

第三章第二节

单晶体的塑性变形

《材料科学基础》 第九章第二节

单晶体金属的塑性变形

塑性变形：当外加应力超过一定值（屈服极限）时，应力和应变不再呈线性关系，卸载后变形也不能完全消失，而会留下一定的残余变形或永久变形，这种不可恢复的变形称塑性变形。

微观上，单晶体中的塑性变形有两个基本方式：**滑移**和**孪生**。

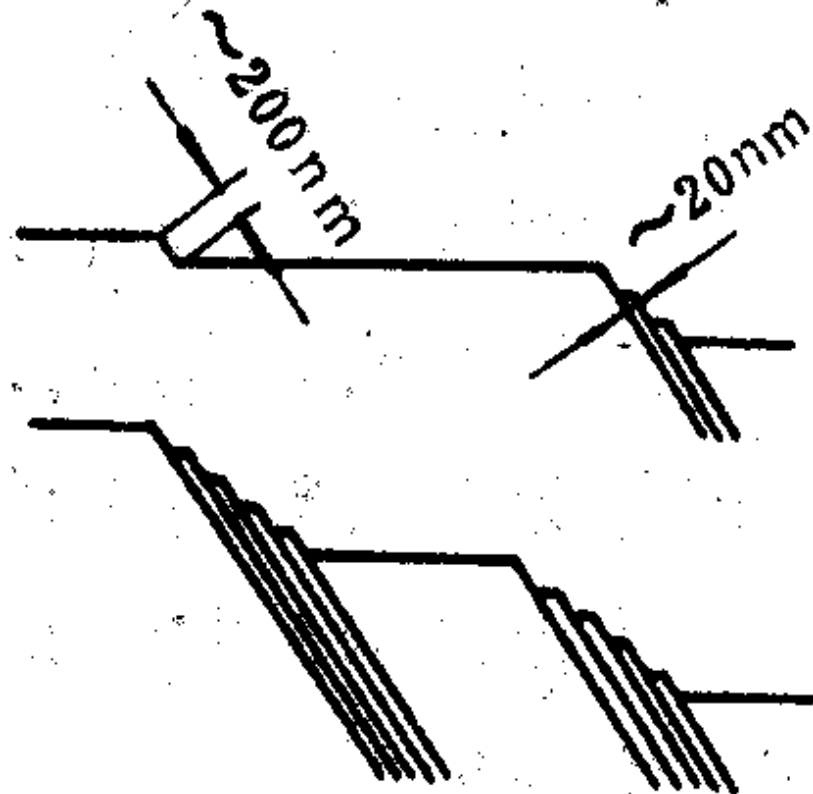
一、滑移

1. 滑移现象

滑移线；滑移带；台阶

当应力超过晶体的弹性极限后，晶体中就会产生层片之间的相对滑移，大量的层片间滑动的累积就构成晶体的宏观塑性变形。

对滑移线的观察也表明了晶体塑性变形的不均匀性，滑移只是集中发生在一些晶面上，而滑移带或滑移线之间的晶体层片则未产生变形，只是彼此之间作相对位移而已。



滑移带示意图

2. 滑移系

塑性变形时位错只沿着一定的晶面和晶向运动，这些晶面和晶向分别称为“**滑移面**”和“**滑移方向**”。晶体结构不同，其滑移面和滑移方向也不同。

一个滑移面（通常为**密排面**）和此面上的一个滑移方向（通常为**密排晶向**）合起来叫做一个**滑移系**。

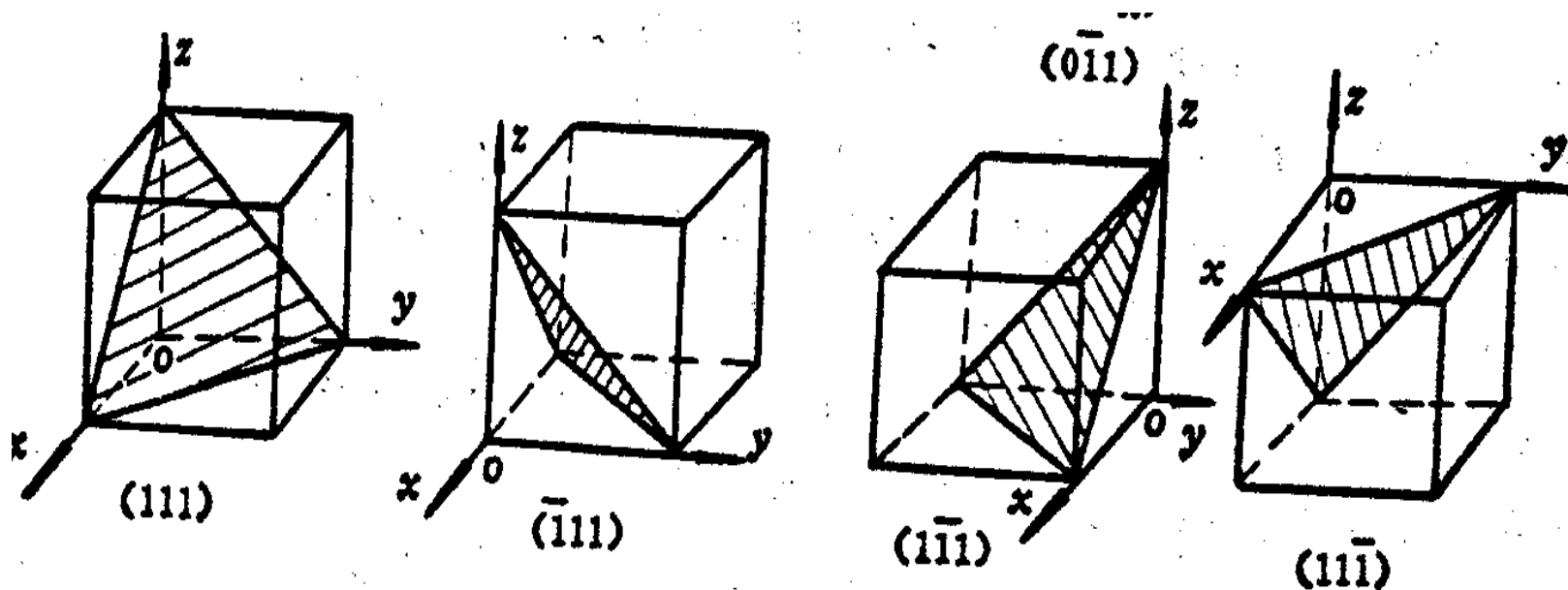
在其他条件相同时，晶体中的**滑移系愈多**，滑移过程可能采取的空间取向便愈多，**滑移容易进行**，它的**塑性便愈好**。

