

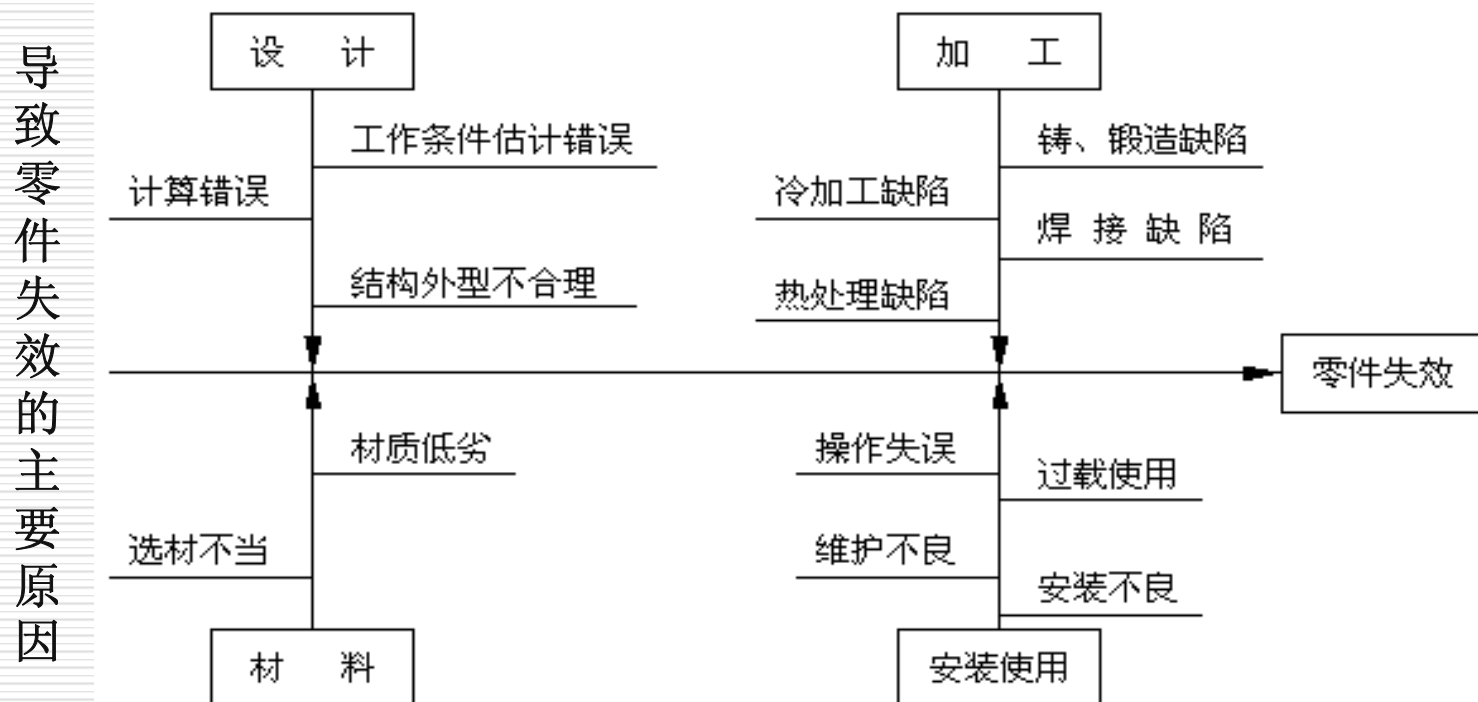
第十一章 机械零件选材及加工路线分析

- ✦ 第一节 机械零件的失效形式
- ✦ 第二节 选材的基本原则
- ✦ 第三节 热处理方案的选择及热处理技术的标注
- ✦ 第四节 预防和控制热处理变形的方法及措施
- ✦ 第五节 典型零件选材与工艺分析

第一节 机械零件的失效形式

零件失效的情况:

- ① 完全破坏不能使用;
- ② 虽然能工作但是不能满意地起到预定的作用;
- ③ 损伤不严重但继续工作不安全。

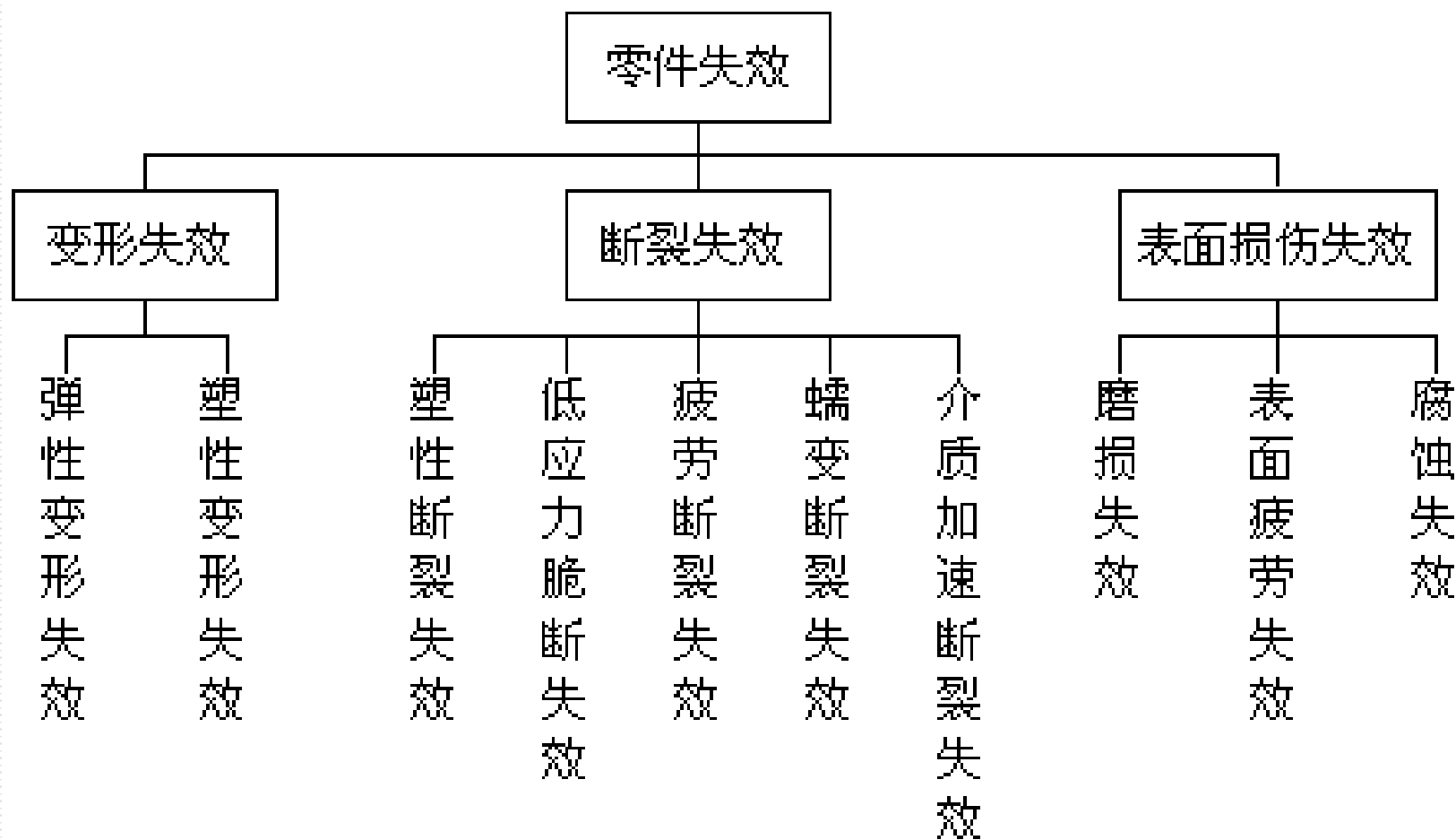


第一节 机械零件的失效形式



第一节 机械零件的失效形式

失效形式:



第一节 机械零件的失效形式

表11-1 几种零件（工具）工作条件、失效形式及要求的力学性能

零件 （工具）	工作条件			常见失效形式	要求的主要力学性能
	应力种类	载荷性质	其他		
普通 紧固 螺栓	拉、切应力	静		过量变形、 断裂	屈服强度及抗剪强度
传动 轴	弯、扭应力	循环、冲击	轴颈处 摩擦、 振动	疲劳破坏、过 量变形、轴颈 处磨损、咬蚀	综合力学性能
传动 齿轮	压、弯应力	循环、冲击	强烈摩 擦、振 动	磨损、麻点剥 落、齿折断	表面硬度及弯曲疲劳强 度、接触疲劳抗力、心 部屈服强度、韧性
弹簧	扭应力（螺 旋簧）、弯 应力（板簧）	循环、冲击	振动	弹性丧失、 疲劳断裂	弹性极限、曲强比、疲 劳强度



第一节 机械零件的失效形式

续表11-1

油泵柱塞副	压应力	循环、冲击	摩擦、油的腐蚀	磨损	硬度、抗压强度
冷作模具	复杂应力	循环、冲击	强烈摩擦	磨损、脆断	硬度、足够的强度、韧性
压铸模	复杂应力	循环、冲击	高温、摩擦、金属液腐蚀	热疲劳、磨损、脆断	高温强度、热疲劳抗力、韧性与红硬性
滚动轴承	压应力	循环、冲击	强烈摩擦	磨损、麻点剥落、疲劳断裂	接触疲劳抗力、硬度、耐磨性
曲轴	弯、扭应力	循环、冲击	轴颈摩擦	磨损、咬蚀、疲劳断裂、脆断	疲劳强度、硬度、冲击疲劳抗力、综合力学性能
连杆	拉、切应力	循环、冲击		脆断	抗压疲劳强度、冲击疲劳抗力



