧角	最小圆角半径 R		
		黄铜、紫铜、铝	低 碳 钢	合 金 钢
落料	$\alpha_1 \geq 90^\circ$	$R_1 = 0.24\delta$	$R_1 = 0.30\delta$	$R_1 = 0.45\delta$
	$\alpha_2 < 90^\circ$	$R_2 = 0.35\delta$	$R_2 = 0.50\delta$	$R_2 = 0.70\delta$
冲孔	$\alpha_1 \geq 90^\circ$	$R_1 = 0.20\delta$	$R_1 = 0.35\delta$	$R_1 = 0.50\delta$
	$\alpha_2 < 90^\circ$	$R_2 = 0.45\delta$	$R_2 = 0.60\delta$	$R_2 = 0.90\delta$



(3) 冲裁件的孔径及孔位距。冲裁件的孔径太小,凸模易折断和压弯,冲孔允许的最小尺寸与模具结构、材料性能及板料厚度有关。如图 2-48 所示,图中 δ 为板料厚度。

4. 精密冲裁简介

为了提高冲裁件的断面品质和尺寸精度,在生产中通常应用整修、光洁冲裁或齿圈压板冲裁等方法,谓之精密冲裁(fine blanking),简称精冲。精密冲裁还可以与其他成形工序组合,以提高生产效率,降低成本,是一项具有良好发展前景的新技术。

图 2-49 所示为带 V 形齿圈压板进行冲裁的方法。其工作部分由凸模、凹模、带齿圈的强力压板及顶件器四部分组成。其工作过程是:材料被送入模具后,齿圈压板与凹模及顶件器将板料压紧;然后凸模下降开始冲切,冲切时顶件器始终压紧板料;

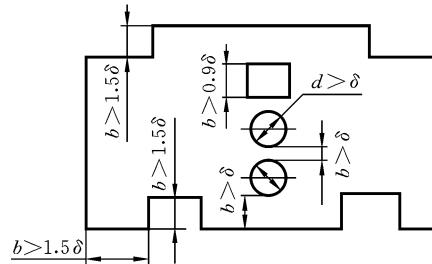


图 2-48 冲裁件的孔径及孔位距

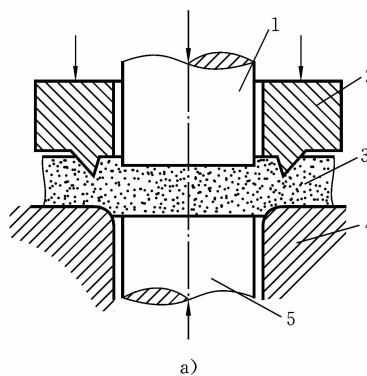


图 2-49 齿圈压板精密冲裁

a) 原理 b) 实例

1—凸模 2—V 形齿圈压板 3—冲裁件 4—凹模 5—反压力推杆

冲切完成后,凸模回复,条料从凸模上卸下,接着顶件器将工件顶出。

由于精冲法选用极小的间隙,凹模刃口带有小圆角,且有齿圈压板与顶件器的强大压力作用,变形区材料处于三向压应力状态,抑制了裂纹产生,使其以塑性变形的方式完成分离。因此,精冲法所获得的零件切断面,其光亮带可达板料厚度的100%,断面平直,零件的尺寸精度公差等级可达IT6~IT9,表面粗糙度 R_a 可达 $3.2\sim0.2\mu\text{m}$ 。

精冲对材料的塑性有一定的要求,材料必须具有良好的变形特性。材料的塑性越好,越适合精冲。有色金属中的铝、黄铜等材料一般均能获得良好的精冲效果。在钢铁金属中, $\omega(\text{C})<0.35\%$ 、 $R_m=300\sim600\text{ MPa}$ 的碳钢精冲效果较好。 $\omega(\text{C})=0.35\%\sim0.7\%$ 或碳含量更高的碳钢及低合金钢,经球化退火后也可获得良好的精冲效果。

2.6 成形工艺

1. 弯曲

弯曲是将坯料弯成具有一定角度和形状的工艺方法。弯曲可以在压力机上使用弯曲模进行,也可以在折板机、弯管机、滚弯机、拉弯机上进行。

1) 弯曲工艺及特点 弯曲时应尽可能使弯曲线与坯料纤维方向垂直(见图2-50)。若弯曲线与纤维方向一致,则容易产生破裂。此时应增大弯曲半径。

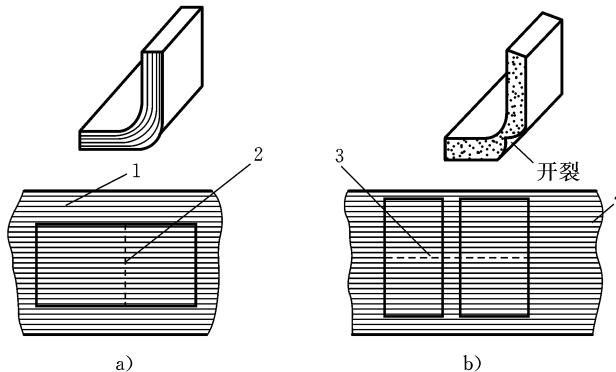


图 2-50 板料纤维与弯曲关系

a) 弯曲线与纤维方向垂直 b) 弯曲线与纤维方向平行

1、4—流线 2、3—弯曲线

在弯曲结束后,由于弹性变形的恢复,坯料略微弹回一点,使被弯曲的角度增大。此现象称为弹复或回弹(spring back)。一般回弹角为 $0^\circ\sim10^\circ$ 。因此在设计弯曲模时,必须使模具的角度比成品角度小一个回弹角进行补偿,以便在弯曲回弹后得到准确的弯曲角度。

2) 弯曲伸长与尺寸计算 零件在弯曲时,弯曲圆角部分内侧受压缩而缩短,外侧受拉伸而伸长。从缩短过渡到拉长,应该有一层纤维既未缩短也未拉长,即它的长度在弯前与弯后并不改变,这一层纤维称为中性层。当相对弯曲圆角半径较大($r/\delta > 5$)时,中性层位于板厚的中央;当相对弯曲圆角半径较小($r/\delta < 5$)时,中性层的位置向板料内侧方向移动。

一般弯曲件的宽度方向尺寸比厚度方向尺寸大得多,所以弯曲前后的板料宽度可近似地认为是不变的。但是,板料弯曲时中性层位置的向内移动,出现了板厚的减薄,根据体积不变条件,减薄必然使板料长度增加。相对弯曲圆角半径 r 愈小,减薄量愈大,板料长度的增量也愈大。

在实际生产中,弯曲件需要计算它弯前的尺寸或展开长度。可以根据弯曲前后中性层长度不变的原则来确定弯曲件的毛坯展开长度和尺寸。具体的计算方法是,先把零件分成直线和圆弧部分,如图 2-51 所示的零件分为 1、2、3、4、5 五段,直线部分 1、3、5 的长度可从零件所注尺寸经过换算得到,圆弧部分 2、4 的尺寸可根据中性层位置计算得到。弯曲件的展开长度应为

$$L_{\text{总}} = \sum L_{\text{直}} + \sum L_{\text{弯}}$$

各个弯曲部分中性层长度 $L_{\text{弯}}$ 的计算公式为

$$L_{\text{弯}} = \frac{\pi\alpha}{180}\rho = \frac{\pi\alpha}{180}(r+k\delta) \approx 0.17\alpha(r+k\delta)$$

式中 α ——弯曲中心角($^{\circ}$);

r ——弯曲件内表面的圆角半径(mm);

δ ——弯曲件原始厚度(mm);

k ——中性层系数, k 值随 r/δ 的增大而增大,一般 $k=0.2 \sim 0.5$ 。

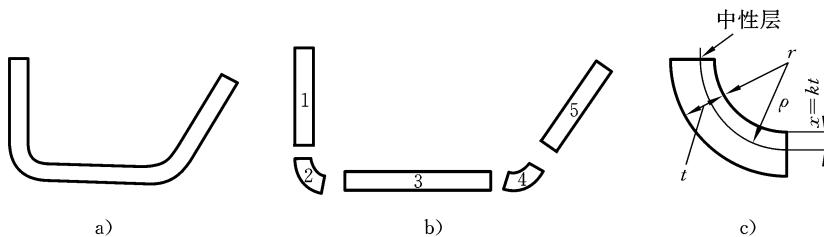


图 2-51 求展开长度的方法

a) 零件图 b) 分段图 c) 弯曲角计算图

对于 r/δ 值较小的弯曲件,在计算弯曲件的展开长度时,可以先用上述公式进行初步计算,经过试压后才能最后确定合适的毛坯形状和尺寸。

3) 柔性模与管子的弯曲 管子的弯曲加工在汽车、金属结构、动力机械、石油化工、管道工程、航空航天等工业领域应用广泛。

管子弯曲与板材弯曲在变形性质等方面非常相似,但由于管子空心横截面的形

状特点,管子弯曲在加工方法、需要解决的工艺难点等方面与板材弯曲是不同的。

管子弯曲时,在弯矩 M 的作用下(见图 2-52),弯管段的外侧因受拉而伸长,使管壁减薄,内侧受压缩而使其增厚或失稳产生褶皱,管子截面变为椭圆,甚至产生裂纹。这些缺陷的产生与相对弯曲半径 R/d 有很大关系。相对弯曲半径愈小,愈容易产生各种缺陷。

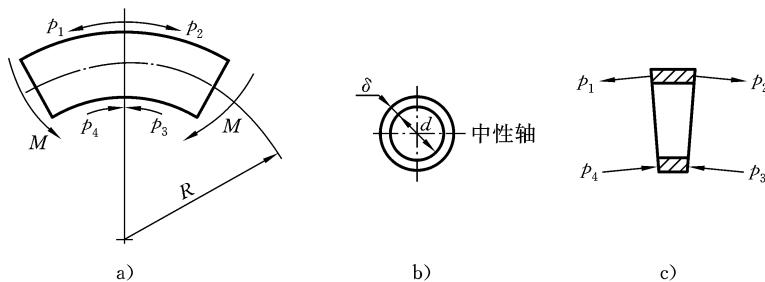


图 2-52 管子弯曲受力图

a) 弯管图 b) 管子截面图 c) 内外管壁应力图

尽可能地减少弯曲加工中产生的管子横截面形状的畸变,对于管子弯曲非常重要,因此产生了多种管子弯曲方法:按弯曲方式可分为绕弯、推弯、压弯和滚弯,按弯曲时加热与否可分为冷弯和热弯,按弯曲时有无填充物可分为有芯(填料)弯和无芯(填料)弯,等等。

绕弯是最常用的弯管方法,它分为手工弯管和弯管机弯管两类。手工弯管是利用简单的弯管装置对管坯进行弯曲加工,劳动强度大,生产效率低,仅适用于单件、小批生产;弯管机弯管是在立式或卧式弯管机上进行弯曲加工,可以采用芯棒对管坯进行弯曲,生产效率高,弯管品质较好,故广泛用于大量生产。

图 2-53 所示为有芯弯管的方法,弯曲模胎固定在机床主轴上并随主轴一起旋转、管坯的一端由夹持块压紧在弯曲模胎上。在管坯与弯曲模胎的相切点附近,其弯曲外侧装有压块,弯曲内侧装有防皱块,而管坯内部塞有芯棒。当弯曲模胎转动时,管坯即绕弯曲模胎逐渐弯曲成形。管件的弯曲角度由挡块(图中未示出)控制,当弯曲模胎转到管件要求的弯曲角度时,则撞击挡块,使弯曲模胎停止转动。

为了防止截面产生畸变,应在弯曲变形区采用适当形状的芯棒支撑截面。管材弯曲时,芯棒处于弯曲变形区(直线段与弯曲段相交接的位置),始终从管坯内部支撑截面。也可以采用柔性芯棒,其结构如图 2-54 所示,这两种类型的芯棒由多节段芯棒组装而成,各节段之间有类似于万向联轴器的结构,它在一定范围内可任意地相对转动。弯曲过程中,这种柔性芯棒可随管坯的变形而自由弯曲,故防截面畸变的效果较好,且弯曲后从管内取出也很方便。其缺点是制造麻烦。

此外,在管子内充填颗粒状介质(如砂、盐等)、流体介质(如水、油等)、弹性介质(如橡胶等)或低熔点合金等,也可代替芯棒,防止截面畸变。

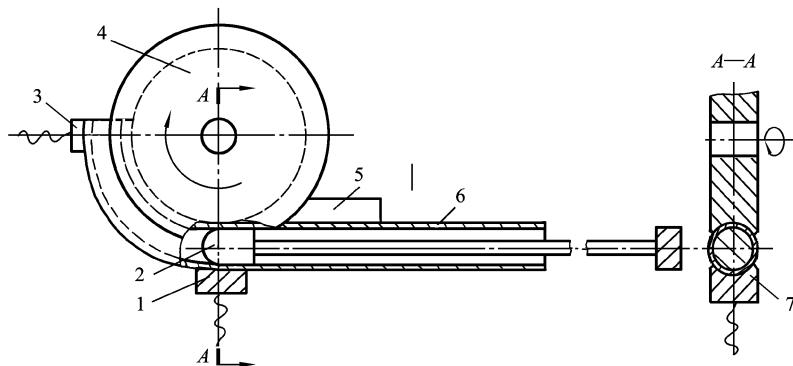


图 2-53 有芯弯管

1、7—压块 2—芯棒 3—夹持块 4—弯曲模胎 5—防皱块 6—管坯

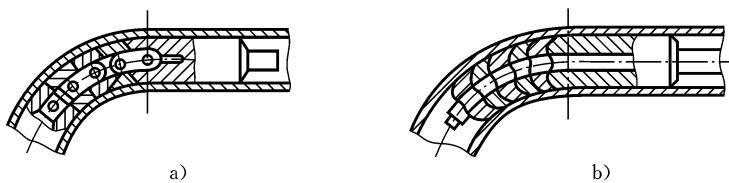


图 2-54 柔性芯棒的结构

a) 链节式 b) 软轴式

4) 弯曲件结构工艺性 采用弯曲方法成形零件时,由于受弯曲变形特点的影响,零件上弯曲部分的形状尺寸,如弯曲半径、弯曲边高度等,应满足一定的工艺性要求。

- (1) 工件的弯曲圆角半径必须大于最小弯曲圆角半径,否则会出现弯裂现象。
- (2) 弯曲件直边的高度必须大于 2δ ,否则应在弯曲部分加工出凹槽或孔,便于弯曲成形,如图 2-55 所示。
- (3) 为了避免弯曲时孔发生变形,孔与弯曲处的距离必须大于其允许的最小距离,如图 2-56 所示, $l > 2\delta$,否则,应先弯曲后冲孔。

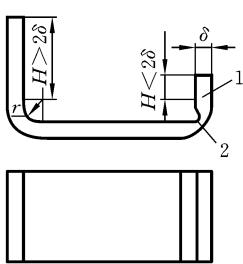


图 2-55 最小弯曲高度

1—弯曲件 2—压槽

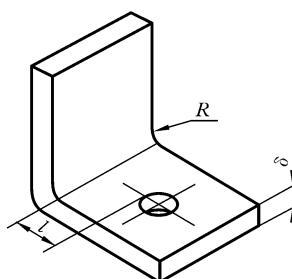


图 2-56 孔与弯曲部位最小距离

- (4) 弯曲件的形状和尺寸应对称,以避免工件偏移,在允许的情况下,应尽量采

用成对弯曲。

为避免应力集中或弯曲变形,在弯曲件上开设必要的工艺孔、槽或缺口,如图2-57所示。

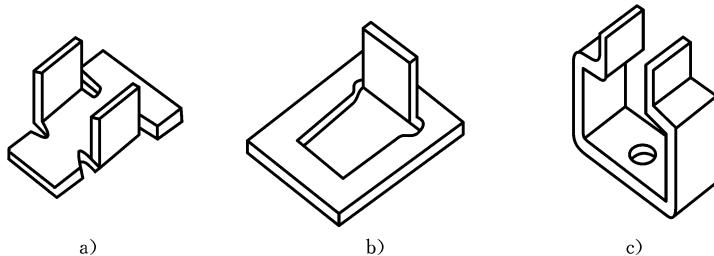


图 2-57 工艺槽、孔及定位孔

a) 折弯槽 b) 缺口 c) 孔

2. 拉深

1) 拉深件品质分析 圆筒件的拉深过程顺利进行的两个主要障碍是凸缘起皱和筒壁拉断。

拉深过程中,凸缘材料在周向产生很大的压应力,这一压应力犹如压杆两端受压失稳似的,使凸缘材料失去稳定而形成褶皱。在凸缘最外缘处,切向压应力最大,因而成为起皱最严重的地方,如图2-58b所示。

另外,当凸缘部分材料的变形抗力过大时,筒壁所传递的力量超过筒壁本身的极限抗拉强度,使得筒壁在最薄的凸模圆角处产生破裂,形成拉穿废品,如图2-58d所示。

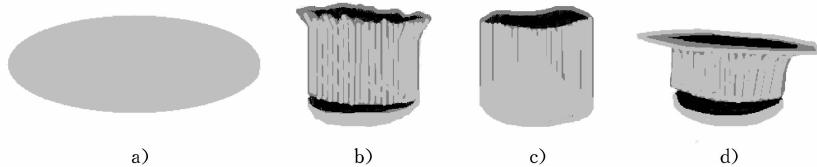


图 2-58 起皱与拉穿

a) 圆形板料 b) 起皱和拉裂 c) 良好 d) 压边力过大导致拉裂

为了防止起皱,需在凸缘上加压边力,此压边力又成为凸缘移动的阻力,并与材料自身的变形阻力和材料通过凹模圆角时的弯曲阻力合在一起,成为拉深阻力。

对于凸缘上产生的拉深阻力,如果不施加与之平衡的拉深力,则成形是无法实现的。此拉深力由凸模给出,它经过筒壁传至凸缘部分。筒壁为了传递此力,就必须经受它的作用。筒壁强度最弱处为凸模圆角附近(即筒壁与底部的过渡圆角处),所以此处的承载能力大小就成了决定拉深成形能否取得成功的关键。

拉深件出现破裂现象与下列因素有关:

(1) 凸凹模圆角半径。拉深模的工作部分不能是锋利的刀口,必须做成一定的圆角 r 。对于钢的拉深件,取 $r_{\text{凹}} = 10\delta$,而 $r_{\text{凸}} = (0.6 \sim 1)r_{\text{凹}}$ 。这两个圆角半径过小

时,容易将板料拉破。

(2) 凸凹模间隙。拉深模的间隙远比冲裁模大,一般取单边间隙 $c=(1.1\sim1.2)\delta$ 。间隙过小,模具与拉深件的摩擦力增大,易拉破工件和擦伤工件表面,且缩短模具使用寿命;间隙过大,又容易使拉深件起皱,影响拉深件的尺寸精度。

(3) 拉深方法。在改善拉深成形、提高成形极限的时候,应使拉深阻力(包括摩擦阻力)减小,使筒壁的承载能力提高。为此,采用润滑措施、退火处理,以及温差成形、软模成形在拉深中很常见。

2) 拉深系数与拉深次数 拉深件直径 d 与坯料直径 D 的比值称为拉深系数,用 m 表示($m=d/D$)。它是衡量拉深变形程度的指标。 m 越小,表明拉深件直径越小,变形程度越大,坯料被拉入凹模越困难,也就越容易产生拉穿废品。一般情况下,拉深系数 m 不小于材料极限拉深系数。坯料塑性越好,材料极限拉深系数越小,一般取 $m\geq 0.5$ 。

如果拉深系数过小,不能一次拉深成形,则可采用多次拉深工艺(见图 2-59),但在多次拉深过程中,加工硬化现象严重。为保证坯料具有足够的塑性,每隔一两次拉深,应安排工序间的再结晶退火处理。此外,在多次拉深中,拉深系数应一次比一次大,以保证拉深件的品质,使生产顺利进行。总拉深系数等于各次拉深系数的乘积。

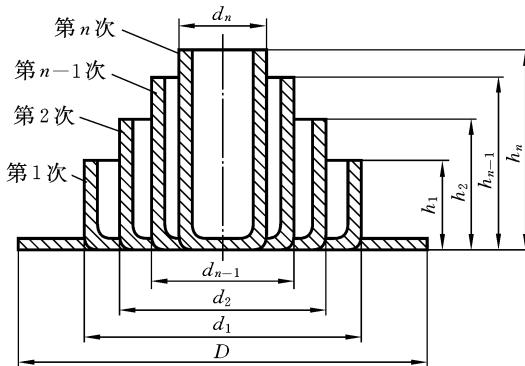


图 2-59 多次拉深时圆筒直径的变化

3) 各类拉深件的工艺分析比较 拉深件的几何形状很多,大体上可以分为以下三类:① 旋转体(轴对称)零件(包括直壁旋转体及曲面旋转体);② 盒形(如方形、矩形、椭圆形、多角形等)零件;③ 复杂曲面零件。

拉深件的变形特点如表 2-4 所示。

板料成形包括各种变形过程,筒形件拉深是其中的一种极端情形。它在板料平面内,主应力一个(径向拉应力)为正,另一个(切向压应力)为负,厚度变化很小。板料成形的另一个极端情形是双向等拉(胀形)。它的两个主应变均为拉伸,工件厚度变薄。其他成形工序则介于两者之间。在同一工序中,在某一区域可能是双向拉伸占优势,而在另一区域可能是拉深占优势。

表 2-4 拉深件的变形特点

拉深件名称		拉深件简图	变形特点
轴对称零件	筒形件		(1) 变形区是毛坯的法兰边部分, 其他部分是传力区, 不参与主要变形; (2) 在切向压应力和径向拉应力的作用下, 毛坯变形区产生切向压缩和径向伸长, 从而产生一面受拉、一面受压的变形; (3) 极限变形参数主要受到毛坯传力区承载能力的限制
	带法兰边圆筒形件		
	阶梯形件		
直壁类拉深件	盒形件		(1) 变形性质与前项相同, 差别仅在于一面受拉、一面受压的变形在毛坯的周边上分布不均匀, 圆弧部分变形大, 直边部分变形小;
	带法兰边的盒形件		
	其他形状的零件		(2) 在毛坯的周边上, 变形程度大与变形程度小的部分之间存在着相互影响与作用
非轴对称零件	曲面法兰边的零件		除具有与前项相同的变形性质外, 还有以下特点: (1) 因为零件各部分的高度不同, 在拉深开始时有严重的不均匀变形; (2) 拉深过程中毛坯变形区内还要发生剪切变形
	球面零件		
曲面类拉深件	锥形件		
	其他曲面零件		
	平面法兰边零件		(1) 拉深毛坯的变形区也是由外部的拉深变形区和内部的胀形变形区所组成的, 这两种变形在毛坯周边上的分布是不均匀的;
非轴对称零件	曲面法兰边零件		(2) 曲面法兰边零件拉深时, 在毛坯外周变形区内还有剪切变形

4) 拉深件的结构工艺性

(1) 拉深件外形应简单、对称,深度不宜过大,以使拉深次数最少,容易成形。如消声器后盖(见图 2-60)经改造后,冲压工序由原来的八道减少为两道,同时,节省材料 50%。

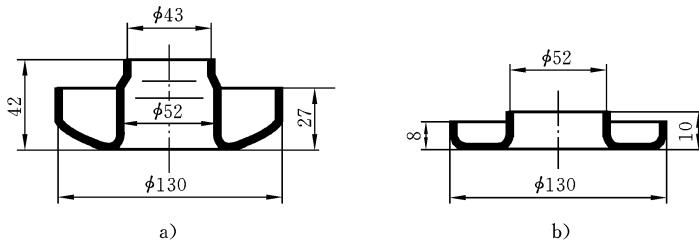


图 2-60 消声器后盖零件结构

a) 改进前 b) 改进后

(2) 拉深件的圆角半径应合适,其最小许可半径如图 2-61 所示,否则会增加拉深次数和整形工作,也增加了模具数量,并容易产生废品和提高成本。

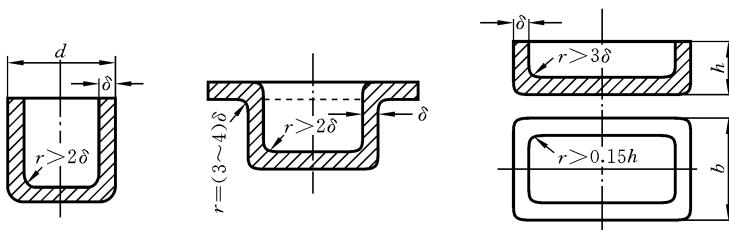


图 2-61 拉深件最小允许半径

(3) 拉深件的制造精度包括直径方向的精度和高度方向的精度。在一般情况下,拉深件的精度不应要求过高。

复习思考题

2.1-1 锡在 20 °C、钨在 1100 °C 变形,各属哪种变形? 为什么? 已知锡的熔点为 232 °C,钨的熔点为 3380 °C。

2.1-2 纤维组织是怎样形成的? 它的存在有何利弊? 试举例说明。

2.1-3 如何提高金属的塑性? 最常用的措施是什么?

2.1-4 “趁热打铁”的含义何在?

2.1-5 原始坯料长 150 mm,若拔长到 450 mm 时,锻造比是多少?

2.1-6 在图 2-62 所示的两种砧块上拔长时,效果有何不同?

2.1-7 重要的轴类锻件为什么在锻造过程中安排有镦粗工序?

2.2-1 为什么在模锻时所用的金属质量比充满模膛所要求的要多一些?

2.2-2 锤上模锻时,多模膛锻模的模膛可分为几种?它们的作用是什么?为什么在终锻模膛周围要开设飞边槽?

2.2-3 如何确定模锻件分模面的位置?

2.2-4 绘制模锻件图应考虑哪些问题?选择分模面与铸件的分型面有何异同?为什么要考虑模锻斜度和圆角半径?锤上模锻带孔的锻件时,为什么不能锻出通孔?

2.2-5 图 2-63 所示零件的模锻工艺性如何?应如何修改使其便于模锻?

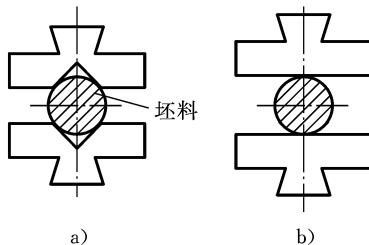


图 2-62 两种砧块

a) V形砧 b) 平砧

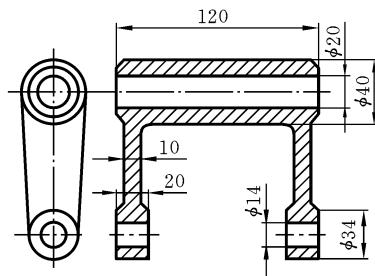


图 2-63 拨叉

2.2-6 图 2-64 所示的两零件采用锤上模锻工艺成形,试选择合适的分模面。

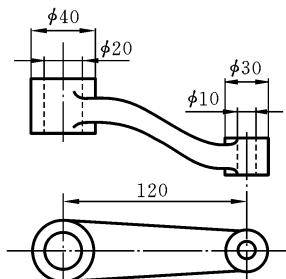
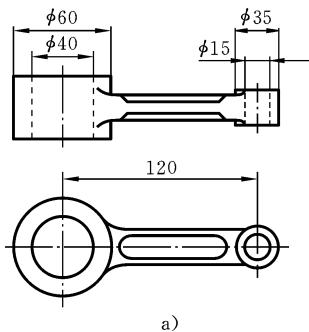


图 2-64 连杆

a) 平连杆 b) 弯连杆

2.2-7 图 2-65 所示的零件若批量分别为单件、小批、大量生产时,各应选用哪种方法锻造?定性地绘出大量生产所需的锻件图。

2.2-8 摩擦压力机上模锻有何特点?

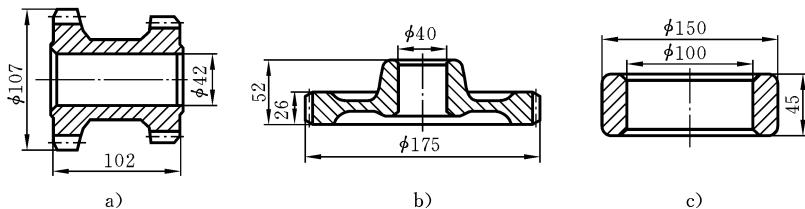


图 2-65 不同的零件

a) 双联齿轮 b) 直齿轮 c) 套

2.2-9 图 2-66 所示的零件采用模锻方法制坯, 设计上有哪些不合理的地方? 为什么?

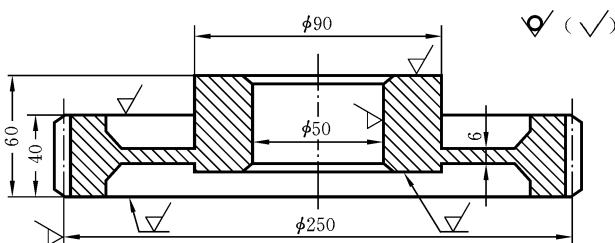


图 2-66 齿轮

- 2.3-1** 与普通模锻相比, 精密模锻具有什么特点?
- 2.3-2** 精密模锻时需采取哪些措施才能保证产品精度?
- 2.3-3** 挤压零件生产的特点是什么?
- 2.3-4** 试述几种主要高能高速成形的特点。
- 2.4-1** 板料冲压生产的特点是什么?
- 2.4-2** 试分析冲裁间隙对冲裁件品质的影响, 如何确定合理的冲裁间隙?
- 2.4-3** 简述精冲的原理及特点。
- 2.4-4** 用 50 mm 冲孔模具来生产 50 mm 落料件能否保证冲压件的精度? 为什么?
- 2.4-5** 用 250 mm×1.5 mm 板料能否一次拉深成直径为 50 mm 的拉深件? 应采取哪些措施才能保证正常生产?
- 2.4-6** 与板料弯曲加工相比, 管子的弯曲加工有何特点?
- 2.4-7** 如何利用弯曲回弹现象设计弯曲模, 使工件得到准确的弯曲角度?
- 2.4-8** 图 2-67 所示零件的冲压工艺性如何? 为什么? 应如何修改使其便于冲压?
- 2.4-9** 试述如图 2-68 所示冲压件的生产过程, 并计算板料的放样(毛坯)尺寸。

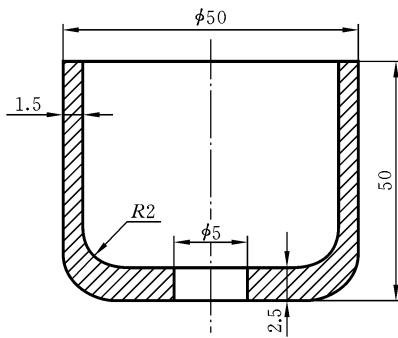


图 2-67 深孔零件

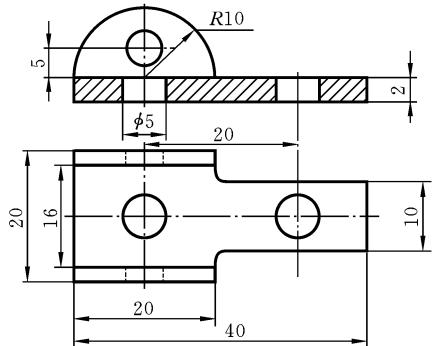


图 2-68 冲压件



图 3-0 德国通快 15kW CO₂ 激光焊接机

第3章 焊接工艺

【学习指导】 学习本章前应预习《工程材料》教材中有关二元相图、金属热处理的内容,以及《机械制图》教材中有关三视图的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的相关工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《基于项目的工程实践》教材中的有关章节。

【主要内容】 焊接工艺原理及特点,熔焊的基本原理,压焊的基本原理,焊接检验,埋弧焊,电阻焊,其他焊接工艺,金属焊接性,焊接结构设计。

【学习重点】 熔焊焊接接头的组织与性能,焊缝系数,焊接应力和焊接变形,焊接热裂纹与冷裂纹形成的原理,估算钢材焊接性的方法,碳钢的焊接,焊接接头工艺设计,焊缝尺寸设计。

3.1 概述

焊接(welding)是指用加热或加压等工艺措施,使两个分离表面产生原子间的结合与扩散作用,从而形成不可拆卸接头的材料成形方法。

1. 焊接工艺的特点

(1) 可将大而复杂的结构分解为小而简单的坯料拼焊。图 3-1 所示是汽车车身生产过程,先分别制造出车门、地板、顶盖、后围和侧围等部件,再将各部件组装拼焊,这样简化了工艺,降低了成本。

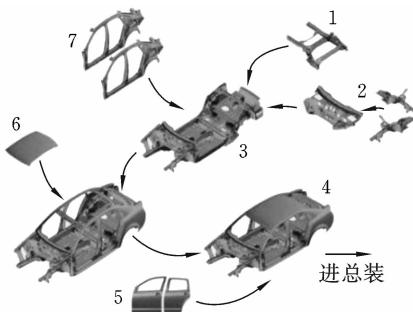


图 3-1 汽车车身装焊过程

1—行李架 2—后围 3—地板 4—车身
5—车门 6—顶盖 7—侧围

(2) 可实现不同材料间的连接成形。气门杆部为 45 钢, 头部为合金钢, 通过焊接形成了一个零件, 从而优化了设计, 节省了贵重材料。

(3) 可实现特殊结构的生产。例如, 1.26×10^6 kW 核电站锅炉, 其外径为 6400 mm, 壁厚为 200 mm, 高度为 13000 mm, 工作参数为 17.5 MPa、350 °C, 要求无泄漏(有放射性核燃料), 这种结构只有采用焊接方法才能制造出来。

(4) 焊接结构质量小。采用焊接方法制造船舶、车辆、飞机、飞船、火箭等运输工具, 可以减小其自身质量, 提高其运载能力和行驶性能。

焊接结构是不可拆卸的, 更换修理部分的零部件不便, 焊接易产生残余应力, 焊缝易产生裂纹、夹渣、气孔等缺陷, 引起应力集中, 降低承载能力, 缩短使用寿命, 甚至造成脆断。因此, 应特别注意焊件品质, 避免造成恶性事故。

我国焊接技术是在新中国成立后, 特别是在改革开放后才真正发展起来的, 现在, 从手弧焊到激光焊的各种焊接方法得到普及, 焊接机器人的应用愈来愈多。焊接的零部件和结构, 小到集成电路基片与引脚, 大到 720 t 大型水轮机的工作轮, 地上的汽车, 水中的万吨级远洋货轮, 天上的飞机, 太空中的火箭、飞船、卫星等, 无处不在。但与世界发达工业国家相比, 我国焊接结构的品质和生产效率还有一定差距。

2. 焊接工艺的分类

根据焊接过程的工艺特点, 可将焊接作如图 3-2 所示的分类。

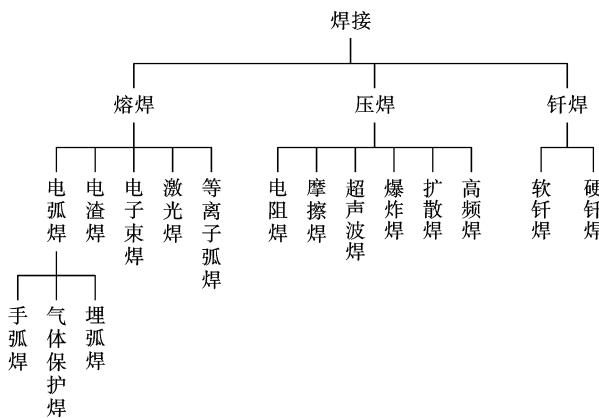


图 3-2 焊接工艺分类

3. 焊接在工业中的应用

(1) 金属结构的焊接。锅炉、压力容器、管道、桥梁、海洋钻井平台和起重机, 以

及船舶、车辆、飞机、火箭的梁架和外壳等,均可焊接成形,像锅炉汽包这样的大型结构,很难用焊接之外的方法制造出来。图 3-3 所示为机器人组成的汽车车身焊装生产线。



图 3-3 机器人组成的汽车车身焊装生产线

(2) 机械零件的焊接。轴、齿轮、锻模和刀具等机械零件,均是焊接件,齿轮结构可以用管、板焊接而成。

3.2 焊接的基本原理

3.2.1 熔焊的基本原理

1. 熔焊的本质及特点

(1) 熔焊(fusion welding)的本质是小熔池熔炼与铸造,是金属熔化与结晶的过程。当温度达到材料熔点时,母材和焊丝熔化形成熔池(melt pool)(见图 3-4a),熔池周围母材受到热影响,组织和性能发生变化形成热影响区,在熔池与热影响区之间一般存在半熔化区——通常称为熔合区(见图 3-4b),热源移走后熔池结晶成柱状晶(见图 3-4c)。

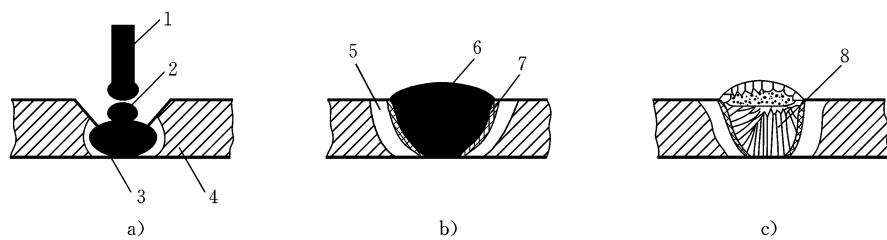


图 3-4 熔焊过程

a) 熔池 b) 热影响区形成 c) 熔池结晶

1—焊丝 2—熔滴 3—熔池 4—母材 5—热影响区 6—焊缝 7—熔合区 8—柱状晶

(2) 熔池存在时间短,温度高;冶金过程进行不充分,氧化严重;热影响区大。

(3) 冷却速度快,结晶后易生成粗大的柱状晶。

2. 熔焊的三要素

由熔焊的本质及特点可知,要获得良好的焊接接头,必须有合适的热源、良好的熔池保护和焊缝填充金属,此称为熔焊的三要素。

(1) 热源。能量要集中,温度要高,以保证金属快速熔化,减小热影响区。满足要求的热源有电弧、等离子弧、电渣热、电子束和激光。

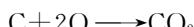
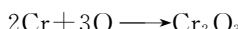
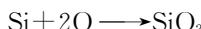
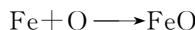
(2) 熔池的保护。可用渣保护(如埋弧焊中焊剂的保护)、气保护和渣-气联合保护(如手弧焊中电焊条药皮的保护),以防止氧化,并进行脱氧、脱硫和脱磷,给熔池过渡合金元素。

(3) 填充金属。保证焊缝填满及给焊缝带入有益的合金元素,以满足力学性能和其他性能的要求。填充金属主要来自焊芯和焊丝。

3. 熔池的冶金反应

熔焊从母材和焊条被加热熔化到熔池的形成、停留、结晶。在高温作用下要发生一系列的氧化还原反应,从而影响焊后的化学成分、组织和性能。

首先,空气中的氧气在电弧高温作用下发生分解,与金属和碳等发生反应,如



这样,Fe、C、Mn、Si、Cr等元素会大量烧损,导致焊缝金属氧含量大大增加,力学性能明显下降,尤其是低温冲击韧度急剧下降,从而引起冷脆等现象。

空气中的氮和氢在高温时能溶解于金属液中,氮还能与铁反应形成FeN和Fe₂N。Fe₂N为片状夹杂物,增大了焊缝的脆性。氢在冷却时保留在金属中造成气孔,引起氢脆和冷裂缝。

4. 熔焊焊接接头的组织与性能

1) 焊接热循环 在焊接加热和冷却过程中,焊缝及其附近的母材上某点的温度随时间变化的过程称为焊接热循环(welding thermal cycle)。对于低碳钢,温度在1100℃以上为过热区,500~800℃为相变温度区, $t_{8/5}$ 为相应的冷却时间(见图3-5)。由此可见,焊缝及其附近的母材上各点在不同时间经受的加热和冷却作用是不同的,在同一时间各点的温度也不同,其组织和性能也不同。焊接热循环的特点是加热和冷却速度很快,对易淬火钢,易导致马氏体相变;对其他材料,易产生焊接变形、应力及裂纹。受焊接热循环的影响,焊缝附近的母材组织或性能发生变化的区域,称为焊接热影响区(见图3-6)。熔焊焊缝和母材的交界线称为熔合线,熔合线两侧有一个很窄的焊缝与热影响区的过渡区称为熔合区或半熔化区。因此,焊接接头由焊缝区、熔合区和热影响区组成。

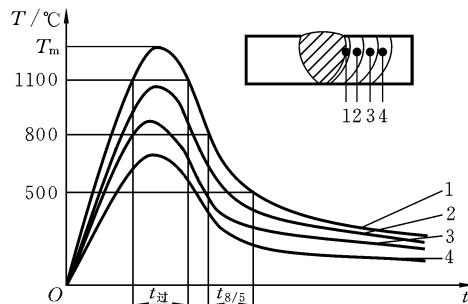


图 3-5 焊接热循环特征

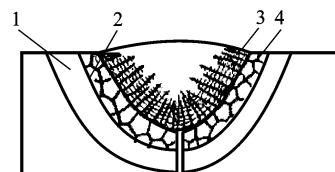


图 3-6 焊缝、熔合区及热影响区的组织

1—热影响区 2—熔合线
3—柱状树枝晶 4—熔合区

2) 焊缝的组织和性能 热源移走后,熔池焊缝(weld bead)中的金属液立刻开始冷却结晶,从熔合区中许多未熔化完的晶粒开始,以垂直于熔合线的方式向熔池中心生长为柱状树枝晶(见图3-7)。这样,低熔点物质将会被推向焊缝最后结晶部位,形成成分偏析。宏观偏析的分布与焊缝成形系数 B/H 有关,如图 3-8 所示。当 B/H 很小时,易形成中心线偏析,产生热裂纹。

熔池金属液凝固为焊缝金属的结晶称为一次结晶。如在其后的冷却过程中固态的焊缝金属继续发生组织转变,则称为二次结晶。低碳钢一次结晶形成奥氏体,二次结晶时奥氏体发生珠光体加铁素体的组织转变。当钢中碳含量较高时,特别是合金元素含量较高时,二次结晶有可能发生奥氏体向马氏体的转变,形成淬火组织。

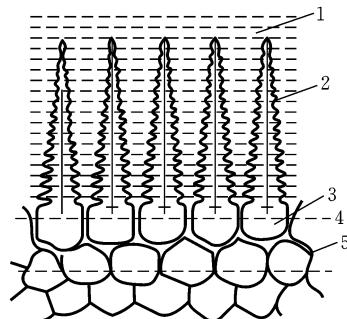


图 3-7 焊缝金属结晶凝固时熔合区的状态

1—熔融的焊缝金属 2—生长中的晶体
3—母材近缝区晶粒 4—熔合线 5—熔化的晶界

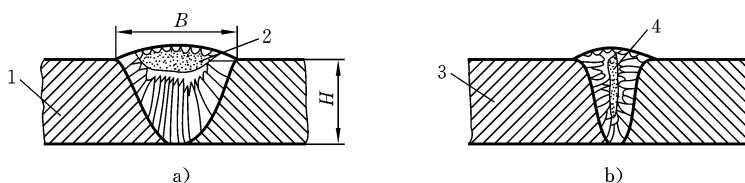


图 3-8 焊缝结晶过程

a) B/H 较大 b) B/H 较小
1、3—母材 2、4—偏析区

焊缝金属的宏观组织形态是柱状晶,晶粒粗大,成分偏析严重,组织不致密。由于焊接相当于小熔池炼钢,焊缝冷却快,化学成分控制严格,碳、磷、硫等含量低,通过

渗合金后焊缝的化学成分得到调整,这样,焊缝金属可与母材的强度相当。

3) 热影响区与熔合区的组织和性能 热影响区(heat-affected zone)内各点的最高加热温度不同,其组织变化也不同。低碳钢的热影响区如图 3-9 所示,图 3-9a 为焊接接头各点的最高加热温度曲线及室温下的组织图,图 3-9b 为简化的铁碳相图(图中 α 为低碳钢的碳含量)。

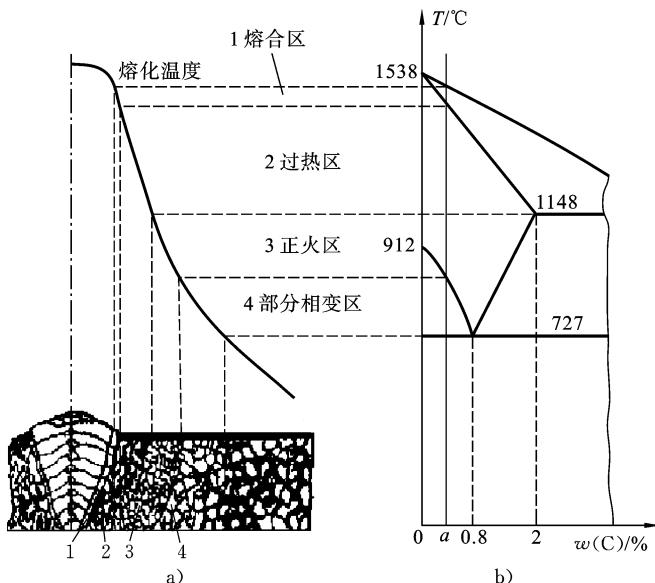


图 3-9 低碳钢焊接热影响区的组织变化

a) 组织图 b) Fe-C 相图

低碳钢的热影响区可分为以下几种:

(1) 熔合区。熔合区(fusion mixed zone)是固、液两相共存区。其成分不匀,组织为粗大的过热组织或淬硬组织,是焊接接头中最差的部位。

(2) 过热区。在过热区,温度 1100 °C 以上,晶粒粗大,塑性差,易产生过热组织,是热影响区中性能最差的部分。

(3) 正火区。在正火区,温度为 850~1100 °C,因冷却时奥氏体向珠光体+铁素体转变,故晶粒细小,性能好。

(4) 部分相变区。低碳钢加热到 700~850 °C 时存在铁素体、奥氏体两相,其中铁素体在高温下长大,冷却时不变,使晶粒粗大。而奥氏体向珠光体+铁素体转变,使晶粒细小。因此,部分相变区中的晶粒大小不匀,性能较差。

易淬火钢的热影响区分为淬火区(Ac_3 以上区域)、部分淬火区(Ac_1 至 Ac_3 区域)。焊后冷却速度快,易产生淬硬组织。调质合金钢的热影响区分为淬火区、部分淬火区和软化区(Ac_1 至高温回火的区域),其中淬火区中金属的力学性能显著下降,易引起冷裂纹。

5. 焊接变形和焊接应力

1) 焊接应力与变形产生的原因 当金属材料在自由状态下整体加热和冷却时, 它可进行自由膨胀和收缩, 不会产生应力和变形(见图 3-10a)。但如受到刚性拘束, 则其完全不能变形(见图 3-10b)。加热时, 不能膨胀到自由变形时的 $L_0 + 2\Delta l$, 仍然为 L_0 , 产生塑性压缩变形; 冷却时, 也不能产生 $2\Delta l'$ 自由收缩量, 这时材料内就受到拉应力并保留下。这个力称为残余应力。在非刚性拘束的情况下, 材料可以产生部分的膨胀和收缩(见图 3-10c)。加热时, 不能产生 $2\Delta l$ 的膨胀量, 而只能产生 $2\Delta l_1$ 的膨胀量, 金属受压应力, 产生一定量的压缩变形。冷却时不能产生 $2\Delta l$ 的收缩量, 而只能产生 $2\Delta l_1'$ 的收缩量, 金属受拉应力并保留下。最后产生的变形 $2\Delta l_1 - 2\Delta l_1'$ 称为残余变形, 也称为焊接变形。

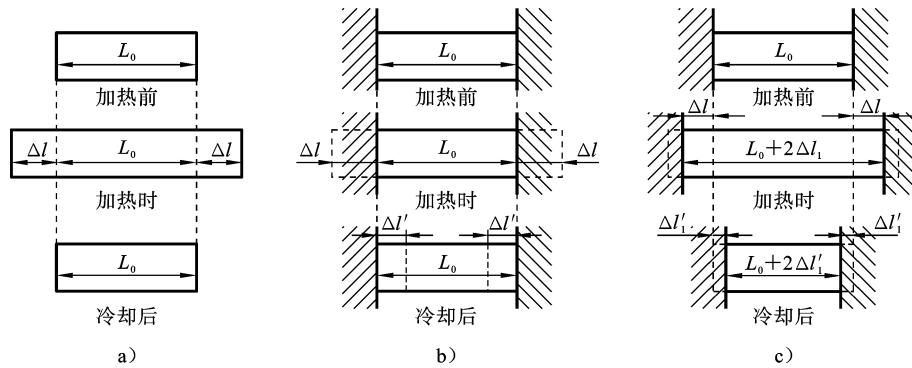


图 3-10 加热和冷却时的应力与变形

a) 自由状态 b) 刚性拘束 c) 非刚性拘束

焊接过程中焊件的加热和冷却受到周围冷金属的影响, 不能自由膨胀和收缩。当拘束很大(如大平板对接)时, 会产生残余应力, 不产生残余变形。当拘束较小(如小板对接焊)时, 既产生残余应力, 又产生残余变形。

2) 对接焊缝变形的计算 在焊接如图 3-11 所示的对接焊缝时, 焊接结构的横向收缩量与焊缝截面面积和焊根开度成正比, 与焊件厚度成反比, 计算公式为

$$S_t = \frac{0.25 A_w}{\delta} + 0.13d$$

式中 S_t —— 焊缝的横向收缩量(mm),

$$S_t = B - b;$$

A_w —— 焊缝截面面积(mm^2);

δ —— 焊件厚度(mm);

d —— 焊根开度(mm)。

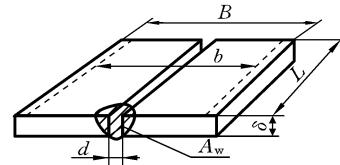


图 3-11 对接焊缝焊接结构示意图

同理, V 形坡口对接焊缝的纵向收缩量与焊缝截面面积成正比, 与焊件截面面积成反比, 计算公式为

$$S_l = \frac{0.005 L A_w}{A_p}$$

式中 S_l ——焊缝的纵向收缩量(mm)；

A_w ——焊缝截面面积(mm^2)；

A_p ——焊件截面面积(mm^2)；

L ——焊缝全长(mm)。

焊件的翘曲变形量与焊缝截面面积、焊缝全长及焊缝质心到中性轴之间的距离成正比,与结构单元对中性轴的惯性矩成反比,计算公式为

$$\Delta = \frac{0.127 A_w L^2 d}{I}$$

式中 Δ ——焊件的翘曲变形量(mm)；

d ——焊缝质心到中性轴之间的距离(mm)；

L ——焊缝全长(mm)；

I ——结构单元对中性轴的惯性矩(mm^4)；

A_w ——焊缝截面面积(mm^2)。

对于图 3-12 所示的角形接头和 T 形接头两种结构,用上述公式计算的翘曲变形量和实际测量得到的翘曲变形量如下:

(1) 对于角接接头,当焊角单边宽度 $W=4.8 \text{ mm}$ 、焊缝质心到中性轴之间的距离 $d=21.3 \text{ mm}$ 、结构单元对中性轴的最小惯性矩 $I_{\min}=177314.6 \text{ mm}^4$ 时,计算得到的翘曲变形量 $\Delta_{\text{计}}=2.74 \text{ mm}$,而实际测量得到的翘曲变形量 $\Delta_{\text{测}}=3.05 \text{ mm}$ 。

(2) 对于 T 形接头,当焊角单边宽度 $W=6.8 \text{ mm}$ 、焊缝质心到中性轴之间的距离 $d=7.34 \text{ mm}$ 、结构单元对中性轴的最小惯性矩 $I_{\min}=554836.5 \text{ mm}^4$ 时,计算得到的翘曲变形量 $\Delta_{\text{计}}=2.57 \text{ mm}$,而实际测量得到的翘曲变形量 $\Delta_{\text{测}}=2.54 \text{ mm}$ 。

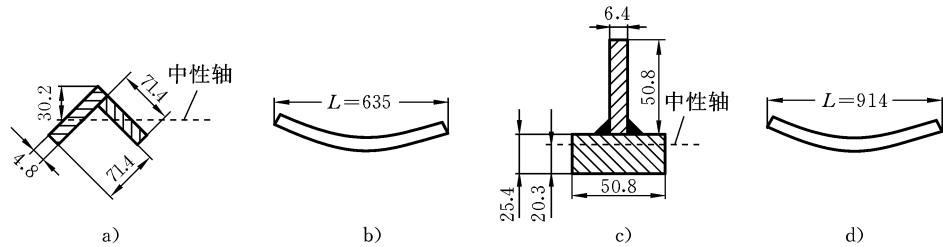


图 3-12 典型焊接结构的翘曲变形

a) 角接接头 b) 角接接头的焊缝全长 c) T 形接头 d) T 形接头的焊缝全长

3) 焊接应力的防止和消除 焊接残余应力是由于局部加热或冷却受到阻碍而产生的,其分布与焊缝接头形式有关,当采用对接焊时,残余应力的分布如图 3-13 所示。由图可见,焊缝受热后冷却收缩时,受到周围冷金属的作用而受拉应力,而母材及边缘受压应力,其应力有时高达金属的屈服点,因此是十分有害的。可采取以下措施防止或消除焊接应力:

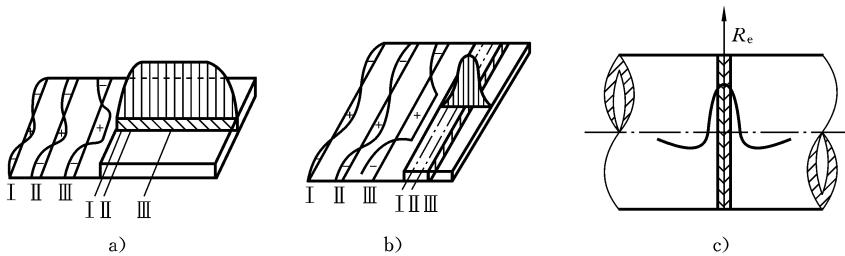


图 3-13 焊接残余应力的分布

a) 对接接头纵向 b) 对接接头横向 c) 圆筒环焊缝纵向

(1) 焊缝不要密集交叉, 截面和长度也要尽可能小, 以减少焊接局部加热, 从而减小焊接应力。

(2) 采取合理的焊接顺序, 使焊缝能够自由地收缩, 以减小应力 (见图 3-14a)。如图 3-14b 所示, 先焊焊缝 1 将导致对焊缝 2 的拘束增大, 而增大残余应力。

(3) 采用小线能量, 多层焊, 也可减小焊缝应力。

(4) 焊前预热可以减小焊件温差, 也能减小残余应力。

(5) 当焊缝还处在较高温度时, 锤击焊缝使金属伸长, 也能减小焊接残余应力。

(6) 焊后进行消除应力的退火可消除残余应力。通常把焊件缓慢加热到 550~650 ℃, 保温一定时间, 再随炉冷却, 利用材料在高温时屈服强度下降和蠕变现象而达到松弛焊缝、释放焊接残余应力的目的。这种方法可以消除残余应力的 80% 左右。

此外, 也可以用机械法, 如加压和振动等来消除应力, 利用外力使焊接接头残余应力区产生塑性变形, 达到释放残余应力的目的。

4) 焊接变形的防止和消除

(1) 焊缝不要有密集交叉, 截面和长度也要尽可能小, 以减少焊接局部加热, 从而减小焊接变形。图 3-15a 所示为对称焊缝, 图 3-15b 所示为对称双 Y 形坡口。

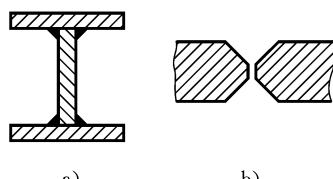


图 3-15 焊缝对称布置

a) 对称焊缝 b) 对称双 Y 形坡口

(2) 采用反变形法 (见图 3-16)。按测定的检验数据估计焊接变形的方向和数量, 在组装时使工件反向变形, 以抵消焊接变形。

(3) 焊接工艺上, 采用高能量密度的热源 (如等离子弧、电子束等), 采用小线能量, 采用对称焊 (见图 3-17) 和分段倒退焊 (见图 3-18), 采用多层多道焊, 都能减小焊接变形。

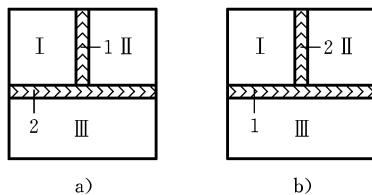


图 3-14 焊接顺序对焊接应力的影响

a) 焊接应力小 b) 焊接应力大

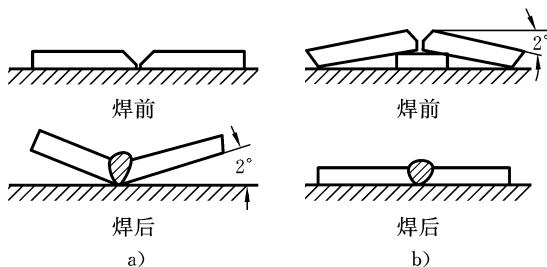


图 3-16 Y形坡口对接焊的反变形法

a) 产生角变形 b) 采用反变形

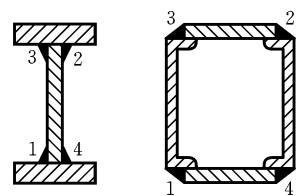


图 3-17 对称焊方法

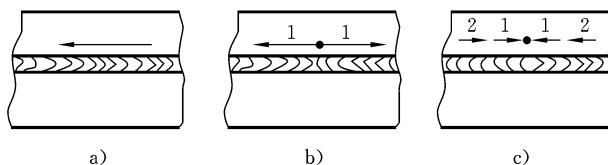


图 3-18 分段倒退焊方法在长焊缝中的应用

a) 变形最大 b) 变形较小 c) 变形最小

(4) 采用焊前刚性固定组装焊, 可减小焊接变形, 但这样会产生较大的焊接应力。采用定位组装焊也可防止焊接变形。

(5) 焊前预热, 焊接过程中采用散热措施(如水冷铜块散热, 见图 3-19c), 锤击处在高温的焊缝等都能减小焊接变形。

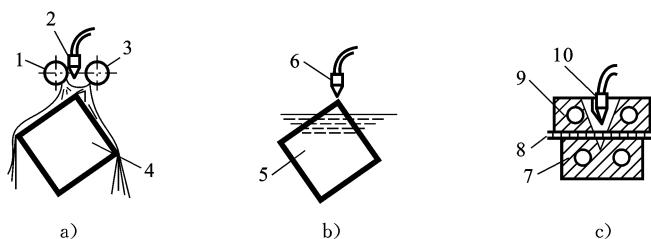


图 3-19 用散热法减小焊接变形

a) 喷水冷却 b) 浸入水中冷却 c) 用水冷铜块冷却

1,3—喷水管 2,6,10—焊炬 4,5,8—焊件 7,9—水冷铜块

焊件焊后的变形形式主要有尺寸收缩、角变形、弯曲变形、扭曲变形、翘曲变形等, 如图 3-20 所示。严重的焊接变形常采用机械矫正法, 以产生塑性变形来矫正焊接变形, 如图 3-21 所示, 这种方法因产生加工硬化而使材料塑性下降, 通常只适用于塑性好的低碳钢和普通低合金钢。火焰矫正法是利用火焰加热的热变形方法, 以产生新的收缩变形来矫正原来的变形, 如图 3-22 所示, 这种方法一般也仅适用于塑性好且无淬硬倾向的材料。

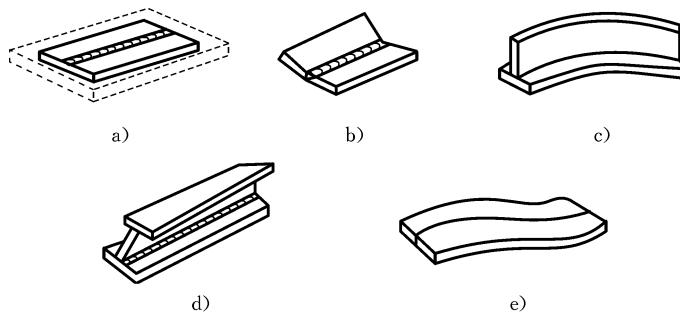


图 3-20 焊接变形的常见形式

a) 尺寸收缩 b) 角变形 c) 弯曲变形 d) 扭曲变形 e) 翘曲变形

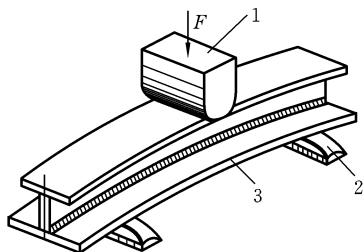


图 3-21 机械矫正法

1—压头 2—支承 3—焊件

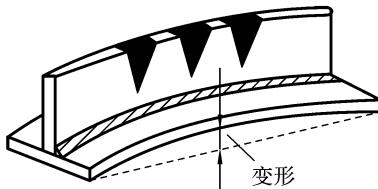


图 3-22 火焰矫正法

3.2.2 压焊的基本原理

压焊(pressure welding)是指通过加热和加压使金属达到塑性状态,产生塑性变形、再结晶和扩散,最后使两个分离表面的原子接近,直到晶格距离(0.3~0.5 nm),形成金属键,从而获得不可拆卸接头的一类焊接方法。

根据压力和温度的不同,压焊可分为冷压焊、扩散焊和热压焊等。

1. 扩散焊的热源与接头形成

扩散焊(diffusion welding)通常要将焊件整体加热到低于焊件材料固相线的某一温度,并长时间加压保温,通过接触面附近的塑性变形、再结晶和扩散形成焊接接头。

1) 热源 扩散焊通常采用感应加热热源(heat source),其热源功率为

$$P = \frac{1.06WcT}{t_1} \quad (\text{kW})$$

式中 W —加热部分质量(kg);

c —比热容($\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{kg} \cdot \text{K})$);

T —温度($^{\circ}\text{C}$);

t_1 —加热时间(h)。

加热达到温度 T 后,保温、保压,其工艺曲线如图 3-23 所示。图中, t_1 为加热

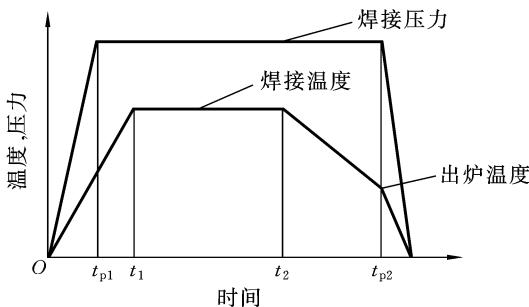


图 3-23 扩散焊的工艺曲线

时间, $t_2 - t_1$ 为扩散时间, $t_{p2} - t_2$ 为保压冷却时间。

2) 接头形成

(1) 固态扩散焊(solid diffusion bonding)的过程。

① 变形-接触阶段。在压力和温度的共同作用下,使工件表面的凸起部分产生塑性变形,使接触面积从 1% 增大到 75%,为原子间的扩散做好准备(见图 3-24a、b)。

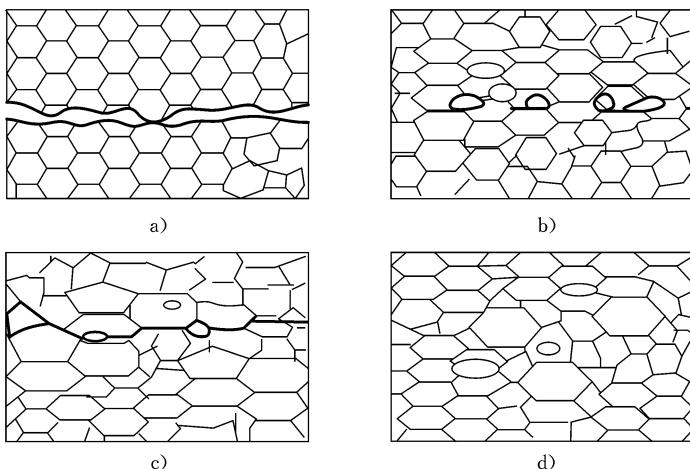


图 3-24 固态扩散焊过程示意图

a) 室温状态 b) 第一阶段 c) 第二阶段 d) 第三阶段

② 扩散-界面推移阶段。因界面产生较大的晶格畸变、位错和空位,使界面处的原子处于高度激活状态,而很快扩散形成金属键,并经过回复和再结晶产生晶界的推移,形成固态冶金结合(见图 3-24c)。

③ 界面和孔洞消失阶段。经过长时间保温扩散,消除孔洞,界面晶粒长大,原始界面消失(见图 3-24d)。

(2) 瞬时液相扩散焊(transient liquid phase diffusion bonding)的过程。

① 液相生成。在一定温度下,利用中间夹层材料与两焊件接触处形成低熔点共晶液相,以填充接头间隙(见图 3-25a、b)。

② 等温凝固。液相中使熔点降低的元素大量扩散至焊件母材中,而焊件母材中某些元素向液相中溶解,使液相的熔点逐渐升高而凝固形成接头(见图 3-25c)。

③ 均匀化。保温扩散使接头成分均匀化(见图 3-25d)。

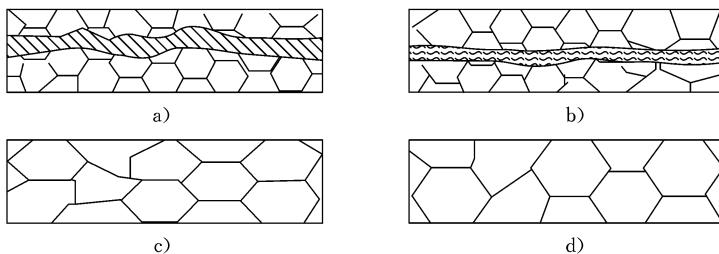


图 3-25 瞬时液相扩散焊过程示意图

a) 夹层材料装夹 b) 液相的生成 c) 等温凝固 d) 均匀化

2. 热压焊的热源与接头形成

热压焊通常采用的热源有电阻热、摩擦热、超声热、爆炸热等,各种热源的大小、特性和应用如表 3-1 所示。

表 3-1 热压焊热源的大小、特性和应用

热源名称	热源大小表达式	主要影响因素	特 性	应 用
电阻热	式中 $Q=0.24I^2Rt$ I——电流; R——焊接区电阻; t——通电加热时间	外因是电流和通电时间;内因是电阻包括焊件电阻和接触电阻	功率大,效率高,控制方便,热源在两焊件结合面内,隔绝了空气,无须保护焊缝	主要用于点焊、缝焊、凸焊、对焊等,不适合电阻太小的材料
摩擦热	式中 $Q=\frac{2}{3}\pi\rho n\int f dt$ f——摩擦因数; ρ——摩擦力; n——摩擦速度; t——摩擦时间	外因是摩擦力、摩擦速度和摩擦时间,内因是焊接材料的摩擦因数	节能、效率高,有清理待焊部位的作用,不适合摩擦因数太小的材料	主要用于惯性摩擦焊、搅拌摩擦缝焊
超声热	式中 $E=63H^{\frac{3}{2}}t^{\frac{3}{2}}$ H——材料显微硬度; t——材料厚度	外因是超声频率、振幅和时间,内因是焊件的硬度和厚度	节能、效率高,热源在两焊件结合面内,隔绝了空气,无须保护焊缝	主要用于点焊、缝焊非导电材料和硬度较高及脆性较大的材料的焊接
爆炸热	式中 $Q=\eta\rho GV$ η——炸药热效率; ρ——焊件材料密度; G——单位体积装载量; V——焊接金属的体积	外因是炸药装载量,内因是焊件材料密度和焊接部位金属的体积	节能、效率高,热源在两焊件结合面内,冲击变形塑性流动量大,隔绝了空气,无须保护焊缝	主要用于异种材料的大面积焊接,复合板和管的制造

尽管热压焊所用热源不同,但接头的形成过程基本上都是一样的,即在固态下通过塑性变形和再结晶获得统一晶粒,如图 3-26 所示。

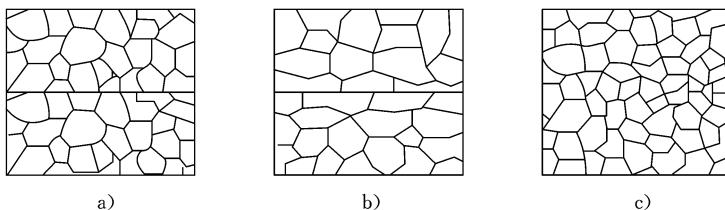


图 3-26 热压焊的接头形成过程

a) 初始接触阶段 b) 塑性变形阶段 c) 再结晶形成统一晶粒

3. 扩散焊和热压焊接头的组织与性能

扩散焊接头的组织为与母材一致的等轴晶粒,无热影响区,因此,接头的性能与母材完全一样。

热压焊接头的组织为再结晶组织,接触面附近晶粒细小;热影响区通常为正火区,晶粒细小。因此,这种接头的性能优于母材。

3.2.3 焊接缺陷

焊接接头的不完整称为焊接缺陷(weld defects),主要有焊接裂纹、未焊透、夹渣、气孔和焊缝外观缺陷等,如图 3-27 所示。这些缺陷将减小焊缝的截面面积,降低焊缝的承载能力,产生应力集中,引起裂纹,并会降低疲劳强度,易引起焊件破裂而导致脆断。其中危害最大的是焊接裂纹和气孔。

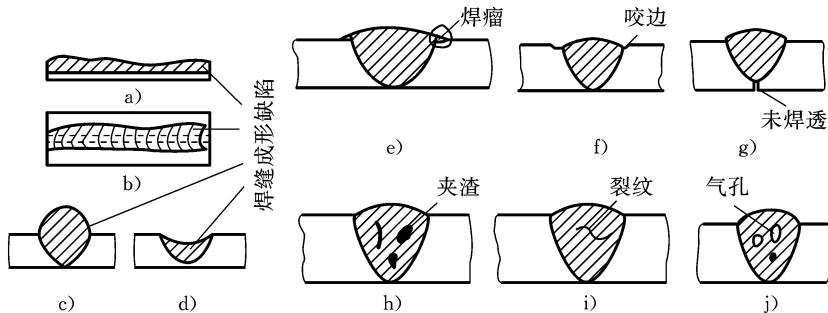


图 3-27 常见焊接缺陷

a) 焊缝堆高不均 b) 焊缝宽度不均 c) 堆高过高 d) 焊缝凹陷 e) 焊瘤
f) 咬边 g) 未焊透 h) 夹渣 i) 裂纹 j) 气孔

1. 焊接裂纹

1) 热裂纹 热裂纹(hot crack)如发生在焊缝区,在焊缝结晶过程中形成,称为结晶裂纹;热裂纹如发生在热影响区,在加热到过热温度时因晶间低熔点杂质发生熔化而形成,称为液化裂纹。热裂纹的微观特征是沿晶界开裂,所以又称为晶间裂纹。

因热裂纹在高温下形成,所以有氧化色彩。

(1) 产生热裂纹的原因。

① 晶间存在液态薄膜。在焊接过程中,焊缝结晶的柱状晶形态,会导致低熔点杂质偏析,从而在晶间形成一层液态薄膜。在热影响区的过热区,如晶界存在较多的低熔点杂质,则形成晶间液态薄膜,从而产生热裂纹。

② 接头中存在拉应力。液态薄膜还未建立起强度,在拉应力的作用下很易开裂,从而产生热裂纹。

(2) 防止热裂纹的措施。热裂纹是由冶金因素和力的因素引起的,因此,防止热裂纹也从这两方面考虑,主要采取下列措施:

① 限制钢材和焊条、焊剂的低熔点杂质,如硫和磷含量。Fe 和 FeS 易形成低熔点共晶体,其熔点为 988 ℃,很容易产生热裂纹。

② 适当提高焊缝成形系数,防止中心偏析的产生。一般认为焊缝成形系数在 1.3~2 之间较合适。

③ 调整焊缝化学成分,避免低熔点共晶,缩小结晶温度范围,改善焊缝组织,细化焊缝晶粒,提高塑性,减少偏析。一般认为,碳的质量分数控制在 0.10% 以下,热裂纹敏感性会大大降低。

④ 采取减小焊接应力的工艺措施,如采用小线能量、焊前预热、合理焊缝布置等。

⑤ 施焊时填满弧坑,以减小应力。

2) 冷裂纹

(1) 冷裂纹的形态。焊缝区和热影响区都可能产生冷裂纹(cold crack),常见冷裂纹的形态有三种(见图 3-28):

