

§ 7-2 线缺陷——位错的基本概念

线缺陷(linear defects)又称为**位错**(dislocation)。也就是说，位错是一种线型的晶体缺陷，位错线周围附近的原子偏离自己的平衡位置，造成晶格畸变。

位错有两种基本类型：

刃型位错 (edge dislocation)

螺型位错 (screw dislocation)

混合位错 (mixed dislocations)，实际晶体中的位错往往既不是单纯的螺位错，也不是单纯的刃位错，而是它们的混合形式，故称之为混合位错。

一、刃型位错

视频

1、刃型位错的形成

动画

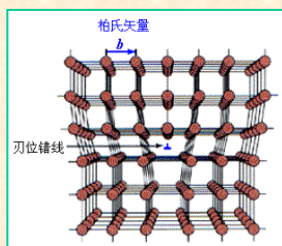
刃型位错的形成，可以描述为：晶体在切应力的作用下，一部分相对于另一部分沿一定的晶面（**滑移面**）和晶向（**滑移方向**）产生位移，从而形成多余半原子面，也就形成了刃型位错。在切应力的继续作用下，刃位错向前运动，位错经过的区域晶体发生了滑移。因此，也可以说位错是晶体已滑移区与未滑移区的分界线（其它类型的位错也是如此）。

位错线垂直于晶体滑移方向。

位错线垂直于位错运动方向。

即，晶体滑移方向与位错运动方向一致。

2、刃型位错的结构



如左图所示，晶体中多余的半原子面好象一片刀刃切入晶体中，沿着半原子面的“刃边”，形成一条间隙较大的“管道”，该“管道”周围附近的原子偏离平衡位置，造成晶格畸变。刃型位错包括“管道”及其周围晶格发生畸变的范围，通常只有3到5个原子间距宽，而位错的长度却有几百至几个原子间距。刃位错用符号“ \perp ”表示。

3、正、负刃型位错的规定

正刃型位错：半原子面位于滑移面上方，表示符号“ \perp ”

负刃型位错：半原子面位于滑移面下方，表示符号“ ∇ ”

正负刃型位错并无本质的差别，只是相对的区别。

二、螺型位错

1、螺型位错的形成

动画

螺型位错也是在切应力的作用下晶体发生滑移形成的。

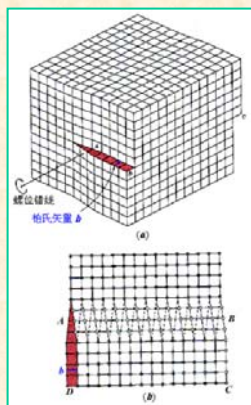
位错线平行于晶体滑移方向。

位错线垂直于位错运动方向。

即，晶体滑移方向与位错运动方向垂直。

2、螺型位错的结构

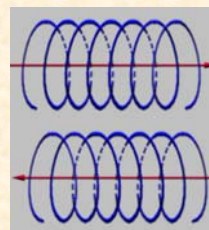
如右图所示，上半部分晶体的右边相对于它下面的晶体移动了一个原子间距。在晶体已滑移和未滑移之间存在一个过渡区，在这个过渡区内的上下二层的原子相互移动的距离小于一个原子间距，因此它们都处于非平衡位置。这个过渡区就是螺型位错，也是**晶体已滑移区和未滑移区的分界线**。之所以称其为螺型位错，是因为如果把过渡区的原子依次连接起来可以形成“螺旋线”。螺位错用环形箭头或用s表示。



3、左、右旋螺型位错的规定

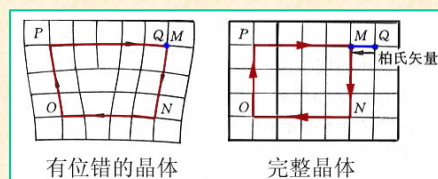
左旋螺型位错：符合左手定则(上图)

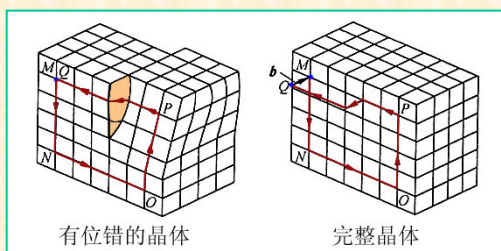
右旋螺型位错：符合右手定则(下图)



三、柏氏矢量(Burgers vector)

