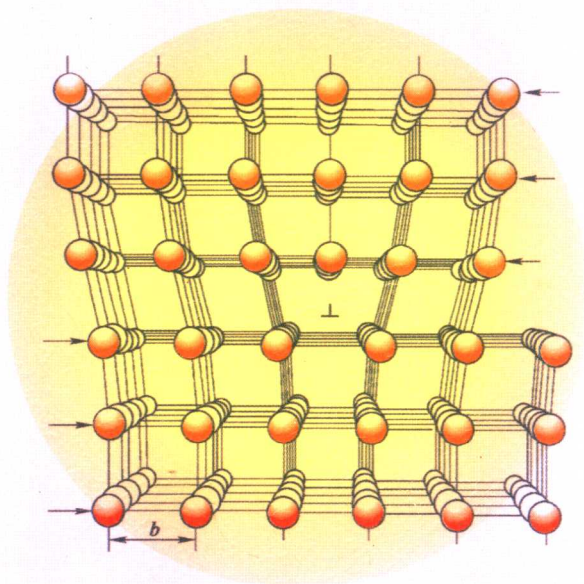


高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

位错理论及其应用

王亚男 陈树江 董希淳 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

077
126
1-

高等学校规划教材

位错理论及其应用

王亚男 陈树江 董希淳 编著

北 京
冶金工业出版社
2007

内 容 提 要

本书系统地介绍了位错的基本理论及其在工程领域中的应用,内容主要包括位错的结构,位错的弹性理论,位错的运动与交割,实际晶体结构中的位错,位错的来源及实验基础,位错理论的应用。

本书可作为金属材料及热处理和其他热加工专业以及冷加工专业的本科生及研究生的教材,也可供相关学科领域科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

位错理论及其应用/王亚男等编著. —北京:冶金工业出版社,2007.3

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4180-7

I. 位… II. 王… III. 位错理论—高等学校—教材 IV. 077

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 029940 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
责任编辑 宋 良 李枝梅 美术编辑 李 心 版面设计 张 青
责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4180-7

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007 年 3 月第 1 版,2007 年 3 月第 1 次印刷

148 mm×210 mm;5.125 印张;161 千字;155 页;1—3000 册

19.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书是近几年我们在辽宁科技大学讲授关于位错理论课程的讲义基础上,进行了大量修改和补充而成的。

位错理论自 20 世纪 30 年代诞生之日起,经过许多学者的研究和发展,其内容已经十分丰富,并成为了解固体材料尤其是金属材料的物理、化学和力学性质的重要基础。本书的内容既包含位错理论的最基本部分,又包含比较深入的部分,以期读者通过本书能够对位错理论及其应用有一个较完整的认识。不过,位错是一种微观的晶体缺陷,其研究方法无论是理论的还是实验的,都不简单,也不直观。因此,我们在写作时力求深入浅出,对一些较复杂的数学问题给出较详细的推导。但限于作者自身的水平,书中难免存在不妥之处,诚请读者指正。

写作过程中,参考了许多文献,并选用了一些图片和数据,在此向文献作者表示谢意。

编 者

2006 年 12 月

目 录

绪论	1
1 位错的结构 (Structure of Dislocation)	3
1.1 位错的基本类型 (Basic Types of Dislocation)	3
1.1.1 刃型位错 (Edge Dislocation)	3
1.1.2 螺型位错 (Screw Dislocation)	4
1.1.3 混合型位错 (Mixed Dislocation)	5
1.2 位错的结构特征	7
1.2.1 柏氏矢量 (Burgers Vector) 的确定	7
1.2.2 柏氏矢量的表示法	9
1.2.3 柏氏矢量的守恒性 (Conservation)	9
2 位错的弹性 (Elastic) 理论	12
2.1 弹性力学的基本知识	12
2.1.1 弹性体 (Elastic Solid) 及弹性连续介质	12
2.1.2 记号与正负	13
2.1.3 平衡微分方程	15
2.1.4 应变与位移的关系	19
2.1.5 应力与应变的关系	21
2.1.6 用位移分量表示平衡方程	22
2.2 直刃型位错的应力场 (Stress Field of a Straight Edge Dislocation)	24
2.2.1 应力场模型 (Stress Field Mode)	24
2.2.2 应力场的数学表达式	24
2.2.3 应力场的特点 (Characteristics of The Stress Field)	30
2.3 螺型位错的应力场 (Stress Field of The Screw Dislocation)	31

