



普通高等教育机电类“十三五”课改规划教材

工程训练基础

主编 付平 李镇江 吴俊飞



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育机电类

教材

工程训练基础

主 编 付 平 李镇江 吴俊飞

副主编 张 猛 赵海霞 杨化林

参 编 王为波 朱开兴 曹同坤

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部机械基础教学指导委员会关于工程训练课程的教学改革精神,并结合编者多年的金工实习教学实践经验而编写的。

本书在内容上涵盖了现代机械制造工艺过程的主要知识和工程训练的基本要求,正确处理了传统工艺与现代新科技的关系。本书共 8 章,内容包括金属的结构与结晶、铸造、锻压、焊接、机械加工基础知识、零件表面的常规加工方法、特种加工和数控机床加工。对于目前仍在广泛应用的传统工艺精选保留,对于过时的内容予以淘汰,增加了技术上较为成熟的、应用范围较广或发展前景看好的“三新”(即新材料、新技术、新工艺)内容,增加了特种加工、数控加工的比重。各章后均有复习思考题。本书取材新颖,内容联系实际,结构紧凑,文字简练,直观形象,图文并茂,基本概念清晰,重点突出。

本书主要作为全国各类普通高等工科院校和高、中等职业技术学院的工程训练课程理论教学用书,也可作为高职、高专相关专业师生及企业技术培训和相关从业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程训练基础/付平,李镇江,吴俊飞主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.12

普通高等教育机电类“十三五”课改规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4319 - 9

I. ① 工… II. ① 付… ② 李… ③ 吴… III. ① 机械制造工艺 IV. ① TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 299863 号

策 划 毛红兵

责任编辑 杨 璠 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16

字 数 376 千字

印 数 1~3000 册

定 价 36.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4319 - 9/TH

XDUP 4611001-1

如有印装问题可调换

前 言

多年来,随着高等教育的发展与科学技术的进步,为满足宽口径人才培养模式和日趋重要的实践能力培养的需求,各工科院校纷纷成立了工程实践训练中心,并开设了工程训练课程。工程训练基础课程逐步吸收不同学科大量的新材料、新工艺、新技术知识,已从传统的金工实习逐步发展为面向跨学科,体现实践能力、综合素质和创新能力培养的现代工程训练,使之逐渐具备了基础性、实践性、趣味性和跨学科的知识结构。因此,它不仅是必修的工艺性技术基础课和工程实践课,是对工科大学生进行综合工程素质教育和现代制造技术教育的重要阵地,而且对提高本科生的全面素质,培养高质量、高层次、复合型的工程技术人才也起到了其他课程不可替代的作用。

本书是面向 21 世纪、建立在原金属工艺学基础上的宽口径、涉及不同学科的工程实训基础教材。本书力图把传统与先进制造工艺基础联系在一起,在内容上包括了金属的结构与结晶、铸造、锻压、焊接、机械加工基础知识、零件表面的常规加工方法、特种加工和数控加工等方面的知识。本书对传统内容进行了精选,尽量避免与工程实训教材内容重复,同时较大幅度地补充了新内容,具有一定的灵活性。在保证教学基本要求的前提下,各院校在使用时,可结合自己学校的情况灵活确定教学内容。

本书由付平、李镇江、吴俊飞担任主编,第 1 章由李镇江、张猛编写,第 2 章由朱开兴编写,第 3 章由王为波编写,第 4 章由赵海霞编写,第 5 章由付平编写,第 6 章由吴俊飞编写,第 7 章由曹同坤编写,第 8 章由杨化林编写。全书由付平、李镇江、张猛统稿。

本书可作为高等工科院校近机类、非机类专业在实训实践基础上的理论教学用书。本书的编写是加强实践教学、提高工程实践教学质量的初步尝试。由于编者水平所限,书中难免有不妥之处,诚请广大读者提出宝贵意见。

