

# 颗粒增强金属基复合材料的热导率

费铸铭 李贤淦 王惠

(上海交通大学复合材料研究所)

**摘要:** 本文研究了颗粒增强铝合金(LD<sub>2</sub>)复合材料的热导率与颗粒的种类、含量、粒度和在基体中的分布情况之间的关系。制作了不同颗粒含量和粒度的SiCp/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>复合材料试样,用定常热流法测定其热导率。将测试结果与用混合热阻模型推得计算式提供的理论值进行比较,根据测试值和理论值比较的结果,对该计算式提出考虑到颗粒粒度对复合材料热导率影响的修正。得到综合考虑了颗粒的种类、含量、粒度和在基体中均匀分布程度影响的颗粒增强金属基复合材料热导率的理论计算式。

**关键词:** 颗粒增强铝合金、热导率、定常热流法、混合热阻模型

## 一、前言

陶瓷颗粒增强的金属基复合材料具有优良的机械性能和物理性能:高的比模量、高的屈服强度、高的抗疲劳性能、低的热膨胀性能和良好的热稳定性。其最大优点是可用常规的加工金属的方法和设备进行加工,且成本亦较低廉<sup>[1]</sup>。因此得到各工业部门的重视,特别是在民用方面有非常广阔的前途。复合材料的热物理性能在设计方面是必不可少的参数,本文就SiCp/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>复合材料导热性能进行研究,为应用提供该材料热导率的特征数据。

颗粒增强金属基复合材料的热导率不但与颗粒和基体材料的热性能有关,而且对颗粒在基体中的分布、含量和粒度十分敏感。本文着重讨论SiCp/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>复合材料热导率与颗粒含量、分布和粒度之间的从属关系。

## 二、颗粒增强复合材料热导率的计算模型

颗粒增强金属基复合材料热导率是可以根据基体和颗粒材料的热导率和颗粒在基体中的含量进行计算的,许多学者对陶瓷颗粒增强树脂基复合材料的热导率与基体和颗粒材料的热导率及颗粒含量之间的关系进行了详细的研究并由此导出了计算该材料热导率的理论模型<sup>[2]</sup>。其中比较重要的有:

## Bruggeman理论模型

$$1 - V_i = \left[ \frac{\lambda_i - \lambda_c}{\lambda_i - \lambda_m} \right] \left( \frac{\lambda_m}{\lambda_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中  $V_i$ —复合材料中颗粒的体积百分含量;

$\lambda_i$ —颗粒的热导率;

$\lambda_m$ —基体的热导率;

$\lambda_c$ —复合材料的热导率。

## Lewis和Nielsen半经验模型

$$\lambda_c = \lambda_m \left[ \frac{1 + ABV_i}{1 - BV_i\psi} \right] \quad (2)$$

其中 
$$B = \frac{\frac{\lambda_i}{\lambda_m} - 1}{\frac{\lambda_i}{\lambda_m} + A},$$

$$\psi = 1 + \left[ \frac{1 + \phi_m}{\phi_m^2} \right] V_i$$

$A$ 和 $\phi_m$ 是与颗粒形状和在基体中装填形式有关的参数,在参考文献[2]中列有它们的数值。

## Maxwell理论模型

$$\lambda_c = \lambda_m \left[ \frac{\lambda_i + 2\lambda_m + 2V_i(\lambda_i - \lambda_m)}{\lambda_i + 2\lambda_m - V_i(\lambda_i - \lambda_m)} \right] \quad (3)$$

## 几何平均值模型

$$\lambda_c = \lambda_i^{V_i} \lambda_m^{(1-V_i)} \quad (4)$$

## Cheng和Vachon理论模型

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{2}{\sqrt{C(\lambda_i - \lambda_m)} [\lambda_m + B(\lambda_i - \lambda_m)]} \tan^{-1} \frac{B}{2} \sqrt{\frac{C(\lambda_i - \lambda_m)}{\lambda_m + B(\lambda_i - \lambda_m)}} + \frac{1-B}{\lambda_m} \quad (5)$$

