

# 6. 位错

## 引言

- 学习本章的意义：  
晶体非完整性/力学性能与缺陷密度的关系；
- 位错理论形成；理论、实际强度的差异；
- 位错与其它章节的联系；
- 本章讨论的内容；

## 6.1 单晶体滑移

塑性变形方式；

- 滑移要素-滑移系的概念

滑移：

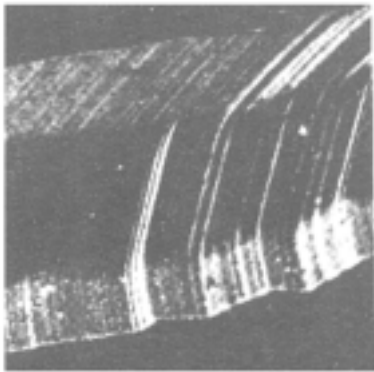
外力作用下晶体沿特定晶面和晶向相对滑开的形变方式。

表 6-1 三种典型结构金属的滑移要素

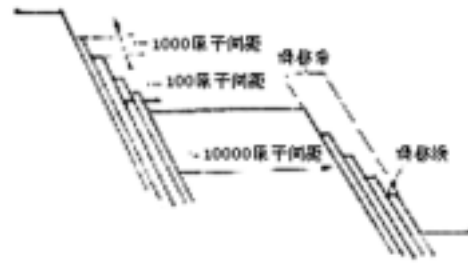
结构	金属	滑移面	滑移方向	<i>c/a</i>
fcc	Al	{111}	$\langle \bar{1}0\bar{1} \rangle$	
	Cu			
	Ag			
	Au			
	Ni			
bcc	$\alpha$ -Fe	{110}{211}{321}	$\langle \bar{1}\bar{1}1 \rangle$	
	Mo	{211}		
	W	{211}		
	K	{321}		
	Nb	{110}		
hcp	Mg	{0001} {10 $\bar{1}$ 0}	$\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$	1.623
	Cd	{0001}		1.886
	Zn	{0001}		1.856
	Be	{0001}		1.586
	Ti	{10 $\bar{1}$ 0} {0001} {10 $\bar{1}$ 1}	$\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle \langle 11\bar{2}3 \rangle$	1.587
	Zr	{10 $\bar{1}$ 0} {0001} {10 $\bar{1}$ $\bar{1}$ }		1.593

# 滑移带和滑移线

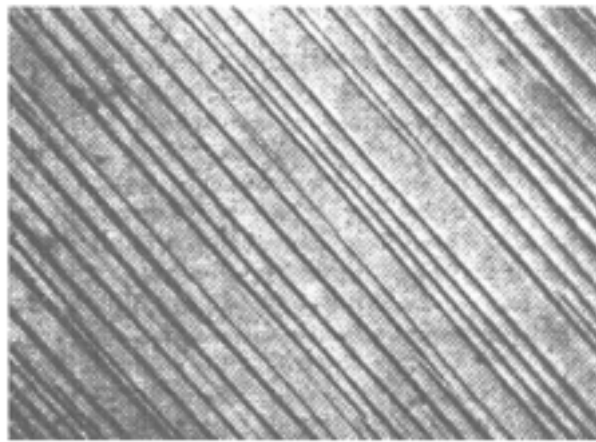
滑移的不均匀性



(a)



(c)



(b)

滑移变形

(a) 形变钴单晶  
(SEM)

(b) 7% 形变的铝表面  
(光学镜)

(c) 滑移带示意图

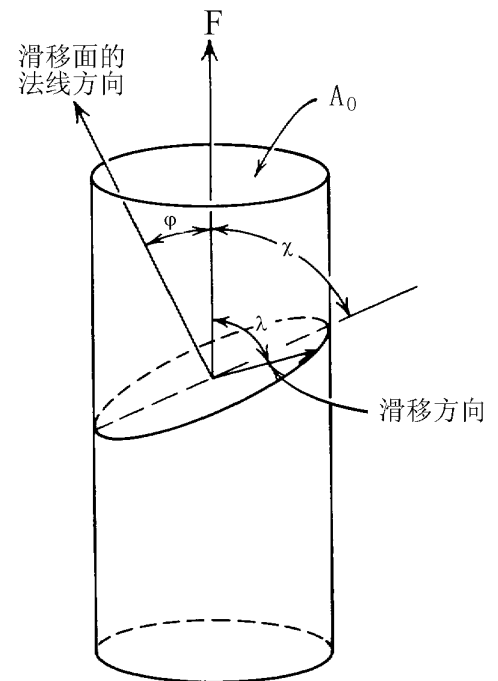
## Schmid定律

滑移面滑移方向上的力？

$$\tau = \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cos \varphi = m \sigma$$

取向因子

拉伸力在滑移系上的分切应力



## 临界分切应力定律

$\tau_c$ 为常数，  
与力轴方向无关；



双曲线分布  
说明所需分切应力为常数

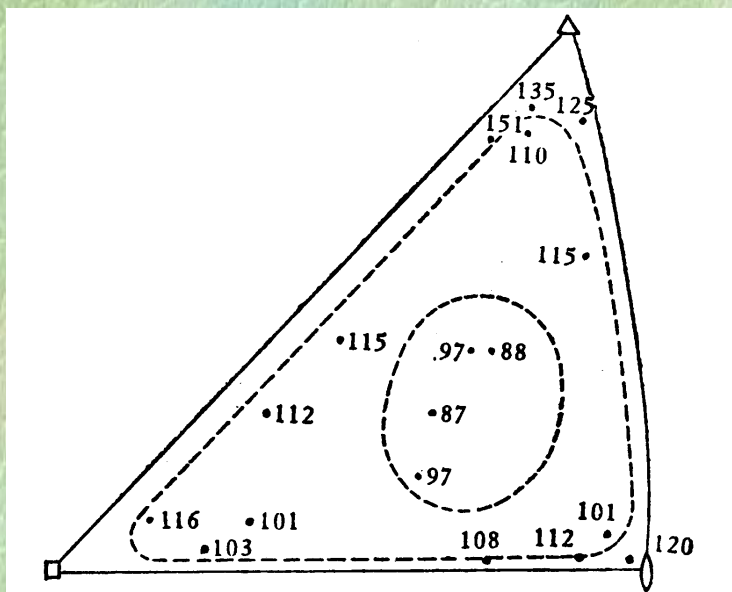
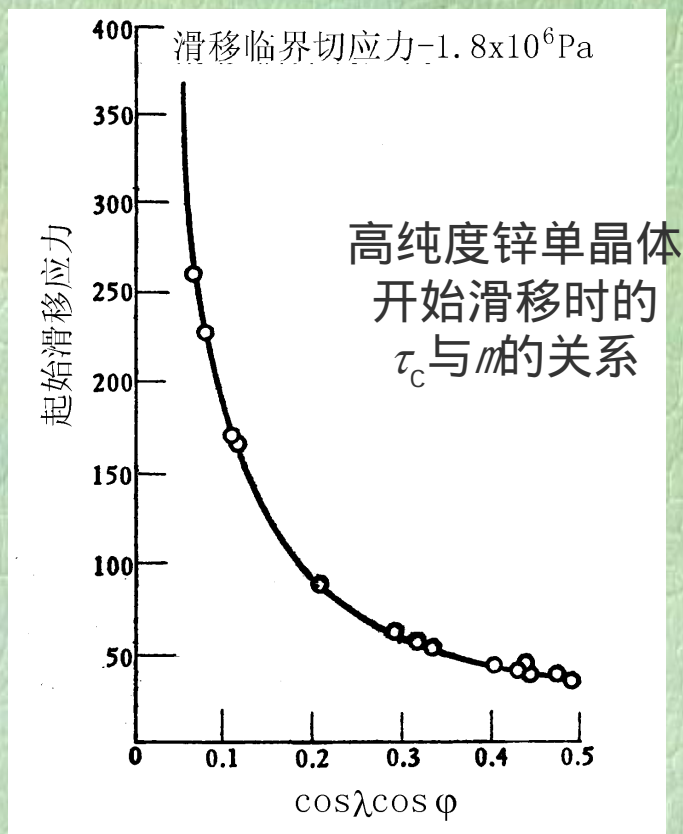
## 成立条件

fcc：单系滑移；

bcc: 一般不适用;

(因特殊位错核心结构) ;

hcp: 一般成立;



铜单晶 $\tau_c$ 与外力取向的关系(图中数字单位:  $\text{g/mm}^2$ )

## 6.2 位错基本概念

### •理论切变强度的估算

周期性  $\tau = \tau_c \sin \frac{2\pi x}{b}$

胡克定律  $\tau = \mu\gamma$

$$\mu \frac{x}{a} \approx \tau_c \frac{2\pi x}{b}$$

$$\tau_c \approx \frac{\mu b}{2\pi a}$$

$$\tau_c \approx \frac{\mu}{2\pi}$$



实测的切变强度比理论切变强度低2~4个数量级。



不是整体刚性相对滑动

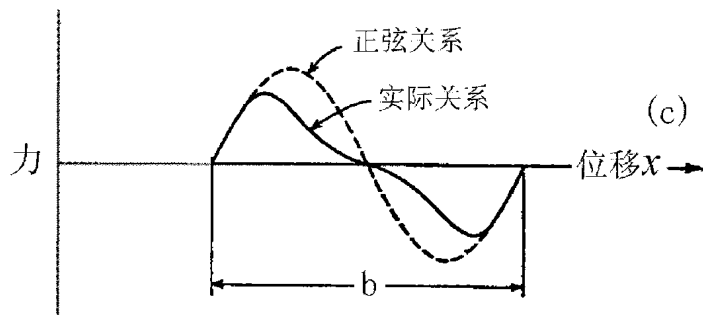
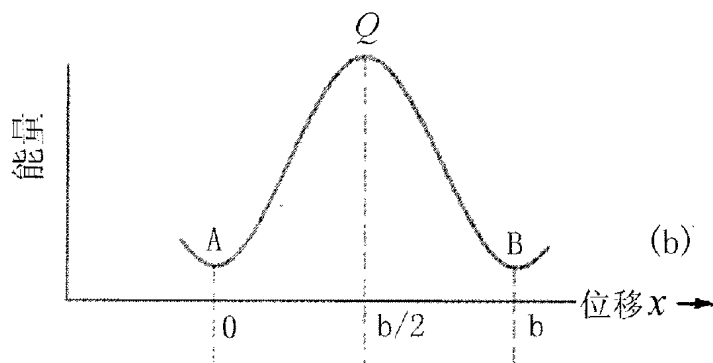
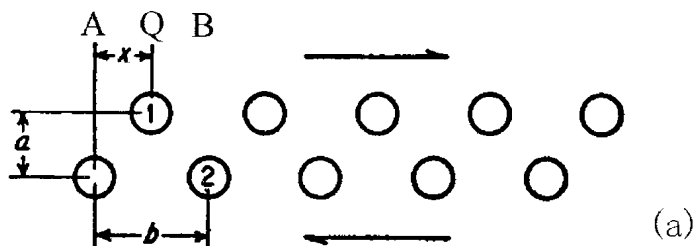
### •位错概念的引入

