



机械工程材料及热加工工艺

安玉民，副教授

河北工业大学，机械工程学院

邮箱：anyumin@hebut.edu.cn

绪论

第1章 机械工程材料的性能

第2章 金属的晶体结构与结晶

第3章 合金的晶体结构与相图

第4章 铁碳合金相图和碳钢

第5章 钢的热处理

第6章 合金钢

第7章 铸铁

第8章 有色金属及其合金

第9章 非金属材料与新型材料 (自学)

第10章 铸造成型

第11章 锻压成型

第12章 焊接与胶接成形

第13章 非金属材料成形 (自学)

第14章 机械零件材料及毛坯的选择与质量检验

»»» § 14.1 机械零件的失效分析

一、失效的基本概念

零件在工作过程中最终都要发生失效

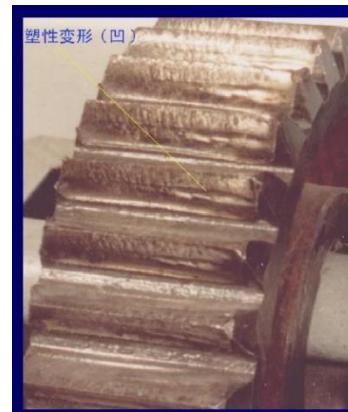
失效的特征：

- (1) 零件完全**破坏**，不能继续工作；
- (2) 严重**损伤**，继续工作很不安全；
- (3) 虽能安全工作，但已**不能**满意地起到**预定的作用**。

