

欢迎学习

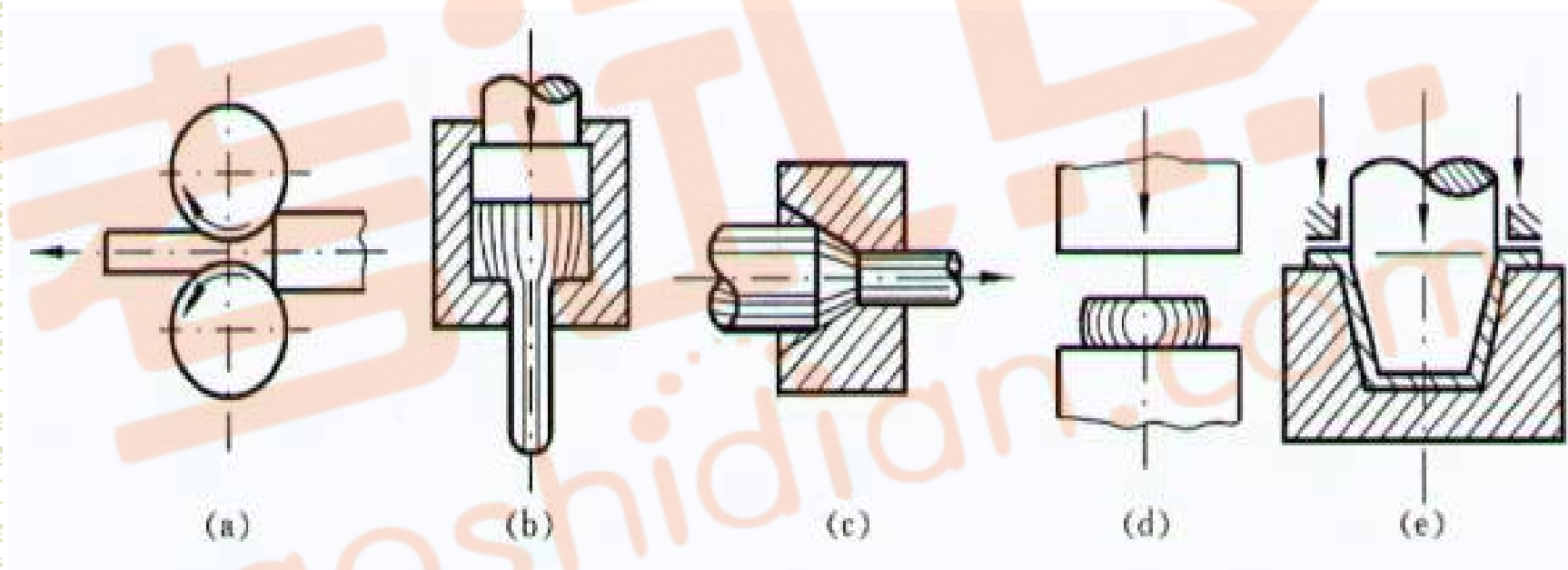
金属学与热处理

金属的塑性变形与再结晶

金属的塑性变形与再结晶

- ◆ 塑性是金属材料的重要特性；
- ◆ 金属材料通过冶炼、铸造，获得铸锭后，可通过塑性加工的方法获得具有一定形状、尺寸和力学性能的型材、板材、管材或线材，以及零件毛坯或零件。
- ◆ 塑性加工包括锻压、轧制、挤压、拉拔、冲压等方法。

金属的塑性加工



金属的塑性变形

- ◆ 金属在承受塑性加工时，产生塑性变形，宏观上改变了材料的形状和尺寸；
- ◆ 微观上改变了金属的组织结构；
- ◆ 金属的塑性变形对材料的性能也会产生重要的影响，是金属材料重要的强化手段。

金属的塑性变形

- ◆ 单晶体的塑性变形
- ◆ 多晶体的塑性变形

金属的塑性变形

- ◆ 这一节的主要内容就是从原子的角度看，金属的塑性变形是如何发生的？

金属的塑性变形

- ◆ 当外力作用在金属上时，如受拉，金属内的原子间距变大，如果这种变化是弹性范围内的，当外力去除后，原子还能恢复到原来的状态；如果外力较大，这种变化就达到了塑性阶段了，当外力去除之后，有一部分变化就不能恢复了，金属就发生了塑性变形。作为一种极限，当外力大到一定程度，原子间的结合力被打破，那么金属就断了。

单晶体的塑性变形

- ◆ 单晶体的塑性变形的的基本方式有两种：
滑移和孪生

一、滑移

- ◆ 滑移是晶体在切应力的作用下，晶体的一部分沿一定的晶面(滑移面)上的一定方向(滑移方向)相对于另一部分发生滑动。

一、滑移

滑移只能在切应力作用下才会发生，不同金属产生滑移的最小切应力(称滑移临界切应力)大小不同。钨、钼、铁的滑移临界切应力比铜、铝的要大。



一、滑移

- ◆ 由于位错每移出晶体一次即造成一个原子间距的变形量, 因此晶体发生的总变形量一定是这个方向上的原子间距的整数倍。

一、滑移

- ◆ 滑移总是沿着晶体中原子密度最大的晶面(密排面)和其上密度最大的晶向(密排方向)进行，这是由于密排面之间、密排方向之间的间距最大，结合力最弱。因此滑移面为该晶体的密排面，滑移方向为该面上的密排方向。

滑移系

- ◆ 一个滑移面与其上的一个滑移方向组成一个滑移系。如体心立方晶格中，(110)面和[111]晶向即组成一个滑移系。
- ◆ 滑移系越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性就越好。

金属三种常见晶格的滑移系

晶格类型	体心立方 晶格	面心立方 晶格	密排六方 晶格
滑移面	$\{110\}$ 6个	$\{111\}$ 4个	$\{0001\}$ 1个
滑移方向	$\langle 111 \rangle$ 2个	$\langle 110 \rangle$ 3个	$\langle 1120 \rangle$ 3个
滑移系数目	$6 \times 2 = 12$	$4 \times 3 = 12$	$1 \times 3 = 3$

滑移系

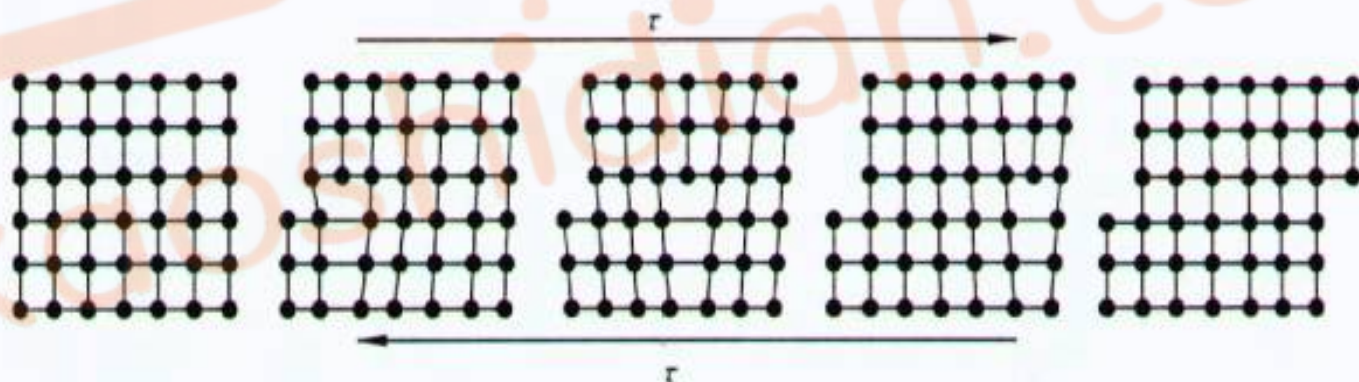
- ◆ 滑移方向对滑移所起的作用比滑移面大，所以面心立方晶格金属比体心立方晶格金属的塑性更好。
- ◆ 金、银、铜、铝等金属的塑性高于铁、铬等金属；而铁的塑性又高于锌、镁等金属。

二、位错滑移机制

- ◆ 滑移非刚性滑动，而是由位错的移动实现的（1934年提出）。

二、位错滑移机制

滑移是晶体内部位错在切应力作用下运动的结果。滑移并非是晶体两部分沿滑移面作整体的相对滑动,而是通过位错的运动来实现的。在切应力作用下,一个多余半原子面从晶体一侧到另一侧运动,即位错自左向右移动时,晶体产生滑移。

