



# Mg 对真空压力浸渗 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料组织和性能的影响

陈以心, 王日初, 王小锋, 彭超群, 彭健, 孙月花

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 采用光学显微镜、X 射线衍射仪和电子万能试验机等手段研究 Mg 含量对真空压力浸渗 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料组织和性能的影响。结果表明: Mg 能提高 Al 合金的浸渗性能, Mg 含量的增加使复合材料致密度升高。Mg 促进 SiC/Al 界面反应的发生, 当 Mg 含量为 0~6%(质量分数)时, 未观察到明显界面反应产物; 当 Mg 含量为 8% 时, 发生界面反应生成 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>。当 Mg 含量为 0~6% 时, 由于复合材料致密度的提高及 Mg 对 Al 基体的固溶强化作用, 导致复合材料强度提高; 当 Mg 含量为 8% 时, 生成的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 降低 SiC/Al 界面结合力, 使复合材料强度下降。当 Mg 含量为 0~4% 时, 致密度的提高使复合材料热导率上升; 当 Mg 含量为 4%~8% 时, 过量的 Mg 使 Al 基体热导率降低, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成使界面热传导受阻, 导致复合材料热导率下降。

**关键词:** SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料; 真空压力浸渗; 显微组织; 物相; 力学性能; 热导率

**中图分类号:** TG146

**文献标志码:** A

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料具有热导率高、热膨胀系数可调、强度高和密度低等优点, 且其热膨胀系数可通过改变 SiC 体积分数调节, 从而与电子芯片基板热膨胀系数匹配<sup>[1]</sup>。因此, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料作为新型电子封装用材料受到了广泛关注, 在汽车、电子和航空航天等领域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

合金成分对金属基复合材料的组织与性能有较大影响<sup>[3]</sup>。对于使用液相浸渗法制备的复合材料, 这些影响不仅体现在界面反应、复合材料性能等方面, 基体成分对浸渗过程也有影响<sup>[4]</sup>。向基体中添加合金元素, 通过改变微观结构进而改善复合材料性能, 是金属基复合材料研究中一种常用的手段<sup>[3]</sup>。WU 等<sup>[5]</sup>采用挤压铸造法制备 Al/金刚石复合材料, 研究了 Cu 对复合材料界面和热物理性能的影响, 发现基体中添加 3%(质量分数)的 Cu 后复合材料的热导率从 210 W/(m·K)提升至 330 W/(m·K)。徐志锋等<sup>[6]</sup>的研究表明, 在真空压力浸渗过程中, 不同基体合金对连续 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中的纤维损伤有明显差异, 导致复合材料的显微组织及力学性能产生显著变化。对于使用无压浸渗法制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料, Al-Mg 系合金是一种常用的基体合金<sup>[7]</sup>。REN 等<sup>[8]</sup>研究了 Mg 和 Si 对无压浸渗制备 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的影响, 其结果表明 Al 基

体中 Mg 的添加有利于浸渗过程自发进行。关于合金元素对真空压力浸渗制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料组织及性能的影响报导较少。刘玫潭等<sup>[9]</sup>仅对比了两种 Al 合金作为基体时相应复合材料的热物理性能。

本文作者选用 Al-Mg 系合金作为基体合金, 通过模压成型和真空压力浸渗制备 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料, 研究基体合金中 Mg 含量对复合材料的显微组织、界面反应、力学性能及热导率的影响。

## 1 实验

本试验中所用 SiC 颗粒平均粒径为 4 和 51 μm, 将粗细两种 SiC 颗粒按质量比 2:1 混合均匀后经模压成型并烧结制备预制块。浸渗用 Al 合金采用普通电阻炉熔铸, 熔炼过程中通 Ar 保护, 所用 Al、Mg 均为高纯铸锭。Al 合金中 Mg 含量分别为 0, 2%, 4%, 6% 和 8%(质量分数, 下同)。SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料采用真空压力浸渗法制备, 其具体工艺参数为上室(预制块)温度 650~670 °C、下室(铝合金熔体)温度 700 °C、浸渗压力 2~4 MPa, 保压 15 min 后随炉冷却。

