



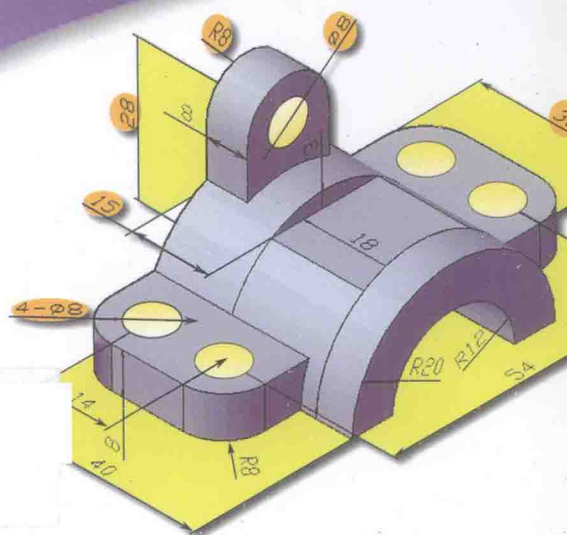
普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

机械设计基础

J I X I E S H E J I J I C H U

主编◎韩喆 程婧璠 林涛



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

机械设计基础

韩 喆 程婧璠 林 涛 编

北 京

冶金工业出版社

2014

内 容 简 介

全书分为4个大项目,包括设计概论、机构设计、零部件设计、传动装置设计,每个大项又包含若干小节并有相应的课后习题。全书突出重点知识点,强化职业技能训练,既方便高等院校教师教学,又方便学生学习。

本书适合为高等院校本科、高职高专、高级技校、技师学院的机电、数控、模具、汽车等专业的基础课教材,也可供机械工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/韩喆等主编. —北京:冶金工业出版社, 2014. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6522-3

I. ①机… II. ①韩… III. ①机械设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 003961 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

ISBN 978-7-5024-6522-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京明兴印务有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版, 2014 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16 印张; 385 千字; 253 页

32.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书针对普通本科和高职高专学生的学习特点,从工程应用的角度出发,在内容的选择和讲解方面,以当前高等院校学生就业技能实际需求以及学生对相关知识的实际接受能力为依据,体现针对性和实用性,以适应当前教学发展的需要。本书具有以下特点:

(1)知识点完整。全面讲述了机械设计的基础知识,包括从机械结构的受力分析到典型机构的应用和设计等,并且适当控制好难度,讲解深入浅出,以学生易于接受的方式,使学生获得一个完整的知识体系。

(2)重点突出。在讲述机械设计基础的各个具体知识点时,力求简化理论推导,重点突出机械零件、机构的应用及其设计方法的介绍,并配有大量的图例,让学生易学、易懂。

(3)实践性强。为培养学生的动手能力,加强技能训练,本书在相关章节安排了案例分析以及例题解析,以帮助学生更好地对所学知识进行总结和消化。

(4)素材丰富。本教材针对主要的知识点和较难理解的内容提供了虚拟实验,这样可以提高课堂教学效果,激发学生学习兴趣。

教师在讲授时,可根据具体的教学计划和教学条件等实际情况,对书中内容有针对性地进行选择,对相应的学时进行适当的增减。

本书由武汉船舶职业技术学院韩喆、武汉软件工程职业学院程婧璠和湖北随州技师学院林涛合编完成,在编写过程中,得到许多同行的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编写者水平有限,经验不足,书中若有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2013年4月



目 录

项目一 设计概论	(1)
1.1 课题一:本课程的性质和研究对象、主要内容和任务	(1)
1.2 课题二:机械工程材料	(1)
1.3 课题三:物体的受力分析	(62)
1.4 课题四:机械设计概述	(71)
项目二 机构的设计	(81)
2.1 课题一:平面连杆机构	(81)
2.2 课题二:凸轮机构	(96)
2.3 课题三:其他常用机构	(110)
项目三 零部件的设计	(120)
3.1 课题一:连接	(120)
3.2 课题二:轴	(139)
3.3 课题三:轴承	(153)
项目四 传动装置的设计	(180)
4.1 课题一:带传动	(180)
4.2 课题二:齿轮传动	(194)
4.3 课题三:齿轮系	(227)
附录 型钢	(246)
参考文献	(250)

项目一 设计概论

1.1 课题一：本课程的性质和研究对象、主要内容和任务

随着科学技术的进步和生产过程的机械化、自动化水平的不断提高,除机械制造部门外,在动力、采矿、冶金、石油、化工、土建、轻纺、食品工业等各部门工作的工程技术人员,也常遇到机械设备的使用、维护、管理问题和机械产品的研制与开发问题。这就要求各个专业的工程技术人员都应具备一定的机械设计基础知识,才能更好地为国民经济现代化服务。因此,机械设计基础是重要的技术基础课。

