复 合 材 料 学 报　　第 22 卷　第 1 期　2 月　2005 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 22　No. 1　February　2005

文章编号：1000-3851（2005）01-0047-05

两种粒径颗粒混合增强铝基复合材料的导热性能

张　强，陈国钦，姜龙涛，武高辉*
（哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要： 选用粒径为 20 μm 和 60 μm 的 SiC 颗粒，采用挤压铸造方法制备了基体分别为工业纯铝 L2、LD11（Al-12 %Si）和 AlSi20（Al-（18～21）%Si）的复合材料，研究了材料的导热性能。在等比表面积的基础上，提出了等效颗粒直径的概念，解决了两种粒径颗粒混合增强铝基复合材料导热率的预测问题。结果表明，SiC_P/Al 复合材料具有较为优异的导热率，且 LD11 基与 AlSi20 基复合材料的导热率大于基体合金的导热率，这与颗粒的等效直径大于临界粒径且颗粒导热率大于基体导热率有关；但复合材料的导热率随着基体中 Si 含量的增加而降低。

关键词： 铝基复合材料；颗粒直径；导热率
中图分类号： TB331　　**文献标识码：** A

THERMAL CONDUCTION PROPERTIES OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH DUAL-SIZED PARTICLES

ZHANG Qiang, CHEN Guoqin, JIANG Longtao, WU Gaohui*
(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: By squeeze casting technology, industrial pure aluminum L2, LD11 (Al-12 %Si) and AlSi20 (Al-(18～21) %Si) alloys were reinforced with SiC particles of 20 μm and 60 μm. And their thermal conduction properties were investigated. On the basis of equal specific interfacial areas, an equivalent particle diameter is brought forward and the thermal conductivity of dual-sized particles reinforced aluminum matrix composites is calculated. The SiC_P/Al composites possess relatively excellent thermal properties, and the thermal conductivities of LD11 and AlSi20 matrix composites are larger than those of matrices. This is attributed to the fact that the equivalent particle diameter of SiC is larger than its critical diameter and the thermal conductivity of SiC is higher than those of LD11 and AlSi20. But the thermal conductivities of SiC_P/Al composites decrease with the increasing of Si additions to the matrix.

Keywords: aluminum matrix composites; particle diameter; thermal conductivity

采用多种粒径颗粒混合增强的方法，可以提高颗粒的堆积密度[1]，制备高体积分数的颗粒增强铝基复合材料[2,3]。通过调整复合材料的基体成分、颗粒种类、含量及复合材料热处理状态，可以对其热物理性能和力学性能进行设计，从而满足电子封装应用多方面的性能要求[3～7]。导热率是电子封装用铝基复合材料的重要性能指标，因为散失热量的效率将直接影响电子器件的可靠性[4,5]。研究表明，复合材料的导热性能与各组元的导热能力、含量、增强体的尺寸及界面状态有关[5,7～9]。Hasselman 等人[7,10]提出了用于分析单一粒径颗粒增强复合材料导热率的理论模型——EMA（Effective medium approximation）方法，并强调了界面热阻的重要性。Davis[5]和 Liu[9]等人分别通过有限元分析和实验工作验证了 EMA 方法的合理性。但是，目前关于多种粒径颗粒混合增强复合材料导热性能的研究却很少。

本文作者选用两种不同粒径的 SiC 颗粒，采用挤压铸造方法制备了体积分数为 70 %的 SiC 颗粒增强铝基复合材料，研究了基体成分对复合材料导热率的影响。在等比表面积的基础上，提出等效颗粒直径的概念，基于 EMA 方法，分析了两种粒径颗粒混合增强复合材料的导热性能。

收稿日期： 2004-03-01；**收修改稿日期：** 2004-04-27
通讯作者： 武高辉，博士，教授，研究方向为金属基复合材料；**会员证号：** E63060002HY　E-mail: wugh@hope.hit.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1　材料及实验方法

