

无机材料基础I

主讲：李志成

中南大学
材料科学与工程学院
材料化学研究所

第 6 章 晶体线缺陷——位错

本章学习要求：

- ① **了解**：位错的概念、基本类型、形成方式。
- ② **理解并掌握**：不同类型位错的几何特征与运动特征，位错的产生与增值。
- ③ **难点**：位错的相互作用、位错弹性能；实际晶体中的位错(不全位错)的形成与缺陷特征。

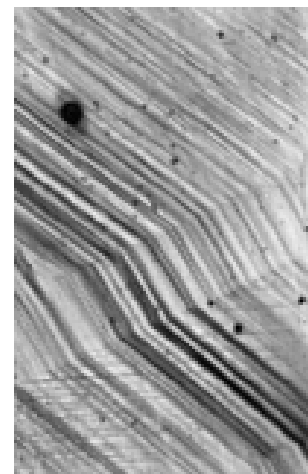


一、位错概念的引入

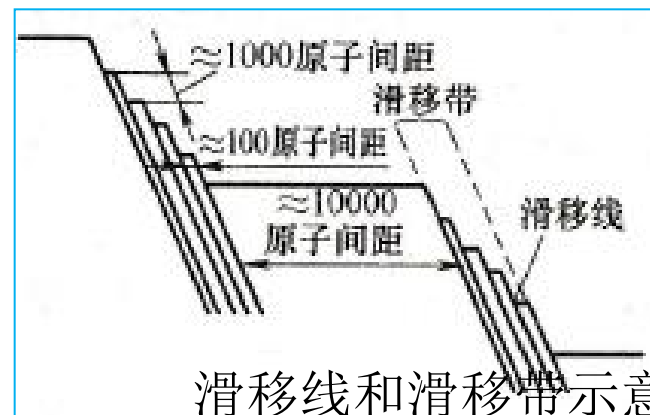
早在认识位错前，人们对晶体塑性变形的宏观规律已作了广泛的研究。发现：

塑性变形的主要方式是**滑移**，即在切应力作用下，晶体相邻部分彼此产生相对滑动。

- **晶体滑移**：沿一定的滑移面(密排面)和其上的一个滑移方向进行晶体相邻部分彼此产生相对滑动。
- 只有当切应力达到一定临界值时，滑移才开始。此切应力被称为**临界分切应力(τ_m)**，即晶体的**切变强度**。

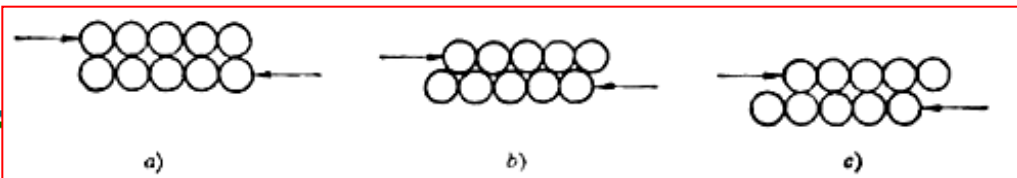


低碳钢拉伸样中的滑移带



滑移线和滑移带示意图

一、位错概念的引入

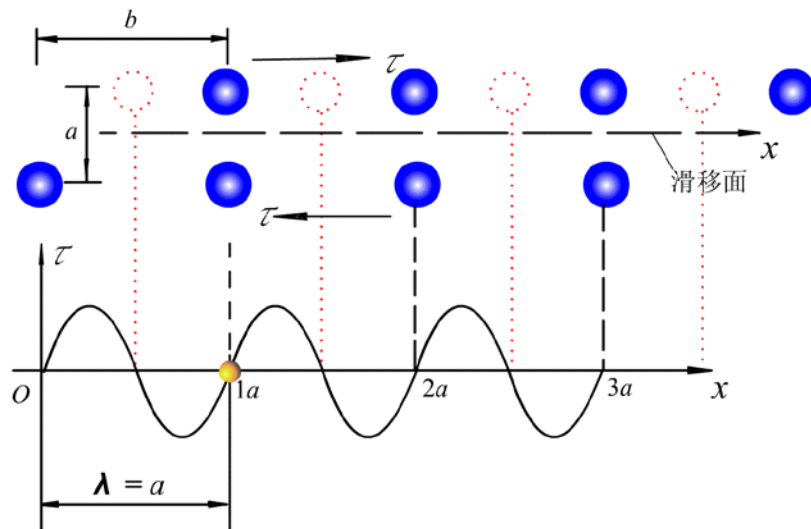


1926年，弗兰克(Frank)从刚体滑移模型(所有原子同步平移)出发，推算晶体的理论强度。

设滑移面上沿滑移方向的外加剪切应力为 τ ，滑移面上部晶体相对下部发生位移为 x 。则设所需的 τ 为周期函数：

$$\tau = \tau_m \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$

其中： τ_m 是晶体的理论剪切强度。



一、位错概念的引入

当位移很小($x \ll a$, $x \ll b$), 可得:

$$\tau \approx \tau_m \left(\frac{2\pi x}{b} \right)$$

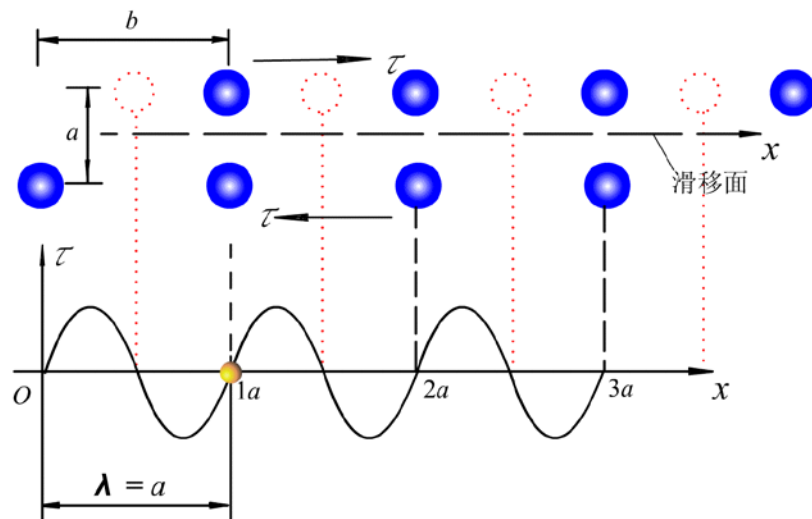
由虎克定律, 可得:

$$\tau = G\gamma = G\left(\frac{x}{a}\right)$$

其中 G 为切变模量, γ 为切应变。

- 比较上两式得: $\tau_m = \frac{G}{2\pi} \left(\frac{b}{a} \right)$
- 若取 $a \approx b$, 则 $\tau_m = \frac{G}{2\pi} \approx 0.1G$

- 当 $\tau > \tau_m$ 后, 理想完整晶体就开始发生滑移变形了。



一、位错概念的引入

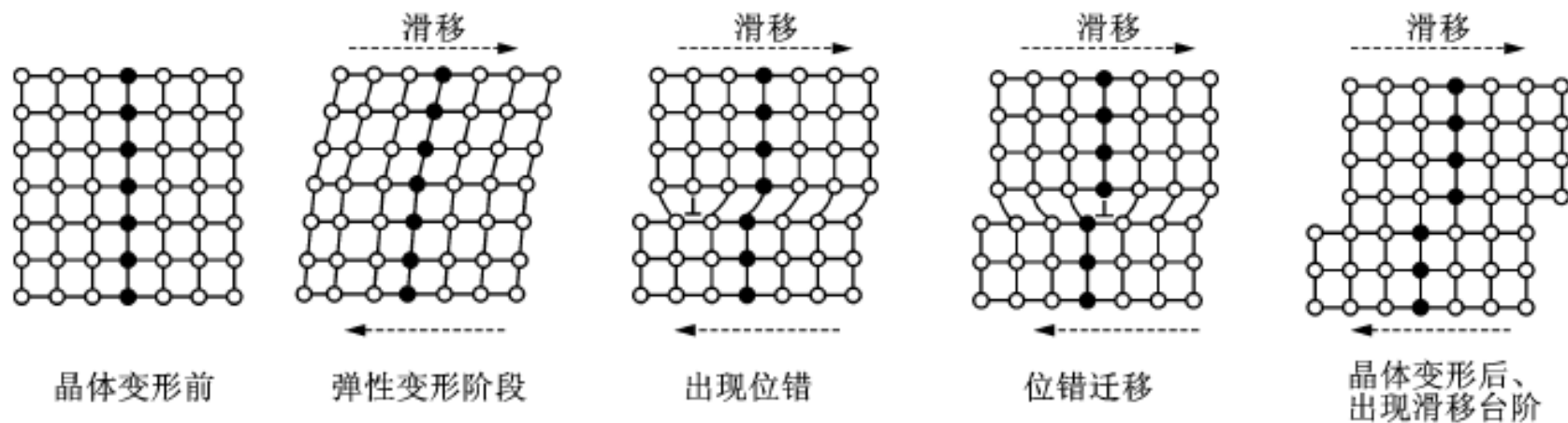
- 一般金属: $G \approx 10^4 \sim 10^5 \text{ MPa}$, $\tau_m \approx 10^3 \sim 10^4 \text{ MPa}$,
 - 但一般纯金属单晶体实际切变强度只有 $1 \sim 10 \text{ MPa}$ 。
 - 实验测得的实际强度比理论强度低了 3 个数量级。
-
- 即使采取更切实际的原子间作用力规律来代替上面所用的正弦关系, 也仅仅把 τ_m 减小到 $G/30$ 左右, 它仍比临界分应力的实验值高出 $3 \sim 4$ 个数量级。
 - 也就是说: 实际晶体在比理想完整晶体的理论切变强度小一千到一万倍的应力作用下就开始滑移变形。



一、位错概念的引入

为何理论切变强度与实际切变强度间的差异巨大？

- ① 从根本上否定理想完整晶体的刚性相对滑移的假设，即实际晶体是不完整的，而有缺陷的。
- ② 滑移也不是刚性的，而是从晶体中局部薄弱地区(即缺陷处)开始，而逐步进行的。

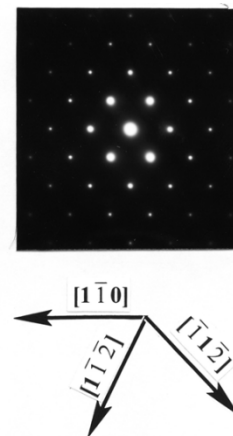
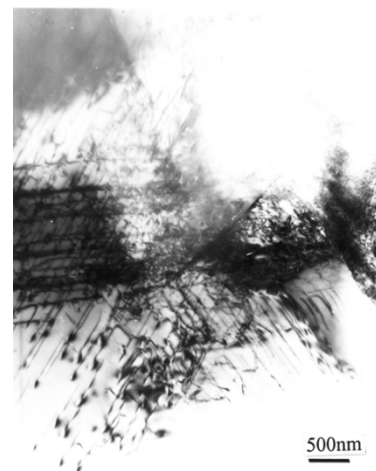


一、位错概念的引入

1934年，泰勒(G.I. Taylor)、波朗依(M. Polanyi)和奥罗万(E. Orowan)几乎同时从晶体学角度提出位错概念。

泰勒把位错和晶体塑性变形联系起来，开始建立并逐步发展了位错理论。

直到1950年后，电子显微镜技术的发展，证实了位错的存在。



TEM观察位错线组态



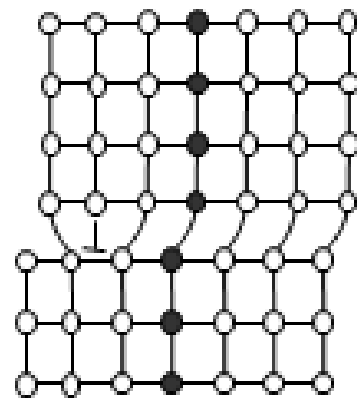
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

一、位错概念的引入

位错(dislocation):

- 在材料科学中，指晶体材料的一种内部微观缺陷，即原子的局部不规则排列(晶体学缺陷)。
- 从几何角度看，位错属于一种线缺陷，可视为晶体中已滑移部分与未滑移部分的分界线。

其存在对材料的物理性能，尤其是力学性能，具有极大的影响。



二、位错的基本类型

位错是线缺陷，主要有两种基本形式：

刃型位错(edge dislocation)

螺型位错(screw dislocation)。

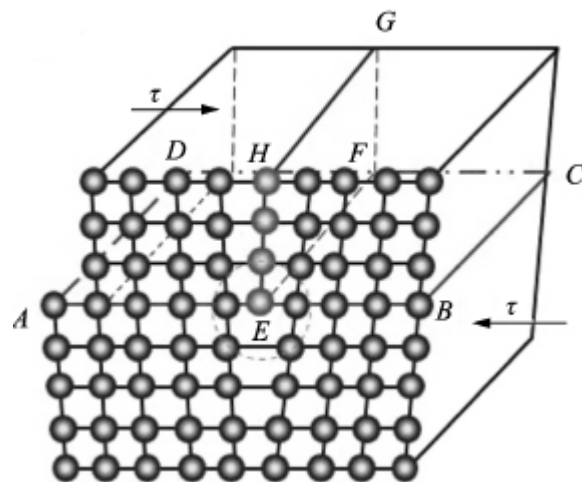
混合位错(mixed dislocation)兼有前面两者的特征。



二、位错的基本类型

2.1 刃型位错

- 晶体在外切应力 τ 作用下，以**ABCD面为滑移面**发生滑移。**EFGH面以左**发生了滑移、以右尚未滑移，致使ABCD面上下两部分晶体间产生了原子错排。
- **EF线**将滑移面分成**已滑移区**和**未滑移区**，即是“**位错**”。
- **EFGH晶面**称**多余半原子面**。犹如在晶体中插入一把刀刃，故称之为“**刃型位错**”，“**刃口**”**EF**称为**刃型位错线**。

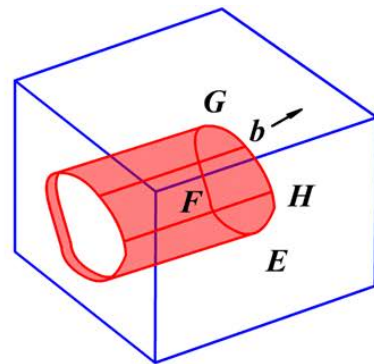
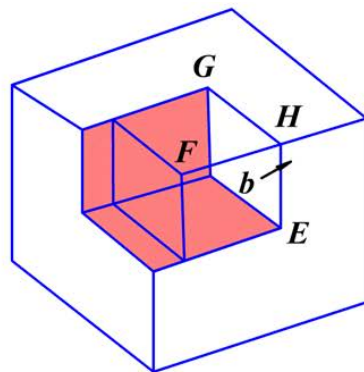
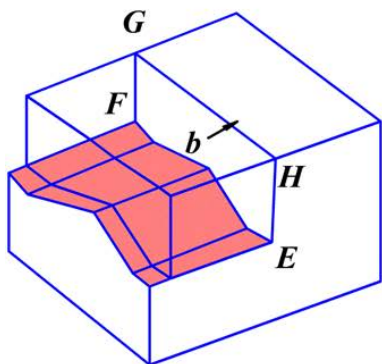