本课程的研究对象是常用机构和通用零件。主要阐述机械设计的一般原则、步骤、应满足的基本要求,零件的设计准则和工作能力,常用工程材料选用、力学模型的简化与计算、常用机构、通用零件、传动装置等的工作原理、特点和基本设计方法。

机械设计基础是机类专业必修的一门专业技术基础课,其任务是使学生获得金属材料及热处理、力学、机械原理及机械零件的基本知识和基本技能。通过学习,学会选材、学会使用手册查阅资料、选用标准;研究机械零部件在载荷等因素作用下的平衡问题及承载能力,具有设计机械传动及简单机械装置的能力,同时为后续课程的学习和解决工程实际问题打下坚实的基础。

1.2 课题二：机械工程材料

1.2.1 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指在力的作用下,所显示与变形与破坏有关的性能。常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、冲击吸收功、疲劳极限等。

1.2.1.1 强度和塑性

A. 拉伸试验及拉伸曲线

静载荷拉伸试验是工业上最常用的力学性能试验方法之一。试验时在试样两端缓慢地施加试验力,使试样的标距部分受轴向拉力,沿轴向伸长,直至试样拉断为止。测定试样对外加试验力的抗力,可以求出材料的强度值;测定试样在断裂后塑性变形的大小,可以求出材料的塑性值。

试验前,将材料制成一定形状和尺寸的标准拉伸试样。图 1-1 所示为常用的圆形拉伸试样。若设试样从开始加载直到断裂前所受的拉力为 F ,与其所对应的试样原始标距长度 L_0 的伸长量 ΔL 绘成曲线,便得到拉伸曲线。图 1-2 为退火状态的低碳钢拉伸曲线。用试样原始截面积 S_0 去除拉力 F 得到应力,以试样原始标距 L_0 去除绝对伸长量 ΔL 得到应变



ϵ , 即 $\sigma = F/S_0$, $\epsilon = \Delta L/L_0$, 则力—伸长 ($F-\Delta L$) 曲线就成了工程上的应力—应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线。

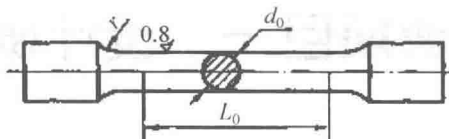


图 1-1 标准拉伸试样

从图 1-2 拉伸曲线可看出, 低碳钢在拉伸过程中明显地表现出不同的变形阶段, 所以通常将低碳钢的应力—应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线当作典型情况来说明材料的力学性能。整个曲线可分为弹性变形、塑性变形、及断裂三个阶段。在弹性变形阶段 (oe 段) 中, 若卸除试验力, 试样能完全恢复到原来的形状和尺寸; 其中在 op 阶段, 应力与应变呈正比关系, 即符合虎克定律。当应力超过, 塑性变形便进入屈服阶段 (es 段), 应力应变曲线出现平台或锯齿, 应力不增加或只有微小增加, 试样却继续伸长。屈服之后材料进入均匀塑性变形阶段 (sb 段), 均匀变形的原因是冷变形强化 (加工硬化) 所致, 变形与硬化交替进行, 变形量越大, 为使材料变形所需的应力越大。当试样变形达到最高点 b 时, 变形强化跟不上变形的变化, 不能再使变形转移, 致使某处截面开始减小。在断裂阶段 (bk 段), 应力增加, 变形加剧, 形成缩颈。此时, 施加于试样的力减小, 而变形继续增加, 直至断裂 (k 点)。

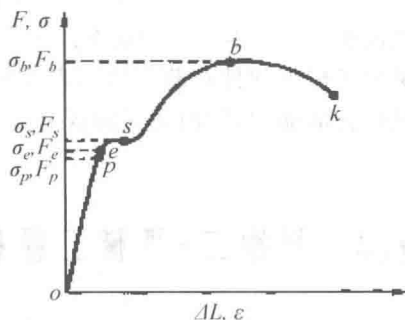


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

B. 常用强度性能指标

强度是材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。工程上常用的强度指标有规定非比例伸长应力、屈服强度、抗拉强度等。

a. 规定非比例伸长应力

金属材料在载荷作用下, 试样标注部分的非比例伸长达到规定的原始标注百分比时的应力, 以 σ_p 表示, 单位为 MPa。

$$\sigma_p = F_p / S_0$$

式中 F_p ——试样非比例伸长为规定量时的拉力, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

弹性极限是理论上的概念, 一般难以用实验直接测定。在实际工程上, 常以屈服点或规定残余伸长应力代替之。

规定非比例伸长应力是弹性元件设计和选材的主要依据。

b. 屈服强度



金属材料在载荷作用下,产生屈服时的最低应力称为材料的屈服强度,以 σ_s 表示,单位为 MPa:

