

热喷涂技术丛书

# 热喷涂实用技术

王海军 主编

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了热喷涂的基础知识,一些典型的热喷涂设备的基本原理与组成,火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂的工艺特点,一些重要的热喷涂材料和涂层设计,涂层的质量检测,热喷涂涂层的机械加工与性能评价以及安全防护等内容。

本书注重理论与实际相结合,突出实用性,同时也介绍了热喷涂技术领域的最新发展和研究成果。可作为从事热喷涂的工程技术人员和大专院校相关专业的参考书,也可作为热喷涂技术普及读物和技术培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

热喷涂实用技术/王海军主编. —北京:国防工业出版社, 2006. 5

(热喷涂技术丛书)

ISBN 7-118-04456-3

I. 热... II. 王... III. 热喷涂 IV. TG174.442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 017593 号

※

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 20 字数 358 千字

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

热喷涂是一门具有悠久历史的工艺性技术,学科上主要涉及热加工和材料科学。热喷涂技术是表面工程的关键技术之一,是维修与再制造的重要手段。相对于其它材料制备技术,具有工艺相对简单、灵活、可喷涂材料种类多、涂层质量好、应用范围广、经济效益大等特点。随着科学技术的进步,现代热喷涂技术在理论与实践上都有了很大的发展。例如:传统的火焰喷涂已发展到超音速火焰喷涂,可以喷涂结合力高、十分致密的 WC-Co、NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 等超硬涂层,已成功替代了对环境有污染的镀硬铬工艺;电弧喷涂已由普通金属丝电弧喷涂发展成为高速金属-陶瓷复合管状丝电弧喷涂,涂层的质量大幅提高,应用范围也得到扩展;冷喷涂的出现可在较低温度(600℃以下)下喷涂一些高塑性易氧化的金属材料,获得高致密度和纯净的涂层;装甲兵工程学院最近研制成功的高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet),可在小气体流量(3m<sup>3</sup>/h~6m<sup>3</sup>/h)和较低功率(50kW~80kW)下获得超音速粒子射流,能制备超高硬度 WC 硬质合金涂层和梯度功能热障涂层,还可方便的制备纳米结构涂层,相对于国内外普通等离子喷涂,涂层的质量有了显著提高。在涂层后加工领域,电解、超声先进切削、研磨技术的出现,解决了高硬度难加工的金属或陶瓷涂层的精细加工问题,显著提高了涂层后加工的质量和效率。

为了较全面系统地向热喷涂生产领域的工程技术人员普及热喷涂技术的基本知识,推广现代热喷涂技术在先进制造、设备维修和再制造技术领域的应用,我们组织编写了这套《热喷涂技术丛书》。包括《热喷涂实用技术》、《热喷涂技术问答》、《热喷涂材料及应用》和《热喷涂工程师指南》四个分册。《丛书》主要供热喷涂技术领域的工程技术人员及蓝领工人阅读使用,也可供先进制造技术领域的设计人员、技术人员及大专院校相关专业的师生参考。

本书为《热喷涂技术丛书》的第一分册,分为十一章,较全面系统地介绍

了有关热喷涂的基础知识 热喷涂设备的基本原理与组成 热喷涂工艺的特点和主要参数 ,一些重要的热喷涂材料和涂层设计 涂层的结构特点和涂层质量检测 涂层的机械加工和一些典型应用实例。同时也介绍了热喷涂技术领域的最新研究成果。

本书由王海军任主编 ,各章节编写人员为 :第一章 王海军 ,第二章 周世魁、魏伟(北京矿冶研究总院) ,第三章、第四章 潘荣辰 刘明 ,第五章、第七章 王海军 周世魁 ,第六章、第八章 蔡江、谢凤宽 ,第九章 翁熙祥 ,第十章 周世魁 ,第十一章 王建。全书由王海军、周世魁统稿 ,韩志海审稿。陆欢、张兴等同志参加了校阅工作。

本书得到了装甲兵工程学院许多同事的帮助与支持 ,在此深表感谢。

翁熙祥教授对本书编写给予了悉心指导 ,对全书的构思及整体结构提出了许多宝贵意见 ,在此表示诚挚的感谢。

本书在编写过程中参考了许多文献 ,特别是近年来的相关著作和学术论文资料 ,在此谨向原文献作者表示诚挚的敬意。

由于编者的水平有限 ,书中不妥之处在所难免 ,恳请各位读者、同行和专家批评指正。

# 目 录

第一章 热喷涂技术概述.....	1
1.1 热喷涂技术的定义和分类 .....	1
1.2 热喷涂技术的发展概况 .....	1
1.3 热喷涂涂层形成机理 .....	2
1.4 热喷涂技术的特点 .....	3
1.5 热喷涂技术的应用 .....	5
第二章 热喷涂材料.....	9
2.1 热喷涂材料分类和要求 .....	9
2.2 热喷涂线材.....	11
2.2.1 锌、铝、锌铝合金及低熔点合金丝.....	11
2.2.2 铁基合金丝.....	14
2.2.3 铜与铜合金丝.....	16
2.2.4 镍与镍合金丝.....	16
2.2.5 其它丝材.....	18
2.3 热喷涂(熔)粉末材料 .....	20
2.3.1 金属及合金粉末.....	20
2.3.2 陶瓷材料粉末.....	28
2.3.3 纳米材料粉末.....	36
2.3.4 塑料粉末.....	38
2.3.5 复合材料粉末.....	39
第三章 热喷涂工件的表面制备 .....	41
3.1 基体表面净化处理.....	41
3.1.1 常用表面除油处理技术.....	41
3.1.2 表面除锈处理.....	43
3.2 基体表面预加工.....	44
3.3 基体表面粗化处理.....	45
3.3.1 喷砂处理.....	45

3.3.2	机械加工法粗化.....	50
3.3.3	电拉毛.....	52
3.4	非喷涂表面的保护.....	52
3.4.1	胶带保护.....	52
3.4.2	化合物保护.....	52
3.4.3	机械保护.....	53
第四章	热喷涂涂层设计 .....	54
4.1	根据使用要求选择喷涂材料.....	54
4.1.1	耐磨损涂层.....	54
4.1.2	耐热和抗氧化涂层.....	57
4.1.3	耐腐蚀涂层.....	58
4.1.4	电绝缘和导电涂层.....	60
4.1.5	控制机械部件间隙的涂层.....	61
4.2	复合涂层系统设计.....	61
4.3	喷涂工艺的选择.....	63
第五章	火焰喷涂(熔)技术 .....	65
5.1	气体燃烧火焰基础.....	65
5.1.1	气体燃料燃烧方式.....	65
5.1.2	燃气和助燃气的混合.....	66
5.1.3	脱火、回火及回火的预防 .....	66
5.1.4	火焰的形貌、构成和性质 .....	67
5.2	火焰线材喷涂技术.....	69
5.2.1	火焰线材喷涂原理及特点.....	70
5.2.2	火焰线材喷涂设备.....	70
5.2.3	火焰线材喷涂技术的应用及其实例.....	79
5.3	火焰粉末喷涂技术.....	84
5.3.1	火焰粉末喷涂的分类及特点.....	84
5.3.2	普通火焰粉末喷涂.....	85
5.3.3	火焰塑料粉末喷涂.....	93
5.3.4	超声速火焰粉末喷涂技术.....	99
5.3.5	爆炸喷涂技术 .....	106
5.4	氧—乙炔火焰粉末喷熔技术 .....	110
5.4.1	氧—乙炔火焰粉末喷熔的原理 .....	110
5.4.2	氧—乙炔火焰粉末喷熔的特点 .....	112

5.4.3	工件对火焰粉末喷熔的适应性 .....	112
5.4.4	氧—乙炔焰粉末喷熔设备 .....	114
5.4.5	氧—乙炔焰粉末喷熔工艺 .....	117
5.4.6	氧—乙炔焰喷熔用粉末的特性 .....	121
5.4.7	氧—乙炔焰粉末喷熔应用实例 .....	123
第六章	电弧喷涂技术 .....	125
6.1	电弧喷涂原理及特点 .....	125
6.1.1	电弧喷涂原理 .....	125
6.1.2	电弧喷涂的主要特点 .....	126
6.2	电弧喷涂设备 .....	127
6.2.1	电弧喷涂电源 .....	127
6.2.2	送丝机构 .....	129
6.2.3	送丝软管 .....	131
6.2.4	电弧喷涂枪 .....	132
6.2.5	控制系统 .....	133
6.2.6	电弧喷涂设备维护与故障排除 .....	134
6.3	电弧喷涂工艺参数 .....	135
6.3.1	喷涂电压 .....	136
6.3.2	工作电流 .....	137
6.3.3	雾化空气 .....	138
6.3.4	喷涂距离 .....	139
6.4	电弧喷涂工艺 .....	140
6.4.1	表面预处理 .....	140
6.4.2	电弧喷涂层的材料选择 .....	141
6.4.3	喷涂 .....	141
6.4.4	后处理 .....	144
6.5	电弧喷涂的应用 .....	146
6.5.1	长效防腐涂层的应用 .....	146
6.5.2	机械零件修复与预保护 .....	147
6.5.3	工业锅炉受热管件耐高温腐蚀涂层的应用 .....	148
6.5.4	电弧喷涂快速制模技术 .....	148
第七章	等离子喷涂技术 .....	150
7.1	等离子喷涂的基本知识 .....	150
7.1.1	等离子弧的压缩效应 .....	150

7.1.2	等离子弧的类型 .....	151
7.1.3	等离子焰流的特性 .....	152
7.1.4	等离子焰流工作气体 .....	153
7.1.5	等离子喷涂的基本原理和特点 .....	154
7.1.6	等离子喷涂的主要工艺参数 .....	156
7.2	普通等离子喷涂 .....	157
7.2.1	普通等离子喷涂的特点 .....	158
7.2.2	普通等离子喷涂设备 .....	158
7.2.3	普通等离子喷涂工艺 .....	169
7.2.4	普通等离子喷涂应用实例 .....	171
7.3	低压等离子喷涂 .....	173
7.3.1	低压等离子喷涂特点 .....	173
7.3.2	低压等离子喷涂设备 .....	175
7.3.3	低压等离子喷涂的工艺 .....	178
7.4	超声速等离子喷涂 .....	179
7.4.1	超声速等离子喷涂的特点 .....	180
7.4.2	超声速等离子喷涂设备 .....	181
7.4.3	超声速等离子喷涂工艺 .....	185
7.4.4	超声速等离子喷涂应用实例 .....	188
7.5	水稳等离子喷涂 .....	189
7.6	三阴极等离子喷涂 .....	190
第八章	其它喷涂技术 .....	193
8.1	激光喷涂技术 .....	193
8.2	冷喷涂技术 .....	194
8.3	电热爆炸喷涂技术 .....	197
第九章	热喷涂涂层的机械加工 .....	199
9.1	热喷涂涂层机械加工的特点 .....	199
9.1.1	加工过程中冲击与振动大 .....	199
9.1.2	刀具容易崩刃和产生非正常磨损 .....	199
9.1.3	刀具耐用度低 .....	199
9.1.4	热喷涂涂层易剥落 .....	200
9.1.5	需冷却 .....	200
9.2	热喷涂涂层的车削加工 .....	200
9.2.1	刀具材料的选择 .....	200



9.2.2	刀具几何参数的选择 .....	205
9.2.3	车削切削用量的选择 .....	216
9.3	热喷涂涂层的磨削 .....	225
9.3.1	影响砂轮切削性能的因素及其选用 .....	225
9.3.2	磨削用量的选择 .....	227
9.3.3	国外部分热喷涂涂层的磨削规范 .....	228
9.4	热喷涂涂层的电解磨削 .....	231
9.4.1	电解磨削原理 .....	231
9.4.2	电解磨削的工艺特点 .....	231
9.4.3	电解磨削电解液的选择 .....	232
9.4.4	电解磨削用设备 .....	233
9.4.5	电解磨削的工艺参数 .....	235
9.5	热喷涂涂层的超声振动车削 .....	235
9.5.1	超声振动车削原理 .....	235
9.5.2	超声振动车削的装置 .....	236
9.5.3	超声振动车削热喷涂涂层的工艺参数 .....	237
9.5.4	超声振动车削热喷涂涂层实例 .....	241
第十章	热喷涂材料与涂层检测 .....	242
10.1	热喷涂粉末的性能检测 .....	242
10.1.1	热喷涂粉末粒度测试 .....	243
10.1.2	热喷涂粉末流动性能测试 .....	246
10.1.3	热喷涂粉末松装密度测量方法 .....	248
10.2	热喷涂涂层的性能检测 .....	249
10.2.1	测定涂层性能的目的 .....	250
10.2.2	涂层性能检测项目和分类 .....	250
10.2.3	热喷涂涂层常规性能检测 .....	252
10.2.4	涂层力学和机械性能检测 .....	259
10.2.5	涂层使用性能检测 .....	271
10.2.6	热喷涂涂层结构的金相检测 .....	279
第十一章	热喷涂的安全与防护 .....	286
11.1	安全技术 .....	286
11.1.1	防火防爆 .....	286
11.1.2	电器设备的防护 .....	287
11.1.3	机械设备的防护 .....	287

11.2 劳动防护 .....	287
11.2.1 劳动防护措施 .....	287
11.2.2 个人防护和卫生保健 .....	289
11.2.3 操作人员警示语 .....	289
附录 部分推荐厂商及其产品 .....	291
参考文献 .....	307

# 第一章 热喷涂技术概述

## 1.1 热喷涂技术的定义和分类

热喷涂技术是指利用某种热源将喷涂材料迅速加热到熔化或半熔化状态，再经过高速气流或焰流使其雾化，加速喷射在经预处理的零件表面上，使材料表面得到强化和改性，获得具有某种功能（如耐磨、防腐、抗高温等）表面的一种应用性很强的材料表层复合技术。

热喷涂方法通常可按热源性质进行分类和命名。常用的热喷涂方法可分为：火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂与其它喷涂方法等，热喷涂分类如图 1 - 1 所示。

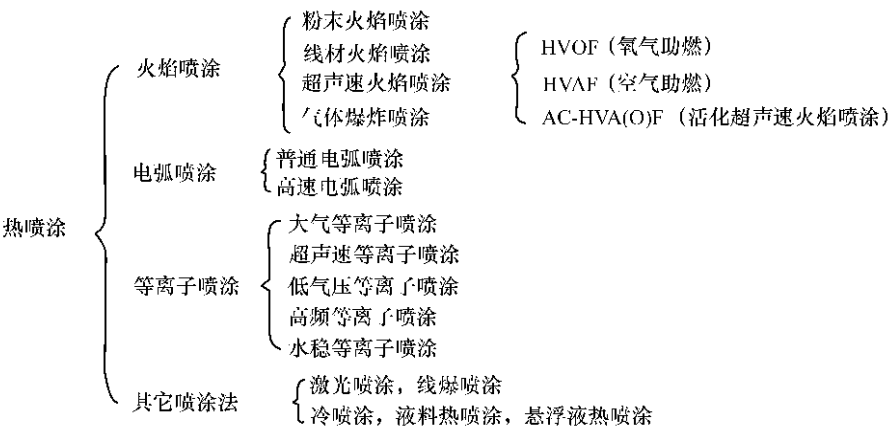


图 1 - 1 热喷涂方法分类

## 1.2 热喷涂技术的发展概况

热喷涂技术自 1910 年由瑞士的 M. U. Schoop 博士完成最初的金属熔液喷

涂装置以来,已有近百年的历史。最初,热喷涂主要用于喷涂装饰涂层,以氧—乙炔火焰或电弧喷涂铝线和锌线为主。20 世纪 30 年代—40 年代,随着火焰和电弧线材喷涂设备的完善及火焰粉末喷枪的出现,热喷涂技术从最初的喷涂装饰涂层发展为用钢丝修复机械零件,喷涂铝或锌作为钢铁结构的防腐蚀涂层。50 年代爆炸喷涂技术及随后等离子喷涂技术的开发成功,使热喷涂技术在航空航天等领域获得了广泛的应用。同一时期研制成功了自熔合金粉末,使通过涂层重熔工艺消除涂层中的气孔,与基体实现冶金结合成为可能,扩大了热喷涂技术的应用领域。80 年代初期开发成功超声速火焰喷涂技术,90 年代初期得到广泛应用,使 WC - Co 硬质合金涂层的应用从航空航天领域大幅度扩大到各种工业领域。功率高达 200kW 的高能等离子喷涂技术、超声速等离子喷涂技术及轴向送粉式等离子喷涂技术,尤其是高效能超声速等离子喷涂技术的出现,为在各个工业领域进一步有效地利用热喷涂技术提供了有力的手段。

自热喷涂技术进入实际应用以来,新的工艺方法以及新型结构喷枪的开发都对热喷涂技术的发展起到了巨大的推动作用。自 20 世纪 80 年代以来,热喷涂技术的新概念不断出现,新的技术不断涌现,与此同时,关于热喷涂技术的基础研究也越来越受到重视。

随着先进制造业和高新材料的发展,现代工业要求涂层更加致密、强度(内聚强度和结合强度)更高、可靠性更好,而涂层的致密性和结合强度很大程度上依赖于喷射熔滴的速度。因此,近年来提高热喷涂射流和粒子的速度已成为当前国际热喷涂技术发展的新趋势,相继出现了气体爆炸喷涂、超声速火焰喷涂、高速电弧喷涂及超声速等离子喷涂等技术,这些技术的共同特点是显著提高了喷涂粒子的速度,使涂层的孔隙率、结合强度都得到明显改善,这已成为国际热喷涂技术的最新发展趋势。

### 1.3 热喷涂涂层形成机理

热喷涂涂层的形成过程是将被喷涂材料(粉末、线材或棒材)送入由喷枪口喷射出的高温、高速火焰或等离子体射流中,使其迅速受热,以熔融或半熔融形态高速喷射到经预处理的基体材料表面,熔融粒子撞击基体时发生能量转换、变形、铺展、流散和润湿,并以约  $10^6 \text{K/s}$  的速度极快地冷却、凝固、堆积形成涂层。涂层形成过程如图 1 - 2 所示。

在形成涂层的过程中,单个熔融粒子为形成涂层的基本单位,其行为基本反映了涂层形成的特点。单个粒子的行为包括三个基本过程:先是喷涂材料送入热源的过程,接着是喷涂材料粒子与热源的相互作用过程,在热源作用下,喷涂

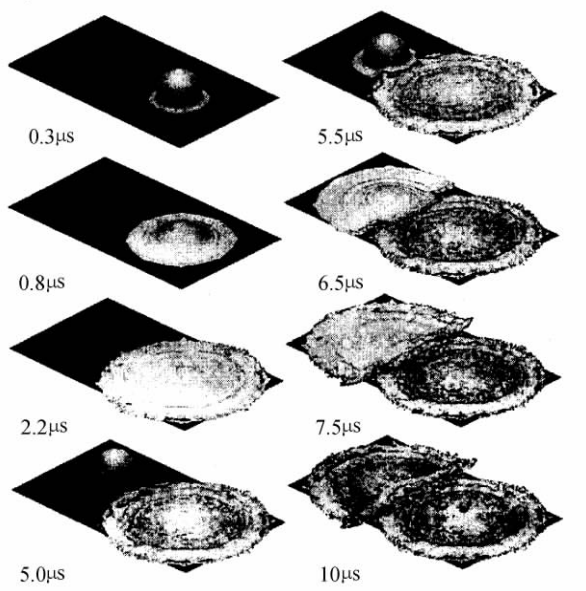


图 1 - 2 热喷涂涂层形成过程

材料被加热、熔化、加速 ,同时还发生高温高速粒子与环境气氛的作用过程 ,尤其对于金属材料 ,由于通常喷涂在大气气氛中进行 ,热源中空气的卷入 ,会导致喷涂粒子与气氛反应 ,如氧化等 ,最后是高温高速熔融粒子与基体(或已沉积形成的涂层)的作用 ,包括熔融粒子与基体的碰撞、横向流动扁平化和急速冷却凝固。整个过程是在数十微秒的极短时间内完成的。这些基本过程对所形成涂层的组织结构以及性能影响较大。对于给定的材料 ,描述高速粒子的参量一般主要包括粒子尺寸、形状、速度与温度 ,喷涂系统、工艺参数等 ,涂层结构与性能的影响主要通过这些参数来调整 and 实现。

一般只要具有熔融状态 ,能形成熔融态粒子或准熔融态粒子的材料 ,均可以通过热喷涂形成涂层。涂层的性能与涂层材料本身密切相关。选择合适的材料 ,可以获得具有优越的耐磨、耐蚀、耐热、绝热、耐辐射等性能的表面强化和防护涂层 ,也可获得使材料表面具有导电、绝缘、特殊光学、磁学、电学等性能的功能涂层。

## 1.4 热喷涂技术的特点

热喷涂特点很多,采用热喷涂技术制备各种表面强化和表面防护涂层,具有许多独特的优点。主要有以下几点:

(1) 涂层基体材料广泛。可制备涂层的基体除了金属材料,还有无机材料(玻璃、陶瓷、石膏等)和有机材料(包括木材、布、纸类)等。

(2) 能够喷涂的材料范围广,制备的涂层种类多。有熔点且熔点远低于沸点或拟熔融态的材料均可用于喷涂,包括各种金属及合金、陶瓷、金属陶瓷、金属间化合物、非金属矿物、塑料等几乎所有固态工程材料,此外,还能制成具有特殊性能的不同材料构成的复合涂层或叠加涂层,因而能够制备各种各样的保护涂层和功能涂层,如耐磨、减摩自润滑、可磨耗密封、摩阻、耐蚀、抗氧化、耐高温、热障、绝缘、导电、超导、辐射、防辐射、屏蔽、抗干扰、波长吸收、催化及生物功能等涂层。

(3) 沉积效率较高,特别适合沉积厚膜涂层。与电镀、化学镀、离子镀、气相沉积等技术相比,热喷涂的沉积效率、生产效率较高,且涂层厚度能够控制,可从几十微米到几毫米,甚至可厚达 20mm。

(4) 节约贵重材料,降低成本。在满足强度要求的前提下,制件基体可以用较普通材料代替贵重材料,仅涂层使用优质材料。

(5) 可喷涂成型。热喷涂技术不仅可在材料表面形成涂层,还可以用来制造机械零件实体,即喷涂成型。该方法是先在成型模表面形成涂层,然后采用合适的方法脱去成型模后而成为涂层成型制品。

(6) 一般不受工件尺寸和施工场所的限制。既可喷涂大型重型工件,又可喷涂小件、薄壁件,既可在工厂内施工,也可现场施工;可以在整体表面上进行喷涂,也可在大型构件的限定表面上进行喷涂。对大型构件的局部表面制备涂层,是既经济又方便的方法。

(7) 对基体材料的热影响小。与热扩散渗镀、气相沉积、高温合成、烧结等工艺相比,除喷熔外,热喷涂对基体的热影响最小,基体受热温度一般不超过 200℃,从而使母材的组织结构与性能不发生变化,工件的变形可以忽略,因此热喷涂也可称为一种“冷工艺”。

(8) 调整涂层成分比较容易。通过调整涂层材料的种类、配比及涂覆工艺等,能够比较容易地调整涂层成分和涂层性能。

热喷涂技术的局限:

(1) 热喷涂涂层耐高应力、冲击和重载性能较差。热喷涂涂层与基体的结

合主要为物理和机械结合,结合强度较低,一般低于 50MPa。但气体爆炸喷涂、超声速火焰喷涂、超声速等离子喷涂及超高速冷喷涂等先进工艺正使热喷涂涂层的结合强度得到相当大的提高,最高甚至可达 200MPa。

(2) 涂层的力学性能及耐蚀、抗氧化、绝缘等性能都比致密实体的同种材料要差。喷涂涂层含有不同程度的孔隙和夹杂,片层状涂层结构导致涂层的各向异性,这降低了涂层的力学性能及耐蚀、抗氧化、绝缘等性能。图 1-3 示出了热喷涂涂层与整体致密材料的性能比较。

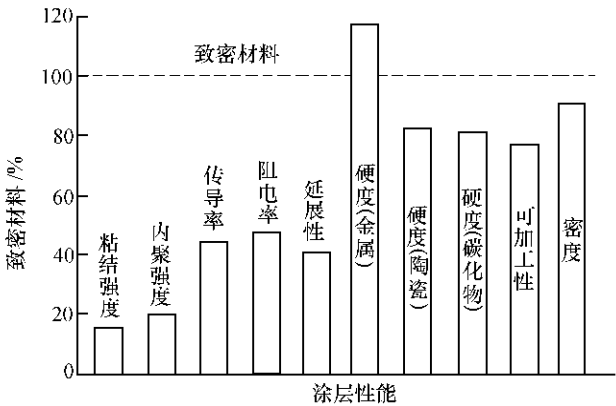


图 1-3 热喷涂涂层与整体致密材料的性能比较

孔隙的存在,虽然使热喷涂涂层在用于防腐蚀、绝缘、耐高温等工况时不利,但在用于气敏元件(如氧探测器)、可磨损密封、催化、生物功能等时,则可获得意想不到的成功。孔隙还是很好的储油结构,使涂层具有更好的减摩润滑性能。

(3) 热能利用率比较低,成本相对较高。占热喷涂技术主体地位的等离子喷涂,其热能却只有 10% ~ 20% 被用于熔化涂层材料;而等离子喷涂陶瓷涂层的沉积效率依据喷涂材料的不同,在 30% ~ 80% 间变化,特别是喷涂小件时,涂层材料的沉积率低。这些都使得热喷涂涂层的成本相对较高。

(4) 热喷涂粒子呈线性飞行的特性,难于在易遮蔽的凹腔、复杂型面、细长内孔、盲孔等部位喷涂合格涂层。

(5) 热喷涂工作环境较差,有噪声、粉尘、热和弧光辐射问题,必须采取相应的劳动保护与环境保护措施。但随着计算机控制技术、机器人技术等先进技术的应用,热喷涂操作和产业化生产已能完全自动化。

掌握喷涂技术的特点,再根据表面涂层产品的形状、尺寸精度及其所需表面性能、设备经费和运行费用、作业地点的环境条件等,来综合考虑是否采用热喷

涂方法 这样才能在保证涂层性能与质量的基础上获得热喷涂技术的最佳经济效益。

## 1.5 热喷涂技术的应用

热喷涂技术涉及面广、加工工艺相对简单灵活、应用范围广(表 1 - 1 列出了热喷涂技术的应用)、经济效益大的现代加工新技术,它可使表面具备耐磨、防腐、绝热、耐热、导电、绝缘、抗冲蚀、抗氧化、减摩、润滑、防辐射等功能,不但可以用于机械零部件的修复和表面强化,而且可以用于制造。由于喷涂材料的选择范围广,不受整体材料合金化的限制,可较方便地获得超硬合金、各种陶瓷或金属陶瓷涂层以及各种功能涂层,且涂层相对于整体高级材料而言材料用量少,比起整体提高材质无疑要经济得多,因此可大胆使用贵重材料,其成本不会增加很多,而材料的表面性能却能得到大幅提高,经热喷涂修复的零件,其使用寿命一般可以达到甚至数倍超过新品。某重负荷车辆多种修复件的实车考核表明,其使用寿命比新品提高了 1.4 倍 ~ 8.3 倍。



表 1 - 1 热喷涂技术的应用

领域	零 部 件	工艺 <sup>①</sup>	涂 层 用 途	涂 层 材 料
火箭技术	火箭头部和喷管	1	耐热、抗冲蚀	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ,W
宇宙飞行器	喷气推进弹体整流罩； 宇宙研究装置； 超短波天线	1 1 1	绝热； 防粘连、绝热、热辐射性能； 绝热、绝缘	ZrO <sub>2</sub> ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ,W 金属及氧化物、碳化物等； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
航  空	喷气发动机涡轮和压气机； 叶片； 燃气涡轮叶片； 燃烧室内衬； 起落架轴颈； 机翼和机身承力结构； 前整流舱； 机匣	1 1 2 1 1 1 1 1 1	耐冲蚀； 耐热； 耐热； 耐热； 耐热； 耐磨； 强度、刚度； 滑动、封严； 耐磨、润滑减摩、封严	Co - WC ,TiC ,Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Ni - Al ,Ni - Cr - B - Si ； Ni - Al ,Al ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Co - Cr - Al - Y ,MgAlO <sub>2</sub> ； 硬质碳化物及其合金； 纤维增强复合材料； 聚苯脂 - 硅铝； 镍包石墨 ,镍包硅藻土
机  械  制  造	压铸模具； 可拆卸的和不可拆卸的压膜；  难熔金属挤压模具； 轧机； 高频感应圈； 大型零件(例如涡轮)； 铸件的半永久性模具、机床导轨； 管状金属结构； 烧结舟； 切削和磨削工具 ,其中包括精磨；   量具；	1 1 2  1 1 1 1 1 2 1 1 1  1	耐热； 耐热和防止粘合、耐磨；  绝热； 防止粘合； 电绝缘； 耐热； 耐磨； 绝热； 防止粘合； 耐久性、精确度；	Cr - Ni 合金； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,Ni - Al ； Ni - Cr - B - Si ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Mo ,Ni - Cr - B - Si 等； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ； 硬质合金 ,金刚石 ,碳化物等；   碳化物；

(续)

领域	零 部 件	工艺 <sup>①</sup>	涂 层 用 途	涂 层 材 料
机 械 制 造	阀体和蝶板；	2	防腐；	Al；
	通用阀门密封面；	1 3	耐磨；	镍基、铁基、自熔性合金；
	铰犁；	3	耐磨；	高铬铸铁合金；
	挖泥船驳头；	3	耐磨；	镍基合金；
	混砂机刮板；	3	耐磨；	镍基合金；
	螺旋送粉杆；	3	耐磨；	铁基合金；
	轴、曲轴修复；	1 2 4	耐磨；	镍基合金 高碳钢；
	剪刀片；	3	耐磨；	铁基合金；
	离合器锥体；	1 2	耐磨；	Mo；
	离合器推板；	3	耐磨；	镍基合金；
	齿轮、凸轮；	3	耐磨；	铁基合金、镍基合金；
	冷拔钢管内膜；	3	耐磨；	铁基合金、镍基合金；
	热切边模具；	3	耐磨；	钴基合金；
	冲头；	1	耐磨；	Mo；
	陶瓷钎焊处的金属涂层	1	达到陶瓷和金属牢固结合	Mo
动 力 (包 括 原 子 能)	输电铁塔；	2 4	防腐；	Zn ,Al；
	大型水闸门；	2 4	防腐；	Zn ,Al；
	MHD 通道和零件；	1	电绝缘；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,MgO - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ；
	燃料电池；	1	热强；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ；
	排烟风机叶片；	1	耐磨；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,Ni - Al；
	粉状燃料燃烧嘴；	1	耐热；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ；
	核反应堆铀芯和导热元件的 内外表面；	1	改善热交换和防止 CO <sub>2</sub> 对铀 的腐蚀；	有铝底层的镁合金；
	反应堆零件 ,其中包括石墨 零件控制设备的传感器(压 力传感器)	1 1	防止粘合、绝热； 电绝缘	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ； Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
冶 金	高炉节气管；	1	高温下的热强和耐磨；	Al ,Ni - Al ,ZrO <sub>2</sub> ；
	高炉风口、渣口；	1	高温下的热强和耐磨；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,Ni - Al ,ZrO <sub>2</sub> ；
	薄钢板转炉防护罩；	1	抗金属溅射 ,炽热气体冲蚀；	一层 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 一层 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ；
	平炉炉顶耐火材料；	1	耐久性；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ；
	炼锌用搅拌机；	1	耐热防止铁锌反应；	Ni - Al ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ；
	电锯盘；	1	电绝缘；	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ；
	熔炼钎和铀的石墨坩锅；	1	防止炭沾污熔融金属；	锆酸镁；
	熔炼半导体材料硅；	1	减少杂质含量；	Mo；
	镍矿浸析压力锅	1	防腐、耐磨	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 浸渗聚合物
化 工	冷凝器零件；	1	耐腐蚀	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 浸渗聚合物
	容器、管道及其它装置；	1	耐腐蚀	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 浸渗聚合物
	碳化塔；	2	耐腐蚀	Al 浸渗聚合物
	柱塞阀门密封面；	1 3	防腐、耐磨	镍基合金
	通风机桨片；	1	防硫酸蒸气腐蚀	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	液泵叶轮耐磨环	1	防腐、耐磨	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

(续)

领域	零 部 件	工艺 <sup>①</sup>	涂 层 用 途	涂 层 材 料
石油 煤炭	水力采煤钻孔泵工作轮衬套和其它零件；	1	防腐、耐磨	粗粒 WC + Cr - Ni ,Cr - B - Ni - Si
	土壤加工机械工具、电铲和传送带；	1	耐磨、防腐	硬质合金
	裂化装置泵；	3	耐磨、防腐	镍基合金
	钻杆接头；	3	耐磨	高铬铸铁合金
	采煤机镐形截齿；	3	耐磨	高铬铸铁合金
	刮板输送机中部槽板；	3	耐磨	高铬铸铁合金
	固液泵叶轮	3	耐磨	高铬铸铁合金
轻工	造纸烘缸；	2 4	防腐	不锈钢 ,铜合金
	烘烤元件；	1	增加红外辐射	TiO <sub>2</sub> ,ZrO <sub>2</sub> 等
	玻璃模具	3	耐磨	镍基合金
交通 运输 铁道	铁路桥梁；	2 4	防腐	Zn ,Al
	内燃机排气阀；	3	耐磨	钴基合金等
	活塞端部和燃烧室表面；	1	绝热、耐热(触媒作用)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,Al - Ni
	发动机汽缸；	1	耐磨	钢
	活塞环	1 2	耐磨	Mo
纺织	纤维导管；	1	耐磨	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>
	细纱机成型凸轮；	1	耐磨	镍基合金
	精纺机前分离罗拉	1	耐磨	Ni - Al ,镍基合金
电子 无线 电和 仪器 制造	热电子发电的极板和电子源、离子源；	1	增强发射	LaB <sub>3</sub>
	逻辑和记忆装置的固体电路超高频设备等；	1	电路中的电绝缘磁性及其它性能电联结、电绝缘	电绝缘材料 ,半导体材料 ,铁氧体材料和金属
	固定电容和可变电容；	1		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	带有正负电阻温度系数的热敏电阻	1		BeTiO <sub>3</sub>
材料 科学	纤维增强复合材料	1	制备材料基体	金属和合金
建筑	建筑物的内部和外部修饰	1 2 4	装饰和防护	金属和氧化物
水利	水闸门起闭杆等	4	防腐耐磨	不锈钢、Al、Zn
注 1—等离子喷涂 2—火焰喷涂 3—喷熔 4—电弧喷涂				

## 第二章 热喷涂材料

### 2.1 热喷涂材料分类和要求

热喷涂材料分类方法很多,根据材料性质可分为金属与合金、氧化物陶瓷、金属陶瓷复合材料、有机高分子材料等;按照使用性能与目的又可分为防腐材料、耐磨材料、耐高温热障材料、减摩材料以及其它功能材料;按材料形态来分,可以分为线材、棒材和粉末三大类,见表 2 - 1、表 2 - 2。

表 2 - 1 热喷涂线材和棒材

类别	材 料 品 种
金属线材	Zn、Al、Cu、Ni、Mo、Sn、Ti、Ti - Ni、Ti - 6Al - 4V、Zn - Al、Al - Re、Cu - Zn、Cu - Al、Cu - Ni、Cu - Sn、Pb - Sn、Pb - Sn - Sb(巴氏合金); Fe - Cr、不锈钢、Fe - Cr - Al; Ni - Cr - Al、Ni - Cr - Fe、Ni - Cu - Fe(蒙乃尔合金)
棒材	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、TO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> 、SiO <sub>2</sub> 、ZrO <sub>2</sub>
复合线材	铝包镍、镍包铝、金属包碳化物、金属包氧化物、塑料包金属、塑料包陶瓷、金属有机物复合软丝

表 2 - 2 热喷涂粉末材料

类别	分 类	品 种
金属	纯金属	Sn、Pb、Zn、Al、Cu、Ni、W、Mo、Ti 等
	合金	(1) Ni 基合金 :Ni - Cr、Ni、Ni - Cu、Ni - Al、NiCrAlY; (2) Co 基合金 :CoCrW、CoCrMoSi、CoCrAlY; (3) Fe 基合金 :Fe - Ni、FeCrBSi、FeCrAlY; (4) 不锈钢;(5)铁合金;(6)铜合金;(7)铝合金; (5) 巴氏合金;(9)Triballoy 合金
	自熔合金	(1) Ni 基自熔合金 :NiCrBSi、NiBSi、NiCrBSi + 复合碳化物; (2) Co 基自熔合金 :CoCrWB、CoCrBSi、CoCrWBNi; (3) Fe 基自熔合金 :FeNiCrBSi;(4)Cu 基自熔剂合金

(续)

类别	分 类	品 种
陶瓷	金属氧化物	(1) Al 系 : $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ ; (2) Ti 系 : $\text{TiO}_2$ ; (3) Zr 系 : $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ 、 $\text{CaO} - \text{ZrO}_2$ 、 $\text{MgO} - \text{ZrO}_2$ ; (4) Cr 系 : $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ ; (5) 其它氧化物 : $\text{BeO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$
	金属碳化物及 硼氮硅化物	(1) $\text{WC}$ 、 $\text{W}_2\text{C}$ ;(2) $\text{TiC}$ ;(3) $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 和 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ; (4) $\text{B}_4\text{C}$ 、 $\text{SiC}$ ;(5) $\text{VC}$
复 合 物	包覆粉(液相沉 积,气相沉积, 电化学沉积)	(1) Ni 包 Al ;(2) Ni 包金属及合金 ; (3) Ni 包陶瓷 ;(4) Ni 包有机材料
	团聚粉(包覆团 聚,球磨预合金, 喷雾干燥等)	(1) 金属 + 合金 ;(2) 金属 + 自熔剂合金 ;(3) $\text{WC}$ 或 $\text{WC} - \text{Co}$ + 金属及合金 ; (4) $\text{WC}$ 或 $\text{WC} - \text{Co}$ + 自熔合金 + 包覆粉 ;(5) 氧化物 + 金属及合金 ;(6) 氧 化物 + 包覆粉 ;(7) 氧化物 + 氧化物
	熔炼粉及烧结粉	碳化物 + 自熔合金 , $\text{WC} - \text{Co}$
	机械混合	Ni/Al + 陶瓷、Ni/Al + 合金粉
塑料		(1) 热塑性粉末 :聚乙烯、尼龙、聚苯硫醚 ;(2) 热固性粉末 :环氧树脂

对于粉末材料,基于送粉特性及经济性考虑,其颗粒大小一般具有一定的粒度分布范围。一般金属粉末的粒度范围为  $105\mu\text{m}$ (150 目) ~  $53\mu\text{m}$ (270 目),记作 - 150 目 + 270 目(或 -  $105\mu\text{m}$  +  $53\mu\text{m}$ ),而陶瓷粉末常为  $45\mu\text{m}$ (325 目) ~  $10\mu\text{m}$ (400 目),记作 - 325 目 + 400 目(或 -  $44\mu\text{m}$  +  $10\mu\text{m}$ )。另外,不同的工艺方法对喷涂粉末粒度的要求也不同,如:超声速火焰喷涂要求粉末的粒度为 - 400 目( -  $10\mu\text{m}$ ), - 500 目粉末含量低于 1%,高效能超声速等离子喷涂材料的粉末应在 - 325 目 + 400 目( $44\mu\text{m}$  ~  $10\mu\text{m}$ )。

热喷涂材料在热喷涂过程中承受高温,且是在空气中飞行,随后以高速撞击工件表面产生形变,淬冷后形成叠层,涂层在冷却收缩时会产生应力,因此热喷涂材料除了应满足使用性能的要求外,还应满足喷涂工艺性能的要求。

(1) 具有良好的使用性能。所选用的热喷涂材料必须能满足零部件表面工况要求,如具有耐磨、耐蚀、耐高温、抗氧化、导电、绝缘等使用性能。

(2) 具有良好的化学稳定性和热稳定性。热喷涂材料在喷涂过程中承受高温,应具有化学稳定性和热稳定性,即在高温下不挥发、不升华、不发生有害的化学反应和晶型转变,以保持原材料的优良性能。

(3) 具有与工件材料相接近的热膨胀系数、热导率。这样可以减少涂层在冷凝过程中的热收缩应力。

(4) 粉末材料还应具有良好的固态流动性,以保证均匀平稳送粉。松装密

度、粉末的形状、粒度分布、表面状态及粉末的干燥程度等都是影响粉末流动性的重要因素。球形粉末流动性最好,粉末越潮湿,流动性越差,超细粉末或非球形粉末应使用特殊送粉器,才能保证均匀连续送粉。

(5) 线材要能满足均匀送丝的要求。应具有一定的强度、径值均匀(误差为 $+0.0\text{mm}$ 、 $-0.1\text{mm}$ )、表面清洁无污染。

(6) 具有良好的润湿性。材料的润湿性与表面张力有关。表面张力愈小,润湿角愈小,液态流动性愈好,易得到平整光滑的涂层,同时也使得涂层与基体接触紧密,有利于提高涂层和基体间的结合强度和涂层本身的致密性,这种性能对于重熔工艺更为重要。

## 2.2 热喷涂线材

热喷涂线材是应用最早的热喷涂材料,传统的热喷涂线材是可拉拔成丝状的金属材料,近些年随着复合丝、管状粉芯丝材及塑料包套的柔性喷涂丝的开发,热喷涂线材从单一的金属丝、合金丝发展成为金属陶瓷、陶瓷等类型。线材热喷涂具有喷涂速率高、成本低、设备简单、操作方便等特点,广泛用于喷涂各种大型户外钢结构的长效防腐涂层和机械零部件的耐磨、耐蚀和尺寸恢复涂层。

热喷涂用的普通线材是用拉丝机通过冷拔拉丝制造的,因此,一般主要适用于具有一定塑性的金属材料。常用的喷涂线材有锌丝、铝丝、铝锌合金丝、钢丝、铜丝、镍铬丝与钼丝等。丝材表面可能存在拉丝时涂覆的润滑剂,使用时需要进行脱脂处理。

### 2.2.1 锌、铝、锌铝合金及低熔点合金丝

热喷涂用的锌,原材料要求纯度高。用于防腐时要求含锌 $99.995\%$ 以上,含铁在 $0.001\%$ 以下。作为线材含锌至少 $99.9\%$ 以上,含铜在 $0.05\%$ 以下,为了防止喷涂中断丝,要求拉伸强度大于 $147\text{MPa}$ 、延伸率大于 $40\%$ 。锌丝纯度越高,喷涂粒子越细小,涂层越致密。

锌在干燥大气中基本不发生氧化,在潮湿气氛或有二氧化碳存在时,会在表面形成碱基碳酸亚锌( $2\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn}(\text{OH})_2$ )、氧化亚锌( $\text{ZnO}$ )、氢氧化亚锌( $\text{Zn}(\text{OH})_2$ )。这些化合物将形成防腐膜,膜的致密性及耐久性决定其防腐性能。其次,锌比铁的电化学电位低,与铁接触时具有牺牲阳极保护作用。但锌在二氧化硫等氧化物存在的大气中,不具备耐腐蚀性能。锌在常温下,pH值为 $6 \sim 12$ 的水中具有较好的防腐作用,在中性水中耐腐蚀性比铝稍差,在酸性或强碱环境

中耐腐蚀性很差。水温低于 50 时 ,才能具有良好的防腐性能 ,当水温达到 60 以上时 ,腐蚀会显著加剧。

铝的耐腐蚀性受其中杂质的影响显著 ,主要的杂质元素包括硅、铁、铜等 ,喷涂用铝丝的纯度一般要求 99.7% 以上。使用硬质的铝丝有利于粒子的细化与均匀送丝。铝在大气中可形成致密的氧化铝保护膜 ,可防止腐蚀的发生。与铁相比 ,铝电化学电位低 ,具有电化学保护效应。在亚硫酸含量较高的大气中或海洋性气氛中 ,耐腐蚀性比锌优越 ,在 60 以上的温水中也具有防腐效果。但是不耐强酸或强碱的腐蚀 ,在有卤离子存在的情况下易发生孔蚀。因此 ,与锌类似 ,铝广泛用于钢铁结构件的防腐喷涂。

另一方面 ,喷铝钢材在低于约 500 高温下使用时 ,表面铝的氧化会生成致密的氧化铝膜 ,可以阻止氧向内的扩散 ,呈现优越的抗氧化性。在 500 以上使用时 ,表面的铝会向铁基体内部扩散 ,形成耐氧化性优越的 Fe - Al 合金 ,可显著提高钢材的耐热性。

锌和铝组成合金涂层 ,在一定场合具有比单独的锌或铝更好的耐蚀性。常用的锌铝合金的锌铝比有 95: 5 与 70: 30 两种。锌铝合金的电位接近锌 ,因此 ,对于钢铁结构具有电化学保护作用。盐雾试验表明锌铝合金涂层的耐蚀性优于单纯的锌或铝涂层。

总之 ,喷涂以锌、铝、锡、铅为主要成分的合金丝 ,主要目的是利用其对钢铁良好的保护作用 ,使暴露于大气、淡水环境中的钢铁结构件形成长效防腐涂层。其材料的各种性能见表 2 - 3。

表 2 - 3 锌、铝、锌铝合金及低熔点合金材料性能

材料名称	牌号	熔点 /	主要化学成分 (质量分数) /%	涂层物理性能	涂层的特性	主要应用
纯 锌 丝	Zn - 1	419	Zn≥99.99 Pb0.003 Fe0.003 Cd0.003	标准电极电位 - 0.763V ,有良好的导电性 ,导电率 16.7s/mm <sup>2</sup> ,对电磁波有相当高的反射率 ,涂层与水泥、石膏、木材、塑料有高的粘附能力	涂层与钢基体的结合强度约为 6MPa ,孔隙率约为 8% ~ 10% ,涂层厚度大于 0.3mm ,涂层基本无贯通针孔。锌中含杂质质量越低 ,涂层的耐蚀性越好。 注意 :热喷涂锌时 ,烟雾、粉尘有毒 ,需防护	主要用于 pH 值为 6 ~ 12 的环境中的钢结构长效防护 ,如大气、淡水中的水闸门、铁塔 ,喷涂 0.3mm 的锌涂层外加有机涂装 ,对钢铁的有效保护期已长达 25 年。 用作电磁波干扰屏蔽涂层时能提供 60dB ~ 120dB 的高能衰减屏蔽效应。 可用作非金属基体上喷涂层的过渡底涂层
	Zn - 2		Zn≥99.90 Pb0.03 Fe0.02 Cd0.02			

(续)

材料名称	牌号	熔点 /	主要化学成分 (质量分数) / %	涂层物理性能	涂层的特性	主要应用
纯铝丝	LG <sub>1</sub> L <sub>1</sub>	660	Al ≥ 99.85 Al ≥ 99.7	标准电位 - 1.662V, 密度 2.70g/cm <sup>3</sup> , 面心立方晶体结构铝与空气中氧的亲合力极高, 能在表面形成坚固的致密氧化膜涂层, 与钢表面结合强度应达到 10MPa, 致密度应达到 2.45g/cm <sup>3</sup> 。厚度小于 160μm 时应进行封孔处理和表面涂装	铝的耐蚀性取决于氧化膜在介质中的化学稳定性, 在各种气体、海水、硝酸中有很高的耐蚀性。铝丝中铜、铁和硅等杂质, 会降低铝的耐蚀性。 注意: 铝粉尘聚集能引起的燃烧、爆炸事故	用于含 SO <sub>2</sub> 的大气、淡水、海水及 pH4.5 ~ 8.5 的溶液及其它氧化性环境中的耐蚀涂层。 铝涂层表面有较大的摩擦系数, 可用作钢结构强力螺栓连接处的摩擦阻力涂层和舰船甲板的防滑涂层。 碳钢表面喷铝涂层、加高温涂料封孔处理后, 经高温扩散处理, 提高碳钢的高温抗氧化性能
锌铝合金丝	ZnAl15	352 ~ 450	Al14 ~ 16 Mg0.02 ~ 0.04Zn 余量	这种涂层既有锌涂层的阳极保护效果, 又有对点蚀和裂纹不敏感的特点和耐环境腐蚀的优点	涂层呈银白色, 熔点因锌铝含量比例不同而有差异	主要用于户外钢结构的长效保护
铝-硅合金丝	LT <sub>1</sub>	621	Si4.5 ~ 6.0 Fe0.6 杂质总量 0.9 铝余量	火焰喷涂层的宏观硬度 96HB	这种合金具有自熔性, 涂层颗粒小, 致密, 硬度高于纯铝涂层, 但耐蚀性低于纯铝涂层	适用于喷涂机械零件, 修复磨损的铝部件和修补铝铸件的砂眼。 用于含盐气氛中的耐蚀涂层。 玻璃上的热反射和光反射涂层
锡丝	Sn - 1 Sn - 2	232	Sn ≥ 99.9 Sn ≥ 99.8	涂层呈白色, 硬度为 10HB	涂层非常容易粘附于石膏和玻璃表面。 注意: 热喷涂时, 应严格控制火焰的能量, 否则会造成锡烧损严重, 并产生大量有害烟雾	用作食品容器的耐蚀涂层。 非金属表面热喷涂时的粘附底层
锡-锌合金丝	70Sn/ 30Zn	270 ~ 325	Sn70 Zn30	涂层致密、晶粒细小, 几乎无孔隙, 硬度 (30 ~ 40) HB		主要用在电子元器件表面的焊接导线涂层



(续)

材料名称	牌号	熔点 /	主要化学成分 (质量分数) / %	涂层物理性能	涂层的特性	主要应用
锡基巴氏合金丝	CH - A10	约 354	Sb7. 5、Cu3. 5 Pb0. 25、Sn 余量	涂层致密	火焰喷涂层有良好的吸附油膜和储油能力,摩擦系数小,导热性好,有良好的相容性和嵌入性	特别适合高速低负荷轴承、制备滑动轴承涂层和压缩机、鼓风机、汽轮机、船用内燃机轴瓦的修复
铅丝	Pb - 1 Pb - 2	328	Pb≥99. 994 Pb≥99. 99	具有良好的防 X 射线等辐射的能力	特别耐硫酸腐蚀,也耐盐酸、磷酸、铬酸和氢氟酸腐蚀,不耐硝酸	主要用作耐蚀涂层
铅基巴氏合金丝	PbSb6		Sb5. 5 ~ 5. 6 Pb 余量	注意:含铅的材料,烟雾极其有毒,需认真防护		主要用作低速,低负荷或静载下工作的轴承涂层

2.2.2 铁基合金丝

铁基合金丝主要分为碳素钢丝和不锈钢丝两种。碳素钢丝一般用于磨损件的修复和喷涂机械零部件的耐磨涂层。不锈钢种类较多,且各自都有其独特的性能,需要在充分了解的基础上,选择合适的材料。各种铁基合金丝的性能见表 2 - 4。

表 2 - 4 铁基合金丝的性能

材料	牌 号	熔点 /	化学成分 (质量分数) / %	其它物理性能	涂 层 特 性	适 用 范 围
低碳钢丝	GB343—88 GB344—88	1500 ~ 1520	CO. 09 ~ 0. 15 Si0. 12 ~ 0. 3 Mn0. 25 ~ 0. 5 P≤0. 045 S≤0. 055	硬度 (140 ~ 200) HB 线膨胀系数 (100 ) (10 <sup>-6</sup> /K) 12. 19	其涂层易于切削加工,价格低,比同类材质的整体低碳钢制件的耐磨性好。 注意:涂层厚度大于 0. 75mm 时,工件表面需开沟槽	用于滑动磨损部件及轴承面、超差件修复,铸件孔隙填补
中碳钢丝	GB345—88 45 <sup>#</sup>	1490	CO. 42 ~ 0. 50 Si0. 17 ~ 0. 37 Mn0. 5 ~ 0. 8 P≤0. 004 S≤0. 04	硬度 (200 ~ 280) HB 线膨胀系数 11. 2(10 <sup>-6</sup> /K)	喷涂层比相同硬度值的中碳钢部件有更好的抗粘差磨损能力,涂层厚度不受限制	用于轴类零件的喷涂和修复,内孔表面喷涂

(续)

材料	牌 号	熔点 /	化学成分 (质量分数)/%	其它物理性能	涂 层 特 性	适 用 范 围
高碳 钢丝	GB543—88 80 <sup>#</sup>	1420	C0.77~0.85 Si0.17~0.37 Mn0.5~0.8 Ni≤0.25 Cu≤0.25 P≤0.040	硬度 >280HB 线膨胀系数 11.11(10 <sup>-6</sup> /K)	涂层硬度相当高,耐磨性好,最好采用磨削加工	用于各种轴类零件喷涂耐磨涂层,如曲轴轴颈、缸套等
碳素 工具 钢丝	YB543—88			硬度 >500HB	涂层有很高硬度,比高碳钢丝涂层有更好的耐磨性,其粘聚强度亦比高碳钢涂层高	用于制备高耐磨涂层,如泥浆泵柱塞、石油钻机柱塞
高碳 铬轴 承钢 丝	YB245—88 GCr15		C0.95~1.05 Si0.15~0.35 Mn0.2~0.4 P≤0.027 S≤0.02 Cr1.3~1.65 Ni≤0.3 Fe 余	实体硬度 63HRC	特性与碳素工具钢丝涂层相似,其涂层的韧性、硬度略高于前者,机械加工最好采用磨削	主要用于喷涂表面硬化耐磨涂层
高碳 高铬 不锈钢 丝	GB4240—88 2Cr13	1450 ~ 1510	C0.16~0.24 Mn≤0.6 Cr≤12~14 Si≤0.6 Fe 余	硬度 33HRC 线膨胀系数 11.0(10 <sup>-6</sup> /K)	涂层组织为马氏体,具有较高的硬度和耐磨性,涂层收缩性小,能够喷涂厚涂层,可以切削加工	主要用于喷涂耐磨耐蚀硬面涂层
18 - 8 型 奥氏 体不 锈钢 丝	GB4240—88 1Cr18Ni9Ti	1370 ~ 1400	C≤0.03 Si≤1.0 Mn≤2.0 P≤0.035 S≤0.030 Cr17~19 Ni8~11 Ti0.8 Fe 余		涂层组织主要为奥氏体,在多数腐蚀性较强的介质中有化学稳定性,但耐磨性一般,喷涂层收缩性大,易开裂,作耐蚀涂层需进行封孔处理	主要用于喷涂耐蚀涂层
低碳 高锰 奥氏 体不 锈钢	GB4240—88 1Cr18Mn8Ni5N	1400 ~ 1450	C≤0.1 Si≤1.0 Mn7.5~10 P≤0.08 S≤0.03 Cr17~19 Ni4~6 No.15~0.25 Fe 余		性能同上,但涂层硬度提高,耐蚀性和收缩性减小,涂层不易开裂	主要用于耐蚀且有一定耐磨的场合

2.2.3 铜与铜合金丝

铜与铜合金耐腐蚀性优越,铜不受碱的侵蚀(氨除外),在磷酸和氢氟酸中呈惰性,电导率与热传导率高,易于加工成型。作为喷涂材料,常用于喷涂电气元件的导电层、美术工艺品的装饰层和轴承的减摩层,各类铜合金的性能见表2-5。

表 2 - 5 铜及铜合金材料性能

材料	牌 号	熔点 /	化学成分 /%	其它物理性能	涂 层 特 性	适 用 范 围
紫铜丝	GB3109—88 T1 T2	1083	Cu≥99.95 Cu≥99.9	硬度 96HB	由于氧化作用,涂层韧性会下降,厚涂层需控制涂层温度	导电、导热和装饰涂层
黄铜丝	GB3110—88 HSn62 - 1	940	Cu67 Zn33	硬度(110 ~ 140)HRB 电导率 $15.66 \times 10^6$ (S/m)	喷涂时沉积效率高,涂层致密且较硬,但喷涂时易发生锌烧损现象,同时烟雾有毒,需防护	喷涂修复黄铜铸件的砂眼以及耐海水腐蚀部件等
铝青铜丝	QA19 - 2		Al8 ~ 10 Mn1.5 ~ 2.5 Fe≤0.5 Zn≤1.0 Sn≤0.1 Pb≤0.03 P≤0.01 杂质≤1.7 Cu 余		喷涂时,雾化颗粒较粗大,但涂层致密,容易加工,电弧喷涂时,涂层表现出自粘结性能	适用于各种青铜工件的喷涂,也可以做铜基体上的过渡层
锡青铜丝	GB3124—88 QSn4 - 3		Sn3.5 - 4.5 P < 0.03 Zn2.7 - 3.3 Fe < 0.06 杂质 < 0.2 ,Cu 余		涂层有较高的力学性能、减摩性能和耐蚀性,无磁性	用于喷涂各种青铜件及轴承涂层,如:衬套、轴套、抗磁元件
磷青铜丝	GB3124—88 QSn7 - 0.2		Sn6 ~ 8 P0.1 ~ 0.25 杂质 < 0.15 Cu 余量		涂层呈淡黄色,在大气、淡水和海水中耐蚀,易于焊接和钎焊,碰击时无火花	用于需要一定耐粘着磨损性能、负荷承载能力高的滑动轴承、轴套等场合,也用作装饰涂层

2.2.4 镍与镍合金丝

镍在空气中加热到 500 以下基本不氧化,即使加热到 1000 氧化程度也

不严重,但长期加热,氧化物沿晶界生长,将导致脆化。因为镍具有一定的硬度且耐腐蚀性优越,所以镍丝一般用于制备防冲蚀、泵柱塞轴或装饰涂层,也用于机械零件的堆焊。

镍铬合金抗氧化性、耐腐蚀性优越,代表性的材料为 Ni80 - Cr20,主要用于制备耐热涂层;镍—铬—钛合金具有优异的抗高温燃气冲蚀性能;镍—铜合金(即“蒙乃尔”合金)具有很好的耐蚀性能,特别是具有耐氟化氢和海水腐蚀的性能。镍及其合金丝的性能详见表 2 - 6。

表 2 - 6 镍及其合金材料性能

材料	牌 号	熔点 /	主要化学成分 (质量分数) / %	其它物理性能	涂 层 特 性	适 用 范 围
纯 镍 丝	GB3120—88 N6	1453	Ni + 99.5 C ≤ 0.1、Si ≤ 0.1 Fe ≤ 0.1、S ≤ 0.05 Cu ≤ 0.06	密度 8.9 (g/cm <sup>3</sup> ) 宏观硬度 58HRB	有一定硬度和耐蚀性,在水、还原性酸、还原性气氛和各种化学药品中有很强的耐蚀性,镍溶于硝酸和王水,并能缓溶于盐酸、硫酸。360℃以下有磁性	主要用作耐腐蚀涂层,如泵活塞、旋转轴、密封环等
镍 铬 耐 热 合 金 丝	GB3120—88	1420	Ni77 ~ 79 Cr19 ~ 21 杂质 Fe、Mn、S、C、Si ≤ 4	电阻率 (20℃) 180 (μΩ · cm)	合金组织为 Ni、Cr 奥氏体固溶体,在高温有优良的抗起皮、抗氧化性能、耐酸碱,但不耐含硫酸气氛的燃烧废气,易受盐酸、醋酸 的侵蚀	在高达 1200℃氧化性气氛中抗氧化,用作低碳钢、低合金钢基体在 980℃以下的抗热抗氧化涂层,用作耐高温陶瓷涂层的粘结底层
镍 铜 合 金 丝	GB3113—80 NCu28 - 2.5 - 1.5	1300 ~ 1350	Cu29, Fe0.9 Al < 0.5, Mn1.1, CO.1, Si0.05, SO.35		这种合金有优良的耐蚀性。耐非氧化性酸的腐蚀,对氢氟酸的耐蚀性非常好,耐热碱。不耐氧化性酸、熔盐、含硫高温气体的腐蚀。在锡盐、汞盐中腐蚀迅速	用于腐蚀环境中使用的机械零件的耐蚀涂层,如海洋环境用的各种泵的柱塞杆、轴、氢氟酸环境用轴类

(续)

材料	牌 号	熔点 /	主要化学成分 (质量分数)/%	其它物理性能	涂 层 特 性	适 用 范 围
镍 铬 钛 合 金 丝	TAFALLOY 45CT(美)		Cr43.0 Ti < 4.0 Fe < 0.1 Ni 余		喷涂层与钢管基 体能形成牢固的结 合,热膨胀率与碳 钢接近,韧性好,不 易产生裂纹和剥 离,在 400 ~ 800 具有优异的 抗硫化物、高温燃 气腐蚀性	主要用于锅炉 管道的耐热、抗含 硫燃气腐蚀的涂 层
镍 铬 铝 合 金 丝			Cr15 ~ 17 Al5 ~ 7 Ni 余	涂层显微硬度 (58 ~ 62)HRA	涂层具有自粘结 性能,有优良的抗 高温氧化、耐燃气 侵蚀性能,使用温 度可达 1000	直接用作抗高 温氧化和燃气侵 蚀的高温保护涂 层
镍 铬 铁 合 金 丝	GB1234—88 Cr15Ni60	≈ 1425	Ni60 Cr15 Fe 余		这是一种耐热, 耐腐蚀性能优良的 电热丝,在 1066 温度以下良好的 抗氧化性能,在 含硫量较小的腐 蚀气体中,能保护 钢铁基体耐 870 ~ 982 高温	主要用作耐高 温抗氧化涂层

## 2.2.5 其它丝材

### 2.2.5.1 钼丝

钼的熔点高(2620 )、热膨胀系数低、高温强度高、加工性能良好,在边界润滑条件下有很好的耐磨性能,因此钼涂层主要用作边界润滑条件下的耐磨涂层,如汽车变速器同步锥环、机床轴。钼还是能耐热盐酸的唯一金属材料,镍钼合金(含钼 20% ~ 30%)称为耐盐酸合金。钼涂层与钢铁基体结合优良,以前常用作结合打底层,目前主要被镍钼合金替代。钼涂层用于自粘结底层时适用于普通钢、不锈钢、蒙乃尔合金、铸铁、铸钢、镁合金、铝及铝合金、陶瓷和玻璃等表

面,一般不用于铜和铜合金、铬板、氮化表面和硅铁等表面。钼的主要缺点是易氧化,其氧化物( $\text{MoO}_3$ )熔点低(约 780 ),且具有挥发性,因此,高于熔点时会被急剧氧化消耗。

#### 2.2.5.2 镍铝复合喷涂丝

镍铝复合喷涂丝是由镍和铝组对形成的包复型自粘结复合丝材,镍铝复合丝对喷涂工艺参数变化的适应性优于钼丝,重复性好,是替代钼作为自粘结底层的理想材料,适用于可燃气体火焰喷涂。在火焰喷涂过程中,镍与铝发生剧烈的铝热反应,生成镍铝金属间化合物并放出大量的热,喷涂到基体表面,能产生自粘结效应。在某些金属表面微区产生扩散可获得部分冶金结合,而且喷涂层表面粗糙,是随后喷涂其它涂层材料比较理想的表面,因而广泛用于涂层的自粘结底层。

#### 2.2.5.3 管状线材

管状线材是指用金属管状外皮包裹金属或非金属化合物粉末构成的热喷涂复合线材,又名管状粉芯线材或粉芯线材。在制作过程中,先将适于轧制的金属带轧制成槽形,然后将混合均匀的合金粉或其它粉体送入金属带槽内,经轧辊使金属带闭合,轧制成圆形,再经拔丝模逐渐减径至所需最终尺寸,拉拔减径也可使丝材材料硬化从而增加管状粉芯丝材的刚度。制备过程如图 2-1 所示。

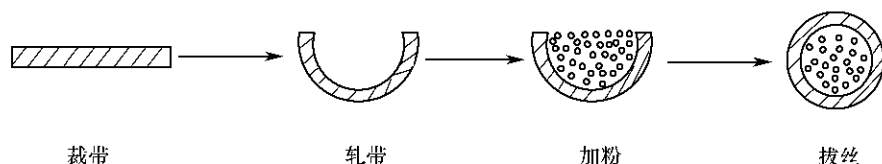


图 2-1 粉芯丝材生产工艺示意图

管状丝材的金属外皮要求是具有一定拉拔性能的金属或合金材料,选择范围比传统线材小。粉芯材料可以是各种合金、氧化物、碳化物等。与传统线材相比,管状粉芯线材大大拓宽了涂层的成分和应用范围,并可制造特殊的合金涂层和复合涂层。只要调配不同的粉芯就可以得到不同成分及用途的线材及相应涂层。但制造粉芯线材的轧制设备成本较高,金属外皮的选材受成分与拉拔性能的限制较大。合金元素的加入量受粉末粒度、密度以及加粉系数的影响,粉芯线材加粉系数一般最大为 50% 左右,一些多元素高合金的丝材因轧制困难而使喷涂层的合金成分也受到限制。

#### 2.2.5.4 陶瓷棒

陶瓷棒是由微细的氧化物粉末粘合压制烧结而成。陶瓷棒喷涂的主要特点

是它的端部在氧—乙炔火焰中停留时间较长 接近焊条熔化方式 陶瓷棒端部充分熔化后 再用射流雾化成微滴喷射到工件表面形成涂层 从而克服了粉末喷涂时 由于陶瓷熔点高 在热源中加热时间短 熔化不充分而产生的“生粒”现象。

## 2.3 热喷涂(熔)粉末材料

### 2.3.1 金属及合金粉末

#### 2.3.1.1 喷涂用合金粉末

喷涂用合金粉末涂层不经重熔处理 在喷涂状态下应用 按其用途分为打底层粉末和工作层粉末两类。

打底层粉末通常为放热型复合粉末(其名称和涂层性能见表 2 - 7) 其目的是提高涂层与基体金属的结合强度。当金属粉末在热喷涂火焰中飞行 加热至一定温度时 粉末组分之间发生金属间化合反应 生成金属间化合物 颗粒撞击工件表面伴随剧烈放热反应 部分颗粒可与工件表面之间产生微冶金焊点 从而提高涂层的结合强度 这种作用称为自粘结效应。具有这类效应的喷涂材料称为自粘结喷涂材料。例如常用的镍铝复合粉末：



表 2 - 7 放热型自粘结复合粉末(打底层粉末)

名 称	成 分	质量分数/%	金属间化合物	涂 层 性 能
镍包铝	Ni - Al	83 /17	$\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{NiAl}$	自粘结 致密 抗高温氧化 耐高温 抗多种金属熔体和玻璃侵蚀
镍包铝	Al - Ni	5 /95	$\text{Ni}_3\text{Al}$	
镍铬铝	NiCr - Al	94 /6	含铬的 $\text{Ni}_3\text{Al}$	
镍钼铝	NiMoAl	90 /5 /5	$\text{Ni}_3\text{Al}$ 及镍钼化合物	
钼包硅	Mo - Si	61 ~ 65 /39 ~ 35	$\text{MoSi}$	涂层致密 高温下具有优异的抗氧化能力
硅包钼	Si - Mo	61 ~ 65 /39 ~ 35	$\text{MoSi}$	
硅包铬	Si - Cr	15 ~ 52 /85 ~ 48	$\text{Cr}_3\text{Si}_2$	
铬包硅	Cr - Si	85 /15	$\text{Cr}_3\text{Si}_2$	
铬包锆	Cr - Zr	53 /47	铬化锆	
钛包铬	Ti - Cr	65 /35	钛化铬	
铝包锂	Al - Li	25 ~ 30 /75 ~ 70	铝锂化合物	熔点很高 涂层致密 具有优异的抗高温氧化能力
铝包铬	Al - Cr	38 ~ 40 /62 ~ 60	铬铝化合物	
铬包铝	Cr - Al		铬铝化合物	

常用的自粘结粉末有 Ni - Al 和 NiCr - Al 复合粉末 ,其次 Al 与 Co、Cr、Mo、Nb、Ta、W 以及 Si 与 Co、Cr、Mo、Nb、Ta、W、Ti 等之中的一种或几种金属制成的复合粉末也具有自粘结效应。此外 ,当难熔金属 W、Mo、Ta 等喷涂到熔点较低的钢铁材料表面时 ,也可以引起基体表面的局部熔化 ,从而实现冶金结合 ,提高结合强度 ,这类材料也称为自粘结材料。

自粘结材料除自身用来制备工作涂层外 ,常用作结合强度较低的工作涂层与基体之间的结合涂层 ,以避免工作涂层在使用过程中剥离。

工作层粉末主要是保证涂层具有所要求的使用性能 ,如 耐磨、耐蚀等 ,其成分及性能见表 2 - 8。

表 2 - 8    喷涂合金粉末的成分和性能

种类	牌号	主要组分及其质量分数 / %	硬度	特 性 及 用 途
镍基	Ni100	Ni - 23Cr - 1.2Si	100HB	耐热、耐高温氧化 ,用于绝热涂层
	粉 111	Ni - 15Cr - 7Fe	150HV	易切削 ,用于轴承
	Ni180	Ni - 14Cr - 7Fe - 0.8Si - 0.3Al	180HB	加工性好 ,耐摩擦、磨损 ,用于轴承、轴类
	粉 112	Ni - 15Cr - 7Fe - 3Al	200HV	涂层致密 ,用于泵、轴
	Ni222	Ni - 14Cr - 7Fe - 0.8Si - 5Al	222HB	耐蚀性好 ,用于印刷辊、电动机轴
	粉 113	Ni - 10Cr - 1.5B - 3Si	250HV	耐磨性较好 ,用于活塞
	Ni320	Ni - 14Cr - 7Fe - 1.5B - 3Si - 1.5Al	320HB	耐磨 ,用于机床轴、电动机轴、曲轴、轧辊
	粉 115	Ni - 35WC	400HV	耐磨性好
铁基	Fe250	Fe - 17Cr - 1.5B - 2.0Si - 10Ni	250HB	韧性、加工性好 ,用于汽轮机箱密封面、轴承
	粉 313	Fe - 15Cr - 1.5B	250HV	耐磨性好 ,用于轴承
	粉 314	Fe - 18Cr - 9Ni - 1.5B	250HV	
	Fe280	Fe - 13Cr - B - 2.5Si - 37Ni	280HB	耐磨性、抗压性好 ,用于各种耐磨件
	Fe300	Fe - 13Cr - 2B - 3Si - 37Ni - 4.5Mo	300HB	
	Fe320	Fe - 15Cr - 2B - 1.5Si	320HB	
	Fe500	Fe - 15Cr - 3B - 4.5Si - 12Ni	500HB	耐磨性、抗压性好 ,用于各种耐磨件



(续)

种类	牌号	主要组分及其质量分数/%	硬度	特 性 及 用 途
铜基	粉 412	Cu - 10Sn - 0.3P	80HV	易切削 ,用于轴承
	粉 411	Cu - 10Al - 5Ni	150HV	
	Cu150	Cu - 0.4P - 8Sn	150HB	摩擦系数小 ,易加工 ,用于缸体、机床导轨以及铝、铜件
	Cu180	Cu - 5Ni - 10Al	180HB	
	Cu200	Cu - 0.4P - 8Sn	200HB	
打底层	粉 511	Ni - 20Al		打底层
	粉 512	Ni - 8Al - 2Si		

2.3.1.2 自熔性合金

自熔性合金又称自熔剂合金或共熔合金 ,是常用的一类合金喷涂材料 ,含有一定量的 B、Si 元素的镍基、铁基、钴基和铜基合金 ,为了提高涂层性能 ,除了 B、Si 外 ,还含有 Cr 和 C 等元素 ,加入的各种元素在合金中的作用见表 2 - 9。B、Si 的加入可大大降低粉末的熔点 ,并在后期涂层加热重熔过程中起到脱氧造渣并消除涂层气孔的作用 ,帮助喷熔层与基体之间形成牢固的冶金扩散 ,除此之外还与其它元素形成硼化物等强化相以提高喷熔层的综合性能。自熔合金粉末的成分、硬度及用途见表 2 - 10。

表 2 - 9 硅、碳、铬、钼、钨、铜在自熔剂合金中的主要作用

硼、硅元素	碳元素	铜元素	铬元素	钼、钨元素
<p>(1) 显著降低合金熔点 ,扩大固液相线温度区 ,形成低熔共晶体 ,如铁硼合金 1161 、镍硼合金 1045 、钴硼合金 1095 。</p> <p>(2) 脱氧还原作用和造渣功能 : B 和 Si 与氧作用 ,生成熔点为 910 的硼硅酸盐渣。</p> <p>(3) 对焊层的硬化、强化作用。</p> <p>(4) 改善操作工艺性能 : 一般 ,随着合金中硼、硅元素含量的增大 ,合金焊层的硬度增高 ,塑性和韧性显著下降 ,脆性增大 ,焊层容易出现裂纹甚至产生崩落</p>	<p>碳一般与合金中元素 Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta、Cr、Mo、W 等形成硬质碳化物 ,从而提高合金硬度和耐磨性能</p>	<p>在铁基合金中加入少量铜 ,能显著提高其耐海水腐蚀能力 ;在镍基合金中加入 1% ~ 3% 能显著提高合金的耐蚀能力</p>	<p>铬固溶在 Fe、Ni、Co 的面心立方晶体中 ,对晶体既起固溶强化作用 ,也起钝化作用 ,从而提高耐蚀性能和抗高温氧化性能。</p> <p>富余的铬容易与碳、硼形成碳化铬、硼化铬硬质相 ,从而提高合金硬度和耐磨性</p>	<p>固溶在 Fe、Ni、Co 基体中 ,使晶格发生大的畸变 ,显著强化合金基体 ,提高基体的高温强度和红硬性。</p> <p>加入过量钨 ,与碳形成碳化钨硬质相 ,能提高耐磨性。</p> <p>镍合金中加钼 ,能提高合金的耐蚀性 ,特别是在盐酸、硫酸磷酸中的耐蚀能力</p>

表 2 - 10 自熔剂合金粉末的成分、硬度及用途

名称	牌 号	自熔合金粉末的化学成分及其质量分数 / %								喷熔层硬度 HRC	用 途
		w( C )	w( Cr )	w( Si )	w( B )	w( W / Mo )	w( Fe )	w( Ni )	w( Co / Cu )		
镍基	FNi - 01	<0. 10		3. 0 ~ 4. 0	1. 0 ~ 2. 0		<1. 5	余		20 ~ 30	玻璃模具、塑料橡胶模具表面喷熔
	FNi - 02	<0. 10		2. 8 ~ 3. 7	1. 9 ~ 2. 6		<2. 0	余		30 ~ 35	
	Ni01 , Ni01H	Ni - 10Cr - 2B - 2. 5Si - 5Fe								30 ~ 35	修复汽门、齿轮、模具、汽轮机叶片
	Ni02 , Ni02H	Ni - 15Cr - 3. 5B - 4Si - 5Fe								48 ~ 58	内燃机活塞环、阀门、柱塞及其它金属间磨损件
	Ni02B , Ni02BH	Ni - 15Cr - 3. 5B - 4Si - 10Fe									
	Ni03 , Ni03H	Ni - 18Cr - 4B - 4. 5Si - 5Fe								≥58	高磨料磨损零件的等离子或火焰喷涂
	Ni03B , Ni03BH	Ni - 18Cr - 4B - 4. 5Si - 15Fe								≥58	高磨料磨损零件、风机叶片、密封环、密封面喷涂
	Ni04 , Ni04H	Ni - 15Cr - 4B - 4Si - 3. 5Mo - 5Fe								54 ~ 60	用于金属间磨损件和有 Cl <sup>-</sup> 腐蚀的零件、耐酸泵的各种轴和密封环、装甲车磨损件
	Ni04B , Ni04BH	Ni - 15Cr - 4B - 4Si - 3Mo - 10Fe								50 ~ 58	
	Ni06 , Ni06H	Ni - 2. 5Si - 1. 5B - 2. 5Fe								20	耐热耐蚀 ,修复 600 下工作的玻璃模具
	Ni07 , Ni07H	Ni - 28Cr - 4B - 4. 2Si - 5Fe								≥58	高磨料磨损零件、风机叶片、密封环、密封面喷涂
	Ni25	Ni - 3. 5Si - 1. 5B - 6Fe								25	玻璃模具、铸铁件喷涂
	Ni31	Ni - 36Cr - 2Si - 0. 2B - 5Fe								25 ~ 30	飞机发动机排气阀喷涂
	Ni35	Ni - 10Cr - 3. 5Si - 2. 5B								35	模具、齿轮、轴、汽门和阀门喷涂

(续)

名称	牌 号	自熔合金粉末的化学成分及其质量分数/%								喷熔层硬度 HRC	用 途
		w(C)	w(Cr)	w(Si)	w(B)	w(W/Mo)	w(Fe)	w(Ni)	w(Co/Cu)		
镍基	Ni45	Ni - 16Cr - 3.5Si - 3B - 15Fe - 10Co								45	内燃机排气阀密封面喷涂
	Ni55	Ni - 17Cr - 4Si - 3.5B - 15Fe - 3Mo - 3Cu								45	模具、凸轮、链轮、排气阀密封面喷涂
	Ni60	Ni - 17Cr - 4Si - 3.5B								60	模具、凸轮、链轮、排气阀密封面、拉丝滚筒喷涂
	Ni80 Ni80H	Ni - 20Cr - 1.5Si								100HB	航空发动机喷涂
	F101	0.30 ~ 0.70	8.0 ~ 12.0	2.5 ~4.5	1.8 ~2.6		≤4	余		40 ~50	泵转轮、柱塞、阀门座、阀门球体、玻璃刀、搅拌机部件、玻璃模具等喷熔
	F102	0.60 ~ 1.0	14.0 ~ 18.0	3.5 ~5.5	3.0 ~4.5		≤5	余		≥55	耐蚀耐高温阀门、模具、泵转子、柱塞等喷熔
	F103	≤0.15	8.0 ~ 12.0	2.5 ~4.5	1.3 ~1.7		≤8	余		20 ~30	修复和预防性保护铸铁件,如玻璃模具、发动机汽缸、机床导轨等喷熔
	F104	0.60 ~ 1.0	14.0 ~ 18.0	3.5 ~5.5	3.5 ~4.5	2.0 ~4.0	≤5	余	2.0 ~4.0	≥55	耐泵零件、柱塞、耐蚀阀门等喷熔
	F106	≤0.15	8.0 ~ 12.0	2.5 ~4.5	1.7 ~2.1		≤8	余		30 ~40	气门、齿轮、受冲击滑块等喷熔
	F109	0.40 ~ 0.90	14.0 ~ 16.0	3.5 ~5.0	3.0 ~4.0		≤15	余	/24.0 ~ 26.0	≥55	起重、装卸机械如铲车铲斗、挂钩等耐磨零件喷熔
钴基	Co01 Co01H	Co - 29Cr - 5W - 1.3Si - 5Fe								38 ~45	高温高压阀门密封面喷涂
	Co02 Co02H	Co - 29Cr - 5W - 1.3Si - 0.8B - 5Fe								40 ~48	高温高压阀门、内燃机进排气阀密封面、高压泵柱塞、切纸刀片喷涂

(续)

名称	牌 号	自熔合金粉末的化学成分及其质量分数/%								喷熔层硬度 HRC	用 途
		w(C)	w(Cr)	w(Si)	w(B)	w(W/Mo)	w(Fe)	w(Ni)	w(Co/Cu)		
钴基	Co03 Co03H	Co - 2.5Ni - 29Cr - 6W - 0.8Si - 0.5Nb - 5Fe								30 ~ 38	热锻模、热冲模喷涂
	Co04 Co04H	Co - 27Cr - 11W - 0.7Si - 0.8B - 5Fe								≥45	内燃机进排气阀、排气机叶片等 离子喷涂
	Co05 Co05H	Co - 27Ni - 20Cr - 5Mo - 4Si - 3B - 5Fe								47 ~ 52	高温、高压阀门、内燃机进排气 阀密封面、高压泵柱塞、切纸 刀片喷涂
	Co42	Co - 15Ni - 19Cr - 7.5W - 3Si - 1.2B - 6Fe								42	高温排气阀等离子或火焰喷 涂
	Co50	Co - 27Ni - 19Cr - 6Mo - 4Si - 13B - 5Fe								50	阀门、高温模具、汽轮机叶片 喷涂
	F201	Co - 26Cr - 5W - 2Si - 0.8B - 5Fe								40 ~ 45	内燃机进排气阀、排气机叶片 等 离子喷涂
	F202	0.50 ~ 1.0	19.0 ~ 23.0	1.0 ~ 3.0	1.5 ~ 2.0	7.0 ~ 9.0 /	≤5	—	余钴	48 ~ 54	700 以下耐磨、耐蚀件如热 剪刀片、内燃机阀头或凸轮、高 压泵封口圈等喷熔
	F203 F223	0.70 ~ 1.3	18.0 ~ 20.0	1.0 ~ 3.0	1.2 ~ 1.7	7.0 ~ 9.5 /	≤4	11.0 ~ 15.0	余钴	35 ~ 45	高温、高压阀门、热鼓风机的 加热交错部位等喷熔
	F204 F224	1.3 ~ 1.8	19.0 ~ 23.0	1.0 ~ 3.0	2.5 ~ 3.5	13.0 ~ 17.0 /	≤5	—	余钴	≥55	强烈磨损的高温、高压阀门密 封环等喷熔
	F221	0.5 ~ 1.0	24.0 ~ 28.0	1.0 ~ 3.0	0.5 ~ 1.0	4.0 ~ 6.0 /	≤5		余钴	40 ~ 45	700 以下高温、高压阀门密 封面等喷熔
	F221A	0.6 ~ 1.0	26 ~ 32	1.5 ~ 3.0		4.0 ~ 6.0 /	≤5		余钴	40 ~ 45	

(续)

名称	牌 号	自熔合金粉末的化学成分及其质量分数 / %								喷熔层硬 度 HRC	用 途
		w(C)	w(Cr)	w(Si)	w(B)	w(W/Mo)	w(Fe)	w(Ni)	w(Co/Cu)		
铁  基	Fe01	Fe - 22Ni - 19Cr - 3Si - 2.1B								30 ~ 35	钢轨、球墨铸铁阀门等喷熔
	Fe03	Fe - 23Ni - 17Cr - 2.8Si - 2B								32 ~ 35	装甲车磨损件等喷熔
	Fe04	Fe - 23Ni - 15Cr - 3.2Si - 2.2B								36 ~ 42	各种阀门密封面的修复
	Fe07	Fe - 8Ni - 17Cr - 3.5Si - 3.2B								51 ~ 58	石油、矿山机械等磨损件
	Fe11	Fe - 22Ni - 13Cr - 4.2Si - 3.5B - 10W								53 ~ 60	石油、矿山机械等磨损件
	Fe12	Fe - 3.8C - 4Ni - 7Cr - Si - 1.6B - 5Mo - 1.2V								≥62	铰犁、矿山机械、挖泥船用铰刀、煤粉机打击板等喷熔
	Fe14	Fe - 5Ni - 30Cr - 2Si - 2B - 3.5Mo								≥58	铰犁、矿山机械、石油钻杆接头等喷熔
	Fe15	Fe - 23Ni - 20Cr - 3.2Si - 2B - 4.0Mo								36 ~ 42	各种阀门密封面的修复
	Fe30	Fe - 29Ni - 13Cr - 3Si - 2B								30	钢轨、球墨铸铁阀门等
	Fe45	Fe - 7Ni - 17Cr - 3.5Si - 3.5B								45 ~ 50	轴类、机床导轨
	Fe50	Fe - 20Ni - 13Cr - 4Si - 4B - 4W								50	石油、矿山机械等磨损件
	Fe55	Fe - 1.2C - 12Ni - 15Cr - 4.5Si - 3B - 5Mo								55	风机叶片、螺旋输送器
	Fe57A	Fe - 12Ni - 20Cr - 4Si - 1.7B - 4Mo - 0.9W - 0.9V - 0.9Nb								36 ~ 40	闸板阀、截止阀等
	Fe57B	Fe - 12Ni - 20Cr - 4Si - 1.7B - 4Mo - 0.9W - 0.9V									
	Fe60	Fe - 11Ni - 16Cr - 3Si - 3.5B								50 ~ 60	石油钻杆接头等喷熔
	Fe65	Fe - 4.5C - 50Cr - 1.5Si - 2B								60 ~ 65	石油钻杆接头、矿山机械、破碎机 等喷熔
	Fe81 F81H	Fe - 4.7C - 47Cr - Si - 2.1B								63 ~ 68	石油钻杆接头、煤矿机械、农业机械等喷熔
F301	0.40 ~ 0.80	4.0 ~ 6.0	3.0 ~ 5.0	3.5 ~ 4.5		余	28.0 ~ 32.0	—	40 ~ 50	齿轮、刮板、铰犁、车轴等喷熔	

(续)

名称	牌 号	自熔合金粉末的化学成分及其质量分数/%								喷熔层硬度 HRC	用 途
		w(C)	w(Cr)	w(Si)	w(B)	w(W/Mo)	w(Fe)	w(Ni)	w(Co/Cu)		
铁基	F302	1.0 ~ 1.5	8.0 ~ 12.0	3.0 ~ 5.0	3.5 ~ 4.5	/4.0 ~ 6.0	余	28.0 ~ 32.0	—	≥50	耙片、锄齿、刮板、车轴等喷熔
	F303	0.40 ~ 0.80	4.0 ~ 6.0	2.5 ~ 3.5	1.0 ~ 1.6		余	28.0 ~ 32.0	—	26 ~ 30	反复冲击或要求不高的零件如铸铁修补、齿轮修复
	F306	0.40 ~ 0.60	5.0 ~ 7.0	3.0 ~ 4.0	1.5 ~ 2.0	/2.0 ~ 4.0	余	38.0 ~ 42.0	—	30 ~ 40	受小能量多冲击的零件如枪械、齿轮、气门等喷熔
	F307	0.40 ~ 0.80	4.0 ~ 6.0	2.5 ~ 3.5	1.1 ~ 1.6		余	28.0 ~ 32.0	—	26 ~ 30	铁路钢轨擦伤、低塌等缺陷的修复
	F311	Fe - 8Ni - 18Cr - 3Si - 2.3B - 1.2Mn - 0.7Mo - 0.5V								41 ~ 46	轴类等喷熔
	F312	Fe - 11Ni - 18Cr - 3Si - 2.3B								35 ~ 40	装甲车磨损件等喷熔
	F314	Fe - 2.5C - 30Cr - 3.5Si - 3B								≥58	冶金、矿山机械等喷熔
含碳化钨型	F105Fe	F102 + 35% WC								≥55	耐磨料磨损零件如导板、刮板、风机叶片等喷熔
	F105	F102 + 50% WC								≥55	强烈耐磨料磨损零件如导板、刮板、风机叶片等喷熔
	F108	F102 + 80% WC								≥55	强烈磨损零件如挖泥船耙齿、风机叶片、刮板等喷熔
	F205	F204 + 35% WC								≥55	700 以下抗强烈磨损零件的喷熔
	F305	F302 + 25% WC								≥50	承受土砂磨损的零件如犁刀、刮板、铲齿等的喷熔
	NiWC25	Ni60 + 25% WC								基体 60 WC70	风机叶片、螺旋输送机
	NiWC35	Ni60 + 35% WC									
	CoWC35	Co50 + 35% WC								基体 50 WC70	风机叶片、螺旋输送器等

### 2.3.1.3 高温合金粉末

高温合金粉末是为了满足高温使用要求而开发的合金粉末,一般以 Ni、Fe、Co 元素形成的面心立方体  $\gamma$  相为基体,加入其它强化合金元素,如 Cr、Al、Ti、Zr、W、Mo、Nb 等。这些强化元素主要以三种方式对高温合金进行强化:一是固溶强化,将合金元素加入到基体金属中形成单相奥氏体达到强化目的;二是第二相析出强化,靠在基体上析出弥散的碳化物或金属间化合物来强化;三是晶界强化。高温合金按照其基体成分的不同分为三类:镍基高温合金、铁基高温合金和钴基高温合金。

MCrAlY 为目前最为常用的热喷涂高温合金材料,其中 M 表示基体元素,为 Fe、Ni、Co 三种金属元素的一种或两种。根据其基体元素的不同主要有以下几类:FeCrAlY 适宜在增碳环境下工作,表现出优良的抗硫化性能,价格较低,塑性好,但其组织为铁素体,与一般高温合金工件的基体合金组织不匹配,因此一般不能在镍基与钴基合金工件表面使用;NiCrAlY 一般延性和抗氧化性较好,但抗硫化性能较差,在航空发动机中应用较好;CoCrAlY 具有较高的抗硫化能力,但抗氧化性和延性较低,适宜在舰艇、地面工业燃气轮机环境下工作;NiCoCrAlY 及 CoNiCrAlY 这类合金兼有 NiCrAlY 及 CoCrAlY 的优点,综合性能较好。

MCrAlY 涂层的抗氧化和腐蚀作用,是基于在涂层表面形成致密的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜,这些氧化膜作为氧的扩散屏障层,阻止基体或结合层进一步氧化或腐蚀,氧化钇在涂层中具有“钉扎效应”起到稳固各相组织的作用。

热喷涂用高温合金粉末一般采用气体雾化法制备。

### 2.3.2 陶瓷材料粉末

陶瓷属高温无机材料,是金属氧化物、碳化物、硼化物、硅化物、氮化物等的总称,一般具有硬度高、熔点高、热稳定性及化学稳定性好的特点,用作涂层可有效地提高基体材料的耐磨损、耐高温、抗高温氧化、耐热冲击、耐腐蚀等性能。热喷涂常用的陶瓷材料主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$  等氧化物陶瓷材料,碳化物等非氧化物陶瓷通常采用金属合金作粘结剂制备成金属基陶瓷复合材料使用。

#### 2.3.2.1 氧化物类陶瓷材料粉末

以氧化物为主的热喷涂陶瓷涂层的应用领域十分广泛,包括利用其耐腐蚀性能的石油化工、金属冶金等化学与冶金领域,利用耐磨损性能的机械、输送领域,利用其耐热和热障性能的航天航空发动机领域。作为功能材料涂层,也有利用电气绝缘、磁屏蔽、固体电解质、红外辐射等性能的应用。

陶瓷材料一般熔点较高,为了能够完全将其熔化而制备涂层,一般需要较高

温度的热源,因此,常用等离子喷涂技术。由于火焰喷涂燃烧火焰的温度低,难以将其加热到熔融或高塑性状态,制备的涂层的粒子间结合较弱,一般不适于喷涂陶瓷涂层。

表 2 - 11 为热喷涂常用的几类氧化物陶瓷粉末,根据成分分类,主要有氧化铝系、氧化锆系、氧化钛以及氧化铬、莫来石、尖晶石陶瓷等。热喷涂陶瓷粉末的粒度范围因其用途而异,常用的粉末粒度为 10 $\mu\text{m}$  ~ 44 $\mu\text{m}$  或 10 $\mu\text{m}$  ~ 53 $\mu\text{m}$ 、5 $\mu\text{m}$  ~ 25 $\mu\text{m}$ ,以及 30 $\mu\text{m}$  ~ 74 $\mu\text{m}$ 。国内粉末生产厂家一般都根据用户的要求进行分筛,提供所要求粒度范围的粉末。陶瓷粉末主要采用电熔破碎法制造,呈多角形形貌,其次,也可用喷雾干燥烧结法制备球形粉末,球形粉末有呈现中空的趋势,还可用等离子球化或火焰球化法制备球形粉末,此法制备的球形粉结构致密。

表 2 - 11    典型热喷涂氧化物陶瓷粉末的组成(质量分数)

	材 料 名	组成(质量分数)
氧化铝系	白色氧化铝 灰色氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 3% TiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 13% TiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 17% TiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 40% TiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 50% TiO <sub>2</sub>
氧化锆系	氧化钙稳定氧化锆 氧化镁稳定氧化锆 氧化钇稳定氧化锆	5% CaO - ZrO <sub>2</sub> 8% CaO - ZrO <sub>2</sub> 31% CaO - ZrO <sub>2</sub> 20% MgO - ZrO <sub>2</sub> 24% MgO - ZrO <sub>2</sub> 6% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> 7% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> 8% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> 10% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> 12% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> 20% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> ZrO <sub>2</sub> - 33% SiO <sub>2</sub>
氧化钛系	氧化钛	TiO <sub>2</sub>



(续)

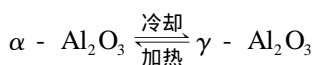
	材 料 名	组成(质量分数)
氧化铬系	氧化铬	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 3\% \text{TiO}_2 - 5\% \text{SiO}_2$
其它	氧化镁尖晶石 莫来石 氧化镁石英	20% $\text{Al}_2\text{O}_3 - 80\% \text{MgO}$ $\text{Al}_2\text{O}_3 - 20\% \text{SiO}_2$ 40% $\text{MgO} - 60\% \text{SiO}_2$

### 1. 氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )基陶瓷粉末材料

氧化铝类陶瓷是陶瓷材料家族中最重要、应用最广泛的一类陶瓷,其熔点为2050℃,典型的晶体结构为 $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ (立方晶),高纯度的氧化铝呈白色,故也称白色氧化铝,为氧化物中最硬的陶瓷,俗称刚玉,其化学稳定性高,具有优越的耐酸腐蚀性,与熔融金属的反应性低,热传导率比较高,线膨胀率大,耐热冲击性不高,是优良的绝缘体。

在氧化铝的晶格中铝离子只填满由氧离子组成的晶格空隙的 $2/3$ ,可以向 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体晶格中加入离子半径较小的其它金属阳离子,而衍生出一系列以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为基的氧化物陶瓷,包括 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{玻璃材料}$ 等。下面重点介绍常用的纯氧化铝和氧化铝-氧化钛( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ )复合粉末。

(1) 纯氧化铝粉末。热喷涂用氧化铝主要为 $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ ,在900℃~1200℃的温度范围内会发生晶型转变:



这种晶型转变不产生明显的体积变化。最适用于喷涂氧化铝的工艺是等离子喷涂工艺,特别是超声速等离子喷涂,能获得优质的氧化铝涂层。氧化铝涂层可用作常温下的低应力磨粒磨损、硬面磨损、耐多种化工介质和化工气体腐蚀、耐气蚀和冲蚀涂层,还用于高温下的耐燃气冲蚀、热障、高温可磨耗涂层和高温反射涂层。

(2) 氧化铝-氧化钛( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ )复合粉末。由一定比例的 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末组成,制备方法主要有喷雾干燥法、电熔破碎法、等离子熔融急冷法和烧结破碎法。常见的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ 复合粉末有灰色氧化铝、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\% \text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - 20\% \text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - 40\% \text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\% \text{TiO}_2$ 等几种,其涂层性能及应用见表2-12。

表 2 - 12 氧化铝 - 氧化钛( $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{TiO}_2$ )复合粉末的性能和应用

材料	牌号	化学成分 (质量分数) / %	性 能	适用范围
氧 化 铝 类 陶 瓷 粉 末	氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) AF - 251	$\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 99.8$	莫氏硬度 9 级, 绝缘强度 1069 伏/ 0.1 毫米, 密度 $3.96 \sim 4.0 \text{ g/cm}^3$ , 熔点 1970 ~ 2040 , 辐射率 0.28 (1200 ) 0.38 (1500 ) , 粒度 $\leq 60 \mu\text{m}$ 。能耐大 多数酸、碱、盐和溶剂腐蚀, 不耐 HF, 耐 $\text{H}_2$ , $\text{N}_2$ , Ar, 水蒸汽, CO, $\text{CO}_2$ , $\text{SO}_2$ , 含 S 气体, $\text{NH}_3$ 等化工气体腐蚀, 不耐 碱性炉渣侵蚀, 喷涂层韧性较差, 孔隙 率较高, 采用封孔处理或固化处理, 有 利于改善涂层耐蚀性、绝缘性	常温下耐磨粒磨损, 硬 面磨损, 气蚀和纤维磨 损。840 ~ 1650 耐冲 蚀, 热障 ( $\approx 1650$ ) 和电 绝缘涂层, 高温反射涂层
	灰色氧化铝 粉末 P7111	$\text{Al}_2\text{O}_3$ + (2.5% ~ 3% ) $\text{TiO}_2$	硬度 1009HV, 涂层呈浅灰色, 气孔率 约 3% , 与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相比, 涂层致密度提 高, 硬度虽降低, 但耐磨性提高, 具有更 好的韧性和电绝缘性、耐蚀性能, 耐锌、 铝、铜等熔融金属侵蚀。机加工采用金 刚石砂轮粗磨, 绿碳化硅砂轮精磨, 特 别适合化工介质(含结晶颗粒)的腐蚀、 磨损同时作用的环境	耐气蚀和颗粒冲蚀、纤 维磨损涂层; 耐高温 (1095 ) 磨耗涂层, 耐熔 融金属及熔渣的腐蚀涂 层。如泥浆泵柱塞、汽缸 衬套
	13% $\text{TiO}_2$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合 粉末 P7112	$\text{TiO}_2$ 13 其它 添加剂微量 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 余量	涂层呈蓝黑色, 比前两种有更高的 结合强度和致密度, 具有优异的耐磨、 耐蚀、绝缘和精加工等综合性能, 喷涂 层经激光重熔后, 能获得完全的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiAl}_2\text{O}_5$ 固溶体组织, 硬度极 高、耐蚀性极好	540 以下使用的耐磨 粒磨损、硬面磨损、微震 磨损、化纤及纱线磨损涂 层, 耐磨损腐蚀涂层
	20% $\text{TiO}_2$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合 粉末 P7113	$\text{TiO}_2$ 20 其它 添加剂微量 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 余量	满意的涂层呈蓝黑色, 与 13% $\text{TiO}_2$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相比, 涂层致密度、韧性、结合 强度、抗化学介质腐蚀性能都有所提 高, 但硬度和耐磨性有所下降, 电绝缘 性明显下降	主要用于耐化学介质 腐蚀(强酸除外)和耐化 纤及纱线磨损的涂层, 使 用温度不超过 540
	40% $\text{TiO}_2$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合 粉末 P7114	$\text{TiO}_2$ 40 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 余量 添加剂微量	涂层粘结性极好, 呈深黑色, 呈半导 体电性能, 具有良好的耐粘着磨损、硬 面磨损和化纤磨损性能, 特别适合喷 涂薄的耐磨耐蚀涂层	主要用于耐化学介质 腐蚀(强酸除外)和耐化 纤及纱线磨损的涂层, 使 用温度不超过 540
	50% $\text{TiO}_2$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合 粉末 P7115	$\text{TiO}_2$ 50 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 余量	性能与 40% $\text{TiO}_2$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相近, 喷涂 层的突出特点是耐化纤及纱线磨损, 并赋予纱线一定量的“绒度”, 广泛用 于纺织部门与纱线接触的纺机零件 上。容易进行磨削加工	耐腐蚀磨损、滑动磨损 和纤维磨损涂层, 如: 纺 织机械导丝零件、机械密 封环等

2. 氧化锆( $\text{ZrO}_2$ )基陶瓷粉末

氧化锆( $\text{ZrO}_2$ )是一种白色晶体粉末,熔点为 2720 ,沸点约为 5000 ,纯氧化锆的晶体结构有三种:单斜晶、四方晶与立方晶,随温度的变化将发生结构的转变。

单斜晶 $\leftrightarrow$ 四方晶 $\leftrightarrow$ 立方晶

单斜晶与四方晶之间的相变属于无扩散型马氏体相变,该相变伴随着约 4.6% 体积变化,图 2 - 2 给出了氧化锆的线膨胀率随温度的变化曲线,表 2 - 13 是不同  $\text{ZrO}_2$  变体的密度。纯氧化锆冷却时会发生马氏体相变,产生体积变化,引起相变应力,产生裂纹导致开裂,通常不宜直接作为热喷涂材料。

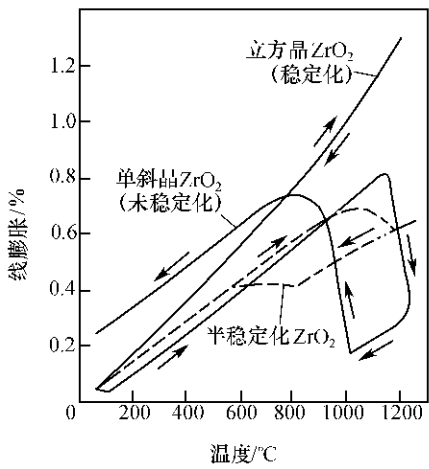


图 2 - 2 氧化锆的线膨胀率随温度的变化

表 2 - 13 不同  $\text{ZrO}_2$  变体的密度

温度/	常温 ~ 1000	1000	1000 ~ 2000	> 2000
晶体结构	单斜晶 $\beta - \text{ZrO}_2$	单斜晶 $\rightleftharpoons$ 四方晶 $\beta - \text{ZrO}_2 \rightleftharpoons \alpha - \text{ZrO}_2$	四方晶 $\alpha - \text{ZrO}_2$	等轴晶体
密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	5.7	—	6.1	6.27

因此,实际使用的  $\text{ZrO}_2$  是在其中加入一定量的  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{CeO}_2$  等物质作为稳定剂,对其进行晶体结构稳定化处理,使其在加热冷却过程中,晶格不再发生变化,这种  $\text{ZrO}_2$  被称为稳定化  $\text{ZrO}_2$ 。控制稳定相与未稳定相的比例能获得热膨胀系数较小(图 2 - 2 虚线所示)、耐热震性能优异、使用寿命长的氧化锆

涂层。不同稳定性的氧化锆陶瓷涂层粉末及涂层性能见表 2 - 14。上述稳定或半稳定氧化锆是热喷涂领域应用广泛、性能优异的耐高温、抗热震和绝热涂层，对现代喷气发动机燃烧室和火焰喷管、现代火箭火焰喷管、航空发动机涡轮叶片等高温合金材料的性能提高和发展做出了重要贡献。目前,大多数  $ZrO_2$  陶瓷涂层的使用温度多低于 1200，随着新一代航空发动机的发展,人们正在研究新的稳定剂,渴望将使用温度提高到 1400 以上。

表 2 - 14 氧化锆陶瓷粉末和涂层性能

牌 号	化学成分 (质量分数)/%	性 能	适 用 范 围
氧化钙稳定 氧化锆粉末 $ZrO_2/CaO$ CSZ	$ZrO_2$ 93. 9 $CaO$ 4 ~ 6 其它少量	粉末粒度 - $100\mu m \sim +40\mu m$ 流动性 39. 1s/50g ~ 64s/50g ,熔点 2535 ~ 2550 , 硬度莫氏 7 ~ 8 ,热膨胀系数 $(5. 5 \sim 9. 0) \times 10^{-6}/K(20 \sim 1200)$ ,体积电阻 $10^4\Omega \cdot m$ , $CaO$ 稳定的 $ZrO_2$ 涂层 ,具有满意的平均热膨胀和耐热疲劳性能 ,硬度适中、气孔隙较高 ,具有优良的绝热、耐热和抗热震性能 ,但长期置于 1093 以上温度 , $CaO$ 有扩散出稳定化 $ZrO_2$ 晶体之外的倾向	845 以上使用的 耐高温、绝热、抗热震 涂层 ;坩埚内壁防熔 融金属侵蚀或熔体污 染涂层
锆酸镁 ( $ZrO_2/MgO$ ) 粉末 KF - 301	$MgO$ 24 $ZrO_2$ 余量	粉末粒度 - $45\mu m \sim +5\mu m$ ,熔点 2140 ,涂 层硬度 400HV ,热膨胀系数 $(21 \sim 1100)$ $2. 2 \times 10^{-6}/K$ ,稳定剂 ( $MgO$ ) 加入 $ZrO_2$ 晶格 中 ,使 $ZrO_2$ 的晶型由单斜晶系转变成稳定的 立方晶系 , $MgO$ 的加入量为 20% ~ 30% ,喷涂 层热导率低 ,高温化学性能稳定 ,耐多种熔融 金属和碱性炉渣侵蚀但不耐酸性炉渣腐蚀	耐高温热障涂层、 抗高温粒子冲蚀涂 层、耐熔融金属及碱 性炉渣侵蚀涂层。 如 燃气轮机叶片 ,航 空发动机燃烧室 ,连 铸模 ,高炉风口、渣 口 ,熔炼坩埚
氧化钇稳 定氧化锆 ( $ZrO_2/Y_2O_3$ ) 复合粉末 KF - 230	$ZrO_2$ 92 $Y_2O_3$ 8	粒度 - $100\mu m \sim +45\mu m$ , - $56\mu m \sim +$ $10\mu m$ ,喷涂层呈白色到淡黄色 ,坚硬、致密 ,抗 高温粒子冲蚀性能和抗热震能力优异 ,温度 高达 1650 时不会像 $CaO$ 那样向晶体外扩 散 ,其化学稳定性和热稳定性均优于 $CaO$ 稳 定的 $ZrO_2$ 和 $MgO$ 稳定的 $ZrO_2$	1650 高温热障涂 层 ,854 以上抗高温 冲蚀涂层
硅酸锆 ( $ZrSiO_4$ ) 和锆英石粉末 P7251	$ZrO_2$ 55. 4 $SiO_2$ 32. 5 $TiO_2$ 6. 5 $Fe_2O_3$ 3. 1 $MgO$ 0. 17 $Al_2O_3$ 0. 7 $CaO$ 0. 1	熔点 2010 ~ 2121 ,粒度 - $100\mu m \sim$ $+45\mu m$ ,涂层结构 :氧化锆为四方晶变体 ,氧 体硅则以非晶相玻璃态存在。这种结构一直 保持到 1200 左右 ,当温度超过 1400 时 ,玻 璃相发生相变 ,析出方石英 ,同时单斜晶的氧 化锆含量增加 ,超过 1730 ,锆英石显著分解	抗酸性化学药品、 酸性炉渣、酸性气体 腐蚀和颗粒冲蚀涂 层 ,耐熔融金属侵蚀 涂层 ,抗热震涂层和 电绝缘涂层

3. 其它氧化物陶瓷粉末

(1) 二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )基陶瓷粉末。二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )熔点 1825 ,晶体结构有金红石型、锐钛矿型与板钛矿型三种。金红石为立方晶 ,属热力学稳定相 ,锐钛矿也属立方相 ,但主要在低温下使用。喷涂材料用的主要是金红石型 ,等离子喷涂后涂层也呈金红石结构 ,其中含有少量的锐钛矿。二氧化钛熔点低 ,喷涂过程中熔化充分 ,可形成致密涂层。除热浓硫酸以外 ,它不溶于其它种类的酸 ,耐化学腐蚀性优越 ,同时 ,具有较高的耐磨损性能。在大气中等离子喷涂氧化钛时 ,将发生高温还原 ,使其失去部分氧而呈黑色。这种非化学计量的  $\text{TiO}_2$  呈现 n 型半导体特性 ,随失氧量的增加导电率增加。

氧化钛晶体中加入氧化铬 ,能形成氧化钛氧化铬( $\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ,它容易喷涂、工艺性能好、沉积效率高。涂层呈黑色 ,是很好的黑体吸收涂层材料和红外辐射涂层材料。但  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  有毒 ,喷涂现场应加强通风 ,操作人员应穿戴防护服。

钛酸钡( $\text{Ba} - \text{TiO}_2$ )粉末是一种重要的具有高介电性和很好压电性能的陶瓷材料 ,用于要求介电性能高的电绝缘涂层 ,如陶瓷电容器、绝缘子等 ,也用作压电传感器用涂层。

