

## 第三章 金属的塑性变形与再结晶

- ★ 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标
- ★ 第二节 金属的塑性变形
- ★ 第三节 塑性变形对组织和性能的影响
- ★ 第四节 回复与再结晶
- ★ 第五节 金属的热加工



# 第三章 金属的塑性变形与再结晶

## 塑性变形

### 1. 压力加工:

得到预期外形的工件

改善金属内部组织，提高金属的强度和韧性

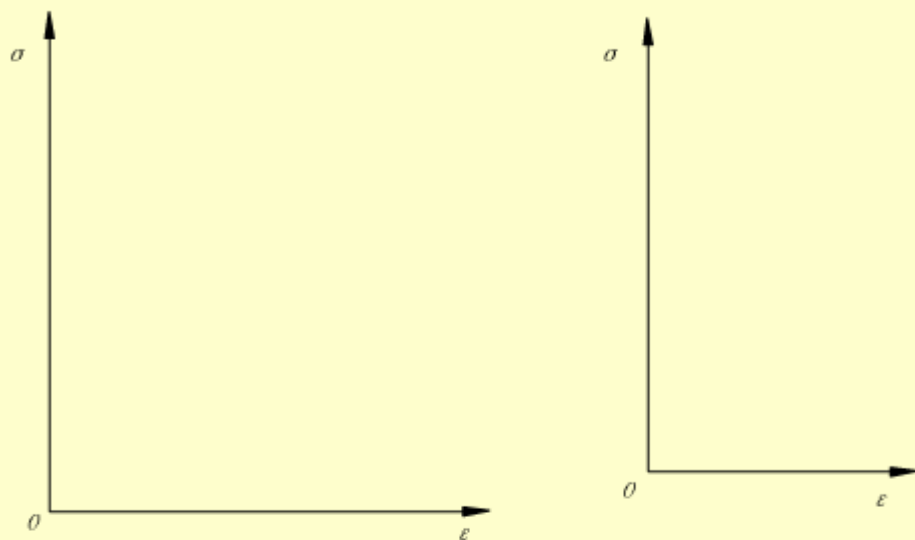
### 2. 材料在使用中发生变形



# 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标

## 一、金属变形的特性

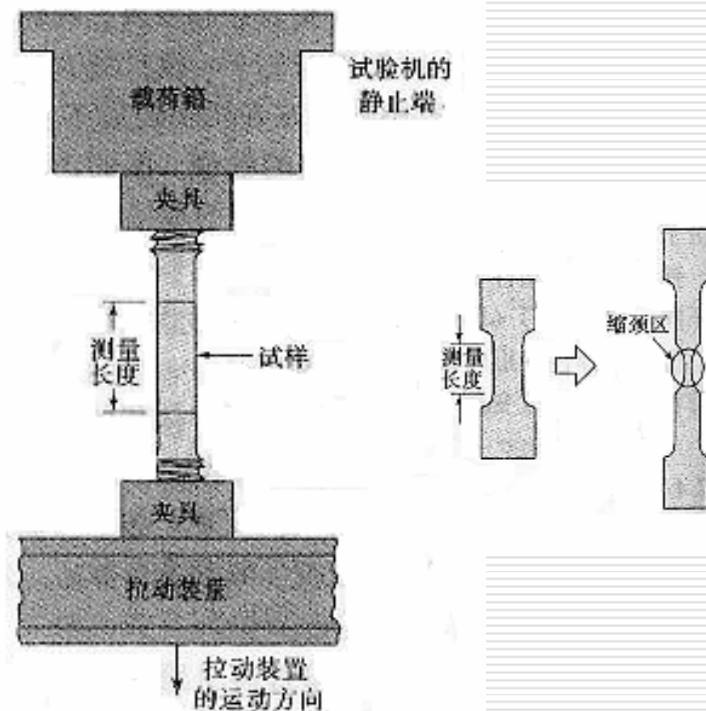
变形三阶段：弹性变形、塑性变形、断裂



低碳钢

铸铁

低碳钢和铸铁的  $\sigma - \varepsilon$  曲线



材料的拉伸试验



# 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标

## 二、力学性能指标

### 1. 强度指标:

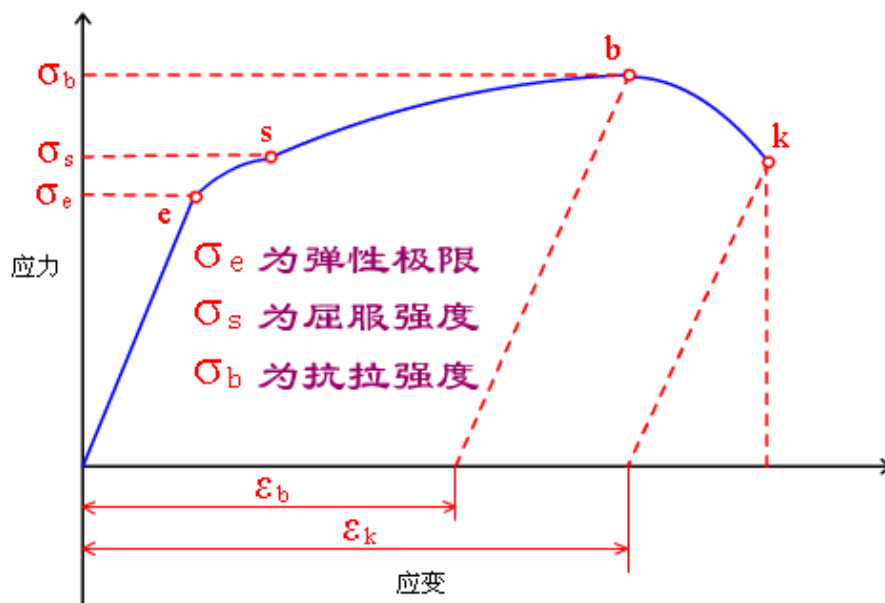
(1) 比例极限( $\sigma_p$ )与弹性极限( $\sigma_e$ )

(2) 屈服强度( $\sigma_s$ 与 $\sigma_{0.2}$ )

——机械设计指标

(3) 抗拉强度( $\sigma_b$ )

(4) 疲劳强度



软钢的应力-应变曲线

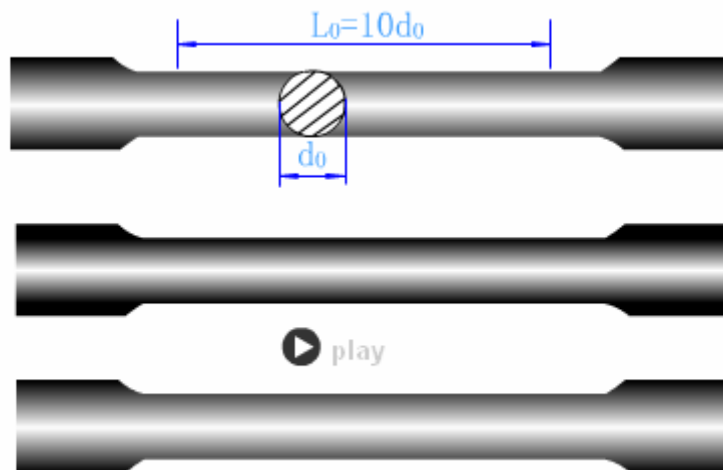


# 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标

## 2、塑性指标：

延伸率 ( $\delta$ )

断面收缩率 ( $\psi$ )

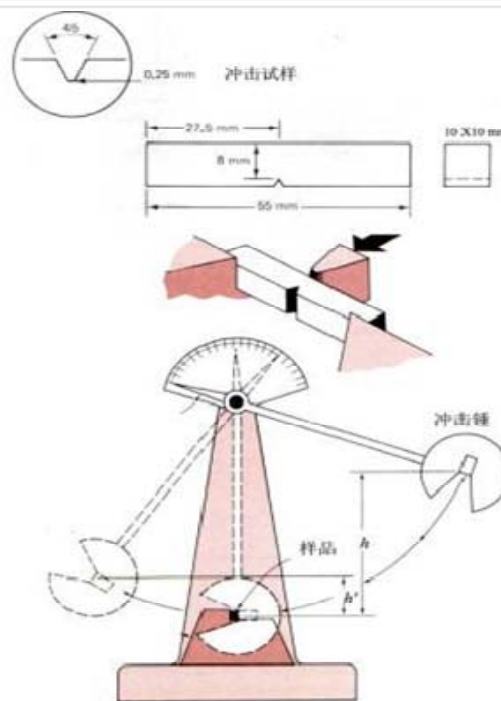
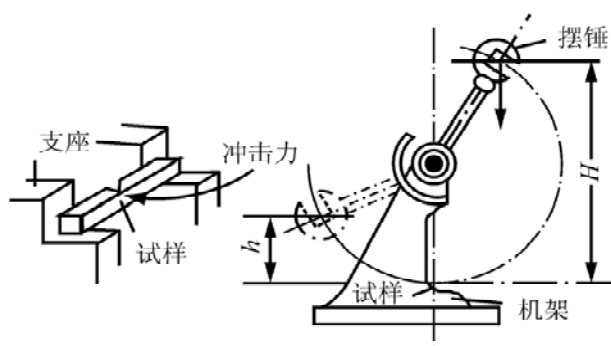