面心立方晶体的滑移系共有 $\{111\}4\langle 110 \rangle 3 = 12$ 个；
体心立方晶体，可同时沿 $\{110\}\{112\}\{123\}$ 晶面滑移，故滑移系共有 $\{110\}6\langle 111 \rangle 2 + \{112\}12\langle 111 \rangle 1 + \{123\}24\langle 111 \rangle 1 = 48$ 个；
密排六方晶体的滑移系仅有 $(0001)1 \cdot 3 = 3$ 个。由于滑移系数目太少，**hcp**多晶体的塑性不如**fcc**或**bcc**的好。

(1) fcc滑移系

滑移方向 $\langle 110 \rangle$ ，滑移面 $\{111\}$

面心立方结构共有 $4 \times 3 = 12$ 个滑移系



(2) bcc滑移系

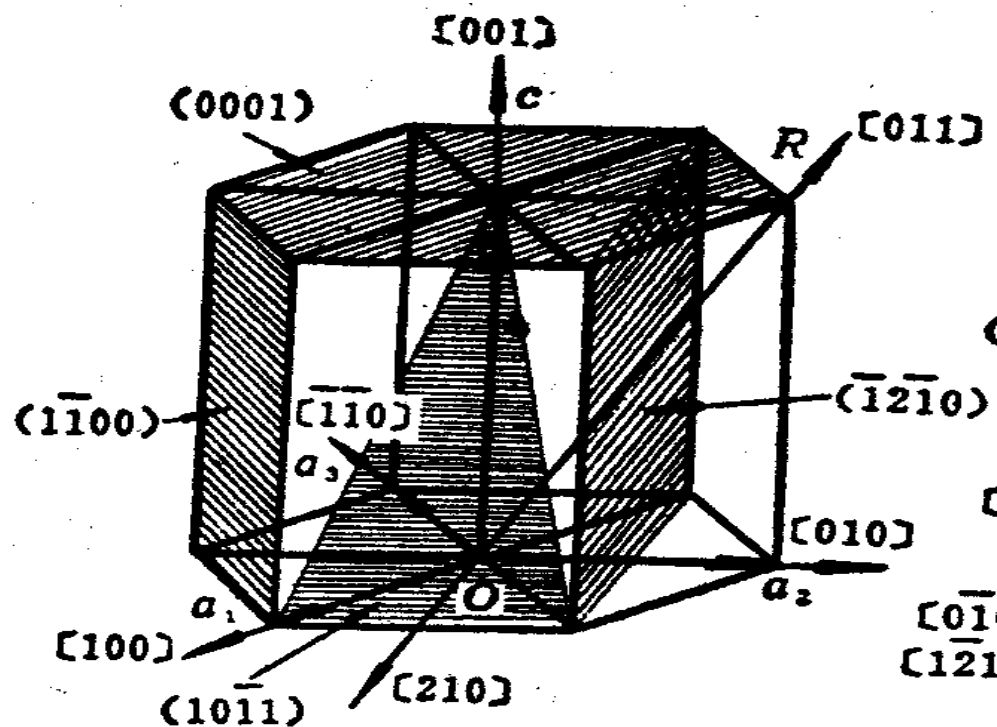
滑移方向为 $\langle 111 \rangle$ ，可能出现的滑移面有 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ ，如果三组滑移面都能启动，则潜在的滑移系数目为：

$$\overbrace{6 \times 2}^{\{110\}} + \overbrace{12 \times 1}^{\{112\}} + \overbrace{24 \times 1}^{\{123\}} = 48$$

