

- serpentine heat exchanger; part i-effectiveness and heat transfer characteristics [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (14/15): 3081-3087.
- [7] KADYLAK D, CAVE P, MERIDA W, et al. Effectiveness correlations for heat and mass transfer in membrane humidifiers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5/6): 1504-1509.
- [8] MATHEW B, HEGAB H. Application of effectiveness-NTU relationship to parallel flow microchannel heat exchangers subjected to external heat transfer [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(1): 76-85.
- [9] ABD EIBAKY M A A, MOHAMED M M. Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27 (4): 795-801.
- [10] WILLIS N C. Analysis of three-fluid crossflow heat exchanger[D]. NASA, USA, 1966.
- [11] 王礼进,张会生,翁史烈. 三股流高温紧凑板翅式换热器的性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 389-393.  
WANG LI-JIN, ZHANG HUI-SHENG, WONG SHI-LIE. Performance analysis of high temperature three-fluid compact heat exchanger[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(3): 389-393.
- [12] GVOZDENAC D D, BACLIC B S. Performances of three-fluid single pass crossflow heat exchanger [J]. Heat and Mass Transfer, 1994, 29(6): 343-347.
- [13] 石程名,辛明道,陈远国. 三流体分离型热管换热器的传热性能[J]. 重庆大学学报, 1992, 15(4): 20-25.  
SHI CHENG-MING, XIN MING-DAO, CHEN YUAN-GUO. The heat transfer performance of three-fluid separate type heat pipe exchanger [J]. Journal of Chongqing University, 1992, 15(4): 20-25.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 122 页)

- [13] 曾鹏,刘清,叶建荣. 利用模拟钢筋混凝土中的收敛问题的对策[J]. 四川建筑, 2008, 20(3): 113-117.  
ZENG PENG, LIU QING, YE JIANRONG. Solving convergence problems of Reinforced Concrete Simulation Using ANSYS. Sichuan Construction, 2008 (6): 113-117.
- [14] 吴胜兴. 混凝土裂缝宽度计算的有限单元法[J]. 计算力学学报, 1997, 14(1): 69-77.  
WU SHENG-XING. Finite element method of the crack width prediction for RC beams[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, 14(1): 69-77.
- [15] ZUCCHINI A, LOURENCO P B. A coupled homogenization-damage model for masonry cracking[J]. Computers and Structures, 2004, 82(11/12): 917-929.
- [16] 彭人玮. 某国外工程实心混凝土小型砌块填充外墙裂缝原因的研究与分析[J]. 工业建筑, 1998, 28(4): 44-48.  
PENG RENWEI. A study on the causes of Concrete small solid block in-filled walls' cracks-case study of a foreign construction project [J]. Industrial Construction, 1998, 28(4): 44-48.
- [17] 班明霞. 框架轻质填充墙温度和干缩裂缝产生机理的研究[D]. 成都: 西华大学, 2007.
- [18] 日本混凝土工程协会. 混凝土裂缝调查及修补规程[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [19] 梁建国, 方亮, 彭茂丰. 美国砌体结构房屋墙体裂缝的控制[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2007(6): 2-6.  
LIANG JIAN-GUO, FANG LIANG, PENG MAO-FENG. Crack control of masonry building wall in USA[J]. Building Block and Block Building, 2007(6): 2-6.
- [20] VERHOEF L G W, VAN ZIJL G P A G. Restrengthening of brickwork to reduce crack width [J]. Advanced in Engineering Software, 2002, 33 (1): 49-57.

(编辑 张小强)

文章编号:1000-582X(2010)08-136-07

## 颗粒增强铝基复合材料的制备及热膨胀性能

栾佰峰<sup>1</sup>,裴英飞<sup>2</sup>,黄天林<sup>1</sup>,叶青<sup>1</sup>,黄光杰<sup>1</sup>,杨谦<sup>1</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400044;2 大庆师范学院教育科学学院,黑龙江 大庆 163712)

**摘要:**以复合材料在电子封装方面的应用为目标,选择粒径大约为  $4\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlN}$  和  $\text{SiC}$  颗粒,采用挤压铸造法方法制备了颗粒体积分数为 40% 的 3 种铝基复合材料。研究表明,所制备的复合材料组织致密,颗粒均匀分布。对比分析表明,复合材料的平均线膨胀系数(CTE)在  $11.51 \times 10^{-6} \sim 18.62 \times 10^{-6}/\text{K}$  之间并随着加热温度的升高而增大。 $\text{SiC}_p/2024$  复合材料的 CTE 实测值最低, $\text{AlN}_p/6061$  次之, $\text{Al}_2\text{O}_{3p}/2024$  略高; $\text{Al}_2\text{O}_{3p}/2024$  的实测值与 Kerner 模型预测值相符得较好,而  $\text{AlN}_p/6061$  复合材料与 ROM 模型符合得较好, $\text{SiC}_p/2024$  复合材料的实测值介于 Shapery 模型的上下限之间。