二、位错的基本类型

2.1 刃型位错

刃型位错结构特点

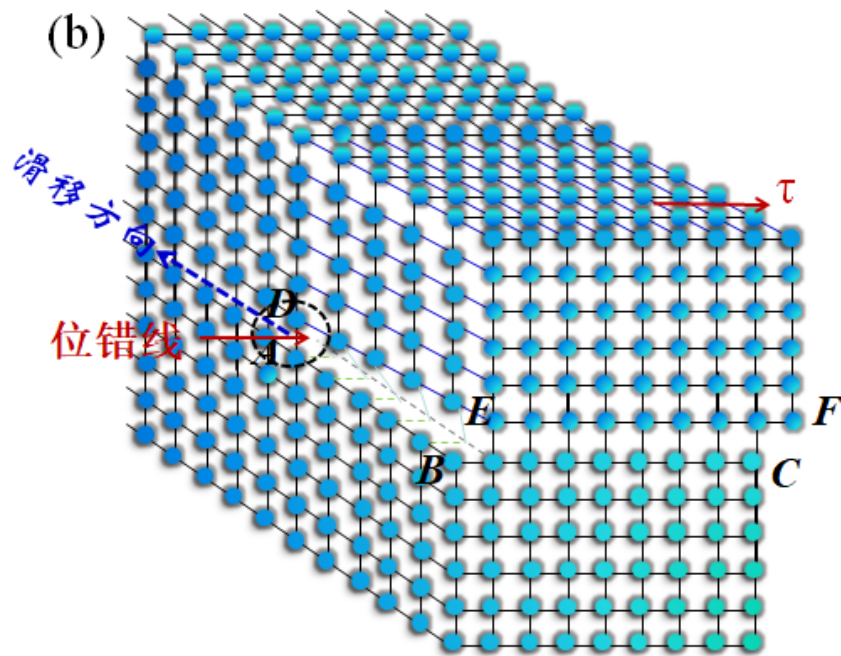
- ① 有一个额外半原子面，晶体上半部多出原子面的位错称正刃型位错，用符号“ $\perp$ ”表示；
反之，为负刃型位错，用“ $\neg$ ”表示。（此正、负之分只具相对意义而无本质区别，如将晶体旋转 180° ，同一位错的正负号发生改变）
- ② 刃位错线可以是直线、折线、曲线或环。但**位错线必与滑移方向相垂直**，即垂直于滑移矢量 $\mathbf{b}$ 。



二、位错的基本类型

2.2 螺型位错

- 晶体在外切应力 τ 作用下，右端晶体上下区在滑移面(ABC)发生一个原子间距的切变，使右侧晶体上下两部分发生晶格扭动。
- AD所在位置且指向晶体的区域为已滑移区与未滑移区的交界处，即**位错线**。
- 在**BC线**与**位错线**之间的原子失去正常相邻关系，连接则成了一个**螺旋路径**，该路径所包围的呈长管状原子排列紊乱区即成**螺型位错**。



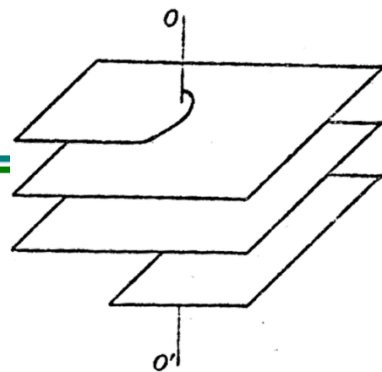
螺型位错的原子组态



二、位错的基本类型

2.2 螺型位错

螺型位错特征



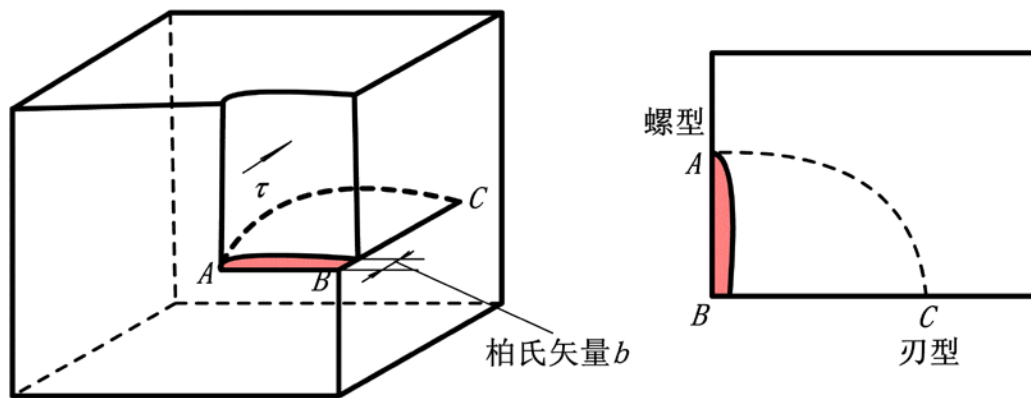
- ① 螺型位错无额外半原子面，原子错排呈轴对称；
- ② 螺型位错线与晶体滑移矢量平行，故一定是直线；
- ③ 包含螺位错的面必然包含滑移矢量，故螺位错可以有无穷个滑移面，但实际上滑移通常是在原子密排面上进行(故有限)；
- ④ 螺位错周围的点阵发生了弹性畸变，但只有平行于位错线的切应变，无正应变(在垂直于位错线的平面投影上看不出缺陷)；
- ⑤ 位错线的移动方向与晶体滑移方向、应力矢量互相垂直；
- ⑥ 螺位错形成后，所有原来与位错线相垂直的晶面，都将由平面变成以位错线为中心轴的螺旋面。



二、位错的基本类型

2.3 混合位错

- 位错线的滑移矢量既不平行也不垂直于位错线，而与位错线相交成某任意角度，此位错称为混合位错。这是一种更为普遍的位错存在形式。
- 晶体右上角在外力 F 作用下发生切变，在滑移面 ABC 范围内原子发生了位移，其滑移矢量用 b 表示，弧线 AC 即是位错线（为已滑移区和未滑移区的边界），与滑移矢量成任意角度。



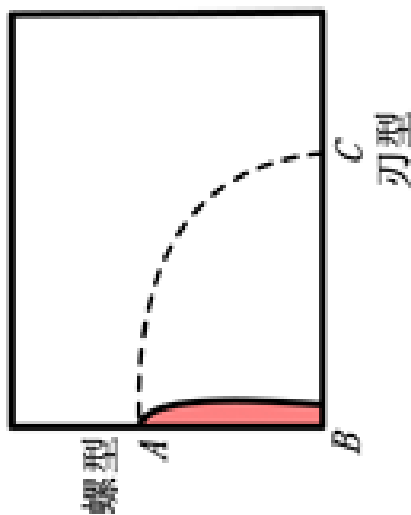
混合位错的形成

二、位错的基本类型

2.3 混合位错

在AC位错线是一条曲线，

- 靠近A端：位错线段平行于滑移矢量 $\mathbf{b}$ ，属于纯螺型位错；
- 靠近C端：位错线段垂直于滑移矢量 $\mathbf{b}$ ，属于纯刃型位错；
- 其余部分线段与滑移矢量 $\mathbf{b}$ 成任意角度，均属混合位错，其中的每一段位错线均可分解为刃型和螺型两个分量



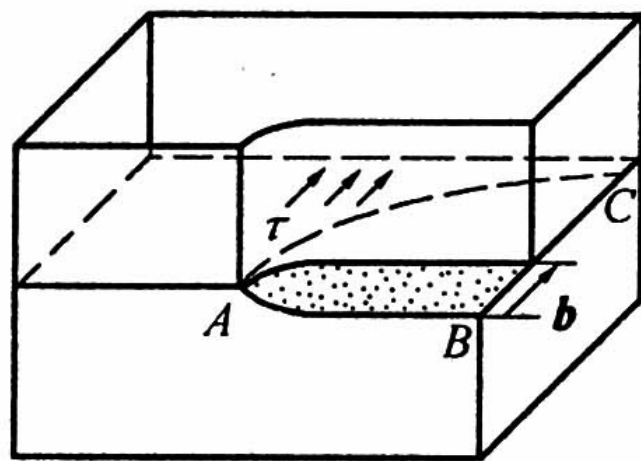
二、位错的基本类型

小结与综合

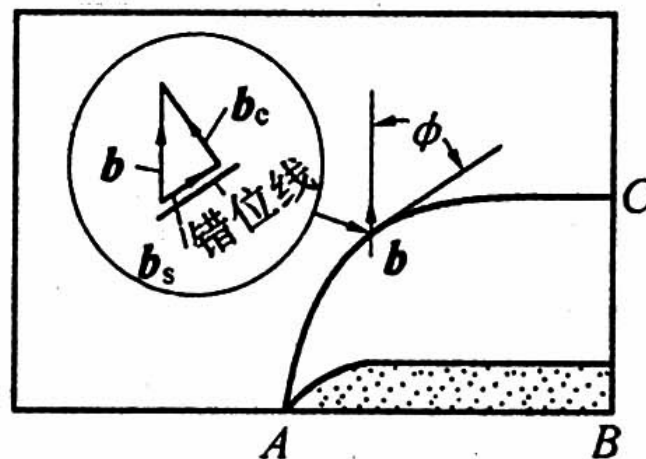
混合位错可分解为螺型分量 b_s 与刃型分量 b_e ,

$$b_s = b \cos \varphi$$

$$b_e = b \sin \varphi。$$



(a)



(b)

混合位错

(a) 立体图

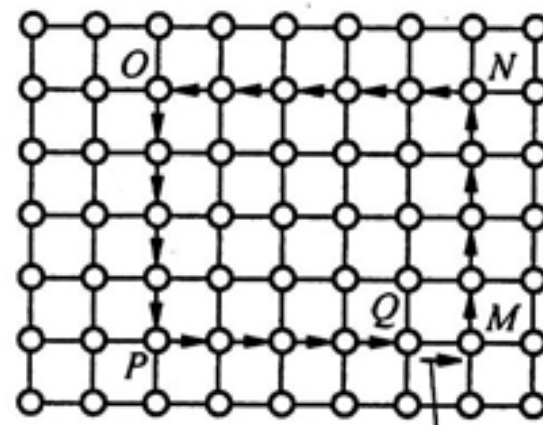
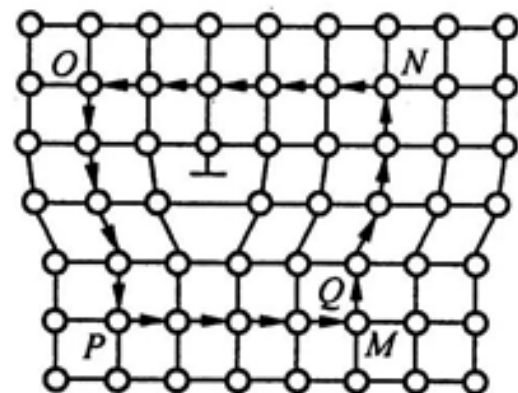
(b) 俯视图



三、 柏氏矢量

3.1 柏氏矢量的确定方法

- ① 先假定位错线方向，一般是从纸面向外或由上向下为位错线正向；
- ② 按右手法则做柏氏回路，右手大拇指指向位错线正向，回路方向按右手螺旋方向确定。
- ③ 从实际晶体中任一原子M出发，避开位错附近的严重畸变区作一闭合回路MNO PQ，回路每一步连接相邻一个原子。
- ④ 按同样方法，在完整晶体中做同样回路，步数、方向与上述回路一致，这时终点Q和起点M不重合，由终点Q到起点M引一矢量QM即为**柏氏矢量b**。

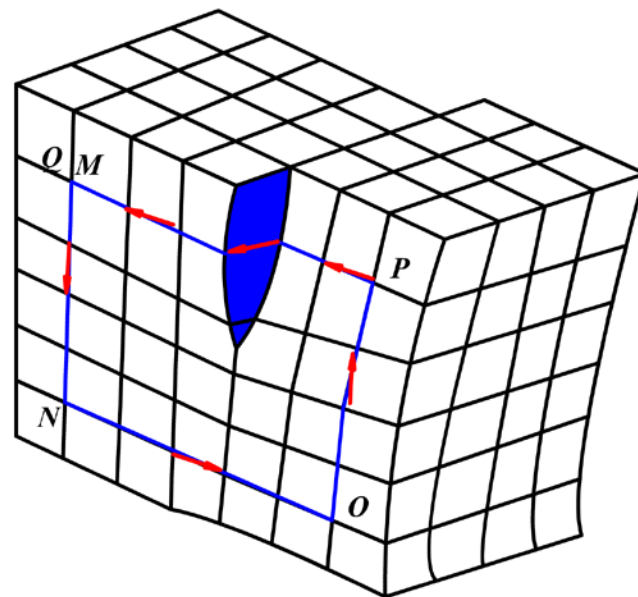
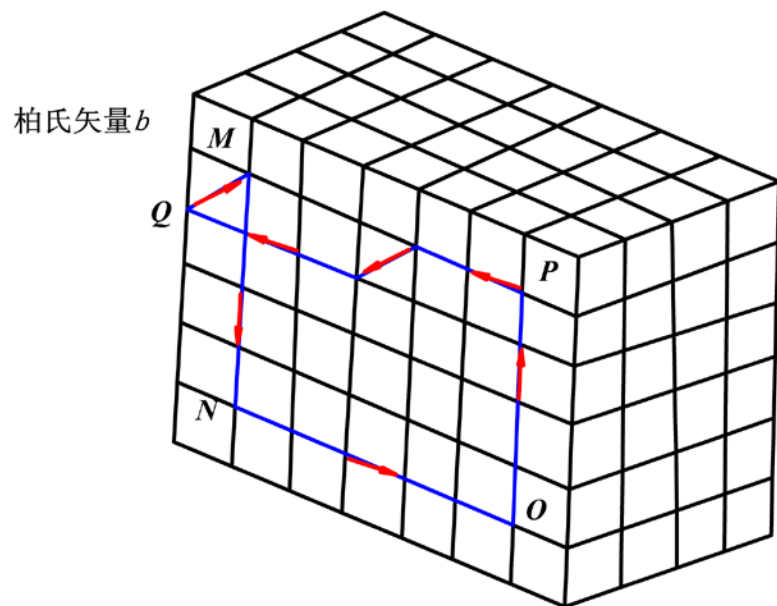


柏氏矢量b

三、 柏氏矢量

3.1 柏氏矢量的确定方法

螺型位错柏氏矢量 b 的确定：（左螺型位错）



(a)完整晶体 (b)有位错的晶体

三、柏氏矢量

3.2 柏氏矢量的物理意义

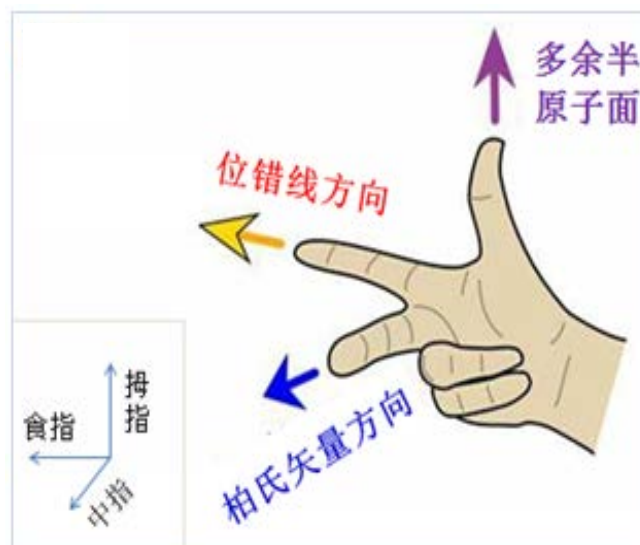
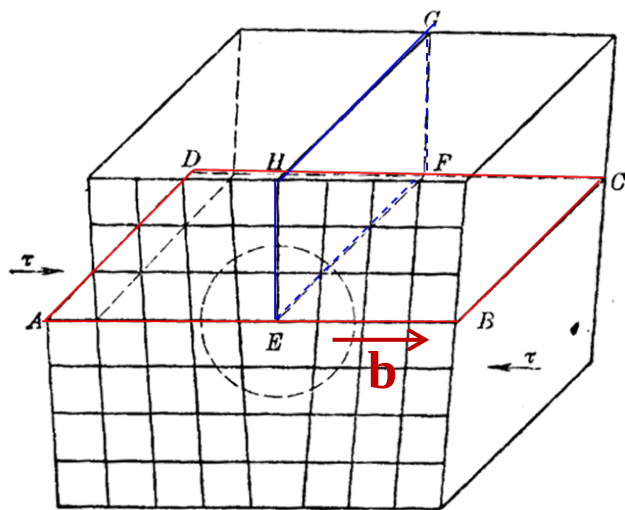
- ① **表征了位错周围点阵畸变总积累。** 位错周围原子都不同程度偏离其平衡位置，离位错中心越远的原子偏离量越小。柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 表示其畸变总量的大小和方向。柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 越大，位错周围的点阵畸变也越严重。
- ② **表征了位错强度。** 柏氏矢量的模 $|\mathbf{b}|$ 称为位错强度。同一晶体中， $\mathbf{b}$ 更大的位错具有更严重的点阵畸变，能量更高且更不稳定。
- ③ **表示出晶体滑移的大小和方向。** 位错的许多性质，如位错的能量、应力场、位错受力等，都与 $\mathbf{b}$ 有关。
- ④ **利用柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 与位错线的关系，可判定位错类型。**
 - 刃型位错：柏氏矢量 $\mathbf{b} \perp$ 位错线；
 - 螺型位错：柏氏矢量 $\mathbf{b} \parallel$ 位错线，其中同向为右螺，反向为左螺。
 - 混合型位错：柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 和位错线成任意角度。