第一节 机械零件的失效形式

一、过量变形

(1)过量弹性变形

除了弹簧以外，大多数零件都必须限制，要求有足够的刚度。

如：弹性变形大的镗床镗杠无法保证精度。

(2)过量塑性变形

是零件失效的重要形式，轻则使机器的工作情况变坏，重则使它不能继续运行，甚至破坏。

如：齿轮的塑性变形会使啮合不良，甚至卡死、断齿。



第一节 机械零件的失效形式

二、断裂

是金属材料最严重的失效形式，特别是在没有明显塑性变形的情况下突然发生的脆性断裂，往往会造成灾难性事故。

防止脆断的方法：准确分析零件所受应力及应力集中的情况，选择满足强度要求并具有一定塑性和韧性的材料。

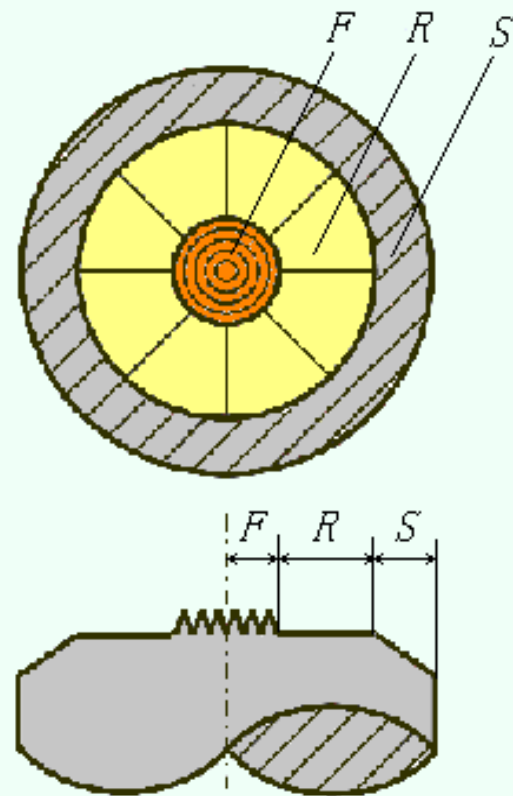
断口分析：是断裂失效分析的核心，同时又是断裂失效分析的向导，指引断裂失效分析少走弯路。

例：右图为金属材料的室温拉伸或冲击试样的断口宏观观察，可以看到其断口分为：

F - 纤维状区

R - 放射状区

S - 剪切唇区



第一节 机械零件的失效形式

不同断裂的实物比较:



塑性断裂



脆性断裂



疲劳断裂



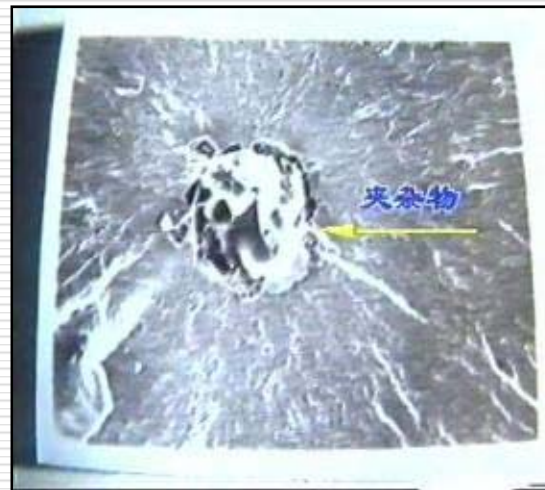
第一节 机械零件的失效形式

不同断裂的显微特征：

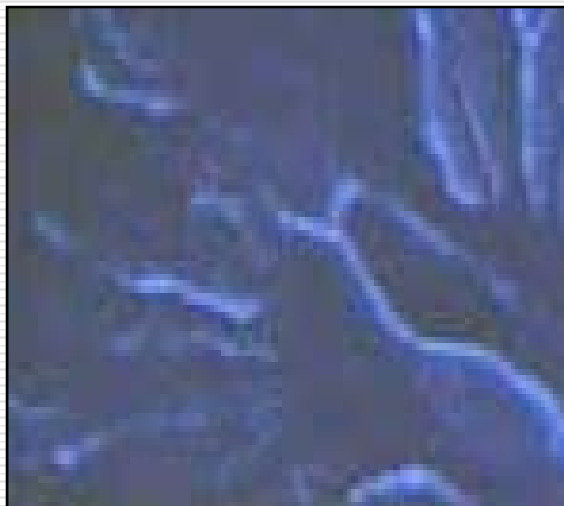
塑性断裂断口
(韧窝)



疲劳断裂断口



脆性断裂
a. 解理花样

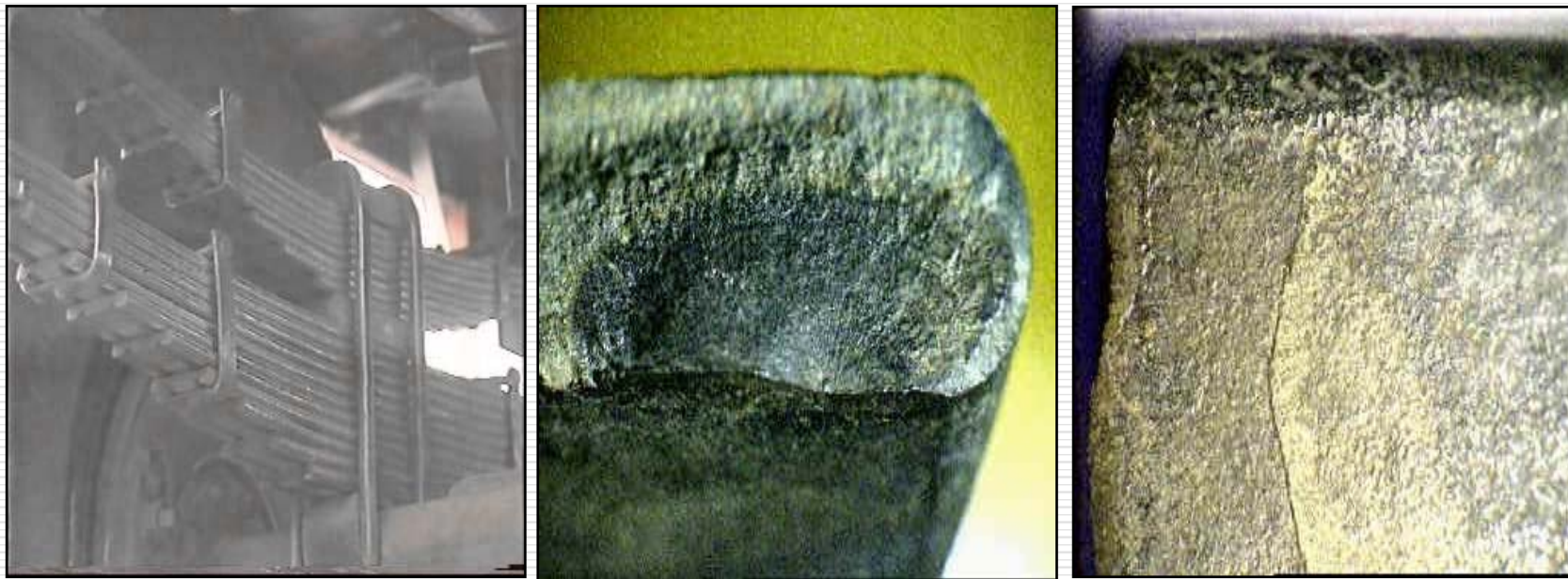


b. 冰糖花样



第一节 机械零件的失效形式

实例：汽车板簧断裂失效



板簧表面存在严重的热加工缺陷-折叠，疲劳源在折叠造成的表面裂纹处形成。根据板簧的安装条件和工作状况分析，板簧断裂位置处于应力集中处。裂纹在应力作用下扩展，最后造成板簧疲劳断裂。