**关键词:**线膨胀系数;复合材料;颗粒;电子封装

**中图分类号:** TG146.23

**文献标志码:** A

## Fabrication and thermal expansion properties of particle reinforced Al matrix composites

LUAN Bai-feng<sup>1</sup>, PEI Ying-fei<sup>2</sup>, HUANG Tian-lin<sup>1</sup>, YE Qing<sup>3</sup>, HUANG Guang-jie<sup>4</sup>, YANG Qian<sup>5</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Daqing Normal College, Daqing College of Educational Science, Daqing 163712, Heilongjiang, P. R. China)

**Abstract:** Aimed at electronic packaging application, the different types of particles of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  and  $\text{SiC}$  which the mean size is about  $4\mu\text{m}$  are selected and three types of composites are fabricated by squeeze casting method with the particle volume fraction is 40%. The results show that the microstructure of composites is dense and free of pores with the particle distribute uniformly. The mean linear coefficient of thermal expansion (CTE) of composites ranges from  $11.51 \times 10^{-6} \sim 18.62 \times 10^{-6}/\text{K}$  and increases with increasing temperature. The measured coefficient of thermal expansion of  $\text{SiC}_p/2024$  is lower than that of  $\text{AlN}_p/6061$  and  $\text{Al}_2\text{O}_{3p}/2024$ . The measured CTE values of  $\text{Al}_2\text{O}_{3p}/2024$  composites agreed well with Kerner's model, the CTE of  $\text{AlN}_p/6061$  is closer to the prediction by ROM, and the CTE of  $\text{SiC}_p/2024$  varies from lower limit to upper limit of Shapery's model.

**Key words:** coefficient of thermal expansion; composite; particle; electronic packaging

现代科学技术的发展对材料的要求日益提高,特别是在电子封装领域,随着电子器件和电子装置中元器件的复杂性和密集性日益提高,开发加工性能优良、线膨胀系数可调、导热性良好及其它参数也

都满足要求的电子元器件封装用基片材料已成为当务之急<sup>[1-3]</sup>。近年来,国内外一部分研究工作将提高增强体的体积分数作为主要发展方向,来降低复合材料的热膨胀系数并提热导率,因为增强颗粒的体

收稿日期:2010-02-14

作者简介:栾佰峰(1973-),男,重庆大学研究员,博士,主要从事轻合金研究,Tel:(023)-65106067;  
(E-mail)bfluan@cqu.edu.cn.

积分数是决定热膨胀系数的主要参数,但到目前为止,关于颗粒种类和颗粒尺寸影响复合材料热膨胀系数的研究尚不多见<sup>[3-8]</sup>。

颗粒增强铝基复合材料由于增强颗粒的加入,能降低材料的热膨胀系数,可以满足电子封装的技术要求,而且颗粒增强铝基复合材料具有成本低、制备方法多、微观组织均匀、能同时具备颗粒和基体的优点等许多独特的优点<sup>[1, 2, 9]</sup>,在军事航空电子元件、微电机等方面的应用日益广泛<sup>[10, 11]</sup>。美国在 F-22“猛禽”战斗机的遥控自动驾驶仪、发电单元、飞行员头部上方显示器、电子计数测量阵列等关键电子系统上,替代包铜的钼及包铜的殷钢作为印刷电路板板芯;摩托罗拉公司电子元器件的基座和外壳,均采用铝基复合材料来代替原来的 Kovar 封装合金和 W/Cu、Mo/Cu 合金。前期研究表明,选择合适的变形参数如挤压温度、挤压速率和挤压比等可以实现中高体积分数颗粒增强铝基复合材料的热挤压成形等塑性变形<sup>[12, 13]</sup>,形变加工一方面可以促进复合材料的力学性能进一步提高,另一方面还可以大大减少零件制备过程中的机械加工余量。但研究也初步表明,如果增强颗粒体积分数过高(超过 50Vol. %),就会引起复合材料挤压加工后性能急剧下降。

笔者选用 3 种粒径约为 4  $\mu\text{m}$  的颗粒,采用制备方法简单,同时具有成本优势的挤压铸造方法,制备了颗粒体积分数为 40% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{2024}$ 、 $\text{SiC}_p/\text{2024}$  和  $\text{AlN}_p/\text{6061}$  3 种铝基复合材料,并对材料进行了微观组织观察和平均线膨胀系数的测试与分析。

