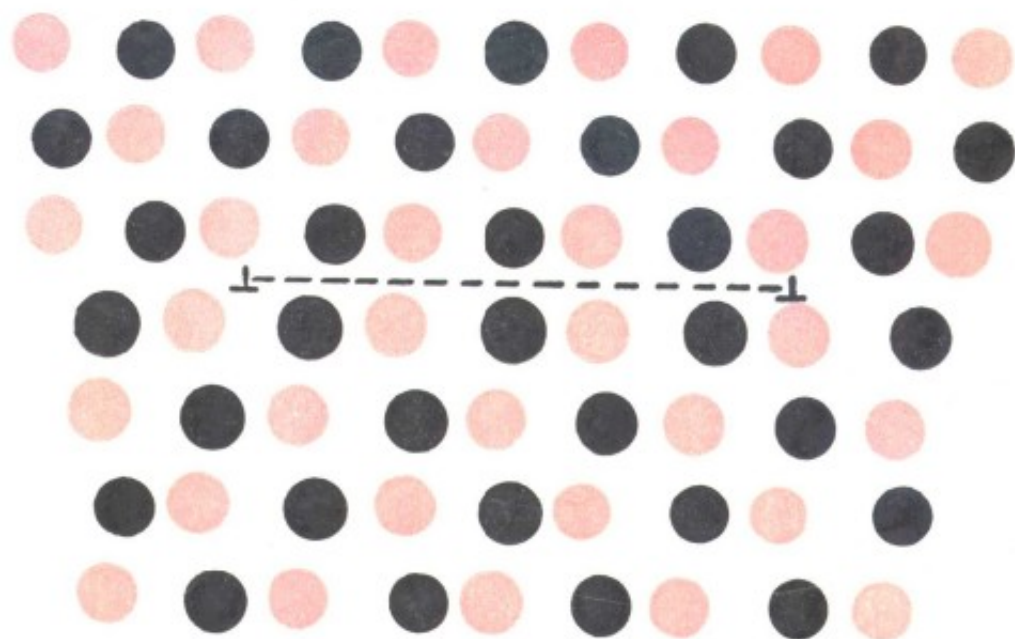


哈尔滨工业大学研究生教材

DISLOCATIONS AND STRENGTHENING
MECHANISMS OF METALS



杨德庄 编著

位错与金属强化机制

哈尔滨工业大学出版社



数据加载失败，请稍后重试！

位错与金属强化机制

杨德庄 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书阐述位错理论的基本概念,探讨各种强化机制的微观力学本质,为充分发挥金属材料性能潜力提供理论依据。全书共分七章,主要内容包括:位错的基本性质及在弹性介质中的行为,晶体中位错的行为,位错强化机制,晶界强化机制,固溶强化机制,第二相强化机制,以及强化机制在金属材料组织设计中的应用等。

本书是针对金属材料及热处理专业硕士研究生学习金属强化理论的需要而编写的,也可供有关从事金属材料专业的工程技术人员参考。

位错与金属强化机制

杨德庄 编著

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨建筑工程学院附属印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张13.5 字数310 000

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数1—2000

ISBN 7-5603-0336-6/TG·24 定价: 3.85元

前 言

金属强度问题是金属物理学科中的一个重要领域。位错理论的发展为深刻理解金属的强化机制提供了微观理论基础。本书是针对金属材料及热处理专业硕士研究生学习金属强化理论的需要而编写的,也可供有关工程技术人员参考。主要目的是在深入理解位错理论的基础上,建立强化的物理模型,为探讨金属材料的强化途径以充分发挥性能潜力提供理论依据。

培养建立理论模型的能力是硕士研究生学习阶段的重要任务。要善于从所研究的复杂现象中找到其物理本质,并力求作到定量描述。这是一种抽象思维的能力。是否具有这种能力应该作为区别研究生与本科生的重要标志。本书着眼于引导学习前人用以建立金属材料强化机制的方法,启发思路,开阔视野,以求举一反三。

