

材料科学基础



第九章 回复、再结晶与金属热加工



第九章回复、再结晶与金属热加工



9.1 概述

- 机械功（塑性变形）
 - 热量（散失）
 - 晶体内部缺陷 → 金属处于不稳定的高能状态 → 有向低能转变的趋势

- 转变的三个阶段：**回复**（recovery）、**再结晶**（recrystallization）和**晶粒长大**（grain growth）
- 回复与再结晶的用途：再结晶退火，去应力退火，金属高温强度调整等。
- 本章重点：转变过程三个阶段中的组织、性能的变化规律及主要影响因素。



9.2 冷变形金属加热时组织与性能变化



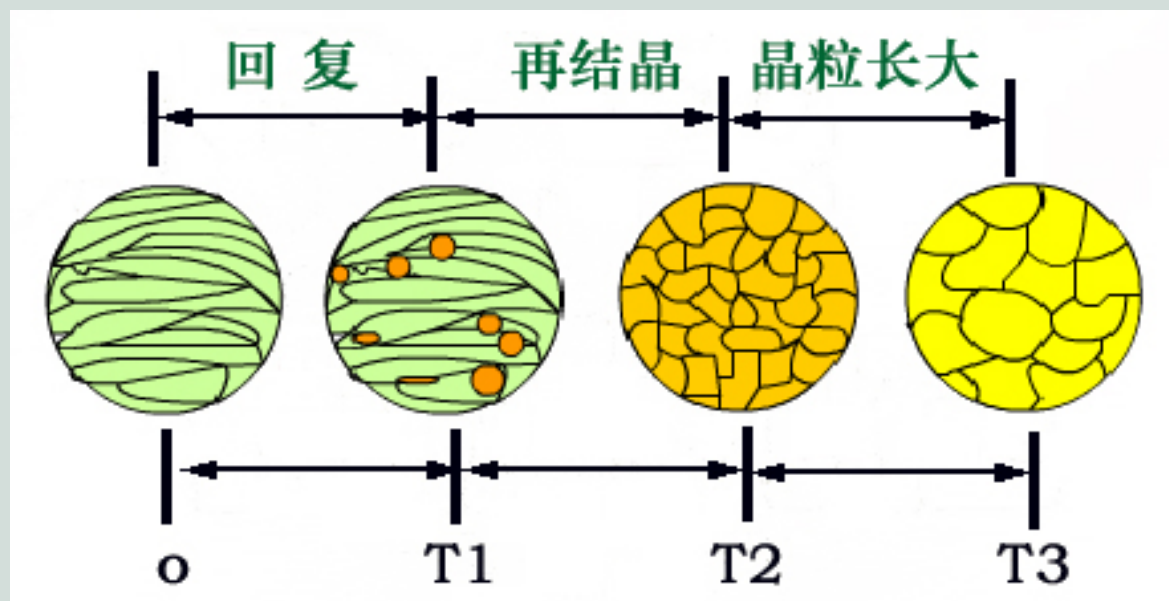
9.2.1 回复再结晶

(1) **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。

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。

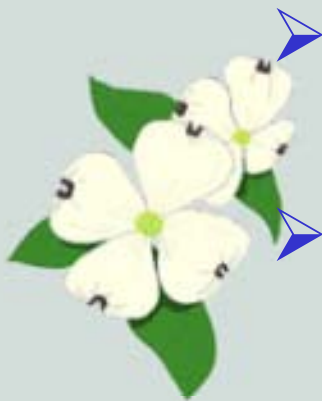


9.2.2 显微组织的变化



冷变形金属组织随加热温度及时间的变化示意图

- 回复阶段：显微组织仍为纤维状，无可见变化；
- 再结晶阶段：变形晶粒通过形核长大，逐渐转变为新的无畸变的等轴晶粒。
- 晶粒长大阶段：晶界移动、晶粒粗化，达到相对稳定的形状和尺寸。



9.2.3 性能变化

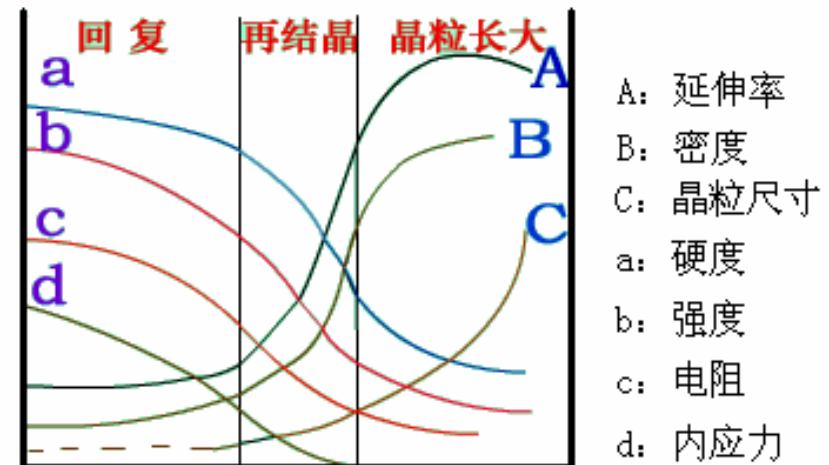
(1) 力学性能

- 回复阶段：强度、硬度略有下降，塑性略有提高。
- 再结晶阶段：强度、硬度明显下降，塑性明显提高。
- 晶粒长大阶段：强度、硬度继续下降，塑性继续提高，粗化严重时下降。

(2) 物理性能

密度：回复阶段变化不大，再结晶阶段急剧升高；

电阻：由于点缺陷密度下降，电阻在回复阶段可明显下降。



三个阶段性能变化示意图

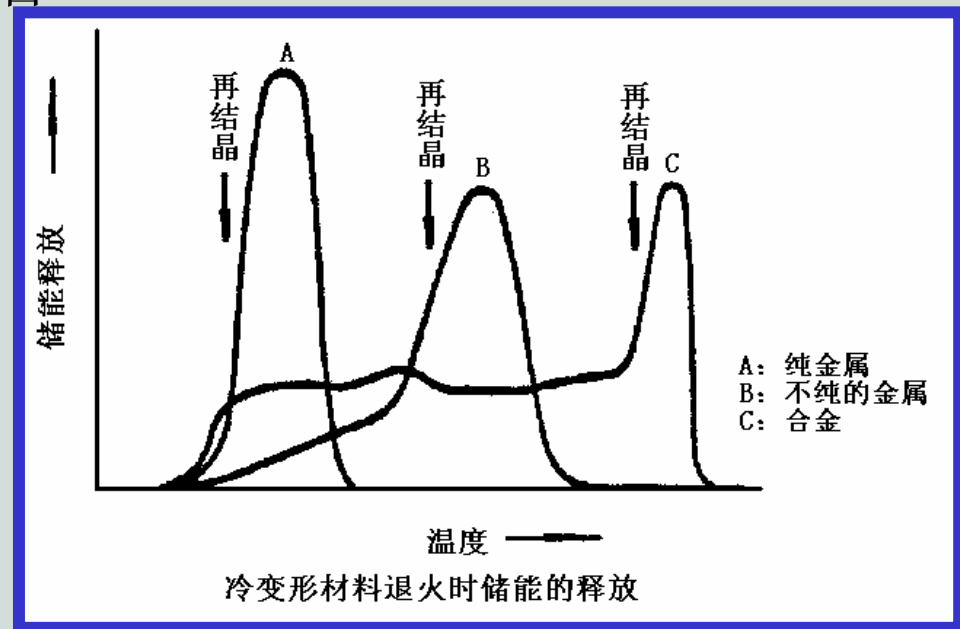
9.2.4 储存能变化

(1) **储存能**：存在于冷变形金属内部的一小部分 ($\sim 10\%$) 变形功。

(2) 储存能存在形式 { 弹性应变能 ($3\sim 12\%$)
位错 ($80\sim 90\%$) } 驱动力

点缺陷

(3) 储存能的释放：原子活动能力提高，迁移至平衡位置，储存能得以释放。



9.2.4 内应力变化

回复阶段：大部分或全部消除第一类内应力，部分消除第二、三类内应力；

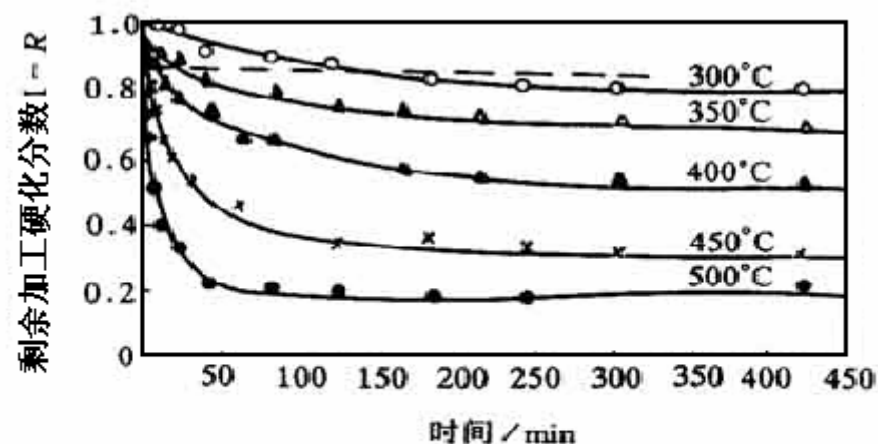
再结晶阶段：内应力可完全消除。



9.3 回复

9.3.1 回复动力学

(1) 回复动力学曲线



经拉伸变形的纯铁在不同温度下加热时，
屈服强度的回复动力学

(2) 回复动力学特点

- 回复过程**没有孕育期**，随着退火的开始进行，发生软化。
- 在一定温度下，**开始变化快，随后变慢**，直到最后回复速率为零。
- 每一温度的回复程度**有一极限值**，退火温度越高，这个极限值也越高，而达到此极限所需时间则越短。
- **回复不能使金属性能恢复到冷变形前的水平。**