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料样品经电火花切割、磨样、抛光

后, 采用 XJP-6A 型金相显微镜观察复合材料组织。SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料及基体 Al 合金密度采用排水法测得, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的致密度由式(1)计算得出:

$$\theta = \frac{\rho_A}{\varphi_{\text{SiC}}\rho_{\text{SiC}} + \varphi_{\text{Al}}\rho_{\text{Al}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料致密度;  $\rho_A$  为 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料密度;  $\varphi_{\text{SiC}}$  为 SiC 体积分数;  $\rho_{\text{SiC}}$  为 SiC 密度;  $\varphi_{\text{Al}}$  为 Al 基体体积分数;  $\rho_{\text{Al}}$  为基体 Al 合金密度 ( $\varphi_{\text{SiC}}=65\%$ ,  $\varphi_{\text{Al}}=35\%$ ,  $\rho_{\text{SiC}}=3.2 \text{ g/cm}^3$ )。采用 Rigaku D/max 2500 型 X 射线衍射分析仪(XRD)鉴定物相。样品经切割、机械打磨、凹坑及离子减薄后, 采用 Tecnai G2 20 ST 透射电镜(TEM)观察显微组织, 采用 X 射线能谱仪(EDS)分析成分。三点弯曲强度由 CSS-44100 型电子万能试验机测定, 压头移动速率为 0.5 mm/min, 跨距为 30 mm, 弯曲试样尺寸为 4 mm×3 mm×40 mm。采用 FEI QUANTA-200 型扫描电镜(SEM)观察

断口形貌。采用 JR-22 型激光导热仪测定热扩散系数, 试样尺寸为直径 10 mm×3 mm, 热导率根据测得的热扩散系数和比热容计算得出。

## 2 结果与分析

### 2.1 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的金相组织及致密度

图 1 所示为采用不同 Mg 含量作为基体制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的金相照片。从图 1 可看出, 粗 SiC 颗粒均匀分布于 Al 基体中, 同时细 SiC 颗粒填充在粗 SiC 颗粒之间, 提高了复合材料中的 SiC 体积分数。本研究中 SiC 体积分数为 65%, 高于由单一粒径 SiC 作为增强体制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料<sup>[10]</sup>。图 1(a)所示为基体中未添加 Mg 的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料, 此时可见明显孔隙(即图片中黑色区域); 而从图 1(c)可见, 当 Mg