- **失效分析目的**：找出零件损伤的原因，提出改进措施
- **失效分析意义**：指导零件的设计、选材、加工和使用



轴承内圈断裂



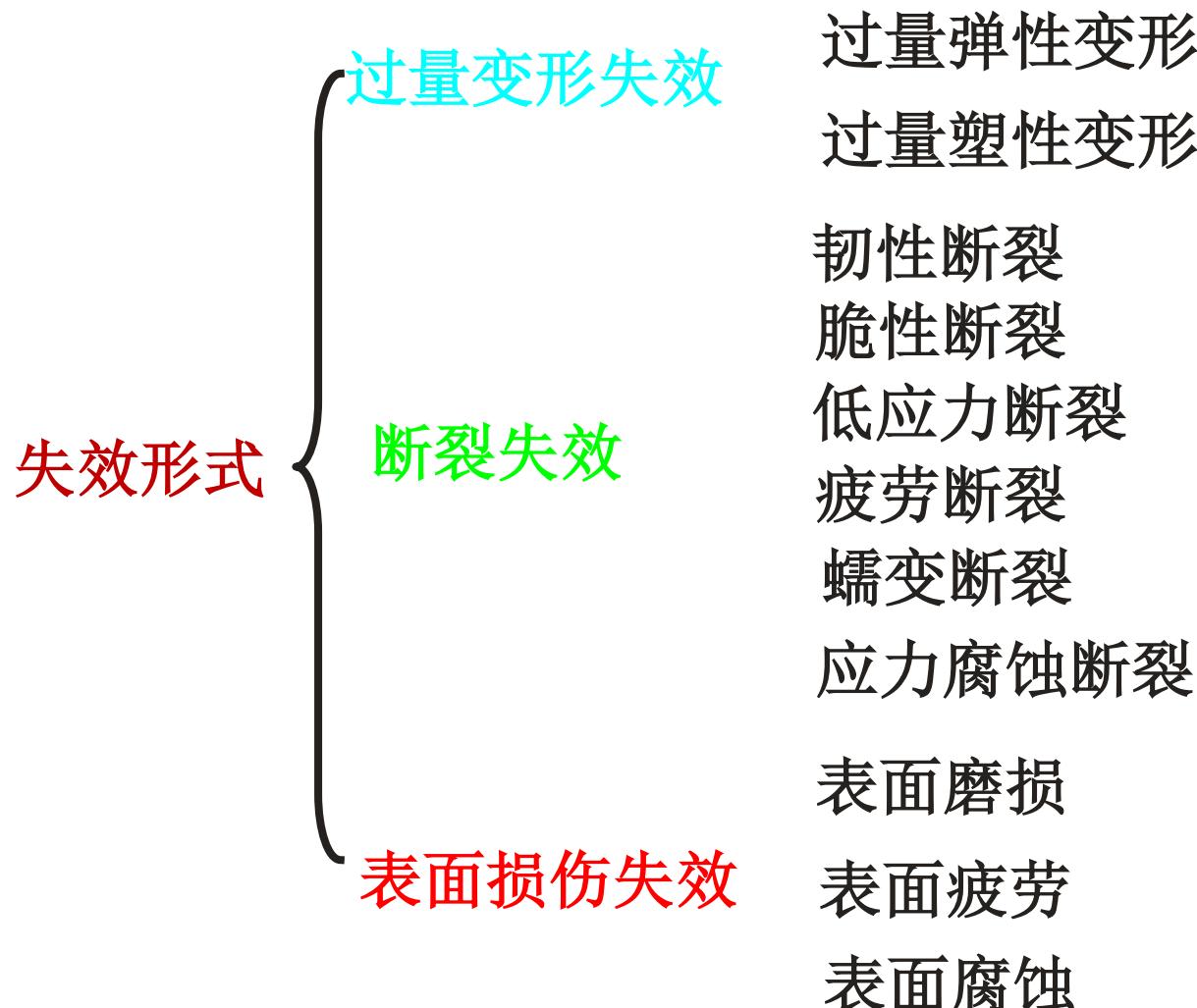
齿轮齿面塑形变形



轴承外圈塑性变形

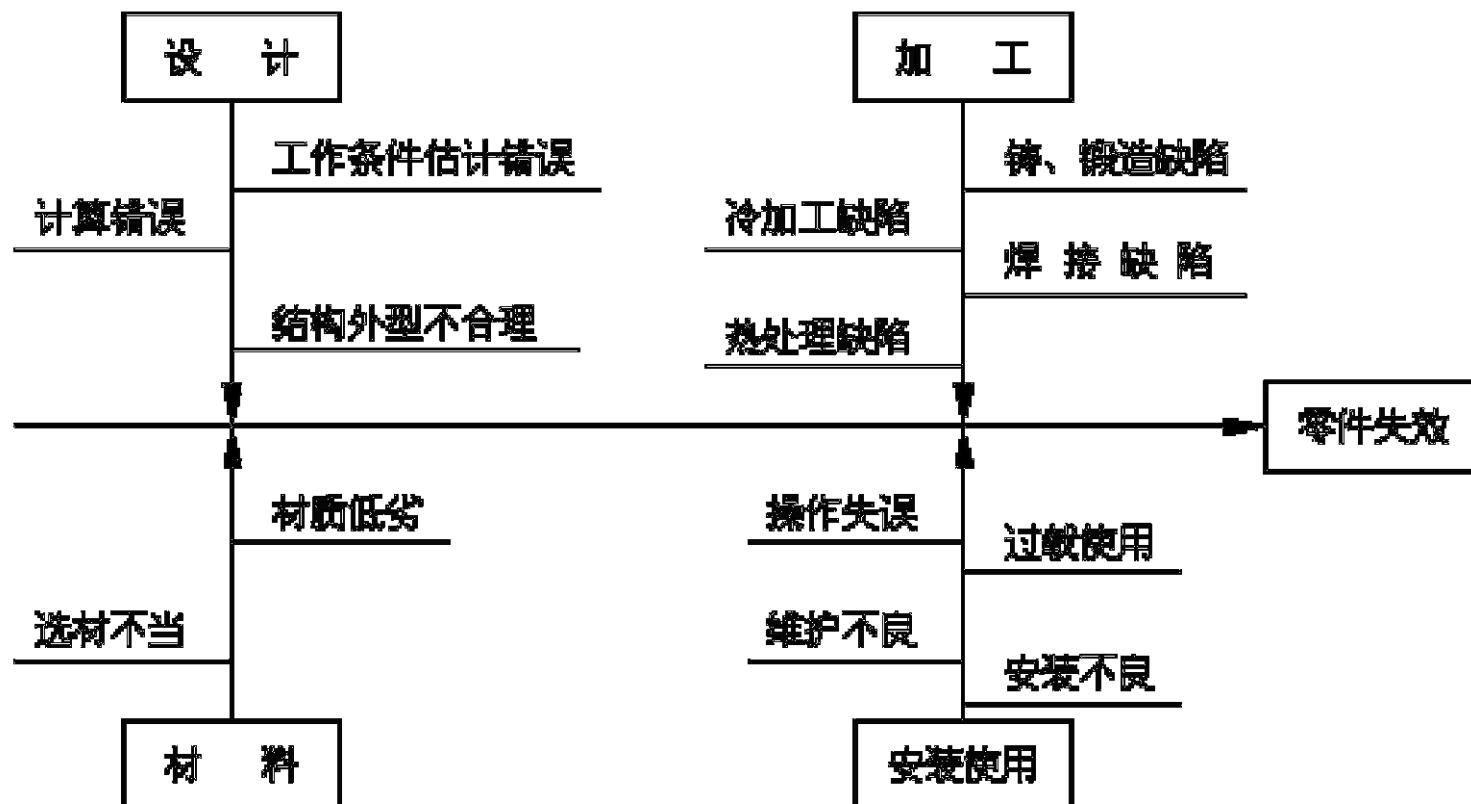


服役条件 → 失效形式





零件失效的原因





»»» § 14.1 机械零件的失效分析

机械零件失效分析流程

- ① 收集失效零件的残骸，并拍照记录实况，确定重点分析的对象，样品应取自失效的发源部位，或能反映失效的性质或特点的地方。
- ② 详细记录并整理失效零件的有关资料，如设计情况（图纸）、实际加工情况及尺寸、使用情况等。根据这些资料全面地从设计、加工、使用各方面进行具体的分析。
- ③ 对试样进行宏观（用肉眼或显微镜）及微观（用高倍的光学或电子显微镜）**断口分析**，以及必要的金相剖面分析，确定失效的发源点及失效的方式。
- ④ 对失效样品进行**性能测试、组织分析、化学分析**和**无损探伤**，检验材料的性能指标是否合格，组织是否正常，成分是否符合要求，有无内部或表面缺陷等。
- ⑤ **断裂力学分析**。在某些情况下需要进行断裂力学计算，以便于确定失效的原因及提出改进措施。
- ⑥ 综合各方面分析资料作出判断，确定失效的具体原因，提出改进措施，写出报告

»»» § 14.2 机械零件材料选择的一般原则

- ◆ 选材是否恰当，直接影响到产品的使用性能、使用寿命及制造成本
- ◆ 选材不当，严重的可能导致零件的完全失效。

判断零件选材是否合理的

能否满足必需的使用性能；

能否具有良好的工艺性能；

能否实现最低成本。

选材的任务就是求得三者之间的统一。因此选材时一般应遵循以下三个原则：

使用性能原则、

工艺性能原则、

经济性原则。

一、使用性能

零件选材应满足零件工作条件对材料使用性能的要求。材料在使用过程中的表现（使用性能），是选材时考虑的最主要根据。有的零件要求高强度，有的则要求高的耐磨性，或有美丽的外观。在选材时，首要任务是准确地**判断零件所要求的主要使用性能**。

使用性能的简单分类

分类	典型性能	用途举例
力学性能	强度、刚度、韧性	各机械装置、承载结构零件，如齿轮、轴、螺栓、连杆等
物理性能	密度	航天航空、运动机械
	导热性	热交换器、隔热保温装置
	导电性	电机电器、输变电设备
化学性能	耐热性	热工动力机械与加热设备、化工设备、海洋平台、船舶与户外结构
功能特性	电、磁、声、光、热等性能	功能器件，敏感元件如太阳能电池、压电器件等

机械零件的工作条件、主要失效方式及所要求的主要机械性能指标

零件名称	工作条件	主要失效方式	主要机械性能指标
重要螺栓	交变拉应力	过量塑性变形或由疲劳而造成破断	屈服强度, 疲劳强度
重要传动齿轮	交变弯曲应力, 交变接触压应力, 齿表面受带滑动的滚动摩擦和冲击载荷	齿的折断, 过度磨损或出现疲劳麻点	抗弯强度, 疲劳强度, 接触疲劳强度, HRC
曲轴、轴类	交变弯曲应力, 扭转应力, 冲击负载	疲劳破断, 过度磨损	屈服强度, 疲劳强度, HRC
弹簧	交变应力, 振动	弹力丧失或疲劳破断	弹性极限, 屈强比, 疲劳强度
滚动轴承	点或先接触下的交变压应力, 滚动摩擦	过度磨损破坏	抗压强度, 疲劳强度, HRC

