

21 世纪高等教育系列教材

金属材料及热加工基础

主 编	王景奕	
副主编	罗世昌	
参 编	曲凤武	谢劲松
	李燕青	孟庆东
主 审	谢劲松	

西南交通大学出版社
· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属材料及热加工基础/王景奕主编. - 成都: 西南交通大学出版社, 2004. 9

ISBN 7-81057-934-7

I. 金… II. 王… III. ①金属材料 - 高等学校 - 教材②热处理 - 高等学校 - 教材 IV. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 078740 号

金属材料及热加工基础

主编 王景奕

*

责任编辑 张华敏

封面设计 水木时代

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 87600564)

<http://prcss.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

安徽省蚌埠方达印刷厂印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 21.25

字数: 493 千字 印数: 1 - 5000 册

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-934-7/TG·347

定价: 32.00 元

编 审 说 明

本书是高等工科院校机械类、近机类、非机类专业一门重要技术基础课教材。作为主要从事机械设计制造的工程技术人员,必须具有合理选择、正确使用材料的能力,必须具有正确选用各种毛坯制造方法的能力。因此,工程材料及热加工基础一直是机械设计制造及其自动化专业必修的一门专业基础课程。

全书内容包括金属材料及热处理、铸造、锻压、焊接及机械零件毛坯的选择。各章之后附有适量的习题。全书具有如下特点:

①在总结各校教改经验的基础上,针对热加工课程实践性强的特点,将理论教学、现场实习教学结合起来,内容体系上不同于以往的同类教材。

②吸取同类教材的优点,力求内容精练,重点突出。同时对传统教学内容进行了必要的调整和增删,并提倡‘教师精讲引导,学生博学自学’的教学理念。

③拓宽知识面,介绍新工艺、新技术(建议自学加提问、讨论)。

④书中名词、术语、图表、符号、单位均采用最新国家标准和法定计量单位。

⑤将传统的《金属材料及热处理》与《热加工基础》密切结合在一起,达到了课程间的融汇贯通,且删减了两门课中大量的、不必要的重复和赘述。

⑥以创新教育及素质教育为理念,在教学方法及手段上给予了新的建议。

经审定,本书可作为高等院校及高职高专机械类专业教材,以及开设本课程的其他专业选用教材,也可供成人高等教育同类专业选用。此外,还可作为相关教学改革试点专业师生参考书。

本书由长春理工大学机电工程学院王景奕主编,罗世昌担任副主编。参加编写工作的有:长春理工大学机电工程学院王景奕(第1篇第2、3章、第2篇、第5篇)、罗世昌(第1篇第1、4、5、6章)、谢劲松(第3篇),长春理工大学工程训练中心曲凤武(第2、3、4篇实习操作内容),长春理工大学外事处李燕青(第4篇第16、17章),长春理工大学图书馆孟庆东(第4篇第18章)。本书由谢劲松主审。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免存在错误及不妥之处,恳请广大读者不吝批评指正,以便不断修订完善。

21 世纪高等教育系列教材编审指导委员会

2004 年 9 月

目 录

第 1 篇 金属材料与热处理

第 1 章 金属的晶体结构和结晶	(2)
1.1 金属的晶体结构	(2)
1.2 金属的结晶	(15)
1.3 金属的塑性变形与再结晶	(20)
习题 1	(33)
第 2 章 二元合金相图	(34)
2.1 合金中的相及相图的建立	(34)
2.2 匀晶相图	(37)
2.3 共晶相图	(38)
2.4 包晶相图	(41)
2.5 共析相图与含有稳定化合物的相图	(42)
2.6 合金的性能与相图的关系	(43)
习题 2	(44)
第 3 章 铁碳合金相图	(46)
3.1 Fe-Fe ₃ C 系合金的组元与基本相	(46)
3.2 Fe-Fe ₃ C 相图	(46)
3.3 典型铁碳合金的平衡结晶过程	(49)
3.4 含碳量与铁碳合金平衡组织、机械性能的关系	(53)
3.5 Fe-Fe ₃ C 相图的应用和局限性	(54)
3.6 碳钢及其常存杂质	(56)
习题 3	(60)
第 4 章 钢的热处理	(61)
4.1 钢在加热时的组织转变	(61)
4.2 钢在冷却时的转变	(63)
4.3 钢的退火与正火	(67)
4.4 钢的淬火	(70)
4.5 钢的回火	(73)
4.6 钢的表面热处理	(75)
4.7 钢的化学热处理	(77)
4.8 钢的热处理新技术	(80)
习题 4	(83)
第 5 章 合金钢	(85)
5.1 概 述	(85)

5.2	合金结构钢	(92)
5.3	合金工具钢	(100)
5.4	特殊性能钢	(110)
	习题5	(117)
第6章	有色金属及其合金	(118)
6.1	铝及其合金	(118)
6.2	铜及其合金	(122)
6.3	钛及其合金	(128)
6.4	镁及其合金	(130)
6.5	轴承合金	(132)
	习题6	(134)

第2篇 铸 造

第7章	铸件成形理论基础	(139)
7.1	液态合金的工艺特性	(139)
7.2	合金的工艺特性与铸件质量的关系	(144)
	习题7	(145)
第8章	常用铸造合金	(146)
8.1	铸 铁	(146)
8.2	铸铁的熔炼	(149)
8.3	铸 钢	(150)
8.4	铸钢的熔炼	(151)
8.5	铸铝及铸铜	(152)
	习题8	(153)
第9章	砂型铸造	(155)
9.1	造型材料	(155)
9.2	模样与芯盒	(156)
9.3	造型(制芯)	(157)
9.4	合型及熔炼	(164)
9.5	浇注、落砂与清理	(165)
9.6	铸件的检验及缺陷分析	(167)
	习题9	(168)
第10章	铸造工艺设计	(169)
10.1	铸件结构工艺性	(169)
10.2	铸造工艺方案的确定	(172)
	习题10	(181)
第11章	铸造技术的发展	(183)
11.1	特种铸造简介	(183)
11.2	常用铸造方法比较	(192)
11.3	铸造新工艺简介	(193)

习题 11	(195)
-------------	--------

第 3 篇 锻 压

第 12 章 金属塑性成型基础知识	(197)
12.1 塑性变形的力学基础	(197)
12.2 金属锻造性能	(198)
12.3 坯料的加热及锻件的冷却	(201)
习题 12	(204)
第 13 章 锻 造	(205)
13.1 自由锻造	(205)
13.2 模 锻	(214)
13.3 胎模锻	(221)
习题 13	(224)
第 14 章 冲 压	(226)
14.1 冲压设备	(226)
14.2 冲压的基本工序	(227)
14.3 冲 模	(231)
14.4 冲压件结构工艺性	(232)
14.5 冲压件工艺设计	(234)
14.6 典型冲压件冲压工艺卡实例	(236)
习题 14	(237)
第 15 章 特种成形方法及新工艺	(239)
15.1 粉末冶金及其锻造	(239)
15.2 超塑性成形	(241)
15.3 挤压与拉拔	(242)
15.4 液态模锻	(244)
15.5 轧 制	(246)
15.6 高能率成形	(247)
15.7 少、无切削成型	(248)
习题 15	(249)

