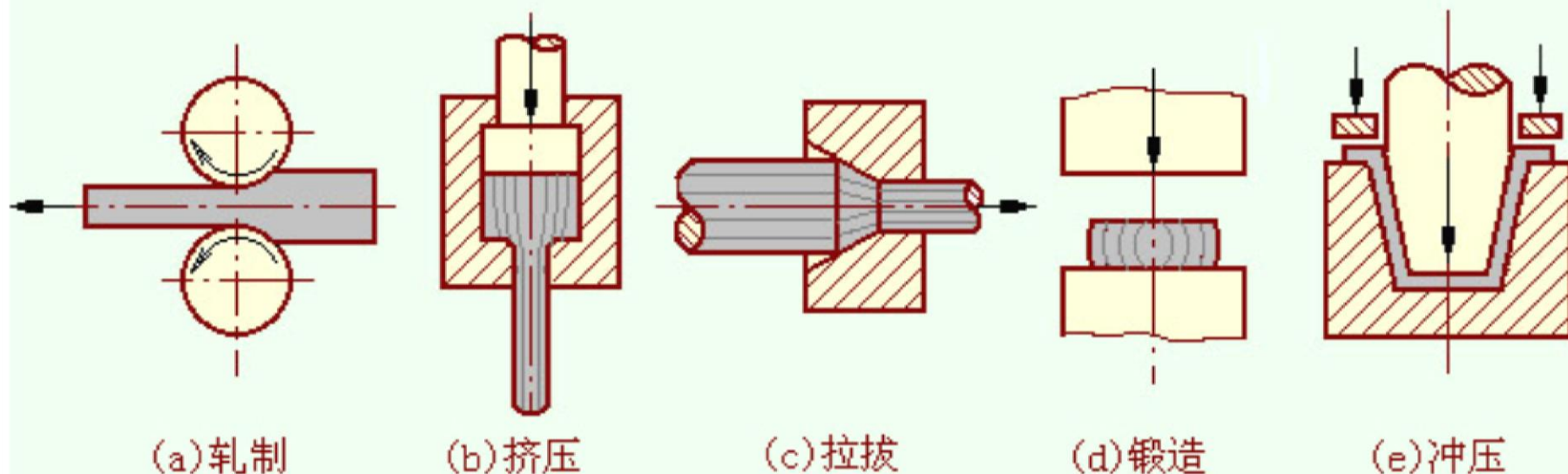


第六章 金属的 塑性变形与再结晶



0 前言

金属材料的铸态组织往往具有晶粒粗大、组织不均、成份偏析及材质不致密等缺陷，需要经过压力加工来改善材料的组织和性能，同时实现预期外型的工件。



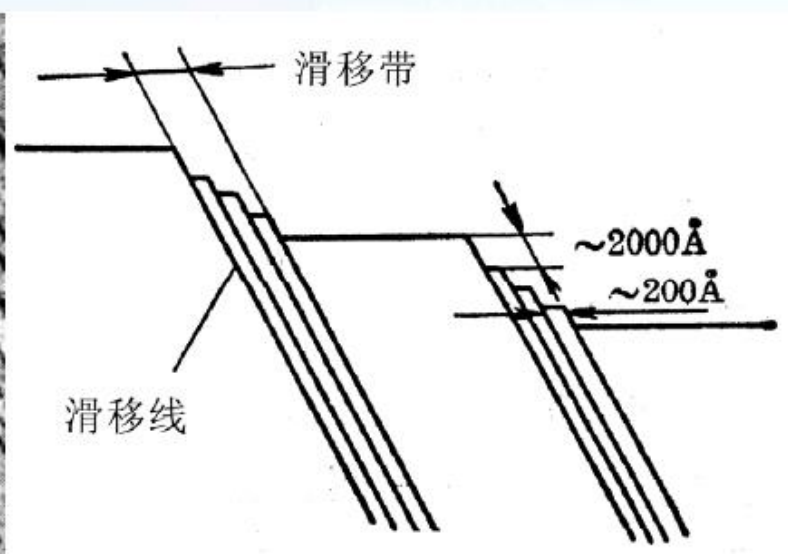
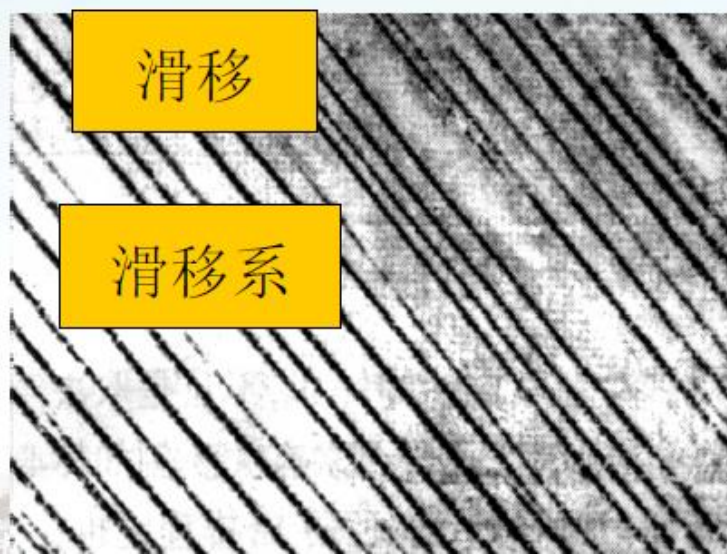
■ 块体材料的塑性加工包括：
锻造、轧制、 挤压、拉拔、冲压等方法。