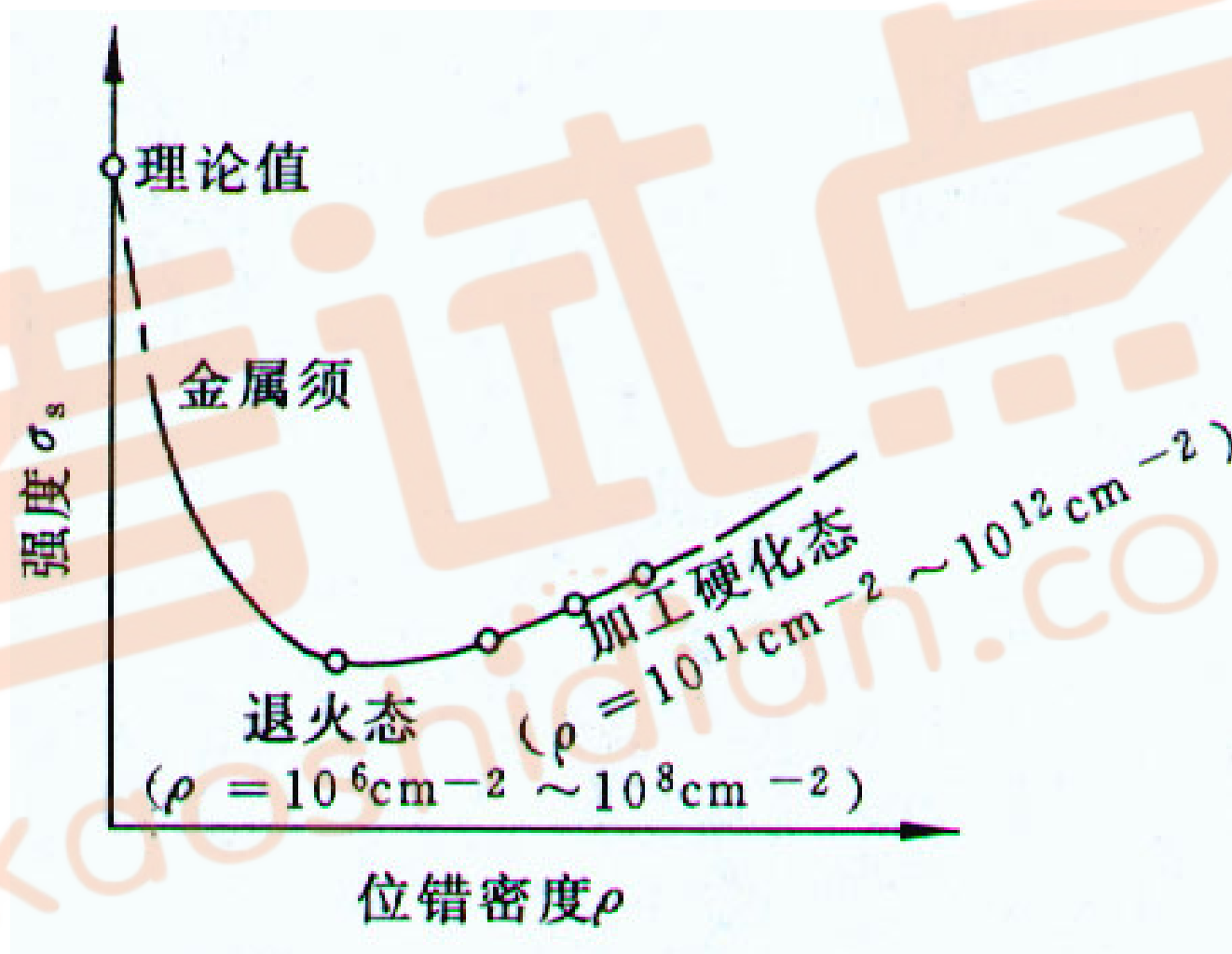


二、位错滑移机制

- ◆ 通过位错的移动实现滑移时：
 - 1、只有位错线附近的少数原子移动；
 - 2、原子移动的距离小于一个原子间距；所以通过位错实现滑移时，需要的力较小；

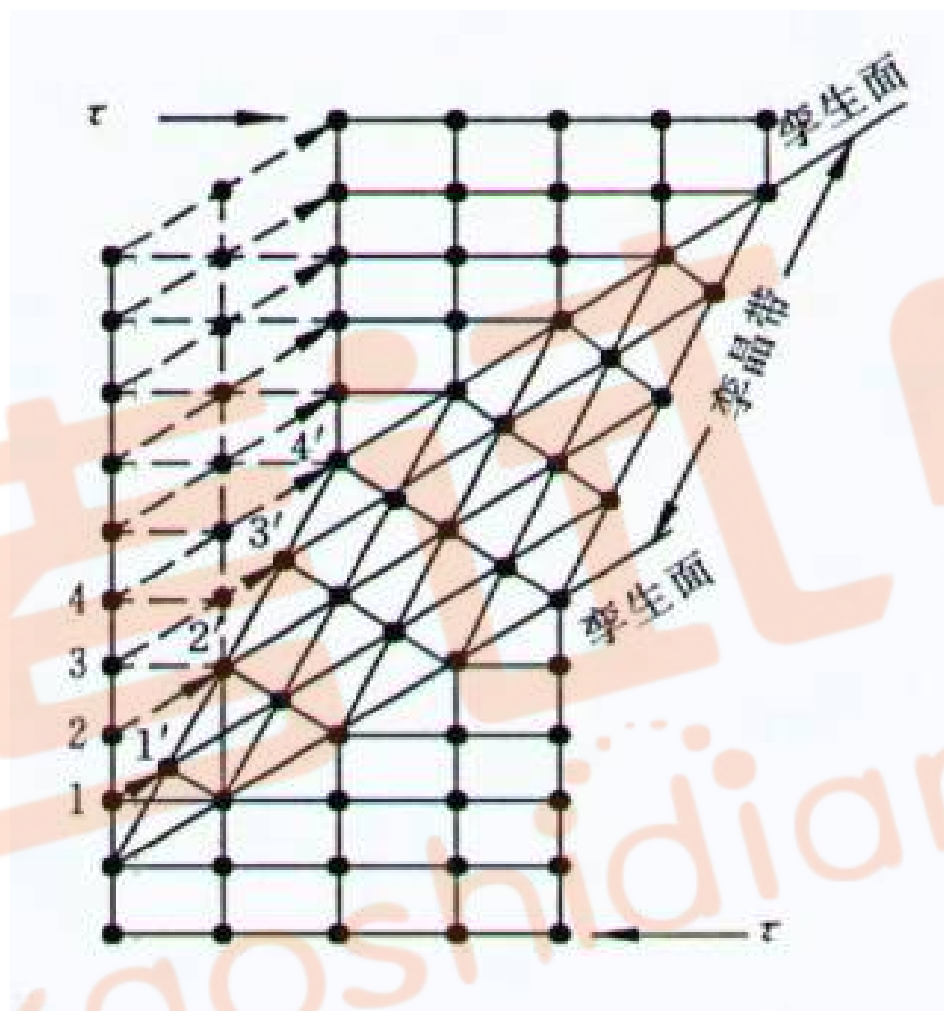
二、位错滑移机制

- ◆ 金属的塑性变形是由滑移这种方式进行的，而滑移又是通过位错的移动实现的。所以，只要阻碍位错的移动就可以阻碍滑移的进行，从而提高了塑性变形的抗力，使强度提高。金属材料常用的五种强化手段（固溶强化、加工硬化、晶粒细化、弥散强化、淬火强化）都是通过这种机理实现的。



三、孪生

- ◆ 在切应力作用下晶体的一部分相对于另一部分沿一定晶面(孪生面)和晶向(孪生方向)发生切变的变形过程称孪生。发生切变、位向改变的这一部分晶体称为孪晶。孪晶与未变形部分晶体原子分布形成对称。孪生所需的临界切应力比滑移的大得多。孪生只在滑移很难进行的情况下才发生。体心立方晶格金属(如铁)在室温或受冲击时才发生孪生。而滑移系较少的密排六方晶格金属如镁、锌、镉等,则比较容易发生孪生。

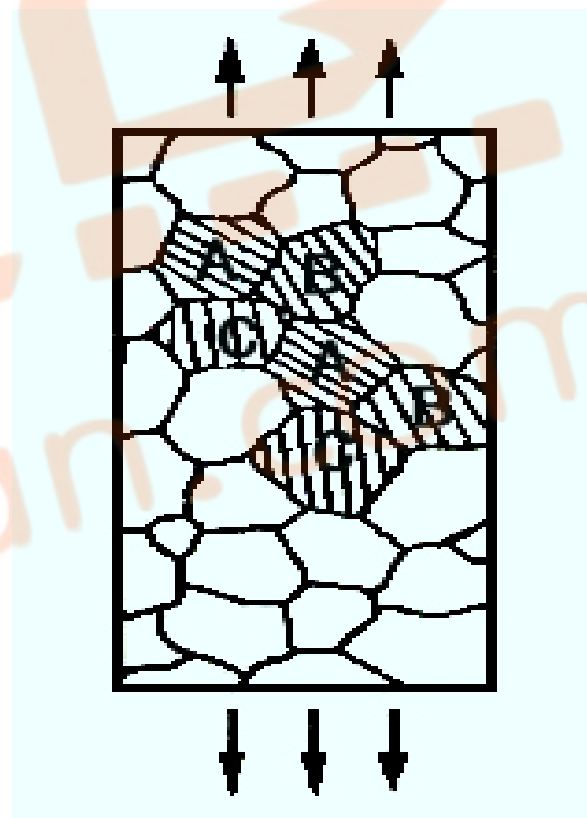


四、多晶体的塑性变形

- ◆ 工程上使用的金属绝大部分是多晶体。多晶体中每个晶粒的变形基本方式与单晶体相同。但由于多晶体材料中，各个晶粒位向不同，且存在许多晶界，因此变形要复杂得多。

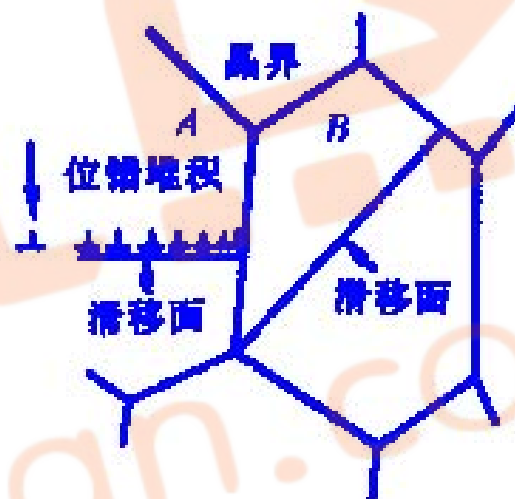
四、多晶体的塑性变形

- ◆ 多晶体中每个晶粒位向不一致。一些晶粒的滑移面和滑移方向接近于最大切应力方向(称晶粒处于软位向), 另一些晶粒的滑移面和滑移方向与最大切应力方向相差较大(称晶粒处于硬位向)。在发生滑移时, 软位向晶粒先开始。当位错在晶界受阻逐渐堆积时, 其它晶粒发生滑移。因此多晶体变形时晶粒分批地逐步地变形, 变形分散在材料各处。



