第 16 卷 第 3 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 3
1999 年 8 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA August 1999

喷雾共沉积 SiC 增强锌基复合材料的阻尼特征

刘永长* 张忠明 吕衣礼 杨根仓
(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要 在 ZA 27 合金中添加重量分数为 5% Si 并采用喷雾共沉积技术制备了 SiC 体积分数为 10% 的锌基复合材料。采用多功能、声频内耗仪对材料的低高频内耗行为进行了测量。结果发现, 较之常规铸造 ZA 27 合金, 在测试温度、频率范围内, 材料的阻尼能力均有较大幅度的提高; 挤压后材料的阻尼能力进一步提高。在材料微观组织形貌分析的基础上, 根据 Schoeck 理论分析了材料的主要内耗机制。

关键词 喷雾共沉积, 锌基合金, 复合材料, 内耗
中图分类号 TB331

现代高科技的发展要求材料有良好的的阻尼减振降噪能力[1~2]。在高阻尼结构材料制备方面, 虽有不少人一直致力于合金性能的改进, 但一直未取得突破性进展, 其根本原因在于金属和高阻尼材料在结构上的巨大差异不可能通过传统的合金化来消除[3]。因此高阻尼结构材料的发展必须抛开传统思路, 从制备技术入手来开发不同材料的优势。近年来 Singer 提出的喷雾沉积快速凝固技术在保证快凝效果的同时能实现材料的高效复合[4~5], R J Perez 等率先采用喷雾共沉积法研究了 SiC 增强铝基复合材料的阻尼性能, 但未能把提高阻尼能力作为其主要目的[6]。杨留栓等[7]对喷雾沉积含硅 ZA 27 合金阻尼性能、摩擦磨损性能和高温蠕变性能进行了研究, 取得明显进展。这里报导了用该技术制备的 SiC 颗粒增强锌基复合材料的低频内耗特性, 分析了复合材料的界面结合状况并对其内耗机制的影响。

1 实验方法

1.1 试样制备

所选合金成分为标准 ZA 27 合金中添加 5% Si 和 0.5% Ce(这里 Ce 起细化变质作用)。首先将预制 ZA 27 加入石墨坩埚在电阻炉中熔化, 530℃时加入碎片结晶 Si, 搅拌待 Si 全部溶解后将金属液过热至 760℃保温 15~20 min, 然后降温至 700℃加入 Al-18 wt% Ce 中间合金, 再次升温至 740℃静置 10 min, 最后转入卧式喷雾共沉法装置制备沉积毛坯。所用 SiC 为郑州第二砂轮厂生产的名义粒度为 4 μm 的 β-SiC。颗粒在流化床内随高速气流射入喷射体, 调节气体压力大小和喷嘴尺寸制得体积分数为 10% 的复合材料(编号为 3); 为了对比, 还制备了常规铸造 ZA 27 合金(编号为 1) 和喷雾沉积含 5% Si 合金(编号为 2)。所有材料均在中部取阻尼性能和金相试样。

收修改稿、初稿日期: 1998-15-04, 1998-01-01。国家自然科学基金(资助号 59671026)、中科院内耗与超声衰减开放实验室开放基金资助项目 * 博士研究生, 西安市西北工业大学凝固技术国家重点实验室(710072)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2　挤压工艺

挤压时先将沉积材料墩粗成棒材, 然后将棒材在 280℃等温热挤, 挤压比为 6.9; 挤压后棒材经 240℃、2h 固溶处理, 96℃时效 2h。取试样横截面做金相组织观察, 沿挤压方向取阻尼性能试样(编号为 3')。

1.3　内耗与 SiC 体积分数测定

低频内耗在多功能内耗仪上完成[8]。试样用电火花线切割成最后尺寸 3×1×70 mm; 测量频率为 1 Hz, 温度范围为 30～200℃; 应变振幅恒定为 5×10^{-5}, 升温速率为 2℃/min。高频内耗在声频内耗仪上完成, 试样尺寸 2.1×2.1×73 mm; 测量频率 1000±5 Hz, 温度范围为 30～150℃, SiC 颗粒体积分数测定采用 Leica Quanti 500 图象分析软件完成。