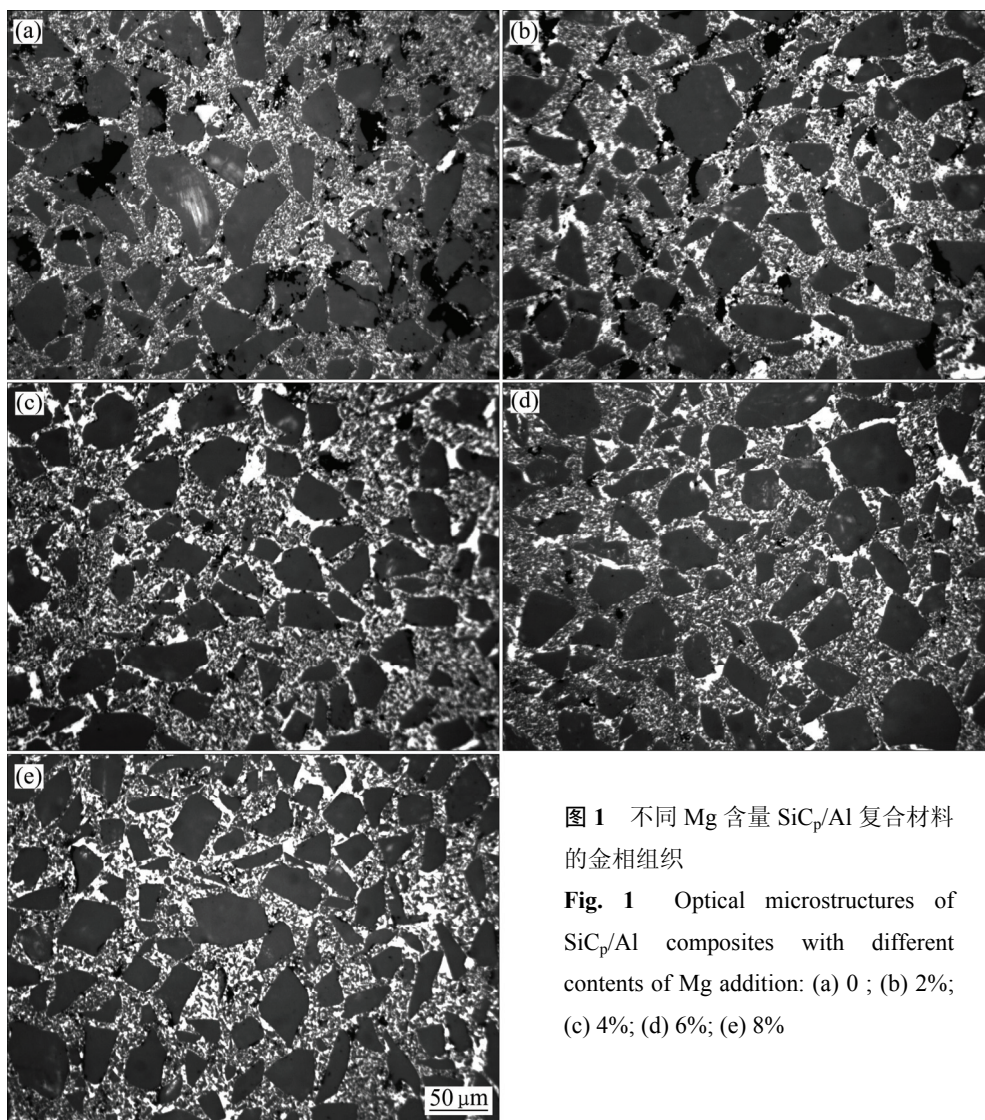


图 1 不同 Mg 含量 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的金相组织

Fig. 1 Optical microstructures of SiC<sub>p</sub>/Al composites with different contents of Mg addition: (a) 0; (b) 2%; (c) 4%; (d) 6%; (e) 8%

含量为 4% 时, 照片中孔隙数目明显减少。复合材料致密度与基体中 Mg 含量关系见图 2。当 Mg 含量从 0% 增加至 4% 时, 致密度从 91.1% 提升至 97.6%, 这一阶段少量 Mg 含量的增加可有效提升复合材料致密度。但当 Mg 含量从 4% 增加至 8% 时, 致密度仅从 97.6% 提升至 98.2%, 此时 Mg 含量的增加对复合材料致密度的提升作用变得不再显著。

在真空压力浸渗过程中, 忽略 SiC 表面吸附的气体和孔隙中气体受压缩后产生的反压力, 浸渗过程可由 Young-Laplace 公式描述:

$$p_s = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

式中:  $p_s$  为毛细管力;  $\sigma$  为液-气表面张力;  $\theta$  为 Al 液与 SiC 颗粒润湿角;  $r$  为等效孔隙半径。当  $\theta > 90^\circ$  时, 毛细管力  $p_s < 0$ , 此时毛细管力表现为阻力, 需要对 Al 液施加大小为  $p_s$  的压力才能使其渗入半径为  $r$  的孔隙中。HAN 等<sup>[11]</sup>的研究表明, 在 650~960 °C 下, Al 基体中含质量分数 5% 的 Mg 可将 Al 液与 SiC 颗粒润湿角降至 90° 以下, 使浸渗变为自发过程; 刘玫潭等<sup>[12]</sup>认为 Al 熔体中的 Mg 可降低 Al 液的表面张力。因此, 在外加压力保持不变的前提下,  $\sigma$  与  $\theta$  的减少可使得 Al 液能渗入半径  $r$  更小的孔隙中, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料致密度得到提高。然而, 实际浸渗时 Al 液的流动过程还受粘滞阻力和摩擦力等因素的影响, 因此通过液相浸渗法难以获得完全致密的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料<sup>[13]</sup>。樊子民等<sup>[14]</sup>研究了 Mg 含量对无压浸渗制备 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的影响, 其研究表明随着 Mg 含量的增加, Al 液在 SiC 预制块中的浸渗深度增加; 当 Mg 含量达到 10% 后, Mg 的增多不再影响 Al 液的浸渗深度。由于本研究的制备条件为真空压力浸渗, 浸渗过

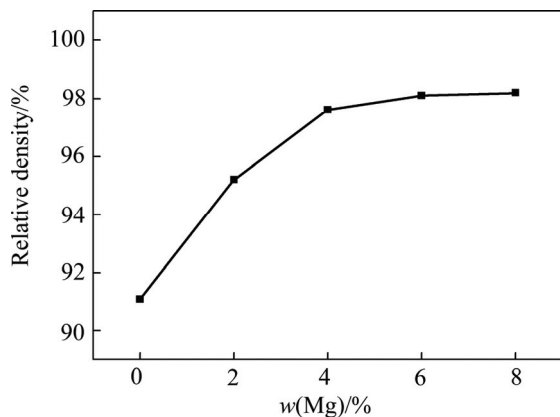


图 2 不同 Mg 含量 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的致密度

Fig. 2 Variation of relative density of SiC<sub>p</sub>/Al composites with different contents of Mg

程中气压远高于无压浸渗的气压, 因此对 Al 液的浸润性要求有所降低, 表现为添加少量 Mg 即可将 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的致密度提升至较高水平。

## 2.2 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的物相分析

不同 Mg 含量 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的 XRD 谱如图 3 所示。从图 3 可以看出, 当基体中 Mg 含量为 0 和 6% 时, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料 XRD 谱中仅可见 SiC 和 Al 衍射峰。复合材料中 Al 合金体积分数为 35%, 在 XRD 谱中未观察到 Al-Mg 金属间化合物。当 Mg 含量为 8% 时, 可观察到 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 衍射峰。此外, 没有明显的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 及 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 相衍射峰。为进一步确认 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的存在, 利用 TEM 观察 SiC/Al 界面附近形貌, 并通过 EDS 测定相应组织成分。Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相形貌及其对应能谱如图 4 所示。