第 4 篇 焊 接

第 16 章 焊接成型工艺基础	(251)
16.1 焊接原理及特点	(251)
16.2 熔焊工艺基础	(252)
16.3 焊接应力与变形	(257)
习题 16	(261)
第 17 章 焊接成型工艺方法	(263)
17.1 焊条电弧焊	(263)

17.2	埋弧自动焊	(267)
17.3	气体保护焊	(268)
17.4	气 焊	(270)
17.5	电渣焊	(272)
17.6	等离子弧焊	(273)
17.7	电子束焊和激光焊	(275)
17.8	堆焊和喷涂	(276)
17.9	压力焊	(277)
17.10	钎 焊	(280)
17.11	金属的热切割	(281)
习题 17		(283)
第 18 章	常用金属材料的焊接及结构设计	(285)
18.1	金属材料焊接性的概念	(285)
18.2	常用金属材料的焊接	(286)
18.3	焊接方法的选择及应用	(289)
18.4	焊接件结构设计	(290)
习题 18		(295)
 第 5 篇 机械零件的选材与毛坯选择		
第 19 章	机械零件的选材	(298)
19.1	材料的机械性能	(298)
19.2	零件的失效分析	(302)
19.3	材料选择的一般原则	(304)
19.4	热处理零件的结构工艺性	(309)
19.5	典型零件的选材与工艺分析	(310)
习题 19		(318)
第 20 章	机械零件毛坯的选择	(319)
20.1	零件毛坯类型及其制造方法比较	(319)
20.2	典型机械零件毛坯成型方法的选用	(320)
20.3	毛坯选用实例	(324)
习题 20		(327)
第 21 章	零件毛坯的质量检验	(328)
21.1	毛坯的无损检验	(328)
21.2	计算机在毛坯质检中的应用	(329)
习题 21		(329)
主要参考文献		(330)

第

1

篇

金属材料与热处理

众所周知,生产中使用的材料的发展将人类生活的时代划分为石器时代(公元前 10 万年)、青铜器时代(公元前 3000 年)、铁器时代(公元前 1000 年)、水泥时代(公元 0 年)、钢时代(1800 年)、硅时代(1950 年)以及人工合成新材料时代(1990 年)。

在所有材料当中金属材料占有较大比重,而作为金属材料主体的钢铁材料的发展在一定程度上推动着一个国家的科学技术发展。仅以日本和英国为例,二战后,1952 年,日本钢产量为 700 万吨,而英国为 1 700 万吨;1962 年,日本钢产量猛增到 2 755 万吨,而英国只有 2 500 万吨;日本钢铁业的发展推动了其汽车工业和其他使用钢铁材料的产业的飞速发展,并使其工业地位与美国及欧洲等发达国家并驾齐驱。

金属材料包括纯金属及其合金,是由金属元素或以金属元素为主形成的具有一般金属特征(如导电性、导热性、延展性等)的重要工程材料。在 17 世纪的科学革命和 18、19 世纪的工业革命时期,人们对它的认识仍是非理性的,主要停留在工匠、艺人经验技术的水平上。为了更有效地使用金属材料,需要了解其内部的结构及影响金属材料性能的各种因素,掌握提高或改善其性能的途径。金属材料与热处理这一篇就是阐述各种金属材料的共性基础知识,从金属材料的组织结构出发,研究金属材料的结构与其外在性能的关系及如何改善和提高其自然属性和性能。

第 1 章 金属的晶体结构和结晶

金属材料固态下通常都是晶体(金属晶体),原子呈规则排列,这是由金属键的特征所决定的。研究金属及其合金的内部结构,即研究金属中原子的相互作用和结合方式,原子的聚集状态和分布规律,各种晶体的特点和彼此的差异,实际金属中的各种晶体缺陷,是金属材料研究的必要手段。因此,在第 1 章我们首先学习金属的晶体结构和结晶方面的一些基础知识,为进一步学习金属材料及热处理打好基础。

1.1 金属的晶体结构

1.1.1 晶体与非晶体

固态物质按其内部原子(或分子)的聚集状态分为晶体和非晶体两大类,其根本区别在于:晶体中的质点(原子、离子或分子)在空间作有规则的排列,即相同的质点在空间有周期性地重复出现,这称为长程有序排列(或远程有序排列);而非晶体内部的质点排列不规则,至多有些局部的所谓短程有序排列(或近程有序排列)。通常条件下液态金属凝固后原子是规则排列的,所以固态金属往往都是晶体。液体中的原子处于紧密聚集的状态,但并不存在长程的周期性排列,从物质的质点排列是否规则而言,固态的非晶体实际上是一种过冷状态的液体,只是其物理性质与通常意义上的液体有所不同。玻璃是典型的非晶体,故往往也将固态非晶体(即非晶态的固体)称为玻璃体。

晶体与非晶体内部结构的不同,造成两者性能上的一些重要差异。①冷却或熔化时晶体有一定的凝固点或熔点(即固体与液体之间转变的临界温度)。在临界温度以上为非晶体状态的液体,临界温度以下液体转变为晶体,即晶体的固、液态转变具有突变性质,当然也就导致物理性质的突变,例如液态金属转变为固态金属,其粘度的上升幅度可以达到约 20 个数量级。非晶体的固态与液态之间的转变则是逐渐过渡的,没有明显的凝固点或熔点,其物理性质的变化也是逐渐过渡的。②晶体与非晶体另一个重要的差异是:沿晶体不同方向测得的性能(例如导电性、导热性、热膨胀性、弹性、强度和外表面的化学性质等等)并不相同。例如,沿铜单晶体(冷却时,仅由液体中一个晶体核心长大而成的晶体称单晶体)不同方向测定有关性能的最大值与最小值之比,对弹性模量来说,可达 2.86,抗拉强度则为 2.70,而伸长率更达到 5.5 之多,这种现象就是晶体的各向异性(或异向性)。非晶体的性能不因方向而异,这称为各向同性(或等向性)。

自然界的许多晶体(例如天然金刚石、结晶盐、水晶等等)有规则的外形,这与晶体的形成条件有关,如果条件不具备,晶体也可能有不规则的外形,所以,晶体与非晶体的本质区别在于内部结构而非外形。一定条件下,晶体与非晶体可以互相转化。玻璃经高温长时间加热能形成所谓的晶态玻璃,而液态金属快速凝固(冷却速度大于 10^6 K/s)可获得非晶态的固体金属(又称金属玻璃)。当然,随着晶态与非晶态的转变,其性能也会发生极大的改变。

