电子封装用 SiCp/6063 复合材料的制备与性能研究

修子扬,张强,王子鸣,蒋涵

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室,哈尔滨 150001)

摘要:目的研究体积分数与热处理工艺对 SiCp/6063 复合材料热物理性能的影响规律,制备一种提高电子 封装热管理能力的铝基复合材料。方法 采用挤压铸造法制备体积分数分别为 55%,60%,65%的 SiCp/6063 复合材料,对不同体积分数的铝基复合材料分别进行热处理,比较复合材料在压铸态、退火态和 T6 时效处 理态的性能差异。结果 碳化硅颗粒均匀地分布在铝基体中,碳化硅和铝的结合良好,组织致密,没有微小的空 洞和明显的缺陷。SiCp/6063 复合材料在 20~50 ℃的温度区间内,其平均热膨胀系数约在 10×10⁻⁶~13×10⁻⁶ ℃⁻¹, 导热系数为 200~220 W/(m·K),已经基本满足电子封装基板材料的性能要求。结论 随着温度的升高,复合 材料的热膨胀系数呈先增加后短暂回落再增加的趋势;复合材料的热膨胀系数随着增强体体积分数的增加 而减小;退火处理后 SiCp/6063 复合材料的热导率明显增加。

关键词:复合材料;电子封装;碳化硅;热导率

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.01.011

中图分类号: TB331; TN405 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2018)01-0091-06

Preparation and Properties of SiCp/6063 Composites for Electronic Packaging

XIU Zi-yang, ZHANG Qiang, WANG Zi-ming, JIANG Han

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: The paper aims to study influences of volume fraction and heat treatment process on thermo physical properties of SiCp/6063 composite, and to prepare an aluminum matrix composite for improving the thermal management ability of electronic packaging. SiCp/6063 composites with volume fractions of 55%, 60% and 65% were prepared by squeeze casting. Heat treatment of aluminum matrix composites with different volume fraction was carried out to compare the performance differences of the composite in the die casting, annealed and T6 aging treatments. SiC particles were uniformly distributed in the aluminum matrix, and the silicon carbide and aluminum had good bonding. The composite material had compact structure, no tiny cavities and obvious defects. The average thermal expansion coefficient of SiCp/6063 composites was about $10 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6} \, ^{\circ}C^{-1}$ at the temperature range of 20~50 °C. The thermal conductivity was about $200 \sim 220 \, W/(m \cdot K)$, which basically met the requirements of the electronic packaging substrate materials. With the increase of temperature, the thermal expansion coefficient of the composite increases first and then drops after transient increase; the thermal expansion coefficient of the composites increases significantly after annealing treatment.

KEY WORDS: composite material; electronic packaging; SiC; thermal conductivity

电子封装技术为了满足高密度、小型化、大功率 IC 的性能要求,对理想封装材料特性提出如下要求: 良好的导热性能;②相匹配的热膨胀系数;③足够的强度和刚度;④较好的机械加工性能;⑤尽可

能低的材料成本。此外,针对在航空、航天和空间技术领域及民用移动通信设备方面的特殊应用要求,还 需要具有较低的密度^[1—4]。

在封装技术发展远落后于 IC 发展的今天,随着 电子工业的大力发展,特别是大功率电子元件的广泛 应用,提出的对电子封装基板材料高热导率、低热膨 胀的要求,必将使电子封装基板材料成为材料科学研 究领域的热点之一^[5]。

传统的封装材料中, Cu和Al具有高热导率,一般可用作功率器件的底座或热沉,由于其膨胀系数较大,与陶瓷基片的热匹配性能差,将引起器件整体的可靠性降低; Kovar 合金的膨胀系数较小,并具有良好的焊接性能,但是热导率低,且密度较大; Mo, W, W-Cu和 Mo-Cu 材料的热膨胀系数和热导率都较合适,但是密度较大、可焊性差; Be-BeO 复合材料性能优异,但是有剧毒,价格昂贵,限制了材料的应用。由此可见,这些材料无法兼顾电子封装综合性能的要求。

近年来,颗粒增强金属基复合材料(PMMCs)由于 其良好的强度、结构刚度、尺寸稳定性和热物理性能, 为设计师们提供了高温下应用的许多优势。通过改变 增强体的种类、体积分数、粒径配比、排列方式,或 者基体合金的成分,或者热处理工艺,就可以得到一 系列多种不同性能的材料;通过添加高体积分数的增 强体降低材料热膨胀系数,完全可以做到同电子元器 件材料(Si、GaAs等)CTE 相匹配,同时又具有高 的导热性能和低密度^[5,11–17]。

文中通过挤压铸造法制备高体积分数 SiCp/6063 复合材料,对不同体积分数的铝基复合材料分别进行 热处理;系统探究体积分数、热处理工艺等因素对 SiCp/6063 复合材料的微观组织、力学性能和热物理 性能等影响规律,为制备符合电子封装基板材料要求 的铝基复合材料提供依据。

