

# 电子封装用 SiC<sub>p</sub>/ ZL101 复合材料热膨胀性能研究 \*

张建云<sup>1,2</sup> 孙良新<sup>1</sup> 洪平<sup>2</sup> 华小珍<sup>2</sup>

(1 南京航空航天大学宇航学院,南京 210016)

(2 南昌航空工业学院材料工程系,南昌 330034)

**文 摘** 采用无压渗透法制备了 SiC<sub>p</sub>/ ZL101 复合材料,测定了 SiC<sub>p</sub>/ ZL101 复合材料在 25 ~ 400 区间的线膨胀系数值,运用理论模型对复合材料的线膨胀系数进行了计算,分析了热膨胀性能的影响因素。结果表明,复合材料的线膨胀系数比基体合金显著降低,Turner 模型对 SiC<sub>p</sub>/ ZL101 复合材料线膨胀系数的计算与实验值相接近,复合材料热应力引起线膨胀性能的变化随温度的不同而不同。

**关键词** 电子封装, SiC<sub>p</sub>/ ZL101 复合材料,线膨胀系数,热应力

## Study on Thermal Expansion of SiC Particulate Reinforced ZL101 Composite for Electronic Packaging

Zhang Jianyun<sup>1,2</sup> Sun Liangxin<sup>1</sup> Hong Ping<sup>2</sup> Hua Xiaozhen<sup>2</sup>

(1 College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Department of Material Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

**Abstract** SiC<sub>p</sub>/ ZL101 composite is prepared by use of pressureless infiltration. The coefficients of thermal expansion (CTE) of SiC<sub>p</sub>/ ZL101 composites are measured at temperature range of 25 to 400 . Theoretical models are employed to calculate the CTE of SiC<sub>p</sub>/ ZL101. The influence factors on thermal expansion property are analyzed. The results show that the CTE of the composite decreases apparently by comparison with the CTE of its matrix alloy. The CTE calculated by Turner model is close to the experimental values. The influence of thermal stress on CTE depends on temperature.

**Key words** Electronic packaging, SiC<sub>p</sub>/ ZL101 composite, CTE, Thermal stress

### 1 引言

近年来,碳化硅颗粒增强铝基复合材料发展十分迅速,特别是作为电子级功能复合材料的优势逐渐被人们所认识,现已作为新型电子封装材料重要开发方向之一。随着航空、大规模集成电路、军事通讯等方面的不断发展,传统的电子封装材料已经满足不了这些领域的要求。例如:电子半导体集成度越来越高,所用的电子封装材料要求有高的热导率、

低的线膨胀系数;在航空方面,飞机起飞、导弹发射等,电子系统常伴随激烈的温度变化,所用电子封装材料要求具有高的热导率和低的线膨胀系数,同时它的质量也是必须考虑的重要因素。而传统封装金属材料 Al、Cu 的线膨胀系数都较大,同器件匹配性能差,Fe - Ni 合金热导率低、密度大,均存在一定缺陷。而碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有高热导率、低线膨胀系数、密度小等优点,因而用作新型电

收稿日期:2003 - 09 - 10

\*国家自然科学基金资助(50275074),江西省自然科学基金资助(0350038)

张建云,1958 年出生,教授,博士研究生,主要从事金属基复合材料的研究工作

子封装材料前景广阔<sup>[1~3]</sup>。

碳化硅陶瓷颗粒作为复合材料的增强相,具有比基体合金低很多的线膨胀系数。另外,复合材料常在高温下制备,有些又在较大的温度变化环境下使用,因此要求具有良好的热尺寸稳定性。本文通过对 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料的热膨胀性能的研究,探讨了温度对复合材料热膨胀性能的影响。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

增强相为 SiC 颗粒,平均粒径为 140 μm,金属基体为 ZL101 铝合金,模子使用陶土做成。SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料采用无压渗透法制备<sup>[4]</sup>,工艺流程为:

一定形状模子制备——SiC 颗粒倒入模内——铝合金熔炼——铝合金浇注(850 )——保温(900 )——冷却。

保温在普通井式加热炉中进行,保温结束后随炉冷至室温,再进行脱模。

### 2.2 线膨胀系数试验

将所制备的复合材料线切割加工成 5 mm × 12 mm 试样。在 FUJI(富士)电机株式会社生产的热模拟检测仪上测定复合材料的线膨胀系数,升温速度为 5 /min,探头压力为 12 g,最高温度为 400 ,此温度范围包括了 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料实际应用中可能工作的温度范围。

## 3 结果及讨论

### 3.1 复合材料组织

无压渗透法制备的电子封装用 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料试样的组织如图 1、图 2 所示。由图可见, SiC 颗粒在基体中分布均匀,颗粒与金属基体的界面结合良好。

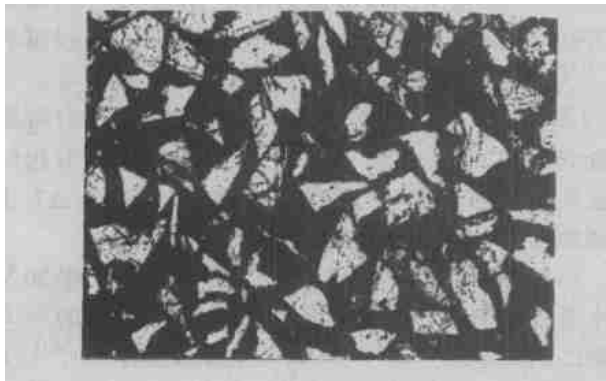


图 1 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料金相组织 63 ×

Fig. 1 Microstructure of SiC<sub>p</sub>/ZL101 composite

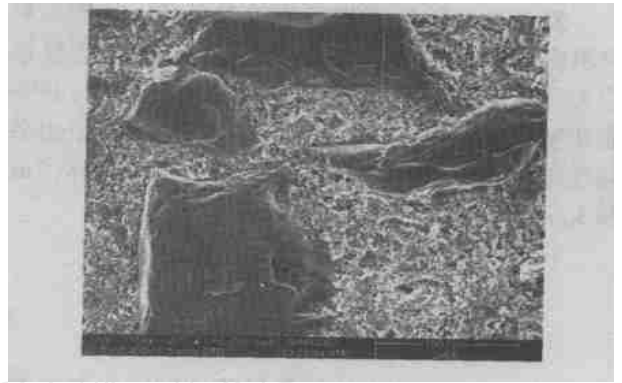


图 2 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料 SEM 形貌

Fig. 2 SEM morphology of SiC<sub>p</sub>/ZL101 composite

### 3.2 复合材料线膨胀系数

测定试样的伸长量,按式(1)换算,得 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料线膨胀系数(CTE)与温度的关系见图 3。

$$\alpha = \frac{L}{L_0 T} \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为线膨胀系数,  $L_0$  为试样的原始长度,  $T$  为温度间隔,  $L$  为试样在  $T$  温度区间的长度增加量。

图 3 中 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料的线膨胀系数比基体合金的线膨胀系数(表 1)显著降低。在温度低于 200 的范围内,复合材料线膨胀系数随温度的增加基本维持一定的斜率增加;当温度高于 200 时,复合材料线膨胀系数随温度变化增加的斜率变大。

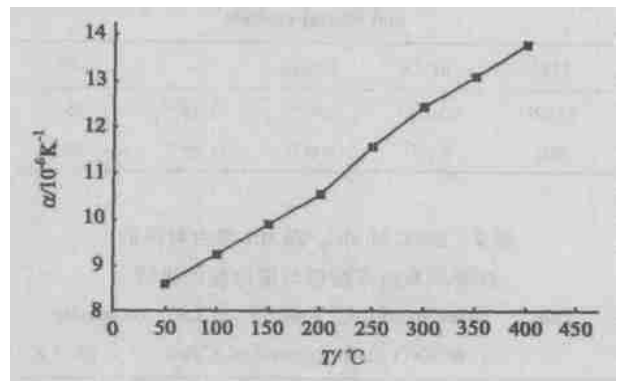


图 3 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料线膨胀系数与温度的关系

Fig. 3 Relation between CTE and temperature of SiC<sub>p</sub>/ZL101 composite

复合材料的热膨胀行为较为复杂。热膨胀将使材料内部产生复杂的应力分布,反过来这些复杂的应力分布又将约束和抑制进一步的热膨胀,并有可能使基体材料发生一定的弹塑性变形。对于由各向同性组分构成的复合材料线膨胀系数的计算,Turner 和 Kerner 分别作了研究<sup>[5]</sup>。

