

宏观体缺陷对材料阻尼行为的影响*

韩福生, 马中华, 魏健宁, 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: 利用渗流法在 ZA27 合金中分别引入线尺寸为毫米量级的宏观孔洞和石墨颗粒, 对比研究了该两种缺陷对材料阻尼行为的影响. 实验表明, 引入孔洞对 ZA27 合金的阻尼本领影响很小, 而引入宏观尺度的石墨颗粒, 其低温内耗变化不大, 高温内耗峰明显下降. 据初步分析认为, 在 ZA27 合金连续升温测量过程中出现的内耗峰为一相变峰, 石墨颗粒的引入, 可能会对该相变过程从而对内耗峰的产生起到一定的抑制作用.

关键词: 阻尼材料; 内耗; 缺陷

中图分类号: TG111.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) S1-0217-03

组织中的微观缺陷在材料阻尼响应中具有重要作用已是公认的事实, 而且在此基础上已经发展了多种系列的高阻尼金属材料和金属基复合材料. 但是, 由于阻尼增强相和可供利用的阻尼机制有限, 这些材料的阻尼性能仍处于较低的水平. 对金属基复合材料的研究发现, 其阻尼性能正比于增强物的体积含量, 而且弱结合界面比强结合界面有更高的阻尼性能. 受这一思想启发, 近年来产生了阻尼性能有较大提高的宏观意义上的金属基复合材料, 即阻尼增强相已达到宏观的尺度, 如金属多孔材料(或金属泡沫材料)和颗粒增强复合材料. 对这些材料的初步测试显示, 其阻尼性能(内耗值)比基体金属材料提高了近一个量级^[1,2]. 这一研究成果对于发展具有一定结构性能的高阻尼金属材料具有一定的借鉴意义, 引起了研究者和相关应用部门的关注. 但是, 对这类材料的阻尼特征及其机制现在还了解甚少, 譬如, 基体材料和宏观体缺陷类型(孔洞或颗粒)、数量、尺寸等对材料阻尼性能有何影响? 这些新阻尼源的引入, 与材料原有阻尼机制的交互作用如何等等. 为此, 本文以高阻尼的 ZA27 合金为基体, 分别引入两种模量差异很大的阻尼增强相: 孔洞及石墨颗粒. 通过内耗测试和研究, 以对上述问题有一个初步的认识.

1 实验方法

1.1 样品制备

样品制备采用渗流法, 在本实验室自行研制

的渗流装置上进行. 其基本过程为: 先取一定粒度的颗粒材料在模具中压实, 制成预制块, 然后将熔炼好的金属液浇注到模具中, 并施加一定的压力驱使液态金属渗入到预制块孔隙中. 待金属液凝固后, 得到金属-预制块颗粒复合材料. 制备多孔材料时, 预制块采用可溶性盐颗粒, 待金属凝固后, 用水将盐去除, 即得连通型多孔材料. 用石墨颗粒取代可溶性盐, 即可制备出宏观颗粒复合材料. 多孔材料孔隙率变化范围为 50%~75%, 宏观颗粒复合材料石墨颗粒体积分数为 19%~94%, 孔径和粒径均为 (1 ± 0.5) mm. 作为对比实验的致密试样, 在渗流制备试样块的顶部致密部分切取, 即保证致密试样和含宏观缺陷试样的冷却速度接近.

1.2 内耗测试

试样的内耗测量在本实验室自行设计的多功能内耗仪上完成. 其结果和测量原理请参见文献[1]. 为消除铸造应力的影响, 在内耗测试前, 将各试样施以 400 °C 保温 2 h 的退火处理. 实验参数分别为: 样品尺寸为 3 mm × 4 mm × 70 mm, 振动频率 0.5~3.0 Hz, 试样表面上最大应变振幅 1.0×10^{-5} , 升降温速率 2 °C/min. 每种样品各切取 4 个进行测试, 然后取平均值.