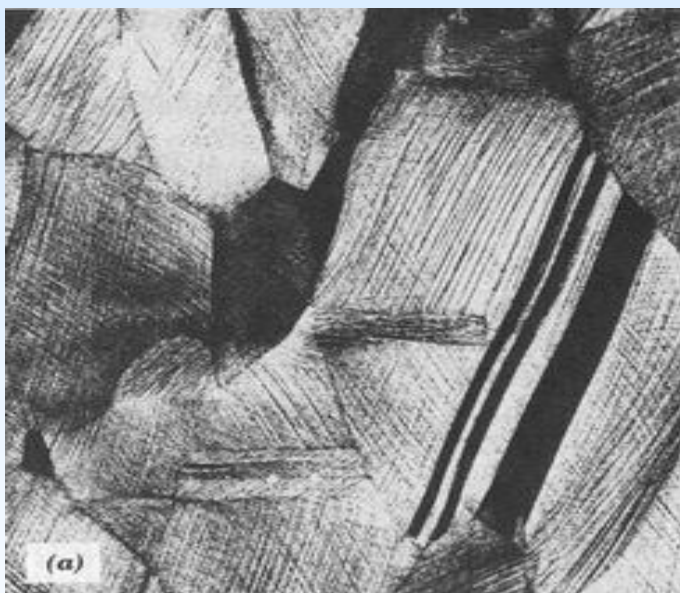
➤ 6.1.1 单晶体的塑性变形

金属的塑性变形主要通过**滑移和孪生**方式来进行。

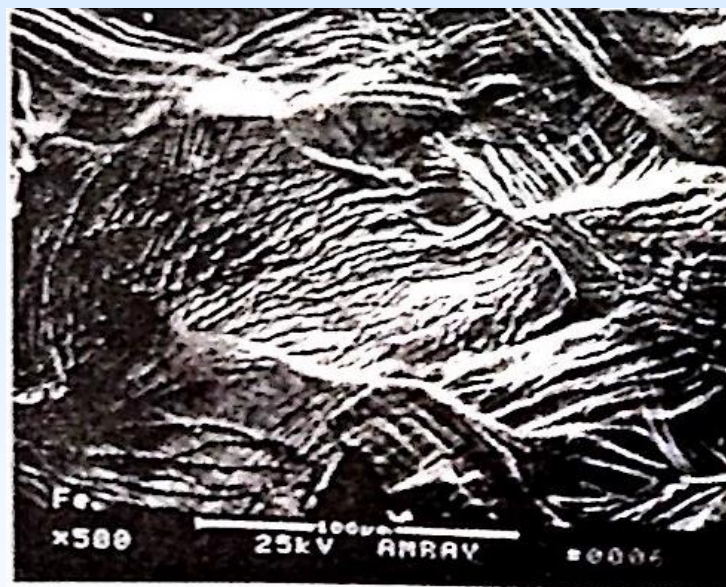
滑移带：将表面经过抛光的纯金属试样进行拉伸，当产生一定的塑性变形后，在显微镜下观察，可看见试样表面有许多相互平行的线条。

滑移线：用电子显微镜作高倍观察下，发现滑移带都是由许多密集而相互平行的更细的滑移线和小台阶所构成。





工业纯铜

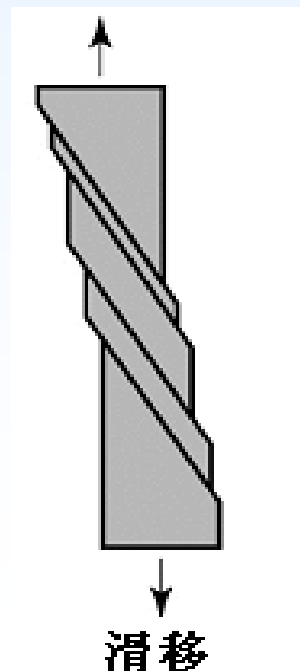
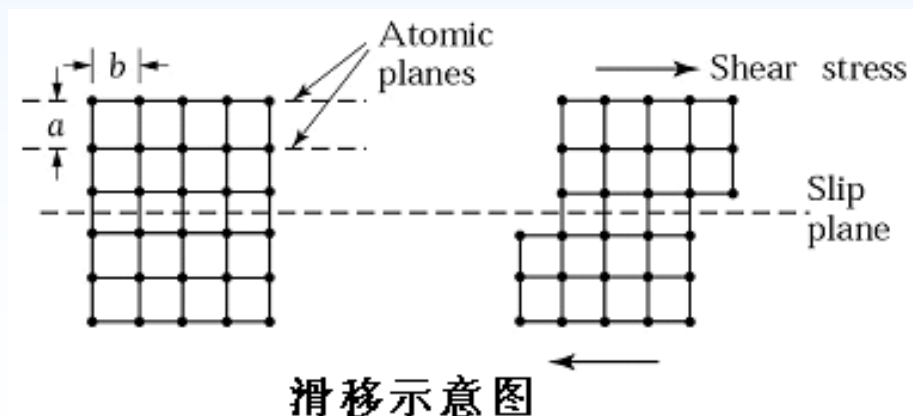


低碳钢

什么是滑移？

滑移是金属晶体塑性变形最基本的方式。

在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿着**一定晶面**（滑移面）和**晶向**（滑移方向）产生相对位移，**且不破坏晶体内部原子排列规律性**的塑性变形方式。

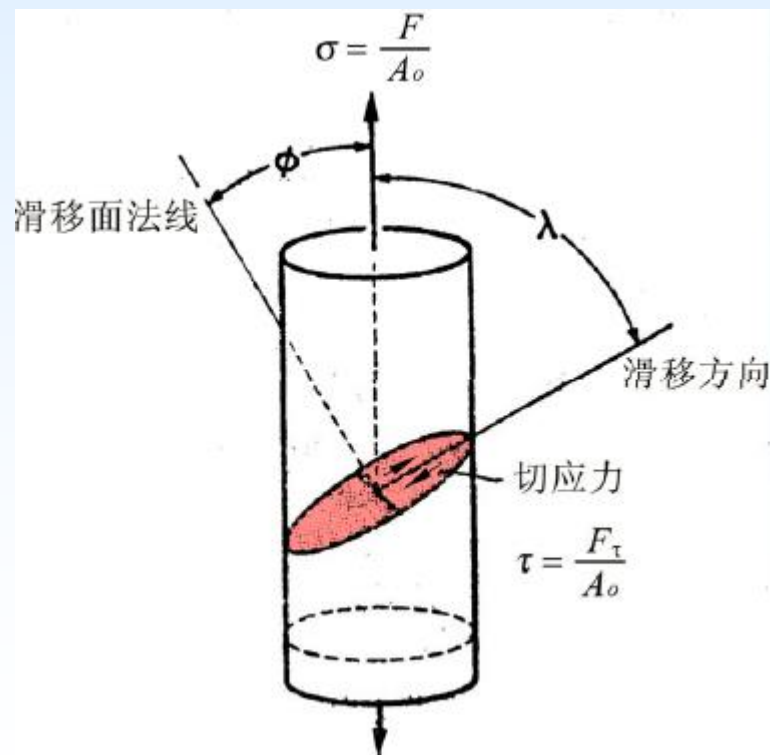


滑移变形的特点

- (1) 滑移只能在切应力的作用下发生。产生滑移的最小切应力称**临界切应力**。

滑移应力：切应力

$$\begin{aligned}\tau_k &= \frac{F_\tau}{A_s} = \frac{F \cos \lambda}{A_0 / \cos \phi} \\ &= \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cos \phi \\ &= \sigma_s \cos \lambda \cos \phi (\text{取向因子})\end{aligned}$$