编者
2016 年 4 月

目 录

第 1 章 金属的结构与结晶..... 1

1.1 金属的晶体结构..... 1

1.1.1 晶体的结构..... 1

1.1.2 晶面和晶向及其标定..... 4

1.1.3 晶体的各向异性..... 5

1.1.4 实际金属的晶体结构..... 5

1.2 金属的结晶..... 8

1.2.1 纯金属的结晶..... 8

1.2.2 纯金属的结晶过程..... 9

1.2.3 晶粒大小的控制..... 10

1.3 二元合金相图..... 11

1.3.1 合金的相结构..... 11

1.3.2 相图的基本知识..... 13

1.4 铁碳合金相图..... 19

1.4.1 铁碳合金的相结构..... 19

1.4.2 Fe-Fe₃C 相图分析..... 20

1.4.3 含碳量对 Fe-C 合金组织及性能的影响..... 25

1.5 热处理工艺..... 27

1.5.1 热处理的概述..... 27

1.5.2 奥氏体的形成过程..... 27

1.5.3 退火与正火..... 28

1.5.4 淬火及回火工艺..... 30

复习思考题..... 35

第 2 章 铸造..... 37

2.1 铸造工艺基础..... 37

2.1.1 液态合金的充型能力..... 37

2.1.2 铸件的收缩..... 40

2.2 砂型铸造..... 43

2.2.1 砂型铸造的工艺过程..... 43

2.2.2 手工造型..... 44

2.2.3 机器造型..... 46

2.2.4 砂型铸造常见的缺陷..... 47

2.3 特种铸造..... 48

2.3.1 熔模铸造..... 48

2.3.2 金属型铸造..... 50

2.3.3 压力铸造..... 51

2.3.4 低压铸造..... 52

2.3.5 离心铸造..... 53

2.3.6 铸造方法的选择..... 53

2.4 铸件结构工艺性..... 54

2.4.1 从简化铸造工艺过程分析..... 54

2.4.2 从避免产生铸造缺陷分析..... 56

2.4.3 铸件结构要便于后续加工..... 59

2.4.4 组合铸件的应用..... 59

复习思考题..... 59

第 3 章 锻压..... 61

3.1 概述..... 61

3.2 金属的塑性变形理论..... 62

3.2.1 金属塑性变形的实质..... 63

3.2.2 塑性变形对金属组织及性能的影响..... 66

3.2.3 影响金属可锻性的因素..... 70

3.3 锻造..... 71

3.3.1 坯料的加热..... 72

3.3.2 自由锻..... 73

3.3.3 模锻..... 78

3.3.4 胎模锻..... 80

3.4 板料冲压..... 81

3.4.1 冲压设备..... 82

3.4.2 冲模..... 83

3.4.3 板料冲压的工序..... 84

3.4.4 冲压件结构工艺性..... 86

复习思考题..... 87

第 4 章 焊接..... 89

4.1 熔化焊成形基本原理..... 90

4.1.1 焊接电弧..... 90

4.1.2 焊接接头的组织和性能..... 91

4.1.3 焊接应力和变形..... 93

4.2 常用焊接成形方法..... 96

4.2.1 手工电弧焊..... 96

4.2.2 其他焊接方法	100	6.3 孔的加工	153
4.3 金属材料的焊接	106	6.3.1 孔的技术要求	153
4.3.1 金属材料的焊接性	106	6.3.2 钻孔、扩孔、铰孔	154
4.3.2 常用金属材料的焊接	107	6.3.3 镗孔	158
4.4 焊接工艺及结构设计	110	6.3.4 拉孔	160
4.5 焊接缺陷与焊接质量检验	111	6.3.5 磨孔	161
复习思考题	114	6.4 平面的加工	162
第5章 机械加工基础知识	115	6.4.1 平面的技术要求	162
5.1 切削运动及切削要素	115	6.4.2 车平面	162
5.1.1 零件表面的形成	115	6.4.3 刨平面	163
5.1.2 切削表面与切削运动	116	6.4.4 铣平面	164
5.1.3 切削用量	117	6.4.5 磨平面	166
5.1.4 切削层参数	118	6.5 齿轮齿形的加工	167
5.2 切削刀具及其材料	118	6.5.1 齿轮的技术要求	167
5.2.1 切削刀具	119	6.5.2 铣齿	169
5.2.2 刀具材料	124	6.5.3 滚齿	170
5.3 切削过程及控制	127	6.5.4 插齿	171
5.3.1 切屑的形成及其种类	128	6.5.5 齿轮齿形的其他加工方法	174
5.3.2 积屑瘤	130	复习思考题	176
5.3.3 切削力和切削功率	131	第7章 特种加工	178
5.3.4 切削热和切削温度	132	7.1 电火花加工	180
5.3.5 刀具磨损和刀具寿命	134	7.1.1 电火花加工的原理	180
5.3.6 切削用量的合理选择	136	7.1.2 电火花加工的特点	182
5.4 磨具与磨削过程	137	7.1.3 电火花加工的应用	183
5.4.1 磨具	137	7.2 电解加工	190
5.4.2 磨削过程中磨粒的作用	140	7.2.1 电解加工的原理	191
5.5 材料的切削加工性	141	7.2.2 电解加工的特点	191
5.5.1 衡量材料切削加工性的指标	141	7.2.3 电解加工的应用	192
5.5.2 常用材料的切削加工性	142	7.3 超声波加工	195
5.5.3 难加工材料的切削加工性	142	7.3.1 超声波加工的原理	195
复习思考题	143	7.3.2 超声波加工的特点	196
第6章 零件表面的常规加工方法	145	7.3.3 超声波加工的应用	197
6.1 金属切削机床的基本知识	145	7.4 激光加工	200
6.1.1 机床的分类	145	7.4.1 激光加工的原理	200
6.1.2 金属切削机床的型号	146	7.4.2 激光加工的特点	201
6.2 外圆面的加工	148	7.4.3 激光加工的应用	202
6.2.1 外圆面的技术要求	148	7.5 电子束和离子束加工	204
6.2.2 外圆面的车削	148	7.5.1 电子束加工	204
6.2.3 外圆面的磨削	150	7.5.2 离子束加工	207