bcc滑移系数目最多，但不能同时启动，通常塑性不如**fcc**金属好。

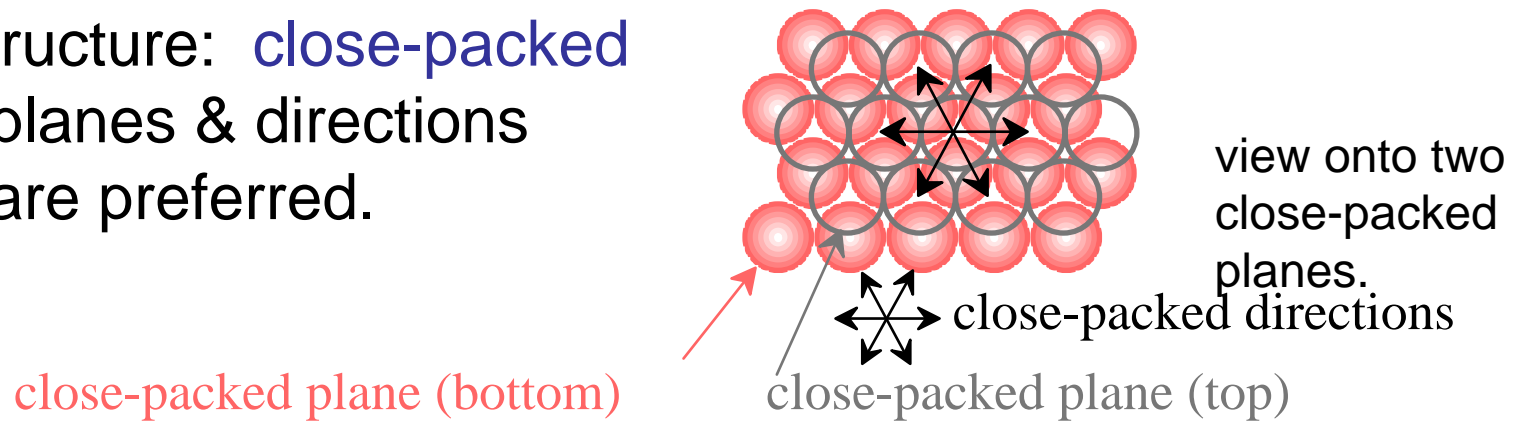
(3) hcp 滑移系

滑移方向为 $\langle 1, 1, -2, 0 \rangle$ ，滑移面为 (0001) 或棱柱面 $\{1, 0, -1, 0\}$ 、棱锥面 $\{1, 0, -1, 1\}$



hcp 滑移系数目较少，故密排六方金属的塑性通常都不太好。

- Structure: **close-packed** planes & directions are preferred.



- Comparison among crystal structures:
 FCC: many close-packed planes/directions;
 HCP: only one plane, 3 directions;
 BCC: none

- Results of tensile testing.

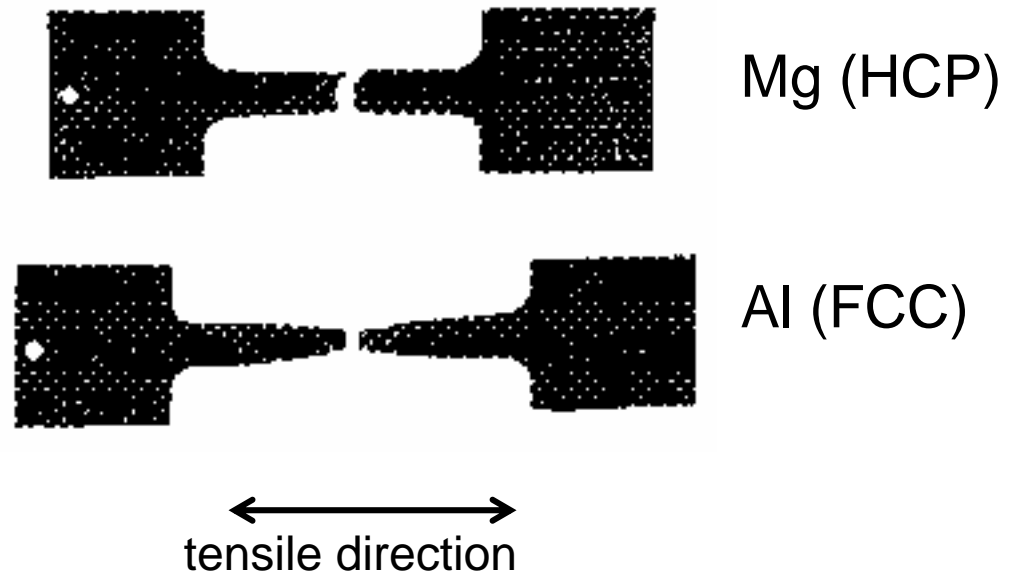


表 8-1 几种常见金属的滑移面和滑移方向

点阵类型	金 属	温度/°C	滑 移 面	滑移方向
面心立方	Al、Cu、Ag、Au、Ni、Pb、 γ -Fe	20	{111}	$\langle 110 \rangle$
	Al	>450	{100}	$\langle 110 \rangle$
体心立方	α -Fe	20	{110}、{112}、{123}	$\langle 111 \rangle$
	W		{112}	$\langle 111 \rangle$
	Mo		{110}、{112}	$\langle 111 \rangle$
	Nb、Ta		{110}	$\langle 111 \rangle$
	α -Fe+4Si		{110}	$\langle 111 \rangle$
	β 黄铜		{110}	$\langle 111 \rangle$
密排六方	Zn、Cd、Mg、Co	20	(0001)	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	Mg	>225	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	Mg+少量Li	20	(0001)、{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	α -Ti	20	(0001)、{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	α -Ti	高温	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$
	Be	20	(0001)、{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$

