

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



热加工 金属学原理

REJIAGONG JINSHUXUE YUANLI

胡宗遯 主编

华中理工大学出版社

35

10

热加工金属学原理

胡宗逖 主编

魏国臣 宋润滨 副主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

502.3 : 403
华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书介绍金属材料热加工的金属学原理,包括金属及合金的固态结构,合金相图;铸造金属及合金的凝固、组织与性能;金属焊接接头的形成、组织与性能;塑性变形加工金属及合金的组织与性能等。

全书共四篇、二十章。在内容选取方面注意更新,并注意控制其深度和广度,力求理论与实际相结合。为了使读者能掌握各章的重点,每章之后都附有本章内容小结及一定数量的习题。

本书为高等工科院校机械系各类热加工专业教材(如铸造、焊接、锻压、热处理)。还可供从事金属材料研究及金属热加工方面工作的工程技术人员参考。

热加工金属学原理

胡宗遯 主编

责任编辑 刘宣藩

*

华中理工大学出版社出版发行

《武昌喻家山》

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 20 字数: 485 000

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-0872-1/TH·72

定价: 5.20元

(鄂)新登字第 10 号

前 言

由于过去热加工专业的分工过细,不能适应目前社会对人才的需求,因此有必要改革教学体制,同时对专业课教材也提出了新的要求,尤其是“金属学”这门重要的技术基础课教材应拓宽专业面,将各热加工专业的有关金属学内容合编在一起,以满足各类热加工专业的需要,为此编写了本教材。本书共分四篇,第一篇为金属及合金的固态结构及其相图;第二篇为铸造金属及合金的凝固、组织与性能;第三篇为金属焊接接头的形成、组织与性能;第四篇为塑性变形加工金属及合金的组织与性能。本书在内容选取方面注意更新,从教学要求出发,控制其深度和广度。为了加强理论与实际的结合,在内容编排上,除最基础的部分(如金属及合金的结构和合金相图)外,其他金属学原理与各种金属热加工最常用的材料、各种热加工的主要工艺条件相结合,对铸造、焊接及变形加工等各金属学原理部分分别予以论述,以提高学生学以致用的能力。

本书在编写过程中,对金属学的基础理论,注意深入浅出,力求阐明其基本概念。同时编者总结多年来从事金属学教学的经验和体会,并吸收兄弟院校经验,对学生在学习过程中易于混淆以及不易理解的问题,重点阐述。为了使學生能够掌握各章的重点,帮助学生复习和巩固所学内容,在各章之后均附有小结及习题。

本书为高等工科院各类金属热加工专业的教材,同时还可供从事金属材料研究及金属热加工方面工作的技术人员参考。

本书第一篇由哈尔滨科学技术大学胡宗逖编写,第二篇由大庆石化总厂魏国臣编写,第三篇第十二、十三、十四、十五章由哈尔滨工业高等专科学校胡琨编写,第十六章由哈尔滨焊接研究所张晓航编写,第四篇由哈尔滨科学技术大学宋润滨编写。全书由胡宗逖主编,魏国臣,宋润滨副主编。书中金属组织的照片由哈尔滨科学技术大学金相室孙大民提供。

由于编者水平有限,本书在编排上又是一种新的尝试,难免有许多不足之处,敬请读者批评指正。

编者

1993年4月

目 录

第一篇 金属及合金的固态结构及其相图

第一章 金属的晶体结构	1
第一节 晶体学基础	1
第二节 金属的晶体结构	8
小 结	15
习 题	15
第二章 金属晶体结构中的缺陷	16
第一节 点缺陷	16
第二节 位错	18
第三节 金属界面	34
小 结	40
习 题	41
第三章 合金相结构	43
第一节 影响合金结构的因素	43
第二节 合金相的分类	44
第三节 固溶体	44
第四节 中间相	50
小 结	58
习 题	59
第四章 二元合金相图	60
第一节 相图的建立及其基本规律	60
第二节 匀晶相图	62
第三节 共晶相图	64
第四节 包晶相图	68
第五节 其他类型的二元合金相图	72
第六节 二元相图的分析方法	76
小 结	77
习 题	77
第五章 铁碳合金相图	78
第一节 铁碳合金的基本组成相	78
第二节 相图分析	78
第三节 典型铁碳合金的相变过程	80
第四节 铁碳合金的平衡组织与机械性能	89
小 结	89
习 题	90

第六章 三元合金相图	91
第一节 三元合金相图的表示方法及其基本规律	91
第二节 具有两相平衡的三元合金相图	94
第三节 具有三相平衡的三元合金相图	99
第四节 具有四相平衡的三元合金相图	104
第五节 三元合金相图举例	112
小结	118
习题	119

