

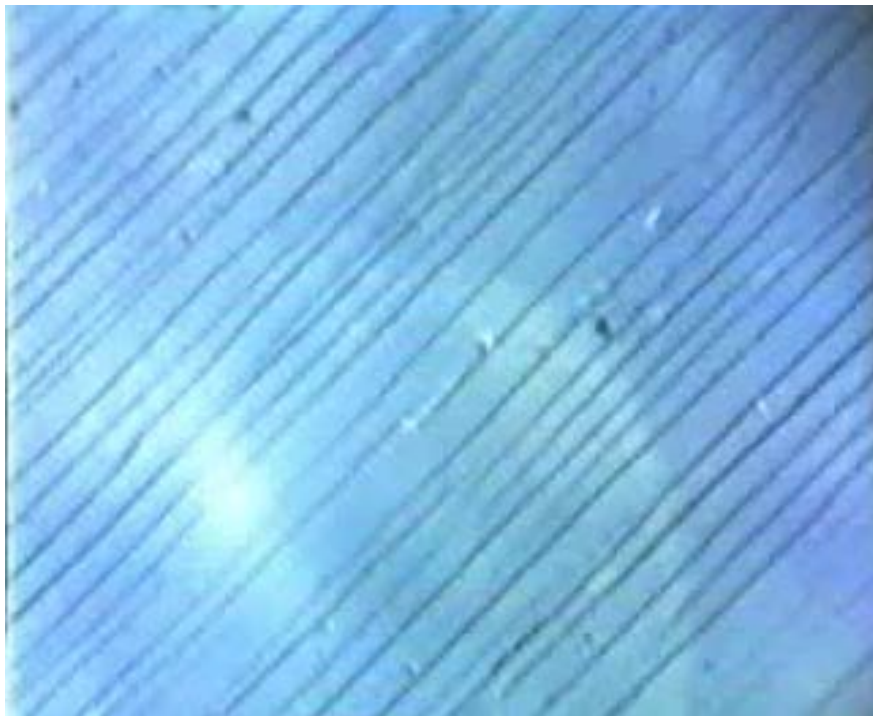


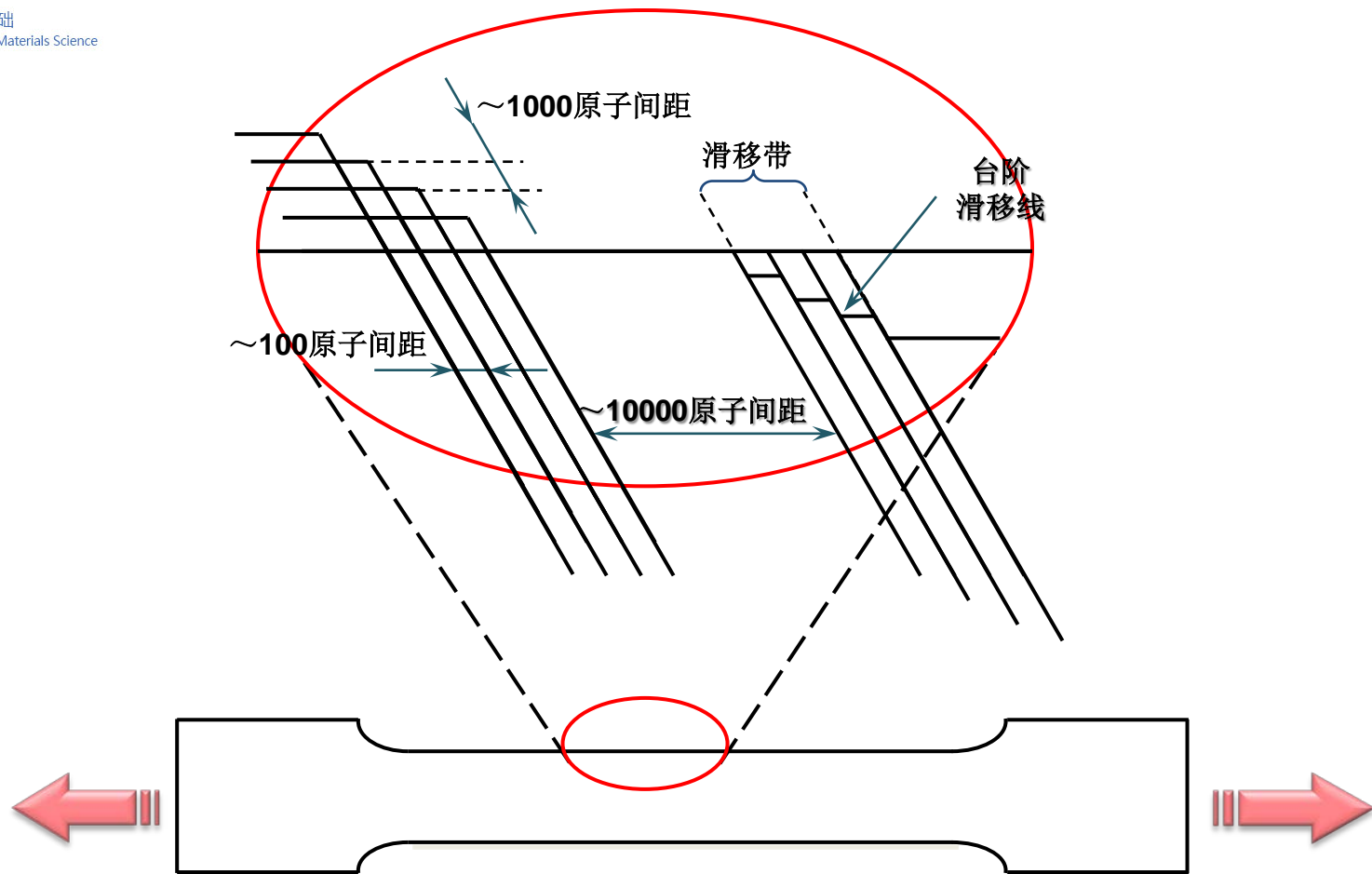
# 第二讲 单晶体的塑性变形

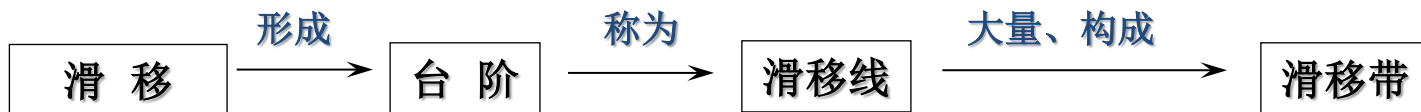
## —— 滑移变形



# 一、滑移现象



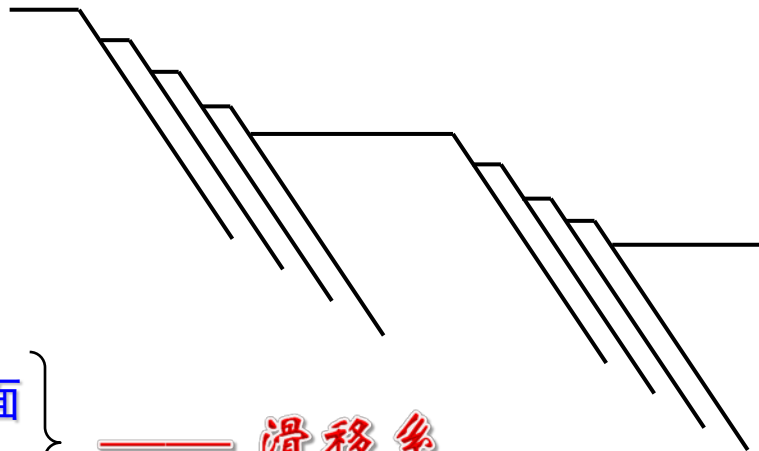




**滑移**：发生在**特定的晶面**和**晶向**上

- ④ 可以发生滑移的**晶面** —— 滑 移 面
- ④ 可以发生滑移的**晶向** —— 滑移方向

—— **滑移系**





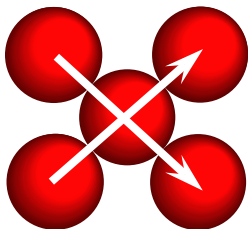
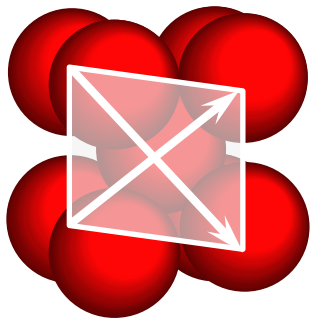
## 二、滑移系

