

位错基础

陈进化 编著

上海科学技术出版社

内 容 简 介

本书是专为初学者编写的位错理论基础读本。书中从位错基本模型出发,系统而简明地讲述位错的基本概念和基础理论,对位错在强度和塑性变形中的应用亦有所介绍。全书深入浅出,自成体系,适合工程技术人员自学参考和用作高等学校各热加工专业的教学参考书。

2066/06

封面设计 卜允台

位 错 基 础

陈进化 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 6.75 字数 145,000

1984 年 12 月第 1 版 1984 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—5,000

统一书号: 15119·2365 定价: 1.15 元

前 言

随着位错理论越来越广泛地应用于金属强度的微观机制,有关专业的技术人员越来越感到掌握位错理论知识的必要。本书是根据作者近年来为高校金属材料等专业的学生和研究生讲授《位错理论基础》时所写的一部分讲义整理而成的,目的是向初学者提供一个便于学习的位错理论基础读本。

本书在内容编排顺序上,力求按照认识规律由浅入深,以便读者学会了前面的内容,就有条件学习后面的内容,循序渐进地迈入位错理论之门。除了着重介绍有关位错的基本知识和基础理论之外,还在第一章介绍了必需的准备知识,并在最后一章概要介绍了应用位错机制阐明的强度理论。

本书的编写是在多方面的敦促和帮助下着手的。承北京钢铁学院章守华教授和刘国勋教授对本书的编写予以热情鼓励和支持;天津大学陈敏熊副教授在百忙中仔细审阅了全稿,提出颇多宝贵意见;费振奋同志为本书图稿的描绘做了不少工作;陶岚琴同志对本书的定稿出版做了有益的工作,在此谨向他们深致谢意。

限于作者的水平,书中难免有疏漏和谬误之处,恳请有关专家和读者批评指正。

陈 进 化

1983年3月于沈阳

目 录

第一章 晶体缺陷和晶体的塑性变形	1
§ 1-1 晶体结构	1
一、晶体与晶格	1
二、晶面指数和晶向指数	5
(一)立方晶体的晶面指数	6
(二)立方晶体的晶向指数	9
(三)六方晶体的晶面指数和晶向指数	10
(四)原子坐标位置符号	13
三、常见金属的晶体结构	13
(一)三种金属晶体的晶胞结构	13
(二)金属晶体中原子的堆垛方式	15
§ 1-2 晶体缺陷	17
一、晶体中的原子平衡位置与结合能	18
二、晶体缺陷及其能势	19
(一)空位、间隙原子及其能势	20
(二)界面和界面能	24
§ 1-3 晶体的塑性和强度	29
一、完整晶体的塑性变形方式	29
(一)滑移	29
(二)孪生	33
二、完整晶体的理论切变强度	37
三、位错理论的产生	40
第二章 位错与柏氏矢量	42
§ 2-1 滑移与位错	42

§ 2-2 两种基本位错模型	43
一、刃型位错	43
二、螺型位错	44
§ 2-3 柏氏矢量	46
一、柏氏矢量及其表示方法	46
二、柏氏回路	47
三、柏氏矢量的守恒性	49
四、柏氏矢量的意义	53
§ 2-4 混合位错	54
§ 2-5 位错的密度	56
第三章 位错的运动	58
§ 3-1 位错的滑移	58
一、位错的滑移机理	58
二、位错滑移面与晶体滑移面的关系	61
三、位错的滑移方向	62
四、位错滑移与晶体滑移	63
§ 3-2 位错的攀移	66
§ 3-3 关于位错运动对晶体体积的影响	68
第四章 位错的交割与割阶	70
§ 4-1 位错交割与割阶的概念和分析方法	70
一、交割、割阶与扭折	70
二、割阶的最终状态	72
三、分析交割与割阶的步骤和方法	73
§ 4-2 几种典型的位错交割	75
一、柏氏矢量互相平行的两刃型位错的交割	75
二、柏氏矢量互相垂直的两刃型位错的交割	76
三、刃型位错与螺型位错的交割	77
四、两螺型位错的交割	78
§ 4-3 带割阶的位错运动	78