1.1　复合材料制备

在电子封装应用中，为了降低颗粒增强铝基复合材料的热膨胀系数，使其与陶瓷基片或半导体材料保持热匹配，通常采用较高体积分数的增强体。而为了有效提高颗粒的体积分数，必须合理选择颗粒的粒径和粒径分布，采用多种粒径颗粒混合增强的方法[2]。本文中，选择了粒径分别为 20 μm、60 μm两种 SiC 颗粒(纯度 > 98.5 %)，按 4∶1 的质量比实现了 70 %的体积分数。铝基体则分别选取工业纯铝 L2、LD11 和 AlSi20 三种，其化学成分如表 1 所示。

SiC_p/Al 复合材料采用挤压铸造方法制备。首先，利用机械搅拌方法将两种 SiC 颗粒充分混合，将其装入模具，制成体积分数为 70 %的预制件，于 500～600 ℃保温。将铝液于 750～800 ℃(LD 和 AlSi20 合金)或 800～850 ℃(纯铝 L2)浇铸，迅速加压至 100 MPa，保温 5 min 后脱模，得到 SiC_p/Al 复合材料。

1.2　性能测试

复合材料的组织分析在 S-570 扫描电镜上观察。利用 TCT 416 型导热率测试仪(NETZSCH Corp.)测试复合材料及基体铝合金的导热率，测试温度为 50 ℃。测试前，将材料进行退火处理，具体工艺如下：纯铝 L2 及 L2 基复合材料于 345 ℃保温 3 h 后，炉冷；LD11、AlSi20 基体及其复合材料于 410 ℃保温 3 h 后，炉冷。

2　实验结果与分析

2.1　微观组织观察

SiC_p/Al 复合材料的 SEM 显微组织如图 1 所示。可以看到，复合材料的铸态组织非常均匀、致密，没有微小的孔洞和明显的缺陷。SiC 颗粒的层次明显，小颗粒充分填充到大颗粒的间隙中，从而有效地提高了颗粒整体的体积分数。虽然采用了两种粒径的颗粒混合增强，但颗粒分布均匀，不存在颗粒的偏聚区和贫化区。致密无孔隙的微观组织有助于提高材料的导热率，因而可以期望复合材料获得较为优异的导热性能。

2.2　导热性能

2.2.1　导热率

几种复合材料及基体的导热率测试结果如图 2 所示。本文中，SiC_p/Al 复合材料的导热性能较为优异，其导热率全部大于 130 W/(m·K)，是常用

表 1　铝基体的化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical compositions of aluminum matrices (Mass fraction)　%

Alloy	Si	Cu	Mg	Fe	Ni	Zn	Mn	Al
L2	≤0.20	≤0.01		≤0.25				≥99.6
LD11	12	0.5～1.3	0.8～1.3	1.0	0.5～1.3	0.25		Balance
AlSi20	18.0～21.0	≤0.2	≤0.4	≤0.45	≤0.2	≤0.2	≤0.35	Balance

