

# 晶界内耗峰在高温形变中的变化\*

孔庆平<sup>1</sup>, 蔡彬<sup>1</sup>, GOTTSTEIN G<sup>2</sup>

(1. 中国科学院固体物理研究所内耗与固体缺陷开放研究实验室, 合肥 230031;  
2. 德国亚琛工业大学金属学和金属物理研究所)

**摘要:** 研究晶界内耗峰在3种高温形变模式下(静态蠕变、循环蠕变、循环扭转)的变化, 以研究晶界在高温形变过程中的行为和作用。

**关键词:** 晶界; 内耗峰; 高温变形

**中图分类号:** TG115.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) S1-0208-03

## 1 实验方法

内耗测量在本室全自动多功能内耗仪上进行, 采用强迫共振法. 频率分别为 0.3, 1.0 和 3.1 Hz. 升降温速率均约为 4 K/min. 应变振幅为  $1 \times 10^{-5}$ .

所用材料为  $w = 99.999\%$  的高纯 Al. 试样标距长为 55 mm, 横截面为  $1.7 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ . 在测量内耗前, 试样在 450 °C 原位退火 2 h. 平均晶粒尺寸为 2 mm.

在 2 个温度, 3 种形变模式下进行原位塑性形变: ① 静态蠕变: 450 °C, 1.5 MPa 和 300 °C, 4.0 MPa; ② 循环蠕变: 450 °C, 0 ~ 1.5 MPa 和

300 °C, 0 ~ 4.0 MPa, 周期为 30 s; ③ 循环扭转: 450 °C 和 300 °C, 周期为 30 s, 扭角为  $\pm 40^\circ$ .

## 2 实验结果

图 1 给出在 1 Hz 下 (a) 450 °C 静态蠕变, (b) 300 °C 循环扭转, 在不同应变量的内耗温度谱. 450 °C 循环蠕变和循环扭转, 300 °C 静态蠕变和循环蠕变的结果也类似.

设弛豫时间  $\tau$  满足高斯分布, 背景内耗随着温度指数上升<sup>[2]</sup>. 用方前锋的拟合程序<sup>[3]</sup>, 对内耗数据拟合的结果如图 2 所示.

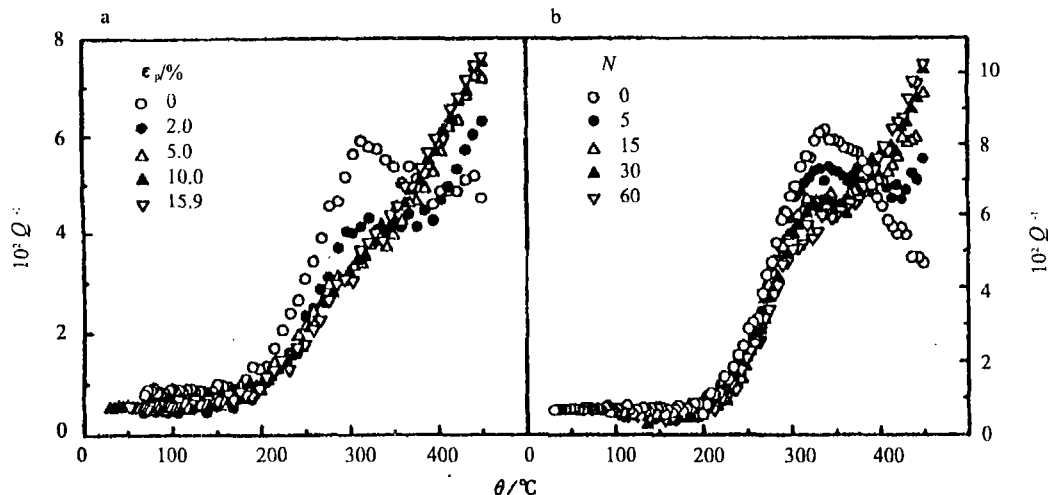


图1 高纯 Al 晶界内耗峰在高温形变过程中的变化  
a 450 °C 静态蠕变; b 300 °C 循环扭转

\* 收稿日期: 2000-12-30;

作者简介: 孔庆平 (1930-), 男, 研究员, 博士生导师; E-mail: qpkong@mail.issp.ac.cn

从图2中可看出,随着应变量或扭转量的增加,内耗峰降低且移向低温,背景内耗升高.另外还发现激活能(1.5 eV)与形变量关系不大,峰宽变化也很小.