第二篇 铸造金属及合金的凝固、组织与性能

第七章 纯金属的凝固与组织	121
第一节 液体金属的性质和结构	121
第二节 纯金属凝固的基本条件	122
第三节 纯金属凝固的基本规律	124
第四节 晶核的形成	124
第五节 晶核的长大	129
第六节 纯金属结晶组织的控制	133
小结	135
附录 液、固界面相对自由能的推导	136
习题	137
第八章 单相固溶体合金的凝固与组织	138
第一节 合金固溶体凝固时溶质的重新分布	138
第二节 合金固溶体的成分过冷与晶体的生长形态	141
第三节 合金中溶质的重新分布与合金的偏析	143
小结	145
附录 8-1 液体中溶质完全混合时, 溶质分布方程的推导	145
附录 8-2 液体中溶质不混合时, 溶质分布方程的推导	146
附录 8-3 液体中溶质部分混合时, 溶质分布方程的推导	147
习题	149
第九章 多相合金的凝固及组织	151
第一节 共晶合金的凝固及组织	151
第二节 包晶合金的凝固及组织	157
小结	158
习题	159
第十章 铸铁的凝固及组织	160
第一节 铸铁及其种类	160
第二节 灰口铸铁的凝固及组织	160
第三节 孕育处理和孕育铸铁	165
第四节 球化处理和球墨铸铁	166
小结	168

习题	168
第十一章 金属及合金铸件的凝固、组织与性能	169
第一节 金属及合金铸件的凝固方式与铸造性	169
第二节 金属及合金铸件的凝固过程及组织	171
第三节 合金铸件的凝固与偏析	174
第四节 铸件的组织、性能与控制	176
小结	178
习题	178

第三篇 金属焊接接头的形成、组织与性能

第十二章 焊接化学冶金过程与焊缝金属的成分	180
第一节 焊接化学冶金条件	180
第二节 焊接区气体对焊缝金属的作用	181
第三节 熔渣的冶金作用及对焊缝成分的影响	187
第四节 焊缝金属的熔合比	190
第五节 焊缝金属的成分与性能	191
小结	192
习题	192
第十三章 焊缝金属的凝固、组织与性能	193
第一节 焊缝金属的凝固条件	193
第二节 焊缝金属的凝固特点	193
第三节 焊缝金属的凝固组织形态及对性能的影响	195
第四节 焊缝金属成分的不均匀性	197
第五节 焊缝中的气孔	199
小结	203
习题	203
第十四章 焊接接头的固态相变、组织与性能	204
第一节 焊接接头的固态相变条件	204
第二节 钢固态相变的基本原理	205
第三节 焊接接头的组织与性能	221
小结	225
习题	226
第十五章 焊接裂纹	227
第一节 焊接裂纹的种类	227
第二节 结晶裂纹	228
第三节 近缝区的液化裂纹	230
第四节 再热裂纹	231
第五节 焊接延迟裂纹	233
小结	236
习题	237

第十六章 合金结构钢的焊接性	238
第一节 焊接用结构钢简介	238
第二节 热轧及正火钢的焊接性	239
第三节 低碳调质钢的焊接性	240
第四节 中碳调质钢的焊接性	241
第五节 特殊用钢的焊接性	242
小结	243
习题	243

第四篇 塑性变形加工金属及合金的组织与性能

第十七章 金属塑性变形方式及机制	244
第一节 滑移	244
第二节 孪生	257
第三节 扭折	261
小结	261
习题	262
第十八章 塑性变形对金属及合金组织与性能的影响	263
第一节 金属的塑性变形	263
第二节 合金的塑性变形	265
第三节 塑性变形对金属组织和性能的影响	270
小结	275
习题	276
第十九章 温度对变形金属及合金的组织与性能的影响	277
第一节 变形金属及合金在加热时的变化	277
第二节 回复	278
第三节 再结晶	281
第四节 再结晶后的晶粒长大	288
第五节 再结晶退火后的组织	294
第六节 动态回复与动态再结晶	296
小结	300
习题	302
第二十章 热变形钢的组织与性能	302
第一节 热变形钢的组织	302
第二节 热变形钢的性能特点	308
第三节 热变形加工工艺对碳钢组织与性能的影响	309
小结	310
习题	311
参考文献	312

第一篇 金属及合金的固态结构及其相图

金属及合金是现代工业应用的主要材料。人们研究金属和合金是为了掌握金属、合金的性能及其变化规律,从而能合理地使用金属和充分挖掘其潜力,有效地提高其性能。为此,必须了解影响金属及合金性能的因素,以及受各因素影响金属、合金发生变化的规律。显然,这是一个十分复杂的问题,但经长期实践和研究表明,决定金属、合金性能的基本因素是金属、合金的晶体结构及其显微组织。本篇主要讨论金属、合金的固态结构及组织,合金相图则是研究合金组织的基础。