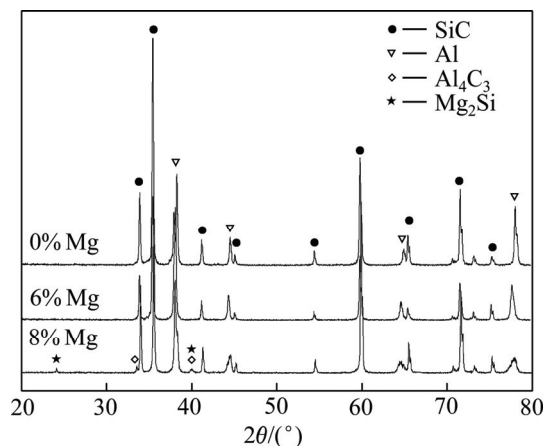


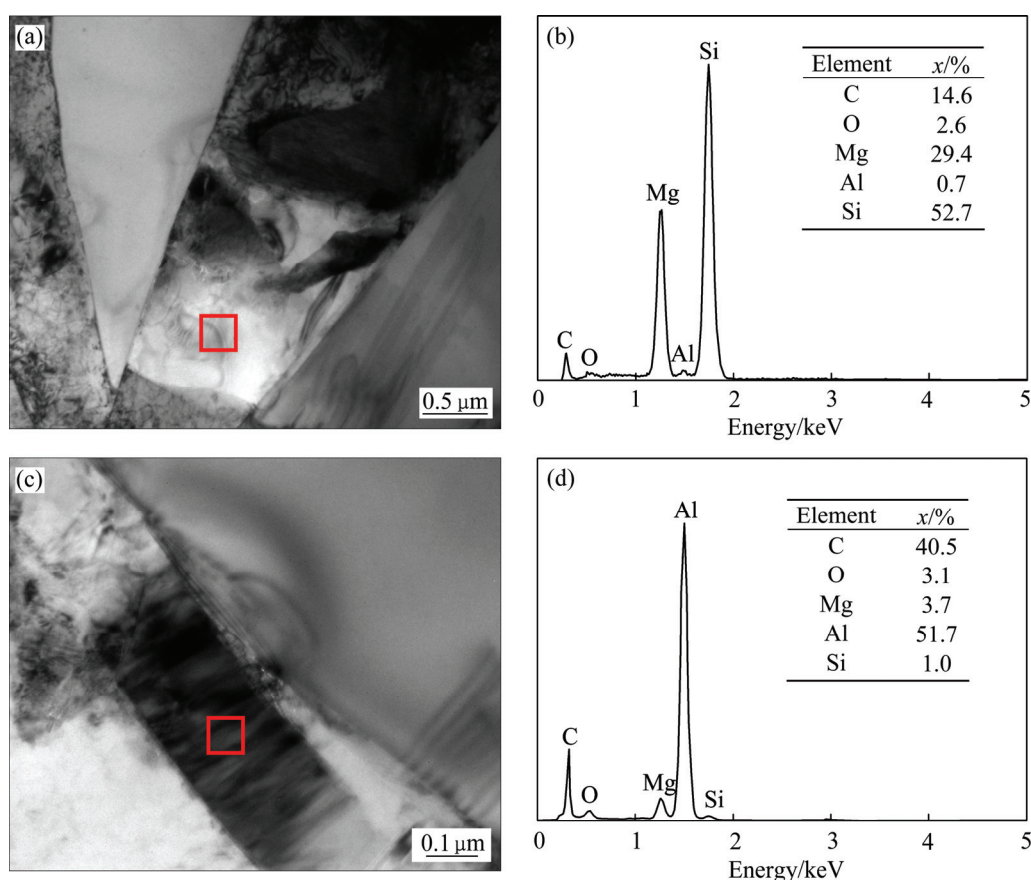
图 3 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of SiC<sub>p</sub>/Al composites

Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的形成由溶解-析出机制控制<sup>[15]</sup>。在熔融 Al 液中, SiC 分解为 C<sup>4+</sup>和 Si<sup>4+</sup>。而 C<sup>4+</sup>在 Al 液中溶解度极低, 因此, SiC 附近的 C<sup>4+</sup>很快达到过饱和态。在能量起伏的作用下, 发生反应生成 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 沉淀, 其总反应式为<sup>[14]</sup>



ROMERO 等<sup>[16]</sup>研究了反应温度对 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 形成的影响, 其 Al 基体为 1100 合金, 将热压制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料置于 680 °C 下退火 10 h, 未观察到 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的形成; 而在 700 °C 条件下, 组织中出现层状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>。ROMERO 等<sup>[16]</sup>认为在 680 °C 下, Al 熔体中的 Si 在 SiC/Al 界面附近偏聚, 导致 Si 浓度升高, 反应(3)受到抑制。本研究中使用真空压力浸渗法制备 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料, 其 SiC 预制块与 Al 合金加热温度均低于

