

文章编号:1671-6833(2004)02-0079-05

6061Al /SiCp 淬火后残余应力对阻尼性能影响的模拟

顾金海¹, 朱 杰², 于 涛³, 王西科⁴, 张小农¹, 顾明元¹

(1. 上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030; 2. 濮阳职业技术学院, 河南 濮阳 457000; 3. 中原油田分公司采油工程技术研究院电潜泵研究所, 河南 濮阳 457000; 4. 郑州大学材料研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要: 采用喷射共沉积方法制备了 6061Al /SiCp 金属基复合材料(MMC), 利用有限元方法对其淬火态下的热残余应力和阻尼性能进行了模拟, 计算结果表明, 淬火态试样的基体材料中存在显著的残余拉应力, 而且水淬态试样要高于干冰淬火态试样, 根据位错阻尼机制, 基体中的拉伸内应力将有助于位错的开动, 从而降低了临界应变振幅的大小, 提高了应变振幅相关效应, 表现为内耗值有所改善. 最后, 实验结果再次验证了上述理论分析.

关键词: 6061Al /SiCp 复合材料; 残余应力; 阻尼性能; 有限元

中图分类号: TG 113.22⁺6; TB 331 文献标识码: A

0 引言

金属基复合材料不仅具有较高的比强度、比模量, 还有较好的机械阻尼性能, 是目前最具有发展前途的结构-功能型阻尼材料之一, 在航天、航空、汽车及先进武器系统中有着广泛的应用前景^[1,2]. 阻尼本领是材料的一种性质, 它能够将材料的机械振动能量通过内部机制不可逆地转变为其它形式的能量(通常是热能), 因此在要求减振降噪的场合阻尼材料得到了广泛的应用. 目前已有一些文献对 Al 基复合材料的阻尼性能进行了报道^[3~9], 然而他们的研究大多集中在影响阻尼性能的外部参量和对内耗峰的产生机制上, 而对具体服役条件和复杂应力状态下工程阻尼材料的应用缺少更清晰的认识. 随着计算材料科学的发展, 使这项工作成为了可能. D. Xu^[10] 和 J. Whang^[11] 等人分别对循环载荷作用下的塑性能损耗和室温阻尼性能进行了模拟, 然而他们的模型并没有考虑到实际热处理过程中所产生的复杂应力状态及其对阻尼性能的影响. 为此, 本文将以工程应用较为广泛的 6061Al /SiCp 复合材料为对象, 采用一种更接近实际颗粒分布的多颗粒模型, 首先对材料在淬火过程中所产生的内应力进行了动态模拟, 然后将此应力引入到后续的阻尼性能分

析中, 并结合实验结果在理论上作了进一步阐述.

1 计算模型

1.1 试样制备及阻尼性能测试

首先, 采用喷射共沉积方法制备了 Φ180 mm × 220 mm 的 6061Al /SiCp MMC 锭坯, 然后在 400 °C 温度下将锭坯热挤压, 制成 Φ18 mm 棒材, 再在棒材中取阻尼试样(35 mm × 5 mm × 1 mm)和金相试样. 热处理分两种制度进行: ①520 °C 固溶处理 1 h, 室温水淬后于 170 °C 时效 8 h(简称水淬). ②520 °C 固溶处理 1 h, 干冰(−60 °C)淬火后于 170 °C 时效 8 h(简称干冰淬).

金相试样在 Olympus B071 型金相显微镜上观察, 并通过 WD 高清晰度金相分析系统进行定量分析. 阻尼性能的测量采用动态热机械分析仪(DMA 2980 型), 形变方式为单悬臂. 测试了试样应变振幅 ε 在 10^{−6}~5 × 10^{−3} (f = 1 Hz) 范围内的内耗值.

1.2 阻尼模拟计算的原理

理想弹性材料的应力 σ 与应变 ε 之间存在单值函数关系, 即应力与应变同位相, 而实际的固体材料却往往表现出不同程度的非弹性行为, 引起应变落后于应力的现象. 这样, 在循环载荷的作用下, 应力-应变曲线上就会产生一滞后回线. 如图

收稿日期:2004-02-05; 修订日期:2003-03-20

作者简介:顾金海(1978-), 男, 江苏省靖江市人, 上海交通大学博士研究生, 主要从事金属基复合材料机械与阻尼性能一体化研究.