氧化钛系远红外辐射涂层粉末 ,是由  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$  和  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  组成的复合氧化物陶瓷粉末(TZN)。用其喷涂的涂层也呈黑色 ,具有高的热辐射率。在受热时能够辐射出波长为  $6\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$  的远红外波。该波长的能量极易被高分子有机物、水和空气等物质的分子吸收 ,引起分子、原子的剧烈振动和转动 ,产生共振现象而发生内热 ,从而加速这些物质内在的干燥过程 ,达到缩短加热时间、提高加热效率、节能节电的目的。它用于较低温度下的电热烘烤设备上 ,如食品、涂装、纺织、粮食烘干等部分 ,可降低电耗 30% 左右。

(2) 氧化铬。氧化铬为暗绿色的立方晶结构 ,熔点约 2300 ,密度为  $5.12 \text{ g/cm}^3$  ,一直稳定至高温。等离子喷涂氧化铬的优点是涂层致密 ,研磨后可获得表面精度高的镜面 ,表面光洁、硬度高 ,常用于薄膜输送辊、印刷辊等耐滑动磨损的零部件 ,同时 ,因具有强的耐酸碱能力 ,可用于 200 以下的耐化学药品涂层。

2. 3. 2. 2 碳化物、氮化物、硼化物及硅化物粉末

常用碳化物、氮化物、硼化物及硅化物粉末的性能和用途见表 2 - 15。

表 2 - 15 碳化物、氮化物、硼化物及硅化物粉末的性能和用途

名称	牌 号	成 分	性 能	用 途
碳化钨 粉末	FWC GB4295—84	WC99.7 杂质 余量	熔点 :2700 ,硬度 (1200 ~ 2000 ) HV 粉末粒度 - $74\mu\text{m} \sim +26\mu\text{m}$ 。注意 :WC 抗氧化能力很差 ,在氧化性气氛中受强热易分解为 $\text{W}_2\text{C} + \text{C}$	主要用作热喷涂耐磨涂层的原料粉末 ,但涂层的附着力不佳

(续)

名称	牌 号	成 分	性 能	用 途
碳化铬 粉末 $\text{Cr}_3\text{C}_2 +$ $\text{Cr}_7\text{C}_3 +$ $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$		$\text{Cr}86.6$ $\text{C}13.4$	熔点 1810 ,硬度 1400HV ,粉末粒度 - 25 $\mu\text{m} \sim +5\mu\text{m}$ ,碳化铬在金属型碳化物中具有最高的抗氧化能力 ,是性能优异的抗高温氧化、磨损和冲蚀材料	是 $\text{NiCr} - \text{Cr}_3\text{C}_2$ 高温耐磨、耐蚀、抗氧化复合粉末材料的主要原料组分
TiC			密度 4.93g/cm <sup>3</sup> ,熔点 3067 ,硬度约 3000HV ,面心立方晶体结构	用作特种硬质耐磨碳化物复合粉末的原料
ZrC			密度 6.46g/cm <sup>3</sup> ,熔点 3420 ,硬度 2700HV ,面心立方体结构	
NbC			密度 7.78g/cm <sup>3</sup> ,熔点 3600 ,硬度 2000HV ,面心立方体结构	
TaC			密度 14.48g/cm <sup>3</sup> ,熔点 3985 ,硬度 1800HV ,面心立方体结构	
TiN		N22.6 ,Ti77.4	熔点 2950 ,硬度莫氏 > 9 ,粒度 - 14 $\mu\text{m} \sim +10\mu\text{m}$	用于真空等离子喷涂 1000 以下耐热、抗氧化、耐磨、耐蚀、耐熔融金属侵蚀涂层
ZrN			熔点 2980 ,硬度莫氏 8 + ,膨胀系数 (24 ~ 2400 ) $8.55 \times 10^{-6} / \text{K}$ ,体积电阻率 $2.8 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$	用于真空等离子喷涂特种涂层
二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 陶瓷粉末		Si36.9 Mo63.1 (理论值)	$\text{MoSi}_2$ 是非常稳定的化合物 ,可以使用到 1700 高温 ,在空气中加热到 1000 以上时 , $\text{MoSi}_2$ 表面形成一层致密的不透气的 $\text{SiO}_2$ 保护膜	抗高温氧化涂层 ,耐无机酸涂层 ,耐熔融金属侵蚀涂层
氮化硼 (BN) 陶瓷粉末		B43.7 N56.3 (理论值)	BN 涂层有优良的抗高温氧化能力、良好的导热性和电绝缘性 ,化学性能稳定 ,摩擦系数非常低 ,润滑性能优良 ,并具有大的中子吸收截面	立方 BN 用于超硬耐磨涂层 ,六方 BN 用于高温润滑减摩涂层、电绝缘涂层、中子吸收涂层
氮化硅 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 陶瓷涂层		N39.9 Si60 (理论值)	$\text{Si}_3\text{N}_4$ 具有优异的高温力学性能 ,至 1240 仍有高的抗热震性 ,1100 ~ 1400 中仍保持稳定 ,硬度高莫氏 9 ,摩擦系数低 ,具有自润滑性能 ,但导热性比金属差	高温抗氧化耐冲蚀涂层、耐磨蚀涂层 ,如 : 发动机活塞、燃烧室耐磨、耐蚀、耐热涂层

### 2.3.2.3 金属陶瓷粉末

金属陶瓷是用金属或合金作粘结相,用陶瓷颗粒作强化硬质相经烧结、团聚、包覆等工艺处理而制成的一类重要的热喷涂材料。采用不同的金属或合金及陶瓷粉末材料的组分与配比能制成不同的金属陶瓷粉末材料,使陶瓷材料的高硬度、高化学稳定性、绝缘、绝热及特殊功能等特性和金属的强韧性、导热导电性、可加工性等特性有机地结合起来,充分发挥两大工程材料的综合优势。最常用的金属陶瓷有 WC - Co 系和  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  - NiCr 系。

在 WC - Co 系中,Co 的含量为 6% ~ 18%。用于在 540℃ 以下耐磨料磨损、冲蚀磨损、硬面磨损和微动磨损涂层,为应用最广的耐磨材料。在高温火焰下,部分 WC 会发生脱碳分解。提高粒子的速度、缩短粒子与高温热流的作用时间,或降低焰流温度可有效抑制分解的发生。常用的 WC - Co 粉末的制造方法有:铸造粉碎法、烧结粉碎法、聚合造粒法与包覆法。最适宜喷涂 WC - Co 涂层的方法是爆炸喷涂、超声速火焰喷涂和高效能超声速等离子喷涂(HEPJet)。由装甲兵工程学院最新开发的高效能超声速等离子喷涂法,除了具备超高速或超声速火焰喷涂的特点外,高温超声速等离子体射流相对于较低温度的超声速燃料气体射流具有可调整射流性质及射流热焓的特点。另一方面,等离子气体主要使用 Ar 或 He 等惰性气体,喷涂 WC - Co 时 WC 在惰性射流中飞行,可显著减少 WC 粒子的氧化行为。达到适当的熔融状态和在颗粒速度高的(颗粒速度可达 400m/s 以上)情况下,制备的 WC - Co 涂层孔隙率低、结合强度高、综合性能好,图 2 - 3、图 2 - 4 是采用高效能超声速等离子喷涂(HEPJet)设备、超声速火焰喷涂(JP5000)和爆炸喷涂(Dnepr - III)方法制备的 WC - Co 涂层的 SEM 断面形貌、孔隙率和耐冲蚀性能的对比如。

在  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  - NiCr 系中,NiCr 合金含量一般为 25%,在 900℃ 以下,具有优越的耐冲蚀、耐腐蚀和耐磨损性能。这种粉末包括两种类型:包覆型和混合型。用作 540℃ ~ 980℃ 的氧化介质中使用的耐高温磨粒磨损、微震磨损、燃气冲蚀磨损和硬面磨损涂层,以及耐高温侵蚀气体腐蚀涂层,如:燃料芯杆、喷气发动机转子、涡轮机叶片等。

### 2.3.3 纳米材料粉末

近年来在材料科学与工程领域,纳米材料研究成为热点,在热喷涂领域,纳米喷涂材料和纳米结构涂层也有了发展,大部分研究工作主要集中在两类材料上:氧化铝基陶瓷和碳化钨基材料。在热喷涂中,纳米结构涂层的形成机理因材料不同而不同。对于氧化铝基陶瓷材料,涂层是典型的等离子喷涂沉积,更适宜的是超声速等离子喷涂沉积,等离子喷涂温度高达粉料完全熔融温度。为了获

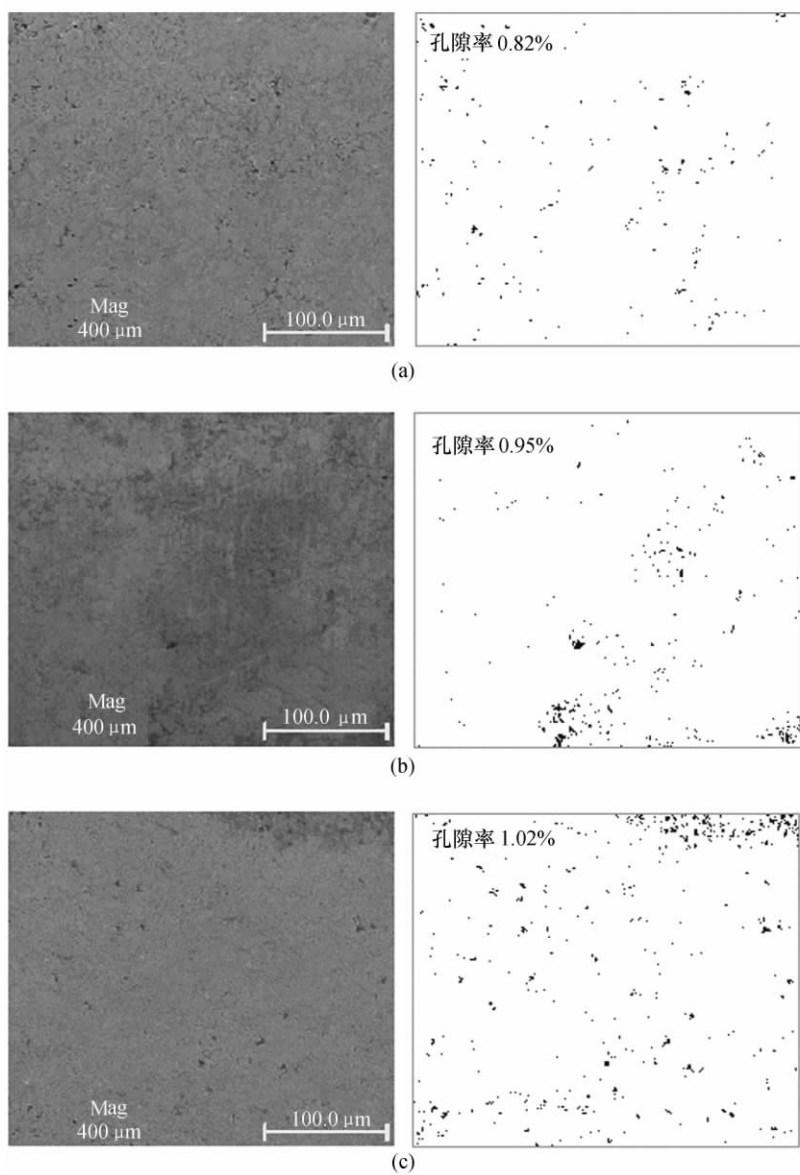


图 2 - 3 三种喷涂层的孔隙率比较

(a) HEPJet 喷涂层 ; (b) JP - 5000 喷涂层 ; (c) Dnepr - III 喷涂层。

得纳米结构涂层 ,必须采取措施控制喷涂参数和粉料化学结构。迄今为止已生产了氧化铝—氧化钛及氧化铝—氧化锆纳米结构涂层。碳化钨基纳米结构涂层



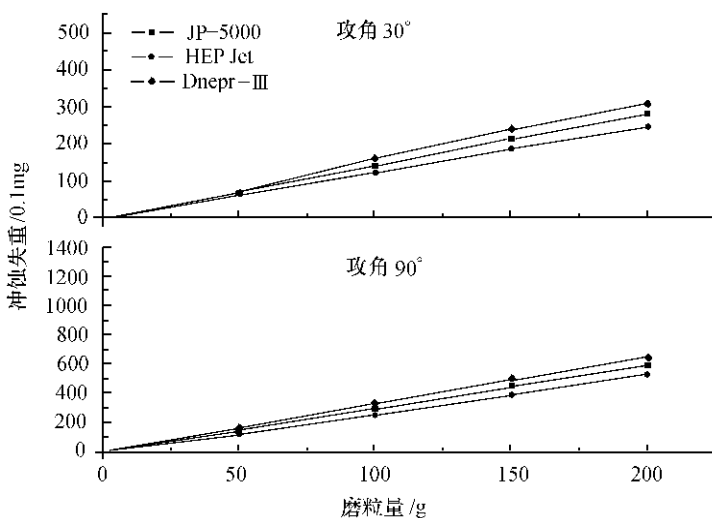


图 2 - 4 WC - Co 涂层抗冲蚀曲线

通过 HVOF 和超声速等离子喷涂工艺制备 ,粉料中碳化物的大小严重影响喷涂过程中的反应 ,碳化物的尺寸下降导致碳化物相在喷涂过程中的损失。因此 ,有两个矛盾因素影响着纳米结构涂层的抗磨性 :纳米结构材料硬度的提高和均匀的微观结构有利于提高抗磨性 ,然而 ,减小粉料中碳化物的尺寸 ,却带来碳化物相的严重减少有损于抗磨性。所以 ,喷涂工艺和喷涂参数对纳米喷涂材料比传统的碳化钨材料影响更大。由于喷涂时的高温 ,纳米粉粒材料的优势通常在纳米涂层中是不容易全面反应出来的。纳米结构喷涂粉末通常由喷干工艺制备 ,但最新的研究表明 ,球磨机械合金化很适合生产亚微米及纳米陶瓷粒子强化的金属基复合材料。

#### 2. 3. 4 塑料粉末

塑料粉末是指室温下处于玻璃态的高分子聚合物 ,有热塑性和热固性两种。热塑性塑料分子链为直链或带有支链 ,众多分子链靠分子间力集聚在一起受热后软化、熔融 ,冷却后可恢复原状 ,多次反复以后其化学结构基本不变。常用的热塑性塑料有聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚酰胺(尼龙)、聚酰亚胺、ABS 塑料、聚氯醚、聚苯醚、聚苯硫醚、聚碳酸酯、聚苯酯、聚甲醛、聚砒、氟塑料 ,热固性塑料具有网状分子链结构 ,各分子之间由化学链联结 ,一般不熔融 ,也不溶解 ,固化反应是不可逆的 ,通常与固化剂粉末混合喷涂 ,并在 130 ~ 170 加热 30min ,以使其完全聚合、固化。常用的热固性塑料有酚醛树脂、环氧树脂、有机硅、聚氨

酯、氨基塑料、聚邻苯二甲酸二丙烯脂。

2.3.5 复合材料粉末

复合材料粉末是由两种或更多种金属和非金属(陶瓷、塑料、非金属矿物)固体粉末经机械混合而成,其特点是:复合粉的粉粒是非均相体,在热喷涂作用下形成广泛的材料组合,从而使涂层具有多重功能;复合材料之间在喷涂时可发生某些有利的反应,从而改善喷涂工艺,提高涂层质量(例如,可制成放热型复合粉,使涂层与基体除机械结合外,还有冶金结合,提高涂层结合强度);包覆型复合粉的外壳,在喷涂时可对核心物质提供保护,使其免于氧化和受热分解。国内常用复合粉末的成分和性能见表 2 - 16。

表 2 - 16 常用复合粉末的成分和性能

名 称	化学成分及其质量分数 / %	性能及用途
镍包铝	Ni - Al(80/20 或 90/10 )	放热型自粘结材料,涂层致密,抗高温氧化,抗多种自熔合金熔体和玻璃的侵蚀
铝包镍	Ni - Al(5/95 )	
镍包石墨	Ni - C(75/25 或 80/20 )	良好的减摩自润滑可磨密封涂层,用于 550 以下
镍包硅藻土	Ni - 硅藻土(75/25 )	良好的减摩自润滑可磨密封涂层,用于 800 以下
镍包二硫化钼	Ni - MoS <sub>2</sub> (80/20 )	良好的减摩性能,用作无油润滑涂层
镍包氟化钙	Ni - CaF <sub>2</sub> (75/25 )	良好的减摩性能,用于 800 以下
镍包氧化铝	Ni - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (80/20 ,50/50 ,30/70 )	高硬度、耐磨耐蚀涂层;Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量高则韧性降低
镍包氧化铬	Ni - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 ~ 25/80 ~ 75 )	耐高温、耐磨、耐腐蚀
镍包碳化钨	Ni - WC(20/80 )	高硬度、耐磨、耐蚀,用于 500 以下
钴包碳化钨	Co - WC(12/88 ,17/83 )	高硬度、高耐磨、耐热、耐蚀,用于 700 以下
镍包复合碳化钨	Ni - WTiC <sub>2</sub> (85/15 )	高硬度、高耐磨
镍包碳化铬	Ni - Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (20/80 )	高硬度、高耐磨、耐蚀、抗高温氧化
镍铬包碳化铬	NiCr - Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (25/75 )	高硬度、高耐磨、耐蚀、抗高温氧化、耐高温
镍基自熔合金包碳化钨	0.6C ,14Cr ,3B ,3Si ,≤9Fe ,余 Ni + 20% WC	耐蚀、抗严重磨损,用于 600 以下
	0.5C ,9 ~ 12Cr ,2.5 ~ 3.5B ,2 ~ 4Si ,≤9Fe ,余 Ni + 35% WC	
	0.3C ,8 ~ 9Cr ,1B ,2Si ,≤6Fe ,余 Ni + 50% WC	

(续)

名 称	化学成分及其质量分数 / %	性能及用途
钴基自熔合金包碳化钨	0. 4C ,16Ni ,17 ~ 18Cr ,2. 5B ,3. 0Si ,5Mo , 0. 4W ,≤5Fe ,余 Co + 20% WC	耐热、耐腐蚀、抗氧化、抗严重磨损 ,用于 700 以下
	0. 3C ,13Ni ,14Cr ,2B ,2. 5Si ,4Mo ,3W ,≤ 3Fe ,余 Co + 35% WC	
	0. 2C ,10Ni ,11Cr ,1. 5B ,1. 5Si ,3Mo , 2. 5W ,≤3Fe ,余 Co + 50% WC	
铁基自熔合金包碳化钨	0. 5C ,6Ni ,13Cr ,3B ,3Si ,余 Fe + 20% WC	一般耐蚀 ,抗严重磨料磨损 ,用于 400 以下
	0. 4C ,5Ni ,10Cr ,2. 5B ,2. 5Si ,余 Fe + 35% WC	
	0. 3C ,4Ni ,8Cr ,1. 5B ,2Si ,余 Fe + 50% WC	
镍包金刚石	Ni - 金刚石	高硬度、高耐磨、耐冲击
钴包氧化锆	Co - ZrO <sub>2</sub>	耐热、耐磨、耐腐蚀、抗氧化
镍包铜	Ni - Cu(70/30 ,30/70 )	耐磨、耐腐蚀
镍包铬	Ni - Cr(80/20 ,60/40 )	耐热、耐蚀、抗氧化、耐磨
镍包聚四氟乙烯	Ni - PTFE(70/30 )	耐腐蚀、减摩自润滑涂层
铝 - 聚苯酯		摩擦系数极低 ,用于 300 以下

## 第三章 热喷涂工件的表面制备

为了提高涂层和基体间的结合强度,要求工件表面洁净、粗糙,因此对工件表面进行预处理是一个十分重要的环节,它往往关系到整个工艺过程的成败,必须引起高度重视。表面清洗与预处理加工又称表面前处理,是用机械、物理或化学的方法改善基体表面状态,为热喷涂提供良好的基础表面。表面预处理过程主要包括表面净化处理、表面预加工、表面粗化处理和非喷涂表面的保护。

### 3.1 基体表面净化处理

表面净化处理是指去除表面污染物如:锈蚀、油脂、污垢、杂质等,使基体表面达到必要的洁净度。表面净化处理主要包括表面除油处理和表面除锈处理。

#### 3.1.1 常用表面除油处理技术

##### 3.1.1.1 有机溶剂清洗除油

有机溶剂清洗除油是利用有机溶剂对油脂的溶解作用而清除表面油污的除油方法。常用的溶剂有煤油、汽油、酒精、甲苯、丙酮、三氯乙烯和四氯化碳等。这种方法的特点是操作简单,适应性强,基本上不腐蚀金属,对皂化及不皂化油脂都能除去。缺点是某些溶剂易燃,有一定毒性。常用的除油清洗方式有浸泡、擦刷法、喷淋法及蒸气法。

(1) 浸泡擦刷法。将工件浸渍于溶剂中,用机械搅拌和擦刷的方式除去油污。

(2) 喷淋脱脂。将溶剂通过喷嘴对工件表面进行喷淋,在溶剂的冲刷作用下除去油脂相固体污物。喷淋脱脂后,一般要接着再用清洁的溶剂漂洗。

(3) 蒸气法。蒸气除油要在专门的蒸气箱内进行,溶剂一般为三氯乙烯、四氯化碳、二氯甲烷等。将工件悬挂在蒸气箱的上部,溶剂放在蒸气箱的底部并加热,溶剂蒸气冷凝于工件表面,溶掉的油脂随冷凝的溶剂回流到溶剂吸收器中,再加热成蒸气。因为溶剂气化温度低,可保证蒸气总是清洁的。溶剂在箱内反

复循环,消耗量少,所以这是经济有效的除去油脂的方法。三氯乙烯蒸气对人体有害,工作时要特别注意安全。

### 3.1.1.2 化学碱液清洗除油

化学碱液清洗除油是利用碱性介质对油脂的皂化或乳化作用,分别将工件表面皂化性油污或非皂化性油污除去的方法。化学碱液除油是较常用的除油方法之一,与有机溶剂除油相比,具有无毒、不易燃、操作方便、设备简单、经济性好等优点,在除油的同时可以除掉附在工件表面上的金属碎屑及混在油脂中的研磨料、炭渣等杂质。缺点是对某些金属有一定的腐蚀。

碱液清洗一般都采用浸洗方法,适用于尺寸不太大的工件。碱液浓度和温度参数可根据工件批量、零件几何形状以及油污程度、要求达到的清洁度等作适当调整。用手工清洗时,操作温度不可过高,碱液浓度也应选用低指标,一般低于30g/L,操作时要防止碱液伤害皮肤和眼睛。经过碱液清洗后的工件,应立即用软水漂洗或冲洗并烘干。

### 3.1.1.3 电化学除油

电化学除油又称电解除油,其基本原理是:在碱性电解液中,以工件为阴极或阳极,以铁板或镀镍板为阳极或阴极,在通电的情况下,氢气或氧气在工件表面电解析出,析出的氢气或氧气气泡对工件表面油污产生强烈的机械撕裂和冲击作用,促使油污脱离工件表面,同时,氢气或氧气的析出对工件表面附近的溶液起到搅拌作用,促使溶液不断地循环更新,加速了碱性电解溶液对工件表面油污的皂化和乳化作用,使工件表面油污得到清除。根据工件所处的极性不同,电化学除油分为阴极除油和阳极除油。

### 3.1.1.4 加热除油

对于被油脂浸透的铸件等多孔质工件,如果用溶剂或碱液清洗,仅能除去工件表面的油污,而微孔中的油脂则很难清除。采用加热除油的方式,在200~350℃对工件进行低温加热,使微孔中的油挥发、炭化,即可将油脂除去。采用加热方式除油时应注意清除表面残留积炭。

### 3.1.1.5 水基清洗剂除油

水基清洗剂是一种工业用洗涤剂,它由表面活性剂和少量添加剂组成,有粉状、膏状和液态三种形式,一般呈碱性。水基清洗剂除油清洗的原理:水基清洗剂与水配成水溶液,其中的表面活性剂分子对工件表面油污物产生乳化和分解作用,工件表面水溶性污物被水溶解,从而达到表面除油清洗的目的。水基清洗剂除油是近年来得到迅速发展的一种除油清洗方法,它以水代油,具有节省能源、成本低、劳动条件好、使用安全、低污染等特点。常用的水基清洗剂除油清洗方式有浸洗法、冲洗法、蒸气法和超声波法等。

### 3.1.1.6 高压射流清洗除油

将清洗液用高压泵加压从喷嘴喷出形成高速射流射向工件表面,高速射流在工件表面产生冲蚀、疲劳和气蚀等多种机械、化学作用,从而将工件表面油脂、污垢等除去。高压射流清洗除油常用的清洗液有水、水基清洗剂溶液。它的主要特点是冲刷力大、清洗效率高,能除去严重的表面油污和固态污垢,特别适合形状复杂和大型工件的除油清洗。

### 3.1.1.7 超声波清洗除油

超声波清洗除油的原理 超声波使液体产生超声空化效应,液体分子时而受拉、时而受压,形成一个微小空腔,即所谓“空化泡”。由于空化泡的内外压力差十分悬殊,待空化泡破裂时,会产生局部液力冲击波(压力可达几十至几百兆帕)。这种压力,会使粘附在工件表面的各类油脂、污垢剥落。与此同时,在超声场的作用下,清洗液流动性增加,对油脂、污垢的溶解和乳化作用加速,从而进一步强化了除油清洗。

常用的超声波清洗除油方式是将工件浸入盛有清洗液的超声波清洗槽内,清洗液可以是有机溶剂、化学碱性清洗液或水基清洗剂溶液。超声波由清洗槽底部辐射至清洗液内进行清洗。对清洗要求严格的零件还可采用多步清洗法,也可采用先喷射清洗,然后再超声波清洗。超声波清洗除油所使用的溶液其浓度和温度比相应的化学除油、电化学除油低,从而减少了工件表面金属的腐蚀。它还具有操作简单、清洗质量好、清洗速度快,能快速清洗含有孔洞、空腔和沟槽等形状复杂工件的特点,而且易于实现机械化和自动化。

## 3.1.2 表面除锈处理

### 3.1.2.1 化学除锈

化学除锈是利用酸性(或碱性)溶液与金属表面锈层发生化学反应,使表面锈层溶解、剥离的原理而将表面锈蚀除去。化学除锈又称“浸蚀”、“酸洗”,常用于小型或形状复杂工件的除锈。

### 3.1.2.2 电化学除锈

电化学除锈按工件所处的极性不同分为阳极除锈和阴极除锈,此外也有交流电除锈。

阳极除锈是利用阳极的电化学溶解、化学溶解及氧气气泡析出时对氧化皮的机械剥离作用而进行除锈的。由于氧气气泡大而稀少,故机械剥离作用不强。阳极除锈时应注意当处理时间过长时,易产生过腐蚀现象。阳极除锈适合于高强度和具有较好弹性的金属工件。

阴极除锈是利用氢气气泡析出时的机械剥离作用而进行除锈的。由于氢气

泡密而小,故对氧化皮的机械剥离作用较强烈。阴极除锈几乎不腐蚀基体,能保证工件的几何精度。阴极除锈的不足是氢的析出容易造成金属的氢脆,电解液中其它金属离子会在阴极工件表面还原形成杂质。阴极除锈适合于氧化层致密、尺寸精度要求较高的工件。

交流电除锈兼有阳极除锈和阴极除锈的特点。实际生产中常用阴阳极除锈交替进行,既可缩短浸蚀时间,又可保证尺寸精度及减轻氢脆。

### 3.1.2.3 火焰除锈

火焰除锈是用氧乙炔火焰对工件进行加热,利用钢铁和氧化皮的热膨胀系数不同,使氧化皮脱落。主要适用于厚型钢铁构件及大型铸件,不适用于薄壁件及小型铸件,否则工件将受热变形而影响质量。

### 3.1.2.4 手工及机动工具除锈

手工及机动工具除锈是以手持工具(铲刀、砂布、钢刷等)或机动手持工具(电动或气动砂轮、除锈机等)对工件表面进行机械切削作用而使锈层除掉。这种方法生产效率低,劳动强度高,但由于具有工具简单、操作方便的特点,目前较为常用。

### 3.1.2.5 滚光除锈

滚光除锈是将零件、磨料、除锈液一起放在滚光筒中,随着滚筒的旋转而对工件表面进行磨削、冲刷,从而除掉工件表面锈层。这种方法生产效率高,除锈质量好,常用于批量小型零件的除锈。

### 3.1.2.6 喷砂(丸)除锈

喷砂(丸)除锈是目前最为常用的一种除锈方式,喷砂(丸)除锈的同时也能达到表面粗化、表面活化的目的,具有一种方式多种用途的特点,但是在热喷涂应用中如有条件,最好将除锈砂和粗化喷砂分开,以免污染粗化用砂,影响喷涂层质量。有关喷砂(丸)除锈的具体技术细节请参见下节(表面粗化处理)。

## 3.2 基体表面预加工

表面预加工的主要目的是对工件进行表面清理,除去待修工件表面的各种损伤(如疲劳层和腐蚀层等)、原喷涂层、淬火层、渗碳层、渗氮层等,以及修正不均匀的磨损表面,使喷涂层的厚度均匀,预留喷涂层厚度;对工件表面进行粗化处理,以提高喷涂层与工件的结合强度。

预加工量由设计规定的喷涂层厚度决定,对修复旧件,一般切至该零件最大磨损量以下 $0.1\text{mm} \sim 0.25\text{mm}$ 。对新件,预加工量与工件工作条件有关,如滑动配合表面的预加工量应为 $0.15\text{mm} \sim 0.18\text{mm}$ 或略大一些。

对于需要对喷涂涂层进行精饰加工的圆柱形零件 ,一般采用车削方法将基体下切至深度为最小涂层厚度的尺寸。喷涂涂层的厚度通常小于 1.0mm ,陶瓷涂层的厚度通常为 0.3mm ~0.5mm。

轴类零件的最小涂层厚度与轴的直径有关。不同直径的轴类零件的最小涂层厚度见表 3 - 1。

表 3 - 1 不同直径的轴类零件的最小涂层厚度

轴的直径 /mm	≤25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	100 ~ 125	125 ~ 150	≥150
最小涂层厚度 ( 径向 )/mm	0.25	0.37	0.50	0.62	0.75	0.87	1.00

在预加工时 ,要特别注意边角过渡。这是因为喷涂层中存在着内应力 ,在喷涂层边缘 特别是锐边处 ,有剥离的倾向。在边角处有较大的圆角或倒角能防止喷涂层的剥离。在工件的喷涂与非喷涂的结合部位以及轴的端部 ,均应有合适的过渡倒角或过渡圆弧 ,以减少涂层尖角效应产生的应力集中。通常 ,喷涂与非喷涂相邻面的过渡倒角以 30° ~45°为宜 ,轴端圆弧倒角一般以 r = 1.0mm 为宜 ;轴端面涂层应以端头圆弧包覆为宜。

3.3 基体表面粗化处理

粗化处理是使净化和预加工后的基材表面形成均匀的凹凸不平的粗糙面 ,以增大涂层和工件之间的接触面积 ,并控制涂层粗糙度。经过粗化处理的表面才能和涂层产生良好的机械结合。正确的粗化处理能起到以下作用 :

- (1) 实现“ 抛锚效应 ”,即使涂层中变形的扁平状粒子互相交错 ,形成联锁的叠层。
- (2) 增大涂层与基材结合的面积。
- (3) 改善涂层的残余应力 ,使涂层产生压应力 ,减少涂层的宏观残余应力 ,使涂层和基体产生更强的结合。
- (4) 进一步净化表面 ,并起到使表面活化的作用。

粗化的方法有 :喷砂、机械加工( 车沟槽、压花等 )、电拉毛与喷涂自粘结中间过渡层等。

3.3.1 喷砂处理

喷砂是以压缩空气流或离心力作动力 ,将硬质磨料高速喷射到基材表面 ,通



过磨料对表面的冲刷、凿削和锤击作用而使表面粗化。喷砂粗化兼有表面净化作用,可以除去氧化皮、锈斑和其它附着物。喷砂还能使表面产生一定的残余压应力,这对提高喷涂层的疲劳强度有利。另外,喷砂处理的效率高,特别适合于大面积、大批量工件的表面预处理和现场施工,是工业上最常用的表面预处理方法。

### 3.3.1.1 喷砂设备

热喷涂常采用干式喷砂装置,根据工作原理主要分为压力式喷砂机、射吸式喷砂机和离心式喷砂机。

#### 1. 压力式喷砂机

压力式喷砂机是利用压缩空气的压力和砂粒自重,将压力罐(密闭的压力容器)中的砂粒压入喷砂管,由压缩空气推动,从喷嘴高速喷出对工件表面进行粗化处理的装置。喷砂系统由压缩空气供给设备、压力罐(砂罐)、砂管和喷砂枪等组成。压力式喷砂机的原理和结构如图3-1所示。

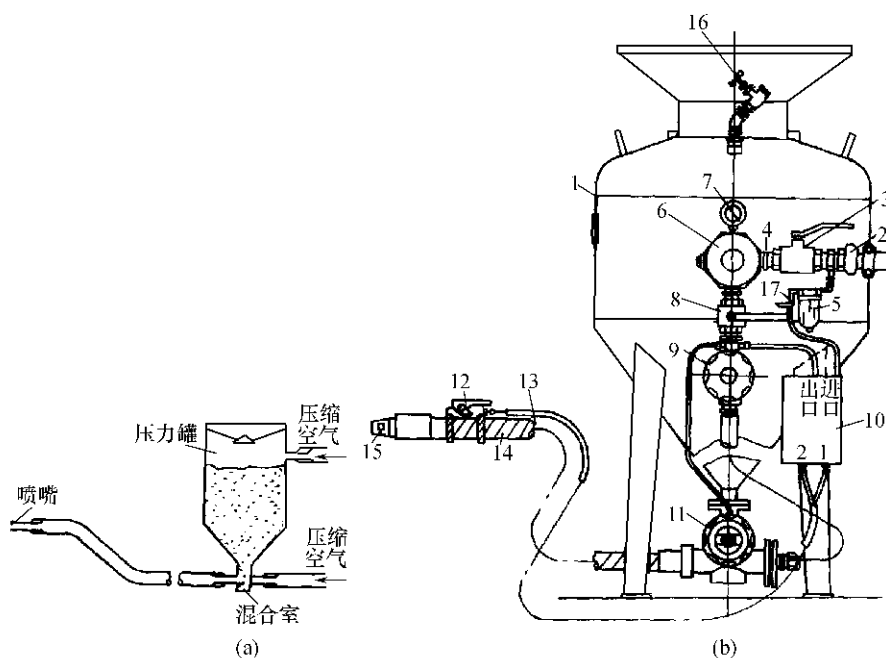


图3-1 压力式喷砂机的原理与结构

(a) 压力式喷砂原理;(b) 压力式喷砂罐结构。

- 1—罐体容器;2—空气管接头;3—总阀;4—螺纹接头;5—空气滤清器;6—十字形接头;  
7—压力表;8—空气调节阀;9—空气阀;10—控制箱;11—喷砂阀;12—遥控键;  
13—遥控用空气管;14—砂管;15—喷砂嘴;16—排气阀;17—操作作用空气阀。

砂罐是压力式喷砂机的关键设备,其容量通常在  $0.6\text{m}^3 \sim 1\text{m}^3$  之间,其中的空气压力通常维持在  $0.7\text{MPa}$  左右,压力式喷砂机可选用的磨料范围很广,可使用冷硬铸铁砂、钢丝切丸、棕刚玉、铜矿渣、石英砂等磨料。选用粗颗粒磨料,可得到粗糙度较高的表面,同时可进行远距离和高空喷砂作业,是高效率的喷砂方法。因此适用于大型钢铁构件大面积喷锌、喷铝前的预处理和大型厚壁工件的粗化处理。在使用细砂或对较小、较薄的零件喷砂时,压力应酌情降低,以防止工件变形,或者采用射吸式喷砂方法粗化工件表面。

## 2. 射吸式喷砂机

射吸式(又称吸入式)喷砂机是利用压缩空气流在喷砂枪的射吸室内造成的负压,通过砂管吸入砂粒,并使砂粒随气流从喷嘴喷出对工件表面进行粗化预处理的装置。这种喷砂方法设备简单、使用方便,但砂的吸入量较少、喷射速度较低、喷砂效率不高,通常用于小面积或薄壁件及有色金属的喷砂处理。

射吸式喷砂枪结构如图 3-2 所示。在喷砂过程中,从空气喷嘴喷出的高速气流在空气喷嘴周围形成负压,吸砂管把磨料从喷砂箱底部的锥型料斗处吸进,带入高速喷出的气流中。在高速气流中,磨料被加速,喷射到工件基体表面。在封闭的喷砂柜中,撞击到工件表面的砂粒被弹射,收集在喷砂柜中,经过筛网筛分下落到漏斗内,并被回收循环使用。磨料可被连续使用,直至磨料破碎失去喷砂效果。射吸式喷砂机有小型的手工操作的装置以及中型的、完全自动化的装置。这种喷砂机适宜使用相对密度较小的非金属磨料,不适合使用相对密度较大的金属磨料,因为相对密度较大,且粒度较大的铸铁砂或钢砂需要更大的负压吸入力。

与压力式喷砂机和离心喷砂机相比,射吸喷砂枪的生产效率较低,吸砂管路较短,只适用于加工体积较小的工件,但这种喷砂枪结构简单、价格低、使用灵活、维护方便,在现场可用于小面积的局部喷砂处理。射吸式喷砂枪需要的压缩空气流量较小,但要求使用较高的压力,通常为  $0.52\text{MPa} \sim 0.7\text{MPa}$ 。

## 3. 离心式喷砂机

离心式喷砂机亦称抛丸式喷砂机,它不使用压缩空气作为磨料喷射的动力,而是依靠抛砂轮的高速旋转的离心力,将磨料抛射,使磨料以叶轮端部的圆周线速度冲击工件表面而达到喷砂净化、粗化表面的目的。离心式喷砂机的原理如图 3-3 所示。该方法喷砂效率高而且经济,但喷砂装置庞大,造价较高,一般只用在成批量加工的生产线上。

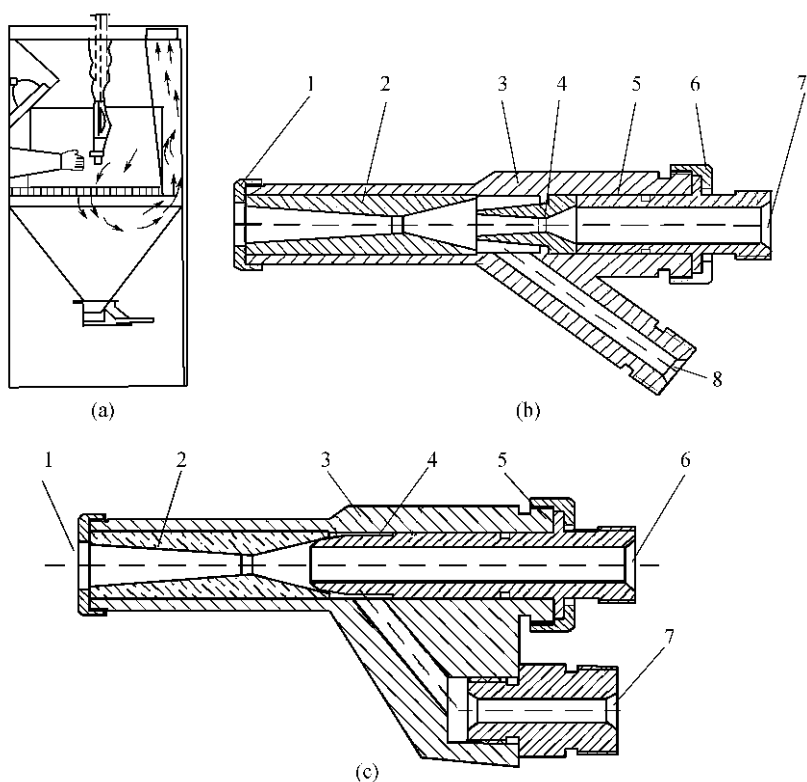


图 3 - 2 射吸式喷砂枪

(a) 喷砂箱(或小室);(b) 侧向进砂射吸式喷砂枪;1、6—压帽;2—陶瓷喷嘴;3—枪体;  
4—射吸嘴;5—进气管;7—压缩空气入口;8—砂料进口;(c) 轴向进射吸式结构示意图;  
1、5—压帽;2—陶瓷喷嘴;3—枪体;4—进砂管;6—砂料进口;7—压缩空气入口。

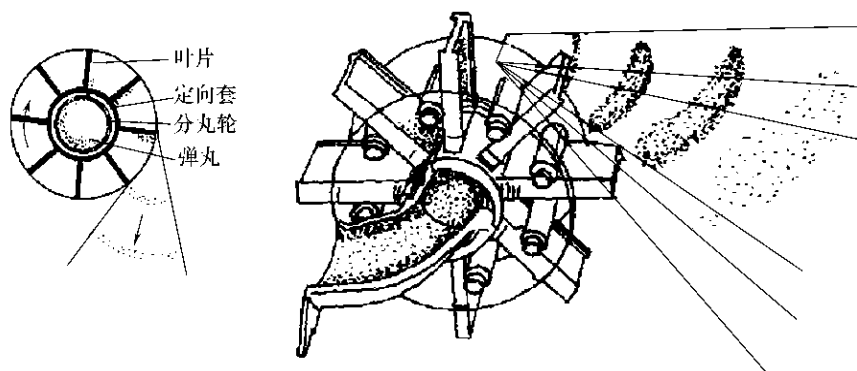


图 3 - 3 离心式喷砂机的原理和抛射示意图

选择喷砂机要根据喷砂机的性能特点 结合生产实际需要 综合考虑工件喷砂要求、生产规模等因素选择适合自己企业的喷砂设备。

3.3.1.2 喷砂磨料和喷砂操作参数的选择

选择喷砂磨料和喷砂操作参数时 ,主要应考虑待喷涂基体材料的类型、结构、性能及对表面粗糙度的要求以及喷砂磨料的类型、硬度、粒度、形状等。对于铝、铜及塑料等基体材料 ,要选用硬度较低、粒度较细的磨料并采用较低的空气压力、拉大喷砂距离 ,以减少砂粒嵌入的可能性。对薄的基体或薄壁部位宜采用细粒度的刚玉砂 ,不宜使用冲击力大的钢砂 ,以免工件发生变形。基体硬度低于 (40 ~ 45 )HRC 的大多数钢铁制件最好采用铸钢砂或铸铁砂喷砂 ;基体硬度高于 45HRC 时 ,则宜采用刚玉砂、碳化硅砂。要求基体的表面粗糙度大或喷涂厚涂层时 ,应使用粗砂 ,反之 ,则使用细砂 ,热喷涂用喷砂磨料通常使用多角形磨料而不采用球丸类磨料 ,否则达不到热喷涂工艺对表面粗糙度的要求。

1. 喷砂磨料的选择

金属类磨料 ,如铸铁砂和铸钢砂 ,使用寿命长、破碎率低、能重复使用 ,多用于钢铁制件大批量产品生产时的喷砂作业 ,但这类材料不适用于铜、铝、镁等材料的喷砂处理 ,容易产生铁锈污染。非金属类磨料有氧化铝、碳化硅、石英砂、河砂、炉渣、石榴石等 ,特别是棕刚玉砂质地坚硬、破碎率低、喷砂效率高、质量好、价格适中、不会对基体表面产生污染 ,是最常用的喷砂磨料。碳化硅砂虽然硬度很高 ,但对基体的嵌入能力强、破碎率较高 ,通常使用不多。在无法回收的现场大面积喷砂操作中 ,亦可使用优质石英砂和河砂。表 3 - 2 列出了几种常用喷砂磨料在控制条件下的循环使用次数。

表 3 - 2 几种常用喷砂磨料在控制条件下的循环使用次数

磨料类型	棕刚玉砂	冷激铸铁砂	铸 钢 砂	白刚玉砂
循环使用次数	10	15	100	7

白刚玉砂 (氧化铝) 硬度高、破碎率低、喷砂效果好 ,但价格较高。可用于马氏体钢类的硬质基体 ,可循环使用。若用其喷软基体 ,应降低压缩空气压力 ,喷砂后用压缩空气除去嵌入基材表面的颗粒。

石英砂破碎率高 ,一般一次性使用。其粉尘会损害人体健康 ,使用时要特别注意采取防护通风措施 ,防止对人体的损害和环境污染。

激冷铁砂和带棱角的钢砂硬度高、破碎率低、使用寿命长、可循环使用 ,但容易锈蚀 ,生锈后使用会影响预处理质量。

工件表面硬度越高 ,喷砂粗糙度越低。为了获得较理想的粗糙度 ,需要对硬度较高的工件表面进行退火处理。

## 2. 喷砂磨料粒度的选择

磨料粒度的选择主要取决于所需要的表面粗糙度,也与磨料的硬度、涂层厚度和喷砂用空气压力等因素有关。实际使用的喷砂磨料,其粒度范围通常分为三档:粗砂(0.6mm~2.0mm, -10目+30目),中粗砂(0.425mm~1.4mm, -14目+40目),细砂(0.18mm~0.6mm, -30目+80目)。当要求喷涂涂层厚度超过0.25mm时,推荐采用粗砂,以提高基体的表面粗糙度,获得最佳的粘结性能;当涂层厚度小于0.25mm,要求基体表面的粗糙度比较均匀时,则宜采用中粗砂,能达到满意的粘结强度;当涂层厚度小于0.25mm,且涂层以喷涂态使用时,即要求喷涂态涂层的表面比较均匀、光洁时,宜采用细砂。喷细砂时,单位面积上冲击基体表面的磨料数目和接触面积均增大,因而喷砂效率高,但表面粗糙度较小;反之,磨料粒度大,喷砂效率低、表面粗糙度增大。喷砂用磨料必须清洁、干燥、有棱有角,忌用铸件抛丸清理后用过的磨料。

## 3. 喷砂操作参数的选择

(1) 压缩空气要干净整洁、干燥无水。可用能迅速蒸发的溶剂(如丙酮)洒在喷砂面上,如果发现有明显的黑印,则表明压缩空气中含油污。也可用白纸检查压缩空气中是否有油、水等物。

(2) 喷砂的角度。喷砂枪轴线应与工件表面呈 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,要避免垂直。如果是内孔,喷砂枪与基体之间的角度不能小于 $45^{\circ}$ ,特别要注意,喷涂方向应与喷砂方向一致,否则会影响涂层与基体的结合强度。

(3) 喷砂嘴到基体表面的距离一般在100mm~300mm。

(4) 在完成表面粗化处理后,尽可能地在较短的时间内进行喷涂,一般不得超过2h,北方一般不要超过4h,以防止氧化和落上灰尘。如果需要搬动喷砂粗化后的工件,应戴清洁的不脱绒的手套或类似的物品,不能用手接触已粗化的表面,否则会降低涂层与基体之间的结合强度。

### 3.3.2 机械加工法粗化

机械加工粗化法包括车削、磨削和滚花等,应用较多的是车削。机械加工粗化喷涂面时,不能采用冷却液。

机械加工的主要目的是使涂层的收缩应力限制在局部地区,减少涂层的应力积累,增大涂层与基体的结合面积,以提高涂层的粘结强度,并且使涂层中各层之间折叠,提高涂层本身的剪切强度。

根据工件的形状及喷涂部位的不同,机械加工粗化可以分为以下几种情况。

#### 3.3.2.1 车削螺纹

回转零件如轴类等,可以采用车削螺纹的方法进行表面粗化处理,同时去掉

损伤或疲劳层 ,预留出喷涂层厚度 (见图 3 - 4 )。

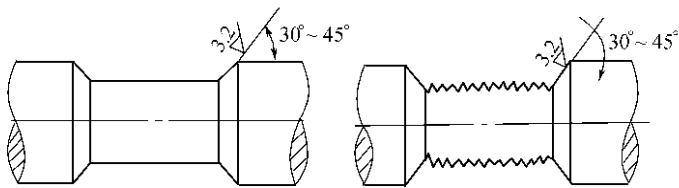


图 3 - 4 轴类零件车螺纹

在一般情况下 ,可以采用 90°的 V 形刀具 ,螺距为 0. 5mm ~ 0. 6mm 较为适宜。刀尖应磨成圆弧形 ,以免产生锋点切削。如不希望有深沟槽 ,进刀深度按标准螺纹深度的 50% 即可。对于很厚的涂层 ,使用螺距为 0. 85mm ~ 1. 0mm 的螺纹可以产生较强的粘结作用。螺纹形状与螺距是否准确 ,对喷涂效果的影响并不太重要。为了使很厚的涂层具有非常强的粘结强度 ,可采用圆底沟槽。沟槽宽 1. 1mm ~ 1. 3mm ,深约 0. 6mm ~ 0. 8mm ,所用刀刃的倒角半径约 0. 13mm。沟槽之间的脊顶宽 ,柔性材料约为 0. 38mm ,脆性材料约为 0. 64mm。在具有这种沟槽的表面上喷涂时 ,最初几次 ,喷枪应与喷涂表面成 45°左右的角度交替喷涂 ,以保证涂层能填满沟槽。

3. 3. 2. 2 平面开槽

对于基体存在棱边且需要喷涂与基体热膨胀系数差别较大的厚涂层时 ,建议采用棱边开槽的方法粗化 ,即在基体棱边切出等宽沟槽 (如图 3 - 5 所示)。

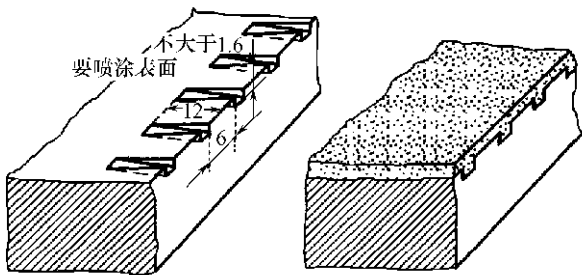


图 3 - 5 平面开槽

开槽的主要作用是：

- (1) 减少涂层的收缩应力。
- (2) 增大涂层与基体的结合面积。

(3) 防止涂层在基体边缘处翘起,即分散应力增加抛锚效应。

对于硬度较高的基体或较厚的平面涂层还可以采用平面布钉的方法(埋钉法)。布钉过程包括钻孔与攻丝,拧入与基体材料相近的无镀层平头螺钉,疏密根据具体情况而定,固定之后,再对螺钉与基体表面一起做粗化处理。

### 3.3.3 电拉毛

这种方法是把镍片或镍丝束作为电极,将工件作为另一电极,采用手工电弧焊电源对工件表面进行轻微焊接,使工件表面上溅射形成小的凹凸点。凸点高度可达 $0.1\text{mm} \sim 0.75\text{mm}$ ,但在 $0.5\text{mm}$ 以下为宜。该方法可制备出相当粗糙的表面,可以提高涂层的结合强度。镍拉毛前,必须对工件表面进行脱脂和洗涤。

镍拉毛适用于硬度较高,而又不能采用喷砂或机械处理的工件表面。此外,在镍拉毛粗化时由于形成了小的熔化放电斑点,将降低零件的耐疲劳性能。

## 3.4 非喷涂表面的保护

大多数要喷涂的零件仅是局部面积,在待喷涂面上进行喷砂时,不喷砂的部分应进行遮盖,以防止砂粒溅伤或损害工件。常用的方法有胶带保护、化合物保护和机械保护,油孔、螺钉孔等可用耐热材料堵住。

### 3.4.1 胶带保护

常用的胶带是用不燃的玻璃布或铝箔涂以耐热胶制成,能承受一般喷涂温度的压力敏感胶带。所用的胶在喷涂高温下,必须不流淌,不污染零件。这种方法适于零件形状复杂、制作夹具比较困难的部位,而且保护部位与喷涂部位在同一个表面上。当喷涂层比较厚时,在喷涂过程中要经常清理沉积在保护胶带上的涂层,以防止喷涂层在胶带上堆积,避免胶带去除时产生困难和涂层边缘的损坏。

### 3.4.2 化合物保护

保护化合物一般为流体状态,可以很方便地刷涂到不需喷涂的表面上,以防止喷涂层粘结,喷涂后可以用水或溶剂将其除掉。这类保护化合物种类很多,使用比较广泛的是水溶性甲基纤维素,其中加有其它耐热填料。这种保护涂料干

燥后 ,保护膜完整 ,能耐喷涂射流的冲刷 ,对基体材料无腐蚀作用。适用于与喷涂层不在同一个平面上的部位。若保护部位与喷涂层在同一个表面 ,且喷涂层很薄时 ,也可以采用这种保护方法。但当喷涂层较厚时 ,如采用化合物保护 ,保护部位会逐渐堆积形成“涂层壳” 。它与涂层连接在一起 ,很难分离。

### 3.4.3 机械保护

这种方法是根据零件形状制作夹具 ,把不需要喷涂的地方保护起来。制作夹具时应遵循下列原则 :

(1) 保护夹具与被保护部位间应留有一定的间隙 ,一般为  $1.3\text{mm} \sim 3.8\text{mm}$  ,以防止保护夹具与涂层粘结 ,在卸除夹具时 ,损坏涂层边缘。

(2) 在喷涂内径时 ,尽量不要因安装保护夹具使内径形成盲孔 ,否则喷涂时产生的粉尘不易排出而污染涂层 ,而且冷却效果差 ,容易产生喷涂过热。

(3) 夹具应具有一定的强度 ,以防使用时变形。

(4) 夹具不应使用低熔点合金或金属和硬度很低的金属制作 ,以防止产生金属污染。



## 第四章 热喷涂涂层设计

进行涂层设计时,首先要了解工件的服役情况和工件表面应具备的性能,准确判定工件的失效原因,例如工件工作的介质、温度、受力的性质和大小、工件的材质、组织、尺寸等,从而确定对涂层的要求,包括结合强度、硬度、厚度、孔隙的多少及大小、表面精度、耐磨、耐蚀、耐热或其它性能。

### 4.1 根据使用要求选择喷涂材料

一般地说,采用热喷涂涂层的主要目的有下述几种:耐磨损、耐热和抗氧化;耐大气和溶液腐蚀、耐化学腐蚀;导电或电绝缘;作为间隙控制使用的可磨耗封严涂层;修补尺寸。使用中应根据不同的目的选用不同的涂层。

#### 4.1.1 耐磨损涂层

##### 4.1.1.1 耐粘着磨损涂层

###### 1. 软支承表面用涂层

软支承表面是指可以使润滑剂中携带的磨料粒子嵌入涂层中,也允许变形以调整支承表面的涂层。这种涂层的磨损优先于其配合表面,设计时应考虑低成本材料。喷涂材料多为有色金属,如铝青铜、磷青铜、巴氏合金和锡等。

对这类涂层必须提供良好的润滑,不然磨损率将会增大;支承的涂层必须软,以捕集润滑剂夹带的磨粒。热喷涂涂层的固有性能增加了它作为支承涂层的适应性。微孔的作用犹如润滑剂的储存器,同时由于降低了粒子的熔合,而具有较小的粘着磨损倾向。表面粗糙度对支承性能也起一定作用,粗糙表面一般具有较高的磨损率,但精细表面不会形成储藏磨粒的凹槽。

这类涂层常用于巴氏合金轴承、水压机轴套、止推轴承瓦、活塞导承、压缩机十字头滑块。

###### 2. 硬支承表面用涂层

硬支承表面用涂层是指可以用作高耐磨和硬支承的涂层,能耐磨料磨损,减

少划痕和划伤,可用于高负荷低速度的硬支承表面上。常用的喷涂材料有镍基、铁基自熔合金、氧化物和碳化物陶瓷(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Co}$  -  $\text{WC}$  等)以及难熔金属  $\text{Mo}$ 、 $\text{Mo}$  加自熔合金等。

对这类涂层也应当有良好润滑,但不如对软支承那么重要,因为涂层具有较高的耐磨性可以经受住瞬时无润滑的操作;表面一般应该有相等的硬度;虽然两个相似的涂层可以用来彼此相对滑动,但实践中常使用两个不相似的组合物,例如某一涂层对铸锻金属,这样可以减少擦伤和划伤。常用于冲床的减振器曲轴、糖粉碎辊辊颈、防擦伤轴套、方向舵轴承、涡轮轴、主动齿轮轴颈、活塞环(内部燃烧)、燃料泵转子等。

#### 4.1.1.2 耐磨粒磨损涂层

##### 1. 耐磨粒磨损涂层

耐磨粒磨损涂层是指能耐滑动表面之间的外来粒子的切削和划槽作用的涂层,涂层的硬度应大于外来磨料粒子的硬度。在高温下使用的涂层,其工作温度为  $540 \sim 845$  ;在低温下使用的涂层,其工作温度在  $540$  以下。当工作温度在  $540$  以下时,涂层材料可选用自熔性合金加  $\text{Mo}$  或  $\text{Ni}/\text{Al}$  混合粉、 $\text{Ni}/\text{Al}$  丝以及自熔性合金加  $\text{Co}$  -  $\text{WC}$  混合粉;当工作温度为  $540 \sim 845$  时,喷涂铁基、镍基、钴基材料、 $\text{Ni}/\text{Al}$  丝以及  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  金属陶瓷粉;在受冲击或振动负荷时,若温度低于  $760$  ,自熔性合金最好;侵蚀严重时最后采用  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ;主要用于抗氧化则可采用铁、镍、钴基涂层。

这类涂层应该有高的硬度,特别是表面的硬度应该超过所存在的磨粒的硬度;在工作温度下必须有良好的抗氧化性能。常用于泥浆泵活塞杆(石油工业)、抛光杆衬套(石油工业)、吸油管连接杆、混凝土搅拌机的螺旋输送机、磨碎锤(烟草制品)、芯轴、干电池电解槽、磨光和抛光夹具等。

##### 2. 耐硬面磨损涂层

耐硬面磨损涂层是指能耐硬面或含硬磨料的软面滑动磨损的涂层。涂层须光滑以减少磨损程度,还应具有适当的摩擦系数。工作温度为  $540 \sim 845$  时认为是在高温下使用的涂层;工作温度在  $540$  以下时认为是在低温下使用的涂层。在低温下使用的耐硬面磨损的涂层中,还包括耐纤维和纺织线磨损的涂层。当工作温度在  $540$  以下时,涂层可采用铁基、镍基、钴基材料、自熔性合金、有色金属、氧化物陶瓷、碳化钨及某些难熔金属材料。当工作温度为  $540 \sim 845$  时,可采用钴基自熔性合金、 $\text{Ni}/\text{Al}$  及碳化铬涂层材料。当温度低于  $760$  且有冲击载荷时,宜选用自熔性合金;温度再高宜选用  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  涂层;以抗氧化为主则选  $\text{Ni}/\text{Al}$  等。

这类涂层应比配对表面硬度要高;当配对物表面光滑时,磨损的严重性减

轻,磨损有时与配对面的粗糙度成比例,接触的两个表面将产生碎屑,它能起磨料的作用,最硬的质点将与表面的最硬部分相当。常用于拉丝绞盘、拨叉、插塞规、轧管定径穿孔器、挤压模、导向杆等。

#### 4.1.1.3 耐表面疲劳磨损涂层

##### 1. 耐微振磨损涂层(可预计的运动)

耐微振磨损涂层(可预计的运动)是指能承受在轨道上重复滑动、滚动或冲击所产生的磨损,并足以承受连续的冲击磨损的涂层。由于反复地加载和卸载产生周期应力,诱发表面裂纹或表面下的裂纹,最终这些裂纹会致使表面破断和大断片剥落,这种磨损的先决条件是不出现磨粒磨损或粘着磨损。当使用温度低于 540℃ 时,应选韧性较好的涂层,所以采用自熔性合金、氧化物、碳化物金属陶瓷、某些铁基、镍基、钴基材料和有色金属等。当使用温度为 540 ~ 843℃ 时,可采用铁基、镍基、钴基材料及金属碳化铬陶瓷材料。

这里的疲劳虽然类似于通常的疲劳,但是这种疲劳极限不能用于评价涂层成功的可能,因为,大多数情况下表面疲劳比通常的疲劳更为严重。涂层应具备较好韧性。润滑剂仅能减轻微振磨损的作用。常用于伺服电动机机轴、车床和磨床的顶针、凸轮随动件、摇臂、活塞环(内燃机)、汽缸衬套等。

##### 2. 耐微振磨损涂层(不可预计的运动)

耐微振磨损涂层(不可预计的运动)是指能耐相互接触的表面发生小量位移引起的振动摩擦的涂层。由于接触摩擦系统运动是不可预计的,涂层的磨损很难预料,振动是这类磨损中最常见的现象。这种涂层在低温环境条件时,限于 538℃ 以下工作;在高温环境条件下,宜于在 538 ~ 843℃ 温度范围内工作。所选材料与耐微振磨损涂层(可预计的运动)的材料相同。

此种涂层必须在工作温度中耐氧化,如果形成氧化物,它必须是韧性的和粘着力强的。粘附松弛的氧化物将引起严重的磨粒磨损。这种涂层常用于飞机襟翼导向装置、伸胀接缝、压缩机防气圈、涡轮机气密圈、涡轮机气密环、涡轮机气密垫圈等。

##### 3. 耐气蚀涂层

耐气蚀涂层是指能够承受由于液体流的空穴造成的机械冲击磨损的涂层,应具有韧性高、耐磨和耐腐蚀性能,耐表面疲劳的材料均耐气蚀。涂层材料可采用镍基自熔性合金、含 95% Al 和 1% Fe 的铜合金、含 38% Ni 的铜合金、自熔性合金加 Ni/Al 混合粉、超细的  $Al_2O_3$ 、纯  $Cr_2O_3$  粉等。

当发生气蚀时,一定存在液体与金属表面之间的相对运动,涂层应该经过密封处理以防液体的渗入,它也必须具有韧性。脆性的涂层会很快破损,加工硬化的涂层能经受气蚀的反复冲击。耐气蚀涂层常用于耐磨环—水轮机,水轮机叶片,

水轮机喷头、柴油机汽缸衬、泵等。

#### 4.1.1.4 耐冲蚀涂层

耐颗粒冲蚀涂层(低温)是指耐尖锐和坚硬粒子的冲蚀的涂层。这些粒子由气体或液体传递并以一定速度冲击涂层表面。当粒子的冲击角小于  $45^\circ$  时,粒子沿表面飞行而产生磨料磨损,这时要求涂层有高的硬度;当粒子的冲击角大于  $45^\circ$  时,则涂层的韧性显得特别重要。涂层在低温条件下,限于 538 以下温度;在高温环境下,能在 538 以上温度使用。涂层材料可采用几种镍基自熔性合金粉、自熔性合金加细铜混合粉、高铬不锈钢粉、超细的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、纯  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  粉、87%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 13%  $\text{TiO}_2$  复合粉、Co - WC 复合粉。

如果颗粒冲击的角度小于  $45^\circ$  时,选择的涂层应当比较硬和更具有耐磨粒磨损性能;如果颗粒冲击的角度大于  $45^\circ$ ,选择的涂层应当比较柔软坚固;在高温环境下,涂层应该具有较高的红硬性,并在 538 ~ 816 的温度中对介质具有抗氧化性。除自熔合金以外,所推荐的全部涂层都需要封闭处理,最好采用 BP 密封剂,但也可使用 AP 密封剂。在低于 260 温度、高角度冲击的情况下,经过封闭处理的涂层其耐冲蚀性能显著得到改善,超过 260 封闭层会被烧掉,如果使用温度超过 260,涂层不必进行封闭;当液体为载体时,必须考虑所选择涂层的耐腐蚀性能。耐颗粒冲蚀涂层常用于抽风机、水电阀、旋风除尘器、切断阀阀杆和阀座。

#### 4.1.2 耐热和抗氧化涂层

##### 4.1.2.1 耐高温氧化涂层

耐高温氧化涂层是指能防止基体由于高温氧化造成损坏的涂层。要求涂层的熔点高于工作温度,在工作温度下具有低蒸气压。不要求涂层承受机械磨损。涂层材料可选用 Al、Ni - Cr 合金、Ni/Al 丝等。

这类涂层必须耐氧化,涂层要尽可能致密。温度的周期变化将影响涂层的耐热疲劳或耐热冲击性能,温度变化范围越大、变化速度越快,涂层越容易破坏,所以要求涂层和基体有相似的热膨胀系数。这类涂层常用于排气消声器、退火盘、退火罩、热处理夹具、金属条、回转窑的外表面等。

##### 4.1.2.2 耐气体腐蚀涂层

耐气体腐蚀涂层是指能保护基体使之免受高温腐蚀性气体侵蚀的涂层。必须考虑到气体与涂层发生反应时,要防止形成粘附氧化物、脆性化合物或者由于渗透涂层而破坏基体。不要求这种涂层具有承受机械冲击或磨损的能力。涂层材料可采用 Ni - Cr 合金、Ni - Cr - Al 合金或 Al 等。

可能遇到周期加热和局部过热点,这些是最恶劣的暴露区,涂层和基体材料应具有相似的热膨胀系数。这类涂层常用于柱塞端部、回转窑的内表面、钎焊火具、排气阀杆、碳化盒、氰化处理坩埚。

#### 4.1.2.3 耐高温(高于850℃以上)冲蚀涂层

耐高温(高于850℃以上)冲蚀涂层是指能耐高温及颗粒冲蚀的涂层。在高温下,高速颗粒和高压气体形成各种恶劣的环境,这些涂层必须能经受运动着的尖硬颗粒所引起的磨损,涂层可采用纯 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及稳定的 $\text{ZrO}_2$ 涂层材料。这类涂层常用于火箭喷嘴(喷管)、导弹鼻锥。

#### 4.1.2.4 热障涂层

这种涂层具有较低的热导性,可作为热障以防止基体材料达到其熔点,也具有转移辐射热的作用。涂层可采用高温氧化物涂层 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 或用 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 稳定的 $\text{ZrO}_2$ 等。一般特征和要求:在工作环境温度下必须耐氧化,涂层应有与基体材料相似的热膨胀系数、低的蒸气压、低的热导率、低的辐射率和高反射率。涂层的辐射率愈低,绝热性能愈好。低密度的涂层是比较好的绝热体,而且对热冲击的敏感性也较小。这类涂层常用于高温炉的感应圈、火箭发动机燃烧室、火箭发动机推进室、钎焊和热处理夹具等。

### 4.1.3 耐腐蚀涂层

耐腐蚀涂层材料的选择比较复杂,零件的工作状态、工作温度和其它工作环境、各种腐蚀介质都增加了对涂层材料的要求。腐蚀环境可能是水溶液、气体或各种化学介质,还可能具有宽广的温度范围。在有燃气存在的条件下,燃烧的气体或未燃烧的燃料也可能在适当的温度下与其它物质发生反应,形成很复杂的腐蚀环境。

#### 4.1.3.1 耐大气腐蚀

这类涂层耐下述条件的腐蚀:金属或合金暴露在户外或室内的大气中,涂层在大气中能抵抗风、雨、阳光和其它气候条件的腐蚀。在户外使用的涂层在室内也能很好地使用。这类涂层包括耐工业气氛的涂层、耐海洋气氛腐蚀的涂层和耐农村大气腐蚀的涂层。

##### 1. 抗工业大气腐蚀的涂层

抗工业大气腐蚀的涂层能承受具有烟尘或化学烟雾(如大城市和重工业区等)的恶劣气氛,可喷涂 $\text{Al}$ 、 $\text{Zn}$ 涂层。这类涂层必须进行封孔处理,封孔剂的选择非常重要,具体选择和施工注意事项可参阅第六章电弧喷涂。

这类涂层常用于所有类型的结构和构件钢、电的导线管、桥梁、输电线、金属构件、草坪和庭院设施等。

## 2. 耐海洋气氛腐蚀的涂层

这种涂层能承受海洋附近或盐雾条件下的腐蚀。常用于桥梁(高于水线)、船坞结构(高于水线)、储藏容器外壁、船的上层结构、栈桥、变压器表面等。

## 3. 耐农村大气腐蚀的涂层。

农村大气中虽然没有工业烟雾和海洋性气候的盐雾,但含有少许的污染物。它们通常是温和的和干燥的。

### 4. 1. 3. 2 耐浸渍腐蚀涂层

浸渍腐蚀是金属或其涂层暴露在液体中,并且是全部或部分,或两者交替地受到浸渍。防腐蚀涂层必须能够耐液面以上或液面以下环境的腐蚀。这类涂层有如下几种:耐食用淡水涂层、耐非饮用淡水涂层、耐热淡水涂层、耐盐水腐蚀涂层、化学和食品工业使用的涂层。

#### 1. 耐饮用淡水涂层

这种涂层耐淡水,并且不能改变水的化学成分。为了适合可饮用水的要求,不能使用含铬酸盐的密封剂。常喷涂 Zn 涂层。这类涂层常用于淡水储存器、高架渠(高架水道、输水道、导水管)、过滤机水槽、水输送管等。

#### 2. 耐非饮用淡水的涂层

这种涂层耐非饮用淡水,水温不超过 52 °C, pH 值为 5 ~ 10。常喷涂 Al、Zn 涂层。常用于发电厂引入线、浸渍在淡水中的结构装置、航行在淡水中的船身等。

#### 3. 耐热淡水涂层

这种热淡水是指非饮用水,水温在 52 ~ 204 °C, pH 值为 5 ~ 10,可喷涂 Al 涂层,但要封孔。常用于交换器、热水储藏容器、蒸汽净化设备、暴露于蒸汽的零件。

#### 4. 耐盐水涂层

这种涂层可以全部或部分浸在静止的或运动的食盐水或海水中。对静止状态的结构,海水浸没的范围应从泥线之下一直延伸到潮线之上 0.914m 的部位,高出这一范围,应作为“盐类大气”考虑。常喷涂 Al 涂层。常用于船用发动机的集油盘、钢体河桩和桥墩、船体、鱼舵和鱼箱、在船体水线之下存有污垢问题的部位等。

#### 5. 化学和食品工业使用的涂层

这种涂层能耐诸如油、燃料和溶剂等的化学作用,并且能耐各种食品的腐蚀,但不能改变食品的化学成分和味道,可喷涂 Al 涂层,但要封孔。常用于汽油、原油、燃料油以及二甲苯、乙醇、丁醇、醋酸戊酯和甲苯等药剂的储藏、啤酒厂的麦芽浆槽、软饮料设备、乳品及制酪业设备、食品油储槽及糖蜜罐、甘油槽内

衬、木屑洗涤机等。

#### 4.1.3.3 耐化学腐蚀涂层

这类涂层能承受各种酸、碱、盐类的溶液、蒸气和固体的腐蚀。它主要是各种铁基、镍基和钴基合金、自熔性合金、有色金属、氧化物陶瓷、碳化铬和碳化钨等金属陶瓷。由于热喷涂涂层都有一定的孔隙率,所以,必须对各种涂层进行填充密封处理。密封剂本身也必须耐化学介质的腐蚀。

为了抗化学腐蚀,在给定环境下采用的所有涂层,必须用推荐的密封剂进行处理。使用专门的密封剂,不会破坏涂层的机械性能。然而,在高温下涂层抗化学腐蚀的能力部分地取决于密封剂。

#### 4.1.4 电绝缘和导电涂层

##### 4.1.4.1 导电涂层

这类涂层必须具有良好的导电性能和低电阻。材料的导电性几乎总是随着温度的升高而降低,致密的无氧化物的涂层总比多孔的带有氧化物的涂层具有较高的导电性,喷涂涂层具有较高的内应力,处于异常的应变状态,经过退火可使之消除并相应改善涂层的导电性。可喷涂纯 Cu、纯 Al 涂层。导电涂层常用于运动轴类方面、电容器的接触器、接地联结器、避雷器。

##### 4.1.4.2 电阻涂层

这类涂层必须具有阻止电流通过的绝缘体作用。击穿涂层的强度(通常以单位长度上的电压表示)和容许的电导是介电强度的量度。致密无孔的涂层比多孔涂层具有较高的绝缘强度,绝缘强度随温度的升高而减小,涂层的绝缘强度是在特定的温度和湿度条件下测定的。随着湿度的增大,绝缘强度降低,为了改善绝缘强度与减小湿度对它的影响,对氧化物陶瓷可用有机密封剂进行处理,可采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  超细粉及 87% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  复合粉。电阻涂层常用于加热器管道的绝缘、焊烙铁的焊接头。

##### 4.1.4.3 射频屏蔽涂层

这些涂层能拾取散射射频并使之入地。这类干扰性射频是由下列原因引起的:由其它电台所发射的无线电信号,除传播之外的其它射频能量,如大气、人造天电、电力线天电等。射频屏蔽涂层通过超高频率对无线电频率起屏蔽作用。应事先测定出无线电频率的功率,以便确定涂层所适应的功率大小,致密而光整的涂层对超高频率具有更强的绝缘性能。多孔涂层(由粗颗粒组成)能抗阻超高频率,可喷涂纯 Cu、Al、Zn 或 Sn 涂层。射频屏蔽涂层常用于仪器仪表盒、导弹系统等。

#### 4.1.5 控制机械部件间隙的涂层

由气体在压力之下驱动机器其机械效率取决于转子的密封能力,密封能力高可以减小或防止气体的泄漏,因此,要求转动与静止零件之间具有非常紧密的配合间隙。由于转动零件在工作条件下可能因延伸或膨胀而与静止零件发生碰撞,所以,要制造具有紧密间隙的机器是很困难的,但使用可磨耗封严层即可解决这一问题。方法是在静止零件上喷涂一层可磨耗封严层,通过转动部分的零件,使涂层形成紧密尺寸配合的密封通道。

##### 4.1.5.1 可磨耗涂层

这些涂层与配合部件接触时,允许产生所控制的优先磨损。由于对涂层有可磨损的要求,故涂层很容易遭受气流冲蚀。如果喷涂一种极端可磨涂层,它只有很小的抗气流冲蚀能力,喷涂一种具有良好抗气流冲蚀的涂层,它却只有很小的可磨性能,因此在可磨能力和抗气流冲蚀能力之间采取折衷措施是必要的。这些涂层必须不是磨料。这些涂层也必须抗燃烧产物的各种不同热的变化和化学腐蚀。

为了在最初能提供尽可能好的密封,在新件制造时采用这些涂层。当然在修复时也采用这些涂层,目的是使已存在的间隙减至最小。

一般特性和要求如下:

(1) 所有可磨涂层要求一种合适的粘结底层,因为它们本身固有的性质对精加工的基体的结合能力很差。

(2) 通常采用厚涂层(厚度可达 3.81mm)。

(3) 涂层应当机加工到适合的尺寸,研磨将改变涂层的表面性质及其可磨性能。

##### 4.1.5.2 磨料涂层

这些涂层用于促进配合部件的磨损。应用于定子上时,产生的磨损必须没有咬接和材料转移现象,以减少着火危险。当应用于转子部件时,磨料涂层提供可靠的切削作用,从而使定子能使用最好的抗气流冲蚀的涂层。当一种磨料涂层应用于旋转部件时,为了加强它的切削作用,它应当具备如下特性:

(1) 抗颗粒冲蚀。

(2) 具有很高的结合强度。

(3) 喷涂厚度小于 0.127mm。

#### 4.2 复合涂层系统设计

在喷涂时,有时只允许或只需要在零件上喷涂一种材料。如在铜的基体上



喷涂铜及其合金时,只允许直接用铜及其合金粉末喷涂。如果先喷涂一层镍包铝反而是不可取的,因为铜基体的导热系数大,在其上喷涂镍包铝,得不到自粘结性涂层。但是在多数情况下,单一材料的涂层是不能满足要求的,往往需要选用多种材料的复合涂层系统。常用的复合涂层系统有:多层复合涂层、混合粉涂层、复合粉涂层。

### 1. 多层复合涂层和混合粉涂层

在高温工作环境下往往需选用在高温下稳定的和耐热性能良好的耐高温氧化物涂层,如氧化铝、氧化锆、锆酸镁作为涂层材料。但它有很多不足之处:氧化物与金属的结合强度较低;氧化物涂层往往含有 10% ~ 15% 的气孔,并且其中一部分是通孔,介质可以通过气孔与基体发生作用;氧化物的膨胀系数较低,与金属不匹配,抗热震性能不好。因此广泛地采用在氧化物涂层下施加底层的方法来弥补这些缺点。另外在某些情况下,选用底层的目的是防止表层与基体的相互作用。例如为防止钨涂层与石墨基体生成碳化钨,而在石墨基体上先喷涂钽作底层。

对底层的要求是:它与基体及与后续的涂层结合良好;涂层比较致密,抗氧化性好;膨胀系数介于基体和后续涂层之间,以减少因热膨胀系数的不同而引起的应力。常用的底层材料有 Mo、Ni - Al 等自粘结材料。其中 Ni - Al 的应用较为广泛,它的优点是:能与多种材料粘结、结合强度较高、涂层本身致密、抗氧化性能好。但在铜合金等材料上不适用。

为提高陶瓷耐热涂层的抗热震性,通常采用多层复合涂层;为使金属基体向陶瓷表层逐步过渡,采用了三层的复合层,即:金属底层、金属陶瓷过渡层和陶瓷表层。金属陶瓷过渡层可以采用三种方法,第一种是金属与陶瓷粉末混合喷涂。这种方法比较简便,也是可行的。但由于两种粉末的密度不同,混合粉在送粉过程中成分变得不均匀,而且两种粉末的熔点、比热、导热率相差悬殊,要使这两种粉末都充分熔化,就必须分别严格控制两种粉末的粒度。第二种是分别用两个送粉器从两个送粉口把金属和陶瓷两种粉末送入焰流,使熔点高、导热率低的陶瓷粉从焰流的上游送入,以增加粉末与高温区的接触时间,从而得到充分加热;易熔化的金属粉末从焰流下游送入,使得金属粉不至于过热和蒸发。第三种是采用包复粉末,例如镍包氧化铝等。这种粉末中每粒氧化铝粉均包有一层镍,因此所得涂层成分比较均匀恒定,不会产生偏析。缺点是粉末的成本较高。

近来复合耐热涂层也有采用阶梯涂层的。如用多台送粉器的送粉系统制造以镍、钴、铬、铝、钇与氧化锆两组分成连续变化的阶梯涂层。这种涂层系统的抗热震性与抗氧化性都优于 Ni - Al (或 Ni - Cr)、Ni - Al (或 Ni - Cr) +  $ZrO_2$ 、 $ZrO_2$  的三层涂层系统,可用于更重要的航空发动机部件上。

## 2. 复合粉末涂层

复合粉末的出现显著地扩大了涂层材料的应用范围,改善了涂层性能,它具有以下独特性能:

(1) 可根据需要,采用不同的制造方法,制备出具有不同要求和综合性能的涂层,特别是金属或合金与非金属陶瓷制成的复合粉末涂层,更是其它方法难以达到的。

(2) 具有单一颗粒的非均质性与粉末整体的均质性的统一。所得的表面涂层具有均匀的综合物理化学性能。因此,在储运和使用过程中,就不会出现成分偏析倾向,从而避免了由此造成的涂层质量不均匀的缺陷。

(3) 芯核材料受到包覆层或包覆粉末的保护,能够避免或减少热喷涂过程中,因高温火焰的作用而产生的元素的氧化烧损、失碳、挥发等现象,从而获得高性能的涂层。

(4) 选择适当的组分配制复合粉末,使在热喷涂的火焰温度下,粉末组分间能够发生化学反应,生成熔点比粉末各组分的熔点更高的金属间化合物,伴随着放出大量的热,对粉粒和基体表面辅助加热,得到致密的涂层。

(5) 喷涂复合粉末与喷涂混合粉末相比,不仅涂层性能优异,而且喷涂速率和沉积效率也要高得多,从而可以提高劳动生产率。

## 4.3 喷涂工艺的选择

### 1. 决定涂层质量的基本因素

(1) 喷涂材料的加热温度。

(2) 喷涂材料撞击到基体材料上的速度。

(3) 在加热、喷涂和冷却时,喷涂材料和基体的氧化程度。

不同的热喷涂方法所得的最高温度和粒子速度是不同的。对于许多材料来说,喷涂粒子的氧化是不符合要求的,因此必须快速加热和提高粒子速度。

选择工艺方法时,还应考虑喷涂层的机械加工性能,根据零件的尺寸和形状考虑能否机械加工,采用哪种机械加工方法,以及加工成本等。

### 2. 喷涂工艺选择的原则

(1) 可靠性原则。若涂层结合力要求不是很高,采用的喷涂材料的熔点不超过 2500℃ 时,可采用设备简单、成本低的火焰喷涂。

(2) 适用性原则。对涂层性能要求较高或某些比较贵重的部件,应采用等离子喷涂。因为等离子喷涂材料熔点不受限制,热源具有非氧化性,涂层结合强度高、孔隙率低。

(3) 经济性原则。工程量大的金属喷涂施工常采用电弧喷涂。

(4) 要求结合力高、孔隙率低的金属或合金涂层可采用超声速等离子喷涂或超声速火焰喷涂。

(5) 对于批量大的工件,宜采用自动喷涂。自动喷涂机可以成套购买,也可以自行设计。

### 3. 涂层厚度

理论上涂层厚度似乎可以根据需要确定,例如根据磨损速率、预定寿命和必要的加工余量确定耐磨涂层厚度;根据涂层的热导率选择绝热涂层的厚度。但是实际上在喷涂过程中涂层和基体都有可能产生各种类型的应力,这些应力都会影响涂层的结合强度和涂层淬冷后的应力分布。在一般情况下,涂层表面受拉应力,厚度愈大,应力数值也愈大,甚至于使涂层从基体上剥落或涂层自身开裂。在与涂层结合的基体界面上往往是受压应力,根据基体的形状不同,力所起的作用也不同。球形基体最为有利,圆柱形基体次之,其压应力增强了结合强度。如果基体是平面,则界面的压应力趋向削弱涂层和基体的结合。最为不利的是内孔表面,它促使涂层从基体上脱离。

涂层的结合强度随着涂层厚度的增加而降低。实际应用的等离子涂层的厚度一般为 0.5mm 左右。某些耐热涂层可根据绝热的需要,采取与金属层交替的办法,可以达到 2mm 左右。在多层复合涂层中,金属底层一般在 0.05mm ~ 0.1mm 内,起绝热作用的陶瓷层约为 0.2mm ~ 0.3mm。

## 第五章 火焰喷涂(熔)技术

火焰喷涂(熔)技术以氧—燃料气体(或液体)火焰作为热源,将喷涂(熔)材料加热到熔融或半熔融状态,并以高速喷射到经过预处理的基体表面上,形成一种具有特殊性能的涂层。火焰喷涂(熔)的燃料气体包括乙炔(燃烧温度3100)、氢气(燃烧温度2856)、液化石油气(燃烧温度约2500)和丙烷(燃烧温度2828)等。液化石油气温度偏低而丙烷价格较贵,因此火焰喷涂(熔)很少使用这两种气体。氧—乙炔火焰具有明显的优势,火焰温度高且能够容易地调节燃烧比例,以得到氧化性、中性或还原性火焰。使用细粉末进行喷涂时,一般采用氢气作为燃料气体,能得到质量优良的涂层。

火焰喷涂法的另一个发展是液体燃料法。用液体燃料(例如重油)和氧作为热源,粉末与燃料油混合,悬浮于燃料油中。此法与其它方法相比,粉末在火焰中有较高的浓度并分布均匀,热传导性更好,很多氧化物(例如氧化铝、氧化硅、富铝红柱石- $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ )宜采用此法进行喷涂。

氧—乙炔火焰喷涂(熔)可以喷涂(熔)各种丝材、棒材和粉末材料。

### 5.1 气体燃烧火焰基础

#### 5.1.1 气体燃料燃烧方式

气体燃料燃烧方式分类见表5-1。

表5-1 气体燃料燃烧方式分类

扩 散 燃 烧		预 混 燃 烧		
层流扩散燃烧 (靠分子扩散混气)	湍流扩散燃烧 (靠湍流扩散混气)	部分预混燃烧		完全预混燃烧
		层流预混燃烧	湍流预混燃烧	

扩散燃烧是指燃料气体和助燃气体分别由各自喷口喷入燃烧室,一边扩散混合,一边燃烧的燃烧方式。扩散燃烧火焰很长,燃烧火焰稳定性好,不会发生

回火现象,但火焰温度不太高。

预混燃烧是指气体燃料与部分或全部助燃气均匀混合后再进入燃烧室燃烧,预混燃烧属于动力燃烧。在部分预混燃烧时,火焰有两个锥面,即内焰和外焰,在外焰区实际上是气体燃料的扩散燃烧。随助燃气的增加,火焰缩短。达到完全预混燃烧时,燃料燃烧速度很快,燃烧几乎可以在瞬间完成,外焰不再存在。

采用预混燃烧方法能够实现高负荷燃烧,但有回火的危险。热喷涂常采用的是预混燃烧方式,下面将重点介绍该燃烧方式。

### 5.1.2 燃气和助燃气的混合

在预混燃烧中,燃料气和助燃气的混合方式主要有射吸式混合和等压式混合两种。

射吸式混合指燃烧气与助燃气按喷射器原理混合,如图 5-1 所示,  $p_0$ 、 $p_1$  和  $p_m$  分别是助燃气、燃气和混合气体的压力,热喷涂一般以助燃气做喷射气体。

等压式混合是燃料气和助燃气均以临界速度喷入混合室内进行混合(图 5-2)。等压式混合时,燃料气和助燃气的压力相等或成一定比例,燃料气与助燃气流动可分为平行流动(靠湍流混合)和按一定角度或垂直相交流动及两者均为旋转气流之间的混合两种。

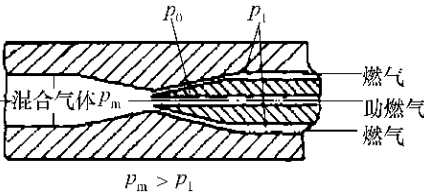


图 5-1 射吸式混合原理图

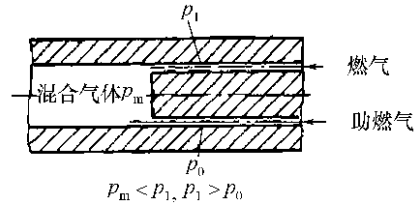


图 5-2 等压式混合原理图

等压式混合的预混燃烧稳定性较射吸式混合的预混燃烧要高,其预混燃烧的气体流量(火焰功率)及调节范围也比射吸式预混燃烧大。

### 5.1.3 脱火、回火及回火的预防

按气体火焰传播理论,要维持火焰的稳定性,应保持可燃气体向火焰锋面的运动速度与火焰传播速度相等,否则将出现回火或脱火现象。气体燃料燃烧的火焰传播速度是指燃烧火焰锋面在其法线方向上向未燃烧气体燃料方向传播的速度。

当可燃气体混合物在燃烧火焰锋面处,沿法线方向上的分速度大于该混合

物火焰传播速度时,火焰会脱离喷口燃烧,甚至被吹灭,这种现象称为脱火。对应于脱火时的可燃气体混合物的气流速度称为脱火极限。反之,当可燃气体混合物在燃烧火焰锋面处,沿法线方向上的分速度小于该混合物火焰传播速度时,火焰缩回燃烧器内部,这种现象称为回火。对应于回火时的可燃气体混合物的气流速度称为回火极限。回火可能性与火焰传播速度成正比。

可燃气体混合物气流速度只有在回火极限和脱火极限之间时,火焰才能稳定燃烧。对火焰喷涂设备而言,脱火危害远小于回火。因此在喷涂操作中要特别注意防止回火的发生,预防回火的方法主要是降低火焰传播速度或提高燃气喷出速度,具体措施如下:

(1) 在保证可燃气体流量的条件下,选择多孔数、小孔径、深喷口的喷嘴设计,可以提高喷嘴的冷却作用,减小火焰的传播速度。

(2) 选用火焰传播速度较低的燃气。

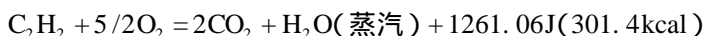
(3) 对喷嘴进行冷却,可有效防止可燃气体初始温度的上升,减小火焰传播速度。

(4) 保证较高的喷嘴内气压,提高燃气的喷出速度。

(5) 选择扩散燃烧方式,使燃气和助燃气在喷嘴外边扩散混合边燃烧。但这种方式燃烧强度有限。

#### 5.1.4 火焰的形貌、构成和性质

以氧—乙炔焰为例,氧—乙炔完全燃烧将遵循下列反应式。



此状态下的火焰为中性焰。若两者流量比  $q_{\text{O}_2}/q_{\text{C}_2\text{H}_2} > 2.5$  时火焰为氧化焰,小于 2.5 时,火焰呈还原焰(或称碳化焰)。火焰的形貌如图 5-3 所示。

中性焰内焰区里基本上没有自由氧及自由碳存在,具有轮廓鲜明的焰芯,焰芯的端部均匀地呈圆形。焰芯外面是呈淡白色微微可见的内焰。外焰由内到外颜色从淡蓝色渐变为橙色。

碳化焰的内焰中有游离的自由碳,随燃气比例加大,外焰伴有黑烟。其焰芯、内焰和外焰三部分都很明显,焰芯较长,呈蓝白色;内焰边界清晰,呈淡蓝色;外焰软而长,呈橙黄色。

氧化焰由于内焰区有自由氧存在,具有很强的氧化性氧化焰。只由焰芯和外焰两部分组成,焰芯短而尖,呈青白色;外焰短,呈紫色。氧化焰火焰挺直,伴有剧烈的嘶嘶声。

火焰温度的高低与燃气燃烧值、燃烧产物的数量、燃烧产物的热容量、燃气与助燃气的温度及助燃气的数量有关。各种气体燃料的不同燃烧火焰及火焰温

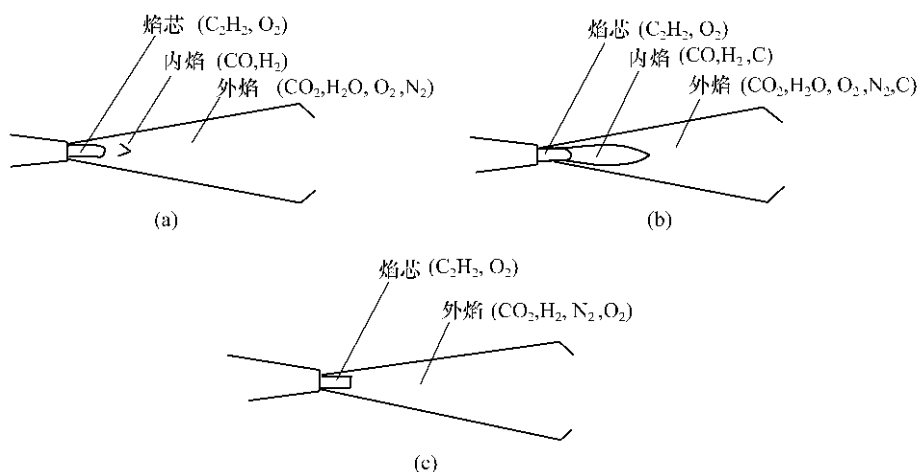
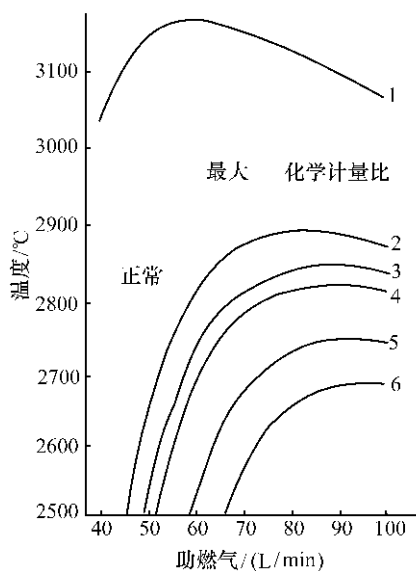


图 5 - 3 火焰的形貌示意图  
(a) 中性焰 ; (b) 还原焰 ; (c) 氧化焰。

度见图 5 - 4。表 5 - 2 是常用气体的物理化学特性。



些常用气体燃料燃烧所需助燃气体流量和火焰温度

2—丙烯 ; 3—氢气 ; 4—丙烷 ; 5—煤气 ; 6—一氧化碳。

表 5 - 2 一些常用气体的物理化学特性(0 、0. 101325MPa)

气体	气体 常数 R  (J/kg·K)	密度  (kg·m <sup>3</sup> )	绝热 指数 k	热值  (kJ·m <sup>3</sup> )		火焰温度/				需氧量  (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )燃气			空气 耗量  (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) 燃气
				高	低	中性焰 温度	最高 温度	化学 计量 比温度	空气 助燃 温度	中性 焰	最高 温度	化学 计量 比	
氢气	4125	0.0899	1.407	12753	10794	2834	2856	2840	2210	0.36	0.42	0.50	2.38
一氧化碳	297	1.2506	1.403	12644	12644	—	—	—	2370	—	—	0.50	2.38
甲烷	518	0.7174	1.309	39842	35906	2770	2786	2778	2043	1.6	1.8	2	9.52
乙炔	319	1.1709	1.269	58502	56488	3106	3160	3066	2620	1.1	1.5	2.5	11.90
乙烯	296	1.2605	1.258	63438	59482	2902	2924	2902	2343	2.0	2.4	3.0	14.28
乙烷	276	1.3553	1.198	70351	64397	2800	2818	2810	2115	2.6	3.1	3.5	16.66
丙烯	197	1.9136	1.170	93671	87667	2872	2896	2878	2224	3.1	3.7	4.5	21.42
丙烷	188	2.0102	1.161	101270	93244	2810	2828	2820	2155	3.75	4.3	5.0	23.80
正丁烷	143	2.7030	1.144	133885	123649	2816	2834	2824	2130	4.8	5.6	6.5	30.94
异丁烷	143	2.6912	1.144	133048	122857	2814	2832	2822	2118	4.8	5.6	6.5	30.94
二氧化碳	188	1.9771	1.304										
氧气	259	1.4291	1.400										
氮气	296	1.2504	1.402										
空气	287	1.2931	1.401										
水蒸气	461	0.833	1.335										

5.2 火焰线材喷涂技术

火焰线材喷涂一般采用氧—燃气火焰做热源 ,喷涂的材料可以是丝状的金属、合金 ,压制棒状的陶瓷 ,柔性材料包覆的复合粉末丝材。

目前火焰线材喷涂可以喷涂碳钢、不锈钢、镍合金、蒙乃尔合金、镍、铜及其合金、铝、锌及锌铝合金、镉、锡、铅、钼等金属丝材及用柔性材料包覆的复合粉末材料等。压制成棒材的陶瓷材料通过使用特殊的喷枪进行喷涂。



火焰线材喷涂目前已在碳素结构钢、储罐的长效防护、机械零部件的修复及强化等方面得到广泛应用。它是热喷涂中历史最久,至今应用面最宽的一种热喷涂方法。

### 5.2.1 火焰线材喷涂原理及特点

火焰线材喷涂是利用氧—燃气(一般为乙炔气)燃烧为热源,将连续、均匀送入火焰中的喷涂丝材端部加热到熔化状态,借助于高压气体将熔化状态的丝材雾化成微粒,喷射到经过预先处理的工件表面形成涂层的工艺方法。其基本原理如图5-5所示。

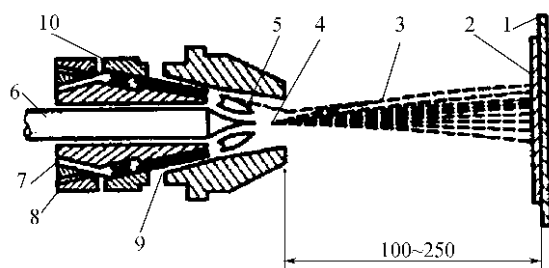


图 5-5 火焰线材喷涂基本原理图

2—涂层;3—喷涂束流;4—熔融材料;5—火焰;6—线材或棒材;  
7—氧气;8—燃料气;9—雾化气;10—气体喷嘴。

火焰线材喷涂的特点:装置简单、操作方便,容易实现连续均匀的送料,喷涂质量稳定,喷涂效率高耗能少。缺点:丝材制造受到拉丝成型工艺的限制。

### 5.2.2 火焰线材喷涂设备

#### 5.2.2.1 火焰线材喷涂设备的组成

典型的火焰线材喷涂系统如图5-6所示,主要包括:喷枪、送丝装置、供气系统和气体控制系统。

火焰线材喷涂设备比较简单,一般包括氧气瓶、乙炔瓶或乙炔发生器、氧气减压阀、空气压缩机或车间压缩空气管道、空气过滤器、可燃气体流量计、空气流量表、火焰喷枪、送丝装置等。

金属丝喷涂装置大小不同,小型手持装置常用来喷涂不可动的大工件,例如,储油罐、船体、桥梁等表面上喷涂铝或锌的保护层。更大的装置常是按机械化操作设计的,以便用来喷涂运动中的零件。

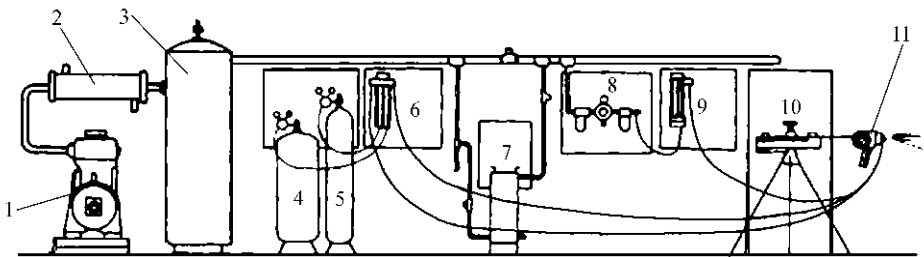


图 5-6 火焰线材喷涂系统图

1—空气压缩机；2—空气干燥器；3—储气罐；4—乙炔瓶；5—氧气瓶；6—气体流量表；  
7—空气净化器；8—空气控制器；9—空气流量表；10—丝架；11—喷枪。

### 1. 喷枪

喷枪是火焰线材喷涂设备中最关键的部件,用于喷涂线材的火焰喷枪,按氧—燃气的引进方式可分为射吸式和等压式两种,按送丝动力可分为气涡轮送丝和电机送丝两种。我国设计的喷枪多为射吸式。

SQP-1 型氧—乙炔火焰线材喷枪是由上海喷涂机械厂自行设计的射吸式火焰线材喷枪,该喷枪的性能见表 5-3。

表 5-3 国产 SQP-1 型火焰线材喷枪性能

序号	项 目		性能和数据	序号	项 目		性能和数据		
1	型号		SQP - 1 射吸式	2	操作方式		手持固定两用		
3	动力源		压缩空气吹动汽轮	4	调速方式		离心力—离合器		
5	质量/kg		≤1.8	6	外形尺寸		90 × 180 × 215		
7	喷射时颗粒 直径(钢)/μm		4 ~ 40	8	使用热源		氧—乙炔火焰		
				9	火花束角度		4		
10	引力/N		≥65	11	线材直径/mm		φ2. 3、φ3. 0		
12	气体表 压力 /MPa	氧气	0. 3 ~ 0. 7	14	喷涂效率 /(kg/h)	80 钢	φ2. 3	1. 8	
		乙炔	0. 03 ~ 0. 1			铝	φ3. 0	2. 7	
			空气			0. 4 ~ 0. 8	锌	φ3. 0	3. 2
13	气体 消耗量					氧气	2. 5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	φ2. 2
		乙炔				0. 7	低碳钢	φ3. 3	2
			铜			φ3. 0	4. 3		
			空气			30	钼	φ2. 3	0. 9

SQP - 1 型氧—乙炔火焰线材喷枪是目前国内最常用的火焰线材喷枪 ,它以线材的金属材料为喷涂材料 ,以氧—乙炔火焰为热源 ,送丝动力气源为气涡轮 ,可手持和机夹 ,该枪的外形和结构如图 5 - 7 所示。

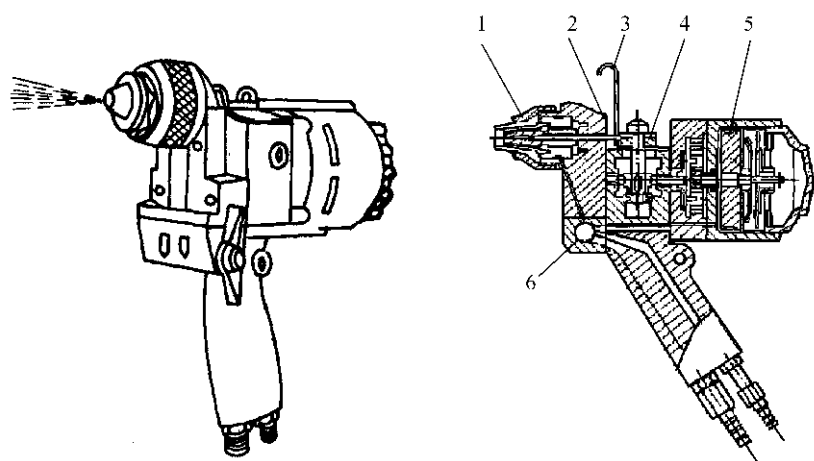


图 5 - 7 SQP - 1 型火焰线材气喷枪外形和结构图

1—喷嘴部分 ;2—丝材 ;3—挂钩 ;4—送丝滚轮 ;5—风机部件 ;6—气体开关。

该喷枪主要由三大部分组成 :丝材送进的机动部分 ,气体输入控制和气体燃烧 ,材料熔化雾化等。

SQP - 1 型氧—乙炔火焰丝材喷枪有如下特点 :

- (1) 该喷枪采用射吸原理 ,不受乙炔压力大小的限制。
- (2) 射吸式喷枪便于清洗保养。
- (3) 喷枪的送丝机构采用压缩空气吹动气轮的方式 ,使喷枪的质量轻 ,可用于手工喷涂操作。

SQP - 1 型氧—乙炔火焰丝材喷枪送丝机动部分是由气动涡轮、离心调速、差动蜗杆组成减速装置。弹簧压紧送丝轮等零件组成机械装置 ,该部分的工作原理如图 5 - 8 所示。

压缩空气吹动多槽飞轮旋转 ,偏心轴则和飞轮作同方向旋转 ,带动偏心轴上的滚珠轴承 ,使行星齿轮绕轴心与内齿啮合作行星运动。由于内齿固定且行星齿数与内齿数相差两齿 ,当偏心轴转动一周时 ,行星齿轮就会向相反的方向自转两齿 ,带动伸入齿轮箱内的蜗杆旋转 ,通过蜗杆与螺旋斜齿轮的减速 ,使送丝滚轮作相对方向运动 ,夹持喷涂线材送入喷枪喷嘴。SQP - 1 型喷枪的中速喷枪蜗杆为单头 ,高速喷枪蜗杆则为双头。

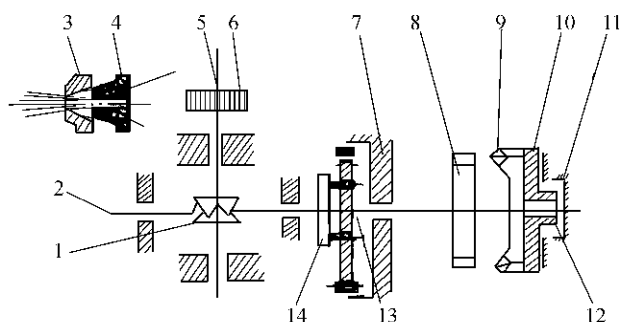


图 5 - 8 SQP - 1 型火焰线材气喷枪送丝工作原理图

；2—蜗杆；3—空气帽；4—喷嘴；5—送丝轮轴；6—夹送丝滚轮；7—内齿轮；  
9—慢性锤；10—刹车片；11—复位弹簧盖；12—轴承；13—齿轮；14—离合器。

线材送进速度因喷涂线材的材料和直径不同而不同。该枪的送丝调速装置为一套离心摩擦调节机构,主要是通过调节刹车片与摩擦圈之间的间隙来调节丝材的送进速度,调节间隙的大小应与喷涂材料的熔点、线径成反比,即熔点越高,线径越粗则间隙就应调节得越小。

氧气、燃气及压缩空气经手柄下部进入枪体,旋转组合阀可控制气体的开关、流向及导通次序。阀开 90°,乙炔气和通向涡轮的空气先导通,逐渐开阀则氧气和雾化用压缩空气同步导通,气体流量也逐渐增大。通过射吸管用氧气来抽吸燃气,与之混合进入喷枪的喷嘴部分,喷出燃烧。压缩空气则置于喷嘴的外部,在空气压缩帽的作用下,使熔化的喷涂材料雾化喷射出来。喷涂操作程序如下:

(1) 打开氧气源、燃气源和压缩空气源的阀门,参照喷枪使用说明书和喷涂材料性能,将氧气、燃气、压缩空气压力通过气体控制屏,调节到规定的数值。

(2) 检查气体管路、喷枪气路是否密封。

(3) 打开喷枪的开关,检查涡轮旋转是否正常和三气是否畅通。

(4) 将准备好的线材插入喷枪送入口,并伸出喷枪喷嘴 3mm ~ 5mm。然后松开送丝轮的顶开螺杆,使送丝轮在弹簧作用下压紧喷涂线材。

(5) 将喷枪的阀置于点火位置点火后,再将阀开到正常工作位置,然后通过喷枪摩擦圈间隙的调节,使喷涂材料微粒细化后,按工艺规定,开始对工件表面进行喷涂。

(6) 工件表面喷涂完毕后,将喷枪阀从工作位置一次关到全闭位置,使喷涂停止。

(7) 喷涂过程中喷枪出现任何问题 ,应立即进行调节处理 ,否则喷涂层的质量将得不到保证 ,甚至会危及操作者的人身安全。

无论使用何种类型的火焰线材喷枪 ,在正式使用前一定要进行喷枪试验和检查。

2. 供气系统

(1) 火焰线材喷涂必须氧气、燃气、压缩气体三气俱全 ,对“三气”性能要求见表 5 - 4。

表 5 - 4 氧气、乙炔、压缩空气的要求

名称	分子式	纯度 / %	压力 / MPa	流量 / ( m <sup>3</sup> / h )	备注
氧气	O <sub>2</sub>	≥99. 2	>0. 3	>0. 5	
乙炔	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	≥99. 0	>0. 04	>0. 4	
空气			>0. 4	>36	清洁干燥

火焰线材喷枪最好选用瓶装氧气、乙炔气和经干燥、净化处理的压缩空气。

乙炔气最低限度也要用中压发生器产生的乙炔气 ,并且要能保证足够的供气量。压缩空气压力、流量都必须满足喷枪说明书的要求。压缩机后应接有空气换热排污器及油水分离器 ,以除去压缩空气中所含的水分和油。

(2) 火焰线材喷涂气体流量控制。为保证喷涂层的涂层质量 ,通过气体控制屏来控制喷涂所需的三气压力和流量的稳定 ,并为操作者指示喷涂的气体参数。控制屏的气路原理如图 5 - 9 所示。

5. 2. 2. 2 火焰线材喷涂工艺

火焰线材喷涂层能改善基体材料的表面特性。涂层的质量取决于喷枪的性能和金属丝的质量 ,合理地选择喷涂工艺方法和工艺参数也是确保涂层质量的重要因素之一。喷涂工艺参数的变化将影响涂层的喷涂效率、沉积效率、结合强度、内应力和组织状态等。

