

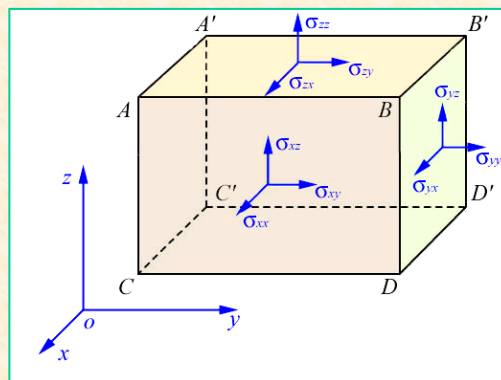
§ 7-4 位错的弹性性质

晶体中有位错存在时，位错线及其周围的晶格产生严重畸变，畸变处的晶体原子偏离平衡位置，能量增高。位错线及其周围区域产生**弹性应变**和**应力场**。

本节讨论：位错的应力场、位错的能量和张力、外力对位错的作用、位错间的交互作用等。

一、位错的应力场

从材料力学知识，我们已知固体中任一点的应力状态可用下图所示的9个应力分量来表示：



单元体各面上的应力描述

要准确地对晶体中位错周围的弹性应力场进行定量计算是复杂而困难的，为简化起见，通常采用弹性连续介质模型来进行计算。该模型作了以下**假设**：

- a. 晶体是完全弹性体；
- b. 晶体是各向同性的；
- c. 晶体中没有空隙，由连续介质组成。因此晶体中的应力应变是连续的，可用连续函数表示。

1、螺位错的应力场

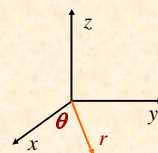
动画crew-3

力学模型：取外半径为 R ，内半径为 r_0 的各向同性材料的圆柱体，圆柱中心线作为 z 轴坐标，将圆柱沿 xoz 面切开，使切面沿 z 轴方向相对位移 b ，再把切面粘起来，这样在圆柱体内就产生了螺位错的弹性应力场。

采用柱坐标：

$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

式中， G ——材料的剪切模量
 b ——位错的柏氏矢量
 r ——距位错线中心的距离（半径）
 $\tau_{\theta z}$ —— z 方向上的切应力



由于圆柱只在 z 轴方向有位移，在 xy 方向都没有位移，所以其他分量都为0：

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{zz} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r} = \sigma_{rz} = \sigma_{zr} = 0$$

采用直角坐标：

σ ——正应力
 τ ——切（剪）应力

当应力都用 σ 表示时，下标2个字母相同时，为**正应力**，不同时为**切应力**

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0 \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = 0 \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \end{aligned} \right\}$$

螺位错的应力场的特点：

- 1) 没有正应力分量；
- 2) 切应力对称分布：在包含位错线的任何径向平面上切应力相等，与 θ 角无关。因螺位错的结构是对称的。

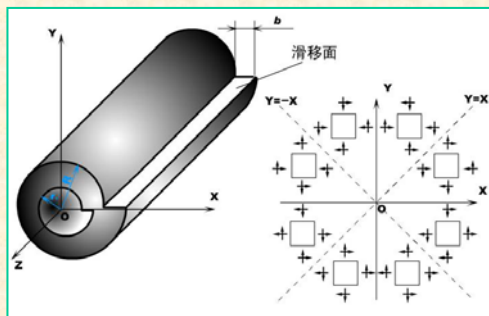
2、刃位错的应力场

动画edge-3

力学模型：取外半径为 R ，内半径为 r_0 的各向同性材料的圆柱体，圆柱中心线作为 z 轴坐标，将圆柱沿 xoz 面切开，使切面沿**径向**方向相对位移 b ，再把切面粘起来，这样在圆柱体内就产生了刃位错的弹性应力场。**刃位错的应力场比螺位错复杂。**