已滑动区域与未滑动区域原子位置无变化；

所需力仅用在过渡区

已滑移区与未滑移区的交界；

位错

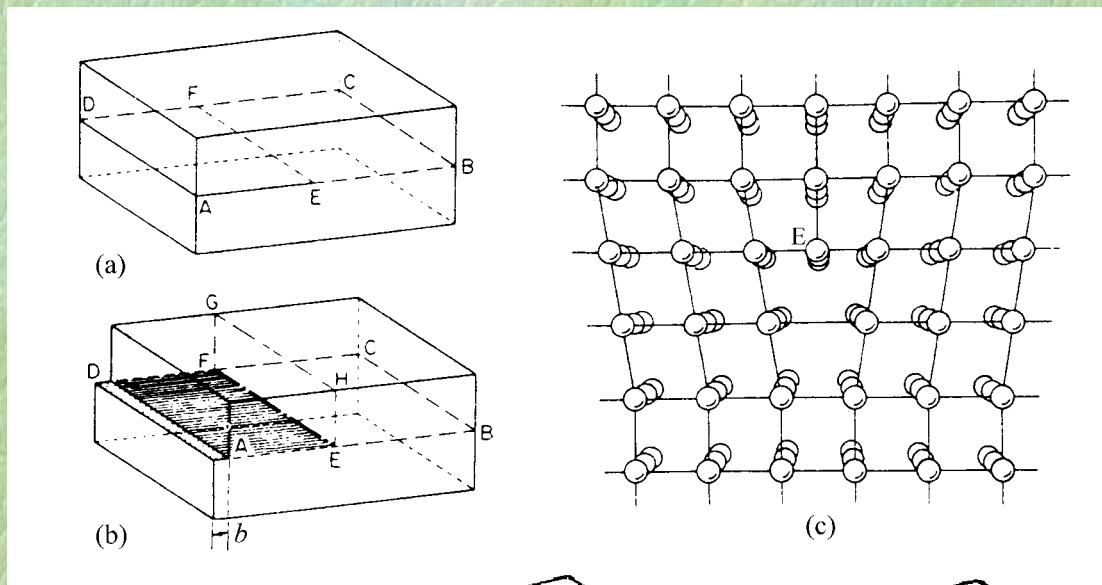


(a)形变前滑移面两侧原子的排列；  
(b)原子处于不同位置的能景；  
(c)原子所受的恢复力

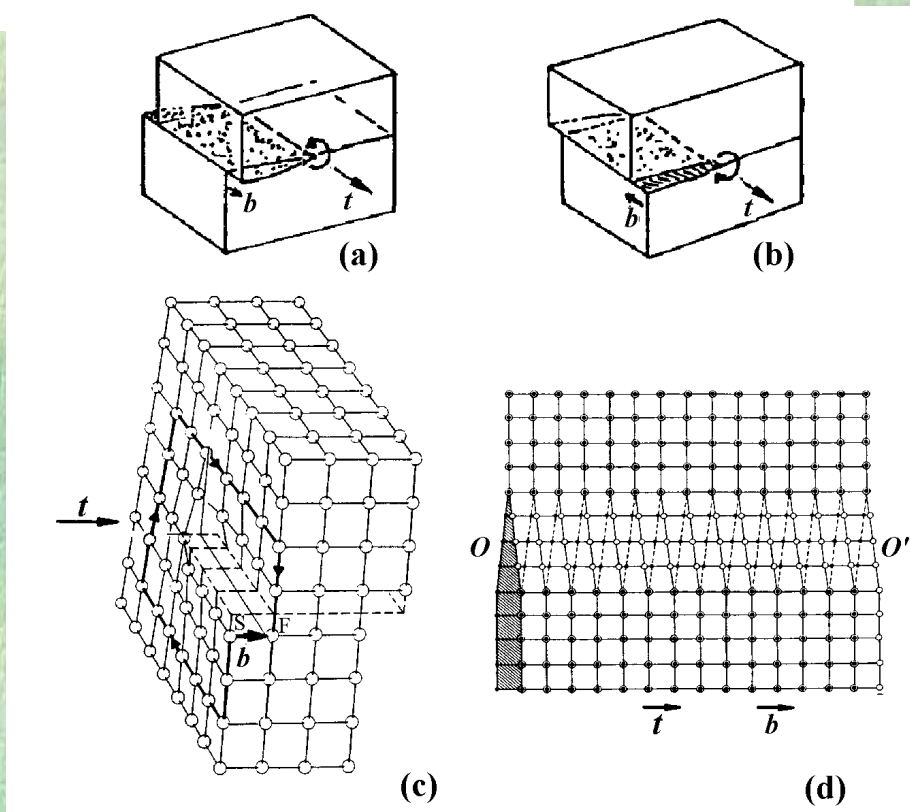
## 6.3 位错的几何形态

滑移区与未滑移区交界（位错）的几何形态？

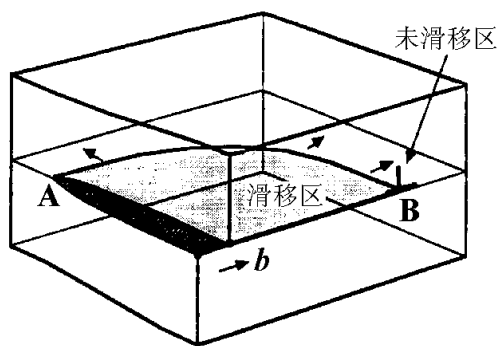
### •刃位错



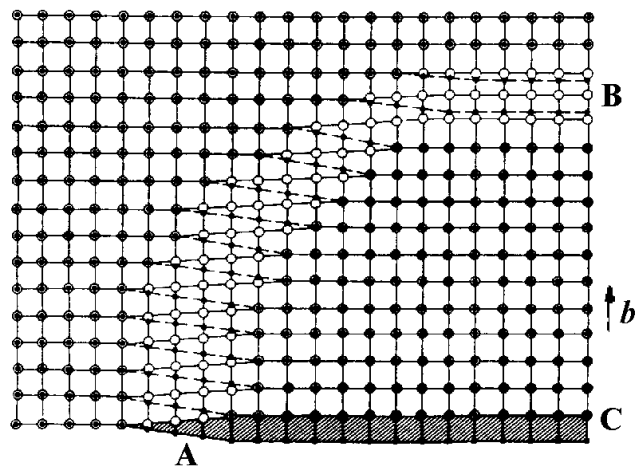
### •螺位错



## •混合位错



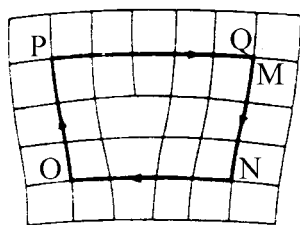
(a)



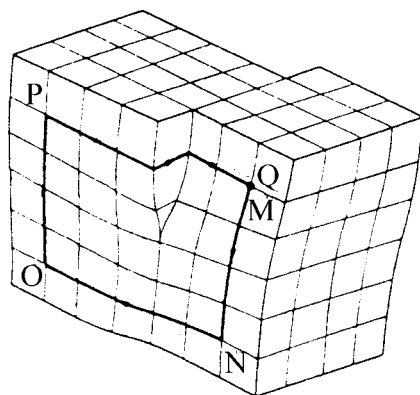
(b)

## •柏氏回路 及柏氏矢量

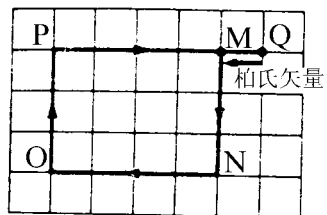
### 柏氏矢量的 确定



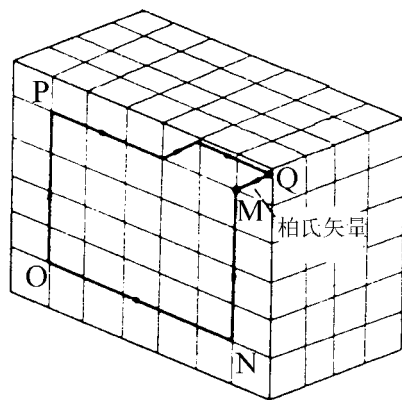
(a)



(c)



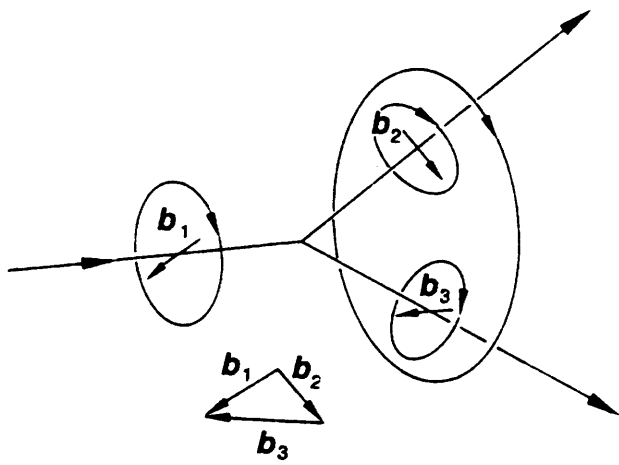
(b)



(d)

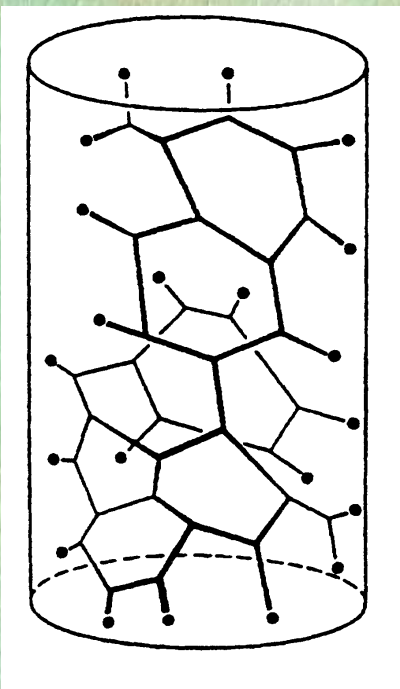
## 重要概念：

- (1) 一根不分岔的位错线不论形状如何变化，只有一个恒定的柏氏矢量。
- (2) 一位错线不能终止在晶体内部，只能终止于晶体表面或晶界；若它终止在晶体中部，它必和其他位错线相连接，相交于一个接点，或自成封闭的位错环。
- (3) 汇聚在一点的各位错线，如果从汇聚点向外的方向定为正向，则它们的柏氏矢量总和为零，类似于电路中的Kirchoff定律。



汇聚在一结点的3根位错  
及柏氏矢量守恒的说明

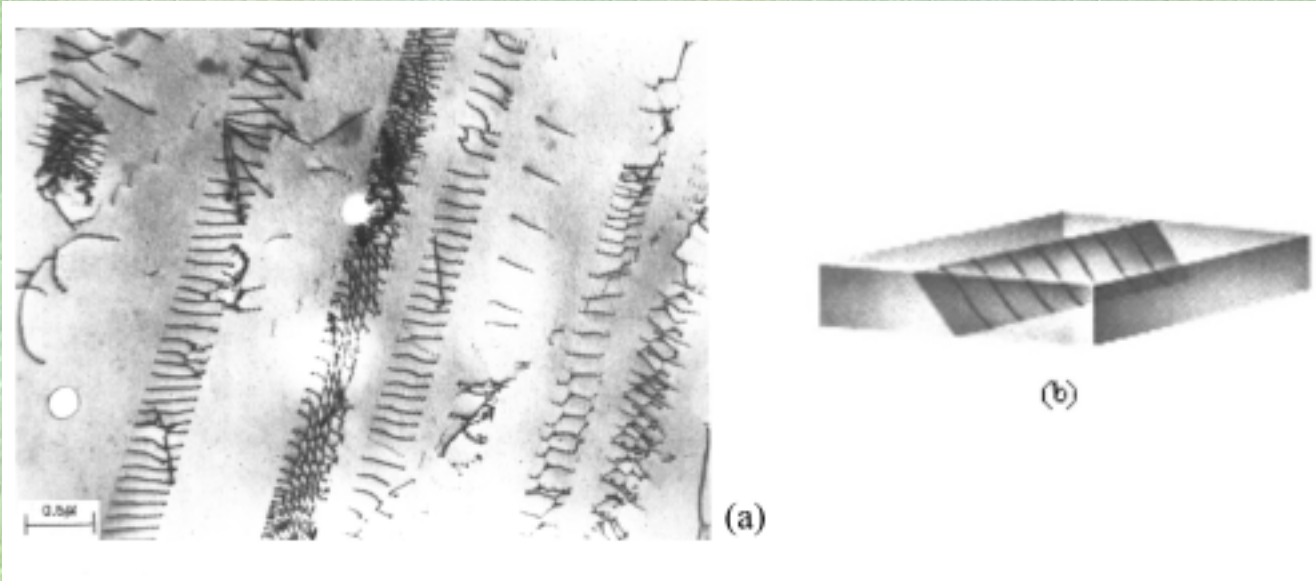
$$b_1 = -(b_2 + b_3) \rightarrow \sum b_i = 0$$



