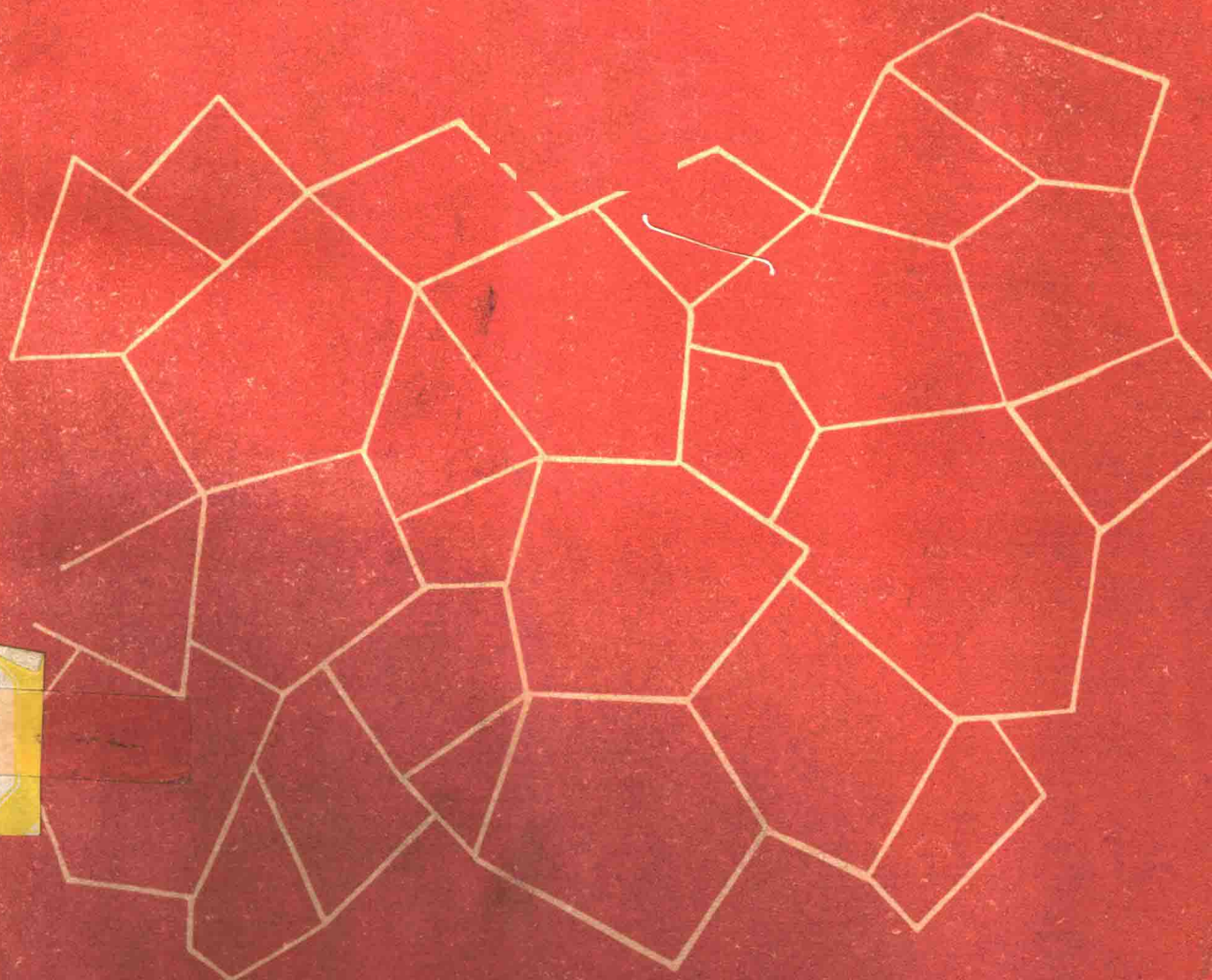


金属学及热处理

胡德林

主编



西北工业大学出版社

封面设计 孙元元
技术设计 潘玉浩

ISBN 7-5612-0489-2/TG·22
定价 24.80 元

金属学及热处理

胡德林 主编

西北工业大学出版社

1995年8月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】本书概括地叙述了合金的成分、结构及性能之间的变化规律,比较系统地介绍了金属与合金的晶体结构、相图与结晶、塑性变形与再结晶、热处理原理与工艺,以及常用金属材料成分、热处理及力学性能。本书各章后备有大量复习思考题和习题,以便加深学生对基本概念、基本理论和基础知识的理解,培养学生的独立分析能力,并有助于学生进行系统地总结和提商。

本书可作为高等院校机械制造类热加工工艺及设备专业,以及锻造、铸造、焊接及腐蚀防护专业学生的教材,也可供热加工工艺技术人员自学及参考。

金属学及热处理

胡德林 主编

责任编辑 刘红

责任校对 钱伟峰

*

© 1995 西北工业大学出版社出版发行

(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 4253407)

全国各地新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0489-2/TG·22

*

开本 787×1092 毫米 1/16 25 印张 字数 612 千字

1994 年 6 月第 1 版 1995 年 8 月第 2 次印刷

印数: 2 101—6 100 册 定价: 24.80 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