三、 柏氏矢量

3.3 位错线方向确定

3.3.1 刃型位错

右手法则：以右手的拇指、食指及中指分别指向垂直的三个方向。食指代表位错线方向、中指代表柏氏矢量方向，则拇指的指向即为刃型位错多余半原子面所在的位向，若拇指向上，即为正刃型位错，否则为负刃型位错。



三、 柏氏矢量

3.3 位错线方向确定

3.3.2 螺型位错

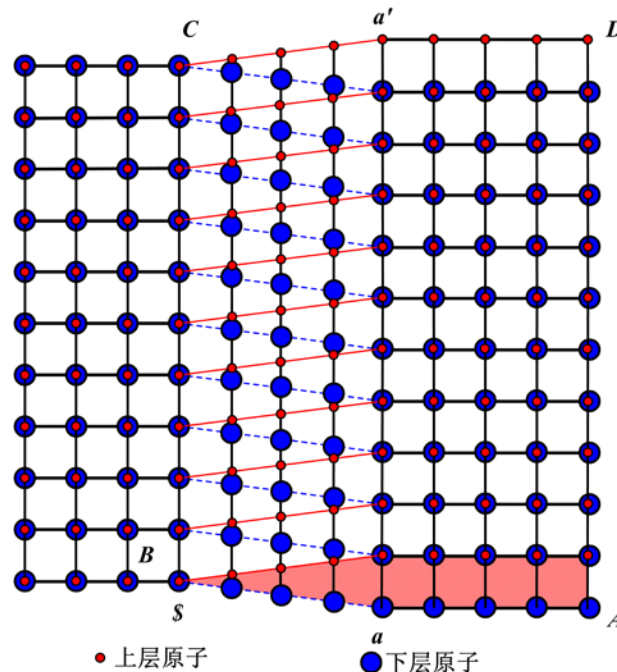
用右手螺旋法则来确定回路方向。

拇指——位错线方向；四指——柏氏矢量回路方向。

若柏氏矢量与位错线方向一致，则为右螺型位错；
方向相反，则为左螺型位错。



柏氏回路方向的确定

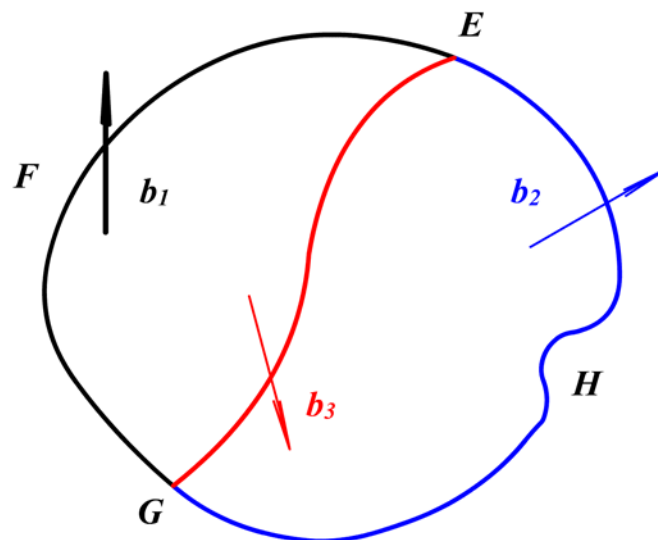
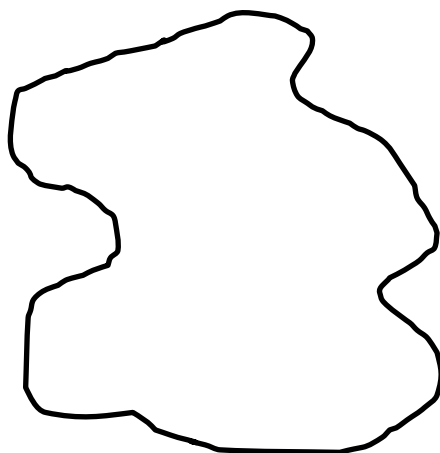


三、 柏氏矢量

3.4 柏氏矢量的守恒性质

柏氏矢量守恒性： 柏氏矢量与回路起点选择、具体途径、大小无关，或在柏氏回路任意扩大和移动，只要不与原位错或其他位错相遇，畸变总累积不变，其柏氏矢量是唯一的(守恒性)。

■ **推论1：** 一根不分叉的任何形状的位错只有一个柏氏矢量。



三、 柏氏矢量

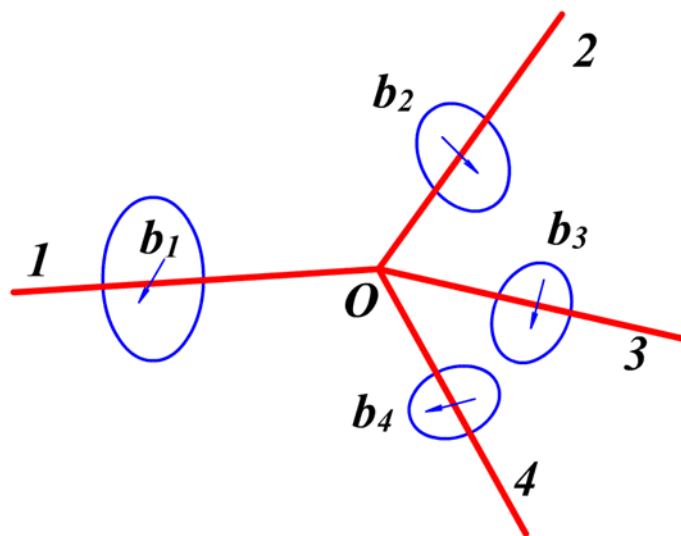
3.4 柏氏矢量的守恒性质

推论2：相交于一点的各位错，同时指向结点或离开结点时，各位错的柏氏矢量 b_i 之和为零。

即：几根位错相遇于一点，朝向节点的各位错柏氏矢量 b_i 之和必等于离开节点各位错柏氏矢量之和。如图，即O点的柏氏矢量之和为零， $\Sigma b_i = 0$ 。

$$b_1 = -(b_2 + b_3 + b_4) \quad (\text{注：矢量和})$$

$$b_1 + b_2 + b_3 + b_4 = 0$$

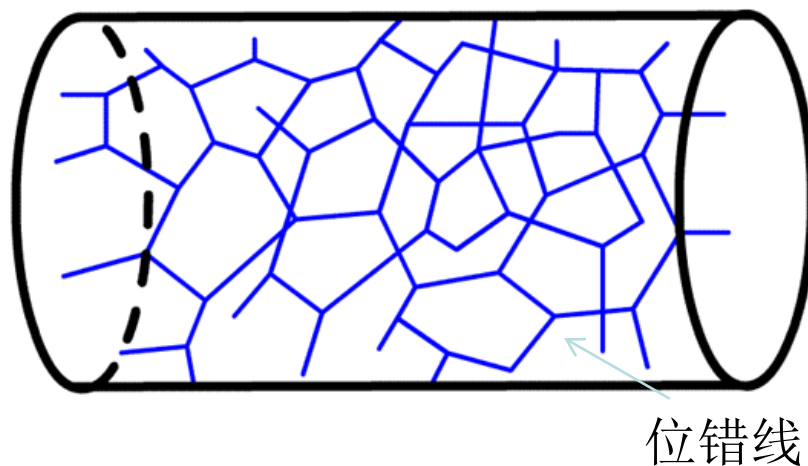


三、 柏氏矢量

3.4 柏氏矢量的守恒性质

- **推论3**: 从柏氏矢量特性可知, **位错线不能中断于晶体的内部, 而只能终止在晶体表面或晶界上, 即位错线的连续性。**

在晶体内部, 它只能自成封闭的环或与其他位错相遇于节点形成**位错网络**, 或**终止于晶体表面**。



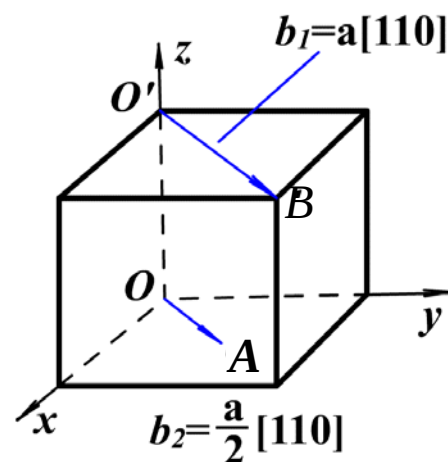
三、 柏氏矢量

3.5 柏氏矢量的表示方法

- 柏氏矢量或滑移矢量可用符号 $\mathbf{b} = k\mathbf{a}[uvw]$ (或者 $k=1/n$, n 为正整数) 表示。
- **步骤:** 将某个滑移矢量在晶胞坐标 xyz 轴上的分量, 依次填入 $[\]$ 号内, 再提取公因数 k 作为系数, 放在 $[\]$ 号前, 使 $[\]$ 号内的数字为最小整数。
- $[uvw]$ 为矢量方向, 与表示晶体的晶向符号相同, 不同之处是多了 ka 因子。

如: 某滑移矢量 OA 在三轴上分量依次为 $a/2$ 、 $a/2$ 、 0 , 则柏氏矢量符号为:

$$\vec{b} = \left[\frac{a}{2} \frac{a}{2} 0 \right] = \frac{a}{2} [110]$$



三、 柏氏矢量

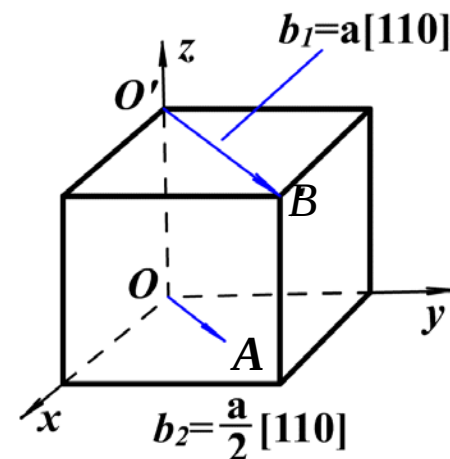
3.5 柏氏矢量的表示方法

□ **柏氏矢量**，不仅可表示矢量的方向(用晶向指数表示)，同时也表示出柏氏矢量的模的大小。

□ 位错的柏氏矢量： $\mathbf{b} = k\mathbf{a}[uvw]$

□ 柏氏矢量模：

$$|\mathbf{b}| = ka\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$



□ 一定晶体中的柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 是可变化的，但变化是不连续的，其取向与取值也不是任意的。因为晶体的滑移方向是一定的，且滑移方向上的晶体的周期性，滑移的量只能是晶体周期的整数倍。

四、位错的运动

■ 位错线在晶体中的移动—位错运动。

当晶体中存在位错时，只需用一个很小的推动力便能使位错发生滑动。

晶体的宏观塑性变形实际上是通过位错运动来实现的。

位错运动方式：滑移和攀移。

■ **滑移**：位错线沿滑移面的移动。

■ **攀移**：位错线垂直于滑移面的移动。

刃位错的运动：有滑移和攀移两种方式。

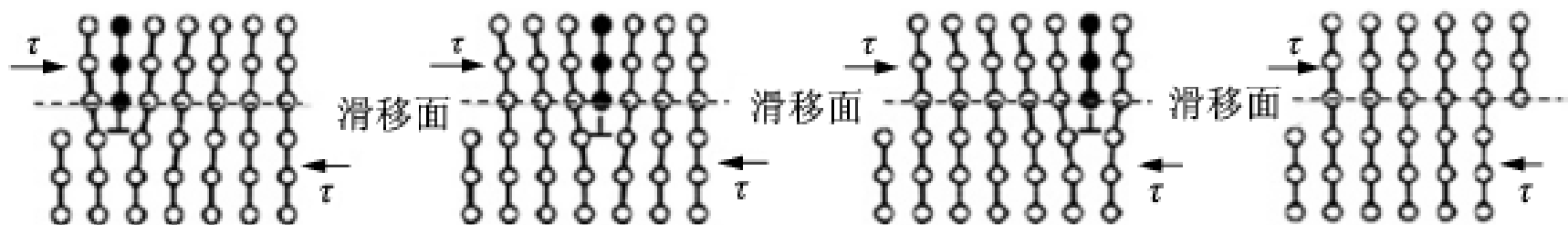
螺位错的运动：只作滑移、不存在攀移。



四、位错的运动

4.1 位错的滑移

位错的滑移是在外加应力的作用下，通过位错中心附近的原子沿**b**方向作少量的移动(小于一个原子间距，故只需加很小切应力就可实现)而逐步实现的。



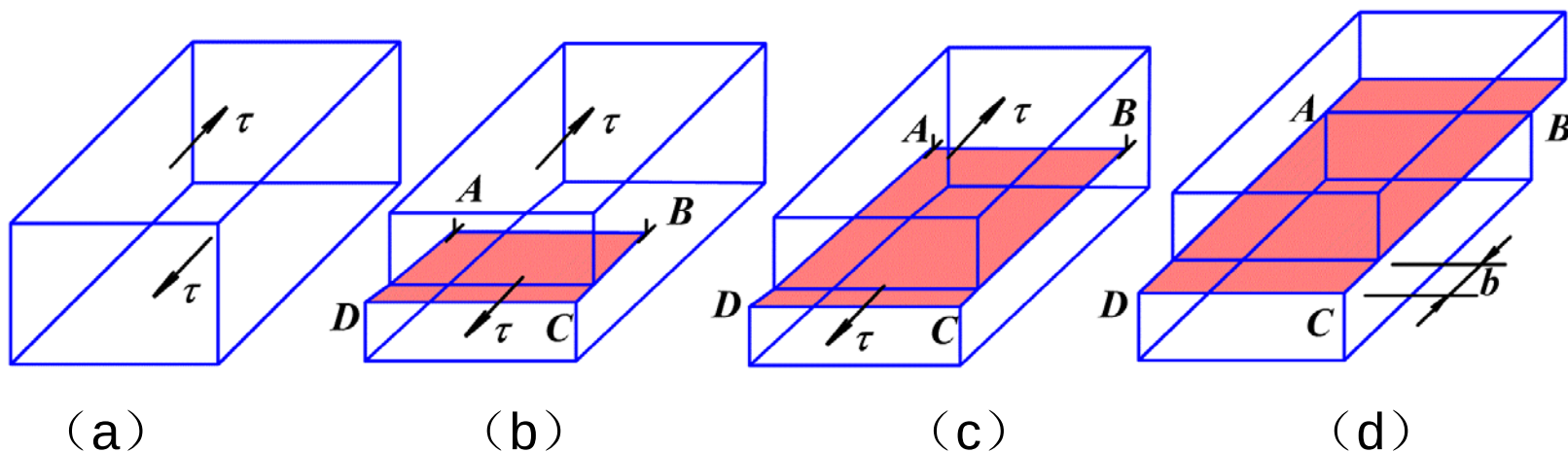
一个刃型位错的滑移过程。



四、位错的运动

4.1 位错的滑移——刃型位错的滑移

- 位错扫过整个滑移面，即位错运动移出晶体表面时，滑移面两边晶体将产生一个柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 的位移。
- **刃位错移动方向**：与位错线垂直，即与其柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 一致。
- **刃位错滑移面**：由位错线与其柏氏矢量所构成平面。

