



普通高等学校机械基础课程规划教材

# 机械制造基础

◎ 主 编 夏绪辉 谢良喜



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

普通高等学校机械基础课程规划教材

# 机械制造基础

主 编 夏绪辉 谢良喜  
副主编 吴海华 赵 刚 肖 明  
杜 辉 王 蕾

华中科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书共7章,分别介绍了金属材料及热处理概论、铸造、金属塑性成形、焊接、金属切削的基础知识、常用切削加工方法以及先进制造技术。

本书的内容深入浅出,简明易懂,体系完整,实用性强,可作为高等院校机械类各专业学生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/夏绪辉,谢良喜主编. —武汉:华中科技大学出版社,2014.6

ISBN 978-7-5609-9775-9

I. ①机… II. ①夏… ②谢… III. ①机械制造-高等学校-教材 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 118697 号

机械制造基础

夏绪辉 谢良喜 主编

责任编辑:姚 幸

封面设计:刘 卉

责任校对:马燕红

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:仙桃市新华印务有限责任公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:17.25

字 数:366千字

版 次:2014年8月第1版第1次印刷

定 价:35.00元



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

# 前 言

“机械制造基础”是机械类各专业的一门主要专业基础课程。本书是根据教育部高等学校机械基础课程教学指导委员会批准的《机械制造基础教学基本要求》而编写的。

从 17 世纪 60 年代第一次工业革命兴起到现在,机械制造技术发生了巨大而深刻的变化,制造技术向自动化、柔性化、集成化、智能化、精密化、清洁化的方向发展,而传统的制造方法及理论则是其根基,是从事机械设计、机械制造及相关工作必不可少的基础知识。

本书整合了材料成形工艺基础、金属切削原理、金属切削刀具、机床概论和现代先进制造技术等内容,坚持“以工艺为主”和“以常规为主”,同时兼顾学科前沿的一些新技术、新成果,以扩大学生的视野,激发其创新意识。本课程的实践性很强,课程的教学需要与金工实习、生产实习、实验教学及课程设计等多种教学环节密切配合。希望通过本课程的学习,学生能全面了解机械零件从毛坯到产品的加工方法,理解制造现象的本质原因,掌握必要的机械制造基本常识。

参加本书编写工作的有:武汉科技大学夏绪辉、王蕾(第 7 章)、谢良喜(第 3 章、第 5 章)、杜辉(第 1 章)、赵刚(第 2 章)、肖明(第 4 章),三峡大学吴海华(第 6 章)。谢良喜负责全书的统稿。文晓莉、崔广宇、让勇等同学参与了部分插图的绘制与文字校对工作。

本书在规划、编写及出版的过程中,得到了武汉科技大学教务处、武汉科技大学机械自动化学院、华中科技大学出版社的领导和老师们的大力支持。在本书的编写过程中,参阅了其他版本同类教材、相关资料和文献,并得到许多同行专家、教授的支持和帮助,在此衷心致谢。

由于编者水平有限,书中一定还存在一些不尽如人意的地方和错误,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2014 年 5 月

# 目 录

<b>第 1 章 金属材料及热处理概论</b> .....	(1)
1.1 金属及合金的基本性能 .....	(1)
1.2 金属和合金的晶体结构及结晶过程 .....	(8)
1.3 铁碳合金状态图.....	(16)
1.4 钢的热处理.....	(24)
习题 .....	(32)
<b>第 2 章 铸造</b> .....	(33)
2.1 铸造工艺基础.....	(33)
2.2 常用合金铸件的生产.....	(44)
2.3 砂型铸造.....	(57)
2.4 砂型铸件的结构设计.....	(70)
2.5 特种铸造.....	(76)
习题 .....	(87)
<b>第 3 章 金属塑性成形</b> .....	(94)
3.1 金属塑性成形概论.....	(94)
3.2 金属塑性变形后组织及性能变化.....	(96)
3.3 自由锻造.....	(99)
3.4 模型锻造.....	(99)
3.5 冲压成形 .....	(101)
3.6 其他塑性成形方法 .....	(104)
习题.....	(104)
<b>第 4 章 焊接</b> .....	(105)
4.1 概述 .....	(105)
4.2 焊条电弧焊 .....	(106)
4.3 其他常用的焊接方法 .....	(123)
4.4 常用金属材料的焊接 .....	(136)
4.5 焊接结构设计 .....	(143)
习题.....	(152)
<b>第 5 章 金属切削的基础知识</b> .....	(153)
5.1 切削运动与切削要素 .....	(153)
5.2 金属切削刀具 .....	(156)

