

### 第三章第八节

## 冷变形金属的回复、再结晶与晶粒长大

《材料科学基础》 第九章第九节

## 本节主要内容

### I. 再结晶有关概念

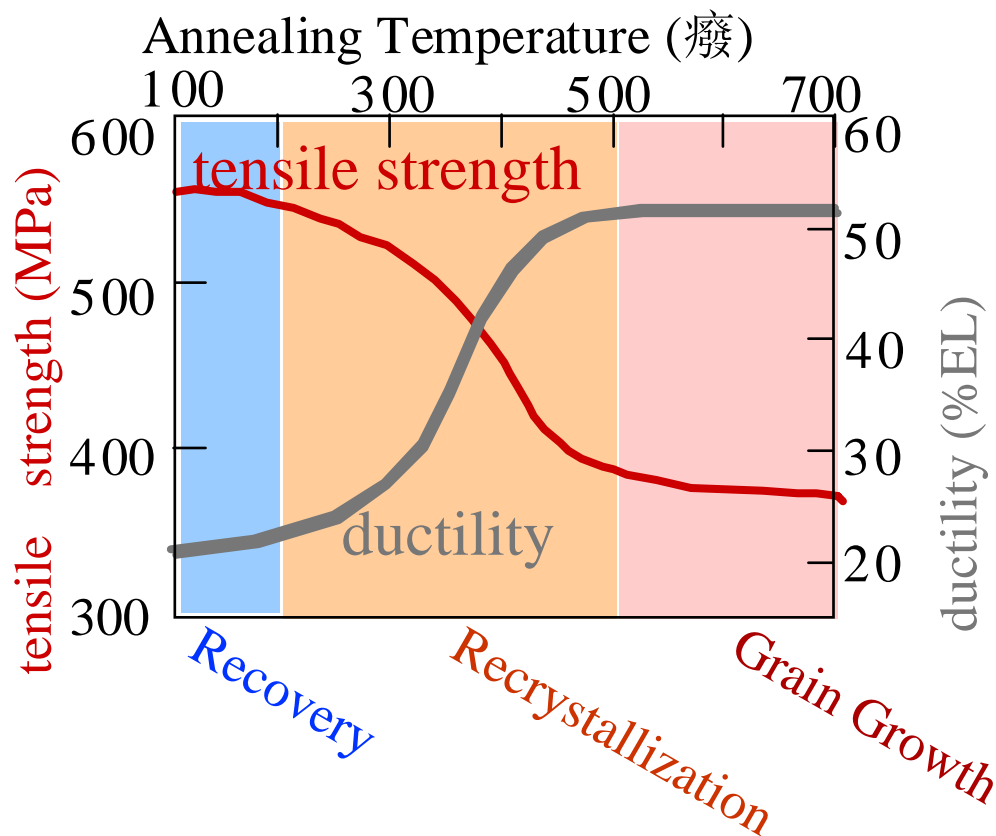
- 一、金属的冷变形状态
- 二、变形储存能
- 三、静态回复
- 四、静态再结晶

### II. 再结晶过程

- 一、再结晶的形核
- 二、再结晶的形核率及长大速率
- 三、再结晶动力学
- 四、再结晶温度及晶粒尺寸

### III. 再结晶后的晶粒长大

- 一、正常晶粒长大
- 二、异常晶粒长大



## I. 重要概念

---

### 一、金属的冷变形状态

非均匀变形产生残余内应力;  
原等轴晶粒沿变形方向被拉长;  
结构缺陷(空位和位错)密度增加;  
位错组态和分布发生变化: 随形变量增加, 位错增殖→位错缠结→位错胞

### 二、变形储存能

冷变形所消耗的能量中有百分之几到百分之十几存在于晶体内部, 称为储存能。主要存在于结构缺陷中。

## I. 重要概念

---

### 一、金属的冷变形状态

非均匀变形产生残余内应力;  
原等轴晶粒沿变形方向被拉长;  
结构缺陷(空位和位错)密度增加;  
位错组态和分布发生变化: 随形变量增加, 位错增殖→位错缠结→位错胞