# 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标

## 3、韧性指标

(1) 冲击韧度( $\alpha_k$ )

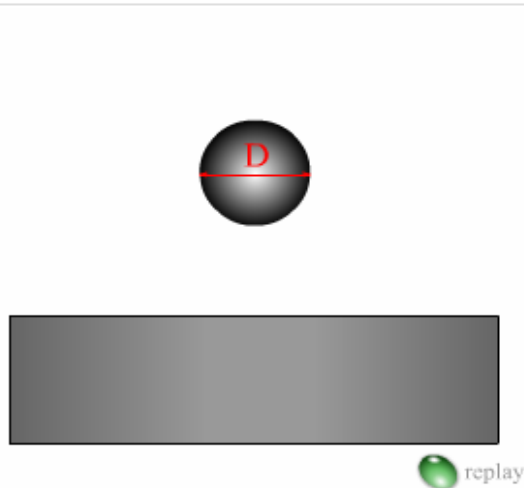
(2) 断裂韧度



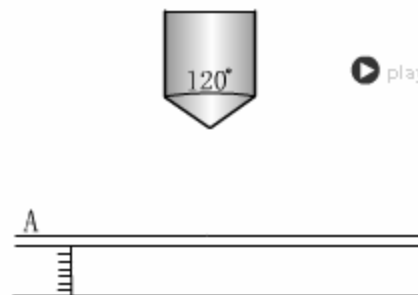
# 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标

## 4、硬度指标

布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)、肖氏硬度(HS)。



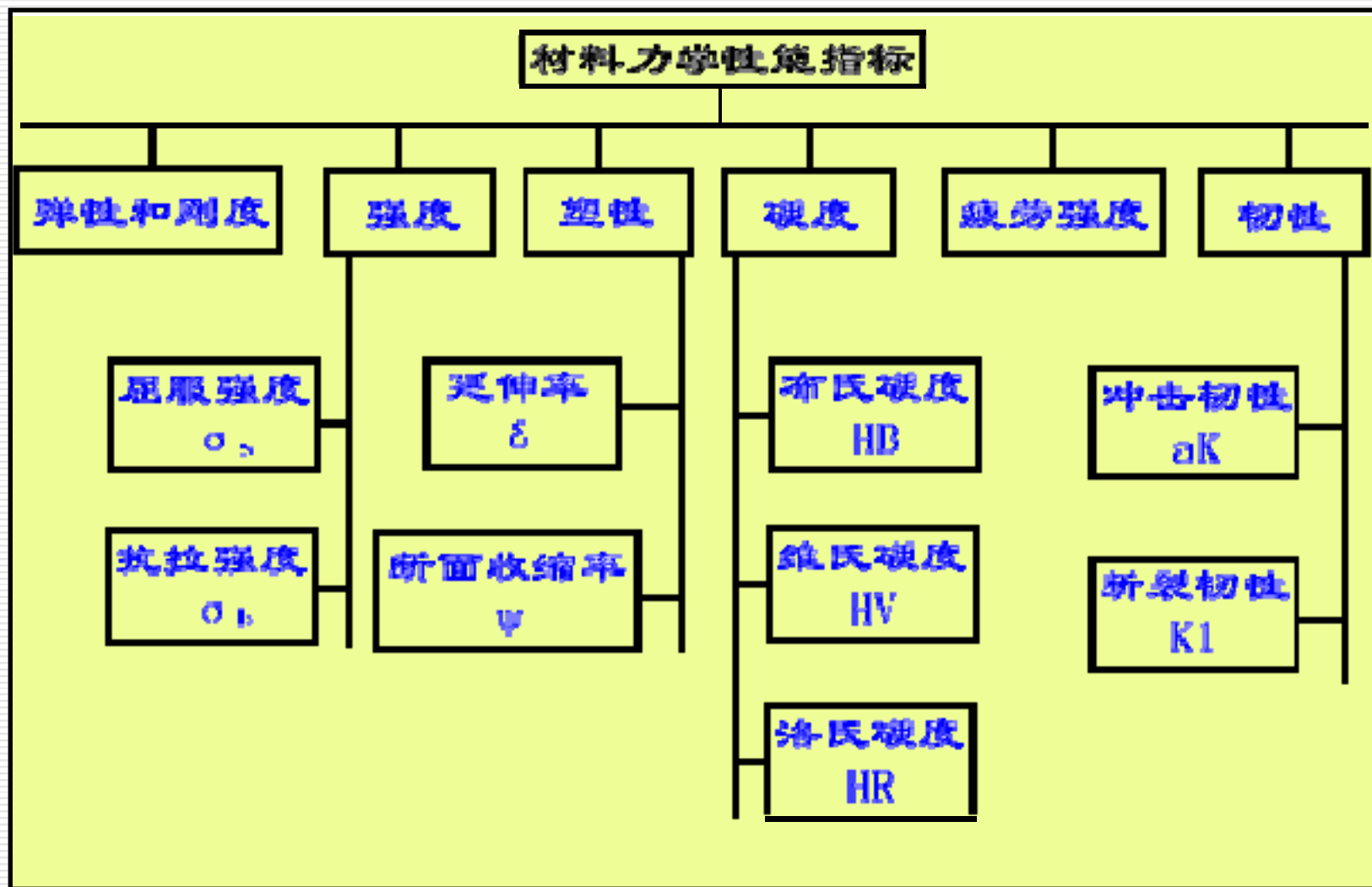
布氏硬度(HB)



洛氏硬度(HR)