---

5.3	金属切削机床 .....	(161)
5.4	金属的切削过程 .....	(163)
	习题 .....	(168)
<b>第 6 章</b>	<b>常用切削加工方法 .....</b>	<b>(169)</b>
6.1	车削工艺特点及其应用 .....	(169)
6.2	钻、镗削的工艺特点及其应用 .....	(174)
6.3	刨、拉削的工艺特点及其应用 .....	(183)
6.4	铣削的工艺特点及其应用 .....	(188)
6.5	磨削的工艺特点及其应用 .....	(194)
	习题 .....	(206)
<b>第 7 章</b>	<b>先进制造技术 .....</b>	<b>(207)</b>
7.1	先进制造技术概论 .....	(207)
7.2	计算机辅助设计与制造 .....	(209)
7.3	数控加工技术 .....	(222)
7.4	计算机辅助工艺过程设计 .....	(246)
7.5	计算机集成制造系统 .....	(250)
7.6	柔性制造系统 .....	(252)
7.7	几种典型先进制造技术简介 .....	(258)
	习题 .....	(268)
	参考文献 .....	(270)

# 第 1 章 金属材料及热处理概论

## 1.1 金属及合金的基本性能

工程材料分为金属材料和非金属材料两大类,在工业生产中的应用日益广泛。根据工程材料性能的不同,可用于制造不同的机械零件、工程部件等,在机械制造中具有举足轻重的作用。

众所周知,金属材料在地壳中储量非常丰富,且应具有较好的使用性能和工艺性能。其中工艺性能是指材料在各种加工过程中表现出来的性能,比如铸造性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。使用性能是指材料在使用过程中表现出来的性能,主要有物理性能、化学性能和力学性能等。因此,在本章的学习过程中,必须熟悉金属及合金的主要性能,为本课程的后续学习奠定基础。

在机械制造领域中,材料的选用主要以力学性能为依据。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。金属材料的力学性能主要有:强度、塑性、硬度、冲击韧度、疲劳强度等。

### 1.1.1 强度与塑性

强度是指在外力作用下材料抵抗塑性变形和断裂的能力。按照作用力的性质,强度可分为屈服强度、抗拉强度、抗弯强度和抗剪强度等。工程上常用来表示金属材料强度的指标有屈服强度和抗拉强度。

金属材料的强度指标和塑性指标是通过拉伸试验测定的。图 1-1 所示为拉伸标准试样。将拉伸试样装夹在拉伸试验机上,在试样两端缓慢施加载荷。随着拉伸力不断地增大,试样不断被拉长,直至试样被拉断为止。在整个拉伸过程中,试验机自动记录载荷  $F$  和伸长量( $\Delta L=L_1-L_0$ ),并绘制拉伸曲线。图 1-2 所示为低碳钢的拉伸曲线。由图 1-2 可知,当  $F=0$  时, $\Delta L=0$ ;随着载荷增加至  $F_e$  时, $\Delta L$  呈线性增加,此时去除载荷后,试样将恢复到原来的形状和尺寸,此时试样处于弹性变形阶段。当载荷超过  $F_e$  之后,试样不仅发生了弹性变形,还发生了塑性变形,形成永久变形,此时去除载荷后,试样不能恢复到原始的形状和长度。当外力增加到  $F_s$  以后,曲线出现水平或锯齿线段,此时载荷不变,但试样仍继续拉长,出现“屈服”现象, $s$  点称为屈服点。屈服现象过后,试样随着载荷的增加而伸长,进入强化阶段。当载荷增加到  $F_b$  ( $b$  点时),试样出现局部变细的“缩颈”现象。 $b$  点之后,载荷逐渐减小,变形主要集中于缩颈处。当载荷减小至  $F_k$  时,试样被拉断。

