

碳化硅增强铝基复合材料的力学性能和断裂机制

金 鹏¹ 刘 越^{1,2} 李 曙¹ 肖伯律¹

1. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016
2. 东北大学材料与冶金学院 沈阳 110004

摘 要 研究了碳化硅颗粒 (SiC_p) 尺寸对用粉末冶金法制备体积分数为 15% 的 $\text{SiC}_p/2009$ 铝基复合材料力学性能和断裂机制的影响. 结果表明, 复合材料的强度随着 SiC_p 尺寸的增大而减小, 塑性则随着颗粒的增大而增大. 当 SiC_p 尺寸为 $1.5\mu\text{m}$ 时, $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$ 复合材料的断裂主要以界面处撕裂和基体材料的开裂为主; 当 SiC_p 尺寸为 $20\mu\text{m}$ 时, 复合材料的断裂主要以 SiC_p 断裂为主; 当 SiC_p 尺寸处于两者之间时, $\text{SiC}_p/2009\text{Al}$ 复合材料界面处撕裂和 SiC_p 断裂的共同作用决定复合材料的断裂.

关键词 复合材料, 铝基复合材料, 颗粒尺寸, 粉末冶金法, 力学性能, 断裂机制

分类号 TB331

文章编号 1005-3093(2009)02-0211-04

Effects of SiC particle size on tensile property and fracture behavior on particle reinforced aluminum metal matrix composites

JIN Peng¹ LIU Yue^{1,2} LI Shu¹ XIAO Bolv^{1*}

1. Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

2. School of Material and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

Manuscript received November 20, 2008; in revised form January 8, 2009.

* To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)83978630, E-mail: blxiao@imr.ac.cn

ABSTRACT In this paper the tensile properties and fracture behaviour of aluminum alloy 2009 reinforced with silicon carbide particulates (SiC_p) fabricated via elemental powder metallurgical technique were presented. The results indicate that the strength of 15% $\text{SiC}/2009\text{Al}$ composite decrease with increasing particulates size, but ductility inversely. When particulates were $1.5\mu\text{m}$, the breakage is due to tearing of matrix near interface. The failure of composites with $20\mu\text{m}$ particulate results from crack of SiC_p . When particulates are between above sizes, the failure of composite results from tearing of matrix near interface and crack of SiC_p .

KEY WORDS composites, aluminum matrix composites, particle size, powder metallurgical, mechanical property, fracture mechanism

SiC 颗粒与铝合金的复合使颗粒增强铝基复合材料 (SiC_p/Al) 展现出优异的性能, 如低密度、高的比强度和比刚度、耐磨性能好、高热导率和低热膨胀系数. 颗粒增强铝基复合材料因其具有的优异性能而在航空航天领域被广泛的关注^[1-4].

但是, 目前 SiC_p/Al 复合材料的性能还难以满足航空航天发展对于高性能材料的要求. SiC_p/Al 复合材料性能影响因素包括颗粒尺寸^[5,6]、形貌^[7]、颗粒

分布^[8]、热处理^[9]和二次变形^[10,11]. 颗粒尺寸对铝基复合材料性能的影响已有一些研究, 但是还很不充分. 同时, 用固液法在高温下制备的 SiC_p/Al 复合材料易于在界面产生影响力学性能的脆性相 Al_4C_3 ^[12], 而用粉末冶金法在低温制备 SiC_p/Al 复合材料能够有效避免不利的界面化学反应^[13]. 因此, 有必要系统地研究增强体颗粒尺寸对其力学性能和断裂机制的影响. 本文用粉末冶金法制备不同的 SiC_p 尺寸增强铝基复合材料, 研究其力学性能和断裂机制.

1 实验方法

基体材料 2009 铝合金的化学成分 (质量分数,

%) : Cu 3.7, Mg 1.3, 其余为 Al, 增强相 α -SiC_p 的尺寸分别为 1.5 μm 、3.5 μm 、7 μm 和 20 μm 的. 用粉末冶金法制备成不同尺寸增强的 SiC_p/2009Al 复合材料, SiC 的体积分数为 15%. 将复合材料在 480 $^{\circ}\text{C}$ 挤压成直径为 16 mm 的棒材, 挤压比为 10:1, 然后在 495 $^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h, 水淬后在室温下自然时效 96 h. 沿挤压方向加工成直径为 5 mm、标距段为 25 mm 的拉伸试样.