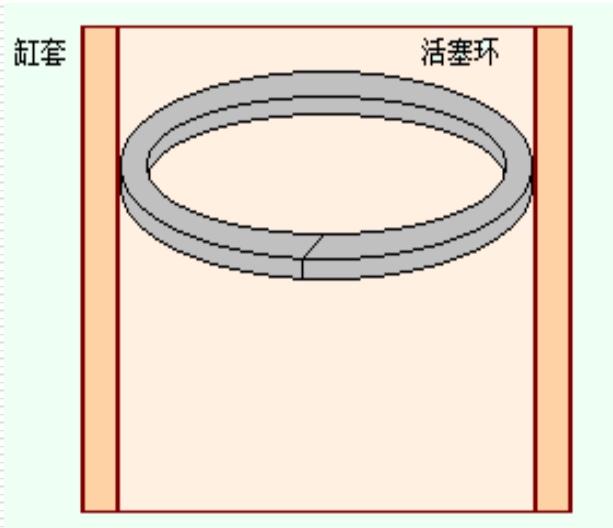


第一节 机械零件的失效形式

三、表面损伤

据资料介绍，70%的机器是由过量磨损而失效的。磨损不仅消耗材料，损坏机器，而且耗费大量能源。

相互接触的一对金属表面，相对运动时金属表面不断发生损耗或产生塑性变形，使金属表面状态和尺寸改变的现象称为磨损。



活塞环与缸套之间的摩擦

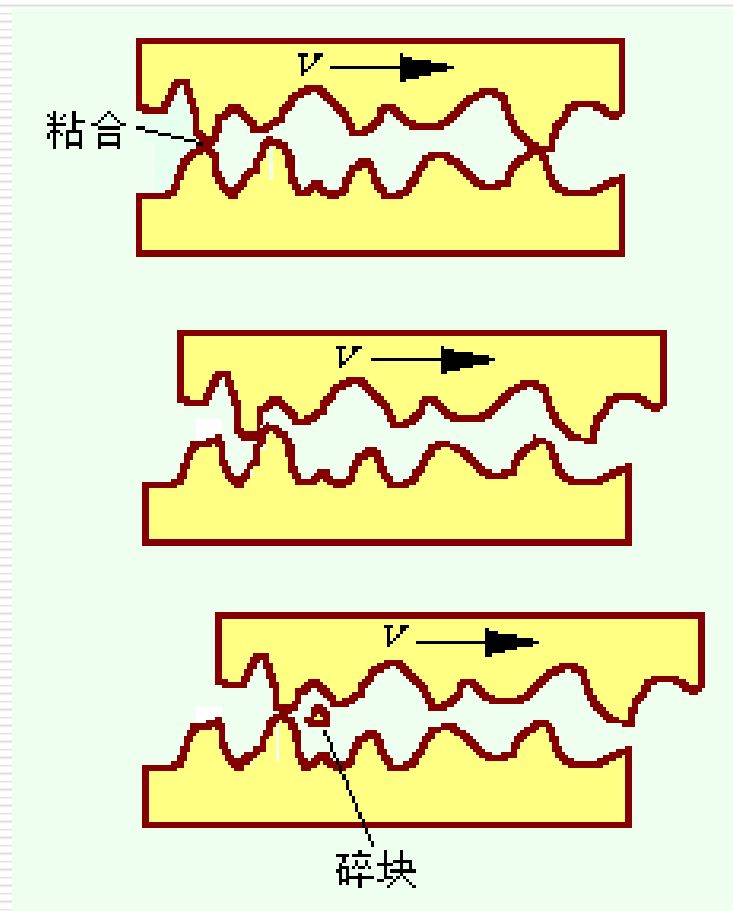


第一节 机械零件的失效形式

1. 磨损失效

(1) 粘着磨损

两个金属表面的微凸部分在局部高压下产生局部粘结(固相粘着), 使材料从一个表面转移到另一表面或撕下作为磨料留在两个表面之间, 这一现象称为粘着磨损。

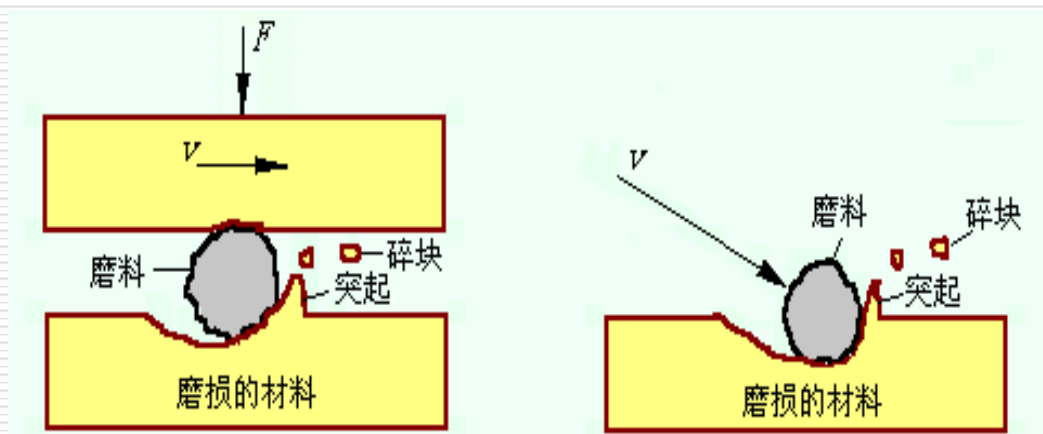


粘着磨损示意图

第一节 机械零件的失效形式

(2) 磨料磨损

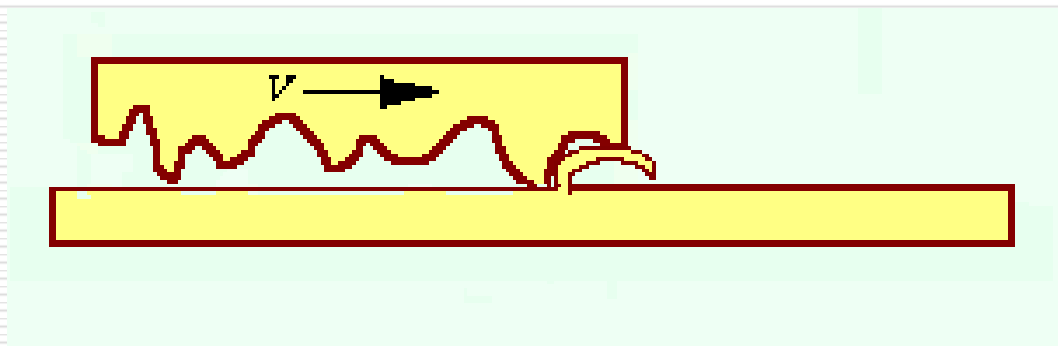
配合表面之间在相对运动过程中，因外来硬颗粒或表面微突体的作用造成表面损伤（被犁削形成沟槽）的磨损称为磨粒（料）磨损。



磨粒磨损示意图

(3) 犁削磨损

硬材料表面的微凸点切削较软材料的表面，在较软材料的表面形成“犁沟”。

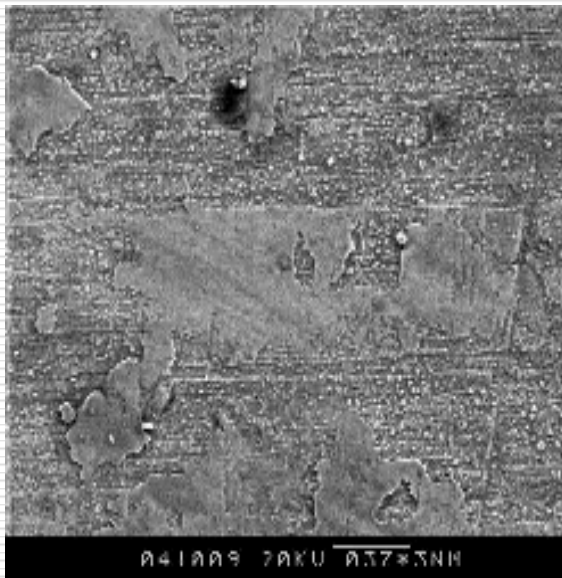


犁削磨损示意图

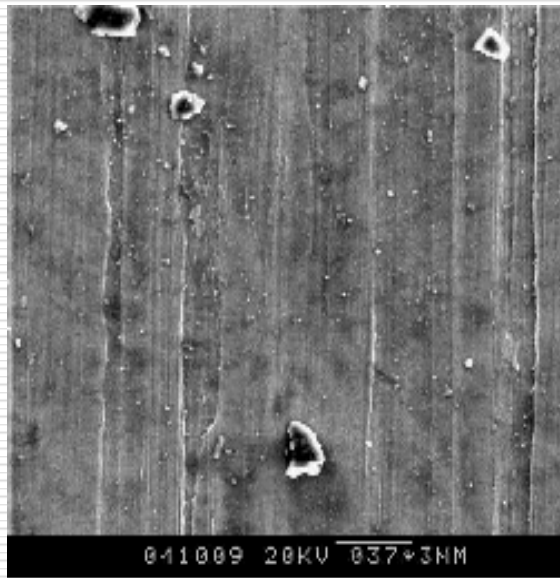


第一节 机械零件的失效形式

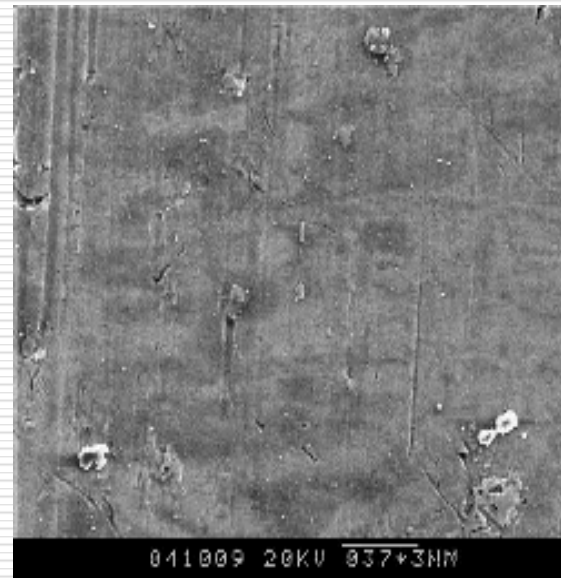
不同磨损的磨痕:



