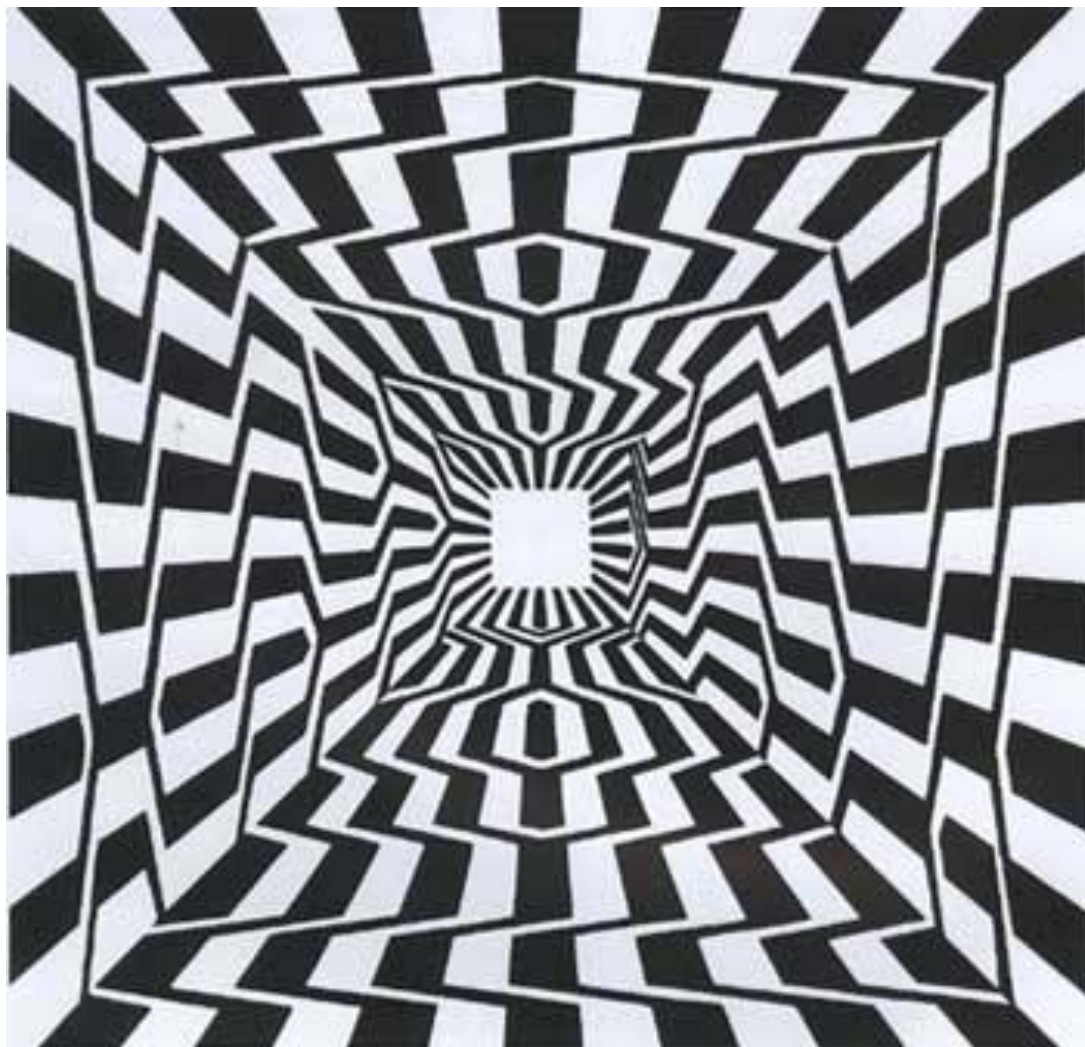
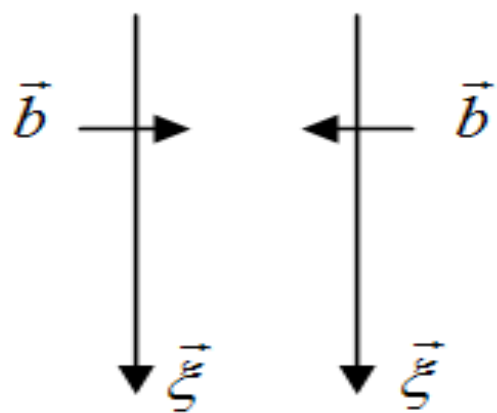
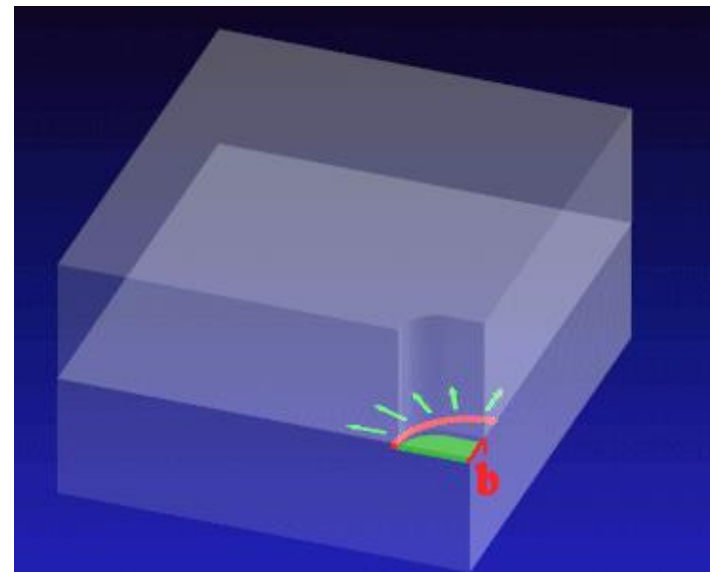
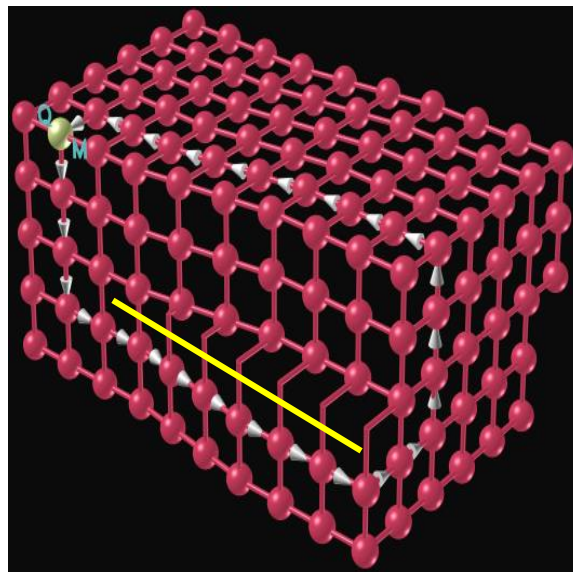
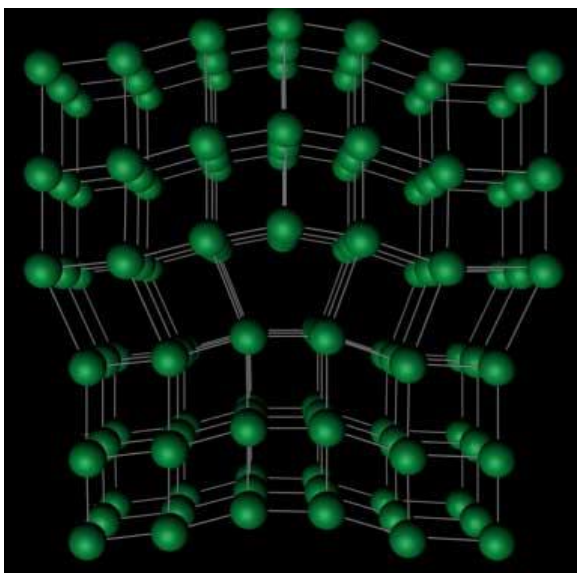


本章重点

- 点缺陷的基本概念平衡浓度公式
- 位错的基本概念、柏氏矢量、柏氏回路
- 位错的几何相关性之：运动（滑移、攀移、交割）、增殖、合成与分解
- 位错的力学相关性质：应力场、能量、作用在位错上的力
- 几何与力学交互作用： $\tau = Gb/r$
- 实际晶体中的位错：全位错、层错、部分位错、扩展位错、面角位错
- 汤普森四面体
- 面缺陷：表面与界面的微观结构、能量特性及由其导致的其它性能
- 小角晶界的位错模型，大角晶界的重合位置点阵模型。
- 相界：共格，半共格（位错模型），非共格



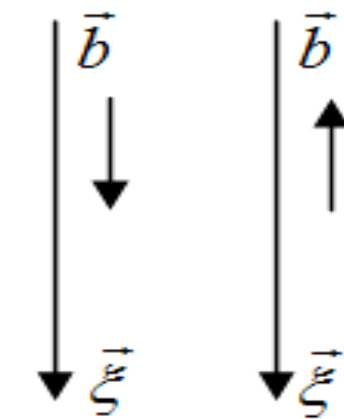
位错类型



正
刃型



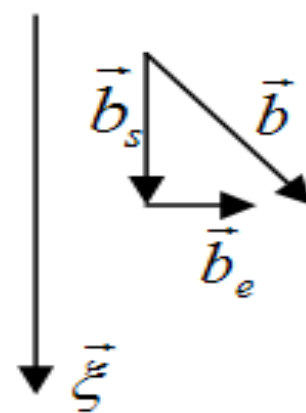
负



右
螺型



左

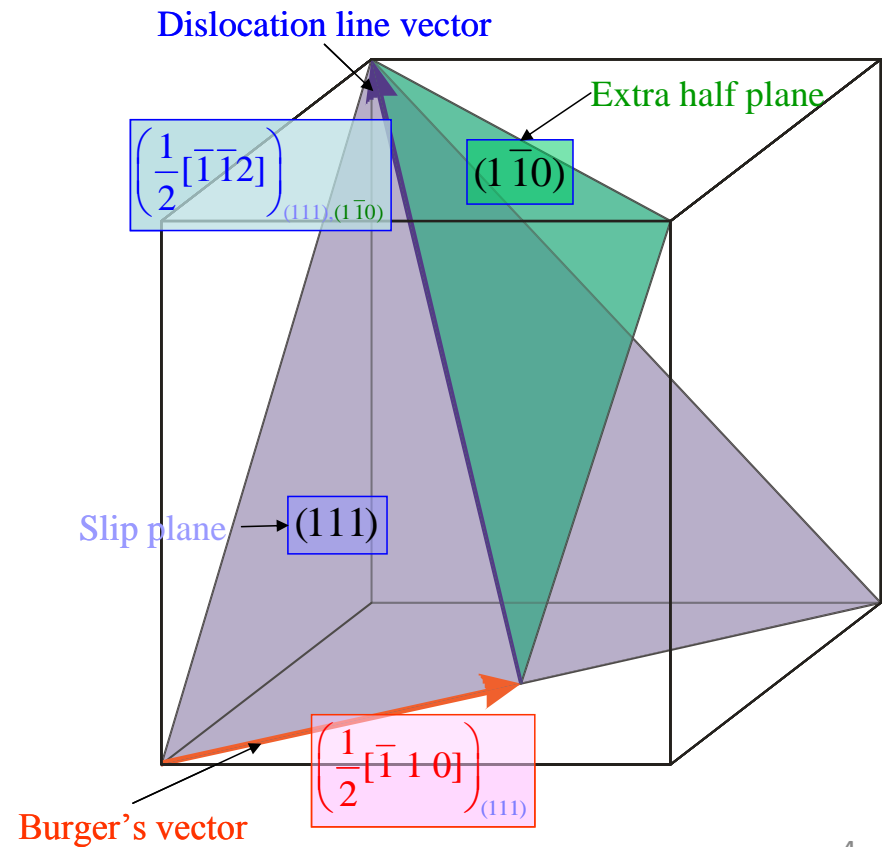
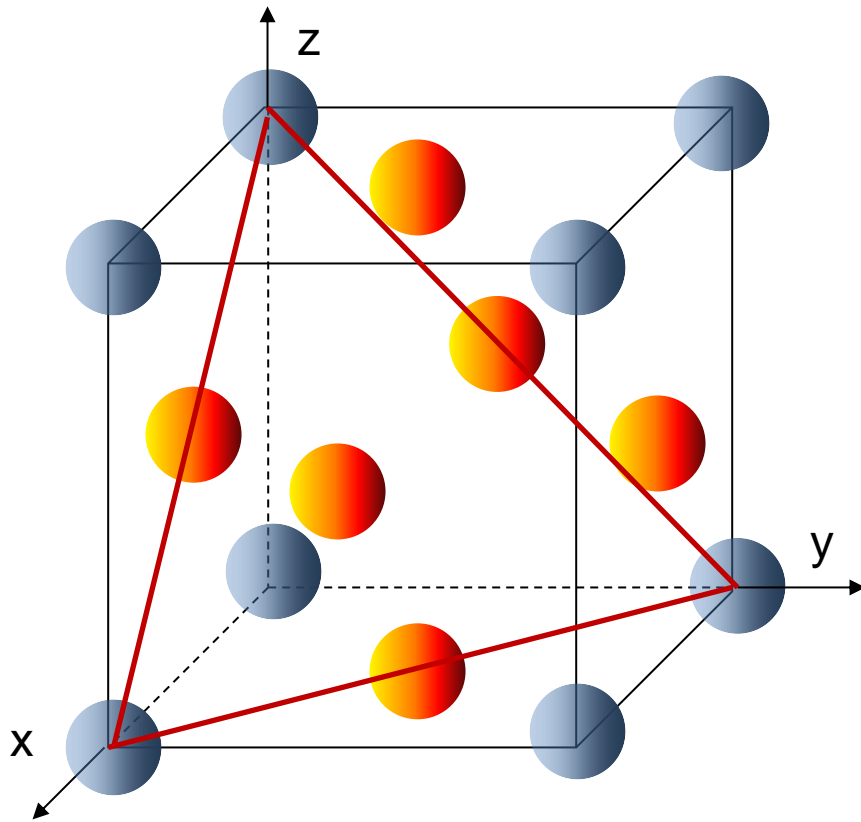


混合型

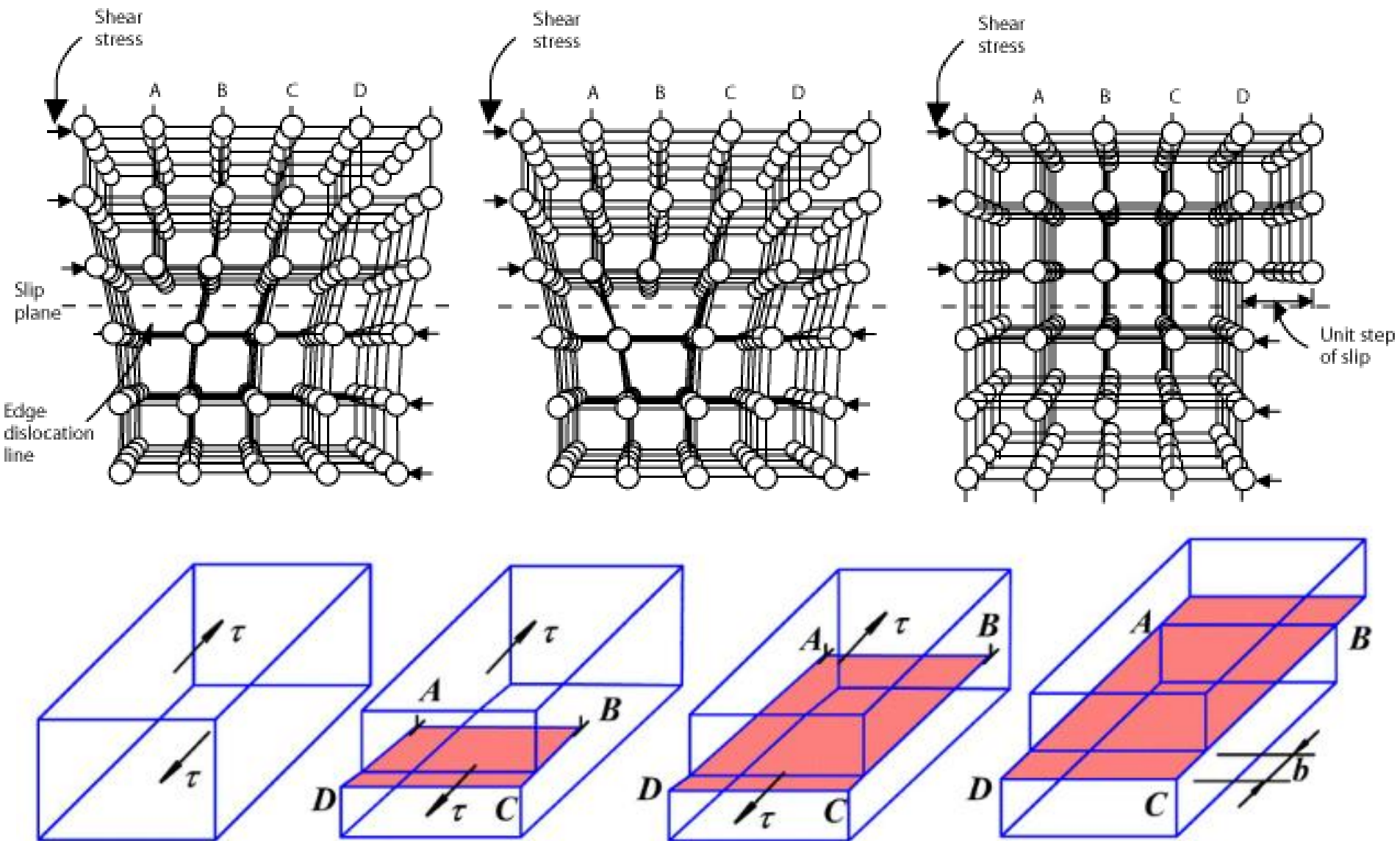
□ 位错的柏氏矢量

立方晶体中， 可用晶向指数来表示： $b = \frac{a}{n}[uvw]$

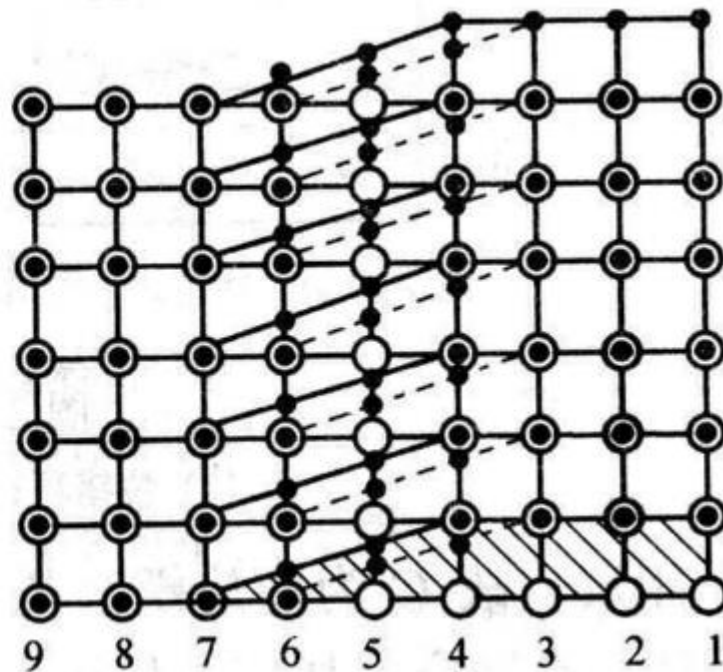
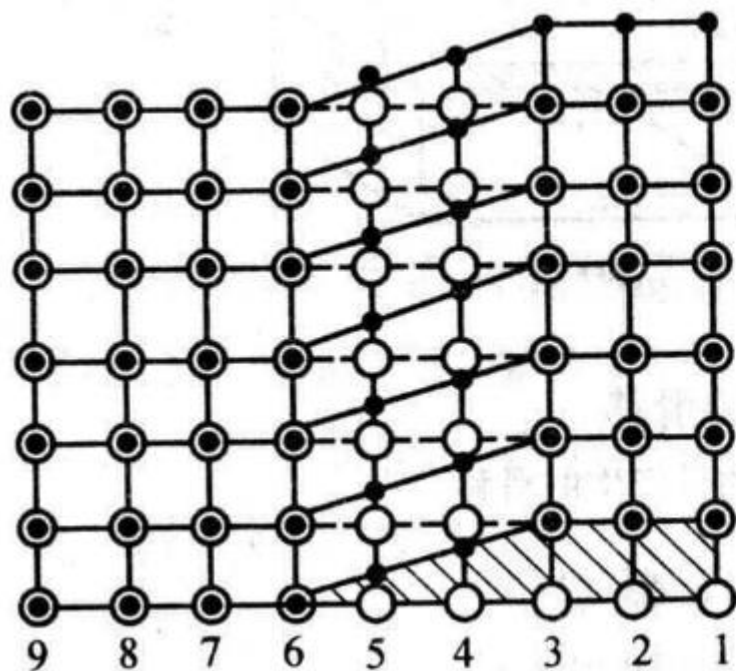
位错强度 $|b| = \frac{a}{n} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$