1 所示),引起机械振动能的消耗.滞后环的面积就代表了循环一次材料内部所消耗的能量 (ΔW),它与材料的最大储能 (W) 的比值称为比阻尼能力 Ψ ,表达式如下:

$$\Psi=\frac{\Delta W}{W} \tag{1}$$

式中:

$$\Delta W=\oint \sigma d \epsilon \tag{2}$$

$$W=\int_0^{\epsilon_0} \sigma d \epsilon \tag{3}$$

表征材料阻尼性能有很多参数,在科学研究中倒质量系数 Q^{-1} 、损失正切角 $\tan \phi$ 常被采用,在衰减能较小的场合,它和比阻尼能力具有如下的换算的关系^[13]:

$$Q^{-1}=\tan \phi=\frac{\Psi}{2 \pi} \tag{4}$$

由于存在上述关系式,对材料阻尼性能的模拟就可通过给材料施加循环载荷的办法,通过计算迟滞环的面积来得到材料的阻尼值.

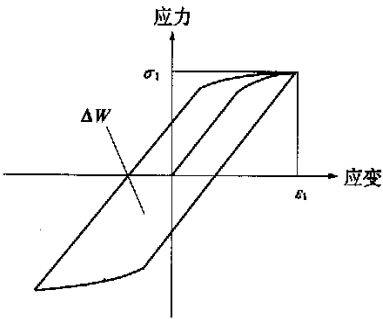


图 1 计算 ΔW 的示意图

Fig.1 Sketch of the calculation for ΔW

1.3 计算模型及有限元结果的后处理

1.3.1 淬火过程的模拟

为了引入有限元的计算,首先假设颗粒与基体的界面在加载过程中始终保持良好接触,无脱粘和界面滑移发生.为了更真实地描述材料内部的颗粒分布,这里在金相照片上采用图象编辑的技术直接建立多颗粒模型.图 2 是试样划分网格后的情况,可见其中的颗粒分布和图 3 所示的金相照片是极为相似的.随后的有限元计算得到的颗粒体积分数 (12%) 与定量金相的结果相符再次说明了这一点.在淬火应力的模拟过程中,我们假设两种淬火介质具有相同的冷却速度,忽略冷却速度对材料性能的影响,同时,为了简化计算,在模拟温度区间内采用单一的材料常数.表 1 是模拟过程中所用到的材料参量,这是结合文献^[13, 14]综合得到的.由于淬火过程中更加接近平面应

力状态,所以淬火过程的模拟采用八节点四边形等参元.边界条件^[13]如下:左边界 $u_x=0$,下边界 $u_y=0$,上边界所有节点有一共同 u_y ,右边界所有节点有一共同 u_x , u 指位移.

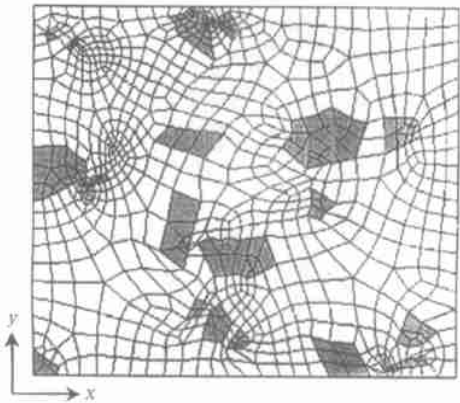


图 2 试样的网格划分情况

Fig.2 Sketch of the grid meshing of sample

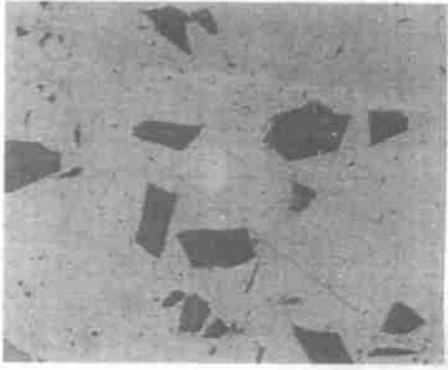


图 3 水淬试样的金相照片 $\times 1000$

Fig.3 Optical photograph of water quenched sample

表 1 FEM 计算中所用的材料参量

Tab.1 Material parameters used in FEM calculation

材料	E/GPa	γ	σ_s/MPa	E_T/GPa	$\alpha/(10^{-6}\text{K}^{-1})$
6061Al	68.3	0.3	55.2	2.08	23.4
SiC	442	0.19	—	—	3.3