二、工艺性能

零件选材应满足生产工艺对材料工艺性能的要求。材料的工艺性能包括以下内容

- (1) **铸造性能**: 包含流动性、收缩性、疏松及偏析倾向、吸气性、熔点高低等
- (2) **压力加工性能**: 指材料的塑性和变形抗力等
- (3) **焊接性能**: 包括焊接应力、变形及晶粒粗化倾向，焊缝脆性、裂纹、气孔及其他缺陷倾向等
- (4) **切削加工性能**: 切削抗力、零件表面光洁度、排除切屑难易程度及刀具磨损量等
- (5) **热处理性能**: 材料的热敏感性、氧化、脱碳倾向、淬透性、回火脆性、淬火变形和开裂倾向等

三、经济性

零件的选材应力求使零件生产的总成本最低。选材的经济性不单是指选用的材料本身价格应便宜，更重要的是采用所选材料来制造零件时，可使产品的**总成本降至最低**，同时所选材料应符合国家的资源情况和供应情况，等等。

- (1) **材料的价格**：不同材料的价格差异很大，而且在不断变动，因此设计人员应对材料的市场价格有所了解，以便于核算产品的制造成本。
- (2) **国家的资源**：选用材料时必须对此有所考虑，特别是对于大批量生产的零件所用的材料应该是来源丰富并符合我国的资源状况的。例如，我国缺钼，但钨却十分丰富，所以我们选用高速钢时就要尽量多用钨高速钢，而少用钼高速钢。另外，还要注意生产所用材料的能源消耗，尽量选用耗能低的材料。
- (3) **零件的总成本**：由于生产经济性的要求，选用材料时零件总成本应降至最低

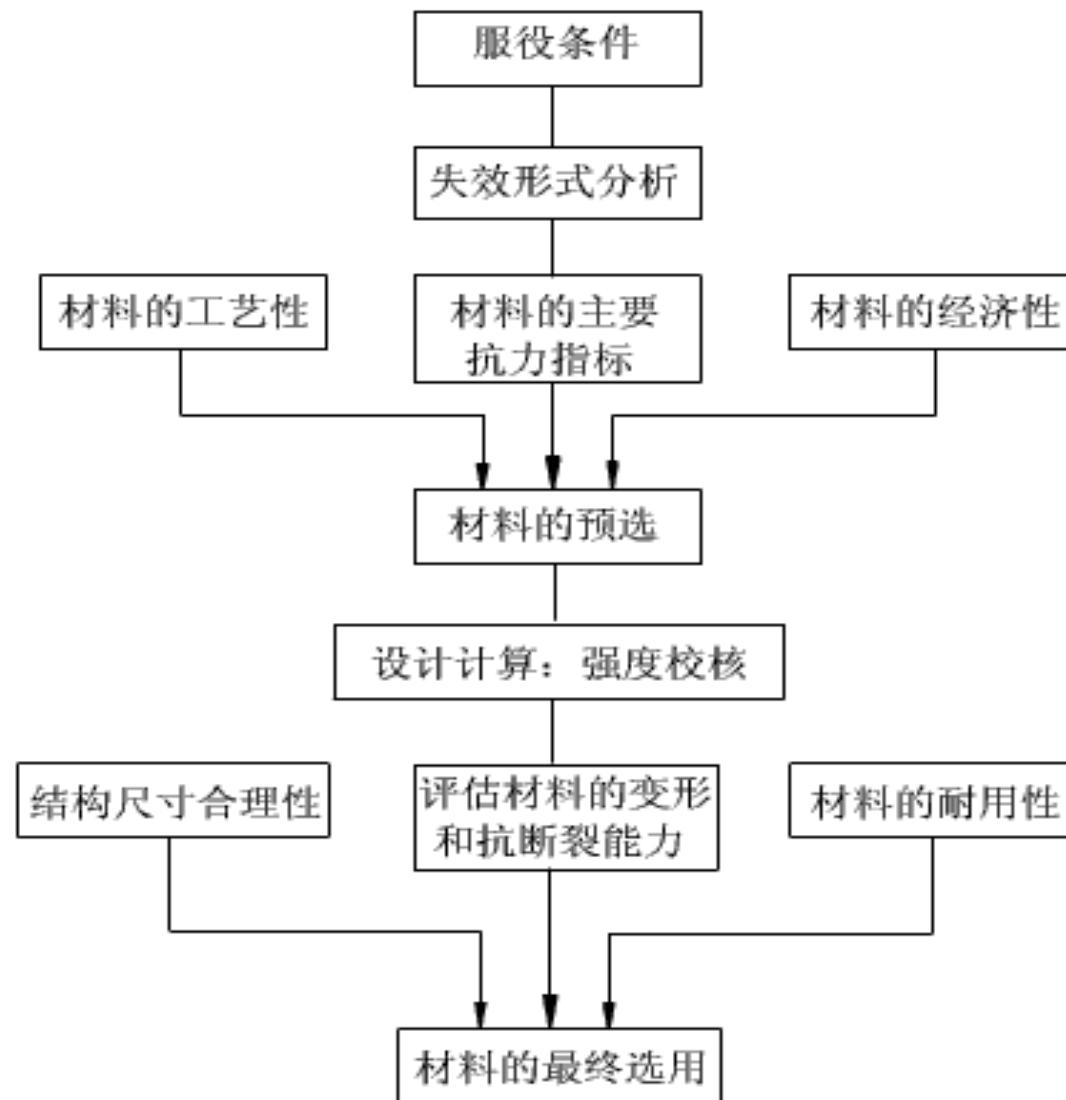
材料的相对价格

材 料	相 对 价 格	材 料	相 对 价 格
碳素结构钢	1	碳素工具钢	1.4~1.5
低合金结构钢	1.2~1.7	低合金工具钢	2.4~3.7
优质碳素结构钢	1.4~1.5	高合金工具钢	5.4~7.2
易切削钢	2	高速钢	13.5~15
合金结构钢	1.7~1.9	铬不锈钢	8
铬镍合金结构钢	3	铬镍不锈钢	20
滚动轴承钢	2.1~2.9	普通黄铜	13
弹簧钢	1.6~1.9	球墨铸铁	2.4~2.9

