复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第1 期　2 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 1　February　2007

文章编号: 1000-3851(2007)01-0065-05

SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的阻尼性能

于思荣*[1,2], 罗彦茹[2], 张英波[2], 刘家安[2]

(1. 吉林大学 汽车材料教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学 南岭校区 材料科学与工程学院, 长春 130025)

摘　要: 对采用熔体直接发泡法制备的SiC_p/ZL104 泡沫复合材料进行了阻尼性能和机理的分析。研究结果表明: 在孔径一定的条件下, SiC_p/ZL104 泡沫复合材料室温下的阻尼性能表现为损耗因子随着孔隙率的增大呈非线性递增趋势, 且递增幅度越来越小; SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的阻尼性能好于相同孔隙率的泡沫铝、SiC_p/ZL104 复合材料和ZL104 的阻尼性能; SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的损耗因子随着SiC_p 含量的增加和SiC_p 粒度的减小而增大。SiC_p/ZL104 泡沫复合材料内部的气泡以及高密度位错对其阻尼性能的提高起主要作用。

关键词: SiC_p/ZL104 泡沫复合材料; 孔隙率; 损耗因子; 位错

中图分类号: TG331　　**文献标识码**: A

Damping properties of SiC_p/ZL104 composite foams

YU Sirong*[1,2], LUO Yanru[2], ZHANG Yingbo[2], LIU Jiaan[2]

(1. Key Laboratory of Automobile Materials of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Nanling Campus, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The damping properties and damping mechanism were investigated for SiC_p/ZL104 composite foams, fabricated by the method of direct melt foaming. The results show that under the conditions of the same pore-diameter, the loss factors of SiC_p/ZL104 composite foams are non-linear rising with the increase of porosity at the ambient temperature, and the incremental changes lessen gradually. The damping properties of SiC_p/ZL104 composite foams are better than those of foam aluminum, SiC_p/ZL104 composites and ZL104 alloy. The loss factors of SiC_p/ZL104 composite foams increase with the increase of the content of SiC_p and the decrease of granularity of SiC_p. Pores and high density dislocations in SiC_p/ZL104 composite foams contribute to their damping properties.

Keywords: SiC_p/ZL104 composite foams; porosity; loss factor; dislocation

泡沫金属材料是一种充满气泡的多孔金属, 它兼具金属特性和气泡特性, 既有一定的耐热性、耐蚀性和良好的切削加工性, 又有质轻、隔热、减振、降噪、导电、传热等优点, 不仅能用作装饰、建筑材料, 制作热交换器和高级包装材料, 还可作为精密仪器的基底或防护罩、汽车发动机减振用材和吸音器、保险杠中的内芯材料等以吸收声能或冲击能[1], 因此研究其阻尼性能具有重要的意义。

陶瓷颗粒(SiC、SiO_2、MgO、TiB_2、Al_2O_3 等)增强泡沫铝基复合材料是近年来发展的一种新型的泡沫金属材料, D. Leitlmeier 等人用气体注入的方法制备颗粒增强泡沫铝基复合材料并对其组织进行了研究, S. ELBIR 用粉末冶金法制备SiC_p 增强泡沫铝基复合材料并对其制备工艺和力学性能进行了分析, 桂满昌等人对SiC_p 增强泡沫铝基复合材料的吸声性能进行了评述, 但国内外文献中尚未见有关SiC_p 增强泡沫铝基复合材料的孔隙率和SiC_p 与阻尼性能关系的报道[1-4]。本文中采用直接发泡法制备了SiC_p 增强泡沫铝基复合材料, 并分析了其阻尼性能和阻尼机理。

1　实验材料及方法

1.1　试样的制备

试验选用ZL104 合金、粒度为5、10、28 μm的α 绿SiC_p 以及44 μm 的TiH_2 发泡剂作为实验原材料。将SiC_p 在800 ℃高温焙烧1 h 后降至300 ℃保

收稿日期: 2006-03-20; 收修改稿日期: 2006-06-12
基金项目: 吉林大学'985 工程'项目
通讯作者: 于思荣, 教授, 博士生导师, 主要从事复合材料制备及性能表征　E-mail: yusr@jlu.edu.cn