2.4 位错的应变能(Strian Energy of The Dislocation)	32
2.4.1 刃型位错的应变能	33
2.4.2 螺型位错的应变能	34
2.4.3 混合型位错的应变能	34
2.4.4 结论(Conclusion)	35
2.5 位错的线张力(Line Tension of Dislocation)	35
2.5.1 直线位错	36
2.5.2 弯曲位错(Curved Dislocation)	36
2.5.3 弯曲位错的向心恢复力(f)(Centripetal Restoring Force)	37
2.6 应力场对位错的作用力	38
2.6.1 求位错所受的力	38
2.6.2 位错受力(Subjected Force of Dislocation)的一般表达式	39
2.7 位错间的相互作用力(Interactive Force)	42
2.7.1 两个螺型位错间的相互作用力	43
2.7.2 两刃型位错间的相互作用力	45
2.7.3 刃型位错与螺型位错间的相互作用力	48
2.8 位错与溶质原子(Solute Atoms)的交互作用能	48
2.9 位错的半点阵(Semilattice)模型	51
2.9.1 P-N 模型及其基本公式	52
2.9.2 位错中心宽度(Dislocation Central Width)	55
2.9.3 位错移动所需的临界切应力(Critical Shear Stress) (即 P-N 力)	56
2.10 位错的塞积群(Dislocation Pile-up Group)	58
2.10.1 塞积群中位错的分布(Distribution)	59
2.10.2 塞积群对障碍物(Barrier)的作用力	60
3 位错的运动与交割	62
3.1 位错的运动(Dislocation Movement)	62
3.1.1 刃型位错的滑移(Slip)运动	62
3.1.2 螺型位错及混合型位错的滑移运动	63

3.1.3 刃型位错的攀移(Climb)运动	65
3.1.4 螺型位错的交滑移(Cross Slip)	67
3.2 运动位错的交割(Dislocation Intersection)	69
3.2.1 两个柏氏矢量互相垂直(Vertical)的刃型位错交割	69
3.2.2 两个柏氏矢量互相平行(Parallel)的刃型位错交割	70
3.2.3 两个柏氏矢量垂直的刃型位错与螺型位错的交割	70
3.2.4 两个柏氏矢量互相垂直的螺型位错交割	71
3.2.5 带割阶位错的运动	72
3.3 位错的增殖(Dislocation Multiplication)	74
4 实际晶体(Crystal)结构中的位错	76
4.1 实际晶体中位错的分类	76
4.2 实际晶体中位错的柏氏矢量	76
4.3 位错反应(Dislocation Reaction)	77
4.4 面心立方晶体(Face-centered Cubic Crystal)中的位错	78
4.4.1 堆垛层错(Stacking Fault)	78
4.4.2 不全位错(Partial Dislocation)	80
4.4.3 扩展位错(Extended Dislocation)	85
4.4.4 面角位错(Lomer-Cottrell Dislocation)	89
4.5 体心立方晶体(Body-centered Cubic Crystal)中的位错	90
4.5.1 全位错的合成反应(Synthetic Reaction of Perfect Dislocation)	91
4.5.2 层错(Stacking Fault)	92
4.5.3 不全位错	94
4.5.4 扩展位错	95
4.6 密排六方晶体(Hexagonal Close-packed Crystal)中的位错	97
4.6.1 层错	97
4.6.2 不全位错	98
4.6.3 位错的扩展	104
5 位错的来源及实验基础	106
5.1 位错概念的产生	106
5.2 位错的来源	108

