

新型 Si_p/4032Al 复合材料热物理性能研究

武高辉 修子扬 张强 宋美慧

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

文 摘 采用挤压铸造方法, 制备了高体积分数的 Si_p/4032Al 复合材料。显微组织观察表明, 复合材料组织致密, 颗粒分布均匀, 材料中没观察到孔洞和缺陷; 复合材料的线膨胀系数介于 $(8.1 \sim 12) \times 10^{-6}/K$ 之间可调, 并且随着增强体含量的增加而降低, 退火后线膨胀系数略有降低, Kerner 模型能够较好的预测复合材料的线膨胀系数; 复合材料的热导率可达 $103 W/(m \cdot K)$, 随着增强体含量的增加略有下降, 退火处理后热导率略有升高, 热导率计算结果均大于测试值。

关键词 铝基复合材料, Si 颗粒, 热膨胀, 热导率

Study on Thermo-Physical Properties of New Type of Si_p/4032Al Composites

Wu Gaohui Xiu Ziyang Zhang Qiang Song Meihui

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Si_p/Al composites with large content of Si particles are fabricated by squeeze-casting technology. The microstructure observation shows that the composites are dense and Si particles are distributed uniformly, moreover, no holes and defects are observed within the composites. The linear CTE of Si_p/Al composites lies between $(8.1 \sim 12) 10^{-6}/K$ and is increased, with increase of the contents of Si particles and decreased after annealing. Kerner model can predict the coefficient of thermal expansion (CTE) of Si_p/Al composites moderately. The thermal conductivity can reach $103 W/(m \cdot K)$, which is decreased with increase of the contents of Si particles and increased after annealing. The thermal conductivity calculated is higher than that tested.

Key words Aluminum matrix composite, Si particles, Thermal expansion, Thermal conductivity

0 引言

铝基复合材料尤其是颗粒增强铝基复合材料, 由于具有制备工艺灵活、热物理性能优异及可设计性等许多独特的优点^[1-3], 在电子封装、热控方面的应用日益广泛^[4-9]。美国 Lanxide 和日本 Sumitomo 电子公司已经成功地将铝基复合材料用于功率器件底座或热沉、印刷电路板芯和微处理器端盖封装中^[1,8]。

对于 W/Cu、Mo/Cu、SiC_p/Al 等复合材料来说, 难加工是困扰其广泛应用的一大难题^[6], 最新发展起来的 Si_p/Al 复合材料, 因为铝硅在铸造过程中没有中间相化合物产生, 所以 Si_p/Al 复合材料能够较好的继承增强体和基体的优良特性, 而且其低膨胀、高导热、低密度和易加工等特性更受到了广大研究者的青睐, 日本住友电器公司用粉末冶金法生产了

40% (体积分数) Si/Al 材料 CMSHA-40, 但其综合性能不十分理想^[4]。美国最近采用喷射沉积和液态金属熔渗等方法, 英国的 Osprey 金属公司采用喷射沉积 + 热等静压的方法^[10] 都制备出了综合性能优良的 Si/Al 电子封装材料, 然而这些方法均存在对设备要求较高、制造成本昂贵的缺点。本文采用具有制造设备简单、成本较低、材料致密度高并且均匀性好等特点的挤压铸造法, 制备了以高纯 Si 颗粒为增强体, 以 4032Al 铝合金为基体的三种复合材料, 以研究复合材料的热物理性能。

1 材料及试验方法

基体选用 Si 质量分数为 11.99% 的 4032 铝合金, 增强体选择了平均粒径为 $10 \mu m$ 的高纯 Si 颗粒。采用挤压铸造法制备了增强体体积分数分别为

收稿日期: 2006-04-14; 修回日期: 2006-07-05

基金项目: 2005 年哈尔滨市科技攻关计划项目 (2005AA5CG041)

作者简介: 武高辉, 1955 年出生, 教授, 主要从事金属基复合材料的研究

55%、60%和65%的 $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ 复合材料,分为原始铸造状态和去应力退火状态(退火工艺为:410℃保温3h,炉冷);使用OLYMPUS PME3照相机拍摄复合材料金相照片,以观察其光学显微组织;试验材料的线膨胀系数采用德国NETZSCH公司生产的DIL 402型膨胀测试仪测定,本文所用线膨胀系数为相对于20℃的平均线膨胀系数(CTE),考察温度范围为20~495℃。热导率测试是在德国NETZSCH公司生产的TCT 416型热导率测试仪上进行,测试温度范围为20~60℃。