复习思考题	209	8.3.2 数控加工程序的代码及其 功能	229
第 8 章 数控机床加工	210	8.3.3 代码使用举例	230
8.1 数控机床的基本组成	210	8.3.4 数控编程的种类	233
8.1.1 输入与输出装置	212	8.4 加工中心	234
8.1.2 数控系统	212	8.4.1 加工中心的分类与应用范围	234
8.1.3 伺服系统	214	8.4.2 加工中心的特点	236
8.1.4 数控机床主机	217	8.4.3 加工中心的特殊构件	237
8.1.5 数控机床的辅助装置	220	复习思考题	245
8.2 数控机床的加工特点	224	参考文献	246
8.3 数控加工程序的编制	226		
8.3.1 数控程序编制的基本知识	226		



第1章 金属的结构与结晶

1.1 金属的晶体结构

材料的性能随着其化学组分的不同而出现明显的变化,对于拥有同种组分的材料,人们也可以通过改变其内部结构和组织状态,获得各项理想性能。根据原子(离子、分子)聚集状态划分,固态物质可以分为晶体和非晶体两大类。金属在固态下通常都是晶体,要了解金属的内部结构,首先要了解晶体的结构。

1.1.1 晶体的结构

1. 晶体与非晶体

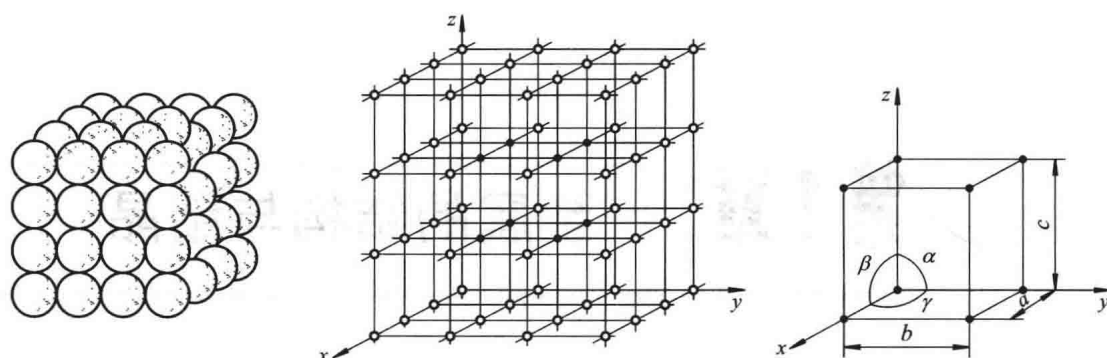
组成原子(离子、分子)在空间上按一定规律呈现周期性重复排列的固态物质称为晶体。石英、云母、食盐、金刚石、固态金属及其合金就是常见的晶体。组成原子(离子、分子)在空间上不具有规则周期性排列(或短程有序而长程无序)的固体称为非晶体。例如普通玻璃、松香、石蜡等。

由于具有不同的内部原子(离子、分子)排列,导致了晶体和非晶体表现出较大的性能差异。晶体具有固定的熔点,在性能上表现出各向异性;非晶体没有固定的熔点,但可以在一个温度范围内熔化,在性能上表现为各向同性。

晶体与非晶体在一定条件下可以实现转化。有些金属液体在极快冷却条件下可以凝固成非晶态金属,而普通玻璃在高温下长时间保温可以形成晶态玻璃。

2. 晶格、晶胞和晶格常数

为了方便地研究排列规律性,一般把理想晶体中的原子(离子、分子)抽象成几何质点,这类质点称为阵点。将这些阵点按照一定的规律进行重复排列所形成的三维空间阵列称为空间点阵(见图 1-1(a))。用假想的直线将阵点连接起来而形成的空间格架,称为晶格(见图 1-1(b))。为了简化分析过程,根据晶格中原子排列的周期性特点,选取一个能够完全反映晶格特征的代表性的最小几何单元来表达晶体的结构特征,如图 1-1(c)所示。组成晶格的基本重复单元称为晶胞,通常采用 a 、 b 、 c 来表示晶胞的棱边长度(称为晶格常数),用 α 、 β 、 γ 来表示晶胞棱边间的相互夹角,这 6 个参数共同决定了晶胞的大小和形状。



(a) 晶体中金属原子的排列

(b) 金属的晶格

(c) 晶胞及晶格常数的表示方法

图 1-1 立方晶体球体几何模型、晶格和晶胞示意图

3. 典型的金属晶体结构

90%以上的金属晶体具有比较简单的晶体结构，其中最常见的是：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

1) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞(见图 1-2)为一个立方体，其三个棱边长度 $a = b = c$ ，三个晶轴之间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