其中  $B = \sqrt{3V_i/2}; \quad C = -4\sqrt{2/(3V_i)}.$

上列计算模型的导出条件是圆球形颗粒在基体中作均匀分布,只有Lewis和Nielsen模型考虑了非圆球颗粒和装填方式不同带来的影响。在树脂基复合材料中 $\lambda_i > \lambda_m$ ,而在金属基复合材料中刚好相反;在所研究的SiC<sub>p</sub>/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/LD<sub>2</sub>复合材料中, SiC和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒是不规则的多面体,且由于制作工艺所限,颗粒在基体中的分布带有某种不可避免的不均匀性。虽然如此,上列模型仍然是研究颗粒增强金属基复合材料热导率计算的基础。

### 三、试验结果及其讨论

#### 1. 试验结果

选择LD<sub>2</sub>铝合金作基体, SiC和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒作增强材料, 制作了不同颗粒含量和不同颗粒粒度的八只试样:

试样编号	颗粒种类	成型方法	含量, %	粒度, $\mu$
1 #	SiC	热压	11.23	10
2 #	SiC	热压	16.31	10
3 #	SiC	热压	30.83	10
4 #	SiC	热压	16.19	5
5 #	SiC	热压	21.36	20
6 #	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	热压	12.33	10
7 #	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	热压	18.00	10
8 #	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	热压	26.46	10

用定常热流法对上述试样热导率的测试结果如下:

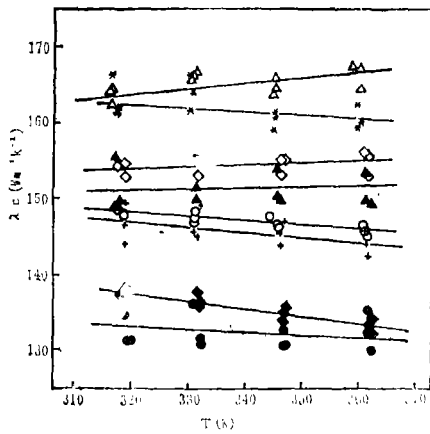


图1 SiCp/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>复合材料热导率与温度的关系

△试样1\*; □试样2\*; ○试样3\*; +试样4\*;  
\*试样5\*; ▲试样6\*; ◆试样7\*; ●试样8\*。

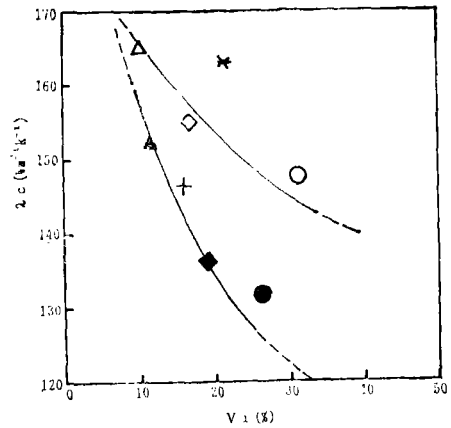


图2 SiCp/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>3</sub>复合材料热导率与颗粒含量的关系

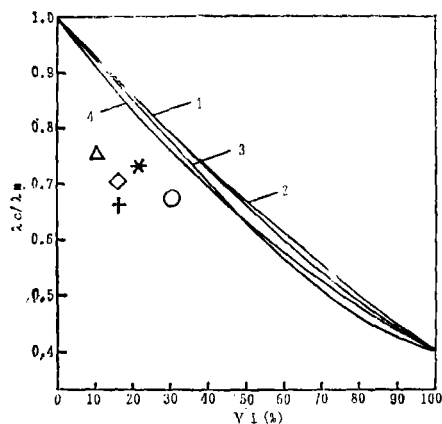
由图1可见: 用粒度10 $\mu$ 的SiC颗粒复合成的SiCp/LD<sub>2</sub>复合材料的热导率, 当SiC含量较少时, 随着温度的升高而增加。但随着SiC含量的增加, 复合材料热导率随温度升高而增加的趋势逐渐减弱, 当SiC含量超过一定数量时(如3\*试样), 复合材料热导率转而随温度的升高而减小。这是因为在测试的温度范围内, 铝合金的热导率随温度的升高而增加<sup>[3]</sup>, 而SiC的热导率却随温度的升高而减小<sup>[4]</sup>。所以, 随着SiC含量的增加, 颗粒对复合材料热导率的贡献将逐渐增加, 对复合材料热导率随温度变化规律的影响, 将逐渐由基体影响为主转变成