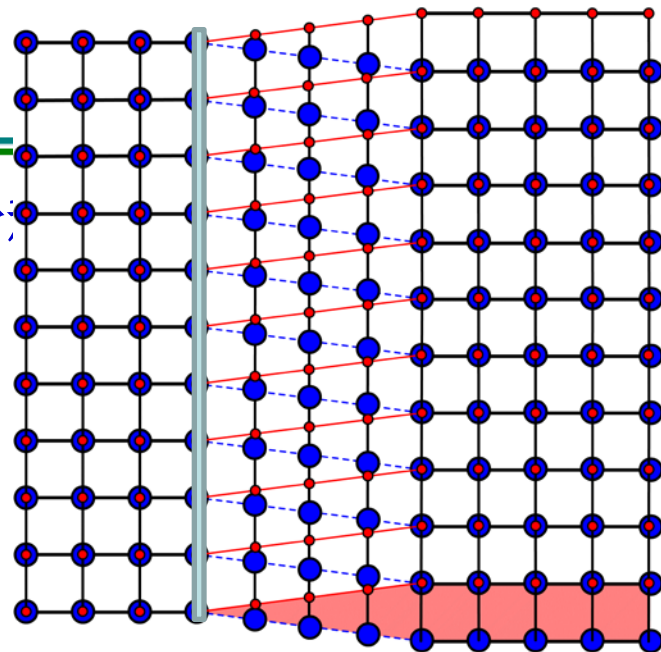


(a)原始状态的晶体, (b)(c)位错滑移中间阶段
(d)位错移出晶体表面，形成一个台阶

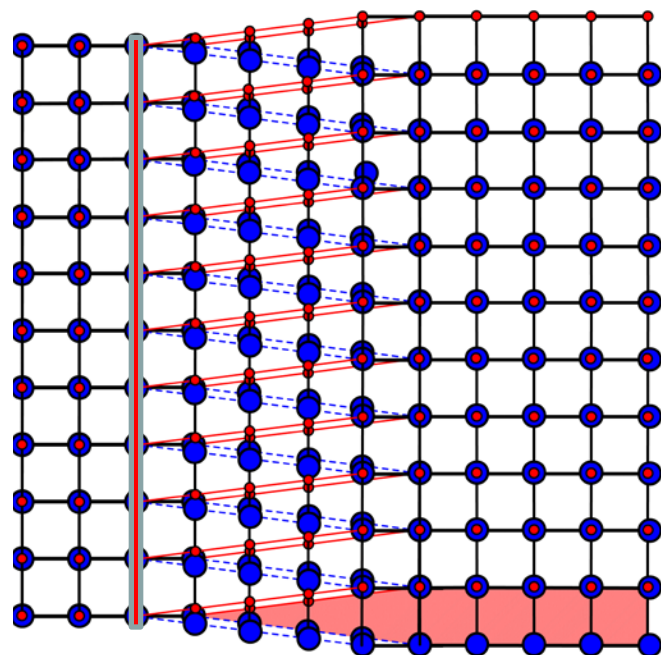
四、位错的运动

4.1 位错的滑移——螺型位错的滑移

- 在切应力 τ 作用下，当原子做很小距离的移动时，螺位错本身向左移动了一个原子间距。
- 滑移台阶(阴影部分)亦向左扩大了一个原子间距。



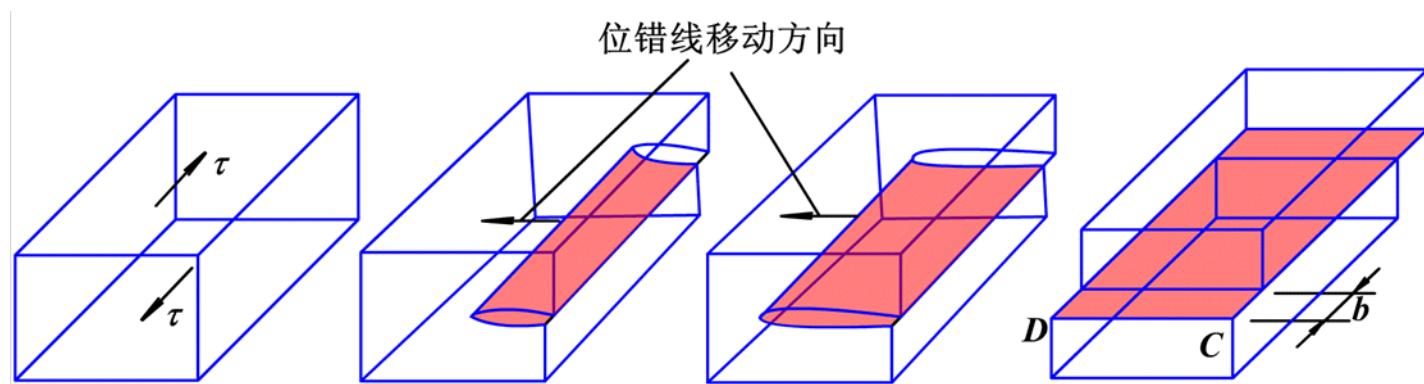
原始位置



(b) 位错向左移动一个原子间距

四、位错的运动

4.1 位错的滑移——螺型位错的滑移



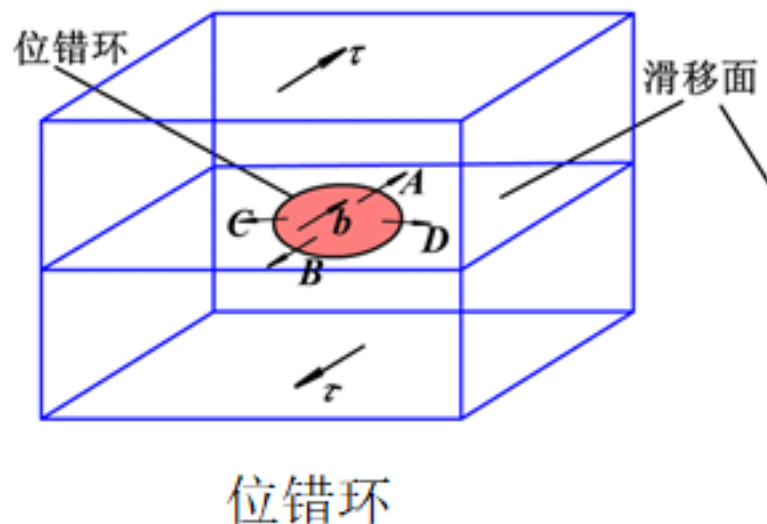
螺型位错滑移导致晶体塑性变形的过程

(a) 原始状态的晶体； (b) (c) 位错滑移中间阶段； (d) 位错移出晶体表面，形成一个台阶。

四、位错的运动

4.1 位错的滑移——混合位错的滑移

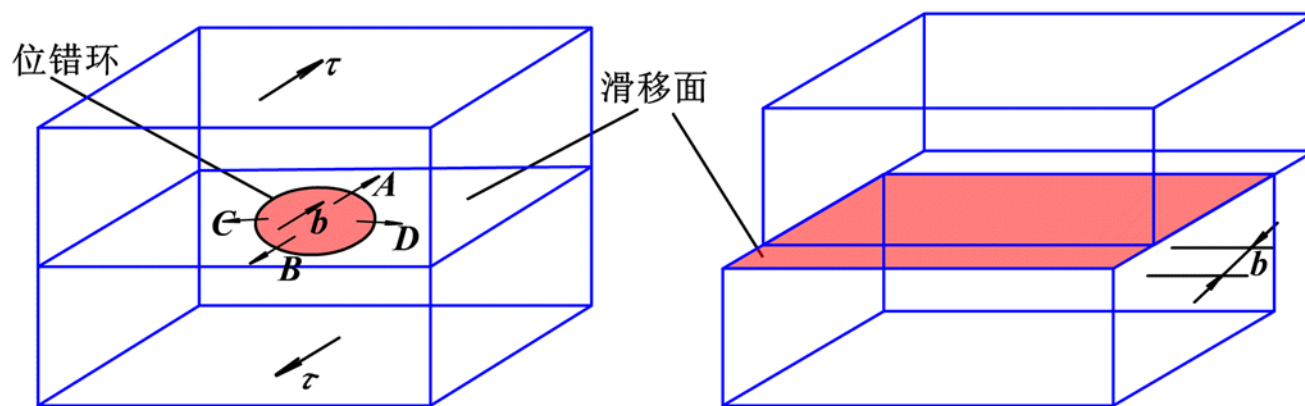
- **混合位错滑移**：混合位错可分解为**刃型**和**螺型**两部分。
- 在切应力作用下，**沿其各线段的法线方向滑移**，并同样使晶体产生与其柏氏矢量相等的滑移量。
- **圆环形位错**：位于滑移面上，在切应力作用下，**正刃位错运动方向与负刃位错相反**；**左、右旋螺型位错方向也相反**。各位错线分别向外扩展，一直到达晶体边缘。



四、位错的运动

4.1 位错的滑移——混合位错的滑移

- 各位错移动方向虽不同，但所造成晶体滑移却是由其柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 所决定的。故位错环扩展结果使晶体沿滑移面产生了一个 $\mathbf{b}$ 的滑移。



位错环

位错环运动后产生的
滑移位错环的滑移

四、位错的运动

位错的滑移特点

4.1 位错的滑移

- ① **刃型位错**：滑移方向与外应力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 平行，正、负刃位错滑移方向相反。
- ② **螺型位错**：移动方向与外应力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 垂直，也与晶体滑移方向相垂直，左、右螺位错滑移方向相反。
- ③ **混合位错**：滑移方向与外力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 成一定角度。
- ④ **交滑移**：只有螺型位错才能交滑移，因其位错线与柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 平行，故无确定滑移面，通过位错线并包含 $\mathbf{b}$ 的所有晶面都可能成为它的滑移面。若螺位错在某一滑移面滑移后受阻，可转移到与之相交的另一个滑移面上去，此过程叫交叉滑移，简称交滑移。
- ⑤ 晶体的滑移方向与外力 τ 及位错的柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 相一致，但并不一定与位错的滑移方向相同。
- ⑥ 不论位错如何移动，晶体滑移总是沿柏氏矢量相对滑移，故晶体滑移方向就是位错的柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 方向。

四、位错的运动

4.2 位错的攀移

- 攀移----刃型位错在垂直于滑移面方向的运动。
- 攀移的本质是刃型位错的半原子面向上或向下运动，于是位错线亦向上或向下运动，即是多余半原子面的伸长或缩短。
- 通常把半原子面向上移动称为正攀移，半原子面向下移动称为负攀移。
- **刃位错**：除可在滑移面上滑移外，还可在垂直滑移面的方向上进行攀移运动。
- **螺位错**：没有多余半原子面，故无攀移运动。

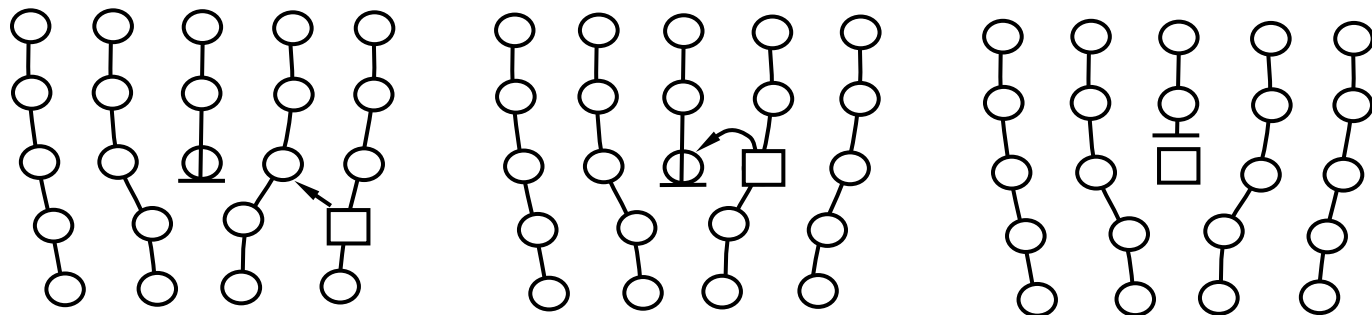


四、位错的运动

4.2 位错的攀移

攀移的机理与滑移不同，它是通过原子的扩散来实现的，多余半原子面不发生与柏氏矢量方向的移动。

空位扩散至半原子面的边缘形成割阶，随着空位扩散的继续，当原始位错线被空位全部占据时，原始位错线向上移动了一个原子间距，即刃型位错发生正攀移；同理，原子扩散至刃型位错半原子面的下方，使整条位错线下移了一个原子间距，位错发生了负攀移。



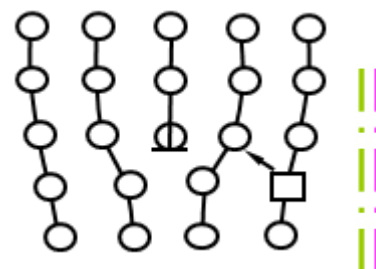
空位运动引起的攀移

四、位错的运动

4.2 位错的攀移

攀移的特点：

- 攀移伴随物质的迁移，需要借助于空位的扩散，需要热激活，比滑移需更大能量。
- 低温攀移较困难，高温时易攀移。在许多高温过程如蠕变、回复、单晶拉制中，攀移却起着重要作用。
- 攀移通常会引起体积的变化，故属非保守运动。
- 作用于攀移面的正应力有助于位错的攀移。
- 压应力将促进正攀移，拉应力可促进负攀移。
- 晶体中过饱和空位也有利于攀移。



四、位错的运动

4.3 位错运动的动力

在外力作用下，晶体中位错将沿其法向运动，产生塑性变形。

位错：只是一种畸变的原子组态，并非是物质实体；

位错的运动：只是原子组态的迁移，

驱使位错运动的力：实际上是作用在晶体中（位错附近的畸变区域）的原子上，而非只作用在位错中心线的原子上。

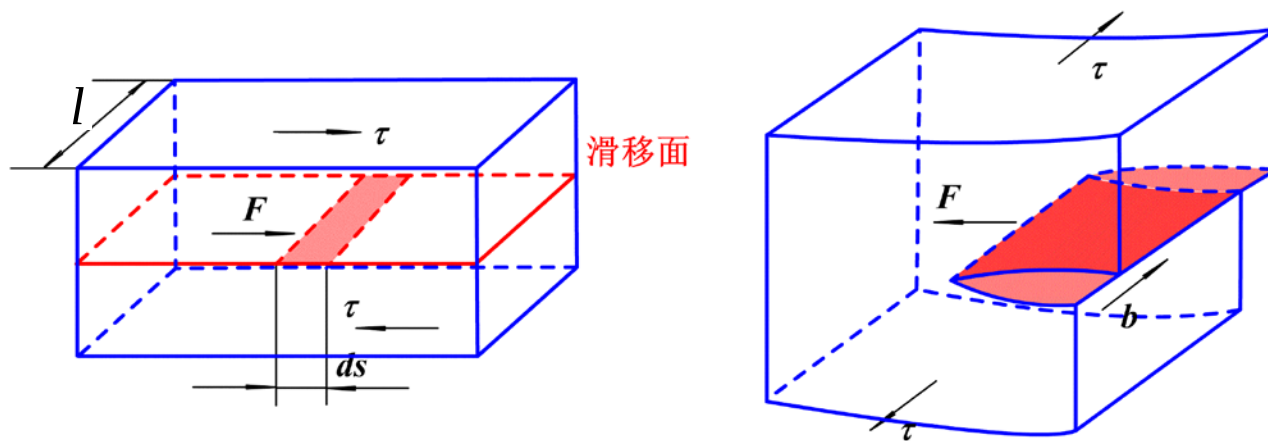
但是，为研究问题方便，把位错线假设为物质实体线，把位错的滑移运动看作是受一个垂直于位错线的法向力作用的结果，并把这个法向力称为**作用在位错上的力**。



四、位错的运动

4.3 位错运动的动力

- 利用**虚功原理**可导出**外力场作用在位错上的力**。
- **虚功原理**：切应力使晶体滑移所做的功等于法向“法向力” F 推动位错滑移所做的功。
- 如图为在分切应力 τ 作用下，柏氏矢量为 b 的位错滑移与晶体滑移的情况。



(a) 一小段位错线移动；

(b) 作用在螺型位错上的力

切应力作用下位错所受的力



四、位错的运动

4.3 位错运动的动力

- 1) 设位错长度为 l ，当滑移 ds 距离时，**法向力做功为 Fds** 。
- 2) 若滑移面积为 A ，位错滑移 ds ，滑移区也增加 ds 距离，
则产生的滑移量为： $(\frac{ds}{A/l})b$

