

# 绪 论

## 0.1 本课程的研究内容

“工程材料及机械制造基础”(后文简称“课程”)是研究金属材料成形和零件加工方法的综合性技术基础课程,是高等工科教育的重要内容,是机械类、材料类专业本科生必修的一门专业基础课,主要研究常用金属材料的性能及其对加工工艺方法的影响,各种加工工艺方法自身的规律性及其相互联系与比较,各种加工工艺过程和零件的结构工艺性等。

课程主线与主要内容如图 0-1 所示,以零件的制造过程为主线展开。通过课程的学习,学生可以构建起工程材料—毛坯成形—切削加工的零件制造知识体系,培养学生分析问题、解决问题的能力,培养学生的工程素养和创新思维。帮助学生建立一个关于现代制造工程的较为全面、系统的基础知识架构。

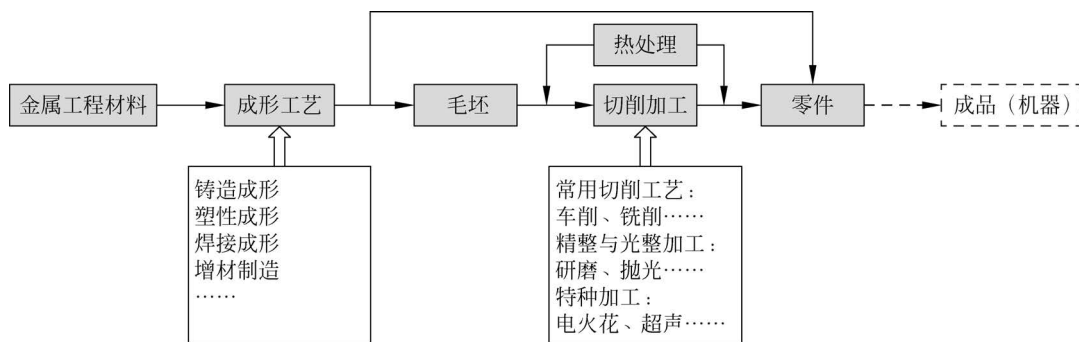


图 0-1 课程的主要研究内容

多数零件由于形状复杂或者加工精度和表面质量要求较高,难以采用单一的方法直接生产,通常先用铸造、塑性成形、焊接或增材制造的方法制成毛坯,再经过切削加工制成所需的零件。为了易于切削加工和改善零件的某些性能,中间常需穿插不同的热处理工艺。最后将制成的各种零件经过检验、装配成为成品(机器)。

由于机器中各零件的结构、特性各不相同,因此所采用的制造工艺各有特点。例如,轴承和工具制造中磨削加工占据很大的工作量,锅炉、轮船的钢结构由钢板焊接而成,机床工业中铸件所占比重很大,而仪表工业中的冲压件很多,故制造时加工方法显著不同。必须指出,各种加工方法是在不断发展的,各种制造方法都在朝着高质量、高生产率和低成本的方向迅速发展。各种少切削、无切削加工,以及增材制造的新工艺发展,已改变了越来越多零件的传统制造工艺,从而节省了大量的材料并大幅提高了生产率。此外,各种加工工艺过程

的智能化、机械化、自动化的迅猛发展,已改变了整个机械制造业的面貌。

下面以齿轮的制造为例,说明零件制造过程中所涉及的制造技术。齿轮是典型的盘套类零件,在工作时齿面承受较高的接触应力和摩擦力,齿根承受较大的弯曲应力,有时还承受冲击载荷。因此,对齿轮的力学性能要求较高,要求齿面有高的硬度和耐磨性,齿轮心部有足够高的强度和韧性。齿轮的工作条件不同,所选材料和制造方法也存在差异。下面列举几种金属齿轮的制造方法。

(1) 对于低速、轻载齿轮,常用低碳钢或中碳钢锻造成形,再经切削加工成形,其中要穿插调质处理工序。

(2) 对于高速、重载齿轮,常用 20CrMnTi、20CrMo 等合金渗碳钢锻造成形,再经切削加工成形,其中要穿插渗碳处理工序。

(3) 对于要求不高的齿轮,可以用灰铸铁、球墨铸铁等材料铸造成形。

可见,不同应用场景的齿轮,制造工艺是不同的。对具有一定尺寸和形状精度要求的机械零件而言,一般都需要选择合适的材料,选择合理的成形工艺制造毛坯,再经切削加工和热处理获得成品。