粘着磨损磨痕



磨粒磨损磨痕



犁削磨损磨痕

(4) 表面疲劳磨损

两个接触面作滚动或滚动滑动复合磨擦时，在交变接触压应力作用下，使材料表面疲劳而产生材料损失的现象称为表面疲劳磨损。

第一节 机械零件的失效形式

2. 腐蚀失效

腐蚀是金属暴露于活性介质环境中发生的一种表面损耗，它是金属与环境介质之间发生的化学和电化学反应的结果。

(1) 均匀腐蚀

均匀腐蚀是在整个金属的表面均匀地发生。

腐蚀均匀性的前提：被腐蚀的金属表面具有均匀的化学成分和显微组织，腐蚀环境包围金属表面是均匀而且不受限制。

均匀腐蚀可在大气、液体以及土壤里产生。如质量保证的钢材在大气中所产生的锈蚀。

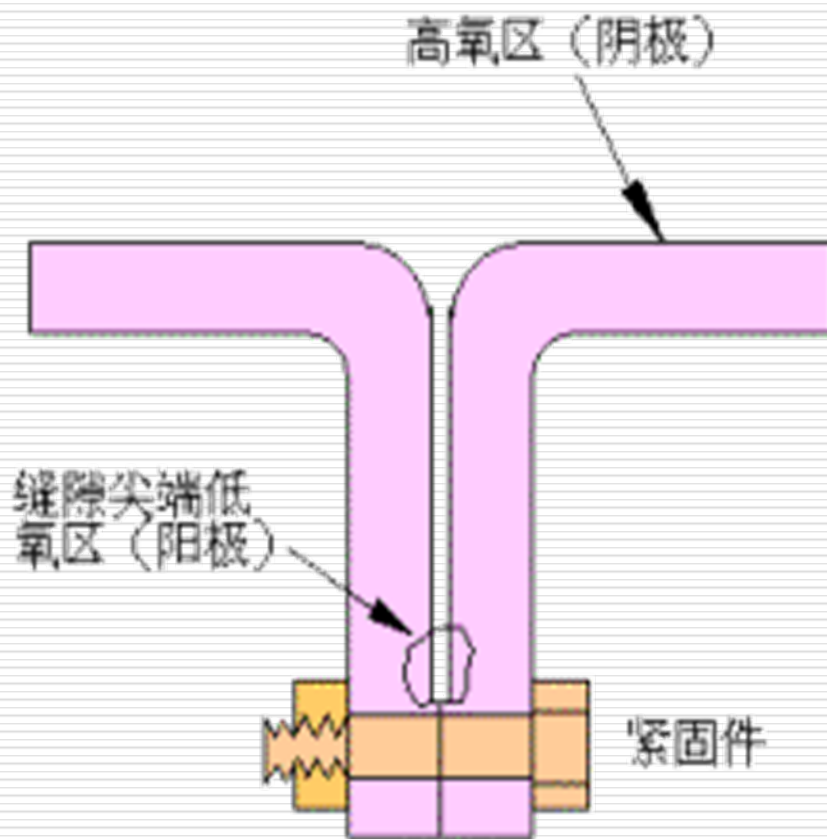


第一节 机械零件的失效形式

(2) 点腐蚀

腐蚀集中于局部，呈尖锐小孔，进而向深度扩成孔穴甚至穿透(孔蚀)。

金属表面受破坏处和未受破坏处形成“局部电池”，其中受破坏处是阳极，未受破坏处是阴极，腐蚀电流由阳极流向周围的阴极，阳极处很快被腐蚀成小孔。



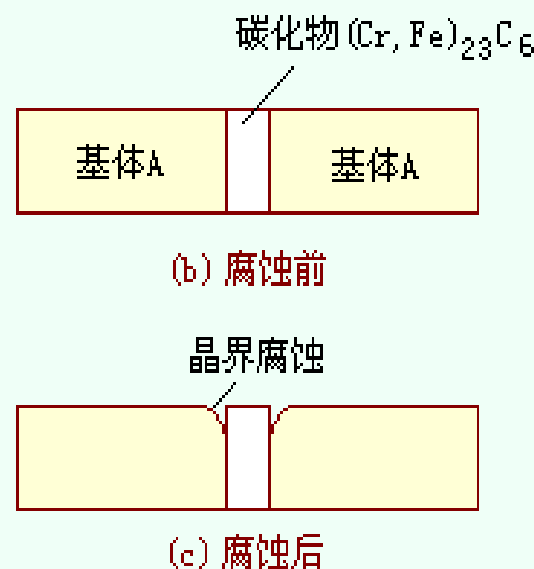
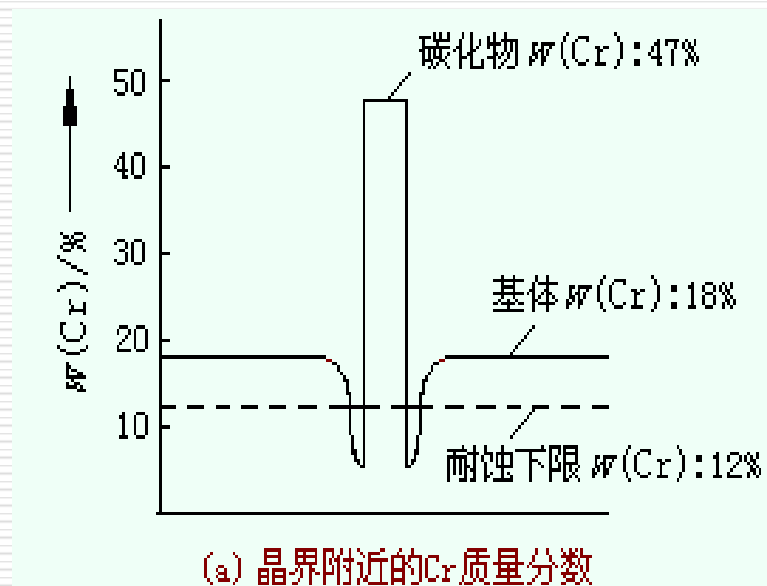
点腐蚀示意图



第一节 机械零件的失效形式

(3) 晶间腐蚀

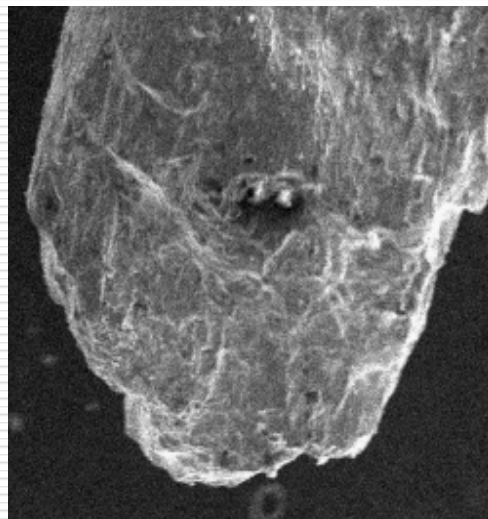
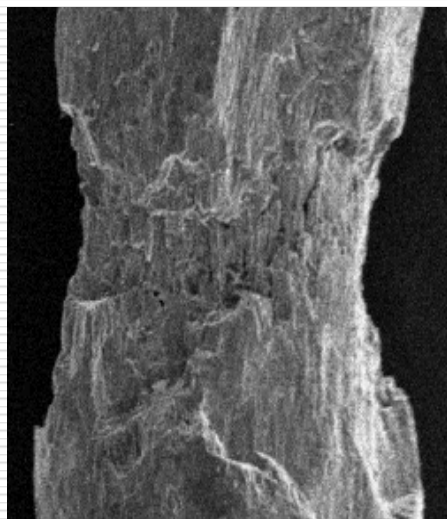
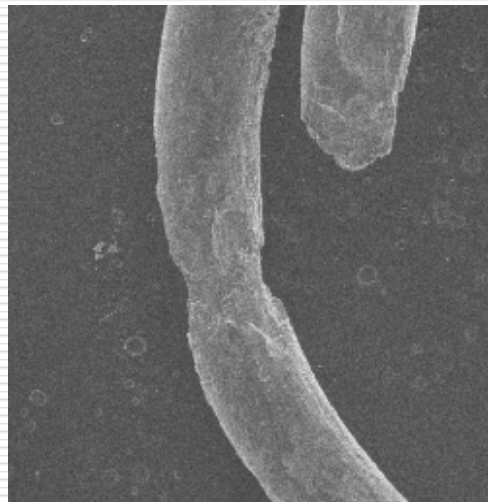
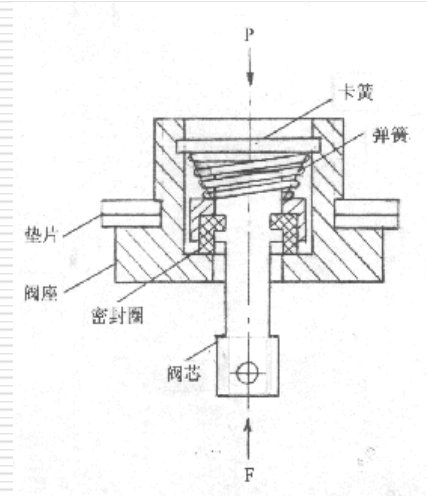
腐蚀发生于晶粒边界或其近旁，其主要原因是晶界处化学成分不均匀。



晶间腐蚀示意图

第一节 机械零件的失效形式

实例：汽车储气罐放水阀弹簧腐蚀失效



弹簧材料为碳素弹簧钢，长期在含有氧、硫的水油混和物中浸泡，受到严重腐蚀，表面腐蚀产物从材料表面剥落，减少了弹簧丝的截面，同时弹簧因腐蚀而变脆。在阀芯受到向上的作用力 F 时，弹簧破断。当作用力去除后，阀芯在重力和气罐内气压的作用下，阀芯与阀座间尚能起到一定的密封作用。但如果车辆受到强烈震动，阀芯会跳离阀座，破断的弹簧丝会卡入阀芯、阀座的密封面处，使气体泄漏，造成气压降低，刹车失灵。



第二节 选材的基本原则

- **选材的基本原则** ---- 在满足力学性能的前提下,很好地考虑材料的工艺性和经济性.

1. 根据零件工作条件、失效形式提出合理的抗力指标。

工作条件	失效形式	抗力指标
应力状态：拉、压、弯、扭 载荷性质：静、冲击、交变 工作温度：常、高、低温 工作介质：空气、液、腐蚀	过量变形 断裂 表面状态、尺寸改变	σ_b , HB, σ_{-1} , ψ δ , a_k , σ_s / σ_b , K_{1c} 等

2. 在满足力学性能前提下，尽量照顾工艺性（铸、锻、焊、切削加工、热处理），特别在批量生产时。

第二节 选材的基本原则

3. 充分考虑经济性:

- (1) 尽量用本地可购材料；材料品种、规格尽量集中。
- (2) 考虑初始成本与附加成本（售后服务）的关系
 - 1) 初始成本 \uparrow ，质量 \uparrow ，附加成本 \downarrow ；
 - 2) 初始成本 \downarrow ，质量 \downarrow ，附加成本 \uparrow 。

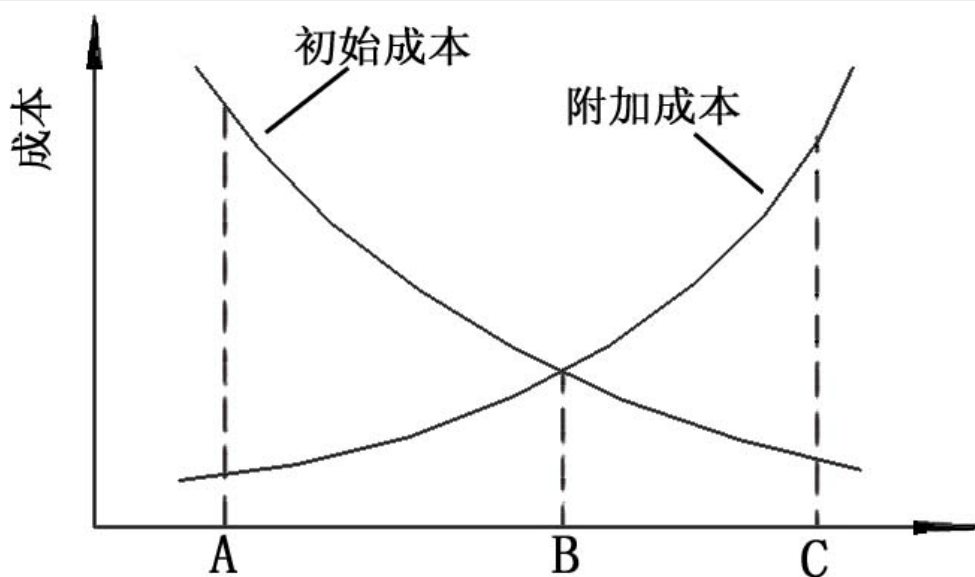


图 11-1 材料的初始成本和附加成本

第二节 选材的基本原则

● 材料的工艺性能

➤ 铸造性能：主要指流动性、收缩性、偏析倾向、吸气性等。

接近共晶成分的合金铸造性能最好。

➤ 锻造性能：材料的塑性高,变形抗力小,则锻造性能好。

➤ 焊接性能：主要指焊缝区形成裂纹及气孔的能力。

含碳量和合金元素含量 \uparrow , 焊接性能 \downarrow



第二节 选材的基本原则

● 材料的工艺性能

- 切削加工性: 主要指允许的切削速度、切削抗力的大小、零件加工后的表面粗糙度、断屑能力及刀具的耐用度。

钢的硬度为**170~230HB**时, 其切削性能最佳。

∴ 在选用预先热处理时, **低碳钢应采用正火; 中碳钢应采用正火或退火; 高碳钢应采用球化退火。**

- 热处理工艺性: 主要指淬透性, 变形开裂倾向, 过热敏感性 & 氧化脱碳倾向等。

合金钢的热处理工艺性比碳钢好。



第二节 选材的基本原则

● 常用金属材料工艺性能比较

	碳钢	合金钢	铸铁
铸造	×	×	√(灰铸铁√)
锻造	低碳钢√ 高碳钢×	高碳高合金钢 ×	× ×
焊接	低碳钢√ 高碳钢×	×	× ×
切削加工	√	高速钢× 易切削钢√	√
热处理工艺	×	√	×