切应力使晶体滑移所作的功应为： $(\tau A)(\frac{ds}{A/l})b = \tau bl ds$ ，于是

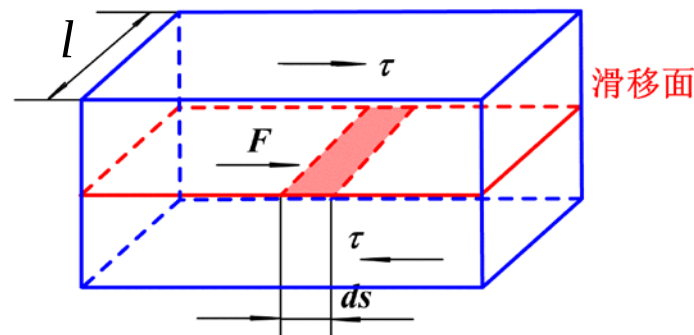
$$Fds = \tau bl ds$$

则

$$F = \tau bl$$

则，单位长度位错所受的力则为：

$$f = F / l = \tau b$$



四、位错的运动

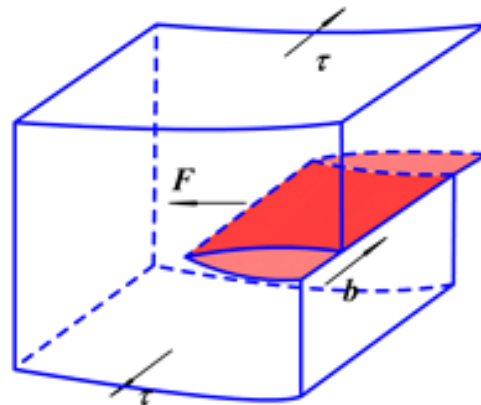
4.3 位错运动的动力

如图为螺型位错滑移与晶体滑移的情况。

用上述同样方法，也可导出平行于柏氏矢量 b 的分切应力 τ 施加于单位长度位错的法线方向的力：

$$f = F / l = \tau b$$

- 此结果可推广到任意形状有位错。



四、位错的运动

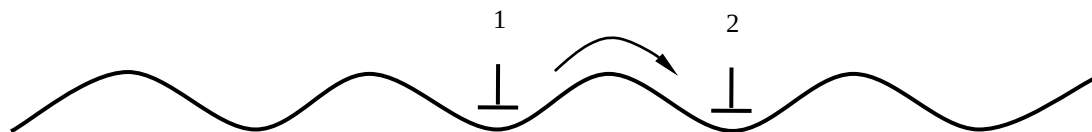
4.4 位错运动的阻力

4.4.1 点阵阻力

实际晶体中，位错运动要遇到多种阻力，各种晶体缺陷对位错运动均能构成阻碍。

即使无任何缺陷情况下，位错运动也需克服滑移面两侧原子间相互作用力(最基本阻力)，称为**点阵阻力**。

如当位错在“1”与“2”平衡位置，能量最小。当从位置“1”→“2”时，因两侧原子排列不对称状态，即需要越过一个能垒，即位错运动遇到了阻力(**点阵阻力**)。



四、位错的运动

4.4 位错运动的阻力

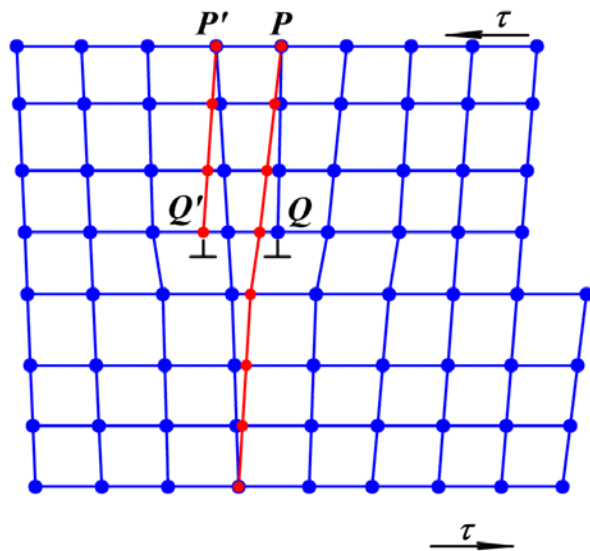
4.4.1 点阵阻力

派尔斯(R. Peierls)、纳巴罗(F.R.N. Nabarro)估算了这一阻力，故又称为**派-纳力**。近似计算式为：

$$\tau_{P-N} = \frac{2G}{1-\nu} \exp \left[-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b} \right]$$

式中：a 为滑移面面间距，b 为滑移方向上的原子间距；G 为切变模； ν 为泊松比。

上式虽在简化、假定条件下导出，但与实验结果符合较好。



四、位错的运动

4.4 位错运动的阻力

4.4.1 点阵阻力

$$\tau_{P-N} = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left[-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b}\right]$$

τ_{P-N} 与 $(-a/b)$ 呈指数关系。

表明：当滑移面间距 a 值越大，位错强度 b 值越小，则派-纳力越小，故越容易滑移。

晶体中，原子最密排面间距 a 最大，最密排方向原子间距 b 最小，故位于密排面上，且柏氏矢量 b 方向与密排方向一致的位错最易滑移。

因此，晶体滑移面和滑移方向一般都是晶体原子密排面与密排方向。



四、位错的运动

4.4 位错运动的阻力

4.4.2 其他缺陷阻力

晶体中其他缺陷(如点缺陷、其它位错、晶界、第二相粒子等)都会与位错发生交互作用,从而引起位错滑移的阻力,并导致晶体强化。

4.4.3 错的线张力等也会引起附加的阻力。



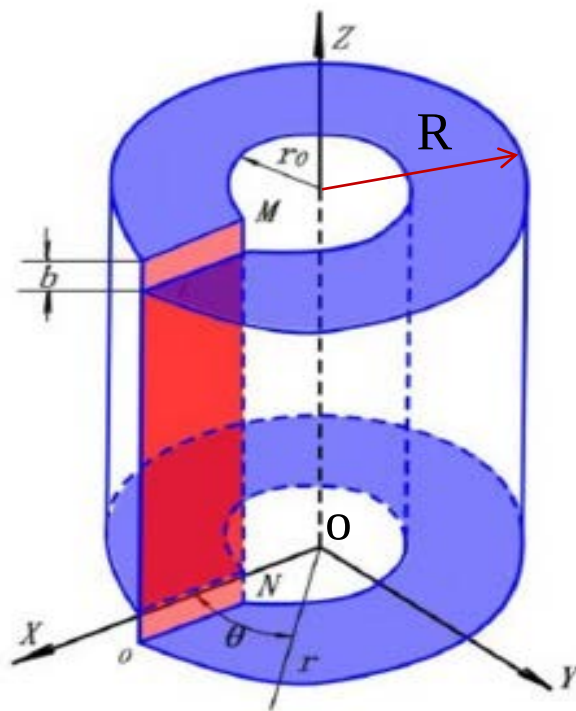
四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

[1] 平行螺型位错间的相互作用

螺型位错的连续介质弹性切变模型如图所示。

在半径为 R 的弹性圆柱体中心挖一个半径为 r_0 的小孔，沿 xOz 面切开，使两个切开面沿 z 方向作相对位移 b ，再把这两个面胶合起来，就形成了一个螺型位错应力场。



四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

[1] 平行螺型位错间的相互作用

对螺型位错，没有正应力，只有切应力。

即正应变 $\varepsilon_{xx}=\varepsilon_{yy}=\varepsilon_{zz}=0$ 。

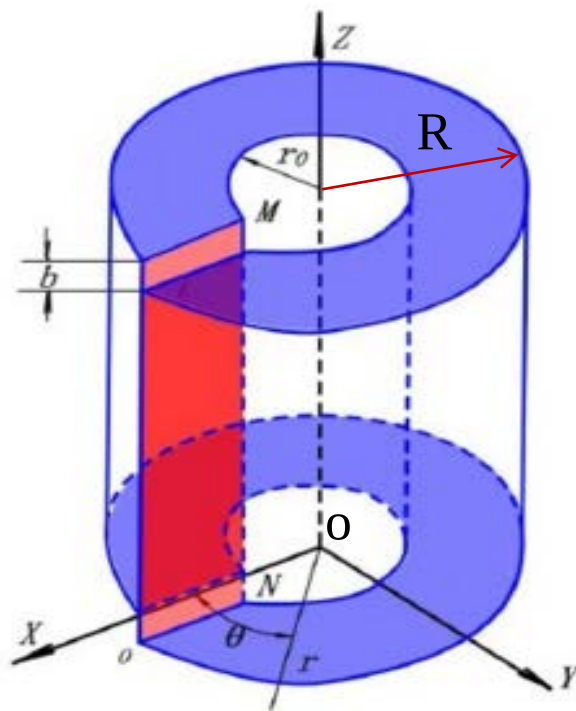
只有沿Z轴的切应变(用柱坐标表示为):

$$\gamma_{\theta z} = \frac{b}{2\pi r}$$

由虎克定律可知:

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

G为切变模量，其他应变、应力为0



四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

[1] 平行螺型位错间的相互作用

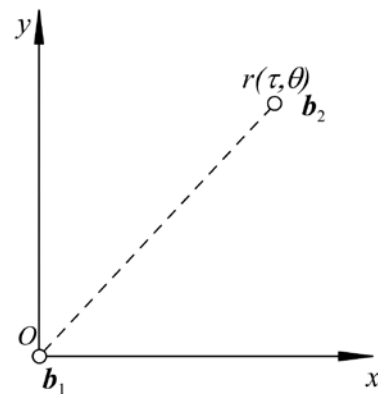
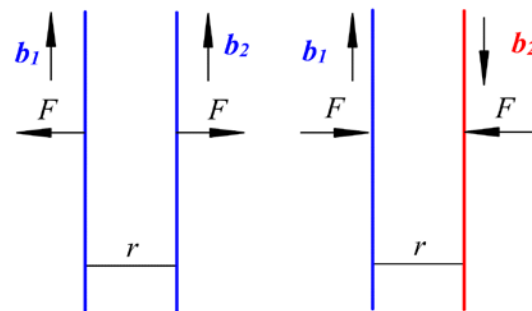
两平行于Z轴的螺型位错 b_1 、 b_2 。螺型位错的应力场对称于位错线(Z轴)，且只有轴向(切)应力为：

$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb_1}{2\pi r}$$

位错 b_2 在 $\tau_{\theta z}$ 作用下受到的力为：

$$f_r = \tau_{\theta z} \cdot b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi r}$$

- 其方向为矢径 r 的方向。
- 同理，位错 b_1 在位错 b_2 应力场中，也受到一个大小相等，方向相反的作用力。

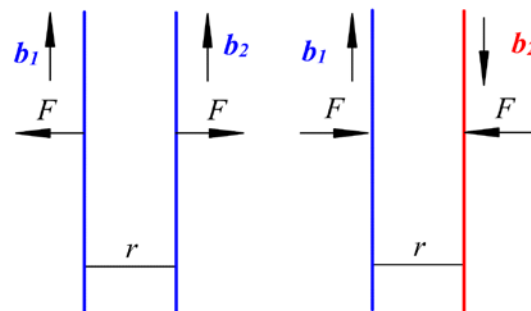


四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

[1] 平行螺型位错间的相互作用

$$f_r = \tau_{\theta z} \cdot b_2 = \frac{Gb_1b_2}{2\pi r}$$



可见，当 b_1 与 b_2 同向时， $f_r > 0$ ，作用力为斥力；

当 b_1 和 b_2 反向时， $f_r < 0$ ，作用力为引力。

即两平行螺型位错相互作用特点：同号相斥，异号相吸。

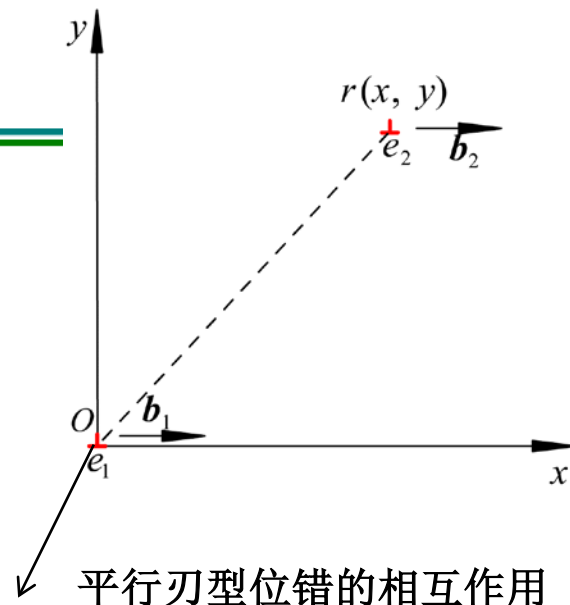
相互作用力的绝对值：与两位错柏氏矢量模的乘积(b_1b_2)成正比，而与两位错间距离 r 成反比。

四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

(2) 平行刃型位错间的相互作用

两平行Z轴、相距 $r(x, y)$ 刃位错，在两平行晶面上，柏氏矢量 b_1 和 b_2 均与X轴同向。



令位错 b_1 与Z轴重合，因位错 b_2 的滑移面平行于X-Z面，故只有位错 b_1 切应力分量 τ_{yx} 和正应力分量 σ_{xx} 对位错 b_2 起作用。前者使 b_2 沿X轴方向滑移，后者使其沿Y轴方向攀移。

这两个力分别为：

$$f_x = \tau_{yx} b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$f_y = -\sigma_{xx} b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

由此可分析位错 b_2 处不同处时受力状态，滑移力 f_x 随位错 b_2 所处位置而异。

四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

(2) 平行刃型位错间的相互作用

对两同号刃位错：

1) 当 $|x| > |y|$ 时，

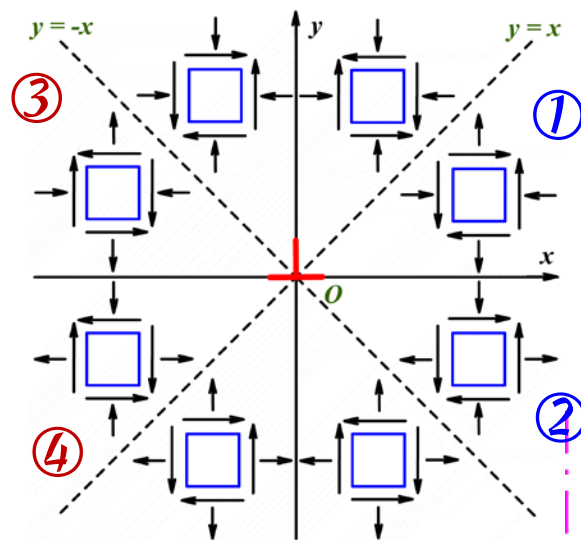
若 $x > 0$ ，则 $f_x > 0$ ；若 $x < 0$ ，则 $f_x < 0$ ，

表明：当位错 b_2 位于①、②区间时，两位错相互排斥；

当位错 b_2 位于③、④区间时，两位错相互吸引。

在此四区间中，当 $x \neq 0$ ，而 $y = 0$ 时， $f_r > 0$ ，
表明：在同一滑移面上，同号位错总是相互排斥，距离越小，排斥力越大。

$$f_x = \tau_{yx} b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$



刃型位错周围的应力分布

四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

(2) 平行刃型位错间的相互作用

对两同号刃位错：

2) 当 $|x| < |y|$ 时，

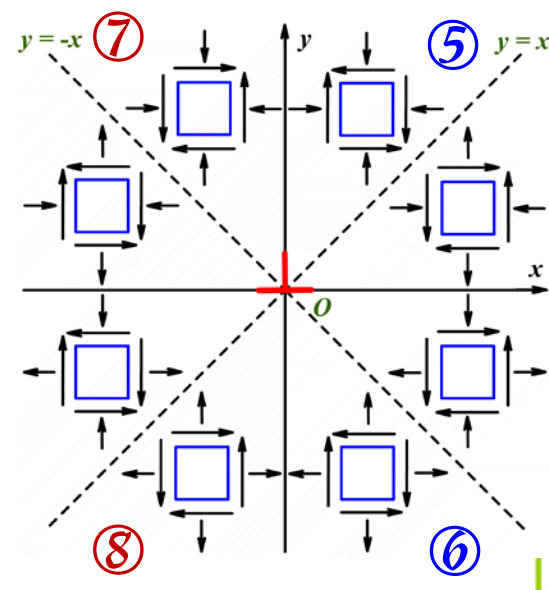
若 $x > 0$ ，则 $f_x < 0$ ；若 $x < 0$ ，则 $f_x > 0$ ，