① 焊道下裂纹。在焊道下的热影响区内形成的焊接冷裂纹称为焊道下裂纹,它常平行于熔合线扩展。

② 焊趾裂纹。沿应力集中的焊趾处形成的焊接冷裂纹称为焊趾裂纹,它在热影响区扩展。

③ 焊根裂纹。沿应力集中的焊缝根部所形成的焊接冷裂纹称为焊根裂纹,它向焊缝或热影响区扩展。

冷裂纹的特征是无分支,通常为穿晶型裂纹。表面冷裂纹无氧化色彩。最主要、最常见的冷裂纹是延迟裂纹,即在焊后延迟一段时间才发生的裂纹。

(2) 产生延迟裂纹的主要原因。

① 焊接接头(焊缝和热影响区及熔合区)的淬火倾向严重,产生淬火组织,导致接头性能脆化。

② 焊接接头氢含量较高,并聚集在焊接缺陷处形成大量氢分子,造成非常大的

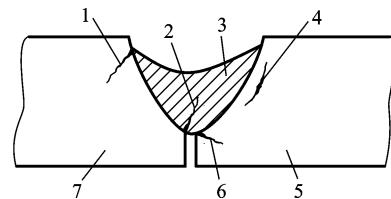


图 3-28 焊接冷裂纹的形态

1—焊趾裂纹 2、6—焊根裂纹 3—焊道;

4—焊道下裂纹 5、7—焊件

局部压力,使接头脆化。

③ 存在较大的拉应力。因氢的扩散需要时间,所以冷裂纹在焊后需延迟一段时间才出现。由于它是氢所诱发的,故也称为氢致裂纹。

(3) 防止延迟裂纹的措施。

① 选用碱性焊条或焊剂,减少焊缝金属中氢的含量,提高焊缝金属的塑性。

② 焊前清理一定要严格,焊条、焊剂要烘干,焊缝坡口及附近母材要去油、去水、除锈,减少氢的来源。

③ 工件焊前预热,焊后缓冷,可降低焊后冷却速度,避免产生淬硬组织,并可减小焊接残余应力。

④ 采取减小焊接应力的工艺措施,如对称焊、小线能量的多层多道焊等。

⑤ 焊后立即进行去氢处理,加热到 250 °C,保温 2~6 h,使焊缝金属中的扩散氢逸出金属表面。

⑥ 焊后进行清除应力的退火处理。

2. 气孔

焊缝气孔(blowhole)的产生是由于在熔池液体金属冷却结晶时,原来高温下溶解在焊缝液体金属中大量的气体,随温度的下降产生溶解度的降低而析出。氢和氮在室温下几乎不溶于铁,但在 1500 °C 以上的高温下,氮、氢在铁中的溶解度增大约 40 倍。这样在焊缝快速冷却下,气体来不及逸出熔池表面,由此导致气孔的产生。

1) 焊缝气孔的种类

(1) 氢气孔。高温时,氢在液体中的溶解度很大,大量的氢溶入焊缝熔池中,而焊缝熔池在热源离开后快速冷却,氢的溶解度急速降低,析出氢气,产生氢气孔。

(2) 一氧化碳(CO)气孔。当熔池氧化严重时,熔池存在较多的 FeO,在熔池温度下降时,将发生如下反应:



此时,若熔池已开始结晶,则 CO 将来不及逸出,便产生 CO 气孔。熔池氧化越严重,碳含量越高,越易产生 CO 气孔。

(3) 氮气孔。熔池保护不好时,空气中的氮溶入熔池而产生。

2) 防止气孔的措施

(1) 焊条、焊剂要烘干,焊丝和焊缝坡口及其两侧的母材要清除锈、油和水。

(2) 焊接时采用短弧焊,采用碱性焊条。

(3) 用 CO₂ 气体保护焊焊接时,采用药芯焊丝。

(4) 采用低碳材料,也可减少和防止气孔的产生。

3.2.4 焊接检验

为了保证焊接接头品质,防止有缺陷焊件投入使用,对焊接过程进行严格的检验是十分必要的。

1. 焊接检验过程

1) 焊接检验 焊接品质检验是焊接结构生产过程的重要组成部分。焊前检验是防止缺陷产生的必要条件,主要指焊接原材料检验、设计图样与技术文件的论证检查和焊接工人的培训考核等。其中,焊前原材料检验特别重要,应对原材料进行化学分析、力学性能试验和必要的焊接性能试验。必须注意原材料的保管与发放,不允许借用材料或混料,否则就可能造成大的焊接缺陷或事故。因一块钢板错用而造成重大事故并不鲜见。

2) 焊接生产中的检验 焊接生产中的检验是指生产工序之间的检验。通常贯彻自检制,由每个工序的焊工在焊后自己认真进行检验(主要是外观检验),合格后打上焊工代号的钢印。这样可以及时发现问题,予以补救。

3) 成品检验 成品检验是焊接产品制成后的最后品质评定检验。例如,按设计要求的品质标准,经 X 射线检验、水压试验等有关检验合格以后,产品才能出厂,以保证以后的安全使用性能。至于哪种产品应该要求哪一级的焊接品质标准,或采取哪种焊接检验方法,应由产品设计部门和有关产品技术标准与规程来决定。

2. 外观检验

用肉眼或低倍数(小于 20 倍)放大镜检查焊缝区有无可见的缺陷,如表面气孔、咬边、未焊透、裂缝等,并检查焊缝外形及尺寸是否合乎要求。外观检验(appearance inspection)合格以后,才能进行下一步的其他方法检验。

3. 无损检验

1) 磁粉检验 磁粉检验(magnetic particle inspection)原理是:在工件上外加一磁场,当磁力线通过完好的焊件时,它是直线进行的,当有缺陷存在时,磁力线就会发生扰乱。在焊缝表面撒上铁粉时,磁力线扰乱部位的铁粉就吸附在裂缝等缺陷之上,其他部位的铁粉并不吸附。所以,可通过焊缝上铁粉吸附情况,判断焊缝中缺陷所在位置和大小。

2) 着色检验 着色检验(shade test)的过程是:将焊件表面加工打磨到 $Ra \approx 12.5 \mu\text{m}$,用清洗剂除去杂质污垢;涂上渗透剂,渗透剂呈红色,具有很强的渗透性能,可通过工件表面渗入缺陷内部;10 min 以后,将表面的渗透剂擦掉,再次清洗表面;涂上白色的显示剂,借助毛细管作用,缺陷处的红色渗透剂即显示出来;用 4~10 倍放大镜直接观察缺陷的位置与形状。

3) 超声波检验 超声波的频率在 20000 Hz 以上,具有透入金属材料深处的特性,而且由一种介质进入另一种介质截面时,在界面会发生反射波。因此,用超声波检验(ultrasonic inspection)焊件时,在荧光屏上可看到始波和底波。若焊接接头内部存在缺陷,将另外发生脉冲反射波形,介于始波与底波之间,根据脉冲反射波形的相对位置及形状,即可判断出缺陷的位置、种类和大小。

4) X 射线和 γ 射线检验 X 射线和 γ 射线都是电磁波,都能不同程度地透过金属。当经过不同物质时,会引起不同程度的衰减,从而使在金属另一面的照相底片得

到不同程度的感光。焊缝中有未焊透、裂缝、气孔与夹渣等缺陷时,通过缺陷处射线的衰减程度会减小。因此,相应部位的底片感光较强,底片冲出后,就在缺陷部位上显示出明显可见的黑色条纹和斑点。

国家标准 GB/T 3323—2005 根据焊接接头中裂纹、未熔合、未焊透等缺陷的性质和数量,将焊接品质分为四级。各级焊缝不允许哪种缺陷和允许哪种缺陷达到什么程度,在标准中都有详细的规定,可由检验人员借助计算机进行评定。

3.3 焊接工艺方法

3.3.1 熔焊工艺方法

1. 手工电弧焊

手工电弧焊(manual arc welding)是手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法,简称手弧焊。手弧焊所用的设备简单,操作方便、灵活,应用极广。

1) 手弧焊的焊接过程 焊接前,将焊钳和焊件分别接到焊机输出端的两极,并用焊钳夹持焊条。焊接时,利用焊条与焊件间产生的高温电弧(见图 3-29)作热源,使焊件接头处的金属和焊条端部迅速熔化,形成金属熔池。当焊条向前移动时,随着新的熔池不断产生,原先的熔池不断冷却、凝固,形成焊缝,从而使两分离的焊件成为一体。焊接过程如图 3-30 所示。

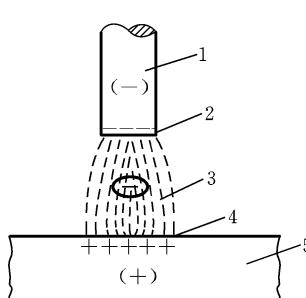


图 3-29 焊接电弧

1—焊条 2—阴极区 3—弧柱
4—阳极区 5—焊件

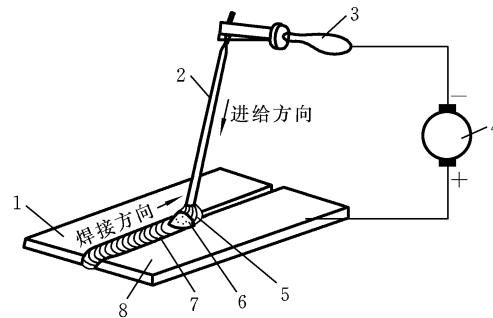


图 3-30 手弧焊焊接过程

1、8—焊件 2—焊条 3—焊钳
4—弧焊机 5—电弧 6—熔池 7—焊缝

2) 手弧焊设备 手弧焊主要设备有交流弧焊机和直流弧焊机两类,其型号编制方法及含义可参阅国家标准《电焊机型号编制方法》(GB/T 10249—2010)。

(1) 交流弧焊机。交流弧焊机(AC arc welding machine)又称为弧焊变压器,具有结构简单、噪声小、成本低等优点,但电弧稳定性较差。它可将工业电源的 220 V 或 380 V 电压降到 60~90 V(焊机的空载电压),以满足引弧的需要。焊接时,随着

焊接电流的增加,电压自动下降至电弧正常工作时所需的电压,一般是20~40V。而在短路时,又能使短路电流不致过大而烧毁电路或变压器本身。

(2) 直流弧焊机。直流弧焊机(DC arc welding machine)分为旋转式直流弧焊机和整流式直流弧焊机两类。旋转式直流弧焊机结构复杂,噪声较大,价格较高,能耗较大,目前已很少使用。

整流式直流弧焊机(简称弧焊整流器)通过整流器把交流电转变为直流电,既具有比旋转式直流弧焊机结构简单、价格低、效率高、噪声小、维修方便等优点,又弥补了交流弧焊机电弧不稳定的不足。图3-31为ZXG-300型硅整流式直流弧焊机。

直流弧焊机输出端有正、负极之分,焊接时电弧两极极性不变。焊件接电源正极、焊条接电源负极的接线法称为正接,也称为正极性(见图3-32a);反之称为反接,也称为反极性(见图3-32b)。

焊接厚板时一般采用直流正接,焊接薄板时一般采用直流反接,但使用碱性焊条时均采用直流反接。

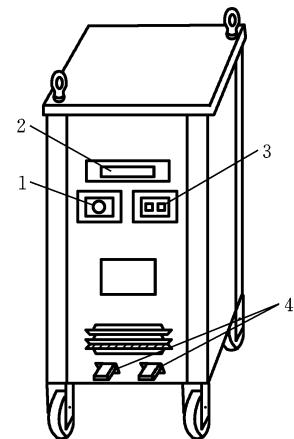


图3-31 直流弧焊机

1—电流调节仪表 2—电流表
3—电源开关 4—输出接头

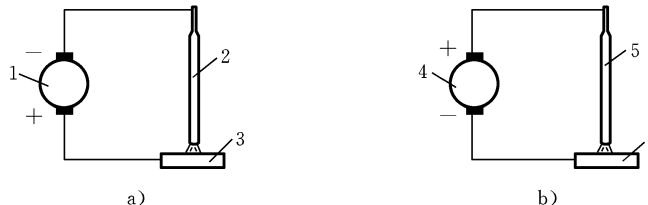


图3-32 直流焊机的正反接法

a) 正接 b) 反接

1、4—发电机 2、5—焊条 3、6—焊件

3) 焊条 焊条(covered electrode)是涂有药皮的供手弧焊用的熔化电极。

(1) 焊条的组成和各部分作用。焊条由焊芯和药皮两部分组成,如图3-33所示。焊芯(core wire)是焊条内的金属丝,在焊接过程中用作电极,并起产生电弧和熔化后填充焊缝的作用。为保证焊缝金属具有良好的塑性、较高的韧度,减小产生裂纹的倾向,焊芯必须由经过专门冶炼的,低碳、低硅、低磷的金属丝制成。

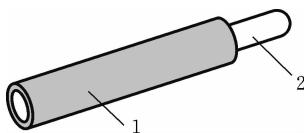


图3-33 焊条的结构

1—药皮 2—焊芯

焊条的直径是表示焊条规格的一个主要尺寸,由焊芯的直径来表示,常用焊条的直径为2.0~6.0mm,长度为300~400mm。

药皮(coating)是压涂在焊芯表面上的涂料层,是由矿石粉、有机物粉、铁合金粉和黏结剂等原料按一定比例配制而成的。药皮的主要作用是引弧、稳弧、保护

焊缝不受空气中有害气体侵害以及去除杂质等。

(2) 焊条的种类与型号。焊条按用途不同分为若干类,如碳钢焊条、低合金钢焊条、不锈钢焊条等。

碳钢焊条型号是以字母“E”加四位数字组成:“E”表示焊条;前面两位数字表示熔敷金属的最低抗拉强度值(单位:10 MPa);第三位数字表示焊接位置,“0”及“1”表示焊条适用于全位置焊接,“2”表示焊条适用于平焊(包括平角焊);第三位和第四位数字组合,表示焊接电流种类和药皮类型,如“03”表示钛钙型药皮,交直流两用,“05”表示低氢型药皮,只能用直流电源(反接法)焊接。例如,型号 E4315(牌号 J427)表示焊条的熔敷金属的最低抗拉强度为 430 MPa,全位置焊接,低氢钠型药皮,直流反接使用。

焊条按药皮熔渣化学性质分为酸性焊条和碱性焊条两大类。

酸性焊条(acid electrode)的熔渣中含有较多的酸性氧化物(如 SiO_2)。酸性焊条能用于交、直流焊机,焊接工艺性能较好,但焊缝的力学性能,特别是冲击韧度较低。酸性焊条适于一般的低碳钢和相应强度等级的低合金钢结构的焊接。

碱性焊条(basic electrode)的熔渣中含有较多碱性氧化物(如 CaO 和 CaF_2)。碱性焊条一般用于直流电焊机,只有在药皮中加入较多稳弧剂后,才能交流、直流电源两用。碱性焊条脱硫、脱磷、除氢能力强,焊缝金属具有良好的抗裂性和力学性能,特别是冲击韧度很高,但工艺性能差。碱性焊条主要适用于低合金钢、合金钢及承受动载荷的低碳钢重要结构的焊接。

4) 手弧焊工艺

(1) 接头形式和坡口形式。根据焊件厚度和工作条件的不同,需要采用不同的焊接接头(welded joint)形式。常用的有对接接头(butt joint)、角接接头(fillet joint)、T形接头(T-joint)和搭接接头(jap joint)几种(见图 3-34)。对接接头受力比较均匀,是用得最多的一种接头,重要的受力焊缝应尽量选用。

坡口(groove)的作用是保证电弧深入焊缝根部,使根部能焊透,以便清除熔渣,获得较好的焊缝形状和焊件品质。

(2) 焊接空间位置。按焊缝在空间的位置不同,可分为平焊(flat position welding)、立焊(vertical position welding)、横焊(horizontal position welding)和仰焊(overhead position welding)等,如图 3-35 所示。平焊操作方便,劳动强度小,金属液不会流散,易于保证焊件品质,操作空间位置是最理想的,应尽可能采用。

(3) 工艺参数及其选择。为保证焊件品质而选定的诸物理量(例如焊条直径、焊接电流、焊接速度和弧长等)的总称为焊接工艺参数(welding process parameters)。

焊条直径的选择主要取决于焊件的厚度。焊件较厚应选较粗的焊条,焊件较薄则相反。焊条直径的选择可参见表 3-2。立焊和仰焊时选择的焊条直径应比平焊时更小一些。

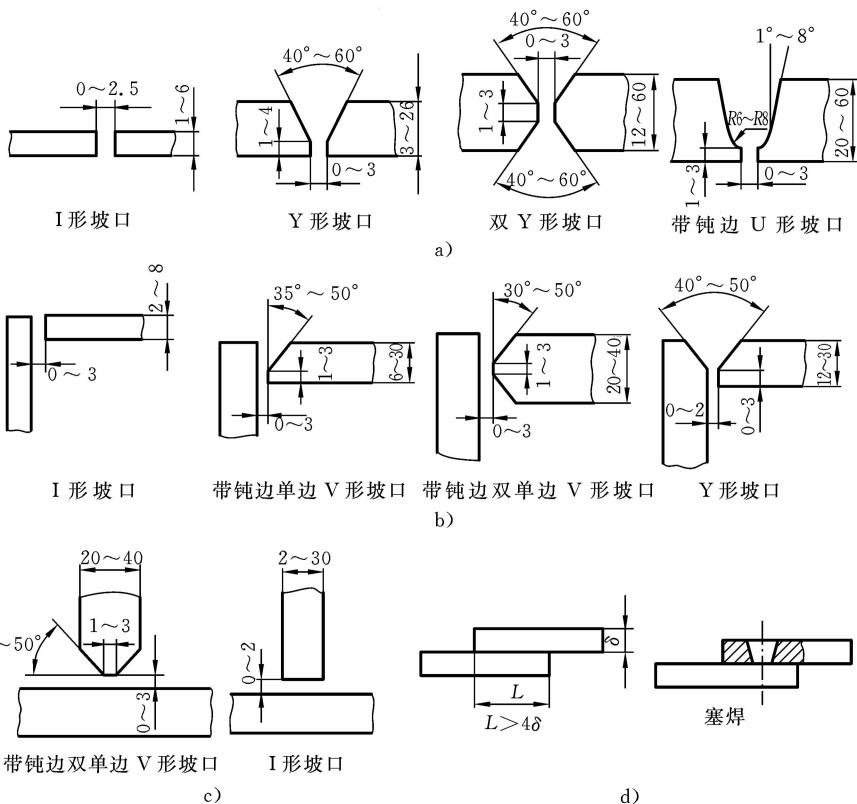


图 3-34 焊接接头形式与坡口形式

a) 对接接头 b) 角接接头 c) T形接头 d) 搭接接头

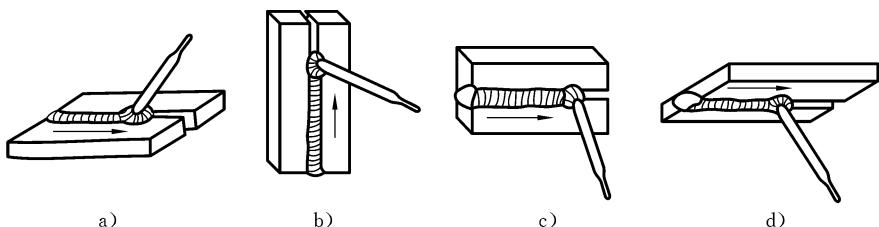


图 3-35 焊缝的空间位置

a) 平焊 b) 立焊 c) 横焊 d) 仰焊

表 3-2 焊条直径选择

(mm)

焊件厚度	2	3	4~7	8~12	>12
焊条直径	1.6~2.0	2.5~3.2	3.2~4.0	4.0~5.0	4.0~5.8

焊接电流 (welding current) 应根据焊条直径选取。平焊低碳钢时, 焊接电流 I (A) 和焊条直径 d (mm) 的关系为

$$I = (30 \sim 60)d$$

用该式求得的焊接电流只是一个初步值,还要根据焊件厚度、接头形式、焊接位置、焊条种类等因素,通过试焊进行调整。

焊接速度(welding speed)是指单位时间内完成的焊缝长度,它对焊缝品质影响很大。焊速过快,易导致焊缝的熔深浅,焊缝宽度小,甚至可能产生夹渣和焊不透的缺陷;焊速过慢,焊缝熔深和焊缝宽度增加,特别是薄件易烧穿。手弧焊时,焊接速度由焊工凭经验掌握,一般在保证焊透的情况下,应尽可能增大焊接速度。

弧长(length of arc)是指焊接电弧的长度。弧长过长,燃烧不稳定,熔深减小,空气易侵入而产生缺陷。因此,操作时尽量采用短弧,一般要求弧长不超过所选择焊条

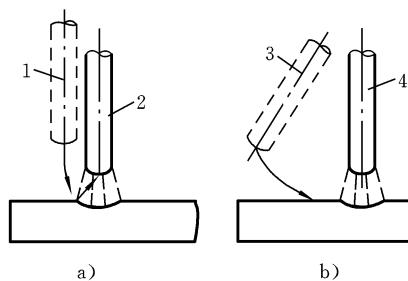


图 3-36 引弧方法

a) 敲击法 b) 划擦法
1、3—引弧前 2、4—引弧后

直径,多为 2~4 mm。

(4) 焊接操作。

① 接头清理(joint cleaning)。焊接前接头处除尽铁锈、油污,以便于引弧、稳弧和保证焊缝品质。

② 引弧(striking)。常用的引弧方法有划擦法和敲击法,如图 3-36 所示。焊接时将焊条端部与焊件表面划擦或轻敲后迅速将焊条提起 2~4 mm,电弧即被引燃。此类引弧方法的原理为短路热电子发射引燃。

③ 运条(moving electrode)。引弧后,首先必须掌握好焊条与焊件之间的角度(见图 3-37),并同时完成的三个基本动作(见图 3-38):焊条沿其轴线向熔池送进,焊条沿焊缝纵向移动和焊条沿焊缝横向摆动(为了获得一定宽度的焊缝)。

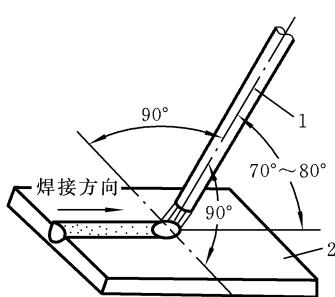


图 3-37 平焊的焊条角度

1—焊条 2—焊件

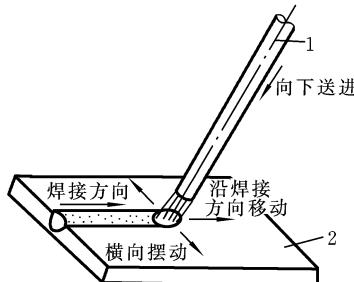


图 3-38 手弧焊的基本操作

1—焊条 2—焊件

④ 焊缝收尾。焊缝收尾时,要填满弧坑,为此焊条要停止前移,在收弧处画一个圆圈并慢慢将焊条提起,拉断电弧。

1. 埋弧焊

1) 埋弧焊的原理及特点

埋弧焊(submerged arc welding)是埋弧自动焊的简

称,用焊剂进行渣保护,焊丝为一电极,在焊剂层下引燃电弧燃烧。因电弧在焊剂包围下燃烧,所以热效率高;焊丝为连续的盘状焊丝,可连续馈电;焊接无飞溅,可实现大电流高速焊接,生产效率高(见图 3-39);金属利用率高,焊件品质好,劳动条件好。埋弧焊适用于平直长焊缝和环焊缝的焊接。

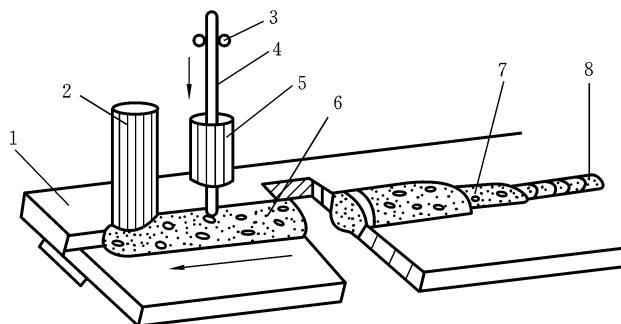


图 3-39 埋弧焊的工艺过程

1—焊件 2—焊剂斗 3—送丝滚轮 4—焊丝 5—导电嘴 6—焊剂 7—焊渣 8—焊缝

2) 埋弧焊的工艺

(1) 焊前准备。板厚小于 14 mm 时,可不开坡口;板厚为 14~22 mm 时,应开 Y 形坡口;板厚为 22~50 mm 时,可开双 Y 形或 U 形坡口。Y 形和双 Y 形坡口的角度为 50°~60°(见图 3-40)。焊缝间隙应均匀。焊直缝时,应安装引弧板和引出板(见图 3-41),以防止起弧和熄弧时产生的气孔、夹杂、缩孔、缩松等缺陷进入焊缝之中。

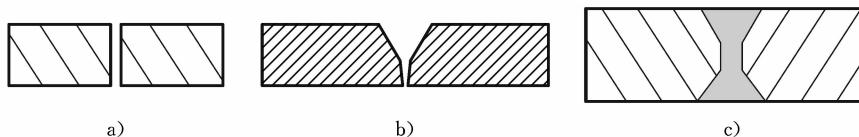


图 3-40 坡口形式

a) I 形坡口 b) Y 形坡口 c) 双 Y 形坡口

(2) 平板对接焊。一般采用双面焊,可不留间隙直接进行双面焊接,也可采用打底焊或加焊剂垫(或垫板)的方法。为提高生产效率,也可采用水冷铜板进行单面焊双面成形(见图 3-42)。

(3) 环焊缝。焊接环焊缝时,焊丝起弧点应与环的中心线偏离一段距离 e (见图 3-43),以防止熔池金属液流淌。一般 $e=20\sim40$ mm, 直径小于 250 mm 的环缝一般不采用埋弧焊。

3) 埋弧焊的应用 埋弧焊主要用于压力容器的环缝焊和直缝焊,锅炉冷却壁的长直焊缝焊接,船舶和潜艇壳体的焊接,起重机械(行车)和冶金机械(高炉炉身)的焊接。

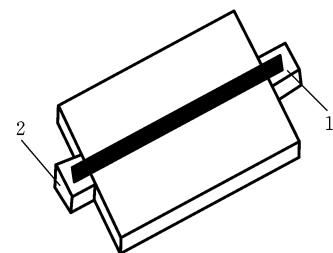


图 3-41 引弧板和熄弧板

1—引出板 2—引弧板

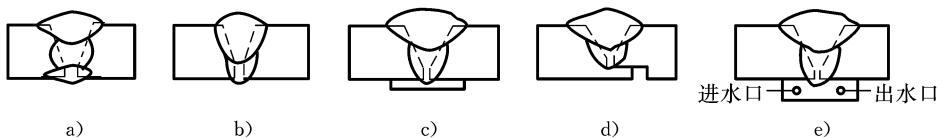


图 3-42 平板对接焊工艺

a) 双面焊 b) 打底焊 c) 采用垫板 d) 采用锁底坡口 e) 水冷钢板

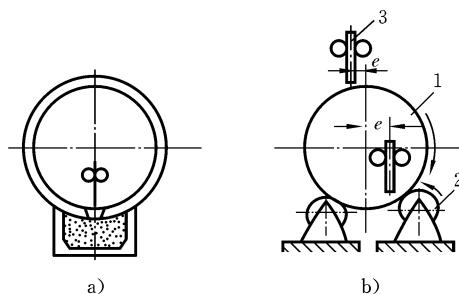


图 3-43 圆形件埋弧焊

a) 纵缝埋弧焊 b) 环缝埋弧焊

1—焊件 2—滚轮 3—焊丝

2. 其他熔焊工艺方法

其他熔焊工艺方法包括氩气保护电弧焊(氩弧焊)、二氧化碳气体保护电弧焊、电渣焊、等离子弧焊、电子束焊和激光焊等。它们的工艺过程、特点及应用如表 3-3 所示。

表 3-3 其他熔焊方法的工艺过程、特点及应用

焊接方法名称	工艺过程	特点	应用
氩弧焊	钨极脉冲氩弧焊 gas tungsten arc welding-pulsed arc	阴极为钨钍合金和钨铈合金,形成不熔化极氩弧焊	采用直流正接,阴极产热少,钨合金熔点高,钨极寿命长 用于有色金属、合金钢和不锈钢等的焊接。焊接铝时,可采用交流氩弧焊,利用负半周消除氧化皮。通常用来焊薄板
	熔化极脉冲氩弧焊 gas metal arc welding-pulsed arc	以焊丝为一电极、焊丝熔化进入熔池,形成熔化极氩弧焊	所用电流比较大,生产效率高,通常采用直流反接 用于有色金属、合金钢和不锈钢等的焊接。焊接铝时,可采用交流氩弧焊,利用负半周消除氧化皮。通常用来焊接较厚的工件
	脉冲氩弧焊 pulsed argon arc welding	在钨极氩弧焊中,将电流波形调制成脉冲形式,用高脉冲来焊接,低脉冲来维弧和凝固	可控制焊缝的尺寸和品质 用于有色金属、合金钢和不锈钢等的焊接。焊接铝时,可采用交流氩弧焊,利用负半周消除氧化皮。通常用来焊接非常薄的薄板

续表

焊接方法名称	工艺过程	特点	应用
二氧化碳气体保护焊 CO ₂ shielded arc welding	以CO ₂ 为保护气体,用焊丝为电极引燃电弧,实现半自动焊或自动焊	CO ₂ 气体密度大,高温体积膨胀大,保护效果好。易产生合金元素的氧化、熔池金属飞溅和CO气孔。成本低,生产效率高,焊缝品质较好	主要用于低碳钢和低合金结构钢薄板焊接
电渣焊 electroslag welding	利用电流通过熔渣时产生的电阻热加热和熔化焊丝和母材来进行焊接的一种熔焊方法	线能量大,加热和冷却速度低,高温停留时间长。焊缝晶粒为粗大的树枝状组织,热影响区也严重过热。为了改善焊接接头的力学性能,焊后要进行正火处理。生产效率高	用来焊接厚大工件的直缝和环缝,在锅炉制造、重型机械和石油化工等行业应用广泛
等离子弧焊 plasma arc welding	利用机械压缩效应、热压缩效应和电磁收缩效应将电弧压缩为细小的等离子体,等离子弧温度高,能量密度达105~106W/cm ² ,因而可一次性熔化较厚的材料	有穿孔型、熔入型和微束等离子弧焊。穿孔型等离子弧焊可实现单面焊双面成形。熔入型等离子弧焊焊接薄板,加填或不加填充焊丝,焊速较快	用来焊接国防工业及尖端技术领域所用的合金钢,铜、钨、钼、钴、钛等合金件,如钛合金导弹壳体、波纹管及膜盒、微型继电器、飞机上一些薄壁容器等,还可用于切割、电容器的外壳封焊
等离子弧切割 plasma arc cutting	采用氮和压缩空气作离子气,将切口金属熔化并吹除	空气等离子弧的热焓值高,加上氧和金属相互作用过程中放热,切割速度提高,切口品质也很好	用来切割厚度为0.6~80mm的低碳钢
电子束焊 electron beam welding	利用高速运动的电子撞击工件,将动能转化为热能。当阴极被灯丝加热到2600K时,发出大量电子,电子在阴极与阳极间的高电压作用下,经电磁透镜聚焦成电子流束,以160000km/s的速度射向焊件表面,将动能转变为热能	能量密度大,穿透能力强,加热量小,焊接变形小,成本高。当电子束能量密度较小时,加热区集中在工件表面,这时与电弧焊相似;而电子束能量高时,将产生穿孔效应,熔深可达200mm。保护效果好,焊缝品质好,适用范围广	主要用于微电子器件焊装、导弹外壳的焊接、核电站锅炉汽包和精度要求高的齿轮等的焊接。一般不加填充金属,如要求有堆高可在接缝预加垫片。对接缝间隙为0.1倍的板厚,一般不能超过0.2mm,可焊接厚大截面工件和难熔金属

续表

焊接方法名称	工艺过程	特点	应用
激光焊 laser welding	光学系统将激光聚焦成微小光斑,使其能量密度达 1013 W/cm^2 , 从而使材料熔焊	分为脉冲激光焊和连续激光焊。高能高速,无焊接变形,灵活性大,生产效率高,材料不易氧化,焊缝性能好,设备复杂。用于切割和打孔等加工时工艺过程简单,节省材料,加工性能好	主要用于冲压薄钢板、航空航天零部件,以及微型线路板、集成电路、微电池上的引线等的焊接,也能焊接金-硅、锗-金、镍-钛、铜-铝等异种复合金属。脉冲激光焊主要用来焊接微电子工业中的薄膜、丝、集成电路内引线和异材,连续激光焊可焊接较厚的、接缝间隙很小的板材

3.3.2 压焊工艺方法

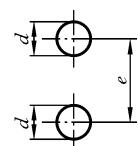
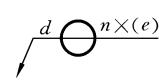
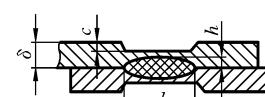
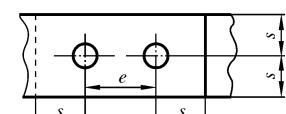
1. 电阻焊

1) 电阻点焊

(1) 点焊过程。电阻点焊(resistance spot welding, RSW)是用圆柱电极压紧工件,通电、保压获得焊点的电阻焊方法(见图 3-44)。

(2) 点焊焊缝设计。点焊焊缝设计包括焊点直径 d 、焊点数 n 等,如表 3-4 所示。

表 3-4 点焊焊缝设计

焊缝名称	焊缝形式		基本符号	标注方法
点焊	 			
序号	经验公式	简图	备注	
1	$d = 2\delta + 3$		d —熔核直径(mm) A —焊透率(%) c —压痕深度(mm)	
2	$A = 30\% \sim 70\%$		c —压痕深度(mm) e —点距(mm) s —边距(mm)	
3	$c \leq 0.2\delta$			
4	$e > 8\delta$			
5	$s > 6\delta$		δ —焊件厚度(mm)	

(3) 点焊过程中的分流。已焊点形成导电通道,在焊下一点时,焊接电流一部分将从已焊点流过,使待焊点电流减小,这种现象称为分流(见图 3-45)。

分流减小了焊接电流,使焊点品质下降。如焊接电流为 I ,分流电流为 I_1 ,流过待焊点的电流为 I_2 ,则

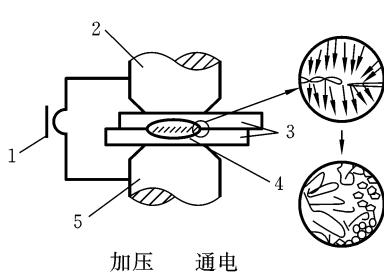


图 3-44 点焊过程

1—焊接变压器 2、5—电极 3—焊件 4—熔核

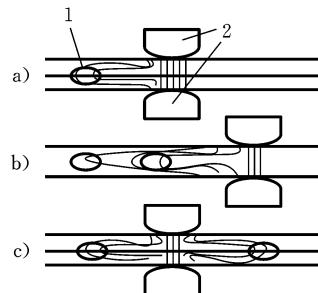


图 3-45 点焊时分流

a) 分流量较小 b) 分流量居中 c) 分流量较大

1—先前焊点 2—电极

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1 = \frac{K\delta}{e}$$

式中 K —比例系数； δ —板厚； e —点距。

从上式可见：工件愈厚，则导电性愈好；点距愈小，则分流愈严重。因此，对一定的材料和板厚，为防止分流应满足最小点距的要求。常用板材点焊时的最小点距如表 3-5 所示。

表 3-5 常用板材点焊时的最小点距

材 料	板厚 δ /mm	最小点距 e /mm
低碳钢或低合金钢	0.5	10
	1.0	12
	2.0	18
	4.0	32
铝合金	0.5	11
	1.0	14
	2.0	25

(4) 点焊过程中的熔核偏移。焊接不同厚度或不同材料时，薄板或导热性好的材料吸热少而散热快，导致熔核偏向厚板或导热性差的材料的现象（见图 3-46）称为熔核偏移。熔核偏移易使焊点减小，导致接头性能下降。可通过采用特殊电极和加工艺垫片等措施，防止熔核偏移。图 3-47a 所示为在薄板处用加黄铜套的电极减少薄板散热。图 3-47b 所示为在薄件上加一工艺垫片来加厚薄件。

(5) 点焊工艺参数。点焊的工艺参数为电流、压力和时间。大电流、短时间称为强规范，主要用于薄板和导热性好的金属的焊接，也可用于不同厚度或不同材料及多层薄板的点焊。小电流、长时间称为弱规范，主要用于厚板和易淬火钢的点焊。

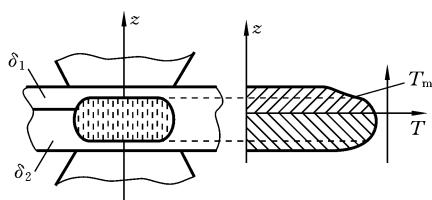


图 3-46 点焊的熔核偏移

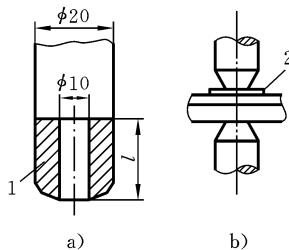


图 3-47 采用特殊电极和工艺垫片防止熔核偏移

a) 特殊电极 b) 工艺垫片

1—黄铜 2—垫片

电极压力分为平压力、阶梯形压力和马鞍形压力。其中以马鞍形压力最好,因为它有预压、焊接压力和顶锻压力,从而可改善通电状况,调整接触电阻的大小,防止缩松和缩孔的产生和细化晶粒。点焊主要用于汽车、飞机等薄板结构的大量生产。

2) 电阻缝焊 电阻缝焊(resistance seam welding)是连续的点焊过程,它用连续转动的盘状电极代替了柱状电极,焊后可获得相互重叠的连续焊缝(见图 3-48)。缝焊分流严重,通常采用强规范焊接,焊接电流比点焊大电流 1.5~2 倍。电阻缝焊主要用于低压容器,如汽车、摩托车的油箱、气体净化器等的焊接。

3) 对焊 对焊(butt welding)是利用电阻热将工件断面对接焊接的一种电阻焊方法。

(1) 电阻对焊。电阻对焊(upset welding)的工艺过程是:将工件夹紧并加压,然后通电使接触面温度达到塑性温度(950~1000 °C),在压力下发生塑性变形并再结晶,形成固态焊接接头(见图 3-49a)。电阻对焊要求对接处焊前严格清理,所焊截面面积较小,一般用于钢筋的对接焊。

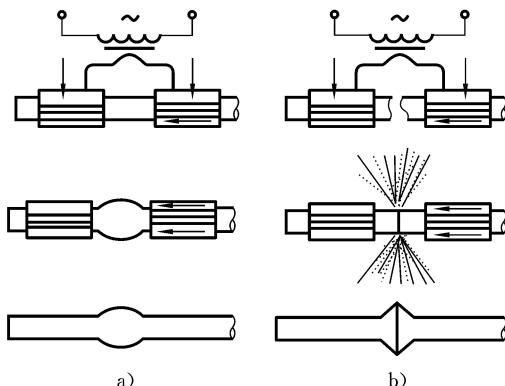
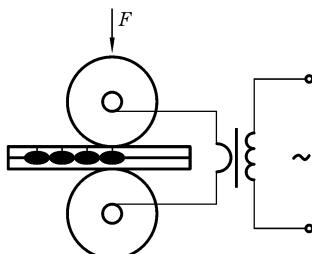


图 3-48 电阻缝焊

图 3-49 对焊

a) 电阻对焊 b) 闪光对焊

(2) 闪光对焊。闪光对焊(flash welding)的工艺过程是:先通电,后接触,因个别点接触,个别点通过的电流密度很高,可使其瞬间熔化或气化,形成液态过梁。过梁上存在的电磁收缩力和电磁引力及斥力使过梁爆破飞出,形成闪光(见图3-49b)。闪光一方面可排除氧化物和杂质,另一方面可使对口处的温度迅速升高。当温度分布达到合适的状态后,立刻施加顶力,将对口处所有的液态物质全部挤出,使纯净的高温金属相互接触,在压力下产生塑性变形和再结晶,形成固态连接接头。

闪光对焊主要用于钢轨、锚链、管子等的焊接,也可用于异种金属的焊接。因接头中无过热区和铸态组织,所以性能好。

2. 其他压焊的方法及工艺

其他压焊包括摩擦焊、超声波焊、扩散焊和爆炸焊,它们的工艺原理、方法、特点及应用列于表3-6中。

表3-6 其他压焊的工艺原理、方法、特点及应用

压焊名称	工艺原理	方法	特点	应用
摩擦焊 friction welding	利用焊件接触面相对旋转运动中相互摩擦所产生的热,使端部达到塑性状态,然后迅速顶锻,完成焊接	旋转 摩擦对 焊,摩 擦凸焊 和缝焊	焊接接头的品质好、稳定,其废品率是闪光对焊的1%左右;适合焊接异种钢和异种金属,如碳素结构钢-高速钢、铜-不锈钢、铝-铜、铝-钢等;焊件尺寸精度高,可以实现直接装配焊接;焊接生产效率高,是闪光对焊的4~5倍;三相负载均衡,节能,可改善三相供电电网的供电条件;容易实现机械化、自动化;操作技术简单,容易掌握;加工成本很低。一些摩擦因数特别小的和易碎的材料,很难进行摩擦焊;另外,摩擦焊的一次性投资较大,因此,适合于大量集中生产而不适合于单件生产	主要用来焊接汽车、拖拉机工业中的结构、产品及圆柄刀具,以及内燃机排气阀、双金属电磁阀零件等
超声波焊 ultrasonic welding	利用超声频的高频振动能,通过磁致伸缩元件,将超声频转化为高频振动,在上、下振动极的作用下,两焊件局部接触处产生强烈的摩擦、升温和变形,从而使氧化皮等污物得以破坏或分散,并使纯净金属的原子充分靠近,形成冶金结合	超声 波点焊 和缝焊	焊接过程中没有电流流经焊件,也没有火焰或弧光等热源的作用,是一种摩擦、扩散、塑性变形综合作用的焊接方法;接头中无铸态组织或脆性金属间化合物,也无金属的喷溅;接头的力学性能比电阻焊好,且稳定性高;可焊的材料范围广,特别适合于高熔点、高导热性和难熔金属的焊接及异种材料的焊接;可焊接厚薄悬殊及多层箔片等特殊结构;工件表面清理简单,电能消耗少,仅为电阻焊的5%	主要用来焊接微小的薄片,微电子器件中的IC、LSC等集成电路的引线,铝线圈、铜线圈与铝导线,聚氯乙烯、聚乙烯、尼龙和有机玻璃等

续表

压焊名称	工艺原理	方法	特点	应用
扩散焊 diffusion welding	将两工件压紧在一起并置于真空或保护气氛中加热,使两焊件表面微观凸凹不平处产生塑性变形达到紧密接触,经过较长时间的保温和原子扩散而形成冶金结合	固态扩散焊和瞬时液相扩散焊	焊接温度低(焊件熔点的40%~80%),可焊接用熔焊工艺难以焊接的材料,如高温合金及复合材料;可焊接结构复杂、精度要求高的焊件;可焊各种不同材料;焊缝可与母材成分和性能相同,无热影响区;要求焊件表面十分平整和光洁	主要用来焊接高温合金涡轮叶片、钛合金构件、钛-陶瓷静电加速管、异种材料,如不同钢材、铝合金、复合材料、金属与陶瓷等
爆炸焊 explosive welding	利用炸药爆炸时产生的高压和高温及高速冲击波作用在覆板上,使其与基板猛烈撞击,接触处产生射流清除表面的氧化物等杂质,并在高压下形成固态接头	平行法和角度法	撞击速度较低,结合面无熔化发生,形成平坦界面,接头性能较差;撞击速度较高,结合面为波浪形且有熔化发生,接头性能好;撞击速度过高,结合面产生连续的熔化层,接头性能也较差	主要用来焊接铝-钢-铜、钛-钢和锆-铌等复合板和复合管

3.4 金属的焊接性

3.4.1 焊接性的概念和估算方法

1. 焊接性的概念

金属材料的焊接性(weldability)是指被焊金属在采用一定的焊接方法、焊接材料、工艺参数及结构形式条件下,获得优质焊接接头的难易程度,即金属材料在一定的焊接工艺条件下,表现出“好焊”和“不好焊”的差别。

金属材料的焊接性不是一成不变的。同一种金属材料,采用不同的焊接方法、焊接材料与焊接工艺(包括预热和热处理等),其焊接性可能有很大差别。例如,化学活泼性极强的钛的焊接是比较困难的,人们曾一度认为钛的焊接性很不好,但随着氩弧焊应用比较成熟,钛及钛合金的焊接结构已在航空等工业部门广泛应用。由于新能源的发展,等离子弧焊、真空电子束焊、激光焊等新的焊接方法相继出现,钨、钼、钽、铌、锆等高熔点金属及其合金的焊接都已成为可能。

焊接性包括两个方面:一是工艺焊接性,主要是指焊接接头产生工艺缺陷的倾向,尤其是出现各种裂缝的可能性;二是使用焊接性,主要是指焊接接头在使用中的可靠性,包括焊接接头的力学性能及其他特殊性能(如耐热、耐蚀性等)。金属材料这

两方面的焊接性通过估算和试验方法来确定。

根据目前的焊接技术水平,工业上应用的绝大多数金属材料都是可焊的,只是焊接时的难易程度不同而已。当采用新材料(指以前未应用过的材料)制造焊接结构时,了解及评价新材料的焊接性,是产品设计、施工准备及正确制订焊接工艺的重要依据。

2. 估算钢材焊接性的方法

实际焊接结构所用的金属材料绝大多数是钢材,影响钢材焊接性的主要因素是化学成分。各种化学元素加入钢中,对焊缝组织性能、夹杂物的分布及对焊接热影响区的淬硬程度等影响不同,产生裂缝的倾向也不同。在各种元素中,碳的影响最明显,其他元素的影响可折合成碳的影响,因此可用碳当量 $CE(\%)$ 来估算被焊钢材的焊接性。硫、磷对钢材焊接性影响也很大,在各种合格钢材中,硫、磷都要受到严格限制。碳钢及低合金结构钢的碳当量经验公式为

$$CE = w(C) + \frac{w(Mn)}{6} + \frac{w(Cr) + w(Mo) + w(V)}{5} + \frac{w(Ni) + w(Cu)}{15}$$

(1) $CE < 0.4\%$ 时,钢材塑性良好,淬硬倾向不明显,焊接性良好,在一般的焊接工艺条件下,焊件不会出现裂缝,但对厚大件或在低温下焊接时应考虑预热焊件。

(2) $CE = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时,钢材塑性下降,淬硬倾向明显,焊接性较差,焊前焊件需要适当预热,焊后应注意缓冷,要采取一定的焊接工艺措施才能防止出现裂缝。

(3) $CE > 0.6\%$ 时,钢材塑性较差,淬硬倾向很强,焊接性不好,焊前必须将焊件预热到较高温度,焊接时要采取减小焊接应力和防止开裂的工艺措施,焊后要进行适当的热处理,才能保证焊接接头的品质。

利用碳当量法估算钢材焊接性是粗略的,因为钢材焊接性还受结构刚度、焊后应力条件、环境温度等的影响。例如,当钢板厚度增大时,结构刚度会增大,焊后残余应力也会增大,焊缝中心部位将出现三向拉应力,这时实际允许的碳当量将降低。因此,在实际工作中确定材料焊接性时,除初步估算外,还应根据情况进行抗裂试验及焊接接头使用焊接性试验,为制订合理工艺规程与规范提供依据。

3.4.2 碳钢的焊接

1. 低碳钢的焊接

碳含量不大于 0.25% (质量分数) 的低碳钢塑性好,一般没有淬硬倾向,对焊接的热过程不敏感,焊接性良好。焊这类钢时,不需要采取特殊的工艺措施,通常也不需要在焊后进行热处理(电渣焊除外)。

厚度大于 50 mm 的低碳钢结构需用大电流多层焊,焊后应进行消除应力退火。低温环境下焊接较大刚度的结构时,由于焊件各部分温差较大,变形又受到限制,所以焊接过程容易产生大的内应力,可能导致构件开裂,因此应焊前预热工件。

低碳钢可以用各种焊接方法进行焊接,用得最多的是手弧焊、埋弧焊、电渣焊、气

体保护焊和电阻焊。

用熔焊法焊接低碳钢结构时,焊接材料及工艺的选择主要应保证焊接接头与母材的强度。用手弧焊焊接一般低碳钢结构时,可根据情况选用E4313(J421)、E4303(J422)或E4320(J424)焊条。焊接承受动载结构、复杂结构或厚板结构时,应选用E4316(J426)、E4315(J427)或E5015(J507)焊条。采用埋弧焊时,一般选用H08A或H08MnA焊丝配焊剂431进行焊接。

低碳钢结构也不许用强力进行组装,装配点固焊应使用选定的焊条,点固后应检验焊道是否有裂缝与气孔。焊接时,应注意焊接规范,焊接次序,多层焊的熄弧处和引弧处应相互错开。

2. 中、高碳钢的焊接

碳含量在0.25%~0.6%(质量分数)之间的中碳钢,随碳含量的增加,淬硬倾向愈发明显,焊接性逐渐变差。在实际生产当中,主要是焊接各种中碳钢的铸件与锻件。中碳钢的焊接特点如下所述。

1) 热影响区易产生淬硬组织和冷裂缝 中碳钢属于易淬火钢,热影响区被加热到超过淬火温度的区段时,受焊件低温部分的迅速冷却作用,将出现马氏体等淬硬组织。图3-50所示为易淬火钢与低碳钢的热影响区组织比较(图中,L、 α 、 γ 、P、M分别表示液相、铁素体、奥氏体、珠光体、马氏体)。焊件刚度较大或工艺不恰当时,就会在淬火区产生冷裂缝,即焊接接头焊后冷却到相变温度以下或冷却到常温后产生裂缝。

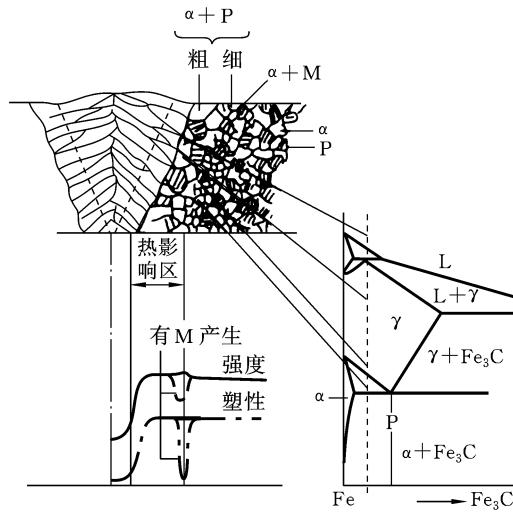


图3-50 热影响区的组织

2) 焊缝金属产生热裂缝倾向较大 焊接中碳钢时,因母材碳含量与硫、磷杂质含量远远高于焊条钢芯,母材熔化后进入熔池,使焊缝金属碳含量增加,塑性下降,加上硫、磷低熔点杂质的存在,焊缝及熔合区在相变前就可能因内应力的增大而产生裂缝。因此,焊接中碳钢时,对焊件必须进行预热,使其各部分的温差减小,以减小焊接

应力,同时减慢热影响区的冷却速度,避免产生淬硬组织。一般情况下,35钢和45钢的预热温度可选为150~250℃,结构刚度较大或钢材碳含量更高时,可将预热温度再提高些。

焊接时,应选用抗裂能力较强的低氢型焊条。要求焊缝与母材等强度时,可根据钢材强度选用E5016(J506)、E5015(J507),或E6016(J606)、E6015(J607)焊条,如不要求等强度,可选择E4315(J427)等强度低些的焊条,以增强焊缝的塑性。不论用哪种焊条,焊接中碳钢均应选用细焊条,并采用小电流、开坡口进行多层焊,以防止母材过多地熔入焊缝,同时减小焊接热影响区的宽度。

焊接中碳钢一般都采用手弧焊,但厚件可考虑应用电渣焊,因为电渣焊焊接过程可减轻焊接接头的淬硬倾向,能提高生产效率,但焊后要进行相应的热处理。

高碳钢的焊接特点与中碳钢基本相似,由于碳含量更高,焊接性变得更差,应采用更高的预热温度、更严格的工艺措施(包括焊接材料的选配)。实际上,高碳钢的焊接只限于修补工作。

3.4.3 有色金属的焊接

1. 铜及铜合金的焊接

铜及铜合金的焊接比低碳钢的焊接困难得多,其原因如下:

(1) 铜的导热性很强(紫铜的热导率约为低碳钢的8倍),焊接时热量极易散失。因此,对焊件要进行预热,焊接时要选用较大电流或火焰,否则容易造成焊不透缺陷。

(2) 铜在液态易氧化,生成的氧化亚铜(Cu_2O)与铜组成低熔点共晶体,分布在晶界形成薄弱环节;另外,铜的膨胀系数大,凝固时收缩率也大,容易产生较大的焊接应力。因此,焊接过程中极易引起开裂。

(3) 铜在液态时吸气性强,特别容易吸氢。凝固时气体从熔液中析出,来不及逸出就会生成气孔。

(4) 铜的电阻极小,不适合采用电阻焊。

(5) 铜合金中的合金元素有的比铜更易氧化,使焊接的困难增大。例如黄铜(铜锌合金)中的锌沸点很低,极易烧蚀、蒸发并生成氧化锌(ZnO)。锌的烧损不但会改变接头化学成分、降低接头性能,而且易形成氧化锌烟雾而使人中毒。铝青铜中的铝焊接时易生成难熔的氧化铝,增大熔渣黏度,生成气孔和夹渣。

铜及铜合金可用氩弧焊、气焊、碳弧焊、钎焊等方法进行焊接。

采用氩弧焊是保证紫铜和青铜焊件品质的有效方法。氩弧焊时,焊丝应选用特制的紫铜焊丝和磷青铜焊丝,此外还必须使用焊剂来溶解氧化铜与氧化亚铜以保证焊件品质。焊接紫铜和锡青铜所用焊剂主要成分是硼砂和硼酸,焊接铝青铜时应采用由氯化盐和氟化盐组成的焊剂。

2. 铝及铝合金的焊接

工业上用于焊接的主要是纯铝(熔点为658℃)、铝锰合金、铝镁合金及铸铝。铝

及铝合金的焊接也比较困难,其焊接特点如下:

(1) 铝与氧的亲和力很大,极易氧化生成氧化铝(Al_2O_3)。氧化铝组织致密,熔点高达2050℃,它覆盖在金属表面,能阻碍金属熔合。此外,氧化铝密度大,易使焊缝夹渣。

(2) 铝的热导率较大,要求使用大功率或能量集中的热源,厚度较大时应考虑预热。铝的膨胀系数也较大,易产生焊接应力与变形,并可能导致裂缝的产生。

(3) 液态铝能吸收大量的氢,固态铝又几乎不含氢,因此熔池金属凝固时易生成气孔。

(4) 铝在高温时强度及塑性很低,焊接时常由于不能支持熔池金属而引起焊缝塌陷,因此常需采用垫板。

目前焊接铝及铝合金的常用方法有氩弧焊、气焊、点焊、缝焊和钎焊。

氩弧焊是焊接铝及铝合金较好的方法,由于氩气的保护作用和氩离子对氧化膜阴极的破碎作用,焊接时可不用焊剂,但氩气纯度要求大于99.9%。

3.4.4 异种金属的焊接

1. 焊接性分析

异种金属(dissimilar metal)的焊接通常要比同种金属的焊接困难,因为除了金属本身的物理化学性能对焊接有影响外,两种金属材料性能之间的差异会在更大限度上影响它们之间的焊接。

1) 结晶化学特性的差异 结晶化学特性的差异,也就是通常指的“冶金学上的不相容性”。它包括晶格的类型、晶格的参数、原子半径、原子的外层电子结构等差异。两种被焊金属在冶金上是否相容取决于它们在液态和固态时的互溶性,以及在焊接过程中是否会产生金属间化合物(脆性相)。

两种金属,如纯铅和铜、铁与镁、铁与铅等,在液态下不能互溶时,采用熔焊方法进行焊接是很困难的。这类异种金属组元的不相容性,将使被熔金属从熔化到凝固的过程中极容易产生分层脱离而导致焊接失败。因此,在选择材料搭配时,首先要满足互溶性。

影响结晶化学特性的因素有:①组元的晶体结构;②原子半径。

2) 物理性能的差异 金属的物理性能主要是熔化温度、膨胀系数、热导率和电阻率等。它们的差异将影响焊接的热循环过程和结晶条件,增大焊接应力,降低接头品质,使焊接困难。

2. 焊接方法

异种金属的焊接方法与同种金属焊接方法一样,按其热源的性质可分为熔焊、压焊、钎焊等。不同焊接方法焊接异种金属有不同的特点。

1) 熔焊 异种金属焊接中应用较多的是熔焊方法,常用的有手弧焊、埋弧焊、气体保护电弧焊、电渣焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊等。熔焊的最大特点是可控制

稀释率和金属间化合物的产生。因此,为了降低稀释率、熔合比,控制不同金属母材的熔化量,常选用热源能量密度较高的电子束焊、激光焊、等离子弧焊等方法;为了减小熔深,可以采取间接电弧、摆动焊丝、带状电极、附加不同焊丝等工艺措施。无论如何,只要是熔焊,就总有部分母材熔化进入焊缝而引起稀释,很多情况下还会形成诸如金属间化合物、共晶体等新的组分。为了减轻这类不利影响,必须控制和缩短金属在液态或高温固态下的停留时间。为了解决母材金属稀释的问题,可采用堆焊隔离层的方法,如图 3-51 所示。

对一些熔合不理想的金属,可通过增加过渡层金属,来使其能更好地熔合在一起。

2) 压焊 一般在进行压焊时,都只是将被焊金属加热至塑性状态,甚至不加热而施加一定压力。与熔焊相比,当焊接异种金属接头时,压焊具有一定的优越性,只要接头形式允许,压焊往往是比较合理的选择。压焊时,异种金属接触表面可以熔化(闪光焊和摩擦焊),只有少数情况下压焊后还保留了曾经熔化的金属(点焊)。压焊不加热或加热温度很低,可以减轻或避免热循环对金属性能的不利影响,防止产生脆性的金属间化合物,某些形式的压焊(如闪光焊、摩擦焊等)甚至能将已产生的金属间化合物从接头中挤出去。此外,压焊不存在因稀释而引起的焊缝金属性能变化的问题。

不过,大多数压焊方法对接头形式有一定的要求。例如,点焊、缝焊、超声波焊必须用搭接接头,摩擦焊时至少有一个工作面必须是具有旋转体的截面,爆炸焊只适合较大截面的连接等。压焊设备也不普及。这些无疑限制了压焊的应用范围。

3.5 焊接结构设计

3.5.1 焊件材料和方法的选择

1. 焊接材料

(1) 尽量选用焊接性好的材料,如:尽量选用 $w(C) < 0.25\%$ 的低碳钢或 $CE < 0.4\%$ 的低合金钢,因为这类钢淬硬倾向小,塑性好,焊接工艺简单;尽量选用镇静钢,因为镇静钢含气量低,特别是 H_2 和 O_2 含量低,可防止气孔和裂纹等缺陷。

(2) 焊接异种金属时焊缝应与低强度金属等强度,而工艺应按高强度金属设计。

(3) 尽量采用工字钢、槽钢、角钢和钢管等型材,以简化工艺过程。

2. 焊接方法

1) 生产单件钢结构件

(1) 若板厚为 $3 \sim 10\text{ mm}$,强度较低,且焊缝较短,应选用手弧焊。

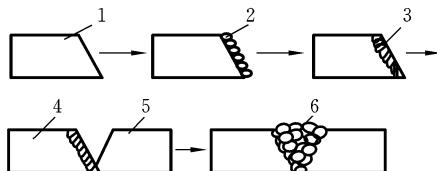


图 3-51 隔离层的应用

1、4—母材 B 2—堆焊隔离层
3—坡口加工 5—母材 A 6—焊缝

(2) 若板厚大于 10 mm, 焊缝为长直焊缝或环焊缝, 应选用埋弧焊。

(3) 若板厚小于 3 mm, 焊缝较短, 应选用 CO₂ 气体保护焊。

2) 生产大批量钢结构

(1) 若板厚小于 3 mm, 无密封要求, 应选用电阻点焊, 若有密封要求应选用缝焊。

(2) 若板厚为 3~10 mm, 焊缝为长直焊缝或环焊缝, 应选用 CO₂ 气体保护焊。

(3) 若板厚大于 10 mm, 焊缝为长直焊缝和环焊缝, 应选用埋弧焊或电渣焊。

3.5.2 焊接接头和焊缝尺寸的设计

1. 焊缝的布置

(1) 焊缝应尽可能分散, 如图 3-52 所示, 以便减小焊接热影响区, 防止粗大组织的出现。

(2) 焊缝的位置应尽可能对称分布, 如图 3-53 所示, 以抵消焊接变形。

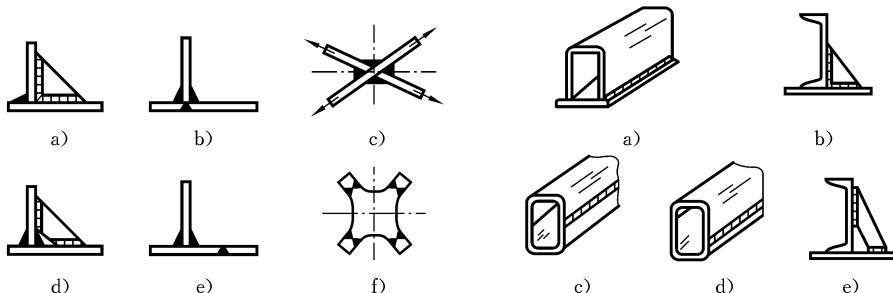


图 3-52 焊缝分散布置的设计

a)、b)、c) 不合理 d)、e)、f) 合理

图 3-53 焊缝对称布置的设计

a)、b) 不合理 c)、d)、e) 合理

(3) 焊缝应尽可能避开最大应力和应力集中的位置, 如图 3-54 所示, 以防止焊接应力与外加应力相互叠加, 造成过大的应力和开裂。

(4) 焊缝应尽量避开机械加工表面, 如图 3-55 所示, 以防止破坏已加工面。

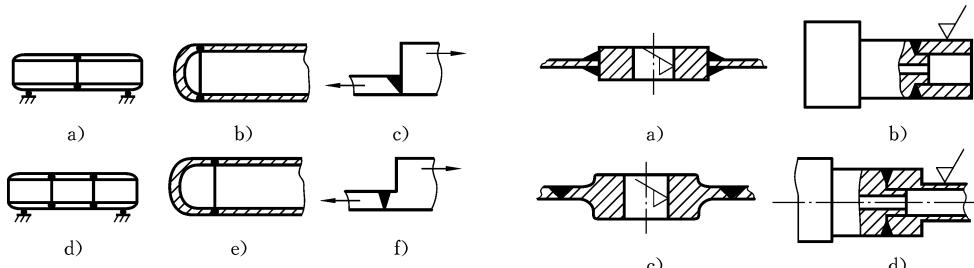


图 3-54 焊缝避开最大应力集中位置的设计

a)、b)、c) 不合理 d)、e)、f) 合理

图 3-55 焊缝远离机械加工表面的设计

a)、b) 不合理 c)、d) 合理

(5) 应便于焊接操作, 如图 3-56、图 3-57、图 3-58 所示, 焊缝位置应使焊条易到位, 焊剂易保持, 电极易安放。

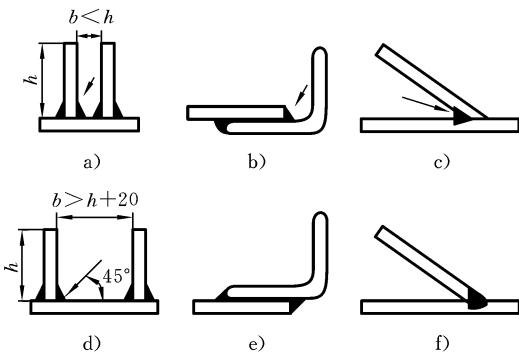


图 3-56 焊缝位置便于手工电弧焊的设计

a)、b)、c) 不合理 d)、e)、f) 合理

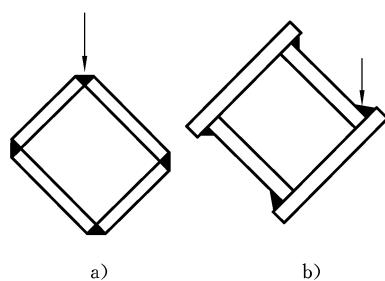


图 3-57 焊缝位置便于自动焊的设计

a) 放焊剂困难 b) 放焊剂方便

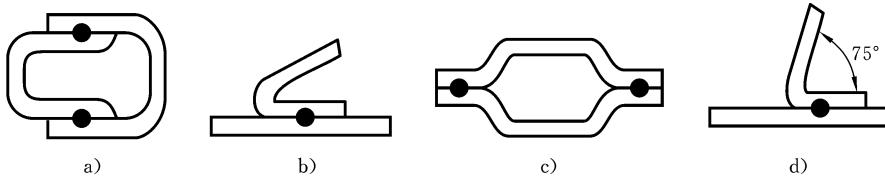


图 3-58 便于点焊及缝焊的设计

a)、b) 电极难以伸入 c)、d) 操作方便

2. 接头形式的选择与设计

接头形式应根据结构形状、强度要求、工件厚度、焊后变形大小、焊条消耗量、坡口加工难易程度等各个方面因素综合考虑决定。根据 GB/T 985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》规定,焊接碳钢和低合金钢的接头形式可分为对接接头、角接接头、T形接头及搭接接头四种,常用接头形式基本尺寸如图 3-34 所示。

对接接头受力比较均匀,是用得最多的接头形式,重要受力焊缝应尽量选用这种接头。搭接接头因两工件不在同一平面,受力时将产生附加弯矩,而且金属消耗量也大,一般应避免采用。但搭接接头不需开坡口,装配时尺寸要求不高,对某些受力不大的平面连接与空间架构,采用搭接接头可节省工时。角接接头与 T 形接头都比对接接头的受力情况复杂些,但接头成直角或一定角度连接时,必须采用这类接头形式。

采用手弧焊时,板厚在 6 mm 以下对接一般可不开坡口。板厚较大时,为了保证焊透,接头处应根据工件厚度预制各种坡口,坡口角度和装配尺寸可按标准选用。厚度相同的工件常有几种坡口形式可供选择,Y 形和 U 形坡口只需一面焊,容易焊到,但焊后角变形较大,焊条消耗量也较大。双 Y 形和双 U 形坡口两面施焊,受热均匀,变形较小,焊条消耗量较小,但必须两面都可焊到,所以有时受到结构形状的限制。

U形和双U形坡口根部较宽,允许焊条深入,运条也不受阻碍,容易焊透,而且焊条消耗量也较小;但因坡口形状复杂,需用机械加工准备坡口,成本较高,一般只在重要的、承受动载的厚板结构中采用。

设计焊接结构最好采用厚度相等的金属材料,以便获得优质的焊接接头。如果采用两块厚度相差较大的金属材料进行焊接,则接头处会造成应力集中,而且接头两边受热不匀,易产生焊不透等缺陷。根据生产经验,不同厚度的金属材料对接时允许的厚度差如表3-7所示。如果 $\delta_1 - \delta_2$ 超过表中规定的值,或者双面超过 $2(\delta_1 - \delta_2)$,应在较厚板料上加工出单面或双面斜边的过渡形式,如图3-59所示。

表3-7 不同厚度的金属材料对接时允许的厚度差

较薄板的厚度/mm	2~5	6~8	9~11	≥ 12
允许厚度差($\delta_1 - \delta_2$)/mm	1	2	3	4

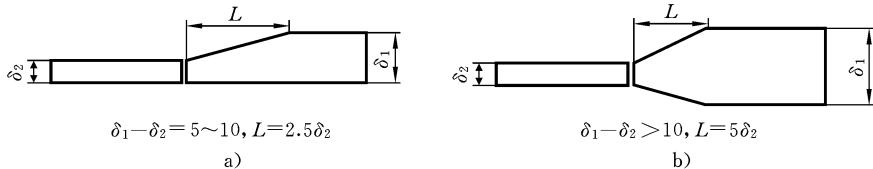


图3-59 不同厚度金属材料对接的过渡形式

a) 单面斜边过渡 b) 双面斜边过渡

3. 搭接焊缝的应力计算

搭接焊缝(lap weld)的应力计算公式为

$$\sigma = \frac{F}{2LT}$$

式中 σ ——单位焊缝截面的应力(MPa);

F ——焊件所受的外部载荷(N);

L ——焊缝长度或焊件宽度(mm);

T ——焊角三角形高度(mm), $T = \frac{\sqrt{2}}{2}s$, s 为焊角长度(mm),如图3-60所示。

4. 焊缝尺寸设计

设计的假设条件:填角焊缝在板的两边;填角焊缝充满板的全长;当两板厚度不一致时,薄板是控制因素。

如图3-61所示的焊角尺寸的一般关系为

$$s = 3.75\delta_1$$

式中 s ——焊角长度(mm);

δ_1 ——厚板焊件的厚度(mm)。

设计参数如表3-8所示,但焊角长度一般应小于薄板焊件的厚度。

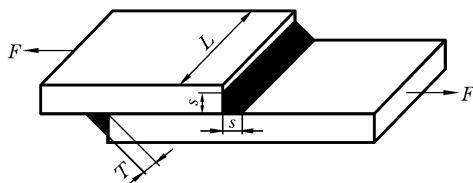


图 3-60 搭接焊缝

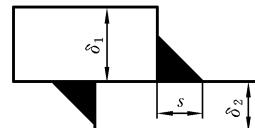


图 3-61 角焊缝截面

表 3-8 搭接焊缝的最小焊角长度

被焊接的厚板厚度/mm	最小填角焊缝的焊角长度/mm
<12	5
12~18	6
18~36	8
36~54	10
54~150	12
>150	15

5. 典型焊件的工艺设计

结构名称:中压容器(见图 3-62)。

材料:16 MnR(原材料尺寸为 1200 mm×5000 mm)。

件厚:筒身,12 mm;封头,14 mm;人孔圈,20 mm;管接头,7 mm。

生产批量:小批。

工艺设计要点:筒身用钢板冷卷,按实际尺寸分为三节,为避免焊缝密集,筒身纵焊缝可相互错开 180°,封头应采用热压成形,与筒身连接处应有 30~50 mm 的直段,使焊缝躲开转角应力集中位置。如卷板机功率有限,可加热卷制人孔圈。图 3-63 为该中压容器工艺图。其中,筒身共分 I、II、III、IV、V 五个部分,焊接次序为:首先依次焊筒身纵缝 1、2、3,互相错开 180°,接着焊筒身环缝 4、5、6、7,然后焊管接头缝 8,再焊人孔圈纵缝 9,最后焊人孔圈环缝 10。

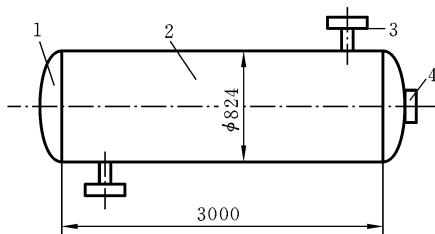


图 3-62 中压容器外形图

1—封头 2—筒身 3—管接头 4—人孔圈

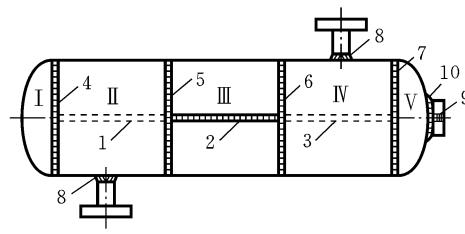


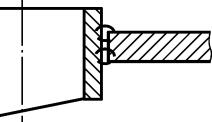
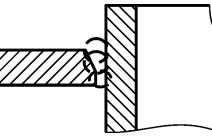
图 3-63 中压容器工艺图

1、2、3—筒身纵缝 4、5、6、7—筒身环缝

8—管接头缝 9—人孔圈纵缝 10—人孔圈环缝

根据各条焊缝的不同情况,可选用不同的焊接方法、接头形式、焊接材料与工艺,如表 3-9 所示。

表 3-9 中压容器焊接工艺设计

序号	焊缝名称	焊接方法选择与焊接工艺	接头形式	焊接样
1	筒身纵缝 1、2、3	因容器品质要求高,又小批生产,故采用埋弧焊,双面焊,先内后外。材料为 16MnR,应在室内焊接(以下同)		焊丝:H08MnA 焊剂:431
2	筒身环缝 4、5、6、7	采用埋弧焊,依次焊接焊缝 4、5、6,先内后外;装配后再焊接焊缝 7,先在内部用手弧焊封底,再用自动焊焊外环缝		焊条:E5015 (J507)
3	管接头缝 8	管壁为 7 mm,角焊缝插合式装配,采用手弧焊、双面焊,先内后外		
4	人孔圈纵缝 9	板厚 20 mm,焊缝短(100 mm),选用手弧焊,平焊位置,V形坡口		焊条:E5015 (J507)
5	人孔圈环缝 10	处于立焊位置的圆角焊缝,采用手弧焊,单面坡口双面焊,焊透		