第一章 金属的晶体结构

固态物质按其原子(或分子)的聚集状态可以分成两类,即晶体和非晶体。晶体内部原子呈有规则地排列,而非晶体中原子则是紊乱无序的。用X射线或电子衍射等实验方法证明,固态金属都是晶体,而且,具体确定了各种金属的结构。本章主要介绍典型金属的晶体结构。

第一节 晶体学基础

晶体学是研究晶体结构的一门科学。它包括:几何晶体学、分子或原子晶体学等。本章为分析金属的晶体结构,应用了晶体学的一些基本概念和知识。

一、空间点阵和晶胞

为了便于描述和分析晶体中原子排列的规律性,可以把晶体中的原子(或分子)抽象为几何的点,并规定这些点周围的环境都是相同的。也就是说,在任一个点周围相同的方向和距离处,都可以找到环境相同的另一个点。由这样的点在空间有规则的排列就可构成一个空间的阵列,称为空间点阵。而构成此空间点阵的点则称之为阵点或结点。为便于表现空间点阵的几何图形,可用几何的线将空间点阵中的阵点连接起来,构成一个空间的网格,如图1-1所示,称为空间格子。用空间点阵或空间格子可以表示晶体中原子排列的规律性。因空间点阵

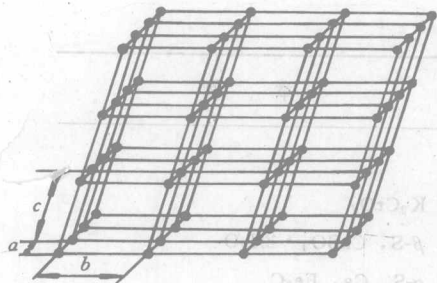


图 1-1 空间格子的一部分

中的阵点环境相同,所以,空间点阵具有周期重复性,即位于同一直线上的阵点,每隔一个相同的距离就会重复出现。由于空间点阵有上述特性,为说明点阵排列的规律和特点,就可以在空间点阵或空间格子中取出一个小单元,来代表整个的空间点阵或空间格子。这个小单元也称为单位点阵或晶胞。对同一空间点阵因选取方式不同,可以得到不同的晶胞。图1-2所

示表示了在一个二维的点阵平面上所选取的不同晶胞。因此，为得到统一的结果，在选取晶胞时常作如下的规定：在能代表空间点阵特征的前提下，选取对称性最高和体积最小的单元作为晶胞。按此规定选取的结果，晶胞通常为一个最小的平行六面体。

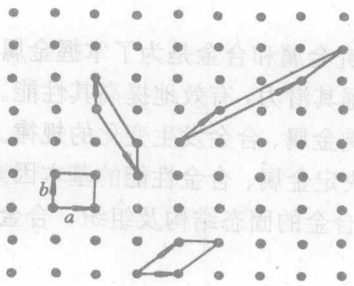


图 1-2 在点阵中选取晶胞

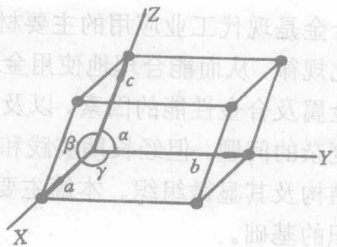


图 1-3 晶胞、晶轴和点阵矢量

图 1-3 所示为选取的一个晶胞。若取晶胞某角上的阵点作为原点，沿晶胞的三个棱边取坐标轴 X 、 Y 、 Z （称为晶轴），则晶胞的形状和大小，可用沿三个晶轴的边长 a 、 b 、 c （称为晶格常数）和晶轴间的夹角 α 、 β 、 γ 六个参数来表示。实际上，如用三个点阵矢量 a 、 b 、 c （如图 1-3）来描述晶胞将更为方便，因为用三个矢量不仅可以确定晶胞的形状和大小，而且只要——任选一个阵点为原点，就可确定空间点阵中任一阵点的位置。例如：

$$\mathbf{r}_{uvw} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c} \tag{1-1}$$

式中 $\mathbf{r}_{uvw}$ 为由原点到某一个阵点的矢量， u 、 v 、 w 分别表示三个点阵矢量的平移量，也就是该阵点的坐标。

二、晶系和布拉菲点阵

晶体根据晶胞尺寸和形状可以分为七类，也称为七个晶系。七个晶系的六个参数关系如表 1-1 所示。此外，根据空间点阵中每个阵点环境必须相同的要求，布拉菲（A. Bravais）用数学方法确定晶胞中阵点的可能排列方式只能有 14 种，并分别属于不同的晶系。这 14 种点阵也称为布拉菲点阵，它们的晶胞如图 1-4 所示。