表明：

当位错 b_2 处于⑤、⑥区间时，两位错相互吸引；

当位错 b_2 处于⑦、⑧区间时，两位错相互排斥。

$$f_x = \tau_{yx} b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$



刃型位错周围的应力分布

四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

(2) 平行刃型位错间的相互作用

对两同号刃位错：

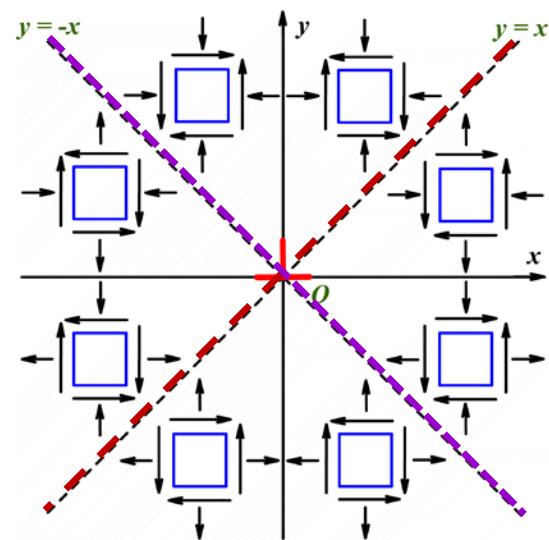
3) 当 $|x| = |y|$,

即位错 b_2 位于X-Y直角坐标的分角线位置时, $f_x = 0$,

表明：此时不存在使位错 b_2 滑移的作用力，但当稍许偏离此位置时，所受到的力会使它偏离得更远，

这一位置是位错 b_2 的介稳定位置。

$$f_x = \tau_{yx} b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$



刃型位错周围的应力分布

四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

$$f_x = \tau_{yx} b_2 = \frac{Gb_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

(2) 平行刃型位错间的相互作用

对两同号刃位错：

4) 当 $x=0$ ，即位错 b_2 处于Y轴上时， $f_x=0$ ，

表明：此时同样不存在使位错 b_2 滑移的作用力，且一旦稍许偏离此位置，所受到的力会使其退回原处。

这一位置是位错 b_2 的稳定平衡位置。

可见，同号刃型位错处于相互平行的滑移面上，将力图沿着与其柏氏矢量 b 垂直的方向排列起来。

通常，把此呈垂直排列的位错组态叫做位错壁(或位错墙)。

回复过程中多边化后的亚晶界就是由此形成的。



四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

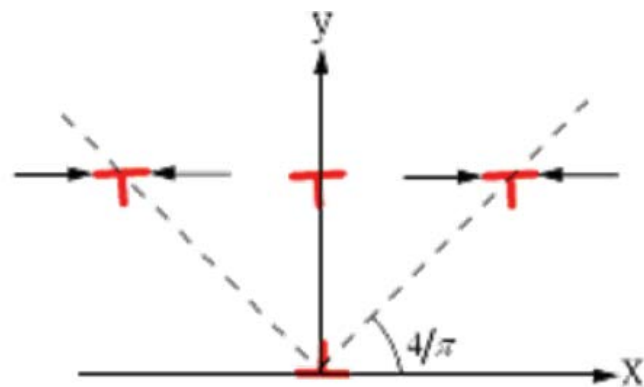
(2) 平行刃型位错间的相互作用

对两异号刃型位错：

因其交互作用力 f_x 方向与同号位错相反，且位错 b_2 的稳定平衡位置和介稳定平衡位置也恰好相互对换，如图。

当位错2位于 $x=0$ 和 $x=y$ 两点时 $f_x=0$ 。但在 $x=0$ 处是**亚稳平衡状态**，而在 $x=y$ 为**稳定平衡状态**。

因此，**异号刃型位错力图排在和滑移面成 45° 的平面上**。且**异号刃型位错间相互吸引**。



四、位错的运动

4.5 位错间的相互作用

(3) 其它情况

当两互相平行的位错，一个是纯螺型，另一个是纯刃型，因螺位错应力场既无可使刃位错受力的应力分量，刃位错的应力场也无可使螺位错受力的应力分量，故此两位错间便无相互作用。



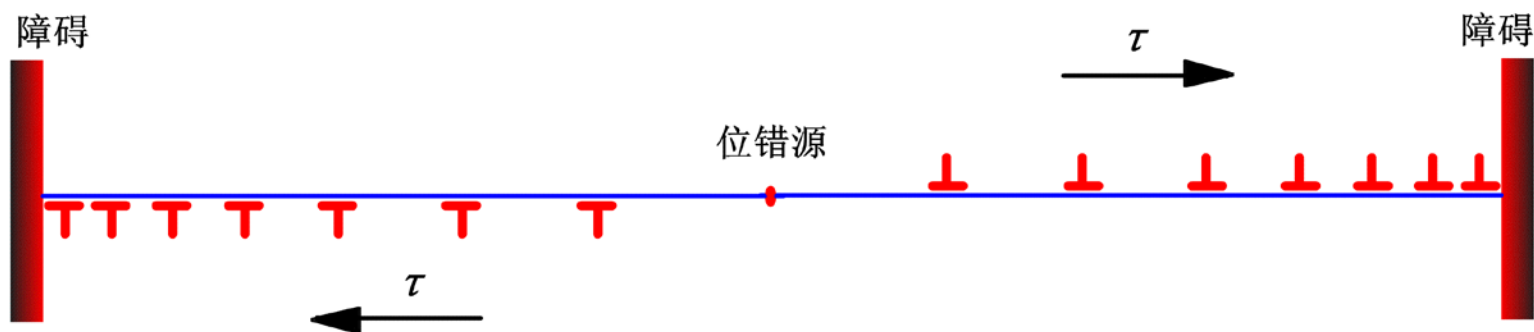
四、位错的运动

4.6 位错间的塞积

晶体塑性形变，往往会在一个滑移面上有许多位错在某种障碍物前被迫堆积，形成**位错群的塞积**。

这些位错因来自同一位错源，具有相同柏氏矢量 b 。

晶界易成为位错运动的障碍物，位错间的相互作用也可产生障碍。



四、位错的运动

4.6 位错间的塞积

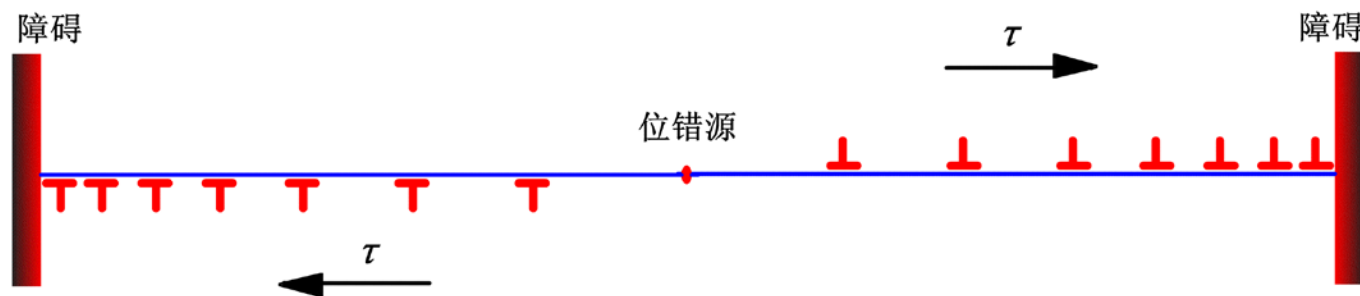
塞积群在垂直于位错线方向的长度：

刃型位错为 $n\mu\mathbf{b}/\pi\tau(1-\nu)$,

螺型位错为 $n\mu\mathbf{b}/\pi\tau$,

其中： n —塞积群中位错总数， τ —外加切应力（实际上应为减掉晶格阻力之后的有效切应力）， μ 为切变模； ν 为泊松比。

可见，塞积群的长度正比于 n ，反比于 τ 。



四、位错的运动

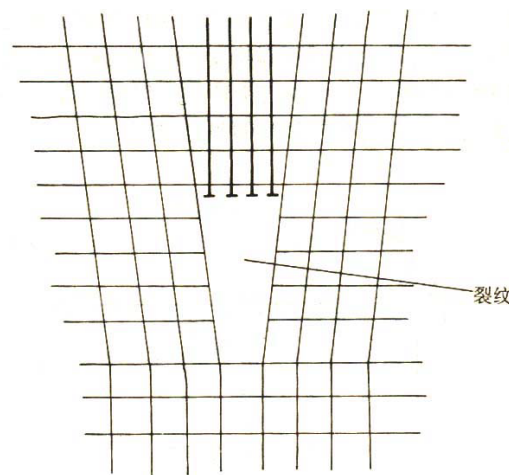
4.6 位错间的塞积

位错塞积群的重要效应：是在它的前端**引起应力集中**。

当 n 个位错被切应力 τ 推向障碍物时，在塞积群的前端将产生 n 倍于外力的**应力集中**。

晶界前位错塞积：引起应力集中效应能使相邻晶粒屈服，也可在晶界处**引起裂纹**。

刃位错塞积时，当 n 足够大，会出现如图的微裂纹。



刃型位错塞积造成的微裂纹



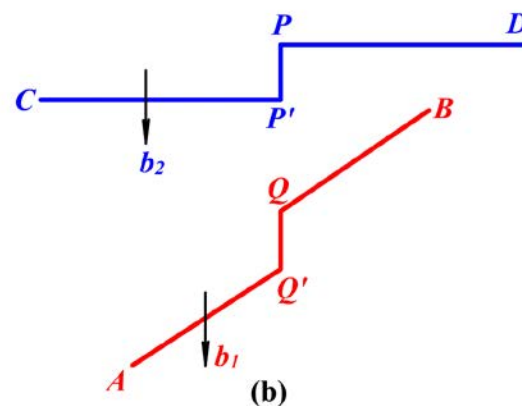
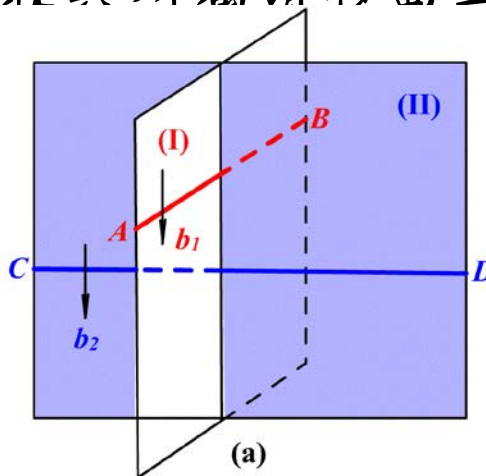
四、位错的运动

4.7 位错间的交割

在滑移面上运动的某一位错，必与穿过此滑移面上的其它位错（称为“位错林”）相交截，该过程即为“**位错交割**”。

位错相互切割后，将使位错产生弯折，生成位错折线，这种折线有两种：

- 1) **割阶**：位错折线垂直（或不在）其所属滑移面上。
- 2) **扭折**：位错折线在其所属滑移面上。

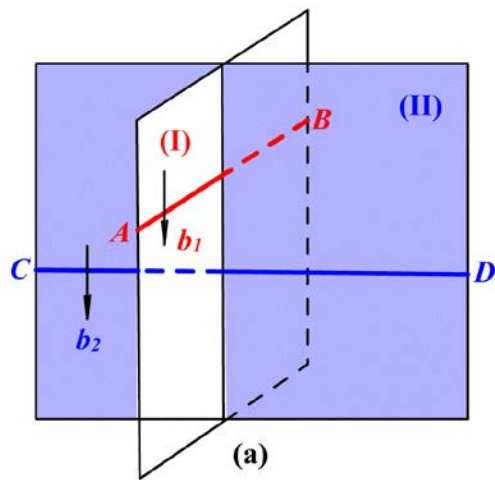


四、位错的运动

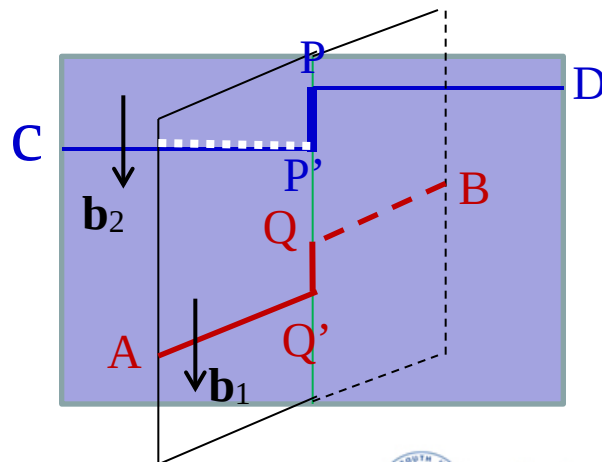
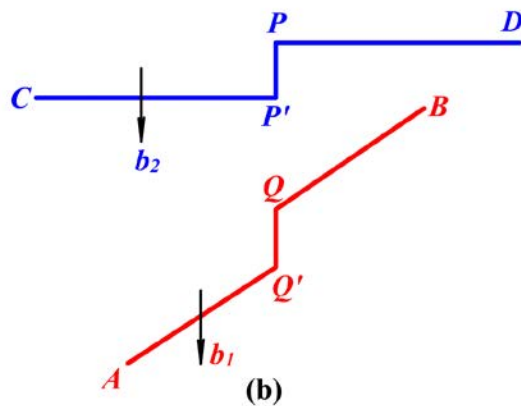
4.7 位错间的交割

1、柏氏矢量相互平行的两刃位错的交割

刃位错 AB ($\mathbf{b}_1$) 与刃位错 CD ($\mathbf{b}_2$) ($\mathbf{b}_1 \parallel \mathbf{b}_2$) 相交割，形成扭折线 PP' 、 QQ' 。 $PP' \parallel QQ'$ ，且大小为 $PP' = \mathbf{b}_1$ 、 $QQ' = \mathbf{b}_2$ (对方的柏氏矢量尺寸)，**初始状态为螺位错** (柏氏矢量为原位错的 $\mathbf{b}$)，均在原位错滑移面上，在原位错向前运动中，都因位错线伸直而消失，故均为**扭折**。



两个平行刃型位错交割



PP' 、 QQ' 螺位错



四、位错的运动

4.7 位错间的交割

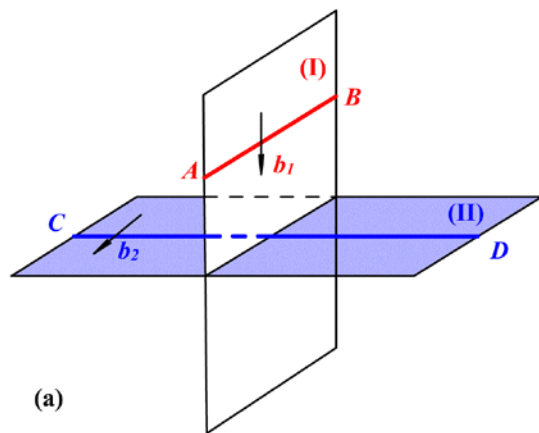
[2] 柏氏矢量相互垂直的两刃位错的交割:

交割后位错AB形状不变，位错CD产生台阶PP' ($\parallel \mathbf{b}_1$)。

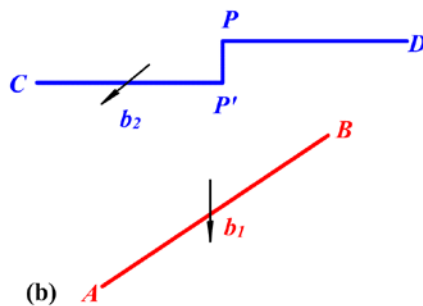
此时，PP'滑移面是(I)面，而不是交割前位错CD的滑移面(II)面，故PP'台阶不会在后续滑移中因位错线张力而自行消失。

