

四、再结晶温度及晶粒尺寸

1. 再结晶温度

再结晶起始温度及其确定的局限性：新晶粒须满足一定的尺寸才可能被实验仪器探测到

再结晶完成温度：定义为1小时内完成95%再结晶时所对应的温度

(1) 实验确定

(2) 理论推导

(3) 经验估算

$$T_R = (0.35 \sim 0.40) T_m$$

(4) 查找手册或数据库

II. 再结晶过程

2. 再结晶晶粒尺寸

指再结晶刚刚完成时的平均晶粒尺寸，应该和再结晶完成后的晶粒长大过程中的平均晶粒尺寸区分开。

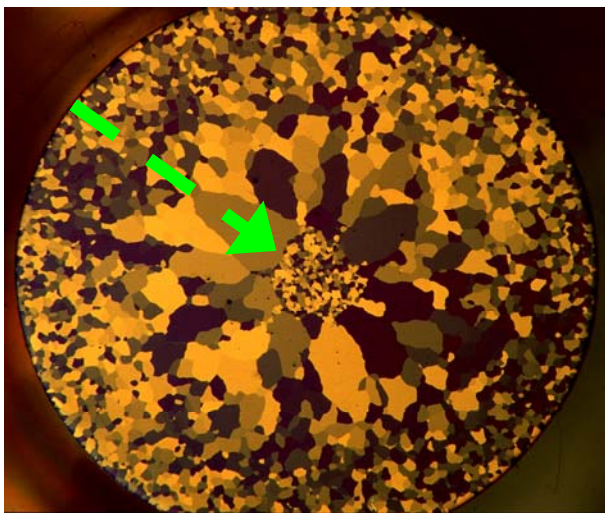
粗略估算式：

$$d = C(G / N)^{1/4}$$

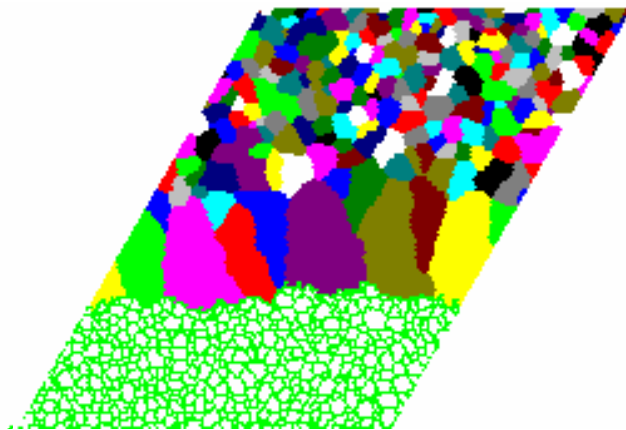
即， $G \uparrow$ ， $d \uparrow$ ； $N \uparrow$ ， $d \downarrow$ 所有影响 G 和 N 的因素必然影响再结晶晶粒尺寸，其中决定性因素是形变量大小。

II. 再结晶过程

变形量对再结晶晶粒尺寸的决定性作用
同一材料中观察预变形量的重要作用



Ti G2, 冷拔后退火



再结晶过程仿真

一、单相材料的正常晶粒长大

(Normal Grain Growth, NGG)

NGG过程中，晶粒尺寸比较均匀，平均尺寸随时间连续增大。

驱动力：晶界能(晶界面曲率)

—凸晶界倾向晶粒内部移动，凹晶界倾向晶粒外部移动。

在达稳定状态之前，小于六边的晶粒有尺寸自发减小以至消失的趋势；大于六边的大晶粒有自发长大的趋势。

- Empirical Relation:

exponent typ. ~ 2

grain diam.
at time t.

d^n

$- d_0^n$

$= Kt$

coefficient dependent
on material and T.

elapsed time

III. 再结晶后的晶粒长大

2. 有第二相粒子的复相材料的正常晶粒长大

(1) 钉扎和脱钉

如果局部晶界能小于粒子钉扎力，晶界则被钉扎住；如果晶界能大于晶粒/粒子界面能，即晶粒长大的驱动力大于粒子钉扎力，晶界能够持续移动，即晶界脱钉，NGG能够连续进行。