复习思考题

- 3.1-1 分别简述焊接工艺的原理、特点和类型。
- 3.2-1 熔焊的三要素是指哪三个要素? 对每个要素的要求是什么?
- 3.2-2 压焊的两要素是指哪两个要素? 对每个要素的要求是什么?
- 3.2-3 焊接接头由哪几个部分组成? 各部分的组织和性能特点是什么?
- 3.2-4 焊缝系数对宏观偏析和结晶裂纹有何影响? 一般应选择多大的焊缝系数才比较合适?
- 3.2-5 试指出低碳钢和合金钢(退火态)热影响区的组织有何异同。怎样防止合金钢的焊接裂纹?
- 3.2-6 常见焊接缺陷有哪几种? 其中对焊接接头性能危害最大的为哪几种?
- 3.2-7 试述热裂纹及冷裂纹的特征、形成原因及防止措施。

3.2-8 试述 H_2 、 N_2 和 CO 气孔的形成原因及防止措施。

3.2-9 对焊接裂纹进行无损检测的有效方法是哪种？

3.2-10 常用无损检测方法有哪几种？简述各自的基本原理和适用范围。

3.2-11 产生焊接应力与变形的原因是什么？焊接过程中和焊后，焊缝区纵向受力是否一样？清除和防止焊接应力有哪些措施？

3.2-12 按图 3-64 所示拼接大块钢板是否合理？为什么？是否需要改变？如不合理，怎样改变？为减小焊接应力与变形，其合理的焊接次序是什么？

3.2-13 厚件多层焊时，为什么有时要用圆头小锤敲击红热状态的焊缝？

3.3-1 埋弧焊为什么要安装引弧板和引出板？

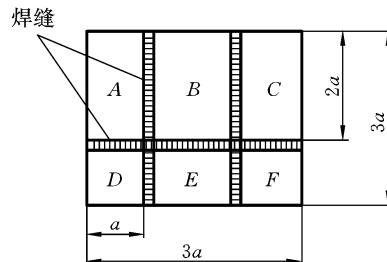


图 3-64 焊缝设计及焊接次序

3.3-2 等离子弧焊与普通手弧焊有何异同？各自的应用范围如何？

3.3-3 电渣焊的焊缝组织有何特点？焊后需要热处理吗？如需要，怎样处理？

3.3-4 简述电子束焊和激光焊的特点及适用范围。

3.3-5 点焊的热源是什么？为什么会有接触电阻？接触电阻对点焊熔核的形成有什么影响？怎样控制接触电阻的大小？

3.3-6 什么是点焊的分流和熔核偏移？怎样减小和防止它？

3.3-7 试述电阻对焊和闪光对焊的过程。为什么闪光对焊的接头为固态下的连接接头？

3.3-8 试述摩擦焊的过程、特点及适用范围。

3.3-9 什么叫扩散焊？扩散焊在哪些场合应用？

3.3-10 固相扩散焊与瞬时液相扩散焊有什么不同？

3.3-11 什么叫超声波焊？超声波焊有何特点？适用于什么场合？

3.3-12 什么类型的爆炸焊接头是理想的连接接头？

3.4-1 什么叫焊接性？怎样评定或判断材料的焊接性？

3.4-2 应采取哪些综合措施来防止高强度、低合金结构钢焊后产生的冷裂缝？

3.4-3 用下列板材制作圆筒形低压容器：

(1) Q235 钢板，厚 20 mm，大量生产；

(2) 20 钢板，厚 2 mm，大量生产；

(3) 45 钢板，厚 6 mm，单件生产；

(4) 紫铜板，厚 4 mm，单件生产；

(5) 铝合金板，厚 20 mm，单件生产；

(6) 镍铬不锈钢板，厚 10 mm，小批生产。

试分析其焊接性，并选择焊接方法与焊接材料。

3.5-1 图 3-65 所示三种焊件的焊缝布置是否合理? 若不合理, 请加以改正。

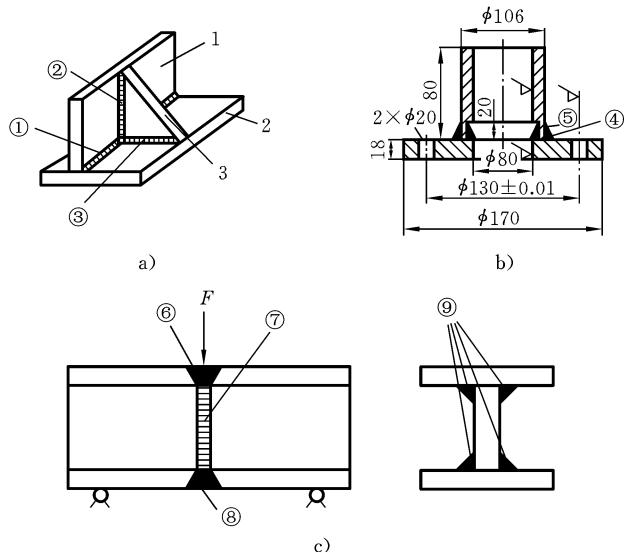


图 3-65 焊缝布置

a) 角接 b) 管-板结构 c) 行车架

1—竖板 2—底板 3—肋板 ①~⑨—焊缝

3.5-2 图 3-66 所示为焊接式齿轮工艺图, 采用管-板焊接方式生产, 如批量生产, 请选择焊接方法, 并对接头形式与焊接材料提出工艺要求。

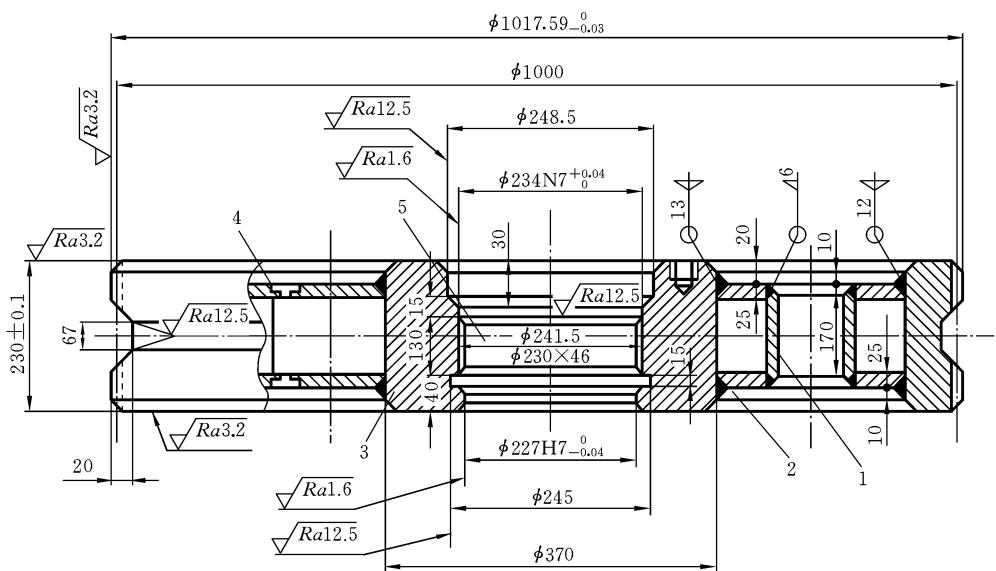


图 3-66 焊接齿轮的设计

1—钢管 2、4—支承圈 3—中心套 5—渐开线花键孔

3.5.3 焊接梁尺寸如图 3-67 所示, 材料为 15 钢, 现有钢板最大长度为 2500 mm。要求: 决定腹板与上、下翼板的焊缝位置, 选择焊接方法, 画出各条焊缝接头形式并确定各条焊缝和焊接次序。

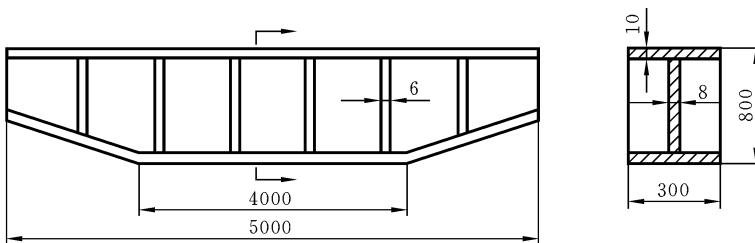


图 3-67 焊接工艺设计

3.5.4 选择焊接材料、工艺及方法实现下列异种材料的焊接:

- (1) 铝与低碳钢; (2) 铜与铝; (3) 钛合金与不锈钢; (4) 铝与不锈钢。

3.5.5 双面填角的搭接接头长度为 254 mm, 作用在其上的拉力为 54480 kg。板厚足以保证破断发生在焊缝上。如果填角焊缝正截面的许用切应力为 96 MPa, 计算所要求的填角焊缝的尺寸。

3.5.6 计算如图 3-68 所示对接焊缝的横向收缩量。

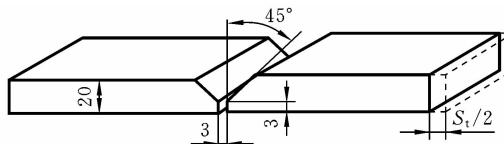


图 3-68 对接焊缝装配



图 4-0 机械加工成的复杂形状和高品质的齿轮

第 4 章 材料切削加工基础

【学习指导】 学习本章前应预习《工程材料》教材中有关合金钢与工具钢、金属热处理的内容,《机械制图》教材中有关三视图的内容,以及《互换性与技术测量》教材中有关尺寸精度、形状公差、位置公差和表面粗糙度的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的相关工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《基于项目的工程实践》教材中的有关章节。

【主要内容】 金属切削加工概述,金属切削加工的基础理论,切削加工的技术经济评价。

【学习重点】 切削用量的选择,车刀切削部分的几何参数,切屑种类,积屑瘤的产生、防止与利用,切削力与切削功率,刀具的磨损与耐用度,材料的切削加工性,基本切削加工工艺时间的计算。

4.1 切削加工基本知识

4.1.1 金属切削加工的特点及应用

在现代机械制造工业中,加工机器零件的方法有多种,如铸造、锻造、焊接、切削加工(metal-cutting process)和各种特种加工等。其中金属切削加工是利用切削刀具与工件的相对运动,从工件(毛坯)上切去多余的金属层,从而获得符合要求的零件的加工过程。金属切削加工可分为钳工和机械加工(简称机加工)两大类。

钳工一般是通过工人手持工具来进行切削加工的,常用的方法有划线、錾削、锯削、锉削、刮研、钻孔、铰孔、攻螺纹、套螺纹等。虽然钳工工人的劳动强度大、生产效率低,但在机器装配或修理中,对某些配件的锉削、对笨重机件上的小型螺孔的攻螺纹、对复杂型面上某些难加工部位的刮削等工作,使用钳工作业却是非常经济和方便的,有时甚至是唯一的方法。因此,钳工加工有其独特的价值,在现代机械制造中仍占有重要地位。随着技术的进步,一些新型的钳工工具先后出现,这使得钳工本身逐渐地实现机械化,有效地降低了钳工工人的劳动强度,并提高了生产效率。

机械加工是由工人操纵机床来进行切削加工的,其基本加工方法有车削、铣削、刨削、磨削、钻削等,另外还有电火花、超声波、激光、等离子等特种加工方法。一般所讲的切削加工多指基本的机械加工。

在机器的生产制造过程中,对组成机器的大部分零件都有较高的加工要求。因此,除了少部分零件可以由精密铸造或精密锻造的方法直接获得外,其余的大部分零件都要由切削加工来获得。切削加工在机械制造中所担负的工作量占机械制造总工作量的40%~60%。切削加工的技术水平直接影响机械制造工业的产品品质和生产效率。机械制造工业承担着为国民经济各部门提供现代化技术装备的任务,即为工业、农业、交通运输、科研和国防等部门提供各种机器、仪器和工具。为适应现代化建设的需要,必须大力发展战略性新兴产业。作为机械制造工业的基础,切削加工技术必须朝着不断提高生产效率和自动化程度的方向发展。

近年来,数控加工已成为切削加工的主流,数控加工技术的应用可全面提高机械制造工业的技术水平。我国虽然在数控技术的应用方面有了很大的进步,但与发达国家相比,仍存在较大的差距。它主要表现在:大部分高精度和超精密切削加工机床的性能还不能满足要求,精度保持性也较差,特别是高效自动化和数控化机床的产量、技术水平及产品品质等方面都明显落后世界先进水平。因此,要使我国的切削加工技术赶上或超过发达国家,在先进数控系统及机床的开发和研制方面还需作进一步的努力。

4.1.2 零件的加工精度和表面粗糙度

切削加工的目的是得到符合一定品质要求的零件。零件的品质包括加工精度与表面品质两个方面。所谓表面品质是指零件表面粗糙度、加工硬化层、表面残余应力及金相组织结构等,它们对零件的使用性能有很大影响。一般来说,零件切削加工的表面品质的主要指标是零件的表面粗糙度。下面分别介绍零件品质的这两个主要指标,即加工精度及表面粗糙度。

1. 加工精度

加工精度(machining accuracy)是指工件加工后,尺寸、形状和位置等参数的实际数值与它们绝对准确的理论数值之间相符合的程度。相符合的程度越高,也就是说加工误差越小,加工精度越高。加工精度主要包括尺寸精度、形状精度及位置精度。

1) 尺寸精度 尺寸精度(dimensional accuracy)是指加工后的零件的尺寸与理想尺寸相符合的程度。尺寸精度包含两个方面:一是表面本身的尺寸精度,如圆柱面的直径等;二是表面间的尺寸精度,如孔间距等。加工零件时,要想使其实际尺寸与理想尺寸完全相符是不可能的,因此,在保证零件使用要求的前提下,应允许尺寸有一定的变动。尺寸允许变动的最大范围即为尺寸公差(tolerance of size)。公差越小,则精度越高。国家标准 GB/T 1800.2—2009 规定,标准公差分为 20 级,分别用 IT01,IT0,IT1,IT2, …, IT18 表示。其中,IT 表示公差,数字表示等级。IT01 的公差值最小,精度最高。其他的等级中,数字越大,则公差等级越低,相应的精度也就越低。一般 IT01~IT13 用于配合尺寸,其余的用于非配合尺寸。

当加工条件一定时,对于不同尺寸的零件,达到某一公差等级的公差值是不同的,即零件的公差值取决于零件的基本尺寸与公差等级。标准公差值、标准公差等级、公称尺寸三者之间的关系如表 4-1 所示。

表 4-1 标准公差值

公称尺寸 /mm		公差等级																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于	至	/μm												/mm							
—	3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.1	0.14	0.25	0.4	0.6	1	1.4
3	6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.3	0.48	0.75	1.2	1.8
6	10	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.9	1.5	2.2
10	18	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.7	1.1	1.8	2.7
18	30	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.3	2.1	3.3
30	50	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1	1.6	2.5	3.9
50	80	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.3	0.46	0.74	1.2	1.9	3	4.6
80	120	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.4	2.2	3.5	5.4
120	180	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.4	0.63	1	1.6	2.5	4	6.3
180	250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.9	4.6	7.2
250	315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.3	2.1	3.2	5.2	8.1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.4	2.3	3.6	5.7	8.9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.5	4	6.3	9.7
500	630	4.5	6	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0.7	1.1	1.75	2.8	4.4	7	11
630	800	5	7	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0.8	1.25	2	3.2	5	8	12.5
800	1000	5.5	8	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0.9	1.4	2.3	3.6	5.6	9	14
1000	1250	6.5	9	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1.05	1.65	2.6	4.2	6.6	10.5	16.5

续表

公称尺寸 /mm	公差等级																				
	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18	
大于	至	/ μm												/mm							
1250	1600	8	11	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1.25	1.95	3.1	5	7.8	12.5	19.5
1600	2000	9	13	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1.5	2.3	3.7	6	9.2	15	23
2000	2500	11	15	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1.75	2.8	4.4	7	11	17.5	28
2500	3150	13	18	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2.1	3.3	5.4	8.6	13.5	21	33

注:公称尺寸小于1 mm时,无IT14~IT18。

加工过程中有多种因素影响加工精度,所以,同一加工方法在不同的条件下所能达到的精度是不同的。有时在相同的条件下,采用同样的加工方法,如果多费一些工时,也能提高加工精度,但这样会降低生产效率,增加生产成本,是不经济的。通常所说的精度,是指采用某加工方法在正常情况下所能达到的精度,称为经济精度。

零件的精度越高,加工过程就越复杂,加工成本也就越高。设计零件时,应在满足技术要求的前提下,选用较低级别的公差,以降低生产成本。各种公差等级的使用范围如表 4-2 所示。

表 4-2 尺寸精度公差等级的使用范围

公差等级	应用	加工方法
IT01~IT1	块规	研磨
IT1~IT7	量规	研磨、珩磨、精磨
IT5~IT13	一般配合尺寸	磨、拉、车、镗、铣、钻、铰、粉末冶金
IT2~IT5	特别精密零件的配合	研磨、珩磨、精磨、精车、精镗、拉
IT12~IT18	用于非配合尺寸	冲压、铸造、锻造
IT8~IT14	原材料的尺寸公差	粗车、粗镗、粗铣、粗刨、钻

2) 形状精度 形状精度(form accuracy)是指零件上的实际形状要素与理想形状要素的符合程度。当零件的尺寸精度符合要求时,并不意味着其形状也符合要求,如加工一个 $\phi 25^{+0.2}_{-0.1}$ mm 的轴,其实际尺寸为 24.95 mm,符合精度要求,但轴的某一截面的实际形状不是理想的圆形,故其形状不一定符合要求。在实际加工中,要使零件形状完全达到理想值是不现实的,应允许有一定的误差。关于形状误差,国家标准 GB/T 1182—2008、GB/T 4249—2009、GB/T 16671—2009 规定了 6 种标准公差,其表达符号、相应的含义和检测方法可参阅有关文献中加工精度和产品品质的内容。

3) 位置精度 位置精度(position accuracy)是指零件上的表面、轴线等的实际位置与理想位置的符合程度。零件应允许有一定的位置误差,国家标准 GB/T

1182—2008、GB/T 4249—2009、GB/T 16671—2009 规定了 3 类共 8 种标准公差, 其表达符号、相应的含义和检测方法可参阅有关文献中加工精度和产品品质的内容。

2. 表面粗糙度

无论用何种方法加工, 在零件表面上总会留下微细的凹凸不平的刀痕, 出现交错起伏的现象。粗加工后的表面用肉眼就能看到, 精加工后的表面用放大镜或显微镜仍能观察到。表面上微小峰谷间的高低程度称为表面粗糙度 (surface roughness), 也称为微观不平度。

国家标准 GB/T 1031—2009 规定了表面粗糙度的评定参数和评定参数允许值系列。常用参数是轮廓算术平均偏差 R_a 和微观不平度十点高度 R_z , 其表达符号、相应的含义和检测方法可参阅有关文献中表面粗糙度和产品品质的内容。

表面粗糙度对零件的疲劳强度、耐磨性、耐蚀性及配合性能等方面均有很大影响。表面粗糙度越低, 零件的表面品质越高, 同时零件加工的难度越大, 加工成本也越高。因此在设计零件时, 应根据实际情况合理选用, 即在满足技术要求的条件下, 尽可能选用较大的值。表 4-3 列出了不同加工方法所能达到的表面粗糙度, 供选用时参考。

表 4-3 表面粗糙度的选用举例

加工方法	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	表面状况	应用举例
粗车、镗、刨、钻	100	明显可见的刀痕	如粗车、粗刨、切断等粗加工后的表面
	25		粗加工后的表面、焊接前的焊缝、粗钻的孔壁等
粗车、铣、刨、钻	12.5	可见刀痕	一般非配合表面, 如轴的端面、倒角等
半精车、镗、刨、铣、钻、锉、磨、粗铰、铣齿	6.3	可见加工痕迹	不重要零件的非配合表面, 如支柱、支架、外壳等的端面; 紧固件的自由表面、紧固件通孔的表面等
半精车、镗、刨、铣、拉、磨、锉、滚压、铣齿、刮 (12 点/ cm^2)	3.2	微见加工刀痕	与其他零件连接, 但不形成配合的表面, 如箱体、外壳等的端面
精车、镗、刨、铣、拉、磨、铰、滚压、铣齿、刮 (12 点/ cm^2)	1.6	看不清加工刀痕	安装直径超过 80 mm 的 G 级轴承的外壳孔、普通精度齿轮的齿面、定位销孔等重要表面
精车、镗、拉、磨、立铣、滚压、刮 (3 ~ 10 点/ cm^2)	0.8	可辨加工痕迹的方向	要求保证定心及配合特性的表面, 如锥销与圆柱销的表面、磨削的轮齿表面、中速转动的轴颈表面等

续表

加工方法	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	表面状况	应用举例
铰、磨、镗、拉、滚压、刮(3~10 点/ cm^2)	0.4	微辨加工痕迹的方向	要求长期保持配合性质稳定的配合表面,如尺寸精度公差等级为 IT7 的轴、孔配合表面,精度较高的轮齿表面等
砂带磨、磨、研磨、超级加工	0.2	不可辨加工痕迹的方向	工作时受变应力作用的重要零件的表面,保证零件的疲劳强度、耐蚀性和耐久性,并在工作时不破坏配合性质的表面等
超级加工	0.1	暗光泽面	工作时承受较大变应力作用的重要零件的表面,保证精确定心的锥体表面等
	0.05	亮光泽面	保证高度气密性配合的表面,如活塞、柱塞的外表面和气缸的内表面等
	0.025	镜状光泽面	高压柱塞泵中的柱塞与柱塞套的配合表面等的精密表面等
	0.012	雾状光泽面	仪器的测量表面和配合表面,尺寸超过 100 mm 的表面
	0.008	镜面	块规的工作表面,高精度测量仪器的测量表面及摩擦机构的支承表面等

4.1.3 切削用量及选用

1. 零件表面形状及切削运动

切削加工所得到的零件表面形状虽然多种多样,但通过分析可知,这些表面都由一些基本表面元素组合而成。只要能对这几种基本表面元素进行加工,就能对所有表面进行加工。这些基本表面元素分别是平面、直线成形面、圆柱面、圆锥面、球面、圆环面、螺旋面,如图 4-1 所示。

基本表面元素都可看成是一条线(称为母线)沿另一条线(称为导线)运动的轨迹。如图 4-1a 所示,为得到平面,必须使直线 I 沿直线 II 移动;如图 4-1b 所示,为得到直线成形面,必须使直线 I 沿曲线 II 移动。因此,使刀具获得母线(或导线)的形状,同时使工件获得导线(或母线)的形状,当两者作一定的相对运动时,就可得到所需形状的表面。刀具与工件之间的相对运动即为切削运动。切削运动主要包括主运动与进给运动。

主运动是指切削所需要的最基本的运动,其特点是速度高、消耗功率大。任何切削加工都必须有而且只能有一种主运动。进给运动是指使金属层不断进入切削中,从而获得所需几何特性的已加工表面的运动,其特点是速度较低、消耗功率小。切削

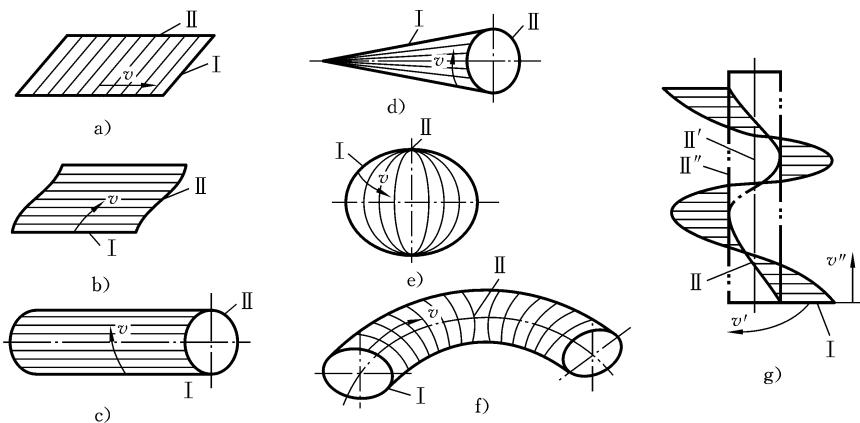


图 4-1 基本表面元素

a) 平面 b) 曲面 c) 圆柱面 d) 锥形面 e) 球面 f) 环状圆柱面 g) 复杂曲面

加工中可能有一种或多种进给运动,但也可能一种进给运动也不需要。

2. 切削要素

切削要素(cutting element)包括切削用量三要素和切削层几何参数。切削用量三要素是指切削速度(cutting speed) v_c 、进给量(feed rate) f 、背吃刀量(back engagement of the cutting edge) a_p ,其值的大小反映了切削运动的快慢和刀具切入工件的深浅。有关定义和计算方法可参阅有关文献中切削运动与切削用量的内容。

3. 切削用量的选择

1) 选择原则 切削用量的大小直接影响切削加工的生产效率、零件品质、刀具耐用度等,从而影响切削加工的成本,因此必须合理地选择切削用量,以达到切削加工的最优化。切削用量的选择主要是依据机床、刀具等工艺系统的性能和工件的加工精度、表面粗糙度等技术要求。

从提高生产效率的角度看,应采用较大的切削用量,即在工艺系统允许的条件下,切削速度、进给量、背吃刀量尽可能取较大值。从刀具耐用度的角度看,切削速度应尽量取较小值,以延长刀具寿命。从加工精度的角度看,背吃刀量应尽量取较小值,以减小加工时的切削力,避免工件加工时的受力变形过大而造成加工误差。从加工表面品质的角度看,进给量应尽量取较小值,以降低加工表面的粗糙度。

可以看出,切削用量三要素是互相关联的,不能都取较大值,也不能都取较小值。选择切削用量时必须根据具体情况,以某一参数为主,然后再考虑其他参数。一般的选择原则是,在粗加工阶段,以提高生产效率为主,因此应尽可能多地切除加工余量,在选择合理的刀具耐用度后,把背吃刀量选得大些,其次选择较大的进给量,最后确定合适的切削速度;对于有硬皮的铸件、锻件的第一刀加工,其背吃刀量应大于硬皮厚度;在精加工阶段,为保证工件获得需要的尺寸精度和表面粗糙度,应选择较小的进给量和背吃刀量,以及选择较高的切削速度,只有在受到刀具等工艺条件限制不能

使用较高切削速度时,才考虑选用较低的切削速度。

2) 三要素的选择 在实际应用中,应综合考虑工件材料、刀具材料、机床的功率、工艺系统的刚度、加工零件品质要求等因素,首先选择尽可能大的背吃刀量,其次选择尽可能大的进给量,最后选择尽可能大的切削速度。

(1) 背吃刀量的选择。不论是粗加工还是精加工,最佳方法是一次走刀就能完成切削加工。但当切削余量较大时,切削力较大,这时就会由于机床功率、工艺系统刚度、刀具强度等方面的因素而无法一次完成。因此,生产中往往需要多次走刀,第一次走刀的背吃刀量,应在机床工艺系统的承受能力范围内尽可能取大值,其后的背吃刀量相对地可取得小一些。

(2) 进给量的选择。当选定背吃刀量后,切削力的大小主要受进给量的影响。因此,粗加工时,对加工表面品质的要求不高,进给量可在工艺系统允许的范围内尽可能取得大一些;精加工时,为减小切削力,同时保证较高的表面品质,宜选择较小的进给量。

(3) 切削速度的选择。在选定了背吃刀量及进给量后,可根据合理的刀具耐用度,用计算法或查表法选择切削速度。粗加工时,若所选的切削速度较大,将使切削功率超过机床的承受能力,这时应适当降低切削速度。

在实际生产中选择切削用量时,具体值可参照有关手册和资料推荐的数据。

4.1.4 切削刀具

1. 刀具的分类

刀具(cutting tool)种类很多,为便于认识各种刀具的基本特征,有必要对刀具进行分类。按刀具切削加工的类型,可以将刀具分为如下几类(见图 4-2):

(1) 切刀类,包括普通切刀(如车刀、刨刀、插刀等)、成形插刀等。

(2) 孔加工类,如钻头、铰刀、镗刀、复合孔加工刀具等。

(3) 铣刀类,按用途分,有圆柱铣刀、平面铣刀、立铣刀、端铣刀、成形铣刀等,按齿背形式分,有尖齿铣刀、铲齿铣刀等。

(4) 拉刀类,如圆孔拉刀、花键拉刀、平面拉刀等。

(5) 螺纹刀具类,如螺纹车刀、螺纹铣刀、丝锥、板牙等。

(6) 齿轮刀具类,如成形齿轮铣刀、齿轮滚刀、插齿刀、剃齿刀等。

(7) 磨具类,如砂轮、磨头、油石等。

(8) 其他类,如自动线和数控机床上所用的刀具。

除上述分类方法外,还可按刀具材料分为碳素钢、高速钢、硬质合金、陶瓷刀具等,按刀具结构分为整体式、镶片式、复合式刀具等。

2. 刀具材料

在金属切削过程中,直接完成切削工作的是刀具。无论哪种类型的刀具,一般都是由切削部分与夹持部分组成的。刀具依靠夹持部分固定在机床上,夹持部分的作



图 4-2 刀具结构与种类

用是保证刀具正确的工作位置、传递切削所需要的运动与动力。这一部分对切削加工的性能影响不大,因此对它的基本要求是夹持可靠、牢固,装卸方便。切削部分是刀具上直接参加切削工作的部分,刀具是否具有良好的切削性能,主要取决于刀具切削部分的材料、几何形状、几何角度及其结构。

1) 对刀具切削部分材料的基本要求 在切削过程中,刀具切削部分要承受很大的切削力、摩擦力、冲击力和很高的温度,因此,切削部分应具有以下基本性能:

(1) 硬度必须大于工件材料的硬度,以便刀具能切入工件。常温下,刀具材料的硬度一般要求在 60HRC 以上。

(2) 足够的强度和韧度,以便承受切削力和切削时的冲击。

(3) 高的耐磨性,有足够长的寿命,以满足加工的需要。

(4) 高的耐热性,在高温下刀具仍有足够的硬度和耐磨性,以保持切削的连续进行。

此外,还要求刀具材料有良好的工艺性、导热性、抗黏结性及热处理性能等。

2) 常用刀具切削部分的材料

(1) 碳素工具钢。碳素工具钢(carbon tool steel)是一种碳含量较高($w(C)=0.7\% \sim 1.3\%$)的优质钢。其优点是淬火后硬度较高,可达 60~66HRC,刃磨容易,价格低廉,但不能耐高温,在 200~250℃ 时即开始失去原来的硬度,所以切削速度不能太高;热处理时,淬透性差、变形大、易产生裂纹,所以不宜用来制造复杂的刀

具。常用的碳素工具钢主要有 T10A、T12A 钢等,多用来制造锯条、锉刀等手工工具。

(2) 合金工具钢。在碳素工具钢中加入一定的铬(Cr)、钨(W)、锰(Mn)等合金元素,能够提高材料的耐热性、耐磨性和韧度,同时还可减小热处理时的变形,淬火后具有较高的硬度(60~66HRC)。合金工具钢(alloy tool steel)碳含量为 0.85%~1.5%(质量分数),能耐 350~400 °C 的高温,常用的合金工具钢有 9SiCr、CrWMn 等。由于合金工具钢具有刃磨容易、热处理性能好、工艺性能好等优点,常用来制造丝锥、板牙、铰刀等形状复杂、切削速度较低($v_c < 0.15 \text{ m/s}$)的刀具。

(3) 高速钢。高速钢(high speed steel)又称锋钢、白钢,含有较多的钨、铬、钼(Mo)、钒(V)等合金元素。常用的高速钢有 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 等,能耐 550~600 °C 的高温。与合金工具钢相比,高速钢的耐磨性、耐热性有显著提高。与硬质合金相比,高速钢具有较高的抗弯强度和冲击韧度,工艺性能、热处理性能也较好,容易刃磨锋利,因此常用来制造钻头、铣刀、拉刀和齿轮刀具等形状复杂的刀具。高速钢的耐热性不太好,多用于切削速度不高($v_c < 0.5 \text{ m/s}$)的场合,是目前使用较广泛的刀具材料之一。

(4) 硬质合金。硬质合金(cemented carbide)由耐磨性和耐热性都很高的碳化物(WC、TiC 等)粉末,用钴(Co)、钼、钛(Ti)等作黏结剂烧结而成,硬度可达 74~82HRC,能耐高达 850~1000 °C 的温度,故可用于高速($v_c = 1.5 \sim 5 \text{ m/s}$)切削。但与高速钢相比,其抗弯强度较低,承受冲击能力较差,刃口也不能太锋利。硬质合金也是目前国内使用较广泛的刀具材料之一,常制成各种形式的刀片,焊接或夹持在车刀、刨刀等刀具的刀柄上使用。

常用的硬质合金有三类:① 由 WC 和钴组成的钨钴类(YG 类,国际分类为 K 类);② WC、TiC 和钴组成的钨钴钛类(YT 类,国际分类为 P 类);③ 在钨钴钛类硬质合金中添加少量的碳化钽(TaC)或碳化铌(NbC)组成的通用硬质合金(YW 类,国际分类为 M 类)。目前国产的硬质合金主要为前两类。

YG 类硬质合金的抗弯强度和韧度较高,适用于铸铁、青铜等材料的加工。其常用的牌号有 YG8、YG6、YG3 等,其中数字表示钴的质量百分数。钴含量低,则硬质合金较脆、耐磨性好,适用于精加工。粗加工时宜选用钴含量较高的型号,如 YG8。

YT 类硬质合金比 YG 类硬质合金硬度高,耐热性好,适合加工钢材等塑性材料。其常用的牌号有 YT5、YT15、YT30 等,其中数字代表 TiC 的质量百分数。TiC 含量越高,则韧度越低、耐磨性越好,适用于精加工。粗加工时则应选用 TiC 含量少的硬质合金,如 YT5。

YW 类硬质合金的韧度、与钢黏附的温度比 YT 类硬质合金高,既可用来加工铸铁等脆性材料,也可用来加工钢材等塑性材料,还可用来加工高温合金、不锈钢等难加工钢材。其常用的牌号主要有 YW1 与 YW2 两种,前者用于精加工,后者用于粗加工。

各类常用的刀具材料的主要性能和用途如表 4-4 所示。

表 4-4 刀具材料的主要性能和用途

种类	硬 度	承受最高温度/℃	抗弯强度/MPa	工 艺 性 能	用 途
碳素工具钢	60~66HRC (81.5~84.5HRA)	0~200	2500~2800	可冷、热加工成形,刃磨性能好,需热处理	用于手动工具,如锯条、锉刀等
合金工具钢	60~66HRC (81.5~84.5HRA)	250~300	2500~2800		用于低速成形刀具,如丝锥、板牙等
高速工具钢	63~70HRC (83~87HRA)	550~600	2500~4500	可冷、热加工成形,刃磨性能好,需热处理,但淬火性差	用于钻头、铣刀、车刀等
硬质合金	89~94HRA	800~1000	1000~2500	压制烧结后使用,不能冷、热加工,镶片使用	用于车刀刀头、铣刀等
陶瓷材料	94HRA	900~1200	500~700		用于车刀刀头,适合于连续切削
立方氮化硼	8000~9000HV	1400~1500	0~300	压制烧结而成,可用金刚石砂轮磨削	用于硬度、强度极高材料的精加工
金刚石	10000HV	700~800	0~300	用天然金刚石刃磨极困难	用于高精度、低表面粗糙度有色金属部件的切削

3. 刀具的几何形状及参数

金属切削刀具的种类虽然很多,具体结构也各不相同,但其切削部分的结构要素和几何形状却有着许多共同的特点。如图 4-3 所示的各种刀具,它们的一个刀齿的作用都类似一把车刀,与车刀的切削部分有着共同的特点。因此,只要掌握了车刀的

几何结构及其参数特征,就可了解其他刀具。有关车刀的结构和刀具角度可参阅文献[1]中有关车刀的内容。

1) 车刀的标注角度 刀具切削部分必须具有合理的几何形状,才能保证切削加工的顺利进行,获得预期的加工效果。刀具切削部分的几何形状主要用一些刀面和刀刃的方位角度来标注。为了确定刀具的这些角度,必须建立相应的参考系,如刀具

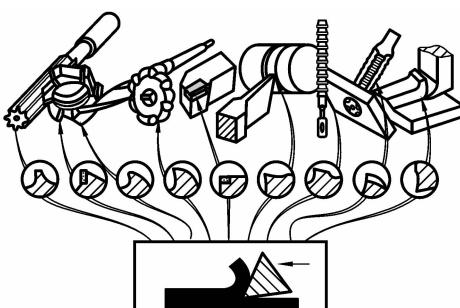


图 4-3 刀具的切削部分

标准角度参考系。刀具标准角度是指刀具图样上标注的角度,即刃磨角度。

(1) 车刀标注角度的参考系由三个相互垂直的平面,即基面、主切削平面和正交平面组成(见图 4-4)。

① 基面(tool reference plane)是指通过切削刃上选定点、垂直于主运动方向的平面。对车刀来说,其基面平行于车刀底面,即水平面。

② 主切削平面(tool major cutting edge plane)是指通过主切削刃选定点与主切削刃相切并垂直于基面的平面。车刀的切削平面是竖直面。

③ 正交平面(tool orthogonal plane)是指通过切削刃选定点并同时垂直于基面和主切削平面的平面。

(2) 车刀的标注角度有前角、后角、主偏角、副偏角和刃倾角(见图 4-5)。

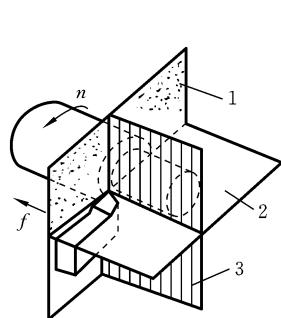


图 4-4 外圆车刀静止参考系

1—主切削平面 2—基面 3—正交平面

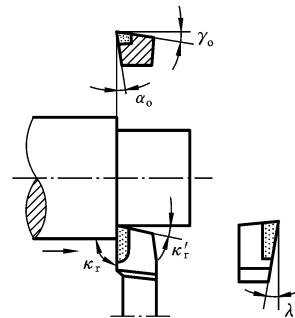


图 4-5 车刀的主要标注角度

① 前角(tool orthogonal rake) γ_o 。在正交平面中测量,是指前刀面和基面之间的夹角。前角愈大,刀具愈锋利,切削时金属变形愈小;前角愈大,刀具强度愈低。

② 后角(tool orthogonal clearance) α_o 。在正交平面中测量,是指主后刀面和主切削平面之间的夹角。后角愈大,刀具与工件之间的摩擦愈轻;但后角愈大,刀具强度愈低。

③ 主偏角(tool cutting edge angle) κ_r 。是指主切削刃和走刀方向在基面上投影的夹角。增大主偏角可以使进给力增大,径向力减小,有利于减小振动,但刀具磨损加快,散热条件变差。减小主偏角时,刀具因磨损较小而较为耐用,但会使径向切削力显著增大,在加工细长工件时,容易引起变形和振动。

④ 副偏角(tool minor cutting edge angle) κ'_r 。是指副切削刃和走刀方向在基面上投影的夹角。其主要作用是减轻刀刃与工件的摩擦,同时它对加工表面的粗糙度影响较大。

⑤ 刃倾角(tool cutting edge inclination angle) λ_s 。在主切削平面内度量,是主切削刃与基面之间的夹角。

2) 车刀各参数的作用及选择

(1) 前角。前角较大时,切屑的塑性变形较小,同时切屑与前刀面间的摩擦也较

轻,有利于降低切削温度、减小刀具磨损量等。但前角过大将导致切削刃强度下降,刀头散热体积减小,影响刀具使用寿命。前角大小的选择主要考虑工件材料、刀具材料和加工性质。若工件的强度、硬度都不高,前角可取较大值,反之则取较小值;加工塑性材料或韧性材料时,前角可取较大值,反之则应取较小值;精加工时由于切屑较薄,前角可取较大值,而粗加工时则可取较小值。一般硬质合金车刀前角在 $-5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间选取,高速钢车刀前角在相应条件下取较大值。

(2) 后角。后角的大小影响已加工表面的品质及主后刀面的磨损。较大的后角可减轻主后刀面与工件已加工表面间的摩擦,但后角过大,会影响切削刃强度,并减小刀头的散热体积,所以需选择合适的后角。

工件材料的硬度、强度较高时,后角宜取较小值,反之则应取较大值;加工脆性材料时,由于切屑较短,后角宜取较小值,反之,加工塑性材料时宜取较大值;粗加工时,切削厚度较大,对表面品质要求也较低,后角宜取较小值,而精加工时,后角就应取较大值。硬质合金车刀后角在 $6^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 之间选取,高速钢车刀后角可相应取较大值。

(3) 主偏角。在背吃刀量和进给量相同的情况下,改变主偏角的大小可以改变切削厚度与切削宽度,也就是改变切削刃的工作长度。

主偏角较小,则主切削刃参加切削的长度较大,刀刃单位长度上的受力较小,刀具寿命较长。但过小的主偏角使得刀具切削时的径向分力较大,从而使得工件已加工表面的弹性回复量及加工时的振动较大。所以加工细长轴时,主偏角一般取较大值。

通常,加工细长轴时,宜选用 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$,甚至大于 90° 的主偏角;单件、小批生产时,可选用通用性好的 45° 车刀及 90° 偏刀。

(4) 副偏角。副偏角取较大值,可减轻副后刀面与已加工表面间的摩擦。但当主偏角选定后、副偏角增大时,加工残留面积也会增大,已加工表面也就越来越粗糙。副偏角一般粗加工时取 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,精加工时取 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。

(5) 刀倾角。刀倾角主要影响刀头强度与加工时的排屑方向。刀倾角一般取 $-10^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。由于负的刀倾角可使远离刀尖的切削刃先接触工件,可避免刀头受到冲击,刀头强度得到加强,所以粗加工时刀倾角一般取负值。精加工时,为避免切屑划伤已加工表面,刀倾角常取正值。

可以看出,车刀几何参数之间是相互影响、相互制约的。在选择车刀几何参数时,应将车刀作为一个整体,根据切削过程的具体情况综合考虑。例如,前角和后角都影响切削刃强度及刀具的散热面积,它们之间可以相互补偿。粗加工时,采用较大的前角,适当减小后角,此时就可在不改变切削刃强度的情况下,减轻刀具的负荷。精加工时,采用较大的后角,适当减小前角,就可在不改变切削刃强度的情况下,减轻后刀面与已加工表面间的摩擦,从而提高已加工表面的品质。此外,前角、主偏角、刀倾角之间也有一定的关系。采用负的刀倾角、小的主偏角,都能增强刃尖强度,延长刀具寿命。因此,在切削较硬的材料或存在冲击作用时,可采用较小的主偏角和负的

刃倾角,而不必明显地减小前角。

2) 车刀的工作参数 车刀角度是车刀处于理想状态下的标注角度。在实际切削中,车刀安装位置的变化,将会影响基面、主切削平面、正交平面的实际位置,从而使刀具的实际角度发生变化,影响车刀的工作。刀具工作时的实际角度称为工作角度,工作角度与标注角度往往是不相等的。

如图 4-6a 所示,当车刀刀尖与工件轴线等高时,其工作前角与标注前角相等,工作后角与标注后角相等。如图 4-6b 所示,当车刀刀尖高于工件旋转轴线时,工作前角大于标注前角,工作后角小于标注后角;反之,如图 4-6c 所示,工作前角小于标注前角,工作后角大于标注后角。

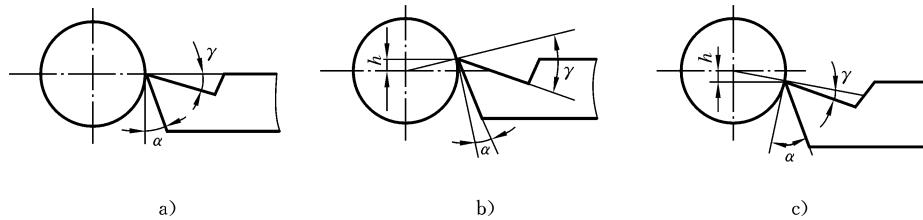


图 4-6 车刀安装高度对前角及后角的影响

a) 正常 b) 高于中心线 c) 低于中心线

如图 4-7 所示,车刀安装时,若刀柄轴线与工件旋转轴线不垂直,会引起主偏角及副偏角的变化。图 4-7a 中,刀柄向右偏斜,主偏角增大、副偏角减小。图 4-7c 中,刀柄向左偏斜,主偏角减小、副偏角增大。

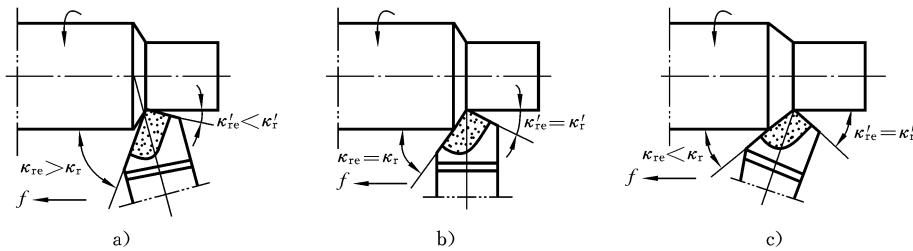


图 4-7 刀柄安装偏斜对主、副偏角的影响

a) 左偏 b) 正常 c) 右偏

3) 车刀的结构形式

(1) 整体式。这种结构刀柄与刀头为一整体,故对较贵重的刀具材料消耗量较大,经济性较差。早期的刀具大多为这种结构,现在较少使用。

(2) 焊接式。这种结构的刀头是焊接到刀柄上的,其结构简单、紧凑、刚度好,可以根据加工条件和加工要求方便地磨出所需角度。但经过高温焊接和刃磨后,硬质合金刀片会产生内应力和裂纹,使切削性能降低。

(3) 机夹重磨式。刀片与刀柄是两个相互独立的元件,工作时靠夹紧装置将它们固定在一起,图 4-8 所示为机夹重磨式切断刀的一种典型结构。机夹重磨式切断

刀避免了焊接式的内应力缺陷,提高了刀具耐用度,同时还可使刀柄多次重复使用。

(4) 机夹可转位刀片式。如图 4-9 所示,将按一定几何参数压制的多边形刀片,用机械夹固的方法装夹在标准的刀柄上。使用时,刀片上一个切削刃用钝后,只需将夹紧机构松开,将刀片转位换成另一个新的切削刃,便可继续切削。

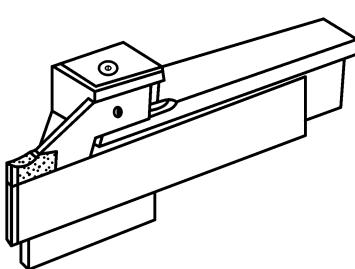


图 4-8 机夹重磨式切断刀

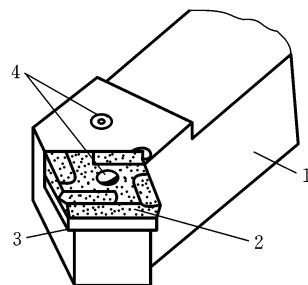


图 4-9 机夹可转位刀片式车刀

1—刀柄 2—刀片 3—刀垫 4—夹固件

近年来,数控机床等柔性自动化加工设备的发展,使得产品品质及加工效率都得到了大幅度提高。但无论是焊接式车刀,还是机夹重磨式车刀,在加工过程中都需换刀、调刀,所造成的停机时间会极大地降低自动化设备所带来的优势。因此,只有机夹可转位刀片式车刀才能适应自动化设备的需要。机夹可转位刀片式车刀的优点可归纳为如下几点:

- (1) 由于避免了因焊接而引起的缺陷,所以在相同的切削条件下,其耐用度较其他刀具耐用度有大大提高;
- (2) 在一定条件下,卷屑、断屑稳定可靠;
- (3) 刀片转位换成另一个切削刃时,不会改变切削刃与工件的相对位置,从而可保证加工尺寸,减少调刀时间;
- (4) 刀片一般不需重磨,有利于涂层、陶瓷等新型刀片的推广使用;
- (5) 刀柄使用寿命长,故可节约大量刀柄材料及制造刀柄的费用;
- (6) 刀片和刀柄可以标准化,有利于减少刀具制造成本和刀具库存量,提高了加工的经济性。

4.2 金属切削加工的基础理论

金属切削过程是指刀具从工件上将多余的金属切下的过程,其实是一种挤压过程。在切削过程中出现的许多物理现象,如切削热、刀具磨损等,都是与切屑形成过程有关的。生产实践中出现的许多问题,如振动、卷屑、断屑等,都同切屑的变形规律有着密切的关系。因此,研究金属切削过程,对保证加工零件品质、降低生产成本、提高生产效率等,都有着十分重要的意义。

4.2.1 切削过程

1. 切屑的形成

金属切削过程实质上就是切屑的形成过程,如图 4-10 所示,图中, β_1 、 β_2 分别为塑性变形前沿、切屑剪裂前沿与刀具进给方向的夹角。被切削金属层受到刀具的挤压作用力时,开始产生弹性变形(见图 4-10a)。随着切削的继续进行,刀具继续给被切削金属层施加挤压压力,金属内部产生的应力与应变也随之不断地加大。当应变达到材料的屈服点时,被切削金属层产生塑性变形(见图 4-10b)。此时切削仍在继续进行,金属内部产生的应力与应变继续加大,当应力达到材料的断裂强度极限时,被切削金属层就会断裂而形成切屑(见图 4-10c)。此时,金属内部的应力迅速下降,又重新开始“弹性变形→塑性变形→断裂变形”的循环,从而形成新的切屑。

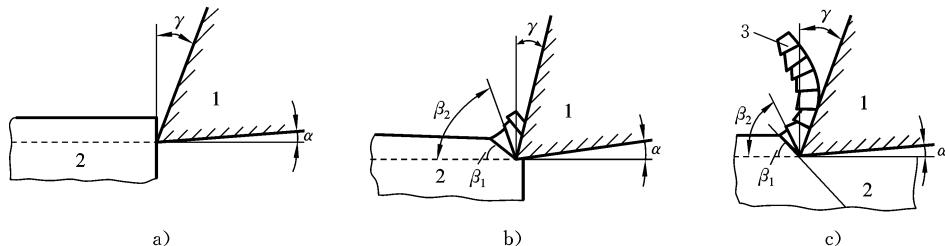


图 4-10 切屑形成过程

a) 刀具切入工件前 b) 刀具刚刚切入工件 c) 刀具切入工件后

1—刀具 2—工件 3—切屑

2. 切屑类型

由于工件材料不同,切削加工条件各异,因此切削过程中的变形程度就不一样,所产生的切屑也不一样。生产中一般有带状切屑、节状切屑、单元切屑、崩碎切屑等四类。

(1) 带状切屑。带状切屑(continuous chips)的内表面光滑,外表面呈微小的锯齿形,如图 4-11a 所示。用较大的前角、较高的切削速度和较小的进给量切削塑性材料时,多形成此类切屑。有带状切屑的切削过程一般较平稳,切削力波动小,已加工表面较光滑。但由于切屑连绵不断,有可能擦伤已加工表面或擦伤操作人员,故不太安全,需采取断屑措施。

(2) 挤裂切屑。挤裂切屑(continuous chip with built-up-edge)的外表面呈较大的锯齿形,并有较深的裂纹,如图 4-11b 所示。用较小的前角、较低的切削速度、较大的切削厚度加工中等硬度的塑性材料时,容易形成此类切屑。

(3) 单元切屑。如果在挤裂切屑的剪切面上,裂纹扩展到整个面上,则整个单元被切离,成为梯形的单元切屑(unit chips),如图 4-11c 所示。

(4) 崩碎切屑。崩碎切屑(discontinuous chip)为一块一块的碎片,如图 4-11d 所示。

示。在切削铸铁、青铜等脆性材料时,切削层金属一般在发生塑性变形前就被挤裂或崩断,从而形成不规则的碎块状切屑。工件材料越脆硬,刀具前角越小,切削厚度越大,就越容易形成此类切屑。

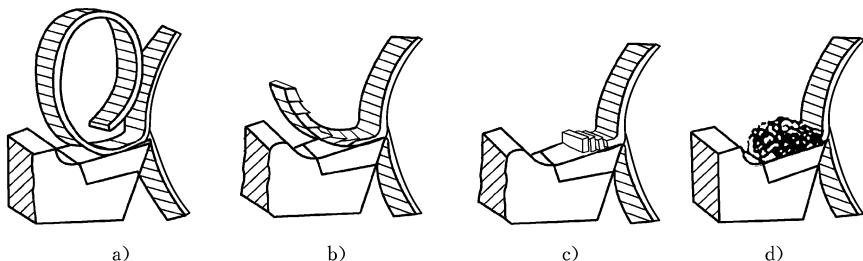


图 4-11 切屑类型

a) 带状切屑 b) 挤裂切屑 c) 单元切屑 d) 崩碎切屑

带状、挤裂、单元切屑只有在加工塑性材料时才可能得到。其中,带状切屑的切削过程最平稳,单元切屑的切削力波动最大。在生产中最常见的是带状切屑,有时得到挤裂切屑,单元切屑则很少见。假如改变挤裂切屑的条件,如进一步减小刀具前角,减低切削速度,加大切削厚度,就可以得到单元切屑;反之,则可以得到带状切屑。这说明切屑的形态是可以随切削条件而转化的。掌握了它的变化规律,就可以控制切屑的形态和尺寸,以达到卷屑和断屑的目的。

3. 切屑收缩

在金属切削过程中,经过滑移变形而形成的切屑,其外形与原来的切削层不同。如图4-12所示,切屑厚度 h 通常大于切削层厚度 h_D ,而切屑长度 l 却小于切削层长度 l_D 。这种现象称为切屑收缩。切屑厚度与切削层公称厚度之比称为切屑厚度压缩比。由定义可知: $\delta = h/h_D$ 。一般情况下, $\delta > 1$ 。

切屑厚度压缩比反映了切削过程中材料塑性变形程度的大小。对切削力、切削温度和表面粗糙度有重要影响。

在其他条件不变时,切屑厚度压缩比越大,则切削力越大,切削温度越高,已加工表面也越粗糙。因此,在切削加工过程中,可根据具体情况,采取相应措施来减小变形程度,改善切削过程。例如,切削前对工件进行适当的热处理,可降低被加工材料的塑性,使切屑变形减小。

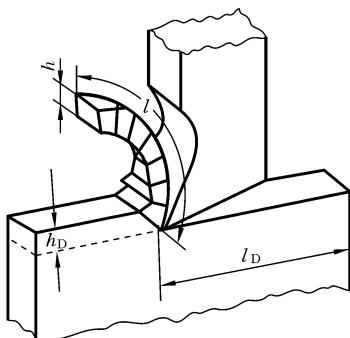


图 4-12 切屑收缩

4.2.2 积屑瘤

在一定速度下切削塑性材料时,前刀面上经常会黏附着一小块很硬的金属,这块金属就是积屑瘤(built-up-edge, BUE),它由前刀面与切屑间的剧烈摩擦而产生。

如图4-13a所示,当切屑沿前刀面流出时,在一定的温度与压力的作用下,与前刀面接触的切屑底层会受到很大的摩擦阻力。当摩擦阻力超过切屑的分子间力时,切屑底层的金属就会被撕下而留在前刀面上,在切削刃附近形成积屑瘤。随着切削的继续进行,积屑瘤逐渐长大;当长大到一定程度后,就容易破裂而被工件或切屑带走,然后又形成新的积屑瘤。此过程反复进行。

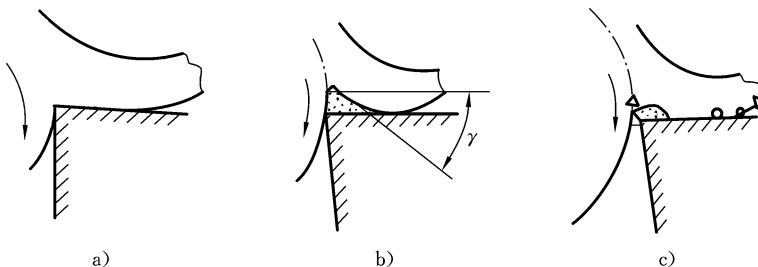


图4-13 积屑瘤及其对切削过程的影响

a) 切屑与刀具相对摩擦 b) 切屑部分焊合在刀具前刀面上 c) 已加工表面黏附的切屑硬点

如图4-13b所示,由于积屑瘤的存在,刀具的工作前角增大了。另外,在形成积屑瘤的过程中,金属材料因塑性变形而产生硬化,因此积屑瘤的硬度比被切材料高很多,可代替切削刃进行切削。由于积屑瘤可以保护切削刃、减小切削力,粗加工时希望积屑瘤存在。

积屑瘤时大时小、时有时无,影响切削过程的平稳性,使刀尖的位置偏离准确位置,继而使零件产生尺寸误差,加工精度降低。另外,积屑瘤会在已加工表面产生划痕,并且部分切屑还会黏附在已加工表面上,因此,积屑瘤会影响表面粗糙度,如图4-13c所示。积屑瘤对加工表面品质及零件加工精度有不利的影响,因此,精加工中应避免产生积屑瘤。

工件材料的塑性会影响积屑瘤的形成。塑性越好,越容易产生积屑瘤。因此,若要避免产生积屑瘤,应对塑性好的材料进行正火或调质处理,提高其硬度和强度,降低塑性,然后再进行加工。

切削速度的大小也会影响积屑瘤的形成。切削速度很低($v_c < 0.1 \text{ m/s}$)时,切削温度较低,切屑内部结合力较大,同时前刀面与切屑间的摩擦力较小,积屑瘤不易形成。切削速度很高($v_c > 1.5 \text{ m/s}$)时,切削温度很高,摩擦力较小,也不会产生积屑瘤。因此,一般精车、精铣时采用高速切削,而拉削、铰削时均采用低速切削,都可避免产生积屑瘤。

另外,增大前角、减小切削厚度、降低前刀面的粗糙度、合理使用切削液等,都可减少或避免积屑瘤的产生。

4.2.3 残余应力与冷硬现象

切削加工时,剧烈的摩擦会导致产生大量的热,该热量及加工时的切削力都会使

工件产生一定的内应力和裂纹。大部分的内应力和裂纹会随着切屑的分离而消失,但仍会有一小部分内应力和裂纹会残留在工件已加工表面的表层金属里,从而影响零件的表面品质和使用性能。若已加工表面各部分的残余应力(residual stress)分布不均匀,零件便会发生变形,从而影响尺寸和形状精度。这一点在细长零件或扁薄零件加工时表现得尤为明显。

切削加工时,前刀面的推挤,后刀面的挤压和摩擦,致使工件已加工表面层的晶粒产生很大变形,且硬度显著提高,这种现象称为冷硬现象或加工硬化(work hardening)。切削加工所造成的加工硬化,常伴随着表面裂纹的产生,因而使零件的疲劳强度与耐磨性降低。此外,由于已加工表面产生了冷硬层,在下一步切削时,刀具的磨损将更快。

残余应力与加工硬化都会影响材料的切削性能,降低加工零件的品质,因此有必要对其进行适当的控制。一般来说,凡是能减少切削变形、摩擦和切削热的措施,如增大刀具前角、提高切削速度、使用切削液等,都可降低残余应力和减少加工硬化现象。

4.2.4 切削力与切削功率

切削加工时,切削层金属和工件表面层金属会发生变形,工件表面与刀具、切屑与刀具会发生摩擦,因此,切削刀具必须克服变形抗力与摩擦力才能完成切削工作。变形抗力和摩擦力就构成了实际的切削力(cutting force)。

在切削过程中,切削力会使由机床、工件、刀具、夹具等构成的工艺系统发生变形,从而影响加工精度。如图 4-14 所示,由于切削力的作用,磨削后工件有可能成为腰鼓形。切削力还会影响切削热的大小、刀具耐用度、加工表面品质等。切削力是切削过程中所需要消耗的主要动力,因此也是工艺系统设计的主要依据。

生产中常常只需要知道切削力在某个方向上的分力大小,没必要知道总切削力的大小与方向。因此,为了适应工艺分析、机床设计及使用的需要,常将切削力分解为三个互相垂直的分力。以车削外圆为例,其切削力的三个分力如图 4-15 所示。

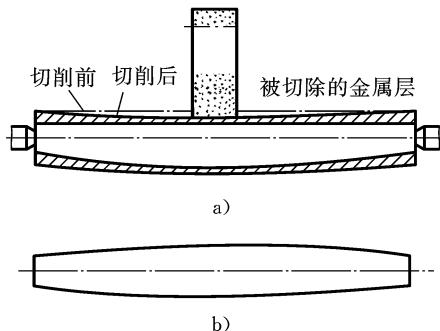


图 4-14 磨削受力变形

a) 磨削变形过程 b) 磨削后的工件

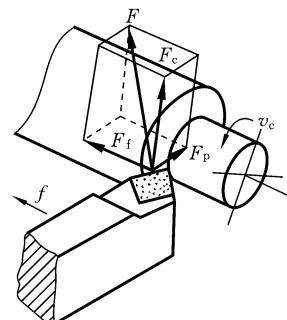


图 4-15 车削外圆面时切削力的分解

(1) 主切削力 F_c 是切削力在主运动方向上的正投影。主切削力的大小占总切削力的 80%~90%，消耗的功率占车床总功率的 90% 以上。因此，主切削力是各分力中最大的，是机床主要的受力。计算机床动力、校核主传动系统零件的强度和刚度、分析刀具和夹具受力情况时，均是以主切削力为依据的。主切削力过大，会使刀具发生崩刃或使机床发生“闷车”现象。

(2) 进给力 F_f 是切削力在进给运动方向上的正投影，又称轴向力。进给力主要作用在进给机构上，是设计和校核进给机构的主要参数。

(3) 径向力 F_p 是切削力在垂直于工作平面上的分力，又称径向力或吃刀抗力。车削时刀具沿径向运动的速度为零，因此该力不做功。但它作用在工件刚度较小的部位时，会使工件发生变形。磨削轴类零件时，径向切削力引起轴的弯曲变形，使得轴上各处的实际背吃刀量各不相同。变形越大，实际背吃刀量越小；变形越小，实际背吃刀量越大。因此，在轴的中间，也就是变形最大处，实际切削量最小；在轴的两端，也就是变形最小处，实际切削量最大。这样，磨削后的工件实际形状就变成了两头小、中间大的腰鼓形（见图 4-14）。

径向力除了可能使工件产生变形外，还有可能引起切削振动。因此，径向力对工件的加工精度影响很大，应采取措施减小或消除径向力的影响。如车细长轴时，常使用 $\varphi=90^\circ$ 的偏刀，就是为了减小径向力。

主切削力的大小是由很多因素决定的，其中最主要的因素是工件材料和切削用量。材料的强度、硬度越高，则切削力越大；材料的塑性越好，主切削力也越大；当背吃刀量与进给量增大时，主切削力也会随之增大。由于进给量比背吃刀量对切削力的影响要小，因此，单从主切削力和切削功率的角度考虑，加大进给量比加大背吃刀量对提高生产效率更有利。

主切削力的大小可根据经验公式进行计算。经验公式是在实验的基础上，综合了影响主切削力的各个因素而得到的。例如车外圆时，计算主切削力 F_c 的经验公式为

$$F_c = C a_p^x f^y K \quad (\text{N})$$

式中 C ——与工件材料、刀具材料等有关的系数；

a_p ——背吃刀量 (mm)；

f ——进给量 (mm/r)；

x, y ——指数；

K ——切削条件不同时的修正系数。

系数和指数可从有关手册中查得。例如，当用前角为 10° 、主偏角为 45° 的硬质合金车刀车削结构钢件外圆时，可查得： $C=1470, x=1, y=0.75$ 。这表明，背吃刀量对主切削力的影响比进给量对主切削力的影响大。

由于经验公式计算往往比较复杂，因此目前常用单位切削力来进行估算主切削力。单位切削力 p 是指单位切削面积所需要的切削力，与主切削力的关系为

$$F_c = p a_p f$$

单位切削力 p 的大小可从有关手册中查得,因此,只要知道了背吃刀量与进给量,便可估算出主切削力的大小。

切削功率 P 是三个切削分力所消耗功率的总和。车外圆时,径向速度为零,所耗功率为零;进给方向速度较低,所耗功率较小,占总功率的 1%~2%,可忽略不计。因此,一般可用主切削力来计算切削功率,即

$$P = F_c v_c$$

由上式可知,切削功率的大小是由主切削力和切削速度决定的,而主切削力又与背吃刀量和进给量有关,因此,直接影响切削功率的是切削用量三要素。

4.2.5 切削热

在切削过程中,绝大部分的切削功都将转化为热,所以有大量的热产生,这些热称为切削热(heat in cutting)。切削热的来源主要有以下三个方面:

- (1) 切削层金属在切削过程中的变形所产生的热,这是切削热的主要来源;
- (2) 切屑与刀具前刀面之间的摩擦所产生的热;
- (3) 工件与刀具后刀面之间的摩擦所产生的热。

切削热产生以后,由切屑、工件、刀具及周围的介质(如空气等)传出。各部分传出的比例取决于工件材料、切削速度、刀具材料及刀具几何形状。根据车削实验的结果知道,用高速钢车刀及与之相适应的切削速度切削钢材,不用切削液时,切削热传出的比例是:切屑传出的热为 50%~80%,工件传出的热为 10%~40%,刀具传出的热为 3%~9%,其他为周围介质传出的热。

虽然切削热主要是由切屑传出的,但传入切屑及介质中的热对加工没有影响。传入刀具的热虽不多,但由于刀具切削部分体积小,散热条件又较差,因此切削过程中刀具的温度可能很高(高速切削时可达 1000 ℃以上)。温度升高后,会降低刀具的切削性能,加速刀具的磨损。传入工件的热会使工件发生热变形,从而产生形状及尺寸误差。因此,在切削加工中,应设法减少切削热的产生,改善散热条件,从而减少切削热对刀具和工件的不良影响。

切削热的产生无疑会使切削温度升高,切削温度一般是指切削区的平均温度。生产实践中,一般不用仪器测量切削温度的高低,而是通过观察切屑的颜色来估计。这主要是因为随着切削温度的升高,金属内部组织结构会发生相应变化,这一变化会反映到切屑的颜色上。

切削温度的高低取决于切削热的产生和传出情况,它受切削用量、工件材料、刀具材料及几何形状等因素的影响。

在切削用量三要素中,切削速度对切削温度的影响最大。切削速度增加时,单位时间内产生的热量随之增加,使得切削温度升高。进给量和背吃刀量增大时,切削力增大,摩擦力也会随着增大,从而导致切削热增加,切削温度也会升高。在保持切削

面积相同的条件下,增大背吃刀量对切削温度的影响比增大进给量的小。因此,若单从降低切削温度的角度考虑,应通过增大背吃刀量来提高生产效率。

工件材料的强度及硬度越大,切削消耗的功越多,产生的切削热也越多,切削温度会随切削热的增加而升高。这就是切削钢材时比切削铸铁时的切削温度高很多的原因。

选用导热性好的工件材料和刀具材料,可以降低切削温度。主偏角减小时,切削刃参与切削的长度增加,传热条件较好,也可降低切削温度。前角较大时,切削过程中的变形和摩擦力都较小,产生的热较少,切削温度较低。但前角过大,会使刀具的传热条件变差,反而不利于切削温度的降低。

4.2.6 切削液的作用

合理选用切削用量、刀具材料及几何参数,可以降低切削温度,但降温作用十分有限。有效降低切削温度的方法是使用切削液(cutting fluid)。

在切削过程中连续大量地使用切削液。一方面,切削液充当润滑剂,可以减轻切屑与刀具、工件与刀具之间的摩擦,从而有效地降低由于摩擦而产生的切削热;另一方面,切削液吸收并带走切削区大量的热,使刀具与工件在加工中能得到及时的冷却,从而降低切削区的温度。合理地选用切削液,可以有效地降低切削力和切削温度,提高刀具耐用度和零件品质。

生产中常用的切削液主要有以下两类:

(1) 水基类,如水溶液、乳化液等,这类切削液的热容量大,流动性好,可以吸收大量的热,冷却效果极佳,但润滑作用不是很明显,对零件的品质提高不多,故多用于粗加工,以提高刀具的寿命或切削速度。

(2) 油基类,如植物油、矿物油等,这类切削液的热容量小,流动性比前者稍差,但润滑效果非常好,因此常用于精加工或某些成形表面的加工中,以提高加工表面的品质。

4.2.7 刀具的磨损与耐用度

在切削加工过程中,刀具与工件、刀具与切屑之间的剧烈摩擦会使刀具产生一定的磨损。随着刀具切削时间的延长,这种磨损不断地加大,最终将使得刀具无法继续进行切削。可重磨刀具经重新刃磨后,切削刃会恢复锋利而继续使用,一段时间后又会被磨损而无法使用。不论是可重磨刀具还是不可重磨刀具,最终都会完全报废。刀具从开始切削到最终完全报废,实际用于切削的所有时间之和称为刀具的使用寿命。

在正常情况下,刀具的磨损按发生部位的不同,可分为三种形式:后刀面磨损,前刀面磨损,前、后刀面同时磨损。

在切削厚度较大且切削速度较高时,切削塑性材料的刀具前刀面会被逐渐磨出

一个小的月牙洼,这就是前刀面磨损(见图 4-16a)。前刀面的磨损量用月牙洼的深度 KT 表示。当切削脆性材料时,或用较小的切削速度和较小的背吃刀量切削塑性材料时,在后刀面毗邻切削刃的部分磨损成小棱面,这就是后刀面磨损(见图 4-16b)。后刀面的磨损高度用 VB 表示。在一般的加工条件下,常会出现前、后刀面同时磨损的情况(见图 4-16c)。

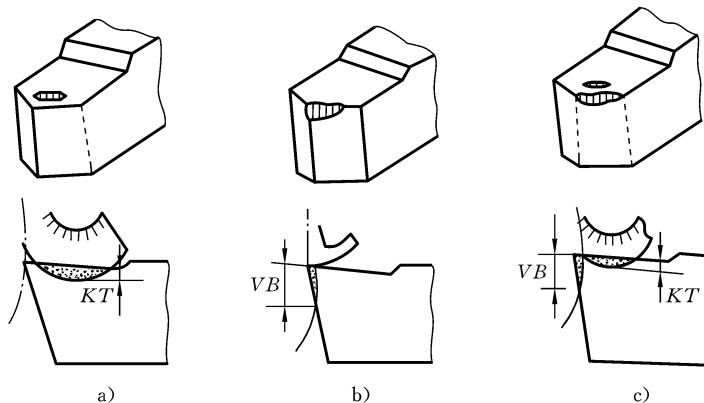


图 4-16 刀具磨损的形式

a) 前刀面磨损 b) 后刀面磨损 c) 前、后刀面同时磨损

刀具的磨损一般会经历三个阶段,如图 4-17 所示。第一阶段为初期磨损阶段(OA 段),第二阶段为正常磨损阶段(AB 段),最后是急剧磨损阶段(BC 段)。正常磨损阶段的刀具尺寸变化较小,这一阶段是刀具工作的有效时间。使用刀具时,应在正常磨损阶段的后期、急剧磨损阶段之前更换刀具或重磨刀具,这样既可以保证加工品质,又能避免刀具软化或崩刃,从而充分利用刀具材料。

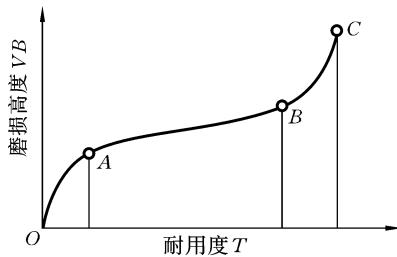


图 4-17 刀具磨损过程

VB 到达一定值作为磨钝标准。例如:若用硬质合金车刀切削碳钢,粗车时 $VB = 0.6 \sim 0.8$,精车时 $VB = 0.4 \sim 0.6$;若切削铸铁,粗车时 $VB = 0.8 \sim 1.2$,精车时 $VB = 0.6 \sim 0.8$ 。实际操作中,刀具是否磨钝,常以观察切屑的形状、颜色、工件表面粗糙度的变化及加工过程中的声音是否正常来判断。