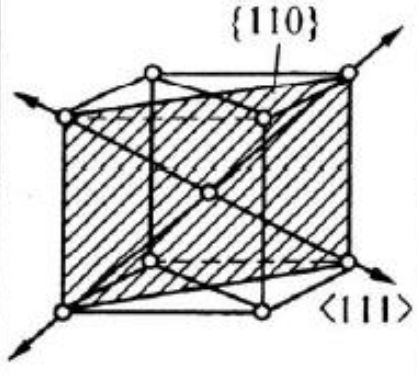
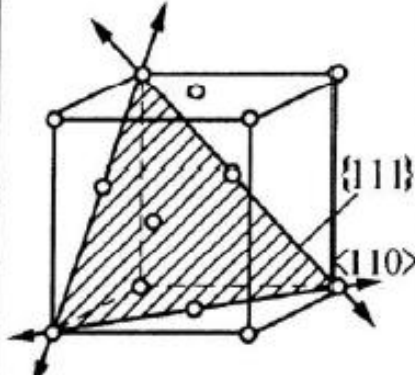
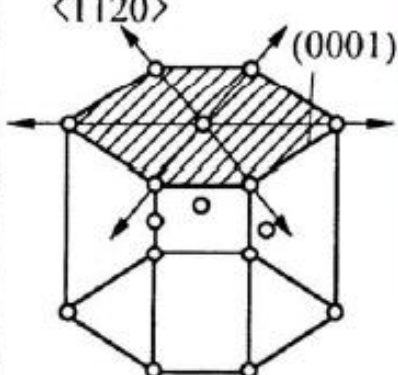


单晶体的屈服强度取决于临界分切应力和取向因子。

滑移变形的特点

- (2) 滑移的能量原理：金属塑性变形遵从能量最低原理。滑移只能从一定晶面和晶体方向上进行
 - 滑移面：原子排列最密排面。晶面间距最大，切变变形所需要的分切应力最小
 - 滑移方向：原子排列最密排方向。此时原子间距最小，原子滑移变形从一个稳定位置至下一个稳定位置所经距离最小，外力做功小
 - 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。

表 5-1 三种常见金属晶体结构的滑移系

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	$6 \times 2 = 12$		$4 \times 3 = 12$		$1 \times 3 = 3$	

滑移系与材料塑性的关系：

- 一般滑移系越多，塑性越好；（塑性同时受变形温度、应力状态、晶粒大小影响）
- 滑移方向对塑性的贡献比滑移面更大；
- 面心要好于体心，体心要优于密排。

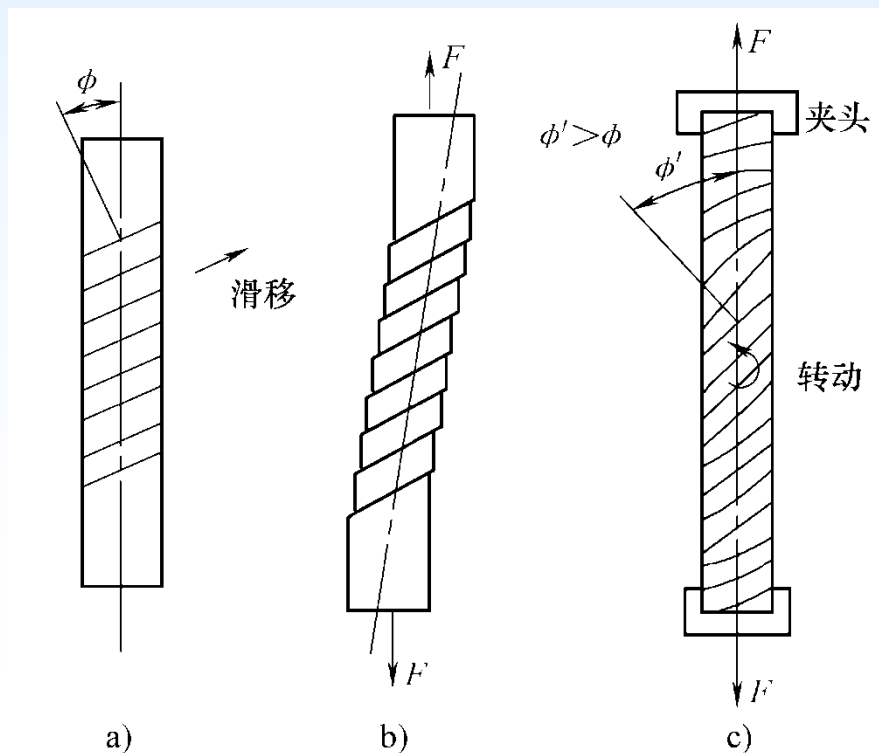
表5-2 高纯度金属晶体室温滑移系及临界分切应力

金属	Ag	Al	Cu	Ni	Fe	Nb	Ti	Mg	
滑移面	{111}	{111}	{111}	{111}	{110}	{110}	{1010}	{0001}	{1011}
滑移方向	<110>	<110>	<110>	<110>	<111>	<111>	<1120>	<1120>	<1120>
临界分切应力, MPa	0.47	0.79	0.98	5.68	27.44	33.8	13.7	0.81	3.92

滑移变形的特点

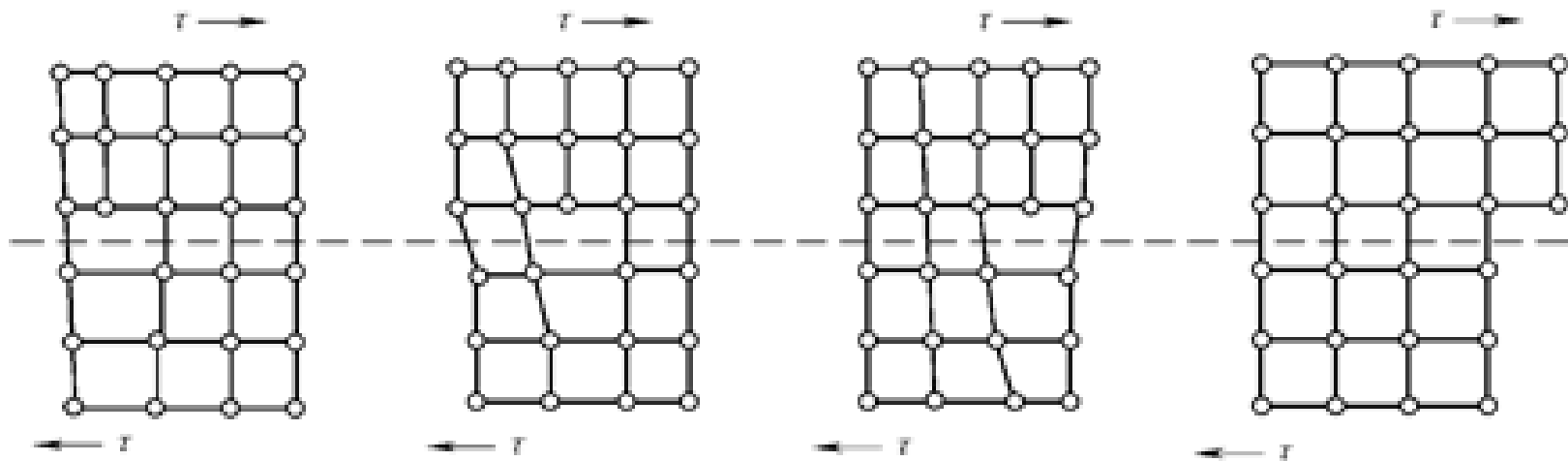
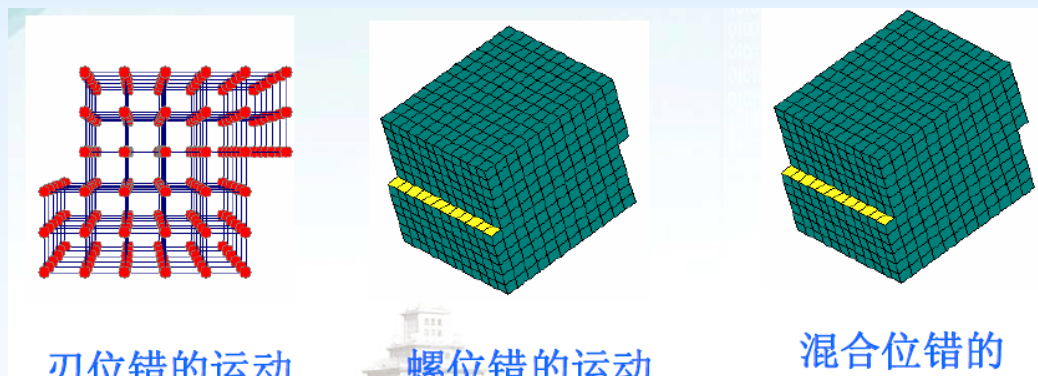
(3) 滑移时晶体的转动