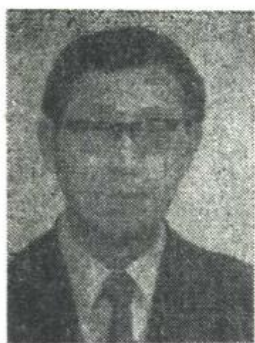
本书前两章旨在本科生阶段已学过内容的基础上,加深对位错基本概念的理解,为进一步探讨强化机制打下必要的基础。后四章分别针对不同强化机制加以具体论述。论述中主要以分析问题为主,对在有关本科生教科书中涉及较多的内容不再简单重复,不求系统的完整性。最后一章讨论强化机制应用的基本思路。

在本书定稿过程中,费维栋讲师曾参与有关文字的整理与审阅工作,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1990年12月



作者简介

杨德庄,男,1937年6月生,教授(博士导师),哈尔滨工业大学金属材料及热处理教研室主任。1960年毕业于哈工大机械工艺系金相专业。1982年至1984年,美国科罗拉多矿冶学院冶金工程系访问学者;1990年6月至12月,美国弗吉尼亚大学材料科学系高级访问学者。长期从事金属材料微观结构与力学行为研究,研究领域涉及双相钢、铝-锂合金及金属间化合物等。已在国内外刊物上发表论文50余篇。合编或主编《金属材料学》、《钢的形变热处理》及《材料与力学冶金》等教材和专著5种。

目 录

第一章 位错的基本性质及在弹性介质中的行为	1
§ 1-1 位错的定义及柏氏矢量	1
一、位错的定义	1
二、柏氏回路与柏氏矢量	2
三、柏氏矢量的守恒性	3
四、弗兰克处理柏氏回路和柏氏矢量的方法	4
§ 1-2 位错的几何性质与运动特性	5
一、刃型位错	5
二、螺型位错	6
三、混合位错	7
四、位错环	8
§ 1-3 位错的弹性性质	9
一、复杂应力状态下应力与应变的关系	10
二、位错的应力场	12
三、位错的弹性应变能	17
四、位错的线张力	19
§ 1-4 作用在位错上的力	21
一、作用在刃型位错上的力	22
二、作用在螺型位错上的力	23
三、作用在混合位错上的力	24
§ 1-5 位错间作用力	25
一、平行螺型位错间的作用力	25
二、平行刃型位错间的作用力	26
三、两相互垂直螺型位错间的作用力	28
四、螺型位错与相互垂直的刃型位错间的作用力	29
§ 1-6 位错与界面的交互作用	30
一、位错与自由表面的交互作用	30
二、不同弹性介质界面与位错的交互作用	32
参考文献	33
第二章 晶体中位错的行为	35
§ 2-1 派-纳位错模型与派-纳力	35

一、派-纳位错模型	35
二、Peierls位错的能量与派-纳力	39
§ 2-2 位错的弯折与割阶	42
一、弯折	42
二、割阶	46
§ 2-3 全位错的能量条件与滑移系统	49
一、Frank 能量准则	50
二、晶体的滑移系统	51
§ 2-4 扩散滑移与攀移机制	52
一、弯折的扩散滑移	52
二、位错的扩散攀移	54
三、割阶位错的攀移	55
四、位错心扩散引起的攀移	57
§ 2-5 割阶位错的滑动	59
一、保守性滑动	59
二、非保守性滑动	61
§ 2-6 面心立方晶体中的层错与部分位错	63
一、FCC 点阵中层错的类型	64
二、FCC 点阵中的部分位错	66
三、FCC 点阵中的扩展位错	68
四、Thompson记号	71
§ 2-7 面心立方晶体中几种重要的位错反应	73
一、Lomer位错	73
二、压杆位错	74
三、Lomer-Cottrell位错锁	76
四、会合位错	77
五、扩展偶极子	79
六、扩展位错结点	79
§ 2-8 面心立方晶体中扩展位错的运动	80
一、扩展位错运动的派-纳障碍	80
二、扩展位错的滑移	81
三、扩展位错的交滑移	82
四、扩展位错的攀移	83
五、扩展割阶的运动	84
§ 2-9 密排六方晶体中的层错与位错反应	85
一、密排六方晶体中的层错	85
二、密排六方晶体中的部分位错	86
三、密排六方金属中位错的扩展	91