刀磨后的刀具由开始切削到磨损量达到磨钝标准,所经历的所有切削时间之和称为刀具的耐用度,用 T 表示。粗加工时,多以切削时间表示刀具耐用度。如目前硬质合金焊接车刀的耐用度为 60 min,高速钢钻头的耐用度为 80~120 min,齿轮刀具的耐用度为 200~300 min 等。精加工时,常以走刀次数或加工零件个数来表示刀具耐用度。

刀具磨损到一定程度,就应重磨刀刃,以保持刀刃锋利。由于各类刀具都有后刀面磨损,而且容易测量,故通常用后刀面磨损高度

通过实验得知,切削速度对刀具的耐用度影响最大,其次是切削厚度,切削宽度的影响最小。刀具耐用度与切削用量和生产效率密切相关。刀具耐用度如果定得过高,则要选取较小的切削用量,从而降低生产效率;反之如果定得过低,虽然可用较大的切削用量以提高生产效率,但增加了换刀、磨刀等辅助生产时间,从而抵消了提高切削用量的效果。生产中常用的是使加工成本最低的耐用度,即经济耐用度。

4.2.8 材料切削加工性

材料切削加工性(machinability)是指材料被切削加工的难易程度。某种材料切削加工性的好坏往往是相对另一种材料而言的,具有一定的相对性。另外,具体的加工条件和要求不同,加工的难易程度也有很大的差别。例如:纯铁切除余量很容易,而要使表面粗糙度很低则很困难;不锈钢在普通机床上加工较容易,但在自动化机床上,由于断屑问题不好解决而较难加工。因此,在不同的情况下要用不同的指标来衡量,常用的指标如下:

(1) 一定刀具耐用度下的切削速度 v_T 。刀具耐用度为 T 时,切削某种材料所允许的切削速度为 v_T 。该值越大,则材料的切削加工性越好。通常取 $T=60$ min,则 v_T 可记作 v_{60} ,若取 $T=30$ min,则记作 v_{30} 。

(2) 相对加工性 K_r 。以正火处理后的 45 钢的 v_{60} 值作为基准,将其他材料的 v_{60} 值与其比较,所得比值即为该材料的 K_r 。常用材料的相对加工性可分为 8 级(见表 4-5)。凡 $K_r > 1$ 的材料,其切削加工性比 45 钢好;反之较差。

表 4-5 材料切削加工性

加工性等级	名称和种类		K_r	代表性材料
1	很容易切削	一般有色合金	>3	铝镁合金,铝铜合金
2	容易切削材料	易切削的钢	$2.5 \sim 3.0$	15Cr 退火 $R_e = 380 \sim 450$ MPa 20 钢正火 $R_e = 400 \sim 500$ MPa
3		较易切削的钢	$1.6 \sim 2.5$	30 钢正火 $R_e = 450 \sim 560$ MPa
4	普通材料	一般的钢及铸铁	$1.0 \sim 1.6$	45 钢,灰铸铁
5		稍难切削的材料	$0.65 \sim 1$	2Cr13 调质 $R_e = 850$ MPa 85 钢 $R_e = 900$ MPa
6		较难切削的材料	$0.5 \sim 0.65$	45Cr 调质 $R_e = 1050$ MPa 65Mn 调质 $R_e = 950 \sim 1000$ MPa
7	难切削的材料	难切削的材料	$0.15 \sim 0.5$	50CrV 调质,某些钛合金
8		很难切削的材料	<0.15	某些钛合金,铸造镍基高温合金

(3) 已加工表面品质。凡较容易获得较好表面品质的材料,其切削加工性较好;反之较差。精加工时常以此作为指标。

(4) 切屑控制或断屑的难易。凡切屑较容易控制或易于断裂的材料,其切削加

工性较好;反之较差。在自动机床上加工时,常以此为主要指标。

(5) 切削力。在相同的条件下,凡需要较小切削力的材料,其切削加工性较好;反之较差。在粗加工中,当机床的动力或刚度不足时,常以此为主要指标。

在以上指标中,前两者是最常用的指标,对于不同的加工条件都适用。

材料的使用要求经常与其切削加工性相矛盾,因此,生产中应在保证零件使用性能的前提下,通过各种途径来提高材料的切削加工性。

直接影响材料切削加工性的主要因素是其物理、力学性能。若材料的强度、硬度高,则切削力大,切削温度高,刀具磨损快,切削加工性较差。若材料的塑性好,则断屑困难,不易获得较好的表面品质,切削加工性也就较差。若材料的导热性差,切削热不易散失,会导致切削温度高,其切削加工性也就不好。

通过适当的热处理,可以改善材料的力学性能,从而达到改善其切削加工性的目的。如对高碳钢进行球化退火处理以降低其硬度,对低碳钢进行正火处理以降低其塑性,对铸铁进行退火处理以降低其表层硬度等,都可达到改善切削加工性的目的。

除热处理外,还可通过适当调整材料的化学成分来改善其切削加工性。如在钢中添加硫、铅等元素,可使其切削加工性得到显著改善,这样的钢称为易切削钢。

4.3 切削加工的技术经济评价

在考虑机械加工的方案时,最终的目标是在保证加工零件品质的同时,尽可能地降低其生产成本。生产过程中的许多因素都会影响生产成本,这些因素主要有:切削用量的选择、工件材料的可切削性、刀具材料和角度的合理选择等。它们对生产成本的影响主要是通过生产效率与材料消耗成本这两个指标反映出来的。全面地分析各有关因素与生产效率和材料消耗成本之间的关系是一个复杂的问题,需要时可查阅关于“技术经济分析”的资料。

1. 产品品质

零件经切削加工后的品质主要包括加工精度与表面品质。

通常所说的某种加工方法所能达到的加工精度,是指正常操作情况下所能达到的经济精度(即保证生产成本最低的精度)。设计零件时:首先应根据零件尺寸的重要性来决定选择哪一级精度;其次应考虑本厂的设备条件和加工费用的高低,即在保证能达到技术要求的条件下,尽可能地降低精度等级。

表面品质包括表面粗糙度、表层加工硬化的程度和深度、表层残余应力的性质和大小。在一般情况下,零件的尺寸精度要求越高,其形状和位置精度要求就越高,表面粗糙度也越低。但有些零件出于某种需要,其表面要求光洁而精度要求并不高,如机床操作手柄、面板等。

对于重要的零件,除限制零件表面粗糙度外,还要控制其表层加工硬化的程度和深度,以及表层残余应力的性质和大小。对于一般零件,则主要规定其表面粗糙度的

范围。

2. 生产效率

切削加工中,常以单位时间内生产的零件数量来表示生产效率,即

$$R_0 = \frac{1}{t_w}$$

式中 R_0 ——生产效率;

t_w ——生产一个零件所需的时间。

t_w 由三个部分组成:① 基本工艺时间 t_m ,即加工一个零件所需的总切削时间,也称机动时间;② 辅助时间 t_c ,即除切削时间之外,与加工直接有关的其他时间,它是工人为了完成切削加工而消耗于各种操作,如调整机床、刀具等上的时间;③ 其他时间 t_o ,即除切削时间之外,与加工没有直接关系的时间,如擦拭机床、清扫切屑等花费的时间。

由 $R_0 = 1/t_w$ 可知,提高切削生产效率的方法,就是减少基本工艺时间、辅助时间及其他时间。采用自动化生产线或自动加工机床,使用先进的工夹具等设备,可有效地减少辅助时间。改进车间管理,妥善安排和调度生产,可以有效地减少其他时间。而减少基本工艺时间则有多种途径,如图 4-18 所示,车削外圆时所用基本工艺时间的计算式为

$$t_m = \frac{l \cdot h}{n f a_p} = \frac{\pi d_w l h}{1000 v_c f a_p}$$

式中 l ——车刀行程长度(mm);

d_w ——工件待加工表面直径(mm);

h ——外圆面切削加工余量(mm);

v_c ——切削速度(m/s);

f ——进给量(mm/s);

a_p ——背吃刀量(mm);

n ——工件转速(r/s)。

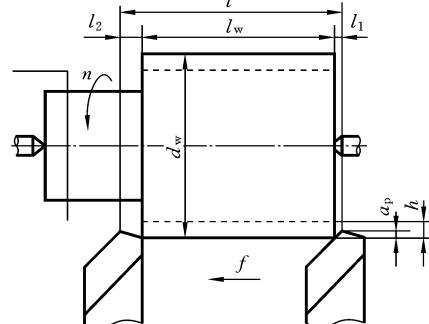


图 4-18 基本工艺时间计算

由上式可知,减少基本工艺时间的主要方法有以下几种:

- (1) 在可能的条件下,采用先进的毛坯制造工艺和方法,减少切削加工余量;
- (2) 合理地选择切削用量,粗加工时可采用强力切削以增大 f, a_p 值,精加工时宜用高速切削以增大 v_c 值;
- (3) 改善其他切削条件,如使用切削液等。

3. 经济性分析

零件切削加工的成本,包括工时成本和刀具成本两部分。工时成本受基本工艺时间、辅助工艺时间及其他时间的影响,刀具成本受刀具耐用度、刀具使用寿命的影响。显然,若要在保证零件品质的条件下降低切削加工的成本,主要是通过提高生产效率和降低刀具成本两条途径。

复习思考题

4. 1-1 对刀具材料的性能有哪些基本要求?
4. 1-2 简述车刀前角、后角、主偏角、副偏角、刃倾角的作用。
4. 1-3 什么是切削用量? 切削用量各要素对加工零件品质有何影响?
4. 1-4 用高速钢制造锯刀, 用碳素工具钢制造拉刀, 是否合理? 为什么?
4. 1-5 试说明下列加工方法的切削运动: 车端面孔、钻孔、刨平面、磨内孔。
4. 2-1 积屑瘤是如何形成的? 它对切削加工有何影响?
4. 2-2 试说明切削热的主要来源。
4. 2-3 切削液的主要作用是什么? 如何选择切削液?
4. 2-4 车刀有哪几种结构形式? 自动化大量生产宜选用哪一种结构?
4. 2-5 材料的切削加工性的含义是什么? 如何衡量一种材料的切削加工性?
4. 2-6 如何改善材料的切削加工性?
4. 2-7 什么是刀具的耐用度? 如何提高刀具的耐用度?
4. 2-8 车刀安装时, 若刀尖与工件轴线不在同一高度上, 会产生什么后果?
4. 2-9 零件的加工品质包括哪些内容?
4. 2-10 切屑是怎样形成的? 常见的切屑有哪几种?
4. 2-11 刀具磨损的形式有哪几种? 刀具磨损对加工有何影响?
4. 3-1 切削加工的生产效率一般用什么来表示? 如何提高生产效率?
4. 3-2 粗车 45 钢轴的外圆, 毛坯直径 $d_w = 86$ mm, 粗车后直径 $d_m = 80$ mm, 被加工外圆表面长度 $l_w = 50$ mm, 切入、切出长度 $l_1 = l_2 = 3$ mm, 切削用量 $v_c = 120$ m/min, $f = 0.2$ mm/r, $a_p = 3$ mm, 试求基本工艺时间 t_m 。

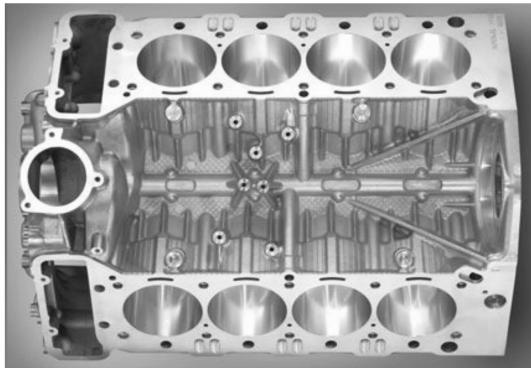


图 5-0 通过多种加工方法获得的 V 形发动机的缸体成品

第 5 章 典型表面的加工

【学习指导】 学习本章前应预习《机械制图》教材中有关三视图、形面构造与建模的内容,《互换性与技术测量》教材中有关尺寸精度、形状公差、位置公差和表面粗糙度的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的相关工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《基于项目的工程实践》教材中的有关章节。

【主要内容】 外圆面的加工,孔的加工,平面的加工,齿形表面的加工。

【学习重点】 细长轴外圆的车削加工,外圆表面的磨削方法,钻孔和镗孔的工艺特点,孔的分类、加工方法及选择,铣削的工艺特点,铣削方式,直齿圆柱齿轮的铣削。

5.1 概述

1. 零件表面的形成

零件表面通常都可看成是一条线(母线)沿另一条线(导线)运动的轨迹。母线和导线统称为表面的发生线。切削加工时,实现这两条发生线的是刀具的切削刃与工件的相对运动,并通过此运动切削工件,形成表面。

不同的加工运动、不同的切削刀刃形状,形成发生线的方式不同,形成零件表面的方法也不同。形成零件表面的方法可归纳为以下四种:

(1) 轨迹法。工件表面的发生线(母线和导线)均由轨迹运动生成。如图 5-1a 所示,刀刃为切削点 3,它按照一定的规律生成运动轨迹 5,得到母线 2,工件绕自身

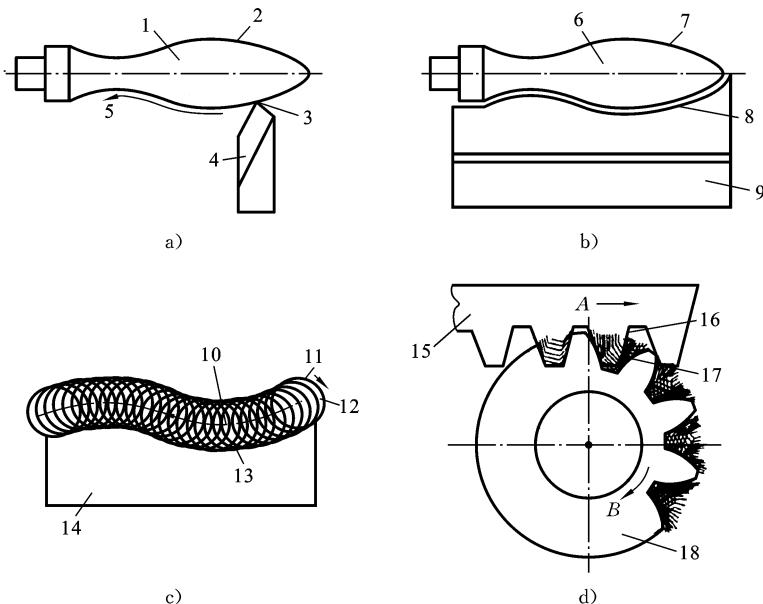


图 5-1 形成零件表面的四种方法

a) 轨迹法 b) 成形法 c) 相切法 d) 展成法

1、6、14、18—工件 2、7、13—母线 3、8、11、16—切削点(线)

4、9—车刀 5、10—运动轨迹 12、15—滚齿刀 17—共轭发生线

的轴线作回转运动,形成导线,最终获得回转表面。

(2) 成形法。工件的一条发生线是通过刀刃的形状直接获得的。如图 5-1b 所示,刀刃 8 的形状与工件的母线 7 的相同,工件绕自身的轴线作回转运动,形成导线,最终获得回转表面。

(3) 相切法。工件的一条发生线是通过刀刃运动轨迹的包络线。如图 5-1c 所示,刀刃切削点 11 作回转运动,其回转轴线按照一定的规律生成运动轨迹 10,刀刃切削点运动轨迹的包络线形成发生线 13。

(4) 展成法。工件的一条发生线也是刀刃运动轨迹的包络线,且包络线需要通过滚齿刀与工件之间的展成运动来生成。如图 5-1d 所示,滚齿刀刀刃的形状为一条直线,通过滚齿刀的运动与工件的运动所组合而成的展成运动,使切削线 16 相对于工件 18 的位置按确定的规律变化,形成共轭发生线 17,共轭发生线 17 是切削线 16 的包络线。各种形式的齿轮、链轮大多采用展成法加工。

2. 获得零件尺寸精度的方法

在加工时,除了获得零件的表面外,还需保证一定的加工精度。获得尺寸精度的方法有如下几种:

(1) 试切法。通过试切、调整、再试切、再调整,反复进行,直到达到尺寸要求为止的加工方法称为试切法。这种方法的效率低,对操作者的技术要求高,主要适用于

单件、小批生产。

(2) 调整法。先调整好刀具和工件在机床上的相对位置,并在一批零件的加工过程中保持这个位置不变,以保证被加工尺寸的方法称为调整法。这种方法广泛用于各类半自动、自动机床和自动线上的成批、大量生产。

(3) 定尺寸刀具法。用刀具的相应尺寸来保证加工部位的尺寸的方法称为定尺寸刀具法,如铰孔、拉孔等。这种方法的加工精度主要取决于刀具的制造、刃磨品质和切削用量。其优点是生产效率高,但刀具制造较复杂,常用于孔、螺纹和成形表面的加工。

(4) 自动控制法。这种方法是用度量装置、进给机构和控制系统构成加工过程的自动循环,即自动完成加工中的切削、度量、补偿调整等一系列的工作,当工件达到要求的尺寸时,机床自动退刀停止。

此外,零件的相互位置精度主要由机床的精度、夹具精度和工件装夹精度来保证。

5.2 外圆表面的加工

轴、套、盘类零件的主要表面或辅助表面常常由外圆表面组成,外圆表面的加工在表面加工中占有很大的比重。外圆表面的技术要求有以下几种:

- (1) 尺寸精度,包括外圆表面直径和长度的尺寸精度;
- (2) 形状精度,包括圆度、圆柱度和轴线的直线度等;
- (3) 位置精度,包括与其他外圆表面(或孔)间的同轴度,以及与规定平面间的垂直度和径向圆跳动等;
- (4) 表面品质,包括表面粗糙度、表面层的加工硬化、金相组织变化和残余应力等。

车削、磨削及光整加工是外圆表面的主要加工方法。

5.2.1 外圆表面的车削

车削(turning)是外圆表面粗加工、半精加工的主要方法。单件、小批生产中常采用普通卧式车床;成批、大量生产中多采用生产效率高的多刀半自动车床、液压仿形车床或数控车床等。

1. 外圆车削的工艺范围

(1) 粗车。粗车外圆表面的主要目的是去掉零件大部分的加工余量以达到较高的生产效率,为后续加工做好准备。一般粗车的加工尺寸精度公差等级可达IT10~IT13,表面粗糙度 R_a 可达 $6.3\sim12.5\mu\text{m}$ 。粗车外圆表面也可作为不重要表面或次要表面的最终工序。

(2) 半精车。半精车的加工尺寸精度公差等级可达IT9~IT10,表面粗糙度 R_a 可达 $3.2\sim6.3\mu\text{m}$ 。半精车外圆表面的主要目的是为零件的精加工做准备,也可以

作为外圆表面的最终加工工序。

(3) 精车。精车的加工尺寸精度公差等级可达 $IT7 \sim IT8$, 表面粗糙度 R_a 可达 $0.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。精车外圆表面可作为表面加工的最终工序或光整加工的预加工。

(4) 精细车。精细车常作为终加工工序, 加工尺寸精度公差等级可达 $IT6 \sim IT7$, 表面粗糙度 R_a 可达 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。高速精细车是小型有色金属零件的主要加工方法, 并可获得比加工钢件和铸铁件更低的表面粗糙度(R_a 为 $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$)。精细车所使用的车床应具备较高的精度和刚度。

为了提高外圆车削的生产效率, 常选用新型刀片材料。如采用含有添加剂(如碳化钽或碳化铌等)的新型硬质合金、新型陶瓷(加入碳化钛及其他添加剂的复合陶瓷及氮化硅陶瓷)及立方氮化硼等, 或使用涂层硬质合金(如涂覆碳化钛、氮化镍等), 可以提高切削速度或刀具耐用度。

2. 外圆车削的工艺特点

(1) 生产效率较高。外圆车刀结构简单, 刚度高, 制造、刃磨、安装方便, 且车削过程是连续的, 比较平稳, 故可进行高速切削或强力切削。

(2) 应用广泛。不仅轴和盘套类零件上的外圆可进行车削, 而且其他能在车床上装夹的零件, 其外圆也可进行车削。

(3) 加工的材料范围较广。钢、铸铁、非金属和某些金属均可车削。当要求有色金属加工精度很高和表面粗糙度很低时, 可在精车之后进行精细车, 以代替磨削。

3. 细长轴外圆的车削加工

通常将长径比 $L/D \geq 5$ 的轴称为细长轴, 其刚度很低, 车削时容易弯曲和振动, 产生腰鼓形或竹节形误差而不能保证加工品质。因此, 必须采取有效措施来解决车削时的变形、振动等问题。

1) 改进工件中的装夹 车削细长轴时, 工件的装夹采用一端在卡盘中夹紧, 另一端支承在顶尖中的方法。如图 5-2 所示, 为了避免工件因切削热而膨胀伸长, 从而引起弯曲变形, 尾顶尖应采用弹性尾架顶尖, 因它能自动伸缩。

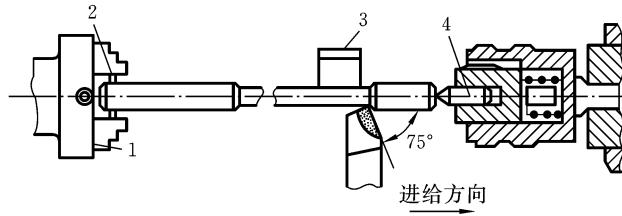


图 5-2 改进工件中的装夹

1—卡盘 2—钢丝 3—跟刀架支承块 4—弹簧顶尖

在车床卡盘中夹紧工件常用的形式有两种: 一是在工件的左端绕上较细的钢丝, 以减小接触面积, 使工件在卡盘内能自由调节其位置, 可避免被卡爪卡死而引起弯曲变形; 二是在卡盘一端的工件上车出一个缩颈部分(见图 5-3), 缩颈直径 $d = D/2$ (D

为工件的坯料直径),因而增加了工件的柔性,起到与万向接头类似的作用,缓解了由于坯料本身的弯曲而在卡盘强制夹持下轴心线歪斜的影响。

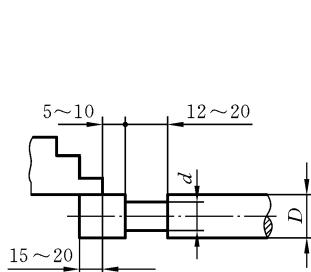


图 5-3 缩颈法

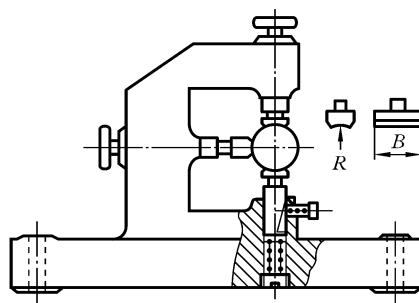


图 5-4 跟刀架

此外,可采用如图 5-4 所示的跟刀架。它有三个铸铁支承块,其圆弧面 R 经过与工件配研贴合紧密,宽度 B 常取工件直径的 $1.2\sim1.5$ 倍。切削时工件外圆被限制在刀具和三个支承块之间,能有效地提高工件的刚度,减小切削振动和加工误差。粗车时跟刀架的支承块装在刀尖后面 $1\sim2$ mm 处(见图 5-5a);精车时支承块则装在刀尖前面(见图 5-5b),以防止划伤已精车的工件表面。

2) 选择合理的切削方法 车削细长轴时,宜采用由车头向尾座走刀的反向切削法(见图 5-5)。这时在轴向切削力 F_t 的作用下,从卡盘到车刀区段内,工件受到的是拉力;利用可伸缩的回转顶尖,不会把工件顶弯。同时选择了较大的进给量和主偏角,增大了轴向切削力,工件在大的轴向拉力作用下,能有效地消除径向颤动,使切削过程平稳。

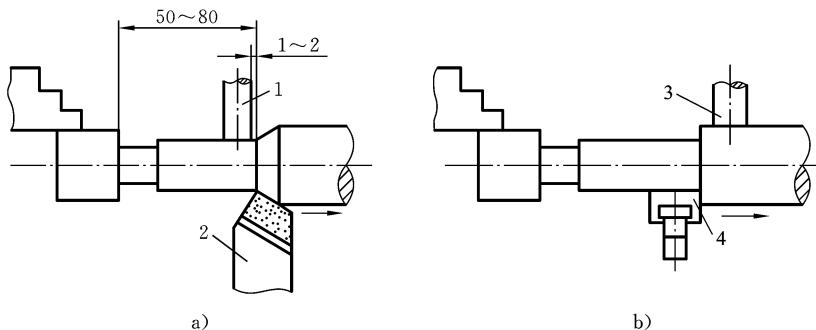


图 5-5 跟刀架安装位置

a) 粗车 b) 精车

1、3—跟刀架 2—粗车刀 4—宽刃精车刀

3) 合理地选择刀具 粗车刀(见图 5-6)常用较大的主偏角(75°)。以增大轴向力而减小径向力,可以防止工件的弯曲变形和振动。选用较大的前角($15^\circ\sim20^\circ$)和较小的后角(3°),既可减小切削力又可加强刃口强度。通过磨出卷屑槽和选用 5° 的

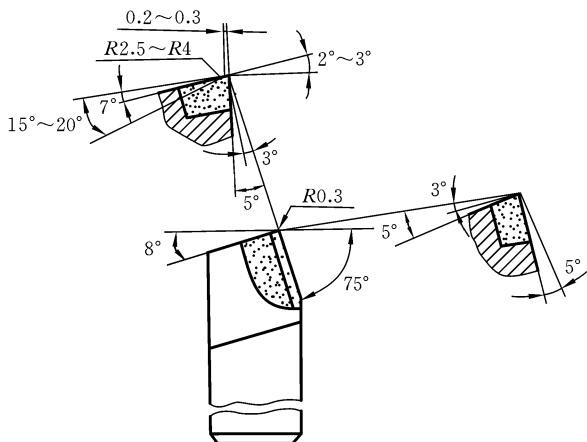


图 5-6 细长轴粗车刀

刃倾角,以控制切屑的顺利排出。

刀片材料宜采用强度和耐磨性较好的硬质合金,如 YW1 或 YG6A。

精车刀(见图 5-7)常用宽刃的高速钢刀片,装在弹性可调节的刀排内。刀片装入刀排内形成 25° 的前角和 10° 的后角,并旋转形成 $1.5^\circ\sim2^\circ$ 的刃倾角,刀刃宽度 $B=(1.3\sim1.55)f$ (mm)。采用大进给量、低速切削($f=10\sim20$ mm/r, $v_c=1\sim2$ m/min)。

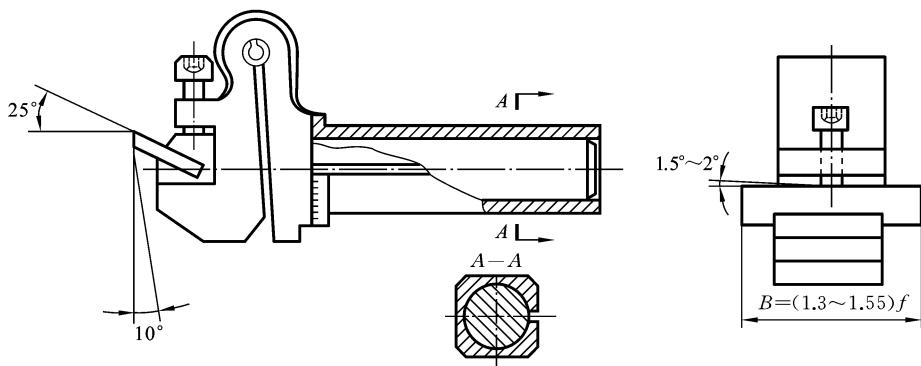


图 5-7 精车刀

这种大前角、无倒棱的宽刀,刀刃易于切入工件,切下很薄的切屑,便于消除粗车时留在工件上的形状误差。小刃倾角($1.5^\circ\sim2^\circ$)和弹性刀柄使得切入平稳,并防止振动和啃刀,低速切削时可以避免振动和产生积屑瘤,且宽平刀刃可以修光工件表面,因此可以获得良好的品质。

此外,粗车刀安装时刀尖可比工件中心高 $0.1\sim0.15$ mm,使刀尖部分的后刀面压住工件,车刀此时相当于跟刀架的第四个支承块,有效地增强了工件的刚度。精车时刀具安装高度低于工件中心 $0.1\sim0.15$ mm,以增大后角减少刀具磨损,并使弹性刀柄振动时刀刃不会啃入工件。

5.2.2 外圆表面的磨削

磨削(grinding)加工是外圆精加工的主要方法。它用砂轮作切削工具，既能加工淬火的黑色金属零件，也能加工不淬火的黑色金属零件和有色金属零件。外圆磨削分为粗磨、精磨、光整加工。

1. 砂轮

关于砂轮(grinding wheel)的结构可参阅文献[1]中的磨削加工。砂轮是由磨料-结合剂-空隙所组成,其比例及磨料的粒度大小决定了砂轮的特性。

1) 粒度 粒度是指磨料颗粒的大小,通常分为磨粒(颗粒尺寸 $>40\ \mu\text{m}$)和微粉(颗粒尺寸 $\leqslant 40\ \mu\text{m}$)两类。磨粒用筛选法确定粒度号,如粒度 60# 的磨料,表示其大小正好能通过 1 in(1 in=2.54 cm) 长度上孔眼数为 60 的筛网。粒度号越大,表示磨料颗粒越小。微粉按其颗粒的实际尺寸分组,如 W20 是指用显微镜测得的实际尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 的微粉。

粒度对加工表面粗糙度和磨削生产效率影响较大。如表 5-1 所示,一般来说,粗磨用粗粒度($30^# \sim 46^#$),精磨用细粒度($60^# \sim 120^#$)。当工件材料硬度低、塑性大和磨削面积较大时,为了避免砂轮空隙被堵塞,也可采用粗粒度的砂轮。

表 5-1 砂轮磨料的粒度及适用范围

类别	粒 度 号	适 用 范 围
磨 粒	8# 10# 12# 14# 16# 20# 22# 24#	荒磨
	30# 36# 40# 46#	一般磨削, 加工表面粗糙度 R_a 可达 $0.8 \mu\text{m}$
	54# 60# 70# 80# 90# 100#	半精磨、粗磨, 加工表面粗糙度 R_a 可达 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$
	120# 150# 180# 220# 240#	精磨、精密磨、超精磨、成形磨、刀具刃磨、珩磨
微 粉	W63 W50 W40 W28	精磨、精密磨、超精磨、珩磨、螺纹磨
	W20 W14 W10 W7 W5 W3.5 W2.5	超精密磨、镜面磨、精研, 加工表面粗糙度 R_a
	W1.5 W1.0 W0.5	可达 $0.012 \sim 0.05 \mu\text{m}$

2) 硬度 砂轮的硬度是指砂轮工作表面的磨粒在磨削力的作用下脱落的难易程度。它反映磨粒与结合剂的黏结强度。如磨粒不易脱落则称砂轮硬度高,反之则称砂轮硬度低。

砂轮的硬度从低到高分为超软、软、中软、中、中硬、硬、超硬 7 个等级(见表 5-2)。

表 5-2 砂轮硬度及适用范围

工件材料较硬时,为使砂轮有较好的自锐性,应选用较软的砂轮;工件与砂轮的接触面积大、工件的导热性差时,为减少磨削热,避免工件表面烧伤,应选用较软的砂轮;对于精磨或成形磨削,为了保持砂轮的廓形精度,应选用较硬的砂轮;粗磨时应选用较软的砂轮,以提高磨削效率。

3) 结合剂 结合剂是将磨料黏结在一起,使砂轮具有必要的形状和强度的材料。结合剂的性能对砂轮的强度、抗冲击性、耐热性、耐蚀性,以及对磨削温度和磨削表面品质都有较大的影响。

常用结合剂的种类有陶瓷、树脂、橡胶及金属等。陶瓷结合剂的性能稳定,耐热,耐酸、碱,价格低廉,应用最为广泛;树脂结合剂强度、韧度高,多用于高速磨削和薄片砂轮;橡胶结合剂适用于无心磨的导轮、抛光轮、薄片砂轮等;金属结合剂主要用于金刚石砂轮(见表 5-3)。

表 5-3 砂轮结合剂种类

名称	代号	特 性	适 用 范 围
陶瓷	V	耐热,耐油和耐酸、碱,强度较高,但较脆	除薄片砂轮外的各种砂轮
树脂	B	强度高,富有弹性,具有一定抛光作用,耐热性较差,不耐酸、碱	荒磨砂轮,磨窄槽、切断用砂轮,高速砂轮,镜面磨砂轮
橡胶	R	强度高,弹性更好,抛光作用好,耐热性差,不耐油和酸,易堵塞	磨削轴承沟道砂轮,无心磨导轮,切割薄片砂轮,抛光砂轮

4) 组织 砂轮的组织是指砂轮中磨料、结合剂和空隙三者间的体积比例关系。按磨料在砂轮中所占体积的不同,砂轮的组织分为紧密、中等和疏松三大类。

砂轮的组织号、磨料体积分数和用途如表 5-4 所示。组织号越大,磨料的体积分数越小,表明砂轮越疏松。这样,空隙就越多,砂轮不易被切屑堵塞,同时可把切削液或空气带入磨削区,使散热条件改善。但过分疏松的砂轮,磨料含量少,容易磨钝,砂轮廓形也不容易长久保持。生产中最常用的是中等组织(组织号 4~7)的砂轮。

表 5-4 砂轮的组织号、磨料体积分数和用途

组织号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
磨料体积分数 /%	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34
用途	成形磨削,精密磨削				磨削淬火钢,刀具刃磨				磨削韧度高而硬度不高的材料				磨削热敏感性大的材料		

2. 磨削过程

从本质上来看,磨削也是一种切削,砂轮表面上的每一个磨粒可以近似地看成一

个微小刀齿。砂轮上比较锋利而凸出的磨粒可以切下工件材料,不太凸出或磨钝的磨粒只在工件表面上刻划出细小的沟痕,比较凹下的磨粒只从工件表面上滑擦而过。磨粒切削过程大致可分为三个阶段(见图 5-8)。

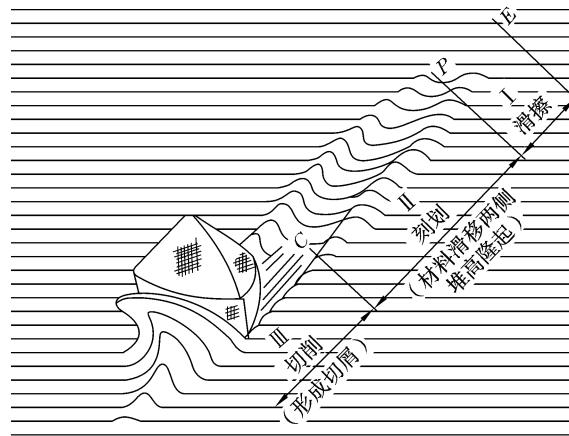


图 5-8 磨粒切削过程的三个阶段

(1) 滑擦阶段。磨粒从工件表面上滑擦而过,表面金属只有弹性变形而无切屑。

(2) 刻划阶段。随着挤入深度逐步增大,表面金属由弹性变形逐步过渡到塑性变形,就表示磨削过程进入刻划阶段。此时磨粒切入金属表面,磨粒的前方及两侧出现表面隆起现象,在工件表面刻划成沟纹。

(3) 切削阶段。随着切削厚度逐步增加,在达到临界值时,被磨粒推挤的金属明显地滑移而形成切屑。

3. 磨削工艺特点

(1) 精度高、表面粗糙度低。砂轮表面有极多的切削刃,并且刃口圆弧半径 r_n 小。磨粒上锋利的切削刃能够切下一层很薄的金属,切削厚度可以小到数微米。

磨床有较高的精度和刚度,并有实现微量进给机构,可以实现微量切削。磨削的切削速度高,磨削时有很多切削刃同时参加切削,每个磨刃只切下极细薄的金属,残留表面的高度很小,有利于形成光洁的表面。

(2) 砂轮有自锐作用。在磨削过程中,磨粒的破碎产生新的、较锋利的棱角,以及由于磨粒的脱落而露出一层新的锋利磨粒,能够部分地恢复砂轮的切削能力,这种现象称为砂轮的自锐作用,也是其他切削刀具所没有的。在实际生产中,可利用这一原理进行强力连续切削,提高生产效率。

(3) 磨削的径向磨削力 F_p 大。 F_p 作用在工艺系统刚度较小的方向上,因此,加工刚度较小的工件时,应采取相应的措施,增大工艺系统的刚度。

(4) 磨削温度高。磨削时切削速度高,再加上磨粒多为负前角,挤压和摩擦严重,产生的切削热多,加上砂轮的导热性很差,大量的磨削热在磨削区形成瞬时高温,容易造成工件表面烧伤和微裂纹。因此,磨削时应采用大量的切削液以降低磨削温度。

4. 外圆表面的磨削方法

粗磨后工件的尺寸精度公差等级可达 IT8~IT9, 表面粗糙度 R_a 可达 $0.8\sim1.6\mu\text{m}$, 精磨后工件的尺寸精度公差等级可达 IT6~IT7, 表面粗糙度 R_a 可达 $0.2\sim0.8\mu\text{m}$ 。外圆表面的磨削可参阅文献[1]中的有关内容。

图 5-9 所示为无心磨削 (centerless grinding) 的加工原理。无心磨削外圆时, 工件不是用顶尖或卡盘定心, 而是直接由托板和导轮支承, 用被加工表面本身定位。磨削砂轮以高速旋转作切削主运动, 导轮是用树脂或橡胶为结合剂的砂轮, 它与工件之间的摩擦因数较大, 当导轮以较低的速度带动工件旋转时, 工件的线速度与导轮表面的线速度相近。工件由托板与导轮共同支承, 工件的中心一般应高于砂轮与导轮的连心线, 以免工件加工后出现棱圆形。

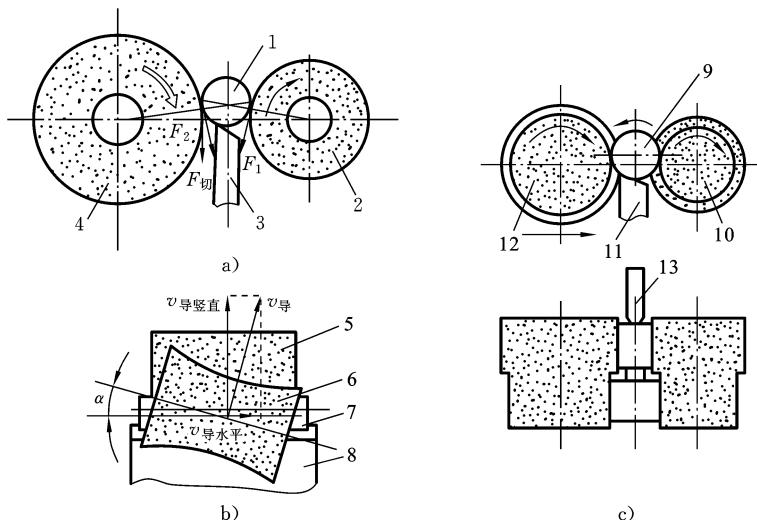


图 5-9 无心磨削的加工原理

a) 磨光轴 b) 磨锥度轴 c) 磨阶梯轴

1、7、9—工件 2、6、10—导轮 3、8、11—托板 4、5、12—砂轮 13—挡块

无心外圆磨削有两种方法: 贯穿磨削法(纵磨法)和切入磨削法(横磨法)。用贯穿磨削法时, 将工件从机床前面放到托板上并推至磨削区。导轮轴线在竖直平面内倾斜一个角度, 导轮表面经修整后为一回转双曲面, 其直母线与托板表面平行。工件被导轮带动回转时产生一个水平方向的分速度(见图 5-9b), 从导轮与磨削砂轮之间穿过。用贯穿磨削法时, 工件可以一个接一个地连续进入磨削区, 生产效率高且易于实现自动化。用贯穿磨削法可以磨削圆柱形、圆锥形、球形工件, 但不能磨削带台阶的圆柱形工件。

用切入磨削法时, 导轮轴线的倾斜角度很小, 仅用于使工件产生小的轴向推力, 顶住挡块而得到可靠的轴向定位(见图 5-9c), 工件与导轮向磨削轮作横向切入进给, 或由磨削轮向工件进给。

5.2.3 外圆表面的精加工及光整加工

1. 砂带磨削

砂带(sand belt)磨削是用粘满细微、尖锐砂粒的砂带作为磨削工具的一种加工方法。砂带磨削可以根据工件的几何形状,用相应的接触方式,在一定的工作压力下与工件接触,并作相对运动,对工件表面进行磨削和抛光。这种多刀刃连续切削的高效加工工艺,近年来获得极大的发展。它具有以下特点:

(1) 磨削效率高。砂带磨削的效率是铣削的10倍,是目前金属切削机床中效率最高的一种,功率利用率达95%。

(2) 磨削表面品质好。砂带与工件柔性接触,磨粒所受的载荷小且均匀,能减振,属于弹性磨削。加上工件受力小,发热少,散热好,因而可获得好的加工品质,表面粗糙度 R_a 可达 $0.02 \mu\text{m}$,特别适合加工细长轴和薄壁套筒等刚度较小的零件。

(3) 磨削性能好。由静电植砂制作的砂轮,磨粒有方向性,尖端向上,摩擦生热少,砂轮不易堵塞,切削时不断有新磨粒进入磨削区,磨削条件稳定。

(4) 适用范围广,可用于内、外圆及成形表面的磨削。

图5-10给出了几种常见的砂带磨削方式。

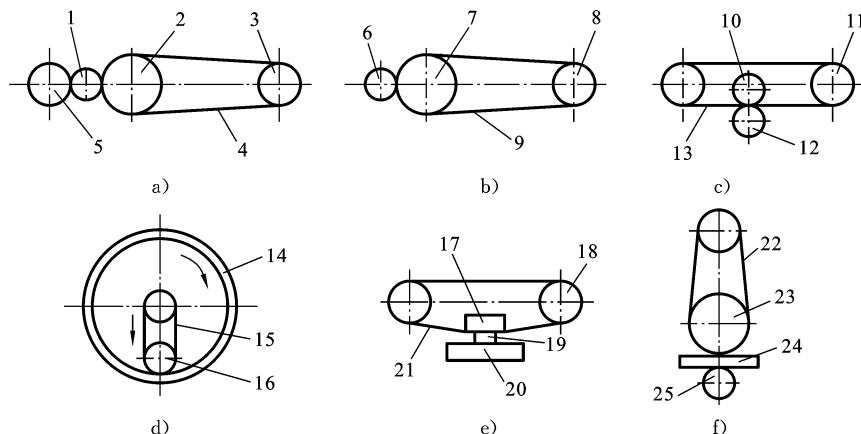


图 5-10 砂带磨削

- a) 砂带无心外圆磨削(导轮式) b) 砂带定心外圆磨削(接触轮式) c) 砂带定心外圆磨削(接触轮式)
- d) 砂带内圆磨削(回轮式) e) 砂带平面磨削(支承板式) f) 砂带平面磨削(支承轮式)
- 1、6、12、14、19、24—工件 2、7、10、16、23—接触轮 3、8、11、18—主动轮
- 4、9、13、15、21、22—砂带 5、20—导轮 17—支承板 25—支承轮

2. 研磨

图5-11所示为外圆表面的研磨(lapping)。研磨时工件转动,研具作轴向往复运动。在工件和研具之间放置研磨剂。

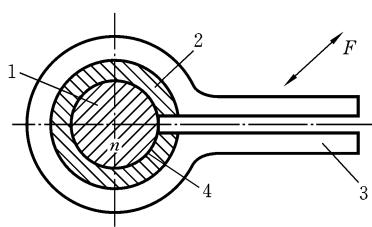


图 5-11 外圆表面的研磨

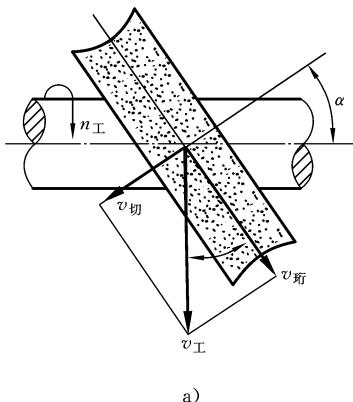
1—工件 2—研具 3—研具夹 4—研磨剂

研磨剂通常由磨料(如氧化铝、碳化硅等)与煤油、润滑油等组成。为了存留研磨剂,工件和研具之间应有 $0.02\sim0.05\text{ mm}$ 的间隙。研磨速度一般为 $0.3\sim1\text{ m/s}$ 。研具通常由铸铁或硬木制成,研具磨损后可通过调整研具夹的开口间隙来补偿。研磨后表面粗糙度 R_a 可达 $0.01\sim0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

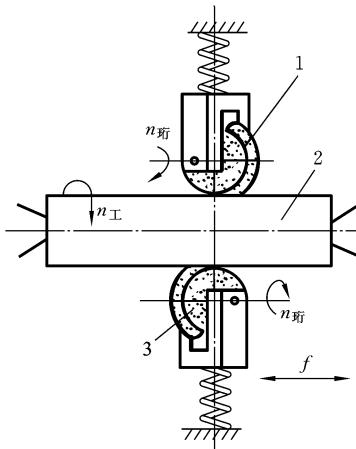
3. 磨削

图 5-12 所示为双砂轮磨削(honing)外圆

的工作原理。工件安装在机床两顶尖之间。工件两侧各安装一外表面修整成双曲面的磨削轮,各与工件轴线倾斜成 α 角,在弹簧力的作用下,磨削轮压向工件加工表面。当工件以速度 $n_{工}$ 转动时,通过摩擦力带动两个磨削轮以速度 $n_{磨}$ 转动。由于 α 角的存在,磨削轮在被工件带动的同时,还相对于工件加工表面以速度 $v_{切}$ 滑动,从而产生切削作用。磨削轮结构如图 5-13 所示。



a)



b)

图 5-12 双砂轮磨削外圆的工作原理

a) 磨削轮与工件的位置关系 b) 磨削加工运动原理

1、3—磨削轮 2—工件

进行外圆表面的双砂轮磨削加工时,磨粒对工件具有切削、挤压和抛光作用,磨削轮与工件间的接触面积小,脱落的磨粒易被切削液带走,故加工表面的粗糙度稳定,一般表面粗糙度 R_a 可达 $0.025\text{ }\mu\text{m}$,尺寸精度公差等级可达 $IT6\sim IT7$,同时还可以修正工件外圆母线的直线度误差,但不能修正工件的圆度和位置误差。

4. 滚压

滚压(rolling)加工就是用硬度比工件高的滚压工具(滚轮或滚珠),对半精加工后的零件表面在常温下加压,使受压点产生弹性及塑性变形,将表面的凸起部分压下

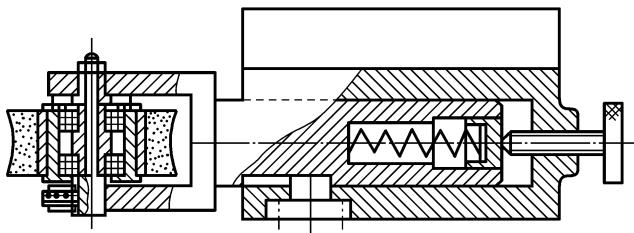


图 5-13 珩磨轮结构

去,凹下部分向上挤,以修正零件表面的微观几何形状,降低表面粗糙度(见图5-14)。由于工件表面层金属受挤压产生加工硬化现象,因此晶粒沿金属流动方向呈纤维状,工件表面层产生残余应力,从而大大提高零件的力学性能,使工件表面层的屈服强度增大,显微硬度提高20%~40%,同时使零件的疲劳强度、耐磨性和耐蚀性都有显著改善。

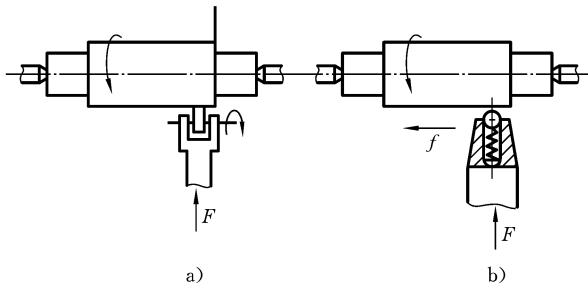


图 5-14 滚压加工

a) 滚轮滚压 b) 滚珠滚压

5. 抛光

抛光(polynomial)是用带有微细磨粉或软膏磨料的布轮、布盘或皮轮、皮盘等软质工具,靠机械滑擦和化学作用来降低加工表面的粗糙度。抛光对尺寸误差和形状误差没有修正能力。抛光后工件表面粗糙度 R_a 可达 $0.008\sim1.25\mu\text{m}$,还可以提高零件的疲劳强度、耐磨性和耐蚀性,但不能提高零件的精度。此外,抛光也用于镀铬前的准备和表面装饰加工。抛光主要有机械抛光和液体抛光两种。

1) 机械抛光 机械抛光就是使用涂有抛光膏的高速旋转的软轮对工件表面进行加工的一种方法。抛光膏用油脂和磨料(如氧化铬、氧化铁等)混合制成。软轮用毛毡、橡胶、帆布或皮革等叠制而成。抛光时,金属表层与油脂产生化学作用而形成软的氧化膜,故可以用软磨料来加工工件,而不会划伤工件表面。抛光的工作速度很高,高温使工件表面出现很薄的熔流层,产生塑性流动而填平工件表面原有的微观不平度。

2) 液体抛光 液体抛光就是将含磨料的抛光液,经喷嘴用 $(6\sim8)\times10^2\text{ kPa}$ 的压力高速喷向加工表面的一种方法。喷出的磨料颗粒把工件表面上留下的凸峰击

平,从而获得极光滑的表面。液体抛光的生产效率和加工表面粗糙度取决于液体的流动速度(50~70 m/s)、磨粒大小(100#~W5)、液流的喷射方向与加工表面所形成的角度(40°~60°),以及喷嘴与加工表面的距离(50~100 mm)等参数。液体抛光时磨粒对工件表面微观凸峰作高频和高压冲击,不仅使得已加工表面的粗糙度低,生产效率很高,而且不受工件形状的限制,能抛光其他光整加工方法难以加工的部位,是一种高效、先进的工艺方法。

5.3 孔加工

孔是轴套类、盘盖类和箱体类零件的主要表面(如轴承孔、定位孔等),也可能是这些零件的辅助表面(如油孔、紧固孔等)。孔加工的方法较多,常用的有钻、扩、铰、镗、拉、磨等。

5.3.1 钻孔

孔是组成零件的基本表面之一。钻头作回转运动和轴向进给运动,从工件实体上切去切屑、加工出孔的工序称为钻孔(drilling)。钻孔是孔加工的一种基本方法。钻孔经常在钻床和车床上进行,也可以在镗床或铣床上进行。常用的钻床有台式钻床、立式钻床和摇臂钻床。

1. 麻花钻

钻孔常用的刀具是麻花钻(twist drill),如图 5-15 所示。麻花钻的前端称为切削部分,其几何参数如图 5-16 所示。图中,γ_o 为前角,α_o 为后角,β 为螺旋角,2κ_r 为顶角,ϕ 为横刃斜角,d_o 为钻心厚度。切削部分有两条对称的主切削刃,两主切削刃的

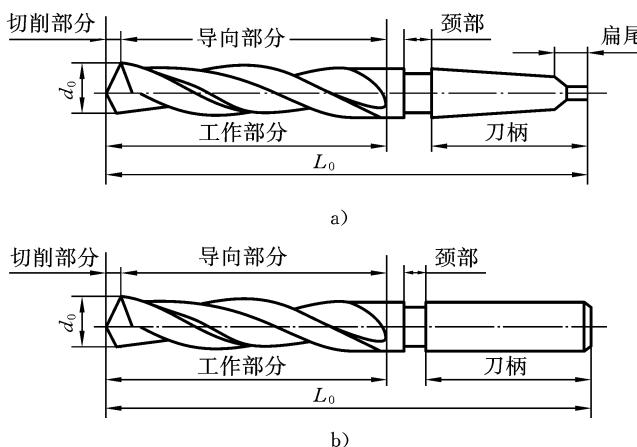


图 5-15 麻花钻

a) 圆柱锥柄 b) 圆柱直柄

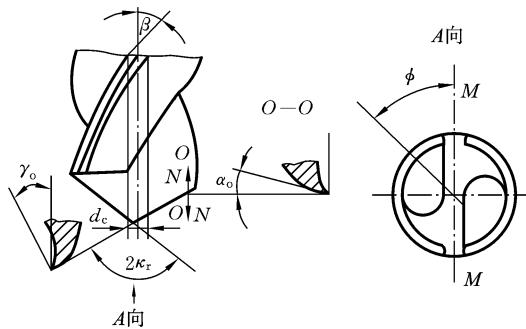


图 5-16 麻花钻的几何参数

夹角 $2\kappa_r$ 称为顶角, 标准麻花钻的顶角为 118° 。导向部分边缘有两条副切削刃, 在钻头的顶部, 两主后刀面的交线形成横刃, 横刃的前角为负角, 因此在钻削时, 横刃在挤压、刮削工件, 切削条件很差。切屑都是从钻头的螺旋槽中排出的, 因此容易刮伤已加工表面。由于螺旋槽的存在, 钻头的实心部分较小, 刚度较小, 如果顶角刃磨得不对称, 形成的径向力易使钻头引偏, 造成孔的位置误差, 因此麻花钻钻孔的精度和表面品质较差。

麻花钻的主要几何参数如表 5-5 所示。

表 5-5 麻花钻的主要几何参数

几何参数	定 义	特 点	标 准 值
螺旋角 β	棱边切线与钻头轴线的夹角	β 越大, 切削越方便, 但钻头强度越低	$\beta = 18^\circ \sim 30^\circ$
顶角 $2\kappa_r$	两个主切削刃的夹角	$2\kappa_r$ 越小, 主切削刃越长, 则轴向力越小	$2\kappa_r = 118^\circ$
前角 γ_0	正交平面 $N-N$ 内前刀面与基面的夹角	从外缘至中心 γ_0 逐渐减小, 切削条件变差	横刃处 $\gamma_0 = -54^\circ$
后角 α_0	轴向剖面 $O-O$ 内刀面与切削平面的夹角	与 γ_0 变化相适应, 从外缘至中心, α_0 增大, 切削刃的强度增高	外缘处 $\alpha_0 = 8^\circ \sim 10^\circ$

2. 钻削的特点

钻孔与车削外圆相比, 工作条件要差得多。钻削时, 钻头工作部分处在已加工表面的包围中, 因而引起一些特殊问题, 如钻头的刚度和强度、容屑和排屑、导向和冷却润滑等。

1) 容易产生引偏 所谓引偏, 是指加工时由于钻头弯曲而引起的孔径扩大、孔不圆(见图 5-17a)或孔的轴线歪斜(见图 5-17b)等现象。钻孔时产生引偏主要是因为麻花钻的直径和长度受所加工孔的限制, 一般呈细长状, 刚度较小。为形成切削刃和容纳切屑, 必须制作出两条较深的螺旋槽, 使钻心变细, 进一步削弱了钻头的刚度。

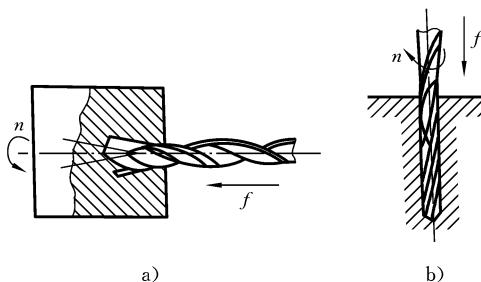


图 5-17 钻孔引偏

a) 车床钻孔 b) 钻床钻孔

为减少导向部分与已加工孔壁的摩擦,钻头仅有两条很窄的棱边与孔壁接触,接触刚度和导向作用也很差。

钻头横刃处的前角 γ_0 具有很大的负值(见图 5-16),切削条件极差,实际上不是在切削,而是在挤刮金属。有资料介绍,钻孔时一半以上的轴向力是由横刃产生的,稍有偏斜,将产生较大的附加力矩,使钻头弯曲。此外,钻头的两个主切削刃也很难磨得完全对称,加上工件材料的不均匀性,钻孔时的径向力不可能完全抵消。

因此,在钻削力的作用下,刚度很小且导向性不好的钻头很容易弯曲致使钻出的孔产生引偏,降低了孔的加工精度,甚至造成废品。在实际加工中,常采用如下措施来减少引偏:

(1) 预钻锥形定心坑(见图 5-18a)。先用小顶角($2\kappa_r = 90^\circ \sim 100^\circ$)、大直径短麻花钻预先钻一个锥形坑,然后再用所需的钻头钻孔。由于预钻时钻头刚度大,锥形坑不易偏,以后再用所需的钻头钻孔时,这个坑就可以起定心作用。

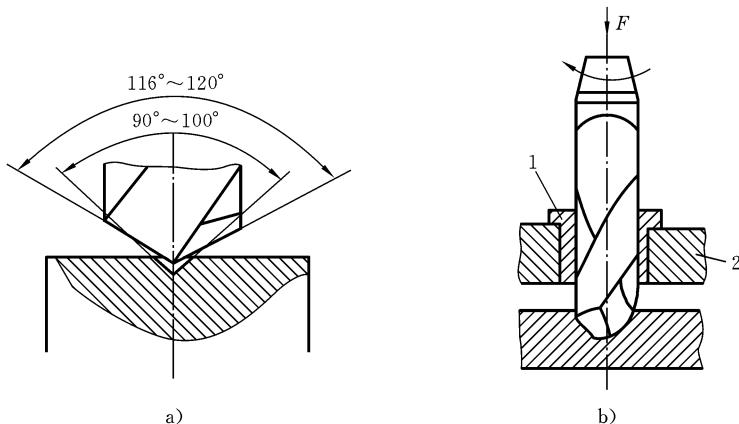


图 5-18 减少引偏的措施

a) 预钻定心坑 b) 用钻套导向

1—钻套 2—钻模板

(2) 用钻套为钻头导向(见图 5-18b)。使用钻套可减少钻孔开始时出现引偏,特别是在斜面或曲面上钻孔时,更为必要。

(3) 钻头的两个切削刃刃磨得对称。尽量把钻头的两个主切削刃磨得对称一致,使两主切削刃的径向切削力互相抵消,从而减少钻孔时产生引偏。

2) 排屑困难 钻孔时,由于切屑较宽,容屑槽尺寸又受到限制,因而,在排屑过程中,切屑往往与孔壁发生较大的摩擦,挤压、拉毛和刮伤已加工表面,降低表面品质。有时切屑可能阻塞在钻头的容屑槽里,卡死钻头,甚至将钻头扭断。

因此,排屑问题成为钻孔时要妥善解决的重要问题之一。尤其是用标准麻花钻加工较深的孔时,要反复多次把钻头退出排屑,很麻烦。为了改善排屑条件,可在钻头上修磨出分屑槽(见图 5-19),将宽的切屑分成窄条,以利于排屑。当钻深孔($L/D > 5$)时,应采用合适的深孔钻进行加工。

3) 切削热不易传散 钻削是一种半封闭式的切削,与车削相比,钻削时所产生的热量虽然也由切屑、工件、刀具和周围介质传出,但它们之间的比例却大不相同。如在不加切削液的情况下,用标准麻花钻钻钢件时,热量传出的比例是:工件约 52.5%,钻头约 14.5%,切屑约 28%,而介质仅占 5%左右。

钻削时,大量的高温切屑不能及时排出,切削液难以进入切削区,切屑、刀具与工件之间的摩擦很严重。因此,切削温度较高致使刀具磨损加剧,这就限制了钻削使用的扩大和生产效率的提高。

3. 钻削的加工精度和粗糙度

在各类机器零件上,经常需要进行钻孔,因此,钻削的应用还是很广泛的。但是,由于钻削工艺特点的限制,钻孔的直径一般不大于 80 mm,钻削的精度较低,可达到的尺寸精度公差等级为 IT11~IT13,表面粗糙度 R_a 为 $12.5 \sim 25 \mu\text{m}$,生产效率也比较低。因此,钻削主要用于粗加工,例如加工精度和表面粗糙度要求不高的螺栓孔、油孔等。一些内螺纹在攻螺纹之前,需要先进行钻孔;加工精度和表面粗糙度要求较高的孔,也要以钻孔作为预加工工序。

5.3.2 扩孔和铰孔

1. 扩孔

扩孔(counter boring)是利用扩孔钻对已有的孔进行加工以扩大孔径,并提高孔的精度和降低孔的表面粗糙度的一种方法。扩孔时的切削深度 $a_p = (d_m - d_w)/2$,比钻孔时的($a_p = d_m/2$)小很多,因而刀具的结构和切削条件比钻孔时好很多。扩孔的特点可参阅文献[1]中有关扩孔加工的内容。

扩孔常作为孔的半精加工,一般加工尺寸精度公差等级可达 IT9~IT10,表面粗

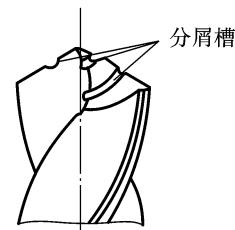


图 5-19 分屑槽

糙度 R_a 可达 $3.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$ 。当孔的精度和表面粗糙度要求再高时,则要采用铰孔。

2. 铰孔

铰孔(reaming)是用铰刀对孔进行精加工的一种方法,一般加工尺寸精度公差等级可达 IT7~IT9,表面粗糙度 R_a 可达 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 。铰孔的特点可参阅文献[1]中有关铰孔加工的内容。

钻、扩、铰只能保证孔本身的精度,而不易保证孔与孔之间的尺寸精度及位置精度。为了解决这一问题,可以利用夹具(如钻模)进行加工,或者采用镗孔。

5.3.3 镗孔

用镗刀对已有的孔进行再加工的方法称为镗孔(boring)。对于直径较大的孔(一般 $D > 80 \text{ mm}$)、内成形面或孔内环槽等,镗削是唯一合适的加工方法。一般镗孔尺寸精度公差等级可达 IT7~IT8,表面粗糙度 R_a 可达 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$;精细镗孔时,尺寸精度公差等级可达 IT6~IT7,表面粗糙度 R_a 可达 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。

1. 镗削的工艺特点

(1) 适应性广。镗削可在钻孔、铸孔和锻孔的基础上进行,可达到的尺寸精度公差等级和表面粗糙度的范围较宽,除直径很小且较深的孔以外,各种直径及各种结构类型的孔均可镗削。

(2) 可有效地修正前工序所造成的孔轴线的弯曲、偏斜等形状误差和位置误差。但由于镗刀杆直径受孔径的限制,一般刚度较小,易弯曲变形和振动,故对工件品质(特别是细长孔)的控制不如铰削方便。

(3) 镗刀杆的长径比大,悬伸距离长,切削稳定性较差,易产生振动,故切削用量很小,生产效率低。为减小镗杆的弯曲变形,必须采用较小的背吃刀量和进给量进行多次走刀。镗床和铣床镗孔需调整镗刀头在刀杆上的径向位置,操作复杂、费时。

(4) 镗刀在内孔里面工作,难以观察,故只能凭切屑的颜色、出现的振动等情况来判断切削过程是否正常。

2. 镗孔的方式及应用

镗孔可以在多种机床上进行,回转体类零件上的孔多在车床上加工;而箱体类零件上的孔或孔系(即要求相互平行或垂直的若干个孔)则常用镗床加工。镗孔的方式按其主运动和进给运动的形式可分为以下三种(见图 5-20):

(1) 工件旋转,刀具作进给运动。在车床类机床上加工盘类零件属于这种方式(见图 5-20a)。其特点是加工后孔的轴线和工件的回转轴线一致,孔轴线的直线度好,能保证在一次安装中加工的内孔有较高的同轴度,并与端面垂直。当刀具进给方向不平行于回转轴线或不呈直线运动时,都不会影响轴线的位置和直线度,也不影响孔在任何一个截面内的圆度,仅会使孔径发生变化,产生锥度、变为腰鼓形等。

(2) 工件不动,刀具作旋转和进给运动。这种加工方式在镗床上进行(见图 5-20b),能基本保证镗孔的轴线和机床主轴轴线一致,但随着镗杆伸出长度的增加,

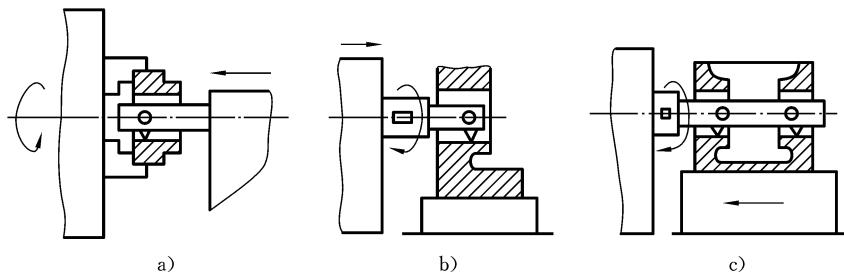


图 5-20 钳孔方式

a) 刀具进给 b) 刀具进给和旋转 c) 刀具旋转

镗杆变形加大会使孔径逐步减小。此外,镗杆及主轴自重引起的下垂变形,也会导致孔轴线弯曲。镗削同轴线的多孔时,会加大这些孔的不同轴度,故这种方式适合加工孔深不大而孔径较大的壳体孔。

(3) 刀具旋转,工件作进给运动。这种加工方式适合镗削箱体两壁相距较远的同轴孔系,易于保证孔与孔、孔与平面间的位置精度(见图 5-20c)。镗孔时进给运动方向发生偏斜或非直线性都不会影响孔径。但镗孔的轴线相对于机床主轴轴线会产生偏斜或不成直线,使孔的横截面形状呈椭圆形。镗杆与机床主轴间多用浮动连接,以减少主轴误差对加工精度的影响。

3. 浮动镗孔的特点及应用

镗刀有单刃镗刀和多刃镗刀。在多刃镗刀中,有一种可调的浮动镗刀片(见图 5-21)。调节镗刀片的尺寸时,先松开螺栓,再旋紧螺钉,将刀齿的径向尺寸调好后,拧紧螺栓把刀齿固定即可。镗孔时,镗刀片不是固定在镗杆上,而是插在镗杆的长方孔中,并能在垂直于镗杆轴线的方向上自由滑动,由两个对称的切削刃产生的切削力,自动平衡其位置。因此,用它镗孔时,具有如下特点:

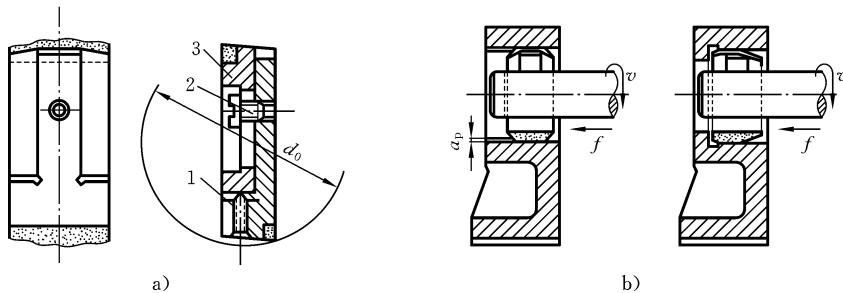


图 5-21 浮动镗刀片及其工作情况

a) 可调浮动镗刀片 b) 浮动镗刀片工作情况

1—螺钉 2—螺栓 3—刀齿

(1) 加工零件品质较高。镗刀片在加工过程中的浮动,可抵消刀具安装误差或镗杆偏摆所引起的不良影响,提高孔的加工精度。较宽的修光刃,可修光孔壁,

降低表面粗糙度。但是它与铰孔类似,不能校正原有孔的轴线歪斜或位置偏差。

(2) 生产效率较高。浮动镗刀片有两个主切削刃同时切削,并且操作简便,所以可提高生产效率。

(3) 刀具成本较单刃镗刀高。浮动镗刀片的结构比单刃镗刀的复杂,且刃磨要求高,故成本较高。

由于以上特点,浮动镗刀片镗孔主要用于批量生产、精加工箱体类零件上直径较大的孔。

4. 高速精镗的工艺特点

在大量生产的镗孔加工中,高速精镗一般是在专门的镗床上进行的。其工艺特点如下:

(1) 切削速度高而切削面积很小,因此能获得较高的加工精度和表面品质。

(2) 生产效率比内圆磨削的高得多,而且容易适应不同结构零件上的各种精密孔的加工,如发动机的汽缸孔、连杆孔、活塞销孔及车床主轴箱上的主轴孔等。

5.3.4 磨孔

1. 磨孔方式

孔的磨削(grinding holes)可以在内圆磨床上进行,也可以在万能外圆磨床上进

行。目前应用的内圆磨床多是卡盘式的,它可以加工圆柱孔、圆锥孔和成形内圆面等。与外圆磨削类似,内圆磨削也可以分为纵磨法和横磨法。鉴于砂轮轴的刚度很小,横磨法仅适用于磨削短孔及内成形面,且一般情况下很难以采用深磨法,所以,孔的磨削多数情况下采用纵磨法。

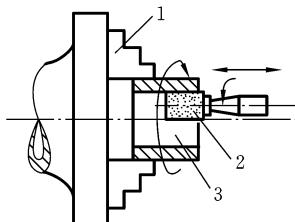


图 5-22 纵磨圆柱孔

1—自定心卡盘 2—砂轮 3—工件

往复行程终了时,作周期性的横向进给。若磨圆锥孔,只需将磨床的头架在水平方向偏转半个锥角即可。

在大量生产中,对于短工件上要求与外圆面同轴的孔的精加工,也可以采用无心磨法(见图 5-23)。

2. 磨孔加工的特点

与铰孔或拉孔比较,磨孔有如下特点:

- (1) 可以加工淬硬工件的孔;
- (2) 不仅能保证孔本身的尺寸精度和表面品质,还可以提高孔的位置精度和轴的直线度;
- (3) 用同一个砂轮,可以磨削不同直径的孔,灵活性较大;

(4) 生产效率比较低,比拉孔更低。

3. 磨孔加工存在的主要问题

(1) 表面粗糙度较高。受工件孔径的限制,磨孔的砂轮直径一般较小,磨头转速又不可能太高(一般低于20000 r/min),加上砂轮与工件的接触面积大,切削液不易进入磨削区,所以与磨外圆相比,磨孔的表面粗糙度较高。

(2) 生产效率较低。磨孔时,砂轮的轴细、悬伸长,且刚度很小,不宜采用较大的磨削深度和进给量,故生产效率较低。另外,砂轮直径小,为维持一定的磨削速度,转速要高,增加了单位时间内磨粒的切削次数,故磨损快;磨削力小,降低了砂轮的自锐性,且易堵塞。因此,需要经常修整砂轮和更换砂轮,增加了辅助时间,使磨孔的生产效率进一步降低。

由于以上的原因,磨孔一般仅适用于淬硬工件孔的精加工,如滑移齿轮、轴承环及刀具上孔的加工等。但是,磨孔的适应性较好,不仅可以磨削通孔,还可以磨削阶梯孔和盲孔等,因而在单件、小批生产中应用较多,特别是对于非标准尺寸的孔,其精加工用磨削更为合适。

5.3.5 拉削

拉削(broaching)利用特制的拉刀(见图5-24)逐齿依次从工件上切下很薄的金属层,使表面达到较高的尺寸精度和较低的粗糙度,是一种高效率的加工方法(见图5-25)。拉削所用的机床称为拉床。

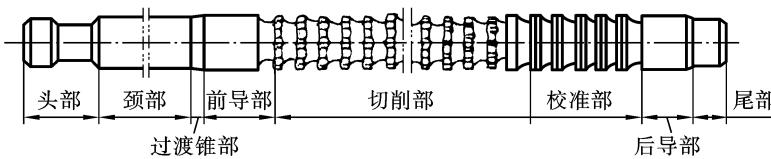


图 5-24 圆孔拉刀

拉削加工的主要特点如下:

(1) 生产效率较高。拉刀是多齿刀具,同时参加工作的刀齿数较多,使总的切削宽度增大,并且拉刀的一次行程中能够完成粗加工、半精加工和精加工工序,使基本工艺时间和辅助时间大大缩短,所以拉削的生产效率较高。

