

高职高专“十二五”规划教材

机械制造基础

邹积德 主 编

胡传松 余新旻 副主编



JIXIE
ZHIZAO JICHU

6
3



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

机械制造基础

邹积德 主 编
胡传松 余新旻 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容分模块一机械工程材料（金属材料基础知识、钢的热处理、常用金属材料及其应用），模块二金属材料热加工工艺基础（铸造成形、锻压成形、焊接成形），模块三金属切削加工基础（金属切削原理与刀具基础、金属切削加工机床与加工方法、机械加工工艺与机械装配工艺基础），每章都有重点提示、学习目的、学习参考素材和习题。

本书注重实际应用，具有一定的先进性、综合性、应用性。可作为高职高专机械类专业教学用书，也可作为职业教育培训教材和相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

机械制造基础/邹积德主编. —北京：化学工业出版社，2011.12

高职高专“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-12776-1

I. 机… II. 邹… III. 机械制造-高等职业教育-教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 228988 号

责任编辑：李 娜

装帧设计：刘丽华

责任校对：郑 捷

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 323 千字 2012 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

编者根据高职高专技能型人才培养目标,按照“突出职业能力培养”的总体要求,体现以工学结合,“教、学、做”一体化为方向构建高职高专课程和教学内容体系的指导思想,在机械制造领域岗位群职业能力分析并结合用人单位的反馈信息、企业调研和多年来的专业建设、教材建设和教学实践的基础上编写了本教材。

本书在内容组织上从培养技术应用能力和加强素质教育出发,学习内容与工作过程相一致。为此,综合了“金属工艺学”、“金属热加工”和“金属切削加工”等相关知识,构建三个知识模块,内容设计上符合学生的认知规律,突出高职学生应用能力培养,体现职业教育的针对性。内容选择上贯彻“够用、实用及可操作性”的原则,不追求知识的系统性和完整性。尽量减少枯燥、繁琐和实用性不强的理论推导和灌输,注重应用。采用以案例导入教学的编写模式,理实结合并引用大量生产实际的案例,启发学生思考,培养学生实践能力,体现了职业教育的应用性。

本书编写分工:第1、7章由合肥通用职业技术学院胡传松编写,第2、3章由北京科技大学何飞编写,第4章由桂林电子科技大学鲍家定编写,第5章由合肥通用职业技术学院邹积德编写,第6章由合肥荣事达三洋电器股份有限公司洪伟编写,第8章由合肥通用职业技术学院余新旻编写,第9章由艾默生环境优化技术研发有限公司李洪山编写。

本教材由合肥通用职业技术学院邹积德担任主编,胡传松、余新旻担任副主编。

本教材在编写过程中,得到合肥通用职业技术学院领导、相关教师的大力支持和多方帮助,在此对所有支持者表示衷心的感谢。

由于教材的编写是教学改革的一次探索,更限于编者的水平,书中疏漏及不当之处在所难免,恳请各位同仁和广大读者不吝批评指正。

编者

2011年10月

目 录

模块一 机械工程材料

第1章 金属材料基础知识	1	2.3.1 钢的淬火	31
1.1 金属材料的性能	1	2.3.2 钢的回火	33
1.1.1 金属材料的力学性能	1	2.4 钢的表面热处理	34
1.1.2 金属材料的工艺性能	5	2.4.1 钢的表面淬火	34
1.2 金属的晶体结构和结晶	6	2.4.2 钢的化学热处理	35
1.2.1 金属的晶体结构	6	2.5 热处理工序位置安排及其应用实例	36
1.2.2 金属的实际晶体结构	8	2.5.1 热处理工序位置安排	36
1.2.3 纯金属的结晶	9	2.5.2 热处理工艺应用实例	37
1.3 合金的晶体结构与结晶	11	习题	37
1.3.1 合金的基本概念	11	第3章 常用金属材料及选用	39
1.3.2 合金的组织	11	3.1 钢	39
1.3.3 二元合金相图	13	3.1.1 常存元素对钢性能的影响	39
1.4 铁碳合金及相图	14	3.1.2 钢的分类、命名及编号	40
1.4.1 纯铁的同素异构转变	14	3.2 碳素结构钢和合金结构钢	41
1.4.2 铁碳合金的基本组织	15	3.2.1 碳素结构钢	41
1.4.3 铁碳合金相图分析及应用	16	3.2.2 合金结构钢	45
习题	21	3.2.3 合金工具钢与高速工具钢	49
第2章 钢的热处理	23	3.2.4 特殊性能钢	51
2.1 钢在热处理时的组织转变	24	3.3 铸铁	53
2.1.1 钢在加热时的组织转变	24	3.3.1 铸铁的分类	53
2.1.2 钢在冷却时的组织转变	26	3.3.2 常用铸铁及其应用	54
2.2 钢的退火与正火	29	3.4 有色金属及合金	57
2.2.1 钢的退火	29	3.4.1 铝及铝合金	57
2.2.2 钢的正火	31	3.4.2 铜及铜合金	60
2.3 钢的淬火与回火	31	习题	62

