

JIXIE GONGCHENG CAILIAO

机械工 程材料

吴维琍 庄和铃 主编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要叙述各种常用工程材料的成分、组织、性能及其应用的基本规律和基础知识,包括金属材料的结构、二元合金相图与凝固、铁碳相图与碳钢、塑性变形与再结晶、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、粉末冶金材料、工程聚合物、工程陶瓷材料和功能材料概论等12章。

本书可作为大专院校、职大、电大、函大机械类(非热加工)各专业的教学用书,也可供从事机械制造、动力机械制造和仪器仪表制造的工程技术人员阅读参考。

机 械 工 程 材 料

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

常州村前印刷厂印装

开本787×1092毫米1/16 印张14.75 字数330,000

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数: 1—5,300

ISBN7-313-00267-X/TG14 科技书目: 179-275

定价: 2.50元

前 言

本书是根据上海交通大学机械类各专业(包括机械制造、动力机械和精密仪器等)对工程材料的要求,结合多年来教学改革实践编写的。可作为上述各专业工程材料课程的教材。

考虑到工程材料是一门基础技术课,因而本书主要叙述各类金属材料的成分、组织结构、性能及其相互关系的基本规律和选用材料的基础知识。同时叙述一些现代机械工程上常用的非金属材料,包括高分子材料和陶瓷材料等的基础知识。限于篇幅,在编写时力求既符合教学要求,又简明扼要,并且仍留有余地,以便各专业按需要选择内容。

本书由吴维琍、庄和铃主编。第1~4章由吴维琍编写,第5、8章由庄和铃编写,第6、7章由荣雪华编写,第9章由程大可编写,第10、11章由朱钰如编写,第12章由钱庙根编写。全书由荣雪华主审。

书中不足和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编者

于上海交通大学1988年1月

目 录

第 1 章 金属材料的结构

1.1 概述.....	1
1.2 金属的晶体结构.....	1
1.3 合金相结构.....	6
1.4 金属晶体中的缺陷.....	11

第 2 章 二元合金相图与凝固

2.1 纯金属的结晶.....	14
2.2 二元合金相图及其建立.....	18
2.3 匀晶相图与固溶体合金的凝固.....	20
2.4 共晶相图及其结晶.....	22
2.5 包晶相图及其结晶.....	28

第 3 章 铁碳相图与碳钢

3.1 铁碳相图.....	30
3.2 碳钢.....	40
3.3 金属铸锭的组织 and 缺陷.....	44

第 4 章 塑性变形与再结晶

4.1 金属材料的变形.....	48
4.2 塑性变形对金属组织与性能的影响.....	56
4.3 变形金属和合金在加热时的变化.....	58
4.4 金属材料的热加工.....	62

第 5 章 钢的热处理

5.1 钢在加热时的转变.....	64
5.2 奥氏体冷却时的转变.....	67
5.3 钢的热处理工艺.....	76
5.4 钢的表面热处理.....	86

第 6 章 合金钢

6.1 合金钢概述.....	96
6.2 合金元素在钢中的作用.....	97

6.3	结构钢	105
6.4	工具钢	116
6.5	不锈钢耐酸钢	125
6.6	耐热钢	128

第 7 章 铸铁

7.1	铸铁概述	132
7.2	铸铁的石墨化	133
7.3	白口铸铁概述	136
7.4	灰口铸铁	136
7.5	可锻铸铁	140
7.6	球墨铸铁	142
7.7	合金铸铁概述	145

第 8 章 有色金属及其合金

8.1	铝及其合金	147
8.2	铜及其合金	153
8.3	滑动轴承合金	158
8.4	钛及其合金	161

第 9 章 粉末冶金材料

9.1	粉末冶金铁基结构材料	164
9.2	粉末冶金减摩材料	168
9.3	粉末冶金过滤材料	170
9.4	粉末冶金摩擦材料	172
9.5	硬质合金	174

第 10 章 工程聚合物

10.1	基本概念	177
10.2	聚合反应	179
10.3	高聚物的结构	180
10.4	工程高聚物简介	185
10.5	高聚物材料的选用	190

第 11 章 工程陶瓷材料

11.1	陶瓷材料的分类及其应用	194
11.2	陶瓷材料的显微组织	194
11.3	陶瓷材料的性能	197
11.4	常用陶瓷材料分类简介	200

第 12 章 功能材料概论

12.1 功能材料及其分类.....	204
12.2 弹性材料.....	204
12.3 膨胀材料.....	208
12.4 磁性材料.....	210
12.5 电阻材料.....	213

第 1 章 金属材料的结构

1.1 概 述

在全部化学元素中，金属元素约占四分之三。

金属具有良好的导电性、导热性、塑性和工艺性能等，因此，在工业中获得了广泛的应用。金属的这些特性是与其内部结构有关的。

金属由原子所组成，但金属原子的价电子数很少，大多只有1~2个价电子，且它们与其原子核的联系很弱，因此金属原子易失去其价电子而变成正离子。在金属原子互相结合时，每个原子均交出其价电子而变成正离子。正离子按一定的规律在空间排列，并各以空间的某定点为其平衡中心作轻微的振动；而所有的价电子则在各正离子之间运动，为整个离子集体所共有，形成所谓“电子气”，这种电子通常称为自由电子。由于自由电子与正离子之间存在引力，因此金属原子能牢固地结合，成为固体。金属原子的这种结合方式称为金属键，如图1-1所示。