## 0.2 机械制造的发展史

### 1. 机械制造的概念

制造一般是指通过人工或机器使原材料或半成品成为可供使用的物品(即成品)。制造过程一般需要相应的资源和活动,并产生相应的附加值。

一般,机械制造的定义有狭义和广义两种。狭义的机械制造是指各种金属的机械切削加工方法。广义的机械制造则泛指以机械作用方式为主或直接关联的各种加工制造方法,既包括切削加工,也包括铸造、塑性成形、焊接、增材制造等成形工艺。作为加工对象的工程材料也是从金属材料扩展到非金属材料等。本教材的内容设计是基于广义机械制造的系统性知识学习,考虑到知识的相关性和认知规律,将必要的工程材料基础知识一并编入教材中。

### 2. 材料的分类

材料是社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。从人类发现并使用金属材料开始,历经青铜器时代、铁器时代,一直发展到近现代,金属材料一直是机械制造最主要的材料。20世纪60年代以后,在工业革命的推动以及科技进步与新材料需求的背景下,非金属材料 and 复合材料进入快速发展期。由金属材料、非金属材料 and 复合材料构成了现代制造所用材料的三大基本分类,统一归为工程材料,如图0-2所示。本教材重点介绍金属材料的成形工艺和切削加工等内容。

### 3. 机械制造技术的发展史

机械制造技术的发展与人类文明的发展同步,从人类发现并使用金属材料至今,金属材料在机械制造中一直扮演着非常重要的角色。

公元前5000年前后,古埃及人开始冶炼铜,并用铜制造工具和武器。公元前1800年前后,中国进入青铜器时代,商代铸造的后母戊鼎形状雄伟、气势宏大、纹饰华丽,质量为832.8kg,是世界上迄今出土的最重的青铜器。

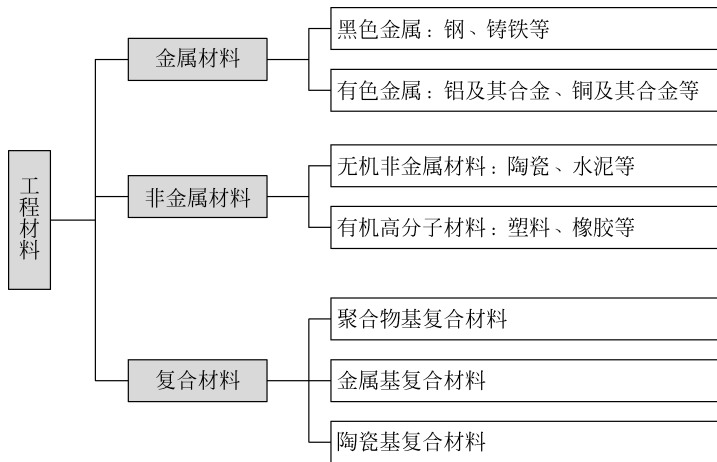


图 0-2 工程材料的分类

公元前 1400 年前后,人类掌握了炼铁技术。在商代和西周时期制造出了辘轳、鼓风机等工具。公元前 513 年,中国铸出了世界上最早见于文字记载的铸铁件——晋国铸刑鼎。从东汉到宋元时期,中国的机械制造技术在世界上长期居于领先地位。

1405 年,明代航海家郑和 7 次远航,访问了 30 多个国家。郑和船队航行时间之长、规模之大、范围之广,达到了当时世界航海事业的顶峰,也反映出了中国当时的机械制造水平之高。1637 年,明代末年的学者宋应星所著的《天工开物》一书,记载了中国农业、工业及手工业的生产工艺和经验,其中包括金属的开采、冶炼、铸造和锤锻工艺,船舶、车辆、武器、工具的结构和制作方法的等。《天工开物》被译成多种文字流传于世,是一部在世界科技史上占有重要地位的科技著作。郑和船队的远洋壮举与《天工开物》的科技集成,堪称中国古代科学技术辉煌成就的两大重要标志。

历史上,真正的工业化制造,是从 18 世纪后期第一次工业革命开始的。蒸汽机开创了以机器代替手工劳动的时代。而蒸汽机的制造,要求更高的尺寸公差等级来加工的金属零件,促成了金属切削技术的第一次大发展,出现了可制造金属零件的镗床和铣床。金属材料的加工进入机械化时代,机械制造水平大幅提高。