2 结果与讨论

2.1 复合材料微观组织

从图1复合材料金相显微组织照片可以看出:Si颗粒为带有棱角的不规则形状,复合材料的铸态组织均匀、致密,没有明显的颗粒团聚和偏聚,也不存在微小的孔洞和明显的缺陷,这对于电子封装用复合材料是很有利的,均匀致密的组织不但能提高复合材料的热导率,还能提高材料的强度和弹性模量,有利于提高材料的尺寸稳定性,从而增加材料的使用寿命。

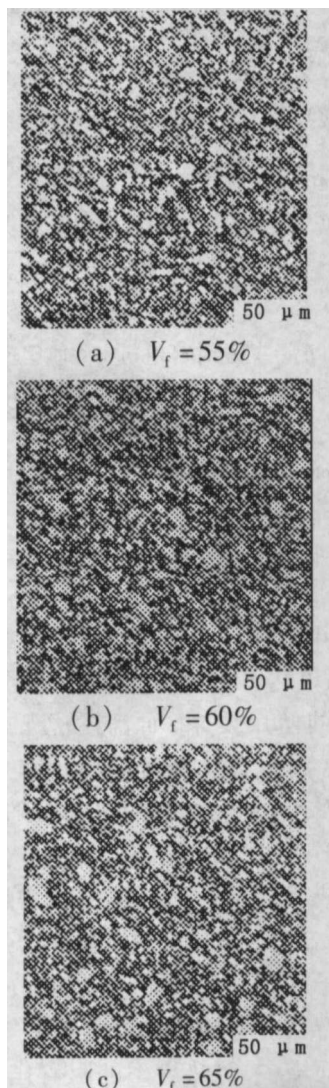


图1 $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ 复合材料的显微组织

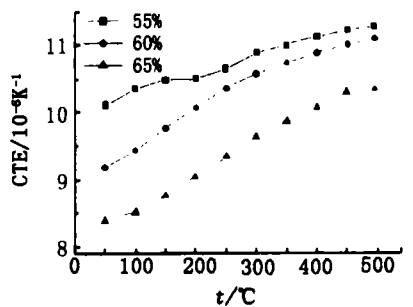
Fig. 1 Microstructure of $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ composite

宇航材料工艺 2007年 第2期

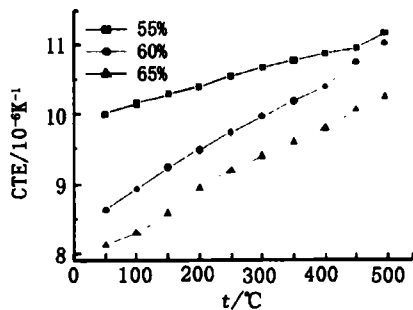
2.2 $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ 复合材料的热物理性能

2.2.1 热膨胀性能及其理论预测

三种不同体积分数的 $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ 复合材料在不同温度下的CTE如图2所示。可以看出,随着温度的升高,复合材料的CTE也呈现增加的趋势。对复合材料而言,其CTE主要取决于基体合金的CTE和增强体通过基体-增强体界面对基体合金的制约程度。一方面,由于铝合金的CTE随温度提高而增大,导致复合材料的CTE也随温度提高而增大。另一方面,随着温度的提高,复合材料中增强体-基体界面承载能力下降,增强体对基体合金膨胀的制约能力降低,也导致复合材料CTE随温度提高而增大。其中体积分数为65%的 $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ 复合材料退火后20~50℃的CTE为 $8.1 \times 10^{-6}/\text{K}$,与Si芯片($4.1 \times 10^{-6}/\text{K}$)相差不大,很好的满足电子封装用材料的要求。基体相同,复合材料的CTE随着增强体含量的增加明显减小,这是由于Si颗粒的CTE只有基体合金的1/5左右,当温度升高时,复合材料中加入的Si颗粒很好的抑制了基体的热膨胀,加入的Si颗粒越多,这种抑制作用就越明显,复合材料的CTE越低。退火处理后,降低了复合材料中由于铸造而产生的热应力,所以复合材料的CTE略有降低。



(a) 铸造状态



(b) 退火状态

图2 增强体含量对复合材料CTE的影响

Fig. 2 Impact of Si particles content on CTE of $\text{Si}_p/4032\text{Al}$ composites

颗粒增强金属基复合材料的CTE理论模型有以下几种。

(1)混合定律(Rom)假设基体材料的弹性模量很小,基体对颗粒的变形的约束作用忽略:

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

(2)Turner 模型假设材料中只存在等静压力:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_m K_m V_m + \alpha_p K_p V_p}{K_m V_m + K_p V_p} \quad (2)$$