本书是根据原航空航天工业部 1991 年 4 月制订的十个专业两大类的教学大纲编写的。

“金属学及热处理”是热加工工艺及设备专业大类的技术基础课,它概括地叙述合金的成分、结构及性能之间的变化规律,比较系统地介绍金属与合金的晶体结构、相图与结晶、塑性变形与再结晶、热处理原理与工艺,以及常用金属材料成分、热处理及力学性能。它既不像金属物理课程那样理论性很强,又不像金属工艺学课程那样有很强的实践性。工程技术人员运用金属学及热处理的基本理论与基本知识去指导金属材料的生产及科研,解决其使用中的故障,充分发挥金属材料的潜力。

由于现代科学技术的迅猛发展,对金属材料提出更高、更新的要求;学科之间的互相渗透、基础理论的日益深化;以及各种近代测试手段的发展,金属材料内部的结构被揭示得更加精密细微。因此,作为教材必须首先注意到内容的更新,同时做到符合教学规律,特别要注意处理好更新内容与基本要求,教学系统与学科系统,物理概念与数学推导的关系。同时,在精选内容、加强基础、联系实际及便于学生自学等方面都有所发展。

本书内容分为金属学原理、钢的热处理及金属材料等三部分。金属学原理部分包括金属的晶体结构、纯金属的结晶、二元及三元相图、铁碳相图、塑性变形、回复与再结晶及固态金属中的扩展;钢的热处理部分包括钢的热处理及工艺;金属材料部分包括合金钢、高温合金及有色金属。本书各章后备有大量复习思考题,一部分是让学生加强对基本概念理论和基础知识的理解;另一部分是让学生联系实际深入学习,培养独立分析能力。此外,还备有一定量的习题,让学生进行系统地总结与提高。

本书可作为高等院校机械制造类热加工工艺及设备专业,以及锻造、铸造、焊接及腐蚀防护专业学生的教材,也可以供热加工工艺技术人员自学及参考。

本书共十二章,其中第一、七章由西北工业大学副教授张帆编写;第二、六、八章由西北工业大学副教授孟亮编写;第三、四、五章由西北工业大学教授胡德林编写;第九、十章由南昌航空学院副教授区桂叶编写;第十一、十二章分别由北京航空航天大学副教授郭淑平、梁佑明编写。全书由西北工业大学教授胡德林主编,由西安交通大学教授刘静华主审。此外,西北工业大学杨惠芳参加部分金相照片制作,三院校有关同志参加绘图及缮写工作,对他们的辛勤劳动,在此一并致谢。

由于编者水平有限、错误难免,望读者提出宝贵意见。

编 者

1993 年 9 月

目 录

第一章 金属及合金的晶体结构	1
§ 1-1 金属概述	1
§ 1-2 金属的晶体结构	4
§ 1-3 金属晶体的缺陷	17
§ 1-4 合金的相结构	33
复习思考题	44
习题	45
第二章 纯金属的结晶	46
§ 2-1 金属结晶的基本规律	46
§ 2-2 金属结晶的基本条件	48
§ 2-3 晶核的形成	50
§ 2-4 晶体的长大	57
§ 2-5 结晶理论应用举例	64
复习思考题	67
习题	68
第三章 二元合金相图及结晶	70
§ 3-1 合金相、相图及其测定	70
§ 3-2 匀晶相图及固溶体的结晶	72
§ 3-3 共晶相图及共晶转变	86
§ 3-4 包晶相图及包晶转变	94
§ 3-5 其它类型的二元合金相图	98
§ 3-6 二元合金相图的应用	102
§ 3-7 合金铸锭(件)的结晶	105
复习思考题	110
习 题	111
第四章 铁碳合金相图及结晶	112
§ 4-1 铁碳合金相图中的相	112
§ 4-2 Fe-Fe ₃ C 相图	116
§ 4-3 铁碳合金的平衡结晶	119
§ 4-4 铁碳合金的平衡组织和力学性能	125

§ 4-5 Fe-C(石墨)稳定系相图及石墨化	128
复习思考题	131
习 题	132
第五章 三元合金相图及结晶	133
§ 5-1 三元合金相图的几何原理	133
§ 5-2 三元匀晶相图	137
§ 5-3 三元共晶相图	141
§ 5-4 其它三元合金相图	152
§ 5-5 相平衡判断方法	156
§ 5-6 实际三元合金相图	157
复习思考题与习题	165
第六章 固态金属中的扩散	166
§ 6-1 扩散的宏观规律及其应用	166
§ 6-2 扩散的微观规律及其应用	171
§ 6-3 上坡扩散与反应扩散	176
复习思考题	180
习题	180
第七章 金属及合金的塑性变形	182
§ 7-1 金属的变形特性	182
§ 7-2 单晶体的塑性变形	184
§ 7-3 多晶体的塑性变形	198
§ 7-4 合金的塑性变形	200
§ 7-5 塑性变形对金属组织和性能的影响	207
§ 7-6 金属的断裂	213
复习思考题	222
习题	222
第八章 金属的回复与再结晶	224
§ 8-1 变形金属与合金在加热时的变化	224
§ 8-2 回复	225
§ 8-3 再结晶	227
§ 8-4 再结晶后的晶粒长大	233
§ 8-5 金属的热加工	242
复习思考题	246
习题	247