位错密度 $\rho$ ：  
表达及重要性

位错网络排列示意图

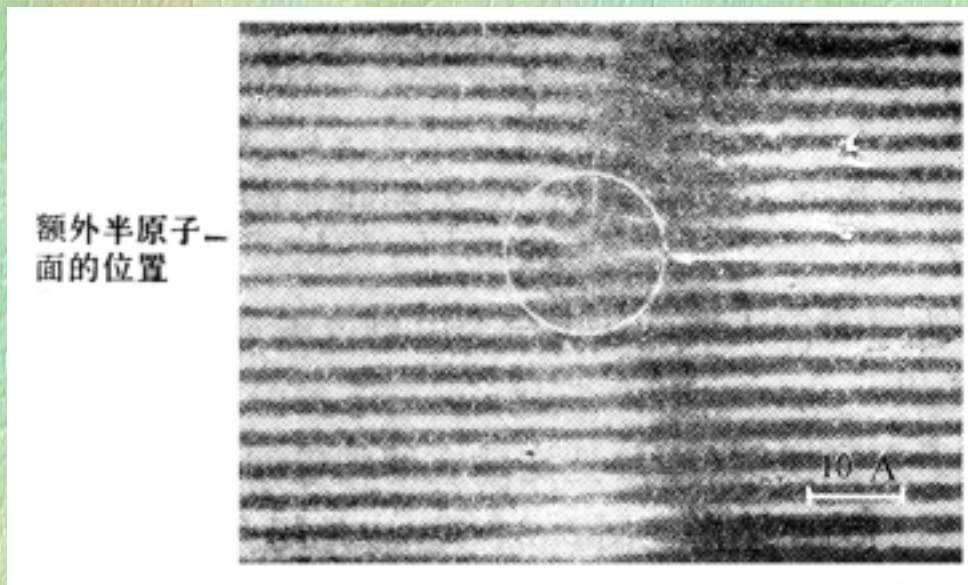
## •位错的观察



用TEM观察位错

(a) 18Cr-8Ni 不锈钢薄膜中的平面排列的位错；

(b) 在薄膜中排列在滑移面上的位错的示意图



锺晶体中位错的电子显微镜图象

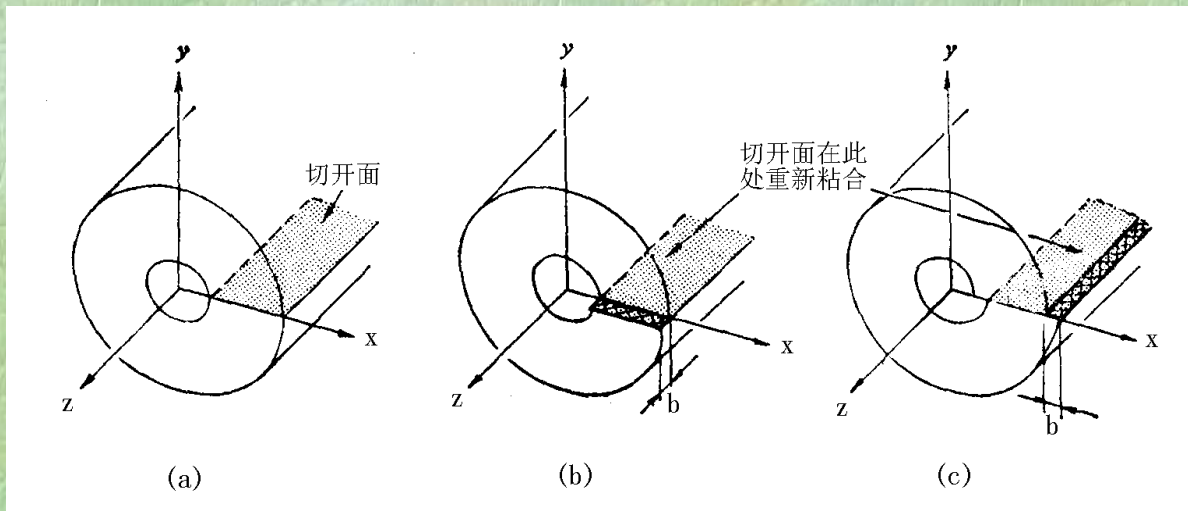
## 6.4 在弹性介质中的位错

分析意义：

位错线是局部畸变区，必有弹性应变场及应变能，会与其它缺陷发生交互作用。

条件：各向同性介质。

### 6.4.1 直位错的应力场



#### • 直螺位错的应力场

柱坐标下  $\gamma_{z\theta} = \frac{b}{2\pi r} \quad \tau_{z\theta} = G\gamma_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r}$

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

直角坐标系下

$$\tau_{xz} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \quad \tau_{yz} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2}$$

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

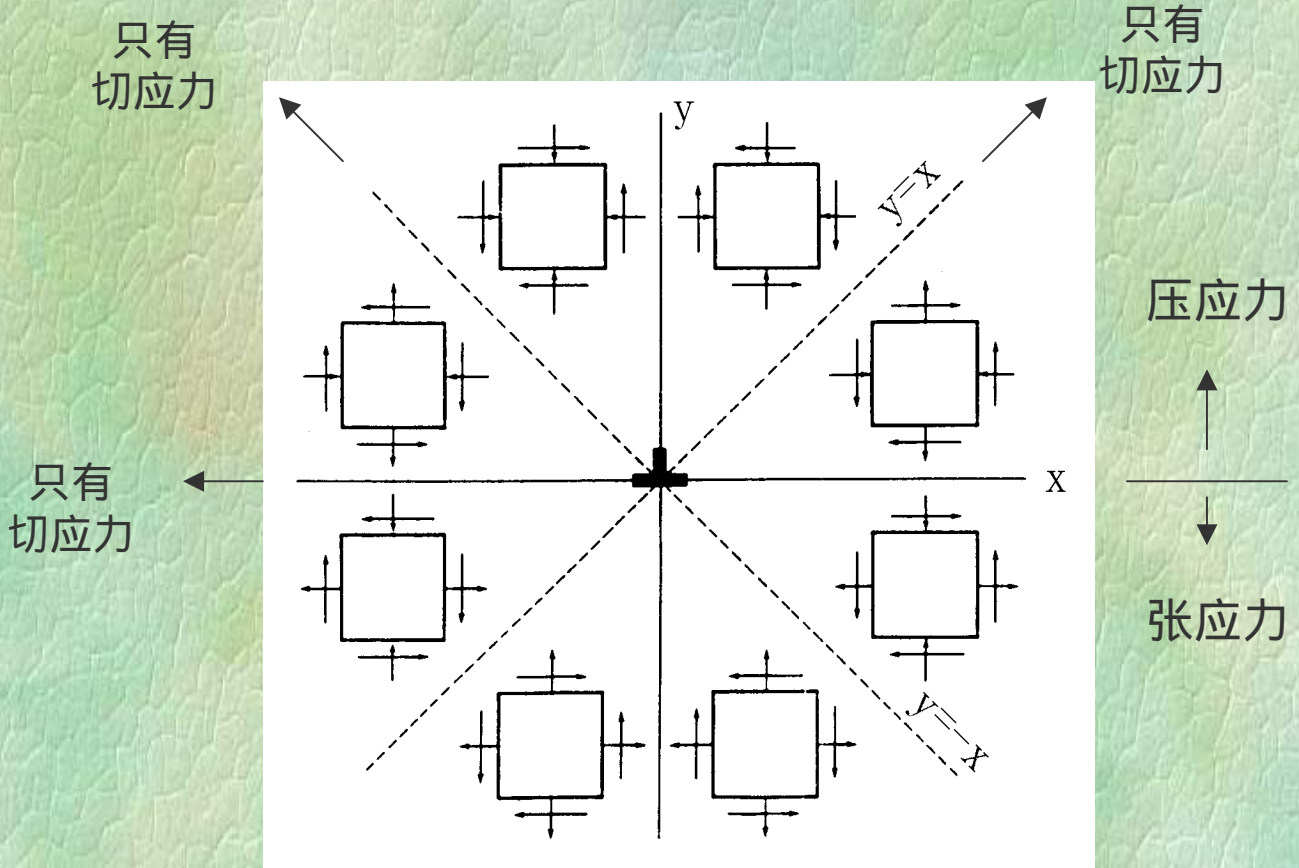
特点：  
纯切应力场

## •直刃位错的应力场

$$\sigma_{xx} = -Dy \frac{(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad \tau_{xy} = Dx \frac{(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

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

两侧应力对称



正刃位错周围的应力场的正值和负值的分布

## 6.4.2 位错线的能量

单位长度； $E_{\text{el}} + E_{\text{core}}$

$$E_{\text{el(S)}} = 2\pi \int_{r_0}^R w r dr = 2\pi \int_{r_0}^R \gamma_{z\theta} \tau_{z\theta} r dr$$

$$E_{\text{el(R)}} = \int_0^1 \int_{r_0}^R \frac{Gb^2 \alpha}{2\pi(1-\nu)} \frac{d\alpha dx}{x} = \frac{1}{2} \int_{r_0}^R \frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} \frac{dx}{x}$$

$$= \frac{Gb^2}{4\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}$$

螺位错

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

刃位错

## 6.4.3 位错受力

(1) 位错所受的机械力

一般表达式：

$$F_i = \sum_{j=x}^z \sum_{m=x}^z \sum_{k=x}^z \varepsilon_{ijk} \sigma_{jm} b_m l_k$$

或

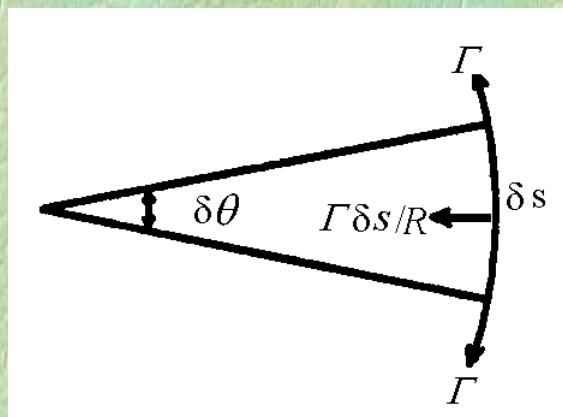
$$F_{12} = (\sigma_2 \cdot b_1) \times t_1$$

Peach-Koehler公式

(2) 位错的线张力

$$F \delta s = \tau_g b \delta s = \Gamma \frac{\delta s}{R}$$

$$\tau_g = \frac{\Gamma}{bR} = \frac{kGb}{R}$$



### (3) 位错所受的化学力（渗透力）

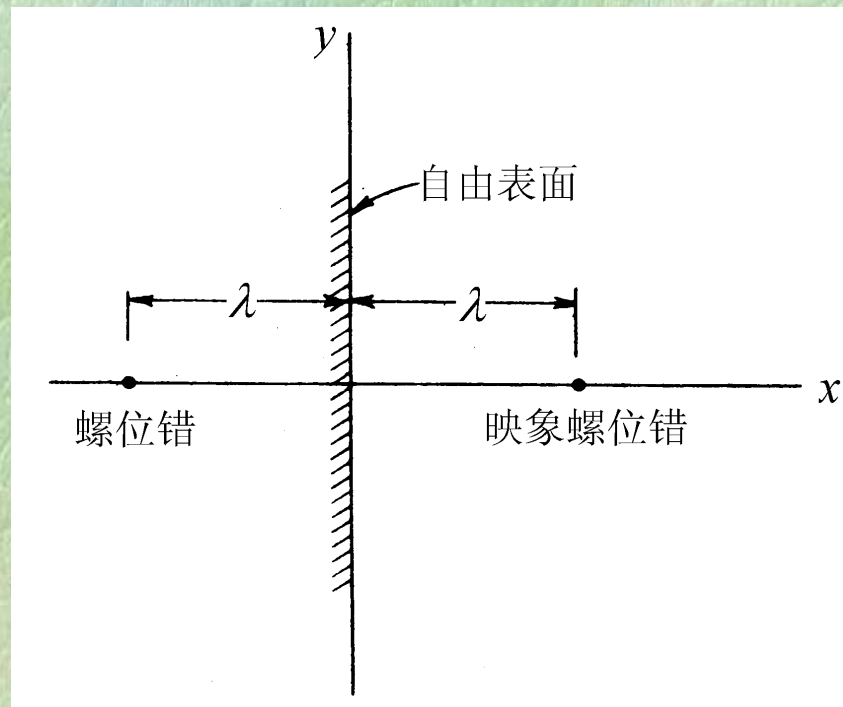
来自：过饱和空位；

计算：

$$F_s = \frac{bkT}{\Omega} \ln \frac{c}{c_0} \approx \frac{kT}{b^2} \ln \frac{c}{c_0}$$

### (4) 映像力

来源：  
表面/界面的吸引。



$$E_{cl} = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{\lambda}{r_0}$$

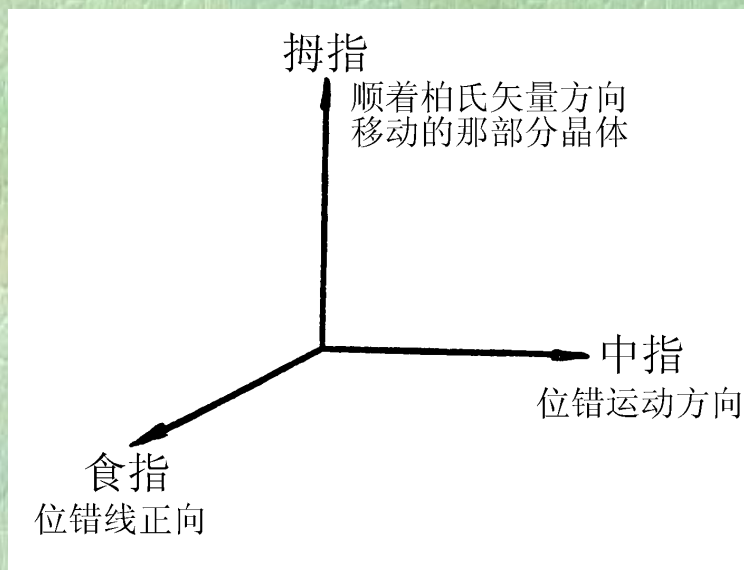
$$F_{im} = \frac{\partial}{\partial \lambda} E_{cl} = \frac{Gb^2}{4\pi\lambda}$$