Turner 模型的计算公式为:

$$c = \frac{m V_m K_m + p V_p K_p}{V_m K_m + V_p K_p} \quad (2)$$

Kerner 运用热弹性能量极值原理得出复合材料的线膨胀系数为:

$$c = \frac{V_p(1 - V_p)(c_p - c_m)(K_p - K_m)}{(1 - V_p)K_m + V_p K_p + (3 K_p K_m)/4 G_m} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

式中,  $c$  为线膨胀系数,  $V$  为体积分数,  $K$  为压缩模量,  $G$  为剪切模量,  $\nu$  为泊松比,  $E$  为弹性模量。脚标  $c$ 、 $m$  和  $p$  分别表示复合材料、基体合金和增强相颗粒。

基体合金和 SiC 颗粒的相关参数见表 1,按两种理论模型(2)、(3)式计算的 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料线膨胀系数值及实验值(100 °C)见表 2。

表 1 基体合金和 SiC 颗粒的物理参数

Tab.1 Physical parameters of matrix alloy and silicon carbide

材料	$\alpha / 10^{-6} K^{-1}$	$E / GPa$	$\nu$	$V / \%$
ZL101	23.0 <sup>[6]</sup>	69 <sup>[6]</sup>	0.33 <sup>[7]</sup>	45
SiC	4.0 <sup>[3]</sup>	400 <sup>[8]</sup>	0.20 <sup>[8]</sup>	55

表 2 100 °C 时 SiC<sub>p</sub>/ZL101 复合材料的线膨胀系数实验值与理论值的比较

Tab.2 Experimental CTE of SiC<sub>p</sub>/ZL101 composite at 100 °C and theoretical CTEs

Turner 模型	Kerner model 模型	实验值
7.79	11.30	9.25

由表 2 可知,复合材料线膨胀系数的实验值介

于 Turner 模型和 Kerner 模型的计算值之间,Turner 模型的计算值与实验值更接近一些。

### 3.3 复合材料热膨胀性能的影响因素

对于颗粒增强的 ZL101 复合材料,当温度有  $\Delta t$  的变化时,基体中某点受力状态分析如图 4 所示<sup>[9]</sup>。

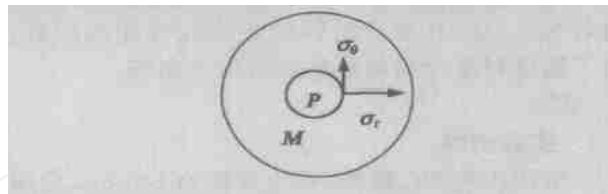


图 4 SiC 颗粒附近基体中热应力简图

Fig.4 Diagram of thermal stress in matrix

$$\sigma_r = P[(a/r)^3 - V_p]/(1 - V_p) \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = P[0.5(a/r)^3 + V_p]/(1 - V_p) \quad (5)$$

$$P = \frac{(c_m - c_p) \Delta t}{\frac{0.5(1 + \nu_m) + (1 + 2\nu_m)}{E_m(1 - V_p)} + \frac{V_p(1 - 2\nu_p)}{E_p}} \quad (6)$$

式中,  $\sigma_r$  为径向应力,  $\sigma_\theta$  为环向应力,  $V$  为体积分数,  $a$  为颗粒半径,  $r$  为基体受力点到颗粒中心的径向距离,  $P$  为界面应力,  $\Delta t$  为温度差。

从式(4) ~ (6) 可看出,应力随  $r$  的减小而增大,在基体与颗粒增强相的界面处达到最大,塑性变形最可能开始于界面。当颗粒附近基体某点的应力满足  $|\sigma_r - \sigma_\theta| > \sigma_y$  时,此点将有产生塑性变形的倾向<sup>[9]</sup>,  $\sigma_y$  为基体的拉伸屈服强度。