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

式中 F_s ——材料屈服时的拉伸力。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服点外,大多数合金都没有屈服现象,因此提出“规定残余伸长应力”作为相应的强度指标。国家标准规定:当试样卸除拉伸力后,其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比的应力,作为规定残余伸长应力 σ_r 。表示此应力的符号应附以角标说明,例如 $\sigma_{r0.2}$ 表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力。

$$\sigma_r = F_r / S_0$$

式中 F_r ——产生规定残余伸长时的拉力, N。

国标曾将产生 0.2% 残余伸长率的规定残余伸长应力 $\sigma_{r0.2}$ 称为屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。目前一些技术资料仍沿用这一术语。

屈服强度是金属工程结构设计和选材的主要依据。

c. 抗拉强度

金属材料在载荷作用下,断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度(曾称强度极限),以 σ_b 表示,单位为 MPa:

$$\sigma_b = F_b / S_0$$

抗拉强度的物理意义是表征材料在载荷作用下,对最大均匀变形的抗力,表征材料在拉伸条件下所能承受最大力的应力值,它是设计和选材的主要依据之一,是工程技术上的主要强度指标。

C. 塑性性能指标

金属材料在载荷作用下,断裂前发生不可逆永久变形的能力就是塑性。常用的塑性指标是材料断裂时最大相对塑性变形,如拉伸时的断后伸长率和断面收缩率。

a. 断后伸长率

试样拉断后,标距的伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,以 δ 表示:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_1 ——试样拉断后的标距, mm;

L_0 ——试样原始标距, mm。

试样的长度和截面尺寸对 δ 是有影响的。按直径的尺寸分为标准试样和比例试样两种。标准试样的直径为 20 mm,而比例试样直径是任意的。因采用标距的不同,又有长、短试样之分。国家标准规定,长标距试样的标距以公式 $L_0 = 10d_0$,短试样的标距以公式 $L_0 = 5d_0$,式中的 d_0 和 S_0 分别为试样原始直径和原始截面积。短试样的伸长率用符号 δ_5 表示,长试样的伸长率用符号 δ_{10} 表示,对同一材料 $\delta_5 > \delta_{10}$,通常试验优先选取短的比例试样。

b. 断面收缩率

试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率,以 ψ 表示。其数值按下式计算:

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$



式中 S_0 ——试样原始面积, mm^2 ;

S_1 ——试样断裂后缩颈处的最小横截面积, mm^2 。

δ 或 ψ 数值越大, 则材料的塑性越好。

除常温试验之外, 还有金属材料高温拉伸试验方法(GB/T4338—1995)和低温拉伸试验方法(GB/T13239—1991)供选用。

1.2.1.2 硬度

硬度能够反映出金属材料在化学成分、金相组织和热处理状态上的差异, 是检验产品质量、研制新材料和确定合理的加工工艺所不可缺少的快速检测性能之一; 同时硬度试验是金属力学性能试验中最简便、最迅速的一种方法。

硬度实际是指一个小的金属表面或小的体积内抵抗弹性变形、塑性变形或抵抗破裂的一种抗力, 因此硬度不是一个单纯的确定的物理量, 不是基本的力学性能指标, 而是一个由材料的弹性、强度、塑性、韧性等一系列不同力学性能组成的综合性能指标, 所以硬度所表示的量不仅决定于材料本身, 而且还取决于试验方法和试验条件。

硬度试验方法一般采用压入法, 常用的硬度性能指标有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

A. 布氏硬度

布氏硬度的测定原理是用一定大小的试验力 $F(\text{N})$, 把直径为 $D(\text{mm})$ 的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面(图 1-3), 保持规定的时间后卸除试验力, 用读数显微镜测出压痕平均直径 $d(\text{mm})$, 然后按公式求出布氏硬度 HB 值, 或者根据 d 值从有关的布氏硬度表中查出 HB 值:

$$HBS(HBW) = 0.102 \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

由于金属材料有硬有软, 被测工件有厚有薄, 有大有小, 如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D , 就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此, 在生产中进行布氏硬度试验时, 要求能使用不同大小的试验力和压头直径, 对同一种材料采用不同的 F 和 D 进行试验时, 能否得到同一的布氏硬度值, 关键在于压痕几何形状的相似, 即可建立 F 和 D 的某种选配关系, 以保证布氏硬度的不变性。

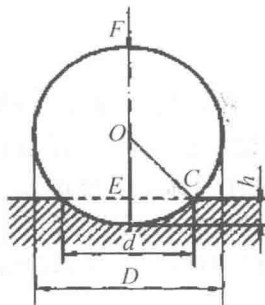


图 1-3 布氏硬度试验原理

国家标准(GB231—1984)规定布氏硬度试验时, 常用的 $0.102F/D^2$ 的比例为 30、10、2.5 三种, 根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同, 按照表 1-1 的规范选择试验压头(钢球)直径 D 、试验力 F 及保持时间。