9.3.2 回复过程及机制

一般认为是点缺陷和位错在退火过程中发生运动，从而改变了它们的组态和分布。



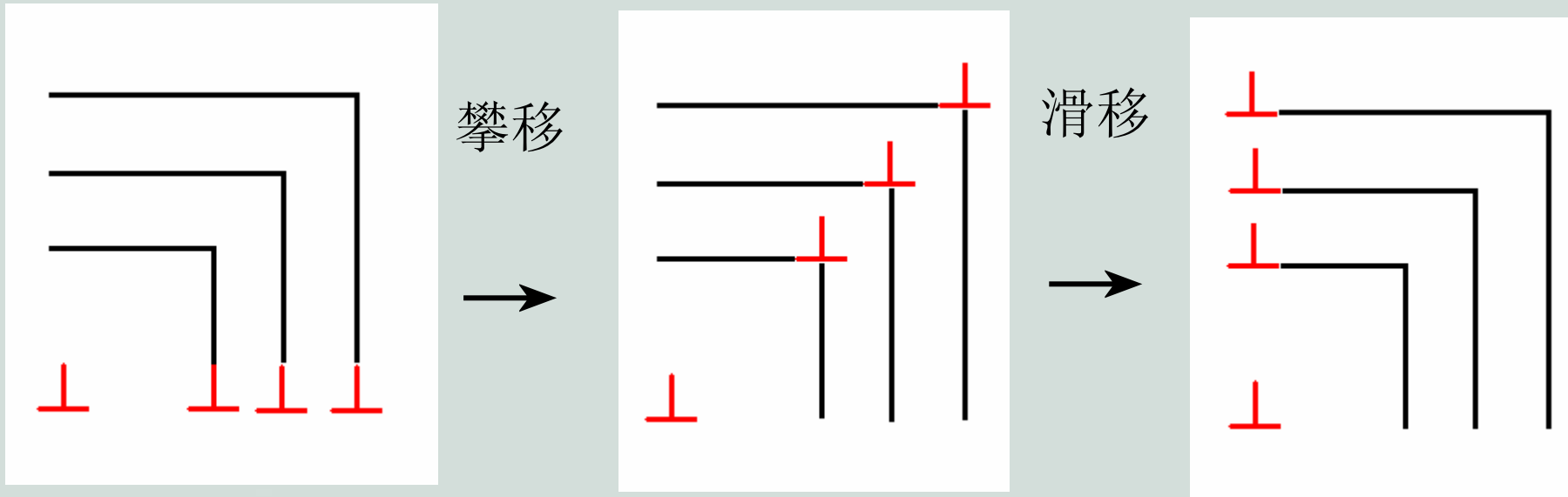
低温回复：回复的机制主要是**过剩空位的消失**，趋向于平衡空位浓度。

中温回复：其主要机制是**位错滑移**，导致**位错重新组合**；异号位错会聚而互相抵消以及亚晶粒长大，**位错密度降低**。

高温回复：回复机制是包括**攀移**在内的**位错运动**和**多边化**，以及**亚晶粒合并**，**弹性畸变能降低**。

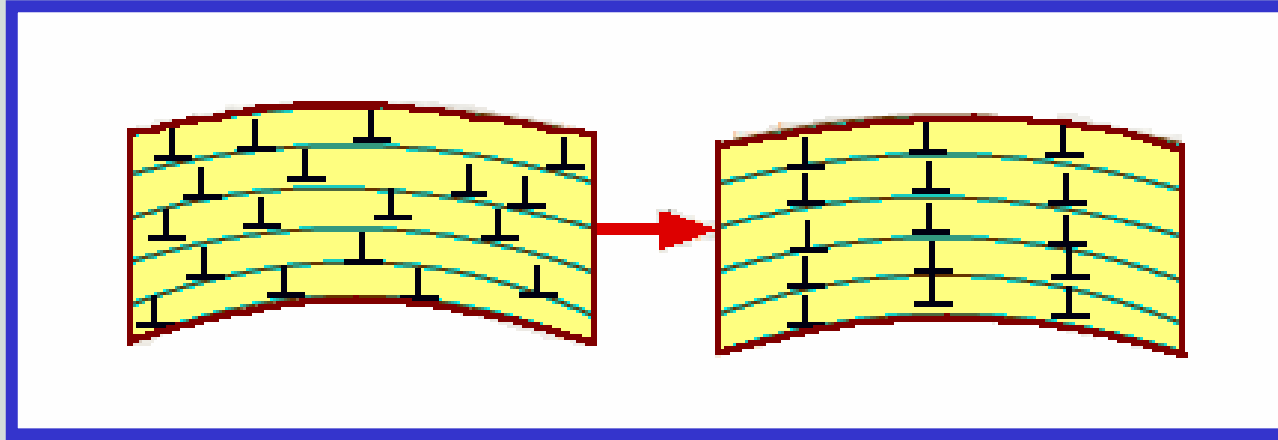


攀移：刃型位错沿垂直于滑移面的方向运动，沿攀移后所在的滑移面滑移，使在同一滑移面并排的同号位错处于不同滑移面竖直排列，以降低总的畸变能。



回复中刃型位错的攀移及滑移

多边化：刃型位错通过攀移和滑移构成**竖直排列**（位错墙），形成**位错墙**的过程称为多边形化。

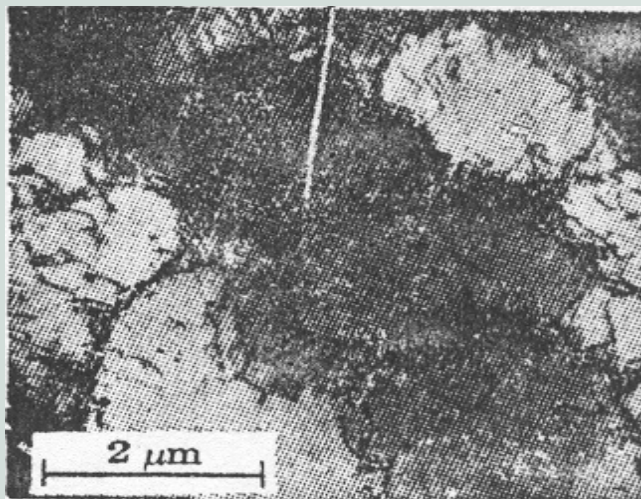


多边化示过程意图

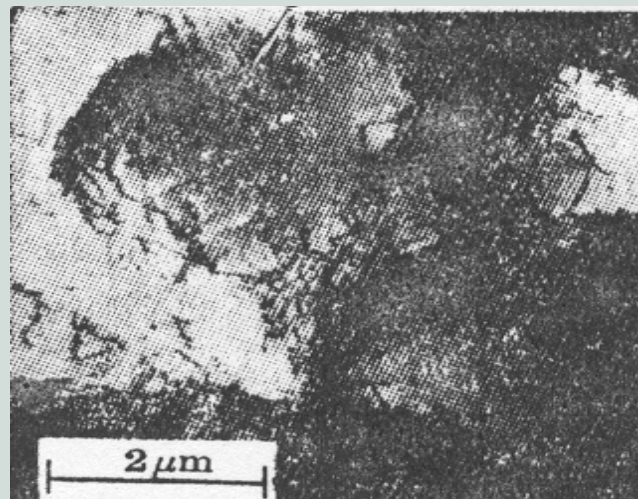
回复亚晶：多边化形成小角度晶界，亚晶界将原来的晶粒分割成许多亚晶块。



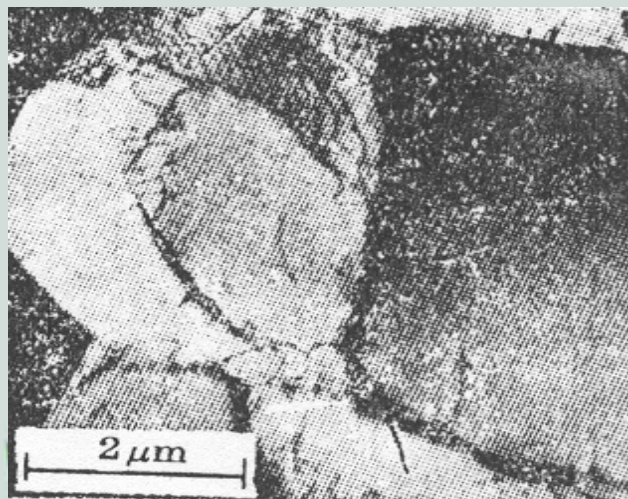
实质：胞壁处的缠结位错不断聚集、使胞壁变薄，逐渐形成网络，构成清晰的亚晶界过程。



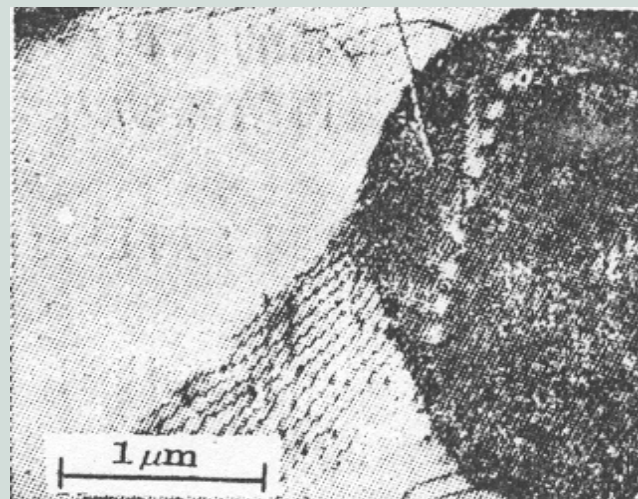
(a)



(b)



(c)



(d)

