

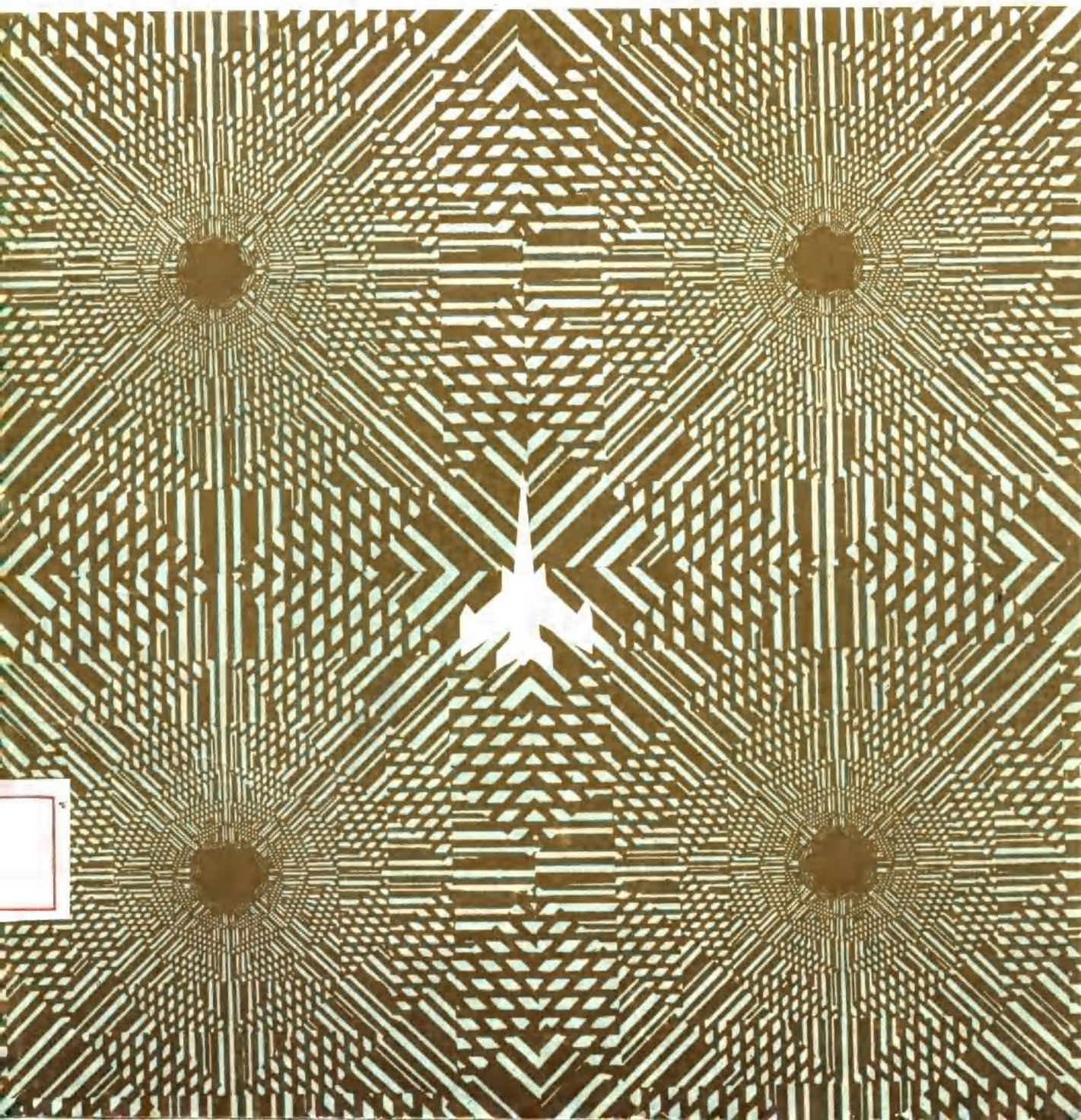
• 高等工科院校教材

金属材料 及热处理

• 沈阳航空工业学院

曾周良 刘宝文 刘文远 闵 一 刘明玲编

辽宁科学技术出版社



金 属 材 料 及 热 处 理

曾周良 刘宝文 刘文远
闵 一 刘明玲 编

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)
辽宁省新华书店发行 沈阳航空工业学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 19 1/2 字数: 440,000
1986年12月第1版 1986年12月第1次印刷

责任编辑: 白京久 版式设计 韩雪差
封面设计: 庄庆芳 责任校对 张 燕

印数: 3,000

统一书号: 15288·246 定价: 3.40元

前 言

本书是根据一九八五年十二月教育委员会主持制定的《工程材料》课程教学基本要求（征求意见稿）编写的。本书在内容处理上有以下特点：

- 一、本书包括金属学基础、钢铁热处理和常用金属材料等三部分内容。
- 二、本书在深入阐述金属学基本原理的基础上，以材料的成分—组织—性能间的关系为主线，处理有关章节的内容，以便使学生掌握正确选材，合理用材的基本原则。
- 三、本书加强了典型零件加工工艺流程的分析，使机械制造专业的学生能深刻理解热处理工序的作用及其与冷加工工序的关系，从而能妥善安排零件的加工工艺路线。
- 四、为使本书的适用面更广，书后附录了常用金属材料的热处理工艺参数及处理后的性能。

本书可作为高等工业院校机械类工艺专业和设计专业的教材，也可供从事金属材料及热处理工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中，力求语言精炼、标题醒目、插图清晰、数据准确；力求反映八十年代的科技水平和生产实际。但由于编者水平有限，可能还有许多不妥之处，敬希读者批评指正！

本书第一、二章由刘文远编写；第三、四章由闵一编写；第五、十章由刘宝文编写；第六、七章由刘明玲编写；第八、九章由曾周良编写；附录由田玉春编写。全书由曾周良、刘宝文统一修改、定稿。