单晶体在滑移变形时还伴随着晶体的转动。不同位向的滑移系交替进行滑移，结果使晶体均匀地变形。

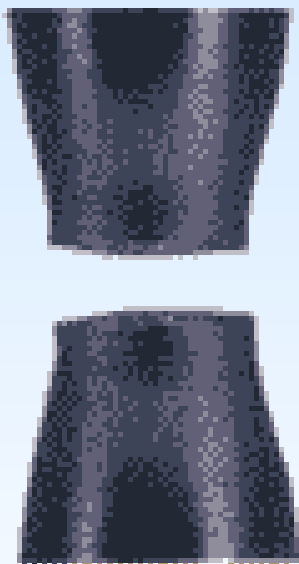


滑移变形的特点

(4) 滑移的本质：是位错的运动。位错在分切应力作用下的运动。

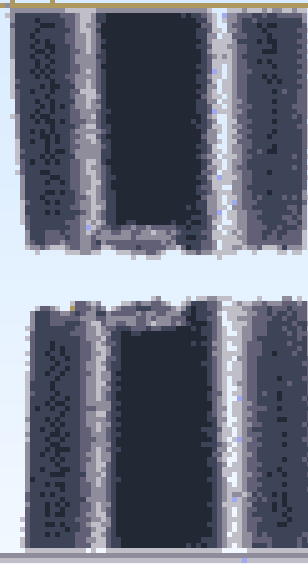


延性



鋁

脆性



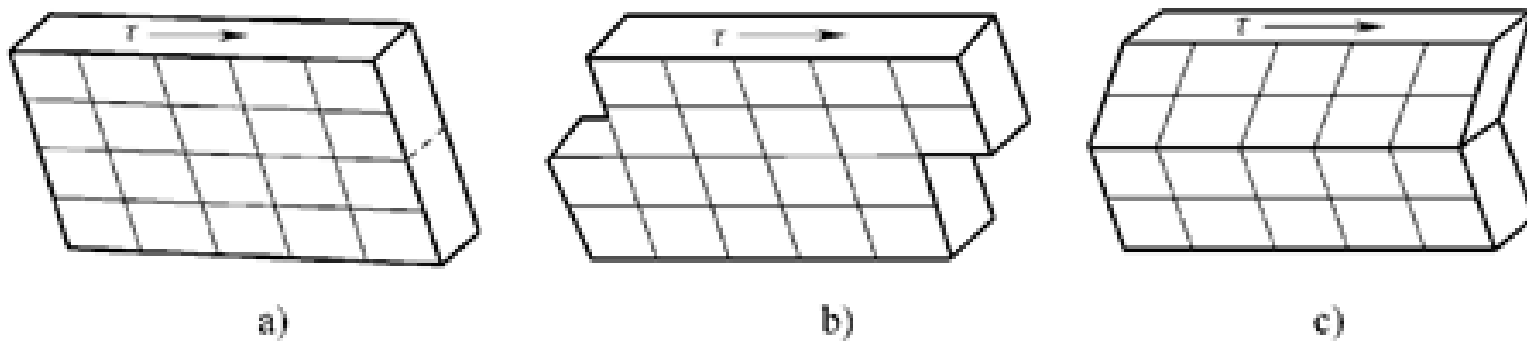
鎂

塑性变形的另一种方式：孪生

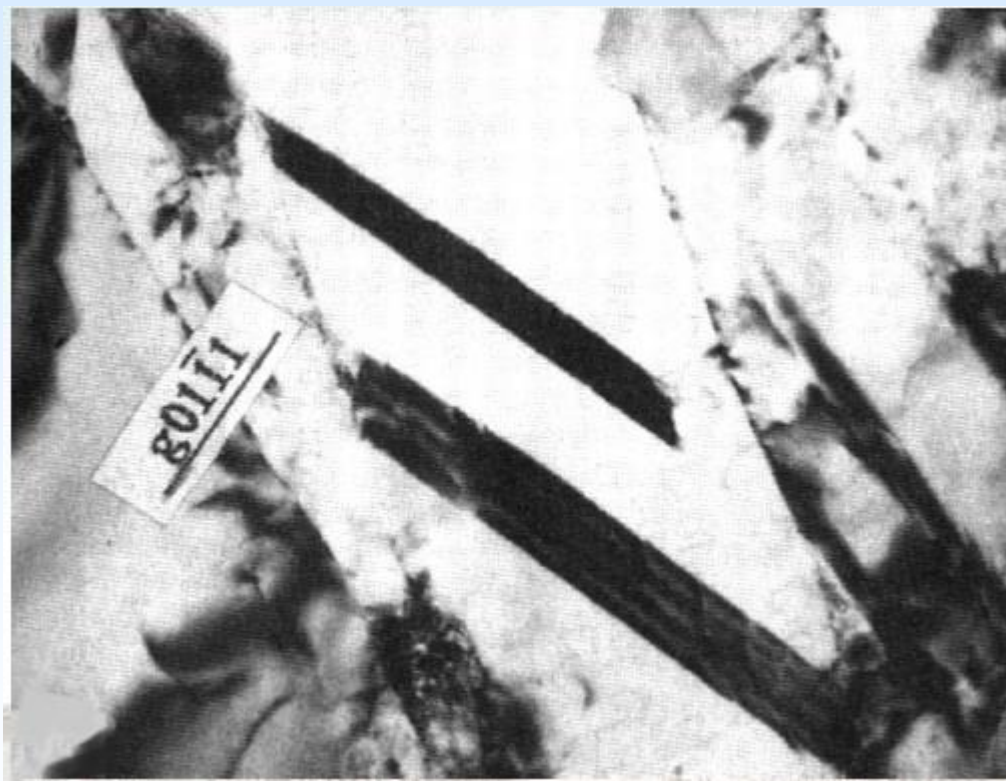
孪生条件：当金属中滑移系较少或晶体取向不利于滑移，位错不能开动时，可进行孪生变形。