表 1-1 晶系

晶 系	棱边长度及夹角关系	举 例
三 斜	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	K_2CrO_7
单 斜	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$\beta\text{-S}, \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
正 交	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\alpha\text{-S}, \text{Ca}, \text{Fe}_3\text{C}$
六 方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	$\text{Zn}, \text{Cd}, \text{Mg}, \text{NiAs}$
菱 方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$\text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}$
四 方	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\beta\text{-Sn}, \text{TiO}_2$
立 方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Ag}, \text{Au}$

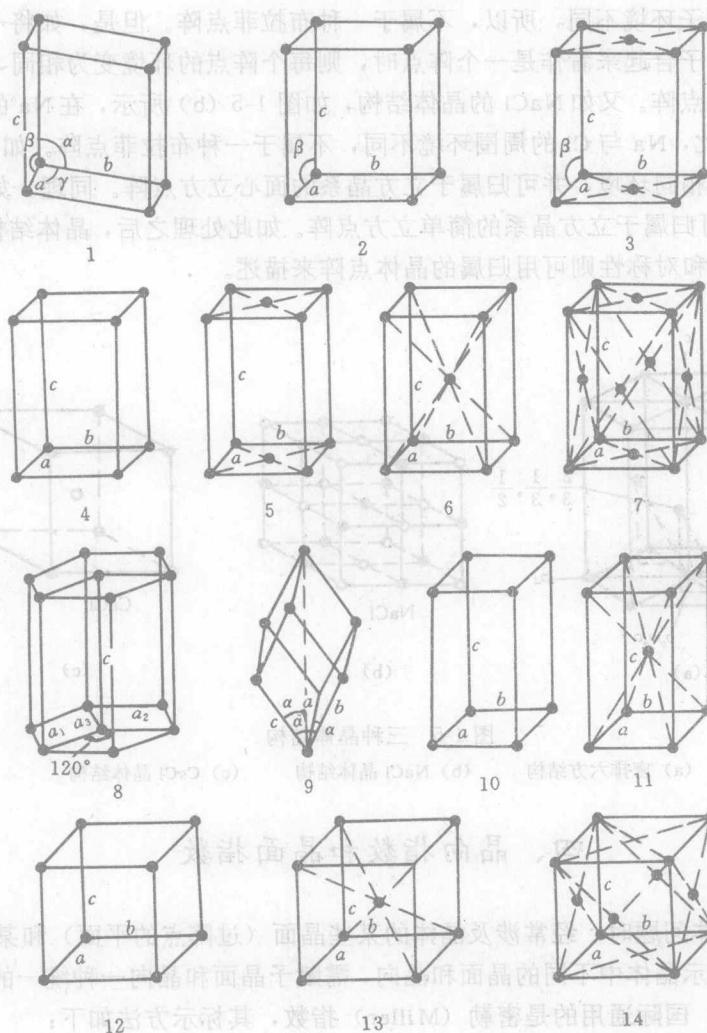


图 1-4 14 种布拉菲点阵的晶胞

1—简单三斜；2—简单单斜；3—底心单斜；4—简单正交；5—底心正交；6—体心正交；7—面心正交；8—简单六方；9—简单菱方；10—简单四方；11—体心四方；12—简单立方；13—体心立方；14—面心立方

三、晶体结构与空间点阵

如前所述，空间点阵是晶体中质点（原子或分子）排列的几何抽象，用以描述和分析晶体结构的周期性和对称性。由于规定各阵点的环境必须相同，所以只能有 14 种。而晶体结构则是指晶体中原子（或分子）的实际排列情况。其中，每个原子（或分子）的环境不尽相同，所以有各种类型。实际上可能形成的晶体结构种类是无限多的，但是，如按晶体结构中原子（或分子）排列的周期性和对称性，总可以将其归属于 14 种布拉菲点阵中的一种。图 1-5 为常

见的三种晶体结构。例如，金属中常见的密排六方结构如图 1-5 (a) 所示，由于晶胞角上的原子与晶胞内的原子环境不同，所以，不属于一种布拉菲点阵。但是，如将一个角上的原子和一个晶胞内的原子合起来看作是一个阵点时，则每个阵点的环境变为相同，并可归属于六方晶系的简单六方点阵。又如 NaCl 的晶体结构，如图 1-5 (b) 所示，在 Na 的周围是 Cl，Cl 的周围是 Na，因此，Na 与 Cl 的周围环境不同，不属于一种布拉菲点阵。如将 NaCl 看作是一个阵点，则变为相同环境，并可归属于立方晶系的面心立方点阵。同理，如图 1-5 (c) 所示的 CsCl 结构，可归属于立方晶系的简单立方点阵。如此处理之后，晶体结构中的原子（或分子）排列周期性和对称性则可用归属的晶体点阵来描述。