表 1-1 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度使用范围(HBS)	球直径 D/mm	$0.102F/D^2$	试验力 F/N	试验力保持时间/s	备注
钢铸铁	≥ 140	10	30	29420	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍。 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍。
		5		7355		
		2.5		1839		
	< 140	10	10	9807	10~15	
		5		2452		
		2.5		613		
非铁金属材料	≥ 130	10	30	29420	30	试样厚度至少应为压痕深度的 10 倍。试验后,试样支撑面应无可见变形痕迹
		5		7355		
		2.5		1839		
	35~130	10	10	9807	30	
		5		2452		
		2.5		613		
	< 35	10	2.5	2452	60	
		5		613		
		2.5		153		

淬火钢球作压头测得的硬度值以符号 HBS 表示,用硬质合金球作压头测得的硬度值以符号 HBW 表示。符号 HBS 和 HBW 之前的数字为硬度值,符号后面依次用相应数值注明压头直径(mm)、试验力(0.102FN)、试验力保持时间(s)(10~15s 不标注)。例如:500HBW5/750,表示用直径 5mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500;120HBS10/1000/30,表示用直径 10mm 的钢球压头在 9807N 试验力作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。

目前,布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材的硬度测试。

B. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的性能试验方法,它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。

洛氏硬度试验原理如图 1-4 所示。它是用顶角为 120° 金刚石圆锥体或直径为 1.588mm (1/16in) 的淬火钢球作压头,先施加的初始试验力 F_1 (98N),再加上主试验力 F_2 ,其总试验力 $F=F_1+F_2$ (588N、980N、1471N)。图中 0-0 为压头没有与试样接触时的位置;1-1 为压头受到初试验力 F_1 后压入试样的位置;2-2 为压头受到总试验力 F 后压入试样的位置经规定的保持时间,卸除主试验力 F_2 ,仍保留初试验力 F_1 ,试样弹性变形的恢复使压头上升到 3-3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为 h ,即 1-1 位置至 3-3 的位置。金属越硬, h 值越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念,故人为的规定一常数 K 减去压痕深度 h 的值作为洛氏硬度指标,并规定每 0.002 mm 为一个洛氏硬度单位,用符号 HR 表示,则洛氏硬度值为:

$$HR = \frac{K - h}{0.002}$$



由此可见,洛氏硬度值是一无量纲的材料性能指标,使用金刚石压头时,常数 K 为 0.2,使用钢球压头时,常数 K 为 0.26。

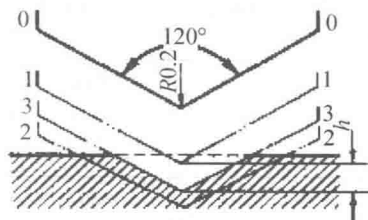


图 1-4 洛氏硬度试验原理

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度,采用了不同的压头和总负荷组成几种不同的洛氏硬度标度,每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后加以注明,我国常用的是 HRA 、 HRB 、 HRC 三种,试验条件(GB230—1991)及应用范围见表 1-2。洛氏硬度值标注方法为硬度符号前面注明硬度数值,例如 $52HRC$ 、 $70HRA$ 等。

洛氏硬度 HRC 可以用于硬度很高的材料,操作简便迅速,而且压痕很小,几乎不损伤工作表面,故在钢件热处理质量检查中应用最多。但由于压痕小,硬度值代表性就差些。如果材料有偏析或组织不均匀的情况,则所测硬度值的重复性差,故需在试样不同部位测定三点,取其算术平均值。

上述硬度试验方法中,布氏硬度试验力与压头直径受制约关系的约束,并有钢球压头的变形问题;洛氏硬度各标度之间没有直接的简单的对应关系。维氏硬度(用符号 HV 表示)克服了上述二种硬度试验的缺点,其优点是试验力可以任意选择,特别适用于表面强化处理(如化学热处理)的零件和很薄的试样,但维氏硬度试验的生产率不如洛氏硬度试验高,不宜用于成批生产的常规检验。维氏硬度的测定原理与布氏硬度相类似,其试验方法和技术条件可参阅有关国家标准。

表 1-2 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总实验力 F/kN	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120° 金刚石圆锥体	0.5884	70~85HRA	硬质合金,表面淬硬层,渗碳层
HRB	$\phi 1.588mm$ 钢球	0.9807	25~100HRB	非铁合金,退火、正火钢等
HRC	120° 金刚石圆锥体	1.4711	20~67HRC	淬火钢,调质钢

1.2.1.3 冲击吸收功

机械零部件在工作过程中不仅受到静载荷或交变载荷作用,而且受到不同程度的冲击载荷作用,如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时,必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧性。

目前最常见的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验,其试验原理如图 1-5 所示。

将被测定的材料先加工成标准试样,然后放在试验机的机架上,试样缺口背向摆锤冲击方向(见图 1-5),将具有一定重力 F 的摆锤举至一定高度 H_1 ,使其具有势能(FH_1),然后摆锤落下冲击试样;试样断裂后摆锤上摆到 H_2 高度,在忽略摩擦和阻尼等条件下,摆锤冲断



