

含高体积分数的 SiC_p 的 Al 复合材料微观组织及弯曲性能

王庆平^{1,2}, 吴玉程¹, 洪雨¹, 盘荣俊¹, 闵凡飞²

(1.合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;

2.安徽理工大学 材料科学与工程学院, 淮南 232001)

摘要: 利用无压浸渗法制备高体积分数的 SiC 的 SiC_p/Al 复合材料。采用 XRD 和 SEM 对复合材料的相组成、微观组织及断口形貌进行分析, 研究颗粒粒径分布和基体合金成分对复合材料抗弯性能的影响。结果表明: 以 Al-10Si-8Mg(质量分数, %)合金为基体制备的复合材料组织均匀, 致密度好, 无明显气孔缺陷; 界面反应产物为 Mg₂Si、MgAl₂O₄ 和 Fe, 其弯曲强度高于以 Al-10Si 合金为基体制备的复合材料的弯曲强度; SiC_p/Al 复合材料的弯曲强度随着 SiC 颗粒粒径的增大而减小; 复合材料整体上表现出脆性断裂的特征。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 微观组织; 弯曲性能; 无压浸渗

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

Microstructures and bending properties of Al composites with high volume fraction of SiC_p

WANG Qing-ping^{1,2}, WU Yu-cheng¹, HONG Yu¹, PAN Rong-jun¹, MIN Fan-fei²

(1.School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2.School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The SiC_p/Al composites with high volume fraction of SiC were fabricated by pressureless infiltration technique. The microstructures and the fracture morphologies of composites were observed by SEM and the components were analyzed by XRD. The effects of the particle size distribution and the components of aluminum matrix on the bending strength of the composites were studied. The results show that the microstructures in the SiC_p/Al-10Si-8Mg(mass fraction, %) composites are quite uniform without obvious pores. The interfacial reaction products are Mg₂Si, MgAl₂O₄ and Fe. The bending strength of the SiC_p/Al-10Si-8Mg composites is better than that of the SiC_p/Al-10Si composites. Besides, the bending strength of the SiC_p/Al composites decreases with increasing particle size of SiC_p. The composites have the character of brittleness fracture.

Key words: SiC_p/Al composites; microstructure; bending strength; pressureless infiltration

SiC_p/Al 复合材料由于具有比强度高、比模量高、耐磨性好、热导率高和热膨胀系数低等优异的性能, 而被广泛应用于航空、航天、军事武器、汽车和电子等领域^[1-2]。而在用作电子封装方面, 与低体积分数的 SiC_p/Al 复合材料相比, 高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料具有更小的热膨胀系数, 更高的热导率, 尺寸稳定性

好等优点特别受到关注^[3-5]。

目前, 国内外对高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料性能的研究多集中于材料力学性能模拟和分析及其热物理性能的研究^[6-9], 而关于力学性能的研究则较少报道。周储伟^[10]建立一个高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料的细观力学模型, 并在该基础上进行弹塑性及损伤分

析,认为颗粒分布方式对材料强度有显著影响,颗粒分布得愈均匀,则塑性和损伤发展愈慢,材料整体上表现出更大的强度和韧性。刘君武等^[11]对单尺寸 SiC 颗粒增强 Z101 所得复合材料的热学性能进行研究。本文作者采用双尺寸 SiC 颗粒级配,以 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 为造孔剂,采用无压渗透法制备高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料,利用 SEM 观察复合材料的组织及断口形貌,研究颗粒粒径级配和基体合金对 SiC_p/Al 复合材料抗弯性能的影响。

1 实验

为了获得高体积分数的 SiC 的复合材料,以酸洗过的双组分工业磨料用 SiC 颗粒及造孔剂 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 为主要原料,采用硬脂酸锌作为润滑剂,水玻璃作为粘接剂。实验条件如下:1[#]和 3[#]复合材料的基体为 Al-10Si-8Mg,2[#]和 4[#]复合材料的基体为 Al-10Si;1[#]和 2[#]复合材料中粒径 85 μm 的 SiC_p 与粒径为 28 μm 的质量比为 2:1,3[#]和 4[#]复合材料中粒径 50 μm 的 SiC_p 与粒径为 14 μm 的质量比为 2:1。将上述原料按设计比例配料,分别在混料机上混合 5 h,然后在手动陶瓷压片机上以 100 MPa 的压力压制成形。素坯经 60 干燥处理后在管式炉中 1000 烧结。随炉冷却至室温,获得 SiC 体积分数均为 66% 的预制块,然后分别以 Al-10%Si 和 Al-10%Si-8%Mg 合金为基体在自制浸渗设备中 900 进行浸渗,充氮气保护,制得 SiC 体积分数为 66% 的复合材料。