5.3 位错的实验基础	111
5.3.1 浸蚀法(Etching Method)	112
5.3.2 缀饰法(Decorating Method)	113
5.3.3 透射电子显微(TEM)分析	115
5.3.4 X射线衍射分析(X-Ray Diffraction Analysis)	119
5.3.5 场离子显微分析(Field-Ion Microanalysis)	120
6 位错理论的应用	122
6.1 固溶强化效应(Solid Solution Strengthening Effect)	122
6.1.1 弹性交互作用(Elastic Interaction)	122
6.1.2 化学交互作用(Chemical Interaction)	124
6.1.3 电学交互作用(Electrical Interaction)	126
6.1.4 几何交互作用(Geometrical Interaction)	127
6.2 第二相粒子强化效应(Strengthening Effect of Second phase Particles)	130
6.2.1 可变形粒子的强化效应(Strengthening Effects of Deformable Particles)	131
6.2.2 不可变形粒子的强化效应	132
6.3 晶界强化效应(Grain Boundary Strengthening Effect)	135
6.3.1 小角度晶界的结构(Structure of Low Angle Grain Boundary)	136
6.3.2 大角度晶界的结构(Structure of High Angle Grain Boundary)	139
6.3.3 晶界能(Grain Boundary Energy)	141
6.3.4 晶界的特性(Grain Boundary Characteristics)	143
6.3.5 晶界对金属塑性(Metallic Plasticity)的影响	143
6.4 加工硬化效应(Work-Hardening Effect)	146
6.4.1 单晶体(Single Crystal)的加工硬化	146
6.4.2 多晶体的加工硬化	151
6.4.3 加工硬化的理论(Theory)分析	152
参考文献	155

绪 论

自 20 世纪 20 年代末起,人们对金属单晶的塑性变形进行了系统的研究。1926 年弗兰克尔(J. Frankel)按着晶体塑性变形是通过滑移面整体滑移这样的概念计算出的完整晶体的理论切变强度比当时用实验测得的切变强度值约高 1000 倍。为了解释这个差异,在 1934 年,泰勒(G. I. Taylor)、奥罗万(E. Orowan)及波兰伊(M. Polanyi)几乎同时提出了晶体中存在位错的假设,晶体在切应力作用下位错容易滑移,并引起塑性变形,该位错后来被称为刃型位错。1938 年弗兰克尔发现在外力作用下位错线的运动,提出了一种动态的位错点阵模型。1939 年柏格斯(J. M. Burgers)提出了螺型位错的概念和柏氏矢量,使位错的概念普遍化,并发展了位错应力场的一般理论,接着位错理论得到多方面的发展。1940 年派尔斯(R. Peierls)提出半点阵模型,到 1947 年在纳巴罗(F. R. Nabarro)的帮助下,计算出了使位错滑移所需的临界切应力(P-N 力)。从 1934 年位错提出以后,人们用来解释各式各样的塑性变形问题,并经历了大约 15 年之久的理论发展,但由于没有进行位错的直接实验观察,因此当时关于晶体中存在位错的问题,尚未获得实验的证明。因而在一部分解释塑性变形的位错理论中往往带有一定的任意性,使得当时部分科学家对位错理论持怀疑和非难态度。

自 1949 年之后,位错理论的发展进入了一个新时期。1949 年柯垂尔(A. H. Cottrell)提出位错与溶质原子的作用问题,用碳原子钉扎位错来解释钢中屈服点的现象获得成功(Cottrell 气团),弗兰克尔的螺型位错促进晶体生长的理论预告获得了令人信服的证实。1940 年布拉格(Bragg)的皂泡筏实验获得了位错存在的第一个“证据”,而后许多人几乎同时独立地在显微镜下观察到了位错的存在及其形状。特别是在 1956 年鲍曼(Bollman)在不锈钢中,赫许(P. B. Hirsch)在铝中独立地发现用透射电镜透过减薄到约 10^2 nm 的金属膜直接观察到位错和位错在应力作用下的运动,赫许在 20 世纪 80 年代初已制作了位错运动的影片,同时还有一些其他关于位错的实验结果。这对于晶体中位错的结构、分布、动力学性质

以及位错与塑性变形的关系等提供了确切可靠的资料,证实了位错理论的一些基本论点和许多细节,为进一步发展塑性变形的位错理论奠定了巩固的基础,使位错理论趋于成熟。

位错理论的骨架已经确定,这不仅表现在位错理论已完全能够解释塑性变形中的力学问题以及位错能通过实验直接观察到,重要的还在于位错理论的确立促进了其他理论的发展。例如 1940 年柏格斯和布拉格就提出了晶界的位错模型,20 世纪 50 年代这个模型得到了大量实验资料的证实,从而促进了晶界理论的发展。目前位错理论不仅仅局限于塑性变形等问题,在滞弹性、断裂、相变、晶体的电磁性能、晶体的光学性质以及超导体等领域位错理论也愈来愈重要。

