

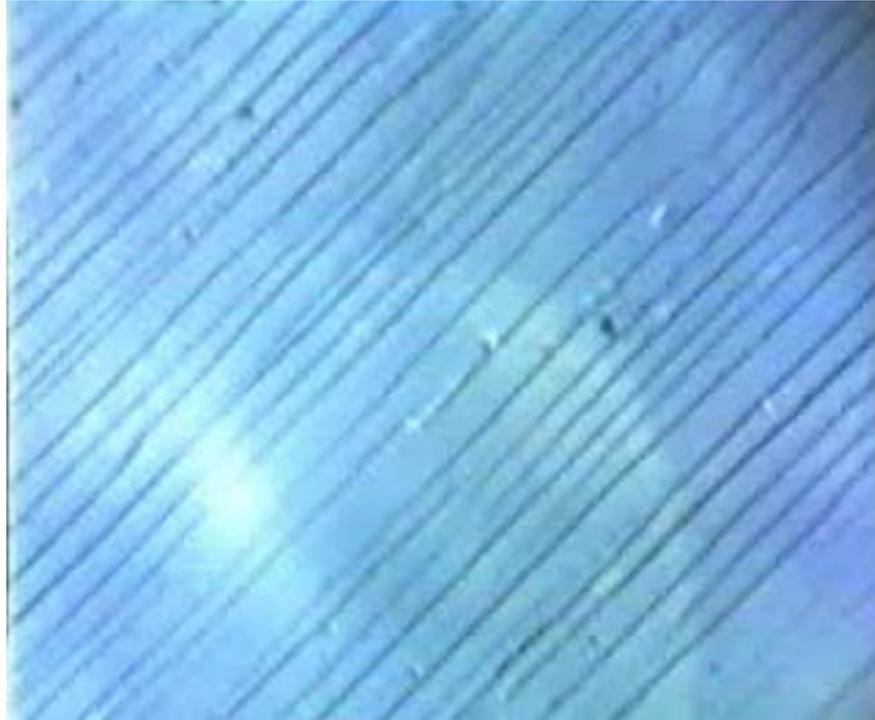


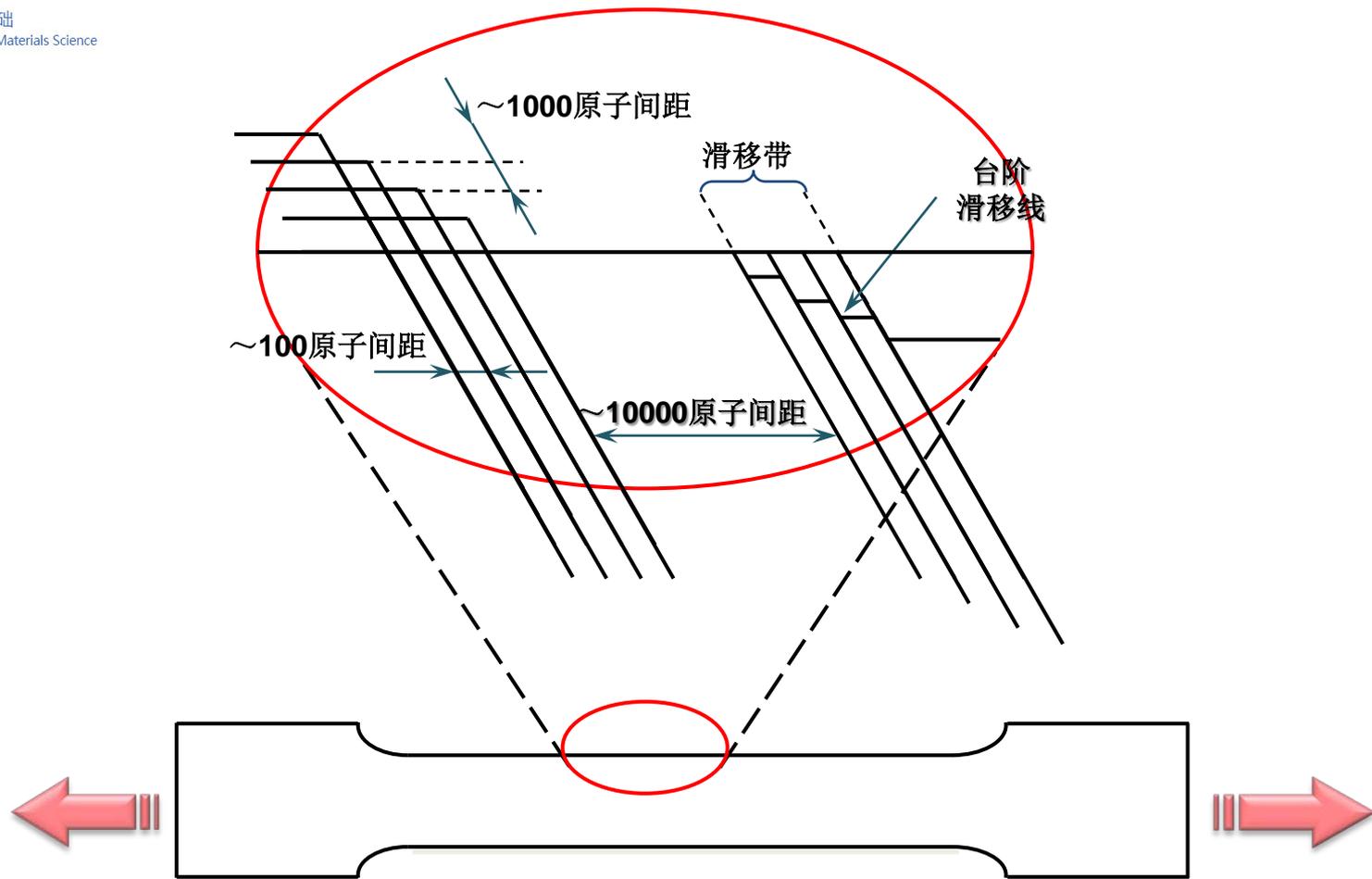
第二讲 单晶体的塑性变形

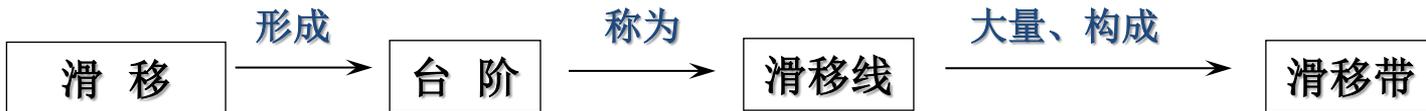
—— 滑移变形



一、滑移现象



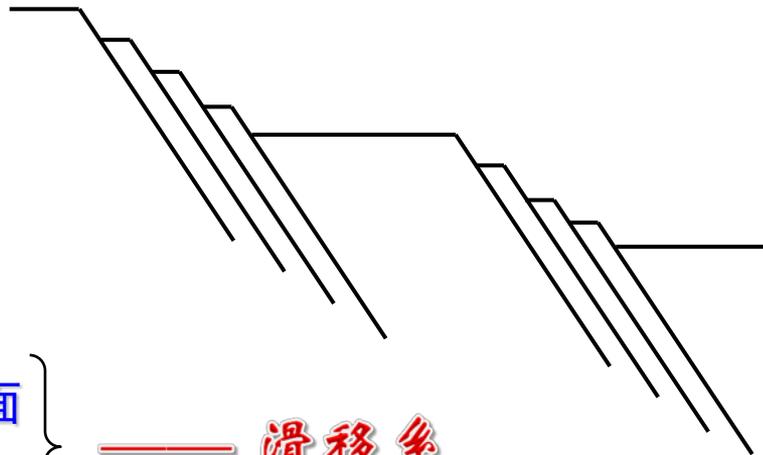




滑移：发生在**特定的晶面**和**晶向**上

- 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**





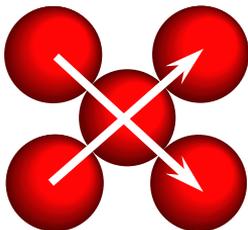
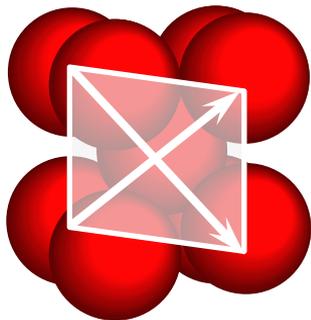
二、滑移系