19 世纪中叶,随着发电机和电动机的发明,人类进入了电气时代。随着内燃机的发明,出现了汽车和飞机,从而对机器的运转速度、零部件的加工精度、生产效率提出了更高的要求,磨床、插齿机、滚齿机、自动机床、组合机床、精密机床相继发明和使用,各种专用的切削机床趋于完备。由电气技术与制造技术的融合引发的制造技术大变革,推动世界进入第二次工业革命。

20 世纪中期,第三次工业革命的兴起,促使机械制造自动化与智能化水平显著提升,推动机械制造数字化与信息化技术深度融合,数控加工机床和柔性加工制造方式等开始出现,新材料与新工艺蓬勃发展。第三次工业革命全方位重塑机械制造技术,使其在效率、精度、灵活性等多方面实现质的飞跃,开启了机械制造新纪元。

从 20 世纪 90 年代至今,机械制造数字化与信息化深度交融,随着人工智能理论和相关技术的融入与应用,使机械制造技术具有了智能化制造的内涵。智能制造、增材制造、复合材料与复合制造等一大批新概念、新技术进入制造领域,目前将具有信息化、智能化特征的

制造技术泛称为先进制造技术。2015年,我国发布了以发展先进制造技术为核心的《中国制造2025》计划。

### 0.3 本课程的学习要求

在学习本课程之前,应先修“工程制图”和“工程训练”等课程,需具备一定的机械产品和机械加工方面的感性知识,以及机械制图和金属材料的基础知识。本课程的学习和能力达成要求如下所述。

(1) 建立工程材料、材料成形工艺与现代机械制造的完整概念,培养学生良好的工程意识,并具有良好的工程实践能力、现代工程工具使用能力。

(2) 了解工程材料的成分、组织、性能之间的关系以及牌号表示方法,掌握强化金属材料的基本途径、钢的热处理原理和工艺。

(3) 掌握成形工艺的基本原理和工艺特点,具有选择成形工艺及工艺分析的初步能力。

(4) 掌握各种切削加工工艺的基本原理和工艺特点,具有选择切削加工工艺的能力,能制定简单的制造工艺规程。

(5) 掌握零件的结构工艺性,具有分析零件结构工艺性的能力,能够进行产品的结构设计和工艺设计,培养综合分析与设计的能力。

(6) 了解制造相关的新材料、新工艺、新技术及发展趋势。

(7) 具备一定的辩证思维能力,培养精益求精的大国工匠精神,激发科技报国的家国情怀和使命担当。

本课程可以采用混合式教学模式,其中线上教学可借助河北省精品在线开放课程《金属工艺学》开展,线下课堂教学适当融入工程案例开展案例式教学,将理论教学融入工程背景中,以此培养学生理论联系实际、分析问题和解决问题的工程实践能力。2023年,课程获评国家级线上线下混合式一流课程。

本课程与“工程训练”课程有着紧密的内在联系,其知识内容关联度和学习时序关联度都很大。主动将两种课程的内容有机关联起来,理论联系实际,特别是紧密联系“工程训练”经历,来学习本课程的理论知识,将有助于读者高效完成学习任务,并较快形成分析和解决机械制造一般性技术问题的能力。

# 第1章

## 材料学基础



### 本章知识要点

知识要点	学习目标	相关知识
金属材料的力学性能	了解金属材料的力学性能指标的物理含义以及测试方法	强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等指标
纯金属与合金的晶体结构	了解纯金属和合金的晶体结构,理解晶体缺陷对金属力学性能的影响	晶体结构的概念,纯金属与合金的晶体结构,实际金属的晶体结构
金属的结晶	掌握金属结晶过程并理解细化晶粒的措施	结晶的过程,晶粒大小的控制
铁碳合金相图	了解铁碳合金相图的构成,掌握典型合金的平衡结晶过程,理解相图在生产中的应用	同素异构转变,铁碳合金的基本组织,铁碳合金相图分析,相图的应用
常用的金属材料	掌握常用钢材的分类以及牌号的含义,为合理选材奠定基础	非合金钢、低合金钢、合金钢的成分特点及应用范围