第九章 钢的热处理原理	248
§ 9-1 钢在加热时的转变	248
§ 9-2 钢在冷却时的转变	256
§ 9-3 珠光体转变	260
§ 9-4 马氏体转变	265
§ 9-5 贝氏体转变	273
§ 9-6 过冷奥氏体连续冷却转变图	278
§ 9-7 钢在回火时的转变	284
复习思考题.....	289
习题.....	289
第十章 钢的热处理工艺	291
§ 10-1 钢的退火与正火	291
§ 10-2 钢的淬火	295
§ 10-3 钢的回火	305
§ 10-4 钢的化学热处理	306
§ 10-5 特种热处理	309
复习思考题.....	313
习题.....	313
第十一章 合金钢与高温合金	315
§ 11-1 概论	315
§ 11-2 合金结构钢	326
§ 11-3 合金工具钢	340
§ 11-4 特殊性能钢及合金	347
复习思考题.....	362
习题.....	362
第十二章 有色金属及合金	364
§ 12-1 铝及铝合金	364
§ 12-2 钛及钛合金	374
§ 12-3 铜及铜合金	379
§ 12-4 其它有色金属及其合金	385
复习思考题及习题	390
参考文献	391

第一章 金属及合金的晶体结构

金属及合金在固态下通常都是晶体,它们的许多特性都与晶体的结构特点有关。要了解金属及合金的各种性能特点,就必须掌握其内部的晶体构造特点,其中包括晶体中原子是如何相互作用并结合起来的,原子的排列方式和分布规律,各种晶体的特点及差异,不同元素组成合金相时的晶体结构特点,以及晶体结构中缺陷的类型及特点等。这些均是本章要重点介绍的内容。在学习本课程时,首先应掌握这方面的基础知识,同时这些知识也是学习后续专业课程必不可少的重要基础。

§ 1-1 金属概述

某一特定元素是否为金属取决于它的某些性能。而对于用哪几种性能作为判断标准却是因人而异的:从化学的角度看,若某种元素的氧化物溶于水后形成碱性溶液,则这种元素为金属;从物理的角度来说,具有良好的导电性且导电性随温度升高而减小的元素称为金属;从冶金学和工程的角度来说,如果某种元素能满足上述导电性能的要求,并且能进行某种程度的塑性变形,则被认为是金属。应该指出,上述定义并非十分严格,在化学元素周期表中,已发现的化学元素有 105 种,其中有 80 余种是金属元素。在这些金属元素中,有些元素(如铋)并不具有良好的延展性,铋、锗的导电性还不如某些非金属元素(如石墨)好。显然上述定义并未揭示出金属与非金属之间差别的本质。比较通用的定义是:凡具有正的电阻温度系数的元素即为金属。而所有的非金属其电阻都随温度的升高而下降。为了弄清金属与非金属这一区别的本质,应从金属的原子结构及原子间的结合方式入手。

一、金属原子的结构特点

金属原子的结构特点在于其最外层的电子数很少,只有 1~2 个,一般不超过 4 个。由于这些外层电子与原子核的结合力较弱,很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子,使得金属原子变为正离子,因此常将这些元素称为正电性元素。非金属原子的结构与此相反,其外层电子数较多,最多 7 个,最少 4 个,原子易于获得额外电子成为负离子,因此非金属元素又称为负电性元素。

在化学元素周期表中,还有一些所谓的过渡族金属元素,例如钛、钒、铬、锰、铁、钴、镍等,它们的原子结构除具有上述特点之外,还有一个特点,就是在次外层尚未填满电子的情况下,最外层就先填充了电子。因此过渡族金属的原子不仅容易丢失最外层电子,而且还容易丢失次外层的 1~2 个电子,这导致了过渡族金属的化合价是可变的。当过渡族金属的原子互相结合时,不仅最外层电子参与结合,而且次外层电子也参与结合,使其原子间结合力特别强,表现出熔点高、强度高等重要的重要的宏观特性。因此,过渡族金属在金属材料中占有极为重要的地位。

二、金属键

金属处于气态时,各原子间距离较远,只是偶尔发生碰撞,彼此间并不存在结合键,当金属原子互相靠近到一定程度而成为液体金属或固体金属时,原子间就形成了结合键,使原子紧凑而规则地排列在一起。这种金属原子间的结合键称为金属键。

金属键的基本特点是“电子公有化”。当金属原子结合成晶体时,价电子不再被束缚在各个原子上,而是在整个晶体内运动,形成所谓的“电子气”,失去价电子的金属正离子与组成电子气的自由电子之间产生的静电引力使金属原子结合在一起,形成了金属晶体。

图 1-1 示意地给出了金属键的模型。在实际的固态金属中,并不是所有的金属原子都变成正离子,而只是绝大部分处于正离子状态,还有小部分处于中性原子状态,并且金属原子的这种状态也是在不断地变化着。

由金属键的本质可以解释固态金属的许多特性。例如,金属在很小的外电场作用下,自由电子即可沿着电场方向流动,形成电流,所以金属具有良好的导电性;金属正离子的热振动与自由电子的运动都可以传递热能,故金属具有良好的导热性;随温度的升高,金属正离子振动的振幅加大,阻碍自由电子流过,使电阻升高,故金属具有正的电阻温度系数;自由电子易吸收可见光的能量,使金属具有不透明性,而吸收了能量从被激发态的电子回到基态时产生辐射,使金属具有光泽;在固态金属中,电子气好像是一种流动的万能胶,把所有正离子都结合在一起,所以金属键并不挑选结合对象,也没有方向性,当一块金属的两部分发生相对位移时,金属正离子始终“浸泡”在电子气中,仍保持着金属键的结合。这样,金属就能经受变形而不断裂,使其具有较好的延展性(塑性)。