刃位错应力场的特点：

- 1) 正应力分量和切应力分量同时存在，各分量与 z 无关；
- 2) 以滑移面为分界面，有半原子平面的一侧为**压应力** ($\sigma_{xx} < 0$)，另一侧为**拉应力** ($\sigma_{xx} > 0$)；
- 3) 在滑移面上 ($y=0$)，没有正应力，此时切应力最大。



刃型位错的应力场

式中， ν 为泊松比； G 为切变模量。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= -\frac{\tau_0 b y (3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_{yy} &= \frac{\tau_0 b y (x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\ \tau_{xy} &= \frac{\tau_0 b x (x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0 \\ \tau_0 &= \frac{G}{2\pi(1-\nu)} \end{aligned} \right\}$$

二、位错的弹性能和线张力

1、位错的弹性能

位错的弹性能又称为**畸变能**或**应变能**。是由于晶格畸变造成了晶体内能的增加。

位错总的应变能 E_{total} 包括两部分：

位错中心区($r < 0$) E_{core} ，以外区域 E_{el} ，即， $E_{total} = E_{core} + E_{el}$ 。这里仅讨论 E_{el} ，原因：

- ◆弹性力学对 $r < 0$ 时不适用；
- ◆位错在运动或与其他缺陷交互作用时，只有 E_{el} 发生变化，从而影响位错的力学行为。

计算弹性能的方法：弹性密度积分法，做功法。教材(清华)P.248

刃位错的弹性能：

$$E_{el} = \frac{Gb^2 l}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)$$

螺位错的弹性能：

$$E_{el} = \frac{Gb^2 l}{4\pi} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)$$

G ——剪切模量
 b ——柏氏矢量(模)
 ν ——泊松比
 l ——位错线长度

混合位错的弹性能：

螺型分量的弹性能+刃型分量的弹性能

2、位错的线张力

定义——单位长度位错线的弹性能。

$$T = \frac{dE_{el}}{dl} = \frac{\tau_0 b^2}{2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)$$

式中， T 为线张力，

$$\text{对于螺位错: } \tau_0 = \frac{G}{2\pi} \quad \text{对于刃位错: } \tau_0 = \frac{G}{2\pi(1-\nu)}$$

由于 τ_0 、 r_0 和 R 都是常数，故可简写为：

$$T = \alpha G b^2$$

动画线张力

由于线张力的作用，弯曲的位错线力图伸直(缩短长度)。

三、作用于位错上的力

在**切应力**的作用下，位错将在滑移面上产生**滑移**；在**正应力**的作用下，**刃型位错**将在垂直于滑移面的方向上产生**攀移**。

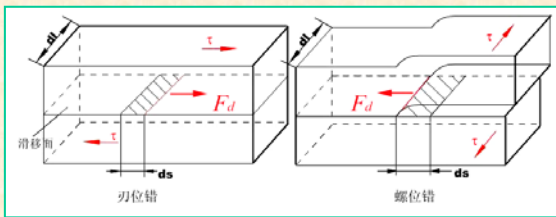
1、引起位错滑移的力

在切应力的作用下，位错在滑移面上滑移。由于位错运动的方向总是与位错线垂直，故可以设想有一个垂直于位错线的力使位错运动，这个力可以应用虚功原理求得：

$$F_d = \tau b$$

F_d 是作用在单位长度位错上的力，**方向**：垂直于位错线，并指向未滑移区。

注意：螺位错 F_d 与 τ 相互垂直。



2、引起位错攀移的力

在正应力 σ 的作用下，刃型位错将在垂直于滑移面的方向上产生攀移。

动画攀移

$$F_y = \sigma b$$

§ 7-5 位错与位错间的交互作用

结论：无论是刃位错还是螺位错，同号位错相互排斥，异号位错相互吸引。

同号刃位错间的作用——动画edge-5

异号刃位错间的作用——动画edge-6

螺位错间的作用——动画screw-5

§ 7-6 位错与点缺陷间的交互作用

链接ch03-02e6.htm

根据刃型位错和各类点缺陷应力场的特点，我们看到为了降低体系自由能，点缺陷将自发运动至如下位置：

1. 大的置换原子和间隙原子将处于正刃型位错滑移面下方区域。
2. 小的置换原子将处于正刃型位错滑移面上方区域。
3. 空位与位错的交互作用是使位错发生攀移，这种作用在高温下显得十分重要。