靠近自由表面的螺位错所受映像力

## 6.5 位错运动

位错运动的本质  
是塑性变形。

判定晶体滑动方向  
(右手定则)



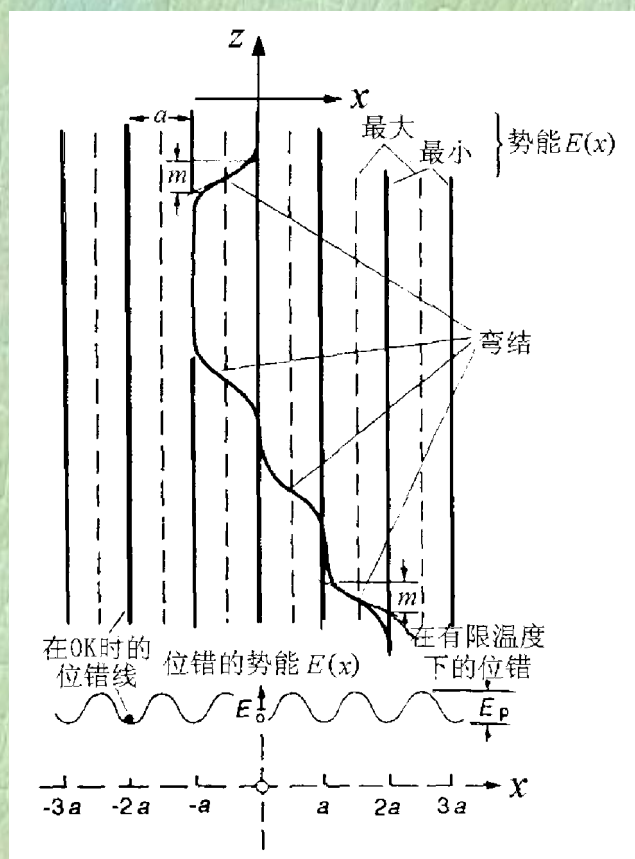
### 6.5.1 位错滑动和滑移

晶格阻力  $\tau_p = \frac{2\pi}{b^2} E_p = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(-\frac{4\pi\zeta}{b}\right) = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(-\frac{2\pi a}{b(1-\nu)}\right)$

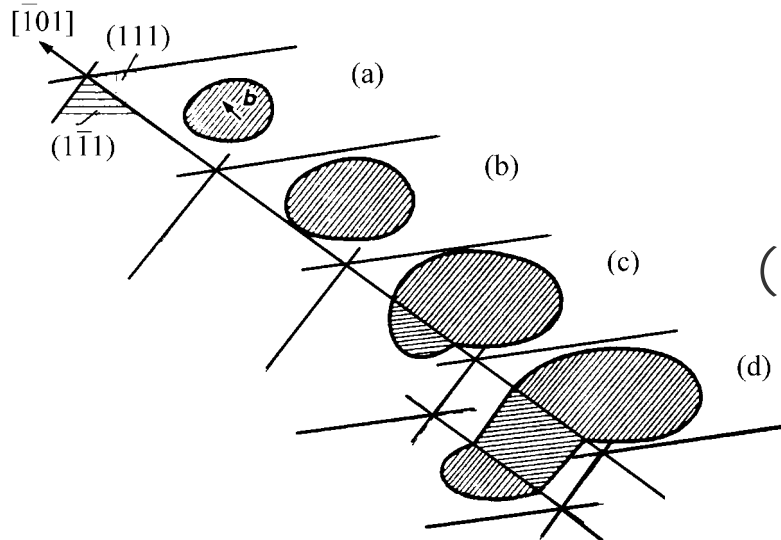
该式的意义：  
滑移总发生在密排面。

实际滑动过程 

右图：  
因 $E_p$ 使位错线势能  
随位错线位置改变。



## 6.5.2 交滑移



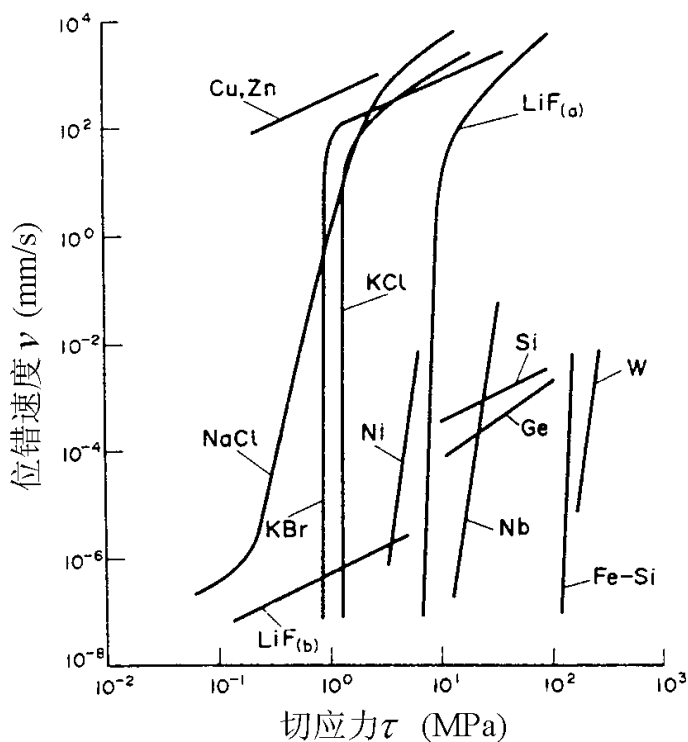
左图：f.c.c金属中的交滑移，柏氏矢量平行于(111)面和(1-11)面的交线 $[-101]$

## 6.5.3 位错的滑移速度

影响因素：  
应力、  
温度、  
纯度等。

低速运动时：

$$v = \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^m$$



上图：各种晶体中位错速度 $v$ 与外加切应力的关系<sup>14</sup>

## 6.5.4 位错攀移

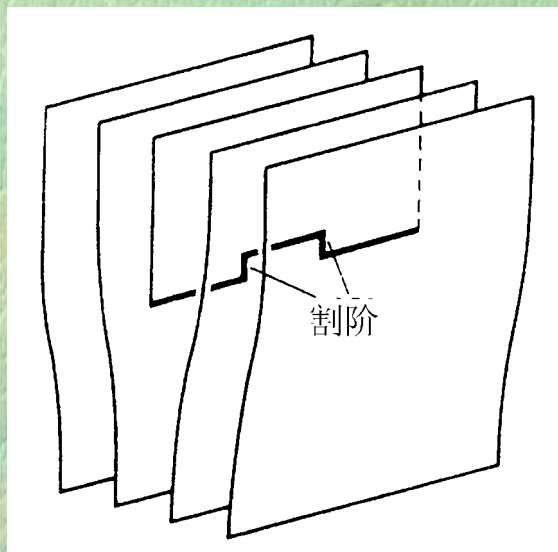
本质

伴随点缺陷的形成。

$$v = bC_j v_j$$

$$v = D_s C_j \left[ \exp\left(\frac{F_c b^2}{kT}\right) - \exp\left(\frac{F_s b^2}{kT}\right) \right]$$

攀移过程由扩散过程控制，攀移速度很慢。



上图：刃位错上的割阶

•位错运动引起的塑性变形（量）

$$\gamma = \frac{Ldb}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3} = \frac{L}{V} db = \rho_v db$$

