

# 无压浸渗法制备 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 电子封装基板及其性能

黄俊 王晓刚 朱明 王明静 任怀艳

(西安科技大学材料科学与工程学院,西安 710054)

**文 摘** 采用无压浸渗法制备出电子封装用高体积分数的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料基板,研究了主要合金元素对浸渗过程的影响和  $\text{SiC}$  体积分数对复合材料热物理性能的影响。结果表明:合金中  $\text{Mg}$  元素能促进界面润湿, $\text{Si}$  元素能减小有害界面反应的发生;随着  $\text{SiC}$  体积分数的增加,复合材料的热导率和线胀系数都呈下降趋势,当  $\text{SiC}$  体积分数为 65% 左右,热导率下降幅度减缓;当  $\text{SiC}$  体积分数为 68% 左右时,线胀系数显著降低。

**关键词**  $\text{SiC}_p/\text{Al}$ , 电子封装, 无压浸渗

## Properties of $\text{SiC}_p/\text{Al}$ Electronic Packaging Substrates Fabricated by Pressureless Infiltrating

Huang Jun Wang Xiaogang Zhu Ming Wang Mingjing Ren Huaiyan

(College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054)

**Abstract** Silicon carbide particle reinforced aluminum composite  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  was fabricated by pressureless infiltration technology. The effects of alloying elements on infiltration process were studied. The influence of  $\text{SiC}$  volume fraction on thermo-physical properties of composite was investigated as well. It was found that magnesium improved interface wettability and silicon depressed the harmful interface reaction. With the increasing of  $\text{SiC}$  volume fraction, the values of thermal conductivity and linear expansion coefficient of the composite decreased. When the  $\text{SiC}$  volume fraction approached 65 percent, the decrease of thermal conductivity slowed down. When the  $\text{SiC}$  volume fraction approached 68 percent, linear expansion coefficient rapidly decreased.

**Key words**  $\text{SiC}_p/\text{Al}$ , Electronic packaging, Pressureless infiltration

### 0 引言

高体积分数的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料具有高热导率、低线胀系数、低密度、良好的力学性能,且可通过调整  $\text{SiC}$  体积分数和铝合金成分,以获得与芯片、集成电路、大功率器件的热物理性能相匹配,对这些器件起到封装、保护、散热的作用<sup>[1-2]</sup>。而传统的电子封装材料  $\text{Cu-Mo}$ 、 $\text{Cu-W}$  等合金由于密度大,线胀系数与芯片不匹配,制备成本高,很难在工业上大规模运用。据文献[3]报道,美国 TTC、CPS 等公司的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料产品应用于 LEO(Low-earth-orbit)、卫星 PWB 基板、F-22 Raptor(猛禽)、F-18 Hornet(大黄蜂)等军用飞机的无线遥控装置、发电机组及平视显示器仪表盘以及火星探路者和卡西尼号太空船等深太空探测器。电子封装用  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料由于  $\text{SiC}$  分数很高,采用常规的粉末冶金,搅拌铸造等工艺很难实

现,国内外多采用设备复杂的气压浸渗法工艺研究。本文采用无压浸渗法,克服了  $\text{SiC}$  与铝液之间界面的不润湿性及高温发生界面反应<sup>[4-5]</sup>等困难,在无保护气氛下制备出各种体积分数的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  电子封装材料,所用设备、原料价格低廉,工艺简单。

### 1 实验

#### 1.1 材料的选取

实验所采用的  $\text{SiC}$  颗粒为  $\beta\text{-SiC}$ 。 $\beta\text{-SiC}$  属立方晶系,与金刚石晶体结构相似,具有比普通  $\alpha\text{-SiC}$  更高的热导率,更低的线胀系数<sup>[6]</sup>。 $\text{SiC}$  颗粒平均粒径为  $10\ \mu\text{m}$ ,密度  $3.18\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。铝合金基体选用在中频感应熔炼炉中自行配制、熔炼的  $\text{Al-10Si-4Mg}$  特殊铝合金,密度约为  $2.57\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。黏结剂采用 5% 聚乙烯醇水溶液,造孔剂选用可溶性淀粉。