### 定义：

一个滑移面及其上的一个滑移方向构成的一个空间位向关系

### 特点：

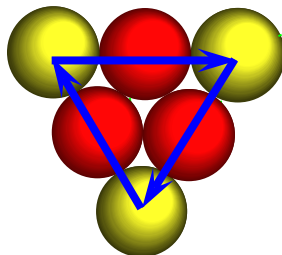
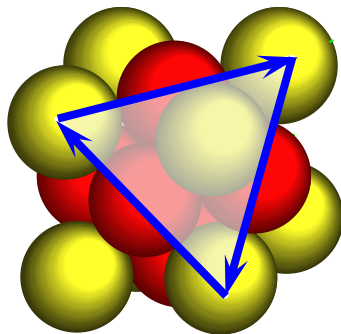
- 1) 条件相同时，滑移面越多，塑性越好  
条件相同时，滑移方向越多，塑性越好
- 2) 一般地：滑移面多是最密排面，滑移方向多是最密排方向



密排面  
密排方向

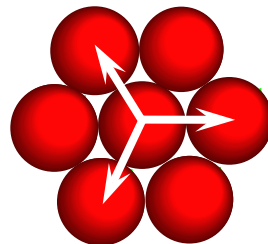
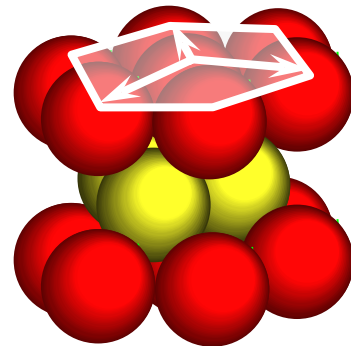
**BCC**

$\{110\}$   
 $\langle 111 \rangle$



**FCC**

$\{111\}$   
 $\langle 110 \rangle$



**HCP**

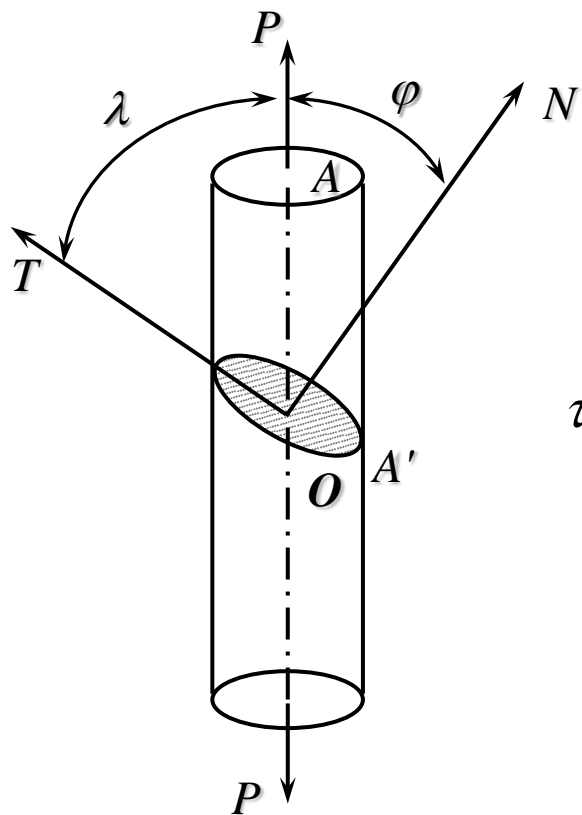
$\{0001\}$   
 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$



晶体结构	滑移面	滑移方向
面心立方	$\{111\}$	$\langle 110 \rangle$
	$\{112\}$	$\langle 111 \rangle$
体心立方	$\{110\}$	$\langle 111 \rangle$
	$\{123\}$	$\langle 111 \rangle$
密排六方	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$



### 三、临界分切应力



$\varphi$  —— 载荷  $P$  与滑移面法线夹角

$\lambda$  —— 载荷  $P$  与滑移方向夹角

$$P' = P \cos \lambda \quad A' = \frac{A}{\cos \varphi}$$

$$\tau = \frac{P'}{A'} = \frac{P \cos \lambda}{A / \cos \varphi} = \frac{P}{A} \cos \lambda \cos \varphi = \sigma \cos \lambda \cos \varphi$$