一、带小割阶的位错运动	79
二、带位错偶极的位错运动	80
三、带大割阶的位错运动	81
第五章 位错的弹性性质	82
§ 5-1 弹性连续介质、应力和应变	82
一、弹性连续介质	82
二、应力分量	83
三、应变分量	84
四、弹性系数	85
§ 5-2 位错的应力场	87
一、螺型位错的应力场	88
二、刃型位错的应力场	90
§ 5-3 位错的应变能	92
§ 5-4 位错的受力	95
一、外加应力场作用在位错线上的力	95
二、位错的线张力	96
三、位错间的相互作用力	97
(一)相互平行的两个螺型位错间的作用力	98
(二)相互平行的两个刃型位错间的作用力	100
(三)其它情况的位错之间的作用力	102
(四)晶体表面作用于位错上的力	103
(五)位错运动的晶格阻力——派-纳力	104
§ 5-5 位错与点缺陷的交互作用	105
一、球状对称点缺陷模型及其与位错的作用	106
二、非球对称的点缺陷与位错的作用	108
三、关于空位与位错的作用	110
第六章 位错的形成与增殖	111
§ 6-1 位错的形成	111
§ 6-2 位错的增殖	115

一、弗兰克-瑞德增殖机理	116
二、位错源的开动	121
第七章 金属晶体中的位错	124
§ 7-1 金属晶体中的全位错	125
§ 7-2 堆垛层错	126
§ 7-3 不全位错	131
一、两种不全位错及其形成方式	131
(一)肖克莱不全位错	131
(二)弗兰克不全位错	132
二、不全位错柏氏矢量的测定	135
三、不全位错的分析方法	136
§ 7-4 位错反应和扩展位错	138
一、位错反应	138
二、位错反应的条件和判据	139
三、扩展位错	142
四、位错的组态转变	143
五、位错束集	146
§ 7-5 罗曼-柯垂尔位错与其它不动位错	149
一、罗曼-柯垂尔位错	149
二、 $\frac{1}{3}\langle 111 \rangle$ 型不动位错	151
三、位错反应的晶胞模型分析法	153
§ 7-6 汤普森四面体和汤普森符号	156
§ 7-7 超点阵中的位错	160
第八章 位错观测技术	165
§ 8-1 浸蚀坑法	166
§ 8-2 缀饰法	169
§ 8-3 电子显微分析	170
一、透射法	170

二、水纹法	170
三、电子衍射法	172
§ 8-4 X 射线衍射法	174
§ 8-5 场离子显微分析	174
第九章 金属强化的位错机制	177
§ 9-1 加工硬化机制	177
一、加工硬化现象——单晶体的 σ - ϵ 曲线	177
二、晶体在滑移时的几何硬化	178
三、几何硬化的位错机制—— σ - ϵ 曲线三阶段的解释	182
§ 9-2 晶界强化机制	184
一、多晶体的强化与结构因素	184
二、晶界强化机制	186
(一)晶界的位错塞积	186
(二)霍尔-配奇关系	190
§ 9-3 固溶强化机制	192
一、溶质原子与位错的交互作用	192
(一)弹性交互作用	192
(二)化学交互作用和电化学交互作用	197
二、有序强化机制	197
(一)反相畴界的界面能	198
(二)有序结构与无序结构之间的界面能	199
§ 9-4 沉淀相强化机制	201
一、位错绕过机制	202
二、位错切过机制	204

第一章 晶体缺陷和晶体的塑性变形

位错作为一种缺陷存在于晶体之中，对晶体的塑性、强度、断裂等力学性质发生很大的影响。因此，人们常用晶体结构的参数表示位错组态，并通过晶体中原子间的结合力、结合能，揭示位错及其它缺陷对晶体力学性质影响的实质。为了掌握位错的基本理论，首先必须掌握晶体结构、晶体缺陷和晶体塑性变形的有关基本知识。