§ 2-10、体心立方晶体中的层错与位错反应	92
一、体心立方晶体中的层错	92
二、体心立方晶体中的部分位错	94
三、体心立方晶体中的扩展位错	95
四、体心立方晶体中螺型位错心的结构	97
五、体心立方晶体中的全位错合成反应	98
§ 2-11 过饱和空位对位错组态的影响	98
一、过饱和空位的形成机制	99
二、过饱和空位对位错组态的影响	100
参考文献	105
第三章 位错强化机制	107
§ 3-1 金属单晶体塑性变形的一般特点	107
一、单晶体塑性变形的的基本方式	107
二、Schmid 定律与滑移系统的开动	109
三、金属单晶体的应力-应变曲线	111
四、金属单晶体加工硬化行为	114
§ 3-2 位错增殖机制	115
一、Frank-Read源位错增殖机制	115
二、双交滑移位错增殖机制	116
三、空位盘位错增殖机制	117
四、位错增殖的极轴机制	117
五、晶界增殖位错机制	119
§ 3-3 位错的交互作用	119
§ 3-4 位错塞积	120
§ 3-5 孪生的位错机制	123
一、孪生位错	124
二、孪晶形成机制	125
三、发射位错	126
四、滑移位错与孪晶界的交互作用	127
§ 3-6 位错强化的数学表达	128
一、位错运动阻力的估算	128
二、流变应力的表达式	131
§ 3-7 应变速率与位错运动速率关系的推导	131
§ 3-8 温度及应变速率对流变应力的影响	133
参考文献	134
第四章 晶界强化机制	135
§ 4-1 金属多晶体塑性变形条件	135
§ 4-2 晶界的位错模型	136

一、晶界结构模型	136
二、晶界与位错的交互作用	140
三、晶界的运动	142
四、晶界发射位错的机制	143
§ 4-3 双晶体变形模型	144
一、双晶体变形条件	144
二、双晶体弹性变形的不匹配性	145
三、双晶体塑性变形的不匹配性	146
§ 4-4 晶界强化作用	147
一、直接强化作用	147
二、间接强化作用	147
§ 4-5 晶界强化的数学表达	148
§ 4-6 亚晶界及相界的强化效应	150
一、亚晶界强化	150
二、相界强化	151
参考文献	151
第五章 固溶强化机制	153
§ 5-1 错配球模型	153
一、无限大基体中的应力-应变场	153
二、球内的应力-应变场	155
三、在有限大基体中的错配球	156
四、 δv 、 $\angle v$ 与 δV 的关系	158
五、错配球模型的适用性	159
§ 5-2 置换式溶质原子与位错的弹性交互作用	160
一、置换式溶质原子的错配球效应	160
二、溶质原子间的弹性交互作用	161
三、溶质原子与刃型位错间的弹性交互作用	162
四、溶质原子与螺型位错间的弹性交互作用	164
§ 5-3 间隙式溶质原子与位错的弹性交互作用	164
一、FCC结构中间隙原子的错配球效应	164
二、BCC结构中间隙原子的错配球效应	165
三、 α -Fe中碳原子之间的弹性交互作用	166
四、 α -Fe中碳原子与螺型位错的弹性交互作用	166
五、 α -Fe中碳原子与刃型位错的弹性交互作用	167
§ 5-4 溶质原子与位错的化学相互作用	167
§ 5-5 位错与有序分布的溶质原子间的交互作用	170
一、短程有序引起的强化	170
二、长程有序引起的强化	171