### 案例导入

建设海洋交通强国,离不开钢铁材料的有力支撑。钢铁材料的高速发展带动了我国高端装备及制造业体系的建设,对我国的国防安全、科学考察、资源开采等领域产生了重大影响。

航空母舰(简称航母)是一种以空中作战为主要任务的大型军舰,是现代海上军事力量的核心之一。甲板是航母舰体结构的关键部位,为保证抗冲击和火焰灼烧,厚度需达到50~80mm。为减少焊缝对强度的影响,宽度应尽可能宽,同时保证每平方米甲板钢的不平度小于5mm。国产航母山东舰的特种钢材由5.5m超宽轧机制造,其在-84℃低温冲击韧性大于250J,屈服强度达到了690MPa,其耐受抗压性能达到了全球顶尖水平。

“蓝鲸1号”是中国建造的全球首座超深水半潜式海上钻井平台,钻探深度、工作水深都堪称世界之最。为满足该深水钻井平台对钢板厚度的特殊要求,鞍钢股份公司通过热机械控制工艺,研发生产出一系列厚度为8~80mm的热机械控制(TMCP)态超高强海工钢产品。其具有易焊接、超高强度、低屈强比、超低温冲击韧性等优异特性。“蓝鲸1号”使用了大约4000t抗拉强度达到772~940MPa的NVF690超强超厚钢。

海洋交通用钢铁材料冶金制备技术包括模铸、连铸、特种冶炼和增材制造等。随着技术的不断创新与应用,将进一步促进海洋交通的高安全、高质量、低能耗发展,为国家的安全、经济发展、科技进步提供强有力的支撑和保障。

资料来源:干勇,刘中秋,肖丽俊.海洋交通用钢铁材料及其冶金制备技术的发展现状与趋势[J].现代交通与冶金材料,2023,3(5):1-7.

## 1.1 金属材料的性能

金属材料由于具有良好的性能而被广泛应用于各种结构件、机械设备、工具和日常生活用品中,是现代制造业的基础材料。金属材料的性能主要包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中表现出来的性能,主要有力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指金属材料在加工过程中表现出来的性能,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

### 1.1.1 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在受外力作用时所反映出来的性能,是衡量金属材料性能的重要指标,是选择和使用金属材料的重要依据。金属材料的力学性能主要包括强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等。

#### 1. 强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。按照作用力性质的不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。

抗拉强度是由静拉伸试验测定的。依据国家标准《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021),首先将金属材料制成标准试样,拉伸试样有圆形和矩形两类,图 1-1(a)所示为圆形拉伸试样。将其装夹在拉伸试验机上,施加轴向静拉力,缓慢拉伸使试样产生变形,直至把试样拉断,如图 1-1(b)所示。图中, $L_0$  为原始标距, $L_u$  为拉伸后标距, $S_0$  为试样原始截面面积, $S_u$  为拉断后试样最小截面面积。

拉力  $F$  与变形量  $\Delta L$  之间的关系曲线,称为拉伸曲线。低碳钢的拉伸曲线如图 1-2 所示。从图中可以看出,低碳钢试样的拉伸过程可以分为弹性变形阶段、屈服阶段、塑性变形阶段和缩颈断裂阶段。

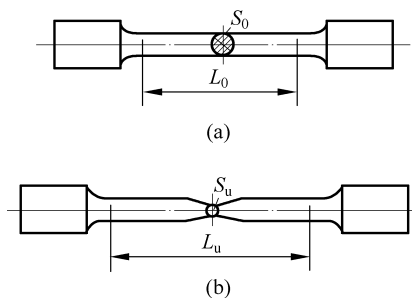


图 1-1 圆形拉伸试样  
(a) 拉伸前; (b) 拉伸后

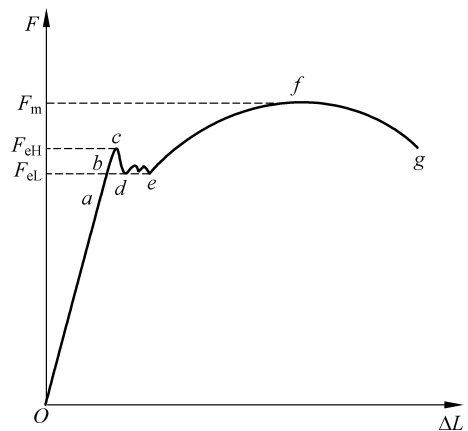


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

(1) **弹性变形阶段**( $Ob$  阶段): 在  $Oa$  阶段, 试样发生弹性变形, 拉力与伸长量成正比例关系, 服从胡克定律; 卸除载荷, 试样能完全恢复到原来的形状和尺寸。在  $ab$  段, 试样发生滞弹性变形, 外力与伸长量为不成正比例的直线关系。