温3 h，随炉冷却后密封备用；为保证TiH_2中氢元素含量，采用化学方法制成Al_2O_3/TiH_2包覆颗粒；采用搅拌铸造法制备复合材料，搅拌装置见图1，搅拌速度为900 r/min。加热ZL104合金至全部熔化后，梯度降温至590～610 ℃，降温速度20 ℃/h；将处理过的SiC_P按不同体积分数加入到合金熔体中，搅拌15～20 min后迅速升温至700 ℃，一部分浇注成型，形成SiC_P/ZL104复合材料；另一部分，根据不同孔隙率的要求在720 ℃时加入一定量处理过的TiH_2颗粒发泡剂，继续搅拌50～80 s，使其在铝液中均匀分布，迅速提起搅拌器，发泡5～6 min制得不同孔隙率的SiC_P/ZL104泡沫复合材料，图2是孔隙率为32 %、45 %、59 %、70 %的10 % SiC_P/ZL104泡沫复合材料的截面图。

将ZL104基体合金、SiC_P/ZL104复合材料和SiC_P/ZL104泡沫复合材料用线切割设备加工成尺寸为60 mm×60 mm×15 mm的试样备用。

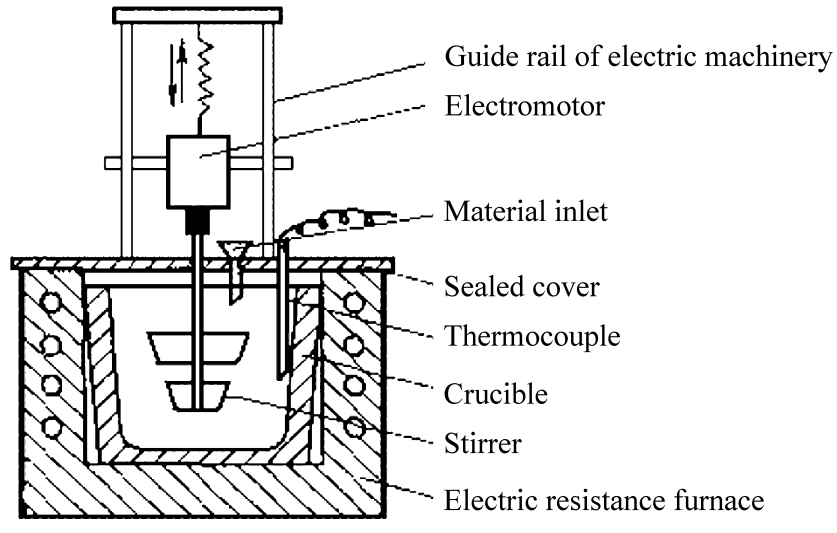

图1　搅拌装置示意图

Fig.1　Schematic of the stirring equipment

1.2　阻尼特征值的测量方法及原理

目前阻尼特征值的测量方法有很多种，常用的有自由振动法、频率响应法、复刚度法[5]。本文中采用自由振动法进行阻尼特征值的测量，实验设备为吉林大学测试中心研制的，主要包括B&K4383型加速度传感器、B&K8200型激振器、B&K2626型信号放大器、1NV306D型智能信号采集处理分析仪、示波器，测试系统如图3所示。