§1-1 晶体结构

一、晶体与晶格

晶体是由离子、原子或分子有规律地排列而构成的，即构成晶体的质点按一定规律排列着。质点在空间的分布，具有周期性与对称性。

人们习惯用空间几何图形来抽象地表示晶体结构。就是把晶体质点的中心，用直线联起来，构成一个空间格架，如图1-1所示，这样的空间格架，叫晶体格子，简称晶格，质点的中心位置，称为晶格的结点，结点仅有几何意义，并不真正代表任何质点，由这些结点构成的空间总体，称为晶体点阵。实际上，它就是空间格子。晶格的每一结点，因在点阵中，又叫阵点。

由图1-1所见，整个晶体可看作是由一个结点沿三个不

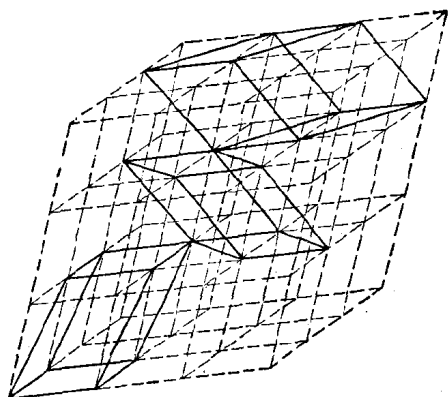


图 1-1 晶体点阵及晶胞的不同取法

同的方向，各按一定距离重复地出现结点而形成的。每个方向上结点间的距离，称为这个方向上的晶体周期。显然，同一晶体，不同方向的周期不一定相同。由于晶体具有周期性，我们可以从晶格中任取一个单元，表示晶体结构的特征。同一晶体点阵，可以有不同取单元方法。如图 1-1 的黑线所表示的不同单元，都可以把该晶格的特征表示出来。为了使这个单元尽量简单，又能充分表示出晶体的结构特点，所选取的单元须具备如下条件：它应能充分表示出晶体的对称性；它的三条相交棱边应尽量相等，或相等的数目尽可能地多；三棱边的夹角要尽可能地构成直角；在保证以上条件的前提下，单元的体积要尽可能地小。这样的最小晶格单元，称为晶胞。

一个晶胞可以用六个参数来表示，即 3 条棱边的长度 a 、 b 、 c 和 3 条棱边的夹角 α 、 β 、 γ ，如图 1-2。这 6 个参数，叫晶格特征参数。在确定了晶格特征参数之后，晶胞和由它表示的晶格也就确定了。

空间点阵中所有阵点的周围环境都是相同的，或者说，所有阵点都具有等同的晶体学位置。布拉非 (Bravais) 通过数

学运算指出：按照晶格特征参数之间关系的不同，可以把所有晶体的空间点阵划归为 7 类，即 7 个晶系，见表 1-1。其中参数关系最复杂的是 $a \neq b \neq c$ ， $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ 的三斜点阵，它的对称性最差。参数关系最简单的是 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 的立方点阵，它的对称性最高。在这两者

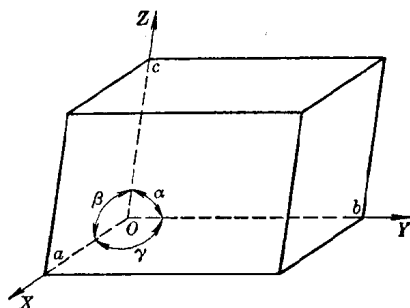


图 1-2 晶胞坐标及特征参数

之间，从三斜点阵到立方点阵，参数关系逐渐简单，对称性逐渐变强，可推演出其它几类点阵。在每一类点阵中，又因阵点在空间排列方式不同——是只占据在晶胞的顶角，或是还占据在它的上下底面的面心，各面的面心，晶胞的体心，而构成不同的点阵。因此，每类点阵又可分为简单的、底心的、面心的、体心的等 1~4 种点阵。究竟可分为几种，是由各类点阵的参数特征决定的，并不是每类点阵都可分为 4 种独立点阵。例如，三斜点阵只可能有简单三斜点阵 1 种。立方点阵，只可能有简单、面心和体心立方 3 种点阵。再多一种时，只要重取晶胞，便可把它变为既有的一种点阵；再少一种，便不能概括所有点阵。这样 7 个晶系，共可包括 14 种点阵，叫布拉菲点阵。