由于界面热应力随着温度的升高而增加。当加热温度在 200 °C 以下时,复合材料基体与增强颗粒界面处存在着应力作用,由于低温时基体的强度较高,作用于其上的应力可能还不能满足  $|\sigma_r - \sigma_\theta| > \sigma_y$  的条件,应力不引起基体的塑性变形,应力对膨胀量的影响并不显著,因而应力的变化未能引起线膨胀系数的明显变化,线膨胀系数(1)式中的  $L$  主要来源于基体与陶瓷颗粒的膨胀量。

当加热温度超过 200 °C 时,随着应力的增加及基体强度的下降,颗粒附近区域基体中存在的应力可能已满足  $|\sigma_r - \sigma_\theta| > \sigma_y$  的条件,基体中产生了塑性变形。此时线膨胀系数(1)式中的  $L$  等于基体

(下转第 43 页)

中心位置均会导致胶层靠近间隙端应力集中明显加剧,成为新的高应力区,并可能导致接头破坏模式的变化。

#### 参考文献

- 1 Olia M, Rossetto J N. Analysis of adhesively bonded joints with gaps subjected to bending. *Int. J. Solids Struct*, 1996; 33 (18): 2 681 ~ 2 693
- 2 Lang T P, Mallick P K. The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single - lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1999; 19: 257 ~ 271
- 3 郭忠信. 铝合金结构胶接. 国防工业出版社, 1993

4 郑小玲, 娜日松, 游敏等. 胶瘤对单搭接胶接头强度的影响. *三峡大学学报*, 2001; (6): 530 ~ 532

5 游敏. 金属 - 胶层复合材料接头性能及基础研究. 华中科技大学博士学位论文, 2002

6 Gonçalves J P M, De Moura M F S F, De Castro P M S T. A three - dimensional finite element model for stress analysis of adhesively joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002; 22: 357 ~ 365

7 Lang T P, Mallick P K. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1998; 18: 167 ~ 177

(上接第 34 页)

和陶瓷颗粒的膨胀量与基体塑性变形量之和。压应力对膨胀产生的阻碍作用引起的膨胀量的减小可能远小于其所引起的基体塑性变形量,因而最终导致了此阶段复合材料变形量的增加,从而使线膨胀系数增加。关于这一解释,可以从图 3 中当温度高于 200 时复合材料线膨胀系数随温度变化的斜率变大现象得到验证。所以在高温加热区时应力对膨胀量的改变有较大影响,应力的改变引起了线膨胀系数较大的改变。

#### 4 结论

(1)  $\text{SiC}_p/\text{ZL101}$  复合材料的线膨胀系数比 ZL101 合金的线膨胀系数显著降低。

(2) 在 Turner 模型和 Kerner 模型对  $\text{SiC}_p/\text{ZL101}$  复合材料的线膨胀系数计算值中, Turner 模型的计算值与实验值更接近。

(3)  $\text{SiC}_p/\text{ZL101}$  复合材料,在低温加热区时,应力因素对线膨胀系数变化的贡献不明显,在高温加热区时,应力的改变能引起线膨胀系数较明显的改变。

#### 参考文献

- 1 Carl Zweben. Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging. *JOM*, 1998; 50(7): 47 ~ 51
- 2 催岩等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用. *材料工程*, 2002; (6): 3 ~ 6
- 3 黄强等. 电子封装材料的研究现状. *材料导报*, 2000; 14(9): 28 ~ 32
- 4 张建云等. 陶瓷粒子增强铝基复合材料制取新工艺及其磨损性能. *机械工程材料*, 1996; 20(4): 26 ~ 28
- 5 Sharma S C. Effect of albite particles on the coefficient of thermal expansion behavior of the Al6061 alloy composites. *Metallurgical and materials transactions*, 2000; 31A(3): 773 ~ 780
- 6 张国定等. 金属基复合材料. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 13
- 7 刘鸿文. 材料力学. 北京: 人民教育出版社, 1979: 43
- 8 Geiger A L, Jackson M. Low expansion MMCs boost avionics. *Advanced Materials Processes*, 1989; (7): 23 ~ 30
- 9 Vaidya R U, Chairla K K. Thermal expansion of metal matrix composites. *Composites Science and Technology*, 1994; 50 (1): 13 ~ 22