试样受到激励后，不再施加外力，试样自身的惯性引起势能和动能的相互转换，开始进行周期性振动，但由于在振动过程中空气与气泡壁的摩擦作

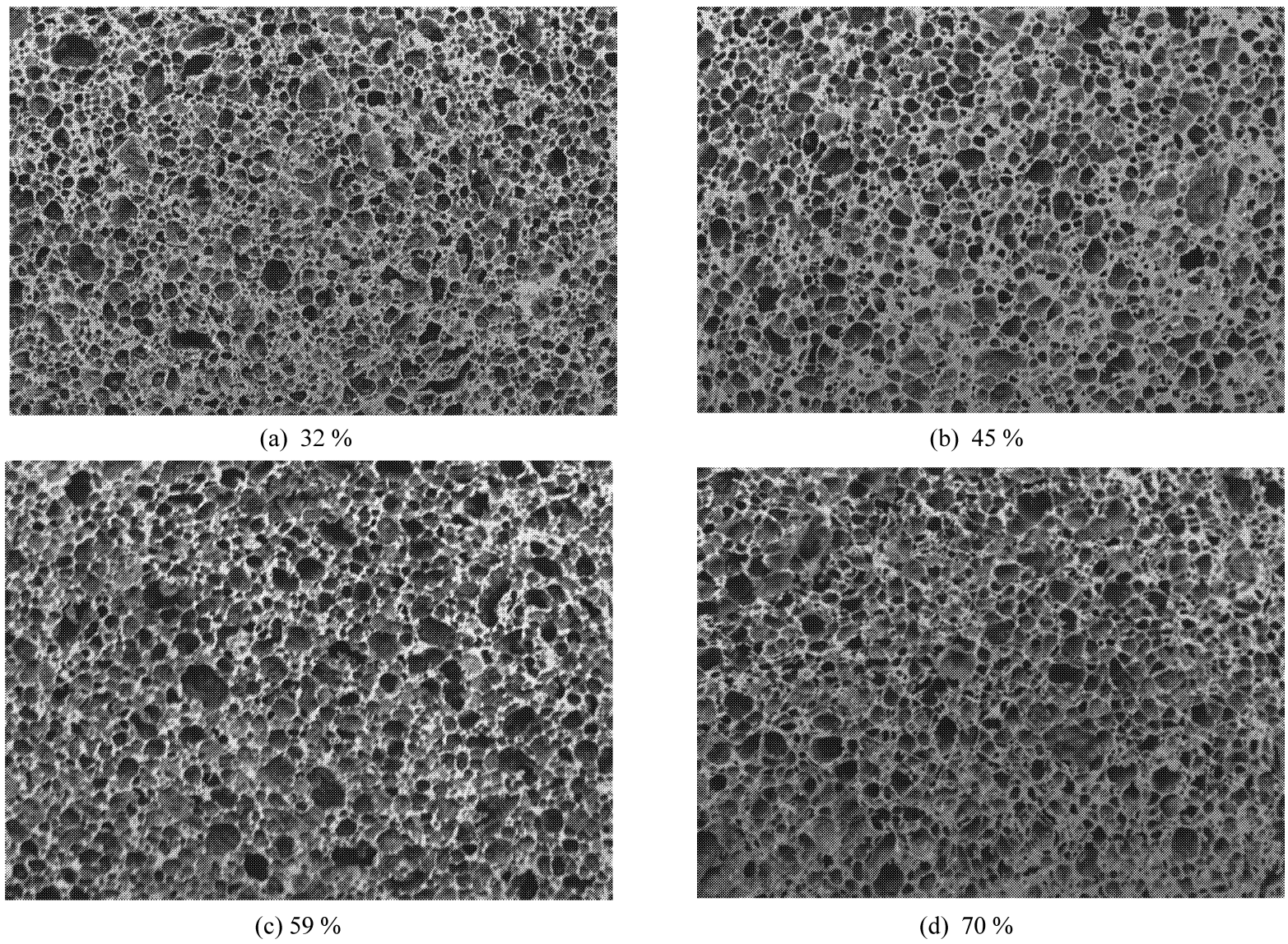

图2　不同孔隙率的10 % SiC_P/ZL104泡沫复合材料的截面图

Fig.2　10 % SiC_P/ZL104 composite foams with different porosities

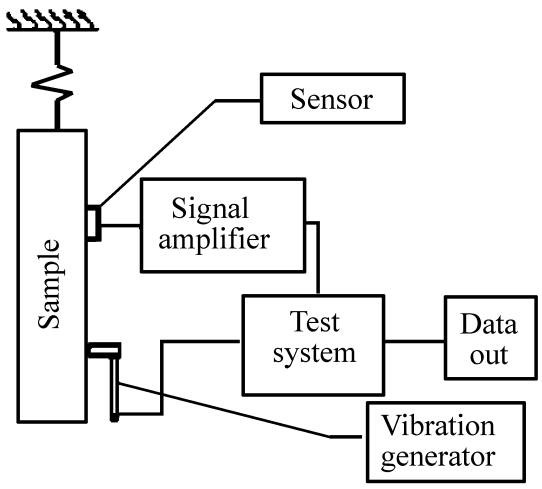

图3　阻尼测试系统简图

Fig.3　Sketch of the damping test system

用以及内部的原因使振动能不断被消耗，振动振幅不断减小，故此法也被称为自由振动衰减法。损耗因子与振幅之间的关系式可表示为[2]

$$\beta = \left[\frac{\pi}{\ln x_i / x_{i+1}}\right]^2 + 1^{-1} \qquad (1)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \beta^2/4} \approx \omega_n \qquad (2)$$