## 1 实验

### 1.1 复合材料制备

增强体选取了粒径约为 4  $\mu\text{m}$  左右的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlN}$  和  $\text{SiC}$  3 种颗粒,基体合金选择应用较为广泛的

2024 和 6061 两种铝合金,其主要化学成分(质量分数)如表 1 所示。试验所采用的颗粒增强体和铝合金基体的基本性能如表 2 所示。复合材料制备采用先进的挤压铸造方法,将选择的 3 种颗粒进行粉体处理,即采用 5% HF 水溶液酸洗 30 min,再用蒸馏水漂洗 3~5 次,然后放入 120  $^\circ\text{C}$  烘干炉中烘干 48 h,最后过筛(120 目),去除结块团聚的颗粒。将经过粉体处理后的颗粒计算好后分别装入挤压铸造模具,先经过冷压成形后制成颗粒体积分数为 40% 的预制件;然后将模具和预制件一同放入保温炉中保温 2~3 h,保温炉的设定温度为 500~600  $^\circ\text{C}$ ;最后将同时准备好的 700~750  $^\circ\text{C}$  的熔融铝液浇铸到预热模具中,采用压力试验机迅速加压至 100 MPa 以上,保压约 10 min 后脱模,得到颗粒增强铝基复合材料的铸态块体坯料。

### 1.2 复合材料性能测试

铸态复合材料的光学组织观察和微观组织分析分别在 Carl Zeiss Axiovert 40 MAT 金相显微镜、Tescan VegaII LMU 扫描电镜和 FEI Nova 400 Nano 场发射扫描电镜上进行。在性能测试前,复合材料先经 400  $^\circ\text{C}$  保温 3 h 后炉冷进行退火处理,以消除铸造过程产生的残余应力。材料的热膨胀系数采用德国 NETZSCH 公司的 DIL 402C 型膨胀测试仪测定,升温速率为 5  $^\circ\text{C}/\text{min}$ ,试样测试尺寸为  $\Phi 4 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。为保证测试时温度均匀和防止试样氧化,采用氩气保护,流量为 80 mL/min。参照 GB4339-84 中的规定,根据联机测试的温度-伸长量曲线对数据进行处理,分别得到材料在 20~500  $^\circ\text{C}$  之间的平均线膨胀系数。为了减小设备的系统误差,在相同的实验条件下,采用铂标样进行基线校准。

表 1 6061 和 2024 铝合金的化学成分

|      | w · t %   |         |       |      |         |       |       |           |      |
|------|-----------|---------|-------|------|---------|-------|-------|-----------|------|
|      | Cu        | Mg      | Mn    | Fe   | Si      | Zn    | Ti    | Cr        | Al   |
| 2024 | 3.8~4.9   | 1.2~1.8 | 0.22  | <0.5 | <0.50   | <0.25 | <0.15 | <0.1      | bal. |
| 6061 | 0.15~0.40 | 0.8~1.2 | <0.15 | <0.7 | 0.4~0.8 | <0.25 | <0.15 | 0.04~0.35 | bal. |

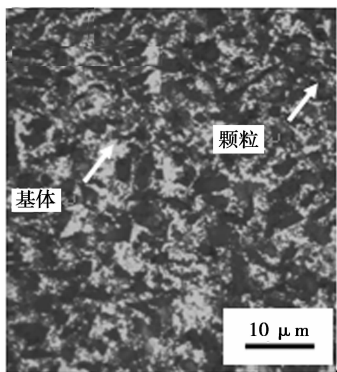
表 2 增强颗粒和基体的物理性质

| 材料                      | 密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 热膨胀<br>系数 $\times 10^{-6}/\text{K}$ | 弹性模量/<br>GPa | 剪切模量/<br>GPa | 体积模量/<br>GPa | 泊松比  |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|------|
| AlN                     | 3.30                    | 4.7                                 | 331          | 132.4        | 220.7        | 0.25 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 3.89                    | 8.3                                 | 345          | 138.0        | 230.0        | 0.25 |
| SiC                     | 3.25                    | 4.0                                 | 450          | 192.3        | 227.2        | 0.17 |
| 2024                    | 2.77                    | 22.9                                | 72           | 27.5         | 63.2         | 0.31 |
| 6061                    | 2.70                    | 23.2                                | 68.3         | 25.6         | 67.0         | 0.33 |