$$\dot{\gamma} = \rho_v vb$$

## 6.6 位错的产生和增殖

•位错的起源

“籽晶”中本来就存在。

凝固界面不同部分碰挤产生。

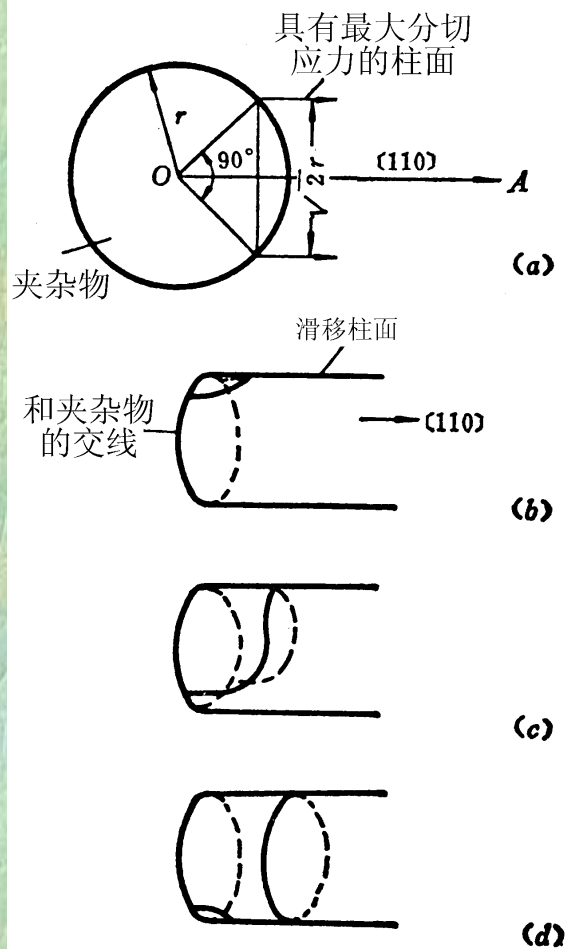
在杂质颗粒或在很大的温度梯度区域因热收缩不同产生。

材料之间外延时接触产生的点阵错配引起。

急冷或受辐照的材料中的过饱和空位或间隙原子萌生。

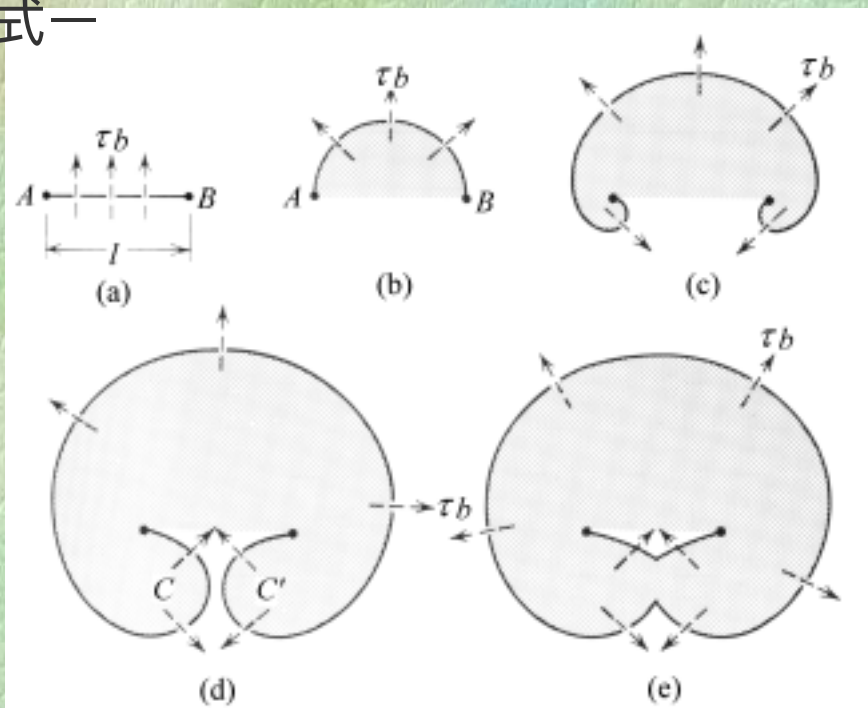
## 6.6.2 在应力集中处位错的非均匀形核

刚性球形夹杂  
与基体界面上萌  
生位错的示意图



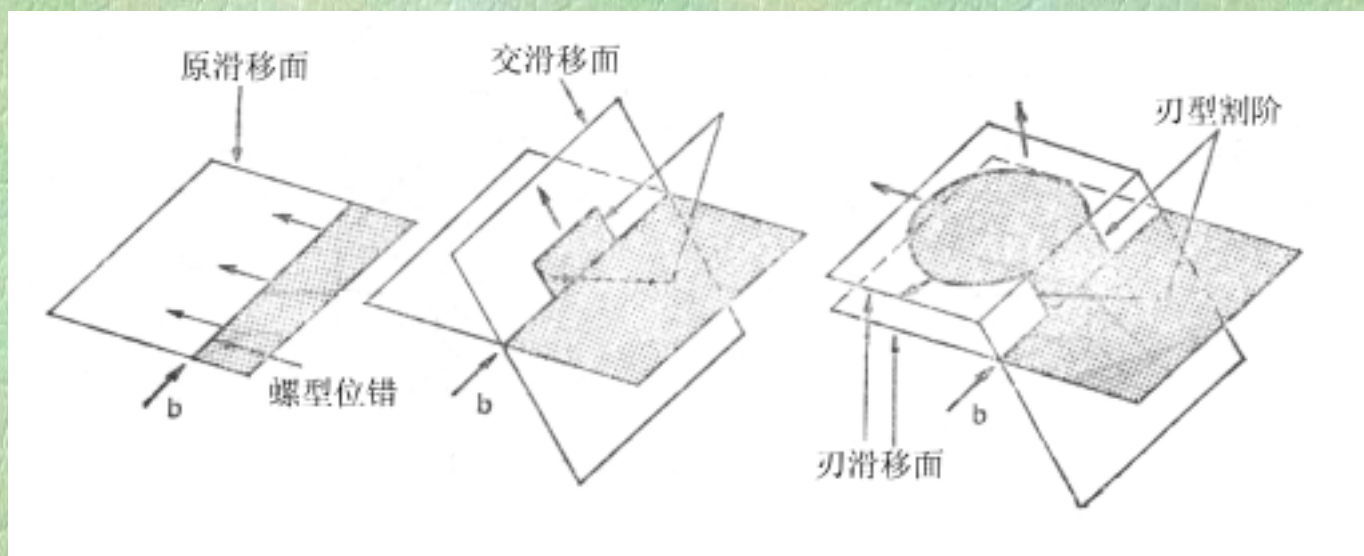
## 6.6.3 位错的增殖

增殖方式一



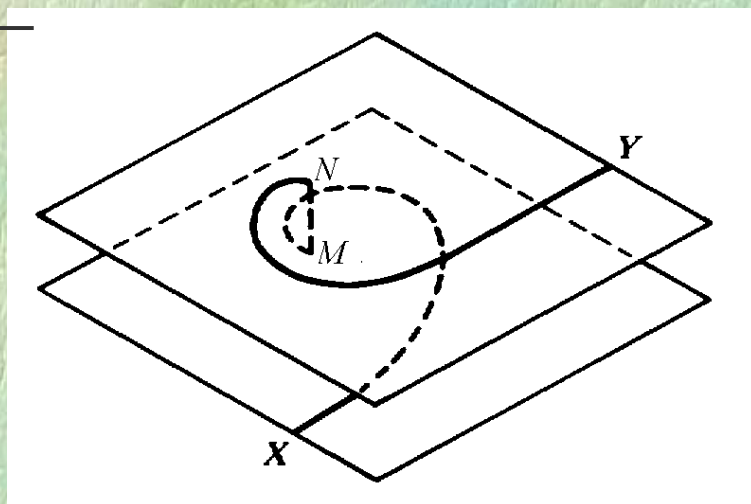
F-R位错源增殖位错的示意图

## F-R源的形成



螺位错双交滑移形成F-R源

## 增殖方式二

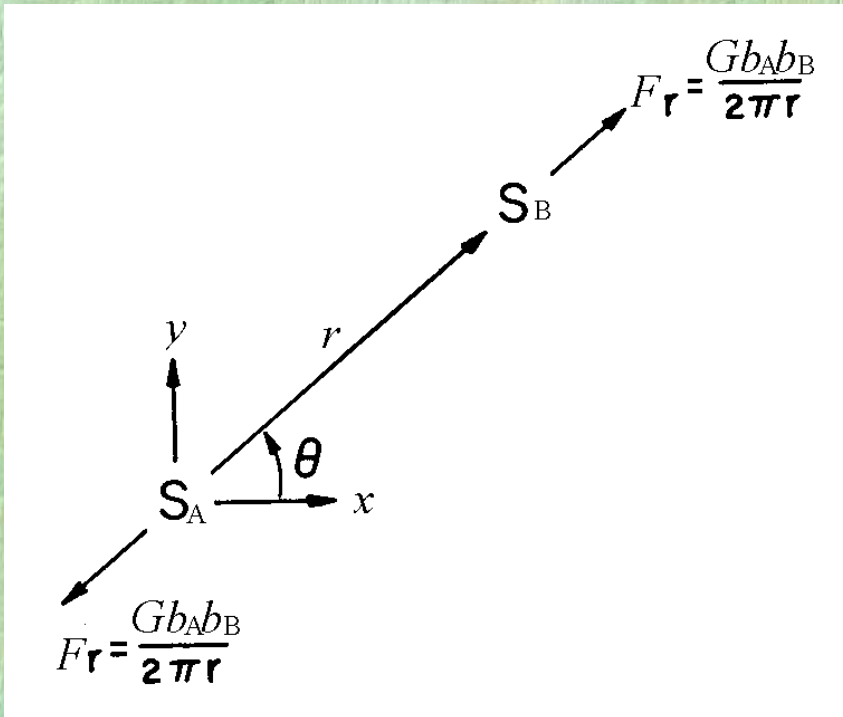


大割阶 $MM$ 两端的位错 $NY$ 、 $MX$ 各自运动

## 6.7 在整体中的位错

### 6.7.1 位错间的长程交互作用

- 两平行螺位错间的交互作用



两平行螺位错  
的交互作用

$$F_{BA} = (\sigma_A \cdot b_B) \times t_B$$

$$F_x^{A \rightarrow B} = (\tau_{yz})_A b_B = \frac{Gb_A b_B}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2}$$

$$F_y^{A \rightarrow B} = (\tau_{xz})_A b_B = \frac{Gb_A b_B}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}$$

## • 2平行刃位错间的交互作用

$$F_x^{A \rightarrow B} = (\tau_{xy})_A b_B = \frac{Gb_A b_B}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

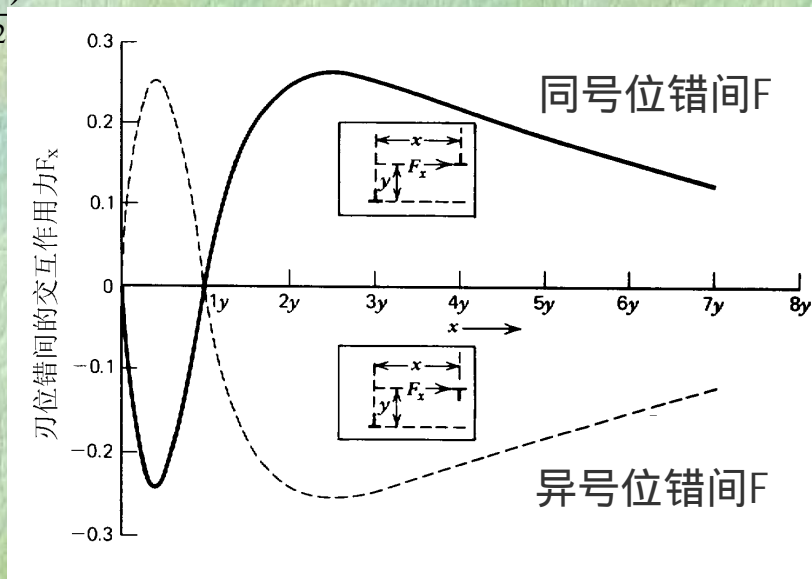
$F_x$  单位是  $Gb^2/2\pi(1-\nu)y$

$$F_y^{A \rightarrow B} = \frac{Gb_A b_B}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$F_x = \frac{\mu b_A b_B}{2\pi(1-\nu)y} \frac{n(n^2 - 1)}{(n^2 + 1)^2}$$