式中：β为损耗因子；x_i 为振幅值；ω_d 为阻尼固有频率；ω_n 为无阻尼固有频率。其中，β是表征材料阻尼性能的参数，参数的值越大，表明瞬时输入的能量可以在较短的时间里耗尽，阻尼就越大。

由式(1)、式(2)可知，频率对材料的损耗因子β的影响不显著，故本实验将频率恒定为400 Hz，时间间隔定为0.0025 s，用上述阻尼测试系统对一系列材料进行测试。

2　实验结果

室温下的阻尼性能试验结果如图4所示。

图4(a)表明10% SiC_p/ZL104 泡沫复合材料损耗因子β随着孔隙率p 的增加呈不断上升趋势，递增幅度越来越小。实验测得10% SiC_p/ZL104 的损耗因子为0.011，小于10% SiC_p/ZL104 泡沫复合材料。孔隙率为45%的10% SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的损耗因子是孔径为2 mm、孔隙率为47%的泡沫铝的损耗因子的8 倍[6]。由图4(b)可知，ZL104 的损耗因子为0.001，ZL104 的损耗因子比10% SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的损耗因子小了近2 个数量级，SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的损耗因子随着SiC_p 含量的增加而增大，递增幅度越来越小。图4(c)表明随着SiC_p 的粒度的增大SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的损耗因子逐渐减小，减小的幅度趋于平缓。