第三节 热处理方案的选择热处理技术条件标注

一、热处理方案的选择

选择热处理方案遵循的原则：

1、要求综合力学性能好的零件：调质

2、要求弹性好的零件

{ 较大弹性变形量：淬火+中温回火（大截面）
（弹簧钢） 去应力退火（小截面）
大弹性变形量：去应力退火 或 淬火+时效处理
（铜基合金）

3、要求耐磨的零件：淬火+低温回火

4、要求特殊物理性能的零件：根据要求进行处理



第三节 热处理方案的选择热处理技术条件标注

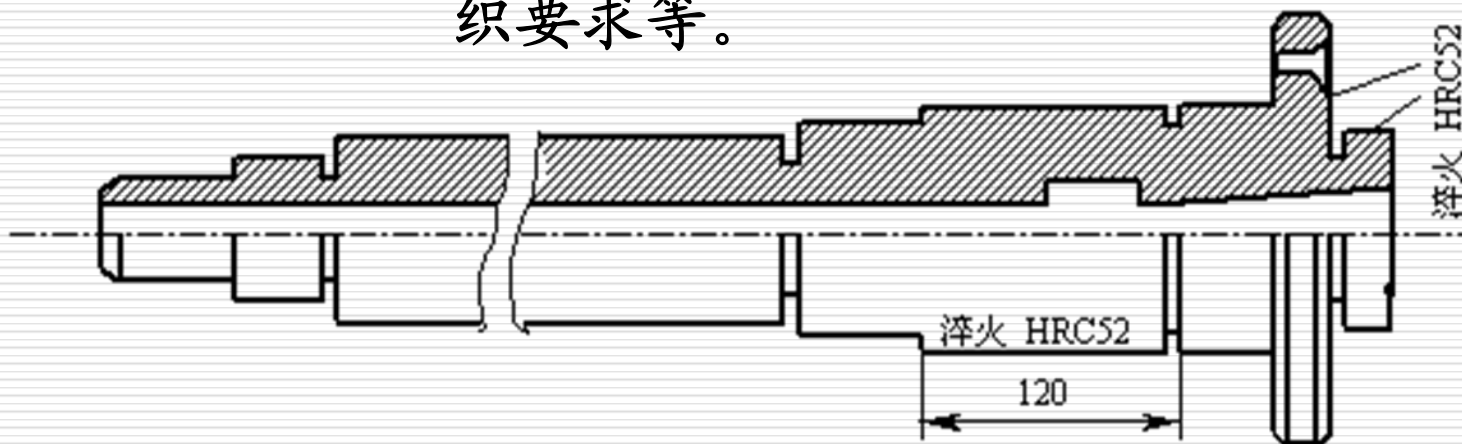
二、 热处理技术条件标注

1. 一般标硬度：无损、可直接在零件测试

（注意与所选材料及组织一致）

波动范围：**HRC 5个单位；HB 30 ~ 40个单位**

2. 表面热处理：范围、深度、表面与心部硬度及组织要求等。



C620车床主轴及热处理技术条件

第四节 预防和控制热处理变形的方法和措施

- 变形主要是由于热处理产生内应力（**热应力**和**组织应力**）引起的。
- 热应力**：由于温度差而产生体积收缩（膨胀）量不同所引起的内应力。
- 组织应力**：由于组织转变而产生体积变化不同所引起的内应力。



第四节 预防和控制热处理变形的方法和措施

➤ 结构设计要充分考虑热处理变形（甚至开裂），避免应力集中

1. 避免尖角、棱角、厚薄悬殊等不合理结构；

尽量采用封闭、对称，组合等结构。

2. 掌握变形规律，调整加工尺寸或预留加工余量。

3. 合理安排加工工艺路线。

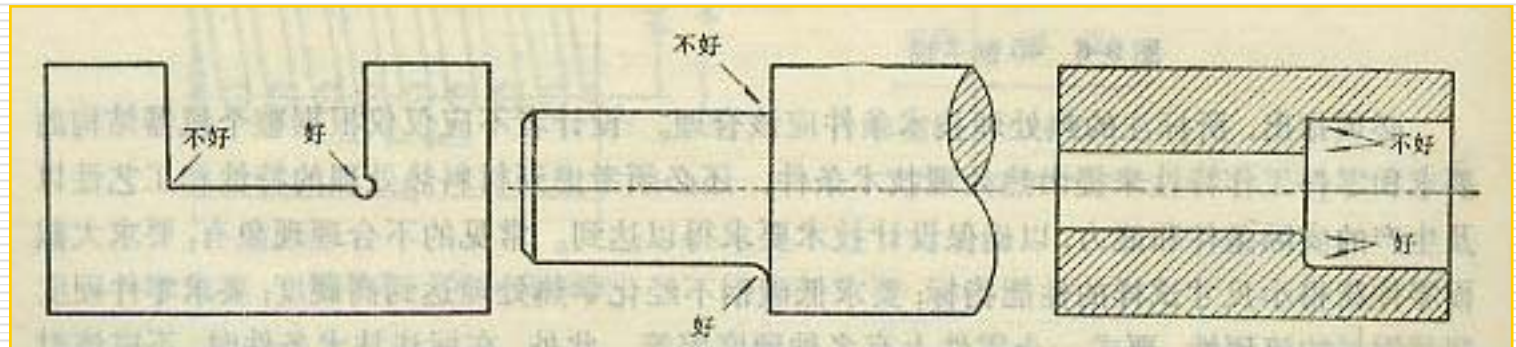
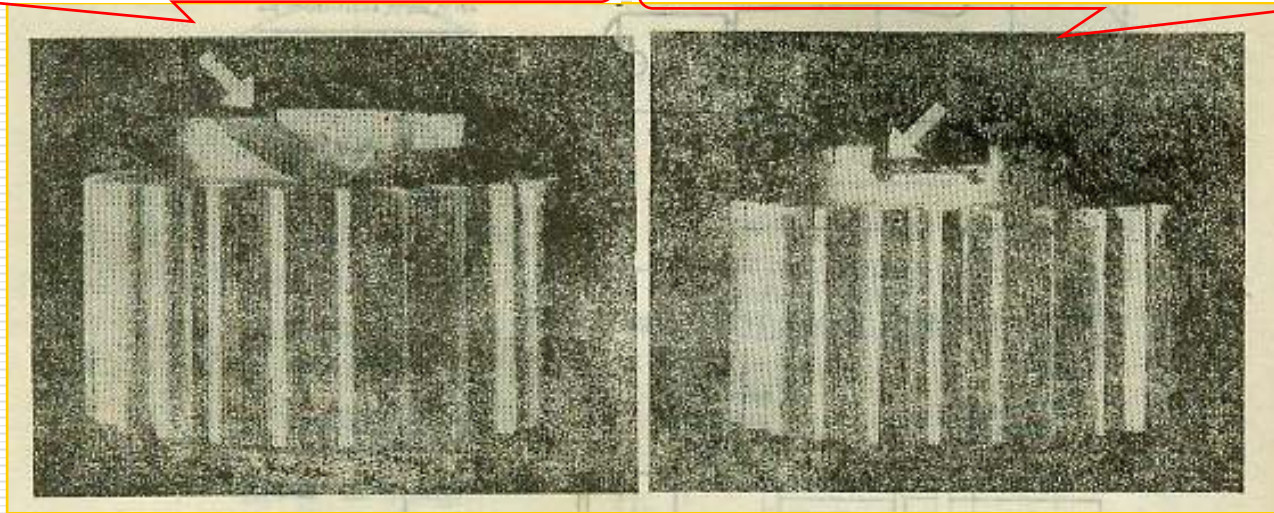