淬火过程中,颗粒内的 x 方向上(y 方向类同)的应力通过下式计算:

$$\sigma_{xp}=\sum_{i=1}^{N_p} \sigma_{xi} V_i / V_p \tag{5}$$

式中: σ_{xi} 和 V_i 分别代表颗粒第 i 个单元的 x 方向上的平均应力和体积; V_p 是颗粒的总体积; N_p 则代表颗粒的总单元数.

同理,基体 x 方向上(y 方向类同)的应力可通过下式计算

$$\sigma_{xm}=\sum_{i=1}^{N_m} \sigma_{xi} V_i / V_m \tag{6}$$

式中: σ_{xi} 和 V_i 分别代表基体第 i 个单元的 x 方向上的平均应力和体积; V_m 是基体的总体积; N_m 则

代表基体单元的总数目。

1.3.2 室温阻尼性能的模拟

由于影响复合材料阻尼性能的因素非常多,但若只考虑室温时的情况,问题会相对简单得多.计算时,我们将室温下材料的阻尼性能简化成了两部分:一是由于颗粒增强物的加入所带来的颗粒本征阻尼性能的影响,这可以通过混合法则计算得出;二是由于增强颗粒与基体弹性模量之间存在显著差别,变形错配会在近界面处产生塑性能的消耗.这部分阻尼性能的模拟依据公式 1) 的原理,沿 y 轴施加一循环载荷,载荷的大小以应变振幅来进行表征,通过计算 ΔW 和 W 的比值获得.由于在描述对称模型的变形问题时平面单元会更加合适^[14],所以这里采用平面单元模拟材料的阻尼性能,用到的室温组元材料 6061Al 和 5C 的阻尼值分别为 3.6×10^{-3} 和 4.0×10^{-4} ^[3~9].另外,为了考察残余应力对阻尼性能的影响,在阻尼性能的模拟之前,引入了上文中淬火后得到的复杂状态的残余应力.以上所有模拟均在 ANSYS 上采用 APDL 语言编程实现。

2 实验结果与讨论

2.1 淬火应力的模拟结果与分析

图 4 为干冰淬火过程中基体内的有限元应力模拟,在 x 方向和 y 方向都经历了相似的过程.由于本研究中设定固溶温度(520 °C)为无应力的参考温度,而 6061Al 基体的收缩远高于 5C 增强相,所以从这一温度开始,随着冷却过程的进行,基体内的错配拉伸应力逐渐增加,当温度下降 70 °C 左右时,基体内的拉伸残余应力达到了它的屈服强度,此后热残余应力以一较低的加工硬化系数增加,这个过程一直持续到干冰介质的温度.需加以注意的是,本文中采用的多颗粒模型由于存在多个尖角效应,所以达到屈服极限的时间可能会比单颗粒的模型稍有提前.从介质温度向时效温度的升温过程中,基体内的残余应力首先经历了一个弹性卸载过程,然后达到了反向屈服极限,应力逐渐增加至压缩时的最大值,最后从时效温度到室温的冷却过程又使基体经历了弹性回复,从而得到了室温下的残余应力值.这种动态模拟的结果和文献[13,16]所预测的低温淬火内应力的变化趋势是很吻合的.表 2 列出了水淬和干冰淬火态基体和增强颗粒内的残余应力值。

