

9. 回复和再结晶

学习的意义：

- 物理冶金的基本过程；
- 特殊的组织、性能变化规律；与相变的异同点；

发生的原因：

- 金属形变后的变化（组织、性能）；
- 热力学不稳定性；动力学条件，向低能状态转变；

退火过程三个阶段：

回复、再结晶、晶粒长大。

•回复的特点

•再结晶的特点：

主要通过大角晶界的迁动来完成。

•长大的特点

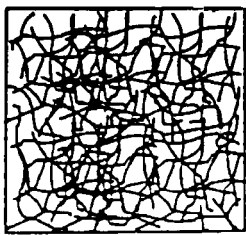
分：正常晶粒长大和异常晶粒长大（二次再结晶）。

9.1 回复

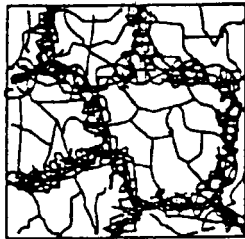
要点：

回复阶段不涉及大角度晶面的迁动；

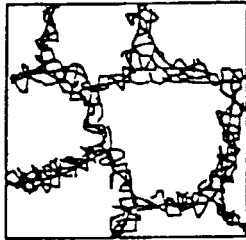
通过点缺陷消除、位错的对消和重新排列来实现的；



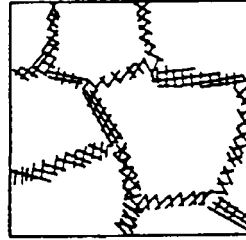
(a) 位错缠结



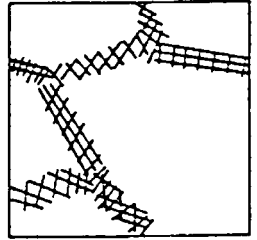
(b) 位错胞结构



(c) 胞内位错对消



(d) 形成亚晶



(e) 亚晶长大

过程示意

研究方法

量热法

电阻法

硬度法

位错密度法

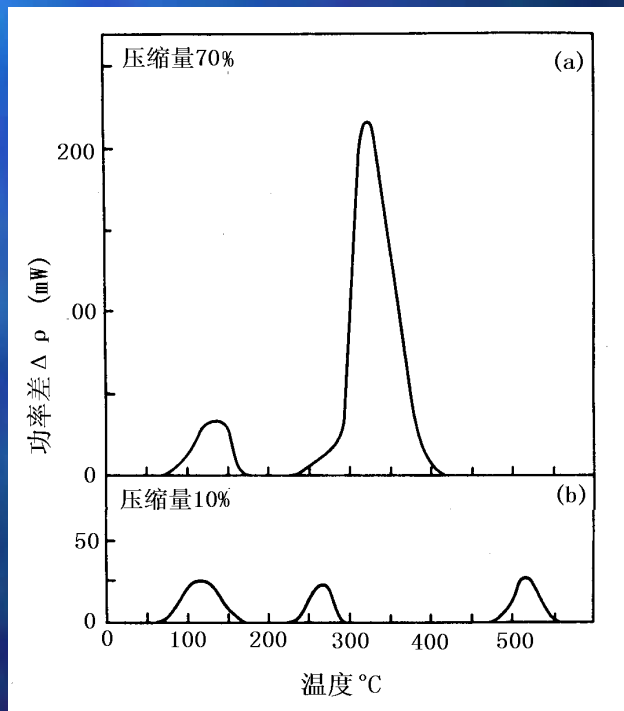
X射线法



难以直接观察到

9.1.1 储存能的释放

功率差随加热
温度的变化



9.1.2电阻和密度的回复

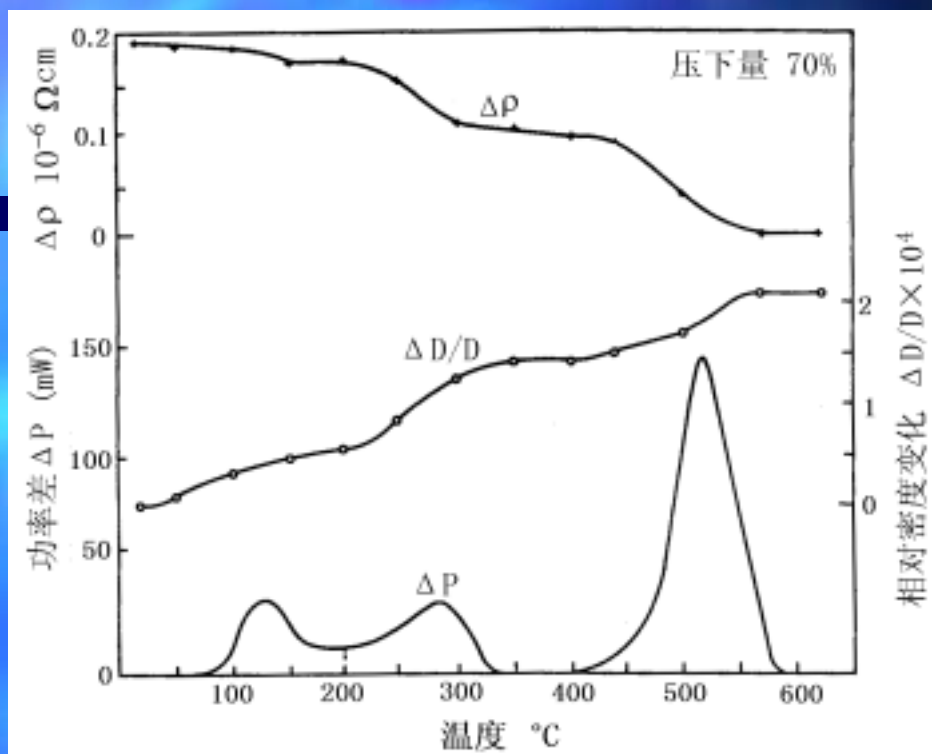
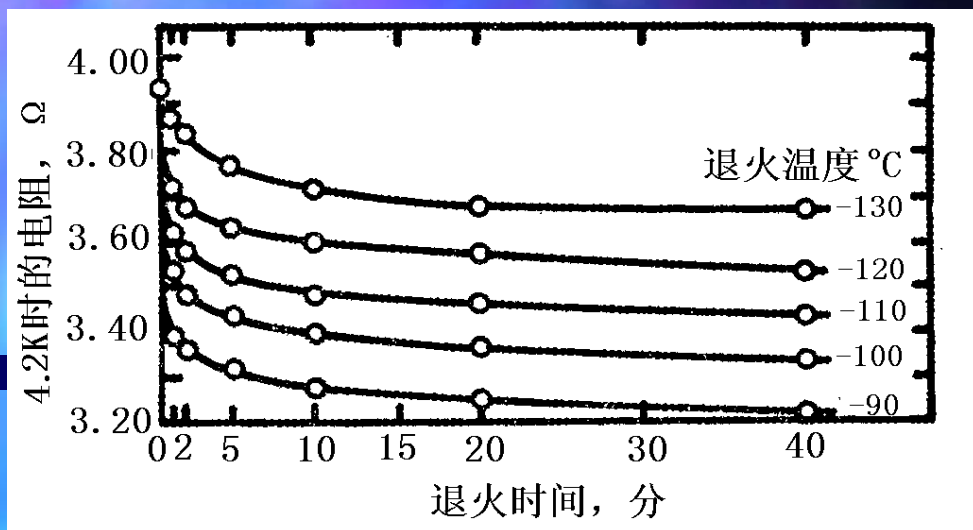