#### 1.2 预制体的制备

收稿日期:2010-12-01;修回日期:2011-01-11

基金项目:陕西省 13115 重大创新科技项目 2007ZKC-03-04

作者简介:黄俊,1984 年出生,硕士研究生,主要从事金属基复合材料的研究。E-mail:myway6357@163.com

将 SiC 颗粒与不同质量比的淀粉混合均匀,加入黏结剂进行造粒,过筛,分选,在钢模中机械压制成型,厚度约为 1mm 的薄片。然后烘干、排胶,随后在电阻炉中 1 200℃ 下保温 60 min,烧结成具有一定度和孔隙率的 SiC 预制体。

### 1.3 无压浸渗

将自行熔炼的铝合金切割成块,置于刚玉坩埚中,在电阻炉中加热至 680℃ 熔化,再将经 700℃ 预热过的 SiC 预制体迅速浸入铝合金液中,预热过程预制体内空气受热膨胀大量排除,减小了浸渗阻力;同时

采用特殊装置将预制体保持在铝液的底部,使之承受一定的铝液压力,盖好坩埚,迅速升温至 850℃,保温 120 min,在浸渗过程中坩埚铝液表面会形成一层致密氧化物渣层,对层面下的新鲜铝液起到保护作用。然后降温至 680℃ 时,取出浸渗体,同时清理铝合金液表面氧化物,以备铝合金的重复利用。将浸渗体随炉冷却,在砂轮机上打磨,抛光后得到 SiC<sub>p</sub>/Al 封装基板试样见图 1。整个浸渗过程在空气气氛下置于电阻炉中进行,无须惰性气氛的保护。

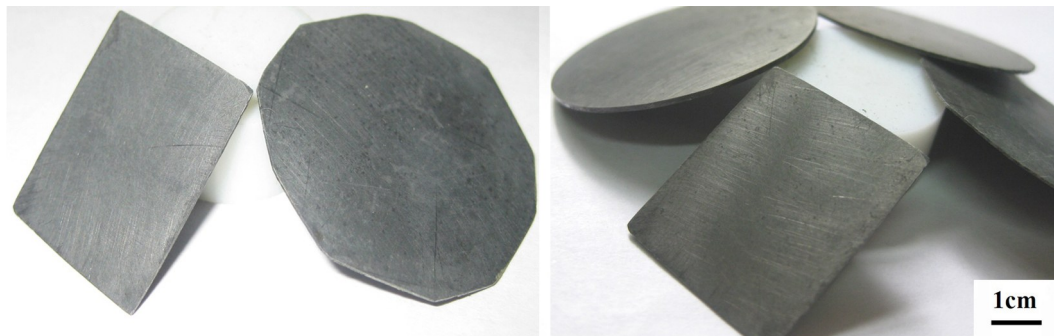


图 1 制备的封装基板样品  
Fig. 1 Samples of packaging substrates

### 1.4 测试

采用 OLYMPUS BX51 金相显微镜对复合材料的组织进行观察;采用 FEI QUANTA600F 扫描电镜分析结构和元素;使用岛津 XRD-7000 分析复合材料物相组成;使用 NETZSCH DIL402C 线胀系数综合测试仪测定复合材料线胀系数;采用 NETZSCH LFA 427 测定热扩散系数,从而计算出热导率。

## 2 结果与分析

### 2.1 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的密度测试

采用排水法测定试样的密度等相关参数如表 1 所示,SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料在无压浸渗铝后密度较 SiC 预制体有显著变化,复合材料的相对密度达到 98% 左右,说明浸渗过程顺利发生。气孔率保持在 2% ~ 3%,可以推断仍有少量孔隙未浸渗完全,且随着 SiC 体积分数的增加,复合材料的相对密度略有下降,残余气孔量有所增加,试验发现,当 120 min 浸渗发生后,继续延长保温时间,对气孔率的减小没有明显的效果。