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

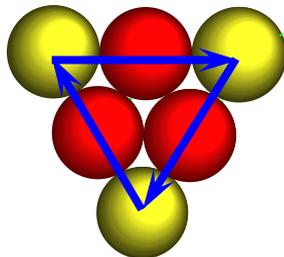
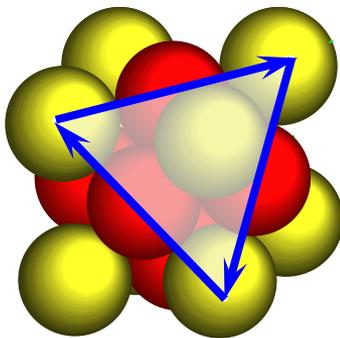


密排面
密排方向

BCC

$\{110\}$

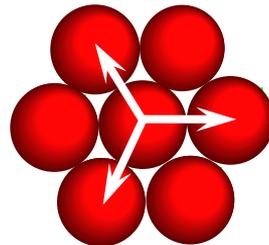
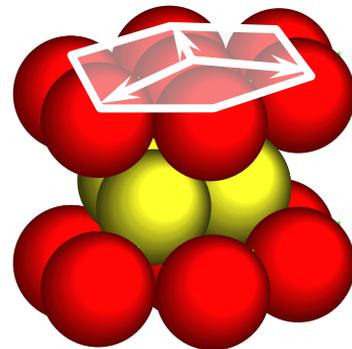
$\langle 111 \rangle$