2　实验结果

2.1　材料的内耗特征

2.1.1　低频内耗

材料在特定温度点的内耗值见表 1。从中可以看出, 利用喷雾共沉积工艺在基体中加入 SiC 以后, 材料阻尼性能有较大幅度的提高(35℃时约 3.81 倍), 在较低温度时复合材料阻尼性能的提高幅度大; 挤压后除阻尼能力进一步提高以外, 在测试温度范围内改善了高温时的阻尼状况, 这与材料挤压成形后晶粒进一步细化和增加了可动位错源有关; 没有发现明显的低频内耗蜂。

表 1　1Hz 时材料在各温度点的内耗值

Table 1　Low frequency internal friction of the materials investigated at 1Hz

No.	Q^{-1}, $\times10^3$　1 Hz							
	35℃	50℃	65℃	80℃	95℃	110℃	125℃	140℃
1	2.19	2.54	7.00	12.19	22.68	36.12	52.63	67.29
2	8.07	8.43	12.53	18.91	28.62	39.18	52.64	68.52
3	8.35	8.49	14.54	21.72	38.56	46.71	63.00	83.44
3'	10.21	12.31	24.56	29.18	47.85	73.21	84.32	100.51

2.1.2　高频内耗

各材料在特定温度点的高频内耗值见表 2。从中可以看出: 采用喷雾共沉积以后, 材料的阻尼能力有很大幅度的提高; 对复合材料挤压成形后进一步提高了材料阻尼能力; 同时在测试温度范围内没有发现明显的内耗蜂。

表 2　制备材料在各温度点的高频内耗值

Table 2　High frequency internal friction of the materials investigated

试样号	Q^{-1}, $\times10^3$				共振频率/Hz
	30℃	70℃	110℃	150℃	
1	2.09	8.20	17.81	16.42	1000
2	6.21	7.69	17.99	18.55	999
3	7.10	11.71	8.92	20.91	1001
3'	9.08	13.21	18.62	25.10	1000

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 金相组织

图 1 为挤压前喷雾沉积材料的微观组织形貌, 它主要由白色α(Al)相、黑色富 Si 相和细层片状共析体组成。由于Ce 在中间合金中主要以高熔点稀土相Al_3Ce_{11}的形式存在, 该稀土相与α(Al) 相有很好的共格对应关系, 起到了结晶衬底的作用[11]; 同时该相的形成阻碍晶粒的进一步长大, 从而使材料组织得以细化。通过喷雾共沉积工艺加入 SiC 增强相颗粒以后, 材料的基体组织仍主要由层片状共析体组成。从图 2 复合材料界面形态可以看出, SiC 与层片状共析体之间以强界面结合的方式存在。图中的Ce 成分线扫描结果表明, Ce 在复合材料的界面处呈正梯度分布, 因此微量元素 Ce 的加入显著改善了材料的界面润湿状况, 提高了材料的阻尼能力。

www.cnki.net

图 1 3# 材料微观组织

Fig. 1 Microstructure of sample 3#

图 2 3# 材料界面形态

Fig. 2 Interface morphology of sample 3#

3 讨 论

3.1 材料的内耗机制

材料内部的能量耗散主要来源于两个方面: 一是热滞弹性阻尼, 二是微观晶体结构缺陷阻尼, 这主要是指沉积多晶材料中的点缺陷(空位、间隙原子)、线缺陷(位错)、面缺陷(晶界、相界)和体缺陷(微孔、细裂纹)的不可逆运动引起的能量损耗。热滞弹性内耗是 Zener 根据材料内部应力状态不同产生的温度梯度引起不可逆热流而提出来的。在不均匀形变时该现象尤为显著。其中滞弹性内耗大小主要与热弛豫常数Δ和弛豫时间τ有关,

$$Q^{-1} = \Delta \frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \tag{1}$$