1.1.2 金属的晶体结构

金属的性能不仅取决于其组成原子的本性和原子间结合键的类型,也与原子的排列方式有关。换句话说,不同的金属因其原子排列方式不同而性能有所差异;即使同一种金属,在不同温度或压力条件下,由于其内部原子排列不同,性能也会发生很大的变化。

1.1.2.1 有关金属晶体的一些基本概念

按照金属键的概念(见图 1.1),金属离子沉浸在自由运动的电子气中,呈均匀对称分布的形态,没有方向性,不存在结合的饱和性,所以完全可以将金属晶体中的原子(或离子)看做为固定的圆球。那么晶体就由这些圆球有规则地堆垛而成,即晶体中原子(或离子)在空间呈规则排列[见图 1.2(a)]。规则排列的方式即称为晶体的结构。原子堆垛模型尽管直观,但是不便于看清晶体内部的质点排列规律。为了便于研究晶体结构,假设通过原子的中心画出许多空间直线,这些直线将形成空间格架。这种假想的格架在晶体学上就叫晶格[见图 1.2(b)]。晶格的结点为原子(或离子)平衡中心的位置。晶格的最小几何组成单元称为晶胞[见图 1.2(c)]。晶胞在三维空间的重复排列构成晶格并形成晶体。由晶胞可以描述晶格和晶体结构,所以研究晶体结构就在于考查晶胞的基本特性。



图 1.1 金属键模型示意图

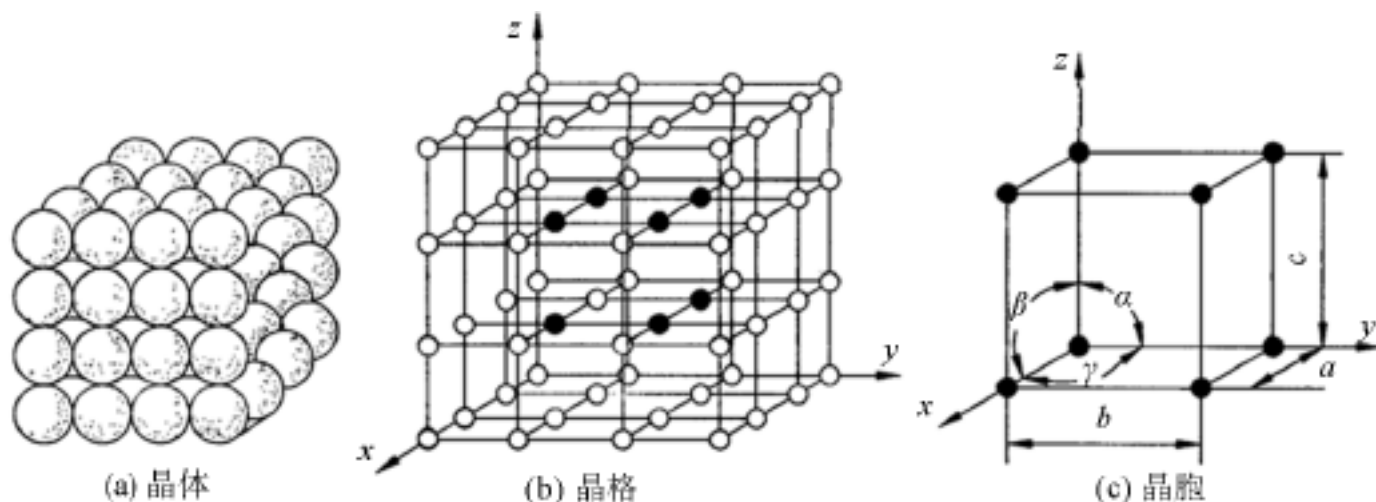


图 1.2 晶体、晶格、晶胞示意图

在三维空间中,晶胞的几何特征可以用晶胞的三条棱边长 a 、 b 、 c 和三条棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 等 6 个参数来描述。其中 a 、 b 、 c 称为晶格常数。按照这 6 个参数组合的可能方式,或根据晶胞自身的对称性,法国晶体学家布拉维(A. Bravais)用数学方法证明了有 7 种简单晶胞(仅在平行六面体角顶上有阵点)和 7 种复合晶胞[除了角顶有阵点,在晶胞中心(称体心)、每个面的中心(称面心)、在上下底面的中心(称底心)位置还有阵点]。

1.1.2.2 纯金属的典型晶体结构

20 世纪初,X 射线结构分析技术出现之后,利用它测定了金属的晶体结构。除了少数元素外,绝大多数金属皆为体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种典型的、紧密的晶体结构,如图 1.3、图 1.4、图 1.5 所示。

在体心立方晶格(见图 1.3)中,金属原子分布在立方晶胞的 8 个角顶上和立方体的中心。具

有这类晶格的金属有 Cr、Mo、W、V 和 α -Fe 等。

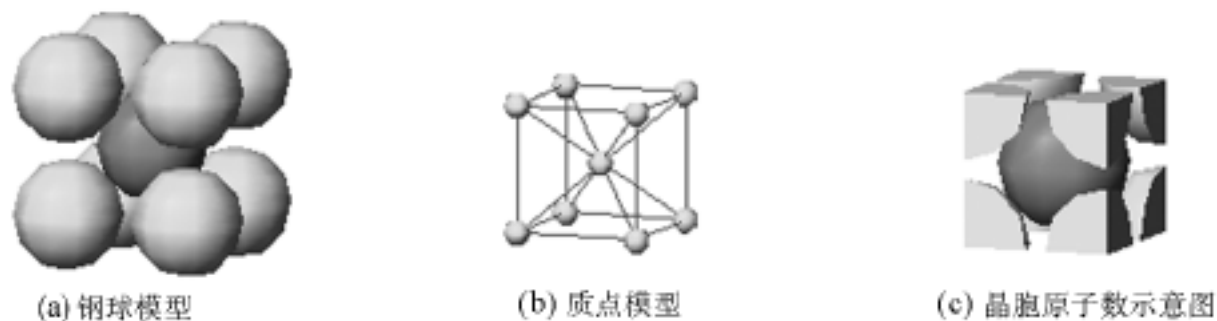


图 1.3 体心立方晶胞示意图

在面心立方晶格中(见图 1.4), 金属原子分布在立方晶胞的 8 个角顶上和 6 个面的中心。具有这类晶格的金属有 Al、Cu、Ni、Pt、Ag、Au、 γ -Fe 和 Pb 等。