(3)Kerner 模型假设增强体为球形,周围被一层均匀的基体所包围,且考虑到组元各相中同时存在剪切和等静压力的情况:

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

式中, α_c 、 α_m 、 α_p 为复合材料、基体及增强体的 CTE; K_m 、 K_p 为基体和增强体的体积模量; V_m 、 V_p 为基体和增强体的体积分量; G_m 为基体的剪切模量。

将表 1 所示的基体合金及增强体的性能参数代入到以上几种模型中,对 Si_p/4032Al 复合材料的 CTE 进行理论计算,其计算结果与本文实测值进行对比,如图 3 所示。

表 1 基体合金及增强体的基本性能^[3]
Tab.1 Basic performance of matrix alloy and Si particles^[3]

材料	密度 /g·cm ⁻³	CTE /10 ⁻⁶ K ⁻¹	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa
Si	2.33	4.1	112.4	—	235
4032Al	2.68	20.8	79	29.7	77.5

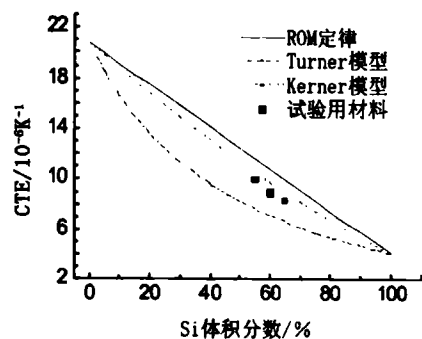


图 3 复合材料 CTE 实测值与理论计算值

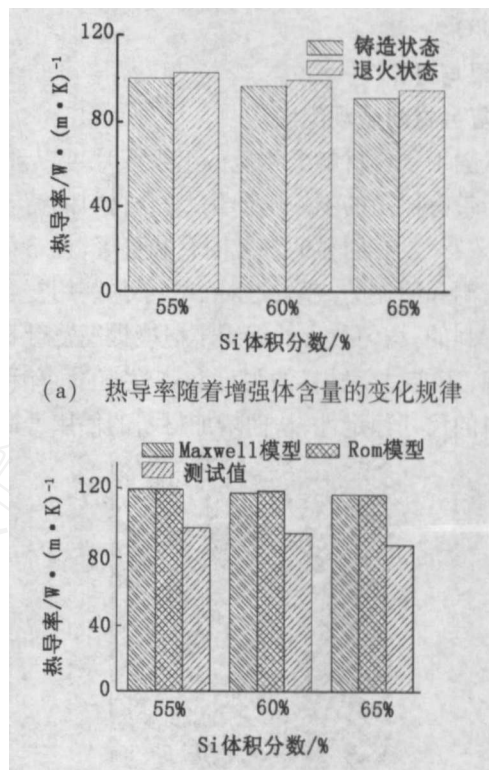
Fig. 3 Calculated and measured CTE for Si_p/4032Al composites

图 3 中基体合金的 CTE 为实测值(20~100℃的平均值),可以看出,本文材料的 CTE 介于 Rom 模型和 Turner 模型之间,而与 Kerner 模型计算结果最接近。这是因为 Turner 模型只考虑了材料中只存在等静压力的情况,没有涉及到复合材料各组元之间可能产生的切应力,而 Rom 模型忽略了基体对颗粒的变形的约束作用导致理论计算结果较大。Kerner 模型

充分考虑到了组元各相中同时存在剪切和等静压力的情况,较好的描述复合材料内部实际的应力情况,其理论计算结果与实际值最为接近,但它把颗粒认作是球形粒子,而实际上本文所用的 Si 颗粒为带有棱角的不规则形状,所以其理论计算结果比实际值稍大。

2.2.2 导热性能及其理论预测

图 4(a)给出了 Si_p/4032Al 复合材料热导率随着增强体含量的变化规律。



(b) 理论计算值与实测值比较

图 4 热导率随着增强体含量的变化规律
和理论值与实测值比较

Fig. 4 Variation of thermal conductivity with Si volume fraction and comparison between calculated and measured thermal conductivity

可以看出,材料退火后的热导率大于 94.7 W/(m·K),最高可达 103 W/(m·K)。已经完全满足电子封装材料的使用要求,而且还优于传统的 Kovar [17 W/(m·K)]合金及 Invar 合金[10 W/(m·K)]。同时还可以看出,复合材料的热导率随着 Si 含量的增加而略有下降,在颗粒增强金属基复合材料中基体为金属主要依靠自由电子传递热量;增强体为非金属颗粒主要依靠声子传热;并且基体和增强体颗粒之间的界面对电子、声子运动具有一定的散射作用,阻碍热传导的进行^[3]。增强体体积分量的增加使得在复合材料中界面增多,对热导率的阻碍作用加剧,从而降低了复合材料的热导率。退火后复合材料的热导率比压铸态的热导率稍高。这是由于复合材料在铸