3. 临界分切应力定律

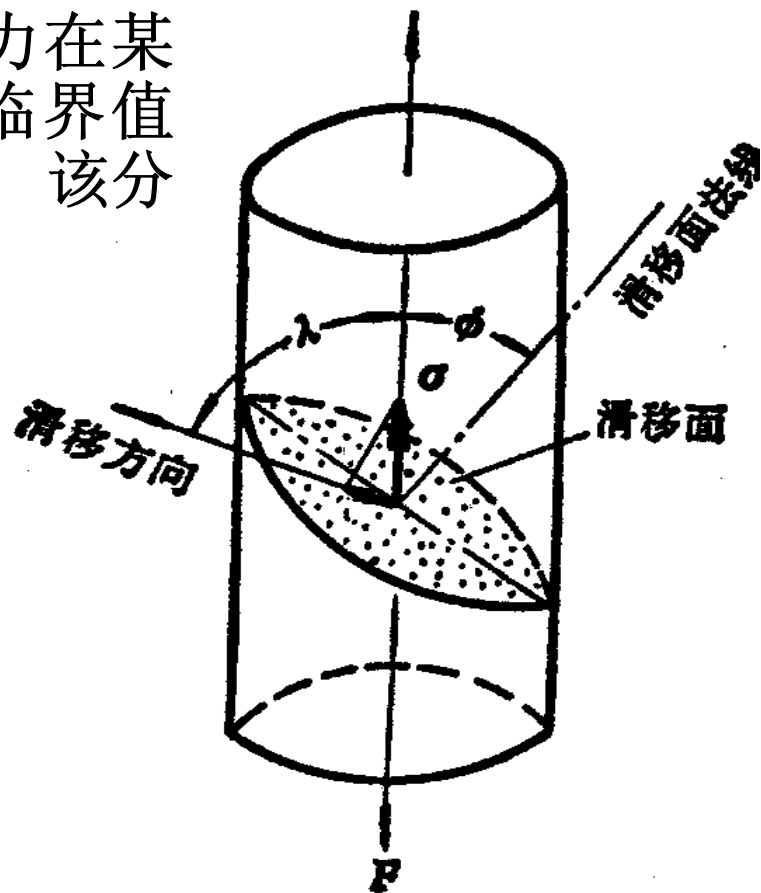
滑移的临界分切应力：只有当外力在某一滑移系中的分切应力达到一定临界值时，该滑移系方可以首先发生滑移，该分切应力称为滑移的临界分切应力。

分切应力 τ 作用在滑移方向使晶体产生滑移，其大小为：

$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

$$\cos \lambda \cos \phi$$

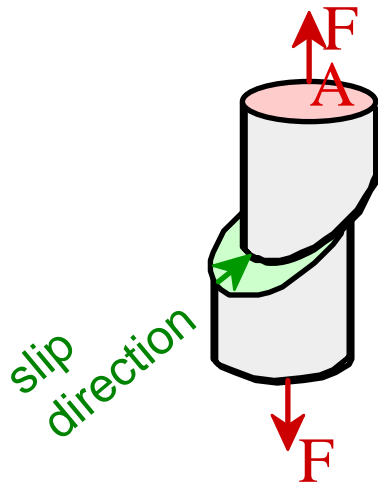
称为**取向因子**，取向因子越大，则分切应力越大。



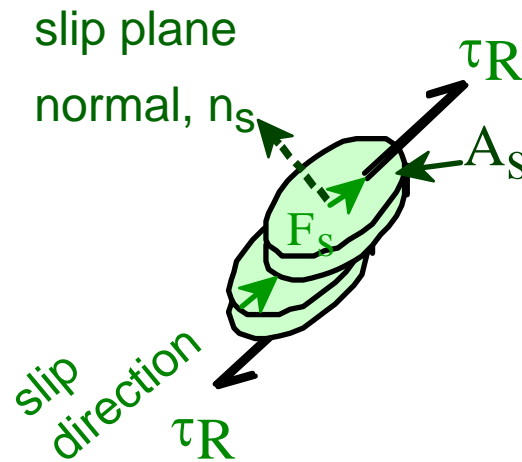
外力在滑移方向的分切应力

- Crystals slip due to a **resolved shear stress, τ** .
- Applied tension can produce such a stress.