四、多晶体的塑性变形

- ◆ 第二个要注意的问题是晶界的影响。晶界是原子排列不规则的地方，它对位错的移动有阻碍作用，要想使位错通过晶界，外界必须对它施加更大的力，所以晶界处的强度比晶内高。



位错在晶界处
堆积示意图

四、多晶体的塑性变形

- ◆ 晶粒越细，单位体积内的晶界面积越多，对位错的阻碍作用越大，金属的强度越高。晶界与强度之间的关系有一个经验公式（Hall—Petch公式）：

$$\sigma = \sigma_0 + k \times d^{-1/2}$$

四、多晶体的塑性变形

- ◆ 具有细小晶粒的材料不仅强度高，而且塑性、韧性也较高，这是其他强化手段不能达到的。
- ◆ 晶粒越细，金属的变形越分散，减少了应力集中，推迟裂纹的形成和发展，使金属在断裂之前可发生较大的塑性变形，因此使金属的塑性提高。由于细晶粒金属的强度较高，塑性较好，所以断裂时需要消耗较大的功，因而韧性也较好。

四、多晶体的塑性变形

- ◆ 我们一般将通过使材料的组织变细来改善其性能的方法称为细晶强化或晶粒细化，细晶强化是金属的一种很重要的强韧化手段。

温 故 知 新

- ◆ 单晶体塑性变形的方式
- ◆ 什么是滑移系?滑移系的数目对金属的塑性有什么影响?
- ◆ 金属的滑移是通过什么方式实现的?
- ◆ 多晶体的塑性变形与单晶体有什么区别?



单晶体塑性变形的方式

- ◆ 单晶体的塑性变形的的基本方式有两种：
滑移和孪生。
- ◆ 滑移是晶体在切应力的作用下, 晶体的一部分沿一定的晶面(滑移面)上的一定方向(滑移方向)相对于另一部分发生滑动。



滑移系

- ◆ 一个滑移面与其上的一个滑移方向组成一个滑移系。如体心立方晶格中，(110)面和[111]晶向即组成一个滑移系。
- ◆ 滑移系越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性就越好。



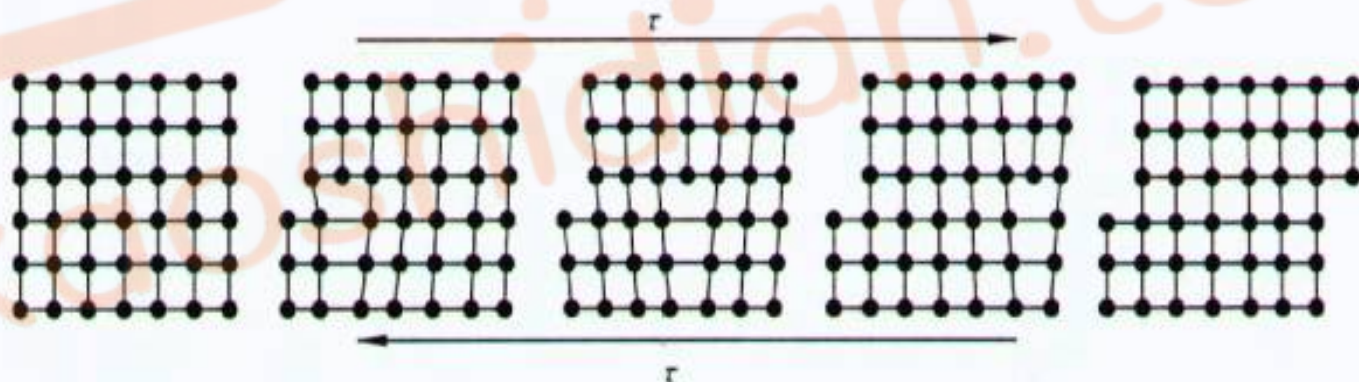
金属三种常见晶格的滑移系

晶格类型	体心立方 晶格	面心立方 晶格	密排六方 晶格
滑移面	$\{110\}$ 6个	$\{111\}$ 4个	$\{0001\}$ 1个
滑移方向	$\langle 111 \rangle$ 2个	$\langle 110 \rangle$ 3个	$\langle 1120 \rangle$ 3个
滑移系数目	$6 \times 2 = 12$	$4 \times 3 = 12$	$1 \times 3 = 3$



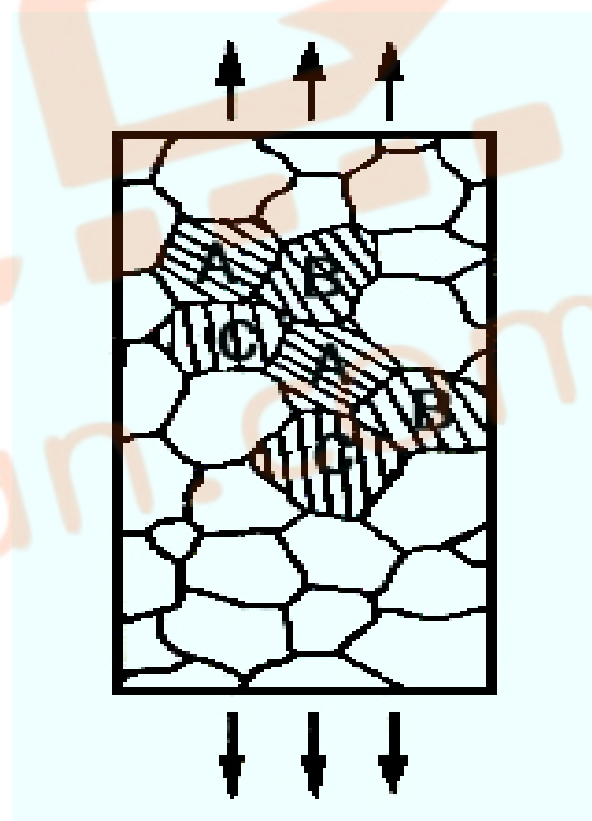
位错滑移机制

滑移是晶体内部位错在切应力作用下运动的结果。滑移并非是晶体两部分沿滑移面作整体的相对滑动,而是通过位错的运动来实现的。在切应力作用下,一个多余半原子面从晶体一侧到另一侧运动,即位错自左向右移动时,晶体产生滑移。



多晶体的塑性变形

- ◆ 多晶体中每个晶粒位向不一致，各晶粒不是同时开始滑移的，而是分批逐次进行的。
- ◆ 多晶体中，由于晶界上原子排列不很规则，阻碍位错的运动，使变形抗力增大。



我们已经学习了金属
塑性变形的机理,那塑
性变形后金属的组织
和性能是否也发生了
变化呢?



我们已经学习了金属
塑性变形的机理,那塑
性变形后金属的组织
和性能是否也发生了
变化呢?