FCC

$\{111\}$

$\langle 110 \rangle$



HCP

$\{0001\}$

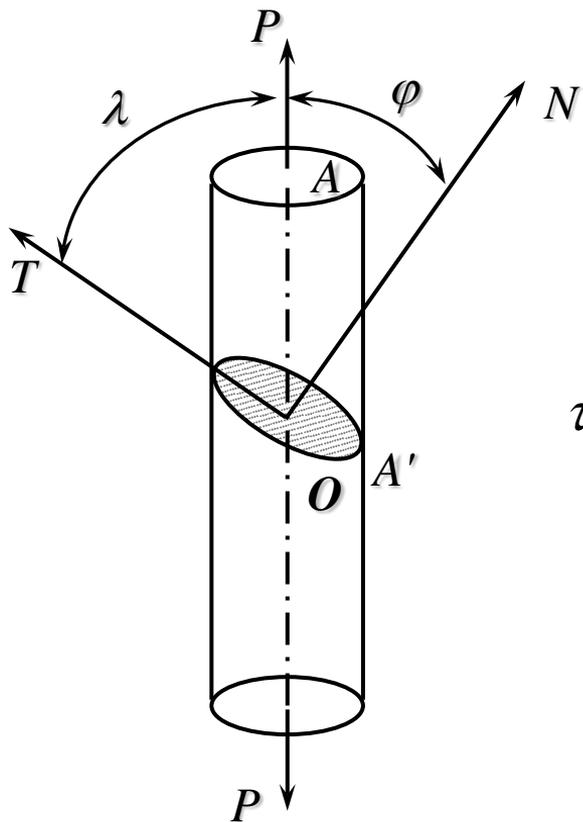
$\langle 11\bar{2}0 \rangle$



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



φ —— 载荷 P 与滑移面法线夹角

λ —— 载荷 P 与滑移方向夹角

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

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

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



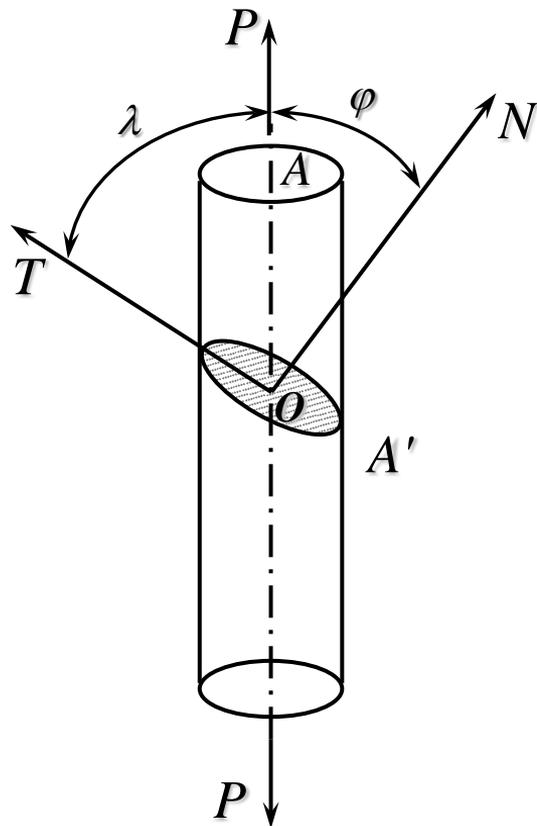
$$\tau = \sigma \cos \lambda \cos \varphi$$

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

—— 临界分切应力

- ④ 晶体开始滑移所需的最小分切应力
- ④ τ_c 取决于晶体的本性，与外力无关
- ④ τ_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

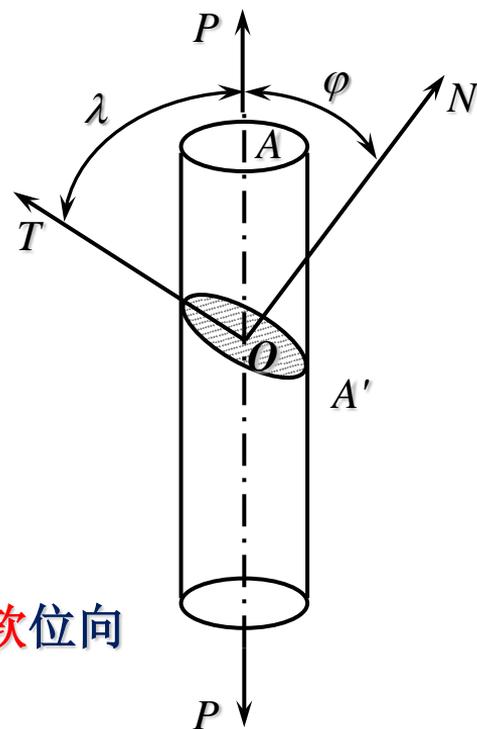
$$m = \cos \lambda \cos \varphi = \cos \varphi \cos(90^\circ - \varphi) = \frac{1}{2} \sin(2\varphi)$$