火焰线材喷涂工艺流程为 :基体表面的预处理、预热、喷涂底层(用一次自粘结复合

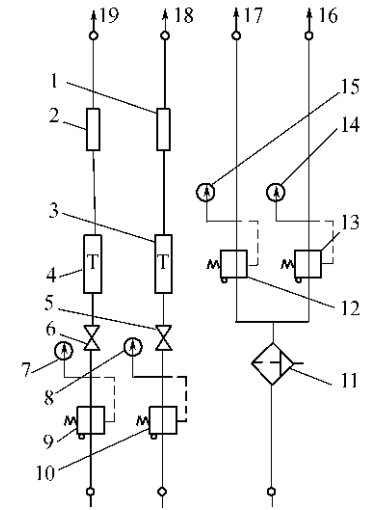


图 5 - 9 气体控制屏气路原理图  
1、2—干式防回火器 ;3、4—转子流量计 ;  
5、6—开关 ;7、8、14、15—压力指示表 ;  
9、10、12、13—压力调节器 ;  
11—空气过滤器 ;16、17—压缩空气出口 ;  
18—乙炔气出口 ;19—氧气出口。

型丝材时,可省去此工序)、喷涂工作层、涂层的切削加工等工序。基体表面预处理和涂层的切削加工分别参见第二、第六章。这里主要介绍氧—乙炔火焰喷涂的工艺。

### 1. 氧—乙炔火焰的选择

目前火焰喷涂施工中,除因喷涂材料对燃气有特别要求外,基本采用氧—乙炔火焰进行喷涂作业。这是因为氧—乙炔火焰温度高、燃烧稳定、火焰刚度强。

火焰性质对涂层质量的影响,对不同材料会得出不同的效果。只有根据喷涂材料特性、涂层工作环境来选用适宜的火焰性质,才能更好地提高喷涂效率和涂层质量。

中性火焰燃烧残余物少,能提高喷涂效率和喷涂质量,节约能源,是火焰线材喷涂时最常用的火焰,常用的金属线材(如:锌、铝、钢、铜、不锈钢等)都采用中性火焰进行喷涂作业。

氧化焰在喷涂合金钢、不锈钢、铝之类材料时,则会增加涂层材料中的碳和合金元素的烧损,使涂层中的氧化物含量增高,耐蚀性下降,因此一般不用。但在使用陶瓷棒火焰喷枪喷涂氧化铝之类材料时,利用氧化焰高温(3250℃)能够提高陶瓷材料的喷涂效率。

还原焰中若乙炔含量过高,火焰的稳定性和刚度将下降,只是在喷涂铝、不锈钢材料时使用微还原焰可以减少涂层中氧化物含量和合金元素的烧损,提高涂层的耐蚀性能。

### 2. 气体压力和流量的选择

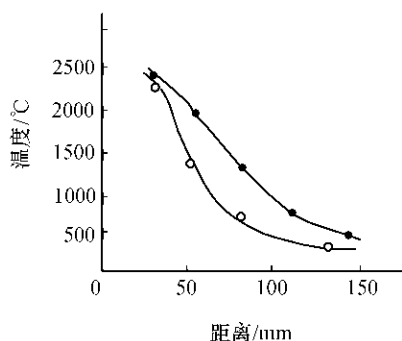
如采用不同型式的喷枪,其喷涂参数可能不同,应根据每把枪的使用说明书进行调整。采用 SQP - 1 型喷枪时,由于是射吸式,一般氧气压力选用 0.4MPa ~ 0.5MPa;乙炔压力选用 0.04MPa ~ 0.08MPa;压缩空气是氧—乙炔火焰线材喷涂中不可缺少的气源之一,是线材熔化后形成微小粒子并喷射到工件表面动力的主要来源,在喷涂过程中,提高压缩空气的压力,既能使丝材熔滴获得高的动能,又能使熔滴保持高的温度,对提高涂层与基体的结合强度和涂层的致密度都非常有利,但压力和流量过大将使火焰的温度降低,造成粒子熔化不良,也会影响涂层质量,因此,压缩空气的压力与流量也要根据火焰的参数进行匹配选择。一般氧—乙炔喷涂时选用的压缩空气的压力为 0.5MPa ~ 0.7MPa。

燃气流量和氧气流量的大小,可决定火焰的长度。采用 SQP - 1 型喷枪当火焰为中性焰时,随着氧—燃气流量的增加,火焰的长度明显增加,焰流速度也增加。表 5 - 5 是 SQP - 1 型喷枪在不同气体流量下,火焰的长度。

表 5 - 5 氧—乙炔流量改变时火焰的长度

流量/( $\text{m}^3/\text{h}$ )	1.3	1.8	2.3
火焰长度/mm	70	95	110
注 压缩空气压力在三种情况下均为 0.5MPa			

显然 增加氧乙炔流量 火焰长度和焰流速度也会随之增加 这样可以增加喷涂效率 增加雾化颗粒的温度和速度 达到提高涂层的结合强度 减少涂层的孔隙率 改善涂层质量的目的。图 5 - 10 是距喷枪出口不同距离时 火焰温度在喷涂轴线上的变化情况。图 5 - 11 是距喷枪出口不同距离的焰流速度的变化情况。



不同距离的火焰温度

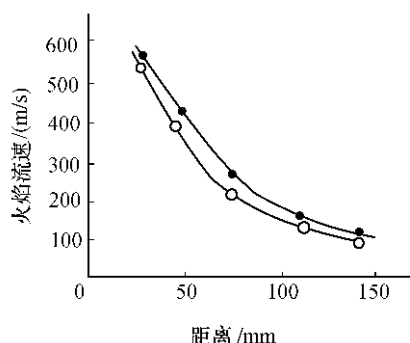


图 5 - 11 距喷枪出口不同距离的火焰流速

### 3. 喷涂距离和喷涂角度的选择

喷涂距离是指喷枪口距工件被喷涂表面的垂直直线距离 也是喷涂粒子的飞行距离。选择合适的喷涂距离 对涂层的质量影响很大 若选用过小的喷涂距离 丝材的熔滴温度就高 动能也大 有利于提高涂层与基体表面的结合强度。但是 氧—乙炔焰传递给基体表面的温度增高 容易引起基体的热变形 同时也会因为涂层与基体间热膨胀系数的差异而引起涂层中新的应力 严重时将导致涂层的开裂和剥落。喷涂距离过大时 丝材熔滴的温度和动能下降 会降低涂层与基体的结合强度和涂层的致密度。因此 喷涂时的理想情况是在对基体几乎不产生热变形的条件下 尽可能选用较小的喷涂距离。

粒子的最高飞行速度同喷涂时所用的燃气、氧气流量 压缩气体压力的大小 有非常大的关系。当三种气体都增加时 粒子的飞行速度将增加 而且最大速度的位置前移 此状态时 喷涂距离可以选择较大些。

在通常的工艺参数下 丝材熔滴飞行的最大速度在喷涂距离为 100mm 左右处。因此 氧—乙炔焰丝材喷涂距离一般选为 100mm ~ 150mm 对于放热型复合丝材 喷涂距离可加大到 150mm ~ 180mm。

喷涂角度是指喷涂粒子射流与被喷涂工件表面之间的夹角。当喷枪轴线与基体平面的夹角小于  $45^\circ$  时,涂层结构将出现“遮蔽效应”,如图 5 - 12 所示,它降低了涂层的质量。因此在选择喷射角时,希望越大越好(喷涂角度的选择适用于所有喷涂技术,在后面的喷涂技术工艺中不再叙述)。

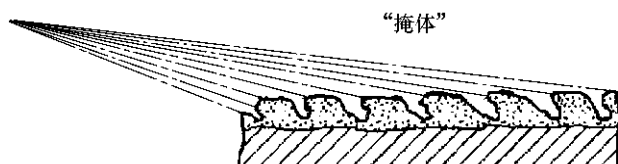


图 5 - 12 喷涂角度太小时产生的“遮蔽效应”

#### 4. 丝材直径和丝材送进速度的选择

在氧—乙炔焰丝材喷涂中,选用直径大的丝材,可以提高喷涂的效率,降低涂层的含氧量,但是会受到喷枪功率的限制。国产 SQP - 1 型氧—乙炔焰丝材喷枪选用的丝材直径为 2.3mm 和 3mm 两种。美制 12E 型氧—乙炔焰丝材喷枪选用的丝材直径一般为 3.77mm 和 4.77mm 两种。

丝材送进速度取决于丝材本身的熔点和氧—乙炔焰参数的最佳条件。当氧—乙炔焰参数为最佳条件时,由于火焰能量大稳定性好,丝材也可处于最佳的加热状态,丝材的送进速度可以偏高些。但是,当丝材的送进速度过高时,会造成丝材熔滴出现熔化不均匀的现象。因此,在确保涂层质量的前提下,必须选用较高的丝材送进速度,以便提高喷涂效率。当丝材的送进速度过低时,丝材熔滴出现细密状颗粒,造成涂层含有较多的氧化物,会降低涂层的性能和喷涂效率。比较合适的送丝速度,得到的金属雾化粒子的尺寸约在  $20\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$ 。每一种喷涂材料其喷涂时送丝速度是不同的。使用 QX - 1 型喷枪可以通过观察丝材在火焰中伸出空气帽的长度判断送丝速度是否合理。一般熔点高于 750 的金属材料,如碳钢、不锈钢丝等,其伸出长度约在 3mm ~ 5mm,而熔点低于 750 的锌、锡、铅、巴氏合金等其伸出空气帽的长度可大于 5mm。

国产 SQP - 1 型氧—乙炔焰丝材喷枪具有中速和高速两种送进速度。对于高熔点丝材和氧化物丝材,其直径为 2.3mm 时,则一般选用中速挡;对熔点较低金属丝材,其直径为 3mm 时,则一般用高速挡。

#### 5. 喷枪与基体表面的相对移动速度的选择

喷枪与基体表面的相对移动速度,对涂层质量和基体的热变形有一定的影响。当相对移动速度过慢时,基体表面温度升高,严重时出现表面氧化和热变形。同时基体表面出现的热膨胀与涂层出现的冷凝收缩,均发生在它们之间的



接触面上,使之出现较大的拉伸应力,从而降低了涂层与基体表面之间的结合强度。所以,除及时冷却涂层外,正确选择喷枪与基体表面的相对移动速度是很重要的,一般选择为 5m/min ~ 12m/min。

6. SQP - 1 型喷枪故障原因及排除方法(见表 5 - 6)

表 5 - 6 SQP - 1 型喷枪故障原因及排除方法

故 障	产 生 原 因	排 除 方 法
点不着火	1. 氧气压力过高; 2. 在点火位置时乙炔流量太小, $\phi 4\text{mm}$ 弹簧疲劳; 3. 混合室中的氧气喷射嘴发生堵塞; 4. 混合室上面的 O 形密封圈压扁失去弹性,使三种气体混乱串气	1. 调整到 0.4MPa ~ 0.5MPa; 2. 更换新的弹簧; 3. 用针清理喷射嘴上的四个 $\phi 0.15\text{mm}$ 孔; 4. 换新的
点火后当阀门全开时随小爆炸声而熄灭	1. 氧气压力太高; 2. 金属丝在点火时不送进或送进太慢	1. 调到 0.4MPa ~ 0.5MPa; 2. 将调速转盘放松 1r ~ 2r
点火后火焰一亮一暗(约 1 次/s ~ 6 次/s)	1. 氧气压力太低; 2. 金属丝送得太慢; 3. 金属丝卡在喷嘴内	1. 调到 0.4MPa ~ 0.5MPa; 2. 将调速转盘放松 1r ~ 2r; 3. 用 $\phi 2.3\text{mm}$ 或 $\phi 3\text{mm}$ 钻头钻通孔道,并除去金属丝上的油脂
火焰不集中	1. 氧气压力太低; 2. 金属丝送进太慢	1. 调整到 0.5MPa; 2. 调速转盘慢慢松开到火焰集中为止
部分火焰向后喷射	金属丝直径太细	选用的金属丝直径比喷嘴套管孔径小 0.1mm
火焰偏吹	1. 空气帽与喷嘴的间隙不合适; 2. 喷嘴套管单边磨损; 3. 空气帽内有部分结渣	1. 调节空气帽或将喷嘴和混合室拆下重装; 2. 换新或重镶套管; 3. 清除结渣
金属丝送进不畅	1. 送丝轮上油垢太多,打滑; 2. 送丝轮磨损; 3. 压紧弹簧太松; 4. 金属丝锈斑太多; 5. 喷铝时铝丝表面氧化; 6. 刹车片与摩擦片断油	1. 清洗; 2. 换新的; 3. 调整; 4. 清除; 5. 用布片抹上一层极薄的油膜; 6. 涂油

火焰线材喷涂层与基体表面的结合,在碳钢表面,大部分以机械啮合的结合

形式存在,但在喷涂(Ni/Al 复合线材、钼等材料)时,在碳钢预处理表面会有微区的显微冶金结合情况存在。这些材料的喷涂层的结合强度远高于一般材料的喷涂层,其数值比约为 3: 1 左右。所以通过喷涂(Ni/Al、Mo)等放热材料作为结合底层,能明显提高涂层的结合强度。

改善基体表面状态,能提高涂层的结合性能,钢基体表面经严格的喷砂处理,可改善粒子与基体表面的浸润和啮合及涂层内应力的分布情况,提高涂层的结合强度。

火焰线材喷涂涂层是由大量熔化的喷涂材料微粒堆积而成,与等离子喷涂层和火焰粉末喷涂层相比,其特征如下:

(1) 涂层的结构同样为碟状的喷涂材料微粒相互交错叠加堆积,涂层内部附着一定量的金属氧化物和存在一定量的空洞。

(2) 涂层的结合强度低于等离子喷涂层,而高于常规的火焰粉末喷涂层。

(3) 涂层的内部约有 7% ~ 15% 的孔隙(喷钼涂层约 3%)。

喷涂层以碟状叠加堆积的结构,使涂层的纵向抗拉强度与法向抗拉强度有所区别。一般涂层纵向抗拉强度约是法向抗拉强度的 5 倍 ~ 10 倍,但也只有喷涂材料自身强度的 30% ~ 50%,喷涂层的这种结构,使其涂层的抗冲击能力和抗疲劳能力很差。因此,大部分火焰线材喷涂层都不能用于冲击强度很大的部位。

以碟状粒子堆集的喷涂层,其碟状粒子的扁平程度,同粒子的材料性能和粒子的飞行速度关系最大,一般低熔点喷涂材料(如锌、锡、巴氏合金、铝等),在火焰线材喷涂时其粒子的飞行速度却往往大于高熔点喷涂粒子,其撞击到基体表面时会有非常明显的撞击变形,因此涂层具有较低的孔隙率。等离子焰流温度和焰流速度都远高于火焰线材喷涂的火焰温度和焰流速度,喷涂高熔点材料时,其等离子喷涂层的质量优于火焰线材喷涂层。

### 5.2.3 火焰线材喷涂技术的应用及其实例

火焰线材喷涂可以直接、快速、方便地在钢结构、储罐、机械零部件表面制备耐腐蚀、抗氧化、耐磨损、导电、屏蔽等金属及复合材料涂层,还可以在水泥、木材、石膏等非金属表面制备具有装饰性的金属涂层,目前该技术的应用已遍及到各行各业。

在应用火焰线材喷涂涂层时,应考虑涂层的如下特点,使涂层性能达到使用要求。

(1) 涂层与基体的结合是机械锚接形式,涂层与涂层的母材相比更脆、更硬、耐磨性更好。但它不适合在冲击载荷下使用。

(2) 涂层一般都有孔隙,在有腐蚀介质环境中使用,涂层必须进行封闭处理。

(3) 涂层形成过程中,有元素烧损和氧化反应。对涂层进行热扩散处理时,则需考虑元素烧损和氧化物的含量。

### 5.2.3.1 火焰线材喷涂技术的应用

#### 1. 轴及曲轴的修复

各种曲轴磨损不能使用时,表面常出现拉槽或偏磨损失圆的情况。一般火焰线材喷涂修复工艺如下:

(1) 下切磨圆。采用曲轴磨床将需喷涂处半径下切  $0.3\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$ ,彻底去除疲劳层。轴径大于  $80\text{mm}$  的曲轴,轴径下切值应大于  $1.2\text{mm}$ 。

(2) 油孔预处理。使用磨头或电钻,对已下切的油孔进行倒角处理。

(3) 喷砂或电火花表面粗化。对需喷涂的轴径进行表面喷砂处理或电火花镍拉毛。

(4) 预热。将喷涂处轴径表面进行预热处理,预热温度应低于  $200^\circ\text{C}$ 。一般直接采用火焰预热法。

(5) 喷涂结合底涂层。采用镍铝复合丝或铝丝,在喷涂轴径表面均匀喷涂一层厚度约在  $80\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$  的结合涂层。

(6) 喷涂工作层。根据曲轴使用的工况条件,选择高碳钢丝、高铬合金钢丝或其它喷涂材料进行喷涂,喷涂层的尺寸应达到轴标准尺寸加  $0.2\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$  加工余量。

(7) 涂层封闭及油孔的清理。待喷涂层温度冷却到  $60^\circ\text{C}$  左右时,可对涂层进行渗机油处理,以提高涂层使用时的润滑性能。涂层完全冷却后,对油孔进行预磨削处理和油孔道内喷涂残留物的清理。

(8) 涂层的磨削加工。曲轴径上的喷涂层只能采用曲轴磨床进行加工,根据所使用喷涂材料的性质选择适宜材料的砂轮,并按涂层的特点制定合理的磨削工艺。

注意事项:许多曲轴的损坏是单节和几节。喷砂预处理和喷涂时都应对未损坏轴径进行遮、包、挡、堵等保护处理,以避免这些轴径的损坏。

大部分汽油发动机的曲轴都可以采用火焰线材喷涂工艺修复。而且喷涂层的耐磨、润滑性能都优于未喷涂的轴。柴油机曲轴修复时应注意发动机的功率,发动机产生的功率大于  $147\text{kW}$  时,不推荐使用火焰线材喷涂工艺。

#### 2. 机械轴或辊表面修复及强化

机械轴或辊表面磨损或腐蚀而失效,也可以用火焰线材喷涂进行修复,其工艺过程如下:

(1) 轴下切粗化。各种机械轴或辊表面预处理多采用车床车削粗螺纹,直径下切尺寸一般为  $0.8\text{mm} \sim 1.2\text{mm}$  为宜。

(2) 待喷涂与不喷涂的结合部粗化最好采用电火花镍拉毛处理 ,或在结合部喷涂较厚的结合底层。

(3) 车削粗螺纹后用钢丝刷除去浮着的切屑。使用溶剂清洗表面 ,彻底去除表面的油迹。

(4) 工件的预热根据喷涂层材料 ,喷涂部位应预热  $95 \sim 120$  。

(5) 工件预热后 ,对不喷涂处进行遮挡保护 ,然后喷涂厚  $80\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$  的均匀结合底层。

(6) 喷涂工作面层的材料选择根据工况而定 ,其涂层的尺寸应大于轴标准尺寸加  $0.2\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$  的加工余量。

(7) 在涂层温度约  $60$  左右时 ,根据工况使用环境 ,选择渗油、蜡或其它涂料进行封闭处理。

(8) 直轴或辊表面涂层的机械加工 ,可采用车磨处理。

### 3. 钢结构、储罐的长效保护

火焰线材喷涂铝、锌及其合金涂层 ,外加有机涂料封闭 ,可以使处于大气、淡水、海洋气氛中的钢结构有效保护期长达 10 年以上。其喷涂工艺如下 :

(1) 表面预处理。钢结构及储罐的表面使用喷砂处理 ,使表面达到无锈、无油、无轧制氧化皮 ,露出金属本色 ,其喷砂的基体表面粗化程度应达到  $R_a \geq 25\mu\text{m}$ 。

(2) 喷涂涂层。喷砂完毕后 ,吹去表面灰尘 ,即可喷涂铝、锌及其合金涂层 ,涂层厚度应达到设计的要求。

(3) 涂层封闭及涂装。吹去浮于涂层表面的灰尘 ,进行涂层表面封闭处理或涂装。可采用重铬酸盐、磷酸盐等溶液或黏度很低的树脂涂料进行封闭处理。锌涂层厚度大于  $300\mu\text{m}$  后 ,涂层可不必进行封闭处理。铝及铝合金涂层则最好进行封闭处理 ,而且封闭加涂装可以延长铝涂层保护钢结构的时间。各类保护涂层厚度设计和封闭种类见表 5 - 7。

表 5 - 7  锌、铝及合金涂层厚度设计与封闭

环 境	第一次维修寿命	涂层类型	标 号	总厚度/μm
非污染内陆 大气使用的涂层	很长(20 年以上)	喷铝	Al 160	160
		喷锌	Zn160	160
		喷铝 + 封闭	Al120LF	120
		喷锌 + 封闭	Zn160LF	160
	长(10 年 ~ 20 年)			
		喷铝	Al120	120
		喷锌	Zn120	120
		喷锌 + 封闭	Zn120LF	120
		喷铝 + 封闭 + 涂装	Al120LQA	120 + (30 ~ 100 )
		喷锌 + 封闭 + 涂装	Zn120LQA	120 + (30 ~ 100 )

(续)

环 境	第一次维修寿命	涂层类型	标 号	总厚度/ $\mu\text{m}$
污染的 inland 大气 户外使用的涂层	很长(20 年以上)	喷铝	Al 160	160
		喷锌	Zn300	300
		喷铝 + 封闭	Al 160LF	160
		喷锌 + 封闭	Zn160LF	160
	长(10 年 ~ 20 年)	喷铝	Al120	120
		喷锌	Zn160	160
		喷铝 + 封闭	Al1200LF	120
		喷锌 + 封闭	Zn120LF	120
		喷铝 + 封闭 + 涂装	Al120LQB	120 + (60 ~ 100)
非污染海岸大气 户外使用的涂层	很长(20 年以上)	喷铝	Al160	160
		喷锌	Zn300	300
		喷铝 + 封闭	Al160LF	160
		喷锌 + 封闭	Zn160LF	160
	长(10 年 ~ 20 年)	喷锌	Zn160	160
		喷铝 + 封闭	Al120LF	120
		喷锌 + 封闭	Zn120LF	120
		喷铝 + 封闭 + 涂装	Al120LQA	120 + (30 ~ 100)
		喷锌 + 封闭 + 涂装	Zn120LQA	120 + (30 ~ 100)
	中长(5 年 ~ 10 年)	喷锌	Zn120	120
室内常年环境 使用的涂层	很长(20 年以上)	喷铝	Al120	120
		喷锌	Zn120	120
	长(10 年 ~ 20 年)	喷铝 + 涂料	Al80LQA	80 + (30 ~ 100)
		喷锌 + 涂料	Zn80LQA	80 + (30 ~ 100)
污染的海洋大气 户外使用的涂层	很长(20 年以上)	喷铝	Al300	300
		喷锌	Zn400	400
		喷铝 + 封闭	Al120LF	160
		喷锌 + 封闭	Zn300LF	300
	长(10 年 ~ 20 年)	喷铝	Al160	160
		喷锌	Zn300	300
		喷铝 + 封闭	Al120LF	120
		喷锌 + 封闭	Zn160LF	160
		喷铝 + 封闭 + 涂装	Al120LQB	120 + (60 ~ 100)
		喷锌 + 封闭 + 涂装	Zn160LQB	120 + (60 ~ 100)
	中长(5 年 ~ 10 年)	喷锌	Zn160	160
		喷锌 + 封闭	Zn120LF	120

(续)

环 境	第一次维修寿命	涂层类型	标 号	总厚度/ $\mu\text{m}$
经常结露和常湿环境使用的涂层	很长(20 年以上)	喷铝	Al160	160
		喷锌	Zn160	160
		喷铝 + 封闭	Al120LF	120
		喷锌 + 封闭	Zn120LF	120
	长(10 年 ~ 20 年)	喷铝	Al120	120
		喷锌	Zn120	120
		喷铝 + 封闭 + 涂料	Al120LQA	120 + (30 ~ 100)
		喷锌 + 封闭 + 涂料	Zn120LQA	120 + (30 ~ 100)
海水全浸涂层	很长(20 年以上)	喷铝 + 封闭	Al160LF	160
		喷锌 + 封闭	Zn300LF	300
	长(10 年 ~ 20 年)	喷锌	Zn300	300
		喷锌 + 封闭	Zn200LF	200
		喷铝 + 封闭 + 涂料	Al160LQB	160 + (60 ~ 100)
		喷锌 + 封闭 + 涂料	Zn200LQB	200 + (60 ~ 100)
	中长(5 年 ~ 10 年)	喷锌	Zn160	160
		喷锌 + 封闭	Zn120LF	120 + (60 ~ 100)
		喷铝 + 封闭	Al120LQB	120 + (60 ~ 100)
	短(5 年以下)	喷锌	Zn120	120

在碳钢表面喷涂纯铝涂层经高温扩散处理 ,能显著提高碳钢的抗高温氧化性能 ,延长使用寿命 3 倍 ~ 5 倍。

火焰线材喷涂各种丝材 ,使用国产 QX - 1 型喷枪的工艺参数见表 5 - 8。

表 5 - 8 常用金属丝材火焰喷涂工艺参数

喷涂材料	气体流量及压力				压缩空气 压力/MPa	喷涂距离 /mm	送丝 速度 * /mm	每遍涂 层厚度 /μm
	氧气		乙炔					
	压力/MPa	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	压力/MPa	流量 /(m <sup>3</sup> /h)				
镍铝复合丝	0.45 ~ 0.65	0.8 ~ 1.2	0.08 ~ 0.12	0.65 ~ 1.0	0.45 ~ 0.65	100 ~ 150	0 ~ 2	30 ~ 40
铝、锌及 合金丝	0.4 ~ 0.5	0.75 ~ 0.9	0.07 ~ 0.1	0.55 ~ 0.85	0.4 ~ 0.5	100 ~ 120	2 ~ 5	60 ~ 80
铜及合金丝	0.4 ~ 0.5	0.7 ~ 0.9	0.07 ~ 0.1	0.55 ~ 0.85	0.45 ~ 0.55	150 ~ 180	3 ~ 7	40 ~ 50
钼丝	0.55 ~ 0.75	0.8 ~ 1.2	0.08 ~ 0.12	0.65 ~ 1.0	0.55 ~ 0.65	120 ~ 180	3 ~ 10	30 ~ 40
2Cr13 钢丝	0.6 ~ 0.7	0.8 ~ 1.0	0.08 ~ 0.10	0.65 ~ 0.75	0.5 ~ 0.7	100 ~ 120	2 ~ 5	30 ~ 40
巴氏合金丝	0.25 ~ 0.35	0.4 ~ 0.5	0.05 ~ 0.08	0.35 ~ 0.50	0.6 ~ 0.8	120 ~ 180	5 ~ 10	30 ~ 40
* 指在喷枪正常工作状态下 将喷涂粒子束调整到浓密状态时 喷吐丝伸出喷枪空气帽的长度								

#### 4. 水闸门的防腐涂层

水闸门是水利工程中的钢结构件,它长期处于干湿交替的状态,浸没水下时环境比较恶劣,并受到各种水(如海水、淡水、工业污水)、气体、日晒、水生物的侵蚀以及泥沙等物的冲磨,易发生磨蚀,为提高水闸门的使用寿命,往往采用涂料保护,一般的保护周期为3年~4年,比较好的为7年~8年。如果采用喷涂锌保护法,水闸门的使用寿命可延长到20年~30年。这是因为锌的标准电极电势比较低,基体金属铁和涂层锌构成一个原电池,锌为阳极,而铁为阴极,阳极锌溶解极其缓慢,使基体金属铁不受腐蚀,从而延长水闸门的使用寿命。

水闸门喷涂锌的工艺如下:

(1) 喷涂表面进行喷砂处理除去污、锈,并粗化水闸门表面。

(2) 用SQP-1型喷枪喷涂锌丝。乙炔的压力为0.04MPa~0.05MPa,氧气压力为0.4MPa~0.5MPa,压缩空气的压力为0.5MPa~0.6MPa。为保证涂层质量及其对基体的结合强度,在喷涂过程中,应严格控制氧与乙炔的比例和压力,使火焰为中性焰或微碳化焰,喷涂距离一般控制在150mm~200mm,涂层厚度一般控制在0.3mm左右。应多次喷涂达到此厚度,以防止涂层脱落。

(3) 涂层经检验合格后,应刷油漆封孔,油漆一般选用沥青漆。

#### 5. 退火包的喷涂

热处理用的退火包长期在高温下工作,易产生高温氧化,使用期只有1个月~1个半月。

采用氧—乙炔焰丝材喷涂法在退火包上喷涂铝,可提高其抗氧化性能,因铝在高温作用下,除了形成稳定的氧化膜外,还能在铁基体上扩散,与铁作用形成抗高温氧化的铝化铁,从而提高钢材的耐热性。

退火包喷涂铝的工艺如下:

(1) 采用喷砂法除去退火包表面的锈,并使它粗化。

(2) 用SQP-1型喷枪进行线材喷涂,铝丝的直径为3mm。

(3) 涂刷泡化碱。

(4) 喷涂后进行扩散处理,以产生抗950℃高温氧化的铝化铁。

喷涂过的退火包的使用寿命,可比未喷涂的提高4倍。

### 5.3 火焰粉末喷涂技术

#### 5.3.1 火焰粉末喷涂的分类及特点

火焰粉末喷涂是利用燃气与助燃气燃烧(爆)产生的热量加热粉末态喷涂



材料,使其达到熔融或软化状态,借助焰流动能或喷射加速气体,将粉末喷射到经预处理的基体表面,形成涂层的工艺方法。

根据燃烧火焰焰流速度及燃烧方式等,火焰粉末喷涂方法分类及特点见表 5 - 9。

表 5 - 9 火焰粉末喷涂方法及其特点

喷涂方法	普通火焰粉末喷涂	塑料火焰粉末喷涂	高速火焰喷涂	爆炸喷涂
火焰燃烧方式	喷嘴外燃烧	喷嘴外燃烧	燃烧室内燃烧	枪管内爆燃
焰流速度/(m/s)	50 ~ 200	50 ~ 200	1700	2000
火焰温度/	2000 ~ 3300	2000 ~ 3300	2800 ~ 3300	5000
使用燃气	乙炔、丙烷、氢气	乙炔、丙烷、液化石油气	丙烷、丙烯、乙炔、煤油	乙炔
特点	设备简单、轻便,操作工艺简单,宜用于现场操作,可以喷涂熔点低于 2800 以下的金属及合金、陶瓷粉末材料	设备简单,易操作,一次可以涂覆较厚的涂层,工件尺寸不受限制。缺点:涂层平整性、均匀性较差	涂层致密,结合强度高,但不能喷涂高熔点陶瓷粉末,其低温高速的特点非常适合喷涂 WC 材料	涂层非常致密,结合强度高,可以喷涂金属、合金、陶瓷等粉末材料,但整套设备笨重,喷涂时产生高噪声

5.3.2 普通火焰粉末喷涂

5.3.2.1 普通火焰粉末喷涂原理和特点

普通火焰粉末喷涂时预混助燃气及燃气在喷嘴外燃烧,以氧—乙炔火焰喷涂为例,原理如图 5 - 13 所示。喷涂粉末从喷枪上方的料斗通过进粉口漏到枪内有送粉气流过的送粉孔道中,在喷嘴出口处受到氧—乙炔火焰迅速加热至熔融或高塑性状态后,喷射并沉积到经过预处理的基体表面,形成牢固结合的涂层。

氧—乙炔火焰粉末喷涂具有设备简单、工艺操作简便、应用广泛灵活、适应性强、修复速度快、经济性好、噪声小等特点。

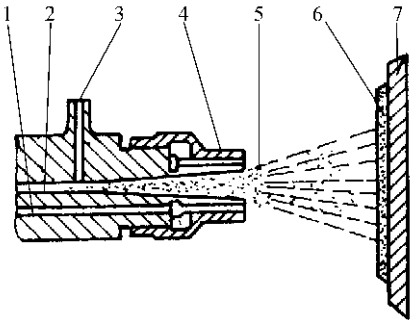


图 5 - 13 普通火焰粉末喷涂原理示意图

- 1—氧—乙炔混合气;2—送粉气;
- 3—喷涂粉末;4—喷嘴;5—燃烧火焰;
- 6—涂层;7—基体。

### 5.3.2.2 普通火焰粉末喷涂设备

氧—乙炔焰粉末喷涂设备主要包括各种喷枪、氧气和乙炔供给装置以及辅助装置。

#### 1. 氧—乙炔焰粉末喷枪

氧—乙炔焰粉末喷枪是喷涂设备中的主要部件,集火焰燃烧系统和粉末供给系统于一身,其喷枪的类型有专门用于喷涂的喷枪,也有喷涂喷熔两用喷枪。对火焰粉末喷枪的基本要求是:

(1) 不易回火、火焰能量大、燃烧稳定均匀、调节灵敏。

(2) 吸粉力强,送粉力要大,送粉开关灵活,启闭要可靠,操作方便,维修要简便且易于携带。

(3) 各连接处密封要好,各通道不得漏气,安全可靠。

氧—乙炔焰喷枪可分为等压式、中压式或射吸式三种,见表 5 - 10。

表 5 - 10 氧—乙炔焰喷枪的种类

喷枪种类	乙炔压力 /MPa	氧气压力 /MPa
等压式	0.05 ~ 0.1	0.05 ~ 0.1
中压式	0.05 ~ 0.1	0.2 ~ 0.4
射吸式	真空负压抽吸	0.3 ~ 0.5

氧—乙炔焰喷枪的结构,根据火焰大小、用途、工艺特点及不同应用场合,把送粉机构设计成由氧—乙炔混合气送粉,在火焰中心由氧气流或其它气体流送粉,从火焰外面送粉等三种类型。

中小型喷枪的结构基本上是在气焊枪上加一套供粉装置。当送粉阀不开启时,其作用与普通的气焊枪相同,仅作喷粉前的预热和喷粉后重熔之用。送粉阀开启,合金粉就从粉斗流进枪体,随氧—乙炔混合气一起从喷嘴喷出。

大型枪内另外设置了送粉气路,由氧气送粉。为了操作方便,这类枪多做成手枪形。当工件体积较大时,对预热和重熔的火焰功率需要也大,喷枪往往不能满足要求,此时需用特制的重熔枪。重熔枪实际上就是大型氧—乙炔火焰加热器。为了加大火焰功率,燃烧气体喷嘴的孔形多做成梅花状,混合气管也比一般焊枪要长,可加大操作人员与火焰的距离,改善劳动条件。

近年来氧—乙炔焰喷枪向高速发展,出现了亚声速火焰喷枪,如 CP 长城热喷涂技术有限责任公司推出的 CP - 1000 和 CP - 3000 型亚声速火焰喷枪,其中 CP - 1000 型亚声速火焰喷枪,喷涂粒子飞行速度达到 300m/s,结合强度高,气孔率低。

## 2. SPH - E 型喷枪

SPH - E 型喷枪是一种常用的,既适用于氧—乙炔焰粉末喷涂,又适用于氧—乙炔焰粉末喷熔的两用枪。图 5 - 14 为 SPH - E 型喷枪的结构图。该喷枪是由上海喷涂机械厂研制生产的。

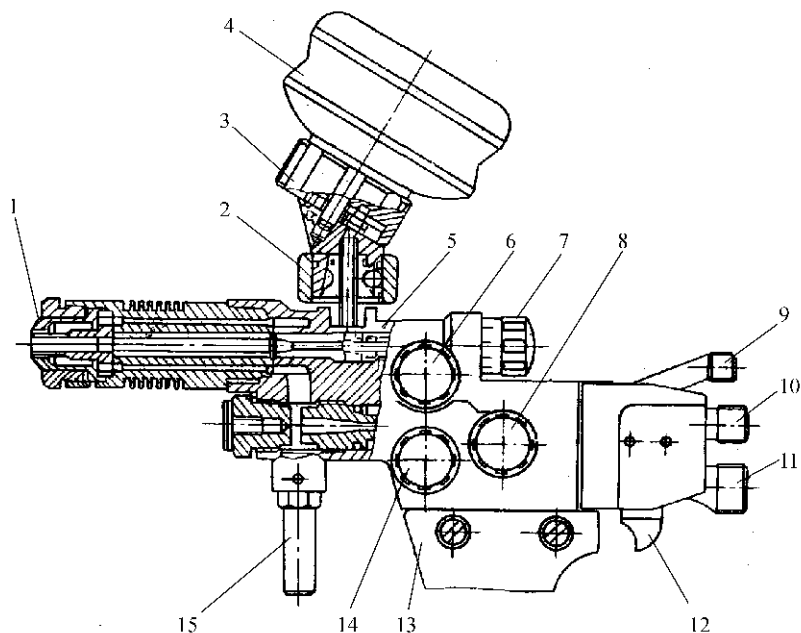


图 5 - 14 SPH - E 型喷枪结构图

- 1—喷嘴;2—锁紧环;3—粉斗座;4—储粉罐;5—本体;6—送粉器控制阀;  
7—粉末流量控制安全阀;8—氧气阀;9—补充送粉气体进口;10—氧气进口;  
11—乙炔进口;12—气体快速关闭阀;13—手柄;14—乙炔阀;15—支柱。

(1) SPH - E 型喷枪的结构及组成。SPH - E 型喷枪的火焰燃烧系统和粉末供给系统采用射吸式原理。由于枪体上部的粉斗座位置可以调节,以及带有专用接长管附件,因此除一般位置操作外,还可以进行仰喷以及复杂形状零件的喷涂。喷枪有如下主要组成部分:

① 喷嘴。喷嘴是喷枪的主要零件,有两种形式:一种是梅花孔嘴,热能量较大,火焰速度较低,不适用于内孔零件的喷涂;另一种是环形喷嘴,热能量较小,但火焰速度高,不易回火,适用于内孔零件的喷涂,同时也适用于具有放热性元素的合金粉末的喷涂。

② 送粉气体控制阀。送粉气体控制阀是用于控制送粉气体的流量,以调节

射吸系统吸入粉末的数量和粉末到达火焰中的速度。

- ③ 粉末流量控制阀。粉末流量控制阀是控制通入送粉系统的粉末数量。
- ④ 氧气和乙炔控制阀。氧气和乙炔控制阀是分别用来控制氧气和乙炔的流量。
- ⑤ 方向可调的粉斗座及储粉罐。

(2) SPH - E 型喷枪的故障与排除(表 5 - 11)。

表 5 - 11 SPH - E 型喷枪的故障与排除

故 障	发 生 原 因	解 决 办 法
点不着火	氧气压力太高 ,乙炔流量太小	调节氧气压力 0. 4MPa ~ 0. 5MPa 乙炔压力 0. 07MPa ~ 0. 08MPa
点火后 ,调节中性火焰时发现喷嘴头部有断续爆破声	喷嘴孔被堵塞 ,喷嘴与喷嘴座接触面接触不好	用通针清理孔道 ,扳紧喷嘴压帽
点火后 ,火焰飘忽不稳定	氧气和乙炔压力不稳定 ,调压器失灵	修理调压器 ,天冷时用 300W 的红外线灯泡照射氧气表
粉斗座旋到(Z)位置 ,粉关不死	送粉气流量不足 ,粉座内 $\phi 8$ O 形圈磨损	调节(T)阀 ,开大送粉氧气 ,掉换 $\phi 8$ O 形圈 ,枪工作位置在 $\pm 75^{\circ}$

5. 3. 2. 3 氧—乙炔焰粉末喷涂工艺

氧—乙炔焰粉末喷涂工艺与氧—乙炔焰丝材喷涂工艺相似。其工艺流程包括喷涂前基体表面的预处理、喷涂打底层粉(用一步法喷涂粉末时可省去此道工序)、喷工作层粉末、涂层后处理。喷涂前基体表面的预处理可见第三章喷涂前基体表面的预处理。本节主要介绍喷涂打底层粉以及喷涂工作层粉、涂层的封孔处理等工艺。

1. 喷涂打底层粉末

为了使涂层与基体材料达到良好结合 ,其涂层大都由底层、过渡层与工作层组成。

(1) 打底层粉末的选择。在氧—乙炔焰粉末喷涂中 ,一般选用镍铝复合粉末作为打底层。镍铝复合粉末可分为镍包铝和铝包镍。

由于镍包铝复合粉放热反应剧烈 ,放热温度较高 ,因此喷涂时易产生大量的烟。为防止工件被烟雾污染 ,应严格控制喷涂规范 ,采用较强的火焰、较大的送粉气流量和较小的送粉量来调节。操作法可用快速薄层喷涂法 ,即将喷枪来回反复移动 ,不要在一个地方停留时间过长。粉末粒度 ,选用 180 目 ~ 250 目为宜。

铝包镍复合粉末的工作性能较好,结合强度较高,冒烟少,所以应尽量采用铝包镍粉。由北京矿冶研究总院研制的KF-6复合粉末(铝包镍复合粉)可作为打底层粉,它与镍包铝复合粉相比,具有更高的结合强度,涂层韧性好,喷涂时烟雾少,粉末沉积效率高。

(2) 工艺参数选择。喷粉时喷嘴与工件距离为180mm左右,喷嘴与工件表面要保持垂直,并与工件轴心在同一水平上,喷到有凹槽的地方,喷枪应作适当的倾斜,旋转工件的线速度约为 $6\text{m/min} \sim 30\text{m/min}$ ,喷枪移动速度为 $3\text{mm/r} \sim 5\text{mm/r}$ 。喷涂时,火焰一般采用中性焰。

底层的厚度不需太厚,一般以 $0.1\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ 为宜。这是因为该层仅作为提高结合强度用,如果喷得太厚,反而会降低结合强度,也不经济。

质量好的镍包铝或铝包镍涂层呈银白色,周围烟尘污染很少。

## 2. 喷涂工作层

底层喷好之后,应立即喷涂工作层粉末,以防止氧化和污染。底层为喷涂工作层粉末提供了良好的活性表面层,有助于提高结合强度。

### 1) 工作层粉末的选择

(1) 选择粉末的原则。根据基体表面的工作条件和技术要求来选择性能合适的粉末,粉末材料的热膨胀系数尽可能与基体相近,以避免相差过大而造成涂层出现较大的收缩应力,粉末的熔点要低,流动性要好,粉末的球形要好,粒度要均匀。

(2) 粉末品种牌号选择。根据被喷涂基体表面的工作条件和技术要求的不同,可分别选择与其相适应的耐磨损、耐腐蚀、耐热抗氧化、导电、绝缘等不同性能的合金粉末材料,以使基体表面获得一层具有合金粉末性能的涂层。

几种选择方法:

耐磨性能的涂层,可选用成本较低的铁基合金粉末,如机床的主轴轴颈和床身导轨面的喷涂;耐磨和耐腐蚀等综合性能的涂层,可选用镍基合金粉末,如挤压机回程缸轴和燃汽轮机叶片的喷涂;对耐热性能要求高的涂层可选用金属陶瓷材料;对要求高硬度的耐磨涂层可选用钴包碳化钨粉末。

### 2) 喷涂工作层工艺参数的选择

要选择恰当的喷涂距离。在该喷涂距离时,粉粒的温度最高,速度最大,其沉积效率最佳,结合强度最高。根据实践经验,喷涂距离可取为火焰总长度的 $4/5$ ,一般以 $150\text{mm} \sim 200\text{mm}$ 为宜。

火焰一般采用中性焰。可以通过调整火焰功率和送粉量来调整粉末的加热温度。喷涂工作层粉末的火焰能率应大一点,出粉量应适当,观察火焰中的粉末颜色可以鉴别粉末加热的程度。若火焰的末端粉末呈白亮色,说明温度较高,如

果是暗红或红色,则说明加热不够,这时需调节送粉气流大小和火焰能率,使粉末加热到发白亮为宜。如果出粉速度太大,即送粉氧气流量开得太大,这时火焰中的粉末颜色变暗。造成的原因是粉末通过火焰区的加热时间不够,使粉末温度不够高,则使沉积效率降低、生粉多,涂层性能差。喷涂工作层粉末要分层喷,每道涂层厚度要控制在 $0.1\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ ,最大不超过 $0.2\text{mm}$ 。工作层的总厚度一般不超过 $1\text{mm}$ ,太厚会降低涂层的结合强度。

喷涂层的厚度可以计算,在修复零件时,喷涂层的厚度一定要考虑基体金属的热膨胀量和加工余量。

在整个喷涂过程中,工件的温度不要超过 $250^\circ\text{C}$ 。超过此温度时,可以暂停喷涂,降温后再继续,也可用干燥清洁的冷却气流(如压缩空气)来冷却喷涂点附近不喷涂的部位。

在车床上喷轴类零件时,喷涂面的线速度以 $20\text{m/min} \sim 30\text{m/min}$ 为宜,喷枪的横向移动速度一般为 $3\text{mm/r} \sim 7\text{mm/r}$ 。

喷涂完毕,应缓慢自然冷却,轴类等可转动的零件可在车床上旋转冷却。

### 3. 涂层的封孔

大多数喷涂工艺所获得的涂层是有孔隙的。涂层经封孔处理后,可防止在涂层磨削加工时从砂轮上掉下来磨粒污染涂层中的孔隙,如果取用石蜡封孔,不但能有效地密封孔隙,防止污染涂层,而且还可作切削润滑剂。

喷涂陶瓷粉末作为绝缘涂层时,如果孔隙暴露在外,则可以吸入潮气或灰尘,在材料中形成许多导电通路,会降低绝缘性能。石蜡可密封孔隙,保持涂层的绝缘性能不变。在高温工作的场合,就应考虑使用无机封孔剂,如水解硅酸乙酯等。

涂层封孔的另一个目的,是为了提高涂层的抗腐蚀性能。如氧化铝涂层是一种多孔性涂层,可以用酚醛树脂封孔处理,能增强防腐蚀能力。

常用的封孔材料有石蜡、液态酚醛树脂和环氧树脂等。无机封孔材料有水玻璃和水解硅酸乙酯等。这两种都不是很好的涂层封孔剂,一般不推荐使用。

在涂敷封孔剂前,必须使涂层表面清洁干燥,最好是喷涂完毕后马上进行封孔处理,切忌表面附着油脂。若有油脂,必须用适当的溶剂洗净并蒸发后,再进行涂敷操作。

为了得到满意的密封效果,有时采用抽真空注入涂敷方法。

### 4. 对涂层缺陷的分析

(1) 剥落和裂纹。涂层从基体上剥落下来,多数发生在喷涂冷却、机械加工或使用过程中,从喷涂工艺考虑,产生剥离和裂纹缺陷的主要原因有:工件表面的氧化物、油污、锈斑、灰尘或潮气等未除净;工件预热温度不恰当;底层过薄,且

与工件基体结合不牢,涂层太厚且不均匀,导致涂层内应力较大,当涂层内应力超过涂层自身强度时,则涂层出现开裂。在喷涂内孔时,涂层的冷却收缩,容易引起剥落,因此尽可能喷得薄一些,以减少冷却时的收缩量。

(2) 分层和疏松。涂层的层间分离是由于各次喷涂的时间间隔太长,在先喷涂的涂层上因吸附气体和灰尘或温度降低等原因,导致前后两层结合不牢而造成的。一次喷涂的涂层过厚,内应力过大,也能导致层间分离。产生涂层疏松的大致原因:喷涂距离太远,粉末颗粒动能小、塑性差、氧化严重,送粉量过大,涂层产生不致密现象;火焰热能不集中;乙炔中含有过量的湿气;喷射角度偏离垂直方向过大等。

#### 5.3.2.4 氧—乙炔火焰粉末喷涂应用实例

##### 1. 采煤机电机转子轴磨损修复

图 5 - 15 为采煤机电机轴。

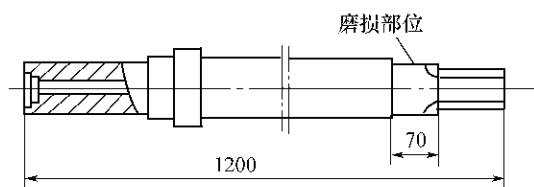


图 5 - 15 SIRU - 400 采煤机电机轴

电机转子轴为中空水内冷式,失效时轴承内圈已与轴颈咬合,解体时用电焊强行切下,轴颈处损伤面积达  $800\text{mm}^2$  以上。多处呈现硬斑、凹坑,并有几条深达  $0.7\text{m}$  的拉伤,此工件的特点是薄壁中空,两端装轴承部位同心度要求很高。

采用氧—乙炔火焰粉末喷涂修复,主要工艺如下:

(1) 用金属清洗剂将零件施喷部位及其附近彻底清洗,然后用低倍放大镜及磁力探伤器检查表面损坏及裂纹情况。

(2) 用电炉或火焰预热零件,预热温度为  $120^\circ\text{C}$ 。为保证结合强度,应使零件里外均匀热透。

(3) 将轴装在车床上并细心找正,切去损坏的表面。局部损伤较深处,用小磨头砂轮打磨至露出无伤基材,然后切制螺纹以粗化表面,切深  $0.2\text{mm}$ ,螺距  $0.4\text{mm} \sim 0.6\text{mm}$ 。

零件温度保持在  $80^\circ\text{C}$  以上,可满足喷涂要求。如果零件较小,也可先装卡找正再以火焰预热。为减少表面的污染和氧化,以先预热再切螺纹为宜。切削外皮或螺纹时,刀具应用丙酮擦净,以免污染工件。

(4) 喷涂可选用 QSH - 4 型或 SPH - E 型喷枪。氧气压力为  $0.5\text{MPa} \sim$

0.7MPa,乙炔压力为 0.05MPa ~ 0.1MPa,枪距为 180mm ~ 220mm。先喷一层 Ni/Al (F501、F502) 或 Al/Ni (F505) 打底粉,厚约 0.1mm ~ 0.15mm;接着喷 Ni222(或粉 112、粉 313)至预定厚度。火焰用中性焰,工件温度保持小于 250℃,工件转动线速度以  $V=20\text{m/min}$  左右为宜。喷涂过程中,要注意随时微微松动车床后顶尖,以免工件受热后膨胀受阻引起变形。

(5) 冷却和喷层加工。喷涂后,零件要继续卡在车床上旋转,空冷至室温。冷却时要注意不允许风流直接吹工件,随温度下降可稍稍顶紧顶尖。

车削可选用 YA6 或 YW 型刀片。切削速度  $30\text{m/min} \sim 50\text{m/min}$ 。半精加工时,切削深度  $t=0.1\text{mm} \sim 0.2\text{mm}$ ;精加工时选  $t=0.065\text{mm} \sim 0.11\text{mm}$ 。磨削选用绿色碳化硅砂轮,纵向进给量以  $0.01\text{mm} \sim 0.05\text{mm/往复}$  为宜。

矿山机械中类似的零件很多,如各种电机轴、齿轮轴、车轴、滚筒主轴,甚至提升绞车的天轮轴,都可以用这一工艺修复,效果良好。

有些轴除均匀磨损外,还伴有局部严重损伤,如不是断裂而是拉伤成沟,即使深度稍大亦可修复,但先要局部修补后,再按操作程序处理。如不先修补,而是在表面制备时把损坏层全部切除,将因切深过大影响零件强度。因此应先补再车,然后喷涂。修补方法可采用喷熔修补,即采用 SPH - 1/h 或 SPH - 2/h 型喷枪,把已清理打磨好的拉伤部位用 Ni25 类粉末“一步法”填平;电弧堆焊修补,即用铸 308 类焊条,以小电流堆平,车好后再喷涂。如零件只有个别小凹坑,也可在喷涂进行到一定程度时停止转动,定点喷涂,填平凹坑。应注意在表面预处理时,务必将凹坑边缘倒圆,处理干净。

## 2. 镗床空心轴超差修复

图 5 - 16 为 T68 镗床空心主轴,全长 954mm 的内孔,对两端轴承部位处的振摆允差为 0.1mm,内孔不圆柱度允差为 0.015mm。该件因为内孔振摆超差,用氧—乙炔焰粉末喷涂法修复。

喷涂工艺如下:

(1) 利用原加工空心轴的堵头,将轴两端夹持,两堵头用螺杆拉住。该件特点是精度高、空心薄壁、细而长。因而用堵头夹持时,要考虑受热膨胀而留有游隙,以防变形。然后在车床上用顶尖定位,安装找正。

(2) 表面清理擦净后,火焰预热至 80℃,外圆下切 0.2mm 并车螺纹拉毛。

(3) 按常规方法,用 Al/Ni (F505) 喷 0.1mm ~ 0.15mm 厚打底层;用粉 113 喷工作层。

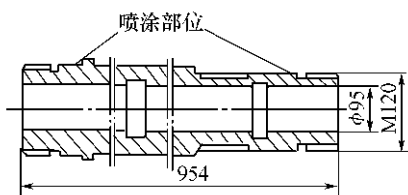


图 5 - 16 T68 镗床空心轴



这个零件喷涂突出的要求是不得变形,为此采取了低温喷涂措施,始喷温度低于 80℃,用结合效果好的 Al/Ni 粉打底。喷涂中零件受热要尽量均匀,以防轴弯曲或薄壁径向变形。经常用半导体点温计(如 68A 型)监测工件表面温度,不许超过 120℃。超过此限,立即停喷,空转降温。零件在旋转中冷却,可避免因自重影响而变形,待零件温度下降后,再接着喷涂。这样,间歇喷涂至工作层达到要求厚度为止。

经过严格控制,一般零件表面温度不会超过 120℃,零件的几何精度不会因喷涂而受到影响。

(4) 旋转空冷至室温。

(5) 车削用 YW 型刀片,磨削用绿色碳化硅砂。

该件采用上述工艺后,保证了零件精度,达到了设计要求。

### 5.3.3 火焰塑料粉末喷涂

火焰塑料粉末喷涂真正应用到工业部门是在 20 世纪 70 年代,由于塑料粉末喷涂装置的不断完善和改进,同时开发了许多树脂喷涂材料,人们逐渐认识到,要获得较厚的塑料涂层时,火焰塑料粉末喷涂法具有突出的优越性。因此,近年来塑料喷涂的应用在迅速扩大。

#### 5.3.3.1 火焰塑料粉末喷涂原理

火焰塑料粉末喷涂是利用火焰间接将塑料粉末加热到熔融状态并喷射到工件表面以形成涂层的一种喷涂工艺过程,其原理如图 5-17、图 5-18 所示。

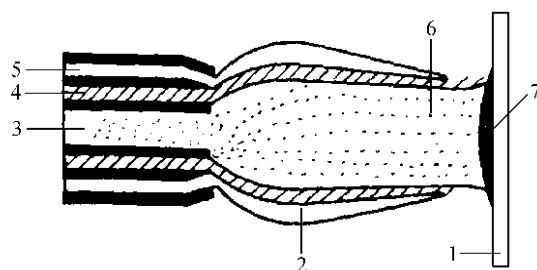


图 5-17 中心送粉火焰喷塑示意图

焰;3—送粉气+粉末;4—冷却气;5—燃气+助燃气;6—喷涂束;7—涂层。

图 5-17 是中心送粉式塑料喷涂枪,右侧是熔融的塑料粉末、压缩空气幕帘和火焰的相互关系及形成涂层的示意图。用压缩空气将塑料粉末通过喷枪的中心管道喷出,在塑料粉末的外围喷出冷却用的压缩空气,以构成气幕帘,在最外

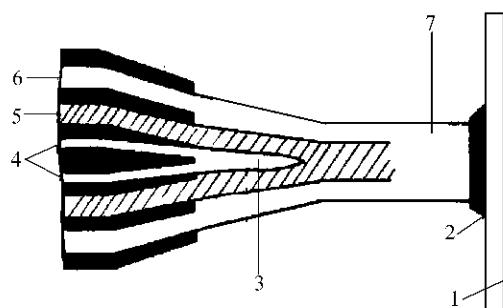


图 5 - 18 外周边送粉火焰喷塑示意图

3—火焰；4—燃气 + 助燃气；5—冷却气；6—塑料粉末 + 送粉气；7—喷涂束。

层则为燃烧气体形成的火焰。这样，加热火焰隔着压缩空气幕帘将塑料粉末加热至熔融状态，从而形成涂层。

图 5 - 18 所示为塑料粉末喷涂的另一种方式。它是将加热火焰置于中心，火焰外围为空气幕帘，最外层为塑料粉末。

火焰塑料粉末喷涂与其它热喷涂相似，不同之处是由于塑料（高分子聚合物）的熔点（或软化点，分解温度）一般远低于金属或其它无机物，所以在火焰喷涂时，一般都需对加热过程中的塑料粉末提供保护。外加的气幕通常是环形，使塑料粉末和火焰隔离，以减少塑料粉末在火焰高温区的加热程度，避免塑料粉末的燃烧、分解。

另外在火焰塑料粉末喷涂过程中喷涂层已熔化成致密的涂层，几乎无孔隙，厚度超过 0.3mm 之后，涂层成为无孔隙涂层。这种性能使需喷涂的工件规格不受加热炉腔体尺寸的限制，可以在任意尺寸的工件表面制备塑料涂层，以提高钢铁容器的耐蚀性能。

塑料喷涂的加热火焰一般不采用氧—乙炔火焰，而采用压缩空气—丙烷火焰或氧—丙烷火焰。除此以外，还在加热火焰与塑料粉末之间添加一层用压缩空气流形成的幕帘，以保护和控制塑料粉末的加热程度。这种以加热火焰、压缩空气幕帘和塑料粉末的构成的多层结构，正是火焰塑料粉末喷涂与火焰金属合金粉末喷涂的最根本的不同之处。

### 5.3.3.2 火焰塑料粉末喷涂设备

一般的火焰塑料粉末喷涂装置由气源（燃气、助燃气、冷却保护气）、喷枪、送粉器三大部分和必要的辅助加热设备组成，如图 5 - 19 所示。

（1）气源。燃气常用丙烷、液化石油气，有时也用乙炔气。助燃气一般为氧气。冷却保护气最常用的是洁净干燥的压缩空气，必要时也可使用二氧化碳或

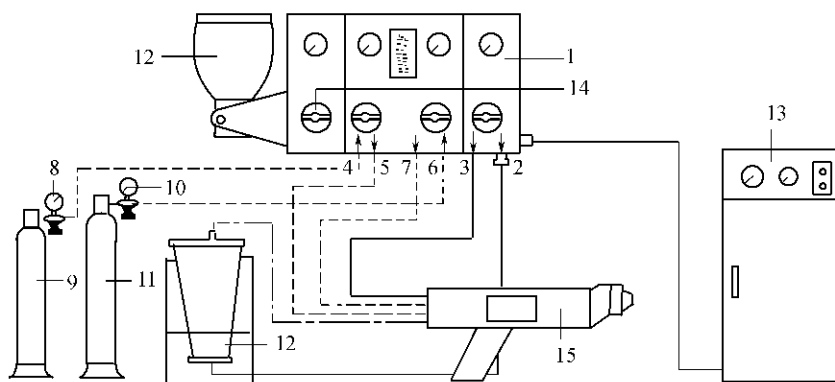


图 5 - 19 SNMI 塑料喷涂装置的组成

1—控制板；2—粉末罐用空气出口；3—枪用侧空气出口；4—氧气入口；5—枪用氧气出口；  
6—燃气入口；7—枪用燃气出口；8—氧气表；9—氧气瓶；10—燃气表；11—燃气瓶；  
12—粉末罐；13—压缩空气机；14—输送气体开关；15—喷涂枪。

氮气。

(2) 喷枪。火焰喷涂塑料粉末的喷枪的类型较多,专门设计的喷枪型号和性能见表 5 - 12。

表 5 - 12 火焰喷枪性能

型号	送粉形式	保护气幕形状	气体参数(压力)/MPa			可喷涂材料	喷涂效率/(kg/h)	粉末送入位置	生产厂家
			氧气	乙炔	冷却气				
PSP - II	枪上	环形气幕	0.2 ~ 0.25	0.1 ~ 0.12	0.1 ~ 0.5	PE、EP、尼龙、PPS	PE3.5 ~ 5.5	焰心	武汉材料保护研究所
PSP - III	粉斗	圆周分布六孔柱形气幕	0.5	0.1	0.1 ~ 0.5		EP > 5		四川长城喷涂技术研究所
CP - D <sub>3</sub>	或送粉口		0.4 ~ 0.6	0.1 ~ 0.11	0.4 ~ 0.6		EP > 1		
UNi - SPRAY - JE	枪上料斗送粉	环形气幕	0.2 ~ 0.25	0.08 ~ 0.1	0.1 ~ 0.5		PE3.6 EP > 5		UTP 公司(德国)
JET - P	枪外送粉				0.07 ~ 0.17		PE3.2, 25	火焰外围	SNMI 公司(法国)
ZB - 2ZD - 7ZT - 7	器送粉		0.105 ~ 0.176	丙烷 0.01 ~ 0.02			EP3 ~ 6 尼龙 11		Schori 公司(英国)

(3) 送粉器。送粉器有两种 ,一种是输送塑料粉末专用的大容量流动或粉末压力送粉器 ;另一种是金属、陶瓷、塑料粉末通用的小容量射吸式送粉罐(带有振动器)。用压力送给 ,送粉平稳 ,可调节性好。大容量送粉器一次可投入 8kg 塑料粉末。

5.3.3.3 火焰塑料粉末喷涂工艺

1. 火焰喷塑工艺流程

工件表面预处理(净化和粗化处理)→待喷涂表面预热→喷涂→涂层后处理→涂层质量检测。

2. 工件表面预处理

火焰喷塑前 ,工件表面必经严格的预处理 ,去除表面的油污、锈或其它腐蚀产物。可以采用酸洗、磷化、喷砂等表面预处理方法。在基体表面喷涂金属涂层或涂刷结合底漆 ,能够提高塑料涂层与金属基体表面的结合性能。表面磷化膜层有利于塑料涂层在其上面的浸润和结合。

3. 工件预热

喷涂热塑性塑料涂层时 ,工件的预热温度和塑料粉末的性能、工件的形状、需喷涂的位置有很大的关系。一般粉末的熔点越高 ,则工件预热温度越高 ,工件尺寸越大 ,板壁越厚 ,则预热温度也相应地提高。

喷涂热固性塑料涂层时 ,提高工件的预热温度可以提高热固性涂层的固化交联程度 ,火焰喷涂热固性塑料粉末 ,工件温度一般为 80 ~ 120 ,要求涂层厚度较厚时 ,工件预热温度要再提高 30 ~ 50 。

4. 火焰喷塑工艺参数选择(见表 5 - 13)。

FSP - II 火焰喷枪喷涂工艺参数见表 5 - 14。

表 5 - 13 火焰喷塑工艺参数选择

参数	选 择 指 南
喷枪功率	喷枪功率主要由输入喷枪的燃气和助燃气流量所决定 ,最适用火焰喷塑的燃气为丙烷。喷枪功率的增大会增加对高分子聚合物材料的烧损 ,造成分子量下降。过小的喷枪功率则不能使涂层成膜 ,一般喷枪功率主要根据塑料粉末的粒度和工件规格而定 ,粗粉末、厚工件 ,宜选择高功率 ,而细粉末、薄板工件 ,宜选择小功率
喷涂距离	一般喷涂热塑性、粒度约 80 目的塑料粉末 ,喷距为 200mm ~ 250mm。喷涂热固性、粒度约 160 目的塑料粉末 ,喷距 120mm ~ 180mm
保护气体	保护气体一般为压缩空气、二氧化碳、氮气三类 ,其中二氧化碳冷却保护效果最好 ,氮气适用于尼龙、聚苯硫醚材料的保护。保护气体量由粉末粒度所决定 ,选择气体压力在 0.1MPa ~ 0.4MPa 之间
送粉量	一般火焰喷枪的送粉量在 40g/min ~ 60g/min 之间

表 5 - 14 FSP - II 火焰喷枪喷涂工艺参数

喷涂材料	粉末粒度 /目	工件预热 温度/	氧气压力 /MPa	乙炔压力 /MPa	保护气压 力/MPa	喷涂距离 /mm	送粉量 /(kg/h)
高压聚乙烯粉末	- 80 ~ +200	80 ~ 120	0.2 ~ 0.25	0.1 ~ 0.12	0.05 ~ 0.15	150 ~ 200	3.5
环氧粉末	- 180 ~ +400	60 ~ 100	0.2 ~ 0.25	0.1 ~ 0.12	0.4 ~ 0.5	80 ~ 150	5.5
尼龙 1010 粉末	- 80 ~ +200	150 ~ 220	0.2	0.1	0.3 ~ 0.4	100 ~ 150	4.5 ~ 5.5
注 喷涂高分子聚合物材料时 ,应严格控制每遍喷涂时的涂层厚度和涂层温度。一般聚乙烯每遍厚度约为 0.3mm~0.4mm ,温度约为 130 ~ 150 ,环氧粉末每遍厚度约为 0.1mm~0.2mm ,温度约为 140 ~ 180 ,尼龙粉末每遍厚度约为 0.1mm~0.3mm ,温度约为 180 ~ 240							

采用火焰喷涂聚苯硫醚、氯化聚醚材料时 ,涂层不宜过厚 ,否则在涂层材料冷却过程中由结晶产生的内应力 ,会使涂层产生龟裂现象。氟树脂材料热喷涂时 ,必须注意许多氟塑料在高于其分解温度后 ,会产生剧毒的气体和分解物。

#### 5. 涂层后处理

喷涂的塑料若具有较大的结晶度时 ,通过对其结晶度的控制 ,能改变塑料材料的性能。一般通过对材料最大结晶速率温度区的控制 ,可改变涂层的结晶度 ,在此温度区对涂层进行急冷处理 ,则可以减少结晶度 ,提高涂层的韧性 ;若进行保温或缓冷处理 ,则可以提高涂层结晶度 ,改善涂层的内应力状态和耐蚀性。

#### 6. 涂层质量检验

外观 :火焰喷涂的塑料涂层表面不允许有龟裂、焦化等现象 ,色泽应基本一致。

结合状态 :涂层与基体表面应牢固附着 ,不允许出现涂层与基体剥离、鼓泡现象。

绝缘性 :用于耐腐蚀的涂层 ,涂层的最低绝缘值应大于 10Ω。

#### 5.3.3.4 火焰塑料粉末涂层技术的应用

目前火焰塑料粉末涂层技术已广泛用于制备耐腐蚀涂层、耐磨涂层和装饰涂层。一般涂层厚度选择大于 0.3mm ,主要应用如下 :

常温储弱酸、弱碱的罐、槽 ,碳钢表面用火焰喷涂聚乙烯涂层 ,可以保护罐、槽 3 年 ~ 5 年。各种食品溶液的罐、槽喷涂聚乙烯涂层 ,可以提高食品的质量。

印刷机的墨辊表面用火焰喷涂尼龙涂层 ,能提高辊的均墨能力 ,提高印刷质量。

某些机械零件的表面需要局部耐磨、耐蚀、绝缘时,可以用火焰喷涂聚苯硫醚和氯化聚醚涂层。

### 5.3.3.5 火焰塑料粉末喷涂应用举例——发酵罐内壁火焰喷涂塑料防护

某葡萄酒厂低温发酵车间的16个发酵罐是采用一般不锈钢板焊接而成的,使用后发现发酵罐内壁出现点状腐蚀,并导致酒中铁离子超标,影响了产品的质量,只能存放中、低档葡萄酒。为了解决内壁防腐蚀问题,该厂曾采用过环氧树脂涂料涂刷工艺,但使用一年,涂层大片脱落,尤其罐底部,涂层几乎全部脱落。在该车间进行技术改造时,为了防止酒罐内壁继续腐蚀及铁离子渗出,采用现场火焰喷涂塑料涂层对葡萄酒罐进行保护,取得了良好的效果。

#### 1. 涂层材料选择

(1) 对涂层的要求。要求内壁涂层材料无毒、无味,不影响葡萄酒质量,具有一定的耐酸性和耐碱性,涂层与罐壁结合良好,使用中不得脱落。涂层最好与酒石酸不粘或粘后易于清除,表面光滑,具有一定的耐磨性。

(2) 涂层材料的选择。根据低温发酵罐工作情况及厂方的要求,选择白色聚乙烯粉末作葡萄酒罐内壁涂层材料。

#### 2. 火焰喷塑工艺

(1) 喷涂设备及工艺流程。聚乙烯粉末火焰喷涂使用塑料喷涂装置,包括喷枪、送粉装置等。工艺流程为:喷砂→预热→喷涂→加热塑化→检查。

(2) 喷砂预处理。在喷涂塑料前,采用压力式喷砂设备,使用刚玉砂处理。

(3) 表面预热。基体表面预热的目的是除去表面潮气,使熔融塑料完全浸润基体表面,从而得到与基体的最佳结合。通常将基体预热至接近粉末材料的熔点。

(4) 喷涂。葡萄酒罐内壁火焰喷塑施工采用由上到下的顺序进行,即顶部→柱面→底部。在经预热使基体表面温度达到要求后,即可送粉喷涂。喷涂时,应保持喷枪移动速度均匀、一致,时刻注意涂层表面状态,使喷涂涂层出现类似于火焰喷熔时出现的镜面反光现象,与基体表面浸润并保持完全熔化。火焰喷涂聚乙烯涂层的喷涂参数见表5-15。

表5-15 葡萄酒发酵罐内壁喷涂参数

喷涂材料	氧气压力/MPa	乙炔压力/MPa	空气压力/MPa	喷涂距离/mm
聚乙烯	0.1~0.2	0.02~0.08	0.1	150~250

(5) 加热塑化。喷涂聚乙烯涂层,由于聚乙烯熔化缓慢,涂层流平性略差,因此在喷涂后,需用喷枪重新加热处理或者喷涂后停止送粉使涂层完全熔化,流

平后再继续喷涂。加热时,应防止涂层过热变黄。

(6) 涂层检查。在喷涂过程中及喷涂完一个罐后,对全部涂层进行检查,主要检查有无漏喷、表面是否平整光滑和是否有机机械损伤等可见缺陷,然后进行修补。葡萄酒罐装酒前经酸液和碱液消毒清洗,再进行检查。对查出结合不良的部位进行修补。

### 5.3.4 超声速火焰粉末喷涂技术

自1981年,美国的J. A. Browning发明了高速氧—燃气火焰喷枪(High Velocity Oxygen Fuel System, HVOF)以来,超声速火焰喷涂技术快速发展,使传统的氧—乙炔火焰喷涂技术发生了深刻的变化,成为当代热喷涂工艺领域最重要的技术进展之一。

与普通等离子喷涂相比,超声速火焰喷涂具有设备较简单、一次性投资少、喷涂粒子速度高、涂层质量好、可以现场喷涂、使用气源较广等优点。它的特点是火焰具有很高的焰流速度( $>2$  马赫),喷涂层结合强度接近于爆炸喷涂工艺制备的涂层。它的低温高速特性,使喷涂诸如碳化钨类受热易分解的材料时,涂层的耐磨性能优于普通等离子喷涂层,但其温度低无法喷涂熔点高的陶瓷材料。

#### 5.3.4.1 超声速火焰粉末喷涂工作原理和特点

##### 1. 超声速火焰粉末喷涂的工作原理

超声速焰流在管口外的流动是由膨胀波和压缩波的反射与相交,交替变换形成的流场。超声速火焰焰流特征波形如图5-20所示,图中实线区表示压缩波区,虚线区表示膨胀波区。由于在压缩区焰流的密度、温度、压强均较高,故在压缩波区相交形成锥形块(图中阴影线部分)——马赫锥,在实际焰流中可观察到超声速流动所特有的明亮的冲击金刚石(马赫锥)。马赫锥的存在与否可以作为火焰是否达到超声速的一个重要判据。

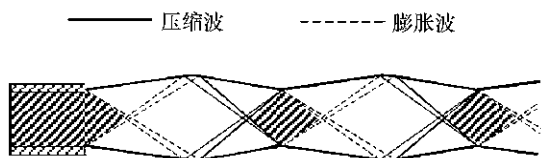


图5-20 超声速火焰焰流特征

超声速火焰喷枪是超声速火焰喷涂设备的关键装置,以JP-5000型超声速火焰喷枪为例(结构示意图见图5-21)。

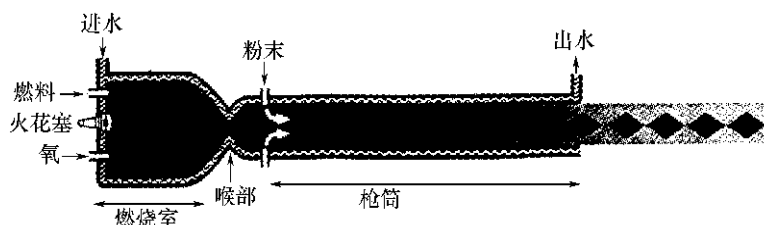


图 5 - 21 JP - 5000 型超声速火焰喷枪结构示意图

其结构的主要特点是采用一根类似于拉瓦尔管的细长火焰喷管,供给压力足够高的可燃气和氧气,可燃气和氧气在燃烧室混合燃烧后,通过喷枪的喉部被压缩,然后膨胀,产生一股超声速的低压喷射气流,类似于一个小型火箭。在焰流刚膨胀的低压部位导入喷涂粉末,粉末随高速低压焰流的抽吸作用被高速焰流加热和加速,达到很高的粒子速度从喷枪口喷出,然后高速撞击基体表面,形成优质涂层。涂层非常致密,与基体的结合强度高,压应力小,其质量完全可以达到甚至超过爆炸喷涂涂层。

## 2. 超声速火焰粉末喷涂的特点

喷涂粒子的极高飞行速度和相对较低的温度,在制备耐磨涂层中显出了独特优势,其具备以下特点:

(1) 火焰及喷涂粒子速度极高,高速区范围大,喷射粒子撞击能量大。火焰速度可达  $2000\text{m/s}$ ,喷涂粒子速度可达  $300\text{m/s} \sim 650\text{m/s}$  甚至更高,可操作喷涂距离范围大( $150\text{mm} \sim 300\text{mm}$ ),工艺性好。

(2) 火焰温度低,粒子与周围大气接触时间短,粉末氧化、烧损小。高速喷涂的火焰温度一般在  $2900 \sim 3300$  之间,与等离子喷涂和电弧喷涂相比温度较低,且颗粒在焰流中的飞行时间短,粉末在喷嘴中停留时间较长,而一旦离开喷嘴后高速飞行,与周围大气接触时间短,因而与大气几乎不发生反应,喷涂材料微观组织变化小,能保持其原有的特点。因而粉末的氧化、烧损小,特别适合喷涂碳化物等易氧化的粉末材料,如  $\text{Co} - \text{WC}$ 、 $\text{Co} - \text{Cr} - \text{WC}$ 、 $\text{NiCr} - \text{CrAlCz}$  等。

(3) 超声速火焰粉末喷涂所制备的涂层结合强度高,喷涂  $\text{Co} - \text{WC}$  涂层可达  $70\text{MPa} \sim 90\text{MPa}$ ,涂层非常致密,孔隙率极低(小于  $1\%$ );涂层硬度高,喷涂  $\text{Co} - \text{WC}$  涂层的显微硬度(HV)最高可达  $1600$ ,与烧结材料相当,涂层应力为压应力,且残余应力低,可喷涂厚涂层。

(4) 与爆炸喷涂相比,超声速火焰喷涂虽然也是采用燃料燃烧形成超声速



气流,但后者是连续、均匀的高速焰流,前者则是脉动的,还必须同步脉动地用惰性气体清洗枪管中的残余燃气。两种喷涂的特性比较列于表 5 - 16。

表 5 - 16 超声速火焰喷涂与爆炸喷涂设备性能比较

性 能	超声速火焰喷涂 (JP - 5000)	爆 炸 喷 涂
超声速焰流特性	稳定、均匀、连续	脉动。用清洗气清洗枪膛
沉积速率/(kg/h)	11.3	0.91
涂层厚度/mm	可达 6.35	≤1.0
涂层气孔率/%	<1	<1
涂层粘结强度/MPa	≥68.9	≥68.9
WC - Co 涂层的硬度(DPH <sub>300</sub> )	900 ~ 1600	850 ~ 1300
涂层应力	压应力	
涂层成本	低 1 个 ~ 2 个数量级	很高
喷涂施工	可现场施工	只能在喷涂工厂施工

超声速火焰喷涂涂层有非常高的致密度、结合强度和硬度,而且涂层中的氧化物含量很低。但是 HVOF 仍然存在以下其自身难以克服的缺陷:

(1) 适宜喷涂的材料较少。超声速火焰喷涂 WC - Co、WC - Co - Cr 和 NiCr - Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 等粉末时,高速度及较低的温度,较短颗粒飞行时间,保证了粉末在喷涂中更少氧化和失碳,从而使涂层有更高的硬度和更好的耐磨损性。但它无法熔融高熔点陶瓷粉末材料,喷涂金属或合金粉末时,成本太高,体现不出优越性。

目前,超声速火焰喷涂主要用于喷涂 Co - WC、CoCr - WC、NiCr - Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 等碳化物类金属陶瓷涂层材料,不适于喷涂陶瓷涂层材料,不推荐用于喷涂金属及合金粉末材料。

(2) 对喷涂粉末的粒度要求高。由于 HVOF 喷涂时颗粒飞行速度很高,火焰温度又较低,粉末被加热时间仅数千分之一秒,且粗颗粒粉末会在高速射流中出现明显的滞后,影响其沉积效率和涂层的均匀性,因此对喷涂粉末的粒度要求很高。

(3) 热效率低,成本高。燃料高强度燃烧产生的热能大量被冷却水或冷却空气带走,高速焰流的热能,因粉末在焰流中停留时间短,热交换并不充分,也影响热能利用率。这样,使涂层成本升高,一般高于气稳等离子喷涂的成本。

(4) 沉积效率较低。沉积效率不仅影响到涂层的生成速度,更直接影响生产成本。超声速火焰喷涂 Co - WC 粉末时,沉积效率通常低于 45%,而喷涂 NiCr - Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 时,沉积效率仅为 30% 左右,大大增加了涂层材料的消耗和材料

成本。

虽然由于超声速火焰喷涂形成压应力涂层,因而理论上能喷涂厚涂层,但实际上,在喷涂第1层 Co - WC 涂层后,由于涂层硬度高,对随后喷涂的 Co - WC 颗粒的反弹力大,会使沉积效率进一步下降。

(5) 供气系统庞大,操作不方便。超声速火焰喷涂的气体消耗量大,通常为普通火焰喷涂法的数倍至 10 倍,即使采用液体燃料如煤油,氧气用量也很大,需采用“汇流排”管网供气。若用气体燃料,供气装置就更大了。

(6) 工件受热大。受大流量燃气连续喷射,工件基体受热量大。

(7) 枪管容易结瘤。JP - 5000 配有长度不等的枪管,枪管的必要性和优越性在很多文章中都提到,但很少提到它经常结瘤。据中国用户反映,喷涂 WC - Co 只能坚持 30min 左右。

新发展的超声速火焰喷枪,采用压缩空气作助燃气体,称为高速空气燃料喷涂(HVAF),它可以大大减少氧气消耗和成本,简化供氧设备,不需水冷却,而且燃烧火焰温度降低,喷涂 Co - WC 类易氧化高耐磨涂层时,碳化物的烧损减少,涂层质量更好,但是要配 10m<sup>3</sup> 以上的空气压缩机。

#### 5.3.4.2 超声速火焰粉末喷涂设备

超声速火焰喷涂系统由喷枪、控制柜、送粉器、冷却系统与连接管路构成。典型的超声速火焰喷涂设备系统及管路如图 5 - 22 所示。

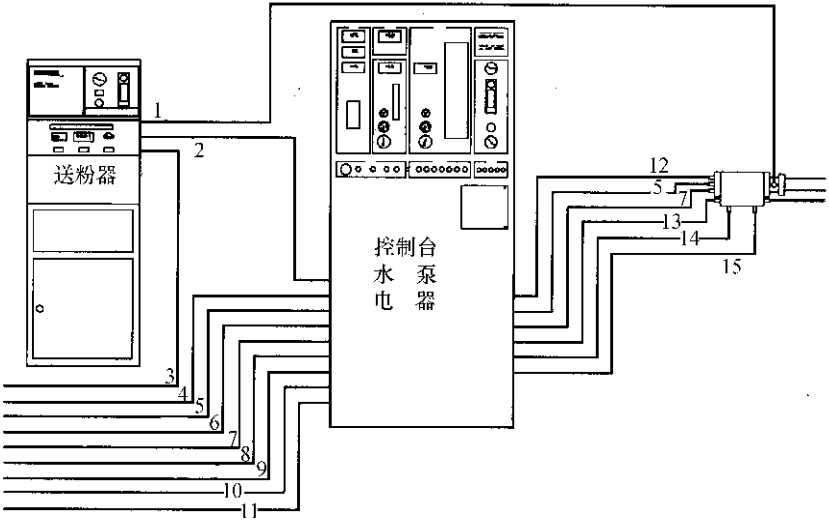


图 5 - 22 高速火焰喷涂设备系统及其管路

1—送粉至喷枪;2—载气至送粉器;3—送粉器电源;4,5—燃料供给;6—燃料回路;

7—氧气供给;8—载气供给;9—压缩空气供给;10—进水;11—冷却水回路;

12—火花塞点火;13—燃烧室压力;14—出水;15—冷却水回路。

典型的超声速火焰喷涂设备系统包括如下一些主要部分：

(1) 超声速火焰喷枪。

(2) 控制装置。主要用于控制燃料( 气体燃料或液体燃料)供给气、载气、压缩空气等气体流量,也控制喷枪冷却水循环用的水泵。

(3) 送粉装置。通常输送单一粉末材料。

(4) 燃料和氧的储罐或气瓶。由于超声速火焰喷涂耗用燃料和气体的量很大,因此储罐数量也很大。且使用不同的燃气时,气瓶的数量相差非常大,氧气的消耗量也很大,如 JP - 5000 型超声速火焰喷枪的氧气消耗为  $56.6\text{ m}^3/\text{h}$ ,按常用的  $6\text{ m}^3$  氧气瓶计,即需 10 瓶/h。

(5) 喷涂机械和工作机械。包括安装超声速火焰喷枪并使之运动的喷涂机械,装夹工件并使之与喷涂机械的运动相匹配的工作机械。

下面重点介绍几种典型的超声速火焰喷涂枪。

超声速火焰喷枪的三大要素：


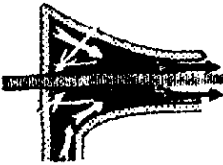
(1) 燃料的种类及助燃气体类型。超声速火焰喷涂用的燃料,有气体燃料如氢气、丙烷、丙烯,也有液体燃料如煤油;助燃气体多用氧气,也可使用空气。

(2) 喷枪结构。主要包括燃烧室结构与尺寸、拉瓦尔管的设计、枪管长度等。

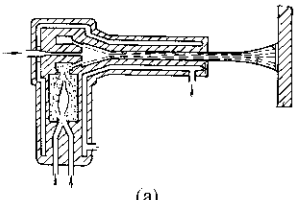
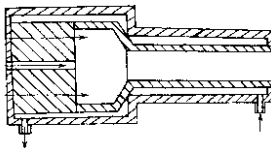
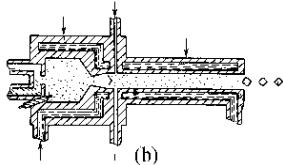
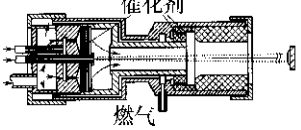
(3) 喷枪的冷却方式。水冷或空气冷却。

上述三个因素的组合与调节衍生出几种不同的超声速火焰喷枪,显示了不同的特性。表 5 - 17 示出了几种超声速火焰喷枪的结构与特性。

表 5 - 17 几种超声速火焰喷枪的结构及特性

喷 枪 结 构		燃料与助燃气		燃烧特性		冷却 方式	参 考
		燃料	助燃气	燃烧 温度/ ℃	燃气速 度/(m/s)		
喉 部 燃 烧 型 喷 枪		乙炔	氧气	3316	1524	轴向 水冷	Linde 公司
		燃料 气体	氧气	2927	1463	轴向 吹风 冷却	Metco 公司

(续)

喷 枪 结 构		燃料与助燃气		燃烧特性		冷却 方式	参 考
		燃料	助燃气	燃烧 温度/ ℃	燃气速 度/(m/s)		
燃烧室燃烧	 (a)	燃料 气体	氧气	2982	1768	水冷	Jet Kote
		燃料 气体	氧气	—	—	水冷	CH - 2000 西安交大
	 (b)	煤油	氧气	3093	2195	水冷	JP - 5000
	 催化 剂 燃 气	燃料 气体	压缩 空气	1900	—	空气 冷却	SB - 500

5.3.4.3 应用实例

修复强化青铜峡水电站 6<sup>#</sup> 机组转轮叶片。青铜峡水电站处于黄河多泥沙河段,多年平均输沙量 2.2 亿 t,最大年输沙量 5.29 亿 t,多年平均含沙量 9.83kg/m<sup>3</sup>,最大含沙量 431.35kg/m<sup>3</sup>,泥沙中含有大量的石英砂、长石,平均粒径 0.015mm~0.02mm。高含沙量与空蚀的联合作用造成水轮机过流部件磨蚀严重,机组效率急剧下降。严重的腐蚀和大量的补焊修复,使叶片实际线形偏离原设计流线形,使水流流态更加恶化,水轮机效率严重损失,形成恶性循环,已严重影响了水电厂的安全经济运行。采用 VA TECH 爱雪维斯公司根据黄河流域水情特点开发的水轮机过流部件表面抗磨蚀新材料 SXH - 70,采用超声速火焰喷涂技术对转轮叶片进行了全方位表面涂层防护,喷涂总面积 45m<sup>2</sup>。SXH - 70 涂层材料是由陶瓷、金属合金等混合组成,兼具良好的刚性和韧性。实验室模拟试验表明,在基材为 0Cr13Ni4Mo 部件上,喷涂厚度 0.25mm~0.3mm,结合强度

不小于 70MPa ,抗气蚀能力是 0Cr13Ni4Mo 的 1.55 倍 ,抗泥沙磨损能力为 1.5 倍。该技术采用前 在黄河多泥沙流域几家电站进行了两年多的挂片试验 经验证 抗磨蚀效果比较理想。

青铜峡水电厂 6<sup>#</sup>机转轮叶片喷涂前后磨蚀情况对比如下(见表 5 - 18) :

(1) 喷涂前转轮叶片磨蚀情况。6<sup>#</sup>机转轮 1996 年更新 ,叶片材质为 0Cr13Ni4Mo 经过 18164h 的运行 ,1999 年 12 月检查 ,叶片呈现整体减薄趋势 ,叶片背面从进水边至出水边距外缘 500mm 区域严重磨蚀 ;叶片外缘、进出水角局部出现穿孔 ,叶片与转轮室间隙增大 15mm ~30mm ,空蚀面积达 9.56m<sup>2</sup> ,总失重 423.7kg ,最大气蚀深度 40mm ,平均深度 5mm ~7mm。

(2) 喷涂后转轮叶片磨蚀情况。经过 15284h 运行 2003 年 6 月 18 日对转轮叶片喷涂层进行检查。叶片正面涂层完好 ,涂层厚度无明显减薄 ,叶片外缘基本完好 ,叶片与转轮室间隙无扩大 ;叶片背面强气蚀区局部涂层空蚀脱落 ,总面积 0.408m<sup>2</sup> ,总失重 10.7kg ,母材平均空蚀磨损 2mm ~4.4mm。

表 5 - 18 青铜峡水电厂 6<sup>#</sup>机转轮叶片喷涂前后磨蚀情况记录

检查日期	涂层防护	运行小时	叶片编号	空蚀面积 cm <sup>2</sup>	平均深度 /mm	损失重量 /kg	最大空蚀 深度/mm
1999. 12. 5	无	20687h	#1	17300	5	66. 2	16
			#2	18360	6. 3	88. 5	22
			#3	20240	6. 2	97. 6	24
			#4	22450	5. 7	100. 2	31
			#5	17250	5. 3	71. 2	20
			总计	95600	5 ~6. 3	423. 7	16 ~31
2003. 6. 18	有	15284h	#1	416	3	1. 02	14
			#2	516	2. 7	1. 13	12
			#3	964	4. 4	3. 39	15
			#4	1636	2. 5	2. 9	14
			#5	556	2. 8	2. 26	13
			总计	4088	2. 5 ~4. 4	10. 7	12 ~15

从 6<sup>#</sup>机转轮叶片喷涂前后实际运行结果来看 ,青铜峡水电厂轴流式水轮机表面用超声速火焰喷涂 ,采用 SXH - 70 抗磨蚀涂层防护取得了明显效果 ,从根本上解除了泥沙磨损破坏 缓解了空蚀的危害 延长了水轮机的使用寿命和机组检修周期。

### 5.3.5 爆炸喷涂技术

爆炸喷涂技术是美国联合碳化物公司林德公司(Union Carbide CorP. Lide Division)在 20 世纪 50 年代发明的专利技术,当时简称为 D - Gun。主要用于喷涂航空发动机、火箭等的关键零部件用高结合强度、高耐磨涂层。30 多年里,一直只对外加工,不出售设备,不转让技术。20 世纪 60 年代,苏联的乌克兰科学院材料研究所也研制出爆炸喷涂设备。现在,爆炸喷涂已经成为热喷涂工业领域制备高质量耐磨涂层的有效方法,得到较广泛的推广应用。

#### 5.3.5.1 爆炸喷涂的原理和特点

爆炸喷涂设备结构简图如图 5 - 23 所示。爆炸喷涂的实质是利用脉冲式气体爆炸的能量将被喷涂的粉末材料加热加速轰击到工作表面后形成坚固涂层。

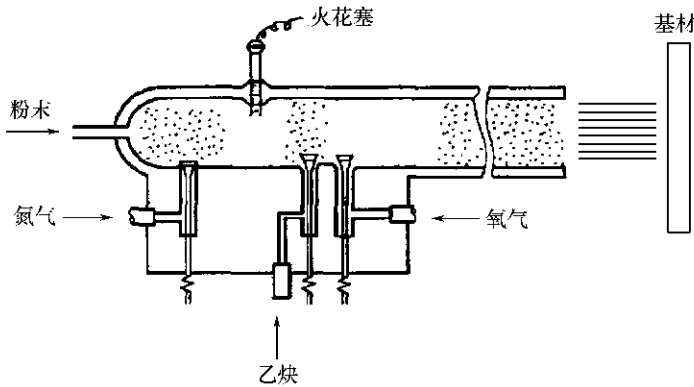


图 5 - 23 爆炸喷涂枪的基本原理

喷涂时,先将一定比例的  $O_2$  和  $C_2H_2$  由供气口送入水冷喷枪的燃爆室,然后由送粉气将喷涂粉末送入燃爆室,经火花塞点火, $O_2$  和  $C_2H_2$  混合气发生爆炸式燃烧,其热能加热喷涂粉末到一定状态,而爆炸冲击波则把喷涂粉末粒子高速喷向工件表面形成涂层。接着向燃爆室内送入清扫气,为下次爆喷准备,如此循环反复进行。

$O_2$  和  $C_2H_2$  混合气体的自由燃烧温度为  $3100^\circ\text{C}$ ,但其爆炸式燃烧温度可达  $4200^\circ\text{C}$  左右,因而喷涂粉末粒子的温度可达  $3500^\circ\text{C}$  以上,而且爆炸波传播速度可达  $3000\text{m/s}$ ,从而将喷涂粉末粒子的喷出速度提高到  $700\text{m/s} \sim 820\text{m/s}$ ,最高可达  $1500\text{m/s}$ 。每次爆喷可产生一个直径约  $25\text{mm}$ 、厚约数微米的圆形涂层斑,整个涂层即是由这样一些小圆形涂层斑有序地相互错落重叠而成。喷涂不同材料、不同粒度的粉末使用不同的爆炸频率,最快可达  $10\text{次/s}$ 。

爆炸喷涂最大的特点就是以突然爆发的热能加热熔化喷涂材料,并利用爆炸冲击波产生的高压把喷涂粉末材料高速喷射到工件基本表面形成涂层。

爆炸喷涂与其它喷涂工艺相比有很多优点:

(1) 爆炸喷涂涂层结合强度高、致密、孔隙率低。喷涂时,由于粉末颗粒迅速被加热、加速,半熔融粉末对基体的撞击力大,所以涂层结合强度高,喷涂陶瓷粉末可达 70MPa,喷涂金属陶瓷粉末可达 175MPa,涂层致密,孔隙率 <2%。

(2) 工件热损伤小。爆炸喷涂是脉冲式喷涂,热气流对工件表面作用时间短,因而工件的温升不高于 200℃,不会造成工件变形和组织变化。

(3) 涂层均匀、厚度易控制。爆炸喷涂每次喷涂形成的涂层厚度约为 0.6μm,所以涂层的厚度均匀、易控制,工件加工余量小。

(4) 涂层硬度高、耐磨性好。涂层材料相同时爆炸喷涂形成的涂层硬度更高、耐磨性更好,硬质合金涂层硬度可达 1100HV。

虽然爆炸喷涂具有涂层致密、孔隙率低、结合强度高、硬度高、耐磨性高、工件热损伤小等优点,但是爆炸喷涂仍然存在以下局限:

(1) 喷涂效率低。爆炸频率低,不超过 10 次/s,而每次喷涂的涂层厚度仅为 4μm~6μm,面积也只有 25mm<sup>2</sup> 一个圆域。

(2) 沉积效率低。喷涂 WC-Co 粉末时,沉积效率只有 30% 左右。

(3) 噪声大。爆炸喷涂时噪声强烈,达到或超过 150dB。

(4) 粉尘多。爆炸喷涂时会产生极细的尘粒,因此需专用的防尘室等措施。

(5) 难以喷涂复杂零部件。形状复杂的工件表面和小内径内腔表面和长内腔内表面无法喷涂。

(6) 喷涂炮身笨重,难以使用先进的喷涂机械手进行自动化作业。

### 5.3.5.2 爆炸喷涂设备

爆炸喷涂设备是利用乙炔气和氧气按一定比例混合,然后点火引爆燃烧,形成高温爆炸冲击波射流,并将送入射束中的粉末颗粒加热加速,高速撞击到基体表面形成涂层的成套工艺装置系统。该套系统主要包括如下组成部分:

(1) 爆炸喷枪。

(2) 气体控制装置。用以控制乙炔气和氧气的流量、气体混合物的比例、送粉气用载气,以及每一次爆炸燃烧后清洗枪膛的气体用量。

(3) 点火器,通常为电火花塞。

(4) 送粉器。

(5) 枪体冷却装置。

(6) 控制装置。控制工艺过程及每一次脉冲爆喷的循环时间等。

(7) 喷涂机械和工作机械。

### 5.3.5.3 几种典型爆炸喷涂的涂层特点与应用

爆炸喷涂因其涂层的质量高,受到了各行业广泛的认同和欢迎,国内外都做了大量的研究。现在,爆炸喷涂已在能源工业、汽车工业、纺织工业、钢铁工业及造纸行业等部门内得到了快速的发展和应用。较成功的涂层主要是耐磨涂层。

磨损是材料失效的三种主要形式之一,而且是避免不了的,每年因磨损造成的经济损失非常惊人。据统计资料显示,美国1981年因磨损造成的损失约1000亿美元。我国没有做过具体的统计,但我国材料的耐磨性与国外先进材料的耐磨性相比还有一定的差距,磨损带来的损失也是巨大的。最初只靠发展结构材料来提高材料的耐磨性能,但结构材料的发展已接近极限,不能满足更高的耐磨要求。喷涂技术的发展为解决材料的磨损问题带来了新的途径。20世纪60年代末各国都对耐磨涂层展开了研究。一方面,不断地发展新的喷涂技术,爆炸喷涂因其涂层结合强度高、致密度高、对工件无热影响性及涂层均匀、表面粗糙度低等优点,成为高质量耐磨涂层主要的制造技术。另一方面,不断地开发新的涂层材料,目前常用的耐磨涂层主要有碳化钨(WC)涂层、碳化铬涂层、氧化铝涂层、碳化钛涂层等。

#### 1. 耐磨涂层

(1) 碳化钨涂层。碳化钨是一种常用的耐磨涂层材料,具有较高的硬度和优异的耐磨粒磨损性能,其硬度仅次于金刚石。喷涂碳化钨时,由于温度较高,WC容易分解,使涂层的结合强度和致密度大大降低。随着复合工艺的发展,采用钴将碳化钨包覆起来形成钴包碳化钨粉末。钴的包覆减小了碳化钨的氧化和分解。爆炸喷涂钴包碳化钨试验表明,涂层的主要组成相为WC、W和Co,只有极少量碳化钨发生分解产生 $W_2C$ 相。目前碳化钨涂层主要用于提高航空航天发动机叶片、主动齿轮及一些传动件和轴类等部件的耐磨性能。

(2) 碳化铬涂层。碳化铬的硬度较高,在高温环境下具有较好的耐磨损、抗氧化及耐擦伤性能,常用于喷涂腐蚀性环境下耐高温磨损涂层( $<900^\circ\text{C}$ )。国内外都对这种涂层的制备工艺及涂层的性能做了全面的研究,并将其与普通大气等离子喷涂的碳化铬涂层的性能做了比较,发现爆炸喷涂的碳化铬涂层比普通大气等离子喷涂的碳化铬涂层具有更少的缺陷、更高的结合强度和更好的耐高温磨损性能(由于碳化铬的耐磨耐腐蚀性能,其涂层在石油和化工工业中得到了广泛使用)。在油泵柱塞和化工阀芯喷涂碳化铬涂层,使其寿命提高了数倍。

#### 2. 爆炸喷涂热障涂层

对于氧化锆涂层的制备,多年以来一直主要用等离子喷涂和电子束物理气相沉积,但是常规等离子喷涂制备的热障涂层,涂层呈层状结构,结合强度不高,



喷涂过程基体温升较高,易使组织发生变化。而且涂层表面粗糙度大且涂层中含有的气孔和未熔颗粒会使涂层产生裂纹及降低热障性和耐高温腐蚀性。利用电子束物理气相沉积得到的涂层,工艺复杂,沉积率低,不易制备较厚的涂层。利用爆炸喷涂的氧化锆涂层均匀、致密度高、结合强度高,其硬度约为等离子喷涂层的两倍,抗高温氧化性更高。

#### 5.3.5.4 应用实例

##### 修复航空燃气轮机透平叶片

航空燃气轮机透平叶片(见图5-24)采用钛合金制造,基材硬度(27~36)HB,叶片防振翼缘在工作时常因腐蚀磨损和一定的冲击载荷的共同作用而失效。现有一批失效的透平叶片,其防振翼缘处磨损深度约 $250\mu\text{m}$ ,请选择合适的喷涂材料与工艺对叶片进行修复与强化。

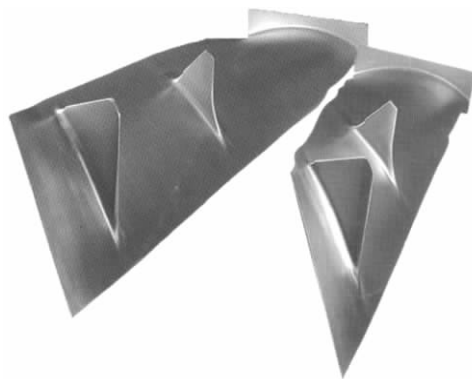


图5-24 航空燃气轮机透平叶片

##### 1. 喷涂材料

针对航空燃气轮机透平叶片的工作条件与失效机理,选用具有良好抗磨蚀性能、强韧性匹配较好的80WC-20Co碳化物喷涂粉末。

##### 2. 喷涂方法

由Co-WC二元相图可知,1340℃时,存在 $\gamma$ +WC低共溶混合物( $\gamma$ 相为W和C在Co中的固溶体)。WC的分解温度为2775℃,W<sub>2</sub>C熔点2800℃,因此在喷涂碳化钨基涂层时,碳化钨会发生分解、氧化。在600~2000℃范围内,C和W均会氧化,生成CO<sub>2</sub>、WO<sub>3</sub>。C的损失,将对涂层产生不利影响。正是由于上述原因,采用气体爆炸喷涂制备碳化钨涂层的性能优于普通等离子涂层。因此,优先采用气体爆炸喷涂方法进行喷涂。

##### 3. 喷涂工艺

(1) 预加工。对防振翼缘处磨耗部位进行加工 ,深度  $300\mu\text{m}$ 。

(2) 喷砂。采用粒度 20 目 ~ 40 目的刚玉砂对加工部位进行喷砂 ,其它部位遮盖处理 ,喷砂后应马上喷涂。

(3) 喷涂。

工艺参数如下 :

$$V_{\text{C}_2\text{H}_2} : V_{\text{O}_2} = 1 : 1 \sim 1.2$$

氧气压力 0.4MPa ;乙炔 0.15MPa

爆炸频率 4 次 /s

送粉速度 3.6kg/h ~ 4.2kg/h

喷涂时间 15min

涂层厚度  $350\mu\text{m}$

(4) 后加工。金刚石研磨 ,表面粗糙度  $0.63\mu\text{m}$ 。

(5) 涂层性能。涂层硬度 HV(9500 ~ 11000 )MPa ;结合强度 120MPa ;孔隙率  $<1\%$ 。

(6) 使用效果。在叶片防振翼缘处喷涂 80WC - 20Co 涂层 ,叶片寿命提高 3 倍。

## 5.4 氧—乙炔火焰粉末喷熔技术

### 5.4.1 氧—乙炔火焰粉末喷熔的原理

氧—乙炔火焰粉末喷熔的原理是以氧—乙炔火焰为热源 ,把自熔性合金粉末喷涂在经过预处理的工件表面上 ,在工件不熔化的情况下 ,加热涂层 ,使其熔融并润湿工件 ,通过液态合金与固态工件表面的相互溶解与扩散 ,形成一层牢固的呈冶金结合的并具有特殊性能的表面熔敷层。

喷熔包括两个过程 :一是喷涂过程 ;二是重熔过程。重熔过程的目的是要得到无气孔、无氧化物、与工件表面结合强度高的熔敷层。要达到这一目的 ,必须具备以下两个条件 :

(1) 熔化的涂层能润湿工件表面 ,即液态合金必须能在固态工件表面上自由铺展 ,既不流淌 ,又不凝成球状。

(2) 液态合金润湿工件之后 ,必须能够与工件表面起适当的物理化学作用 ,当熔态合金冷却时 ,与工件表面形成牢固的结合 ,而不是粘附在工件表面上。

在重熔时 ,熔化的涂层合金在固态工件表面上可能有两种不同的状态(见图 5 - 25) :一种是液态合金不能在工件表面铺展 ,而是凝缩成球状或流滴 ,与工

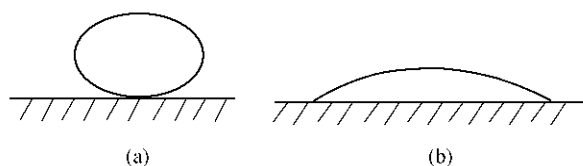


图 5 - 25 润湿与不润湿

(a) 不润湿 ; (b) 润湿。

件表面不润湿(见图 5 - 25(a)) ,另一种是液态合金能自由地在工件表面铺展 ,并粘附在工件表面上 ,称为润湿(见图 5 - 25(b))。熔化涂层合金对工件表面的润湿性主要取决于以下几种因素 :

(1) 涂层合金和工件金属成分。当涂层合金和工件金属在液态和固态均不相互作用时 ,它们之间的润湿性就很差 ,若涂层合金与工件金属能够相互溶解与扩散 ,则熔化的涂层合金能较好地润湿工件表面。

基材表面容易生成钝化膜时 ,熔融的涂层合金难以对其表面润湿。钝化膜的成分和性质由基材成分决定 ,例如 ,采用镍基合金喷熔时 ,在镀铬层和渗碳层上难以润湿 ,在耐热钢上润湿性一般 ,在普通碳钢和合金结构钢上润湿性良好 ,在纯铁上润湿性很好。如果遇到润湿性不好的工件 ,可设法在需要喷熔的表面上喷涂一薄层纯铁 ,即可大大改善润湿性 ,提高喷熔层的质量。

(2) 工件表面的清洁程度。工件表面愈清洁 ,润湿性愈好。若工件表面存在油污、氧化膜等脏物 ,会严重影响润湿 ,在喷前必须清除。至于在预热和喷涂过程中 ,表面产生的薄层氧化物 ,可由合金粉末中的硼、硅脱氧元素进行还原清除。如果工件表面氧化物过多 ,或合金粉末中含氧量过高 ,则作为还原剂的硼、硅元素数量不足 ,脱氧不充分 ,对喷熔层与工件之间的良好结合及喷熔层的性能都有不利的影响。因此 ,必须控制合金粉末中的含氧量 ,工艺上则要设法尽量减少工件表面的氧化。

(3) 工作表面粗糙度。工作表面粗糙 ,润湿性比表面光洁的要好。这是由于粗糙表面上纵横交错的沟槽起着特殊的毛细管作用 ,有利于熔融合金沿工件表面流布 ,改善了润湿性。

(4) 重熔温度。重熔温度升高 ,使熔化涂层合金的表面张力降低 ,导致液态涂层合金容易铺展 ,从而提高熔化涂层合金对工件表面的润湿性。但是重熔温度不能过高 ,否则会导致涂层合金流动性过大 ,造成流淌 ,使得喷熔层不光滑、不均匀。温度过高还会使熔化的涂层合金对工件表面熔蚀加重 ,改变喷熔层的性能。因此 ,要适当地控制重熔温度。

重熔时的相互作用及喷熔层的结合机理 :重熔时熔化的自熔性合金与工件表面的相互作用有两种 :一种是工件金属向熔融合金溶解 ;另一种是熔融合金的原子向工件金属扩散。自熔性合金熔点比基材的熔点低。当涂层合金熔化时 , 基材金属仍处于固态。合金中硼、硅元素的还原作用 ,使基材表面金属氧化物脱氧 ,形成低熔点的硼硅酸盐类熔渣 ,并浮出液态金属表面 ,形成保护膜 ,使熔化的合金紧密地与被清洁了的固态基材金属表面接触。基材表面金属向熔融合金溶解以及它们之间相互扩散和渗透 ,形成了一个薄层表面合金过渡层 ,使喷熔层和基材产生类似钎焊的牢固的冶金结合。工件表面合金过渡层的组织对喷熔层的结合强度有较大影响 ,如果其组织是固溶体 ,则具有良好的强度和塑性 ,有利于提高结合强度 ;如果形成的是共晶体组织 ,由于共晶熔点低 ,且性能较脆 ,会使结合强度变低 ;如果形成的是金属间化合物 ,由于化合物硬而脆 ,也会使结合强度显著降低。

#### 5.4.2 氧—乙炔火焰粉末喷熔的特点

由上述分析可以看出 ,氧—乙炔火焰粉末喷熔具有下列特点 :

(1) 工艺特点。火焰粉末喷熔时 ,基材是不熔化的 ,这与喷涂工艺相似 ,涂层合金是经过重熔的 ,基材受热较高 ,这又与堆焊相类似。火焰粉末喷熔与火焰喷涂一样 ,具有设备简单、投资少、见效快、操作方便、较易掌握等特点。

(2) 结合机理特点。火焰粉末喷熔层与工件之间是通过过渡层各种组织的晶粒彼此作用而相互结合的 ,这种结合称为晶间结合。喷熔层与工件的结合机理和喷涂层与工件的结合机理有较大差别 ,除了喷涂材料是自粘结型(如镍包铝复合粉末)外 ,大部分喷涂层与工件是以机械结合为主 ,因此 ,喷熔层与工件的结合强度较高 ,是冶金结合。

(3) 喷熔层的特点。既能像喷涂那样 ,表面光滑平整 ,其厚度可在0.2mm ~ 3mm 之间自由控制 ,又能与堆焊类似 ,使喷熔层无气孔、无氧化物 ,而且互溶区窄(约 0.05mm)、冲淡率极低 ,保证了喷熔层的性能。因此 ,火焰粉末喷熔介于金属粉末喷涂和堆焊之间。