(2) **屈服阶段**( $be$  阶段): 在  $bc$  阶段, 试样发生连续均匀的微小塑性变形。若将拉力去掉, 试样的伸长变形不会完全消失。在  $cde$  阶段, 试样发生较大的塑性变形, 开始时由于屈服变形的不连续, 拉力突然下降; 随后试样伸长急剧增加, 拉力仅在小范围内波动。如果忽略波动, 则此时拉力不变而变形量却在继续增加, 这种现象称为屈服。

(3) **塑性变形阶段**( $ef$  阶段): 在此阶段, 必须进一步增加外力才能使试样继续被拉长。同时, 随变形量的增加, 材料不断被强化, 这种现象称为应变强化(加工硬化)。宏观上, 试样产生了均匀的塑性变形。

(4) **缩颈断裂阶段**( $fg$  阶段): 在  $f$  点, 试样开始发生局部收缩, 称为缩颈。此时变形所需的拉力逐渐降低, 但由于缩颈部位的面积迅速减小, 缩颈处单位截面上受到的载荷不断增加, 缩颈部位的材料被拉长, 直至  $g$  点试样被拉断。

#### 1) 屈服强度

屈服强度用来表征材料抵抗塑性变形的能力。对于有明显屈服现象的金属材料, 可以测定其上屈服强度  $R_{eH}$  和下屈服强度  $R_{eL}$ 。上屈服力( $c$  点对应的力)用  $F_{eH}$  表示, 下屈服力( $e$  点对应的力)用  $F_{eL}$  表示。用上、下屈服力除以试样的原始截面面积  $S_0$ , 得到上、下屈服强度。有些金属材料如高碳钢、铸铁、铜、铝等, 没有明显的屈服现象, 通常以规定塑性延伸强度作为其屈服强度, 如规定塑性延伸率为 0.20% 时的强度用  $R_{p0.2}$  表示。

#### 2) 抗拉强度

规定材料在屈服后、断裂前单位面积上所能承受的最大载荷为抗拉强度, 用  $R_m$  表示, 即  $R_m = F_m / S_0$ 。其中,  $F_m$  为试样在拉伸过程中所能承受的最大外力( $f$  点所对应的力)。

### 2. 塑性

塑性是指金属材料产生塑性变形而不断裂的能力, 通常以断面收缩率  $Z$  和断后伸长率  $A$  来表示。

#### 1) 断面收缩率 $Z$

测量拉断试样缩颈处的直径, 计算出最小截面面积  $S_u$ 。试样的原始横截面面积  $S_0$  和最小截面面积  $S_u$  之差与原始横截面面积的百分率称为断面收缩率, 用符号  $Z$  表示。

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

#### 2) 断后伸长率 $A$

将拉断后的试样紧密地对接在一起, 使其轴线处于同一直线上, 测得断后标距  $L_u$ 。断后标距  $L_u$  减去原始标距  $L_0$  后, 再除以  $L_0$  后得到的百分率即断后伸长率, 用符号  $A$  表示。

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

### 3. 硬度

硬度是指材料表面抵抗局部塑性变形的能力, 是衡量材料软硬程度的指标。工程上常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

### 1) 布氏硬度

依据国家标准《金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法》(GB/T 231.1—2018)，布氏硬度测量方法如图 1-3 所示。用一定直径  $D$  的硬质合金球作压头，在一定的静载荷下压入试样表面，保持压力  $F$  至规定的时间后卸载，测量试样表面压痕直径  $d$ ，求得压痕表面积  $S$ ，进而得到试样压痕表面所承受的平均应力，即布氏硬度，用 HBW 表示。

$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D \sqrt{D^2 - d^2}} \quad (1-3)$$