编 者

1986年5月

主 要 参 考 文 献

- 1、R.A.Higgins: 《 Properties of Engineering Materials 》, 1980
- 2、Rrof.y.Lakntin: 《 Engineering Physical Metallurgy 》, 1965
- 3、Ken-ichi Hirano: 《 Field on Microscopic studies on G.P.Zones in Al-Cu alloys 》, 1981
- 4、Gulyaev: 《 Phycal Metallurgy 》, 1980
- 5、Yu.Geller: 《 Tool steels 》, 1975
- 6、Robert Wilson: 《 Metallurgy and Heat treatment of tool steels 》, 1975
- 7、Michael F.Ashby: 《 Engineering Materials 》, 1980
- 8、AMERICAN SOCIETY FOR METALS: 《 METALS HANDBOOK 》
8th Edition VOL.8.1973
- 9、宫川大海: 《 金属材料工学 》, 森北出版株式会社
- 10、曾周良、刘宝文: 《 金属材料及热处理 》, 1982, 航空专业教材编审室
- 11、吴培英: 《 金属材料学 》, 1981, 国防工业出版社
- 12、卢光熙、侯增寿: 《 金属学教程 》, 1985, 上海科学技术出版社
- 13、陈进化: 《 位错基础 》, 1983, 上海科学技术出版社
- 14、田长生: 《 金属材料及热处理 》, 1980, 航空专业教材编审室
- 15、刘云旭: 《 金属热处理原理 》, 1980, 机械工业出版社
- 16、安运铮: 《 热处理工艺学 》, 1982, 机械工业出版社
- 17、安正昆: 《 钢铁热处理 》, 1985, 机械工业出版社
- 18、吴云书等: 《 现代工程合金 》, 1983, 国防工业出版社
- 19、《 金相图谱 》编写组: 《 金相图谱 》, 1980, 电力工业出版社
- 20、张宝昌等: 《 有色金属及其热处理 》, 1981, 国防工业出版社

目 录

第一篇 金属学基础

第一章 纯金属

§ 1—1 金属键·····	1
§ 1—2 金属的晶体结构·····	2
§ 1—3 纯金属的结晶·····	17

第二章 合金

§ 2—1 合金的相结构·····	25
§ 2—2 二元合金相图概述·····	31
§ 2—3 匀晶相图·····	33
§ 2—4 共晶相图·····	36
§ 2—5 包晶相图·····	40
§ 2—6 其它相图·····	43
§ 2—7 合金的性能与相图的关系·····	45

第三章 金属的塑性变形

§ 3—1 纯金属的塑性变形·····	47
§ 3—2 合金的塑性变形·····	60
§ 3—3 冷压加工的塑性变形·····	63
§ 3—4 热压加工的塑性变形·····	71

第四章 金属的机械性能

§ 4—1 强度·····	75
§ 4—2 塑性·····	79
§ 4—3 硬度·····	79
§ 4—4 冲击韧性·····	85
§ 4—5 疲劳强度·····	87
§ 4—6 断裂韧性·····	89

第二篇 铁碳合金及其热处理

第五章 铁碳合金

§ 5—1 Fe—Fe ₃ C相图·····	95
§ 5—2 碳钢·····	109

§ 5—3 铸铁·····	117
第六章 钢的热处理原理	
§ 6—1 钢在加热时的转变·····	126
§ 6—2 钢在冷却时的转变·····	130
第七章 钢的热处理工艺	
§ 7—1 退火·····	143
§ 7—2 正火·····	146
§ 7—3 淬火·····	148
§ 7—4 回火·····	156
§ 7—5 时效·····	161
§ 7—6 表面淬火·····	162
§ 7—7 化学热处理·····	164
§ 7—8 热处理新技术简介·····	172

第三篇 金属材料

第八章 合金钢	
§ 8—1 合金钢概述·····	178
§ 8—2 合金结构钢·····	185
§ 8—3 合金工具钢·····	200
第九章 不锈钢及高温合金	
§ 9—1 不锈钢概述·····	213
§ 9—2 马氏体不锈钢·····	214
§ 9—3 奥氏体不锈钢·····	217
§ 9—4 过渡型不锈钢·····	221
§ 9—5 高温合金概述·····	223
§ 9—6 变形铁基高温合金·····	225
§ 9—7 变形镍基高温合金·····	230
§ 9—8 铸造成形高温合金·····	234
第十章 有色金属	
§ 10—1 铝及铝合金·····	241
§ 10—2 镁及镁合金·····	260
§ 10—3 钛及钛合金·····	263
§ 10—4 铜及铜合金·····	273
附录一 黑色金属硬度及强度换算表·····	277
附录二 常用钢材热处理工艺参数·····	281
主要参考文献	

第一篇 金属学基础

第一章 纯 金 属

§ 1—1 金属键

在已知的一百多种元素中，有三分之二以上是金属元素。金属元素除汞（Hg）外，常温下均为晶态固体。各种金属不同程度地存在以下共性：良好的导电性和导热性，正的电阻温度系数，良好的延展性，特殊的金属光泽，等等。金属的这些共性是由于金属原子之间特殊的结合方式——金属键（图1—1）决定的。

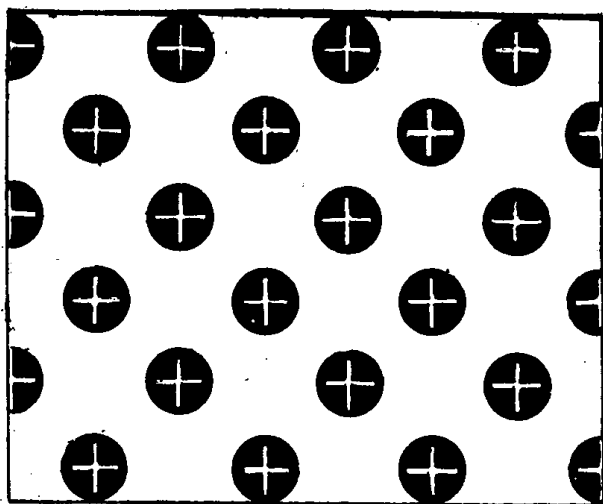


图1—1

众所周知，元素周期表中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ族元素是典型的金属元素，它们在原子结构上的特点是具有较少的外层电子，一般为1~3个。由于满层电子的屏蔽作用，使带正电的原子核与外层电子之间的静电引力不大，在外界因素的影响下，容易失去外层电子（价电子）而成为金属正离子。失去的价电子在金属正离子间自由运动，并为全部原子所共有，称之为自由电子或电子气。金属离子（或原子）规则地沉浸在电子气中，通过正离子与电子气间的静电引力，使金属原子聚合在一起，这就是