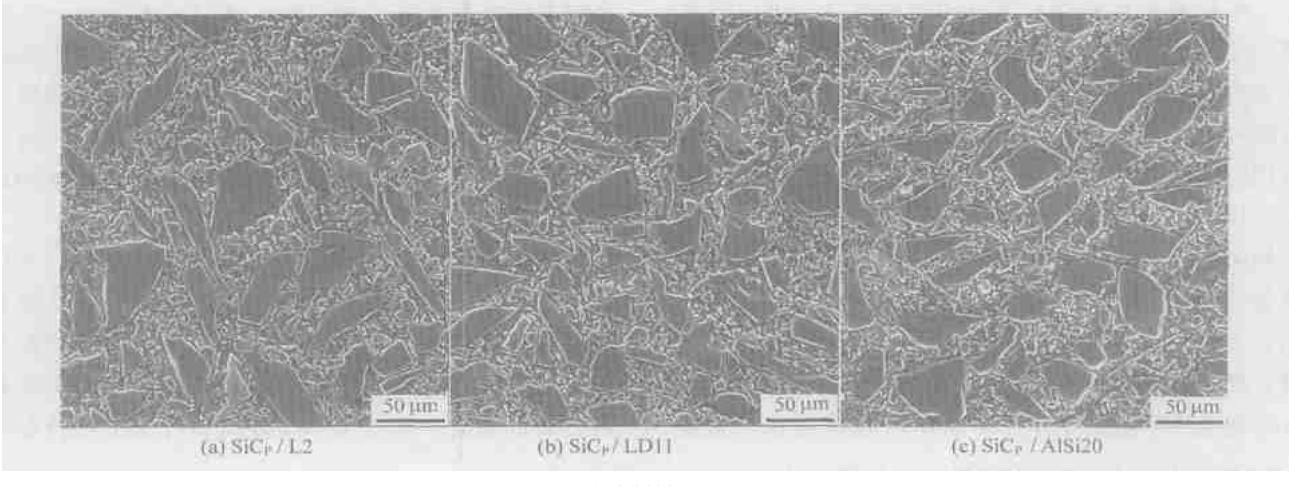

图 1　SiC_p/Al 复合材料的 SEM 显微组织

Fig. 1　SEM Microstructures of SiC_p/Al composites

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

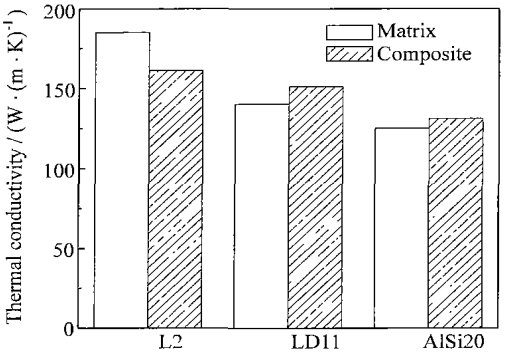

图 2　SiC_P/Al 复合材料及基体的导热率

Fig. 2　Thermal conductivities of SiC_P/Al composites and their matrices

的电子封装材料 Kovar 合金(～20 W/(m·K))的 6 倍以上。并且，SiC_P/LD11 和 SiC_P/AlSi20 复合材料的导热率均高于基体合金。三种基体中，纯铝 L2 的导热率最高，AlSi20 合金的导热率最低。说明，增加铝合金中的 Si 含量，将降低材料的导热性能；复合材料中也存在类似的规律。这是由于 Si 自身的导热率相对较低，加入到铝中后，降低了铝基体及其复合材料的导热率。以往的研究也指出，Si 含量的增加将使铝的导热率下降 20%～30%[11]。

2.2.2　复合材料导热性能分析

物质的热传导就是能量的输送过程。在颗粒增强铝基复合材料中，基体为铝合金，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。当它们组成复合材料时，声子和电子对热传导共同起作用。同时，由于 SiC 颗粒的体积分数较高，它的加入在材料中引入大量界面，对电子和声子运动具有一定的散射作用，阻碍热传导的进行。在 Hasselman 等人提出的 EMA 方法中，充分考虑了界面热阻对复合材料导热性能的影响，得到其导热率的表达式

$$K_{com} = K_m \frac{\left[2\left(\frac{K_P}{K_m} - 2\frac{K_P R_{Bd}}{d} - 1\right)V_P + \frac{K_P}{K_m} + 2\frac{K_P R_{Bd}}{d} + 2\right]}{\left[\left(1 - \frac{K_P}{K_m} + 2\frac{K_P R_{Bd}}{d}\right)V + \frac{K_P}{K_m} + 2\frac{K_P R_{Bd}}{d} + 2\right]} \quad (1)$$