(2) 加工范围较广。拉削不但可以加工平面和没有障碍的外表面,还可以加工各种形状的通孔,所以拉削的加工范围较广。

(3) 加工精度较高、表面粗糙度较低。拉刀具有校准部,其作用是校准尺寸,修光表面,并可作为精切齿的后备刀齿。校准齿的切削量很小,只切去工件材料的弹性恢复

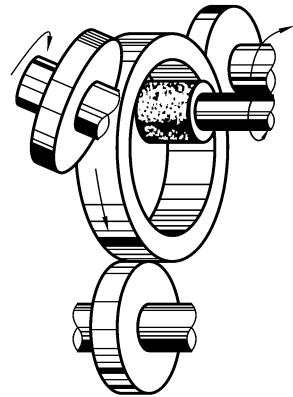


图 5-23 无心磨轴承环内孔

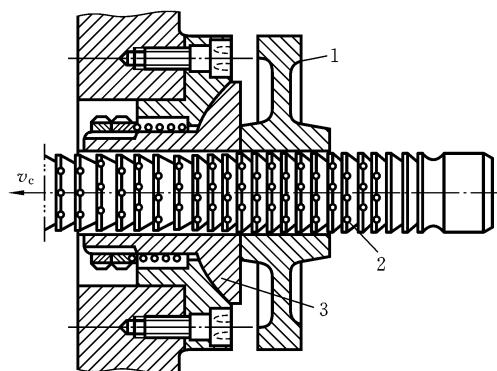


图 5-25 拉孔

1—工件 2—一切削齿 3—球面垫圈

量。另外,拉削的切削速度一般较低($v_c < 18 \text{ m/min}$),每个切削齿的切削厚度较小,因而切削过程比较平稳,并可避免积屑瘤的不利影响。所以,拉削加工可以达到较高的精度和较低的表面粗糙度。一般拉孔的尺寸精度公差等级为 IT7~IT8,表面粗糙度 R_a 为 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。

(4) 拉床的结构简单。拉削只有一个主运动,即拉刀的直线运动,进给运动是靠拉刀的后一个刀齿高出前一个刀齿来实现的,刀齿的高出量称为齿升量 a_f ,所以拉床的结构简单,操作也较方便。

(5) 拉刀的使用寿命长。拉削时切削速度较低,刀具磨损慢,刃磨一次,可以加工数以千计的工件,一把拉刀又可以重磨多次,所以拉刀的使用寿命长。

拉削虽然具有以上优点,但是由于拉刀的结构比一般孔加工刀具复杂,制造困难,成本高,所以仅适用于成批、大量生产。在单件、小批生产中,对于某些精度要求高、形状特殊的成形表面,用其他方法加工困难时,也有采用拉削加工的。盲孔、深孔、阶梯孔和有障碍的外表面,则不能用拉削加工。

5.3.6 孔的珩磨

1. 孔的珩磨原理

珩磨是利用安装于珩磨头圆周的油石,采用特定结构推出油石作径向扩张,直至与工件孔壁接触的一种方法。在珩磨加工(见图 5-26a)中,油石不断作径向进给运动,珩磨头作旋转运动及直线往复运动,从而实现对孔的低速磨削。珩磨时,珩磨头上的磨条以一定压力压在被加工表面上,由机床主轴带动珩磨头旋转并沿轴向作往复运动(工件固定不动)。在相对运动的过程中,磨条从工件表面切除一层极薄的金属,加之磨条在工件表面上的切削轨迹是交叉而不重复的网纹(见图 5-26b),故而可获得很高的精度和很低的表面粗糙度。

2. 珩磨的特点和应用

(1) 加工精度高。加工小孔,圆度可达 $0.5 \mu\text{m}$,圆柱度可达 $1 \mu\text{m}$;加工中等孔,圆度可达 $3 \mu\text{m}$ 以下,孔长 $300 \sim 400 \text{ mm}$ 时,圆柱

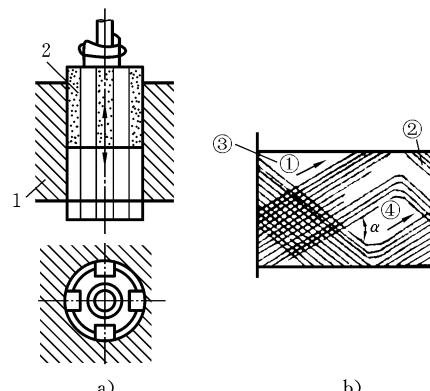


图 5-26 珩磨

a) 珩磨加工 b) 珩磨网纹

1—工件 2—珩磨头

度在 $5 \mu\text{m}$ 以下。尺寸精度:小孔为 $1\sim 2 \mu\text{m}$;中等孔为 $3\sim 10 \mu\text{m}$ 。加工尺寸的分散性误差可在 $1\sim 3 \mu\text{m}$ 范围内。

(2) 表面品质好。珩磨是一种表面接触低速切削,磨粒的平均压力小、发热量小、变质层小,加工表面粗糙度 R_a 为 $0.04\sim 0.4 \mu\text{m}$ 。

(3) 加工表面使用寿命长。珩磨加工的表面具有交叉网纹,有利于油膜的形成和保持,其使用寿命比其他加工方法高一倍以上,特别适用于相对运动精度高的精密零件的加工。

(4) 切削效率高。因珩磨是面接触加工,同时参加切削的磨粒多,故切削效率高。在批量生产时,加工中等孔的材料切除率可达 $80\sim 90 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

(5) 加工范围广。珩磨主要用来加工各种圆柱形通孔、径向间断的表面孔、盲孔和多台阶孔等,加工圆柱的孔径范围为 $1\sim 2000 \text{ mm}$ 或更大,长径比 $L/D \geq 46$ 。几乎对所有金属材料均能加工。

珩磨不仅在大量生产中应用极为普遍,而且在单件、小批生产中应用也较广泛。对于某些零件的孔,如飞机、汽车、拖拉机的发动机的汽缸体、汽缸套、连杆及液压油缸、炮筒等的孔,珩磨已成为典型的光整加工方法。

5.3.7 孔的加工方法

1. 孔的分类

孔是组成零件的基本表面之一,零件上有多种多样的孔,常见的有以下几种:紧固孔(如螺钉孔等)和其他非配合的油孔等;箱体类零件上的孔,如车床主轴箱箱体上的主轴和传动轴的轴承孔等,这类孔往往构成“孔系”;深孔,即 $L/D > 5$ 的孔,如车床主轴上的轴向通孔等;圆锥孔,如车床主轴前端的锥孔以及装配用的定位销孔;等等。

不同的孔,加工要求不同,故需要根据具体的生产条件,拟订较合理的加工方案。这里仅讨论圆柱孔的加工方案。

2. 孔加工方法的选择

孔加工可以在车床、钻床、镗床或磨床上进行,大孔和孔系则常在镗床上加工。选择孔的加工方法时,除应考虑孔径的大小和孔的深度、加工精度和表面粗糙度等要求外,还应考虑工件的材料、形状、尺寸(直径)、品质要求和批量及车间的具体生产条件(如现有加工设备)等。

若在实体材料上加工孔(多为中小直径的孔),必须先钻孔;若是对已经铸出或锻出的孔(多为中大直径的孔)进行加工,则可直接采用扩孔或镗孔。

至于孔的精加工,铰孔和拉孔适于加工未淬硬的中小直径的孔;对中等直径以上的孔,可以采用精镗或精磨;对淬硬的孔,只能采用磨削。

在孔的光整加工方法中,珩磨多用于直径稍大的孔,研磨则对大孔和小孔都适用。

孔的加工与外圆面的加工条件有很大不同,刀具的刚度小,排屑、散热困难,切削

液不易进入切削区,刀具易磨损。因此,加工同样精度和表面粗糙度的孔,要比加工外圆面困难,成本也较高。

图 5-27 为孔加工方法的选择框图,可以作为选择孔加工方法的参考依据。

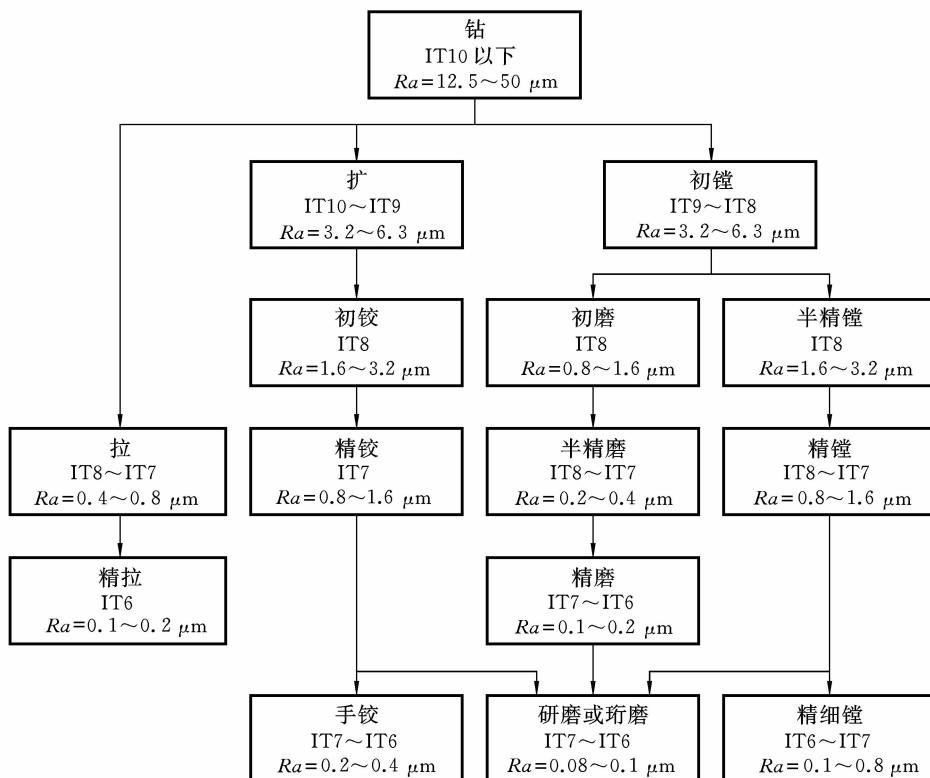


图 5-27 孔加工方法的选择框图

1) 在实体材料上加工孔的方法

(1) 钻,用来加工尺寸精度公差等级为 IT10 以下低精度的孔。

(2) 钻→扩(或镗),用来加工尺寸精度公差等级为 IT9 的孔,当孔径<30 mm 时,钻孔后扩孔,若孔径>30 mm,则采用钻孔后镗孔。

(3) 钻→铰,用来加工直径<20 mm、尺寸精度公差等级为 IT8 的孔。

(4) 钻→扩(或镗)→铰(或钻→粗镗→精镗,或钻)→拉,用来加工直径>20 mm、尺寸精度公差等级为 IT8 的孔。

(5) 钻→粗铰→精铰,用来加工直径<12 mm、尺寸精度公差等级为 IT8 的孔。

(6) 钻→扩(或镗)→粗铰→精铰(或钻→拉→精拉),用来加工直径>12 mm、尺寸精度公差等级为 IT7 的孔。

(7) 钻→扩(或镗)→粗磨→精磨,用来加工尺寸精度公差等级为 IT7 并已淬硬的孔。

尺寸精度公差等级为 IT6 孔的加工方法与尺寸公差等级为 IT7 的孔的加工方法基本相同,其最后工序要根据具体情况,分别采用精细镗、手铰、精拉、精磨、研磨或珩磨等精细加工方法。

2) 对已铸出或锻出孔的加工方法 对于铸(或锻)件上已铸(或锻)出的孔,可直接进行扩孔或镗孔;对于直径 >100 mm 的孔,用镗孔比较方便。至于半精加工、精加工和精细加工,可参照在实体材料上加工孔的方法,例如,粗镗 \rightarrow 半精镗 \rightarrow 精镗 \rightarrow 精细镗,扩 \rightarrow 粗磨 \rightarrow 精磨 \rightarrow 研磨(或珩磨)等。

5.4 平面加工

5.4.1 平面刨削

刨削(planing)是以刨刀相对工件的往复直线运动与工作台(或刀架)的间歇进给运动来实现切削加工的,它是平面加工的主要方法之一。常见的刨削机床有牛头刨床、龙门刨床和插床等。

1. 刨削的工艺特点

(1) 通用性好。根据切削运动和具体的加工要求,刨床的结构比车床、铣床等简单,成本低,调整和操作也较简便。所用的单刃刨刀与车刀基本相同,形状简单,制造、刃磨和安装皆较方便,因此刨削的通用性好。

(2) 生产效率较低。刨削的主运动为往复直线运动,反向时受惯性力的影响,加之刀具切入和切出时有冲击,其切削速度的提高受到限制。单刃刨刀实际参加切削的切削刃长度有限,一个表面往往要经过多个行程才能加工出来,基本工艺时间较长。刨刀在返回行程中,一般不进行切削,增加了辅助时间。由于以上原因,刨削一般比铣削的生产效率低。但是对于狭长表面(如导轨、长槽等)的加工,以及在龙门刨床上进行多件或多刀加工时,刨削的生产效率可能高于铣削。

(3) 可达一定的加工精度。一般刨削的尺寸精度公差等级可达 IT7~IT8,表面粗糙度 R_a 可达 $1.6\sim6.3\ \mu\text{m}$ 。当采用宽刃精刨时(即在龙门刨床上,用宽刃刨刀以很低的切削速度,切去工件表面上一层极薄的金属),平面度小于 $0.02\ \text{mm}^2/\text{m}^2$,表面粗糙度 R_a 可达 $0.4\sim0.8\ \mu\text{m}$ 。

2. 强力刨削和精细刨削

刨削的主运动是直线往复运动,因此加工的平面平直性较好,而且刨刀结构简单,机床调整方便,通用性好。在龙门刨床上可以利用几个刀架,在一次安装中完成工件上几个表面的加工,能方便地保证这些表面间的相互位置精度。但是,由于刨削时刨刀在回程中不切削,空程时间约占刨削过程时间的 $1/3$,并且往复主运动速度受惯性力的限制而较低,如一般牛头刨床的刨削速度不大于 $22\ \text{m}/\text{min}$,龙门刨床的刨削速度不大于 $90\ \text{m}/\text{min}$,因此,刨削的生产效率低,多用于单件、小批生产。

为了提高刨削平面的生产效率,可以在龙门刨床上采用多刀刨削和多件加工的方法,也可以通过改进刀具的结构和几何角度,来增加背吃刀量和进给量,进行“强力刨削”(powerful planing)。

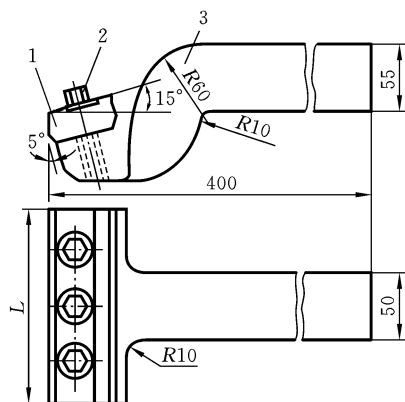


图 5-28 宽刃精细刨刀

1—刀片 2—压紧螺栓 3—刀柄

用精细刨削(fine plane)来代替刮削能有效地提高生产效率,对于定位表面与支承表面间接接触面积较大的导轨、机架、壳体,常采用宽刃精细刨刀(见图 5-28)进行加工。在精细刨削平面的基础上,以很低的切削速度在工件表面上切下极薄的一层金属,以提高平面的精度和降低表面粗糙度。刨削速度一般为 $2\sim 12$ m/min,预刨时背吃刀量取 $0.08\sim 0.12$ mm,终刨时背吃刀量取 $0.03\sim 0.05$ mm,加工铸铁时常用煤油(其中含 0.03% 的重铬酸钾)作切削液。由于切削力小,工件的发热和变形

小,精细刨削加工的精度高(直线度可达 0.

02 mm/m),表面粗糙度低($Ra=0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$),生产效率也高。应用宽刃精细刨刀进行刨削时,要求机床有足够的精度和刚度,并且运动平稳;刀具具有足够的刚度,并经仔细刃磨,刀面粗糙度 Ra 不大于 $0.1\ \mu\text{m}$,刀刃的平直度误差不大于 0.05 mm,不得有锯齿形。安装刨刀时,必须保持刃口呈水平状态。在精细刨削之前,工件要进行一次时效处理,以消除内应力。工件安装时也应尽量减小夹紧力,避免夹紧变形。

3. 薄板零件刨削的特点

薄板零件的刚度小,散热困难,加工时很容易翘曲变形,刨削时应掌握以下特点:

(1) 装夹应稳定可靠。常采用撑板来进行装夹(见图 5-29),既有水平方向又有

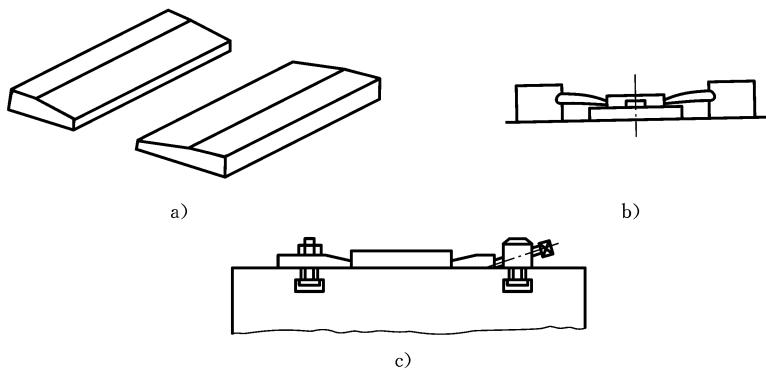


图 5-29 用撑板装夹薄板零件

a) 撑板 b) 在平口钳中装夹 c) 在工作台上装夹

竖直方向的夹紧力,增加了装夹的可靠性。但夹紧力不可过大,否则工件会变形而中间凸起。

(2) 一般选用高速钢刀具。所用刨刀的前角、后角较大,修光刃较短,以减小切削力;主偏角较小,以增加径向切削力,利于压紧工件;减小轴向切削力,以减小工件变形。

(3) 刨削用量不宜过大。加工时宜用较小的背吃刀量($a_p \leq 0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$)和进给量($f = 0.1 \sim 0.25 \text{ mm/双行程}$),以减小切削力,并使用适当的切削液。

(4) 一般应先刨四周,再刨顶面,但对于薄而阔的工件,可从中间开始刨削,再向两边扩展,这样加工变形较小。

5.4.2 平面铣削

铣削(milling)也是加工平面的主要方法之一。铣床的种类很多,常用的是升降台卧式和立式铣床。

1. 平面铣刀的结构特点

平面铣刀主要有圆柱铣刀和端铣刀两种,前者轴线平行于被加工表面,后者轴线垂直于被加工表面。铣刀刀齿虽多,但每个刀齿的形状和几何角度相同,所以可以用一个刀齿为对象来说明它的结构特点。铣刀的每一个刀齿相当于一把车刀,其结构特点与车刀几乎相同。

(1) 圆柱铣刀的刀齿只有主切削刃,无副切削刃,故无副偏角,其主偏角 $\kappa_r = 90^\circ$ 。圆柱铣刀的前角 γ_r 在法平面 P_n 中测量,后角在正交平面 P_o 中测量。刃倾角 λ_s 就是铣刀的螺旋角 β ,它是在切削平面 P_s 中测量的切削刃与基面的夹角。

(2) 端铣刀的一个刀齿,相当于一把普通的外圆车刀。

2. 铣削的工艺特点

(1) 生产效率较高。铣刀是一种多刃刀具,铣削时有多个刀齿同时参加工作,总的切削宽度较大。铣削的主运动是铣刀的旋转,有利于采用高速铣削,所以铣削一般比刨削的生产效率高。

(2) 容易产生冲击和振动。铣削过程是一个断续切削过程,铣刀的刀齿切入和切出时,由于同时工作的刀齿数有增有减而产生冲击和振动。当振动频率与机床固有频率一致时会发生共振,造成刀齿崩刃,甚至毁坏机床零部件。另外,每个刀齿的切削厚度是变化的(见图 5-30),这就引起切削面积和切削力的变化,因此,铣削过程不平稳,容易产生振动。冲击和振动现象的存在,限制了铣削加工品质和生产效率的进一步提高。

(3) 刀齿散热条件较好。铣刀刀齿在切离工件的一段时间内,可以得到一定的冷却,散热条件较好。但是,切入和切出时热量和力的冲击,将加速刀具的磨损,甚至可能引起硬质合金刀片的碎裂。

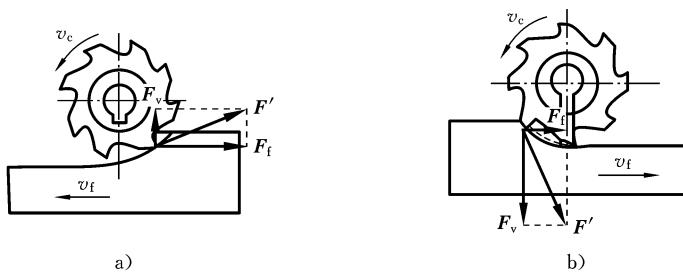


图 5-30 铣削切削厚度的变化

a) 逆铣 b) 顺铣

(4) 切削方式多样化。铣削时,可根据不同材料的可加工性和具体加工要求,选用顺铣和逆铣方法来提高刀具耐用度和生产效率。

当用铣削方式加工平面时,用圆柱铣刀加工的方法称为周铣法,用端铣刀加工的方法称为端铣法。有关周铣法与端铣法的特点可参阅文献[1]中有关铣削加工的内容。

3. 高速精铣的工艺特点

高速精铣是提高生产率和加工精度的重要手段。与一般切削工艺相比,高速精铣具有以下特点:

(1) 对刀具材料要求更高。刀具应具有较好的抗热冲击性、耐磨性及抗崩齿的性能,才能对断续切削时的温度变化有较好的适应性,铣削时不易产生裂纹。

(2) 对刀具工作角度要求更高。精铣时,为了保证加工表面有较低的粗糙度和较高的直线度,尽量选择副偏角为 0° ,并使铣刀主轴轴线与进刀方向偏斜一定角度。

(3) 生产效率比一般铣削更高。高速精铣由于其刀具材料的保证,切削速度高,切削余量大,因此适合进行批量加工。

(4) 可进行特种零件加工。对于薄壁零件(如飞机机翼上的结构肋)采用小进给量的高速精加工,可得到无变形的截面。

5.4.3 平面磨削

用砂轮或其他磨具加工零件的方法称为磨削,这里主要讨论平面磨削。

1. 平面磨削方式及其比较

1) 平面磨削方式 平面磨削主要有两种方式:用回转砂轮周边磨削,称为周磨(见图 5-31a);用回转砂轮端面磨削,称为端磨(见图 5-31b)。工件随工作台作直线往复运动,或随圆形工作台作圆周运动,磨头作间歇进给运动。

2) 周磨与端磨的比较 周磨平面时,砂轮与工件的接触面积小,散热、冷却和排屑情况较好,因此加工零件品质较好。端磨平面时,磨头伸出长度较短,刚度较

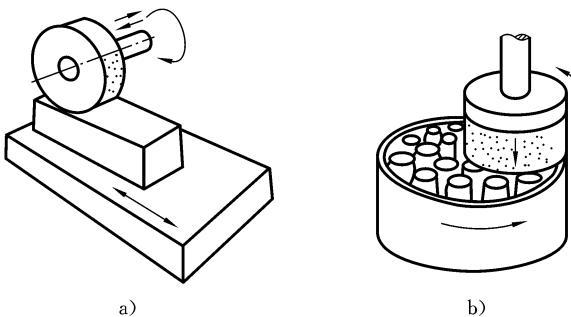


图 5-31 平面磨削方式

a) 周磨 b) 端磨

大,允许采用较大的磨削用量,故生产效率较高;但是,砂轮与工件的接触面积较大,发热量大,冷却较困难,故加工零件的品质较差。所以,周磨多用来加工品质要求较高的工件;端磨用来加工品质要求不很高的工件,或者用它代替铣削作为精磨前的预加工。

周磨平面用卧式平面磨床,端磨平面用立式平面磨床。它们都有矩形工作台(简称矩台)和圆形工作台(简称圆台)两种形式。卧式矩台平面磨床适用性好,应用最广;立式矩台平面磨床多用于粗磨大型工件或同时加工多个中小型工件。圆台平面磨床则多用于成批、大量生产中小型零件的加工,如活塞环、轴承环等的加工。

磨削铁磁性工件(如钢件、铸铁件等)时,多利用电磁吸盘将工件吸住,装卸很方便。对于某些不允许带有磁性的零件,磨完平面后应进行退磁处理,为此,平面磨床附有退磁器,可以方便地将工件的磁性退掉。

2. 薄片零件的磨削特点

垫圈、摩擦片及镶钢导轨等较薄或狭长零件,因磨削前,其表面的平面度较差,磨削时也易受热变形和受力变形,因此磨削此类平面应掌握以下特点:

(1) 改善磨削条件。选用软的砂轮、采用较小的磨削深度和较高的工作台纵向进给速度,以及供应充分的切削液等。

(2) 合理的装夹。磨削平面常采用电磁工作台来装夹工件,而磨削薄片工件时,由于工件刚度较小,很容易产生夹紧变形,如图 5-32 所示。合理的装夹常常是保证薄片平面磨削品质的关键。生产中有多种行之有效的措施,其中之一是在工件与电磁工作台之间垫上一层薄橡胶垫,厚度约为 0.5 mm,以减小工件被吸紧时的弹性变形。

(3) 适当的加工工艺。对于薄片总是先将工件的翘曲部分磨去(见图 5-32d),磨完一面再翻过来磨另一面(见图 5-32e)。如此反复几次就可以消除工件上的翘曲变形,得到合格的平面。

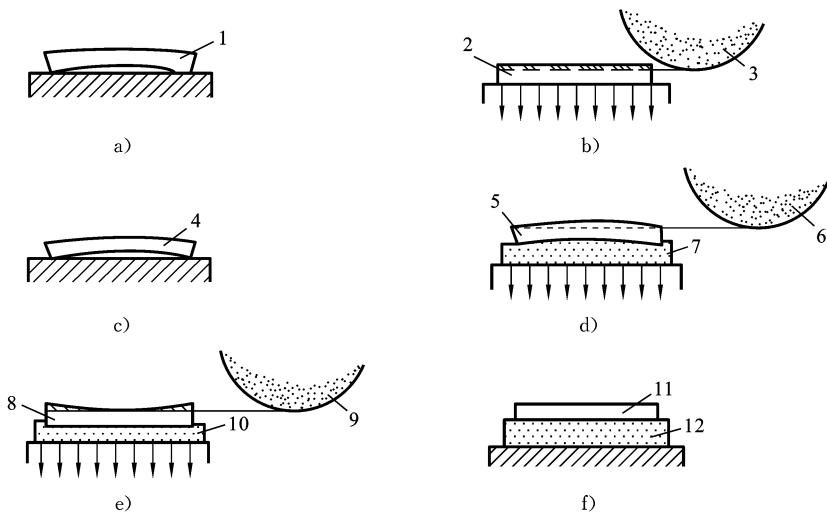


图 5-32 薄片零件的磨削

a) 毛坯翘曲 b) 吸平后磨削 c) 磨后松开 d) 磨削凸面 e) 磨削凹面 f) 磨后松开
1、2、4、5、8、11—工件 3、6、9—砂轮 7、10、12—橡胶垫

5.5 齿形加工

5.5.1 概述

1. 齿轮的技术要求

齿轮传动机构可以用来传递空间任意两轴间的运动,且传动准确可靠、结构紧凑、寿命长、效率高,是应用最广泛的传动机构之一。在各种机械、仪表、运输、农业机械等设备中大都使用齿轮来传递运动和动力。常见的齿轮传动类型如图 5-33 所示。

在国家标准 GB/T 10095—2008 中,对齿轮精度规定了 0~12 共 13 个等级,根据目前加工方法所能达到的精度水平来划分,0 级为最高精度等级,12 级为最低精度等级。

齿轮及齿轮副的使用要求主要包括:① 齿轮的运动精度;② 齿轮的工作平稳性;③ 齿面接触精度;④ 齿侧间隙。对于分度传动用的齿轮,主要要求它的运动精度,使传递的运动准确可靠;对于高速动力传动用的齿轮,要求它必须工作平稳,没有冲击和噪声;对于重载、低速传动用的齿轮,则要求它的接触精度高,使啮合齿的接触面积最大,以提高齿面的承载能力和减少齿面的磨损;对于换向传动和读数机构,齿侧间隙就十分重要的,必要时必须消除间隙。

2. 齿形的加工方法

按齿形形成的原理不同,齿形加工(gear making)方法可以分为两类:一类是成形法,采用与被切齿轮齿槽形状相符的成形刀具切出齿形,如铣齿(用盘状或指状铣刀)、拉齿和成形磨齿等;另一类是展成法(包络法),齿轮刀具与工件按齿轮副的啮合

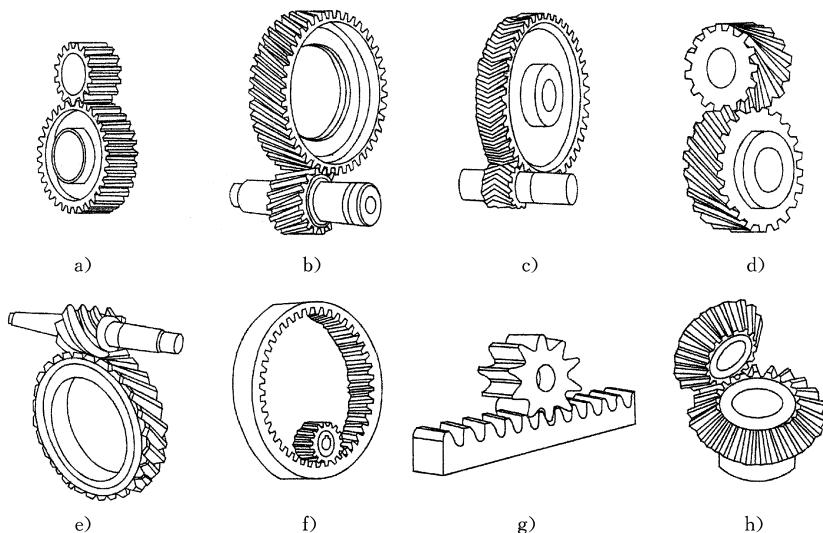


图 5-33 常见的齿轮传动类型

- a) 直齿圆柱齿轮传动 b) 斜齿圆柱齿轮传动 c) 人字齿圆柱齿轮传动 d) 螺旋齿轮传动
 e) 蜗杆传动 f) 内啮合齿轮传动 g) 齿轮齿条传动 h) 直齿锥齿轮传动

关系作展成运动,工件的齿形由刀具的切削刃包络而成,如滚齿、插齿、剃齿、磨齿和珩齿等。齿形加工常用的方法如表 5-6 所示。

表 5-6 齿形加工常用的方法

加工方法	加工原理	齿形品质		生产效率	设备	应用范围
		精度等级	齿面粗糙度 $R_a/\mu m$			
铣齿	成形法	9	3.2~6.3	较插齿、滚齿低	普通铣床	单件修配生产中,加工低精度外圆柱齿轮、锥齿轮、蜗轮
拉齿	成形法	7	0.4~1.6	高	拉床	大量生产 7 级精度的内齿轮,因齿轮拉刀制造很复杂,故少用
插齿	展成法	7~8	1.6~3.2	一般较滚齿低	插齿机	单件、成批生产中,加工中等品质的圆柱齿轮、多联齿轮
滚齿	展成法	7~8	1.6~3.2	较高	滚齿机	单件、成批生产中,加工中等品质的内、外圆柱齿轮及蜗轮柱
剃齿	展成法	6~7	0.4~0.8	高	剃齿机	精加工未淬火的圆柱齿轮
珩齿	展成法	6~7	0.4~0.8	很高	珩齿机	光整加工已淬火的圆柱齿轮,适用于成批和大量生产
磨齿	成形法 展成法	5~6	0.2~0.8	成形法高于展成法	磨齿机	精加工已淬火的圆柱齿轮

5.5.2 铣齿

1. 铣削直齿圆柱齿轮

图 5-34 所示的铣削直齿圆柱齿轮(简称直齿轮)是铣齿(milling gear)的一种情况,铣削时齿轮坯紧固在芯轴上,并将芯轴安装在分度头和尾架顶尖之间,铣刀旋转,工件随工作台作纵向进给运动。每铣完一个齿槽,纵向退刀进行分度,再铣下一个齿槽。

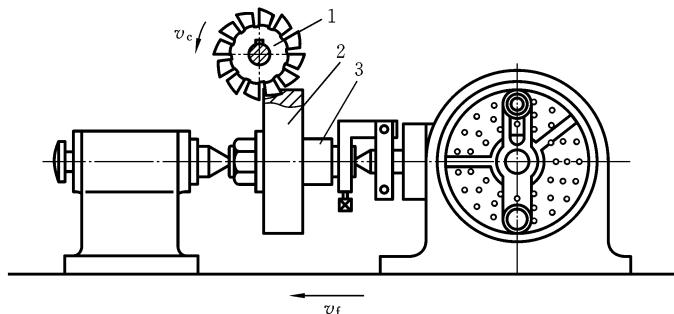


图 5-34 铣削直齿圆柱齿轮

1—齿轮铣刀 2—齿轮坯 3—圆柱芯轴

模数 $m \leq 20$ 的齿轮一般用盘形齿轮铣刀在卧式铣床上加工;模数 $m > 20$ 的齿轮用指形齿轮铣刀在专用铣床或立式铣床上加工(见图 5-35)。

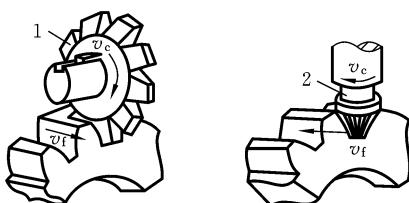


图 5-35 盘形和指形齿轮铣刀

1—盘形齿轮铣刀 2—指形齿轮铣刀

选用的齿轮铣刀除了模数 m 和压力角 α 应与被切齿轮的模数、压力角一致外,还需根据齿轮的齿数 z 选择相应的刀号。

渐开线的形状与基圆直径大小有关。基圆直径愈小则渐开线的曲率愈大,基圆直径愈大,则渐开线的曲率愈小;当基圆直径无穷大时,渐开线便成为一条直线,

即为齿条的齿形曲线。相同模数而齿数不同的齿轮,其分度圆直径($d = mz$)、基圆直径均不相同,如果为每一个模数的每一种齿数的齿轮制备一把相应的齿轮铣刀,既不经济也不便于管理。为此,同一模数的齿轮铣刀,一般只制作 8 把,分为 8 个刀号,分别用来铣削一定齿数范围的齿轮,如表 5-7 所示。为了保证铣削的齿轮在啮合运动中不致卡住,各号铣刀的齿形应按该号范围内最小齿数齿轮的齿槽轮廓制作,以获得最大齿槽空间。各号铣刀加工范围内的齿轮除最小齿数的齿轮外,其他齿数的齿轮,只能获得近似的齿形。

表 5-7 盘形齿轮铣刀的刀号及加工的齿数范围

刀号	1	2	3	4	5	6	7	8
加工的齿数范围	12~13	14~16	17~20	21~25	26~34	35~54	55~134	135 以上

2. 铣削螺旋齿圆柱齿轮

铣削螺旋齿圆柱齿轮(简称螺旋齿轮)不能直接根据实际齿数 z 选择齿轮铣刀的刀号。如图 5-36 所示,螺旋齿轮只有在某齿 A 的法向截面内,才能使齿 A 得到正确的渐开线齿形,这一齿形相当于分度圆直径为 d 的直齿轮的齿形。此直齿轮称为当量齿轮,其齿数 z_d 称为当量齿数。实际齿数 z 与当量齿数 z_d 的关系为

$$z_d = z / \cos^3 \beta$$

式中 β —螺旋齿轮的螺旋角。

若 z_d 的计算结果为小数,则四舍五入取整即可。铣削螺旋齿轮,要按法面模数 m_n 和当量齿数 z_d 选择齿轮铣刀。

铣削螺旋齿轮可看成是铣削一般螺旋槽和铣削直齿轮两种方法的综合运用。使用盘形铣刀时,为使铣刀的旋转平面与螺旋槽的切线方向一致,需将万能卧式铣床工作台由原来位置扳转一个角度(螺旋槽的螺旋角)。铣螺旋槽时卧式铣床工作台的转向如图 5-37 所示。螺旋槽为右旋时,工作台逆时针扳转;螺旋槽左旋时,则顺时针扳转。为了铣出螺旋槽,工件必须在沿轴向移动一个导程 L 的同时,绕自身旋转轴线旋转一周。为此,必须在纵向工作台丝杠末端与分度头挂轮轴之间选择配换齿轮 z_1, z_2, z_3, z_4 ,如图 5-38 所示。其配换齿轮的计算公式如下:

$$\frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} = \frac{40P}{L} = \frac{40P \sin \beta}{\pi m_n z}$$

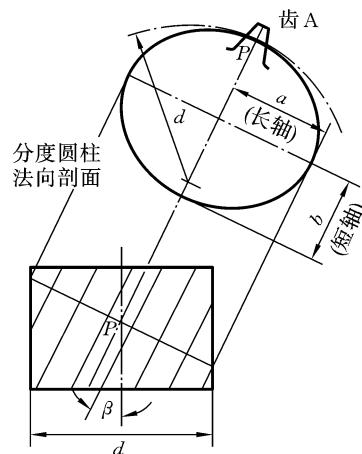


图 5-36 螺旋齿轮法向齿形

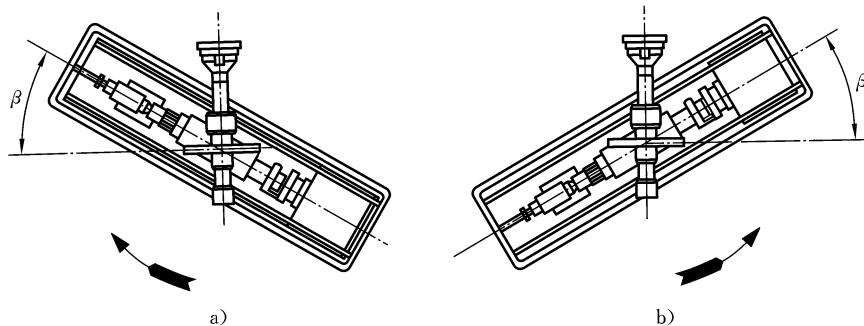


图 5-37 铣螺旋槽时卧式铣床工作台的转向

a) 铣左螺旋槽 b) 铣右螺旋槽

3. 铣齿的工艺特点

- (1) 生产成本低。齿轮铣刀的结构简单,在普通铣床上即可完成铣齿工作。
- (2) 加工精度低。齿形的准确性完全取决于齿轮铣刀,而一个刀号的铣刀要加

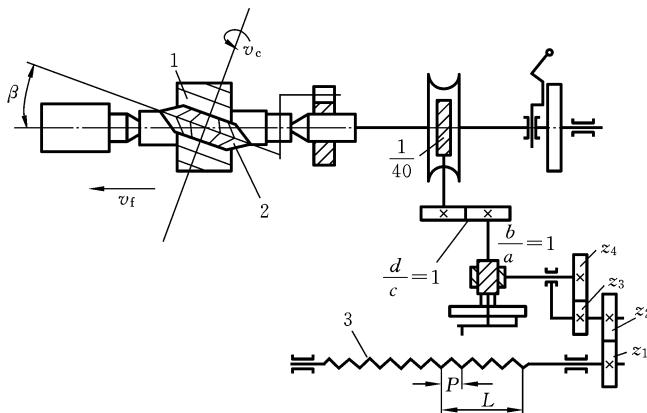


图 5-38 铣削螺旋槽

1—工件 2—铣刀 3—纵向进给丝杠

工一定齿数范围的齿轮,因此齿形误差较大。此外,在铣床上采用分度头分齿,分齿误差也较大。

(3) 生产效率低。每铣一齿都要重复耗费切入、切出、吃刀和分度的时间。

5.5.3 插齿

插齿(gear shaping)是在插齿机上进行切削的一种方法。插齿刀很像一个直齿圆柱齿轮,只要齿顶呈圆锥形,以形成顶刃后角;端面呈凹锥面,以形成顶刃前角;齿顶高比标准圆柱齿轮大 $0.25m$,以保证插削后的齿轮在啮合时有径向间隙。

1. 插齿原理和插齿运动

插齿加工相当于一对无啮合间隙的圆柱齿轮传动(见图 5-39)。插齿时,插齿刀与齿轮坯之间严格按照一对齿轮的啮合速比关系强制传动,即插齿刀转过一个齿,齿轮坯也转过相当一个齿的角度。与此同时,插齿刀作上下往复运动,进行切削。其刀齿侧面运动轨迹所形成的包络线,即为被切齿轮的渐开线齿形(见图 5-40)。

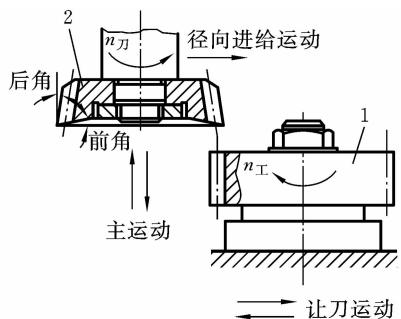


图 5-38 铣削螺旋槽

1—工件 2—铣刀 3—纵向进给丝杠



图 5-40 插齿时渐开线齿形的形成

1—插齿刀 2—刀齿侧面运动轨迹

3—包络线 4—被切齿轮

插齿需要主运动、分齿运动、圆周进给运动、径向进给运动、让刀运动等五种运动。

(1) 主运动。插齿刀的上下往复运动称为主运动。向下是切削行程,向上是返回行程。插齿速度用每分钟往复行程次数(str/min)表示。

(2) 分齿运动。强制插齿刀与被加工齿轮之间保持一对齿轮的啮合关系的运动称为分齿运动。其转速的关系如下:

$$\frac{n_{\text{刀}}}{n_{\text{工}}} = \frac{z_{\text{工}}}{z_{\text{刀}}}$$

式中 $n_{\text{刀}}, n_{\text{工}}$ ——插齿刀和被加工齿轮的转速;

$z_{\text{刀}}, z_{\text{工}}$ ——插齿刀和被加工齿轮的齿数。

(3) 圆周进给运动。在分齿运动中,插齿刀的旋转运动称为圆周进给运动。插齿刀每往复行程一次,在其分度圆周上所转过的弧长(mm/str)称为圆周进给量,它决定了每次行程中金属的切除量和形成齿形包络线的切线数目,直接影响着齿面的粗糙度。

(4) 径向进给运动。在插齿开始阶段,插齿刀沿齿轮坯半径方向的移动称为径向进给运动。其目的是使插齿刀逐渐切至全齿深,以免开始时金属切除量过大而损坏刀具。径向进给量是指插齿刀每上下往复一次径向移动的距离(mm/str)。径向进给运动是由进给凸轮控制的,当切至全齿深后即自动停止。

(5) 让刀运动。为了避免插齿刀在返回行程中擦伤已加工表面和加剧刀具的磨损,应使工作台沿径向让开一段距离;当切削行程开始前,工作台需恢复原位。工作台所作的这种短距离的往复运动,称为让刀运动。

2. 齿轮坯的安装方法

(1) 内孔和端面定位(见图 5-41a)就是依靠齿轮坯内孔与芯轴之间的正确配合来决定齿轮坯的轴线位置。这种安装方法适用于大量生产。

(2) 外圆和端面定位(见图 5-41b)就是将齿轮坯套在芯轴上(内孔与芯轴之间留有较大的间隙),用百分表找正外圆,以决定齿轮坯轴线位置。这种安装方法适用于单件、小批生产。

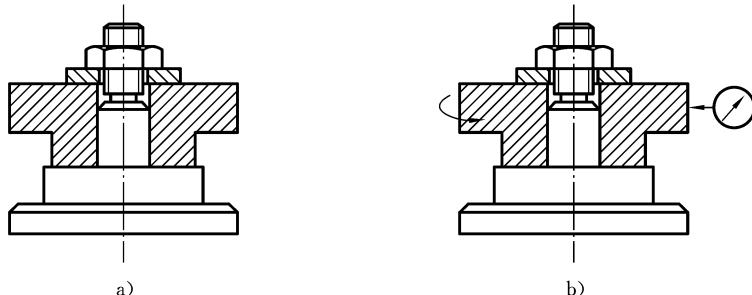


图 5-41 齿轮坯的安装方法

a) 内孔和端面定位 b) 外圆和端面定位

5.5.4 滚齿

1. 滚刀

滚齿(gear hobbing)是在专用的滚齿机上进行的。滚切齿轮所用的齿轮滚刀如图 5-42 所示。其刀齿分布在螺旋线上,且多为单线右旋,其法向剖面呈齿条齿形。当螺旋升角 $\phi > 5^\circ$ 时,沿螺旋线法向铣出若干沟槽;当 $\phi < 5^\circ$ 时,则沿轴向铣槽。铣槽的目的是形成刀齿和容纳切屑。刀齿顶刃前角 γ_p 一般为 0° 。滚刀的刀齿需要铣削,形成一定的后角 α_p ,以保证在重磨前刀面后,齿形不变。通常 $\alpha_p = 10^\circ \sim 12^\circ$ 。

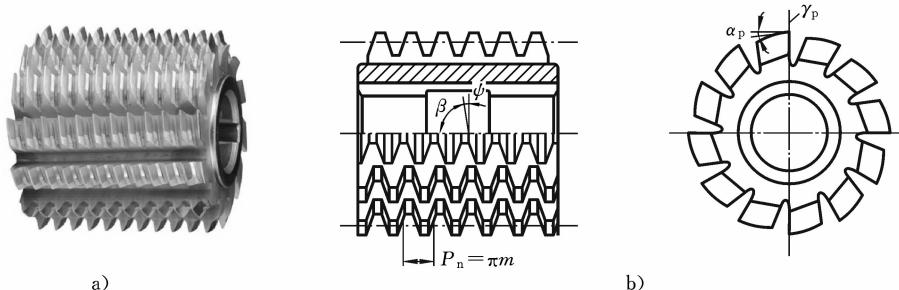


图 5-42 齿轮滚刀

a) 涂层滚刀结构 b) 滚刀角度

2. 滚齿原理和滚齿运动

滚切齿轮也属于展成法切削的一种方法,如图 5-43 所示。可将其看成无啮合间隙的齿轮与齿条传动。滚刀旋转一周,相当于齿条在法向移动一个刀齿,滚刀的连续转动,犹如一根无限长的齿条在连续移动。当滚刀与齿轮坯之间严格按照齿轮与齿条的传动比强制啮合传动时,滚刀刀齿在一系列位置上的包络线就形成了工件的渐开线齿形,如图 5-44 所示。随着滚刀的竖直进给,即可滚切出所需的渐开线齿廓。

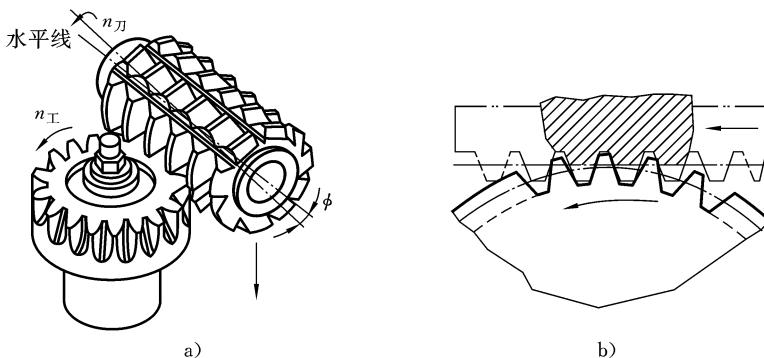


图 5-43 滚切齿轮

a) 滚齿 b) 滚刀的法向剖面为齿条齿形

滚切直齿齿轮有主运动、分齿运动、竖直进给运动等三种运动。

(1) 主运动。滚刀的旋转运动称为主运动,用转速 $n_{\text{刀}}(\text{r}/\text{min})$ 表示。

(2) 分齿运动。强制齿轮坯与滚刀保持齿轮与齿条的啮合运动关系的运动称为分齿运动。其转速的关系如下:

$$\frac{n_{\text{刀}}}{n_{\text{工}}} = \frac{z_{\text{工}}}{K} n$$

式中 $n_{\text{刀}}, n_{\text{工}}$ —— 滚刀和被切齿轮的转速(r/min);

$z_{\text{工}}$ —— 被加工齿轮的齿数;

K —— 滚刀螺旋线的线数。

(3) 竖直进给运动。为了在整个齿宽上切出齿形,滚刀需沿被加工齿轮的轴向向下移动,即为竖直进给运动。工作台每转一周,滚刀竖直向下移动一段距离(mm/r),这个距离称为竖直进给量。

滚齿的径向切深是通过手摇工作台控制的。模数小的齿轮可一次切至全齿深,模数大的齿轮可分两次或三次切至全齿深。滚齿时,为保证滚刀螺旋齿的切线方向与轮齿方向一致,滚刀的刀轴应扳转相应角度,以适应加工的需要。

右旋滚刀滚切直齿圆柱齿轮如图 5-45 所示,滚刀刀轴相对于水平面应扳转 ψ 角(即滚刀的螺旋升角)。

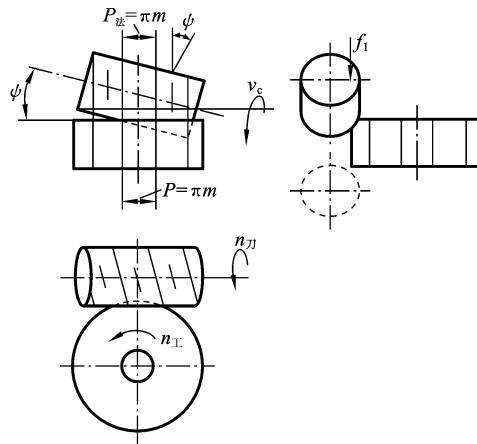


图 5-45 右旋滚刀滚切直齿圆柱齿轮

3. 滚切螺旋齿圆柱齿轮

应根据滚刀与被加工齿轮的旋向、滚刀螺旋升角 ψ 和被加工齿轮的螺旋角 β 确定刀轴扳转的角度。图 5-46 所示为右旋滚刀滚切右旋齿轮,刀轴扳转 $\beta - \psi$ 角;图 5-47 所示为右旋滚刀滚切左旋齿轮,刀轴扳转 $\beta + \psi$ 角。

滚切过程中滚刀竖直向下进给,由点 a 切入,点 b 切出。但轮齿为 ac 方向,为使滚刀由点 a 到达点 b 时,工件上点 c 也同时到达点 b 。被加工齿轮还需有一个附加转

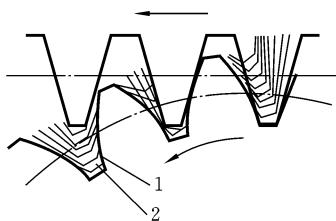


图 5-44 滚齿过程中渐开线

动,转速为 n 。根据螺旋线的形成原理可知,若被加工齿轮的导程为 L ,在滚刀竖直进给 L 距离的同时,被加工齿轮应多转或少转一周。附加转速 n 就是根据这一关系,通过调整滚齿机内部有关配换齿轮得到的。

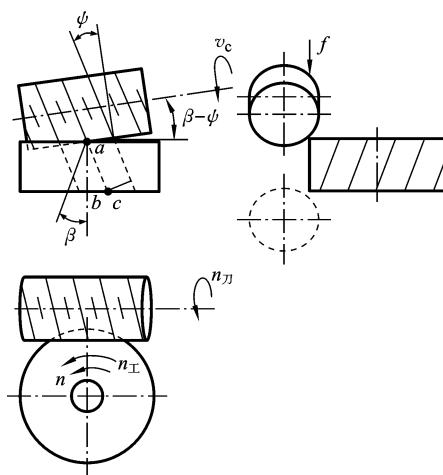


图 5-46 右旋滚刀滚切右旋齿轮

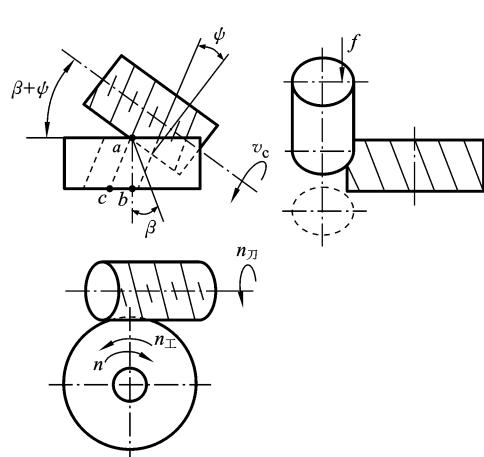


图 5-47 右旋滚刀滚切左旋齿轮

4. 滚切蜗轮

滚切蜗轮需用蜗轮滚刀。滚切时,相当于无啮合间隙的蜗杆传动。滚刀相当于蜗杆,如图5-48所示,但是沿轴向或法向铣出沟槽,以形成刀刃。在强制啮合运动的过程中,包络出蜗轮轮齿的相应齿形。

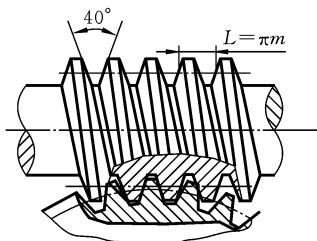


图 5-48 蜗杆齿形

运动,以逐渐切至全齿深。

5. 滚齿与插齿分析比较

(1) 加工原理滚齿与插齿相同,均属于展成法切削的方法。因此,选择刀具时,只要求刀具的模数和压力角与被加工齿轮一致,与齿数无关(最少齿数 $z \geq 17$)。

(2) 加工精度和齿面粗糙度滚齿与插齿基本相同,精度为 7~8 级,表面粗糙度 R_a 为 $1.6 \mu\text{m}$ 左右。

(3) 分齿精度插齿略低于滚齿,而齿形精度滚齿略低于插齿。这是因为:插齿刀

蜗轮滚刀的模数为 m 、压力角为 α 、螺旋升角为 ψ 且螺旋齿的旋向与被切蜗轮相啮合的蜗杆一致,只是外径较蜗杆顶圆直径 d_a 大 $0.4m$,可保证被加工出的蜗轮与蜗杆啮合时有 $0.2m$ 的径向间隙。

滚切蜗轮的方法如图 5-49 所示,蜗轮滚刀应水平放置,其轴线应处于蜗轮的中心平面内。蜗轮滚刀由蜗轮齿顶开始切削,被切蜗轮作径向运动。

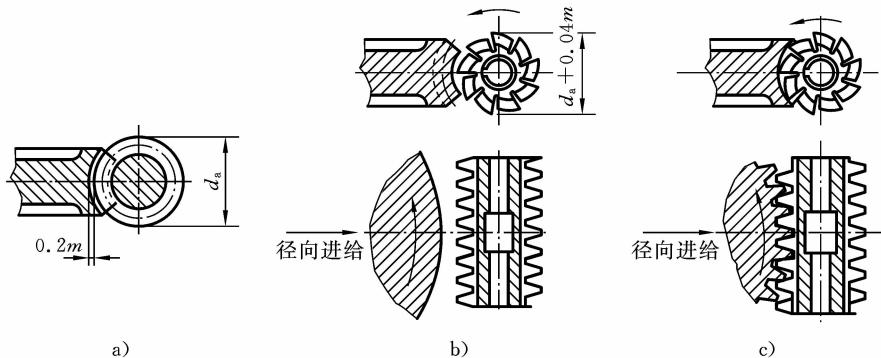


图 5-49 滚切蜗轮

a) 蜗轮蜗杆剖面图 b) 滚切蜗轮的起始位置 c) 滚切蜗轮的终止位置

的制造误差、安装误差及刀轴旋转误差等因素,导致插齿刀在旋转一周的过程中引起被加工齿轮的分齿不均匀;滚刀的制造误差、安装误差及刀轴旋转误差等因素,容易使滚刀在旋转一周的过程中造成被加工齿轮的齿形误差。

(4) 齿面粗糙度插齿略小于滚齿。这是因为:插齿刀沿轮齿的全长是连续切削,且插齿可调整圆周进给量,使形成齿形的包络线的切线数目较多,造成插齿后的齿面粗糙度较低($R_a=1.6 \mu\text{m}$);而滚齿的轮齿全长是由滚刀刀齿多次断续切出的圆弧面组成,且滚齿形成的齿形包络线的切线数目又受滚刀的开槽数所限,造成滚齿后的齿面粗糙度较高($R_a=1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$)。

(5) 生产效率滚齿高于插齿。这是因为滚齿为连续切削,插齿不仅有返回空行程,而且插齿刀的往复运动,切削速度的提高受到限制。

(6) 加工范围滚齿与插齿不同。这是因为:螺旋齿轮在滚齿机上加工比插齿机方便且经济;内齿轮和小间距的多联齿轮受结构所限,只能插齿不能滚齿,而对于蜗轮和轴向尺寸较大的齿轮轴,只能滚齿不能插齿。

(7) 生产类型滚齿与插齿相同,在单件、成批、大量生产中均被广泛应用。

5.5.5 齿形的光整加工方法

滚齿和插齿一般加工中等精度(7~8级)的齿轮。对于7级精度以上或经淬火处理后的齿轮,在滚齿、插齿加工之后还需进行精加工,以进一步提高齿形的精度。常用的齿形精加工方法有剃齿、珩齿、磨齿和研齿。

1. 剃齿

剃齿(gear shaving)是用剃齿刀在剃齿机上进行齿轮加工的一种方法,主要用来加工滚齿或插齿后未经淬火(35HRC以下)的直齿和螺旋齿圆柱齿轮。剃齿精度可达6~7级,表面粗糙度 R_a 可达 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。

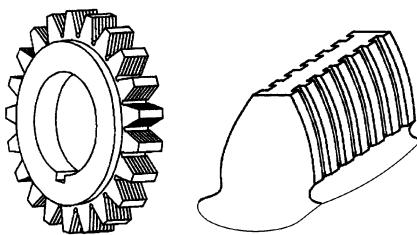


图 5-50 刨齿刀

刨齿刀的形状类似一个高精度、高硬度的螺旋齿圆柱齿轮,齿面上开有许多小沟槽以形成切削刃(见图 5-50)。在与被加工齿轮啮合运动的过程中,刨齿刀齿面上许多的切削刃从工件齿面上刨下细丝状的切屑,提高了齿形精度并降低了齿面粗糙度。

图 5-50 刨齿刀
图 5-51 刨削直齿圆柱齿轮的方法如图 5-51 所示,它属于一对螺旋齿轮“自由啮合”的展成法加工。齿轮固定在芯轴上,并安装在刨齿机的双顶尖间,由刨齿刀带动,时而正转,时而反转,正转时刨削轮齿的一个侧面,反转时刨削轮齿的另一个侧面。由于刨齿刀的刀齿呈螺旋状(螺旋角为 β),当它与直齿轮啮合时,其轴线应偏斜 β 角。刨齿刀高速旋转时,在点 A 的圆周速度 v_A 可分解为沿齿轮圆周切线方向的分速度 v_{An} 和沿齿轮轴线方向的分速度 v_{At} 。 v_{An} 使工件旋转, v_{At} 为齿面相对滑动速度,即刨削速度。为了刨削轮齿的全齿宽,工作台需带动齿轮作纵向往复直线运动。为了刨去全部余量,工作台在每往复行程终了时,刨齿刀需作径向进给运动。进给量一般为 $0.02\sim0.04$ mm/str。

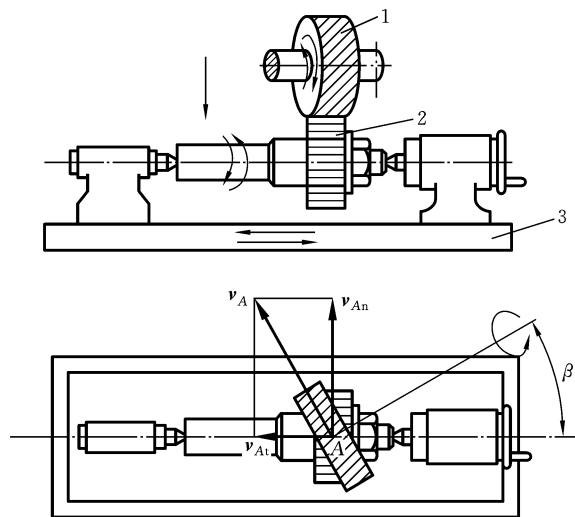


图 5-51 刨齿方法

1—刨齿刀 2—工件齿轮 3—工作台

刨齿的主要目的是提高齿形精度和齿向精度,降低齿面粗糙度。由于刨齿加工时没有强制性的分齿运动,故不能修正被切齿轮的分齿误差。因此,刨齿前的齿轮多采用分齿精度较高的滚齿加工。刨齿的生产效率很高,多用于大批、大量生产,刨齿余量一般为 $0.08\sim0.12$ mm,模数小的取小值,反之取大值。

2. 珩齿

珩齿(gear honing) 是用珩磨轮在珩齿机上进行齿形精加工的一种方法,其原理

和方法与剃齿相同。被加工齿轮的齿面粗糙度 R_a 可达 $0.2\sim0.4\ \mu\text{m}$ 。

珩磨轮(见图 5-52)是用金刚砂或白刚玉磨料与环氧树脂等材料合成后黏结而成的,可视为具有切削能力的“螺旋齿轮”。当模数 $m>4$ 时,采用带齿芯的珩磨轮;当模数 $m<4$ 时,珩磨轮不带齿芯。

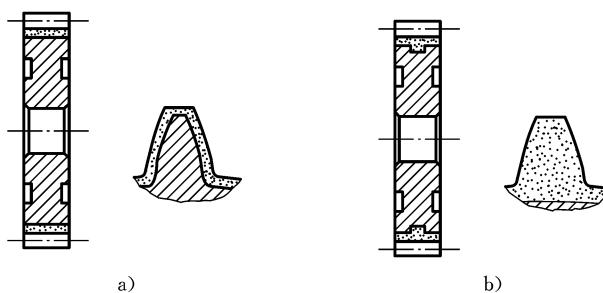


图 5-52 珩磨轮

a) 带齿芯 b) 不带齿芯

珩磨时,珩磨轮比剃齿刀的转速高得多,一般为 $1000\sim2000\ \text{r}/\text{min}$ 。当珩磨轮以高速带动被珩齿轮旋转时,在相啮合的轮齿齿面上产生相对滑动,从而实现切削加工。珩齿具有磨削、剃削和抛光的综合作用。

珩齿主要用于消除淬火后的氧化皮和轻微磕碰而产生的齿面毛刺与压痕,可有效地降低齿面粗糙度。对修整齿形和齿向误差的作用不大。珩齿可作为 6~7 级精度淬火齿轮的“滚→剃→淬火→珩”加工方案的最后工序,一般可不留加工余量。

3. 磨齿

磨齿(gear grinding)是用砂轮在磨齿机上加工高精度齿形的一种精加工方法,被加工齿轮精度可达 4~6 级,齿面粗糙度 R_a 可达 $0.2\sim0.4\ \mu\text{m}$ 。可磨削经淬火或未经淬火的齿轮,磨齿的方法有成形法和展成法两种。

(1) 成形法磨齿。成形法磨齿如图 5-53 所示,其砂轮要修整成与被磨齿轮的齿槽相吻合的渐开线齿形。这种方法的生产效率较高,但砂轮的修整较复杂。在磨齿过程中砂轮磨损不均匀,会产生一定的齿形误差,加工精度一般为 5~6 级。

(2) 展成法磨齿。展成法磨齿有锥形砂轮和双碟形砂轮磨削两种形式。

锥形砂轮磨齿如图 5-54 所示,砂轮的磨削部分修整成与被磨齿轮相啮合的假想齿条的齿形。磨削时,砂轮与被磨齿轮保持齿条与齿轮的强制啮合运动关系,使砂轮锥面包络出渐开线齿形。为了在磨齿机上实现这种啮合运动,砂轮作高速旋转,被磨齿轮沿固定的假想齿条向左或向右作往复纯滚动,以实现磨齿的展成运动,分别磨出齿槽的两个

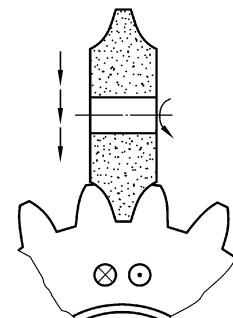


图 5-53 成形法磨齿

侧面Ⅰ和Ⅱ;为了磨出全齿宽,砂轮沿着齿向还要作往复进给运动。每磨完一个齿槽,砂轮自动退离工件,工件自动进行分度。

双碟形砂轮磨齿如图 5-55 所示,将两个碟形砂轮倾斜一定角度,构成假想齿条两个齿的外侧面,同时对两个齿槽的侧面Ⅰ和Ⅱ进行磨削。其原理与锥形砂轮磨齿相同。为了磨出全齿宽,被磨齿轮沿齿向作往复进给运动。

展成法磨齿的生产效率低于成形法磨齿,但加工精度高,可达 4~6 级,齿面粗糙度 Ra 在 $0.4 \mu\text{m}$ 以下。在实际生产中,它是齿面要求淬火的高精度齿轮常采用的一种加工方法。

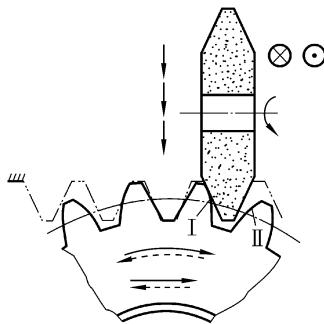


图 5-54 锥形砂轮磨齿

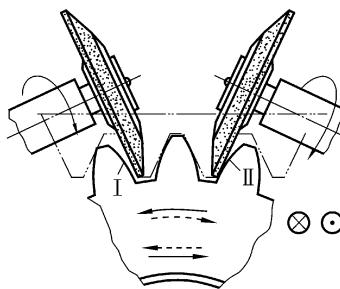


图 5-55 双碟形砂轮磨齿

4. 研齿

研齿(gear lapping)在研齿机上进行,其加工原理如图 5-56 所示。被加工齿轮安装在三个研轮中间,并相互啮合,在啮合的齿面加入研磨剂,电动机驱动被加工齿轮,

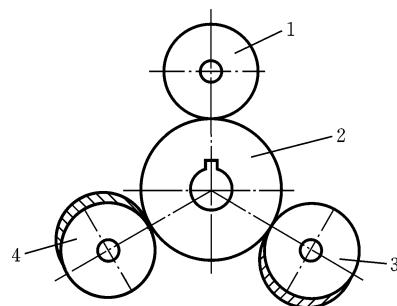


图 5-56 研齿原理

1—研轮(直齿轮) 2—被加工齿轮(直齿轮)

3,4—研轮(螺旋齿轮)

带动三个略带负载(或轻微制动状态)的研轮,作无间隙的自由啮合运动。若被加工齿轮为直齿轮,则三个研轮中要有两个螺旋齿轮,一个直齿轮。由于直齿轮与螺旋齿轮啮合时,齿面产生相对滑动,加上研磨剂的作用,在齿面产生极轻微的切削,以降低齿面粗糙度。在研齿过程中,为能研磨全齿宽,被加工齿轮除旋转外,还应轴向快速短距离移动。研磨一定时间后,改变被加工齿轮的方向,研磨齿的另一侧面。

研齿一般只降低齿面粗糙度(包括去除热处理后的氧化皮), Ra 可达 $0.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$,不能提高齿形精度,其齿形精度主要取决于研齿前齿轮的加工精度。

研齿机结构简单,操作方便。研齿主要用于没有磨齿机、珩齿机的企业或不便磨齿、珩齿的淬硬齿轮(如大型齿轮)的精加工。在实际生产中,如果没有研齿机,对于

淬火后的齿轮可采用一种简易的研齿方法,将被研齿轮按工作状态装配好,在齿面间放入研磨剂,运行跑合一段时间后拆卸清洗即可。

复习思考题

5.1-1 一般情况下,车削的切削过程为什么比刨削、铣削等平稳? 车削对加工零件品质有何影响?

5.1-2 试述细长轴加工的特点。为防止细长轴加工中产生弯曲变形,在工艺上需要采取哪些措施?

5.1-3 加工要求精度高、表面粗糙度低的紫铜或铝合金轴件的外圆时,应选用哪种加工方法? 为什么?

5.1-4 研磨、珩磨和抛光的作用有何不同? 为什么?

5.2-1 试用简图说明麻花钻的结构特点和几何参数特点。

5.2-2 为什么钻孔时会出现引偏? 给出几种防止引偏的方法。

5.2-3 钻孔有哪些工艺特点? 在钻孔后进行扩孔、铰孔为什么能提高孔的品质?

5.2-4 铰孔有哪几种方式? 各具有什么特点?

5.2-5 试说明浮动镗孔的特点及应用。

5.2-6 简述高速精镗的加工特点。

5.2-7 拉削加工有哪些特点? 它适用于什么场合?

5.2-8 试说明珩孔的加工原理。珩孔适用于什么场合?

5.2-9 试说明孔的种类及加工方法,简述孔的加工方法的选择原则。

5.3-1 一般情况下为什么刨削比铣削的生产效率低?

5.3-2 试说明薄板件的刨削特点。

5.3-3 简述平面铣刀的结构特点,并根据铣刀的特点归纳平面铣削的工艺特点。

5.3-4 试比较周铣和端铣的特点。

5.3-5 平面磨削有哪些方式? 对这些方式进行比较。

5.3-6 简述薄板零件的磨削特点。

5.3-7 何谓顺铣法和逆铣法? 试用图示说明。

5.4-1 对7级精度的斜齿圆柱齿轮、蜗轮、扇形齿轮、多联齿轮和内齿轮,各采用什么方法加工比较合适?

5.4-2 对齿面淬硬和齿面不淬硬的6级精度直齿圆柱齿轮,其齿形的精加工应当采取什么方法?

5.4-3 试比较插齿和滚齿的加工原理、加工件品质和加工范围。

5.4-4 剃齿能够提高齿轮的运动精度和工作平稳性吗? 为什么?