金属键。金属键的特点是没有饱和性和方向性，它可以粗略地解释金属性能的一般特点。

金属中的电子气在电位差作用下作定向运动，形成电流，因而显示出良好的导电性；随着温度升高，原子热振动的振幅加大，使电子气运动阻力——电阻升高，故金属具有正的电阻温度系数；原子热振动对金属的导热性起主要作用，但自由电子与原子碰撞同样对导热性也有贡献，所以金属具有良好导热性；在外力作用下，金属原子之间发生相对滑移时，金属键始终保持着，所以显示出良好的延展性，如图1—2所示；金属受到光的照射时，吸收了能量而被激发到高能状态的电子回到低能量的基态时，以光的形式释放出能量，故金属具有光泽，等等。

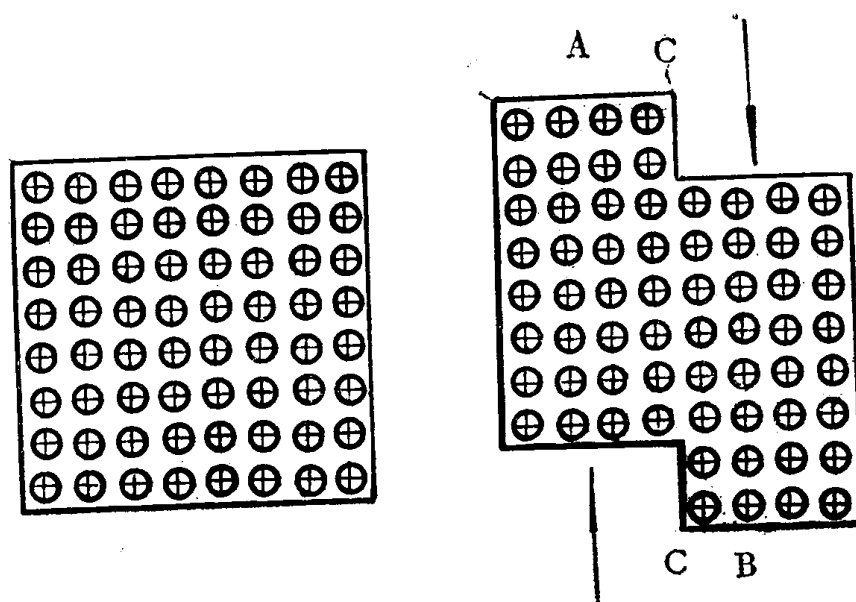


图1—2

§ 1—2 金属的晶体结构

由于金属键没有饱和性与方向性，金属正离子（或原子）均匀、对称、紧密地沉浸在电子气中，形成规则的聚集状态。所以金属在一般情况下都是晶体，如图1—3（a）所示。

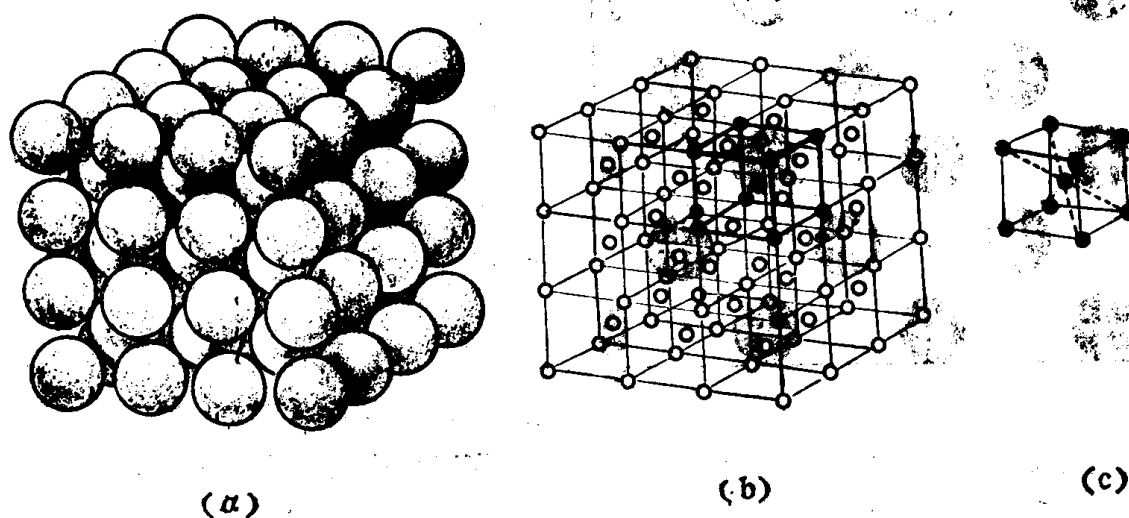


图1—3

一、晶体结构的基本概念

一块晶体是由无数的金属原子组成的，每个原子可以看成是具有一定尺寸（ $\text{\AA}$ 为单位）的小球。象图1—3（a）那样，把这无数多的小球描绘出来去分析金属的晶体结构，显然是极不方便的，为此，给出以下的概念。

1. 晶格

用假想的几何线条，通过各原子中心，把所有的原子串联起来，得到如图 1—3 (b) 所示的空间格子，格子的结点则表示各原子中心的平衡位置。这样一种空间格子反映了实际原子的排列规律，显示了金属晶体结构的全部特点。我们把这样一种能反映晶体中原子排列规律特点的空间格子叫“晶格”。

2. 晶胞

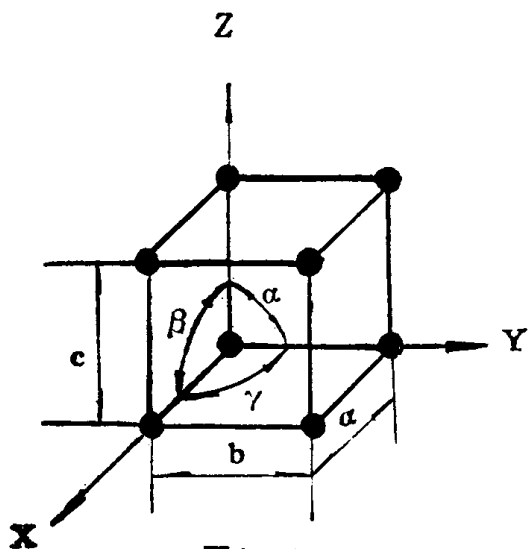


图1—4

分析图1—3 (b) 所示晶格可知，它是由图1—3 (c) 所示的最小几何单元在三维空间多次重复构成的，晶体结构的所有特点都可以从这个最小几何单元上反映出来。我们把这样一种能反映晶体中原子排列特点的最小几何单元叫“晶胞”。通过分析晶胞特点来考察晶体结构的全部特征，显然是很方便的。