在岛津拉伸试验机上进行拉伸实验, 用扫描电镜 (HITACHI S-3400N) 观察拉伸断口形貌, 用透射电镜 (TECNAI G² 20) 观察界面和位错.

2 结果与讨论

颗粒尺寸分别为 1.5 μm 和 3.5 μm 的 SiC_p 增强铝基复合材料挤压方向微观组织如图 1 所示. 从图中可以看出, 3.5 μm SiC_p 增强铝基复合材料分布比 1.5 μm SiC_p 增强铝基复合材料的分布均匀, 在 1.5 μm SiC_p 增强的铝基复合材料中存在 SiC_p 团聚. 对 3.5 μm SiC_p 增强铝基复合材料挤压棒材的透射电镜观察结果表明, SiC 颗粒表面平整干净 (图 2a), 没有明显的反应产物和孔洞存在, 说明实验中热压工艺和热挤压能防止过度化学反应侵蚀增强颗粒. 同时

还可以发现, SiC_p 团聚处较之基体合金有大量的位错产生 (图 2b).

从表 1 可以看出, 复合材料的屈服强度和抗拉强度都随着 SiC_p 尺寸的增大而减小, 而延伸率则随着 SiC_p 尺寸的增大而增高, 同时 20 μm SiC_p 增强铝基复合材料的屈服强度和抗拉强度都低于基体合金. 对于其它三种 SiC_p 增强铝基复合材料, 其屈服强度和抗拉强度远高于基体合金. 对于相同体积分数的增强体, 小尺寸的 SiC_p 可以得到更高的强度. 而对于 20 μm SiC_p 增强的复合材料, 其强度甚至低于基体合金的强度.

强度的提高可以归结为: (1) 沉淀强化, 基体合金中的 Cu 和 Mg 富集的金属间化合物. (2) 高密度位错, 由于基体合金与 SiC_p 间的热膨胀系数相差较大, 因产生热错配应变而放出位错环来松弛. 在颗粒增强复合材料中, 位错密度 ρ ^[14] 为