需要指出，金属晶体结构或其它晶体结构中质点的周围环境，不一定是相同的。例如，在图 1-3(a)、(b) 所表示的晶体中，A、B 两种原子的周围环境是各不相同的。但是，如果把互相对应的一对 A、B 原子看成一个阵点，即复合阵点，则每个阵点的周围环境就成为相同的了，它们分别成为由每

表 1-1 布拉菲点阵的结构特征

晶 系	参 数 关 系	种类名称	阵 点 坐 标
三斜系	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	简单三斜	$[0, 0, 0]$
单斜系	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	简单单斜	$[0, 0, 0]$
		底心单斜	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0 \right]$
六方系	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$	简单六方	$[0, 0, 0]$
菱方系	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	简单菱方	$[0, 0, 0]$
正交系	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	简单正交	$[0, 0, 0]$
		体心正交	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$
		底心正交	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0 \right]$
		面心正交	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0 \right] \left[\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2} \right] \left[0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$
正方系	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	简单正方	$[0, 0, 0]$
		体心正方	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$
立方系	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	简单立方	$[0, 0, 0]$
		体心立方	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$
		面心立方	$[0, 0, 0] \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0 \right] \left[\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2} \right] \left[0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$

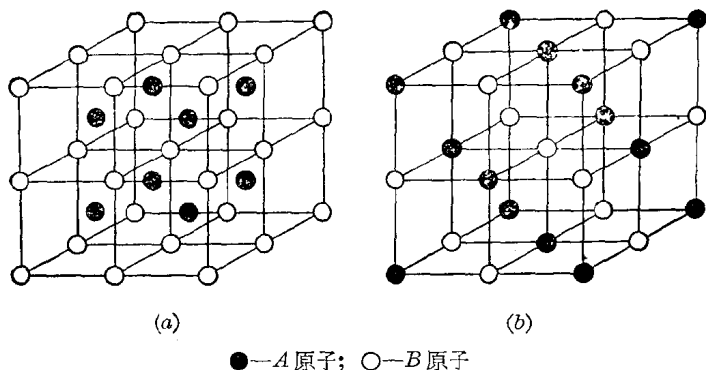


图 1-3 复合阵点构成的晶体点阵示例
(a) 简单立方的 AB 结构; (b) 面心立方的 AB 结构

对 A 、 B 原子构成的简单立方晶体(图 a)和面心立方晶体(图 b),皆为布拉菲点阵的一种,所以晶体点阵和具体晶体结构不同。晶体结构指的是晶体中原子或分子的排列情况,晶体结构的形式是无限多的。但是,任何一种晶体结构都可以按其阵点的周期性和对称性,被归到这 14 种点阵的一种中去。点阵则是把晶体结构中的原子或分子抽象为周围环境相同的阵点之后,描述晶体的周期性和对称性的图象。

二、晶面指数和晶向指数

研究分析晶体时,经常需要分析一定的晶面和晶向。晶体中不同质点构成的平面,叫晶面。一个晶面上的结点,在空间构成一个二维点阵。晶体中任何一个位向的一系列平行晶面,都可以包含晶体中所有的质点。如图 1-4 上粗黑线所表示的每一组平行晶面,都可以包含晶体的全部质点。

晶体中穿过任何一排原子的直线,构成一个晶轴。具有一定方向的晶轴,叫晶向。任一方向的所有平行晶向都可包含所有质点,任一质点也可以处于所有晶向上。

在分析晶体时，常需要指出不同的具体晶面和晶向，因而需要一种统一的符号，用以表示不同晶面和晶向的这种符号，分别叫晶面指数和晶向指数。有了这套符号，便可以确定任意晶面或晶向的空间位向；若已知晶面或晶向的位向，便可以给出相应的晶面或晶向指数。下面介绍常见的立方晶体及六方晶体的晶面指数和晶向指数的确定方法。