晶胞的形状和大小可以用三条棱边长度 a 、 b 、 c 和三条棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 六个参数来描述，如图1—4所示。棱边长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数，一般在 $1 \sim 7 \text{ \AA}$ 之间。

二、常见金属的晶格类型

x射线结构分析表明，绝大多数金属的晶格类型属于以下三种：体心立方晶格，面心立方晶格，密排六方晶格，见表1—1。

1. 体心立方晶格

图1—5所示为体心立方晶胞示意图。晶胞每个顶点上有一个原子，立方体的中心还有一个原子。属于体心立方晶格的金属有： α —Fe、 δ —Fe、Cr、Mo、W、V、Nb、 β —Ti、Na、K、Ba、 β —Zr、Ta等。

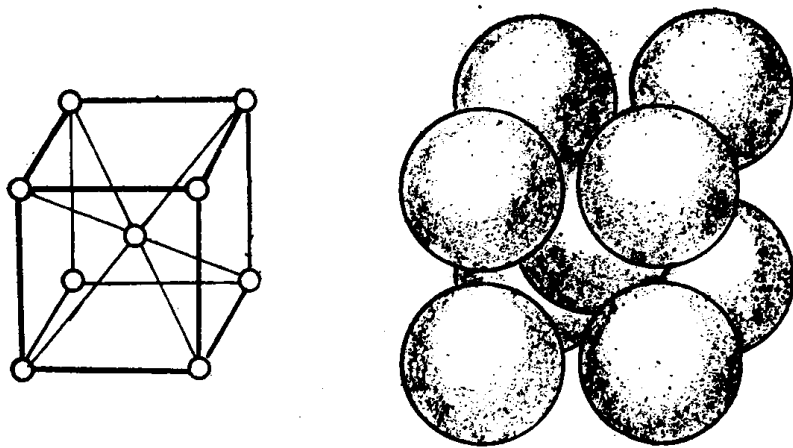


图1—5

体心立方晶胞的六个参数是： $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

体心立方晶胞每个顶点上的一个原子同时属于八个晶胞，因此每个晶胞只占 $1/8$ 个原子。一个体心立方晶胞内所真正含有的原子数为：

$$N = 1 + \frac{1}{8} \times 8 = 2 \text{ (个)}$$

按原子刚性堆积的几何模型（见图1—5），显然晶胞体积并不完全为原子体积所占，存在一定的空隙。为表示原子堆积的紧密程度，给出致密度的概念：一个晶胞中原子本身所占有的体积与该晶胞的体积之比叫致密度。可用公式表示：

$$K = \frac{NV_a}{V}$$

式中 K —致密度；
 N —晶胞中所含原子数；
 V_a —单个原子体积；
 V —晶胞体积。

设体心立方晶胞原子半径为 r ，则晶格常数 $a = \frac{4}{\sqrt{3}}r$ （见图1—6），故体心立方晶

格的致密度：

$$K = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}}r\right)^3} = \frac{\sqrt{3} \pi}{8} = 0.68$$

这就意味着在体心立方晶格中，原子体积只占68%、而其余32%则是空隙。

2、面心立方晶格

图1—7为面心立方晶胞示意图。从此图中看到，晶胞每个顶点上有一个原子，立方体每个侧面中心有一个原子。属于面心立方晶格的金属有： r —Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pt、 β —Co、Pb、Ca等。

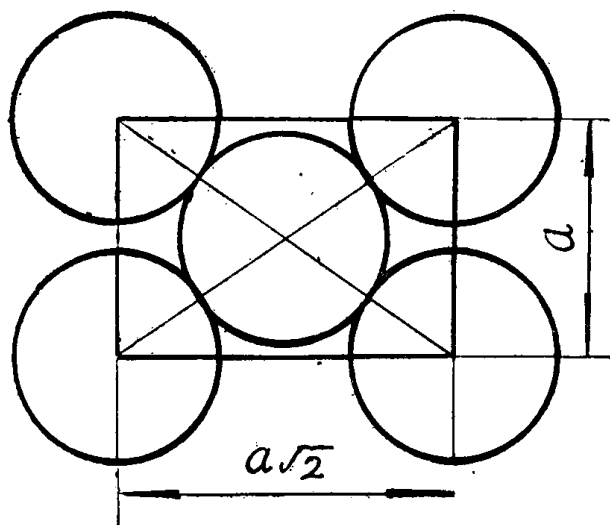


图1—6

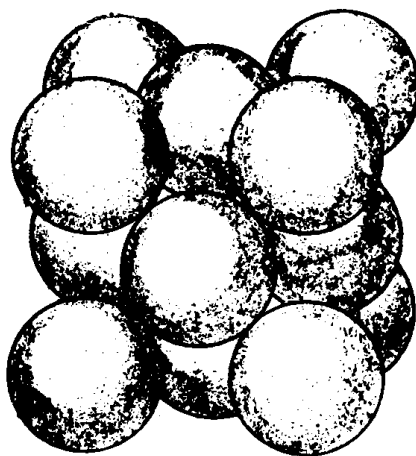
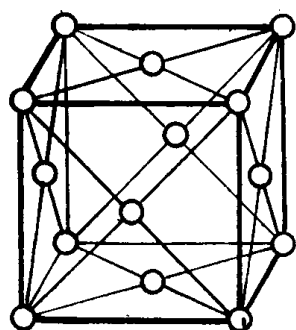