采用 D/max-r B 型 X 射线衍射仪分析复合材料的物相组成,利用 JSM-6490LV 和 HITACHI S-3000N 型扫描电子显微镜观察复合材料的微观组织和断口形貌,利用日本岛津 DCS-3000 型万能试验机测试复合材料的三点弯曲性能(40 mm × 5 mm × 5 mm),跨距 30 mm,压头位移速度为 0.2 mm/min。

2 结果与分析

2.1 复合材料的相组成

图 1 所示为 SiC_p/Al 复合材料的 XRD 谱。对于无压浸渗 SiC_p/Al 复合材料体系来说,在高温下增强体 SiC 与基体 Al 合金之间会发生界面反应,它对复合材料的微观组织和宏观性能起着关键的作用。对 SiC_p/Al 系统界面反应的研究表明,在铝的熔点以上, SiC 即可与熔融铝合金液发生界面反应生成各种不同的化合物,

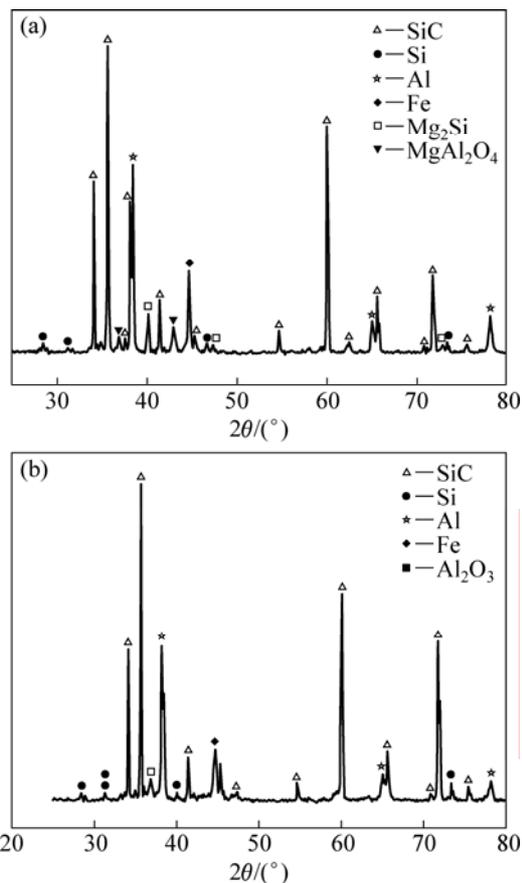
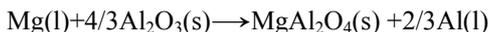
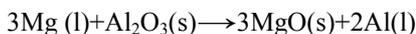


图 1 SiC_p/Al 复合材料的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of SiC_p/Al composites: (a) Composite 1; (b) Composite 2

如 Mg_2Si 和 MgAl_2O_4 等。1[#] SiC_p/Al 复合材料的 XRD 谱结果如图 1(a)所示。由图 1 可知:复合材料中除含 SiC 增强相、Si 和 Al 基体外,还有 Mg_2Si 、 MgAl_2O_4 和 Fe 等。分析发现,当基体中含有 Mg 时, Mg 会和 Al_2O_3 发生反应^[12],因此该复合材料中不含 Al_2O_3 :



2[#]复合材料的 XRD 结果(见图 1(b))表明,复合材料中没有 Mg_2Si 和 MgAl_2O_4 相,主要原因是 2[#]基体中未含 Mg 的缘故。同时可以看出,两种复合材料中都存在 Fe 相,说明铝液和 Fe_2O_3 在 900 时发生铝热反应 $[2\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}]$,该反应是放热反应,瞬间温度大于 2000 降低了 Al 和 SiC 的润湿角^[13-14],对基体的浸渗起到了一定的促进作用。同时可看出两种复合材料中均无有害相 Al_4C_3 生成。