由颗粒影响为主。至于用粒度 $5\mu$ 和 $20\mu$ 的SiC颗粒复合成的SiCp/LD<sub>2</sub>和用粒度 $10\mu$ 的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒复合成的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>复合材料热导率随温度的变化规律与颗粒含量的关系亦有类似的情况。虽然在作出上述分析时没有考虑颗粒在基体中分布的不同,但上述试验结果仍明白地显示:颗粒增强金属基复合材料热导率随温度变化的规律也受到混合律的支配。

如果将各试样的热导率在同一温度(333K)下进行比较,则由图2可发现:SiCp/LD<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>的热导率随颗粒含量增加而下降的趋势是明显的;且由于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的热导率比SiC更低<sup>[4]</sup>,所以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD<sub>2</sub>的热导率随颗粒含量增加而下降的趋势比SiCp/LD<sub>2</sub>更大。另外,在图2上也可以看到:颗粒度 $20\mu$ 的SiCp/LD<sub>2</sub>试样的热导率比相同颗粒含量的、颗粒粒度为 $10\mu$ 的试样的热导率高,而对于颗粒粒度 $5\mu$ 的SiCp/LD<sub>2</sub>则刚好相反。由此可见:颗粒增强金属基复合材料的热导率除了与颗粒的含量有关外,还与颗粒的粒度有关。

## 2. 试验结果与理论模型计算值的比较

将用几何平均值模型、Maxwell模型、Lewis-Nielsen模型和Cheng-Vachon模型对333K的SiCp/LD<sub>2</sub>复合材料热导率与颗粒含量的关系的计算结果示于图3。由图可见:各条



1-Maxwell模型; 2-Cheng-Vachon模型

3-Lewis-Nielsen模型; 4-几何平均值模型

图3 SiCp/LD<sub>2</sub>复合材料热导率测试值和各模型计算值的比较

计算曲线相当接近,特别是当 $V_1$ 较低时尤其如此。再将测试结果标到此图上,则可看到:测试值普遍比理论值低。且颗粒粒度愈细,偏低的程度愈大。

上述几个计算模型的推导基础是球状颗粒在基体中作均匀分布,且未考虑颗粒粒度的影响。而目前研究的复合材料试样与上述计算模型的推导条件,无论在颗粒形状、粒度和基体中分布情况等方面均有差异。正是这些差异,导致其热导率的测试值低于计算值。作者在讨论纤维增强复合材料的热导率时<sup>[5]</sup>,曾经论述过:金属基复合材料中热能的传输是通过晶格波(声子)和自由电子的传输性来实现的,声子和自由电子传输热

能的能力,会因受到几何界面散射而减弱,从而降低复合材料的导热能力。颗粒的含量和粒度决定着散射面积的大小,复合材料中颗粒含量愈多、粒度愈细,则提供的散射面积愈大,对复合材料导热性能的降低也愈剧烈。相同含量的颗粒在基体中作不同分布时,颗粒和基体形成的几何界面对导热方向上的声子和自由电子的散射效应也不一样。如果以均匀分布的圆球所产生的散射效应作为比较标准,那末,颗粒分布愈不均匀,颗粒形态的对称性愈差,其散射效应就愈会偏离这个标准,这种偏离可正可负,由此对复合材料的热导率产生或增或降的影响。由上述分析可得出结论:颗粒增强金属基复合材料的热导率不仅仅是颗粒含量的函数,还必须考虑到颗粒在基体中的分布情况、颗粒形状和粒度的影响。所以,以颗粒在基体中作均匀的分布为前提导出的理论模型,不能全面反映复合材料热导率与多种影响因素的关系。我们研究了颗粒在基体中分布和颗粒粒度对复合材料热导率的影响,提出了下列计算模型:

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{\sqrt[3]{V_i \psi N}}{\lambda_i \sqrt[3]{\frac{(V_i \psi)^2}{N} + \lambda_m \left[ 1 - \sqrt[3]{\frac{(V_i \psi)^2}{N}} \right]}} - \frac{1 - \sqrt[3]{V_i \psi N}}{\lambda_m} \quad (6)$$

其中  $N = \frac{(a+d)(a+c)}{(a+b)^2}$ ,  $V_i^2 \leq N \leq \frac{1}{V_i}$ ;

$$\psi = \left( \frac{6 \times 10^6}{D} \right)^{\frac{1-V_i}{2D+25V_i}}$$

式中  $N$ -表示颗粒在导热方向上分布不均匀程度的参数, 对于均匀分布的颗粒,  $N=1$ ;