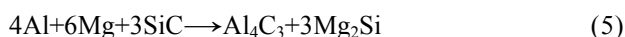
图 4 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的形貌及能谱分析Fig. 4 Morphologies of Mg<sub>2</sub>Si(a) and Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>(c) and EDS analysis of Mg<sub>2</sub>Si(b) and Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>(d)

700 °C, 且 SiC 预制块与熔融 Al 液接触时间较短, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的形成被抑制<sup>[13]</sup>. 因此, 本研究中以纯 Al 为基体制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中未出现 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相。

然而, 当 Al 基体中的 Mg 含量达到 8% 时, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料样品中可检测到 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相, 此时 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的形成与 Mg<sub>2</sub>Si 有关。溶解于 Al 熔体中的 Si 可与 Mg 反应<sup>[17]</sup>:



该反应使 SiC/Al 界面附近的 Si 浓度下降, 在 Mg 反应完全之前, Si 无法产生偏聚, 促进式(3)向正反应方向进行, 生成 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 沉淀。此时 SiC/Al 界面总反应式为:

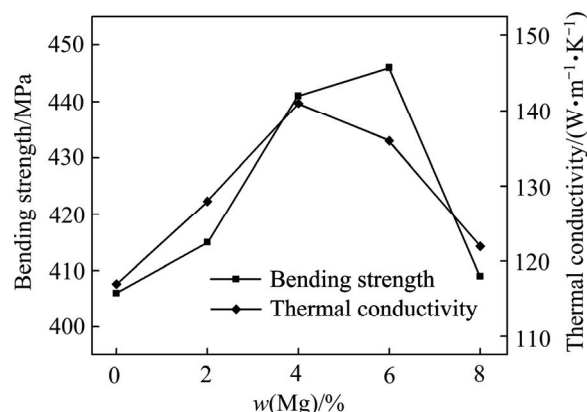


由于本研究中仅在基体含 8% Mg 的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中检测到 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, 因此, 在真空压力浸渗制备工艺条件下, Mg 浓度对反应(5)的发生有一定影响。

### 2.3 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的力学性能及热物理性能

Mg 含量与 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料弯曲强度及热导率的

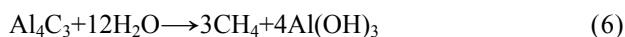
关系如图 5 所示。当 Al 基体中不含 Mg 时, 复合材料弯曲强度为 406 MPa; 随着 Mg 含量提升至 6%, 复合材料弯曲强度升高至 446 MPa。当基体中 Mg 含量达到 8% 时, 复合材料弯曲强度急剧下降至 409 MPa。复合材料热导率随基体中 Mg 含量增加的变化趋势与

图 5 不同 Mg 含量 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的弯曲强度及热导率Fig. 5 Variations of bending strength and thermal conductivity of SiC<sub>p</sub>/Al composites with different content of Mg

强度随 Mg 含量增加的变化趋势类似, 当 Mg 含量为 4% 时复合材料热导率达到本研究中最大值, 当 Mg 含量超过 4% 之后, 热导率随 Mg 含量的增加而下降。

从图 1(a)和(b)可知, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中尺寸较大的孔洞主要分布在 SiC 颗粒之间或 SiC/Al 界面附近。康忻蒙等<sup>[17]</sup>的研究表明, 此类孔洞对复合材料的强度有较大影响。当基体中 Mg 含量为 2% 时, 复合材料中仍存在较多孔洞, 因此相对于基体中 Mg 含量为 0% 时, 复合材料弯曲强度提升不显著。当基体中 Mg 含量为 4% 时, 复合材料已经具有较高致密度, SiC 颗粒之间和 SiC/Al 界面附近无明显孔洞(见图 1(c)), 因此其强度相对于基体中 Mg 含量为 2% 的复合材料有较大提高。而当基体中 Mg 含量从 4% 增加至 6% 时, 复合材料致密度变化较小(见图 2), 因此弯曲强度提升较少。除了通过提高致密度间接影响 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料弯曲强度之外, 添加 Mg 可通过固溶强化提高 Al 基体强度, 从而使复合材料强度提高<sup>[7]</sup>。

当 Al 基体中 Mg 含量从 6% 提升至 8% 时, Al 基体与 SiC 颗粒发生界面反应(式(5))使 SiC 颗粒表面部分溶解, 导致 SiC/Al 界面结合能力减弱。此外 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相可与潮湿空气中的水反应, 导致复合材料强度下降, 其反应式为<sup>[18]</sup>



