

含宏观石墨颗粒材料界面 位错形态及内耗特征的研究*

魏健宁, 韩福生, 高俊昌

(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)

摘 要: 利用渗流技术在工业纯铝中引入宏观尺度的石墨颗粒, 研究该宏观缺陷界面附近的微观缺陷(位错)形态及对材料内耗的影响. 结果表明, 在连续升温测量过程中, 大约在 260 °C 附近观察到了一个内耗峰, 其峰位与频率无关, 峰高与测量频率的倒数和升温速率近似成直线关系, 且表现出正常振幅效应. 而在没有宏观石墨颗粒增强的工业纯铝样品中无峰出现. 通过透射电子显微镜(TEM)观察, 发现在石墨颗粒/基体界面附近存在高密度位错. 根据内耗实验结果和微观结构特征的观察, 认为该内耗峰的机制与基体和增强物之间因热膨胀系数的不同而诱发的高密度位错以及位错在外加应力作用下的运动有关.

关键词: 金属基复合材料; 内耗; 位错; 热应力

中图分类号: TG111.2; TG115.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) S1-0214-03

在金属基复合材料中由于金属基体和增强物之间热膨胀系数存在较大差别, 使得材料在制备过程中会产生较大的热应变, 从而在颗粒/基体界面附近产生高密度位错和残余内应力. 本文研究了包含宏观石墨颗粒的工业纯铝材料的温度-内耗谱, 在连续升温测量过程中约在 260 °C 附近观察到一个低频内耗峰. 在透射电子显微镜下观察, 发现在颗粒/基体界面附近存在高密度的位错. 根据内耗测量、微观观察和理论分析, 认为该内耗峰的产生与基体/石墨颗粒界面附近高密度位错以及位错在外加应力作用下的运动有关. 本文的基本目的是提出在金属基复合材料中位错产生的源和位错对金属基复合材料阻尼行为的影响, 以便于对高阻尼金属基复合材料的设计提供理论和实验依据.

1 实 验

本文所用试样采用渗流法工艺制备. 基体为工业纯铝, 石墨颗粒平均直径约 1 mm, 材料中石墨颗粒所占体积分数为 68% 和 88%. 在多功能内耗仪上进行试样内耗和相对动力学模量的测量, 条形试样尺寸为 2.5 mm × 3.1 mm × 70.0 mm. 透射电镜样品采用标准金相学技术进行减薄和腐蚀.

2 结果与讨论

图 1 所示分别为含有和不含石墨颗粒样品的温度内耗谱. 对于含石墨颗粒的样品, 在约 260 °C 出现一内耗峰, 对应的内耗峰处模量出现明显下跌, 该内耗峰现象与 Parrini 等人在复合材料中所观察到的现象非常接近^[1]. 而不含石墨颗粒样品的内耗只是随着温度的增加而缓慢增加, 没有内耗峰出现. 从图 2 可以看出, 内耗峰的高度随升温速率增加而升高, 峰位则随着升温速率的增加而向高温移动.

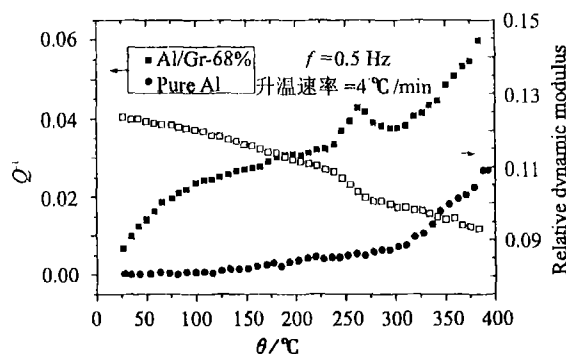


图 1 含有和不含宏观石墨颗粒样品的温度-内耗谱

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59971049); 内耗与固体缺陷开放研究实验室资助项目 (99-5)

收稿日期: 2000-12-30; 作者简介: 魏健宁 (1973-), 男, 博士研究生.