式中：K_{com}、K_m、K_P 分别为复合材料、基体及颗粒的导热率；d 为颗粒的直径；R_{Bd}为复合材料界面热阻($m^2 \cdot K/W$)；V_P 为颗粒的体积分数。

界面是与颗粒直径及体积分数均相关的参量。因此，本文中基于 EMA 方法，在复合材料比表面积相等的基础上，引入等效颗粒直径的概念，以分析文中两种粒径颗粒混合增强复合材料的导热性能，如图 3 所示。

在单一粒径颗粒增强的复合材料中，假设颗粒为球形，则复合材料的比表面积为 $6V_P/d$。因此，当复合材料是由两种粒径(大尺寸 d_1 和小尺寸 d_2)的颗粒混合增强，且其体积分数分别为 V_1 和 V_2 时，复合材料的比表面积为$(6V_1/d_1 + 6V_2/d_2)$。

令两种材料的比表面积相等，称此时的单一直径为等效粒径 d_e，计算公式如下：

$$d_e = \frac{V_P d_1 d_2}{V_1 d_2 + V_2 d_1} \quad (2)$$

因此，将 EMA 方法中的颗粒直径 d 换成等效粒径d_e，联合式(1)和式(2)，可以计算得到多种

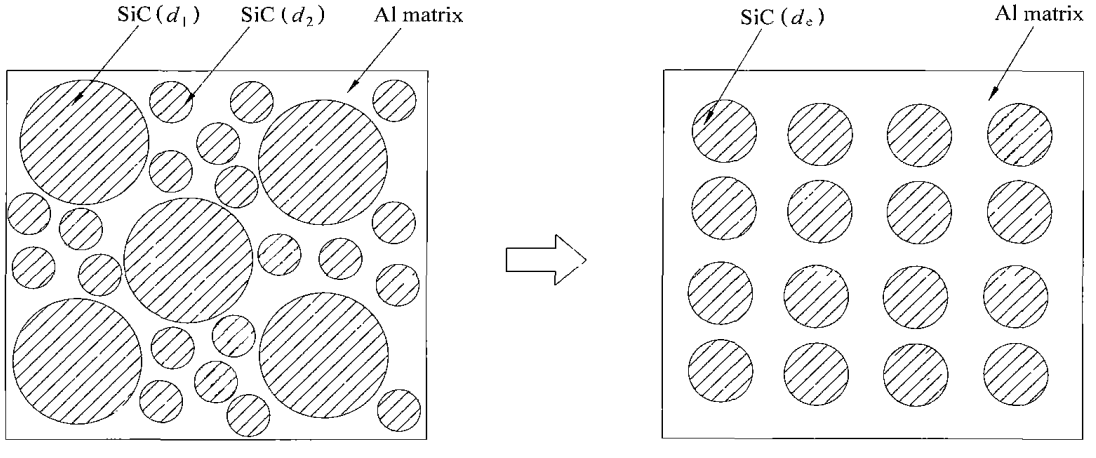

图 3　等效粒径颗粒增强复合材料示意图

Fig. 3　Schematic diagram of composites reinforced with equivalent identical particles

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粒径颗粒混合增强复合材料的导热率。

本文中，20 μm 和 60 μm 的 SiC 颗粒按 4∶1 的配比混合，其等效粒径为 23.1 μm。根据 Hasselman 等人的研究结果[6]，Al-SiC 系统的界面热阻为 0.685×10^{-8} $m^2 \cdot K/W$。取 SiC 的导热率为 180 W/(m·K)[5]，由此采用等效粒径 EMA 方法计算得到以 L2、LD11 和 AlSi20 为基体的三种复合材料的导热率分别为 169.2、155.6 和 150.6 W/(m·K)。计算结果与实测值(分别为 161、151 和 131 W/(m·K))较为接近，其中尤以 SiC_P/LD11 和 SiC_P/L2 复合材料符合的最好。但是，计算值略高于实测值，这可能与 EMA 方法中假设增强体为球形有关，而实际采用的颗粒为带有棱角的不规则形状。在相同体积分数的情况下，其比表面积比球形颗粒复合材料的比表面积大，因此界面热阻对材料导热性能的负面影响也更严重，导致实测值略低于理论预测值。