位错理论的发展历史较短,还存在一些不完善之处。弗兰克和斯蒂兹(J.W. Steeds)在 1975 年的一篇“晶体位错”的评论中指出:位错有些理论是确切的,因为它们是纯几何的或纯形貌的。有些部分显然是近似的,然而却是可靠的。但现在有意义的问题是不能确信那些已做的近似的可靠性,因此必须依靠全部的理论方法以及观察和推测来谋求进一步发展。除了这些“近似”之外,在位错领域中迄今还没有完全解决的主要问题是怎样填补单个位错的性质和位错集团的行为之间的鸿沟。因此,位错理论尚有待今后进一步发展和完善。

1 位错的结构(Structure of Dislocation)

1.1 位错的基本类型(Basic Types of Dislocation)

位错是晶体原子排列的一种特殊组态。从位错的几何结构来看,可将它们分为两种基本类型,即刃型位错和螺型位错。已滑移区(Slip Zone)与未滑移区在滑移面(Slip Plane)上的交界线,称为位错线,一般简称为位错。

1.1.1 刃型位错(Edge Dislocation)

刃型位错的晶体结构如图 1.1 所示。设该晶体结构为简单立方晶体,在其晶面 $ABCD$ 上半部存在有多余的半片原子面 $EFGH$,这个半原子面中断于 $ABCD$ 面上的 EF 处,它好像一把刀刃插入晶体中,使 $ABCD$ 面上下两部分晶体之间产生了原子错排,故称刃型位错,多余半原子面与滑移面的交线 EF 就称作刃型位错线。

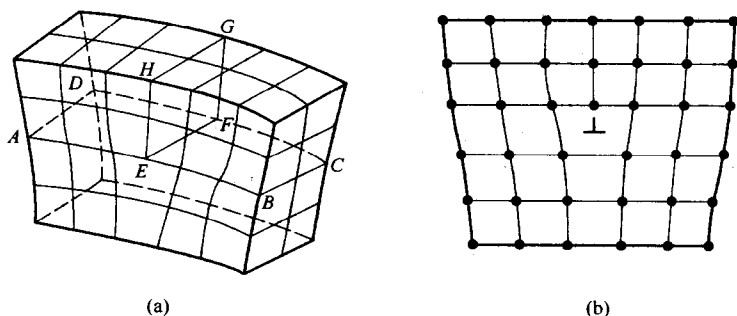


图 1.1 含有刃型位错的晶体结构

(a) 立体模型;(b) 平面图

刃型位错的特征如下:

1) 刃型位错有一个多余的半原子面。一般把多余的半原子面在滑移面上边的称为正刃型位错,记为“ $\perp$ ”;而把多余的半原子面在滑移面下

边的称为负刃型位错,记为“-”。其实这种正、负之分只具相对意义,而无本质的区别。

2) 刃型位错线可理解为晶体中已滑移区与未滑移区的边界线。它不一定是直线,可以是折线或曲线,但它必与滑移方向(Slip Direction)垂直,也垂直于滑移矢量(Slip Vector)。

3) 滑移面必是同时包含有位错线和滑移矢量的平面,在其他面上不能滑移。由于刃型位错中,位错线与滑移矢量互相垂直,因此由它们所构成的平面只有一个。

4) 晶体中存在刃型位错之后,位错周围的点阵发生弹性畸变(Elastic Distortion),既有切应变,又有正应变。就正刃型位错而言,滑移面上方点阵受到压应力,下方点阵受到拉应力;负刃型位错与此相反。

5) 在位错线周围的过渡区每个原子具有较大的平均能量,但该区只有几个原子间距宽,所以它是线缺陷(Line Defect)。

1.1.2 螺型位错 (Screw Dislocation)