表 9-1 铜和金电阻率回复的基本过程

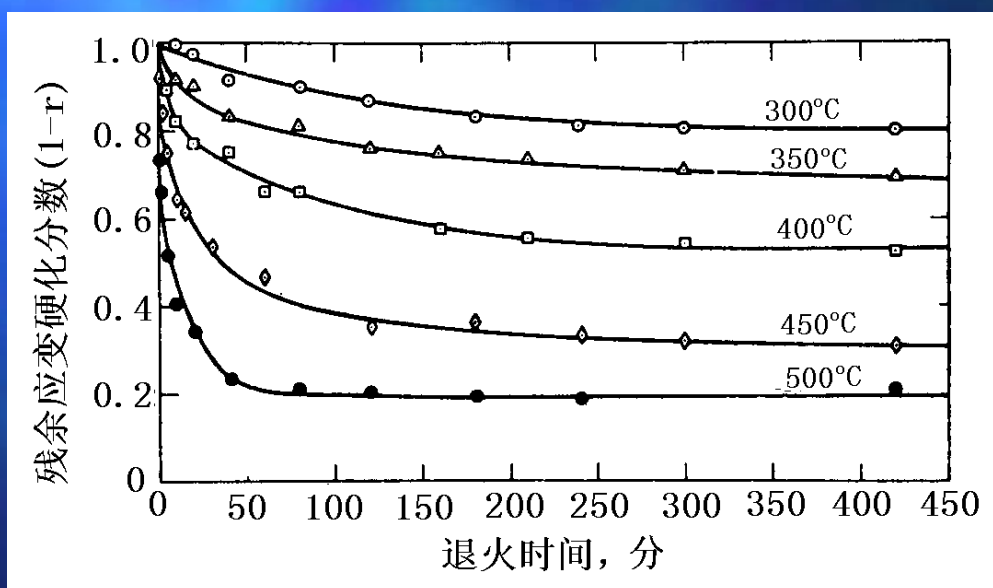
基本过程	阶 段	温 度 范 围 /K	激活能/eV	过程的基本机制
回复： 点缺陷消失		30~40(0.03 T_m)	0.1	间隙原子-空位对重新结合
		90~200[(0.1~0.15) T]	0.2~0.7	间隙原子迁移
		210~320[(0.16~0.20) T_m]	0.7	空位迁移到阱, 空位对迁移
回复： 多边形化		350~400[(0.27~0.35) T_m]	1.2	空位迁移到位错, 位错重新分布 (形成小角度界面)和部分消失
一次再结晶		400~500[(0.35~0.40) T_m]	2.1	位错攀移和热激活移动而部分消 失以及形成大角度界面

*金属的纯度变化可改变过程的温度范围



不同温度下电阻随保温时间的变化/铜

9.1.3机械性能的回复



9.1.4 回复动力学

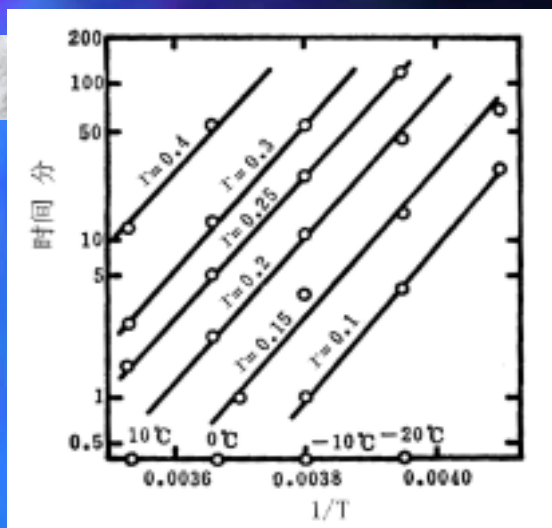
I 型动力学符合如下关系：

$$\frac{dr}{dt} = \frac{a}{t}$$

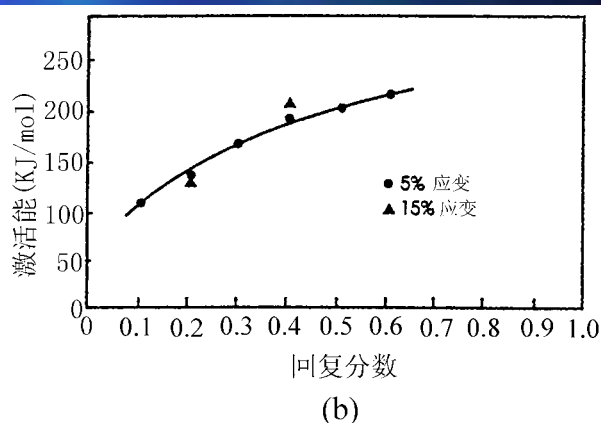
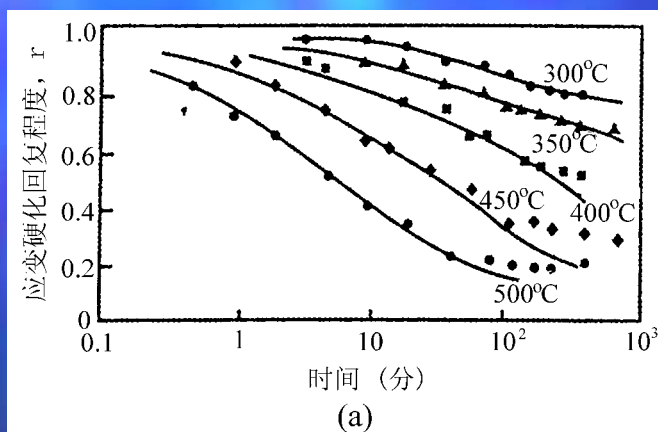
$$r = a \ln t + b$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{a}{t} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$$\ln \frac{dr}{dt} = \ln \frac{a}{t} = \ln A - \frac{Q}{RT}$$



-50°C切变的单晶锌应变硬化回复到不同的 r 值所需时间与温度的关系



多晶体铁在0°C形变5%的回复动力学

(a)应变硬化回复程度 r 与 $\ln t$ 间的函数关系；

(b)回复激活能 Q 与回复分数间的关系

II 型回复动力学符合如下关系：

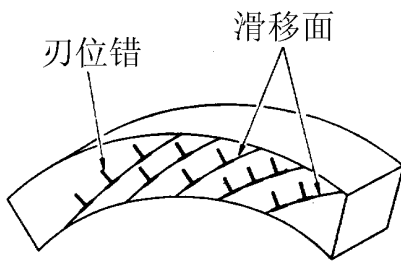
$$\frac{dr}{dt} = -c_1 r^m$$



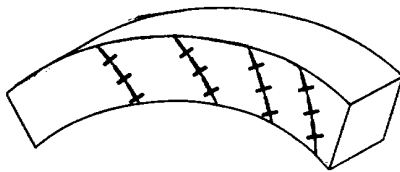
$$r^{-(m-1)} - r_0^{-(m-1)} = (m-1)c_1 t$$

9.1.5回复过程结构的变化

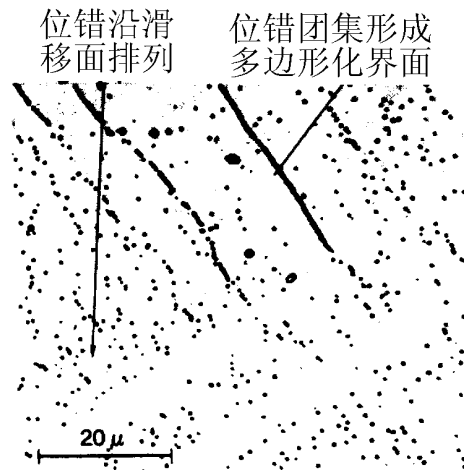
多边形化



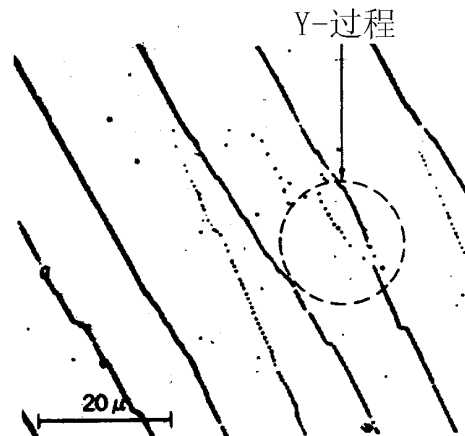
(a) 弯曲后在(110)面上残留的同号刃位错



(c) 刃位错垂直于滑移面排列形成多边形化



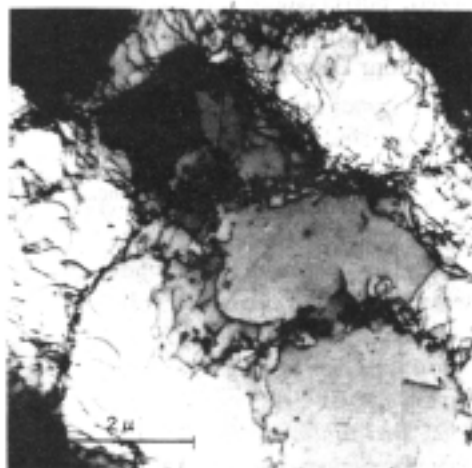
(b) 经700 °C 1h退火后，位错沿滑移面排列，有少部分位错排列成多边形化界面



(d) 经925 °C 1h退火，几乎所有位错对处在多边形化界面上，相邻的界面正在粗化(Y过程)