1 实验材料及方案

1.1 原材料

实验材料采用挤压铸造法制备出体积分数分别 为 55%, 60%, 65%的 SiCp/6063 复合材料,基体材料 为工业用 6063 铝合金,增强体为平均粒径 30 μm 的 碳化硅颗粒粉末。复合材料经过机械加工制备出各种 尺寸的测试试样。

挤压铸造法是将增强体颗粒粉末装入模具中,在 一定温度下保温制成具有一定形状和体积分数的预 制块,随后将熔融的铝合金液倒入模具腔中,并加压 使铝液强行渗透到多孔隙的预制块中,然后冷却凝固 形成复合材料的一种制备方法,见图 1。





1.2 热处理工艺

所用复合材料的状态分为压铸态、退火态和 T6 时效处理态 3 种。根据 6063 合金的热处理规范,对 材料进行热处理。复合材料热处理工艺见表 1。

表 1 复合材料热处理工艺 Tab.1 Heat treatment process of composite material

退水处理	T6时效处理					
返八处垤	T6固溶处理	人工时效				
退火温度: 400 ℃	固溶温度: 510 ℃	时效温度: 170 ℃				
退火时间:2h	固溶时间:1h	保温时间:8h				
退火设备: 空气炉	固溶设备: 盐浴	保温设备:保温箱				
冷却条件:随炉冷却	冷却条件:水淬	冷却条件: 空冷				



第10卷 第1期

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

将未经过热处理的铸态试样研磨、抛光,得到复 合材料的金相显微照片,如图 3 所示。SiC 增强体颗 粒几何形状呈不规则的凸多面体(金相上看是不规则 多边形),这种几何形状上的不规则主要是由制造、 加工方法决定。这种 SiC 颗粒是由尺寸很大的高强度 的 SiC 晶体经破碎、研磨、筛选而成,在这个过程中, 脆性的 SiC 经反复多次的断裂形成小颗粒,自然会有 许多棱角。



图 3 不同体积分数的铸态 SiCp/6063 复合材料金相 Fig.3 Microstructure of as cast SiCp/6063 composite material of differfent volume fraction

SiC 颗粒宏观分布比较均匀,没有明显的颗粒团 聚和偏聚,这有利于提高复合材料的尺寸稳定性,从 而增加材料的使用寿命,从而增加封装器件的有效寿 命;铸态复合材料中 SiC 颗粒与 Al 基体结合紧密, 致密的组织对于电子封装基板用 MMCs 是很有利的, 这不但能提高材料的导热性能,还能提高材料的强度 和弹性模量。观察到的少量孔洞可能是在金相试样制 备中掉落了 SiC 颗粒而形成的孔洞,也可能是材料本 身存在的气孔。

2.2 导热系数分析

实验采用非稳态导热系数测试法——激光闪射法,该方法是一种测量高导热材料与小体积样品的技术,可直接测量材料的热扩散系数,然后在已知样品的比热容和密度的情况下,通过计算求得导热系数的数值。SiCp/6063 复合材料导热系数见表 2。

材料	状态	密度/(g・cm ⁻³)	热扩散系数/(mm ² ・s ⁻¹)	热导率(室温下)/(W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)
55vol%SiC _p /6063	铸态	2.94989	92.185	205.855
	退火态	2.95107	97.509	217.831
	T6时效态	2.97107	95.312	214.366
60vol%SiC _p /6063	铸态	2.96019	93.652	206.257
	退火态	2.95178	100.119	219.874
	T6时效态	2.97461	97.687	216.192
65vol%SiC _p /6063	铸态	2.94169	96.149	206.756
	退火态	2.93745	99.952	214.625
	T6时效态	2.96697	96.434	209.151





Fig.4 Thermal conductivity of SiCp/6063 composites

根据表 2 和图 4 发现, 退火处理使材料的热导率 大幅度增加。这主要是由于退火处理降低了基体合金 中的内应力, 减少了基体中的缺陷, 从而使材料中的 电子运动更加迅速。

时效处理会在一定程度上降低材料的热导率,分析原其因,主要是因为时效处理后材料内部产生了大量的G.P.区,造成基体合金铝的晶格畸变,从而阻碍了材料内部声子和电子的自由振动,使声子和电子的平均自由程降低,从而导致材料的热导率下降。

目前,计算复合材料热导率的理论模型主要有以

(1)

下4种:

 $\lambda_{\rm c} = \lambda_{\rm m} \cdot x_{\rm m} + \lambda_{\rm p} \cdot x_{\rm p}$