其弱点是喷熔时工件加热温度较高 ,工件热影响区较大 ,会导致工件变形和金相组织发生变化。此外 ,要求工件材料的熔点必须高于自熔性合金粉末的熔点 ,这些弱点使喷熔工艺的应用受到了一定的限制。

#### 5.4.3 工件对火焰粉末喷熔的适应性

##### 5.4.3.1 工件材质的适应性

喷熔时 ,由于基材受热较多 ,其成分、组织和热膨胀性能都给喷熔质量带来

一些影响,有的材料对喷熔的适应性好,而有的材料就不适于喷熔。

(1) 成分。基材中与氧亲和力大的元素,对喷熔质量有着明显的不良影响,属于这类元素的有铝、镁、钛、铌、钨、钼和铜等。当金属材料中钨和钼的含量大于3%,铝、镁、钼、钛等总含量大于0.5%时,会给喷熔带来困难,因为这类金属在工件表面预热时,会产生较多的氧化物。含氧量若超过自熔性合金中硼、硅的脱氧能力,则重熔时就会影响熔融合金对基材表面的润湿,未能充分还原的氧化物残留在喷熔层内,会降低结合强度及其它性能。

(2) 组织。一些钢材在喷熔过程中,因受热会产生相变,有一些相变会引起较大的应力,使喷熔层质量受到影响,为保证质量,喷熔后必须立即进行等温退火。

(3) 线膨胀系数。常用的镍基和铁基自熔性合金的线膨胀系数大多在 $(14 \sim 16) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 之间,它们比钢铁略高些,当基材的线膨胀系数与此值相差过大时,会引起较大的应力,严重时难以获得良好的喷熔质量。若基材的线膨胀系数小于 $12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 时,喷熔后涂层会受到过大的拉应力,未待重熔完成,就会被拉裂。如果基材的线膨胀系数大于 $18 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 时,则涂层要受到较大的压力,重熔前就会引起喷熔层的挠曲、脱壳。

据以上情况,国内外将各种金属材料对喷熔的适应性大体归纳为如下几种类型:

(1) 无需特殊处理就可喷熔的材料。含 $C < 0.25\%$ 的一般碳素结构钢,锰、钼、钒总量小于3%的结构钢,18-8型不锈钢和镍不锈钢;灰铸铁、可锻铸铁和球墨铸铁,低碳纯铁和紫铜等。

(2) 需预热 $250 \sim 350^\circ\text{C}$ ,喷熔后需要缓冷的材料。含 $C > 0.4\%$ 的碳素结构钢,锰、钼、钒含量大于3%的结构钢,含 $\text{Cr} \geq 2\%$ 的结构钢等。

(3) 喷熔后需等温退火的材料。含 $C \geq 11\%$ 的马氏体不锈钢,含 $C \geq 0.4\%$ 铬钼结构钢等。

(4) 不适于喷熔的金属。熔点比喷熔用的自熔性合金粉末的熔点还要低的材料,例如,铝、镁及其合金,以及某些铜合金;含 $\text{Cr} > 18\%$ 的马氏体高铬钢,红硬性高的镍铬、镍铬钼合金钢等。

以上分类若进行技术改进可以改变,例如在青铜零件上喷镍基合金粉,按上述分类是不适于喷熔的,但改进工艺后,可获得成功。

#### 5.4.3.2 工件形状的适应性

喷熔工件受热多,应力变形问题比较突出。外形简单的工件受热容易均匀,冷却后不会残留大的应力和变形,精加工后容易获得好的质量。若工件形状复杂,刚度较小或仅在局部喷熔,则受热不易均匀,将产生较大的应力和变形,精加

工时,不易保证尺寸精度。因此形状复杂和刚度较小的工件对喷熔的适应性较差。

#### 5.4.4 氧—乙炔焰粉末喷熔设备

氧—乙炔焰粉末喷熔设备包括喷熔枪、重熔枪、氧气和乙炔供给装置等。根据被喷熔零件表面的特点和工艺上的需要,可以配备相应的辅助设备。喷熔枪是进行氧—乙炔焰喷熔的主要工具。下面主要介绍喷熔枪。

##### 5.4.4.1 喷熔枪的特点

喷熔枪与一般气焊枪有所不同,主要区别在于喷熔枪上附加了输送粉末的机构。根据工艺要求、火焰大小和用途的不同,粉末进入火焰的方式可分为以下三大类(图5-26):火焰混合气送粉、火焰外送粉、在火焰中心氧气送粉。

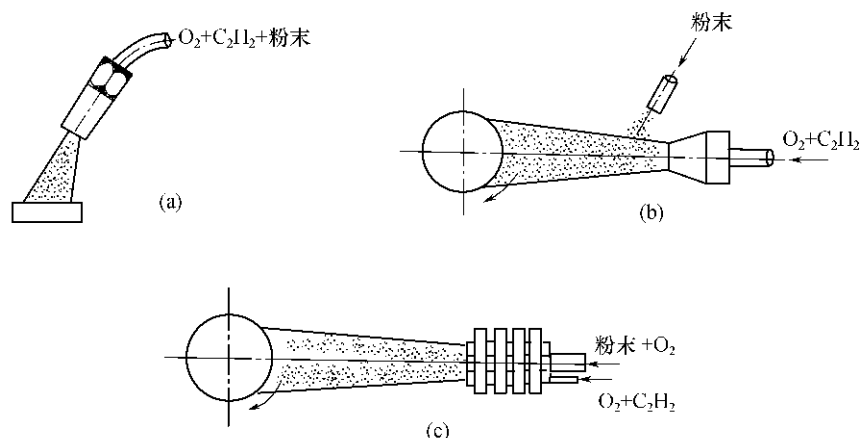


图5-26 喷枪的不同送粉方式

(a) 火焰混合气送粉;(b) 火焰外送粉;(c) 在火焰中心氧气送粉。

采用火焰混合气送粉时,粉末通过焰心,受热大,但送粉时粉流会影响火焰,调整时要注意,目前这种送粉方式用得较多。采用火焰中心氧气送粉的方式时,火焰混合气和氧气粉流各自有独立的通路,粉末不影响焰心,多用于第二步法喷熔或氧—乙炔焰喷涂。有些粉末不宜接受高温,如镍包铝粉,多用火焰外面方式送粉,火焰外面送粉的方式,主要用于第二步法喷熔。

按可燃气体与氧混合的方式,喷熔枪又可分为射吸式和等压式两类。这两类枪都由混合气送粉,并且根据功率大小分为大、中、小型三种。中小型喷熔枪

用于喷熔中小型零件和精密零件。大型喷熔枪用于喷熔大直径和大面积零件。为了适应大面积长时间喷熔,有些大功率喷熔枪喷嘴装有水冷却装置。

#### 5.4.4.2 国产喷熔枪的牌号与性能

国产中小型喷熔枪技术参数见表 5 - 19。喷熔枪的工作原理见图 5 - 27。从表中可以看到,喷熔枪都有 2 个 ~ 3 个不同孔径的喷嘴,以适应生产中对火焰功率和生产效率的不同要求,并且还有为专门用途设计的具有圆形和排形喷嘴的喷熔枪。

表 5 - 19 国产中小型喷熔枪技术参数

喷嘴孔径 /mm	使用气体压力 /MPa		气体消耗量 /(m <sup>3</sup> /h)		送粉量 /(kg/h)	总长度 /mm	总重量 /kg
	氧 气	乙 炔	氧 气	乙 炔			
0.9	0.20	0.05 ~ 0.1	0.16 ~ 0.18	0.14 ~ 0.15	0.4 ~ 0.6	430	0.55
1.1	0.25	0.05 ~ 0.1	0.26 ~ 0.28	0.22 ~ 0.24	0.6 ~ 0.8		
1.3	0.30	0.05 ~ 0.1	0.41 ~ 0.43	0.35 ~ 0.37	0.8 ~ 1.0		

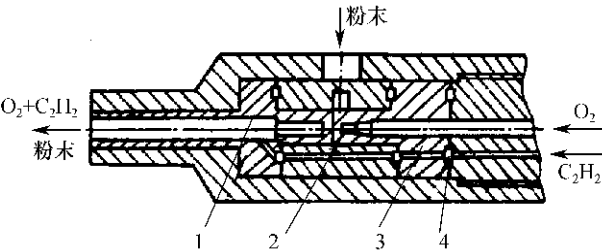


图 5 - 27 喷熔枪的工作原理

1—混合室;2—射吸室;3—喷射器;4—进气通道。

常见国产喷熔枪的构造见图 5 - 28,它相当于在普通气焊枪上装置了专门的送粉机构。工作时打开氧气开关 13 和乙炔开关 14,氧气和乙炔在混合室 2 混合、喷出、点燃即是氧—乙炔焰。送粉时按下粉阀柄 7,使压紧胶管粉阀 11 的阀杆 9 后退放松胶管,常闭粉阀开通。粉斗 12 中的粉末由于自重的作用沿管路下流,并由向前喷射的氧气在喷射器前端造成的负压将粉末吸入混合室,与乙炔混合。混合气体又将粉末送出喷嘴、喷射到工件上。当放开粉阀柄 7 时,弹簧 10 使粉阀杆 9 复位,压紧胶管粉阀 11,中止送粉。送粉量的大小可由粉阀柄按下量的多少控制。

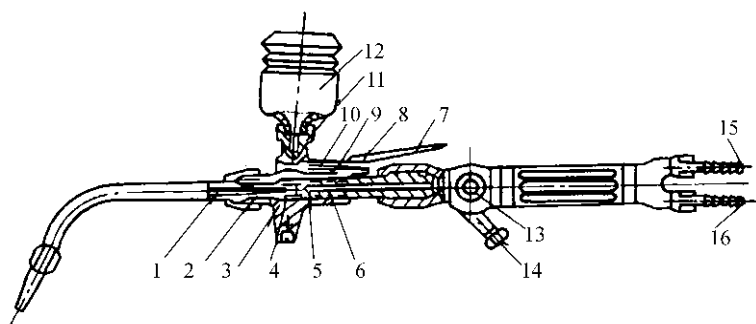


图 5 - 28 喷熔枪的构造

- 1—混合气管；2—混合室；3—喷枪体；4—射吸室；5—喷射器；6—进气通道；  
7—粉阀柄；8—尼龙套；9—粉阀杆；10—弹簧；11—粉阀；12—粉斗；  
13—氧气开关；14—乙炔开关；15—乙炔接头；16—氧气接头。

#### 5.4.4.3 喷熔枪的使用

根据喷熔工件的大小,选择适当的枪型和喷嘴号码。喷嘴装好后要认真检查各连接部位和阀是否紧固严密。

检查气源通路。把经过氧气减压器的氧气管紧扎在喷熔枪的氧气接头上。先打开乙炔开关,然后打开氧气开关,用手指按在乙炔接头上。如果接头处有一定吸力,表示乙炔和氧气管路畅通。再按住粉斗接头,按下粉阀柄。如果有吸力也表示粉路通畅。如果氧气从乙炔接头或粉斗接头处倒流出来,则表示不能使用,必须处理。

将乙炔气胶管扎在喷枪的乙炔接头上,先把氧气开关稍稍打开,再打开乙炔开关,然后点火,点火后应及时调节火焰,如果火焰不正常或有放炮现象,即应检查是否漏气和气体管道内部是否被堵塞。

火焰调整正常后,装上装有粉末的粉斗,按下粉阀柄,若粉末喷射正常即可工作。喷枪在没有点火时,不要打开粉阀开关,以防合金粉末落入管路,堵塞孔道。

当氧气管路都接通且氧气阀、乙炔阀也已开启时,要严格防止喷嘴堵塞,以防氧气倒流入乙炔发生器。

喷熔枪停用后,可用橡皮筋把粉阀柄按下扎住,这样能保证胶管粉阀处于放松状态,不致长时间受压变形,造成粉阀关不住而漏粉。

#### 5.4.4.4 重熔枪和接长管

重熔枪用于两步法喷熔的重熔工序。它的构造类似普通焊枪,采用的喷嘴是梅花形的。这种喷嘴火焰热量大、流速低,重熔后喷熔层平整、致密,克服了单



孔喷嘴在喷熔过程中喷熔层表面产生波纹等缺点。该枪型号为 SPH - C。根据喷熔工件的大小 ,有三个号码的喷嘴供选择。重熔枪的使用操作方法与喷熔枪类似。

接长管用于喷涂工件的特殊部位或内孔表面 ,它是喷涂枪的配套附件。SPH - E 型枪的接长管 JCG - 50 ,备有 45°、80°角喷管各一根。45°弯头的接长管用于喷熔直径 150mm ~ 200mm 的内孔 ,80°弯头的接长管用于喷熔直径大于 200mm 孔深可达 500mm 的内孔。

使用 JCG - 50 型接长管时 ,先拆下 SPH - E 型喷嘴 ,在此位置装上接长管。安装时将喷嘴口朝着被喷表面方向 ,然后将接长管拧紧。接长管使用环形喷嘴。

用接长管喷内孔表面时 ,由于产生大量的热辐射会使接头管头部发热而“放炮” ,要通入空气冷却。空气压力 0.1MPa ~ 0.3MPa ,经过滤器由软管接入接长管进气接头中 ,通过冷却管道进入喷嘴头部以冷却管头及吹净被喷表面的灰粒。

如果接长管深入工件内孔的深度大于内孔直径 ,工件应是通孔 ,以便使焰流和冷却空气排出。如果是盲孔 ,则会引起紊流和过高压力 ,影响喷熔质量。

#### 5.4.5 氧—乙炔焰粉末喷熔工艺

根据喷涂粉末和重熔的先后次序 ,氧—乙炔焰粉末喷熔工艺可分为“一步法”和“二步法”。

##### 5.4.5.1 “一步法”喷熔工艺

###### 1. “一步法”喷熔工艺过程

“一步法”喷熔工艺过程包括 :工件表面制备、预热、预喷粉、喷熔、冷却和喷熔层后加工。

(1) 工件表面制备。待喷熔表面的制备方法和待喷涂表面的制备方法原则上是一致的。喷熔层如承受局部压力时 ,其厚度应大于 0.5mm ,以保证涂层不被压透。

(2) 预热。预热火焰宜采用中性焰或微碳化焰。枪口距工件距离约为 100mm ~ 250mm ,预热范围应超出待喷面边缘 50mm ~ 100mm。

(3) 预喷粉。为了防止零件表面在预热后和喷熔过程中被氧化 ,可以在工件达到预热温度后 ,立即在待喷的表面先均匀地喷上一层厚度约为 0.2mm 左右的粉末涂层 ,将工件表面保护起来。

(4) 喷熔。在预喷一层保护性粉末涂层后 ,将喷熔枪的火焰集中在工件表面的一个局部区域进行加热。当该区域的温度达到使工件表面的预保护层粉末开始润湿时 ,按下送粉开关 ,将粉末均匀地喷在这个局部区域上 ,喷到一定厚度

后,用同一火焰将这个局部区域的涂层熔融,直到出现“镜面”反光现象后,均匀而缓慢地将喷熔枪移到下一个局部区域,重复上述工艺过程,直至整个工件表面均被喷熔层覆盖。

在喷熔过程中,喷枪与工件表面的距离因喷枪的型号不同而有差异。用 SPH - 2/h 喷枪喷熔距离一般在 20mm ~ 50mm 之间变动,加热和熔融时为 20mm 左右,喷粉时为 50mm 左右,也可以采用边喷粉边重熔工艺。粉末不断地投入熔池,熔池随喷枪的移动而移动,冷却后形成喷熔层。

喷熔火焰宜为中性焰或微碳火焰,火焰要柔和,喷熔枪要作轻微摆动,避免火焰对熔融金属的冲击力过大,影响喷熔质量。

(5) 冷却。由于自熔性合金的线膨胀系数较大,塑性较差,因而在冷却时容易产生裂纹。尤其在喷熔层较厚,或零件较大,基体淬透性较好时,更易产生裂纹。因此,喷熔后更应该让零件均匀地缓冷,必要时应采取等温退火处理。

喷熔好的零件可以进行喷熔层的后加工。

## 2. “一步法”的工艺特点和应用范围

“一步法”的工艺特点:

(1) 喷粉和重熔是交替或同时进行,粉末是直接喷入熔池的,所以要求粉末的粒度细、分布比较分散。

(2) 输入工件的热量较低,对基体金属组织影响较小,工件变形较小。

(3) 喷熔层的厚度可在较大范围内变化,一般为 0.8mm ~ 1.2mm,很少超过 2mm。

(4) 工艺简单,操作灵活。

它的缺点是一般都采用手工操作,劳动条件差,生产率较低,喷熔层的均匀性和质量随操作者的熟练程度而异,不易稳定。用机械化操作喷熔层的成型较好,且质量稳定。

“一步法”的应用范围:小零件的表面保护性熔敷和修理;中型或大型零件边角处的表面保护性熔敷及处理;某些零件损坏甚至断裂后,可以进行局部修补和连接。

## 5.4.5.2 “二步法”喷熔工艺

### 1. 工艺过程

“二步法”喷熔工艺过程是工件表面制备、预热、喷粉、重熔、冷却和喷熔层后加工。

工件表面制备和预热方法与“一步法”相同。

(1) 喷粉。在工件预热到所需温度后,应立即对工件表面进行喷粉。喷保护粉 0.1mm ~ 0.15mm,再提高预热温度,喷洒一定数量的工作层粉。

喷粉是“二步法”工艺中一道重要工序,要选择好喷枪和工件的距离。喷枪型号不同,喷涂距离也不同。SPH - 4/h 型喷枪的喷涂距离约为 100mm ~ 150mm,SPH - 6/h 型喷枪的喷涂距离为 200mm。

为了保证涂层厚薄均匀和获得较好的结合强度,每次喷粉厚度以不超过 0.2mm 为宜。要获得较厚的涂层,可采用多次喷粉的办法。一般喷熔层的厚度不大于 1.2mm。对磨损深度大于 1.2mm 的零件,则可通过多次喷粉和重熔达到,在整个喷熔过程中,工件的温度应保持在 350℃ 左右。如果温度迅速下降,则涂层易产生龟裂和剥落。工件较大,喷熔时间较长时,可采用其它方法辅助加热。

喷粉宜采用中性焰或微碳化焰。喷粉过程中,喷枪的移动要均匀,以保证整个喷熔层的厚度均匀一致,在平面零件上喷粉时,喷嘴要垂直于平面,喷枪的移动速度约为 7.5cm/s ~ 15cm/s,在圆柱形零件上喷粉时,工件要装夹在车床上,使之旋转。被喷面的线速度为 18m/min ~ 25m/min,喷枪横向移动速度为 5mm/r ~ 7mm/r。

(2) 重熔。在“二步法”喷熔工艺过程中,重熔是一道关键的工序。重熔操作是把喷敷的粉末层加热到固、液相之间的温度范围,使原来比较疏松多孔的涂层变成连续致密的熔敷层,与基材之间达到完全的冶金结合。

重熔要在喷粉后工件温度尚未降低时立即进行,这样一方面可减少热量损失,另一方面可以减少因冷却和重复加热导致涂层脱壳的可能性。

重熔按其加热方法,有感应重熔、炉中重熔和火焰重熔等多种形式。近几年来,又发展了激光重熔技术。

高频感应加热重熔的加热方式与高频淬火相似,具有速度快,对工件基体热影响小的特点,是一种较为理想的重熔工艺。

炉中重熔适用于难以用其它方法重熔的大型工件。重熔时应严格控制炉温,一般控制在合金固相线以上 10℃,最高不能超过合金固相线以上 30℃。以某种镍基自熔性合金粉为例,其固相点为 1035℃,液相点为 1280℃,则炉温应控制在 1045℃ ~ 1065℃ 之间。在这个温度范围内,合金约有 60% ~ 80% 液相和 20% ~ 40% 固相,有足够的黏度,不致于流淌。

在炉中重熔,工件升温较慢。在一般情况下,重熔是在保护气氛中完成的,它能保护工件表面避免产生高温氧化。

火焰重熔的设备简单,使用灵活,应用最广泛。在火焰重熔时,一般采用重熔枪,操作时应注意如下几点:

重熔枪应有足够的火焰能率,一把不够时,需增一二把辅助枪。火焰重熔时,因火焰气体的保护性不好,所以应特别注意从 700℃ 至重熔完毕的时间不应

超过 20min。如果在 700℃ 以上停留时间过长,涂层因高温氧化,超过自熔性合金的脱氧能力,粉末会“发渣”自熔性变坏,甚至重熔无法继续进行。

重熔火焰宜采用中性焰,喷嘴距工件不宜过近,一般约 40mm,薄件宜稍远,厚件可稍近。

重熔不可以在工件的端部或边缘处开始,应从距离端部或边缘约 30mm 处开始。

重熔过程中,温度的控制很重要,重熔温度与粉末的熔点一般在 1000℃ 左右,凭经验控制,当喷熔表面发现“镜面”反光时,说明粉层已熔化,重熔温度已达到。若重熔温度过低,熔渣不易浮出表面,喷熔层不能与基材实现良好的冶金结合,冷却后易开裂,硬度不均且偏低。温度过高,熔化层溢流,出现波浪状,影响表面平整。

激光重熔:激光的能量密度大,可作为重熔的热源,激光重熔对工件基体的热影响小,工件变形也小,能获得性能优异的涂层。但需有大功率激光器。

重熔后再需喷粉的工艺:重熔后喷熔层厚度将会收缩,其收缩量随着粉末的不同而不同,一般收缩量为 25%,例如重熔后发现加工余量不够需补喷粉时,应注意预热温度。此时表面上存在的是氧化镍而不是氧化铁,若预热温度为 250℃ 或略高些,则粉末中的硼、硅元素在此温度下无法使氧化镍还原,必须把预热温度提高到 670℃ ~ 700℃ 时,然后进行喷粉,才能成功。

冷却和喷熔层后的加工:重熔结束后,应让工件自行缓慢冷却。易淬火的基体,在冷却过程中,应防止由于组织相变而开裂。对于这种材料一般要采用等温退火处理,若合金的线膨胀系数与基体的相差较大,更应采取缓冷措施,如采用在石棉布中或在炉中缓冷。

薄件在喷熔过程中易产生变形,则可趁工件尚未完全冷却的热态下进行整形校正。如果冷却后整形,则喷熔层易开裂。

## 2. “二步法”喷熔工艺特点和应用范围

“二步法”的工艺特点:

(1) “二步法”是把喷粉和重熔分开,先喷粉后重熔。喷粉过程与火焰粉末喷涂相同,粉末在火焰中停留的时间较长,过细的粉末容易氧化,甚至气化,因此所用的粉末粒度比“一步法”的要粗,且要求粒度分布集中。

(2) 工件受热较多,喷熔后工件变形较大。

(3) 一次喷熔的厚度不能过大,一般为 1mm 左右,这样容易获得高质量的喷熔层。

(4) 喷熔层均匀平整,生产率较高,易实现机械化操作。

“二步法”喷熔适用于圆柱及旋转零件表面的保护性熔敷和修理,需要做大

面积保护性熔敷的工件。

5.4.5.3 喷熔层缺陷产生的原因及预防

氧—乙炔焰自熔性合金粉末喷熔层常见的缺陷有喷熔层剥落、裂纹、夹渣和气孔等,产生缺陷的原因及预防措施见表 5 - 20。

表 5 - 20 喷熔层缺陷产生的原因及预防措施

缺陷	产生缺陷的原因	预 防 措 施
喷熔层剥落	1. 工件表面制备不合乎要求； 2. 熔化时基体温度过低； 3. 熔化厚的喷层,火焰移动速度过快； 4. 重熔温度不够,国产铁基粉末熔化时,“镜面反光”不明显,是否熔化(比镍基合金粉末)难以区别	1. 按规定要求做工件表面的制备工作； 2. 在重熔时,应先加热喷层附近的金属基体,使之接近粉末的熔化温度； 3. 熔化厚的喷层,火焰应稍作停留,使表面均达到熔化的程度； 4. 掌握铁基粉末的重熔温度
喷熔层裂纹	1. 喷粉前,工件预热温度太低； 2. 喷熔后冷却速度太快,或者喷熔层材料与基体金属之间的膨胀系数相差太大	1. 提高预热温度,为防止氧化,可先在工件表面喷一层薄合金粉,然后再提高预热温度至 400 ~ 500 再进行喷熔； 2. 喷熔后缓冷或进行等温处理
喷熔层夹渣	1. 重熔时,火焰移动速度太快,熔渣未能完全浮出； 2. 合金粉末自熔性能差、熔点高、黏度大等	1. 重熔瞬间,稍提高火焰,在熔化处停留,使渣完全浮出； 2. 选择质量好的合金粉末,在采用新品种或不同工厂生产的粉末时,应预先掌握其性能
喷熔层气孔	1. 工件表面有铁锈、油污； 2. 工件表面和合金粉末在喷熔前被氧化； 3. 乙炔气体中有水分； 4. 熔化温度过高、时间过长,引起喷熔层“翻泡”	1. 认真做好工件表面制备； 2. 预热温度不要过高,用于“二步法”喷熔的粉末不要太细,回收粉末如已被氧化,不要用在重要工件上； 3. 在刚加电石的乙炔发生器中使用乙炔气时,应先放掉含有水分的乙炔气； 4. 掌握好重熔时的温度和时间

5.4.6 氧—乙炔焰喷熔用粉末的特性

根据喷熔原理,适合喷熔用的合金粉末属于自熔性合金粉末,应具有以下特性：

1. 熔点低

合金的熔点都低于组成合金的各组分的熔点。硼、硅可以降低镍、钴、铁的熔点,同时自熔性合金中硼、硅元素能生成低熔点的共晶固溶体,使镍、钴、铁为基的合金熔点得到降低。各种自熔性合金的熔点如下:镍基自熔性合金950 ~

1100 钴基自熔性合金 1050 ~ 1150 铁基自熔性合金 1100 ~ 1120 含碳化钨型自熔性合金 960 ~ 1250 。

## 2. 自脱氧造渣

喷熔时,由于熔化的各种金属与氧作用,必然生成各种氧化物。这些氧化物不及时脱除就不能得到理想的喷熔层,所以喷熔时必须解决脱氧造渣问题。自脱氧造渣一般也称为自熔性。由于硼和氧的亲合力高于镍、钴、铁与氧的亲合力,因此硼能还原镍、钴、铁的氧化物而生成氧化硼。虽然氧化硼熔点很低(450℃),可是其黏度很大,不容易分离、浮出喷熔层。而硅则是又一种较好的自熔性元素,硅不但能还原镍、钴、铁的氧化物生成氧化硅,而且氧化硅又可以与氧化硼生成黏度小的硅酸硼熔剂,再与其它金属氧化物一起形成硼硅酸盐熔渣浮出喷熔层,起到脱氧造渣的作用。

## 3. 硬度高

喷熔主要是一种硬面加工技术,所以喷熔层一般要求高硬度。

硼在自熔性合金的混合晶体中溶解度小而形成多种的硼化物( $\text{CrB}$ 、 $\text{Cr}_2\text{B}$ 、 $\text{Ni}_2\text{B}$ 、 $\text{Ni}_3\text{B}$ ) ,从而提高合金的硬度。硅则完全溶解在富镍的混合晶体中,亦能起到固溶强化的作用,因此自熔性合金是具有高硬度的材料。

此外,碳、铬、铁生成物( $\text{Fe}$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ )等也有利于合金硬度的提高。所以合金的硬度是由合金固溶体中所含  $\text{CrB}$ 、 $\text{Cr}_2\text{B}$ 、 $\text{Ni}_2\text{B}$ 、 $\text{Ni}_3\text{B}$  的数量以及碳化物( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ )析出的多少决定的。

为了使合金硬度更高,可以在自熔性合金中添加超硬的碳化钨颗粒,使其弥散于喷熔层中,从而得到硬度更高的喷熔层。

## 4. 喷熔粉末含氧量要低

粉末含氧量高,自熔性就要降低,致使喷熔和重熔时产生气孔和夹渣,影响喷熔层质量。因此,喷熔粉末的含氧量一般应小于 0.1%。

除以上基本特征外,适于喷熔的自熔性合金粉末还必须具有以下性能:

(1) 有适度的液态流动性。喷熔及重熔时,合金粉末在熔融状态下应有一定的流动性,使其对基体金属具有良好的“润湿能力”,但又不致流失,这就要求合金粉末具有较宽的结晶温度,以便保持较宽的塑性范围。从喷熔工艺讲,自熔性合金的固相线与液相线之间的温度差一般应为 50 ~ 150℃ 较为合适。

(2) 粉末在熔融状态下与基体应有良好的“润湿性”。由于自熔性合金中含有硅、硼元素,喷熔及重熔时,它们能与金属氧化物形成硼硅酸盐玻璃渣,这不但对自熔性合金起到了保护作用,也有利于润湿和熔合,同时硅是降低表面张力的主要元素,可以使熔融金属很容易在基体表面上铺散开。

(3) 粉末颗粒应有良好的球状和适中的粒度。

(4) 粉末与基体材料的线膨胀系数应尽量接近。由于自熔性合金中含有较多的硼、硅元素,其线膨胀系数一般为 $(14 \sim 16) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ( $25 \sim 500$  ) ,略高于一般钢材的线膨胀系数。若选用的合金粉末与基体材料线膨胀系数差别太大,由于热胀冷缩的结果,喷熔层就易剥落和龟裂。

#### 5.4.7 氧—乙炔焰粉末喷熔应用实例

##### 1. MK II 采煤机花键轴

MK II 采煤机花键轴零件图见图 5 - 29。轴头一端花键磨损,外径磨损 0.5mm,齿厚磨损 1.2mm,磨损长度达 65mm,失效。

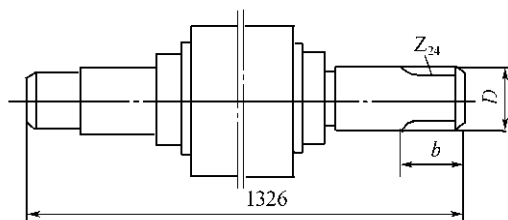


图 5 - 29 MK II 采煤机花键轴

花键轴齿面传递较大动力,以承受疲劳磨损为主,不能采用喷涂法处理。考虑用喷熔法修复,其工艺过程如下:

(1) 用金属清洗剂彻底清洗零件待喷部位及附近区域,检查零件损坏情况,并用砂布将待喷部位打磨致光亮,露出洁净金属表面。

(2) 将工件水平放置在平台上。

(3) 选用小型喷熔枪 SPH - 1/h,用“一步法”喷 103 铁粉。先喷齿的一侧,并间隔跳喷以减少变形。要把待喷齿面转成水平位置后喷涂。待花键各齿的一侧都喷完一遍后,再喷另一侧。如果齿形尺寸尚不满足要求,则再依序重复进行。

(4) 喷涂前先做一成型样板,喷涂时边喷边测量,直到符合预定尺寸为止,可留铣削加工余量 0.2mm ~ 0.3mm。

(5) 缓冷至室温。

(6) 在花键铣床上用花键铣刀加工至规定尺寸。

103 铁粉虽然喷后硬度只有 25HRC,但耐磨性好,可满足使用要求,且便于利用现有成型刀具加工。

##### 2. 减速机齿轮

减速机齿轮见图 5 - 30 ,因一齿端部撕裂 ,另外两齿齿面有点蚀坑 ,深达 2mm 失效。

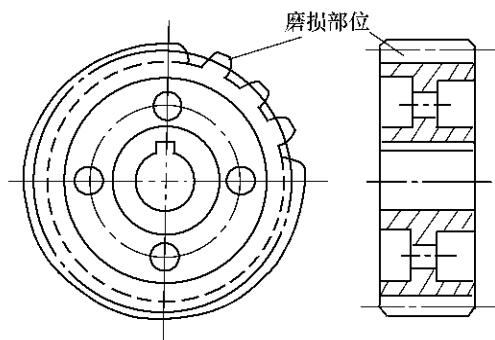


图 5 - 30 减速机齿轮

减速机齿轮修复工艺如下：

(1) 用金属洗净剂清理损坏表面 ,并用小磨头砂轮打磨 ,露出纯净金属表面。

(2) 用结 506 焊条堆补断齿 ,然后用修磨工具精修成型至小于图纸要求 0.4mm。

(3) 用 SPH - 2/喷枪、Ni35 粉以“二步法”依形喷涂。

(4) 以小磨头砂轮精修打磨至样板要求。

(5) 有点蚀坑的两齿 ,也按上述工序处理 ,只是不用结 506 焊条堆焊 ,而用 SPH - 1/h 型喷枪、Ni35 粉“一步法”补平 ,再以小磨头砂轮修整成型。

注意：

(1) 修补时选用的粉末喷后硬度要稍低于原齿面硬度 ,这样可保证与之啮合的齿轮正常工作。

(2) 点蚀处修补后打磨时应使修补处略低于正常齿面。

当齿面产生点蚀、局部剥落等缺陷时 ,也可先铣去损坏的表面 ,采用 Ni35 粉“二步法”喷熔修补。



## 第六章 电弧喷涂技术

电弧喷涂产生于 20 世纪 20 年代 40 年代末开始实际应用 ,在我国 ,电弧喷涂的应用起源于 20 世纪 50 年代 ,但近代电弧喷涂无论在设备还是喷涂材料上,都比早期电弧喷涂有了巨大进步 ,实现了高速电弧喷涂 ,喷涂材料上则研制了复合丝材和粉芯丝材等新材料。目前电弧喷涂已发展成为喷涂效率高 ,相对于普通火焰喷涂涂层质量好、成本低的一项热喷涂工艺 ,因而广泛应用于机械零部件的表面防护和修复 ,特别是钢结构大面积长效防腐工程。

### 6.1 电弧喷涂原理及特点

#### 6.1.1 电弧喷涂原理

电弧喷涂是以电弧为热源 ,将连续送入的金属丝加热熔化并用高速气流雾化、加速喷射到工件表面形成涂层的一种工艺 ,其工作原理如图 6 - 1 所示。

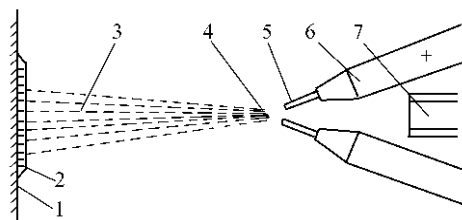


图 6 - 1 电弧喷涂示意图

;3—喷涂束;4—电弧;5—喷涂丝材;6—导电嘴;7—压缩空气喷嘴。

喷涂过程中 ,两根丝状喷涂材料用送丝装置通过送丝轮均匀、连续地送进电弧喷涂枪中的两个导电嘴内 ,导电嘴分别接电源正、负极 ,未接触之前要保证两根丝材之间的可靠绝缘。两丝材端部互相接触时发生短路并产生电弧 ,瞬间熔

化并被压缩空气雾化呈微熔滴 ,以很高的速度喷射到工件表面 形成涂层。

6. 1. 2 电弧喷涂的主要特点

(1) 生产率高。电弧喷涂的生产率与喷涂电流值成正比 ,由表 6 - 1 可知 ,当喷涂电流为 300A 时 ,每小时可喷各种钢丝约 15kg ,可喷锌约 30kg ,这大约相当于通常的火焰喷涂的 4 倍 ~ 5 倍。为了适应大规模钢结构热喷涂防腐蚀涂层施工的需要 ,国外开发出了最大工作电流为 1000A 的电弧喷涂装置。

表 6 - 1 各种材料的电弧喷涂生产率

喷涂材料	每 100A 的生产率/(kg/h)	喷涂材料	每 100A 的生产率/(kg/h)
锌	10	锡青铜	5
铝	2. 7	钢	4. 7 ~ 5. 1
巴氏合金	20 ~ 28	80 / 20NiCr	5. 4
铝青铜	4	钼	3

(2) 涂层质量高。电弧喷涂时 ,电弧温度高达 5000 ,喷涂金属受到高温电弧的直接热作用 ,粒子加热的程度和速度都比火焰喷涂高。加之喷涂粒子的尺寸通常较火焰喷涂时的粒子大 ,粒子的热能与动能均较高 ,从而获得较高的结合强度及涂层自身强度 ,涂层更致密 ,氧化物含量较低 ,喷涂铝青铜时可呈现自身结合性能。

电弧喷涂时 ,造成的较高的界面温度为粒子与基体间的相互作用提供了良好的条件。在没有充分喷砂的钢表面电弧喷涂铝时 ,过热的铝粒子与工件表面残存的氧化铁相互反应会出现独特的闪光现象。这种强烈的放热反应能够清洁钢的表面 ,铝的粒子就牢固地结合于钢基体的表面 ,结合强度较高。对同样表面的基体进行火焰喷涂时 ,就不会出现闪光现象 ,涂层结合强度很低或根本不能结合。

(3) 能源利用率高。电弧喷涂能源利用率可达 90% ,是所有喷涂方法中能源利用率最高的 ,电弧直接作用于喷涂金属丝的端部而用来熔化金属。

(4) 操作简单、维护容易。电弧喷涂的设备比等离子喷涂设备体积小 ,也简单得多 ,虽然比线材氧—乙炔火焰装置复杂 ,投资大 ,但操作起来比后者容易得多。电弧喷涂时只有四个工艺参数变量(喷涂电压、喷涂电流、喷涂距离和雾化空气压力) ,其中有三个变量在预先设置后 ,在喷涂过程中通常不会发生改变。电弧喷涂设备中的唯一易损件是喷涂枪中的导电嘴 ,它成本很低 ,消耗量也不大。电弧喷涂设备对环境要求不高 ,能可靠地在环境恶劣的现场工作。

(5) 电弧喷涂时,可同时使用两种不同的线材,方便地获得“伪合金”涂层。例如,同时使用一根锌丝和一根铝丝能得到兼有两者优点的锌铝伪合金涂层。在涂层中这两种材料的粒子相互紧密结合,粒子之间还存在少量的两种材料的合金或金属间化合物。这种“伪合金”涂层具有两种组成材料的性能,从而常常能发挥其独特的优越性。

电弧喷涂的局限性是喷涂材料必须做成导电的线材,有很多材料特别是硬质合金、难熔合金很难拉拔成线材,即使做成粉芯管状线材,由于电弧送丝、电极起弧过程复杂,也很难获得高质量、高性能的超级合金涂层。另一方面由于温度相对等离子弧低,不宜喷涂不导电的陶瓷材料,因而在现代技术高新材料和高性能涂层领域,电弧喷涂的应用受到限制。

## 6.2 电弧喷涂设备

电弧喷涂所使用的整套设备如图 6-2 所示。

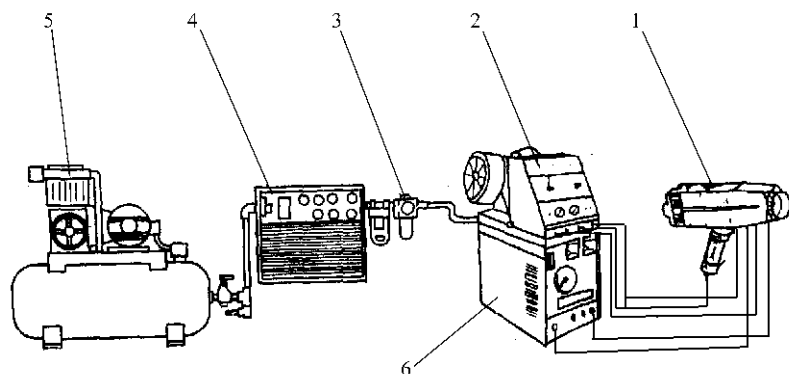


图 6-2 电弧喷涂设备组成

弧喷涂枪;2—送丝机构;3—油水分离器;4—冷却装置;5—空气压缩机;6—电弧喷涂电源。

电弧喷涂设备由电源、送丝系统、电弧喷枪、压缩空气供给系统等组成。电源维持电弧稳定燃烧,并提供喷涂过程所需的能量。送丝系统将丝材从丝盘中拉出,通过送丝软管进入喷枪,在喷枪内通过导电嘴接触带电而引燃电弧。供气系统提供纯净的压缩空气用来雾化与加速喷涂材料。电弧喷涂设备按送丝方式不同分为推丝式与拉丝式,又按喷枪夹持方式分为手持式与固定式两种。

### 6.2.1 电弧喷涂电源

喷涂电源是向电弧供电的装置,电弧通过能量转换释放热能以满足喷涂过程丝材的熔化与加速。电源性能影响电弧燃烧稳定性、喷涂过程稳定性及涂层的质量。

#### 6.2.1.1 电弧喷涂电源的特性要求

电弧是电弧喷涂的热源,而喷涂电源是电弧能量的供应者。喷涂电源的特性好坏会影响电弧燃烧的稳定性,而电弧的燃烧又直接影响喷涂过程的稳定性和喷涂质量。

电弧喷涂电源应具有平伏安特性,因为具有平伏安特性的电源有如下突出优点:

(1) 短路电流大,引弧容易。

(2) 电弧自调节作用强。电弧的弧长变化能引起较大的电流变化,从而迅速影响喷涂丝熔化速度并调节电弧。

(3) 喷涂参数的调节比较方便,可以单独地对喷涂电流与喷涂电压进行调节。通过改变送丝速度可以调节喷涂电流。可以根据喷涂材料选择不同的喷涂电压,喷涂电流与喷涂电压两者相互影响不大。

(4) 有利于防止线材回烧。当电弧回烧时,随着电弧拉长,电弧电流很快减小,在电弧还没有回烧到导电嘴前端时,电弧就将熄灭,可以提高导电嘴的使用寿命。

具有平伏安特性的电源具有良好的弧长自调节性能,当弧长发生变动时,它会产生很大的电流变化,从而引起线材熔化速度的变化,并迅速地促进电弧恢复本来的弧长。如图 6-3 所示,图中曲线 1 是电弧喷涂电源的伏安特性,它是一条水平的直线。在电流发生变化时,电压不改变。曲线 2、3 是喷涂电弧的伏安特性,它对应于一定的弧长下电流与电压的关系。当电弧的电流增大时,电弧的电压也会升高。

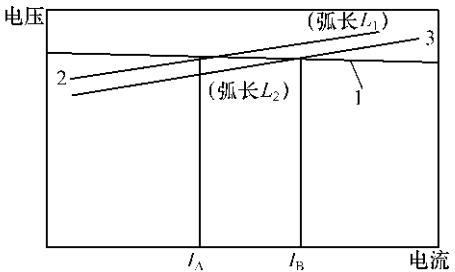


图 6-3 电弧长度自调节原理

1—电源;2—喷涂电弧(弧长  $L_1$ );

3—喷涂电弧(弧长  $L_2$ )。

假设电弧工作电流为  $I_A$ ,当弧长缩短时,电弧的伏安特性就会变为曲线 3,电流从  $I_A$  变为曲线 3 与曲线 1 交点所对应的电流值  $I_B$ ,电流大幅度升高,导致线材熔化速度的显著升高。丝材熔化速度的升高,使电弧变长又恢复到原来的状态。这种弧长自身调节以维持电弧原始

状态的作用对保持稳定的弧长,保证稳定的喷涂质量是十分重要的。

### 6.2.1.2 电弧喷涂电源的组成

电弧喷涂通常采用变压器—整流器式直流电源,以硅二极管作整流器元件,主电路由降压变压器、硅整流器、外特性调节机构等组成,如图6-4所示。硅整流电源结构简单、坚固耐用、噪声小、维修方便。它将50/60Hz三相交流网络电压通过降压变压器降至50V以内,经硅整流器获得直流电源对喷涂电弧供电。

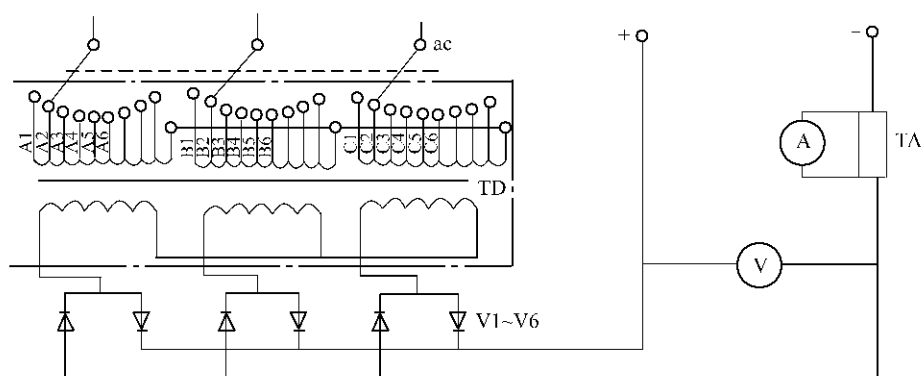


图6-4 电弧喷涂电源主电路

### 6.2.1.3 电弧喷涂电源参数的调节

喷涂电源采用抽头式主变压器,空载电压一般分八级,电压范围常在22V~40V间,通过抽头换挡有级调节所需的空载电压。设定空载电压后,在喷涂过程中只须改变送丝速度便可调节喷涂电流。根据不同的金属丝材与工艺需要,可以方便、单独地调节电弧电压或电流。

## 6.2.2 送丝机构

电弧喷涂时两根金属丝需要以均匀的速度送进喷涂枪,金属丝的送进是依靠送丝机构来完成的。送丝机构由送丝电机、减速器、送丝轮等组成。工作时电动机带动减速器和压紧金属丝的送丝轮转动,将金属丝向前送进。

(1) 送丝电机。送丝电机通常为直流伺服电动机。直流伺服电动机动作反应迅速,在喷涂过程中可以随时进行开、停操作,以方便喷涂施工操作。现在还有一些送丝机构采用直流永磁电动机驱动,这种电动机用永久磁铁代替励磁回路,特点是力矩大、结构紧凑。

(2) 减速器。多数送丝减速器是蜗轮蜗杆结构。其优点是减速比大、结构紧

凑。缺点是传动摩擦力较大,功率损失也较大,所以减速箱内应保持良好的润滑。

(3) 送丝滚轮。为增加对金属丝的驱动力送丝滚轮开有凹形槽。开槽的形式有许多种,常用的是 V 形槽,主要有光面 V 形槽和带齿 V 形槽两种,如图 6-5 所示。

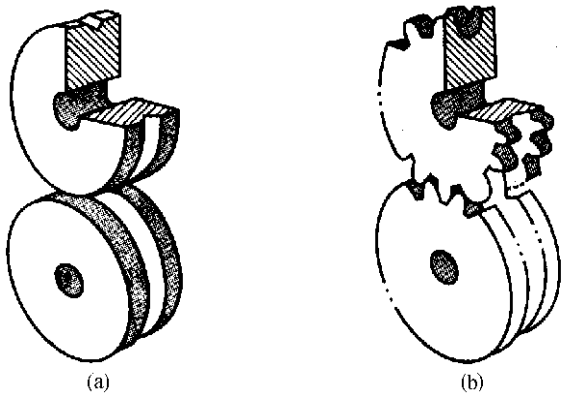


图 6-5 送丝滚轮

(a) 带有 V 形槽的滚轮 ; (b) 开槽带齿的滚轮。

光面 V 形送丝滚轮如图 6-5 中的(a)图所示。这类滚轮不会损坏软的金属丝表面,适合于送进较软的线材。

带齿 V 形槽的送丝滚轮,如图 6-5 中的(b)所示。每个滚轮就是一个齿轮,并且有一环形的 V 形沟槽。该沟槽刻进两个滚轮中,但只是齿上刻去一部分。它是靠沟槽上比较平的表面压住金属丝。带齿 V 形槽滚轮对金属丝有较大的摩擦力,可以避免金属丝在送进过程中打滑,而且不需使用过分的压力就能送进,特别适合于送进较硬的材料。

每组送丝滚轮的压紧力可调,对于软质材料压紧力应适当减少,较大的压紧力会使材料表面变形损伤,增加线材的行进阻力,影响电弧喷涂过程稳定。

选择适合于喷涂丝规格的滚轮很重要,当喷涂丝直径有改变时,必须更换滚轮。

送丝方式一般有两种,一种是推丝式系统(见图 6-6(a)),即丝盘上的金属丝经过安装在减速器输出轴上的送丝轮组由送丝轮驱动进入送丝软管及喷枪内的导电嘴,其特点是喷涂枪结构简单轻便,操作及维修方便。另一种是拉丝式系统(见图 6-6(b)),金属丝先经过送丝软管然后再经过其余部分进入喷枪内的导电嘴。

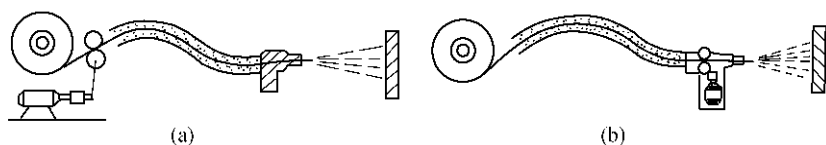


图 6-6 送丝方式示意图

(a) 推丝式；(b) 拉丝式。

送丝系统工作是否可靠,直接影响电弧喷涂的生产率与涂层质量。送丝系统应具有优良的驱动性能与较小的送丝阻力。

### 6.2.3 送丝软管

#### 1. 对软管的性能要求

推丝式送丝需要经过软管将喷枪和送丝机构连接起来。金属在送丝软管内受到的阻力与以下因素有关：

(1) 应有合适的内径尺寸和长度。软管内径过大或过小都会使送丝阻力增大,从而使送丝困难。通常直径为 2mm 的金属丝,软管内径为 3mm;直径为 3mm 的金属丝,要求送丝软管内径为 4.2mm。软管长度要求在 1.5m~3m 之间,随着软管的加长,金属丝在软管中的阻力增大,送丝稳定性变差。软管内径过小,金属丝与软管内壁间接触面积增大,送丝阻力大。在这种情况下,如果软管内有金属碎屑及其它杂质存在,会使金属丝卡紧在软管内送不出丝去。软管内径过大,金属丝在软管里呈波浪状态,同样使送丝阻力增大。

(2) 芯管材料摩擦系数要小。软管材料摩擦系数越小越好。目前,送丝软管有两种类型:一类用弹簧钢丝绕制而成;另一种是用聚四氟乙烯、尼龙等材料制成。对于大多数金属材料来说,弹簧钢丝制成的芯管就可满足要求。喷涂铝丝时需要选用专门的聚四氟乙烯芯管。

(3) 要有一定的挠度和刚度。软管处于平直送丝时,阻力小,而软管弯曲送丝阻力大,因而在操作中应尽可能减少软管的弯曲,更不应产生局部小弯曲,因此软管应具备一定的挠度和刚度,使喷枪在手中不会产生局部小弯曲和瞬间伸长。喷涂铝丝时,软管弯曲后产生的送丝阻力比喷涂钢丝时要大得多,所以使用软管喷涂铝丝会遇到较多的问题。

(4) 具备较好的抗拉强度,以便于操作和经久耐用。

#### 2. 送丝软管的结构

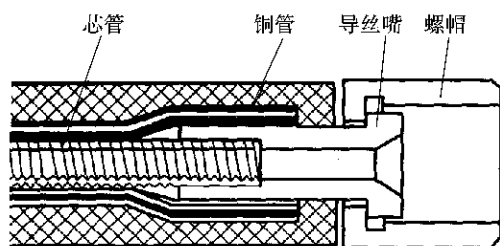


图 6-7 软管的结构图

软管的典型结构如图 6-7 所示。它主要由允许线材顺利通过的芯管和与传输电流的铜线及保护外皮组成。目前多数的送丝软管是将铜电线与送丝管制成一体,这样既可以与喷枪的连接更紧凑,又可增加软管自身的强度。软管内的铜电缆应有足够的导电截面,否则在长时间使用后,电缆就要发热,以致损坏软管。

总而言之,在电弧喷涂设备中送丝软管的弱点是相对的比较薄弱、易损,只有注意维护保养、操作得当,才能延长其使用寿命。

#### 6.2.4 电弧喷涂枪

电弧喷涂枪分手持式与固定式两类。手持式操作灵便、万能性强,固定式常用于喷涂生产线。喷涂枪由壳体、导电嘴、喷嘴、雾化气帽、遮弧罩等组成。电弧喷涂枪要完成送进线材后再使送出的线材端很可靠地相交,以维持电弧连续燃烧、雾化与喷射熔化金属这三个基本功能。图 6-8 是一个典型的手持电弧喷涂枪的结构剖面图。

导电嘴与喷嘴是喷涂枪的关键零件,直接影响喷涂层质量与过程稳定。金属丝材在导电嘴中既要导电又要减少送丝阻力,导电嘴要有合适的孔径与长度。孔径过小送丝阻力大,孔径过大导电性能不稳定,丝材对中性能也差,甚至在导电嘴内引发电弧产生粘连。导电嘴内壁要保持清洁,油污与氧化物会影响丝材导电性能。导电嘴受到金属丝材的正常磨损应定期更换。两导电嘴的夹角常在  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$  之间。

喷嘴对熔化金属起到有效的雾化作用。喷嘴有开放式与封闭式两种。开放式喷嘴(参见图 6-1 和图 6-8)其雾化气流从导电嘴出丝端后方喷出,压缩空气动能利用不充分,对电弧没有压缩作用,射流不集中,雾化效果差,目前应用不多。封闭式喷嘴置于导电嘴前方,与开放式喷嘴相比具有二次雾化效果,因此熔化金属粒子更细更均匀,涂层组织明显细化,结合强度较高,在相当低的压缩空气压力下(0.3MPa),即可得到很好的雾化效果,不仅节省了能源,而且噪声水平



也较低。它的结构如图 6 - 9 所示。

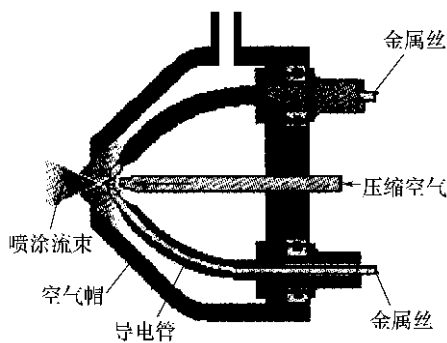


图 6 - 8 电弧喷涂枪的结构剖面图

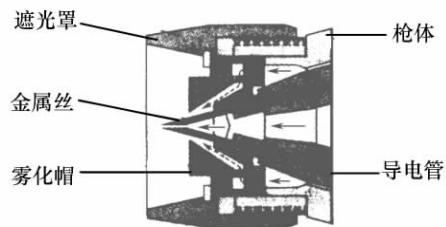


图 6 - 9 TAFE 喷涂枪喷嘴结构

国内外对改进喷嘴雾化效果比较重视 ,已有多种封闭式喷嘴结构形式 ,见图 6 - 10。

带有封闭喷嘴的喷枪其内部封闭 ,把喷嘴设置于导电嘴的前方 ,两根金属丝的端部的外表面都暴露于空气射流之中 ,这样可以保证所有的金属滴都能很好雾化。由于在导电嘴之间没有空气喷嘴 ,因此 ,两个导电管靠得比较近 ,使两根金属丝端部相交得更好 ,从而保证了喷涂过程的稳定。

### 6. 2. 5 控制系统

电弧喷涂的控制系统比较简单 ,一般包括 喷涂电流、喷涂电压、气路的控制以及操作程序上的一些控制。现在一些先进的电源技术和控制技术也正逐渐地用到了电弧喷涂设备的设计中 ,如电源逆变技术、晶闸管整流以及电机调速技术等。在电弧喷涂设备的控制系统中 ,使用了许多诸如继电器、接触器、晶闸管等各类电器元件和电子元件 ,这些元件的质量直接关系到整个设备的可靠性 ,所以在修理或更换相应的元件时 ,要选择质量可靠的品牌。

### 6. 2. 6 电弧喷涂设备维护与故障排除

#### 1. 设备维护

电弧喷涂设备要定期维护。在现场防腐蚀施工作业时 ,喷砂和喷涂过程会产生大量的粉尘 ,它们可能积存在喷涂设备中。尤其是在喷锌作业时产生的粉尘量更有害 ,因为微细锌粉的电阻较小 ,如果进入到电器元件内或积存在变压器线圈的间隙处可能引起短路 ,带来严重后果。由于锌灰细小 ,吸附性强 ,通常难以用简单的方法清理 ,所以最好将喷涂设备安放在与喷涂区域隔离的地方。要经常检查电

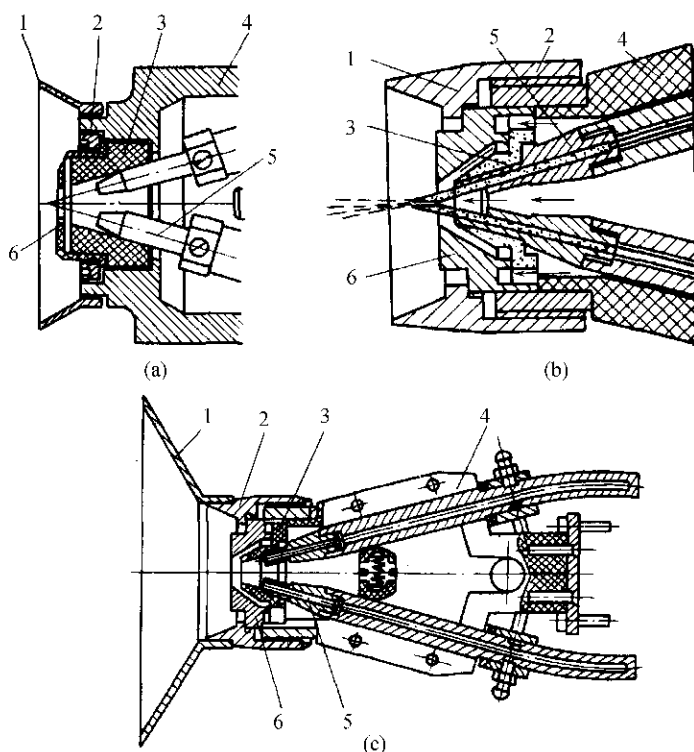


图 6-10 国产部分喷枪头部示意图

(a) 推丝式；(b)、(c) 拉丝式。

1—遮弧罩；2—紧固螺母；3—陶瓷喷嘴；4—枪体；5—导电嘴；6—空气帽。

缆接头、送丝软管接头等部位的压紧情况，如有发热松动，应及时拧紧。

对送丝机构和控制箱上粉尘要及时清理，可在每天喷涂工作完毕后，用压缩空气吹净浮尘。此外，还要适时对送丝机构定期清洗，添加润滑剂，清理和加润滑剂的间隔时间依使用情况而定。送丝轮应经常保持清洁与良好的润滑，在施工量较大时，至少每周对轮轴部位清理和润滑一次，以免送丝轮与轮轴间卡死。在粉尘严重的情况下，线材表面润滑剂会使粉尘粘附于线材表面而带入送丝机构，妨碍正常工作，此时，需要采取专门的措施，除去黏附的粉尘。例如，让线材穿过一小片橡胶板，会刮掉粉尘。

对导管、送丝滚轮以及丝盘必须适当对中，并进行调节，而且必须定期清理送丝软管，一般是在装上一捆新的金属丝之前作清理。进行清理工作须把金属丝取出，并用洁净的压缩空气吹扫软管。

## 2. 故障及排除

设备的平时维护以及正确使用是减少设备故障的有效措施。了解设备的原理 ,积累使用维修经验可以迅速使设备恢复正常。总体来说 ,电弧喷涂设备比较简单 ,其电源部分与普通直流电焊机类似 ,送丝部分通常也只是简单的调速和机械传动。对于推丝方式的设备 ,送丝软管是经常损坏的部件之一 ,精心的使用会增长软管的寿命 ,保证喷涂施工的顺利进行。下面以 XDP 型电弧喷涂设备为例 ,介绍一些常见的设备故障及排除方法 ,见表 6 - 2。

表 6 - 2    电弧喷涂设备常见故障及排除方法

现 象	原 因	排 除 方 法
设备不能启动 设备内风扇不转动	输入的电源没有连接好 ; 设备控制部分的熔断器熔断	检查输入电源线的连接 ; 查清熔断器烧断原因 ,排除后换上新的熔断器

(续)

现 象	原 因	排 除 方 法
送丝后不起弧 (电压表无指示)	程控开关没在“工作”位置； 设备内的电压输出控制线路有故障	将程控开关置于“工作”位置； 请电气技术人员进行检查、修理
送丝后不起弧 (电压表有指示)	电压输出电缆没有连接好； 导电管与金属丝之间接触不好	检查输出电缆； 清理或更换导电管
设备的总开关(空气开关)自动断开或合不上	主变压器一次线圈发生匝间短路； 主电路有整流管击穿	请电气技术人员进行检查、修理； 更换整流管
电弧燃烧不稳定； 电压表指示低于正常值	输入三相电源缺相； 主电路一个整流管烧断	检查输入电源接线； 更换整流管
送丝电机不转动	送丝电路熔断器烧断； 电机调速控制板中电子元件损坏； 电机控制线路故障； 电机接线有断路处	查清原因,更换熔断器； 更换电机调速板； 请电气技术人员检修； 检查电机连线,接通断路的电线
送丝电机不能调速	电机调速控制板中晶闸管损坏	更换晶闸管或更换调速控制板
电机转动,但不送丝	过分弯曲的金属丝不能通过导电管； 金属丝与导电管焊合	拆下喷涂枪,去除焊合或过分弯曲的金属丝
涂层质量差,雾化不好	压缩空气供应不足或压力低,流量不够； 喷涂枪的导电管或雾化嘴位置不当； 导电嘴磨损严重	增加气体供应,加大进气管直径； 调整导电嘴或雾化嘴的位置； 更换导电嘴
送丝不稳定； 电弧燃烧不稳定	线材表面质量差,有较多的非自然弯曲； 线材表面氧化膜导电不好,污物较多； 送丝软管过度弯曲； 送丝软管内污物积存较多或软管损坏	更换或平直金属丝； 去除氧化膜或污物； 使用时尽量避免软管过度弯曲； 清理或更换送丝软管

### 6.3 电弧喷涂工艺参数

电弧喷涂的主要工艺参数有四项:喷涂电压、工作电流、雾化空气压力和喷涂距离。

对于操作人员来说,在喷涂时,控制这些参数很容易,只需短时间培训就可熟练地操作设备,得到稳定质量的涂层。

### 6.3.1 喷涂电压

喷涂电压是指喷涂时两金属丝间的电弧电压。在电弧喷涂时,两根金属丝被均匀地送进,在喷涂枪前部两丝尖端产生电弧,欲得到性能稳定和质量可靠的涂层,需要维持稳定的电弧电压。电弧电压反映了线材尖端距离的量度,有效地控制这个参数可以维持雾化区几何形状的稳定,所以,通常使用的电弧设备要求具有平直的电源伏安特性。电弧电压影响着电弧燃烧的稳定性的,每一种材料都有自己的电弧稳定燃烧的最低电弧电压值。电弧电压越低,熔化了了的粒子尺寸就越小,范围也越窄。但是,如果电弧电压低于材料的临界最低电弧电压,电弧就不能稳定地燃烧,线材就会出现断续接触现象,伴随着电弧的间断和引燃,块状的未充分熔化的丝段出现,有时,甚至出现两根丝平行焊在一起的现象。此时电流表指数剧烈摆动,有时甚至超出电流表的量程范围。

材料的临界电弧电压值主要与材料的熔点有关,一般说来,熔点低材料,临界电弧电压值低;反之,临界电弧电压高。临界电弧电压除了受材料熔点影响外,线材表面氧化膜的电阻率对材料的临界电弧电压值也有影响。例如,纯铝的熔点667℃,它的喷涂电弧电压要求在30V~32V,这个数值与熔点为1500℃的钢丝喷涂电弧电压值相近。喷涂铝丝对电压要求较高是因为在铝丝表面氧化膜的电阻率较大,导电性差,需要高的电压值才能维持电弧的稳定。

当喷涂电压高于临界电弧电压值后,随着电弧电压的提高,线材尖端的距离增大,喷涂射流的角度增加,喷涂粒子的颗粒尺寸范围将会增大。图6-11是电弧电压对喷涂粒子雾化和分布的影响。随着电弧电压的提高,喷涂材料的元素烧损倾向增加,尤其是那些容易与氧化合的元素,元素的损失更严重。

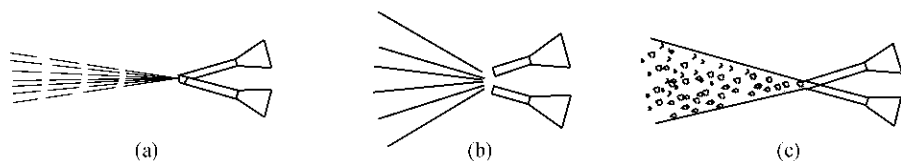


图6-11 电弧电压对喷涂粒子的影响

(a) 正常电弧电压;(b) 过高的电弧电压;(c) 过低的电弧电压。

例如,当电弧喷涂含碳0.36%的4Cr13线材时,如果选用31V的电弧电压,160A的工作电流,雾化空气压力为0.45MPa,喷涂距离150mm,所得涂层的碳含量是0.22%,涂层硬度390HV,与原始线材相比,碳元素烧损40%左右;在其它参数不变的情况下,当电弧电压提高到34V时,涂层含碳量为0.16%,涂层硬度

328HV 碳元素烧损了 55% ,若提高电弧电压到 37V ,涂层含碳量仅剩下 0.11% 涂层硬度 298HV。由此可见 ,电弧电压对喷涂质量影响很大 ,欲得到高质量涂层 ,在保证电弧稳定燃烧的前提下 ,要选择尽可能低的电弧电压值。电弧电压越高 ,电弧越长 ,这就意味着在保持电弧稳定的前提下 ,允许两根金属丝在喷涂枪枪口处的交点偏差越大。在喷涂过程中 ,有时利用电弧的这个性质 ,在导电管磨损 ,且又没有备用导电管可供更换的情况下 ,通过提高电压来保持电弧的稳定。当然 ,使用这种应急方法获得的涂层雾化质量会受到影响。表 6 - 3 是一些材料的喷涂工作电压。

表 6 - 3 一些材料的喷涂工作电压

材 料	工作电压 /V	材 料	工作电压 /V
锌	26 ~ 28	碳钢及不锈钢	30 ~ 32
铝	30 ~ 32	锡合金	23 ~ 25
锌铝合金	28 ~ 30	镍合金	30 ~ 33
铝镁合金	30 ~ 32	铜合金	29 ~ 32
稀土铝合金	30 ~ 32	铝青铜(粘结层)	34 ~ 38
锌铝伪合金	28 ~ 30	镍铝合金(粘结层)	34 ~ 38

在喷涂用于粘结底层为目的的自粘结材料时 ,不能依据上述原则选择电弧电压。在这种情况下应用时 ,粗大的喷涂粒子 ,过热程度大 ,有利于粒子的氧化反应 ,以便携带更多的热量。当粒子撞击到工件表面时 ,只有那些具有较大尺寸 ,并充分过热的粒子才可能与工件表面发生冶金结合 ,增加涂层与基体之间的结合强度。具有自粘结性质的材料 ,即使喷涂在没有经过喷砂处理的光滑干净的钢铁表面 ,也可以得到牢固结合的涂层 ,所以 ,这些材料多被用来粘结底层 ,以提高表面工作层的结合可靠性。

### 6.3.2 工作电流

平伏安特性的电弧喷涂设备 ,使喷涂电流直接受到送丝速度的控制。提高送丝速度 ,会使线材尖端的间隙减小。由于线材的间距决定于电弧电压 ,电源有自动维持电弧电压稳定的特性 ,因此 ,只有增加输出功率 ,即增加工作电流 ,使线材更迅速地熔化才能维持这个平衡。工作电流正比于送丝速度 ,也就是说工作电流是喷涂生产效率的量度。从微观角度看 ,电源的这个特点也很重要 ,如果由于某种原因 ,在喷涂过程中 ,送丝速度发生微小变化 ,电源会自动调节熔化线材所需功率。电弧喷涂的这个性质是与火焰喷涂不同的 ,火焰喷涂时的能量输出

不会自动随着送丝量的变化而变化 这就势必影响材料的熔化程度。

提高工作电流 不但可以增加喷涂生产效率 还可以提高涂层质量。表6 - 4 是在 0.5MPa 的雾化空气压力 ,125mm 的喷涂距离条件下 ,选用不同工作电流 ,测得的 Cr13 型马氏体不锈钢涂层中的氧化物含量和气孔率。

表 6 - 4 工作电流对涂层中氧化物含量和气孔率的影响

工作电流 /A	生产能力 /(kg/h)	气孔率 /%	氧化物 含量/%	工作电流 /A	生产能力 /(kg/h)	气孔率 /%	氧化物 含量/%
50	1. 14	4. 29	8. 48	200	4. 54	1. 96	9. 33
100	2. 27	2. 47	11. 80	300	8	1. 79	6. 56

较大的工作电流可以得到高质量的涂层 ,但工作电流的上限往往受到电弧喷涂设备容量的限制。当工作电流低于某一数值时 ,电弧也不能稳定燃烧。最低工作电流值不但与材料有关 ,还与线材尺寸截面有关 ,对具体规格的线材来说 ,每种材料都有对应的最低工作电流值。

6. 3. 3 雾化空气

雾化空气压力很大程度上决定了喷涂粒子的雾化程度和飞行速度 ,并影响涂层的性能。同样的雾化空气压力 ,对不同的喷枪设计有不同的雾化效果 ,好的喷枪设计应当使雾化气流集中在熔化金属丝的尖端部位 ,使高速气流以剪切方式将金属熔滴变成细片状脱离电弧区 ,并进一步将其加速和雾化。对具体的喷涂枪来说 ,当喷涂某种线材时 ,在其它工艺参数不变的情况下 ,高的雾化空气压力将得到高致密的涂层。

在喷涂自结合材料做粘结底层时 ,往往不希望使用很大的雾化空气压力去获得细密的涂层 相反的 稍粗大一些的喷涂粒子可携带较多的热量 ,更有利于与基体之间发生冶金结合。

有时对某些低熔点材料也不希望有过高的雾化空气压力 ,因为 材料的熔点较低 ,高的雾化压力将使熔滴更细小 ,加剧熔滴氧化和冷却 ,在喷涂粒子流到达工件表面之前 ,许多比较细小或严重氧化的熔滴已经凝固和硬化 ,当撞击到工件表面时就会被反弹掉 ,降低喷涂的沉积率。例如 ,在喷涂锌涂层时 ,可明显地观察到这种现象。

压缩空气是最经济的雾化气源 ,在钢铁结构大面积防腐蚀的喷涂施工中 ,主要是采用压缩空气作为雾化气体。为了避免某些材料的过分氧化 ,有时 ,使用氮气作为雾化气源可得到非常致密 ,且氧化物含量很少的涂层 ,涂层的力学性能也

有明显改善。由于电弧喷涂时气体消耗量很大,大量使用瓶装氮气会造成经济上和运输上的困难,因此限制了它的应用。

### 6.3.4 喷涂距离

喷涂距离是指喷涂枪与工件表面间的距离。金属丝在电弧区被熔化后经雾化空气雾化和加速,撞击到工件表面形成涂层。在喷涂枪的喷嘴处,压缩空气的速度流动最大,熔滴的速度最低,随着喷涂距离的增加,喷涂粒子被逐渐加速,同时雾化气流的速度逐渐降低。例如,在喷涂钢丝时,在大约 50mm 处喷涂粒子有最快的飞行速度,由于空气阻力和加速气流的减弱,喷涂粒子的飞行速度开始下降。根据流体力学原理,在一定的雾化气体压力和流量下,粒子的飞行速度取决于它的尺寸。熔化的金属从喷涂枪喷射出后,被雾化和加速,由于粒子的尺寸不同,它们被加速的程度不同,图 6-12 是电弧喷涂碳钢涂层时,测绘的喷涂粒子尺寸、雾化气流速度与喷涂距离的关系。

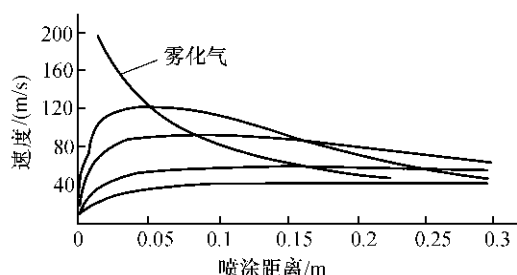


图 6-12 喷涂粒子尺寸、雾化气流速度、  
喷涂粒子飞行速度与喷涂距离的关系

由图 6-12 中可见喷涂粒子在 50mm ~ 200mm 的喷涂距离内有较高的飞行速度。欲得到高质量涂层,不但需要喷涂粒子具有较高的飞行速度,还要求粒子具有足够高的温度,使粒子处于熔化或软化状态,在撞击到工件表面时充分变形,保证各个喷涂粒子互相镶嵌,使涂层之间或涂层与工件基体间有足够的结合强度。图 6-13 是喷涂距离对 3Cr13 涂层的结合强度的影响。

在喷涂过程中,处于高度过热状态的喷涂粒子极易氧化,它们具有很大的比表面积。粒子尺寸越细小,单位体积的比表面积越大,与氧化合的机会越多。在正常喷涂距离内,喷涂粒子只需 1ms ~ 2ms 时间就可达工件表面。尽管粒子在空气中的飞行时间很短,由于粒子有很大的比表面积和有充分的氧气供给,粒子



的氧化现象往往是很严重的。对钢铁材料来说,氧化过程会给涂层带来许多不利的影响。如碳元素烧损、氧化物含量增加和气孔率增加等,其中碳元素含量的变化直接影响着涂层的力学性能。图 6 - 14 是喷涂距离对 3Cr13 涂层的氧化物含量和气孔率的影响。

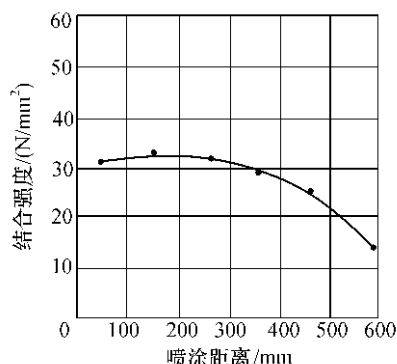


图 6 - 13 喷涂距离对 3Cr13 涂层的结合强度的影响

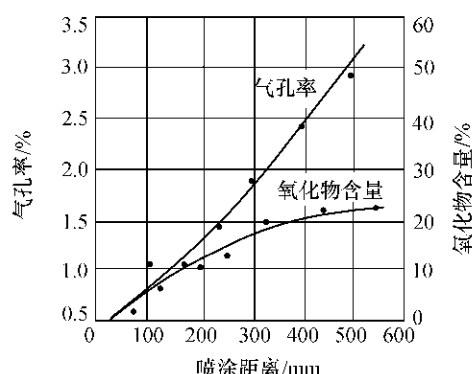


图 6 - 14 喷涂距离对 3Cr13 涂层的氧化物含量和气孔率的影响

对于电弧喷涂锌或电弧喷涂铝这些防腐蚀涂层来说,常用的喷涂距离应为 150mm ~ 250mm。在这个范围内,喷涂粒子可获得足够高的飞行速度和粒子温度,所得到的涂层具有较好的涂层质量和力学性能。随着喷涂距离的增大,一些飞行速度较慢的粒子以及一些氧化严重的粒子已丧失了足够的动能和塑性,不能沉积到工件上,从而影响了涂层的沉积效率。由于离开喷枪的喷涂粒束流大多呈圆锥形状,距喷枪越远,锥底越大。大面积防腐蚀施工时,较远一些的喷涂距离有助于提高喷涂沉积的均匀程度,但一定注意不要过大,以免过多地降低涂层的结合强度和沉积率。

## 6.4 电弧喷涂工艺

### 6.4.1 表面预处理

表面预处理是热喷涂作业的重要工序,涂层质量直接与工件表面清洁度和粗糙度有关。尽管电弧喷涂可以达到固有的结合强度,但表面预处理仍应予以推荐。

电弧喷涂过程中工件受热状况不足以清除污垢、氧化皮、油渍、油脂与油漆,仍需要用常规的机械与化学清洗方法进行表面清洗,工件清洗后其清洁度要一

直保持到喷涂过程終了。

修复旧件时为去除有害表层,保证涂层达到设计规定的厚度,工件采用车、磨削等预机械加工方法。应该考虑到工件在预加工后将减少有效承载截面,电弧喷涂层并不能提高工件整体强度。在预机械加工后的工件需要采用喷砂、车螺纹、镍拉毛等粗化处理方法以增大结合面积,改善应力状态。尽管电弧喷涂时温度很高,喷涂粒子会达到过热状态,加上采用某些有自粘结性能的丝材即使在光洁的表面上仍有相当的结合强度,但为了达到最佳的结合效果,在喷涂前也应作喷砂处理。

### 6.4.2 电弧喷涂层的材料选择

正确选择涂层材料是涂层设计的重要内容,关系到喷涂层能否达到预期的使用寿命。

电弧喷涂使用的是丝材,凡能轧、拔成丝材的金属与合金都可以用于电弧喷涂,常用的有铁、镍、铜、铝、锌、锡及其合金和管状丝材。其材料的应用范围和实例见表6-5。

表6-5 电弧喷涂材料的应用范围和实例

喷涂丝材	应用范围	应用实例
镍铝合金	结合涂层材料	曲轴、柱塞、高炉风口
镍铜合金	氨、苛性碱、食盐、海水、大部分有机酸、矿物油、硫酸、磷酸、氰氢酸、醋酸等介质	液压泵、密封环、密封阀杆、泵柱塞杆、旋转轴等
镍铬钛	高温、含硫燃气冲蚀环境	电站锅炉、黑液锅炉的水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管

根据电弧喷涂使用双丝的特点,可以选用不同材质的丝材,甚至分别改变丝材直径与送丝速度以得到一系列伪合金涂层。伪合金涂层的组织结构是两种组成材料的机械混合物,也有少量新合金或金属间化合物存在,因此伪合金涂层兼备两种组成材料的性能与特点。

电弧喷涂丝材的主要技术指标是材料成分、尺寸规格、表面状态。电弧喷涂要求丝材表面光滑、无氧化、无油脂和其它污垢,不允许有较严重的表面缺陷。丝材允许的直径误差应在0mm~0.06mm之间,丝材盘绕不允许有折弯及严重扭弯。

### 6.4.3 喷涂

目前,国内已有许多厂家生产电弧喷涂设备,由于多数同类设备与 XDP 型电弧喷涂设备在结构和操作上类似,所以,现以 XDP - 5 电弧喷涂设备为例,介绍电弧喷涂过程的基本操作程序。

(1) 连接压缩空气管路并检查压缩空气的供给是否正常。连接好电缆和插头,即可进入待喷涂状态。

(2) 将工作状态开关置于“工作”位置,在接通送丝开关的同时,供给压缩空气与喷涂电压接通,并在喷涂枪口处产生电弧,通过调节“电流调节”旋钮,改变送丝电机的转速,而实现电流调节。观察设备面板上的电流表指示,调节工作电流到预定的数值,开始喷涂。

(3) 在喷涂过程中,喷涂操作可以随时启动或停止,执行这些操作不需再对电流和电压做任何调节。停止送丝时,即停止了喷涂,两者间隔大约 0.2s,压缩空气的供给和喷涂电压随即切断。

注意事项:电弧喷涂的工艺参数比较少,三个设备参数(电弧电压、喷涂电流和雾化空气压力)一经设置后,通常变化很小,而且电弧喷涂参数的波动对涂层质量的影响相对较小。另一个参数,即喷涂距离需要操作者凭经验掌握,手工喷涂操作时,喷涂枪与工件的距离、喷涂枪摆动的速度以及重复喷涂的遍数还决定着涂层的厚度。为了保证喷涂设备的良好状态和涂层质量,应注意如下几点:

调节电压的操作应在喷涂之前完成,如在喷涂过程中需要改变喷涂电压,则应停止喷涂,在调节好电压后,再重新进入喷涂状态。

喷涂枪中的导电嘴内径会在使用中逐渐磨损而增大,磨损严重时,将影响电弧喷涂过程的稳定性,使喷涂粒子变粗,并出现不规则的大颗粒,当发生这种情况时,首先检查导电嘴,如确实发现导电嘴已磨损,应予以更换。安装导电嘴时,应使两个导电嘴的前端最近处保持 3mm 左右的距离。

当喷涂过程开始后,两根金属丝被加载不同极性的电压,要注意不要出现使喷涂枪以外之处发生任何两根金属丝相接触的情况,如有发生,应立即停止喷涂,对发生接触起弧的部位进行修整。

为了保证涂层与工件基体有较高的结合强度,在喷涂时,要求喷枪的轴线与工件的表面法线间夹角小于  $45^{\circ}$ 。有些特殊情况,如一些内孔或空间较窄部位,使用普通喷涂枪很难胜任,则需要使用专门设计的内孔喷枪来完成。

电弧喷涂钢涂层时须先喷涂结合涂层以提高涂层结合强度。为达到最好的结合效果,喷涂前仍应对工件作喷砂处理。对太薄太硬的工件,形状尺寸难以喷砂或作其它粗化处理时也须喷涂结合涂层。

电弧喷涂常用的结合涂层材料有铝丝、镍铝丝、铝青铜丝以及低合金钢管状丝材。此外, 锌对陶瓷、玻璃、石膏、塑料等材料有良好的润湿性与较高的结合强度, 但只耐低温。

喷涂结合涂层的工艺参数与工作涂层有别, 应采用较高的电弧电压、较低的雾化空气压力及较近的喷涂距离。这样可使喷涂过程中产生过热的、粗大的喷涂粒子有可能在工件表面发生化学与冶金反应, 产生局部的冶金结合, 同时也为下一步喷涂工作提供粗糙的表面状态。结合涂层的厚度以充分、均匀覆盖基体表面为依据, 通常为  $0.08\text{mm} \sim 0.18\text{mm}$ 。

钢铁结构件的大规模长效防腐蚀施工主要是用锌或铝涂层的热喷涂。在任何时候, 使用一种新设备前都应仔细阅读设备的操作说明书, 各种热喷涂设备均应按制造商提供的参数来使用。

喷涂距离取决于喷涂设备, 通常范围为  $150\text{mm} \sim 250\text{mm}$ 。喷涂距离太短, 会发生工件过热现象, 喷涂距离和金属颗粒在行程中会发生变化, 不能很好地黏附于金属表面上, 同时氧化物含量升高, 结合强度降低, 涂层的结合力下降。

铝、锌材料的纯度为  $99.5\%$  在大多数场合是可以接受的。事实上, 可以使用纯度更高的材料, 但这并不是很必要的。对任何厚度的锌涂层来说, 除了上述各点, 孔隙并不十分重要, 它们会通过阳极极化过程而自封。而对于铝涂层, 厚度达到或超过  $100\mu\text{m}$  时, 则不会发生“褐斑”现象。一般地讲, 上述厚度的涂层, 以及孔隙度正常的较薄的涂层都会从界面上开始产生腐蚀斑。厚度小于  $100\mu\text{m}$  的铝涂层, 产生褐斑的原因主要是在较薄的涂层中存在与界面连通的贯穿孔隙, 来自大气中的腐蚀媒介, 尤其是氧和水分通过这些连通孔, 穿透涂层到达构件基体界面, 并形成褐斑状的亚铁氧化物。这些反应产物在数量上并不多, 但能封闭原有的连通孔, 因此, 不会发生进一步的严重破坏。假定基体表面已经磨料喷砂处理过, 要进行喷涂, 则最主要的是保证这一表面不能被锈蚀物、灰尘、油、润滑脂、水等物质污染。上述物质破坏涂层与基体的结合, 增加界面上的腐蚀程度, 某些化学污染的后果就是这样的。喷涂前另一个要确保的是磨料不得被嵌在所处理的表面缝隙里, 如果它们埋在涂层里, 会对涂层的结构产生不良影响。

涂层与基体的结合主要是机械结合。塑性状态的小金属颗粒碰撞在基体上, 沉积成鱼鳞状结构, 随着喷枪的每次扫过, 该结构的厚度不断增加。在喷涂过程中, 每个被喷出的金属粒子都覆盖上一层氧化物, 使涂层孔隙率增加。涂层孔隙也可能是由于涂层粒子的不规则形态造成的空洞。特别是当工件表面温度低时进行喷涂, 更会出现这种情况。

有时, 要在涂层上进行修整和再次喷涂, 尤其是对进行过破坏性结合强度测试的涂层面。使用锌材不会出现什么问题, 使用铝涂层时, 则需特别注意。重新

喷砂最好采用带尖角的中级非金属磨料,这种磨料不会对处理区域邻近的铝涂层造成高的压应力。要确保喷砂角度为  $90^{\circ}$  左右,喷砂面积不可外延。再次喷涂应在正常的最小喷距离内进行,但工件表面不可过热,对于薄型工件尤其要注意。同时喷涂区应限制在再次喷砂的范围内,否则新喷上的涂层会发生卷边,并会大块剥落。

当大面积的喷砂表面来不及喷涂涂层到要求厚度时或在潮湿气候环境下,有时先在喷砂表面喷上一层薄的涂层,防止构件表面生锈。这种方法常在喷涂锌涂层时使用,并且效果令人满意,但喷涂铝涂层时效果不好,后喷的涂层与原有涂层间的界面结合不好,有时出现分层现象。

金属喷涂到粗糙表面的倾角会使金属粒子黏附在粗糙表面的一定部位,并为另外的涂层所覆盖。实际上,所有用喷枪进行喷涂时都有个角度,所以涂层都有不均匀的部分。角度过大会引起大量粒子偏斜,沉积率受到影响。质量差的涂层中含有大量的氧化物,结合强度差,由于夹有固体金属颗粒,使涂层外观粗糙、孔隙率高。

保证喷涂技术的正确运用是重要的。当涂层为多于一个面的组合体时,例如,螺栓表面的棱角,在进行正常喷涂时,棱角是涂层的弱点,特别是  $90^{\circ}$  角。应记住遇到棱角时,应先喷涂角的部分,而薄的边缘部分必须最后喷。

通常情况下,凡可用肉眼观察到的表面,都可以进行喷涂。但有时需要用特殊的内孔喷涂枪对管内壁或在使用其它方法难以进入的地方进行喷涂。涂层的厚度一般由操作者掌握喷枪在表面上喷涂的次数进行控制,熟练的操作者可以比较准确地控制涂层的厚度,每一遍的厚度随着操作者调节喷枪在工件表面上的移动速度而改变。实际上,移动的速度越慢,喷涂效率越高,沉积率也越高,而孔隙率却越低。熟练的操作者能掌握好喷枪的移动速度,以及适当的喷射角度,有效地进行大面积喷涂。新的操作者可以先在一块试板上逐渐移动喷枪,在整个表面喷上一层涂层,如此喷涂几遍直到获得要求的厚度为止,这是一种很实用的练习方法。

#### 6.4.4 后处理

电弧喷涂层常有  $2\% \sim 10\%$  的孔隙,孔隙可以互相连接并可以从表面延伸到基体。封孔是常用的后处理方法,其目的是填充涂层固有的孔隙。电弧喷涂层封孔的原因是防止或阻止由于液体介质渗入而引起的涂层与基体界面处的腐蚀,延长钢铁构件喷锌、喷铝涂层的使用寿命,防止一些接触高压液体介质的机械零件的密封泄漏。

#### 6.4.4.1 对封闭剂的性能要求

在工业气氛、海洋环境、化学活性物质、腐蚀气体及高温环境中,涂层中的孔隙是有害的。由于腐蚀介质可能会通过这些孔隙渗入到钢铁基体,使涂层与基体发生化学或电化学侵蚀,导致涂层失效,在这种情况下,必须对涂层进行封闭处理。

经过封闭处理的热喷涂涂层在腐蚀环境中消耗速度减缓,通常可以提供更长久的保护作用,即使在表面封闭涂层失效后,其下面金属涂层也比未经封闭处理的金属涂层消耗缓慢。热喷涂涂层固有的孔隙和粗糙表面使封闭剂和涂料能牢固地结合在其表面,涂料在其表面的结合效果甚至还优于已经过最好喷砂的基体表面。

封闭剂的种类较多,为了达到良好的封闭效果,封闭剂必须满足下列要求:

有足够的渗透性,与涂层间有较高的结合强度,在工作温度下性能稳定,耐化学溶剂的作用,不能与涂层或基体发生化学或电化学反应,在工作环境下与涂层和基体保持化学稳定性。

#### 6.4.4.2 封闭剂的施工要点

一般来说,用于防腐蚀涂层的封闭剂,在投入使用前必须充分固化。一般的封闭剂无危险性,但有些封闭剂易挥发和易燃,在储存和使用过程中,应格外小心。应充分通风,以免影响施工者的正常呼吸。

封闭剂大体分为有机和无机两种。有机封闭剂多是由适当比例的树脂、溶剂和颜料组成。通常封闭剂的浓度较低,如果添加颜料,颜料的粒子尺寸必须很小,使其能渗入热喷涂涂层的孔隙中。适合于热喷涂锌或热喷涂铝涂层使用的封闭剂是低黏度的乙烯树脂、硝基涂料、醋酸共聚物、苯酚树脂、改性醇酸树脂、酚醛树脂、改进型环氧树脂等。金属涂层的封闭剂与面漆涂料有着根本的差异。涂料用于涂层是作为一个保护层,而封闭剂是用低黏度物体渗入涂层的孔隙,并将其封闭,不增加保护层的总厚度。选择封闭剂的主要依据是所处介质的腐蚀情况及工作温度。

有机封闭剂主要是用于锌涂层或铝涂层的封闭,工作温度不高,处于大气氧化、工业气氛、海水等环境中,对于高温氧化介质,则用沥青基铝浆、铝硅酮树脂及某些硅酸盐、铬酸盐等无机物,最高工作温度可达 980℃。不同封闭剂有不同要求,大体遵循以下几点:

(1) 应在喷涂后尽快对金属涂层施加封闭处理,避免涂层表面污染。待涂刷封闭的热喷涂涂层表面应无污物,最好在涂刷封闭剂之前用干燥、清洁的压缩空气清除涂层表面的浮尘。最好用蚀洗涂料(通常是磷酸)作预处理,以形成一种复合的磷酸盐化合膜,有助于封闭剂的粘结。

(2) 大多数封闭剂需要稀释剂稀释,以降低黏度,保证其良好的渗透性。对于一些高温环境的应用,可在封闭剂中掺加片状铝粉,以改善封闭剂的耐温及抗蚀性能。

(3) 封闭剂通常用毛刷涂抹,根据需要,封闭剂可以刷一遍,也可刷多遍,第一遍最重要,要保证封闭剂能够充分地渗入涂层孔隙之中。

#### 6.4.4.3 面漆施工要点

在热喷涂的防腐蚀金属涂层经封闭处理后,有时对于有装饰要求,有海水飞溅或浸泡的场合以及直接经受强腐蚀场合可以在外面涂刷面漆。面漆的涂装方法与常规涂料涂装类似,应按照涂料涂装的施工要求和安全要求进行施工。

由于在多层的涂料间会积存一些潮气,在持续的腐蚀条件下,反而会造成腐蚀加重,所以一般情况下,在涂层外,仅有一层面漆就够了。不要直接将面漆涂刷在金属涂层表面,应在已经过封闭处理和施加了底漆的热喷涂涂层表面涂刷面漆。修复在热喷涂金属涂层表面上的面漆比传统涂料涂装简单得多,只需对面漆的损坏部分做简单的清理,然后重新涂刷一层相同的面漆即可。

热喷涂防护复合涂层体系面漆的涂装方法与传统涂料涂装类似。由于热喷涂防腐蚀施工的构件体积通常较大,施工环境粉尘较多,所以只允许使用一些常温固化的涂料种类和采用像涂刷、滚涂这样简单的涂料施工方法。在面漆涂料施工中主要应注意以下几点:

(1) 一定要在涂层封闭剂和底漆完全固化后再进行面漆的施工。

(2) 在涂后施工时,应根据涂料的品种和涂刷的部位选择合适的漆刷。进行涂刷时,不要在漆刷上蘸过多的涂料,一般不超过刷毛的  $2/3$ ,然后在盛涂料罐的内壁上轻拍一下,去掉多余的涂料,以免流淌浪费。涂刷时要有顺序,一般从上到下,从左向右,不可横涂乱抹,造成涂料膜薄厚不均。

(3) 大平面构件的面漆施工也可以选用手工滚涂的方法。这种方法涂膜均匀、无流挂现象、生产效率高。在边角不易滚到的地方,需用刷子补充。

许多机械零件在电弧喷涂后需要机械加工,电弧喷涂层的加工性能不同于同样成分的锻件或铸件,这是由于涂层内有一定数量的氧化物,会加速刀具磨损,降低涂层与基体结合的可靠性,因此电弧喷涂层的主要加工方法为磨削。车削方法适用于硬度低于 300HV 的轴、管类零件,铜涂层建议使用硬质合金刀具,除刀具选择外,刀具角度、进刀量、工件转速是防止涂层损坏的关键因素。对于硬度较高不宜车削的涂层均采用磨削方法,薄涂层一定要用磨削方法,高铬不锈钢虽可以车削,为保证涂层加工质量仍建议用磨削方法,磨削时应采用中软、锐利的砂轮与有效的冷却条件。

## 6.5 电弧喷涂的应用

### 6.5.1 长效防腐涂层的应用

锌、铝及锌铝合金是长效防腐的主要涂层材料,锌与铝具有比铁更低的电极电位,对钢铁基体起阳极保护作用,广泛用于钢铁构件耐大气、淡水、海水和土壤环境的长效防腐。锌在大气、淡水与土壤中有相当高的耐蚀性能,适用于 pH 值为 6~12 的环境,但在  $\text{SO}_2$  工业大气、海水中耐蚀性较差,在 67℃ 以上大气、淡水中由于电极电位的“跃变”,失去对钢铁基体的阳极保护作用,不耐酸碱腐蚀,不宜用于食品工业。铝对钢铁基体既起阳极保护作用又因在表面形成坚固致密的三氧化二铝薄膜起惰性保护作用,适用于各种大气环境、淡水、海水及 pH 值为 4.5~8.5 的环境。实践表明,在工业大气、淡水、海水及土壤环境下选择相应的电弧喷锌、喷铝涂层加上封闭技术所组成的涂层体系可为钢铁构件提供 20 年以上的长效防护。金属涂层的使用寿命与单位面积的涂层重量成正比,锌涂层厚度可在 0.05mm~0.50mm,铝涂层厚度可在 0.1mm~0.25mm 间。国内已成功地应用于建筑桥梁、海洋钻井平台、闸门、广播电视天线、雷达天线、输电铁塔、电缆支架、公路护栏、灯柱、高架人行道、各种储罐、管道等。

近几年应用电弧喷涂技术治理船舶钢结构腐蚀已引起有关部门的重视,取得了较好的成绩。采用由电弧喷铝涂层、有机封闭涂料涂层、常规船舶面层涂料组成的长效防腐喷铝涂层体系,据有关部门组织的电弧喷铝治理舰船的试验与评审工作认为,经实船试验与理论计算电弧喷铝技术可使舰船钢结构在 15 年~20 年内基本不受腐蚀。而目前采用的有机涂层防腐体系其寿命仅 1 年~2 年。

煤矿井筒大型钢铁构件处于严重的腐蚀环境中,矿井的设计寿命为 50 年,甚至 100 年,现行的防腐工艺为除锈、刷漆的平均寿命为 3 年~5 年。采用电弧喷涂锌铝复合涂层后,其使用寿命在 30 年以上。经我国山西、河南、安徽、山东等地煤矿矿井应用表明,电弧喷涂是最经济的长效防腐方法。

球墨铸铁离心浇铸管道量大面广,广泛用于工业及民用输水管道,外壁喷锌对于管壁已经减薄的球铁管道尤为重要。国外铸管生产厂在铸管球化退火后(保持管温在 400℃ 以上)直接喷锌,国内已经建成若干条铸管喷锌生产线,采用大功率电弧喷涂机喷锌,单机生产率达 60kg/h,涂层厚度控制在 60 $\mu\text{m}$ ~80 $\mu\text{m}$  间。球铁铸管采用喷锌与沥青涂层体系后,按有关国际标准使用寿命在 100 年以上。



### 6.5.2 机械零件修复与预保护

以 Cr13 钢为代表的高铬马氏体不锈钢丝(包括 2Cr13、3Cr13 以及具有自粘结作用的 7Cr13 管丝)喷涂后收缩性小,可以得到较厚的涂层,空冷可直接得到马氏体组织,涂层有较高的硬度与耐磨性,因含高铬还具有较好的耐蚀性,涂层可以用硬质合金刀具进行切削与磨削加工。常用这类涂层作大型关键机械零件如曲轴、柱塞、烘缸等的修复与新件预保护。

我国冶金、石化、煤炭行业千吨以上压力机保有量近万台,压力机的大型柱塞长期运行后表面出现划沟,影响密封效果,经多次磨削修复后因尺寸超限而报废。采用电弧喷涂 3Cr13 涂层不仅能恢复使用功能,还能提高耐磨耐蚀性。主要喷涂工艺:喷涂前车削或磨削除去锈蚀及其它表面缺陷,消除圆度偏差,局部喷涂铝青铜填平凹坑,用喷砂或车螺纹作粗化处理,喷涂铝青铜结合涂层 0.1mm,喷涂 3Cr13 工作涂层 1mm~3mm。避免短时局部过量喷涂,以防涂层损坏。合格的柱塞用稀释的环氧清漆作封孔处理,最后磨削加工。

造纸烘缸是造纸机械中的重要部件,烘缸内通 120℃ 蒸汽,外表面接触纸浆中腐蚀介质,不少地区水质差,腐蚀更为严重,烘缸表面还与刮刀接触因而还有磨损问题。采用电弧喷涂 3Cr13 涂层修复或制造新烘缸不仅延长了烘缸的使用寿命,也提高了生产质量。其主要喷涂工艺:喷涂前清洗烘缸表面,车削加工去除表面缺陷,消除圆度偏差,两端留下涂层保护凸台。新烘缸时效处理才允许喷涂,喷涂前建议用车螺纹加镍拉毛作粗化处理,也可以在车螺纹及喷砂后喷铝青铜结合涂层。喷涂 3Cr13 工作涂层 3mm,喷涂时要防止烘缸停转(局部过量喷涂将会损坏涂层),最后磨削加工。

电弧喷涂修复轴类零件应用普遍,各种轴类零件喷涂工艺相仿,以曲轴修复为例,喷涂前清除曲轴颈及主油道油锈,磨去表面磨损层、疲劳层,消除圆度偏差,尽可能保留轴颈根部原有圆角。喷砂处理,喷涂铝青铜或镍铝复合材料的结合涂层,堵塞油孔并遮盖不需要喷涂的部位。喷涂 3Cr13 工作涂层,涂层加工余量 0.4mm~1.0mm,最终涂层厚度应大于 0.5mm。合格的曲轴用稀释的环氧清漆作封孔处理,磨削加工,修整油孔。

### 6.5.3 工业锅炉受热管件耐高温腐蚀涂层的应用

动力、造纸、化工等工业用锅炉受热管件的高温腐蚀问题严重,受热管件中的水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管等常因过早失效而严重影响锅炉安全运行,造成很大的经济损失。电弧喷涂已成为锅炉受热管件防止高温腐蚀的

最有效手段。它与其它热喷涂方法相比,选用专用丝材形成非消耗性涂层,喷涂效率高、锅炉停工检修时间短、施工费用低、现场适应性强,在环境恶劣的锅炉作业现场能保持稳定的喷涂质量。实践表明,锅炉受热管件经喷砂、打磨去除腐蚀表层,喷涂具有自粘结性能的镍铬钛与铁铬铝专用丝材,涂层厚 0.38mm,结合强度可达 48MPa,受热管件在 7 年~10 年内可正常运行。

#### 6.5.4 电弧喷涂快速制模技术

现代工业中塑料制品应用领域日益扩大,塑料制品换型十分频繁,因此,要求缩短制造周期,许多企业需要快速、经济的模具制造技术。电弧喷涂快速制模技术具有生产周期短、制模成本低、原型尺寸不受限制的优点,尤其适合制造难以机械加工、图形复杂带有装饰花纹的型腔模具,可用于反应注塑成型工艺(RIM)中的聚氨酯零件如汽车的驾驶盘、仪表盘、座垫、靠垫、阻流板、汽车内装饰顶篷,民用建筑的隔热材料、轻工业中的鞋底等。

电弧喷涂快速制模技术的工艺材料包括熔点适中、涂层致密、低气孔率的锌铝合金、锡铋合金丝材;具有良好成膜性能、耐热性能、脱模性能的脱模剂;由环氧树脂和有色金属粉末组成的浇注填充材料。电弧喷涂快速制模的工艺流程有:①模型准备,对原型表面清洗,弥合表面缺陷,涂脱模剂;②喷涂金属模壳,喷枪要尽可能垂直于模型表面并作快速均匀的移动以防止过热,喷涂时要注意周边部位保持均匀的涂层厚度,涂层厚度为 1.5mm~2.0mm;③模具外框架制作,浇注填充材料,固化后对喷涂成的金属模壳起支撑和加固作用;④脱模,后加工。

## 第七章 等离子喷涂技术

等离子喷涂技术的主要特征是以等离子焰流为喷涂热源。由于等离子焰流的温度高、能量集中、喷涂气氛可控,是各种难熔材料的良好热源。粉末材料在焰流中的飞行速度高,为获得结合良好、结构致密的喷涂层提供了条件。近年来发展起来的超声速等离子喷涂、低压等离子喷涂、水稳等离子喷涂技术进一步提高了等离子喷涂层的质量,扩大了等离子喷涂的应用领域。

### 7.1 等离子喷涂的基本知识

电弧有两种形态,一是自由电弧,二是压缩电弧。等离子弧是压缩电弧,电弧在等离子发生器(等离子喷枪)中受到压缩,能量集中,其横截面的能量密度可提高到  $10^5 \text{ W/cm}^2 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ ,弧柱中心温度可升高到  $15000\text{ K} \sim 33000\text{ K}$ 。在这种情况下,弧柱中气体随着电离度的提高而成为等离子体。而这种压缩型电弧为等离子弧。

等离子体是物质的第四种形态,自然界的物质除了固、液、气三种形态外,还存在第四态——等离子体及第五种形态——超固体,第六种形态——辐射场态。在物理学中把电离度大于  $0.1\%$  的气体称为等离子体。等离子体的主要特征是中性的气体发生了电离,电离后的正、负粒子数量增多且相等,其空间电荷为零,呈中性状态。等离子体有三个基本特点,即很强的导电性、电准中性与磁场的可作用性。

等离子体是一个广义的概念,如太阳是一种高温等离子体,日光灯利用的光源是低温等离子体中的冷等离子体。等离子喷涂技术中所叙述的等离子体是低温等离子体中的热等离子体。

#### 7.1.1 等离子弧的压缩效应

等离子弧受到机械压缩、热压缩和自磁压缩等三种压缩效应。

##### 1. 机械压缩效应

水冷紫铜喷嘴对弧柱的机械压缩效应。水冷紫铜喷嘴孔径的大小限制了等

离子弧弧柱的直径大小,喷嘴孔径越小,孔道越长,对弧柱的压缩越强,弧柱直径越小,能量越集中。

## 2. 热压缩效应

冷却气流的压缩即热压缩效应。水冷紫铜喷嘴孔道内壁温度很低,喷嘴内壁附近的气体受到冷却,形成薄层冷气膜,电离度很低,导电性差,迫使等离子弧集中流过电离度高的中心部位,电弧受到压缩称之为热压缩效应。

## 3. 自磁压缩效应

电弧电流有一定的流向,弧柱相当于一束电流方向相同的平行导体。平行导体间电磁力的相互作用,使弧柱各部位都受到指向弧柱轴线的压缩力作用,弧柱直径进一步缩小。这种现象是由电弧自身的磁场产生的,称之为自磁压缩效应。

# 7.1.2 等离子弧的类型

根据电源的接法不同,等离子弧主要有下述三种类型,如图 7-1 所示。

## 1. 非转移型等离子弧

非转移型等离子弧简称非转移弧,如图 7-1(a)所示,它是在接负极的钨极与接正极的喷嘴之间形成的,工件不带电。等离子弧在喷嘴内部不延伸出来,但从喷嘴中喷射出高温焰流。非转移弧常用于喷涂、表面处理以及焊接、切割较薄的金属或非金属。

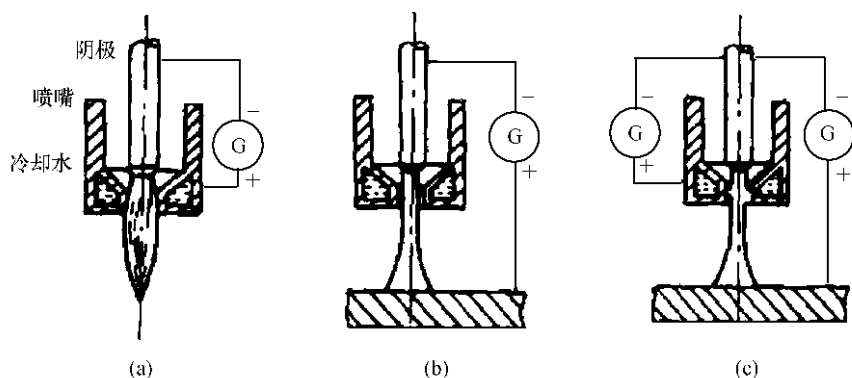


图 7-1 等离子弧的形式

(a) 非转移型等离子弧;(b) 转移型等离子弧;(c) 联合型等离子弧。

## 2. 转移型等离子弧

转移型等离子弧简称转移弧,如图 7-1(b)所示。它是在接负极的钨极与

接正极的工件之间形成的。在引弧时要用喷嘴接电源正极，产生小功率的非转移弧，而后工件接正极将电弧引出，同时喷嘴断电。转移弧有良好的压缩性，其电流密度和温度都高于同样焊枪结构同样功率的非转移弧。转移弧主要用于切割、焊接及堆焊。

3. 联合型等离子弧

联合型等离子弧由转移弧和非转移弧联合组成，如图 7 - 1(c)所示。它主要用于电流在 100A 以下的微弧等离子焊接，以提高电弧的稳定性。在用金属粉末材料进行等离子弧堆焊时，联合型等离子弧可以提高粉末的熔化速度，从而减少熔深和焊接热影响区。

通常将非转移型等离子弧称为等离子焰流，而将转移型等离子弧称为等离子弧。

7. 1. 3 等离子焰流的特性

1. 温度高、能量集中

等离子焰流的最大特点之一是具有非常高的温度和能量密度，图 7 - 2 为等离子焰流温度测量结果（氩气流量为  $0.6\text{m}^3/\text{h}$ ），等离子焰流的中心温度最高达 32000K，喷嘴出口处中心温度仍达 20000K。

等离子焰流温度高、能量集中的特点有很大的应用价值，在喷涂或焊接、堆焊时，它能够熔化任何金属或非金属；可以切割铜、铝、不锈钢、钛等用氧—乙炔焰无法切割的金属。

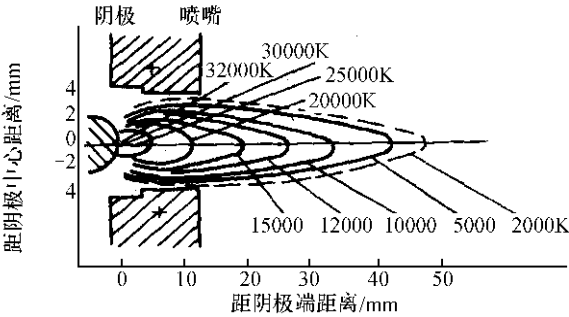


图 7 - 2 等离子焰流温度分布图

2. 速度高、稳定性好

等离子焰流在喷嘴附近的喷射速度可达亚声速或超声速。装甲兵工程学院研制的高效能超声速等离子喷涂设备的焰流速度可达马赫数  $\text{Ma}4 \sim 6$ 。由于等