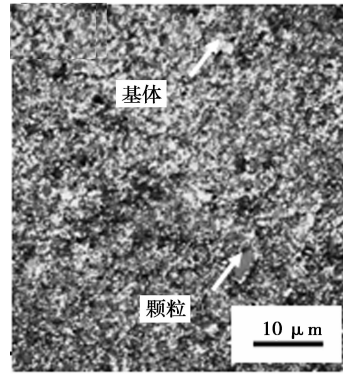
## 2 结果与分析

### 2.1 微观组织观察

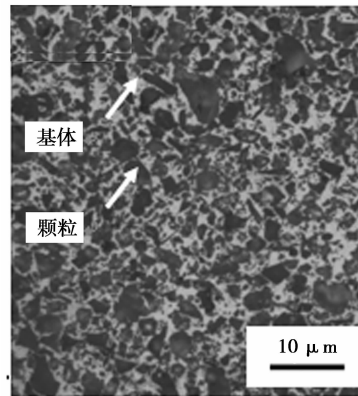
复合材料的显微组织如图 1-2 所示。由图 1 中的光学组织和图 2 的 SEM 观察可以看到,3 种颗粒基本为块状并带有一定的棱角,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的棱角尖锐一些,  $\text{AlN}$  颗粒次之,  $\text{SiC}$  颗粒多为椭球形, 颗粒这些特征主要是在制备和加工过程中造成的。作者前期研究工作发现, 颗粒的种类、大小、形状对复合材料制备过程中粉体预制块的制备有很大的影响, 尤其是对粉体预制块的理论填装体积和质量控制起主导作用。一般来说, 颗粒粒径越小、形状越接近球形, 则预制块理论填装密度越小, 越难以复合制备成形; 而颗粒粒径过大、颗粒尖角过多, 也同样影响预制块的成形和质量, 而且尖角越大就越容易引起应力集中, 导致复合材料力学性能和热膨胀性能下降。同时, 不同种类的颗粒与铝合金基体的浸润性有很大的差异, 只有与铝合金具有良好浸润性的颗粒才能在复合材料制备过程中得到冶金结合良好的增强体—基体界面, 进而得到较高的热导率和热膨胀性能及力学性能。上述几个因素共同作用, 使粉体预制块的成形和质量控制非常复杂困难, 因此, 合理选择颗粒的种类、大小及形状是能否得到高致密度、高性能复合材料的关键。通过图 1-2 的显微组织观察发现, 制备的 3 种复合材料的颗粒与基体之间界面结合良好, 因此可以较好的承担载荷和进行热传导; 同时, 复合后材料的组织都比较均匀、致密、无明显缺陷; 颗粒分布弥散且均匀。这种组织特征对复合材料用于电子封装都是有利和必需的, 致密的组织有利于提高材料的力学性能和热物理性能<sup>[14]</sup>。



(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}/2024$

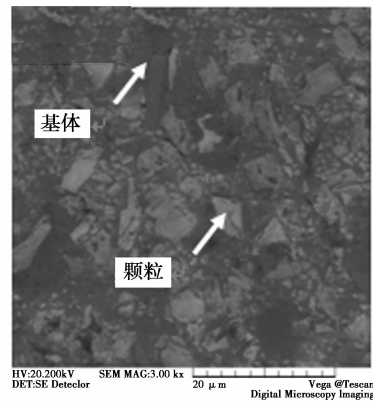


(b)  $\text{SiC}_\text{p}/2024$

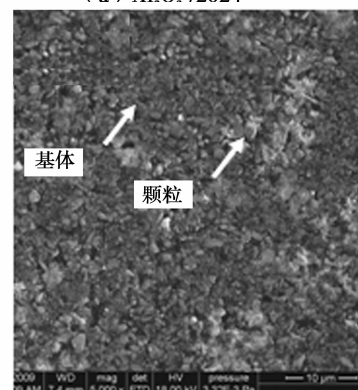


(c)  $\text{AlN}_\text{p}/6061$

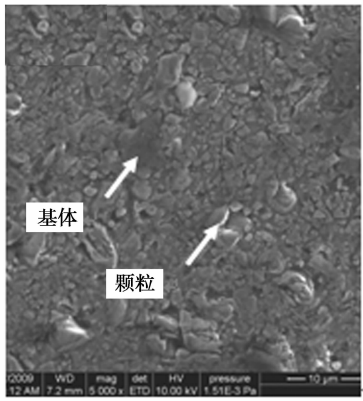
图 1 3 种铝基复合材料的金相照片



(a)  $\text{AlO}_2/2024$



(b)  $\text{SiC}_\text{p}/2024$



(c) AlN<sub>p</sub>/6061

图 2 3 种铝基复合材料的 SEM 照片

### 2.2 热膨胀性能

3 种复合材料在 20~500 °C 之间的平均线膨胀系数如图 3 所示,热膨胀系数测试结果表明,复合材料的平均线膨胀系数(CTE)在  $11.51 \times 10^{-6} \sim 18.62 \times 10^{-6}/K$  之间并随着加热温度的升高而增大。复合材料的热膨胀系数远低于基体铝合金,可以较好地满足电子封装的技术要求。在复合材料中,低膨胀系数的增强体颗粒可以降低复合材料的热膨胀系数,而且增强颗粒和基体合金的热膨胀行为相互制约,在复合材料制备及使用过程中由于温度变化而导致材料内部必然出现内应力,而内应力又对复合材料的热膨胀行为产生影响,因此对复合材料的热膨胀系数进行理论预测十分复杂<sup>[12-13]</sup>。

