

第六章 位错

一、学习的意义、基本线路及要求

根据晶体结构计算出来的强度（理论强度）和实际测量的强度之间的巨大差异，人们推测晶体结构远非完整，其内部一定存在某种缺陷，这种缺陷的运动及交互作用决定了晶体的力学性质。强度与晶体缺陷的多少直接相关，与位错的关系可表达为 $\sigma = \alpha G b \sqrt{\rho}$ 。位错理论成为解释和研究晶体力学行为的坚实基础。对于晶体结构来说，规则的完整排列是主要的，而非完整性则是次要的；但对于晶体的力学性能来说，起主要作用的却是晶体的非完整性，晶体的完整性却居于次要地位。本章内容与形变一章密切相关，是形变的微观过程基础，也与再结晶一章及固态相变一章有一定关系，因为高位错密度区总是再结晶形核及相变形核的优先地点。

基本线路：1) 研究位错的意义；2) 位错的本质、特征、类型、形貌；3) 位错的应力场、能量；4) 位错受力，包括线张力/P-N 力/外机械力/渗透力/映像力/其它位错；5) 位错的交互作用；与点缺陷：气团、与线缺陷：长程、短程；与面缺陷：塞积；6) 位错的运动：滑移、攀移；宏观塑性变形量，微观弯结/割阶；平衡组态；7) 位错的萌生与增殖：夹杂；单、双边 F-R 源；8) 实际晶体中的位错：FCC 全位错、肖克来位错、弗兰克位错；层错、扩展、面角位错。

要求：按基本线路叙述各部分的内容。

二、主要内容

宏观晶体的滑动是微观位错运动的结果。位错是线缺陷，是晶体已滑移区与未滑移区的交界线。位错有两个特征量 b , t 。 b 有两个基本含义，宏观上是位错扫过后上、下晶体相对滑动的量，这个量通常是原子间距的整数；微观上是位错中心周围晶格畸变量。通过做柏氏回路可确定柏氏矢量。

因位错附近原子处于畸变状态，因而位错产生应力场并有应变能，并通过应力场与其它类型的缺陷（点、线、面缺陷）发生交互作用。刃位错有三个正应力场分量，一个切应力场分量；螺位错有只有两个切应力场分量（直角坐标下），两类位错应力场不重叠，因而相互间没有交互作用。位错本身受线张力的作用，也可受外加应力、其它位错作用力、化学力、映像力、P-N 力的作用。若已知外应力场 σ ，则位错受力可用通式 $F = \sigma \cdot b \cdot t$ ，即 Peach-Koehler 公式计算。应用时 t 要以单位矢量代入。位错线所受外应力场 σ 的作用和所受的力 F 是完全不同的两个概念。只要外应力场在位错的柏氏矢量方向有应力分量，该位错就受力。位错受力必与位错线垂直。位错的能量正比于其柏氏矢量的平方，因此，实际存在的柏氏矢量总是原子间距最小的密排方向，以降低能量。以网络方式存在的位错是一种低能状态，以位错墙的形式排列也是一种低能状态。

位错的运动产生宏观塑性变形，两者的关系为： $\gamma = b \rho \bar{x}$ ；用右手定则可确定晶体相对滑动的确切方向。位错在应力的作用下以不同速度运动时，有不同的 $v \sim \sigma$ 关系式。位错整根滑移或攀移时，不如通过热激活的方式在滑移位错上形成弯结或攀移位错上形成割阶以侧向运动带来垂直方向的运动省力。

位错间的交互作用分长程的和短程的，长程交互作用主要通过各自的弹性应力场起作用；短程交互作用主要通过位错相互交割产生弯结或割阶或者局部反应变成低能组态而产生，其作用的结果会使位错的继续运动受到额外阻力，这些都是加工硬化的机制。

位错可靠凝固时晶体的碰撞、升降温时硬的第二相不均匀膨胀产生的应力集中萌生；可靠单、双边 F-R 源实现增殖。同号位错在障碍物前受阻会形成塞积，塞积群内位错越多，对障碍物的反作用力越大，极端情况可摧毁障碍物或诱发新的位错源。

Cottrell 气团, Snoeck 气团, Suzuki 气团是点缺陷与位错交互作用的典型例子，分别是刃位错的正

应力场与溶质原子的弹性交互作用，螺位错的切应力场与间隙原子的交互作用导致的有序，扩展位错（主要是位错间的层错）与溶质的化学交互作用。作用的结果是位错附近溶质的富集及对应的低能组态，这种状态的位错运动需要更大的外应力。交互作用的例子有上、下屈服点效应及吕德丝带的出现和促进 FCC 向 HCP 的转变（提供有效的形核地点）。