离子弧是一种压缩型电弧,弧柱挺直、电离度高,因而弧电压、弧电流都比自由电弧稳定,可以保证等离子喷涂工艺过程稳定可靠。

3. 可调节性好

等离子弧的可调节因素有如下几个方面：

(1) 等离子弧的热量和温度可在较大范围调节。通过改变输入功率、工作气体的流量、喷嘴的几何形状和电源的连续方式等可以控制等离子弧的热量和温度。

(2) 等离子弧的气氛可控。通过改变工作气体的种类,可以控制等离子弧的氧化、还原和惰性气氛。

(3) 等离子焰流冲击力刚性可调。通过改变弧电压、喷嘴结构和气体流量等,可以控制等离子焰流的刚性,以适应不同的喷涂要求。

7.1.4 等离子焰流工作气体

等离子焰流工作气体除了要满足较好的起弧和维弧性能要求外还要满足以下基本要求:对阴极(通常是钨电极)和阳极(紫铜喷嘴)材料的腐蚀性要尽可能小;喷涂过程中不与被喷涂的材料发生有害反应;有足够的热焓,温度要高,价格低廉、供应方便。

常用的工作气体有氩气(Ar)、氮气(N<sub>2</sub>)、氢气(H<sub>2</sub>)、氦气(He)等。各种气体具有不同的热物理性能,如导热系数、热焓、密度、比热、离解度、电离度和电离能等。在等离子喷涂过程中,合适的等离子气体成分能够提高粉末的沉积效率,改善涂层的质量,延长喷嘴的使用寿命。表7-1列出了常用工作气体的部分热物理性能。表7-2列出了不同工作气体等离子焰流温度、热焓等有关参数。

表 7 - 1 常用工作气体的部分热物理性能

气 体	导热系数 λ /W/(m·K) [kCal/(cm·s)]	分解度(5000K)	电离电位/V
N <sub>2</sub>	2.43×10 <sup>-2</sup> (0.58×10 <sup>-4</sup> )	0.038	13.5
H <sub>2</sub>	19.76×10 <sup>-2</sup> (4.72×10 <sup>-4</sup> )	0.096	14.5
Ar	1.58×10 <sup>-2</sup> (0.378×10 <sup>-4</sup> )	—	15.7

表 7 - 2 不同工作气体等离子焰流温度、热焓等有关参数

气体	喷枪功率/kW	电弧工作电压 /V	等离子体温度 /K	等离子体热焓 /(1~7)/(kg/K)(kCal/kg)	热效率/%
N <sub>2</sub>	60	65	7600	41680(9900)	60
H <sub>2</sub>	62	120	5400	321720(76600)	80
He	50	47	20300	214200(51000)	48
Ar	48	40	14700	19320(4600)	40

氩气(Ar)是单原子气体,它在温度升高过程中没有离解过程,而是直接吸收热量进行电离。因此,它的热焓值不高,低于双原子气体。纯氩等离子炬的电弧电压较低,传热系数也比较小。但是,它的引弧性能和稳弧性能比双原子气体好,还具有很好的保护性能,在等离子喷涂中,常混入氢气或氮气来提高等离子焰流的热焓。

氮气( $N_2$ )是双原子气体,它作为等离子气体时具有很高的热焓值,在电离过程中吸收的热量,能量利用率高,且来源方便,价格便宜,已成为等离子喷涂中较为常用的工作气体。但是氮气的保护性能差,具有一定的氧化性,不适用于喷涂容易氧化的粉末。在等离子喷涂中常用来提高弧电压及对粉末的传热。

氢气( $H_2$ )是双原子气体,在热电离过程中,氢气作为等离子气体具有较高的热焓值。此外,氢气的导热系数是气体中最高的,这有助于粉末在等离子气体中的熔化。在等离子喷涂中,一般在氩气中加入一定量的氢气,可以提高等离子弧的热能及传热。在喷涂高熔点的粉末时,氢气是不可缺少的气体。对于绝大多数金属材料来说,氢气是还原性气体,因此在工作气体中加入氢气可以有效防止材料的氧化,提高涂层质量。此外,在喷枪中加入一定量的氢气,可以有效提高等离子炬的电压和使用功率。

氦气(He)是单原子气体,其电离电位(24.5V)要大大高于其它等离子喷涂气体。在高温的状态下具有很高的热焓值。氦气的黏度也是各种等离子体中最高的,因此在等离子体中加入一定量的氦气能够有效稳定电弧。但是,氦气的来源困难、成本高,限制了其在工业中的应用。

在等离子喷涂中,通常要在氩气中加入一定量的氢气或氮气来提高等离子炬的传热能力。对于高熔点的陶瓷粉末,只有在氩气中加入较高含量的氢气才会获得满意的喷涂效果。

## 7.1.5 等离子喷涂的基本原理和特点

### 7.1.5.1 等离子喷涂的基本原理

等离子喷涂的基本原理如图7-3所示。

图右侧是等离子发生器又叫等离子喷枪,根据工艺的需要经进气管通入氮气、氩气或混入5%~15%的氢气。这些气体进入弧柱区发生电离,成为等离子体。钨极与前枪体有一段距离,在电源的空载电压加到喷枪上以后,并不能立即产生电弧,需在前枪体与后枪体之间并联一个高频电源。高频电源接通使钨极端部与前枪体之间产生火花放电,引燃电弧。电弧引燃后,切断高频电路。引燃后的电弧在孔道中受到压缩,温度升高,喷射速度加大,此时往前枪体的送粉管中输送粉状材料,粉末在等离子焰流中被加热到熔融状态,并高速喷打在零件表

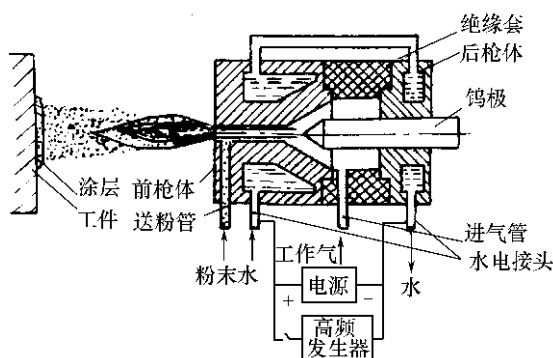


图 7 - 3 等离子喷涂原理图

面上。撞击零件表面时熔融状态的球形粉末发生塑性变形，粘附于零件表面，各粉粒之间也依靠塑性变形而互相结合起来，在零件表面获得一定厚度的喷涂层。

#### 7.1.5.2 等离子喷涂的主要特点

等离子喷涂除了具有和其它喷涂方法一样的优点，如零件尺寸不受限制、基体材质广泛、加工余量小、可喷涂强化普通基材零件表面等外，还具备以下优点：

(1) 基体受热小、零件不变形，不改变热处理状态。由于喷涂时零件不带电，基体金属不熔化，所以尽管等离子焰流的温度较高，但能量非常集中，等离子弧的轴向温度梯度很大，一般零件温升不超过 200℃，零件不会发生变形，这对于修复薄壁件、细长杆以及一些精密零件十分有利。由于在 200℃ 以下基体金属的热处理性质不会发生变化，可以对一些高强度钢材实施喷涂。

(2) 能够喷涂的材料广泛，涂层的种类多。由于等离子焰流的温度高，可以将各种喷涂材料加热到熔融状态，因而可供等离子喷涂使用的材料非常广泛，从而也可以得到多种性能的喷涂层，如耐磨涂层、隔热涂层、抗高温氧化涂层、绝缘涂层等等。就涂层的广泛性来说，氧—乙炔焰喷涂、电弧喷涂、高频感应喷涂和爆炸喷涂都不及等离子喷涂。

(3) 工艺稳定，涂层质量高。等离子喷涂的各工艺参数都可定量控制，工艺稳定，涂层再现性好。在等离子喷涂中，熔融状态粒子的飞行速度可达 180m/s ~ 480m/s 甚至更高，远比氧—乙炔焰粉末喷涂时的粒子飞行速度 (45m/s ~ 120m/s) 高。熔融微粒在和零件碰撞时变形充分，涂层致密，与基体的结合强度高。等离子喷涂层与基体金属的法向结合强度通常为 30MPa ~ 70MPa，而氧—乙炔焰喷涂一般为 5MPa ~ 20MPa。由于等离子喷涂时可以通过



改换气体来控制气氛,涂层中的氧含量或氮含量可以大大减少。

等离子喷涂的缺点是一次性投资较多,需要一定纯度的氮气或氩气等,还须加强安全防护措施,要充分注意操作者的保健。

### 7.1.6 等离子喷涂的主要工艺参数

等离子喷涂的工艺参数主要有电功率、送粉量、气体流量和喷涂距离以及喷枪移动速度、基体金属的温度等。

#### 1. 送粉量及电功率

送粉量及电功率这两个工艺参数是喷涂过程中最主要的参数,又是需要经常变动的参数,而且这两个参数是互相联系的,在确定这两个工艺参数时,重点是保证两者的恰当匹配。送粉量和电功率恰当匹配指的是对于由一定牌号一定粒度组成的粉末,在不同的送粉量下,应当施加不同的电功率,通过调整氩气流量来保证所需的工作电压和射流的热焓,通过调整电流的大小调节输入功率。当送粉量不变时,电功率过小,则粉末熔化不良,涂层中夹杂的生粉多,粉末撞击工件时变形不充分,并有较多的粉末弹跳损失,沉积效率低,涂层质量下降。若电功率过大,虽然粉末的熔化和撞击变形良好,但粉末受热氧化烧蚀严重,涂层中夹着较多烟尘,熔化粒子飞溅严重,同样会使沉积效率降低,涂层质量下降。因此,对于一定牌号一定粒度的粉末,送粉量的大小和电功率值要相适应。生产中确定送粉量和电功率最佳匹配的方法是采用喷涂沉积效率试验,一般取沉积效率曲线中最高点处的电功率值为最佳值。

#### 2. 喷涂距离

粉末在等离子焰流中加热和加速都需要一段时间,因此应有一个合适的喷涂距离。喷涂距离过近,会因粉末加热不良,撞击变形不充分而影响涂层质量,还会使零件受等离子焰流的影响而严重氧化,同时也会使基体温升过高,造成热变形。喷涂距离过远又会使已经加热到熔融状态的粉末在与零件接触时冷了下來,飞行速度也开始降低,同样影响涂层质量,喷涂效率会明显降低。

#### 3. 主气、二次气及送粉气的流量

通入喷枪用于压缩电弧并发生电离的气体称为主气,等离子喷涂常用 Ar 气等作为主气,为了提高等离子弧的热焓常在离子气中加入  $N_2$ 、 $H_2$ ,称之为二次气或次级气,用于带动粉末的气体称为送粉气。主气的流量,是重要的工艺参数之一,它直接影响到等离子焰流的热焓和流速,继而影响喷涂效率和涂层孔隙率等,气流量过大或过小均会导致喷涂效率的降低和涂层孔隙率的增加。气流量过大,离子浓度减少,过量的气体会冷却等离子体的焰流,使热焓和温度下降,不利于粉末的加热,粉末熔化不均匀,使喷涂效率降低,涂层组织疏松,孔隙率增加;

气流量太小,会使喷枪工作电压下降,使焰流软弱无力,并容易引起喷嘴烧蚀。送粉气的流量对涂层质量的影响也很大,对外送粉喷枪而言送粉气对涂层质量的影响尤其严重,送粉气流量过小会使粉末难以到达焰流中心,过大则会使粉末穿过射流中心,产生严重的“边界效应”,致使涂层疏松,结合强度降低。

#### 4. 喷枪移动速度

喷枪移动速度对涂层质量和喷涂效率的影响在一定范围内并不明显。在一定送粉量下喷枪移动速度或喷枪与工件的相对速度的慢与快,意味着单位时间内,喷枪扫过工件面积的多少或每次喷涂层的厚度,所以调节喷枪的移动速度实际上是控制每次喷涂层的厚度。每次喷涂的厚度不宜太厚,一般情况下,每次喷涂的涂层厚度不要超过 0.1mm,对于要求喷涂厚的涂层的零件,也应以两次或多次喷成为好。此外喷枪移动速度对工件的温升也有影响,为不使基体局部温升过高而造成热变形或热应力过大,也希望在保证覆盖的前提下,选用较快的喷枪移动速度。

#### 5. 基体金属的温度

基体金属的温度是喷涂工艺一项重要的参数。多数工件在喷涂前,需进行一定的预热,目的是去除湿气,并使表面活化,有利于涂层与基体的结合,以及控制基体相对涂层的热膨胀。对于一些薄壁件,可减小喷涂后冷却时由于零件和涂层的收缩不一致而造成的应力,从而有利于涂层与基体的结合。喷涂前预热还可以使零件在喷涂后的抗疲劳强度下降量减少。但是当金属零件的预热温度超过 200℃ 时,零件表面开始出现严重的氧化膜,导致涂层的结合强度显著下降。一般情况下预热温度为 100 ~ 150℃,在喷涂 Co - WC 粉末时,为减少碳的烧损,基体应保持更低温度。

上述参数的具体选择在后面章节中将结合不同的等离子喷涂技术具体描述。

## 7.2 普通等离子喷涂

普通等离子喷涂也称常规等离子喷涂,是指在大气气氛下操作,粒速度一般在 200m/s ~ 300m/s 的等离子喷涂方法。

目前使用的普通等离子喷涂设备大部分是通过送粉气流与轴向成一定角度将粉末从枪外送入等离子焰流中的,送粉气流会使等离子焰流温度降低,再加上枪的冷却水和周围空气也会带走一些热量,真正用于加热粉末的电能为输入总能量的 15% ~ 20%,普通等离子喷涂,无论是内送粉还是外送粉,其粉末的沉积率一般为 50% 左右,因粉末的品种不同而有差异,最高可达 85%。

### 7.2.1 普通等离子喷涂的特点

普通等离子喷涂主要有以下特点：

(1) 工作环境气氛是大气, 这区别于低压等离子喷涂。

(2) 喷涂颗粒速度一般低于声速(约为  $150\text{m/s} \sim 250\text{m/s}$ ) ,高能等离子喷涂系统可以接近声速, 区别于超声速等离子喷涂。

(3) 喷涂效率高, 涂层较致密, 与基体结合强度较高, 基体热变形小, 涂层平整、光滑, 可精确控制涂层厚度, 能获得氧化物及杂质含量较少、比较纯洁的涂层, 喷涂工艺参数可调节的范围宽。

### 7.2.2 普通等离子喷涂设备

普通等离子喷涂设备通常包括电源、控制与监测装置、等离子喷枪、冷却系统、气源供给装置、送粉装置、等离子喷枪的运动与控制设备、喷涂部件的运动与控制设备、通风与排气装置、除尘装置、喷涂室(或箱)以及相应的连接电缆与软管等, 图 7-4 是普通等离子喷涂装置的基本组成。

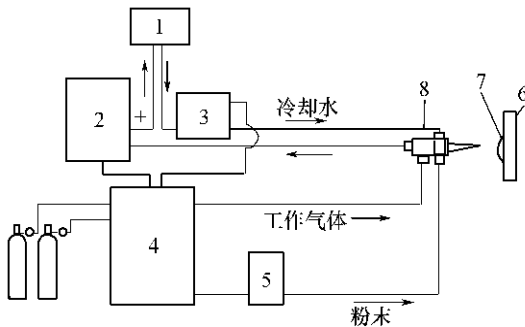


图 7-4 普通等离子喷涂装置的基本组成

循环水泵及热交换器；2—直流电源；3—高频发生器；4—控制装置；

5—粉末供给装置；6—基体材料；7—涂层；8—喷枪。

普通等离子喷涂设备运行功率一般在  $40\text{kW} \sim 80\text{kW}$  ,如我国产的 GDP - 50 型、GDP - 2 型、LP - 60Z 型设备。为了提高涂层结合强度和质量, 国内外相继开发了高能等离子喷涂设备, 其特点是等离子射流具有高温、高速、高热值和大功率。喷枪的运行功率提高到  $80\text{kW}$  ,喷射粒子速度由  $0.2$  马赫  $\sim 0.5$  马赫提高到  $1$  马赫甚至更高。焓值由  $2093.4\text{kJ/kg}$  提高到  $9211\text{kJ/kg}$  。涂层的结合力由小于  $50\text{MPa}$  提高到  $50\text{MPa} \sim 80\text{MPa}$  ,涂层的孔隙率下降到  $5\%$  以下。在国内外有代表

性的设备见表 7 - 3。

表 7 - 3 国内外有代表性的设备

设备型号	功率/kW	喷枪型号	送粉器型号	生产厂家
DH1080	80	DH - 1080 型外圆喷枪	双筒刮盘式送粉方式； 单筒容积 2. 5L	上海瑞法喷涂机械有限公司
	80	78W2 型		北京军区 装甲兵工程学院
	80	QZNI 高能内孔喷枪		北京军区、清华大学 工程力学系
LP - 60Z	60	781 型外圆喷枪	3GP - 1(三筒刮板式) B5(转盘气动式) F710	625 研究所
GP - 80	80	PQ - 1SA(手持式) PQ - 1JA(机装式) PQ - 1NA(大内孔) PQ - 2NA(中内孔) PQ - 3NA(小内孔)	SF - 1A 型(双筒式) (仿 Metco 3MP 型)	九江等离子喷涂厂
Metco 9M	80	9M, 10M, 11M, 14M	3MP 型 4MP 型 4MP - Dual(双筒) ATC - EG88 - P(四组送粉器)	美国 Metco 公司
Plasmadyne - 3600	80	SG - 100 型 SC - 200 型	1251 型 1275 型(双筒)	美国 Plasmadyne 公司
		F <sub>4</sub> 系列外圆喷枪 SM 系列内孔喷枪	PT Twin - 10 型 Quadro Jumbo 型	瑞士 PT 公司
	100	HPG - 100 型	PM 系列	日本

7. 2. 2. 1 普通等离子喷涂电源

1. 电源

等离子喷涂电源通常为直流弧焊电源，具有陡降外特性和较高的空载电压（空载电压一般在 160V ~ 200V）。输出功率较大，一般喷涂时，功率大都在 40kW 左右，大功率喷涂时功率可达 60kW ~ 80kW 甚至更高，额定输出电流一般为 500A ~ 1000A，工作电压 80V ~ 100V，由于喷涂是长时连续工作，因此在考虑额定电流时，要按 100% 的暂载率考虑。输出电流有起始递增和熄弧衰减的性能，起弧时冲击电流低于 100A，起始电流递增斜率一般为 50A/s ~ 100A/s。具有良好的电流调节性能，供给等离子弧的输出电流应能在较宽的范围内连续、平

滑地调节 ,以满足工艺上对电弧功率的要求。输出电流受电网电压、电弧电压波动影响要小。用于等离子喷涂的电源有磁放大器式硅整流电源、晶闸管整流电源和直流发电机电源三种 ,其各自特点如下 :

(1) 磁放大器式硅整流电源。磁放大器式硅整流电源 ,是目前国内等离子喷涂行业使用很广泛的一种电源 ,具有结构简单、使用可靠、电流调节方便等特点。表 7 - 4 是几种等离子喷涂电源的主要技术参数。

表 7 - 4    几种等离子喷涂电源的主要技术参数

参 数	型    号			
	GDP - 2	GDP - 80	DH1080	PS - 61S
空载电压 / V	170	165	—	80 / 160
额定工作电流 / A	500	1000	1000	500 / 1000
电流调节范围 / A	150 ~ 600	100 ~ 1000	0 ~ 1000	
工作电压范围 / V	50 ~ 110	40 ~ 80	30 ~ 85	≤40 / ≤80
额定输出功率 / kW	50	80	80	40
额定暂载率 / %	100	100	100	100
生产厂	九江等离子喷涂厂	625 研究所	上海瑞法喷涂机械有限公司	Piasmadyne

(2) 晶闸管整流电源。晶闸管整流电源的陡降外特性是通过电流负反馈调节系统来实现的。这种电源具有起弧平稳、输出电流稳定、耗电少等特点。和磁放大器式硅整流电源相比 ,省去了磁饱和电抗器 ,节省了大量的硅钢片和钢材 ,使整个电源具有体积小、重量轻、效率高、成本低等优点。

2. 主电路及高频引弧装置

(1) 主电路。指通过电弧电流的主回路 ,如图 7 - 5 所示。

由于喷涂时所使用的工作电流较大 ,一般在电源的输入侧加接触器 ,通过启动和断开电源来控制主电路的通断。但也有的设备是在电源输出侧加接触器控制主电路的通断。

(2) 高频发生器。在主电路里连接的高频发生器 ,如图 7 - 6 所示。

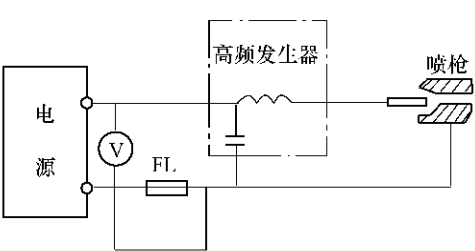


图 7 - 5 主电路原理图

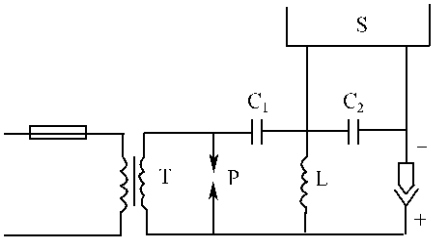


图 7 - 6 高频发生器原理图

T—高漏抗变压器 ;C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>—电容 ;L- 电感线圈 ;  
P—火花放电器 ;S—主电源。

当主电路接通后 ,高频发生器接电 ,高漏抗变压器 T 将 220V 或 380V 交流电压升到 2500V ~ 3500V ,由 C<sub>1</sub> L 和火花间隙 P 形成放电回路 ,L、C<sub>1</sub> 和喷枪阴极与喷嘴间隙之间也形成放电回路 ,由于高频高压电的作用 ,在阴极与喷嘴之间击穿产生高频火花放电 ,从而引燃电弧。

### 7.2.2.2 电气控制系统

电气控制系统应能对水路、气路、电路、高频发生器、送粉器等进行控制 ,使各个部件的动作按喷涂工艺要求的程序进行。图 7 - 7 为普通等离子喷涂工艺动作程序。

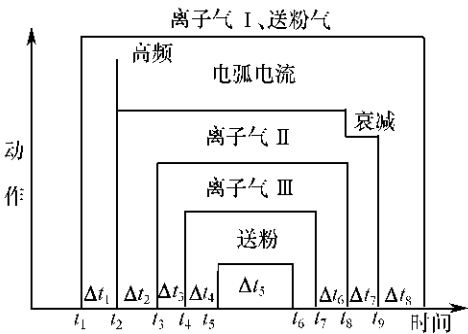


图 7 - 7 等离子喷涂工艺动作时序图

目前的等离子喷涂系统已大多采用自动控制。实现自动控制的方式有继电器接触器式、矩阵顺序控制器式、PLC 可编程序控制器式、工业控制计算机式。

以上几种程序自动控制方式的比较见表 7 - 5。

表 7 - 5 几种程序自动控制方式的比较

控制方式	优 点	缺 点
继电器、接触器式	结构简单、经济实用、容易维护、抗干扰能力强	机械触点多,稳定性和可靠性较差,程序固定,控制器件及连线多
矩阵顺序控制器式	成本较低、可靠性好、抗干扰性能好、维修方便、更改程序较方便。是国产设备的主流选择方式	元件集成度低
PLC 可编程序控制器式	元器件集成度较高,连线和触点较少,可靠性好。抗干扰能力强,修改程序很方便。价格适中,目前国内部分产品已开始使用	
工业控制计算机式	元器件集成度高、连线及触点少、可靠性好、抗干扰能力强、程序改变很方便。可对主要工艺参数进行控制,能将典型工艺参数进行存储,工艺再现性好,控制精度高	系统维护要求高,价格昂贵

### 7.2.2.3 供气和冷却系统

#### 1. 供气系统

通常供喷涂用的等离子工作气体有 Ar、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、送粉气。因此控制台一般要有这几种气体的控制和调节装置,如图 7-8 所示。瓶装气体由减压阀将压力调到合适的数值,一般为 0.3MPa ~ 0.6MPa。气体流量的调节一般由调节阀和转子流量计来调节和检测,也有的已采用板孔流量调节方式(如美国 Pwsmadsle-3600 系统)。

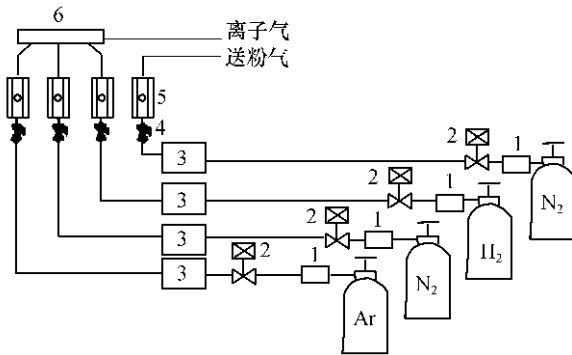


图 7-8 供气系统原理图

;2—电磁气阀;3—储气包;4—调节阀;5—转子流量计;6—混合气包。

#### 2. 冷却系统

为了保证喷枪正常运行,必须对喷枪进行强制冷却。完善的供水系统由增压水泵和热交换器组成。用增压水泵使供给喷枪的冷却水压不低于 0.8MPa,流量

低于 8kg/min。用热交换器 ,使喷枪的出水温度低于 45 。

#### 7.2.2.4 等离子喷涂枪

等离子喷涂枪也就是等离子弧发生器。它汇集水、电、气、粉于一体。等离子喷涂枪是等离子喷涂系统的核心部件 ,其结构和性能的好坏直接影响到工艺过程的稳定和涂层质量的好坏。

##### 1. 对等离子喷涂枪的基本要求

从使用性能考虑 ,应满足 :能产生稳定、纯净、能量集中的等离子弧 ;有较高的热效率 ,喷嘴和电极使用寿命长。

从结构性能考虑 ,应满足 :气密性、水密性好 ,使用时不漏水、漏气 ;电极与喷嘴孔道同心度好 ;正、负电极之间(阴极与喷嘴)绝缘可靠 ,能承受 5000V 以上高压 ;整体结构紧凑 ,体积小、重量轻。阴极和喷嘴的更换、调整方便。

##### 2. 喷枪的基本结构

普通等离子喷涂枪一般由三部分组成(如图 7 - 9(a)、(b)所示) :前枪体、后枪体和绝缘体。前后枪体均用黄铜制成 ,前枪体用于安装喷嘴 ,后枪体用于安装阴极 ,绝缘体由玻璃纤维绝缘棒等绝缘材料制成 ,用于连接前后枪体并起绝缘作用。78W2 型等离子喷枪枪体则采用整体结构(如图 7 - 9(c)所示)。



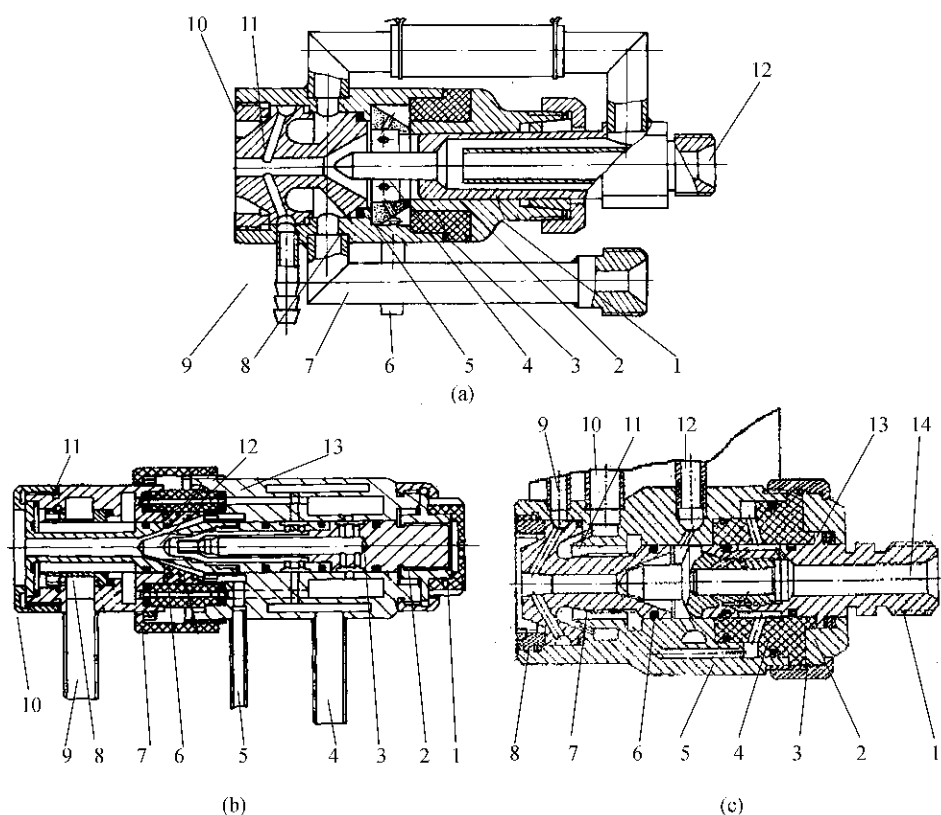


图 7-9 等离子喷枪结构示意图

- (a) 1—后枪体；2—钨极夹头；3—绝缘套；4—钨极；5—隔热均气环；6—离子气管；  
7—进水管；8—前枪体；9—送粉管；10—喷嘴压母；11—喷嘴；12—出水口。
- (b) 1—压帽；2—调节螺母；3—阴极杆；4—出水管；5—离子气管；6—隔热环；7—绝缘体；  
8—喷嘴；9—进水管；10—喷嘴压盖；11—前枪体；12—阴极头；13—后枪体。
- (c) 1—阴极体；2—绝缘压帽；3—后压帽；4—绝缘体；5—枪体；6—阴极头；  
7—喷嘴；8—喷嘴压母；9—送粉管；10—进水管；11—导流器；  
12—离子气管；13—调整垫片；14—出水口。

前后枪体分别通过水冷电缆接电源的正、负极，冷却水从前枪体引进由后枪体排出。前后枪体之间的水路有两种联通方式：一种是枪外走水方式，如图 7-9(a)所示，其联结管设计在枪体外，结构简单，不影响枪体的密封性能，但影响美观；另一种是枪内走水，如图 7-9(b)、(c)所示，其联结管设计在枪体内，结构复杂，增加了枪体密封的复杂性，但结构紧凑，外形美观，是喷枪中最常用的形式。

图 7 - 9(c)是 78W2 型喷涂枪的结构图 ,具有结构简单、紧凑、喷嘴的冷却巧妙等特点。采用枪内送粉方式 ,提高了粉末加热热效率和加热的均匀性 ,有利于圆锥状喷射轨迹的形成。既可大幅度减少粉末耗用量 ,又可延长电极的使用寿命 ,从而能够获得降低成本的效果 ,该喷枪具有下列特点 :

体积小、重量轻、使用及维修方便 ;采用高工作电压运行方案 ;采用内送粉方式 ,粉末沉积效率高 ,涂层质量好 ,喷嘴、电极使用寿命长 ,焰流速度高。

3. 阴极

阴极设计或选择应考虑其材料、形状和尺寸、冷却方式等。

阴极材料的选择 :阴极材料应具有熔点高、蒸发低、电子发射能力强、许用电流大、引弧和稳弧性能好等特性 ,这是因为弧电流集中流过阴极斑点 ,电流密度高达  $10^3\text{ A/cm}^2 \sim 10^6\text{ A/cm}^2$  ,局部热负荷相当高 ,阴极的烧损直接影响阴极的使用寿命和工艺的稳定性。

过去常用钍钨极(含氧化钍 1.5% ~ 2% ) ,近几年来多用铈钨极(含氧化铈 2% ~ 3% )代替钍钨极。用铈钨作阴极时有下列优点 :在电流密度很小的情况下 ,起弧电流较钍钨极低 ,等离子弧的稳定性好 ;在采用相同规范参数时 ,铈钨极的烧损较钍钨极小 ,铈钨极所产生的放射性剂量要比钍钨极少得多 ,减少了对人体的危害。

阴极形状和尺寸的选择 :阴极头部的直径选择应以阴极的温度低于材料的熔点为原则。在喷枪的最大工作电流确定后 ,电极直径愈大 ,其电流密度愈小 ,电极的温度就愈低。因此 ,电极直径愈大愈有利。此外 ,电极的直径还与阴极的冷却情况、阴极斑点的运动情况等有关 ,目前还只能根据经验选择。表 7 - 6 列出一些实践数据 ,电流密度不得超过  $20\text{ A/mm}^2$ 。

表 7 - 6 阴极直径与最大工作电流的关系

电极直径/mm	$\phi 4$	$\phi 5$	$\phi 6$	$\phi 8$
最大工作电流/A	250	360	450	600

阴极端部的几何形状和尺寸 ,对等离子焰流的稳定性影响很大。头部太尖的阴极有利于起弧 ,但易于烧损 ;头部太钝会引起阴极斑点的跳动而造成电弧的不稳定。通常采用的形状如图 7 - 10 所示。阴极端部的锥角  $\beta$  应适当小于喷嘴压缩角  $\alpha$  (见图 7 - 13)。当  $\alpha = 60^\circ$  时  $\beta = 30^\circ \sim 50^\circ$  较为适宜。阴极端部锥面与喷嘴压缩角锥面应有适当间隙 ,一般在 1mm 左右。

等离子喷枪的阴极通常是棒状 ,固定于后枪体中 ,受到强烈冷却。由于钨极的电极会强烈发热 ,因此大功率喷枪的钨极长度应该短些。通常是将很短的钨

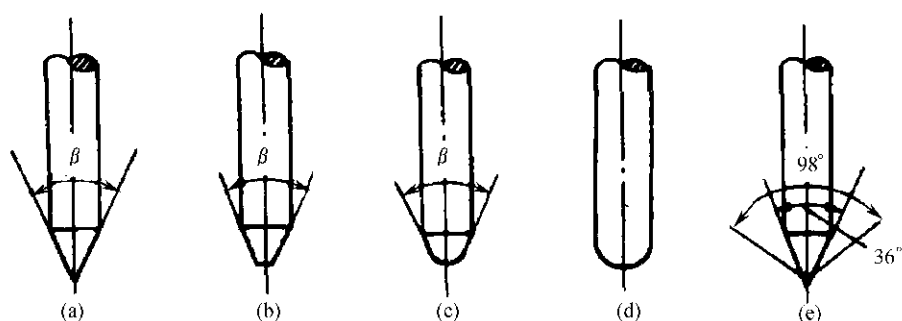


图 7 - 10 电极端部的几何形状

(a) 尖形 ; (b) 圆台形 ; (c) 圆锥圆球形 ; (d) 圆球形 ; (e) 尖角形。

极钎焊在水冷的铜座上 , 可以大大延长钨极的使用寿命。阴极的冷却方式有间接冷却 (如图 7 - 11) 和直接冷却 (如图 7 - 12) 两种。

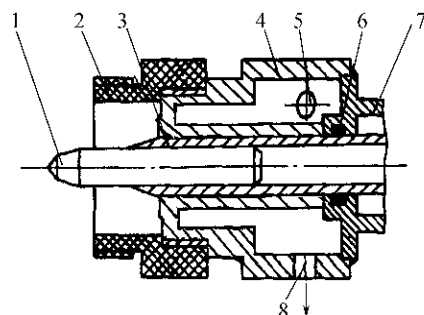


图 7 - 11 等离子喷枪中阴极间接冷却方式

阴极杆 ; 4—隔套 ; 5—进水孔 ; 6—密封圈 ; 7—后枪体组件 ; 8—出水孔。

直接冷却的结构复杂 , 但冷却的效果好 , 间接冷却的结构简单 , 阴极调节、更换方便 , 但冷却的效果较差。

#### 4. 喷嘴

喷嘴是等离子喷枪中最关键的部件 , 等离子弧的性质很大程度上取决于喷嘴的几何尺寸参数。喷嘴几何尺寸与冷却方式合理与否 , 对喷枪工作的稳定性、喷涂工艺规范的选择和喷枪的使用寿命有很大影响。

温度很高的弧柱通过喷嘴内壁喷出 , 因此喷嘴内壁将要接受大量的热量。为了不使喷嘴过热及熔化 , 需要用高导热率的紫铜制造 , 并要用水流直接强迫冷却。

各种喷枪都配有多种规格的喷嘴 , 这些喷嘴主要是喷嘴孔径、压缩角、压缩

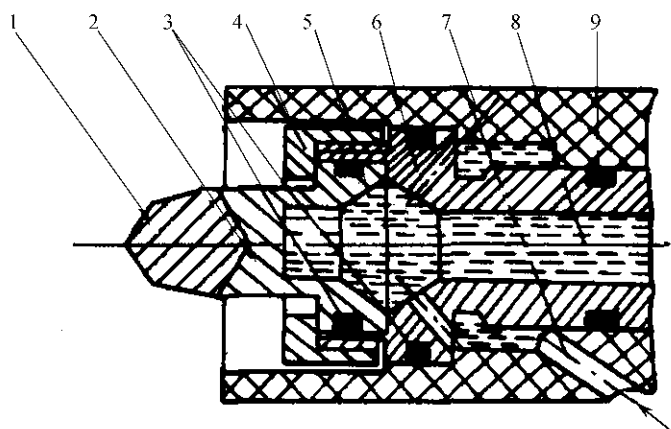


图 7 - 12 7MB 等离子喷枪中阴极直接冷却方式

1—阴极；2—阴极座；3—密封圈；4—拼帽；5—绝缘体；6—隔套；  
7—进水孔；8—出水方向；9—密封圈。

比以及进气方式不同,以适应不同气体、不同涂层致密度的要求,见图 7 - 13。

设计喷嘴时应特别考虑以下各点：

(1) 压缩孔道长度  $L$ 。为使焰流充分压缩及难熔粉末在通过喷嘴的瞬间良好熔化，孔道长度  $L$  一般在 20mm ~ 30mm 左右。

(2) 压缩角  $\alpha$ 。压缩角的大小直接影响等离子弧的压缩程度和刚性。过去  $\alpha$  角一般为  $60^\circ$  左右,近年来改进使  $\alpha$  角比较小。如 PQ - 77A 型喷枪中喷嘴压缩角为  $40^\circ \sim 30^\circ$ 。美国 Metco 公司生产的 7MB 型喷枪的喷嘴压缩角约为  $26^\circ$  左右。

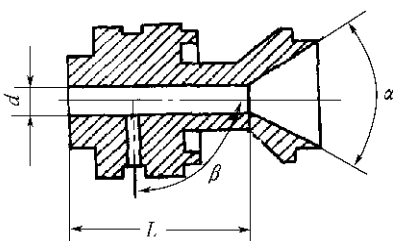


图 7 - 13 喷嘴的主要尺寸示意图

(3) 压缩孔道直径  $d$ 。一般为 5.5mm ~ 6.0mm。

(4) 压缩孔道与送粉孔间夹角  $\beta$ 。一般在  $45^\circ \sim 90^\circ$ 。

在设计喷嘴时要考虑氮气喷嘴的孔径比氩气喷嘴大一些,而且氮气喷嘴的压缩比又比氩气喷嘴小,氮气喷嘴通常用直流进气方式,而氩气喷嘴常用切向进气方式。

#### 7.2.2.5 送粉器

送粉器是储存喷涂粉末,并能按工艺要求定量、均匀而连续地向喷枪输送粉末的装置,等离子喷涂过程能否顺利进行与送粉器的性能有密切关系。对送粉

器的主要技术要求是送粉量准确度高、送粉量调节方便、对粉末粒度适应范围广。送粉器在满足这些要求的前提下,应力求结构简单可靠。

喷涂用的粉末,大体上分为自流态粉末和非自流态粉末,很难由一种送粉器同时输送各种类型的粉末。等离子喷涂用送粉器主要有以下几种:

(1) 刮板式送粉器。刮板式送粉器如图 7-14 所示,该送粉器适于粒度 200 目~350 目范围的各种球形粉末,通过调整漏嘴与粉盘距离以及改变粉盘转速或更换不同孔径的漏嘴来控制送粉量,该装置调节精度较高、范围宽。为了保

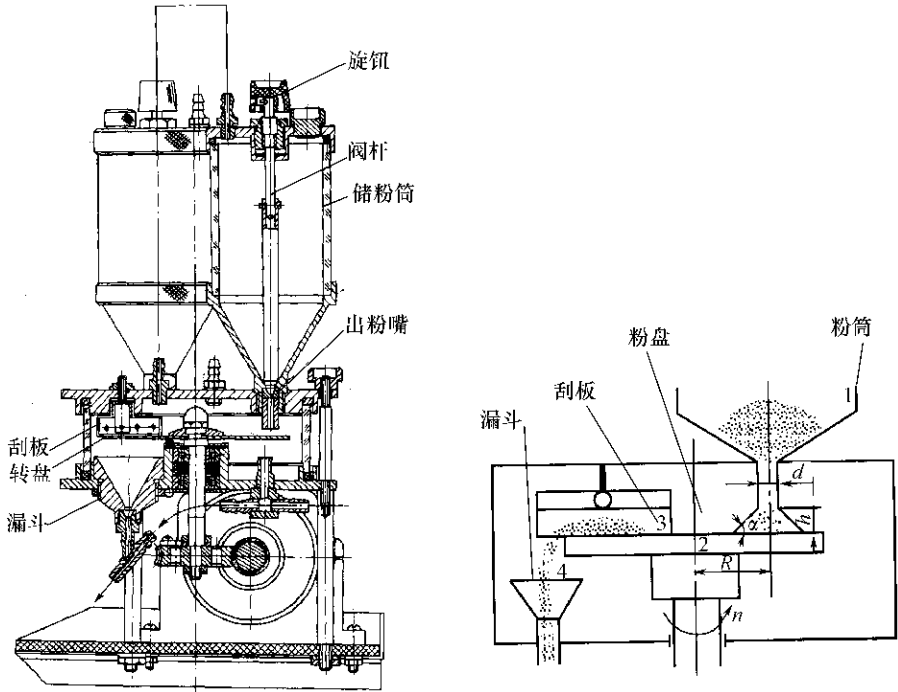


图 7-14 刮板式送粉器

证压力平衡,送粉器各零部件连接处均采用橡胶垫密封。该送粉器最多有三个储粉筒,可同时装三种不同的粉末材料,在喷涂过程中,可根据工艺需要随时选用其中任何一种,更换方便。其送粉速率可通过下式计算:

$$Q_m = 2\pi Rh(h\cos\alpha + d)cn \times 10^{-3}$$

式中  $d$  为粉筒漏孔直径(mm)  $h$  为漏孔端面距粉盘高度(mm)  $R$  为漏孔中心与粉盘中心的距离(mm)  $\alpha$  为粉末自然堆积角( $^\circ$ )  $c$  为粉末的松装密度( $g/cm^3$ )  $n$  为粉盘转速(r/min)。

(2) 沸腾床式送粉器。沸腾床式送粉器原理如图 7 - 15 所示 ,它是在粉罐上部通入送粉气 ,对罐内粉体施加一定气压 ,同时送粉气(沸腾气)通过粉罐底部安装的多孔板 ,从粉体下部进入粉罐 ,从而使气体与粉末充分混合 ,形成流态化的“沸腾床” ,利用载气喷射形成的负压 ,将“沸腾床”中粉末裹吸入喷气管中 ,喷气管与喷枪连接 ,实现送粉作业。在粉罐底部还用振荡空气推动一个振动杆使底部产生振荡 ,促进粉末疏松下落。

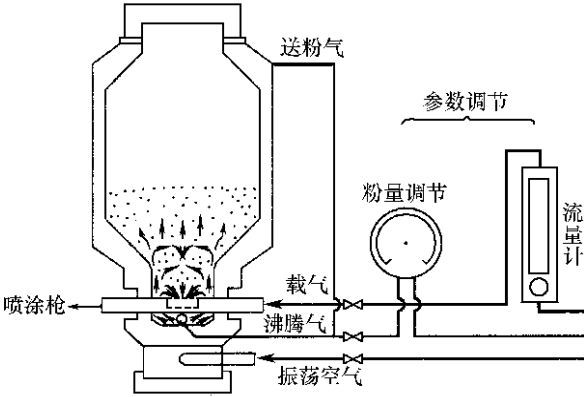
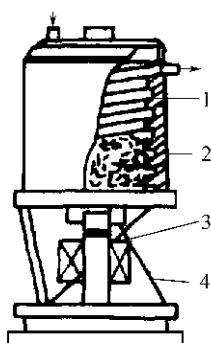


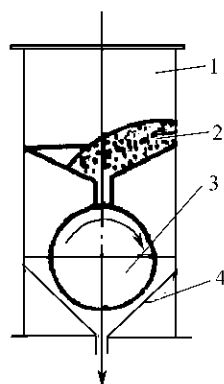
图 7 - 15 DZ - 1195“沸腾床”式送粉器原理图

(3) 电磁振动式送粉器。电磁振动式送粉器如图 7 - 16 所示 ,它是一种较新型的送粉器 ,在储粉料斗的壁上开有螺旋槽 ,当电磁振动器接通电源产生振动时 ,料斗中粉末沿螺旋槽向上源源不断地运动 ,并从位于料斗上部的出口流出 ,再由送粉气将粉末送入喷枪。送粉量决定于电磁振动器的输入电压 ,调节振动电压能非常精确和平滑地连续改变送粉量。这样就比较容易对送粉进行程序自动控制。其不足之处是不适用于送密度不同和颗粒度相异的混合物。

(4) 鼓轮式送粉器。鼓轮式送粉器如图 7 - 17 所示。粉末由储存粉斗经漏孔流至鼓轮上。调整好漏孔的直径和距离鼓轮的间隙 ,使得在鼓轮不转动时 ,粉末不会自动流下。而当鼓轮一转动 ,粉末便随着鼓轮的转动方向流至出口口。送粉量决定于鼓轮的转速 ,只要调节鼓轮的转速就能精确控制送粉量 ,而且送粉比较均匀。其最大的优点是适用于混合粉的输送 ,不会造成或增加不同密度和颗粒度粉末的分层 ,减少涂层成分的偏析。



6 电磁振动式送粉器示意图  
2—粉末 ;3—振动器 ;4—弹簧片。



- 17 鼓轮式送粉器示意图  
筒 ;2—粉末 ;3—鼓轮 ;4—漏斗。

### 7.2.3 普通等离子喷涂工艺

普通等离子喷涂的涂层质量 ,不仅取决于喷涂设备和喷涂材料的质量 ,还取决于所采用的喷涂工艺。合理选择等离子喷涂工艺是确保涂层质量的重要措施之一。

基体表面准备参见第三章 ,本章只介绍普通等离子喷涂特殊的喷涂工艺。

普通等离子喷涂工艺的可变参数很多 ,这些参数都会影响到涂层质量 ,如图 7 - 18 所示。

等离子喷涂的主要工艺参数在 7.1.5 节已有说明 ,这里只介绍普通等离子喷涂工艺参数的具体选择方法和选择范围。

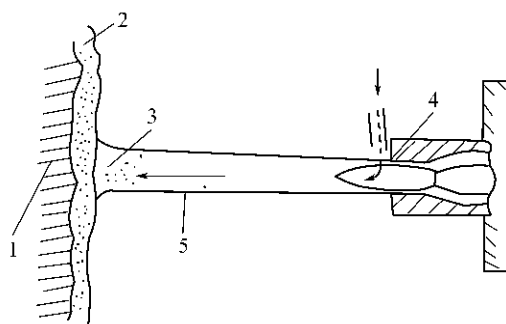


图 7 - 18 等离子喷涂过程的重要参数

1—工件(温度、应力控制、冷却速度); 2—涂层; 3—粉末(粉粒形状和粒度分布、成分均匀性,在等离子射流中停留时间、送粉位置、送粉气流); 4—等离子喷枪(喷枪与工件相对运动、喷枪至工件距离);  
—等离子体射流(气体成分、热焓、温度、速度、环境气氛)。

### 7.2.3.1 喷涂距离

普通等离子喷涂距离与喷涂效率的关系见图 7 - 19。

合适的喷涂距离可用观察喷涂微粒的变形情况来确定(如图 7 - 20 所示)。此法是将玻璃片或经过抛光的钢板放在喷枪出口不同距离上接喷涂粉末,然后在低倍显微镜下观察其熔化情况。在玻璃片上所看到的呈圆形的粉末,只是熔化不良的粉末,未熔粉末不会粘在上面。

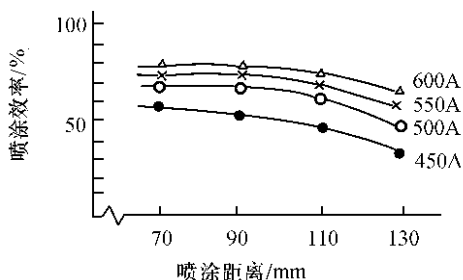


图 7 - 19 喷涂距离与喷涂效率的关系

实验条件 电压 26V ~ 28V ;工作气体(Ar)流量 :  
1.8m<sup>3</sup>/h ;工件移动速度 50cm/s ~ 80cm/s ;  
喷涂材料 :Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 送粉速度 7g/min ~ 10g/min。



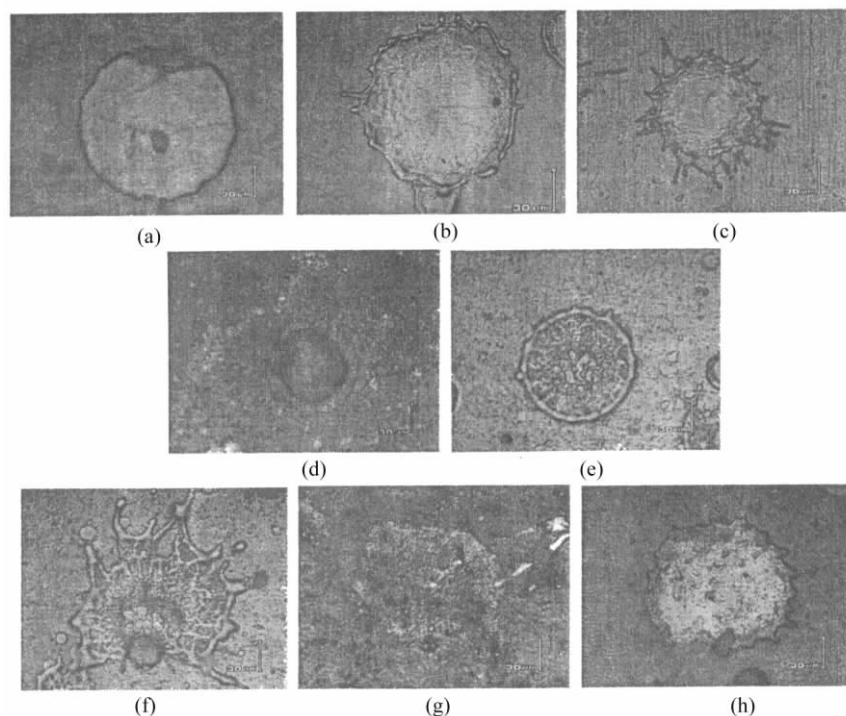


图 7 - 20 粒子与基体碰撞后各种变形形态

(a) 圆盘扁平粒子 ;(b) 圆环扁平粒子 ;(c) 扁平飞溅粒子 ;(d) 嵌入基体粒子 ;  
(e) 薄膜圆环粒子 ;(f) 薄膜飞溅粒子 ;(g) 基体反弹粒子 ;(h) 反应终止粒子。

### 7. 2. 3. 2 主气及送粉气

普通等离子喷涂时常用的主气流量为  $2\text{m}^3/\text{h}$  左右。

送粉气的流量一定要与主气流量相适应 , 避免出现相互干扰的现象 , 若两者之间匹配不当 , 将会造成喷嘴堵塞 , 严重时烧坏喷嘴的阴极 , 一般送粉气体的流量为  $0.6\text{m}^3/\text{h} \sim 0.8\text{m}^3/\text{h}$ 。

### 7. 2. 4 普通等离子喷涂应用实例

#### 1. 等离子喷涂在机械零件修复中的应用

##### 1) 喷涂耐磨涂层

(1) 在重载履带车辆零件修复中 , 对密封环配合面选用  $\text{FeO}_4$  粉末 , 轴承配合面选用  $\text{FeO}_3$  粉末 , 衬套配合面选用  $\text{FeO}_4$  和  $\text{Ni}/\text{Al}$  粉末。用等离子喷涂方法修复 , 经 12000km 的实车考核 , 效果很好。重载履带车辆的变速箱和齿轮传动箱体 ( 铝

合金部件)使用后常发生结合平面漏油以及各轴承配合面磨损等情况,用其它方法修复困难,而采用等离子喷涂 Ni/Al 粉,简单可靠,实车考核效果良好。

(2) 石油取芯钻头喷涂耐磨涂层。取芯钻头是油田开采的关键工具。在地质复杂、岩层坚硬的深井中,使用进口的人造金刚石钻头,钻到地面 2700m 以下时,由于基体磨损,导致金刚石颗粒脱落。采用等离子喷涂工艺,在取芯钻头上喷涂镍包铝和钴包碳化钨复合涂层,既增加了人造金刚石颗粒在钻头上的结合强度,又提高了钻头基体的抗磨性能,使金刚石颗粒能更有效地发挥作用,从而节省了大量人造金刚石。

(3) 在机床修理中的应用。机床导轨的耐磨性及尺寸精度是影响机床使用寿命和精度的主要因素之一。一般机床导轨由铸铁制造,其硬度和耐磨性较低。因此在机床修理工作中,导轨的修理占 50% ~ 90%。采用等离子喷涂技术,不仅可以有效地修复导轨的局部磨损部位,而且在生产导轨上应用,可以提高它的耐磨性,延长机床的使用寿命。

哈尔滨电机厂大型车床导轨磨损 0.3mm,采用等离子喷涂工艺,喷涂 Ni/Al 加铁基金属涂层,喷后磨削,粗糙度为  $R_a 1.60 \mu\text{m}$ ,使用效果良好。

## 2) 喷涂耐腐蚀涂层

$6 \times 10^5 \text{ kW}$  汽轮发电机大轴过水表面喷涂耐腐蚀涂层。发电机大轴过水表面常受到 80℃ 热水以 7m/s 速度的冲刷腐蚀,需要喷涂防水冲蚀的涂层,以确保在两年以上的长期运行过程中轴不锈蚀、涂层不脱落,同时能保证水冷却系统的水质洁净,不引起冷却效果下降或堵塞等故障。这是  $6 \times 10^5 \text{ kW}$  汽轮发电机组的关键问题之一。哈尔滨电机厂、哈尔滨电机研究所对 48 种防水冲蚀涂层材料(包括油漆、电镀、塑料、搪瓷、橡胶、热喷涂涂层等)进行了模拟工况选材试验。试验结果表明,采用等离子喷涂 Ni/Al 防腐涂层,性能完全满足要求,防水冲蚀较理想。

## 3) 喷涂耐高温涂层

(1) 高炉渣口喷涂耐热涂层。渣口是高炉放渣的重要装置,在高炉冶炼过程中渣量大,放渣频繁。渣口由铜质水冷套组成。在放渣时,渣口受到高温碱性炉渣、渣中夹带的铁水及高炉煤气的高温浸蚀、腐蚀和冲刷,很容易破损,因此,高炉渣口的寿命是高炉冶炼中的关键问题之一。采用等离子喷涂工艺,在渣口易破损的前端轴向 30mm 范围内喷涂耐热复合涂层(金属 + 金属陶瓷 + 陶瓷),经在冶炼生产中使用考核,其寿命比未喷涂的渣口提高 3 倍以上,经济效益十分显著。

(2) 多晶硅还原炉喷涂防扩散耐热涂层。多晶硅还原炉内壁采用耐热不锈钢板制成,在多晶硅还原温度下,由于不锈钢中所含元素的微量污染,影响硅晶

体的成品率和硅元件的质量。国外采用昂贵的水晶钟保护多晶硅晶体还原,价值高达几十万美元。

上海喷涂机械厂和上海电子器材厂合作,在不锈钢内壁上采用等离子喷涂纯硅涂层,有效地防止了不锈钢内元素的扩散污染,使多晶硅产品的纯度提高了一个数量级。

(3) 在航空工业生产和修理中的应用。湘江机器厂对专用发动机的 I、II、III 级涡轮叶片采用等离子喷涂 50% Ni - Cr - B - Si, 50% TiC, 厚为 0.1mm 的涂层。经生产 20 台发动机约 6 万片叶片装机飞行,证明使用效果良好,该厂已在设计图纸上正式规定使用该涂层。

在压力燃烧室内壁用 Ni/Al 打底,表面喷涂  $Al_2O_3$ , 抗高温腐蚀和隔热效果很好。飞机机尾罩采用等离子喷涂  $Al_2O_3$ , 防止了机尾罩由于高温气流冲刷造成的龟裂现象。

## 2. 等离子喷涂修复典型零件工艺

### 1) 等离子喷涂修复重载履带车辆零件工艺

重载履带车辆上的密封环配合面、自压油挡配合面、轴承内外圈配合面、衬套滑动配合面、箱体支撑面等零件,经等离子喷涂修复后,通过实车考核试验,证明能满足工作条件要求。开始时有 95.9% 的修复件没有发生涂层脱落,有 4.1% 的修复件由于工艺控制不够严格(例如零件油污清洗不净),出现涂层局部脱落现象,在改进工艺后完全得到克服。比较难喷涂的钢质零件内圆表面,没有一件发生涂层脱落,说明涂层与基体的结合是可靠的。

### 2) 喷涂工艺条件

(1) 采用 PQ - 77A 型等离子喷枪,类同 GDP - 500 - 1 型的 40kW 硅整流电源,3GP - 1 型三料斗刮板式送粉器。在水冷却系统中增加了进出口水温表和流量计,并固定出水流量为  $0.5m^3/h$ 。

(2) 喷涂材料选用来源方便、价格便宜的耐磨粉末 NiO<sub>1</sub>、FeO<sub>3</sub>、FeO<sub>4</sub>、WF<sub>311</sub>、WF<sub>315</sub>、粉 115Fe。应用时都以 Ni/Al(NBL7501)粉打底,并相应固定各种粉末的送粉量。粒度范围按粉末厂提供的范围,必要时再次过筛。

(3) 采取焓值高、各修理单位容易买到的纯氮气为喷涂用气体,氮气纯度不小于 99.9%,不加入氢气。固定主气流量为  $2m^3/h$ ,送粉气流量为  $0.6m^3/h \sim 0.8m^3/h$ 。在气路中安装了 QFH - 2B 型空气过滤减压阀,保证了气体流量的稳定性。

(4) 对除油后的待喷表面进行喷砂预处理。压缩空气经过严格过滤,气压为 0.5MPa ~ 0.6MPa,供气量为  $0.6m^3/min \sim 0.9m^3/min$ ,采用射吸式喷砂枪,出砂孔 69mm,喷砂距离 100mm,砂粒为 20<sup>#</sup>及 24<sup>#</sup>白刚玉,喷砂后试件用压缩空气

吹净,并在 2h 内进行喷涂。

(5) 喷涂距离视粉末种类而定, Ni/Al 粉取 120mm ~ 130mm, 其余粉末 100mm ~ 110mm。

## 7.3 低压等离子喷涂

低压等离子喷涂(Low Pressure Plasma Spraying, LPPS)又称真空等离子喷涂(VPS)是将等离子喷涂工艺在低压保护性气氛中进行操作,从而获得成分不受污染、结合强度高、涂层致密的一种工艺方法。到 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始在工业上推广应用。

### 7.3.1 低压等离子喷涂特点

低压等离子喷涂是将等离子喷枪、工件及其运转机械置于低真空或选定的可控气氛的密闭室里,在室外控制喷涂过程,通过真空和过滤系统,保持真空室一定的真空度。当等离子射流进入低真空环境时,其形态和特性都将发生变化,主要特点如下:

(1) 等离子射流束长,粒子受热充分。由于真空的作用,等离子射流在真空中飞行阻力大大减小,从而拉长了等离子射束的长度,从常压下弧束长度约 4cm ~ 5cm 拉长到 40cm ~ 50cm,使粉末颗粒在弧束中的停留时间显著增加,有利于粉末颗粒的充分受热和熔化,使喷涂颗粒具有高的热能。

(2) 粒子速度高。由于真空室的压力低,等离子气流的速度可以增加至马赫数  $Ma = 2 \sim 3$ ,且粉末颗粒在低压室中的飞行阻力大大减小,所以粉末颗粒的飞行速度高,具有很高的动能。

(3) 金属粒子几乎无氧化。由于真空室中含氧量低,特别是充入高纯度惰性气体后,含氧量非常低,因此,在低压室中喷涂的涂层基本不含氧化物夹杂,涂层清洁,使涂层颗粒之间的粘结强度大大提高,涂层致密。真空(低压)或惰性气体等离子喷涂主要用于喷涂含易氧化组分的高温合金(如  $MCrAlY$ )、易燃烧金属(Mg、Ti、Li、Na 和 Zr 等)、有毒性金属(如 Be 及其合金)以及易氧化的碳化物类金属陶瓷材料。

(4) 基体预热温度高。由于真空和惰性气体的双重保护作用,工件基体在不发生变形或组织变化的情况下,可以允许较高的预热温度。这样,一是可以使涂层颗粒与基体的温差减小,减慢涂层的冷却速度,从而减小热应力,使涂层不易产生裂纹;二是使熔融颗粒喷射到工件表面时,能充分地变形、润湿铺展、排除

气体,形成致密涂层,使涂层气孔率低于1%;三是使基体表面处于更好的活化状态,有利于提高涂层与基体的结合强度。

(5) 可进行自净化表面预处理。真空等离子喷涂前,通过自动控制系统,采用反基极等离子转移弧起弧,即起弧时将工件基体接电源负极,使电子从工件表面逸出,形成清洁、活化的表面。这样,工件不需机械粗化或喷砂处理,就能与喷涂熔滴达到良好的结合状态。

(6) 喷涂距离对涂层性能的影响小。由于真空等离子喷涂时射束很长,飞行粒子处于高热能和动能状态的时间长,因而喷嘴口与基体之间喷距的一些变化对涂层性能的影响很小,这使得真空等离子喷涂很适合于喷涂复杂形状、曲面工件(如喷涂燃气轮机叶片),可获得均匀的优质涂层。

(7) 沉积速率高。真空等离子喷涂涂层的质量完全可以与电子束—物理气相沉积(EB-PVD)涂层相比,但其沉积速度更快,为后者的2个~3个数量级。例如,在 $25.6\text{cm}^2$ 的透平机叶片上,真空等离子喷涂 $5\mu\text{m}\sim 40\mu\text{m}$ 的CoCrAlY涂层,只需30s就能喷涂到0.13mm厚,而物理气相沉积的沉积速率为 $4\mu\text{m}/\text{min}\sim 50\mu\text{m}/\text{min}$ 。

(8) 涂层性能优异。真空等离子喷涂涂层结合强度高,涂层致密,气孔率极低,无氧化物夹杂,涂层应力小、硬度高、韧性好,具有优异的综合性能。

(9) 操作条件好。真空室中喷涂,高噪声被隔离,粉尘被密闭处理,操作条件好。

真空等离子喷涂的主要缺点如下:

(1) 设备昂贵,一次性投资高。一台全自动的真空等离子喷涂设备售价高达100万美元,因此,它主要用于宇航等尖端工业的关键部件喷涂,如燃气轮机部件、火箭喷管等。

(2) 工件尺寸受真空室限制。

(3) 低气压等离子射流的加热效率降低,热焓值较低,不易喷涂高熔点材料。

### 7.3.2 低压等离子喷涂设备

典型的低压等离子喷涂设备(如图7-21和图7-22所示),实物如图7-23所示,主要包括护套式水冷真空室、等离子喷枪、工件调控装置、抽真空排气除尘装置、手套密封式操作孔、惰性气体管路等。

(1) 真空室。它是保证在低压条件下进行等离子喷涂的装置,要求有极好的密封性能。为了防止连续喷涂过程中真空室的过热,设计有双层水冷壁,同时要有1.3Pa的气密性。待喷的工件和喷完的工件可以自动送入和移出真空室,

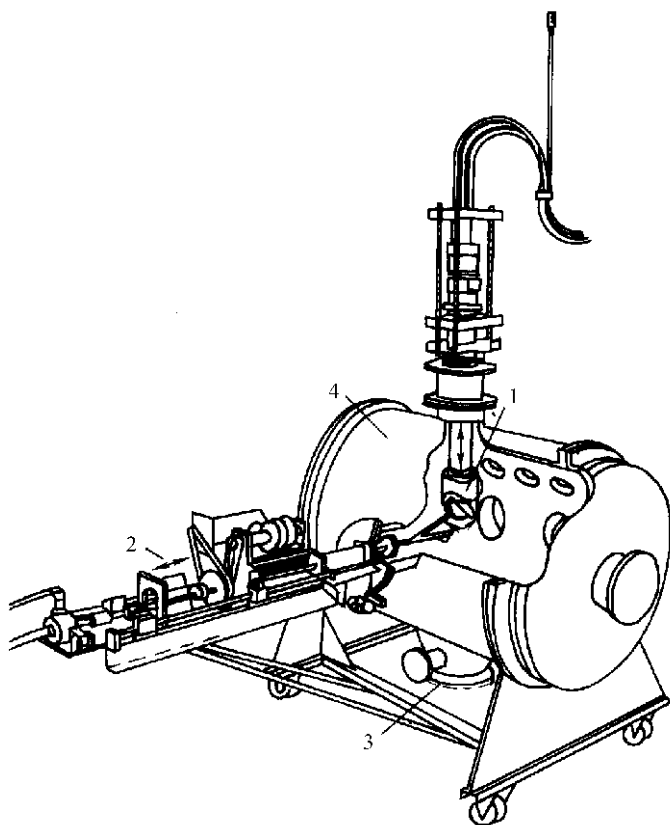


图 7 - 21 低压等离子喷涂设备

1—等离子喷枪；2—工件调控装置；3—抽真空排气除尘装置；4—真空室。

并装有工件的真空闭锁装置。

(2) 等离子喷枪。低压等离子喷涂枪的基本工作原理和结构与普通等离子喷涂枪很相似。区别之处在于,低压等离子喷涂枪都装有特殊的拉瓦尔(Laval)喷嘴,能得到超声速的粒子喷射速度。如:德国 DFVLR(航空航天研究院)的低压等离子喷枪,就是为终端压力约  $266\text{Pa} \sim 665\text{Pa}$  和马赫数  $\text{Ma} = 3$  而设计的,其等离子束长度约为  $400\text{mm}$ 。在喷嘴内的不同位置,主要是在两个区域安排了几个送粉口,如图 7 - 24 所示。

(3) 等离子喷枪机械手和工件操纵台。针对低压工作条件,均经密封以防灰尘,具有六个自由度,很容易喷涂复杂形状的零件。如图 7 - 25 所示。

(4) 计算机控制操纵系统。采用计算机控制低压等离子喷涂全过程。VPS

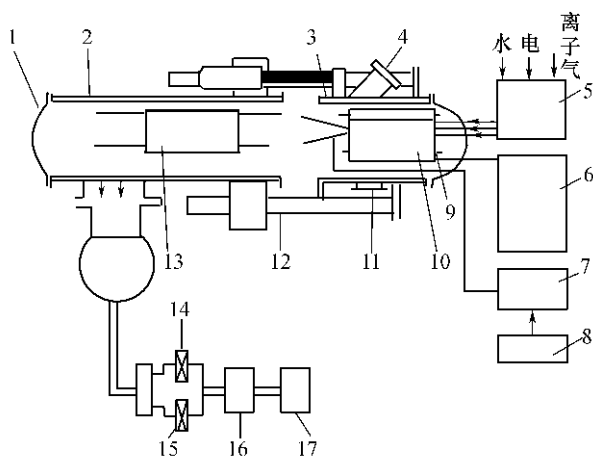


图 7 - 22 低压等离子喷涂成套设备组成示意图

固定室；3—可动腔体；4—观察窗；5—等离子控制屏；6—等离子弧喷枪行走控制屏；末输送装置；9—等离子喷枪；10—喷枪行走机构；11—观察窗；12—可动腔体行走轨；持器；14—手动阀；15—电动阀；16—罗茨泵  $500\text{m}^3/\text{h}$ ；17—机械泵  $180\text{m}^3/\text{h}$ 。

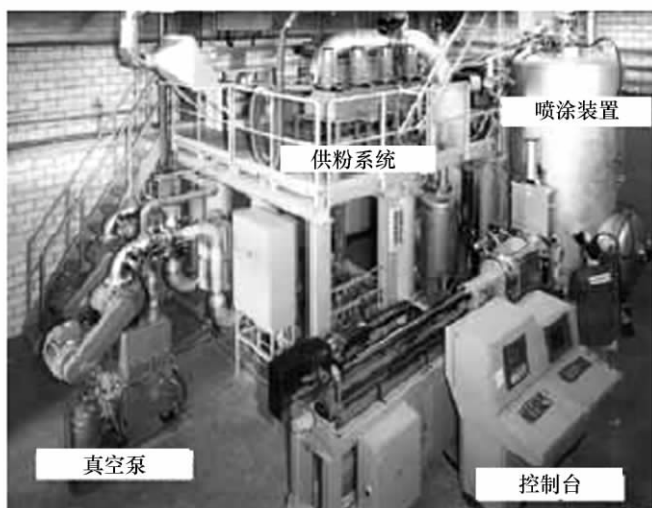


图 7 - 23 低压等离子喷涂成套设备实物图

控制台编排典型喷涂工艺，如真空抽气循环及全部喷涂工序程序。采用压电监控系统预定并控制所选压力在  $66.5\text{Pa} \sim 26600\text{Pa}$ ，进行清除飞溅、预热和喷涂

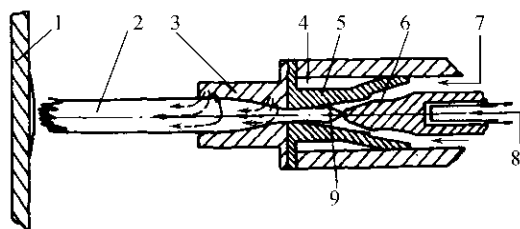


图 7 - 24 DFVLR LPPS 喷枪示意图

2—等离子焰；3—具有联合送粉口的拉瓦尔喷嘴；4、8—冷却水；  
5—阳极；6—阴极；7—等离子气体；9—高电流电弧。

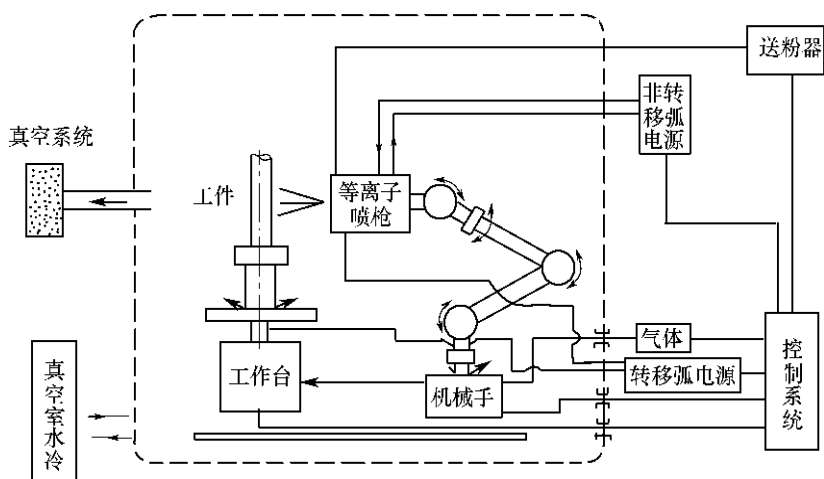


图 7 - 25 低压等离子喷涂机械手和工件操纵台示意图

工作。

### 7.3.3 低压等离子喷涂的工艺

#### 7.3.3.1 低压等离子喷涂工艺过程

低压等离子喷涂工艺过程包括 抽真空、工件预热、电清理、涂层制备和冷却等过程。

(1) 抽真空并充惰性气体。将工作室抽真空到  $2.6\text{Pa}$  ,然后向工作室中充入氩气 ,使室内压力达  $1.3 \times 10^3\text{Pa}$ 。

(2) 工件预热。采用正向转移弧 ,即工件为阳极 ,喷枪为阴极对工件进行预



热。这种转移弧的加热方法比一般的非转移弧预热可节省 50% 的时间(对小的工件可省去预热工序)。

(3) 电清理。采用反向转移弧 ,即工件为阴极 ,喷枪为阳极 ,利用电弧对工件表面进行溅射清理 ,可将工件表面的氧化膜及其它污物去除 ,从而产生一个活性很高的表面 ,以使涂层和基体产生一定的冶金结合(实用中均用联合弧将电路接通后 ,再用转移弧工作)。

(4) 涂层制备。在电清理后继续充氩气入工作室 ,使其压力达  $3.9 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$  ,具体值随工况要求的不同而不同。其压力应严格控制在设定值的  $\pm 5\%$  以内 ,否则会对涂层的质量造成不良影响。

(5) 冷却。喷涂完毕后工作室要继续维持低压惰性气氛直到工件冷却到 100℃ 以下 ,再充入空气。

7.3.3.2 低压等离子喷涂工艺控制

1) 喷涂前的基体表面处理(参见第三章)

喷砂处理对低压等离子喷涂的涂层结合强度显得并不重要 ,相反在薄的基体上采用喷砂是有害的 ,可能在结合区域带有杂质。只采用化学腐蚀几乎不可能使涂层与基体有可靠的结合。提高结合强度更为有效的办法是用转移弧清理、预热基体表面 ,并在喷涂过程中加热基体以改善结合性能。

2) 工艺参数的选择

影响涂层结构和性能的参数有以下五个

(1) 等离子射流。其特性主要取决于电流、气体种类、气体流量 ,应由微处理机监控 ,以保证高的精度和再现性。

(2) 供粉。低压等离子喷涂系统要用相同纯度的粉末 ,在粉末送到喷枪之前 ,对粉末要进行干燥和真空除氧处理。

(3) 基体质量。采用转移弧清理和加热基体。

(4) 工件的运动。喷涂操作时 ,为使复杂零件表面获得均匀的涂层厚度 ,采用机械手系统操纵喷枪 ,由工件操纵机构移动工件。

(5) 粉末输送和注入状态。采用新型容积式送粉系统输送粉末。喷嘴上不同位置的送粉孔 ,用以同时喷涂不同材料。低压等离子喷涂涂层的性能见表7 - 7。

表 7 - 7 低压等离子喷涂制  $\text{MCrAlY} + \text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层的主要喷涂参数和物理性能

项 目	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量 / %										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	100
喷涂时压力 / 100Pa	60	65	65	70	70	75	75	80	80	90	100

等离子电流/A	685	685	690	695	700	705	710	715	730	745	760
粉末表面积/( $\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	0.31	0.34	0.37	0.40	0.44	0.50	0.55	0.60	0.66	0.71	1.00
涂层粗糙度/ $\mu\text{m}$	7.5	7.2	7.1	7.0	6.9	6.7	6.9	6.8	6.6	6.2	2.9
涂层硬度(500HV)	508	539	639	707	716	753	869	879	936	980	1290
结合强度/( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	76	69	75	78	77	64	83	68	74	77	68

## 7.4 超声速等离子喷涂

超声速等离子喷涂是指利用专门设计的喷枪与喷嘴,一次或多次供入较高压力、大流量的工作气体,一级或多级喷嘴拉长电弧,使电弧受到强烈的机械、自磁和热压缩,从而得到能量密度非常高的超声速等离子射流。利用这种超声速等离子射流加热、加速喷涂材料而获得高质量涂层的工艺过程称为超声速等离子喷涂。

美国从20世纪80年代中期率先投入超声速等离子喷涂技术的研究,90年代中期由TAFE公司向市场推出了能够满足工业化生产需要的“PLAZJet”超声速等离子喷涂。该系统采用特殊超长阳极来获得超声速射流的等离子喷枪,为了保证高速射流具有足够高的热焓值使喷涂粒子充分熔化,采用了提高弧流功率的措施。弧电压可高达200V~400V,电流400A~700A,焰流速度超过3000m/s,气体流量达21 $\text{m}^3/\text{h}$ ,该喷枪的最大功率(270kW)比普通高能等离子(80kW)提高了3倍~4倍。由于大幅提高了喷射粒子的速度(可达400m/s~600m/s)和动能,涂层质量明显优于常规速度(200m/s~300m/s)的等离子喷涂层。但是由于能量消耗大,且为了保证连续工作,采用了外送粉方式,造成粉末利用率降低,喷涂成本很高。

在国内,装甲兵工程学院发明了具有自主知识产权的高效能超声速等离子喷涂系统(HEPJet),使我国具备了生产超声速等离子喷涂成套设备的能力,该系统喷枪采用拉瓦尔喷嘴型面的单阳极结构,压缩孔道长度缩短,对电弧初始段的机械压缩增强,迫使阳极斑点前移来拉长电弧(弧压可达200V),由于提前对电弧区段的加速,提高了喷枪热效率,获得了高焓值超声速射流,并应用了内送粉结构,有效降低了能耗。系统达到了国际先进水平,系统的核心部件——高效能超声速离子喷涂枪达到国际领先水平,2002年度获军队科技进步一等奖,2003年度获国家科技进步二等奖。

该系统的核心部件——高效能超声速离子喷涂枪,打破了通过二级喷嘴对扩展弧进行加速获得超声速射流的设计思想,解决了拉瓦尔喷嘴直接作等离子

阳极易烧损、内送粉粘嘴等诸多技术难题 ,综合性能达到国际领先水平。HEPJet 高效能等离子喷涂系统 ,射流速度高(马赫数  $Ma = 3 \sim 5$ ) ,喷涂粒子飞行速度可达 700m/s ,涂层质量高(结合强度可达 70MPa ,孔隙率低于 1%) ,喷涂高性能 WC 金属陶瓷涂层 ,硬度可达 1400HV 以上 ,结合强度 72MPa ,孔隙率低于 0.5% ,能量利用率、材料沉积效率高 ;气体消耗少(最大  $6\text{m}^3/\text{h}$ )。HEPJet 系统与 PLAZJet 性能比较见表 7 - 8。

表 7 - 8 HEPJet 系统与 PLAZJet 性能比较

性能指标	HEPJet	PLAZJet	两者比较
最大功率	80kW	270kW	节能 71%
平均热效率	73%	60%	高 21%
喷涂粒子速度	600m/s	600m/s	相当
耗气量	$3.5\text{m}^3/\text{h} \sim 6\text{m}^3/\text{h}$	$15\text{m}^3/\text{h} \sim 25\text{m}^3/\text{h}$	节约 75%

7.4.1 超声速等离子喷涂的特点

等离子喷涂层的质量强烈地受颗粒性质、速度、温度、熔化程度及它们的统计分布的影响。与普通等离子喷涂相比 ,超声速等离子喷涂的突出优势是射流的速度高(超过 5 马赫) ,由于速度高 ,喷涂粉末颗粒在射流中停留时间缩短 ,熔融或半熔融粒子撞击基体时的动量增大 ,能量转换效率高 ,熔滴铺展充分 ,扁平度好 ,涂层致密、孔隙率底、结合强度高 ,涂层的韧性等综合指标均有所改善 ,超声速等离子喷涂的特点如下 :

(1) 射流温度高、速度高且集中稳定。超声速等离子喷涂既具备等离子喷涂的高温的特点 ,又兼有超声速火焰喷涂的高速特点 ,这些使其涂层质量较普通等离子喷涂涂层质量高 ,可喷涂材料范围较超声速火焰喷涂材料的范围宽 ,与低压等离子喷涂类似 ,克服了等离子射流发散紊乱和对喷涂颗粒加速较差的缺陷 ,同时喷涂零件的尺寸又不受真空室的限制。

等离子射流被有效地压缩 ,即使远离喷嘴仍稳定集聚。如 :在喷涂碳化钨粉末时 ,细长的等离子射流长达 1m 仍未发散。

(2) 弧电压高(可达 400V) ,等离子射束长 ,射束集中 ,压缩充分 ,能量密度高。喷嘴外等离子射流的长度是常规等离子喷涂的 3 倍 ~ 4 倍。

(3) 由于提高了焰流对喷涂粒子的热传输率 ,尤其是喷涂粒子动能提高 ,涂层质量明显优于常规等离子喷涂 ,与爆炸喷涂和超声速火焰喷涂相近。

(4) 喷涂材料(尤其是金属—陶瓷复合或梯度涂层中的金属相)在高温射

流中经过的时间短,克服了粉末颗粒的氧化、烧损的缺点,形成涂层后的污染和夹杂等现象大为减轻,涂层缺陷减少。

(5) 喷涂粒子的飞行速度高(约  $400\text{m/s} \sim 500\text{m/s}$ ,普通等离子喷涂约  $200\text{m/s} \sim 250\text{m/s}$ ) ,形成涂层片层状结构致密,片层间结合强度(内聚强度)和涂层基体界面结合强度(宏观结合强度)都有所提高。

(6) 涂层的孔隙率大大降低,一般低于  $1\%$  ,特别是片层结构变形充分、致密,开放性孔隙或通孔趋于极小,阻挡了高温燃气中的腐蚀性介质的侵蚀,有效减缓了涂层中因合金成分的氧化、腐蚀而导致的整体涂层的快速退化。

## 7.4.2 超声速等离子喷涂设备

超声速等离子喷涂设备与普通等离子喷涂装置基本相同,主要由喷枪、送粉装置、送气装置、冷却水循环系统、控制系统和主机电源组成,如图 7 - 26 所示。

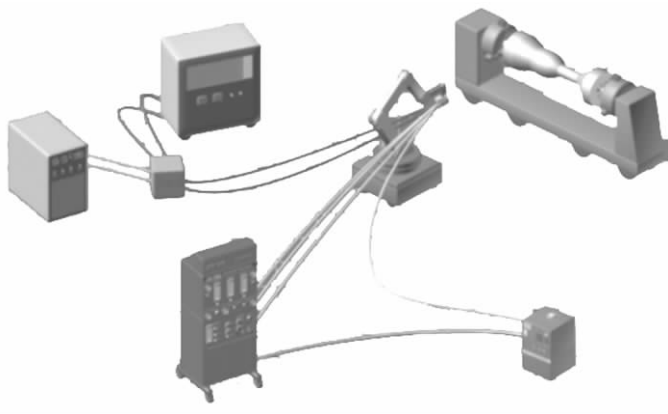


图 7 - 26 超声速等离子喷涂系统结构示意图

### 7.4.2.1 超声速等离子喷涂枪

超声速等离子喷涂设备与普通等离子喷涂装置的区别主要在喷涂枪。超声速等离子喷涂枪主要有两种结构,一种是双阳极结构,如图 7 - 27 所示,另一种是单阳极结构,如图 7 - 28 所示。

#### 1. 双阳极结构超声速等离子喷涂枪

20 世纪 80 年代中期 Browning 公司开发出了双阳极超声速等离子喷涂枪,结构如图 7 - 27 所示,喷枪由前枪体和后枪体两部分组成。前枪体装有二次喷嘴、气体旋流环和送粉嘴,后枪体包括钨极、一次喷嘴。

喷枪工作过程如下：

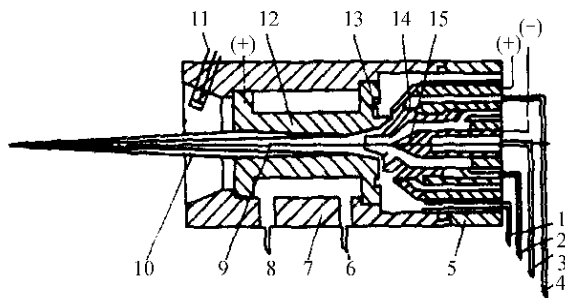


图 7-27 超声速等离子喷涂枪示意图

气；2—主气；3—冷却进水；4—冷却回水；5—后枪体；6—冷却回水；  
8—冷却进水；9—扩展弧；10—等离子射流；11—送粉管；12—二次喷嘴；  
13—气体旋流环；14—一次喷嘴；15—阴极。

(1) 送气。由枪体输入主气( $\text{Ar}$ )和次级气( $\text{H}_2$  或  $\text{N}_2 + \text{H}_2$ )。从钨极与一次喷嘴之间通过的主气流量较小( $1.5\text{m}^3/\text{h} \sim 2\text{m}^3/\text{h}$ )，大流量的次级气( $9\text{m}^3/\text{h} \sim 11\text{m}^3/\text{h}$ )经气体旋流环作用，通过二次喷嘴射出。

(2) 引弧。钨极接负极，引弧时一次喷嘴接正极，经高频引弧后，正极接二次喷嘴，即在钨极与二次喷嘴内壁间产生电弧，在旋转的次级气强烈作用下，电弧被压缩在喷嘴中心并拉长至喷嘴外缘，形成扩展等离子弧，该喷枪由于综合性不够完善，没有在工业上得到广泛应用。

## 2. 单阳极结构超声速等离子喷涂枪

具有代表性的单阳极结构超声速等离子喷涂枪是由装甲兵工程学院徐滨士院士带领课题组研制成功的具有自主知识产权的高效能超声速等离子喷涂枪，其结构如图 7-28 所示，喷涂枪主要由枪座、枪体和送粉架三部分组成，枪座上装有后绝缘体、阴极体，枪体内装有绝缘体、气体旋流环和喷嘴等，送粉架由送粉架体、过渡丝头、连接丝头和压母组成，能方便调节送粉管的方向。

HEPJet 高效能超声速等离子喷涂枪的特点如下：

(1) 小功率( $80\text{kW}$ )、小气体流量( $6\text{m}^3/\text{h}$ )的超声速等离子喷涂枪的设计，突破了国外大功率( $270\text{kW}$ )、大气体流量( $21\text{m}^3/\text{h}$ )的设计模式，充分利用了热源，提高了能量转换率。

(2) 高效率的单阳极拉瓦尔喷嘴设计，突破了国外传统的双阳极结构逐级拉长电弧的低效率结构。喷嘴压缩孔道长度被减短，为使粉末送入射流高温区提供了条件，喷枪热效率、射流热焓得到提高，减少了能耗。

(3) 采用以机械压缩为主、气动力压缩为辅的射流加速方案。依靠对电弧

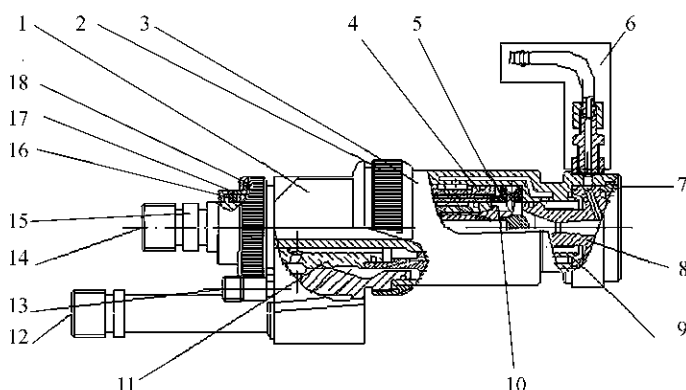


图 7 - 28 HEPJet 高效能超声速等离子喷涂枪结构示意图

座；2—枪体压帽；3—枪体；4—绝缘体；5—气体旋流环；6—送粉架；7—喷嘴压帽；  
极喷嘴；9—导热结构；10—阴极头；11—后绝缘体；12—进水口；13—等离子气体进口；  
14—出水口；15—阴极体；16—调整垫片；17—后绝缘压帽；18—阴极体压帽。

初始段的强烈压缩效应迫使阳极斑点前移来拉长电弧，实现对电弧区段的加速，突破了现有技术对焰流区段加速的方案，攻克了拉瓦尔喷嘴直接作阳极型面而不被烧损的技术难点。

(4) 特殊的内送粉结构设计实现了超声速等离子喷涂内送粉方式。可将喷涂粉末直接送到等离子焰流的高温区(国外目前等离子喷枪普遍采用的外送粉方式，是将粉末送入喷嘴外端的温度相对较低的焰流区)，有效提高了等离子弧热能的利用率，改善了粉末的熔化状况，提高了沉积率，克服了外送粉存在的粉末加热不均匀、沉积效率低的问题，并解决了普通等离子喷枪常出现的内送粉堵嘴、粘嘴的难题。

(5) 由两路进气减为一路进气，增强了电弧初始段的气动力效果。在保证气体流速的情况下，可以降低气体流量。

(6) 通过气体流量和电参数的合理匹配，可实现等离子射流温度和速度的大范围调节，满足了喷涂不同性能材料的需要。既可制备高熔点的氧化物陶瓷涂层、金属陶瓷涂层及低熔点的自熔合金涂层，又可制备易于高温失碳的碳化物涂层，适用范围宽。

(7) 喷枪结构紧凑、轻巧，重量功率比(G/W)小，便于装配、调节；性能稳定，电极和喷嘴使用寿命长，可维修性强，易损件更换容易，机动和手动操作互换方便，无需更换枪座。

#### 7.4.2.2 HEPJ - II 超声速等离子喷涂控制柜

控制柜对 HEPJet - II 超声速等离子喷涂系统中各部件进行操作和控制 ,可实现各路气体流量的稳定供给和预置参数自动准确定位或复位 ,提高了整套系统的可靠性和喷涂参数的可重复性、一致性 ,保证了喷涂质量。其工作过程和特点如下 :

(1) 系统状态监视器实时自检。在系统启动之前和喷涂过程中 ,对系统主要部件状态进行监测 ,以 LED 方式显示检查结果或故障原因 ,并对故障进行声光报警。

(2) 采用 PLC(可编程控制器)。以 PLC 为核心 ,完成超声速等离子喷涂的全部时序操作功能 ,具有操作简单、抗干扰能力强的特点。控制柜的动作时序如图 7 - 29 所示(其中纵坐标  $y$  为逻辑关系)。

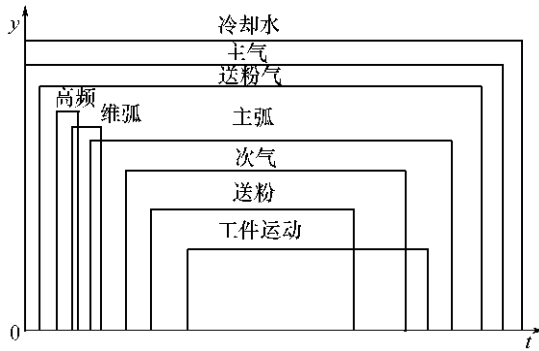


图 7 - 29 超声速等离子喷涂动作时序图

(3) NECT 和 NFPA 码安全控制。电器组件和气路组件隔离 ,电器组件的压缩空气自动维持一定的正压 ,使元器件不和氢气接触 ,持续风扇排风 ,保证电、气路元器件清洁、散热。

(4) 自动/手动操作及预置模式选择 ,可实现单/双极喷枪、单/双送粉器以及  $\text{Ar} + \text{H}_2$ 、 $\text{Ar} + \text{N}_2$ 、纯  $\text{N}_2$  及  $\text{N}_2 + \text{H}_2$  等多种配气方案的转换 ,既可以制备单一粉末涂层 ,又可以制备梯度涂层。

#### 7.4.2.3 HEPJ - II 电源

在国内外率先采用先进的 IGBT 20kHz PWM 全桥整流逆变技术(见图 7 - 30) ,研制成功了超声速等离子喷涂逆变电源 ,解决了超声速等离子喷涂大功率、大电流、高工作电压、冲击电流大、连续工作时间长和高频干扰强的技术难点。该电源主要参数为 :恒流时精度优于 1% ,恒功率时精度优于 5% ,最大输出电流 600A ,最高工作电压 220V ,最大功率 80kVA。

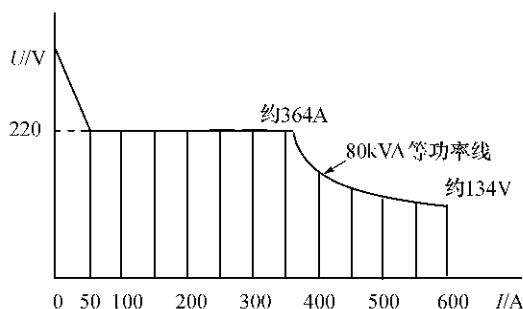


图 7 - 30 超声速等离子喷涂电源外特性图

### 7.4.3 超声速等离子喷涂工艺

超声速等离子喷涂工艺控制和普通等离子喷涂基本相同,这里只对超声速等离子喷涂时功率、送粉量和喷涂距离的选择进行介绍。采用芬兰 Oseir 公司生产的 Spray Watch 2i 型热喷涂状态监控仪,对喷涂过程中粒子在超声速等离子射流中速度、温度、流量分布以及喷涂粒子束的发散角度、宽度进行了研究,为超声速等离子喷涂功率、送粉量和喷涂距离的选择提供了直观的依据。Spray Watch 2i 型热喷涂状态监控仪测试原理如图 7 - 31 所示。

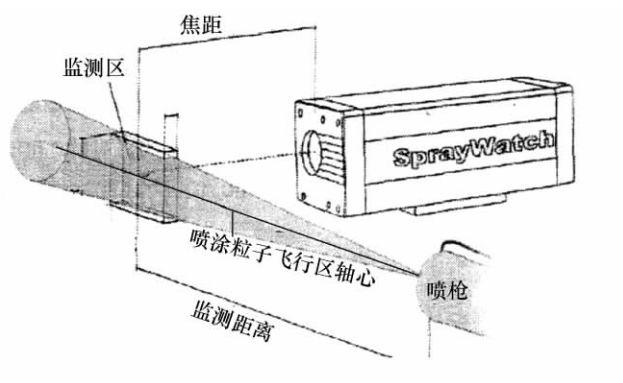


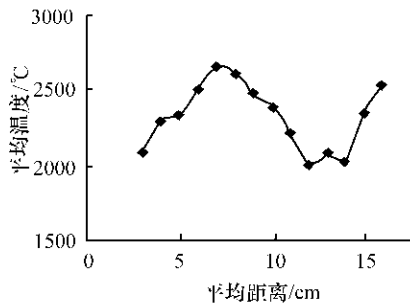
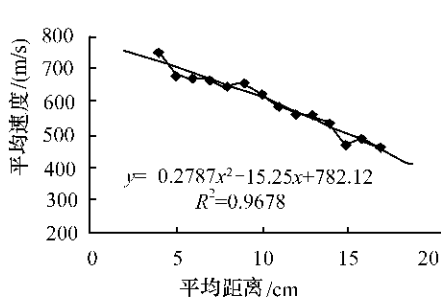
图 7 - 31 飞行粒子特性测试方法示意图

#### 7.4.3.1 喷涂距离的选择

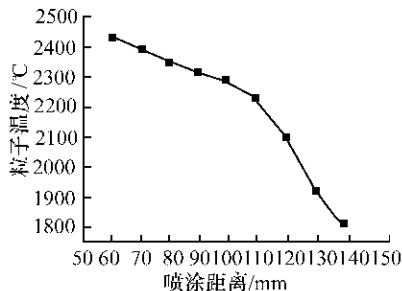
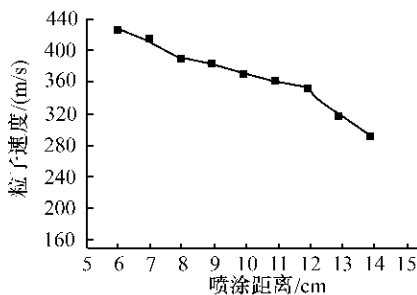
图 7 - 32 是对超声速等离子喷涂不同材料时粒子速度和温度与距离的关系。

用超声速等离子法喷涂低密度、低热导率的陶瓷材料时,喷涂距离在 60 mm ~ 80mm 左右温度达到最高,速度在出口处最高达 700m/s 以上,温度最高时陶瓷颗粒速度仍保持在 600m/s 以上,因此喷涂陶瓷材料时喷涂距离选择 60mm





a- 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  热喷涂粉末



喷涂距离-WC-Co金属陶瓷粉末

图 7 - 32 功率和送粉量不变粒子速度和温度随喷涂距离变化规律

~80mm 为宜。喷涂高密度、高热导率的金属陶瓷或合金材料时,随着离枪口距离的增大,温度和速度均下降,所以在喷涂此类材料时在保证基体温度不过热的情况下尽量采用小喷涂距离。

#### 7.4.3.2 喷涂功率的选择

粒子速度和温度随功率变化曲线如图 7 - 33 所示(喷涂材料为 WC - Co)。

(1) 粒子平均温度随功率的增加而增加。

(2) 粒子平均速度随功率的增加而增加,但当功率增加到 50kW 后,速度增加缓慢,并有下降的趋势。这是由于功率加大导致粉末过熔,反而阻碍了速度的提高。因此可以说,50kW 后在送粉量不变的前提下,增加的功率对速度的提高贡献不大。

因此,对喷涂 WC - Co 涂层来说,当送粉量为 50g,喷涂距离为 100mm 时,功率选择在 56kW 左右,既可保证有较高的粒子速度还可以使喷涂 WC - Co 粉末的温度不至于太高。

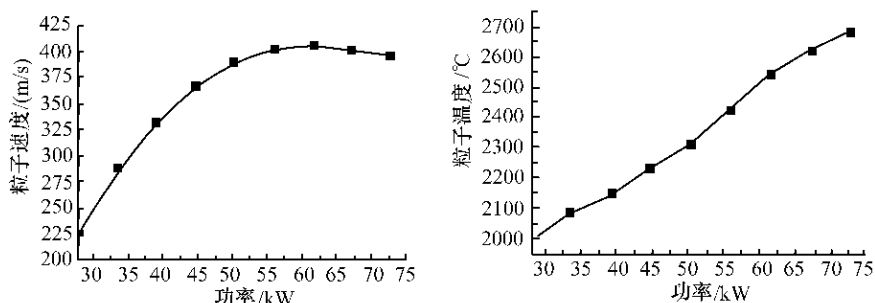


图 7 - 33 距离和送粉量不变粒子速度和温度随功率变化规律

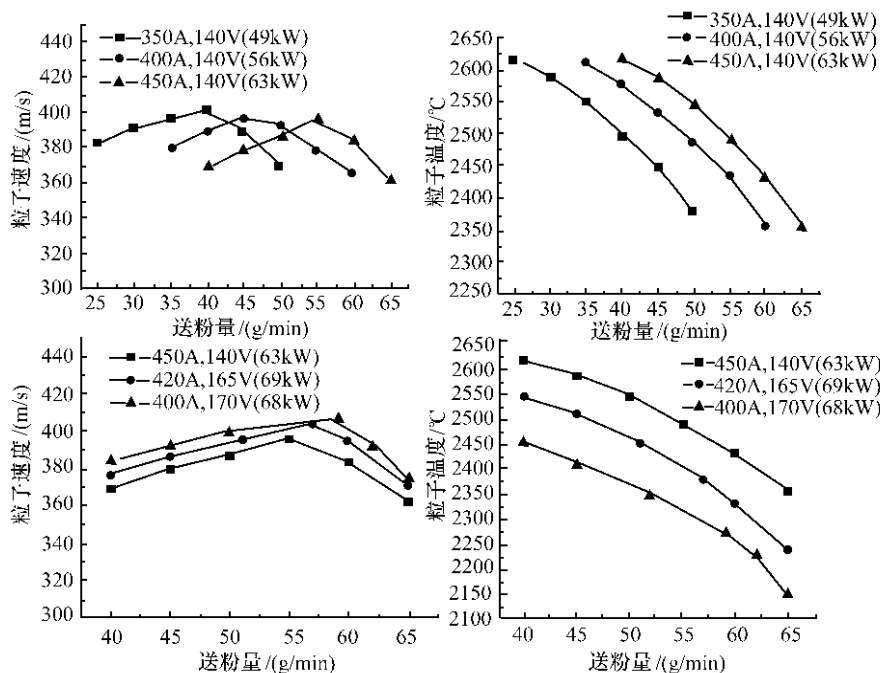


图 7 - 34 喷涂距离不变不同功率下的粒子速度和温度随送粉量变化的规律

#### 7.4.3.3 送粉量的选择

在保证喷涂涂层质量的前提下,选择的最佳送粉量应该是在单位时间内获得最大体积的涂层即保证最大生产效率。图 7 - 34 是喷涂距离不变不同功率下的粒子速度和温度随送粉量的变化规律。可以看出:

(1) 粒子速度随送粉量的增加呈先增后减的趋势,这是由于功率和送粉量

之间需要有最佳的匹配关系。送粉量过小,粉末受热氧化烧蚀太多,涂层中夹着较多的烟尘,过熔粒子相互撞击导致射流紊乱,反而影响速度的提高;送粉量过大,涂层中夹杂的生粉多,粉末撞击工件时变形不充分,并有较多的粉末弹跳损失,也影响速度的提高。

(2) 粒子温度随送粉量的增加而下降,这是由于每种功率下的焰流热焓是一定的,送粉量的增加,载气流量和粉末量的加大都会降低等离子射流的温度。

7.4.4 超声速等离子喷涂应用实例

超声速等离子喷涂瓦楞辊的实例。

图 7-35 是喷涂前的瓦楞辊表面形貌。该瓦楞辊已经过一段时期的运行,表面已有一些磨损和划伤的痕迹。喷涂前对表面进行除油、除锈等净化处理,并对表面损伤之处进行探伤,检查有无裂纹等缺陷。仔细测量瓦楞辊楞深、楞尖、楞底、楞尖间距等基本尺寸,然后进行喷砂处理,使瓦楞辊表面达到设定的清洁度和粗糙度,喷砂后表面粗糙度  $R_a \geq 12.4\mu\text{m}$ 。喷砂前后都需对瓦楞辊进行预热,以进一步去除表面吸附的水分,减小瓦楞辊的表面的残余应力,以及喷涂时高温熔滴喷射到工件表面上时的骤冷应力,改善喷涂层和基体间的收缩应力,防止涂层脱落。对瓦楞辊不需喷涂的部位用保护材料进行屏蔽保护,防止喷砂或喷涂熔滴飞溅其上损伤表面。

采用先进的 HEPJet 高效能超声速等离子喷涂设备进行精确喷涂。喷涂时,控制每一遍涂层厚度为  $20\mu\text{m}$ ,喷涂 10 遍后,喷涂层的总厚度为  $(0.20 \pm 0.01)\text{mm}$ 。喷涂工艺参数选用表 7-9 所示的经试验优化后的参数。

表 7-9 超声速等离子喷涂 WC-12Co 粉末的工艺参数

喷涂距离/mm	电压/V	电流/A	氩气压力/MPa	氩气流量/( $\text{m}^3/\text{h}$ )
100	130	330	1.1	4.0
氩气压力 /MPa	氩气流量 /( $\text{m}^3/\text{h}$ )	送粉氩气压力 /MPa	送粉氩气流量 /( $\text{m}^3/\text{h}$ )	送粉量 /( $\text{g}/\text{min}$ )
1.0	0.2	0.7	0.60	50

喷涂后瓦楞辊形貌如图 7-36 所示。可看出涂层沿着瓦楞辊齿面的起伏分布得十分均匀,涂层表面致密,表面粗糙度较小。待喷涂后的瓦楞辊自然冷却至室温后,用细金刚石磨料对涂层进行进一步抛光。根据抛光后的涂层表面形态,可估计涂层表面硬度与试验测试的结果基本接近(约  $1400\text{HV}_{0.1}$ )。目前修复后的瓦楞辊已装机运行 1500 万米纸板长度,涂层仍完好无损,未出现任何磨损、开

裂或疲劳剥落现象。



图 7-35 喷涂前瓦楞辊齿面形貌

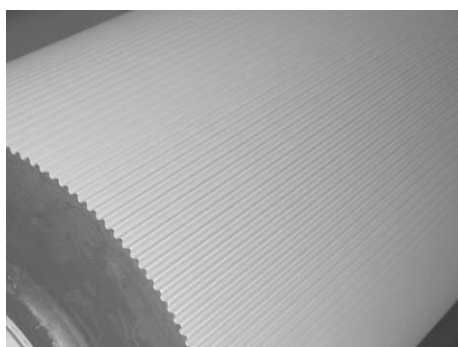


图 7-36 喷涂后瓦楞辊齿面涂层形貌

## 7.5 水稳等离子喷涂

水稳等离子喷枪(如图 7-37 所示)是用水作水稳等离子弧工质,根据液流旋涡的构思进行设计。一定压力的水进入喷枪后,沿导流环的液面产生旋涡。由于离心力使水流旋涡依附在壁面上,在电弧腔里形成空心。碳棒与旋涡腔密封,并接电源负极,旋转阳极接电源正极,借助金属丝短路产生电弧。液流旋涡使弧柱与电弧腔的金属壁“绝缘”,同时冷却和强烈压缩电弧。在电弧的加热下,旋涡表面的部分水被蒸发,蒸汽向喷嘴方向流动,在流动过程中被电离,形成  $H^+$  和  $O^{2+}$  的等离子体。产生的等离子弧离开喷嘴后体积迅速膨胀,产生高速等离子射流。在喷嘴出口处往等离子射流中送入粉末,粉末被加热熔化和加速,形成喷涂粒子束。

水稳等离子喷枪主要由水流旋涡腔、阴极和阴极送进机构、水冷旋转阳极、枪体外套和喷嘴、绝缘体、引弧装置组成。如图 7-37 所示。

与气稳等离子弧不一样,水稳弧的弧柱长度取决于电弧腔的长度,而水蒸气中的氢和氧电离很高,弧压几乎保持不变,且比气稳等离子弧长数倍,弧压很高,可达三四百伏,电弧功率也可达到上百千瓦。水稳等离子射流热焓远比气稳等离子射流高,相应的射流温度和速度都很高,可以达到很高的喷涂速率,并可使用较粗的粉末,喷涂较厚的涂层。主要具有以下特点:

(1) 采用水作工作介质,运行成本低于气稳等离子喷涂,制备同样的陶瓷涂层,水稳等离子喷涂的总成本仅为气稳等离子喷涂的  $1/30 \sim 1/40$ 。

(2) 等离子射流温度高、高温区域宽。

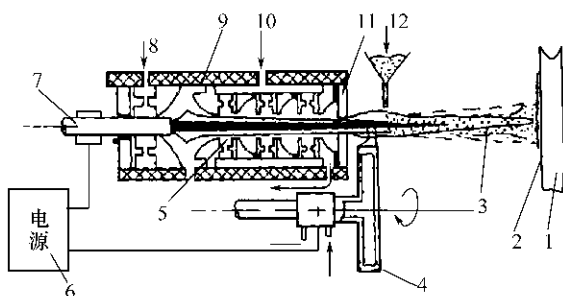


图 7-37 水稳等离子喷枪结构示意图

2—涂层；3—喷涂焰流；4—旋转阳极（带水冷）；5—旋涡腔；6—电源；  
进机构；8—进水；9—枪体外壳；10—进水；11—喷嘴；12—喷涂粉末。

① 最高温度。水稳等离子弧的最高温度为 30000℃，气稳等离子弧为 15000℃。

② 高温区域宽。水稳等离子弧射流离喷嘴出口 20mm 处的温度为 23500℃，离喷嘴出口 90mm 处的温度在 10000℃ 以上。焰流长度约为气稳等离子射流的 3 倍，直径方向上的高温区域也相应扩大，高温区域体积比气稳等离子射流的大数十倍。