螺型位错的晶体结构如图 1.2 所示。设立方晶体右侧受到切应力 τ 的作用,其右侧上下两部分晶体沿滑移面 $ABCD$ 发生了错动,如图 1.2(a) 所示,这时已滑移区和未滑移区的边界线 bb' 平行于滑移方向。图 1.2(b) 是 bb' 附近原子排列的俯视图,图中圆点“ $\cdot$ ”表示滑移面 $ABCD$ 下方的原子,圆圈“ $\circ$ ”表示滑移面 $ABCD$ 上方的原子。可以看出,在 aa' 右边的晶体上下层原子相对错动了一个原子间距,而在 bb' 和 aa' 之间出现一个约有几个原子间距宽的、上下层原子位置不吻合的过渡区,原子的正常排列遭到破坏。如果以 bb' 为轴线,从 a 开始,按顺时针方向依次连接此过渡区的各原子,则其走向与一个右螺旋线的前进方向一样,见图 1.2(c)。这就是说,位错线附近的原子是按螺旋形排列的,所以把这种位错称为螺型位错。

螺型位错的特征如下:

1) 螺型位错无多余半原子面,原子错排是呈轴对称的。根据位错线附近呈螺旋形排列的原子旋转方向不同,螺型位错可分为右旋和左旋螺型位错。

2) 螺型位错线与滑移矢量平行,因此一定是直线。

3) 纯螺型位错的滑移面不是唯一的。凡是包含螺型位错线的平面

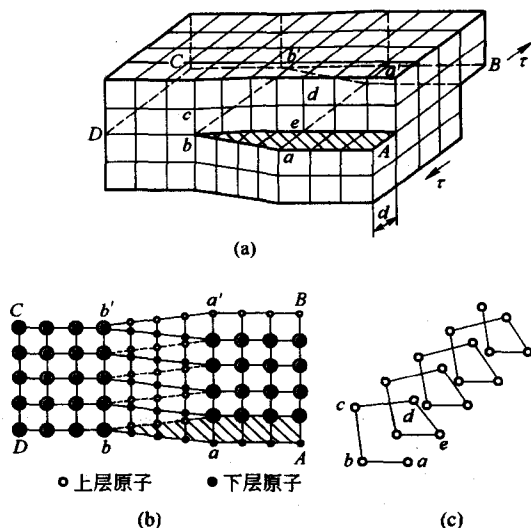


图 1.2 螺型位错

都可以作为它的滑移面。但实际上,滑移通常是在那些原子密排面上进行的。

4) 螺型位错线周围的点阵也发生了弹性畸变,但只有平行于位错线的切应变而无正应变,即不会引起体积膨胀和收缩,且在垂直于位错线的平面投影上,看不到原子的位移,看不到有缺陷。

5) 螺型位错周围的点阵畸变随离位错线距离的增加而急剧减少,故它也是包含几个原子宽度的线缺陷。

1.1.3 混合型位错(Mixed Dislocation)

除了上面介绍的两种基本型位错外,还有一种形式更为普遍的位错,其滑移矢量既不平行也不垂直于位错线,而与位错线相交成任意角度,这种位错称为混合型位错,见图 1.3。混合型位错线是一条曲线,在 A 处位错线与滑移矢量平行,因此是螺型位错;而在 C 处位错线与滑移矢量垂直,因此是刃型位错。A 与 C 之间,位错线既不垂直也不平行于滑移矢量,每一小段位错线都可分解为刃型和螺型两个部分。