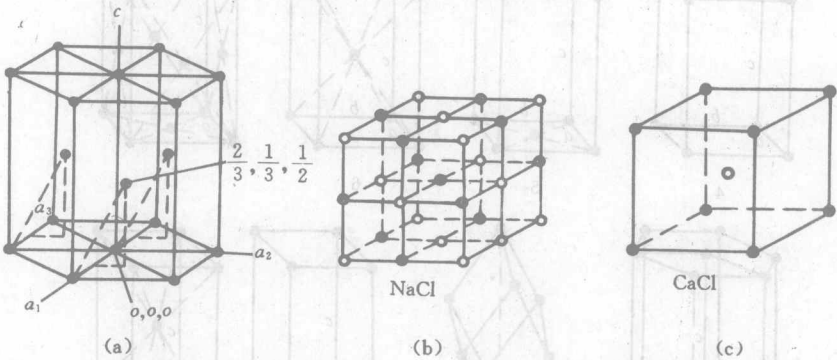


图 1-5 三种晶体结构
(a) 密排六方结构 (b) NaCl 晶体结构 (c) CsCl 晶体结构

四、晶向指数和晶面指数

在研究有关晶体问题时，经常涉及晶体的某些晶面（过阵点的平面）和某些晶向（连接阵点的直线）。为表示晶体中不同的晶面和晶向，需赋予晶面和晶向一种统一的标号，称为晶面指数和晶向指数。国际通用的是密勒（Miller）指数，其标示方法如下：

1. 晶向指数

1) 在晶体内设参考坐标系。如图 1-6 所示，取晶胞的任一个阵点为原点，沿晶胞的三个棱边方向取坐标轴，以点阵常数 a 、 b 、 c （晶胞的三个棱边长）作为坐标的长度单位。

2) 过原点沿所求晶向取最近的一个阵点的坐标，如图 1-6 中所示 OP 方向的 P 点在三个坐标轴的坐标 U 、 V 、 W 。

3) 将 P 点的坐标 U 、 V 、 W 化为最小的整数 u 、 v 、 w ，并加上方括号，即成为所求晶向的晶向指数 $[uvw]$ 。

图 1-7 所示为立方晶系的晶体中一些晶向及其晶向指数。若其坐标为负值，则将负号记在该数的上方，如图中的 $[\bar{1}10]$ 。

根据上述的晶向指数确定方法可知，一个

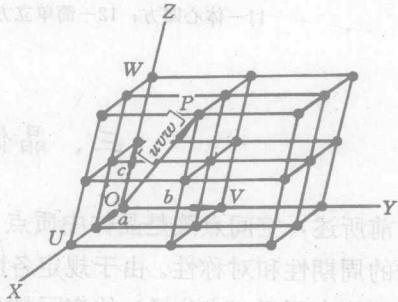


图 1-6 晶体中的参考坐标系

面晶轴为晶轴时，其晶轴为晶轴，其晶轴为晶轴。

图 1-7 立方晶系的一些主要晶向及其晶向指数

2. 晶面指数

确定晶体中晶面指数的具体步骤如下:

- 1) 在晶体中设参考坐标系,方法与确定晶向指数时相同。但需注意,所取的原点应在待定晶面之外,以免出现零截距。

- 2) 取待定晶面在三个坐标轴的截距 H 、 K 、 L ，当截距与坐标轴平行时，截距为 ∞ 。

- 3) 取截距的倒数 $1/H$ 、 $1/K$ 、 $1/L$ ，并化为最小的简单整数 h 、 k 、 l ，用圆括号括入，即得到所求晶面的晶面指数 (hkl) 。

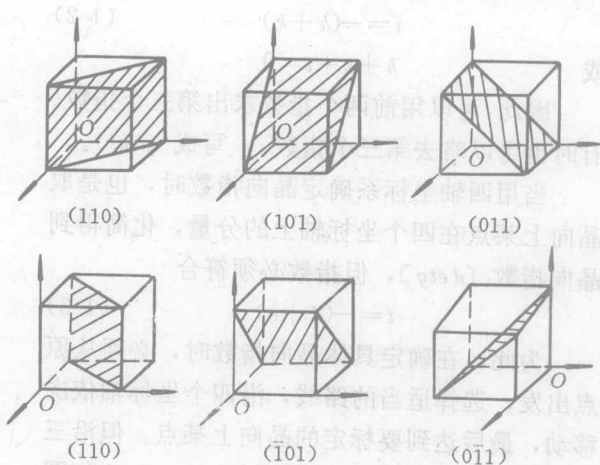


图 1-9 立方晶系的 $\{110\}$ 晶面族

图 1-8 所示为立方晶系的一些晶面及其晶面指数。如晶面在坐标轴上的截距为负值时,则在相应截距数字的上方加一负号,如 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 、 $(1\bar{1}\bar{2})$ 等。