图1—7

面心立方晶胞的六个参数与体心立方晶胞相同，也是 $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

面心立方晶胞每个侧面中心的原子同时属于两个晶胞，故一个面心立方晶胞含有的原子数为：

$$N = \frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4 \text{ (个)}$$

设面心立方晶胞的原子半径为 r ，则晶格常数 $a = \frac{4}{\sqrt{2}}r$ （见图1—8），故面心立方晶格的致密度：

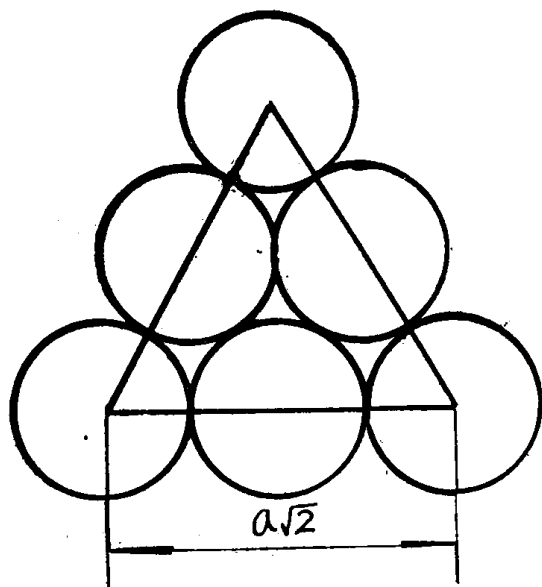


图1—8

$$K = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{2}}r\right)^3} = \frac{\sqrt{2} \pi}{6} = 0.74$$

3、密排六方晶格

图1—9为密排六方晶胞示意图。该晶胞呈六方柱体，在柱体的十二个顶角上各有一个原子，上下两个六边形底面的中心各有一个原子，六方柱体中间三个均匀分布的间隙里各有一个原子。属于密排六方晶格的金属有：Mg、Zn、Cd、 α -Ti、 α -Co、 α -Zr、Be等。

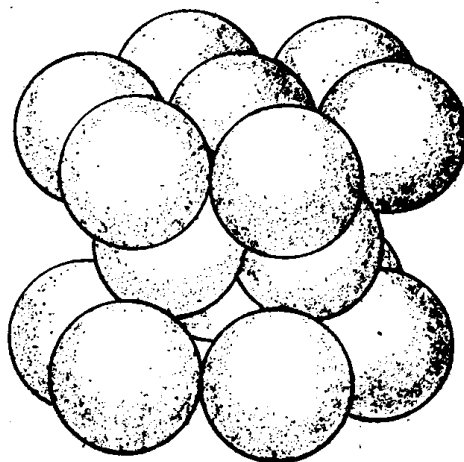
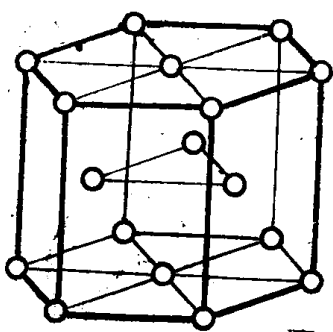


图1—9

密排六方晶胞的六个参数是： $a = b \neq c$ ； $\alpha = \beta = 90^\circ$ ； $\gamma = 120^\circ$ 。 a 表示底面六边形的边长， c 表示六方棱柱体的高度，晶胞内三个原子位于 $\frac{1}{2}c$ 高度上。在理想情况下，

通过简单的几何计算可知： $c/a = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$ 。

密排六方晶胞每个顶角上的原子同时属于六个晶胞，故一个密排六方晶胞含有的原子数为： $N = 3 + \frac{1}{2} \times 2 + \frac{1}{6} \times 12 = 6$ （个）

设密排六方晶胞的原子半径为 r ，则晶格常数 $a = 2r$ （见图1—10）。故密排六方晶格的致密度：

$$K = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{6 \times \frac{1}{2} a \cdot \sqrt{a^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \times 1.633a}$$

$$= \frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{1}{2} \times 2r \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2r \times 1.633 \times 2r}$$

$$= \frac{2\pi}{3\sqrt{3} \times 1.633}$$

$$= 0.74$$

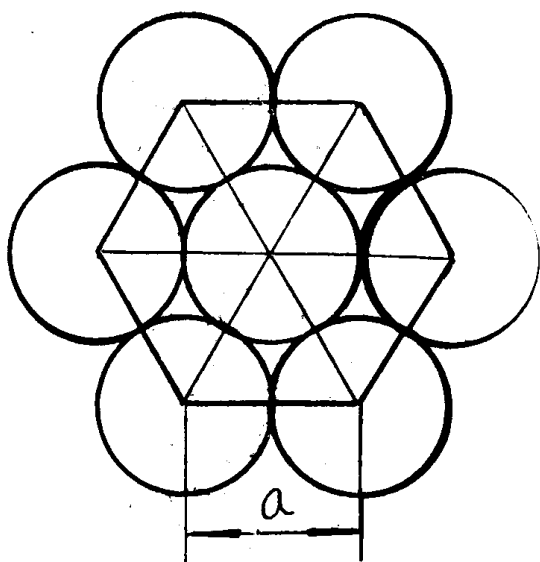


图1—10

密排六方晶格与面心立方晶格的致密度相同，说明在最密排的晶面上原子排列情况完全相同（见图1—8和图1—10），只是密排面的堆垛次序不同；面心立方的堆垛次序为ABCA BC……，而在密排六方中堆垛次序为AB AB……。

三、晶面指数和晶向指数

在晶体学中通过原子中心的平面叫“晶面”，通过原子中心的直线叫“晶向”。金属的许多性能以及金属中发生的许多现象都和某些特定的晶面和晶向有着密切的关系。例如，单晶体金属在力学性能上的各向异性，其原因是不同晶面和晶向上原子排列情况不同。为了便于研究和表述不同晶面和晶向的原子排列特点，有必要给出各晶面和晶向以一定符号，这就是晶体结构的数字表示法——晶面指数和晶向指数（又叫 Miller 指数）。