模块二 金属材料热加工工艺基础

第4章 铸造成形	63	4.3.2 金属型铸造	78
4.1 铸造成形的特点与工艺基础	63	4.3.3 压力铸造	79
4.1.1 铸造成形方法和主要特点	63	4.3.4 低压铸造	80
4.1.2 合金的铸造性能	63	4.3.5 离心铸造	80
4.2 砂型铸造	66	习题	81
4.2.1 砂型铸造工艺过程	66	第5章 锻压成形	82
4.2.2 铸造工艺与铸件结构工艺性	70	5.1 锻压成形的特点与工艺基础	82
4.2.3 铸件的缺陷分析和质量检验	76	5.1.1 锻压成型的主要特点	82
4.3 特种铸造简介	77	5.1.2 锻压成形的工艺基础	82
4.3.1 熔模铸造	77	5.2 锻压成形方法	85

5.2.1 自由锻	85	6.2.2 其他焊接方法	107
5.2.2 模锻	89	6.3 常用金属材料的焊接	111
5.3 板料冲压	92	6.3.1 金属材料的焊接性	111
5.3.1 板料冲压的特点及其应用	92	6.3.2 碳素结构钢和低合金结构钢的 焊接	112
5.3.2 板料冲压设备	92	6.3.3 不锈钢的焊接	112
5.3.3 板料冲压的基本工序	93	6.3.4 铸铁的补焊	113
习题	95	6.3.5 非铁金属及其合金的焊接	113
第6章 焊接成形	96	6.4 焊接缺陷和质量检验	113
6.1 焊接的特点与方法	96	6.4.1 常见焊接缺陷	113
6.1.1 焊接的特点	96	6.4.2 焊接质量检验	114
6.1.2 焊接方法分类	96	习题	114
6.2 常用焊接方法	97		
6.2.1 焊条电弧焊	97		

模块三 金属切削加工基础

第7章 金属切削原理与刀具基础	116	8.4 钻削与镗削加工	144
7.1 切削运动与切削要素	116	8.4.1 钻床与钻削加工	144
7.1.1 零件表面的形成	116	8.4.2 铰削加工	145
7.1.2 切削运动与切削要素	117	8.4.3 镗床与镗削加工	147
7.2 金属切削刀具	119	8.5 磨削加工	149
7.2.1 刀具的几何参数及标注	119	8.5.1 磨床与磨削加工范围	149
7.2.2 常用刀具材料及其应用	122	8.5.2 磨削加工方法	151
7.3 金属切削过程	124	8.5.3 磨削加工工艺特点及应用	153
7.3.1 切屑的形成及种类	124	8.6 刨削加工	154
7.3.2 积屑瘤	125	8.6.1 刨床与刨削加工	154
7.3.3 切削力	126	8.6.2 刨削加工工艺特点及应用	155
7.3.4 切削热和切削温度	127	习题	156
7.3.5 刀具磨损与刀具耐用度	127	第9章 机械加工工艺与机械装配 工艺基础	157
7.4 金属材料切削条件的选择	129	9.1 机械加工工艺过程的基本知识	157
7.4.1 金属材料的切削加工性	129	9.1.1 生产过程与工艺过程	157
7.4.2 金属切削条件的选择	130	9.1.2 生产纲领和生产类型	159
习题	132	9.1.3 机械加工工艺规程的作用、原则 和制订步骤	160
第8章 金属切削加工机床与加工 方法	134	9.2 零件的工艺分析与毛坯选择	164
8.1 金属切削机床基础知识	134	9.2.1 零件的工艺分析	164
8.1.1 金属切削机床的分类	134	9.2.2 毛坯的选择	165
8.1.2 金属切削机床的型号编制	135	9.3 工件的装夹与定位基准	165
8.2 车削加工	136	9.3.1 工件的装夹	165
8.2.1 车床与车削加工	136	9.3.2 工件的定位与定位基准的选择	166
8.2.2 工件在车床上的装夹	138	9.4 工艺路线的拟定	172
8.2.3 车削加工工艺特点及应用	139	9.4.1 加工经济精度及表面加工方法的 选择	172
8.3 铣削加工	139	9.4.2 加工阶段的划分	174
8.3.1 铣床与铣削加工	139	9.4.3 机械加工工序的安排	175
8.3.2 铣削要素与铣削方式	142		
8.3.3 铣削加工工艺特点及应用	144		

9.5 加工余量、工序尺寸及其公差	177
9.5.1 加工余量	177
9.5.2 工序尺寸及其公差	178
9.6 轴类零件的加工工艺	179
9.6.1 轴类零件概述	179
9.6.2 轴类零件加工工艺制订实例	181
9.7 盘、套类零件的加工工艺	184
9.7.1 盘、套类零件概述	184
9.7.2 盘、套类零件的加工工艺制订实例	185

参考文献	197
------------	-----

9.8 箱体类零件加工工艺	186
9.8.1 箱体类零件的工艺特征	186
9.8.2 箱体类零件工艺规程的制订实例	186
9.9 机械装配工艺基础	188
9.9.1 机械装配概述	188
9.9.2 装配方法	190
9.9.3 机械装配工艺规程	193
习题	195

模块一 机械工程材料

第1章 金属材料基础知识

本章重点

金属材料性能及铁碳合金相图。

学习目的

掌握金属材料的性能（强度、硬度、塑性）及其测量方法，了解金属的晶体结构、结晶过程及其组织特点，熟悉铁碳合金的成分、组织和性能的变化规律及铁碳合金相图的应用。

教学参考素材

金属材料力学性能试验、硬度试验，金属晶体结构图片，铁碳合金组织图片及实物金相观察。

1.1 金属材料的性能

金属材料在现代工业、农业、石油化工、国防、科学技术及日常生活中都得到广泛应用，是制造各类机器零件最常用的材料。因此，了解和熟悉各种金属材料的性能是合理选用材料、确定金属材料加工方法的重要依据。