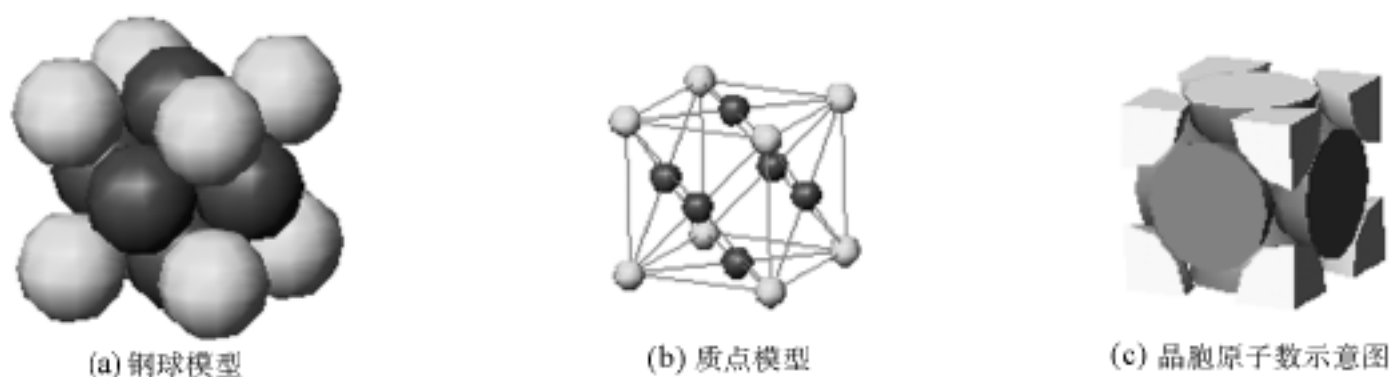


图 1.4 面心立方晶胞示意图

在密排六方晶格中(见图 1.5), 金属原子分布在六方晶胞的 12 个角顶上、下底面的中心和两底面之间的 3 个均匀分布的间隙里。这种晶胞在晶格常数 c 和 a 的比值为 1.633 时最密。具有这类晶格的金属有 Mg、Be、Cd、Zn 等。

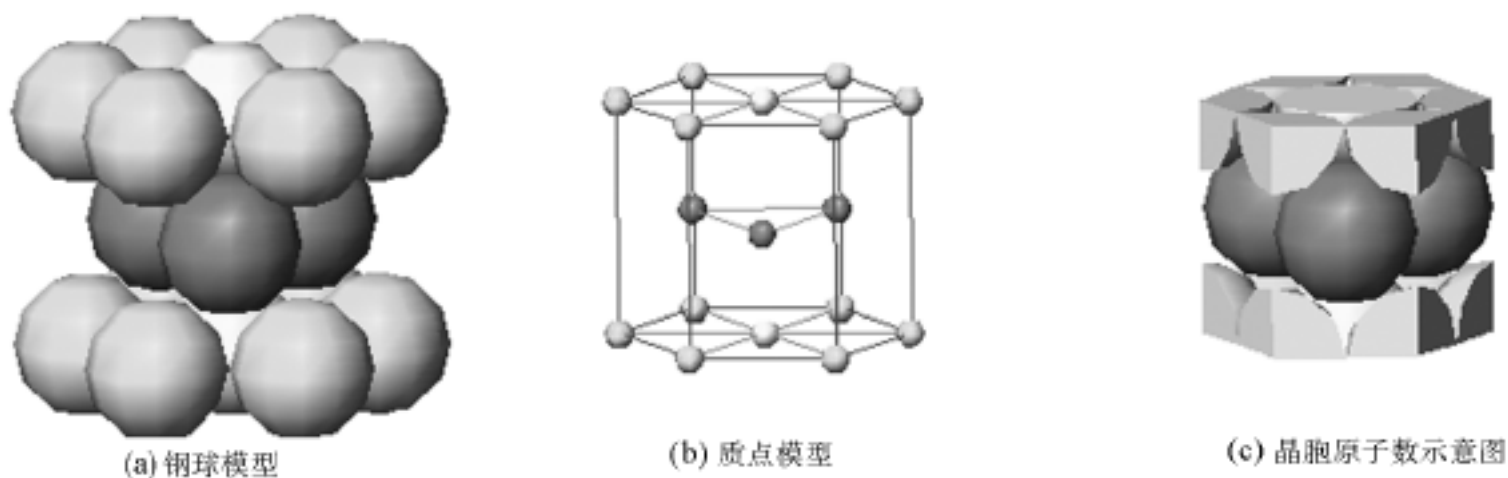


图 1.5 密排立方晶胞示意图

1.1.2.3 金属晶体结构的一些重要概念

除了晶格类型和晶格常数以外, 关于金属的晶体结构, 还有以下几个重要的概念:

1. 晶格尺寸

晶格尺寸是指晶胞的大小, 可用晶格常数表达。对于体心立方和面心立方晶体, 晶格常数 $a = b = c$, 晶格尺寸的表达用一个晶格常数 a 即可; 对于密排六方晶格, 则须采用 a 和 c 两个晶格常

数来表达。晶格常数的单位为 $\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$), 金属的晶格常数大都为 $1 \sim 7\text{\AA}$ 。

2. 晶胞原子数

晶胞原子数是指一个晶胞内所包含的原子数目。它对金属的许多性能有很大的影响。对于体心立方晶格的晶胞(见图 1.3), 每个角顶上的原子在空间同时属于 8 个相邻的晶胞, 因而属于一个晶胞的原子数为 $\frac{1}{8}$, 而立方体中心的原子则完全属于这个晶胞所有。所以, 体心立方结构的晶胞原子数为 $2 \left[\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2 \right]$ 。同样, 可以算出, 面心立方晶格(见图 1.4)的晶胞原子数等于 $4 \left[\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4 \right]$; 密排六方晶格(见图 1.5)的晶胞原子数等于 $6 \left[\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6 \right]$ 。

3. 原子半径

原子半径 r , 指晶胞中原子密度最大的方向上相邻两原子之间平衡距离的一半, 或晶胞中相距最近的两个原子之间距离的一半。它与晶格常数有一定关系, 是金属原子行为的一个非常重要的参量。体心立方晶胞(见图 1.3)中原子相距最近的方向是体对角线, 所以原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$; 面心立方晶胞(见图 1.4)中原子相距最近的方向是面对角线, 所以原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$; 密排六方晶胞(见图 1.5)中原子相距最近的方向是上下底面的对角线, 所以原子半径 $r = \frac{1}{2}a$ 。可见, 同一种金属原子处于不同类型的晶格时, 原子半径是不一样的。为了便于进行金属之间的比较, 通常以最密排晶胞的原子半径作为比较的标准。