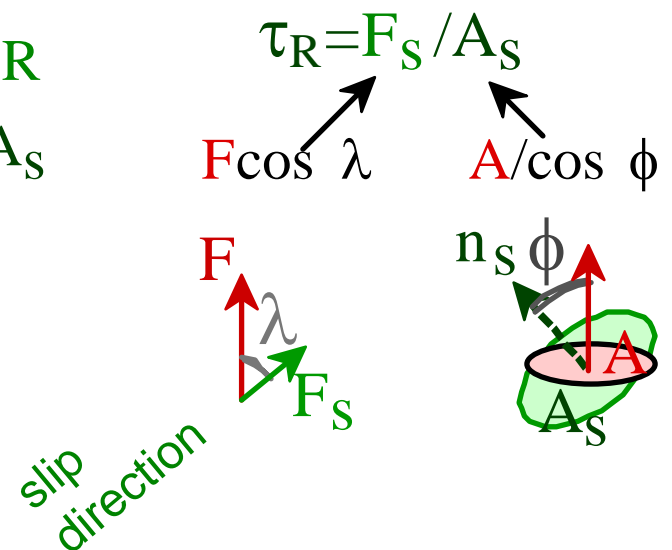
Applied tensile stress: $\sigma = F/A$



Resolved shear stress: $\tau_R = F_S / A_S$



Relation between σ and τ_R



$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

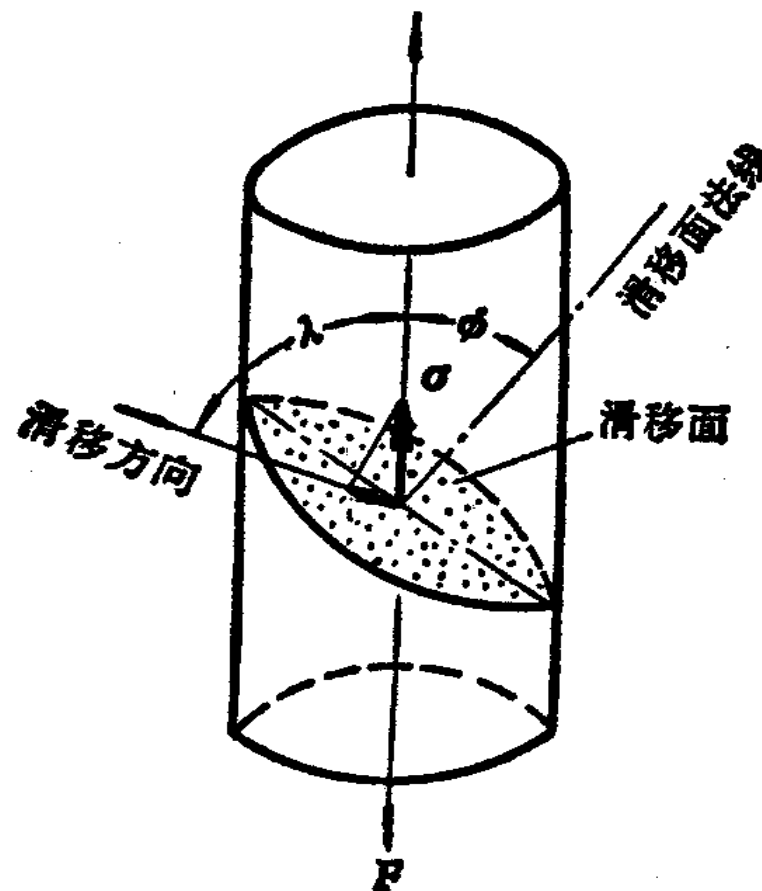
推导

滑移面面积： $Q = \frac{A}{\cos \phi}$
 作用在此滑移面的滑移方向上的分力：

$$F \cos \lambda$$

作用在滑动面上的
分切应力:

$$\tau = \frac{F}{A} \cos \phi \cos \lambda = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$



外力在滑移方向的分切应力

CRITICAL RESOLVED SHEAR STRESS

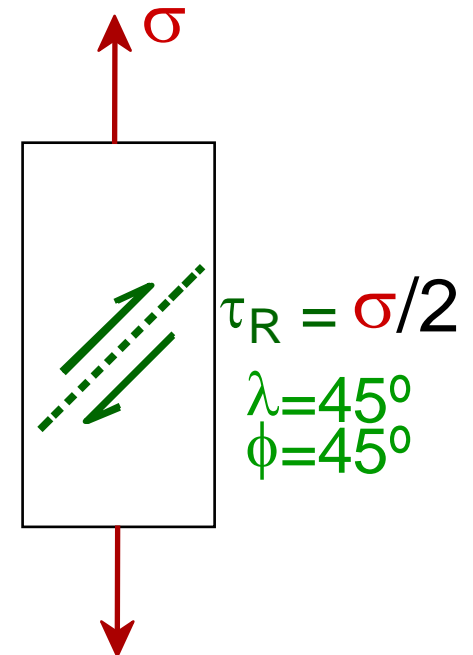
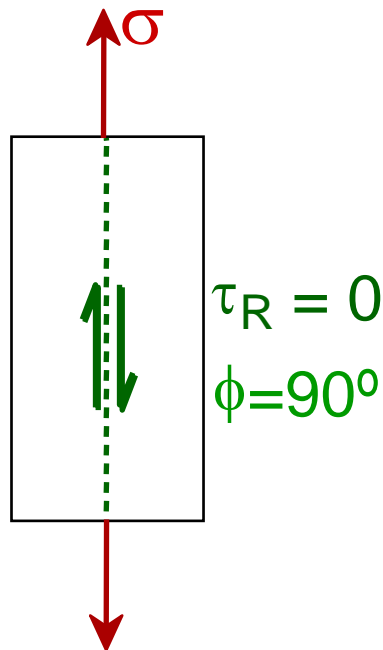
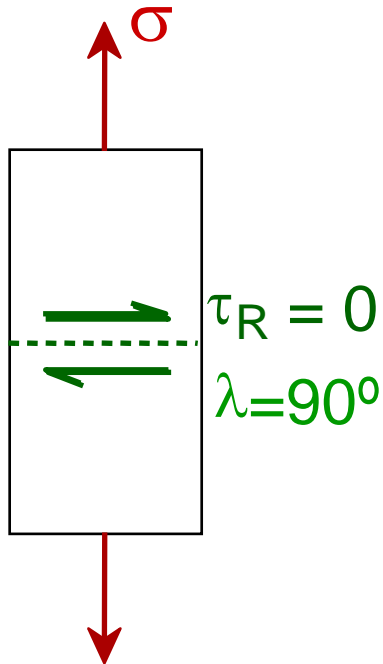
- Condition for dislocation motion:

$$\tau_R > \tau_{CRSS}$$

- Crystal orientation can make it easy or hard to move disl.