(3) 输出功率大。水稳等离子弧电功率可达 160kW ~ 200kW，气稳等离子弧电功率一般为 80kW（多数为 50kW ~ 60kW）。

(4) 生产效率高。以喷涂  $Al_2O_3$  为例，水稳等离子喷涂为 30kg/h ~ 50kg/h，气稳等离子喷涂为 2kg/h ~ 5kg/h。

(5) 涂层质量好。

(6) 可以制备原陶瓷涂层。涂层厚度可大于 2mm，最大可达 10mm ~ 20mm。

(7) 可喷涂粗粒度粉末。水稳等离子喷涂粉末粒度 60 $\mu$ m ~ 80 $\mu$ m，气稳等离子喷涂粉末粒度 小于 40 $\mu$ m。

但是由于射流氧化性强，不宜喷涂金属，而且水稳等离子设备结构复杂，水流稳定性也较差，应用还在初级阶段。

## 7.6 三阴极等离子喷涂

三阴极等离子喷涂是最新开发的应用于工业领域的等离子喷涂技术。该技术的核心是等离子喷枪，由三个平行且相互绝缘的阴极和几个被绝缘环串联的阳极喷嘴组成，只有离阴极最近的一个绝缘环上的喷嘴作为阳极工作，如图

7-38所示。因为从3个阴极到同1个阳极产生的3个独立电弧的长度稳定不变,从而产生了稳定的等离子喷射。与传统的带有1个阴极和1个阳极的喷枪相比,这种喷枪结构可实现真正的轴向送粉,可获得较高的沉积效率和送粉率,粉末熔化和涂层质量都得到了提高。但是该系统结构复杂,需要三个独立电源,且相互之间的匹配和控制要求很高,否则系统很难长时间稳定工作。采用这种系统制备的陶瓷涂层性能通常好于用传统的普通等离子喷涂(APS)工艺制备的涂层。目前市场上已初步投入工业应用的有 Sulzer Meteo 公司的 Triplex II 和 Mettech 公司的 Axial III 两种喷枪。

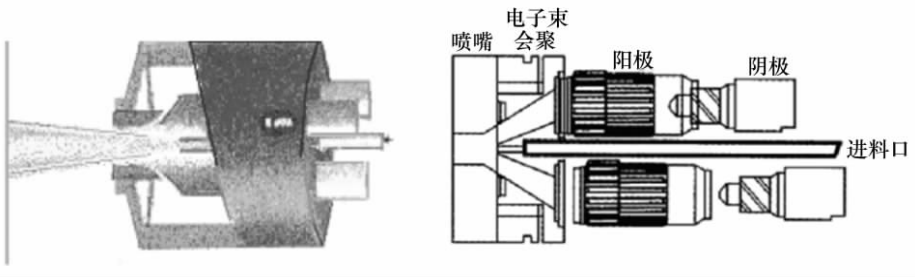


图 7-38 三阴极等离子喷枪结构示意图

三阴极喷枪的优点是:①将原来单阴极的单电弧分为三个电弧,降低了单一喷嘴及阴极因系统需要获得同样能量功率电极表面过热而烧损的情况,每一对喷嘴和阴极电弧功率下降而延长了喷嘴及阴极的寿命。②由于三根阴极各自离阳极都处于偏位置,有一个最短的距离,根据“最小的焓要求最小的弧长”的原理,每个阴极尖端只有一个与之对应阳极的弧根,避免了阳极弧根的周向运动及轴向运动,有利于电弧的稳定。③为避免送粉气流对电弧稳定性的影响,采用了喷枪中心送粉(如加拿大 Mettech 公司的 Axial III)的方法。这样可使粉末全部送入等离子射流的中轴线的高温区域,避免了单阳极喷枪外侧径向送粉,难以保证粉末全部送到轴向区的问题,使粉末的沉积效率大大提高,喷涂同样面积及厚度的涂层与常规等离子喷涂相比仅需一半的时间,工作效率很高,对于大型工件或大批量部件的喷涂其优越性更加突出。由于电弧稳定,因此噪声也比常规等离子喷涂的 120dB 低,仅为 90dB 左右。表 7-10 列出了 Triplex II 和常规等离子喷枪的喷涂效率及粉的沉积效率的对比结果。从表 7-10 可以看出,三阴极等离子喷涂技术比常规等离子喷涂技术要优越。但是由于设备一次性投资大,且三电极对系统的稳定性和自动控制提出了更高的要求,目前该技术还处于初级发展阶段。

表 7 - 10 三阴极与单阴极喷涂送粉速率及沉积效率的比较

材 料	普通等离子喷涂		三阴极等离子喷涂( Triplex II )	
	送粉速率/( g/min )	沉积效率/ %	送粉速率/( g/min )	沉积效率/ %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	60	150	80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	45	150	50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 13% TiO <sub>2</sub>	60	70	150	85
ZrO <sub>2</sub> - 8% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80	30	150	50
Ni - 5% Al	80	70	200	90

## 第八章 其它喷涂技术

### 8.1 激光喷涂技术

激光是具有高度的方向性、单色性、相干性、可调谐性和高能量密度的一种特殊光波。聚焦以后焦点附近的能量密度可达  $10^7 \text{ W/cm}^2 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$  以上,激光可作为一种热源来制备有特殊要求的涂层。

光在材料表面的反射、透射及吸收是光这种横向电磁波与材料作用的结果。金属中存在大量的自由电子,通常光子能量只对金属中的自由电子起作用,即光子的能量通过自由电子作为中间体传递给晶格。因金属中自由电子密度很大,故透射光波在金属中仅能穿透  $10 \text{ nm}$  左右的深度。一般讲金属对激光的吸收是随波长的变短而增加的,如金属对  $10.6 \mu\text{m}$  波长的  $\text{CO}_2$  激光的吸收率不到  $10\%$ ,而对波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的 YAG 激光的吸收率比  $\text{CO}_2$  激光高出  $3 \sim 4$  倍。通常情况下当照射到金属材料上的激光功率密度达  $10^4 \text{ W/cm}^2 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,材料表层即可熔化;当激光功率密度达  $10^6 \text{ W/cm}^2$  时,材料即会强烈气化,并形成深熔小孔,这时金属对激光的吸收率达  $90\%$  以上;当激光功率密度超过  $10^7 \text{ W/cm}^2$  时,将会出现等离子体对激光的屏蔽现象。

激光喷枪的原理图如图 8-1 所示。激光喷枪的工作原理是:激光光束经透镜聚焦在喷枪出口的喷嘴前沿,要喷涂的粉末或线材向焦点输送,进入焦点的粉末或线材的端部被激光光束熔融。压缩空气从环状喷嘴喷出,把熔融的材料雾化微细的颗粒喷射到基材的表面形成涂层。喷枪中的透镜保护气可对透镜进行保护。

调节激光光束的焦距使其焦点落在基体上,就可将粉末和基材同时熔融,形成喷熔层。

目前商品化的  $\text{CO}_2$  激光器的功率已达  $45 \text{ kW}$ ,其量子效率高达  $40\%$  以上。工业器件总效率也可达  $25\%$ ,已在工业生产中应用。近年来随着新型二极管激光泵浦的 YAG 激光器技术的改进,其效率也可达  $10\%$  以上,且近年来开发出可通过光纤传输的 YAG 激光,使得激光喷涂枪可由机器人握持进行柔性的空间运



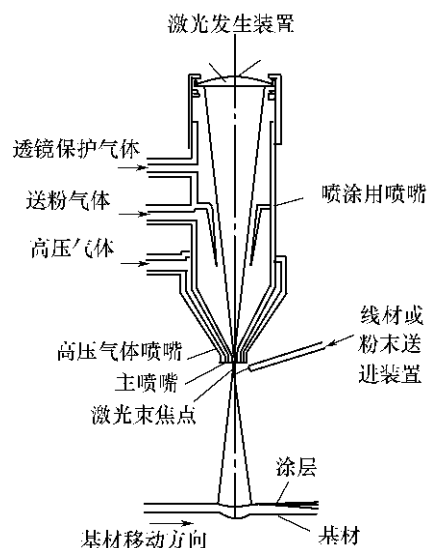


图 8 - 1 激光喷涂用喷嘴结构示意图

动 ,使激光喷涂的工业化前景变得具有更大的吸引力。

## 8.2 冷喷涂技术

冷喷技术是近来出现的新型喷涂工艺。其原理图、装置图、粒子的温度和速度曲线分别如图 8 - 2、图 8 - 3、图 8 - 4 所示。冷喷的工作原理是 ,利用电能把高压气流加热到一定的温度(100 ~ 600 ) ,该气流再经拉瓦尔管加速产生超

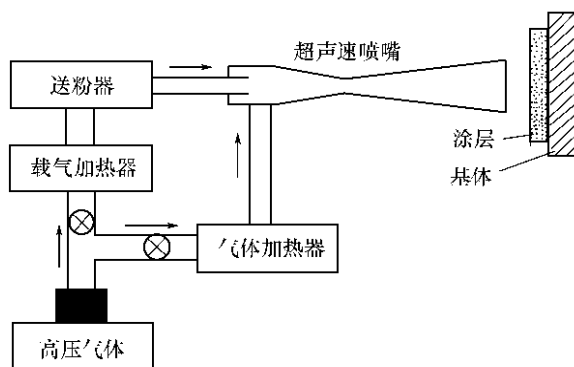


图 8 - 2 冷喷工作原理图

声速的束流,用该束流加速粉末粒子,使其以超声速撞击到基体的表面,通过固体的塑性变形形成涂层。由于粉末粒子在喷涂过程中没有熔化,因此是以固态变形叠加而形成涂层。同时,先沉积的粒子又受到后沉积粒子的撞击,故使涂层更加致密,与基体结合更加牢固。这种形成涂层的机制称为微锻造效应。

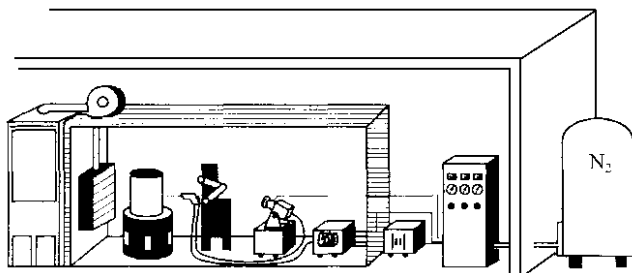


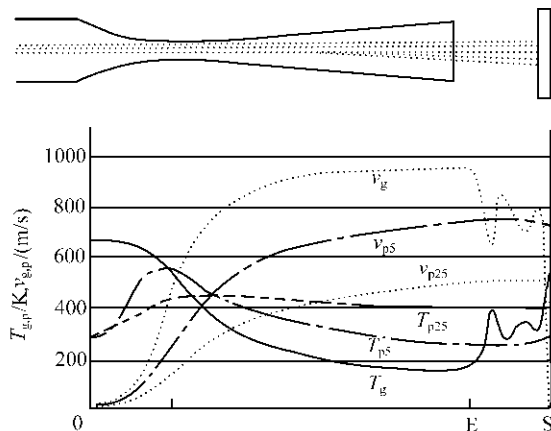
图 8 - 3 冷喷装置图

要达到通过微锻造效应形成良好的涂层应满足下列两个基本条件：

(1) 粒子的速度要达到临界速度。对于不同的材料有不同的临界速度(见表 8 - 1)。

表 8 - 1 冷喷技术中常用的几种材料的临界速度

材 料	Cu	Ni	Fe	Al
临界速度/(m/s)	560	620	620	680



8 - 4 沿着喷嘴轴向运动的铜粉粒子的速度和温度曲线

.5MPa ,喷嘴膨胀比=9 ,喷嘴喉管直径=2.7mm  $v_g$ 、 $T_g$ —气体速度、温度曲线；

$5\mu\text{m}$  粒子的速度、温度曲线  $v_{p25}$ 、 $T_{p25}$ —粒径  $25\mu\text{m}$  粒子的速度、温度曲线。

(2) 基体和被喷涂粉末粒子均要有一定的塑性变形性能,否则形成不了良好的涂层结构以及高的结合强度。目前能用于冷喷技术制作高性能涂层的材料大部分是金属,如 Cu、Fe、Ni、Al、Ti、Inconel718、SS316 等。虽然提高气体温度和压力也能增加粉末粒子的速度和提高粒子的塑性变形能力,但温度过高容易造成粉末粒子的氧化。冷喷的温度通常在 600℃ 以下,最大压力为 3.5MPa。冷喷的动力气为  $\text{N}_2$  或 He 等保护性气体。粉末的粒径应限定在一定的范围内,粒子过大,不易达到临界速度;粒子太小,其动能就小,在到达基体表面前受反射冲击波的影响,极易减速达不到临界速度,从而不能形成良好的涂层。冷喷铜粉末的粒径在  $5\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$  之间时,其沉积率可高达 70%。

冷喷铜涂层的喷涂参数见表 8 - 2。

表 8 - 2 冷喷铜涂层的喷涂参数

粒径/ $\mu\text{m}$	喷枪行走速度/(mm/s)	压力/MPa	线距间隔/mm	气体温度/
5 ~ 25	125	2.5	1.7	400
每道沉积厚度/ $\mu\text{m}$	送粉速率/(kg/h)	沉积率/%	喷距/mm	喷嘴膨胀率/%
200 ~ 230	3	72	30	9

冷喷有以下特点：

- (1) 涂层致密 其成分可以保持与原始喷涂粉末一致。
- (2) 涂层中的残余热应力低 涂层的厚度几乎不受限制。
- (3) 涂层具有稳定的相结构。
- (4) 基体工件温度低 热影响小。
- (5) 由于涂层具有锻造结构 其硬度高于同样成分的块体材料。
- (6) 冷喷涂层是形变组织 经特殊条件下的处理后 可以得到纳米结构的组织。
- (7) 冷喷的沉积斑点可以调节 故可以省去热喷涂过程所需要的遮挡工作。
- (8) 设备及运行成本低。
- (9) 工作环境较好 无高温辐射 噪声仅在 70dB ~ 80dB。
- (10) 大多数金属及合金均可进行喷涂。

由于冷喷有以上的特点 它可应用于防腐、导热、导电、电子器件及无挥发性的塑料涂层等的制作 尤其对钛合金涂层的制作有良好的前景。现也开始用此技术制作纳米 WC - Co 耐磨涂层。

该项技术现在还在不断地完善之中 相信随着技术的不断改进 它的应用领域将得到很大的拓展。

### 8.3 电热爆炸喷涂技术

电热爆炸喷涂技术是一种新兴的热喷涂技术。国外 ,Tamuta 等人在 20 世纪 90 年代末 开展了利用电热爆炸技术喷涂陶瓷粉末的试验研究 并对粉末爆炸过程中的电学特性进行了研究和分析。电热爆炸喷涂 是指在一定的气体介质氛围下通过对金属导体(丝、箔或粉末)沿轴向施加瞬间直流高电压 在金属导体内部形成  $10^6 \text{ A/cm}^2 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$  的电流密度 使其在短时间内爆炸 金属粒子以极高的速度喷射 然后在基体上沉积形成涂层。电热爆炸过程中 能量密度是决定爆炸导体的爆炸特性和粒子喷射速度的主要参数。

电热爆炸喷涂系统由高压直流电源、储能电容器组、三电极开关、真空压力罐、电爆炸喷涂腔以及测量爆炸箔的两端电压和电流装置组成。系统装置原理如图 8 - 5 所示。将陶瓷合金箔 置于电爆炸喷涂腔内并与 RLC 回路串联。陶瓷箔在高压大电流的快速加热作用下 在极短的时间内熔化并爆炸。

导体的电爆炸是一个相对复杂的过程 一般可将导体的爆炸过程分为以下几个阶段 ①导体的固态加热阶段 电流的欧姆加热使导体逐步趋向熔化 ;②导

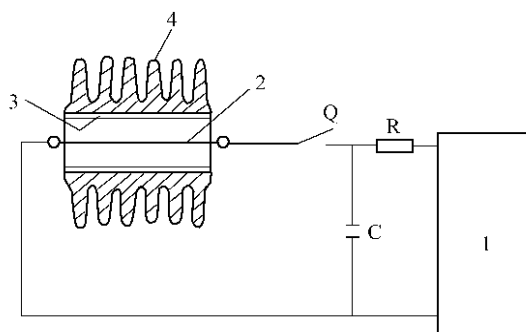


图 8 - 5 电热爆炸喷涂系统原理图

置；2—金属丝；3—涂层；4—工件；C—电容；R—电阻；Q—开关。

体的熔化气化阶段 欧姆加热的持续作用使导体开始熔化 ,由于周围介质气体 (空气)对导体表面的冷却作用 ,使导体内部产生高温并汽化 ,使熔融导体破裂成液滴 ,并使部分汽化 ,汽化的蒸气因电流作用又电离化 ,电磁箍缩效应使蒸气的膨胀力受到限制而产生内部高压 ,高压蒸气的继续快速膨胀最终导致导体的爆炸 ;③电爆炸阶段 ,导体汽化爆炸产生冲击波 ,速度达  $3\text{km/s} \sim 5\text{km/s}$  ,同时蒸气及粒子也以极高的速度喷射 ,由于高电阻率粒子的喷射 ,在一定电压下将使介质气体被电弧击穿 ;④冷凝阶段 ,几乎达到沸点的粒子在与基体材料的碰撞过程中仅需  $10^{-8}\text{s}$  就可固化 ,而粒子的冷却速率可达  $10^7\text{K/s} \sim 10^9\text{K/s}$ 。

## 第九章 热喷涂涂层的机械加工

热喷涂涂层表面的尺寸精度和表面粗糙度等,都远远达不到零件图所规定的  
质量要求,所以对它们必须进行机械加工。

热喷涂所用的材料种类很多,所得涂层的性能亦各异。有的好加工,但有许  
多是很难加工的。例如,高硬度自熔性合金粉末涂层、陶瓷涂层等。它们最大的  
特点是具有很高的硬度和耐磨性。其硬度可达到 $(50 \sim 70)$ HRC。其平均相对  
耐磨系数为 $2 \sim 3$ (以65 锰钢为标准试样)。因此,对于它们的切削加工,如果解  
决不好,就直接影响热喷涂技术的推广与应用。对于它们的加工则要采用特殊  
的刀具材料、砂轮或采用特种加工方法,如电解磨削、超声振动车削等。本章着  
重介绍难加工热喷涂涂层的机械加工。

### 9.1 热喷涂涂层机械加工的特点

热喷涂涂层的切削加工方法,用得最广泛的是车削与磨削。热喷涂涂层的  
自身特性使得在切削加工时具有以下特点。

#### 9.1.1 加工过程中冲击与振动大

热喷涂层因其外表面的高低不平,以及其内部硬度的不均匀、硬质点及孔隙  
等,都会使加工时的切削力呈波动状态,致使加工过程产生较大的冲击与振动。  
这就要求机床—夹具—工件—刀具工艺系统的刚性要好,对于刀刃(或砂轮砂  
粒)的强度则提出更高的要求。

#### 9.1.2 刀具容易崩刃和产生非正常磨损

热喷涂层内部的硬质点(碳化物、硼化物等),再加上切削过程中的振动、冲  
击负荷,使刀刃或砂轮砂粒产生崩刃和划沟等非正常磨损,失去切削能力。

#### 9.1.3 刀具耐用度低

热喷涂涂层一般都具有较高的硬度与耐磨性,特别是高硬度的热喷涂涂层,

在加工时产生较大的切削力和切削热。例如,车削 Ni60 高硬度喷熔层,其切削力要比 45 淬火钢大 30% ~ 60%,切削温度要比 45 淬火钢高 41 (高 10%),因而加速刀刃或砂轮砂粒的磨损,使它们迅速变钝。这给切削加工带来很大的困难,甚至难以进行切削加工。由于刀具耐用度低,限制了切削用量的提高,使生产效率降低。

#### 9.1.4 热喷涂涂层易剥落

热喷涂涂层与基体的结合强度不高,用喷涂方法得到的涂层与基体的结合多为机械结合,结合强度一般为 30MPa ~ 50MPa,再加上涂层的厚度一般较薄,所以,在切削加工时,当切削力超过一定限度时,涂层易剥落,这是在切削加工时应注意防止的。

#### 9.1.5 需冷却

热喷涂涂层磨削加工时,由于产生的热量大,磨削加工表面容易被烧伤和产生裂纹,所以要注意冷却润滑液的使用。

### 9.2 热喷涂涂层的车削加工

车削加工主要适用于内、外圆表面的加工。它对于工件的结构、表面热喷涂涂层的材质、精度与表面粗糙度,以及生产批量的适应性都较强,因此得到广泛的应用。一般车削的精度在 IT13 ~ IT6 级之间。表面粗糙度  $R_a$  值在  $12.5\mu\text{m}$  ~  $0.80\mu\text{m}$  之间。

#### 9.2.1 刀具材料的选择

刀具材料是决定刀具切削性能的根本因素。它对于加工效率、加工质量、加工成本以及刀具耐用度影响很大。例如,1900 年左右出现了新刀具材料高速钢,切削钢材的切削速度比高碳钢提高了近 6 倍,生产效率得到了大大的提高。从 19 世纪末到 20 世纪 80 年代的大约 80 年间,切削加工的生产率提高了近 100 倍,其主要原因是刀具材料的改进和新刀具材料的应用,使切削速度和进给量得到大幅度的提高。

被加工材料的发展推动了刀具材料的发展。高锰钢、高强度钢、不锈钢、高温合金、钛合金、耐磨合金铸铁以及表面强化层,都要求提供切削性能更好的刀具材料,以便进一步提高切削加工生产率及加工质量。

### 9.2.1.1 刀具材料应具备的性能

刀具在切削时,受到切削力、切削热的作用,因此作为刀具材料应满足如下的基本要求。

#### 1. 高的硬度

刀具材料的硬度必须高于被切材料的硬度才能切下金属,所以硬度是刀具材料应具备的基本特性。现有刀具材料的硬度一般都在 60HRC 以上。

#### 2. 高的耐磨性

耐磨性是刀具材料抗磨损的能力,一般刀具材料的硬度越高,其耐磨性越好。当然耐磨性不仅决定于硬度,还决定于它的化学成分、金相组织等。耐磨性可用  $V_B/L$  来表示( $V_B$  为后刀面的平均磨损量,单位为 mm; $L$  为切削路程,单位为 m)。

#### 3. 足够的强度与冲击韧性

强度是抵抗切削力的作用,而不致于崩刃与折断所应具备的性能。一般用抗弯强度来表示,其单位为 GPa。

#### 4. 高的耐热性(热稳定性)

耐热性是衡量刀具材料性能的主要指标,它综合反映刀具材料在高温下能保持的硬度、耐磨性、强度、抗氧化、抗粘结和抗扩散的能力。耐热性一般用高温下的硬度来表示。

#### 5. 良好的工艺性和经济性

为了便于制造刀具与刃磨,要求刀具材料具有良好的工艺性能。如锻造、热处理、磨削加工性能等。当然在制造与选用刀具材料时,应考虑经济性。

常用的刀具材料有高速钢、硬质合金、陶瓷、金刚石、立方氮化硼等。目前用得最多的是高速钢和硬质合金。

### 9.2.1.2 难加工热喷涂涂层所用的刀具材料

热喷涂涂层对刀具材料总的要求是:刀具材料应具有高的硬度与高的耐磨性,同时还应具备足够的抗弯强度与韧性。一般的硬质合金牌号是不能加工高硬度热喷涂涂层的。目前,切削热喷涂涂层较好的刀具材料有以下三类。

#### 1. 添加碳化钽、碳化铌的超细晶粒硬质合金

碳化钽(TaC)、碳化铌(NbC)在硬质合金中所起的主要作用:①能提高硬质合金常温与高温的硬度(因它们的熔点高,达 3500 ~ 3880 °C),从而提高硬质合金的耐磨性。②能阻止 WC 晶粒在烧结过程中长大,起到细化晶粒的作用,从而提高 YT 类硬质合金的抗弯强度和冲击韧性与耐磨性。③能提高硬质合金与钢的粘结温度(因它们的粘结温度高于 WC 与 TiC,达 1200 ~ 1250 °C),减轻合金成分向钢中的扩散,从而减少刀具的粘结磨损,提高刀具耐用度。

硬质合金按合金中碳化钨晶粒尺寸分为普通硬质合金(几  $\mu\text{m}$ )、细晶粒硬



质合金(WC 晶粒平均尺寸应小于 1.5μm)和超细晶粒硬质合金(WC 晶粒平均尺寸应小于 0.5μm)。

细晶粒硬质合金中 ,由于 WC 与钴高度分散 ,增加了粘结面积 ,提高了粘结强度 ,因此可提高硬度(1.5 ~ 2 )HRA ,抗弯强度亦可大大提高。所以 ,超细晶粒硬质合金可用于低速切削而不容易崩刃。

综上所述 ,添加碳化钽、碳化铌的超细晶粒硬质合金在硬度与耐磨性以及抗弯强度与韧性方面都有较好的性能 ,适应高硬度热喷涂涂层的切削加工。

我国株洲硬质合金厂生产的刀具材料牌号有 :YC09、YH1、YH2、YH3 等 ;

我国自贡硬质合金厂生产的刀具材料牌号有 K10、643、726 等。

它们的物理力学性能、使用性能及用途见表 9 - 1、表 9 - 2。

表 9 - 1 株洲硬质合金厂几种新牌号硬质合金

牌 号	物理力学性能			使 用 性 能	用 途	相当于 ISO
	密度 /( g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HRA)	抗弯强度 /GPa			
YC08 YC09 YC10	14. 7 ~ 14. 9 14. 8 ~ 15 15 ~ 15. 3	93. 8 94 94	1. 3 ~ 1. 5 1. 2 ~ 1. 4 1. 2 ~ 1. 3	耐磨性能高 ,导热性能良好 ,红硬性 能好 ,抗冲击和振 动性能中等	专用于各种镍基、 钴基、铁基及含碳 化钨粉自熔性喷涂 合金材料等	
YH1	14	≥92. 5	≥1. 65	系超细晶粒合金 ,耐 磨性高 ,红硬性及韧 性好 ,通用性强	适用于铁基、铁镍、 镍及耐热合金粗、精 加工 ,	MI0 ~ M20 K01 ~ K20
YH2	14	≥92. 5	≥1. 6	系超细晶粒合金 , 通用性好 ,红硬性 高 ,耐磨性优良		MI0 ~ M20 K01 ~ K25
YH3	13. 9	≥92. 5	≥1. 6	系超细晶粒合金 , 耐磨性优良 ,红硬 性好		MI0 ~ M20 K01 ~ K20

表 9 - 2 自贡硬质合金厂几种新牌号硬质合金

牌号	物理力学性能			应 用 范 围	相当于 ISO
	密度 /( g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HRA)	抗弯强度 /GPa		
726	13. 6 ~ 14. 5	≥92	≥1. 4	62HRC 以下喷熔层的半精、精加工	K05 ~ K10 M20
610	14. 4 ~ 14. 9	≥93	≥1. 2	65HRC 以下喷熔层的连续切削	K01 ~ K10
643	13. 6 ~ 13. 7	≥93	≥1. 5	喷熔层的半精、精加工	K05 ~ K10 MI0

图 9 - 1、图 9 - 2 是不同刀具材料切削高硬度镍基喷熔层的磨损曲线。

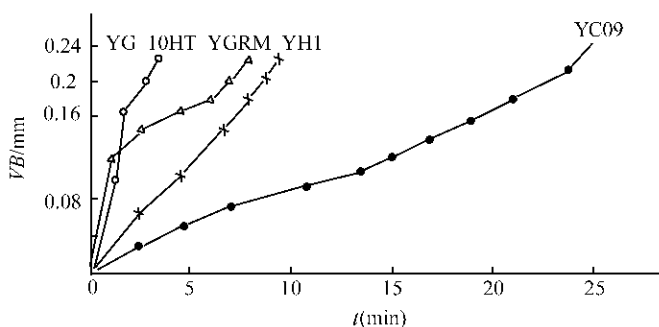


图 9 - 1 切削 Ni60 喷溶层不同刀具材料的磨损曲线

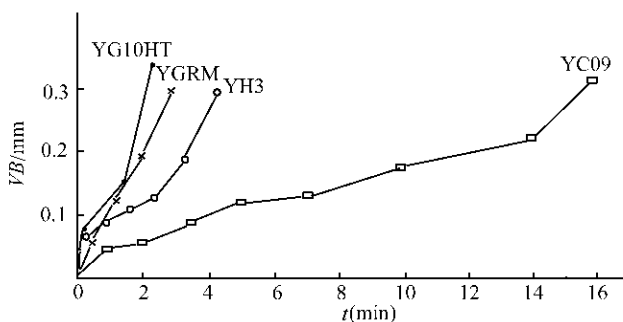


图 9 - 2 切削 G112 喷溶层不同刀具的磨损曲线

以下曲线的试验条件：

图 9 - 1 中被加工材料为 Ni60 喷熔层(56HRC)。

刀具几何参数： $\gamma_0 = -8^\circ$ ， $\alpha_0 = 8^\circ$ ， $K_r = K'_r = 15^\circ$ ， $\lambda_s = -3^\circ$ ， $r_e = 0.3\text{mm}$ ， $\gamma_{01} = -15^\circ$ ， $b_{r1} = 0.08\text{mm}$ 。

切削用量： $v = 25\text{m/min}$ ， $f = 0.2\text{mm/r}$ ， $a_p = 0.2\text{mm}$ 。

机床：CA6140 普通车床，干切。

图 9 - 2 中，被加工材料为 G112 喷熔层((52~54)HRC)。

刀具几何参数： $\gamma_0 = -6^\circ$ ， $\alpha_0 = 8^\circ$ ， $K_r = K'_r = 15^\circ$ ， $\lambda_s = -3^\circ$ ， $r_e = 0.5\text{mm}$ ， $\gamma_{01} = -15^\circ$ ， $b_{r1} = 0.04\text{mm}$ 。

切削用量： $v = 25\text{m/min}$ ， $f = 0.24\text{mm/r}$ ， $a_p = 0.2\text{mm}$ 。

机床：CA6140 普通车床，干切。

试验结果表明：

(1) 刀具材料切削性能较优越的是 YC09 ,YH3、YH1 次之 ,YG10HT、YGRM 不能胜任高硬度镍基喷熔层的切削加工。

切削加工 G112 镍基喷熔层 ,四种刀具材料刀具耐用度的比较见表 9 - 3。

表 9 - 3 刀具材料切削性能比较

项 目	刀 具 材 料			
	YG10HT	YGRM	YH3	YC09
L0.2	45	52.5	87.5	327.5
刀具耐用度比	1	1.2	1.9	7.3
L0.3	59	75.3	113	401.6
刀具耐用度比	1	1.3	1.9	6.8
注 $L_{0.2}$ 是 $VB=0.2\text{mm}$ 的切削路程 $L_{0.3}$ 是 $VB=0.3\text{mm}$ 时的切削路程 $L=v\times t(\text{m})$ ,刀具耐用度即一定磨损限度( $VB$ )的切削时间				

从耐用度数值看 ,YC09 比 YH1、YH3 约高 3 倍。

(2) 刀具材料 YC09、YH3、YH1 ,它们的合理磨钝标准(后刀面的  $VB$  值) ,半精加工和精加工时以  $0.2\text{mm}$  为宜。因从磨损特性曲线可以看出 ,当  $VB > 0.2\text{mm}$  时 ,刀具磨损加剧 ,进入剧烈磨损阶段。

(3) 刀具材料 YC09、YH3、YH1 可用的切削速度范围为  $10\text{m/min} \sim 30\text{m/min}$  ,此时刀具磨损以粘结磨损为主。在  $40\text{m/min} \sim 70\text{m/min}$  范围内存在高温熔敷磨损 ,此时磨损已进入非正常磨损阶段。

2. 陶瓷刀具材料

用作刀具材料的陶瓷有 :纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,陶瓷、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$  混合陶瓷和氮化硅基 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )陶瓷。

陶瓷刀具材料具有下列特点：

- (1) 很高的硬度和耐磨性。陶瓷的硬度高于硬质合金 ,其硬度可达(91 ~ 95 )HRA。
- (2) 很高的耐热性和热稳定性、较小的摩擦系数。陶瓷在  $1200^\circ\text{C}$  时还能进行切削 ,在切削过程中它与金属的亲合力小 ,抗粘结和抗扩散能力较强。因此 ,其耐用度较高 ,切削速度可比硬质合金提高 2 倍 ~ 5 倍。
- (3) 抗弯强度很低 ,冲击韧性差。纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的抗弯强度仅有  $0.5\text{GPa}$  左右 ,细晶粒  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$  混合陶瓷的抗弯强度为  $0.8\text{GPa} \sim 0.9\text{GPa}$  ,比硬质合金低得多。

陶瓷刀具材料可用于加工钢、铸铁、硬铸铁、淬硬钢等的精加工和半精加工

零件。

陶瓷刀具材料最大的缺点是抗弯强度低,但它是很有发展前途的刀具材料。

我国的牌号有 SG5 (硬度 94HRA,抗弯强度大于 0.7GPa),AG2 (93.5 ~ 95HRA,抗弯强度大于 0.8GPa),用它们切削热喷涂涂层有较好的效果,但它们的抗弯强度需要进一步提高。例如,用 SG5 刀片切削镍基 102 喷熔层 (55 ~ 60HRC),切削用量为  $a_p = 0.1\text{mm}$ ,  $f = 0.3\text{mm/r}$ ,  $v = 29\text{m/min}$ 。加工直径 50mm,总长 650mm 的外圆,刀具的切削路程长达 150m 后,刀具后刀面的磨损  $VB = 0.15\text{mm}$ ,加工表面粗糙度达  $R_a$  为  $10\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 。

### 3. 立方氮化硼(CBN)

立方氮化硼是由六方氮化硼在高温、高压下加入催化剂转变而成。它分为两种,整体聚晶立方氮化硼和立方氮化硼复合刀片(在硬质合金基体上烧结一层厚度约为 0.5mm 的立方氮化硼)。

立方氮化硼有很高的硬度和耐磨性,其显微硬度可达 (8000 ~ 9000)HV,仅次于金刚石;有很高的热稳定性(可达 1400 )比金刚石要高得多;有很大的化学惰性,它与铁族金属在 1200 ~ 1300 时也不易起化学作用;它的抗弯强度目前还处在低的水平,有的刀片可达 0.5GPa 以上。

立方氮化硼刀具可用于硬质合金切削,一般用于钢材及铸铁,如半精和精加工淬火钢、冷硬铸铁、高温合金等难加工材料的切削。其加工效果可达磨加工的水平。目前,对于高硬度的热喷涂材料它是切削效率最高的一种刀具材料。

我国成都工具研究所生产的立方氮化硼刀片(牌号 FD),其硬度 5000HV,抗弯强度达 0.5GPa,热稳定性大于 1000 。例如,使用 FDAW 牌号刀片,粗车镍基 102 粉加钴包碳化钨热喷熔层外圆,用  $v = 79\text{m/min}$ ,切削路程长度 224m,刀具后刀面仅磨损 0.05mm( $VB$  值)。一般用立方氮化硼刀片车削高硬度热喷涂涂层,切削速度可比 YC09 硬质合金刀片提高 4 倍 ~ 5 倍。立方氮化硼是切削加工热喷涂涂层效果最好的刀具材料。

## 9.2.2 刀具几何参数的选择

刀具切削部分的几何参数是决定刀具切削性能的重要因素。有了好的刀具材料还要靠合理的刀具几何参数,才能使其性能得到更好地发挥。

### 9.2.2.1 刀具几何参数及其选用原则

刀具切削部分的几何参数,对刀具的切削性能有很大的影响。它是切削加工中需要研究与解决的又一重要问题,在这里首先把他们的基本定义介绍如下。

切削加工的刀具,虽然种类很多,但它们的切削部分在几何特征上却具有共性,外圆车刀的切削部分,可以看作是其它各种刀具切削部分的基本形态,当然

它们还有各自的特点。所以下面的基本定义 是以外圆车刀切削部分给出的。

### 1. 刀具切削部分的表面与刀刃

图 9 - 3 是外圆车刀的切削部分。

前刀面( $A_\gamma$ )——切屑沿其流出的表面。

后刀面( $A_\alpha$ )——与加工表面相对的表面。

副后刀面( $A'_\alpha$ )——与已加工表面相对的表面。

主切削刃( $S$ )——担任主要切削工作的切削刃 ,它是前刀面与后刀面相交而得到的边锋。

副切削刃( $S'$ )——担任少量切削工作的切削刃 ,它是前刀面与副后刀面相交而得到的边锋。

刀尖——主、副切削刃相交的一小段切削刃 ,通常为一段圆弧 ,其半径称为刀尖半径  $r$ 。

### 2. 刀具几何角度

刀具几何角度是表示刀具的前、后刀面 ,主、副切削刃相对于工件的空间位置。为了确定它们的空间位置 ,必须首先确定参考平面(即坐标平面)。

#### 1) 参考平面(坐标平面)

刀具角度参考平面(坐标平面)系统有三种 ,其中主剖面参考系应用得最广泛 ,它由以下三个平面组成 ,见图 9 - 4。

(1) 基面  $P_r$ ——通过主切削刃一点 ,而又垂直于主运动方向(切削速度方向)的平面 ,称之为该点的基面。

(2) 切削平面  $P_s$ ——通过主切削刃一点 ,相切于主切削刃而又垂直于基面的平面 ,称之为该点的切削平面。

(3) 主剖面  $P_0$ ——通过主切削刃一点 ,而又垂直于主切削刃在基面上投影的剖面 ,称之为该点的主剖面。

由以上定义可知 :基面、切削平面、主剖面是三个互相垂直的坐标平面。

#### 2) 刀具几何角度定义

图 9 - 5 是主剖面系标注的刀具角度 ,其中主要的有五个 ,它们的定义分别如下 :

(1) 前角  $\gamma_0$ ——前刀面与基面的夹角(在主剖面中测量)称之为前角。当前刀面低于基面时(图 9 - 5 所示位置) ,前角为正值 ,反之则为负值。

(2) 后角  $\alpha_0$ ——后刀面与切削平面的夹角(在主剖面中测量) ,称之为后角。

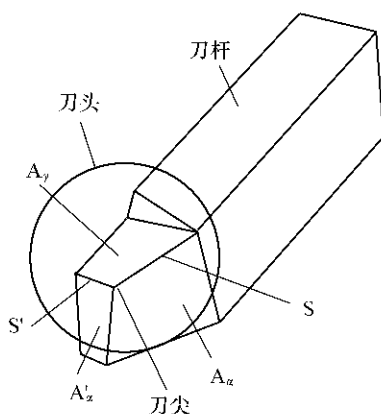


图 9 - 3 车刀的切削部分

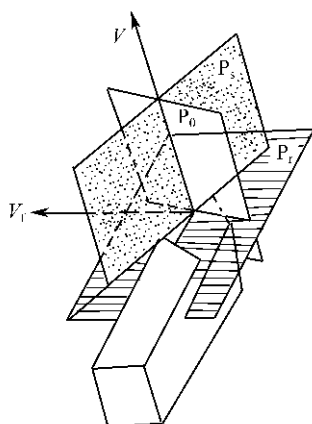


图 9 - 4 主剖面系参考平面

(3) 主偏角  $K_r$ ——主切削刃与进给方向在基面上投影的夹角,称之为主偏角。

(4) 副偏角  $K'_r$ ——副切削刃与进给方向在基面上投影的夹角,称之为副偏角。

(5) 刃倾角  $\lambda_s$ ——主切削刃与基面的夹角(在切削平面中测量),称之为刃倾角。当主切削刃低于基面时(图 9 - 5 所示位置)刃倾角为正值,反之为负值。

由图 9 - 5 可知  $\gamma_0$ 、 $\lambda_s$  两角确定了前刀面的方位; $K_r$ 、 $\alpha_0$  两角确定了后刀面的方位; $K_r$ 、 $\lambda_s$  两角确定了主切削刃的方位。

此外 根据刀具的需要 给定几个派生的角度,它们的名称与定义如下:

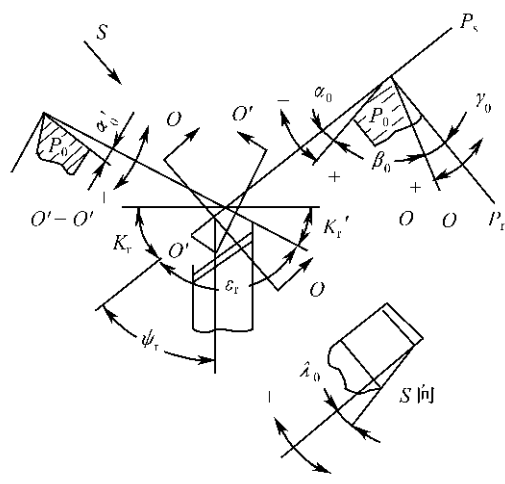


图 9-5 主剖面系标注的刀具角度

楔角  $\beta_0$ ——前刀面与后刀面之间的夹角(在主剖面中测量)。

$$\beta_0 = 90^\circ - (\gamma_0 + \alpha_0)$$

刀尖角  $\epsilon_r$ ——主切削刃与副切削刃在基面上投影的夹角。

$$\epsilon_r = 180^\circ - (K_r + K'_r)$$

### 3. 前角及前刀面形状的选择

#### 1) 前角的功用

前角是刀具重要的角度之一,它的大小决定切削刃的锋利程度和强固程度。增大前角可以减小切屑变形,从而使切削力和切削功率减小,切削时产生的热量减小,使刀具耐用度得到提高。但是增大前角会使楔角减小,刀刃强度降低,容易造成崩刃,另一方面会使刀头散热体积减小,致使切削温度升高。因此,刀具的前角太大时,刀具耐用度也会下降。在一定的加工条件下,存在一个刀具耐用度为最大的前角即合理前角。

#### 2) 前角的选择

刀具合理前角主要取决于刀具材料、工件材料的种类、性质和加工情况。

(1) 刀具材料的抗弯强度及韧性较高时,可选择较大的前角。例如,高速钢的抗弯强度高、韧性好,硬质合金抗弯强度低、脆性大、怕冲击、易崩刃。因此,高速钢刀具的前角可比硬质合金刀具选得大一些,可大  $5^\circ \sim 15^\circ$ 。陶瓷刀具的脆性更大,故前角应选得比硬质合金刀具还要小一些。

(2) 按工件材料的种类、性质选取前角。

① 加工塑性材料(如钢)时,应选取较大的前角,加工脆性材料(如铸铁)时,应选取较小的前角。

切削钢料时,切屑变形很大,切屑与前刀面的接触长度较长,刀屑之间的压力和摩擦力都很大,为了减小切屑的变形和摩擦,宜选较大的前角。用硬质合金刀具加工一般钢料时,前角可选  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

切削灰铸铁时,塑性变形较小,切屑呈崩碎状,它与前刀面的接触长度较短,与前刀面的摩擦不大,切削力集中在切削刃附近,为了保护切削刃不致损坏,宜选用较小的前角。一般加工灰铸铁时,前角可选  $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。

② 工件材料的强度或硬度较小时,宜选用较大的前角。这是因为此时切削力不大,刀具不易崩刃,对刀具强固的要求较低,为了使切削刃锋利,可选较大的前角。例如,加工铝合金时  $\gamma_0 = 30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,加工中硬钢时  $\gamma_0 = 10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ,加工软钢时  $\gamma_0 = 20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

③ 用硬质合金车刀加工强度很大的钢料( $\sigma_b = 0.8\text{GPa} \sim 1.2\text{GPa}$ )或淬火钢时需采用负前角( $\gamma_0 = -5^{\circ} \sim -20^{\circ}$ )。材料的强度或硬度越高,负前角的绝对值也越大。这是因为此时的切削力很大,当采用正前角时,切削刃和刀尖部分主要受到的是弯曲和剪切变形(图 9-6(a)),由于硬质合金的抗弯强度较低,在重载下容易破损。采用负前角时,切削刃和刀尖部分受到的是压应力(图 9-6(b)),硬质合金的抗压强度比抗弯强度高 3 倍~4 倍,切削刃不易因受压而破损。抗弯强度更差的陶瓷和立方氮化硼刀具,也经常采用负前角。但是负前角刀具会增大切削力和能耗,特别是径向分力  $F_y$ ,容易引起机床振动,因此,只有在工件材料的强度与硬度很高、切削时冲击很大、采用正前角要产生崩刃,而工艺系统刚性很好不产生振动的条件下,才采用负前角。

(3) 粗加工时,切削力和冲击力一般都比较大,为使切削刃有足够的强度,宜取较小的前角,精加工时,对切削刃强度的要求较低,为使刀刃锋利,降低切削力,减少工件变形和表面粗糙度,宜取较大的前角。

合理前角的参考数值见表 9-4。

表 9-4 硬质合金车刀合理前角参考值

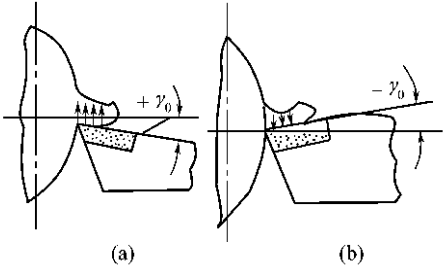


图 9-6 车刀不同前角的受力情况  
(a) 正前角; (b) 负前角。



工 件 材 料	合理前角/(°)		工 件 材 料	合理前角/(°)	
	粗车	精车		粗车	精车
低碳钢 A3	18 ~ 20	20 ~ 25	40Cr(正火)	13 ~ 18	15 ~ 20
45 钢(正火)	15 ~ 18	18 ~ 20	40Cr(调质)	10 ~ 15	13 ~ 18
45 钢(调质)	10 ~ 15	13 ~ 18	40 钢 40Cr 钢锻件	10 ~ 15	
45 钢、40Cr 铸钢件或钢锻件断续切削	10 ~ 15	5 ~ 10	淬硬钢((40 ~ 50)HRC)	- 15 ~ 5	
灰铸铁 HT15 - 32、HT20 - 40、青铜 ZQSn10 - 1、脆黄铜 HPb59 - 1	10 ~ 15	5 ~ 10	灰铸铁断续切削	5 ~ 10	0 ~ 5
			高强度钢( $\sigma_b < 180$ )	- 5	
铝 L3 及铝合金 LY12	30 ~ 35	35 ~ 40	高强度钢( $\sigma_b \geq 180$ )	- 10	
紫铜 T1 ~ T4	25 ~ 30	30 ~ 35	锻造高温合金	5 ~ 10	
奥氏体不锈钢(185HB 以下)	15 ~ 25		铸造高温合金	0 ~ 5	
马氏体不锈钢(250HB 以下)	15 ~ 25		钛及钛合金	5 ~ 10	
马氏体不锈钢(250HB 以上)	- 5		铸造碳化钨	- 10 ~ - 15	

#### 4. 倒棱及其参数的选择

倒棱是沿主刀刃在前刀面上磨出一个很小的棱面,如图 9 - 7(a)、(b)所示。这样就避免了由于使用正前角而引起刀刃强度减弱的缺陷,同时刀尖楔角增大,改善了散热条件。实践说明,倒棱对于减少崩刃和提高刀具耐用度的效果是很显著的。

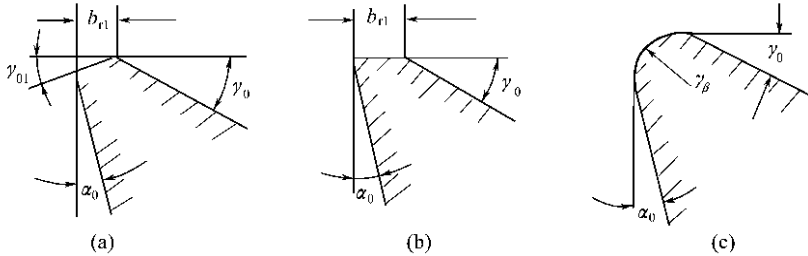


图 9 - 7 前刀面上的倒棱

倒棱的宽度值通常与进给量有关,一般取  $b_{r1} = 0.2\text{mm} \sim 1\text{mm}$  或  $b_{r1} = (0.3 \sim 0.8)f$  粗加工时取大值,半精加工时取小值  $f$  为进给量。

倒棱的前角,高速钢刀具  $\gamma_{01} = 0^\circ \sim 5^\circ$ ,硬质合金刀具  $b_{r1} = -5^\circ \sim -10^\circ$ 。

用硬质合金车刀切削带硬皮的工件时,如果切削冲击力较大,而机床的刚性和功率许可,倒棱的  $b_{r1}$  及  $\gamma_{01}$  的绝对值还可增大,如取  $b_{r1} = (1 \sim 2)f$ ,  $\gamma_{01} = -10^\circ \sim -15^\circ$ 。用陶瓷刀铣削淬硬钢((58 ~ 65)HRC)时  $\gamma_{01} = -15^\circ \sim -30^\circ$  为

好。必须指出,倒棱宽度不能太大,当切屑完全沿倒棱流出时,则负倒棱就起负前角前刀面的作用了。

对于进给量很小( $f \leq 0.2 \text{ mm/r}$ )的精加工刀具,由于切下的切屑很薄,为了使切削刃锋利,不宜磨出倒棱。此外加工铸铁、铜合金等脆性材料的刀具,一般也都不磨出倒棱。

采用刀刃钝圆(图 9 - 7(c)),也是增强切削刃的有效方法,目前经钝圆处理的硬质合金可转位刀片,已经获得广泛的应用,钝圆刃还有一定的切挤熨压及消振作用,可减小工件已加工表面的粗糙度。

钝圆半径  $r_\beta$  推荐如下:一般情况下  $r_\beta < f/3$  ( $f$  为进给量),轻型钝圆半径  $r_\beta = 0.02 \text{ mm} \sim 0.03 \text{ mm}$ ,中型钝圆半径  $r_\beta = 0.05 \text{ mm} \sim 0.1 \text{ mm}$ ,重型钝圆半径  $r_\beta = 0.15 \text{ mm}$  (用于重载切削)。

## 5. 后角的功用与选择

### 1) 后角的功用

后角的主要功用是减小刀具后刀面与加工表面之间的摩擦,因而对刀具耐用度和加工表面质量有很大的影响。适当增大后角可以提高刀具耐用度,这是因为增大后角可减小弹性恢复层与后刀面的接触长度,同时容易切入工件,因而减小后刀面的摩擦与磨损。另外,当后刀面磨损标准  $VB$  值相同时,后角较大的刀具,用到磨钝时,所磨去的金属体积较大(图 9 - 8(a)),从而延长了刀具的使用时间。但是,当后角太大时,楔角会显著减小,削弱了切削刃的强度,减小散热体积而使散热条件恶化,使刀具耐用度降低。所以,后角也存在一个刀具耐用度为最大的合理数值。

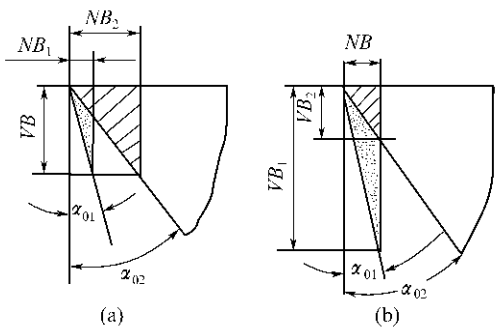


图 9 - 8 后角的大小对刀具材料磨损体积的影响  
(a)  $VB$  一定 ; (b)  $NB$  一定。

2) 后角的选择

(1) 合理后角的大小主要取决于进给量的大小。当进给量很小时 ,磨损主要发生在后刀面上 ,为了减小后刀面的磨损 ,宜取大的后角。反之 ,这时后角取小值可以增强切削刃和改善散热条件 ,从而可提高刀具的耐用度。

(2) 工件材料的强度或硬度较高时 ,为了加强切削刃 ,宜取较小的后角。工件材料较软 ,塑性较大 ,已加工表面易产生加工硬化 ,后刀面摩擦对刀具磨损和加工表面质量影响较大时 ,应取较大的后角。例如 ,加工高温合金宜取  $\alpha_0 = 10^\circ \sim 15^\circ$  ,加工钛合金时 ,由于这种材料的弹性极限较大 ,加工后的表面弹性恢复较大 ,为了减小后刀面与弹性恢复层的接触面积 ,宜取较大的后角  $\alpha_0 = 10^\circ \sim 12^\circ$ 。

(3) 对于尺寸精度较高的刀具 ,宜取小的后角。因为当径向磨损量 NB 选为定值时(图 9 - 8(b)) ,后角较小 ,所允许磨掉的金属体积较多 ,刀具可连续使用时间较长 ,故刀具耐用度较高。

这里应该指出 ,后角的选择与切削刃的运动轨迹有很大关系。例如 ,切断刀工作时的进给量较小 ,刀具愈接近中心 ,工作后角愈小。因此 ,切断刀的后角要比外圆车刀选得大一些 ,一般  $\alpha_0 = 10^\circ \sim 12^\circ$ 。又如在车削大螺距右螺纹时 ,由于进给运动的关系 ,主刀刃的后角比副刀刃的后角要磨得大些。

车刀的副后角一般取其等于主后角。合理后角的参考数值见表 9 - 5。

表 9 - 5 硬质合金车刀合理后角参考值

工 件 材 料 及 切 削 条 件		合理后角/(°)
低碳钢 $\sigma_b = 0.392\text{GPa} \sim 0.491\text{GPa}$	精车 $f \leq 0.3\text{mm/r}$	10 ~ 12
	粗车 $f > 0.3\text{mm/r}$	8 ~ 10
钢 $\sigma_b = 0.687\text{GPa} \sim 0.785\text{GPa}$		6 ~ 8
钢 $\sigma_b = 0.883\text{GPa} \sim 0.981\text{GPa}$		5 ~ 7
淬硬钢		10 ~ 15
铸 铁		6 ~ 8
铜、铝及其合金		8 ~ 10
不 锈 钢	奥氏体 185HB 以下	6 ~ 8
	马氏体 250HB 以下	6 ~ 8
	马氏体 250HB 以下	8 ~ 10
高强度钢	$\sigma_b < 1.766\text{GPa}$	10
	$\sigma_b \geq 1.766\text{GPa}$	10
高温合金	锻 造	10 ~ 15
	锻 造	10 ~ 15

6. 主偏角、副偏角及刀尖形状的选择

1) 主偏角的功用及选择

(1) 主偏角的功用。主偏角的大小影响三个切削分力的大小和比例关系。增大主偏角 ,可减小主切削力  $F_z$  ,同时可使径向分力  $F_y$  减小 ,走刀抗力  $F_x$  增大。 $F_y$  力的减小 ,有利于减小工艺系统的弹性变形和振动 ,这是生产中常常选用较大主偏角的一个重要原因。

主偏角的大小影响主刀刃的工作长度及刀尖角  $\epsilon_r$  的大小 ,当切削深度  $a_p$  和进给量  $f$  不变时 ,减小主偏角 ,参加切削的刀刃长度增加 ,单位长度刀刃上的负荷减轻 ,散热条件亦得到改善。同时刀尖角  $\epsilon_r$  增大 ,使刀尖强度提高 ,刀尖散热体积增大 ,因此可提高刀具耐用度。从刀具耐用度出发 ,主偏角应小些为好。

主偏角还影响断屑效果 ,增大主偏角 ,使切屑变得窄而厚 ,容易折断。

(2) 主偏角的选择。

① 当工艺系统刚性较好时 ,可选用较小的主偏角 ;刚性不足 (如车细长轴) 时 ,应选取大的主偏角 ,以减小径向分力  $F_y$  ,减少弹性变形和振动 ,从而提高零件的加工精度 ,降低表面粗糙度。

② 粗加工和半精加工 ,硬质合金车刀一般选用较大的主偏角 ,以利于减少振动、断屑和采用较大的切削深度。

③ 加工很硬的材料 (如冷硬铸铁和淬火钢) 时 ,为了减轻单位切削刃上的负荷 ,改善刀头的散热条件 ,提高刀具耐用度 ,宜取较小的主偏角。

④ 需要从中间切入的车刀 ,应增大主偏角和副偏角。有时 ,由于受工件形状的限制 (如车阶梯轴) ,则需用主偏角为  $90^\circ$  的车刀。

硬质合金车刀合理主偏角的数值见表 9 - 6。

表 9 - 6 车刀合理偏角参考值

加 工 情 况		偏角数值 / ( $^\circ$ )	
		主偏角 $K_r$	副偏角 $K_f$
粗车 ,无中间切入	工艺系统刚性好	45 , 60 , 75	5 ~ 10
	工艺系统刚性差	65 , 75 , 90	10 ~ 15
车削细长轴		90 , 93	6 ~ 10
精车 ,无中间切入	工艺系统刚性好	45	0 ~ 5
	工艺系统刚性差	60 , 75	0 ~ 5
车削冷硬铸铁、淬火钢		10 ~ 30	4 ~ 10

从工件中间切入	45 ~ 60	30 ~ 45
切断刀,切槽刀	60 ~ 90	1 ~ 2

## 2) 副偏角的功用及选择

(1) 副偏角的功用。副偏角主要影响已加工表面的粗糙度和刀具耐用度。小的副偏角,可使“残留面积”的高度减小,从而改善表面粗糙度;过小的副偏角将增加副刀刃参与切削工作的长度,增大副后刀面与已加工表面之间的摩擦与磨损,同时还会引起振动。过大的副偏角,将削弱刀尖和恶化刀头散热条件,结果都会使刀具耐用度降低。只有取某一合理的数值,才能有最高耐用度。

(2) 副偏角的选择。在工艺系统刚性较好不产生振动的条件下,副偏角应取小值。精车时,一般  $K'_r = 5^\circ \sim 10^\circ$ ,粗车时  $K'_r = 10^\circ \sim 15^\circ$ 。

加工高强度高硬度材料或断续切削时,应取较小的副偏角 ( $K'_r = 4^\circ \sim 6^\circ$ ),以提高刀尖强度。

硬质合金车刀合理副偏角参考数值见表 9 - 6。

(3) 刀尖形状及尺寸的选择。刀尖处的强度较差,散热条件亦不好。因此,在切削时刀尖处的切削温度较高,很容易磨损。当主偏角与副偏角都很大时,这一情况尤为严重。所以强化刀尖可显著提高刀具的抗崩刃性和耐磨性,从而提高刀具耐用度。此外,刀尖的形状对残留面积的高度和已加工表面的粗糙度也有很大的影响。

强化刀尖的办法可采取不同的过渡刃形式,如图 9 - 9 所示。

① 圆弧形过渡刃。圆弧形过渡刃(图 9 - 9(a))不仅可提高刀具耐用度,还可大大减小已加工表面的粗糙度。精加工车刀常常采用圆弧形过渡刃。

圆弧形过渡刃的半径称为刀尖半径  $h$ ,对硬质合金和陶瓷车刀一般  $r_g = 0.5\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$ ,对高速钢车刀  $r_g = 1\text{mm} \sim 3\text{mm}$ 。适当增大刀尖半径,刀具的磨损与破损均可减小,但刀尖半径增大后,径向分力  $F_y$  也增加,在工艺系统刚性不足时,刀尖半径太大,容易引起振动。因此,硬质合金及陶瓷刀具的刀尖半径取得较小。

② 直线形过渡刃。粗加工时,切削深度比较大,为了减小径向分力  $F_y$  和振动,通常采用较大的主偏角。由此引起刀尖强度较差,散热条件恶化。为了改善这种情况,提高刀具耐用度,常常磨出直线过渡刃(图 9 - 9(b))。

一般取过渡刃偏角  $K_{re} = 1/2 K_r$ ,过渡刃长度  $b_g = 0.5\text{mm} \sim 2\text{mm}$  或  $b_g = (1/4 \sim 1/5) a_p$

## 7. 刃倾角的功用与选择

### 1) 刃倾角的功用

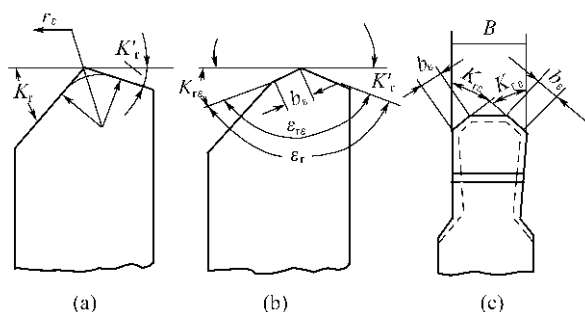


图 9 - 9 刀具的过渡刃

(1) 控制切屑流出方向。如图 9 - 10 所示, 当  $\lambda_s = 0$  时, 切屑在前刀面上近似沿垂直于主刀刃的方向流出; 当  $\lambda$  为正值时, 切屑流向机床床头箱, 形成的长卷屑不仅妨碍工人操作, 而且容易缠绕在机床传动部件上, 因此, 从安全和工作方便的观点看, 这种切屑流向是不好的; 当  $\lambda_s$  为负值时, 切屑流向已加工表面, 形成的长卷屑易损坏已加工表面。精车时, 为避免切屑擦伤已加工表面, 则常取正刃倾角。

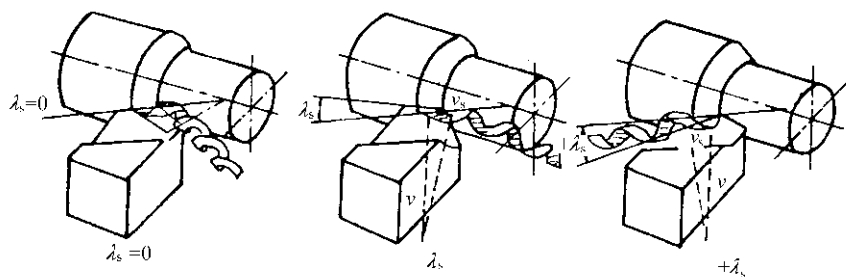


图 9 - 10 刃倾角对切屑流出方向的影响

(2) 改变切削时切削刃上受冲击的位置, 可提高刀头的强度。

如图 9 - 11 所示, 当  $\lambda_s = 0$  时, 切削刃全长与工件同时接触, 切削力在瞬间由零增至最大, 因而冲击较大。当  $\lambda_s > 0$  时, 刀尖首先接触工件, 冲击作用在刀尖上容易崩尖。当  $\lambda_s < 0$  时, 即为负值时, 离刀尖较远处的切削刃首先接触工件, 保护了刀尖。其次, 切削面积在切入时由小到大, 切出时由大到小逐渐变化, 因而切削力是逐渐变化的, 切削比较平稳, 可大大减少刀具受到冲击的机会和崩刃现象的发生。因此, 在粗加工时, 特别是冲击较大的加工中, 常常采用负刃倾角的刀具。

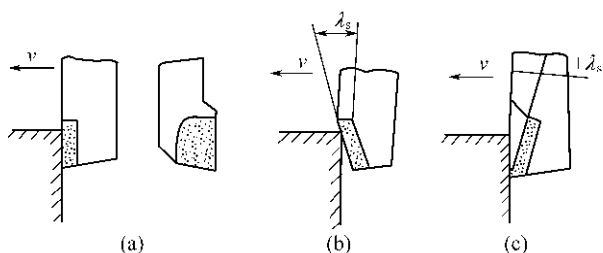


图 9 - 11 切削时刃倾角对切削刀受冲击位置的影响

(3) 影响切削分力的大小。当负刃倾角的绝对值增大时 ,径向分力  $F_y$  显著增大。它将导致工件变形及引起振动 ,在工艺系统刚性不足时 ,应尽量不用负刃倾角。

## 2) 刃倾角的选择

刃倾角对刀具耐用度的影响 ,也存在一个刀具耐用度为最大时的合理数值。

在加工一般钢材材料和铸铁时 ,粗车取  $\lambda_s = 0^\circ \sim - 5^\circ$  ,精车取  $\lambda_s = 0^\circ \sim + 5^\circ$  ;有冲击负荷时  $\lambda_s = - 5^\circ \sim - 15^\circ$ 。当冲击特别大时 ,可取  $\lambda_s = - 30^\circ \sim - 45^\circ$ 。

加工高强度钢、高锰钢、淬硬钢时 ,可取  $\lambda_s = - 20^\circ \sim - 30^\circ$ 。

工艺系统刚性不足时 ,应尽量不用负刃倾角。

金刚石和立方氮化硼车刀 ,取  $\lambda_s = 0^\circ \sim - 5^\circ$ 。

## 9. 2. 2. 2 难加工热喷涂涂层刀具几何角度的选择

热喷涂涂层对刀具几何参数总的要求是 :要保证刀刃 (或刀头) 的强度与好的散热条件 ,这也是我们选择刀具几何参数的原则。当然还应注意系统刚性 ,注意径向分力  $F_y$  不能过大 ,以免引起振动。

根据试验结果和实际加工情况 ,推荐的刀具几何参数见表 9 - 7。

表 9 - 7 刀具几何参数推荐值

工件材料		Ni60 喷熔层		GI12 喷熔层	
刀具牌号		YC09		YH3	
工序		半精车	精车	半精车	精车
切削	$a_p / \text{mm}$	0. 2	0. 1	0. 2	0. 1
用量	$f / (\text{mm} / \text{r})$	0. 2	0. 1	0. 2	0. 1
前角	$\gamma_0$	- 5°	0° ~ - 5°	- 5°	0° ~ - 5°
后角	$A_0$	8°	12°	8°	12°

主偏角 $K_r$		$10^\circ$	$15^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$
副偏角 $K'_r$		$15^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$10^\circ$
刃倾角 $\lambda_s$		$-5^\circ$	$0^\circ$	$-5^\circ$	$0^\circ$
刃尖圆弧半径 $r_e/\text{mm}$		0.3	0.5	0.3	0.5
负倒棱	$b_{rl}/\text{mm}$	0.1	0.05	0.1	0.05
	$\gamma_{0l}$	$-15^\circ$	$-10^\circ$	$-15^\circ$	$-10^\circ$

### 9.2.3 车削切削用量的选择

#### 9.2.3.1 切削用量的三要素

车削时的运动如图 9-12 所示,切削用量三要素有切削速度、进给量和切削深度。它们对于加工质量、生产率以及加工成本有很大的影响,如何选择合理的切削用量,是一个需要研究与解决的问题。

##### 1. 切削速度 $v$

切削速度是刀刃与工件接触点的主运动的线速度,单位为  $\text{m}/\text{min}$ 。

当主运动为旋转运动时,切削速度可由下式决定

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

式中  $d$  为完成主运动工件的最大直径( $\text{mm}$ )  $n$  为主运动的转速( $\text{r}/\text{min}$ )。

##### 2. 进给量 $f$

进给量是工件或刀具在进给运动方向上的单位量。例如车削,其单位为  $\text{mm}/\text{r}$ ,即工件 1 转刀具沿进给方向的位移量,也称走刀量。

##### 3. 切削深度 $a_p$

切削深度是待加工表面与已加工表面间的垂直距离,单位为  $\text{mm}$ 。

$$\text{切削外圆的切削深度} \quad a_p = \frac{d_w - d_m}{2}$$

式中  $d_w$  为工件待加工表面的直径( $\text{mm}$ )  $d_m$  为工件已加工表面的直径( $\text{mm}$ )。

#### 9.2.3.2 切削用量的选用原则

在一定的加工条件下,选用不同的切削用量,当然会产生不同的加工效果。如切削用量选低了,则生产效率下降,生产成本自然增加;若选高了,则会加速刀

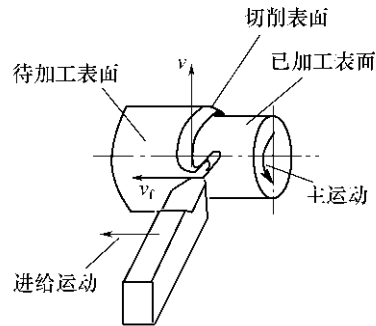


图 9-12 车削运动



具的磨损 增加磨刀、换刀时间和磨刀费用 生产效率也会下降 生产成本也会增加。因此 切削用量有一个优化与组合的问题。

所谓“合理的”切削用量是指在保证加工质量的前提下 获得高的生产率和低的加工成本的切削用量。

### 1. 切削用量的选择原则

刀具耐用度是限制切削用量最基本的因素 因为它在很大程度上严重地影响到生产率和加工成本 所以 选择切削用量的原则是以刀具耐用度作为基础的。

(1) 对于粗加工 要尽可能保证较高金属切除率的原则。

例如 车削加工 金属切除率可用下式表示

$$Z_w = 1000 \times v f a_p$$

式中  $Z_w$  为金属切除率 ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) ;  $v$  为切削速度 ( $\text{m}/\text{min}$ ) ;  $f$  为进给量 ( $\text{mm}/\text{r}$ )  $a_p$  为切削深度 ( $\text{mm}$ )。

从上式可以看出 提高切削速度、增大进给量和切削深度 都能提高金属切除率。但是 它们对刀具耐用度的影响则不同 影响刀具耐用度最大的是切削速度 其次是进给量 最小的是切削深度。所以 在选择粗加工的切削用量时 应优先考虑采用最大的切削深度 其次考虑采用切削力功率允许的最大进给量 最后才根据刀具耐用度选定合理的切削速度。

(2) 对于半精加工及精加工 要保证加工精度、表面质量的原则。

半精加工和精加工时 切削深度只是粗加工后留下来的不大的余量 限制进给量提高的主要因素是表面粗糙度。为了减小工艺系统的弹性变形、已加工表面残留面积的高度 在选择半精加工和精加工的切削用量时 一般多首先选取加工精度与加工表面质量允许的切削深度与进给量 然后也是在保证刀具耐用度的前提下确定合理的切削速度。

总之 当切削用量受刀具耐用度的限制时 选择切削用量的原则是 首先选取大的切削深度 其次选取大的进给量 最后选取合理的切削速度。

### 2. 切削用量三要素的确定

(1) 切削深度的确定。切削深度根据加工余量的大小而定 除留给下一道工序的余量外 其余的粗加工时应尽可能一次切除。当粗加工余量太大或因加工工艺系统刚性较差 不能一次切除时 则第一次走刀的切削深度要比第二次的大。这样可得到较高的加工精度和较小的表面粗糙度。一般第一次走刀的切削深度为加工余量的  $2/3 \sim 3/4$ 。

(2) 进给量的确定。粗加工时切削力较大 进给量应是工艺系统所能承受的最大进给量。它受车刀刀杆的强度和刚度、硬质合金或陶瓷刀片的强度、工件

的装夹刚度以及机床进给机构的强度等的限制。

精加工时 ,最大进给量则主要受加工精度和表面粗糙度的限制。

进给量可根据经验选取。粗加工时 ,按加工材料、车刀刀杆尺寸、工件直径及已确定的切削深度按表 9 - 8 来选择。表中说明当刀杆尺寸增大 ,工件直径增大时 ,可以选择较大的进给量 ,当切削深度增大时 ,由于切削力增大 ,故应选择较小的进给量 ,加工铸铁时的切削力较加工钢时小 ,故可选择较大的进给量。按经

表 9 - 8 硬质合金车刀粗车外圆及端面的进给量

工件材料	车刀刀杆 尺寸 /mm	工件直径 /mm	切削深度 $a_p$ /mm				
			≤3	>3~5	>5~8	>8~12	>12
			进给量 $f$ /(mm/r)				
碳素结构 钢、合金结 构钢及耐 热钢	16×25	20	0.3~0.4	—	—	—	—
		40	0.4~0.5	0.3~0.4	—	—	—
		60	0.5~0.7	0.4~0.6	0.3~0.5	—	—
		100	0.6~0.9	0.5~0.7	0.5~0.6	0.4~0.5	—
		400	0.8~1.2	0.7~1.0	0.6~0.8	0.5~0.6	—
	20×30 25×25	20	0.3~0.4	—	—	—	—
		40	0.4~0.5	0.3~0.4	—	—	—
		60	0.6~0.7	0.5~0.7	0.4~0.6	—	—
		100	0.8~1.0	0.7~0.9	0.5~0.7	0.4~0.7	—
		400	1.2~1.4	1.0~1.2	0.8~1.0	0.6~0.7	0.4~0.6

(续)

工件材料	车刀刀杆 尺寸 /mm	工件直径 /mm	切削深度 $a_p$ /mm				
			≤3	>3~5	>5~8	>8~12	>12
			进给量 $f$ /(mm/r)				
铸铁及铜 合金	16×25	40	0.4~0.5	—	—	—	—
		60	0.6~0.8	0.5~0.8	0.4~1.6	—	—
		100	0.8~1.2	0.7~1.0	0.6~0.8	0.5~0.7	—
		400	1.0~1.4	1.0~1.2	0.8~1.0	0.6~0.8	—
铸铁及铜 合金	20×30 25×25	40	0.4~0.5	—	—	—	—
		60	0.6~0.9	0.5~0.8	0.4~0.7	—	—
		100	0.9~1.3	0.8~1.2	0.7~1.0	0.5~0.8	—
		400	1.2~1.8	1.2~1.6	1.0~1.3	0.9~1.1	0.7~0.9

注：(1) 加工断续表面及有冲击的工件时，表内进给量应乘系数  $k=0.75 \sim 0.85$ ；  
(2) 在无外皮加工时，表内进给量应乘系数  $k=1.1$ ；  
(3) 加工耐热钢及其合金时，进给量不大于  $1\text{mm/r}$ ；  
(4) 加工淬硬钢时，进给量应减少。当钢的硬度为  $(44 \sim 56)\text{HRC}$  时，乘系数  $0.8$ ，当钢的硬度为  $(57 \sim 62)\text{HRC}$  时，乘系数  $0.5$

验确定的粗车进给量，在一些特殊情况下，如切削力很大，工件长径比很大等还需对所选定的进给量进行校验。在半精加工和精加工时，进给量则按表面粗糙度的要求、工件材料、刀尖圆弧半径、切削速度等从表 9 - 9 来选择。表中说明表面粗糙度较好，进给量应取小值；当刀尖圆弧半径增大、切削速度较高时，进给量可以取大值。

表 9 - 9 按表面粗糙度选择进给量的参考值

工 件 材 料	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	切削速度范围 $/( \text{m/min} )$	刀尖圆弧半径 $r_e/\text{mm}$		
			0.5	1.0	2.0
			进给量 $f/( \text{mm/r} )$		
铸铁、青铜、 铝合金	10	不限	0.25 ~ 0.40	0.40 ~ 0.50	0.50 ~ 0.60
	5		0.15 ~ 0.25	0.25 ~ 0.40	0.40 ~ 0.60
	2.5		0.10 ~ 0.15	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.35
碳钢及合金钢	10	<50	0.30 ~ 0.50	0.45 ~ 0.60	0.55 ~ 0.70
		>50	0.40 ~ 0.55	0.55 ~ 0.65	0.65 ~ 0.70
	5	<50	0.18 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.40
		>50	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.35	0.35 ~ 0.50
	2.5	<50 50 ~ 100 >100	0.10 0.11 ~ 0.16 0.16 ~ 0.20	0.11 ~ 0.15 0.16 ~ 0.25 0.20 ~ 0.25	0.15 ~ 0.22 0.25 ~ 0.35 0.25 ~ 0.35

(续)

工 件 材 料	表面粗糙度 R <sub>a</sub> /μm	切削速度范围 (m/min)	刀尖圆弧半径 r <sub>e</sub> /mm		
			0.5	1.0	2.0
			进给量 f/(mm/r)		
加工耐热合金及钛合金时进给量的修正系数(v>50m/min)					
工 件 材 料					修正系数
TC5 , TC6 , TC2 , TC4 , TC8 , TA6 , BT14 , Cr20Ni77TiAlB , Cr14Ni70WMoTiAl (GH37)					1.0
1Cr13 , 2Cr13 , 3Cr13 , 4Cr13 , 4Cr14Ni14W2Mo , Cr20Ni78Ti , 2Cr23Ni181Cr21Ni5Ti					0.9
1Cr12Ni2WMoV , 30CrNi2MoVA , 25Cr2MoVA , 4Cr12Ni8Mn8MoVNB , Cr9Ni62Mo10W5Co5Al5 , 1Cr18Ni11Si4TiAl , 1Cr15Ni35W3TiAl					0.8
1Cr11Ni20Ti3B , Cr12Ni22Ti3MoB					0.7
Cr19Ni9Ti , 1Cr18Ni9Ti					0.6
1Cr17Ni12 , 3Cr14NiVBA , 18Cr3MoWV					0.5
注 r <sub>e</sub> = 0.5mm 用于 12mm×20mm 以下刀杆 ,r <sub>e</sub> = 1mm 用于 30mm×30mm 以下刀杆 ,r <sub>e</sub> = 2mm ,用于 30mm×45mm 及以上刀杆					

(3) 切削速度的确定。根据已经选定的切削深度  $a_p$ 、进给量  $f$  及刀具耐用度  $t$  ,可按下面由试验所得的公式计算出车削时的合理切削速度

$$v = \frac{c_v}{t^m a_p^{x_v} f^{y_v}}$$

式中  $c_v$ 、 $x_v$ 、 $y_v$  及  $m$  值可由金属切削手册查出或由试验求出。

9.2.3.3 难加工热喷涂涂层的切削用量

热喷涂涂层的切削用量同样受刀具耐用度的限制 ,刀具的磨损限度亦称磨钝标准。它是指在刀具切削后刀面上的磨损值  $VB$  ,单位为  $\text{mm}$ 。例如 ,对于一般钢及铸铁用硬质合金刀具进行精加工 ,其磨钝标准为  $0.1 \text{mm} \sim 0.3 \text{mm}$ 。对于热喷涂涂层的切削加工 ,其刀具的磨钝标准 ,可用试验的方法通过求出刀具磨损量与切削时间的关系曲线而加以确定。

刀具耐用度  $t$  与切削用量的关系式可通过正交试验法得到。

当用 YC09 硬质合金车刀切削 G112 粉氧—乙炔火焰喷熔层时 ,可以得到如下的经验公式 ,即

$$t = \frac{501.5}{v^{1.5} \cdot f^{0.20} \cdot a_p^{0.16}} \tag{9 - 1}$$

当用立方氮化硼(CBN)刀具切削 Ni60 粉末喷熔层时 ,可以得到如下的经验公式 ,即

$$t = \frac{189}{v^{0.7} \cdot f^{0.28} \cdot a_p^{0.08}} \tag{9 - 2}$$

当用 YC09 硬质合金车刀切削 Ni60 粉末喷熔层时 ,可以得到如下的经验公

式,即

$$t = \frac{6500}{v^{2.4} \cdot f^{0.6} \cdot a_p^{0.10}} \tag{9 - 3}$$

当用 YH3 硬质合金车刀车削 G112 粉氧—乙炔喷熔层时,可以得到如下的经验公式,即

$$t = \frac{297}{v^{1.6} \cdot f^{0.48} \cdot a_p^{0.18}} \tag{9 - 4}$$

由上面的耐用度公式可知:切削速度对刀具耐用度的影响最大,其次是进给量,切削深度的影响最小。所以在优选切削用量时,其选择先后顺序应为:首先尽量选用大切削深度  $a_p$ ,然后根据加工条件和加工要求选取允许的进给量  $f$ ,最后在刀具耐用度或机床功率允许的情况下选取最大的切削速度  $v$ (此时所得到的  $v$  亦称合理的切削速度)。

当刀具耐用度选取为 30min,则可按式(9 - 1) ~ 式(9 - 4)经验公式计算出合理的切削速度。所求出的切削用量见表 9 - 10、表 9 - 11 和表 9 - 12。

表 9 - 10 合理耐用度与切削速度的计算值(一)

刀具—工件材料	YC09 - Ni60 喷熔层	
工 序	半精车	精车
$A_p$ /mm	0.2 ~ 0.3	0.1 ~ 0.15
$f$ / (mm/r)	0.2 ~ 0.24	0.1 ~ 0.14
$t$ /min	30	30
$V$ / (m/min)	13	16

表 9 - 11 合理耐用度与切削速度的计算值(二)

刀具—工件材料	YC09—G112 喷熔层		YH3—G112 喷熔层	
工序	半精车	精车	半精车	精车
$a_p$ /mm	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2
$f$ / (mm/r)	0.08 ~ 0.14	0.14 ~ 0.24	0.08 ~ 0.14	0.14 ~ 0.24
$t$ /min	30	30	30	30
$V_{mincost}$ / (m/min)	11 ~ 12.8	9.4 ~ 11	9.1	7.2 ~ 9.1

表 9 - 12 合理耐用度与切削速度的计算值(三)

刀具—工件材料	CBN - Ni60 喷熔层	
工 序	半精车	精车
$a_p$ /mm	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2
$f$ / (mm/r)	0.05 ~ 0.16	0.16 ~ 0.2
$t$ /min	30	30
$V$ / (m/min)	38 ~ 67	32 ~ 44

9.2.3.4 热喷涂涂层部分国内外的切削数据

表 9 - 13、表 9 - 14 表中的切削数据,可供切削加工时参考。

表 9 - 13 热喷涂涂层

刀具 牌号	物理力学性能		切削数据(L为切削路程长)				
	硬度 (HRA)	抗弯强度 /GPa	热喷涂层材料	硬度 (HRC)	切削用量		
					V/(m/min)	f/(mm/r)	a <sub>p</sub> /mm
YC09 (YD05)	94	1. 20 ~ 1. 40	Ni120 + Fe ( 喷熔外圆 ) ①	55 ~ 60	8. 5	0. 05	0. 2 ~ 0. 9
			Ni102 + 35% Co/WC ( 喷熔外圆 ) ①	70	7. 6	0. 45	0. 2
			Ni60 ( 喷熔外圆 ) ①	60	8. 7	0. 6	0. 15
			Ni105 + Fe ( 喷熔外圆 ) ①	60	17	0. 3	0. 15 ~ 0. 20
			Ni102 + Fe ( 喷熔外圆 ) ①	55 ~ 60	21. 8	0. 3	0. 4 ~ 0. 25
			Ni60 ( 喷熔外圆 ) ②	56	25	0. 2	0. 2
			GI12 ( 喷熔外圆 ) ②	52 ~ 54	25	0. 24	0. 2
YC08	93. 8	130 ~ 150	Ni102 ( 喷熔外圆 ) ①	55 ~ 60	12	0. 30	0. 15
YH1	≥92. 5	≥1. 65	Fe07 ( 喷熔外圆 ) ②	54	15	0. 2	1
			Ni60 ( 喷熔外圆 ) ②	56	25	0. 2	0. 2
YH2	≥92. 5	≥1. 6	Fe07 ( 喷熔外圆 ) ②	54	15	0. 2	1
YH3	≥92. 5	≥1. 6	Fe07 ( 喷熔外圆 ) ②	54	15	0. 2	1
			Fe04 ( 喷熔外圆 ) ②	58	27	0. 08	0. 2
610	≥93	≥1. 0	GI12 ( 喷熔外圆 ) ②	52 ~ 54	7. 9	0. 24	0. 2
			Ni102 + Fe ( 喷熔外圆 ) ①	55 ~ 60	8. 5 ~ 11	0. 3 ~ 0. 6	0. 10 ~ 0. 3
			Ni102 + 35% Co/WC	68	7	0. 4 ~ 0. 6	0. 2 ~ 0. 4
600	≥93. 5	≥1. 0	313 铁基 ( 喷熔外圆 ) ③	250HV	90 ~ 130	0. 06 ~ 0. 12	0. 1 ~ 0. 2
813	≥90. 5	≥1. 6	313 铁基 ( 喷熔外圆 ) ③	同上	90 ~ 110	0. 6 ~ 0. 12	0. 1 ~ 0. 2
1 号	≥91	1. 6	313 铁基 ( 喷熔外圆 ) ③	同上	90 ~ 110	0. 06 ~ 0. 12	0. 1 ~ 0. 2
T20	≥92	≥1. 1	313 铁基 ( 喷熔外圆 ) ③	同上	80 ~ 100	0. 6 ~ 0. 12	0. 1 ~ 0. 2
SG5	94	≥0. 7	Ni102 ( 喷熔外圆 ) ①	55 ~ 60	29	0. 3	0. 1
			GI12( 镍基 ) ( 喷熔层 φ110 端面 ) ①	50 ~ 60	43	0. 17	0. 15
FDAW	5000HV	1. 5	Ni102 + Co/WC ( 喷熔外圆 ) ①	70	79		
LDP - J - CF			Ni102 ( 喷熔外圆 ) ①	50 ~ 60	76. 6	0. 2	0. 1 ~ 0. 3
LBN - Y			Ni60 ( 喷熔外圆 ) ②	56	25	0. 2	0. 2

注 ①—上海金属切削技术协会资料 ②—装甲兵工程学院 ③—戚墅堰机车车辆工艺研究所资料 1—

的切削数据

度 ,VB 为后刀面磨损量)						切削效果
$\gamma_0$	$\alpha_0$	$K_r$	$K'_r$	$\lambda_s$	$r_\varepsilon$	
- 6°	9°	15°	10	- 2	0. 1	L=475m VB=0. 21 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	6	10° ~ 12°	10	6	0. 5	L=196m VB=0. 16 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	6	15	15	- 2	0. 5	L=327m VB=0. 13 $R_a10\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	6	20 ~ 25	30	0	0. 8	L=196m VB=0. 16 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	6	20 ~ 25	30	0	0. 8	L=552m VB=0. 45 $R_a10\mu m\sim2.5\mu m$
- 8	8	15	15	- 3	0. 3	L=408m VB=0. 40 $R_a20\mu m\sim5\mu m$
- 6	8	15	15	- 3	0. 5	L=600m VB=0. 2 $R_a2.5\mu m\sim0.63\mu m$
- 2	17	20	20	- 2	1. 5	L=350m VB=0. 2 $R_a20\mu m\sim1.25\mu m$
- 5	5	15	15	0	0. 1 ~ 0. 2	L=197m VB=0. 21 $R_a10\mu m\sim2.5\mu m$
- 8	8	15	15	- 3	0. 3	L=500m VB=0. 20 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	5	15	15	0	0. 1 ~ 0. 2	L=250m VB=0. 2 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	5	15	15	0	0. 1 ~ 0. 2	L=500m VB=0. 15 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 5	6	15	15	0	0. 1 ~ 0. 2	L=500m VB=0. 18 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
- 8	8	15	15	- 3	0. 3	L=500m VB=0. 04 $R_a2.5\mu m\sim0.63\mu m$
0° ~ - 3°	10	10 ~ 15	15	0	1. 5	L=550m VB=0. 20 $R_a5\mu m\sim2.5\mu m$
0	15	15	15	0	1. 5	L=176m VB=0. 30 $R_a10\mu m\sim2.5\mu m$
12	6	75	15			L=680m VB=0. 26 $R_a20\mu m\sim5\mu m$
						L=2040m VB=0. 30
12	6	75	15	0		L=1130m VB=0. 30
12	6	75	15			L=1440m VB=0. 30
- 10	8	12 ~ 15	12	- 5	0. 15	L=150m VB=0. 15 $R_a10\mu m\sim2.5\mu m$
- 10	8	12 ~ 15	12	- 5	0. 5	端面行程一次 VB=0. 20 $R_a10\mu m\sim2.5\mu m$
						L=224m VB=0. 05
						L=880m VB=0. 25
						L=7756m VB=0. 11
切削路程 $L=v\times t$ $t$ —切削时间 ; $v$ —切削速度 ;VB—后刀面的磨损值 ,单位为 mm						

表 9 - 14 车削加工的切削速度参考数值

加工材料		硬度 (HB)	切削深度 $a_p$ /mm	高速钢刀具		硬质合金刀具						陶瓷(超硬材料)刀具		
				$v$ /(m/min)	$f$ (mm/f)	未涂层			涂层		$v$ /(m/min)	$f$ (mm/r)	说明	
						$v/(m/min)$		$f$ (mm/r)	材料	$v$ /(m/min)				$f$ (mm/r)
						焊接式	可转位							
易切碳钢	低碳	100 ~ 200	1	55 ~ 90	0.18 ~ 0.2	185 ~ 240								
			4	41 ~ 70	0.40	135 ~ 185								
			8	34 ~ 55	0.50	110 ~ 145								
	中碳	175 ~ 225	1	52	0.20	165								
			4	40	0.40	125								
			8	30	0.50	100								
碳钢	低碳	125 ~ 225	1	43 ~ 46	0.18	140 ~ 150								
			4	34 ~ 38	0.40	115 ~ 125								
			8	27 ~ 30	0.50	88 ~ 100								
	中碳	175 ~ 275	1	34 ~ 40	0.18	115 ~ 130								
			4	23 ~ 30	0.40	90 ~ 100								
			8	20 ~ 26	0.50	70 ~ 8								
	高碳	175 ~ 275	1	30 ~ 37	0.18	Ab								
			4	24 ~ 27	0.40									
			8	18 ~ 21	0.50									
合金钢	低碳	125 ~ 225	1	41 ~ 46	0.18									
			4	32 ~ 37	0.40									
			8	24 ~ 27	0.50									
	中碳	175 ~ 225	1	34 ~ 41	0.18									
			4	26 ~ 32	0.40									
			8	20 ~ 24	0.50									
	高碳	175 ~ 225	1	30 ~ 37	0.18									
			4	24 ~ 27	0.40									
			8	18 ~ 21	0.50									
高强度钢	225 ~ 350	1	20 ~ 26	0.18										
		4	15 ~ 20	0.40										
		8	12 ~ 15	0.50										
高速钢	200 ~ 275	1	15 ~ 24	0.13 ~ 0.18										
		4	12 ~ 20	0.25 ~ 0.40										
		8	9 ~ 15	0.4 ~ 0.5										



### 9.3 热喷涂涂层的磨削

磨削主要适用于外圆、内圆、平面以及各种成形表面(齿轮、螺纹、花键等)的精加工。它可以用于加工难加工热喷涂涂层,但比起磨削加工其它难加工的金属材料,其生产效率较低。一般磨削精度可达 IT6 ~ IT5 级,表面粗糙度  $R_a$  值可达  $0.80\mu\text{m} \sim 0.20\mu\text{m}$ 。

#### 9.3.1 影响砂轮切削性能的因素及其选用

磨削加工所用的刀具是砂轮,目前可用于磨削难加工热喷涂涂层的砂轮种类不多,只有绿色碳化硅、金刚石和立方氮化硼砂轮。

##### 1. 磨料

磨料在磨轮中担负切削的材料,它和车刀材料一样应具备高的硬度、高的耐磨性、足够的抗弯强度与冲击韧性、高的耐热性等。目前,用于高硬度热喷涂涂层磨削加工的磨料有绿色碳化硅、人造金刚石和立方氮化硼。大量的试验表明人造金刚石砂轮的性能远远优于绿色碳化硅与白刚玉砂轮。表 9 - 15 是不同砂轮的磨削效率对比。

表 9 - 15 喷涂层的磨削效率(g/min)对比

砂 轮	喷 涂 材 料			
	Ni35	Ni55	Ni60	NiWC35
JRC 人造金刚石	25	22	20	11.38
绿色碳化硅	5.16	4.8	5	2.16
白刚玉	4.3	2.3	2.3	1.15

立方氮化硼砂轮,从许多实际加工的例子以及一些与人造金刚石砂轮的磨削对比情况说明,它有更高的磨削效率和更好的磨削性能。例如,用立方氮化硼砂轮磨削镍基喷熔层(粉 102 + 50% WC)外圆,硬度(76 ~ 78)HRC。又如磨削镍基喷熔层(粉 102 + 35% WC)外圆,硬度 65HRC,不但磨削效率高,而且加工质量优于金刚石砂轮。因此,立方氮化硼砂轮是磨削加工高硬度热喷涂涂层比较理想的砂轮。

##### 2. 粒度

粒度表示磨料颗粒的大小,一般用号数来表示。粒度主要依据表面粗糙度来选择,在保证一定表面粗糙度的条件下,尽可能选用小粒度号数的粒度,即磨料颗粒尺寸较大,这样不但保证了加工表面质量,而且可以采用较大的切削用

量 ,从而提高了生产效率。

(1) 绿色碳化硅砂轮的粒度选用范围是  $36^{\#} \sim 80^{\#}$ 。

(2) 人造金刚石砂轮的粒度选用范围是：

表面粗糙度为  $R_a 1.25\mu m \sim 2.5\mu m$  ,粒度为  $46^{\#} \sim 60^{\#}$  ；

表面粗糙度为  $R_a 0.63\mu m \sim 1.25\mu m$  ,粒度为  $80^{\#} \sim 100^{\#}$  ；

表面粗糙度为  $R_a 0.32\mu m \sim 0.63\mu m$  ,粒度为  $120^{\#} \sim 150^{\#}$  ；

表面粗糙度为  $R_a 0.16\mu m \sim 0.32\mu m$  ,粒度为  $150^{\#} \sim 240^{\#}$ 。

(3) 立方氮化硼砂轮的粒度选用范围是：

表面粗糙度为  $R_a 0.32\mu m \sim 1.25\mu m$  ,粒度为  $80^{\#} \sim 100^{\#}$  ；

表面粗糙度为  $R_a 0.16\mu m \sim 0.63\mu m$  ,粒度为  $100^{\#} \sim 150^{\#}$  ；

表面粗糙度为  $R_a 0.32\mu m \sim 0.08\mu m$  ,粒度为  $150^{\#} \sim 240^{\#}$  ；

表面粗糙度为  $R_a 0.16\mu m \sim 0.02\mu m$  ,粒度为  $280^{\#} \sim W40$ 。

3. 砂轮硬度

硬度是指磨粒受力后从砂轮脱落的难易程度。砂轮硬度影响砂轮的“自砺性” ,这对于磨削热喷涂涂层是很重要的。砂轮硬度的一般选用原则是 ,被加工材料硬度越高 ,砂轮硬度的级别越软。这一原则也适合热喷涂涂层的磨削。

绿色碳化硅砂轮的硬度选用范围是 ZR—R (中软—软) 。软 1 ( $R_1$ ) 、软 3 ( $R_3$ ) 有较高的磨削效率。

人造金刚石砂轮的硬度级别有 ZR、Z、ZY、Y ,只有树脂结合剂的人造金刚石砂轮才有硬度级别。一般选用 ZR 与 Z 级。

4. 浓度

浓度是金刚石与立方氮化硼砂轮的一个性能指标 ,它是指在砂轮的工作层内单位体积金刚石或立方氮化硼的含量。规定  $1cm^3$  体积中金刚石或立方氮化硼含有 4.4 克拉 (0.88g) 的砂轮 ,称其浓度为 100% 。

浓度共分五种 ,见表 9 - 16。

表 9 - 16 金刚石砂轮浓度

浓度%	金刚石含量 / ( $mg/cm^3$ )	代 号
25	220	25
50	440	50
75	660	75
100	880	100
150	1320	150

浓度的选用。粗磨时应选浓度高的砂轮 ,因单位面积上有较多的磨粒 ,切削

能力较强。半精和精磨,一般选用中等浓度(75%左右)的砂轮。

### 5. 砂轮宽度

砂轮宽度对磨削的径向分力影响较大,径向分力  $F_y$  容易引起振动,这对于加工质量与砂轮的耐用度都是不利的。所以,在磨削难加工热喷涂涂层时,应尽量选用窄的砂轮(在砂轮强度允许的条件下),其宽度约为砂轮直径的 10% 左右为宜。

### 6. 组织

砂轮的组织反映容纳切屑空间的大小,它可分为紧密、中等、疏松三类,号数为 0 ~ 12。一般采用中等组织的砂轮。磨削难加工热喷涂涂层时,为了避免砂轮被“塞实”,特别在磨内圆时,可采用疏松组织(10 号 ~ 12 号)的砂轮或采用大气孔砂轮。

## 9.3.2 磨削用量的选择

磨时的运动如图 9 - 13 所示,其磨削用量有:砂轮速度  $v$ 、轴向进给量  $f_a$ 、工件速度  $v_0$ 、径向进给量  $f_r$ 。

### 1. 砂轮速度 $v$

试验表明,砂轮速度过低,砂轮的磨耗会增大,加工表面粗糙度变大。但砂轮的速度过高,砂轮的磨耗也会增大,对加工表面粗糙度的改善并不明显。因此,砂轮速度在一定的加工条件下,有一合理的数值。一般,绿色碳化硅的砂轮速度  $v = 20\text{m/s} \sim 25\text{m/s}$ ;人造金刚石砂轮速度  $v = 15\text{m/s} \sim 25\text{m/s}$ ;立方氮化硼砂轮速度  $v = 25\text{m/s} \sim 35\text{m/s}$ 。

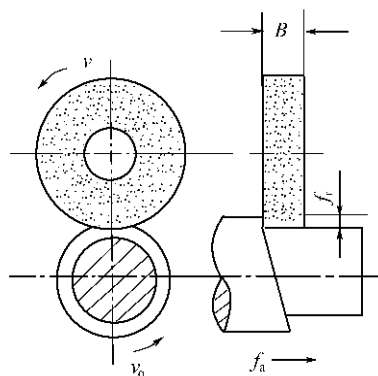


图 9 - 13 磨削运动

### 2. 轴向进给量 $f_a$

轴向进给量增加,生产率随之增大,但砂轮的磨耗亦增大,加工表面粗糙度变大。一般内、外圆磨削  $f_a = 0.5\text{m/min} \sim 1\text{m/min}$ ;平面磨削  $f_a = 10\text{m/min} \sim 15\text{m/min}$ 。

### 3. 工件速度 $v_0$

工件速度过高,容易产生振动。一般工件速度  $v_0 = 10\text{m/min} \sim 20\text{m/min}$ 。

### 4. 径向进给量 $f_r$

径向进给量亦称磨削深度,它对磨削表面的尺寸精度、表面粗糙度,砂轮耐用度以及磨削效率等影响较大。用绿色碳化硅砂轮磨削 Ni04 喷涂层内孔,当径

向进给量等于 0.006mm/dst(mm/双行程)时,磨削效率、砂轮耐用度均已大大下降,并且产生明显的振动,表面粗糙度变大。所以,磨削难加工喷涂层内孔的径向进给量比磨削淬火钢要小得多。

径向进给量的选用原则是:当加工要求越高、工艺系统刚性越小、热喷涂涂层的硬度越高等,则径向进给量  $f_r$  应越小。

一般 外圆磨  $f_r=0.005\text{mm/dst} \sim 0.015\text{mm/dst}$

内圆磨  $f_r=0.002\text{mm/dst} \sim 0.01\text{mm/dst}$

平面磨  $f_r=0.005\text{mm/dst} \sim 0.02\text{mm/dst}$

磨削加工方法,在保证尺寸精度和表面粗糙度方面的高要求是好的,但存在的主要问题是生产率低。特别是磨削难加工热喷涂涂层,其径向进给量是很小的,若要完成一定厚度余量的磨削,其生产率自然是不能令人满意的。

另外,热喷涂层内孔的磨削要比磨外圆困难,但内孔表面用等离子喷涂修复更具有特殊意义。因为内孔表面多是薄壁盘类零件上的一部分,采用等离子喷涂修复,除了获得高耐磨性的表面外,还不致引起整个零件的热变形,这是用传统堆焊修复方法所做不到的,因而,它对扩大零件的修复范围是很重要的。根据对某一工程机械要修复的零件表面进行统计,内孔表面占 70% 左右,内孔磨削加工的问题显得突出,因此,提高磨削热喷涂涂层的生产率,特别是提高磨削喷涂层内孔的生产率是一个需要解决的重要问题。

9.3.3 国外部分热喷涂涂层的磨削规范

(1) 表 9-17 是用碳化硅砂轮磨削 Eutalloy 涂层的规范。

表 9-17 用碳化硅砂轮磨削 Eutalloy 涂层的规范

合金牌号	硬度 HRC	磨削方法	磨粒	粒度	硬度	组织	粘合剂	周围速度
RW12999 10011 10092 10112 10611 10999 RW12112	59 ~ 63	I	C	80	I	8	V	18 ~ 25
	57 ~ 62							
	45 ~ 50	II	C	80	I	8	V	18 ~ 25
	57 ~ 62							
	45 ~ 50	III	C	60	G	5	V	20 ~ 25
	60 ~ 63							
	57 ~ 62	IV	C	60	H	5	V	15 ~ 20
RW12497 10009 10675 12093 12495 12486	59 ~ 63	I	C	80	H	5	V	25 ~ 32
	55 ~ 62							
	45 ~ 50	II	C	60	I	8	V	25 ~ 32
	50 ~ 52							
	45 ~ 50	III	C	46	I	7	V	20 ~ 25
	55 ~ 62							
		IV	C	60	H	5	V	15 ~ 20

(续)

合金牌号	硬度 HRC	磨削方法	磨粒	粒度	硬度	组织	粘合剂	周围速度
10185	34 ~ 42	I	C	60	K	5	V	25 ~ 35
10491	290 ~ 330	II	C	60	Jot	7	V	20 ~ 25
10292	35 ~ 40	III	C	46	I	7	V	20 ~ 25
RW12494	35 ~ 40	IV	C	46	I	5	V	15 ~ 20
16006	40 ~ 45							
10224	24 ~ 26	I	C	60	K	5	V	25 ~ 30
10670	18 ~ 20	II	C	60	I	5	V	20 ~ 25
10680	24 ~ 26	III	C	60	I	5	V	15 ~ 20
注 I—用 $\phi 400\text{mm}$ 砂轮磨外圆 ;II—用 $\phi 300\text{mm}$ 砂轮磨平面 ;III—用碗形砂轮磨平面 ;IV—内圆磨削								

(2) 表 9 - 18 是用碳化硅和刚玉砂轮磨削 Rototec 涂层的规范。

表 9 - 18 用碳化硅和刚玉砂轮磨削 Rototec 涂层的规范

合金牌号	硬度	磨削方法	磨料	粒度	硬度	组织	粘合剂	圆周速度
19112	350	I	A	80	Jot	8	V	25 ~ 30
19222	250							
19910	300 ~ 360	II	A	54	I	9	V	20 ~ 25
19985	120 ~ 160							
19300	250	III	A	60	Jot	8	V	15 ~ 20
19400	350							
19850	100 ~ 120	I	C	80	H	3	V	25 ~
19868	200 ~ 220	II	C	54	I	7	V	20 ~ 25
		III	C	46	I	5	V	15 ~ 20
25885	120 ~ 140	I	A	80	Jot	8	V	25 ~ 30
		II	A	54	I	9	V	20 ~ 25
Ultrabond		I	A	80	K/L	10	V	25 ~ 30
注 砂轮推荐规格都是以湿砂轮为前提的。 I—用 $\phi 400\text{mm}$ 砂轮磨外圆 ;II—用 $\phi 300\text{mm}$ 砂轮磨平面 ;III—内圆磨削								

(3) 表 9 - 19 是用金刚石砂轮磨削 Eutalloy 硬质材料涂层规范。

表 9 - 19 用金刚石砂轮磨削 Eutalloy 硬质材料涂层规范

合金牌号	硬度 HRC	粒度 (按 FEPA 标准)	浓度 / %	合金树脂粘合剂		金属粘合剂	
				圆周速度 /(m/s)	磨削方法	圆周速度 /(m/s)	磨削方法
RW12999	59 ~ 63	D151	75	8 ~ 16	干	8 ~ 12	干 湿 干 湿 干 湿
10011	57 ~ 62	D151	75	18 ~ 22	湿	12 ~ 18	
				8 ~ 16	干	8 ~ 12	
10112	57 ~ 62	D151	75	18 ~ 22	湿	12 ~ 18	
				8 ~ 16	干	8 ~ 12	
10611	45 ~ 50	D151	75	18 ~ 22	湿	12 ~ 18	
				8 ~ 16	干	8 ~ 12	
10999	60 ~ 63	D151	75	8 ~ 16	干	8 ~ 12	干
				18 ~ 22	湿	12 ~ 18	湿
RW12112	57 ~ 62	D151	75	8 ~ 16	干	8 ~ 12	干
				18 ~ 22	湿	12 ~ 18	湿

表中所列代号如下：

(1) 磨料：

A—氧化铝(刚玉)；

C—碳化硅；

D—金刚石。

(2) 硬度：

特软 A B C D；

中等 Jot K L M；

硬 N O P Q；

极硬 R S T；

特硬 U V W X Y Z。

(3) 组织：

共分 14 级 8 为中间值 14 为最疏松。

(4) 结合剂：

V—玻璃或陶瓷；

S—硅酸盐；

B 和 BF—合成树脂；

E—洋干漆；

R 和 RF—橡胶。

## 9.4 热喷涂涂层的电解磨削

上面已经述及高硬度热喷涂涂层的磨削,热喷涂涂层内孔的磨削,存在着砂轮耐用度低、生产效率低的问题。采用电解磨削可获得高的生产率和高的表面质量。

### 9.4.1 电解磨削原理

电解磨削是利用电解液对被加工金属的电化学作用(电解作用)和导电砂轮对加工表面的机械磨削作用,达到去除金属表面层的一种加工方法。它的原理如图 9-14 所示。

电化学作用的产生是由于磨削时工件接直流电源的正极,导电砂轮接负极。当电解液输入到砂轮与工件间极小间隙中时,电解液产生电离,工件表面金属被电解,发生阳极溶解。溶解的金属在电解液中变成化合物被电解液带走。同时在阳极表面上产生一层钝化膜,它阻止电流通过,影响电解的继续进行。要使金属继续电解,需用砂轮将钝化膜及时刮除。因此随着电化学作用与机械磨削的交替进行,可使零件表面达到所需的尺寸精度与表面粗糙度。

试验说明电解磨削过程是以强氧化剂使工件表面层的金属氧化,在氧化的过程中工件表面又迅速地产生钝化薄膜,而砂轮又很快地从工件表面上刮除这一层钝化膜,因而在工件阳极上又重新露出了新的金属表面并被继续电解。如此循环交替地进行电化学和机械刮除作用,工件将被加工到一定的精度与表面粗糙度。

### 9.4.2 电解磨削的工艺特点

#### 1. 生产率高

电解磨削可以提高磨削用量,特别是径向磨削量(磨削深度),可比一般磨削大得多。按单件工时进行统计比较,生产率比一般磨削提高 3 倍~5 倍。

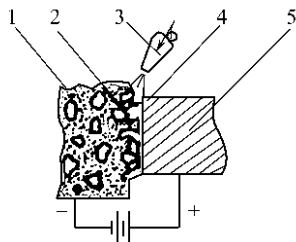


图 9-14 电解磨削原理

1—导电砂轮；2—磨粒；  
3—电解液喷嘴；4—阳母膜；  
5—工件。

## 2. 加工质量好

电解磨削时,砂轮主要是磨除涂层表面上的氧化膜。所以能减轻由于磨削热、磨削力所引起喷涂层表面的热应力、残余应力和变形,加工表面不易产生裂纹和烧伤,尺寸精度与表面粗糙度可达 IT7 级和  $R_a 1.25$  以上。用电解磨削加工喷涂层零件,经使用考核,证明质量合格,效果良好。

## 3. 砂轮磨耗量小、经济性好

电解磨削砂轮主要是磨除氧化膜,根据测量,磨削难加工热喷涂涂层,铜基金刚石导电砂轮,磨除金属量与砂轮损耗量之比  $G$  为 400 左右(磨削内孔)。

## 4. 适应性强,加工范围广

电解磨削可加工各种难加工导电的热喷涂涂层,对于各型面(如齿轮表面等)磨削也容易实现。

总之,电解磨削是一种生产率高、加工质量好、经济实用的加工方法,是加工难加工热喷涂涂层新的加工方法。

### 9.4.3 电解磨削电解液的选择

电解液是电解磨削工艺中影响生产率及加工质量极其重要的因素,因为它直接影响阳极电化学反应。根据电化学反应理论,不同成分的电解液,其阳极反应的速度不同,对其反应产物的化学溶解程度也不同。电解磨削过程不但要求氧化,而且也要求钝化。为了获得高生产率和良好的表面质量,一般多用亚硝酸钠或磷酸氢二钠为主要成分的水溶液(其 pH 值为 8~9)。对电解液另一重要的要求是不锈蚀机床和危害人体。