# 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标



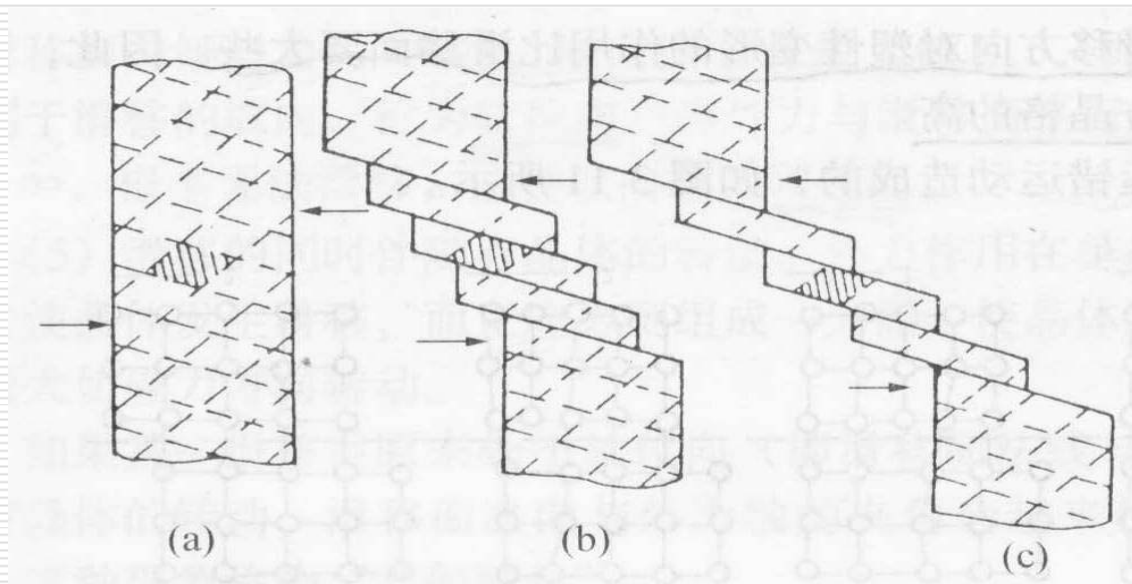


## 第二节 金属的塑性变形

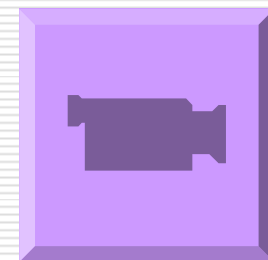
### 一、单晶体的塑性变形

#### 1. 滑移变形

晶体的一部分相对于另一部分沿一定晶面(滑移面)和晶向(滑移方向)发生相对位移——主要变形方式



单晶体滑移示意图



## 第二节 金属的塑性变形

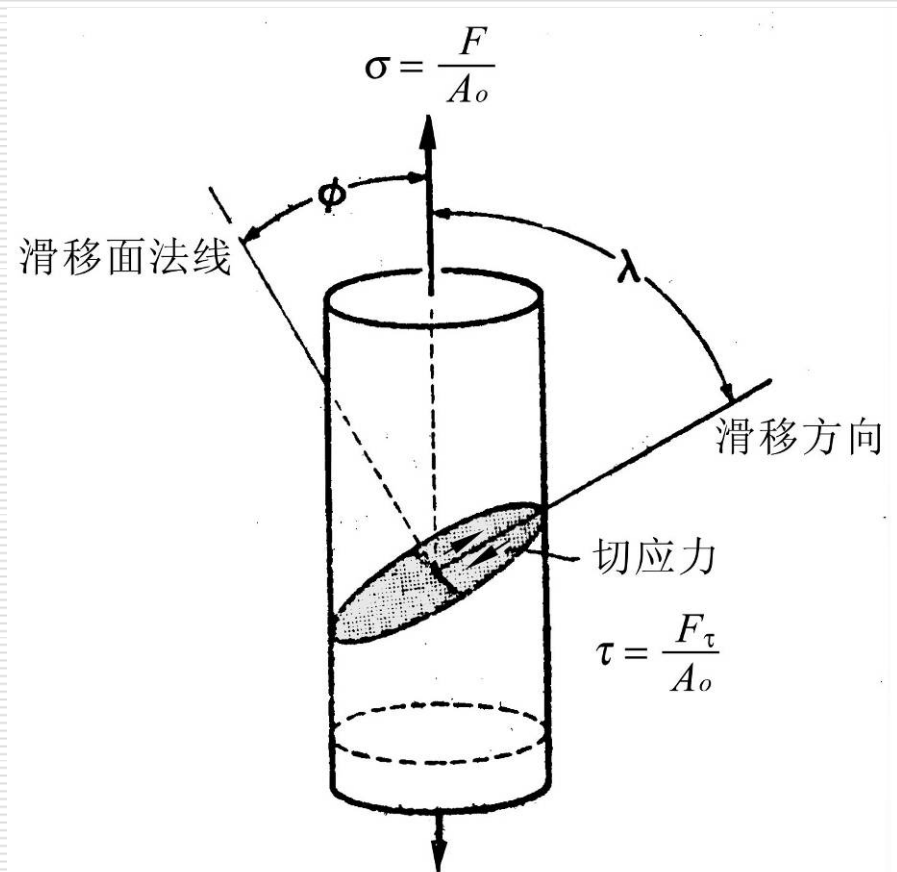
### 2. 滑移的特点

(1) 只能在切应力作用下发生

**切应力：**平行于滑移面。

使晶格在发生弹性歪扭之后进一步造成滑移。

**正应力：**垂直于滑移面，  
使晶格弹性伸长，甚至进一步拉断。



外力分解



## 第二节 金属的塑性变形

(2) 滑移沿晶体中原子密度最大的晶面(滑移面)和晶向(滑移方向)发生

滑移系：一个滑移面和其上的一个滑移方向组成一个滑移系。

滑移系数：滑移面数 $\times$ 滑移面上的滑移方向数

滑移系 $\uparrow$ （滑移系相同时滑移方向 $\uparrow$ ），塑性 $\uparrow$

晶体结构	材料	滑移面	滑移方向
面心立方	Al、Cu、Ni	$\{111\}$	$\langle 110 \rangle$
体心立方	$\alpha$ -Fe	$\{110\}\{112\}\{123\}$	$\langle 111 \rangle$
	Mo、Nb、Ta	$\{110\}$	$\langle 111 \rangle$
密排六方	Be、Co、Mg、Zn、Cd	$\{0001\}$	$\langle 11-20 \rangle$
	TiZ	$\{10-10\}$	$\langle 11-20 \rangle$

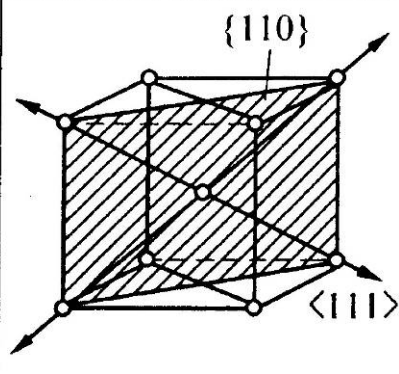
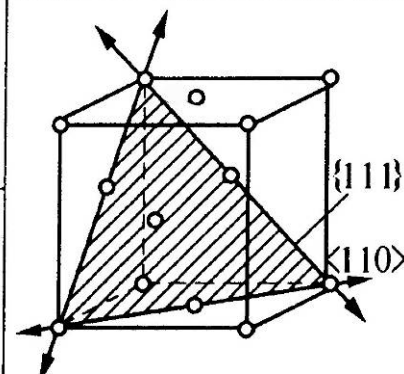
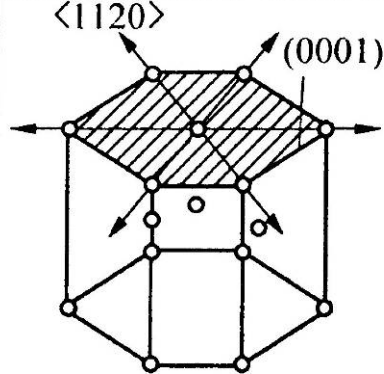
# 第二节 金属的塑性变形

## 典型金属中的滑移系

**bcc:**  $\{110\} \ 6 \times \langle 111 \rangle \ 2 = 12$

**fcc:**  $\{111\} \ 4 \times \langle 110 \rangle \ 3 = 12$

**hcp:**  $\{0001\} \ 1 \times \langle 1120 \rangle \ 3 = 3$

晶体结构	体心立方结构		面心立方结构		密排六方结构	
滑移面	$\{110\}$		$\{111\}$		$\{0001\}$	
滑移方向	$\langle 111 \rangle$		$\langle 110 \rangle$		$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	
滑移系数目	$6 \times 2 = 12$		$4 \times 3 = 12$		$1 \times 3 = 3$	



## 第二节 金属的塑性变形

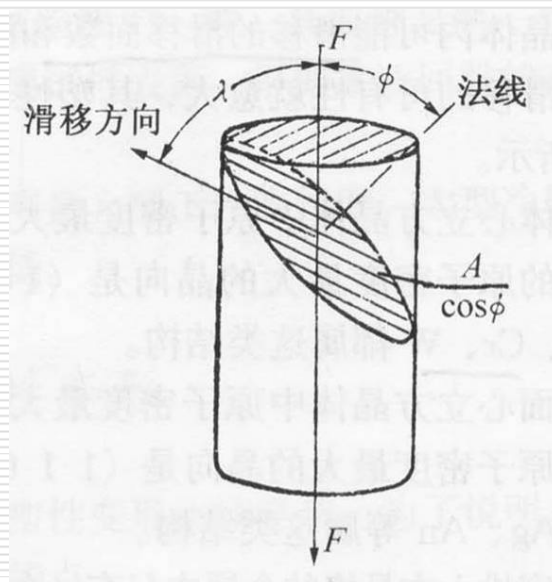
### (3) 滑移的临界分切应力

开始滑移所需要的最小分切应力

$$\tau_k = \sigma_s \cos \phi \cos \lambda$$

$$\text{或} \quad \sigma_s = \frac{\tau_k}{\cos \phi \cos \lambda}$$

$\cos \phi \cos \lambda$  称为取向因子



**软取向：**  $\phi = 45^\circ$  ,  $\lambda = 45^\circ$  .

当滑移面法线、滑移方向、外力轴处于同一平面，且  $\phi = 45^\circ$  、  $\lambda = 45^\circ$  )，取向因子=0.5，分切应力最大，最有利于滑移。

**硬取向：**  $\phi = 90^\circ$  或  $\lambda = 90^\circ$

∵外力//滑移面 ( $\phi = 90^\circ$ ) 或垂直 ( $\lambda = 90^\circ$ ) 时，取向因子=0， $\sigma_s = \infty$ ，滑移无法进行。