实际晶体中的位错有其特定的性质，如 FCC 结构晶体内除全位错（或完整位错）外，还有肖克莱和弗兰克不全位错，不全位错的运动总产生层错。肖克莱位错只能滑移，不能攀移；弗兰克位错只能攀移，不能滑移。这些位错间的合并与分解可按 Thompson 四面体方便而明确地写出。扩展位错间有一平衡宽度，其大小主要由材料本身的层错能决定。低层错能的材料，如银或黄铜，有宽的扩展位错宽度，这种位错难以实现交滑移，应力作用下位错间的作用常会造成高的加工硬化系数，低的回复倾向/高的再结晶倾向。

三、常见问题及学习难点

- 1、如何理解位错柏氏矢量 \mathbf{b} 的物理含义？
- 2、了解位错核心结构有何实际意义？
- 3、怎样知道电镜下看到的细线是位错线？
- 4、如何区分位错受到的应力作用和位错线受到的力的作用？
- 5、如何理解位错受到的化学力和映像力？
- 6、如何理解流变应力对温度的提高逐渐降低，达到一定温度后保持恒定的现象？
- 7、割阶的正、负攀移或运动与刃位错的正、负攀移有何联系或区别？
- 8、如何理解两平行刃位错的稳定位置和亚稳位置？
- 9、怎样能比较熟练地了解 FCC 全位错、不全位错（肖克莱及弗兰克位错）之间的分解关系？
- 10、如何理解肖克莱位错的不可攀移性及弗兰克位错的不可滑移性？

四、典型题解答

1. 一个位错环能否各部分都是螺位错？能否各部分都是刃位错？为什么？

解：螺位错的柏氏矢量与位错线平行，而一个位错只有一个柏氏矢量，一个位错环不可能与一个方向处处平行，所以一个位错环不能各部分都是螺位错。刃位错的柏氏矢量与位错线垂直，如果柏氏矢量垂直位错环所在的平面，则位错环处处都是刃位错。这种位错的滑移面是位错环与柏氏矢量方向组成的棱柱面，这种位错又称棱柱位错。

2. 单晶体受拉伸形变，拉伸轴是 $[001]$ ，求对 $\mathbf{b}=a[\bar{1}01]/2$ 及 \mathbf{t} 平行于 $[1\bar{2}1]$ 的位错滑移和攀移方向所受的力。已知 $a=0.36\text{nm}$ 。

解：单位长度位错线在滑移面上所受的力 F 是外加应力场在滑移面滑移方向的分切应力 τ 与柏氏矢量 b 的乘积： $F_{\parallel}=\tau b$ 。在单向拉伸（应力为 σ ）的情况， $\tau=\sigma \cos \lambda \cos \varphi$ 。因 $\mathbf{b}=a[\bar{1}01]/2$ 及 \mathbf{t} 平行于 $[1\bar{2}1]$ ，所以滑移面是 (111) ，因此， λ 是 $[001]-[\bar{1}01]$ 的夹角， φ 是 $[001]-[111]$ 的夹角。经计算知 $\cos \lambda=1/\sqrt{2}$ ， $\cos \varphi=1/\sqrt{3}$ ；故 $\tau=\sigma/\sqrt{6}=0.408\sigma$ 。而 b 的模为 $a\sqrt{2}/2=0.36\times 10^{-9}\times \sqrt{2}/2=2.55\times 10^{-10}\text{m}$ ，最后得

$$F_g = \tau b = 0.408 \times 2.55 \times 10^{-10} \sigma \text{ N/m} = 1.04 \times 10^{-10} \sigma \text{ N/m}$$

式中 σ 的单位为 Pa。

单位长度位错线在攀移方向上所受的力 F_c 是外加应力场在刃位错半原子面的正应力 σ_c 与半量 b 的乘积: $F_c = -\sigma_c b$ 。因为 b 垂直于位错线, 所以讨论的位错是刃位错。其半原子面的法线是 b , 即为 $[\bar{1}01]$, 故 $\sigma_c = \sigma \cos^2 \varphi' = \sigma/2$ 。作用在单位长度位错线上的攀移力为

$$F_c = \frac{\sigma}{2} 2.55 \times 10^{-10} \sigma \text{ N/m} = 1.275 \times 10^{-10} \sigma \text{ N/m}$$

式中 σ 的单位为 Pa。

3. 简单立方晶体(100)面有 1 个 $b=[0\bar{1}0]$ 的刃位错

(a)在(001)面有 1 个 $b=[010]$ 的刃位错和它相截, 相截后 2 个位错产生弯结还是割阶?

(b)在(001)面有 1 个 $b=[100]$ 的螺位错和它相截, 相截后 2 个位错产生弯结还是割阶?