电解液的选择应考虑如下五个方面的要求:

(1) 能够使金属表面生成结构紧密、粘附力强的钝化膜,以获得良好的尺寸精度和表面粗糙度。

(2) 导电性能好,以获得高生产率。

(3) 不锈蚀机床与工夹具。

(4) 对人体无危害,确保人身健康。

(5) 经济效果好、价格便宜、来源丰富,在加工中不易消耗。

要同时满足上述五个方面的要求是困难的。在实际生产中,应针对不同产品的技术要求、不同材料,选用最佳的应用于电解磨削的电解液。

试验说明,电解磨削难加工热喷涂涂层,以磷酸氢二钠为主要成分的电解液,有较好的磨削性能。

这种电解液的加工效率高,主要是因为除了亚硝酸钠和硝酸钾的导电及氧化作用外,磷酸氢二钠在水溶液中电离后,使溶液呈弱碱性(pH 值为 8~9),有



利于氧化物的溶解 加速了电解过程 从而获得大的电流效率 使加工效率提高。

通过试验优选 对于难加工热喷涂涂层电解磨削的电解液推荐如下：

磷酸氢二钠	3% ~ 5%
亚硝酸钠	2%
硝酸钾	2%
水	91% ~ 93%

上述成分的电解液 其 pH 值为 8 ~ 9 不锈蚀机床。

#### 9.4.4 电解磨削用设备

电解磨削的机床 可采用专用的电解磨床和普通磨床、车床改装而成。

改装机床 需要增加一直流电源(一般为硅整流电源),以及送电装置、送液装置(供给电解液)、防护电解液飞溅及抽走有害气体的装置。

图 9 - 15 是普通车床改装成内孔电解磨床的外观图。

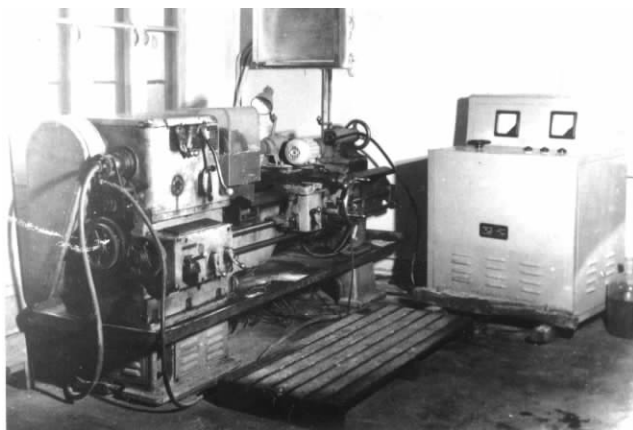


图 9 - 15 电解磨削机床

电解磨削用的直流电源要求有可调的电压(5V ~ 20V)和较硬的外特性,最大工作电流视加工面积和所需生产率可自 10A 到 1000A 不等。只要功率许可,一般可以和电解加工的直流电源设备通用。

供应电解液的循环泵一般用小型离心泵,但最好是耐酸、耐腐蚀性的,还应有过滤和沉淀电解液杂质的装置。在电解过程中有时会发生对人体有害的气体如一氧化碳等,因此在机床上最好设有强制抽气装置或中和装置,至少应在空气较流通的地点操作。

电解液的喷射一般都用管子和扁喷嘴,喷嘴接在管子上,向工作区域喷注电

解液。电解磨床与一般磨床相仿,在没有专用磨床时,也可以用其它机床改装(如用车床改装成外圆及内孔电解磨床)。改装的主要工作有:①增加电刷导电装置;②将砂轮主轴与床身绝缘,不让电流有可能在轴承的摩擦面间流过;③将工件、夹具和机床绝缘;④增加机床对电解液的防溅防锈装置。为了减轻和避免机床的腐蚀,机床与电解液接触的部分应选择耐蚀性好的材料。机床主轴应保证砂轮工作时的振摆量不大于 $0.01\text{mm} \sim 0.02\text{mm}$ ,否则不仅磨削时接触不均匀,而且不可能保证具有合理电极间隙。

### 1. 内圆磨头

它由高速砂轮轴与三相交流电机组成。高速砂轮轴的径向摆差 $\leq 0.01\text{mm}$ ,转速 $5000\text{r/min} \sim 6000\text{r/min}$ 。三相交流电机功率 $0.75\text{kW}$ ,转速 $2800\text{r/min}$ 。它安装在车床的溜板上,并与溜板绝缘。砂轮轴心线与车床主轴中心同高。

砂轮座与溜板的绝缘如图9-16所示。

### 2. 车床主轴的改装

车床主轴的改装主要是使卡盘与主轴绝缘,并在主轴末端装上阳极电刷,它与直流电源箱的输出正极相接,如图9-17所示。

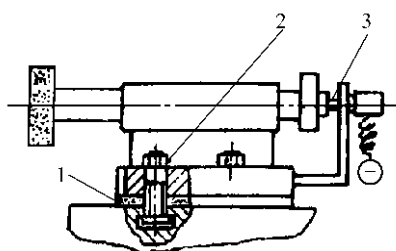


图9-16 内圆磨头与溜板的连接

1—有机玻璃板;2—绝缘套;3—电刷。

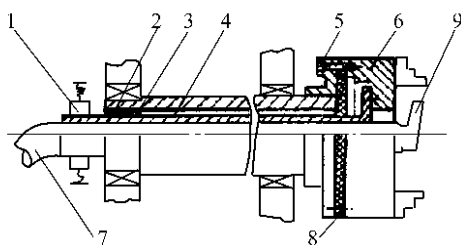


图9-17 车床主轴的改装

1—电刷;2、5—绝缘套;3—车床主轴;4—导电臂;  
6—卡盘;7—电解液输入管;8—绝缘板;9—喷嘴。

### 3. 直流电源箱

直流电源可采用硅整流直流电源,输出电压 $0\text{V} \sim 30\text{V}$ ,输出电流 $0\text{A} \sim 200\text{A}$ 。能无级调压,并有过压、过电流保护装置。

### 4. 电解液输送装置

电解液泵可采用机床冷却泵,电解液可由机床的冷却液箱经胶皮管通过主轴孔直接喷在零件上,再由回液管流回电解液箱。

机床改装后应符合下列要求:

(1) 绝缘部分应具备良好的绝缘性。

(2) 电解液应采用过滤装置以保持电解液的清洁,这对获得高的表面质量是很重要的。

(3) 为了防止电解液四处飞溅,应有良好的防护罩,以及排除有害气体的装置。

(4) 车床主轴的径向摆差应小于  $0.01\text{mm}$ 。

#### 9.4.5 电解磨削的工艺参数

##### 1. 砂轮的工艺参数

砂轮可采用金刚石青铜粘合剂的导电砂轮,也可采用石墨、渗银导电砂轮。

砂轮速度  $v = 15\text{m/s} \sim 20\text{m/s}$

轴向进给量

$f_a = 0.5\text{m/min} \sim 1\text{m/min}$  (内外圆磨)  $f_a = 10\text{m/min} \sim 15\text{m/min}$  (平面磨)

工件速度  $v_w = 10\text{m/min} \sim 20\text{m/min}$

径向进给量  $f_r = 0.05\text{mm/dst} \sim 0.15\text{mm/dst}$

##### 2. 电压、电流规范

根据以上电解液的试验所得的电流效率特性曲线,可得最佳电流密度与电压。

粗加工 电压  $8\text{V} \sim 12\text{V}$

电流密度  $20\text{A/cm}^2 \sim 30\text{A/cm}^2$

精加工 电压  $6\text{V} \sim 8\text{V}$

电流密度  $10\text{A/cm}^2 \sim 15\text{A/cm}^2$

以上工艺参数在应用时,如磨削表面出现烧黑现象,应降低电压或减小径向进给量,增大轴向进给量。

#### 9.5 热喷涂涂层的超声振动车削

超声振动车削是一种精密切削加工的先进工艺方法。它是在精密度较高的普通车床的基础上,附加一个超声振动车削装置,使车刀沿切削速度方向产生超声频率的机械振动(一般频率为  $20\text{kHz}$ ,振幅为  $10\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ ),从而得到普通车削难以得到的切削效果,表现在加工精度与表面粗糙度明显优于普通车削。这一新的工艺方法,对于解决热喷涂涂层的精加工,以及难加工非导电喷涂层(例如陶瓷涂层)的切削加工是很重要的。目前,陶瓷涂层的切削加工,主要是靠金刚石或立方氮化硼砂轮的磨削加工,不但加工成本高(砂轮费昂贵),而且生产率比较低,超声振动车削就有其优越性了。

##### 9.5.1 超声振动车削原理

超声振动车削是使车刀沿切削速度方向产生超声高频振动进行车削的一种

加工方法 其原理如图 9 - 18 所示。

超声振动车削与普通车削在切削时的根本区别在于 超声振动车削 ,刀刃与被切金属形成分离切削(即刀具在每一次振动中仅以极短的时间便完成一次切削与分离) 而普通车削 ,刀刃与被切金属则是连续切削的(刀刃与被切金属没有分离)。所以 ,超声振动车削的机理已不同于普通车削。已有的文献与资料说明 ,超声振动车削过程的主要特点是切削力与切削热均比普通车削小得多 ,切削力约为普通车削的  $1/3 \sim 1/20$  ,切削热约为普通车削的  $1/5 \sim 1/10$  ,这是超声振动车削所以能获得加工精

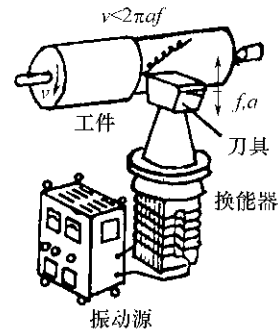


图 9 - 18 超声振动车削原理

度高、表面质量好的基本原因。切削力、切削热小的原因在于 :①刀具与被切金属的摩擦系数大大降低。②切削能(刀具给被切金属的超声能)集中在刀刃前局部的很小范围内 ,使工件材料滑移变形小 ,同时由于刀具冲击特性引起的工件材料疲劳特性的强化作用 ,使金属材料容易被切下。

实践证明 ,工件的速度  $v_w$  应小于刀具的振动速  $v_v$  ,才有好的切削效果 ,因为此时才能造成刀具与工件的分离 ,形成分离切削。一般当  $\frac{v_w}{v_v} = \frac{1}{3}$  时 ,切削效果比较理想

$$v_w = \frac{\pi D n}{1000} \quad \text{m/min}$$

式中  $D$  为工件直径(mm)  $n$  为工件每分钟的转速(r/min)。

$$v_v = a\omega \cos \omega t$$

式中  $a$  为刀具振幅( $\mu\text{m}$ )  $\omega$  为振动角频率  $2\pi f$ ( $f$  为振动频率)  $t$  为时间(s)。

当  $\omega t$  为零时 , $v_{v\max} = a2\pi f \times 60/1000 \times 1000$

超声振动车削时 ,对车刀刀尖的位置有较高的要求 ,即刀尖最好低于工件旋转中心线一个振幅值。因为当刀具上振时 ,刀尖正好处于工件的旋转中心处 ,下振时刀尖便可离开工件。如果当刀尖高于工件旋转中心时 ,加工表面将会出现规则发亮的低频振纹 ,反之 ,则会出现发白而不亮的低频振纹。

## 9. 5. 2 超声振动车削的装置

### 1. 振动源(超声波发生器)

振动源能产生高频正弦波电振动 ,并且有一定的功率。一般频率为18kHz ~

30kHz,功率为 250W ~ 2000W。功率可根据切削用量的大小选取。

## 2. 换能器

换能器的作用是把输入的高频正弦电振动变为高频正弦的机械振动。图 9 - 18 所示的换能器是用得最广泛的磁致伸缩换能器,它是由厚度为 0.1mm 的镍片组成,其上缠有导线并与超声波发生器的输出端相接。镍片芯在磁场的作用下产生伸缩,从而达到把电能转变为机械能的目的。一般由镍片芯制成的换能器,其横断面输出的功率为  $30\text{W}/\text{cm}^2 \sim 40\text{W}/\text{cm}^2$ ,其长度的伸缩量每 100mm 长为  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 。由于发热,使用时应把它放置在一外壳内,用水循环冷却。

## 3. 变幅杆

变幅杆的作用是把换能器的伸缩量(即振幅)放大,它是一个变截面的杆,根据声振原理可设计成圆柱阶梯形、圆锥形、指数曲线形等。不同形式的变幅杆其特性与效果有所不同。圆锥形的变幅杆的振幅放大比较小,一般为 5 倍 ~ 10 倍,易于制造;指数曲线形的变幅杆的振幅放大比稍大,可达 10 倍 ~ 20 倍,使用中性能稳定,但不易制造;圆柱阶梯形变幅杆振幅放大比最大,可达 20 倍以上,且易制造,但工作性能不够稳定。

变幅杆之所以能放大振幅,是因为通过它任一截面的振动能量是不变的(传播损耗不计),截面小的地方能量密度大。由于能量密度正比于振幅  $a$  的平方,因此,振幅在小端处也就得到了放大。它可把换能器  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$  的振幅放大到  $10\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ ,满足车削加工的需要。

变幅杆应选用内耗损失小、疲劳强度高的材料,一般采用经过调质处理的碳素钢、镍铬钢和工具钢等。它与换能器的连接,可用锡焊或银焊等。

## 4. 车刀

车刀可把刀片焊在刀块上或直接把刀片用螺纹等方式固连于变幅杆小端,刀尖应处在振幅最大的位置上。

### 9.5.3 超声振动车削热喷涂涂层的工艺参数

在确定加工时的工艺参数时,主要是以表面粗糙度作为依据的。超声振动车削主要是能获得低的表面粗糙度,从而提高表面加工质量。

#### 9.5.3.1 切削速度(零件转速)对表面粗糙度的影响

图 9 - 19 至图 9 - 22 是切削速度(零件转速)对表面粗糙度  $R_z(R_a)$  值的影响曲线。

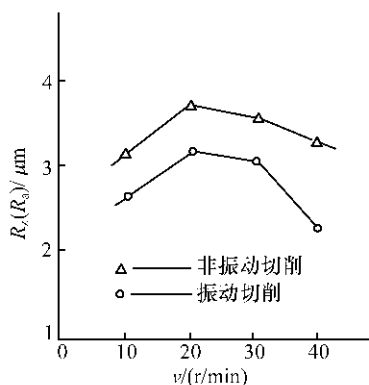


图 9 - 19 用 YC09 硬质合金刀片  
切削 Ni60 喷熔层

$f=0.08\text{mm/r}$   $a_p=0.5\text{mm}$  ;刀具振幅  $a=15\mu\text{m}$  ;  
振动频率 20kHz ;工件直径  $D=40\text{mm}$ 。

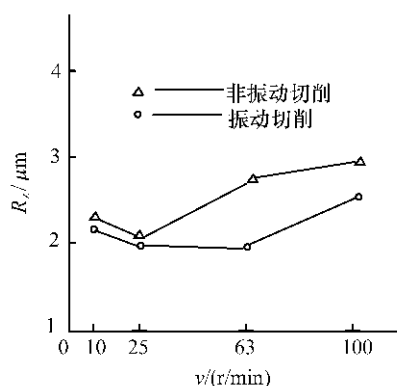


图 9 - 20 用 CBN 刀片切削陶瓷  
( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 喷涂层

$f=0.1\text{mm/r}$   $a_p=0.25\text{mm}$  ;刀具振幅  
 $a=15\mu\text{m}$  振动频率 20kHz ;工件直径  $D=40\text{mm}$ 。

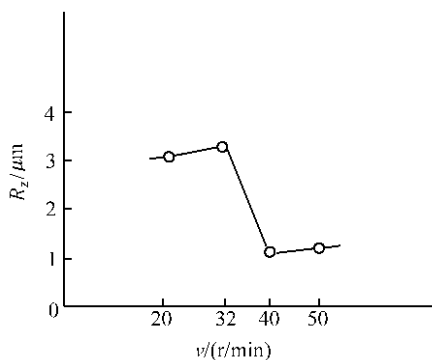


图 9 - 21 用 YT15 圆形刀片超声  
振动车削 Ni60 喷熔层

$f=0.1\text{mm/r}$   $a_p=0.1\text{mm}$  ;刀具振幅  $a=15\mu\text{m}$  ;  
振动频率 20kHz ;工件直径  $D=40\text{mm}$ 。

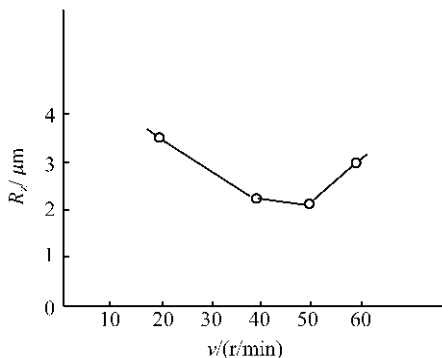


图 9 - 22 用 YW2 刀片超声  
振动车削 Ni60 喷熔层

$f=0.1\text{mm/r}$   $a_p=0.1\text{mm}$  ;刀具振幅  $a=15\mu\text{m}$  ;  
振动频率 20kHz ;工件直径  $D=40\text{mm}$ 。

从以上所得的试验数据与曲线可以看出：

(1) 在所试验的切削速度(转速)范围内(转速  $0\text{r/min} \sim 100\text{r/min}$  ,切削速度  $0\text{m/min} \sim 12\text{m/min}$  ) ,以  $40\text{r/min}$ 、 $50\text{r/min}$  ( $4.8\text{m/min}$ 、 $6\text{m/min}$ ) 时 ,表面粗糙度值  $R_z(R_a)$  最小。也就是说 ,在一定的切削速度(转速)范围内 ,切削速度(转速)有最佳值。此时超声振动车削 Ni60 喷熔层表面粗糙度  $R_a$  最小可达  $1.012\mu\text{m} \sim 1.15\mu\text{m}$  (图9 - 21) ;超声振动车削陶瓷 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 涂层表面粗糙度  $R_a$

为  $2.0\mu\text{m}$  (图 9 - 20)。其主要原因是由该机床各级转速传动时的平稳特性决定的(当  $40\text{r/min}$ 、 $50\text{r/min}$  时传动比较平稳)。

(2) 超声振动车削的表面粗糙度值比普通车削的小。

9.5.3.2 进给量  $f$  对表面粗糙度的影响

图 9 - 23、图 9 - 24 是进给量对表面粗糙度的影响曲线。

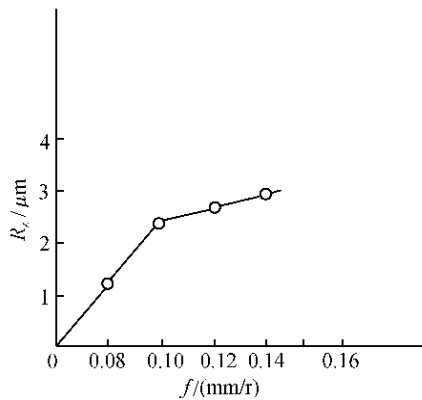


图 9 - 23 用 YTi15 圆形刀片超声振动车削 NJ60 喷熔层  
 $v=4.8\text{m/min}$   $a_p=0.1\text{mm}$  ;  
刀具振幅  $a=15\mu\text{m}$  振动频率  $20\text{kHz}$ 。

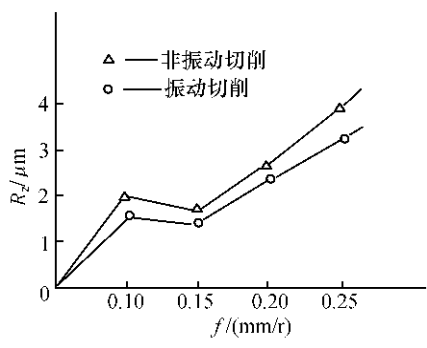


图 9 - 24 用 CBN 刀片切削降瓷 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 喷涂层  
 $v=7.2\text{m/min}$   $a_p=0.05\text{mm}$  ;  
刀具振幅  $a=10\mu\text{m}$  振动频率  $20\text{kHz}$ 。

从以上所得的试验数据与曲线可以看出：

(1) 随着进给量的增大 ,表面粗糙度及  $R_z(R_a)$  增大 ,表面质量下降 ,这与普通切削的规律是一致的。

(2) 超声振动车削的表面粗糙度值比普通车削的小 ,表面质量高。

9.5.3.3 切削深度  $a_p$  对表面粗糙度的影响

图 9 - 25、图 9 - 26 是切削深度对表面粗糙度的影响曲线。

从以上所得的试验数据与曲线可以看出：

(1) 随切削深度的增加 ,表面粗糙度  $R_z(R_a)$  值增大 ,表面质量下降。其原因主要是切削深度对切削力的影响较大 ,根据广西大学研究超声振动切削力的结果表明 ,切削深度在切削力的公式中其指数为 4.26 ,远大于普通车削的指数 1 ,致使  $R_z(R_a)$  值上升 ,表面质量下降。

(2) 超声振动车削时的表面粗糙度值比普通车削时的小 ,表面质量高。

9.5.3.4 刀具振幅  $a$  对表面粗糙度的影响

图 9 - 27 是刀具振幅  $a$  对表面粗糙度的影响曲线。

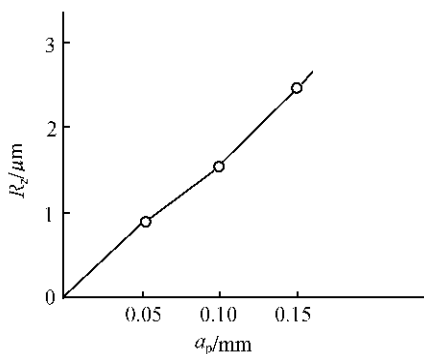


图 9 - 25 用 YN15 圆形刀片  
超声振动车削 Ni60 喷熔层

$v=4.8\text{m/min}$   $f=0.1\text{mm/r}$  ;

刀具振幅  $a=15\mu\text{m}$  振动频率 20kHz。

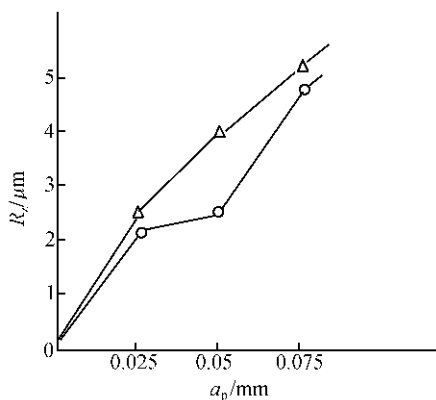


图 9 - 26 用 CBN 刀片切削陶瓷  
( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 喷涂层

$v=7.2\text{m/min}$   $f=0.1\text{mm/r}$  ;

刀具振幅  $a=10\mu\text{m}$  振动频率 20kHz。

曲线说明 ,随着刀具振幅的增大 ,表面粗糙度  $R_z$  值减小 ,表面质量提高。这主要是因为随振幅的增大 ,刀具的振动速度提高 ( $v_v = 2\pi fa$ ) ,使切削力降低 ,因而表面粗糙度  $R_z$  值减小。

### 9.5.3.5 切削用量的优选

试验是针对难加工 Ni60 喷熔层 ,对其切削用量进行优选。

采用正交试验法 ,以表面粗糙度  $R_z$  值为目标函数 ,用极值处理数据。

#### 1. 试验条件

YC09 硬质合金刀片

$\gamma_0 = 0^\circ$   $\alpha_0 = 7^\circ$   $\gamma_\varepsilon = 1.5\text{mm}$

刀具振幅  $a=15\mu\text{m}$  振动频率 20kHz

#### 2. 试验用量范围

切削速度  $v=1.2\text{m/min} \sim 4.8\text{m/min}$   
( $n=10\text{r/min}$ 、 $20\text{r/min}$ 、 $40\text{r/min}$ )

切削深度  $a_p=0.05\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$

进给量  $f=0.08\text{mm/r} \sim 0.12\text{mm/r}$

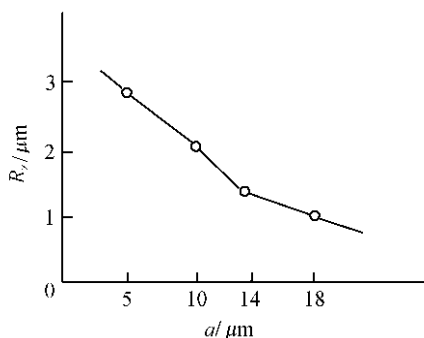


图 9 - 27 刀具振幅对表面粗糙度  
的影响用 YN15 圆形刀片

超声振动切削 Ni60 喷熔层

$\gamma_0 = 0^\circ$   $\alpha_0 = 7^\circ$   $v=1.2\text{m/min}$  ,

$f=0.08\text{mm/r}$   $a_p=0.05\text{mm}$  ,

刀具振动频率 20kHz。



### 3. 试验结果

(1) 根据极差  $R$  值的大小  $v$ 、 $f$ 、 $a_p$  对表面粗糙度的影响, 切削深度  $a_p$  最大, 进给量  $f$  次之, 切削速度  $v$  最小。

(2)  $v$ 、 $f$ 、 $a_p$  最好的组合方案  $v = 4.8 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.1 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 0.05 \text{ mm}$ 。

#### 9.5.3.6 刀具材料及刀具几何参数

试验说明, 超声振动车削难加工热喷涂涂层要求刀具(刀刃和刀尖)具有较高的强度和耐磨性, 所以, 刀具材料和刀具几何参数应符合这一总的要求。

##### 1. 刀具材料

YC09、YW2 等刀具材料, 在加工难加工 Ni60 喷熔层时, 均有较好的切削性能; 对于陶瓷( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )喷涂层, 则要采用立方氮化硼(CBN)刀片。它们的刀具耐用度均达到较好的实用程度, 并比普通车削时的高。

##### 2. 刀具几何参数

为了使刀刃有较高的强度, 一般前角  $\gamma_0 = 0^\circ$ , 为了减少摩擦, 一般后角  $\alpha_0 = 8^\circ \sim 12^\circ$ 。为了增强刀尖强度, 主偏角  $K_r$  与副偏角  $K'_r$  均可取小值, 刀尖圆弧半径  $r_s$  可取大值, 以便增强刀尖强度  $r_s = 2 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$ 。

#### 9.5.4 超声振动车削热喷涂涂层实例

某工程机械发动机活塞销, 磨损后大量报废, 经采用热喷涂修复后, 机械加工困难, 喷熔层材料为 Ni60, 硬度 60HRC。

活塞销外径的加工要求, 尺寸公差为  $0.011 \text{ mm}$ , 表面粗糙度为  $R_a 0.32 \mu\text{m} \sim 0.040 \mu\text{m}$  ( $\nabla 9, \nabla 11$ ), 采用一般车削是达不到这一要求的。

采用超声振动车削, 其工艺参数如下:

车刀振动频率	20kHz;
车刀振幅	$a = 15 \mu\text{m}$ ;
工件速度	$v = 4.8 \text{ m/min}$ ;
进给量	$f = 0.08 \text{ mm}$ ;
切削深度	$a_p = 0.1 \text{ mm}$ 。

加工后的活塞销外圆经测量, 尺寸误差为  $0.009 \text{ mm}$ , 表面粗糙度为  $0.16 \mu\text{m}$ , 满足了图纸要求。

超声振动车削是一种有效的精加工方法, 是难加工热喷涂涂层, 特别是陶瓷涂层切削加工的新方法与新途径。

## 第十章 热喷涂材料与涂层检测

### 10.1 热喷涂粉末的性能检测

热喷涂粉末对热喷涂涂层质量、工艺和沉积效率影响比较大,比较容易检测的指标有以下几项:

(1) 粉末的流动性。热喷涂粉末必须具有良好的流动性,以利于连续、均匀、流畅地送入喷射焰流中,金属及合金粉末的霍尔流速一般为  $20\text{s}/50\text{g} \sim 50\text{s}/50\text{g}$ 。热喷涂粉末的形状最好呈球形或近似球形,这样不仅流动性好,而且球形粉末的表面积最小,其表面在热源温度下受氧化及杂质污染程度小,且各向受热均匀,有利于提高涂层的质量。

(2) 粉末的粒度。粉末的粒度是指粉末颗粒的尺寸,通常用球形粉末的直径或异型不规则粉末的等效直径来表示。粉末粒度的大小直接影响着粉末的输送、受热状态和涂层的致密度。粒度的选择取决于使用的热源种类、喷涂材料的熔点、热导率、比热容和密度等。

(3) 粉末的粒度分布。指某一类型的粉末其不同粒度粉末所占有的比率。合理的粉末粒度分布应是宽窄适中且服从或接近正态分布,合理的粉末粒度分布能保证涂层的质量、工艺的稳定和最佳的沉积效率。粉末粒度分布窄,对热喷涂工艺和涂层质量都有好处,但是会加大制粉难度,提高粉末成本;粉末粒度分布宽,在喷涂过程中会出现细小粉末易“结珠”,粗大粉末飞溅等现象。

(4) 粉末的松装密度。指粉末松装保持静止时,单位容积粉末的质量,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。松装密度是粉末体的一个综合性能,受材料的种类和成分、粉末的形状、粒度分布、粒度、粉末内含气体的量及粉末表面干燥程度等表面状态诸因素的影响。松装密度与粉末的呈球形状、材料的密度、粉末表面干燥程度、粉末粒度分布成正比;与粒度、粉末内含气量成反比。

(5) 粉末的表面质量。粉末材料有极大的表面积,粉末表面含氧量大或有其它污染物时,会对喷涂层的质量产生影响。提高粉末的抗氧化能力和去除粉末表面吸附的潮气,或对粉末进行还原、净化处理,都能改善喷涂层的质量。

### 10.1.1 热喷涂粉末粒度测试

热喷涂粉末的粒度测试多种多样,本节重点介绍传统的干筛分法和激光粒度仪测试法测定热喷涂粉末的粒度。

#### 10.1.1.1 干筛分法测试热喷涂粉末的粒度

干筛分法测试热喷涂粉末粒度的原理是利用按照筛孔尺寸依次组合的一套试验筛,把粉末分成不同的筛分粒级。称量每个筛子上和底盘上的粉末量,即可计算粉末样品每个筛级的粒度组成。此方法适用于干的、无润滑的粉末,而不适用于明显不等轴形状的粉末(如片状粉末)及颗粒尺寸全部或大部分小于 $45\mu\text{m}$ 的金属粉末。其测量设备和测量步骤如下:

##### 1. 测量仪器设备

(1) 标准筛:由六个筛子号的标准筛组成,具体筛号及筛网孔径见表10-1。

表10-1 标准筛的筛号及孔径

筛号	45	80	120	170	230	325
筛网孔径/ $\mu\text{m}$	354	177	125	88	63	44

标准筛的直径为200mm,高度为50mm,用青铜、黄铜或不锈钢筛布制成。每级筛网上的筛孔孔径允许在 $\pm 30\%$ 的范围内波动,但在此范围内的筛孔总数,应占本筛面全部筛孔的95%。如230<sup>#</sup>筛所对应的筛孔孔径是 $63\mu\text{m}$ ,允许其筛面上的筛网孔径从 $44\mu\text{m} \sim 82\mu\text{m}$ 的孔径之和占总筛孔的95%。

(2) 振筛机。可用偏心振动式振筛机,即在振筛过程中,能使标准筛一边摆动和上下振动一边做圆周运动。其规格型号如下:

摇动次数 220 次/分;

振击次数 146 次/分;

回转半径 12.5mm。

(3) 天平 称量 100g 感量 0.1g。

(4) 软毛刷。

##### 2. 测量步骤及结果计算

(1) 按筛号顺序把标准筛叠起来(小号在上、大号在下),并套在底盘上。将事先称好的待测样品,倒入最上面的筛内,加好密封盖,将整套筛子一起放置到振筛机上,振筛15min为止。然后分别称量各筛面及底盘内的热喷涂粉末重量,精确到0.1g,分别记录。必须保证其粉末总和不小于原称量的99%。各

级总和与原称样重量之差值应加入到底盘内的粉末重量之中。

(2) 粒度组成是以标准筛的各级筛面上的粉末重量百分比来计算的 ,计算时精确到 0.1 ,其中小于 0.5 % 的作为微量。

例如表 10 - 2 是某粉末利用筛分法测量粒度结果。

表 10 - 2 某粉末利用筛分法测量粒度结果

筛 号		粒度组成 / %
	+ 45(354μm)	0.8
- 45	+ 80(177μm)	1
- 80	+ 120(125μm)	20
- 120	+ 170(88μm)	20
- 170	+ 230(63μm)	30
- 230	+ 325(44μm)	7
- 325		21.2
* 其中 , “ + ”号表示留在筛面上的 , “ - ”号表示通过筛子的		

(3) 同一种粉末取样二份 ,分别测量 ,然后取平均值报告结果。

(4) 标准筛的修正。经常使用的标准筛 ,经过一段时间之后 ,由于筛孔变形或被堵塞 ,不再符合原来的尺寸规格而逐渐失去其标准性。因此一般应备有另外一套经过检定的标准筛作为校验标准筛 ,其校验方法如下 :

用同一种粉末按上面所述的测量方法 ,分别在校验筛和被校验筛上做粒度组成的测量试验 ,从而得出被校筛的修正系数。每级被校筛测的数据都应乘以其对应的修正系数。

求修正系数的方法及公式如下 :

$$x = \frac{J}{G}$$

式中 x 为标准筛修正系数 ; J 为校验筛上的粉重( % ) ; G 为被校筛上的粉重( % )。

例如 x 的求法(表 10 - 3) :

表 10 - 3 标准筛修正系数求法

筛 号	校验筛粉重 / %	被校筛粉重 / %	修正系数 x
+ 80	2.0	2.0	2.0 / 2.0 = 1.0
- 80 + 120	10	10	10.0 / 10.0 = 1.0
- 120 + 170	40	35	40 / 35 ≈ 1.142
- 170 + 230	10	8	10 / 8 = 1.25
- 230 + 325	36	30	36 / 30 = 1.2
- 325	2	15	2 / 15 ≈ 0.133

### 10.1.1.2 激光粒度测试仪测试热喷涂粉末的粒度

目前,热喷涂粉末的粒度测试也经常采用各种粒度测试仪,粒度测试仪的型号和种类很多,但激光粒度仪是目前研究分析最常用的仪器。下面以国产的BT-9300S激光粒度仪为例介绍如何利用激光粒度测试仪测试热喷涂粉末的粒度。

#### 1. T-9300S 激光粒度仪简介

##### 1) 仪器介绍

BT-9300S型激光粒度仪具有自动调整光路焦距、自动对中、自动给排水、超声定时、流量可调等功能,是一种自动化程度较高、使用方便、性能好的粒度分布测试仪。其外观如图10-1所示,它采用进口的半导体激光器,功率大、寿命长、单色性好;采用由大规模集成电路工艺制造的大尺寸、高灵敏度光电探测器阵列;离心循环泵和微量样品池两种进样方式;全程米氏理论和多种分布模型的数据处理方式;高精度的数据传输与处理电路等一系列先进的技术和制造工艺,使该仪器具有准确可靠、测试速度快、重复性好、操作简便等突出特点,是集激光技术、计算机技术、光电子技术于一体的新一代粒度测试仪器。



图 10-1 BT-9300S 型激光粒度仪外观图

##### 2) 性能指标与技术参数

- (1) 测试范围  $0.1\mu\text{m} \sim 340\mu\text{m}$ 。
- (2) 进样方式:微量样品池式和循环泵式。
- (3) 重复性误差:小于1%(标样D50相对偏差)。
- (4) 测试时间:一般2min/次~3min/次。
- (5) 仪器净重32kg;体积660mm×280mm×290mm;功率180W;电压220V。
- (6) 自动对中系统精度: $\leq 1\mu\text{m}$ 。

##### 2. 分析测试实例

如测  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  和美国 Inframat 公司的 Nanox<sup>TM</sup> 2613P 纳米热喷涂粉的粒度分布情况,首先将粉体采用超声波分散在酒精溶液中,然后进行测试。

图 10 - 2 是各种粉体粒径大小的频率分布图 ,表 10 - 4 是粉体粒径分布的统计值。

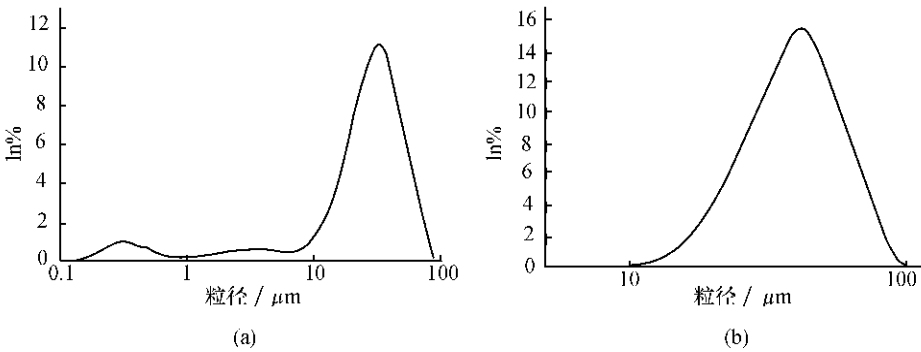


图 10 - 2 粉体的粒度分布图

(a) 喷雾造粒纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  粉体 ;(b) Inframmat 公司 Nanox™2613P 纳米热喷涂粉。

表 10 - 4 粉体粒度分布的统计值

	喷雾造粒粉体	Nanox™ 2613P
平均粒度( $D_{50}$ )/μm	30. 24	43. 91
分布宽度 *	1. 756	1. 039
* :分布宽度的计算公式为 $(D_{90} - D_{10})/D_{50}$ , $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 和 $D_{90}$ 分别指有 10%、50% 和 90% 的颗粒的粒径小于该粒度值		

从图 10 - 2 可以看出 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  造粒粉体的粒度分布曲线由两个波峰组成 ,其中较大的波峰是大颗粒的团聚粉 ,较小的波峰是由于部分的造粒粉体在酒精溶液中受超声波作用而发生破碎造成的。粒度分布的统计结果表明 ,喷雾造粒粉体的平均粒径为 30. 24μm ,小于 Nanox™2613P 粉体 43. 91μm ,而分布宽度为 1. 756 ,略大于 Nanox™2613P 粉体的分布宽度。

采用激光粒度仪可以方便、快捷地测定粉末的粒度大小和粒度分布情况 ,与干筛分法相比 ,粒度测试仪更加方便、准确。因此 ,目前热喷涂粉末的粒度测试主要以激光粒度测试仪测试分析为主。

10. 1. 2 热喷涂粉末流动性能测试

通常采用标准漏斗法(霍尔流速计)来测定粉末的流动性 ,其测试的原理是以 50g 粉末流过规定孔径的标准漏斗所需要的时间来表示粉末的流动性 ,单位 252

是  $s/50g$ 。

10.1.2.1 测量仪器设备

(1) 标准漏斗 标准漏斗应由非磁性耐腐蚀的金属材料制成, 为防变形和过度磨损, 还应具有足够的壁厚和硬度。通常选用黄铜材料制作, 其尺寸如图 10-3 所示。

(2) 秒表 测量时间能精确到 0.2s。

(3) 天平 最大称重量 100g 精度 0.05g。

(4) 支架、底座和接收器。

支架用以固定漏斗, 底座用于安装支架和接收器, 必须水平、稳固且无振动。接收器用来收集粉末, 可使用任何能容纳 50g 金属粉末的干净杯或盘, 也可用光滑的蜡纸代替。各部分的连接如图 10-4 所示。

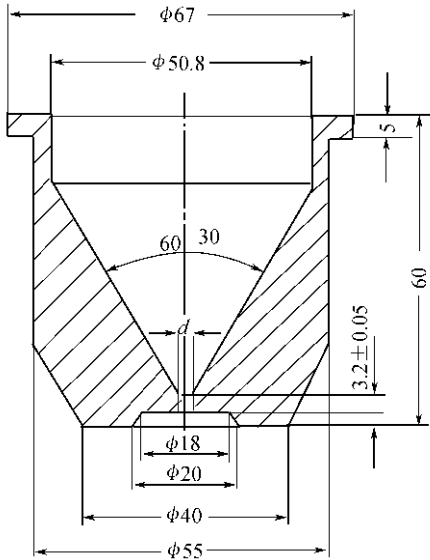


图 10-3 标准漏斗尺寸

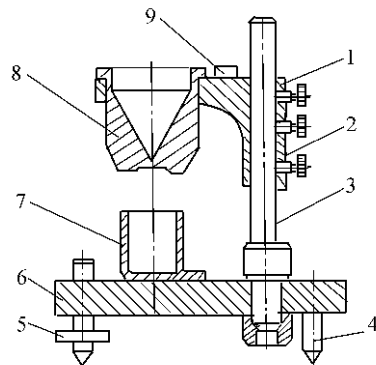


图 10-4 流动性测试仪

— 1 支架; 2—支撑套; 3—支柱架; 4—定位销;  
— 5 调节螺钉; 6—底座; 7—接收器; 8—漏斗;  
— 9—水准器。

10.1.2.2 测量步骤及结果计算

(1) 从成品中取一定数量的热喷涂粉末放入烘箱中, 在  $(105 \pm 5)$  温度下保温 1h, 然后移入干燥器内冷却至室温。易被氧化的热喷涂粉末试样, 烘干过程应在真空或惰性气氛中进行。

(2) 从干燥器中取出 50g 试样, 精确至 0.1g。

(3) 先用左手指堵住标准漏斗的漏孔,再把称好的 50g 试样全部倒入漏斗中。

(4) 用右手持秒表,当左手离开漏斗孔时同时开动秒表,待漏斗中的试样全部漏完时立即停止秒表,记下全部试样流完的时间,重复三次试验,取其平均值。

(5) 结果计算。

将上面测量得到的数值代入下式:

$$\rho = T \cdot K$$

式中  $\rho$  为热喷涂粉末的流动性(s/50g); $T$  为三次测量时间的平均值(s); $K$  为标准漏斗的修正系数。

(6) 标准漏斗修正系数的测量。测量热喷涂粉末流动性的漏斗制成之后必须进行修正。修正的方法是用标准砂按上述测量方法进行测量,连续重复测量五次,取其测量时间的平均值为这个标准漏斗的基准流动性参数,以  $g$  表示,并于漏斗外部注明。测量时必须保证重复测量的五次时间最大值与最小值之差不超过 0.4s。假定 50g 标准砂从标准漏斗中流完的时间是 40s,则标准漏斗的修正系数为

$$K = \frac{40}{g}$$

标准漏斗使用过程中,应定期用标准砂校准。如果在校验中标准砂的流动性秒数有变化,则应以新的时间平均值计算出新的修正系数。如果新的流动性秒数减少,说明由于热喷涂粉末的摩擦而使漏斗孔径变大。反之,可能是由于细粉末粘在孔颈内,使孔径变小,应加以清除。当标准砂在同一漏斗中的漏出时间比原来时间减少 3s 时,此漏斗应报废。

### 10.1.3 热喷涂粉末松装密度测量方法

热喷涂粉末松装密度的测试通常采用标准漏斗法,其原理是粉末从漏斗孔按一定高度自由落入杯子。在松装状态下,以单位体积粉末的质量表示粉末的松装密度。

#### 10.1.3.1 测量仪器设备

(1) 测量热喷涂粉末松装密度用的是标准漏斗:按漏斗下端漏孔直径大小分为两种规格:一种直径  $\phi 2.5\text{mm}$ ;另一种直径  $\phi 5\text{mm}$ 。

(2) 量杯:量杯容积为  $(25 \pm 0.05)\text{cm}^3$ ,内径为  $(30 \pm 1)\text{mm}$ 。

(3) 专用支架和底座:支架用来固定标准漏斗,确定漏斗与量杯间的距离。标准漏斗颈末端底距离量杯口处 25mm,并保证同心。底座用来安装支架和量杯,要保证水平与稳固,各部件连接同流动性测试仪见图 10-4。



(4) 天平 感量为 0.05g。

#### 10.1.3.2 测量步骤及结果计算

(1) 样品制作同粉末流动性测试。

(2) 将热喷涂粉末从标准漏斗的漏孔中自由漏进量杯内,直到漏斗内的试样全部流完,量杯完全注满,然后用直尺将量杯顶端热喷涂粉末刮平,但不要使量杯内粉末受到压力,测试金属粉末时应用非磁性直尺。

(3) 如果试样不能从孔径  $\phi 2.5\text{mm}$  的漏斗中漏下时,可改用孔径  $\phi 5\text{mm}$  的漏斗。如果还不能漏下,可用一根直径  $1\text{mm}$  的非磁性金属直丝,从漏斗内垂直插入至漏斗底部的孔径中,稍加旋转以带动热喷涂粉末漏下,但要注意不要把金属丝插到下面量杯中去。

(4) 将量杯中热喷涂粉末刮平后,轻轻敲打几下,使量杯内的热喷涂粉末密实些,以免移动过程中杯内粉末撒出。

(5) 称量杯中粉末的重量,精确到  $0.05\text{g}$ ,试验重复三次,取其平均值。

(6) 将测得数值,代入下式进行计算,即

$$p = \frac{m}{v}$$

式中  $p$  为松装密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  $m$  为热喷涂粉末的质量( $\text{g}$ )  $v$  为量杯的容积( $\text{cm}^3$ )。

## 10.2 热喷涂涂层的性能检测

随着热喷涂技术作为一种表面强化工艺广泛地应用于各种机械设备零部件的制造与修复,人们对涂层的可靠性、信赖性提出了越来越高的要求。涂层的性能检测与研究越来越受人们的重视。要采用准确而又方便的检验方法,对热喷涂层的质量和性能进行可靠的评价,使热喷涂层的强度、耐磨、耐热、耐腐蚀等性能满足实际应用中的使用要求,保证工程结构件的安全运行。

涂层的性能反映了涂层的质量,它是由热喷涂材料、热喷涂工艺及涂层后处理等多种因素决定的。因此,热喷涂层性能既不同于喷涂材料的性能,也不同于基体材料的性能,常规的检测金属或非金属材料性能的方法可借鉴来评定涂层的性能,但常需进行必要的修改。在评定涂层质量时,必须根据各类产品的不同涂层,按其实际用途和使用要求来确定有关测试内容和相应的测试方法。涂层质量检验的测试内容和方法是很广泛的,评定涂层性能涉及到多方面的技术指标。根据国内涂层研究和生产的实际应用情况,就一般涂层而言,通常要求测试的性能有:涂层的外观质量、厚度、硬度、结合强度、孔隙率、耐磨性、耐蚀性、涂层内应力、耐热性等。由于涂层的性质不同或其使用环境不一,对于同一测试项目

又有多种测试方法。评定涂层性能有很多指标是相同的,但不是所有涂层都要求同样的性能指标。涂层性能指标取决于涂层特定的使用要求。不同的性能要求,在某些性能指标上有很大差别,甚至是相反的。

目前,涂层各项性能仍然是通过试验测量才能得到。涂层和基材在实际使用中是一个复合体系,测量性能时应作为整体加以考虑。

## 10.2.1 测定涂层性能的目的

### 1. 满足工艺要求

通过喷涂层性能数据的比较,检查工艺参数是否选择得当,是测定涂层性能的第一个目的。因此选用的测试项目应该对工艺参数十分敏感,而且简单易行。目前采用最多的是沉积效率、抗弯试验或杯突试验。在更换或选择新工艺参数时,可采用比较细致的方法测定涂层与基体的结合强度。

### 2. 满足设计要求

根据测定的喷涂层性能数据,设计或计算涂层的结构和厚度,以满足实际需要。这类性能对工艺参数不太敏感,通常是涂层的基本物理性能,例如热导率、辐射率等。在考虑热震性能特别是长期持续高温下工作的耐热涂层时,应重点测定涂层的比热容和热膨胀系数等。测定这些性能需要专用的设备,并要求喷射一定规格的试样,难于在一般的车间或工厂内完成。

### 3. 满足使用要求

判断涂层在实际情况下(大多是复杂环境)可能出现的损坏情况以及使用寿命,是测定涂层性能的又一个重要目的。这已接近典型的台架试验,例如涂层在动态下的隔热和抗蚀情况,涂层在某一部件上的耐磨蚀情况等。这些往往要根据具体的使用环境,专门设计和研制出专用测试装备来进行涂层性能的测试。

## 10.2.2 涂层性能检测项目和分类

由于热喷涂涂层性能检测的复杂性,至今还没有一项专为热喷涂涂层性能检测而制定的国家标准,许多检测方法尚未形成统一标准。表 10-5 是目前采用的国家标准和行业标准,供读者参考并结合实际情况查阅使用。

表 10-5 列的项目对于给定的涂层并不需要全部检测,但是有些基本项目对于所有热喷涂涂层都需要检测,例如涂层外观、涂层厚度、涂层与基体的结合强度、涂层自身结合强度、涂层密度和孔隙率、涂层微观结构分析等。下面分别介绍涂层性能常见的检测项目和检测方法。

表 10-5 热喷涂涂层检测项目和相关标准

类 别	检 测 项 目	主要检测方法	执行或参照标准	备 注
外观	1. 表面粗糙度； 2. 表面宏观缺陷； 3. 厚度及厚度均匀性	轮廓仪 标准试片 ,目视； 低倍放大×10 ,目视； 无损测厚 量具 金相	GB 1031—83  GB 11374—89	
力学性能	对基体的： 1. 涂层拉伸结合强度； 2. 涂层剪切强度； 3. 涂层弯曲试验； 4. 涂层划格试验。 涂层自身的： 5. 涂层粘结强度； 6. 涂层抗压强度； 7. 涂层应力； 8. 涂层收缩率	拉伸试验机； 剪切试验装置； 芯棒及涂层薄片； 划格刀具。  拉伸试验机；  X 射线 光弹性法	GB 8642—88 DIN 50161 MIL - STD - 1687 ISO 2063. 2—1989  GB 8641—88	应规定表面制备和基体材料,列出所有喷涂工艺参数
微观及结构分析	1. 涂层组织结构； 2. 涂层与基体的界面结合状态； 3. 涂层微裂纹、气孔	金相检验、X 射线衍射分析 金相 扫描电镜；  金相 声发射 无损探伤	ISO—1463	
化学性能	1. 化学成分； 2. 电化学特性	溶液分析 ,X 射线荧光分析 电位仪		
物理性能	1. 涂层密度及气孔率； 2. 热膨胀系数； 3. 冲击试验； 4. 热导率(比较性)； 5. 电导率； 6. 介电强度； 7. 抗热震性； 8. 热辐射率； 9. 磁性	膨胀仪； 落球式冲击试验； 热导率测定仪；  加热炉 等离子火焰	JB 2112(3)—77 GB 2572—81  GB 3139—82 GB 1409—79  ISO - 2178	
耐磨 耐腐蚀性能	1. 宏观硬度； 2. 微观硬度； 3. 高温硬度； 4. 磨料磨损； 5. 滑动磨损； 6. 抗自然环境腐蚀(水、大气)； 7. 化学介质腐蚀； 8. 抗高温氧化； 9. 耐熔融金属、炉渣等腐蚀	表面洛氏硬度、洛氏硬度、布氏硬度； 显微硬度(HV)； 洛氏硬度； 吹砂磨损 SiO <sub>2</sub> 砂浆磨损； 无油润滑 油润滑下 潮湿箱试验 盐雾试验；  浸渍试验 模拟试验； 高温炉 质量变化试验； 现场试验 模拟试验	GB 8640—88  GB 9790—88  ASTM G65—81  GB 6458—86 GB 6460—86 GB 10124—88	

热喷涂与铸造、锻压、机加工相比是一种截然不同的加工技术。测试性能用的试件必须设计成既适合进行性能测试又能代表实际使用的涂层。这就要求试件所有喷涂参数、基本材料、涂层厚度、喷涂的温度条件等应该尽可能与最后使用的涂层相同。例如试件通常比实际工件小得多,因此在喷涂时温度若不加以控制就可能高得多,造成试件的涂层性能和实际工件的涂层性能之间的差异。这样测得的数据就不能代表实际情况。在很多情况下,充分考虑使用情况,正确地设计出一种能很好地模拟真实使用条件下的试件,要比考虑测试本身的简易性更为重要。

### 10.2.3 热喷涂涂层常规性能检测

#### 10.2.3.1 热喷涂涂层外观检查

使用涂层的目的除了防护基材及达到某些功能指标外,几乎都要求一定的外观质量,不允许存在明显的缺陷,另外通过外观检查能推断出涂层工艺上的不足。因此,涂层的外观检验是最基本、最常用的检验内容,外观不合格就无需进行其它项目的测试。

##### 1. 热喷涂涂层表面缺陷的类型及其特征

热喷涂涂层表面应色泽应一致,涂层及工件边角无氧化,厚度均匀;外观应光滑平整,不允许有聚缩及涂层剥落;应无气孔、夹渣、裂纹、针眼等缺陷。

(1) 聚缩。聚缩是喷熔层常出现的缺陷,重熔时合金粉熔融后不能均匀地润湿基体表面而是聚缩成球。主要是由于基体表面或合金粉氧化严重,超过了自熔剂的氧化能力。氧化层将合金与基体表面隔开,液态合金在表面张力的作用下聚缩所致。

产生聚缩的喷涂层为废品,必须除去重新喷熔。

(2) 涂层剥落。喷涂层剥落是由于与基体结合不良而引起。发现剥落,必须将喷涂层除去,重新清理工件表面,再行补喷。

(3) 气孔和夹渣。气孔是在工件准备不当、合金粉含氧量过高、乙炔中含水以及重熔时火焰吹力过大等情况下产生的。夹渣是因为合金粉末质量不好,例如熔点高、黏度大、脱氧能力不足以及粉内含有杂质等问题而产生的。另外,重熔时火焰移动速度过快,熔渣难以充分浮出,亦会引起夹渣。气孔或夹渣均会使喷涂质量下降,直接影响到工件的耐磨、耐腐蚀等性能,还会引起应力集中,影响工件的强度。应当根据工件的工作条件确定是否报废,对于有耐磨要求的工件,涂层在  $1\text{cm}^2$  的面积内直径小于  $0.04\text{mm}$  的气孔或夹渣不得多于 5 个。

(4) 裂纹。引起裂纹的原因很多,例如热喷涂前工件预热温度不足,喷涂后冷却速度过快,喷涂层与基体的膨胀系数相差太大,基体刚度过大,基体在冷却时

产生较大的相变应力等均可能使涂层产生裂纹。裂纹在热喷涂中不允许存在,一旦发现,必须重新喷涂。为了防止裂纹产生,必须严格遵守工件喷涂的工艺要求。

## 2. 检查条件

为了便于清楚地观察涂层表面缺陷、防止外来因素的干扰,目测涂层表面缺陷应在规定的外观检验工作台或外观检验箱进行。

外观检查工作采用自然照明时,试样应放置在不反射光的白色平台上,利用顺方向自然散射光进行检查。

外观检查工作台和外观检查箱采用人工照明时,应采用照度为 300lx 的近似自然光(相当于 40W 日光灯 500mm 处的照度)。目测检查时,试样和肉眼的距离不小于 300mm,对于重要的涂层和有特殊要求的试件,允许采用 2 倍~5 倍的放大镜检查。

进行涂层外观缺陷检验的试件,在检查前应采用清洁的软布或棉纱擦去试样表面的油污。

### 10.2.3.2 热喷涂涂层厚度测量

热喷涂涂层的厚度是衡量涂层质量的重要指标之一。涂层的厚度在很大程度上影响着产品的可靠性和使用价值。通过对涂层厚度的检测,除了评定有公差指标或修复尺寸要求的工件是否合理外,还能直接或间接地评估涂层的耐蚀性、耐磨性等性能。因此它在涂层质量检验和工艺研究中被普遍采用。

涂层厚度的检验,一般分为涂层平均厚度和局部厚度两类检验方法。由于局部厚度比平均厚度在实际应用中更能反映产品的质量,所以在多数情况下采用测量涂层的局部厚度或局部平均厚度。测厚时至少应在有代表性或规定部位测量三个以上厚度,并计算其平均值作为测量厚度的结果。

涂层厚度检验方法有破坏检测法和非破坏检测法(无损检测法)两大类。

#### 1. 显微镜断面测试法

金相显微镜法测量涂层厚度属于物理方法之一。用正常的金相学方法来制作被测涂层的断面试样,然后在带有测微目镜的金相显微镜上观察被测涂层横断面的放大图像,从而直接测量涂层的局部厚度。该方法由于在放大一定倍数下直接测量涂层的断面厚度,所以具有测量准确度高、依据充分、判断直观等优点,但此法在试样制作时操作比较复杂,一般用于厚度控制严格或用其它测厚法对结果有争议等试件进行校验和仲裁或实验室测量时使用。

(1) 显微镜断面测试法原理。金相法测厚是采用具有一定倍率和带有测微目镜的专用金相显微镜来观察、测量被测涂层的横断面厚度的方法。为使涂层的断面符合金相显微镜的要求,在测厚时事先应将被测涂层进行切割、边缘保护、镶嵌、抛光和化学浸蚀,制成符合要求的试样后进行。如果测量平均厚度,则

应在涂层试样的断面测量两个以上视场,每个视场以相等的间隔至少测定 5 点,以平均值或最小值作为涂层的厚度。对热喷涂涂层,可采用 20 倍的倍率。如图 10 - 5 所示。

(2) 取样、切割和试样制备参见 10.3 涂层金相检测。

## 2. 千分尺测量法

事先用千分尺测定基材的厚度,喷涂后再在原来位置进行测量,测量不得少于 3 点,而后以平均值或最小值作为测量厚度。

## 3. 涡电流式厚度计测量法

常见的厚度计有涡电流式、磁力式、触头扫描式等,热喷涂涂层多使用涡电流式厚度计。涡电流法的工作原理是利用一个载有高频电流线圈的探头,在被测试样表面产生高频磁场,由此引起金属涂层内部涡流,此涡流产生的磁场又反作用于探头内线圈,使其阻抗变化而工作,通过检测涂层的涡流损耗来确定涂层的厚度。该测厚仪不受工件铁磁性的限制,需要用标样来进行读数标定。为了能使测量结果尽量准确,应尽可能使标样的厚度、材质、表面状态、均匀度等与涂层相一致。

常用的涡流测厚仪有 JWH - 1, JWH - 2, 7504 型等几种。

## 4. 触头扫描式测量法

触头扫描式测量法如图 10 - 6 所示,事先用铁片等把试片局部遮挡起来,喷涂后用触头扫描式表面粗糙测定器对涂层和基材表面之间的高度进行断面描绘。由断面曲线测定厚度有两种情况:

(1) 中心线间涂层厚度  $d_c$ ——基材面断面的中心线与涂层断面曲线的中心线之间的距离。

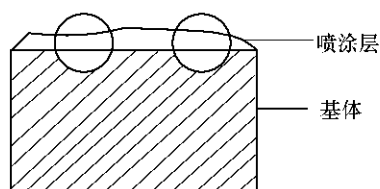


图 10 - 5 涂层厚度测定示意图

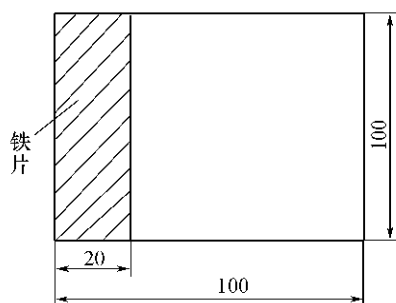


图 10 - 6 触头扫描式测厚示意图

(2) 波峰间涂层厚度  $d_j$ ——基材面断面曲线的波峰与涂层断面曲线的波峰之间的高度。

图中涂层表面与基材面粗糙度最大高度分别用  $H_{1\max}$ 、 $H_{2\max}$  表示 ,有效测量长度(基准、测试长度)用  $L$  表示  $l$  为非测试长度。因为在交界面处有遮蔽物 ,故可能产生涂层边缘隆起、边缘尖角以及缺肉等现象。该区域的涂层状况不具有代表性 ,因此扫描区域应以  $L$  为限。 $L$  的选择可参照表 10 - 6。

表 10 - 6 基准测试长度

$H_{\max} / \mu\text{m}$	标准测试长度 / mm
< 25	2.5
25 ~ 100	8
100 ~ 500	25

在进行厚度测试时 ,每一试样应至少测量三个位置 ,最后以  $d_c$  或  $d_j$  的算术平均值作为涂层厚度。

上述的后两种涂层厚度测定法 ,因测量头与涂层的接触状况、基材厚度、面积、弯曲度不同 ,都会不同程度地影响到测量精度。因此 ,对涂层测厚而言 机械测量方法及显微镜测量法具有较好的测量精度。

10.2.3.3 涂层孔隙率的测定

孔隙率是涂层到基体通道中单位面积上气孔的数目 ,以气孔数/厘米<sup>2</sup> 表示。也有用涂层材料中气孔的体积占涂层几何体积的比值计量孔隙率 ,以% 表示 涂层几何体积是涂层厚度和它的面积的乘积。另外 ,也有用密度比(涂层密度/涂层材料实际密度)来表示孔隙率的 ,它是靠测量涂层的密度同喷涂前原涂层材料的密度相比较而确定的。例如 ,等离子涂层的理论密度从 85% 到 93% 之间变化。

喷涂加工不论采用哪种方式 ,都是使高温微粒在基体表面叠层形成保护涂层的加工方法 ,所以喷涂层内必然含有气孔。喷涂粒子越黏稠 ,速度越快涂层结构越致密。喷涂层的孔隙率通常为 5% ~ 15% 左右 ;当涂层厚度在 0.2mm 以下时 ,常存在贯穿型气孔。

涂层孔隙率是描述涂层密实度的一个度量单位 ,是反映涂层质量的定量指标之一。它可直接影响到涂层的防护性能 ,作为耐磨涂层 ,涂层内的孔洞可用来保存润滑剂、容纳磨粒 ,使涂层更耐磨。但若用于磨蚀或腐蚀工况条件时 ,腐蚀介质会通过孔洞浸透到基材表面 ,不仅有害于耐蚀性能 ,还会使结合强度降低 ,易于产生剥离。用于耐热、耐蚀等环境的涂层 ,必须进行孔隙率测定。

涂层孔隙率实质上是涂层材料在喷涂前后的体积膨胀率 ,即定义涂层孔隙率为涂层材料在喷涂前后体积的相对变化率 ,可以表示为

$$\alpha = \Delta V/V_0 \tag{10 - 1}$$

$$\Delta V = V - V_0 \quad (10 - 2)$$

式中  $V_0$  为喷涂前的体积,  $V$  为喷涂后的体积, 故

$$\alpha = (1 - V/V_0)100\% \quad (10 - 3)$$

但是测量喷涂前后的材料体积有困难, 所以实际是测量喷涂后涂层体积和空隙体积, 则式中  $V_0$  应为涂层体积,  $\Delta V$  应为体积变化, 即孔隙体积。另外由于质量不变时, 体积与密度的反比关系, 又有用密度变化表示涂层孔隙率的, 即

$$\alpha = \Delta\rho/\rho_0 = (\rho_0 - \rho)/\rho_0 = (1 - \rho/\rho_0)100\% \quad (10 - 4)$$

式中  $\rho_0$  为喷涂前的密度,  $\rho$  为喷涂后的密度, 而且  $\rho_0 > \rho$ ,  $\alpha > 0$ , 即测量喷涂前后的密度变化。

检测涂层孔隙率可以根据孔隙率的物理定义直接测量, 有多种方法, 例如浮力法、直接称量法, 后来又出现了电解着色法、渗透液体的称量法、高压放电法、根据透气性进行比较的方法和金相法等。

#### 1. 浮力法

试验步骤如下:

(1) 将涂层与基体剥离, 外观上不应有明显的凸凹不平。

(2) 将涂层试片放在 105 ~ 120 的烤箱中干燥约 2h, 使质量达到恒定, 称出干燥质量  $m_1$ 。

(3) 将干燥后的试片浸入室温的蒸馏水中, 并在真空下浸润排气, 当气泡排完后取出称重, 将此试片称之为饱和水试片。而后用直径 0.5mm 以下的细金属丝将饱和水试件悬挂于水中称重, 扣除金属丝质量后的称量值作为饱和水试样的水中质量  $m_2$ 。

(4) 将饱和水试样从水中取出, 迅速用湿布擦干并称重, 以此作为饱和水试件的质量  $m_3$ 。则表面孔隙率可由下式计算, 即

$$\text{表面孔隙率(开孔孔隙率)} \varepsilon = (m_3 - m_1)/(m_3 - m_2) \times 100\% \quad (10 - 5)$$

#### 2. 直接称量法

该方法的优点是不必将涂层剥离。试样如图 10 - 7 所示。

在规定的圆粒形坯样凹面上进行喷涂, 用砂轮机磨削涂层的多余部分, 而后精加工至规则的圆柱形, 由圆柱坯料的原尺寸可知涂层的体积, 准确称量磨削后圆柱重量, 即可求出涂层的质量, 根据涂层材料的相对密度, 利用下式可简单计算出喷涂层的孔隙率。

$$\varepsilon = (1 - \rho_a/\rho) \times 100\% \quad (10 - 6)$$



式中  $\rho$  为喷涂材料的真密度  $\rho_a$  为喷涂层的表观密度  $\varepsilon$  为喷涂层孔隙率。

另外,在能够以准确的尺寸对涂层进行精加工时,可从精加工试样的尺寸及其重量以及涂层材料的相对密度来直接计算孔隙率。

涂层材料的相对密度是计算孔隙率的基础,但由于涂层内含有在喷涂过程中产生的氧化物等原因,使涂层相对密度与原材料的相对密度有所不同,所以,这样测得的孔隙率值,含有因此产生相变的喷涂材料,在测定时,必须注意涂层材质的变化。

### 3. 喷涂层电解着色法

使用电解着色可直接显示出孔隙的分布、形状及大小,测试装置示意图如图 10-8 所示。试样尺寸为  $40 \times 60(\text{mm})$ 。

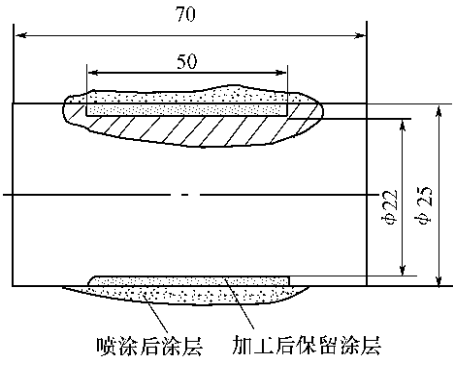


图 10-7 直接称量法

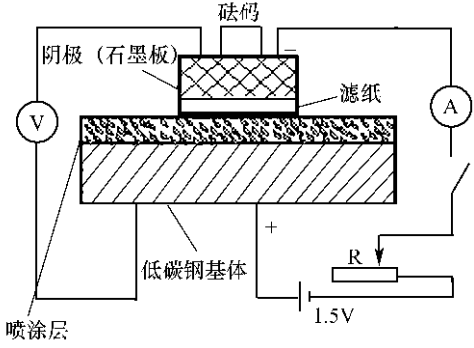


图 10-8 电解着色示意图

试验溶液(以铝为例)为  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6 10\text{g/l} + \text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O} 10\text{g/l} + \text{NaCl} 60\text{g/l}$  的水溶液,试验温度  $16 \sim 28.5$ 。试验方法如下:

- (1) 在铁板上喷涂  $0.05\text{mm} \sim 0.07\text{mm}$  厚度的铝,并按规定制成标准尺寸的试样。
- (2) 将滤纸浸入试验溶液中浸透,按图 10-8 所示,将滤纸置于阴极与涂层之间,压上砝码,以保证接触良好。
- (3) 通直流电电解,电流密度为  $2\text{mA}/\text{cm}^2$ ,时间为  $5\text{min}$ 。
- (4) 电解后取出滤纸,喷涂层中的气孔在滤纸的相应位置上被准确着色,有气孔处呈深蓝色,其余部分为蓝色,用肉眼或 20 倍放大镜查气孔数量,即可得到孔隙率。

### 4. 渗透液体的称量法

渗透液体的称量法是先将涂层试样从基体上剥下来,然后测量涂层试样的

重量,再将试样浸入甲苯中沸腾 1h,最后测量试样在甲苯中的重量。因为甲苯可以通过在涂层内连通着的气孔迅速向内部渗透,所以可测知与表面不连通的气孔的孔隙率。测量后,再把试样置于减压下进行加热,看试样是否恢复到原来的质量。

### 5. 高压放电试验

该试验为一种适用于陶瓷涂层的孔隙率检验方法。

对于有耐腐蚀要求的陶瓷涂层,通常要在喷涂后进行封孔处理,该试验的主要目的是检验封孔效果的好坏。前述的孔隙电解着色法与该试验具有同样效果。

本试验的基本原理如图 10-9 所示,当陶瓷涂层中存在贯穿型气孔时,高电压端子与基材之间通过贯穿性气孔会产生火花放电现象,火花放电的强弱就说明了贯穿性气孔的存在状态。输出电压为直流或交流,最高电压 3kV,短路电流小于 5mA。测试时,高电压端子置于基材面上涂层厚度的 2 倍~2.5 倍的位置上,调整输出电压以使火花产生。

在对与产品相一致的试样进行高压放电试验前,应事先在模拟试样上测试,制定出不导致破坏封孔剂的电压规范,然后再对正式试样进行测试。

应注意将接地端子与基材相连接,高压端子轻触涂层表面,平稳移动,根据火花的有无来确定气孔的有无。

### 6. 根据透气性进行比较的方法

虽然不可能直接推断孔隙率,但可以通过对涂层透气性的测量来间接地进行比较。透气性是气体通过涂层内的一种性质。它与气孔的存在有密切的关系,但不一定以孔隙率的大小表示。孔隙率仅仅表示涂层内气孔存在的量,而透气性还要受涂层结构方向性的影响。所以,对于耐蚀、耐热的涂层,是作为一个重要性质来讨论的。可以通过对透气性的测量来间接地比较涂层的孔隙率。

虽然测定涂层透气性的方法及其表示方法有许多种,但大体上都是用如图 10-10 所示的装置来进行的。把从基体上取下的涂层试样 S 置于接受台 A 上,并用石蜡将其粘结封住不使漏气。此时必须注意石蜡不能粘到有效透气面积  $A(\text{cm}^2)$ 。打开阀门 C,使水从 D 中注入容器 B,到达标线 a 处。再将阀门 C、D 关闭,打开阀门 E、F,使容器内的水流出。这样,容器内的压力在大气压以下,空气就会通过试样 A 的气孔流入。这时,调节阀门的开关,使压力计 M 的水位差  $H(\text{cm})$  保持一定,也就是使空气流入状态稳定。这样,根据从阀门 F 流入量筒 G 的水,可测出流出  $W(\text{cm}^3)$  体积的水所需要的时间。这个时间就是 W 体积的空气流入时所需的时间  $t(\text{s})$ 。

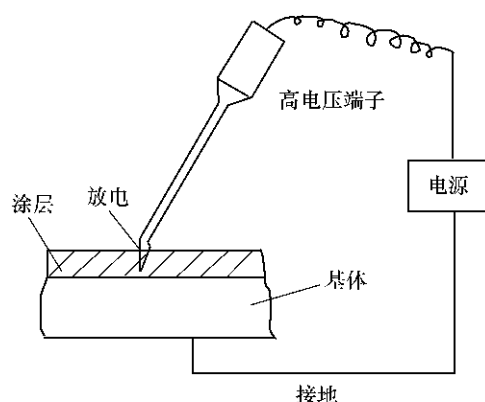


图 10 - 9 高压放电式空隙率试验法

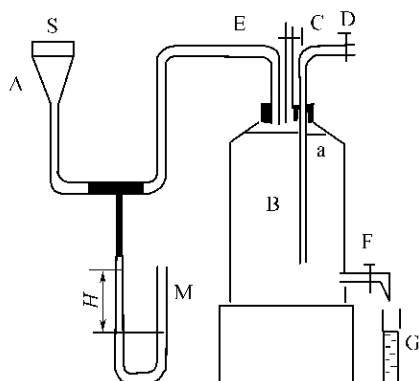


图 10 - 10 透气性的测定装置

## 7. 金相法

金相法测定涂层的孔隙率是用显微镜局部区域孔隙所占的比例来测算。如显微镜具备图像分析功能,则可方便地得到孔隙度的大小。金相法中常用的有栅格法及截面定向截取法。

栅格法是在目镜带有 100 个栅格的视场下测定,选 20 个视场来观察,测出每个视场中孔隙所占的格数,并将 20 个视场的孔隙所占的总格数同总视场的格数相比,比值即为涂层的孔隙度。

截面定向截取法是在带“十”字刻度的目镜下测定以“十”字中心为参考点,连续移动 20 个视场,测出“十”字中心经过孔隙的长度之和与连续移动的总长度之比,比值即为涂层的孔隙度。

涂层金相检验法最主要的特点是快速、敏捷,以不产生伪表面为限。切片的研磨、抛光时间应尽可能短,并应避免采用超声波清洗,以防引起涂层粒子脱落,而影响检测结果。

## 10.2.4 涂层力学和机械性能检测

### 10.2.4.1 涂层结合强度的测定

所谓结合强度是指涂层与基体之间的结合强度。涂层的结合强度对于热喷涂在表面工程中的应用是十分重要的,是涂层的重要机械性能之一,它直接关系到修复和强化零件使用的可靠性,也是优化工艺参数的重要依据之一。

涂层的结合强度不良会引起涂层剥落,不仅会直接影响工件的外观质量,而且使涂层的防护性和功能均失去作用。因此,若涂层的结合强度不合格,则无须进行其它性能检测。

## 1. 涂层的结合机理

涂层的结合机理包括涂层与基材表面的结合及涂层内聚的结合。前者的结合强度称结合力,后者的结合强度称内聚力。

在热喷涂技术发展初期,均认为喷涂层与基材表面的结合是严格的机械结合,即机械的嵌合,即所谓的“抛锚效应”。随着热喷涂技术的发展和高温热源及放热型自粘结喷涂材料的采用,发现涂层材料对基材表面有扩散现象,产生微区冶金结合的组织。还发现喷涂颗粒表面的氧化物薄膜对涂层内聚结合能起到一定作用。因此,用纯粹的机械结合来解释涂层结合机理已不适用。研究和经验表明,热喷涂涂层与基材表面之间的“宏观”界面结合以机械结合为主,物理、化学结合为辅,涂层片片状颗粒之间的“微观”界面结合可能属物理—化学结合的成分更多一些,目前一般常用的结合机理的几种类型如下。

### 1) 机械结合

机械结合是指具有一定动能的熔滴碰撞到经过粗糙处理的基材表面后于表面上的凸起和凹陷处形成的机械咬合。涂层的微粒与表面、微粒与微粒之间靠相互嵌镶而连在一起。在粗糙度较大的表面(如经过粗粒喷砂或有机制沟槽和螺纹的表面)上热喷涂时,机械嵌合具有重要作用。

### 2) 冶金结合

冶金或化学结合可以使涂层材料与基材在界面形成共同晶粒(联生结晶),或者在界面只是晶粒相接触并存在晶粒界限(不形成共同晶粒),也可以相互间发生反应生成金属间化合物。形成共同晶粒的情况,也可以称为“晶内结合”,不形成共同晶粒而只是相互接触的情况称为“晶间结合”。

一般来说,热喷涂工艺中的涂层材料与基材的结合很少见到晶内结合的作用。也就是说,涂层材料在基体表面上的结晶过程,主要不是对基体晶格的外延。究其原因,可以有以下的分析:首先是材料的差异。在钢基体上喷涂铝、陶瓷材料或Ni基、Co基合金时,基体与涂层的晶格类型、晶格常数均极不匹配,这使在基体上外延晶格比较困难,但最重要的因素还是基体的温度太低。在正常的热喷涂过程中,基体的温度不高于200~300℃,这可以减小基体的热变形,并确保熔敷层的化学成分不致于在喷涂过程中发生较大的偏离。在这样低的基体温度下,熔融金属中的原子所具有的能量(包括热能和动能)还不足以克服原子间的势垒,达到形成晶内结合的程度。但由于某些涂层材料自身的放热作用,也可能在某些显微点上出现局部熔化,导致该点形成晶内结合。

晶间结合是热熔融涂层与基体最重要的结合形式。高速运动的熔融液滴撞击到基体表面后迅速推开呈薄片状。冷的基体表面不仅为熔滴的结晶提供了极大的过冷度,而且还为其提供了现成的固态表面。于是在基体表面上迅速发生

了形核和长大的结晶过程。涂层与基体晶粒之间有明显的晶界,相互不能外延或渗透。这种晶间结合的集体效应决定了涂层宏观结合强度不可能太高,而且由于晶间结合是热熔融涂层与基体最重要的结合方式,因此造成了热熔融涂层与基体的结合强度比较低,只是晶内结合的几十分之一。

冶金结合的另外一种方式是涂层与基材反应而生成金属间化合物,这种反应的先决条件是必须有扩散过程。低真空熔结工艺为扩散过程提供了条件。在熔结工艺的加热阶段,待熔敷合金粉末(或合金粉末制成的预制块)被加热到液固两相区并保温一定时间。可以认为,在加热和保温阶段中,涂层与基材有足够的时间和能量相互扩散。金相分析的结果表明,在基材与涂层之间,常常可以看到一条亮带,宽约几十微米。这条亮带的金相结构既不同于基材,又有别于涂层,是加热后扩散反应的结果。例如在钢表面上熔结合有大量钼颗粒的合金时,就会在界面上产生  $\text{Fe}_3\text{Mo}_2$  或  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$  之类的金属间化合物,从而使结合强度上升。一般认为,基材与涂层间的扩散所生成的化合物有利于提高拉伸和剪切结合强度,但对界面的冲击韧性等力学性能指标却可能产生负面的影响。有些金属间化合物的硬度高、脆性大,当涂层受到冲击载荷时,会首先在金属间化合物处萌生裂纹,而导致涂层剥落。因此,根据涂层的服役条件促成或避免某些金属间化合物的形成是选择涂层材料并使之与基材匹配时所必须考虑的一个问题。

在热喷涂工艺中,熔滴从接触基材表面到完成结晶过程,其时间很短,一般不大于 0.1s。因此,大多数研究者认为,在这类工艺中基材与涂层相互扩散并生成化合物的过程仍然有条件地发生。例如,热喷涂常用的打底材料镍包铝粉末,在 660 ~ 680 °C 即发生剧烈的放热反应,使熔滴在到达基材表面之后,有可能形成某种形式的微冶金结合,从而提高结合强度。尽管其他研究者认为,使用有放热效应的粉末所导致的结合强度的提高并不一定归功于扩散化合物的产生,但这种提高确是一个不争的事实。

### 3) 物理结合

物理结合是指借助于分子(原子)之间的范德华力将喷涂层与基材结合在一起。在熔滴飞行速度高、撞击基材表面后变形充分的情况下,涂层的原子或分子与基材表层原子之间的距离接近晶格的尺寸,就进入了范德华力的作用范围。范德华力虽然不大,但在涂层与基材的结合中是一种不可忽视的作用因素。

### 2. 定性检测热喷涂层的结合强度

评定和检测涂层结合强度的方法很多,可分为定性和定量或静态和动态等几类评价方法,但到目前为止,国内外还只有少数几种评价热喷涂涂层与基体间静态结合强度的相对统一的标准。下面描述一些涂层结合强度的测试方法只有

胶结拉伸法是国内外通用的可定量测定涂层结合强度的标准,而其它方法则是相对的或定性的。

根据涂层的种类和工件的使用环境,涂层的定性检验可选择弯曲、锉磨、冲击、划痕、加热骤冷、杯突等多种方法。

### 1) 弯曲试验法

弯曲试验是热喷涂现场检验的主要手段,用于确定喷涂材料的喷涂临界厚度和最佳喷涂规范。

(1) 试样。试样材料为 A3 钢或 40 钢,厚度为 1.2mm,100mm×50mm。

(2) 检验标准。被弯曲涂层有轻微裂纹为合格,涂层龟裂为合格下限,涂层有脱落为不合格。

(3) 喷涂材料喷涂层临界厚度的确定。用该喷涂粉末的最佳规范喷涂弯曲试样。弯曲试样以三块为一组,分组喷涂不同的厚度。例如,第一组涂层厚度为 0.10mm~0.15mm;第二组喷涂 0.16mm~0.20mm;第三组为 0.21mm~0.25mm;第四组为 0.26mm~0.30mm。

试样喷涂后,用弯曲器作弯曲试验,仔细检查涂层的开裂情况,特别要认真鉴别合格下限,所喷涂的涂层厚度即为该材料在工艺条件下的临界厚度。

(4) 生产现场的应用。每次喷涂产品以前或者喷涂一个大件以前必须作弯曲试验,以检验设备情况及工艺的稳定性。此时,用选定的喷涂粉末喷涂三块试件,喷涂后进行弯曲试验。若三块试样均为合格时方可喷涂产品,若三块试件中有不合格者,应检验设备和找明原因,待排除后重新喷涂试件和作弯曲试验。

### 2) 锉磨试验法

该试验法用锉刀、磨轮或钢锯对试样自基体向涂层方向进行锉、磨或锯,利用锉、磨、锯过程中涂层与基体受到不同机械作用力及热膨胀性的不同,使两者界面上产生分力,当该分力大于涂层的结合强度时,涂层将剥落。

本试验对于非常薄的涂层以及锌、镉等软金属涂层不适用,而对于镍、铬等较硬的金属涂层较为有效。同时此法适宜于不易弯曲或使用中经受磨损的喷涂件。

试验的具体条件和方法如下:

(1) 将试样固定在台钳上,用锉刀自基体向涂层方向作单向锉削,锉刀与涂层表面约成 45°角。经过一定次数的锉削后,以涂层不起皮或剥落为合格。

(2) 将试样用工具夹住,在高速旋转的砂轮上对试样边缘部分磨削,磨削的方向是从基体至涂层,经一定时间磨削后,以涂层不起皮或剥落为合格。

(3) 以钢锯代替砂轮,对试样边缘部分,从基体至涂层方向进行锯切,以涂层不起皮或剥落为合格。

### 3) 划痕试验法

用硬质钢针或刀片,在试样表面纵横交错地将涂层划穿成一定间距的平行线或方格,划痕的数量和间距不受限制。由于划痕时使涂层在受力情况下与基体产生作用力,若作用力大于涂层结合力时,涂层将从基体上剥落。划痕后以涂层是否起皮或剥落来评定涂层的结合力是否合格。

此试验法适用于一些硬度中等、厚度较薄的涂层。

### 4) 杯突试验法

杯突试验法是将按一定工艺参数喷涂的一块薄板式样,置于杯突试验机的 $\phi 33\text{mm}$ 压边圈上(涂层一面朝下),然后用一个直径为 $20\text{mm}$ 的钢球在一定压力下沿压边圈中心压出一个凹坑,卸负荷后根据凸起处的涂层情况评定涂层结合强度的一种试验方法。

试验标准:

(1) 杯突试验技术规定的试验标准。

试验机型号:BT6 型杯突试验机;

冲头钢球直径  $\phi 20\text{mm}$ ;

压边圈压边力  $1000\text{kgf}(9806.65\text{N})$ ;

冲头压力  $2000\text{kgf} \sim 3000\text{kgf}(19.61\text{kN} \sim 29.42\text{kN})$ ;

压边圈直径  $\phi 33\text{mm}$ 。

(2) 试样。杯突试样的尺寸为 $75\text{mm} \times 44\text{mm}$ 和 $55\text{mm} \times 60\text{mm}$ ,厚度为 $1.3\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$ 的A3的钢板。在剪切试样时,要保证试样边缘平整无毛刺,并保证试样不受锤击和其它冷作硬化,试样不应进行热处理。

(3) 喷涂层厚度的确定。硬而脆的合金喷涂层,厚度为 $0.05\text{mm} \sim 0.10\text{mm}$ ;塑性好的合金喷涂层,厚度为 $0.10\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ 。

喷涂层厚度的确定极为重要。如果小于或大于以上规定,就会出现涂层全部不裂或全部开裂脱落等现象,往往造成错误的判断。

(4) 杯突深度的确定。硬而脆的合金喷涂层,深度为 $5\text{mm}$ ;塑性好的合金喷涂层,深度为 $7.6\text{mm}$ 。

(5) 杯突试验验收标准。

进行杯突试验后,按下列标准检查涂层凸起部分:合格状态——涂层无裂纹或有轻微龟裂,但涂层无脱落;最低合格状态——涂层开裂但未脱落;不合格状态——涂层开裂并脱落。

### 3. 定量测定热喷涂层与基体间的结合强度

涂层结合强度的定量检验方法比较复杂、繁琐,且一般不能直接在喷涂工件上进行,但定量检验可以提供一定的测量数据,对于检验和比较各种涂层的结合

强度,比定性检验更准确。

定量检验的方法主要有 拉伸强度试验和剪切强度试验。

1) 拉伸试验法

涂层拉伸强度是涂层承受法向拉伸应力的极限能力,这是评定涂层结合强度的最重要指标。试验中利用试验工具或设备使试样承受垂直于涂层表面的拉伸力,直至试样被拉开,即涂层剥离,记下破坏时的载荷,以试样的断面积除以载荷值,即可求出涂层的拉伸强度。如下式,即

$$P_L = \frac{F_L}{S} \quad (10 - 7)$$

式中  $P_L$  为涂层结合强度( $N/mm^2$ );  $F_L$  为拉伸极限载荷( $N$ );  $S$  为涂层与基体结合面积( $mm^2$ )。

(1) 使用粘结剂的拉伸试验。目前,热喷涂层与基体间的拉伸结合强度一般都采用粘结试样。粘结试样拉伸试验法是在如图 10 - 11 所示的试样端面先喷砂处理,然后用热喷涂法喷涂涂层,再与经端面喷砂处理后的对偶试样用粘结剂粘结在一起,经固化后进行拉伸试验,获得拉伸结合强度值,其单位是  $MPa$ 。

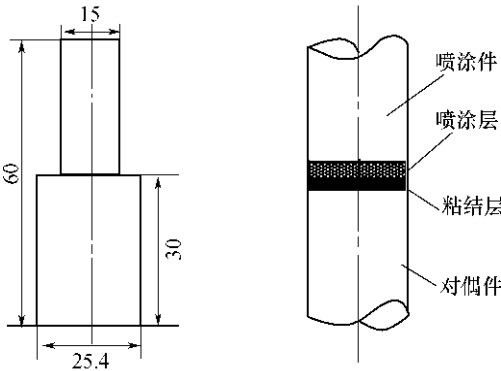


图 10 - 11 喷涂试样和粘结后的拉伸试样

粘结拉伸试样的胶结剂一般采用 CX - 212 胶,但在研究结合强度高的一次喷涂粉末时可采用粘结强度更高的 E - 7 胶。

粘结试样拉伸试验法测定的结合强度与所用的胶结剂及喷涂层厚度有关。主要有两种影响因素:一个是试样用胶粘结并加热固化时,胶结剂将沿着涂层的空隙渗透,若热喷涂层的厚度较薄时,胶结剂就有可能渗透到涂层与基体的结合面,从而提高测定值;另一个因素是随着喷涂层厚度的增大,积累的应力也将增大,内应力的增大将会使测定值降低。



试验方法：

试验程序如图 10 - 12 所示。

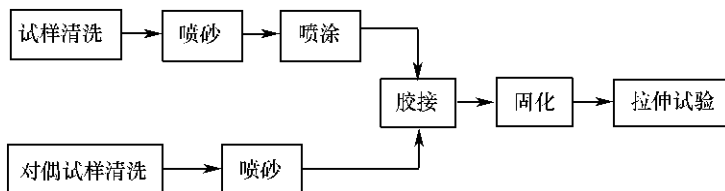


图 10 - 12 拉伸试验程序图

对圆柱形试样 A 的端面经表面处理进行预喷涂。在整个平面上 , 喷涂层厚度均匀一致 , 如果喷涂层厚度不均匀 , 可做精加工修整 , 然后用粘结剂将喷涂层面与同一尺寸的试样 B 的端面粘结起来 , 胶结过程中严格控制对偶试件轴线同轴度 , 勿使气泡残留在粘结剂中。胶结后保持 100℃ 温度 , 在烤箱内停留约 3h 后随炉冷却 , 放置 24h 后即可测试。待胶结固化后 , 用机械方法清除试样表面溢出的胶黏剂 , 在万能材料试验机上将试样拉断。这种试验方法要求使用高强度粘结剂 ( 如 E - 7 环氧树脂胶 ) 。在试验中推荐的厚度大于 0.40mm , 是为了防止粘结剂通过喷涂层渗透到基材上 , 影响试验结果的准确性。

用这种方法测定喷涂层的结合强度时 , 试样的断裂有三种形式：

① 断裂发生在胶层内 , 表示粘结强度小于喷涂层的结合强度 , 试验结果无效。

② 断裂发生在喷涂层内 , 表示喷涂层与基体间的结合强度大于喷涂层内部粒子间的结合强度 , 测得的结果是喷涂层内部粒子间的结合强度 , 即喷涂自身抗拉强度。

③ 断裂发生在喷涂层与基体的界面上 , 这时测得的结果是喷涂层与基体间的结合强度。

(2) 拉拔试验。试验方法如图 10 - 13 所示 , 在试样的 A 中心开孔 , 使芯棒 B 与中心孔动配合 , 并使其断面与试件 A 的表面处于同一平面上 , 按选择的工艺进行喷涂 , 然后在万能材料试验机上 , 从下面支撑住试样 A , 垂直向下拉芯棒 B , 将喷涂层拉断。

此种形状的试样适用于模拟平面喷涂件的结合强度试验。这种试验方法比较简单 , 但对试样的配合精度要求高 , 加工费事。如果配合过紧 , 拉伸时将产生摩擦阻力 , 所得的数据会比实际的结合强度偏高。如果配合过松 , 喷涂层在 A、B 试样之间会形成桥状过渡 , 拉伸时在此处产生应力集中 , 所得的数据会比实际的结合强度偏低。另外 , 在喷涂层较薄时 , 会将其沿芯棒处圆圈边缘剪断 , 使所得的数据不是拉伸时的结合强度。

## 2) 涂层结合强度剪切试验法。

涂层的剪切强度是指涂层承受切线方向(沿涂层表面)剪切应力的极限能力。多数喷涂层是在受剪状态下工作,因此用剪切试验测定其结合强度更符合实际使用条件。

如图 10-14 所示为喷涂层结合强度剪切试验方法。在圆柱形试样 A 的中段部位喷涂后进行机械加工,然后压入阴模中,在万能材料试验机上进行无冲击缓慢加载,直至喷涂层脱落。

剪切强度按下式计算,即

$$P_j = \frac{F_j}{\pi DL} \quad (10-8)$$

式中  $P_j$  为涂层剪切强度( $N/mm^2$ );  $F_j$  为涂层剥离时的载荷(N);  $D$  为试样未喷涂前的直径(mm);  $L$  为试样上涂层的长度(mm)。

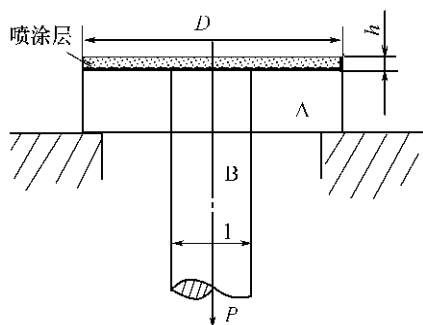


图 10-13 喷涂层结合强度拉伸试验

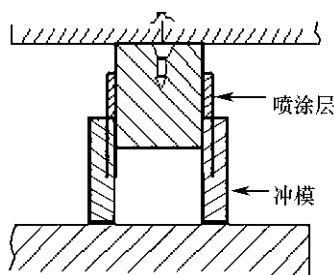


图 10-14 喷涂层结合强度剪切试验

### 10.2.4.2 涂层硬度的测定

硬度是涂层的重要力学性能之一,它关系到工件在使用过程中的耐磨、强度以及使用寿命等方面的问题。涂层的硬度除与喷涂原材料(粉末和丝材)密切相关,还与喷涂方法、喷涂设备、喷涂工艺和喷涂条件等因素有关。这是因为涂层硬度除材料本身硬度外还和涂层组织结构、孔隙分布和氧化物的含量等相关,而喷涂方法或喷涂条件的不同往往会造成以上各因素的差异,导致同一种材料涂层硬度也会有所不同。

表面涂层的硬度测试有多种方法来完成,但不同的硬度测试方法,其涂层的含义也不相同。从本质上讲,测量物体硬度的方法分两种,即静力测量法(压入法)和动态力测量法。静力测量法包括布氏、洛氏、维氏硬度等;动态力测量法包括锤击硬度、肖氏等。此外,表面划痕硬度法也用于涂层硬度的评价。

大量试验表明,对同一涂层而言,当采用不同测试方法或即使是同一种方法

而测试条件(如载荷)不同时,可能显示出不同的硬度值。在选择测试载荷时,在允许的条件下应尽可能地选择较大的载荷,以减少测量误差。另外,对各种不同的硬度测试方法来讲,特别是有压痕深度的测试方法,对相应涂层的厚度都有具体要求,唯有综合考虑这些因素,才能测出符合实际的硬度值。

1. 硬度测试方法

1) 布氏硬度(HB)

布氏硬度测定时的钢球直径、负荷大小、作用时间均应根据试样预期硬度按表 10 - 7 进行选择。试验后的压痕直径应在  $0.25D < d < 0.6D$  范围内,否则测试结果无效。此外,试样最小厚度不得小于压痕深度的 10 倍。该试验法适合于金属喷涂层的硬度测试。

表 10 - 7 布氏硬度测试规范

材 料	硬度范围	试样厚度 /mm	F 与 D 的关系	钢球直径 /mm	载荷 F/N	加载时间 t/s
黑色金属	140 ~450	6 ~3	$F = 30D^2$	10	300	10
		4 ~2 <2		5	750	
				2. 5	187. 5	
	<140	>6 6 ~3 <3	$F = 10D^2$	10 5 2. 5	100 250 62. 5	10
有色金属	>130	6 ~3	$F = 30D^2$	10	300	30
		4 ~2		5	750	
		<2		2. 5	187. 5	
	36 ~130	9 ~3	$F = 10D^2$	10	100	30
		6 ~3		5	250	
		<3		2. 5	62. 5	
	8 ~35	>6	$F = 2. 5D^2$	10	250	30
		6 ~3 <3		5 2. 5	62. 5 15. 6	

2) 洛氏硬度(HR)

洛氏硬度适合于表面硬度大于 450HBW 的试件硬度测试,该方法适用于测定金属喷涂层、陶瓷涂层。喷涂层一般应使用表面洛氏硬度计,其原理与普通洛氏硬度计相同,只是所加载荷较小而已。

检测时,最硬的耐磨涂层宜采用 15N、30N、45N 刻度测量,稍软的涂层可用 15T、30T、45T 刻度测量,对更软的涂层,用带有主负荷为 15kg 的表面洛氏硬度机测定,分别采用直径为 1. 588mm (1/16") 的钢球,R15T 刻度表;直径为

3. 175mm(1/8")的钢球 ,R15W 刻度表 ;直径为 12. 700mm(1/2")的钢球 ,R15Y 刻度表。

装上钢球或更换钢球时 ,第一次打硬度的读数不计入 ,以防因钢球未安装合适而造成的读数不准确。测试点应在涂层表面中心线上均匀分布 ,并避开缺陷。测量点数不应少于 5 个 ,最后取其平均值作为涂层的硬度值。

在测量硬度时 ,涂层厚度极为重要 ,表 10 - 8 中列出了涂层所需的最小厚度 ,该厚度值均为加工后的数值。

表 10 - 8 测定洛氏硬度时要求涂层的最小厚度

洛氏标尺	15N	30N	45N	HRA	HRB	HRC	HRD	15T	15W
涂层厚度/mm	0. 4	0. 64	0. 9	1. 0	1. 6	1. 8	1. 3	1. 8	1. 8

3) 显微硬度(HV)

显微硬度法是采用显微硬度计上特制的金刚石压头 ,在一定静负荷的作用下 ,压入试样涂层表面 ,得到相应的正方角锥体压痕 ,然后用硬度计上测微目镜将压痕放大一定的倍率 ,再测量其压痕对角线长度。

该方法适用的硬度范围及试样种类很宽 ,一般的喷涂、喷熔层均可使用 ,但应保证试样最小厚度不小于  $1. 95(F/HV \times 9. 8)^{1/2}$ 。

其特点是把试验对象缩小到显微尺度以内 ,常用来测定某一组织组成物或某一组成相的硬度。例如 ,在研究喷涂涂层相结构时 ,显微硬度得到了广泛应用。此外 ,测定单个喷涂粒子的硬度 ,使用显微硬度计效果也很好。

显微硬度计在原理上同维氏硬度计 ,但负荷较小 ,通常使用的负荷为 2g、5g、10g、20g、50g、100g、200g ,适用于除塑料涂层以外的所有涂层。

(1) 显微硬度实验条件 :

① 负荷的选择。显微硬度一般常用负荷为 25gf、50gf、100gf、200gf、300gf、500gf 和 1000gf( $1\text{gf}=9. 81 \times 10^{-3}\text{N}$ )。对于特殊细微的试件需要选用更小负荷 ,如 10gf 和 5gf。一些专用的超微小硬度计 ,其负荷可达到 0. 1gf。

试验所选用的负荷要视试件的厚度与硬度范围而定。在试件厚度允许的范围内尽量采用较大负荷 ,以便获得较大尺寸的压痕 ,从而减小测量的相对误差。但对于过硬的物质不宜采用过大的负荷 ,以免损坏压头。然而也不宜采用所获得压痕之对角线小于  $10\mu\text{m}$  的负荷。选取试验负荷是要针对材料硬度范围而定。通常 ,载荷大小可用下式估算 ,即

$$m = \frac{HV \cdot \delta^2}{72. 692} \tag{10 - 9}$$

式中  $m$  为载荷重量(g) ;HV 为估计涂层硬度值( $\text{N}/\text{mm}^2$ )  $\delta$  为( $\mu\text{m}$ )。

在负荷减小时 ,所获得压痕对角线长度与负荷之比不是常数。

在测定材料硬度值时 ,要在试件厚度允许的范围内尽量使所得压痕对角线大于  $10\mu\text{m}$ 。

② 试样的制备。试样的表面应光滑清洁、平整、无油污 ,试样表面应进行研磨抛光 ,其表面粗糙度不宜高于  $R_a0.025\mu\text{m}$ 。涂层应有相应的厚度。试验后 ,试件不应有变形的痕迹 ,其厚度一般不小于压痕深度的 10 倍。对于特小试件 ,应将其镶嵌在塑料或其它较软材料上 ,但镶嵌材料应有一定的强度 ,使其在试验时不产生位移。

试件要有足够的试面 ,其面积直径应不小于 5 倍的压痕对角线。

③ 压头。用两棱面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四面棱角锥体为压头。

(2) 负荷的施加、保持与卸除。

① 负荷应平稳、缓慢地施加 ,无任何振动和冲击现象 ,加载速度也不宜过慢 ,特别是在保持时间较短的情况下。一般不得大于  $50\mu\text{m}/\text{s}$ 。加载速度大多在  $15\mu\text{m}/\text{s} \sim 70\mu\text{m}/\text{s}$  的范围。

② 负荷保持时间对试验结果也有影响 ,保持时间越长 ,材料变形越充分 ,硬度值就越低 ;同时保持时间过长 ,容易受外界条件干扰 ,也影响试验结果。通常选用 30s 左右完成加载。

③ 负荷卸除时 ,禁忌冲撞和振动 ,应平稳、均匀地卸除。一般卸荷速度较加载速度快。

(3) 压痕测量装置。显微镜放大倍数一般不低于 400 倍。其分度值不得大于  $0.5\mu\text{m}$  ,读数精度不得低于  $\pm 0.2\text{s}$ 。

(4) 试验环境及其它。

① 试验应在室温为  $(20 \pm 1)$  的、干燥的、无腐蚀气体的清洁环境中进行 ,附近无振源 ,硬度计应安装在稳固的基础上 ,并调至水平。

② 硬度计应经检验合格后 ,方可使用。

③ 同一试件上至少要测定三点 ,取三点之平均值作为被测试件的硬度值。

④ 压痕中心距试件边缘以及相邻两压痕中心间的距离不得小于 2.5 倍的压痕对角线的长度。对于有色金属不得小于压痕对角线长度的 5 倍距离。

(5) 检验步骤 :为了保证涂层硬度测试准确 ,应按以下步骤进行检验。

① 试样准备。被测试试样的测试部位应适当预处理 ,使其表面平整、光滑 ,并经清洗使其表面清洁 ,无油污等脏物 ,当测量剖面硬度时 ,则需按金相测厚法制备试样。

② 仪器检验与校正。应按仪器产品说明书对显微硬度计进行严格全面检查

和校正,以保证仪器工作时正常,压痕清晰,测值准确,并符合标准硬度值范围。

③ 选择载荷重量及加载速度。在实际操作前,应根据被测涂层性能和厚度按前述公式估算出载荷重量,并选择适宜的加载速度,在可能范围内尽量选择较大的载荷和较小的加载速度。

④ 加荷。将被测试样的测试部位置于硬度计的物镜下,选择好压痕的合适位置后,将其缓慢移至硬度计金刚石压头下方,然后均匀缓慢进行加载,直至仪器指示灯指示加载以到所选定载荷时停止加载,立即卸去载荷。

⑤ 观察压痕。将试样再移至硬度计物镜下,通过硬度计的目镜可以清晰看到试样上正方形角锥体压痕及压痕的对角线。

⑥ 测量压痕长度。准确测出压痕对角线长度,并根据此长度查表求出硬度值。

⑦ 重复操作。对于同一试样,应按以上步骤,在相同条件下重复操作 5 次以上,取其平均值作为涂层硬度的最后测量结果。

#### 4) 霍夫曼(Hoffman)划痕硬度

该方法可以间接测定涂层的硬度及耐磨损性能。采用 6mm 有斜面的负荷尖头在  $2 \times 9.807(N)$  负荷作用下于喷涂层表面刻划,要求最小涂层厚度为 0.89mm,以划痕宽度表示硬度及耐磨性。划痕越宽,硬度就越低,涂层结合状况也越弱。Hoffman 划伤硬度值  $H_N$  可按下式计算。

$$H_N = b/5 \times 10^{-3} \quad (10 - 10)$$

划伤硬度试验方法目前还不甚完善,除了霍夫曼划痕硬度法外,美国曾提出过利用立方体金刚石的棱线倾斜于工件进行擦伤,随后用显微镜测量划痕的宽度,宽度越大,则硬度越低。

划伤硬度法适用于软的金属涂层和塑料涂层。但是,由于塑料涂层的性质所致,划痕形状如图 10 - 15 所示,呈现出二重宽度。操作者常常为取 aa' 或 bb' 而产生困惑,因此不同的涂层材料,不同的操作者都会带来测试误差。

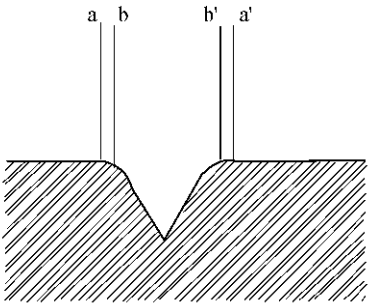


图 10 - 15 划痕痕迹示意图

其划痕硬度值可以近似用划痕宽度来衡量,也可用下式计算,即

$$\text{划痕硬度} = \text{给针头施加的力}(N) / \text{划痕宽度平方值}(\text{mm}^2) \times 9.807$$

塑料涂层的试片形状及尺寸与测试无直接关系,通常以方便为原则进行截取。

#### 5) 锤击硬度和肖氏硬度

试验时用手锤冲击仪器的撞销,此时冲击力传到钢球上,钢球同时压入所试

的涂层和标准杆,且对二者的压入力相等。硬度值是用比较金属涂层和标准杆上压痕直径的方法来确定的。试样的硬度可由下式近似给出,即

$$HBO = HBB(d_b^2/d_0^2) \quad (10-11)$$

该试验法的特点是适合于现场及大型工作硬度的测试,可以比较不同涂层材料的硬度差别,但其硬度值不宜作为性能指标使用。

此外,肖氏硬度试验法也可用于涂层硬度测试,许多现代化测试技术如单片机数字测硬仪等也正在应用,尤其是在现场测试时可显示出其快速、便于携带等优越性。

## 2. 涂层硬度示值分析

由于涂层的形成方法工艺规范不同,或者是涂层材料特性不同,以及微观结构、微粒大小、气孔的多少与尺寸、氧化物含量等不同,所测出的涂层硬度也会有明显差别。

涂层硬度随喷涂距离变化而变化。尽管喷涂枪功率大小有别,但总会出现一个硬度高峰。过大过小的喷涂距离,都使涂层硬度下降。

粉末粒度大小也对硬度有一定影响。试验表明,粉末粒度越细,得到的涂层硬度就越低。

喷涂时空气压力对涂层硬度的影响。空气压力增大使粒子飞行速度增大,同时冷却作用也越大,因此使硬度有所增加。

不同的涂层厚度,其硬度值显示也有差异。试验表明,当热喷涂涂层厚度小于0.6mm时,硬度随厚度的增大而增大,当厚度达到0.6mm以上时,硬度值趋于稳定。

不同的热喷涂工艺方法得到的涂层,其硬度值也有变化。一步喷熔法的涂层硬度高于二步喷熔法的涂层硬度。

此外,喷熔时重熔次数也对硬度有一定影响。重熔次数越多,则硬度值就越低。

## 10.2.5 涂层使用性能检测

热喷涂层应用范围很广,其使用工况多种多样。对于选定工况下服役的涂层,就按相应的标准规范,或者根据协议要求,进行涂层有关性能的检测。这里只介绍有关涂层的耐磨性、耐腐蚀性和耐热隔热性能的通用检测方法。

### 10.2.5.1 涂层耐磨性的测定

涂层在机械工业的应用中最多和最能发挥其作用的性能就是其耐磨损性能。涂层的耐磨损性是指涂层与它相互接触的物体在相对运动的条件下抵抗磨

损的能力。喷涂层的耐磨性取决于金相组织与硬度的配合。由于喷涂涂层中存在一些气孔,而且氧化物作为薄膜介于涂层粒子之间,或以不同形态(如粒状)存在于涂层组织内。因此,虽然其宏观硬度并不很高,但却具有很高的耐磨性,尤其是在有润滑油的情况下,涂层的气孔会起到储油孔的作用,从而显示出优良的耐磨性。此外,涂层的摩擦磨损性能,并非材料的固有特性,而是由磨损系统中许多因素共同决定的,是相对的,有条件的(如压力大小、速度快慢、温度高低、介质性质、磨屑硬度等)。若条件改变,其磨损试验的数据会发生很大变化。因此,只有在某种具体条件下才能对涂层的耐磨性能进行评价。

涂层的耐磨性检验,一般是模拟磨损的工况条件,进行对比性的摩擦磨损试验,以评定检验涂层的耐磨性。实际应用中,磨损的类型很多,相应的磨损试验方法也很多。

### 1. 磨粒磨损试验

磨粒磨损是指硬的颗粒或对磨材料表面上硬的微凸体在摩擦过程中引起对应材料的损失。主要包括三种情况:发生在磨粒工作中的零件上;外来硬颗粒夹在两摩擦表面之间的磨损,又称三体磨损;粗糙而坚硬的表面在工作材料表面上滑动造成的损伤。按磨粒对材料表面作用的程度又分为:高应力磨粒磨损和低应力磨粒磨损。前者为磨粒在大载荷作用下,磨粒易压碎,对工件表面磨损加剧;后者为磨粒在磨损过程中,基本保持完整,对材料磨损量小。