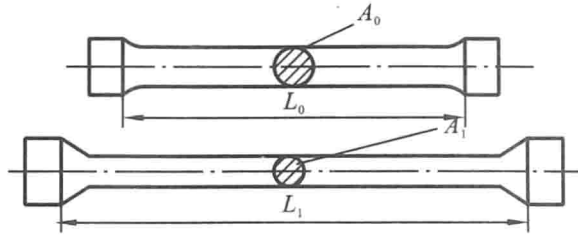


图 1-1 拉伸试样

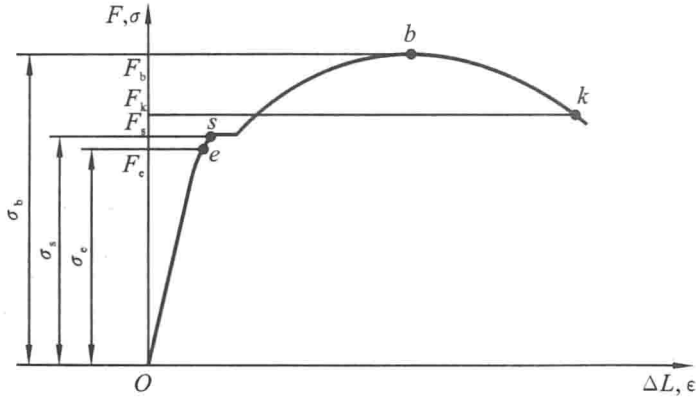


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

### 1. 强度

强度是指金属材料在力的作用下,抵抗塑性变形和断裂的能力,通常用应力值来表征(试样单位横截面的拉力用符号  $\sigma$  表示,即  $\sigma = F/A_0$ ),图 1-2 可变为应力-应变曲线,其横坐标的变形量用应变  $\epsilon$  表示( $\epsilon = \Delta L/L_0$ )。通过拉伸测试试验得到的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

(1) 屈服强度(也称屈服点) 是指金属材料开始产生明显塑性变形时的最小应力,用符号  $\sigma_s$  表示,即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \text{ (MPa)} \tag{1-1}$$

式中:  $F_s$ ——屈服时的最小载荷(N);

$A_0$ ——试样原始截面积( $\text{mm}^2$ )。

对于某些材料,如铸铁等脆性材料无明显的屈服现象,无法测定  $\sigma_s$ ,工程上规定产生 0.2% 塑性变形时的应力作为该材料的屈服点,用  $\sigma_{0.2}$  表示。

(2) 抗拉强度 是指材料在拉断前所承受的最大应力,用符号  $\sigma_b$  表示,即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \text{ (MPa)} \tag{1-2}$$

式中:  $F_b$ ——试样断裂前所承受的最大载荷(N)。

在设计机械零件时,选择金属材料的重要依据是屈服强度和抗拉强度。由于某些机械零件工作时(如螺栓),不允许发生塑性变形,因此多以屈服强度为强度设计依



据。而对于脆性材料来说,必须使用抗拉强度为强度指标。

## 2. 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下产生不可逆转的永久变形而不发生断裂的能力。塑性指标也是通过拉伸试验测得的。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

(1) 伸长率 是指试样断裂后,其标距长度的伸长量  $\Delta L$  与原始标距  $L_0$  的百分数,即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: $L_0$ ——试样原始标距长度(mm);

$L_1$ ——试样拉断后的标距长度(mm)。

(2) 断面收缩率 是指试样断裂后,断口处截面积与原始横截面积的百分数,即

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中: $A_0$ ——试样的原始横截面积( $\text{mm}^2$ );

$A_1$ ——试样拉断后断口处横截面积( $\text{mm}^2$ )。

伸长率和断面收缩率可以较可靠地反应材料的塑性,两者数值越大,表明金属材料的塑性越好。通常,工程上把  $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料, $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料。

### 1.1.2 硬度

金属材料抵抗局部变形,特别是局部塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。材料的硬度是专用的硬度计测量的。常用的有布氏硬度和洛氏硬度。

#### 1. 布氏硬度

布氏硬度(HB)通过布氏硬度试验测得,实质上是指材料的抵抗能力,其原理如图 1-3 所示。

经规定的保持时间  $t(\text{s})$  后卸除载荷,然后测量试样表面压痕直径  $d(\text{mm})$ ,用压痕表面积  $A$  除载荷  $F$  所得的值即为布氏硬度值。其符号用 HB 表示,即

$$\text{HBS(HBW)} = \frac{F}{A} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (1-5)$$

式中:HBS(HBW)——用钢球(或硬质合金球)试验时的布氏硬度值( $\text{kgf/mm}^2$ );

$F$ ——试验力(N);

$A$ ——球面压痕表面积( $\text{mm}^2$ );

$D$ ——球体直径(mm);