这种**不位于滑移面上的位错台阶成为割阶**。

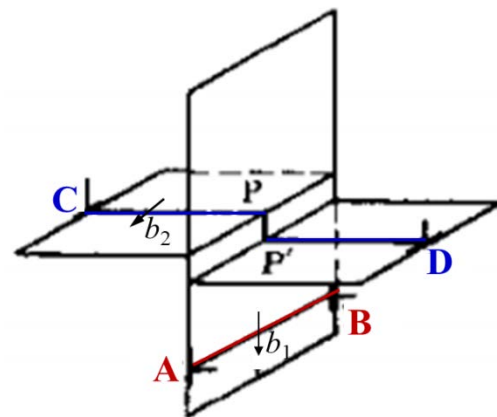
产生割价需供给能量，故**交割过程对位错运动是一种阻碍**。



(a)



(b)



PP'—刃位错

两个垂直刃型位错交割



四、位错的运动

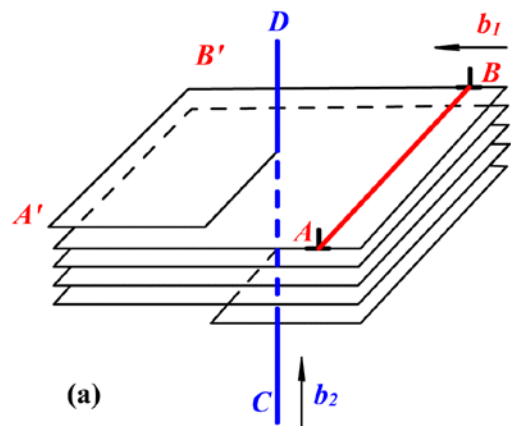
4.7.3 刃位错与螺位错交割

CD螺位错 b_2 贯穿的一组晶面连成一个螺旋面，

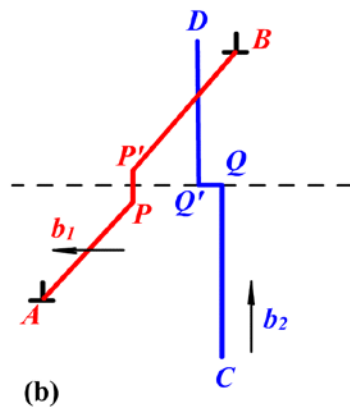
AB刃位错 b_1 滑移面恰好是螺位错 b_2 的螺旋面。

当刃位错AB切过螺位错后，变成分别位于两层晶面上的两段位错，**联线PP'是一个位错割阶**。割阶大小及方向等于螺位错矢量 b_2 ，而柏氏矢量则是 b_1 ，因此是**一小段刃位错**。

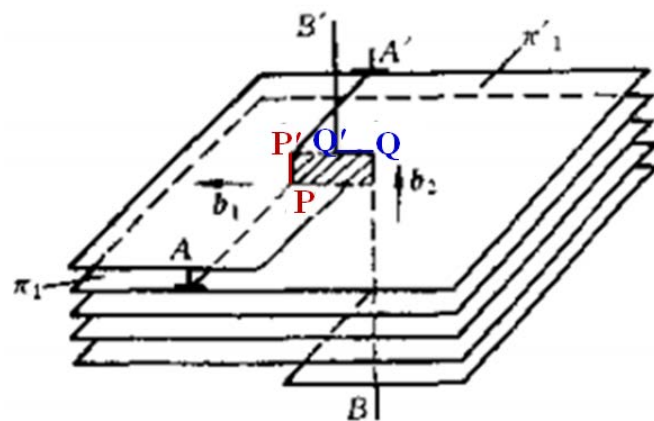
割阶PP'随位错 b_1 一起前进的运动也是滑移。



(a)



(b)

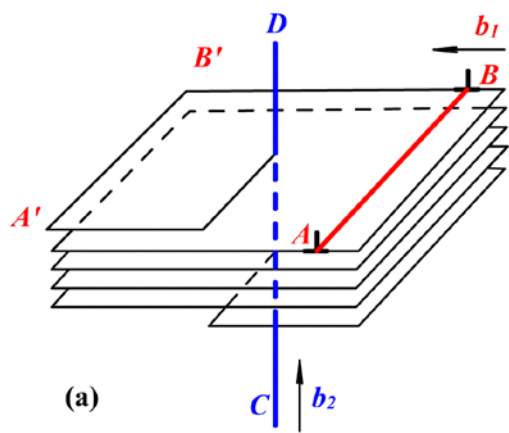


刃型位错与螺型位错交割

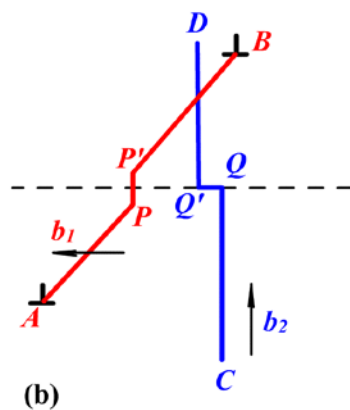
四、位错的运动

4.7.3 刃位错与螺位错交割

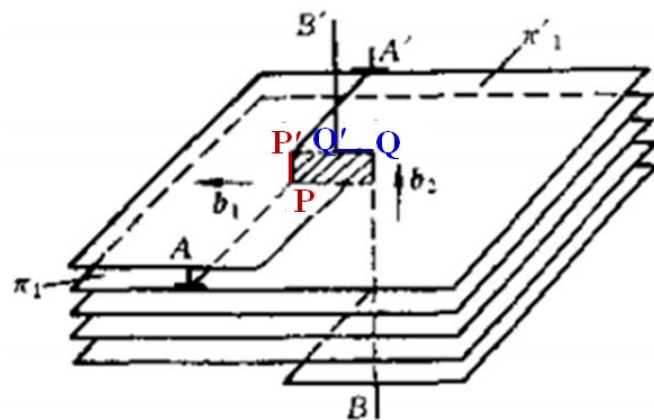
同样，交割后在螺位错CD上也形成一段长度等于 $|b_1|$ 的折线QQ'，它垂直于 b_2 ，故折线QQ'属刃型位错；
又由于它位于螺位错CD的滑移面上，因此QQ'是扭折。



(a)



(b)



刃型位错与螺型位错交割

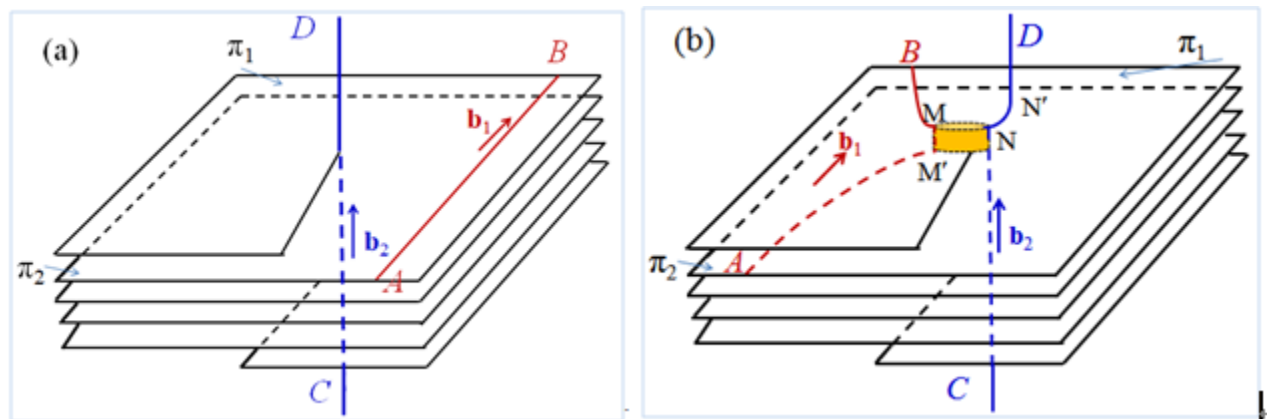
四、位错的运动

4.7.4 两个螺型位错交割

右螺位错AB(b_1)滑移中切割另一右螺位错CD(b_2)情形:

交割后, 在AB上形成大小等于 $|b_2|$, 方向平行于 b_2 的割阶MM'。割阶MM'的柏氏矢量为 b_1 , 其滑移面不在AB的滑移面上, 是刃型割阶。在后续变形中MM'不会消失。

这种刃型割阶都阻碍螺位错的移动。



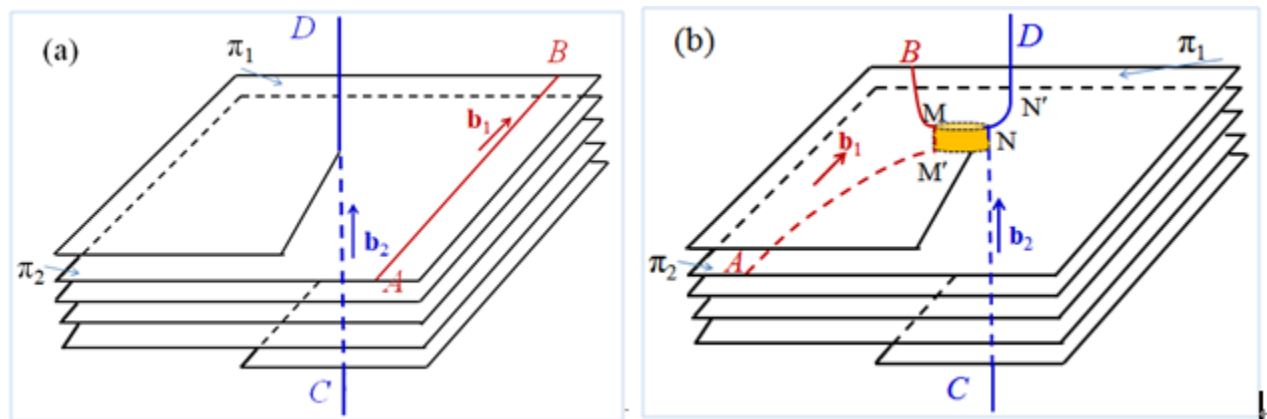
两右螺位错的交割图

四、位错的运动

4.7.4 两个螺型位错交割

在位错线CD上也形成一刀型台阶NN'。

因位错CD滑移面未定，可包含CD线的任何平面，所以台阶NN'可以在CD的滑移面上，刃型台阶NN'是扭折。这样，NN'可在线张力下消失，使CD在交割后恢复直线状；



两右螺位错的交割图

四、位错的运动

4.7 位错间的交割

综上所述：

- ① 运动位错交割后，各位错线都可产生一扭折或割阶，其大小和方向取决于另一位错的柏氏矢量，但具有原位错线的柏氏矢量。
- ② 所有割阶都是刃位错，而扭折可刃型、也可螺型。
- ③ 扭折与原位错线在同一滑移面上，可随主位错线一道运动，几乎不产生阻力，且扭折在线张力作用下易于消失。
- ④ 割阶则与原位错线不在同一滑移面上，除非割阶产生攀移，否则，割阶就不能随主位错线一道运动，成为位错运动的障碍，常称此为割阶硬化。

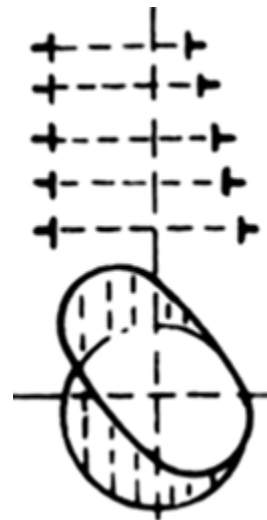
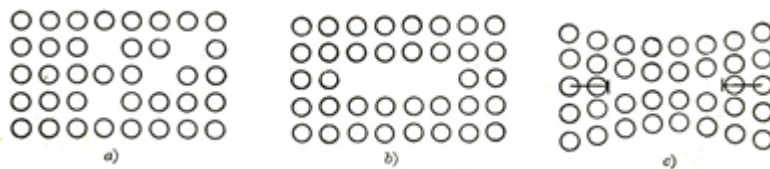


五、位错的生成与增殖

5.1 晶体中位错的萌生

在凝固结晶过程中，位错来源可有几个方面

- ① 凝固时在晶体长大相遇处，因晶体位向略有差别而形成；
- ② 因熔体中杂质原子在凝固过程中不均匀分布使晶体的先后凝固部分成分不同，从而点阵常数也有差异，而在过渡区出现位错；
- ③ 流动液体冲击、冷却时局部应力集中导致位错的萌生。
- ④ 晶体裂纹尖端、沉淀物或夹杂物界面、表面损伤处等都易产生应力集中，这些应力也促使位错的形成。
- ⑤ 过饱和空位的聚集成片也是位错的重要来源



固态晶体受力作用也可产生位错

五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

[1] Frank-Read源

- 塑性变形时，有大量位错滑出晶体，如果这过程中不产生新的位错，那变形以后晶体中的位错数目应当减少(因位错会移出到晶体表面而消失)。
- 但实际上，位错密度随着变形量的增加而加大，在经过剧烈变形以后甚至可增加4-5个数量级。
- 表明：**变形过程中位错肯定是以某种方式不断增殖**，而能增值位错的地方称为**位错源**。
- 位错增殖机制有多种，其中最重要的是：**弗兰克-瑞德源 (Frank-Read source)**，简称F-R源。由弗兰克和瑞德于1950年提出并已被实验所证实的位错增殖机构。



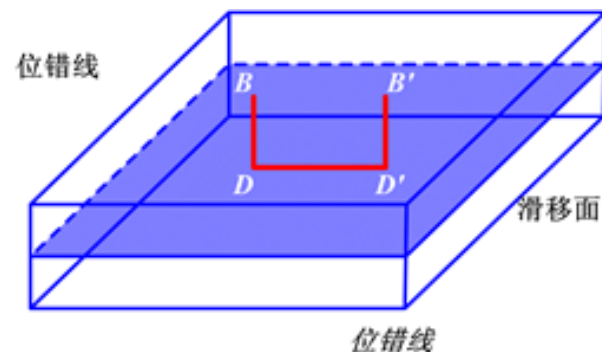
五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

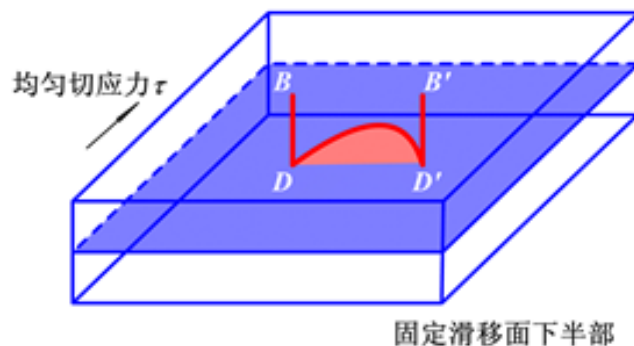
[1] Frank-Read源

设想晶体中某滑移面上有一段刃型位错 DD' ，其两端被位错网节点钉住，如图。

- ① 当外切应力满足必要的条件时，位错线 DD' 将受到滑移力的作用而发生滑移运动。
- ② 在应力场均匀的情况下，沿位错线各处的滑移力 $F_t = \tau b$ 大小都相等，位错线本应平行向前滑移，
- ③ 但因位错 DD' 两端被固定住，不能运动，势必在运动的同时发生弯曲，结果位错变成曲线形状，如图(b)所示。



(a)



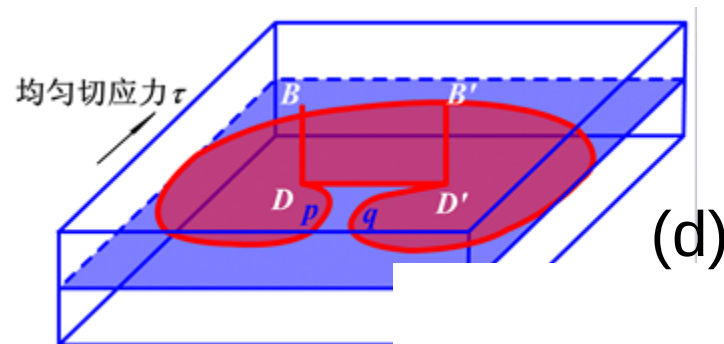
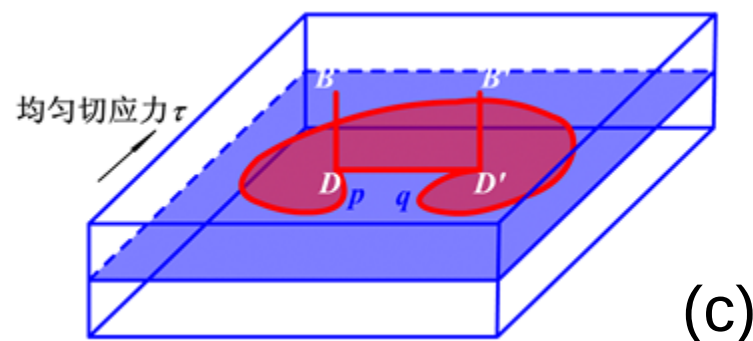
(b)