4. 配位数

金属晶格中原子排列的致密程度(即晶格中原子所占有的体积), 可以用晶格的配位数来描述。配位数为晶格中与任一原子处于相等距离并相距最近的原子数目。配位数愈大, 则原子排列的致密度愈高。由图 1.6(a)可见, 在体心立方晶格中, 原子间的最近距离 $d = \frac{\sqrt{3}}{2}a$, 距任意原子为 d 的相邻原子数为 8。所以体心立方晶格的配位数是 8。同样, 从图中可以看出, 面心立方晶格和密排六方晶格的配位数都是 12。由于它们是金属最致密的排列方式, 所以金属的原子半径都以配位数为 12 的晶体的原子半径作为比较标准。

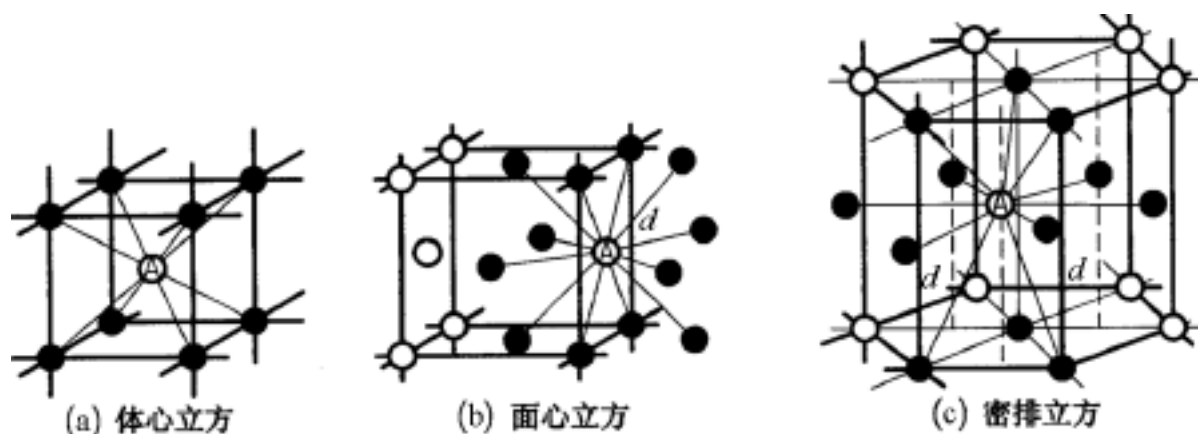


图 1.6 三种典型晶格配位数示意图

5. 致密度

金属晶胞中原子本身所占有的体积百分数称为晶格的致密度或密排系数, 即

$$\text{致密度} = \frac{\text{晶胞中原子所占有的体积}}{\text{晶胞的体积}}$$

因此:

$$\text{①对于体心立方晶格, 致密度} = \frac{2 \times \frac{4\pi}{3} r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4\pi}{3} \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} a \right]^3}{a^3} \approx 0.68 = 68\%;$$

$$\text{②对于面心立方晶格, 致密度} = \frac{4 \times \frac{4\pi}{3} r^3}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4\pi}{3} \times \left[\frac{\sqrt{2}}{4} a \right]^3}{a^3} \approx 0.74 = 74\%;$$

$$\text{③对于密排六方晶格, 致密度} = \frac{6 \times \frac{4\pi}{3} r^3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} a \times a \times c} = \frac{6 \times \frac{4\pi}{3} \times \left[\frac{1}{2} a \right]^3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} \times 1.633 a^3} \approx 0.74 = 74\%;$$

就是说, 体心立方晶胞中原子占据了 68% 的体积, 面心立方晶胞和密排六方晶胞中原子占据了 74% 的体积。晶胞内其余的 32% 和 26% 的体积为空隙。所以配位数大的面心立方晶格和密排六方晶格比配位数小的体心立方晶格的致密度大。这一点对金属的许多性能和行为都有很大的影响。

1.1.3 金属晶体中晶面与晶向表示法

在分析研究有关晶体的生长、变形和相变, 以及性能等方面的问题时, 常涉及晶体中某些原子所构成的方向和平面。在晶体学中, 通过晶体中原子中心的平面称为晶面; 通过原子中心的直线称为原子列, 其所代表的方向称为晶向。晶体结构的规律也反映在晶面和晶向上。为了便于表示各种晶向和晶面, 需要确定一种统一的标号, 称为晶面指数和晶向指数。国际上通用的是密勒(Miller)指数, 标号方法如下:

1.1.3.1 立方晶系的晶面指数

确定晶面指数的步骤如下:

①选定晶胞中任一结点为空间坐标系的原点 O (待定晶面不能通过该点), 如图 1.7 所示, 以晶胞的三条棱边为 Ox 、 Oy 、 Oz 轴, 以晶胞的边长作为坐标轴的单位长度。

②求出待定晶面在三个坐标轴上的截距(如该晶面与某轴平行, 则截距为 ∞)。例如 1、1、 ∞ , 1、1、1, 1、1、1/2 等。

③取这些截距数的倒数。例如 110, 111, 112 等。

④将上述倒数化为最小的简单整数, 并加上圆括号, 即表示该晶面的指数, 一般记为 (hkl) 。例如 (110), (111), (112) 等。如果所求晶面在坐标轴上的截距为负数, 则在相应的指数上方加一负号, 如 $(\bar{1}10)$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(\bar{1}12)$ 等。