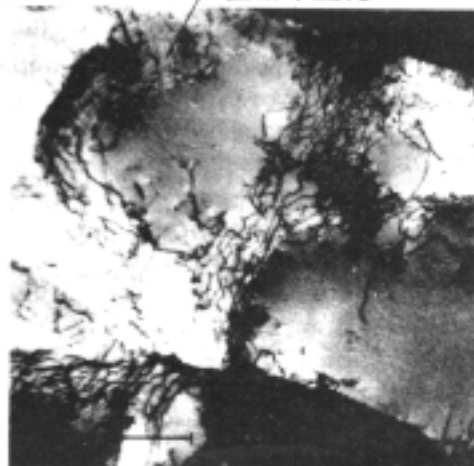
亚晶形成

位错缠结



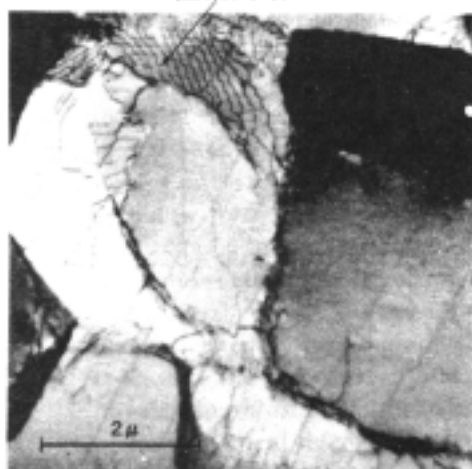
(a) 冷加工后的胞状结构，胞壁中含有高密度的位错缠结

位错平直化



(b) 回复退火0.1h后，胞壁中的位错平直了一些

位错网络



(c) 回复退火50h后，在胞壁中的位错形成网络，亚晶伸长了

大的稳定网络

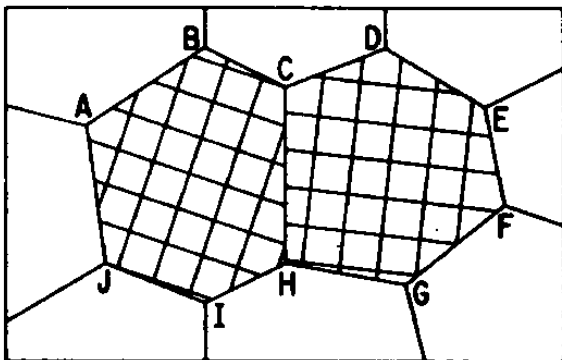


(d) 回复退火300h后，一些位错网络断开并连成更稳定的网络

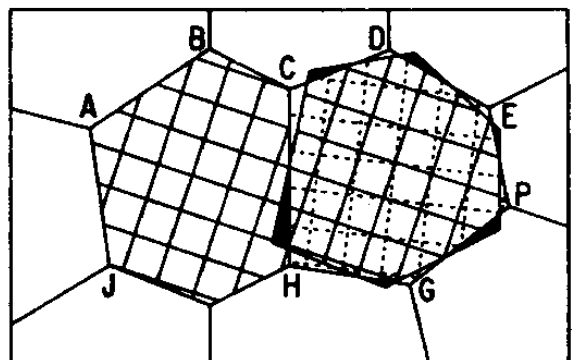
•亚晶粗化和长大

流变应力 σ 和亚晶尺寸 d 的关系：

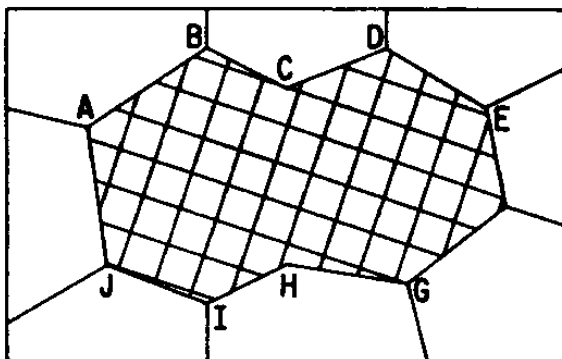
$$\sigma = \sigma_0 + k_y d^{-m}$$



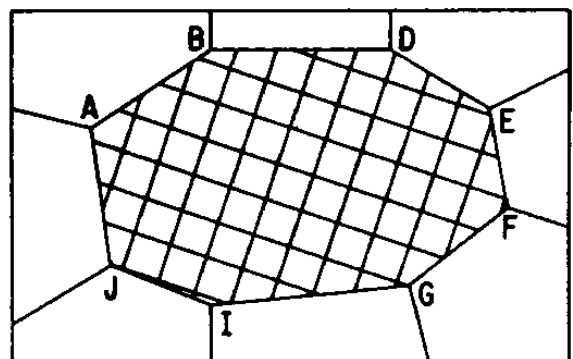
(a)



(b)



(c)



(d)

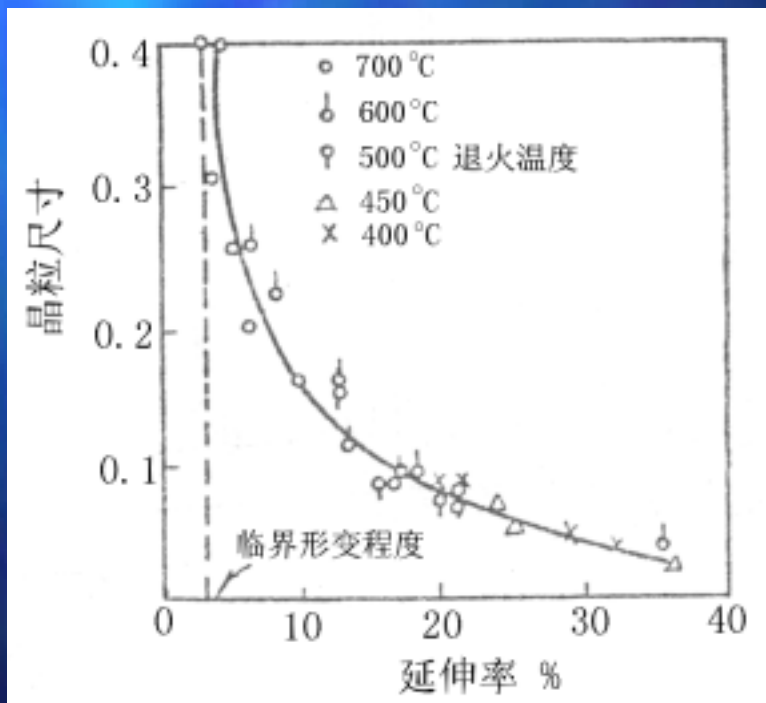
9.2 再结晶

驱动力：形变金属的机械储存能（注意与相变的区别）。

再结晶温度---一定时间内完成再结晶的温度。

9.2.1 再结晶的基本规律

- (1) 需超过一最小形变量--- ε_c 。
- (2) 随 $\varepsilon \uparrow$ ， $T_{\text{再}} \downarrow$ ；但当 ε 大到一定值后， $T_{\text{再}}$ 趋于一稳定值。
- (3) 再结晶刚完成时的 d 取决于 ε 而和 T 关系不大。
- (4) 原始 $d_0 \uparrow$ ，要获得相同的 $T_{\text{再}}$ 的 ε 越大。
- (5) $T_{\text{def}} \uparrow$ ，要获得相同程度的应变硬化所需的 $\varepsilon \uparrow$ 。
- (6) 新晶粒不会长入取向相同或取向略有差异的形变晶粒中。
- (7) 再结晶后继续加热， $d \uparrow$ 。