试样所做的功,称为冲击吸收功,以 A_K 表示,单位为 J ,则有 $A_K = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。在 GB/T229—1994 中,仅规定了冲击吸收功的概念。若用试样的断口处截面积 S_N 去除 A_K 即得到冲击韧性,用 a_K 表示,单位为 J/cm^2 。

$$a_K = A_K / S_N$$

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收功 A_K 越大,材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收功的 A_K 组成比较复杂,所以有时测得的 A_K 值及计算出来的 a_K 值不能真正反映材料的韧脆性质。

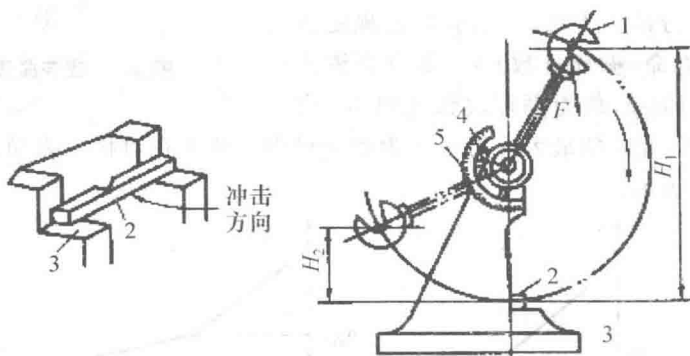


图 1-5 冲击实验原理图

1—摆锤;2—试样;3—机架;4—指针;5—刻度盘

长期生产实践证明 A_K 、 a_K 值对材料的组织缺陷十分敏感,能灵敏地反映材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,因而冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效办法之一。由于温度对一些材料的韧脆程度影响较大,为了确定出材料由塑性状态向脆性状态转化趋势,可分别在一系列不同温度下进行冲击试验,测定出 A_K 值随试验温度的变化。实验表明, A_K 随温度的降低而减小;在某一温度范围,材料的 A_K 值急剧下降,表明材料由韧性状态向脆性状态转变,此时的温度称为韧脆转变温度。根据不同的钢材及使用条件,其韧脆转变温度的确定有冲击吸收功、脆性断面率、侧膨胀值等不同的评定方法。

1.2.1.4 疲劳极限

许多机械零件如轴、齿轮、弹簧等许多工程结构都是在交变应力下工作的,它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。材料在循环应力和应变作用下,在一处或几处产生局部永久性累积损伤,经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程称为材料的疲劳破坏。

疲劳破坏与静载荷下的破坏不同,断裂前没有明显的塑性变化,发生断裂也较突然。这种断裂具有很大的危险性,常常造成严重的事故。据统计,大部分机械零件的失效是由金属疲劳造成的。因此,工程上十分重视对疲劳规律的研究。无裂纹材料的疲劳性能指标主要是疲劳极限和疲劳缺口敏感度等。

在交变载荷下,金属材料承受的交变应力(σ)和断裂时应力循环次数(N)之间的关系,通常用疲劳曲线来描述,如图 1-6 所示。金属材料承受的最大交变应力 σ 越大,则断裂时应力交变的次数 N 越小;反之 σ 越小,则 N 越大。当应力低于某值时,应力循环到无数次也不会发生疲劳断裂,此应力值称为材料的疲劳极限,以 σ_D 表示。常用钢铁材料的疲劳曲线,如



图 1-7a 所示形状有明显的水平部分,其它大多数金属材料的疲劳曲线,如图 1-7b 所示上没有水平部分,在这种情况下,规定某一循环次数 N_0 断裂时所对应的应力作为条件疲劳极限,以 $\sigma_R(N)$ 表示。

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳实验机上进行,具体试验方法参阅 GB4337—1984《金属旋转弯曲疲劳试验方法》。试验规范规定各种金属材料指定寿命(循环基数) N_0 (如合金钢为 10^7 ,低碳钢 5×10^6),应力循环次数达到 N_0 次仍不发生疲劳破坏,此时的最大应力可作为疲劳极限。通常在对称应力循环条件下的纯弯曲疲劳极限用 σ_{-1} 表示。

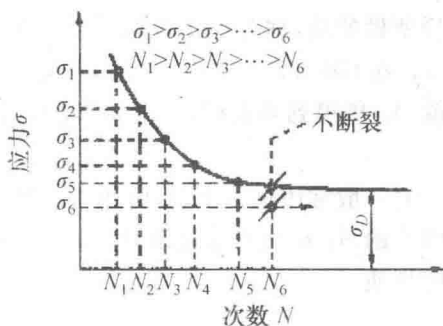


图 1-6 疲劳曲线示意图

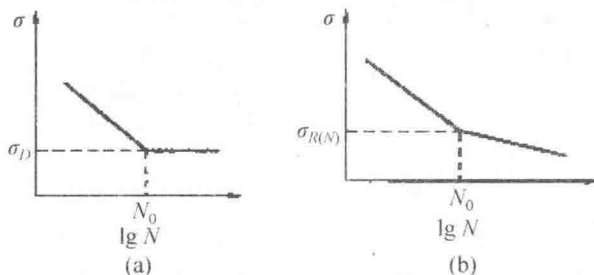


图 1-7 两种类型疲劳曲线

(a) 钢铁材料; (b) 部分非铁合金

由于疲劳断裂通常是从零件最薄弱的部位或外部缺陷所造成的应力集中处发生,因此疲劳断裂对许多因素很敏感,例如,循环应力特性、环境介质、温度、零件表面状态、内部组织缺陷等,这些因素导致疲劳裂纹的产生或裂纹迅速扩展而降低疲劳寿命。