§ 5-6 均匀固溶强化	174
一、稀固溶体的均匀固溶强化	175
二、浓固溶体的均匀固溶强化	176
参考文献	177
第六章 第二相强化机制	178
§ 6-1 质点障碍模型	178
一、Orowan 模型	178
二、Friedel 模型	179
§ 6-2 沉淀强化机制	181
一、共格应变强化	182
二、化学强化	183
三、有序强化	184
四、模量强化	185
五、层错强化	186
六、派-纳力强化	187
§ 6-3 弥散强化机制	188
一、有效粒子间距的确定	188
二、Orowan公式的修正	189
三、硬粒子与基体变形不协调对强化的影响	190
§ 6-4 第二相强化合金的加工硬化行为	191
一、沉淀强化合金的加工硬化行为	192
二、弥散强化合金的加工硬化行为	192
§ 6-5 纤维强化机制	195
一、纤维增强复合材料的变形行为	195
二、长纤维增强复合材料的抗拉强度	196
三、短纤维增强复合材料的抗拉强度	197
参考文献	198
第七章 强化机制在金属材料组织设计中的应用	199
§ 7-1 晶界强化效应的利用	199
一、晶界强化在单相合金中的利用	199
二、晶界强化在复相合金中的利用	200
§ 7-2 固溶强化效应的利用	200
§ 7-3 可变形粒子强化效应的利用	201
§ 7-4 不可变形粒子强化效应的利用	203
§ 7-5 纤维强化效应的利用	204
§ 7-6 加工硬化效应的应用	204
参考文献	204

第一章 位错的基本性质及在弹性介质中的行为

位错的概念早在本世纪初就已提出^[1]，但对它的研究，无论是理论上还是实验上，主要是在30年代^[2-4]以后才得到长足的发展。现在，位错理论已影响到金属材料科学的各个领域，成为分析金属材料许多重要行为，特别是力学行为的理论依据^[5-8]。

金属强化的着眼点是提高塑性变形抗力。塑性变形的元过程是位错运动，因而强化金属材料的基本途径就是造成某种障碍用以阻碍位错运动。所以，深入理解位错的基本性质与行为，对于建立金属强化机制将具有重要的理论和实际意义。

§ 1-1 位错的定义及柏氏矢量

一、位错的定义

1934年泰勒(G.I.Taylor)、波朗依(M.Polanyi)和奥罗万(E.Orowan)三人几乎同时将位错的概念引入晶体，用以同晶体的不均匀滑移变形相联系。特别是泰勒以较清晰的图象表明，位错是一种同晶体内部原子排列畸变有关的线性晶体缺陷。晶体滑移不是整体进行，而是在较小的切应力作用下逐步发生。在逐步滑移的任何阶段，必然在滑移面内存在一条围绕着已滑移区的边界，通常便称之为滑移位错。由这个定义可知，位错线包围着滑移面内的一个面积，因而必然在晶体内形成一个闭合的回线，或者终止在晶体的自由表面，也可以与晶体内的任何界面相通。

晶体中位错线的一般形式如图1-1所示。设想将晶体沿画阴影的 S 面剖开，再将分开的上下两面 S_1 和 S_2 相对作一个刚性位移 $\vec{b}$ 。矢量 $\vec{b}$ 可以是晶体的任一点阵平移矢量。显然，此操作会使 S 面上不平行于 $\vec{b}$ 的地方出现空隙或原子的重叠。再设想将重叠的原子去掉或在空隙处填入同种质料的晶体后，把经过相对滑移的两个截面 S_1 和 S_2 胶合起来，并撤去加在截面上的外力。由于 $\vec{b}$ 是点阵矢量，使胶合后在 S 面上不留下任何痕迹，但 S 面的周界 C 由于是滑移区与未滑移区的分界线，其附近的原子组态必然会发生某种错排。其错排程度与相对滑移矢量 $\vec{b}$ 有关。在这里，滑移矢量

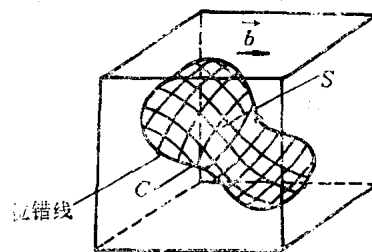


图1-1 一般形式的位错线

$\vec{b}$ 便是一个表征位错线特征的重要参量，通常称为柏氏矢量。

二、柏氏回路与柏氏矢量

怎样描述位错线是位错理论中的一个基本问题。作为一根几何上抽象的线段，通常只需标出其在坐标系中的位置。可是对于位错线而言，不仅需要标出它在晶体中的位置，更重要的是应表示出它的特征。因此，要确切的定义位错线必然涉及如何确定柏氏矢量问题。