学无止境



是的，金属塑性变形后组织和性能发生了明显的变化，这正是我们今天要学习的主要内容。

塑性变形对金属组织和性能的影响

- 塑性变形对金属性能的影响
- 塑性变形对金属组织结构的影响
- 残余内应力

一、塑性变形对金属性能的影响

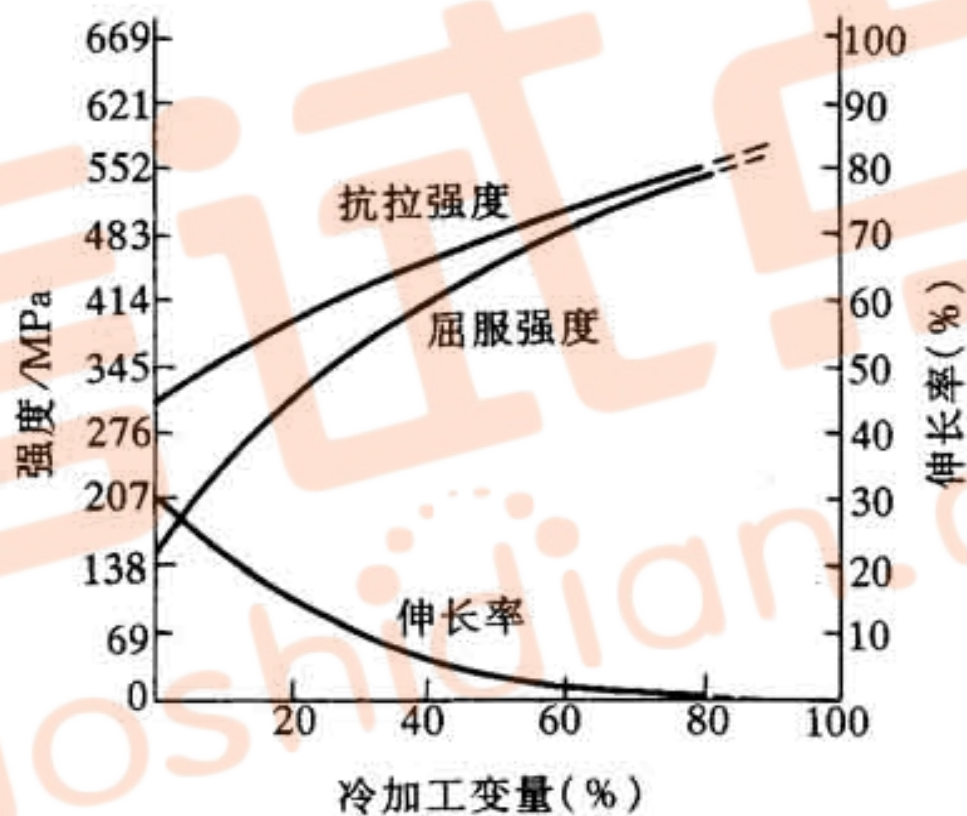
◆ 演示试验



1、加工硬化

- ◆ 金属发生塑性变形时，随变形度的增大，金属的强度和硬度显著提高，塑性和韧性明显下降，这种现象称为加工硬化，也叫形变强化或冷作硬化。

2、加工硬化示意图

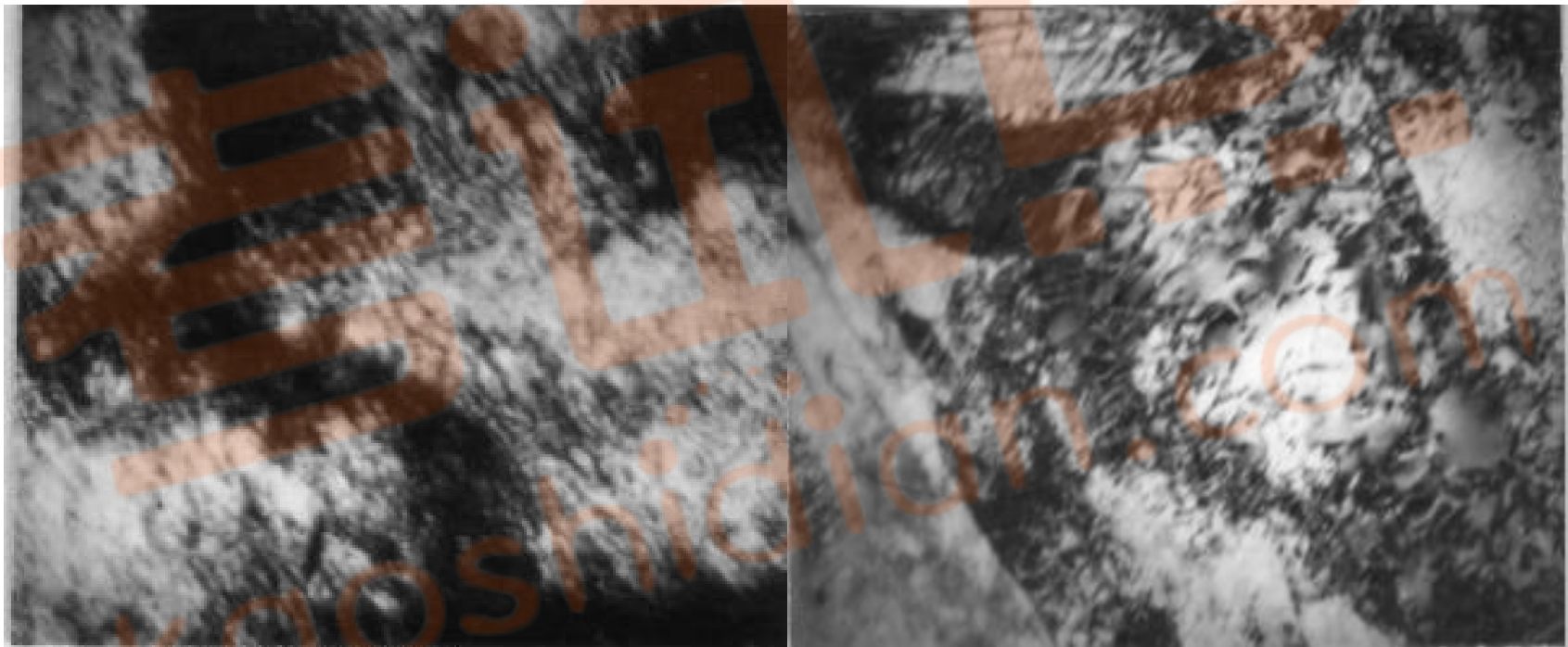


3、加工硬化的原因

- ◆ 金属发生塑性变形时, 位错密度增加, 位错间的交互作用增强, 相互缠结, 造成位错运动阻力的增大, 引起塑性变形抗力提高。另一方面由于晶粒破碎细化, 使强度得以提高。



加工硬化的原因



高密度位错缠结组态 36000×

c. 位错网络组态 36000×

4、加工硬化的意义

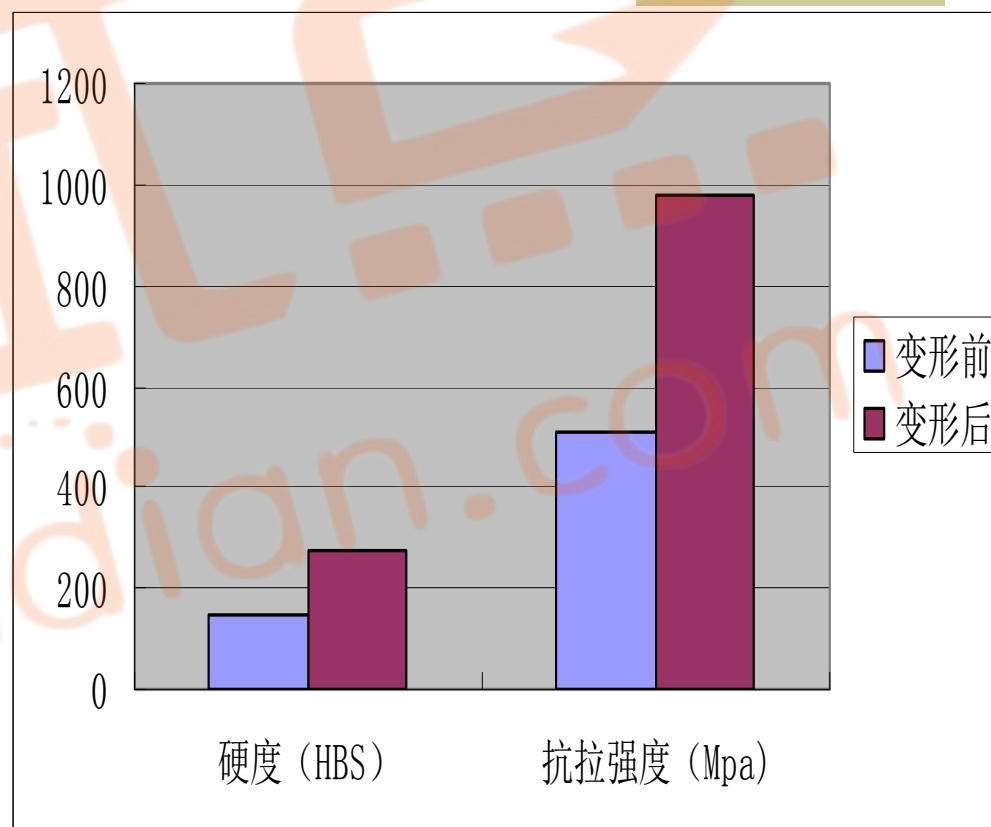
- 强化金属的重要途径；
- 加工硬化是金属冷冲压成型的保证；
- 提高构件在使用过程中的安全性。

强化手段

- 加工硬化是金属材料五大强化手段之一；在生产中可通过冷轧、冷拔提高钢板或钢丝的强度。特别是对于纯金属和不能热处理强化的材料，冷变形加工是强化它们的主要手段；

链条板的轧制

- ◆ 材料为Q345（16Mn）钢 的自行车链条经过五次轧制，厚度由3.5mm压缩到1.2mm，总变形量为65%，硬度从150HBS提高到275HBS；抗拉强度从510MPa提高到980MPa；使承载能力提高了将近一倍。



弹簧钢丝的强化

- ◆ 65Mn弹簧钢丝经冷拉后，抗拉强度可达2000~3000MPa,, 比一般钢材的强度提高4~6倍。



高锰钢的加工硬化

- ◆ 高锰钢（ZGMn13）属于奥氏体钢，热处理不能强化，它的主要强化手段就是加工硬化。
- ◆ 当高锰钢受到激烈摩擦或剧烈冲击时，其表面部分就会产生微量塑性变形，随之产生强烈的加工硬化，使其硬度和强度快速提高，从而能够作为耐磨钢使用。