$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \varphi$$





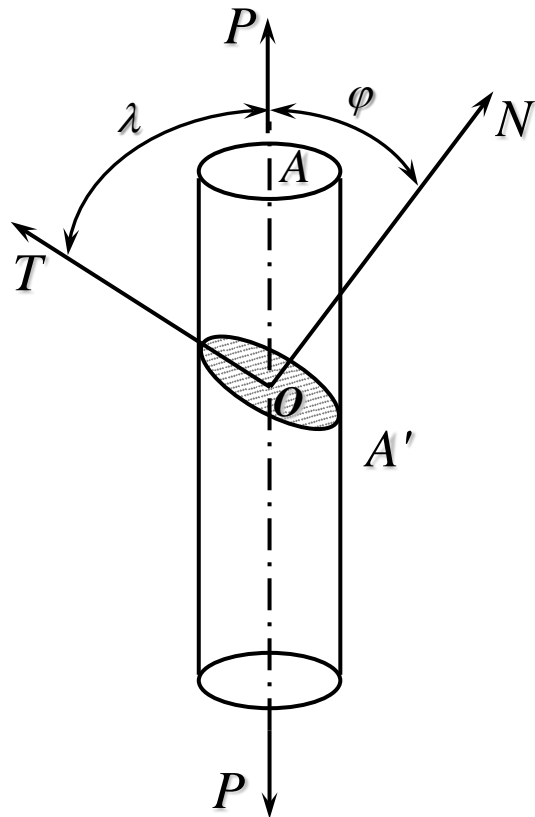
$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \varphi$$

屈服应力 $\sigma_s$  (或 $\sigma_{0.2}$ )       $\tau_c = \sigma_s \cos \lambda \cos \varphi$

—— 临界分切应力

- 晶体开始滑移所需的最小分切应力
- $\tau_c$  取决于晶体的本性，与外力无关
- $\tau_c$  是组织敏感参数。

即，与晶体类型、纯度、温度、热处理状态、滑移系类型等因素有关





$m = \cos \lambda \cdot \cos \varphi$  —— 取向因子（施密特因子）

当  $\varphi + \lambda = 90^\circ$  时

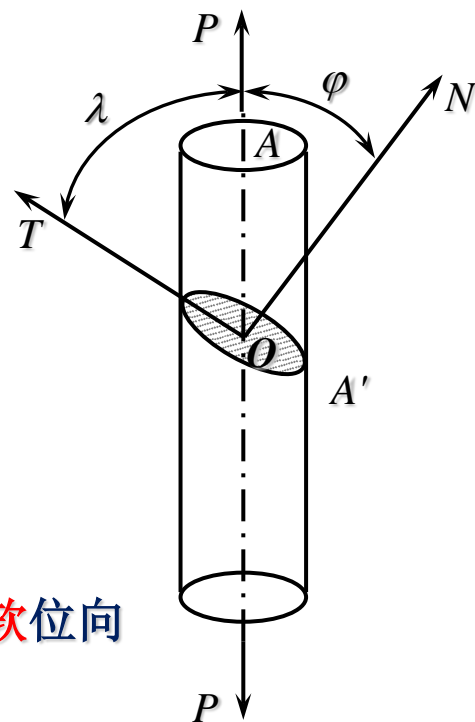
$$m = \cos \lambda \cos \varphi = \cos \varphi \cos(90^\circ - \varphi) = \frac{1}{2} \sin(2\varphi)$$