金属材料的性能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所表现出来的性能，它包括力学性能、物理性能、化学性能等；工艺性能是指金属材料在各种加工过程中所表现出来的性能，如铸造性能、焊接性能、锻压性能、热处理性能和切削加工性能等。通常机械零件的设计和选材是以力学性能的指标作为主要依据。

1.1.1 金属材料的力学性能

力学性能是指金属材料在外力作用下表现出来的性能，主要有强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳强度等。

(1) 强度

强度是指金属材料在静载荷作用下抵抗变形和断裂的能力。按照载荷的作用方式不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。

金属材料的强度一般可通过拉伸试验测定。标准拉伸试样分为圆柱形和板状两类。圆柱形拉伸试样如图 1-1 所示，试样分为长试样（ $l_0/d_0=10$ ）和短试样（ $l_0/d_0=5$ ）两种，其中 d_0 为试样直径， l_0 为试样标距长度。

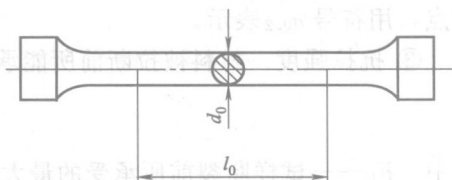


图 1-1 拉伸试样

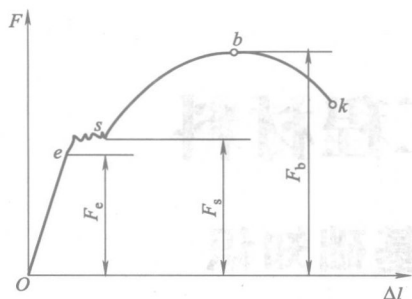


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

试验时，将标准试样安装在拉伸试验机上，缓慢加载，随着载荷的不断增大，试样的伸长量也逐渐增大，直至试样拉断为止。以试样所受载荷 F 为纵坐标，伸长量 ΔL 为横坐标，绘制出载荷与伸长量的关系曲线图，即拉伸曲线，求出相关的力学性能。

图 1-2 为退火低碳钢的拉伸曲线。由图可见，当载荷由零增大到 F_e 时，试样的伸长量与载荷成比例增加，此时卸除载荷，试样能完全恢复到原来的形状和尺寸，即试样处于弹性变形阶段（ oe 段）；当载荷超过 F_e 时，试样除产生弹性变形外，还开始出现塑性变形，即卸除载荷后，试样不能完全恢复到原来的形状和尺寸，当载荷增加到 F_s 后，在曲线上开始出现水平（或锯齿形）线段，即表示载荷不增加，试样却继续伸长，这种现象称为屈服。载荷超过 F_s 后，试样的伸长量又随载荷的增加而增大，此时试样已产生大量的塑性变形，称为均匀塑性变形阶段（ sb 段）。当载荷增加到最大值 F_b 时，试样开始产生局部截面变小，出现了“缩颈”现象，此时逐渐减小载荷，到达 k 点时试样被拉断。

金属材料的强度是用应力来度量的。材料受到载荷作用时其内部即产生一个与载荷相平衡的抵抗力（即内力），单位横截面上的内力称为应力，用 σ 表示，计算公式为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

常用的强度指标有弹性极限、屈服点和抗拉强度。

① 弹性极限 材料产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值，单位为 MPa，用符号 σ_e 表示。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (1-2)$$

式中 F_e ——试样产生完全弹性变形时的最大载荷，N；

A_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

② 屈服点与屈服强度 材料产生屈服现象时的最小应力值为屈服强度，单位为 MPa，用符号 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-3)$$

式中 F_s ——屈服时的最小载荷，N。

有些金属材料（如铸铁、高碳钢等脆性材料）在拉伸试验中没有明显的屈服现象，因此测定很困难。所以国标中规定，以试样的塑性变形量为试样标距长度的 0.2% 时的应力为屈服点，用符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。

③ 抗拉强度 材料被拉断前所能承受的最大应力值，单位为 MPa，用符号 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-4)$$

式中 F_b ——试样断裂前所承受的最大载荷，N。

(2) 塑性

金属材料在静载荷作用下，产生塑性变形而不破坏的能力。

金属材料的塑性值也是通过拉伸试验测得的。常用的塑性指标是伸长率 δ 和断面收缩

率 ϕ 。

① 伸长率 试样被拉断时标距长度的伸长量与原始标距长度的百分比,用符号 δ 表示,即

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 l_0 ——试样原始标距长度, mm;

l_k ——试样被拉断时的标距长度, mm。

② 断面收缩率 试样被拉断时,缩颈处的横截面面积的最大缩减量与原始横截面面积的百分比,用符号 ψ 表示,即

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 A_k ——试样被拉断时缩颈处的最小横截面面积, mm^2 。

断面收缩率不受试样尺寸的影响,因此更能可靠地反映材料的塑性。

金属材料的塑性好坏,对零件的加工和使用都具有十分重要的意义。塑性好的材料不但容易进行轧制、锻压、冲压等,而且所制成的零件在使用时万一超载,也能由于塑性变形而避免突然断裂。因此,大多数机械零件除满足强度要求之外,还必须具有一定的塑性,这样工作时才安全可靠。