纯铝室温5%冷变形后200℃回复退火

不同时间位错胞壁结构的变化

9.3.3 回复退火的应用



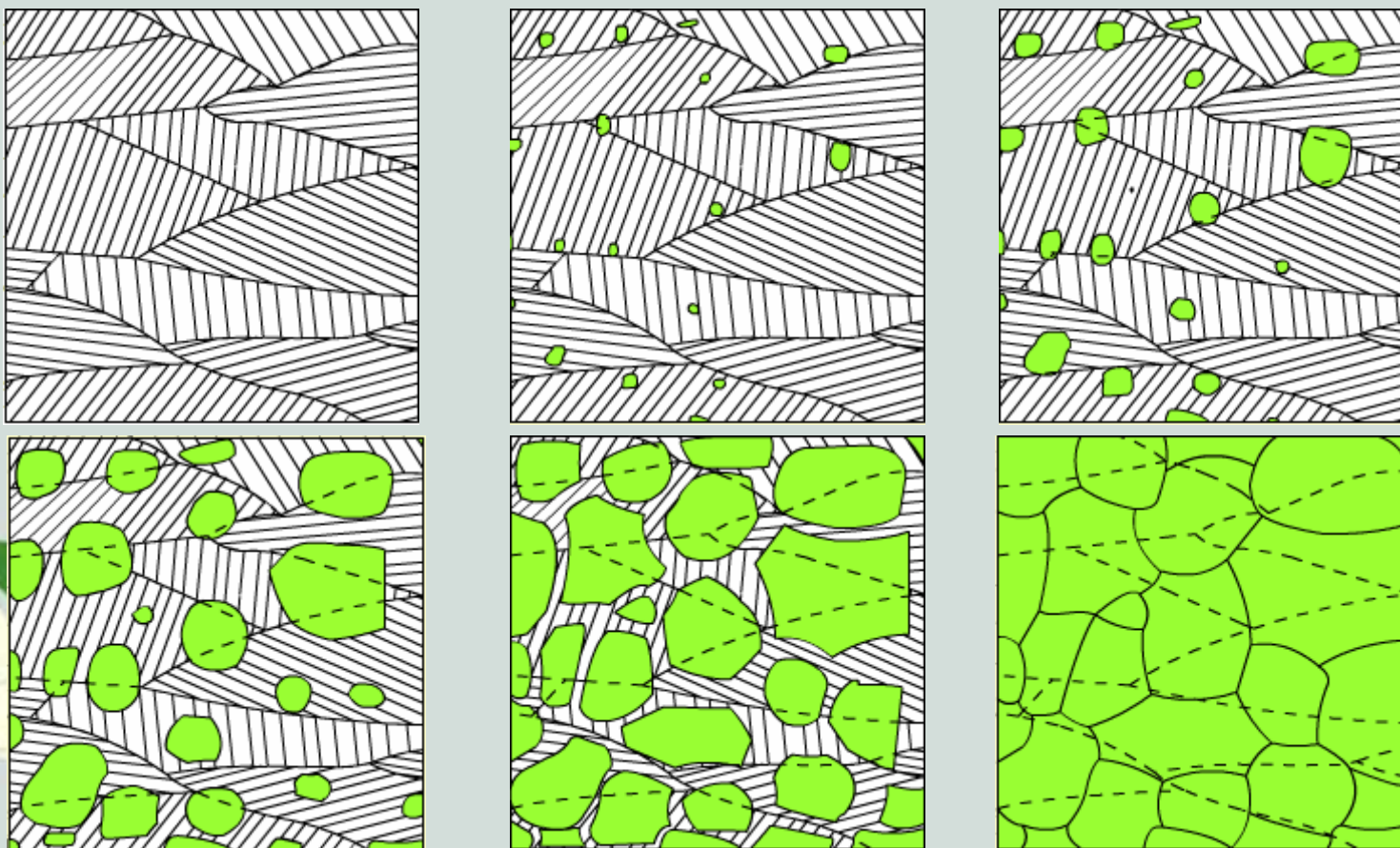
主要用作去应力退火，使冷加工金属在基本上保持加工硬化的状态下降低其内应力，以稳定和改善性能，减少变形和开裂，提高耐蚀性。