### 二、变形储存能

冷变形所消耗的能量中有百分之几到百分之十几存在于晶体内部, 称为储存能。主要存在于结构缺陷中。

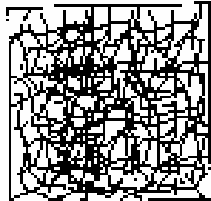
### 三、静态回复

指冷变形金属加热时，在新的无畸变晶粒出现以前经历的亚结构及性能变化的过程。回复机制主要包括位错运动构成低能组态、位错胞转化为亚晶粒、亚晶合并长大局部形成大位向差晶界等几个阶段。

## I. 重要概念

(a)

Dislocation tangles



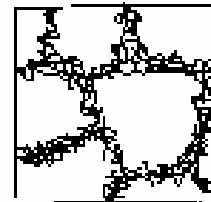
(b)

Cell formation



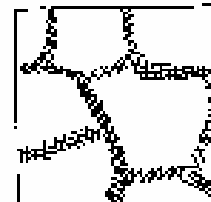
(c)

Annihilation of  
dislocations  
within cells



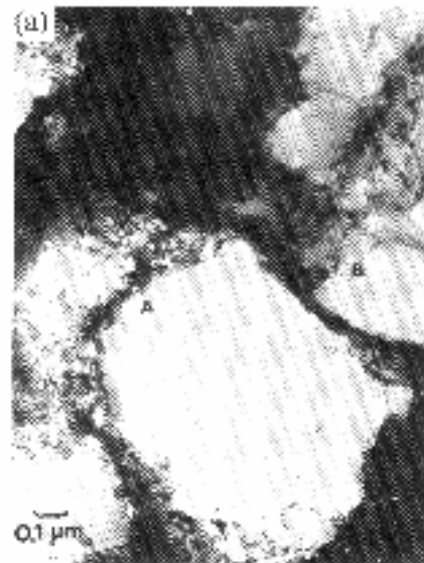
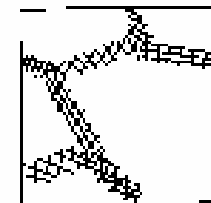
(d)

Subgrain formation

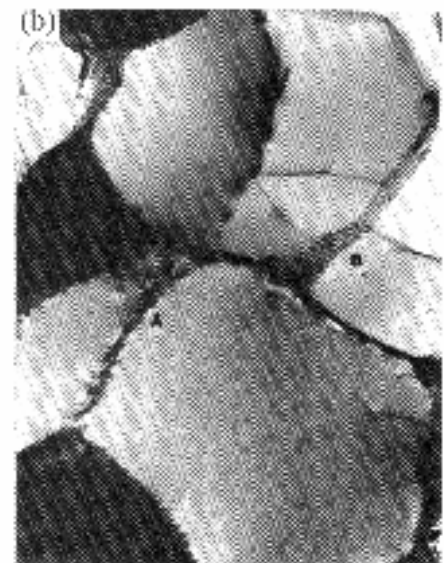


(e)

Subgrain growth



(a)



(b)