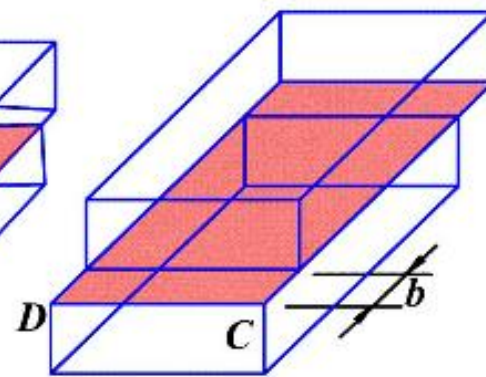
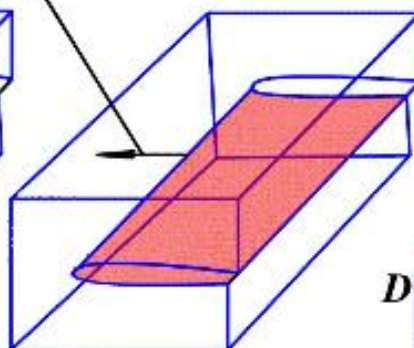
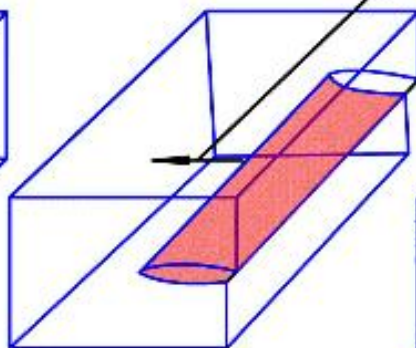
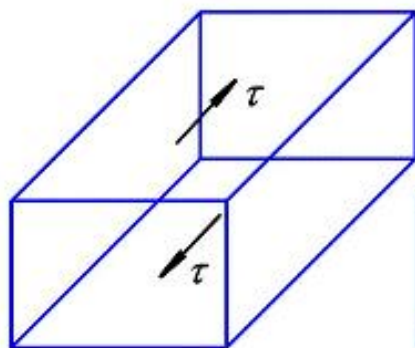
刃型位错的滑移



螺型位错的滑移

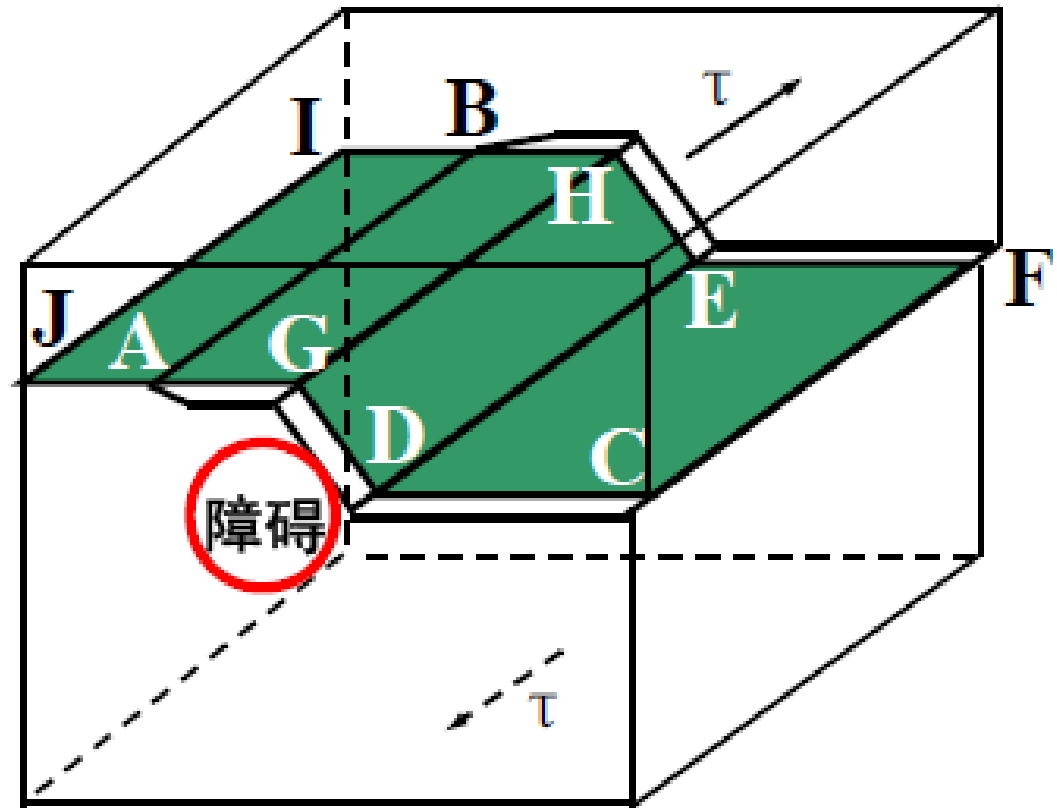


位错线移动方向

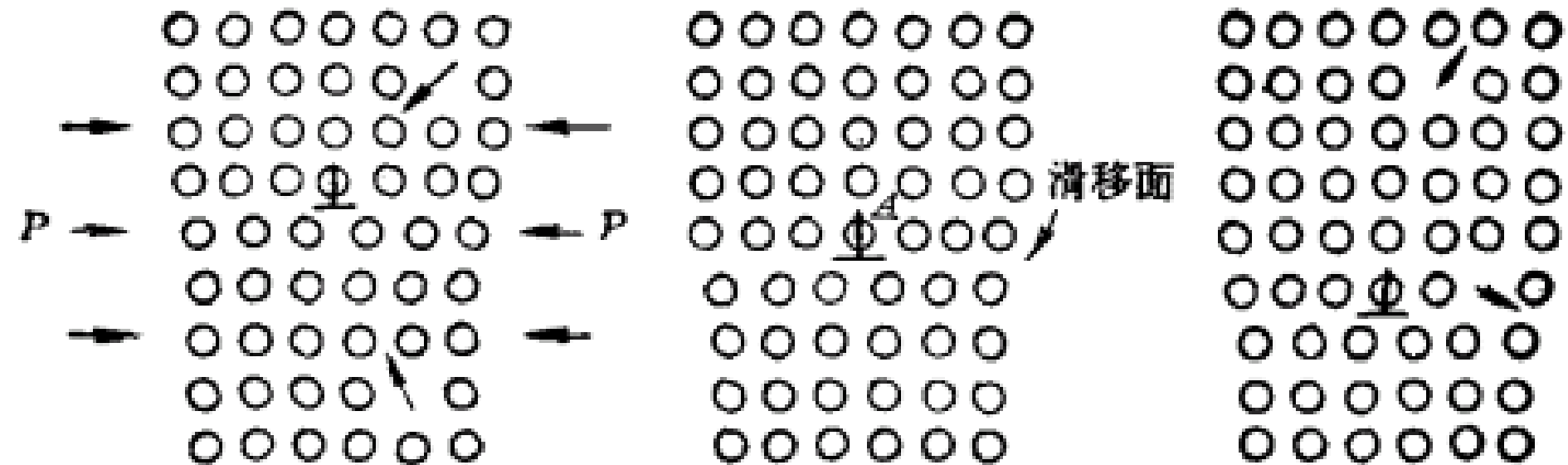


螺型位错的滑移

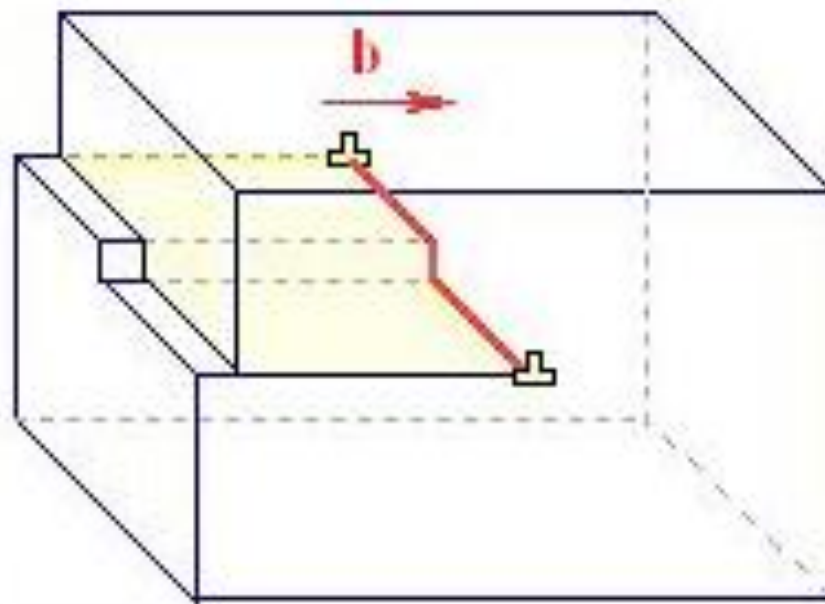
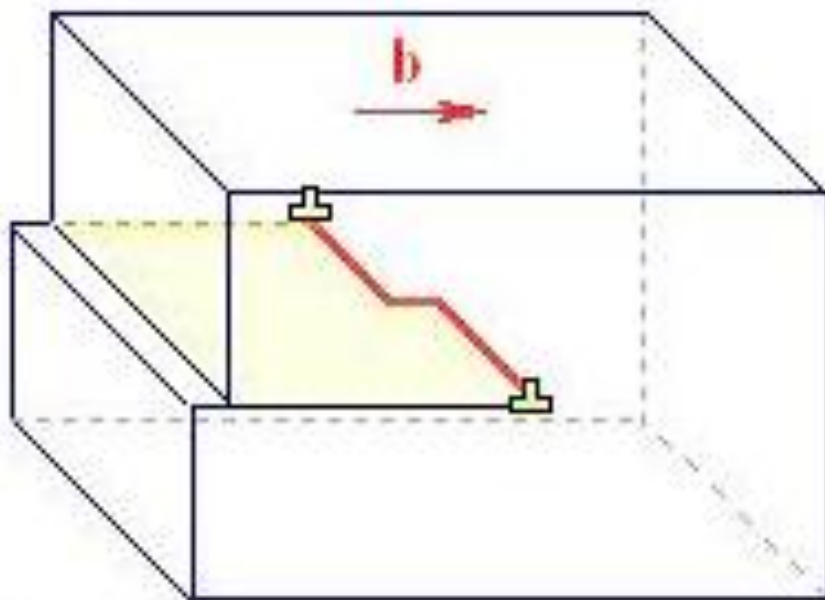
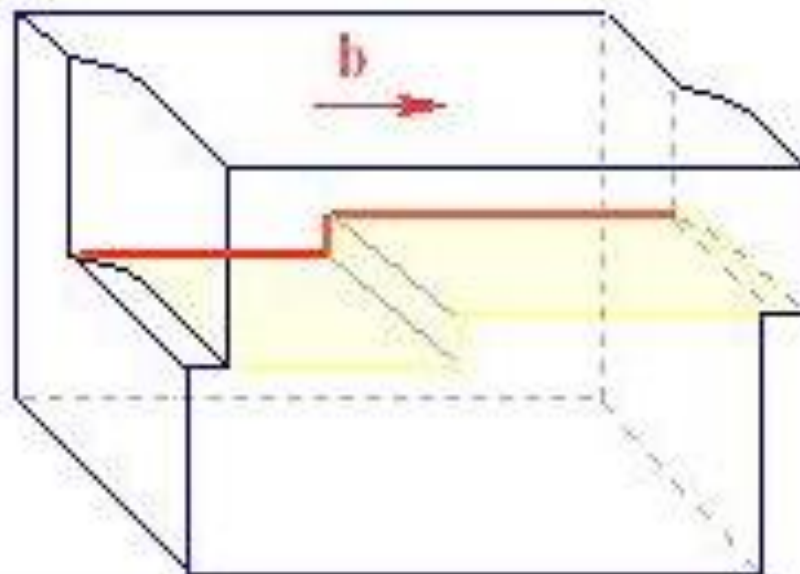
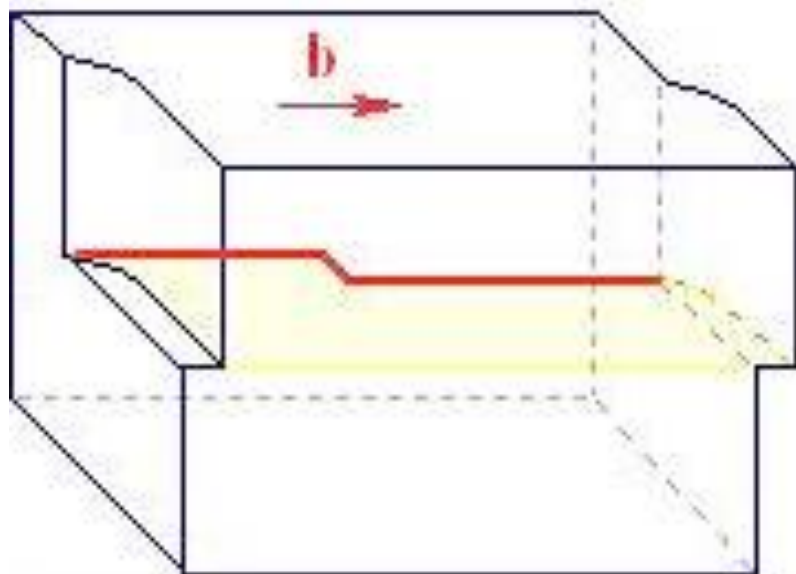
螺位错双交滑移运动示意图



刃型位错的攀移

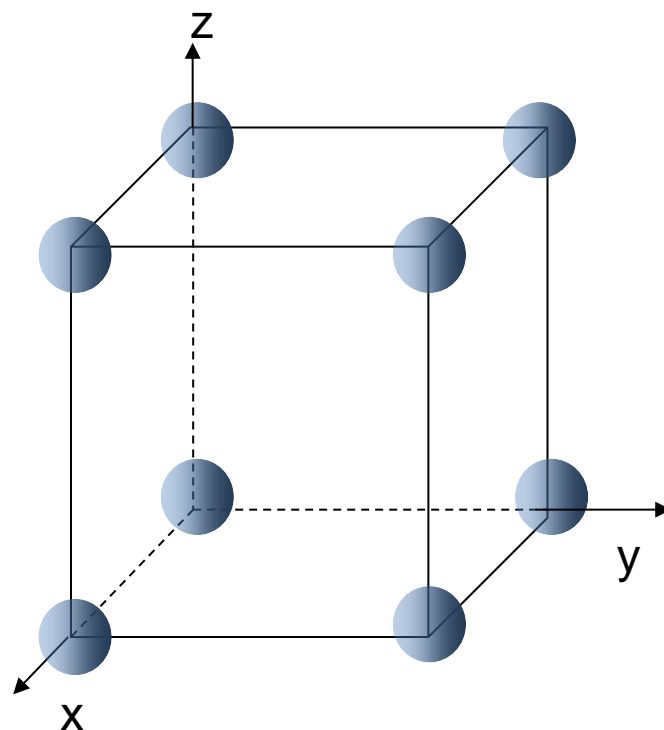


割阶与扭折



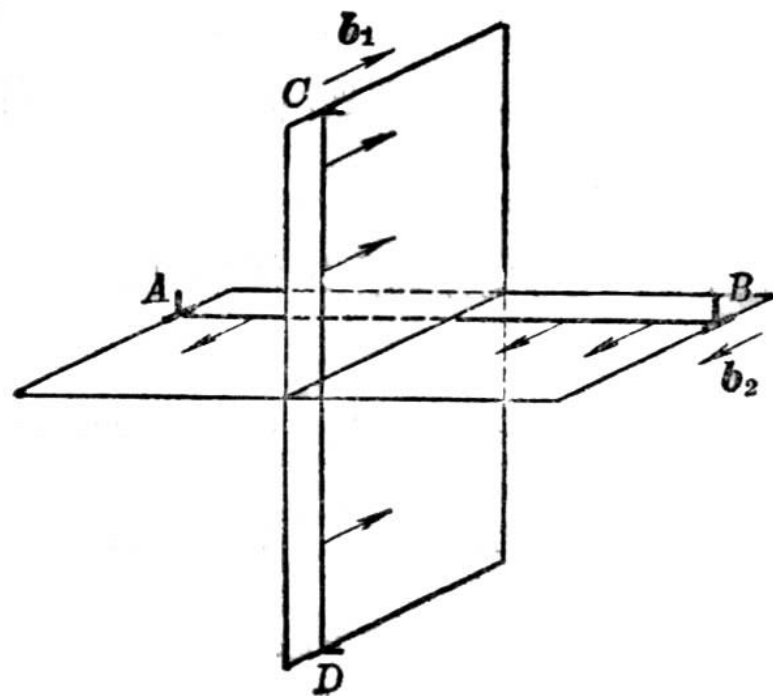
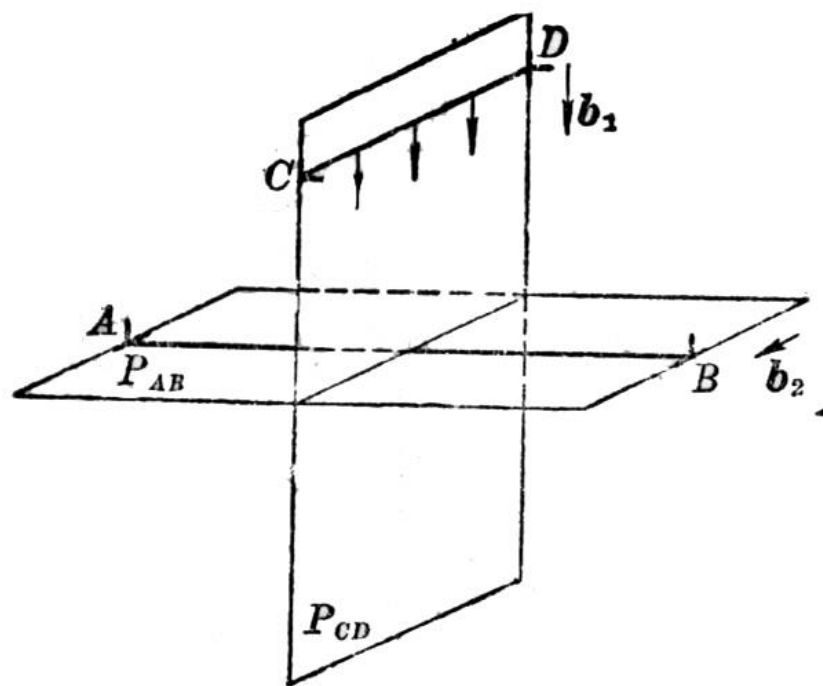
思考题： 假定有一个刃型位错 $b_1 = [0\bar{1}0]$ ，在 (100) 晶面上滑动，

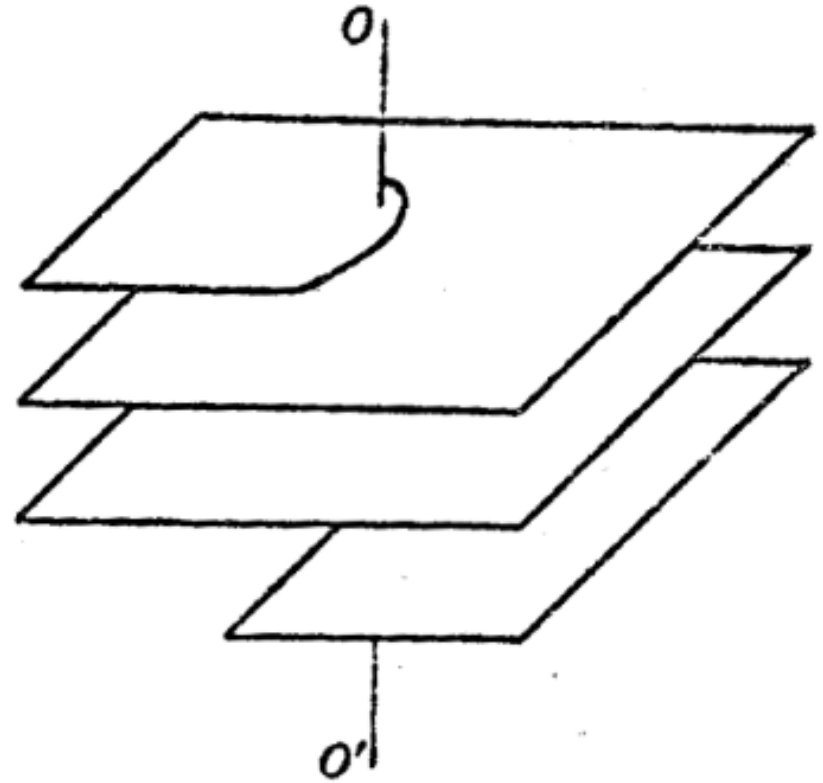
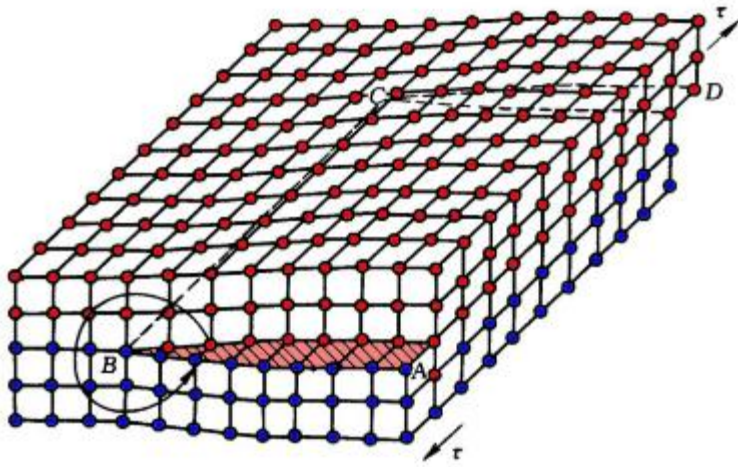
- (1) 如果有另一个刃型位错 $b_2 = [010]$ ，沿着 (001) 晶面上运动，通过上述位错时该位错将发生扭折还是割阶？
- (2) 如果有一个 b_3 方向为 $[100]$ ，并在 (001) 晶面上滑动的螺型位错通过上述位错时，试问它将发生扭折还是割阶？



思考题：假定有一个刃型位错 $b_1 = [0\bar{1}0]$ ，在 (100) 晶面上滑动，

- (1) 如果有另一个刃型位错 $b_2 = [010]$ ，沿着 (001) 晶面上运动，通过上述位错时该位错将发生扭折还是割阶？
- (2) 如果有一个 b_3 方向为 $[100]$ ，并在 (001) 晶面上滑动的螺型位错通过上述位错时，试问它将发生扭折还是割阶？

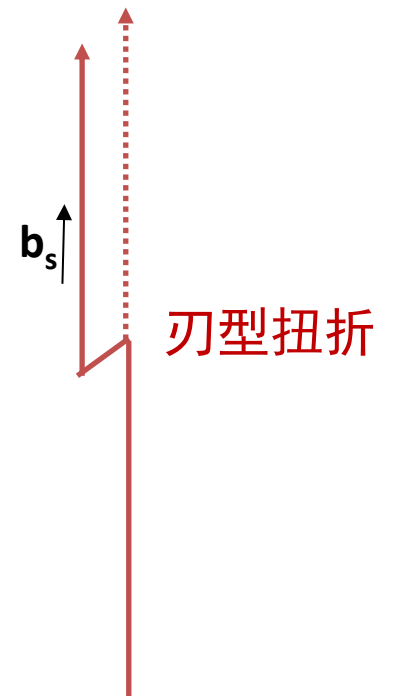
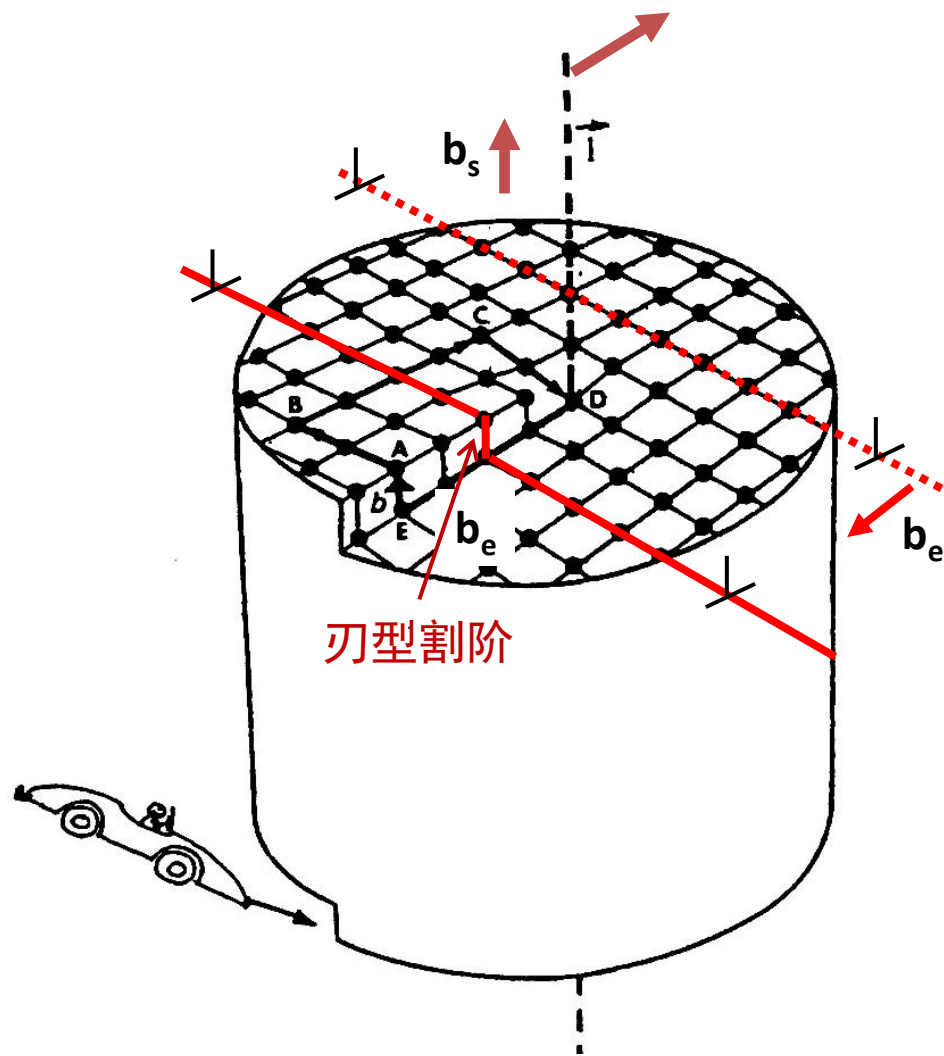




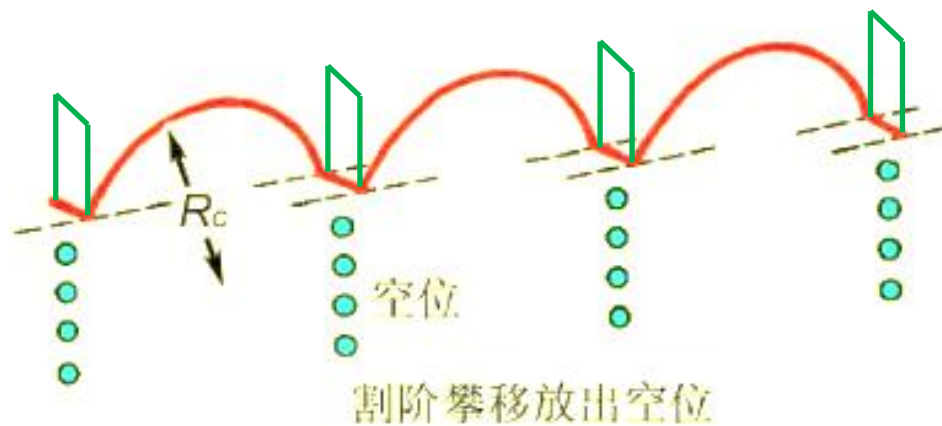
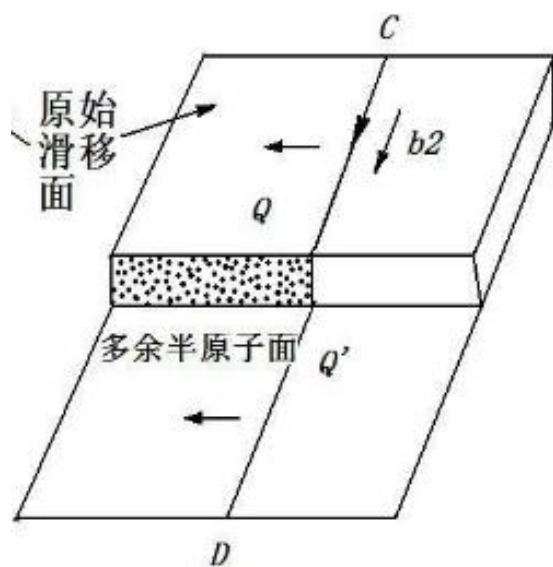
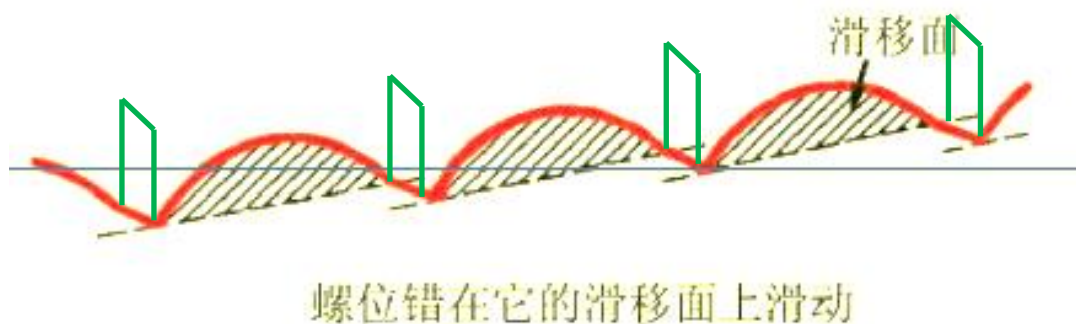
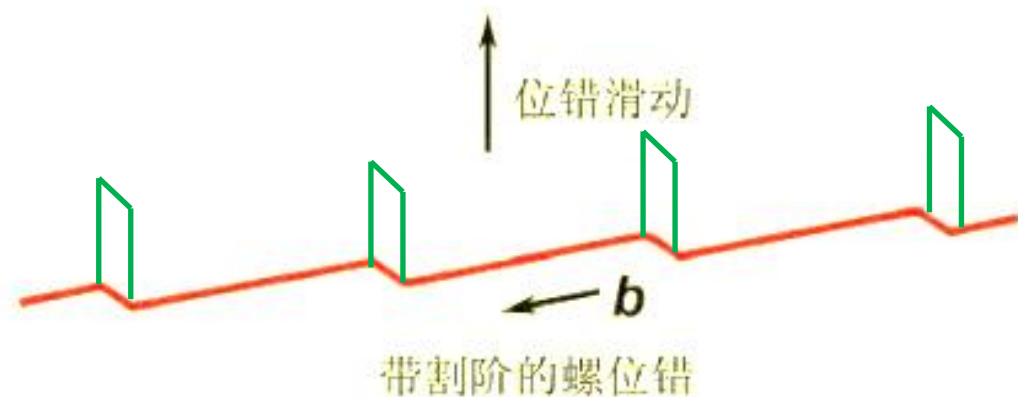
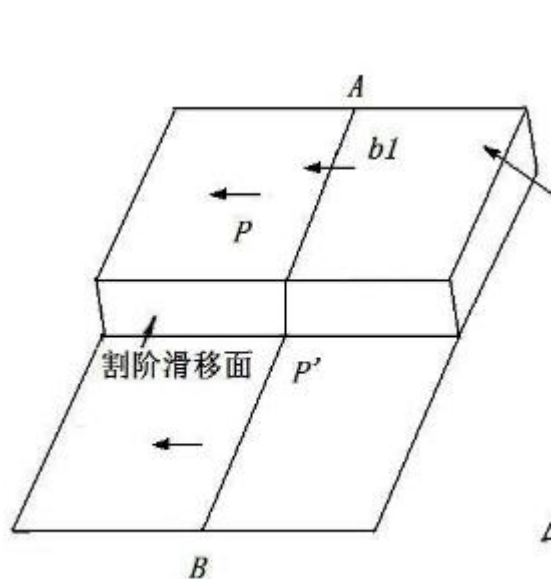
与螺位错垂直的晶面的形状

螺型位错形成后，所有原来与位错线相垂直的晶面，都将有平面变成以位错线为中心轴的螺旋面。

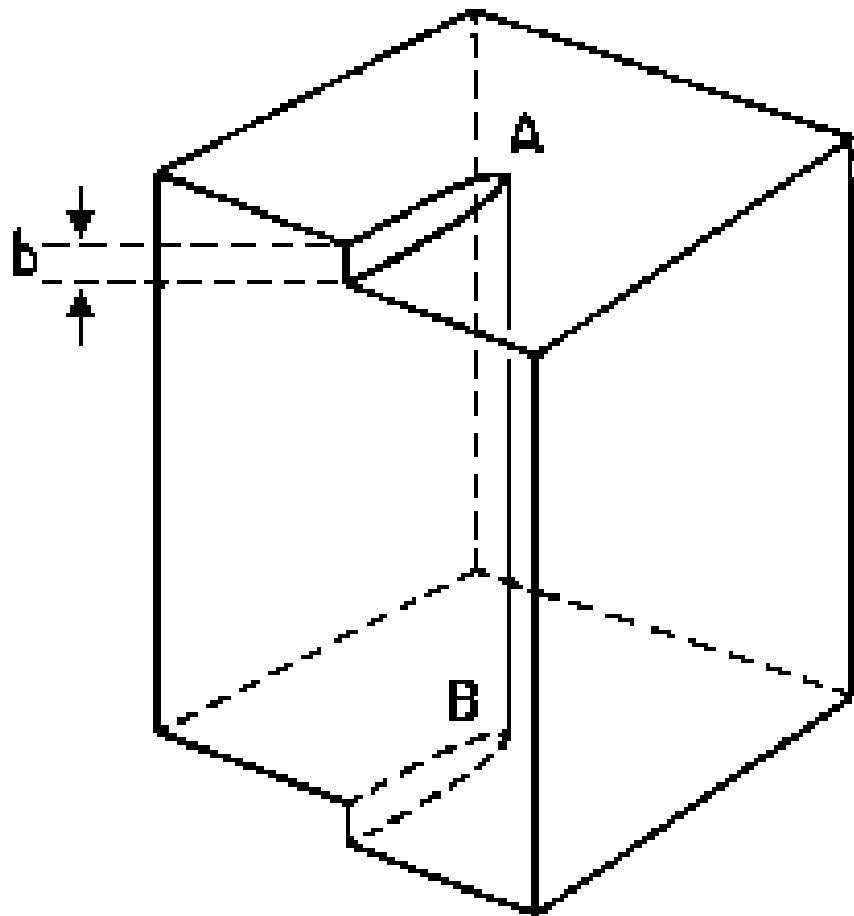
刃型位错和螺型位错的交割



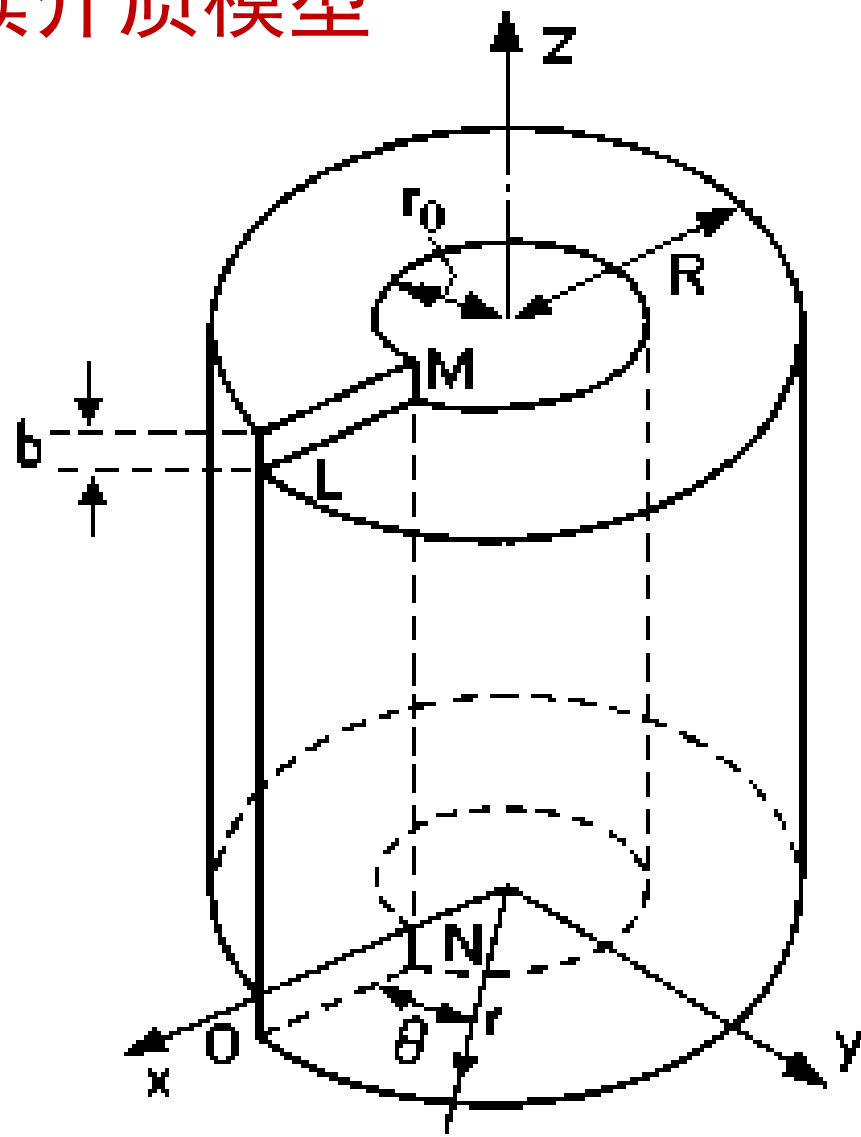
带割阶位错的运动(高度 $1-2b$)



螺型位错的连续介质模型



(a)



(b)

螺型位错的应力场

连续介质模型：

中空圆柱（不考虑位错中心区）

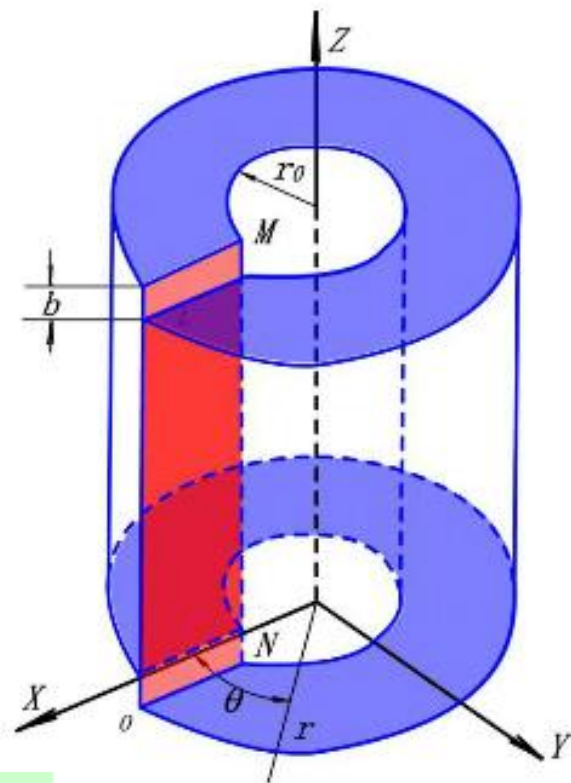
圆柱坐标：方便（利用其轴对称特性！）

位移： $U_z = \frac{b\theta}{2\pi}$ 其余分量为零

应变： $\varepsilon_{\theta z} = \varepsilon_{z\theta} = \frac{b}{2\pi r}$ $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{rr} = \varepsilon_{zz} = 0$

$$\varepsilon_{\theta r} = \varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{rz} = 0$$

应力： $\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r}$ 其余分量为零。

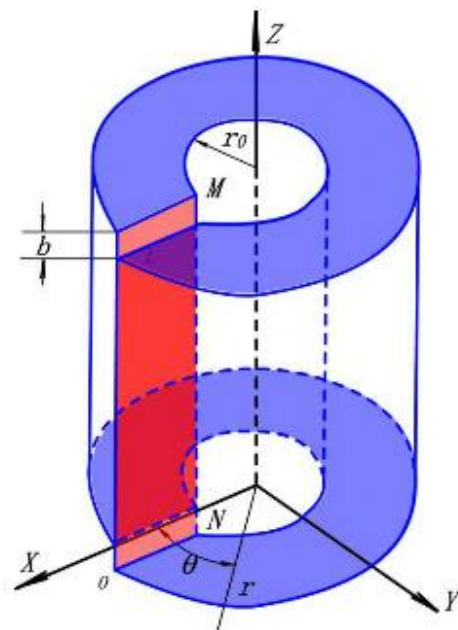


螺型位错的应力场

$$(1) u_x = u_y = 0$$

$$(2) u_z = \frac{b\theta}{2\pi} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

$$(3) u_z = \frac{b}{2\pi} \tan^{-1} \frac{y}{x}$$



$$\epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)$$

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = 0$$

$$\epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} = -\frac{b}{4\pi} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} = -\frac{b}{4\pi} \cdot \frac{\sin \theta}{r}$$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{b}{4\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} = \frac{b}{4\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{r}$$

螺型位错的应力场

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = -\frac{G \cdot b}{2\pi} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} = -\frac{G \cdot b}{2\pi} \cdot \frac{\sin \theta}{r}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{G \cdot b}{2\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} = \frac{G \cdot b}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{r}$$

螺型位错的应力场的特点

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r} \quad \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{zz} = \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \tau_{rz} = \tau_{zr} = 0$$

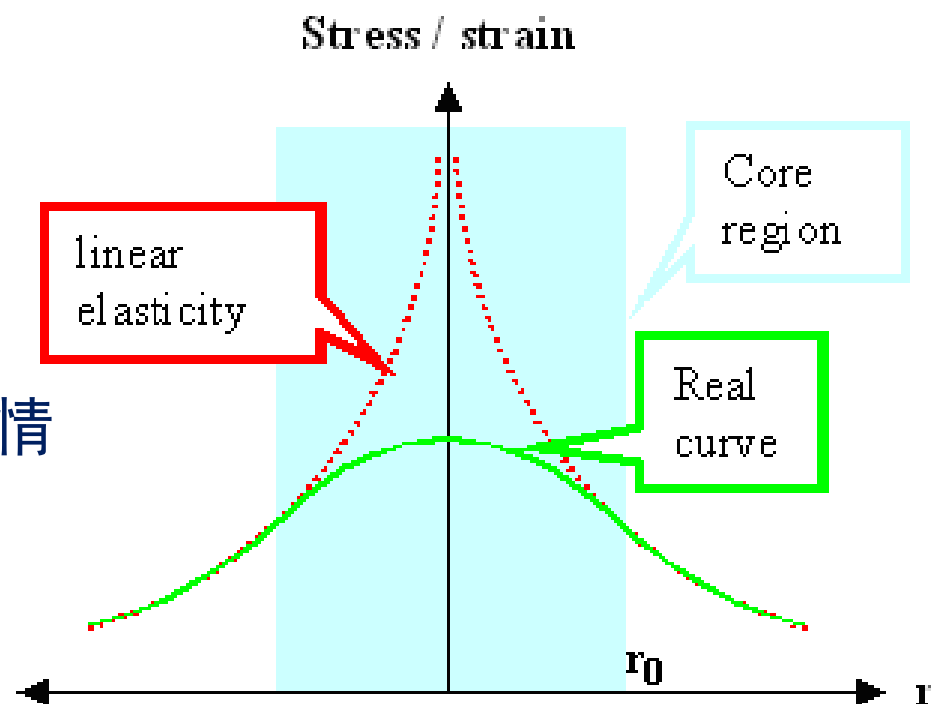
□ 仅切应力分量，无体积变化

□ 应变、应力场为轴对称

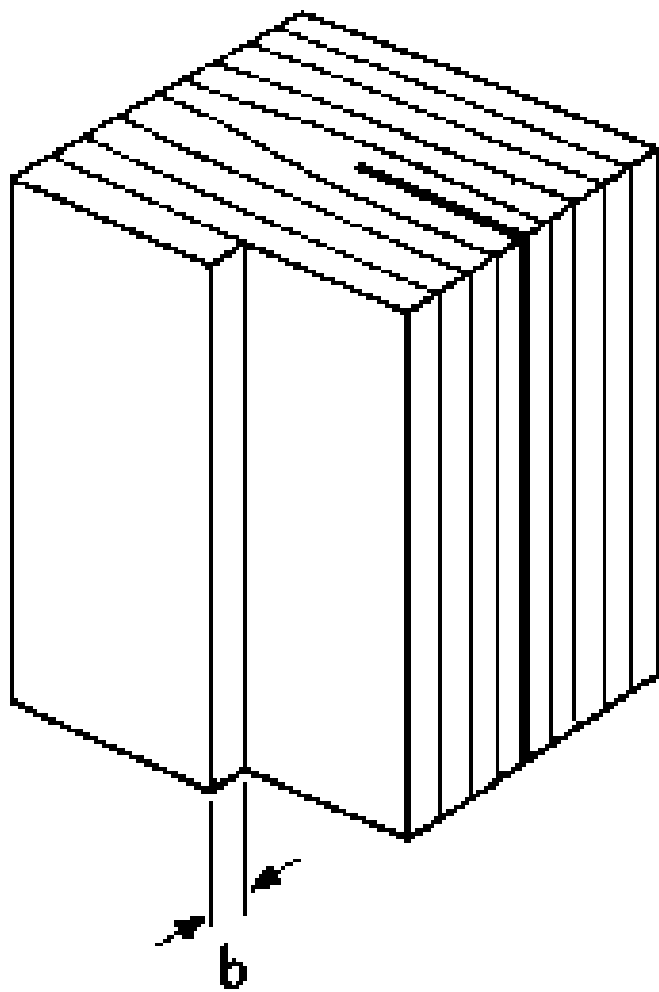
□ $1/r$ 规律；

$r \rightarrow 0$, 应力无穷大，不合实际情况，不适合中心严重畸变区。

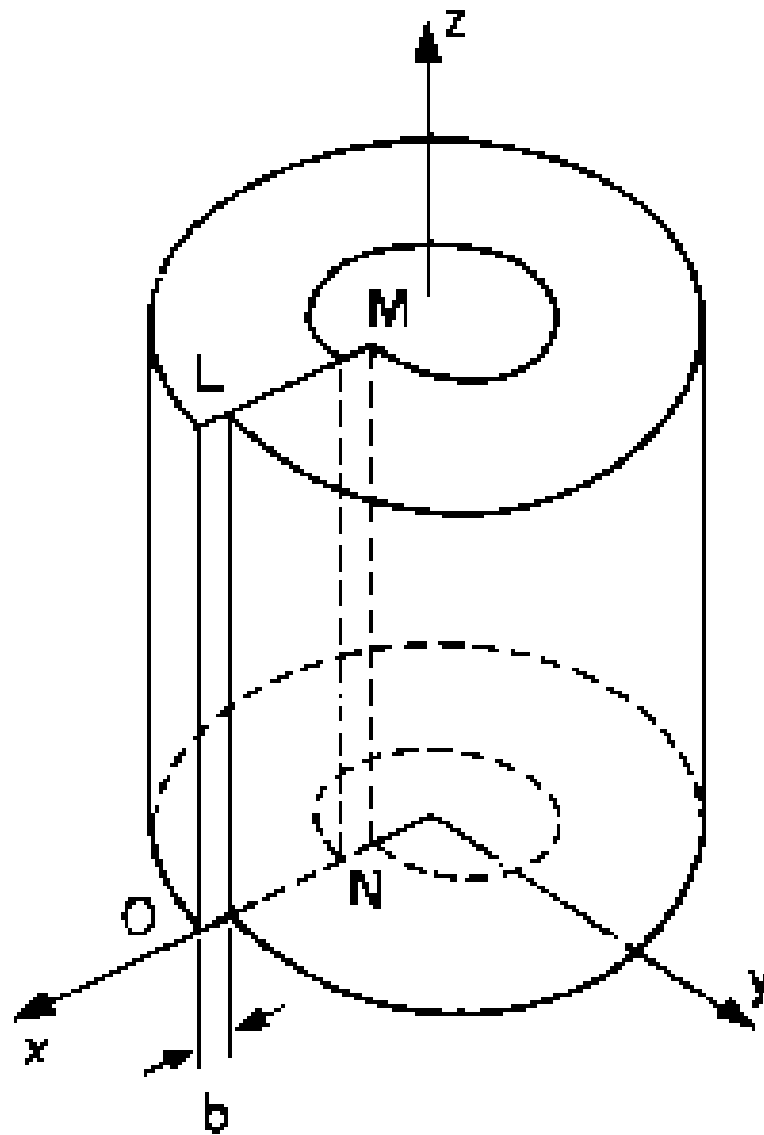
（此规律适用于所有位错！）



刃型位错的连续介质模型



(a)



(b)

刃型位错的应力场

连续介质模型：

- 1、切开，插入半原子面大小的弹性介质
- 2、中空圆柱，径向平移

$$\sigma_{xx} = -D \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^{3/2}},$$

$$\sigma_{yy} = D \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^{3/2}},$$

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}),$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = D \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^{3/2}},$$

$$\tau_{xx} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0.$$

$$D = \frac{Gb}{2\pi(1-\gamma)}$$

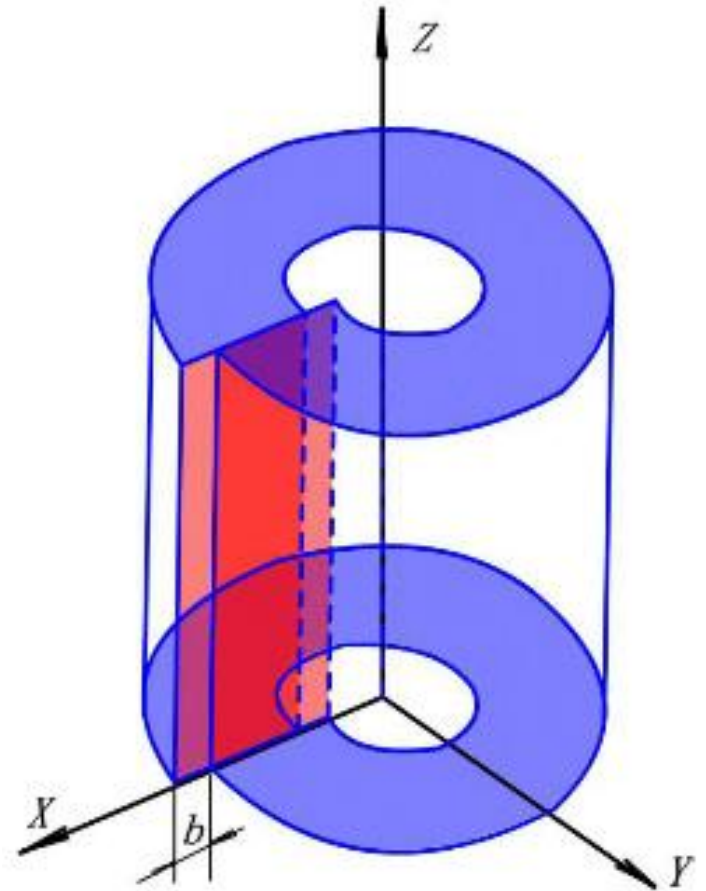
直角坐标
圆柱坐标

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = -D \frac{\sin \theta}{r},$$

$$\sigma_{zz} = -\gamma(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}),$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = D \frac{\cos \theta}{r},$$

$$\tau_{rz} = \tau_{zr} = \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0.$$



刃型位错应力场的特点

$$\sigma_{xx} = -D \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

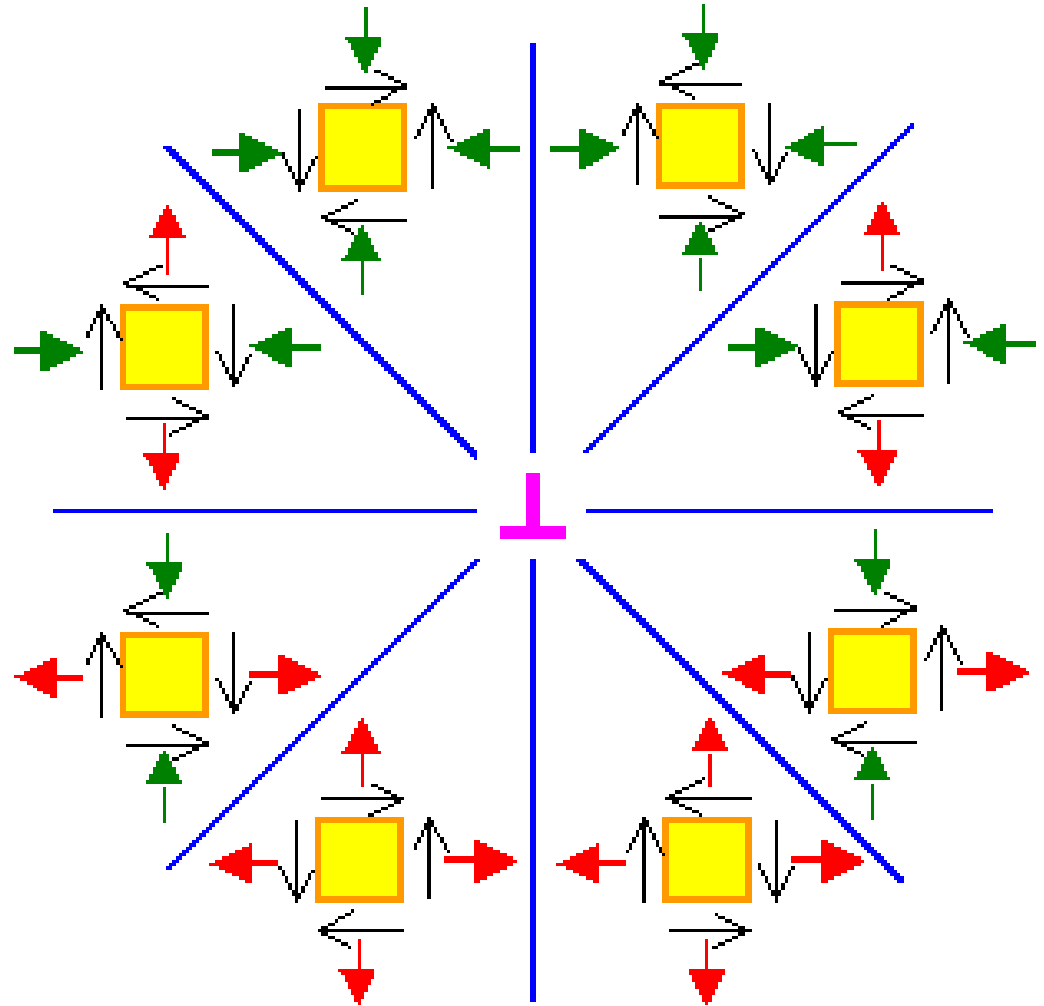
$$\sigma_{yy} = D \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = D \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$\tau_{xx} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$$

$$D = \frac{Gb}{2\pi(1-\gamma)}$$



刃型位错应力场的特点

□ 同时存正、切应力分量，正比于 Gb ，反比于 r

□ 各应变、应力只是 (x, y) 的函数，平面应变

□ 多余半原子面所在平面为对称平面

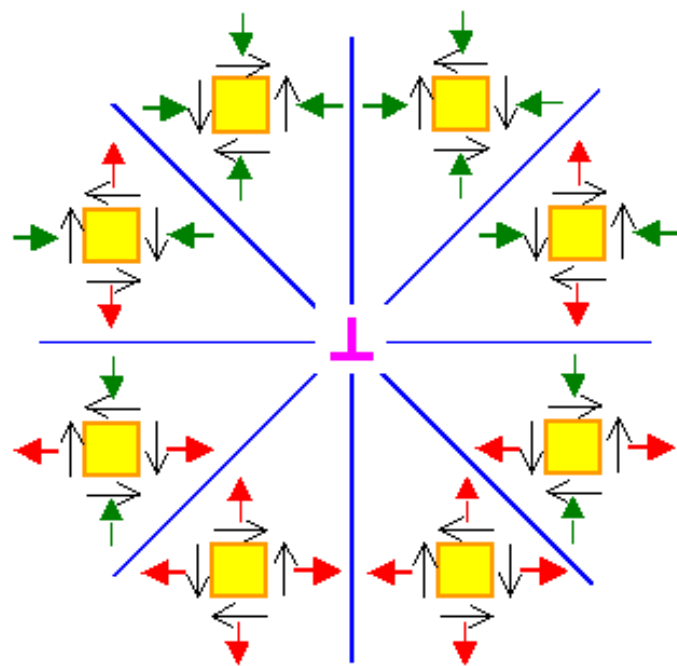
□ 滑移面上无正应力、切应力达最大值 $\left(\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{1}{x} \right)$

□ 上压下拉

□ Anywhere $|\sigma_{xx}| > |\sigma_{yy}|$

□ 特征分界线 $x = \pm y$,

τ_{xy}, τ_{yx} 在其两侧变号，仅正应力
其上则为零



注意：前述为无限长直位错在无限大均匀
各向同性介质中的应力场

位错的应变能 Strain Energy

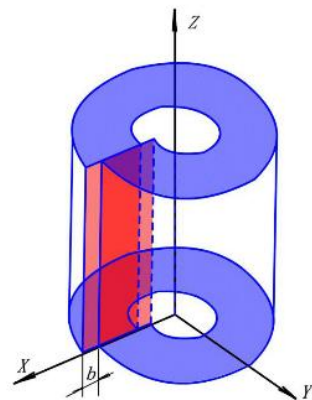
位错=> 点阵畸变=> 能量的增高, 此增量称为位错的应变能
($E = E_c + E_e$)

E_c : 位错中心应变能(占总能量的约10%)

E_e : 位错应力场引起的弹性应变能

单位位错的应变能 = 制造单位位错所作的功

根据位错切移模型和弹性理论可求得



$$E_e^e = W = \int_r^R \int_0^b \tau_{\theta r} dx dr = \int_r^R \int_0^b \frac{Gx}{2\pi(1-\nu)} dx dr = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

$$E_e^s = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}$$

$$E_e^m = E_e^e + E_e^s = \frac{Gb^2 \sin^2 \varphi}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} + \frac{Gb^2 \cos^2 \varphi}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} = \frac{Gb^2}{4\pi K} \ln \frac{R}{r_0}$$

混合位错角度因素: $K = \frac{1-\nu}{1-\nu \cos^2 \varphi}$ 螺 $K=1$ 刃 $K=1-\nu$

位错的应变能 Strain Energy

□ 位错的能量包括两部分： E_c 和 E_e 。

$$(E = E_c + E_e)$$

E_c : 位错中心应变能(占总能量的约10%) $E_c = \frac{Gb^2}{2\pi}$

E_e : 位错应力场引起的弹性应变能

$$E_e^m = E_e^e + E_e^s = \frac{Gb^2 \sin^2 \varphi}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} + \frac{Gb^2 \cos^2 \varphi}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} = \frac{Gb^2}{4\pi K} \ln \frac{R}{r_0}$$

位错的弹性应变能 $E_e \propto \ln \frac{R}{r_0}$ ，随 R 缓慢地增加，所以位错具有长程应力场。一般认为 $r_0 \approx b$ ，约为 $10^{-10}m$ ，而 R 是位错应力场最大作用范围的半径，实际晶体中由于存在亚结构或位错网络，一般取 $R = 10^{-6}m$ 。因此，单位长度位错的总应变能可简化为： $E = \alpha Gb^2$ ，式中 $\alpha = 0.5 - 1$ 。

位错应变能的特点

□ 单位长度位错的总应变能可简化为：

$$E = \alpha G b^2, \text{ 式中 } \alpha = 0.5 - 1.$$

□ 应变能与 b^2 成正比，故具有最小 b 的位错最稳定 b ，大的位错有可能分解为 b 小的位错，以降低系统能量。

□ $E_{\text{螺}}/E_{\text{刃}} = 1 - \nu$ 常用金属材料 ν 约为 $1/3$ ，故 $E_{\text{螺}}/E_{\text{刃}} = 2/3$

□ 位错的能量还与位错线的形状及长度有关，两点之间以直线为最短，位错总有被拉直的趋势，产生一线张力。

□ 位错的存在 \rightarrow 体系内能 \uparrow 。（晶体的熵值 \uparrow 可忽略）

因此位错的存在使晶体处于高能的不稳定状态，

可见**位错是热力学不稳定的晶体缺陷。**

位错的线张力

□ **线张力：** 为了降低能量，位错自发变直，缩短长度的趋势

$$T = dE/dl \quad T = aGb^2 \quad (a=0.5 \sim 1.0)$$

□ **组态力** 趋向于能量较低的状态，没有施力者

□ **线张力的意义：** 使位错线缩短变直；晶体中位错呈三维网状分布。



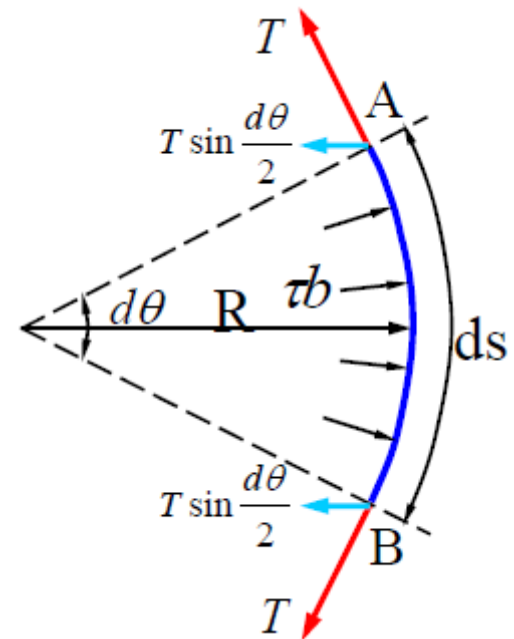
端点固定的位错在剪应力作用下的平衡形态

$$\tau b \cdot ds = 2T \sin \frac{d\theta}{2} \Rightarrow \tau b = \frac{T}{r} \approx \frac{Gb^2}{2r} \quad \text{或} \quad \tau = \frac{Gb}{2r}$$

($ds = r d\theta$)

一条两端固定的位错在切应力作用下将

呈曲率半径为 r 的弯曲： $r = \frac{Gb}{2\tau}$

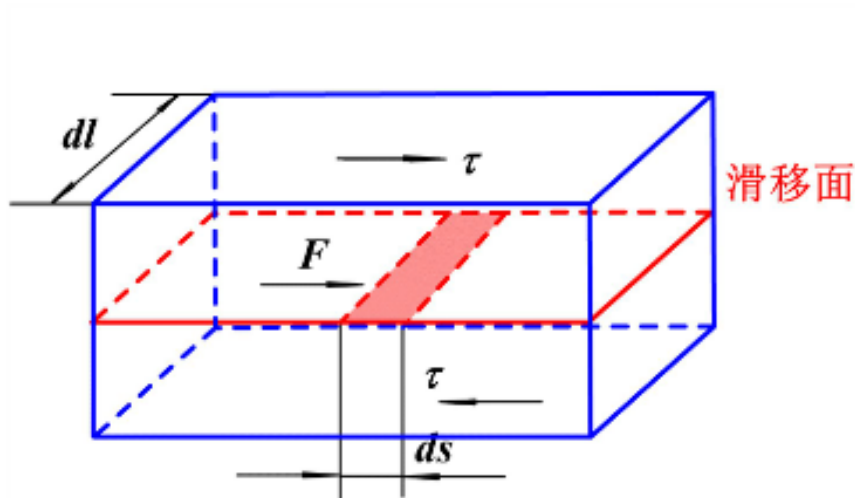


作用在位错上的力

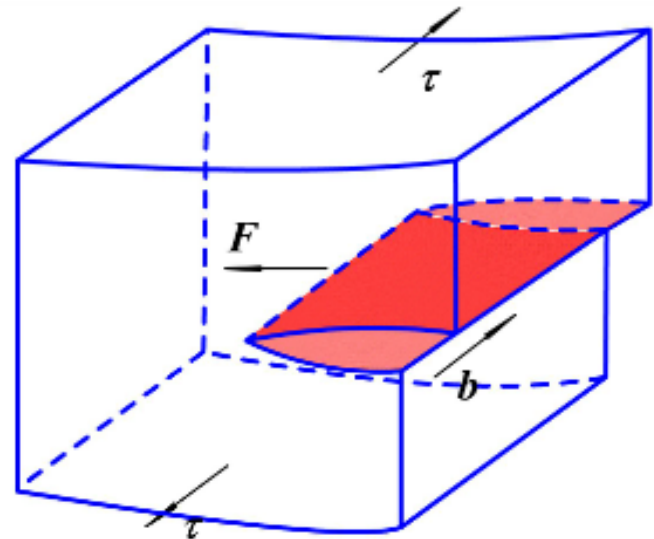
□ 位错运动方向 \perp 位错线 \Rightarrow 假想力作用于位错上

□ 虚功原理： \Rightarrow **滑移力：** $F_d = \tau b$

- $F_d \propto \tau$, $F_d \propto b$ (单位位错线长度)
- $F_d \perp$ 位错线, 指向未滑移区
- F_d 为假象力, 其方向与 τ 不一定一致。(如螺位错 $F_d \perp \tau$)



(a) 一小段位错线移动;



(b) 作用在螺型位错上的力

外力 τ 使长为 l 的位错移动了 ds , τ 作功 dW_1

$$d_{w1} = (\tau \cdot l \cdot ds)b$$

假想有一力 F 作用于位错上, 则 F 作功 dW_2

$$d_{w2} = (F \cdot ds)$$

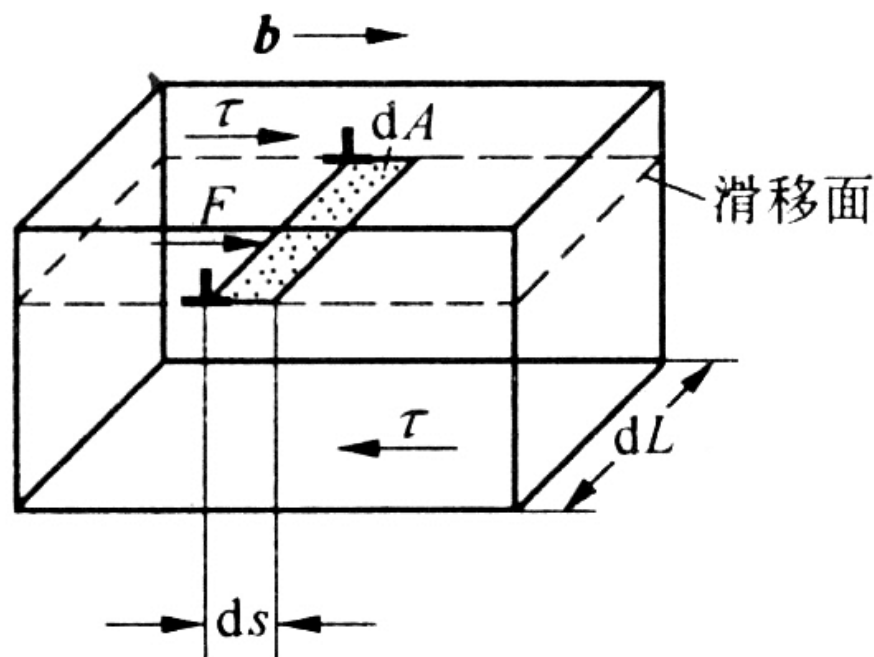
有 $d_{w1} = d_{w2}$

$$\tau \cdot l \cdot ds \cdot b = F \cdot ds$$

$$F = \tau \cdot l \cdot b$$

单位长度位错线上的力:

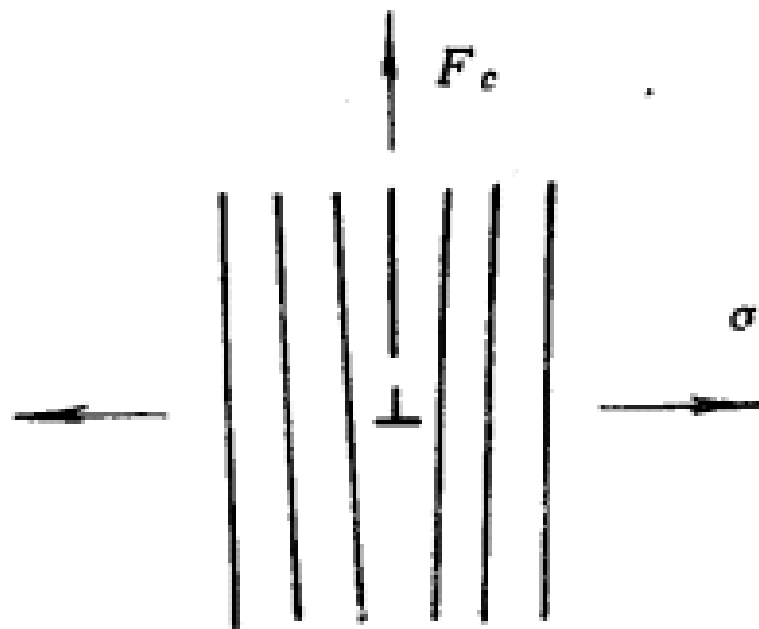
$$F_d = \frac{F}{l} = \tau b$$



作用在位错上的力

□ 攀移力

$$F_y = -\frac{\sigma_{xx} \cdot b \cdot dy}{dy} = -\sigma_{xx}b$$



➤ σ_{xx} 与位错 b 平行的正应力分量，

负号表示压应力，正号表示拉应力

➤ 攀移力是沿 y 方向垂直滑移面的作用力

➤ 攀移力 \perp 位错线

➤ 攀移力 $\perp b$ （刃位错或刃型分量）

位错间的作用力

位错间的作用力通过彼此的应力场实现： $F_{1 \rightarrow 2} = \tau_{1 \rightarrow 2} b_2$

□ 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：

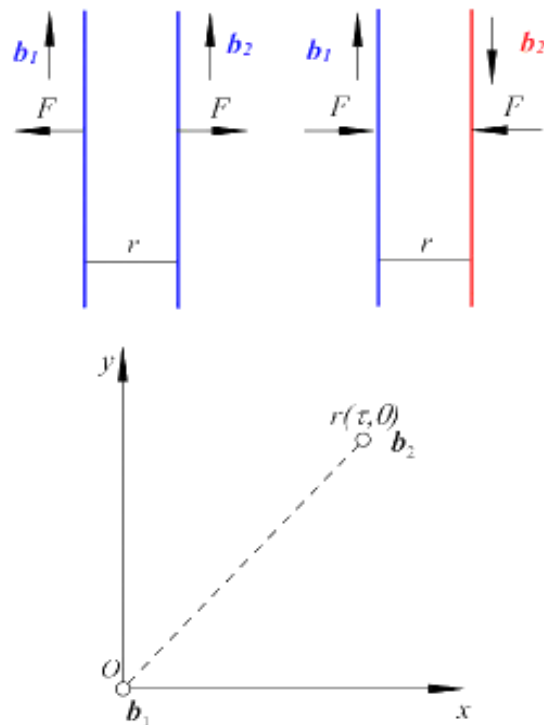
$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb_1}{2\pi r}$$

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。

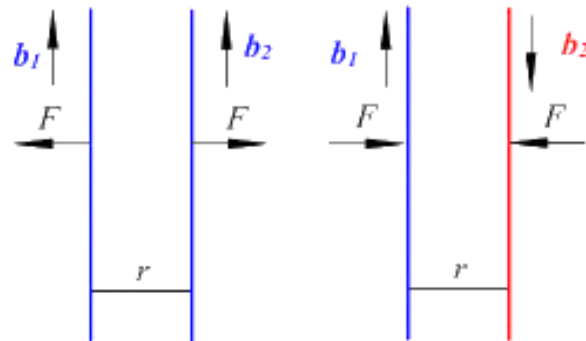


平行螺型位错的相互作用

位错间的作用力

两平行螺位错间的作用力

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



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。

位错间的作用力

□ 平行刃型位错间的相互作用：

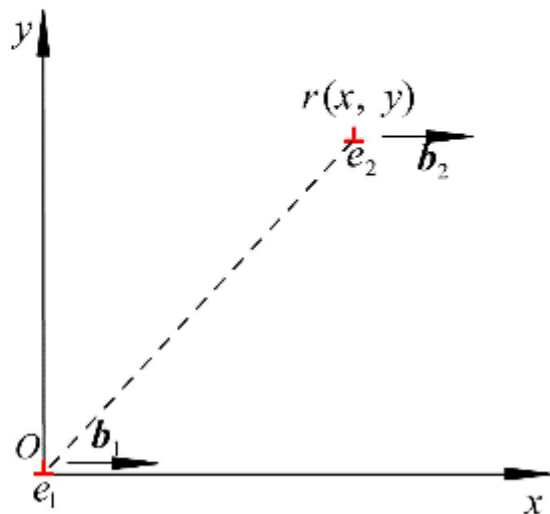
两平行 Z 轴，相距 $r(x, y)$ 刃位错，在两平行晶面上，柏氏矢量 b_1 和 b_2 均与 X 轴同向。

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：

$$f_x = \tau_{yx} b_2 = \frac{G b_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$f_y = -\sigma_{xx} b_2 = \frac{G b_1 b_2}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

由此可分析位错 b_2 处不同处时受力状态。



平行刃型位错的相互作用

两刃位错间作用力的讨论（一）

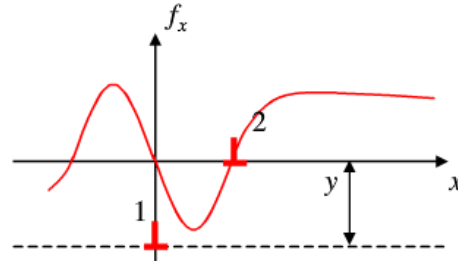
两刃型位错为同号位错，滑移力

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

□ 当 $|x| > |y|$ 时：

➤ 若 $x > 0$ ，则 $f_x > 0$ ；

若 $x < 0$ ，则 $f_x < 0$

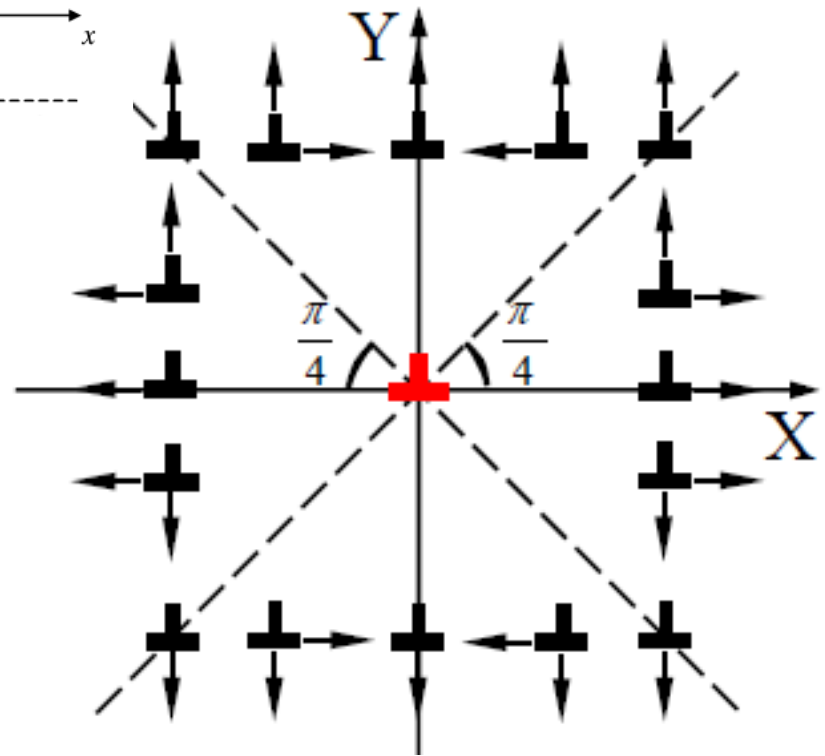


表明：当位错 b_2 位于该区间时，两位错相互排斥

➤ 当 $x > 0$ ， $y = 0$ 时， $f_x > 0$ ；

当 $x < 0$ ， $y = 0$ 时， $f_x < 0$ ；

表明：在同一滑移面上，同号位错相互排斥，距离越小，排斥力越大。



两刃位错间作用力的讨论（一）

□ 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 位于该区间时, 两位错相互吸引。

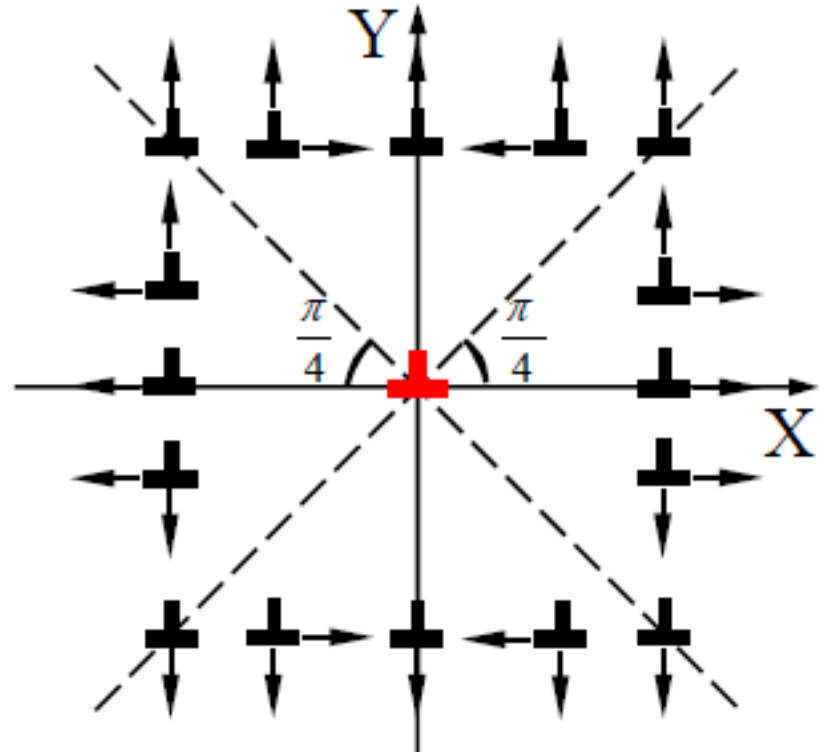
□ 当 $|x| = |y|$ 时:

则 $f_x = 0$;

表明: 当位错 b_2 位于分角线时, 不存在使位错 b_2 滑移的作用力; 介稳位置。

□ 当 $x = 0$ 时, 则 $f_x = 0$:

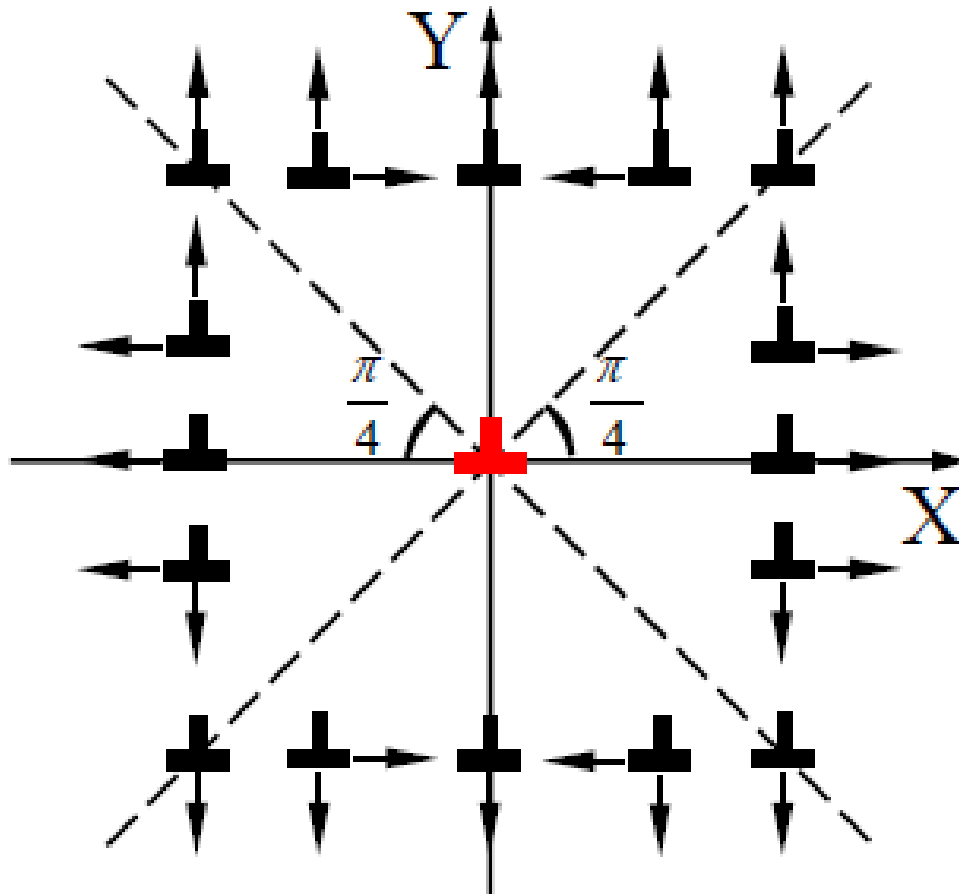
表明: 当位错 b_2 位于Y轴上时, 平行稳定稳位置。



两刃位错间作用力的讨论（一）

攀移力

$$f_y = -\sigma_{xx} \cdot b_2 = \frac{Gb_1b_2}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$



□ 当 $y > 0$ 时, $f_y > 0$

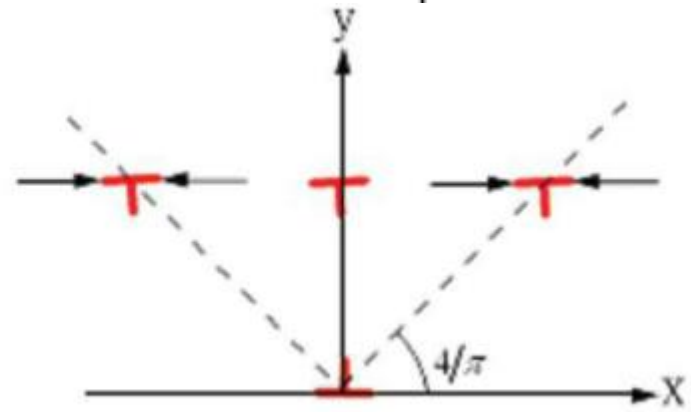
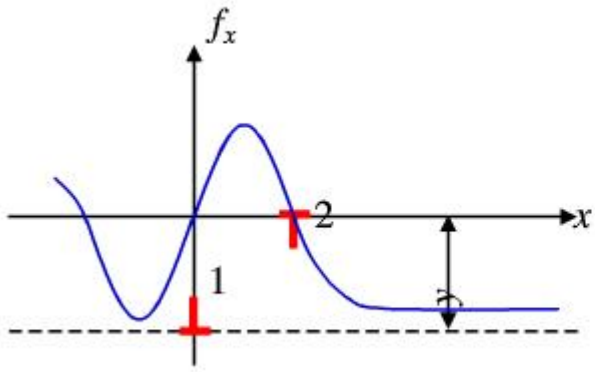
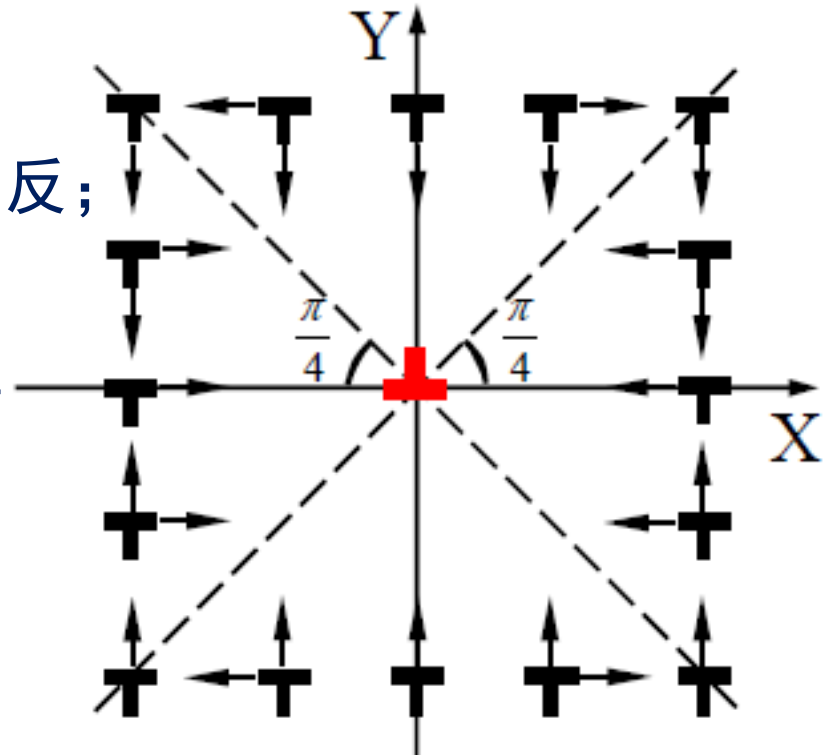
当 $y < 0$ 时, $f_y < 0$

表明：相互排斥。

两刃位错间作用力的讨论（一）

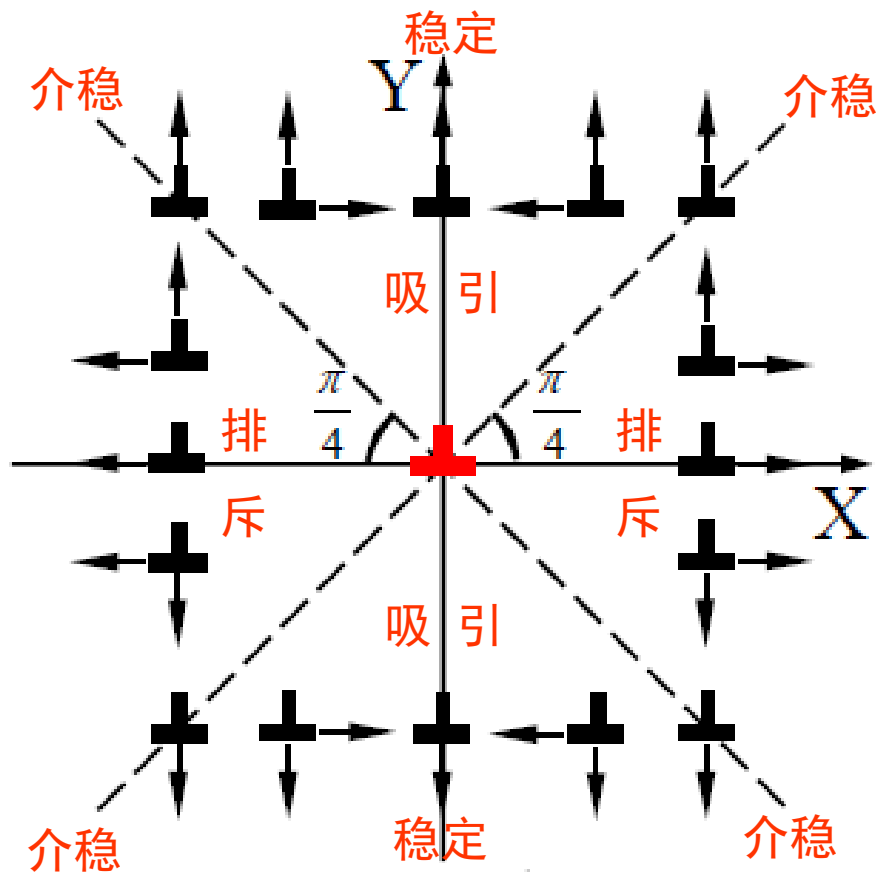
两刃型位错为同号位错

- 交互作用力 f_x 方向与同号位错相反；
- 稳定位置与介稳位置相互对换；
- 异号刃型位错力图排在和滑移面成45度的平面上
- 异号刃型位错间相互吸引，**互相靠近，直到消失。**

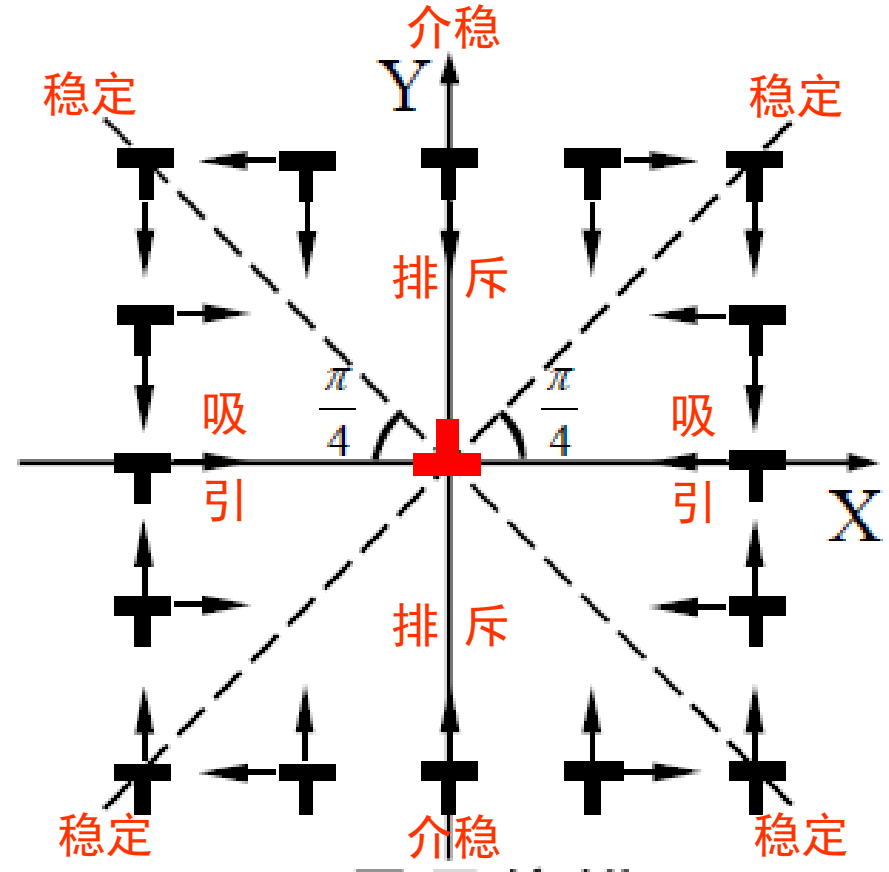


两刃位错间作用力的讨论（一）

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



a) 同号位错



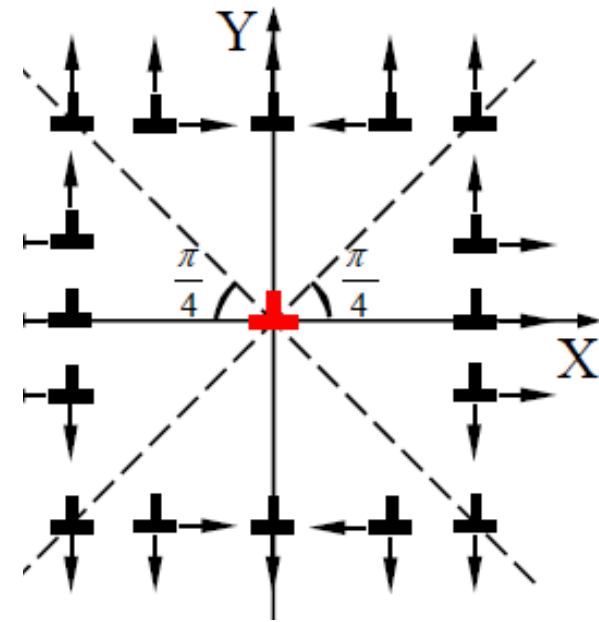
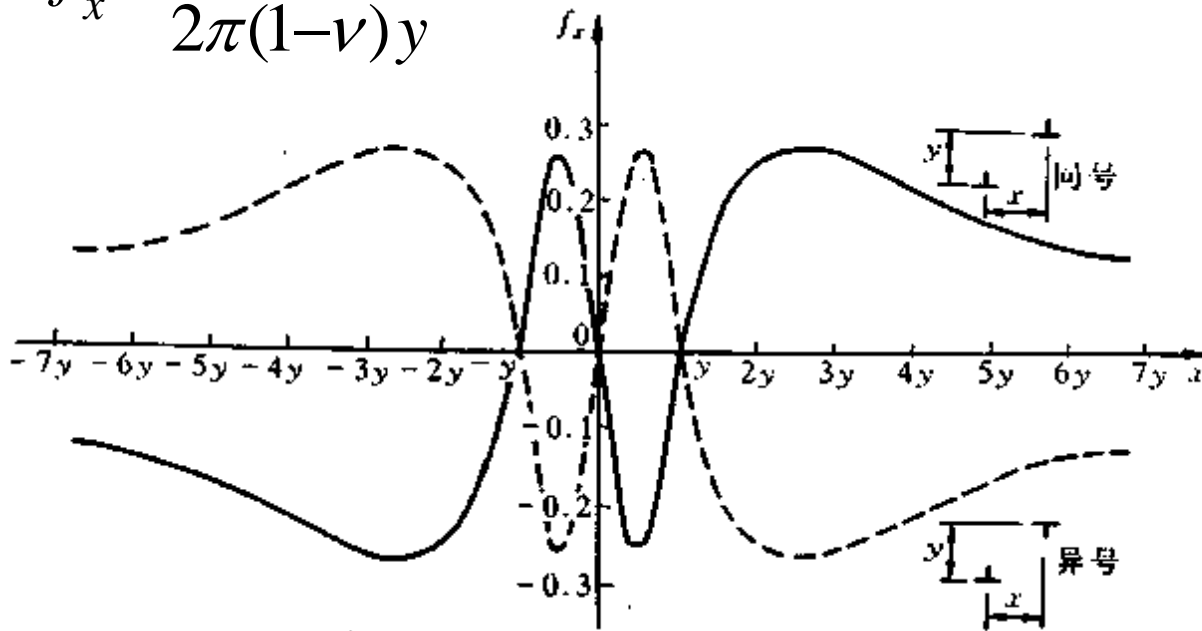
b) 异号位错

平行滑移面内两平行刃型位错间的互作用力

两刃位错间作用力的讨论（二）

两平行刃型位错沿柏氏矢量方向的交互作用力

$$f_x = \frac{Gb_1b_2}{2\pi(1-\nu)y}$$



- y 为两位错垂直距离，即滑移面距离； x 为两位错水平距离，用 y 的倍数度量。
- 两同号位错间作用力（实线）与两异号位错间作用力（虚线）：大小相等，方向相反（适用于所有位错）

位错密度

- 位错密度：单位体积晶体中所含位错线的总长度。

$$\rho = L/V \quad (1/\text{cm}^2) \quad (1)$$

$$\rho = nl/lA = n/A \quad (2)$$

(面积A中所见的位错线数目：穿过单位面积的位错线数目)

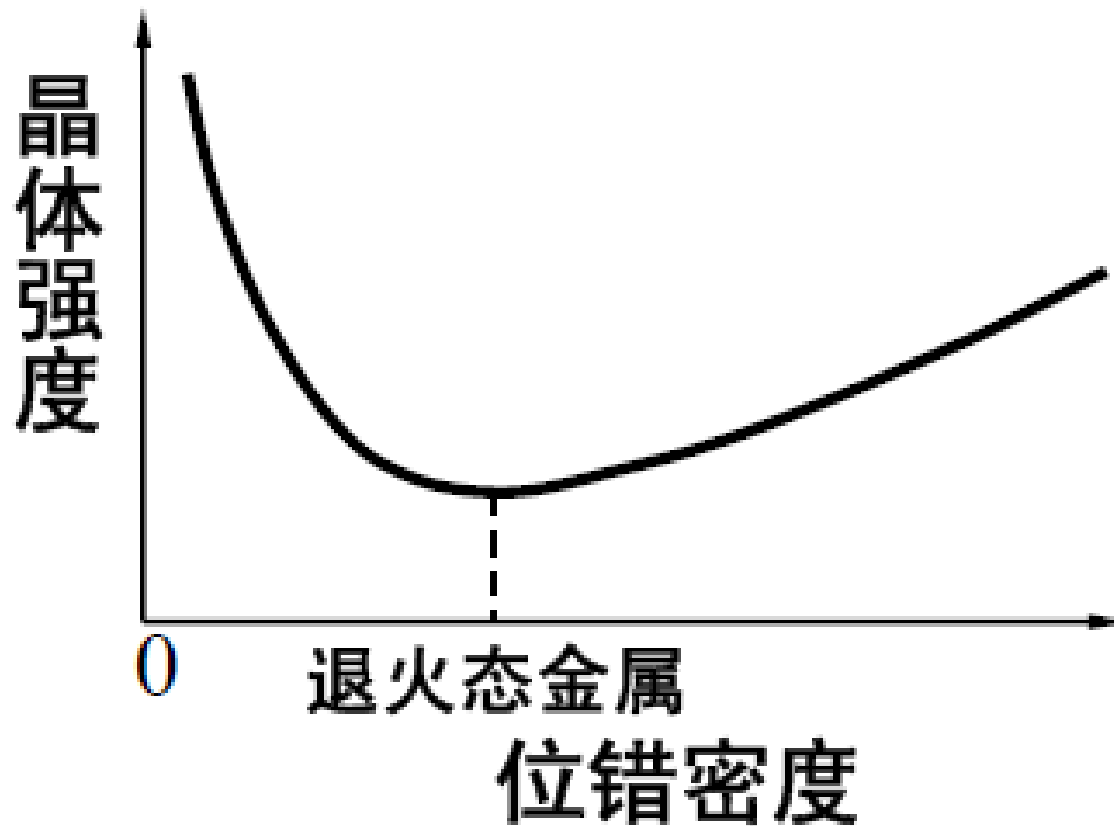
$$(2) < (1)$$

- 金属晶体中的位错密度：

充分退火的金属多晶体： $10^6 \sim 10^8/\text{cm}^2$

超纯金属单晶体： $< 10^3/\text{cm}^2$

剧烈冷变形的金属： $10^{10} \sim 10^{12}/\text{cm}^2$



晶体强度与位错密度关系示意图

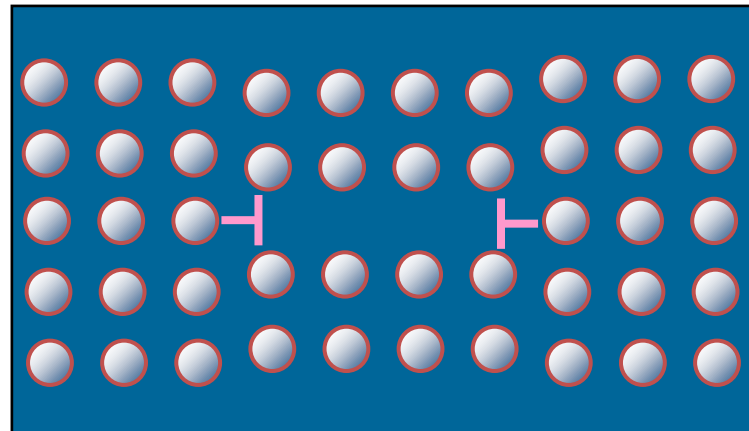
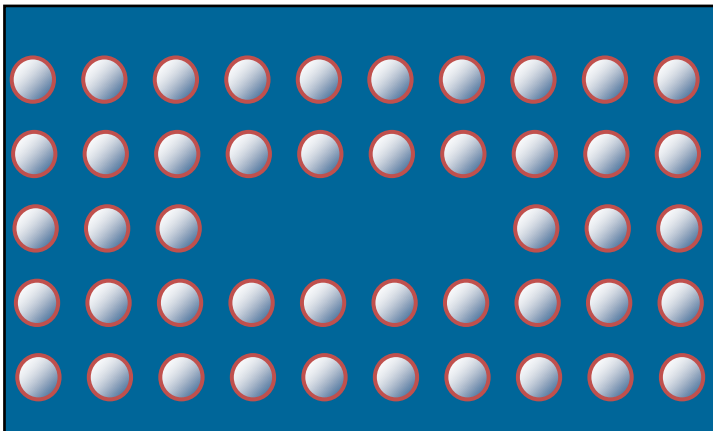
位错的生成

□ 晶体生长过程中产生的位错：

- 1、成分不同 \Rightarrow 晶块点阵常数不同 \Rightarrow 位错过渡
- 2、晶块偏转、弯曲 \Rightarrow 位相差 \Rightarrow 位错过渡
- 3、晶体表面受到影响 \Rightarrow 台阶或变形 \Rightarrow 产生位错

□ 快速凝固 \Rightarrow 过饱和空位 \Rightarrow 聚集 \Rightarrow 位错

□ 热应力和组织应力 \Rightarrow 界面和微裂纹处应力集中 \Rightarrow 局部滑移 \Rightarrow 位错



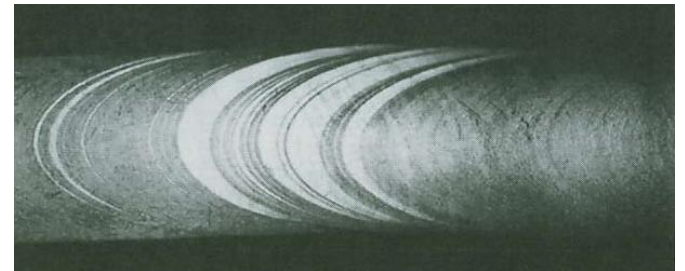
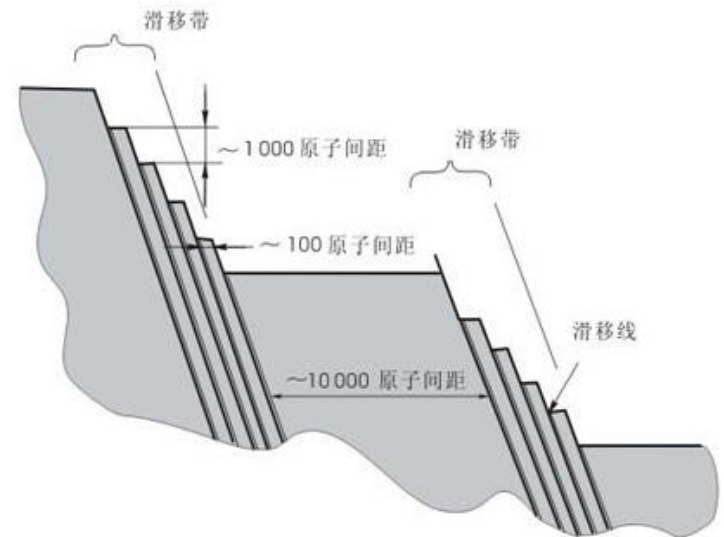
位错的增殖