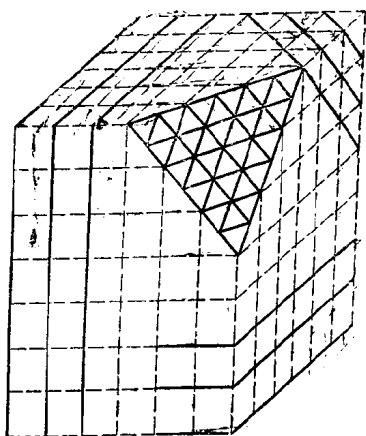


图 1-4 晶面组

号，分别叫晶面指数和晶向指数。有了这套符号，便可以确定任意晶面或晶向的空间位向；若已知晶面或晶向的位向，便可以给出相应的晶面或晶向指数。下面介绍常见的立方晶体及六方晶体的晶面指数和晶向指数的确定方法。

(一) 立方晶体的晶面指数

晶面指数以 (hkl) 表示， h 、 k 、 l 三个数字，是由所表示的晶面在一定晶胞坐标系中的 X 、 Y 、 Z 三轴上截距的倒数简化而来的。晶胞坐标的选取，是以不在要确定的晶面上的任何一个晶胞顶点为原点 O ，以交于此点的三条棱边为 X 、 Y 、 Z 三轴。如图 1-5 所表示的晶面，假设它在各轴上的截距以晶体周期为单位，分别为 x_1 、 y_1 、 z_1 ；将它们的倒数依 X 、 Y 、 Z 轴的顺序填入圆括号 $()$ 内，即为 $(\frac{1}{x_1}, \frac{1}{y_1}, \frac{1}{z_1})$ ，

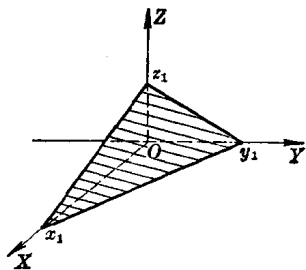


图 1-5 立方晶体晶面指数的标定

再按等比法则，将各数化简为最小整数，表示为 (hkl) ，这里 $h:k:l = \frac{1}{x_1} : \frac{1}{y_1} : \frac{1}{z_1}$ 。 (hkl) 即是这个晶面的晶面指数。

每一个晶面指数,代表的是一组平行晶面。因为它们在三轴截距的倒数,按等比法则化简后是一样的。当然,在一个固定坐标系中,同样指数的晶面组又可以分为位于坐标原点两侧的两个晶面组。它们的指数数字及数序相同,但正负号相反。在某个轴上的截距若是负数,经化简后,便在相应的数字上边标上“-”号,如与 (111) 晶面位于原点相反一侧的晶面,它的指数应为 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 。可见,所有位向相反的两组平行晶面,它们的晶面指数数字及数序一样,符号相反。其实,在晶体中坐标位向并无绝对的意义,因而那些数字、数序一样的指数(包括符号相反的),可以认为代表同一晶面。

下面举例说明确定立方晶体晶面指数的具体步骤。例如确定图1-6影线表示之晶面的晶面指数:

(1) 先确定晶胞坐标。坐标原点可以定在任一结点上,只要不将它定在要确定的晶面上。我们以 O 点为坐标原点。

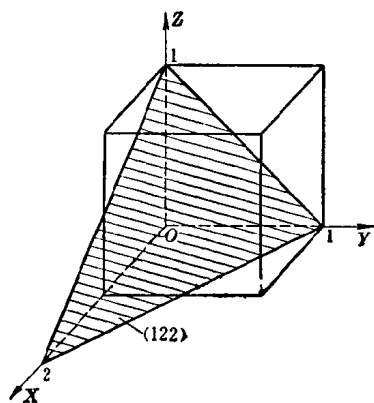


图1-6 标定立方晶体的晶面指数示例

(2) 量取晶面在 X 、 Y 、 Z 各轴上的截距。若以晶体周期 a 为单位,它们分别为2、1、1。

(3) 再取各截距的倒数,它们分别为 $\frac{1}{2}$ 、1、1。

(4) 将以上数字按等比法则化简为最小整数后,填入()内,为 (122) ,即是所要确定的晶面指数。用同样方法可以确定出图1-7(a)、(b)、(c)中影线所示的各晶面的指数分