1、晶面指数（hkl）

晶面指数是表明晶体中某一晶面在空间方位的一组数字。换言之，只要给出某一晶面指数，我们就知道它代表晶体中哪一个晶面。

对于立方晶系，确定晶面指数的步骤如下：

（1）确定坐标。坐标原点选在待定晶面之外，以晶格的三条棱边为OX、OY、OZ轴，晶格常数 a 、 b 、 c 分别为单位长度；

（2）找出待定晶面在OX、OY、OZ轴上的截距 x 、 y 、 z ；

(3) 取 x 、 y 、 z 的倒数 $\frac{1}{x}$ 、 $\frac{1}{y}$ 、 $\frac{1}{z}$ ，并化为最小整数 h 、 k 、 l ，其值填入圆括弧

内，即为所求之晶面指数 (hkl) 。

例如，图1—11及表1—2具体说明了面心立方晶格三个晶面指数的求法及各晶面原子排列特点。

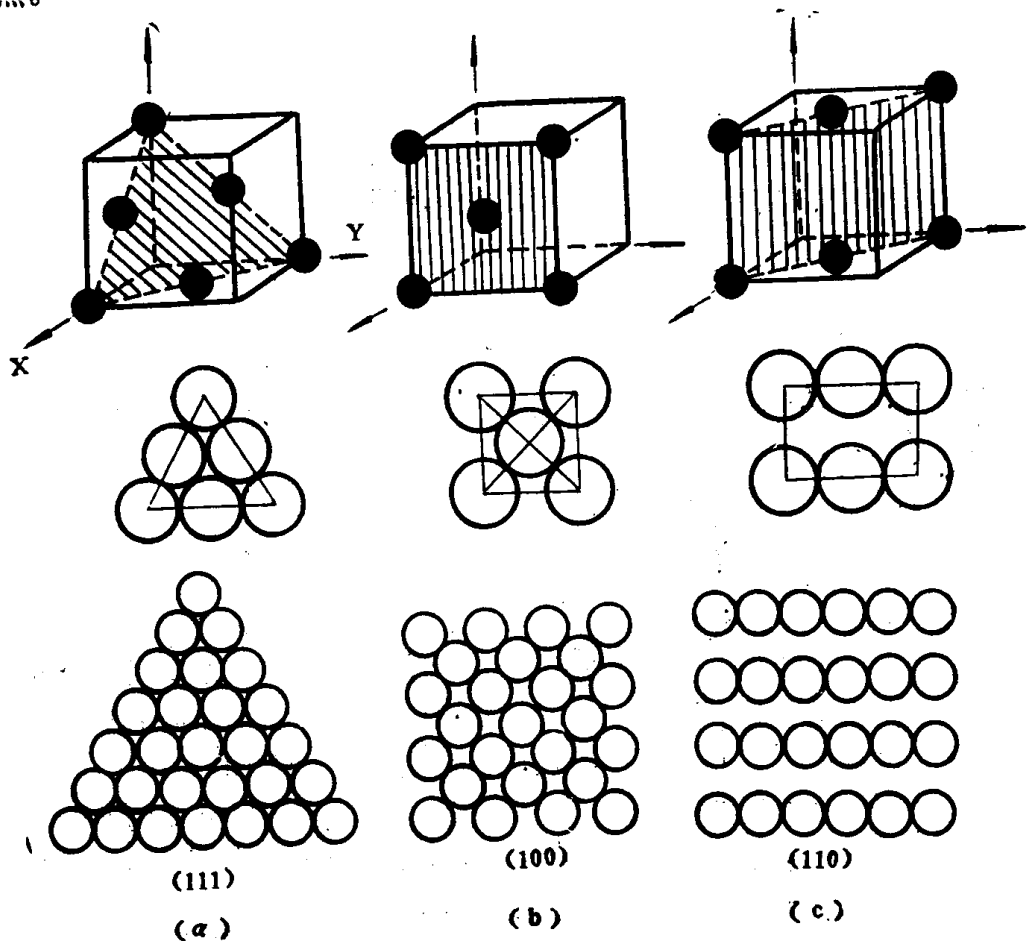


图1—11

表1—2 晶面指数的求法

项 目	图 号	图1—11 (a)	图1—11 (b)	图1—11 (c)
	数 据	OX OY OZ	OX OY OZ	OX OY OZ
	座 标			
座 标 截 距		1 1 1	1 ∞ ∞	1 1 ∞
截 距 倒 数		$\frac{1}{1}$ $\frac{1}{1}$ $\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$ $\frac{1}{\infty}$ $\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{1}$ $\frac{1}{1}$ $\frac{1}{\infty}$
最 简 整 数		1 1 1	1 0 0	1 1 0
晶 面 指 数		(111)	(100)	(110)
晶 面 形 状		等边三角形	正方形	矩形
原 子 密 度		大	中	小

这里应指出二点：

一是由于坐标原点选择的任意性， (hkl) 表示的是一组原子排列情况相同的平行的晶面。例如，图1—12中晶面 I 以 O_1 为坐标原点时晶面指数为 (110) ，平行晶面 II 以 O_2 为坐标原点时晶面指数也为 (110) 。对于同一晶面 I，以 O_1 为坐标原点时晶面指数为 (110) ，以 O_2 为坐标原点时晶面指数为 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 。可见，数字及排列顺序完全相同，而符号完全相反的晶面指数实际上也是指同一组平行晶面。