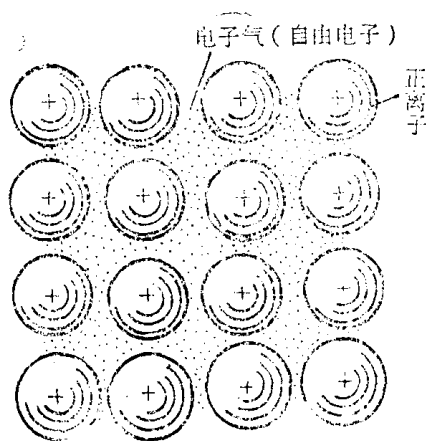


图 1-1 金属键示意图

金属的许多特性正是由这种金属键所决定的，因为金属中有自由电子存在，所以只要在金属两端施加很小的电压，即可使自由电子向正极流动，从而形成电流，这便是金属具有高导电性的原因。当温度升高时，金属离子热振动的振幅增大，阻碍了自由电子的流动，从而使金属的导电性降低，即金属具有正的电阻温度系数。若对金属施加很大的外力时，则其离子将沿着一一定的方向发生相对移动。此时，自由电子亦随之移动，于是其离子间仍保持着牢固的结合。因此，金属能在一定外力作用下发生永久变形而不致破裂，这就是金属具有高塑性的原因。正因为金属具有高的塑性，所以可进行各种塑性加工。

1.2 金属的晶体结构

1.2.1 晶体的概念

晶体就是指原子在空间呈规则排列的固体物质。在固态下，金属原子在空间呈规则排列，故在一般情况下，所有的金属固体皆为晶体。

为描述晶体中的原子(或分子、离子)在空间呈规则排列，可用假想的直线将各原子的中心点连接起来，形成一个三维的空间格架，如图 1-2 所示。这种用来反映晶体中原子规则排列的空间格架，通常称为晶格或点阵。

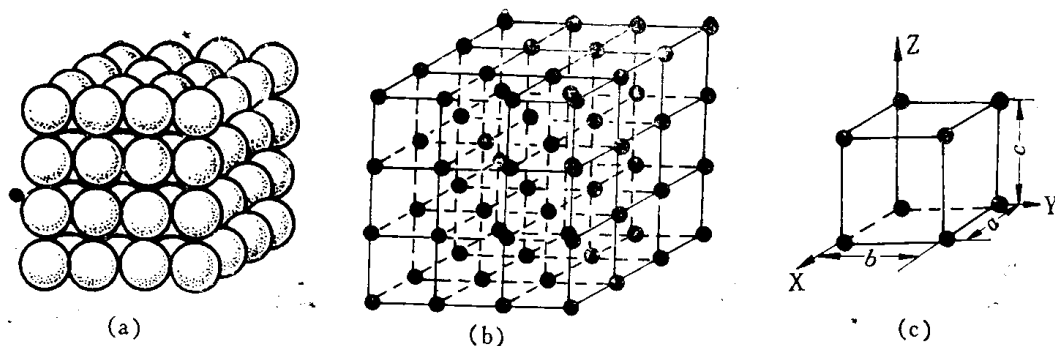


图 1-2 简单立方晶体(a)、晶格(b)和晶胞(c)的示意图

晶格实质上都是由一些最基本的几何排列形式或单元重复堆砌而成的。晶格的这种最基本的几何排列形式或单元常称为晶胞。分析晶胞，便能找出该类晶格的排列规律。晶胞的各边尺寸—— a 、 b 、 c ，称为晶格常数，其大小以 $\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 1 \times 10^{-10}\text{m}$)来量度。图 1-2(c) 表示出简单立方晶格的晶胞。

金属的特性除与上述的结合键的性质有关外，还同其晶格类型有密切的关系。

1.2.2 三种典型的金属晶体结构

金属键使金属晶体的原子排列趋向于尽可能地紧密。绝大多数金属的晶体结构属于体心立方、面心立方或密排立方三种类型。

1. 体心立方结构

体心立方结构的晶胞见图 1-3(a)、(b)，在其每个角上和晶胞中心都有一个原子。在计算晶胞中的原子数目时，考虑到角上的原子应同时属于相邻的8个晶胞所共有(见图1-3(c))，每个晶胞实际上只占有该原子的 $\frac{1}{8}$ ，因此可得：

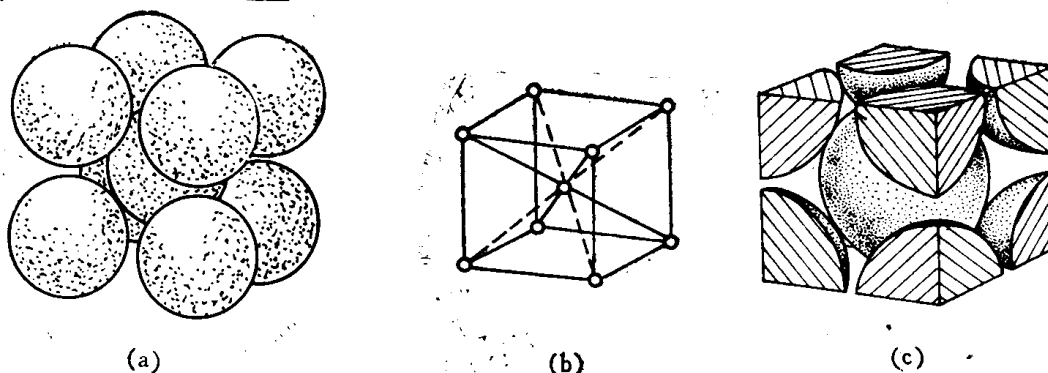


图 1-3 体心立方晶胞

(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞中原子数示意图

体心立方晶胞中的原子数 $= \frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 。

由图 1-3(c) 还可看到，体心立方晶胞角上的原子与晶胞中心原子之间的距离最近(如果以圆球代表原子，它们可相互接触)，而角上原子间的距离就较大(圆球不能相互接触)。通常将晶体结构中每个原子最邻近的等距离原子数称为邻位数(或配位数)，它反映了晶体中

原子排列的紧密程度。显然，体心立方结构的邻位数为8。

具有体心立方结构的金属有 α -Fe、W、Mo、Cr、V和Nb等。这些金属的晶体结构虽属同一类型，但其晶胞大小却不相同，每种金属在一定温度时有其特有的晶胞尺寸。晶胞大小是用点阵常数(即晶格常数)来衡量的。对于立方晶系，其晶格常数只用晶胞棱边长度 a 一个数值。例如， α -Fe的 $a = 2.8664 \text{ \AA}$ (20°C)，Mo的 $a = 3.1468 \text{ \AA}$ (20°C)。