## 第二节 金属的塑性变形

---

### (4) 滑移的同时伴随着晶体的转动——几何硬化

因晶体的转动使滑移面法向与外力轴的夹角越来越远离 $45^\circ$ ，滑移越来越困难。

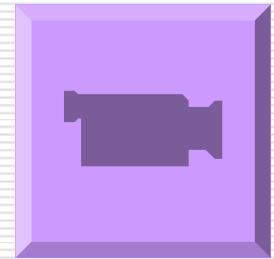
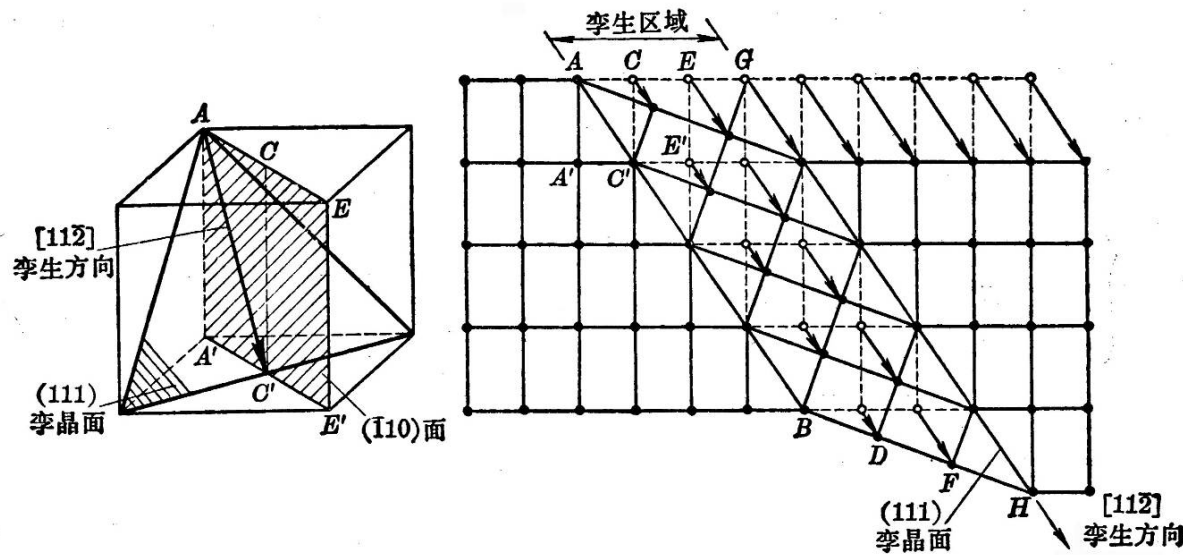
### (5) 滑移前后晶体点阵类型不变，晶体位向也不变。



## 第二节 金属的塑性变形

### 3. 孪生变形

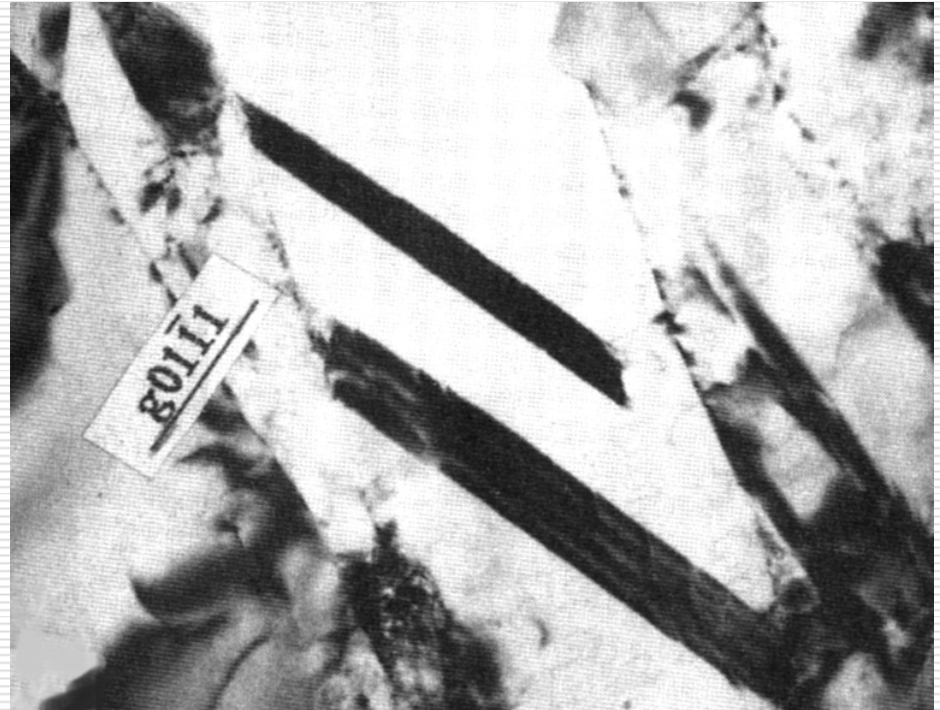
(1) 孪生过程： 在切应力的作用下晶体的一部分沿一定的晶面(孪生面)和一定的晶向(孪生方向)相对于另一部分晶体作均匀切变。