五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

[1] Frank-Read源

- ④ 位错所受力 F_t 总是处处与位错本身垂直，即使位错弯曲也如此，
- ⑤ 在应力作用下，位错的每一微线段都沿其法线方向向外运动，经历图(c)~(d)。
- ⑥ 当位错线再向前走出一段距离，图(d)的p、q两点就碰到一起了。

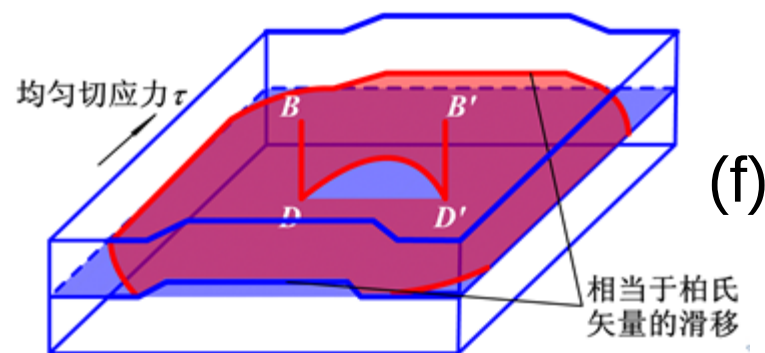
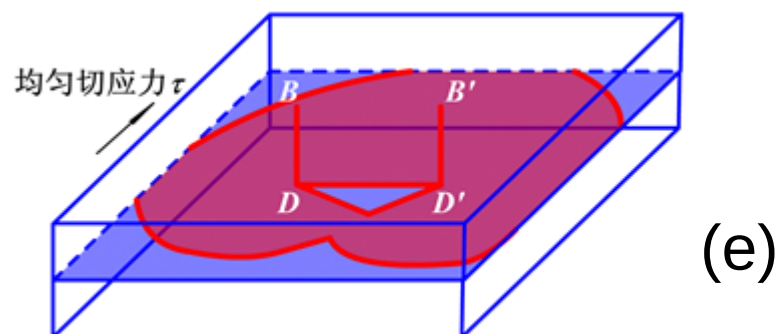


五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

[1] Frank-Read源

- ⑦ 因p、q两点处是一对左、右旋螺位错，遇到时，便互相抵消。
- ⑧ 则原位错线被分成两部分，如图(e)。
- ⑨ 此后，外面位错环在 F_t 作用下不断扩大，直至到达晶体表面，而内部另一段位错将在线张力和 F_t 的共同作用下回到原始状态。
- ⑩ 部分位错滑移至物体外，产生物体形变、晶体滑移；也有一些位错线段依然留在晶体中。



五、位错的生成与增殖

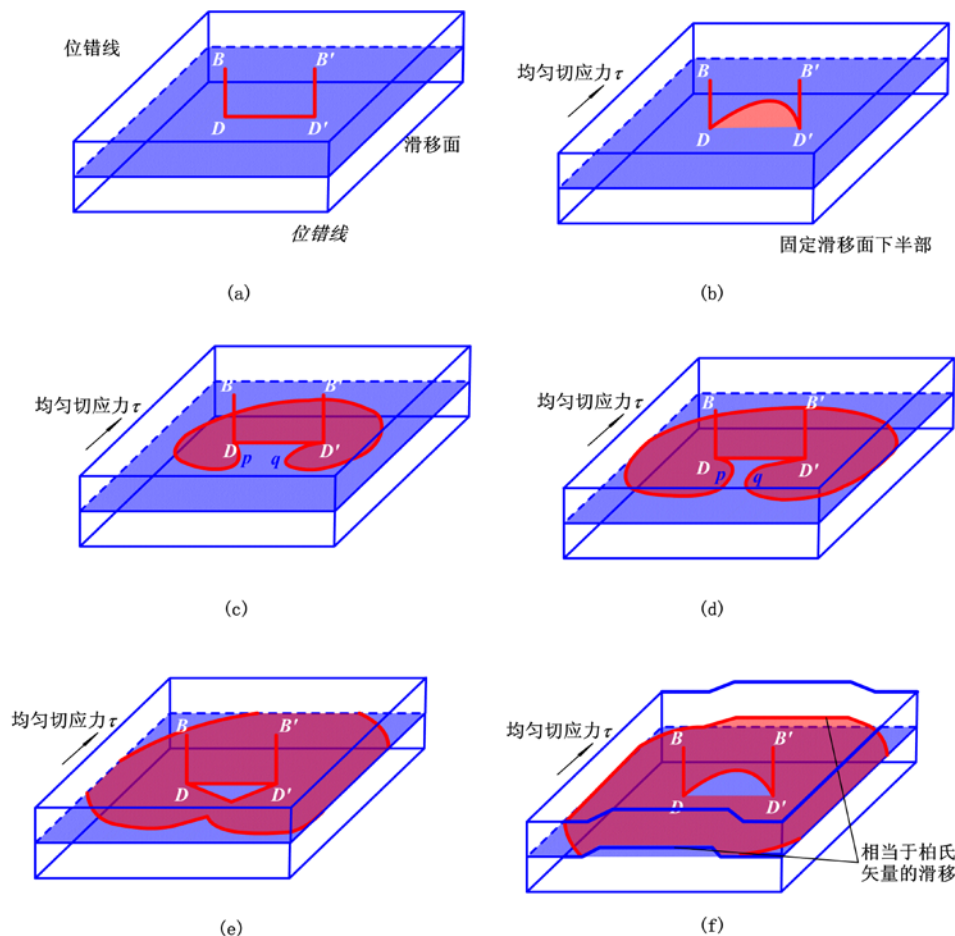
5.2 位错的增殖

[1] Frank-Read源

上述过程到此并没结束，
因应力还施加在晶体上，

在产生一个位错环后，重新回到原始位的位错DD'将在F的作用下，继续不断地重复上述动作。

这样就会放出大量位错环，
造成位错的增殖。



五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

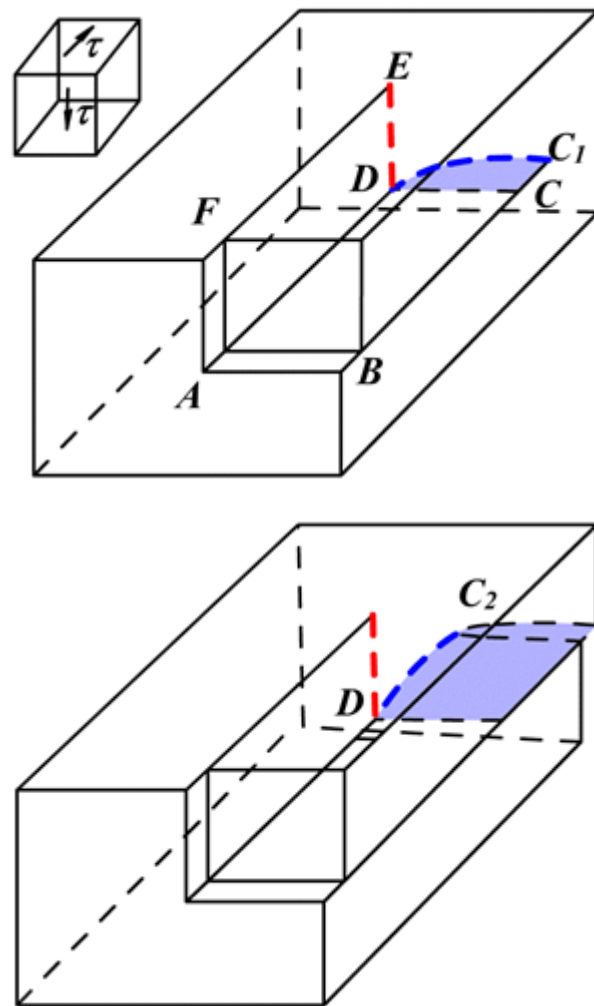
[2] L型平面源

单边(或单轴) F-R源(L型平面源):

实质是一段一端被钉扎的可滑动位错。如图，滑移面上位错CD，DE是不动位错，D点被钉扎住。

在切应力 τ 作用下，CD段开始滑移，并逐渐成为绕D点旋转的蜷线，不断向外扩展。

蜷线每转一周就扫过滑移面一次、晶体便产生一个 b 的滑移量。



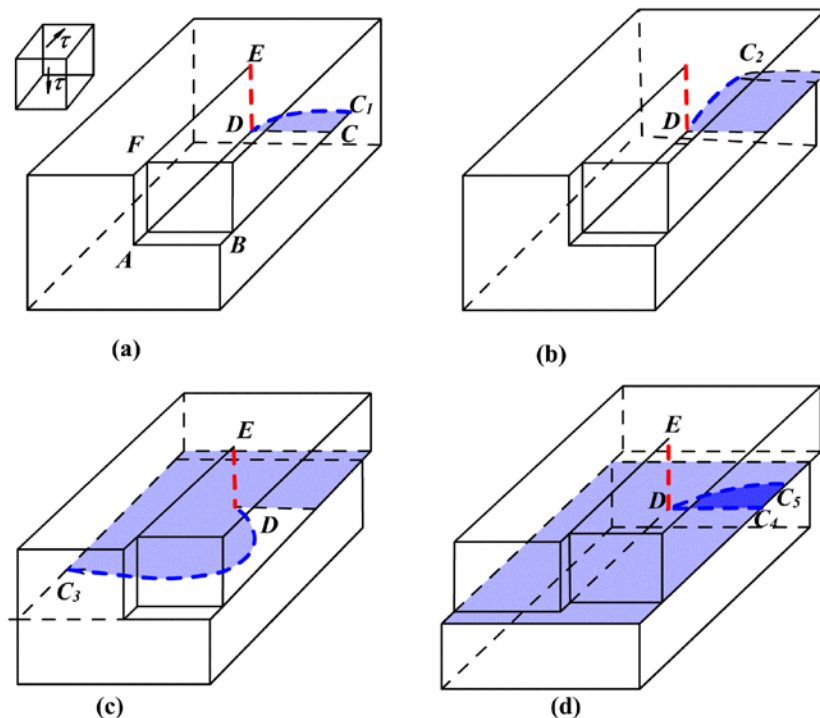
五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

[2] L型平面源

图中(a)、(b)、(c)、(d)表示转动过程的几个阶段。

- a) 开始阶段，DC是一个**正刃型位错**。
- b) 转了 90° 以后，柏氏矢量与位错线方向(DC_2 方向)一致，故是**右螺位错**。
- c) 位错线DC转 270° 后，成为**左螺位错**。
- d) DC转 360° 后，晶体上半部均移动了 b ，而位错又回复到原位置。
- e) 若切应力 τ 保持不变，则晶体可沿滑移面不断地滑移。



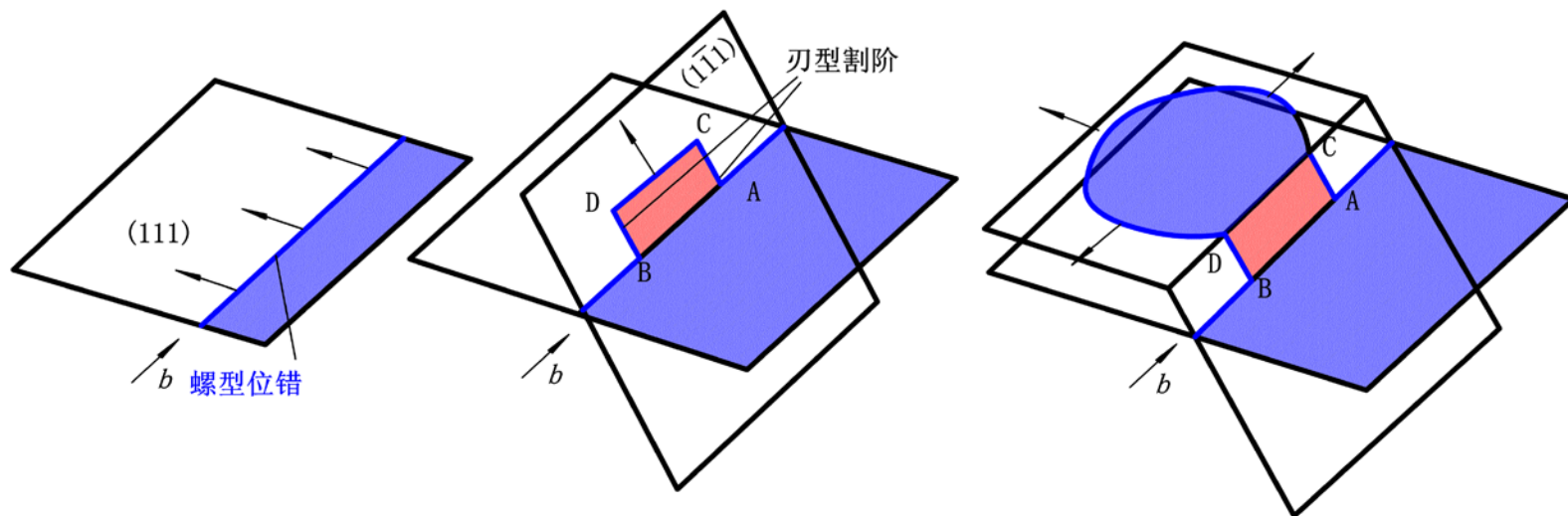
五、位错的生成与增殖

5.2 位错的增殖

[3]双交滑移增殖

一个螺位错开始在 (111) 面滑移，因遇到障碍或局部应力状态变化，位错的一段交滑移到 $(1\bar{1}1)$ ，且在绕过障碍之后又回到与 (111) 面相平行的另一个 (111) 面。

这时留在 $(1\bar{1}1)$ 面上的两端位错是刃型的，不能随 (111) 面上的位错一起前进，结果 (111) 面上的位错就会以图所描述的方式增殖位错。



双交滑移位错增殖机制

五、位错的生成与增殖

5.3 位错密度

单位体积内位错线的总长度

$$\rho_v = L/V$$

$$\rho_s = N/s \text{ (单位面积位错露头数)}$$

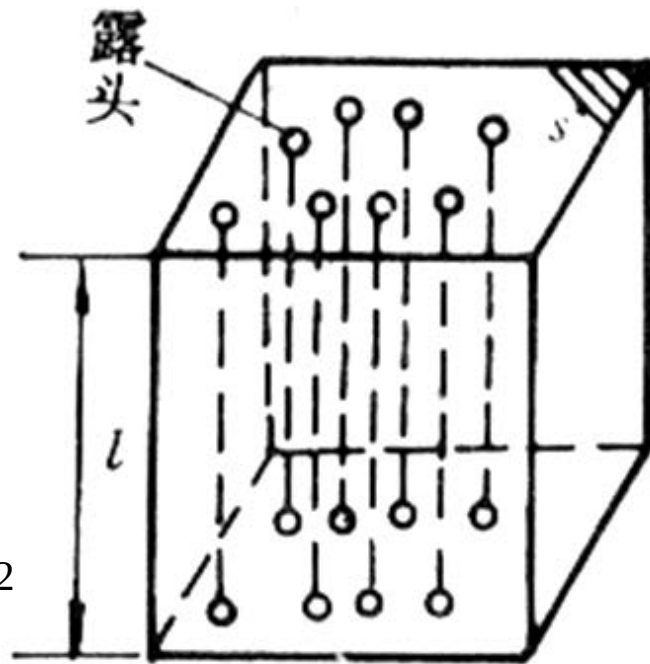
$$\rho_s = \rho_v \text{ (当位错线全部平行时)}$$

$$2\rho_s = \rho_v \text{ (当位错线方向任意时)}$$

退火良好的金属晶体, $\rho_v = 10^6 \sim 10^8 \text{ m}^{-2}$

剧烈冷加工金属 $\rho_v = 10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^{-2}$,

细心制备和处理的半导体材料, 约为 10^6 m^{-2} , 甚至为0



位错密度计算示意图