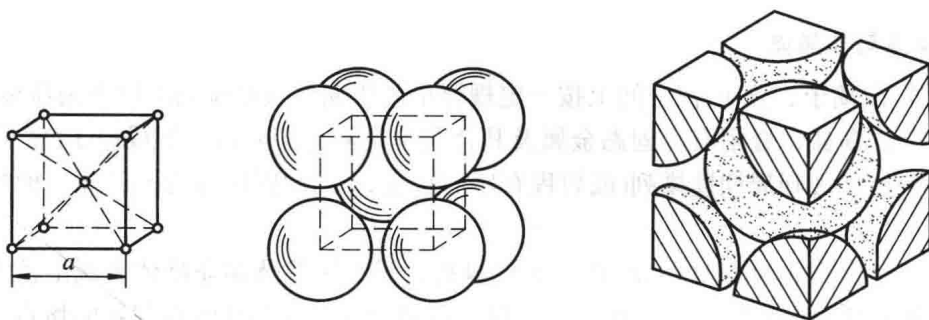


图 1-2 体心立方晶胞模型

在立方体的体心与每个顶角位置处都有一个原子，由于晶胞处于三维点阵结构中，顶角处的原子被其周围的 8 个晶胞共用，则属于体心立方晶胞的原子数目为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 。

沿体对角线方向上的 3 个原子相切，设晶胞的晶格常数为 a ，则体对角线的长度等于 4 个原子半径相连为 $\sqrt{3}a$ ，所以体心立方晶胞中的原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。晶胞中某一个原子最接近

且距离相等的原子数目称为配位数。在体心立方晶格中，以体心原子为中心，与其最近邻且距离相等的原子处于顶角处，所以体心立方晶格的配位数为 8。原子排列的紧密程度可用致密度来表示，致密度指原子所占体积与晶胞总体积之比，即

$$K = \frac{nV_1}{V}$$



式中: K 为致密度; n 为一个晶胞实际包含的原子数; V_1 为一个原子的体积; V 为晶胞的体积。体心立方晶格的致密度为

$$K = \frac{nV_1}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3}{a^3} \approx 0.68$$

常见的体心立方晶格金属有 α -Fe、Cr、V、W 等。

2) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞(见图 1-3)也是一个立方体, 其三个棱边长度 $a = b = c$, 三个晶轴之间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。在立方体的六个面心与每个顶角位置处都有一个原子, 一个面心立方晶胞的原子数目为 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 。沿面对角线的 3 个原子相切, 若晶胞的晶格常数为 a , 则面对角线的长度等于 4 个原子半径相连为 $\sqrt{2}a$, 所以面心立方晶胞中的原子半径

$r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。在面心立方晶格中, 以某一个面心原子为中心, 与其最近邻且距离相等的原子处于该原子四周的顶角处和上下晶胞的四个面心处, 所以面心立方晶格的配位数为 12。面心立方晶格的致密度为

$$K = \frac{nV_1}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3}{a^3} \approx 0.74$$

具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Cu、Au、Pb 等。

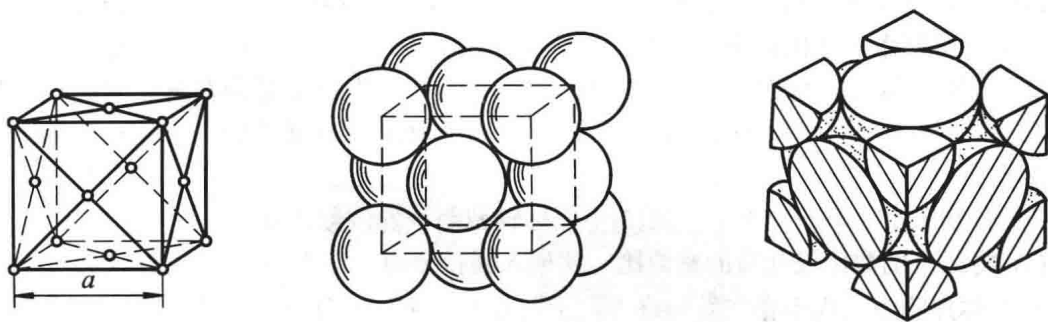


图 1-3 面心立方晶胞模型

3) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞(见图 1-4)可以看做是由上下两个正六边形和中间的六棱柱组合而成的。在正六边形的顶角和面心上各有一个原子, 在中间棱柱的中间面处有间隔 120° 的 3 个原子, 则一个密排六方晶胞的原子数目为 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 。晶格常数用柱体高度 c 和六边形的边长 a 两个晶格常数来表示, c 与 a 之比称为轴比, 典型的密排六方晶格中



$\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$ 。在密排六方晶格中,以底面中心的原子为中心,与其最近邻且距离相等的原子处于该原子面的顶角处和上下柱中心面处,故配位数为 12。密排六方晶格的致密度为

$$K = \frac{nV_1}{V} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 \sqrt{\frac{8}{3}} a} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{3\sqrt{2} a^3} \approx 0.74$$