2.2 复合材料的微观组织

图 2(a)和(c)所示分别为 1[#]和 3[#]SiC_p/Al 复合材料的 SEM 像。由图 2 看出, 复合材料的组织非常均匀、致密, 没有明显的缺陷。SiC 颗粒基本呈均匀随机分布且层次明显, 小颗粒充分填充到大颗粒的间隙中, 从而有效地提高颗粒整体的体积分数。虽然采用两种粒径的颗粒混合增强, 但颗粒分布均匀, 不存在颗粒的偏聚区和贫化区。从图 2 还可以发现, 在 SiC 增强相

的周围的边界处有白色物质存在, 表明无压浸渗 SiC_p/Al 复合材料有界面反应现象的发生。图 2(b)所示为 2[#] SiC_p/Al 复合材料的 SEM 像。由图 2(b)可以看出, 复合材料中有明显气孔存在, 分析认为一是浸渗不完全导致残留下气孔; 二是较大气孔可能是在抛光过程中导致部分颗粒脱落而留下气孔。

图 3 所示为 1[#]SiC_p/Al 复合材料的背散射扫描电镜及 EDS 分析。由图 3 可以看出, SiC 颗粒与基体之间

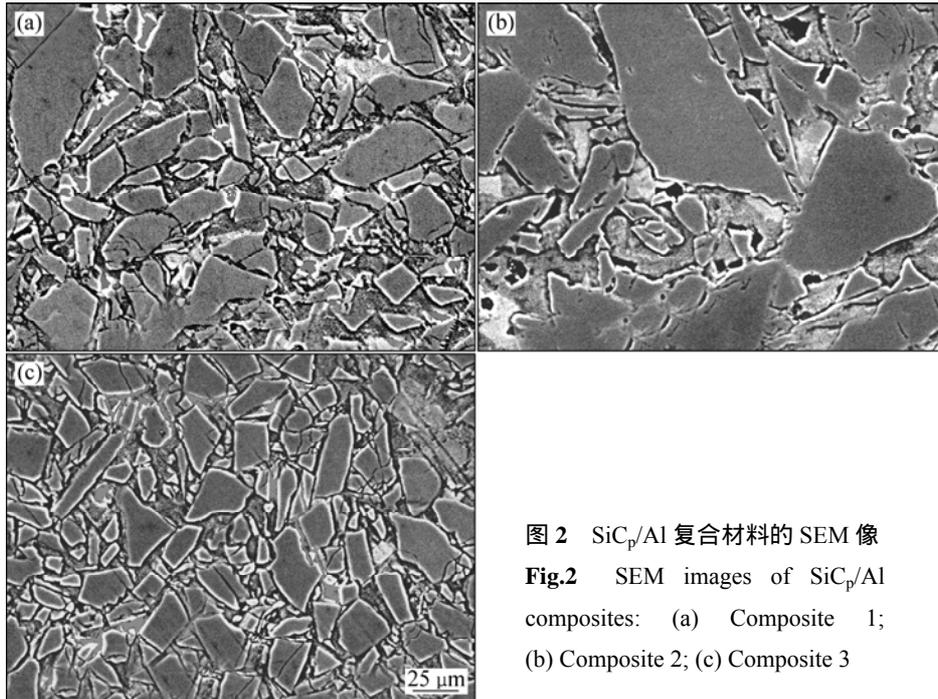


图 2 SiC_p/Al 复合材料的 SEM 像
Fig.2 SEM images of SiC_p/Al composites: (a) Composite 1; (b) Composite 2; (c) Composite 3