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

—— τ 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

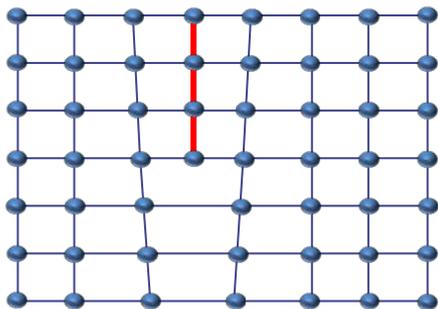




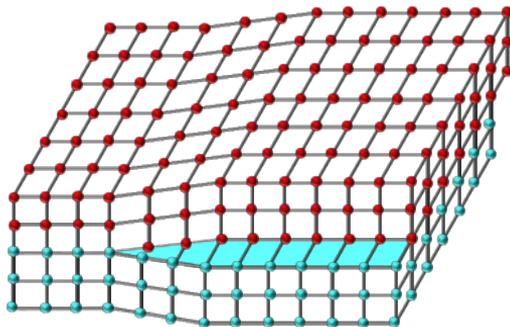
四、滑移的微观机制 —— 位错滑移 —— 塑性变形的的主要机制

1. 位错

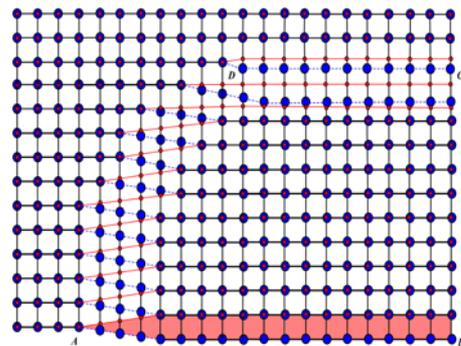
刃位错



螺位错



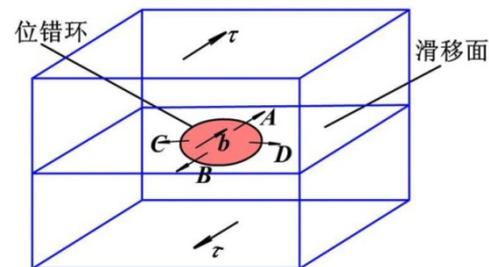
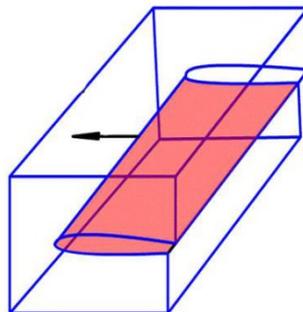
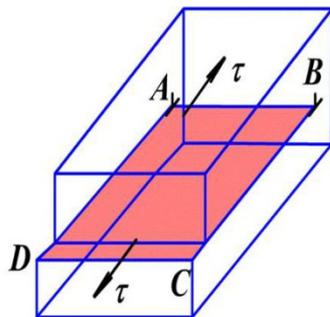
混合位错





2. 位错的滑移

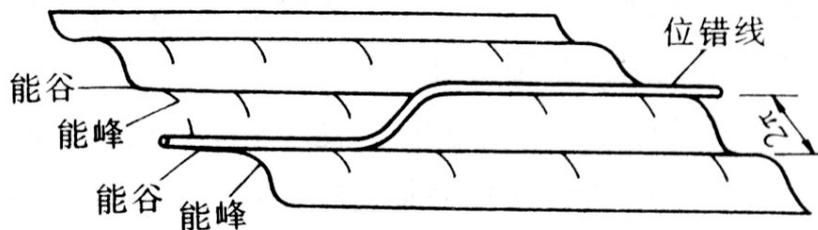
类型	b 与位错线	位错线运动方向	τ 与 b	τ 与位错线	滑移面个数
刃位错	\perp	法线	//分量	\perp	唯一
螺位错	//	法线	//分量	//	多个
混合位错	一定角度	法线	//分量	一定角度	





3. 位错运动阻力

1) 点阵摩擦力 —— 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 τ_{P-N} 与 $(-W)$ 成指数关系，故位错宽度 W 越大， τ_{P-N} 越小
- ④ τ_{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， τ_{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