这样一来，那些溶质原子就偏聚在位错周围，使位错的稳定性提高。溶质原子与位错交互作用后，在位错周围偏聚现象类似气团，因由A·Cottrell首先提出，故又称为柯氏气团。气团的形成对位错具有钉扎作用，是固溶强化的原因之一。

§ 3-7 位错源与位错增殖

一、位错的起源

晶体材料在凝固、固态冷却、外延生长等过程中都会自然产生位错。

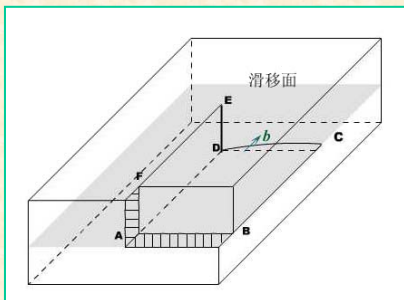
二、位错的增殖

按照前面位错运动一节的讨论，经过塑性变形后的晶体中位错数目应越来越少，因为每产生一个原子间距的滑移台阶就要消耗一个位错。然而实际恰恰相反，经剧烈塑性变形后金属晶体中位错密度可增加4~5个数量级。这个现象充分说明晶体在变形过程中位错必然在不断地增殖。

1、L型位错增殖机制

图中L型位错EDC，其柏氏矢量为 b 。这个位错的各段（ED段和DC段）不在同一个滑移面上。DC段位错在滑移过程中是围绕D点（即ED轴）旋转的。当它旋转了360°后，由于它扫过了整个滑移面，上下晶体便相对滑动了一个柏氏矢量的大小。

动画L-disl



2、弗兰克-瑞德(Frank-Read)位错源

动画Fryuan

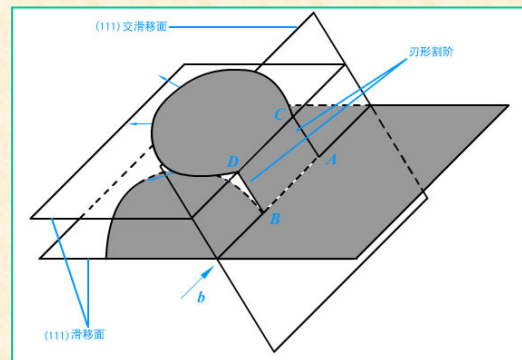
图中刃型位错AB的两端被位错网结点钉住不能运动。若沿柏氏矢量 b 方向施加一切应力，使位错沿滑移面向前滑移运动。由于AB两端固定，所以位错线只能发生弯曲。而单位长度位错线所受的滑移力 $F_d = \tau b$ 总是与位错线本身垂直，所以弯曲后的位错每一小段继续受到 τb 的作用沿它的法线方向向外扩展，其两端则分别绕节点A、B发生回转。当两端弯出来的线段相互靠近时，由于该两线段平行于柏氏矢量 b ，但位错线方向却相反，分别属于左螺和右螺位错，因此会互相抵消，形成一闭合的位错环以及位错环内的一小段弯曲位错线。只要外加应力继续作用，位错环便继续向外扩张同时环内的弯曲位错在线张力作用下又被拉直，恢复原始状态并重复以前的运动，这样源源不断地产生新的位错环，从而造成位错的增殖。