孪生过程：在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分以一定的晶面（孪晶面）及晶向（孪生晶向）产生的剪切变形。

导致变形孪生切应力远高于滑移临界分切应力，但变形速度快。

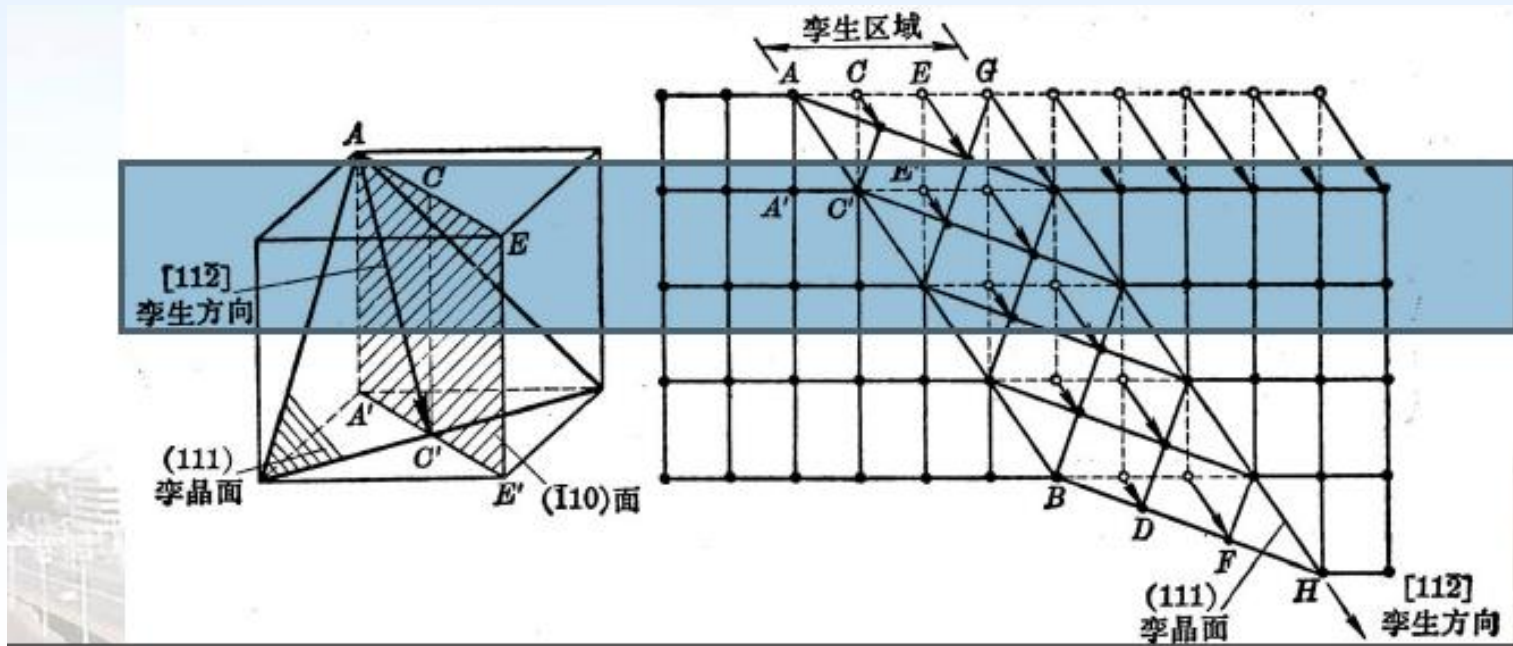


变形孪生的观察：
孪生变形改变晶体位向，产生取向差；以致电子显微分析明场像的取向衬度。

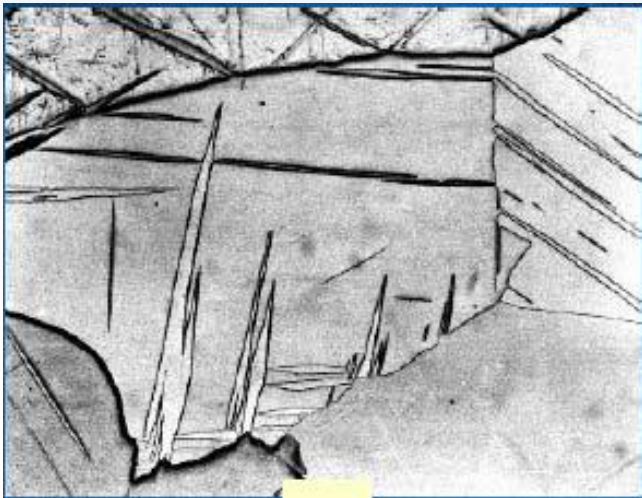


孪生变形的特点

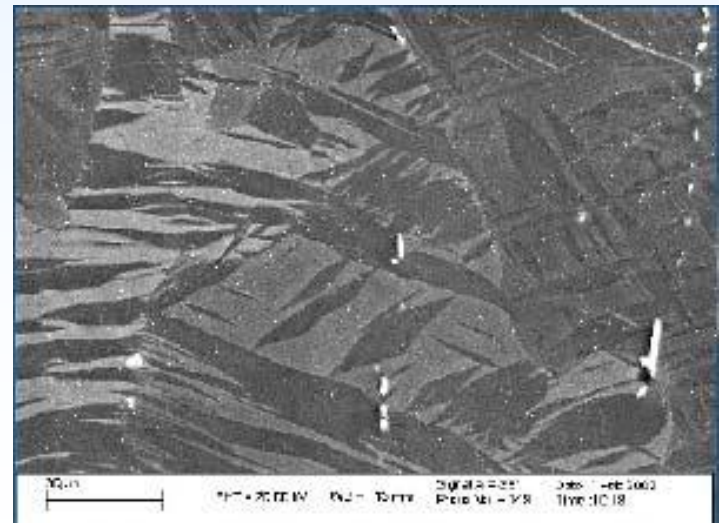
1. 孪生变形使一部分晶体发生均匀的切应变，而滑移变形则集中在一些滑移面上。
2. 孪生使晶体变形部分（孪晶带）的位向发生了改变，而滑移变形后，晶体各部分的相对位向不发生改变。