位错滑移到表面=>宏观变形（减少？）

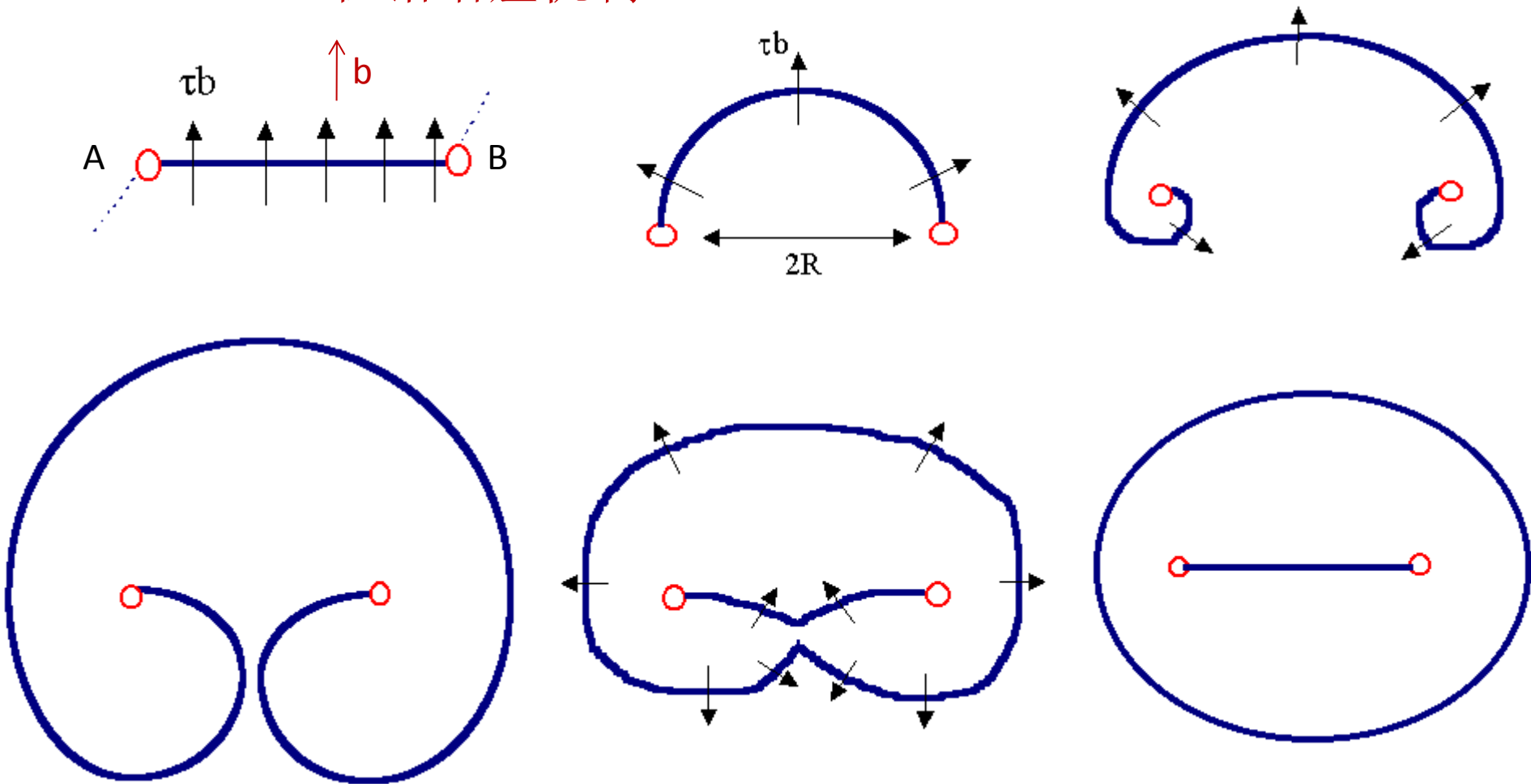
事实上：密度增加，可达4-5 个数量级位错必有增殖！

主要增殖机制：

- Frank-Read 位错源
- 双交滑移增殖机制
- 攀移增殖机制



Frank-Read 位错增殖机制

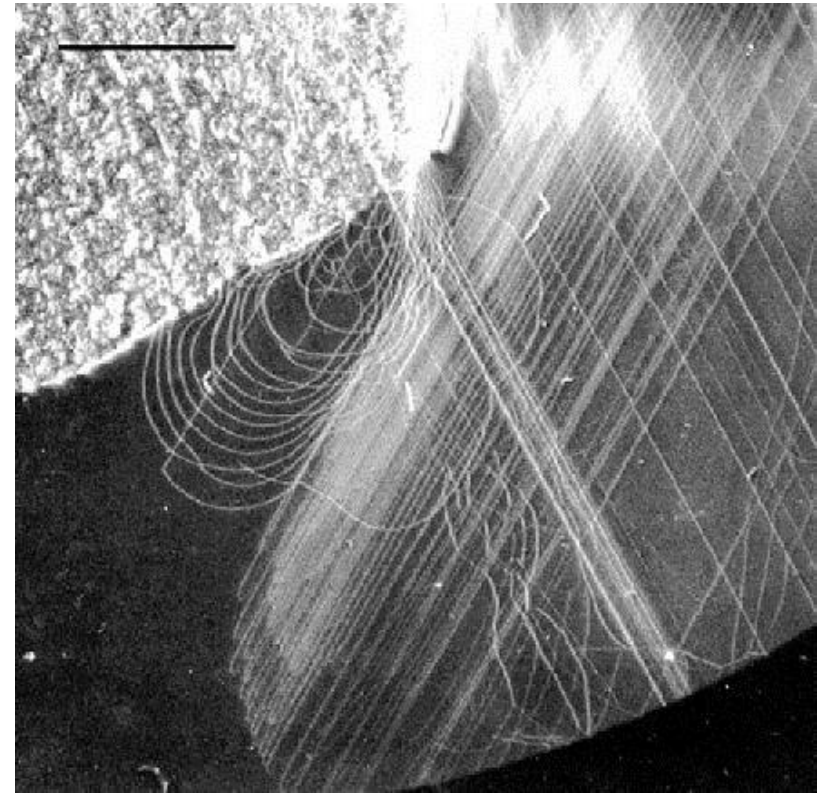
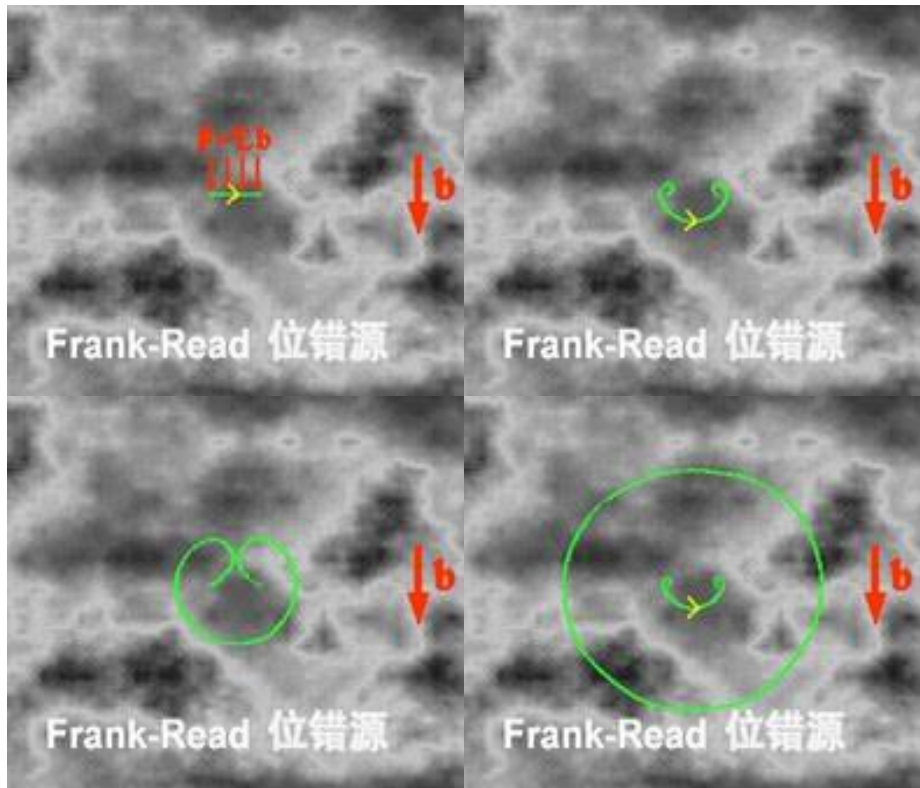


$$\tau_c = \frac{Gb}{2r} = \frac{Gb}{L}$$

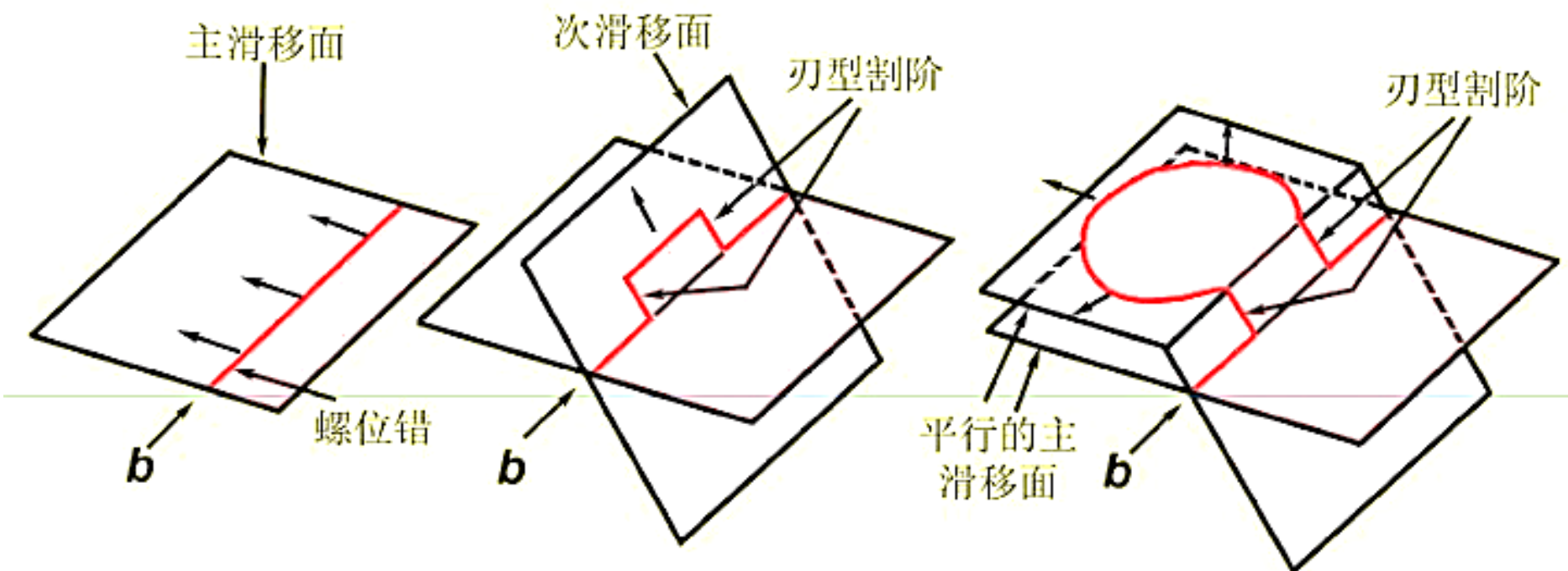
已为实验所证实：Si, Al-Cu...晶体中观察到

Frank-Read 位错增殖机制

已为实验所证实：Si, Al-Cu...晶体中观察到



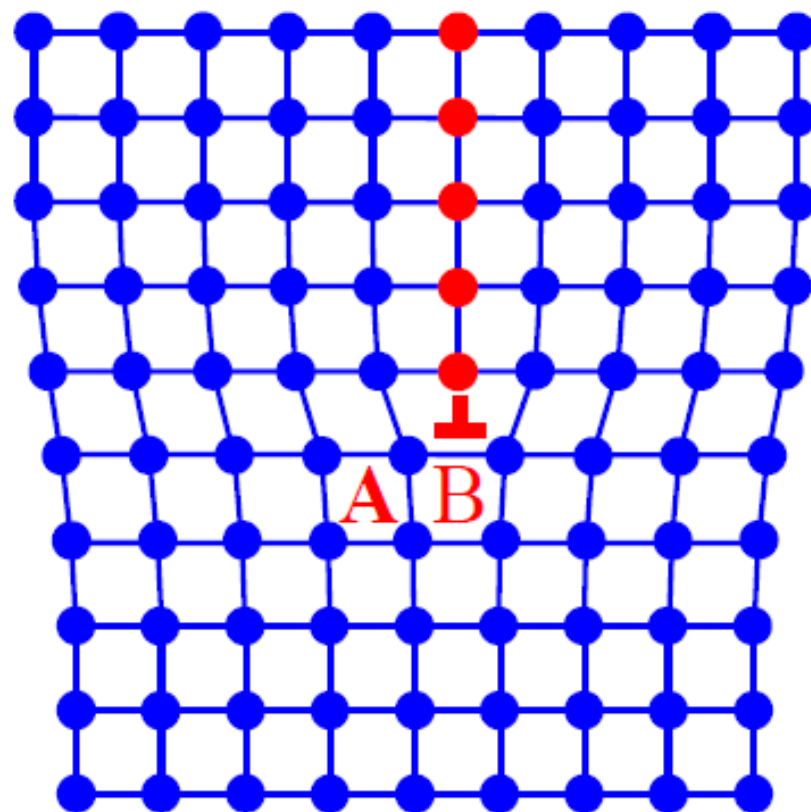
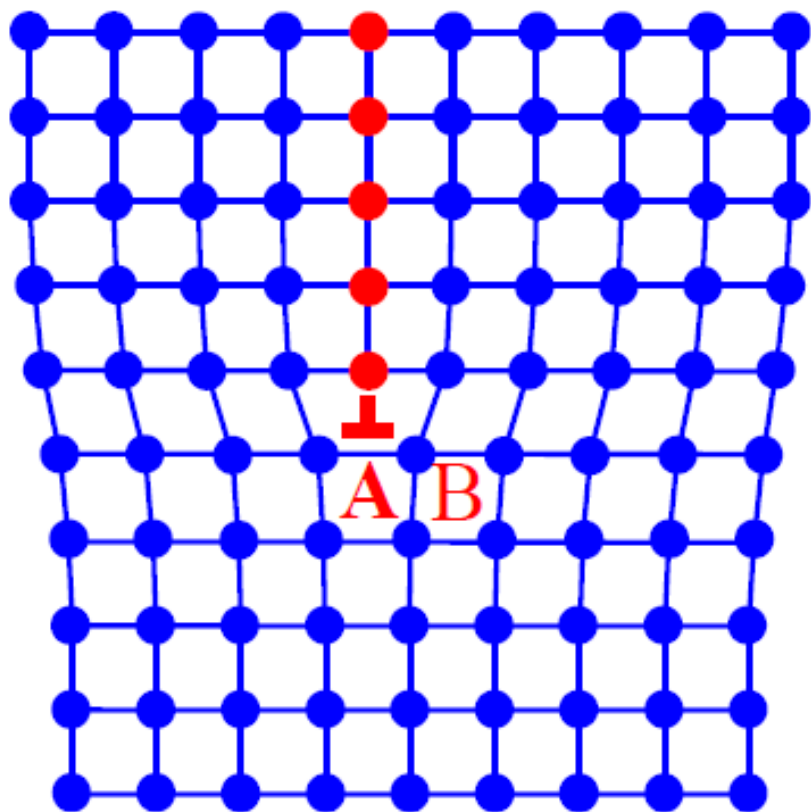
螺位错双交滑移增殖机制



螺型位错经双交滑移后形成了两个刃型割阶，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。

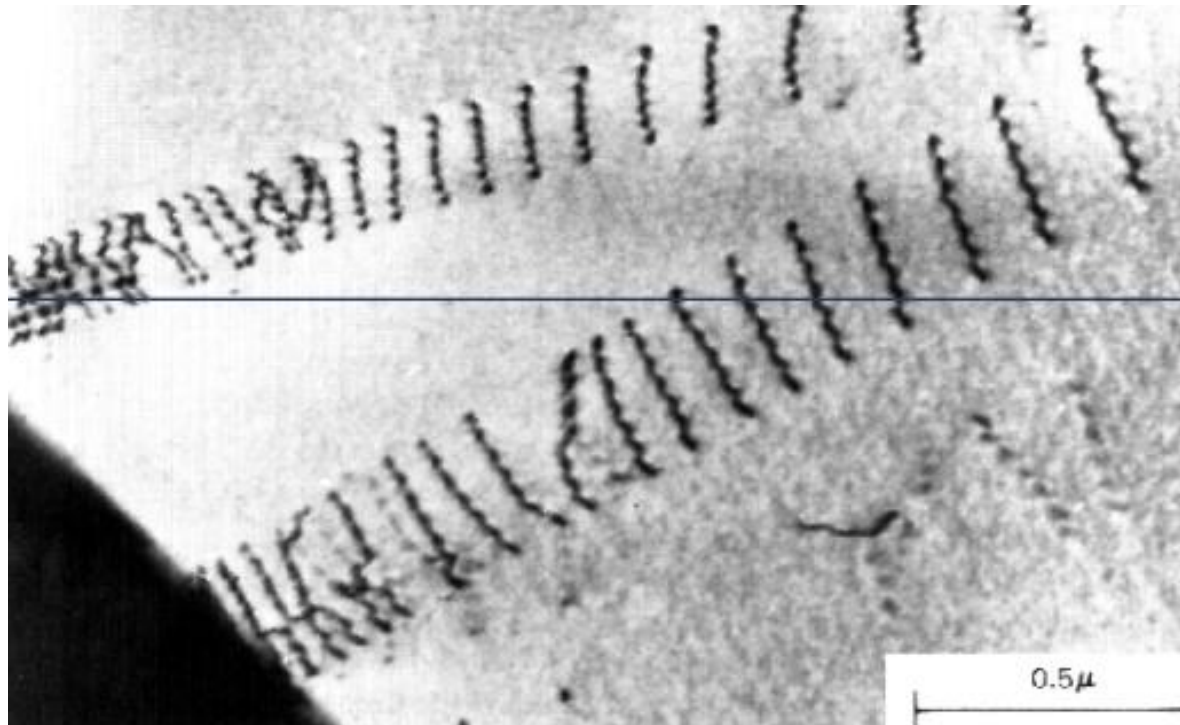
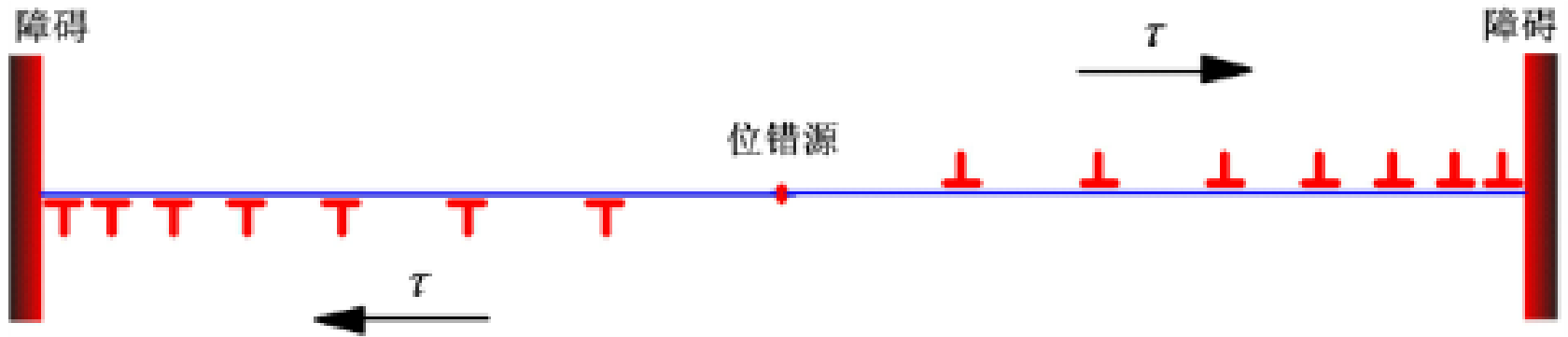
比Frank-Read源更有效!

位错运动的点阵阻力



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

位错堆积



思考题：

- (1) 试计算铜晶体内单位长度位错线的应变能。
- (2) 试计算单位体积的严重变形铜晶体内储存的位错应变能。

提示：

- (1) 铜晶体的切变模量 $G=4 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，
位错的柏氏矢量值等于原子间距，
 $b=2.5 \times 10^{-10} \text{m}$
- (2) 严重变形的金属，晶体中位错密度可达到 $10^{11} \text{cm} / \text{cm}^3$



例题 (1)试计算铜 晶体 内单位长度位错线的应变能。

(2)试计算单位体积的严重变形铜晶体内储存的位错应变能。

解：已知铜晶体的切变模量 $G=4 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，位错的柏氏矢量值等于原子间距， $b=2.5 \times 10^{-10} \text{m}$ ，取 α 值为中限 $\alpha=0.750$

(1)单位长度位错线的应变能 U 为

$$U = \alpha G b^2 = 0.75 \times 4 \times 10^{10} \times (2.5 \times 10^{-10}) \text{Jm}^{-1} = 18.75 \times 10^{-10} \text{Jm}^{-1}$$

(2)对于严重变形的金属，晶体中位错密度可达到 10^{11}cm/cm^3 ，所以单位体积(cm^3)内位错应变能为

$$U = 18.75 \times 10^{-10} \text{Jm}^{-1} \times 10^{11} \text{cm} / \text{cm}^3 = 187.5 \text{Jcm}^{-3}$$

□ 铜的比热容 $C=0.385 \text{J} \cdot \text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ ，位错能足以使晶体提高温度几十度至数百度。

但位错能并不是以热量的形式耗散在晶体中，而是储存在位错内。

□ 降低位错能的驱动力会使位错发生反应，或与其他缺陷发生交互作用。