所以，当  $\varphi = 45^\circ$  时，  $m = m_{\max} = 0.5$

——  $\tau$  最大 —— 有利于滑移

$m$  越大，晶体越容易开始滑移，所需的外加载荷越小 —— 软位向

$m$  越小，晶体越难以开始滑移，所需的外加载荷越大 —— 硬位向

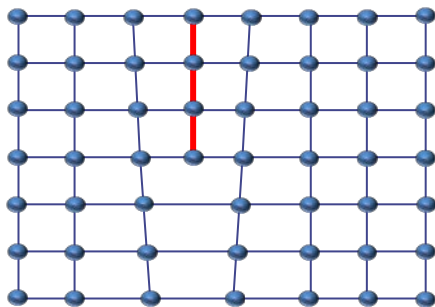




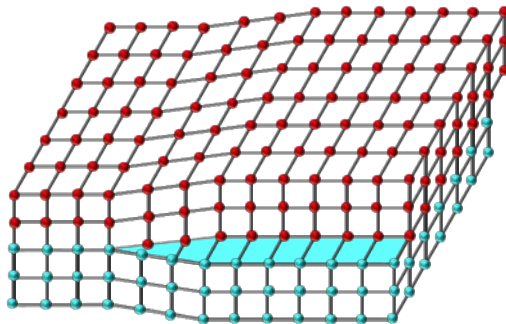
## 四、滑移的微观机制 —— 位错滑移 —— 塑性变形的机制

### 1. 位错

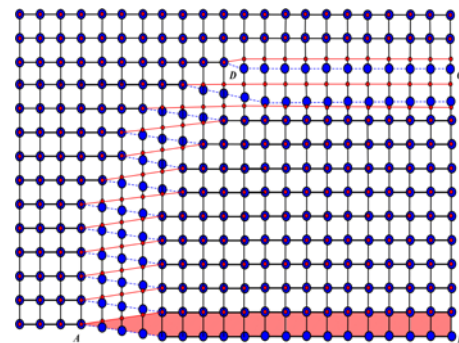
刃位错



螺位错



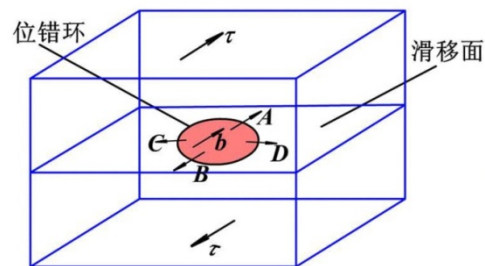
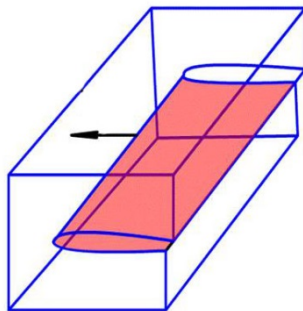
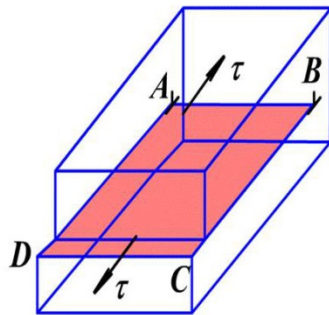
混合位错





## 2. 位错的滑移

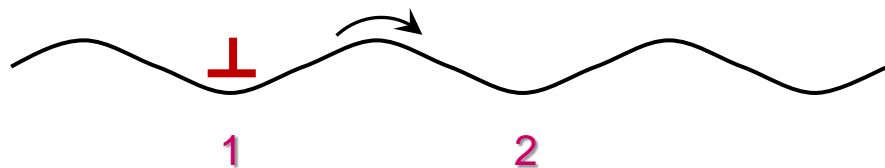
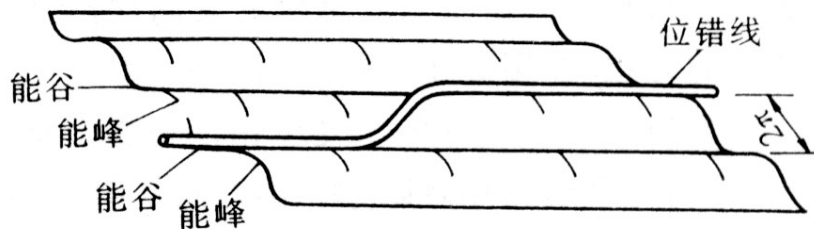
类型	$b$ 与 位错线	位错线运动 方向	$\tau$ 与 $b$	$\tau$ 与 位错线	滑移面 个数
刃位错	$\perp$	法线	//分量	$\perp$	唯一
螺位错	//	法线	//分量	//	多个
混合位错	一定角度	法线	//分量	一定角度	





### 3. 位错运动阻力

#### 1) 点阵摩擦 —— 派-纳力



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

- ④  $\tau_{P-N}$  与  $(-W)$  成指数关系，故位错宽度  $W$  越大， $\tau_{P-N}$  越小
- ④  $\tau_{P-N}$  与  $(-d/b)$  成指数关系，故当晶面间距  $d$  越大、原子间距  $b$  越小时， $\tau_{P-N}$  越小