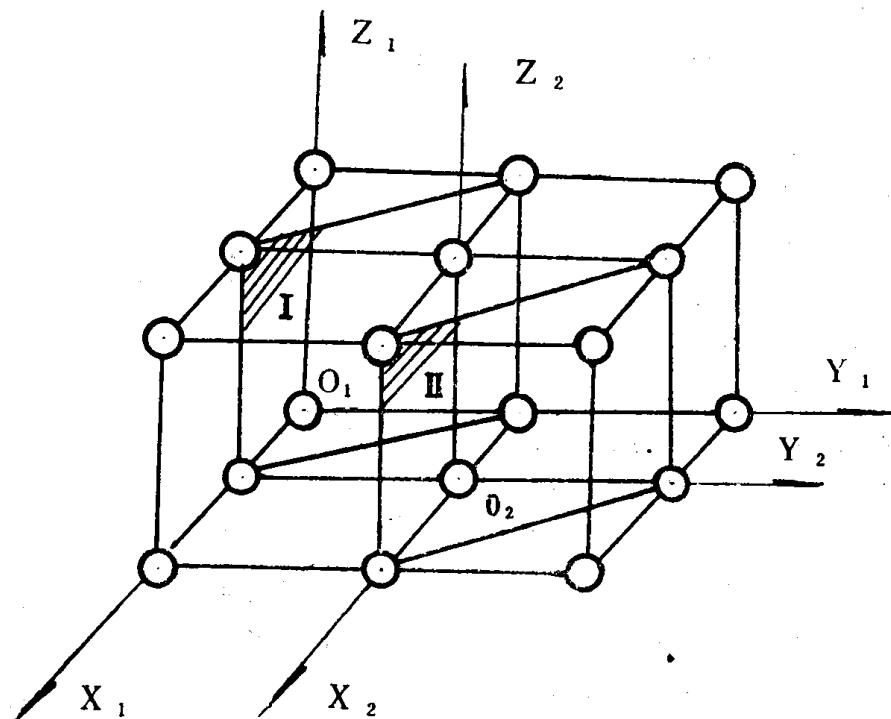


图1—12

二是立方晶格中，由于原子排列具有高度的对称性，往往存在着许多组原子排列情况完全相同而在空间并不平行的对称晶面。例如，图1—13所示的面心立方晶格的 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 四组晶面原子排列情况完全相同，只是互不平行，我们把这些晶面叫晶面族。同一晶面族中各晶面指数的特点是数字相同，但排列顺序及符号可能不同，规定用 $\{hkl\}$ 表示同一晶面族内所有的晶面。

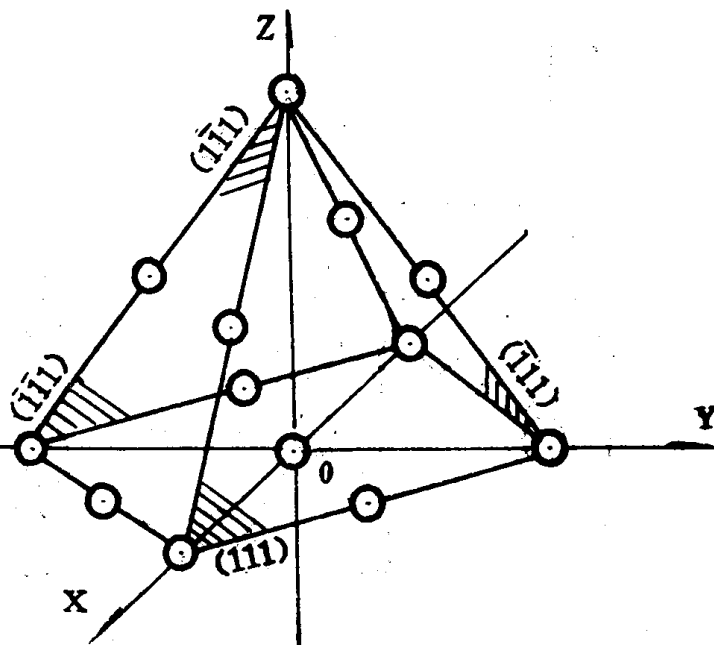


图1—13

2. 晶向指数 $[uvw]$

晶向指数是表明晶体中某一晶向（即原子列）在空间取向的一组数字，只要给出晶向指数，我们就知道它具体指的那个晶向。

立方晶系确定晶向指数的步骤如下：

- (1) 确定坐标。坐标原点选在待定晶向上，以晶格的三条棱边为 OX 、 OY 、 OZ 轴，晶格常数 a 、 b 、 c 为单位长度；
- (2) 找出待定晶向上距坐标原点 O 最近的结点的坐标值 (x, y, z) ；
- (3) 将坐标值 (x, y, z) 化为最小整数 u, v, w ，并填入方括弧中，即为所求之晶向指数 $[uvw]$ 。

图1—14为体心立方晶格的几个晶向指数。

同晶面指数相似，这里也应指出：

由于坐标选择的任意性， $[uvw]$ 所表示的并非某一特定晶向，而是一组原子排列情况相同的平行晶向。由于立方晶系高度的对称性，存在着许多组排列情况相同而在空间取向不同的晶向，统称为晶向族，用 $\langle uvw \rangle$ 表示。如图1—15所示体心立方晶格的六个侧面对角线上共有十二个晶向，它们的原子排列相同只是空间取向不同，属于同一晶向族，可用 $\langle 110 \rangle$ 表示。