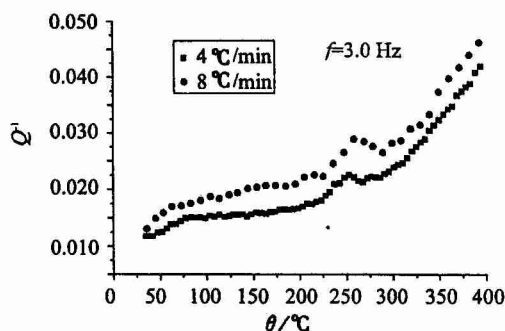


图2 含宏观石墨颗粒样品升温速率对内耗峰的影响

图3表明峰位不随频率变化, 即该峰为非弛豫性的, 峰的高度随测量频率增加而下降. 图4所示分别为块状石墨、致密铝及铝/石墨复合体的内耗-温度曲线. 可以看出, 组成成分对混合物的内耗有重要影响, 特别是在我们实验研究中发现的石墨低温内耗峰对材料的内耗有强烈影响. 在内耗值较小的工业纯铝中引入大量石墨颗粒后, 其内耗显著增加. 复合体的内耗值大于基体和石墨内耗值之和, 显然铝/石墨颗粒界面对材料整体内耗有较大的贡献. 另外, 由于块状石墨和致密铝的内耗在 260 °C 附近均没有峰出现,

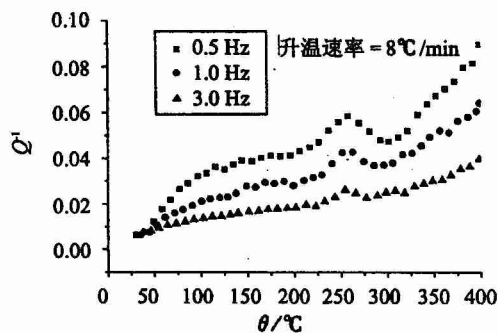


图3 含宏观石墨颗粒样品中内耗峰的频率依赖性

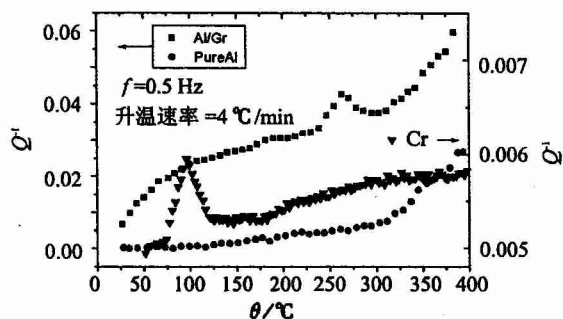


图4 块状石墨、致密铝及铝/石墨颗粒复合体内耗之间的相互关系

说明该处的内耗峰源于铝/石墨颗粒界面. 在透射电子显微镜下观察, 发现界面附近存在多种位错

组态, 包括长位错和高密度位错网 (如图5所示).

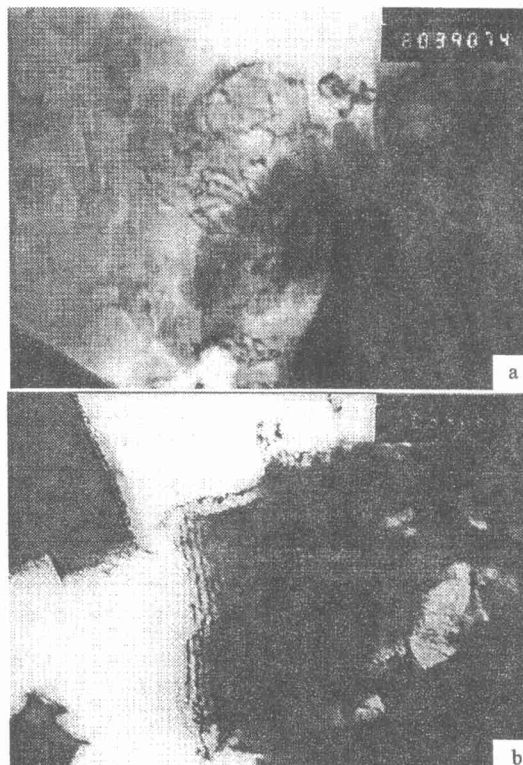


图5 铝/石墨颗粒界面附近的高密度位错
a 位错网; b 长位错

样品在渗流法制备过程中, 由于基体和颗粒间热膨胀系数的不同而引起热应变为 $\epsilon = \Delta\alpha\Delta T$ [2], 足以使石墨颗粒附近的基体发生塑性变形, 即产生位错. 式中, $\Delta\alpha$ 为基体与石墨的热膨胀系数之差, ΔT 为温度的变化量.