$d$ ——压痕平均直径(mm)。

布氏硬度值一般不标出单位。在实际应用中,布氏硬度一般不用计算,而是用专用的刻度放大镜量出压痕直径  $d$ ,根据压痕直径的值,再从专门的硬度表中查出相应

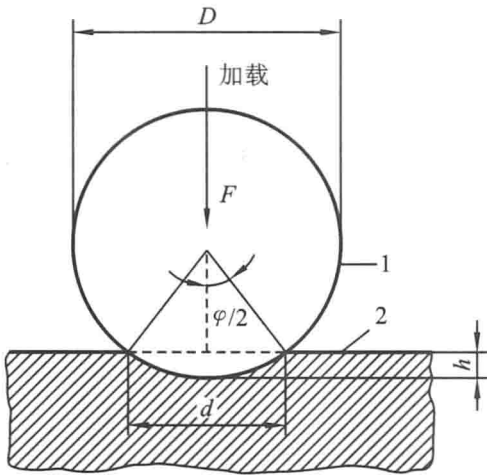


图 1-3 布氏硬度试验原理图  
1—压头;2—被测金属

的布氏硬度值。布氏硬度值越高,表示金属材料越硬。

布氏硬度值的表示方法为:硬度值+HBS或HBW+压球直径+载荷+载荷保持时间(10~15 s不标注)。例如:140HBS10/10 000/30表示用直径为 10 mm 的淬火钢球在 10 000 N 载荷作用下保持 30 s 测得的布氏硬度值为 140;300HBW5/7 500 表示用直径为 5 mm 的硬质合金球在 7 500 N 载荷作用下保持 10~15 s 测得的布氏硬度值为 300。

布氏硬度计以淬火钢球或硬质合金球为压头。当压头为淬火钢球时,布氏硬度值符号为 HBS,一般适用于测量软灰铁、有色金属等 450 HBS 以下的不太硬的材料,布氏硬度试验规范如表 1-1 所示。当压头为硬质合金球时,布氏硬度值符号为 HBW,适用于 450~650 HBW 的材料,从而扩大了布氏硬度法的适用范围。为了推动 HBW 的发展,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—2009)增加了压头直径和载荷范围。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度值范围/HB	试样厚度/mm	载荷 F /N(kgf)	钢球直径 D /mm	$0.102F/D^2$	载荷保持时间/s
钢和铸铁	450~140	>6	29 420(3 000)	10	30	10~15
		6~3	7 355(750)	5		
		<3	1 839(187.5)	2.5		
	<140	>6	9 807(1 000)	10	10	10~15
		6~3	2 452(250)	5		
		<3	613(62.5)	2.5		
有色金属及其合金(铜、铝)	$\geq 130$	>6	29 420(3 000)	10	30	30
		6~3	7 355(750)	5		
		<3	1 839(187.5)	2.5		
	35~130	>6	9 807(1 000)	10	10	30
		6~3	2 452(250)	5		
		<3	613(62.5)	2.5		
	<35	>6	4 903(500)	10	5	60
		6~3	1 266(125)	5		
		<3	307(31.25)	2.5		

布氏硬度试验使用的压头直径有:10 mm、5 mm、2.5 mm、2 mm 和 1 mm。如果试验条件允许,应尽量选用直径为 10 mm 的压头。因为压痕面积大,将消除金属材料个别组成相及微小不均匀性对平均性能的影响,试验数据稳定,重复性好。因此,布氏硬度试验特别适用于测定灰铸铁、轴承合金等具有粗大晶粒或组成相的金属材料的硬度。布氏硬度试验的缺点是对不同金属材料需要更换不同直径的压头和改变载荷,压痕直径的测量也较麻烦,因而用于自动检测时受到限制,且压痕较大,不宜薄片或成品检验。

## 2. 洛氏硬度

洛氏硬度(HR)试验也是一种压入硬度试验,其工作原理与布氏硬度基本相同,所不同的是通过测量压痕的深度来表示金属材料的硬度值。洛氏硬度的测试原理如图 1-4 所示,将压头施以一定的载荷(初载与主载之和),垂直压入被测试样表面,保持一定时间,卸除主载,根据在初载下测定残余压入深度来计算材料的洛氏硬度值。图中 0—0 为压头未和试样接触时的位置,1—1 为加初载后压头深入的深度  $h_0$ ;2—2 为压头加主载后的位置;3—3 为卸载后压头的位置  $h_1$ ,压痕深度为