3、双层多次交滑移增殖机制

动画shuangjiaohuayi

螺型位错经双交滑移后形成了两个刃型割阶AC和BD，由于此割阶不在原位错的滑移面上，因此它们不能随原位错线一起向前运动，从而对原位错产生“钉扎”作用，使原位错在新滑移面(111)上滑移时成为一个弗兰克-瑞德源。有时在第二个(111)面扩展出来的位错圈又可以通过交滑移转移到第三个(111)面上进行增殖，从而使位错迅速增加。因此，它是一个比上述的弗兰克-瑞德源更有效的增殖机制。

4、攀移增殖机制 自学



双交滑移

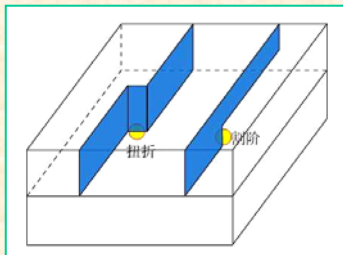
§ 3-8 位错的交割

当一位错在某一滑移面上运动时，会与穿过滑移面的其他位错交割(cross)。位错交割时会发生相互作用，这对材料的强化、点缺陷的产生有重要意义。

动画log-kink

一、割阶与弯(扭)折

一个运动的位错线，特别是在受阻的情况下，有可能其中一部分线段首先进行滑移。若由此形成的曲折线段就在滑移面上时，称为弯(扭)折(kink)；若该曲折线段垂直于位错的滑移面时，称为割阶(jog)。扭折和割阶也可由位错之间交割而形成。

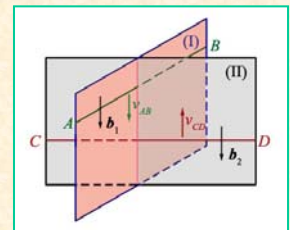


二、刃位错与刃位错的交割

1、两柏氏矢量平行

刃型位错AB：柏氏矢量 b_1 ，滑移面(I)，向下滑移。根据 $I \times v$ 规则，滑移面(I)左侧为半原子面，按 b_1 方向向下运动，右侧晶体则反向(向上)运动。

刃型位错CD：柏氏矢量 b_2 ，滑移面(II)，向上滑移。半原子面在滑移面(II)前面的晶体中，按 b_2 方向向下运动，后面的晶体则反向(向上)运动。

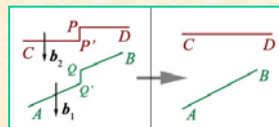


$b_1 \parallel b_2$ ，AB向下滑移，CD向上滑移，相交后相互切割。

交割后，两条刃型位错线上都形成一个位错台阶：

CD上为 $PP'=b_1$

AB上为 $QQ'=b_2$

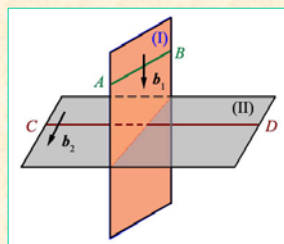


由于形成的位错台阶都在滑移面上，所以都是弯(扭)折(kink)。这些弯折在位错线张力的作用下自动消失，最终两条位错线仍是直线。

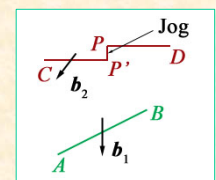
2、两柏氏矢量垂直

$b_1 \perp b_2$ ，位错AB的滑移面(I)，位错CD的滑移面(II)。

两位不能相对滑移。



两刃型位错AB、CD交割后，位错AB的形状不变，CD上产生一个位错台阶 $PP'=b_1$ 。但是这个台阶不在滑移面(II)上，因此这是一个割阶(Jog)。位错线张力不能使其消失。



当CD位错滑移时，割阶 PP' 将随CD一起滑移。也就是说，刃型位错上的割阶一般(较短时)不影响位错的滑移。

三、刃位错与螺位错的交割

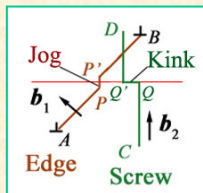
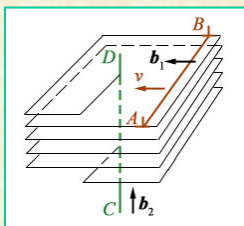
刃型位错AB：柏氏矢量为 b_1 ，滑移方向 v ，半原子面在滑移面上方。