### 四、静态再结晶

指冷变形金属在再结晶温度以上退火时，由新的无畸变的晶粒取代变形晶粒的过程。再结晶不是相变过程，它只有组织变化而没有晶体结构的变化。

### 一、再结晶的形核

#### 1. 形核驱动力

变形储存能

#### 2. 形核位置

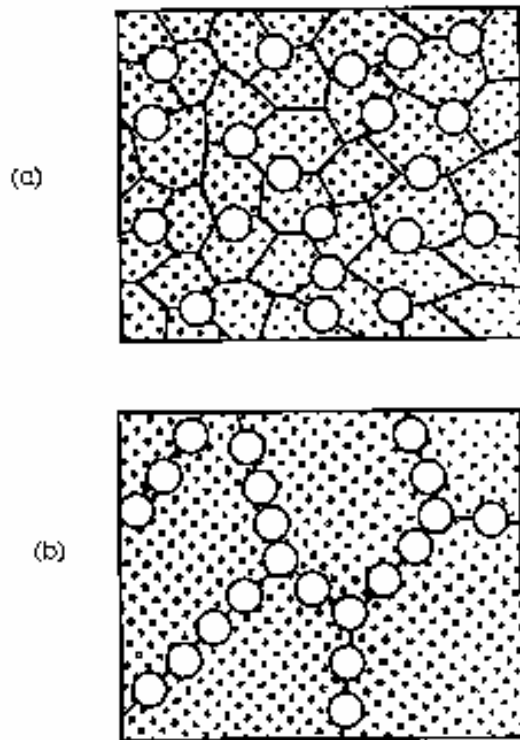
邻近严重畸变区的弱畸变区或无畸变区；  
应变不协调区或强变形区；

大角度界面，如晶界、相界、孪晶界、滑移带界面、或原基体晶粒内某些位向差较大的亚晶界上。

此外，直径 $>1$ 微米的大粒子邻近区的局部强烈畸变区。

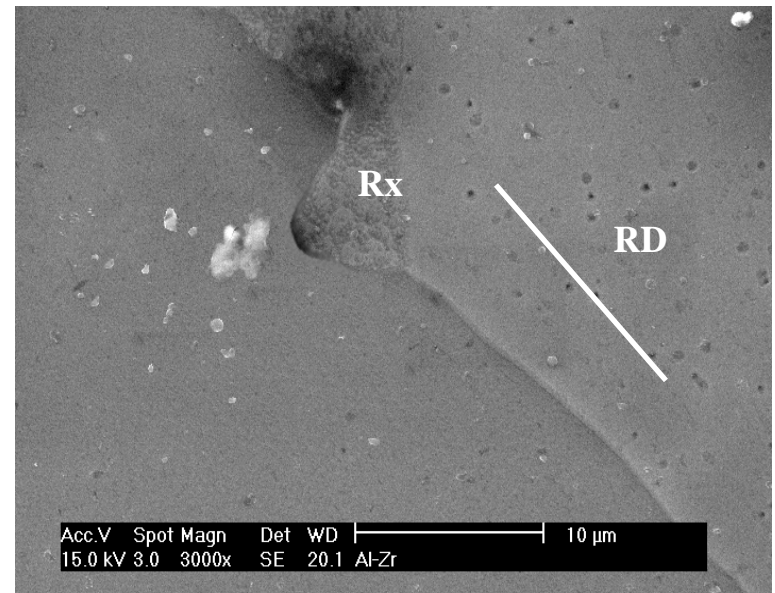
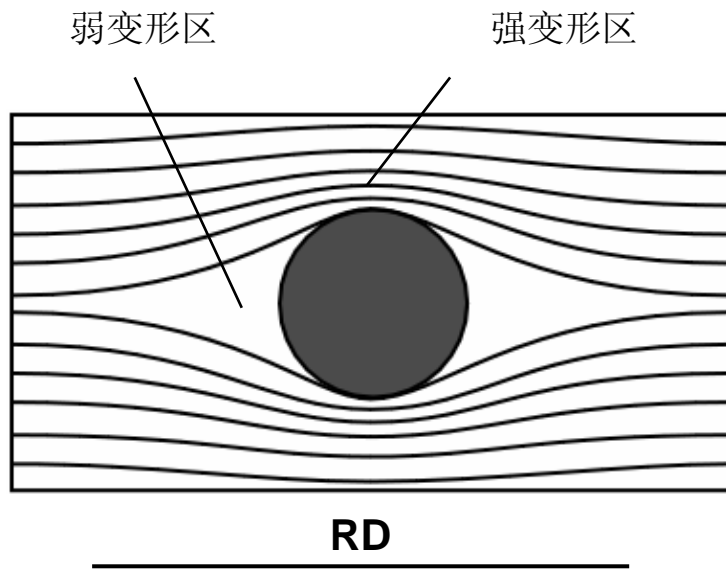
## II. 再结晶形核