(3) 硬度

硬度是指金属材料抵抗比它更硬物体压入其表面的能力,即抵抗局部塑性变形的能力。硬度是检验毛坯或成品件、热处理件质量的重要指标。目前生产中应用最广泛的硬度测定方法是压入法,常用的硬度实验有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

① 布氏硬度 布氏硬度试验法原理如图 1-3 所示。用一定直径的硬质合金球做压头,施加试验力压入被测金属表面,经规定的保持时间后卸除试验力,在被测金属表面上形成一个直径为 d 的压痕,计算出压痕单位面积上所承受试验力的大小,以此作为被测金属材料的布氏硬度值,用符号 HBW 表示。

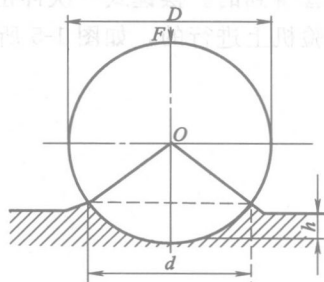


图 1-3 布氏硬度试验原理

$$\text{HBW} = \frac{F}{A} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-7)$$

式中 F ——试验力, N;

A ——压痕表面积, mm^2 ;

D ——压头直径, mm;

d ——压痕直径, mm。

由于布氏硬度压痕面积较大,能反应较大范围内金属各组成相综合影响的平均性能,而不受个别组成相和微小不均匀度的影响,因此,具有较高的测量精度。主要用来测定灰铸铁、有色金属以及经退火、正火和调质的钢材等。布氏硬度不适宜用来检验薄件或成品件。

② 洛氏硬度 洛氏硬度试验是用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球做压头,在规定的试验力作用下,将压头压入试件表面。经规定的保持时间后卸除载荷,根据压痕深度确定金属硬度值。图 1-4 为洛氏硬度的试验原理图,0—0 为 120° 金刚石

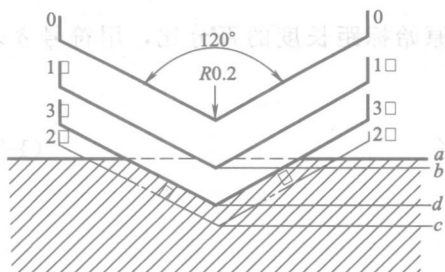


图 1-4 洛氏硬度试验原理

压头没有与试件表面接触时的位置；1—1 为加上初载荷（98.07N）后压入试件的位置；2—2 为压头受到初载荷和主载荷共同作用后压头压入试件的位置；3—3 为卸除主载荷后在初载荷作用下由于试件弹性变形的恢复使压头向上回升的位置。最后，压头受主载荷作用实际压入试件表面产生塑性变形的压痕深度为 bd ，洛氏硬度大小用 bd 大小来衡量。材料越硬，压痕 bd 值越小。

实际应用时洛氏硬度可直接从硬度计表盘上读出。洛氏硬度用符号 HR 表示。计算公式如下

$$HR = K - bd / 0.002 \quad (1-8)$$

式中 K ——常数（金刚石做压头， K 为 100；淬火钢球做压头， K 为 130）。

洛氏硬度计采用三种标度对不同硬度材料进行试验，硬度分别用 HRA、HRB 和 HRC 表示。洛氏硬度实验法操作简单迅速，能直接从刻度盘上读出硬度值；测试的硬度值范围较大，既可测定软的金属材料，也可测定最硬的金属材料；试样表面压痕较小，可直接测量成品或薄工件。但由于压痕小，对内部组织和硬度不均匀的材料其测量结果不准确，为提高测量精度，通常测定三个不同点取平均值。HRA 主要用来测量硬质合金、表面淬火钢等；HRB 主要用于测量软钢、退火钢、铜合金等；HRC 主要用于测量一般淬火钢件。

(4) 冲击韧度

金属材料在冲击载荷的作用下而不被破坏的能力称为冲击韧度。冲击韧度值是通过冲击试验得到的。摆锤式一次冲击试验是目前应用最普遍的一种试验方法。试验是在专门的冲击实验机上进行的，如图 1-5 所示。

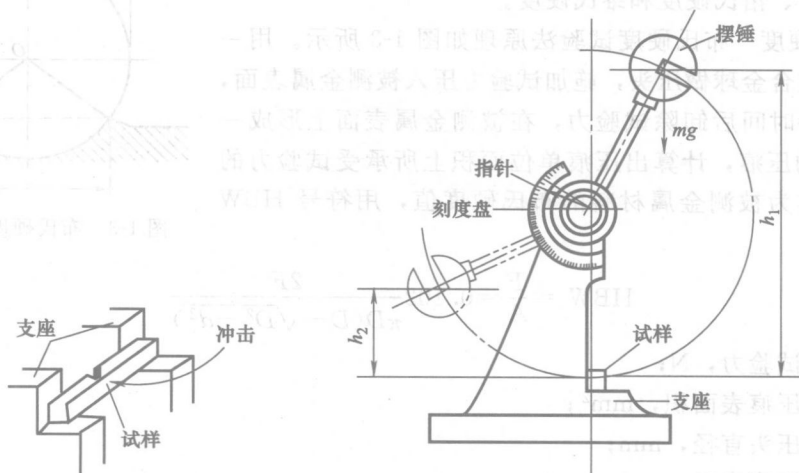


图 1-5 冲击试验原理

实验时，将金属材料制成的标准冲击试样放在冲击实验机上，试样缺口背向摆锤的冲击方向；将一定质量 m 的摆锤举至 h_1 的高度，然后由此高度落下冲击试样；试样断裂后，摆锤继续向前升到 h_2 高度。在此过程中所消耗的势能即为摆锤冲断试样所做的功，记为 A_k ，材料的冲击韧度 a_k 的计算公式为：

$$a_k = A_k / S_0 = G(h_1 - h_2) / S_0 \quad (1-9)$$

式中 A_k ——冲击吸收功, J;