例 1 如图 1.7 中所标出的晶面 $a_1b_1c_1$, 相应的截距为 1/2、1/3、2/3, 求其晶面指数。

解 根据上述步骤得三截距数的倒数为 2、3、3/2, 化为最小的简单整数为 4、6、3, 所示晶面

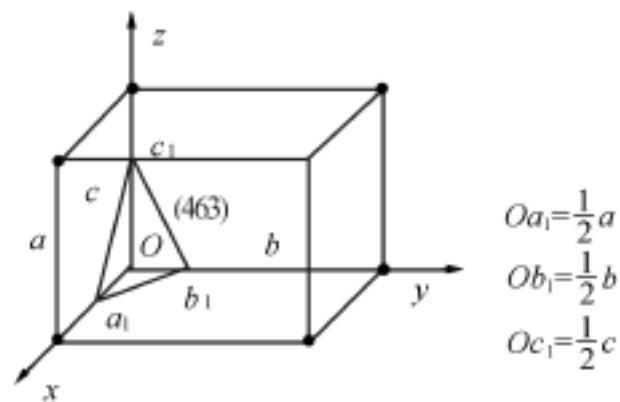


图 1.7 确定晶面指数示意图

$a_1b_1c_1$ 的晶面指数为(463)。

如图 1.8 所示, 为立方晶系中一些常见的重要晶面的晶面指数。

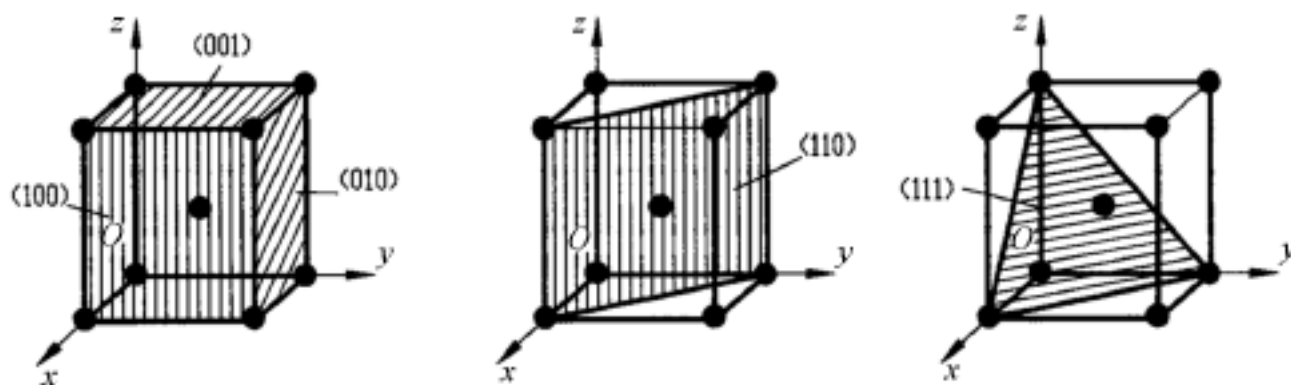


图 1.8 立方晶系常见的重要晶面的晶面指数示意图

例 2 作图表示立方晶系中的 (120) 、 (112) 、 (234) 、 $(\bar{1}32)$ 晶面。

解 (120) 、 (112) 、 (234) 、 $(\bar{1}32)$ 四个晶面在三个坐标轴上的截距分别为 $1, 1/2, \infty$; $1, 1, 1/2$; $1, 2/3, 1/2$ 或 $1/2, 1/3, 1/4$; $1, -1/3, 1/2$ 。

作图如下(见图 1.9):

图(a)为 (120) 、图(b)为 (112) 、图(c)为 (234) 、图(d)为 $(\bar{1}32)$, 需要说明的是图(d)即 $(\bar{1}32)$ 相当于原点选在O点, y轴为负向。

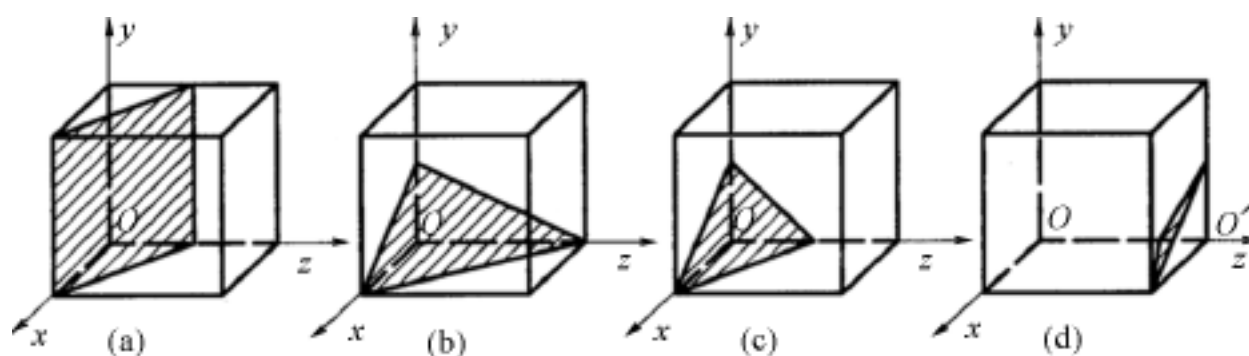


图 1.9 晶面指数示意图

由于坐标原点选择的任意性, 所有相互平行的晶面在三个坐标轴上的截距虽然不同, 但它们是成比例的, 其倒数也是成比例的, 经简化可以得到相同的最小整数。因此, 所有相互平行的晶面, 其晶面指数相同, 或者至多相差一负号。例如 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, 若这个面的指数都乘以 -1 , 则得 (111) 面, 它们是平行面, 分布在原点的两边(见图 1.10)。所以, (hkl) 实际上所代表的不仅是某一晶面, 而是代表一组相互平行的晶面。

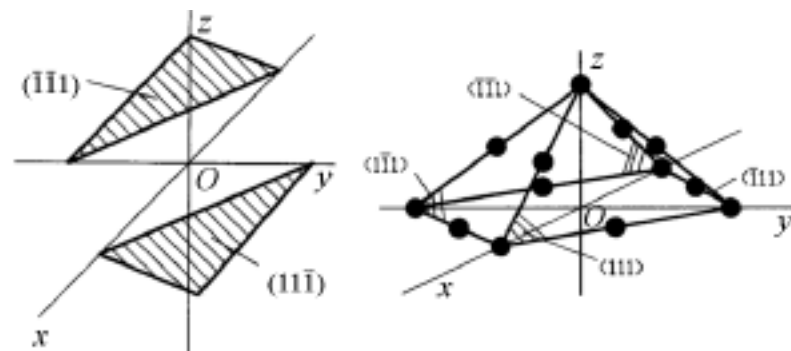


图 1.10 平行晶面示意图

图 1.11 晶面族示意图

在晶体中, 特别是在立方晶系中, 由于原子的排列具有高度的对称性, 往往存在着许多原子排列完全相同但不平行的对称晶面, 例如面心立

方晶体的 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 和 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面(见图1.11)。这四个面在空间不平行, 但其上原子的排列是等同的。在晶体学上等同而彼此不平行的晶面总称为晶面族, 用大括号表示, 即 $\{hkl\}$ 。

在立方晶系中, 同一晶面族中的各晶面的指数数值相同, 而符号和次序不同。例如, 上述面心

立方晶体中体对角面 $\{111\}$, 即包括 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}11)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}1)$ 和 $(\bar{1}1\bar{1})$ 等八个晶面。后四个晶面与前四个晶面是相同的, 是一一对应的平行面, 所以, 实际上这一晶面族只包括四个面。

1.1.3.2 立方晶系的晶向指数

立方晶系的晶向指数采用几何学中由方向指数表示直线方向的方法来表示。确定晶向指数的步骤如下:

①选定晶胞中任一结点为空间坐标系的原点, 以晶胞的三条棱边为坐标轴 Ox 、 Oy 、 Oz , 以晶胞边长为坐标轴长度单位, 如图 1.12 所示。

②过坐标原点作一平行于待求晶向的直线。

③求出该直线上任一结点的空间坐标值; 将其按比例化为最小整数, 例如 100、110、111 等。

④将化好的整数用方括号括起来, 即 $[uvw]$ 。例如 $[100]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ 等。如果 u 、 v 、 w 为负数, 则将负号记于其上方, 晶向指数表示着所有相互平行、方向一致的晶向。若方向相反, 则数字相同, 而符号相反。

例 3 求如图 1.12 所示晶向的晶向指数。

解 如 x 轴方向, 其晶向指数由 A 点的坐标来确定, A 点坐标为 1、0、0, 所以 x 轴的晶向指数为 $[100]$ 。同理, y 轴和 z 轴的晶向指数分别为 $[010]$ 和 $[001]$ 。 D 点的坐标为 1、1、0, 故 OD 方向的晶向指数为 $[110]$ 。 G 点的坐标为 1、1、1, 故对角线 OG 方向的晶向指数为 $[111]$ 。 OH 方向的晶向指数可根据 H 点的坐标来求得, 为 $[210]$ 。若要求 EF 方向的晶向指数, 应将 EF 平移使 E 点同原点重合, 这时 F 点移至 F' , F 点的坐标为 -1、1、0, 故 OF 的晶向指数为 $[\bar{1}10]$ 。既然 EF 与 OF 平行, 所以其晶向指数也为 $[\bar{1}10]$ 。

晶体中因对称关系而等同的各组晶向可归并为一个晶向族, 用 $\langle u\bar{v}w \rangle$ 表示。例如, 对立方晶系来说, $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 和 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 等 6 个晶向, 它们的性质是完全相同的, 用符号 $\langle 100 \rangle$ 表示。

在立方晶系中, 晶面指数和晶向指数相同时, 则晶面与晶向互相垂直, 例如 $(111) \perp [111]$, 如图 1.13 所示。

1.1.3.3 六方晶系的晶面指数与晶向指数

六方晶系的晶面指数和晶向指数同样可以应用上述方法标定。这时取 a_1 、 a_2 、 c 为晶轴。而 a_1 轴与 a_2 轴的夹角为 120° , c 轴与 a_1 、 a_2 轴相垂直, 如图 1.14 所示。但这样表示有缺点, 同类型的晶面, 其晶面指数不相同, 往往看不出它们之间的等同关系。例如, 晶胞的六个柱面是等同的, 但按上述三轴坐标系, 其指数却分别为 (100) 、 (010) 、 (110) 、 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}00)$ 。用这样的方法标定晶向指数也有同样的缺点。例如 $[100]$ 和 $[110]$ 实际上是等同的晶向, 但指数上反映不出来。为了克服这一缺点, 通常采用另一种专用六方晶系的四指数法。

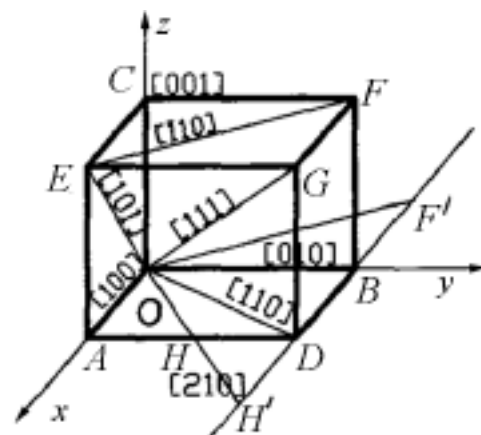


图 1.12 确定晶向指数示意图

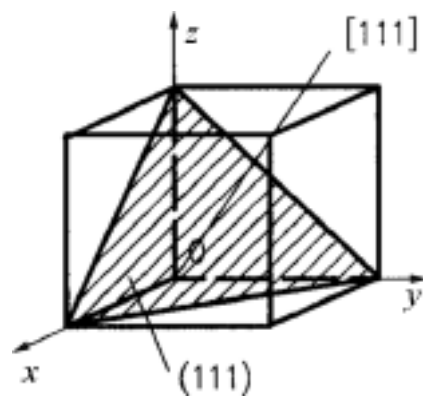


图 1.13 晶面与晶向垂直

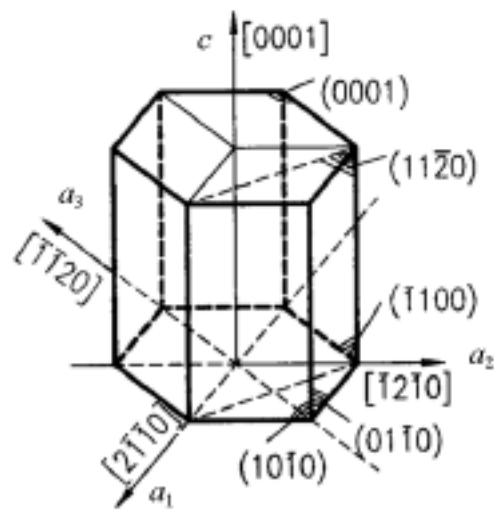


图 1.14 六方晶系示意图

根据六方晶系的对称特点,对六方晶系采用 a_1 、 a_2 、 a_3 、 c 四个晶轴, a_1 、 a_2 、 a_3 之间的夹角均为 120° 。这样,其晶面指数就以 (hkl) 4 个指数来表示。晶面指数的标定方法同前面一样,在图 1.14 中举出了六方晶系一些晶面的指数。采用这种标定方法,等同的晶面可以从指数上反映出来。例如,上述 6 个柱面的指数分别为: $(10\bar{1}0)$ 、 $(01\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}100)$ 、 $(1\bar{0}10)$ 、 $(0\bar{1}10)$ 和 $(\bar{1}\bar{1}00)$, 这 6 个晶面可归并为 $\{10\bar{1}0\}$ 晶面族。

根据几何学可知,三维空间独立的坐标轴最多不超过 3 个。应用上述方法标定的晶面指数形式上是 4 个指数,但是不难看出,前 3 个指数中只有两个是独立的,它们之间有关系: $i = -(h + k)$ 或 $h + k + i = 0$ 。因此,可以由前两个指数求得第 3 个指数,有时将第 3 个指数 i 略去,写成 $(hk \cdot l)$ 。

采用四轴坐标时,晶向指数的确定原则仍同前述,即把晶向 OP 沿四个晶轴分解成四个分矢量: $OP = ua_1 + va_2 + ta_3 + wc$ 。则晶向指数就可用 $[uvw]$ 来表示。问题是 u 、 v 、 t 三个指数中只能有两个独立,不然将会有无限解,得不到确定的指数,因此必须附加一个条件。参照上述晶面指数之间的关系,规定: $u + v = -t$ 或 $u + v + t = 0$ 。这样就得到唯一解,每个晶向有确定的晶向指数。

晶向指数的具体标定方法如下:从原点出发,沿着平行于四个晶轴的方向依次移动,使之最后到达要标定方向上的某一结点。移动时必须选择适当的路线,使沿 a_3 轴移动的距离等于沿 a_1 、 a_2 两轴移动距离之和的负值(即 $u + v = -t$)。将各方向移动距离化为最小整数,加上方括号,即表示该方向的晶向指数(见图 1.15 的举例)。