图3给出450℃和300℃三种形变模式下,归一化的峰高 $Q_{md}^{-1}/Q_{mb}^{-1}$ ( $Q_{md}^{-1}$ 为形变后的峰高, $Q_{mb}^{-1}$ 为形变前的峰高),塑性应变量 $\epsilon_p$

的关系.

其中循环扭转的 $\epsilon_p$ 为累积等效拉伸应变.每周的等效拉伸应变 $\bar{\epsilon}_p$ 由下式给出<sup>[4]</sup>:

$$\bar{\epsilon}_p = w\theta/(\sqrt{3}L) \quad (1)$$

式中, $w$ 是样品表面到扭轴的距离, $\theta$ 是扭角, $L$ 是试样长度, $\sqrt{3}$ 是由扭转到拉伸的转换因子.

累积等效拉伸应变 $\epsilon_p$ 为扭转周数乘以 $\bar{\epsilon}_p$ .

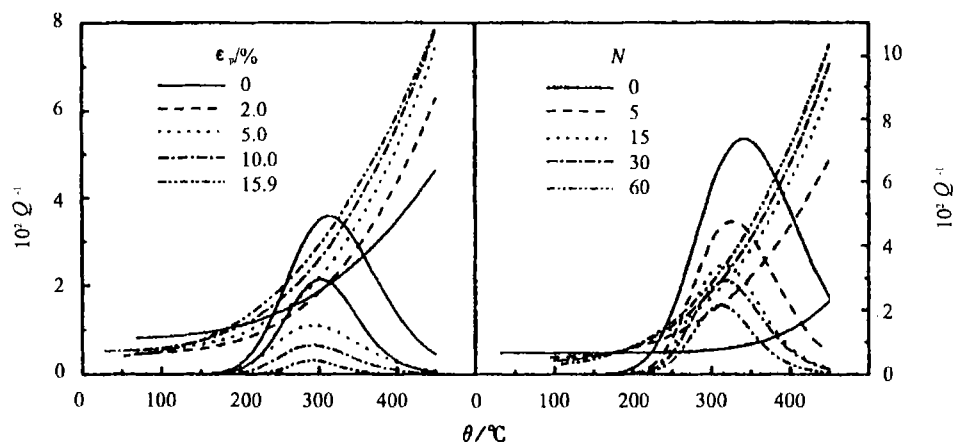


图2 内耗曲线的分析

a 450℃静态蠕变; b 300℃循环扭转

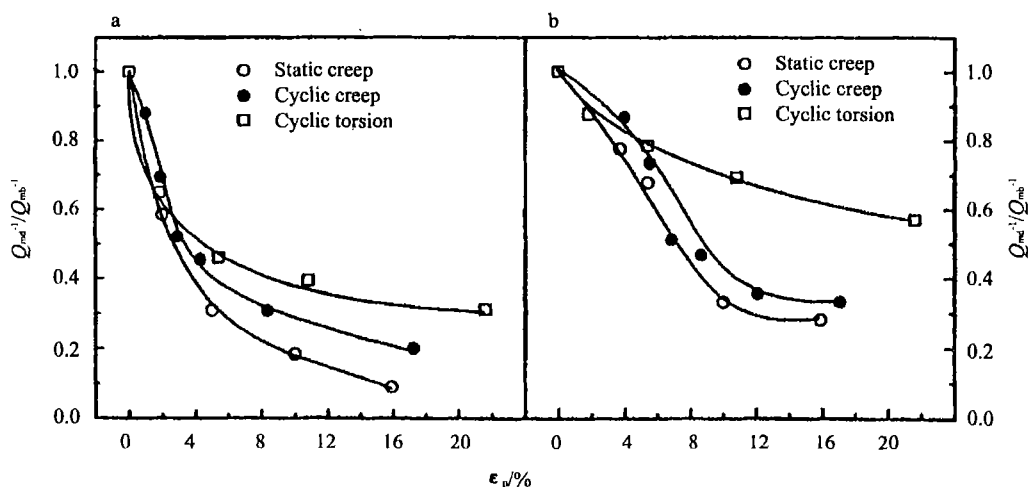


图3 归一化的内耗峰高度 $Q_{md}^{-1}/Q_{mb}^{-1}$ 与塑性应变 $\epsilon_p$ 的关系

### 3 分析和讨论

在测量内耗的切应力作用下,试样产生弹性应变 $\epsilon_0$ 和晶界滑动引起的滞弹性应变 $\epsilon_{an}$ ,弛豫强度为<sup>[2]</sup>

$$\Delta = (M_u - M_r)/M_R = \epsilon_{an}/\epsilon_0 \quad (2)$$

式中 $M_u$ 和 $M_r$ 是未弛豫和已弛豫模量.滞弹性

应变 $\epsilon_{an}$ 与晶界平均滑动距离 $X$ 的关系为

$$\epsilon_{an} = M_X/d \quad (3)$$

式中, $d$ 是晶粒尺寸, $M$ 是取向因子.

根据(2)和(3)式,内耗峰降低意味着 $X$ 降低.形变前,退火后的晶界相对平滑,因而 $X$ 较大.形变过程引入的大量位错与晶界交截,这将阻碍晶界滑动,导致 $X$ 减小,内耗峰降低.

假设滞弹性滑动距离  $X$  正比于位错间距  $1/\rho^{1/2}$ ,  $\rho$  是位错密度, 则

$$X = K/\rho^{1/2} \quad (4)$$