—— 最密排面、最密排方向易成为滑移面和滑移方向



## 2) 位错的交互作用

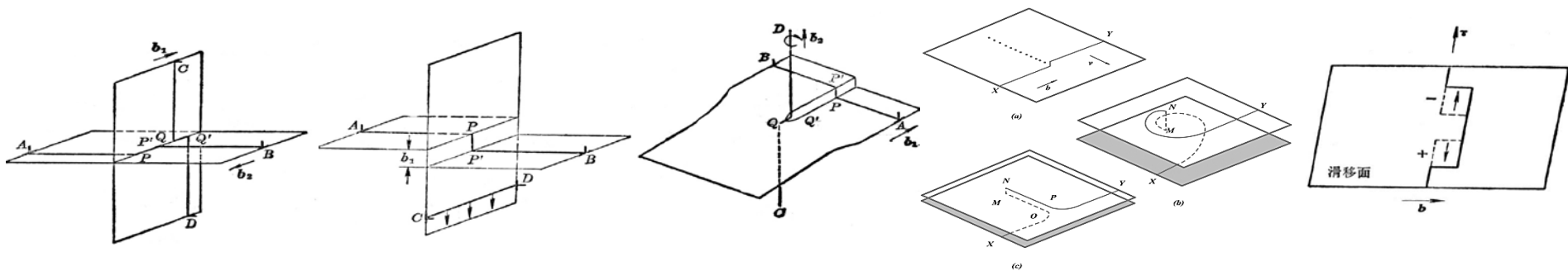
两位错平行 —— 同号相斥、异号相吸

两位错垂直 —— 位错交割

交割 —— 形成一段大小和方向等于对方柏氏矢量的割阶或扭折

割阶 —— 不在滑移面上

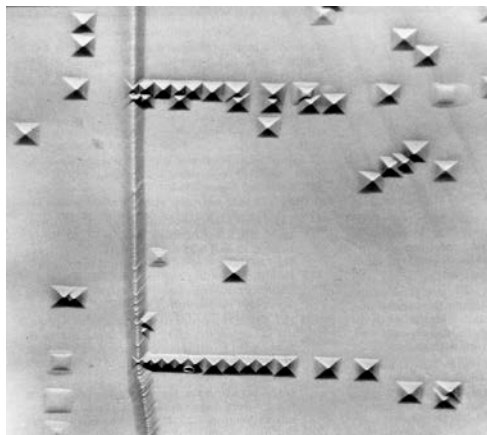
扭折 —— 在原滑移面上，不稳定、易消失、不影响滑移



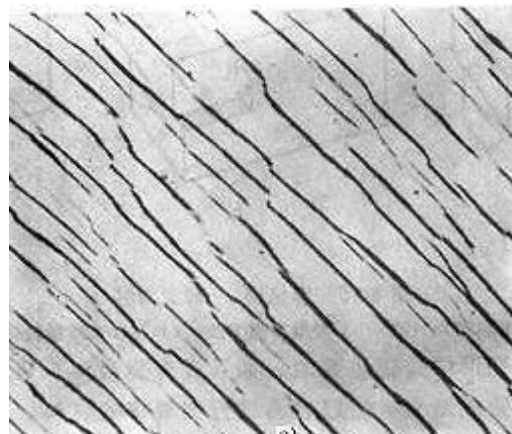


### 3) 位错塞积

位错滑移 —— 受到障碍物阻碍 —— 位错塞积 —— 应力高度集中  
—— 交滑移、攀移 —— 避开障碍物 —— 继续滑移 —— 应力松弛  
—— 滑移线呈波纹状



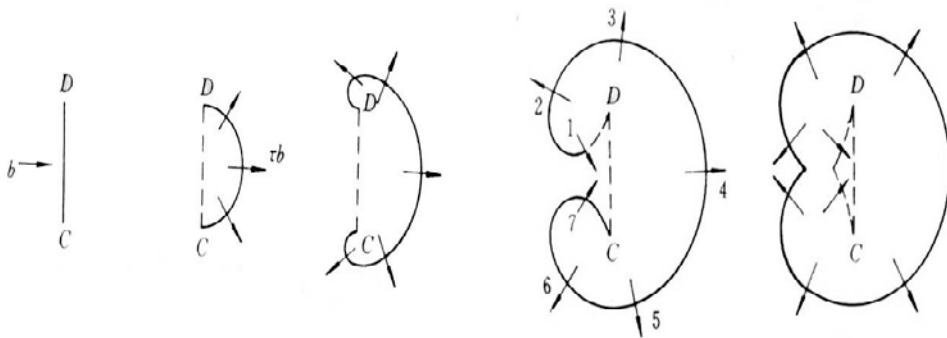
材料评价的高分辨电子显微方法 近藤 大辅, 平贺 贤二 著, 刘安生译  
冶金工业出版社 2002 39页