为了提高零件的疲劳抗力,防止疲劳断裂事故的发生,在进行机械零件设计和加工时,应选择合理的结构形状,防止表面损伤,避免应力集中。由于金属表面是疲劳裂纹易于产生的地方,而实际零件大部分都承受交变弯曲或交变扭转载荷,表面处应力最大。因此,表面强化处理就成为提高疲劳极限的有效途径。

由于工程实际的要求,对疲劳的研究工作已逐渐从正常条件下的疲劳问题扩展到特殊条件下的疲劳问题,如腐蚀疲劳、接触疲劳、高温疲劳、热疲劳、微动磨损疲劳等。对这些疲劳及其测试技术还在广泛进行研究,并已逐步标准化。

1.2.2 金属材料的晶体结构与结晶

不同的金属材料具有不同的力学性能;即使是成分相同的材料,当经过不同的冷热加工后性能也会有很大差异。材料性能上的差异主要取决于金属内部原子排列规律和结构缺陷。

1.2.2.1 金属的晶体结构

A. 金属是晶体

固态物质根据其原子排列特征,可分为晶体和非晶体两类。晶体的特点是:(1)组成晶

体的基本质点(原子、离子或分子)在三维空间呈规则排列,因此晶体一般有规则的外形;(2)具有一定的熔点;(3)具有各向异性。一般情况下固态金属都是晶体。

B. 晶体结构的基本概念

实际晶体中的各类质点(主要是原子)虽然都是在不停地运动着,但是,通常在讨论晶体结构时,常把构成晶体的原子看成是一个个固定的小球,这些原子小球按一定的几何形式在空间紧密堆积,如图 1-8(a)所示。

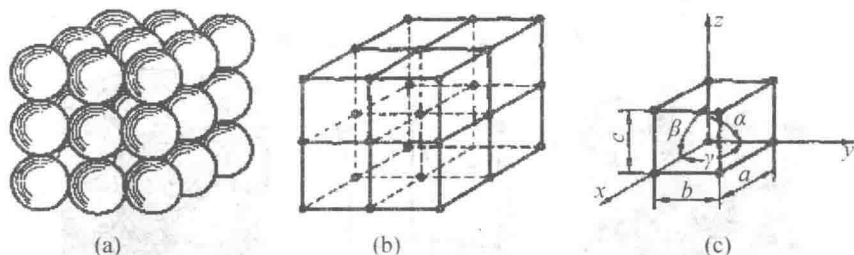


图 1-8 简单立方晶格与晶胞示意图

(a) 晶体中的原子排列; (b) 晶格; (c) 晶胞及晶格参数表示方法

工程上便于描述晶体内部原子排列的规律,人为地将原子视为一个几何质点,并用一些假想的线条将各原子连接起来,便形成一个空间格子,简称晶格,如图 1-8(b)所示。由于晶体中原子作周期性规则排列,因此可以在晶格内取一个能代表晶格特征的,由最少数目的原子排列成最小结构单元来表示晶格,称为晶胞,如图 1-8(c)所示。不难看出晶格是由晶胞不断重复堆砌而成;通过对晶胞的研究可找出该种晶体中原子在空间的排列规律。

C. 常见金属的晶体结构

根据晶体细胞中原子小球排列的规律不同,可以将晶格基本类型划分为 14 种。在金属材料中,常见晶格类型有体心立方晶格、面心立方晶格、密排立方晶格三种。

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,在立方体的八个角上和晶胞中心各有一个原子,如图 1-9 所示。体心立方晶胞每个角上的原子均为相邻八个晶胞所独有,所以体心立方晶胞中的原子数为 $1 + 8 \times 1/8 = 2$ 个。属于这种晶格类型的金属有 α -Fe、Cr、W、Mo、V 等。

原子在晶格中排列的紧密程度对晶体性质有较大影响,晶胞中原子所占有的体积与晶胞体积的比值称为晶格的致密度。晶格的致密度越大,则原子排列越紧密。体心立方晶格的致密度为 0.68。这表明在体心立方晶格中有 68% 的体积被原子所占有,其余为空隙。

面心立方晶胞和密排立方晶胞示意图分别如图 1-10 和图 1-11 所示,三种典型晶体结构晶格特征见表 1-3。属于面心立方晶格类型的金属有 γ -Fe、Cu、Ni、等;属于密排六方晶格类型的金属有 Mg、Zn、Cd、 α -Ti 等。