2.2.3　复合材料导热率大于基体导热率的可能性

在图 2 中可以发现，SiC_P/LD11 和 SiC_P/AlSi20 复合材料的导热率大于基体导热率，这与本文中采用的 SiC 颗粒尺寸较大有关。根据等效粒径 EMA 方法，图 4 给出了三种复合材料的导热率随颗粒等效粒径的变化关系。

从图 4 中看到，由于界面热阻的影响，曲线整体成“S”形，复合材料的导热率随 SiC 等效粒径的增加而增大。如果增强体导热率大于基体(如 SiC_P/LD11 和 SiC_P/AlSi20 复合材料)，粒径存在一个临界值 d_c。当等效直径大于 d_c 时，复合材料的导热率可以大于基体。令 $K_{com} = K_m$ 时，得到 d_c 的具体表达式如下：

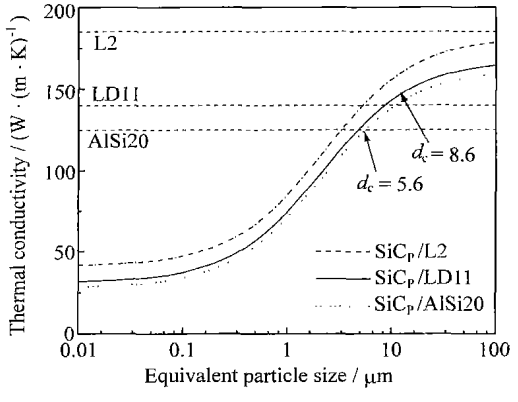

图 4　SiC_P/Al 复合材料的导热率与颗粒等效粒径的关系

Fig. 4　Dependence of thermal conductivity of SiC_P/Al composites with equivalent particle size

$$d_c = \frac{2 K_m R_{Bd}}{1 - K_m / K_P} \tag{3}$$

根据式(3)知道，临界粒径 d_c 受到界面热阻、基体及颗粒导热率的影响，与体积分数无关。并且，如果增强体的导热率小于基体的(例如 SiC_P/L2 复合材料)，式(3)没有意义，说明此时复合材料的导热率将不会大于基体的。在 SiC_P/LD11 和 SiC_P/AlSi20 复合材料中，其临界粒径分别为 8.6 μm和 5.6 μm。而复合材料的等效粒径大于此临界粒径，表明 SiC_P/LD11 和 SiC_P/AlSi20 复合材料的导热率可以大于基体的导热率，与实验结果相符。

3　结　论

(1) 选用粒径为 20 μm 和 60 μm 的颗粒混合增强，采用挤压铸造方法可以制备体积分数高达 70 %且组织均匀、致密的 SiC_P/Al 复合材料。

(2) SiC_P/Al 复合材料与基体的导热率均随着基体中 Si 含量的增加而减小。

(3) 在等比表面积的基础上，引入等效颗粒直径的概念，基于 EMA 方法，可以预测多种粒径颗粒混合增强铝基复合材料的导热率。并且，当颗粒的等效直径大于临界粒径且颗粒导热率大于基体导热率时，复合材料的导热率可以大于基体合金的导热率。

参考文献：

[1] 陆厚根. 粉体技术导论 [M]. 上海：同济大学出版，1998. 30 - 42.

[2] Cordovilla G C, Louis E, Narciso J. Pressure infiltration of packed ceramic particulates by liquid metals [J]. *Acta Materialia*, 1999, 47 (18): 4461 - 4479.

[3] Lee H S, Jeon K Y, Kim H Y, *et al*. Fabrication process and thermal properties of SiC_P/Al metal matrix composites for electronic packaging applications [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35: 6231 - 6236.