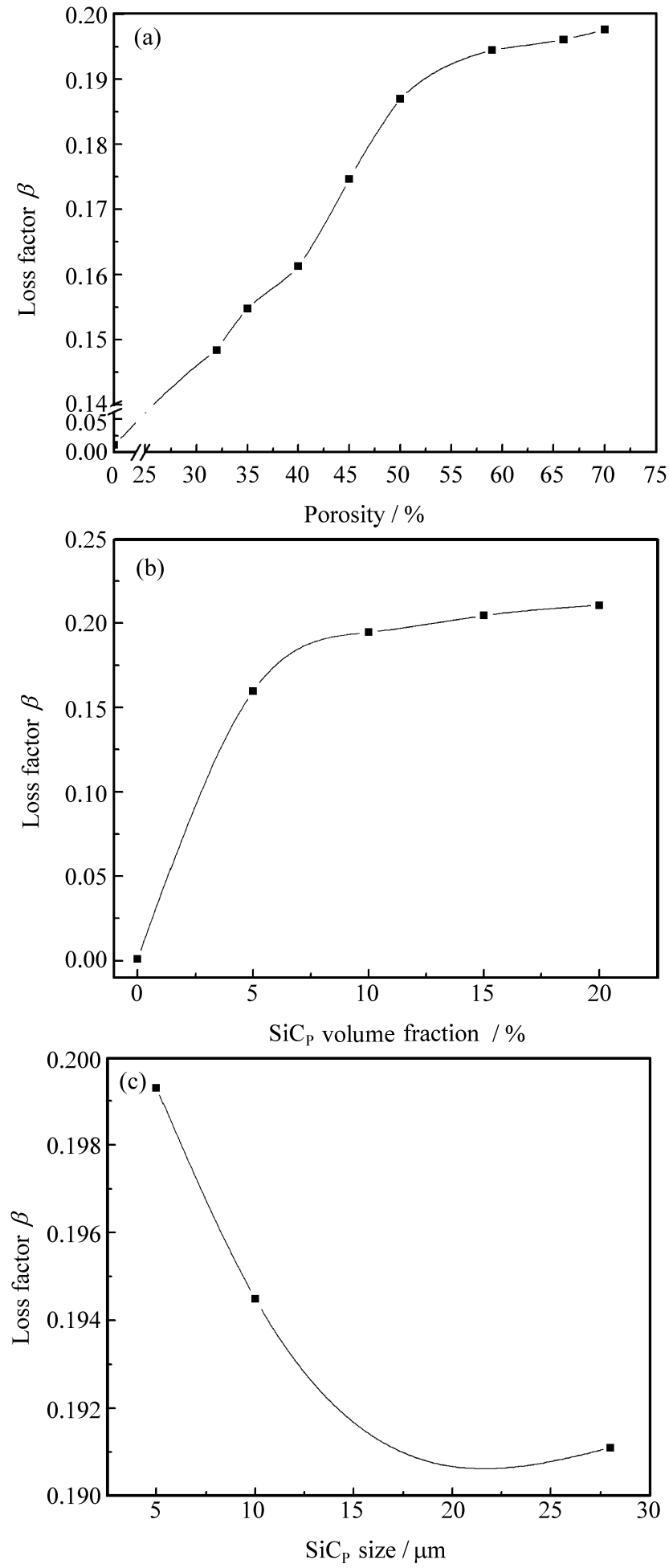

图4　不同孔隙率、SiC_p 含量和SiC_p 粒度的SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的损耗因子β

Fig.4　The relationships of loss factor β of SiC_p/ZL104 composite foams with different porosities, SiC_p contents and sizes

3　SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的阻尼机理

材料在受到机械振动时，由于其内部的原因(如气孔、位错、界面等)产生一个附加的弹性应变，从而导致应变落后于应力，产生阻尼现象，这些产生阻尼现象的内部原因被称为阻尼源。根据

Zener 经典理论可知,通过设法使缺陷之间的交互作用达到最大,以获得最大的线性阻尼或将力学放大机制引入材料,以获得较高的非线性阻尼可提高金属材料阻尼性能[7]。泡沫材料正是利用了创造学中的“缺点利用法”,即人为地放大基体中的孔洞,增加其阻尼性能。

SiC_P/ZL104 泡沫复合材料由3 个组分组成: ZL104、SiC_P 和 TiH_2 分解后释放的氢气。其阻尼性能主要取决于ZL104 的本征阻尼、SiC_P 的本征阻尼、SiC_P 与ZL104 间的界面阻尼、气泡与SiC_P/ZL104 复合材料间的界面粘滞性阻尼以及SiC_P 附近ZL104 的高密度位错产生的微观阻尼。本实验中制备的SiC_P/ZL104 泡沫复合材料最突出的特点是通过控制界面和位错引入阻尼源,在加入SiC_P 后的泡沫铝合金中引入了多种界面,而界面面积的大小及结合强度会对材料的阻尼性能产生影响[8-11]。当作用在界面的剪切应力值大到足以克服摩擦阻力时,便会发生界面滑移,产生阻尼;另外,位错的存在使材料内部的变形抗力不同,从而干扰变形的均匀传递,同时也增加了应变落后于应力的相位滞后角,增大了阻尼。

3.1　气泡对SiC_P/ZL104 泡沫复合材料阻尼的影响

在制备SiC_P/ZL104 泡沫复合材料的过程中,发泡剂TiH_2 分解后会释放氢气,凝固时氢气来不及溢出,便留在金属中,形成气泡。在SiC_P/ZL104 泡沫复合材料中,由于气泡的存在,使SiC_P/ZL104 复合材料与空气接触的面积(界面面积)远大于相同体积其自身的表观面积,当试样受激励后,便会在气体和铝基复合材料之间产生摩擦,使振动系统的一部分机械能转化为热能。

若用机械波来描述材料的振动,则气泡基本等同于球形反射体,随着材料孔隙率的增大,机械波的传播会受到气泡内气体的弹性响应以及孔壁的多重反射所影响,由于孔壁的多重反射,使得波的透射作用随着孔隙率的增大而减小。当机械波从空气中传播到气固界面时,在其方向不垂直于界面时,将产生波形的分裂,即产生转换波的反射、透射现象。如图5 所示,入射波1_i 传到气固界面时,发生第1 次反射和透射,透射波1_t(二次入射波2_i)在固体中继续传播,直到遇到下一个固气界面,发生再一次反射2_r 和透射2_t,透射波$2_t(3_i)$ 继续传播,这样原始入射波经多次界面的反射和透射直至波动的能量慢慢耗尽,完成了衰减的全过程。