其中

$$\Delta = \frac{E_u \alpha^2 T_0}{C_v}, \quad \tau = \frac{C_v h^2}{\pi^2 k}$$

这里 E_u 是弛豫前材料的弹性模量, α是材料的热膨胀系数, T_0 是绝对温度值, C_v 为比热容大小, ω为角频率的大小, h 是试样厚度, k 是导热系数的大小。从上式可以看出热滞弹性内耗大小与频率相关。在我们的测量结果中发现, 高频时材料的内耗值远远低于低频, 按Bishop 给出的Al 的 $\tau = 0.001$ s[9], 由 $\omega\tau = 1$ 来估算Al 的内耗谱上出现峰值的频率为 160 Hz, 这点很好地说明了高频内耗远远低于低频内耗的实验结果。

在喷雾沉积材料中, 相间界面、晶界以及微孔和细小裂纹对材料阻尼性能的提高有举足轻重的作用。从图 3 可以看出, 大量弥散分布的富 Si 相和α(Al)相同基体之间的界面以及有共格对应关系的细密层片共析体界面对材料阻尼性能的提高有着不可忽视的影响。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

喷雾沉积材料中的微孔是由于凝固速度和沉积速度之间的不协调以及气体的侵入而形成的[7]。而细小裂纹却是由于沉积过程中材料内部处于不均匀应力状态而形成的。微孔和细小裂纹处的局部应力集中引起的能量耗散同样也使材料的阻尼性能得以提高。

3.2　SiC 复合对材料内耗机制的影响

对比图 1 和 2 可以看出, 材料经喷雾共沉积成形前后基体组织并没有多大的变化, 基体仍然主要由层片状共析体所组成。由于 SiC 与基体之间以相对较强的界面结合方式存在, SiC/基体界面对材料阻尼性能的贡献均可以用上述的 Schoeck 的理论来说明。该理论指出材料的共格与半共格界面均有利于材料内耗值的提高, 其中提高的程度受界面的数量、形状和体积分数大小的影响, 参考 Schoeck 的理论分析结果有[10]

$$Q^{-1} = \frac{1}{p_{13}^2}\frac{8(1-\nu)}{3\pi(2-\nu)}\frac{1}{V}\sum a_i^3 (p'_{13})_i^2 = \frac{32(1-\nu)}{3p_{13}^2(2-\nu)}\sum \frac{4\pi a^3}{3\nu}(p'_{13})_i^2 = \frac{32(1-\nu)}{3p_{13}^2(2-\nu)}\sum V_p (p'_{13})_i^2 \tag{2}$$

这里 p_{13} 是外加剪切应力的大小, ν 是泊松比, V 是试样体积的大小, a_i 是富 Si 相半径或 α(Al) 相和层片共析组织的特征尺寸大小, $(p'_{13})_i$ 是指富硅相、α(Al) 相 i 颗粒上可弛豫的 p'_{13} 面和层片状共析体的共格对称面的面积大小, V_p 是富硅相、α(Al) 相颗粒和层片状共析体体积分数的大小。上式表明材料的内耗值随沉积体中界面体积分数的增加而提高。

3.3　挤压对材料内耗机制的影响

材料经挤压以后消除了孔洞、微裂纹等体缺陷, 晶粒进一步得以细化。挤压材料阻尼性能的提高还应该从过固溶元素的析出和大量点、线、面缺陷的形成来加以解释。由于析出的脱溶相仍然与基体有很好的共格对应关系, 界面的增多必然导致材料内耗性能大大提高, 其内耗机制可用前面讨论过的 Schoeck 理论来解释; 同时热加工过程空位、位错等缺陷的大量形成并在承受应力条件下的不可逆运动(如空位的移动、位错的增殖和攀移等) 而损耗部分能量, 从而进一步提高了材料的阻尼能力。

4　结　　论

(1) 喷雾共沉积 SiC 增强 Zn 基复合材料的主要内耗机制为热滞弹性内耗和晶体缺陷内耗; 其中界面对阻尼性能的影响可用 Schoeck 理论来解释;