图 6-0 用特种加工方法获得的零件

第 6 章 特种加工及材料成形新工艺

【学习指导】 学习本章前应预习《机械制图》教材中有关三视图、形面构造与建模的内容,《互换性与技术测量》教材中有关尺寸精度、形状公差、位置公差和表面粗糙度的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的机械工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《基于项目的工程实践》教材中的有关章节。

【主要内容】 特种加工,材料成形新工艺。

【学习重点】 电火花加工、激光加工、粉末冶金、快速成形的原理、特点及应用。

6.1 特种加工简介

随着生产发展的需要和科学技术的进步,具有高熔点、高硬度、高强度、高脆性、高韧度等性能的难切削材料不断出现,各种复杂结构与特殊工艺要求的零件越来越多,使用普通的切削方法对它们进行加工往往难以满足要求,于是特种加工得到了发展。特种加工是直接利用电能、化学能、声能和光能等来进行加工的方法,其种类很多,在生产上应用较多的主要是电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工,还有化学加工、电铸、电子束加工和离子束加工等。

特种加工在对硬质合金、软合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、陶瓷等材料的加工中,在对各种模具上特殊截面的型孔、喷油嘴、喷丝头上的小孔、窄缝,以及高精度细长零件、薄壁零件和弹性元件等刚度较小的零件的加工中,均已在加工零

件的品质和生产效率上获得了理想的效果。

当然,在科学技术日新月异的进步中,特种加工将得到相应的发展。

6.1.1 电火花加工

1. 电火花加工的原理

电火花加工(electro-discharge machining, EDM)就是利用两极间脉冲放电时产生的电蚀现象对材料(毛坯)进行加工的一种方法。如图 6-1 所示,加工时工具电极和工件电极浸入煤油(绝缘介质)中,当脉冲电压加至两极,并使工具电极向工件电极不断移动,且两极间达到一定距离时,极间电压将在某一“最靠近点”使绝缘介质击穿而电离。

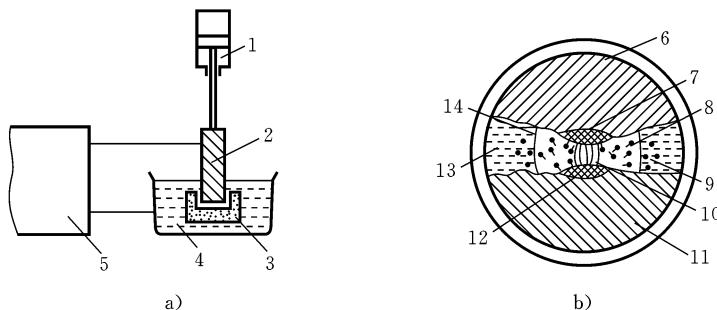


图 6-1 电火花加工

a) 加工原理 b) 放电区结构

1—自动进给调节系统 2—工具 3—工件 4—煤油 5—脉冲电源 6—阴极
7—从阴极上抛出金属的区域 8—熔化金属微粒 9—在工作液中凝固的区域
10—放电通道 11—阳极 12—从阳极上抛出金属的区域 13—工作液 14—气泡

电离后的负电子和正离子在电场力作用下,向相反极性的电极作加速运动,最终轰击电极(工件),形成放电通道,产生大量热能,使放电点周围的金属迅速熔化和气化,并产生爆炸力,将熔化的金属屑抛离工件表面,这就是放电腐蚀。被抛离的金属屑由工作液带走,于是工件表面就形成一个微小的、带凸边的凹坑,如图 6-2 所示,单个脉冲就完成了一次脉冲放电。在脉冲间隔时间内,介质恢复绝缘,等待下一个脉冲的到来。如此不断进行放电腐蚀,工具电极不断向工件进给,只要维持一定的放电间隙,就能在工件表面加工出与工具电极相吻合的型面、型腔来。

放电腐蚀时,由于正、负极接法不同,工具和工件两极的蚀除量不同,这种现象称为极性效应。产生极性效应的基本原因在于,在电火

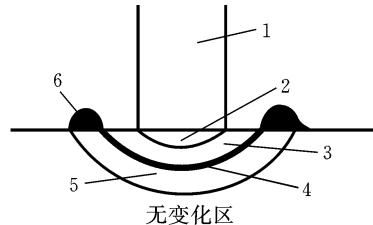


图 6-2 电蚀过程

1—放电柱 2—气化区 3—熔化区
4—凝固区 5—热影响区 6—凸起

花放电过程中,正、负电极表面分别受到负电子和正离子的撞击和瞬时热源的作用,在两极表面所分配到的能量不一样,因而熔化、气化、抛出金属的量也就不一样。一般而言,用短脉冲(脉宽 $<30\ \mu\text{s}$)加工时,负极小于正极的蚀除量。这是因为:每次通道中电火花放电时,负电子的质量和惯性较小,容易获得加速度和速度,很快奔向正极,电能、动能转换成热能后蚀除金属。而正离子由于质量和惯性较大,启动、加速较慢,有一大部分尚未来得及到达负极表面,脉冲便已结束,所以正极大于负极的蚀除量,此时工件应接正极,称为正极性加工;反之,当用较长脉冲(脉宽 $>300\ \mu\text{s}$)加工时,则负极将大于正极的蚀除量,此时工件应接负极,称为负极性加工。这是因为随着脉冲宽度(即放电时间)的加长,质量和惯性较大的正离子也逐渐获得了加速,陆续地都撞击在负极表面上。正是由于正离子的质量较大,因此它对阴极的撞击破坏作用也比负电子的大而显著。显而易见,正极性加工可用于精加工,而负极性加工可用于粗加工。

2. 电火花加工的要点

(1) 必须使工具电极和工件被加工表面之间经常保持一定的放电间隙,这一间隙随加工条件而定。如果间隙过大,极间电压不能击穿极间介质,因而不会产生火花放电;如果间隙过小,很容易形成短路接触,同样也不会产生火花放电。一般放电间隙应控制在 $1\sim100\ \mu\text{m}$ 范围内,这与放电电流的脉冲大小有关。

(2) 必须采用脉冲电源。脉冲电源能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分,把每一次的放电点分别局限在很小的范围内,否则会像持续电弧放电那样,使表面烧伤而无法用做模具电极加工。脉冲宽度一般为 $10^{-7}\sim10^{-3}\ \text{s}$,脉冲间隔时间一般为 $5\times10^{-8}\sim5\times10^{-4}\ \text{s}$ 。

(3) 火花放电必须在绝缘的液体介质中进行。液体介质必须具有较高的绝缘强度,这样有利于产生脉冲性的火花放电。同时,液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属屑、炭黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去,并且对电极和工件表面有较好的冷却作用。通常采用煤油作为放电介质。

(4) 放电点的功率密度足够高。唯有这样,放电时所产生的热量才足以使工件电极表面的金属瞬时熔化或气化。一般电流密度为 $10^5\sim10^6\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。

3. 电火花加工设备的主要组成部分

若将电火花腐蚀原理用于零件加工,则电火花加工设备必须具备四大组成部分:脉冲电源、自动进给调节系统、工具电极、液体介质。

1) 脉冲电源 电火花加工用的脉冲电源很多,用于小功率精加工时,常采用RC脉冲电源(见图6-3)。它由两个回路组成,一个是充电回路,一个是放电回路。电容器时而充电,时而放电,一弛一张,故称之为弛张式脉冲电源。

除RC脉冲电源外,在大功率的电火花加工设备中也采用独立式脉冲电源,如闸流管式、电子管式或可控硅、晶体管等脉冲电源。

2) 自动进给调节系统 从电火花加工原理可以看出,若要使两极不断地进行火

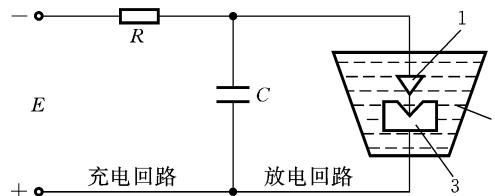


图 6-3 RC 脉冲电源

1—工具电极 2—介质 3—工件电极

花放电,就必须保持两极间有一定的间隙,间隙一般为 $0.01\sim0.2$ mm。若间隙过大,电火花将不能连续工作;若间隙过小,会引起电弧或短路。若要保持 $0.01\sim0.2$ mm 的间隙,就必须依靠自动进给调节系统来完成。

图 6-4 所示为伺服电动机自动进给调节系统。它直接由桥式测量环节送来的电压和电流双信号带动执行电动机 M,使其调速及换向。在其等效电路图中, R 为 RC 脉冲电源的限流电阻,电位器 $r=r_1+r_2$ 为平衡电桥两臂, R_k 为放电间隙的等效平均电阻。当电极间隙为合理值,亦即正常加工时,电桥四个臂的电阻之间的关系为 $r_1:r_2=R:R_k$, 电桥处于平衡状态,电动机 M 两端电位差为零,工具不动。当两极间隙增大时,放电间隙电阻 R_k 相应增大,电桥逐渐失去平衡;电动机 M 左端电位升高,电流自左向右流动,使工具电极进给。当电极开路时, R_k 为无穷大,此时电极进给最快;反之,当电极间隙减小或接近短路状态时, R_k 大大减小,或接近于零,电桥失去平衡,电动机 M 右端的电位升高,电流自右向左流动,电动机 M 反转而使工件电极离开工件,达到自动调节间隙的目的。

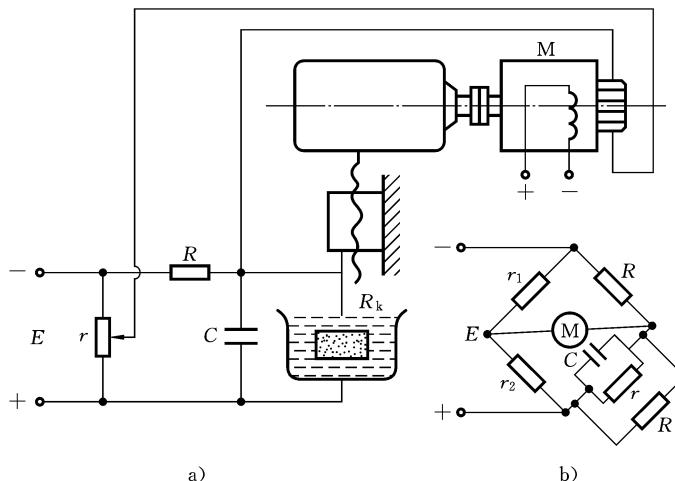


图 6-4 伺服电动机自动进给调节系统

a) 工作原理 b) 等效电路图

3) 工具电极 电火花加工时,工具与工件两极同时受到不同程度的电腐蚀,单

位时间内工件的电蚀量称为加工效率 v_g , 而单位时间内工具的电腐蚀量则称为工具损耗率 v_d 。衡量某工具是否耐损耗, 不只看工具损耗率 v_d 的绝对值大小, 还要看同时能达到的加工效率 v_g , 即应知道每蚀除单位工件金属时工具相对损耗多少, 因此常用相对损耗比(又称相对损耗率) γ 作为衡量工具耐损耗指标, 即

$$\gamma = \frac{v_d}{v_g} \times 100\%$$

工具损耗率与极性及工具材料有关, 根据加工需要确定极性之后, 正确选用工具材料是至关重要的。

一般常用黄铜和紫铜作为工具材料, 但有时为了尽量减少电极的蚀耗, 最好采用铜基石墨(如碳化钨硬质合金等)。采用铜基石墨作为工具电极的原因是: 在工具尖端的紫铜基体迅速蚀耗的同时, 石墨熔点很高, 会阻止它进一步蚀耗, 于是工具电极其余部分的紫铜基体受到保护。这样就保证了工具电极的形状和尺寸, 延长了使用寿命, 也提高了加工精度。加工很小的深孔时, 经常使用钼丝, 它能较好地承受由于火花放电时所产生的冲击波。

如果工具与工件材料选择正确, 则相对损耗率可达 0.1, 可见在选择工具电极材料时, 必须考虑工件材料, 进行全面衡量。几种材料的相对损耗率如表 6-1 所示。

表 6-1 几种材料的相对损耗率

工具材料	工件材料		
	黄铜	碳钢	碳化钨硬质合金
黄铜	0.5	≈1	3

4) 液体介质 火花放电必须在有一定绝缘强度的液体介质(如煤油)中进行。

(1) 液体介质的作用主要表现在以下三个方面: ① 使两极绝缘, 造成火花放电的条件; ② 能把电火花加工后的微小电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去; ③ 加工中对两极起冷却作用, 防止工件发生热变形。

(2) 对液体介质的要求主要表现在以下三个方面: ① 热容量要大, 保证在两极间隙内的液体蒸发, 其他部分仍处于液体状态, 以保证两极及其他部分冷却; ② 黏度要低, 易于流动, 以便于带走金属颗粒, 并对其进行冷却; ③ 消电离作用要快, 即恢复绝缘强度要快, 以减少放电后残留的离子, 避免电弧放电。

(3) 根据上述对液体介质的要求, 常用的液体介质是煤油或机油, 也可用变压器油, 它们都是碳氢化合物, 电离后的离子(H^+)有助于恢复液体绝缘性能。资料表明, 使用极性有机化合物的水溶液(如酒精、乙醚等)效果更好, 因为从这些化合物中逸出电子所需的能量较小, 容易得到放电时的离子, 即液体电离消耗能量较小, 因而相对用于腐蚀金属的能量就更多一些, 效率也更高些。但这种液体成本太高, 而且容易挥发。

4. 电火花加工的应用

1) 加工特点

- (1) 两极不接触,无明显切削力,故工件变形小。
- (2) 可以加工任何难切削的硬、脆、韧、软和高熔点的导电材料。
- (3) 直接利用电能加工,便于实现自动化。

2) 加工零件的品质

(1) 加工精度主要表现在以下三个方面:① 通孔加工精度可达 $\pm(0.01\sim0.05)$ mm,型腔加工精度可达 ±0.1 mm;② 有圆柱度误差,原因是孔壁上段产生附加放电的机会多,受电蚀的时间长,上部分尺寸变大,产生锥度;③ 得不到清晰的棱角。

导致工件尖角变圆的原因是:① 工件和工具的尖角处都存在蚀除量大的问题;② 放电间隙的等距性,导致工件上只能被加工出圆弧。目前采用前沿很陡的高频短脉冲加工,已对复制尖角精度有所提高,可获圆角半径为 0.1 mm 的尖棱。

(2) 表面品质主要表现在以下两个方面:① 粗加工 R_a 在 80 μm 左右,精加工 R_a 可达 0.8~1.6 μm ,若精度要求 R_a 在 0.8 μm 以下,则生产效率将会以几何级数下降,这时一般应采用人工研磨或电解修磨来获得粗糙度更低的表面;② 电火花加工后的表面易存润滑油,因而提高了表面的润滑和耐磨性,在相同粗糙度等级下,其表面优于机械加工的表面。

3) 适用范围

(1) 型孔、曲线孔、小孔和微孔的加工,例如各种冲模、拉丝模、喷嘴和异形喷丝孔等。

(2) 型腔加工,例如各种锻模、压铸模、挤压模、塑料模及整体叶轮、叶片等曲面零件。

(3) 线电极切割,例如切割各种复杂型孔(冲裁模)。

(4) 可加工螺纹、齿轮等成形面。

(5) 电火花磨削、表面强化、刻印及取出折断的钻头、丝锥等。

4) 应用实例 图 6-5 所示为 35 mm 电影胶片冲孔模,其材料为硬质合金,方孔尺寸为 2.8 mm \times 2 mm,孔公差为 ±0.01 mm,孔距公差为 ±0.05 mm,刃口表面粗糙度 R_a 为 0.4 μm ,冲孔模的 12 个方孔、4 个圆孔用电火花加工,只要 4.5 h 就可完成。

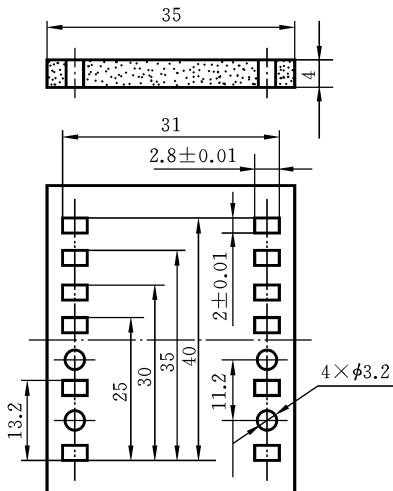


图 6-5 35 mm 电影胶片冲孔模

图 6-6 为电火花加工薄壁孔——波导管穿孔示意图。波导管直径为 12 mm,壁厚为 0.4 mm,材料为黄铜。在管壁加工直径为 12 mm 的孔,以便两波导管相接。如用钻床钻孔,容易使钻头折断或钻偏,工件变形,且钻孔有毛刺。若采用电火花加工,不但加工零件品质好(加工精度为 ±0.02 mm,表面粗糙度 R_a 为 1.6 μm),且无钻头

折断等问题。

图 6-7 所示为窄流道整体叶轮及加工用电极。其流道出口宽度只有 2~6 mm,一般机械加工很困难,采用电火花加工就很容易。

图 6-8 所示为发动机喷油嘴,材料为铬钼钢。其喷油孔直径为 0.33 mm,尺寸下偏差为 -0.04 mm,上偏差为 $+0.01$ mm,表面粗糙度 R_a 为 $0.2\sim0.8 \mu\text{m}$,孔深 2 mm。用直径为 0.3 mm 的铜丝做电极,加工后的孔径为 $0.33\sim0.34$ mm,表面粗糙度 R_a 为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

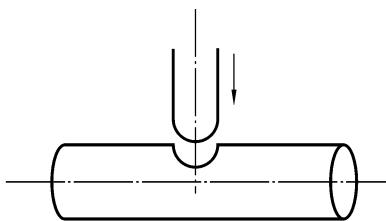


图 6-6 波导管穿孔

0.3 mm 的铜丝做电极,加工后的孔径为 $0.33\sim0.34$ mm,表面粗糙度 R_a 为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

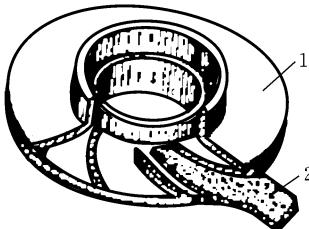


图 6-7 整体叶轮及电极

1—叶轮 2—电极

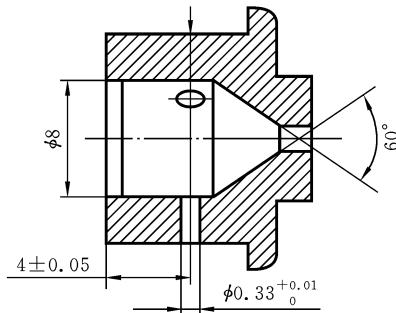


图 6-8 发动机喷油嘴

5. 电火花线切割加工

电火花线切割加工(spark-erosion wire cutting)是利用一根运动着的金属丝(如直径为 $0.02\sim0.3$ mm 的铜丝)作为工具电极,在工具电极和工件电极之间通以脉冲电流,使之产生放电腐蚀,由此切割出所需工件的一种加工方法。控制工作台按确定的轨迹运动,工件就被切割成所需要的形状,如图 6-9 所示。与电火花成形加工相

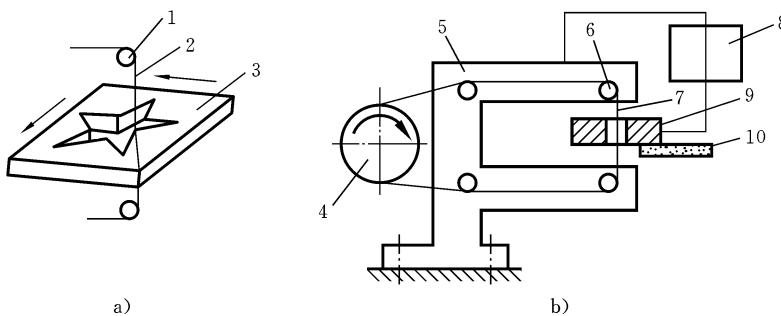


图 6-9 电火花线切割加工

a) 加工实例 b) 加工原理

1、6—导向轮 2、7—钼丝 3、9—工件 4—传动轮 5—支架 8—脉冲电源 10—绝缘底板

比,线切割加工不需制造成形电极。一般采用数控线切割,自动化程度高,成本低。

电火花线切割加工适合于加工各种形状的冲裁模、拉丝模、冷拔模和粉末冶金模等。图 6-10 所示为电动机转子冲裁模,厚度为 5 mm,采用线切割加工,可一次成形。线切割加工还可加工各种微细孔、槽、窄缝及曲线图形,如图 6-11 所示的集成电路冲裁模。试制某些新产品,如图 6-12 所示的螺旋形簧片时,应用线切割加工,可直接在板料上切割零件,就可以省去模具制作过程。

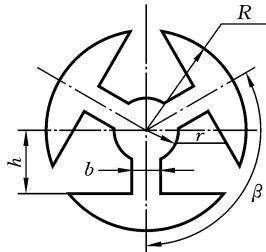


图 6-10 电动机转子冲裁模

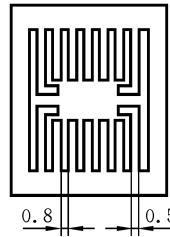


图 6-11 集成电路冲裁模

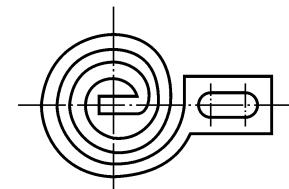


图 6-12 螺旋形簧片

6.1.2 超声波加工

超声波加工(ultrasonic machining, UM)是利用振动频率超过 16000 Hz 的工具头,通过悬浮液磨料对工件进行加工的一种方法,如图 6-13 所示。

当工具以 16000 Hz 以上的振动频率、0.01~0.1 mm 的振幅作用于悬浮液磨料时,悬浮液磨料将会以极高的速度,强力冲击加工表面,在被加工表面的局部产生很大的压强,使工件局部材料发生变形,当达到其强度极限时,材料将发生破坏而成粉末被打击下来。虽然每次打击下来的材料不多,但每秒钟的次数很多(16000 次以上),这是超声波加工的主要作用。另外还有悬浮液磨料在工具头高频振动下对工件表面的抛磨作用,以及工作液进入被加工材料间隙处、加速机械破坏的作用。在上述作用下,工件表面将按工具截面形状逐渐被加工成形。

1. 超声波加工装置

超声波加工装置的基本组成部分包括高频发生器、磁致伸缩换能器、变幅杆、工具头和磨料悬浮液等。

(1) 高频发生器,即超声波发生器,其作用是将低频交流电转变为有一定功率输出的超声频振荡,以供给工具作往复运动和加工零件的能量。要求其功率和频率在一定范围内连续可调。

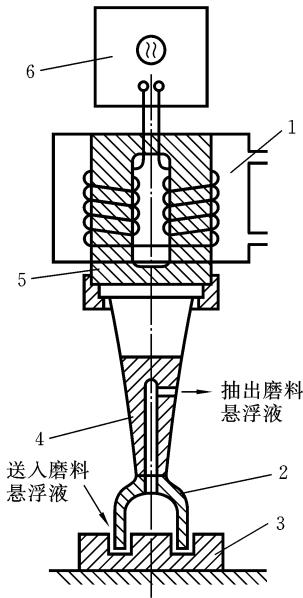


图 6-13 超声波加工

1—冷却器 2—工具头 3—工件
4—变幅杆 5—磁致伸缩换能器
6—高频发生器

(2) 磁致伸缩换能器,其作用是把超声频振荡转换成机械振动。换能器的材料为铁、铬、镍及其合金,这些材料的长度能随着磁场强度的变化而伸缩,其中镍在磁场中尺寸缩短,而铁、铬则在磁场中伸长,当磁场消失后,它们各自又恢复原有尺寸。

(3) 变幅杆,其作用是放大振幅。因为换能器材料的伸缩变形都很小,在共振情况(频率为16000~25000 Hz)下,其伸缩量不超过0.005 mm,而超声波加工需要0.01~0.1 mm的振幅,所以,必须通过上粗下细(按指数曲线设计)的变幅杆进行振幅扩大。由于通过变幅杆的每一截面的振动能量是不变的,因此截面小的地方能量密度大,振幅就大。

(4) 工具头,它与变幅杆相连(螺纹连接或焊接在一起),并以放大后的机械振动作用于悬浮液磨料,对工件进行冲击。工具材料应选硬度不是很大的韧性材料,如用45钢制作工具,能减少工具的相对磨损。工具的尺寸及形状取决于被加工表面的尺寸和形状,它们相差一个加工间隙值(稍大于磨料直径)。

(5) 磨料悬浮液,由工作液和磨料混合而成,常用的磨料有碳化硼、碳化硅、氧化锆或氧化铝等,常用的工作液是水,有时也用煤油或机油。磨料的粒度大小取决于加工精度、表面粗糙度及生产效率的要求。

2. 超声波加工的特点及应用

(1) 适合于加工硬材料和非金属材料。

(2) 宏观作用力(工件加工时只受磨料瞬时的局部撞击压力,故取横向摩擦力)小,适合加工薄壁或刚度较小的工件。

(3) 加工精度高($\pm(0.01\sim0.05)$ mm),表面粗糙度低($R_a=0.01\sim0.04$ μm),工件表面无残余应力、组织变化及烧伤等现象。

(4) 工件上被加工出的形状与工具形状一致,可以加工型孔、型腔及成形面的表面修饰加工,如雕刻花纹和图案等。

(5) 加工机床、工具均比较简单,操作维修方便。

(6) 生产效率较低。

目前,超声波加工主要用于硬脆材料的套料、切割、雕刻和研磨金刚石拉丝模等的加工。

6.1.3 激光加工

1. 激光加工的原理及微观过程

激光是一种能量高、方向性强、单色性好的相干光。通过光学系统的作用,可以把激光束聚焦为一个极小的光斑,这个光斑的直径仅有几微米或几十微米;而其能量密度可达 1×10^7 W/m²,温度可达10000 ℃以上。因此,能在几分之一秒甚至更短的时间内使各种坚硬及难熔材料熔化和气化。在激光加工区内,由于金属蒸气迅速膨胀,压力突增,熔融物以极高速度被喷出,喷出的熔融物又产生了一个强烈的反向冲击力继而作用于熔化区,这样就在高温熔融和冲击波的同时作用下,在工件上打出了

一个孔。激光加工(laser process, LP)就是通过这种原理及微观过程进行打孔和切割的。图 6-14 所示为固体激光器的工作原理。当工作物质(如红宝石、钕玻璃等具有亚稳态能级结构的物质)受到光泵(激励光源)的激发后,便产生受激辐射跃迁,形成激光,并通过由两个反射镜(全反射镜和部分反射镜)组成的谐振腔产生振荡,使光能集中并输出激光束。通过透镜将激光束聚焦到工件加工部位,就可以进行打孔、切割等各种加工。

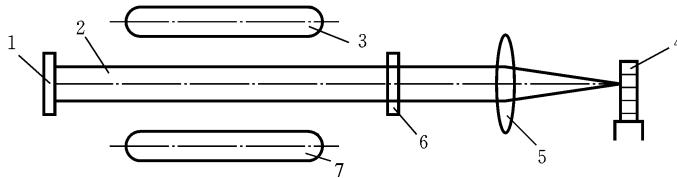


图 6-14 固体激光器的工作原理

1—全反射镜 2—激光工作物质 3、7—光泵(激励脉冲氙灯) 4—工件 5—透镜 6—部分反射镜

2. 激光加工的特点

(1) 不需要工具,不存在工具损耗,更没有更换、调整工具等问题,适合自动化连续操作。

(2) 不受切削力的影响,易于保证精度。

(3) 几乎能加工所有的材料,如各种金属材料、非金属材料(陶瓷、石英、玻璃、金刚石、半导体等);如果是透明材料,只要采取一些表面打毛等措施,也可加工。

(4) 加工速度快,效率高,热影响区小。

(5) 适于加工深的微孔(直径小至几个微米,其深度与直径之比可达 10 以上)及窄缝。

(6) 可透过玻璃对工件进行打孔,这在某些情况(如工件需要在真空中加工)下是非常便利的。

3. 激光加工的应用

1) 激光打孔 激光打孔不需要工具,这有利于打微型小孔及自动化连续打孔。例如,钟表行业的宝石轴承加工,对于直径为 0.12~0.18 mm、深 0.6~1.2 mm 的小深孔,采用工件自动传送,每分钟可连续加工几十个工件。又如,生产化学纤维用的硬质合金喷丝板,一般要在面积为 100 mm^2 的喷丝板上打 12000 多个直径为 $60 \mu\text{m}$ 的小孔。过去用机械加工方法加工,需要熟练工人工作一个月,现在采用数控激光打孔,不到半天即可完成,其品质也比机械加工的好。激光打孔孔径可小到 $10 \mu\text{m}$ 左右,且深度与孔径之比可达 5 以上。

2) 激光切割 激光切割的工作原理与激光打孔的工作原理基本相同。所不同的是,工件与激光束要相对移动,在生产中一般都是移动工件。如果是直线切割,还可借助于柱面透镜将激光束聚焦成线,以提高切割速度。

激光切割已成功地应用于半导体切片,将 1 cm^2 的硅片切割成几十个集成电路

块或上百个晶体管管芯,还可用于划线、雕刻等工艺。激光切割用于切割钢板、铁板、石英、陶瓷及布匹、纸张等也都获得了良好的效果。

图 6-15 所示为化纤喷丝头的型孔,出丝口的窄缝宽度为 $0.03\sim0.07$ mm,长度为 0.8 mm,喷丝板厚度为 0.6 mm,这些微型型孔均可用激光束切割而成。

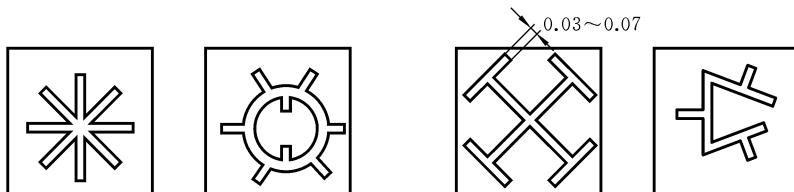


图 6-15 喷丝头的几种型孔

6.2 材料成形新工艺

材料、能源和信息是当代科学技术的三大支柱,材料成形与加工是现代材料科学的组成要素之一。近年来,随着机械工业,尤其是汽车工业的飞速发展与国际竞争的激化,零部件的设计及生产过程的高精度、高性能、高效率、低成本、低能耗、省资源已成为提高产品竞争力的唯一途径。常规切削加工技术和完全拘泥于传统的粗放型的材料成形工艺已难以满足要求,因此,以生产尽量接近零件最终形状的产品,甚至是以完全提供成品零件为目标的材料成形新技术、新工艺,已是必然趋势和发展方向。

6.2.1 粉末冶金

1. 概述

粉末冶金(powder metallurgy, PM)是研究制造各种金属粉末和以粉末为原料通过成形、烧结和必要的后续处理,制取金属材料和制品的一种成形工艺。粉末冶金的生产工艺与陶瓷的生产工艺在形式上类似,又称金属陶瓷法。

粉末冶金工艺能够制造许多用其他方法所不能制造的材料和制品,许多难熔材料的零件至今还只能用粉末冶金工艺来制造。用粉末冶金工艺制造的还有一些特殊性能的材料。例如,由互不溶解的金属或金属与非金属组成的假合金(如铜-钨、银-钨、铜-石墨等),这种假合金具有高的导电性能和高的抗电蚀稳定性,是制造电器触头制品不可缺少的材料。再如,粉末冶金多孔材料能够通过控制其孔隙度和孔径大小,获得优良的使用性能等。

粉末冶金还是一门制造各种机械零件的重要而又经济的成形工艺。由于粉末冶金工艺能够获得具有最终尺寸和形状的零件,实现了少无切削加工,因此,可以节省大量的金属材料和加工工时,具有显著的经济效益。

综上所述,粉末冶金成形工艺既能制造具有特殊性能材料,又能低成本、大批量

地近净成形机械零件。

现代粉末冶金工艺的发展已经远远超出上述加工范围而日趋多样化,如同时实现粉末压制和烧结的热压及热等静压法,粉末轧制,粉末锻造,多孔烧结制品的浸渍处理、熔渗处理,精整或少量切削加工处理,热处理等。

目前采用粉末冶金工艺可以制造板、带、棒、管、丝等各种型材,以及齿轮、链轮、棘轮、轴套类等各种零件;可以制造质量仅百分之几克的小制品,也可以用热等静压法制造质量近两吨的大型坯料。对粉末冶金工艺的研究,已成为当今世界各工业发达国家都十分重视的课题。

2. 粉末冶金工艺

粉末冶金法与金属的熔炼法、铸造法有根本的不同。典型的粉末冶金工艺过程是:原料粉末的制备;粉末物料在专用压模中加压成形,得到一定形状和尺寸的压坯;压坯在低于基体金属熔点的温度下加热,使制品获得最终的物理和力学性能。

将处理过的粉末经过成形工序,得到具有既定形状与强度的粉末体,称为成形(压坯)。粉末成形可以用普通模压成形或特殊成形。普通模压成形是在常温下将金属粉末或混合粉末装在封闭的刚性模内,通过压机按规定的压力使其成形。特殊成形是指各种非模压成形。其中使用最广泛的是普通模压法成形。

1) 称粉与装粉 称粉就是称量一个压坯所需的粉料的质量或容量。采用非自动压模小批生产时,多用质量法;大量生产和自动化压制成形时,一般采用容量法,且是用模具型腔来进行定量。但是,在生产贵金属制品时,称量的精度很重要,即使大量生产也采用质量法。

2) 压制 压制是按一定的压力,将装在模具型腔中的粉料集聚成一定密度、形状和尺寸要求的压坯的工步。

在封闭刚性模中冷压成形时,最基本的压制方式有单向压制、双向压制、浮动压制三种,如图 6-16 所示。其他压制方式或是这三种基本方式的组合,或者是用不同结构来实现的。

(1) 单向压制(见图 6-16a)时,凹模和下冲模不动,由上冲模单向加压。在这种情况下,因摩擦力 f 的作用,制品上、下两端密度不均匀,即压坯直径越大或高度越小,压坯的密度差就越小。单向压制的优点是模具简单,操作方便,生产效率高,缺点是只适合压制高度小或壁厚大的制品。

(2) 双向压制(见图 6-16b)时,凹模固定不动,上、下冲模以大小相等($F_t = F_s$)、方向相反的压力同时加压,正如两个条件相同的单向压坯从尾部连接起来一样。这种压坯中间密度低,两端密度高而且相等。所以,双向压制的压坯允许高度比单向压坯高一倍,适合压制较长的制品。双向压制的另一种方式是:在单向压制结束后,在密度低的一端再进行一次反向单向压制,以改善压坯密度的均匀性。

(3) 浮动压制(见图 6-16c)时,下冲模固定不动,凹模用弹簧、气缸、液压缸等支承,受力后可以浮动。随后上冲模加压,侧压力使粉末与凹模壁之间产生摩擦力 f_s ,

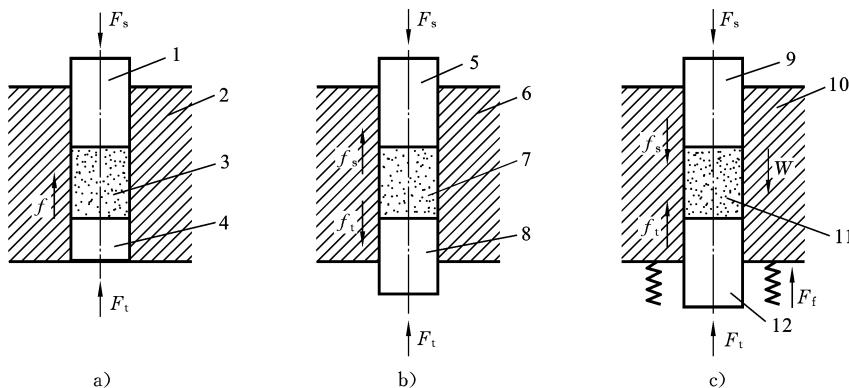


图 6-16 三种基本压制方式

a) 单向压制 b) 双向压制 c) 浮动压制

1、5、9—上冲模 2、6、10—凹模 3、7、11—粉末 4、8、12—下冲模

若凹模所受摩擦力大于浮动压力 F_t , 则弹簧压缩, 凹模与下冲模产生相对运动, 相当于下冲模反向压制。此时上冲模与凹模没有相对运动。当凹模下降, 压坯下部进一步压缩时, 在压坯外径处产生阻止凹模下降的摩擦力 f_t 。若 $f_t = f_s$, 凹模浮动停止, 上冲模又单向加压, 与凹模产生相对运动。如此循环, 直到上冲模不再增加压力为止。此时, 低密度带在压坯的中部, 其密度分布与双向压制相同。浮动压制是最常用的一种压制方式。

压制方式的不同, 压坯密度的不均匀程度有较大差别。但无论哪一种方式, 其密度沿高度的分布都是不均匀的, 而且沿压坯截面的分布也是不均匀的。造成压坯密度分布不均匀的原因是粉末颗粒与模具型腔壁在压制过程中产生的摩擦。

粉末装在模具型腔中, 形成许多大小不一的拱洞。加压时, 粉末颗粒产生移动, 拱洞被破坏, 孔隙减小, 随之粉粒从弹性变形转为塑性变形, 颗粒间从点接触转为面接触。由于颗粒间的机械啮合和接触面增加, 原子间的引力使粉末体形成具有一定强度的压坯。

压坯从模具型腔中脱出是压制工序中重要的一步。压坯从模具型腔中脱出后, 会产生弹性回复而胀大, 这种胀大现象称为回弹或弹性后效, 可用回弹率来表示, 即线性相对伸长的百分率。回弹率的大小与模具尺寸计算有直接的关系。

3) 烧结 金属粉末的压坯在低于基体金属熔点下进行加热, 粉末颗粒之间产生原子扩散、固溶、化合和熔接, 致使压坯收缩并强化的过程称为烧结。粉末冶金制品因都需要经过烧结, 故又称烧结制品(或零件)。

烧结与制粉、成形一样重要, 三道工序缺一不成其为粉末冶金。影响烧结的因素有加热速度、烧结温度、烧结时间、冷却速度和烧结气氛。对于烧结工序的要求主要是: 制品的强度要高, 物理、化学性能要好, 尺寸、形状及材质的偏差要求符合大生产的要求, 烧结炉易于管理和维修等。

为了达到所要求的性能和尺寸精度,需要烧结炉能调节并控制升温速度、烧结温度与时间、冷却速度,以及炉内保护性气氛等因素。烧结炉种类较多,按照加热方式,可分为燃料加热烧结炉和电加热烧结炉,根据作业的连续性,可分为间歇式和连续式两类烧结炉。间歇式烧结炉中有坩埚炉、箱式炉、高频或中频感应炉等。图 6-17 所示为高频真空烧结炉。

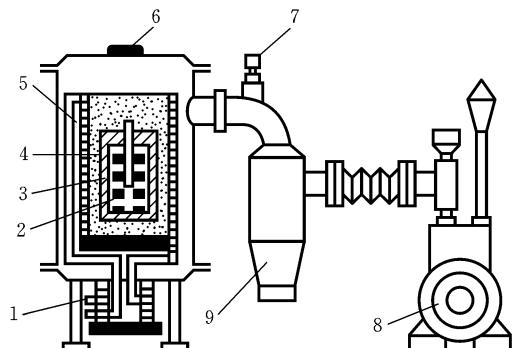


图 6-17 高频真空烧结炉

1—通冷却水入口 2—石墨板 3—工件 4—石墨坩埚 5—感应圈
6—观测孔 7—空气入口 8—真空泵 9—过滤装置

连续式烧结炉一般是由压坯的预热带、烧结带和冷却带三部分组成的横长形管状炉,是马弗炉的一种,适用于大量生产。图 6-18 所示为网带传送式烧结炉。

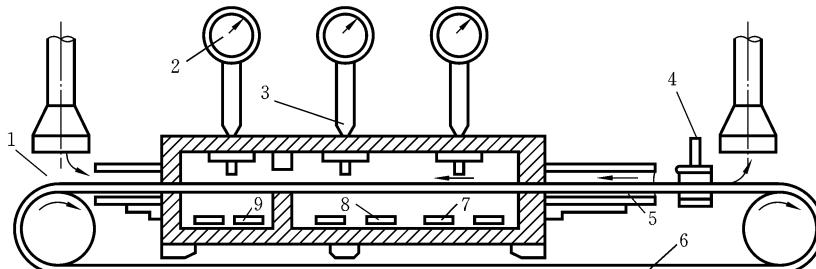


图 6-18 网带传送式烧结炉

1—工件入口 2—温度调节计 3—热电偶 4—保护气体入口
5—冷却带 6—传送带 7—发热电阻 8—烧结带 9—加热带

烧结时,通入炉内的保护气体是影响烧结品质的一个重要因素。对保护气体的一般要求是:不使烧结件氧化、脱碳或渗碳,能够还原粉末颗粒表面的氧化物,除去吸附气体等。

4) 后处理 金属粉末压坯经烧结后的处理称为后处理。后处理种类很多,一般根据产品要求来选择。

(1) 浸渍。浸渍就是利用烧结件的多孔性的毛细现象浸入各种液体。例如:为

了达到润滑的目的,可浸润滑油、聚四氟乙烯溶液、铅溶液;为了提高强度和耐蚀能力,可浸铜溶液;为了保护表面,可浸树脂或清漆;等等。

(2) 表面冷挤压。表面冷挤压是指不经过加温的后处理工艺。例如:为了提高零件的尺寸精度和表面品质,可采用整形;为了提高零件的密度,可采用复压;为了改变零件的形状或表面形状,可采用精压。此外,为提高零件上的横槽、横孔及轴向尺寸精度,可对表面进行切削加工;为提高钢铁制品的强度和硬度,可进行热处理;等等。

3. 粉末冶金工艺的应用

粉末冶金法既是一种制取具有特殊性能的金属材料的方法,也是一种精密的少无切削加工的方法。它可使压制品达到或接近于零件图所要求的形状、尺寸精度及表面粗糙度,使生产效率和材料利用率大为提高,并可节省切削加工用的机床和生产用地面积。

粉末冶金材料应用很广。在普通机械制造业中,它常用做减摩材料、结构材料、摩擦材料及硬质合金等。在其他工业部门中,它用来制造难熔金属材料(如高温合金、钨丝等)、特殊电磁性能材料(如电器触头、硬磁材料、软磁材料等)、过滤材料(如空气的过滤、水的净化、液体燃料和润滑油的过滤材料,以及细菌的过滤材料等)。

由于压制设备吨位及模具制造的限制,目前用粉末冶金工艺还只能制造尺寸不大和形状不很复杂的零件。此外,粉末冶金制品的力学性能仍低于铸件与锻件。

6.2.2 注塑工艺

塑料是以合成树脂或天然树脂为原料,在一定温度和压力条件下可塑性成形的高分子材料。多数塑料以合成树脂为基本成分,一般含有添加剂如填料、稳定剂、增塑剂、色料或催化剂等。塑料可分为热塑性塑料和热固性塑料两大类。热塑性塑料的特点是受热后软化,冷却后固化,再加热仍可软化。热固性塑料在开始受热时也可以软化或熔融,但是一旦固化就不会再软化,即使加热到接近分解的温度也无法软化,而且也不会溶解在溶剂中。

随着石油化工工业的发展和加工技术的提高,塑料的产量逐年增大,应用领域不断扩大。塑料已成为国民经济不可缺少的基础材料,广泛用于日常生活和工程技术领域。一般把原料来源丰富、产量大、应用面广、价格低廉的聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等塑料称为通用塑料。工程塑料则是指具有较高物理性能、力学性能,应用于工程技术领域的塑料。显然,与塑料相比,传统的金属在强度、刚度、耐温等方面有显而易见的优势,但塑料以其密度小、比强度大、耐蚀、耐磨、绝缘、摩擦力小、易成形等优良的综合性能,在机械制造、轻工、包装、电子、建筑、汽车、航天航空等领域得到了广泛应用。

塑料制品的成形方法很多,主要有注射成形、挤塑成形、压制而成形、中空成形、真空成形、缠绕成形和反应注射成形。这里主要介绍常用的注射成形。

注射成形(injection molding)又称为注塑成形,是将热塑性塑料或某些热固性塑料加工成零件的重要加工方法。注射成形的主要设备是注塑机(其上附有注射模具)。注塑机由注射系统、合模系统、液压和电气控制系统组成(见图6-19)。注射系统一般由螺杆、料筒、料斗、喷嘴、计量装置、螺杆传动装置、注射缸和注射座移动缸等组成,其作用是使塑料颗粒在螺杆和料筒之间均匀受热,熔融、塑化成塑料熔体,然后注入模具型腔。合模系统完成塑料注射模具的开启、闭合动作,在注射过程中起锁紧模具的作用。合模系统主要由模板、拉杆、合模机构及液压缸、制品顶出装置、安全门等组成。

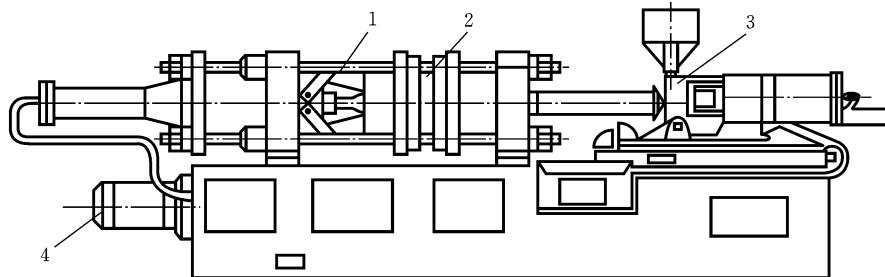


图 6-19 螺杆式注塑机的结构

1—合模系统 2—模具 3—注射系统 4—液压和电气系统

注塑机的工作过程大致如下:

(1) 闭模和锁模。模具首先低压、快速地进行闭合,当动模与定模接近时,转换为低压、低速合模,合模后切换为高压,将模具锁紧。

(2) 注射。合模动作完成以后,在移动缸的作用下,注射系统前移,使料筒前端的喷嘴与模具贴合,再由注射缸推动螺杆,高压、高速地将螺杆前端的塑料熔体注入模具型腔。

(3) 保压。注入模具型腔的塑料熔体在冷却过程中会产生收缩,未冷却的塑料熔体会从浇口处倒流,因此在这一阶段,注射缸仍需保持一定压力进行补缩,才能制造出轮廓清晰、密度均匀的塑料制品。

(4) 冷却和预塑化。当模具浇口处的塑料熔体冷凝封闭后,保压阶段完成,制品进入冷却阶段。此时,螺杆在液压马达(或电动机)的驱动下转动,使来自料斗的塑料颗粒向前输送,同时受热塑化。当螺杆将塑料颗粒向前输送时,螺杆前端压力升高,迫使螺杆克服注射缸的背压后退,螺杆的后退量反映了螺杆前端塑料熔体的体积,即注射量。螺杆退回到设定注射量位置时停止转动,准备下一次注射。

(5) 脱模。冷却和预塑化完成后,为了使注塑机喷嘴顶压模具的时间不至于太长,使喷嘴处不出现冷料,可以使注射系统后退,或者卸去注射缸前移的压力。合模系统开启模具,顶出装置动作,顶出模具内的制品。注塑机的工作循环周期如图6-20所示。

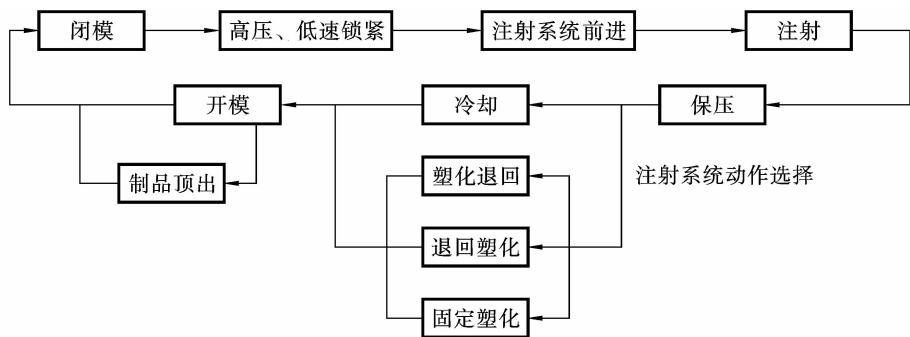


图 6-20 注塑机的工作循环周期

注射模具也是注射成形的重要工艺装备之一,典型的注射模具如图 6-21 所示,它一般包括模架、型腔和芯子、浇注系统、导向装置、脱模机构、排气结构、加热冷却装置等部分。更换模具,就可在注射机上生产出不同的注塑件。

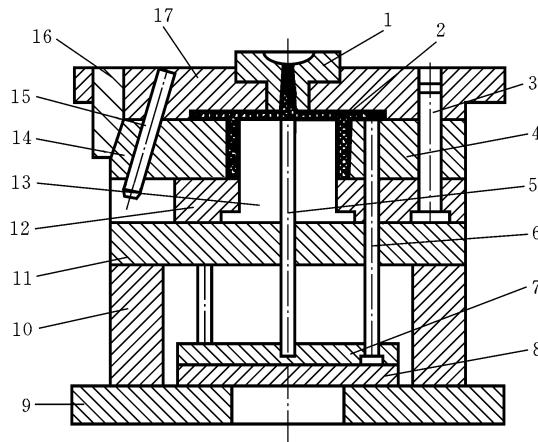


图 6-21 带横向分型抽芯的模具

1—浇口套 2—制品 3—导向柱 4—动模板 5—拉料杆 6—顶杆 7—顶出板 8—顶出底板 9—动模底板
10—支架 11—动模垫板 12—芯子固定板 13—芯子 14—滑块 15—斜导柱 16—压紧块 17—定模板

注射温度、模具温度、注射压力和保压时间是影响注射成形和制品性能的重要因素。注射时塑料熔体温度的高低对制品性能的影响很大,一般说来,随着注射温度的提高,塑料熔体的黏度呈下降趋势,这对充填是有利的,也较容易得到表面光洁的制品。但过高的熔体温度会使塑料降解,其力学性能急剧下降。模具温度对制品性能的影响要小得多,但模具温度对塑料熔体的充填过程、注射成形周期、制品的内应力有较大的影响。模具温度过低时,塑料熔体遇到冷的模具,黏度会增大,很难充满整个型腔;模具温度过高时,塑料熔体在模具内完成冷却定形的时间就长,延长了成形周期。对结晶性塑料如聚丙烯、聚甲醛等来说,较高的模具温度能使其分子链松弛,减小制品的内应力。注射压力主要影响塑料熔体的充填能力,注射压力大则较易充

满型腔。保压时间的确定取决于浇口尺寸的大小,浇口尺寸大则保压时间就长,浇口尺寸小则保压时间就短。如果保压时间短于浇口封冻时间,可能得不到轮廓清晰、密度均匀的制品,同时还会因塑料熔体从浇口处倒流而引起分子链取向变化,增大制品的内应力。

注射成形可制造质量大到数千克、小到数克的各种形状复杂的制品,生产效率高,制品能达到较高的精度,是工程塑料加工的主要成形方法。

6.2.3 快速成形

要将一种新产品成功地投入到激烈竞争的市场中,产品的开发速度及生产周期是关键。将快速成形技术与柔性制造工艺相结合,才能达到此目的。快速成形技术(rapid prototype technology, RPT)集现代数控技术、CAD/CAM技术、激光技术和新型材料科学成果于一体,突破了传统的加工模式,大大缩短了产品的生产周期,提高了产品的市场竞争能力。

快速成形技术有立体平板印刷成形、选择性烧结成形、熔丝沉积成形、分层实体制造成形等,每种技术都基于相同的原理,只是实现的方式不同而已。由设计者首先在计算机上绘制所需生产零件的三维模型,用切片软件对其进行分层切片,得到各层截面的轮廓。按照这些轮廓,激光束选择性地切割一层层的纸(或固化一层层的液态树脂,或烧结一层层的粉末材料),或喷射源选择性地喷射一层层的黏结剂或热熔材料等,形成各截面并逐步叠加成三维产品。上述过程均是在快速成形机上自动完成,能在几小时或几十小时内制造出高精度的三维产品。

1. 快速成形的主要工艺方法

1) 立体平版印刷成形工艺 立体平版印刷成形(stereo lithography apparatus, SLA)工艺也称液态光敏树脂选择固化工艺,该工艺由美国的 Chahes Hull 在 1982 年发明,是最早出现的快速成形工艺。其工作原理是:SLA 将所设计零件的三维计算机图形数据转换成一系列很薄的模样截面数据,然后在快速成形机上,用可控制的紫外激光束,按计算机切片软件所得到的每层薄片的二维图形轮廓轨迹,对液态光敏树脂进行扫描固化,形成连续的固化点,从而构成模样的一个薄截面轮廓。下一层以同样的方法制造。该工艺从零件的最底薄层截面开始,一次一层,连续进行,直到三维立体模样形成为止。一般每层厚度为 0.076~0.381 mm,最后将模样从树脂液中取出,进行最终的硬化处理,再打光、电镀、喷涂或着色即可。图 6-22 为 SLA 工作原理图。

这种工艺能直接成形小的、表面粗糙度较低的塑料制品,并且由于紫外激光波长较短(例如氦镉激光器, $\lambda = 325$ nm),可以得到很小的聚焦光斑,从而得到较高的尺寸精度。其缺点是:①需要设计支承结构,才能确保在成形过程中制件的每一个结构部分都能可靠定位;②成形过程中有物相变化,翘曲变形大,但可以通过支承结构加以改善;③原材料昂贵,有污染,易使人的皮肤过敏。

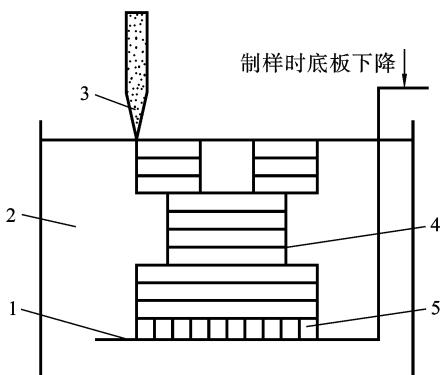


图 6-22 SLA 工作原理图

1—底板 2—树脂槽 3—扫描激光器
4—固化后的树脂模样 5—支承结构

2) 选择性烧结成形工艺 选择性烧结成形(selective laser sintering, SLS)工艺是由美国德克萨斯大学开发的,1989 年开始推广。其工作原理是:使用 CO₂ 激光器烧结粉末材料(如蜡粉、PS 粉、ABS 粉、尼龙粉、覆膜陶瓷和金属粉等);成形时先在工作台上铺上一层粉末材料,按 CAD 数据控制 CO₂ 激光束的运动轨迹,对可熔粉末材料进行扫描熔化,并调整激光束强度正好能将 0.125~0.25 mm 的粉末烧结;当激光在截面轮廓形状所确定的区域内移动时,就将该层粉末烧结,一层完成后,工作台下降一个层厚,再进行下一层的铺粉烧结;如此循环,最终形成三维产品。与 SLA 工艺一样,每层烧结都是在先制成的那层顶部进行。未烧结的粉末在制完一层后,可用刷子或压缩空气去掉。图 6-23 为 SLS 工作原理图。

这种工艺适合成形中小型零件,能直接制造塑料、陶瓷和金属产品。制品的翘曲变形比 SLA 工艺小,但仍需要对容易发生变形的地方设计支承结构。这种工艺要对实心部分进行填充式扫描烧结,因此成形时间较长。可烧结覆膜陶瓷粉和覆膜金属粉,得到成形件后,将制件置于加热炉中,烧掉其中的黏结剂,并在留下的孔隙中渗入填充物(如铜),可以直接制造零件或工具(模具)。SLS 最大的优点在于使用材料很广,几乎所有的粉末都可以使用,所以其应用范围也很广。

3) 熔丝沉积成形工艺 熔丝沉积成形(fused deposition modelling, FDM)工艺的工作原理是:使用一个外观非常像二维平面绘图仪的装置,只是笔头被一个挤压头代替;挤压头在计算机控制下,根据截面轮廓的信息,作三维运动,丝材(如塑料丝)由供丝机构送至挤压头,并在挤压头内加热、熔化,画出和堆积由切片软件所形成的一个二维切片薄层;一层完成后,工作台下降一层,再进行下一层的涂覆;如此循环,形成三维产品。图 6-24 为 FDM 工作原理图。

这种工艺适合成形小塑料件,制品的翘曲变形小,但需要设计支承结构。由于是填充式扫描,因此成形时间较长,为了克服这一缺点,可采用多个热挤压头同时进行涂覆,提高成形效率。

4) 分层实体制造成形工艺 分层实体制造成形(laminated object manufacturing, LOM)工艺也称薄形材料选择性切割,它首先由美国的 Helisys 研制成功(我国也已研制成功并生产出这类机器)。其工作原理是:将需进行快速成形的产品的三维图形输入计算机的成形系统,用切片软件对该三维图形进行切片处理,得到沿产品高度方向上的一系列横截面轮廓线;单面涂覆有热熔胶的纸卷套在纸辊上,并跨

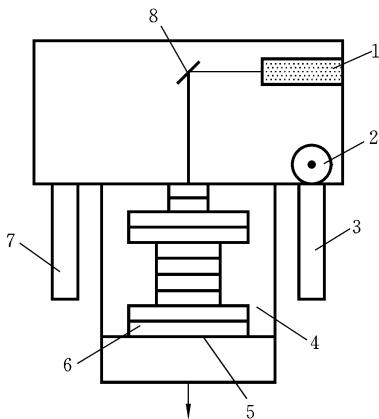


图 6-23 SLS 工作原理图

1—激光器 2—滚子 3、7—粉末箱
4—模样制造箱 5—可竖直运动的底板
6—模样 8—扫描镜

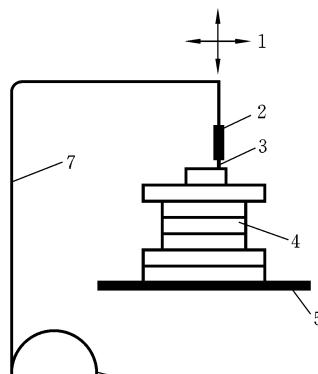


图 6-24 FDM 工作原理图

1—三维方向运动的 FDM 头 2—加热的挤压头
3—熔化的挤出物 4—凝固的模样
5—固定底板 6—材料卷丝 7—丝状材料

过支承辊缠绕到收纸辊上,步进电动机带动收纸辊转动,使纸卷沿图中箭头方向移动一定的距离,工作台上升至与纸接触;热压辊沿纸面自右向左滚压,加热纸背面的热熔胶,并使这一层纸与基底上的前一层纸黏合; CO_2 激光器发射的激光束经反射镜和聚焦镜等组成的光路系统到达光学切割头,激光束跟踪零件的二维横截面轮廓数据,进行切割,并将轮廓外的废纸余料切割出方形小格,以便成形过程完成后易于剥离余料;每切割完一个截面,工作台连同被切出的轮廓层自动下降至一定高度,然后伺服电动机再次驱动收纸辊将纸移到第二个需要切割的截面,重复下一次工作循环,直至形成由一层层纸粘贴在一起的立体纸模样;剥离废纸小方块,即可得到性能类似硬木或塑料的“纸质模样产品”。图 6-25 为 LOM 工作原理图。

与其他快速成形工艺相比,LOM 工艺具有下列优点:

(1) 成形效率高。LOM 工艺无须用激光束扫描所制模样的整个二维横截面,只需沿其横截面的内、外周边轮廓线进行切割,故在短时间内(如几小时、几十小时)就能制出形状复杂的零件模样。

(2) 成形件的力学性能较好。LOM 工艺的制模材料是涂有热熔胶和特殊添加剂的纸,其成形件硬如胶木,有较好的力学性能,表面光滑,能承受 100~200 °C 的高温,必要时可再对成形件进行机械加工。

(3) 成形件尺寸大。LOM 工艺是最适合制造大尺寸模样的快速成形工艺。目前已制出的最大成形件尺寸为 1200 mm×750 mm×550 mm,如发动机汽缸体等中、大型精密铸件。

但是,用这种方法成形的产品尺寸精度不高,材料浪费较大,且清除废料困难。

2. 快速成形的应用及发展

快速成形技术给制造业带来了巨大效益,其应用已遍及世界各地。在我国,从事

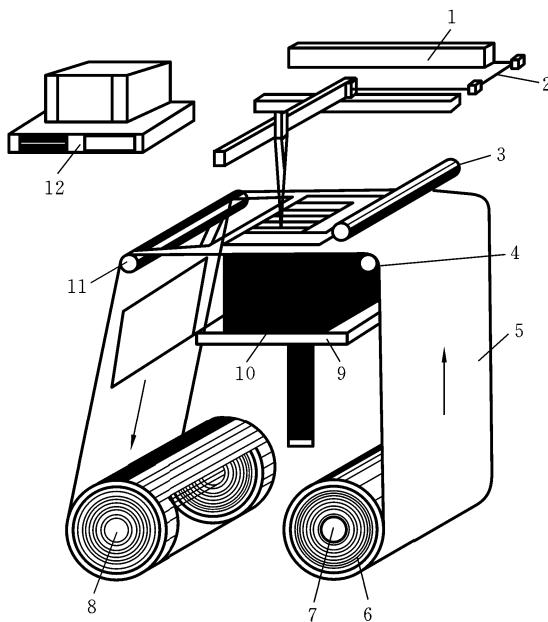


图 6-25 LOM 工作原理图

1—激光器 2—光路系统 3—热压辊 4—支承辊 5—纸 6—纸卷 7—纸辊
8—收纸辊 9—工作台 10—纸模样 11—支承辊 12—计算机控制系统

快速成形机的开发与研究的公司、大学及快速成形服务中心很多,如华中科技大学成功开发并生产了 LOM 类型的快速成形机,清华大学、隆源公司及西安交通大学等开发了 SLS、SLA、FDM 多功能快速成形机。北京、深圳、天津、西安、武汉、宁波等地建立了 RPT 服务中心,开展多种面向社会承揽加工的服务。一些大型企业还配备了快速成形系统,服务于本企业的生产和新产品开发。

快速成形技术的应用可概括为如下几个方面:

1) 复制模具,生产金属或塑料制品

(1) 用快速成形制件作母模,可浇注蜡、硅橡胶、环氧树脂、聚氨酯等软材料,构成软模具,用于零件的小批试制。

(2) 用快速成形制件作母模,复制硬模具。采用的工艺路线是:用快速成形制件作母模复制硅橡胶模→用硅橡胶模复制石膏模→用石膏模铸造金属模→手工抛光→构成生产用硬模(如注塑模、拉伸模等)。模具的使用寿命可达 1000~10000 件,用于批量生产塑料件和金属件。

2) 制造新产品样品,对其形状及尺寸设计进行直观评估 在新产品设计阶段,虽然可以借助设计图和计算机三维实体模型对产品进行评价,但不直观,特别是形状复杂的产品,往往因难以想象其真实形貌,而不能做出正确、及时的判断。采用快速成形技术可以快速制造样品,供设计者和用户直观测量,并迅速反复修改、制造,大大

缩短了新产品的设计周期,使设计符合预期的形状和尺寸要求。例如,德国大众汽车公司设计的汽车齿轮箱有3000多个表面,该公司采用快速成形技术分5块制造齿轮箱的模样,在10天内拼合得到与设计完全吻合的样品。

3) 用快速成形组件进行产品性能测试与分析 用快速成形机直接制造的产品样品,可用于产品的部分性能测试与分析,例如运动特性测试、风洞试验、有限元分析结果的实体表达、零件装配性能判断等。

例如,美国 Sundstrand Aerospace 公司设计的飞机发电机,由很大的箱体和装于其内的1200多个零件构成。仅箱体的工程图就有50多张,至少有3000多个尺寸。因为箱体形状太复杂,不仅设计、校验十分困难,而且给制作铸造模样造成很大麻烦,时间需三四个月,费用高达数万美元。后来采用快速成形技术,仅花2周就获得了样品,6周做出了铸造模样。

4) 在医学上的应用 目前,外科医生已利用CT扫描和MRI(核磁共振成像)所得的数据,用快速成形技术制造人体器官模样,策划头颅和面部的外科手术。他们还用这样的模样进行复杂手术的演习,为骨移植设计样板。牙科医生已用快速成形技术制造病人牙齿的模样进行牙病的诊断和手术安排。

5) 直接使用金属材料和陶瓷成形产品结构件 直接使用金属材料和陶瓷成形产品结构件,即所谓的快速制造,这是目前世界快速成形技术发展的方向。国外已经从事这方面的研究并取得重大成果,如美国 DTM 公司利用 SLS 工艺成形金属件。

总之,快速成形技术作为一种新的制造技术,已经成为制造业的一种新模式,未来必将有更广泛的使用和更大的发展。

复习思考题

- 6. 1-1** 特种加工的特点是什么? 其应用范围如何?
- 6. 1-2** 常规加工工艺与特种加工工艺之间有何关系?
- 6. 1-3** 电火花加工与线切割加工的原理是什么? 各有哪些用途?
- 6. 1-4** 简述激光加工的特点及应用。
- 6. 1-5** 简述超声波加工的基本原理及应用范围。
- 6. 2-1** 简述粉末冶金的工艺过程。
- 6. 2-2** 简述快速成形的原理并举例说明其工艺过程。



图 7-0 经过多道加工工艺获得的美国雪佛莱 350 系列 V8 曲轴

第 7 章 机械加工工艺规程

【学习指导】 学习本章前应预习《机械制图》教材中有关三视图、形面构造与建模的内容,《互换性与技术测量》教材中有关尺寸精度、形状公差、位置公差和表面粗糙度的内容。学习本章时,应该与“金工实习”中实际操作的相关工艺相联系,理论联系实践,并配合一定的习题和作业,参考《基于项目的工程实践》教材中的有关章节。

【主要内容】 生产过程与工艺过程,工件的定位与安装,零件加工的结构工艺性,工艺规程的编制过程,数控加工,典型零件的加工工艺过程分析。

【学习重点】 工艺过程的组成,定位原理与定位方法,定位基准的选择,表面加工方法的选择,加工阶段的划分,工序的安排,数控加工工艺的制订与编程方法,单件、小批生产中轴类、盘套类零件的加工工艺过程。

7.1 概述

7.1.1 生产过程与工艺过程

1. 生产过程

通常,生产过程(procedure of production)是指将原材料或半成品转变为成品所进行的全过程。任何一种机械都是由零件、组件、部件装配而成的,其制造是一个复杂的过程。对一个机械产品来说,要满足和适应市场的需求,其设计与制造的生产需要进行图 7-1 所示的过程。

生产过程既可以指整台机器的制造过程,也可以指某一种零件或部件的制造过程。一个工厂的生产过程又可分为各个车间的生产过程。一个车间生产的成品往往又是另一个车间的原材料,例如,铸造车间铸造的发动机机体既是该车间的成品,又是机械加工车间的毛坯。

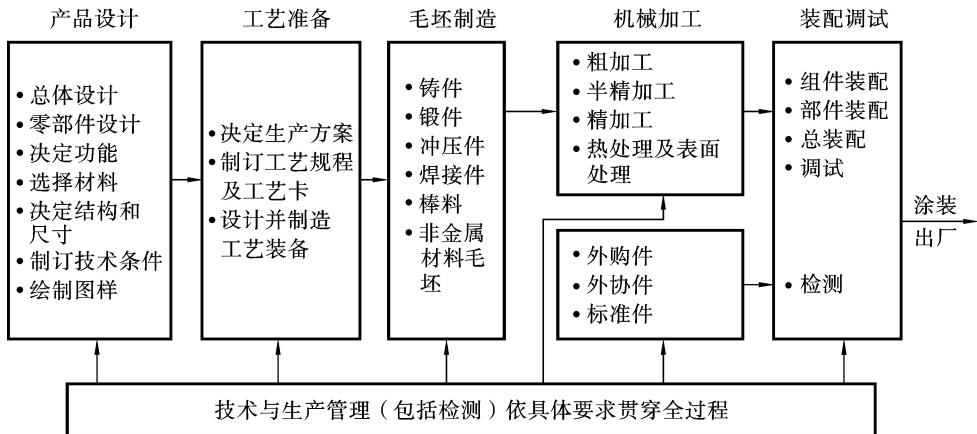


图 7-1 机械产品的生产过程

生产过程是一个十分复杂的过程,它不仅包括那些直接作用于生产对象的工作,而且包括许多生产准备工作,如原材料及半成品的供应、设备维修、品质检测、工具制造等。此外,在当今社会化大生产的条件下,专业化协作生产是提高生产效率、降低成本、组织多品种生产、降低产品开发周期的重要途径,因此,许多产品的生产往往不是在一个工厂(或车间)内单独完成,而是按行业分工,由众多的工厂(或车间)联合起来协作完成的。例如,发动机制造厂并非制造发动机上所有的零部件,而是利用了许多其他工厂的产品,如火花塞、燃油泵、活塞组、轴瓦及起动机等;而发动机厂的产品(发动机)又是其他工厂,如造船厂、汽车厂、拖拉机厂等的半成品或部件。所以,机械产品生产的全过程是指主机厂及其协作厂的生产过程之总和。

2. 工艺过程

在机械产品的生产过程中,工艺过程(process)占有十分重要的地位。工艺过程这一术语通常可定义为加工对象性能的变化,包括几何形状、硬度、状态、信息量等。而产生任何性能的变化必须具备三个基本要素:原料、能源、信息。根据制造过程的主要任务,它或者是一个材料变化的过程,或者是一个能量变化的过程,或者是一个信息变化的过程,更多的则是三者兼而有之,如一般工艺过程有锻造、铸造、机械加工、冲压、焊接、热处理、表面处理、装配和试车等。所以,具体地说,工艺过程是与改变原材料或半成品使之成为成品的直接有关的全过程。

在机械产品的制造过程中,机械加工在总劳动量中不仅所占比例最大(约60%),而且它还是获得复杂构形和高精度零件的主要方法与手段。近年来,由于科学技术的飞速发展,对产品的精度要求愈来愈高。因此,机械加工工艺过程在产品生产的整个工艺过程中,占有最重要的地位。

需要注意的是:工艺过程是一个动态过程,这个动态过程不仅表现为物质(原材料或生产对象)的变化和流动的过程,同时也反映了信息和能量的变化和流动的过程。对传统加工方式来说,所谓信息是指生产过程中使用的图样和工艺规程等,长期

以来一直被视为静态的要素。而在应用现代制造技术和自动化生产过程中,则随时都要对生产过程中产生的信息(以声、光、电、热力、位移等各种形式表现的物理量)进行获取、传输、处理、分析和应用,以执行工况监测、故障诊断、误差补偿和适应控制。在自动化加工过程中,在线检测的数据、刀具磨损后的信息都是动态的,在后续加工程序中需及时加以补偿,因而产生了信息流动过程。金属切削的过程,就是机械能被消耗的过程,也是机械能向热能的转变过程。所以,随着现代制造技术及加工自动化应用的普及,工艺过程是一个物质流动、信息流动和能量流动的综合动态过程,是生产过程的主要部分。

7.1.2 工艺过程的组成

机械加工工艺过程是由一系列工序组成的,毛坯依次通过这些工序而变为成品。工序是工艺过程的基本组成部分。

1. 工序

在一个工作地点上,对一个工件(或一组工件)进行加工所进行的连续工作过程称为工序(working procedure)。如图 7-2 所示的发动机齿轮,单件、小批生产时,可按表 7-1 划分工序,而大批生产时,工序划分如表 7-2 所示。

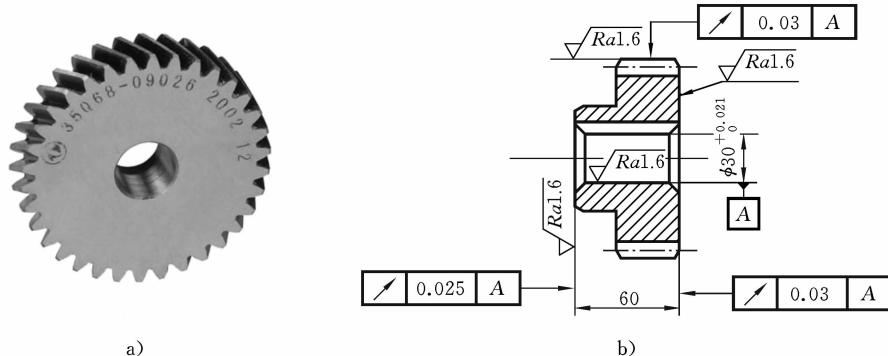


图 7-2 发动机齿轮

a) 实物 b) 工程图

表 7-1 单件、小批生产齿轮的加工工序

工 序 号	工 序 内 容	设 备
10	粗车大端面、大外圆,钻孔;掉头,粗车小端面、小外圆、台阶端面,精车小端面、小外圆、台阶端面,倒角;掉头,精车大端面、大外圆,精镗孔,倒角	车床
20	滚齿	滚齿机
30	插键槽	插床
40	检验	检验台

表 7-2 大批生产齿轮的加工工序

工序号	工序内容	设备
10	粗车大端面、大外圆,钻孔,内倒角	车床 1
20	粗车小端面、小外圆、台阶端面,内倒角	车床 2
30	拉孔	拉床 1
40	精车小端面、小外圆、台阶端面,外倒角	车床 3
50	精车大端面、大外圆,钻孔,内倒角	车床 4
60	滚齿	滚齿机
70	拉键槽	拉床 2
80	检验	检验台

工序的划分依靠两个基本要素:一是工序中的操作者、工件和所用的机床或工作地点是否改变;二是加工过程是否连续完成。比如,即使粗加工和精加工都是在同一机床上进行的,如果中间插入其他处理,失去了工序的连续性,则应把这两次加工分成两道工序。

2. 工步

工序可细分为多个工步(working step)。加工表面不变,切削刀具不变,切削用量中的切削速度和进给量不变的情况下所完成的那一部分工艺过程称为工步。车削图 7-2 所示的齿轮零件,在大量加工时,工序 10 包括下列 4 个工步:① 粗车大端面;② 粗车大外圆;③ 钻孔;④ 内倒角。

为了简化工艺文件,对于在一次安装中连续进行的若干相同的工步,常可看成一个工步(称为合并工步)。如用一把钻头连续钻削几个相同尺寸的孔,就看成是一个工步,而不看成是几个工步。

为了提高生产效率,用几把不同的刀具或复合刀具同时加工一个工件上的几个表面,也看成是一个工步,称为复合工步,如图 7-3 所示。

3. 走刀

在一个工步中,用同一刀具、同一切削用量,对同一表面进行多次切削时,相对被加工表面移动一次,切去一层金属的过程称为走刀(tool moving)。图 7-4 所示为以棒料加工阶梯轴,其中一个工步可包括一次或几次走刀。

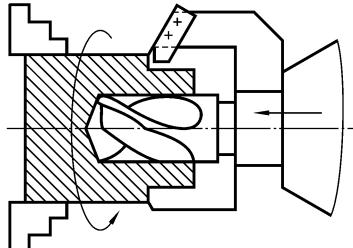


图 7-3 复合工步

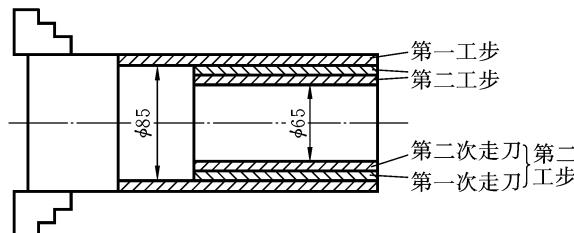


图 7-4 以棒料加工阶梯轴

4. 安装

工件在机床或夹具中定位并夹紧的过程称为安装(setting)。在一个工序内,工件的加工可能只需安装一次,也可能需安装几次。如表 7-1 所示,在工序 40 中,一次安装即可插出键槽;而工序 10 中,车削全部外圆表面至少需安装两次。

工件加工中应尽量减少安装次数,因为多一次安装,就多一次安装误差,且会增加安装工件的辅助时间。

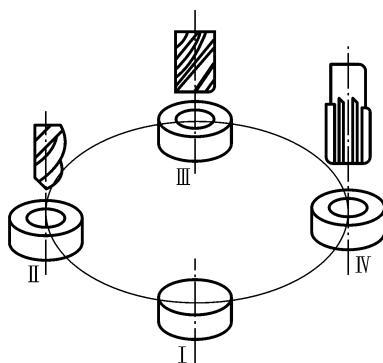


图 7-5 多工位加工

5. 工位

为了减少工件的安装次数,在加工中常采用各种回转工作台、回转夹具或移动夹具及多轴机床。工件在一次安装中,在机床上所占有的每一个位置上所完成的那一部分工作称为工位(working station)。如图 7-5 所示,利用回转工作台,可在一次安装中顺次完成四个工位的加工:I、装卸工件,II、钻孔,III、扩孔,IV、铰孔。采用多工位加工可以减少工件的安装次数,缩短辅助时间,提高生产效率,且有利于保证加工精度。

7.1.3 生产纲领、生产类型及其工艺特征

1. 生产纲领

生产纲领(production program)是指企业在计划期内应当生产的产品产量和进度计划。计划期通常为 1 年,所以生产纲领也称产品的年生产量。

零件的生产纲领要计入备品及废品的数量,其计算式为

$$N = Qn(1+\alpha)(1+\beta)$$

式中 N —零件年产量(件/年);

Q —产品的年产量(台/年);

n —每台产品中,该零件的数量(件/台);

α —备品占年产量的百分数(%);

β —废品占年产量的百分数(%).