9.4 再结晶

再结晶：冷变形后的金属加热到一定温度后，**无畸变的新晶粒取代变形晶粒**的过程。

经过再结晶，性能可恢复到变形以前的完全软化状态。



9.4.1 再结晶的形核与长大

(1) 再结晶形核（非均匀形核）

① **晶界凸出形核机制**：一般发生在形变较小的金属中。

➤ 变形不均匀，位错密度不同。

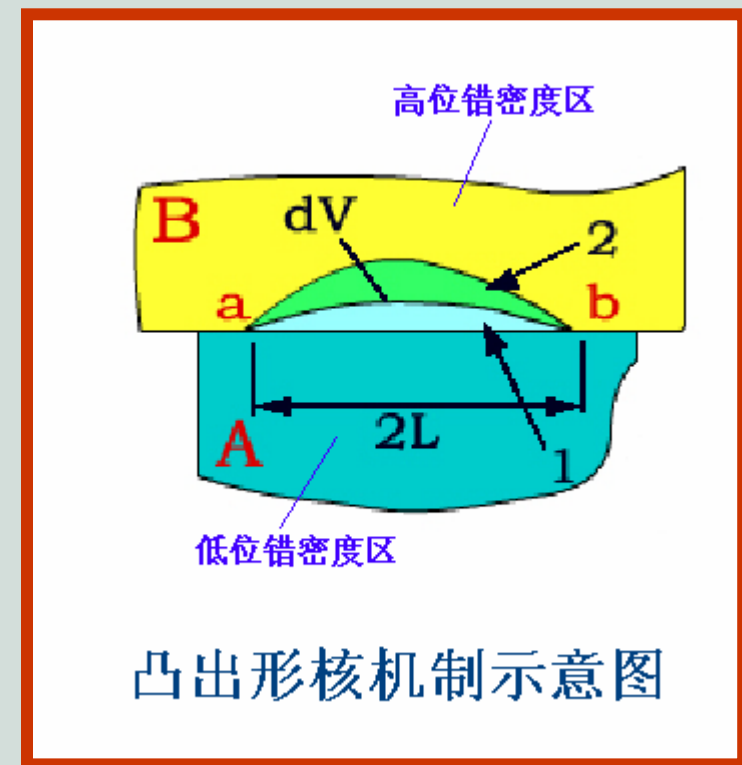
能量条件：

$$E_s \geq \frac{2\sigma}{L}$$

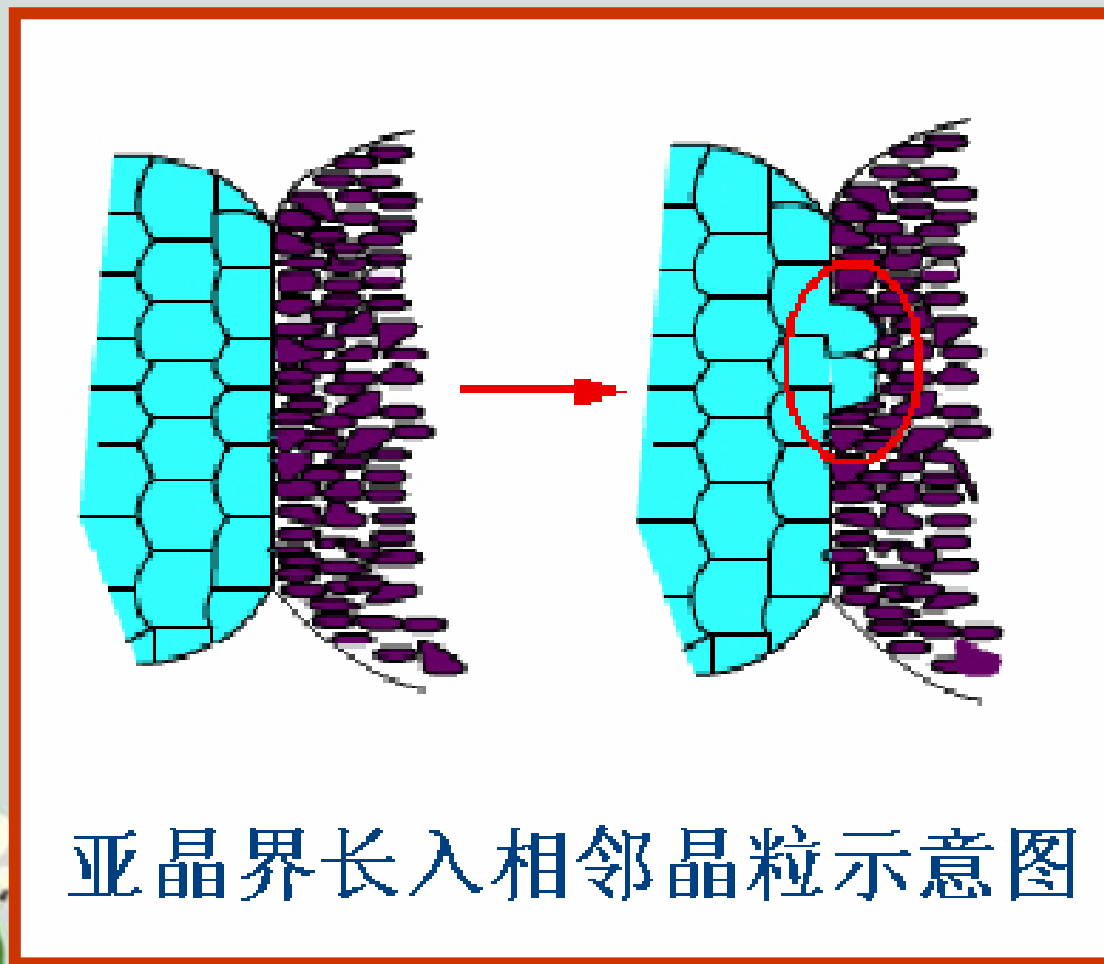
E_s ：单位体积变形畸变能的增量；

σ ：晶面能

L ：球冠半径



- 亚晶界凸出形核，凸向亚晶粒小的方向。

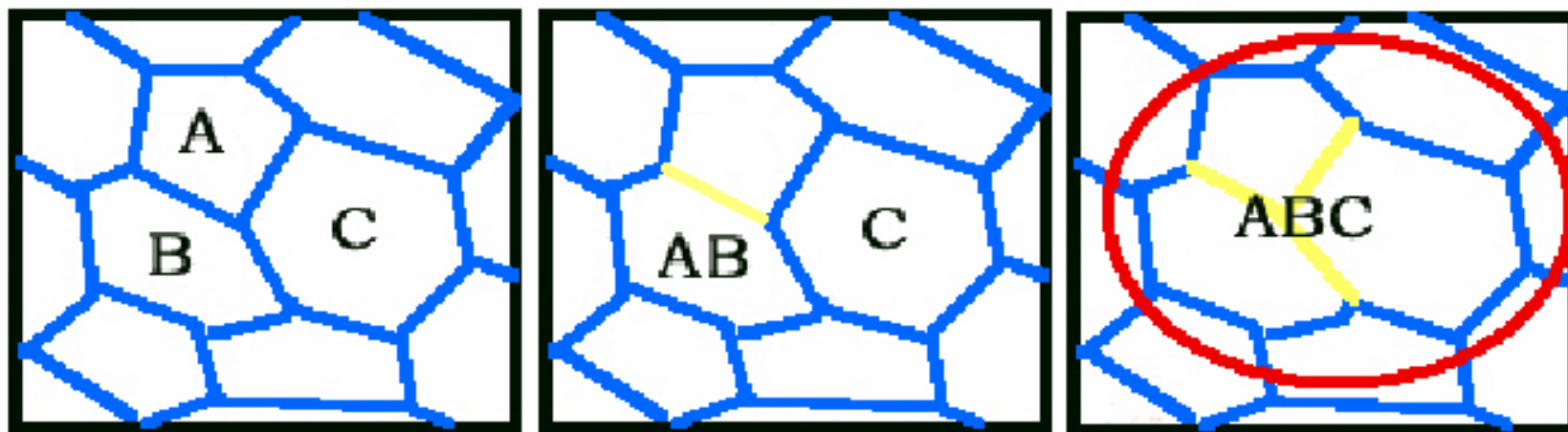


② 亚晶界形核机制

一般发生在冷变形度大的金属。

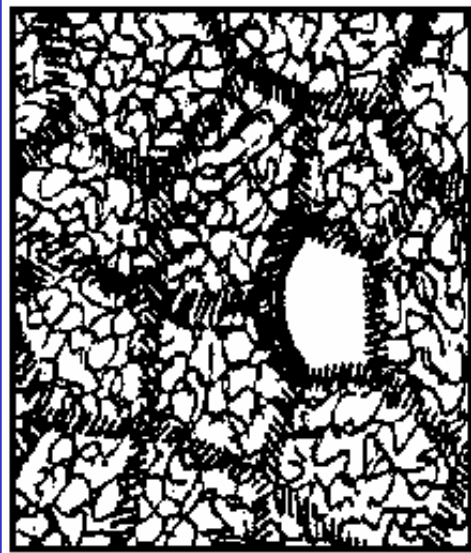
➤ 亚晶合并形核，适于高层错能金属。

过程：位错多边化→回复亚晶→形核



亚晶合并形核示意图

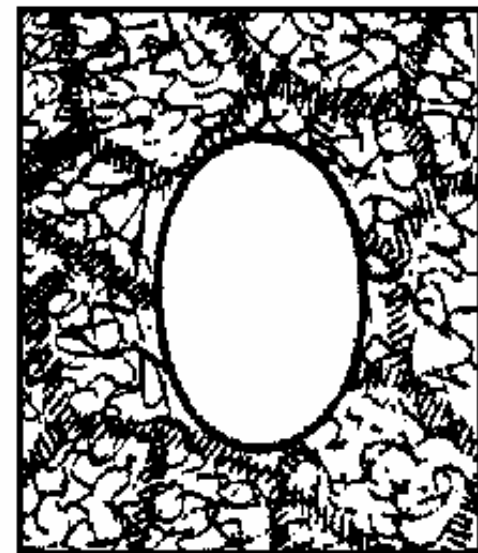
➤ **亚晶粒长大形核：** 适于低层错能金属，通过亚晶合并和亚晶长大，使亚晶界与基体间的取向差增大，直至形成大角度晶界，便成为再结晶的核心。



(a)



(b)



(c)

亚晶长大形核示意图



(2) 再结晶的长大

长大 { 驱动力：畸变能（整体），畸变能差
方式：晶核向畸变晶粒扩展，直至新晶粒相互接触。

（注：再结晶不是相变过程。）



9.4.2 再结晶动力学

(1) 再结晶速度与温度的关系

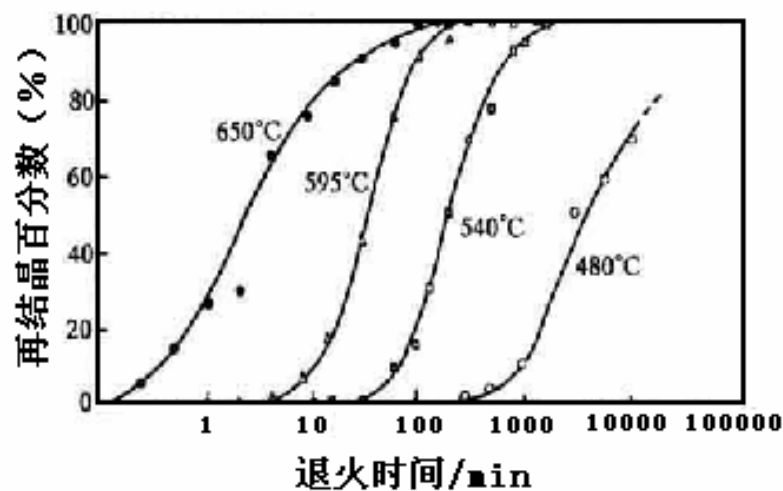
$$v_{\text{再}} = A \exp(-Q_R/RT)$$

(2) 规律

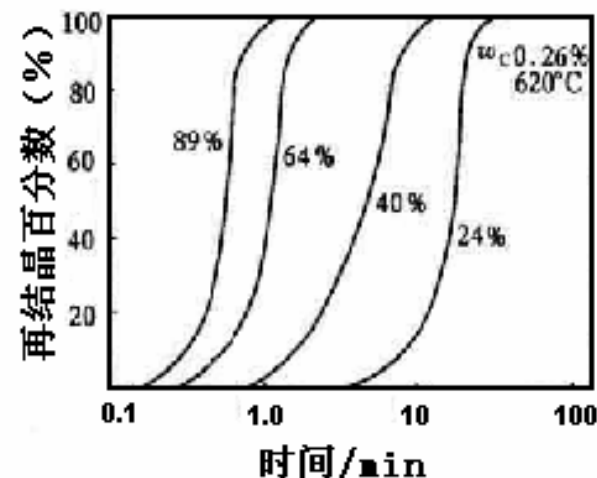
具有**S形**特征，存在孕育期，开始时再结晶速度很小，在**体积分数为0.5时最大**，然后减慢。

温度越高，转变速度越快。

变形量越大，转变速度越快。



纯铁的再结晶



变形量对碳钢再结晶的影响

9.4.3 再结晶温度

(1) **再结晶温度**：经**严重冷变形**（变形量>70%）的金属或合金，在**1h内能够完成再结晶**（再结晶体积分数>95%）的**最低温度**。是一个较宽的**温度范围**。



(2) 经验公式

高纯金属： $T_{\text{再}} = (0.25 \sim 0.35)T_m$

工业纯金属： $T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.45)T_m$

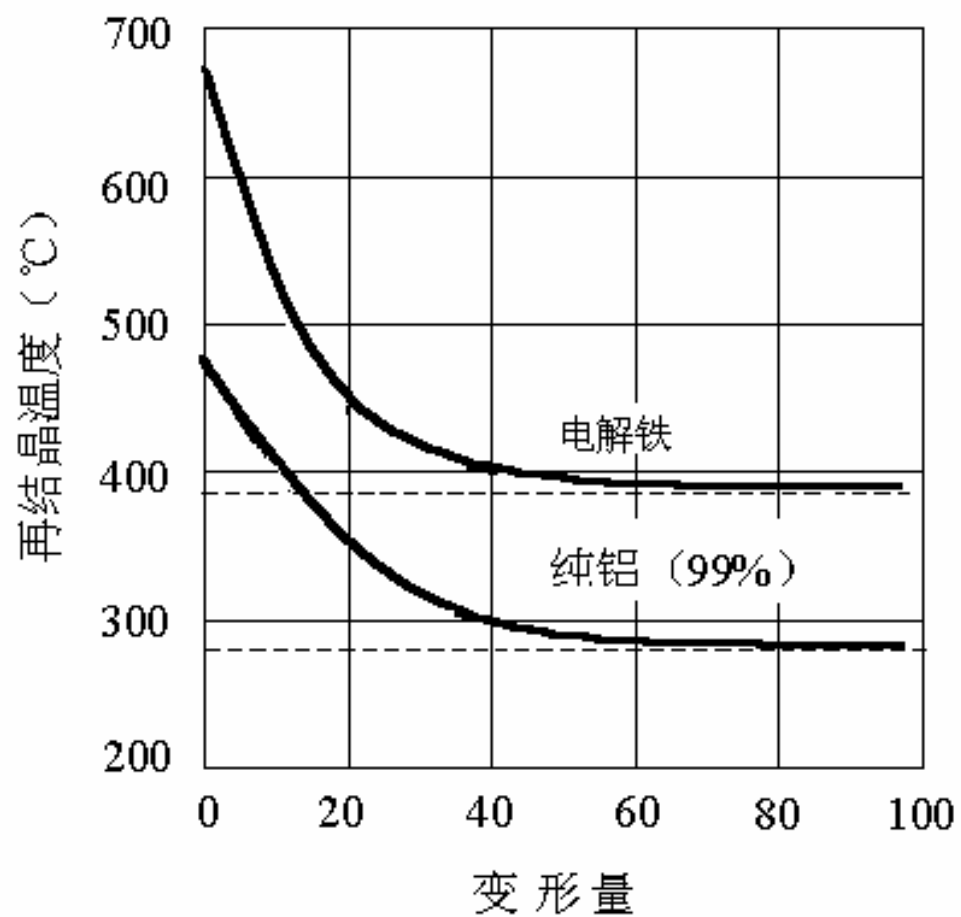
合金： $T_{\text{再}} = (0.4 \sim 0.9)T_m$

（注：再结晶退火温度一般比上述温度高100~200℃。）

(3) 影响因素



变形量越大，驱动力越大，再结晶温度越低；
纯度越高，再结晶温度越低；
加热速度太低或太高，再结晶温度提高。



金属的再结晶温度与变形量的关系





某些工业纯金属的再结晶温度

金属	再结晶温度 (℃)	熔 点 (℃)	T_R/T_m	金属	再结晶温度 (℃)	熔点(℃)	T_R/T_m
Sn	<15	232		Cu	200	1083	0.35
Pb	<15	327		Fe	450	1538	0.40
Zn	15	419	0.43	Ni	600	1455	0.51
Al	150	660	0.45	Mo	900	2625	0.41
Mg	150	650	0.46	W	1200	3410	0.40
Ag	200	960	0.39				



9.4.3 影响再结晶的因素

- **退火温度**：温度越高，再结晶速度越大。
- **变形量**：变形量越大，再结晶温度越低；随变形量增大，再结晶温度趋于稳定；变形量低于一定值，再结晶不能进行。
- **原始晶粒尺寸**：晶粒越小，驱动力越大；晶界越多，有利于形核。
- **第二分散相**：间距和直径都较大时，提高畸变能，并可作为形核核心，促进再结晶；直径和间距很小时，提高畸变能，但阻碍晶界迁移，阻碍再结晶。
- **加热时间**：在一定范围内延长加热时间会降低再结晶温度。
- **微量溶质元素**：阻碍位错和晶界的运动，不利于再结晶。