价值工程原理：价值=功能/成本

	Q235	A-不锈钢	F-不锈钢
价格/使用年限	5000元/年	40000元/10年	15000元/6年
年成本/材料损耗	5000	4000	2500
3000元/停产损失	8000	4300	3000
30000元/停产损失	35000	7000	7500

四、选择材料的基本过程



五、典型零件选材和工艺路线

1. 机床主轴

机床主轴是典型的受扭转—弯曲复合作用的轴件，它受的应力不大（中等载荷）承受的冲击载荷也不大，如果使用滑动轴承，轴颈处要求耐磨。因此大多采用45钢制造，并进行调质处理，轴颈处由表面淬火来强化。载荷较大时则用40Cr等低合金结构钢来制造。

对C620车床主轴的选材结果如下：

材料：45钢

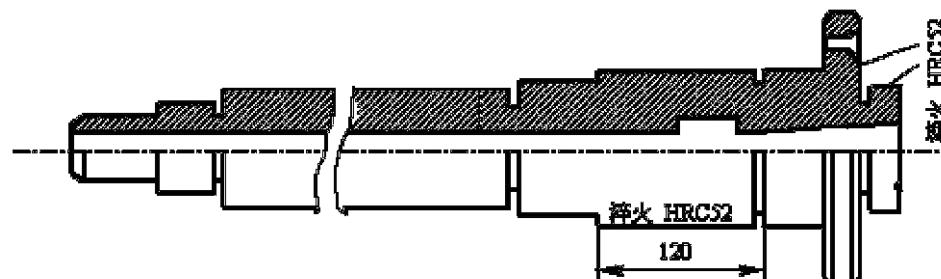
热处理：整体调质，轴颈及锥孔表面淬火

C620车床主轴的结构简图

性能要求：整体硬度HB220~HB240；轴颈及锥孔处硬度HRC52

工艺路线：锻造→正火→粗加工→调质→精加工→表面淬火及低温回火→磨削

该轴工作应力很低，冲击载荷不大，45钢处理后屈服极限可达400MPa以上，完全可以满足要求。现在有部分机床主轴已经可以用球墨铸铁制造



2. 汽车齿轮

汽车齿轮的工作条件远比机床齿轮恶劣，它们受力较大，**超载与受冲击**频繁，因此对材料要求更高。由于弯曲与接触应力都很大，用高频淬火强化表面不能保证要求，所以汽车的重要齿轮都用**渗碳、淬火**进行强化处理。因此这类齿轮一般都用**合金渗碳钢**20Cr或20CrMnTi等制造。为了进一步提高齿轮的耐用性，除了渗碳、淬火外，还可以采用喷丸处理等表面强化处理工艺。喷丸处理后，齿面硬度可提高HRC1 ~ 3单位，耐用性可提高7 ~ 11倍。

例：北京牌吉普车后桥圆锥主动齿轮

材料：**20CrMnTi钢**。

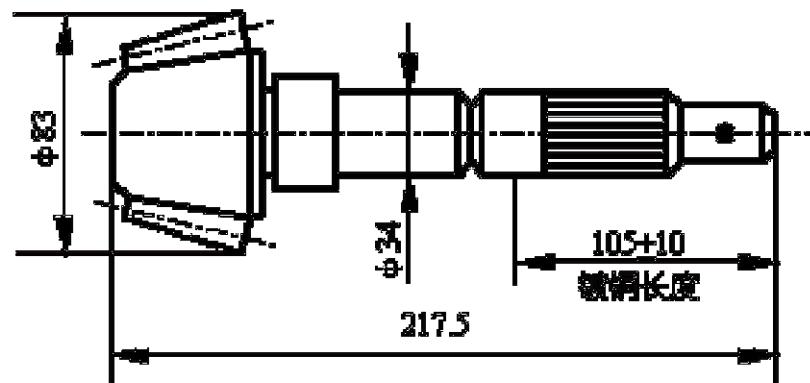
热处理：**渗碳、淬火、低温回火**，

渗碳层深度：**1.2mm ~ 1.6mm**。

性能要求：**齿面硬度HRC58 ~ HRC62**

心部硬度：**HRC33 ~ HRC48**

工艺路线：**下料→锻造→正火→切削加工→渗碳、淬火、低温回火→磨加工**





一、常见的毛坯种类

	铸造	锻压	冲压	焊接	型材
成形特点	液态成形	固态下塑性变形		借助金属原子的扩散和结合	固态下切割
对原材料工艺性能要求	流动性好，收缩率低	塑性好，变形抗力小		强度好，塑性好，液态下化学稳定性好	塑性好，变形抗力小
常用材料	铸铁，铸钢，有色金属	中碳钢和合金结构钢	低碳钢和有色金属薄板	低碳钢和低合金结构钢	碳钢，合金钢，有色金属
适宜的形状	形状不受限，尤其内腔形状可复杂	自由锻件简单，模锻件可复杂	可较复杂	形状不受限制	形状简单
毛胚的组织特征	晶粒粗大、疏松、缺陷多，杂质排列无方向性	晶粒细小、组织致密，杂质呈纤维方向排列	组织致密，可产生纤维组织	焊缝区为铸态组织，熔合区及过热区有粗大晶粒	取决于原始组织
毛胚的性能特点	铸铁件机械性能差，但减震及耐磨性能好；铸钢件机械性能较好	比相同成分的铸钢件好	强度、硬度提高，结构刚度好	接头的机械性能可达到或接近母材	比相同成分的铸钢件好
材料利用率	高	低	较高	较高	较高
生产周期	长	自由锻短，模锻长	长	短	短
生产成本	较低	较高	批量越大，成本越低	较高	—
主要适用范围和应用举例	铸铁件受力不大或承压为主的零件，减震、耐磨的零件；铸钢件承受重载而形状复杂的零件。如机架床身、箱体、曲轴等	用于承受重载、动载及复杂载荷的重要零件，如主轴、连杆、齿轮、锻模等	用于以薄板成形的各种零件。如汽车车身、油箱、机壳等各种薄金属件	主要用于制造各种金属结构件，部分用于制造零件毛胚，如锅炉、压力容器、厂房构架、船体等	制造形状简单的零件，如光轴、丝杠、销子等