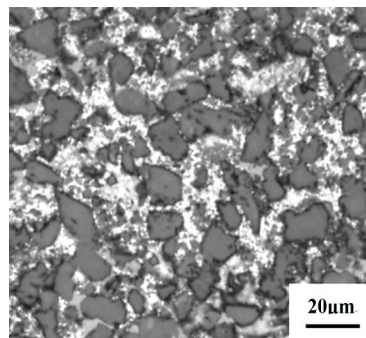
表 1 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的密度

Tab. 1 Density of SiC<sub>p</sub>/Al composites

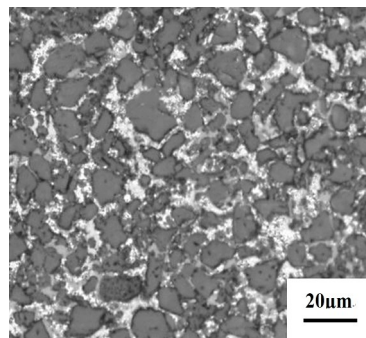
SiC/vol%	SiC 预制体密度/g·cm <sup>-3</sup>	SiC <sub>p</sub> /Al 密度/g·cm <sup>-3</sup>
55	1.75	2.86
60	1.91	2.88
65	2.07	2.89
68	2.16	2.90
70	2.23	2.91

### 2.2 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的显微组织

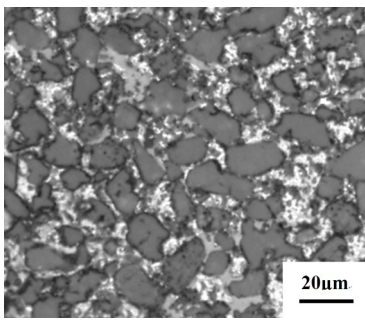
图 2 为不同 SiC 分数的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的金相组织。可以看出,灰色有轮廓的块状分布为 SiC 颗粒,亮白的区域为铝合金基体,SiC 颗粒占据复合材料大部分体积,且比较均匀地分布于铝合金基体中,小颗粒 SiC 处于在大颗粒 SiC 间隙。复合材料的组织比较致密,无明显裂纹,气孔较少。



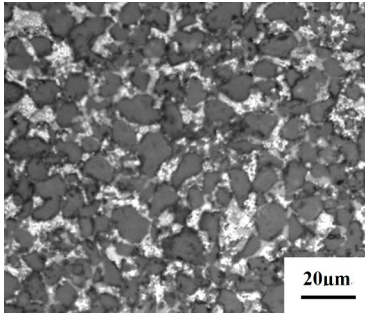
(a) 55% SiC<sub>p</sub>



(b) 60% SiC<sub>p</sub>



(c) 65% SiC<sub>p</sub>

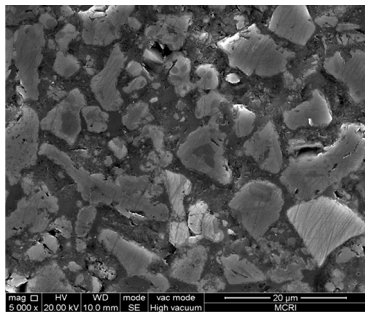


(d) 70% SiC<sub>p</sub>

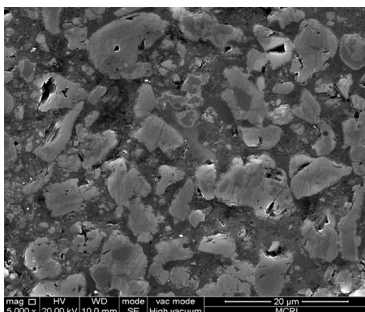
图2 复合材料的金相组织

Fig.2 Microstructure of composites

从图3可以看出:铝合金基体与SiC颗粒界面结合良好,界面过渡自然,平整,观察不到明显的界面反应层存在,也没有在试样打磨,抛光处理过程中形成SiC颗粒脱落而留下的大孔洞,说明SiC颗粒与铝合金基体界面结合强度较高;但仍可观察到残留的少量微观孔隙,可能是由于SiC颗粒存在内部缺陷和预制体中的闭气孔造成的,这些部位铝液很难发生自发浸渗,浸渗结束时便以气孔的形式存在。