1、柏氏矢量b的确定方法





有位错的晶体

完整晶体

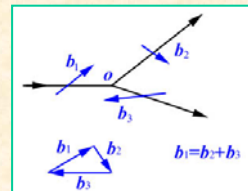
2、柏氏矢量 b 的物理意义

柏氏矢量 b 是描述位错实质的重要物理量。它反映了柏氏回路包含位错所引起点阵畸变的总积累，通常将柏氏矢量称为**位错强度**。位错的许多性质，如位错的能量、应力场、位错反应等均与其有关。它也表示出晶体滑移的大小和方向。

3、柏氏矢量 b 的守恒性

如果若干条位错线交于一点，此交汇点称为节点，那么“流入”节点的位错线的柏氏矢量之和等于“流出”节点的位错线的矢量之和。

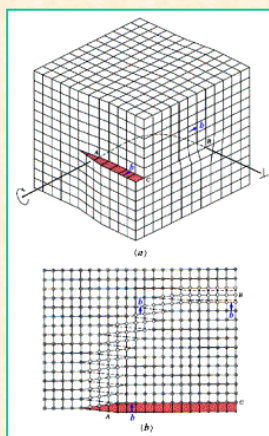
$$\sum b_i^{\text{in}} = \sum b_j^{\text{out}}$$



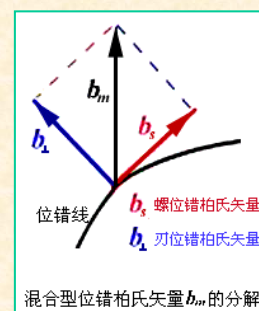
推论：一条位错线只能有一个柏氏矢量。

四、混合型位错

混合型位错是由刃型位错和螺型位错混合而成的。混合型位错用 m 表示。



由于混合型位错是由刃型位错和螺型位错合成的，所以它的柏氏矢量也是由这两个柏氏矢量合成的。或者说，混合型位错的柏氏矢量可以分解成二个矢量：一个和位错线垂直，是刃型位错的柏氏矢量；一个和位错线平行，是螺型位错的柏氏矢量。



混合型位错柏氏矢量 b_m 的分解

五、位错密度

晶体中位错的量（多少）通常用**位错密度**来表示：

$$\rho = \frac{S}{V} \quad (\text{cm}/\text{cm}^3)$$

V ——晶体的体积， cm^3

S ——该晶体中位错线的总长度， cm

为了简便，把位错线当成直线，而且是平行地从晶体的一面到另一面，这样上式可变为：

$$\rho = \frac{n \times l}{l \times A} = \frac{n}{A} \quad (1/\text{cm}^2)$$

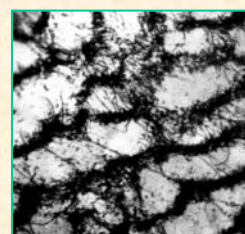
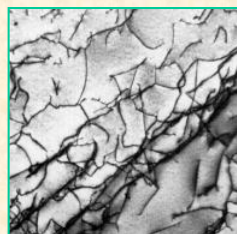
n ——面积 A 中见到的位错数目，个、条

l ——每根位错线长度，近似为晶体厚度。

位错密度可以用透射电镜、金相等方法测定。

一般退火金属中位错密度： $10^5 \sim 10^6/\text{cm}^2$ ，

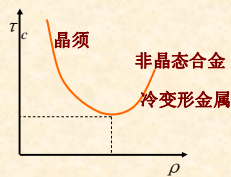
剧烈冷变形金属中位错密度： $10^{10} \sim 10^{12}/\text{cm}^2$ 。



位错密度与晶体强度的关系：

在位错密度较低时： ρ 越低， τ_c 越高。

在位错密度较高时： ρ 越高， τ_c 越高。



因此，在工程实际中可以采取两条相反的途径来获得高强度：

- 1、尽量减小位错密度。例如，晶须；
- 2、尽量增大位错密度。例如，非晶态材料。

晶体强度 τ_c 与位错密度 ρ 的关系
曲线的极小值对应于退火金属的情况。

§ 7-3 位错的运动

位错最重要的性质之一是它可以在晶体中运动。 [视频](#)