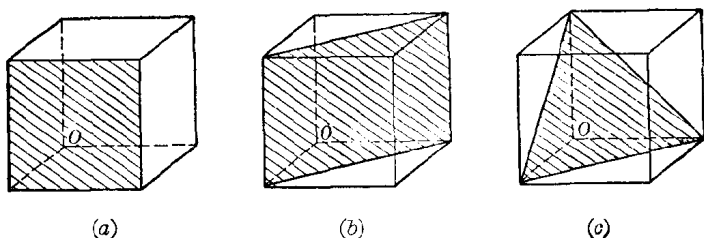


图 1-7 立方晶体重要晶面的晶面指数

(a) (100); (b) (110); (c) (111)

别为 (100)、(110)、(111)。

在对称性较强的晶体(如立方晶系)中, 往往有并不平行的两组以上的晶面, 它们的原子排列状况是相同的, 这些晶面构成一个晶面族。可以证明, 同一晶面族中不同晶面的指数, 数字相同, 只是数字和正负号不同。通常选用此晶面族的某一个最简便的晶面指数填在大括号 { } 内, 作为这个晶面族的指数, 叫晶面族指数, 记作 $\{hkl\}$ 。将 $\{hkl\}$ 中的 $\pm h$ 、 $\pm k$ 、 $\pm l$ 任意排列组合, 即可构成这个晶面族所包括的所有晶面的指数。如 $\{111\}$ 晶面族就包括 (111)、 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 八个不同坐标方位的晶面。实际上它们在晶体中是四个位向不同的平行晶面组, 即四组独立晶面。同样可推知, $\{110\}$ 则包括 12 个坐标方位不同的晶面, 即 6 组独立晶面。 $\{111\}$ 和 $\{110\}$ 这两个晶面族, 在分析立方晶体的形变与位错运动时, 经常要用到。

同一晶面族各平行晶面的面间距, 即任意两个平行晶面的垂直距离 d 是相同的。已知晶面指数 (hkl) 之后, 它的面间距 $d_{(hkl)}$, 可用数学方法计算出来。

对于简单立方晶体, 晶面指数越小, 其面间距越大, 晶面上原子排列也越密。反之, 指数越大, 晶面间距越小, 原子排

列越稀疏, 这由图 1-8 可以看得很清楚。在简单立方晶体中, $\{100\}$ 晶面的间距最大, 晶体周期最小, 原子密度最大。 $\{110\}$ 次之, $\{111\}$ 又次之。对于结构复杂一些的晶体, 还要通过具体的分析, 才能确定其原子排列最密晶面。如面心立方与体心立方晶体的最密的晶面, 分别为 $\{111\}$ 和 $\{110\}$ 。

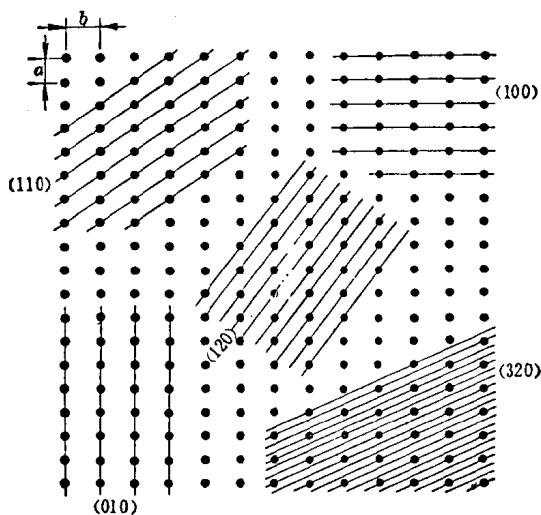


图 1-8 晶体中不同晶面的面间距
(a 、 b 分别为两坐标轴上的晶体周期)

(二) 立方晶体的晶向指数

和晶面指数相似, 晶向指数是表示晶体中一定晶向的符号, 以 $[uvw]$ 标志。其中 u 、 v 、 w 三个数字, 是所代表的晶向矢量在参考坐标系的 X 、 Y 、 Z 轴上的矢量分量经等比例化简而来的。

为确定图 1-9 中 OP 的晶向指数, 将坐标原点定在 OP 的任一结点 O 上, 把前方另一结点 P 的坐标数按 X 、 Y 、 Z 的顺序填在方括号 $[]$ 内, 表示为 $[uvw]$, 即是 OP 的晶向指数。