$$h = h_1 - h_0$$

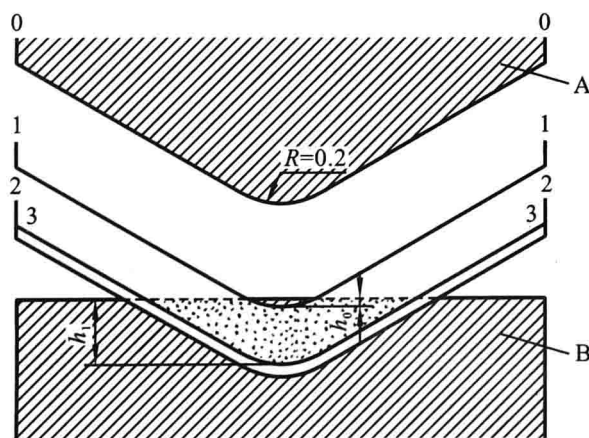


图 1-4 洛氏硬度试验原理图

A—圆形顶端 120°圆锥体压头;B—试样表面

根据  $h$  值及常数  $N$  和  $S$ (见 GB/T 230.1—2009《洛氏硬度试验》表 2),洛氏硬度可表示为

$$\text{洛氏硬度} = N - \frac{h}{S} \quad (1-6)$$

依照国家标准《金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分:试验方法(A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺)》(GB/T 230.1—2009),压头有:120°的金刚石圆锥体、 $\phi 1.588$  mm 和  $\phi 3.175$  mm 的淬火钢球,根据压头的种类和总载荷的大小,洛氏硬度常用 A, B, ..., K, N, T 共十一种标尺,分别用 HRA, HRB, ..., HRK, HRN, HRT 表示(HRN, HRT 为表面洛氏硬度)。其中常用 HRA、HRB、HRC 三种尺度表示。表 1-2

给出了常用测试规范及应用。其中洛氏硬度的表示方法采取“HR”，前面的数值为硬度数值，例如：55HRC表示用C尺度测得的洛氏硬度值为55。

表 1-2 洛氏硬度标尺及测试规范

洛氏硬度标尺	硬度符号	适用范围	压头类型	初始载荷 $F_0/N$	主载荷 $F_1/N$	总载荷 $F/N$	应用
A	HRA	20~88 HRA	金刚石圆锥体	98.07	490.3	588.4	硬质合金、表面渗碳钢、表面淬火钢
B	HRB	20~100 HRB	$\phi 1.588$ mm 球	98.07	882.6	980.7	有色金属、退火钢、正火钢、铸铁
C	HRC	20~70 HRC	金刚石圆锥体	98.07	1 373	1 471	淬火钢、调质钢

洛氏硬度试验的优点是操作简便迅速，硬度值可直接读出，压痕较小，可在工件上直接进行试验，采用不同标尺可测定各种软硬不同的金属材料和厚薄不一的试样的硬度，因而广泛用于热处理质量的检验。其缺点是压痕较小，代表性差，由于金属材料中有偏析及组织不均匀等缺陷，致使所测硬度值重复性差，分散度大。所以要求测量不同部位三个点，取其算术平均值作为被测定材料或构件的硬度值。

### 1.1.3 冲击韧度与金属疲劳

前面所提到的塑性、强度、硬度等都是静载荷作用下金属材料的力学性能指标。而实际上，多数机械零件和构件往往要承受动载荷的作用。如枪管、冷冲模、挂钩等都是冲击载荷下工作；齿轮、轴承、连杆、叶片等零件在工作过程中，受到随时间发生周期性变化的交变载荷作用而产生疲劳。因此，冲击韧度和疲劳是在动载荷作用下测定的金属材料的力学性能指标。

#### 1. 冲击韧度

金属材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧度。由于瞬时的冲击力作用所引起的变形和应力比静载荷大得多，因此，设计承受冲击载荷的零件时，必须考虑材料的冲击韧度。

测定金属的冲击韧度，工程上最普遍的试验方法为摆锤冲击试验。将被测材料按国家标准《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》(GB 229—2007)做成标准试样，其试验原理如图 1-5 所示，将带有缺口的试样放在冲击试验机的两支座上，然后把摆锤(质量为  $G$ )提到  $H_1$  高度，此时摆锤的势能为  $GH_1$ ，然后释放摆锤，冲断试样后摆锤回升到  $h$  高度，摆锤对试样所做的功  $A_k = G(H_1 - h)$ 。冲击韧度就是试样断口处单位面积所消耗的功，即