一、刃型位错的运动

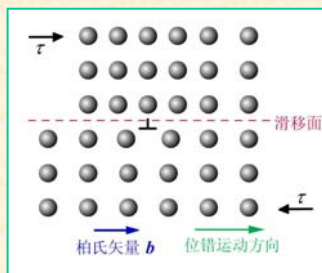
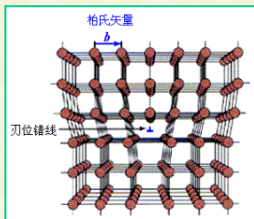
刃型位错有两种运动形式：**滑移**和**攀移**。

1、滑移

[动画](#)

位错的滑移就是它在滑移面上的运动。

滑移面——位错线 l 与柏氏矢量 b 构成的平面 ($l \times b$)。



滑移方向 v 、位错线 l 、柏氏矢量 b 之间的关系：

滑移方向与柏氏矢量方向相同，与位错线垂直： $v \parallel b \perp l$

2、攀移

只有刃型位错才能发生攀移运动，即位错在垂直于滑移面的方向上运动。其实是构成刃型位错的多余半原子面的扩大或缩小，它是通过物质迁移即原子或空位的扩散来实现的。通常把半原子面向上运动称为**正攀移**，向下运动称为**负攀移**。

[正攀移](#)

[负攀移](#)

攀移与滑移不同，攀移时伴随有物质的迁移，需要空位的扩散，需要热激活，比滑移需要更大能量。所以，攀移一般发生在冷变形金属的高温回复阶段。

(外力) 压应力促进正攀移，拉应力促进负攀移。

位错运动方向 v 、位错线 l 、柏氏矢量 b 、运动面之间的关系：

$l \times v$ 规则：

当柏氏矢量为 b 的位错线 l 沿 v 方向运动时，以位错运动面为分界面， $l \times v$ 所指向的那部分晶体必沿着 b 方向运动。

这个规则对刃型位错、螺型位错、混合型位错的任何运动(滑移、攀移)都适用。

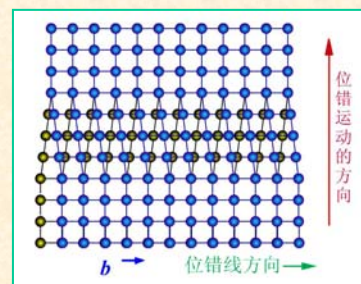


二、螺型位错的运动

螺型位错只能滑移，不能攀移。

[动画](#)

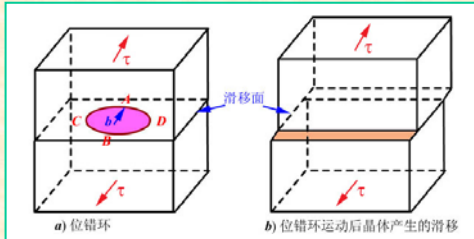
螺型位错的运动方向 v 与位错线 l 、柏氏矢量 b 垂直： $v \perp l \parallel b$



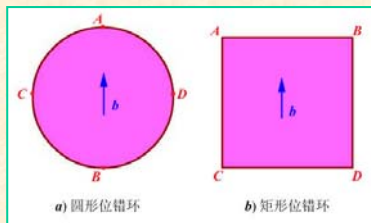
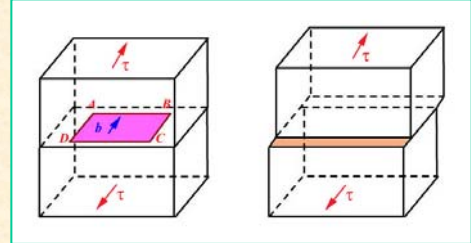
三、混合位错的运动

动画

- ★混合位错只有一个柏氏矢量，
- ★位错运动的方向总是与位错线垂直，
- ★混合位错线各部位的运动方向不尽相同，
- ★但是，晶体滑移的结果是由 b 决定的，晶体只能向一个方向滑移。



在切应力 τ 的作用下，位错环运动，晶体发生滑移。
下图中矩形位错环， AB 、 CD 两段位错线为刃型位错， AD 、 BC 两段为螺型位错。



根据柏氏矢量与位错线的关系，可以确定混合位错（环）中各段位错线的类型：

- a) 中： A 、 B 点与柏氏矢量 b 垂直，所以是单纯的刃型位错， C 、 D 点与柏氏矢量 b 平行，所以是单纯的螺型位错。
- b) 中： AB 、 CD 段与柏氏矢量 b 垂直，所以是单纯的刃型位错， AC 、 BD 段与柏氏矢量 b 平行，所以是单纯的螺型位错。