目前预测复合材料的热膨胀系数的模型主要有<sup>[15-21]</sup>:

#### 1)混合定律(ROM)

该定律在基体材料的弹性模量非常小,则基体对颗粒的变形的约束作用可以忽略的情况下适用

$$\alpha_c = \alpha_m \cdot V_m + \alpha_p \cdot V_p \quad (1)$$

式中: $\alpha_c$ 、 $\alpha_m$ 、 $\alpha_p$  分别为复合材料、基体及增强体的热膨胀系数, $V_m$ 、 $V_p$  为基体和增强体的体积分数。

#### 2)Turner 模型

该模型假定在起始温度下,材料内部无内应力,并在温度变化时各相仅承受等静压力并且各相协调变形,材料内部裂纹、空隙的数量和大小不发生变化:

$$\alpha_c = \frac{\sum_i \alpha_i K_i V_i}{\sum_i K_i V_i} \quad (2)$$

式中: $K_i$  为各组分材料的体积模量。

#### 3)Kerner 模型

该模型假定材料内部晶界或者相界面之间同时

存在等静压力和切变应力:

$$\alpha_c = \alpha_m V_m + \alpha_p V_p + V_p V_m (\alpha_p - \alpha_m) \times \frac{K_p - K_m}{V_m K_m + V_p K_p + (3K_p K_m / 4G_m)} \quad (3)$$

式中: $G_m$  为基体的切变模量。

#### 4)Shapery 模型

该模型考虑了各相之间的应力的相互作用,根据热弹性极值原理,给出了复合材料的热膨胀系数的表达式

$$\alpha_c = \alpha_p + (\alpha_m - \alpha_p) \frac{(1/K_c) - (1/K_p)}{(1/K_m) - (1/K_p)} \quad (4)$$

式中: $K_c$ —复合材料的体积模量。

一般的,复合材料的体积模量只能根据 Hashin 边界来确定其上限值和下限值,由于 Hashin 边界在计算复合材料体积模量的下限时,假设条件与 Kerner 模型一致,所以 Shapery 模型的上限值正好与 Kerner 模型值相吻合,即将式(6)代入式(4),计算得到式(3)<sup>[20]</sup>。

体积模量上限值

$$K_c^{(+)} = \frac{\frac{V_m K_m}{3K_m + 4G_p} + \frac{V_p K_p}{3K_p + 4G_p}}{\frac{V_m}{3K_m + 4G_p} + \frac{V_p}{3K_p + 4G_p}} \quad (5)$$

体积模量下限值

$$K_c^{(-)} = \frac{\frac{V_p K_p}{3K_p + 4G_m} + \frac{V_m K_m}{3K_m + 4G_m}}{\frac{V_p}{3K_p + 4G_m} + \frac{V_m}{3K_m + 4G_m}} \quad (6)$$

3 种复合材料的理论预测值与实验值见表 3, SiC<sub>p</sub>/2024 复合材料的 CTE 实测值最低, AlN<sub>p</sub>/6061 次之, Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/2024 略高,而且与理论模型预测得到的规律一致,分析认为主要原因是 3 种颗粒的体积分数相同,颗粒的热膨胀系数由小到大,因此复合材料的热膨胀系数也具有同样变化规律。3 种复合材料的增强颗粒形状不同,CTE 实测值并没有因为颗粒形状的不同出现异常的变化规律,这进一步说明影响颗粒增强铝基复合材料热膨胀系数的主要因素是颗粒增强体加入的体积分数和种类,而颗粒的形状是次要因素或者说影响很小。但颗粒的形状会影响复合材料的尺寸稳定性性能,主要原因在于颗粒的形状与尖角的多少存在一定的联系,即颗粒约接近球形尖角越少,则材料的尺寸稳定性越好,因为尖角越多,复合材料的内应力也会随之增大,导致尺寸稳定性下降,这方面的研究将在以后的工作中展开。