---

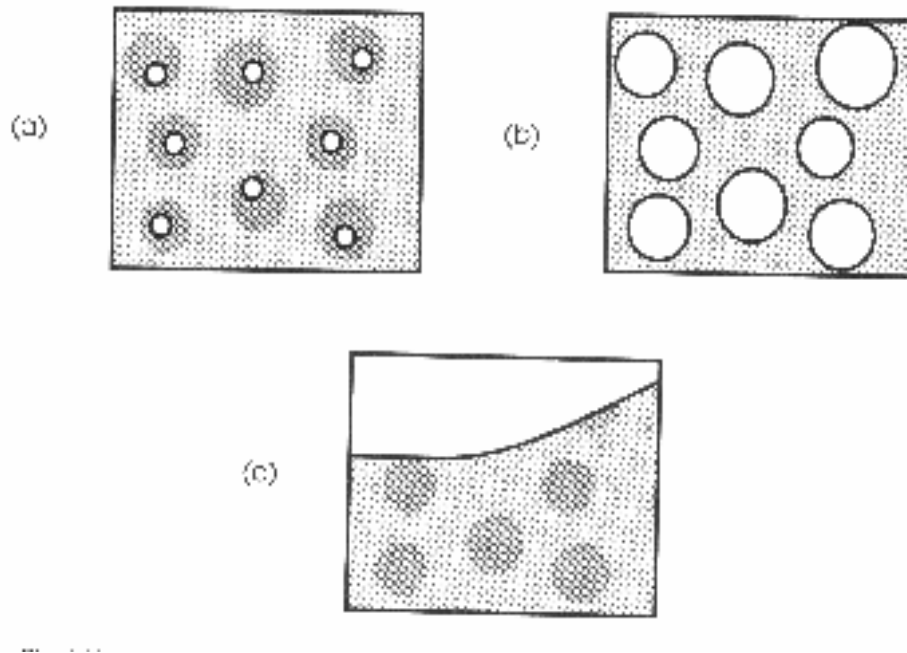


- **Grain boundaries** are preferred sites for nucleation
- **Finer grain size** prior to deformation leads to **more random nucleus distribution**

## II. 再结晶形核



## II. 再结晶形核

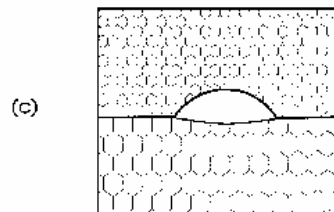
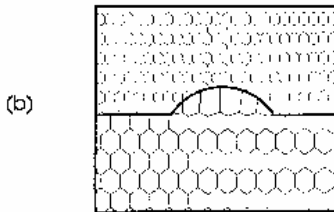
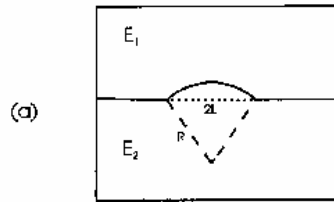


- If **nucleation** starts in **high stored energy regions** then growth rate decreases as nucleus grows
- If nucleation at a scale larger than stored energy variations, **the average growth rate remains constant**

## II. 再结晶过程

### 3. 形核方式

#### (1) 晶界弓出形核



- Driving force is the stored energy difference across the grain boundary
- For the bulge to grow, the rate of decrease in the stored energy must be greater than the energy increase due to the formation of the new boundary
- The critical condition for bulge growth is given by

$$R > \frac{2\gamma_b}{E_1 - E_2}$$

#### (2) 亚晶合并形核

# 二、再结晶的形核率及长大速率

## 1. 定义

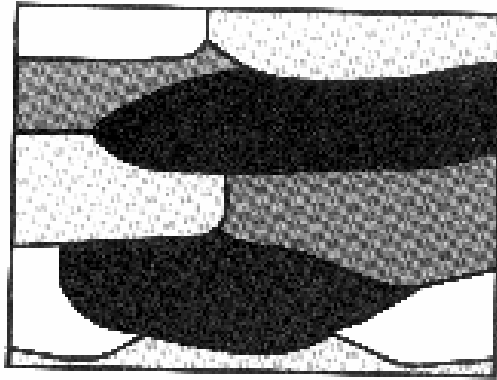
形核率指在单位时间、单位体积内形成的再结晶核心的数目，常以 $N$ 表示。

再结晶核心长大速率指再结晶核心单位时间内一维线性尺寸的增加量，常以 $G$ 表示。

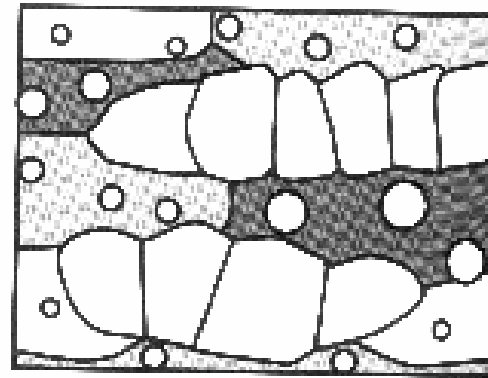
**注意：**  $N$ 是无量纲的，而 $G$ 是以 $m/s$ 为国际单位表征的