解: 两位错相割后, 在位错留下一个大小和方向与对方位错的柏氏矢量相同的一小段位错,

这小段位错在原位错的滑移面上, 则它是弯结; 否则是割阶。为了讨论方便, 设(100)面上 $b=[$

的刃位错为 A 位错, (001)面上 $b=[010]$ 的刃位错为 B 位错, (001)面上 $b=[100]$ 的螺位错为 C

(a)A 位错与 B 位错相割后, A 位错产生方向为 $[010]$ 的小段位错, A 位错的滑移面是 $(1$

$[010] \cdot [100] = 0$, 即小段位错是在 A 位错的滑移面上, 所以它是弯结; 而在 B 位错产生方向为 $[$

的小段位错, B 位错的滑移面是(001), $[0\bar{1}0] \cdot [001] = 0$, 即小段位错在 B 位错的滑移面上,

它是弯结。

(b)A 位错与 C 位错相割后, A 位错产生方向为 $[100]$ 的小段位错, A 位错的滑移面是 $(1$

$[100] \cdot [100] \neq 0$, 即小段位错不在 A 位错的滑移面上, 所以它是割阶; 而在 C 位错产生方向为 $[$

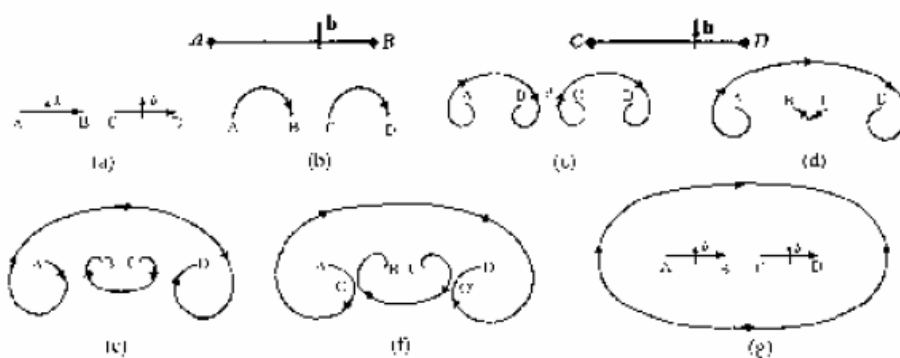
的小段位错, C 位错的滑移面是(001), $[0\bar{1}0] \cdot [001] = 0$, 即小段位错在 B 位错的滑移面上,

它是弯结。

4. 下图表示在同一直线上有柏氏矢量相同的 2 个同号刃位错 AB 和 CD, 距离为 x , 他们作 F-F 动。

(a)画出这 2 个 F-R 源增殖时的逐步过程, 二者发生交互作用时, 会发生什么情况?

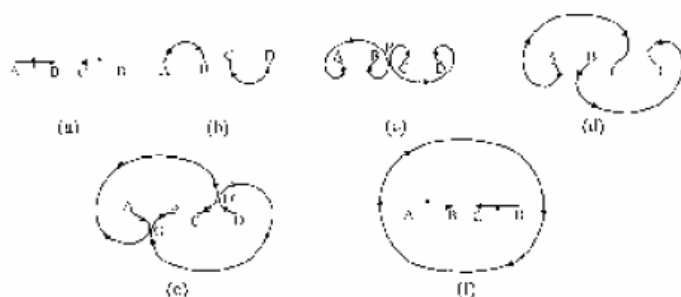
(b)若 2 位错是异号位错时, 情况又会怎样?



解: (a)两个位错是同号, 当位错源开动时, 两个位错向同一方向拱弯, 如下图(b)所示。在外力作用下, 位错继续拱弯, 在相邻的位错段靠近, 它们是反号的, 互相吸引, 如上图(c)中的 P 处所示。两段反号位错相吸抵消后, 原来两个位错连接一起, 即形成 AD 位错, 余下一段位错, 即 BC 位错, 这段位错和原来的位错反号, 如上图(d)所示。在外力作用下, BC 位错也作位错源开动, 但它的拱弯方向与原来的相反, 如上图(e)所示。两根位错继续拱弯在如图(f)的 O 及 O' 处再相遇, 因为在相遇处它们是反号的, 所以相吸抵消。最后, 放出一个大位错环, 并回复原来的 AB 和 CD 两段位错, 如上图(g)所示。这个过程不断重复增值位错。