由于位错线是已滑移区与未滑移区的边界线,因此一根位错线不能终止于晶体内部,而只能露头于晶体表面或晶界。它若终止于晶体内部,

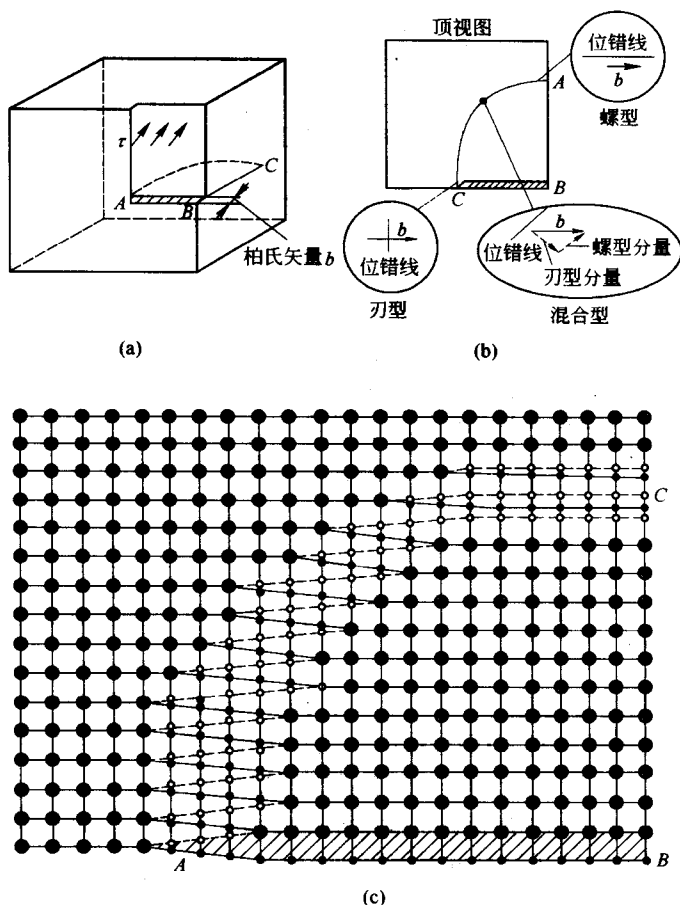


图 1.3 混合型位错

则必与其他位错线相连接,或在晶体内部形成封闭线即位错环,见图 1.4。图中的阴影区是滑移面上一个封闭的已滑移区即位错环,位错环各处的位错结构类型可按各处的位错线方向与滑移矢量的关系分析,如 A、B 两处是刃型位错, C、D 两处是螺型位错,其他各处均为混合型位错。

有纯刃型位错环,无纯螺型位错环。即刃型位错线可以是直线,曲线;而螺型位错线只能是直线,不能是曲线。

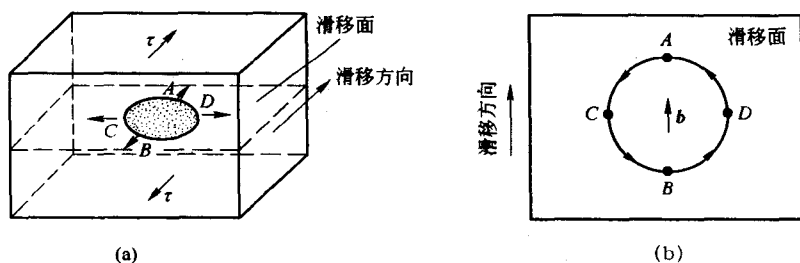


图 1.4 晶体中的位错环

1.2 位错的结构特征

为了便于描述晶体中的位错,更确切地表征不同类型位错的特征,1939年柏格斯提出了采用柏氏回路(Burgers Circuit)来定义位错,借助一个规定的矢量即柏氏矢量来揭示位错的本质。

1.2.1 柏氏矢量(Burgers Vector)的确定

柏氏矢量可以通过柏氏回路来确定,图 1.5(a)、(b)分别为含有一个刃型位错的实际晶体和用作参考的不含位错的完整晶体。确定该位错柏氏矢量的方法如下:

1) 首先选定位错线(ξ)的正向,通常规定出纸面的方向为位错线的正方向。

2) 在实际晶体中,从任一原子出发,围绕位错以一定的步数作一左旋闭合回路 $MNOPQ$,称为柏氏回路,如图 1.5(a)所示。

3) 在完整晶体中按同样的方向和步数作相同的回路,该回路并不闭合,由终点 Q 向起点 M 引一矢量 b ,使该回路闭合,如图 1.5(b)所示。这个矢量 b 就是实际晶体中位错的柏氏矢量。

由图 1.5 可知,刃型位错的柏氏矢量与位错线垂直,这是刃型位错的一个重要特征。刃型位错的正负可用右手法则来确定,如图 1.6 所示。用右手的拇指、食指和中指构成直角坐标,以食指指向位错线的方向,中指指向柏氏矢量的方向,则拇指的指向代表多余半原子面的位向,且规定拇指向上者为正刃型位错,反之为负刃型位错。