3. 孪生变形时，孪晶带中每层原子沿孪生方向的位移量都是原子间距的**分数值**，且和距孪晶面的距离成正比。而滑移变形时，晶体的一部分相对于另一部分沿滑移方向的位移量为原子间距的**整数倍**。
4. 孪生变形所需的**切应力**比滑移变形**大**的多。



Zn

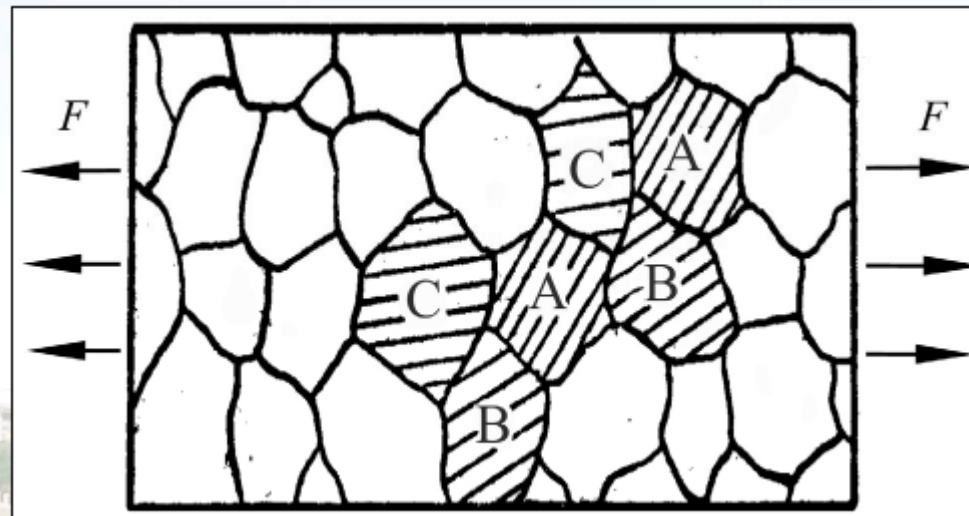


Mg

➤ 6.1.2 多晶体的塑性变形

多晶体的塑性变形特殊性

- 各晶粒取向不同 → 取向因子不同 → 屈服应力不同（不同时性）
- 屈服应力不同 → 承载能力不同 → 变形量不同（不均匀性）
- 试验表明，金属可产生一定的均匀变形而不断裂失效（变形协调性）



晶粒之间变形的协调性，要求滑移系多，**FCC**和**BCC**滑移系多，变形容易协调，所以塑性好，**HCP**晶体滑移系少，协调性差，塑性差。

细晶强化原理

强度贡献：

晶粒细小，单位面积所包含的晶界越多，位错塞积越多，晶界强化越明显，强化效果越好。

塑、韧性贡献

- ◆ 晶粒越细小，需要协调的具有不同位向的晶粒晶粒数目越多，有利于变形的取向多，**变形协调性越好**；
- ◆ 晶粒细小，晶内和晶界的变形差异小，**变形均匀性增加**，由应力集中小导致的开裂机会减小，在断裂前可以承受更大的变形，塑性增加；
- ◆ 应力集中少，**裂纹不易萌生**；晶界多，**裂纹不易传播**，在断裂过程中可吸收较多能量，表现高韧

6.2 冷塑性变形对金属组织与性能的影响

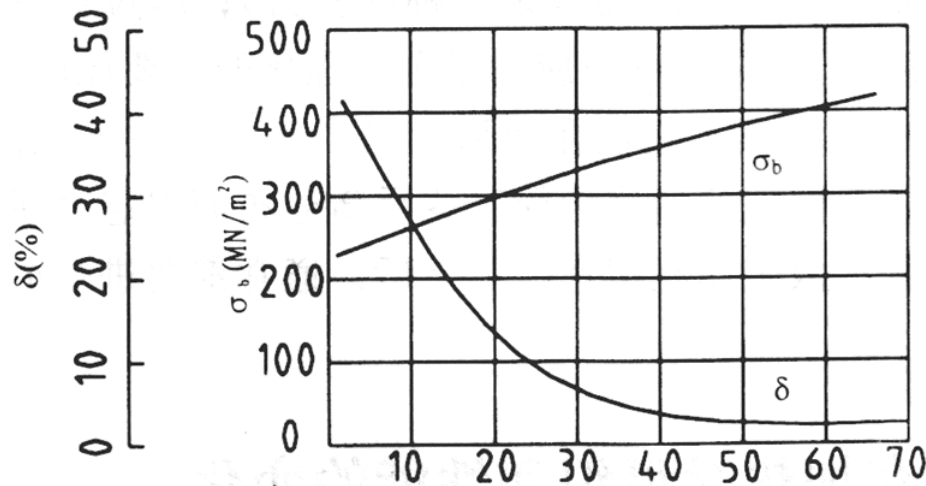
塑性变形不仅可以改变金属材料的外形，而且使材料内部组织和性能发生改变。金属塑性变形后主要发生如下变化。

- (1) 晶粒沿变形方向被拉长，性能趋于各向异性。
- (2) 产生了加工硬化现象。
- (3) 晶粒择优取向，形成变形织构。
- (4) 多晶体塑性变形后，金属内部存在残余内应力。

性能与显微组织的变化

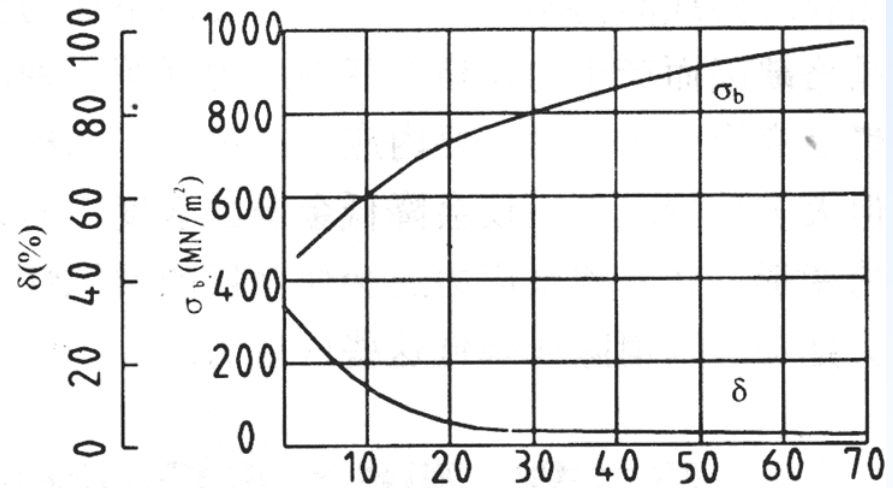
◆ 力学性能

加工硬化：在塑性变形过程中，随着变形程度的增加，金属的强度、硬度增加，而塑性、韧性下降的现象。



冷轧变形度 (%)

a)



冷轧变形度 (%)

b)