2. 面心立方结构

面心立方结构的晶胞见图1-4(a)、(b)，在其每个角上和面中心都有一个原子，而面上的原子为2个晶胞所共有(见图1-4(c))。因此可得：

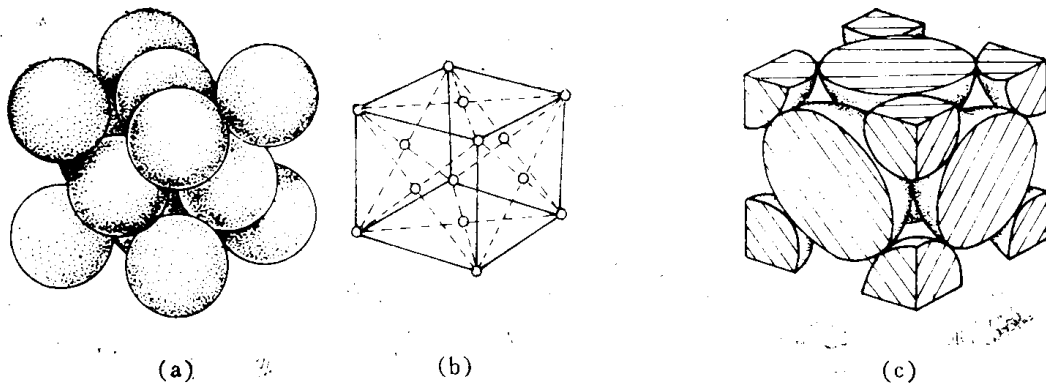


图 1-4 面心立方晶胞

(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞中原子数示意图

$$\text{面心立方晶胞中的原子数} = \frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4。$$

面心立方晶格中，每个原子有12个最邻近的原子，即其邻位数为12。这说明面心立方的排列较体心立方更紧密，它是晶体中原子排列得最紧密的晶体结构之一。

具有面心立方结构的金属有Cu、Al、 γ -Fe、Ni、Ag和Au等。

3. 密排六方结构

密排六方结构的晶胞见图1-5(a)、(b)，它亦是原子排列得最紧密的晶体结构之一。在六

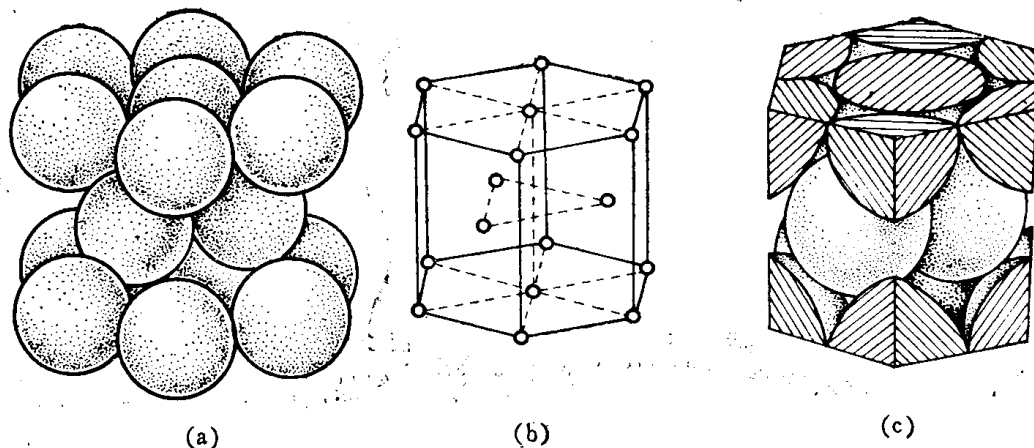


图 1-5 密排六方晶胞

(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞中原子数示意图

方柱体每个角上(共12个角)的原子系六个相邻晶胞所共有,上、下底面中心的原子为两个晶胞所共有,此外在晶胞内有一个原子。因此可得:

$$\text{密排六方晶胞中的原子数} = 12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 1 = 6。$$

密排六方结构的邻位数亦为12。它的晶格常数需以 a (六方边长)与 c (六方柱高)两个参数表示。当邻位数为12时,密排六方晶胞的轴比 $\frac{c}{a} = 1.633$ 。但实际测得的轴比并非严格地等于此值,而是在接近此值的一个范围内变动着,如Be为1.5847,Ti为1.5873;Mg为1.6235;Zn为1.8563等。

1.2.3 晶面和晶向

在晶体中,可以通过其中的原子构成许多不同方位的平面,称为晶面;还可由诸原子构成许多不同方向的直线,这些直线表示出晶体空间的各种方向,称为晶向。在不同的晶面和晶向上,原子的排列各不相同,从而使晶体显示出不同的性质。常用晶面指数和晶向指数来规定晶面和晶向在空间的位置。

1. 晶面指数(hkl)

确定晶面指数的步骤如下:

- (1) 取晶胞某一顶点作为原点O,三棱边分别为三个坐标轴X、Y、Z;
- (2) 以晶胞棱边长度 a (即点阵常数)为单位,量出需要标定的晶面在X、Y、Z三轴上的截距(若该晶面与某轴平行,则在该轴上的截距为 ∞)。如图1-6中虚线表示的晶面在三个坐标轴上的截距分别为1, $\frac{1}{3}$ 和 $\frac{2}{3}$;
- (3) 取此截距的倒数,如上述晶面即为1, 3和 $\frac{3}{2}$;
- (4) 再将上述倒数化为最小的简单整数,并加上圆括号,如(263),即表示上述晶面的晶面指数。