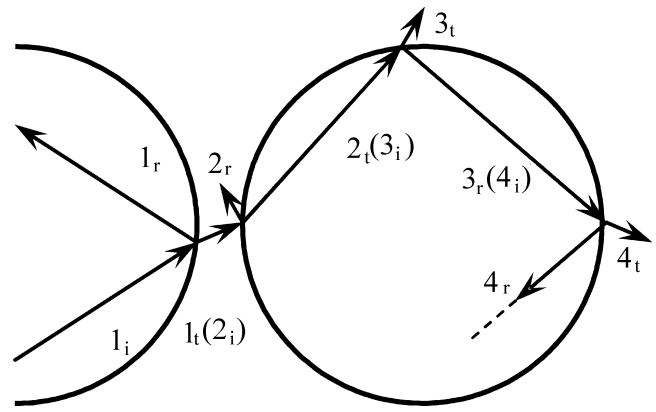

图5　波在SiC_P/ZL104 泡沫复合材料中传播的示意图

Fig.5　Schematic of the wave propagation of SiC_P/ZL104 composite foams

波通过介质时由于内摩擦造成的能量损耗用介质的品质因子Q 来描述,则振幅为x 的弹性波的吸收后振幅可表示为[12,13]

$$x = x_0 \exp[-\pi z f / Q v] \tag{3}$$

$$Q = f m_s (1-p)/r \tag{4}$$

$$v = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho(1-p)} \tag{5}$$

$$x = x_0 \exp\left[-\pi z r \frac{\rho}{(\lambda+2\mu)(1-p)} / m_s\right] \tag{6}$$

式中: z 为传播的距离; f 为激振频率; v 为波在泡沫金属中的传播速度; m_s、ρ 为SiC_P/ZL104 复合材料的质量和密度; r 为比例常数; λ、μ为洛麦的固体弹性常数。

由式(6)可知,对于同样大小的SiC_P/ZL104 泡沫复合材料和SiC_P/ZL104 复合材料,前者的阻尼性能明显优于后者;当波通过SiC_P/ZL104 泡沫复合材料时,随着孔隙率的增大,波动的振幅逐渐减小,振幅衰减得越快,即材料的能量损耗越大,这与实验结果吻合。

3.2　SiC_P 对SiC_P/ZL104 泡沫复合材料阻尼的影响

对于SiC_P/ZL104 泡沫复合材料,SiC_P 存在于ZL104 中,并与其复合形成复合材料,所以室温下SiC_P 的本征阻尼以及SiC_P 附近ZL104 的位错阻尼均会对复合材料的阻尼产生影响[14,15],材料凝固时由于各组分热膨胀系数(CTE)不同产生的应变差

$$\varepsilon = \Delta\alpha \Delta T \tag{7}$$

式中: $\Delta\alpha$为SiC_P 与ZL104 间的CTE 差值; ΔT 为SiC_P/ZL104 泡沫复合材料凝固冷却过程中的温度变化。

SiC_P/ZL104 泡沫复合材料凝固时由于各组分的热膨胀系数(CTE)不同: ZL104 的CTE 为25×10^{-6},SiC_P 的CTE 为5×10^{-6},根据式(7)会产生

很大的应变差, 应变差的产生会在各组分之间产生很大的应力作用, 并导致 SiC_p 附近的ZL104 产生高密度位错, 有资料[16] 表明 SiC_p/ ZL104 复合材料中 SiC_p 附近的位错密度 ρ 为

$$\rho = \frac{BV_f \varepsilon}{b(1 - V_f) d_{min}} \qquad (8)$$

式中: B 为几何常数; V_f 为颗粒的体积分数; b 为柏氏矢量; d_{min} 为 SiC_p 的最小直径。

根据 Koehler- Granato- Lücke 的理论[17], 位错密度与损耗因子的关系为

$$\beta = (A\rho L^2/\theta) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \qquad (9)$$

即 $$\beta = \frac{AB\varepsilon L^2 \omega\tau}{b\theta d_{min}(1 + \omega^2\tau^2)(1/V_f - 1)} \qquad (10)$$

式中: A 为接近于0.1 的系数, 与滑移面有关; θ 为平均晶粒尺寸; L 为位错段长度; τ 为弛豫时间。

由式(10) 可知, SiC_p/ Al 复合材料的损耗因子的理论值远远大于ZL104 合金的损耗因子, 且随着 SiC_p 体积分数的增加和 SiC_p 粒度的减小其阻尼会不断增大。