螺型位错的柏氏矢量也可按同样的方法确定,如图 1.7 所示。由图

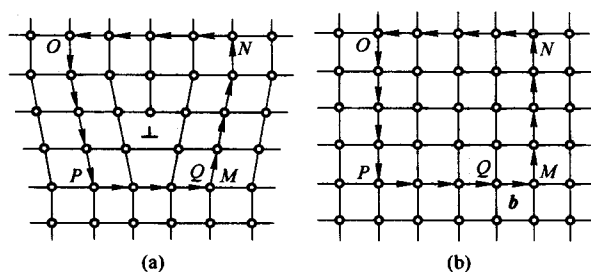


图 1.5 刃型位错柏氏矢量的确定

(a) 实际晶体的柏氏回路; (b) 完整晶体的相应回路



图 1.6 刃型位错的右手三指定则

可知,螺型位错的柏氏矢量与位错线平行,且规定 b 与位错线正向平行者为右螺型位错, b 与位错线反向平行者为左螺型位错。

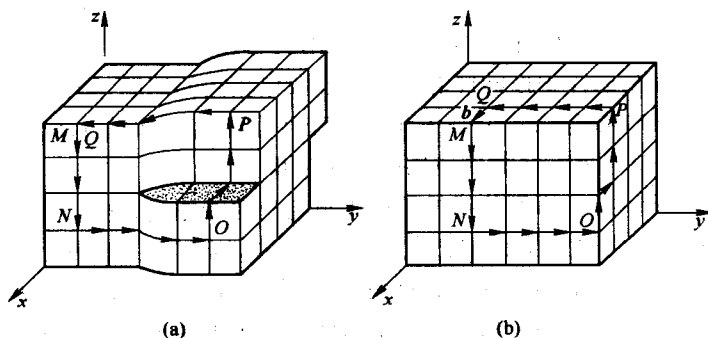


图 1.7 螺型位错柏氏矢量的确定

(a) 实际晶体的柏氏回路; (b) 完整晶体的相应回路

混合型位错的柏氏矢量既不垂直也不平行于位错线,而与它相成 θ 角,可将其分解成垂直和平行于位错线的刃型分量($b_e = b \sin\theta$)和螺型分量($b_s = b \cos\theta$),如图 1.8(a)所示。

用矢量图解法可形象地概括出三种类型位错的主要特征,见图 1.8(b)。

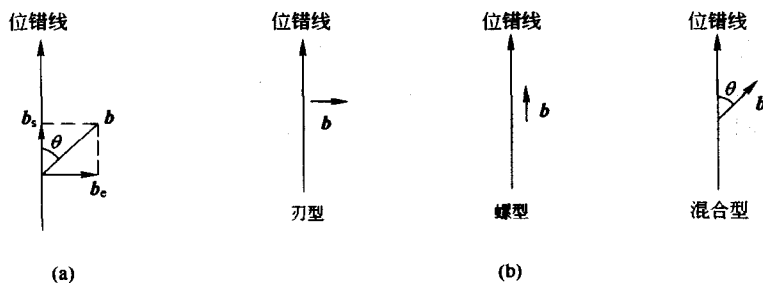


图 1.8 混合型位错柏氏矢量的确定

1.2.2 柏氏矢量的表示法

柏氏矢量的大小和方向可以用它在晶轴(Crystallographic Axis)上的分量,即用点阵矢量 a 、 b 和 c 来表示。对于立方晶系晶体,由于 $a = b = c$,故可用与柏氏矢量 b 同向的晶向指数(Orientation Index)来表示。例如柏氏矢量等于从体心立方晶体的原点到体心的矢量,则 $b = a/2 + b/2 + c/2$,可写成 $b = \frac{a}{2}[111]$ 。一般立方晶系中柏氏矢量可表示为 $b = \frac{a}{n} \langle uvw \rangle$,其中 n 为正整数。

通常还用 $|b| = \frac{a}{n} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 来表示柏氏矢量的大小,即位错强度。同一晶体中,柏氏矢量愈大,表明该位错导致点阵畸变愈严重,它所处的能量也愈高。

1.2.3 柏氏矢量的守恒性(Conservation)

对于一定的位错其柏氏矢量是固定不变的,叫守恒性。反映在三个方面:

(1) 一条位错线只有一个柏氏矢量。

证明:如图 1.9 所示,设有一条位错线 AO , 柏氏回路为 B_1 , 其柏氏