若某坐标轴上的截距在该轴的负方向,则在相应的指数上方加一负号,例如($\bar{h}\bar{k}\bar{l}$)。

图1-7表示了立方晶体中三种重要的晶面。

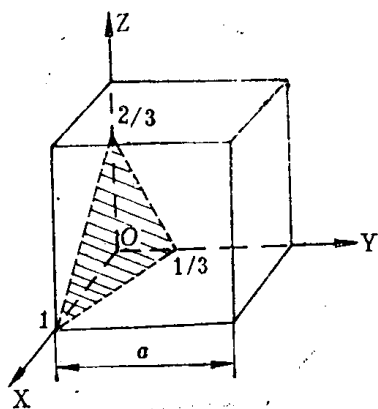


图 1-6 晶面指数表示法

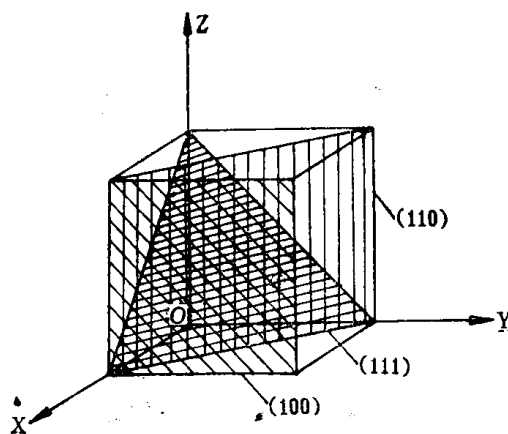


图 1-7 立方晶格中的三种重要晶面

对于晶体中原子排列方式相同而只是方位不同的各组晶面,可以合称为一个晶面族,用 $\{hkl\}$ 表示。例如,在立方晶系中:

$$\begin{aligned} \{100\} = & (100) + (010) + (001) \\ & + (\bar{1}00) + (0\bar{1}0) + (00\bar{1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\{111\} = & (111) + (11\bar{1}) + (1\bar{1}1) \\ & + (\bar{1}11) + (\bar{1}\bar{1}\bar{1}) + (\bar{1}\bar{1}1) \\ & + (\bar{1}1\bar{1}) + (1\bar{1}\bar{1})\end{aligned}$$

2. 晶向指数 $[uvw]$

确定晶向指数的步骤如下：

(1) 以晶胞的晶轴为坐标轴X、Y、Z，以晶胞的边长作为坐标轴的长度单位；

(2) 从原点O沿所指方向的直线上，取最近的一个原子在晶轴X、Y、Z上的坐标值，例如，100，110和111等；

(3) 将此数化为最小整数，并加上方括号，即为晶向指数，例如上述的 $[100]$ ， $[110]$ 和 $[111]$ 等，如图1-8所示。

对于晶体中因对称关系而等同的各组晶向可以归并为一个晶向族，用 $\langle uvw \rangle$ 表示。例如，在立方晶系中

$$\begin{aligned}\langle 100 \rangle = & [100] + [010] + [001] \\ & + [\bar{1}00] + [0\bar{1}0] + [00\bar{1}]\end{aligned}$$

此外，在立方晶系中，具有相同指数的晶向和晶面必定相互垂直。例如， $[100] \perp (100)$ ， $[110] \perp (110)$ ， $[111] \perp (111)$ 等。但是，上述规律并不适用于其他晶系。

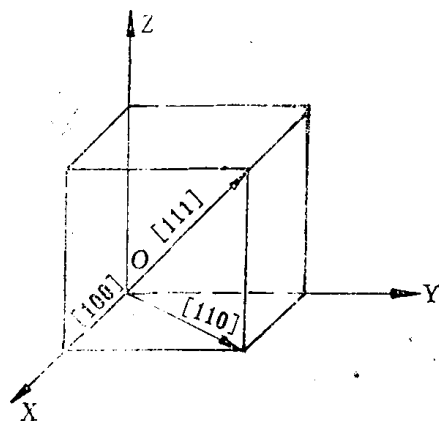


图 1-8 立方晶系中的晶向指数

3. 六方晶系的指数

六方晶系指数的标定方法与前述的基本相同。

考虑到其对称特点，六方晶系采用 a_1 、 a_2 、 a_3 和 c 四个晶轴， a_1 、 a_2 、 a_3 之间的夹角均为 120° ， c 轴与 a_1 、 a_2 、 a_3 轴相垂直，这样，其晶面指数就有四个数，表示为 $(hkil)$ ，且其中 $i = -(h+k)$ 。当用这种标定方法时，等同的晶面可由其指数反映出来。例如，六个柱面的晶面指数分别为 $(10\bar{1}0)$ 、 $(01\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}100)$ 、 $(\bar{1}010)$ 、 $(0\bar{1}10)$ 和 $(1\bar{1}00)$ ，并可将它们归并为晶面族 $\{10\bar{1}0\}$ 。

六方晶系中的一些晶面的晶面指数如图1-9所示。

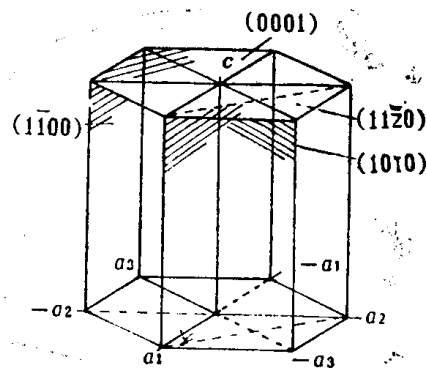


图 1-9 六方晶系中一些晶面的指数

六方晶系中晶向指数的具体标定方法如下：从晶轴原点出发，沿着平行于四个晶轴的方向依次移动，使之最后到达所需表示方向上的某一点；在移动时，必须选择适当的路线，使沿 a_3 轴移动的距离是沿 a_1 、 a_2 轴移动距离之和的负值；最后将各方移动距离化为最小整数值，加上方括号，即为此方向的晶向指数(见图1-10)。

1.2.4 晶体的各向异性

各向异性是晶体的特点之一，即沿一个晶体的不同方向所测得的各种物理、化学或力学

性能相差甚大。例如，沿铁单晶 $[111]$ 方向的弹性模量 $E = 290000\text{MPa}$ ，而沿其 $[100]$ 方向， $E = 135000\text{MPa}$ 。