式中, 系数  $K$  与位错构型有关. 位错密度  $\rho$  与应变  $\epsilon_p$  的关系可用经验关系式表示:

$$\rho = \rho_0(1 + C\epsilon_p^n) \quad (5)$$

式中  $\rho_0$  是形变前位错密度, 常数  $C$  和  $n$  与形变条件有关.

根据 (3) ~ (5) 式, 形变前后的滞弹性应变  $\epsilon_b$  和  $\epsilon_d$  分别为

$$\epsilon_b = \frac{MK}{\rho_0^{1/2}d}, \quad \epsilon_d = \frac{MK'}{\rho^{1/2}d} \quad (6)$$

将 (5) 和 (6) 式代入 (2) 式, 有

$$\frac{\Delta_d}{\Delta_b} = \frac{K'}{K(1 + C\epsilon_p^n)^{1/2}} \quad (7)$$

由于峰宽随应变变化较小, 因而峰高之比  $Q_{md}^{-1}/Q_{mb}^{-1}$  近似等于弛豫强度之比. 从 (7) 式可见, 随着应变  $\epsilon_p$  的增加, 弛豫强度即峰高

降低, 这与实验结果相符. 不同形变模式下在相同应变时, 内耗峰降低程度的差异, 可能与位错密度 (常数  $C$  和  $n$ ) 和构型 (系数  $K'$ ) 有关, 其具体机制有待进一步研究.

Mori 等<sup>[5]</sup>指出, 晶界滑动距离的减小将使弛豫强度和弛豫时间减小相同的因子. 随着应变  $\epsilon_p$  的增加, 弛豫强度降低, 弛豫时间也应降低, 从而导致峰向低温移动, 正如图 2 所示.

#### 参考文献:

- [1] METALL T S K. Mater Trans, 1999, A30:2267.
- [2] NOWICK A S, BERRY B S. Anelastic relaxation in crystalline solids[M]. New York: Academic Press Inc, 1972.
- [3] 方前锋. 金属学报, 1996, 32:565.
- [4] BLUM W, ZHU Q, MERKEL R, et al. Z Metallkd, 1996, 8:1.
- [5] MORI T, KODA M, MONZEN R, et al. Acta Metall, 1983, 31:275.