↑
typically
 $10^{-4}G$ to $10^{-2}G$

$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$



$$\lambda = 90^\circ - \phi$$

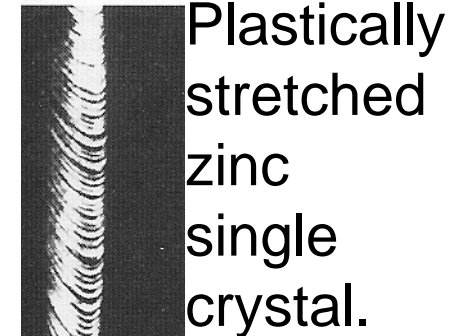
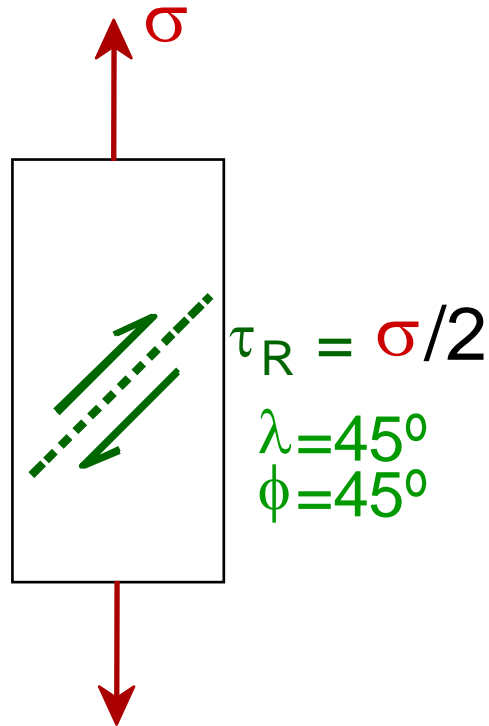
当 $\phi = 45^\circ$ 时，取向因子有最大值 **1/2**，此时得到最大分切应力，滑移处于最有利的取向，也称**软取向**。

当 $\phi = 0^\circ$ 、 90° 时，取向因子为 **0**，称为**硬取向**。

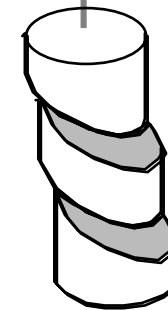
最大分切应力正好落在与外力轴成 **45°** 角的晶面以及与外力轴成 **45°** 角的滑移方向上。

最大分切应力正好落在与外力轴成**45°**角的晶面以及与外力轴成**45°**角的滑移方向上。

$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$



Adapted from Fig. 7.9, Callister 6e. (Fig. 7.9 is from C.F. Elam, *The Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, London, 1935.)

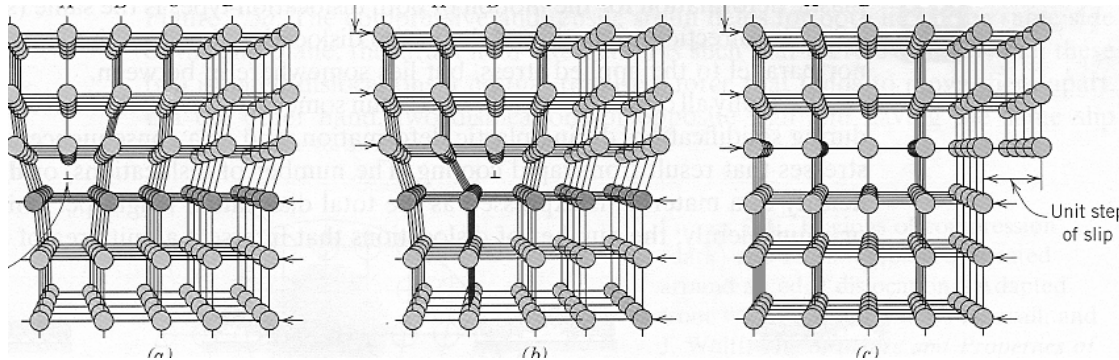


二、滑移的位错机制

晶体的滑移借助位错在滑移面上的运动逐步实现的

DISLOCATION MOTION

- Produces plastic deformation,
- Depends on incrementally breaking bonds.



- If dislocations don't move, deformation doesn't happen!

晶体的滑移借助位错在滑移面上的运动逐步实现的

1. 位错的启动力

(位错中心偏离平衡位置引起晶体能量增加，构成能垒一位错运动阻力，**Peierls—Nabarro力**)

$$\tau \approx \frac{2G}{1-\nu} \exp\left[-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b}\right]$$

a为滑移面的面间距，**b**为滑移方向上的原子间距

密排面 (**a**大)，密排方向 (**b**小)，故派纳力较小
→滑移系的确定

2. 多系滑移

单滑移：只有一个特定的滑移系处于最有利位置而优先开动，形成单滑移。

多系滑移：由于变形时晶体转动的结果，有两组或几组滑移面同时转到有利位向，使滑移可能在两组或更多的滑移面上同时或交替地进行，形成“**双滑移**”或“**多滑移**”。