(a) 68% SiC<sub>p</sub>



(b) 70% SiC<sub>p</sub>

图3 复合材料的SEM照片

Fig.3 SEM morphology of composites

图4所显示的是颗粒和基体间元素的线扫描分布。可以看出,SiC颗粒上的Si峰明显强于铝合金基体中的Si元素,在颗粒与基体相结合的界面处两侧Si、Mg、Al峰都发生突变。Si表现相对基体较弱,Al、Mg峰相对较强。因为界面处成分主要是反应生成的MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,铝合金中的Si从界面附近向基体中扩散,所以界面处的Si分布相对较少,Al、Mg元素大量在界面处富集形成界面产物,有利于改善界面润湿性,这与XRD分析结果一致。MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>有效地起良好的过渡和稳定界面作用。Al、Mg原子向SiC颗粒中有少量扩散现象,由此可知复合材料基体与增强体以界面反应和原子扩散形式结合为主。C元素在基体中几乎探测不到,可以推断SiC颗粒在高温下未被铝液侵蚀而发生分解。

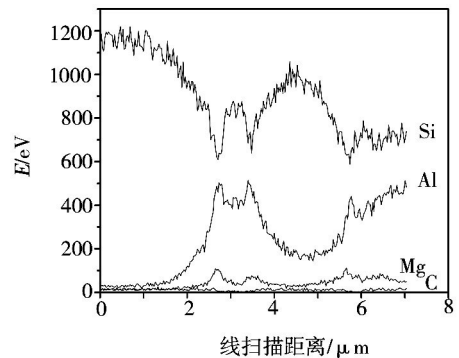
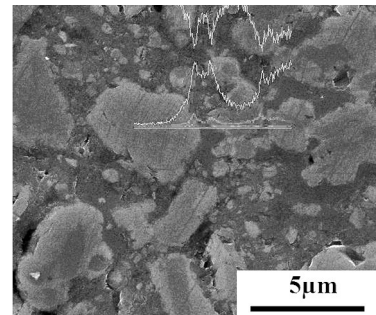


图4 复合材料的线扫描

Fig.4 Analysis of line scanning of composites

### 2.3 XRD物相分析

根据衍射图谱,SiC、Al峰较强,分别为复合材料的增强相和基体相;Si元素主要为原始铝合金成分和少量在浸渗过程中析出的单质Si。由吉布斯吸附理论可知,活性较大的Mg元素扩散至界面,降低界面处金属熔液的黏度,改善其流动性,根据式(1),Mg与SiC颗粒表面SiO<sub>2</sub>薄膜反应形成MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>相,文献[7]报道MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>几乎连续包裹于SiC颗粒表面,同时反应放出大量热,增加了界面润湿性,促进浸渗过程的自发进行,增加了复合材料界面结合强度。复合材料中没有检测到Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>相,由式(2)推断,Si元素对Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>起到了抑制作用,防止了危害界面的脆性相的产生。

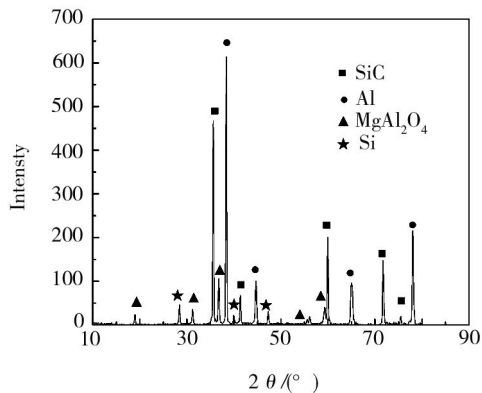
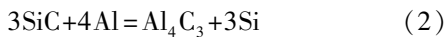