$$a_k = \frac{A_k}{S} \quad (1-9)$$

式中： $a_k$ ——冲击韧度( $J/cm^2$ )；

$S$ ——试样缺口处原始截面积( $cm^2$ )；

$A_k$ ——冲断试样所消耗的功( $J$ )。

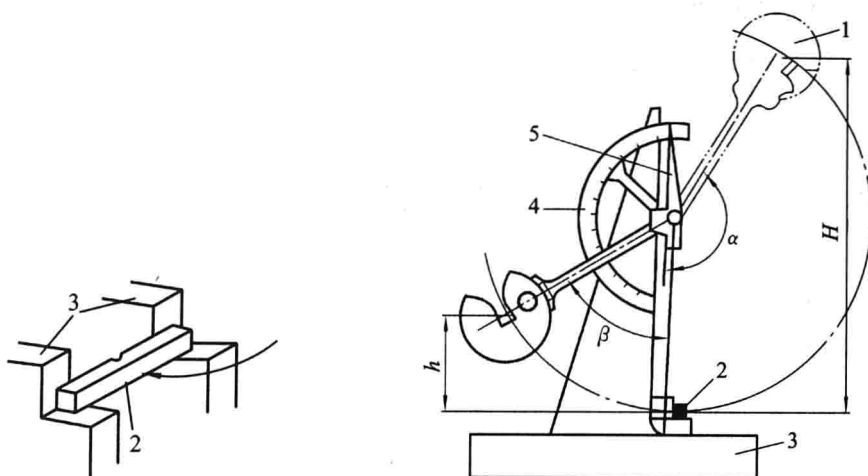


图 1-5 冲击试验原理

1—摆锤；2—试样；3—砧座；4—刻度盘；5—指针

冲击吸收功  $A_k$  值可从试验机的刻度盘上直接读出。 $A_k$  值的大小代表了材料的冲击韧度高低。冲击韧度  $a_k$  值是一个十分重要的力学性能指标， $a_k$  值越大，表明材料韧性越好，受到冲击时不易断裂。

## 2. 疲劳强度

金属材料在工作过程中往往受到交变应力或应变作用，尽管所受应力远低于材料的屈服强度和抗拉强度，但往往会产生裂纹或突然发生完全断裂，这种破坏过程称为疲劳断裂。80%的机械零件失效是属于疲劳破坏造成的。其特征是断裂前不产生明显的塑性变形，不易引起注意，故危险性非常大，常造成严重危害。

金属材料在指定循环基数的交变载荷作用下，不产生疲劳断裂所能承受的最大应力称为疲劳强度(也称疲劳极限)。金属材料的疲劳极限通常由旋转弯曲疲劳试验机测得，可知应力  $\sigma$  与循环次数  $N$  的关系曲线，如图 1-6 所示。由图中可以看出，在应力下降到某值后，疲劳曲线呈水平线，该值称为疲劳极限或疲劳强度，用  $\sigma_{-1}$  表示。此外，并且材料受到交变应力越大，其断裂应力循环次数  $N$  越少。各种金属材料应有一定的循环基数，一般规定钢的交变应力循环基数为  $10^7$  次，有色金属、不锈钢的交变应力循环基数为  $10^8$  次。

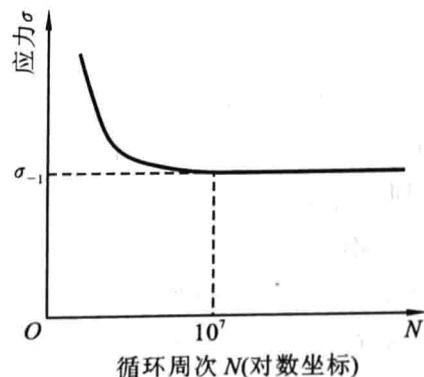


图 1-6  $N$ - $\sigma$  疲劳曲线图

导致疲劳断裂的原因很多，比如材料内部有气

孔、疏松、夹杂等组织缺陷,内部有残余应力的缺陷,表面有划痕、缺口等引起应力集中的缺陷等。这些缺陷导致材料内部的微裂纹产生,随着应力循环次数的增加,微裂纹逐渐扩展,最后造成零件不能承受所加载荷而突然断裂而失效。

为了提高材料和零件的疲劳强度,生产实际中常采用改善零件结构形状,避免尖角和尺寸的突然变化;减小表面粗糙度值;采取各种表面强化处理;减小内应力等方法。

## 1.2 金属和合金的晶体结构及结晶过程

金属材料的力学性能受诸多因素的影响,但经过大量的研究表明,金属材料的力学性能取决于材料的化学成分和内部晶体结构。因此,要正确、合理地选择和使用金属材料,就必须了解金属材料的内部组织结构和结晶规律并进一步掌握其性能变化的特征。

### 1.2.1 晶体结构的基本概念

#### 1. 晶体和非晶体

自然界中的固态物质按原子(或分子、或离子)内部的排列情况,可分为晶体和非晶体两大类。内部原子在空间按一定次序有规则地排列的物质称为晶体,如固态的金属及合金、金刚石、石墨、水晶等。内部原子在空间无规则地排列的物质称为非晶体,如玻璃、沥青、松香、石蜡等。晶体具有固定的熔点和各向异性等特征,非晶体则反之。