柏格斯 (J.M.Burgers) 在1939年提出了应用柏氏回路确定柏氏矢量的方法^{〔8〕}。设在晶体中取三个初基矢量 $\vec{\alpha}$ 、 $\vec{\beta}$ 、 $\vec{\gamma}$ 。用这三个初基矢量做成的平行六面体在 $\vec{\alpha}$ 、 $\vec{\beta}$ 、 $\vec{\gamma}$ 三个方向上顺次堆积可得整个晶体。从晶体中某一点出发，以每个初基矢量为一步，沿着初基矢量方向逐步走去，最后回到原来的出发点，所得到闭合回路称为柏氏回路。设在 $\vec{\alpha}$ 方向上走了 n_α 步，在 $\vec{\beta}$ 方向上走了 n_β 步，在 $\vec{\gamma}$ 方向走了 n_γ 步。若回路中为完整晶体，则有如下关系：

$$n_\alpha \vec{\alpha} + n_\beta \vec{\beta} + n_\gamma \vec{\gamma} = 0 \quad (1-1)$$

若回路中围绕有位错时，则：

$$n_\alpha \vec{\alpha} + n_\beta \vec{\beta} + n_\gamma \vec{\gamma} = \vec{b} \quad (1-2)$$

式中矢量 $\vec{b}$ 为柏氏矢量。一般来说， $\vec{b}$ 是晶体中某一方向上的原子间距或其整数倍，所以可由柏氏回路在三个初基矢量方向上所走步数的矢量和求得。另外，在确定位错的柏氏矢量时，应注意以下几点：

1. 首先明确位错线的方向与柏氏矢量方向是相对的。对位错线的方向一般是人为地规定，从纸面出来指向人的方向为正。

2. 要用右手螺旋法则规定柏氏回路的方向，即在纸面上逆时针方向为柏氏回路的方向。

3. 回路所经过的区域应避开位错线附近原子严重错排的区域。

如以刃型位错为例（见图1-2），从左上角出发沿逆时针方向作柏氏回路。在X、Y、Z三轴方向上，原子间距各为 α 、 β 、 γ ，则：

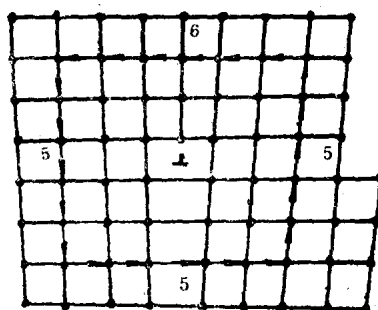


图1-2 环绕刃型位错的柏氏回路

$$n_\alpha = 0 ;$$

$$-5\vec{\gamma} + 5\vec{\beta} + 5\vec{\gamma} - 6\vec{\beta} = \vec{b},$$

$$\vec{b} = -\vec{\beta}$$

故得柏氏矢量为在Y轴负方向上大小为一个原子间距的矢量。

由上所述可见，柏氏回路的作用在于把位错中心周围原子间的畸变叠加起来，并用柏氏矢量的形式加以表达。只要柏氏回路所包含的位错没有变更，则柏氏矢量与柏氏回路起点的选择无关。由此又可以将位错定义为：在晶体中围绕某一缺陷画其柏氏回路时，所得柏氏矢量不为零者，即称此晶体缺陷为位错。可以用位错线的单位矢量 $\vec{\xi}$ 和柏氏矢量 $\vec{b}$ 综合表征位错线的特征。例如，当 $\vec{b} \cdot \vec{\xi} = 0$ 时为刃型位错。而对右螺型位错， $\vec{b} \cdot \vec{\xi} = b$ ；对左螺型位错， $\vec{b} \cdot \vec{\xi} = -b$ 。

三、柏氏矢量的守恒性

柏氏矢量代表着位错线最基本的、不变的特征，具有守恒性。主要表现在以下几方面：

1. 位错线在中途分叉时，分叉前位错的柏氏矢量等于分叉后诸位错柏氏矢量的和。如图1-3所示，位错线1分叉为2和3两段，则2和3两位错的柏氏矢量之和 $\vec{b}_2 + \vec{b}_3$ 应与位错线1的柏氏矢量 $\vec{b}_1$ 相等。位错线1的柏氏回路为 B_1 ，若前进并扩大可与位错线2和3的柏氏回路 B_{2+3} 相合，而回路 B_{2+3} 的柏氏矢量为 $\vec{b}_2 + \vec{b}_3$ ，则 $\vec{b}_1 = \vec{b}_2 + \vec{b}_3$ 。