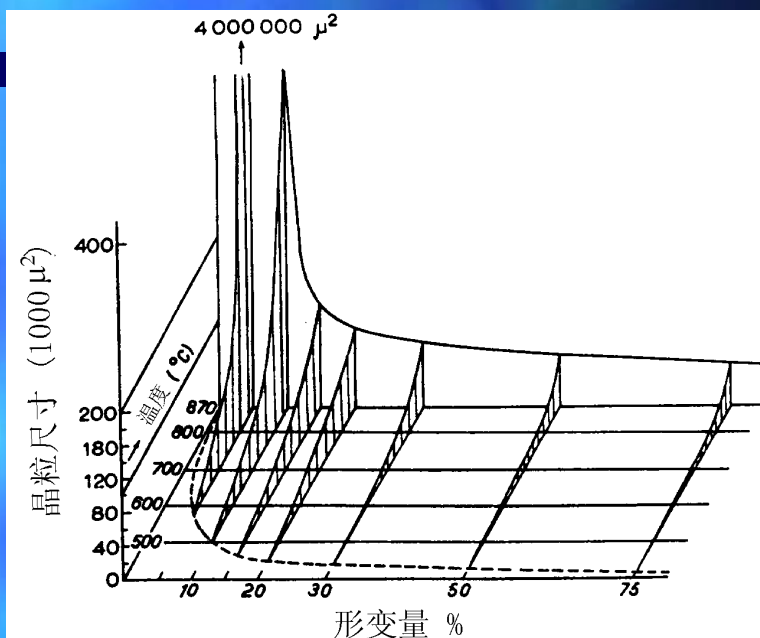


再结晶图

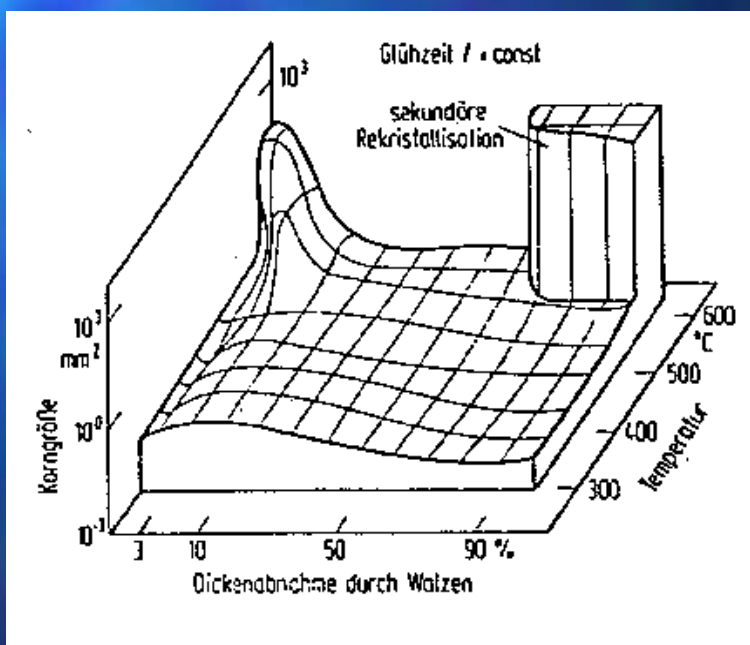
----为 T , ε , D 的关系。

条件：时间1小时，可包含长大效应。

纯铁



纯铝



9.2.2再结晶动力学

条件：

- 形核率不随时间变化；
- 形核地点在整个体积内随机分布；
- 所有核心的长大速度相同，不随时间变化；
- 核心在相碰处停止长大；

导出动力学方程：

$$X = 1 - \exp\left(-\frac{1}{4} f G^3 N t^4\right)$$

Johnson-Mehr EQ

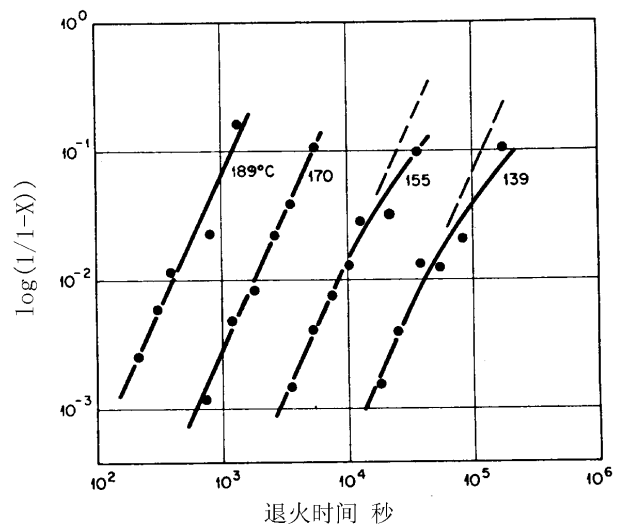
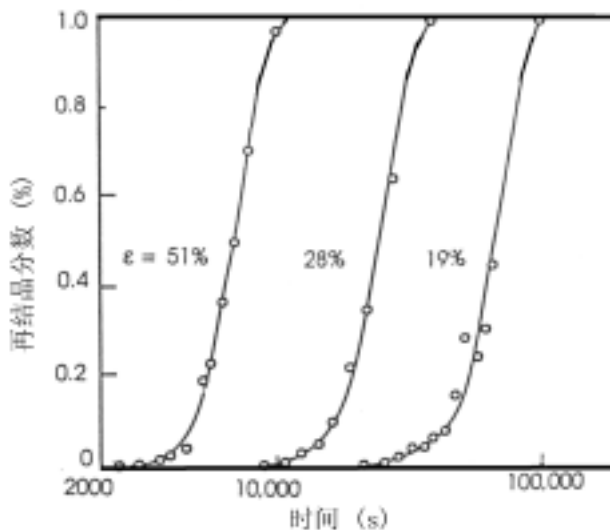
$$X = 1 - \exp(-Bt^n)$$

J-M-A EQ

确定两重要参数B/n

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-X} \right) = \ln B + n \ln t$$

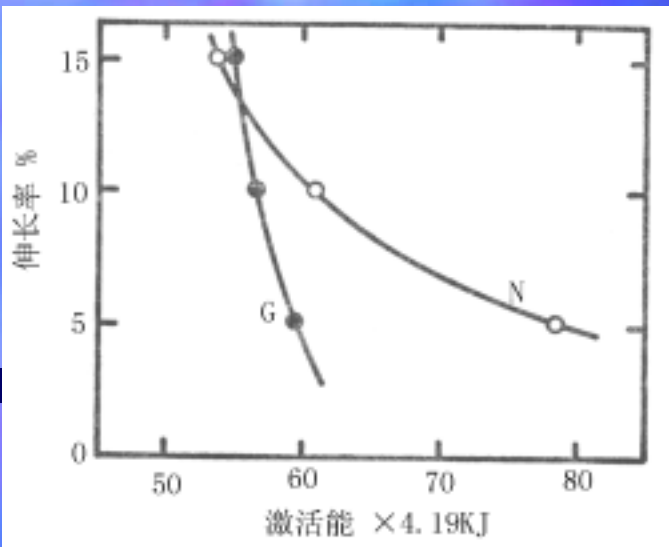
影响因素：



拉伸铝350°C退火的再结晶动力学曲线

40%形变的铝

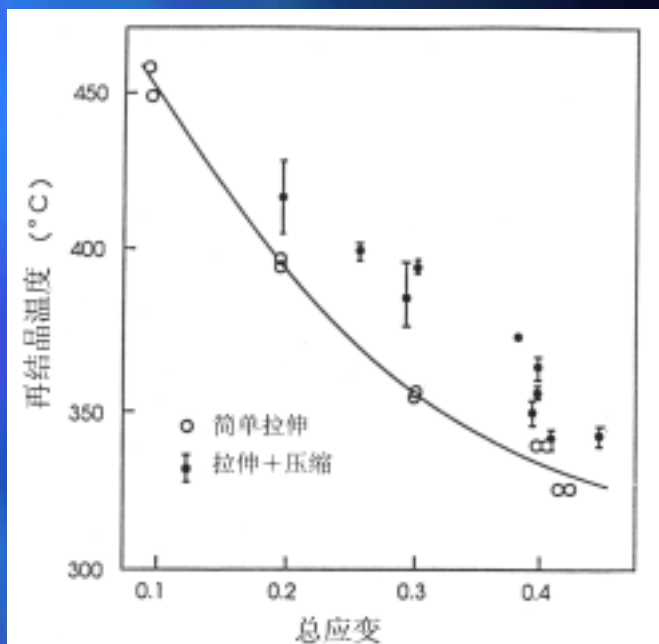
1) 形变量



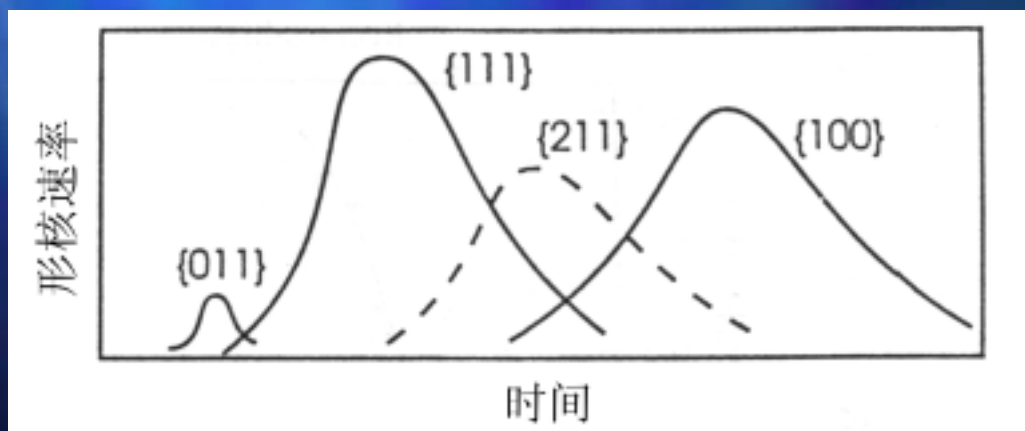
铝的再结晶形核和长大
激活能与形变量的关系
(N 为形核率, G 为长大速度)