如上所述，晶体中的原子呈有规则的排列，从而在不同的晶面上或沿不同的晶向，原子排列的疏密程度也不同。以简单立方晶系为例，图 1-11 表示出其不同晶面的间距。显然， $\{100\}$ 面上原子排列最为紧密， $\{110\}$ 面次之；至于 $\{120\}$ 、 $\{320\}$ 等面上则原子排列就较稀疏。而且，各族晶面的晶面间距也不相同，原子排列愈密的晶面，其晶面间距也愈大。同样还可以看出，沿不同晶向，原子排列的疏密程度也不相同，正是这种原子排列的疏密，使晶体表现出各向异性。

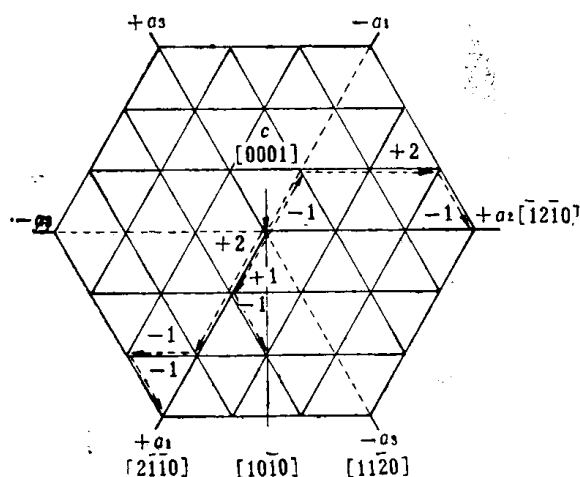


图 1-10 六方晶系晶向指数表示方法
(c轴与图面垂直)

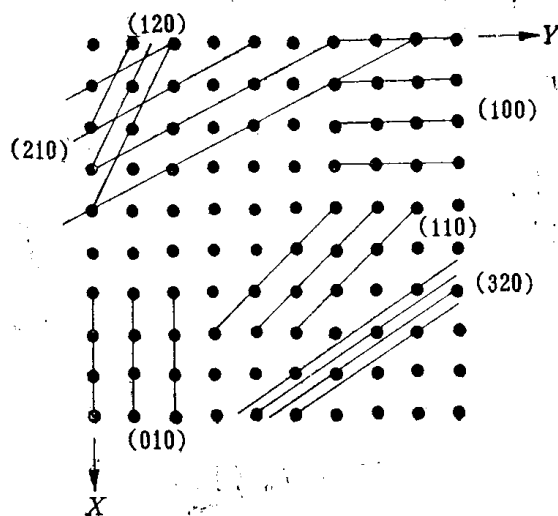


图 1-11 不同晶面的间距

但是，日常使用的金属材料却并不显示出各向异性。例如，铁多晶体的弹性模量 E 约为 210000MPa 。这是因为它们都是多晶体，尽管每个晶粒均具有各向异性，但整块金属的性能则是许多不同位向晶粒的性能之平均值，从而表现为各向同性。当然，这种各向同性只是一种宏观表象，所以常被称为多晶体的伪各向同性。

总之，单晶体呈现各向异性，而多晶体通常呈现出假的各向同性。

1.3 合金相结构

由两种或两种以上的金属或金属与非金属组成的、具有金属特性的物质，被称之为合金。

相是指合金中的均匀部分，它具有同一聚集状态、同一结构和性质。不同相间有界面分隔开来。

合金中相结构的类型是多种多样的，这与合金中异类原子间的相互作用情况有关。根据合金相的结构特征、性能特点和大致的形成条件，可以把合金相归纳为固溶体和金属化合物这两种基本类型。

1.3.1 固溶体

固溶体是溶质原子溶入固态金属溶剂中所形成的合金相。X射线研究证明，固溶体仍保

持溶剂金属所固有的晶体结构。根据溶质原子在溶剂结构中的分布形式，可把固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两种类型。前者为溶质原子置换了溶剂结构中的一部分原子；而后者为溶质原子处于溶剂结构的间隙位置。在三元(或三元以上)合金中，也可能同时兼有两种型式的固溶体。

固溶体的晶体结构虽然和溶剂的相同，但因溶质原子的溶入引起晶格常数改变，并导致晶格畸变，故其性能也发生变化，如强度增高，导电性下降等。

在大多数置换固溶体中，不同原子在晶格中的分布是任意的，这种固溶体称为无序固溶体。有些合金，在一定温度下，其固溶体晶体结构中的不同原子各占据有规则的位置，这种固溶体称为有序固溶体，如图1-12所示。

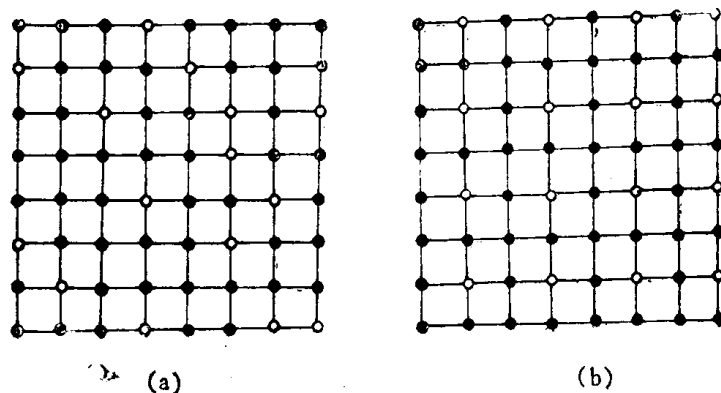


图 1-12 无序固溶体(a) 和有序固溶体(b) 结构示意图

• —溶剂原子 ○ —溶质原子

1. 置换固溶体

如上所述，溶质原子置换了溶剂晶格中一些溶剂原子就形成置换固溶体。图1-13所示系镍溶于铜中形成的置换固溶体：在面心立方晶体结构中，一些铜原子的位置被镍原子所置换。