二、毛坯选择的一般原则

毛坯类型选择同毛坯材料是密切相关的，所以选择毛坯的原则也是在满足使用要求的前提下，努力降低生产成本和提高生产效率。

- 1、**满足零件的使用要求**：机械装置中各零件的功能不同，其使用要求也会有很大的差异。零件的使用要求包括零件形状、尺寸、加工精度和表面粗糙度等的外部质量要求，以及具体工作条件下对零件成分、组织、性能的内部质量要求。
- 2、**降低生产成本**：一个零件的制造成本包括本身的材料费、消耗的燃料和动力费、工资、设备和设备的折旧费，以及其他辅助费用分摊到该零件的份额。进行毛坯选择时，可在保证零件使用性能的条件下，把可供选择的方案从经济上进行分析比较，从中选择出成本最低的最佳方案。
- 3、**结合具体生产条件**：选定毛坯制造方法时，首先应分析本企业的设备条件和技术水平，实施切实可行的生产方案。

三、典型机械零件毛坯的选择

常用的机械零件按形状和用途不同，可分为**轴杆类、盘套类、机架箱体**三大类。

1、轴杆类零件

轴向尺寸远远大于径向尺寸。用来支承传动零件和传递扭矩。

包括各种传动轴、机床主轴、丝杠、光杠、曲轴、偏心轴、凸轮轴、齿轮轴、连杆、摇臂、螺栓、销子等。

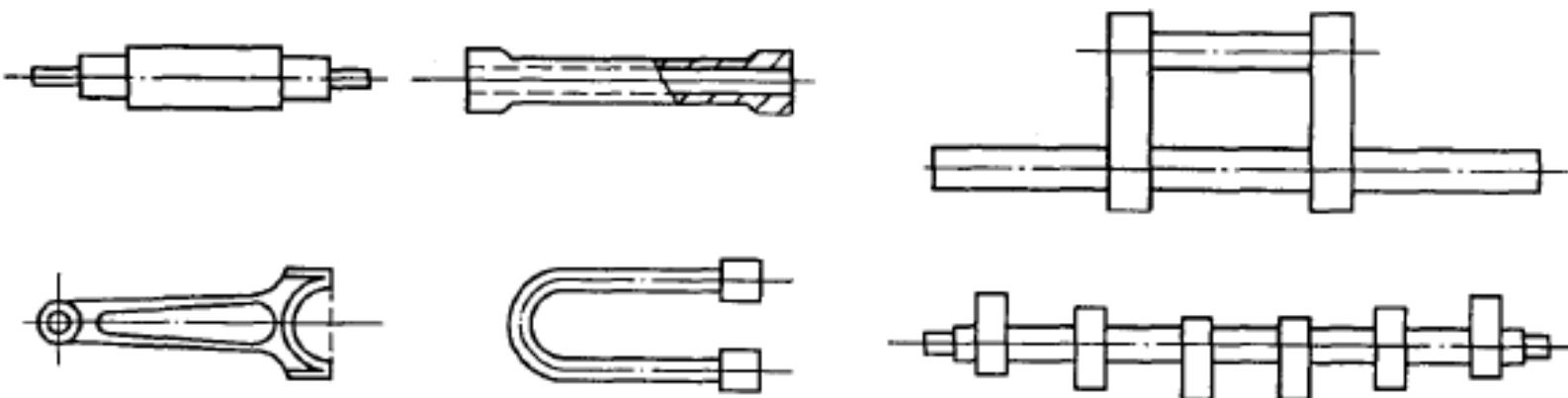


图 14.2 轴杆类零件

(1) 轴杆类零件的毛坯

- 轴类零件最常用的毛坯是**型材**和**锻件**，对于某些大型的、结构形状复杂的轴也可用铸件或焊接结构件。
- 对于光滑的或有阶梯，但直径相差不大的一般轴，常用**型材**（即热轧或冷拉圆钢）作为毛坯。
- 对于直径相差较大的阶梯轴或要承受冲击载荷和交变应力的重要轴，均采用**锻件**作为毛坯。当生产批量较小时，应采用自由锻件；当生产批量较大时，应采用模锻件。
- 对于结构形状复杂的大型轴类零件，其毛坯可采用**砂型铸造件**、**焊接结构件**或**铸一焊结构**毛坯。

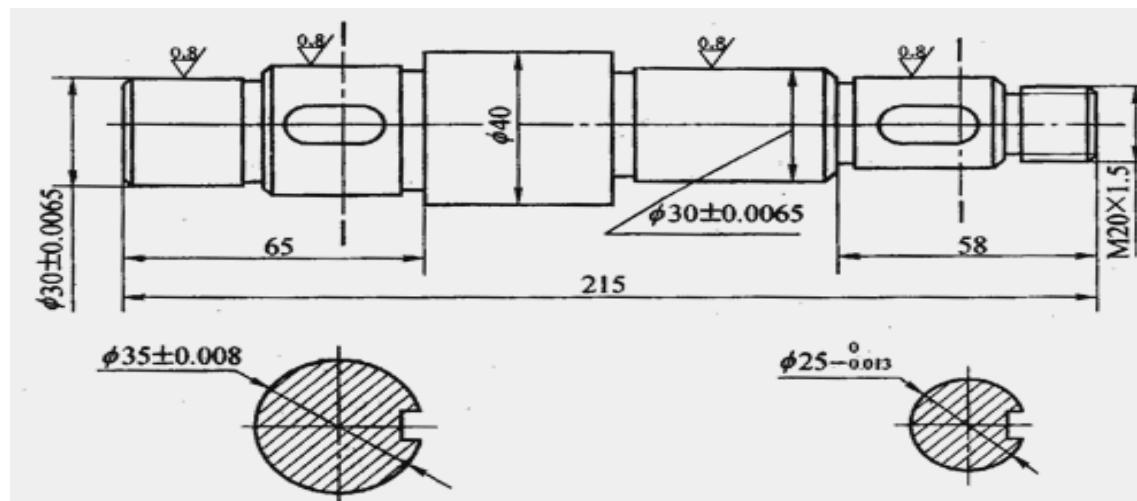
(2) 轴杆类零件的材料

常用轴类材料有：

- 优质**碳素结构钢**，如35钢、40钢、45钢、65Mn钢等，其中用的最多的是45钢；
- **合金钢**，如20Cr、40Cr、40CrNi、20CrMnTi、40MnB等；
- **碳素结构钢**，如Q235、Q275等。
- 除了上述碳钢和合金钢外，近年来越来越多地采用球墨铸铁和**高强度灰铸铁**作为轴的材料，尤其是曲轴的材料。