平行的晶面在三个坐标轴上的截距虽然不同,但取倒数化简后,得到相同的最小整数。所以,一个晶面指数所代表的不是一个晶面,而是一组相互平行的晶面。

晶体中原子排列相同,但空间方向不同的晶面称为等同晶面,并归并为一个晶面族,用符号 $\{hkl\}$ 表示之。例如立方晶系的 $\{110\}$ 晶面族包括 (110) 、 (101) 、 (011) 、 $(\bar{1}10)$ 、 $(\bar{1}01)$ 和 $(0\bar{1}1)$ 等晶面,如图 1-9 所示。但对非立方晶系,晶面指数数字相同的晶面,不是

一个晶面族。

此外，对立方晶系数相同的晶向和晶面，一定是相互垂直的，即 $[hkl] \perp (hkl)$ ，但此关系并不适用于其他晶系。

3. 六方晶系的晶面和晶向指数

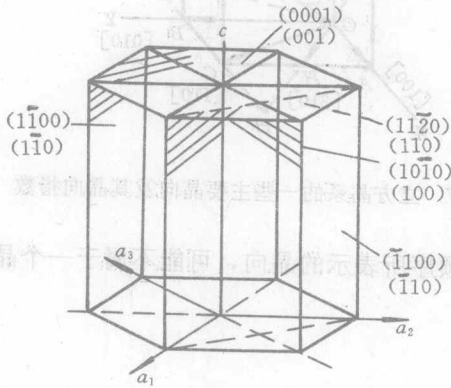


图 1-10 六方晶系的一些晶面指数

$\{10\bar{1}0\}$ 晶面族。

不难看出，当用四轴坐标系时，晶面指数 (hkl) 中的前三个指数中只有两个是独立的。而且，其间有如下的关系：

$$i = -(h+k) \quad (1-2)$$

或 $h+k+i=0$

因此，可以用前两个指数求出第三个指数。有时也可以略去第三个指数 i ，写成 (hkl) 。

当用四轴坐标系确定晶向指数时，也是取晶向上某点在四个坐标轴上的分量，化简得到晶向指数 $[detg]$ ，但指数必须符合

$$t = -(d+e) \quad (1-3)$$

为此，在确定具体晶向指数时，必须从原点出发，选择适当的路线，沿四个坐标轴依次移动，最后达到要标定的晶向上某点。但沿三个水平轴移动的路线必须满足 $d+e=-t$ 。如图 1-11 所示表示确定 $[\bar{1}2\bar{1}0]$ 、 $[10\bar{1}0]$ 和 $[2\bar{1}\bar{1}0]$ 时，沿水平轴移动的路线。

由于用四轴坐标系标定晶向指数比较麻烦，所以，有时仍用三轴坐标系表示六方晶系的晶向。用三轴坐标系表示的晶向指数 $[uvw]$ 与四轴坐标系表示的晶向指数 $[detg]$ 间有如下的对换关系：

$$u = d - t, \quad v = e - t, \quad w = g \quad (1-4)$$

$$d = \frac{1}{3}(2u - v), \quad e = \frac{1}{3}(2v - u), \quad t = -\frac{1}{3}(d + e), \quad g = w \quad (1-5)$$

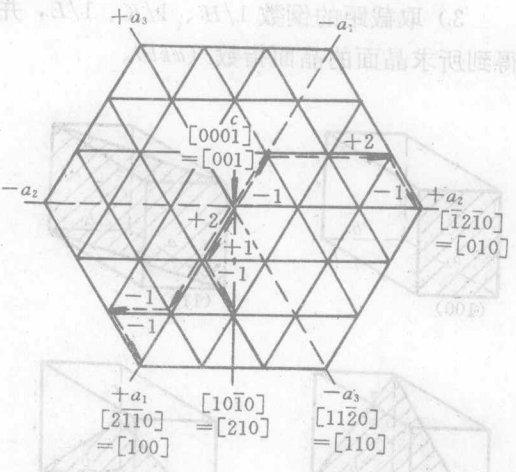


图 1-11 六方晶系晶向指数的表示方法
(c 轴与图面垂直)