G ——摆锤的重力, N;

h_1 ——摆锤举起的高度, cm;

h_2 ——冲断试样后摆锤的高度, cm;

a_k ——冲击韧度, J/cm²;

S_0 ——试样缺口处截面积, cm²。

冲击韧度 a_k 值愈大, 表明材料的韧性愈好, 受到冲击时不易断裂。 a_k 值的大小受很多因素影响, 不仅与试样形状、表面粗糙度、内部组织有关, 还与实验时的温度有关。因此冲击韧度值一般只作为选材时的参考, 而不能作为计算依据。

(5) 疲劳强度

许多机械零件如轴、齿轮、弹簧等都是在循环载荷作用下工作的, 其承受的是交变载荷。在这种载荷作用下, 虽然零件所受应力远低于材料的屈服点, 但在长期使用中往往会发生突然断裂。金属在循环载荷作用下产生疲劳裂纹并使其扩展而导致的断裂称为疲劳断裂。

疲劳断裂与缓慢加载时的断裂不同, 无论是脆性材料还是塑性材料, 疲劳断裂时都不产生明显的塑性变形, 断裂是突然发生的。因此, 疲劳断裂具有很大的危险, 常造成严重事故。据统计, 在损坏的机械零件中, 大部分是由于疲劳造成的。

工程上规定, 材料经受无数次应力循环, 而不产生断裂的最大应力称为疲劳强度。疲劳强度是通过疲劳试验测得材料承受的交变应力和断裂前应力循环次数 N 之间的关系曲线 (如图 1-6 所示) 来确定的。

从曲线上可以看出, 应力值愈低, 断裂前的应力循环次数愈多, 当应力降低到某一定值后, 曲线与横坐标轴平行。这表明, 当应力低于此值时, 材料可经受无数次应力循环而不断裂, 对称循环应力的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实践证明, 当钢铁材料的应力循环次数达到 10^7 次时, 零件仍不断裂, 此时的最大应力可作为疲劳强度。有色金属和某些超高强度钢, 工程上规定应力循环次数为 10^8 次时的最大应力作为它们的疲劳强度。

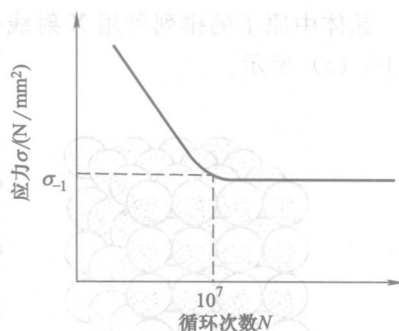


图 1-6 金属的疲劳曲线

金属产生疲劳同许多因素有关, 目前普遍认为是由于材料内部有组织缺陷 (如气孔、疏松、夹杂物等)、表面划痕及其他能引起应力集中的缺陷而导致产生微裂纹, 这种微裂纹随着应力循环次数的增加而逐渐扩展, 最后使零件突然产生断裂。

针对上述原因, 为了提高零件的疲劳强度, 除改善内部组织和外部结构形状避免应力集中外, 还可以通过提高加工工艺, 如降低零件表面粗糙度值和采取各种表面强化的方法 (如表面淬火、喷丸处理、表面滚压等) 来提高疲劳强度。

1.1.2 金属材料的工艺性能

金属材料成形加工的难易程度, 称为金属材料的工艺性能, 包括以下几个方面。

(1) 铸造性能

主要指液态金属的流动性和凝固过程的收缩性及偏析倾向。流动性好, 收缩和偏析倾向

小则铸造性能好。

(2) 锻造性能

主要是指金属锻造时,其塑性好坏和变形抗力大小。塑性大,变形抗力小则锻造性能好。

(3) 切削加工性能

工件材料接受切削加工的难易程度,称为材料的切削加工性能。切削加工性能的好坏与材料的物理和力学性能有关。

(4) 热处理工艺性能

材料在实施热处理工艺过程中所具有的工艺性能,包括淬透性、热处理应力倾向、加热和冷却过程中的裂纹形成倾向等。热处理工艺性能对于钢材十分重要。

1.2 金属的晶体结构和结晶

1.2.1 金属的晶体结构

(1) 晶体与非晶体

自然界中的固态物质,虽然外形各异、种类繁多,但都是由原子或分子组成的。根据原子在内部的排列特征可分为晶体与非晶体两大类。晶体是固态下原子在物质内部作有规则的排列。非晶体是固态下原子在物质内部排列无规则可循。

在自然界中除沥青、玻璃、石蜡、松香等非晶体外,绝大多数的固态物质都是晶体。如纯铝、纯铁及一切固态金属及其合金。晶体的特点是具有一定的熔点,呈各向异性。而非晶体与此相反。