应该指出,以上只是利用经典的自由电子理论,粗略地解释金属的一些特性。实际上,金属中的自由电子并非完全自由。根据量子力学的观点,在金属中运动的自由电子可以看成是电子波(即德布罗意物质波),它们在金属内周期性电场作用下所具有的能量是不连续的,依能带而分布。

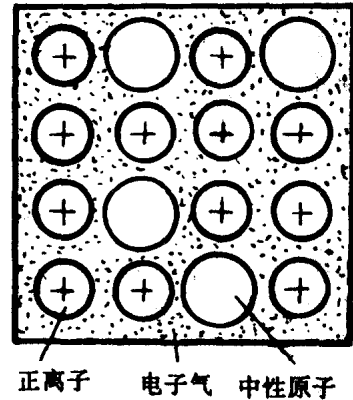


图 1-1 金属键的模型

三、金属原子的结合能

原子能够结合成为晶体的根本原因在于原子结合起来后可使体系的总能量降低,即在分散的原子结合成晶体的过程中,会有一些的能量(E)释放出来,这个能量称为结合能。

由于固态金属是很多原子的集合体,因此研究其结合能就必须考虑众多原子间的相互作用,这是十分困难的。对于塑性变形和热处理方面的许多问题,通常只做近似的考虑。在固态金属中每个原子周围都有几个最近邻的原子,只要了解它们之间的相互作用,便可大体上了解整个金属中原子间的作用情况。

为方便起见,首先分析两个原子间的相互作用情况(即双原子作用模型)。晶体中的原子间存在相互吸引及相互排斥两种矛盾的作用,吸引作用的本质来源于异性电荷之间的库仑引力;而排斥作用则是由同性电荷间的库仑力以及正离子周围电子气相互重叠引起的。两原子相互

作用的综合结果取决于它们之间的距离。一般来说,两原子相距较远时,吸引作用占主导地位;而两原子相距较近时,排斥作用占主导地位。

设以 f_a 代表引力, f_r 代表斥力, R 代表两原子间距离, 则有:

$$f_a = -\frac{a}{R^m}$$

$$f_r = \frac{b}{R^n}$$

原子间的净作用力为:

$$f = f_a + f_r = -\frac{a}{R^m} + \frac{b}{R^n}$$

式中 a, b, m 及 n 均为常数, 且 $m < n$ 。从上式可以看出, 当 R 较大时, $|f_a| > f_r$, 故 $f < 0$, 即原子间相互吸引。当 R 小到一定程度后, $|f_a| < f_r$, 故 $f > 0$, 原子间相互排斥。当 $R = R_0$ 时, $|f_a| = f_r$, 即 $f = 0$, 原子间作用力达到平衡(参见图 1-2)。

显然, 要把原子完全分开需要作功, 其大小等于将 $f-R$ 曲线由 R 积分至 ∞ 处, 这时所做的功便是原子在平衡位置时的势能, 它在数值上等于晶体中原子间的结合能。当两原子间距为平衡距离 R_0 时, 原子处于作用能曲线的低谷, 势能最低、最稳定。在固态金属中, 绝大部分原子都处于这种势能最低的平衡位置, 吸引力和排斥力保持平衡。如果原子偏离了平衡位置, 不论向哪个方向偏离, 立刻会受到一个反方向力的作用, 促使它回到平衡位置。

图 1-3 是三原子作用模型, 分别给出了 A 原子和 C 原子对 B 原子的作用能曲线 U_A 和 U_C , 以及由它们合成的总作用能曲线 U_{A+C} 。可见, 由于两侧原子的共同作用, 使 B 原子处于一个对称的势能谷中, 且能谷更深了。能谷的深浅反映出原子结合的强弱, 能谷愈深, 结合能愈大, 原子结合越牢固。

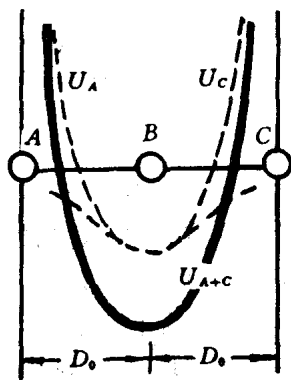


图 1-3 三原子作用模型

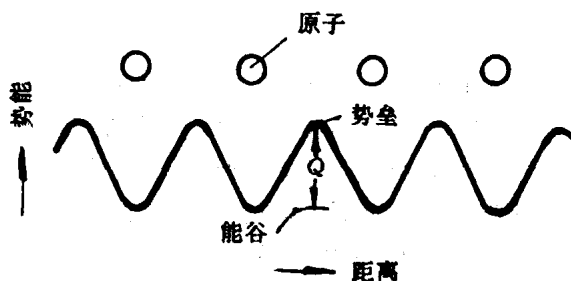


图 1-4 固态金属中的周期势场

在金属晶体中, 每个原子的四面八方都被相邻原子包围着, 因此每个原子都处于周围原子共同形成的势能谷中, 相邻势能谷之间都被一个能量升高的“势垒”隔开。原子结合得越强, 则