## 第二节 金属的塑性变形

### (2) 孪生与孪晶

变形部分与未变形部分以孪晶面为分界面构成镜面对称的位向关系。对称的两部分晶体称为**孪晶**。将形成孪晶的过程称为**孪生**。



特点：

临界分切应力 $\gg$ 滑移，滑移很难进行 $\rightarrow$ 发生孪生。

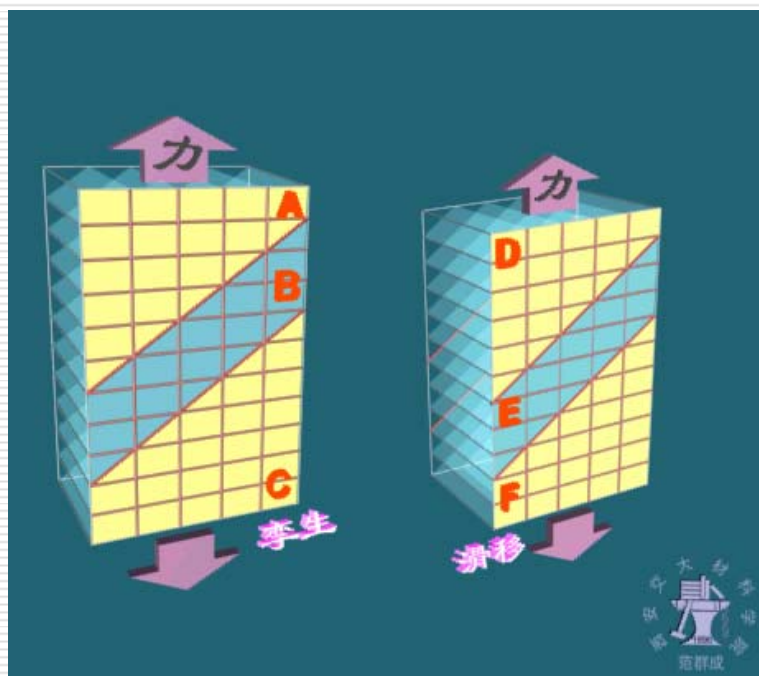




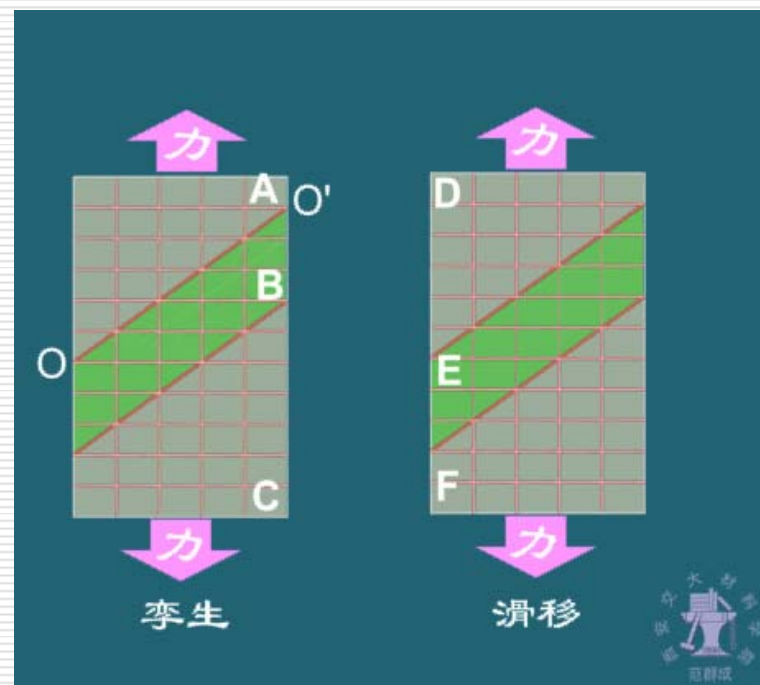
## 第二节 金属的塑性变形

### 单晶体的两种塑性变形方式比较

立体图



前视图



# 第二节 金属的塑性变形

## 二、多晶体的塑性变形

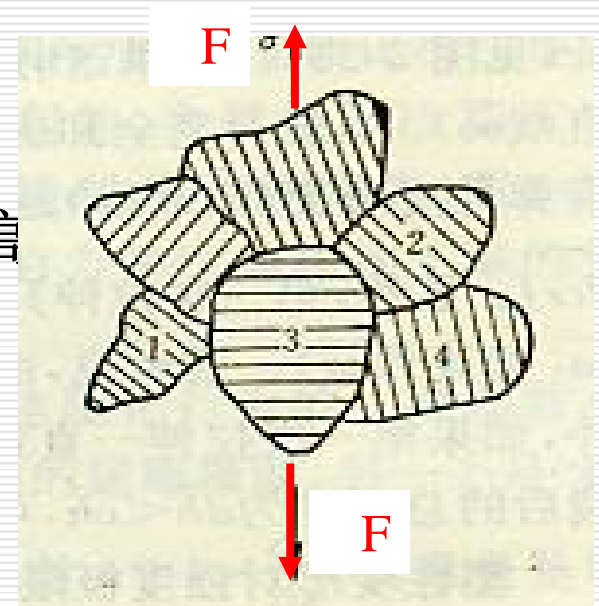
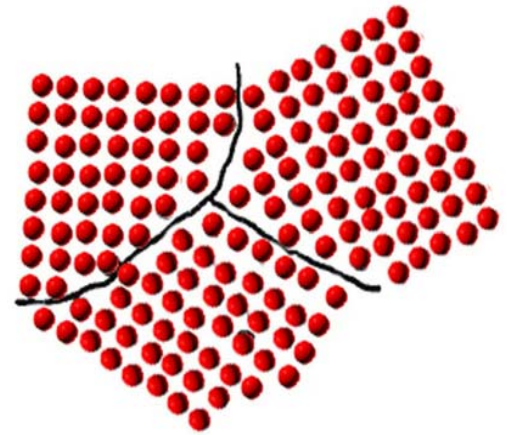
### 1. 基本特征

基本机制：滑移、孪生

与单晶体的不同：晶界、位向差

特点：

- (1) 不同时性——逐批进行
- (2) 相互协调性——变形抗力比单晶体高
- (3) 不均匀性——造成内应力



## 第二节 金属的塑性变形

### 2. 晶粒大小的影响

晶粒细而均匀：

(1)  $\sigma_b \uparrow$ ：晶界  $\uparrow$ ，塑变抗力  $\uparrow$ ，强度  $\uparrow$

——晶界强化

细晶强化——工业生产中重要的强化方法；

(2) 塑性、韧性  $\uparrow$ ：变形分散、均匀，变形量  $\uparrow \rightarrow$  塑性、韧性  $\uparrow$ ；

(3) 内应力  $\downarrow$ 。



Hall-Petch关系

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

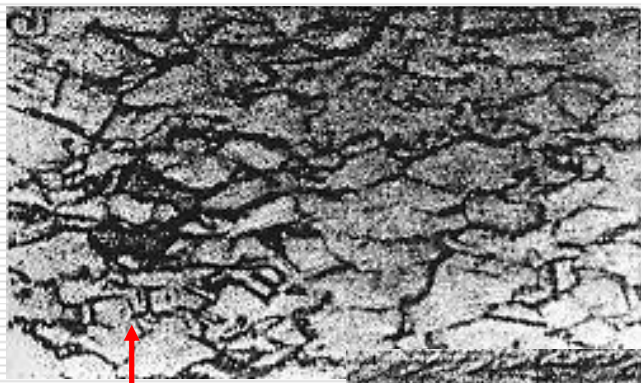


# 第三节 塑性变形对组织和性能的影响

## 一、对组织的影响

### 1、晶粒变形—纤维组织：

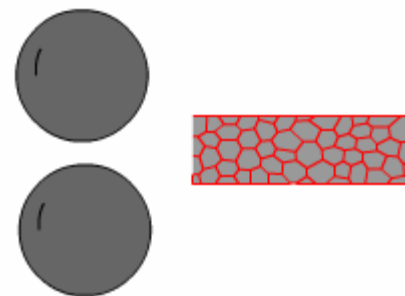
金属经塑性变形后晶粒沿变形方向拉长、压扁，当变形量↑↑时，成纤维状——性能具有明显的方向性



30%压缩率



99%压缩率

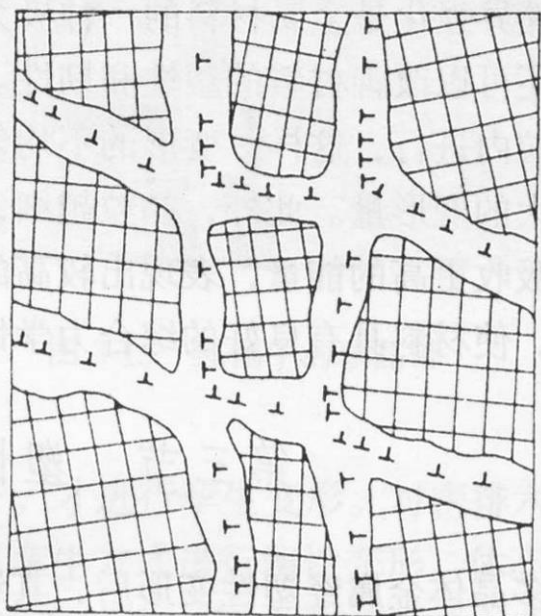




# 第三节 塑性变形对组织和性能的影响

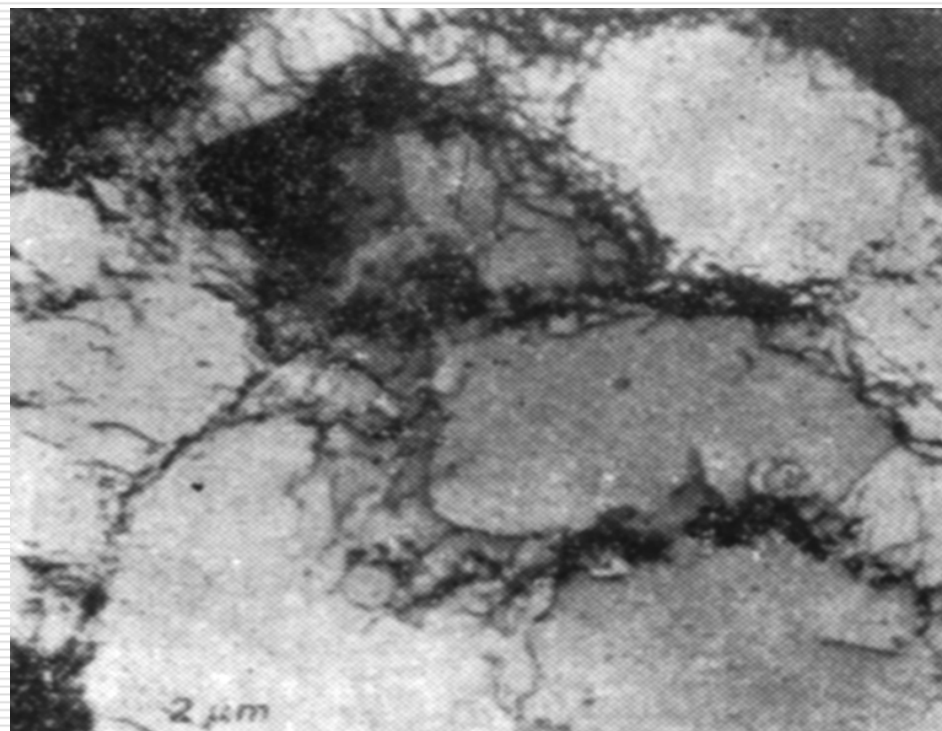
## 2、亚结构细化

位错密度增加, 晶粒破碎, 产生加工硬化现象



严重畸变区 晶格较完整的小块

金属冷加工后的亚结构示意图



# 第三节 塑性变形对组织和性能的影响

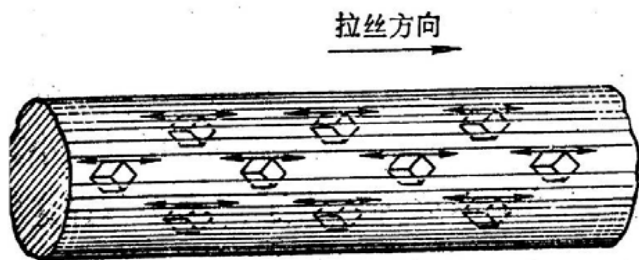
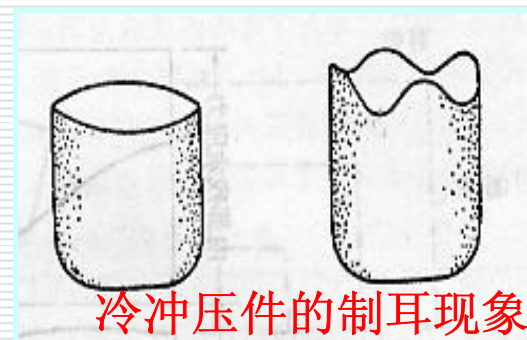
## 3、变形组织