$\psi$ -表示颗粒粒度对热导率影响的参数;

$D$ -表示颗粒粒度的线性尺寸,  $\mu$ 。

用式(6)对333K的SiCp/LD2和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD2复合材料试样的热导率进行计算, 计算的结果分别示于图5和图6上。由

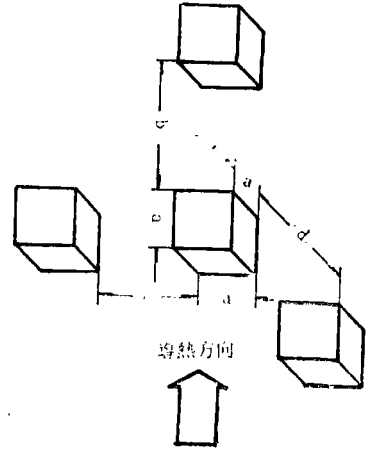


图4 颗粒分布示意图

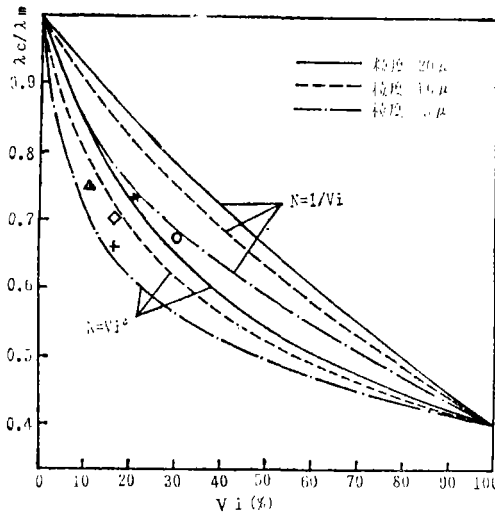


图5 SiCp/LD2复合材料热导率测试值与式(6)计算值的比较

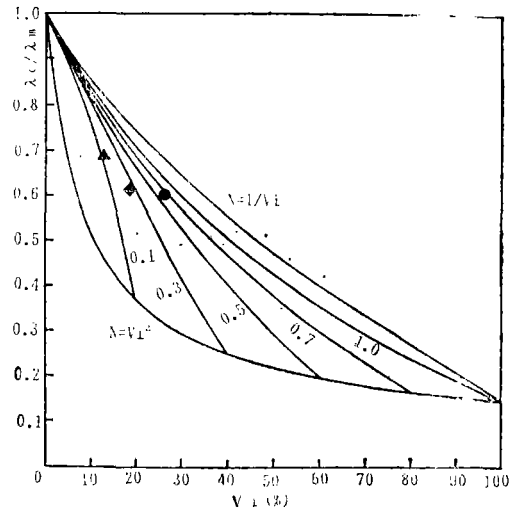


图6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/LD2复合材料热导率测试值与式(6)计算值的比较

图5和图6可见: 颗粒增强复合材料热导率与颗粒分布和含量的关系, 象纤维增强复合材料一样, 在一个区域内变化<sup>[5]</sup>。区域中的每一个点表示一定含量的颗粒作一定分布时的热导率。图3所示的热导率与含量之间的线性关系, 仅是颗粒分布均匀时的一种特殊情况。从图5和图6上还可发现: 复合材料试样中颗粒含量越少, 其中颗粒分布不均匀的倾向就越大, 相同颗粒含量时的 $\lambda_c$ 值的可能变化范围也大, 但随着颗粒含量的增加, 试样中颗粒分布不均匀的倾向和 $\lambda_c$ 的可能变化范围逐渐缩小。在图5上分别画出了颗粒粒度5 $\mu$ 、10 $\mu$ 和20 $\mu$ 的SiCp/LD2