布氏硬度测量稳定、准确，可用于测量铸铁、有色金属以及退火、正火和调质处理后的钢材。但因测量时压痕较大，故不适合测量成品零件和薄件。

### 2) 洛氏硬度

依据国家标准《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法》(GB/T 230.1—2018)，洛氏硬度是将顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥(图 1-4)或直径为 1.588mm 的碳化钨合金球作压头，首先在预加载荷的作用下压入材料表面，测量初始压痕深度  $h_0$ ，再施加主试验力  $F$ ，测得压痕深度为  $h_2$ ，保持一定时间，卸除  $F$  后材料弹性回复，压痕深度变为  $h_1$ ，用残余压痕深度  $h = h_1 - h_0$  来确定其硬度。压痕越深，材料越软，硬度越低；反之，硬度越高。被测材料的硬度可直接在硬度计刻度盘读出。

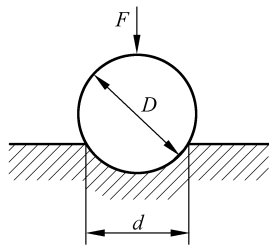


图 1-3 布氏硬度试验示意图

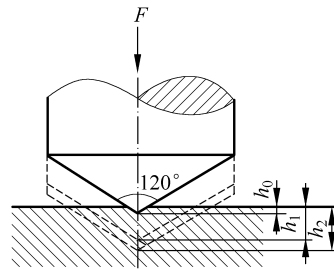


图 1-4 洛氏硬度试验示意图

为了能用同一硬度计测定从极软到极硬的材料，可以采用不同的压头和载荷，组合成不同的洛氏硬度标尺。其中最常用的是 HRA、HRBW、HRC 三种标尺，见表 1-1。

表 1-1 洛氏硬度标尺

标尺	硬度符号	压头类型	初试验力 $F_0/N$	主试验力 $F_1/N$	标尺常数 $S/mm$	全量程常数 $N$	适用范围
A	HRA	金刚石圆锥	98.07	588.4	0.002	100	20~95HRA
B	HRBW	直径 1.5875mm 硬质合金球	98.07	980.7	0.002	130	10~100HRBW
C	HRC	金刚石圆锥	98.07	1471	0.002	100	20~70HRC

洛氏硬度试验操作简单、方便快捷、压痕小，对工件表面损伤小，适宜大量生产中的成品件检验。由于压痕小，洛氏硬度易受金属表面不平或材料内部组织不均匀的影响，因此需要在被测表面的不同部位多次测量，然后取平均值。

#### 4. 冲击韧性

金属材料抵抗冲击载荷而不被破坏的能力称为冲击韧性,反映了材料在冲击载荷作用下发生弹性变形、塑性变形和断裂的过程中吸收能量的多少。常用指标是冲击吸收能量。

冲击韧性常采用夏比(Charpy)摆锤冲击试验测定。依据国家标准《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》(GB/T 229—2020),夏比摆锤冲击试验采用 V 形或 U 形缺口或无缺口试样,测试原理如图 1-5 所示。试验时,将重力为  $F$  的摆锤提升到  $H_1$  的高度,此时摆锤的势能为  $FH_1$ ;然后使摆锤下落,其势能变成动能,冲断试样消耗了一部分能量,剩余的能量使摆锤继续向前升到  $H_2$  的高度,此时摆锤的势能为  $FH_2$ 。试样的冲击吸收能量  $K$  用摆锤冲击前后的势能差表示,即  $K = F(H_1 - H_2)$ 。

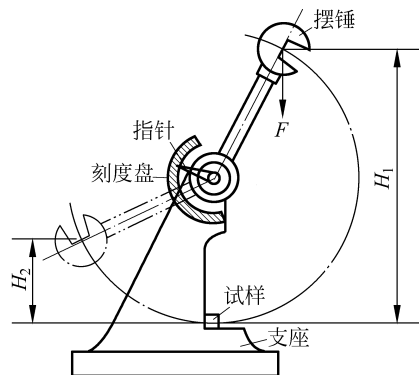


图 1-5 夏比摆锤冲击试验原理



冲击试验

$K$  越大,材料的韧性越好,受到冲击时不易断裂。 $K$  的大小与很多因素有关,不仅受试样形状、表面粗糙度、内部组织等因素的影响,还与试验时的环境温度有关,因而重复性较差。因此,用  $K$  来衡量和设计这些机械零件是不太合适的,一般只用  $K$  作为选择材料的参考。