(3) 应用举例

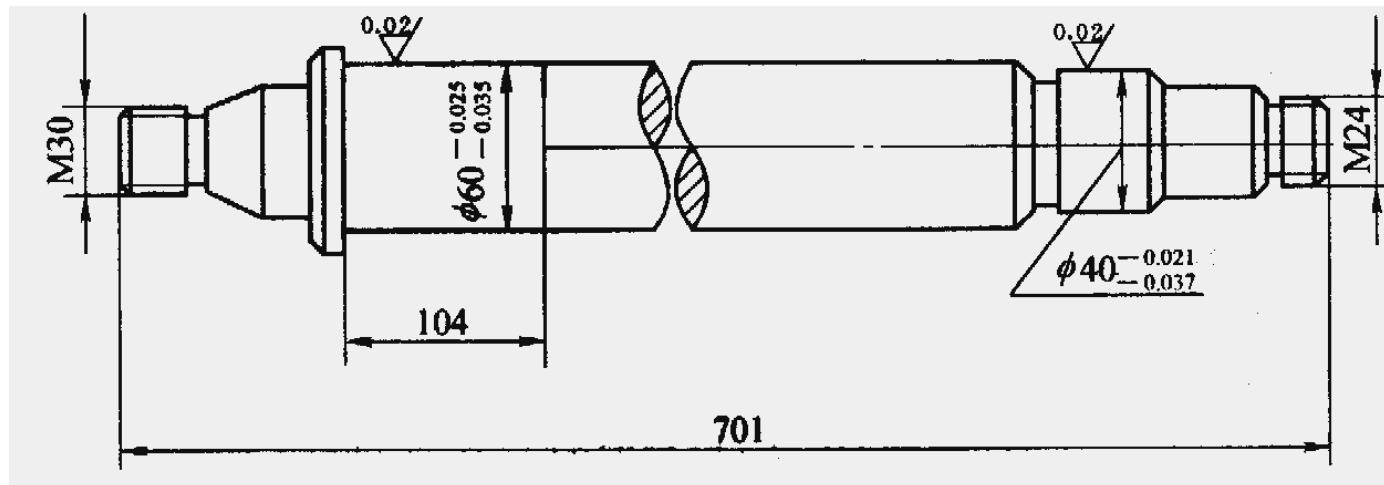
1) 减速器传动轴, 工作载荷基本平衡, 材料45钢, 小批量生产。由于该轴工作时不承受冲击载荷, 工作性质一般, 且各阶梯轴径相差不大, 因此, 可选用热轧圆钢作为毛坯。下料尺寸为Φ45mm×220mm。



热轧棒料下料—粗加工—调质处理—半精加工—磨削

2) 磨床砂轮主轴，生产批量中等。

砂轮主轴主要用于传递动力。该零件**精度要求高**，工作中将承受**弯曲、扭转、冲击**等载荷，要求具有**较高的强度**。选择**65Mn**，采用**模锻件**。