2) 形变方式

经拉伸和压缩的铜的再结
晶温度随变形量的变化



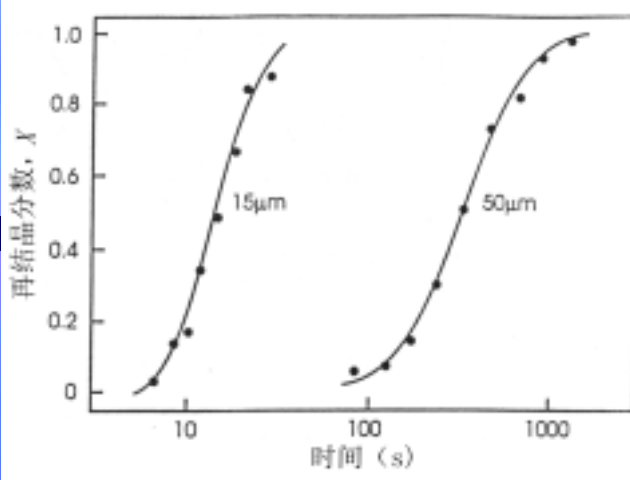
3) 晶粒取向



形变铁的再结晶形核速率与晶粒取向间关系

4) 原始晶粒尺寸

$$\frac{1}{t_{0.5}} = C \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

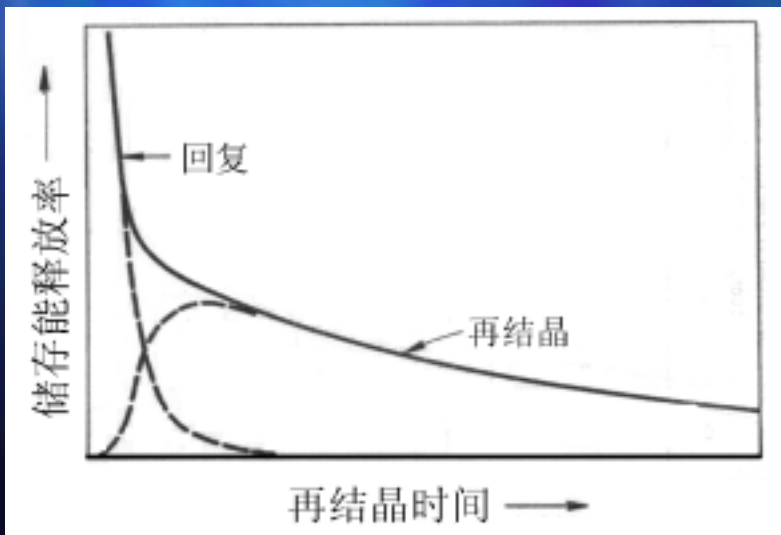


铜，冷轧93%；225℃退火

$t_{0.5}$ 与 $1/T$ 的关系
Fe-Si 合金，60%变形；

5) 溶质/杂质；6) 形变温度/应变速率；7) 退火温度；

9.2.3 再结晶和回复的关系



竞争
↓
重叠
↓
相互削弱

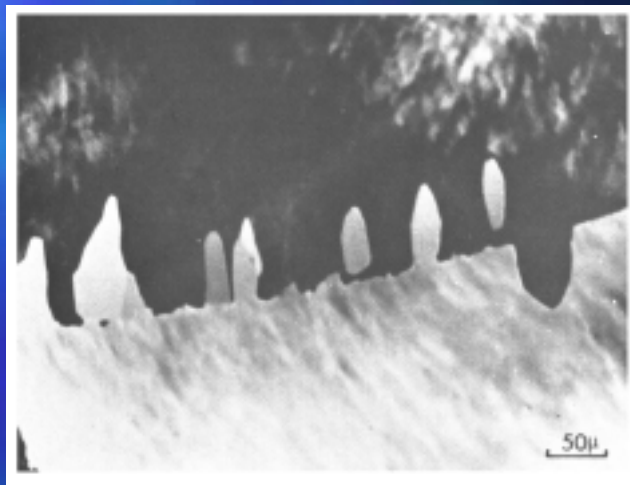
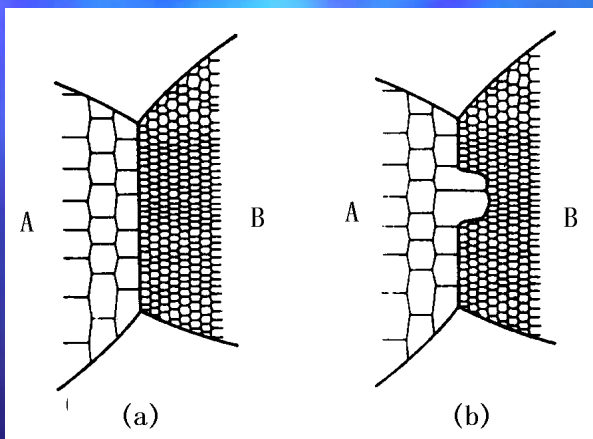
9.2.4再结晶的形核

特点：

- 核心优先在局部形变高的区域形成(形变带, 晶界, 夹杂附近, 孪晶交截处及自由表面附近等)。
- 形变量高于某一临界值后, 形核率随形变量增加而急剧增加。
- 一般情况下(中等形变量下), 核心的晶体学位向与它形成所在的形变区域的晶体学位向有统计关系。
- 核心不能长入和它的位向差别不大的区域中。