2.2 室温阻尼性能的模拟与分析

通过施加一循环载荷得到的应力应变滞后环

显示在图 5 中。

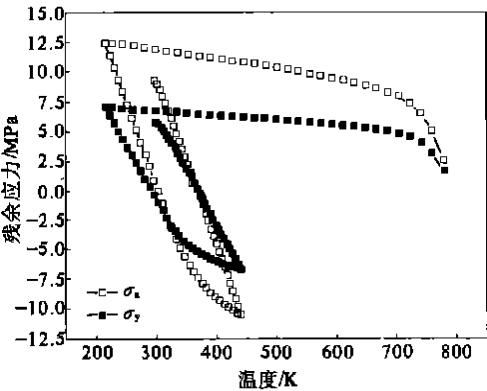


图 4 干冰淬火过程中基体内的应力

Fig. 4 Stress of matrix during ice quenching

表 2 平均残余应力计算结果

Tab. 2 Calculated average values of residual stress MPa

状态	6061Al		5C	
	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x
水淬试样	32.4	20.5	-239.5	-150.3
干冰淬火态试样	19.9	12.0	-147.4	-88.4

由图 5 可见,随着应变幅的增加,滞后环的面积逐渐增大,表明材料内部消耗的塑性能增加.图 6 是根据公式 1) ~ (3) 计算得到的 3 种状态材料的内耗—应变幅曲线,可见当应变振幅 ϵ 大于 4×10^{-4} 以上时,复合材料的阻尼性能强烈地依赖于应变振幅.以前的研究表明,低温下的位错阻尼和高温下的界面阻尼是该种材料的主要阻尼机制,由于本实验考察的是室温阻尼性能,因此位错阻尼机制将起着主要的作用.该种机制可由 K—G—L 模型加以很好地说明.即外界振动引起位错移动,发生从弱钉扎点(如溶质原子、空位等)上出现雪崩式脱钉,然后在强钉扎点(位错网节点、第二相等)周围形成位错环,由此引起应力松弛和机械振动能的消耗.根据 G—L 理论,在低频范围(kHz 以下),位错阻尼可通过下式计算^[17,18]:

$$Q^{-1} = Q_a^{-1} + Q_f^{-1} \tag{7}$$

$$Q_a^{-1} = C_1 \frac{\rho^2}{\epsilon_0} \exp\left(-\frac{C_2}{\epsilon_0}\right) \tag{8}$$

$$Q_f^{-1} = C_3 f^2 / b^2 \tag{9}$$

式中: C_1, C_2 和 C_3 是物理常数; ρ, b 分别为位错密度和柏氏矢量; ϵ_0 和 f 分别是应变幅和频率.在低的应变振幅下,位错阻尼主要由频率指数关系部分 Q_f^{-1} 产生,而当超过某一临界应变振幅时,应变的振幅指数关系部分 Q_a^{-1} 变得重要,式(8)表明 $\ln(Q_a^{-1})$ 对 $1/\epsilon$ 作图将是一条直线,为此,利用图 6 中的有限元模拟结果计算了

$\ln(\sigma_a^{-1})$ 和相应 $1/\epsilon$ 的值,图 7 是计算结果,发现 $\ln(\sigma_a^{-1})$ 对 $1/\epsilon$ 确是一条非常好的直线,这表明,室温下有限元计算内耗的原理是和 G-L 理论相符的.

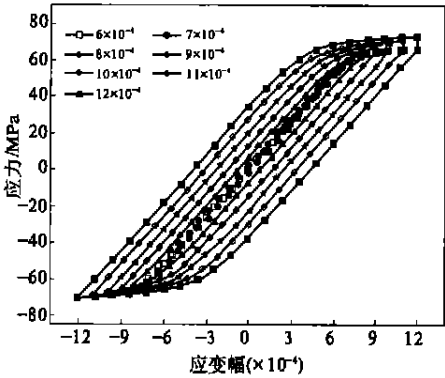


图 5 有限元计算的应力-应变滞后环
Fig. 5 Hysteresis loop in the stress vs. strain curve calculated by FEM