晶体中原子的排列可用 X 射线分析等方法加以测定。晶体中最简单的原子排列情况如图 1-7 (a) 所示。

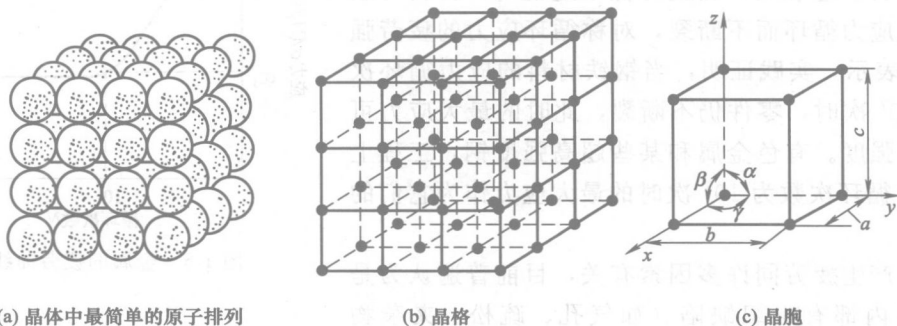


图 1-7 晶体中原子的排列与晶格示意图

(2) 晶体结构的概念

① 晶格 为了形象描述晶体内部原子排列的规律,人为地将原子抽象为几何点,并用一些假想的连线将几何点在三维方向连接起来,这样构成的空间格子,称为晶格,如图 1-7 (b) 所示。

② 晶胞 晶体中原子排列具有周期性变化的特点。因此,在研究晶体结构时,通常是从晶格中选取一个能够完全反映晶体特征的最小的几何单元来分析晶体中原子排列的规律,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 1-7 (c) 所示。

③ 晶格常数 如图 1-7 (c) 所示,晶格常数是用来表示晶胞的形状和大小的。晶胞的

棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 称为晶格常数，以 $\text{\AA}$ (埃) 为单位度量 ($1\text{\AA}=1\times 10^{-8}\text{cm}$)。当棱边长 $a=b=c$ ，棱边夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 时，这种晶胞称为简单立方晶胞。由简单立方晶胞组成的晶格称简单立方晶格。

(3) 金属晶格的类型

不同金属具有不同的晶格类型。除一些具有复杂晶格类型的金属外，大多数金属的晶体结构都是比较简单的。常见晶格类型有以下三种。

① 体心立方晶格 它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 1-8 所示。属于这个晶格类型的金属有铬 (Cr)、钨 (W)、钼 (Mo)、钒 (V)、 α 铁 ($\alpha\text{-Fe}$) 等。

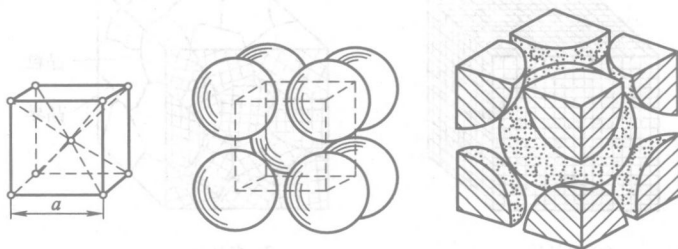


图 1-8 体心立方晶格结构

② 面心立方晶格 它的晶胞是一个立方体，在立方体的八个角上和六个面的中心各有一个原子，如图 1-9 所示。属于这个晶格类型的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、金 (Au)、银 (AS) 和 $\gamma\text{-Fe}$ 铁等。

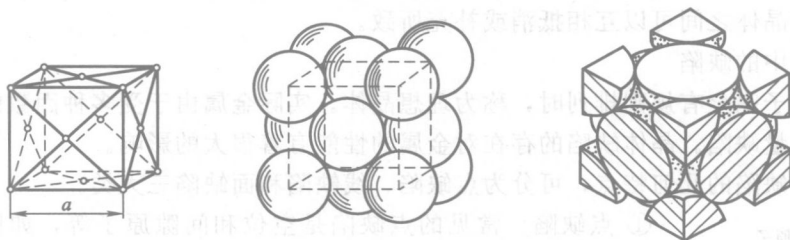


图 1-9 面心立方晶格结构

③ 密排六方晶格 它的晶胞是一个正六方柱体，它是由六个呈长方形的侧面和两个呈正六边形的上、下底面所组成。因此晶胞的大小要用柱体的高度 c 和六边形的边长 a 来表示。在密排六方晶胞的 12 个角上和上、下两个底面中心各有一个原子，另外在上、下底面之间还有三个原子，如图 1-10 所示。属于这个晶格类型的金属有镁 (Mg)、锌 (Zn)、铍 (Be)、 α 钛 ($\alpha\text{-Ti}$) 等。

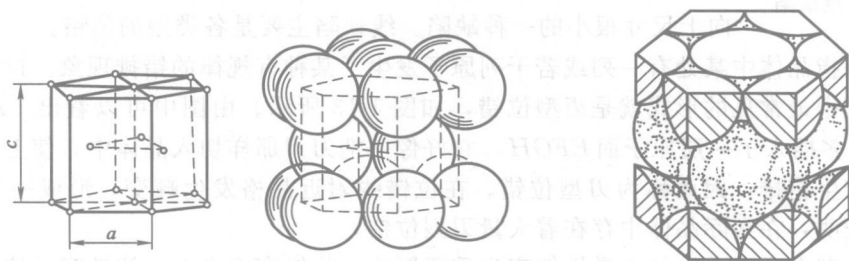


图 1-10 密排六方晶格结构

1.2.2 金属的实际晶体结构

(1) 单晶体与多晶体的概念

单晶体是指内部的晶格位向完全一致的晶体,如图 1-11 (a) 所示。在工业生产中,只有经过特殊制作才能获得单晶体,如半导体元件、磁性材料、高温合金材料等。而一般的金属材料,即使一块很小的金属中也含有许多颗粒状小晶体(晶粒)。每个小晶体的内部,晶格方位都是基本一致的,而各个小晶体之间,彼此的方位却不相同,如图 1-11 (b) 所示。由于其中每个小晶体的外形多为不规则的颗粒,通常称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种实际上由许多晶粒组成的晶体称为多晶体。一般金属材料都是多晶体。