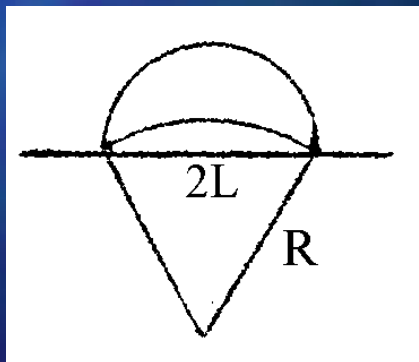
例

应变诱发晶界迁动形核



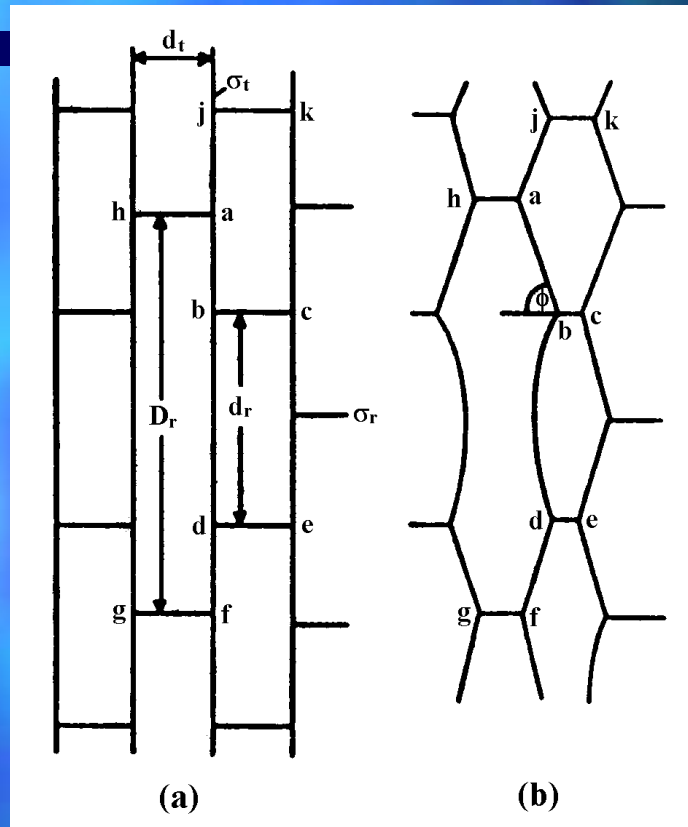
形核条件

$$L \geq \frac{2\gamma_b}{E}$$



亚晶聚合粗化形核

形变过程形成的过渡带中有大的取向梯度。



9.2.5再结晶核心的长大

$$v = \frac{b^2 D_b}{kT} p = Mp$$

$$M = \frac{b^2 D_b}{kT}$$

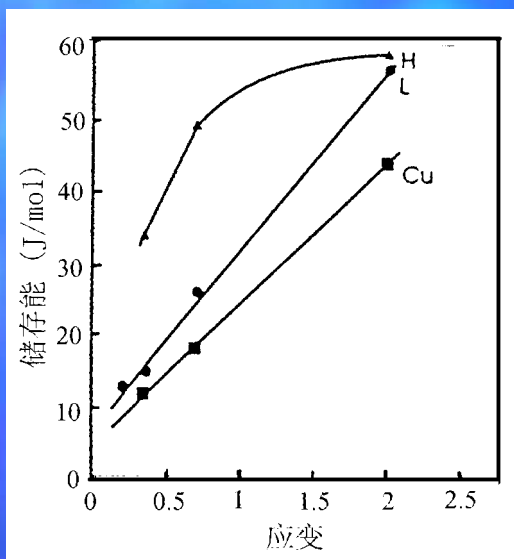
原子随机
跳动导致
的界面迁
移。

储存能产生

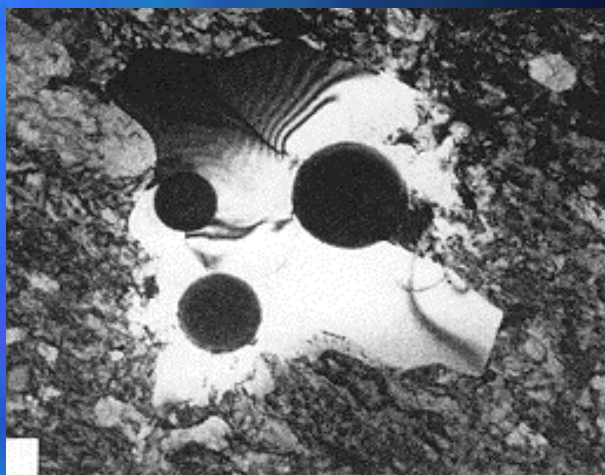
9.2.6 第二相粒子的作用

对再结晶有三方面影响：

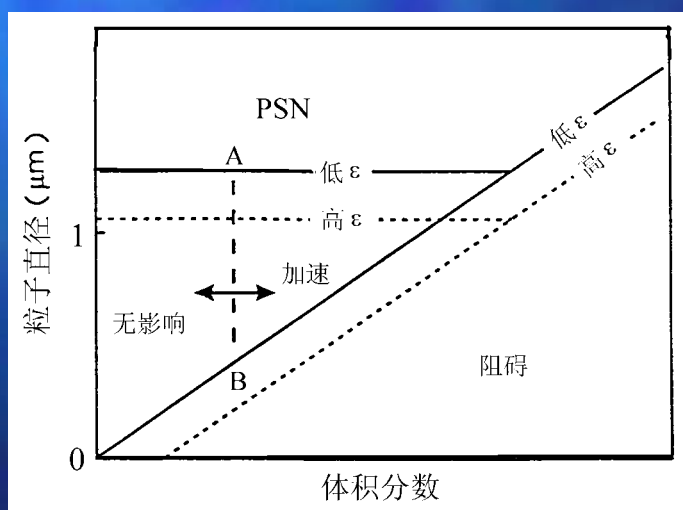
- (1) 增加形变储存能而增加再结晶驱动力。
- (2) 粒子附近可能作为再结晶形核位置。
- (3) 弥散和稠密分布的第二相粒子钉扎晶界，阻碍迁动。



增加作用



PSN机制



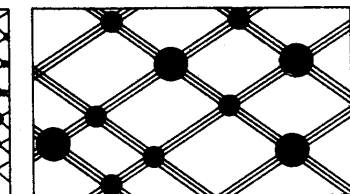
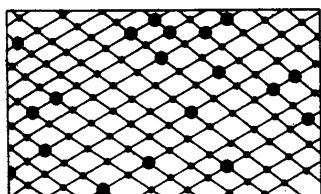
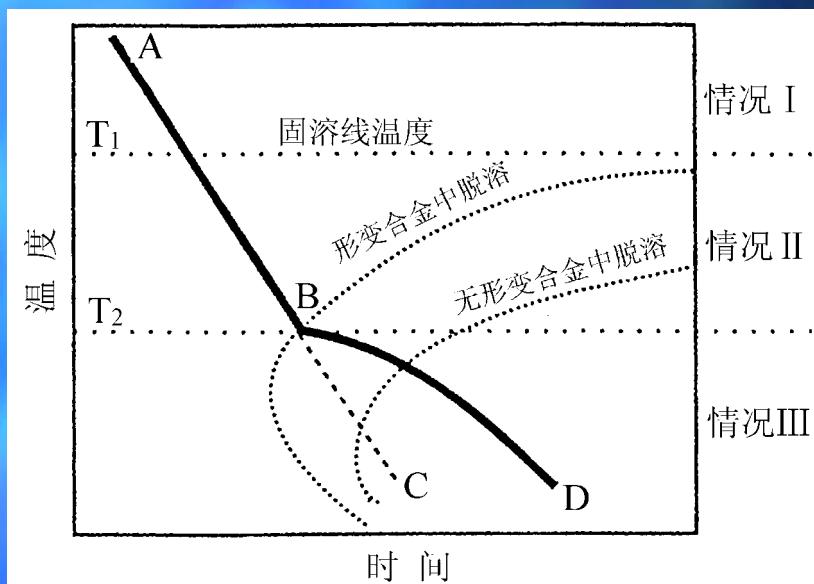
粒子含量、尺寸对再结晶的作用

$$\lambda = r \sqrt{\frac{2\pi}{3f_v}}$$

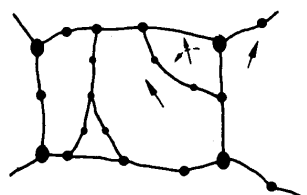
9.2.7 再结晶时的脱溶

基本规律：

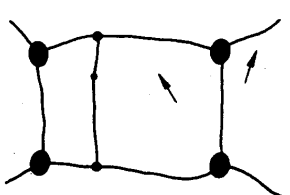
形变引入缺陷促进脱溶和再结晶形核，脱溶析出粒子影响再结晶形核和钉扎晶界从而延缓再结晶。



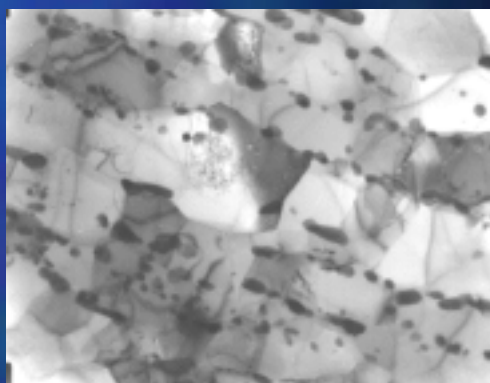
(a)



(b)



(c)