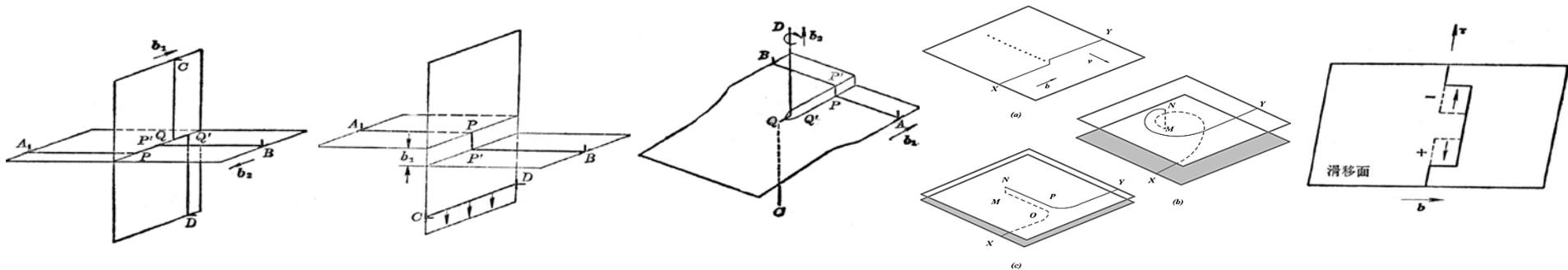
两位错平行 —— 同号相斥、异号相吸

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

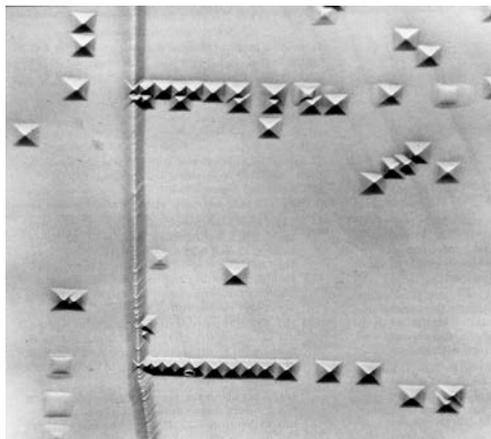
扭折 —— 在原滑移面上，不稳定、易消失、不影响滑移



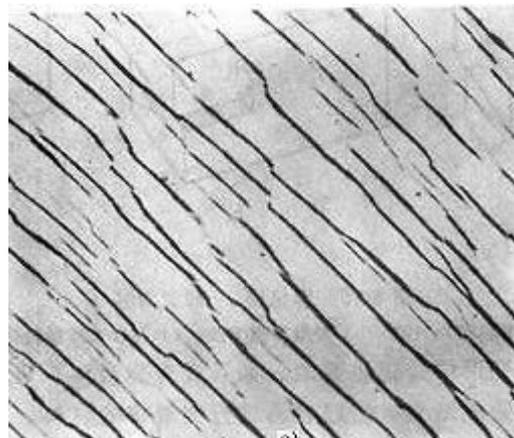


3) 位错塞积

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



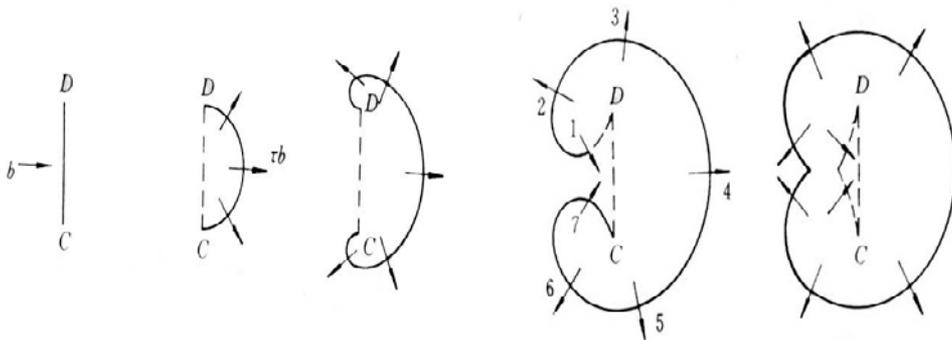
材料评价的高分辨电子显微方法 近藤 大辅, 平贺 贤二 著, 刘安生译
冶金工业出版社 2002 39页