式中: λ_{c} , λ_{m} , λ_{p} 分别表示复合材料、基体和增强体颗粒的热导率; x_{m} , x_{p} 分别为基体合金与增强体的体积分数。

2) 麦克斯韦(Maxwell)研究了两相和多相混合物 的导热性能,得到了热导率的表达式为:

$$\lambda_{\rm c} = \lambda_{\rm m} \cdot \frac{1 + 2r - 2x_{\rm p}(r-1)}{1 + 2r + x_{\rm p}(r-1)} \tag{2}$$

式中: r 为基体热导率与增强体热导率的比值, 即 $r=\lambda_m/\lambda_p$ 。

3) Hiroshi. Hatta 和 Minoru. Taya 等人基于 Eshelby 等效夹杂理论,综合考虑了不同增强体形状 的影响,得到了复合材料有效热导率的一般形式。特 别地,对于颗粒增强金属基复合材料,其热导率计算 公式为:

$$\lambda_{\rm c} = \lambda_{\rm m} \cdot \left[1 + \frac{x_{\rm p}}{\frac{1}{3}(1 - x_{\rm p}) + \frac{\lambda_{\rm m}}{\lambda_{\rm p} - \lambda_{\rm m}}}\right]$$
(2)

根据材料手册中关于 6063 和 SiC 的数据,通过 各模型计算得到复合材料热导率,并与实测值进行比 较,所得结果见表 3。表 3 中的数据分别是 ROM, Maxwell, H-M 三种理论模型预测的和实际测量的热 导率。从表 3 可看出,虽然 Maxwell 模型与 H-M 模型建立的出发点不同,但预测结果几乎相同。与实测值比较可以发现,上述两模型的计算值都大于SiCp/6063 复合材料热导率的实测值,这主要是由于复合材料中的界面、微孔等缺陷造成其热导率下降,可见复合材料性能的提高还有很大的空间。

表3 复合材料热导率理论预测与实测值比较 Tab.3 Comparison of theoretical and measured values of thermal conductivity of composite materials W/(m・K)

材料	状态	ROM	Maxwell	H-M	热导率(20 ℃)
55vol%	退火态	290.6	284.6	284.6	217.831
$\frac{S1C_p}{60}$	T6时效态	283.0	274.7	274.7	214.366
60vol%	退火态	297.2	291.3	291.3	219.874
$S1C_p/60$	T6时效态	290.4	282.4	282.4	216.192
65vol%	退火态	303.8	298.1	298.1	214.625
$S1C_p/60$	T6时效态	297.9	290.1	290.1	209.151

2.3 热膨胀系数分析

用 NETZSCH Proteus 对数据进行处理,并对复 合材料的热膨胀原始曲线进行处理,得到复合材料的 热膨胀系数(CTE, coefficient of thermal expansion)曲 线见图 5。

从图 5 可以看出,随着温度的升高,3 种体积分





数 2 种状态复合材料的热膨胀系数都呈先升高、到 300 ℃左右开始下降、再到 420 ℃左右又升高的趋势,其热膨胀系数的变化趋势有别于金属及其他复合 材料膨胀系数的变化趋势。其中铸态复合材料的热膨 胀系数在 300 ℃左右有明显的尖峰。

不同体积分数复合材料热膨胀系数曲线见图 6, 可以看出,对比 3 种体积分数的复合材料,随着增 强体 SiC 颗粒体积分数的增加,热膨胀系数整体上 呈减小趋势,这一点在铸态复合材料的热膨胀系数 对比中尤其明显。这是由于 SiC 颗粒的膨胀系数较 小,从而阻止了复合材料的热膨胀。

不同状态复合材料热膨胀系数曲线见图 7,可 知,在大约 200 ℃之前的温度区间,铸态的热膨胀 系数较退火态的为低,退火态的热膨胀系数增长较 快,且铸态的热膨胀系数在 30~40 ℃区间出现小幅 度的回落;当温度高于 200 ℃后,铸态的热膨胀系 数快速增加并超过退火态;退火态热膨胀系数在整 个升温区间内都比较均匀,而铸态的热膨胀系数波 动比较大,这可能是由于温度的升高导致铸态材料内 部应力释放,从而使得材料进一步膨胀。



图 6 不同体积分数复合材料热膨胀系数曲线 Fig.6 Thermal expansion coefficient curves of composites with different volume fractions





3 结论

系统研究了3种颗粒体积分数的SiCp/6063复合 材料在3种热处理状态下的导热性能和热膨胀性能, 结果表明。

1) SiCp/6063 复合材料的热导率达到了 210
 W/(m・K),热膨胀系数为 10.5×10⁻⁶ ℃⁻¹,基本达到
 电子封装用基板材料高热导、低热膨胀的要求。