多滑移时两个滑移面上的位错产生相互作用，形成**割阶或扭折**，使位错进一步运动的阻力增加，因此多系滑移比单系滑移要困难。

两根互相垂直的刃型位错的交割

刃型位错中的割阶与扭折形成

两个螺型位错的交割

刃型位错与螺型位错的交割

带割阶位错的运动

如果发生双滑移或多系滑移，会出现交叉形的滑移带

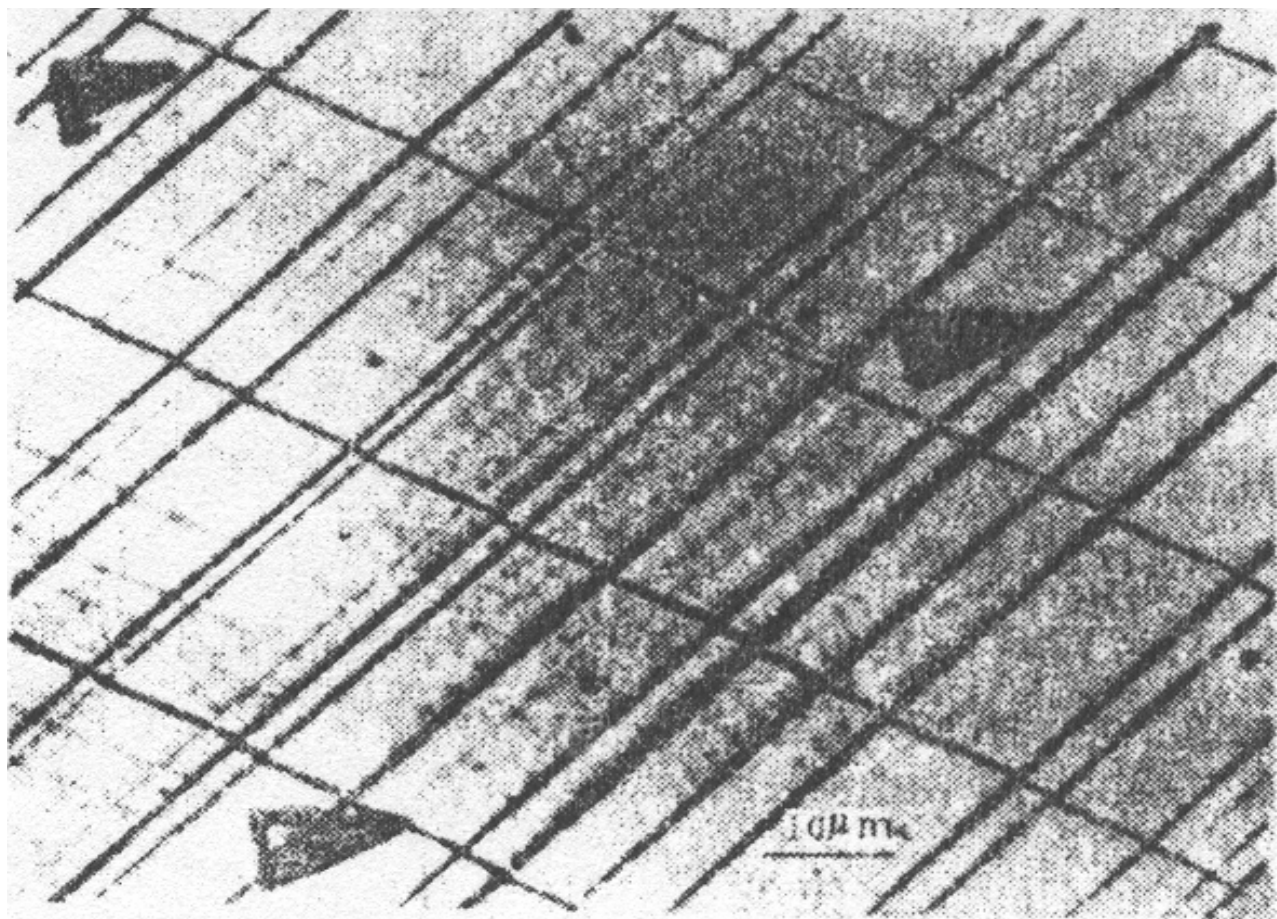


图 8-17 铝在双滑移时产生的交叉形滑移带

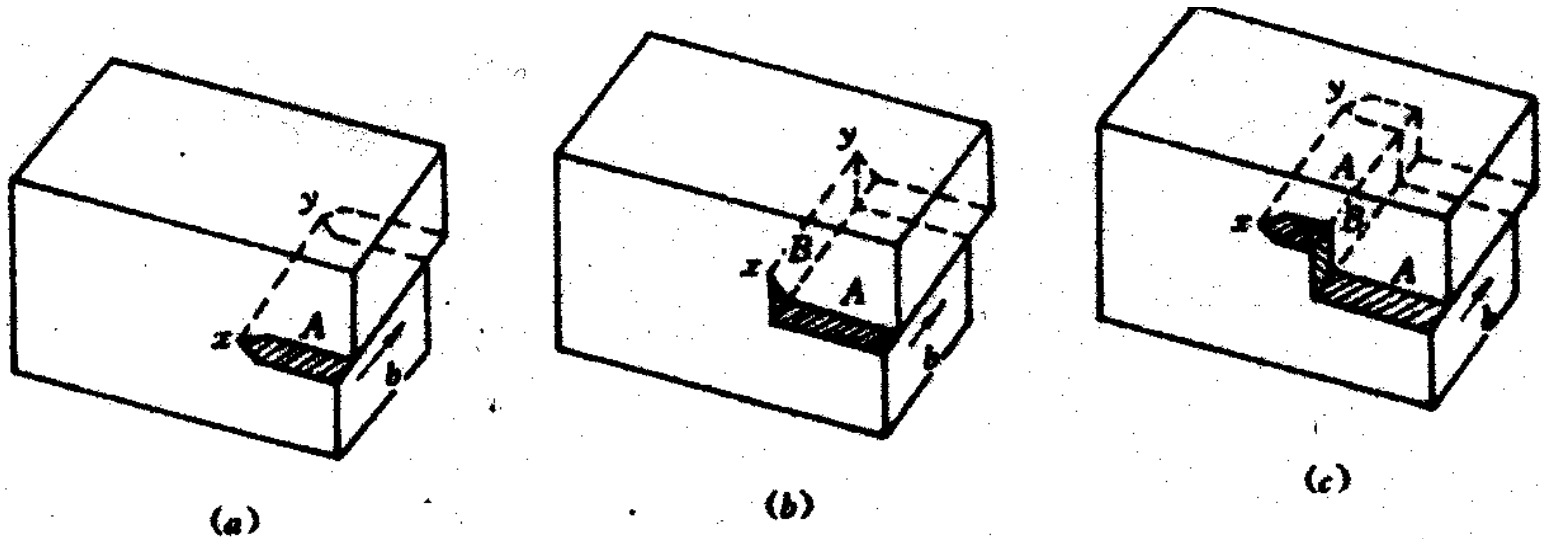
交叉形的滑动带



图 6.8 奥氏体钢中的交叉滑动带

3. 交滑移

螺位错在不改变滑移方向的情况下，从一个滑移面转到另一个滑移面的过程。