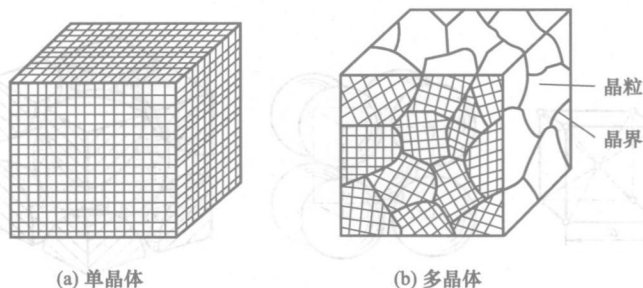


图 1-11 单晶体与多晶体结构示意图

单晶体在不同方位上的物理、化学和力学性能各不相同,即具有各向异性。但是,测定实际金属的性能,在各个方向上却基本一致,显示不出大的差别,即具有各向同性或伪各向同性。这是因为,实际金属是由许多方位不同的晶粒组成的多晶体,一个晶粒的各向异性在许多方位不同的晶体之间可以互相抵消或补充所致。

(2) 晶体中的缺陷

晶体中原子完全有规则排列时,称为理想晶体。实际金属由于受多种因数的影响,内部总是存在着大量缺陷。晶体缺陷的存在对金属的性能有着很大的影响。

根据晶体缺陷的几何特点,可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

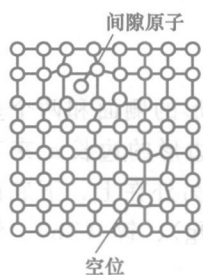


图 1-12 点缺陷

① 点缺陷 常见的点缺陷是空位和间隙原子等,如图 1-12 所示。实际晶体结构中,晶格的某些结点往往未被原子所有,这种空着的位置称为空位。与此同时,又有可能在个别晶格空隙处出现多余原子,这种不占有正常晶格位置而处在晶格空隙中的原子,称为间隙原子。

在空位和间隙原子附近,由于原子间作用力的平衡被破坏,使其周围原子发生靠拢或撑开,因此晶格发生歪曲(亦称晶格畸变),使金属的强度提高,塑性下降。

② 线缺陷 线缺陷是在空间的一个方向上尺寸很大,其余两个方向上尺寸很小的一种缺陷。线缺陷主要是各类型的位错。

位错是指晶体中某处有一列或若干列原子发生了某种有规律的错排现象。这种错排有许多类型,其中最常见的形式就是刃型位错,如图 1-13 所示。由图中可以看出,ABCD 晶面上沿 EF 处多插入了一层原子面 EFGH,它好像一把刀刃那样切入晶体中,使上下层原子不能对准,产生错排,因而称为刃型位错。在位错线附近晶格发生畸变,形成一个应力集中区。实验证明,在实际晶体中存在着大量刃型位错。

位错的存在会对金属的力学性能产生重要影响。位错密度愈大,塑性变形抗力愈大。因

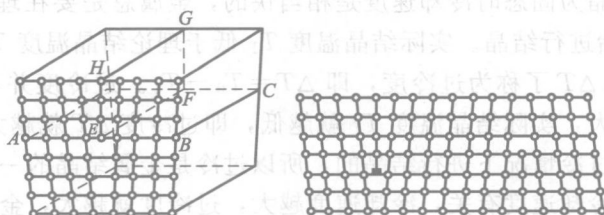


图 1-13 刃型位错示意图

此, 通过塑性变形, 提高位错密度, 是强化金属的有效途径之一。

③ 面缺陷 面缺陷是在两个方向的尺寸很大, 第三个方向的尺寸很小而呈面状的缺陷。这类面缺陷主要是指晶界和亚晶界。

多晶体中两个相邻晶粒之间晶格位向是不同的, 所以晶界处实际上是原子排列逐渐从一种位向过渡到另一种位向的过渡层, 该过渡层的原子排列是不规则的, 如图 1-14 所示。由于过渡层原子排列不规则, 使晶格处于歪扭畸变状态, 因而在常温下会对金属塑性变形起阻碍作用, 从宏观上来看, 晶界处表现出有较高的强度和硬度。