基体中 Mg 含量为 6% 和 8% 的复合材料断口形貌见图 6。由图 6(a)可知, 当 Mg 含量为 6% 时, 复合材料中的粗 SiC 颗粒被拉断, 断裂的粗 SiC 颗粒仍镶嵌在 Al 基体中, 未发现 SiC 被从基体中拔出形成的凹陷或凸起, 断裂机理类似穿晶断裂。这表明此时 SiC/Al 界面结合状况良好, 裂纹无法沿 SiC/Al 界面优先扩展, 使得复合材料具有较高强度。而在图 6(b)中, 可见明显凹陷以及由细 SiC 颗粒和 Al 基体组成的粗糙平面。这是由于 SiC/Al 界面附近生成的 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相降低了界面结合力, 裂纹得以优先沿界面扩展, 导致部分粗 SiC 颗粒被从 Al 基体中整颗拔出, 复合材料强度下降。

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中的孔洞除了影响其抗弯强度, 还降低其热导率。复合材料热导率与孔率有如下关系<sup>[19]</sup>:

$$K_c = K_m \frac{1 - V_p}{1 + 0.5V_p} \quad (7)$$

式中:  $K_c$  为包含孔洞的复合材料热导率;  $K_m$  为完全致密复合材料热导率;  $V_p$  为复合材料孔率。在本研究中,

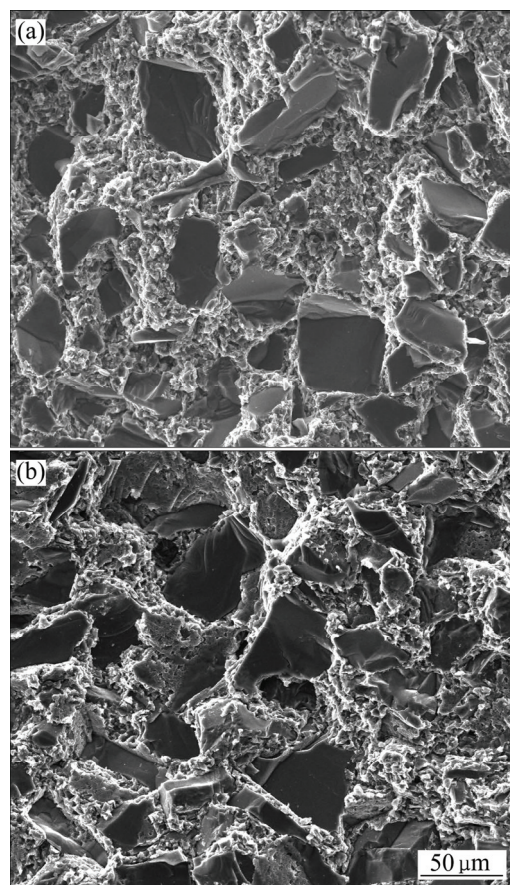


图 6 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的 SEM 断口形貌

Fig. 6 SEM images of fractures surfaces of SiC<sub>p</sub>/Al composites with different contents of Mg addition: (a) 6%; (b) 8%.

当 Al 基体中 Mg 含量分别为 0% 和 4% 时, 复合材料孔率分别为 8.9% 和 2.4%, 将其代入式(7), 可得  $K_c/K_m$  分别为 0.87 和 0.96。因此, 当基体中 Mg 含量从 0% 增加至 4% 时, 随着复合材料致密度升高, 其热导率得到较大提升。当基体中 Mg 含量为 4% 时, 复合材料热导率已达完全致密时的 96%, 此时复合材料致密度的少量提升对其热导率的影响不再显著。由于纯 Mg 的热导率为 156 W/(m·K), 低于纯 Al 的热导率 227 W/(m·K), 因此, Al 合金中的 Mg 含量增加将降低 Al 基体的热导率<sup>[20]</sup>。当 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的致密度、相组成、SiC 体积分数及 SiC 颗粒尺寸无明显变化时, Al 基体热导率下降导致复合材料热导率降低<sup>[20]</sup>。此外, 基体中 Mg 含量为 8% 时出现的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相会阻碍 SiC/Al 界面热传导过程, 导致复合材料热导率下降<sup>[21]</sup>。基于上述原因, 当 Mg 含量高于 4% 时, Mg 含量的增加使复合材料热导率降低。

### 3 结论

1) Al 基体中 Mg 的加入提高 Al 液的浸润性能。在真空压力浸渗条件下, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的致密度随 Al 基体中 Mg 含量的增加而升高, 当 Mg 含量为 8% 时复合材料致密度为 98.2%。

2) Al 基体中 Mg 的加入促进 SiC/Al 界面反应的发生。当 Mg 含量为 0~6% 时, Al 基体与 SiC 颗粒不反应; 当 Mg 含量为 8% 时, Al 基体与 SiC 颗粒反应生成 Mg<sub>2</sub>Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>。

3) SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料弯曲强度随 Al 基体中 Mg 含量增加先升高后降低。由于致密度的提高及 Mg 对 Al 基体的固溶强化作用, 当基体中 Mg 含量为 6% 时, 复合材料弯曲强度达到最大值 446 MPa; 当 Mg 含量为 8% 时, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成使 SiC/Al 界面结合能力减弱, 复合材料弯曲强度下降至 409 MPa。

4) SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料热导率随 Al 基体中 Mg 含量增加先升高后降低。孔隙的减少可提高复合材料热导率, 但 Mg 的增加使得 Al 基体热导率下降, 此外 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成导致 SiC/Al 界面热传导受阻, 使复合材料热导率下降。因此当基体中的 Mg 含量 4% 时, 复合材料热导率达到最大值 141 W/(m·K)。

### REFERENCES

- [1] 朱敏, 孙忠新, 高峰, 刘晓阳. 电子封装用金属基复合材料的研究现状[J]. 材料导报, 2013, 27(2): 181-183.  
ZHU Min, SUN Zhong-xin, GAO Feng, LIU Xiao-yang. Research progress of composites for electronic packaging materials[J]. Materials Review, 2013, 27(2): 181-183.
- [2] 张强, 姜龙涛, 武高辉. 无压浸渗法制备氧化态 SiC 颗粒增强铝基复合材料[J]. 无机材料学报, 2012, 27(4): 353-357.  
ZHANG Qiang, JIANG Long-tao, WU Gao-hui. Fabrication of oxidized SiC particles reinforced aluminum matrix composite by pressureless infiltration technique[J]. Journal of Inorganic Materials, 2012, 27(4): 353-357.
- [3] 王西涛, 张洋, 车子璠, 李建伟, 张海龙. 金刚石颗粒增强金属基高导热复合材料的研究进展[J]. 功能材料, 2014, 45(7): 7001-7015.  
WANG Xi-tao, ZHANG Yang, CHE Zi-fan, LI Jian-wei, ZHANG Hai-long. Review on the progress of diamond particles dispersed metal matrix composites with superior high thermal conductivity[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(7): 7001-7015.
- [4] 熊德赣, 程辉, 刘希从, 赵恂, 鲍小恒, 杨盛良, 堵永国. AISiC 电子封装材料及构件研究进展[J]. 材料导报, 2006,

20(3): 111-115.

- XIONG De-gan, CHENG Hui, LIU Xi-cong, ZHAN Xun, BAO Xiao-heng, YANG Sheng-liang, DU Yong-guo. Advances in research on aluminum silicon carbide electronic packaging composites and components[J]. Materials Review, 2006, 20(3): 111-115.
- [5] WU J, ZHANG H, ZHANG Y, LI J, WANG X. Effect of copper content on the thermal conductivity and thermal expansion of Al-Cu/diamond composites[J]. Materials & Design, 2012, 39: 87-92.
- [6] 徐志锋, 徐燕杰, 余欢, 王振军, 周珍珍. 基体合金对连续 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料显微组织及拉伸强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 392-400.  
XU Zhi-feng, XU Yan-jie, YU Huan, Wang Zhen-jun, ZHOU Zhen-zhen. Effect of matrix alloy in microstructure and tensile strength of continuous SiC<sub>p</sub>/Al composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 392-400.
- [7] BEFFORT O, LONG S, CAYRON C, KUEBLER J, BUFFAT P. Alloying effects on microstructure and mechanical properties of high volume fraction SiC-particle reinforced Al-MMCs made by squeeze casting infiltration[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(3): 737-745.
- [8] REN S, SHEN X, QU X, HE X. Effect of Mg and Si on infiltration behavior of Al alloys pressureless infiltration into porous SiC<sub>p</sub> preforms[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2011, 18(6): 703-708.
- [9] 刘政潭, 凌嘉辉, 刘家成, 洪晓松, 李国强. 电子封装用 AISiC 复合材料热导率影响因素探讨[J]. 半导体光电, 2013, 34(5): 770-774.  
LIU Mei-tan, LING Jia-hui, LIU Jia-cheng, HONG Xiao-song, LI Guo-qiang. Influencing factors of thermal conductivity of AISiC composite[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(5): 770-774.
- [10] MOLINA J M, SARAVANAN R A, ARPON R, CARCIACORDOVILLA C, LOUIS E, NARCISO J. Pressure infiltration of liquid aluminium into packed SiC particulate with a bimodal size distribution[J]. Acta Materialia, 2002, 50(2): 247-257.
- [11] HAN D, JONES H, ATKINSON H V. The wettability of silicon carbide by liquid aluminium: the effect of free silicon in the carbide and of magnesium, silicon and copper alloy additions to the aluminium[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(10): 2654-2658.
- [12] 刘政潭, 蔡旭升, 李国强. 高性能 SiC 增强 Al 基复合材料的显微组织和热性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 1040-1046.  
LIU Mei-tan, CAI Xu-sheng, LI Guo-qiang. Microstructure and thermal properties of high-performance SiC reinforced Al matrix composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 1040-1046.
- [13] 徐志锋, 余欢, 蔡长春, 胡美忠, 严青松, 万红, 郑玉惠. 真空变压力浸渗法制备高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(9): 1551-1557.