$$\rho = 12\Delta T \Delta C \frac{V_f}{bd} \quad (1)$$

其中 ΔT 为温度差, ΔC 为基体合金与 SiC_p 的热膨胀系数差, V_f 和 d 分别为 SiC_p 的体积分数和尺寸, b 为柏氏矢量. 根据

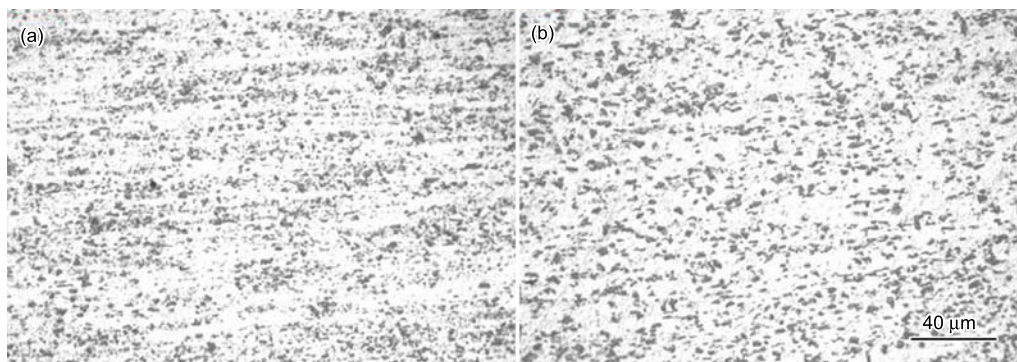


图 1 SiC_p/2009Al 复合材料的显微组织

Fig.1 Microstructure of the SiC_p/2009Al composite (a) 1.5 μm and (b) 3.5 μm

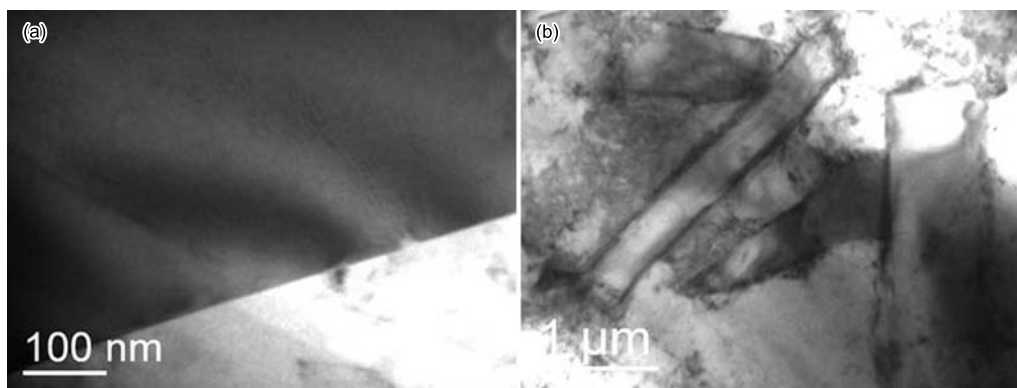


图 2 3.5 μm SiC_p 增强复合材料的 TEM 照片

Fig.2 TEM images of 3.5 μm SiC_p reinforced composite (a) SiC/2009Al interface and (b) dislocations at aggregation

表 1 不同 SiC_p 尺寸 SiC_p/2009Al 复合材料的力学性能

Table 1 The mechanical properties of SiC_p/2009Al composites for different particulate sizes

Particle size, μm	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\sigma_5/\%$
1.5	430	631	5.0
3.5	361	549	8.0
7	351	515	8.5
20	343	464	8.8
2009Al	325	484	17.0

$$\Delta\sigma = \alpha Gb(\rho)^{1/2} \quad (2)$$

可计算因位错而产生的强化^[15]. 式(2)中 α 为常数, G 为基体合金的剪切模量(GPa), b 为基体合金的柏氏矢量, ρ 为因基体合金与SiC_p热膨胀系数不同而产生位错的平均密度. 由式(1)可以看出,随着SiC_p尺寸的减小位错密度增加, SiC_p的尺寸越小所产生的强化效果越明显.

对于相同尺寸的基体合金粉末, SiC_p 越小越容易聚集在基体合金粉末之间, 因此对于 1.5 μm SiC_p 其分散效果不理想, 导致塑性较之尺寸较大的 SiC_p 有所下降, 而大尺寸 SiC_p 在基体合金粉末间聚集相对较少, 所以分布较为理想, 使复合材料的塑性提高.

图 3(a) 是 1.5 μm SiC_p 增强复合材料的拉伸断口, 可以看到碳化硅表面平整且附着基体合金. 这说明, 1.5 μm SiC_p 增强复合材料的断裂方式是以界面处的基体合金撕裂为主要方式, 且颗粒团聚处也是裂纹源(图 3a 中黑色箭头所示). 在 3.5 μm 和 7 μm SiC_p 增强复合材料拉伸断口中, 既有 SiC_p 的断裂, 同时也有在界面处基体合金撕裂(图 3b 和 c). 7 μm SiC_p 增强复合材料的断裂方式是以界面处的基体合金撕裂和 SiC_p 的断裂共同作用. 20 μm SiC_p 增强复合材料的拉伸断口表面 SiC 有较大的裂纹, 且大部分颗粒表面平整(图 3d), 能谱分析结果(表 2)表明, SiC 表面几乎不存在基体合金. 可以看出, 小颗粒尺寸 SiC_p 增强复合材料材料拉伸断口上的颗粒断裂较之 20 μm SiC_p 增强复合材料要少很多. 小颗粒 SiC_p 增强复合材料主要是以界面处基体断裂, 因为小颗粒的界面面积较小, 而且小颗粒本身缺陷较少, 不容易产生断裂. 在本实验中发现, 颗粒与基体之间界面结合良好, 使复合材料所受的载荷能够通过界面有效传递到 SiC_p 上. 对于大尺寸的 SiC_p 增强复合材料, 其界面面积较大, 因此随载荷增加 SiC_p 承受的应力增加, 加之本身存在的缺陷以及在挤压过程中颗粒的断裂, 因此解理断裂倾向明显, 这也是其强度低于基体合金的主要原因. 陈康华^[16]等计算了颗粒尺寸对复合材料断裂机