#### 5. 疲劳强度

许多机械零件,如曲轴、齿轮、连杆、弹簧等,都是在大小或方向反复改变的交变载荷下工作的。零件在远低于材料的屈服强度下工作一定时间后,往往会产生裂纹或突然发生完全断裂,这种现象称为疲劳断裂。疲劳断裂前,零件无明显塑性变形,断裂往往突然发生,会造成严重事故,因此具有很大的危险性。材料在交变载荷作用下经受无数次循环而不致断裂的最大应力称为材料的疲劳强度或疲劳极限。

疲劳强度是通过疲劳试验机测得的。试样在交变应力  $\sigma$  作用下的断裂循环次数  $N$ ,其关系曲线如图 1-6 所示。由图可知,应力  $\sigma$  越低,断裂前的循环次数越多。当应力降低到某一值后,疲劳曲线与横坐标轴平行,表示当应力低于此值时,材料可经受无数次应力循环而不断裂,此时的应力即疲劳

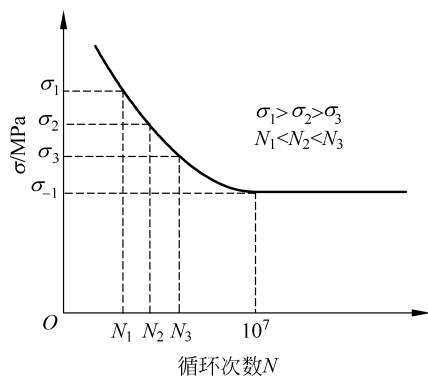


图 1-6 疲劳曲线

强度。

当循环应力对称时,疲劳强度可用 $\sigma_{-1}$ 表示。实际上,金属材料不可能做无数次交变载荷试验。通常规定钢铁材料的 $N$ 取 $10^7$ ,有色金属的 $N$ 取 $10^8$ 。影响疲劳强度的因素很多,除设计时在结构上注意减轻零件应力集中外,改善零件表面粗糙度和进行表面热处理(表面淬火、化学热处理等)也可提高材料的疲劳极限。

### 知识链接

“泰坦尼克号”之殇——“泰坦尼克号”邮轮堪称当时世界上最大、最豪华、设计最先进的邮轮,被称为“永不沉没”的海上都城。1912年4月在其处女航中,在北大西洋冰冷的洋面上与冰山相撞,产生了约92m的裂纹,并在短短3小时后沉入海底。后来科学家对邮轮的残骸进行分析,认定事故与材料的力学性能紧密相关。船体钢板以铆钉连接,其含硫量高,极大降低了韧性,在冰冷的海水中产生了冷脆现象。而铆钉含有较多矿渣成分,韧性很差。碰撞发生时,铆钉无法承受巨大剪切力而断裂,致使船体接连破损,海水大量涌入,这场灾难给人类带来了沉重打击,也让世人深刻认识到材料性能在船舶安全中的关键作用,成为航海史上永远的伤痛与警示。

## 1.1.2 金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能是物理、化学、力学性能的综合。按工艺方法的不同,可分为铸造性能、锻造性能、焊接性能和切削加工性能等。如果某种材料在某种工艺方法中的工艺性能好,就意味着能用简单的工艺加工出高质量、低成本的零件或毛坯。因此,设计机械零件和选择工艺方法时,都要考虑金属材料的工艺性能。各种工艺性能将在以后相关章节中分别介绍。

## 1.2 铁碳合金

### 1.2.1 纯金属与合金的晶体结构

#### 1. 晶体结构的基本概念

##### 1) 晶格

晶体中原子按照一定的规则呈现周期性排列的方式称为晶体结构,如图1-7(a)所示。为了便于研究晶体结构,通常把每个原子抽象成一个静止的刚球,并缩小为一个几何质点,再用假想的线将这些几何质点连接起来,形成一个具有规律性的空间格子,称为晶格,如图1-7(b)所示。晶格中的每个点称为结点。

##### 2) 晶胞

从晶格中取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元进行分析,这个最小的几何单元称为晶胞,如图1-7(c)所示。晶胞的大小和形状可用晶胞的棱边长 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 和棱边夹角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 来描述,称为晶格常数。图1-7(c)中, $a=b=c$ , $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。显然,晶胞的大小取决于晶胞的三条棱的长度( $a$ 、 $b$ 、 $c$ ),而晶胞的形状取决于这些棱之间的夹角( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )。