

高等院校教材

金属材料及热处理

(第二版)

史文 主编

上海科学技术出版社

高等院校教材

金属材料及热处理

(第二版)

上海大学 史文 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属材料及热处理 / 史文主编. — 2版. — 上海:
上海科学技术出版社, 2011.2

ISBN 978-7-5478-0475-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 146949 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

上海书刊印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 18.75

字数: 430 千字

1980 年第 1 版

2011 年 2 月第 2 版 2011 年 2 月第 34 次印刷

ISBN 978-7-5478-0475-9 / TG·17

定价: 35.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书从高等院校机械制造冷加工各专业教学实际需要出发,扼要讲述金属学、金属材料以及热处理方面的基本内容。共包括:金属的结构与结晶;金属的塑性变形与再结晶;合金的结构与相图;铁碳合金;钢的热处理;合金钢;铸铁;有色金属及其合金;机械零件选材及其工艺路线分析等九章内容。

本书可作为高等院校机械制造冷加工各专业的学习教材,也适合机械设计和生产部门的技术人员阅读参考。

第二版前言

《金属材料及热处理》自 1980 年首次出版以来,已被国内多所高等院校选作机械制造、材料加工等专业的课程教材,在 30 余年中历经了 30 多次重印,已有 80 多万学子或工程技术人员直接受惠于此书,相信其中的大多数已成为国家机械制造业或相关行业的中坚者。即使在 30 年后的今天,书中有关金属材料及热处理的基本理论以及大量的实例,对于相关专业的学子和工程技术人员依然有着重要的指导价值,这完全得益于原编写者们的智慧,他们不仅有丰富的教学经验,更有丰富的实践经验,以及他们对编写教材的兢兢业业和一丝不苟,才使得本书具有罕见的生命力并有望成为经典教材。在此向他们表示深深的敬意。

在这 30 年中,中国的机械制造业有了飞速的发展,中国也已经成为世界的制造业大国,新的材料、新的工艺被不断地开发、引进和利用。热处理技术已不仅仅应用于机械制造业,更被大量应用于冶金、汽车、工程装备等行业。这样,原书中的一些内容可能就无法适应新的需求。譬如:许多金属材料的命名方式已不同于 30 年前;原书中引用的技术标准绝大部分已过时,等等。为了维持原书的生命力,在上海科学技术出版社的帮助下,笔者对原书中的一些不适合或明显错误的内容进行了重写和修改,并用现行的标准替换了原书中的旧标准。由于笔者才疏学浅,未敢对原书作很大的改动,故再版依然保持了原书的精髓。即使这样,仍难免存在不妥及疏漏,恳望读者批评指正。

鉴于本书具有精简的理论、详实的实例和最新的标准,本书可以作为高等院校相关专业的教材,也可以作为工程技术人员的参考书。

修订者

第一版前言

根据1978年《高等学校一机部对口专业座谈会纪要》的决定,我们编写了这本《金属材料及热处理》作为高等院校机械制造冷加工各专业的试用教材。

本书以培养机械制造冷加工各专业的学生具有合理选用金属材料,正确选定热处理工艺方法,妥善安排工艺路线的初步能力为主要目标。

本书扼要讲述:金属材料的性能与成分、组织、结构以及加工工艺之间的关系;钢铁材料的热处理基本原理和工艺及其在机械产品零件加工过程中的地位和作用;常用金属材料(碳钢、铸铁、合金钢、有色金属及合金、硬质合金等)的分类、编号、成分、组织结构、性能和用途;金属材料选用原则;热处理技术条件标注;机械设计对减少和防止热处理变形、开裂的考虑;典型零件选材及工艺分析等。

本书计量单位统一采用国际单位制(SI),并以国际代号表示,如强度(σ_b 、 σ_s 等)指标的单位一律用 MN/m^2 (百万牛顿/米²)表示,它同非法定计量单位 kgf/mm^2 (公斤力/毫米²)的关系为: $1\text{MN}/\text{m}^2 \approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ 。另外,本书采用冲击功 A_k 作为冲击韧性的指标,其国际单位为J(焦耳)。 A_k (以J为单位)与冲击值 α_k (以 $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ 为单位)的关系为 $A_k \approx 8\alpha_k$ 。

参加本书编写工作的有:上海大学史美堂(绪论、附录及第四、五、六章),洛阳工学院席聚奎(第一、二、七章),东北重型机械学院杨慧心(第三、八章),山东工业大学时其铨(第九章)。全书由史美堂主编,并由西安理工大学热处理教研室金属材料及热处理教材审阅组主审。

本书在编写过程中,曾得到许多兄弟院校的热忱帮助和支持,谨在此深表感谢。

由于我们水平有限,书中缺点和错误一定不少,恳望广大读者批评指正。

编者

目 录

第一章 金属的结构与结晶	1
第一节 金属的晶体结构	1
一、晶体的概念	1
二、三种常见的金属晶格	2
三、三种典型晶格的致密度及晶面和晶向分析	3
四、晶体的各向异性	6
第二节 金属的实际结构和晶体缺陷	6
一、多晶体结构	6
二、晶格缺陷	7
第三节 金属的结晶与铸锭	8
一、结晶的概念	9
二、结晶时晶核的形成和成长过程	10
三、影响晶核形成和成长速率的因素	11
四、金属铸锭的组织	12
第二章 金属的塑性变形与再结晶	14
第一节 金属的塑性变形	14
一、金属的变形和断裂	14
二、金属单晶体的塑性变形	15
三、多晶体金属的塑性变形	17
第二节 塑性变形对组织和性能的影响	19
一、晶粒沿变形方向拉长,性能趋于各向异性	19
二、晶粒破碎,位错密度增加,产生加工硬化	19
三、织构现象的产生	21
四、残余内应力	21
第三节 回复与再结晶	22
一、变形金属在加热时的组织和性能的变化	22
二、金属的再结晶温度	24
三、再结晶退火后的晶粒度	25
第四节 金属的热加工	27

一、热加工与冷加工的区别	27
二、热加工对金属组织和性能的影响	27
第三章 合金的结构与相图	29
第一节 固态合金中的相结构	29
一、固溶体	30
二、金属间化合物	35
第二节 二元合金相图的建立	40
一、相图的意义及几个名词的涵义	40
二、二元合金相图的建立	40
第三节 匀晶相图	42
一、相图分析	42
二、合金的结晶过程	42
三、二元相图的杠杆定律	43
四、固溶体合金中的偏析	44
第四节 二元共晶相图	45
一、相图分析	45
二、合金的结晶过程	46
第五节 二元包晶相图	49
第六节 形成稳定化合物的二元合金相图	50
第七节 具有共析反应的二元合金相图	51
第八节 合金的性能与相图之间的关系	52
一、合金形成单相固溶体	52
二、合金形成两相混合物	53
三、合金形成化合物	55
第四章 铁碳合金	56
第一节 纯铁、铁碳合金的组织结构及其性能	56
第二节 铁碳合金相图分析	59
一、概述	59
二、钢和白口铸铁结晶过程分析	61
三、组织组成物计算	65
四、含碳量与铁碳合金力学性能的关系	65
五、Fe - Fe ₃ C 相图的应用	66
第三节 碳钢	67
一、钢中常存杂质元素的影响	68
二、碳钢的分类、编号和用途	68
第五章 钢的热处理	75

第一节 钢在加热时的转变	76
一、奥氏体的形成	76
二、奥氏体晶粒的长大及其影响因素	77
第二节 过冷奥氏体转变产物的组织形态与性能	78
一、珠光体类型组织形态与性能	79
二、马氏体类型组织形态与性能	79
三、贝氏体类型组织形态与性能	81
第三节 过冷奥氏体转变曲线图	83
一、过冷奥氏体等温转变曲线图	83
二、过冷奥氏体连续转变曲线图	88
第四节 钢的退火和正火	89
一、退火和正火的目的	89
二、退火和正火的操作及应用	90
第五节 钢的淬火	91
一、淬火的目的	91
二、淬火温度的选择	92
三、淬火冷却介质	92
四、常用的淬火方法	96
第六节 钢的淬透性	98
一、概述	98
二、淬透性对钢力学性能的影响	100
三、影响淬透性的因素	101
四、淬透性的测定及表示方法	102
五、淬透性与淬硬层深度的关系	103
六、钢的淬透性的取舍与拟定	103
七、淬透性曲线应用举例	104
第七节 钢的回火	105
一、回火的目的	105
二、淬火钢在回火时的转变	106
三、回火的种类及应用	108
第八节 钢的表面淬火	109
一、概述	109
二、感应加热表面淬火	109
三、火焰加热表面淬火	114
第九节 钢的化学热处理	114
一、概述	114
二、钢的渗碳	115
三、钢的氮化(气体氮化)	118
四、钢的碳氮共渗	120

第六章 合金钢	122
第一节 概论	122
一、合金元素对钢中基本相的影响.....	122
二、合金元素对 Fe - Fe ₃ C 相图的影响	124
三、合金元素对钢在加热和冷却时转变的影响.....	126
四、合金元素对回火转变的影响.....	128
五、合金钢的分类.....	129
第二节 合金结构钢	130
一、合金结构钢的分类及编号.....	130
二、低合金钢.....	130
三、易切削.....	135
四、渗碳钢.....	136
五、调质钢.....	140
六、弹簧钢.....	146
七、滚动轴承钢.....	150
第三节 合金工具钢	153
一、工具钢的分类及编号.....	153
二、刃具钢.....	154
三、模具钢.....	166
四、量具钢.....	175
第四节 特殊性能钢	177
一、不锈钢.....	177
二、耐热钢.....	187
三、耐磨钢.....	194
第五节 粉末冶金与硬质合金简介	194
一、粉末冶金工艺简介.....	195
二、粉末冶金的应用.....	195
三、硬质合金简介.....	196
第七章 铸铁	200
第一节 概论	200
一、铸铁的成分、组织和性能特点	200
二、铸铁中的石墨化过程.....	200
三、铸铁的分类.....	201
四、铸铁的牌号.....	202
第二节 灰铸铁	203
一、灰铸铁的成分、组织、性能和用途.....	203
二、灰铸铁的变质处理——变质铸铁.....	207
三、灰铸铁的热处理.....	207

第三节 可锻铸铁	208
第四节 球墨铸铁	211
一、球墨铸铁的成分、组织、性能和用途	211
二、球墨铸铁的热处理	213
第五节 特殊性能铸铁	216
一、耐磨铸铁	216
二、耐热铸铁	219
三、耐蚀铸铁	221
第八章 有色金属及其合金	223
第一节 铝及其合金	223
一、工业纯铝	223
二、铝合金概述	225
三、铸造铝合金	228
四、形变铝合金	237
第二节 铜及其合金	239
一、工业纯铜(紫铜)	239
二、铜的合金化	240
三、黄铜	241
四、青铜	249
第三节 轴承合金	259
一、锡基轴承合金	261
二、铅基轴承合金	262
三、铜基轴承合金——铅青铜	262
四、铝基轴承合金	262
第九章 机械零件选材及工艺路线分析	264
第一节 选材的一般原则	264
一、材料的力学性能	264
二、材料的工艺性能	265
三、材料的经济性	266
第二节 热处理技术条件的标注	266
一、整体热处理时的标注图例	267
二、局部热处理时的标注图例	268
第三节 冷加工方面减小变形、防止开裂的措施	269
一、改进淬火零件结构形状的设计	269
二、合理安排工艺路线	272
三、修改技术条件	273
四、按变形规律调整加工尺寸	273

五、预留加工余量·····	274
六、更换材料·····	276
七、减小表面粗糙度·····	276
第四节 热处理与切削加工性的关系·····	277
第五节 典型零件选材及工艺分析·····	279
一、齿轮类·····	279
二、轴类·····	281

第一章 金属的结构与结晶

第一节 金属的晶体结构

通常,金属在固态下都是晶体,故研究金属首先应从了解其晶体结构开始。为此,先介绍一些有关晶体的概念。

一、晶体的概念

所谓“晶体”是指其原子(更确切地说是离子)呈周期性重复排列的物体。图 1-1(a)所示为一最简单的晶体结构示例。在自然界中,除少数物质(如普通玻璃、松香及赛璐珞等)以外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。晶体之所以具有规则的原子排列,主要是由于各原子之间的互相吸引力与排斥力相平衡的结果。由于晶体内部原子排列的规律性,有时甚至可以见到某些物质的外形也具有规则的轮廓,如水晶、食盐及黄铁矿等,但金属晶体一般看不到这种规则的外形。

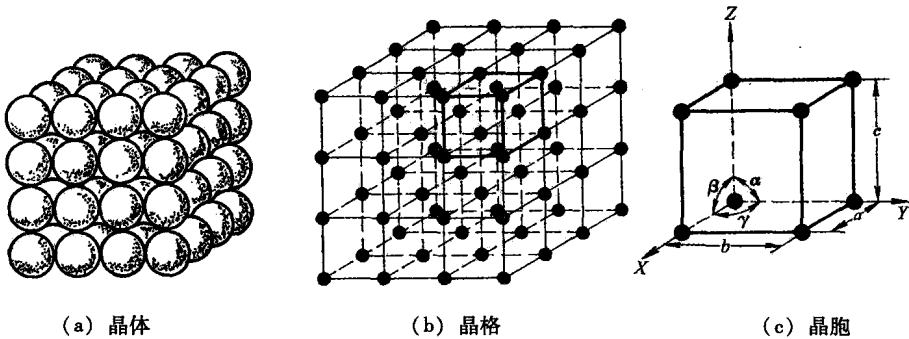


图 1-1 简单立方晶体、晶格及晶胞示意图

为了便于分析各种晶体中的原子排列规律或形式,常以通过各原子中心的一些假想联线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来,如图 1-1(b)所示,各连线的交点称为“结点”,在结点上的小圆圈(或黑点)表示各原子中心的位置,把这种表示晶体中原子排列形式的空间格子叫做“晶格”(或点阵)。显然,由于晶体中原子重复排列的规律性,可从其

晶格中确定一个最基本的几何单元来表达其排列形式的特征,如图 1-1(c)所示。组成晶格最基本的几何单元叫做“晶胞”。晶胞的各边尺寸 a 、 b 、 c 叫“晶格常数”;晶胞各边之间的相互夹角分别以 α 、 β 及 γ 表示。如图 1-1(c)所示的晶胞,其晶格常数 $a = b = c$,而 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$,这种晶胞叫做简单立方晶胞。具有简单立方晶胞的晶格叫做简单立方晶格。简单立方晶格只见于非金属晶体中,在金属中则看不到。

各种晶体物质,或其晶格形式不同,或其晶格常数不同,主要与其原子构造、原子间的结合力(或称结合键)的性质有关。因晶格形式及晶格常数不同,不同晶体便表现出不同的物理、化学和力学性能。

二、三种常见的金属晶格

金属与非金属晶体的不同,主要归因于其原子构造及原子间结合键的差异。我们知道,一切金属元素,在其原子构造上的共同特点是其价电子数目少,价电子与原子核间的结合力小,因而金属晶体中的原子结合形成所谓“金属键”,其特点是部分或全部原子都失去其价电子变为正离子,正离子在晶体中规则地排列起来(实际上每个正离子在各晶格结点上还作轻微的高频率振动,非固定不动),而所有游离的自由电子则穿梭于各离子之间作高速运动,形成所谓“电子云”,电子云与正离子间的引力使金属被坚强地结合起来,而离子与离子间及电子与电子间的斥力则与这种引力相平衡,使金属处于稳定的晶体状态。

正由于金属晶体中有大量的自由电子存在,使金属能区别于非金属而具有良好的导电与导热性能。正由于金属晶体是借助于其电子云与各离子间公有引力的坚强结合,使金属能区别于非金属而具有良好的塑性和高强度等优良的力学性能(详见后述)。同时,也正由于这种坚强的金属键存在,使得金属晶体大都具有紧密排列的趋向,以致原子排列组合形式的数目大为减少,只具有少数几种高对称性的晶格形式,而非金属晶体则一般大都具有比较复杂的晶格,对称性较低。

在金属元素中,约有 90% 以上的金属晶体都属于以下三种密排的晶格形式:

(一) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞(见图 1-2)是由 8 个原子构成的立方体,并在其立方体的体积中心还有一个原子,因其晶格常数 $a = b = c$,故通常只用一个常数 a 即可表示。由图可见,这种晶胞在其立方体对角线方向上的原子是彼此紧密相接触排列着的,故由该对角线长度 $\sqrt{3}a$ 上所分布的原子数目(共 2 个),可计算出其原子半径的尺寸 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。在这种晶胞中,因每个顶点上的原子是同时属于周围 8 个晶胞所共有,故实际上每个体心立方晶胞中仅包含: $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个原子。属于这种晶格的金属有铁($< 912^\circ\text{C}$, $\alpha\text{-Fe}$)、铬(Cr)、钼(Mo)、钨(W)、钒(V)等。

(二) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞(见图 1-3)也是由 8 个原子构成的立方体,但在立方体的每一面的中心还各有一个原子。显然,在这种晶胞中,每个面的面对角线上各原子彼此相互接触,因而其原子半径的尺寸 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。又因每一面心位置上的原子是同时属于两个晶胞所共

有,故每个面心立方晶胞中包含有: $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个原子。属于这种晶格的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)等。

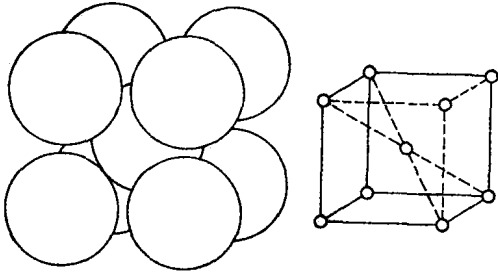


图 1-2 体心立方晶胞

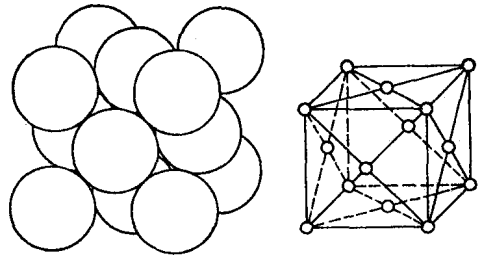


图 1-3 面心立方晶胞

(三) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞(见图 1-4)是由 12 个原子构成的六方体,在六方体的上下两个六方面的中心各有一个原子,且在两个六方面之间还有 3 个原子。密排六方晶格的晶格常数比值 $c/a \approx 1.633$ 。属于这种晶格的金属有铍(Be)、镁(Mg)、锌(Zn)、镉(Cd)等。

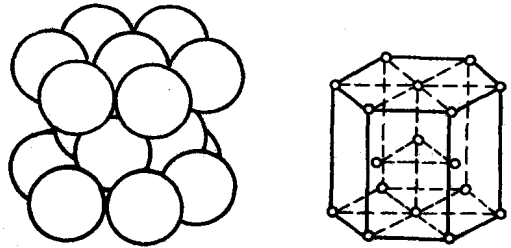


图 1-4 密排六方晶胞

除以上 3 种晶格以外,少数金属还具有其他类型的晶格,但一般很少遇到。

三、三种典型晶格的致密度及晶面和晶向分析

(一) 晶格的致密度

如上所述,金属晶体的特点是其原子排列紧密,即致密度较高。所谓晶格的致密度是指其晶胞中包含的原子所占有的体积与该晶胞体积之比。例如,在体心立方晶格中,每个晶胞含有 2 个原子,原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$,晶胞体积为 a^3 ,故体心立方晶格的致密度为:

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

即晶格中有 68% 的体积被原子所占据,其余为空隙。同样,可求出面心立方及密排六方晶格的致密度均为 0.74,而简单立方晶格的致密度则仅为 0.52。

此外,在定性评定晶体中原子排列的紧密程度时,还应用“配位数”这一概念。所谓配位数是指晶格中任一原子周围最近邻且等距离的原子数。显然,配位数越大,原子排列也越紧密。据此定义,体心立方晶格的配位数为 8,这从晶胞体心位置上的那个原子很容易看出来。当然,这对体心立方中任一顶点上的原子也毫无例外,因为,立方体每个顶点上的原子同时属于它周围 8 个晶胞所共有,即它周围 8 个晶胞中每个体心的原子与它都是最近邻且等距的。与此类似,可求出面心立方与密排六方晶格的配位数均为 12。现将 3 种典型金属

晶格的各种数据列于表 1-1。由表中数据可见,不论从致密度或配位数来看,面心立方和密排六方晶格的原子排列都是最紧密的。

表 1-1 3 种典型金属晶格数据

晶格类型	晶胞中的原子数	原子半径	配位数	致密度
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	0.68
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	0.74
密排六方	6	$\frac{1}{2}a$	12	0.74

(二) 晶面及晶向指数

晶体中各种方位上的原子面叫晶面;各种方向上的原子列叫晶向。在研究金属晶体结构的细节及其性能时,往往需要分析它们的各种晶面和晶向中原子分布的特点,因此,有必要给各种晶面和晶向定出一定的符号,以表示它们在晶体中的方位或方向,便于分析。晶面和晶向符号分别叫“晶面指数”和“晶向指数”。

确定晶面指数的方法有如下 3 个步骤:

(1) 设晶格中某一原子为原点 O ,通过该点平行于晶胞的三棱边作 $OX、OY、OZ$ 3 坐标轴,以晶格常数 $a、b、c$ 分别作为相应的 3 个坐标轴上的量度单位,求出所需确定的晶面在 3 个坐标轴上的截距(见图 1-5)。

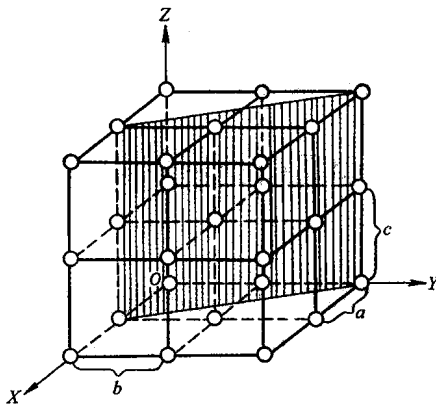


图 1-5 晶面指数的确定方法

(2) 将所得 3 个截距之值变为倒数。

(3) 将 3 个倒数按比例化为最小整数,加上一圆括号,即为晶面指数。晶面指数的一般形式用 (hkl) 表示。

例如,图 1-5 所示带影线的晶面,其晶面指数的确定步骤为:

(1) 它与 $OX、OY、OZ$ 坐标轴截距为:1、2、 ∞ 。

(2) 3 个截距的倒数为:1、 $\frac{1}{2}$ 、0。

(3) 化为最小整数后的晶面指数为:(210)。

在立方晶格中,最具有意义的是图 1-6 所示的 3 种晶面,即(100)、(110)与(111)3 种晶面。需注意的是,所谓晶面指数,并非仅指一晶格中的某一个晶面,而是泛指该晶格中所有那些与其平行的位向相同的晶面。另外,在一种晶格中,如果某些晶面的位向不同,但各晶面中的原子排列相同时,如(100)、(010)及(001)等,这时若无必要予以区别,则可把这些晶面统用 $\{100\}$ 一种晶面指数来表示,换句话说,即 (hkl) 这类符号系指某一确定位向的晶面指数,而 $\{hkl\}$ 则可指所有那些位向不同而原子排列相同的晶面指数,称 $\{hkl\}$ 为晶面族。

晶向指数的确定方法如下:

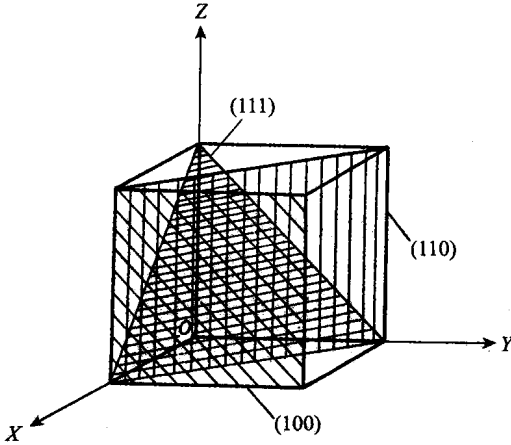


图 1-6 立方晶格中的 3 种重要晶面

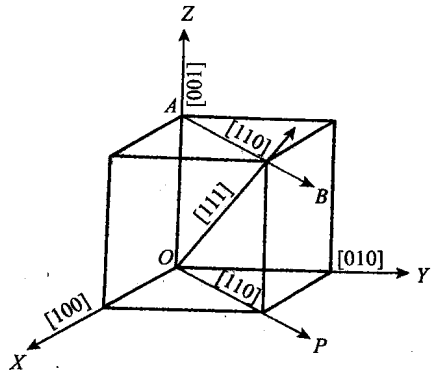


图 1-7 立方晶格中的 3 个重要晶向

(1) 通过坐标原点引一直线,使其平行于所求的晶向。

(2) 求出该直线上任意一点的 3 个坐标值。

(3) 将 3 个坐标值按比例化为最小整数,加一方括号,即为所求的晶向指数,其一般形式为 $[uvw]$ 。

例如,欲求图 1-7 中 AB 的晶向指数,可通过与其平行的 OP 直线上任意一点的坐标化简而求出为 $[110]$ 。图 1-7 中的 $[100]$ 、 $[110]$ 及 $[111]$ 晶向为在立方晶格中最具有意义的 3 种晶向。与晶面指数的表示方法相类似,如 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 等具有相同原子排列的晶向,若无必要区分时,可笼统用 $\langle 100 \rangle$ 这种符号来表示,称 $\langle 100 \rangle$ 为晶向族。将图 1-7 与图 1-6 对比可以看出,在立方晶格中,凡指数相同的晶面与晶向是互相垂直的。

(三) 晶面及晶向的原子密度

所谓某晶面的原子密度即指其单位面积中的原子数,而晶向原子密度则指其单位长度上的原子数。在各种晶格中,不同晶面和晶向上的原子密度是不同的。例如,在体心立方晶格中的各主要晶面和晶向的原子密度见表 1-2。

表 1-2 体心立方晶格中各主要晶面和晶向的原子密度

晶面指数	晶面示意图	晶面密度 (原子数/面积)	晶向指数	晶向密度 (原子数/长度)
{100}		$\frac{1}{4} \times 4 = \frac{1}{a^2}$	$\langle 100 \rangle$	$\frac{1}{2} \times 2 = \frac{1}{a}$
{110}		$\frac{1}{4} \times 4 + 1 = \frac{1.4}{a^2}$	$\langle 110 \rangle$	$\frac{1}{2} \times 2 = \frac{0.7}{a}$
{111}		$\frac{1}{6} \times 3 = \frac{0.58}{a^2}$	$\langle 111 \rangle$	$\frac{1}{2} \times 2 + 1 = \frac{1.16}{a}$