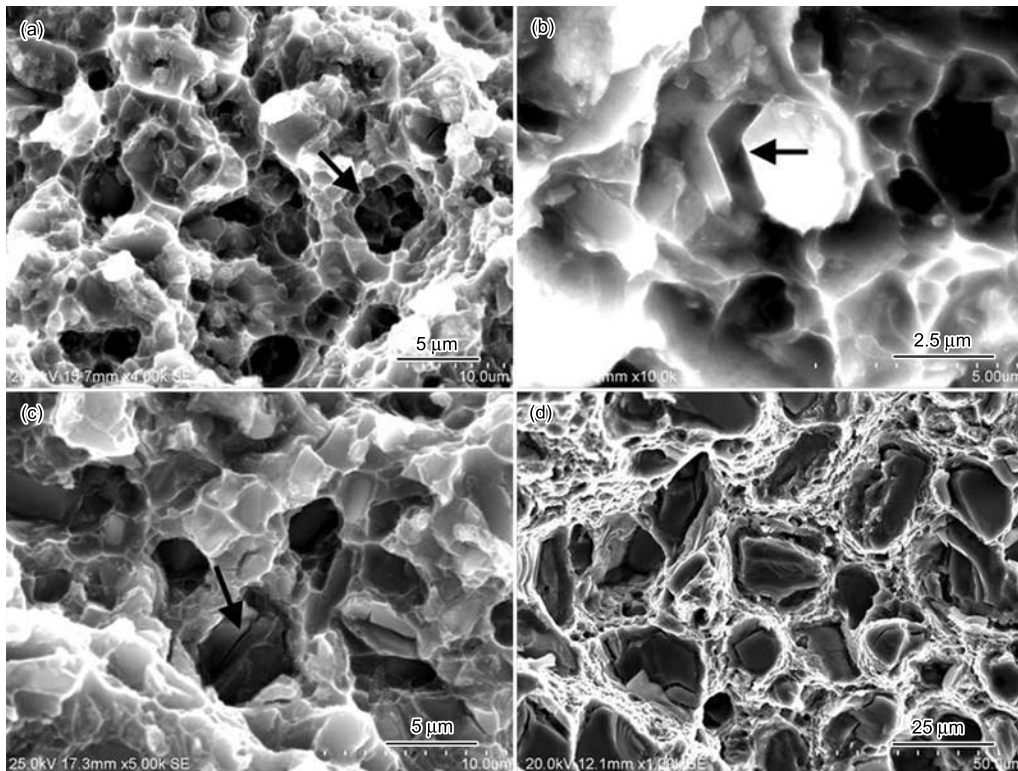


图 3 不同 SiC_p 尺寸增强铝基复合材料的断口照片

Fig.3 Fractography of different particle size reinforced aluminum matrix composites (a) 1.5 μm , (b) 3.5 μm , (c) 7 μm and (d) 20 μm

表 2 SiC 表面的能谱分析结果
Table 2 Surface EDS results of SiC_p

Particle size/ μm	Al, counts	Si, counts
3.5	2300	1600
20	400	3300

制的影响. 结果表明, 当颗粒粒度较小时, 增强体所受应力相应较大, 界面脱粘分数则相应增加, 复合材料的颗粒失效以界面脱粘为主, 随着颗粒尺寸增大, 颗粒失效则转变为颗粒断裂和界面脱粘共同作用. 这些结果与本实验所观察到的结果相似.

3 结 论

用粉末冶金方法制得的体积含量为 15% 的 SiC_p 增强 2009Al 复合材料, SiC_p 尺寸在 1.5–20 μm 范围内变化时, SiC_p 尺寸对材料的力学性能有相当程度的影响. 随着 SiC_p 尺寸的减小, 材料的屈服强度和拉伸强度均逐渐增大, 而延伸率则逐渐减小. 当 SiC_p 尺寸为 1.5 μm 时屈服强度和拉伸强度达到 430 MPa 和 631 MPa. SiC_p 尺寸对 SiC_p/2009Al 复合材料的破坏机制有重要影响. SiC_p 尺寸为 20 μm 时, 复合材料的破坏主要归结于 SiC_p 的解理断裂, SiC_p 尺寸为 3.5 μm 和 7 μm 时, 则是 SiC_p 的解理断裂和界面处基体合金撕裂共同作用. 当 SiC_p 尺寸为 1.5 μm 时, 界面撕裂形成的空洞和裂纹形成和长大以及颗粒团聚处开裂, 最终导致材料断裂.