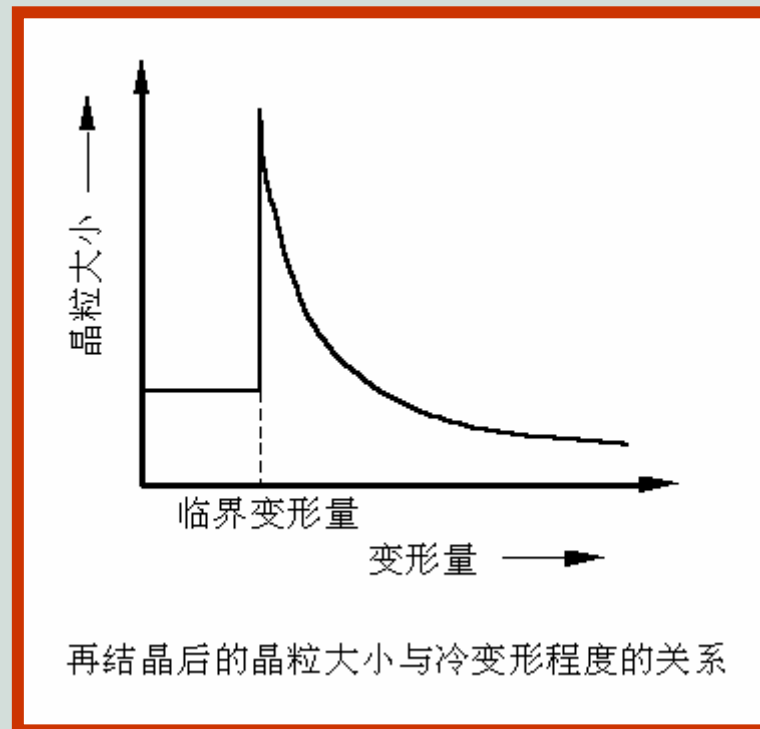


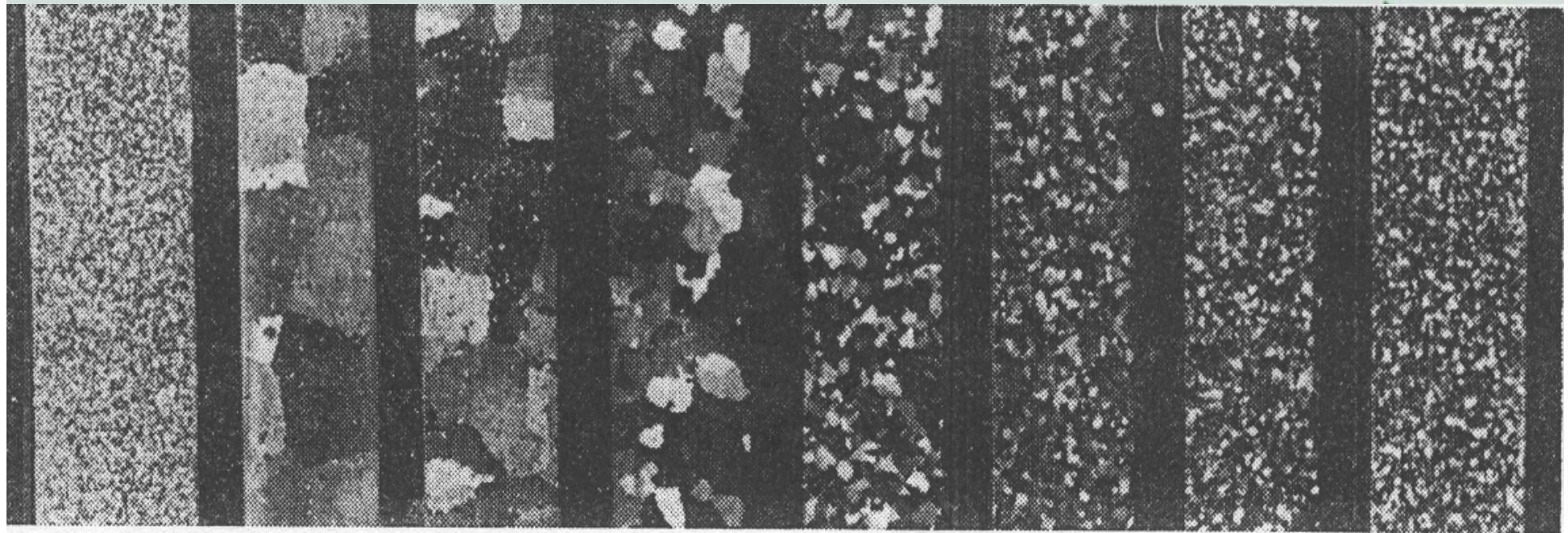
材 料	再结晶温度℃	材 料	再结晶温度 ℃
高纯铜（99.99%）	120	高纯铝（99.999%）	80
无氧铜（99.95%）	200	工业纯铝（99.7%）	150
Cu+0.01%Sn	315	工业纯铝（99.0%）	240
Cu+5%Zn	320	铝合金	320
高纯铁	400	高纯镁（99.99%）	65
工业纯铁	450	工业纯镁（99.9%）	150
低碳钢	540	镁合金	230



9.4.4 再结晶晶粒大小的控制

(1) 变形程度：存在“**临界变形量**”，一般为2-10%，当变形量超过临界变形度以后，随变形度增加，再结晶晶粒变细。





度： 1% 2.5% 4% 6% 8% 10% 12% 15%

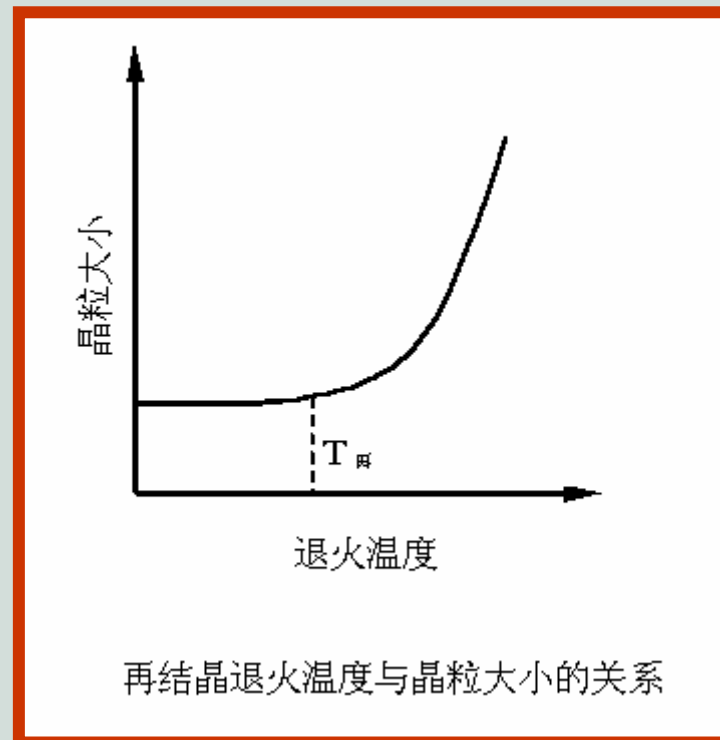
不同程度冷变形的工业纯铝，550℃再结晶退火30min



(2) 原始晶粒尺寸：晶粒越小，驱动力越大，形核位置越多，使晶粒细化。

(3) 合金元素和杂质：增加储存能，阻碍晶界移动，有利于晶粒细化。

(4) 温度：退火加热温度：再结晶退火时加热温度越高，金属的晶粒尺寸越大。当加热温度一定时，时间过长也会使晶粒长大，但其影响不如温度的影响大。

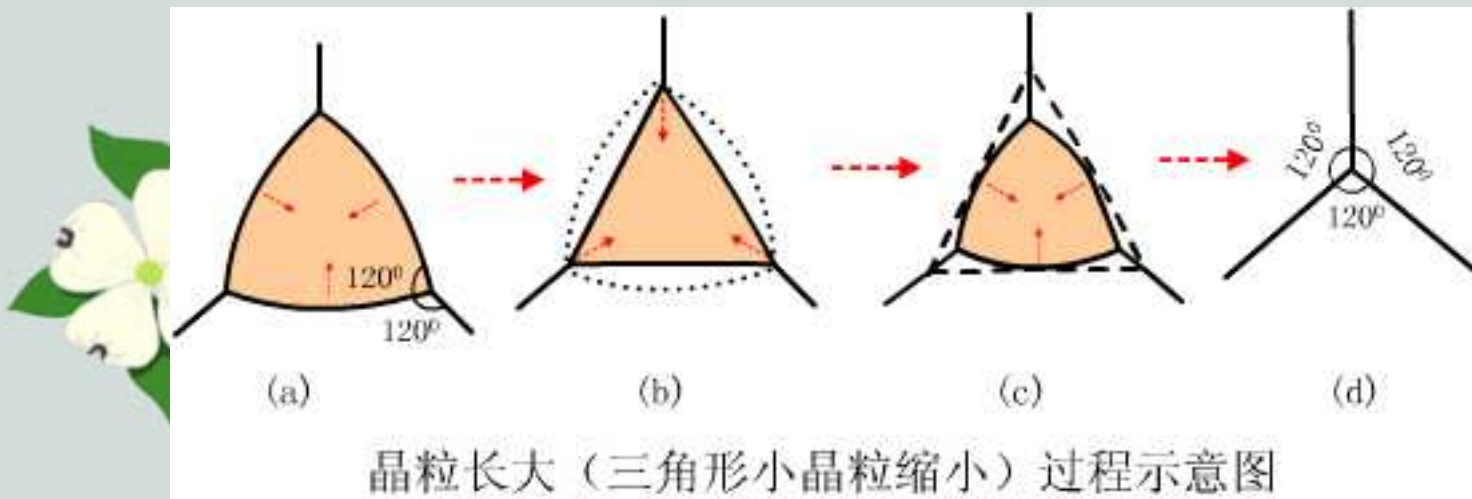


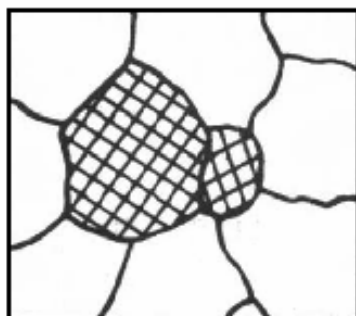
9.5 晶粒长大

9.5.1 晶粒的正常长大

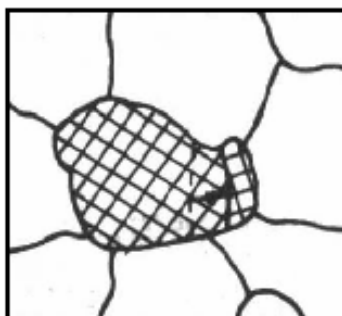
- (1) 正常长大：再结晶后的晶粒均匀连续的长大。
- (2) 驱动力：界面能差。界面能越大，曲率半径越小，驱动力越大。

- (3) 晶粒的稳定形状
 - 晶界趋于平直
 - 晶界夹角趋于 120°
 - 二维为六边形晶体，三维为理想十六面体

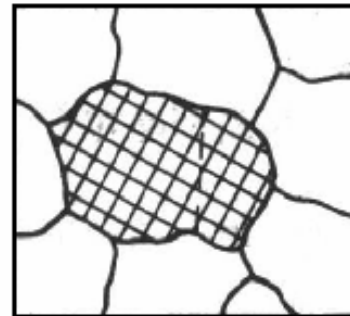




(a)