## 4) 晶体滑移的连续性 —— 位错增殖

### F—R 位错源

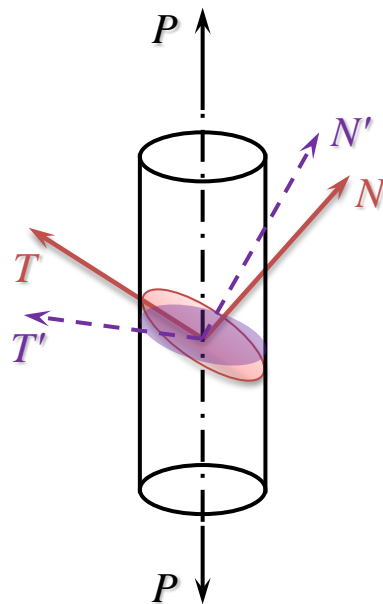
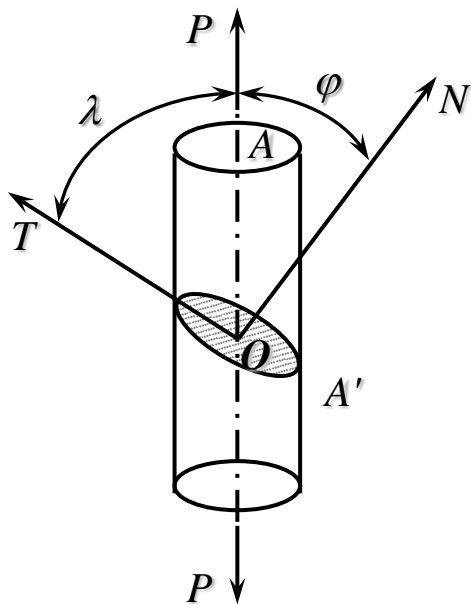






## 五、滑移时晶体的转动

$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \varphi \quad m = \cos \lambda \cdot \cos \varphi \quad \text{—— 取向因子（施密特因子）}$$

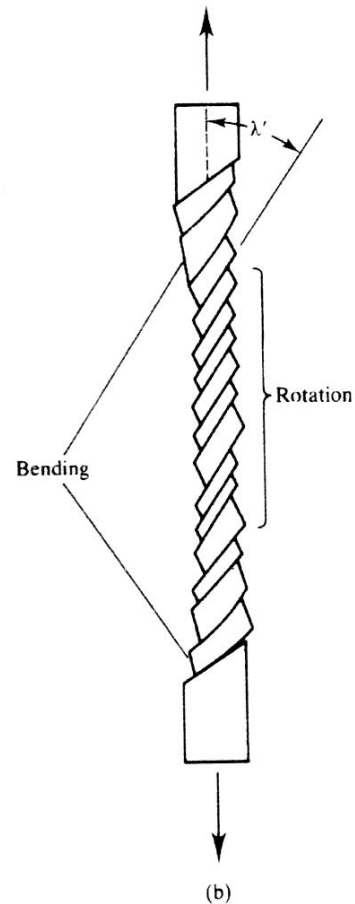
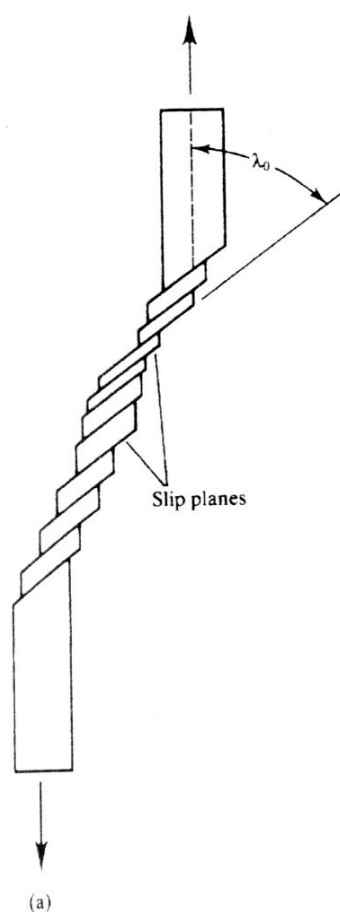
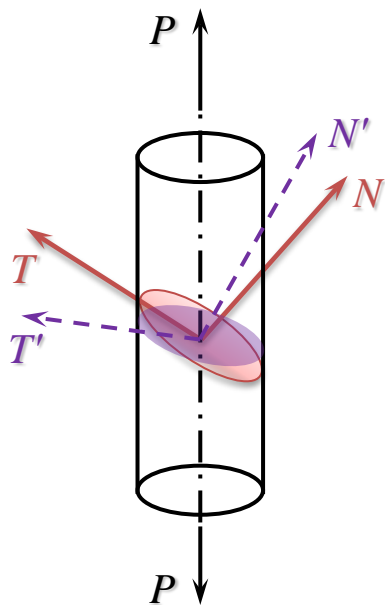