扩展位错的交滑移：不全位错须先束集为全螺位错，再进行交滑移。

Cu不易交滑移，无波纹状滑移带

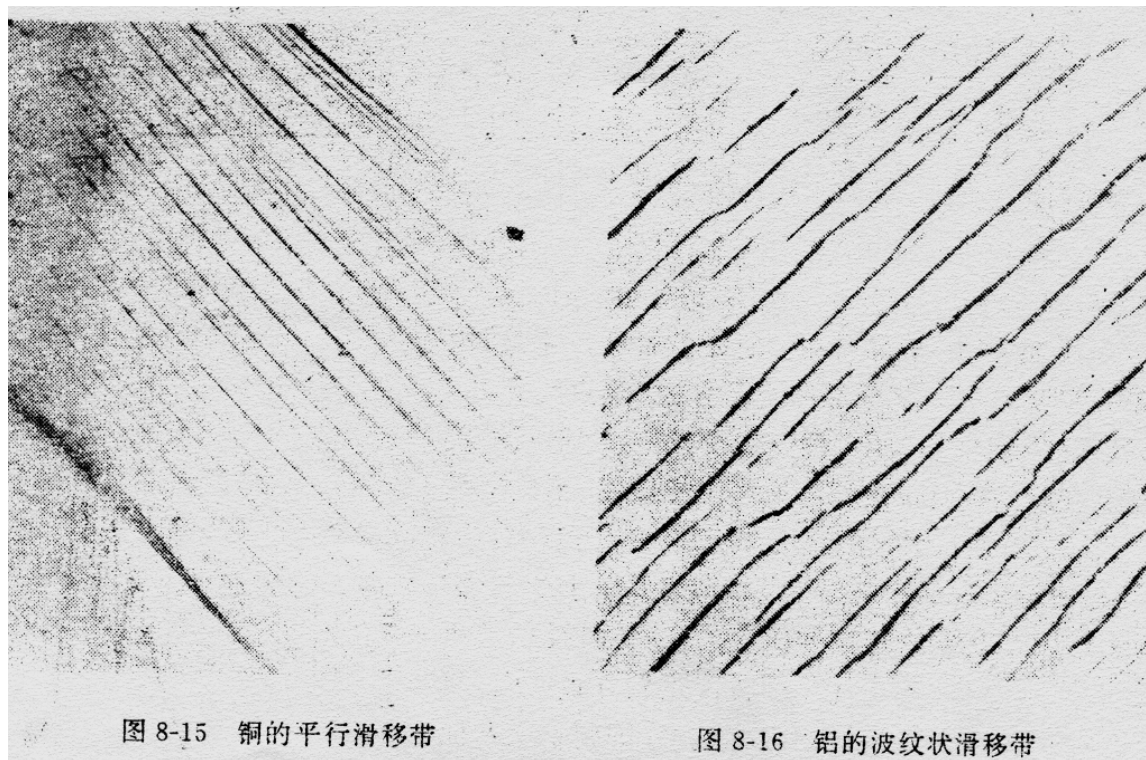


图 8-15 铜的平行滑移带

图 8-16 铝的波纹状滑移带

Al易交滑移，产生波纹状滑移带

4. 复滑移

主滑移系
共轭滑移系

随一次滑移进行，晶体的取向相对于加载轴发生变化，到一定程度后，另一个等价的滑移系也能启动，称共轭滑移系。

三、滑移过程的次生现象

滑移产生的不均匀塑性变形区：

1. 扭折带

2. 形变带

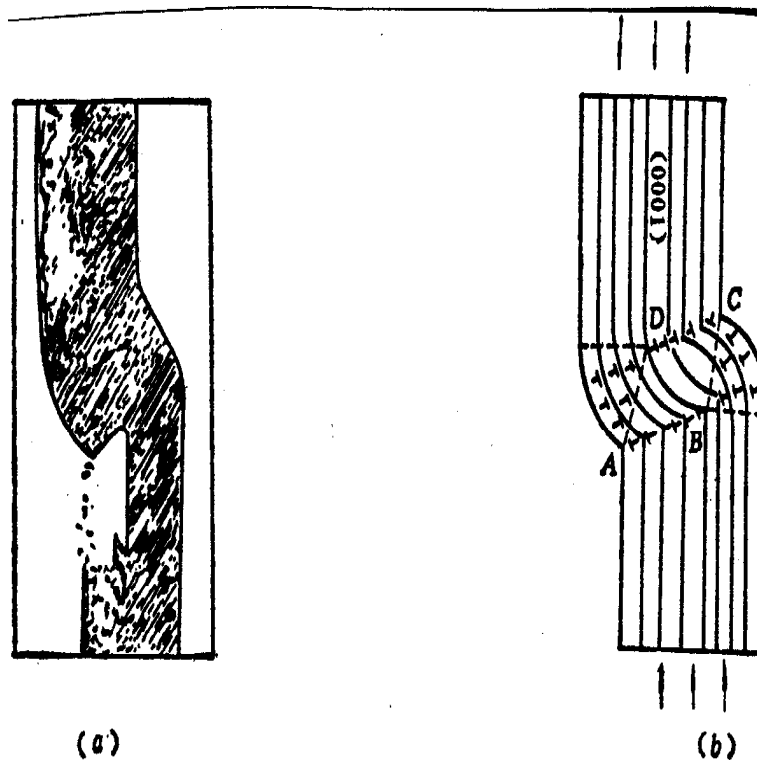


图 7-21 单晶镓被压缩时的扭折

(a) 扭折状态；(b) 扭折示意图