2 实验结果

2.1 孔洞对材料阻尼性能的影响

从图 1a 可以看出, ZA27 合金的内耗几乎不随孔隙率变化, 几条曲线基本重合. 在 300 °C 附

* 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: 韩福生 (1955-), 男, 研究员.

近出现了一个内耗峰. 由于该峰的位置及高度均不随孔隙率变化, 显然与孔洞无关. 根据 Zn-Al 合金相图^[3]及文献^[4]等的研究结果知, 此峰应为相变峰. 此后, 随温度升高, 内耗有进一步增加的趋势. 试样模量总体上随温度升高而软化, 在相应于内耗峰的温度出现软化低谷. 孔隙率对模量有明显影响, 孔隙率增加, 模量下降.

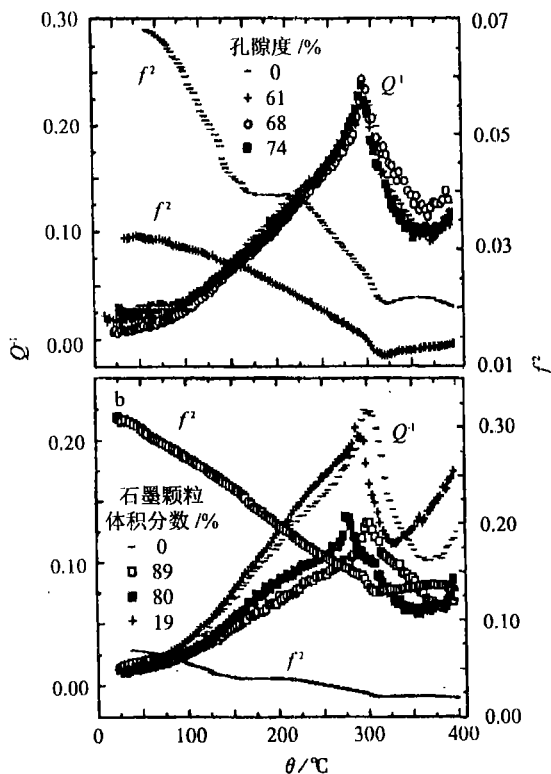


图1 孔洞 (a) 和石墨颗粒体积分数 (b) 对材料阻尼行为的影响

测量频率: 1.004 5 Hz, 应变振幅: 10^{-5}

2.2 石墨颗粒对材料阻尼性能的影响

大量研究表明, 在阻尼较小的金属材料 (如金属 Al 或其合金) 中引入高本征阻尼相 (如石墨颗粒或纤维), 可以在一定程度上提高材料的阻尼本领^[5,6]. 但在高阻尼材料中引入高本征阻尼相, 是否依然会有该效果, 目前尚未有报道.

对于 ZA27/石墨颗粒复合材料, 宏观石墨颗粒并未引起材料内耗增大, 即材料低温背景内耗 ($<100^\circ\text{C}$) 基本保持不变, 而相变峰高度却显著下降. 材料模量随石墨体积分数增加而硬化 (图 1b).

3 分析与讨论

3.1 孔洞对材料阻尼行为的影响机制

文献^[1]对泡沫 Al 及其合金的低频阻尼行

为进行了较为详细的考察, 认为多孔 Al 除了孔洞与基体之间所形成的界面外, 其内部还存在其它大量微观的 (主要是位错) 和宏观的 (较小的孔洞和裂纹) 缺陷, 其组织状态、缺陷分布极不均匀, 因此当外力作用于材料上时, 将产生很不均匀的应变, 特别是在孔洞界面或裂纹附近, 其应变情况更为复杂, 从而引起缺陷区域内原子重排, 缺陷区的这种响应是粘滞性的, 因而引起粘弹性应变^[2], 造成外加能量的损耗, 致使材料的阻尼增加. 由于金属 Al 的本征阻尼很小, 因此这种由孔洞引起的综合缺陷效应就显得较为明显. 我们知道, ZA27 合金是一种高阻尼材料. 如前述, 本研究的最初设想是试图在高阻尼基体材料中引入一定数量的具有高本征阻尼的宏观缺陷, 通过不同阻尼机制的叠加以增强其阻尼性能, 但上述结果表明, 引入孔洞缺陷后, ZA27 合金的阻尼行为并没有发生明显的变化.