备品率的多少要根据用户和修理单位的需要考虑,一般通过调查后凭经验确定。零件的平均废品率根据各企业的生产条件与技术的不同而不同:生产条件稳定,产品定型,如汽车、机床等制造企业,产品的废品率一般为 0.5%~1%;当生产条件不稳定或试制新产品时,废品率高达 50% 也不奇怪。

2. 生产类型

生产类型(production type)是指企业生产的专业化程度的类型。产品的生产纲领决定了企业的生产规模和生产方式。根据生产纲领、产品的复杂程度和品质要求,其生产方式可分为单件生产、成批生产和大量生产三种类型。

(1) 单件生产。单件生产的基本特点是生产的产品品种繁多,每种产品仅制造一件或少数几件,很少重复生产。例如,船用大型柴油机、大型汽轮机、重型机械产品的制造及新产品的试制等,都属于单件生产。

(2) 成批生产。一年中分批轮流地制造几种不同的产品,每种产品均有一定的量,工作地的加工对象周期性地重复。例如,机床、机车、电机和纺织机械的制造常为成批生产。

(3) 大量生产。产品的量很大,大多数工作地按照一定的生产节拍进行某种零件的某道工序的重复加工。例如,汽车、拖拉机、自行车、缝纫机和手表的制造均为大量生产。

同一产品(或零件)每批投入生产的数量称为批量。批量可根据零件的年产量及一年中的生产批数计算确定。一年的生产批数根据用户的需要、零件的特征、流动资金的周转、仓库的容量等具体情况确定。

按批量的多少,成批生产又可分为小批生产、中批生产和大批生产。在工艺上,小批生产和单件生产相似,常合称为单件小批生产;大批生产和大量生产相似,常合称为大批大量生产。生产类型的划分,主要取决于产品的复杂程度及生产纲领的大小。表7-3列出了生产类型与生产纲领的关系,表7-4列出了各种生产类型的工艺过程特点。

表 7-3 生产类型与生产纲领的关系

生产类型	重型机械($W > 200 \text{ kg}$)	中型机械($W = 100 \sim 200 \text{ kg}$)	小型机械($W < 100 \text{ kg}$)
单件生产	5 以下	<20	<100
小批生产	5~100	20~200	100~500
中批生产	—	200~500	500~5000
大批生产	—	500~5000	5000~50000
大量生产	—	>5000	>50000

注:W 为零件的质量。

表 7-4 各种生产类型的工艺过程特点

加工对象	经常换,不固定	周期性更换	固定不变
零件互换性	配对制造,无互换性,广泛用于钳工修配	普遍具有互换性,一般不用试配	全部互换,某些高精度配合件采用分组装配、配研或配磨
毛坯制造与加工余量	木模手工砂型铸造或自由锻造,毛坯精度低,加工余量大	部分用砂型铸造手工或机器造型、模锻,毛坯精度及加工余量中等	广泛采用砂型铸造机器造型、精密铸造、模锻或其他高效的成形方法,毛坯精度高,加工余量较小
机床设备及布置	通用设备,极少用数控机床,按机群布置	通用机床及部分高效专用机床和数控机床等按零件类别分工段布置	广泛采用高效专用机床和自动机床按流水线排列或采用自动线

续表

加工对象	经常换,不固定	周期性更换	固定不变
夹具与安装	多用通用夹具,极少用专用夹具,通常用划线找正方法	广泛使用专用夹具,部分用划线找正方法	广泛使用高效能的专用夹具
尺寸获得方法	试切法	调整法	调整法及自动化生产
刀具与量具	多用通用刀具与万能量具	较多采用专用刀具与量具	广泛使用高效专用刀具与量具
对工人的技术要求	熟练	比较熟练	对操作工人技术要求一般,对调整工人技术要求较高
工艺规程	有简单的工艺路线卡	有工艺规程,关键工序有详细的工艺规程	有详细的工艺规程
生产效率	低	中	高
成本	高	中	低

7.2 安装与定位

7.2.1 工件的安装与基准

1. 工件的安装

要使工件获得所需的尺寸精度、形状精度、位置精度和表面品质,在其机械加工过程中,必须使工件相对于机床、刀具占据一个正确位置,这一过程称为定位。使工件在加工过程中保持所占据的确定位置不变的过程称为夹紧。定位与夹紧总称为工件的安装(setting of workpiece),常称为工件的装夹。

工件安装的好坏将直接影响零件加工精度的高低,而安装的快慢则影响生产效率的高低。工件的安装对保证零件的加工品质、提高生产效率和降低加工成本有着重要的意义。

由于工件的大小、加工精度和批量的不同,工件的安装有下列三种方式:

1) 直接找正安装 直接找正安装是用划针或百分表等直接在机床上找正工件的位置,然后夹紧的一种安装方法。

图 7-6 所示为用单动卡盘装夹套筒,先用百分表按工件的外圆 A 进行找正后,再夹紧工件进行外圆 B 的车削,以保证套筒的 A、B 圆柱面的同轴度。

使用的工具为划线盘时,定位精度在 $(0.1 \sim 0.5)$ mm;找正的工具为千分表时,定位精度在 $(0.01 \sim 0.05)$ mm。这种安装方式的特点是:生产效率低,适用于单件、小批生产,零件的形状简单,对操作者的技术水平要求高。

2) 按划线找正安装 按划线找正安装是用划针根据毛坯或半成品上所划的线为基准, 找正毛坯或半成品在机床上的正确位置, 然后夹紧的一种安装方法。图 7-7 所示为车床床身毛坯的按划线找正安装。为保证床身的各加工面和非加工面的尺寸及各加工面的余量, 先在钳台上划好线, 然后在龙门刨床的工作台上用千斤顶顶起床身毛坯, 然后划线找正并夹紧, 再对床身底平面进行粗刨。由于划线既费时, 又需技术水平高的划线工, 划线找正的定位精度也不高, 所以划线找正安装只用于批量不大、形状复杂而笨重、尺寸公差很大而无法采用夹具安装的工件。

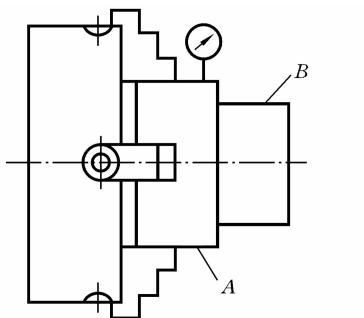


图 7-6 直接找正安装

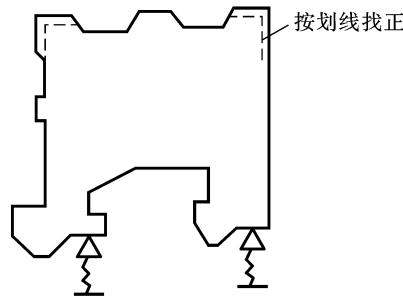


图 7-7 按划线找正安装

3) 采用专用夹具安装 夹具的定位夹紧元件能使工件迅速获得正确位置, 并固定在夹具和机床上, 因此工件定位方便, 定位精度高而且稳定, 安装效率也高。当以精基准定位时, 工件的定位精度一般可达 0.01 mm 。所以, 用专用夹具安装工件的方法广泛用于中批、大批和大量生产。但是, 由于制造专用夹具的费用较高、周期较长, 所以单件、小批生产很少采用专用夹具, 而是采用通用夹具。当工件的加工精度要求较高时, 可采用标准元件组装的组合夹具。

采用专用夹具安装工件生产效率高, 一批工件的精度稳定, 对操作工人的技术水平要求不高。

2. 基准及其分类

基准(datum)就是“依据”的意思。在零件工艺图或实际零件上, 总要依据一些指定的点、线、面来确定另一些点、线、面的位置。这些作为依据的点、线、面称为基准。按基准的作用不同, 常把基准分为设计基准和制造基准两大类。

1) 设计基准 在设计零件图样时, 用以确定其他点、线、面位置的基准称为设计基准, 即零件图上标注尺寸的起点, 或者中心线、对称线、圆心等。如图 7-8 所示的柴油机机身零件, 平面 N 和孔 I 的位置是根据平面 M 决定的, 平面 M 是平

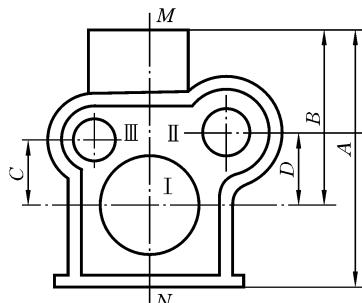


图 7-8 设计基准分析

面 N 和孔 I 的设计基准。孔 II、孔 III 的位置是根据孔 I 的中心线决定的,所以,孔 I 的中心线是孔 II、孔 III 的设计基准。

2) 制造基准 在制造过程(包括度量、装配)中采用的各种基准总称为制造基准,也称工艺基准。按用途不同,制造基准又可分为工序基准、定位基准、度量基准和装配基准。

(1) 工序基准。工序基准也称原始基准,是在工序简图上用来确定本工序加工表面加工后的尺寸、形状、位置的基准。工序尺寸的起点也是工序基准。

如图 7-9a 所示,加工齿轮的端面 E 及内孔面 F 的工序中,B 面和轴线 O_1-O_1 是 E 面及 F 面的工序基准,尺寸 a 及 ϕ_1 是工序尺寸。在图 7-9b 中,在加工齿轮的端面 D 及外圆面 C 的工序中,E 面和轴线 O_2-O_2 是 D 面及 C 面的工序基准,尺寸 b 及 ϕ_2 是工序尺寸。工序基准与工序尺寸可用于工艺过程的任一工序中。图 7-9c 所示是加工后的齿轮。

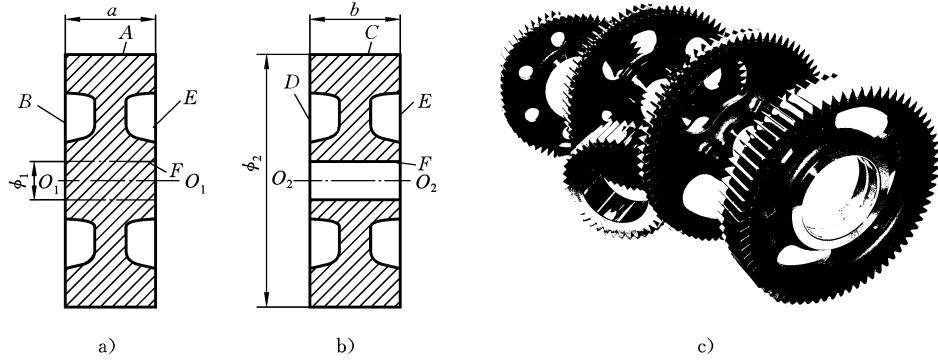


图 7-9 齿轮加工工序

a) B 面与 O_1-O_1 为基准 b) E 面与 O_2-O_2 为基准 c) 齿轮

(2) 定位基准。定位基准是工件在夹具或机床上定位时,用以确定工件在工序尺寸方向上相对于刀具的正确位置的基准。

如图 7-9a 所示,加工齿轮的端面 E 及内孔面 F 时,以外圆面 A 及端面 B 确定工件在夹具上的位置,所以 A 面、B 面即为此工序的定位基准。而在图 7-9b 中,加工齿轮的外圆面 C 及端面 D 时,则以已加工的内孔面 F 及端面 E 确定工件的位置,内孔面 F 及端面 E 即为此工序的定位基准。所以,对不同的工序尺寸,用做定位基准的表面也不同。

(3) 度量基准。用来检验已加工表面的尺寸及各表面之间位置精度的基准称为度量基准。

如图 7-10 所示,利用锥度芯轴检验齿轮外圆和两个端面相对孔轴线的圆跳动时,孔的轴线即为度量基准。

(4) 装配基准。在机器装配中,用来确定零件或部件在机器中正确位置的基准称为装配基准。如图 7-11 所示轴套,其孔以一定的配合精度安装在轴上确定其径向

位置,并以端面A紧贴轴肩确定其轴向位置,轴套孔的轴线和该端面即为装配基准。

必须指出,作为定位基准的点或线总是以具体表面来体现的,这种表面称为基准。例如,图7-11所示轴套孔的轴线并不是具体存在,而是由孔的表面来体现的,因而孔是该零件的定位基准。

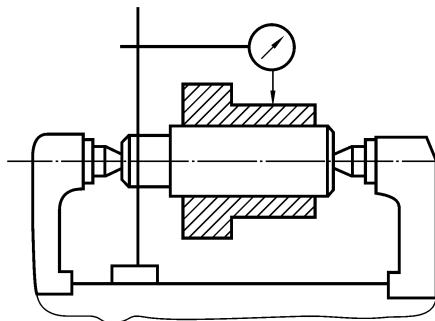


图 7-10 轴套的圆跳动检验

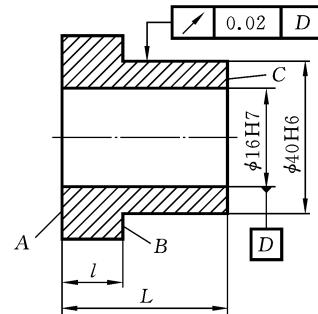


图 7-11 轴套的装配基准

7.2.2 工件在夹具中的定位

1. 定位与夹紧

定位(location)与夹紧(clamping)是安装工件的两个有联系的过程。

工件在夹具中定位就是要确定工件与夹具定位元件的相对位置,并通过导引元件或对刀装置来保证工件与刀具之间的相对位置,从而满足加工精度的要求。对单个工件而言,就是使工件准确地占据由定位元件所规定的位置;对一批工件而言,就是使每个工件都占据同一个位置。

在工件定位以后,为了使工件在切削力等作用下能保持既定的位置不变,通常还需要夹紧,将工件紧固,定位与夹紧是不相同的。若认为工件被夹紧后,其位置不能动了,所以也就定位了,这种理解是错误的。此外,还有些机构,例如自定心卡盘能使工件的定位与夹紧同时完成。

2. 工件定位的基本原理

要解决工件在夹具中的定位问题,必须首先搞清楚下列几个问题:工件在空间有几个自由度?如何限制这些自由度?工件的工序加工精度与自由度限制有什么关系?如何限制工件的自由度?对工件自由度的限制有什么要求?

工件在没有采取定位措施时,它在夹具中的位置是任意的。对一个工件来说,其位置是不确定的;对一批工件来说,其位置是变动的。工件空间位置的这种不确定性可用自由度(或不定度)来描述。把工件看成空间直角坐标系中的一个刚体,则它在空间有六个独立运动,即沿x、y、z轴的移动(分别用 \vec{x} 、 \vec{y} 、 \vec{z} 表示)和绕这三个轴的转动(分别用 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 表示),如图7-12所示。通常将这六个运动称为六个自由度。要使工件在某方向上有确定的位置,就必须限制该方向的自由度,当工件的六个自由度

均被限制后,工件在空间的位置就唯一地被确定下来。如何限制工件的自由度呢?在夹具中,限制工件的自由度可用定位支承点来实现,一个定位支承点限制一个自由度。

例如,对一个长方体工件进行定位,可在其底面布置三个不共线的约束点1、2、3,在侧面布置两个约束点4、5,在端面布置一个约束点6(见图7-13)。这样,约束点1、2、3就限制了 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 三个自由度;约束点4、5可以限制 \hat{x} 、 \hat{z} 两个自由度;约束点6则限制了一个自由度 \hat{y} 。可见,六个按一定规则布置的约束点,就可以限制六个自由度,使工件在空间的位置完全确定,这就是六点定位原理。这样,工件每次都装到与六个定位支承点相接触的位置上,从而使每个工件获得确定的位置,一批工件也就获得了同一位置。

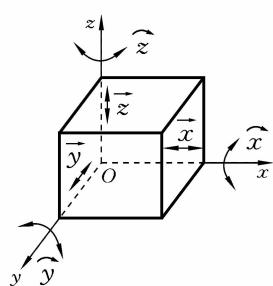


图 7-12 工件在空间的自由度

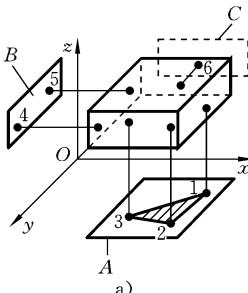


图 7-13 长方体工件的定位

a) 六点定位分解图 b) 六点在工件上的分布

六点定位原理也适用于其他形状工件的定位,只是定位支承点的分布方式有所不同。如图7-14所示圆盘几何体的定位,圆盘的端面为主要定位基准,由定位支承

点1、2、3限制了工件的三个自由度 \hat{z} 、 \hat{x} 、 \hat{y} ,定位销的定位支承点5、6限制了工件的两个自由度 \hat{x} 、 \hat{y} ,防转支承点4限制了工件的一个自由度 \hat{z} 。

在实际定位中,定位支承点并不一定就是一个真正的点,也可能是一线段或一小面积。所以,通常所说“几点定位”仅是指某种定位中数个定位支承点的综合体现,而非某一定位支承点限制了某一自由度。

如图7-15所示圆柱体工件的六点定位情况,定位基准是长圆柱面的轴线、后端面和键槽侧面。长圆柱面采用中心定位,外圆与V形块呈两直线接触。这时,长V形块可看成“四点定位”,即A面布置两点(定位点1、2),B面布置两点(定位点4、5),限制了工件的 \hat{x} 、 \hat{z} 、 \hat{x} 、 \hat{z} 四个自由度,定位支承点3限制了工件的 \hat{y} 自由度,销可简化为支承点6,限制了工件绕 y 轴回转方向的自由度 \hat{y} ,共限制了六个自由度。

3. 限制工件自由度与加工技术要求的关系

工件在夹具中定位时,并非所有情况下都必须完全定位,即工件的六个自由度不

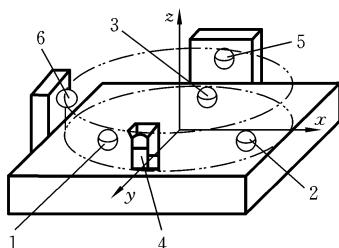


图 7-14 圆盘工件的定位

必全部限制。设计工件的定位方案时,应首先分析必须限制哪些自由度,然后在夹具中配置相应的定位元件。

工件所需限制的自由度主要取决于本工序的加工要求。对空间直角坐标系来说,工件在哪个方面有加工要求,在哪个方面的自由度就应予以限制。如图 7-16 所示,在小轴上铣通槽 W,由于槽有深度与宽度要求,所以应限制 \bar{x} 、 \bar{z} 两个自由度。同时,应保证槽两侧面的中心平面对轴线的重合,及侧面与底面对轴线的平行度要求,则应限制 \bar{x} 、 \bar{z} 两个自由度。而加工的槽为通槽,对槽的长度没有要求,即对沿 y 轴方向的移动没有要求,所以 \bar{y} 可以不限制。又因为加工的是轴,且对其圆周周向有相对角度与位置要求,所以 $\bar{\gamma}$ 也应限制。因此,归纳起来,在小轴上加工通槽时,应限制 \bar{x} 、 \bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{z} 和 $\bar{\gamma}$ 五个自由度。同理,加工方形工件的不通槽(见图 7-17),也应限制五个自由度。

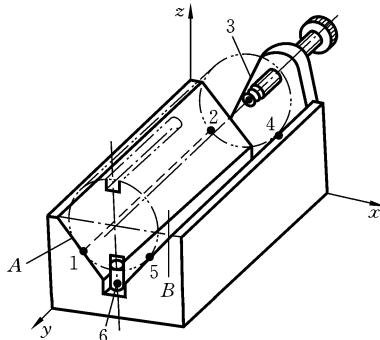


图 7-15 圆柱体工件的定位

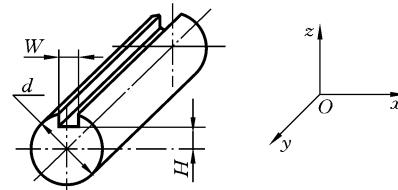


图 7-16 限制工件自由度分析

从上面的分析可知,正确的定位形式有完全定位和不完全定位两种。合理选择并布置定位元件,使工件的六个自由度完全被限制,在夹具中有完全确定的唯一位置,这种定位形式称为完全定位。完全定位适合较复杂工件的加工。在满足加工要求的情况下,可以不对工件的六个自由度全部予以限制(定位),这种定位形式称为不完全定位。在设计定位方案时,对不必要的自由度,一般不布置定位元件,否则将使夹具结构复杂化。但有时为了使加工过程顺利,在一些没有加工尺寸要求的方向也需要对该自由度加以限制。例如铣通槽,在铣削力的相对方向(y 方向)也设置圆柱销。这样并不会使夹具结构过于复杂,还可以减小所需的夹紧力,使加工品质

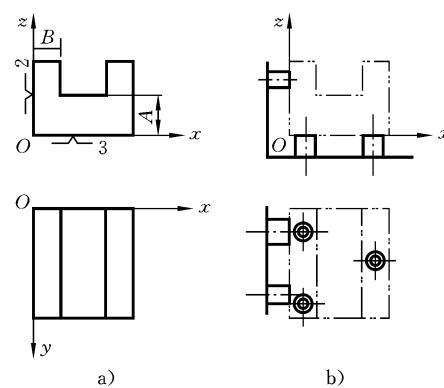


图 7-17 限制方形工件的五个自由度

a) 工件 b) 定位元件

稳定,并有利于铣床工作台的纵向(y 轴方向)行程的自动控制。这不仅是允许的,而且是必要的。

4. 欠定位与过定位

1) 欠定位 所谓欠定位(less positioning)是指工件实际定位所限制的自由度数目少于按其加工要求所必须限制的自由度数目的定位形式。欠定位是一种定位不足而影响加工的情况。因此,欠定位将导致应限制的自由度未予限制的不合理现象出现。这样也就不能保证工件在夹具中占据正确位置,必然无法保证工件所规定的加工要求。图 7-18 所示为轴在铣床自定心卡盘和后顶尖上的定位。在工件上铣不通槽,工件沿 x 方向的自由度没有被限制,故加工出来的键槽在沿 x 方向的长度尺寸 l 不能保证一致。可见,欠定位不能保证工件的加工技术要求,是不允许出现的。

2) 过定位 两个或两个以上的定位支承点同时限制工件的同一个自由度的定位形式称为过定位(most positioning),也常称为超定位或重复定位,如图 7-19a 所示为芯轴、大支承板定位的形式,由于芯轴限制了工件的 \bar{y} 、 \bar{z} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 四个自由度,大支承板限制了工件的 \bar{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 三个自由度。工件以这种过定位形式定位时,由于工件和定位元件都存在误差,几个定位基准面可能与几个定位元件不能同时很好地接触,夹紧后工件和定位元件将产生变形,甚至损坏。例如,图 7-19a 中,当工件的内孔与端面的垂直度误差较大且内孔与芯轴的配合间隙很小时,工件的端面与大支承板只有极少部分接触,夹紧后工件和芯轴将会产生变形,影响加工精度。过定位严重时,还可能使工件无法进行装卸。因此在一般情况下,应尽量避免采用过定位形式。

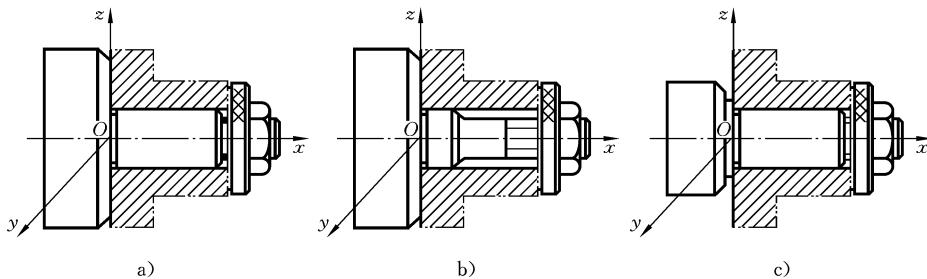


图 7-19 工件的过定位及改进方法

a) 芯轴、大支承板定位 b) 圆柱销、大支承板定位 c) 芯轴、小支承板定位

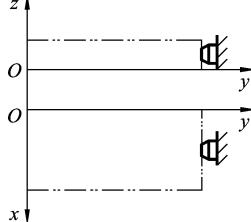
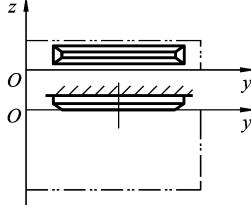
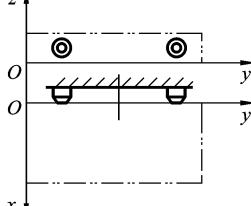
图 7-19b、c 所示为通过改变定位元件的结构形状而避免了过定位的示例。图 7-19b 采用定位销(圆柱销),仅限制工件的 \bar{y} 、 \bar{z} 两个自由度,而没有像芯轴那样限

制了工件的 \vec{y} 、 \vec{z} 、 \vec{y} 、 \vec{z} 四个自由度, 大支承板限制工件的 \vec{x} 、 \vec{y} 、 \vec{z} 三个自由度, 共限制了工件的五个自由度, 没有出现过定位。图 7-19c 采用芯轴和小支承板定位, 芯轴限制工件的 \vec{y} 、 \vec{z} 、 \vec{y} 、 \vec{z} 四个自由度, 小支承板限制工件的 \vec{x} 一个自由度, 共限制了工件的五个自由度, 也没有出现过定位。一般情况下: 当加工表面与工件的大端面有较高的位置精度要求时, 可采用如图 7-19b 所示的定位方案; 当加工表面与工件的内孔有较高的位置精度要求时, 可采用如图 7-19c 所示的定位方案。

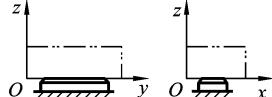
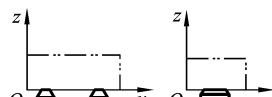
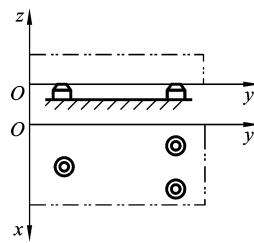
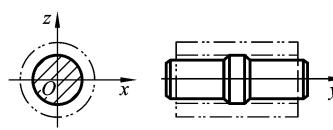
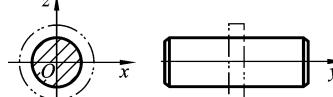
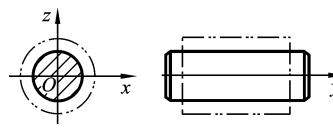
如果工件上的各定位基准面之间及各定位元件之间的位置精度都很高, 这时即使采用了过定位, 也不会造成不良后果, 反而会提高工件在加工中的支承刚度和稳定性, 所以这种情况下过定位是可以采用的, 实际生产中也经常采用。因此, 过定位不一定必须避免, 而应正确对待。如图 7-19a 所示, 如果工件内孔与端面垂直度精度很高, 芯轴与大支承板之间垂直度精度也很高, 这种过定位形式就可以采用。

夹具设计中几种常见的定位方式和所用的定位元件如表 7-5 所示。

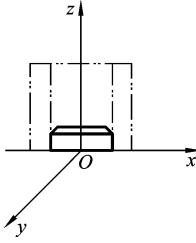
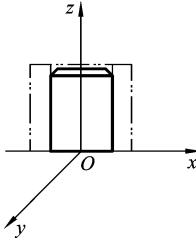
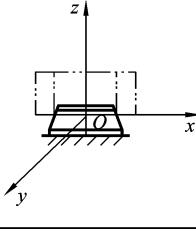
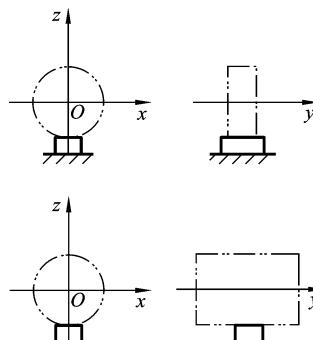
表 7-5 几种常见的定位方式和所用的定位元件

工件定位基准面	定位元件	定位时的接触情况	限定自由度	相当定位支承点数
平面	支承钉	定位平面很小 	\vec{y}	1
	支承板或支承钉组合	定位距离很长  	\vec{x} 、 \vec{z}	2

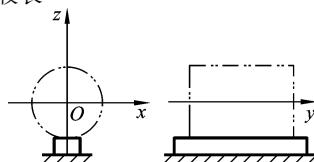
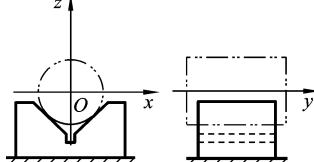
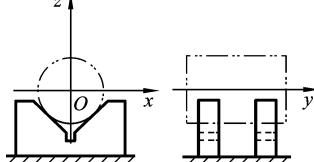
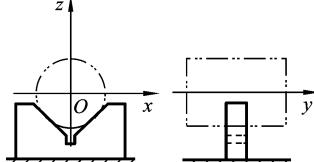
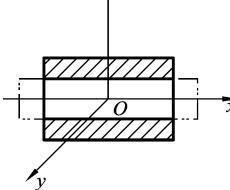
续表

工件定位基准面	定位元件	定位时的接触情况	限定自由度	相当定位支承点数
平面	支承板或支承钉组合	定位平面很大  	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow y$ 、 $\rightarrow x$	3
	支承钉组合	定位平面很大 	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow y$ 、 $\rightarrow x$	3
圆孔	芯轴	定位距离很短  	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow x$	2
		定位距离很长 	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow x$ 、 $\rightarrow x$ 、 $\rightarrow z$	4

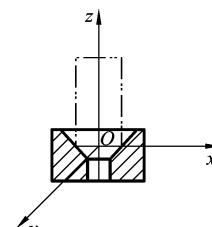
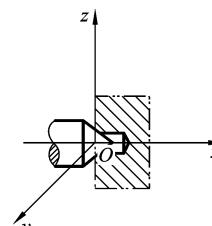
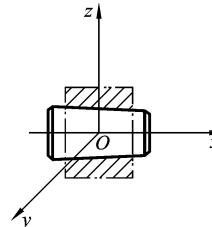
续表

工件定位基准面	定位元件	定位时的接触情况	限定自由度	相当定位支承点数	
圆孔	定位销	定位距离较短	\vec{x}, \vec{y}	2	
					
	定位距离较长		$\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$	4	
外圆柱面	支承板	定位距离很短	\vec{x}, \vec{y}	3	
					
		定位距离较长		\vec{z}	1

续表

工件定位基准面	定位元件	定位时的接触情况	限定自由度	相当定位支承点数
外圆柱面	支承板	定位距离较长 	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow x$	2
	V形块	定位距离较长 	$\rightarrow x$ 、 $\rightarrow z$ 、 $\rightarrow z$ 、 $\rightarrow x$	4
		定位距离较短 	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow x$	2
定位套		定位距离较短 	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow y$	2
		定位距离较长 	$\rightarrow z$ 、 $\rightarrow y$ 、 $\rightarrow y$ 、 $\rightarrow z$	4

续表

工件定位基准面	定位元件	定位时的接触情况	限定自由度	相当定位支承点数
外圆柱面	锥套	定位距离很短 	\vec{z} 、 \vec{x} 、 \vec{y}	3
圆锥孔	固定顶尖	定位距离较短 	\vec{z} 、 \vec{x} 、 \vec{y}	3
	锥芯轴	定位距离较长 	\vec{z} 、 \vec{y} 、 \vec{x} 、 \vec{y} 、 \vec{z}	5

7.2.3 定位基准的选择

在零件加工过程中,合理选择定位基准对保证零件的尺寸精度和位置精度有决定性的作用。定位基准有粗基准和精基准两种。作为定位基准的毛坯表面(即未经加工的表面)称为粗基准,作为定位基准的已加工表面称为精基准。

1. 粗基准的选择原则

粗基准的选择有两个出发点:一是要保证各加工表面有足够的余量,二是要保证不加工表面的位置与尺寸符合图样要求。

1) 保证加工表面的加工余量合理分配 为保证重要表面的加工余量小而均匀,应选择重要的加工表面为粗基准。如图 7-20 所示,为保证导轨面有均匀的组织和一致的耐磨性,应使其加工余量均匀。因此,选择导轨面为粗基准加工床腿底面,然后

再以底面为基准加工导轨面。这样选择的另一个特点是,加工余量最小,成本最低。当工件上有多个重要加工表面要求保证余量均匀时,应选余量要求最小的表面为粗基准。

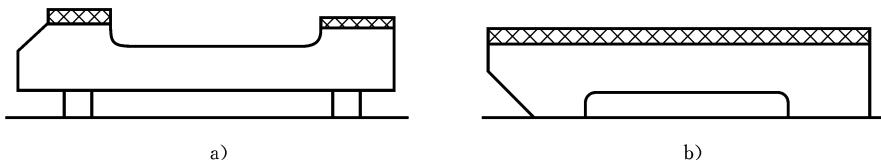


图 7-20 床身加工的粗基准选择

a) 以导轨面为粗基准 b) 以加工过的底面为粗基准

为保证各个加工表面具有足够的加工余量,应选择毛坯余量最小的表面为粗基准。如图 7-21 所示,自由锻件毛坯大外圆面 M 的余量小,小外圆 N 面的余量大,且 N 面、M 面轴线的偏差较大。若以 M 面为粗基准车削外圆面 N,则在掉头车削外圆面 M 时,可使其得到足够而均匀的余量。反之,若以 N 面为粗基准,则外圆面 M 可能因余量过小无法满足加工要求,致使工件报废。

2) 保证相互位置要求 如加工面与非加工面有位置要求,则应以此非加工面作粗基准。这样可使加工面与不加工面之间的位置误差最小,有时还可能在一次装夹中加工出更多的面。如图 7-22 所示的铸铁件,用不需要加工的小外圆面 A 作粗基准,不仅能保证 $\phi 90H7$ mm 孔壁的厚薄均匀,而且能在一次装夹中车削出除小端面以外的全部加工面,使 $\phi 160JS6$ mm 孔与 $\phi 90H7$ mm 孔同轴,大端面、内台阶端面与孔的轴线垂直。

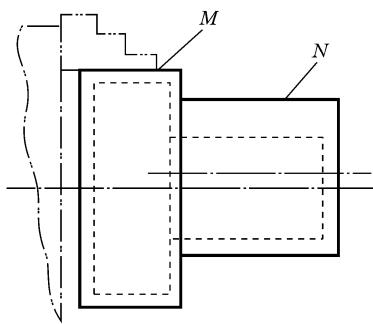


图 7-21 用最小余量表面作粗基准

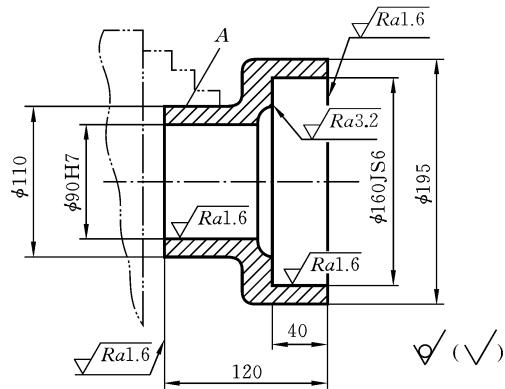


图 7-22 用不加工表面作粗基准

当工件上有多个不加工面与加工面之间有位置要求时,应以其中要求较高的不加工面为粗基准。

3) 方便工件装夹与定位可靠 为保证定位准确、夹紧可靠,粗基准面应尽量平整光洁,有足够大的面积,且应避开飞边、浇道、冒口等部位。

4) 粗基准不重复使用 粗基准一般只在第一道工序中使用,以后应尽量避免重复使用,因为作为粗基准的表面粗糙而不规则,多次使用易导致较大的定位误差,无法保证各加工表面之间的位置精度。

2. 精基准的选择原则

1) 基准重合原则 为避免基准不重合而产生的误差,应尽可能选用设计基准或工序基准作为精基准。如加工为最终工序,所选择的定位基准应与设计基准重合;如加工为中间工序,则应尽量采用工序基准。

如图 7-23 所示箱体件,最终镗孔时应以底面 A 为定位基准。底面 A 为设计基准,直接保证了尺寸 $a \pm \delta_a$ 及孔轴线 I 和轴线 II 对底面的平行度。

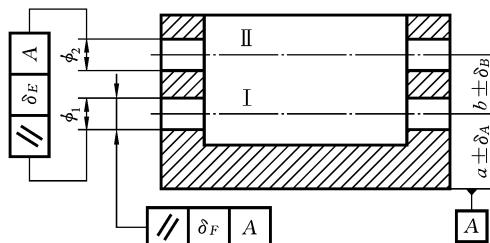


图 7-23 加工箱体孔选用的精基准

设计基准如果与定位基准不重合,会影响定位精度,从而影响加工精度。如图 7-24 所示,当工件表面间的尺寸按图 7-24a 标注时,如果选择设计基准面 A 为定位基准,并按调整法加工面 B 和 C,则对 B 面来说是符合基准重合原则的,而对 C 面来说是定位基准与设计基准不重合。这样,尺寸 c 要通过尺寸 a 间接得到。由于加工中存在的种种原因,故对一批工件来说,尺寸 a 相对定位基准面 A 会产生一定的加工误差 δ_a 。由于尺寸 c 是以 B 面为基准设计的,此时对一批工件来说,B 面是变动的,所以尺寸 c 相对基准面 A 的加工误差 $\delta = \delta_a + \delta_c$ 。 δ_a 是由于尺寸 c 的设计基准与定位基准不重合而造成的,通常称为基准不重合误差,一般 $\delta_a \leq T_a$ 。

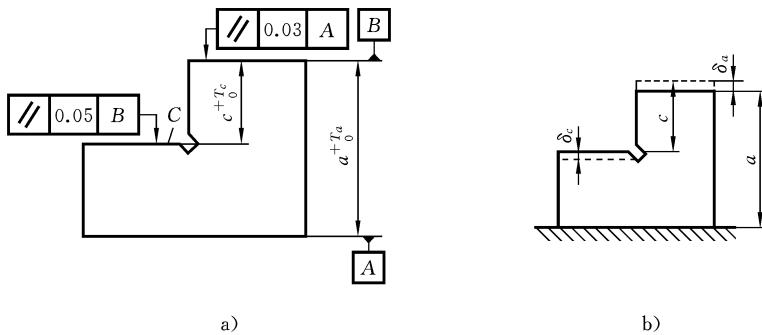


图 7-24 基准不重合误差示例

a) 基准一致 b) 基准不一致

2) 基准统一原则 在工件加工过程中应尽可能选用统一的定位基准,这就是基准统一原则。工件上往往有多个表面要加工,会有多个设计基准。要遵循基准重合原则,就有较多的定位基准,因而夹具种类也较多。为了减少夹具种类,简化夹具结构,可设法在工件上找到一组基准,或者在工件上专门设计一组定位面,用它们来定位加工工件上的多个面,即遵循基准统一原则。为满足工艺需要,在工件上专门设计的定位面(或线)称为辅助基准。常见的辅助基准有轴的中心线、箱体的两工艺孔、工艺凸台和活塞的内止口和中心孔。

在自动化加工中,为了减少工件的装夹次数也需遵循基准统一原则。例如,柴油机机体加工自动线上,常以一面两孔作为统一基准进行平面和孔系的加工。

采用基准统一的原则还可以简化工艺过程,避免基准转换过多,在一次装夹中加工出的表面其位置精度高。但在选用的统一基准与设计基准不重合时,存在基准不重合误差,其定位精度较基准重合时低。为此,如某一工序尺寸不能保证其精度,该工序也可另行单独按基准重合原则加工,其余工序仍以统一基准定位。

3) 自为基准原则 在精加工或光整加工工序中要求加工余量小而均匀时,可以选择加工面本身作为定位基准,这就是自为基准原则。图 7-25 所示为精镗连杆小头孔时,以加工面小头孔作为定位基准的夹具。工件除以大头孔轴线和端面为定位基准外,还以小头孔中心线为定位基准,用削边销定位,消除绕大头孔轴线转动的自由度,并在小头孔两侧用浮动夹紧装置夹紧后,拔出定位销,伸入镗杆对小头孔进行加工。这样能保证加工余量小而均匀。另外,如浮动镗孔、浮动铰孔和珩磨等孔加工方法都是自为基准的实例。

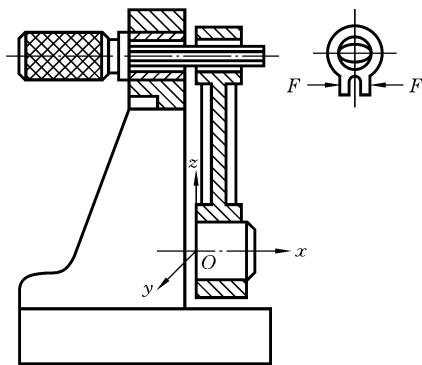


图 7-25 精镗连杆小头孔的定位方案

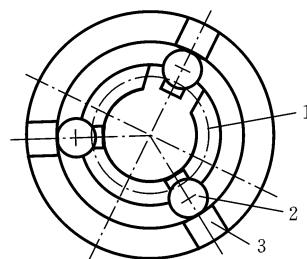


图 7-26 以齿形表面定位加工

1—齿轮 2—滚柱 3—卡盘

4) 互为基准原则 对于相互位置精度要求较高的表面,往往采用互为基准、反复加工的方法予以保证。

精密齿轮的精加工通常是在齿面淬硬以后再磨齿面及内孔的,因齿面淬硬层较薄,磨齿余量应力求小而均匀,所以应先以齿面为基准磨内孔(见图 7-26),然后再以

内孔为基准磨齿面。这样,不但可以做到磨齿余量小而均匀,而且还能保证齿轮基圆对内孔有较高的同轴度。又如,车床主轴的轴颈与前端锥孔的同轴度要求很高,常采用互为基准原则反复加工。

除按以上原则选择的精基准以外,另外所选择的精基准应能保证定位准确、可靠,夹紧机构简单、操作方便。必须指出,对于精基准的选择不能只考虑本工序定位夹紧是否合适,而应结合整个工艺路线统一考虑。

上述粗、精基准选择的各原则都是在保证加工件品质的前提下,从不同角度提出的工艺要求和保证措施,有时这些要求和措施会出现相互矛盾的情况,在制订工艺规程时必须结合具体情况进行全面、系统的分析,分清主次,解决主要问题。

7.3 零件加工的结构工艺性

在设计零件时,不仅要考虑零件的使用要求,还要考虑设计出的零件是否符合加工工艺,也就是零件的结构工艺性(process capability and design aspect)。结构工艺性不合理的零件会造成无法加工,即使能够被加工出来,但也会给加工带来困难,从而影响生产效率和经济性。因此,结构工艺性良好的零件,可以较经济地、高效地、合理地加工出来。

零件结构工艺性的好坏是相对的,它与其加工的方法和生产效率、生产类型、设备条件及工艺过程有着密切的联系。为了获得良好的零件结构工艺性,设计人员应了解和熟悉各种加工方法的工艺特点、典型表面的加工方法、工艺过程的基础知识等。在设计零件时应考虑四个方面。

1. 零件的结构便于加工

(1) 应留有退刀槽、空刀槽和越程槽。为避免刀具或砂轮与工件的某一部分相碰,使加工无法进行,应在二联齿轮中间和变径轴中间留退刀槽、空刀槽或越程槽。图 7-27a 所示为车螺纹时的退刀槽;图 7-27b 所示为滚齿轮时的越程槽;图 7-27c 所示为插齿时的空刀槽;图 7-27d 所示为刨削时的越程槽;图 7-27e 所示为磨削时的越程槽;图 7-27f 所示为磨内孔时的越程槽。

(2) 凸台的孔要留有加工空间。如图 7-28 所示,若孔的轴线距 s 小于钻头外径 D 的一半,则难以加工,一般 $s > D/2 + (2 \sim 5) \text{ mm}$ 。

(3) 避免弯曲孔。图 7-29a、b 所示的弯曲孔加工不出来,图 7-29c 所示的弯曲孔虽能加工,但还需加一个柱塞。

(4) 孔轴线应与其端面垂直。如图 7-30 所示,孔轴线应该与端面垂直,避免钻头在钻入和钻出引偏或折断。

(5) 同类要素要统一。如图 7-31 所示,同一工件上的退刀槽、过渡圆尺寸及形状应该一致,这样可减少换刀时间,减少辅助时间。

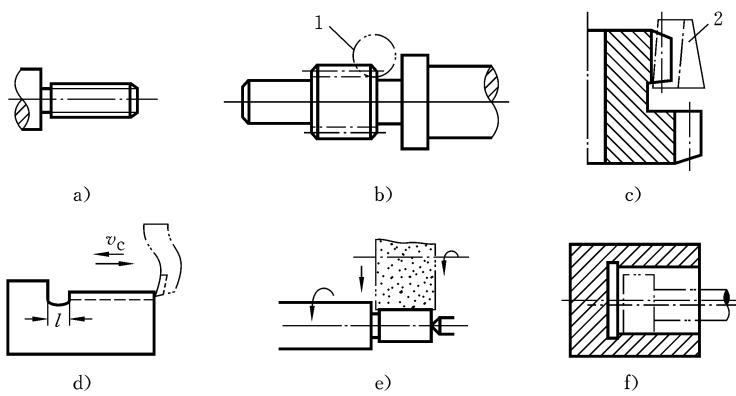


图 7-27 退刀槽、空刀槽和越程槽

a) 退刀槽 b)、d)、e)、f) 越程槽 c) 空刀槽

1—齿轮刀具 2—插齿刀

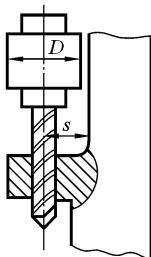


图 7-28 钻孔空间

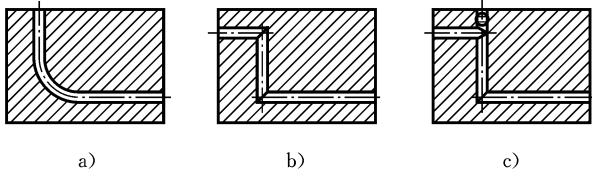


图 7-29 弯曲的孔

a) 内部弯曲孔 b) 内部折线孔 c) 外连直线孔

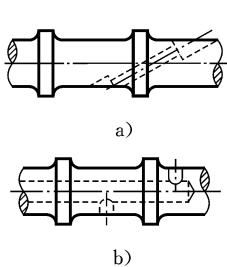


图 7-30 轴上的油孔

a) 斜孔 b) 直孔

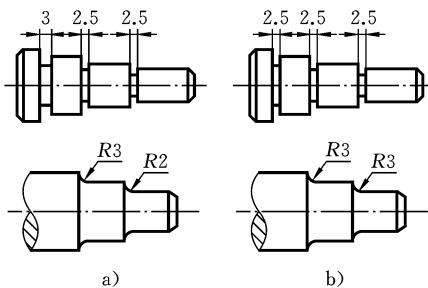


图 7-31 同类结构要素要统一

a) 退刀槽宽度和圆角半径不一致

b) 退刀槽宽度和圆角半径一致

(6) 尽量减少走刀次数。同一面上的凸台应设计得一样高,从而减少工件的安装次数和对刀时间。图 7-32a 所示的结构需多次对刀,若改成图 7-32b 所示的结构

后,只对刀一次即可加工出三个小凸台。

(7) 将零件中难加工的部位进行合理的拆分。图 7-33a 所示的零件其内部为球面凹坑,很难加工,若改为图 7-33b 所示的两个零件,凹坑变为外部加工,比较方便。

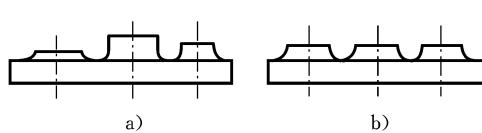


图 7-32 加工面应等高

a) 不等高凸台 b) 等高凸台

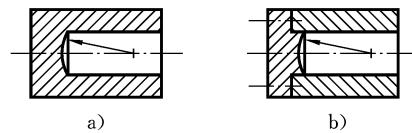


图 7-33 合理的拆分

a) 内部曲面 b) 拆分后变为外部曲面

2. 尽量减小不必要的加工面积

与图 7-34a 相比,图 7-34b 所示结构既减小了加工面积,又能保证装配时零件很好地结合。

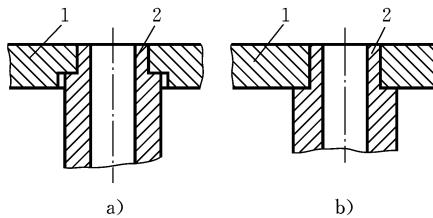


图 7-34 简化零件结构

a) 加工面多 b) 加工面少

1—板 2—管

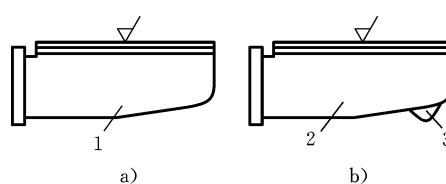


图 7-35 工艺凸台

a) 安装困难 b) 安装容易

1、2—工件 3—工艺凸台

3. 零件的结构应便于安装

(1) 增加工艺凸台。刨平面时,经常将工件直接安装在工作台上。如图 7-35a 所示,如果要刨上平面应使加工面水平,零件较难安装。增加一个工艺凸台(见图 7-35b)后容易找正安装,加工完上平面后再将凸台切去即可。

(2) 增加辅助安装面。零件常在车床上用自定心卡盘、单动卡盘装夹。在图 7-36a 中,如夹在 A 处,则一般卡爪伸出的长度不够,夹不到 A 处;如夹在 B 处,则又因 B 处为圆弧面而夹不牢固。为了方便装夹,将此处结构改为如图 7-36b 所示结构,使 C 处为一圆柱面;或在毛坯上增加一辅助安装面 D,如图 7-36c 所示。

4. 提高标准化程度

(1) 应尽量采用标准件和标准化参数设计,以降低成本。如图 7-37a 中设计的锥孔,其锥度和尺寸都是非标准的,既不能采用标准锥度的塞规进行检验,又不能与标准的外锥面配合使用。改进后,其锥面和直径都采用标准值。图 7-37b 所示为莫氏锥度;图 7-37c 所示为米制锥度。

(2) 尽量选用标准刀具加工工件,这样不用特制刀具。例如,当加工不通孔时由

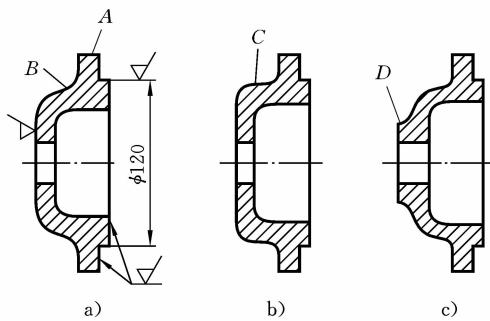


图 7-36 轴承盖结构的改进

a) 加工右端困难 b) 加工两端面容易 c) 加工两端面容易

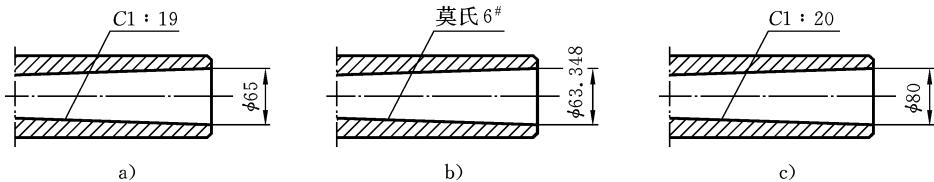


图 7-37 锥孔的锥度

a) 非标准锥度 b) 标准莫氏锥度 c) 标准米制锥度

一直径到另一直径的过渡最好做成与钻头顶角相同的锥面。

7.4 工艺规程的编制过程

制订零件的机械加工工艺路线是制订工艺规程中的一项重要工作。制订工艺路线时需要解决的主要问题是：选定各表面的加工方法、划分加工阶段、安排工序的先后顺序、确定工序的集中与分散程度。

7.4.1 表面加工方法的选择

具有一定加工品质要求的表面，一般都需要进行多次加工才能达到精度要求。而加工相同品质要求的表面，其加工过程和最终加工方法可以有多个方案。不同的加工方法所达到的经济精度（即经济性）和生产效率也是不同的。因此，表面加工方法的选择，在保证加工零件品质的前提下，应同时满足生产效率和经济性的要求。一般选择表面加工方法时，应注意八个方面。

（1）选择合适的加工方法的经济精度及表面粗糙度。加工方法的经济精度是指在正常加工条件下（设备、工艺装备符合标准，操作工人技术水平较高且不延长加工时间）所能保证的加工精度。大量统计资料表明，同一种加工方法，其加工误差与加工成本是成反比例关系的，如图 7-38 所示。精度有一定极限，在点 A 以左，说明要想

减小加工误差,加工成本上升很快,也就是说,再增加成本,加工精度也很难再提高;成本也有一定极限,在点B以右,说明再放宽加工误差要求,即加工精度再降低,加工成本也降低极少。曲线中,加工精度与加工成本互相适应的为AB段,属于经济精度的范围。精度要求愈高,加工成本也愈高。每一种加工方法都有一个经济的加工精度范围。例如,在普通车床上加工外圆的经济精度是,尺寸精度公差等级为IT8~IT9,表面粗糙度 R_a 为 $1.25\sim 3.2 \mu\text{m}$;在普通外圆磨床上磨削外圆的经济精度是,尺寸精度公差等级为IT5~IT6,表面粗糙度 R_a 为 $0.2\sim 0.4 \mu\text{m}$ 。

各种加工方法所能达到的尺寸精度、表面粗糙度、几何形状与表面相互位置的经济精度,可查阅有关机械加工工艺手册。为了实现生产的优质、高产、低耗,表面加工方法的选择应与之相适应。当然,各种加工方法的经济精度不是一成不变的,随着工艺水平的提高,同一种加工方法所能达到的经济精度会有所提高。

(2) 加工表面的技术要求是决定表面加工方法的首要因素。此外,由于基准不重合而可能提高对某些表面的加工要求,由于将某些表面作为精基准而可能对其提出的更高加工要求。

(3) 加工方法选择的步骤总是首先确定被加工零件主要面的最终加工方法,然后再选择前面一系列工序的加工方法和顺序。可提出几个方案进行比较,选择其中一个比较合理的方案。例如,加工一个直径为 $\phi 25\text{H7}$ mm 和表面粗糙度 R_a 为 $0.8 \mu\text{m}$ 的孔,可有四种加工方案:① 钻孔→扩孔→粗铰→精铰;② 钻孔→粗镗→半精镗→磨削;③ 钻孔→粗镗→半精镗→精镗→精细镗;④ 钻孔→拉孔。因此应根据零件加工表面的结构特点和产量等条件,确定采用其中一种加工方案。主要表面的加工方法选定以后,再选定各次要表面的加工方法。

(4) 在被加工零件各表面加工方法分别初步选定以后,还应综合考虑为保证各加工表面位置精度要求而采取的工艺措施。例如,几个同轴度要求较高的外圆或孔,应安排在同一工序的一次装夹中加工,这时就可能要对已选定的加工方法做适当的调整。

(5) 选择加工方法要考虑生产效率和经济性问题。在大批、大量生产中,采用高效率的专用机床和组合机床及先进的加工方法。例如,加工内孔时可采用拉床,对轴类零件进行加工时可采用半自动液压仿形车床。在单件、小批生产中,一般采用通用机床和工艺装备进行加工。

(6) 选择加工方法时应考虑零件的结构、加工表面的特点和材料性质等因素。零件结构和表面特点不同,所选择的加工方法也不同,如位置精度要求高的孔,最好的加工方法是镗孔。考虑工件材料的选择,对淬硬工件应采用磨削加工;对有色

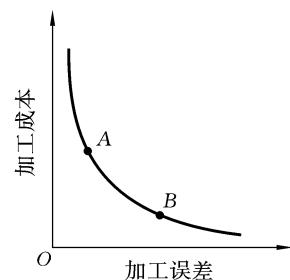


图 7-38 加工成本与加工误差的关系

金属件不宜采用磨削加工,一般采用金刚镗或高速精细车削加工。

(7) 选择加工方法时还要考虑实际生产条件,应充分利用现有的设备,也应注意不断对原有设备和工艺技术进行改造,逐步采用新技术和提高工艺水平。

(8) 一个零件通常是由许多表面所组成的,这些表面不外乎是外圆面、内圆面、平面及各种成表面等。因此,熟悉和掌握这些典型表面的各种加工方案对制订零件加工工艺路线是十分必要的。工件上各种典型表面所采用的典型工艺路线分别如表7-6、表7-7所示,可供选择表面加工方法时参考。

在各表面的加工方法选定以后,需要进一步确定这些加工方法在零件加工工艺路线中的顺序及位置,这与加工阶段的划分有关。

表 7-6 外圆及内圆面的机械加工工艺路线

加工表面	加工要求	加工方案	说 明
外圆面	IT8 $Ra=0.8\sim1.6\mu\text{m}$	粗车→半精车→精车	(1) 适合加工除淬火钢件以外的各种金属件; (2) 若在精车后再加上一道抛光工序,表面粗糙度 Ra 可达 $0.05\sim0.2\mu\text{m}$
	IT6 $Ra=0.2\sim0.4\mu\text{m}$	粗车→半精车→粗磨→精磨	(1) 适合加工淬火钢件,也可用来加工未淬火钢件或铸件; (2) 不宜用来加工有色金属件(因切屑易于堵塞砂轮)
	IT5 $Ra=0.01\sim0.1\mu\text{m}$	粗车→半精车→粗磨→精磨→研磨	(1) 适合加工淬火钢件,不适合加工有色金属件; (2) 可用镜面磨削代替研磨作为终了工序; (3) 常用来加工精密机床的主轴颈外圆
内圆面	IT7 $Ra=0.8\sim1.6\mu\text{m}$	钻孔→扩孔→粗铰→精铰	(1) 适合成批、大量生产; (2) 常用来加工未淬火钢件和铸件上的孔(直径小于 50 mm),也可用来加工有色金属件(但表面粗糙度不易保证); (3) 在单件、小批生产时可用手铰(精度可更高,表面粗糙度更低)
	IT7~IT8 $Ra=0.8\sim1.6\mu\text{m}$	粗镗→半精镗→精镗两次	(1) 多用来加工毛坯上已铸出或锻出的孔; (2) 一般大量生产中用浮动镗杆加镗模或用刚性主轴的镗床来加工
	IT6~IT7 $Ra=0.1\sim0.4\mu\text{m}$	粗镗(或扩孔)→半精镗→粗磨→精磨	(1) 主要用来加工精度和表面粗糙度要求较高的淬火钢件,对于铸件或未淬火钢件,磨孔生产效率不高; (2) 当孔的要求更高时,可在精磨之后再进行珩磨或研磨

续表

加工表面	加工要求	加工方案	说明
内圆面	IT7 $Ra=0.4\sim0.8\mu\text{m}$	钻孔(或扩孔) →拉孔	(1) 主要用于大批、大量生产(如能利用现成拉刀,也可用于小批生产); (2) 只适合加工中小零件上中小尺寸的通孔,且孔的长度一般不宜超过孔径的4倍
	IT6~IT7 $Ra=0.1\sim0.2\mu\text{m}$	钻孔(或粗镗) →扩孔(或半精镗)→精镗→金刚镗→脉冲滚挤	(1) 特别适合加工成批、大量生产有色金属件上中小尺寸的孔; (2) 也可用来加工铸铁箱体上的孔,但滚挤效果通常不够显著

表 7-7 平面的机械加工工艺路线

加工要求	加工方案	说明
IT7~IT8 $Ra=1.6\sim2.5\mu\text{m}$	粗刨→半精刨 →精刨	(1) 因刨削生产效率较低,故常用于单件、小批生产; (2) 加工一般精度的未淬硬表面; (3) 因调整方便故适应性较大,可在工件的一次装夹中完成若干平面、斜面、倒角、槽等的加工
IT7 $Ra=1.6\sim2.5\mu\text{m}$	粗铣→半精铣 →精铣	(1) 大批、大量生产中一般平面加工的典型方案; (2) 若采用高速密齿精铣,加工零件品质和生产效率将有所提高
IT5~IT6 $Ra=0.2\sim0.8\mu\text{m}$	粗刨(铣)→半精刨(铣)→精刨(铣)→刮	(1) 刮削可达很高精度(平面度、表面接触斑点数、配合精度); (2) 劳动量大、效率低,故只适用于单件、小批生产
IT5 $Ra=0.2\sim0.8\mu\text{m}$	粗刨(铣)→半精刨(铣)→精刨(铣)→宽刀低速精刨	(1) 宽刀低速精刨可大致取代刮削; (2) 适合加工批量较大、要求较高的不淬硬平面
IT5~IT6 $Ra=0.2\sim0.8\mu\text{m}$	粗铣→半精铣 →粗磨→精磨	(1) 适合加工精度要求较高的淬硬和不淬硬平面; (2) 对要求更高的平面,可再加滚压或研磨工序
IT8 $Ra=0.2\sim0.8\mu\text{m}$	(1) 粗铣→拉削 (2) 拉削	(1) 适合加工中小平面; (2) 生产效率很高,用于大量生产; (3) 刀具昂贵
IT7~IT8 $Ra=1.6\sim2.5\mu\text{m}$	对于大型圆盘、圆环等回转零件的端平面,一般在车床(立式车床)上与外圆(或孔)一同加工(粗车→半精车→精车),这样可以保证它们之间的位置精度	

7.4.2 加工阶段的划分

制订工艺路线时,往往要把加工零件品质要求较高的主要表面的工艺过程,按粗加工、精加工分开的原则划分为几个阶段,其他加工表面的工艺过程根据同一原则作相应的划分,并分别安排到由主要表面所确定的各个加工阶段中去,这样就可得到由各个加工阶段所组成的、包含零件全部加工内容的整个零件的加工工艺过程。

1. 加工工艺过程的几个阶段

(1) 粗加工阶段。此阶段的主要任务是切除各加工表面上的大部分余量,并加工出精基准。粗加工所能达到的精度较低(尺寸精度公差等级一般大于 IT12)、表面粗糙度较高(R_a 为 $12.5 \sim 50 \mu\text{m}$)。其主要任务是设法获得较高的生产效率。

(2) 半精加工阶段。此阶段的主要任务是使主要表面消除粗加工后引起的误差,使其达到一定的精度,为精加工做好准备,并完成一些次要表面的加工(如钻孔、攻螺纹、铣键槽等)。表面经半精加工后,尺寸精度公差等级可达 IT10~IT12,表面粗糙度 R_a 可达 $3.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$ 。

(3) 精加工阶段。此阶段的任务是保证各主要加工表面达到图样所规定的要求。精加工切除的余量很少。表面经精加工后可以达到较高的尺寸精度(尺寸精度公差等级为 IT7~IT10)和较低的表面粗糙度(R_a 为 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$)。

(4) 光整加工阶段。对于要求精度很高(尺寸精度公差等级小于 IT5)、表面粗糙度很低(R_a 为 $0.2 \mu\text{m}$ 以下)的零件,必须有光整加工阶段。光整加工的典型方法有珩磨、研磨、超精加工及镜面磨等。这些加工方法不但能降低表面粗糙度,而且能提高尺寸精度和形状精度,但多数都不能提高位置精度。

2. 划分加工阶段的必要性

(1) 保证加工零件的品质。由于粗加工阶段切除的金属较多,产生的切削力和切削热也较大,同时也需要较大的夹紧力,而且粗加工后内应力会重新分布,在这些力的作用下,工件会产生较大的变形。如果对要求较高的加工表面,一开始就精加工到所要求的精度,那么,其他表面粗加工所产生的变形就可能破坏已获得的加工精度。因此,划分加工阶段,通过半精加工和精加工可使粗加工引起的误差得到纠正。

(2) 合理地使用机床设备。粗、精加工分开,粗加工使用大功率机床,可充分发挥机床的效能;精加工使用精密机床,既可以保证零件的精度要求,又有利于长期保持机床的精度,达到合理使用机床设备的目的。

(3) 粗、精加工分开,便于及时发现毛坯的缺陷(如气孔、砂眼等),及时修补或报废,避免工时浪费。

(4) 表面精加工安排在最后,可避免或部分避免在夹紧和运输过程中损伤已精加工过的表面。

应当指出,将工艺过程划分成几个阶段是对整个加工过程而言的,不能简单地以某一工序的性质或某一表面的加工特点来决定。例如工件的定位基准,在半精加工

阶段(甚至在粗加工阶段)就需要加工得很准确,而某些钻小孔、攻螺纹之类的粗加工工序,也可安排在精加工阶段进行。同时,加工阶段的划分不是绝对的。对于毛坯精度较高、加工余量较小或刚度较大、加工精度要求不高的工件,就不必划分加工阶段;对于重型零件,由于运输、装卸不便,常在一次装夹中完成某些表面的粗、精加工,在这种情况下,粗加工后要松开工件,然后用较小的夹紧力夹紧工件再精加工。在组合机床和自动机床上加工零件,也常常不划分加工阶段。

7.4.3 工序的集中与分散

选定了加工方法和划分加工阶段之后,就要确定工序的数目,即工序的集中与分散问题。

若在每道工序中所安排的加工内容多,则一个零件的加工将集中在少数几道工序内完成,这时工艺路线短、工序少,故称为工序集中。若在每道工序中所安排的加工内容少,则一个零件的加工就分散在很多工序内完成,这时工艺路线长、工序多,故称为工序分散。

1. 工序集中的特点

(1) 采用高效率专用设备和工艺装备,可提高生产效率、减少机床数量和生产占地面积。

(2) 工件在一次装夹中可加工多个表面,有利于保证这些表面之间的位置精度,减少了装夹次数,也减小了装夹所造成的误差。

(3) 减少了工序数目,缩短了工艺路线,也简化了生产计划和组织工作。

(4) 专用设备和工艺装备较复杂,生产准备周期长,更换产品较困难。

2. 工序分散的特点

(1) 设备和工艺装备比较简单,调整比较容易。

(2) 工艺路线长,需要的设备和工人多,生产占地面积大。

(3) 可采用最合理的切削用量,减少基本时间。

(4) 容易变换产品。

在制订工艺路线时,工序集中或分散的程度,主要取决于生产类型、零件的结构特点及技术要求。生产批量小时,多采用工序集中方式。生产批量大时,可采用工序集中方式,也可采用工序分散方式。由于工序集中的优点较多及数控机床、柔性制造单元和柔性制造系统等的发展较快,现代生产多倾向于采用工序集中方式。

7.4.4 工序的安排

1. 机械加工工序的安排

一个零件有许多表面要加工,各表面机械加工工序的安排应遵循如下原则:

(1) 先基准面,后其他面。首先应加工用做精基准的表面,以便为其他表面的加工提供可靠的基准面,这是确定加工顺序的一个重要原则。

(2) 先主要表面,后次要表面。零件的主要表面是加工精度和表面品质要求较高的表面,它的工序较多,且加工对零件品质的影响甚大,因此应先进行加工。一些次要表面如紧固用的螺孔、键槽等,可穿插在主要表面加工之中或加工之后进行。

(3) 先主要平面,后主要孔。具有平面轮廓尺寸较大的零件(如箱体),用平面定位比较稳定可靠,常用做主要精基准。因此,应先加工主要平面,后加工主要孔及其他表面,并易于保证孔与平面之间的位置精度。

(4) 先安排粗加工工序,后安排精加工工序。技术要求较高的零件,其主要表面应按“粗加工→半精加工→精加工→光整加工”的方案安排,使零件逐步达到较高的品质。

2. 热处理工序的安排

热处理的目的在于改变工件材料的性能和消除内应力。热处理的目的不同,热处理工序的内容及其在工艺过程中所安排的顺序也不同。

(1) 预备热处理安排在机械加工之前进行,其目的是为了改善工件材料的切削性能,消除毛坯制造时产生的内应力。常用的热处理方法有退火、正火和调质,退火和正火通常安排在粗加工之前进行,调质一般安排在粗加工以后进行。

(2) 最终热处理通常安排在半精加工之后和磨削加工之前进行,目的是提高材料的强度、表面硬度和耐磨性。常用的热处理方法有调质、淬火、渗碳淬火等。为了获得更高的表面硬度、耐磨性和疲劳强度,有的零件还常常采用渗氮处理。由于渗氮层较薄,所以渗氮处理后磨削余量不能太大,故渗氮一般安排在粗磨之后、精磨之前进行。为了消除内应力,减小渗氮变形,改善加工性能,渗氮前应对零件进行调质处理和去内应力处理。

(3) 时效处理有人工时效处理和自然时效处理两种,其目的都是为了消除毛坯制造和机械加工中产生的内应力。对于精度要求一般的铸件,只需进行一次时效处理,安排在粗加工之后较好,这样可同时消除铸造和粗加工所产生的应力;有时为减小运输工作量,也可放在粗加工之前进行。对于精度要求较高的铸件,则应在半精加工之后安排第二次时效处理,以使精度稳定。对于精度要求很高的精密丝杠、主轴等零件,则应安排多次时效处理。对于精密丝杠、精密轴承、精密量具及油泵的油嘴配件等,为了消除残留奥氏体,稳定尺寸,还要采用冰冷处理(冷却到 $-80\sim-70$ °C,保持1~2 h),一般安排在回火之后进行。

(4) 表面处理的目的是为了进一步提高某些零件表面的耐蚀性、耐磨性,使零件表面覆盖一层金属镀层、非金属涂层或氧化膜等。覆盖金属镀层有镀铬、镀锌、镀镍、镀铜及镀金、镀银等;覆盖非金属涂层有涂油漆、磷化等;覆盖氧化膜层钢的发蓝、发黑、钝化及铝合金的阳极氧化处理等。零件的表面处理工序一般都安排在工艺过程的最后进行。表面处理时对工件表面本身尺寸的改变一般可以不考虑,但对精度要求很高的表面应考虑尺寸的增大量。当零件的某些配合表面不要求进行表面处理时,则应进行局部保护或采用机械加工的方法予以切除。

3. 检验工序和辅助工序的安排

检验工序分加工品质检验和特种检验,它们是保证产品品质的有效措施,是工艺路线中不可缺少的内容。除了各工序操作者自检外,下列场合中还应考虑单独安排检验工序:①零件从一个车间送往另一个车间的前后;②零件粗加工阶段结束之后;③重要工序加工的前后;④零件全部加工结束之后。

特种检验的种类很多,如用于检验工件内部品质的X射线检验、超声波探伤检验等,一般安排在工艺路线的开始时进行。荧光检验和磁力探伤主要用来检验零件表面品质,通常安排在工艺过程的精加工阶段进行。密封性检验、零件的平衡及重要检验一般都安排在工艺路线的最后进行。

7.4.5 加工余量的确定

1. 加工余量的概念

加工余量一般分为加工总余量和工序间的加工余量。零件由毛坯加工为成品,在加工表面上切除金属的总厚度称为该表面的加工总余量。每个工序切除表面的金属的厚度称为该表面的工序加工余量。工序间加工余量又分为最小余量、最大余量和公称余量。