能谷越深,势垒越高,在固态金属中,无论朝哪个方向看,原子结合能都是一峰一谷地周期变化着,被称为周期势场,如图 1-4 所示。正是这种周期势场使金属原子按周期规律排列起来。

§ 1-2 金属的晶体结构

一、晶体的基本概念

(一) 晶体

自然界中除少数物质(如普通玻璃、松香、赛璐珞等)外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。天然晶体一般具有规则的几何外形,例如食盐(NaCl)结晶成立方体形,明矾结晶成八面体形。然而金属制品却不具有规则的几何外形,可见晶体与非晶体的区别不在外形,主要在于内部原子排列方式。所谓晶体,是指原子(或分子)在三维空间按一定规律作周期性排列的固体。而所有的非晶体,其内部原子则是散乱分布着,至多有些局部的短程规则排列。

晶体与非晶体中原子排列方式不同导致它们在性能上表现出较大差异。首先,晶体具有一定的熔点,非晶体则没有。在熔点之上,晶体变成液体,处于非结晶状态;在熔点以下,液体又变成晶体,处于结晶状态。熔点就是晶体物质的结晶状态与非结晶状态互相转变的临界温度。对于一定的晶体,其熔点是一个恒定值。固态非晶体则是液体在冷却时尚未来得及变成晶体就凝固了,所以它实质上是一种过冷的液体结构。其次,晶体的某些物理性能和力学性能在不同方向上具有不同的数值,此即晶体的各向异性。而非晶体则是各向同性的。表 1-1 列出了几种常用金属沿其不同方向测得的力学性能。

表 1-1 单晶体的各向异性

别 类	弹性模量 (MPa)		抗拉强度 (MPa)		延伸率 (%)	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
Cu	191 000	66 700	346	128	55	10
α -Fe	293 000	125 000	225	158	80	20
Mg	50 600	42 900	840	294	220	20

(二) 空间点阵、晶格和晶胞

在实际晶体中,每个原子都在围绕着自身的平衡位置不停地振动着,并且这种振动随着温度的升高而加剧。此外,晶体中还存在着局部破坏原子排列完整性的各种缺陷。为讨论方便,这里先把晶体看成是由不动的原子所组成,而且是不含各种缺陷的理想晶体。

假理想晶体中的原子都是固定不动的刚球,则晶体可被认为是由这些刚球堆垛而成。图 1-5(a)即为这种刚球堆垛模型,该模型优点是立体感强,很直观,缺点是刚球密密麻麻地堆在一起,很难看清内部的排列规律,不便于研究。为更清楚地表明原子在空间排列的规律性,常将构成晶体的实际质点(原子、离子、分子或原子集团)的体积忽略,抽象成为纯粹的几何点,称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心,也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心,但各个阵点的环境必须相同。这种由周围环境相同的阵点在空间排列的点阵称为空间点阵。进一步用许多平行直线将空间点阵的各阵点连接起来,构成一个三维的空间格架(如图 1-

5(b) 所示)。这种用以描述晶体中原子排列规律的空间格架就称为晶格。

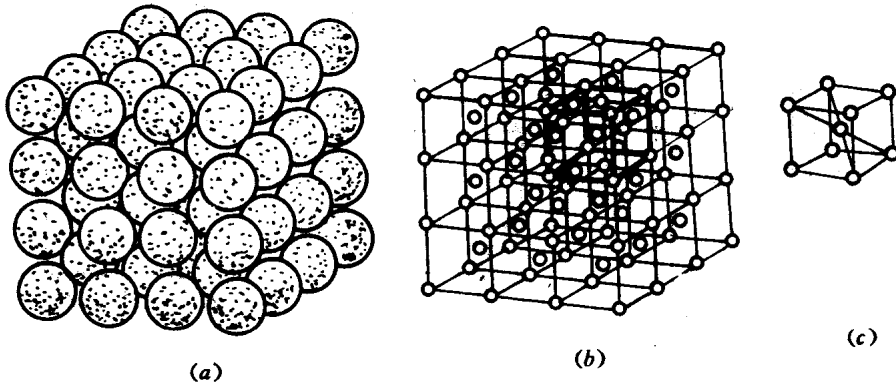


图 1-5 晶体中原子排列示意图
(a) 原子堆垛模型 (b) 晶格 (c) 晶胞

由于晶体中原子排列具有周期性的特点,故可从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元,来分析晶体中的原子排列的规律性,这个最小的几何单元称为晶胞(如图 1-5(c) 所示)。通常是取一个最小的平行六面体作为晶胞,将晶胞作三维的重复堆砌就构成了空间点阵。

同一空间点阵可因阵点连接线选取方式不同而得到不同形状的晶胞,如图 1-6 所示。因此人为规定在选择晶胞时应满足下列条件:

- (1) 晶胞的几何形状应与宏观晶体具有同样的对称性。
- (2) 平行六面体内相等的棱和角的数目应最多。
- (3) 当平行六面体的棱间呈直角时,直角的数目应最多。
- (4) 在满足上述条件下,晶胞的体积应最小。