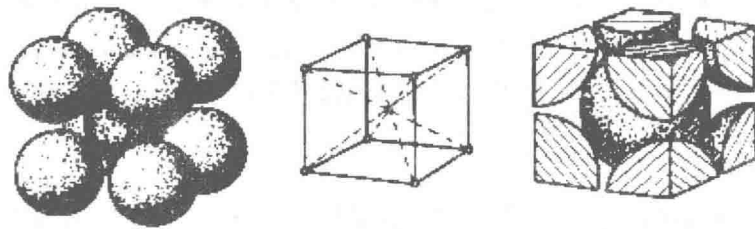


图 1-9 体心立方晶胞示意图

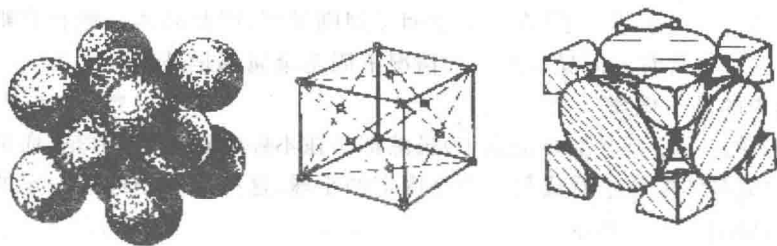


图 1-10 面心立方晶胞示意图

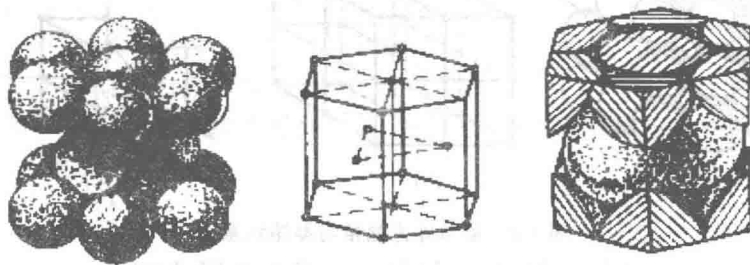


图 1-11 密排六方晶胞示意图

表 1-3 晶体类型及特性参数

结构类型	晶格常数	晶胞中原子数目	最近原子间距 d_0	致密度
面心立方	a	$1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$	$a/2$	0.74
体心立方	a	$1/8 \times 8 + 1 = 2$	$a/2$	0.68
密排立方	a, c	$1/6 \times 12 + 3 + 1/2 \times 2 = 6$	a	0.74

由于晶体中不同晶面和晶向上原子密度不同,原子间结合力也就不同,因此晶体在不同晶面和晶向上表现出不同的性能,这就是晶体具有各向异性的原因。但在实际金属材料中,一般却见不到它们具有这种各向异性的特征。例如在不同晶向测得的 α -Fe 单晶的弹性模量是不同的,在 $[111]$ 方向 $E=286000\text{MPa}$,在 $[100]$ 方向 $E=132000\text{MPa}$,而实际应用的 α -Fe(工业纯铁)取样测试,从任何位向所测得的结果均为 $E=210000\text{MPa}$ 左右。这是因为金属实际晶体结构与理想晶体结构有很大的差异所致。

1.2.2.2 金属的实际晶体结构

A. 单晶体和多晶体

晶体内部的晶格位向完全一致的晶体称为单晶体。金属的单晶体只能靠特殊的方法制得。实际使用的金属材料都是由许多晶格位向不同微小晶体组成的:每个小晶体都相当于是一个单晶体,晶体内部的晶格位向是一致的;小晶体之间的位向却不相同。这种外形呈多面体颗粒状的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体如图 1-12 所示。

B. 晶体缺陷

金属晶体内部原子规则有序地排列是理想晶体的状态。实际上金属由于结晶或其他加工等条件的影响,内部原子排列并不是理想完整的,存在大量的晶体缺陷。这些缺陷的存在,对金属性能会产生显著的影响。

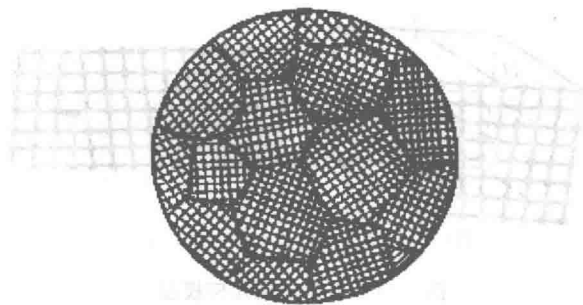


图 1-12 多晶体的晶粒与晶界示意图

根据晶体缺陷存在形式的几何特点,通常将晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

a. 点缺陷

点缺陷特征是在晶体空间三个方向尺寸都很小,不超过几个原子间距,最常见的点缺陷是晶格空位和间隙原子,如图 1-13 所示。由于点缺陷的存在,会使其周围的晶格发生畸变,并使材料的强度、硬度升高。