复合材料的热导率随颗粒分布和颗粒含量而变化的区域。图5中也显示：随着颗粒粒度的增加，该区域向热导率增加的方向移动，但移动的幅度却愈来愈小。可以推断：当粒度增加到某一数值时，粒度的增加不再影响复合材料的热导率。将测得的各复合材料试样的热导率数据标到图5和图6上，可发现：大部份数据落到各预定的区域内，但是颗粒粒度为 $10\mu$ 的SiCp/LD2复合材料1\*和2\*试样的热导率值，却落到了相应的区域之外，进入对应颗粒粒度为 $5\mu$ 的区域。我们分析产生此现象的原因是：（1）从1\*和2\*试样颗粒含量较低和成型工艺的特点可推测，颗粒在基体中分布的不均匀性较大，这就使得它们的热导率值较为接近所对应区域的下限；（2）由于采用的商用SiC颗粒粒度不均匀，在所用的 $10\mu$ 的SiC颗粒中混有较多的粒度低于 $10\mu$ 的小颗粒，导致试样热导率值进一步下降，从对应 $10\mu$ 的区域进入对应 $5\mu$ 的区域。上述试验和分析清楚地表明：颗粒增强金属基复合材料的热导率，不但与基体和颗粒材料的导热性能有关；还与颗粒的含量及其在基体中的分布情况有关；在一定的粒度范围内还与颗粒的粒度有关。

颗粒增强复合材料与纤维增强复合材料不同，在纤维增强复合材料中纤维的排列是通过人工排布实现的，纤维排列方式及其对复合材料热导率的影响是可以根据需要预先进行设计的。而颗粒增强复合材料中颗粒的各种不同分布及其对复合材料试样各个方向热导率的影响是无法预先设计的。因此，在用式（6）对颗粒增强金属基复合材料的热导率进行设计时，必须首先在工艺上保证颗粒在基体中作均匀分布，这样也有利于获得导热性能各向相同的颗粒增强金属基复合材料。

## 四、结 论

1. 颗粒增强金属基复合材料的热导率与温度的关系取决于基体和颗粒材料的热导率与温度的关系，并受混合律的支配；

2. 颗粒增强金属基复合材料的热导率除了与基体和颗粒材料的热导率有关外，还与颗粒的含量、粒度和在基体中分布情况有关；

3. 式（6）可用来设计和计算颗粒增强复合材料的热导率，亦可用来估算多孔材料的热导率。

## 参 考 文 献

- [1] Crowe, C.R., Cray, R.A. and Hasson, D.F. ICCM-V, 843
- [2] Progelhof, R.C., Throne, J.L. and Ruetsch, R.R., Polymer Eng. and Sci., 1976, Vol.16, No.9, 615
- [3] Helmut Wolf, Heat Transfer, Harper Row, New York, 1983, P455
- [4] Touloukian, Y.S., Powell, R.W., Ho, C.Y. and Klemens, P.G., "Thermophysical properties of matter, Thermal Conductivity, Non metallic Solids", Vol.2, IFI/plenum New York—Washington, 1970
- [5] 费铸铭, 徐志刚, 航空学报, 第10期 (1987), B513

# THE THERMAL CONDUCTIVITY OF PARTICULATE-REINFORCED ALUMINIUM COMPOSITE MATERIALS

Fei Zhuming      Li Xiangnan and Wang Hui

*Institute of Composite Materials, Shanghai  
Jiao Tong University China*

## ABSTRACT

The relation of the effective thermal conductivity of particulate-reinforced aluminium composite materials with the kind, size, volume fraction and distribution of particles in the composites was investigated in this work. The specimens were made from alloy (LD2) foil and particulates of SiC with the sizes of 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m, 20 $\mu$ m, and particulates of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with the size of 10 $\mu$ m by hot pressing at 580°C. The thermal conductivity of specimens with different volume percentage of particles have been measured by the method of constant heat flow under different temperatures. The measured thermal conductivity of specimens was compared with that calculated from the equation deduced with the aid of a mixed thermo-resistance model.

On the basis of comparison an amendment was given to above-mentioned equation, in consideration of the influence of particulate size on thermal conductivity. Thus, a new equation, used in calculating the thermal conductivity of the particulate-reinforced aluminium composite materials, was developed. In this equation the influence of the kind, volume fraction, size of particulates and particulate distribution in matrix on the thermal conductivity of the composites was comprehensively taken into account.

Key words: Thermal conductivity, Particulate-reinforced aluminium, Composite materials, Constant heat flow

复合材料文摘: (上接26页)

并行, 对斜交铺层板包括冲击试验也进行了研究。

在拉伸试验中, 由于增强材料的方向不同, 破坏形式除拉伸之外也出现压缩或剪切破坏, 对各种破坏形式及其特性值都进行了讨论。

CF/PEEK复合材料中的残留应变

就CF/PEEK热塑性纤维增强材料, 通过测试拉曼(Raman)振动的应变依存性, 测