具有密排六方晶格的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等。

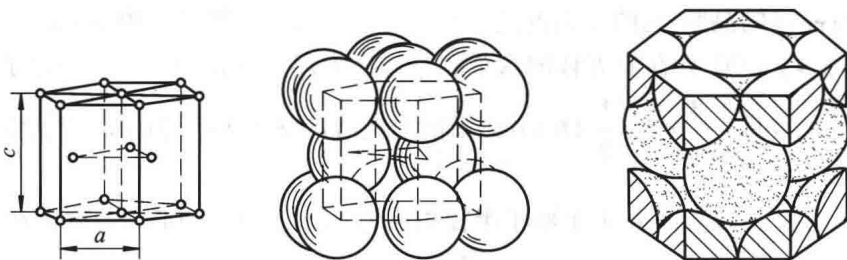


图 1-4 密排六方晶胞模型

1.1.2 晶面和晶向及其标定

晶体中通过一系列原子中心的平面称为晶面。原子之间的连接直线所指的方向称为晶向。由于金属的许多性能与其暴露出的特定晶面和晶向有关,所以正确理解和掌握晶面与晶向的特点显得非常重要。在晶体学中,采用晶面指数(米勒指数)的方式表达晶面,这种数字符号称为晶面指数(hkl)或晶向指数 $[uvw]$ 。

1. 晶面指数的标定步骤(以立方晶格为例)

(1) 以晶胞的某一顶点作为空间坐标系的原点 O ,建立以互相垂直的三个棱边为坐标轴 X 、 Y 、 Z 的坐标系,并保证坐标原点位于待标定晶面之外。

(2) 以原点附近的晶胞棱边长度为单位长度,分别量取待定晶面在三个坐标轴上的截距,与坐标轴平行的截距为 ∞ ,如果所求晶面与坐标轴相交在负方向上,则在相应的指数上方加上负号。

(3) 分别求出各截距的倒数,第(2)步坐标轴截距 ∞ 的倒数为 0。

(4) 将三个倒数化成互质的整数比,并列于圆括号内,即得到晶面指数(hkl)。

在晶体点阵中,由于存在着三维方向上的规则排列,往往存在着原子排列方式一样但彼此之间不平行的系列晶面(称为晶面族),用大括号加 hkl 的方式来表示。例如在 $\{100\}$ 晶面族中,与(100)晶面排列一样且不平行的晶面还有(010)、(001)、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 。

2. 晶向指数的标定步骤(以立方晶格为例)

(1) 按照标定晶面的方式建立坐标系,把坐标原点放在待标定晶向的任一原子中心处(见图 1-5)。

(2) 以三个方向上的晶格常数为度量单位,找出待标定晶向上的另一原子中心的坐标值,若为负值,则在相应指数上方加一个负号。

(3) 把坐标值化为互质的整数比,并列在方括号中,即为该晶向的晶向指数 $[uvw]$ 。

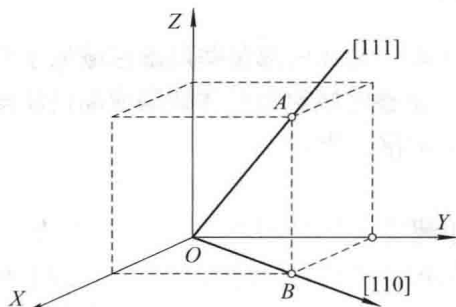


图 1-5 立方晶格中一些晶向的晶向指数

与晶面族类似，在立方晶系中也存在着众多的晶向族，用 $\langle uvw \rangle$ 来表示。 $\langle 100 \rangle$ 晶向族的各晶向指数为 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[\bar{1}00]$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 。

1.1.3 晶体的各向异性

由于不同晶面和晶向上原子排列的疏密程度和相互之间的结合力存在差异性，从而在不同的晶面和晶向上表现出不同的性能，这种现象叫做晶体的各向异性。例如具有体心立方晶体结构的晶体，在 $[111]$ 方向上的弹性模量为 290 MPa，而在 $[100]$ 方向上的弹性模量为 135 MPa。常见的实际金属材料为多晶体，通常见不到理想晶体结构所具有的各向异性特征。

1.1.4 实际金属的晶体结构

1. 单晶体与多晶体

前面所讲的晶体是具有规则的排列顺序且没有任何缺陷的理想晶体，如果一整块金属仅包括一个晶粒，则称做单晶体，在其内部，所有晶胞均有相同的取向，表现出各向异性。在工业生产中，实际的金属晶体都是由许多晶粒组成的，每个小晶体的晶格是一样的，而各小晶体之间彼此方位不同，这种晶体叫做多晶体。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。由于晶界是两个相邻晶粒不同晶格方位的过渡区，所以在晶界上原子排列总是不规则的(见图 1-6)。