4 结 论

(1) 在孔径一定的条件下, SiC_p/ ZL104 泡沫复合材料室温下的阻尼性能表现为损耗因子随着其孔隙率的增大呈非线性递增趋势, 且递增幅度越来越小; SiC_p/ ZL104 泡沫复合材料的阻尼性能比同孔隙率的泡沫铝、SiC_p/ ZL104 复合材料和ZL104 合金的阻尼性能都好; SiC_p/ ZL104 泡沫复合材料的损耗因子随着 SiC_p 含量的增加和 SiC_p 粒度的减小而增大。

(2) SiC_p/ ZL104 泡沫复合材料内部的气泡以及高密度位错对其阻尼起主要作用。

参考文献:

[1] Banhart J. Aluminium foams for lighter vehicles [J]. International Journal of Vehicle Design, 2005, 37(2/3): 114-125.

[2] Leitlmeier D, Hans-Peter Degischer, Herbert Flankl. Metallurgical prerequisites for the production of cellular aluminium castings direct from the melt [J]. Casting Plant and Technology International, 2003, 19(1): 20-30.

[3] Elbir S, Yılmaz A, Toksoy A K, et al. SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: Foaming and compression behavior [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(23): 4745-4755.

[4] Gui M C, Wang D B, Wu J J, et al. Deformation and damping behaviors of foamed Al-Si-SiC_p composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 286: 282-288.

[5] 戴德沛. 阻尼技术的工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 40-48.
Dai Depei. Technical Application of Damping Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 40-48.

[6] 余兴泉, 何德坪. 泡沫金属机械阻尼性能研究[J]. 机械工程材料, 1994, 18(2): 26-32.
Yu Xingquan, He Deping. Research on the mechanical damping properties of metallic foams [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1994, 18(2): 26-32.

[7] 王 月. 舰船舱室减震降噪用泡沫金属铝的室温内耗性能研究[J]. 船舶力学, 2005, 9(1): 111-114.
Wang Yue. Study on damping property of foamed aluminum at ambient temperature for damping and noise reducing of ship cabins [J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(1): 111-114.

[8] Wei J N, Cheng H F, Zhang Y F, et al. Effects of macroscopic graphite particulates on the damping behavior of commercially pure aluminum [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 325: 444-453.

[9] Wang Can, Zhu Zhenggang. Internal friction at medium temperature in an Al matrix composite reinforced by SiC particles [J]. Scripta Materialia, 1998, 38(12): 1739-1745.

[10] 樊建中, 姚忠凯, 杜善义. SiC 颗粒增强金属基复合材料弹性模量与界面结合状况关系研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(2): 1-5.
Fan Jianzhong, Yao Zhongkai, Du Shanyi. Research on relationship between elastic modules and interfacial bonding in SiC particle reinforced metal matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(2): 1-5.

[11] 崔 岩, 耿 林, 姚忠凯. 轻微界面反应对 SiC_p6061Al 复合材料弹性模量的影响[J]. 复合材料学报, 1998, 15(1): 74-77.
Cui Yan, Geng Lin, Yao Zhongkai. Effect of a slight interfacial reaction on the Young's modulus of SiC_p/ 6061Al composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(1): 74-77.

[12] 薛诗桂. 衰减介质中纵波与转换波的分辨率研究[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 7(5): 327-332.
Xue Shigui. On resolution of PP- and PS- waves in attenuated media [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 7(5): 327-332.

[13] ain H J. The Physics of Vibrations and Waves [M]. London: John Wiley- Sons Ltd, 1976: 37-39.

[14] u Jinhai, Zhang Xiaonong, Qiu Yongfu, et al. Damping behaviors of magnesium matrix composites reinforced with Cu-coated and uncoated SiC particulates [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(11/12): 1736-1742.

[15] hang J, Perez R J, Lavernis E J. Effect of SiC and graphite particulates on the damping behavior of metal matrix composites [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(2): 395-409.

[16] rsenault R J, Shi N. Dislocation generation due to differences between the coefficients of thermal expansion [J]. Materials Science and Engineering A, 1986, 81: 175-187.

[17] 葛庭燧. 固体内耗理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 627.
Ge Tingsui. Theoretical basis of solid internal friction[M]. Beijing: Science Press, 2000: 627.