宇航材料工艺 2007 年 第 2 期

造过程中,由于冷却速度非常快,而颗粒与基体的CTE相差很大,热导率也不同,这样在铸锭内部形成较大的内应力。退火的主要目的就是为减小这种内应力。因此退火后复合材料热导率比压铸态略大。颗粒增强复合材料热导率的理论预测模型主要有以下几种。

(1)麦克斯韦(Maxwell)根据两相和多相混合物的电导与热导性能得到了热导率表达式:

$$K_{\text{com}} = K_m \frac{1 + 2x - 2V_p(x-1)}{1 + 2x + V_p(x-1)} \quad (4)$$

(2)P. G. Klemens 推导的复合材料热导率表达式为:

$$K_{\text{com}} = K_m(1 - V_p) + K_p V_p - \frac{1}{3}(1 - V_p) \times V_p \frac{(K_m - K_p)^2}{K_m(1 - V_p) + K_p V_p} \quad (5)$$

(3)Rom 定律:

$$K_{\text{com}} = K_m \times V_m + K_p \times V_p \quad (6)$$

式中, K 为热导率, V_p 为增强体的体积分,脚标com、m和p分别为复合材料、基体和增强体颗粒, $x = K_m/K_p$ 。

Si颗粒的热导率为104 W/(m·K),基体4032Al合金的热导率为140 W/(m·K)。通过各模型计算得到的复合材料的热导率如图4(b)所示。从中可以看出:随着Si增强体体积分的增加,Si_p/4032Al复合材料的热导率减小,但减小的幅度并不大;虽然各个模型考虑问题的出发点不一样,但计算结果相差不大;测试值均小于计算结果。经分析,这主要是由于颗粒增强体的加入,在复合材料中引入了大量的界面,而上述几个模型均没有考虑界面热阻的存在,而实际上在金属基复合材料中,界面热阻是不容忽视的重要影响因素。目前针对Si_p/Al复合材料界面热阻的研究还比较少。如果能够通过一种有效的方法得到它的具体数值,那将对今后材料的设计提供很大的帮助。但是目前用实验的方法还很难解决这个问题。

3 结论

(1)Si_p/4032Al复合材料组织致密,颗粒分布均匀,材料中没观察到孔洞和缺陷。

(2)Si_p/4032Al复合材料的CTE介于(8.1~12)×10⁻⁶/K之间可调,并且随着增强体含量的增加,逐渐降低,退火后CTE略有降低。Si_p/4032Al复合材料的CTE介于Rom模型和Turner模型之间,Kerner模型能够更好的预测Si_p/4032Al复合材料的CTE。

(3)Si_p/4032Al复合材料的热导率可达103 W/(m·K),随着增强体含量的增加略有下降,退火处理后复合材料的热导率略有升高,热导率计算结果均大于测试值。

参考文献

- 1 张强. 电子封装用SiCp/Al复合材料组织与性能. 功能材料, 2004; 增刊(35):1 073~1 075
- 2 张济山. 新型喷射成型轻质、高导热、低膨胀Si-Al电子封装材料. 材料导报, 2002; 16(9):1~4
- 3 张强,陈国钦,姜龙涛等. 高体积分SiCp/Al线膨胀系数与SiC含量的相关性. 见:第十二届全国复合材料学术会议, 2002:478~480
- 4 吉元. 增强相含量及分布对电封装复合材料导热性的影响. 见:全国第十届复合材料学术会议论文集, 上海, 1998:313~315
- 5 Chien C W. Effects of Si_p size and volume fraction on properties of Al/Si_p composites. Materials Letters, 2002; 12(2): 334~341
- 6 武高辉. SiC_p/Al复合材料在电子封装应用中的基础研究. 电子元件与材料, 2003; 6(6): 27~29
- 7 宋美慧. 电子封装用Si_p/Al复合材料热物理性能研究. 宇航材料工艺, 2005; 35(6): 44~46
- 8 陈国钦. SiC_p/Al电子封装复合材料的制备及基础特性研究. 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文, 2002
- 9 张强. 电子封装AlN_p/L3复合材料的热物性与热机械特性. 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文, 2000
- 10 Carl Zweben. Advanced composites and other advanced materials for electronic packaging thermal management. In: Proceedings of 2001 international symposium on advanced packaging materials. Braselton, Georgia, 2001: 360~365

(编辑 任涛)