(1) 最小余量是指该工序切除金属层的最小厚度,对外表面而言,对应于上工序最小工序尺寸、本工序最大尺寸的加工余量。

(2) 对外表面而言,最大余量对应于上工序最大尺寸、本工序为最小尺寸的加工余量(内表面的上工序和本工序的尺寸大小正好相反)。

(3) 公称余量是指该工序的最小余量加上上工序的公差。

图 7-39 为外表面加工顺序示意图。从图可知

$$Z = Z_{\min} + \delta_1$$

$$Z_{\max} = Z + \delta_2 = Z_{\min} + \delta_1 + \delta_2$$

式中 Z ——本工序的公称余量;

Z_{\min} ——本工序的最小余量;

Z_{\max} ——本工序的最大余量;

δ_1 ——上工序的工序尺寸公差;

δ_2 ——本工序的工序尺寸公差。

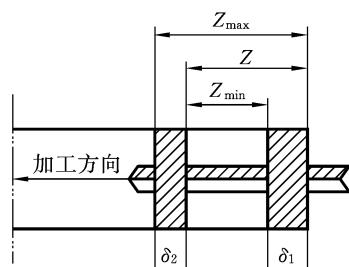


图 7-39 外表面加工顺序示意图

注意,平面的余量是单边的,圆柱面的余量是双边的。余量是以垂直于被加工表面来计算的。内表面(如孔)的加工余量,其概念与外表面相同。由有关工艺人员手册查出的加工余量和计算切削用量时所用的加工余量,都是指公称余量。但在计算第一道工序的切削用量时应采用最大余量。总余量等于各工序的公称余量之总和,总余量不包括最后一道工序的公差。

2. 确定加工余量的方法

(1) 查表法。以大量的生产实践和实验数据为基础,以表格的形式制定出工序

间公称余量的标准,列入有关机械制造工艺手册,通过查表确定工序间公称余量的方法称为查表法。查表法应用较广。

(2) 经验法。根据工艺人员的经验确定工序间公称余量的方法称为经验法。经验法较简单,常用于单件、小批生产。需要注意的是,为防止加工余量不足而产生废品,用经验估计的加工余量常常偏大。

(3) 计算法。在影响加工余量因素的基础上,逐步计算出公称余量的方法称为计算法。计算法得到的加工余量较精确,但由于影响因素较复杂,获得的数据常与工程实际存在偏差,所以很少使用。

7.5 数控加工

7.5.1 数控加工的特点

数控加工(machining of numerical control, MNC)是指一种可编程的由数字和符号实施控制的自动加工过程。数控加工工艺是指利用数控机床加工零件的一种工艺方法。数控机床仍采用刀具和磨具对材料进行切削加工,这点在本质上与普通机床并无区别,但在如何控制切削运动等方面则与传统切削加工存在本质上的差别。两种加工方法的比较如图 7-40 所示。

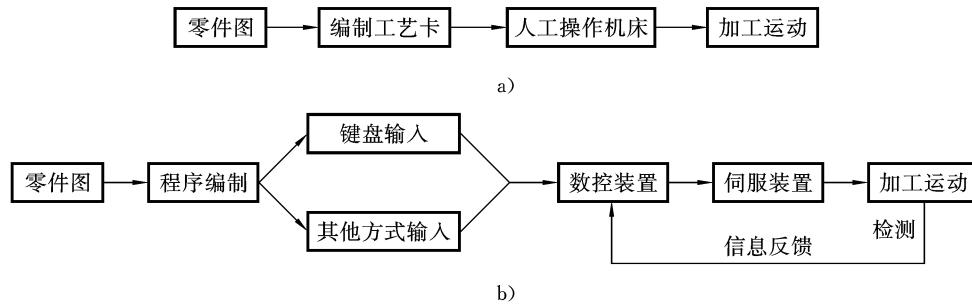


图 7-40 两种加工方法的比较

a) 普通机床加工 b) 数控机床加工

数控加工的主要特点如下：

(1) 加工的零件精度高。数控机床在整机设计中考虑了整机刚度和零件的制造精度,又采用高精度的滚珠丝杠传动,机床的定位精度和重复定位精度都很高,特别是有的数控机床具有加工过程自动检测和误差补偿等功能,因而能可靠地保证加工精度和尺寸的稳定性。

(2) 生产效率高。数控机床在加工中零件的装夹次数少,一次装夹可加工出很多表面,可省去划线、找正和检测等许多中间工序。据统计,普通机床的净切削时间一般为 15%~20%,而数控机床可达 65%~70%,带有刀库可实现自动换刀的数控

机床甚至可达75%~80%。加工复杂零件时,生产效率可提高5~10倍。

(3) 特别适合加工形状复杂的轮廓表面。如利用数控车床加工复杂形状的回转表面和利用数控铣床加工复杂的空间曲面。

(4) 有利于实现计算机辅助制造。目前在机械制造业中,CAD/CAM的应用十分广泛,而数控机床及其加工技术正是计算机辅助制造系统的基础。

(5) 初始投资大,加工成本高。数控机床的价格一般是同规格的普通机床的若干倍,机床备件的价格也很高,加上首件加工进行编程、调整和试加工等的准备时间较长,因而使零件的加工成本大大提高。

此外,数控机床是技术密集性的机电一体化产品,数控技术的复杂性和综合性加大了维修工作的难度,需要配备素质较高的维修人员,维修费用也较高。

7.5.2 数控加工方法

零件进行数控加工时,选用何种数控机床,采用何种方式进行加工,主要与被加工零件的内外轮廓形状、加工数量、加工精度及表面粗糙度等因素有关。

1. 平面孔系零件的加工

平面孔系零件若孔数较多,或者孔位精度要求较高,均宜选用点位直线控制的数控钻床或数控镗床进行加工。这样不仅可以减轻操作工人的劳动强度,提高生产效率,而且还易于保证加工精度。加工时,以快速运动实现孔系的定位,对有两轴联动功能的数控机床,可以指令两个轴同时运动,对没有联动的数控机床,则只能指令两轴依次运动。此外,在编制加工程序时,应尽可能地调用子程序来减少程序段的数目,以减小加工程序的长度和提高加工的精度。

2. 旋转类零件的加工

用数控车床或数控磨床加工旋转类零件时,车削零件毛坯多为棒料或锻件,加工余量大且不均匀,因此在编程中,粗车的加工路线往往是要考虑的主要问题。

图7-41所示手柄的轮廓由三段圆弧组成,加工余量较大且不均匀,因此比较合理的方案是,先用直线、斜线程序车削掉图中所示的加工余量,再用圆弧程序精加工成形。

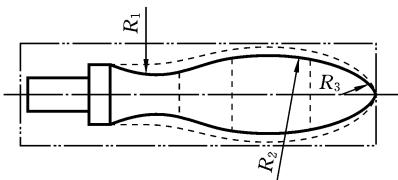


图 7-41 手柄图

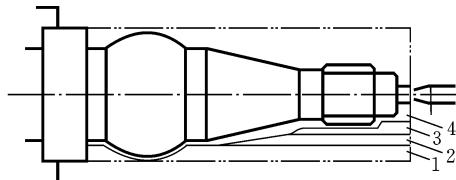


图 7-42 表面形状复杂的零件

图7-42所示零件的表面形状复杂,毛坯为棒料,加工余量不均匀,其粗加工路线按图中1~4依次分段加工,然后再换精车刀一次成形。需要说明的是,图中的粗加

工走刀次数应根据每次的切削深度决定。

3. 平面轮廓零件的加工

平面轮廓零件的轮廓多由直线和圆弧组成,一般在两轴联动铣床上加工。图 7-43 所示为铣削平面轮廓实例,工件轮廓由三段直线和两段圆弧组成。若选用的铣刀半径为 R ,则点画线为刀具中心的运动轨迹。当数控系统具有刀具半径补偿功能时,可按其零件的轮廓编程;若数控系统不具有刀具半径补偿功能,则应按刀具中心轨迹编程。为保证加工平滑,应增加切入和切出程序段。若平面轮廓为非圆曲线,由于一般数控系统都只有直线和圆弧插补功能,故都用圆弧和直线去逼近。

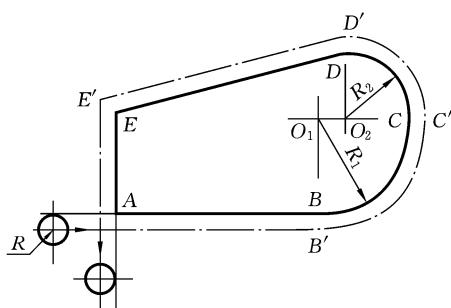


图 7-43 平面轮廓零件的铣削

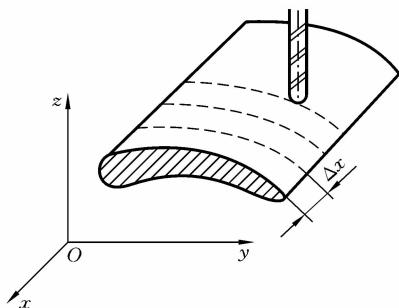


图 7-44 用平面曲线逼近曲面的加工

4. 立体轮廓零件的加工

用数控机床加工立体曲面时,应根据曲面形状、机床功能、刀具形状及零件的精度要求采用不同的加工方法。

1) 两轴联动加工 在三轴控制两轴联动的机床上用“行切法”进行加工。图 7-44 所示为用平面曲线逼近曲面的加工实例。图中以 x 、 y 、 z 三轴中任意两轴作插补运动,第三轴作周期性进给,刀具采用球头铣刀。在 x 向分为若干段,球头铣

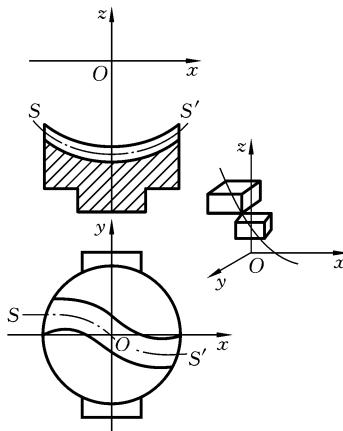


图 7-45 回珠器示意图

刀沿 Oxy 平面的曲线进行插补加工,当一端加工完后进给 Δx ,再加工相邻曲线。如此依次用平面来逼近整个曲面。其中 Δx 根据表面粗糙度的要求及刀头的半径选取,球头铣刀的球头半径应尽可能选得大一些,以利于降低表面粗糙度,增加刀具的刚度和散热性能。但在加工凹面时球头半径必须小于被加工曲面的最小曲率半径。

2) 三轴联动加工 图 7-45 为内循环滚珠螺母的回珠器示意图。其滚道母线 $S-S'$ 为一空间曲线,它可用空间直线去逼近,因此,可在有空间直线插补功能的三轴联动机床上加工。但编程计

算较复杂,加工程序可采用自动编程系统来编制。

3) 四轴联动加工 图 7-46 所示为飞机大梁直纹扭曲面的加工。飞机大梁的加工表面是直纹扭曲面,可采用圆柱铣刀周边铣削方式,在四轴联动机床上加工。除了三个移动轴的联动外,为保证刀具与工件型面在全长上始终贴合,刀具还应绕 O_1 (或 O_2)作摆动联动。由于摆动导致直线移动坐标需作附加运动,其附加运动量与摆动中心 O_1 (或 O_2)的位置有关,因此编程计算较复杂。

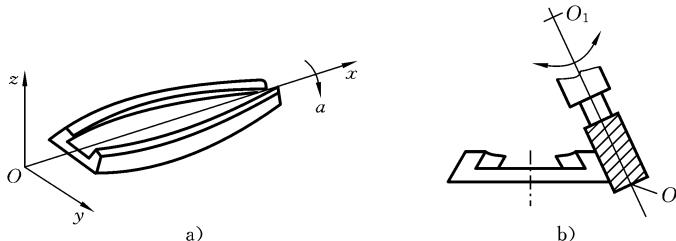


图 7-46 飞机大梁直纹扭曲面的加工

a) 大梁结构 b) 加工示意图

4) 五轴联动加工 船用螺旋桨是五轴联动加工的典型零件之一,其叶片及其加工原理如图 7-47 所示。半径为 R_i 的圆柱面与叶面的交线是螺旋线的一部分,螺旋角为 φ_i ,叶片的径向叶形线(轴向剖面)EF 的倾角 α 称为后倾角。由于叶面的曲率半径较大,常用端铣刀进行加工,以提高生产效率和表面品质。叶面的螺旋线可用空间直线进行逼近,为了保证端铣刀的端面与曲面的切平面重合,铣刀还应作螺旋角 φ_i (坐标 A)与后倾角 α (坐标 B)的摆动运动。由于机床结构方面的原因,摆角中心不在铣刀端平面的中心,故在摆动运动的同时,还应作相应的附加直线运动,以保证铣刀端面位于切削的位置。当半径为 R_i 上的一条叶形线加工完毕后,改变 R_i ,再加工相邻的一条叶形线,依次逐一加工,即可形成整个叶面。由此可知,叶面的加工需要五轴联动,即 x 、 y 、 z 、 \hat{a} 、 \hat{b} 。这种加工的编程计算较为复杂。图 7-48 所示为实际叶片结构、走刀路径和 NC 程序。

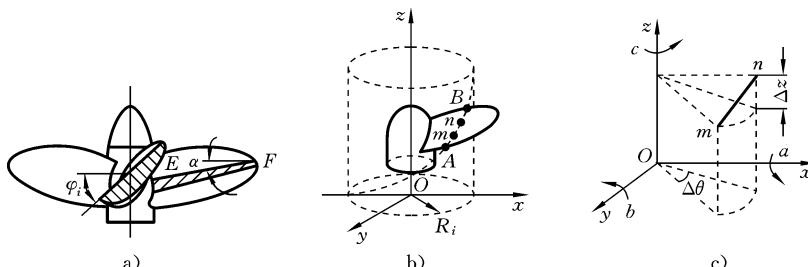


图 7-47 螺旋桨叶片及其加工原理

a) 叶片结构 b) 单片加工轨迹 c) 直线逼近

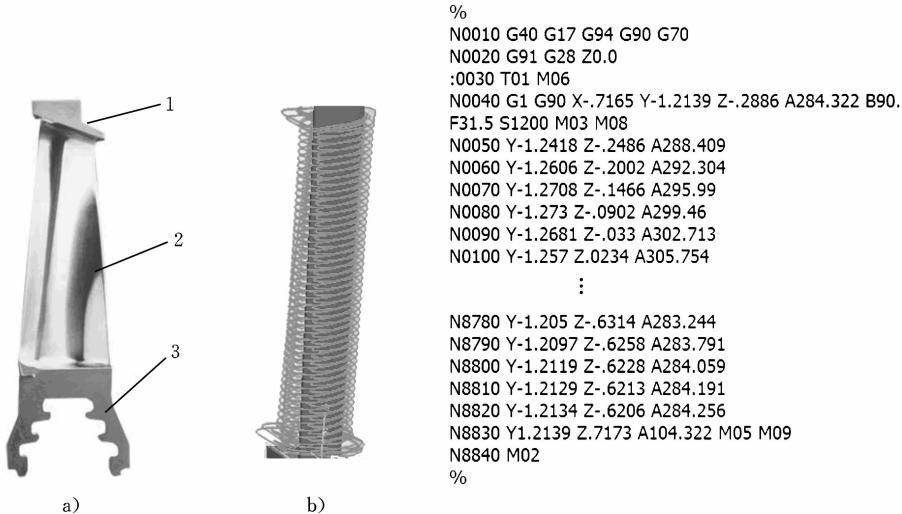


图 7-48 叶片结构,走刀路径和 NC 程序

a) 叶片 b) 走刀路径
1—叶顶 2—叶身 3—叶根

7.5.3 数控编程

1. 数控编程的步骤

(1) 分析零件图。分析零件的材料、形状、尺寸、精度及毛坯形状和热处理要求等,以便确定该零件是否适合在数控机床上加工,且适合在哪种数控机床上加工。有时还需确定在某台数控机床上加工该零件的哪些工序或哪几个表面。

(2) 工艺处理。工艺处理阶段的主要任务是确定零件的加工工艺过程,即确定零件的加工方法(如采用的工装夹具、装夹定位方法等)和加工路线(如对刀点、走刀路线等),并确定加工用量等工艺参数(如走刀速度、主轴转速、切削宽度和深度等)。

(3) 数学处理。根据零件图和确定的加工路线,计算出走刀轨迹和每个程序段所需数据。例如,零件轮廓相邻几何元素的交点和切点坐标需要进行计算,这种计算称为基点坐标的计算;对非圆曲线(如渐开线、双曲线等)需用小直线段或圆弧逼近,根据要求的精度需计算逼近零件轮廓时相邻集合元素的交线和切点坐标,这种计算称为节点坐标计算;自由曲线及组合曲面的数学处理更为复杂,必须使用计算机辅助计算。

(4) 编写程序单。根据加工路线计算出的数据和确定的加工用量,结合数控系统的加工指令和程序格式,逐段编写零件的加工程序单。

(5) 程序校验和首件试加工。加工程序必须校验和试加工合格,才能认为该零件的编程工作结束,然后进入正式加工。

2. 数控编程的方法

1) 手工编程 由分析零件图、制订工艺规程、计算刀具运动轨迹、编写零件加工

程序单直到程序校核,整个过程主要由人来完成。这种人工编制零件加工程序的方法称为手工编程(manual programming)。有关手工编程的方法和步骤可参阅文献[1]中数控加工的内容。

2) 自动编程 编制零件加工程序的全部工作主要由计算机来完成,此种编程方法称为自动编程(automatic programming)。自动编程工作过程如图 7-49 所示。

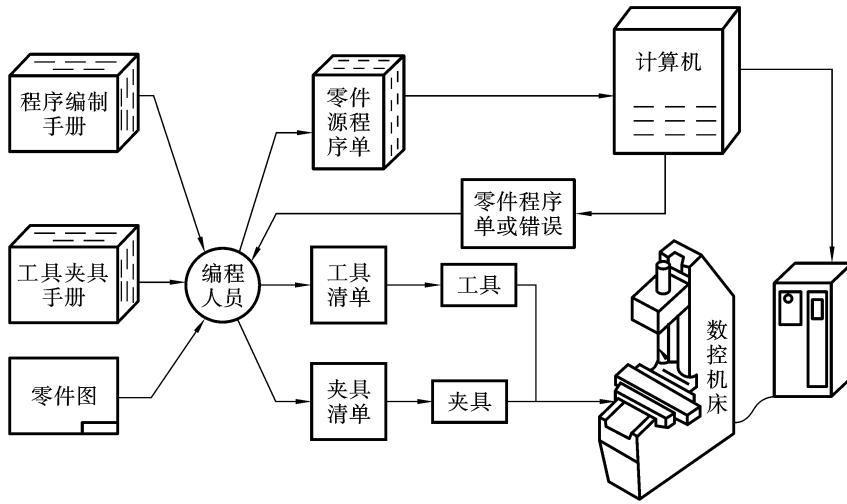


图 7-49 自动编程工作过程

由图 7-49 可看出,编程人员只需根据零件图和工艺过程,使用规定的数控语言编写一个较简短的零件加工源程序,输入计算机,计算机就可通过处理程序自动地进行编译、数学处理,计算出刀具中心运动轨迹,再由后处理程序自动编写出零件的加工程序单。

简言之,自动编程就是利用计算机和相应的程序及后处理程序对零件源程序进行处理,以得到加工程序。

3) 手工编程与自动编程的比较 手工编程和自动编程比较如表 7-8 所示。

表 7-8 手工编程和自动编程比较

内 容	手 工 编 程	自 动 编 程
数学计算	复杂、烦琐	由计算机自动完成
出错率	容易出错	计算机可靠性高,不易出错
表达零件程序方式	用大量的数字和代码来编写	用容易熟悉的语言和符号来描述
修改程序	复杂、费时	简单、迅速
复制检验纸带	人工完成	计算机自动完成
所需设备	简单或借助计算机计算	一台通用计算机和相应的外部设备
对编程人员的要求	必须掌握数学运算能力	只需掌握系统源程序写法

3. 自动编程简介

自动编程是指用某种专用的数控语言描述加工零件的形状、刀具的加工路线、切削条件及机床的各种辅助功能,得出用该语言写成的加工程序单——源程序,然后输入配备有编译程序的计算机的编程过程。当然,这种编译程序是由软件工作者以数控语言专门设计而成的一种软件系统,经计算机执行该编译程序,将输入的源程序翻译、解释并自动地进行全部计算和编码,制备出加工所需要的程序单及纸带。

数控机床诞生之际,美国就着手研究自动编程语言及编译系统,20世纪50年代研制出第一个APT试验性系统,60年代研制出APTⅢ,70年代又研制出APTⅣ,它已是一个可用于点位、连续及多坐标数控加工、需要一台大型电子计算机的大系统,是目前国际上所研制成的一万多种编程语言中功能最全、规模最大的系统。除了APT外,不少国家发展了这一适用于小型及微型计算机的最大编程语言和编译系统,如ADAPT、EXAPT、IFAPT、FAPT、MINIAPPT等。

我国在自动编程技术方面起步较晚,但发展较快,目前已经成熟的系统有SKC、ZCX及SKG等。

数控自动编程基本上朝两个方向发展:一类是朝大而全的方向发展,此类系统功能齐全,对点位、连续及多坐标数控加工都可适用,并且开始与计算机辅助设计系统结合起来,构成综合系统;另一类是朝小而专的方向发展,这类系统针对性强,采用小型计算机或微型计算机。近年来,无论是国外还是国内,都已涌现出不少小型或微型自动编程系统,它们可直接在工厂使用。目前,随着计算机外围设备的不断发展,不少功能完备、使用方便的编程系统,例如音频编程系统、数控图形系统、无尺寸图形的数字化处理系统等相继问世。音频编程系统这种最新的系统,如美国的VNC200,由一台小型机、声音预处理机、话筒等构成输入系统,另外配备有绘图机、显示器及外存储器。当操作者第一次使用该系统时,先要训练系统熟悉操作者的声音,一旦系统熟悉后,操作者只需将加工指令通过话筒告诉系统,系统就能将所需加工的零件形状显示出来供检验与修改,认为满意后即可产生数控加工的信息。此类系统最大特点就是不需要编写源程序和打印、输入等步骤。

7.6 典型零件的工艺规程编制举例

7.6.1 轴类零件的加工工艺

1. 概述

1) 轴的功能与结构特点 轴(axis)类零件主要用来支承传动零件和传递转矩。轴类零件是回转体零件,其长度大于直径,一般由内圆柱面、外圆柱面、圆锥面、螺纹、花键及键槽等组成。

2) 轴的技术要求

(1) 尺寸精度及表面粗糙度。轴的尺寸精度主要指外圆的直径尺寸精度,一般尺寸精度公差等级为 IT6~IT9,表面粗糙度 R_a 为 $0.4\sim6.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

(2) 几何形状精度。轴颈的几何形状精度(如圆度、圆柱度等)应限制在直径公差范围之内。对几何形状精度要求较高时,应在零件图上规定其允许的偏差值。

(3) 相互位置精度。轴的相互位置精度主要有轴颈之间的同轴度、定位面与轴线的垂直度、键槽对轴的对称度等。

3) 轴的材料及热处理 对于不重要的轴,可采用碳素结构钢(如 Q235A、Q275A 等),不进行热处理。对于一般的轴,可采用优质碳素结构钢(如 35、40、45、50 钢等),并根据不同的工作条件进行不同的热处理(如正火、调质、淬火等),以获得一定的强度、韧度和耐磨性。对于重要的轴,当精度、转速较高时,可采用合金结构钢 40Cr、高碳铬轴承钢 GCr15、弹簧钢 65Mn 等,进行调质和表面淬火处理,以获得较好的综合力学性能和耐磨性。

4) 轴的毛坯 对于光轴和直径相差不大的阶梯轴,一般采用圆钢作为毛坯。对于直径相差较大的阶梯轴及比较重要的轴,应采用锻件作为毛坯。其中大批、大量生产采用模锻件,单件、小批生产采用自由锻件。对于某些大型的、结构复杂的异形轴,可采用球墨铸铁件作为毛坯。

2. 轴的加工过程

(1) 预备加工,包括校直、切断、端面加工和钻中心孔等。

(2) 粗车直径不同的外圆和端面。

(3) 对品质要求较高的轴,在粗车后应进行正火、调质等热处理。

(4) 修研中心孔后精车外圆、端面及螺纹等。

(5) 铣键槽、花键及钻孔等其他工序。

(6) 耐磨部位的表面热处理。

(7) 修研中心孔后磨外圆、端面。

3. 轴类零件的加工工艺过程举例

如图 7-50 所示的某挖掘机减速器的中间轴,在中批生产条件下,制定该轴的加工工艺过程。

1) 零件各部分的技术要求

(1) 在轴中有花键的两段外圆轴径对轴线 A—B 的径向圆跳动的公差为 0.016 mm;端面对轴线 A—B 的径向圆跳动公差为 0.03 mm;直径为 $\phi 50\text{h}5$ mm 段的轴径对轴线 A—B 的公差为 0.016 mm。

(2) 零件材料为 20CrMnMo4 钢,渗碳淬火处理,渗碳层深度为 $0.8\sim1.2\text{ mm}$,淬火硬度为 $58\sim62\text{ HRC}$ 。

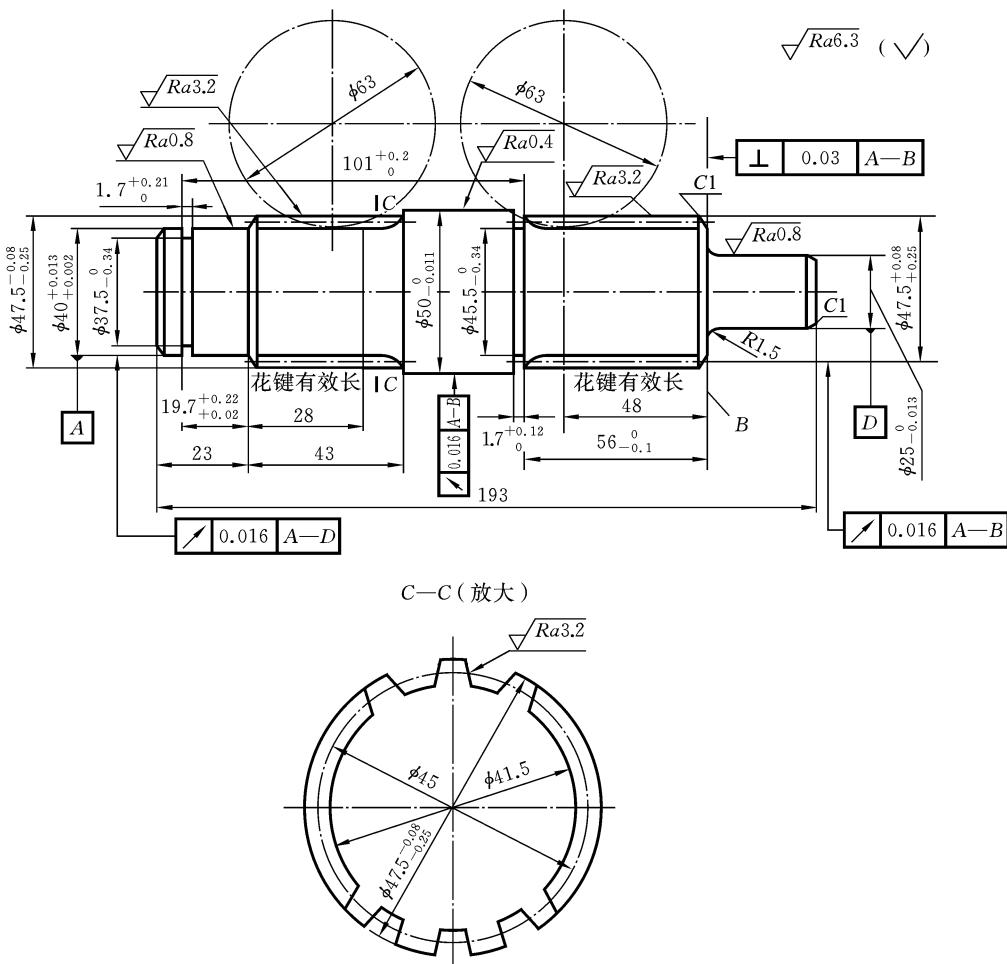


图 7-50 某挖掘机减速器中间轴简图

2) 工艺分析 该零件的各配合表面除本身有一定的精度和表面粗糙度要求外, 对轴线还有径向圆跳动的要求。

根据各表面的具体要求,可采用如下的加工方案:

粗车→精车→铣花键→热处理→磨。

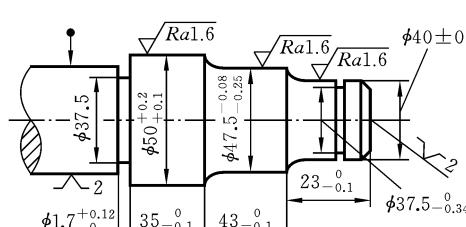
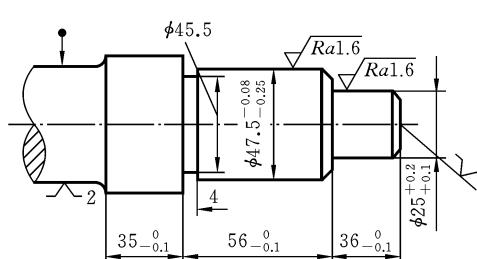
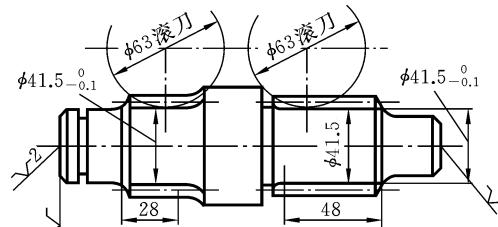
3) 基准选择 在粗加工时,为提高生产效率选用较大的切削用量,选一外圆与一中心孔为定位基准。在精加工时,为保证各配合表面的位置精度,用轴两端的中心孔为粗、精加工的定位基准。这样符合基准统一和基准重合的原则。为保证定位基准的精度和表面粗糙度,在精加工之前、热处理后应修整中心孔。

4) 工艺过程 该轴的材料为 20CrMnMo4 钢。在中批生产条件下,其工艺过程可按表 7-9 安排。

表 7-9 某挖掘机减速器中间轴的加工工艺过程

序号	工序内容	工序简图	定位基准	机床设备
1	切割下料		—	锯床
2	热处理(退火)	—	—	热处理炉 1
3	铣两端面, 总长保持为 196; 打中心孔		毛坯外圆	打中心孔专用机床
4	粗车右端外圆: (1) 粗车轴颈, 从 φ55 车至 φ28 ⁰ _{-0.1} × 35; (2) 粗车花键部分, 从 φ55 车至 φ50 ⁰ _{-0.1} × 45; (3) 粗车圆柱段, 从 φ55 车至 φ53 ⁰ _{-0.1} × 40		一端外圆及顶尖孔	卧式车床 1
5	粗车左端外圆: (1) 粗车轴颈, 从 φ55 车至 φ43 ⁰ _{-0.1} × 22.5 ⁰ _{-0.1} ; (2) 粗车花键部分, 从 φ55 车至 φ50 ⁰ _{-0.1} × 43; (3) 粗车圆柱段, 从 φ55 车至 φ53 ⁰ _{-0.1} × 40; (4) 切长度 101 ⁰ _{-0.1} ; (5) 切长度 193		另一端外圆及顶尖孔	卧式车床 2
6	热处理(退火)	—	—	热处理炉 2
7	修整顶尖孔		外圆	卧式车床 3

续表

序号	工序内容	工序简图	定位基准	机床设备
8	精车左端外圆： (1) 精车轴颈, 从 $\phi 43_{-0.1}^{+0.1}$ $\times 22.5_{-0.1}^{+0.1}$ 车至 40 ± 0 ; (2) 精车花键部分, 从 $\phi 50_{-0.1}^{+0.1} \times 43$ 车至 $\phi 47.5_{-0.25}^{+0.08}$; (3) 精车圆柱段, 从 $\phi 53_{-0.1}^{+0.1} \times 43$ 车至 $\phi 50_{-0.1}^{+0.2}$ $\times 35_{-0.1}^{+0.1}$; (4) 车退刀槽 $\phi 37.5 \times 1.7_{-0.12}^{+0.12}$; (5) 倒角		左端外圆及顶尖孔	卧式车床 4
9	精车右端外圆： (1) 精车轴颈, 从 $\phi 28_{-0.1}^{+0.2}$ $\times 35$ 车至 $\phi 45.5_{-0.1}^{+0.2}$; (2) 精车花键部分, 从 $\phi 50_{-0.1}^{+0.1} \times 45$ 车至 $\phi 47.5_{-0.25}^{+0.08} \times 56_{-0.1}^{+0.1}$; (3) 车退刀槽 $\phi 45.5 \times 4$; (4) 倒角		右端外圆及顶尖孔	卧式车床 5
10	铣花键槽： (1) 铣右端花键底径 $\phi 41.5_{-0.1}^{+0.1} \times 48$; (2) 铣左端花键底径 $\phi 41.5_{-0.1}^{+0.1} \times 28$		两端顶尖孔	花键铣床
11	去毛刺	—	—	—
12	中间检查	—	—	—
13	热处理 (渗碳淬火)	—	—	热处理炉 3
14	研磨顶尖	—	—	钻床

续表

序号	工序内容	工序简图	定位基准	机床设备
15	磨各轴颈外圆： (1) 磨 $\phi 25_{-0.013}^0$ 轴颈； (2) 磨 $\phi 40_{-0.002}^{+0.013}$ 轴颈； (3) 磨 $\phi 50_{-0.011}^0$ 轴颈		两端顶尖孔	外圆磨床
16	清洗	—	—	—
17	终检	—	—	—

7.6.2 轮类零件的加工工艺

飞轮、齿轮、带轮、套类都属于盘类零件,其加工过程相似,因此,不妨以齿轮为例来分析这类零件的加工工艺。

1. 齿轮零件的结构特点

由于功能不同,齿轮具有各种不同的形状与尺寸,但从工艺的角度,可将其看成是由齿圈和轮体两部分构成。齿圈的结构形状和位置是评价齿轮结构工艺性的一项重要指标。单齿轮(见图7-51a)的结构工艺性最好。双联齿轮(见图7-51b)和多联齿轮(见图7-51c),由于轮缘间的轴向距离较小,小齿圈不便于刀具或砂轮切削,因此加工方法受限制(一般只能选插齿加工)。当齿轮精度要求较高时,即需要剃齿或磨齿时,通常将多联齿轮看成单齿轮的组合结构。

2. 机械加工的一般工艺过程

加工一个精度较高的圆柱齿轮,大致经过如下加工方案:

毛坯制造及热处理→齿坯加工→齿形加工→齿端加工→轮齿热处理→定位面精加工→齿形精加工。

1) 齿轮的材料及热处理 齿轮的材料及热处理对齿轮的加工性能和使用性能都有很大的影响,选择时要考虑齿轮的工作条件和失效形式。对速度较高的齿轮传动,齿面易点蚀,应选用硬层较厚的高硬度材料;对有冲击载荷的齿轮传动,轮齿易折

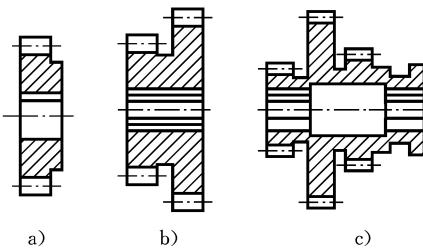


图 7-51 圆柱齿轮的结构形式

a) 单齿轮 b) 双联齿轮 c) 多联齿轮

断,应选用韧度较高的材料;对低速重载的齿轮传动,齿既易折断又易磨损,应选用强度大、齿面硬度高的材料。当前生产中常用的材料及热处理方法大致如下:

(1) 中碳优质碳素结构钢(如45钢)进行调质或表面淬火。这种钢经正火或调质处理后,改善了金相组织,提高了材料的可加工性。但其淬透性较差,一般只对齿面进行表面淬火。它常用于低速、轻载或中载的普通精度齿轮。

(2) 中碳合金结构钢(如40Cr)进行调质或表面淬火。这种钢经热处理后综合力学性能好,热处理变形小,适合制造速度较高、载荷较大、精度高的齿轮。

(3) 渗碳钢(如20Cr、20CrMnTi等)经渗碳淬火,齿面硬度可达58~63HRC,而心部又有较高的韧度,既耐磨又能承受冲击载荷,适合制造高速、小载荷或需要承受冲击载荷的齿轮。

(4) 铸铁以及非金属材料(如夹布胶木与尼龙等)的强度低,容易加工,适合制造轻载荷的传动齿轮。

2) 毛坯制造 齿轮毛坯的制造形式取决于齿轮的材料、结构形状、尺寸大小、使用条件及生产类型等因素。齿轮毛坯形式有棒料、锻件和铸件。

(1) 尺寸较小、结构简单而且对强度要求不高的钢制齿轮可采用轧棒作为毛坯。

(2) 强度、耐磨性和耐冲击要求较高的齿轮多采用锻件,生产批量小或尺寸大的齿轮采用自由锻件,批量较大的中小齿轮则采用模锻件。

(3) 尺寸较大(直径为400~600mm)且结构复杂的齿轮常采用铸造方法制造毛坯,尺寸小而形状复杂的齿轮可以采用精密铸造或压铸方法制造毛坯。

3) 齿坯加工 齿形加工前的齿轮加工称为齿坯加工。齿坯的外圆、端面或内孔经常作为齿形加工、测量和装配的基准,所以齿坯的精度对于整个齿轮的精度有着重要的影响。另外,齿坯加工在齿轮加工总工时中占较大的比例,因此齿坯加工在整个齿轮加工中占有重要地位。齿坯加工的主要内容包括:齿坯的孔加工(对于盘类、套类和齿轮)、端面和顶尖孔加工(对于轴类齿轮)及齿圈外圆和端面的加工。以下主要讨论盘类齿轮的齿坯加工过程。

齿坯的加工工艺方案主要取决于齿轮的轮体结构和生产类型。

(1) 大批、大量生产加工中等尺寸齿坯时,采用“钻→拉→多刀车”的加工方案的步骤如下:

- ① 以毛坯外圆及端面定位进行钻孔或扩孔;
- ② 以端面支承进行拉孔;
- ③ 以内孔定位在多刀半自动车床上粗、精车外圆、端面,车槽及倒角等。

(2) 成批生产齿坯时,常采用“车→拉”的加工方案的步骤如下:

- ① 以齿坯外圆或轮毂定位,粗车外圆、端面和内孔;
- ② 以端面支承拉出内孔(或花键);
- ③ 以内孔定位精车外圆及端面等。

这种方案可在普通车床或转塔车床及拉床上实现,它的特点是品质稳定,生产效率较高。

单件、小批生产齿轮时,一般齿坯的孔、端面及外圆的粗、精加工都在通用车床上经两次安装完成,但必须注意将内孔和基准面的精加工放在一次安装内完成,以保证相互间的位置精度。

4) 齿形加工 齿形加工是整个齿轮加工的核心与关键。齿形加工方案的选择,主要取决于齿轮的精度等级、结构形状、生产类型和齿轮的热处理方法及生产厂家的现有条件,对于不同精度的齿轮,常用的齿形加工方案如下:

(1) 8 级以下精度的齿轮用滚齿或插齿方法就能满足要求。对于淬硬齿轮可采用“滚(插)齿→齿端加工→淬火→校正内孔”的加工方案,但在淬火前齿形加工精度应提高一级。

(2) 6~7 级精度齿轮的齿面若不需淬硬,可采用“滚(插)齿→齿端加工→剃齿”的加工方案。

对于齿面需要淬硬的 6~7 级精度的齿轮,可采用“滚(插)齿→齿端加工→剃齿→表面淬火→校正基准→珩齿”的加工方案。这种加工方案生产效率低,所用设备复杂,成本高,一般只用于单件、小批生产。

(3) 5 级以上精度的齿轮一般采用“粗滚齿→精滚齿→齿端加工→淬火→校正基准→粗磨齿→精磨齿”的加工方案。

5) 齿端加工 齿轮的齿端加工的方式有倒圆、倒尖及倒棱等(见图 7-52),经倒圆、倒尖及倒棱加工后的齿轮,在沿轴向移动时容易进入啮合。倒棱后齿端去除锐边,防止了在热处理时因应力集中而产生微裂纹。

齿端倒圆应用最广,图 7-53 所示为采用指形铣刀倒圆齿端。

齿端加工必须安排在齿形淬火之前,通常在滚(插)齿之后进行。

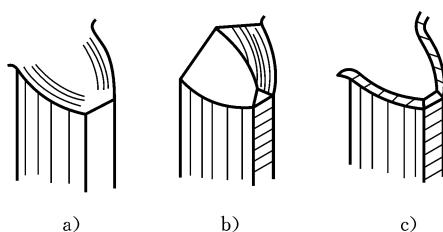


图 7-52 齿端加工后的形状

a) 倒圆 b) 倒尖 c) 倒棱

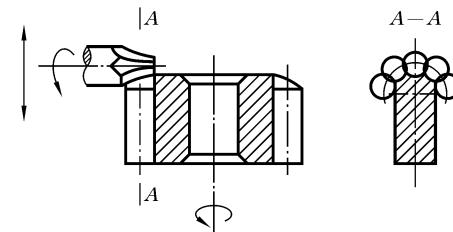


图 7-53 倒圆齿端

6) 齿轮的热处理 齿轮的热处理可分为齿坯的预备热处理和轮齿的表面淬硬热处理。齿坯的热处理通常为正火和调质,正火一般安排在粗加工之前,调质则安排在齿坯加工之后。为延长齿轮寿命,常常对轮齿进行表面淬硬热处理,根据齿轮材料与技术要求不同,常安排渗碳淬火和表面淬硬热处理。

7) 精基准校正 轮齿淬火后其内孔常发生变形,内孔直径可缩小0.01~0.05 mm,为确保齿形的品质,必须对基准孔加以修整。修整的方法一般采用拉孔和磨孔。

8) 齿轮精加工 以磨过(修正后)的内孔定位,在磨齿机上磨齿面或在珩齿机上珩齿。

3. 圆柱齿轮加工工艺过程举例

圆柱齿轮如图7-54所示。在单件、小批生产的条件下,制订该齿轮的加工工艺过程。

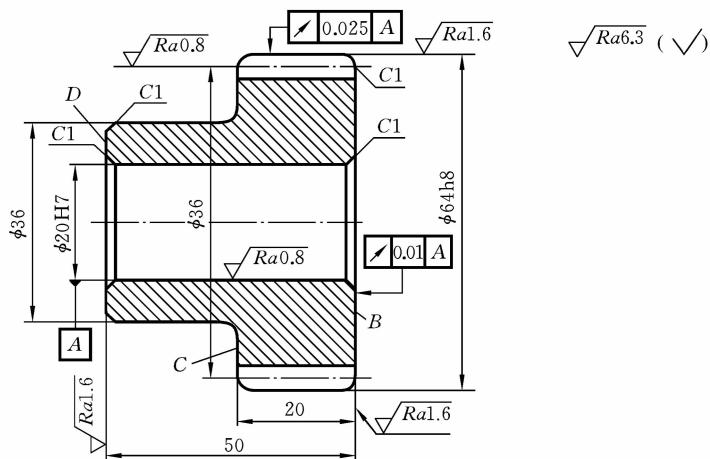


图 7-54 圆柱齿轮

1) 技术要求

- (1) 齿轮外径 $\phi 64h8$ mm 对孔 $\phi 20H7$ mm 轴线的径向圆跳动公差为 0.025 mm。
- (2) 端面对 $\phi 20H7$ mm 轴线的径向圆跳动公差为 0.01 mm。
- (3) 齿轮的精度为 7 级,模数 $m=2$,齿数 $z=30$,材料为 HT200。

2) 工艺分析 该零件属于单件、小批生产,根据本身的尺寸要求,齿坯可采用“粗车→精车→钻→粗镗→半精镗→精镗”的加工方案。

其轮齿加工可采用“滚齿→齿端加工→剃齿”的加工方案。

3) 基准的选择 由零件的各表面的位置精度要求可知,外圆面 $\phi 64h8$ mm 及端面 B 都与孔 $\phi 20H7$ mm 轴线有位置精度的要求,要保证它们的位置精度,只要在一次装夹内完成外圆面 $\phi 64h8$ mm、端面 B 和孔 $\phi 20H7$ mm 轴线的精加工,所以要以 $\phi 36$ mm 外圆面为基准,粗车大外圆、端面 B,精镗孔。 $\phi 36$ mm 外圆面要作为精基准,就要以 $\phi 64h8$ mm 外圆面为粗基准来加工 $\phi 36$ mm 外圆面,所以加工该零件的粗基准是 $\phi 64h8$ mm 外圆面。轮齿的加工以端面 B 及内孔为基准。

4) 工艺过程 在单件、小批生产中,该齿轮的工艺过程可按表 7-10 进行安排。

表 7-10 单件、小批生产时齿轮加工工艺过程

序号	工序	工序内容	加工简图	加工设备
1	铸造	造型、浇注和清理		—
2	车	<p>(1) 粗车、半精车小头外圆面和端面至 36×30；</p> <p>(2) 倒角(小头)；</p> <p>(3) 掉头,粗车、半精车大头外圆面和端面至 65×22；</p> <p>(4) 钻孔至 $\phi 18$；</p> <p>(5) 粗镗孔至 $\phi 19$；</p> <p>(6) 精车大头外圆面和端面, 保证尺寸 $\phi 64h8$、50 及 20；</p> <p>(7) 半精镗孔、精镗孔至 $\phi 20H7$</p>		车床
3	滚齿	滚齿余量为 $0.03 \sim 0.05$		滚齿机
4	倒角	倒角	—	—

续表

序号	工序	工序内容	加工简图	加工设备
5	剃齿	剃齿保证轮齿的精度为7级		剃齿机

7.6.3 箱体类零件加工

箱体(box)类零件是机器及其部件的基础件。它将机器部件中的轴、轴承、套和齿轮等零件按一定的相互位置关系装配在一起,按规定的传动关系协调地运动。因此,箱体类零件的品质不但直接影响箱体的装配精度及回转精度,而且还会影响机器的工作精度、使用性能和寿命。

箱体类零件的加工表面主要是平面和孔。各种箱体的具体结构、尺寸虽不相同,但其加工工艺过程却有许多共同之处。现以某车床主轴箱(见图 7-55)为例,说明制订机械加工工艺规程的过程与方法。

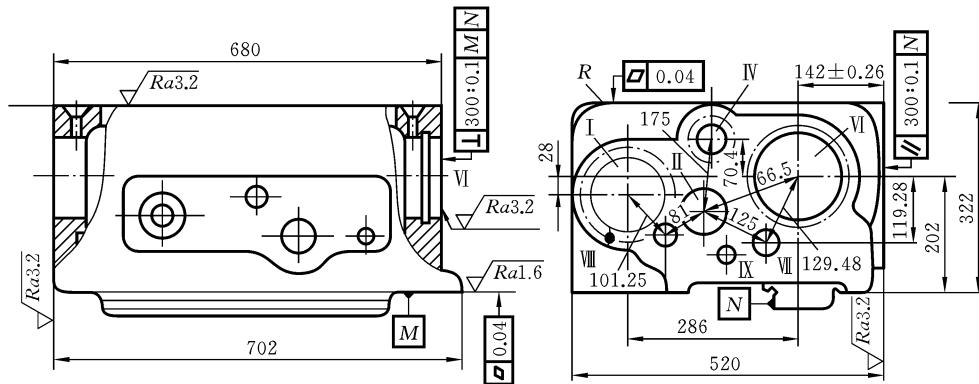


图 7-55 某车床主轴箱简图

1. 制订箱体加工工艺规程的原则

1) 箱体的时效处理 为了消除铸造内应力,防止加工后的变形,使加工精度保持长期稳定,箱体要进行时效处理。自然时效比人工时效好,目前仍用于精密机床铸件,一般都在毛坯铸造后立即进行时效处理。而粗加工之后,精加工之前有一段存放时间,以消除加工内应力。对于精密机床的主轴箱箱体,应在粗加工后甚至半精加工之后再安排一次时效处理。

2) 箱体加工的工艺原则

(1) 先面后孔的原则。因为作为精基准的平面在最初的工序中应该首先加工出

来。而且,平面加工以后,使平面上的支承孔的加工更方便,钻孔时可减少钻头的偏斜,扩孔和铰孔时可防止刀具崩刃。

(2) 粗、精分开,先粗后精的原则。由于箱体结构复杂,主要表面的精度要求高,为减小或消除粗加工时产生的切削力、夹紧力和切削热对加工精度的影响,一般尽可能把粗、精加工分开,并分别在不同机床上进行。

3) 主要表面加工方法的选择 箱体的主要表面为平面和轴承支承孔。箱体平面的粗加工和半精加工,主要采用刨削和铣削,铣削的生产效率一般比刨削高,在成批、大量生产中,多采用铣削。箱体平面的精加工,单件、小批生产时除一些高精度的箱体仍需采用手工刮研外,一般多以精加工代替手工刮研;当生产批量大而精度又较高时,多采用磨削。为了提高生产效率和平面间的相互位置精度,可采用专用磨床进行组合磨削。

箱体上尺寸精度公差等级为 IT7 的轴承支承孔,一般用“钻→扩→粗铰→精铰”或“镗→半精镗→精镗”的加工方案。前者用来加工直径较小的孔,后者用来加工直径较大的孔。当孔的尺寸精度公差等级超过 IT7、表面粗糙度 $Ra < 0.8 \mu\text{m}$ 时,还应增加一道最后的精加工或精密加工工序,如精细镗、珩磨、滚压等。

2. 确定工艺过程

某车床主轴箱体的工艺过程,按照生产类型的不同而有不同的方案,分别如表 7-11 和表 7-12 所示。

表 7-11 中批、小批生产某车床主轴箱的工艺过程

序号	工 序 内 容	定 位 基 准
1	铸造	—
2	清理铸件	—
3	时效处理	—
4	油漆	—
5	划线	—
6	粗加工、半精加工顶面 R	按划线找正, 支承底面 M
7	粗加工、半精加工底面 M 及侧面	支承顶面 R, 并校正主轴孔的中心线
8	粗加工、半精加工两端面	底面 M
9	精加工顶面 R	底面 M
10	精加工底面 M	顶面 R
11	粗加工、半精加工各纵向孔	底面 M
12	精加工各纵向孔	底面 M

续表

序号	工 序 内 容	定 位 基 准
13	粗加工、半精加工各横向孔	底面 M
14	精加工主轴孔	底面 M
15	加工螺纹及紧固孔	—
16	清洗	—
17	检验	—

表 7-12 大批、大量生产某车床主轴箱的工艺过程

序号	工 序 内 容	定 位 基 准
1	铸造	—
2	时效处理	—
3	油漆	—
4	铣顶面 R	主轴支承孔, 并按顶面找正
5	钻、扩铰顶面上两定位销孔及固定螺纹孔的加工	—
6	铣底面 M 及各平面	顶面 R 及两工艺孔
7	磨顶面 R	底面及侧面
8	粗镗各纵向孔	顶面 R 及两工艺孔
9	精镗各纵向孔	顶面 R 及两工艺孔
10	半精镗、精镗主轴三孔	顶面 R 及两工艺孔
11	加工各横向孔	顶面 R 及两工艺孔
12	钻、锪、攻各平面上的螺纹孔	—
13	滚压主轴支承孔	顶面 R 及两工艺孔
14	磨底面、侧面及端面	—
15	钳工去毛刺	—
16	清洗	—
17	检验	—

复习思考题

7.1-1 试述机械加工工艺过程的组成。

7.1-2 什么是基准？它有哪几种类型？在应用基准时，为什么应尽量使各种基准重合？

7.1-3 生产纲领的含义是什么？不同生产类型的工艺过程及生产组织有何特点？

7.1-4 试分析生产纲领和生产类型的划分原理及作用。

7.2-1 试分析如图 7-57 所示齿轮的设计基准、装配基准及滚切齿形时的定位基准、测量基准。

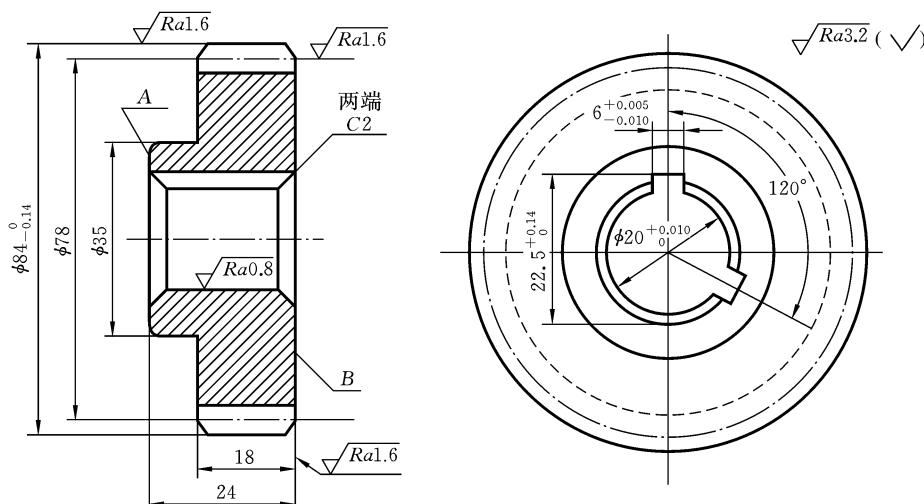


图 7-57 齿轮

7.2-2 图 7-58 所示为小轴零件图及在车床顶尖间加工小端外圆及台肩面 2 的工序图。试分析台肩面 2 的设计基准、定位基准及测量基准。

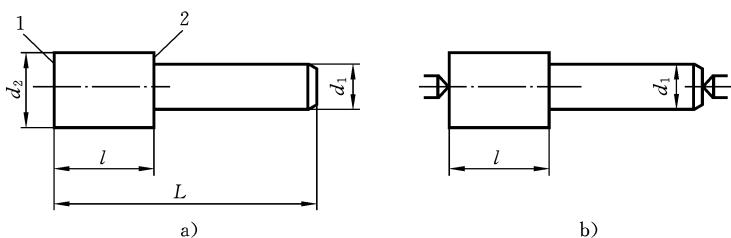


图 7-58 轴

a) 零件图 b) 工序图

7.2-3 试分析下列情况的定位基准：

- (1) 浮动铰刀铰孔；
- (2) 珩磨连杆大头孔；
- (3) 浮动镗刀镗孔；

- (4) 磨削床身导轨面；
- (5) 无心磨外圆；
- (6) 拉孔；
- (7) 超精加工主轴轴颈。

7.2-4 图 7-59 所示零件的 A、B、C 面, $\phi 10H7$ mm 及 $\phi 30H7$ mm 孔均已加工, 试分析加工 $\phi 20H7$ mm 孔时选用哪些表面定位最为合理, 为什么?

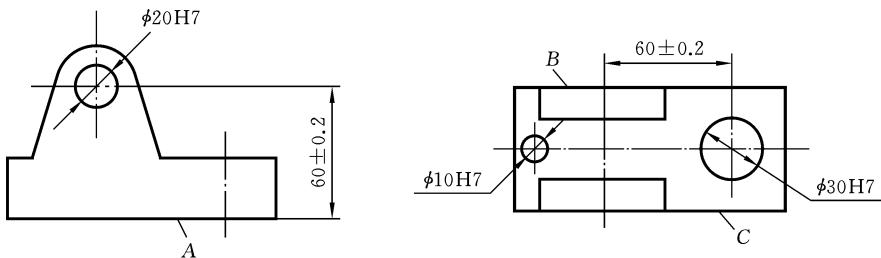


图 7-59 支座

7.2-5 试分析图 7-60 所示钻铰连杆零件的小头孔, 保证小头孔与大头孔之间的距离及两孔平行度。

- (1) 指出各定位元件所限制的自由度；
- (2) 判断有无欠定位或过定位；
- (3) 对不合理的定位方案提出改进意见。

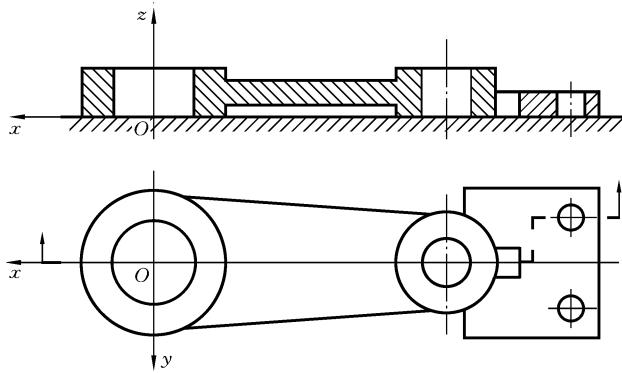


图 7-60 连杆

7.2-6 试举例说明粗、精基准的选择原则。

7.2-7 何谓六点定位原理? 工件在夹具中定位, 是否一定要完全限制其六个自由度才算定位合理?

7.2-8 工件被夹紧所得到的固定位置与工件在夹具中定位而确定的位置有何不同?

7.2.9 分析图 7-61 所示的零件加工中必须限制的自由度。

- (1) 加工齿轮两端面, 要求保证尺寸 A 及两端面与内孔的垂直度(见图 7-61a);
- (2) 在小轴上铣槽, 保证尺寸 H 和 L(见图 7-61b);
- (3) 过轴心打通孔, 保证尺寸 L(见图 7-61b)。

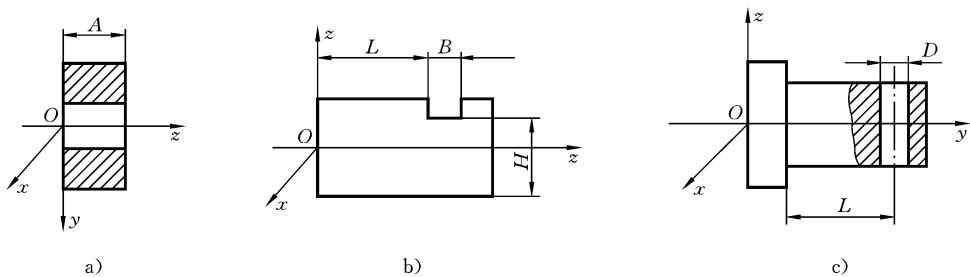


图 7-61 不同的零件

a) 端面加工 b) 小轴上槽的加工 c) 轴上孔的加工

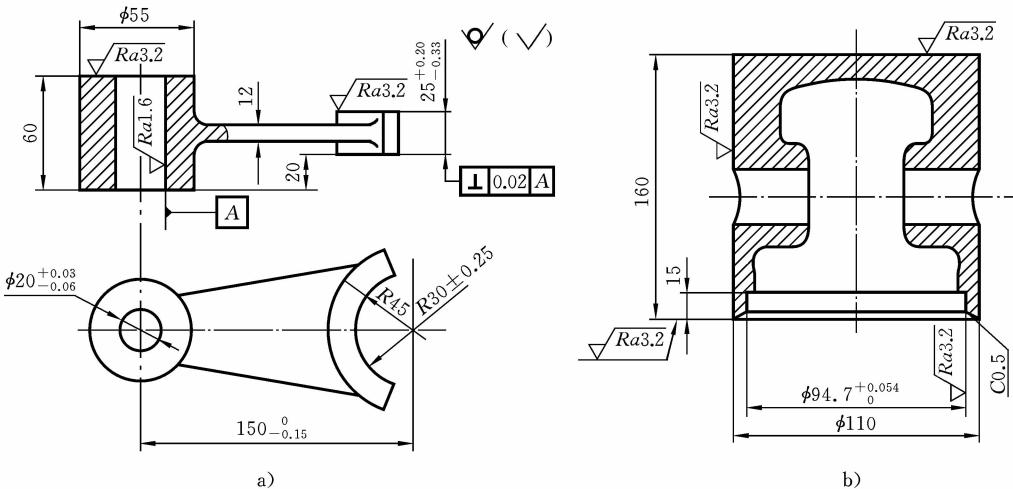


图 7-62 不同的零件

a) 连杆零件图 b) 活塞零件图

7.2.10 如图 7-62 所示各零件加工时的粗、精基准应如何选择? 试简要说明理由。

- 7.3.1 何谓零件的结构工艺性? 它有什么实际意义?
- 7.3.2 设计零件时, 考虑零件结构工艺性的一般原则有哪几项?
- 7.3.3 增加工艺凸台或辅助安装面, 可能会增加加工的工作量, 但为什么还要它们?
- 7.3.4 为什么要尽量减少加工时的安装次数?

7.3-5 为什么零件上的同类结构要素要尽量统一?

7.3-6 如图 7-63 所示,齿轮轮毂的形状共有三种不同的结构设计方案,试从你所选定的齿形加工方法对零件结构的要求,比较出哪种结构工艺性较好,哪种较差。为什么?

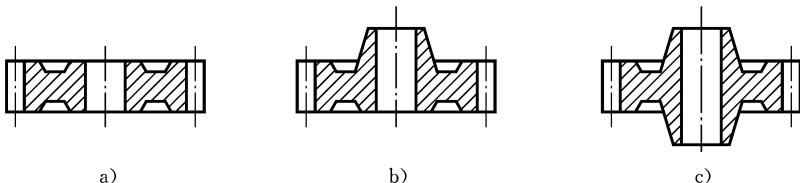


图 7-63 齿轮轮毂的形状

a) 平端面齿轮 b) 一端凸台齿轮 c) 两端凸台齿轮

7.3-7 分析如图 7-64 所示各零件的结构,找出哪些部位的结构工艺性不妥当,为什么?并绘出改进后的图形。

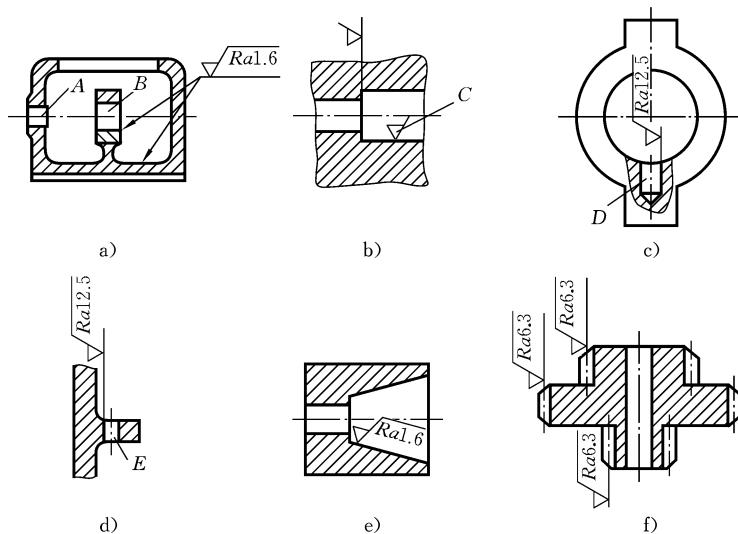


图 7-64 不同零件的结构形状

a) 加工孔 A、B b) 加工孔 C c) 加工孔 D d) 加工孔 E e) 加工锥孔 f) 加工齿面

7.3-8 试指出如图 7-65 所示零件难以加工或无法加工的部位,并提出改进意见。

7.4-1 何谓工艺规程? 它对组织生产有何作用?

7.4-2 说明制定机械加工工艺规程时应遵循的步骤和应具备的原始资料。

7.4-3 零件图的工艺分析的内容是什么?

7.4-4 毛坯选择应遵循的原则是什么?

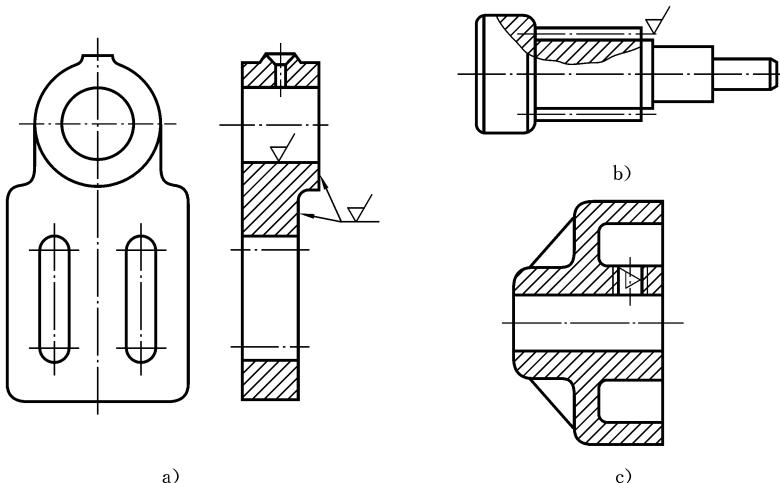


图 7-65 不同零件的结构形状

a) 轴承座 b) 半轴齿轮 c) 端盖

7.4-5 试述设计基准、工序基准、定位基准和装配基准的概念,举例说明它们之间的区别。

7.4-6 选择粗、精基准的原则是什么?

7.4-7 确定加工余量的方法有哪几种?

7.4-8 加工轴类零件时,常以什么作为统一的精基准?为什么?

7.5-1 编制数控机床加工程序的过程是怎样的?

7.5-2 数控加工程序的编制方法有哪几种?各有什么特点?

7.5-3 数控加工程序的手工编程有什么内容?

7.6-1 图 7-66 为减速箱输出轴的零件图。

该轴以两个 $\phi 35^{+0.025}_{-0.008}$ mm 的轴颈及 $\phi 48$ mm 轴肩确定其在减速箱中的径向和轴向位置,轴颈处安装滚动轴承。径向圆跳动为 0.012 mm,端面圆跳动为 0.02 mm。 $\phi 40^{+0.050}_{-0.034}$ mm 是安装齿轮的表面,采用基孔制过盈配合。 $\phi 30^{+0.041}_{-0.028}$ mm 轴颈是安装联轴器的。配合面粗糙度直接影响配合性质,所以,不同的表面有不同的粗糙度要求。一般与滚动轴承相配合的表面要求 Ra 为 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$,与齿轮孔、联轴器孔配合的表面要求 Ra 为 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。调质处理后的硬度不低于 224HBW。材料也可选用 45 钢或球铁。生产批量为单件、小批。试制订其加工工艺规程。

7.6-2 图 7-67 所示为车床主轴箱齿轮,在小批生产条件下:

- (1) 试确定毛坯的生产方法及热加工工艺方法;
- (2) 试制订机械加工工艺规程。

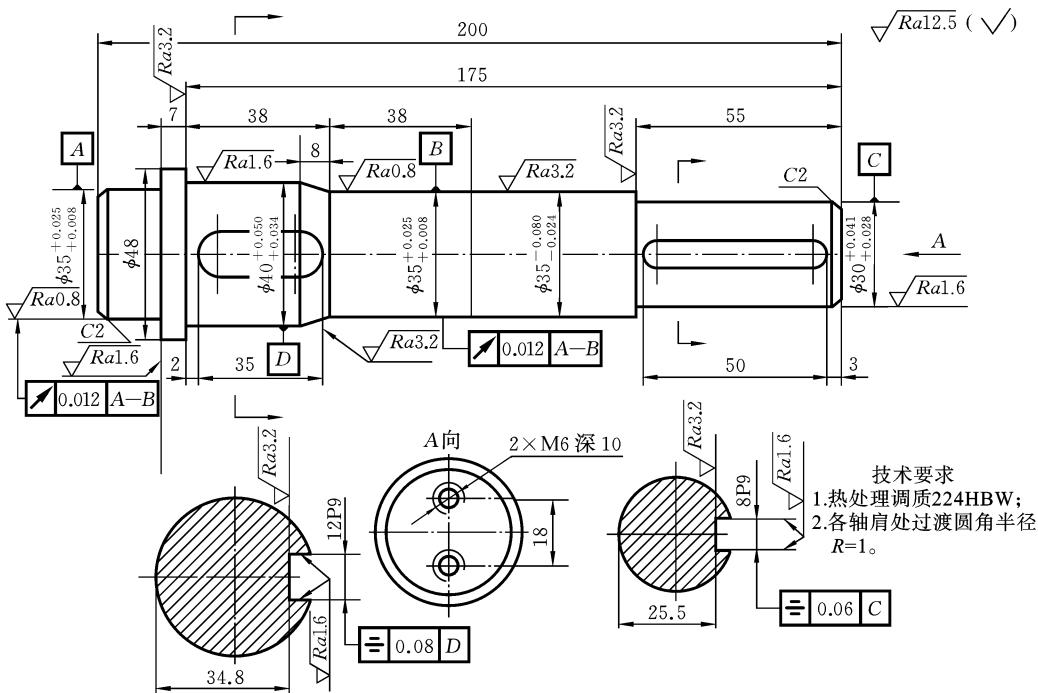


图 7-66 减速箱输出轴

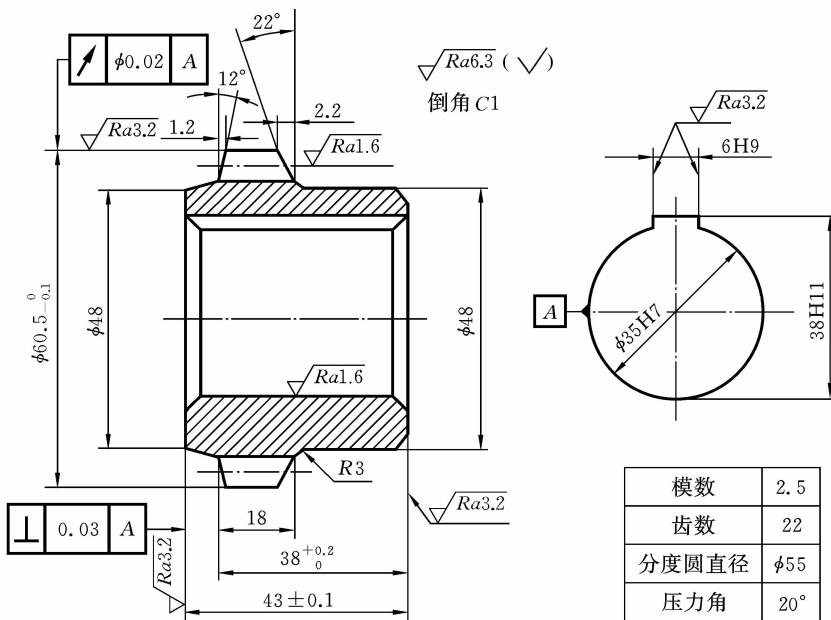


图 7-67 齿轮

参 考 文 献

- [1] 周世权,杨雄. 基于项目的工程实践(机械及近机械类)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009.
- [2] SCHEY J A. Introduction to Manufacturing Processes[M]. McGraw Hill, 1999.
- [3] 沈其文,赵敖生. 材料成形与机械制造技术基础——材料成形分册[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.
- [4] 熊良山. 机械制造技术基础[M]. 3 版. 武汉:华中科技大学出版社,2012.
- [5] 邓文英. 金属工艺学(上册)[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2008.
- [6] 邓文英. 金属工艺学(下册)[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2008.
- [7] 傅水根. 机械制造工艺基础[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2010.
- [8] 翁世修,吴振华. 机械制造技术基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,1999.
- [9] 邢建东,陈金德. 材料成形技术基础[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2011.
- [10] 杜丽娟. 工程材料成形技术基础[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [11] 柳百成. 21 世纪的材料成形加工技术与科学[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [12] 姚智慧. 现代机械制造技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.
- [13] 肖景容,姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [14] 王同海. 管材塑性加工技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [15] 范春华. 快速成形技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [16] 刘军,余正国. 粉末冶金与陶瓷成型技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [17] BENJAMIN W N. Modern Manufacturing Process Engineering[M]. New York:USA McGraw Hill, 1989.
- [18] 韩荣第. 金属切削原理与刀具[M]. 3 版. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [19] 陆剑中,孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2011.
- [20] 王晓霞. 金属切削原理与刀具[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [21] 严岱年. 现代工业训练教程(特种加工)[M]. 南京:东南大学出版社,2001.
- [22] 王贵成. 精密与特种加工[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [23] 刘晋春,白基成. 特种加工[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [24] 吴林,陈善本. 智能化焊接技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [25] 刘中青,刘凯. 异种金属焊接技术指南[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

- [26] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [27] 陈彬. 特种焊接工基本技术[M]. 上海: 金盾出版社, 2003.
- [28] 朱正行, 严向明, 王敏. 电阻焊技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [29] 中国机械工程学会焊接学会. 电阻焊理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [30] 张世昌. 机械制造技术基础[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [31] 许音. 机械制造基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [32] 赵敖生, 沈其文. 材料成形与机械制造技术基础——机械制造分册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2015.