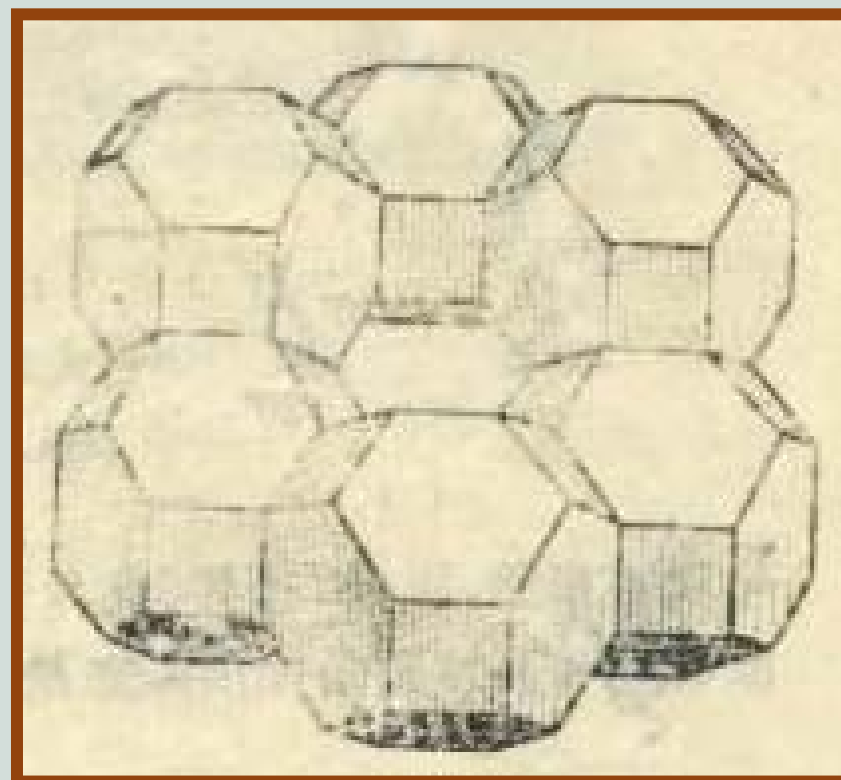
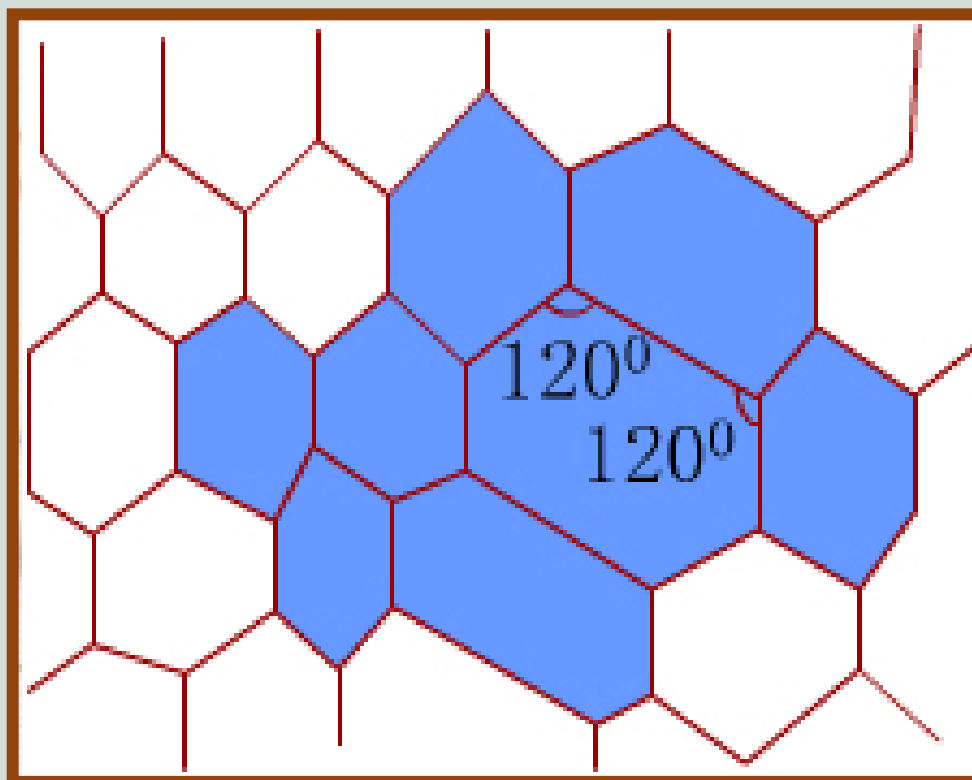


(b)



(c)

晶粒长大示意图



(4) 影响晶粒长大（即晶界迁移率）的因素

① 温度：温度越高，晶界易迁移，晶粒易粗化。

$$G = G_0 \exp(-Q_G / RT)$$

G ：晶界迁移速度

G_0 ：常数

Q_G ：晶界迁移的激活能

② 分散相粒子：阻碍晶界迁移，降低晶粒长大速率。

晶粒稳定尺寸 d 和第二相质点半径 r 、体积分数 φ 的关系：

$$d = 4r / 3\varphi$$

第二相质点的数量越多，颗粒越小，阻碍晶粒长大的能力越强。



③ 可溶解的杂质或合金元素：阻碍晶界迁移，特别是晶界偏聚现象显著的元素，其阻碍作用更大。但当温度很高时，晶界偏聚可能消失，其阻碍作用减弱甚至消失。

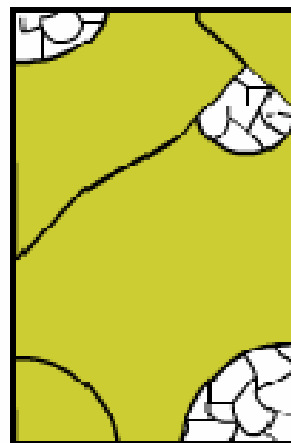
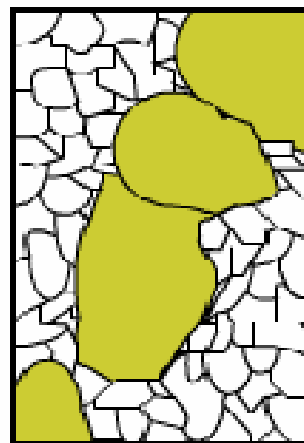
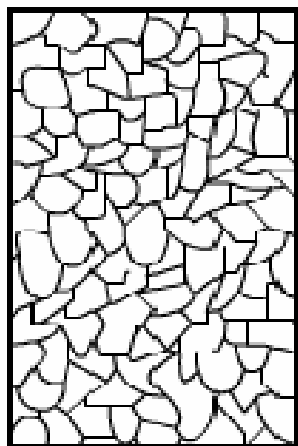
④ 晶粒位向差：大角度晶界原子排布比较混乱，界面能较高，扩散系数较大，小角度晶界的界面能小于大角度晶界，因而小角度晶界的移动速率低于大角度晶界。



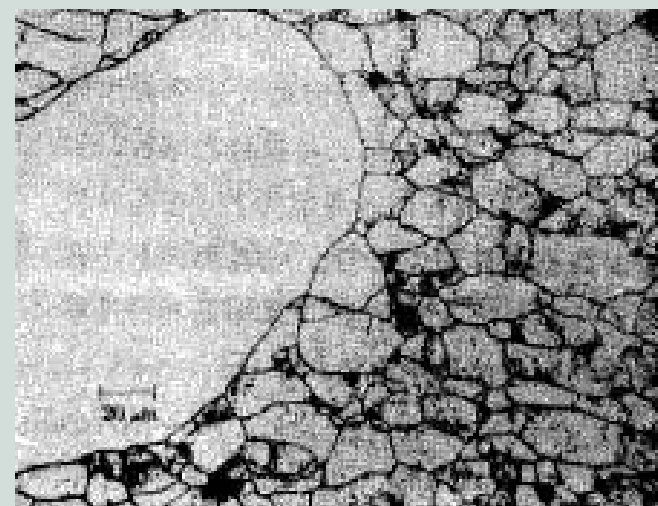
9.5.2 晶粒的异常长大（二次再结晶）

(1) 异常长大：少数**再结晶晶粒**急剧长大的现象。

将再结晶完成后的金属继续加热至某一温度以上，或更长时间的保温，会有少数晶粒优先长大，成为特别粗大的晶粒，而其周围较细的晶粒则逐渐被吞食掉，整个金属由少数比再结晶后晶粒要大几十倍甚至几百倍的特大晶粒组成。



晶粒异常长大示意图



硅铁二次再结晶的反常晶粒

(2) 驱动力： 同正常晶粒长大一样，是长大前后的界面能差

(3) 产生条件： 正常晶粒长大过程被弥散的第二相质点或杂质、织构等所强烈阻碍。

(4) 长大机制 {
钉扎晶界的第二相溶于基体
再结晶织构中位向一致晶粒的合并
大晶粒吞并小晶粒

(5) 对性能的影响



{
织构明显 {
各向异性
优化磁导率
晶粒大小不均 → 性能不均
晶粒粗大 {
各向异性
优化磁导率

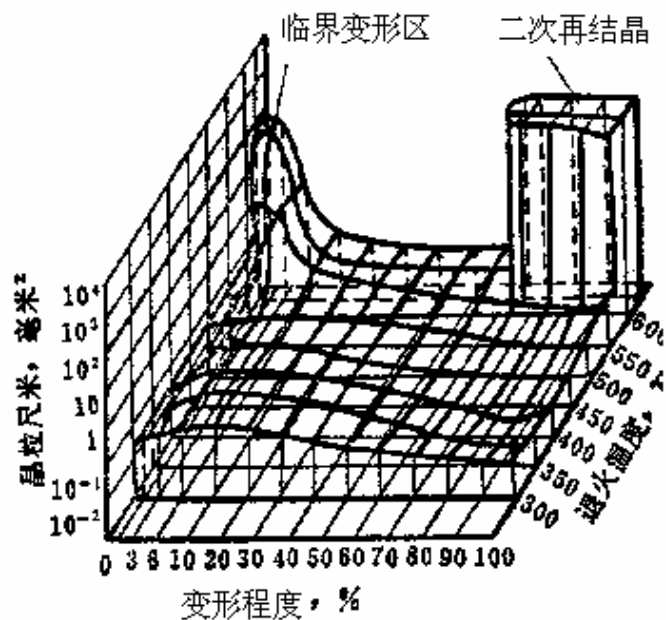


9.5.2 再结晶退火的组织

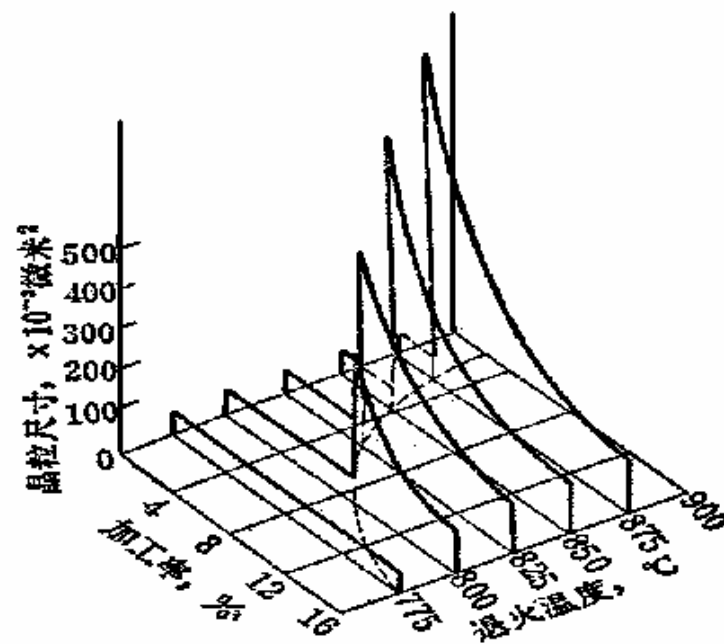
(1) 再结晶退火：将经一定程度冷变形的金属加热到**再结晶温度**以上，保温一定时间，然后**缓慢冷却**到室温。