[4] 张　崎. 功率微电子用铝基复合材料 [J]. 微电子技术，1999, 27 (2): 30 - 34.

[5] Davis L C, Artz B E. Thermal conductivity of metal-matrix composites [J]. *J Appl Phys*, 1995, 77 (10): 4954 - 4960.

[6] 喇培清，许广济，丁广田. 高体积分数粒子型铝基复合材料热膨胀性能的研究 [J]. 复合材料学报，1998, 15 (2): 6 - 11.
La P Q, Xu G J, Ding G T. Study of thermal expansion property for high volume fraction particulate reinforced aluminum matrix composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1998, 15 (2): 6 - 11.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] Giger A L, Hasselman D P H, Donaldson K Y. Effect of reinforcement particle size on the thermal conductivity of a particulate-silicon carbide-reinforced aluminum matrix composite [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1993, 12: 420 - 423.

[8] Klemens P G. Thermal conductivity of composites [J]. *International Journal of Thermophysics*, 1990, 11 (5): 971 - 976.

[9] Liu D M, Tuan W H. Microstructure and thermal conduction properties of Al_2O_3-Ag composites [J]. *Acta Mater*, 1996, 44 (2): 813 - 818.

[10] Hasselman D P H, Lloyd F J. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance [J]. *Journal of Composites*, 1987, 21 (6): 508 - 515.

[11] Mondolfo L F. Aluminum Alloys: Structure and Properties [M]: London: The Butterworth Group, 1976. 368 - 376.

(上接第 14 页)

11. 语言要简练，但不得使用电报型语言。

如 Adsorption nitrobenzene on copper chromite investigation.

应为 Adsorption of nitrobenzene on copper chromite was investigated.

12. 文词要纯朴无华，不多姿多态的文学性描述手法。

13. 组织好句子，使动词尽量靠近主语；例如：

不用：The decolorization in solutions of the pigment in dioxane, which were exposed to 10 hr of UV irradiation, was no longer irreversible.

而用：When the pigment was dissolved in dioxane, decolorization was irreversible after 10hr of UV irradiation.

14. 删繁从简。

如用 increased 代替 has been found to increase

用 the results show 代替 from the experimental results, it can be concluded that

15. 文摘中涉及其他人的工作或研究成果时，尽量列出他们的名字及文献出处。

16. 文摘词语拼写，用英美拼法都可以，但在每篇文章中须保持一致。

17. 文摘中不能出现“图 ××”、“方程 ××”和“参考文献 ××”等句子。

其它几点注意事项：

1. 不要用 home made 表示“国产”这个概念，home made 实际上表示的是“家庭制造”这一概念。

2. 如果不会引起误解，可数名词尽量用复数。

3. 注意中英文不同的表达方法。不要简单地逐字直译。例如，不要将 because 放在句首表达“因为”这一概念，because 表示原因语气用在文摘中过强。不要用“XX are analyzed and studied (discussed)”。来直译“分析研究（讨论）”这一中文概念。用“XX are analyzed”就可以了。尽量不要使用 not only …but also 直译中文“不但”…“而且”这一概念，用 and 就行了。

(三). 文摘中的特殊字符

特殊字符主要指各种数学符号、上下脚标及希腊字母，它们无法直接输入计算机，因此都需转成键盘上有的字母和符号。Ei 对此有专门规定。希望在文摘中尽量少用特殊字符及由特殊字符组成的数学表达式。因为它们的输入极为麻烦，而且极易出错，影响文摘本身的准确性和可读性，应尽量不用，改用文字表达或文字叙述. 更复杂的表达式几乎难以输入，应设法取消。

(四). 缩写字及首字母缩写词 (Abbreviations and Acronyms)

对那些已经为大众所熟悉的缩写词，如 radar、laser、CAD 等，可以直接使用。对于那些仅为同行所熟悉的缩略语，应在题目、文摘或关键词中至少出现一次全称。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net