砂轮主轴的加工路线为：

下料 - 锻造 - 退火 - 粗加工 - 调质处理 - 精加工 - 表面淬火 -
粗磨 - 低温人工时效 - 精磨

退火的目的：消除锻造应力及组织不均匀性，降低硬度，改善加工性。

调质处理：提高主轴的综合性能，以满足心部的强度要求，
同时在表面淬火时能获得均匀的硬化层。

表面淬火：为了使轴颈和外圆锥部分获得高硬度，提高耐磨性。

人工时效：进一步稳定淬硬层组织和消除磨削应力，以减少主轴的变形

2、盘套类零件

零件长度一般小于直径或两个方向尺寸相差不大。

有各种齿轮、带轮、飞轮、模具、联轴器、法兰盘、套环、轴承环和手轮等。

盘类零件由于其用途不同，所用的材料也不相同，毛坯生产方法也较多。

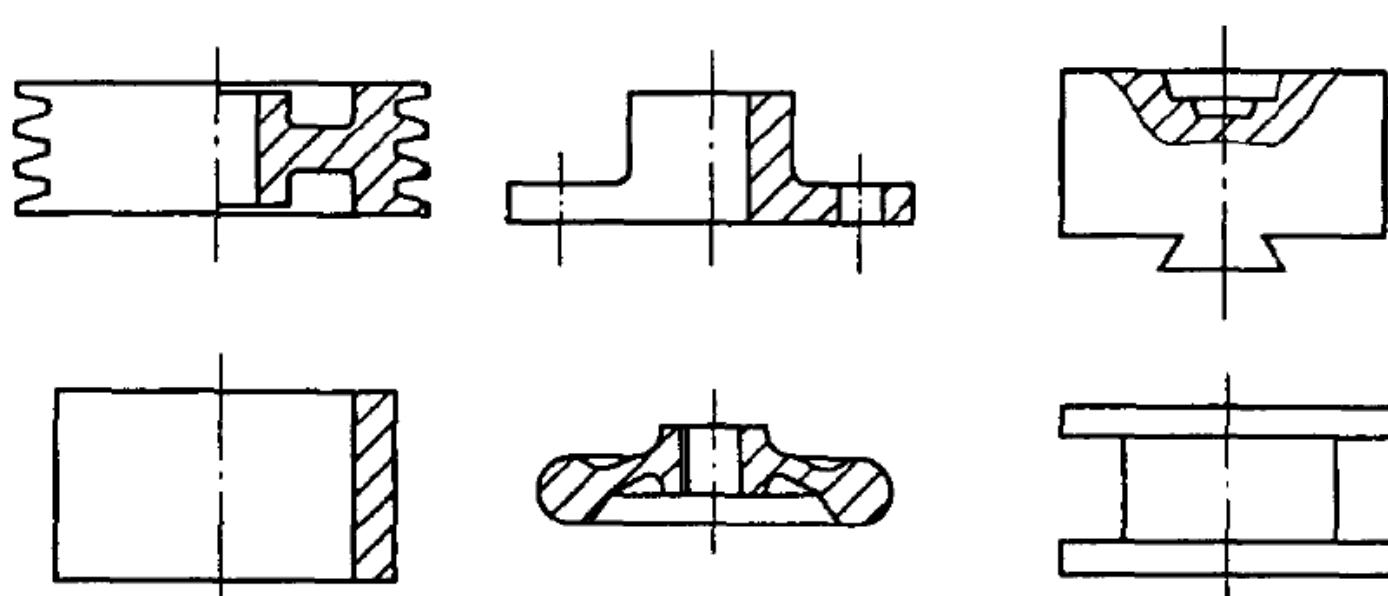


图 14.4 盘套类零件

(1) 带轮的毛坯选择

- 带轮是通过中间挠性件（各种带）来传递运动和动力的，一般载荷比较平稳。
- 对于中小带轮多采用**HT150**制造，故其毛坯一般采用**砂型铸造**，生产批量较小时用手工造型；生产批量较大时可采用机器造型；
- 对于结构尺寸很大的带轮，为减轻重量可采用**钢板焊接毛坯**。

(2) 链轮的毛坯选择

- 链轮是通过链条作为中间挠性件来传递动力和运动的，其工作过程中的载荷有一定的冲击，且链齿的磨损较快。链轮的材料大多使用钢材，最常用的毛坯为锻件。
- **单件**小批生产时，采用**自由锻造**；
- 生产**批量**较大时使用**模锻**；
- 对于新产品试制或修配件，亦可使用**型材**；
- 对于齿数大于50的从动链轮也可采用强度**高于HT150的铸铁**，其毛坯可采用**砂型铸造**，造型方法视生产批量决定。

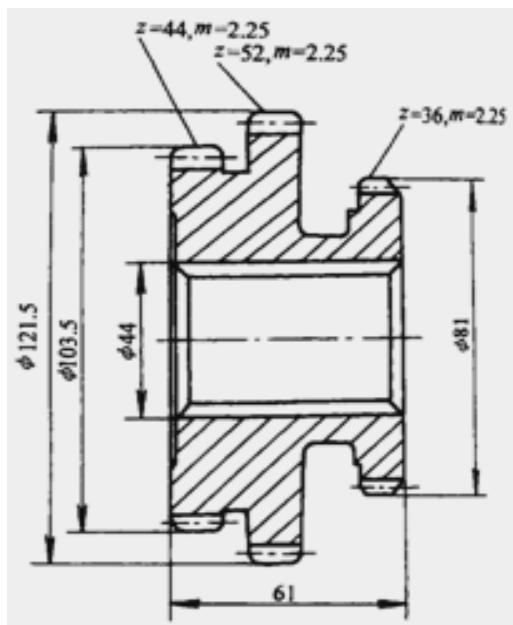
(3) 圆柱齿轮的毛坯选择

- 齿轮的毛坯选择取决于齿轮的**选材、结构形状、尺寸大小、使用条件及生产批量**等因素。
- 对于钢制齿轮，如果尺寸较小且性能要求不高，可直接采用**热轧棒料**，除此之外，一般都采用**锻造毛坯**。
- 生产批量较小或尺寸较大的齿轮采用**自由锻造**；
- 生产批量较大的中小尺寸的齿轮采用**模锻**。
- 对于直径比较大，结构比较复杂的不便于锻造的齿轮，采用铸钢毛坯或**焊接组合毛坯**。

(4) 应用举例

1) 机床齿轮的选材

机床齿轮载荷不大，运动平稳，工作条件好，故对齿轮的耐磨性及冲击韧度要求不高，一般可选用中碳钢制造。为了提高淬透性也可选用中碳合金钢，经高频淬火，基本上能满足机床工作条件。



图为C620 - 1车床主轴箱中Ⅲ轴上的三联滑动齿轮简图，该齿轮承受载荷不大，运动也较平稳，所以可选用中碳钢来制造。但考虑到整个齿轮较厚，采用中碳钢难以淬透，于是选用中碳合金钢更好，如40Cr并经高频表面淬火。

机床齿轮的加工路线为：

下料 - 锻造 - 正火 - 粗加工 - 调质 - 半精加工 - 齿轮高频淬火及回火 - 精磨

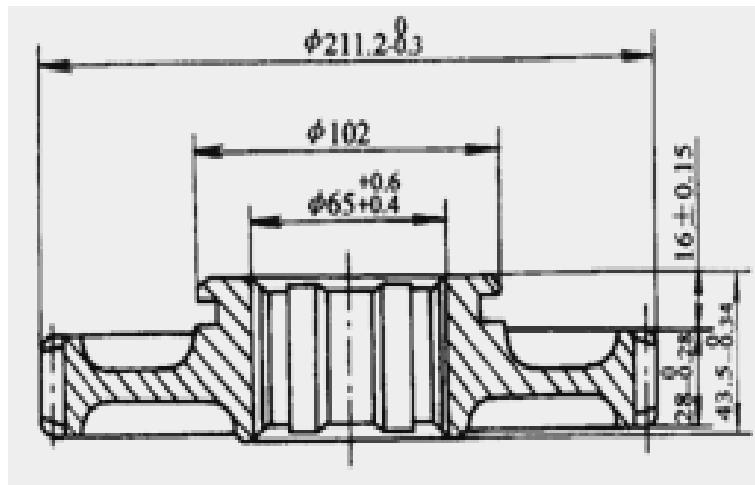
正火处理对锻造齿轮毛坯是必须的热处理工序，它可消除锻造压力，均匀组织，改善切削加工性。对于一般齿轮，正火也可作为高频淬火前的最后热处理工序。

调质处理可以使齿轮获得较高的综合力学性能，齿轮可承受较大的弯曲应力和冲击力，并可减少淬火变形。

高频淬火及低温回火提高了齿轮表面硬度和耐磨性，并且使齿轮表面产生压应力，提高了抗疲劳破坏的能力。低温回火可消除淬火应力，对防止产生磨削裂纹和提高抗冲击能力是有利的。

2) 载重汽车的变速齿轮的选材

汽车变速箱中的齿轮主要用来调节发动机曲轴和主轴凸轮的转速比，以改变汽车运行速度，其工作较为繁重，因此在**疲劳极限、耐磨性**以及**抗冲击作用**等性能方面均比机床齿轮要求高。因此，变速齿轮的材料大多选用**合金渗碳钢**。