五、晶带

晶体中所有相交于某晶向直线或平行该晶向直线的晶面构成一个晶带，并且称该晶向直线为晶带轴，而这些晶面则属于该晶带的晶带面。由于任何两个不平行的晶面必相交，即可构成一个晶带，所以晶体中有很多晶带。但通常用到的则是有许多晶面的晶带。例如，立方晶系以〔001〕为晶带轴的晶带面有(100)、(010)、(110)、(210)和(120)等晶面。

晶带轴〔uvw〕与晶带面(hkl)间有如下的关系：

$$hu + kv + lw = 0 \quad (1-6)$$

若有两个相交的晶面($h_1k_1l_1$)和($h_2k_2l_2$)，则应用下式可求得其晶带轴。

$$u = k_1l_2 - k_2l_1; \quad v = l_1h_2 - l_2h_1; \quad w = h_1k_2 - h_2k_1 \quad (1-7)$$

讨论有关晶体学的许多问题，要应用晶带这一概念。

六、晶面间距

如图 1-12 所示，晶体中不同晶面间的面间距是不同的，而面间距与金属的许多性能又有密切的关系。

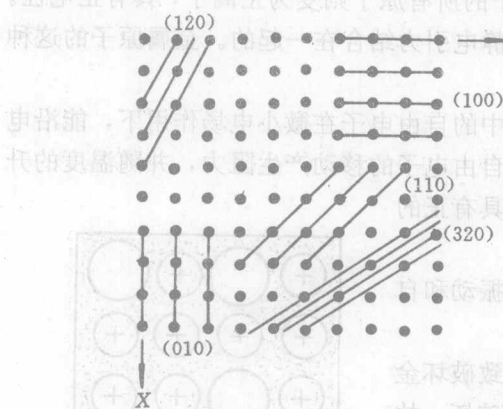


图 1-12 晶面间距

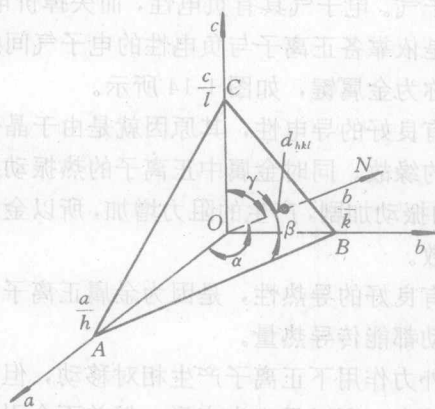


图 1-13 晶面间距的推导

对一组平行的晶面，可用如下的方法求其晶面间距 d_{hkl} 。根据晶面指数的定义可知，其指数的倒数即为晶面在三个坐标轴上的截距。如图 1-13 所示，取距原点最近的一个晶面(hkl)，其在三个坐标轴上的截距为 a/h 、 b/k 和 c/l ，其中 a 、 b 和 c 为晶格常数。如从原点作晶面(hkl)的法线 ON ，则法线被晶面(hkl)所截的截线长就是晶面间距 d_{hkl} 。设法线 ON 与三个坐标轴的夹角为 α 、 β 和 γ ，则可求得：

$$d_{hkl} = \frac{a}{h} \cos \alpha = \frac{b}{k} \cos \beta = \frac{c}{l} \cos \gamma$$

即

$$d_{hkl}^2 \left\{ \left(\frac{h}{a} \right)^2 + \left(\frac{k}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{c} \right)^2 \right\} = \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \quad (1-8)$$

所以，只要求得 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma$ 值，就可求出 d_{hkl} 。对于立方晶系，由于 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ ， $a = b = c$ ，则

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (1-9)$$

但需注意,在计算平行晶面间距时,必须取距原点最近的晶面。例如计算体心立方晶胞的(010)晶面间距 d_{010} 时,若取晶胞的一个角上的阵点为原点,则必须取过体心原子的晶面(020)来计算,而不能取晶面(010)。因为晶面(020)才是距原点最近的,而且与(010)平行的等同晶面。

第二节 金属的晶体结构

一、金属及金属键

工程上所谓金属是指具有一定特性的一类物质。金属的特性是具有光泽、良好的导电性、导热性和塑性,且电阻随温度升高而增加,即有正的电阻温度系数。

金属的特性是由金属原子结构的特点及金属原子间特有的结合方式决定的。典型金属原子的最外层价电子数较少(一般仅有1~2个),且与原子核间的结合力较小,很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子。因此,当由大量的金属原子集合构成晶体时,每个原子的价电子不再只围绕自己的原子核运动,而是在所有的原子核间运动,成为公有的自由电子,和形成所谓的电子气。电子气具有负电性,而失掉价电子的所有原子则变为正离子,具有正电性。金属晶体就是依靠各正离子与负电性的电子气间的静电引力结合在一起的。金属原子的这种结合方式也称为金属键,如图1-14所示。