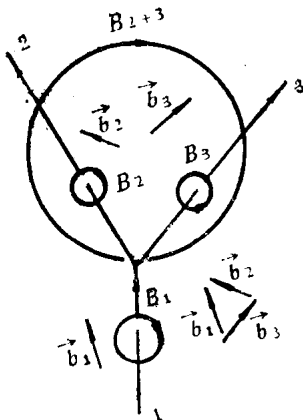


图1-3 位错中途分叉前后柏氏矢量守恒

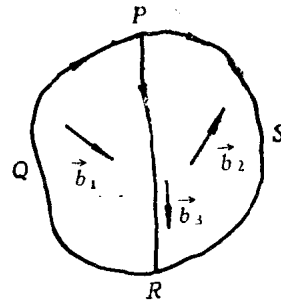


图1-4 位错环只能有一个柏氏矢量

2. 一个位错环只有一个柏氏矢量。这可以用反证法加以证明。如图1-4所示，先假定位错环PQRS有两个不同的柏氏矢量，即PQR的柏氏矢量为 $\vec{b}_1$ ，PSR的柏氏矢量为 $\vec{b}_2$ 。按位错的基本性质，PQR和PSR两区域的变形就应有所不同，以致在两区域之间必须有一位错线加以分开，如PR线。并且，该PR线的柏氏矢量应为 $\vec{b}_3 = \pm(\vec{b}_1 - \vec{b}_2)$ 。如欲消除PR这条位错

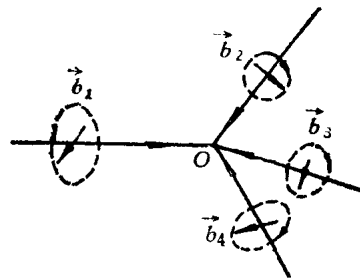


图1-5 指向结点的各位错线的柏氏矢量之和为零

线，必须 $\vec{b}_3 = 0$ ，则 $\vec{b}_1 = \vec{b}_2$ ，亦即 PQRS 位错环只有一个柏氏矢量。

3. 几条位错线相遇一点（称为位错的结点）时，朝向结点的各位错的柏氏矢量之和等于离开结点的位错的柏氏矢量之和。显然这一点与1.是等价的，只是叙述有所不同。因而若在结点处相遇的各位错的方向都是指向或离开结点时，则这些位错线的柏氏矢量之和为零，如图1-5所示。

四、弗兰克处理柏氏回路和柏氏矢量的方法

弗兰克 (F.C.Frank) 在1951年提出了一种比较严格的处理柏氏回路和柏氏矢量作方法^[9]。其基本思路是取两个晶体，一个是非完整晶体，其中存在着位错；另一个是为参考的完整晶体，其晶体结构与实际的非完整晶体相同。在两个晶体中各作一个相同的四边形，其四个顶点为晶体中相邻的四个原子，则两个晶体中的四个原子分别相对应。如图1-6(a)中1、2、3、4为实际晶体中的四个原子；图1-6(b)中1'、2'、3'、4'为参考晶体中四个相对应的原子。先在非完整晶体中，放弃原子1，取邻近的原子5，与2、3、4原子构成一新四边形2 3 4 5。与此相似，在参考晶体中放弃原子1'，取与实际晶体中原子5相对应的原子5'，构成新四边形2' 3' 4' 5'。因此，在两晶体中，逐步放弃一个原子，取邻近原子，再分别将两晶体中所放弃的原子连成线，便构成两个相似的回路。对实际晶体中所选择的回路必须避开位错中心，要在所谓“好”的区域加以选择。回路的方向需视位错线的方向依照右手螺旋法则而定。经这样操作的结果，实际晶体中回路围绕着位错线形成闭路之后，在参考晶体中的回路尚没有封闭，或许闭路已过头。弗兰克将实际晶体中围绕着位错的回路称为柏氏回路，而将在参考晶体中从相当于柏回路中最后一点到起点的矢量称为柏氏矢量。