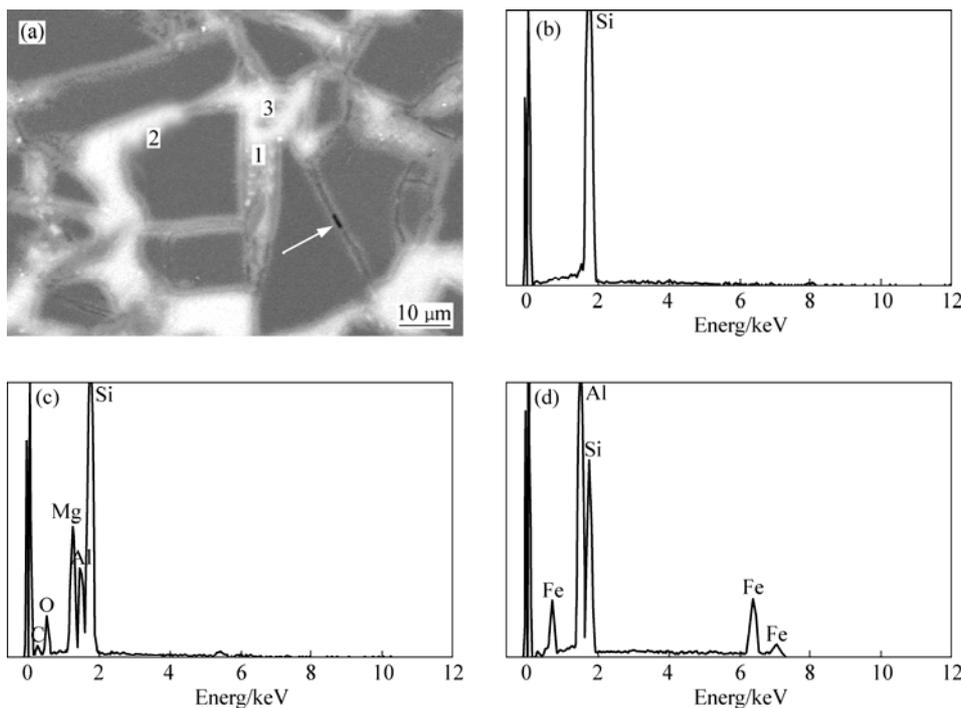


图 3 1[#]SiC_p/Al 复合材料的 SEM 像及 EDS 谱
Fig.3 SEM image and EDS patterns of SiC_p/Al composite 1

的灰色界面清晰, 结合良好, 未发现与基体的脱粘现象。表明本实验的无压浸渗工艺能使铝合金液与 SiC 颗粒润湿复合, SiC 颗粒弥散分布于熔体中, 得到较致密的 SiC 颗粒增强铝基复合材料。由复合材料不同位置的 EDS 分析结果并结合图 1 的 XRD 分析可以确定, 细小颗粒为单质 Si, 主要来源于基体合金, 少部分来源于 SiO₂ 和 Al 发生反应生成的 Si。图 2 中灰色界面物质为 Mg₂Si 和 MgAl₂O₄。由图 3 可知, 复合材料中白色亮点为还原生成的单质 Fe。

2.3 复合材料的弯曲强度及断口形貌

几种复合材料的抗弯强度如图 4 所示。由图 4 可以看出, 以 Al-10Si 合金为基体的复合材料抗弯强度比以 Al-10Si-8Mg 合金为基体的复合材料抗弯强度要低。这是因为合金元素 Mg 的加入有利于合金液的浸渗, 提高复合材料的致密度, 使得复合材料的残余气孔率下降, 从而提高了复合材料的弯曲性能。由图 4 也可以看出, 增强体颗粒的粒径从 14 μm 和 50 μm 增加到 28 μm 和 85 μm 后, 复合材料的抗弯强度减小, 说明增强体颗粒的尺寸大小对复合材料的抗弯强度有明显的影响。对于单一尺寸的 SiC_p/Al 复合材料, 材料的抗弯强度随 SiC 颗粒尺寸的增大而减小。由于 SiC 颗粒的大小影响着复合材料内部应力的分布状态, 同时严重影响复合材料性能的残余气孔多集中在大颗粒界面(如图中箭头所示), 因此, 颗粒尺寸越大, 应力集中也就更为严重, SiC 颗粒优先开裂。另一方面,

当颗粒尺寸增大的时候, 颗粒表面积也同时增大, 这样颗粒表面及内部预设的缺陷也就更多, 这些缺陷就会成为材料断裂的裂纹源, 造成大颗粒的优先脆断, 从而导致复合材料抗弯强度降低。这也同样适用于解释双颗粒配比下的实验结果。

SiC_p/Al 复合材料抗弯断口形貌如图 5 所示。由图 5 可以看出, SiC_p/Al 复合材料整体上表现出脆性断裂的特征, 复合材料中的 SiC 颗粒多发生解理断裂, 由图 5(b)、(d)可知, 复合材料断口中存在的韧窝, 这说明材料断裂时, 裂纹主要沿着 SiC-Al 分界面扩展, 铝基体有一定的韧性, 表现出撕裂的特征, 因而 1[#]和 3[#]复合材料还具有一定的塑性变形的特征。图 5(b)中明