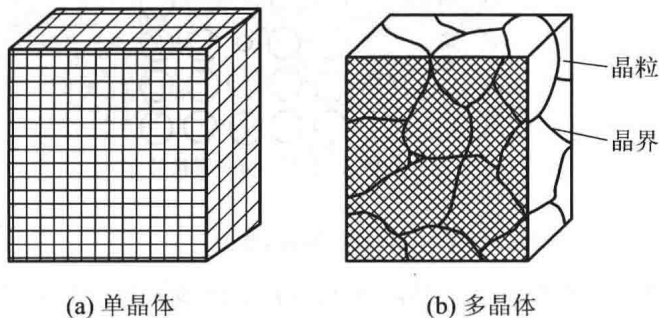


图 1-6 单晶体与多晶体

目前在半导体元件、磁性材料、高温合金材料等方面，单晶体材料已得到开发和应用。单晶体金属材料是今后金属材料的发展方向之一。



2. 实际金属晶体的缺陷

实际晶体受许多因素的影响, 晶体内部某些局部区域原子排列的规则性受到干扰而破坏, 金属晶体结构中存在的不完整区域称为晶体缺陷或晶格缺陷。按照几何类型, 晶体缺陷主要有点缺陷、线缺陷、面缺陷三类。

1) 点缺陷

在三维空间上尺寸范围不超过几个原子层的缺陷叫做点缺陷, 主要包括空位、间隙原子和置换原子等(见图 1-7)。点缺陷的形成主要是由于原子在各自平衡位置上做不停的热运动。

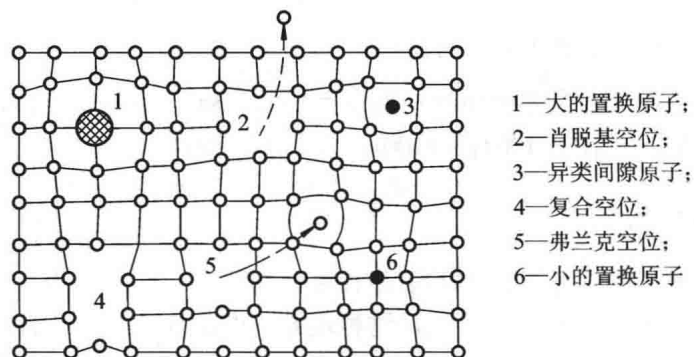
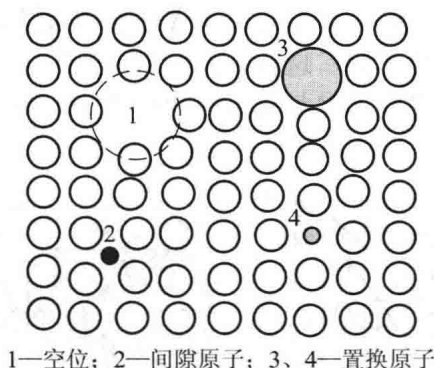


图 1-7 晶体中的各种点缺陷

在实际晶体中的某些晶格结点位置处没有原子填充则形成了空位。空位是一种平衡含量极小的热平衡缺陷, 随着晶体温度升高, 空位的密度增大。处于晶格间隙中的原子称为间隙原子。晶格点阵中的异类原子占据了原来原子的结点位置, 则称为置换原子。当异类原子半径较小时(如硼、碳、氢、氮、氧等), 金属中形成的点缺陷主要是间隙原子; 如果杂质异类原子半径较大时, 容易形成置换固溶体(见图 1-8)。



1—空位; 2—间隙原子; 3、4—置换原子

图 1-8 点缺陷示意图

由于空位和间隙原子的存在, 在其附近的原有平衡被破坏, 使其周围的原子离开了原来的平衡位置, 造成晶格畸变。晶格畸变使材料的强度、硬度和电阻率增加以及其他的力学、物理、化学性能改变; 此外, 点缺陷的存在将会加速金属中原子的扩散过程, 因而与扩散有关的相变、化学热处理、高温下的塑性变形和断裂等, 都与空位和间隙原子的存在和运动有着密切的关系。

在三维空间中某两个维度上的尺度很小、另一个维度上尺寸很大的缺陷叫做线缺陷。

刃型位错模型相当于用一把锋利的钢刀将晶体上半部分切开，沿切口硬插入一个额外半原子面一样，将刃口处的原子列称为刃型位错线(见图 1-9)。刃型位错有正负之分，当半原子面位于晶体的上半部分时，此处的位错线称为正刃型位错，以符号“ $\perp$ ”表示。反之，当额外半原子面位于晶体的下半部分时，则称为负刃型位错，以符号“ $\neg$ ”表示，但正刃型位错和负刃型位错并无本质上的区别。

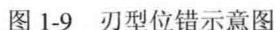


图 1-10 螺型位错示意图

位错可以在晶体中运动，刃型位错既可以沿着滑移面移动(滑移)，也可以在垂直于滑移面的方向上移动(攀移)；而对于螺型位错来讲，它只可以作滑移运动而不能作攀移运动。无论是刃型位错还是螺型位错，沿位错线周围原子排列都偏离了平衡位置，产生晶格畸变。