当变形量  $\uparrow \uparrow \uparrow$  时，因晶粒转动而使各晶粒的取向会趋于一致而形成的结构。

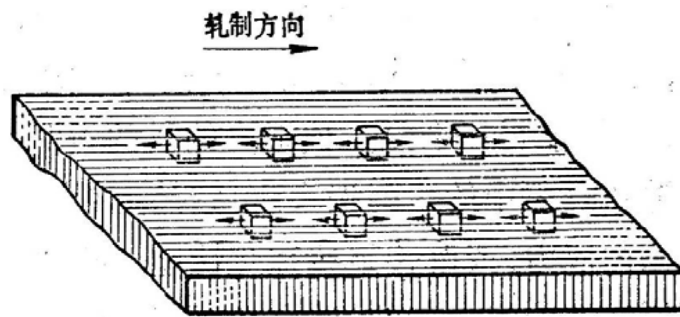
- 某晶面（晶向）//外力方向：板（丝）织构；
- 产生织构后：性能有方向性。

一般不利，如冲压时的制耳现象。

有时可利用，如硅钢片  $\langle 100 \rangle$  丝织构，导磁率  $\uparrow$ 。



丝织构



板织构

# 第三节 塑性变形对组织和性能的影响

## 二、对性能的影响

1. 加工硬化：塑性变形程度 $\uparrow$ ，强度、硬度 $\uparrow$ ，塑性、韧性 $\downarrow$

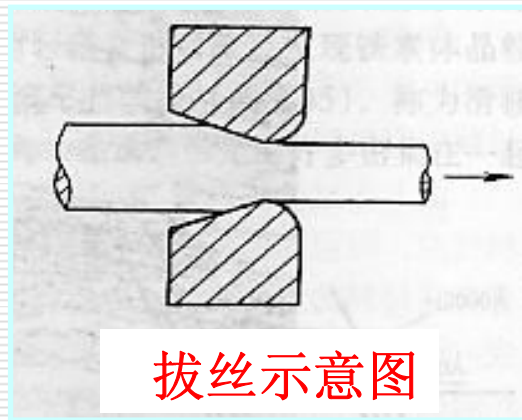
产生原因：位错运动、互相交割 $\rightarrow$ 塞积、割阶、固定、缠结等 $\rightarrow$ 阻碍位错进一步运动 $\rightarrow$ 变形抗力 $\uparrow$

加工硬化的作用：

使压力加工制品截面均匀；

提高金属强度、硬度和耐磨性。

——不能热处理强化的纯金属和某些合金  
不利于继续变形—须用再结晶退火消除之。

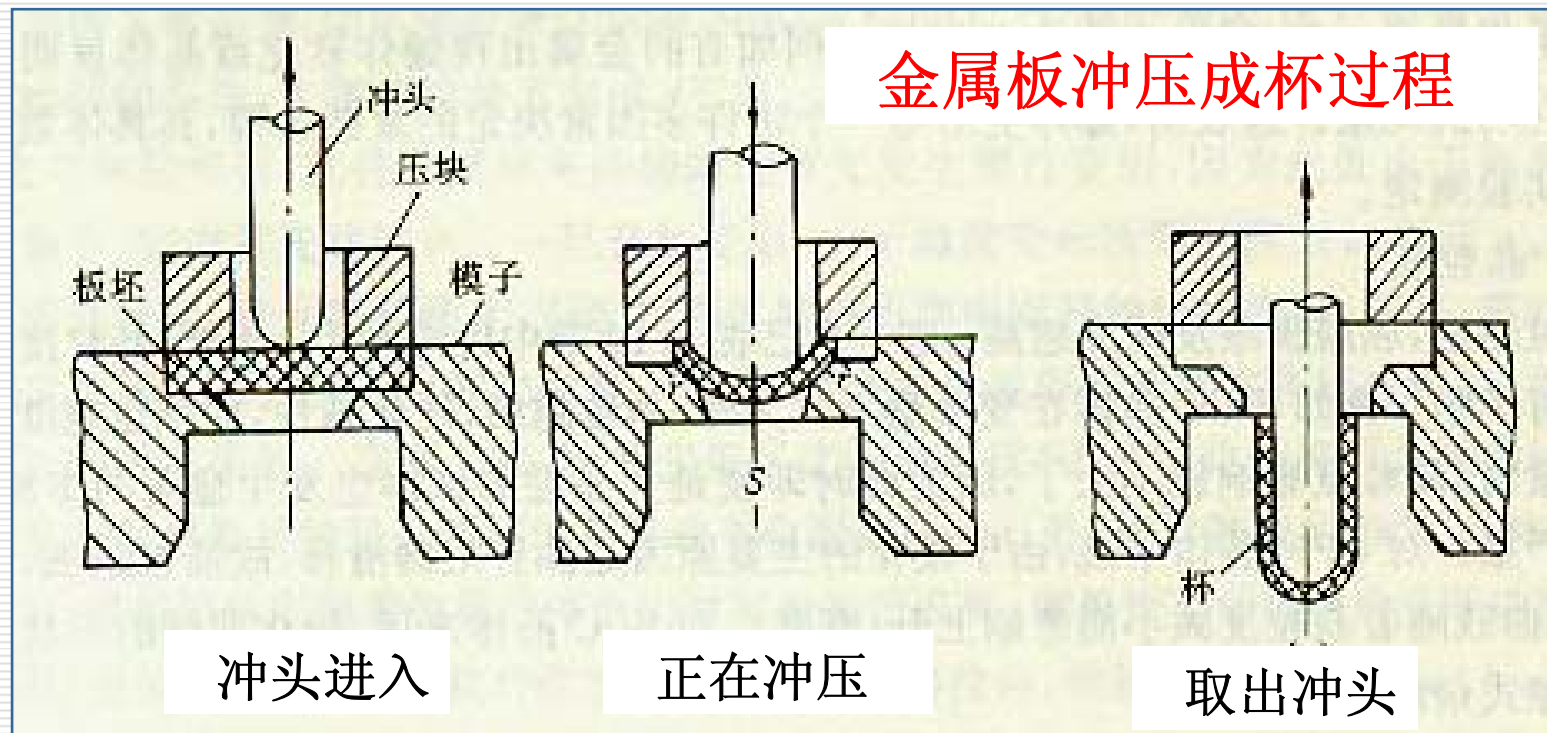


拔丝示意图



# 第三节 塑性变形对组织和性能的影响

使压力加工制品截面均匀





# 第三节 塑性变形对组织和性能的影响

## 2、残留内应力和点阵畸变

- (1) 宏观内应力（第一类）——各部分变形不均匀而造成
- (2) 微观内应力（第二类）——各晶粒或亚晶粒内变形不均匀而造成
- (3) 点阵畸变（第三类）——缺陷（位错和空位） ↑ ↑

⇒ {  
① 强度、硬度 ↑  
② 变形金属能量 ↑

——热力学不稳定状态

⇒ “回复与再结晶”驱动力

# 第四节 回复与再结晶

## 一、回复

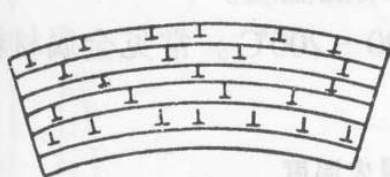
### 1. 特点:

组织、性能变化不大，但电阻率和微观内应力显著降低

### 2. 微观结构变化

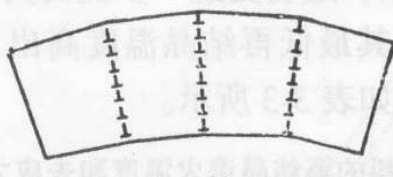
随 $T \uparrow$ ，点缺陷密度 $\downarrow$ ：点缺陷运动 $\rightarrow$ 晶界、位错或相互作用消失，电阻率 $\downarrow$ 。

多边形化：位错从高能混乱排列 $\rightarrow$ 低能量规则排列，成小角度亚晶界，内应力 $\downarrow \downarrow$



(a)

多边形化前



(b)