金属具有良好的导电性,其原因就是由于晶体中的自由电子在微小电场作用下,能沿电场方向移动的缘故。同时金属中正离子的热振动对自由电子的移动产生阻力,并随温度的升高,正离子的振动加剧,产生的阻力增加,所以金属具有正的电阻温度系数。

金属具有良好的导热性,是因为金属正离子的振动和自由电子的运动都能传导热量。

金属在外力作用下正离子产生相对移动,但不致破坏金属原子间的结合,所以虽产生变形,但并不会引起破坏,故有良好的可塑性。

至于金属具有光泽,则是因为自由电子易吸收光的能量被激发,当其回到基态时能产生辐射所致。

此外,金属的结合方式还决定金属所具有的晶体结构特征。由于金属键与离子键、共价键不同,不具有方向性和选择性,因此,金属晶体中的原子趋于尽可能紧密的排列,形成具有高对称的、简单的晶体结构形式。

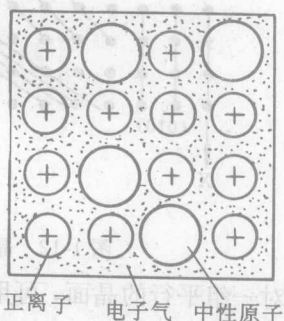


图 1-14 金属键模型

二、典型金属的晶体结构

典型金属大多具有三种简单的晶体结构,即:面心立方结构(A1);体心立方结构(A2)和密排六方结构(A3)。

1. 面心立方结构

面心立方结构 (fcc) 的晶胞如图 1-15 (b) 所示, 在立方体的八个顶角和六个面的中心位置均有一个原子。元素周期表中约有 20 种金属具有这种晶体结构。其中常见的金属为 Al、 γ -Fe、Cu、Ni、Au 和 Ag 等。

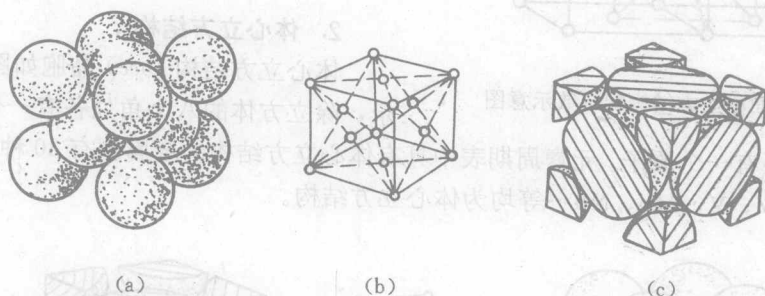


图 1-15 面心立方晶胞

(a) 刚球模型 (b) 晶胞 (c) 晶胞原子数 (示意图)

(1) 晶格常数

晶胞的大小可用晶格常数来表示。由于面心立方晶胞属立方晶系, 所以, 晶格常数只需用晶胞的一个棱边长 a 表示, 单位为 nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。表 1-2 列出几种面心立方结构金属的晶格常数。

表 1-2 几种面心立方结构金属的晶格常数

单位: nm

金属	Al	γ -Fe	β -Co	Ni	Cu	Rh	Pt	Ag	Au
晶格常数 a	40.5	35.6 (912℃)	35.4 (7390℃)	35.2	36.1	38.0	39.2	40.9	40.8

* 除注明温度外, 均为室温数据。

(2) 配位数和致密度

晶胞的原子排列紧密程度可用配位数或致密度来表示。

配位数是指晶体中任一原子周围最邻近、且等距离的原子数。如图 1-16 所示表示面心立方结构的配位数为 12。

致密度 K 是指晶胞中原子所占的体积与晶胞体积之比, 可表示为

$$K = \frac{n \cdot v}{V} \quad (1-10)$$

式中: n ——晶胞原子数; v ——原子的体积; V ——晶胞的体积。

如图 1-15 (a) 将晶体中原子看作是直径相等的刚球, 则面心立方晶胞的原子数为 $n = \frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ (如图 1-15 (c))。设原子半径为 r , 原子体积为 $v = \frac{4}{3}\pi r^3$ 。晶格常数为 a 。晶胞体积为 a^3 。将上列数值代入式 (1-10) 中, 可求得致密度 K

$$K = \frac{4 \times \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \right)}{a^3} \quad (1-11)$$

又根据晶面对角线方向上的原子相切, 故晶格常数 a 与原子半径 r 的关系应为

$$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a \quad (1-12)$$