通过晶胞角上的某一阵点(一般取左下角后面一点),沿其三个棱边作坐标轴 X 、 Y 、 Z (称为晶轴),则此晶胞的形状和大小就可由其三个棱边的长度 a 、 b 、 c (称为点阵常数)和晶轴之间的夹角 α 、 β 、 γ 六个参数完全表达出来,如图 1-7 所示。

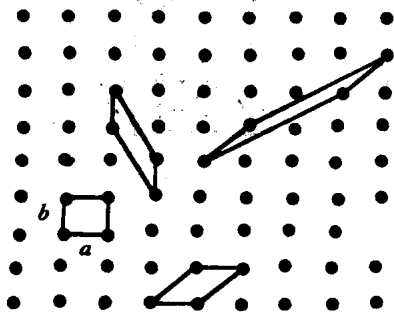


图 1-6 在点阵中选取晶胞

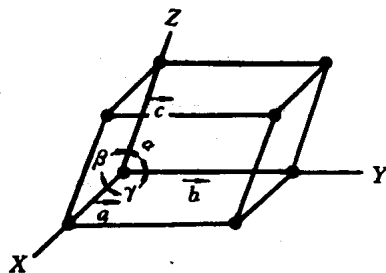


图 1-7 晶胞、晶轴和点阵矢量

有时采用三个点阵矢量 \vec{a} 、 \vec{b} 、 \vec{c} 来描述晶胞更为方便,这三个矢量不仅确定了晶胞的形状和大小,并且完全确定了该空间点阵。只要任选一个阵点为原点,以这三个矢量作平移,平移的方向和单位距离由点阵矢量确定,这样就可以确定空间点阵中任何一个阵点的位置:

$$\vec{Y}_{uvw} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$$

式中, \vec{Y}_{uvw} 为从原点到该阵点的矢量; u, v, w 分别表示沿三个点阵矢量的平移量, 也即为该阵点的坐标。

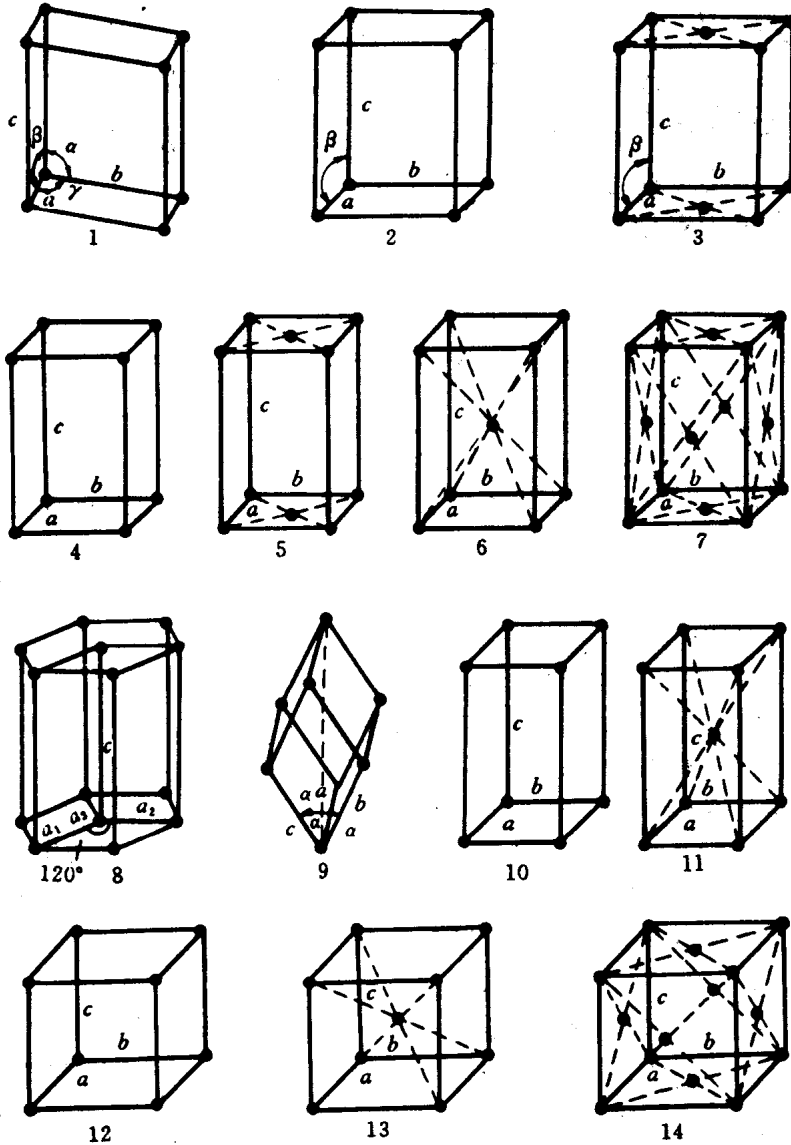


图 1-8 14 种空间点阵的晶胞

(三) 晶系和布拉菲点阵

自然界中的晶体有成千上万种, 它们的晶体结构各不相同, 但根据空间点阵“每个阵点周围有相同的环境”的要求, 布拉菲(Bravais)于 1848 年用数学方法证明空间点阵共有且只能有 14 种, 这 14 种空间点阵的晶胞如图 1-8 所示。进一步根据晶胞的 3 个晶格常数和 3 个轴间夹角的相互关系对所有晶体进行分类, 又可把 14 种空间点阵归纳为 7 个晶系:

(1) 三斜晶系: $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

(2) 单斜晶系: $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$

(3) 正交晶系: $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

(4) 六方晶系: $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

(5) 菱方晶系: $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

(6) 正方晶系: $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

(7) 立方晶系: $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

表 1-2 列出了 14 种空间点阵归属于 7 个晶系的情况。

表 1-2 空间点阵与晶系

晶系	空间点阵	分图号	晶系	空间点阵	分图号
三斜	简单三斜	1	六方	简单六方	8
单斜	简单单斜	2	正方	简单正方	10
	底心单斜	3		体心正方	11
正交	简单正交	4	菱方	简单菱方	9
	底心正交	5	立方	简单立方	12
	体心正交	6		体心立方	13
	面心正交	7		面心立方	14

应特别注意,对晶系分类只考虑晶胞的外形,即 a, b, c 是否相等, α, β, γ 是否相等,以及它们是否呈直角等因素,而不涉及晶胞中原子排列的具体情况。

二、晶面指数与晶向指数

在分析金属的结晶、变形、固态相变等问题时,常需涉及晶体中某些原子在空间排列的方向(称为晶向)和某些原子构成的空间平面(称为晶面)。为区分不同的晶向和晶面,需采用一个统一的标号来标志它们,这种标号称为晶向指数和晶面指数。国际上通用的是密勒(Miller)指数。

(一) 晶向指数

晶向指数是按以下几个步骤确定的(参见图 1-9):

(1) 以晶胞的某一阵点为原点,晶胞的三个棱边为坐标轴,并以晶胞棱边的长度作为坐标轴的单位长度。

(2) 过原点作一直线 OP ,使其平行于待标定的晶向 AB 。

(3) 在直线 OP 上选取距原点最近的一点 P ,确定 P 点的三个坐标值。

(4) 将这三个值乘以公倍数化为最小整数 u, v, w ,加上方括号, $[uvw]$ 即为 AB 晶向的晶向指数。如果 u, v, w 中某一数为负值,则将负号标注在该数的上方。

图 1-10 给出了正交点阵中几个晶向的晶向指数。

显然,一个晶向指数不是表示一个晶向,而是一组互相平行,位向相同的晶向,如果晶向指数相同而正负号相反,如 $[110]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}0]$,则这两组晶向互相平行,但方向相反。

原子排列相同但空间位向不同的所有晶向称为晶向族,以 $\langle uvw \rangle$ 表示。在立方晶系中, $[111], [\bar{1}\bar{1}\bar{1}], [\bar{1}1\bar{1}], [1\bar{1}\bar{1}]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}1], [\bar{1}11], [1\bar{1}1], [11\bar{1}]$ 八个晶向指的是立方体中四个体对角

线的正、反方向,从晶体对称性来看,这一组晶向在性质上是等同的,故属于同一晶向族 $\langle 111 \rangle$ 。同理, $\langle 100 \rangle$ 代表 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 六个晶向。应注意,仅对立方结构晶体,改变晶向指数顺序所表示的晶向上的原子排列情况完全相同,此规律对其它结构的晶体则不一定适用。

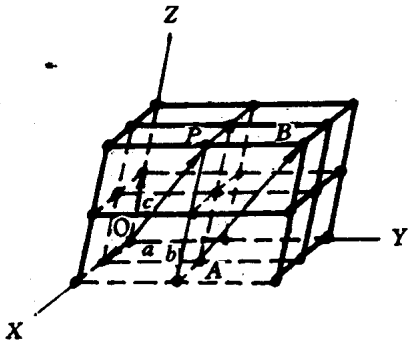


图 1-9 晶向指数的确定

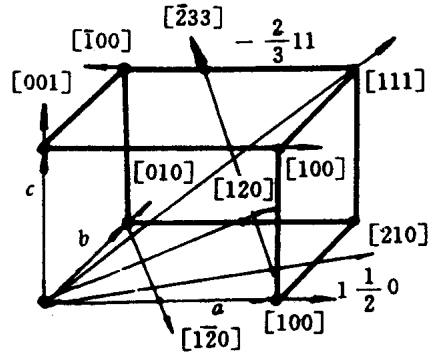


图 1-10 正交点阵中几个晶向的晶向指数

(二) 晶面指数

晶面指数确定方法如下:

- (1) 在点阵中设置参考坐标系,设置方法与确定晶向指数时相同,但不能将坐标原点选在待确定指数的晶面上。
- (2) 以晶胞棱边长度为单位,量出待定晶面在各坐标轴上截距。
- (3) 取三个截距的倒数,并乘以最小公倍数,得到三个最小的整数 h, k, l 。
- (4) 将求得的 h, k, l 用圆括号括起来, (hkl) 即为该晶面的晶面指数。如果晶面在坐标轴上的截距为负,则在相应的指数上加一负号。

同样,平行晶面的晶面指数相同,或数字相同而正负相反,如 (hkl) 与 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$, $(10\bar{1})$ 与 $(\bar{1}01)$ 等。