图为解放牌汽车变速齿轮，采用**20CrMnTi钢**，有较高的力学性能，经渗碳淬火处理及低温回火后**表面硬度为 $58 \sim 62\text{HRC}$** ，**心部硬度为 $30 \sim 45\text{HRC}$** ，这种钢还具有良好的工艺性能，这对大量生产来说极为重要。**20CrMnTi钢**经锻造及正火后，其切削加工性尚可，同时热处理工艺性也较好，如良好的淬透性、过热倾向小、渗碳速度快及淬火变形小等。



载重汽车的变速齿轮的加工路线为：

下料 - 模锻 - 正火 - 机械粗、半精加工(内孔及端面留磨量) -
渗碳(孔防渗)淬火 - 低温回火 - 喷丸 - 校正花键孔 - 珩(或磨)齿

正火：为了均匀和细化组织，**消除锻造应力**，获得较好的切削加工性。

渗碳、淬火及低温回火：为了使齿面具有**高硬度及耐磨性**，而心部可得到低碳马氏体组织，有高的强度和足够的韧性。

喷丸处理：一种强化手段，可使零件渗碳表层的**压应力**进一步**增大**，有利于**提高疲劳强度**，同时也可清除氧化皮。

3. 箱体机架类零件的毛坯选择

箱体机架类零件是机器的基础件，它的加工质量将对机器的精度、性能和使用寿命产生直接影响。

这类零件包括**机身**、**齿轮箱**、**阀体**、**泵体**、**轴承座**等。由于箱体类零件的结构形状一般都比较复杂，且内部呈腔形，为满足减振和耐磨等方面的要求，其材料一般都采用铸铁。为达到结构形状方面的要求，最常见的毛坯是**砂型铸造**的**铸件**。在**单件小批生产**、新产品试制或结构尺寸很大时，也可采用**钢板焊接毛坯**。

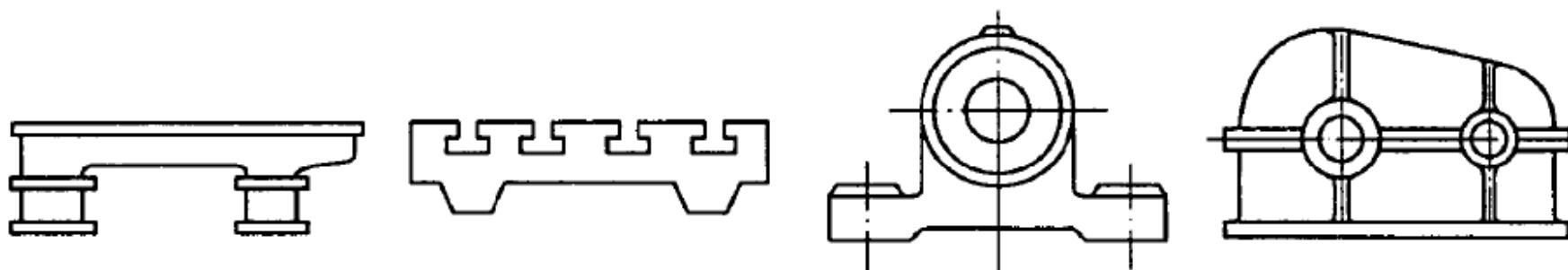


图 14.5 机架、箱体类零件

一、毛坯的质量检验

毛坯的质量检验可分为**破坏性检验**和**非破坏性检验**两类。

破坏性检验包括**力学性能测试**、**化学成分分析**和**金相检验**。破坏性检验必须从被检件上切取试样，或破坏整体被检件进行试验，它主要用于新材料、新工艺、新产品试制和模拟试验。通常可利用特制样件进行破坏性试验，这样可不破坏被检件。

非破坏性检验，它**包括外观检验，各种无损控伤和致密性试验**。该检验直接对被检件检验而不破坏其结构整体，检验合格后直接成为成品或转换到下一工序。

下面介绍几种常用的检验方法：



»»» § 14.4 毛坯质量检验

1. **外观检验**: 毛坯件的外观以肉眼观察为主, 或辅以简单的工具(低倍放大镜、直尺等)。许多毛坯件缺陷都可通过外观检验, 但重要零件仅用外观检验还必须进行内在质量的检验。
2. **无损探伤检验**: 包括超声波检验、射线检验和磁粉检验。
3. **致密性检验**: 检验不受压力或受压很低的容器、管道等。它包括气密性试验和水压试验。
4. **化学成分分析**: 鉴定材料的成分是否符合规范, 并估价材料的优劣。常用方法是光谱析。
5. **力学性能的测试**: 力学性能对毛坯件检查最常用的是硬度试验, 因它能敏感反映出材料成分、组织、性能的关系, 并可间接反映其它力学性能指标; 零件经硬度试验后不受损伤。
6. **金相组织试验**: 通过对毛坯组织检验, 可判定构件所用材料和处理工艺是否符合要求。金相分析能够提供有关金属材料的显微组织、晶粒度、非金属夹杂物等信息, 主要用于对原材料进厂检验和监测各种热处理质量缺陷。

二、毛坯加工中常见缺陷及检验

1、铸件中常见缺陷

- (1) 缩孔，切片宏观断口检验/射线、超声波探测
- (2) 疏松，表面疏松可肉眼观测，内部疏松用射线/超声波探伤，显微疏松用金相检验
- (3) 气孔，无损探伤、切片宏观酸蚀
- (4) 成分偏析，金相法、化学分析法

2、锻件中常见缺陷

- (1) 折叠，直观检查、金相检验法
- (2) 锻造裂纹，表面裂纹（酸蚀法/金相法），内部裂纹（金相法）
- (3) 过热和过烧，金相法/断口法
- (4) 冷成形中常出现的微细裂纹，外观检测/金相法检测

3、焊接件常见缺陷

- (1) 气孔，表面可直接观察，内部用射线探伤/超声波探伤
- (2) 未焊透，直接观察、射线、超声波探伤、金相法检验
- (3) 热裂纹，近表面肉眼检查。远表面用渗透探伤、磁粉探伤及断口检查
- (4) 冷裂纹，内部裂纹用射线探伤/超声波探伤，显微裂纹可用金相法



感谢同学们的聆听！



河北工业大学
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

勤慎公忠