第四节 预防和控制热处理变形的方法和措施

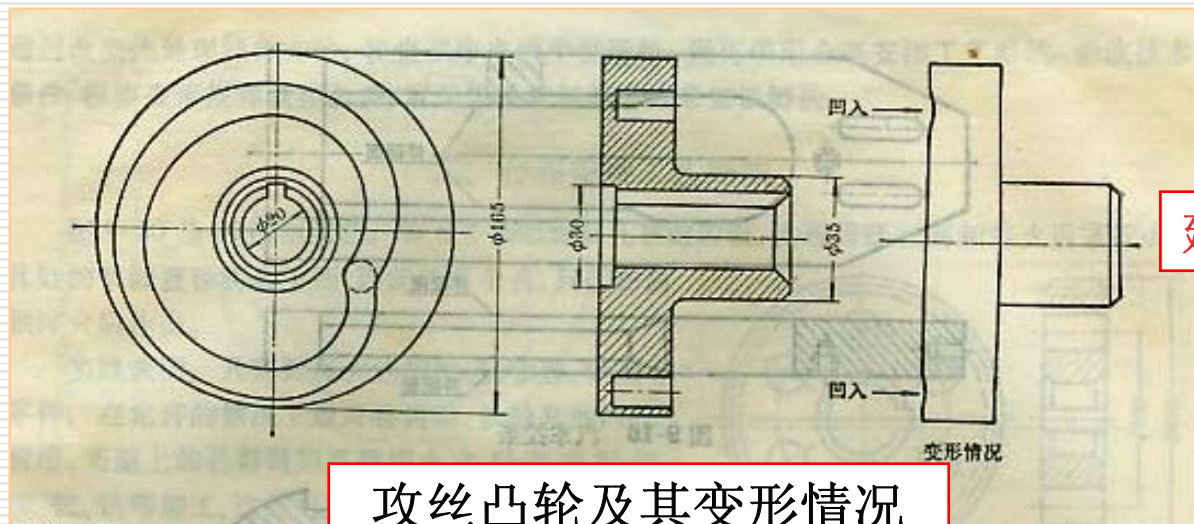
存在尖角、棱角时，出现淬火裂纹

避免尖角、棱角后，不出现淬火裂纹

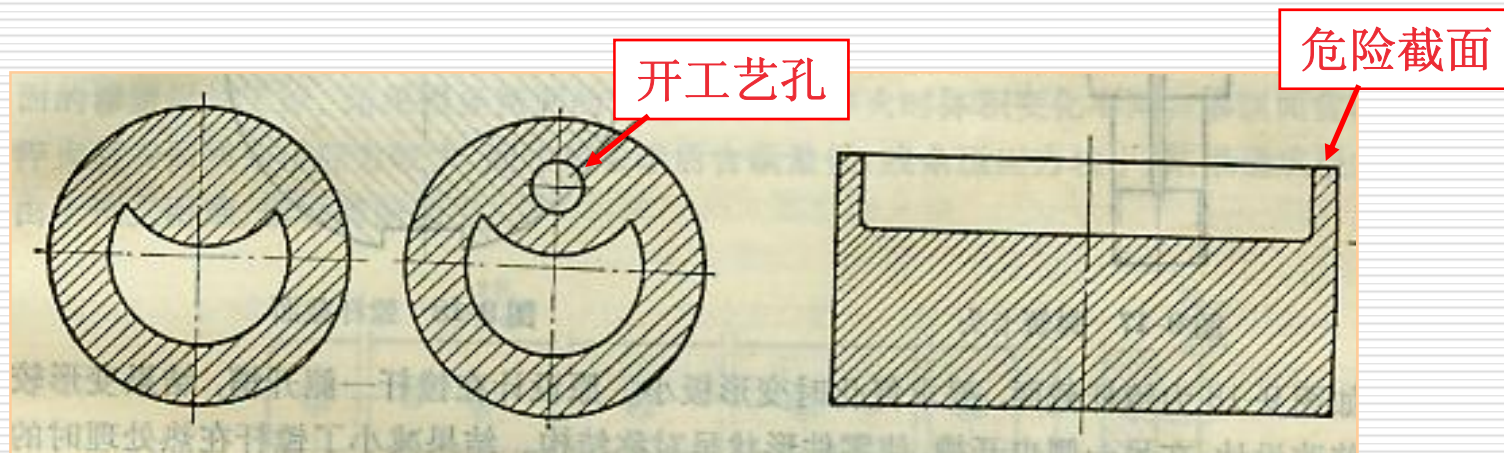
避免尖角实例



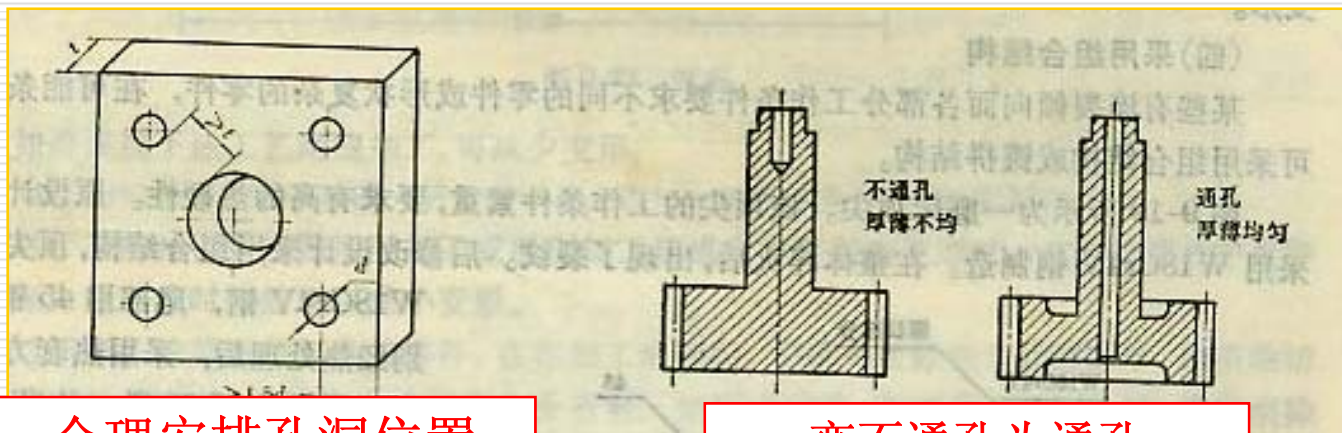
第四节 预防和控制热处理变形的方法和措施



攻丝凸轮及其变形情况



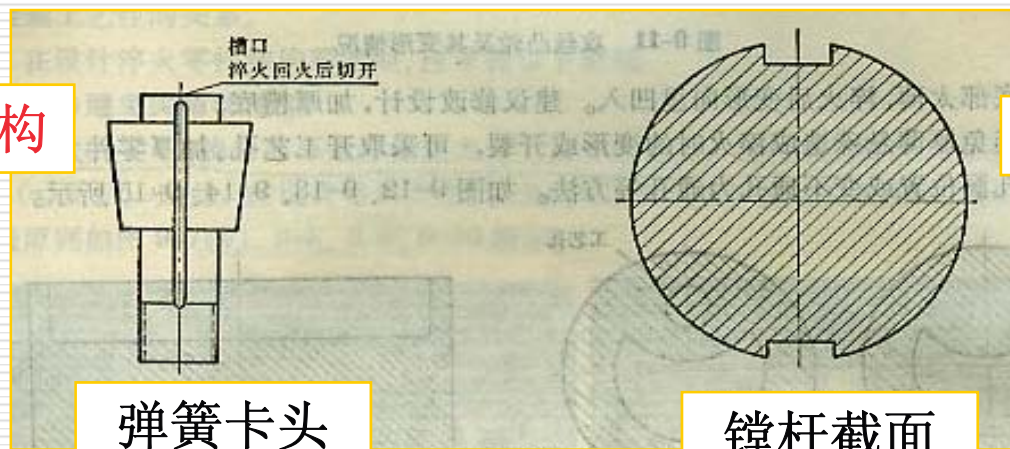
第四节 预防和控制热处理变形的方法和措施



合理安排孔洞位置

变不通孔为通孔

采用封闭结构



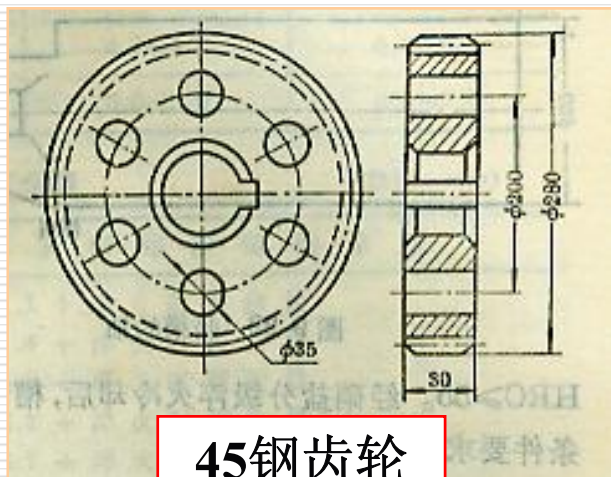
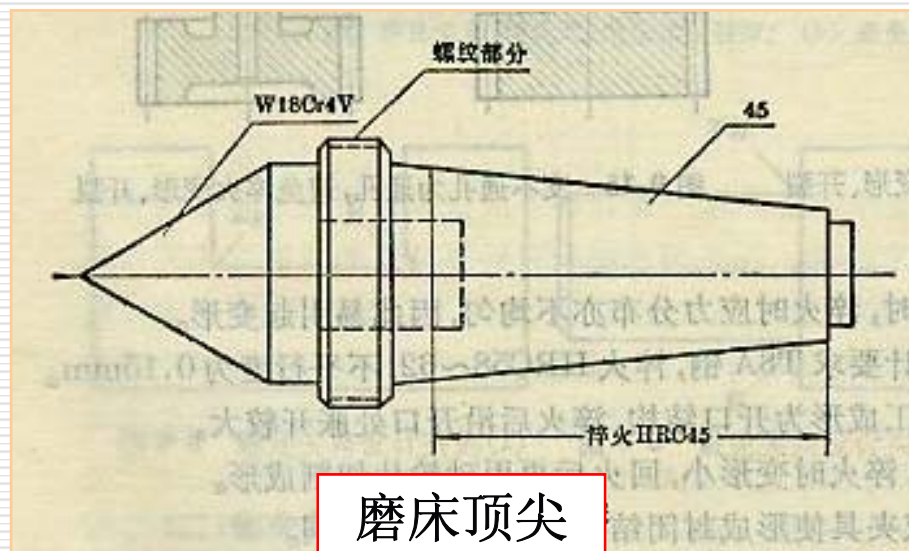
弹簧卡头

镗杆截面

采用对称结构

第四节 预防和控制热处理变形的方法和措施

采用组合结构



合理安排工艺路线



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

一、齿轮类

1. 齿轮的工作条件和对性能的要求

(1) 齿轮的工作条件

- ① 由于传递扭矩，齿根承受很大的交变弯曲应力；
- ② 换挡、启动或啮合不均时，齿部承受一定冲击载荷；
- ③ 齿面相互滚动或滑动接触，承受很大的接触压应力及摩擦力的作用。

(2) 齿轮的失效形式

- ① 疲劳断裂 主要从根部发生；
- ② 齿面磨损 由于齿面接触区摩擦，使齿厚变小；
- ③ 齿面接触疲劳破坏 在交变接触应力作用下，齿面产生微裂纹，微裂纹的发展，引起点状剥落(或称麻点)；
- ④ 过载断裂 主要是冲击载荷过大造成的断齿。