2) SiCp/6063 复合材料经退火处理后,相较于铸态其热导率明显增加; T6 时效处理后,热导率相比 退火态增加较少,但仍满足电子封装的使用要求。

3) 复合材料热膨胀系数随着温度的升高,呈先 增加接着减小后又增加的固定模式; SiCp/6063 复合 材料经退火处理后,热膨胀系数随温度的变化较铸态 下的变化更稳定,这是由于退火处理减少了材料中的 缺陷,减小了挤压铸造过程产生的残余应力,使性能 更加稳定。

参考文献:

- 高尚通,毕克允.现代电子封装技术[J]. 半导体情报, 1998, 35(2): 9—13.
 GAO Shang-tong, BI Ke-yun. Modern Electronic Packaging Technology[J]. Semiconductor Information, 1998, 35(2): 9—13.
- BARRETT J. Electronic Systems Packaging: Future Reliability Challenges[J]. Microelectron Reliab, 1998, 38: 1277—1286.
- [3] 刘文俊. 高密度高性能电子封装技术[J]. 电子产品世界, 1998(8): 38—40.
 LIU Wen-jun. High Density and High Performance Electronic Package Technology[J]. Electronic Engineering & Product World, 1998(8): 38—40.
 [4] 武高辉,张强,姜龙涛,等. SiCp/Al 复合材料在电子封
- [4] 武高库, 东强, 委龙涛, 寺. StCp/AI 复合材料在电子到 装应用中的基础研究[J]. 电子元件与材料, 2003, 22(6): 27—29.

WU Gao-hui, ZHANG Qiang, JIANG Long-tao, et al. Fundamental Study of SiCp/Al Composites in Electronic Packaging Applications[J]. Electronic Components & Materials, 2003, 22(6): 27-29.

- [5] 张强,孙东立,武高辉. 电子封装基片材料研究进展[J]. 材料科学与工艺,2000,8(4):66—72.
 ZHANG Qiang, SUN Dong-li, WU Gao-hui. Recent Achievements in Research for Electronic Packaging Substrate Materials[J]. Materials Science and Technology, 2000, 8(4): 66—72.
- [6] KEVIN A M, YOGENDRA K J. High Performance Packaging Materials and Architectures for Improved Thermal Management of Power Electronics[J]. Future Circuits Int, 2001(7): 45—49.
- [7] 龙乐. 电子封装中的铝碳化硅及其应用[J]. 电子与封装, 2006, 6(6): 16—20.
 LONG Le. AISiC Metal Matrix Composites and Its Application in Microelectronics Packaging[J]. Electronics and Packaging, 2006, 6(6): 16—20.
- [8] 吴泓, 王志法,郑秋波,等. 铜基电子封装复合材料的 回顾与展望[J]. 中国钼业, 2006, 30(3): 30—32.
 WU Hong, WANG Zhi-fa, ZHENG Qiu-bo, et al. The Review and Prospect of Copper-Mstrix Com Posites for Electronic Packaging[J]. China Molybdenum Industry, 30(3): 30—32.
- [9] 陈国钦. 电子封装铜基复合材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
 CHEN Guo-qin. Fabrication and Properties of Copper Composites for Electronic Packing Application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
 [10] 江东亮,李龙土,欧阳世翕等. 中国材料工程大典第八
- [10] 江东亮,李龙土,欧阳世翕等.中国材料工程大典第八卷[M].北京:化学工业出版社,2006.

JIANG Dong-liang, LI Long-tu, OUYANG Shi-xi, et al. Chinese Material Engineering Canon Vol.8[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

- [11] WEYANT J, GARNER S, JOHNSON M, et al. Heat Pipe Embedded AlSiC Plates for High Conductivity-low CTE Heat Spreaders[C]// Thermal and Thermo Mechanical Phenomena in Electronic Systems, 2010: 1—6.
- [12] 何鹏,林铁松,杭春进. 电子封装技术的研究进展[J]. 焊接, 2010(1): 25—29.
 HE Peng, LIN Tie-song, HANG Chun-jin. Development of Electronic Packaging Technology[J]. Welding & Joining, 2010(1): 25—29.
- [13] LIU X, CAO D F, MEI H, et al. Effect of Particle Shapes on Effective Strain Gradient of SiC Particle Reinforced Aluminum Composites[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013: 419.
- [14] 黄强, 顾明元. 电子封装用金属基复合材料的研究现状[J]. 电子与封装, 2003(3): 22—25.
 HUANG Qiang, GU Ming-yuan. Research Progress of Composites for Electronic Packaging Materials[J]. Electronics and Packaging, 2003(3): 22—25.
- [15] JOHNSTON C, YOUNG R. Advanced Thermal Management Materials[J]. International New Microsystems MEMs, 2000, 2(1): 14—15.
- [16] ZWEBEN C. Advances in Composite Materials for Thermal Management in Electronic Packaging[J]. JOM, 1998, 50(6): 47–51.
- [17] HILLS Dix. Metal Mtrix Composites Cools Avionics[J]. Electron Packaging Prod, 1994, 34(12): 21.