导致



两平行刃位错的稳定位置

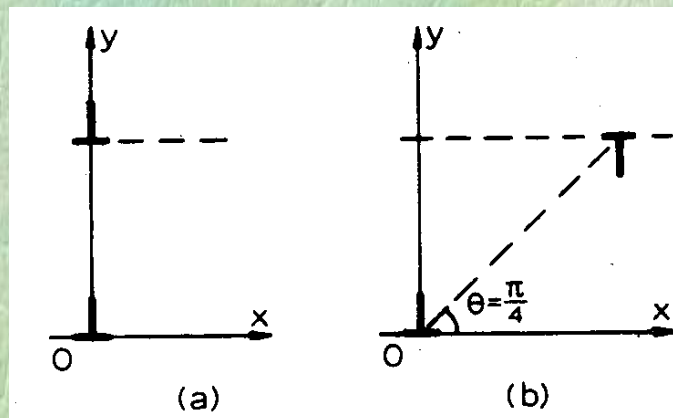
(a) 同号位错；

(b) 异号位错；

意义：

使能量降低；

构成小角晶界；



• 平行螺位错和刃位错的交互作用  
无交互作用。

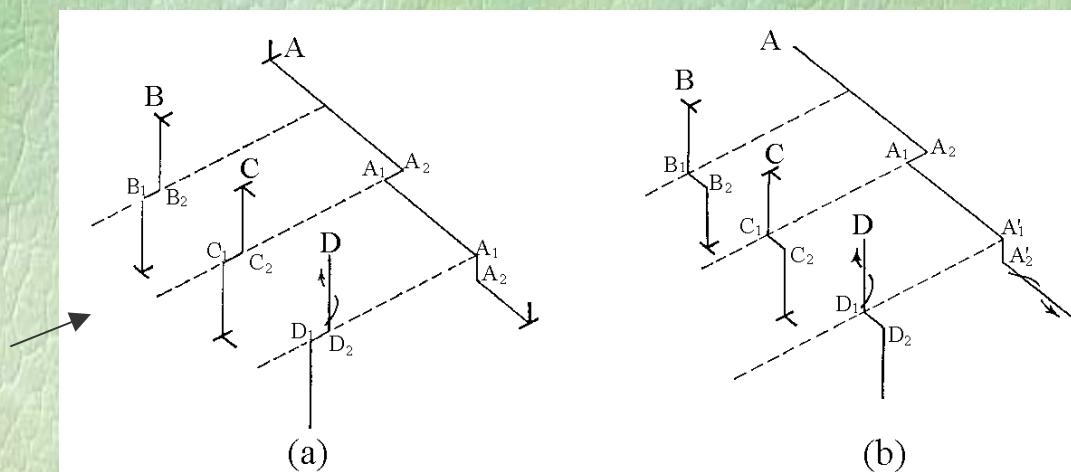
## 6.7.2 位错间的短程交互作用

### •割阶

要点：2位错交割后，必在对方留下和自身柏氏矢量 $b$ 大小和方向相同的一小段位错。

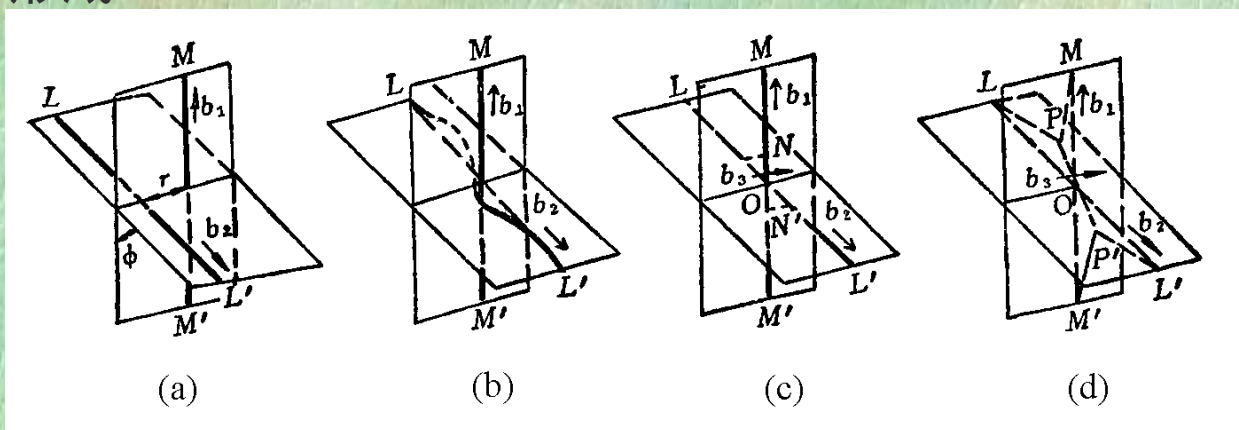
弯结？  
割阶？

位错交截  
的例子



### •会合位错

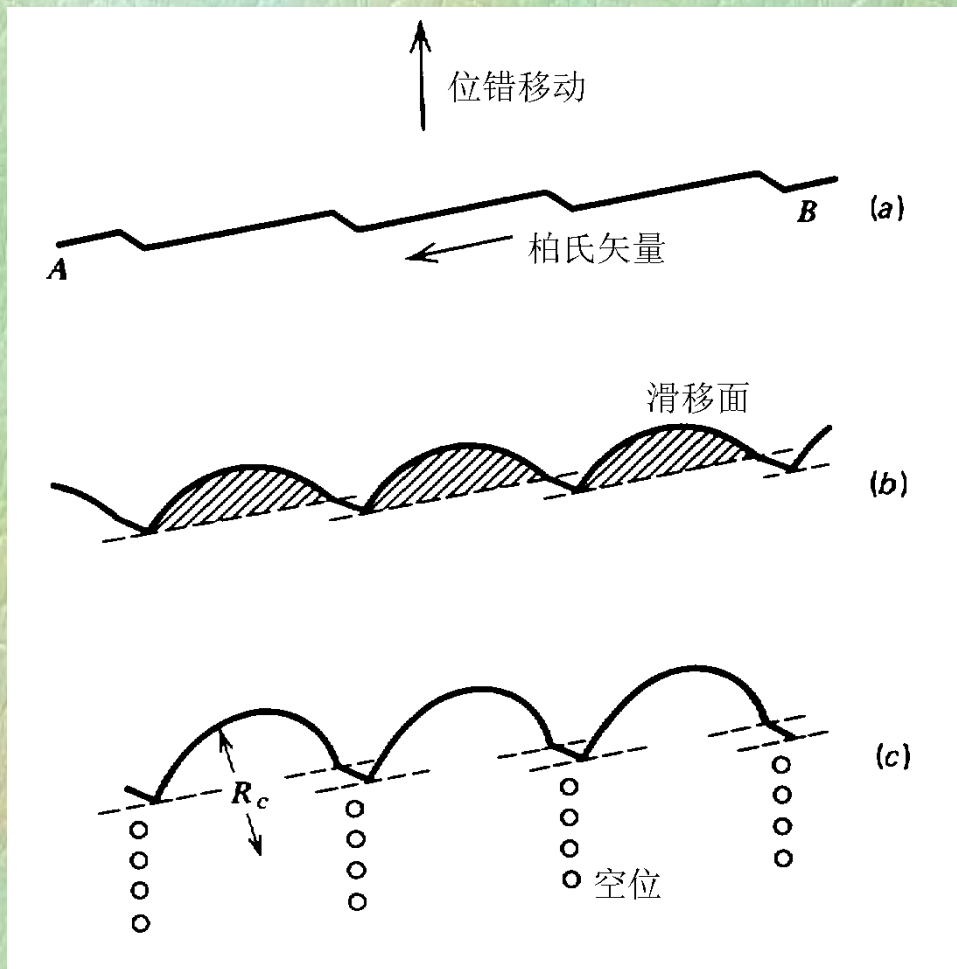
形成



会合位错形成的示意图

影响：增加位错交割的阻力。

### 6.7.3 带割阶的位错的滑移



上图：带割阶的位错运动

(a)带割阶的位错；

(b)在切应力作用下位错在滑移面弯曲；

(c)位错运动，在割阶后留下一串空位  
(或间隙原子)

## 6.7.4 位错塞积群

•第J个位错受力：

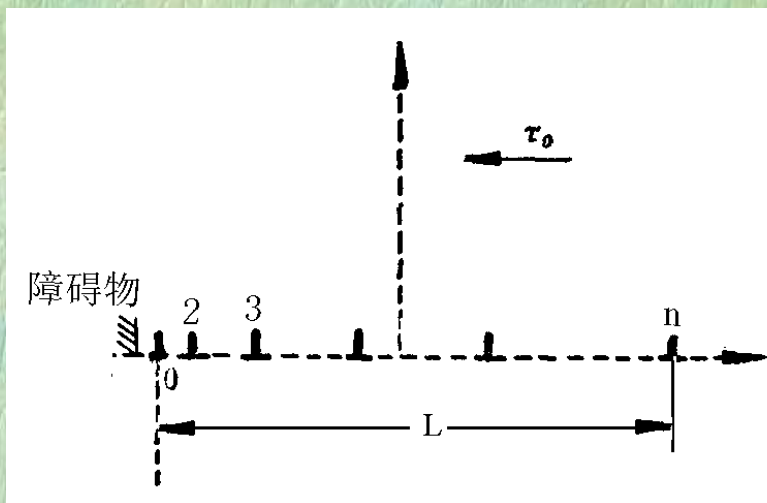
$$F_j = \frac{Gb^2}{2\pi K} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \frac{1}{x_j - x_i} + \tau_0 b$$

•塞积群中的位错数目：

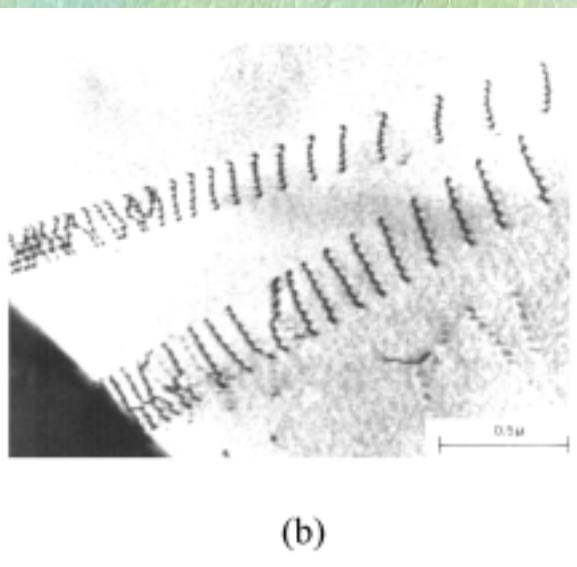
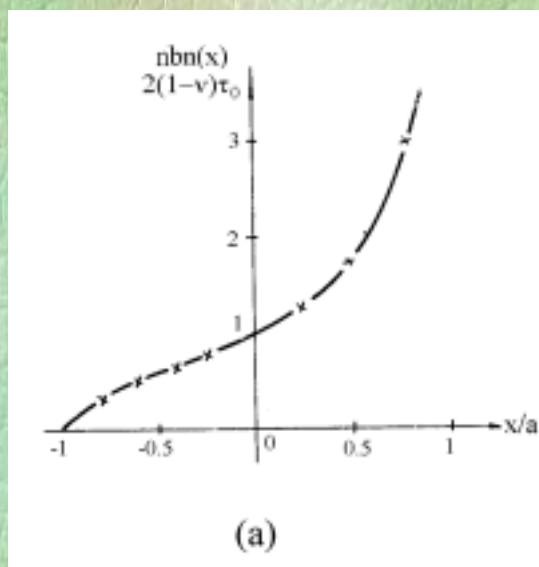
$$n = \int_{-a}^a n(x) dx = \frac{\pi(1-\nu)L\tau_0}{Gb}$$

•塞积群产生的应力集中

$$\tau = n\tau_0$$



外加切应力  $\tau_0$  作用下  
位错在障碍物前塞积

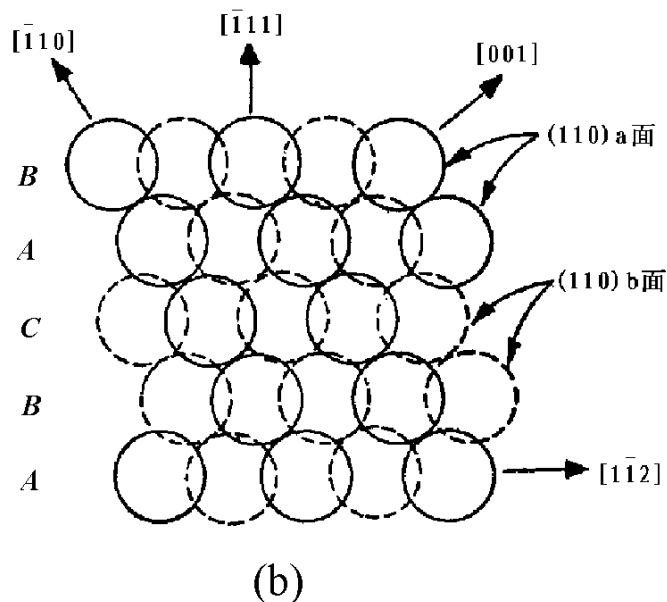
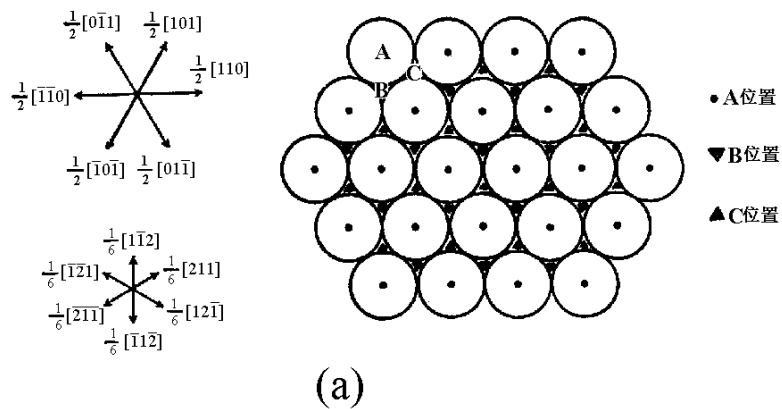


位错塞积群: (a)塞积群的位错密度分布；  
(b)不锈钢中在晶界前的位错塞积群

## 6.8 特殊晶体结构中的位错

### 6.8.1 fcc金属

#### •堆垛及堆垛层错



面心立方 $\{111\}$ 面堆垛的说明

(a)  $(-111)$ 原子排列示意图；

(b) 从 $(110)$ 面看 $(-111)$ 的堆垛

堆垛顺序为

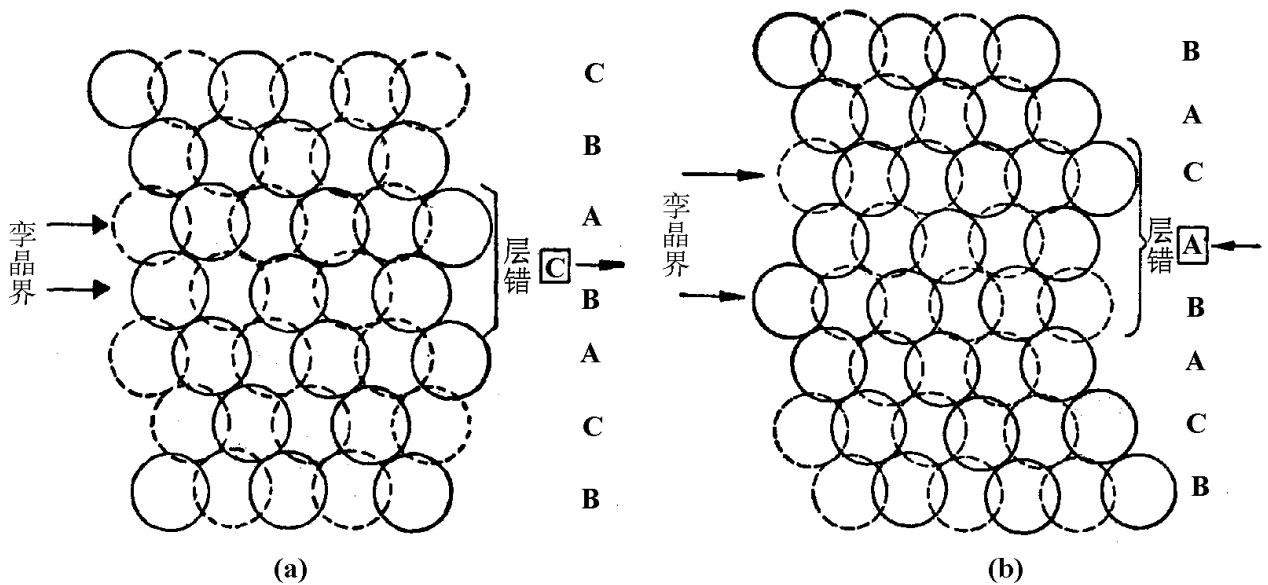
.....ABCABCABCABC.....

内禀层错，又称滑移型层错。

.....ABCABCAB ABCABCABC.....