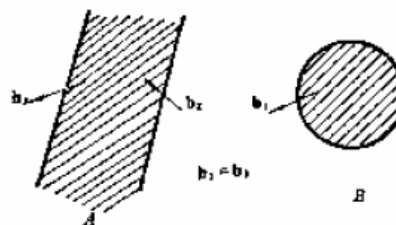
(b)两个位错是反号, 当位错源开动时, 两个位错向相反方向拱弯, 如下图(b)所示。在外力作用下, 位错继续拱弯, 在相邻的位错段靠近, 它们是反号的, 互相吸引, 如下图(c)中的 P 处所示。两段反号位错相吸抵消后, 即形成 AC 和 BD 位错, 如下图(d)所示。AC 和 BD 位错继续滑动, 它们在下图(e)的 O 及 O' 处又相遇, 在相遇处的位错也是反号的。反号位错相吸并抵消, 放出一个大位错环, 同时恢复原来的 AB 和 CD 两段位错, 如下图(f)所示。这个过程不断重复增值位错。

上述过程是两段位错间的距离 x 不是很大的情况下发生的, 如果 x 很大, 两个位错单独作为位错环开动, 他们各自放出一个位错环, 然后两个位错再合并成一个大位错环。



5. 右图中 A 是面心立方结构中的扩展位错, B 是封闭的位错环, 它的柏氏矢量和 A 左边的部分位错的相同。 A 和 B 向左移动时, 不改变其形状和尺寸, 问位错扫过后滑移面两侧原子的移动方式是否相同?

解: A 扩展位错向左移动时, 滑移面上下两侧原子相对跳动 b_3 然后跳动 b_2 , 即移动后滑移面两侧原子总跳动了 b_3+b_2 ; 而 B 位错环向左移动时, 滑移面上下两侧原子相对跳动 b_1 然后再跳动 $-b_1$, 即位错环移动后滑移面两侧原子复原, 好像没有发生跳动。

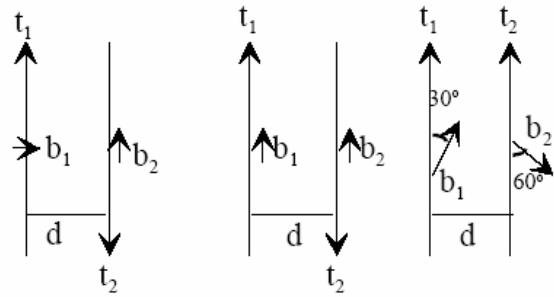


五、小测验及答案

- 1、判断下列问题的对错, 并简述原因 (30 分)

- 1)、位错的受力方向都是晶体的滑移方向。
- 2)、面心立方晶体中下述位错反应可以进行。 $\frac{1}{6}[2\bar{1}1] + \frac{1}{6}[112] \rightarrow \frac{1}{6}[301]$
- 3)、层错能高的晶体, 在形变时位错越不容易产生交滑移。
- 4)、位错线运动的方向就是晶体滑移的方向。
- 5)、两个平行位错的柏氏矢量正交, 则它们没有交互作用。

2、下列三组相互平行的相距为 d 的直位错，箭头是位错线正向，它们的柏氏矢量 b 的大小相等。问它们之间相吸还是相斥，为什么？如果两个平行的、其柏氏矢量大小与上述的 b 相同的反号刃位错，在相距为 d 时恰好能相吸对消，问给出的三组位错有没有可以相对消的，为什么？（10 分）



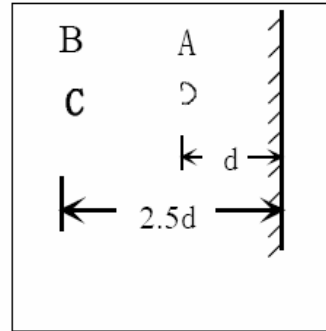
3、（10 分）如图示。

1)、A、B 分别为左螺位错和右螺位错，求开始时 A 位错所受力的大小及方向？

2)、若 A 运动，共受哪几个力？

4、什么是扩展位错？举一个例子。扩展位错的宽度主要由什么决定？扩展位错对晶体的机械性能有什么影响？（20 分）

5、简单立方晶体中有一左螺位错和一个正刃位错，两个位错都平行于 X 轴，并且两个位错所构成的平面的法线是 Y 轴方向，如图所示。若晶体的应力场各分量为 $\sigma_{xx}=\sigma_{zz}=\sigma_{xz}=\sigma_{yz}=0$ ； $\sigma_{yy}=-\sigma_{xy}$ ； $\sigma_{yy}>0$ 。数值为临界分切应力的 1.5 倍。问在应力场的作用下，两个位错如何运动？（20 分）



6、FCC 金属 (111) 面上的 $\vec{b} = \frac{1}{2}[1\bar{1}0]$ 全位错可分解为哪两个肖克莱位错？这个全位错又可由肖克莱位错 $\vec{b} = \frac{1}{6}[1\bar{1}2]$ 与哪个弗兰克位错反应生成？（10 分）