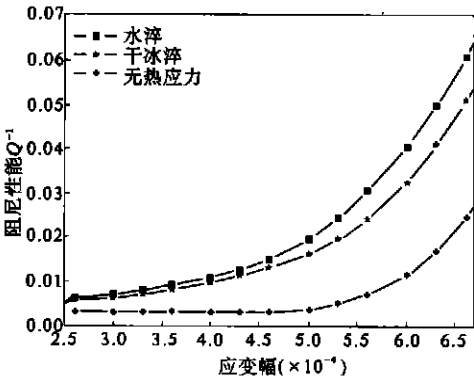


图 6 有限元计算的阻尼-应变幅曲线
Fig. 6 Damping vs. strain amplitude curve calculated by FEM

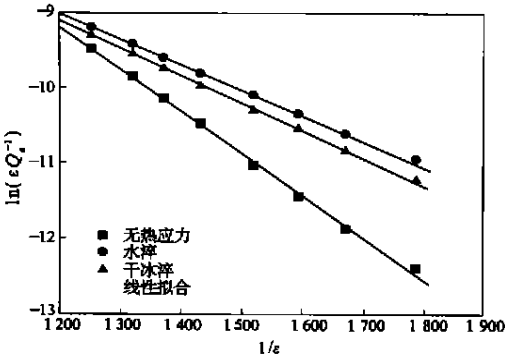


图 7 计算值 $\ln(\sigma_a^{-1})$ 与 $1/\epsilon$ 的线性拟合情况
Fig. 7 Linear fit of $\ln(\sigma_a^{-1})$ vs. $1/\epsilon$

2.3 淬火应力对阻尼性能影响的分析

从图 6 中可以看出,两种淬火态试样的阻尼性能都明显优于无应力状态的理想模型,而且水淬试样的阻尼性能要高于干冰淬火试样.表 2 中残余内应力的计算结果表明,两种淬火态试样的

基体材料中存在显著的残余拉应力,而且水淬态试样要高于干冰淬火态试样,因此,根据上述的位错阻尼机制,实际承受循环载荷时,基体中的拉伸内应力将有助于位错的开动,从而降低了临界应变振幅的大小,提高了应变振幅相关效应,表现为内耗值有所改善.图 8 是实验测得的内耗-应变振幅曲线,可以观察到和模拟计算相同的效果,再次表明基体中的残余内应力对两种淬火态试样的内耗-应变振幅相关性所起到的显著影响.另外也应该看到,实验值和模拟值之间还存在一定差距,这主要是由于建模过程中对材料性能参数、淬火过程、耗能机制以及和时间相关参数的简化处理所造成.然而这并不影响我们对在材料的内耗-应变振幅相关性研究中起重要作用的残余内应力的认识.

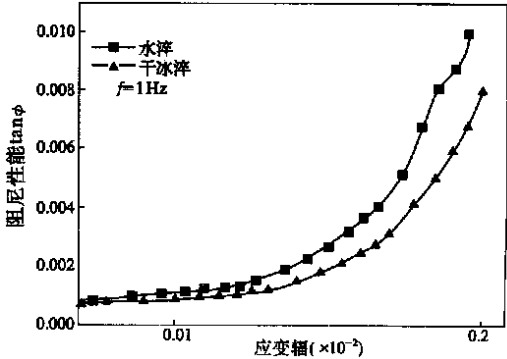


图 8 实验测得的内耗-应变幅曲线
Fig. 8 The curve of damping capacity vs. strain amplitude from experiment

3 结论

(1) 内应力的有限元模拟表明,文中两种淬火态试样的基体中存在拉伸残余应力,且水淬试样的内应力值要高于干冰淬火态试样.

(2) 内耗的计算表明,材料存在明显的应变振幅相关性,而且淬火态试样基体中的残余应力对应变振幅相关性起了显著的影响.

(3) 有限元模拟室温材料阻尼性能的原理是和 G-L 理论相适应的,模拟结果和实验结果有较好的对应.

参考文献:

[1] 张国定,赵昌正.金属基复合材料[M].上海:上海交通大学出版社,1996.
[2] 裴政,王进华,郭洪光,等.铝基复合材料的微观分析[J].兵器材料科学与工程,2001,24(1):8~11.
[3] ZHANG J, PEREZ R J, LAVENA E J. Effect of S.C and

graphite particulates on the damping behavior of metal matrix composites [J]. *Acta Metall. Mater.*, 1994, 42(2): 395~409.