外禀层错，又称插入型层错。

.....ABCABCAB A CABABC.....

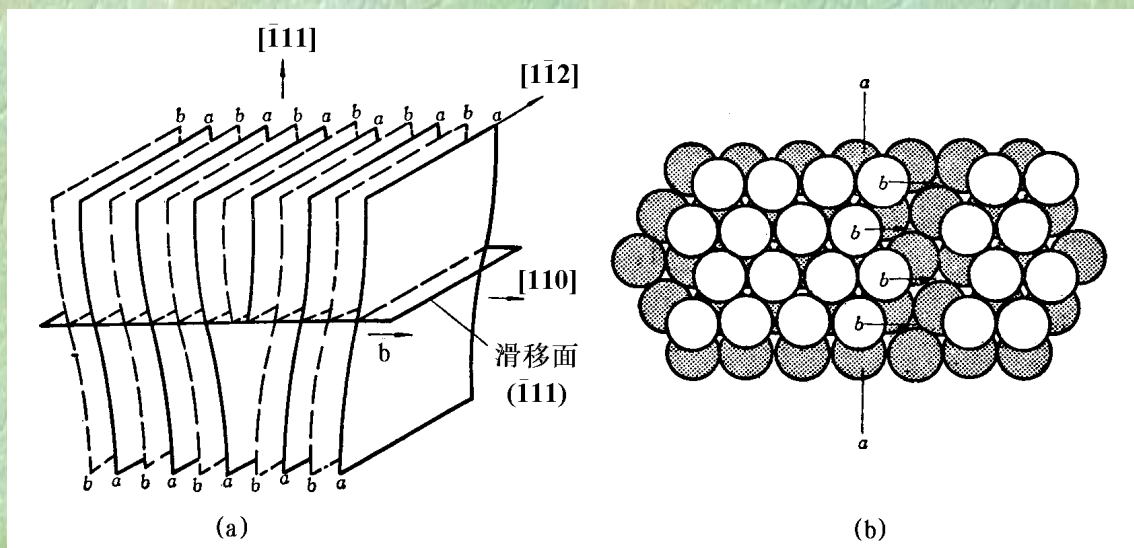


### 面心立方结构中的层错

(a)用滑移方式或抽去一层原子的方式形成的层错；

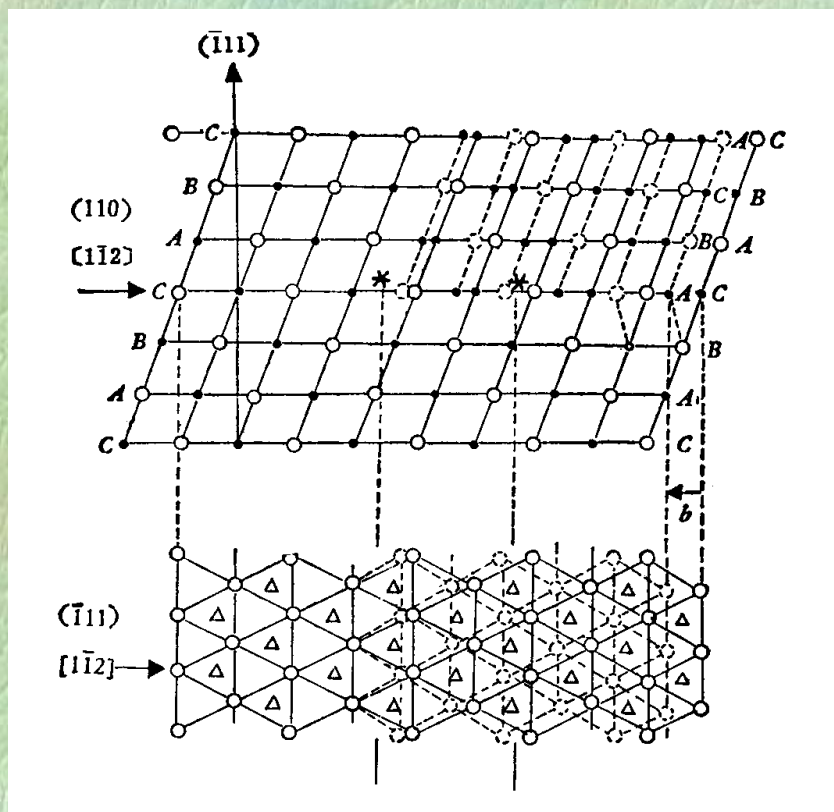
(b)用插入一层原子的方式形成的层错

## •全位错



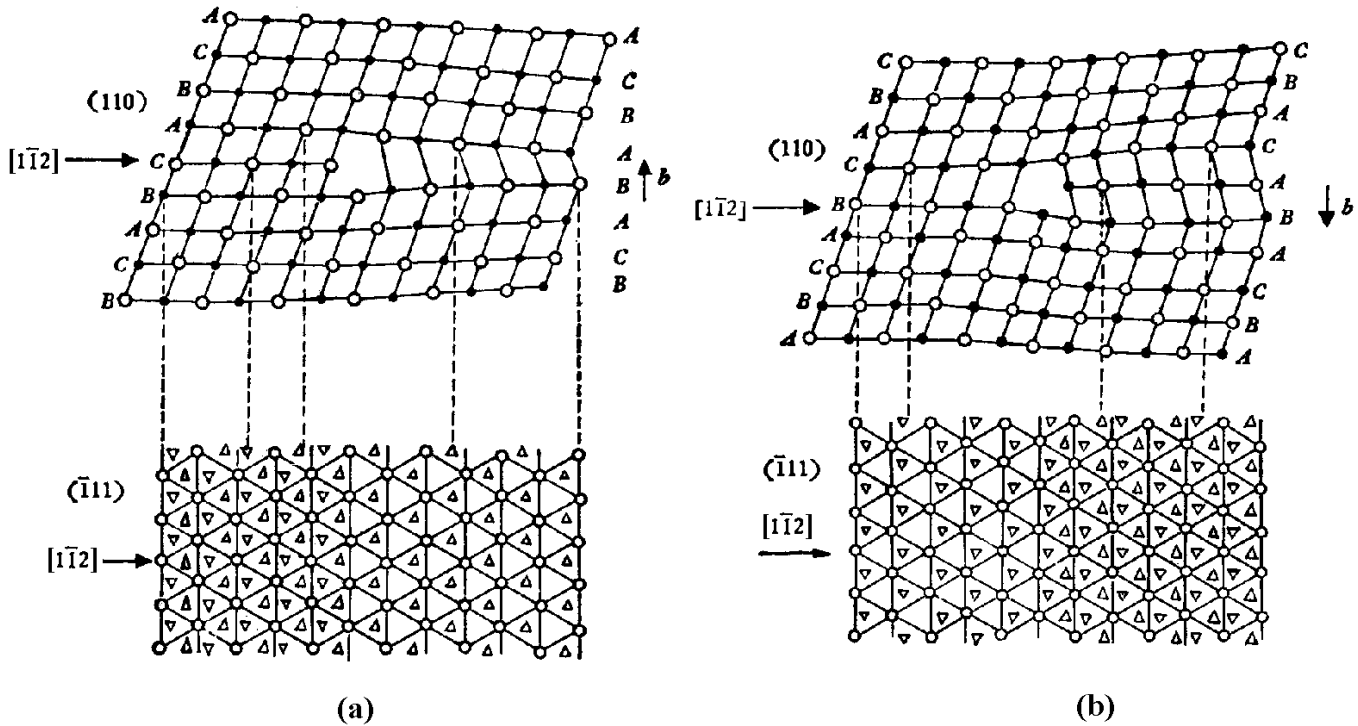
面心立方结构在 $(-111)$ 面上柏氏矢量为 $a[110]/2$ 的全位错

## •部分位错



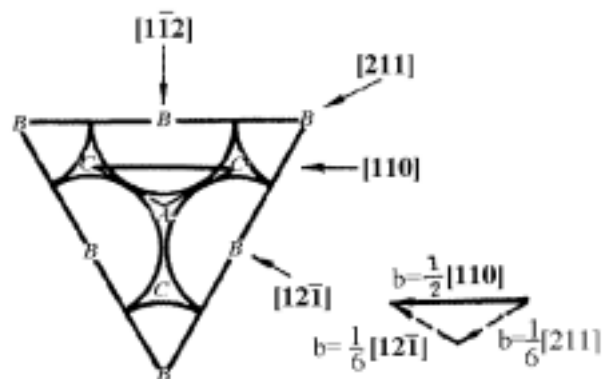
面心立方结构中在 $(-111)$ 面上的纯刃型Shockley部分位错

## •Frank位错结构

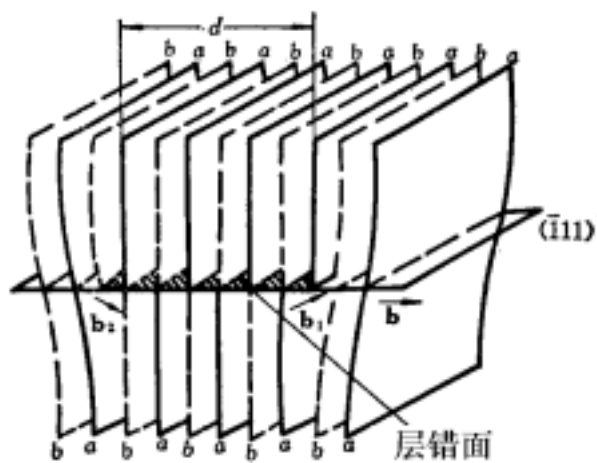
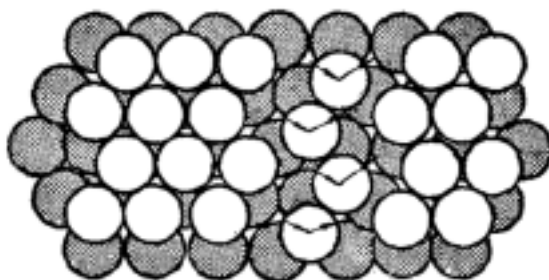


面心立方结构中的(a)负Frank位错和(b)正Frank位错

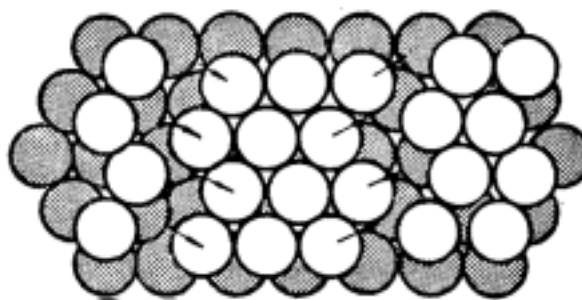
## •扩展位错



(a)



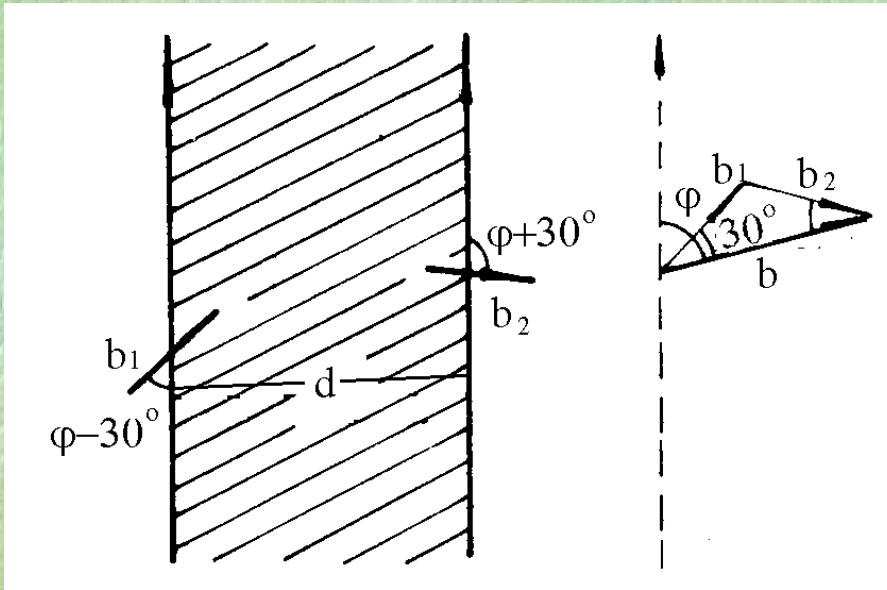
(b)