#### 2. 晶格、晶胞和晶格常数

图 1-7(a)所示为晶体中原子空间堆积的立体模型,许多原子堆积一起,很难看清其内部的排列规律。为了便于表明原子在空间的排列规则,假设原子静止,并将原子看成是一个几何质点,用几何直线把这些质点相连,从而组成空间格架。这种用于描述原子在晶体中排列规则的三维几何空间格架称为晶格(见图 1-7(b))。

晶体中原子排列规律具有明显的周期性变化,因此,在晶格中选取一个能够代表晶格特征的最小几何单元,称为晶胞。图 1-7(c)所示的是一个简单立方晶格的晶胞示意图。无数个大小、形状和位向相同的晶胞在空间的重复排列就构成整个晶格。因此,晶胞的特征就可以反映出晶格和晶体的特征。

不同的金属元素晶体结构不同,其晶胞大小也不相同。晶胞的大小和形状用晶格常数来表示,如图 1-7(c)所示。包括晶胞的三条棱边长度  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和三条棱边之间的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,共六个参数。

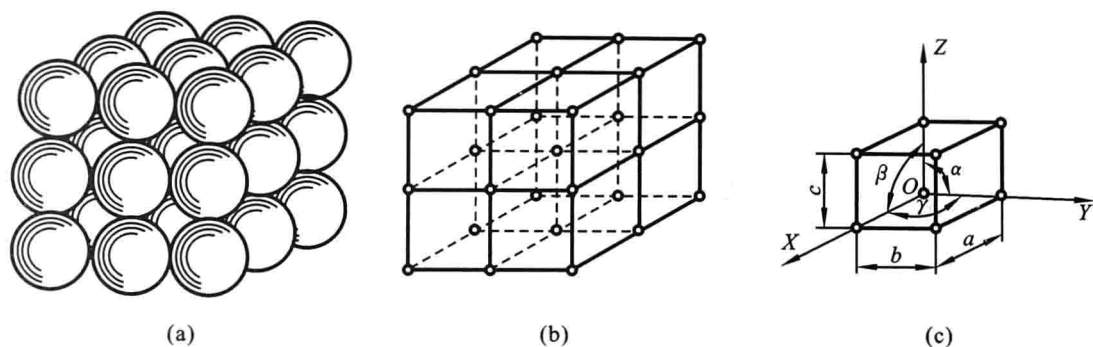


图 1-7 晶体结构示意图

(a) 晶体中简单原子排列 (b) 晶格 (c) 晶胞

## 1.2.2 金属的晶体结构

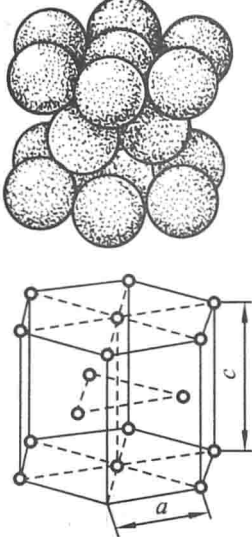
### 1. 纯金属的晶体结构

金属的晶格结构有很多种,其中常见的纯金属晶格结构有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。表 1-3 给出了金属的三种晶体结构特征。

表 1-3 三种晶体结构特征

晶体结构	晶体结构模型	晶胞中原子数	属于此类晶体结构的金属
体心立方晶格 (B. C. C)		<p>晶胞是一个立方体,其晶格常数 <math>a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ</math>。立方体的 8 个顶点和立方体的中心上各有一个原子,顶点上的原子为晶格中相邻 8 个晶胞所共有,中心原子为该晶胞所有</p>	<p>具有这类晶格的金属有铁(<math>\alpha</math>-Fe)、铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)等</p>
面心立方晶格 (F. C. C)		<p>晶胞也是一个立方体,立方体的 8 个顶点和立方体 6 个面的中心上各有一个原子;顶点上的原子为晶格中相邻 8 个晶胞所共有,各面中心上的原子为相邻两个晶胞所共有</p>	<p>属于这类晶格的金属有铁(<math>\gamma</math>-Fe)、铝(Al)、铜(Cu)、金(Au)、镍(Ni)等</p>

续表

晶体结构	晶体结构模型	晶胞中原子数	属于此类晶体结构的金属
密排六方晶格 (H. C. P)		<p>密排六方晶格的晶胞是一个六方柱体,六方柱体的12个顶点上和上、下两个底面的中心处各有1个原子,柱体内部还均匀分布着3个原子</p>	<p>属于这类晶格的金属有镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)等</p>