参 考 文 献

- P.M.Singh, J.J.Lewandowski, Effects of heat treatment and reinforcement size on reinforcement fracture during tension testing of a SiC_p discontinuously reinforced aluminum alloy, *Metallurgical Transactions A*, **24A**, 2531(1993)
- S.H.Chen, T.C.Wang, Size effects in the particle-reinforced metal-matrix composites, *Acta Mechanica*, **157**, 113(2001)
- A.B.Pandey, B.S.Majumdar, D.B.Miracle, Deformation and fracture of a particle reinforced aluminum alloy composite: part I. experiments, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **31A**, 921(2000)
- B.Miracle, Metal matrix composites-From science to technological significance, *Composites Science and Technology*, **65**, 2526(2005)
- G.M.Janowski, B.J.Pletka, The effect of particle size and volume fraction on the aging behavior of a liquid-phase sintered SiC/aluminum composite, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **26A**, 3027(1995)
- Y.W.Yan, L.Geng, Effects of particle size on deformation behaviour of metal matrix composites, *Materials Science and Technology*, **23**(3), 374(2007)
- S.G.Song, N.Shi, G.T.Gray Iii, J.A.Roberts, Reinforcement shape effects on the fracture behavior and ductility of particulate-reinforced 6061-Al matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **27A**, 3739(1996)
- P.B.Prangnell, S.J.Bames, S.M.Roberts, P.J.Withers, The effect of clustering on damage formation in particulate reinforced MMCs deformed in compression, *Key Engineering Materials*, **127-131**, 937(1997)
- Preet M. Singh, John J. Lewandowski, Effects of heat treatment and reinforcement size on reinforcement fracture during tension testing of a SiC_p discontinuously reinforced aluminum alloy, *Metallurgical Transactions A*, **24A**, 2531(1993)
- CHENG Ye, XIE Chunsheng, LUAN Uofen, WU Gaohui, Microstructure and properties of sub-micron Al₂O_{3p}/Al composites after hot extrusion, *Materials for Mechanical Engineering*, **29**(8), 38(2005)
(成 烨, 谢春生, 栾佰峰, 武高辉, 热挤压对亚微米 Al₂O_{3p}/2024A1 复合材料组织和性能的影响, *机械工程材料*, **29**(8), 38(2005))
- L.Geng, S.J.Qu, T.Q.Lei, Hot extrusion and its effect on microstructure and properties of squeeze casting SiC_p/Al composites with lower volume fraction of reinforcement, *Key Engineering Materials*, **249**, 233(2003)
- L.M.Tham, M.Gupta, L.Cheng, Effect of limited matrix-reinforcement interfacial reaction on enhancing the mechanical properties of aluminium silicon carbide composites, *Acta Materialia*, **49**, 3243(2001)
- R.D.Evans, J.D.Boyd, Near interface microstructure in a SiC/Al composite, *Scripta Materialia*, **49**, 59(2003)
- V.K.Varma, S.V.Kamat, V.V.Kutumbarao, Tensile behaviour of powder metallurgy processed (Al-Cu-Mg)/SiC_p composites, *Materials Science and Technology*, **17**, 93(2001)
- T.S.Srivatsan, J.Mattingly, Influence of heat treatment on the tensile properties and fracture behaviour of an aluminium alloy ceramic particle composite, *Journal of Materials Science*, **28**, 611(1993)
- CHEN Kanghua, FANG Ling, LI Xia, HUANG Dawei, FANG Huachan, Influence of particle failure on strength of SiC_p/Al composites, *Journal of Central South University (Science and Technology)*, **39**(3), 493(2008)
(陈康华, 方 玲, 李 侠, 黄大为, 方华婵, 颗粒失效对 SiC_p/Al 复合材料强度的影响. *中南大学学报 (自然科学版)*, **39**(3), 493(2008))