偏位错+层错+偏位错

面心立方结构的全位错分解成扩展位错

## •扩展位错宽度



混合全位错  
分解为扩展  
位错柏氏矢  
量间的关系

1) 全位错分解为2个Shockl ey位错的方式

$$\frac{a}{2}[110] \rightarrow \frac{a}{6}[211] + \frac{a}{6}[12\bar{1}]$$

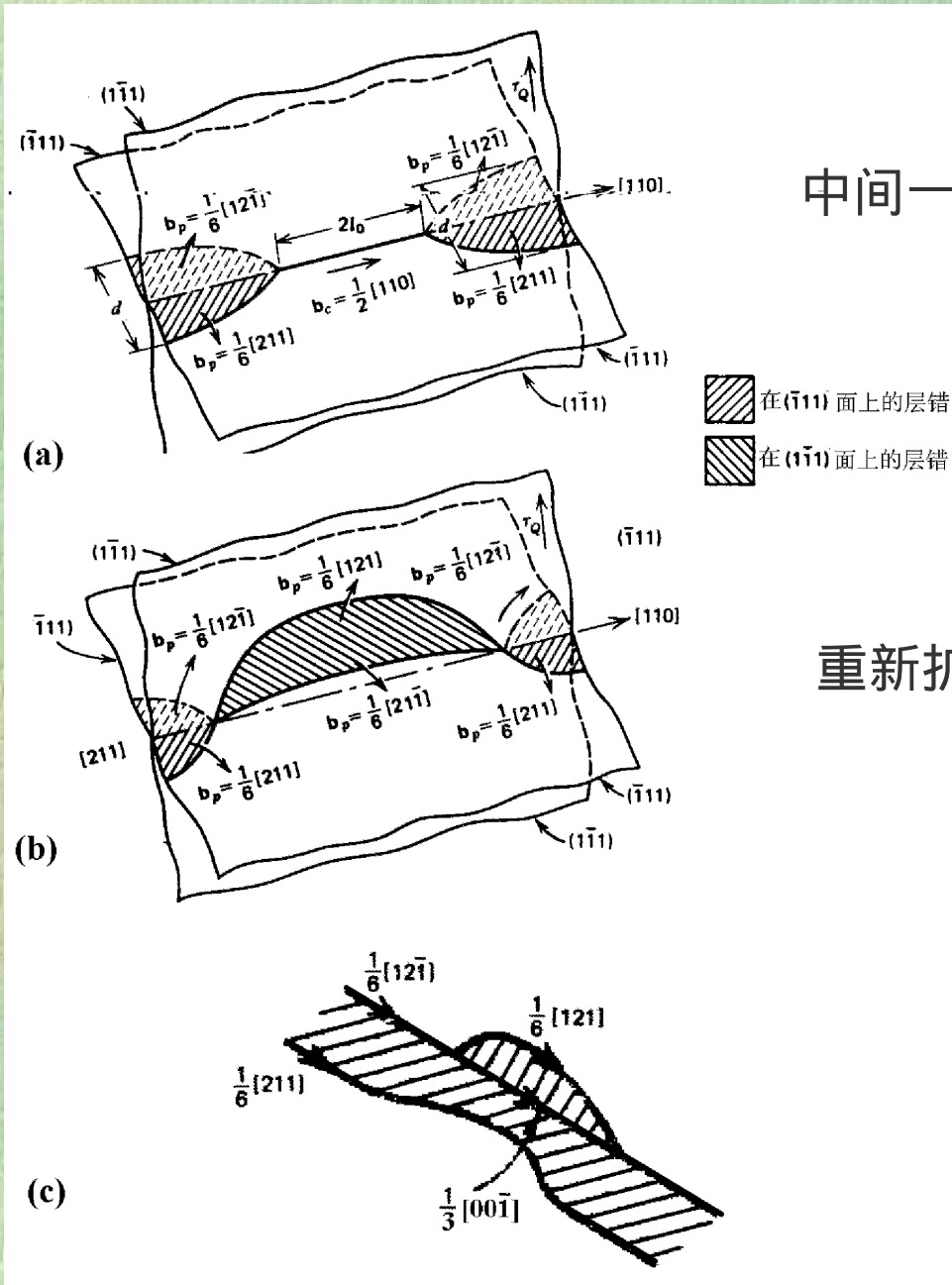
2) 部分位错间的斥力  $F = \frac{Gb^2}{8\pi d} \frac{2-\nu}{1-\nu} \left(1 - \frac{2\nu \cos 2\varphi}{2-\nu}\right)$

3) 处于力学平衡时，即  $F = \gamma$  时，2个部分位错的平衡间距  $d_0$  为

$$d_0 = \frac{Gb^2}{8\pi\gamma} \frac{2-\nu}{1-\nu} \left(1 - \frac{2\nu \cos 2\varphi}{1-\nu}\right)$$

# •扩展位错的交滑移途经

机制一



机制二

扩展位错的交滑移 (a)和(b)是通过束集进行交滑移；  
(c)通过Shockley位错反应进行交滑移

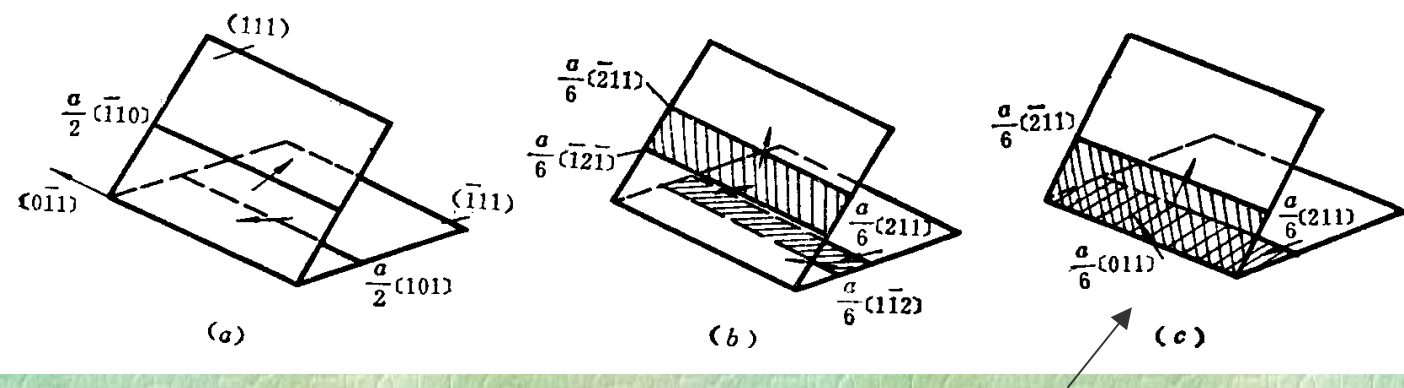
## •Lomer-Cottrell I 位错

分解： $\frac{a}{2}[\bar{1}10] \rightarrow \frac{a}{6}[\bar{2}11] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$  在(111)面

$\frac{a}{2}[101] \rightarrow \frac{a}{6}[211] + \frac{a}{6}[1\bar{1}2]$  在( $\bar{1}11$ )面

合成： $\frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] + \frac{a}{6}[1\bar{1}2] \rightarrow \frac{a}{6}[011]$

生成不动位错  
(面角位错)



滑移面为 (100)

Lomer-Cottrell I 位错形成的示意说明

意义：阻碍位错运动；FCC加工硬化的重要机制。

## 6.9 位错和溶质原子交互作用

### 6.9.1 位错和溶质原子的弹性交互作用

#### •Cottrell I 气团

##### 1) 特点：

松弛位错正应力场产生；  
刃位错才有Cottrell I 气团。

##### 2) 应力场分布

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} \right) \frac{Gb \sin \theta}{3\pi r}$$

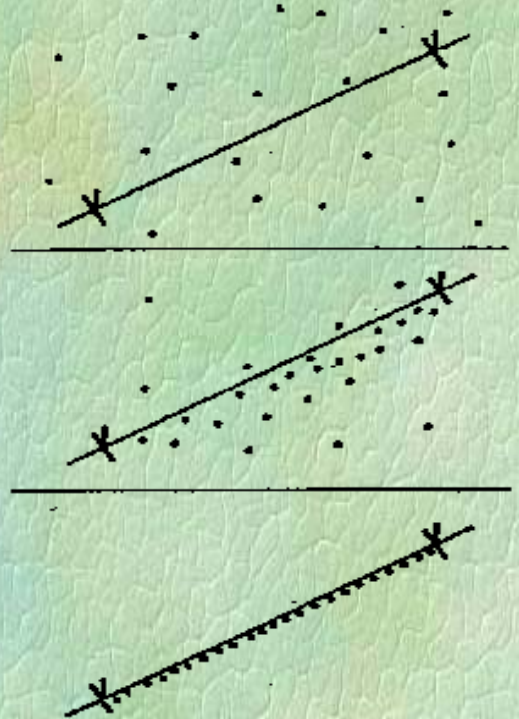
##### 3) 交互作用能分布

$$U = p\Delta V = \frac{4(1+\nu)}{3(1-\nu)} Gb\epsilon R^3 \frac{\sin \theta}{r} = A \frac{\sin \theta}{r}$$

$$A = \frac{4(1+\nu)}{3(1-\nu)} Gb\epsilon R^3$$

##### 4) 溶质分布

$$c(r, \theta) = c_0 \exp\left(-\frac{U(r, \theta)}{kT}\right) = c_0 \exp\left(-\frac{A \sin \theta}{rkT}\right)$$



## •Snoek气团

特点：

溶质引起非球形对称畸变；切应力场和位错的交互作用。  
松弛位错的切应力场产生。

## 6.9.3 位错与溶质原子的化学交互作用

### •铃木 ( Suzuki ) 气团

1) 特点：

溶质与层错的交互作用；因富集而阻碍位错运动；  
交互作用是化学性的；

2) 例

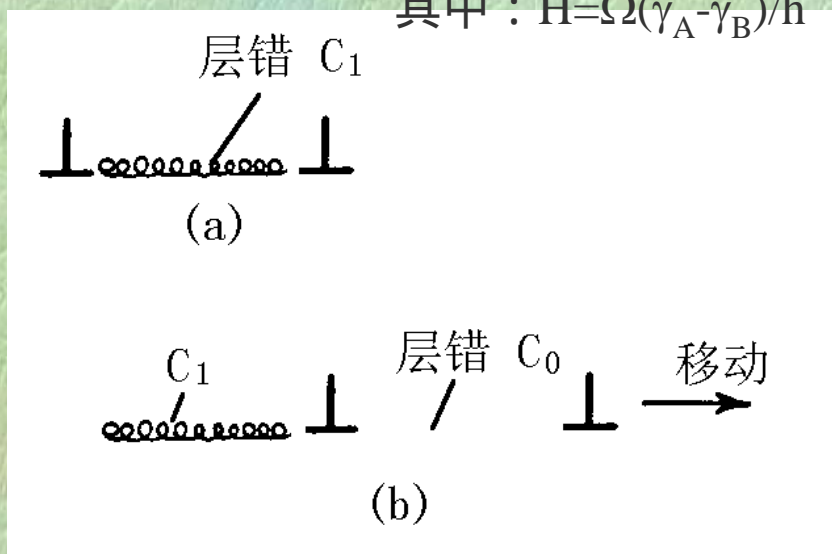
Fcc中hcp层错中溶质浓度

$$c_1 = \frac{c_0 \exp(H / kT)}{1 - c_0 + c_0 \exp(H / kT)}$$

其中： $H = \Omega(\gamma_A - \gamma_B)/h$

考察：

具有铃木气团的扩展位错从气团中拉出



3) 摆脱气团造成的自由能变化及所需应力

$$\Delta G = \frac{h}{\Omega} d_0 [(G^f - G^h)_{c_0} - (G^f - G^h)_{c_1}]$$

$$\tau = \frac{hH}{b\Omega} \frac{c_0(c_0 - 1)[1 - \exp(H / kT)]}{1 - c_0 + c_0 \exp(H / kT)}$$

# 本章小结

•研究位错的意义；位错的本质、特征、类型、组织形貌；

•位错的应力场、能量；

•位错受力  $\longrightarrow$  线张力  
P-N力  
外力  
渗透力  
映像力  
其它位错

•位错的交互作用  $\longrightarrow$  与点缺陷：气团  
与线缺陷：长程、短程；  
与面缺陷：塞积

•位错的运动  $\longrightarrow$  滑移  
攀移  $\longrightarrow$  塑变量，微观：  
弯结/割阶；  
平衡组态

•位错的萌生与增殖  $\longrightarrow$  夹杂；单、双边F-R源

•实际晶体中的位错  $\longrightarrow$  FCC  
BCC  $\longrightarrow$  全位错  
HCP 肖克来位错  
弗兰克位错  $\longrightarrow$  层错  
扩展  
面角位错