III. 再结晶后的晶粒长大

(2) 极限晶粒尺寸

当第二相粒子的钉扎阻力与晶粒长大的驱动力处于平衡状态时，晶粒长大将发生停滞，这时的平均晶粒尺寸常称为极限晶粒尺寸 R_C 。

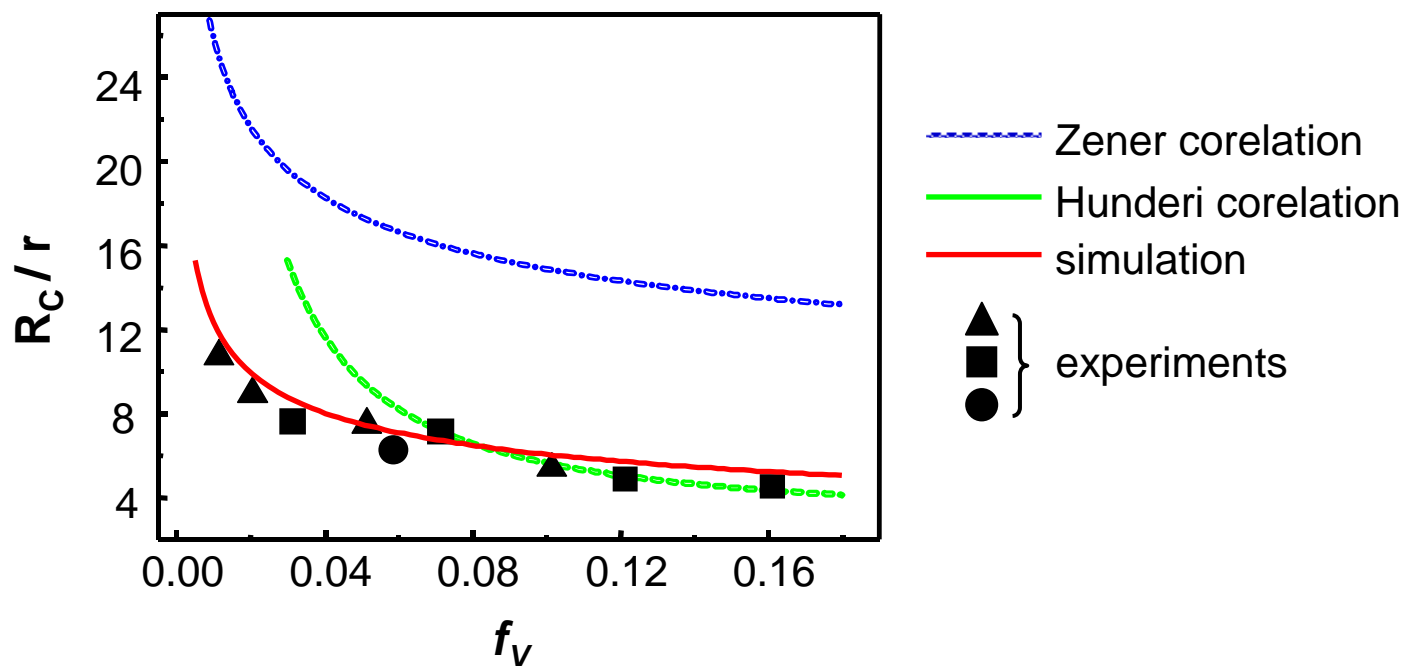
R_C 与第二相粒子参数之间存在定量关系

经典的Zener理论表达式为：

$$R_C = 4 r / 3 f$$

III. 再结晶后的晶粒长大

已有大量实验证实，当含有较多弥散分布的粒子时，Zener公式预测值远大于测量值，原因是过低估算了第二相粒子的钉扎阻力。



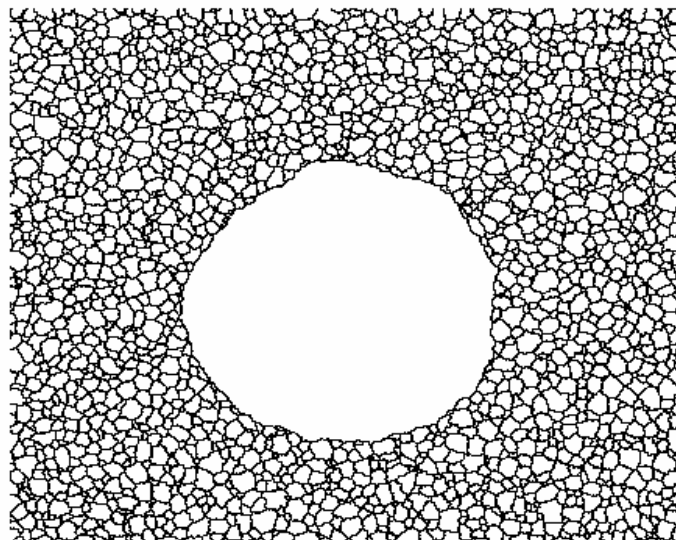
仿真研究结果: $R_C = 3r / f^{1/3}$

III. 再结晶后的晶粒长大

二、异常晶粒长大

(Abnormal Grain Growth, AGG)

AGG指再结晶后少数几个晶粒择优生长，迅速发展成特大晶粒，并不断吞并小晶粒的过程。



$kT=0.8$

III. 再结晶后的晶粒长大

出现ACG的条件:

- (1) 基体晶粒组织稳定化
第二相粒子、织构、表面蚀沟的作用
- (2) 存在择优生长的晶粒
尺寸、取向优越性
- (3) 温度条件
高的晶界迁移率