高锰钢的加工硬化

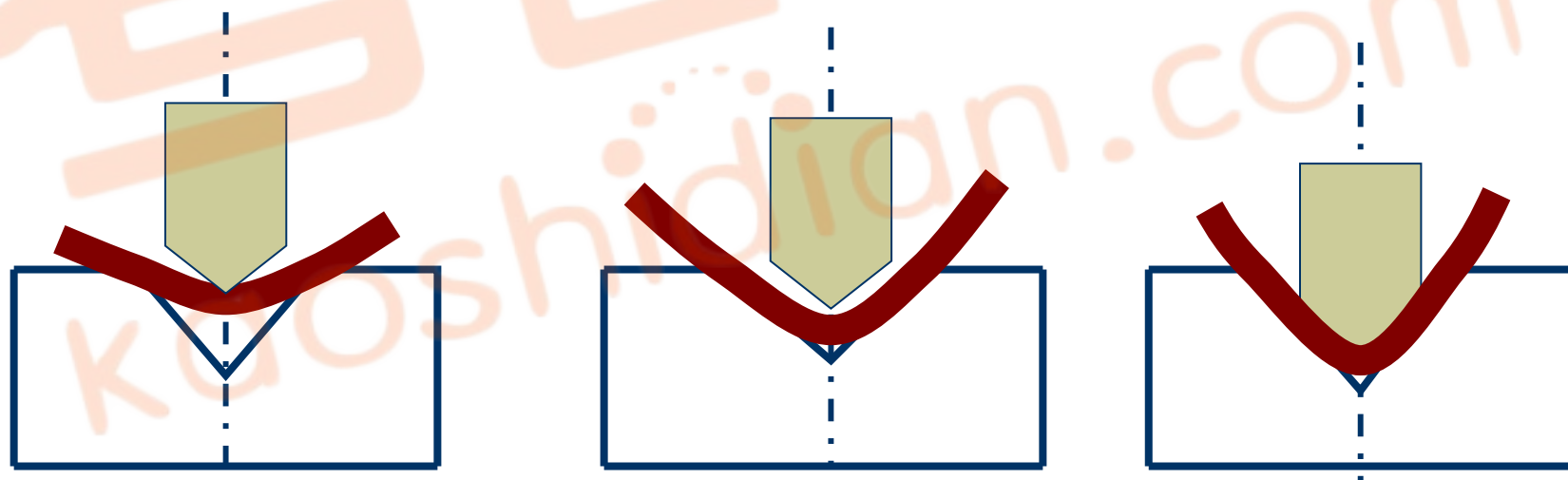


高锰钢的加工硬化



金属的冷成型加工的保证

- 金属的冷成型正是利用了材料的加工硬化特性，使塑性变形均匀地分布于整个工件上，而不致于集中在某些局部而导致最终断裂。



提高构件的安全性

- ◆ 构件在使用过程中，往往不可避免地会某些部位出现应力集中和过载现象，在这种情况下，由于金属能加工硬化，使局部过载部位在产生少量塑性变形之后，提高了屈服强度并与所承受的应力达到平衡，变形就不会继续发展，从而在一定程度上提高了构件的安全性。

加工硬化的不利影响

- 加工硬化使金属在塑性变形过程中变形抗力逐渐增加，以致丧失继续变形的能力。为了消除加工硬化，使金属重新恢复变形的能力，必须对其进行中间退火，这样就增加了生产成本，而且延长了生产周期。



金属塑性变形时其它性能的变化

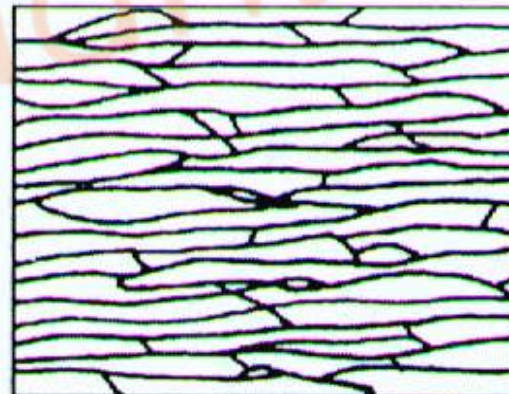
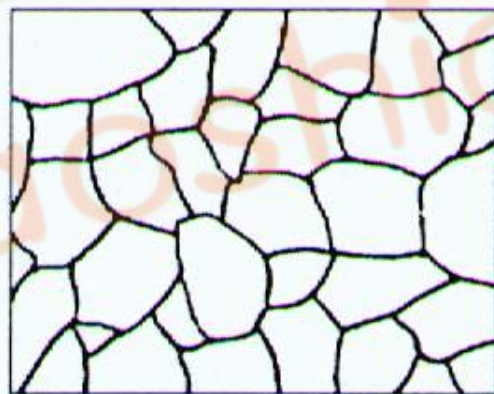
- ◆ 导电性下降（电阻升高）、导磁性下降；
- ◆ 化学活性增加，电极电位提高；耐腐蚀性下降。

二、塑性变形对金属组织的影响

- 冷变形纤维组织的形成
- 亚结构的细化
- 形变织构产生

冷变形纤维组织

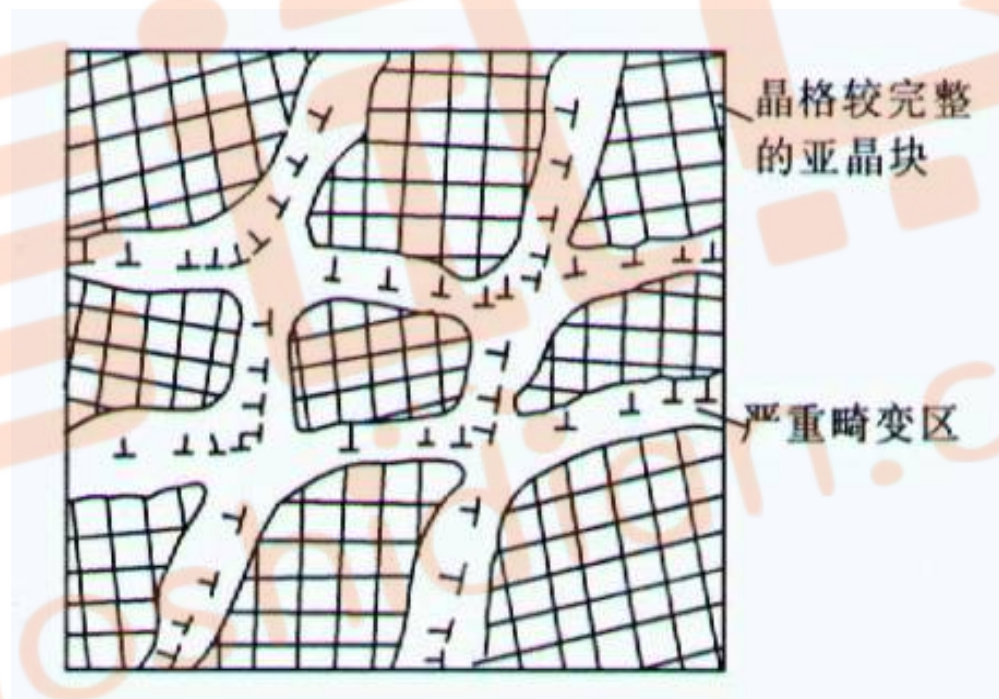
- ◆ 金属发生塑性变形后, 晶粒发生变形, 沿变形方向被拉长或压扁。当变形量很大时, 晶粒变成细条状(拉伸时), 金属中的夹杂物也被拉长, 形成纤维组织。



亚结构的细化

- ◆ 金属经大的塑性变形时, 由于位错的密度增大并发生交互作用, 大量位错堆积在局部地区, 并相互缠结, 形成不均匀的分布, 使晶粒分化成许多位向略有不同的小晶块, 从而在晶粒内产生亚结构 (亚晶粒)。

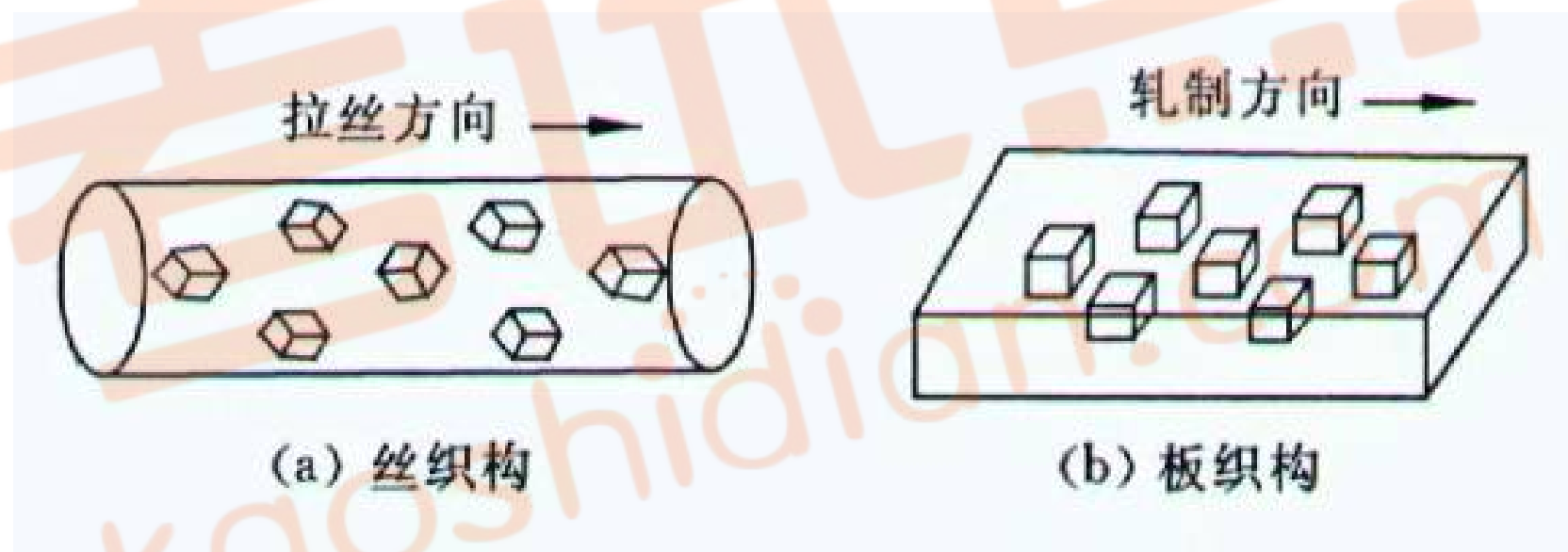
亚结构示意图



形变织构产生

- ◆ 金属塑性变形到很大程度(70%以上)时, 由于晶粒发生转动, 使各晶粒的位向趋近于一致, 形成特殊的择优取向, 这种有序化的结构叫做形变织构。形变织构一般分两种: 一种是各晶粒的一定晶向平行于拉拔方向, 称为丝织构, 例如低碳钢经高度冷拔后, 其 $\langle 100 \rangle$ 平行于拔丝方向; 另一种是各晶粒的一定晶面和晶向平行于轧制方向, 称为板织构, 低碳钢的板织构为 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 。