(2) 再结晶全图：退火温度、变形量与晶粒大小的关系图。



铝的再结晶全图

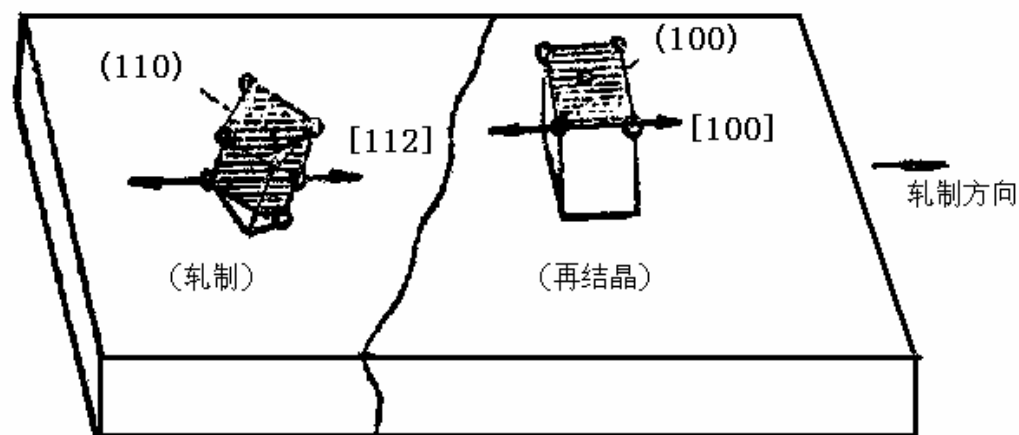


纯铁的再结晶全图

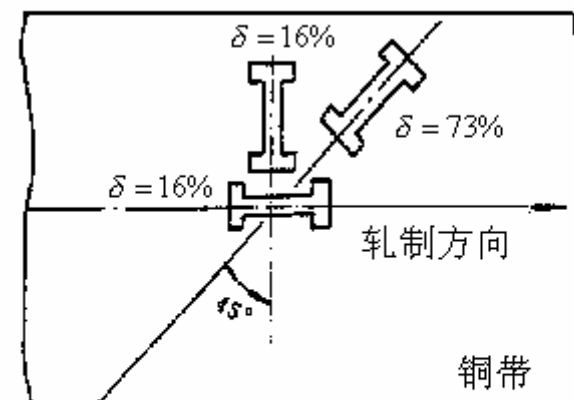
(3) 再结晶组织：冷变形金属在再结晶过程中形成的组织。



- 定向生长理论：取向有利的晶核，其晶界可获得最快的移动速率
- 定向成核理论：再结晶有形核过程，母体有织构，再结晶后的晶体也会形成新的织构。



铜板在轧制时的板织构和退火后的再结晶织构



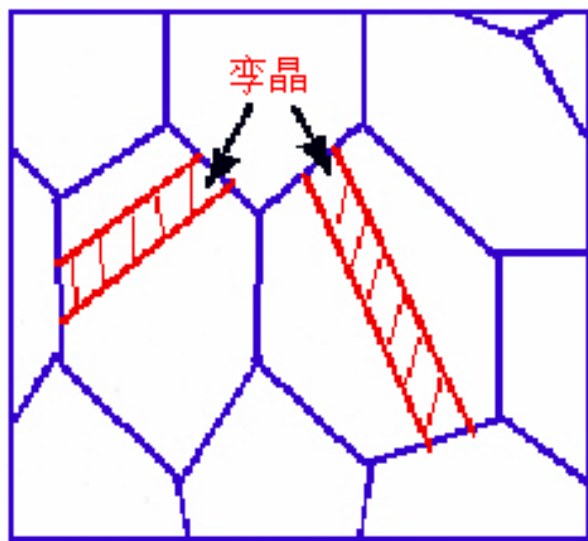
在具有再结晶织构的铜带中，
延伸率呈现各向异性

(4) 退火孪晶：再结晶退火后出现的孪晶。退火孪晶是由于新晶粒界面在推进过程中由于某些原因（如热应力等）而出现堆垛层错而造成的。

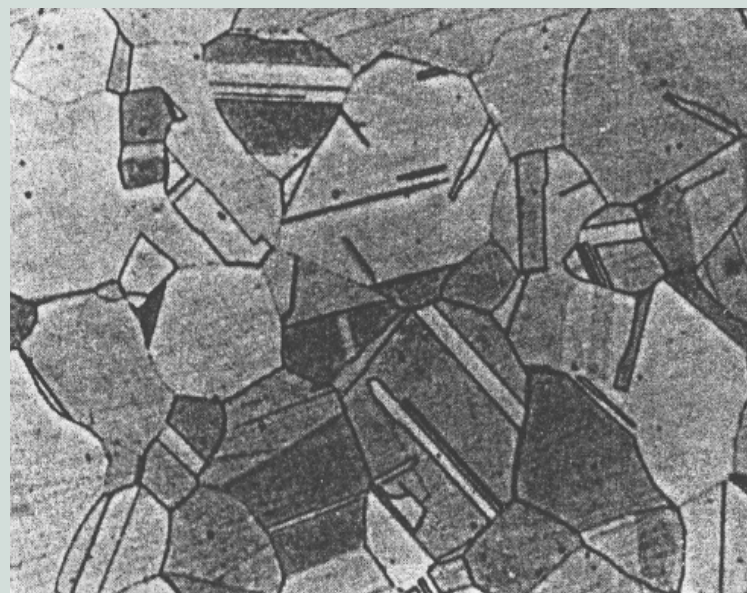


面心立方金属和合金（如铜、黄铜、不锈钢等）经加工及再结晶退火后，经常在再结晶退火组织中发现孪晶。

退火孪晶的形成与层错能有关。Cu和奥氏体钢的层错能低，易形成孪晶。



退火孪晶示意图



形变 α 黄铜退火孪晶组织

9.6 金属的热加工

冷加工：在再结晶温度以下的**压力加工**过程。发生加工硬化。

热加工：将金属或合金加热至**再结晶温度以上**进行的**压力加工**。

热加工时，**硬化过程与软化过程是同时进行的**，按其特征不同，可分为：

在温度和负荷联合作用下发生：

动态回复、动态再结晶；

在变形停止之后，即在无负荷作用下发生：

亚动态再结晶、静态再结晶、静态回复。



9.6.1 动态回复

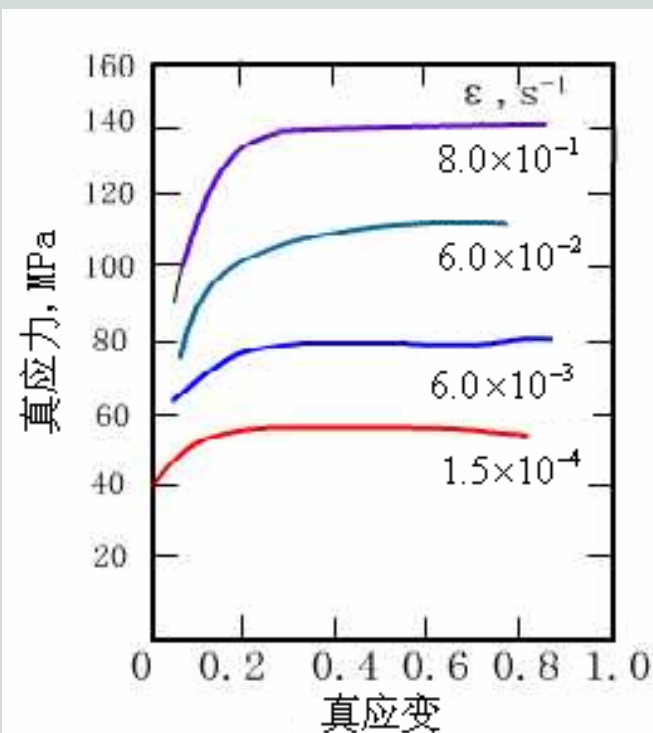
动态回复：在塑变过程中发生的回复。

(1) 真应力-真应变曲线

I. 微应变阶段

II. 动态回复的初始阶段

III. 稳态变形阶段



动态回复的应力-应变曲线
(流变曲线)