图5 复合材料的XRD图谱

Fig. 5 XRD result of composites

## 2.4 SiC 体积分数对复合材料的热物理性能的影响

复合材料的导热机制主要由铝合金基体中自由电子的导热和 SiC 晶格振动产生的声子导热两部分组成,而其中以连续的铝合金基体的导热为主。如图 6 所示,试验条件范围内复合材料的热导率在(142 ~ 173) W/(m·K)变化。随着 SiC 体积分数的增加,复合材料的热导率呈逐渐下降趋势。SiC 体积增加,复合材料单位体积中界面数量增加,界面对自由电子,声子的传热过程有一定的散射作用,热阻随之增大,导致热导率的下降;当体积分数增加到 65% 左右, SiC 颗粒之间相互接触机会增多,形成连续导热通道,界面热阻效应相应减少,复合材料的热导率逐渐呈平缓下降趋势。

一般认为影响复合材料线膨胀性能的主要因素有 3 个:一是基体合金的线膨胀性质;二是增强体的线膨胀性质;三是基体与增强体界面对材料的约束作用。如图 6 所示:试验条件范围内线胀系数在(6.3 ~ 8.7) × 10<sup>-6</sup>/K 变化。在 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中,由于 SiC 颗粒的线胀系数较小, SiC 在三维空间形成网络支撑骨架,铝合金基体在受热膨胀时受到 SiC 及其界面的抑制作用,复合材料宏观表现出较低的线胀系数。随着 SiC 体积分数的增加, SiC 网络骨架空隙逐渐减小,对铝合金基体的膨胀行为约束加强,复合材料的线胀系数逐渐减小。当 SiC 体积分数接近 68% 时曲线斜率迅速增大,线胀系数显著减小,主要由于铝基体从弹性变形向塑性变形转变,复合材料中产生复杂的应力,这些应力的分布加强了对铝合金基体膨胀行为的约束和抑制作用。

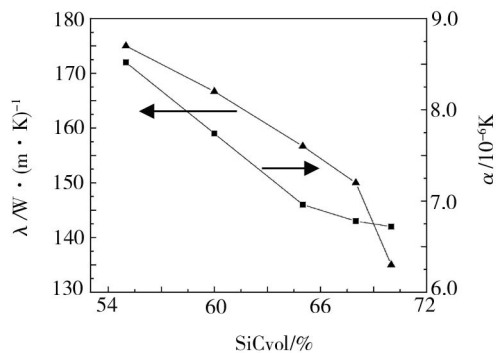


图6 SiC 体积分数对热导率和线胀系数的影响

Fig. 6 Effect of SiC volume fraction on TC and CTE

## 3 结论

(1) 采用无压浸渗法制备出不同体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 电子封装基板,其中热导率大于 150 W/(m·K)、线胀系数在 8.5 × 10<sup>-6</sup>/K 以下的部分复合材料,基本可以满足电子封装材料的性能要求。

(2) Mg 向界面富集形成 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,能改善界面的润湿性; Si 元素起到抑制界面脆性相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 生成的作用。

(3) 随着 SiC 体积分数的增加,复合材料的热导率和线胀系数都呈下降趋势,当 SiC 体积分数增加为 65% 左右时,热导率下降逐渐趋于平缓;当 SiC 体积分数增加为 68% 时,线胀系数显著减小。

## 参考文献

- [1] Lee H S, Hong S H. Pressure infiltration casting process and thermophysical properties of high volume fraction SiC<sub>p</sub>/Al metal matrix composites [J]. Mater. Sci. Techn., 2003, 19: 1057
- [2] Carl Zweben. Advanced composites and other advanced materials for electronic packaging thermal management [J]. Proceeding of 2001 International Symposium on Advanced Packaging Materials, 2001, 3: 360-365
- [3] 钟鼓, 吴树森, 万里. SiC<sub>p</sub> 或高 Si 含量电子封装材料研究进展 [J]. 材料导报, 2008, 22(2): 13
- [4] Molina J M. Pressure infiltration of liquid aluminum into packed SiC particulate with a bimodal size distribution [J]. Acta Materialia, 2002, (50): 247-257
- [5] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用 [J]. 材料工程, 2002(6): 3-6
- [6] 王晓刚. 碳化硅合成理论与技术 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001: 8
- [7] 陶杰, 赵玉涛, 潘蕾. 金属基复合材料制备新技术导论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 226

(编辑 任涛)