六方晶系按两种晶轴系所得的晶面指数和晶向指数可相互转换如下:对晶面指数来说,从 (hkl) 转换成 (hkl) 只要去掉 i 即可。反之则加上 $i = -(h + k)$ 。对晶向指数,则 $[UVW]$ 与 $[uvw]$ 之间的互换关系为: $U = u - t$, $V = v - t$, $W = w$

$$u = \frac{1}{3}(2U - V), v = \frac{1}{3}(2V - U), t = -(u + v), w = W$$

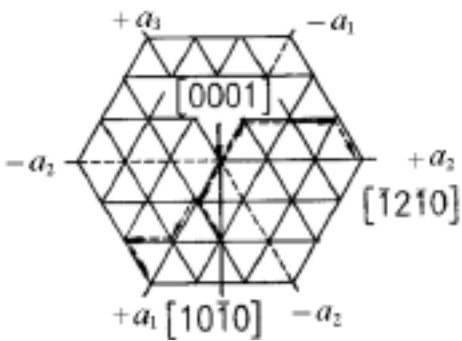


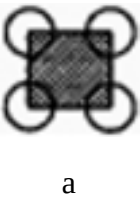
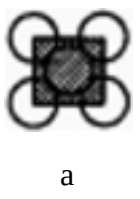
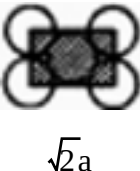
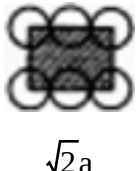
图 1.15 六方晶系晶向指数求法

1.1.3.4 金属晶体的各向异性

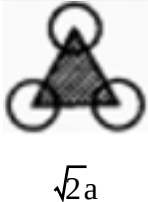
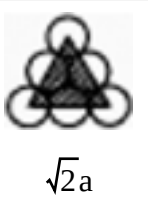
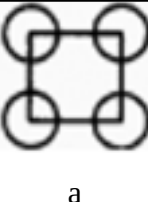
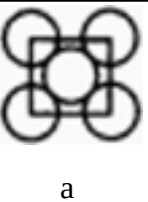
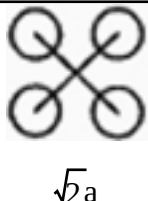
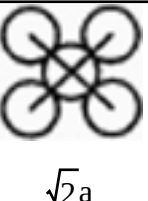
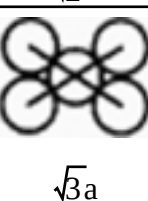
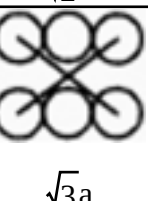
在 1.1.1 中我们已经简述过晶体的各向异性,通过对金属晶体结构的学习,我们进一步了解到:晶体各向异性的产生,与不同晶面和晶向上原子排列的方式和密度不同而造成它们之间的结合力的大小不同有密切的关系如表 1.1 所示。体心立方晶体、面心立方晶体的主要晶面、晶向上原子排列方式和密度计算如下:

晶面原子密度 = 晶面原子数 / 晶面面积; 晶向原子密度 = 晶向原子数 / 晶向长度

表 1.1 不同晶体和晶向上原子排列的方式和密度

体心立方晶格			面心立方晶格	
晶面指数	示意图	晶面原子密度	示意图	晶面原子密度
{100}		$\frac{4 \times \frac{1}{4}}{a^2} = \frac{1}{a^2}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 1}{a^2} = \frac{2}{a^2}$
{110}		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 1}{\sqrt{2}a^2} = \frac{1.4}{a^2}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{2}a} = \frac{1.4}{a}$

续表 1.1

体心立方晶格			面心立方晶格	
晶面指数	示意图	晶面原子密度	示意图	晶面原子密度
{111}	 $\frac{\sqrt{3}}{2}a$	$\frac{3 \times \frac{1}{6}}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{0.58}{a^2}$	 $\frac{\sqrt{3}}{2}a$	$\frac{3 \times \frac{1}{6} + 3 \times \frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{2.3}{a^2}$
晶向指数	示意图	晶向原子密度	示意图	晶向原子密度
<100>	 a	$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{a} = \frac{1}{a}$	 a	$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{a} = \frac{1}{a}$
<110>	 $\sqrt{2}a$	$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{2}a} = \frac{0.7}{a}$	 $\sqrt{2}a$	$\frac{2 \times \frac{1}{2} + 1}{\sqrt{2}a} = \frac{1.4}{a}$
<111>	 $\sqrt{3}a$	$\frac{2 \times \frac{1}{2} + 1}{\sqrt{3}a} = \frac{1.16}{a}$	 $\sqrt{3}a$	$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{3}a} = \frac{0.58}{a}$

由此可见, 在体心立方晶格中, 原子密度最大的晶面为{110}, 原子密度最大的晶向为<111>; 在面心立方晶格中, 原子密度最大的晶面为{111}, 原子密度最大的晶向为<110>。密度的不同造成金属晶体具有各向异性。例如, 单晶体铁的弹性模量 E, 在<111>方向上为 $2.90 \times 10^5 \text{MPa}$, 而在<110>方向上为 $1.35 \times 10^5 \text{MPa}$ 。体心立方金属最易拉断或劈裂的晶面(即解理面)就是{100}面。铁的单晶体在磁场中沿<100>方向磁化, 比沿<111>方向磁化容易。所以制造变压器用的硅钢片的<100>方向(轧制方向)应平行于导磁方向, 以降低变压器的铁损。锌在盐酸中溶解时, 晶面的溶解速度的次序是:

$\{1120\} > \{1010\} > \{0001\} > \cdots$

1.1.4 实际金属中的晶体缺陷

前面所讨论的是理想晶体的结构情况。在实际晶体中, 原子的排列不可能这样规则和完整, 而是或多或少地存在着偏离理想结构的区域, 出现了不完整性, 通常把这种偏离完整性的区域称为晶体缺陷。缺陷的产生与晶体的生成条件、晶体中原子的热运动、对晶体进行的加工过程, 和其他因素的作用(如辐照)等有关; 而且, 通常情况下金属都是多晶体, 在晶粒的交界(晶界)处, 原子的规则排列也必然受到破坏。这些都导致晶体的不完整性, 产生了晶体缺陷。但必须指出, 金属晶体中虽有缺陷存在, 从总的来看其结构仍然保持着规律性, 仍可认为是接近完整的; 即使在严重塑性变形的情况下, 晶体中位置偏移很大的原子数目平均来说至多仅占总原子数的 1/1000。因此, 晶体缺陷仍可以用相当确切的几何图像来描述。

根据晶体缺陷的几何形态特征, 可以将它们分成三大类。

1.1.4.1 点缺陷

点缺陷的特点是在 x、y、z 三个方向上的尺寸都很小(相当于原子的尺寸), 晶体中的点缺陷包