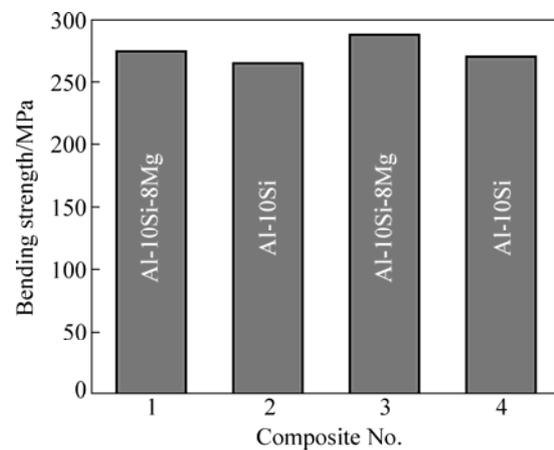


图 4 SiC_p/Al 复合材料的弯曲强度

Fig.4 Bending strength of SiC_p/Al composites

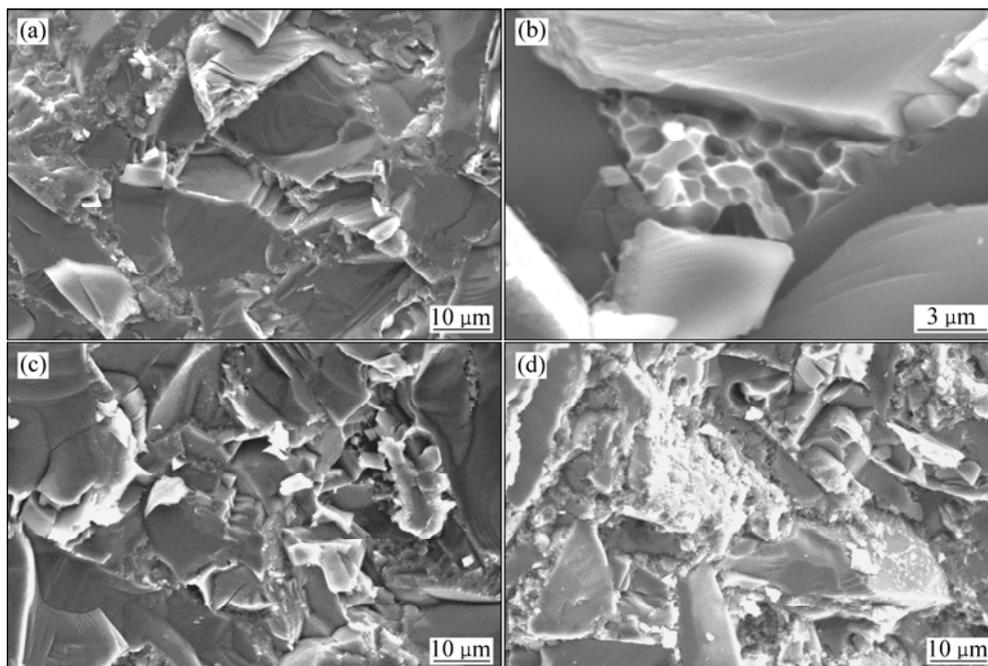


图 5 SiC_p/Al 复合材料的断口形貌

Fig.5 Fracture morphologies of SiC_p/Al composites: (a), (b) Composite 1; (c) Composite 2; (d) Composite 3

显存在着较大残余气孔(如图5(b)中箭头所示),主要原因是铝液没能浸渗到SiC颗粒间的孔隙而残留下孔洞,而图5(a)和图(c)中基本无残余气孔。主要是由于1#和3#复合材料基体中引入了合金元素Mg,有利于铝合金液的浸渗,减少残余气孔的存在。

3 结论

1) 采用无压浸渗法制备出的SiC_p/Al-10Si-8Mg复合材料比SiC_p/Al-10Si复合材料组织均匀,致密度好,同时SiC颗粒与基体之间的界面清晰,无明显气孔等缺陷,界面反应产物为Mg₂Si、MgAl₂O₄和Fe。