- XU Zhi-feng, YU Huan, CAI Chang-chun, HU Mei-zhong, YAN Qing-song, WAN Hong, ZHENG Yu-hui. Preparation of high volume fraction  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites by vacuum adjustable pressure infiltration process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(9): 1551–1557.
- [14] 樊子民, 王晓刚, 田欣伟, 马宁强.  $\text{SiC}/\text{Al}$  基电子封装复合材料的无压浸渗法制备与热性能研究[J]. 铸造技术, 2009, 30(6): 741–744.
- FAN Zi-ming, WANG Xiao-gang, TIAN Xin-wei, MA Ning-qiang. Pressureless infiltration and thermal-properties of  $\text{SiC}$  porous ceramics reinforced  $\text{Al}$  composites for electronic packaging[J]. Foundry Technology, 2009, 30(6): 741–744.
- [15] REN S, HE X, QU X, HUMAIL S I, LI Y. Effect of Si addition to  $\text{Al}-8\text{Mg}$  alloy on the microstructure and thermo-physical properties of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites prepared by pressureless infiltration[J]. Materials Science and Engineering B, 2007, 138(3): 263–270.
- [16] ROMERO J C, ARSENAULT R J. Anomalous penetration of  $\text{Al}$  into  $\text{SiC}$ [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(2): 849–857.
- [17] 康忻蒙, 程小全, 酆正能, 张纪奎, 崔岩. 微缺陷对高体积分数  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料拉伸性能的影响[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 85–91.
- KANG Xin-meng, CHENG Xiao-quan, LI Zheng-neng, ZHANG Ji-kui, CUI Yan. Effect of microdefects on tensile properties of high volume fraction  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(2): 85–91.
- [18] PECH-CANUL M I, KATZ R N, MAKHLOUF M M, PICKARD S. The role of silicon in wetting and pressureless infiltration of  $\text{SiC}_p$  preforms by aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(9): 2167–2173.
- [19] SHEN X, REN S, HE X, QIN M, QU X. Study on methods to strengthen  $\text{SiC}$  preforms for  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites by pressureless infiltration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 468(1): 158–163.
- [20] 邹爱华. 电子封装  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料热导率研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2007: 44–45.
- ZOU Ai-hua. Study on thermal conductivity of Electronic packaging  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2007: 44–45.
- [21] KAWAI C. Effect of interfacial reaction on the thermal conductivity of  $\text{Al}-\text{SiC}$  composites with  $\text{SiC}$  dispersions[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(4): 896–898.

## Effects of Mg on microstructures and properties of $\text{SiC}_p/\text{Al}$ composites prepared by vacuum pressure infiltration

CHEN Yi-xin, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, PENG Chao-qun, PENG Jian, SUN Yue-hua

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The effect of Mg content on the microstructures and properties of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites prepared by vacuum pressure infiltration was investigated by optical microscopy, X-ray diffractometer and electronic universal testing machine. The results reveal that the addition of Mg enhances the infiltration ability of  $\text{Al}$  matrix, leading to the increase of relative densities of composites. The addition of Mg promotes the  $\text{SiC}/\text{Al}$  interface reactions, no obvious reaction products are observed when Mg content is 0–6% (mass fraction), while both  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{Al}_4\text{C}_3$  form at Mg content of 8%. The strength of composites increases with the increasing content of Mg when Mg content is among 0–6%, due to the increase of relative densities and strengthening of  $\text{Al}$  matrix by solid solution hardening. When Mg content is 8%, the formation of  $\text{Al}_4\text{C}_3$  leads to the decrease the bonding strength of  $\text{SiC}/\text{Al}$  interfaces, undermining the bonding strength of composites. The thermal conductivity of composites increases with the increasing Mg content when Mg content is 0–4%, because of the increases of relative densities. When Mg content is 4–8%, the thermal conductivity of composites decreases as Mg content increases. It is explained by the combined action of excessive Mg undermining the thermal conductivity of  $\text{Al}$  matrix and  $\text{Al}_4\text{C}_3$  weakening the heat transfer of interfaces.

**Key words:**  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composite; vacuum pressure infiltration; microstructure; phase; mechanical property; thermal conductivity

**Foundation item:** Project(51202296) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(20120162120006) supported by the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China

**Received date:** 2015-07-30; **Accepted date:** 2016-01-15

**Corresponding author:** WANG Xiao-feng; Tel: +86-731-88886638; E-mail: 13467516329@163.com

(编辑 龙怀中)