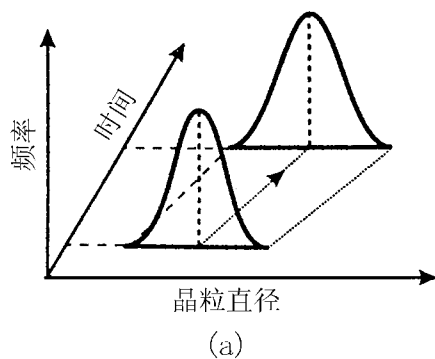


Al-1.3%Mn

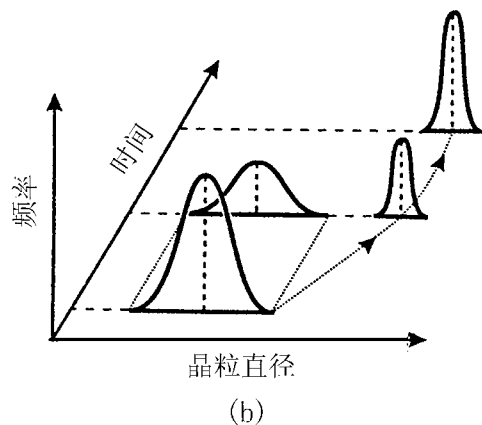
9.3 晶粒正常长大及二次再结晶

长大驱动力: 总界面能的减少。

连续

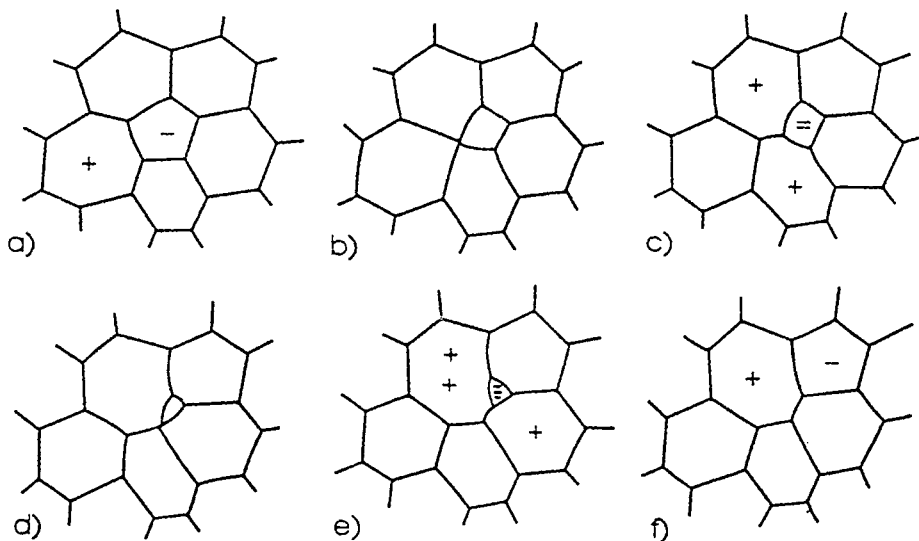


不连续



不同方式的长大

9.3.1 晶粒正常长大



•正常晶粒长大动力学

目的：找出晶粒尺寸与时间的关系

$$v = Mp$$

$$v = \frac{b^2 D_b}{kT} P = \frac{b^2 D_b \gamma_b}{kTD}$$



$$\bar{D}^2 - \bar{D}_0^2 = 2c_1 t = c_2 t$$

通式： $\bar{D}^n - \bar{D}_0^n = c_2 t$

•第二相粒子对晶粒长大的影响（Zener钉扎）

假设

- (1) 第二相颗粒的是尺寸相同的球；
- (2) 颗粒是随机地均匀分布的；

$$-\frac{d\pi(r^2 - x^2)}{dx} = 2\pi x$$

$$P_z = 2\pi r \gamma_b N_A$$

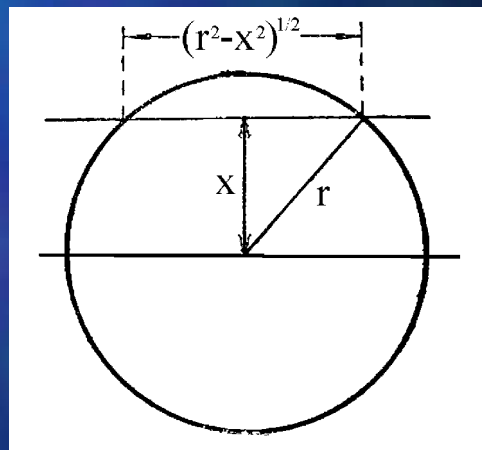
$$\frac{2\gamma_b}{R} = 2\pi r \gamma_b N_A$$

$$R^* = \frac{1}{\pi r N_A}$$

$$N_A = N_V r$$

$$N_V = \frac{3f}{4\pi r^3}$$

$$R^* = \frac{4r}{3f}$$

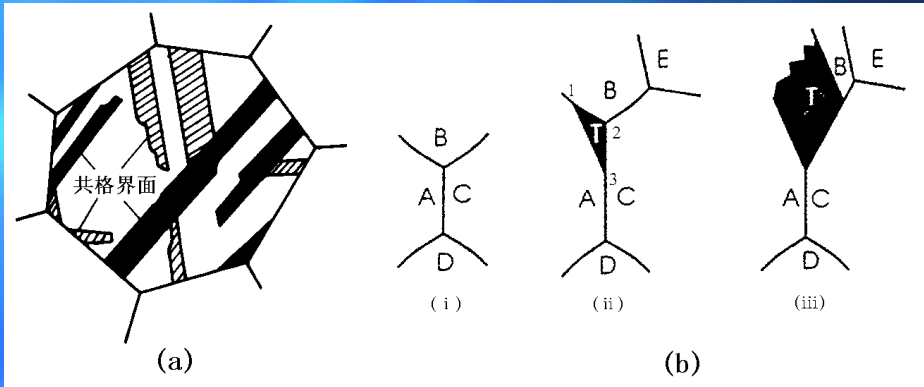


• 织构和表面对晶粒长大的影响

织构抑制；
厚度抑制；

9.3.2 退火孪晶

组织
特征



形成
过程
及能
量变
化。

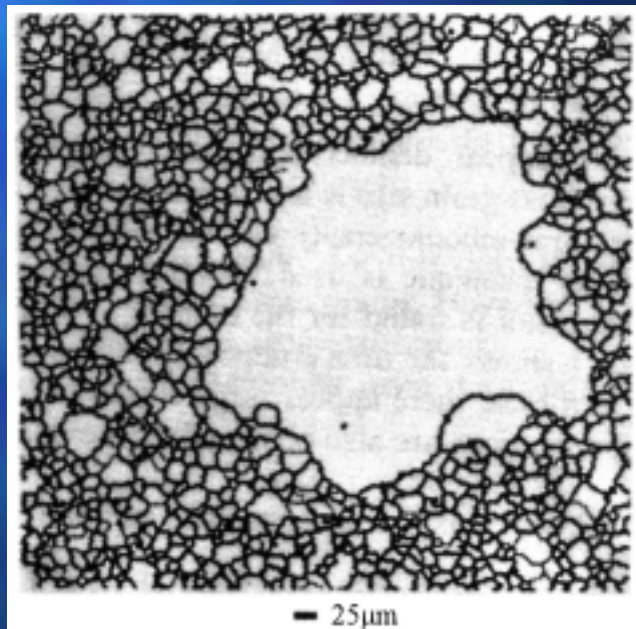
9.3.3 晶粒的非正常长大

现象：

原因：

织构抑制；
第二相粒子的溶解。

对性能的影响：
硅钢片的生产。
(对磁性的影响)。

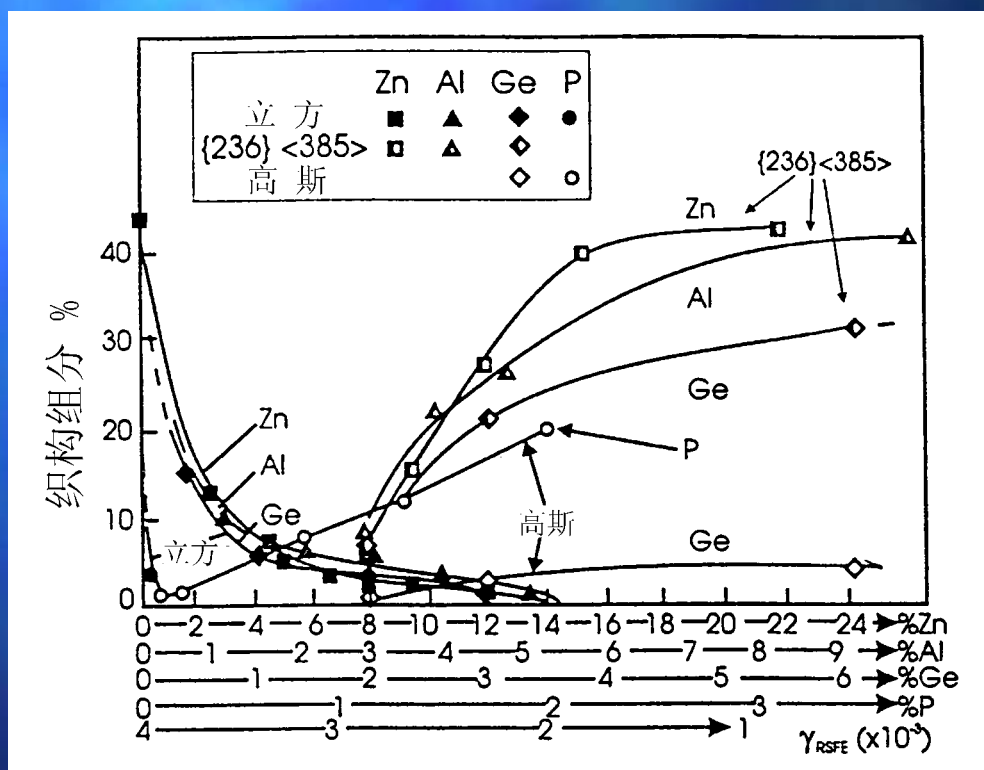


9.4 再结晶织构

9.4.1 典型金属和合金的再结晶织构

面心立方金属的再结晶织构

- 铝中的立方织构和R织构（高层错能）；
- 铜中的立方织构和 $\{236\}<385>$ 织构(孪晶产生，层错的影响)；



合金的加入改变层错能而影响织构

9.4.3 再结晶组织理论

再结晶组织是如何形成的？两大派别。

取向形核理论

在形变组织基体上形成特定的晶体学取向的核心，这些核心长大而成的晶粒必然会具有相对于基体位向的某种特定取向。因为基体是择优取向的，所以这些晶核长大后的晶粒也必然具有择优取向。