(2) 较之常规铸造 ZA 27 合金, 30℃、1000 Hz 时 SiC 增强复合材料的阻尼能力提高3.381 倍; 挤压后复合材料内耗值提高到 4.333 倍左右;

(3) 低频时复合材料的内耗值有很大程度的提高, 如 1 Hz、35 ℃时为常规铸造 ZA 27 合金的 3.81 倍;

(4) 微量 Ce 元素在复合材料界面的富集改善了 SiC 颗粒与基体的润湿行为。

参　考　文　献

1　刘永长. Zn 基高阻尼结构材料的制备及其内耗行为[硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 1997

2　魏大可. 机械工程材料, 1989, 72(3): 17

3　杨根仓. 航空科学技术, 1994, (3): 12～13, 30

4　杨留栓, 杨根仓, 周尧和. 材料科学与工程, 1994, 12(2): 29～33

5　Lavernia E J, Grant N J. *Mater Sci & Enging A*, 1988, (98): 94～381

6　Perez R J, Zhang J, Gungor M N, Lavernia E J. *Metall Trans A*, 1993, (24): 701～712

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

7 杨留栓 雾化沉积含硅 ZA 27 合金的组织与性能[博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 1995
8 Liu Y, Yang G, Lu Y, *et al*. *J Mater Sci & Tech*, 1997, 13(6): 450～497
9 Dunand D C, Mortensen A. *Mat Sci Eng*, 1991, A 135: 179
10 Nelson D J, Hancock J W. *J Mater Sci*, 1978, 13: 2429
11 Kishore N N, Ghosh A, Agarwal B D. *J Reinforced Plast Comp*, 1982, (1): 353

INTERNAL FRICTION BEHAVIOR OF SiC PARTICLE REINFORCED MMCS PREPARED BY SPRAY CO-DEPOSITION

Liu Yongchang Zhang Zhongming Lu Yili Yang Gencang
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The effect of SiC particulate on the resultant damping behavior of the as-spray deposited high silicon alloy ZA 27 was investigated in an effort to develop a high damping materials. The high and low frequency internal friction behavior was conducted on Sound Frequency and Multi-functional Internal Friction Apparatus. The experimental results show that the damping capacities of the MMCs reinforced by SiC particulate were improved a lot, and furthermore, hot extrusion improved the damping capacities. Finally, the operative damping mechanisms were discussed in the light of the data obtained from characterization of microstructure based on the theory of Schoeck.

Key words spray co-deposition, zinc-based alloy, composites, internal friction

(上接第 61 页)

(2) 缺 点

①电子束发生设备价格高

电子束固化法具备以往热固化所没有的特点, 所以有发展革新式的成型技术和创造新设计技术的可能性。可能是因为这一点, 在加拿大和美国似乎正在大力进行研究。特别是加拿大, Atomic Energy of Canada Ltd. 拥有加速器, 与美国协作进行研究。研究课题可列举如下[24, 25]:

(a) Northrop-Grumman: Affordable Polymer Composite Structures Program 飞机蒙皮、蜂窝壁板的成型研究, 低成本工夹具的研究。

(b) Lockheed Advanced Development Company: Integrated Airframe Technology for Affordability Program 纤维排放法与电子束固化法组合。也研究使用发泡芯材的低成本模具。研究对象有翼梁固定框、翼外板、战斗机发动机室的内龙骨等。

(c) Oak Ridge National Laboratory, Lockheed Martin Energy Systems, Inc. 等 10 单位: Cooperative Research and Development Agreement (CRADA)[24] 能源部的防卫计划为后盾进行工艺开发。

(d) Aerotech Engineering&Research Cop.: U. S. Army's Long Range Fiber Optic Guided Missile (Long-Fog)[23], 进行导弹复杂形状部件的成型。

(e) Science Research Laboratory: Advanced Research Projects Agency 的研究[25] 脉冲线性感应加速器的开发。RTM 与电子束固化法组合。

可能由于研究工作刚开始之故, 有关研究详情报告几乎还没有发表。

(下转第 72 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net