ZA27 合金的平衡组织中有 2 个相, 一个是 fcc 结构的 α 相, 一个是 hcp 结构的 β 相, 当切应力跨过这 2 个相的界面时, 两相界面将产生粘性或塑性流动, 引起内耗^[6], 即相界为阻尼源. 由于孔洞尺度为毫米量级, 其总比表面积相对于微米量级 (约 $10\ \mu\text{m}$) 的 ZA27 合金晶粒来说要小得多, 因此孔洞对材料整体阻尼性能的贡献要远远小于相界, 故 ZA27 合金的内耗并未因孔洞的引入发生明显的变化.

3.2 石墨颗粒对材料阻尼行为的影响机制

对于颗粒增强金属基复合材料, 可以用简单混合法则 (ROM) 分析其阻尼性能:

$$\eta_c = \eta_p V_p + \eta_m (1 - V_p) \quad (1)$$

即: 复合材料整体阻尼本领 η_c 正比于增强相阻尼本领 η_p 与其体积分数 V_p 的乘积, 正比于基体阻尼本领 η_m 与其体积分数 $(1 - V_p)$ 的乘积.

根据文献^[4], 石墨的室温内耗值在 0.011 ~ 0.015 之间, 通常取其平均值 0.013. 对于 ZA27 合金来说, 本实验所测低温内耗 ($<100^\circ\text{C}$) 值为 0.012 ~ 0.022 (图 1), 高于石墨的本征内耗. 按照式 (1), 加入石墨后, 材料的阻尼本领应该下降. 但实验结果表明, 其内耗并没有明显下降, 相反, 如果石墨体积分数 $<60\%$, 其内耗还略有提高. 这与按照 ROM 计算的结果是有出入的 (按照 ROM, 整体材料的低温内耗 = 0.018 ~ 0.015, 低于 ZA27 合金). 同样, 在高温条件下, 复合材料的峰值内耗也高于 ROM 的计

算结果. 例如, 当石墨体积分数为 19% ~ 69% 时, 根据 (1) 式, 复合材料的内耗应为 0.182 ~ 0.079 (根据文献 [2], 石墨的内耗几乎不随温度变化, 因此计算时仍然采用石墨的低温内耗值计算), 但从图 2 知, 复合材料的峰值内耗为 0.200 ~ 0.125, 最大内耗高达 0.225, 高于理论计算值. 由于内耗测试的数据分散性较大, 严格的说, 这样的计算仅具有定性的意义, 但可以说明, 对于宏观意义上的复合材料, 简单地应用 ROM 对材料阻尼性能进行定量分析, 可能会得出错误的结论. 图 2 也证明用 ROM 计算宏观石墨颗粒/ZA27 复合材料时得出的误差, 计算时石墨的内耗值取 0.013^[8].

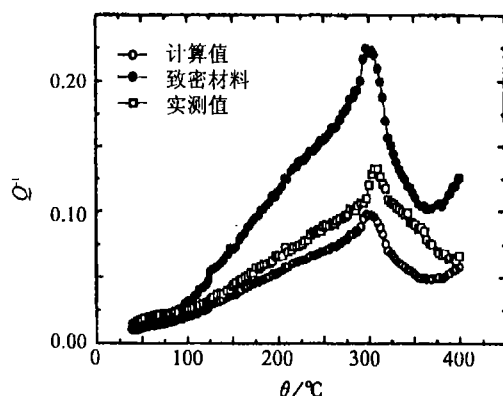


图 2 ZA27/G_p 复合材料内耗的计算与实测值对比

测量频率: 1.004 5 Hz; 应变振幅: 10^{-5}
石墨颗粒体积分数为 69%

ZA27 合金的共析相变是典型的共析扩散型相变. 根据一级相变内耗的普遍规律, 变温测量时, 相变内耗正比于振动一周的相转变量, 即 (Delorme 模型)

$$\delta = \frac{\Delta W}{2W} = \frac{G}{\sigma_0^2} \int_0^{2\pi} \sigma \epsilon_p = \frac{A}{2} \left(\frac{dM}{dT} \cdot \frac{T}{f} \right) \quad (2)$$