4) 晶体滑移的连续性 —— 位错增殖

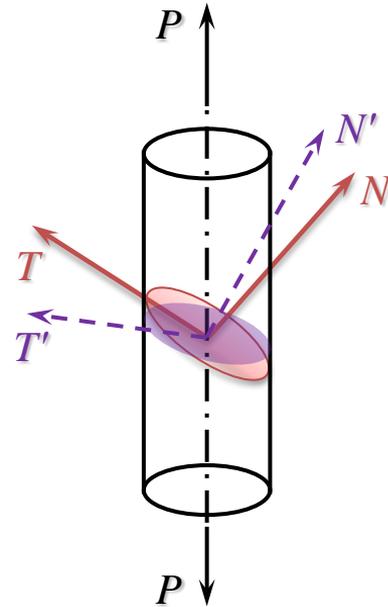
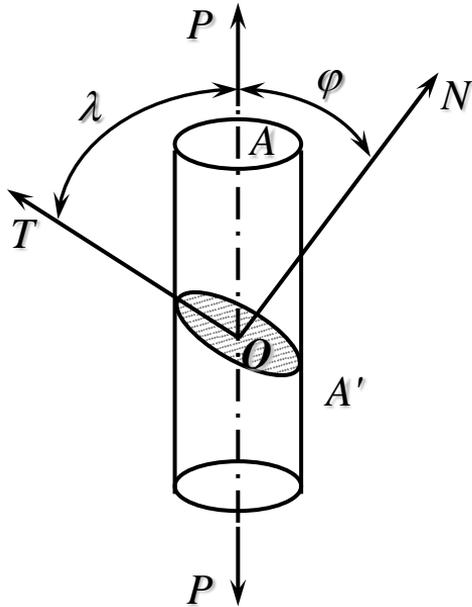
F—R 位错源





五、滑移时晶体的转动

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

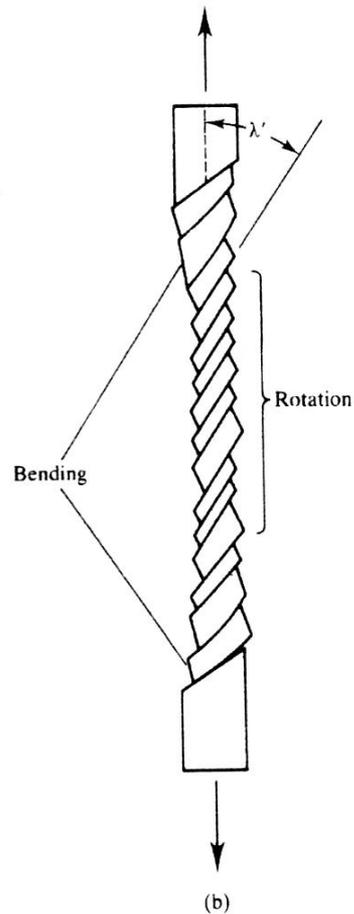
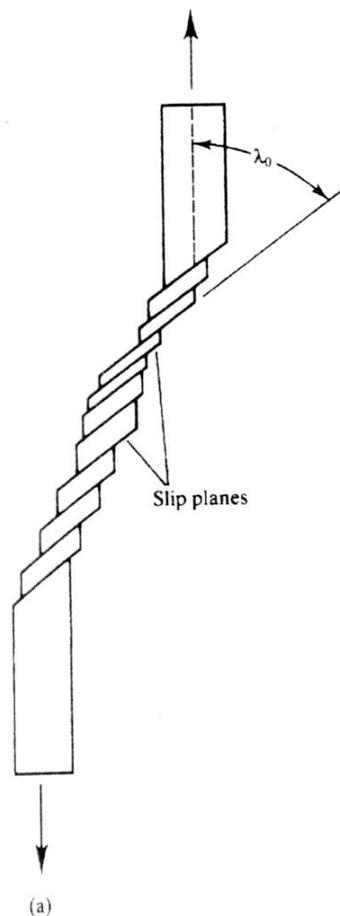
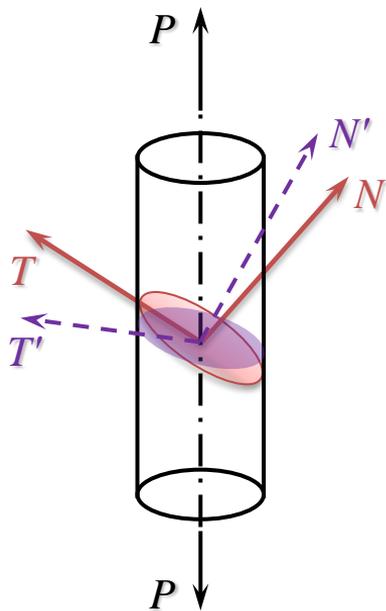