在位错段被钉扎的材料中, 内耗的表达式为: $IF_t = IF_{is} + IF_{ad}$. IF_t 为材料的内耗, IF_{is} 表示在没有温度变化、热应力作用下, 位错在其平衡位置振动而对内耗的贡献, IF_{ad} 为在有温度变化、热应力作用下, 大范围位错运动迭加在由内耗仪引起的振荡运动上的部分. 材料的塑性变形速率: $\dot{\epsilon}_{pl}^{th} = \rho bu + \dot{\rho} bu = \Delta\alpha \frac{dT}{dt}$, ρ 为位错密度, b 为伯格斯矢量, u 为位错平均位移, dT/dt 为变温速率. 同相变内耗考虑相似, 假定非弹性应变增量正比于所加应力, 于是得到 [3,4]

$$IF_{ad} = k\Delta\alpha\sigma_0^2 \frac{dT}{dt} \frac{1}{f} \frac{1}{4\pi w_{el}}$$

k 、 σ_0 为常数, w_{el} 为单位体积的最大弹性储能. 从此关系式可以看出, 如果内耗峰产生于位错机制, 则该内耗峰应与测量频率成反比、与升温速

率成正比. 根据上述可知, 本文试验结果与上式吻合得很好. 结合电镜观察结果, 可以认为界面处形成的高密度位错对材料整体内耗的增加起到了重要的作用. 大约在材料熔点的 0.4 倍处, 即 260 °C 附近, 位错由于热激活被开动使得内耗增加, 随着温度的继续上升, 位错密度逐渐减小且绝大部分热应力被弛豫, 使得内耗减小, 从而出现了内耗峰.

位错阻尼的一个重要特征是应变振幅依赖性, 图 6 表明含石墨颗粒材料具有正常振幅效应. 另外, 从前面的方程中可以得到塑性变形与内耗的关系为: $\epsilon_{pl}^h \propto IF_{ad}$, 即随石墨含量增加, 位错、热应力以及界面面积均增加, 从图 7 可看出, 随着宏观石墨颗粒体积分数的增加内耗明显增加. 综合以上分析, 可以得出此内耗峰的机制与基体和石墨颗粒之间因热膨胀系数不同而诱发的高密度位错以及位错在外加应力作用下的运动有关.

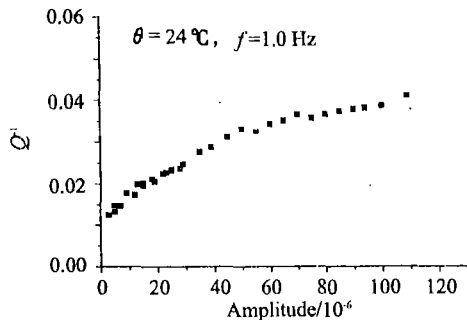


图 6 含宏观石墨颗粒样品中内耗 - 振幅关系图

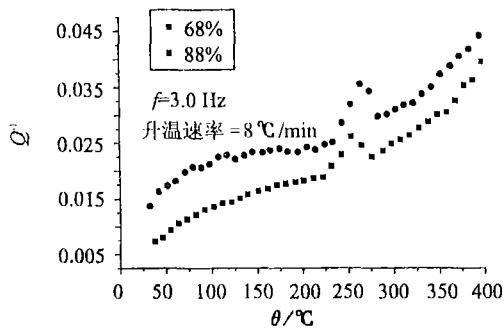


图 7 宏观石墨颗粒体积分数对内耗峰的影响

参考文献:

- [1] PARRINI L, SCHALLER R. Acta Mater, 1996, 44: 4881.
- [2] TAYA M, ARSENAULT R J. Metal matrix composites thermomechanical behavior[M]. Oxford: Pergamon Press, 1989. 1.
- [3] PARRINI L. Characterization of metal matrix composites by mechanical spectroscopy[D]. Switzerland: Lausanne, 1995.
- [4] DELORME J, GOBIN P. Metaux corrosion-industries [M]. 1973. 573 - 574; 3 - 32.