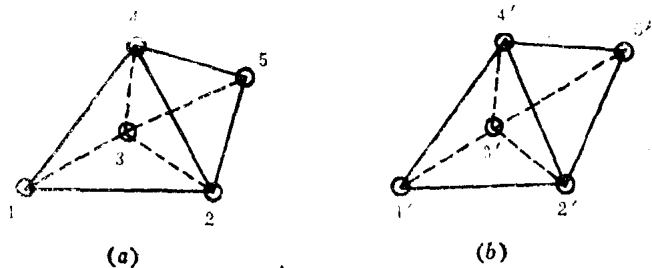


图1-6 在(a)非完整晶体与(b)参考晶体中由相应的四个原子所组成的四边形

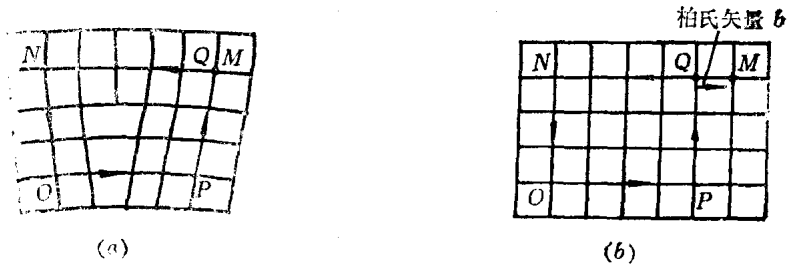


图1-7 围绕(a)实际晶体中位错与(b)完整晶体的柏氏回路

如图1-7所示, 非完整晶体中柏氏回路从 M 到 Q 已形成一闭路, 而在参考晶体中回路的起点 M 和终点 Q 不重合, 故需从终点 M 引一矢量 $\overrightarrow{QM}$ 使回路闭合。这就是非完整晶体中位错的柏氏矢量。由于此处晶体为立方体, 故不必用上述两个相应的四边形而在两个晶体中得到相似的回路。但需注意, 如此得出的柏氏矢量与前面直接由柏氏回路所得到的柏氏矢量方向相反。通常对柏氏矢量的方向容易搞混, 需要选定一种求柏氏矢量的方法。

§ 1-2 位错的几何性质与运动特性

刃型位错与螺型位错是位错的两种基本形式。由这两种位错又可进一步组成混合位错以及位错环等多种常见的位错形态。下面简要回顾这几种常见的位错形式及其几何性质和运动特性。

一、刃型位错

1. 几何性质

刃型位错的特点是其位错线与柏氏矢量相垂直。从几何形状上看, 刃型位错可以是一条直线, 也可以是在一个平面上任何形状的曲线。但实际上, 位错线不是一种严格的几何线, 一般应具有以下三个特点:

1) 有一定宽度。所谓位错线实际上是具有一定宽度的原子畸变区域, 其宽度常以原子间距畸变超过正常值四分之一的区域为限, 一般为2~5个原子间距。

2) 有一定的原子畸变结构。对于刃型位错而言, 原子畸变结构的特点是表现为有一个多余的半原子面, 使点阵畸变具有面对称性。若多余的半原子面位于晶体的上半部时, 称为正刃型位错; 反之, 若多余半原子面位于下半晶体时, 称为负刃型位错。

3) 有一定的方向。这是为了分析问题方便而人为加以规定的。刃型位错的方向可由位错的正负号和柏氏矢量的方向由右手定则决定, 如图1-8所示。由位错线的柏氏矢量的守恒性可知, 在一条连续的位错线中, 位错线的方向必须是一顺的。

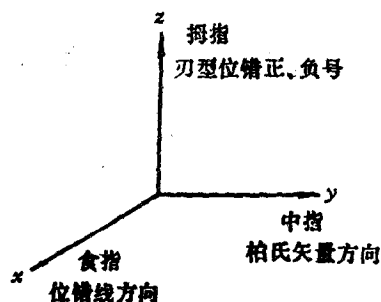


图1-8 刃型位错的正负号、柏氏矢量与位错线之间的右手定则关系

2. 运动特性

一般而言, 刃型位错只有在切应力作用下才能运动。确切地说, 此切应力必须平行于刃型位错的柏氏矢量, 并且要作用在滑移面上。由位错线与柏氏矢量构成的平面叫做滑移面。刃型位错运动时, 有固定的滑移面, 只能平面滑移, 不能交叉滑移。