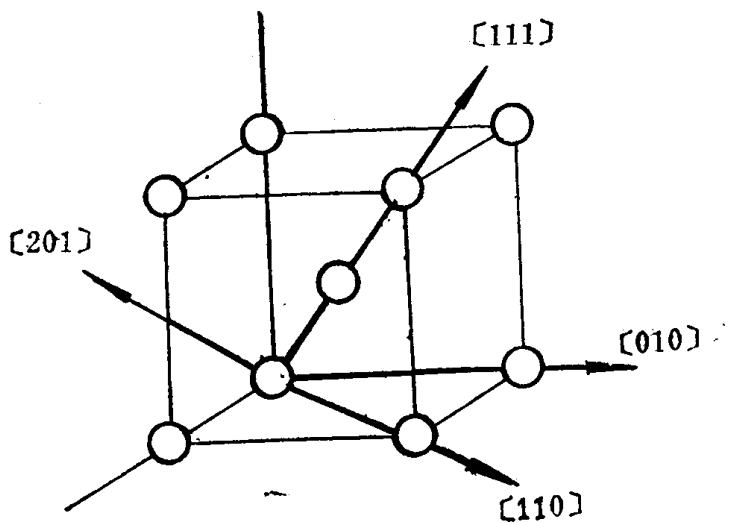


图1—14

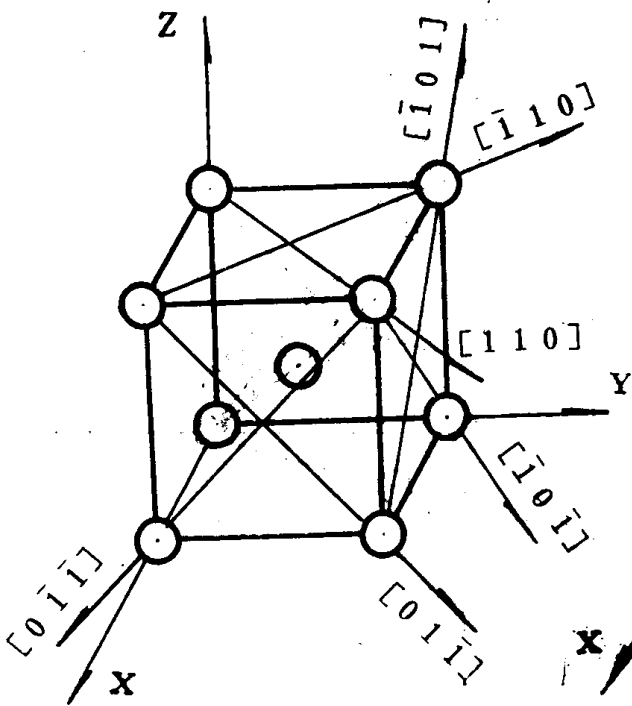


图1—15

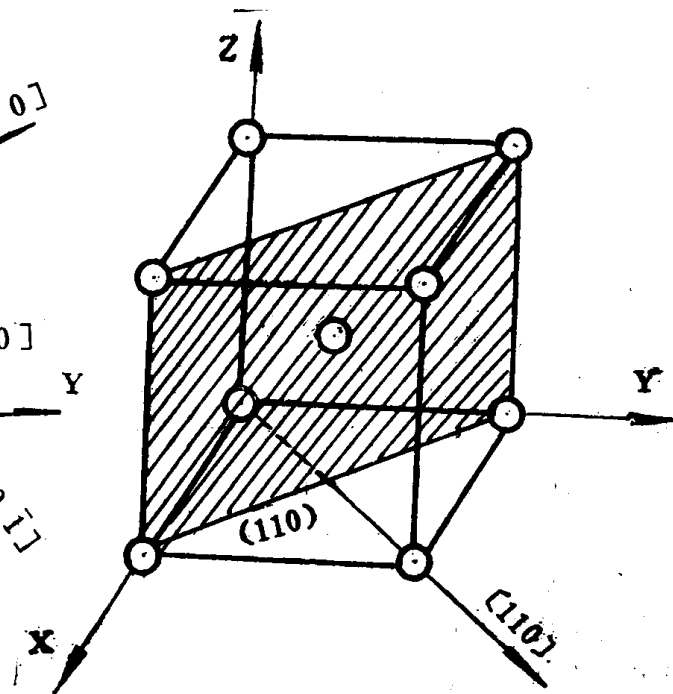


图1—16

若在立方晶系中画出指数相同的晶向与晶面，发现它们是相互垂直的，如图1—16所示。

3. 六方晶系的晶面指数和晶向指数

立方晶系可用三个坐标求出晶面与晶向指数，而对六方晶系必须用四个轴定向才能反映出晶体结构的对称性特点，即用四个指数(hkil)表示晶面，用四个指数[uvtw]表示晶向，如图1—17所示：底面六边形中心为坐标原点O， x_1 、 x_2 、 x_3 为三个坐标轴，垂直轴为Z。根据矢量相加原则可知： $i = -(h+k)$ ， $t = -(u+v)$ 。如图1—17中OA的晶向指数求法是：

点A坐标值为 $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -1, 0)$ ，

化为最小整数并填入方括弧中得晶向指数 $[11\bar{2}0]$ 。晶面H的指数求法是：晶面H在四个坐标轴上的截距为1、1、 $-\frac{1}{2}$ 、 ∞ ，取倒数并化为最小整数得晶面指数为 $(11\bar{2}0)$ 。

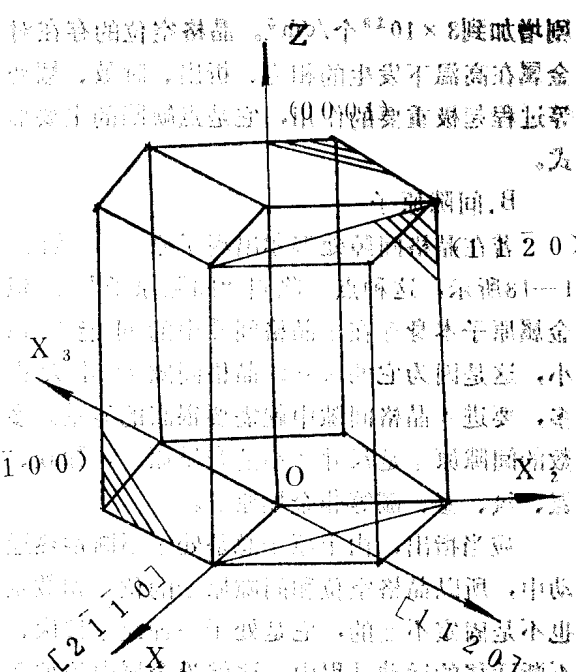


图1—17

四、实际金属的晶体缺陷

工程上所使用的实际金属，由于结晶、压力加工、热处理等等因素的影响，内部原子排列远非上述的理想情况，晶体结构上存在着许多缺陷，这些缺陷的存在对金属的物理、化学、机械、工艺性能等产生重大影响。按晶体缺陷的几何特征可分为点缺陷、线缺陷、面缺陷三类。

1. 点缺陷

金属晶体中三维方向尺寸都很小（不超过几个原子大小）的缺陷叫“点缺陷”。点缺陷有以下两种基本形式：

A. 晶格空位

前已述及，晶格结点上的原子，总是以其平衡位置为中心在不断地做热振动。温度越高热振动能量越大。温度一定时，原子热振动的平均能量也一定。但是各原子的能量并不完全相等，在某一时刻，有些原子的能量高于平均值，有些原子的能量低于平均值，这种现象叫“能量起伏”。某些高能量的原子，特别是晶体表面以及晶界、孔洞、裂纹等内表面附近的高能量原子，有可能克服周围原子对它的束缚作用，脱离原来的平衡位置而逐步迁移到表面上去，使其原来位置或迁移途径上的某个晶格结点产生空位，这种点缺陷叫“晶格空位”，如图1—18所示。

既然晶格空位的形成是由原子热振动引起的，所以随温度升高，晶格空位的平均浓度也急剧升高。例如在室温下，铝的晶格空位浓度是 8×10^{-10} 个/cm³，而在660℃时急