3) 面缺陷

面缺陷是指三维空间中在一维方向上尺寸很小、另外两维方向上尺寸很大的缺陷,包括晶界、亚晶界等。实际的金属是由大量外形不规则的小晶粒组成的,晶粒与晶粒之间的接触面叫做晶界。当相邻晶粒的位向差小于 10° 时,称为小角度晶界;位向差大于 10° 时,称为大角度晶界。晶界上原子的排列呈不规则排列,实际上是不同位向晶粒之间原子排列无规则的过渡层。在多晶体金属中,每个晶粒内的原子排列并不是十分整齐的,其中会出现位向差极小(通常小于 10°)的亚结构,亚结构之间的界面称做亚晶界。亚晶界是晶粒内部的一种面缺陷,是小区域的原子排列无规则的过渡层(见图 1-11)。在晶粒大小一定时,亚晶界越细,金属屈服强度越高。

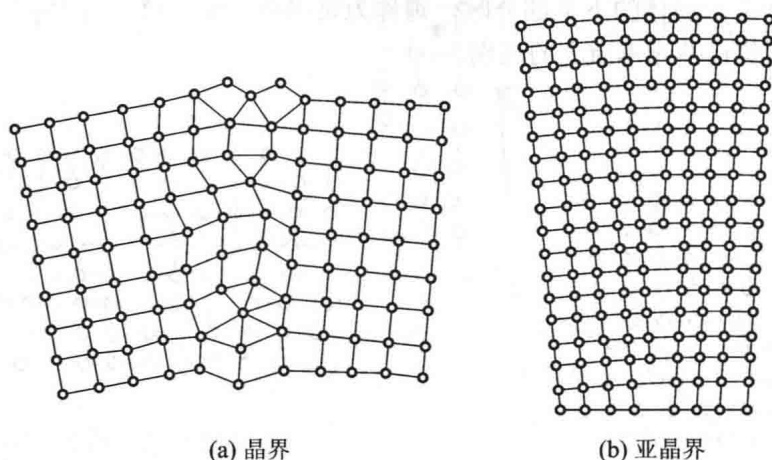


图 1-11 晶界、亚晶界的过渡区结构示意图

晶体缺陷处及其周围均有明显的晶格畸变产生,引起晶格能量的升高,使金属的物理、化学和力学性能发生显著的变化。

1.2 金属的结晶

1.2.1 纯金属的结晶

金属物质从液态转变为固态形成的晶态物质称为结晶。纯金属在固态下呈现明显的晶体形态,所以纯金属由液态向固态转变属于典型的结晶过程。

通常利用热分析法研究金属的结晶过程。图 1-12 所示为热分析装置示意图。将欲测定的金属首先放入坩埚内加热熔化成液态,随后以缓慢的速度进行冷却,每隔一定时间,测定一次温度,并把测得的数据绘制在温度-时间($T-t$)坐标中,即可得到金属的结晶冷却曲线。由图 1-13 可以看出:在金属结晶过程中,随着时间的延长,液态金属的温度不断地下降。当降到某温度时,随着时间的延长,液态金属的温度暂时停止下降,在曲线上出现一个“平台”。越过“平台”阶段后,金属温度才开始又随时间的延长而下降。“平台”的出现,是由于金属在结晶过程中,结晶潜热的释放补偿了冷却时体系向外界散失的热量。因此“平