2) 以Al-10%Si-8%Mg合金为基体制备的复合材料,其抗弯强度高于以Al-10%Si合金为基体制备的复合材料,且抗弯强度随着级配SiC颗粒粒径的增大而减小。

3) 以Al-10%Si-8%Mg合金为基体制备的复合材料整体上表现出脆性断裂的特征,断口中存在SiC颗粒的解理断裂,同时断口形貌中还含一定量的韧窝,因而又具有一定的塑性变形特征。

REFERENCES

- [1] SHEN Xiao-yu, REN Shu-bin, HE Xin-bo, QIN Ming-li, QU Xuan-hui. Study on methods to strengthen SiC preforms for SiC_p/Al composites by pressureless infiltration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 468(1/2): 158-163.
- [2] LATANISH R M. Corrosion science, corrosion engineering and advanced technologies[J]. Corrosion Science, 1995, 51(4): 270-283.
- [3] REN Shu-bin, HE Xin-bo, QU Xuan-hui, LI Yan. Effect of controlled interfacial reaction on the microstructure and properties of the SiC_p/Al composites prepared by pressureless infiltration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 455(1/2): 424-431.
- [4] REN Shu-bin, HE Xin-bo, QU Xuan-hui, Islam S. Humail, LI Yan. Effect of Si addition to Al-8Mg alloy on the microstructure and thermo-physical properties of SiC_p/Al composites prepared by pressureless infiltration[J]. Materials Science and Engineering: B, 2007, 138(3): 263-270.
- [5] LIU Jun-wu, ZHENG Zhi-xiang, WANG Jian-min, WU Yu-cheng. Pressureless infiltration of liquid aluminum alloy into SiC preforms to form near-net-shape SiC/Al composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 465(1/2): 239-243.
- [6] 张强, 陈国钦, 武高辉, 姜龙涛, 栾伯峰. 含高体积分数SiC_p的铝基复合材料制备与性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1180-1183.
- [7] ZHANG Qiang, CHEN Guo-qin, WU Gao-hui, JIANG Long-tao, Luan Bo-feng. Fabrication and property of SiC_p/Al composites with high content of SiC[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1180-1183.
- [7] ZWEBEN C. Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging[J]. JOM, 1998, 50(6): 47-51.
- [8] HEMAMBAR C, RAO B S, JAYARAM V. Al-SiC electronic packages with controlled thermal expansion coefficient by a new method of pressureless infiltration[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2001, 16(6): 779-788.
- [9] 褚克, 贾成厂, 尹法章. 高体积分数SiC_p/Al复合材料电子封装盒体的制备[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 108-113.
- [9] CHU Ke, JIA Cheng-chang, YIN Fa-zhang. Fabrication on electronic package box of SiC_p/Al composites with high volume fraction of SiC_p[J]. Acta Materiea Compositae Sinica, 2006, 23(6): 108-113.
- [10] 周储伟. 高体积含量颗粒增强复合材料的一个细观力学模型: 弹性分析与等效模量, : 弹塑性与损伤分析[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 125-135.
- [10] ZHOU Chu-wei. Micromechanical model for composites reinforced by large volume fraction of particles : Elastic analysis and effective modulus, : Elastoplastic and damage analysis[J]. Acta Materiea Compositae Sinica, 2005, 22 (4): 125-135.
- [11] 刘君武, 郑治祥, 吴玉程, 王建民, 汤文明, 吕 珺, 徐光青. 近净成形制备SiC_p/Al复合材料(): SiC预成形坯自发熔渗Z101[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(12): 2023-2028.
- [11] LIU Jun-wu, ZHENG Zhi-xiang, WU Yu-cheng, WANG Jian-min, TANG Wen-ming, LÜ Jun, XU Guang-qing. Fabrication of SiC/Al composites with near-net-shape (): Spontaneous infiltration of Z101 into SiC preforms[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(12): 2023-2028.
- [12] PECH-CANUL M I, KATZ R N, MAKHLOUF M M. Optimum parameters for wetting silicon carbide by aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31A: 565-573.
- [13] PECH-CANUL M I, KATZ R N, MAKHLOUF M M. The role of silicon in wetting and pressureless infiltration of SiC preforms by aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35: 2167-2173.
- [14] ZULFIA A, HAND R J. The production of Al-Mg alloy/SiC metal matrix composites by pressureless infiltration[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37: 955-961.

(编辑 龙怀中)