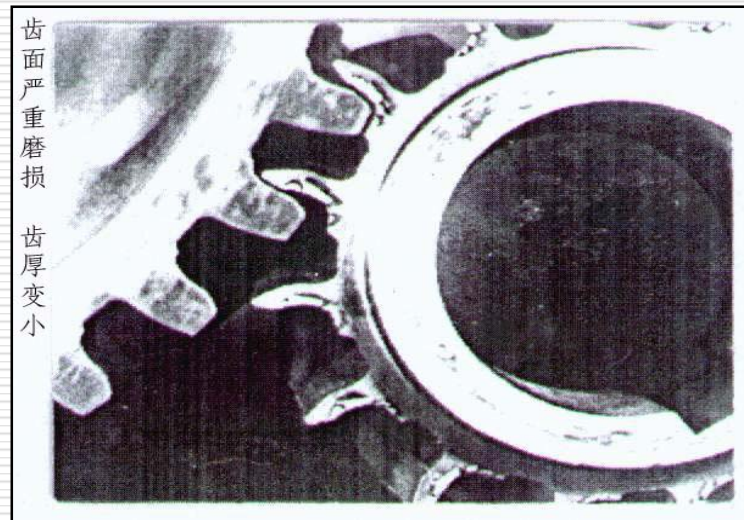


第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

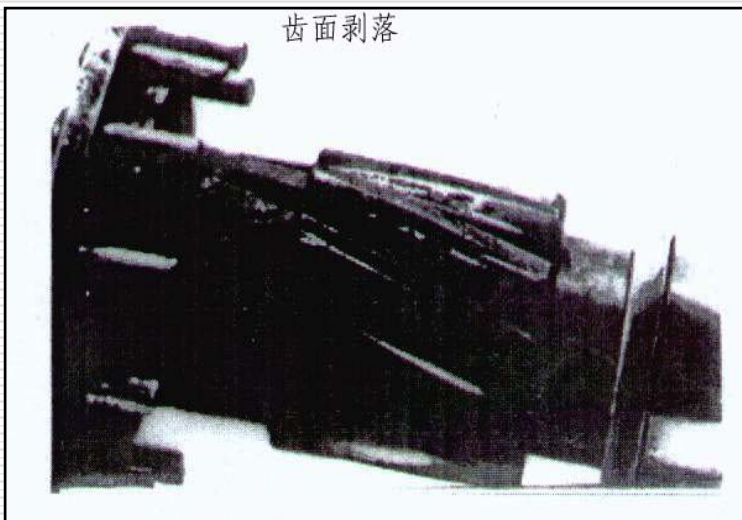
齿轮失效形式



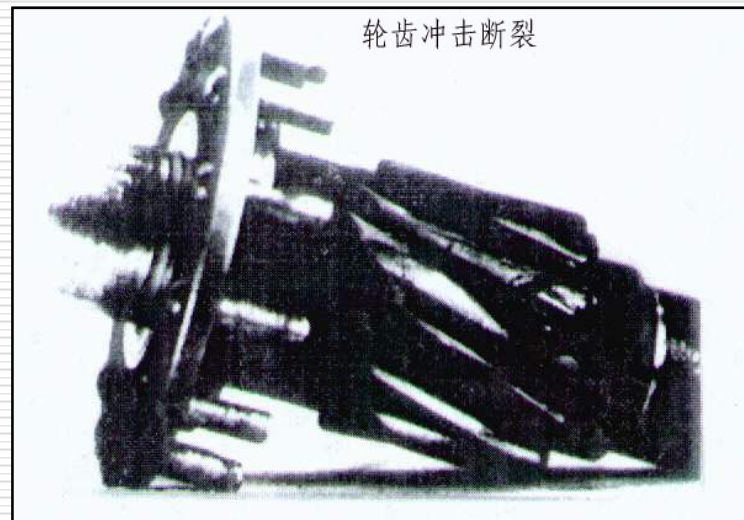
螺旋伞齿轮根部弯曲疲劳断裂



齿面严重磨损
齿厚变小



齿面剥落



轮齿冲击断裂



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

(3) 齿轮材料的性能要求

- ① 高的弯曲疲劳强度；
- ② 高的接触疲劳强度和耐磨性；
- ③ 较高的强度和冲击韧性。

此外，还要求有较好的热处理工艺性能，如热处理变形小等。

(4) 齿轮类零件的选材

齿轮材料要求的性能主要是疲劳强度，尤其是弯曲疲劳强度和接触疲劳强度。表面硬度越高，疲劳强度也越高。齿心应有足够的冲击韧性，目的是防止轮齿受冲击过载断裂。

从以上两方面考虑，选用低、中碳钢或其合金钢。它们经表面强化处理后，表面有高的强度和硬度，心部有好的韧性，能满足使用要求。此外，这类钢的工艺性能好，经济上也较合理，所以是比较理想的材料。



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

2. 汽车、拖拉机齿轮



汽车后桥齿轮



汽车变速箱齿轮



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

汽车、拖拉机齿轮：

- (1) 材料：20CrMnTi
- (2) 工艺路线：锻→正火→机加工→渗碳、预冷淬火+低温回火→喷丸 (压应力、 σ_{-1} ↑) →磨
- (3) 各部热处理组织及作用：
 - 1) 正火：S+ α (少量)
 - ① 消除锻造缺陷（晶粒粗大、应力）；
 - ② 调整硬度、利于切削加工。
 - 2) 渗碳、预冷淬火+低温回火：

表： $M_{\text{回}}+K+A'$ (少量)；

心： $M_{\text{低碳}}$ ，达到“表硬心韧”，满足使用要求。



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

3. 机床齿轮



机床变速箱齿轮



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

机床齿轮：

(1) 材料：45（或40Cr）

(2) 工艺路线：锻→正火→粗机加工→调质→精机加工

(3) 各部热处理组织及作用：

1) 正火：S+ α （少量）

① 消除锻造缺陷（晶粒粗大、应力）；

② 调整硬度、利于切削加工。

2) 调质： $S_{\text{回}}$ ，满足整体机械性能要求：综合机械性能↑

3) 高频淬火+低温回火：

表： $M_{\text{回}}+A'$ （少量）；

心： $S_{\text{回}}$ ，达到“表硬心韧”，满足使用要求。



第五节 典型零件选材及加工工艺流程分析

二、轴类零件

1. 轴的工作条件和性能要求

(1) 轴的工作条件

- ① 工作时主要受交变弯曲和扭转应力的复合作用；
- ② 轴与轴上零件有相对运动，相互间存在摩擦和磨损；
- ③ 轴在高速运转过程中会产生振动，使轴承受冲击载荷；
- ④ 多数轴会承受一定的过载载荷。

(2) 轴的失效形式

- ① 长期交变载荷下的疲劳断裂（包括扭转疲劳和弯曲疲劳断裂）；
- ② 大载荷或冲击载荷作用引起的过量变形、断裂；
- ③ 与其它零件相对运动时产生的表面过度磨损。

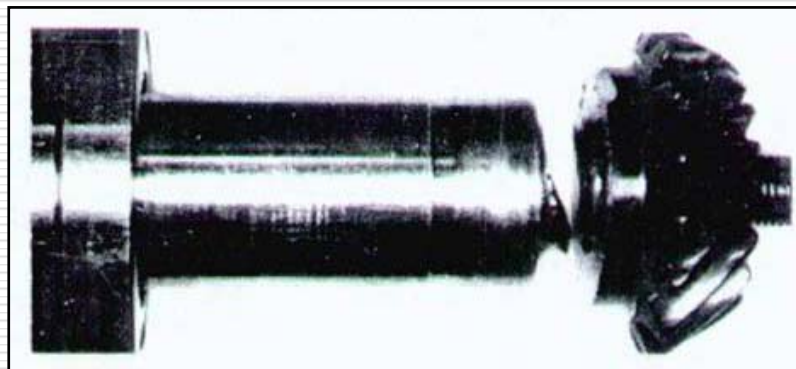


第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

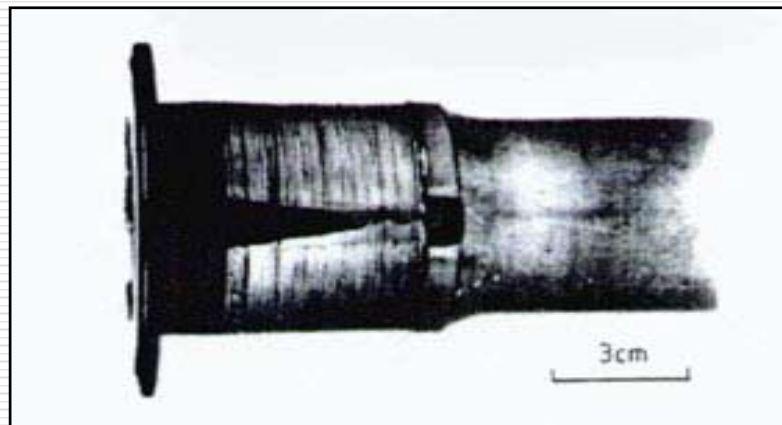
轴的失效形式:



转轴弯曲疲劳断口形貌



直升飞机螺旋桨驱动齿轮轴扭断



轴颈被埋嵌在轴承中的硬粒子磨损



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

(3) 轴的使用性能要求

- ① 高的强度、足够的硬度和良好的韧性；
- ② 高的疲劳极限；
- ③ 在相对运动的摩擦部位，如轴颈、花键等处，应具有高的硬度和耐磨性。

2. 轴的选材

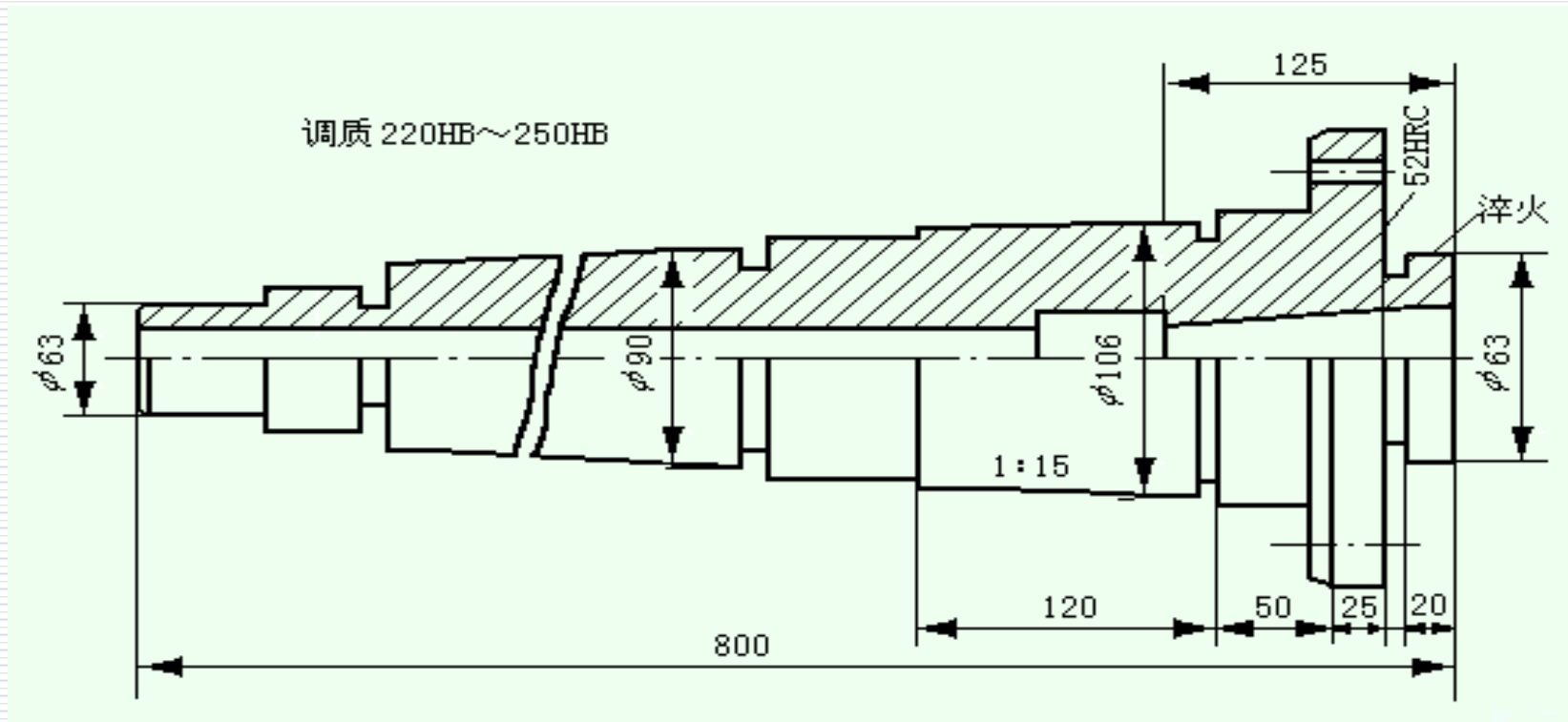
制造轴类零件的材料主要是碳素结构和合金结构钢，一般是以锻件或轧制型材为毛胚。

根据承载能力的大小选用材料，然后根据选材的不同选择相应的热处理工艺。

第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

3. 轴类零件加工工艺路线及其分析

(1) 车床主轴



C620车床主轴简图

第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

车床主轴：

- 1) 材料：45（或40Cr）
- 2) 工艺路线：锻→正火→粗机加工→调质→精机加工→
轴颈：高频淬火+低温回火→磨
- 3) 各部热处理组织及作用：
 - a) 正火：S+ α （少量）
 - ① 消除锻造缺陷（晶粒粗大、应力）；
 - ② 调整硬度、利于切削加工。
 - b) 调质： $S_{\text{回}}$ ，满足整体机械性能要求：综合机械性能↑
 - c) 轴颈：高频淬火+低温回火：
表： $M_{\text{回}}+A'$ （少量）；
心： $S_{\text{回}}$ 达到“表硬心韧”，满足使用要求。



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

(2) 镗杆（磨床主轴）

1) 材料：38CrMoAlA

2) 工艺路线：锻→退火→粗车→调质→精车→去应力退火
→粗磨→氮化→精磨→时效→研磨

3) 各部热处理组织及作用：

a) 退火：P+ α （少量）

① 消除锻造缺陷（晶粒粗大、应力）；

② 调整硬度、利于切削加工。

b) 调质： $S_{\text{回}}$ ，满足整体力学性能要求：综合力学性能 \uparrow 。

c) 去应力退火：消除机加工应力；

d) 氮化：

表：合金氮化物；

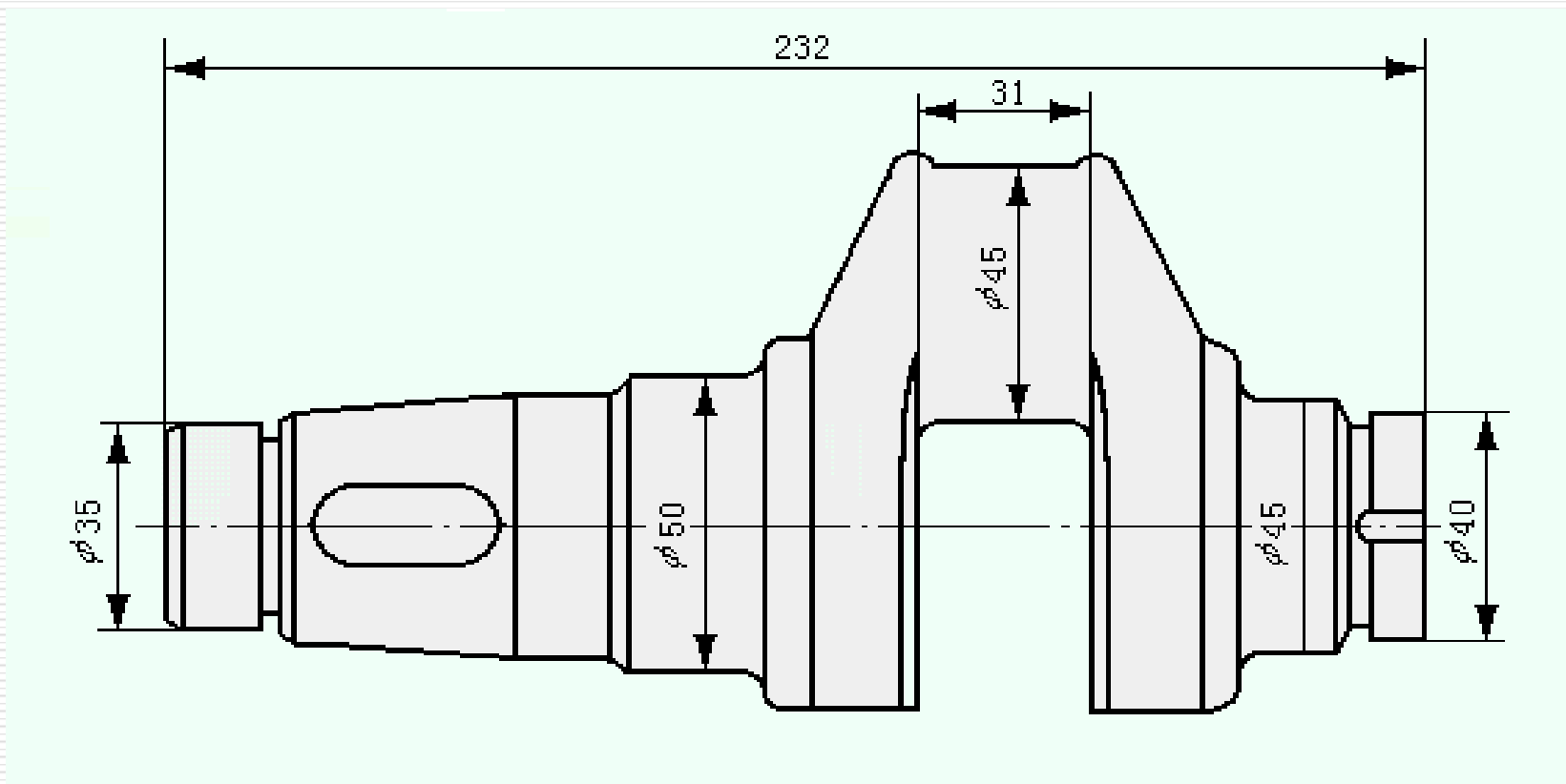
心： $S_{\text{回}}$ ，达到“表硬（ $>Hv800$ ）心韧”，满足使用要求。

e) 时效：消除磨削应力，稳定组织及尺寸，满足精度要求；



第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

内燃机曲轴



175A型柴油机曲轴简图

第五节 典型零件选材及加工工艺路线分析

(3) 内燃机曲轴

(1) 材料: QT600-2

(2) 工艺路线: 铸→正火→去应力退火→机加工→轴颈:
高频淬火+低温回火→磨

(3) 各部热处理组织及作用:

1) 正火: P_细+G_球

① 消除铸造缺陷和应力;

② 获P_细+G_球, 满足整体性能。

2) 去应力退火: 消除正火应力。

3) 轴颈: 高频淬火+低温回火:

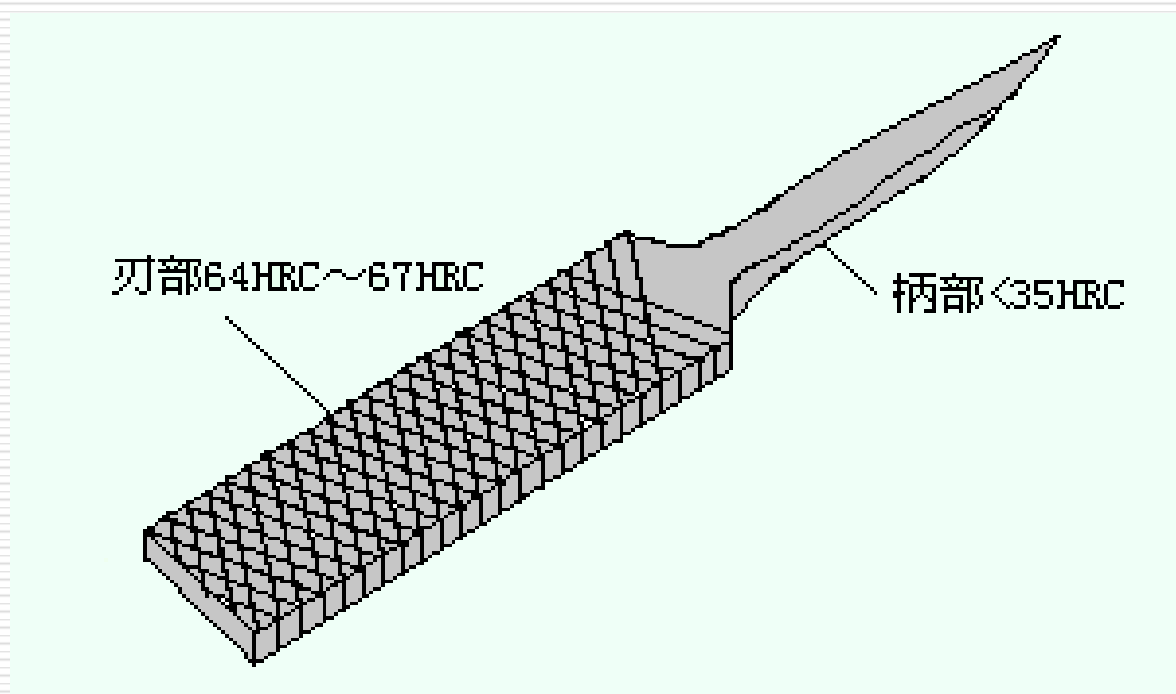
表: M_回 + G_球;

心: P_细+G_球, 达到“表硬心韧”, 满足使用要求。



第五节 典型零件选材及加工工艺流程路线分析

三、其他：W18Cr₄V车刀、Cr12MoV冷(热)作模具、5CrNiMo热锻模、机床床身、手术刀等。



刀具选材