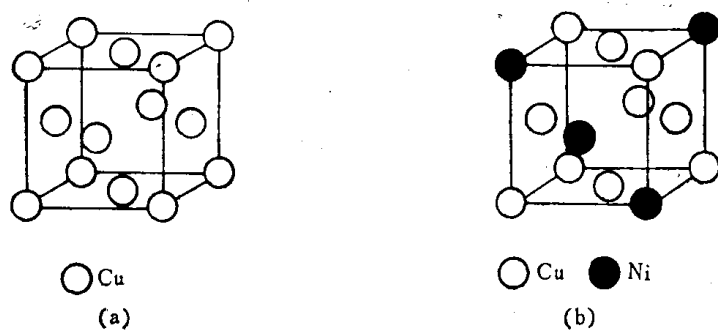


图 1-13 置换固溶体

(a) 溶剂金属铜； (b) Cu-Ni固溶体

组成合金的纯物质称为组元。当两组元在固态呈无限溶解时，所形成的固溶体称为连续固溶体或无限固溶体；当两组元在固态呈有限溶解时，只能形成有限固溶体。溶质在溶剂中的溶解度主要取决于下列条件：

(1) 组元的晶体结构。组元间在固态呈无限溶解时，必须具有相同的晶体结构。因为

只有这样，固溶体在整个浓度范围内，才可能由一种组元的晶体结构连续地过渡到另一种组元的晶体结构，见图1-14。反之，若两组元的晶体结构不相同，则不可避免地要中断这种过渡的连续性，而形成以另一晶体结构类型的组元为溶剂的新的固溶体，从而形成了溶解度的有限性。

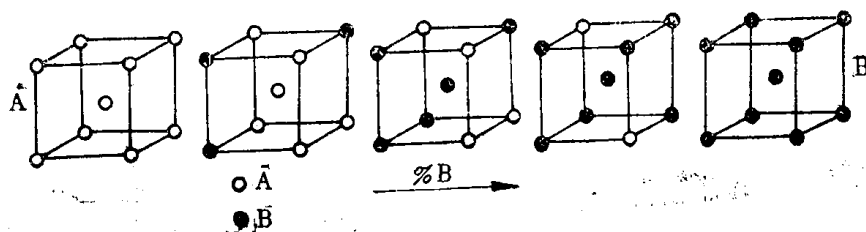


图 1-14 形成无限固溶体时两组元原子连续置换示意图

(2) 原子尺寸因素。组元间原子半径的差别愈小，其溶解度便愈大。实验证明，当组元间原子半径之差小于14~15%时，有利于形成固溶体；而大于15%时，则只能微量溶解。因为当溶质与溶剂原子半径不同时，将会导致溶剂的晶格产生畸变(见图1-15)，且其半径之差愈大，这种畸变愈严重，从而其溶解度也愈小。

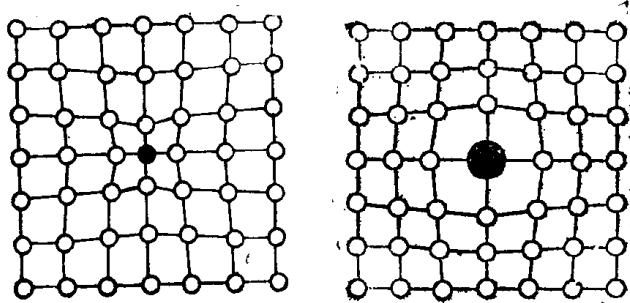


图 1-15 形成置换固溶体时的点阵畸变

(3) 化学亲和力。如果组元之间的化学亲和力很强，则形成化合物的倾向很大，溶解度就减小。电化性质十分接近的元素(即元素周期表中属同一族或很邻近的元素)才具有较大的溶解度，甚至无限溶解。

2. 间隙固溶体

某些原子半径很小的非金属元素，例如氢(0.46 Å)、硼(0.97 Å)、碳(0.77 Å)、氮(0.71 Å)和氧(0.61 Å)等，溶入过渡族金属内，便形成间隙固溶体。此外，当以化合物为溶剂时，也能形成间隙固溶体，例如，Ni溶入NiSb中便属于这种情况。

形成间隙固溶体的必要条件是：在溶剂组元点阵中，有足够大的间隙，而溶质组元则具有很小的原子半径(小于10 Å)。由于原子间隙的大小和原子半径有关，当溶质与溶剂的原子半径比值小于0.59时，才可能形成间隙固溶体。例如，碳原子溶于 γ -Fe中(常称为奥氏体)即满足上述条件，形成间隙固溶体。

如上所述，组元之间形成固溶体时，不论其溶解方式如何，都将造成溶剂金属晶格畸变，且导致其晶格常数也发生变化。对置换固溶体而言，若溶质原子半径大于溶剂原子半径时，晶格常数将增大；反之，则缩小。在铝、铜、铁中溶入其他元素时，其点阵常数的变化如图1-16所示。对间隙固溶体而言，固溶体的点阵常数随溶质元素的增多而加大，图1-17就表示了奥氏体的点阵常数随其含碳量增加而加大的情况。