图 3 还给出了 3 种复合材料热膨胀系数的实测值与各模型计算值之间的比较。从中可以看出,颗粒增强铝基复合材料热膨胀系数的实测值都介于 ROM

和 Shapery 模型下限之间,低温下靠近 Schapery 模型下限,高温下则靠近 ROM 和 Kerner 模型,但都远离 Turner 模型。发现  $\text{Al}_2\text{O}_{3p}/2024$  的实测值与 Kerner 模型预测值相符得较好,而  $\text{AlN}_p/6061$  复合材料与 ROM 模型符合得较好, $\text{SiC}_p/2024$  复合材料的实测值介于 Shapery 模型的上下限之间,即随着温度的升高,实测值从 Shapery 模型的下限向上限偏移。

ROM 模型假定如果基体材料的弹性模量非常小,则基体对颗粒变形的约束作用可以忽略;Kerner 模型假定增强体为球形,周围被一层均匀的基体所包围,且考虑到各组元中同时存在剪切和等静压力的情况。在高温下,由于基体软化,3 种复合材料基体的强度都迅速降低、弹性模量也急剧减小,颗粒对基体变形的约束作用也随之减弱,同时基体和增强体各组元中存在的剪切力和等静压力的情况趋于基本相同,故复合材料整体表现出高温下 CTE 值靠近 ROM 模型和 Kerner 模型的趋势<sup>[22-23]</sup>。而复合材料低温时各组元之间的应力相互作用较强,因此更

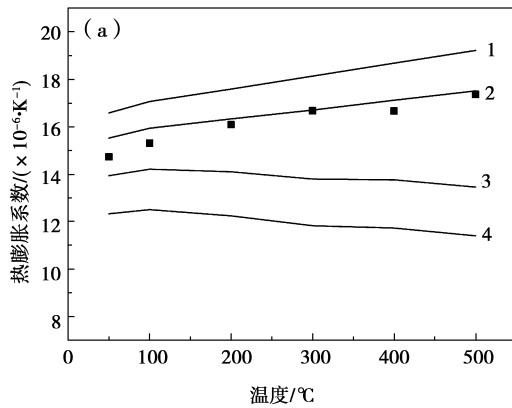
符合 Shapery 模型的假设条件,CTE 的实测值总体上更接近与 Shapery 模型的理论值。但是由于增强体种类不同、形状有差异,导致复合材料内部应力状态也大不相同,因此低温下 3 种复合材料的热膨胀系数差异较大,与模型的预测值之间也存在较大偏差,说明其影响机理非常复杂,进一步的研究工作将在下一阶段进行。

由于 Turner 模型中只考虑了材料中只存在等静压力的情况,而实际上复合材料中的内应力是很复杂的,且该模型忽略了材料在起始温度下存在着在制备过程中从高温冷却时导致的内应力,因而 Turner 模型不能充分描述复合材料内部实际的应力情况。

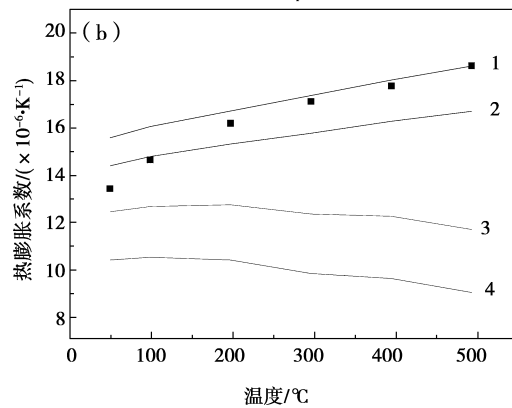
理论计算表明,铝合金基体成分的不同对复合材料热膨胀系数的影响较小, $\text{AlN}_p/2024$  的各个 CTE 模型计算值比  $\text{AlN}_p/6061$  低 5% 以内,计算结果如表 3 所示。

表 3 复合材料热膨胀系数模型预测值与实测值 (CTE:  $\times 10^{-6}/\text{K}$ )