拉伸:

滑移面趋向**平行**于外力轴方向

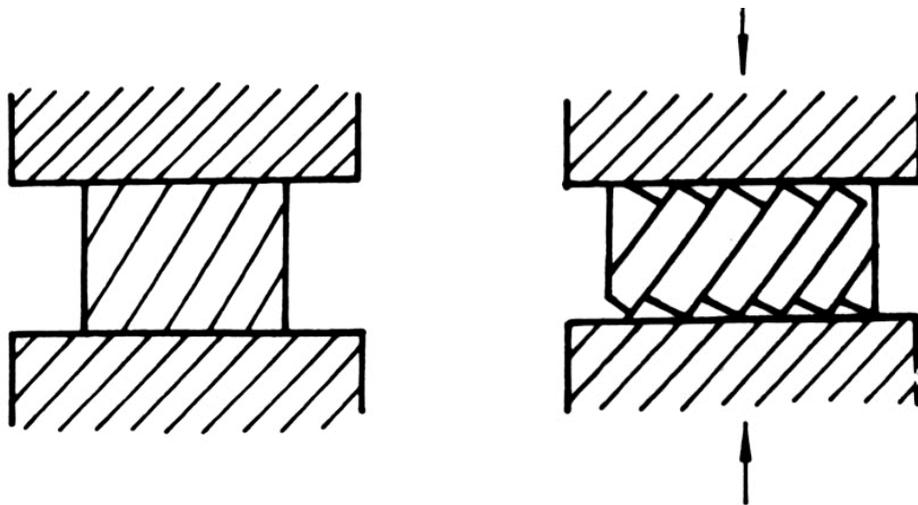
滑移方向趋向**平行**于最大切分应力方向





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



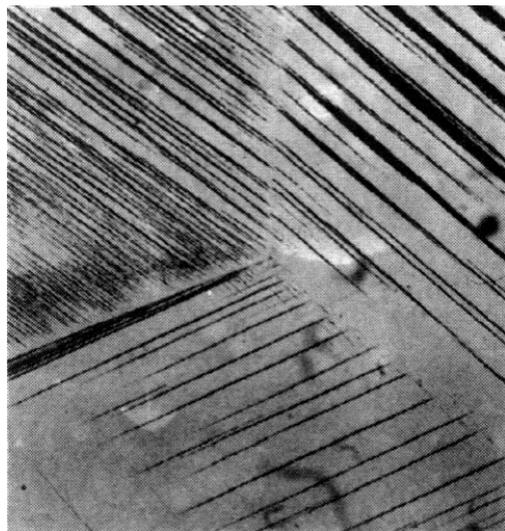
最有利的滑移系开动



单滑移



滑移线平行



变形量大



晶体转动

外应力大



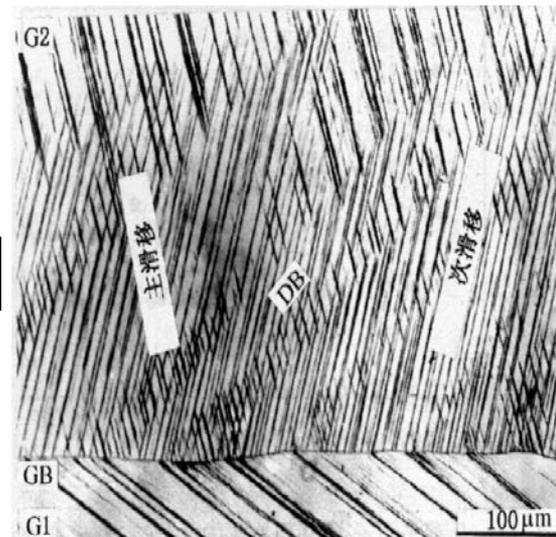
多个滑移系同时或交替开动



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
- ② 平移滑动，相对滑动的两部分晶体位向关系不变
- ③ 临界分切应力较小
- ④ 滑移线与应力轴呈一定角度
- ⑤ 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