台”所对应的温度，即是金属的结晶温度；“平台”延续的时间，即为结晶时所需要的时间。冷却速度越慢，测得的实际结晶温度越接近平衡结晶温度，即理论结晶温度。

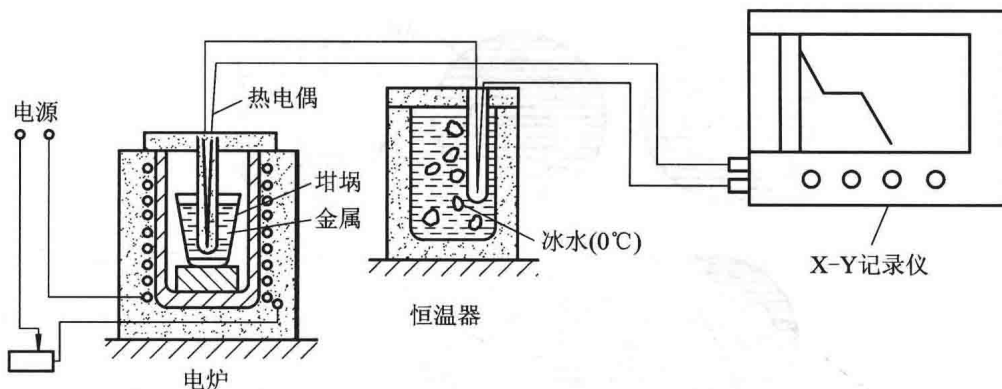


图 1-12 热分析装置示意图

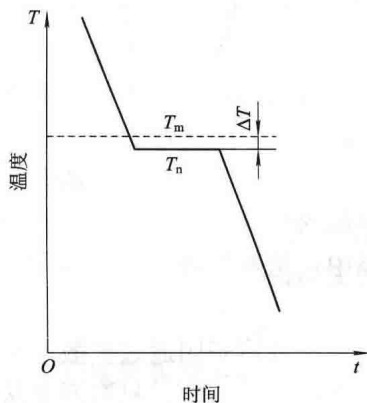


图 1-13 纯金属结晶时冷却曲线示意图

在结晶过程中，金属的实际结晶温度 T_n 一定低于理论结晶温度 T_m 。这种实际结晶温度低于理论结晶温度的现象，称为金属的过冷，实际结晶温度与理论结晶温度的差，称为过冷度，用 ΔT 表示， $\Delta T = T_m - T_n$ 。

过冷度 ΔT 的大小，主要受金属的种类、纯度和冷却速度的影响。金属不同，过冷度的大小也不同。金属的纯度越高，冷却速度越快，则过冷度越大，即实际结晶温度越低；反之，纯度越低，冷却速度越慢，则过冷度越小，即实际结晶温度越高。综上所述，过冷是结晶的必要条件，液态金属必须具有一定的过冷度才能够开始结晶。

1.2.2 纯金属的结晶过程

金属的结晶过程是一个原子重新排列的过程，从结晶核心(晶核)的形成开始，到液态金属的消失为止。这个过程是一个由小到大、由局部到整体的发展过程。金属结晶的微观过程主要分为形核与晶核的长大两个阶段。

在液态金属中，存在着大量不稳定的短程有序原子集团，当液态金属过冷到一定温度时，会形成一些小晶核；随着时间的延长，形成的晶核按各自方向吸附周围原子向液体中



自由长大,同时,在液体中又会形成新的晶核并长大;当相邻晶体彼此接触形成晶界时,晶粒便停止长大,当体系中的液态完全转变成固态时,金属的结晶过程完毕(见图 1-14)。

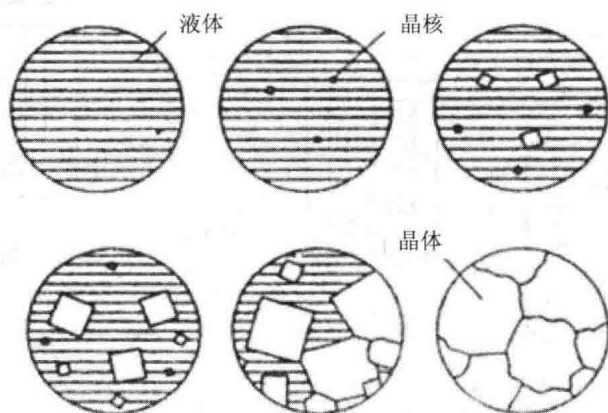


图 1-14 纯金属结晶微观过程示意图

晶核的形成可以通过自发形核与异质形核两个途径完成。在结晶过程中,由金属液体内部短程有序的原子团形成晶核的方式称为自发形核。过冷度越大,能稳定存在的短程有序的原子集团的尺寸越小,生成的自发形核就越多。

如果结晶过程中依靠液体中存在的固体杂质或容器壁形核,则称为异质形核。只有当杂质的晶体结构和晶格参数与结晶的金属或合金相似或相当时,它才可能成为异质形核的核心。在实际金属和合金的结晶中,这两种形核方式通常同时存在,但是异质形核一般更容易发生。

当晶核形成之后,液相中的原子或原子团通过扩散不断依附于晶核表面,使固液界面向液相中移动,晶核逐渐增大。在结晶过程中,只有原子从过冷的液体金属中过渡到晶体上时才能发生晶核的长大。

随着过冷度的增大,液体与固体金属的自由能差值增大,结晶速度提高。在较大的过冷度下,形成晶核的数量和晶核长大的速度都增大,但此时体系的实际温度较低,原子的扩散和迁移运动将会受到限制,易形成非晶型状态。

1.2.3 晶粒大小的控制

实验表明:在常温下的细晶粒金属比粗晶粒金属有更高的强度、硬度、塑性和韧性。因为细晶粒受到外力发生塑性变形时,其塑性变形可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形较均匀,应力集中较小;此外,晶粒越细,晶界面积越大,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展。因此,工业上常通过细化晶粒的方法来提高材料的强度,这种方法称为细晶强化,细晶强化的主要手段有以下三种。

1. 增大过冷度

随着过冷度的增大,形核率和长大速度增大,但形核率的增长速率大于长大速度的增长速率,增大过冷度的主要办法是提高液体金属的冷却速度,因此提高过冷度可以增加单位体积内晶粒的数目,使晶粒细化。过冷度与形核率和长大速度的关系如图 1-15 所示。