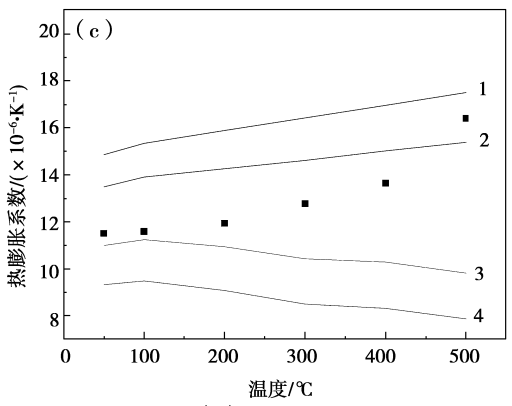
| Materials                       | Temperature/ $^{\circ}\text{C}$ | ROM   | Turner | Kerner | Shapery | Experiment |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------|--------|---------|------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_{3p}/2024$ | 20~50                           | 16.58 | 12.33  | 15.53  | 13.94   | 14.73      |
|                                 | 20~100                          | 17.06 | 12.5   | 15.94  | 14.21   | 15.30      |
|                                 | 20~200                          | 17.60 | 12.24  | 16.33  | 14.10   | 16.09      |
|                                 | 20~300                          | 18.14 | 11.83  | 16.70  | 13.79   | 16.67      |
|                                 | 20~400                          | 18.68 | 11.73  | 17.12  | 13.76   | 16.66      |
|                                 | 20~500                          | 19.22 | 11.40  | 17.51  | 13.45   | 17.36      |
| $\text{SiC}_p/2024$             | 20~50                           | 14.86 | 9.33   | 13.49  | 11.01   | 11.51      |
|                                 | 20~100                          | 15.34 | 9.49   | 13.90  | 11.24   | 11.59      |
|                                 | 20~200                          | 15.88 | 9.08   | 14.26  | 10.95   | 11.94      |
|                                 | 20~300                          | 16.42 | 8.50   | 14.61  | 10.43   | 12.77      |
|                                 | 20~400                          | 16.96 | 8.32   | 15.02  | 10.29   | 13.64      |
|                                 | 20~500                          | 17.50 | 7.87   | 15.39  | 9.82    | 16.40      |
| $\text{AlN}_p/6061$             | 20~50                           | 15.56 | 10.36  | 14.37  | 12.41   | 13.39      |
|                                 | 20~100                          | 16.04 | 10.48  | 14.77  | 12.64   | 14.62      |
|                                 | 20~200                          | 16.70 | 10.36  | 15.29  | 12.71   | 16.17      |
|                                 | 20~300                          | 17.36 | 9.79   | 15.75  | 12.32   | 17.10      |
|                                 | 20~400                          | 18.02 | 9.57   | 16.27  | 12.22   | 17.76      |
|                                 | 20~500                          | 18.62 | 8.98   | 16.69  | 11.65   | 18.62      |
| $\text{AlN}_p/2024$             | 20~50                           | 15.14 | 10.14  | 13.99  | 12.11   | —          |
|                                 | 20~100                          | 15.62 | 10.27  | 14.4   | 12.35   | —          |
|                                 | 20~200                          | 16.16 | 10.1   | 14.82  | 12.35   | —          |
|                                 | 20~300                          | 16.7  | 9.53   | 15.18  | 11.93   | —          |
|                                 | 20~400                          | 17.24 | 9.28   | 15.59  | 11.78   | —          |
|                                 | 20~500                          | 17.78 | 8.72   | 15.96  | 11.23   | —          |



(a)  $Al_2O_{3p}/2024$



(b)  $AlN_p/6061$



(c)  $SiC_p/2024$

1—ROM;2—Kerner model;3—Shapery model;  
4—Turner model;■—Experiment

图 3 3 种复合材料热膨胀系数理论值与实测值的比较

### 3 结 论

1)采用挤压铸造方法可以制备出颗粒分布均匀、组织致密的颗粒增强铝基复合材料。

2)复合材料的热膨胀系数与颗粒种类密切相关。3 种颗粒  $Al_2O_3$ 、 $AlN$  和  $SiC$  强化的铝基复合材料的在  $20 \sim 500\text{ }^\circ\text{C}$  之间的热膨胀系数分别为  $14.73 \times 10^{-6} \sim 17.36 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,  $13.39 \times 10^{-6} \sim$

$18.62 \times 10^{-6}/\text{K}$  和  $11.51 \times 10^{-6} \sim 16.40 \times 10^{-6}/\text{K}$ , 并随着加热温度的升高而增大。

3)  $SiC_p/2024$  复合材料的 CTE 实测值最低,  $AlN_p/6061$  次之,  $Al_2O_{3p}/2024$  略高。

4)通过 4 种模型的理论计算的预测值与实测值比较,发现  $Al_2O_{3p}/2024$  的实测值与 Kerner 模型预测值相符得较好,而  $AlN_p/6061$  复合材料与 ROM 模型符合得较好,  $SiC_p/2024$  复合材料的实测值介于 Shapery 模型的上下限之间。

### 参考文献:

[1] 叶斌,何新波,任淑彬,等. SiC 颗粒特性对无压熔渗  $SiC_p/Al$  复合材料热物理性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2008,30(12): 1410-1413.  
YE BIN, HE XIN-BO, REN SHU-BIN, et al. Effect of SiC particles' characteristics on the thermophysical properties of  $SiC_p/Al$  composites by powder injection and pressureless infiltration [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30 (12): 1410-1413.