图 5-14 金属的加工硬化现象

a) 纯铜

b) 低碳钢

加工硬化产生原因：

1. 塑性变形过程中，在切应力作用下，位错源逐渐开动，位错密度逐渐增加，位错强化效果明显
2. 不同位向的位错在运动过程中会发生交互作用，产生大量位错缠结和堆积，形成亚晶，发挥强化作用

加工硬化的意义：

1. 可利用加工硬化来强化金属，提高金属强度、硬度和耐磨性。
2. 加工硬化也是工件能够用塑性变形方法成形的重要因素。
3. 加工硬化还可以在一定程度上提高构件在使用过程中的安全性。

性能与显微组织的变化

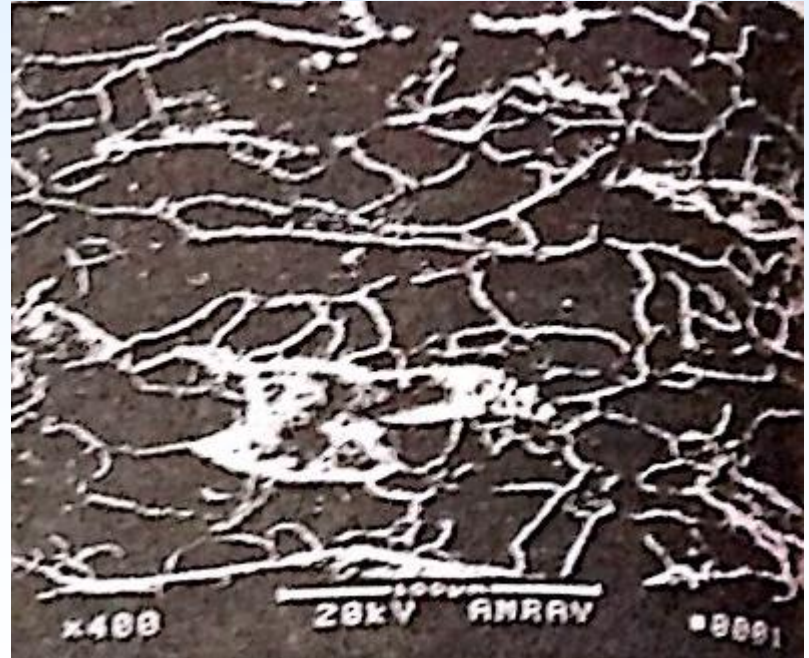
◆ 显微组织

1. 形成纤维状组织

随变形量的逐渐增大，晶粒将被拉长为纤维状，晶界逐渐变得模糊不清。



压缩20%



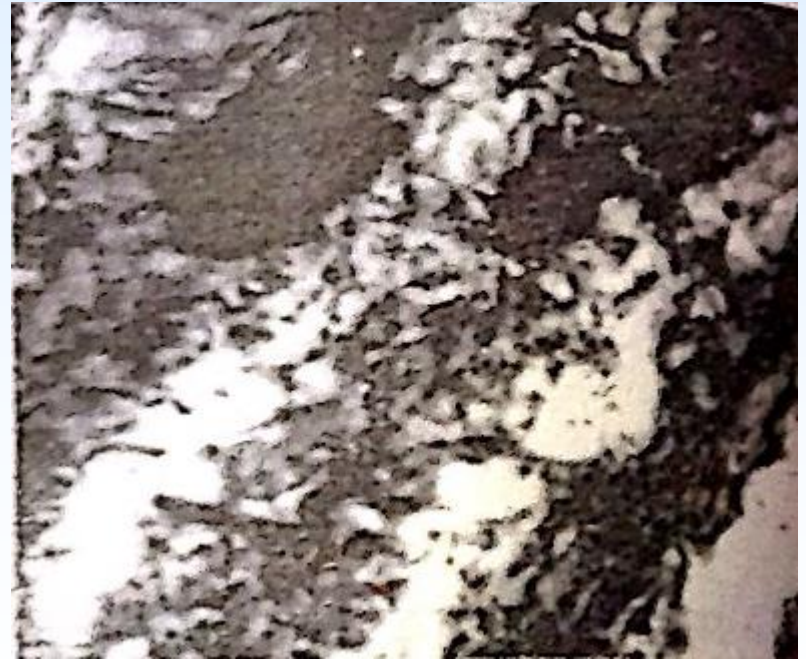
压缩60%

2. 亚晶粒的细化

冷变形会增加位错密度，随变形量增加，位错会交织缠结，随后形成胞状结构-形变亚晶。胞内位错密度较低，胞壁是由大量位错缠结形成。

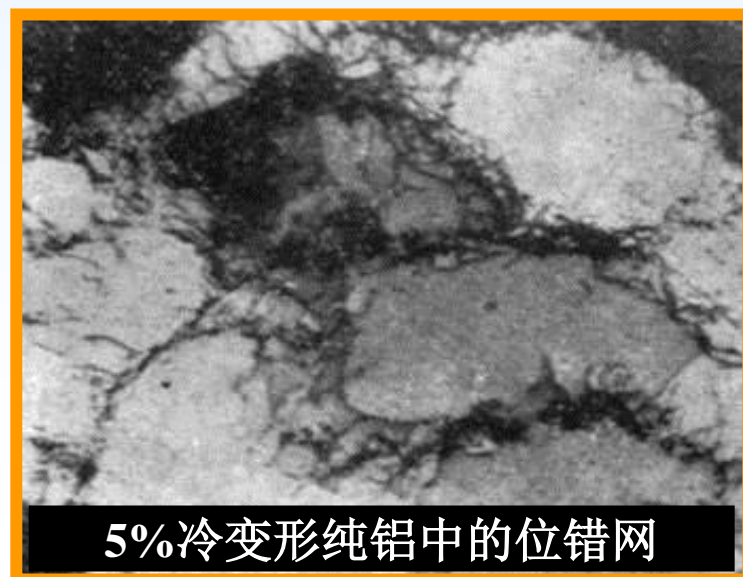
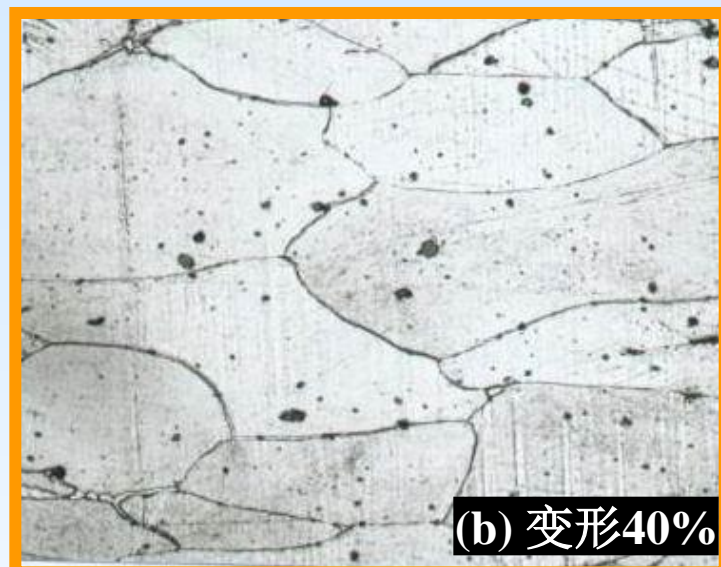
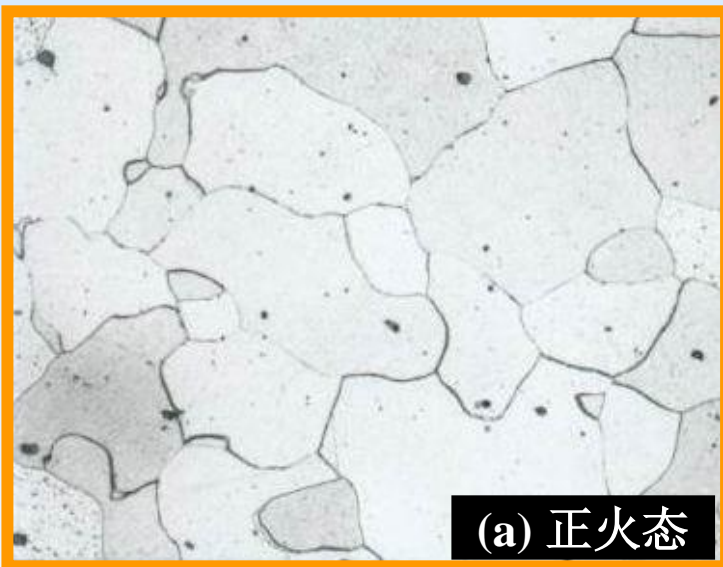