形变织构



制 耳



(a) 无织构



(b) 有织构

残余内应力

- ◆ 由于金属在发生塑性变形时, 金属内部变形不均匀, 位错、空位等晶体缺陷增多, 金属内部会产生残余内应力。即外力去除后, 金属内部会残留下来应力。
- ◆ 残余内应力会使金属的耐腐蚀性能降低, 严重时可导致零件变形或开裂。
- ◆ 齿轮等零件, 如表面通过喷丸处理, 可产生较大的残余压应力, 则可提高疲劳强度。

残余内应力

- ◆ 第一类残余应力 (σ_I)：宏观内应力，
由整个物体变形不均匀引起。
- ◆ 第二类残余应力 (σ_{II})：微观内应力，
由晶粒变形不均匀引起。
- ◆ 第三类残余应力 (σ_{III})：点阵畸变内应力，
由位错、空位等引起。80-90%。

残余内应力的消除

- ◆ 金属塑性变形后的残余内应力，可以通过去应力退火来消除；
- ◆ 如经拉延成型的黄铜弹壳在 280°C 左右进行去应力退火，以避免变形和应力腐蚀。

残余内应力的利用

- ◆ 生产中有意控制残余内应力的分布，使其与工作应力方向相反，可以提高工件的力学性能。
- ◆ 右图是钢板弹簧的例子。



学海无涯

- ◆ 金属经塑性变形后，组织结构和性能发生很大的变化。如果对变形后的金属进行加热，金属的组织结构和性能又会发生变化。随着加热温度的提高，变形金属将相继发生回复、再结晶和晶粒长大过程。

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

一、回复

回复：冷变形金属在低温加热时，其显微组织无可见变化，但其物理、力学性能却部分恢复到冷变形以前的过程。

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

1、显微组织变化（示意图）

回复阶段：显微组织仍为纤维状，无可见变化；

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

2、性能变化

(1) 力学性能（示意图）

回复阶段：强度、硬度略有下降，塑性略有提高。

(2) 物理性能

电阻：电阻在回复阶段可明显下降。

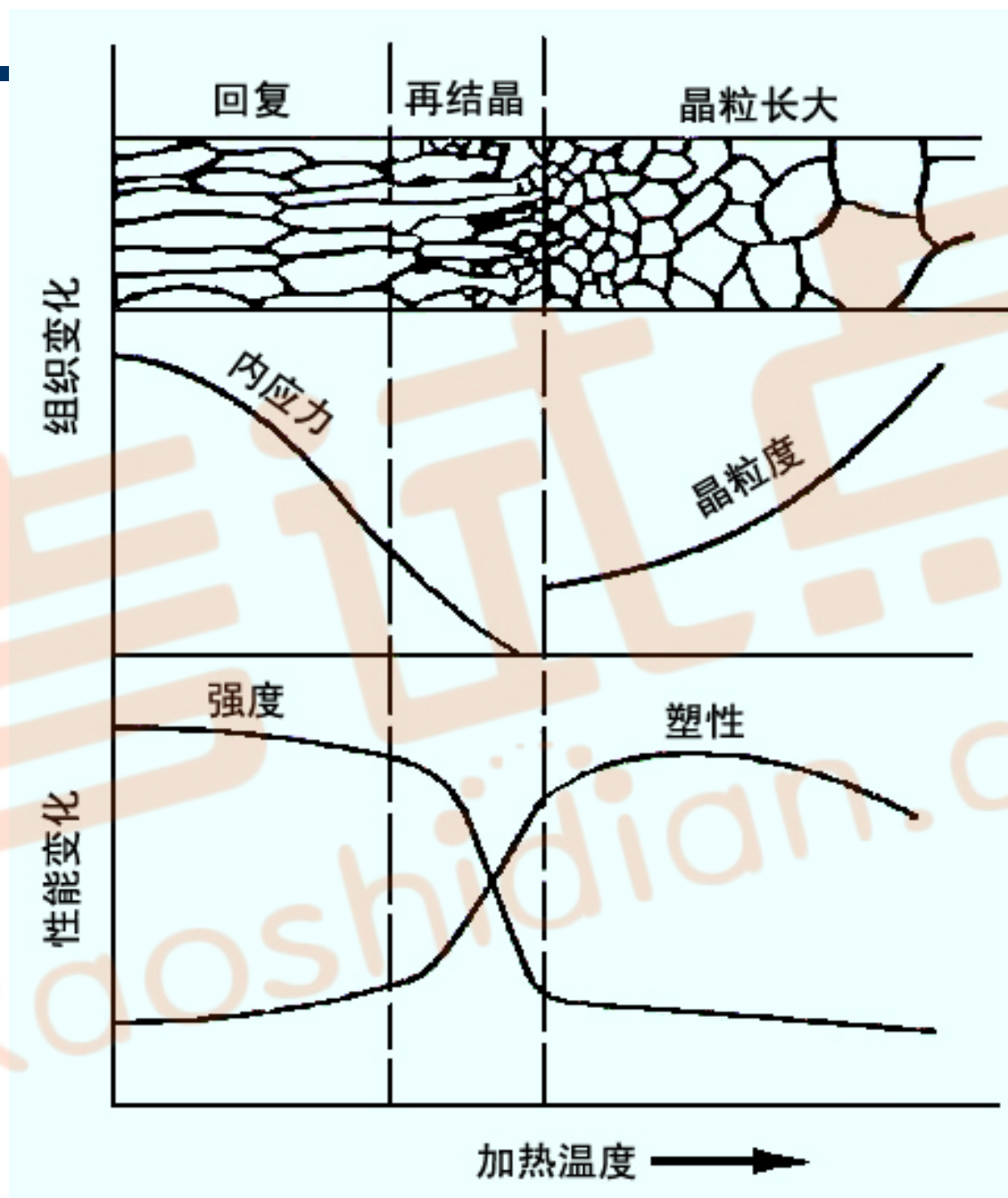
耐蚀性：由于内应力降低，耐应力腐蚀性提高。

第三节 冷变形金属在加热时的组织与性能变化

3、内应力变化

回复阶段：大部分或全部消除第一类内应力，部分消第二类内应力；

再结晶阶段：内应力可完全消除。



第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

4、回复机理

(1) 低温回复 ($0.1-0.3T_m$)

点缺陷运动 { 移至晶界、位错处
空位+间隙原子 } 消失 { 缺陷密度降低
空位聚集 (空位群、对) }

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

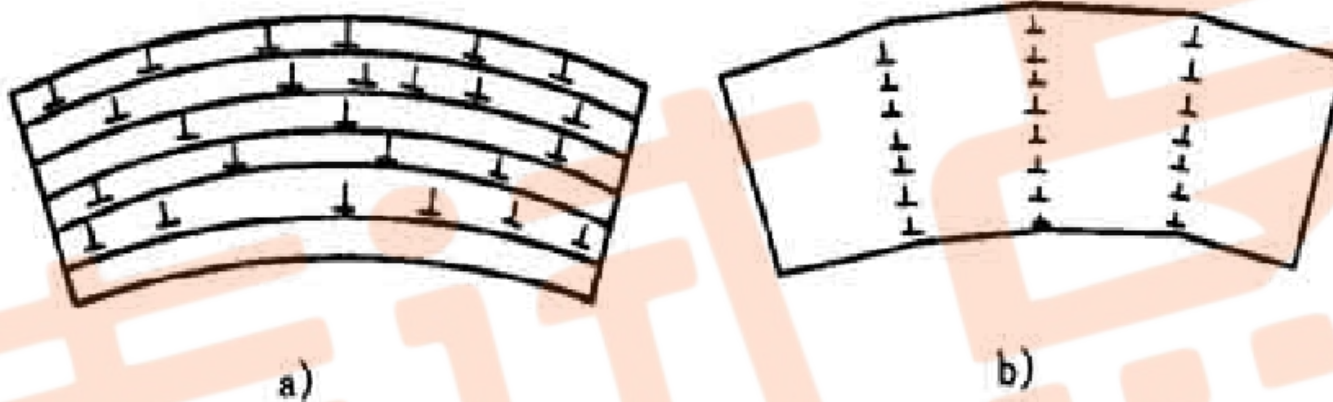
(2) 中温回复 ($0.3-0.5T_m$)

位错滑移 { 异号位错相遇而抵销
位错缠结重新排列
亚晶粒长大 } 位错密度降低

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

(3) 高温回复 ($>0.5T_m$)

位错攀移 (+ 滑移) \rightarrow 位错垂直排列 (亚晶界) \rightarrow
多边化 (亚晶粒) \rightarrow 弹性畸变能降低。



多边形化前、后刃型位错的排列情况

a) 多边形化前 b) 多边形化后

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

5、 回复退火的应用

去应力退火：降低应力（保持加工硬化效果），防止工件变形、开裂，提高耐蚀性。

如冷卷弹簧的定型、黄铜弹壳的去应力等。

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

二、再结晶

冷变形金属被加热到适当温度时，在变形组织内部新的无畸变的等轴晶粒逐渐取代变形晶粒，而使形变强化效应完全消除的过程。

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

1、组织与性能变化

- ◆ 变形金属进行再结晶后，金属的强度和硬度明显降低，而塑性和韧性大大提高，加工硬化现象被消除，此时内应力全部消失，物理、化学性能基本上恢复到变形以前的水平。
- ◆ 再结晶生成的新的晶粒的晶格类型与变形前、变形后的晶格类型均一样。

第三节 冷变形金属在加热时的组织与性能变化

3、再结晶温度

◆ 变形后的金属发生再结晶的温度是一个温度范围，并非某一恒定温度。一般所说的再结晶温度指的是最低再结晶温度($T_{\text{再}}$)，通常用经大变形量(70%以上)的冷塑性变形的金属，经一小时加热后能完全再结晶的最低温度来表示。