式中, ϵ_p 为非弹性应变, dM 为温度变化时 dT 所产生的新相的体积分数增量, σ 为外加应力, G 为切变模量, A 为材料常数, δ 为内耗 ($\sigma = \pi Q^{-1}$), f 为振动频率. 图 3 表明, 本文测试结果符合 Delorme 模型, 即 ZA27 合金相变内耗峰值 δ 正比于 $\frac{T}{f}$, 同时也进一步证明了在 ZA27 合金内耗曲线上所出现的峰为相变峰.

4 结 论

对于本征阻尼较大的材料, 如 ZA27 合金,

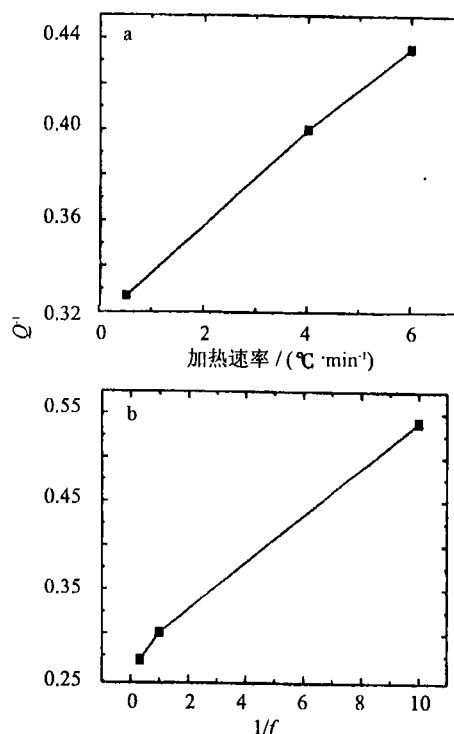


图 3 ZA27 合金峰值内耗与加热速率 (a) 和频率的倒数 (b) 的关系

测量频率为 1.004 5 Hz; 应变振幅为 10^{-5} ;
石墨颗粒体积分数为 69%;

宏观孔洞对其阻尼性能没有明显影响, 其原因可能是孔洞对材料阻尼的贡献要远远小于相界. 引入宏观石墨颗粒也没有观察到因阻尼机制叠加所产生的阻尼增强作用, 反而因石墨的抑制, 使原有的相变峰高度下降. 对于宏观意义上的复合材料, 简单地应用混合法则定量分析材料的整体阻尼性能是不合适的.

参考文献:

- [1] HAN F S, ZHE Z G, LIU C S. Chinese Phys Lett, 1998, 15 (1): 52.
- [2] ZHANG J, PEREZ R, LAVERNIA E J. Acta metall Mater, 1994, 42(2): 395.
- [3] ERIC A. BRANDS. Smithells metals reference book [M]. Sixth ed. Butterworth & Co. Ltd, 1983. 11 - 49.
- [4] KAWABE H, KUWAHARA K. J De Physique, 1981, 42 (10): C5 - 941.
- [5] LAVERNAI E J, PEREZ R J, ZHANG J. Metall Mater Trans, 1995, 26A: 2803.
- [6] ZHANG J, PEREZ R J, WONG C R. Mater Sci Eng, 1994, R13: 325.
- [7] 曾汉民, 等. 高技术新材料要览 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 149.
- [8] NISHIYAMA K, YAMANKA M, UMEKAWA S. J Mater Sci Lett, 1990, 9: 526.