螺型位错CD：柏氏矢量为 b_2 ，右旋螺位错，静止不动，或看作与刃型位错相对运动。

交割后，**AB**上形成刃型台阶

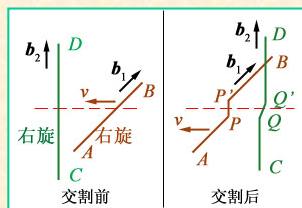
$PP' (=b_2)$ ， PP' 台阶是割阶。可以随**AB**一起滑移。

CD上形成的也是刃型台阶 $QQ' (=b_1)$ ， QQ' 是弯折而不是割阶，在位错线张力作用下可能会自动消失，使**CD**恢复直线状。



四、螺位错与螺位错的交割

螺型位错**AB** (柏氏矢量 b_1)和**CD** (柏氏矢量 b_2)相互垂直，都是右旋。向左(v)滑移，**CD**不动，或看作向右滑移。交割后分别形成刃型台阶。



AB上的刃型台阶 $PP' (=b_2)$ 为割阶，不能随**AB**一起继续运动；**CD**上的刃型台阶 $QQ' (=b_1)$ 是弯折，在位错线张力作用下，会消失，使**CD**恢复直线状。

五、超割阶

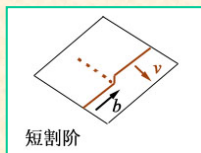
割阶长度为1个原子间距时称为**基本割阶**，大于1个原子间距时称为**超割阶**(Superjogs)。

超割阶的形成：当一个螺位错在滑移过程中切过一系列螺位错时，该螺位错上就会形成一系列刃型割阶。在位错线张力的作用下，相邻的割阶或相互抵消(异号位错)，或相互叠加为超割阶。

根据长度超割阶分为**短割阶**、**中割阶**和**长割阶**。它们对位错运动的影响如下：

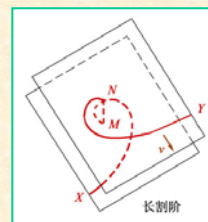
1、短割阶

短割阶是长度只有几个原子间距的割阶。螺型位错在滑移时有可能拖着割阶一起运动，而在晶体中留下若干空位。



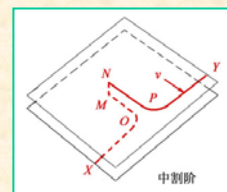
2、长割阶

长割阶是长度大于60个原子间距的割阶。除非温度很高、正应力很大，否则这种割阶是不能攀移的。因此，当螺型位错滑移时割阶被钉扎住，成为**极轴位错**。螺位错段则绕着它旋转，成为**扫动位错**。这实际上是两个同极轴的L型位错源。

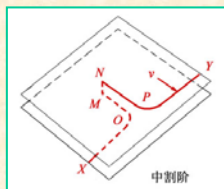


3、中割阶

中割阶的长度介于短割阶和长割阶之间。割阶**MN**仍然难以攀移，为极轴位错；**XM**和**NY**仍为扫动位错。



但与长割阶不同的是，当这两个扫动位错旋转到有两段(**MO**,**NP**)相互平行时，由于它们之间距离很近，而交互作用力(吸引力)就会很强，以致这两段平行的位错不可能继续滑移(旋转)。这样，就形成了一对相距很近的相互平行的异号位错(**OM**和**NP**)，这对位错称为**位错偶极子**。



XO和**PY**两段螺位错可以继续滑移，位错偶极子越来越长。

最终会由于螺位错段发生交滑移，位错偶极子被中断，形成所谓的棱柱形位错环(b 于环面垂直的位错环)。见清华教材，P.276图4-65。棱柱形位错环还会由于两条长边间的强烈吸引而分裂成许多小位错环(空位环或间隙原子环)。