◆ 最低再结晶温度与该金属的熔点有如下关系：

$$T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$$

式中的温度单位为绝对温度(K)。

第三节 冷变形金属在加热时的组织与性能变化

3、再结晶温度

最低再结晶温度与下列因素有关：

- ◆ **预先变形度**：金属再结晶前塑性变形的相对变形量称为预先变形度。预先变形度越大，金属的晶体缺陷就越多，组织越不稳定，最低再结晶温度也就越低。当预先变形度达到一定大小后，金属的最低再结晶温度趋于某一稳定值。
- ◆ **金属的熔点**：熔点越高，最低再结晶温度也就越高。

- ◆ **杂质和合金元素：**由于杂质和合金元素特别是高熔点元素，阻碍原子扩散和晶界迁移，可显著提高最低再结晶温度。如高纯度铝(99.999%)的最低再结晶温度为80℃，而工业纯铝(99.0%)的最低再结晶温度提高到了290℃。
- ◆ **加热速度和保温时间：**再结晶是一个扩散过程，需要一定时间才能完成。提高加热速度会使再结晶在较高温度下发生，而保温时间越长，再结晶温度越低。

第三节 冷变形金属在加热时的 组织与性能变化

4、再结晶的应用

- ◆ 由于塑性变形后的金属加热发生再结晶后，可消除加工硬化现象，恢复金属的塑性和韧性，因此生产中常用**再结晶退火**工艺来恢复金属塑性变形的能力，以便继续进行形变加工。

- ◆ 例如生产铁铬铝电阻丝时，在冷拔到一定的变形度后，要进行氢气保护再结晶退火，以继续冷拔获得更细的丝材。
- ◆ 为了缩短处理时间，实际采用的再结晶退火温度比该金属的最低再结晶温度要高 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

金属的热加工

一、金属的热加工与冷加工

- ◆ 金属塑性变形的加工方法有热加工和冷加工两种。
- ◆ 热加工和冷加工不是根据变形时是否加热来区分，而是根据变形时的温度处于再结晶温度以上还是以下来划分的。
- ◆ 从金属学的角度出发，冷、热变形加工是以再结晶温度为界限的，低于再结晶温度的变形称为冷变形加工；高于再结晶温度的变形就称为热变形加工。

金属的热加工与冷加工

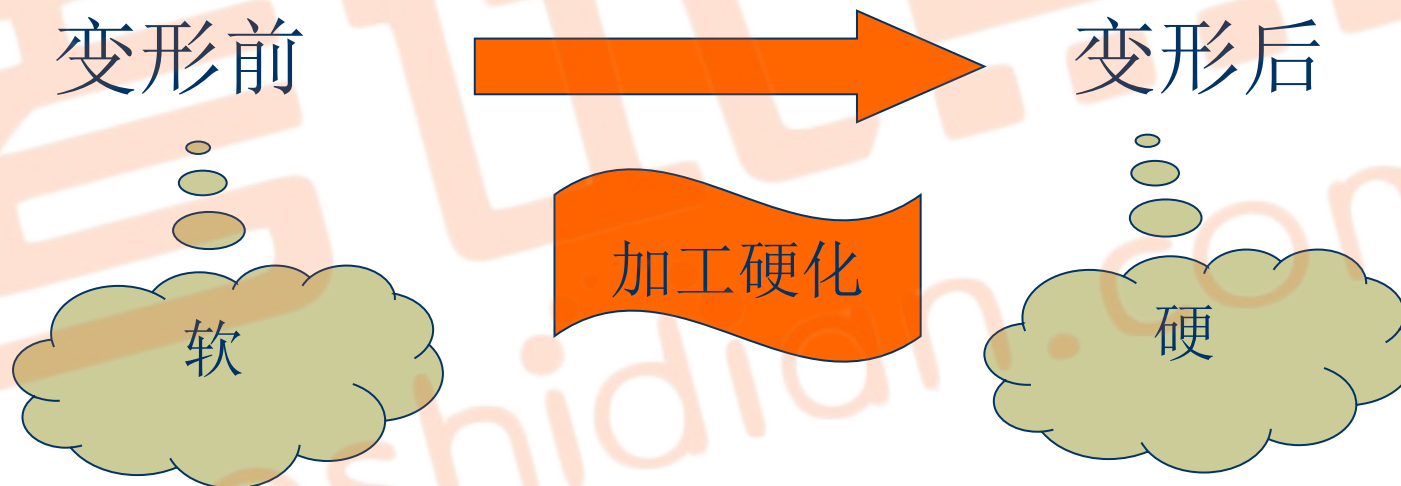
- ◆ 不能凭直觉判断；
- ◆ 如钨的再结晶温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变形加工仍是冷加工；
- ◆ 又如铅、锡等金属，在室温下的变形就是热变形加工；

金属的冷加工

- ◆ 在金属的再结晶温度以下的塑性变形加工称为冷加工。如低碳钢的冷轧、冷拔、冷冲等。
- ◆ 由于加工温度处于再结晶温度以下，金属材料发生塑性变形时不会伴随再结晶过程。因此冷加工对金属组织和性能的影响即是前面的所述塑性变形的影响规律。
- ◆ 与冷加工前相比，金属材料的强度和硬度升高，塑性和韧性下降，即产生加工硬化的现象。

金属的冷加工

- ◆ 性能变化是单向的:



金属的热加工

- ◆ 在金属的再结晶温度以上的塑性变形加工称为热加工，例如钢材的热锻和热轧。
- ◆ 热加工温度：

$$T_{\text{再}} < T_{\text{热加工}} < T_{\text{熔}} - 100 \sim 200^{\circ}\text{C}$$

金属的热加工

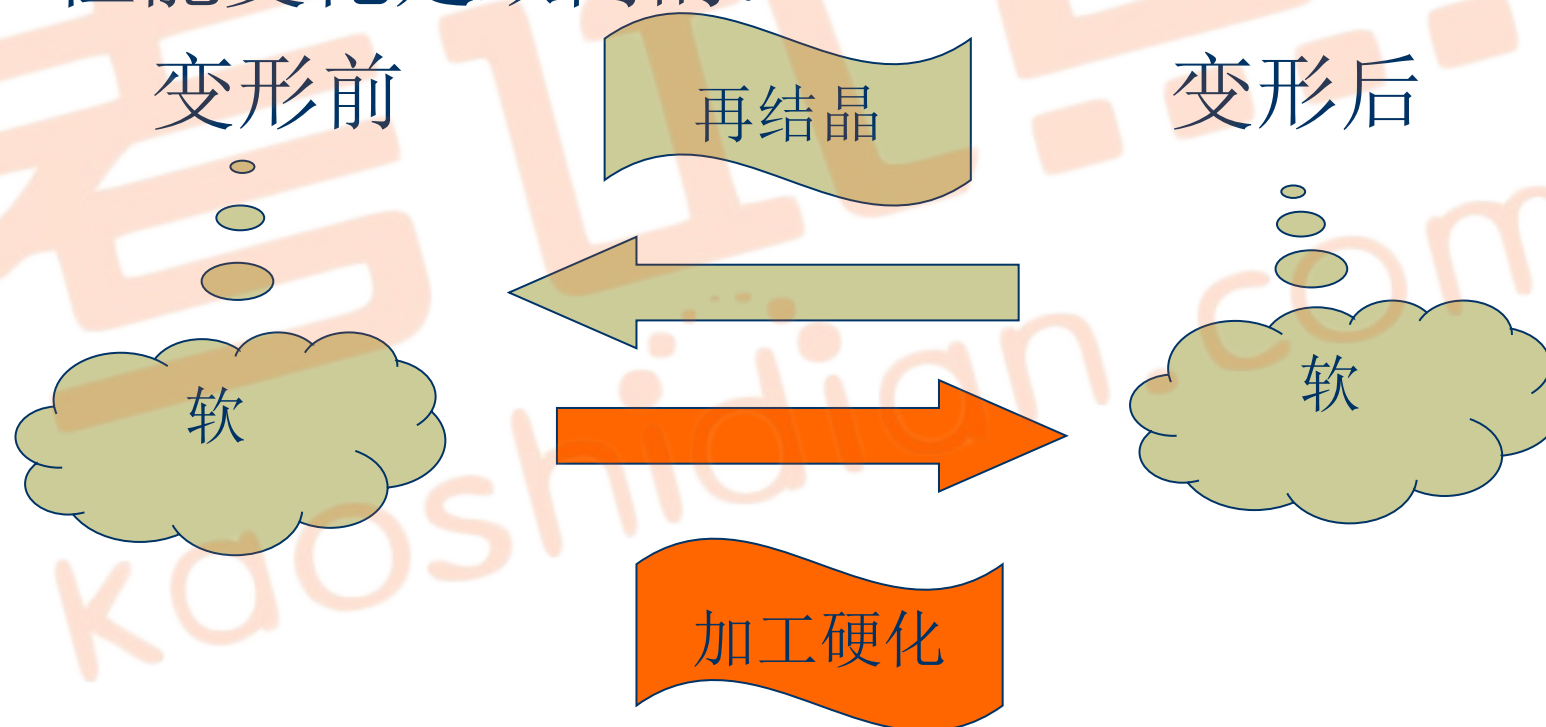
- ◆ 在热变形加工时，由于温度处于再结晶温度以上，材料性能的变化是双向的，因为在发生加工硬化的同时，还发生着再结晶，也就是因为变形发生的硬化和因为再结晶发生的软化在同时进行着。那一个方面占优势要看是变形度和加热温度的具体情况。