(2) 组织结构的变化

热加工后的晶粒沿变形方向伸长，同时，晶粒内部出现动态回复所形成的等轴亚晶粒。

亚晶尺寸与稳态流变应力成反比，并随变形温度升高和变形速度降低而增大。



光学显微组织（偏光）

薄膜透射电镜照片

铝在400℃挤压是动态回复所形成的亚晶

(3) 动态回复的机制

位错的**攀移**和**交滑移**，攀移在动态回复中起主要的作用。

层错能的高低是决定动态回复进行充分与否的关键因素。**动态回复易发生在层错能高的金属**，如铝及铝合金。



9.6.2 动态再结晶

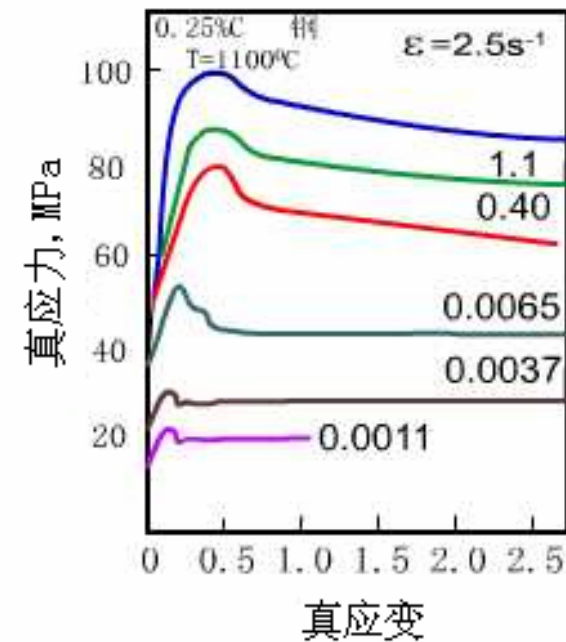
动态再结晶：在塑变过程中发生的再结晶。

(1) 真应力—真应变曲线

I. 加工硬化阶段

II. 动态再结晶的初始阶段

III. 稳态流变阶段

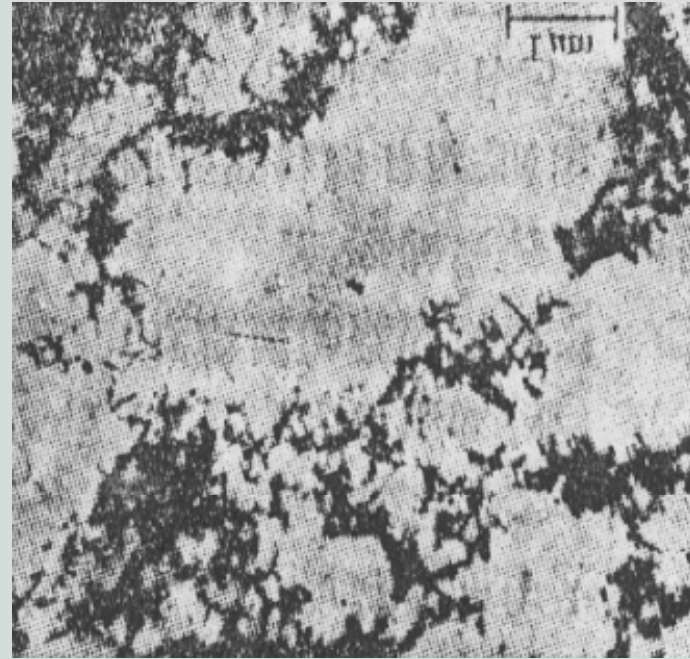
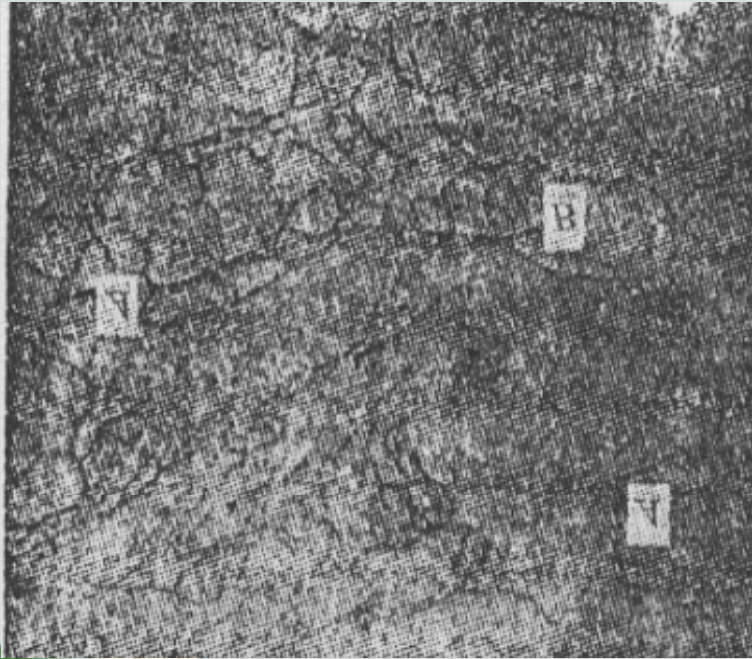


动态再结晶的应—应变曲线



(2) 组织结构的变化:

特点 { 晶内存在被缠结位错所分割成的亚晶粒。
反复形核，有限长大，晶粒较细。



光学照片

晶粒中缠结位错（透射电

镜）

动态再结晶组织



层错能较低的金属，如铜及铜合金，热加工过程中发生的软化过程主要来自动态再结晶。



现存的晶界往往是动态再结晶的主要形核之处。

形变温度越高，应变速率越小，应变量越大，越有利于动态再结晶。

动态再结晶的晶粒大小 d 主要决定于热变形时的流变应力 σ 。

$$\sigma \propto d^{-n}$$

常数 $n = 0.1 \sim 0.5$



应用：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。

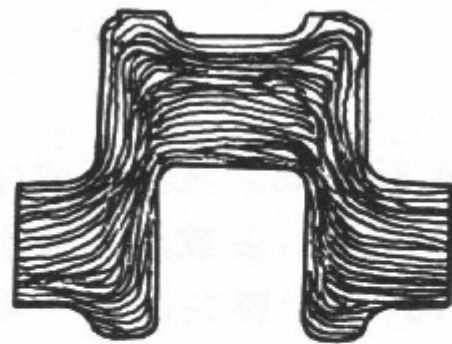
9.6.3 热加工对金属组织和性能的影响

(1) 改善铸锭组织：气泡焊合、破碎碳化物、细化晶粒、降低偏析，提高强度、塑性、韧性。

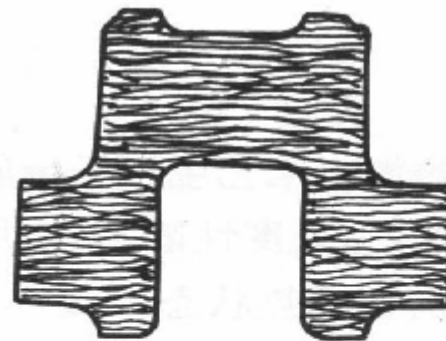
(2) 形成纤维组织（流线）：

组织：枝晶、偏析、夹杂物沿变形方向呈纤维状分布。

性能：各向异性 沿流线方向塑性和韧性提高明显。

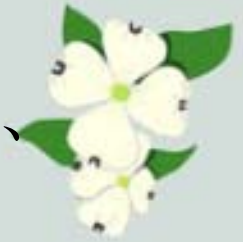


(a) 锻造曲轴



(b) 切削加工曲轴

曲轴的流线分布

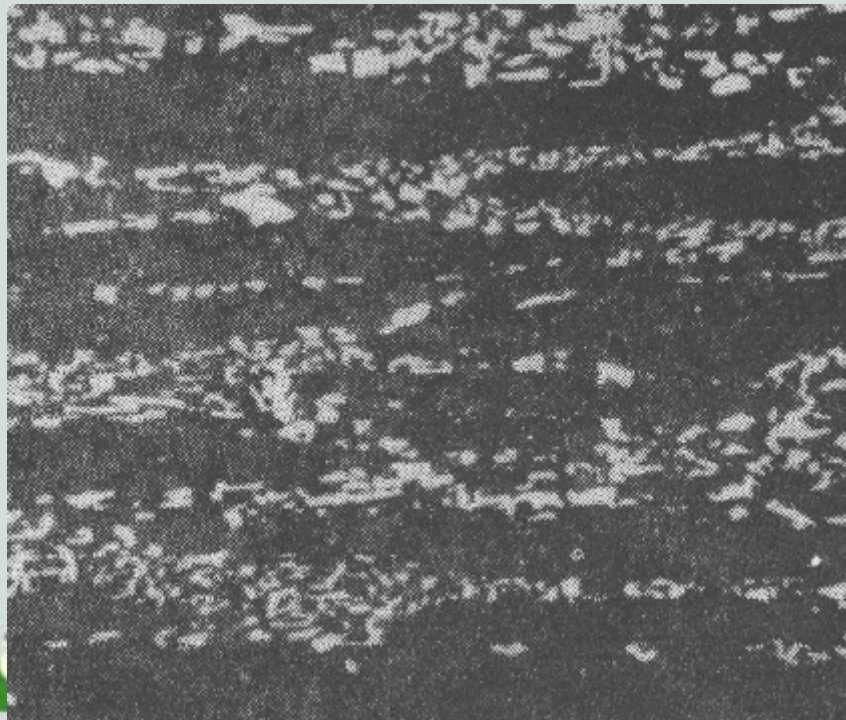


(3) 形成带状组织:

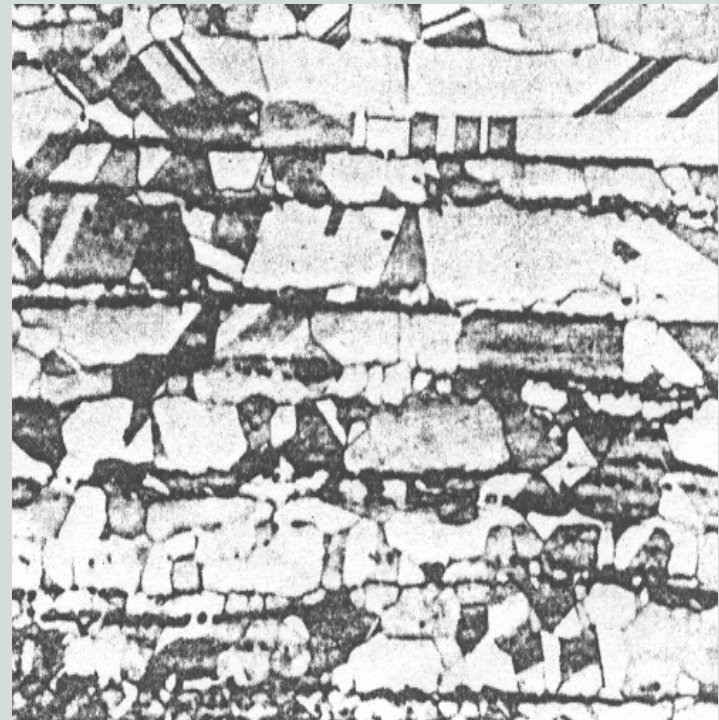
形成: 两相合金变形或带状偏析被拉长。

影响: 各向异性。

消除: 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。



Cr12钢中的带状组织



H62的带状组织

(4) 显微组织的细化

通过动态回复和动态再结晶后，在晶粒内部都形成了亚晶粒，具有这种亚组织的材料，其强度、韧性提高，称为亚组织强化，其屈服强度与亚晶尺寸 d_s 之间满足Hall-petch公式：

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d_s^{-1/2}$$

(5) 热加工的优点

- ① 可持续大变形量加工；
- ② 动力消耗小；
- ③ 提高材料的性能。