刃型位错运动的方向平行于柏氏矢量, 垂直于位错线。由刃型位错运动所引起的晶体变形方向平行于位错线移动的方向, 在位错线移出的晶体表面上形成滑移台阶, 其大

小等于柏氏矢量的量值。

刃型位错有较大的滑移可动性。这是由于刃型位错使点阵畸变有面对称性所致。在滑移面上，位于多余半原子面两侧的原子对位错中心原子的作用力相平衡，稍一加力，便可使位错中心滑移。而且，位错中心附近原子已有滑动，使位错中心滑移时仅需附近的原子在位置上稍有变动即可。实际上，在刃型位错移动过程中所涉及的原子移动距离远小于一个原子间距，如图1-9所示。

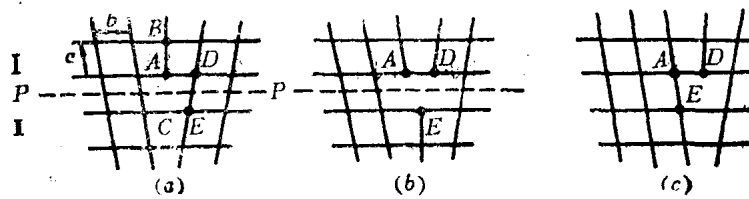


图1-9 刃型位错通过滑移运动

刃型位错有两种运动形式。一是滑移，位错线在滑移面上运动，不涉及物质迁移或原子扩散，属于保守运动，可在一般条件下进行。二是攀移，位错线垂直于滑移面运动，涉及物质的迁移或原子扩散，属于非保守运动，一般需在高温下进行。

二、螺型位错

1. 几何性质

螺型位错的主要特征是位错线平行于柏氏矢量。从几何形状上看，螺型位错一定是一条直线，这是满足其柏氏矢量守恒性的必然结果。如图1-10所示，螺型位错可由晶体的一部分(如右半部)的上下两部分的原子作前后相对位移一个原子间距而成。在左、右两半晶体交界处造成原子错排，可以把错排原子连成一个矩形的螺旋线。所以，位于螺型位错中心区的原子都排列在一个螺旋线上，而不是一个原子列，使点阵畸变具有轴对称性。

由螺型位错造成原子错排的结果是使与位错线垂直的原子面成为绕位错线旋转的螺旋面，如图1-11所示。按照螺旋的方向，可将螺型位错分为右手螺型位错与左手螺型位错两种。右手螺型位错的柏氏矢量与位错线的方向相同；反之，左手螺型位错的柏氏矢量与位错线的方向相反。

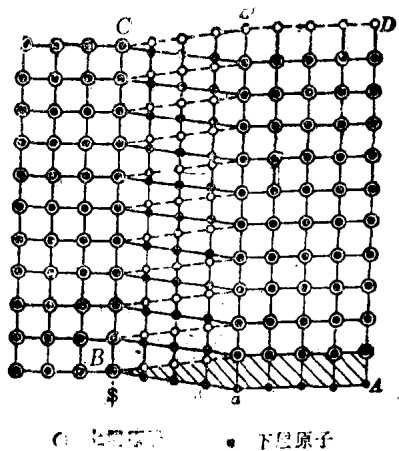


图1-10 螺型位错原子排列顶视图

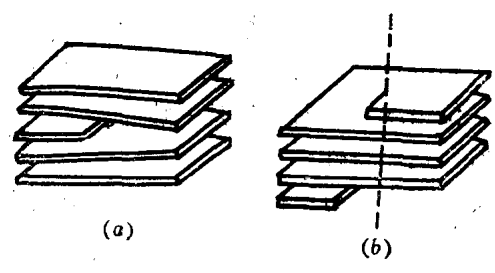


图1-11 (a)刃型位错与(b)螺型位错的晶面形态示意图

000013