b. 线缺陷

线缺陷的特征是在晶体空间两个方向上尺寸很小,而第三个方向的尺寸很大。属于这一类型主要是各种类型的位错。

位错是一种很重要的晶体缺陷。其特点是围绕晶体中一条很长的线,在一定范围内原子发生有规律的错排,都离开它们原来的平衡位置。位错的主要类型有刃型位错和螺型位错。这里只介绍简单立方晶体中的刃型位错几何模型。如图 1-14 所示,在一个完整晶体的某一晶面(如图示 ABC 面)上,沿 EF 线垂直插入半个晶面。由于这多出的晶面像刀刃一样切入,使晶体中以 EF 为中心线的附近一定范围的区域内原子位置都发生错动,其特点是:ABC 晶面上半部原子受挤压,下半部受拉伸,而位错线中心的原子错动最大,晶格畸变严重,离位错线越远,晶格畸变越小,直至恢复正常。

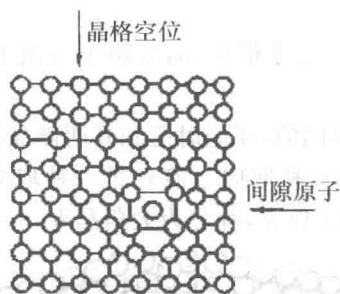


图 1-13 晶格点缺陷示意图

金属晶体中的位错线往往大量存在,相互连接呈网状分布。单位体积晶体中位错的总长度称为位错密度。透射电子显微镜可观察位错并测定其密度。一般退火状态下,金属的位错密度约 $10^4 \sim 10^6/\text{cm}^2$,经过冷变形加工后可增至约 $10^{12}/\text{cm}^2$ 。

晶体中的位错不是固定不变的,在相应外部条件下,晶体中的原子发生热运动或晶体受外力作用而发生塑性变形时,位错在晶体中能够进行不同形式的运动,致使位错密度及组态发生变化。

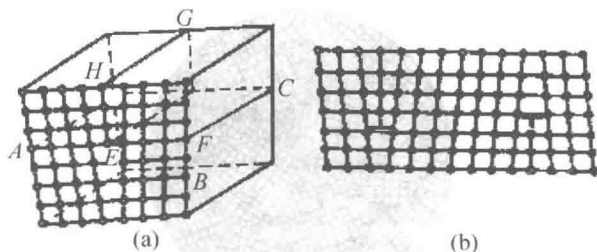


图 1-14 刃型位错几何模型

(a) 立体; (b) 平面

位错的存在及其密度的变化对金属的力学性能及组织转变有显著影响。图 1-15 所示为定性表达了金属强度与金属中位错密度之间的关系。如果用特殊方法制成不含位错的直径为 $1.6\mu\text{m}$ 的铁晶须,其抗拉力强度竟高达 13000MPa ,而退火纯铁的抗拉强度则低于 300MPa ,由于晶须中不含位错,不易塑性变形,故强度很高;而一般金属中含有位错,易于塑性变形,故强度较低。如果金属中位错密度很高,由于位错之间的相互作用和制约,金属强度也可以提高(见图 1-15 中经强化后的金属)。例如经剧烈冷变形的纯铁,由于晶体内产生了大量位错,其抗拉强度也就提高很多。

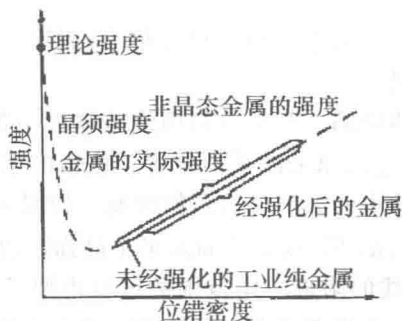


图 1-15 金属强度与位错密度之间的关系

c. 面缺陷

面缺陷特征是在一个方向上尺寸很小,而另两个方向上尺寸很大,主要指晶界和亚晶界。

晶界处原子排列与晶内是不同的,要同时受到其两侧晶粒不同位向的综合影响,所以晶界处原子排列是不规则的,是从一种取向过渡到另一种取向的过渡状态,如图 1-16 所示。大多数相邻晶粒的位向差都在 15° 以上,称之为大角晶界。

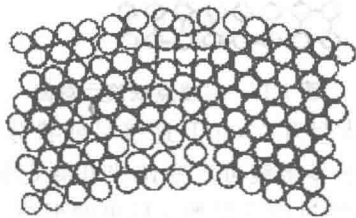


图 1-16 大角晶界的过渡结构模型

在一个晶粒内部,还可能存在着许多更细小的晶块,它们之间晶格位向差很小,通常小于 $2^\circ\sim 3^\circ$,这些小块称为亚晶(有时将细小的亚晶粒称为镶嵌块)。亚晶粒之间的界面称为亚