20%冷压



60%冷压

工业纯铁在塑性变形前后的组织变化



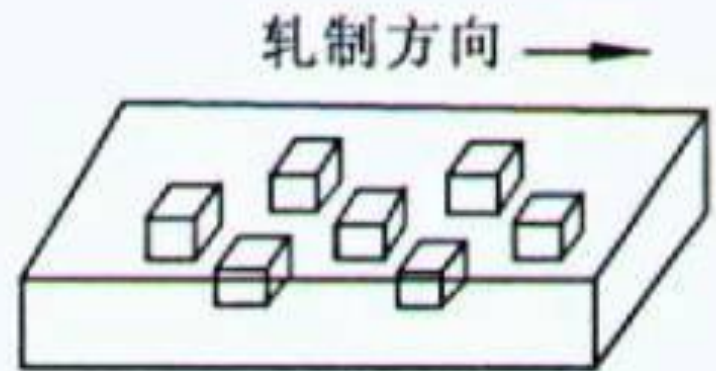
形变织构与各向异性

3、产生形变织构

金属冷塑性变形过程中，晶体要发生转动，使金属晶体中原为任意取向的各晶粒逐渐调整到取向彼此趋于一致，这就形成了晶体的择优取向，称为形变织构。变形量越大，择优取向程度越大。

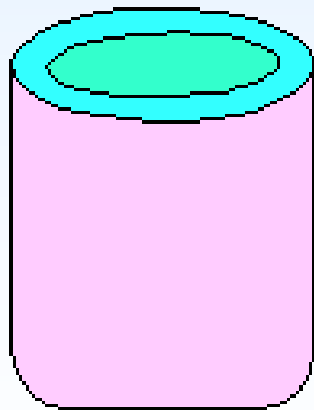


(a) 丝织构

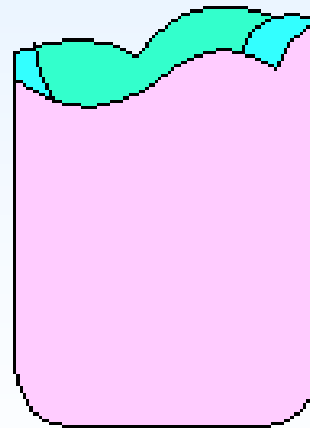


(b) 板织构

形变织构使金属呈现各向异性，在深冲零件时，易产生“制耳”现象，使零件边缘不齐，厚薄不匀。但织构可提高硅钢片的导磁率。



(a) 无织构

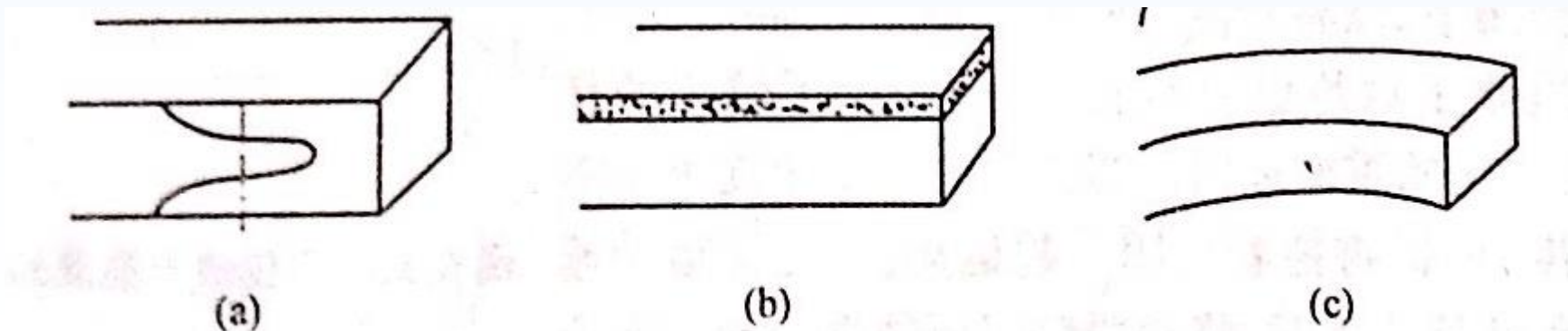


(b) 有织构

4、产生残余应力

冷塑变形过程中，外力所作的功大部分转化为热，尚有一部分（约10%）以畸变能的形式储存在形变金属内部，这部分能量叫储存能。储存能的具体表现方式为：宏观残余应力、微观残余应力、晶格畸变应力。

◆ **宏观内应力**（第一类内应力）：由于金属工件或材料各部分的宏观变形不均匀而引起的，其平衡范围是物体的整个体积；



◆ 微观内应力（第二类内应力）：由于各晶粒或各亚晶粒之间的变形不均匀而产生的，其平衡范围为几个晶粒或几个亚晶粒；

◆ 晶格畸变应力（第三类内应力）：由于塑变使点阵发生畸变，其作用范围在几十至几百纳米范围；

有害：导致材料及工件的变形、开裂和产生应力腐蚀；

根据你所学的知识，列举金属强化的几种方法