按其试验方法,可将磨粒磨损试验分为销盘式磨料磨损试验和橡胶轮磨料磨损试验两大类。简单的方法如砂轮摩擦的磨粒磨损试验法、砂纸摩擦的磨粒磨损试验法以及锉刀摩擦的磨损试验法等,均属于固定磨粒的磨损试验。这些方法通常是以试样的失重或体积损失来衡量其磨粒磨损性能,虽方便简单,但数据分散性较大。刚开始试验时,磨粒尖锐且工件温度较低;当运行一段时间后,由于磨粒的钝化与破坏、温度的升高,均影响试验结果的精确性。

#### 1) 销盘式磨料磨损试验

图 10 - 16 为销盘式磨料磨损试验(砂纸摩擦试验法)工作原理示意图。将砂纸或砂布装在圆盘上,作为试验机的磨料。试样做成销钉式,在一定负荷压力下压在圆盘砂纸上,试样的涂层表面与圆盘砂纸相接触。圆盘转动,试样沿圆盘的径向作直线移动。经一定摩擦行程后,测定试样的失重,即涂层的磨损量,以此来评定涂层的耐磨性。试验设备,推荐采用国产销盘式 ML - 10 型磨料磨损试验机。试样采用直径为 4mm 的圆柱形,在试验的一平面端制备涂层,并将涂层磨平洗净,使其表面无任何缺陷和附着物,试样端面应与其轴线垂直。

#### 2) 橡胶轮磨料磨损试验

不固定磨料的磨损试验(干式橡胶轮磨损试验)原理如图 10 - 17 所示,其特



点是试验数据集中、再现性好。磨粒通过下料管以一定的供给速度落到长方体试样和旋转磨轮之间,磨轮边缘为具有规定硬度的橡胶。试样借助杠杆系统,以一定的载荷压载旋转磨轮上,试样的涂层表面与橡胶轮面相接触。橡胶轮的转动方向应使接触面运动方向与磨粒流动方向一致。在磨轮旋转过程中,磨粒对试样产生低应力磨粒磨损。经一定的磨损行程,用光电天平(精度 0.1mg)测试出试样失重,评定涂层的耐磨性能。每组 5 个试样,取其算术平均值作为涂层的磨损失重。

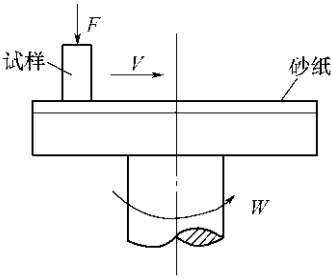


图 10-16 砂纸摩擦试验法

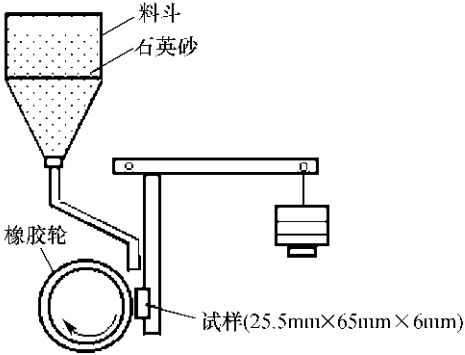


图 10-17 干式橡胶轮磨损试验装置示意图

在试验前后将试样称重,并把试样的重量损失转换为体积损失,以此来衡量材料的耐磨性。

典型的试样为 50mm×75mm 的长方形试片,厚度为 10mm,在其平面上制备涂层,并用平面磨床将涂层磨平,磨削方向应平行于试样长度方向,使涂层表面无任何附着物或缺陷。

### 2. 滑动摩擦磨损试验

一般讲,做相对滑动的摩擦副,其失效往往是由于边界润滑膜破裂时的胶合所致。另外,边界润滑时摩擦系数,最能反映这类摩擦副的性能。因此,边界润滑时的摩擦系数、磨损量、发生胶合时的接触压力及相对滑动速度是评定抗滑动摩擦磨损性能的最主要参数。

图 10-18 是滑动摩擦磨损试样示意图,在滑动面上可以加润滑油,也可以是干式滑动摩擦磨损,一般是通过测量磨痕深度(100 倍显微测微计)或失重来进行计量。其耐磨损性能,可以采用失重法、体积损失或摩擦力矩换算为摩擦系数等进行评定。

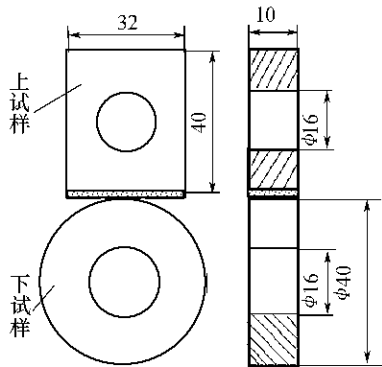
### 3. 滚—滑动摩擦磨损试验

试样形状及运动方式如图 10-19 所示。上轮作为磨轮,一般为 45 钢,其转速比作为试样的下轮低 10%,即构成 90% 的滚动和 10% 的滑动。一般是采用

润滑的方法来进行试验,其相对耐磨性由下式给出,即

$$\text{相对耐磨性} = 45 \text{ 钢磨轮(上试件) 磨损量} / \text{相同条件下下轮涂层式样的磨损量} \quad (10 - 12)$$

当上下轮转速相等时,运动方式变为纯滚动磨损。



10 - 18 滑动摩擦磨损试验上下式样

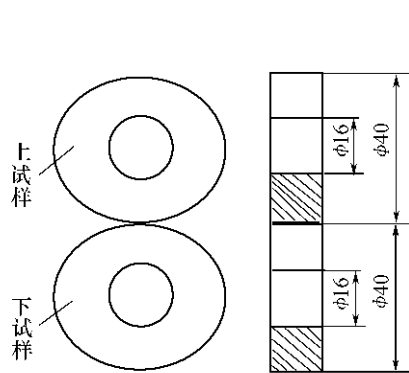


图 10 - 19 滚—滑动磨损试验示意图

上述试验方法均属于反复磨损试验,即始终在同一磨损面进行多次磨损。而处女面磨损试验正好与此相反,加力面始终处于未受磨损过的原始表面,其运动轨迹如图 10 - 20 所示。图(a)表示在圆形工件的端面,一面切削,一面不断磨损;图(b)表示在圆柱形外表面上的磨损,一面旋转圆柱形工件,一面沿轴向移动磨损对偶件;图(c)为平面和柱销的组合,每一次摩擦均要变换摩擦轨迹。

处女面磨损试验与反复磨损试验相同,随表面粗糙度增加,磨损量均单调增大。另外,摩擦副组合材料硬度不同时,高硬度的一方的表面应很好地进行加工。

涂层的耐磨性能还与试验载荷、磨粒状态等有很大关系。图 10 - 21 表示三种不同材料在不同的试验载荷下的耐磨性(以体积损失来进行考核)。发现在低载荷时,虽然镍基自熔合金喷熔层的磨损量小于 45 钢和 GCr15,其优势并不明显。但随着试验载荷的增大,而镍基自熔合金(Ni60)喷熔层的磨损量增长极为缓慢,而 45 钢或 GCr15 磨损量加剧,试验载荷越大,涂层材料与对比材料的差别也越大,效果也越好。

#### 4. 吹砂冲蚀试验

工件表面受尖锐硬质颗粒冲刷引起的磨损为冲刷磨损。这些颗粒可通过气吹或液流携带并以一定速度冲击到工件表面,这种工况可用吹砂试验来对涂层的耐磨损性进行评价。

试验的原理如图 10 - 22 所示。将试样置于喷砂室内,涂层向上,固定在电

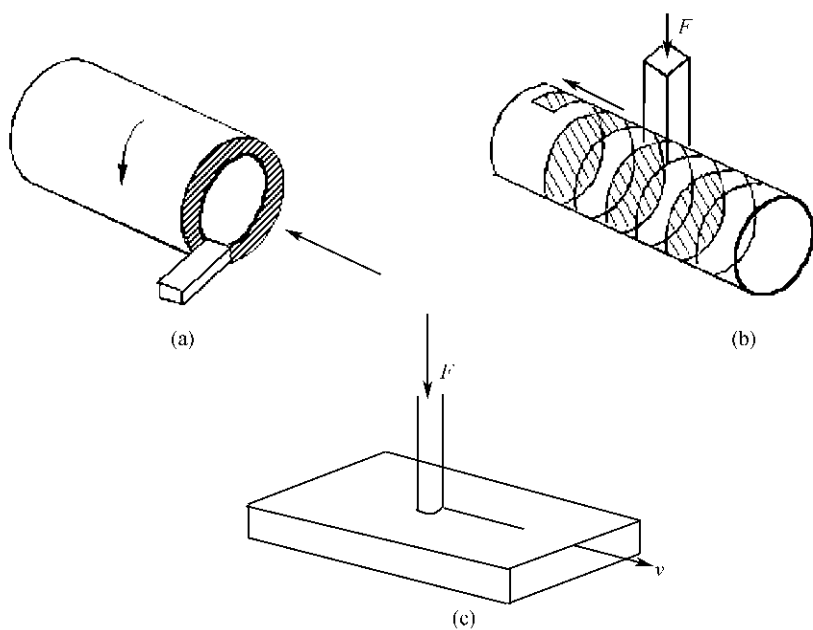


图 10 - 20 面摩擦磨损试验法

(a) 端面磨损 ; (b) 圆柱面磨损 ; (c) 平面磨损。

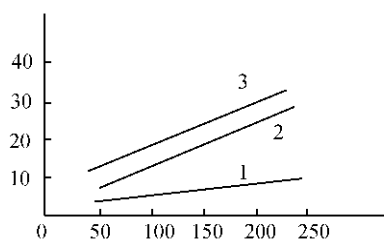
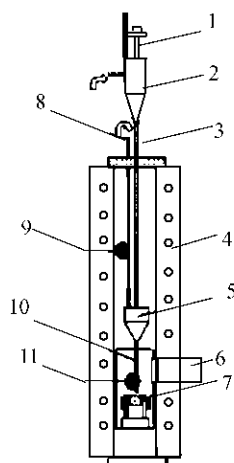


图 10 - 21 试验载荷对材料  
耐磨性的影响

1—镍基自熔合金(Ni60) 2—GCr15 ;  
3—45 钢。



0 - 22 GW/CS - MS 原理图

量调节杆；2—砂斗；3—进砂管；

阻炉；5—砂气混合室；6—排气管；

载气预热管；9、11—热电偶；10—喷管。

磁盘上,周围用橡胶板加以保护。然后采用射吸式喷砂枪吹砂。喷砂枪用夹具固定,以保持喷砂角度和距离不变,并保持一定的喷砂空气压力和供砂速率。试验后用 1/10000 天平测定试样失重量,即涂层失重量,用以评定涂层的耐磨性能。

吹砂条件:磨料采用刚玉砂,粒度为  $-53\mu\text{m} \sim +15\mu\text{m}$ ,吹砂时间为 1min,吹气压力为 0.54MPa,喷砂角度为  $30^\circ$ 、 $90^\circ$ ,喷距为 100mm。试样尺寸为  $60\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ ,涂层厚度大于或等于 0.6mm。

#### 10.2.5.2 涂层耐蚀性的测定

腐蚀试验包括实验室试验和现场试样两类。实验室腐蚀试验,可分为室温或加热的液态浸渍腐蚀(含静态全浸式、部分浸渍式、气腐蚀等流液浸渍等)和气体腐蚀(含高温氧化硫腐蚀等)、电化学腐蚀以及盐雾喷射或熔盐热腐蚀等。现场腐蚀试验也多种多样,如大气腐蚀、海水腐蚀及淡水浸渍、土壤腐蚀、挂片试验等。按腐蚀介质的性质,可分为酸性、碱性、中型盐等类型。腐蚀试验条件需根据试验涂层材料的技术标准或相应整体材料的使用条件来拟定。

##### 1. 液态浸渍法

浸渍溶液的 pH 值、溶液气体量、溶液离子、溶液温度与流速等,都会直接影响涂层金属的腐蚀反应。一般认为,溶液中的溶解气体,特别是中性溶液中的氧含量对腐蚀过程的阴极反应影响很大,而液体温度不仅影响反应速度,而且对反应类型也有一定的影响。

对镍基自熔合金喷熔层,可以分别用 10% HCl、10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、10% HNO<sub>3</sub> 的溶液进行三个周期(每个周期 24h)的试验。不论是常温还是煮沸下的腐蚀试验,均应保持溶液的浓度始终一致。

对喷涂层进行腐蚀试验,可带标样(一般为被喷涂的基体材料)同时进行,也可带入已知耐蚀性的其它材料的试样,以期进行比较,由于喷涂层多有气孔存在,故应首先进行封孔处理后再做腐蚀试验。

浸渍试验,一般是以试验前后的重量变化来作为衡量涂层耐腐蚀性能的判据。

## 2. 大气自然腐蚀法

将刷镀后的试件直接挂于工业性气候或海洋性气候地区的室外大气中,进行定期的观察,以锈蚀斑点出现时所暴露的时间长短来评价其耐蚀性能。

## 3. 盐雾喷射试验

该试验需在专用的盐雾箱中进行,试验规范如下:在 $(5 \pm 1)\%$  NaCl 水溶液( $\text{pH} = 6.5 \sim 7.2$ )盐雾浓度下,喷射量 $(0.625 \sim 1.25) \times 10^{-2} \text{ ml}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$ ,以连续喷雾 8h,然后停顿 16h 为一周期,可以进行四个周期或更多周期的试验(盐雾温度 35 )。

该试验多用于一些熔点低的或塑性好的金属喷涂涂层(如 Zn - Al 合金),也可在 3% NaCl 水溶液中进行盐雾喷射试验的耐蚀性评定。

### 10.2.5.3 涂层的高温氧化和耐热性能的测定

涂层的耐热性主要取决于涂层材料的熔点和涂层的孔隙率。因为除熔点之外,涂层的耐热性应包括涂层材料本身抗氧化性能和涂层保护基体免受高温氧化的能力,而对基体的保护能力决定于涂层材料、涂层厚度和孔隙率。

涂层的耐热试验包括隔热试验、热寿命试验、热震试验和抗高温空气氧化性能试验。这些测试对于评价在高温条件下工作的涂层部件的性能是非常重要的。

#### 1. 隔热试验

决定涂层隔热性能的主要因素是涂层材料本身的导热性,导热性越低,则隔热性越好。此外,涂层的隔热性能还与涂层内分布的气孔和氧化物的尺寸、形状、数量与涂层的厚度以及涂层和基体面结合的结构有关。如果涂层是多孔的,其隔热性会提高,但与此同时其耐热性和抗氧化性就会降低,如果增加涂层的厚度,能提高涂层的隔热效果,但同时会降低涂层与基体的结合性能。

隔热试验的目的是评价热障涂层的隔热效果,其试验装置如图 10 - 23 所示。它涉及到热源(可采用 40kW 等离子枪或氧乙炔喷枪),对试样加热的热流量测定装置,试样的温度测定、自动记录装置和试样及热流量测定装置的移动系统。一般试样离热源 50mm ~ 100mm,试样与火焰中心可垂直或成 40°角。热源的热流量一般为  $2500 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \sim 10000 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  ( $1 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s} =$

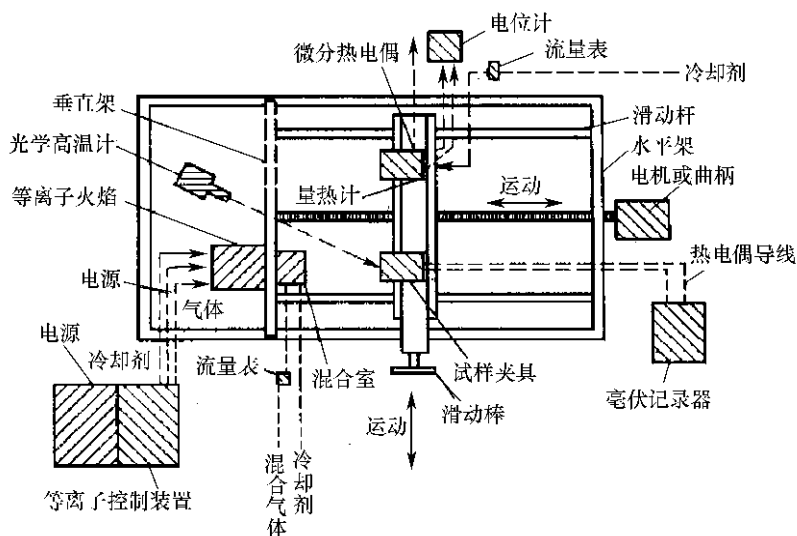


图 10-23 热环境试验装置示意图

4.  $1855\text{kW/m}^2$ )。试验过程中应保证试验条件恒定,并定时测量热流量。试样的温度由试样背面焊上或靠紧的热电偶测定。温度应在记录仪上随时间记录下来,一旦前面和背面温度达到平衡即停止试验,一般大约需要  $5\text{min}$ 。通过比较试验温度随时间变化的曲线来评定涂层的热障性能。

## 2. 热寿命试验

该试验可与隔热试验一起进行,但做此试验时要在试验前及试验一定时间后,测定试样的质量及厚度的变化,或测定试样在火焰下涂层被烧穿所需的时间。为了减少试验开始时热冲击的影响,可将试样由远逐渐靠近喷枪口,直至设定的距离。

## 3. 热震试验

热震试验是测定涂层在反复加热—冷却两个状态交替作用下,评价涂层在热震应力作用下抗开裂和剥落的能力。试验时按规定的时间间隔将试样暴露在火焰中或放置在已达设定温度的炉子中,然后自然冷却到室温或用空气吹试样冷却到室温,再加热,再冷却,这样反复试验直到涂层从基体上剥离下来为止。通过比较涂层剥离所需的循环次数、循环时间及试样损坏的情况来评定试样的抗热震性能。

旋转式材料热震试验机(见图 10-24)是装甲兵工程学院装备再制造国防科技重点实验室研制的热震试验装置,该装置包括设置在试验台上的火焰喷射器和测温装置。另外,在试验台上设有由可编程控制器控制的旋转驱动系统,旋

转式样品转盘固定在旋转驱动系统的电机轴上,旋转式样品转盘上均匀分布若干支悬臂,每支悬臂末端设有样品座;在试验台上还设有显微观测器,测温装置为红外测温系统,显微观测器和测温装置均通过计算机数据通信接口与计算机相连。

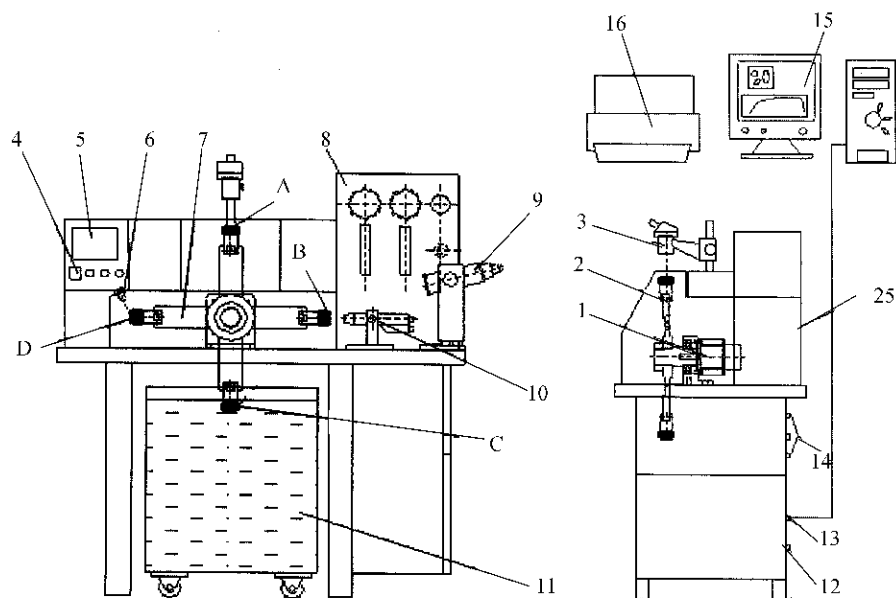


图 10-24 旋转式材料热震试验机

- 1—旋转驱动系统;2—样品座;3—显微观测器;4—电器开关组件;5—可编程控制器;  
6—清洁、干燥喷气装置;7—旋转式样品转盘;8—燃气控制柜;9—红外测温系统;  
10—火焰喷射器;11—冷却水箱;12—电气接口;13—计算机数据通信接口;  
14—气路接口;15—计算机显示屏;16—打印机。

(A、B、C、D 为四个平行试样)

通过旋转式样品转盘自动控制试样精确旋转,分别对四个样品进行加热、冷却、净化和观测,应用计算机技术实现了有关试验过程的重要信息(如试样表面温度和形貌等)现场动态观测和记录保存,并可应用相关数据和图像分析软件对试验结果进行更深入的分析对比,提供定性或定量的试验数据和图表,保证了试验条件的稳定、准确和试验报告的科学性和真实性。

#### 4. 抗高温空气氧化性能试验

首先测定涂层本身的抗氧化性能。可在平板基体样品上,先喷淋盐水然后再进行喷涂程序,试样做成后将其放置在水中,使涂层与基体分离,将从基体材

料上剥离下来的涂层作为试样,清理干净并称重后,放入加温炉内,保温 1h ~ 2h,将试样从炉内取出,在室温下冷却并称重。重复试验得出试样氧化增重量随试验时间的变化曲线,可表明涂层的抗氧化性能,并可结合金相或扫描电镜分析涂层的氧化情况来评定和研究涂层的抗氧化性能。

其次测定涂层对基体高温氧化的保护性能。这个试验是将涂层样品暴露在高温空气中,测定其暴露时间对于重量的影响,以直接表示出涂层的抗氧化能力。其试验方法一般是在  $\phi 6.5\text{mm} \times 100\text{mm}$  的普通钢棒上按正规程序喷涂上适当厚度的涂层,然后称重(精确到 10mg)。将试样放置到设定温度为 1000 或 1300 的空气炉中加热,并保温。定期观察试样的表面状态,若涂层损坏,则记录其结果,试验结束。若 24h 后涂层完好,将试样从炉中取出在大气中自然冷却至室温。若冷却后涂层仍完好,则试样称重后,再重复上述试验。理想的情况是重复数周次后涂层仍然完好。到预定的试验时间后,可将样品切开检查基体的氧化情况,评定涂层对基体的保护作用。

## 10.2.6 热喷涂涂层结构的金相检测

涂层的微观结构是涂层宏观性能的基础,是判定涂层质量和适用性的主要依据之一。通过金相检测,可以直接观察到涂层的微观组织,包括各相组织的类型、组成、形状、分布、显微硬度和百分比含量,气孔含量和大小,还可以直接观察并测量涂层的厚度、涂层与基体的结合情况等。

由于热喷涂涂层组成的多样性和涂层结构的复杂性,使得热喷涂涂层的金相检测要比整体材料的检测困难和复杂得多。这主要是因为存在两个难题:一是如何确保涂层结构的真实性,避免假象;二是如何保证实际显微结构的稳定性和重现性。迄今为止,尚未建立在实验室内制备精确的显微结构的金相制备程序,也还没有一本像“钢铁热处理金相图谱”那样公认的“热喷涂涂层金相图谱”。尽管如此,像航空工业用热喷涂零部件一样,其金相检验仍必须严格。因此,必须认真仔细地进行金相试样制备的自动控制和规范操作,要特别注意切割、取样、制样或镶样、抛光、腐蚀(有很多情况观察涂层断面形貌往往不用腐蚀)等各个环节,自始至终要特别小心,务必使涂层的微观组织保持完整性和真实性。

### 10.2.6.1 涂层试样的金相试样设备程序

金相试样的制备一般包括切割取样、试样镶嵌、磨削抛光、清洗或腐蚀四个步骤。每道工序都同等重要,必须进行正确的操作,才能获得有价值的数

#### 1. 切割取样

喷涂涂层后的制件的切割取样最常遇到的问题是涂层的过



操作难于精确地控制切割力并恒定施力,因而难于稳定地制备出重现性好的试样,因此,最好使用程序控制的砂轮切片机进行取样切割。

因为热喷涂涂层与基相比很薄,所占切割断面的百分比很小,因此,切割砂轮的选择应主要根据基体材料来选择。砂轮材质应与基体材料相适应,一般地说,钢铁基体材料宜选用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  砂轮,有色金属基体则选用  $\text{SiC}$  砂轮,对于超硬涂层,最好用金刚石砂轮。

切割取样时必须采用水冷,以防止涂层过热损坏。切割时涂层要始终处于受压状态,切割力不宜过大,砂轮进给速度也应较小。表 10 - 9 列出了钢铁基体喷涂涂层的通用取样切割工艺参数。

表 10 - 9 钢铁基体上喷涂涂层的通用取样切割工艺参数

切片机类型	切割砂轮类型	砂轮厚度/mm	砂轮转速 (r/mm)	砂轮进给速度 (mm/s)	切割力/N	冷却剂
高速精密型	酚醛树脂粘接的 $\text{Al}_2\text{O}_3$	0.5	3000	0.025	$\leq 60$ (接触力)	水基

当然,如果能使用线切割取样,效果最好,但取样速度慢、成本高。切割喷涂试样时,切割线应离边缘 13mm 以上,从涂层向基体切割。

2. 试样镶嵌

镶嵌工序的主要功能是使金相试样的形状和尺寸标准化;有助于固定不规则形状试样;有利于棱边、刃口的取样分析;有利于涂层的浸渗处理。

对于热喷涂涂层的断面金相检查来说,平行于喷涂方向的断面称为横断面,垂直于喷涂方向即与试样表面平行的断面称为纵断面,大多数涂层都是检查横断面。一般是将两块试样镶嵌在一起进行磨平、抛光。如果涂层很硬,像碳化钨、氧化物陶瓷等,两个试样应按前对后的位置镶嵌,如图 10 - 25(a)所示。磨样时能使里面的涂层受到保护,有利于获得真实完整地金相结构。这类硬质涂层的试样,如果面对面地镶嵌,如图 10 - 25(b)所示,会由于涂层、基体和镶嵌材料的硬度相差很大,磨平和抛光时发生不在同一个平面抛光的现象。如果涂层质软或具有中等硬度,则一般按面对面位置镶嵌,研磨时可使两个试样上的涂层都得到保护。

镶嵌金相试样的最佳方法是采用真空浸渗设备,用加温固化的环氧树脂将试样浇注成型,这样能确保热喷涂涂层的真实结构。在真空条件下,环氧树脂能浸渗到涂层的大多数相互联通的气孔中,而对于单个封闭的盲孔,环氧树脂则难于浸入,这样用金相检测的涂层的气孔和气孔率将不会是准确的。因此,应在环氧树脂

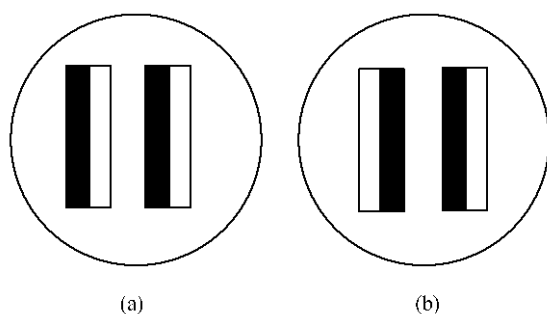


图 10 - 25 喷涂试样镶嵌位置  
(a) 前对后 ; (b) 面对面。

中加入一种荧光材料 ,以便判断由机械损伤而引起的裂纹和气孔 ,才能检测到涂层的真实结构的真实气孔率。热喷涂金相试样的镶嵌工艺参数见表 10 - 10。

表 10 - 10 列出了热喷涂金相试样的镶嵌工艺参数

设 备	树 脂	固化温度 /	固化时间 /min	真空度 /Pa	染 色 剂
真空浸渗设备	加温固化环境	80	60	$10^4$	环氧型荧光染色剂

### 3. 磨削抛光

先进的金相试样的磨平已不再使用人工磨样,而采用自动化装置操作,这样能避免人为误差,如施加在试样上的力、给配料、转盘转速等,都能进行规范作业,任何人操作都不受影响,重现性好。

(1) 磨平。磨平操作的作用首先是磨去取样时产生的损伤和缺陷,然后将所有试样装在夹具中磨成同样的平面。最常用的磨削材料是 SiC 砂纸或砂布,它磨削力强,使用方便, SiC 砂纸的使用寿命较短。喷涂金相试样的磨平操作参数见表 10 - 11。

表 10 - 11 列出了喷涂金相试样的磨平操作参数

设备	磨料类型	磨料粒度	夹头转速 /(r/min)	转盘转速 /(r/min)	旋转方向	试样受力 /N	冷却剂	时间
自动磨样机	SiC	220 <sup>#</sup>	150	150	顺时针	25	水	直到磨平

(2) 精磨。精磨的目的是磨掉在磨平过程中产生的变形。为了达到有效的磨削效率,磨料的硬度至少应比被磨材料高 2.5 倍。对于大多数显微硬度(HV)达到 1000 的金属涂层和材料来说, SiC 磨料是最有效的精磨磨料,但是,对于陶瓷涂层,其精磨能力和磨削效率都显不足。最好使用金刚石磨料,精磨效果好,磨削效率高,与常规的 SiC 磨料精磨相比,操作步骤可由十步简化为一步操作。当然,金刚石贵,且很难买到金刚石砂纸,故建议采用刚性磨盘用金刚石磨料进行精磨操作。表 10 - 12 列出了金刚石刚性磨盘精磨的操作参数。

表 10 - 12 金刚石磨料刚性磨盘精磨操作参数

设备	磨料	磨料粒度 /μm	夹头转速 /(r/min)	转盘转速 /(r/min)	试样受力 /N	旋转方向	润滑液	时间 /min
自动磨样机	聚晶金刚石	9	150	150	25	顺时针	乙醇基	5

刚性磨盘是用复合材料制成的磨盘,可将磨料加入磨盘中对试样进行精磨。该磨盘既有硬质相又有软质相,可以分布不同类型的磨料。当金刚石微粒加入磨料中时,它就嵌入到软质相中,成为一个微型切削刀从试样上切去微小的碎屑。金刚石磨料能有效地切削显微硬度(HV)达 4000 的材料,这对于切削热喷涂用的大多数涂层材料特别是陶瓷和金属陶瓷涂层材料是十分理想的。

(3) 抛光。用光学显微镜观察时,对金相试样的要求不仅要平,而且要有高的光反射率。没有划痕的试样并不意味着没有变形,目视效果好的试样不一定

代表真正的显微结构。

抛光处理的目的是去除精磨工序中产生的微小变形 ,并去除试样的表面污痕。抛光可以采用金刚石抛光和氧化物抛光。金刚石抛光是非常有效的抛光方法 ,常用的金刚石粒度为 6μm、3μm 和 1μm ,金刚石抛光的操作参数列于表 10 - 13。

表 10 - 13 金刚石抛光的操作参数

设备	磨料	磨料粒度 /μm	夹头转速 /(r/min)	转盘转速 /(r/min)	试样受力 /N	旋转方向	冷却剂	时间 /min
自动磨样机	聚晶金刚石	3	150	150	25	顺时针	乙醇基	5

氧化物抛光需采用中级到高级的绒布进行 ,施力很小 ,抛光时间短 ,不超过 1min。氧化物磨料有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MgO 和 CeO<sub>2</sub> ,前两种最常用。表 10 - 14 列出了氧化铝抛光的工艺参数。

表 10 - 14 氧化铝抛光的工艺参数

设备	磨料	磨料载体	磨料粒度 /μm	夹头转速 /(r/min)	转盘转速 /(r/min)	试样受力 /N	旋转方向	润滑剂	时间/min
自动磨样机	酸性胶体 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	合成羔羊皮	0.02	150	150	10	逆时针	无	1

4. 金相试样的腐蚀

金相试样的腐蚀是通过腐蚀液对涂层成分或相的选择性腐蚀或染色而显示涂层或材料显微结构的重要步骤。腐蚀程度控制适当与否直接影响金相观察时的相成分和相分布等的判断 ,影响金相照片的清晰度。

腐蚀金相试样的方法有化学侵蚀、热侵蚀、电解侵蚀、轰击侵蚀等 ,最常用的是化学侵蚀。腐蚀剂和腐蚀液配方的选择则取决于材料和涂层的成分。表 10 - 15列出了一些热喷涂涂层金相试样用的腐蚀液及方法。

表 10 - 15 喷涂涂层金相试样用的腐蚀液及方法

涂 层 类 型	腐蚀液组成	腐蚀方法	腐蚀时间/s
低碳钢	(1) HNO <sub>3</sub> (1.42) <sup>①</sup> 4% + 乙醇 96%	擦或浸	2 ~ 5
Al、Al - Si 合金	(2) HF 10ml ,HCl (1.19) 15ml ,HNO <sub>3</sub> (1.42) 25ml 蒸馏水 50ml	擦或浸	2 ~ 5

(续)

涂 层 类 型	腐蚀液组成	腐蚀方法	腐蚀时间/s
Ni/Al	(3) $\text{FeCl}_3$ 5g, $\text{HCl}$ (1.19) 2ml, 乙醇 9.8ml	擦或浸	2~5
NiCr、NiCr 基合金	(4) $\text{HCl}$ (1.19) 65% + $\text{H}_2\text{O}_2$ 35%	擦或浸	2~5
Ni 基、Co 基合金, NiCr、316 型、413 型不锈钢	(5) 乙二酸 10% + 水 90%	电解腐蚀	2~5
WC - Co, WC - 自熔性合金	(6) $\text{KOH}$ 10% + 水 90%	电解腐蚀	2~5
WC - Co, WC - 自熔性合金, $\text{Cr}_3\text{C}_2$ - 自熔性合金, Mo - 自熔性合金	(7) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 10g, $\text{KOH}$ 10g, 蒸馏水 100ml (I) 或上述溶液 + 4 份水 (II)	擦或浸	2~5
注 ①括号内数字为化学试剂相对密度			

腐蚀试样时,腐蚀程度应掌握适度,以刚好能显示显微组织的细节为宜。一般情况下,高倍观察的金相试样,腐蚀程度应比低倍观察时略浅一些。侵蚀好的试样应立即观察、拍照。若腐蚀不足或过度腐蚀,则需重新抛光后再腐蚀。

10.2.6.2 涂层试样的金相检测

金相分析主要是采用不同的光学显微镜对涂层的结构、物相、气孔、夹杂和晶界等进行分析和检验,进行定性或定量的评定,以研究和判断工艺、涂层结构和性能之间的关系。

例如,陶瓷材料的晶型是判断划分显微结构的重要依据,对性能有很大影响,氧化铝就有  $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  等不同的晶型,导致其晶体结构、体积、力学性能等都有相当的差别,晶粒度对陶瓷的机械强度、介电性能等也有直接的影响,通常细晶粒的陶瓷具有较高的强度,而粗晶粒陶瓷则容易产生裂纹和缺陷,使陶瓷强度下降,晶界的性质和状态对晶粒生长、相变成核、晶界扩散、晶界滑移、裂纹生成和扩展等都有直接的影响。

玻璃相对陶瓷颗粒和陶瓷晶粒起着粘结作用,并能抑制陶瓷晶粒长大,减少气孔率,但会增加陶瓷材料的脆性,降低其耐热性能等。因此,观察分析陶瓷金相组织中玻璃相的比例、分布和对晶体的包围状态就十分必要。

陶瓷材料中总含有不同材料的气孔,陶瓷涂层更甚。气孔的存在必然使显微组织不致密。气孔少且分布均匀,使陶瓷材料的密度提高,强度提高,气孔多或分布不均匀、过度集中,容易造成应力集中,成为裂纹扩展源,使陶瓷的性能变差。显微观察的气孔有两种,即晶内气孔和晶间气孔。显然,金相观察时应注意

气孔的类型、形状、数量、大小和分布等。

此外,添加物、夹杂等都是金相分析的内容。

当然,显微组织的相结构分析、微区成分分析等还需进一步借助 X 射线衍射分析、电子探针分析等。

陶瓷涂层的显微组织观察最好采用偏光显微镜(包括反光显微镜)进行观察分析。它是依据陶瓷材料的各物相在单偏光、正交偏光及聚敛光下呈现的光学特征。

金相观察时使用图像分析仪不仅能观测涂层的金相结构,还能定量地测出各相的百分比、气孔率、颗粒的形状、颗粒分布和颗粒曲率半径等。使用彩色金相显微镜能清楚地观察到多相结构的喷涂涂层的彩色结构,获得涂层的彩色金相照片。

应当指出,热喷涂陶瓷涂层的金相观察和分析还远不成熟,国内外均还没有有关热喷涂陶瓷涂层的检测标准。读者可参考 GB 5594.8—85“电子陶瓷显微结构的测定”。

# 第十一章 热喷涂的安全与防护

热喷涂技术包括的工艺方法很多,涉及电气设备、氧—乙炔系统、喷砂系统、压缩空气系统、防金属粉尘、防光辐射、防噪声、防高频电场、防放射性、防爆、防火以及防毒等多方面的安全技术和劳动保护问题。做好热喷涂的安全与防护工作关系到操作人员的人身安全、身体健康以及喷涂设备的使用寿命。

## 11.1 安全技术

### 11.1.1 防火防爆

热喷涂用气体主要为:氧气、氮气、氢气、氩气、液化丙烷气、石油气、乙炔气、工业煤气及二氧化碳等。

所有瓶装气体的储罐,应按照国家劳动总局颁布的《气瓶安全监察规程》定期进行检查。各种气体压力调节器也应进行定期校正和检查。固定场所喷涂时,各种气体的管道设计耐压值应超过正常使用气体压力的2倍~3倍。每种管道相互要有一定间距,并按规定涂刷标志漆。

开启高压气瓶时,人的面部应避开调节器以防止调节器发生突发漏气,击伤开启者,开启时阀门要缓慢打开。

燃气的使用要注意防火、防爆,燃气瓶应远离火源、高压线放置,搬运时应按国家有关规定进行,燃气管路使用前必须进行密封检查,使用肥皂水对管路连接处进行泄漏检查,禁止用明火作检漏试验。

火焰喷涂和喷熔时,有回火的问题。而且当喷熔空心工件时,工件上必须开通气孔,否则当工作喷熔加热时,内腔气体膨胀,其压强大于工件材质的强度时,会引起爆炸。喷涂(熔)薄壁空心件时,更应注意开通气孔。

氧—乙炔系统密封不严,气体泄漏于空气中,与空气混合,当浓度达到一定比例后,也会引起燃烧和爆炸的危险,尤其是室内作业,通风不好时,应事先进行密封检查,并采取通风措施。

### 11.1.2 电器设备的防护

在热喷涂过程中,会有合金粉末飞扬于空气中,这些合金粉末是良好的导体。当它进入电器设备后,会造成短路的危险,易引起着火或爆炸,应采取相应的措施。在可能的情况下,尽量将电器设备远离现场,不能远离的应加强设备的防粉尘措施。

### 11.1.3 机械设备的防护

热喷涂技术中所用的合金粉末绝大多数是优良的耐磨材料。工作过程中很容易进入设备里面,造成设备的严重磨损,影响其精度和寿命。尤其是机械设备中的滑动部分和传动部分,必须采取相应的防护措施,例如,可用蛇形管等保护液压或机械升降系统。

## 11.2 劳动防护

### 11.2.1 劳动防护措施

对于热喷涂防护来说,措施得当,可以减轻其危害性,甚至可以消除其危害性。现将主要有害因素的相应防护措施简述一下。

#### 11.2.1.1 臭氧、氮氧化物、金属粉尘及其氧化物等的防护

(1) 施工现场应宽敞,空气流通,安装通风装置。

(2) 安装封闭式防护通风罩,并隔离操作,这样可以有效地隔绝有害因素与人的接触,不仅有很好的防护效果,而且对所有有害因素都能起到防护作用。工作过程中,产生的各种有害因素,可最大限度地控制在密封罩内,同时用抽风机经过滤器、分离器和管道连续不断地将有害物质排除掉,这也符合环保的要求。针对不同要求和具体条件,封闭式防护通风罩又可分为以下几种:

① 局部封闭式防护通风罩。将工件和热源(如等离子弧等)封闭在防护通风罩内,即将工作点罩住,然后把有害物质抽出排除掉。抽风罩处的抽气速度以 $1\text{m/s}$ 左右较为适宜。

② 全封闭式防护通风罩。将工件和整个工作机构封闭在防护罩内,等于是一个封闭式的工作室,控制系统等均在工作室外隔离操作,这种形式的防护效果最好。无论是局部或整体的,罩内空气都要有一定的流速,这样既不影响射流正常稳定的工作状态,又使有害物质能有效地抽走。罩口的抽风速度应达到



2m/s ~ 3m/s 防护罩的大小、形状和结构,依工件形状、大小、设备情况及操作要求等具体情况而定。为了防止在长时间工作后罩体过热,罩板与热源要有一定的距离。罩体一般用金属板做外壳、内衬石棉板或红纸板等绝热材料。排气孔置于罩体上方或侧面,不要直对电弧,以免影响电弧稳定燃烧。虽然全封闭式防护通风罩较好,但被封入的设备接触粉尘的几率增加了,容易损坏设备的精度,特别是传动部分,应采取有效的防护措施。

(3) 机械化、自动化操作,可以使操作者远距离控制。尤其是定型产品,当热喷涂工艺方法确定后,就可用专用设备进行机械化自动化生产,操作者可以远距离监视和控制。配有工业电视进行监视,更为理想。

将上述(2)、(3)两项措施结合起来,可将有害因素对人体的危害性减到最小。

(4) 现场工作人员应戴防尘口罩,最好是滤膜防尘口罩。

#### 11.2.1.2 火焰及弧光辐射的防护

(1) 人体裸露部分要严防等离子弧照射。不戴防护镜不得直接观察火焰和弧光。

(2) 氧—乙炔火焰喷涂(熔)操作者必须戴深色防护眼镜,为了防护反射热辐射,最好使用镀铬深色镜面的防护镜。

(3) 等离子喷涂操作者,最好用有反射护目镜的面罩。一般的镜片以绿色和黄色的吸收紫外线效果较好。国产有绿色1号、2号、3号等防护镜片。

(4) 用封闭式防护通风罩并隔离操作对防止光辐射、热辐射等效果显著。防护罩不仅将弧光遮挡,而且吸收了紫外线和红外线。工作情况可通过装有防护镜的观察窗口进行观察。实际上只要戴上工作面罩、工作帽、手套和穿工作服,基本上可防止紫外线对皮肤的辐射。

#### 11.2.1.3 噪声防护

等离子喷涂是热喷涂技术中噪声最厉害的工艺,声强可高达120dB ~ 136dB。尤其是大功率等离子弧时,对其频率、声压强度一定要采取相应的防护措施。

(1) 噪声不厉害时,可戴隔音耳罩或在耳内塞棉花也能降低噪声10dB ~ 20dB。

(2) 采用机械化自动化作业,实现隔离控制。

(3) 最为理想的防护措施,是采用隔音室和机械化、自动化的隔离操作。尤其在使用大功率等离子弧时,更应如此。

#### 11.2.1.4 高频电场的防护

高频电场主要出现在常用的等离子喷涂工艺中,可采取下列相应的防护措施:

(1) 高频发生器系统应有屏蔽装置。

(2) 提高设备的引弧能力,减少引弧的时间。

① 提高和保证喷枪的加工精度,以便减少使用高频火花检查电极对中的次数和时间。

② 火花间隙和钨极距离应调整在要求范围内,尽可能减少使用高频的时间。

③ 在电器线路上要充分保证引弧后能立即切断高频电路。

④ 要实现微弱高频火花,且能瞬间引弧的方法。

#### 11.2.1.5 放射性防护

在热喷涂技术中,防护放射性主要是防护钍钨电极中钍的放射性,特别要防止钍粉尘进入体内所产生的内照射。主要从保管、加工、粉尘后处理和个人防护四个方面采取措施。

(1) 最好的防护办法是不用钍钨电极,改用铈钨电极或铇钨电极。

(2) 钍钨棒必须集中管理,专门保管。应有专门的存放处,用铅筒或厚壁铁料制成容器储存。

(3) 打磨加工钍钨棒时,应注意以下两点:

① 个人防护。应戴口罩、手套和穿工作服、工作鞋等,并经常清洗。每次工作后,必须用流动水和肥皂清洗手和脸部。

② 工作现场防护。打磨砂轮必须安装抽风、排尘、过滤、分离处理设备。经常进行湿式清扫,妥善处理粉尘,例如进行深埋等等。

### 11.2.2 个人防护和卫生保健

#### 11.2.2.1 个人防护

针对不同工种所接触的不同有害因素,要严格遵守各劳动保护条例。工作时,必须戴手套、口罩、工作帽,穿工作服和工作鞋,等等。工作后应用流动水和肥皂清洗手和脸部。班后洗澡,劳动用品不得携出工作室带入生活区,并要经常清洗。

#### 11.2.2.2 卫生预防与保健

尽管实施了一系列劳动保护措施,但从事热喷涂的工作人员仍然会与上述有害因素经常接触。为了保护专业人员的健康,需要对其发放保健待遇。一般认为,热喷涂技术工作人员的保健待遇不应低于焊工的保健标准。

### 11.2.3 操作人员警示语

操作者请时刻牢记下面的警示:

- (1) 高速、高温的喷涂射流对人和设备都有伤害。
- (2) 喷涂粉尘有害健康 ,注意防尘、通风。
- (3) 喷涂噪声可能损坏听力 ,请使用耳罩。
- (4) 喷涂弧光的辐射有损视力 ,请戴护目镜。

# 附录 部分推荐厂商及其产品

## 热喷涂相关设备

上海瑞法喷涂机械有限公司 国内最早、最专业的热喷涂设备和涂层加工企业 ,生产全系列的热喷涂设备 ,同时可以为客户提供热喷涂人员培训和技术咨询服务					
名称	组成	技术指标	设备特点	应用范围	同类产品对比
DH - 1080 等离子喷涂系统	电源	额定输出功率 80kW ;工作电流 0A ~ 1000A ;工作电压 30V ~ 85V ;电源特性 :恒流源 ,电流精度 :<1%。负载率 80%	DH - 1080 等离子喷涂系统是在 Metco 7M、9M 系统的基础上 ,应用多项先进技术 ,结合中国市场的实际情况而研制成功的。在许多方面 ,其性能表现优于 7M、9M 系统。其主要特点为高效能、高稳定和高性价比。 该系统采用低压大电流电源设计理念 ,相比磁放大等离子喷涂电源来说 ,其反应速度更快 ,功率因数更高。全套设备的性能基本等同于苏尔寿·美科公司的 9MB 等离子喷涂系统	(1) 热障涂层 (TBCs) ; (2) 可磨耗密封涂层 ; (3) 抗高温粘着磨损涂层 ; (4) 抗高温熔融金属或熔体侵蚀涂层 ; (5) 耐磨减磨涂层 ; (6) 耐纤维磨损涂层 ; (7) 亲水与介电涂层 ; (8) 高温超导体涂层 ; (9) 在微电子工业中的散热涂层 ; (10) 生物医学功能陶瓷涂层	等同 科 9MB 等离子喷涂系统
	喷枪	三大部分 :1. 前枪体 2. 后枪体 ; 3. 送粉组件			
	控制柜	输入电源 :单相 AC220V、50Hz ;输入功率 200W ;控制类型 :PLC 控制 ;主气类型及压力 :氩气、氮气 0.7MPa ;主气最大耗量 2m <sup>3</sup> /h ;次气类型及压力 :氩气、氮气 0.5MPa ; 气体使用方式 :氩气、氩气 + 氩气、氮气、氮气 + 氩气、氩气 + 氮气、氮气 + 氩气			
	转接箱	外控控制方式。输出高频电压 2500V ~ 3000V			
	送粉器	双筒刮盘式送粉方式 ;单筒容积 2.5l ;送粉气 :氩气或氮气 ;送粉气压力 0.8MPa ;送粉速度 0g/min ~ 150g/min ;送粉精度 ±2%			
	冷水机组	循环水箱容量 280kG ;制冷量 :35.22kW ;出水温度波动 ≤0.8 ;输入功率 ≤15.5kW ;出水温度控制 10 ~ 25			

(续)

名称	组成	技术指标	设备特点	应用范围	同类产品对比
DF - 3000 超声喷涂系统	喷枪	2100m/s 火焰速度, 500m/s ~ 600m/s 粉末速度;喷枪水冷却;涂层气孔率 < 1% ;涂层结合强度 > 70MPa ;适宜喷涂粉末大小 5μm ~ 120μm	DF - 3000 超声速火焰喷涂系统。其以丙烷(或丙烯)为热源,适宜喷涂多种金属及其合金、各种金属同陶瓷的复合粉末等,特别适合喷涂碳化物、金属及其合金粉末。该设备具有先进水准,性能优越、质量可靠、操作方便。全套设备的性能基本等同于苏尔寿·美科公司的 DJ2700 超声速火焰喷涂系统	(1) 超硬耐磨涂层(WC/Co) ; (2) 高耐蚀涂层(无孔隙的不锈钢涂层) ; 应用于要求高硬度、低孔隙、高耐磨涂层的制备	等同美科公司 DJ2700 超声速火焰喷涂系统
	控制器	PLC 控制类型 ;燃气类型及压力 : 丙烷、丙烯 0.65MPa ;氧气及压力 1MPa ;空气及压力 0.6MPa ;氮气及压力 1MPa ;氩气及压力 0.35MPa。			
	送粉器	双筒刮盘式送粉方式 ;单筒容积 2.5l 送粉气 氩气或氮气 送粉气压力 0.8MPa 送粉速度 0g/min ~ 150g/min ;送粉精度 ± 2% ;设备耐压大于 1.3MPa			
QD8 电弧喷涂设备	拉式喷枪	喷涂材料线径(mm) φ1.2 ~ φ3.0 喷枪重量 3kg 压缩空气压力 ≥0.6MPa ; 空气帽口径尺寸 φ6 ~ φ7 喷枪拉力 ≥8kg ;喷涂效率 φ2 锌丝 200A/20kg/h φ2 铝丝 200A/12kg/h	电弧喷涂机主要用于钢结构的大面积防腐及磨损或加工失误的机件表面修复和制备电容导电涂层等。 主要喷涂材料 : 锌、铝、铅锡合金、铜、碳钢及不锈钢等	等同 TAFE 公司 8830 电 弧 喷 涂 系 统	
	喷涂电源	额定输出功率 :18.8kVA、13.2kVA、7.5kVA ;额定电流 : 400A、300A、250A 输出空载电压 21V ~ 45V、18V ~ 42V、14V ~ 36V 负载率 60% 电压调节级数 粗、细调各 3 挡、共 9 挡			
	推式喷枪	喷涂材料线径(mm) φ2.0 ~ φ3.0 喷枪重量 1kg 压缩空气压力 ≥0.4MPa ~ 0.6MPa ;空气帽口径尺寸 φ6.0 ~ φ7.0 ;喷枪推丝力 ≥4kg ;喷涂效率 φ3 锌丝 200A/30kg/h ;φ3 铝丝 : 260A/17kg/h φ2 钢丝 280A/25kg/h			
	送丝机	本送丝装置为双送丝,主要优点 :采用印刷电机为驱动动力,其运行平稳、扭矩大、惯量低、噪声小。寿命长,连续运转 4000h 以上。免维护,主电机及减速箱终身不需加油和换碳刷等维护保养。严格的同步送丝为优质的喷涂电弧弧提供稳定的外界条件			
DPI - 2A 电弧喷金机		(1) 使用空气压力 ≥0.5MPa。每把喷枪压缩空气消耗量 2m <sup>3</sup> /min。电机功率 200W×4,喷涂电源输入功率 5kVA×2 喷枪功率 75W×2。 (2) 喷涂线材直径 :φ1.6mm、φ2.0mm。 (3) 喷涂材料可喷 :锌、铝、锌锡合金、铅锡合金、铜、不锈钢等。 (4) 喷枪往复扫描次数 ≤9 次(可调 1 次 ~ 9 次)。 (5) 喷枪往返速度由变频调速,其凸轮转速(0r/min ~ 8r/min)。转盘转速 60r/min	仿制意大利的喷金机,特点 :结构合理、价格低廉、电弧稳定、涂层均匀、自动喷涂、厚度可控。 组成 (1) 本体 ;(2) 二套金属电弧喷枪 ;(3) 二台喷涂电源 ;(4) 控制柜 ;(5) 吸尘设备(自配或委托加工)等组成	用于薄膜电容两端的自动喷涂锌和锌锡合金或铅锡合金涂层,进行引出线的封装和焊接	达到进口设备的水平

(续)

名 称		技 术 指 标				设备特点	应用范围	同类产品对比	
ZPT - BD 氧化锌 磁块表面自动 喷涂机		(1) 进料传动电机 :变频电机功率 200W、额定传动比 1: 300 (2) 喷枪传动电机 电机功率 60W (3) 回料传动电机 电机功率 400W (4) 喷枪送丝直流永磁电机功率 75W、工作电压 DC24V、转速 7000r/min (5) 使用空气压力 $\geq 0.5\text{MPa}$ (6) 压缩空气消耗量 $0.9\text{m}^3/\text{min}$ (7) 喷涂纯铝丝线材直径 $\phi 1.0\text{mm}$ (8) 涂层厚度 $35\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 可调 (9) 涂层结合通过粘胶试验				本机由电源、控制箱、喷枪、进料传动、回料传动组成。主要应用于避雷磁块表面喷涂金属铝涂层,该机具有自动上料、喷涂、收料功能,涂层性能可靠,大幅度提高磁块的瞬间电通量	用于避雷瓷瓷阀片两端面的喷涂金属涂层之用	涂 层 性 能 达 到 日 本 的 技 术 要 求	
QH 系列 喷熔枪		送 粉 量 kg/hr	产 品	喷嘴 - 1	喷嘴 - 2	喷嘴 - 3	QH - 1/h、QH - 2/h、QH - 4/h 喷熔炬系列,式样新颖、火焰稳定、不易回火、密封性好,粉末抽吸力强,其喷熔嘴能自由作 $360^\circ$ 旋转。QH 系列喷熔炬其内部关键零件采用强韧不锈钢制造,以提高其在金属粉末高速流动时的耐磨性,延长了喷熔炬的使用寿命。	自熔合金粉末一步法喷熔工艺专用工具	
	QH - 1/h		0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0				
	QH - 2/h		1.0 ~ 1.4	1.4 ~ 1.7	1.7 ~ 2.0				
	QH - 4/h		2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 3.5	3.5 ~ 4.0				
QT - E2000 - 7/H 型 两用喷涂枪		材 料	喷嘴	氧气 1/h	乙炔 1/h	空气 MPa	(1) 适用于各种零件粉末喷涂修复。(2) 可在部分非金属基体如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、耐火材料、水泥进行粉末喷涂。(3) 适用于各种自熔性合金粉末的喷涂层制备。(4) 可用于各种金属陶瓷及部分纯氧化物,同时也适用于各种专用合金喷涂粉末	能喷涂喷熔各种微细粉末,所制得的涂层氧化少,气孔率低,特别适合重熔前自熔性合金材料的喷涂	
	合金粉末	梅花嘴	760 ~ 960	700 ~ 960	0.08 ~ 0.2				
	陶瓷粉末	锥梅花嘴	960 ~ 1020	900 ~ 1060	0.4 ~ 0.5				
QX - 1A、2A、2B 气体金属 线材火焰 喷涂枪		喷嘴	氧气 1/h	乙炔 1/h	空气 MPa		QX 型气体金属线材喷枪是采用氧—乙炔气为热源,气动轮(电机)为动力,将金属丝送入高温火焰区熔化后雾化,喷向工件表面,形成涂层的专用设备。本设备分高、中速两种,喷涂材料的熔点在 $750^\circ\text{C}$ 以下选用高速喷枪,熔点在 $750^\circ\text{C}$ 以上选用中速枪	该喷枪由于结构紧凑、轻便灵活、性能可靠,可手持或夹在机床上进行喷涂,已广泛应用于水利、电力、机械、化工、冶金、石油、造纸、印刷、船舶等行业。 喷涂材料:各类金属丝和合金丝,复合管芯丝材	
	$\phi 2.2$	850 ~ 950	750	0.55					
	$\phi 3.0$	850 ~ 1000	800	0.45 ~ 0.6					
喷射时颗粒直径(钢) $4\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ (喷在水中沉淀测量),喷枪引力 $\geq 6.5\text{kg}$ , QX - 1A、QX - 2B 压缩空气耗量 $0.55\text{m}^3/\text{min}$ , QX - 2A 压缩空气耗量 $0.4\text{m}^3/\text{min}$									

(续)

名 称	技 术 指 标				设备特点	应用范围	同类产品对比
QT - PS - 2 型塑料粉末火焰喷涂设备	材料	氧气 l/h	乙炔 l/h	空气 MPa	全套 QT - PS - 2 型塑料粉末火焰喷涂设备由喷枪、送粉器、管路和气体调节阀四大部分组成。特点：QT - PS - 2 型塑料粉末火焰喷涂枪是以各种低熔点合金粉末及各种专用的塑料粉末为喷涂材料、采用氧—乙炔火焰作为热源气体的专用喷涂工具	本设备可以喷涂各类热熔性塑料粉末和部分热固性粉末,主要应用于制备无孔隙的耐腐蚀的厚膜的有机塑料涂层,其涂层具有很好的耐化学溶剂和高腐蚀溶液等性能	
	聚乙烯粉末	960 ~ 1200	800 ~ 1000	0.15			
	尼龙 11	600 ~ 700	650 ~ 700	0.25			
	环氧粉末	700 ~ 800	700 ~ 750	0.35			
QR - CAL - 10 水冷重熔枪	喷火嘴孔径 $\times$ 孔数 ( $\phi 1.2 \times 12$ ) 气体压力: 氧气 0.5 (MPa); 乙炔 0.1 (MPa) 气体消耗量: 氧气 4.2 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ); 乙炔 3.2 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )				QR - CAL - 100 型射吸式水冷重熔枪是对工件加热和自熔性合金涂层重熔的一种专用工具。具有输出热量大、工作稳定的特点	特别适用自熔性合金涂层的重熔处理,是连续作业和大工件加热和涂层重熔处理首选的加热设备	
QTB 陶瓷条棒喷枪	喷枪功率约 15kW ~ 20kW; 氧气 0.7MPa ~ 0.8MPa、乙炔 0.1MPa ~ 0.12MPa; 压缩空气 0.5MPa ~ 0.6MPa; 陶瓷熔融粒子速度 160m/s ~ 240m/s; 涂层厚度可达 0.1mm ~ 1mm 之间				陶瓷条棒喷涂是利用陶瓷棒材为原料,在氧—乙炔火焰中熔融、雾化、喷射到工件表面,形成陶瓷涂层专用热喷涂工具	它是一种价格低廉、品质稳定、操作容易的陶瓷材料喷涂方式,其喷涂后的工件耐磨性特佳	
FDI 型熔融结合器 (拉毛机)	拉毛机变压器: 拉毛电源采用单相电压 380V 变压器,额定容量 5kVA; 次级空载电压调整是通过高、低档开关改变初级数而获得次级空载电压; 高档: 空载电压——7V, 中档: 空载电压——6V, 低档: 空载电压——5V				它是一种喷涂前的预处理方法,这种方法系利用电能施工,它将拉毛的特种金属(镍)“电极”进行电阻加热,紧密地熔融于基体金属上,使工件表面形成一种极为粗糙的多孔表面	这种预处理方法比较简单,工件可靠,使用广泛,特别适合无法进行喷砂表面处理的工件表面	
PS - A1 - 8 PS - A3 - 8 PS - A10 - 8 干式喷砂机	使用空气压力 0.5MPa ~ 0.7MPa。 空气消耗量及清理效率: 喷嘴 $\phi 6.5\text{mm}$ , 磨料消耗 170kg/h ~ 240kg/h, 清理效率 $8\text{m}^2/\text{h} \sim 12\text{m}^2/\text{h}$ 。 喷嘴 $\phi 8.0\text{mm}$ , 磨料消耗 280kg/h ~ 380kg/h, 清理效率 $12\text{m}^2/\text{h} \sim 20\text{m}^2/\text{h}$ 。 喷嘴 $\phi 11\text{mm}$ , 磨料消耗 500kg/h ~ 680kg/h, 清理效率 $18\text{m}^2/\text{h} \sim 30\text{m}^2/\text{h}$				PS - AX - 8 型压力型喷砂机是一种直式的热喷涂预处理机器,以压缩空气为动力,将铁砂、陶瓷砂、炉渣以高速喷到所需喷涂的工件表面,以达到表面清洁、毛化的要求	可以进行除漆、焊缝除锈、制备毛化玻璃和其它工件的喷毛处理,效果十分显著,其粗糙度达到工艺要求	

(续)

名 称	技 术 指 标	设备特点	应用范围	同类产品对比
FSI - 3 油水分离器	工作耐压 0.7MPa ;容积 0.1m <sup>3</sup> ; 输出空气杂质含量 <19.5g/m <sup>3</sup> 滤芯 清理周期 3 个月	通过本过滤器可以 提高空气的质量等级 提高涂层的性能。	压缩空气的二次 过滤和吸潮处理。	
公司信息 :上海市青浦区华新镇嘉松中路 1835 号 民营企业 法人代表 徐文华 电话 021 - 69791050 021 - 69791050 021 - 69791052 021 - 69791056 021 - 69791211 021 - 69791191 传真 021 - 69791053 公司网站 :www.rf-pt.com E - mail chen - huiguo@163.com				

热喷涂粉末材料

湖南省冶金材料研究所 国内早期从事热喷涂粉末研发应用研究的主要基地之一 ,专业从事金属粉末的研发和生产

名称	牌号	成分(质量分数)	粒度 /μm	熔点 /	涂层硬度 涂层工艺		应    用
镍基自熔合金粉	FNi - 00A	C≤0. 1 Si1. 6 ~ 2. 4 B0. 8 ~ 1. 4 Cu19 ~ 21 Fe≤15Ni 余	- 104 + 44 - 44	1050 ~ 1150	176 ~ 224 HV	氧—乙炔喷熔 氧—乙炔喷涂 等离子喷涂	硬度低、结合强度高、韧性好,耐热冲击,适用 600 以下工作的模具和铸铁、铜及合金部件的修复
镍基自熔合金粉	FNi - 15A	C0. 5 ~ 1. 1 Si3. 5 ~ 5. 5 B3 ~ 4. 5 Fe≤5 Cr15 ~ 20 Ni 余	- 104 + 44 - 44	970 ~ 1040	55 ~ 65 HRC	氧—乙炔喷熔 等离子喷熔 等离子喷涂	硬度高、自熔性好、耐腐蚀、抗高温氧化、耐磨损,用于 650 以下工作的抽油泵柱塞、热挤压模具、活塞杆、泵叶片、风机叶片等的修复和防护
镍基喷涂合金粉	LNi - 05	C0. 5 ~ 1 Si2 ~ 3 B3 ~ 4. 5 Fe≤5 Cr15 ~ 20 Ni 余	- 104 + 44	≤1400	250 ~ 350 HB	氧—乙炔喷涂 等离子喷涂	硬度高、耐磨性好,用于机床主轴、电机轴、曲轴等各种轴和印刷辊、轴颈、柱塞、轴套、轴承面等的喷涂与修复
镍基碳化钨合金粉	FNi - WC35	FNi - 15A + WC35	- 104 + 44 - 44	970 ~ 1040	55 ~ 65 HRC	氧—乙炔喷熔 等离子喷熔 等离子喷涂	硬度高、耐磨性好,适用于风叶机片、高温高压阀门和螺旋输送机



(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	粒度 / $\mu\text{m}$	熔点 /	涂层硬度 涂层工艺		应    用
钴基 自熔 合金 粉	FCo - 06	Co. 8 ~ 1 Si3. 5 ~ 4. 5 B2. 5 ~ 3. 5 Cr28 ~ 32 Ni10 ~ 12 Fe2 ~ 3 W5 ~ 6 Co 余	- 104 + 44 - 44	1035 ~ 1150	50 ~ 55 HRC	氧—乙炔喷熔 等离子喷熔 等离子喷涂	耐高温磨蚀, 热 强性能好, 适用于 飞机发动机零部 件, 炼油厂催化装 置烟气轮机叶片、 叶环体、高温高压 阀门, 高压柱塞泵, 内燃机进排气阀门 等的预保护
铁基 自熔 合金 粉	FFe - 11	C2 ~ 3 Si3. 5 ~ 5 B1 ~ 2 Cr16 ~ 20 Ni8 ~ 12 Mn2 ~ 4 Fe 余	- 104 + 44 - 44	$\leq 1200$	58 ~ 65 HRC	氧—乙炔喷熔 等离子喷熔 等离子喷涂	硬度高、耐磨性 好, 用于油田钻杆、 采煤中部槽、溜槽 等耐磨涂层的修复 和防护
铜基 自熔 合金 粉	FCu - 01	Cr $\leq 1. 5$ Ni $\leq 1. 5$ B0. 5 ~ 2. 0 Si3 ~ 4 Mn0. 75 ~ 1. 5 Cu 余	- 104 + 44 - 44	960 ~ 1060	130 ~ 200 HB	氧—乙炔喷熔 等离子喷熔 等离子喷涂	耐磨耐蚀, 易于 加工, 用于压力缸 体铜铝基体铸模, 轴承及中低压阀门 密封面的喷涂或喷 熔
镍基 熔结 合金 粉	CBSFNi - 15B	Co. 5 ~ 1. 1 Si3. 5 ~ 5. 5 B3 ~ 4. 5 Fe $\leq 17$ Cr15 ~ 20 Ni 余	- 104 + 44 - 44	970 ~ 1040	58 ~ 65 HRC	真空熔结	硬度高、耐磨性 好, 用于导卫、轧 辊、排气阀等高温 耐磨涂层零部件的 修复与防护
镍碳 化钨	FWC - 01	Ni16 ~ 18 WC 余	- 104 + 44 - 74 + 44 - 53	1230 ~ 1280	50 ~ 55 HRC	氧—乙炔喷涂 等离子喷涂 爆炸喷涂	硬度高、耐磨损、 耐腐蚀, 用于泥浆 泵柱塞、泥浆机叶 片、螺旋搅拌机螺 旋等部件的修复与 防护
钴碳 化钨	FWC - 02	Co3 ~ 6 WC 余	- 104 + 44 - 74 + 44 - 53	1230 ~ 1280	45 ~ 55 HRC	氧—乙炔喷涂 等离子喷涂 超声速喷涂 爆炸喷涂	硬度高、耐磨损, 比铸造 WC 有更好 的强度和抗冲击性 能, 用于采钻工具、 泥浆泵柱塞、拉丝 卷筒、挖泥船耙齿、 风机叶片、刮板等 耐磨部件的修复

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	粒度 / $\mu\text{m}$	熔点 /	涂层硬度 涂层工艺		应    用
镍铬 碳化 铬	FCr3C2 - 03	Ni31 ~ 33 Cr7. 5 ~ 8. 5 Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 余	- 104 + 44 - 74 + 44 - 53	1360 ~ 1420	35 ~ 40 HRC	氧—乙炔喷涂 等离子喷涂 超声速喷涂 爆炸喷涂	涂层坚硬致密 , 耐磨蚀 抗氧化 耐 磨粒、颗粒 冲蚀。 用于燃烧 芯杆、锻 造工具、热轧辊、钢 铁热镀浸没辊、热 处理炉辊、喷气发 动机转子、涡轮机 叶片、密封面等喷 涂
钴镍 铬铝 钼合 金粉	FY - 03	Ni31 ~ 33 Cr20 ~ 22 Al7 ~ 9 Y0. 4 ~ 0. 6 Co 余	- 104 + 44 - 74 + 44 - 53	1390 ~ 1430	20 ~ 30 HRC	氧—乙炔喷涂 等离子喷涂 超声速喷涂 爆炸喷涂	涂层致密、结合 强度大、耐腐蚀和 气蚀、耐 1038 高 温。用于冶金轧 辊、高温退火炉辊 等防结合表面的喷 涂 ;航空发动机和 燃气机叶片的耐热 涂层 ;喷气发动机 燃烧室加力筒和火 焰热障涂层的粘结 过渡层
镍基 钎料	BNi - 2	Cr6 ~ 8 B2. 75 ~ 3. 50 Si4 ~ 5 Fe2. 5 ~ 3. 5 C0. 06 P0. 02 Ni 余	- 104 - 74	1010 ~ 1175		真空钎焊	用于航空发动机 涡轮叶片、蜂窝结 构、封严环、换热 器、汽车尾排气、催 化净化器等。高温 钎焊已在航空、汽 车、化工行业等大 量应用

单位地址 :长沙市香樟路 589 号      邮编 #10004  
网址 [www.hnyjcl.com](http://www.hnyjcl.com)    E - mail [xyfmyjgs@163.com](mailto:xyfmyjgs@163.com)    电话 0731 - 5573724 13973113245

**北京矿冶研究总院** 始建于 1956 年,是中央直属重点科技企业之一,20 世纪 60 年代末在中国最早开始从事热喷涂技术及其材料的研究推广工作,取得了显著的经济社会效益,为我国热喷涂材料事业的发展做出了重要贡献。金属材料研究所作为北京矿冶研究总院热喷涂事业执行机构,拥有四十余人的研发队伍,6000m<sup>2</sup> 的特种粉体制备中心

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应    用
镍包铝	KF - 2	Al17 ~ 20 杂质 < 1.0 Ni 余量	HRC17	氧—乙炔火焰 等离子喷涂	放热型包覆粉末,与基体结合强度高,主要用于打底喷涂,涂层具有抗氧化性,工作温度 < 800℃;也可作为工作涂层或工件的表面修复。有耐磨、防水冲蚀、抗热震性能,其硬度和耐磨性相当于 420 不锈钢;工件的表面修复;与普通碳钢、合金钢、不锈钢、氮化钢、铸铁、铸钢、镍、镁、锆、钛、蒙乃尔合金、镍铬合金均能实现良好的微冶金结合
铝包镍	KF - 6	杂质 < 2.5 Al4 ~ 6 Ni 余量	HRC16	氧—乙炔火焰 等离子喷涂	放热粉末形成自粘性涂层,其它性能与 KF - 2 相同。喷涂时烟雾较 KF - 2 少
镍铬铝	KF - 110	Cr16 ~ 9.5 Al5.5 ~ 6.5 其它 ≤ 5 Ni 余量	HRC16	等离子喷涂 火焰喷涂	在 800℃ 左右作高温打底涂层,也可作为 800℃ 左右高温抗氧化工作涂层
镍钴铬铝 氧化钇	KF - 113	Cr18 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2 Al15 Ni + Co 余量	HRC16	等离子喷涂 火焰喷涂	在 800℃ 左右作高温打底涂层,也可作为 800℃ 左右高温抗氧化工作涂层。用于喷涂氧化锆前的打底层
镍铬	KF - 28	Cr20 Ni80	HRC20	等离子喷涂 火焰喷涂 超声速喷涂	可在 900℃ 左右作耐氧化、抗气体腐蚀的涂层,也可作陶瓷涂层的打底层。用于喷涂氧化锆前的打底层
镍铬	KF - 28 - 2	Cr50 Ni50	HRC25	等离子喷涂 火焰喷涂 超声速喷涂	高铬镍合金,用途与 KF - 28 类似
自粘结镍 基碳化钨	KF - 91Ni	W25 ~ 30 Al3.5 ~ 5.5 Cr7.5 ~ 11.5 C1.0 ~ 2.2 其它 ≤ 5 Ni 余量	HRC45	氧—乙炔火焰 等离子喷涂	适用于工作温度低于 550℃ 的耐磨工作层,具有放热性,涂层结合强度高,既有工作层功能(耐磨、耐蚀)又兼有结合层特性。用于装甲车辆零部件喷涂修复寿命提高 6.8 倍 ~ 10 倍;汽车模具的表面修复;修复汽车制造厂钢管拉延模和板簧支架弯曲模具,寿命提高 6 倍 ~ 8 倍;喷涂油田高压离心泵轴套,提高寿命 30 倍以上

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应 用
自粘结 镍钼铝	KF - 133	Al5 Mo5 Ni 余量	HRC16	等离子喷涂 火焰喷涂	自粘结一次喷涂粉末,韧性好,不易开裂,耐磨耐冲蚀好。可磨削或车削到很低的粗糙度。用于碳钢工件尺寸恢复和硬轴承表面耐磨涂层
镍铬硼硅 合金粉	Ni60A	Cr15 ~ 20 B3.0 ~ 4.5 Si4.0 ~ 6.0 Co 0.5 ~ 1.1 Fe ≤ 5 Ni 余量	HRC52	氧—乙炔喷熔 等离子喷涂 氧—乙炔喷涂	作为工作层耐磨性、耐蚀性较好,但不宜作为厚涂层使用
镍铬硼硅 合金粉	Ni45	Cr11 ~ 15 B2.0 ~ 3.0 Si2.0 ~ 3.5 Co.3 ~ 0.6 Fe ≤ 8 Ni 余量	HRC35	氧—乙炔喷熔 等离子喷涂 氧—乙炔喷涂	喷涂层硬度较 Ni60 低,韧性好,喷涂厚度可高于 Ni60A,作为工作层具有一定的耐磨性、耐蚀性,可用于工件的尺寸恢复及耐磨涂层
镍铬硼硅 合金粉	Ni25	Si3 B1.5 Cr3 Fe ≤ 5 Ni 余量	HRC20	氧—乙炔喷熔 等离子喷涂 氧—乙炔喷涂	喷涂层硬度低、韧性好,厚涂层不易开裂,作为工作层耐蚀性较好,可用于工件的尺寸恢复及耐腐蚀涂层
镍铜 合金粉		Cu27 ~ 29 Mn1 Ni 余量	Rb 50	氧—乙炔火焰 等离子喷涂 超声速喷涂	属于蒙乃尔合金,涂层致密,机加工性能良好,涂层较一般不锈钢涂层硬一些,可替代部分不锈钢涂层。用于泵柱塞杆、旋转轴、密封环等
烧结型 WC - 12Co	KF - 12	Co12 WC 余量	HV800 ~ 1100	等离子喷涂 爆炸喷涂 亚声速喷涂	耐磨性好,用于抗磨粒、硬面、微动和颗粒冲蚀磨损。如:螺纹导棒、螺旋送料机、飞机引擎、泵的易磨损部件、发电厂通风机叶片、涡轮叶片的保护、泵壳、切割刀具、拉丝机内磨损的零件
烧结型 WC - 17Co	KF - 17	Co17 WC 余量	HV700 ~ 1000	等离子喷涂 爆炸喷涂 亚声速喷涂	耐磨性好,用于抗磨粒、硬面、微动和颗粒冲蚀磨损。涂层较 KF - 12 韧性好且细腻。应用同 KF - 12
烧结型 WC - 25Co		Co25 WC 余量	HRC 50 ~ 55	爆炸喷涂 等离子喷涂 亚声速喷涂	耐磨性好,用于抗磨粒、硬面、微动和颗粒冲蚀磨损。涂层较 KF - 17 韧性更好且细腻。应用同 KF - 12
钴包 碳化钨	KF - 15	Co12 WC 余量	HRC 50 ~ 55	等离子喷涂 氧—乙炔喷熔 层的填料	涂层具有大晶粒碳化钨,耐磨性稍次于 KF - 17
高钴包 碳化钨	KF - 15 - 2	Co17 WC 余量	HRC 57 ~ 59	推荐使用 氧—乙炔火焰 喷涂	是目前抗磨损性能最好的火焰喷涂层,用于泵密封、拉丝绞盘、混凝土搅拌机、柱塞

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应    用
$\text{Cr}_3\text{C}_2/25$ NiCr	KF - 501	$\text{Cr}_3\text{C}_2$ 75 NiCr 25	HV 700 ~ 1000	超声速喷涂、 等离子喷涂、 爆炸喷涂、 亚声速喷涂	抗高温涂层 900 以内抗磨粒、 硬面、颗粒和微振冲蚀磨损,该涂 层极为耐磨和抗氧化。用于锅炉 “四管”工作涂层、高温耐磨部件
$\text{Cr}_3\text{C}_2/30$ NiCr	KF - 501 - 2	$\text{Cr}_3\text{C}_2$ 70 NiCr 30	HV 700 ~ 1000		涂层性能同上,涂层能研磨得更 光一些
镍包 氧化铝	KF - 45 - 1	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 20 ~ 25 杂质 $\leq 1.0$ Ni 余量		等离子喷涂	属高温耐磨涂层,可在 800 工 作条件下耐磨、抗热冲击、氧化、腐 蚀性能、隔热性良好,可作喷涂氧 化铝前过渡涂层。用于高炉风口、 渣口、风机叶片等陶瓷涂层的高温 保护阶梯涂层材料
镍包 氧化铝	KF - 45 - 2	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 40 ~ 45 杂质 $\leq 1.0$ Ni 余			涂层性能同上
氧化锆 陶瓷粉	KF - 230	$\text{Y}_2\text{O}_3$ 7 ~ 8 $\text{ZrO}_2$ 余		等离子喷涂	具有良好的抗高温氧化和隔热 性陶瓷涂层,比氧化铝粉具有更低 的热导率和抗热震性能,主要用作 热障涂层材料,用于火箭和喷气发 动机加力筒、喷嘴的热障涂层;锅 炉燃烧器热辐射端面;连铸机轧 辊、炉底辊的高温耐磨涂层材料
氧化铬 陶瓷粉	KF - 510	$\text{TiO}_2$ 2 ~ 3 $\text{SiO}_2$ 3 ~ 5 其它氧化物 $< 2\%$ $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 余量	60 ~ 70 HRC	等离子、 火焰喷涂	涂层致密抗高温,在高温下耐磨 削磨损。可用于 200 以下的化学 腐蚀环境中,如纺织机械零件、磨 光及抛光夹具,耐硬面模具、泵密 封、润滑耐磨环、柴油发动机汽缸 内衬、风机叶片等
氧化铝 陶瓷粉	KF - 520	$\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 99$	60 ~ 70 HRC	等离子喷涂	耐磨损、耐腐蚀、耐高温,隔热性 能优良,磨擦系数较低,是优良的 抗磨粒磨损、硬面磨损、纤维磨损、 粒子侵蚀和气蚀涂层。用于泵机 械密封件、泥浆泵活塞杆、水力涡 轮机叶片、阀门、阀座、导丝轮、摩 擦片等部件的喷涂
氧化铝 - 40 氧化钛	KF - 530	$\text{TiO}_2$ 40.0% $\text{Al}_2\text{O}_3$ 余量	60 ~ 70 HRC	等离子喷涂	耐硬表面磨粒磨损、纤维磨损, 涂层致密,结合强度高,韧性好,耐 腐蚀,耐磨损。用于传动齿轮轴 颈、磨光及抛光夹具、液压电动阀 门、纺织机械导丝轮、化工用泵轴、 压缩机轴等部件的喷涂

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应    用
铁基高强度复合粉	KF - 201	Cu5 Cl Cr10 Ni13 W14 Fe55	28 ~ 30 HRC		耐磨性好,可作摩擦片。剪切强度 $6\text{kg/mm}^2 \sim 11\text{kg/mm}^2$ 摩擦系数 0.3 ~ 0.5 ,用于坦克、推土机的摩擦片及汽车变速箱同步器摩擦锥面的喷涂
不锈钢粉	1Cr13	Cr12.0 ~ 14.0 Mn $\leq$ 0.6 Si <1.0 C0.1 O <0.18 Fe 余量	28 ~ 30 HRC		硬度略低,加工性能良好,耐金属间摩擦磨损。用于轴承面、轴、轴套、柱塞、农机等的修复
不锈钢粉	2Cr13	Cr12.0 ~ 14.0 Mn $\leq$ 0.6 Si <1.0 C0.2 O <0.18 Fe 余量	30 ~ 32 HRC		Cr13 型马氏体不锈钢,耐磨损,耐腐蚀。用于轴、柱塞、造纸烘缸等的修复
不锈钢粉	3Cr13	Cr12.0 ~ 14.0 Mn $\leq$ 0.6 Si <1.0 C0.3 O <0.18 Fe 余量	32 ~ 33 HRC		Cr13 型高碳马氏体不锈钢,涂层自淬硬性好,硬度高,耐磨损,收缩率低,可切削,易磨削,涂层粒子间结合强度高,对较大接触面的冲击韧性好,适于汽缸、活塞等的修复
不锈钢粉	304	C0.08 Si2 Ni9 ~ 12 Cr16 ~ 19 Mn2.0 Fe 余量	187HB		
不锈钢粉	316	Cr16.0 ~ 18.0 Ni9.0 ~ 12.0 Mo2.0 Si <2.0 C0.08 Fe 余量	200HB	火焰喷涂 等离子喷涂	316 型奥氏体不锈钢,耐腐蚀,耐低温(540 以下)颗粒冲蚀和汽蚀。用于水轮机叶片、喷嘴、磨环,泵的过流部件,柴油机汽缸、衬套,旋风分离器及烟气排风扇等的修复
不锈钢粉	316L	Cr16.0 ~ 18.0 Ni9.0 ~ 12.0 Mo2.0 Si <2.0 C0.03 Fe 余量	187HB		涂层硬度稍低于 316,其它性能同上
高碳铁粉		C3.5 Mn0.35 Fe 余量	40 ~ 47 HRC	只用于等 离子喷涂	是一种优质高碳铁粉,涂层坚硬致密,可替代部分镀铁工艺。用于硬化轴承表面。抗低温磨粒磨损
含硼硅 铁基粉	F313	Cr13 ~ 17.0 C0.1 B0.5 ~ 1.5 Si0.5 ~ 1.5 Fe 余	250HB	氧—乙炔 火焰喷涂	涂层硬度适中、韧性好,喷涂厚涂层不易开裂,恢复工件尺寸并提高工件耐磨寿命。用于造纸烘缸、轴类喷涂

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应 用
含镍硼硅铁基粉		Cr15 ~ 19 C0.1 B0.5 ~ 1.5 Si1.5 ~ 3.0 Ni8 ~ 12 Fe 余	250HB	氧—乙炔 火焰喷涂	涂层韧性好,喷涂厚涂层不易开裂,用于恢复工件尺寸及耐磨处理,轴类喷涂恢复尺寸极佳
铜基高强度复合粉	KF - 210	Cr1.5 Ni12 W14 Fe7 Cl Al4 Cu 余	22HRC	火焰喷涂	剪切强度 $5\text{kg/mm}^2 \sim 6\text{kg/mm}^2$ 摩擦系数 0.15 ~ 0.4,性能同铁基高强度复合粉,用于铜基零件的增磨。用于坦克、推土机的摩擦片及汽车变速箱同步器摩擦锥面的喷涂,延长了使用寿命
自粘结铝青铜	KF - 130	Al10 Cu 余量	50Rb	火焰喷涂 等离子喷涂	软轴承应用的涂层,推荐用于铜合金基体的尺寸恢复,涂层厚度不受限制且不易开裂。此涂层不需要打底层。工作温度超过 230 时开始发生氧化
镍铜合金		Ni38 Cu 余量		等离子喷涂、 火焰喷涂	涂层致密,能耐微动磨损和腐蚀,涂层加工性能好
铜镍钨合金粉		In5 Ni36 Cu 余量		等离子喷涂 火焰喷涂	涂层致密,能耐微动磨损和腐蚀,涂层加工性能好,抗擦伤性和润滑特性较铜镍合金有所改善
银铜合金		Ag70.5 ~ 73.5 Cu 余量		火焰、等离子 喷涂	减磨密封涂层,或用作钎焊料
锡基巴氏合金粉	DH - 41	Sb11 Cu6 Sn 余量	30HB	火焰喷涂 等离子喷涂	用于各种巴氏合金轴瓦、铜、铜、铸铁体的表面修复(需打底层),涂层致密、均匀、硬质相小、结合强度高、承重性好,属软支承面。用于各类高速及重负荷轴瓦的修复
喷涂钼粉	KF - Mo64	Mo $\geq$ 99.5	约 15HRC	等离子喷涂	涂层致密、光滑,与钢基体结合强度高,在大气环境下涂层工作温度超过 350 时钼发生氧化。不能喷涂在铜基工件上。可用于喷涂打底层,也可与 NiCrBSi 粉末按比例混合后喷涂活塞环。在隔氧环境下涂层抗熔融钢和铜的腐蚀
镍包石墨	KF - 21	Ni78 石墨余量		氧—乙炔火焰 喷涂	用作机械零件间隙控制可磨涂层用,涂层最高工作温度为 480 。耐氧化能力较差。飞机喷枪发动机的压气机部件,也能用作固定式喷枪发动机的原动机,需要严密的间隙密封面的各种类型的轮机和机件,可动密封部件,可磨密封圈的涂层

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应    用
铜包石墨	KF - 25	Cu70 石墨 余量	25HRC	火焰喷涂	低摩擦涂层材料,韧性好,具有良好的机械性能及焊接性能,导电性能较高,用于摩擦板间的减磨
铜铝镍 石墨		Ni25 Cu57 Al6.4 石墨余		火焰喷涂	低摩擦涂层材料,具有良好的自润滑性能,韧性好。400 ~ 600 良好的封严涂层。作为航空发动机的压气机部件的可磨封严涂层
镍铬铝 镍石墨				等离子喷涂、 火焰喷涂	低摩擦自润滑减磨涂层材料。工作温度 400 ~ 600
铝硅合金		Si12 Al 余量		火焰喷涂 等离子喷涂	涂层加工性能好,用于修复铝或镁合金部件。废旧零件修复、填充铸件气孔
铝硅 聚苯酯		Al52.5 Si7.5 PBL 余量		等离子喷涂 火焰喷涂	摩擦系数低,高速减摩自润滑性能优异,可在 300 温度下长期使用。用作飞机发动机高速旋转密封件和内燃机增压器的减摩涂层
纯银粉		Ag≥99.5		等离子喷涂 火焰喷涂	涂层具有与纯银面相似的耐蚀性能,可耐酸、碱、盐等腐蚀,航空发动机部件
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni15	Si 2 B 1.2 Cr 3 Fe≤5 Ni 余量	15HRC	一步法喷熔	主要用于铸铁件的修复
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni35	Si 3.3 B 1.7 Cr 7.5 Fe≤5 Ni 余量	约 35HRC	一步法、二步 法喷熔	玻璃模具、阀座
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni45	Si3.5 B 2.1 C 15 Fe≤8 Ni 余量	约 45HRC	一步法、二 步法喷熔	
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni55	C0.4 Si4 B2.2 Cr11 Fe≤5 Ni 余	约 50HRC	一步法、二 步法喷熔	
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni60A	C0.8 Si4.5 B 3.1 Cr15 Fe≤5 Ni 余	60HRC	二步法、一 步法喷熔	
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni60B	C0.8 Si4.5 B3.1 Cr15 Fe≤15Ni 余	60HRC	二步法、一 步法喷熔	涂层性能同 KF - Ni60A,但耐蚀性差
镍基自熔 性合金粉	KF - Ni60 CuMo	C0.5 Si 4 B 4 Cr 16 Cu 3 Mo3 Fe2.5 Ni 余	60HRC	二步法, 炉内重熔	喷熔层韧性好,厚焊层不易开裂,其它性能同 Ni60A



(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应 用
镍基自熔性合金粉	KF - Ni60W10	C0.9 Si 4.7 B3.3 Cr15 W10 Fe≤8 Ni 余	62HRC	二步法、一步法喷熔	涂层高温耐磨性好于 Ni60A ,其它性能同 Ni60A
自熔性镍基碳化钨	Ni60 + 35WC	WC - Ni 35 C0.5 Si2.5 B2.5 Cr11 Fe2.5 Ni 余量	60 ~75 HRC	二步法、一步法喷熔	耐磨性高于 Ni60A
钴基自熔性合金粉	Co50F	C0.2 Fe2.5 B3.0 Si3.5 Mo6 Cr16 Co 40 Ni 余量	50HRC	二步法、一步法喷熔	是一种高钴自熔性合金粉
钴基自熔性合金粉	Co40 - 45F	Cl.8 ~2.2 Cr24 ~26 W11 ~13 Ni20 ~24 Si1 ~1.3Co 余	40 ~45 HRC	一步法喷熔	
钴基自熔性合金粉	Co50 - 57F	Cl.1 ~1.4 Cr19 ~20 W11 ~13 Ni13 Si2.8 ~3.5 B2.3 ~2.6 Co 余	50 ~57 HRC	氧—乙炔一步法喷熔	
钴基自熔性合金粉	Co43 - 46F	C0.7 ~1.4 Cr19 ~20 W6.5 ~7.5 Ni13 ~16 Si2 ~2.5 B1.4 ~1.8 Co 余	43 ~46 HRC	一步法喷熔	
钴基自熔性合金粉	Co48 - 51F	C0.7 ~1.4 Cr19 ~20 W6.5 ~7.5 Ni13 ~16 Si2 ~2.5 B1.4 ~1.8Co 余	48 ~51 HRC	氧—乙炔一步法喷熔	
钴基自熔性合金粉	Co40 - 47F	C0.1 Cr22 W4.5 Si1.5 B2.6 Co 余	40 ~47 HRC	一步法喷熔	

(续)

名称	牌号	成分(质量分数)	涂层	涂层工艺	应    用
钴基自熔性合金粉	Co40 - 43F	C0. 8 Cr26 W5. 5 Si1. 2 B0. 7 Co 余	40 ~43 HRC	一步法喷熔	
铁基自熔性合金粉	Fe30	C0. 3 ~0. 6 Cr5 ~7 B1 ~2 Si2. 5 ~3. 5 Ni28 ~32 Fe 余	30HRC	一步法喷熔	喷熔时有一定的镜面 ,焊层硬度适中。 应用实例如钢轨擦伤 ,齿轮磨损等的修复
铁基自熔性合金粉	Fe56	C0. 8 Si3. 5 B3. 5 Cr17 Ni37 Fe 余量	≥56HRC	一步法、二 步法喷熔	一步法喷熔时镜面很明显 ,用于500 以下的耐磨 ,耐蚀焊层。 应用实例 :分机叶片、刮板、车轴、农机具等喷熔
Fe62 铁基自熔性合金粉		C4 ~5 Si1. 5 B1. 8 Cr38 ~43 Fe 余	≥62HRC	一步法喷熔	喷熔时有一定的镜面 ,焊层硬度高耐磨性好 ,用于表面平整度要求不高的高耐磨部件。 应用实例 :铲齿
北京矿冶研究总院金属材料研究所 地址 北京西直门外文兴街1 号 金属材料研究所 (100044) 电话 010 - 88399159                      传真 010 - 88385389 <a href="http://www.KF-BGRIMM.com">www. KF - BGRIMM .com</a> <a href="http://www.KF-BGRIMM.com.cn">www. KF - BGRIMM .com. cn</a>					

热喷涂用粉芯丝材主要产品

北京工业大学粉芯线材开放实验室 主要以焊接材料 ,尤其是各类粉芯线材的研究、开发及应用为主 ,是国内率先进行粉芯线材全方位研究开发的高等院校。自 20 世纪 70 年代中期 ,先后完成了 50 余种结构钢、不锈钢、堆焊及表面喷涂用粉芯线材的研究和开发 ,是国内知名的粉芯线材研究开发和应用中心				
型号	涂 层 类 型	结合强度 /MPa	涂层硬度 HRC	涂层层性能及应用
7Cr13	马氏体型不锈钢耐磨耐 蚀涂层	> 50	>48	轴类、柱塞、造纸烘缸等修复。锅炉水冷壁 防护。耐磨性为 3Cr13 的 1. 5 倍
DM	低碳马氏体型高结合强 度耐磨涂层	> 50	>40	具有良好的自粘合性能 ,取代铝青铜、镍铝 丝作打底层 ,无毒、高效、低成本。也可作耐 磨层用

(续)

型号	涂 层 类 型	结合强度 /MPa	涂层硬度 HRC	涂用层性能及应用
GY	高硬度耐磨涂层	> 50	> 60	高硬度、高耐磨性。磨粒磨损试验相对耐磨性为 3Cr13 的 9 倍
MC	Fe/Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 耐 高 温 冲 蚀 涂层	> 50	> 60	耐高温冲蚀涂层。锅炉“四管”防护涂层。 耐磨耐蚀涂层
AB	奥氏体不锈钢型(316L) 耐腐	> 50	> 40	在氧化性腐蚀介质中具有良好的耐蚀性
NJ - 1	Ni/Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 耐磨耐蚀涂层	> 50	> 55	耐高温冲蚀涂层。锅炉“四管”防护涂层
NJ - 2	NiCrB 系耐磨耐蚀涂层	> 50	> 58	耐高温冲蚀涂层。锅炉“四管”防护涂层
NJ - 3	NiCrTi 耐蚀涂层	> 50	> 45	石化行业耐腐蚀涂层。抗硫化物及氟、氯 离子等
T50	Fe50/Cr50 耐 磨 耐 蚀 涂层	> 50	> 50	耐高温冲蚀涂层。锅炉“四管”防护涂层。 耐磨耐蚀涂层
N50	Ni50/Cr50 耐 蚀 耐 磨 涂层	> 50	> 45	耐高温冲蚀涂层。锅炉“四管”防护涂层
FH	耐磨防滑涂层	> 50	> 55	良好的防滑性能。高结合强度和硬度
WC	含 WC 耐磨涂层	> 50	> 60	良好的耐磨性能。抗磨粒、泥浆磨损
FS	耐 H <sub>2</sub> S 应力腐蚀涂层	> 30	—	耐 H <sub>2</sub> S 应力腐蚀涂层

## 参考文献

- 1 徐滨士,朱绍华等. 表面工程的理论与技术. 北京:国防工业出版社,1999
- 2 装甲兵工程学院编. 徐滨士院士科研文选. 北京:机械工业出版社,2001
- 3 胡传□. 表面处理技术手册. 北京:北京工业大学出版社,2001
- 4 徐滨士,刘世参,刘学惠. 等离子喷涂及堆焊. 中国铁道出版社,1986
- 5 李国英. 表面工程手册. 北京:机械工业出版社,2001
- 6 韦福水,姜伯平等. 热喷涂技术. 北京:机械工业出版社,1986
- 7 美国焊接学会编. 热喷涂原理与应用技术. 麻毓璜,贾永昌,刘维祥译. 成都:四川科学技术出版社,1987
- 8 杨耀华. 等离子喷涂和燃烧火焰喷涂技术. 北京:国防工业出版社,1984
- 9 徐滨士,朱绍华等. 表面工程与维修. 北京:机械工业出版社,1996
- 10 戴达煌,周克崧,袁镇海等. 现代材料表面技术科学. 北京:冶金工业出版社,2004
- 11 中国机械工程学会焊接学会. 第十一次全国焊接会议论文集,2005
- 12 刘广海,黄菊林. 第一届中日热喷涂技术研讨会论文集(中国部分). 北京:北京农业大学出版社,1994
- 13 钱苗根. 材料表面技术及其应用手册. 北京:机械工业出版社,1998
- 14 邓世均. 高性能陶瓷涂层. 北京:化学工业出版社,2004
- 15 王震林,韩勇,许晋生. 金属热喷涂技术及其应用. 北京:纺织工业出版社,1992
- 16 张志成. 高超声速气动热和热防护. 北京:国防工业出版社,2003
- 17 H. S 英格赫姆, A. P 谢伯德. 等离子火焰喷镀工艺. METO 公司火焰喷镀手册,1978
- 18 彭超群. 喷射成形技术. 长沙:中南大学出版社,2004
- 19 张忠礼. 钢结构热喷涂防腐技术. 北京:化学工业出版社,2004
- 20 徐滨士. 纳米表面工程. 北京:化学工业出版社,2004
- 21 王德泉. 砂轮特性与磨削加工. 北京:中国标准出版社,2001
- 22 谈育熙,胡志忠. 材料研究方法. 北京:机械工业出版社,2004
- 23 李金桂,肖定全. 现代表面工程设计手册. 北京:国防工业出版社,2000
- 24 《喷镀技术》翻译组. 喷镀技术. 北京:国防工业出版社,1978
- 25 韩德伟. 金属硬度检测技术手册. 长沙:中南大学出版社,2003
- 26 王海军,韩志海,徐滨士. 超音速等离子喷涂制备热障涂层的工艺特点与技术优势. 第十三届全国热喷涂技术研讨会论文集(大连). 2003. 9
- 27 张平,王海军,朱胜等. 高效能超音速等离子喷涂系统研制. 中国表面工程,2003,16(3)
- 28 王海军,韩志海,周世魁等. 超音速等离子喷涂系统制备 WC - Co 涂层的性能特点. 第七届国际热喷涂研讨会(ITSS2004)论文集(珠海). 2004. 11 22~27
- 29 王海军,蔡江,韩志海. 超音速等离子与普通等离子喷涂 WC - Co 涂层性能比较. 2004 年全国荷电粒子源、粒子束学术会议论文. 2004 年 9 月

- 30 王海军,蔡江,韩志海. 超音速等离子与普通等离子喷涂 WC - Co 涂层冲蚀磨损性能研究. 材料工程. 2005 年第 4 期
- 31 王海军,周世魁,韩志海. 超音速等离子喷涂连续梯度热障涂层(CG - TBCs)热震性能研究. 2005 年 5 月,第十届全国焊接学术会议论文集(上海)
- 32 王海军,潘荣辰,韩志海. 超音速等离子喷涂 Mo - 30% NiCrBSi 涂层耐磨性能研究. 金属热处理. 2005 年第 3 期刊出
- 33 韩志海,徐滨士,王海军. 三种超音速热喷涂工艺制备 WC - 12Co 涂层的组织结构分析. 中国表面工程. 2005 年 6 月第三期
- 34 Wang Haijun ,Xu Binshi ,Han Zhihai ,et al. Thermal shock property of continuously graded thermal barrier coatings deposited by supersonic plasma spray. 2005 年瑞士国际热喷涂大会论文集
- 35 王海军,蔡江,韩志海. 超音速等离子与 HVOF 喷涂 WC - Co 涂层性能比较. 2005 年 5 月,第十届全国焊接学术会议论文集(上海)
- 36 王海军,刘向平,张平,韩志海. 高效能超音速等离子弧喷涂技术研究. 机械工人. 2004. 9 28 - 31
- 37 王海军,刘向平,张平,韩志海. 高效能超音速等离子喷涂技术. 新技术、新工艺. 2004. 12 25 - 26
- 38 王海军,潘荣辰,韩志海. 超音速等离子喷涂 Mo - 30% NiCrBSi 涂层耐磨性能研究. 2005 年 5 月,第十届全国焊接学术会议论文集(上海)
- 39 徐滨士,梁秀兵,马世宁. 中国表面工程,1998,11(3):16~19
- 40 徐滨士,马世宁等. 表面工程,1995,(4):33~37
- 41 温瑾林,耿维生,刘爱华. 沈阳工业大学学报,1997,19(2):1~6
- 42 贺定勇,闫玉芹,蒋建敏,熊第京,伍志坚. 材料保护. 1999,32:12
- 43 李长久,王豫跃,大森明. 中国表面工程,2000,2:1
- 44 李长久. 中国表面工程,1996,4:29
- 45 李文亚,李长久. 中国表面工程,2002,15(1):12
- 46 吴杰,刘志文,金花子,刘星,熊天英. 表面技术,2002,31(5):4
- 47 徐滨士,王海军,朱胜,梁秀兵. 制造技术与机床,2003,2:30
- 48 徐滨士,张伟,梁秀兵. 新材料产业,2002,7:53
- 49 李长久,徐可为. 第五届全国表面工程学会论文集. 西安:中国机械工程学会表面工程分会,2004
- 50 徐滨士,刘世参. 表面工程. 北京:机械工业出版社,2000
- 51 徐滨士,朱绍华. 表面工程与维修. 北京:机械工业出版社,1996
- 52 徐滨士,刘世参. 表面工程新技术. 北京:国防工业出版社,2001
- 53 陈学定,韩文政. 表面涂层技术. 北京:机械工业出版社,1994
- 54 戴达煌,周克崧,袁镇海等. 现代材料表面技术科学. 北京:冶金工业出版社,2004
- 55 高荣发. 热喷涂. 北京:化学工业出版社,1992
- 56 李金桂,吴再思. 防腐蚀表面工程技术. 北京:化学工业出版社,2003
- 57 日本溶射协会. 溶射技术. 东京:新技术开发株式会社,1998
- 58 徐滨士,李长久. 中国表面工程,1998,11(1):3~9
- 59 Sunil S K. 国外涂料报导,(1993):11~16
- 60 徐小洪等,《涂装技术》,化学工业出版社,1988
- 61 徐滨士. 塑料粉末火焰喷涂技术的进展,《现代机械维修》,中国铁道出版社,1993
- 62 涂料与颜料标准汇编(上),中国标准出版社,1997

- 63 Wang Haijun ,Xu Binshi ,Han Zhihai ,et al. Thermal shock property of continuously graded thermal barrier coatings deposited by supersonic plasma spray. 2005 年瑞士国际热喷涂大会论文集
- 64 Xu Binshi. Surface Engineering and Maintenance [ M ]. Beijing : China Machine Industry Press , 1996
- 65 Marek-Jerzy Pindera , Jacob Aboudi , Steven M. Arnold. The effect of interface roughness and oxide film thickness on the inelastic response of thermal barrier coatings to thermal cycling[ J ]. Materials Science and Engineering A284 ( 2000 ) : 158 ~ 175
- 66 Hua-Ping Xiong , Akira Kawasaki. Yan-Sheng Kang Experimental study on heat insulation performance of functionally graded metal/ceramic coatings and their fracture behavior at high surface temperatures[ J ]. Surface & Coatings Technology 194 ( 2005 ) : 203 ~ 214
- 67 Roy Kamo ,Dennis N. Assanis. Thin Thermal Barrier Coatings for Engines[ J ]. SAE paper 890143 ,1989
- 68 Lloyd Kamo ,Melvin Woods. Thermal Barrier Coatings for Monolithic Ceramic Low Heat Rejection Diesel Engine Components[ J ]. SAE paper ,2000 - 01 - 1236
- 69 Cirolini , J. H. Harding and G. Jacucci. Computer Simulation of Plasma - Sprayed Coatings I. Coating Deposition Model[ J ]. Surf. Coat. Technol. ,48(1991)137 ~ 145
- 70 M. Ferrari , J. H. Harding. Computer Simulation of Plasma-Sprayed Coatings II. Effective Bulk Properties and Thermal Stress Calculations[ J ]. Surf. Coat. Technol. ,48(1991)147 ~ 154
- 71 Vanni Lughì , Vladimir K. Tolpygo. Microstructural aspects of the sintering of thermal barrier coatings[ J ]. Materials Science and Engineering A368 ( 2004 ) 212 ~ 221
- 72 Kang N. Lee ,Robert A. Miller. Development and environmental durability of mullite and mullite/YSZ dual layer coatings for SiC and SiAlN ceramics[ J ]. Surface and Coatings Technology 86 - 87 ( 1996 ) 142 ~ 148
- 73 Zhang Xiancheng , Xu Bin - shi , Wang Hai - dou. Thermo-mechanical integrity of coatings with residual stress[ J ]. Proceedings of Fracture Mechanics and Applications. 2004 : 225 - 240
- 74 Sudarshan Rangaraj , Klod Kokini. Fracture in single-layer zirconia ( YSZ ) - bond coat alloy ( NiCoCrAlY ) composite coatings under thermal shock[ J ] Acta Materialia 52 ( 2004 ) 455 ~ 465
- 75 Cirolini , J. H. Harding and G. Jacucci. Computer Simulation of Plasma-Sprayed Coatings I. Coating Deposition Model[ J ]. Surf. Coat. Technol. ,48(1991)137 ~ 145
- 76 A. M. Karlsson , J. W. Hutchinson , A. G. Evans. The displacement of the thermally grown oxide in thermal barrier systems upon temperature cycling[ J ]. Materials Science and Engineering ,2003 , A351 : 244 ~ 257
- 77 S. Q. Nusier , G. M. Newaz. Growth of interfacial cracks in a TBC/superalloy system due to oxide volume induced internal pressure and thermal loading[ J ] International Journal of Solids and Structures 37 ( 2000 ) 2151 ~ 2166
- 78 L. FuU , K. A. Khor , H. W. Ng , T. N. Teo. Non-destructive evaluation of plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings[ J ]. Surface and Coatings Technology ,2000 ,130 : 233 ~ 239
- 79 A. Kucuk , C. C. Berndt , U. Senturk , R. S. Lima Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. II : Acoustic emission response[ J ]. Materials Science and Engineering A284 ( 2000 ) : 41 ~ 50
- 80 Y. P. Wan , S. Sampath , V. Prasad , R. Williamson , J. R. Fincke. An advanced model for plasma spraying of functionally graded materials[ J ]. Journal of Materials Processing Technology ,2003 ,137 : 110 ~ 116
- 81 K. A. KhorU , Y. W. Gu. Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coat-

- ings[ J ]. Thin Solid Films ,2000 ,372 :104 ~113
- 82 Borisov Y. Sviridov. V. Voynarovich S. Investigation of the Microplasma Spraying Process[ C ]. Proceedings of ITSC 2002 Essen Germany ,2002 :335 ~338
- 83 Yuschenko K. Borisov Y. Microplasma spraying[ C ]. Proceedings of ITSC 1998. Nice France ,1998 :1461 ~467
- 84 Dorier J. L. Gindrat M. Hollenstein Ch. Plasma Jet Properties in a New Spraying Process at Low Pressure for Large Area Thin[ C ]. Deposition Proceedings of ITSC 2001 :34 ~35
- 85 Loch M. Barbezat G. . Characteristics and Potential Application of Thermally Sprayed Thin Film Coatings [ C ]. Proceedings of ITSC 2000 ,Montreal. Canada ,2000 :1141 ~1144
- 86 Barbezat G. Landes K. Plasma Technology TRIPEX for the Deposition of Ceramic Coatings in the Industry [ C ]. Proceedings of ITSC 2000 ,Montreal ,Canada ,2000 :881 ~883
- 87 Barbez G. Ziehut J. Landes K. Triplex a High Performance Plasma Torch[ C ]. Proceedings of UTSC 1999. D. Seldort. Germany ,1999 :271 ~274
- 88 Maurice Gell ,Eric Jordan ,Krishnakumar Vaidyanathan. Bond strength ,bond stress and spallation mechanisms of thermal barrier coatings[ J ]. Surface and Coatings Technology 120 - 121 (1999 ) 53 ~60
- 89 J. D. Lee and H. Y. Ra. Analysis of Deposition Phenomena and Residual Stress in Plasma Spray Coatings [ J ]. Surf. Coat. Technol. ,56(1992)27 ~37
- 90 蓮 井淳. 新版表面工学. 産報出版. 1996
- 91 小林□二郎. 最新の表面改性、機能そ 織技術. 溶接技術 ,1999 ,(8) :66 ~72
- 92 原田良夫. 溶射技術の最新動向. 表面技術 ,1998 ,49(6) :31 ~37
- 93 相板隆行など. 溶射における最近応用の展開. 溶接技術 ,1999 ,(8) :79 ~84
- 94 □ 幸男. プラズマ溶射法の最新技術. 表面技術 ,1998 ,49(6) :44 ~51
- 95 清水保雄. 高速フレーム溶射法の最新技術. 表面技術 ,1998 ,49(6) :38 ~43