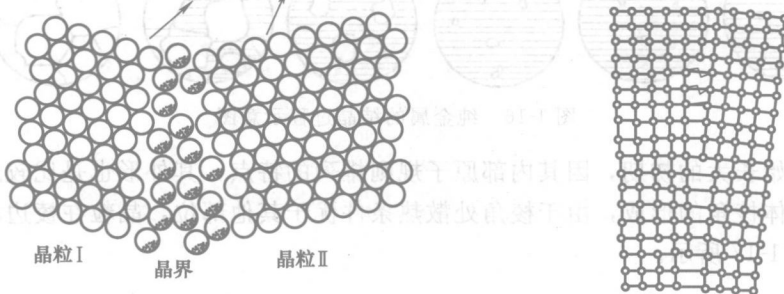


图 1-14 晶界示意图

由于亚晶界处原子排列也是不规则的, 使晶格产生了畸变。因此, 亚晶界作用与晶界相似, 对金属强度也有着重要影响, 亚晶界越多, 强度也越高。

1.2.3 纯金属的结晶

(1) 纯金属的冷却曲线和过冷现象

金属由液态转变为固态的过程称为凝固, 如果凝固的固态物质是晶体, 则这种凝固又称为结晶。

纯金属由液态向固态转变的过程, 可用冷却过程所测得的温度与时间的关系曲线——冷却曲线来描述。

由图 1-15 冷却曲线可见, 液态金属随着冷却时间的增长, 温度不断下降, 但当冷却到一定温度时, 冷却时间虽然增长, 但其温度并不下降, 在冷却曲线上出现了一个水平线段, 这个水平线段所对应的温度就是纯金属实际结晶的温度 (T_1), 出现水平线段的原因, 是由于结晶时放出的结晶潜热补偿了向外界散失的热量。结晶完成后, 由于金属继续向周围散热, 温度又重新下降。

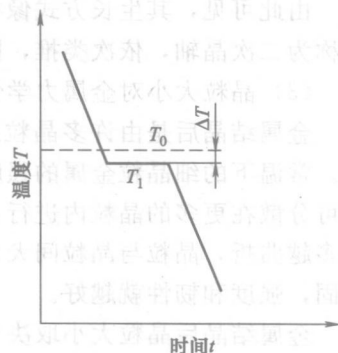


图 1-15 纯金属的冷却曲线

如图 1-15 所示的温度 T_0 为理论结晶温度。但在实际生

产中, 金属由液态结晶为固态时冷却速度是相当快的, 金属总是要在理论结晶温度 T_0 以下的某一温度 T_1 才开始进行结晶。实际结晶温度 T_1 低于理论结晶温度 T_0 的现象称为过冷现象。而 T_0 与 T_1 之差 ΔT 称为过冷度, 即 $\Delta T = T_0 - T_1$ 。过冷度并不是一个恒定值, 液体金属的冷却速度越大, 实际结晶温度 T_1 就越低, 即过冷度 ΔT 就越大。

实际金属总是在过冷情况下进行结晶的, 所以过冷是金属结晶的一个必要条件。金属结晶时过冷度的大小与冷却速度有关, 冷却速度越大, 过冷度就越大, 金属的实际结晶温度就越低。

(2) 纯金属的结晶过程

纯金属在冷却到结晶温度时, 其结晶过程是, 先从液体金属中自发地形成一批结晶核心, 形成自发晶核, 与此同时, 某些外来的难熔质点也可充当晶核, 形成非自发晶核; 随着时间的推移, 已形成的晶核不断长大, 并继续产生新的晶核, 直到液体金属全部消失为止。因此结晶过程就是晶核形成和晶核长大的过程, 并且这两个过程是同时进行的, 如图 1-16 所示。

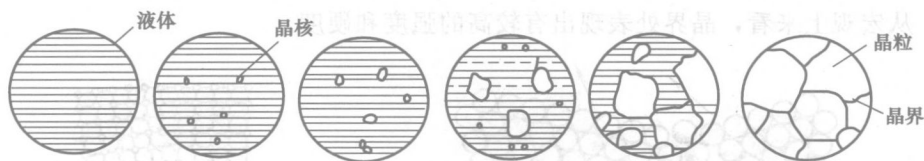


图 1-16 纯金属的结晶过程示意图

在晶核开始长大的初期, 因其内部原子规则排列的特点, 其外形也是比较规则的, 随着晶核长大和晶体棱角的形成, 由于棱角处散热条件优于其他部位, 晶粒在棱边和顶角处就先长大, 如图 1-17 所示。

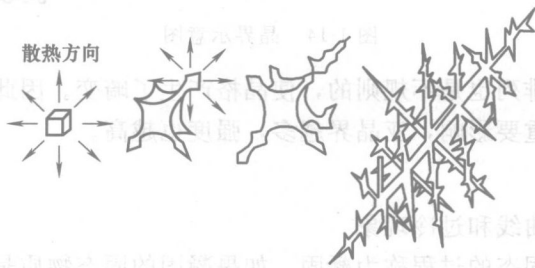


图 1-17 枝晶的形成

由此可见, 其生长方式像树枝状一样, 先生长出干枝, 称为一次晶轴; 然后再生长出分枝称为二次晶轴, 依次类推, 因此, 得到的晶体称为树枝状晶体, 简称为枝晶。

(3) 晶粒大小对金属力学性能的影响

金属结晶后是由许多晶粒组成的多晶体。晶粒的大小对金属的力学性能有着重要的影响。常温下的细晶粒金属的强度、韧性均比粗晶粒金属高。这是因为, 晶粒越细, 塑性变形越可分散在更多的晶粒内进行, 使塑性变形越均匀, 内应力集中越小; 而且晶粒越细, 晶界越多越曲折, 晶粒与晶粒间犬牙交错的机会就越多, 越不利于裂纹的传播和发展, 彼此就越紧固, 强度和韧性就越好。

金属结晶后晶粒大小取决于形核率 N (单位时间、单位体积液态金属中生成的晶核数目) 和晶核长大速率 G (单位时间内晶核长大的线长度)。形核率 N 越大, 长大速率 G 越