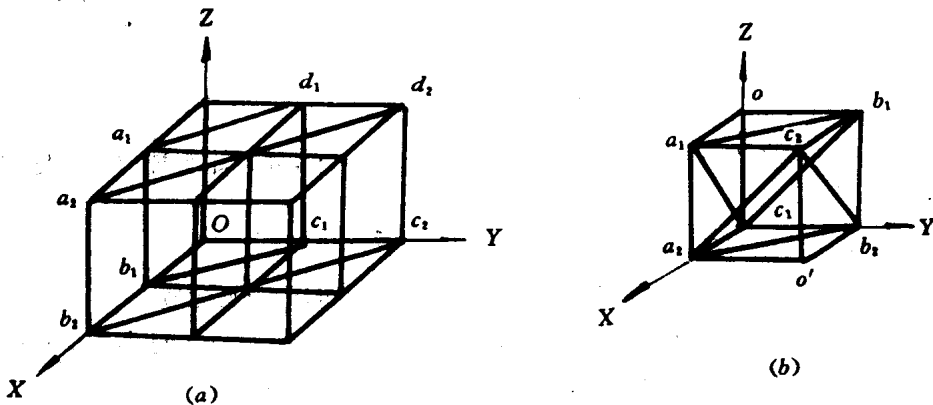


图 1-11 晶面指数的确定

现举例说明如下:(如图 1-11 所示)

图 1-11(a) 中晶面 $a_1b_1c_1d_1$ 及 $a_2b_2c_2d_2$ 为相互平行的两个晶面,在 X, Y, Z 坐标轴上的截

距分别为 $1, 1, \infty$ 及 $2, 2, \infty$, 其倒数分别为 $1, 1, 0$ 及 $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$, 化为最小整数, 则两个晶面的晶面指数都是 (110) 。图 1-11(b) 中晶面 $a_1b_1c_1$ 与 $a_2b_2c_2$ 也是相互平行的, 如果分别选取 O 及 O' 为原点, 则截距分别为 $1, 1, -1$ 及 $-1, -1, 1$, 取倒数化为最小整数, 它们的晶面指数分别是 $(11\bar{1})$ 及 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 。这两个晶面的指数数字相同而符号相反, 这是由于原点选取不同造成的, 但它们仍然是相互平行的。

晶体中凡具有相同的原子排列方式而只是空间位向不同的各组晶面可归并为一个晶面族, 用 $\{hkl\}$ 表示。如在立方晶系中:

$\{100\}$ 包括 $(100), (010), (001)$

$\{110\}$ 包括 $(110), (101), (011), (\bar{1}\bar{1}0), (\bar{1}0\bar{1}), (0\bar{1}\bar{1})$

$\{111\}$ 包括 $(111), (\bar{1}\bar{1}\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}1), (11\bar{1})$

如图 1-12 所示。

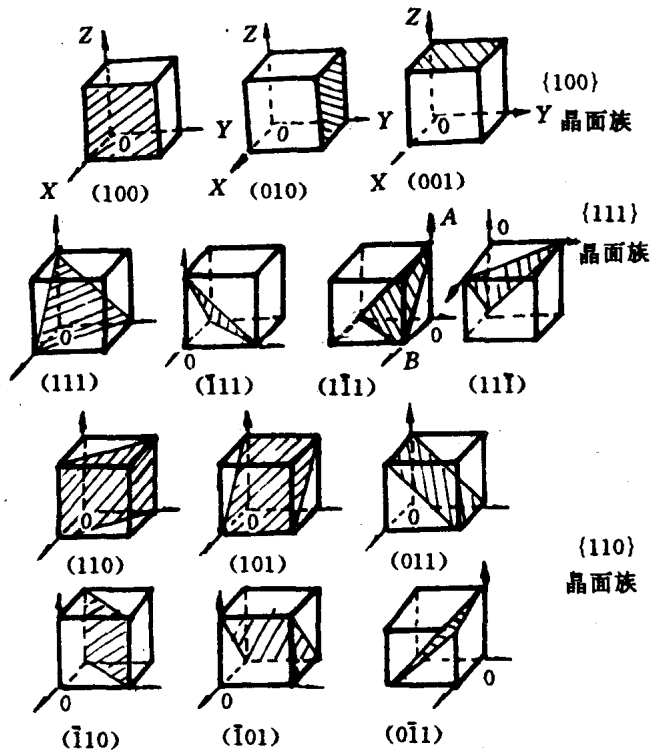


图 1-12 $\{110\}, \{110\}, \{111\}$ 晶面族

从以上分析可以看出: 首先, 晶面族不仅包括相互平行的一组晶面, 而且也包括了位向虽不同但晶面间距相等、原子排列相同的若干组平行晶面。其次, 在立方晶系中, $\{hkl\}$ 晶面族包括的晶面可以用 h, k, l 数字的排列组合方法求出。但此方法不适用于非立方结构的晶体。此外, 在立方晶系中还存在下列关系:

当某一晶向与某一晶面相互垂直时, 其晶向指数和晶面指数完全相同。例如 $[100] \perp (100), [111] \perp (111), [\bar{1}\bar{1}0] \perp (\bar{1}\bar{1}0)$ 。

当一晶向 $[uvw]$ 位于或平行于某一晶面 (hkl) 时, 必须满足 $hw + kv + lw = 0$ 。

(三) 六方晶系的晶向指数与晶面指数