### 2. 多晶体结构

如果晶体内部的晶格位向完全一致,则称为单晶体,如图1-8(a)所示。实际使用的金属材料多由许多位向不同的小单晶体组成,这种晶体结构成为多晶,如图1-8(b)所示。由于每个小单晶体的外形多为不规则的颗粒状,所以常称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。

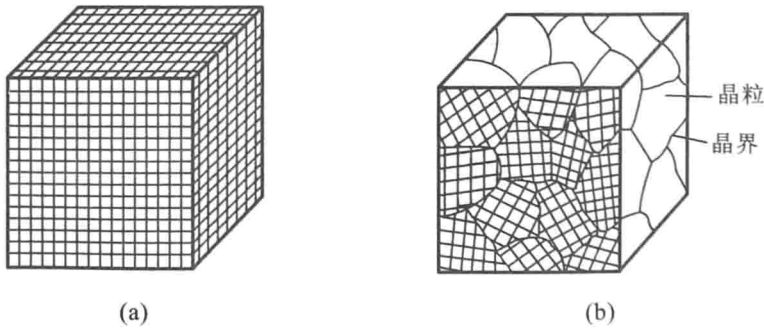


图 1-8 单晶体与多晶体结构

(a)单晶体 (b)多晶体

有些材料的晶粒尺寸非常小,只有用显微镜才能观察到晶粒。在显微镜下所观察到的晶粒大小、形状和分布称为显微组织。还有的金属材料晶粒稍大些,有些不用显微镜就可直接观察。

### 1.2.3 合金的晶体结构

#### 1. 合金的基本概念

(1) 合金 合金是指由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属熔合)组成



的具有金属特性的物质。如碳素钢、铸铁是铁与碳组成的合金。

(2) 组元 组成合金的元素称为组元,可以是纯金属和非金属的化学元素,也可以是某些稳定的化合物。例如,钢是由铁(Fe)元素和碳化三铁( $\text{Fe}_3\text{C}$ )组成的合金。

(3) 合金系 合金系是由两种以上的组元,按不同的比例浓度配制而成的一系列合金。按组元的数目不同,合金可分为二元合金系、三元合金系及多元合金系。

(4) 相 金属或合金中化学成分相同、晶体结构相同或原子聚集状态相同,并与其他部分之间有明确界面的独立均匀组成,这种状态称为相。例如,液态纯金属称为液相,结晶出的固态纯金属称为固相。

(5) 组织 通常,把在金相显微镜、电子显微镜下观察到的金属材料内部的微观形貌称为显微组织,简称组织。

## 2. 合金的晶体结构

与纯金属良好的塑性、导电性和导热性相比,合金的强度、硬度、耐磨性等力学性能都比纯金属高许多,某些合金还具有电、磁、记忆、耐热、耐蚀等特殊性能,因此工业中使用的金属材料几乎全部是合金。合金的结构比较复杂,根据组元之间在结晶时相互作用的不同,按合金晶体结构的基本属性,可把合金分为固溶体和金属化合物两类晶体结构。

### 1) 固溶体

在固态合金中,一种组元的晶格中溶入另一种或多种其他组元而形成的成分相同、性能均匀、结构与组元之一相同的固相,这称为固溶体。在互相溶解时,保留自己原有晶格形式的组元称为溶剂;失去自己原有晶格形式而溶入其他晶格的组元称为溶质。比如,在钢中,碳原子能溶解到铁的晶格中,其中铁是溶剂,碳是溶质。

根据溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置不同,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体两种。

(1) 置换固溶体 溶质原子置换溶剂晶格结点上部分原子而形成的固溶体,称为置换固溶体,如图 1-9(a)所示。根据固溶体中溶质原子的溶解情况,置换固溶体又可分为有限固溶体和无限固溶体。在固态时,若溶质原子和溶剂原子可以任意比例相互溶解(即溶质的溶解度可达 100%),这种固溶体称为无限固溶体,例如铜镍合金等。在固态时,溶质原子的融入有一定限度的置换固溶体,称为有限固溶体,如铁碳合金等。大多数的合金都属于有限固溶体,且溶质的溶解度通常随温度升高而增大,随温度降低而减小。

(2) 间隙固溶体 溶质原子嵌入溶剂晶格节点的间隙而形成的固溶体称为间隙固溶体,如图 1-9(b)所示。由于晶格间隙一般都较小,因此通常形成间隙固溶体的溶质原子多是原子半径较小的非金属元素,如碳(C)、氢(H)、氮(N)等。溶剂晶格的间隙有限,溶解度也有限,故间隙固溶体都是有限固溶体。

固溶体是均匀的单相组织,晶格类型仍然保持溶剂的晶格形式。溶质原子的融