## 拉伸:

滑移面趋向**平行**于外力轴方向

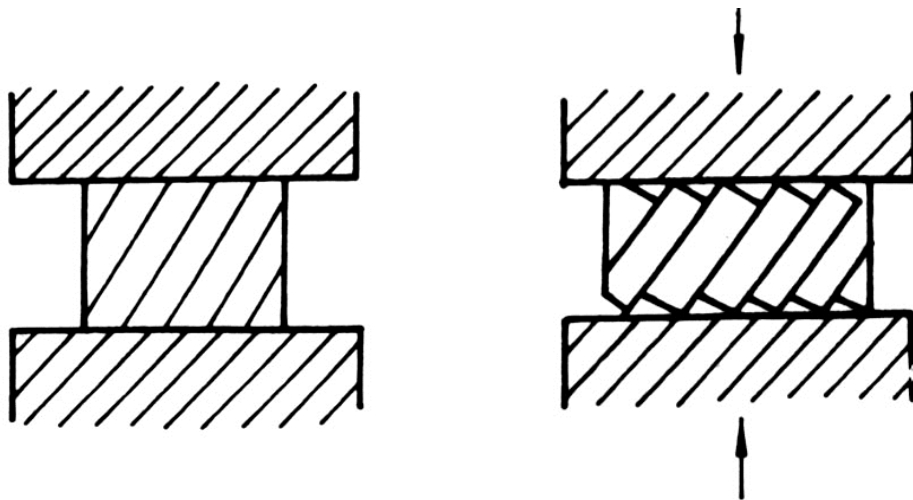
滑移方向趋向**平行**于最大切分应力方向





**压缩：** 滑移面趋向**垂直**于外力轴方向

滑移方向趋向**垂直**于最大切分应力方向





## 六、单滑移与多滑移

变形量小或滑移系少



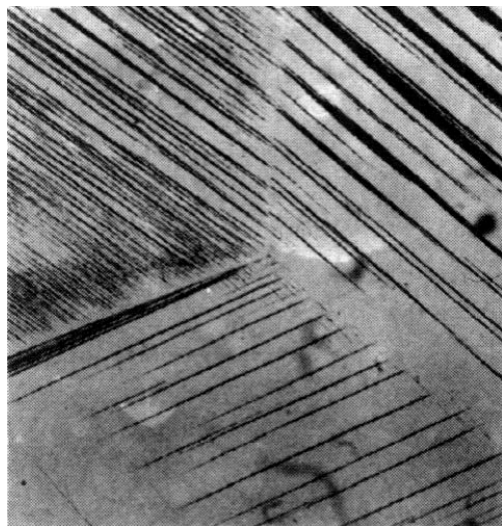
最有利的滑移系开动



单滑移



滑移线平行



变形量大



晶体转动

外应力大



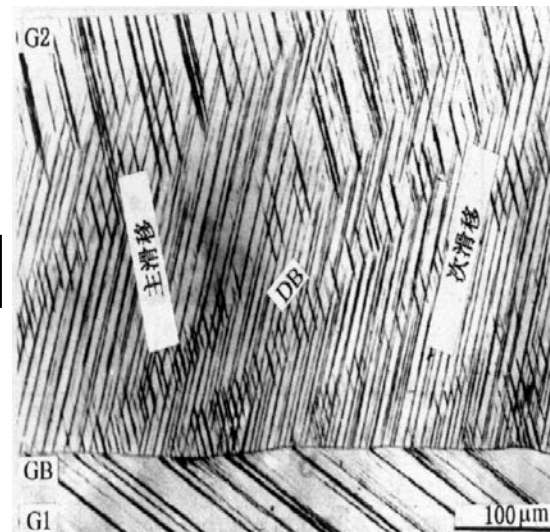
多个滑移系同时或交替开动



多滑移



滑移线相互交叉





## 七、滑移变形特点：

- ① 滑移不均匀，集中在某些晶面上
- ① 平移滑动，相对滑动的两部分晶体位向关系不变
- ① 临界分切应力较小
- ① 滑移线与应力轴呈一定角度
- ① 晶体表面出现滑移线和滑移带，滑移线先于滑移带出现

—— 塑性变形的主要机制