1.3.2 金属化合物

合金相除固溶体外，就是金属化合物。金属化合物有时也称为金属间化合物，其多数是

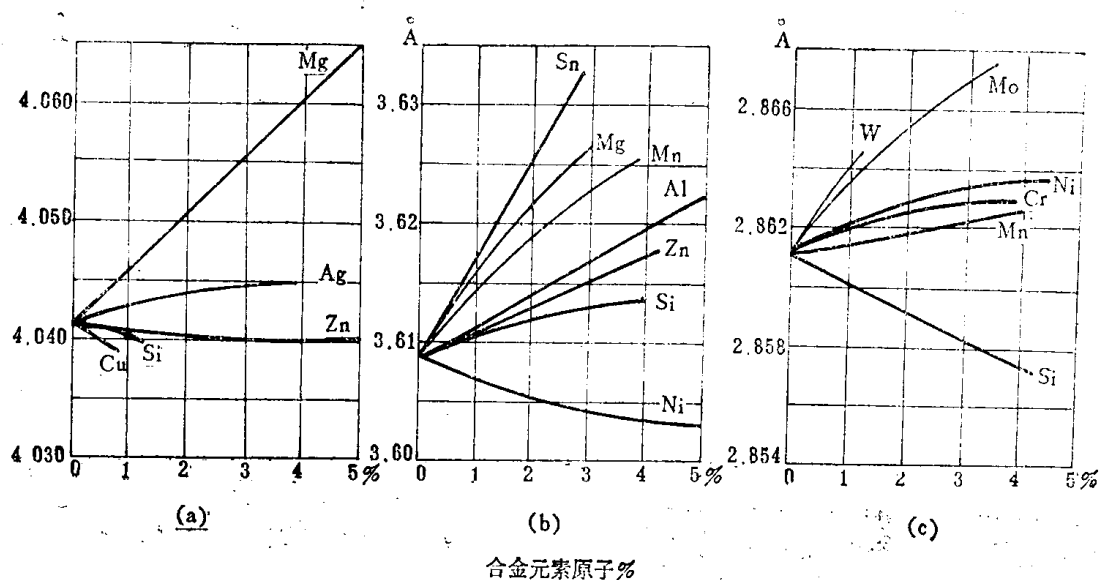


图 1-16 各元素溶入铝、铜、铁中形成置换固溶体时晶格常数的变化
(a) 铝; (b) 铜; (c) 铁;

金属与金属元素之间，或是金属与类金属元素之间的化合物，其结合以金属键为主，使之具有金属的特性。这些化合物的晶体结构与其组元的晶体结构完全不同。一部分金属化合物的成分还可在某个范围内变化，从而使其兼有固溶体的特征。从后面要述及的二元相图来看，它们所处的位置总是在两个固溶体区域之间的中间部位，因此也常称之为中间相。金属化合物的类型很多，一般可分为正常价化合物、电子化合物和间隙相三大类。

1. 正常价化合物

金属元素与周期表中第ⅣA、ⅤA、ⅥA族的元素可形成正常价化合物。这类化合物符合于化合的原子价规律。在周期表中，负电性愈强的元素与正电性愈强的金属所组成的化合物愈稳定，例如 Mg_2Si 、 Mg_2Sn 、 Mg_2Ge 等。

正常价化合物的主要特点是：组元之间的化合比例符合正常价的规律并遵守原子价定则；具有与其组元不同的特殊点阵；熔点一定；对组元的溶解度很小；硬度高而脆性大。

2. 电子化合物

过渡族金属或ⅠB族的贵金属(Cu、Ag、Au)与ⅡB、ⅢB、ⅣB族金属所形成的化合物，其电子浓度(即价电子数与原子数的比值)具有一定的数值($\frac{3}{2}$ 、 $\frac{21}{13}$ 或 $\frac{7}{4}$)，而且电子浓度一定的化合物又有其特定的晶格类型，这一类合金相称为电子化合物。例如， $CuZn$ 、 Cu_3Al 、 Cu_5Sn 、 Cu_5Zn_8 、 $CuZn_3$ 、 $AuCd$ 、 $FeAl$ 等均属这类化合物。

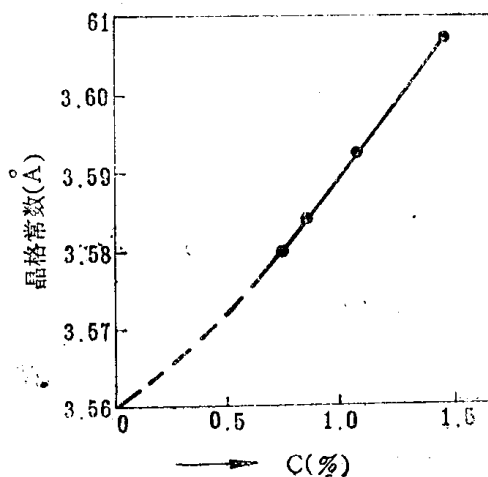


图 1-17 奥氏体点阵常数与含碳量的关系

3. 间隙相和间隙化合物

由过渡族金属(其原子半径设为 r_m)与碳、氢、氮等原子半径(设为 r_x) 较小的非金属元素形成的化合物,其组元间原子半径比值 $\frac{r_x}{r_m} < 0.59$, 并具有简单晶体结构的,称为间隙相。而 $\frac{r_x}{r_m} > 0.59$, 并具有复杂结构的,称为间隙化合物。

(1) 间隙相。间隙相具有与其金属组元不同的晶体结构。在间隙相内,金属原子形成简单的晶体结构(如体心立方、面心立方、密排六方以及轴比 $\frac{c}{a} = 1$ 的简单六方结构),而非金属原子则位于晶格的间隙处。如图1-18所示。

间隙相的一般分子式为MX(如碳化物ZrC、TiC、TaC、VC等;氮化物ZrN、TiN、VN等;氢化物ZrH、TiH等)、 M_2X (如 Fe_2N 、 Cr_2N 、 V_2N 、 W_2C 、 Mo_2C 、 Ta_2C 等)、 M_4X (如 Fe_4N 等)和 MX_2 (如 TiH_2 、 ZrH_2 等)。

间隙相的成分往往不是很严格而具有一个范围,如VC含43~50%C,(原子%),TaC含45~50%C, Fe_4N 含19~21%N,说明间隙原子有时未全部填满而有缺位。此外,晶体结构相同的间隙相彼此可以互溶,甚至无限溶解。例如,TiC、TiN、VC、VN彼此间均可无限溶解。

