

理想晶体：原子完全规则地排列的晶体。

晶体缺陷：晶体中部分原子排列偏离理想状态，局部产生不规则、不完整的原子排列。

晶体缺陷产生的原因：原子的热振动、晶体形成条件限制、施加的外部条件等。

晶体缺陷的分类

- ◆ 实际晶体存在晶体缺陷，按照几何特点这些缺陷可以分为三大类
- ◆ 点缺陷——缺陷在各方向的延伸都很小，亦称零维缺陷。如空位、间隙原子、杂质原子等。
- ◆ 线缺陷——缺陷只在一个方向延伸或称一维缺陷。如位错。
- ◆ 面缺陷——缺陷在二个方向延伸，或称二维缺陷。如表面、晶界、相界等。

2.1 点缺陷

(1) 点缺陷类型

根据对理想晶体偏离的几何位置来分，有三类

空位

正常结点位置没有被质点占据，称为空位。

间隙原子

同类质点进入间隙位置成为间隙原子。

杂质原子

进入

间隙位置—间隙杂质原子

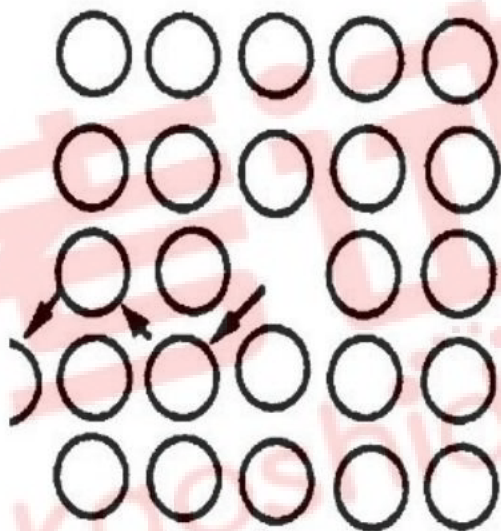
正常结点—取代（置换）杂质原子。

固溶体

(2) 热运动与点缺陷

- ◆ 晶格原子围绕平衡位置作热振动，频率在 $10^{12} - 10^{13}$ 赫兹（德拜频率）
- ◆ 原子的能量不是平均的，也不恒定，原子动能近似服从 **Maxwell-Boltzman** 分布，即能量高于 **E** 原子所占比例 **$\exp(-E/kt)$**
- ◆ 少数高能原子离开自己的平衡位置，在晶格节点出现空位。

晶体中空位



(a)肖脱基空位



(b)弗兰克尔空位

(3) 点缺陷的运动

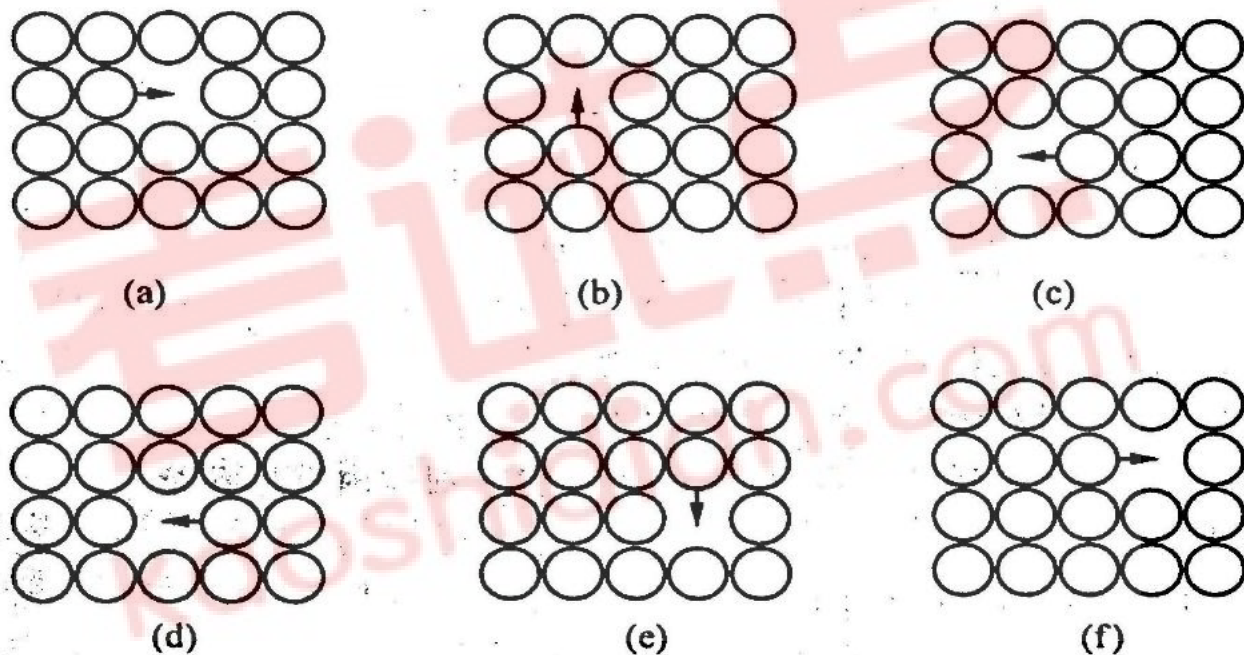


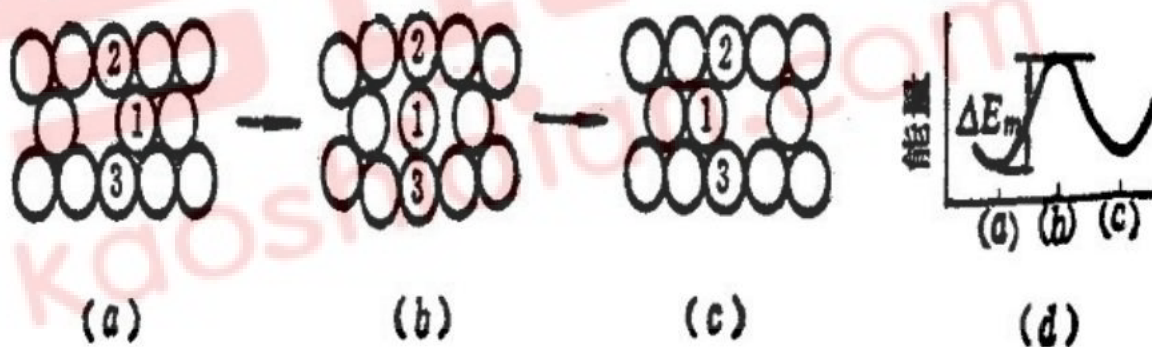
图 1.39 空位的移动

点缺陷运动方式

- ◆ 迁移 — 空位或间隙原子由一个位置运动到另一个位置的过程。
- ◆ 复合 — 间隙原子与空位相遇时，将落入空位，两者同时消失，这一过程称为复合。

点缺陷的运动

- ◆ 点缺陷从一个平衡位置移动到相邻位置，也要克服能量障碍
- ◆ 只有周围原子具有足够能量才可能实现移动



空位的移动

- ◆点缺陷的运动是一个热激活的过程
- ◆运动频率与温度有关。例如**Cu**中的空位，**300K $10^{-5}/s$, 1300K $10^8/s$**
- ◆空位移动所造成的粒子迁移，即晶体中的自扩散。（以后会学到）自扩散激活能相当于空位形成能与移动能的总和。

点缺陷的动态平衡

- ◆ 点缺陷并不是固定不动的，而是处于不断的产生和消失过程中
- ◆ 在一定温度下，晶体中点缺陷的数目是一定的，保持动态平衡。

(4) 空位的热力学分析

- ◆ 空位形成引起点阵畸变，亦会割断键力，故空位形成需能量，空位形成能 (ΔE_V) 为形成一个空位所需能量；
- ◆ 形成空位又使晶体中混乱度增加，使熵增加。而熵的变化包括两部分：
 - ① 空位改变它周围原子的振动引起振动熵， S_V
 - ② 空位在晶体点阵中的排列可有许多不同的几何组态，使排列熵 S_C 增加。

设在温度 T 时，含有 N 个结点的晶体中形成 n 个空位，与无空位晶体相比

$$\Delta F = n \cdot \Delta E_V - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta S = \Delta S_C + n \cdot \Delta S_V$$

n 个空位引入，可能的原子排列方式 $W_c = \frac{N!}{(N-n)! \cdot n!}$

利用玻尔兹曼关系， $S_C = k \cdot \ln W_C$ ，并利用Stirling公式

$$\text{令: } \left(\frac{\partial(\Delta F)}{\partial n} \right)_T = 0$$

$$\therefore C = \frac{n}{N} = \exp(\Delta S_V / k) \cdot \exp(-\Delta E_V / kT) = A \exp(-\Delta E_V / kT)$$

振动熵

根据统计热力学的爱因斯坦模型，振动熵

$$S_v = 3k \ln \frac{kT}{h\nu}$$

形成空位后，原子振动频率降低到 ν'

所以

$$\Delta S_v = 3k \ln \frac{kT}{h\nu'} - 3k \ln \frac{kT}{h\nu} = 3k \ln \frac{\nu}{\nu'}$$

式中 $A = \exp(\Delta S_v/k)$ ，约为1-10

若已知 ΔE_v 和 ΔS_v ，则可由上式计算出任一温度 T 下的浓度 C 。
由上式可得：

- 1) 晶体中空位在热力学上是稳定的，一定温度 T 对应一平衡浓度 C
- 2) C 与 T 呈指数关系，温度升高，空位浓度增大
- 3) 空位形成能 ΔE_v 大，空位浓度小

例如：已知铜中 $\Delta E_v = 1.7 \times 10^{-19} \text{J}$ ， A 取为 1，则

T/K	100	300	500	700	900	1000
n/N	10^{-57}	10^{-19}	10^{-11}	$10^{-8.1}$	$10^{-6.3}$	$10^{-5.7}$

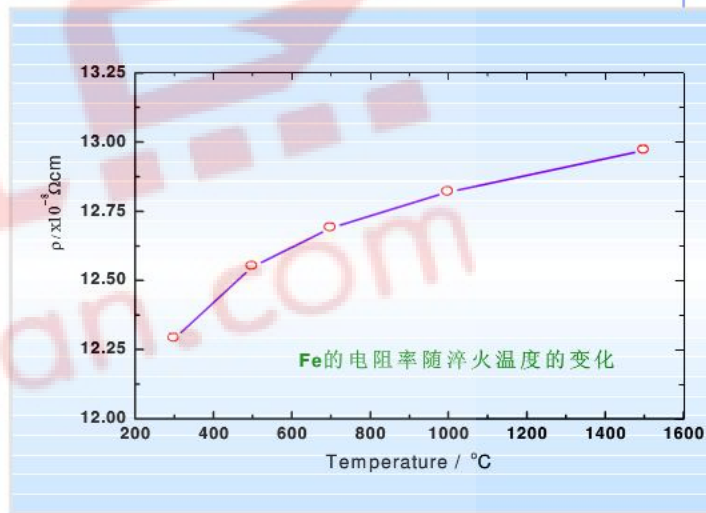
点缺陷的平衡浓度

- ◆ 点缺陷是平衡缺陷，点缺陷与线、面缺陷的区别之一是后者为热力学不稳定的缺陷。在一定温度下，晶体中有一定平衡数量的空位和间隙原子
- ◆ 出现缺陷时，提高内能，但是也引起较大的熵增。



(5) 点缺陷及对性能的影响

- ◆ 高能射线辐射、严重变形、高温淬火等可以获得过饱和缺陷
- ◆ 空位引起点阵畸变，使传导电子受到散射，存在过饱和缺陷提高电阻；
- ◆ 存在过饱和缺陷降低密度
- ◆ 对室温力学性能影响“不大”
- ◆ 空位对材料的高温蠕变、沉淀、回复、表面氧化、烧结有重要影响



2.2 位错的基本概念

(1) 位错理论产生背景

- ◆ 上世纪初，塑性变形已经成为制造金属制品和强化材料的重要手段，但是对于变形的微观过程、加工硬化等尚不能解释。
- ◆ 滑移带现象。当时，普遍认为金属塑性变形是晶体刚性滑移的结果，滑移面两侧的晶体借助于刚性滑动实现变形。
- ◆ **1926**年弗兰克尔从刚性模型出发，估计了晶体的理论强度。

(2) 理论强度

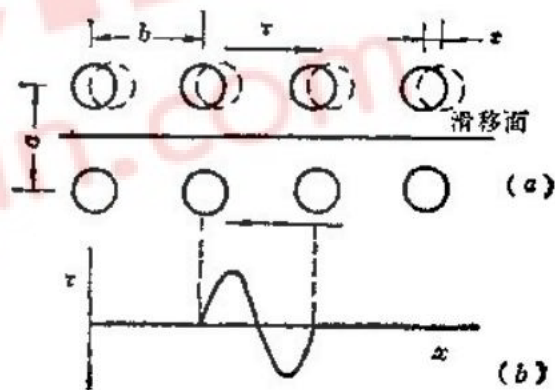
◆ 根据晶体的性质,阻力应是周期函数;

当 $x=0, \tau=0$; $x=b, \tau=0$

取
$$\tau = \tau_m \sin \frac{2\pi x}{b}$$

◆ 当 x 很小时,

$$\tau = \tau_m \frac{2\pi x}{b}$$



计算理论切变强度的模型

◆ 由于切变量 x/a , 根据虎克定律



$$\tau = G \frac{x}{a}$$

◆ 两式比较得

$$\tau = \tau_m \frac{2\pi x}{b} = G \frac{x}{a}$$

◆ 因 $a \approx b$, 所以

$$\tau_m \approx \frac{G}{2\pi}$$

◆ 进一步修正

$$\tau_m \approx \frac{G}{30}$$

晶体的理论切应力与实验值的比较 (MN/m^2)

金 属	理论切应力	实验值	切变模量
Al	3830	0.786	24400
Ag	3980	0.372	25000
Cu	6480	0.490	40700
α -Fe	11000	2.75	68950
Mg	2630	0.393	16400

dislocation

- ◆ 一般金属的 $G=10^4\sim10^5\text{MPa}$, 理论剪切强度应为 $10^3\sim10^4\text{MPa}$, 实际只有 $1\sim10\text{MPa}$
- ◆ 理论强度比实测值大1000倍以上！！
- ◆ 1934年Taylor, Polanyi和Orowan几乎同时提出晶体中存在易动的缺陷 - 位错, 借助于位错运动实现塑性变形

拖动地毯、昆虫的移动

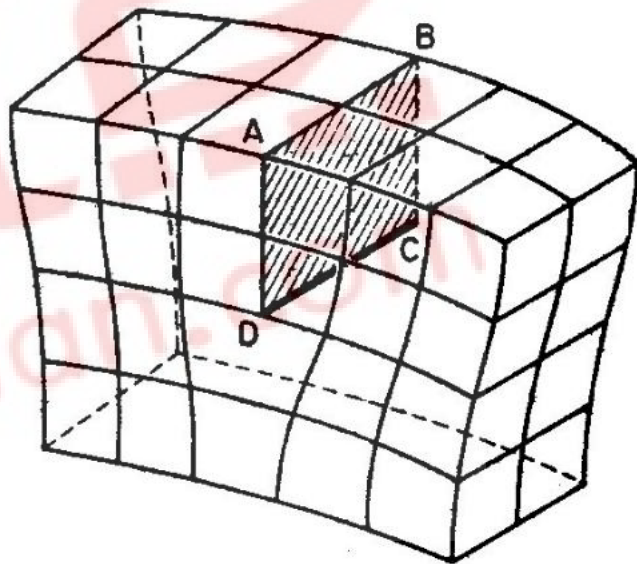
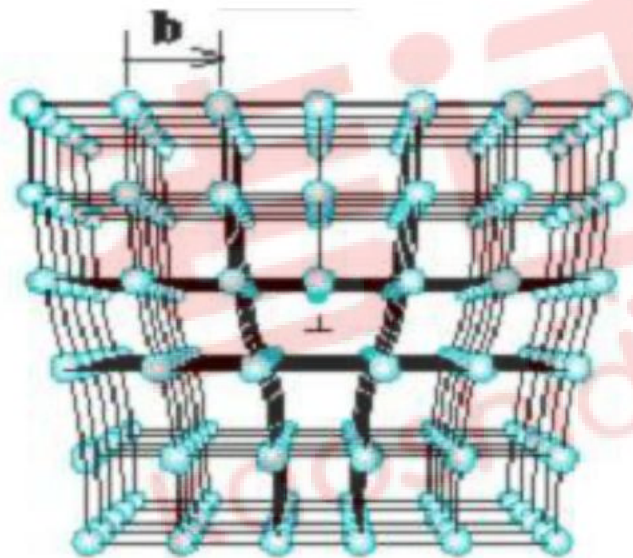


图 4-13 地毯的挪动过程
(位错滑移的比喻)

位错属于一种线缺陷

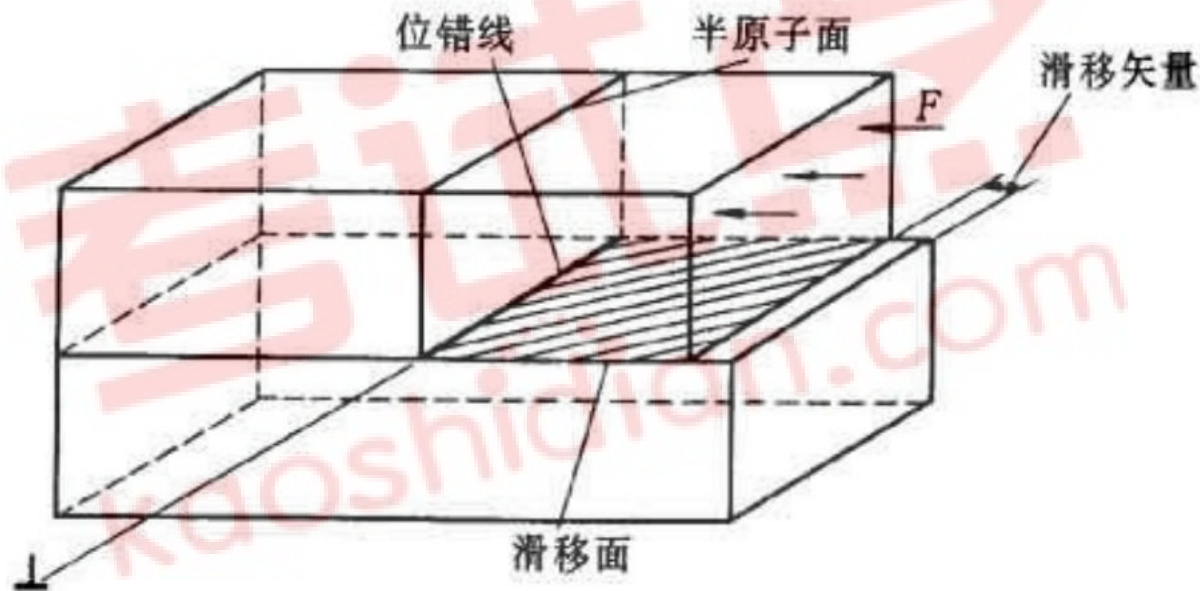
- ◆ 位错是一个直径**3~5**个原子间距，长几千**一**几万个原子间距的管状原子畸变区
- ◆ 从几何上看，它是一个方向尺寸较大，而另外两个方向上尺寸较小的线缺陷。
- ◆ 位错对晶体生长、相变、塑性变形、扩散、再结晶等一系列行为及材料的物理、化学性质都有十分重要的影响。

(3) 刃型位错模型



位错：一系列或相邻的几列原子发生有规律的错排

刃型位错的产生

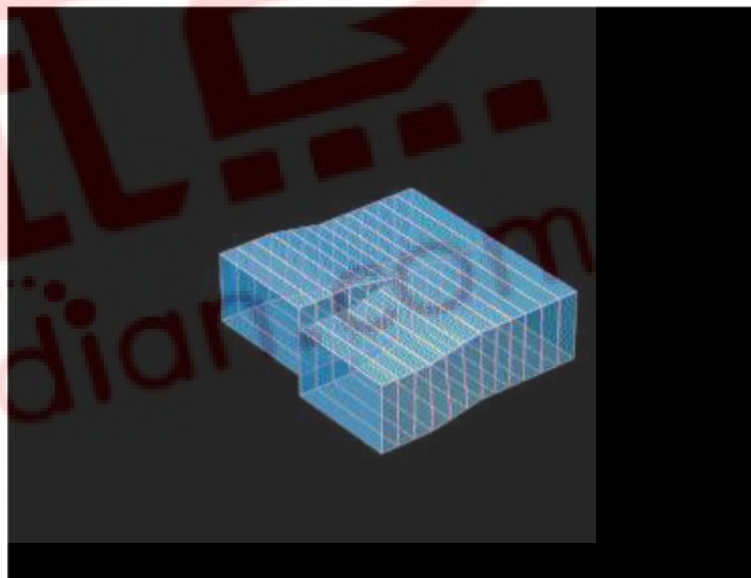


刃型位错特征

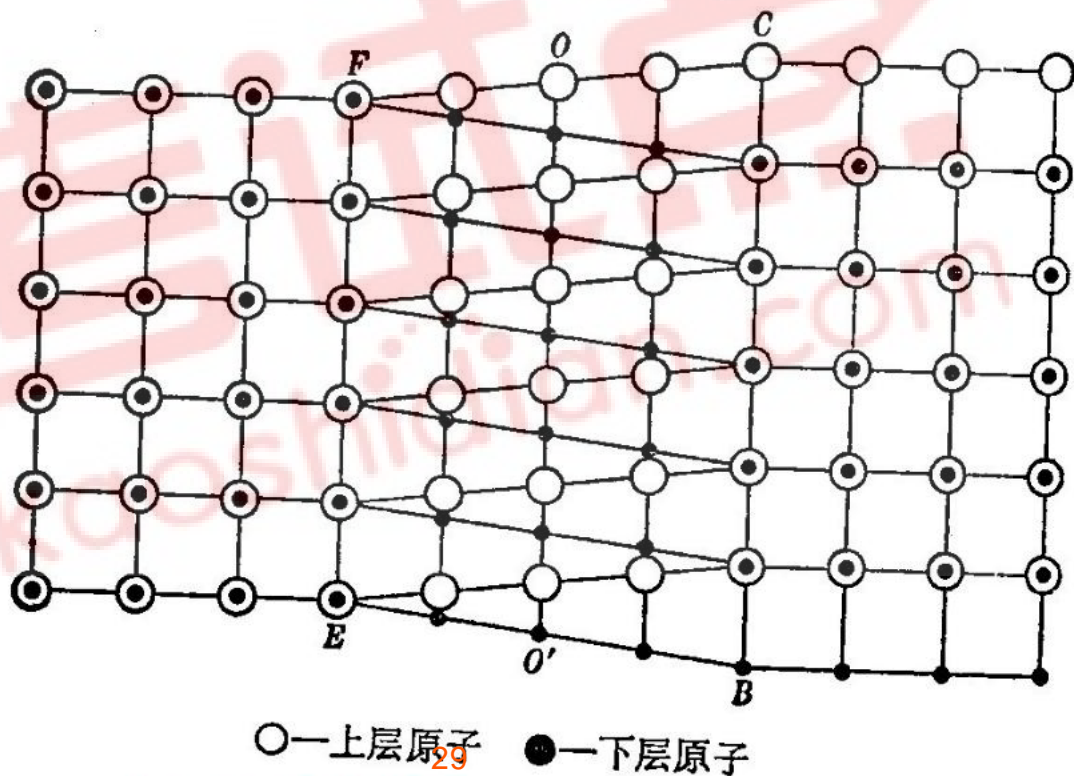
- ◆ **1)**刃型位错有一额外半原子面
 - 多出的半原子面在滑移面上边(严格说来,半原子面与坐标轴正方向一致)的称为正刃型位错,记为“ \perp ”;
 - 多出半原子面在下边的称为负刃型位错,记为“ T ”。
- ◆ **2)**刃型位错线可理解为晶体中已滑移区与未滑移区的边界线。
- ◆ **3)**位错线不一定是直线,可以是平面折线或曲线;刃型位错线必与滑移矢量垂直,
- ◆ **4)**滑移面是包含位错线和滑移矢量的唯一平面。
- ◆ **5)**位错周围的点阵发生弹性畸变,既有正应变,又有切应变

(4) 螺型位错空间形态

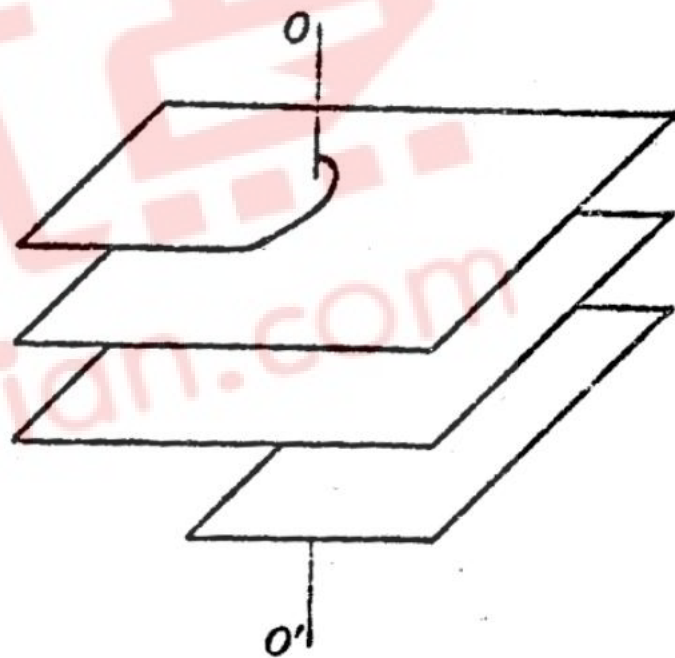
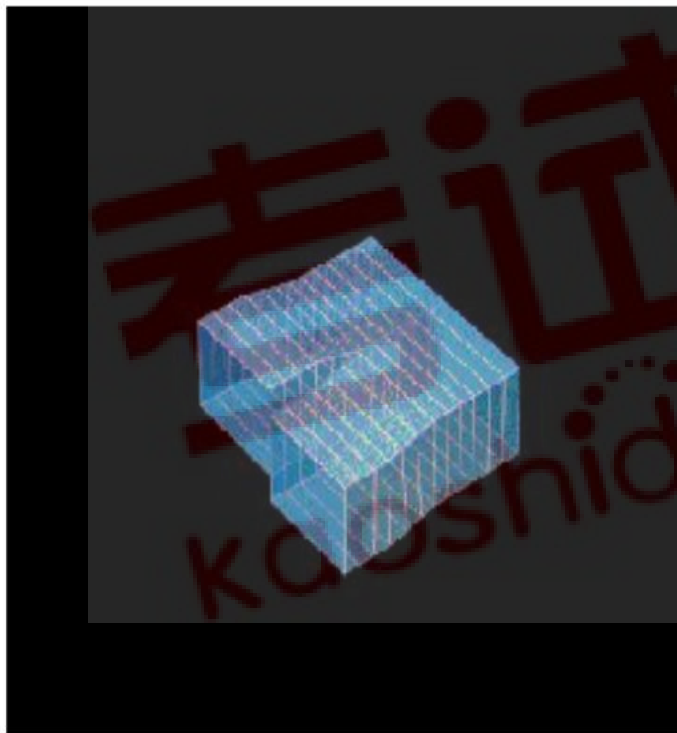
- ◆ 假设外力使晶体作另一种局部滑移（撕裂），滑移面上下两部分晶体作切滑移
- ◆ 滑移区与未滑移区的边界就是螺型位错。
- ◆ 滑移方向与位错线平行。



螺型位错附近两层原子面



垂直于位错线的晶面形状

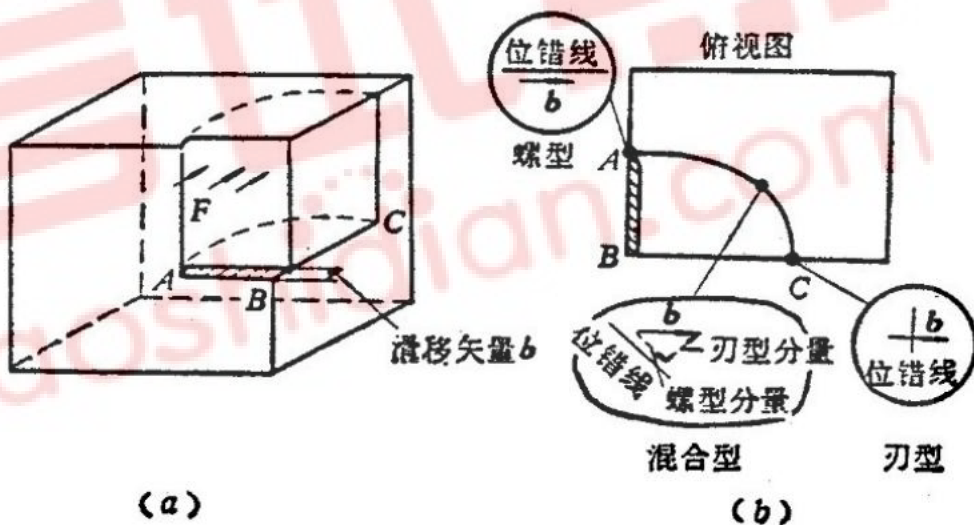


螺型位错的特征

- ◆ 1) 螺型位错无额外半原子面，但是一些晶面变成了螺旋面，原子错排呈轴对称
- ◆ 2) 位错线与滑移矢量平行，故一定是直线
- ◆ 3) 包含螺位错线的面必然包含滑移矢量，故螺位错的滑移面不是唯一的；
- ◆ 4) 螺位错周围的点阵也发生了弹性畸变，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) 分左右螺旋

(5) 混合位错

- 如果滑移方向与位错线两者方向夹角呈任意角度，就是混合位错



混合位错

滑移面附近的原子面

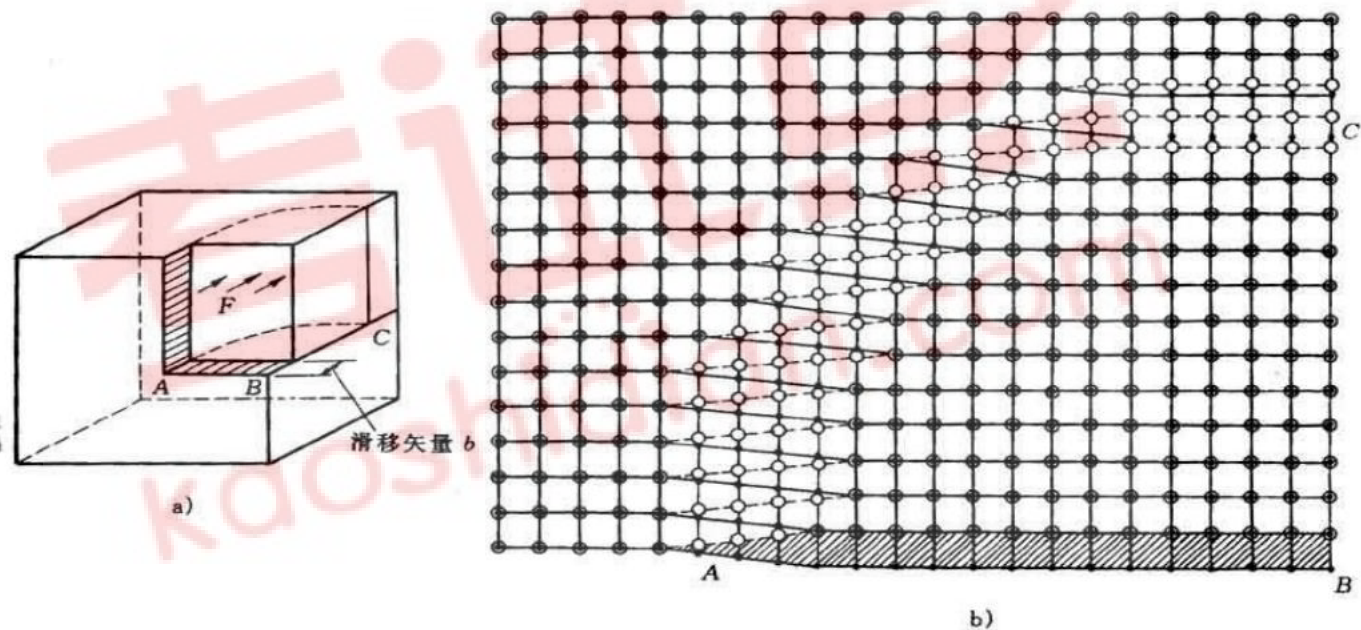


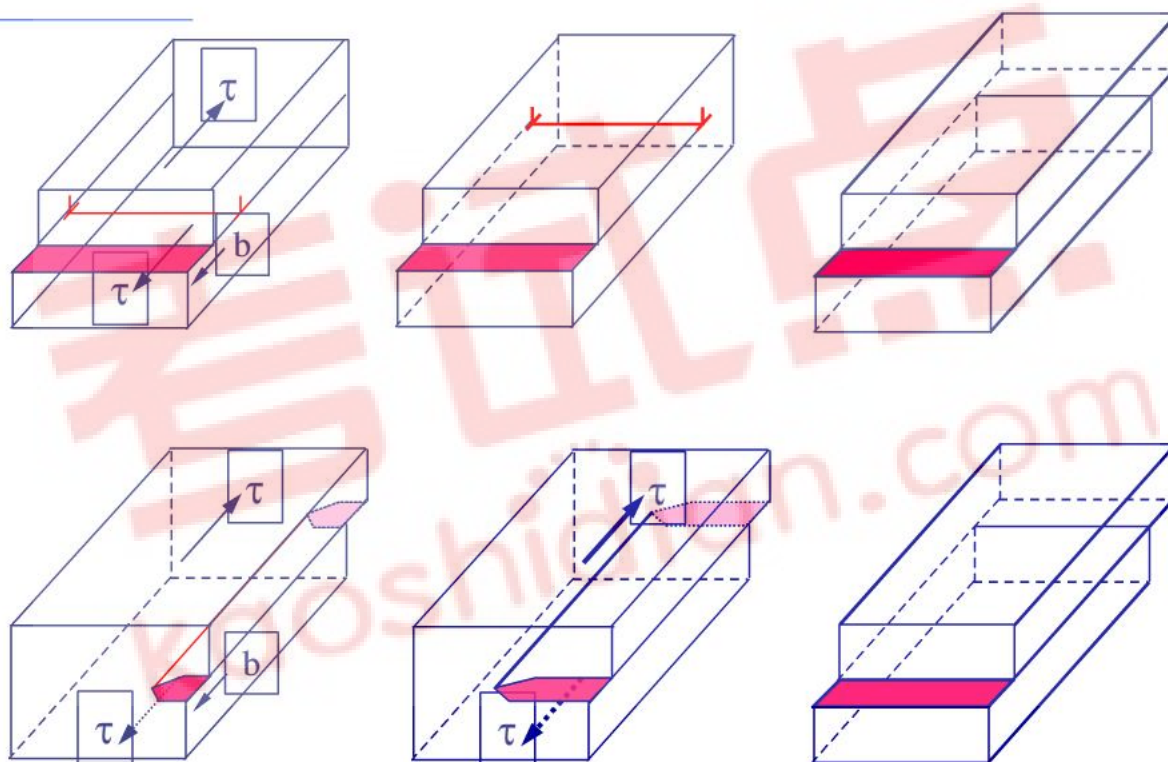
图 4-11 混合位错

a) 晶体的局部滑移 b) 混合位错的原子组态

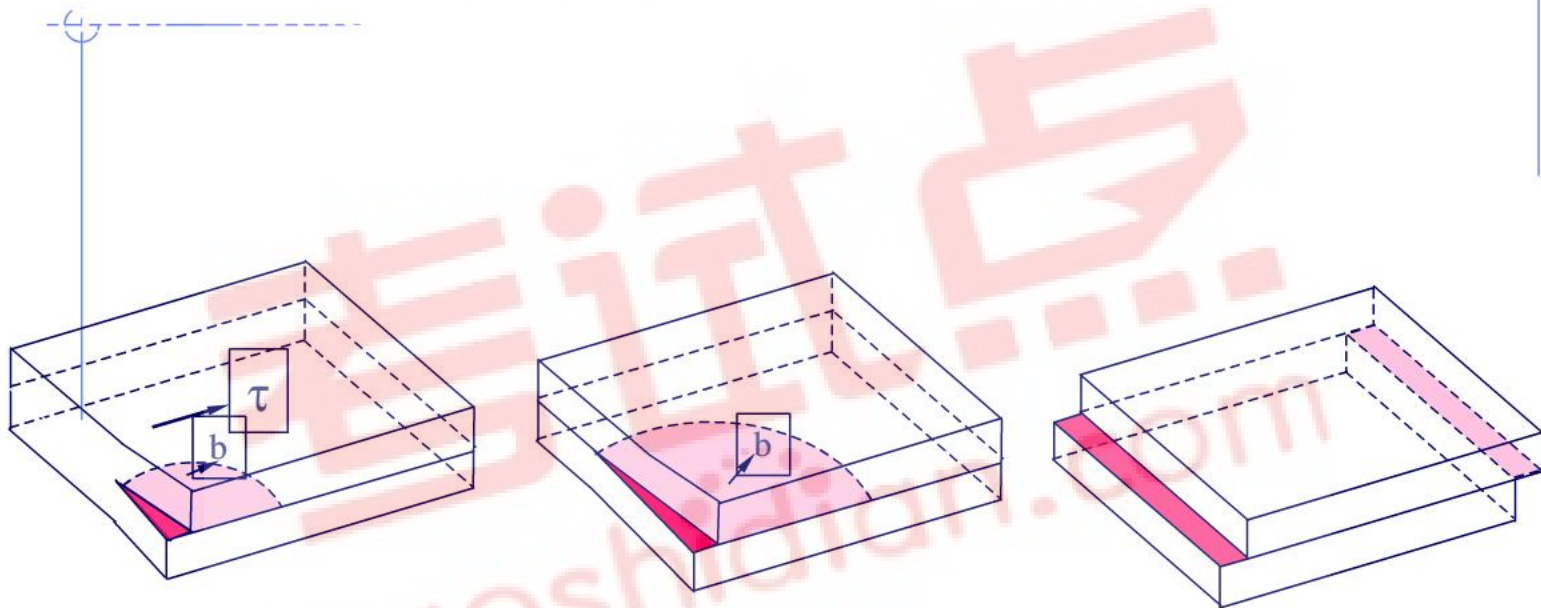
位错线的一些性质

- ◆ (1) 位错线是已滑移区和未滑移区的边界;
- ◆ (2) 位错及其畸变区是一条管道, 位错线附近的原子偏离了平衡位置。
- ◆ (3) 位错线具有连续性, 即位错线不能中断于晶体内部。只可在表面露头, 或终止于晶界和相界, 或其它位错相交, 或自行封闭成环。

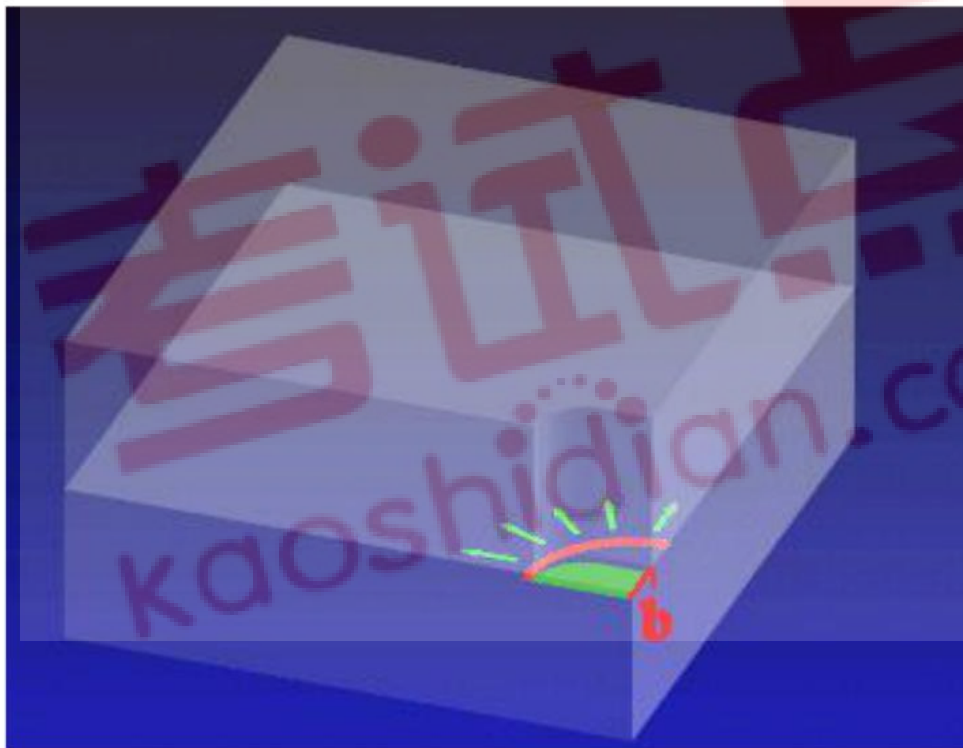
位错的滑移



混合位错滑移



混合位错滑移



(6) 柏氏矢量 Burgers vector

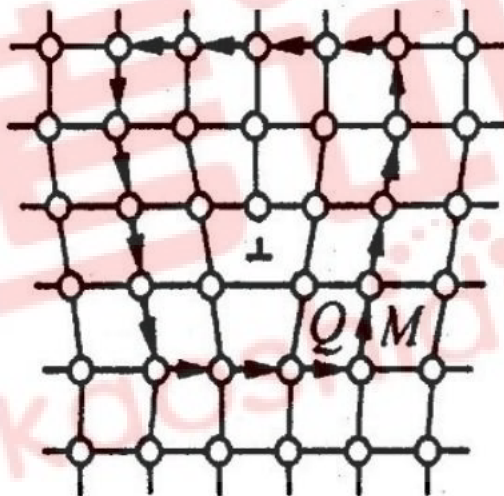
- ◆ 1939年柏格斯 (J. M. Burgers) 提出了采用柏氏回路来定义位错, 借助一个规定的矢量即柏氏矢量来揭示位错的本质。
- ◆ 位错从晶体移出, 滑移台阶的大小方向用滑移矢量 b 表示, 滑移矢量也称柏氏矢量
- ◆ 柏氏矢量反应了位错中心区点阵畸变的程度和方向
- ◆ 柏氏矢量=位错运动时的原子位移

柏氏矢量确定

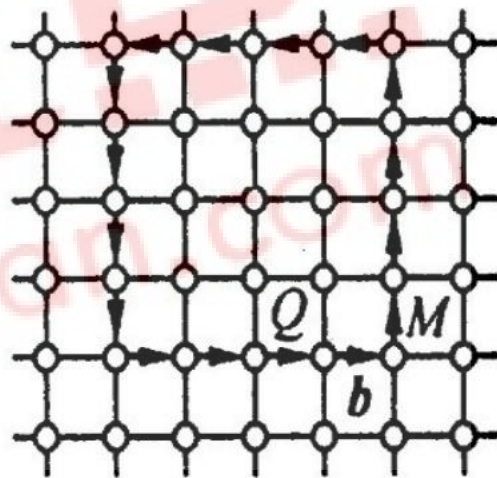
- ◆ 1) 首先选定位错线的正向，例如出纸面的方向
- ◆ 2) 在实际晶体中，从任一原子出发，围绕位错（避开位错线附近的严重畸变区）以一定的步数作一右旋闭合回路（称为柏氏回路）。
- ◆ 3) 在完整晶体中按同样的方向和步数作相同的回路，该回路并不封闭，由终点**F**向起点**S**引一矢量，使该回路闭合，这个矢量**b**就是实际晶体中位错的柏氏矢量。
- ◆ （以上为**Frank**取向）

刃型位错柏氏矢量

◆ \mathbf{b} 与位错线垂直



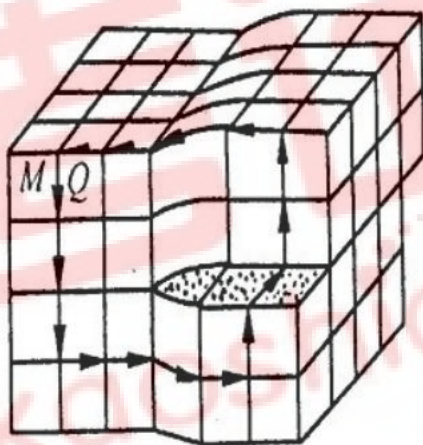
(a) 实际晶体的柏氏回路



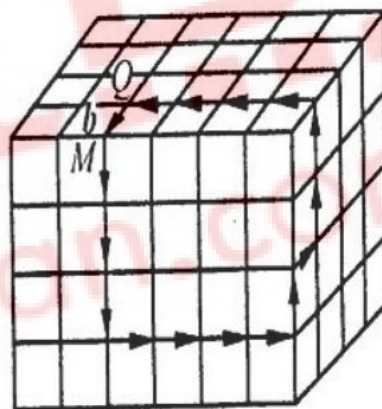
(b) 完整晶体的相应回路

螺型位错柏氏矢量

◆ \mathbf{b} 与位错线平行



(a) 实际晶体的柏氏回路



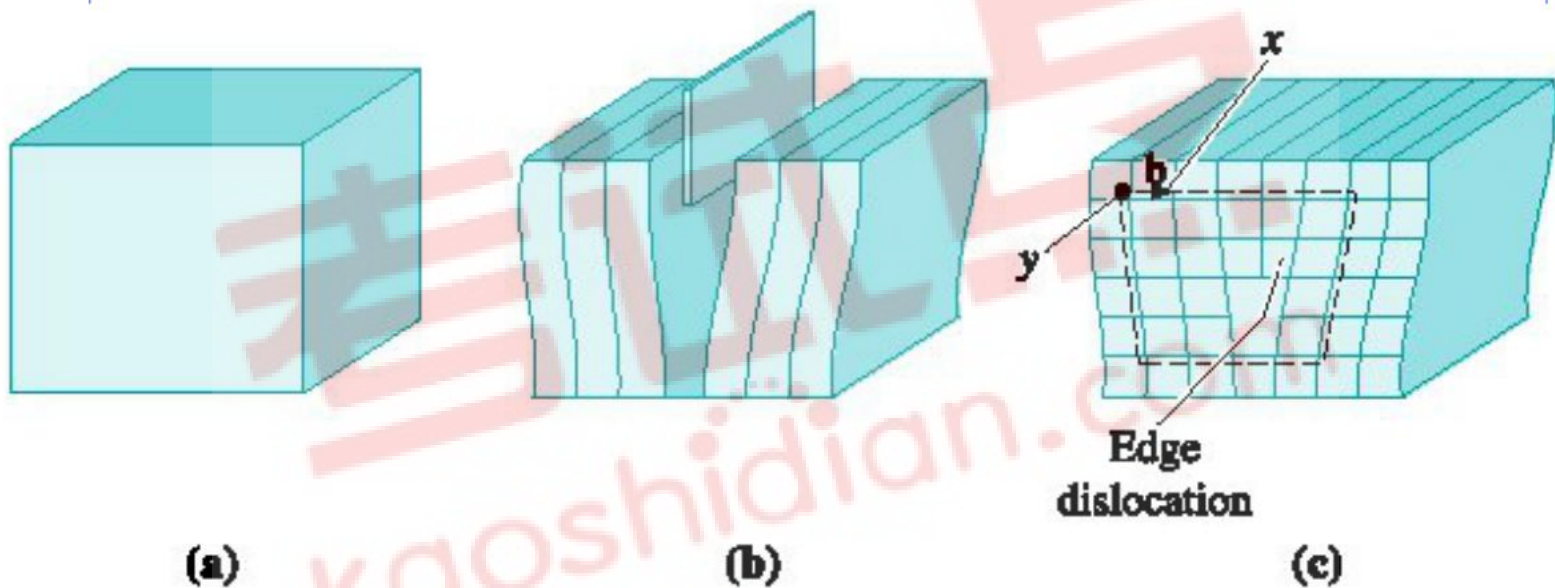
(b) 完整晶体的相应回路

螺型位错柏氏矢量的确定

简单位错的柏氏矢量

- ◆ 刃型位错 $\mathbf{b} \perp \mathbf{t}$ （位错线单位向量），半原子面方向 $\mathbf{n} = \mathbf{t} \times \mathbf{b}$ 。刃型位错可以是直线或平面曲线（刀刃曲线）
- ◆ 螺型位错 $\mathbf{b} // \mathbf{t}$ （位错线单位向量），一定是直线。
 - 二者同向为右旋螺型位错； $\mathbf{b} \cdot \mathbf{t} > 0$
 - 二者反向为左旋螺型位错； $\mathbf{b} \cdot \mathbf{t} < 0$
- ◆ 混合位错的 \mathbf{b} 、 \mathbf{t} 任一角度

Read 系统举例



柏氏矢量的守恒性

- ◆ **b**代表位错周围点阵畸变程度以及错排方向，与选择的柏氏回路无关。
- ◆ 即柏氏回路任意扩大、移动，只要回路不与任何位错线相交，那么回路中的总畸变不会改变，**b**也不变
- ◆ **b**具有守恒性

推论

- ◆ 位错线不能终止于晶体内部;
- ◆ 一条不分叉的位错线无论形状如何, \mathbf{b} 处处相等。
- ◆ 汇集于一点的位错线, 所有位错 \mathbf{b} 之和等于零。

柏氏矢量表示法

- ◆ $\vec{b} = a/n [uvw]$ (可以用矢量加法进行运算)
- ◆ 柏氏矢量方向同晶向指数, 但是有一定长度
- ◆ 符号表示矢量的缩写形式, 上式等价于

$$\vec{b} = \frac{a}{n} u \vec{i} + \frac{a}{n} v \vec{j} + \frac{a}{n} w \vec{k}$$

- ◆ 求模: $|\vec{b}| = a [u^2 + v^2 + w^2]^{1/2} / n$ 。

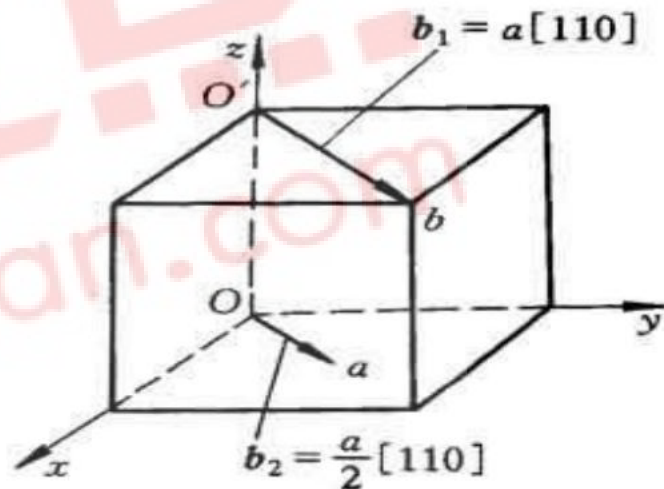


图 4-17 柏氏矢量的表示

(7) 位错密度

- ◆ 晶体中位错的多少可用位错密度来描述
- ◆ 用单位体积中位错线的总长度 $\rho=L/V$ 表示
- ◆ 近似用单位面积位错根数 $\rho=n/A$ 表示。如果位错线不与测试面垂直，则偏小。
- ◆ 位错密度影响材料性能，如强度。

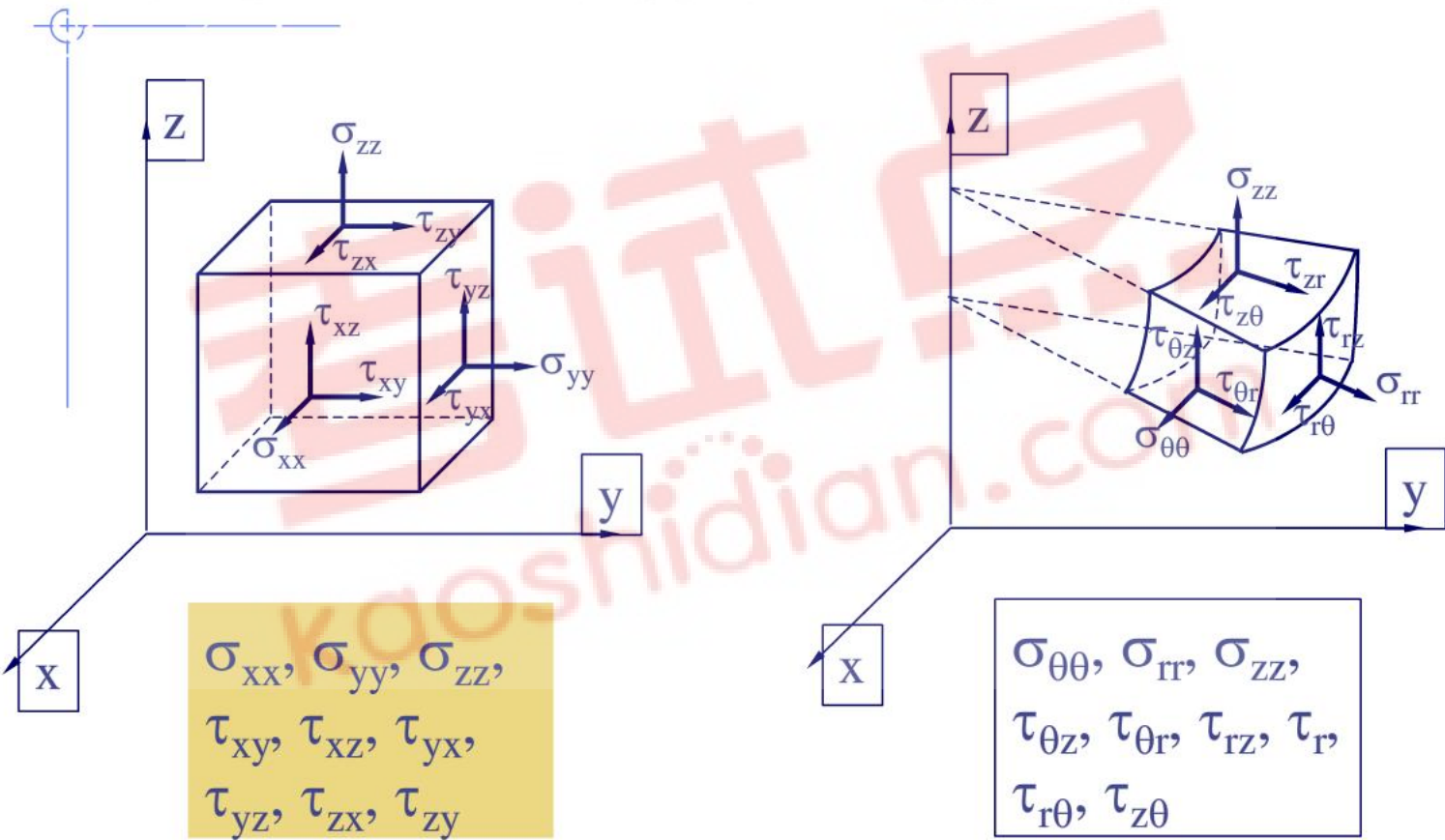
位错的应力场

- ◆ 位错周围的点阵发生不同程度的畸变。
- ◆ 位错中心部分畸变程度最为严重，这部分超出了弹性应变范围。
- ◆ 位错中心区以外为弹性畸变区，借助弹性连续介质模型可讨论位错的弹性性质。

2-3 位错的弹性性质

- ◆ 应力和应变分量
- ◆ 螺型位错的应力场
- ◆ 刃型位错的应力场
- ◆ 位错的应变能和线张力

(1) 应力分量和应变分量



符号规定

- ◆ σ_{ij} 表示作用在垂直于*i*轴的面上，指向*j*轴方向的应力分量；
- ◆ ε_{ij} 表示作用在垂直于*i*轴的面上，指向*j*轴方向的应变分量；
- ◆ 正面（右、前、上面）上的应力，与座标轴正向一直为正，负面（左、后、下面）上的应力，与座标轴负向一致为正。
- ◆ 正应变以伸长为正，切应变以直角变小为正。

◆ 由于单元体很小，作用于两侧的应力变化可以忽略不计

■ 例如，前后两面应力分量对应相等；

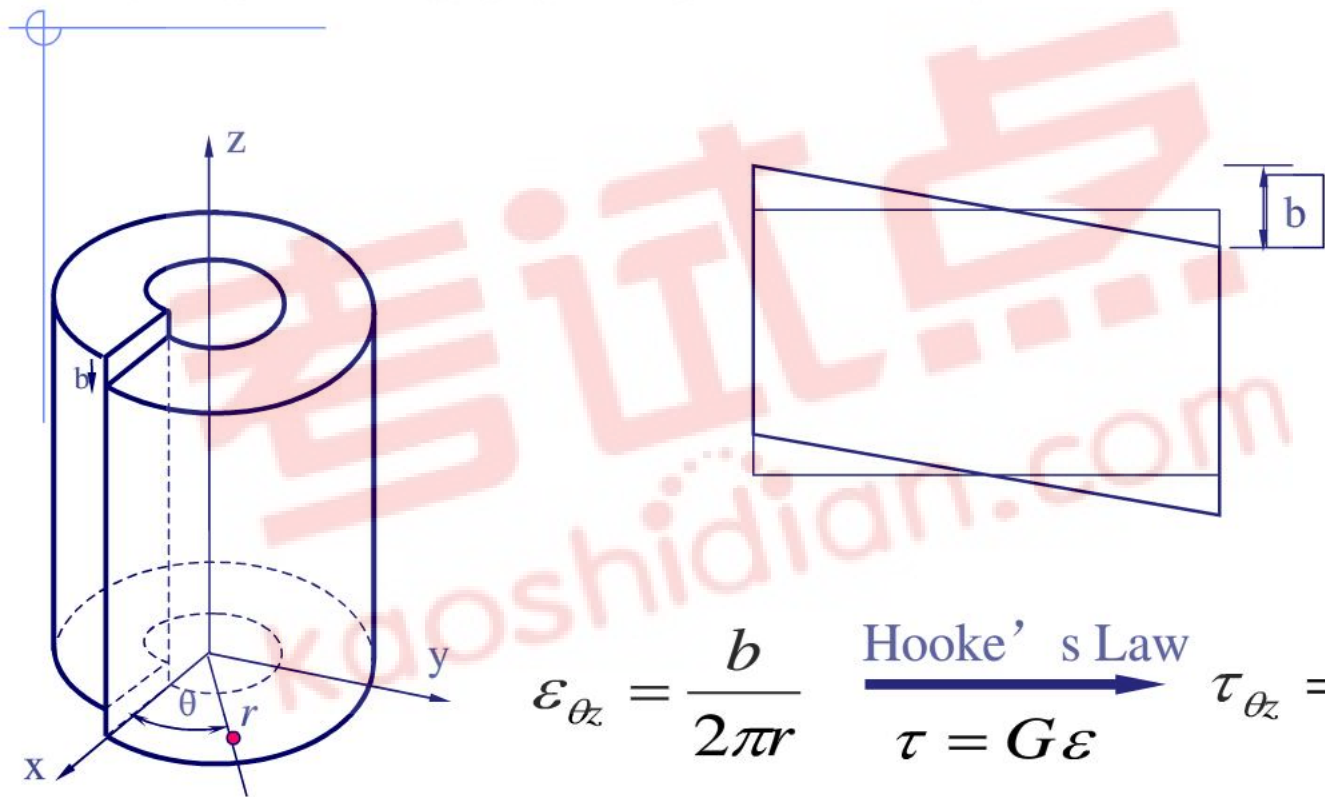
◆ 根据力偶平衡条件

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx}; \sigma_{xy} = \sigma_{yx}; \sigma_{yz} = \sigma_{zy}$$

◆ 所以，独立的应力分量只有**6**个

◆ 应变分量也有**9**个，**6**个独立。

(2) 螺型位错应力场



$$\varepsilon_{\theta z} = \frac{b}{2\pi r} \xrightarrow[\tau = G\varepsilon]{\text{Hooke's Law}} \tau_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

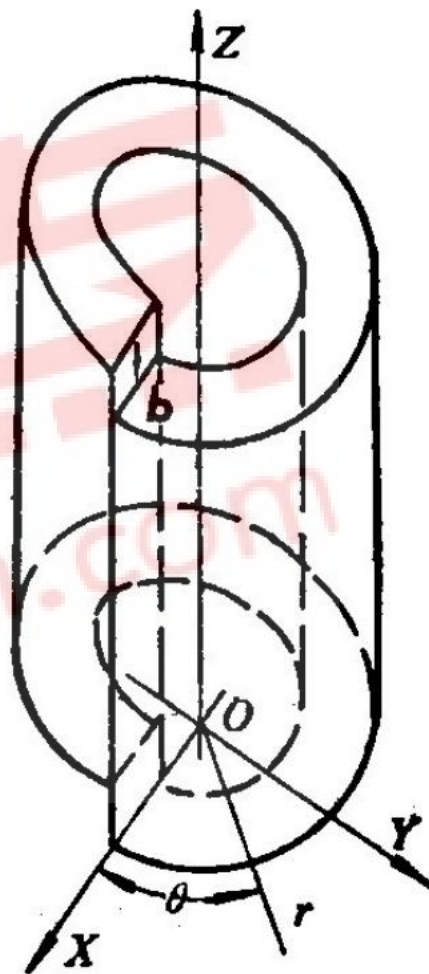
螺型位错的应力场

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{Gb x}{2\pi x^2 + y^2}$$

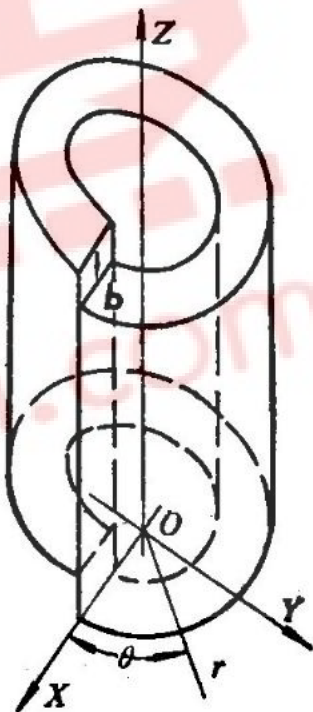
$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{Gb y}{2\pi x^2 + y^2}$$

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

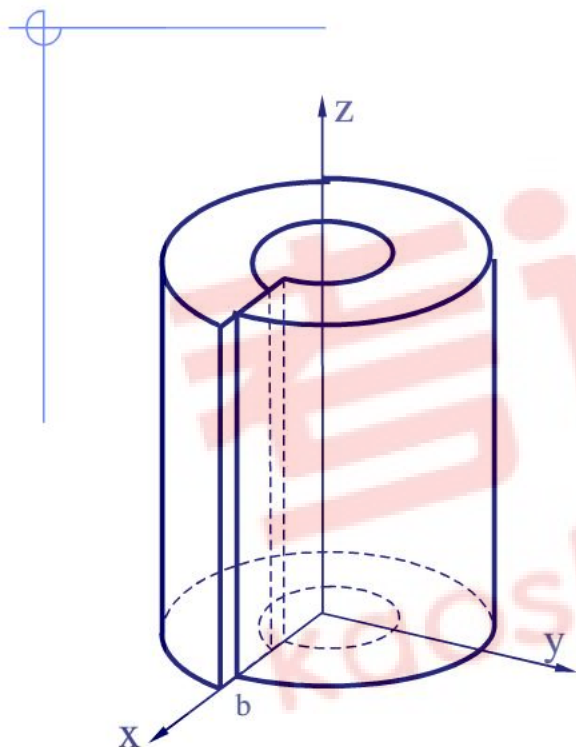
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$$



- ◆ 应力分量与 **b** 成正比，与 **r** 成反比
- ◆ 只有切应力分量
- ◆ 径向对称，与角度无关
- ◆ 公式不能用于位错中心区， **$r \rightarrow 0$**



(3) 刃型位错的应力场



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

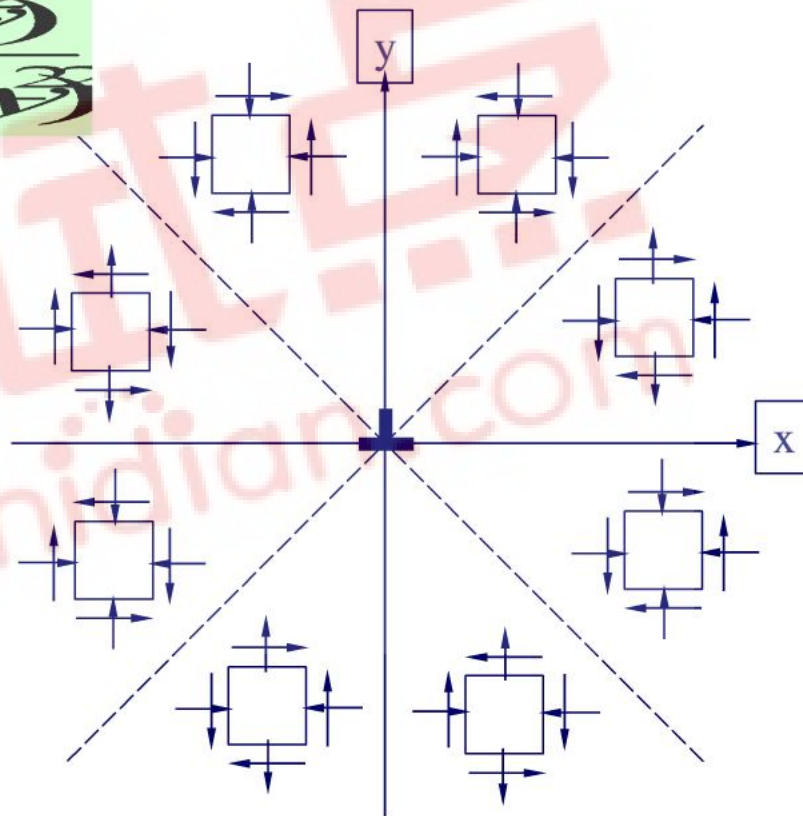
$$\sigma_{yy} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

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

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

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

不同位置应力的方向



在柱坐标中的应力场

◆ 当位错线//z轴,

◆ 半原子面位于+y

◆ 滑移面xoz面

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = -A \sin \theta$$

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r} = A \cos \theta$$

$$\sigma_{zz} = -2\nu A \sin \theta$$

$$A = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)r}$$

刃型位错应力场特点

- ◆ 应力分量与**b**成正比，与**r**成反比（同螺型位错），中心区不适用
- ◆ 沿位错线长度方向无变化（同螺型位错）
- ◆ 相对于半原子面，应力场镜面对称
- ◆ 滑移面上没有正应力；而在**45°** 方向没有切应力

(4) 位错的应变能和线张力

- ◆ 位错线周围原子偏离平衡位置，晶格产生畸变，导致能量提高。这部分额外的能量称为位错的应变能
- ◆ 包括位错中心区的能量（占总能量的 **$1/10 \sim 1/15$** ）和中心区以外（弹性区）的能量
- ◆ 中心区的能量不易计算。

单位长度螺型位错应变能

- ◆ 根据弹性理论，单位体积弹性体的应变能等于产生位错时所作的功
- ◆ 在滑移面上 $\mathbf{l} \cdot d\mathbf{r}$ 内平均力，

$$dF = \frac{1}{2} \frac{Gb}{2\pi r} dr$$

- ◆ 形成位错时，位移等于 \mathbf{b} ，总功

$$E_s = W_s = \int_{r_0}^R \frac{Gb}{4\pi r} \cdot b \cdot dr$$

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

单位长度刃型位错应变能

◆ 在滑移面上 $y=0$ $\sigma_{xy} = \frac{Gb x(x^2 - y^2)}{2\pi(1-\nu)(x^2 + y^2)^2} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)x}$

◆ 同理，在滑移面上 $1 \cdot dx$ 内平均力，

$$dF = \frac{1}{2} \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)x} dx$$

◆ 形成位错时，位移等于 b ，总功

$$E_e = W_e = \int_{r_0}^R \frac{Gb}{4\pi(1-\nu)x} \cdot b \cdot dx$$

$$E_e = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

混合位错

- ◆ 若 **b** 与位错线方向夹角为 θ
- ◆ 只要将 **b** 分解为纯刃型位错分量 **b**sin θ 和纯刃型位错分量 **b**cos θ 两个分量，分别计算，就可以得到

$$E = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} (1 - \nu \cos^2 \theta)$$

位错能量的一般公式

◆一般地，单位长度位错线的能量

$$E = \alpha G b^2 l$$

◆系数与位错类型有关。在**0.5~1**之间。

◆单位长度位错能量 $\propto b^2$ ，实际晶体中只有**b**较短的位错才是稳定的，滑移方向一般是密排方向。

位错的线张力

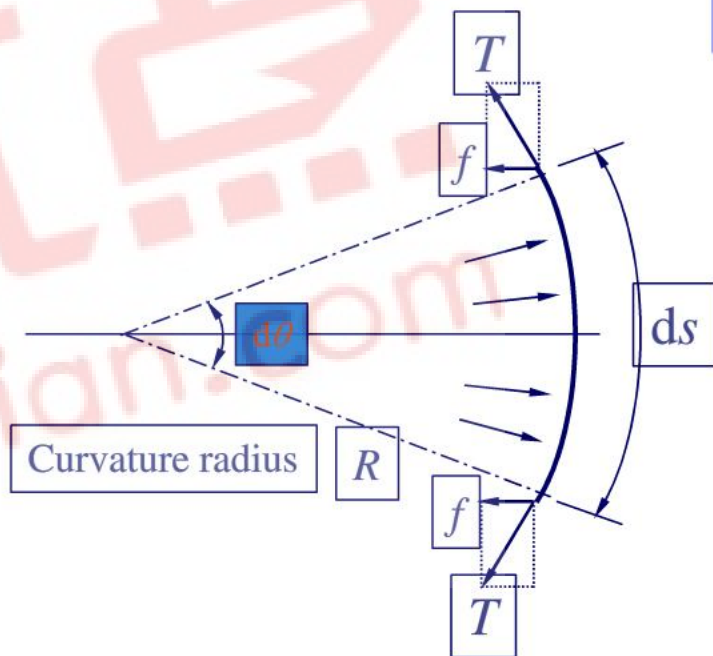
- ◆ 位错的能量正比于长度，所以晶体中的位错会尽量缩短长度，以降低能量。
- ◆ 取位错线张力数值上等于单位长度位错线的能量，作用在位错线的切线方向，力图缩短位错线的长度。

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

- ◆ 若要弯曲位错线，需要附加的外力

弯曲位错需要的力

- ◆ 考虑水平力分量
- ◆ $f = T \cdot \sin(d\theta/2) \approx T \cdot d\theta/2$
- ◆ $\Sigma f = 2f \approx T \cdot d\theta = T \cdot ds/R$
- ◆ 若单位长度位错线受力为 F ，在平衡时，
- ◆ $Fds = T \cdot d\theta$
- ◆ $F = T/R$



位错是不稳定缺陷

- ◆ 位错使晶体的内能提高，但是熵增十分有限，不稳定缺陷
- ◆ 通过估算得出，因应变能而引起系统自由能的增加，远大于熵增加而引起系统自由能的减小。故位错与空位不同，它在热力学上是不稳定的。

2-4 位错的运动

- ◆ 位错有两种运动方式
- ◆ 滑移：位错线在滑移面上的运动。
 - 位错线是已滑移区与未滑移区的边界线。
 - 外加切应力使位错线移动，已滑移区扩大，当位错扫过整个滑移面滑出晶体，滑移面两侧晶体相对移动 b ；
 - 位错移动时，在经过的区域晶体相对运动 b
- ◆ 攀移：位错线在垂直于滑移面上的运动，为半原子面的扩大或缩小。
- ◆ 只有刃型位错才能发生攀移。

- ◆ 假设，位错线 $d\vec{l}$,向任意方向移动 $d\vec{s}$,扫过的面积为

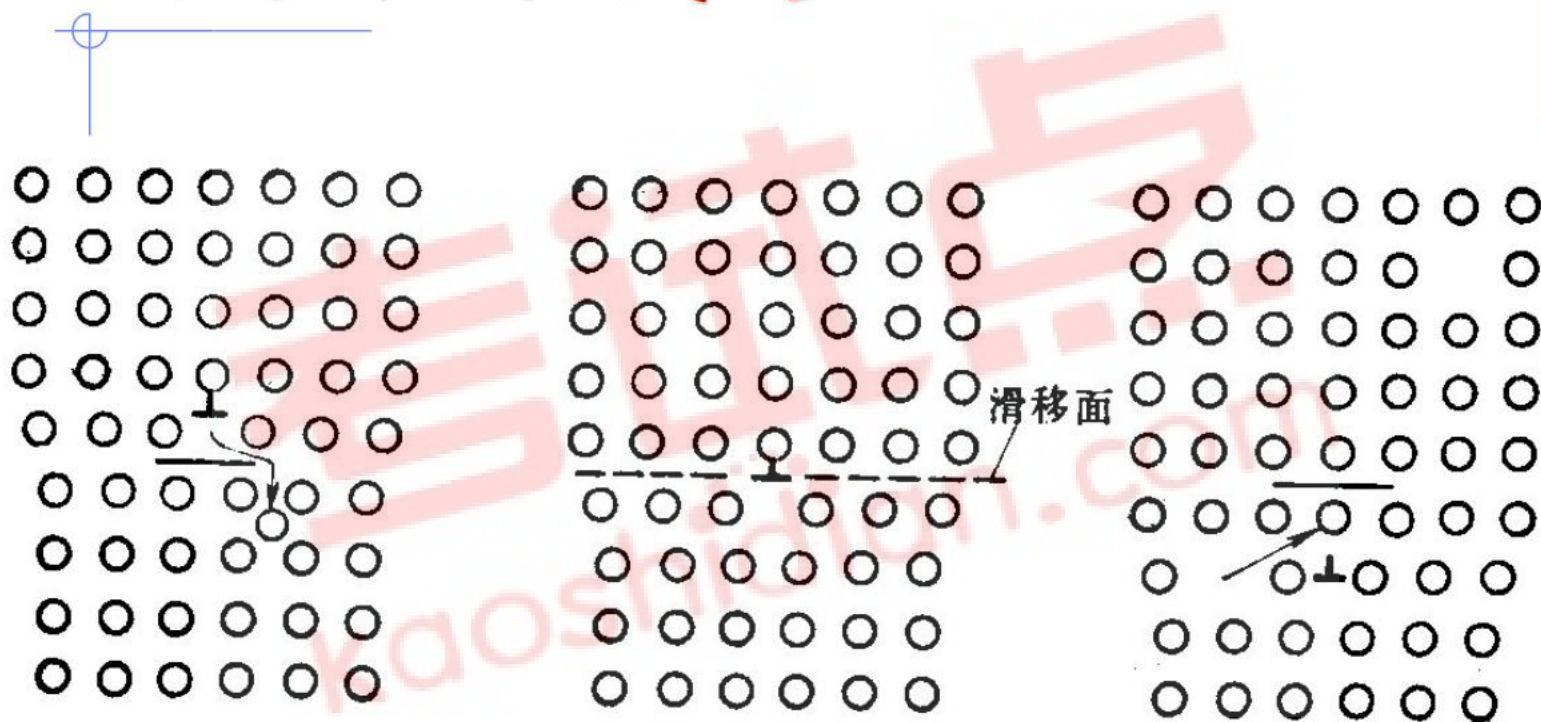
$$d\vec{A} = d\vec{l} \times d\vec{s} = \vec{n} \cdot dA$$

- ◆ 晶体体积变化 $\Delta V = \vec{b} \cdot d\vec{A} = \vec{b} \cdot \vec{n}dA$

- ◆ 滑移时，体积不变，保守运动；

- ◆ 攀移时，体积变化，非保守运动

(1) 位错的攀移运动



攀移的晶格阻力

- ◆ 攀移伴随着体积的变化；如半原子面扩大时，伴随着产生点缺陷。单位长度位错线攀移 dy 距离，体积膨胀 $1 dy b$ ，产生 $b dy / b^3$ 个点缺陷，攀移阻力 $F_{\text{阻}}$ 满足

$$F_{\text{阻}} dy = \frac{dy}{b^2} E_v \quad F_{\text{阻}} = \frac{E_v}{b^2}$$

- ◆ 空位形成能 $\sim Gb^3/5$ ，间隙原子形成能 $\sim 3Gb^3/5$ ，阻力 $\sim G/5$ ，攀移阻力接近理论强度

攀移的驱动力

- ◆ 驱动力包括垂直于半原子面的正应力及点缺陷浓度变化引起的化学力；
- ◆ 攀移和点缺陷的运动分不开，只发生在较高温度下。
- ◆ 在室温，在应力的作用下可以认为攀移是不可能的。

化学力

- ◆ 位错是点缺陷的源泉和陷阱，由非平衡浓度点缺陷产生的攀移力称为化学力或渗透力。
- ◆ 在一定温度下，若平衡、实际空位浓度分别是 C_0 、 C ，空位化学位

$$\mu = \frac{\partial G}{\partial n} = kT \ln \frac{C}{C_0}$$

化学力

◆ 单位长度正刃型位错线移动 dy , 空位数量变化

■ $dn = -dy/b^2$

◆ 引起的自由焓变化

$$dG = \mu dn = -kT \ln \frac{C}{C_0} \frac{dy}{b^2}$$

◆ 化学力

$$F_c = -\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{kT}{b^2} \ln \frac{C}{C_0}$$

◆ 若 $C > C_0$, $F_c > 0$, 即过饱和空位使刃型位错向上攀移;

◆ 若 $C < C_0$, $F_c < 0$, 即空位浓度低于平衡浓度, 位错放出空位使刃型位错向下攀移;

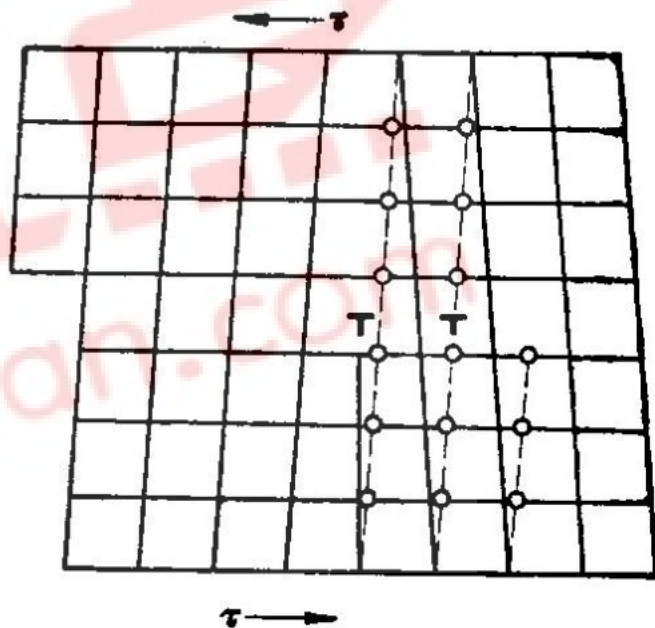
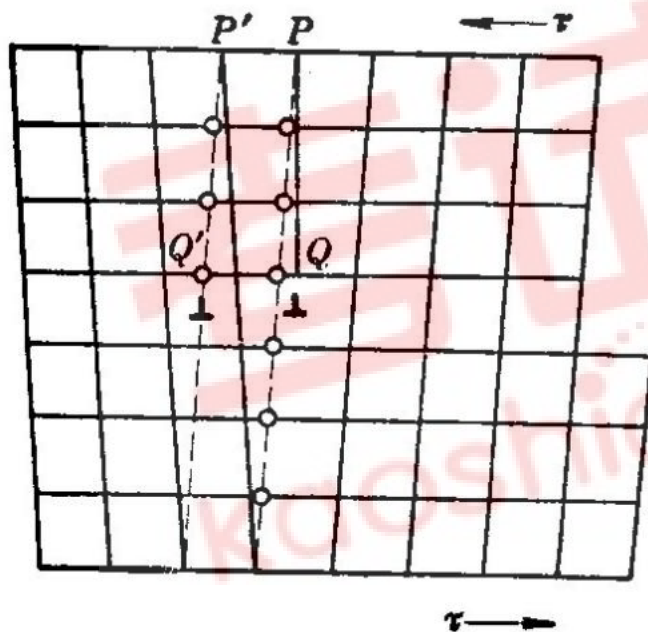
攀移的特点

- ◆ 攀移是刃型位错在垂直于滑移面方向上的运动;
- ◆ 是半原子面的扩大或缩小, 引起体积变化 (非保守运动);
- ◆ 阻力很大, 接近理论强度;
- ◆ 依赖于空位、间隙原子的扩散
- ◆ 室温下难以进行。

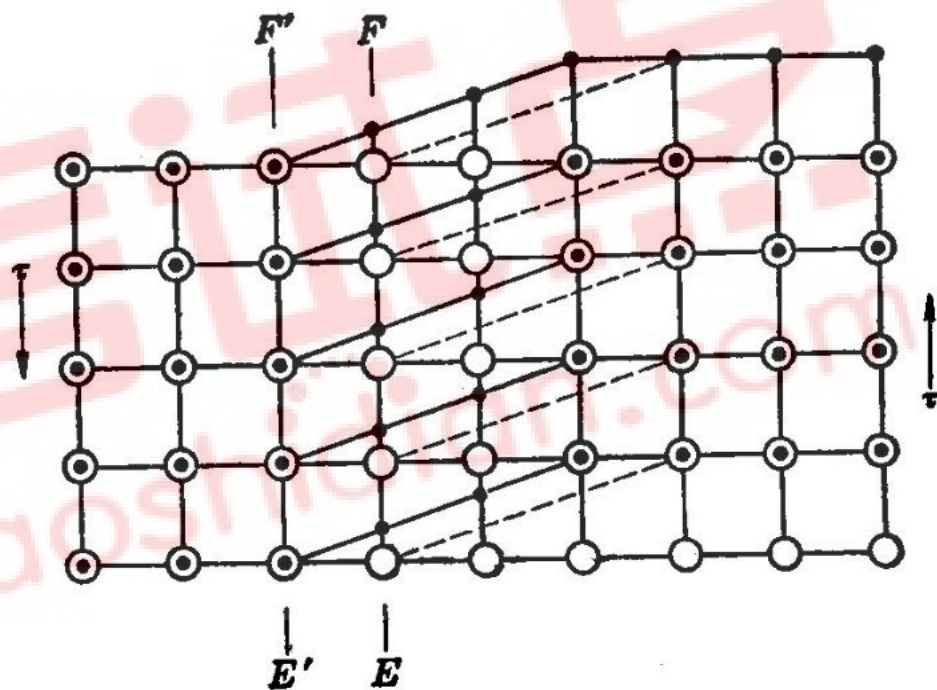
(2) 滑移 考试点 www.kaoshidian.com

刃型位错的滑移

④



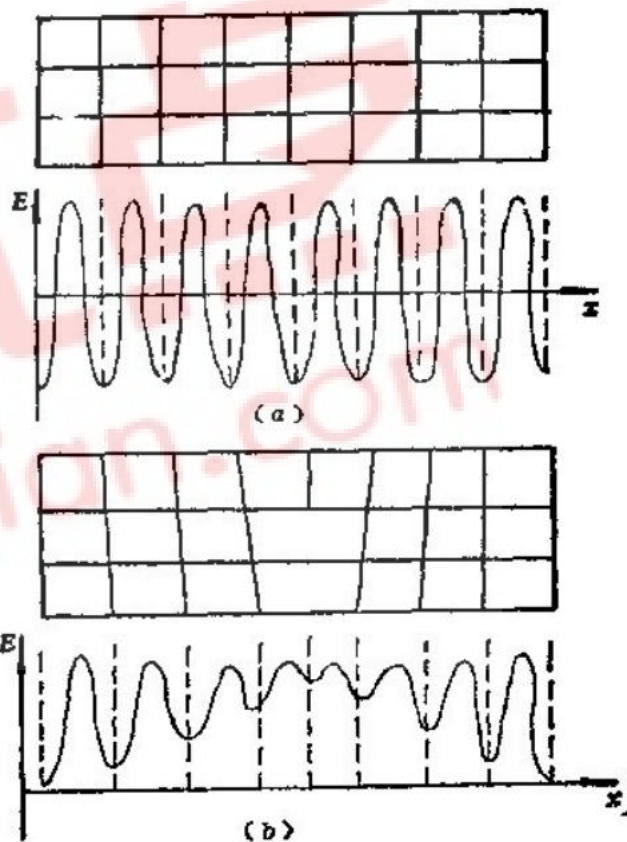
螺型位错的滑移



○—下层原子位置 ●—上层原子位置
 斜虚线: 滑移前 斜实线: 滑移后

原子移动的晶格阻力

- ◆ 理想晶体原子移动的阻力
- ◆ 位错附近原子移动的阻力



滑移的晶格阻力 ($P-N$ 力)



- ◆ G 切变弹性模量
- ◆ ν 泊松比
- ◆ d 滑移面晶面间距
- ◆ b 柏氏矢量
- ◆ 根据位错模型，计算的强度接近实际测量值
 $\sim 10^{-4}G$

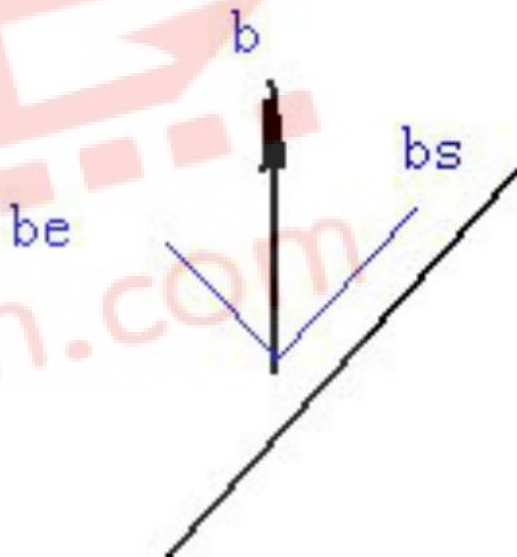
位错的易动性

- ◆ 位错线中心原子已经离开平衡位置，处于高能状态，阻力小
- ◆ 位错移动只需要位错线附近少数原子的运动；
- ◆ 每个原子的位移较小（小于原子间距）

混合位错的滑移

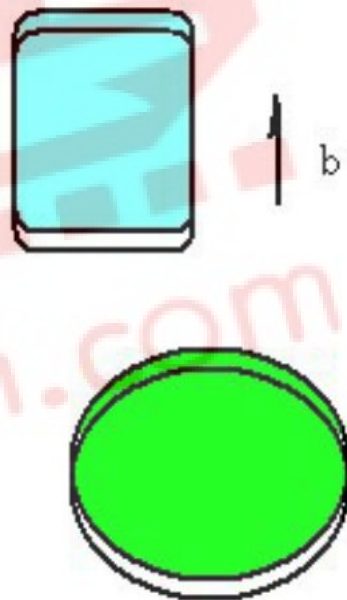
- ◆ 混合位错可以分解为两个分量
 - 螺型分量 $b_s = b \cos \theta$
 - 刃型分量 $b_e = b \sin \theta$
- ◆ 无论任何形式的位错, 位错的运动方向均 \perp 位错线
- ◆ 当两个分量位错滑过晶体, 滑移台阶为

$$\vec{b}_e + \vec{b}_s = \vec{b}$$



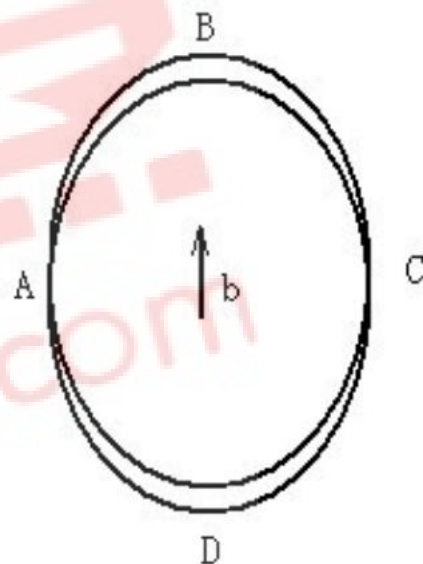
位错环

◆ 在完整晶体内部，滑移面上某一封闭曲线内部区域两侧的原子相对移动 **b** 位移，这一封闭曲线是已滑移区与未滑移区的边界，就是一个位错环。



位错环

- ◆ 在右图的位错环上，**B**处的半原子面在上面， \perp ；**D**处半原子面在下面， \top
- ◆ **A**处右旋螺型位错，**C**点左旋为螺型位错
- ◆ 其余位置为混合位错。
- ◆ 由于位错线方向与**b**相关，事实上位错线方向已经确定，是**ABCD**方向



位错环的运动

- ◆ 运动方向可以分段处理
- ◆ 简单地处理，若外力与产生位错环的外力方向相同，将倾向于撕裂整个滑移面，即位错环将逐步扩大，使位错线移向晶体外缘，最终产生台阶**b**。
- ◆ 反之，位错环逐渐减小，直至消失。

(3) 作用在位错上的滑移力

- ◆ 作用在位错上的力指作用在位错畸变区内每个原子力的总和。
- ◆ 晶体受力变形等价于位错线受力移动，根据两者作功相同的原理(虚功原理)，可以计算位错受到的力。

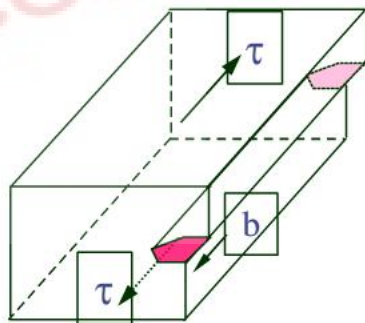
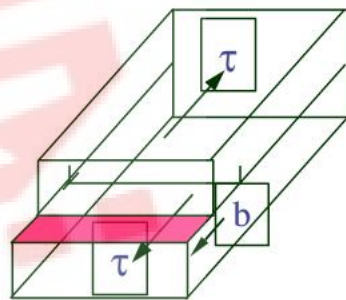
滑移力

- 以刃型位错为例。设切应力 τ 使 dl 长度位错线移动了 ds 距离，结果是晶体中 $dA = dl \cdot ds$ 面积部分沿滑移面产生了滑移量 b 。切应力所作的功为

$$\tau dA \cdot b = \tau \cdot dl \cdot ds \cdot b$$

- 若单位长度位错线受力 F_d ，使位错线移动所作的功

$$(F_d \cdot dl) \cdot ds$$



滑移力

- ◆ 令二者相等，在单位长度位错线上的滑移力

$$F_d = \tau b$$

- ◆ 力垂直于位错线，指向未滑移区，与位错线的运动方向一致
- ◆ 可见，作用在单位长度位错线上的力等于 τ 与沿 τ 方向切应力的乘积。

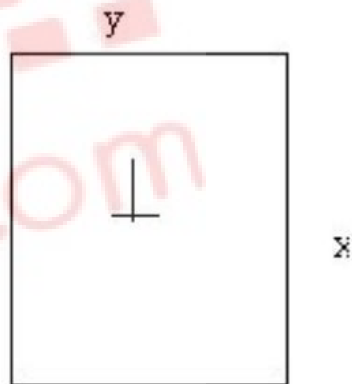
攀移力

- ◆ 对于单位长度位错线，当晶体受到 \perp 半原子面的拉应力 σ ，位错线移动 $-dy$ 。晶体在正应力方向体积膨胀 $dy \cdot 1 \cdot b$ ，膨胀功

$$-\sigma_{xx} \cdot dy \cdot b \cdot 1$$

- ◆ 单位长度位错线攀移力 F_y ，位移 dy ，做功 $F_y dy$ ，比较二者得

$$F = -\sigma_{xx} b$$



(4) 位错之间的作用力

- ◆ 位错产生应力场，另一位错处于它的应力场中。
- ◆ **1**位错对**2**位错的作用力，等价于**1**位错应力场对**2**位错的作用
- ◆ 下面介绍几种简单情况。

两平行螺型位错间的交互作用

右图中坐标原点 $(0, 0)$ 处一螺型位错

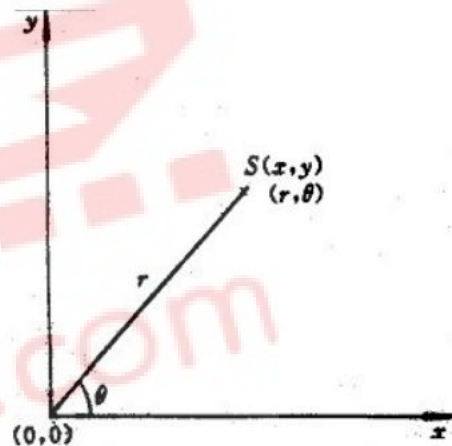
b , $r(x, y)$ 处一螺位错 b'

则

$$|F_r| = \frac{Gb b'}{2\pi r}$$

在直角坐标中

$$\vec{F} = \frac{Gb b'}{2\pi(x^2 + y^2)}(x\vec{i} + y\vec{j})$$

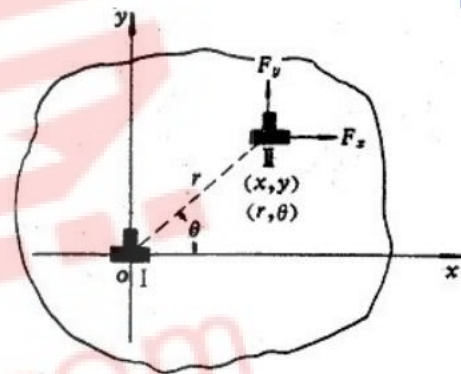


b, b' 同号, F_r 为正值, 两位错相互排斥

b, b' 异号, F_r 为负值, 两位错相互吸引

两平行刃型位错之间的相互作用

设有沿 oz 轴的刃位错**I**和另一处于 (x, y) 并与之平行的同号位错**II**，柏氏矢量分别为 \mathbf{b}_1 、 \mathbf{b}_2 其距离为 r ，可见**I**会产生一切应力分量 τ_{yx} 使**II**受到一滑移力 \mathbf{F}_x ，还会产生一正应力分量 σ_{xx} 作用于**II**多余半原子面，使**II**受到一攀移力 \mathbf{F}_y 。



滑移力 $F_x = \tau_{yx} \cdot b_2 = \frac{Gb_1b_2}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$

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

根据以上两式可推断出**II**在不同位置所受到的攀移力和滑移力。

两平行刃位错间的力 F_x 与距离 x 之间的关系

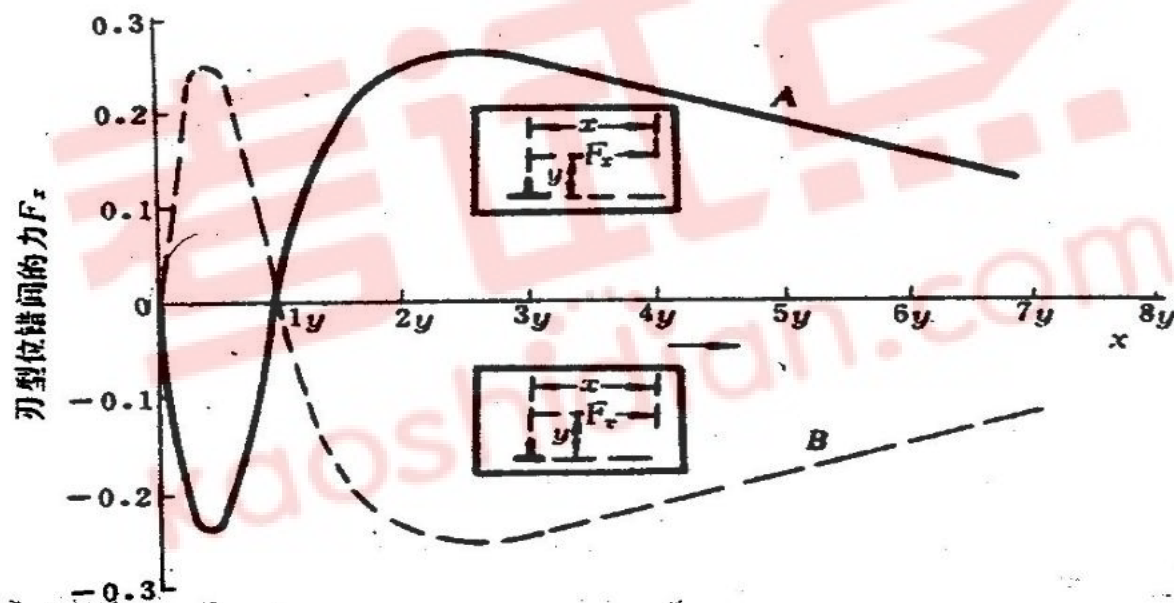
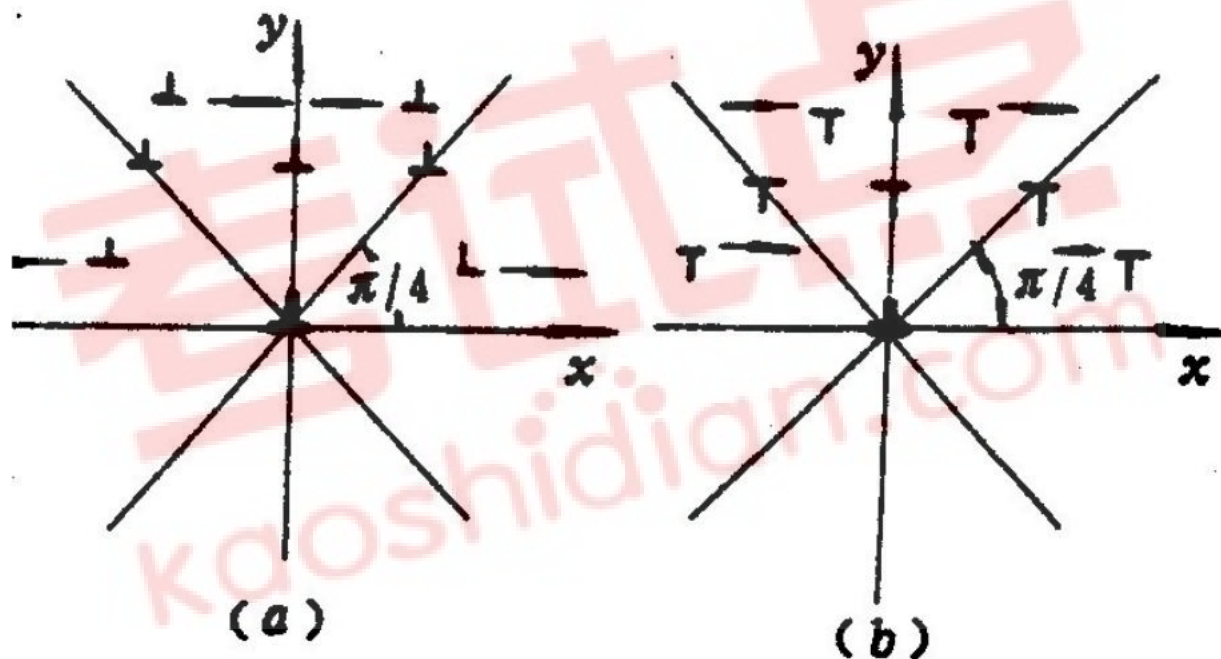


图 6-41 两平行刃型位错间的力

曲线 A 表示同号的位错，曲线 B 表示异号位错， F_x 的单位是 $\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)y}$ ⁹³ 101

滑移力的方向



任意平行位错的作用

- ◆ 可以用普遍公式计算
- ◆ 近似地可以根据两位错柏氏矢量夹角大小进行判断
 - 若夹角小于 $\pi/2$ ，排斥；
 - 若夹角大于 $\pi/2$ ，吸引

(5) 位错与点缺陷的弹性作用

- ◆ 点缺陷在晶体中会引起点阵畸变，所产生的应力场可与位错产生弹性交互作用。
- ◆ 假设晶体为弹性的连续介质，内有一柏氏矢量为 **\mathbf{b}** 的刃位错
- ◆ 设有一半径为 **R** 的点缺陷出现在位错的应力场中，考虑能量的变化。
- ◆ 这相当于在晶体内取走一个半径为 **R_0** 的溶剂原子，然后溶入一个半径为 **R** 的溶质原子。

- ◆ 取走一个半径为 R_0 的溶剂原子，相当于在晶体
内挖掉一半径为 R_0 的小洞。溶入一个半径为 R
的溶质原子，相当于在小洞中填入一半径为 R
的小球，此时将引起径向位移 ΔR
- ◆ 在产生径向位移过程中位错应力场要作功。因
为产生的径向位移是垂直球面的，是球对称的
畸变，故只有位错应力场中的正应力分量作功。

位错应力场中正应力分量的平均值可用水静压力来表示：

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})$$

$$p = \frac{(1+\nu)Gb}{3\pi(1-\nu)} \cdot \frac{\sin\theta}{r}$$

$$\delta = \frac{R - R_0}{R_0}$$

错配度

体积变化

$$\Delta V = \frac{4}{3}\pi R^3 - \frac{4}{3}\pi R_0^3$$

$$\Delta V = \frac{4}{3}\pi(R_0^3(1+\delta)^3 - R_0^3) \approx 4\pi\delta R_0^3$$

位错与点缺陷的弹性作用

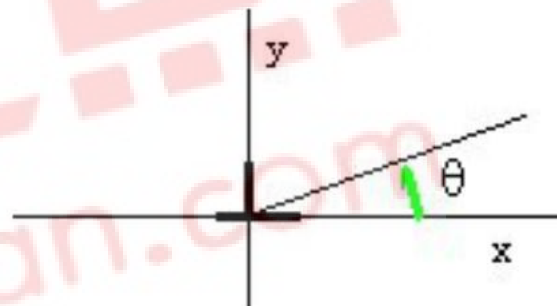
◆ 相互作用能 $w = p\Delta V$

$$W = \frac{4}{3} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot GbR_0^3 \cdot \delta \cdot \frac{\sin \theta}{r}$$

δ 为错配度

◆ 为了使 $W < 0$ ，不同错配度的点缺陷，将处在位错的特定位置

- ◆ 若 $\delta > 0$ ，如较大的溶质原子和间隙原子。为使 $W < 0$ ，必有 $\pi < \theta < 2\pi$ ，即溶质原子位于刃位错下方（膨胀区）
- ◆ 若 $\delta < 0$ ，如较小的溶质原子和空位。为使 $W < 0$ ，必有 $\pi > \theta > 0$ ，点缺陷位于刃位错上方的受压缩部分

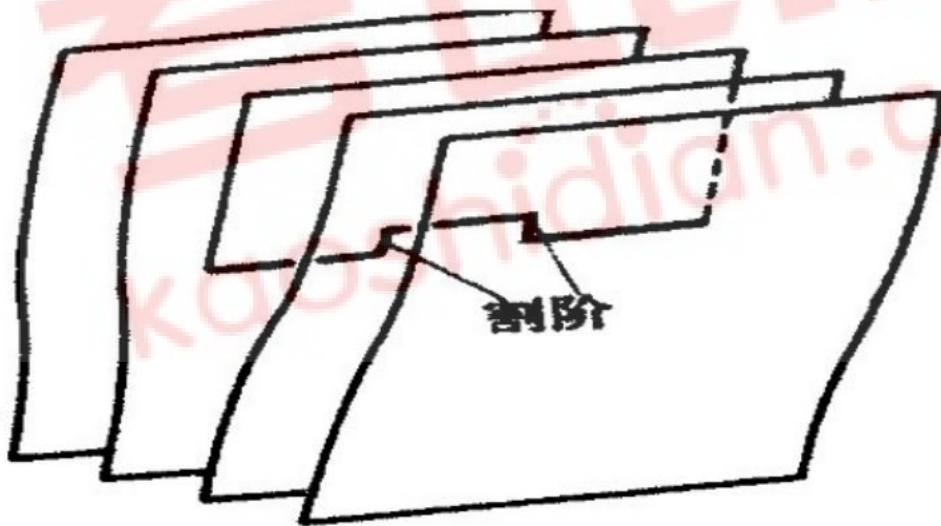


Cottrell Atmosphere

- ◆ 通常把围绕位错而形成的溶质原子聚集物，称为“科垂耳气团”（**Cottrell Atmosphere**），这种气团阻碍位错运动，产生强化。
- ◆ 用柯氏气团可解释合金中出现的应变时效和屈服现象。
- ◆ 课外了解螺型位错附近的“斯诺克气团”（**Snoek Atmosphere**）

位错与空位的交互作用

- ◆ 空位通常被吸引到刃型位错的压缩区，或消失在刃型位错线上，使位错线产生弯折（割阶），如图，空位与位错在一定条件下可互相转化。



空位盘转化为位错环

- ◆ 过饱和空位可以聚集成空位盘，继而可崩塌成刃型位错环，成为“棱柱位错”。

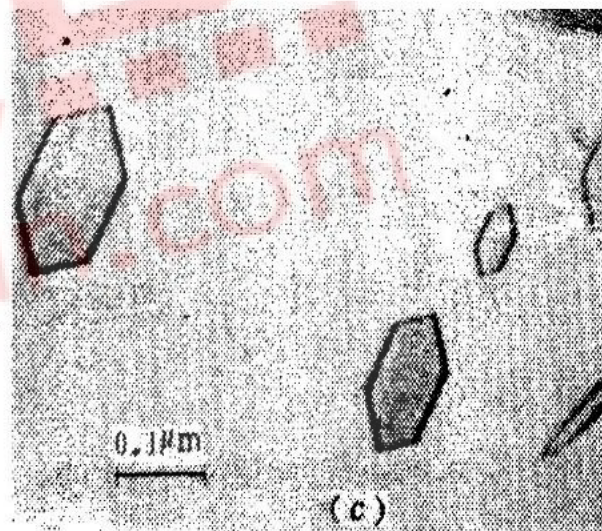
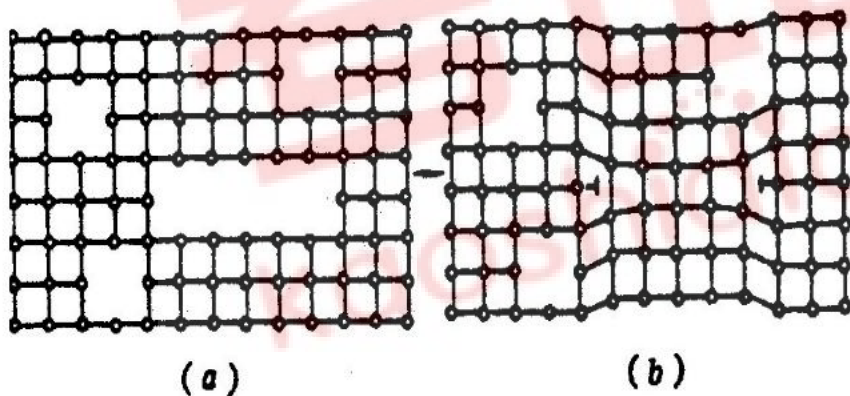
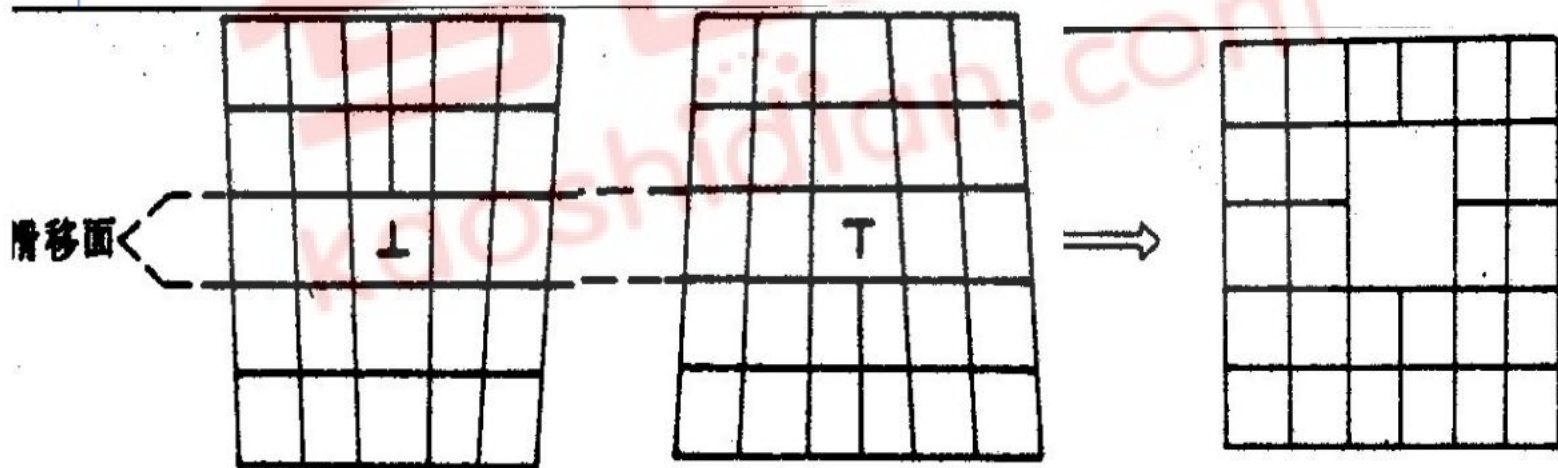


图 6-50 空位盘崩塌成刃型位错环

位错运动产生一串空位

- ◆ 相邻滑移面上异号刃型位错互毁后产生一串空位
- ◆ 刃型位错攀移时后边留下一串空位或间隙原子



(6) 界面与位错-映象力

- ◆ 映象力是指界面对位错的作用力
- ◆ 因为位错的能量正比于弹性模量 G
- ◆ 如果界面两侧 G 不同，位错距离界面不同距离，具有的能量将不同。相当于界面存在映象力。根据最低能量原理
- ◆ 如果界面另一侧 G 较小，位错将被吸引；
- ◆ 如果界面另一侧 G 较大，位错将被排斥。

2-5 实际晶体中的位错

- ◆ 实际晶体中位错的柏氏矢量不是任意的，只有 **\mathbf{b}** 较小（能量较低）的位错才是稳定的
- ◆ 全位错的 **\mathbf{b}** 等于晶体中两原子的连线：平移矢量
- ◆ 单位位错的柏氏矢量为连接最近邻原子的矢量。
- ◆ 单位位错是最短的全位错，与晶体结构有关。

2.5.1 单位位错

晶体结构	单位位错的柏氏矢量
fcc	$\frac{a}{2} \langle 110 \rangle$
bcc	$\frac{a}{2} \langle 111 \rangle$
hcp	$\frac{a}{3} \langle 11\bar{2}0 \rangle$

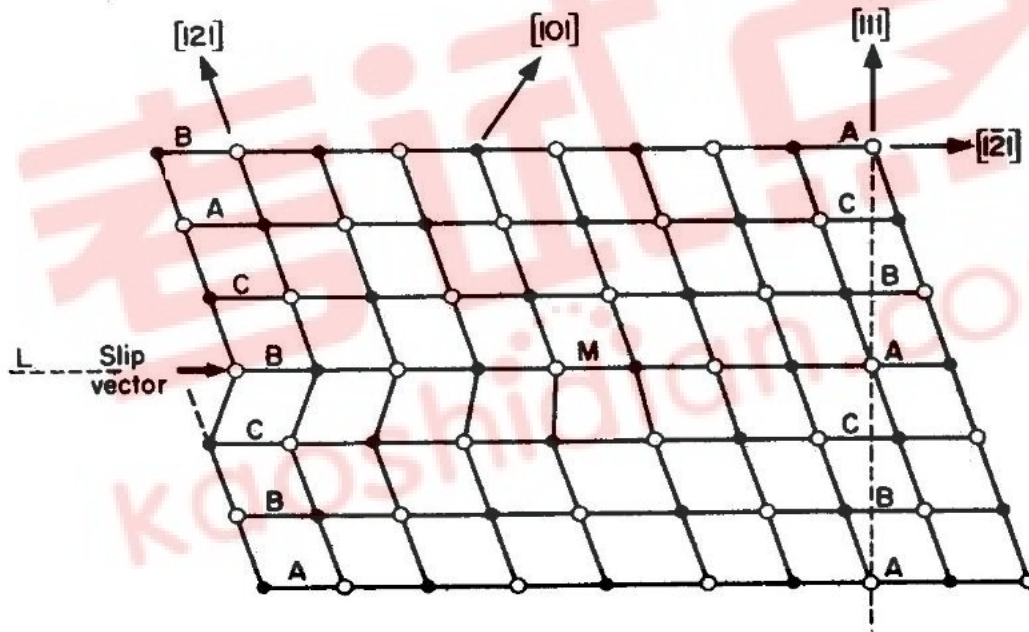
2.5.2 堆垛层错与不全位错

- ◆ 面心立方密排面 $\{111\}$ 的堆垛顺序是 **ABCABCABC**;
- ◆ 密排六方晶体密排面 $\{0001\}$ 的堆垛顺序是 **ABABAB**;
- ◆ 实际晶体当中，堆垛顺序可能出现偶然的差错。这种面缺陷称为堆垛层错 **stacking fault**，简称层错。

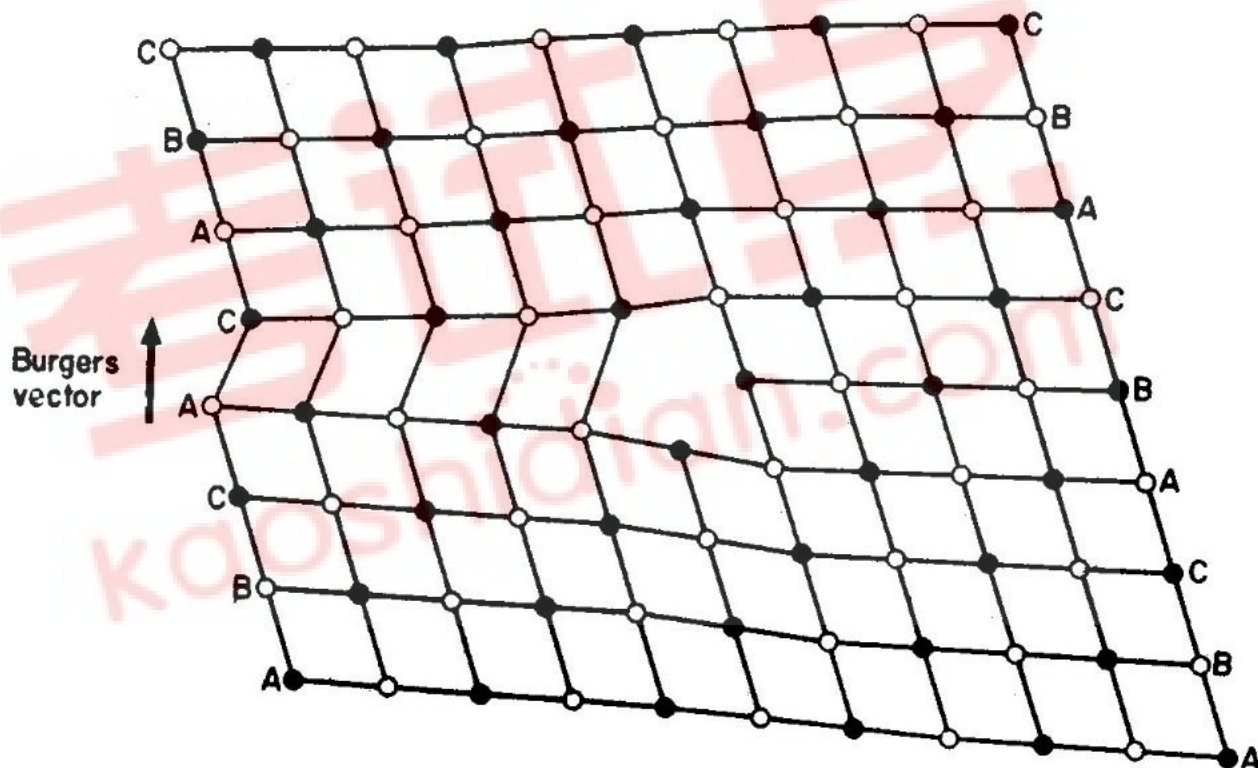
不全位错

- ◆ 如果层错终止于晶体内部，层错区与正常区的边界也是位错，但是这个位错的柏氏矢量 \neq 点阵矢量，属于不全位错。
- ◆ 常见的不全位错 (**partial dislocation**, 也称为部分位错、分位错) 有两种

Shockley Partial Dislocation



Frank Partial Dislocation



2.5.3 位错反应

- ◆ 实际晶体中，组态不稳定的位错可以转化为组态稳定的位错
 - 如具有不同柏氏矢量的平行位错线合并成一条位错线；
 - 一条位错线分解为两条或多条具有不同柏氏矢量的平行位错线
- ◆ 位错之间的相互转化（分解或合并）称为位错反应。

位错反应条件

- ◆ 结构条件：每一个位错的柏氏矢量都是从一个平衡的原子位置指向相邻的平衡原子位置；
- ◆ 能量条件：反应后能量降低，近似用 b^2 代替能量大小
- ◆ 几何条件：反应前后 b 矢量守恒

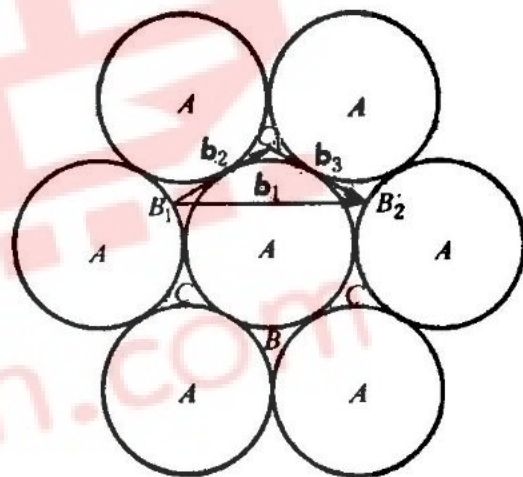
位错反应举例

◆ **Fcc**结构中经常发生单位位错与不全位错之间的反应

◆ 如在 **(111)** 面上，单位位错可分解

$$\frac{a}{2}[\bar{1}10] = \frac{a}{6}[\bar{2}11] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$$

◆ 生成两个肖克莱部分位错、层错

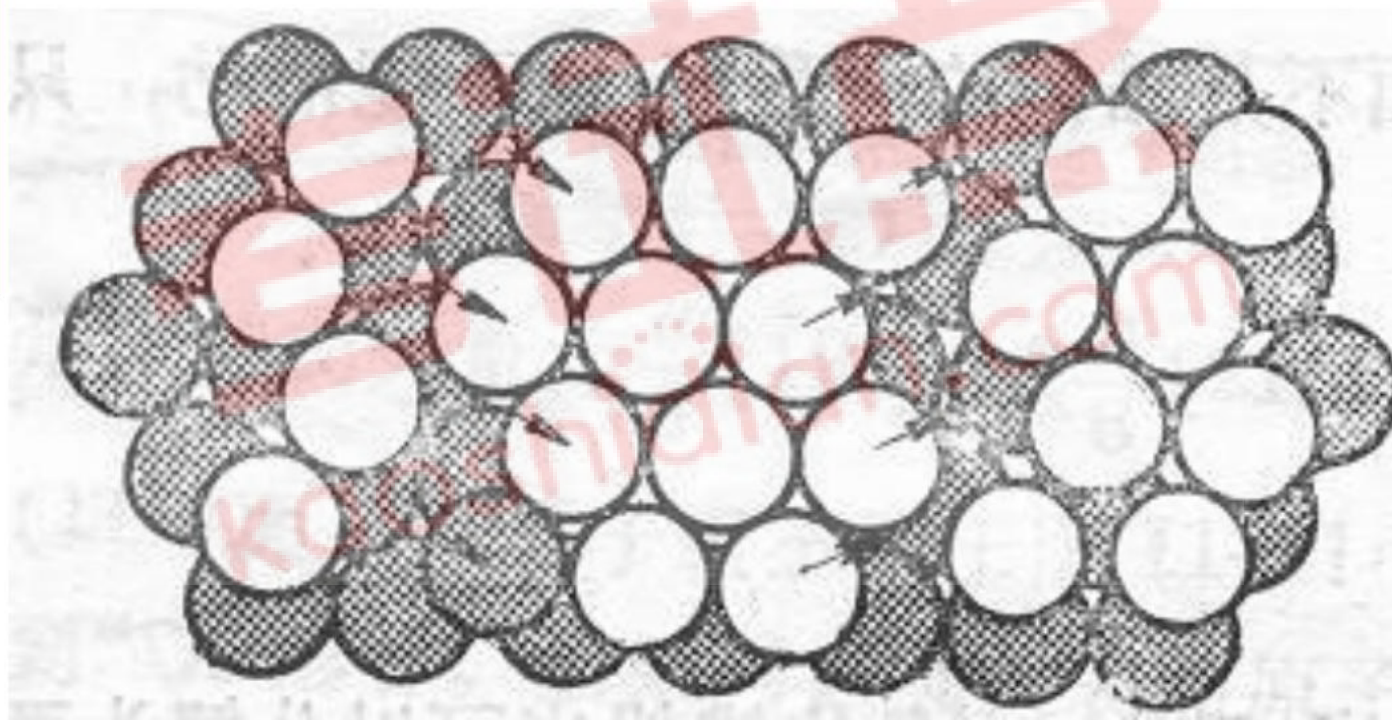


$$b_1 = b_2 + b_3$$

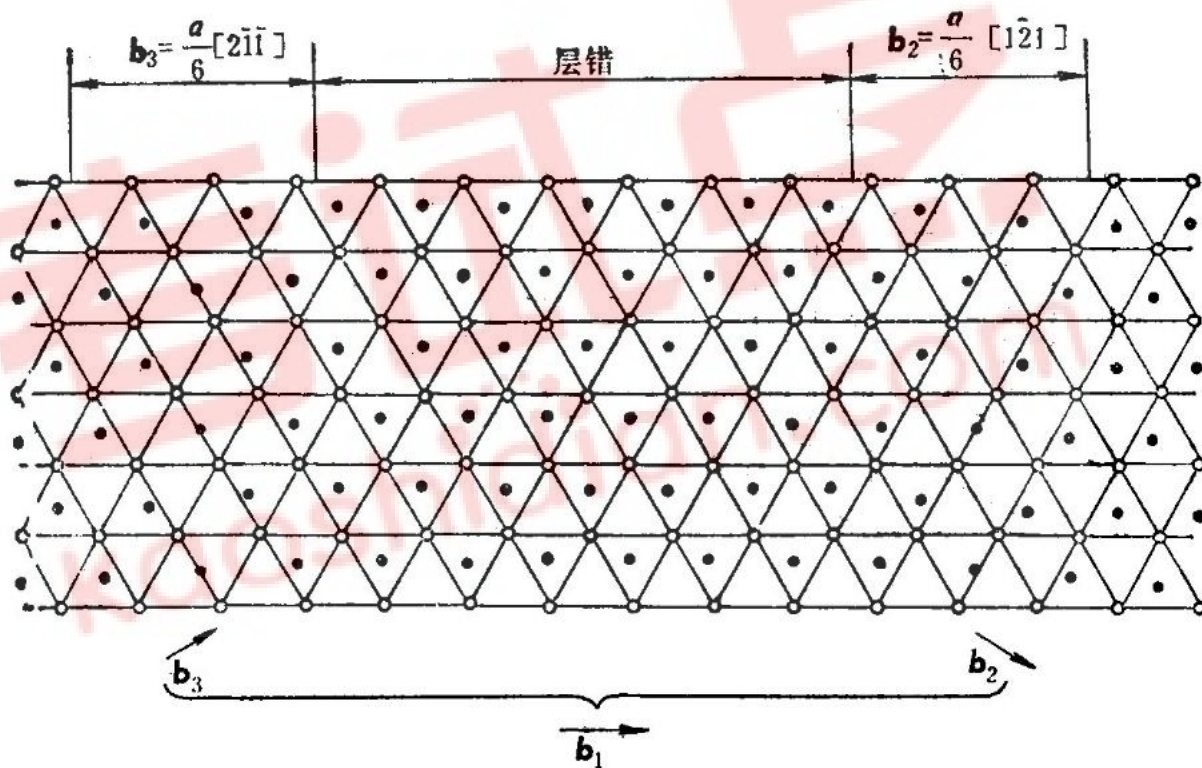
2.5.4 扩展位错

- ◆ 如果整个层错位于一个晶粒的内部，那末层错的两个边界都是不全位错，这种组态称为扩展位错。

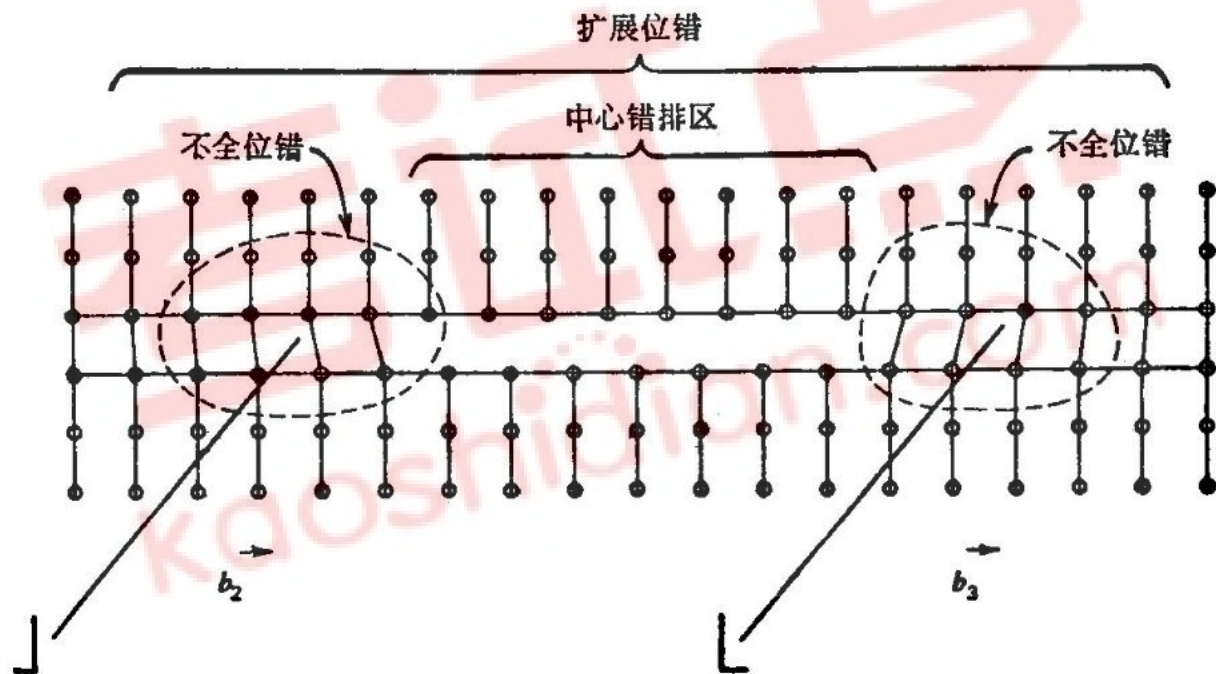
扩展位错原子模型



扩展位错原子模型



扩展位错原子模型



层错能与扩展位错宽度

- ◆ 扩展位错中，单位长度不全位错之间的排斥力

$$F = \frac{G(\vec{b}_1 \cdot \vec{b}_2)}{2\pi d}$$

- ◆ 排斥力使位错远离、层错面积扩大。
- ◆ 单位面积层错能（单位长度表面张力） γ ，尽量缩小层错面积。平衡时

$$F = \frac{G(\vec{b}_1 \cdot \vec{b}_2)}{2\pi d} = \gamma$$

$$d = \frac{G(\vec{b}_1 \cdot \vec{b}_2)}{2\pi\gamma}$$

- ◆ 扩展位错宽度 d 与层错能成反比，与弹性模量成正比。
- ◆ 如果层错能 γ 较大，不易形成扩展位错；而当层错能 γ 较小时，易形成扩展位错
- ◆ 与滑移线形状有关。宽度较大的扩展位错不易交滑移，直滑移线(如**Cu**)；反之，波纹状滑移线(如**Al**)。

铜和铝的滑移带



图 8-15 铜的平行滑移带

121

河北工业大学继续教育学院

图 8-16 铝的波纹状滑移带

2.6 界面

- ◆ 界面是面缺陷
- ◆ 按照界面两侧物相种类：表面、相界、晶界与亚晶界
- ◆ 按照界面原子的匹配程度：共格、非共格、半共格界面
- ◆ 按照界面两侧位相差大小：小角度 ($<10^\circ$)、大角度界面

(1) 界面分类与结构

◆ 表面: **s/g, s/l**

◆ 相界面

- 界面两侧不是同一相

◆ 晶界与亚晶界 (含孪晶界)

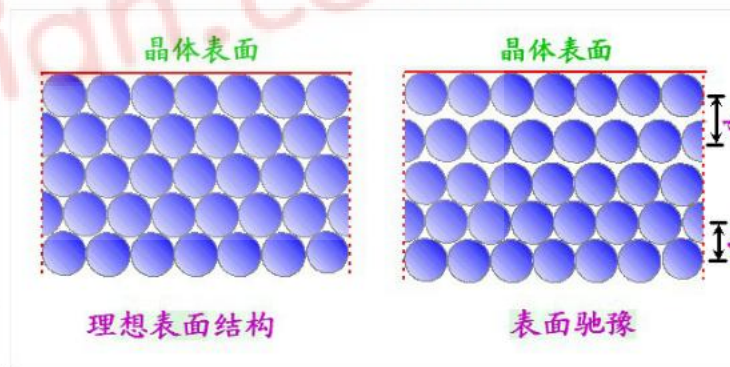
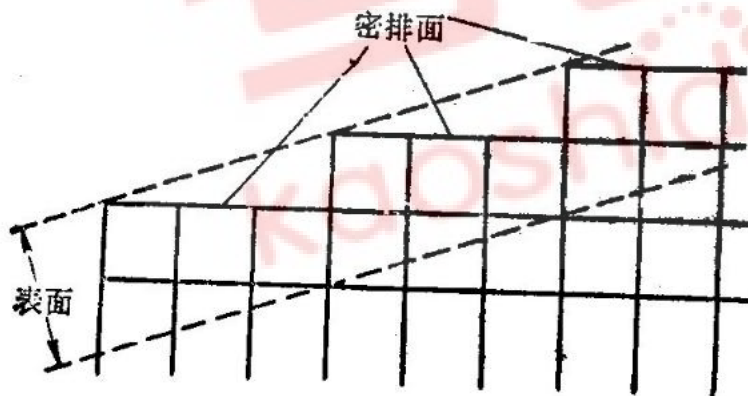
- 大角度晶界 ($>10^\circ$)

- 小角度晶界 ($2-10^\circ$)

- 亚晶界 ($<2^\circ$)

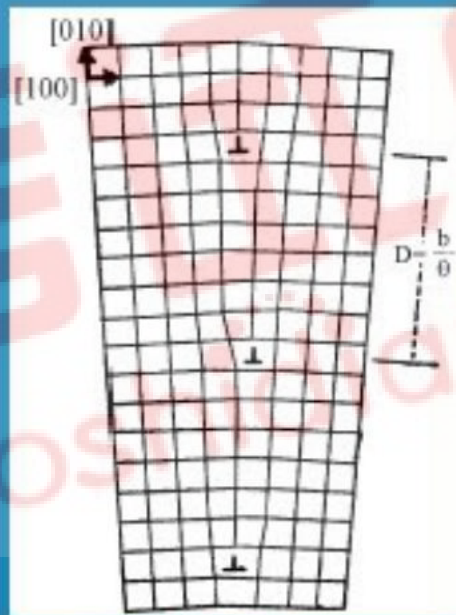
表面

- ◆ 固体与液体、气体之间的界面
- ◆ 表面原子一侧没有固体原子与之键合，有较高能量
- ◆ 几个原子层厚，有弛豫现象和表面重构，取向

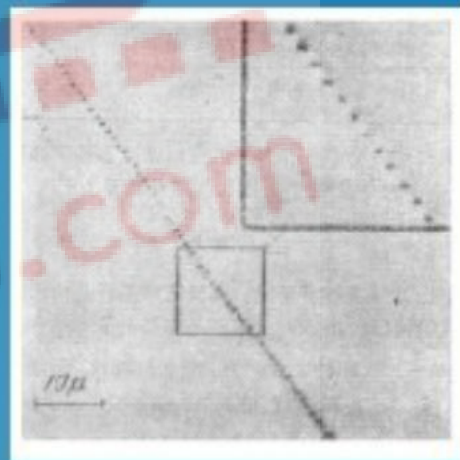


小角度晶界(亚晶界)的位错模型

◆ 对称倾侧界面是由等距离位错构成的



对称倾转晶界



锺中小角晶界侵蚀坑

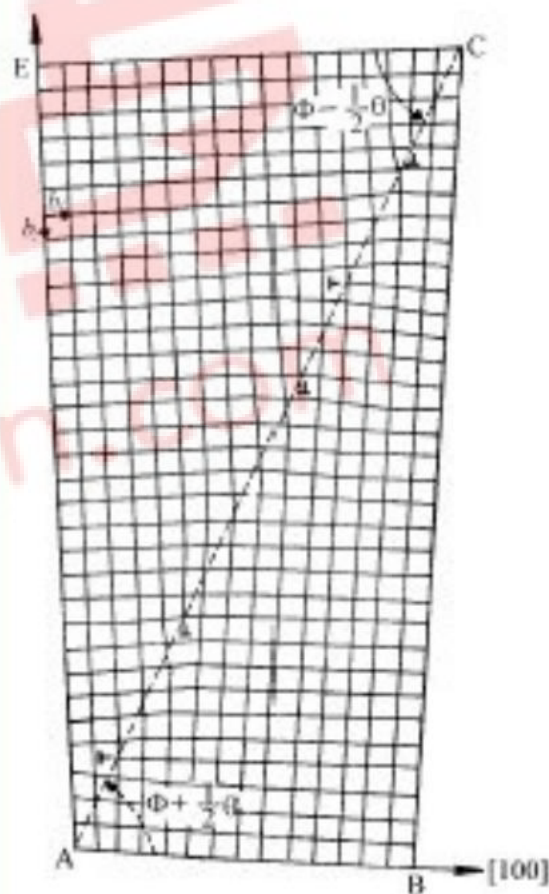
小角度晶界的位错模型

◆ 非对称倾侧界面

$$D_{\perp} = \frac{1}{n_{\perp}} = \frac{b}{\cos(\phi - \frac{\theta}{2}) - \cos(\phi + \frac{\theta}{2})} \approx \frac{b}{\theta \sin \phi}$$

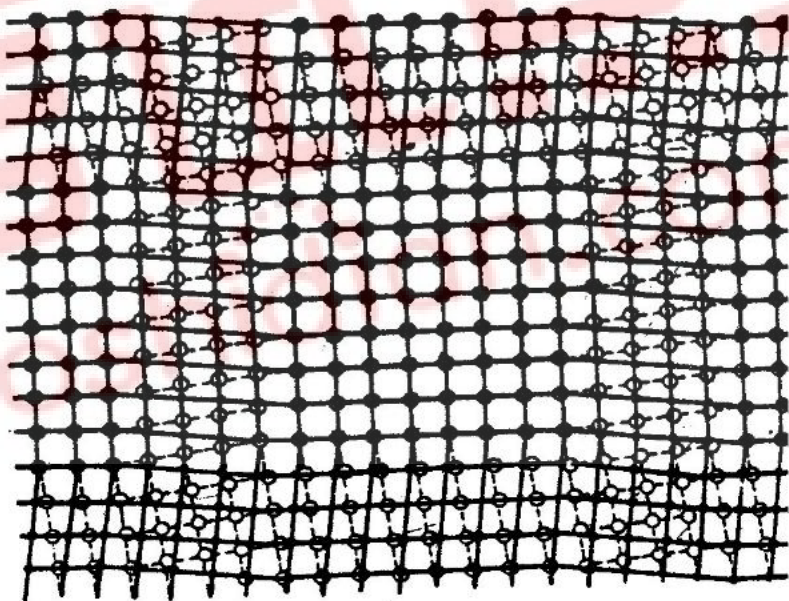
$$D_{\parallel} = \frac{1}{n_{\parallel}} = \frac{b}{\sin(\phi + \frac{\theta}{2}) - \sin(\phi - \frac{\theta}{2})} \approx \frac{b}{\theta \cos \phi}$$

$$D = b/\theta$$

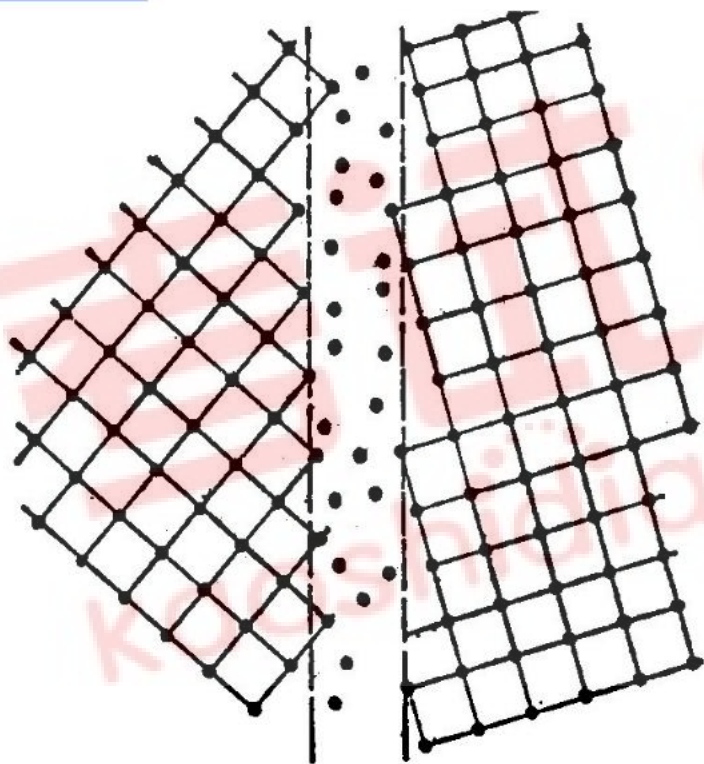


小角度晶界的位错模型

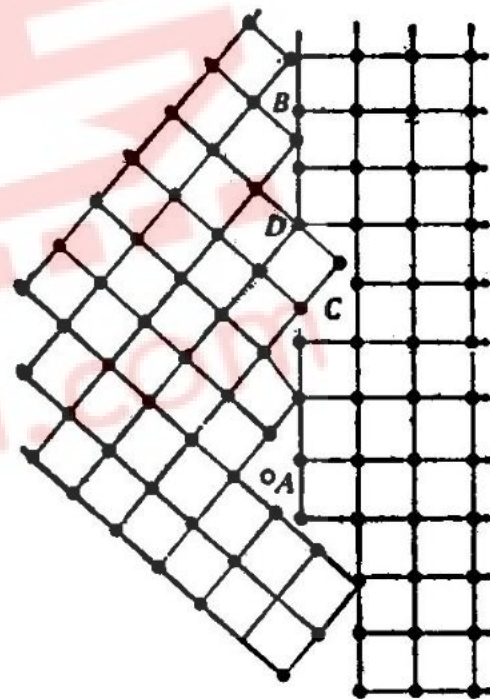
◆ 扭转晶界由螺型位错墙构成



大角度晶界-液体模型



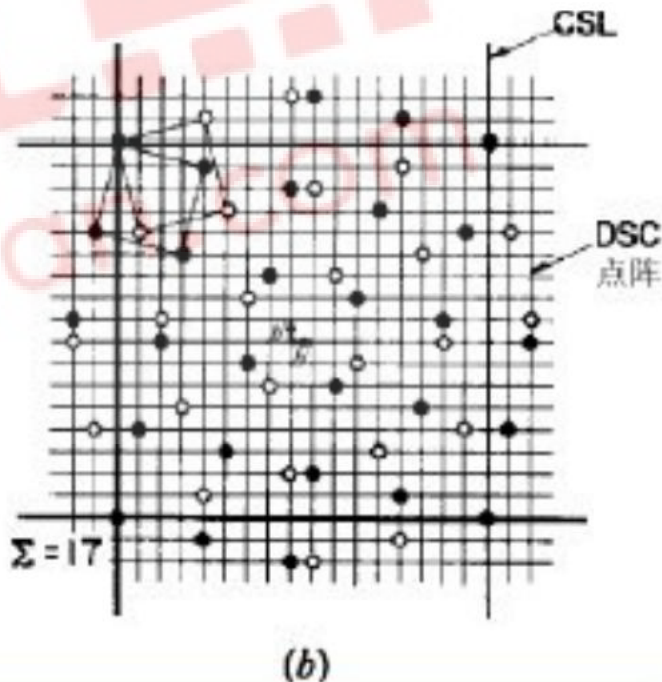
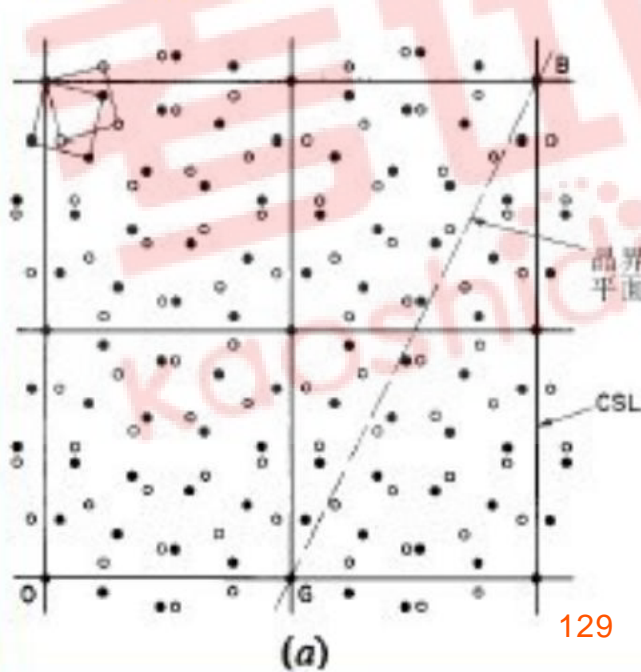
(a)



(b)

大角度晶界-重合点阵模型

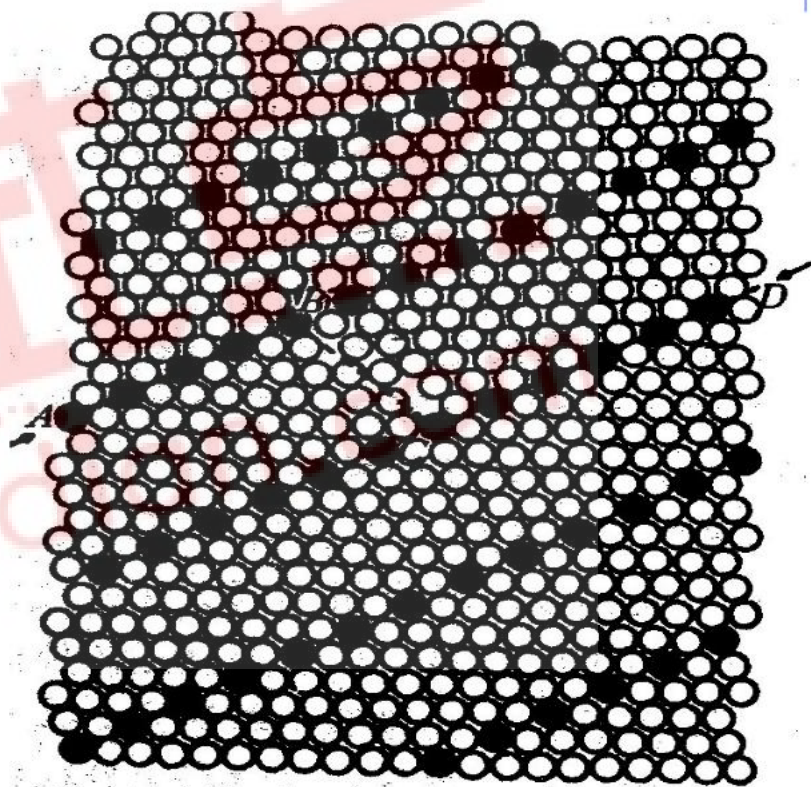
- ◆ 两晶粒位向转动一特定角度后，两晶粒的阵点有部分处于重合位置，由重合的阵点构成重合位置点阵



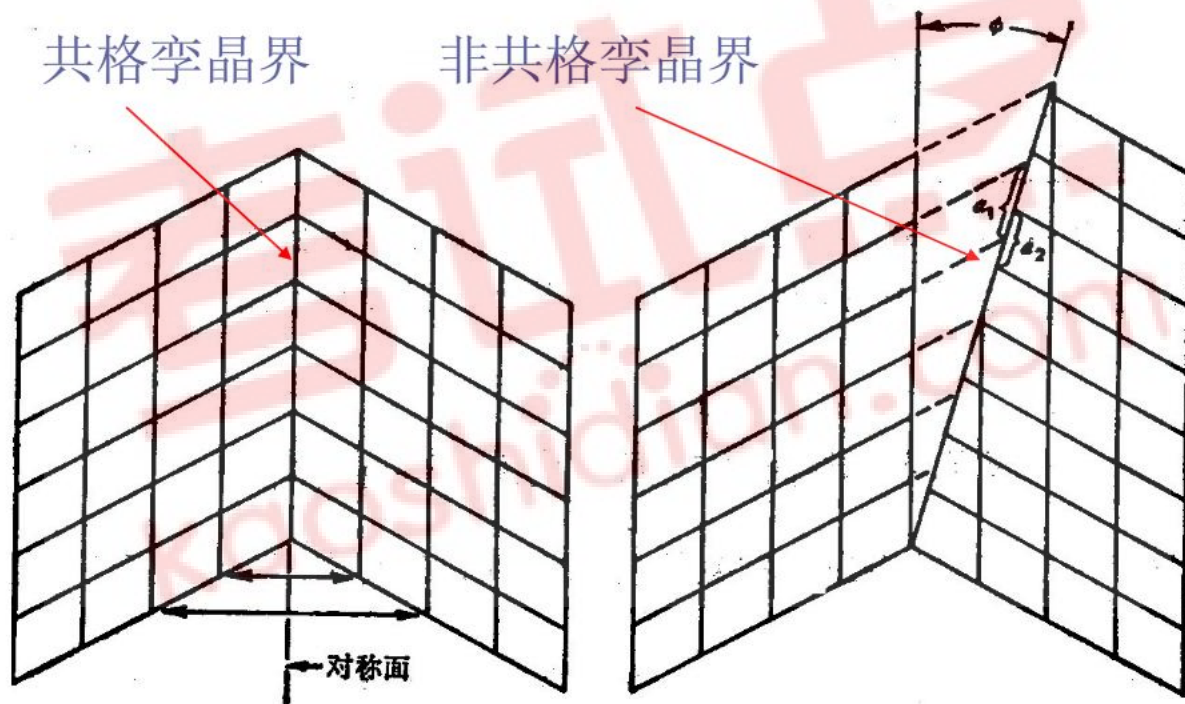
立方晶系一些转轴与重合度

旋转轴	Σ	最小转角 θ°	旋转轴	Σ	最小转角 θ°
100	5	36.9	210	3	131.8
100	13	22.6	210	5	96.4
100	17	28.1	211	5	101.6
110	3	70.5	211	11	63
110	9	38.9	310	7	115.4
110	17	86.6	310	13	76.7
110	19	26.5	311	9	67.1
111	3	60	311	15	50.7
111	7	38.2	322	9	152.7
111	19	46.8	322	13	107.9

- ◆ 晶界力求与重合点阵密排面重合,
- ◆ 即使有偏离, 晶界会台阶化, 使大部分面积分段与密排面重合。
- ◆ 如ABCD界面

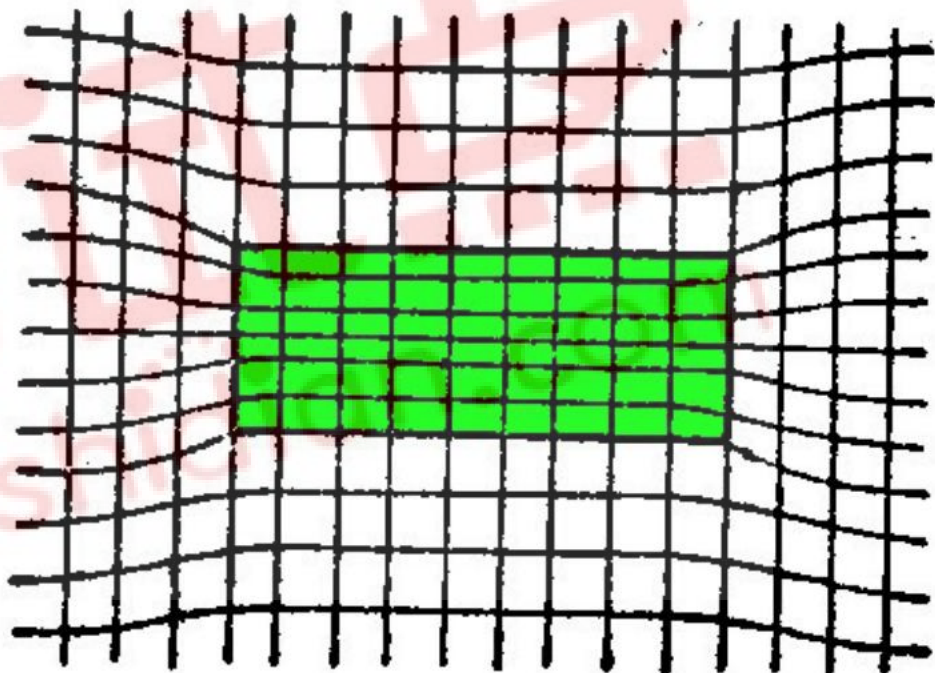


孪晶界



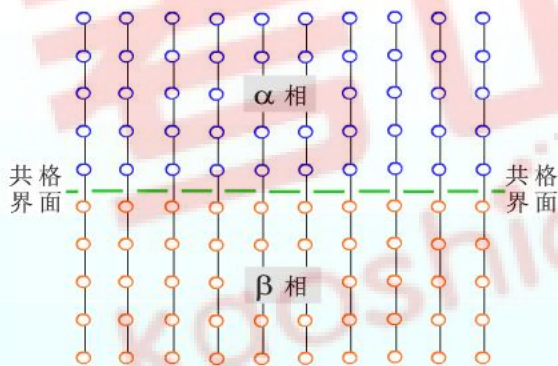
相界

- ◆ 相界模型与晶界类似
- ◆ 按界面原子重合程度，分为共格、半共格、非共格

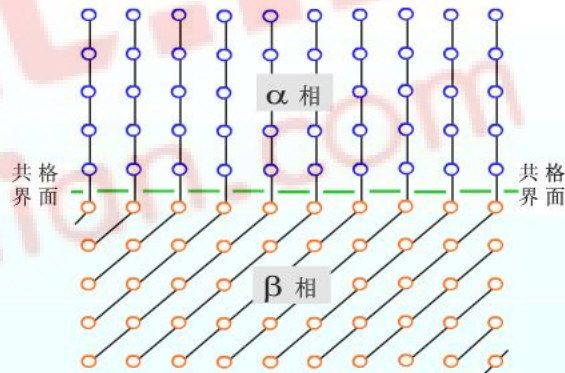


共格界面

界面两侧两相点阵原子在界面处完全吻合的界面称为共格界面。



两相结构相同、界面处原子间距也相同时的共格界面



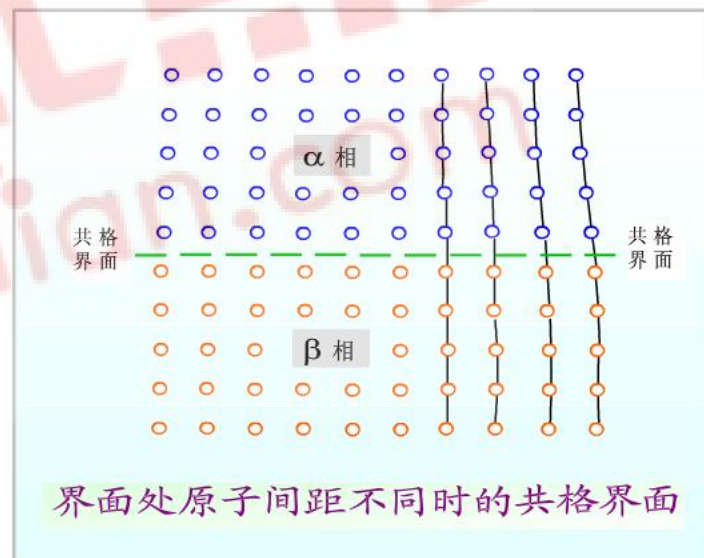
两相结构不相同、界面处原子间距相同时的共格界面

形成条件:

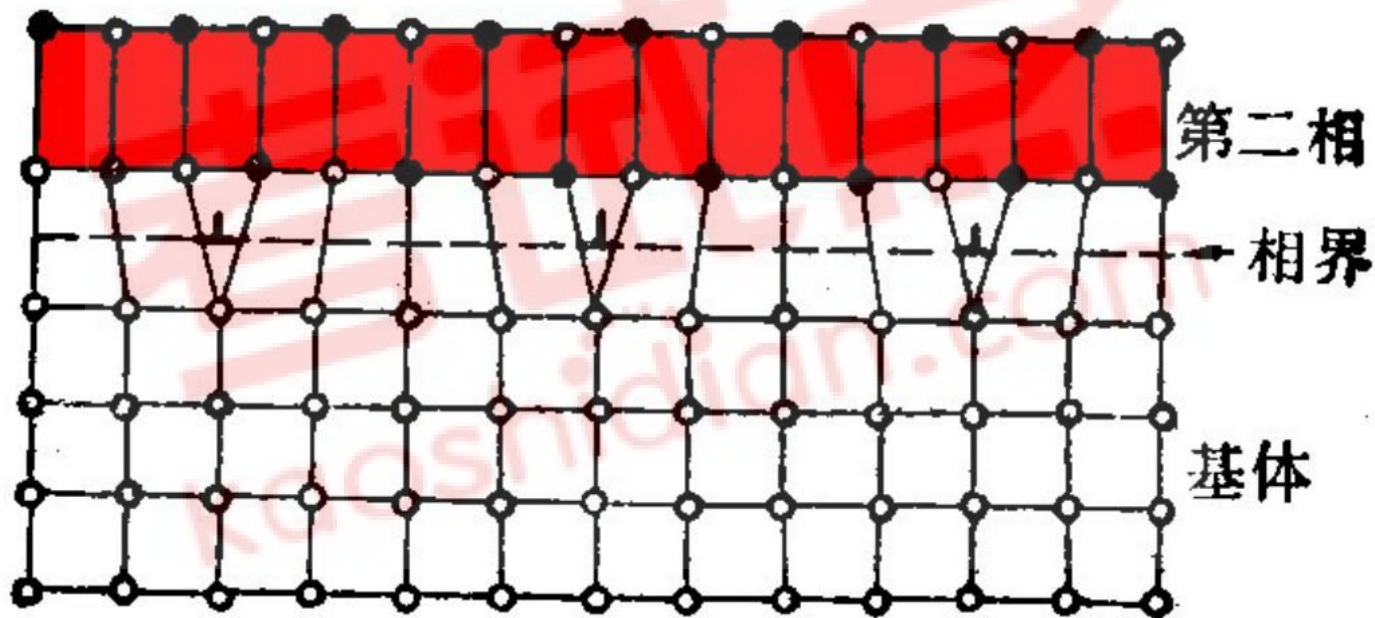
结构条件 - 界面处两相原子排列相同或相近;

点阵参数条件 - 界面处两相原子间距相等或相近;

界面处两相原子间距不相等时, 形成共格界面需要原子位置的调整, 此时的共格界面具有较高的弹性应变能。



半共格相界



(2) 界面能

- ◆ 概念: 形成 (或扩大) 单位面积界面所作的非体积功 (或自由焓增量) 称为 (比) 表面能
- ◆ 界面能的来源: 与内部原子相比, 界面原子所处的环境不同
 - 化学能: 界面原子周围原子数或类型变化, 引起键能的变化;
 - 应变能: 界面原子偏离平衡位置引起弹性应变能。

界面能与界面张力

- ◆ 界面张力是作用在单位长度界面边界上的力
- ◆ 界面张力数值上等于界面能。
- ◆ 作用在界面的切线方向，指向界面缩小的方向
- ◆ 影响因素：材料种类、成分、温度、具有各向异性

表面能影响单晶体的外形

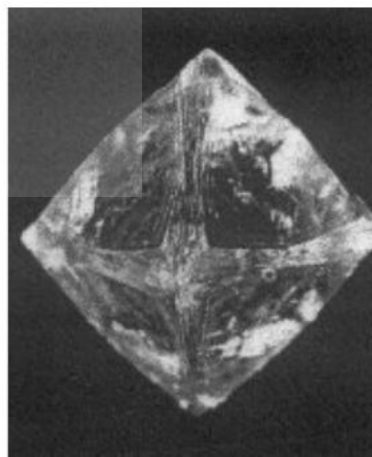
◆ 表面能主要是化学能，近似等于

$$\sigma = \frac{\text{破坏的结合键的总键能}}{\text{形成的表面积}}$$

◆ 面上原子排列不同，具有明显的各向异性。例如**fcc**晶体的低能面**{111}**等，**bcc**晶体为**{100}**、**{110}**；

◆ 单晶体往往有规则的外形。

◆ 腐蚀坑内表面



小角度晶界的能量

单位长度刃型位错的能量

$$E = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} + E_c$$

E_c 为位错中心能量,

单位面积晶界的能量

$$\sigma = E / D \cdot l$$

D -位错平均间距

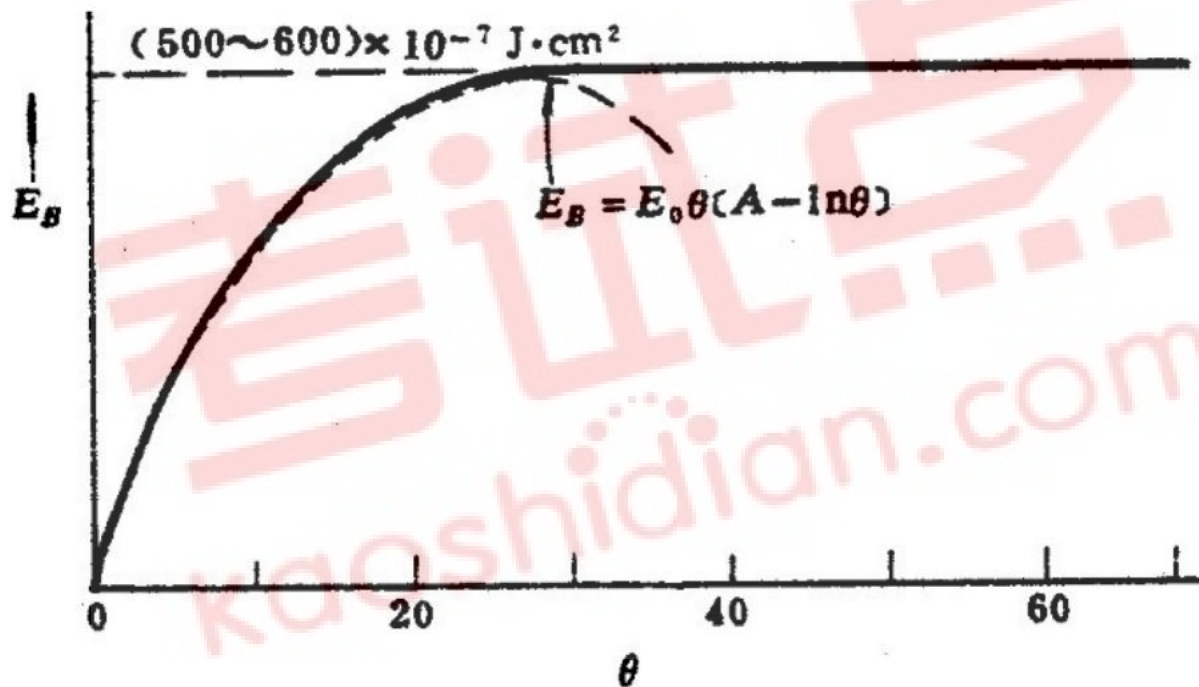
取 $R=D$ $r_0=b$

$$\sigma = \frac{Gb}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{D}{b} + E_c / D$$

因为 $\tan\theta=\theta=b/D$, 上式可转化为

$$E_B = E_0 \theta (A - \ln\theta)$$

晶界能与位向差

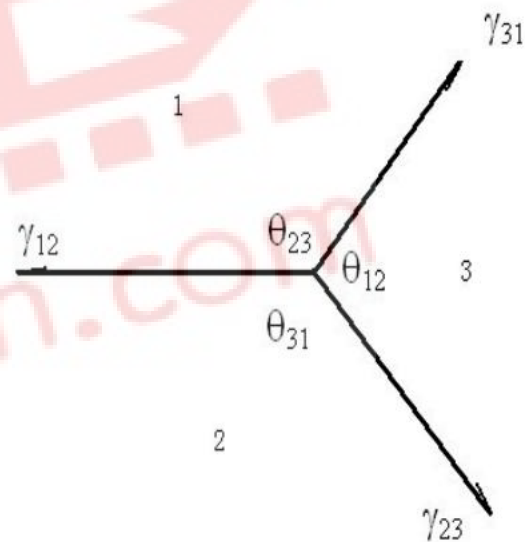


晶界能与位向差 θ 角的关系

晶粒和第二相颗粒的稳定形状

- ◆ 总界面能 = 比界面能和界面面积的乘积
- ◆ 对于非共格大角度界面，比界面能几乎是各向同性的，即常数。
- ◆ 为了降低总的界面能，应该缩小界面面积。弯曲界面趋向于平直化。
- ◆ 界面能影响晶粒和第二相的形状。

三个颗粒交界处的界面张力平衡

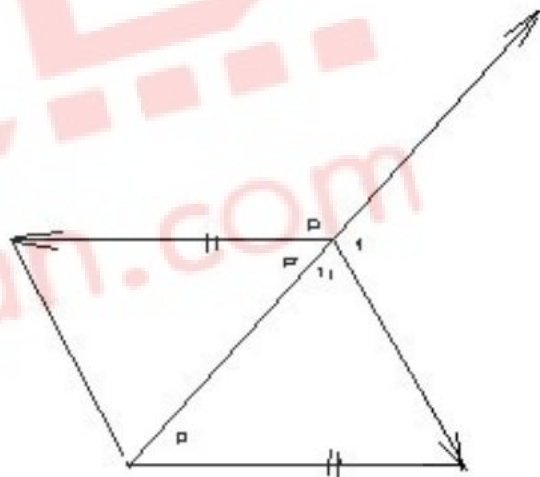


◆ 根据力的平衡关系， γ_{12} 与 γ_{23} 的合力应与 γ_{31} 相平衡。三者可以构成一个三角形

◆ 利用三角形的正弦定理，以及诱导公式

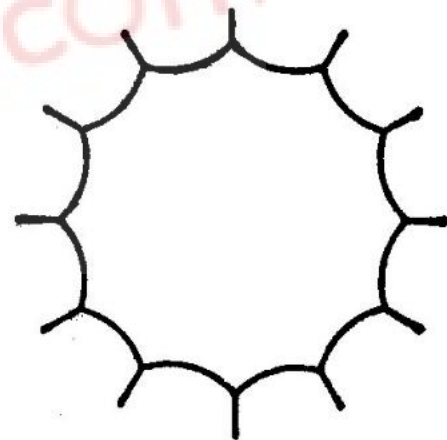
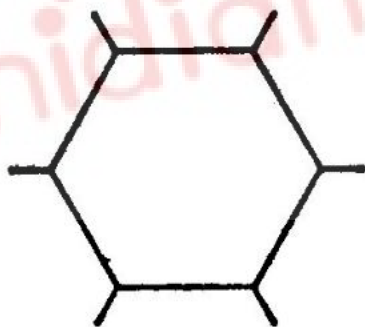
$$\sin(180-\alpha) = \sin \alpha$$

◆ 容易得到以上公式。



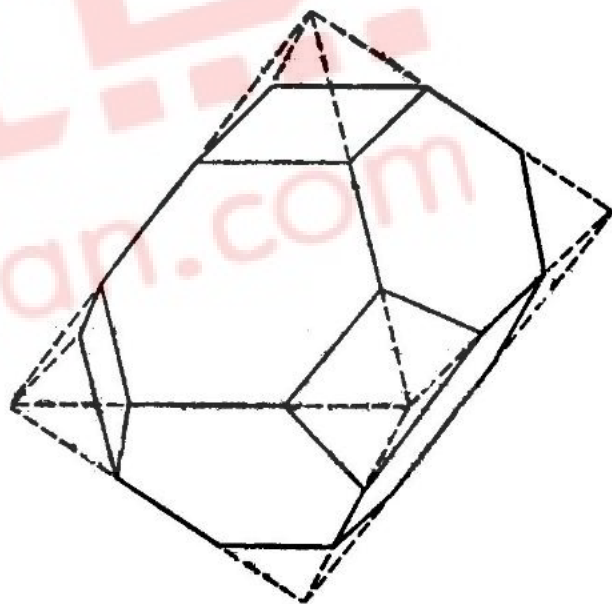
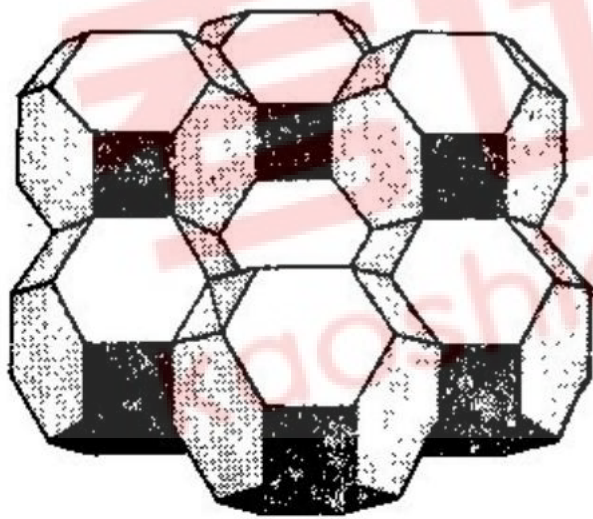
单相合金的二维截面

- ◆ 对于各向同性的大角度晶界，因为界面能恒定，三个角度均为**120**度。稳定性状是**6**边形
- ◆ 加热时小于六边形的晶粒要缩小，直至消失。
- ◆ 大于六边形的晶粒要长大，并逐渐演变为平衡晶粒形貌。



单相合金晶粒的空间形状

◆ 晶粒的空间形状是较多**6**变形表面的多面体



第二相颗粒的形状

- 晶内形成的第二相时，第二相形状取决于两个因素：
 - 基体与第二相的界面能
 - 第二相产生的弹性应变能
- 两相原子尺寸差别 $>5\%$ 时，应变能决定第二相形状，第二相一般为薄片（盘或碟）状。
- 两相原子尺寸差别小时，界面能决定第二相形状，第二相往往为球（等轴）形。
 - ◆ 如果界面能各向同性：球形（面积最小）
 - ◆ 各向异性：（低能面）多面体

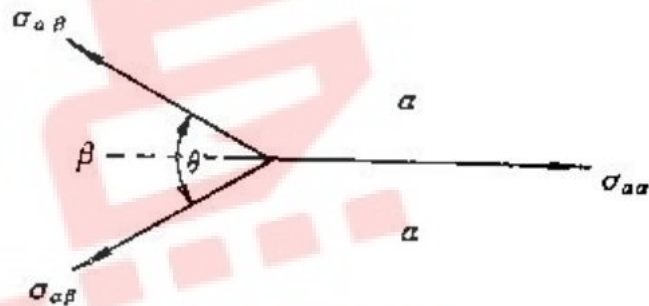
第二相颗粒的形状

◆ 第二相位于晶界上

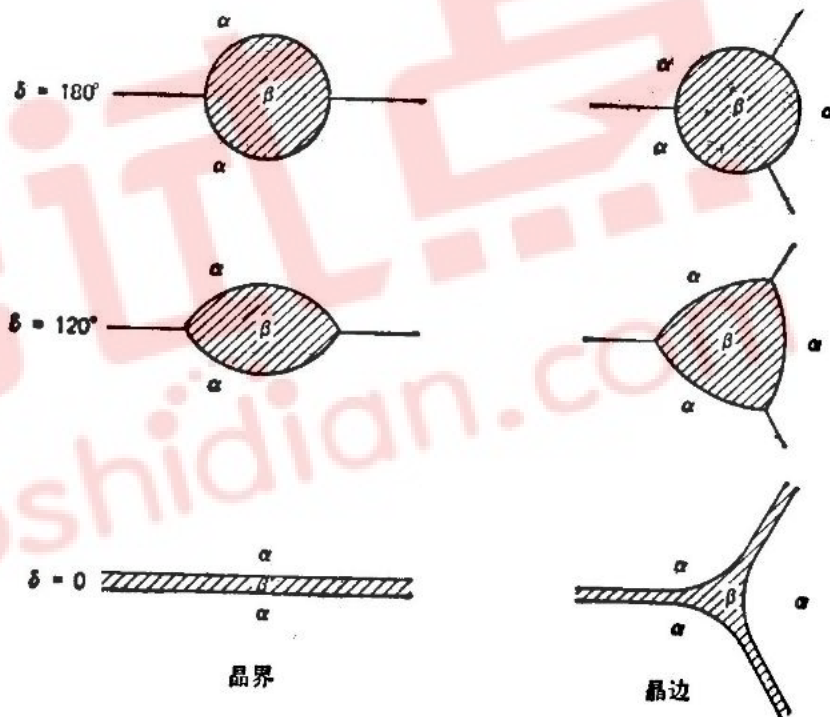
- ◆ 当, $\left\{ \begin{matrix} = \end{matrix} \right\}$ 透镜状;
- ◆ 当, $\gamma_{\alpha\alpha} \left\{ \begin{matrix} << \\ >> \end{matrix} \right\} \gamma_{\alpha\beta}$ 近球状;
- ◆ 当, $\left\{ \begin{matrix} >> \end{matrix} \right\}$ 片状

◆ 第二相位于界棱上(见下图)

- ◆ 当, $\left\{ \begin{matrix} = \end{matrix} \right\}$ 两相界面夹角 **120°** ;
- ◆ 当, $\gamma_{\alpha\alpha} \left\{ \begin{matrix} << \\ >> \end{matrix} \right\} \gamma_{\alpha\beta}$ 两相界面夹角 **180°** (近球状);
- ◆ 当, $\left\{ \begin{matrix} >> \end{matrix} \right\}$ 两相界面夹角 **0°**



第二相颗粒的形状





棱、隅上的第二相形貌与 θ 角的关系

界面偏聚

- ◆ 界面原子化学键不饱和、应变能
- ◆ 溶质原子、杂质原子的吸附可降低界面能
- ◆ 界面原子贫化或偏聚对晶界移动、晶界腐蚀、沿晶断裂、回火脆性及淬透性等有影响

晶界偏聚意义

- a. 纯铁中氧含量增至**0.057%**，由于氧在晶界偏聚降低晶界结合力，脆性转变温度提高至**300℃**以上，**Ni-Cr**合金钢经**250~350℃**回火后脆性增大，是因为**P**（磷）在奥氏体化时在晶界偏聚。
- b. **Ni₃Al**金属间化合物加入**0.1%B**后，**B**在晶界偏聚提高**Ni₃Al**室温塑性
- c. 中、低碳钢中加入**0.0005~0.003%B**可提高淬透性，即是硼（**B**）偏聚在晶界降低奥氏体晶界能，抑制奥氏体分解时的先共析铁素体形成

◆ End of chapter 2