## II. 再结晶过程

### 再结晶核心长大与变形程度之间的关系



a)



b)

- Intergranular **variation in stored energy** causes **variations in the growth rates** of different nuclei

## II. 再结晶过程

### 2. 再结晶形核率和再结晶核心长大速率的表达式

$$N = C_0(E_D - E_D^C - F_p) \exp\left(\frac{-Q_N}{RT}\right)$$

$$G = k_{GB} E \exp\left(\frac{-Q_G}{RT}\right)$$

### 3. 再结晶形核率和再结晶核心长大速率的影响因素

(1) 变形程度 临界变形量的概念

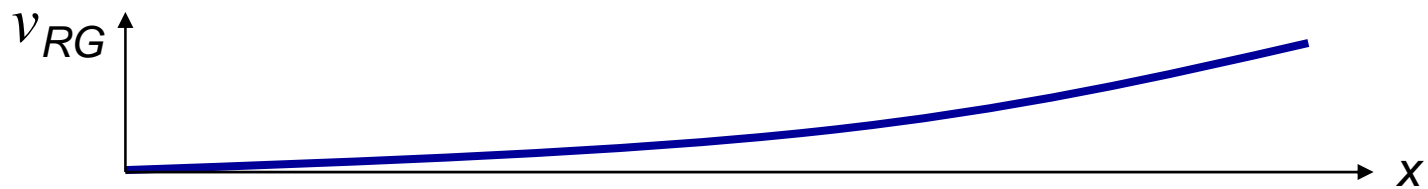
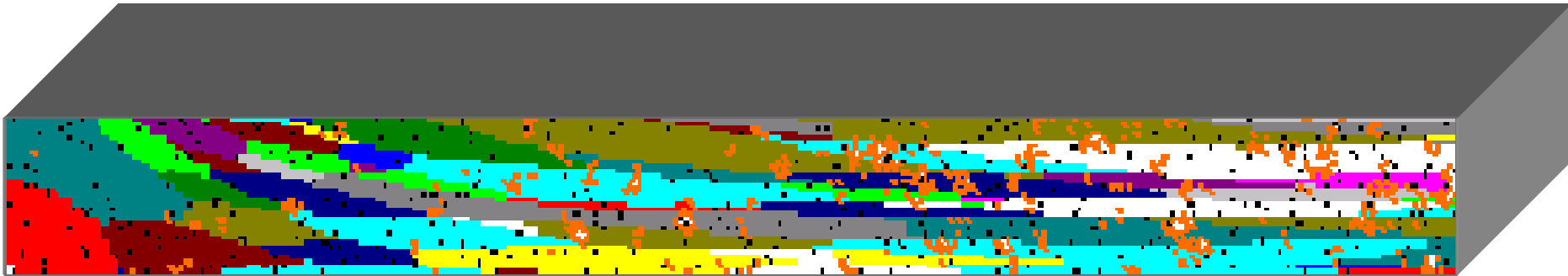
(2) 第二相粒子及夹杂物

(3) 初始晶粒尺寸

(4) 退火温度

(5) 材料特性

## II. 再结晶过程



再结晶形核率和晶粒长大速率随形变量的变化

### 三、再结晶动力学

#### 1 主要内容

研究再结晶量（体积分数）随时间的变化特性

#### 2 Johnson-Mehl 恒温动力学方程

$$X_R = 1 - \exp(-\pi / 3 \ N G^3 t^4)$$

推导条件：

恒定退火温度；

瞬时、饱和位置形核；

核心长大速率各向同性且不随时间发生变化

## II. 再结晶过程

---

### 3 Johnson-Mehl-Avrami 恒温动力学方程

$$X_R = 1 - \exp(-Kt^n)$$

适用条件:

恒定退火温度;

非瞬时形核,  $N$ 随时间发生变化

$n$ 值为3-4

$n$ 值的确定:

$$\lg \ln[1/(1 - X_R)] = \lg K + n \lg t$$