金属的热加工

- ◆ 金属材料发生塑性变形后，随即发生再结晶过程。因此塑性变形引起的加工硬化效应随即被再结晶过程的软化作用所消除，使材料保持良好的塑性状态。

金属的热加工

- ◆ 性能变化是双向的:



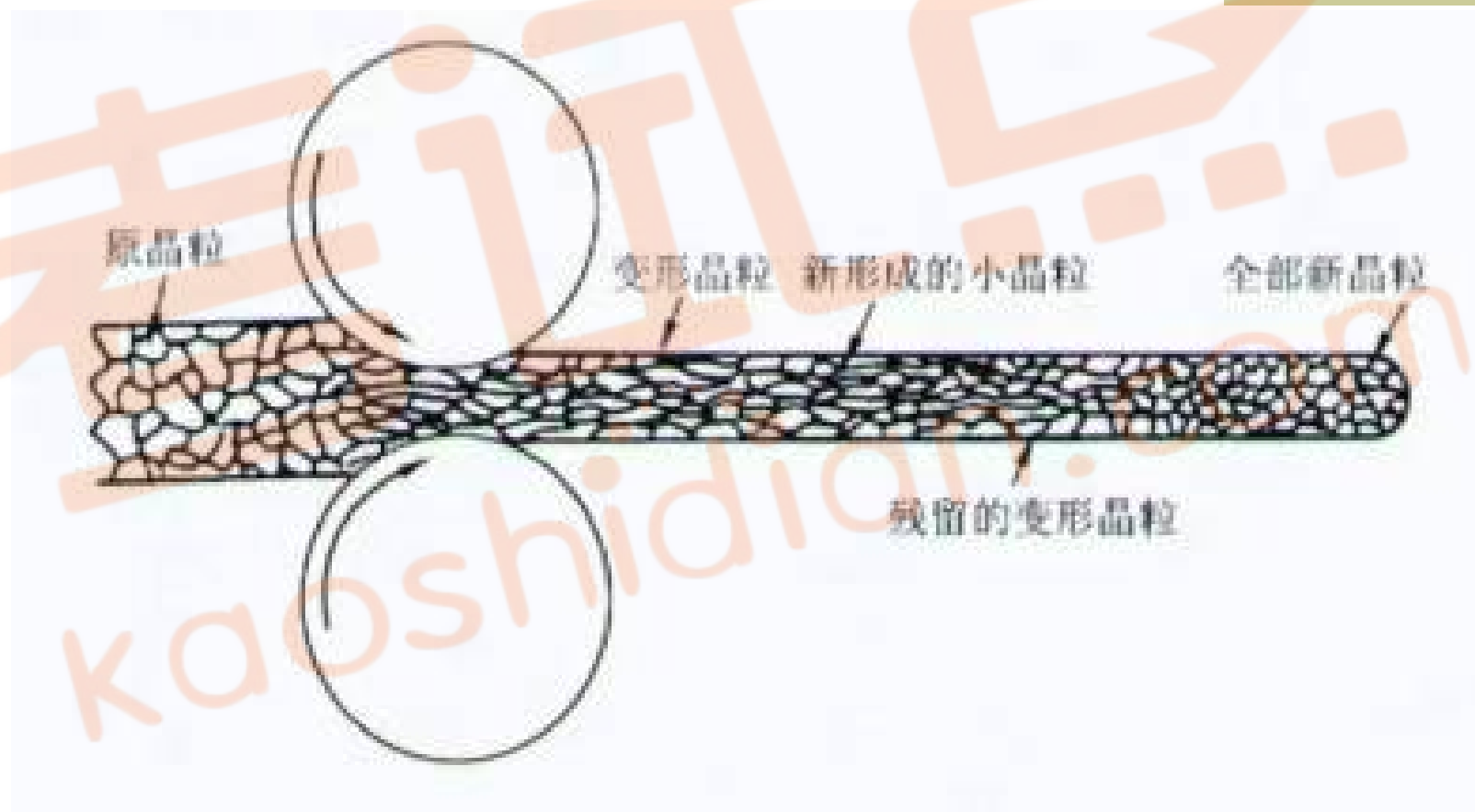
二、金属热加工对组织与性能的变化

消除铸态组织缺陷

- ◆ 热加工能使铸态金属中的气孔、疏松、微裂纹焊合，提高金属的致密度；减轻甚至消除树枝晶偏析和改善夹杂物、第二相的分布等；提高金属的力学性能，特别是韧性和塑性。

消除铸态组织缺陷

- ◆ 热加工能打碎铸态金属中的粗大树枝晶和柱状晶，并通过再结晶获得等轴细晶粒，而使金属的力学性能全面提高。
- ◆ 但这与热加工的变形量和加工终了温度关系很大，采用低的变形终止温度、大的最终变形量、快的冷却速度可获得细小晶粒。



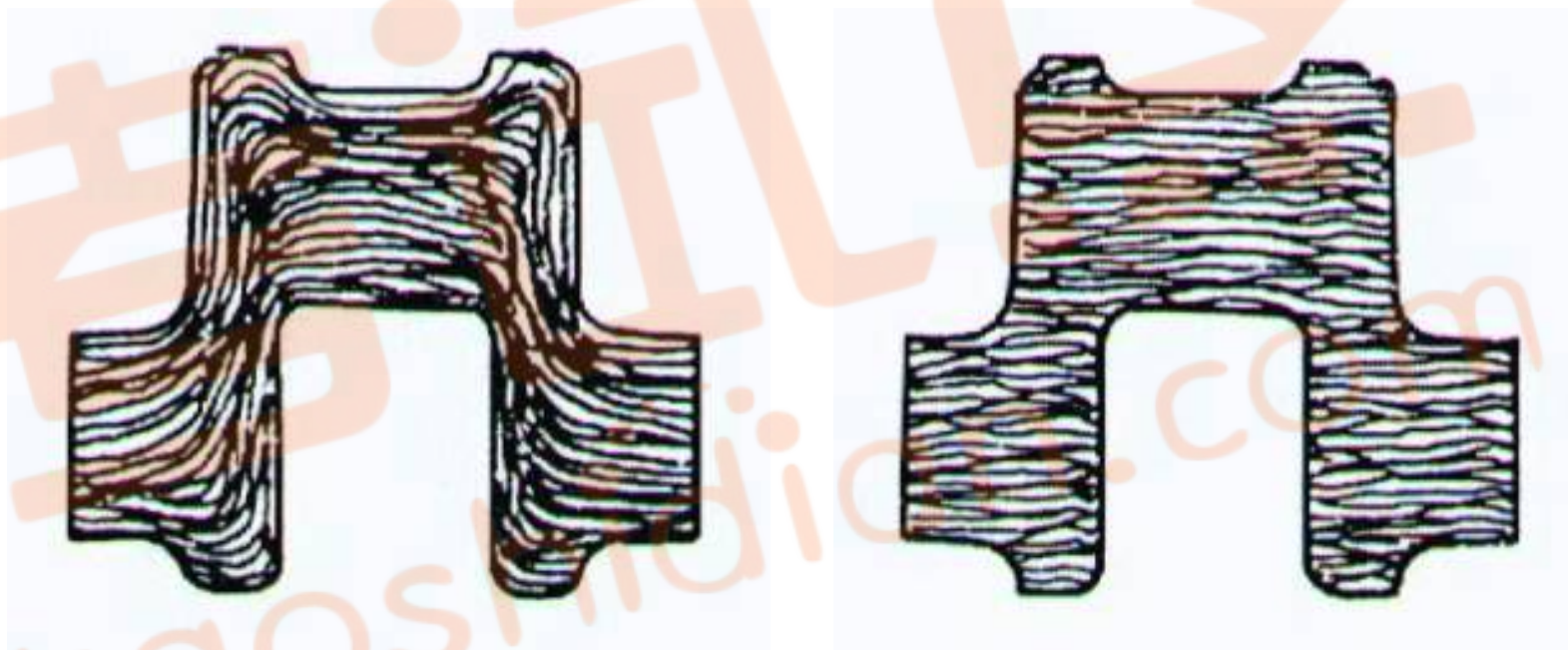
热加工流线

- ◆ 热加工能使金属中残存的枝晶偏析、可变形夹杂物和第二相沿金属流动方向被拉长，形成纤维组织(或称“流线”)，使金属的力学性能特别是塑性和韧性具有方向性，纵向上的性能显著大于横向上的。因此热加工时应力求工件流线分布合理。

热加工流线

- ◆ 锻造曲轴的合理流线分布，可保证曲轴工作时所受的最大拉应力与流线一致，而外加剪切应力或冲击力与流线垂直，使曲轴不易断裂。切削加工制成的曲轴，其流线分布不合理，易沿轴肩发生断裂。

热加工流线



形成带状组织

- ◆ 钢中的铁素体或渗碳体以伸长的杂质为核心形核，形成带状组织。
- ◆ 带状组织能造成材料的各向异性，应加以注意。
- ◆ 避免在两相区变形、减少夹杂元素含量、采用高温 扩散退火或正火可以消除带状组织。

三、热加工的优点

- ◆ 可持续大变形量加工
- ◆ 动力消耗小
- ◆ 提高材料质量和性能

三、热加工的优点

- ◆ 由于热加工可使金属的组织 and 性能得到显著改善，所以受力复杂、载荷较大的重要工件，一般都采用热加工方法来制造。

四、超塑性

- ◆ 超塑性：某些材料在特定变形条件下呈现的特别大的延伸率。
- ◆ 条件：晶粒细小、温度范围（ $0.5\sim 0.65T_m$ ）、应变速率小（ $1\sim 0.01\%/s$ ）。
- ◆ 本质：多数观点认为是由晶界的滑动和晶粒的转动所致。