多边形化后

**回复的应用：**去应力退火，  
如：冷卷弹簧， $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$



# 第四节 回复与再结晶

## 二、再结晶

### 1. 再结晶过程

$T \uparrow \uparrow$ ，原子活动能力  $\uparrow \uparrow$

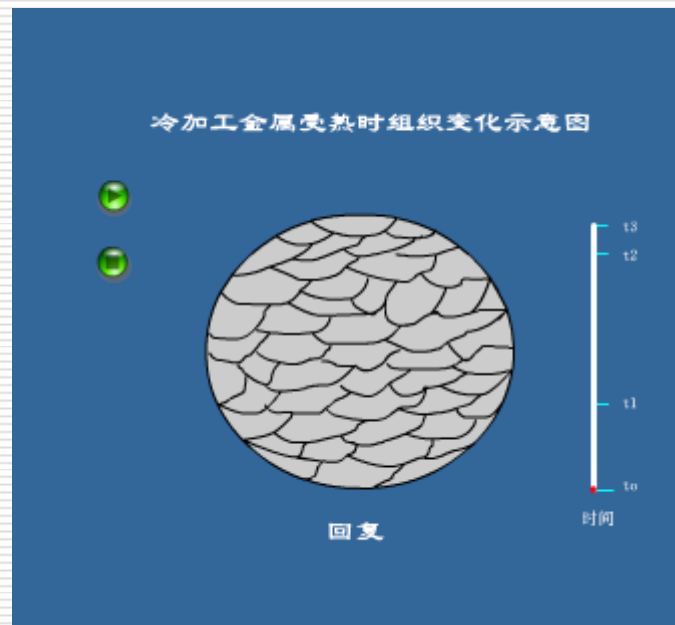
● 显微组织明显变化→新的等轴晶粒

● 加工硬化现象消失，

力学性能和物理性能恢复。

① 都是形核与长大的过程

② 再结晶的晶格类型、成分不变，在一个温度范围内进行



# 第四节 回复与再结晶

## 2. 再结晶温度

再结晶开始的最低温度

$$T_{\text{再}} \approx 0.4 T_{\text{熔}}$$

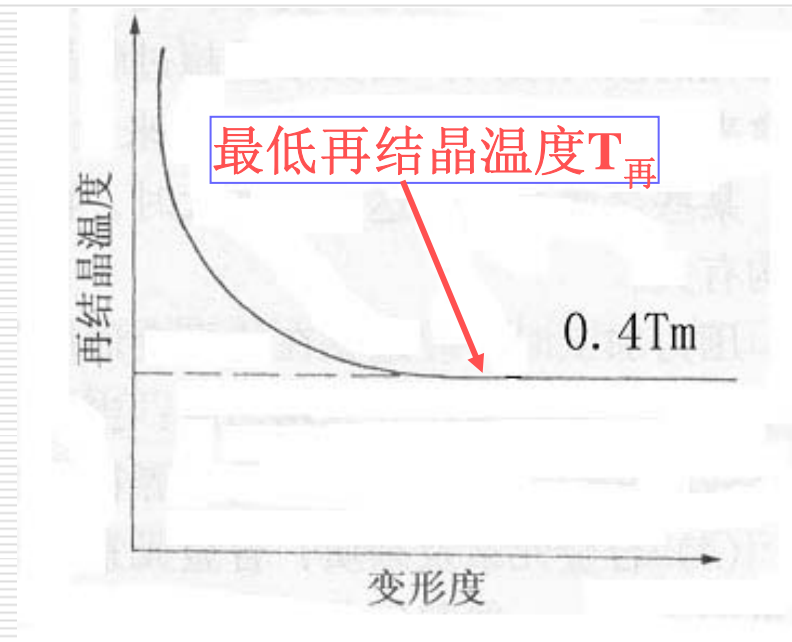
影响因素：

### (1) 变形度

变形度  $\uparrow$ ， $T_{\text{再}} \downarrow$ 。变形度达到一定值后， $T_{\text{再}}$  也趋于一定值（最低再结晶温度  $T_{\text{再}}$ ）

### (2) 金属的纯度

纯度  $\downarrow$ ， $T_{\text{再}} \uparrow$



再结晶开始温度与变形度之间的关系



## 第四节 回复与再结晶

### 3. 再结晶晶粒大小的控制

(1) 加热温度( $T$ )和时间( $t$ )

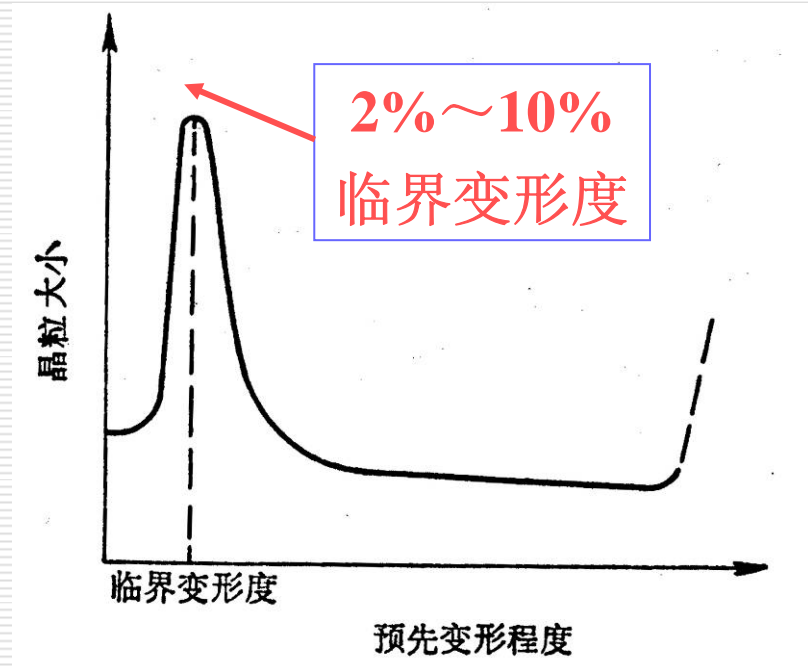
$T$ 、 $t \uparrow$ ，晶粒尺寸 $d \uparrow$

(2) 变形度

在**临界变形度** ( $a=2-10\%$ )，  
 $d \uparrow \uparrow$ ——应避免

变形度 $\uparrow \uparrow \uparrow$ 产生织构，会使  
 $d \uparrow \uparrow$ ——常用 $a=30-60\%$

(3) 原始晶粒尺寸和均匀度  
尺寸 $\downarrow$ ，均匀度 $\uparrow$ ， $d \downarrow$



(4) 杂质及合金元素

杂质及合金元素阻碍原子  
扩散，使 $d \downarrow$

## 第四节 回复与再结晶

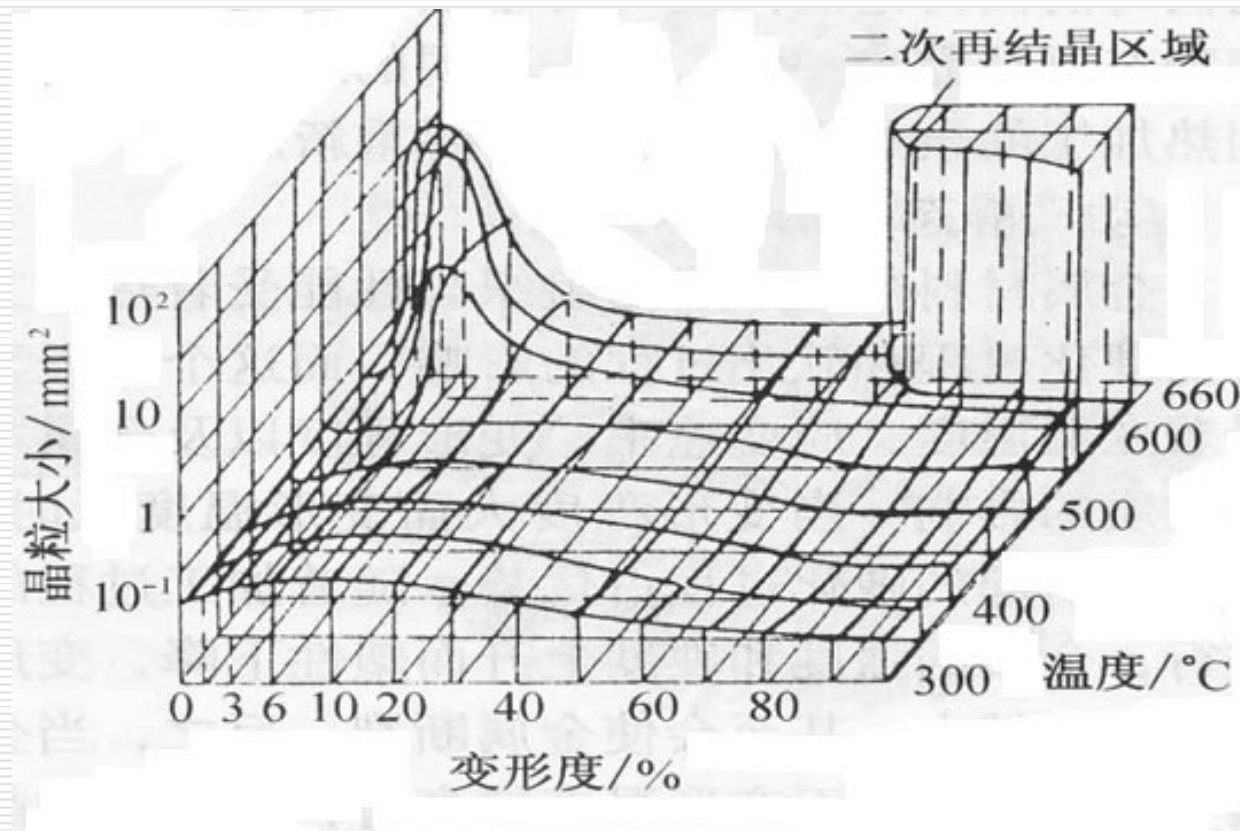
### 4. 再结晶全图

三维坐标:

加热温度

变形量

晶粒度



纯铝的再结晶全图



## 第四节 回复与再结晶

---

### 三、晶粒长大

总界面能减小的过程——自发过程

过程：

随加热温度与时间增加，晶粒互相吞并长大。

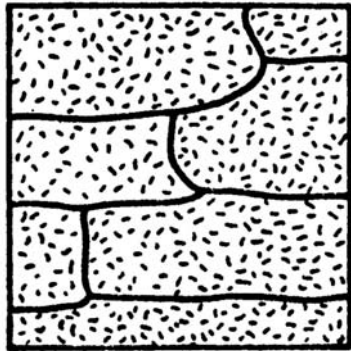
结果：

力学性能(强度、塑性、冲击韧性)下降

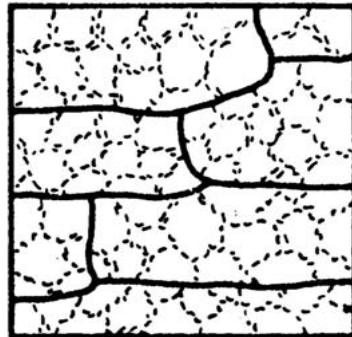


# 第四节 回复与再结晶

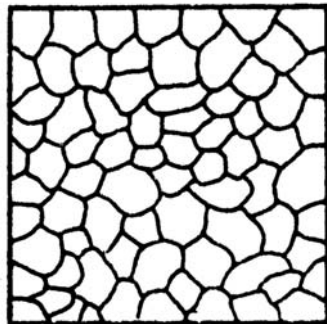
温度  $\uparrow$  , 保温时间  $\uparrow \rightarrow$  回复、再结晶和晶粒长大



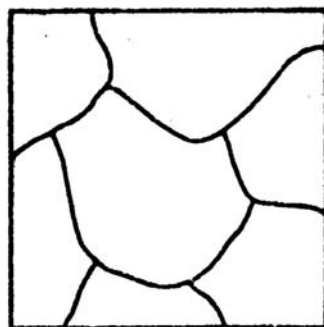
(a) 冷变形态



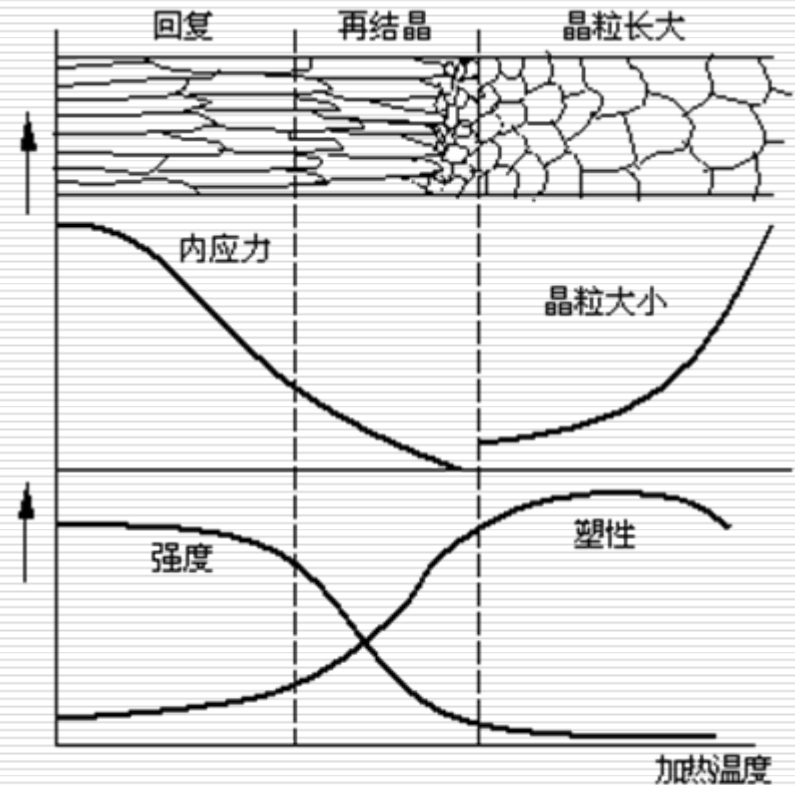
(b) 回复



(c) 再结晶



(d) 晶粒长大





# 第五节 金属的热加工

## 一、热加工与冷加工

冷加工：加工温度 $<T_{\text{再}}$

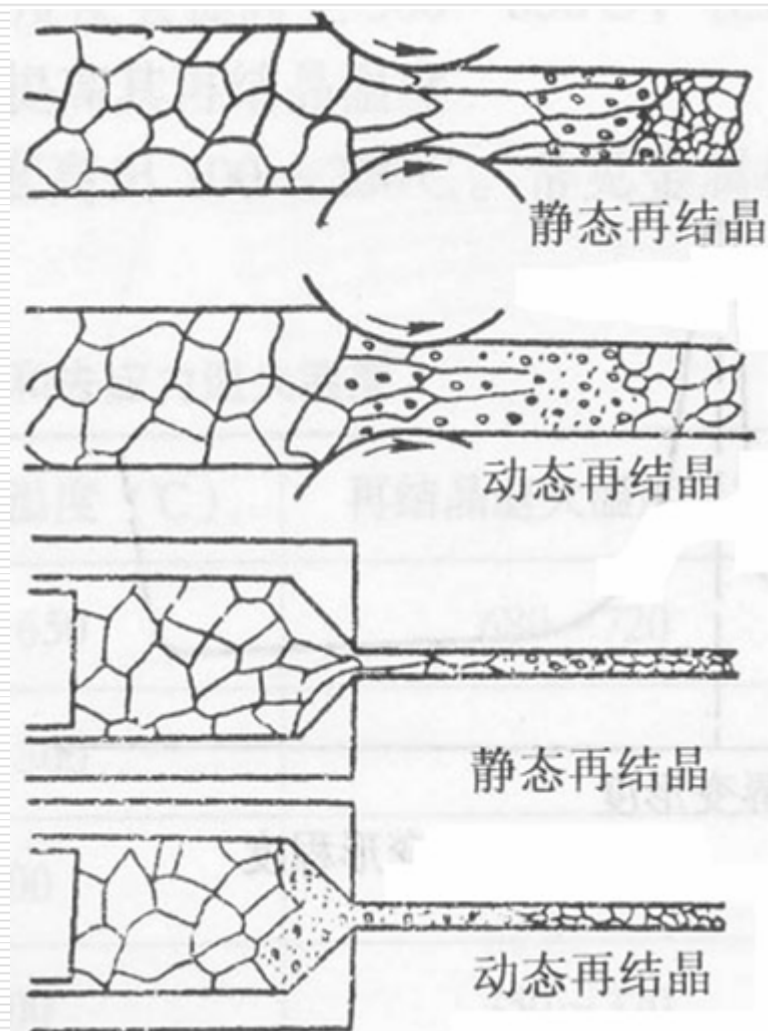
(有加工硬化)

如：**1000℃**拉制钨丝

热加工：加工温度 $>T_{\text{再}}$

(加工硬化随时被动态再结晶消除)

如：室温加工铅



# 第五节 金属的热加工

## 二、热加工后的组织与性能

### 1、改善铸锭组织

### 2、热加工纤维组织——流线

偏析、杂质、夹杂物等沿变形方向形成彼此平行的宏观条纹组织

### 3. 带状组织

合金中各相沿着变形方向交替地呈带状分布——材料性能恶化