(2) 间隙化合物。当非金属原子半径与过渡族金属原子半径之比 $\frac{r_x}{r_m} > 0.59$, 并具有复杂晶体结构的,称为间隙化合物。在合金钢中常遇到的间隙化合物有 M_3C (如 Fe_3C)、 M_7C_3 (如 Cr_7C_3)、 $M_{23}C_6$ (如 $Cr_{23}C_6$)和 M_6C (如 Fe_3W_3C 、 Fe_4W_2C)等,其中M往往可有几种金属原子固溶在内,例如 $(Cr, Fe, W)_{23}C_6$ 、 $(Ni, Fe)_3(W, Mo)_3C$ 、 $(Ni, Co)_4(Mo, W)_2C$ 等。

间隙化合物的晶体结构都很复杂。以钢中渗碳体(Fe_3C)为例,属正交晶系,其晶胞如图1-19所示。晶胞中有16个原子,其中12个是铁原子,4个碳原子。铁原子作接近于密堆的排列,而碳原子位于其间隙处。

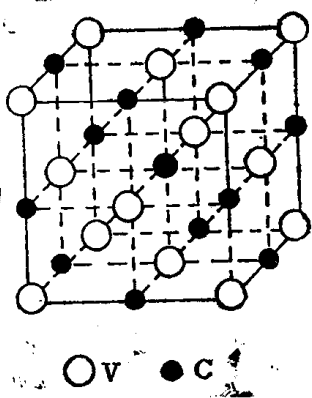


图 1-18 间隙相VC的晶体结构

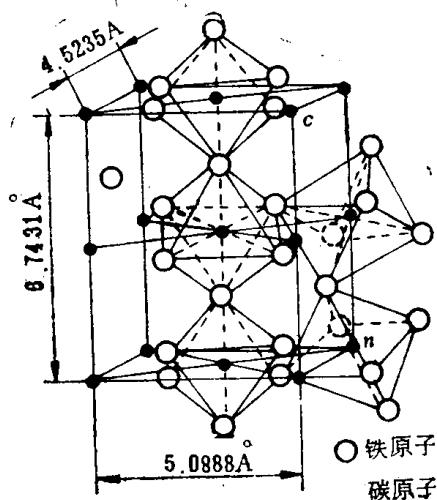


图 1-19 Fe_3C 晶体结构

1.4 金属晶体中的缺陷

如上所述, 固态金属是晶体, 晶体中原子按一定的规律周期重复地排列于空间。但实际晶体内部的原子排列并不如想象地那样规则和完整, 它总是存在着许多缺陷, 这些缺陷造成了实际晶体的不完整性, 并且对金属的许多性能产生极重要的影响。

1.4.1 空位和间隙原子

晶体中的原子在其平衡位置上作热振动, 其振动能量与晶体温度有关, 温度愈高, 能量愈大。但是, 各个原子的能量并不完全相等, 而是呈统计分布, 并经常地变化着。某些原子的能量可暂时高于平均能量, 而某些原子的能量则暂时低于平均值, 此现象称为能量起伏。这样, 一些高能量的原子就可能脱离其原来的平衡位置而迁移到晶体表面或原子之间的间隙位置处, 使原来的位置空着, 称之为空位; 而处于间隙中的原子则称为间隙原子, 见图1-20。空位和间隙原子都破坏了晶格的规则性, 造成晶体缺陷。它们属于晶体中的点缺陷。

此外, 在叙述固溶体时, 曾提及的溶入间隙或进行置换的异类(杂质或溶质)原子, 也属点缺陷的一种。

点缺陷在金属晶体中的位置不是固定的, 它们在不断地改变着, 即不断地迁移着。因此, 点缺陷的存在和运动, 对金属中的原子迁移(即金属的扩散)起着重要的作用。

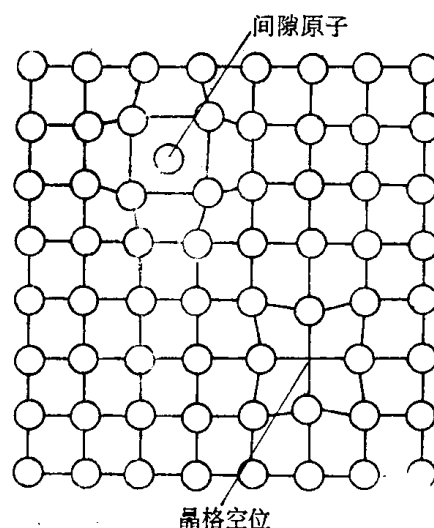


图 1-20 点缺陷示意图

1.4.2 位错

位错是晶体中的线缺陷。其最简单的形式是刃型位错和螺型位错。刃型位错如图1-21(a)

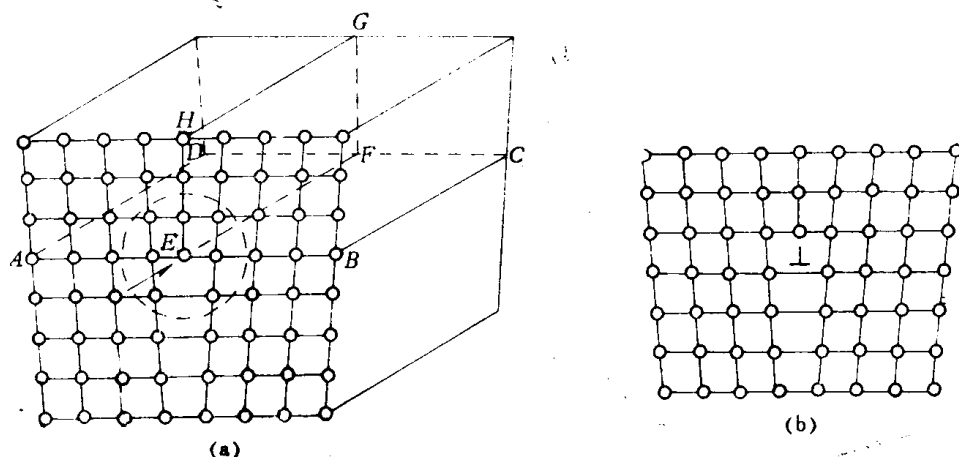


图 1-21 刃型位错示意图
(a) 立体模型; (b) 平面示意