[4] 顾金海,王西科,顾 敏.热处理对喷射共沉积SiCp/6061Al 复合材料内耗峰的影响[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(3): 74~78.

[5] 顾金海,王西科,顾 敏,等.热处理对 6061Al /SiCp 复合材料阻尼性能的影响[J]. *郑州工业大学学报*, 2001, 22(4): 85~89.

[6] GU Jin -hai ,ZHANG Qing -xiao ,GU Min et al .Effect of different heat treatment process on damping peak of 6061Al /SiCp MMC produced by spray codeposition[J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2002, 12(5): 960~965.

[7] GU J H,ZHANG X N,GU M Y,et al .Internal friction peak and damping mechanism in high damping 6061Al /SiCp/Gr hybrid metal matrix composite [J]. *J. Alloys Comp.*, 2004, 372(1, 2): 304~308

[8] GU J H,ZHANG X N,GU M Y .Analytical modeling of damping at micromechanical level in particulate reinforced metal matrix composites [J]. *Mater. Lett.*, 2004, 58(12 ~ 13): 1952~1955.

[9] 顾 敏,顾金海,沈宁福,等.高阻尼 6013Al /SiCp/Gr 复合材料中的内耗峰及其阻尼机制[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(1): 24~28.

[10] XU D,SCHMAUDER S .The plastic energy dissipation in metal matrix composites during cyclic loading[J]. *Comput. Mater. Sci.*, 1999, 15: 96~100.

[11] WANG J ,ZHANG Z ,YANG G .The dependence of damping capacity of PMMCs on strain amplitude [J]. *Comput. Mater. Sci.*, 2000, 18: 205~211.

[12] NOWICK A .S ,BERRY B .S .in : *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids* [M]. New York :Academic Press ,1972.

[13] LI H ,LI J B ,SUN L Z ,et al .Effect of low temperature treatment regime on residual stress state near interface in bonded SiC /6061Al compounds [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 1996, A 221: 179~186.

[14] SHI N ,WILNER B , ARSENAULT R J .An fem study of the plastic deformation process of whisker reinforced SiC /Al composites [J]. *Acta Metall. Mater.*, 1992, 40(11): 2841~2854.

[15] CHEN C R ,QIN S Y ,LI S X ,et al .Finite element analysis about effects of particle morphology on mechanical response of composites [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2000, A 278: 96~105.

[16] JIANG Chuan -hai ,WANG De -zun ,ZHANG Wen -long et al .Effect of low temperature treatment on tensile yield strength of SiCw /6061Al alloy composites [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2000, 10(2): 200~203.

[17] GRANATO A ,LUCKE K . Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. *J. Appl. Phys.*, 1956, 27(6): 583~593.

[18] GRANATO A ,LUCKE K . Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies [J]. *J. Appl. Phys.*, 1956, 27(7): 789~805.

Simulation of Effect of Residual Stress after Quenching on the Damping Capacity

GU Jin -hai ¹, ZHU Jie ², YU Tao ³, WANG Xi -ke ⁴, ZHANG Xiao -nong ¹, GU Ming -yuan ¹

(1.State Key Laboratory of Metal Matrix Composites ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai 200030,China ; 2.Puyang Vocational Technology College , Puyang 457000,China ; 3.ESP Institute ,Oil Production Engineering Technology Institute , Zhongyuan Oilfield Company , Puyang 457000,China ; 4.Research Center for Materials ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract : 6061Al /SiCp metal matrix composite (MMC) was fabricated by spray atomization and deposition firstly , then the thermal residual stress during quenching and its effect on the damping capacity of this material was simulated by using finite element method (FEM) . The computational results reveal that the residual tensile stress exists obviously in the matrix of as -quenched specimens .According to dislocation damping mechanism ,the residual tensile stress in the matrix will help activate the dislocation and decrease the critical strain amplitude ,the strain amplitude -dependency of damping will consequently be improved , and thus , the damping of composite may be improved . Finally , the experimental results verify the above mentioned analysis again .

Key words : 6061Al /SiCp MMC ; residual stress ; damping capacity ; finite element method