[2] 佟林松,樊建中,肖伯律. 低热膨胀铝基复合材料的研究进展[J]. 稀有金属, 2008, 32(3): 375-380.  
TONG LIN-SONG, FAN JIAN-ZHONG, XIAO BO-Lü. Research progress in low thermal expansion aluminum matrix composite [J]. Chinese Journal Rare Metal, 2008, 32(3): 375-380.

[3] TAHAT M S. Aluminium-silicon alloy and its composites reinforced by silicon carbide particles [J]. Microelectronics International, 2010, 21(1): 21-24.

[4] EKICI R, APALAK M K, YILDIRIM M, NAIR F. Effects of random particle dispersion and size on the indentation behavior of SiC particle reinforced metal matrix composites [J]. Materials and design, 2010, 31(6): 2818-2833.

[5] ZHANG Y, WANG XT, WU JH. The influence of silicon content on the thermal conductivity of Al-Si/diamond composite [C]// 2009 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Eensity Packaging, August 10-13, 2009, Beijing, China. [s. l.]: IEEE, 2009: 708-712.

[6] ZHOU W Y, WANG C F, AI T, et al. A novel fiber-reinforced polyethylene composite with added silicon nitride particles for enhanced thermal conductivity [J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(6/7): 830-836.

[7] WEBER L, TAVANGAR R. On the influence of active element content on the thermal conductivity and thermal expansion of Cu-X (x = Cr, B) diamond

- composites [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57 (11): 988-991.
- [8] BEFFORT O, KHALID F A, WEBER L, et al. Interface formation in infiltrated Al(Si)/diamond composites [J]. *Diamond and Related Materials*, 2006, 15 (9): 1250-1260.
- [9] ZWEBEN C. Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging [J]. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 1998, 50(6): 47-51.
- [10] 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.
- CUI YAN. Silicon carbide particles reinforced aluminum composite materials for aerospace applications [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002 (6): 3-6.
- [11] 乌崇德, 傅丹鹰, 益小苏. 空间光学遥感器的的发展对先进复合材料的需求 [J]. *宇航材料工艺*, 1999, 8(4): 11-15.
- WU CHONG-DE, FU DAN-YING, YI XIAO-SU. Demands of advanced composite materials on developing space optical remote sensors [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, 8(4): 11-15.
- [12] LUAN B F, WU G H, HANSEN N, et al. High strength  $Al_2O_3/6061Al$  composites-effect of particles, subgrains and precipitates [J]. *Materials Science and Technology*, 2007, 23(2): 233-236.
- [13] LUAN B F, WU G H, LIU W, et al. High strength  $Al_2O_3/2024Al$  composites-effect of particles, subgrains and precipitates [J]. *Materials Science and Technology*, 2005, 21(12): 1440-1443.
- [14] SRIVASTAVA V C, SCHNEIDER A, UHLENWINKEL V, et al. Effect of porosity and reinforcement content on the electrical conductivity of spray formed 2014-Al alloy +  $SiC_p$  composites [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39 (22): 6821-6825.
- [15] SHEN Y L, NEEDLEMAN A, SURESH S. Coefficients of Thermal Expansion of Metal-Matrix Composites for Electronic Packaging [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, 25(4): 839-850.
- [16] SKIRL S, HOFFMAN M, BOWMAN K, et al. Thermal expansion behavior and macrostrain of  $Al_2O_3/Al$  composites with interpenetrating networks [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(7): 2493-2499.
- [17] GEIGER A, JACKSON M. Low-expansion MMCs boost avionics [J]. *Advanced Materials and Processes*, 1989, 136(7): 23-27.
- [18] TURNER P S. Thermal-expansion stresses in reinforced plastics [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1946, 37 (1/2): 239-245.
- [19] KERNER E H. The elastic and thermo-elastic properties of composite media. *Proceedings of the Physical Society Section B*, 1956, 69(8): 305-370.
- [20] ELOMARI S, SKIBO M D, SUNDARRAJAN A, et al. Thermal expansion behavior of particulate metal-matrix composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(3/4): 369-376.
- [21] RAJENDRA U V, CHAWLA K K. Thermal expansion of metal-matrix composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1994, 50(1): 13-22.
- [22] 张强, 陈国钦, 武高辉, 等. 含高体积分数的  $SiC_p$  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.
- ZHANG QIANG, CHEN GUO-QIN, WU GAO-HUI, et al. 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.
- [23] 姚文杰.  $SiC_p/Cu$  复合材料的显微组织与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

(编辑 张小强)