取向长大理论

认为核心不必有特殊取向，但只有那些相对于基体的某些有利特殊取向的核心才有较大的长大速度，其它取向的核心因界面迁移速度太慢，在竞争生长中被淘汰。

• 组织的控制与应用

组织---性能产生各向异性---获得特殊性能。

例，
冲压用钢板，存在组织，冲压后冲压件出现薄厚不均，并且在冲压件边缘出现一些凸出部分（称为“制耳”），要求尽量减小组织。

超深冲钢板（IF钢），希望沿板面任何方向与板面法线的塑性应变比尽可能大，要求较强的 $\{111\}$ 面平行于板面的组织。

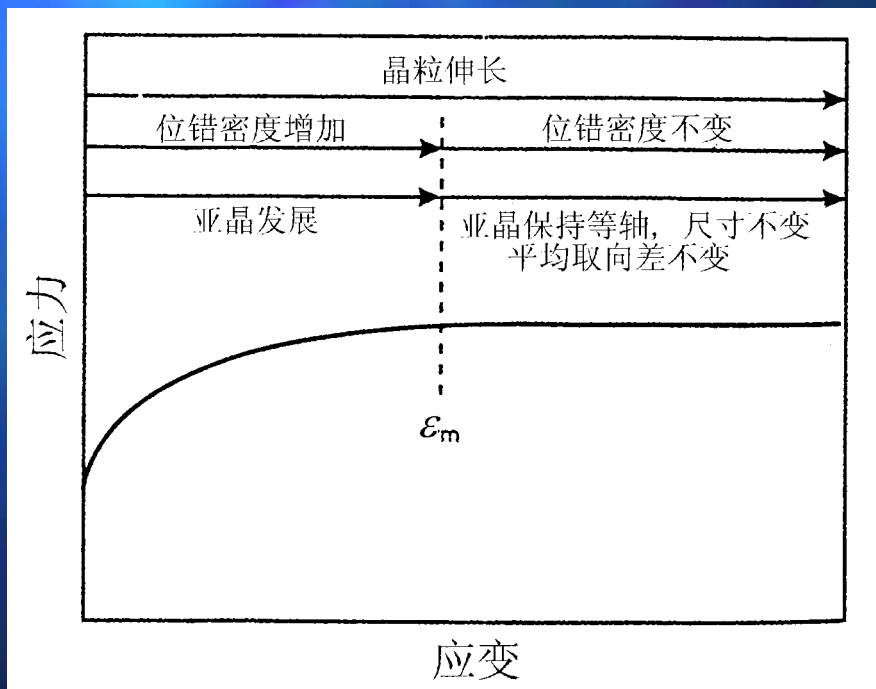
电工用的硅钢（Fe-3.5%Si）板希望有 $\{110\}<001>$ 组织（高斯组织）和 $\{100\}<001>$ 组织（立方组织），这样的钢板有很好的导磁性能（一般硅钢片的组织是二次再结晶组织）。

9.5热加工过程的回复和再结晶

热加工---在材料的再结晶温度以上的加工过程。
即形变中伴随回复和再结晶过程
(称动态回复和动态再结晶)，
亚动态再结晶；

9.5.1动态回复

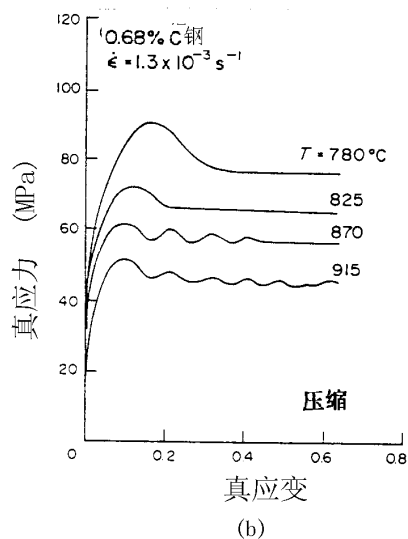
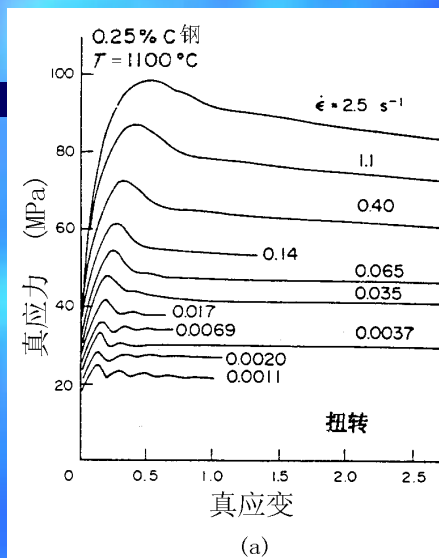
特点：流变应力不随应变而变的稳态流变。



9.5.2 动态再结晶

特点：应变曲线的单峰、多峰现象。

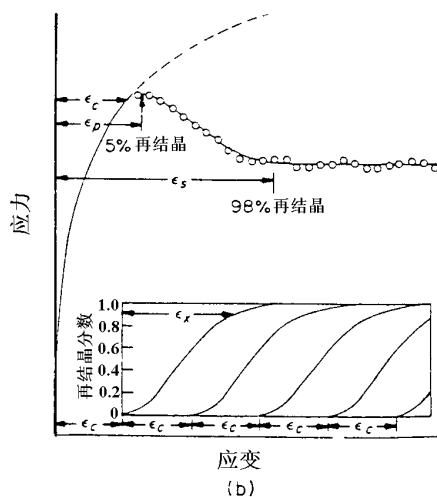
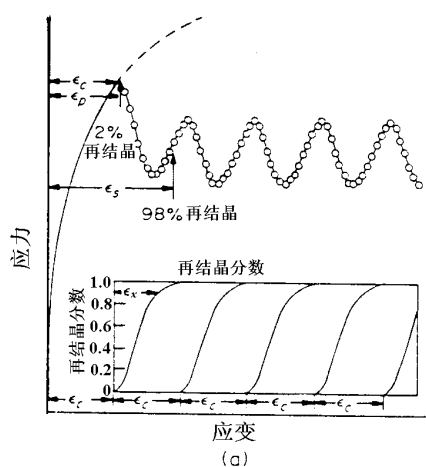
应变速率改变



温度改变

碳钢应力应变曲线

原因：再结晶周期迭加效果不同。



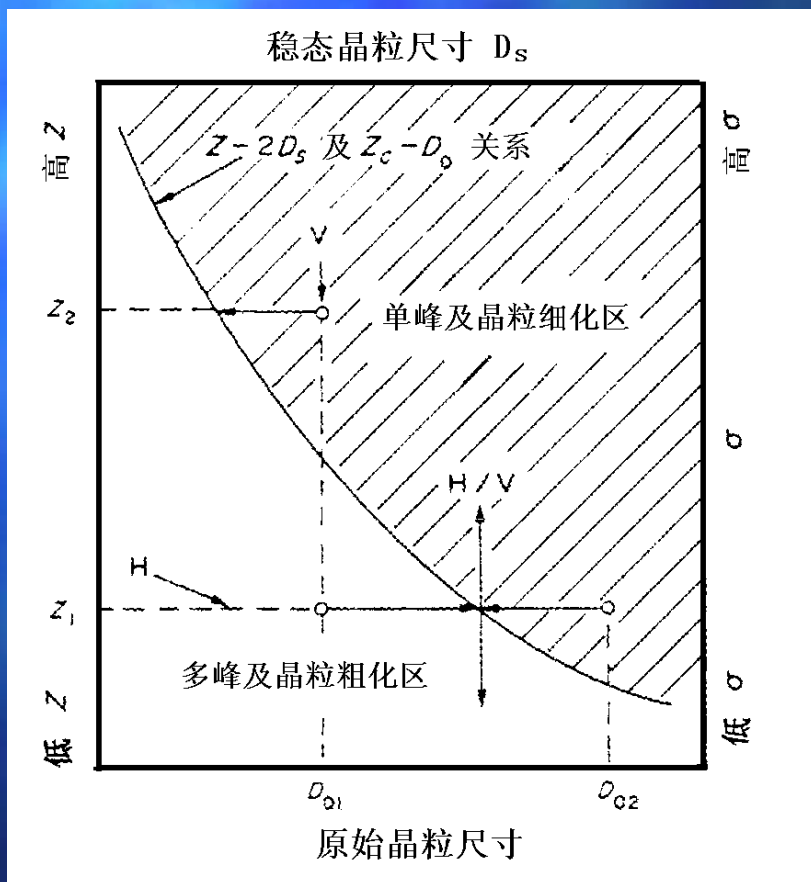
高 ϵ' ;
低 T_{def}

Luton和Sellars的计算机模拟结果。

定义Zener-Hollomon参数 Z 为：

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_0}{RT}\right) = F(\sigma_m)$$

概括了变形温度和应变速率的热加工参数。
(温度校正的应变速率)



通过 Z 参数将两类组织区分开。

本章小结

•研究的意义

•回复



基本特征
组织变化
性能变化
动力学I, II型

•再结晶



基本规律
形核
长大
动力学
与脱溶的交互作用
组织变化（退火孪晶）
取向变化

•长大



正常（连续）



动力学
钉扎



异常（不连续/二次）



现象
原因
利用

•热加工



σ - ε 曲线
组织
原因
利用