

用蜃景效应法测铝基复合材料热扩散率^①

喻学斌

(中山大学物理系, 广州 510275)

张国定 吴人洁

(上海交通大学复合材料研究所, 上海 200030)

章肖融 干昌明 费 冬

(南京大学近代声学实验室, 南京 210008)

摘 要 对蜃景效应法测铝基复合材料热扩散率进行了研究, 发现蜃景效应法热扩散理论尽管是建立在匀质材料基础上的, 但对复合材料同样适用, 只不过 $m = (\gamma \times \pi \times K_s)^{1/2}$ 中的 γ 常数取值不同。根据试验和理论计算, 确定出碳纤维增强铝基和 SiC_p 增强铝基复合材料热扩散率计算式中的 γ 值。

关键词 蜃景效应 金属基复合材料 热扩散率

蜃景效应又称 Mirage 技术, 起始于八十年代初法国巴黎大学 Boccara 研究组^[1, 2], 现已被广泛用来测试材料的各种性能。特别是在测试材料的热扩散率中, 具有无接触、样品小、准确度较高、可实现样品任何方向的热扩散率测试的优点。

铝基复合材料具有密度低、膨胀系数小、导热性能好, 且可以任意设计的优点。TMS 92 年度研讨会上认为^[3]: 金属基复合材料是一种有前途的电子封装材料, 开展它的导热等方面性能的研究具有很大的现实意义。

铝基复合材料, 特别是纤维增强铝基复合材料, 它们的热导性能具有各向异性。因此, 用蜃景效应法对铝基复合材料热扩散性能进行研究就显得非常重要。

蜃景效应理论是在均质材料假设条件下推导建立起来的, 当把这套理论用到复合材料上时是否适用? 本文在试验基础上验证了它的适用性, 并重新确定了复合材料的 γ 常数值。

1 测试原理与方法

1.1 原理

图 1 为测量材料热扩散率的实验示意图, 泵束为一束调制激光, 照在样品上, 样品表面的温度产生周期性变化, 使得样品上方一薄层空气的温度发生周期性的变化, 并有温度梯度存在。当另一束探测激光沿 x 方向掠过样品表面时, 就产生偏折, 根据测出的偏折信息, 可测定样品的热扩散率。

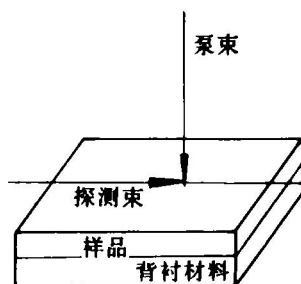


图 1 实验示意图

探测光经过样品偏折的情况如图 2 所示。由于泵束为调制光, 因而偏转角中的切向分量 ψ_t 和法向分量 ψ_n 均为复数。 ψ_t 的实部表示为 $\text{Re}(\psi_t)$, 虚部表示为 $\text{Im}(\psi_t)$ 。而 $\text{Re}(\psi_t) \sim d$ 的关系 ($d = 2y$) 可由图 3 表示, 此处 d 为探测束横向偏转的实部第一个非中心零交点之间的距

① 南京大学近代声学开放实验室资助项目 收稿日期: 1994-09-30; 修回日期: 1994-11-22

离。对不同的调制频率 f ，可得到不同的 d ，而 $d \sim f^{-1/2}$ 为直线关系^[4]，此直线关系由美国 Wagne 大学研究小组的 Kuo P K 和 Thomas R L 发现。西班牙的 Salazr 等^[5] 在 Kuo P K 的直线关系基础上，研究了公式

$$m = (\gamma \times \pi \times K_s)^{1/2}$$

式中 m 为直线的斜率， K_s 为样品的热扩散率， γ 为与材料相关的常数。

1.2 实验方法

按要求线切割铝基复合材料成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 热扩散测试用样品，表面经抛光处理。形状见图 4，参数见表 1。

表 1 复合材料试样分类

试样号	材料	增强形式	体积分数 / %
1 [#]	SiC _p /ZL109	颗粒 (20 μm)	56
2 [#]	SiC _p /ZL109	颗粒 (20 μm)	49
3 [#]	Sc/ZL109	单向	61
4 [#]	Sc/ZL109	正交对称 (0/90)	48
5 [#]	M40/ZL109	正交对称 (0/90)	44

注：Sc—上海碳素厂生产的碳纤维。

2 测试结果与讨论

2.1 试验结果

部分试验结果见图 5。

2.2 讨论

由上面测试结果的线性回归曲线明显可以看出，复合材料的 $d \sim f^{-1/2}$ 线性非常好。它充分说明蜃景效应热扩散理论尽管是对匀质材料来讲的，然而，同样适用于复合材料热扩散。

$$\text{因为 } m = (\gamma \times \pi \times K_s)^{1/2} \quad (1)$$

显然，用 $\gamma = 1$ 或 $\gamma = 1.44$ 代入上式求解复合材料的 K_s 值偏大，是不适合的，因此必须重新确定 γ 值。

根据文献[6]知，平行纤维方向(单向)复合材料热导率

$$\lambda_c = \lambda_f V_f + \lambda_m (1 - V_f) \quad (2)$$

式中 λ_f 是纤维轴向热导率， λ_m 是基体的热导率， V_f 是增强体体积分数。

对颗粒增强复合材料^[7] 有

$$K_c = K_1(1 - f) + K_2 f - (1 - f)f(K_1 - K_2)^2 / \{3[K_1(1 - f) + K_2 f]\} \quad (3)$$

式中 K_1 是基体的热导率， K_2 是颗粒的热导率， f 是增强体体积分数， K_c 是复合材料热导率。

将(1)、(2)、(3)式分别代入表 2 的有关性能值，以及 1[#] 和 3[#] 试样 $\alpha = 0^\circ$ 时的回归直线斜率 m 值，可求得：

$$\gamma_{cf} = 2.42, \gamma_{SiC_p} = 3.98$$

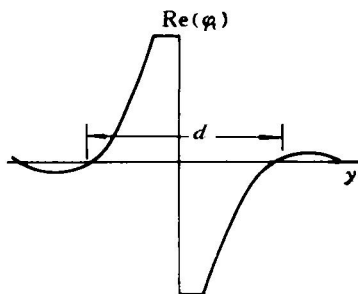


图 3 $\text{Re}(\phi_i) \sim d$ 关系示意图

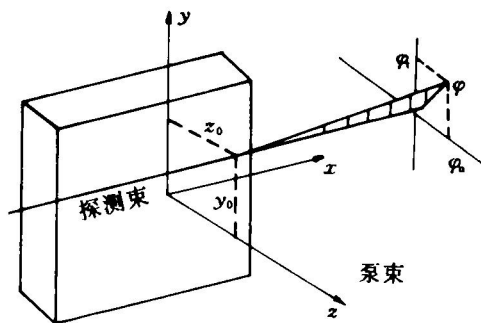


图 2 探测光偏折示意图

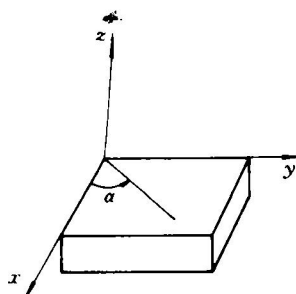


图 4 样品示意图

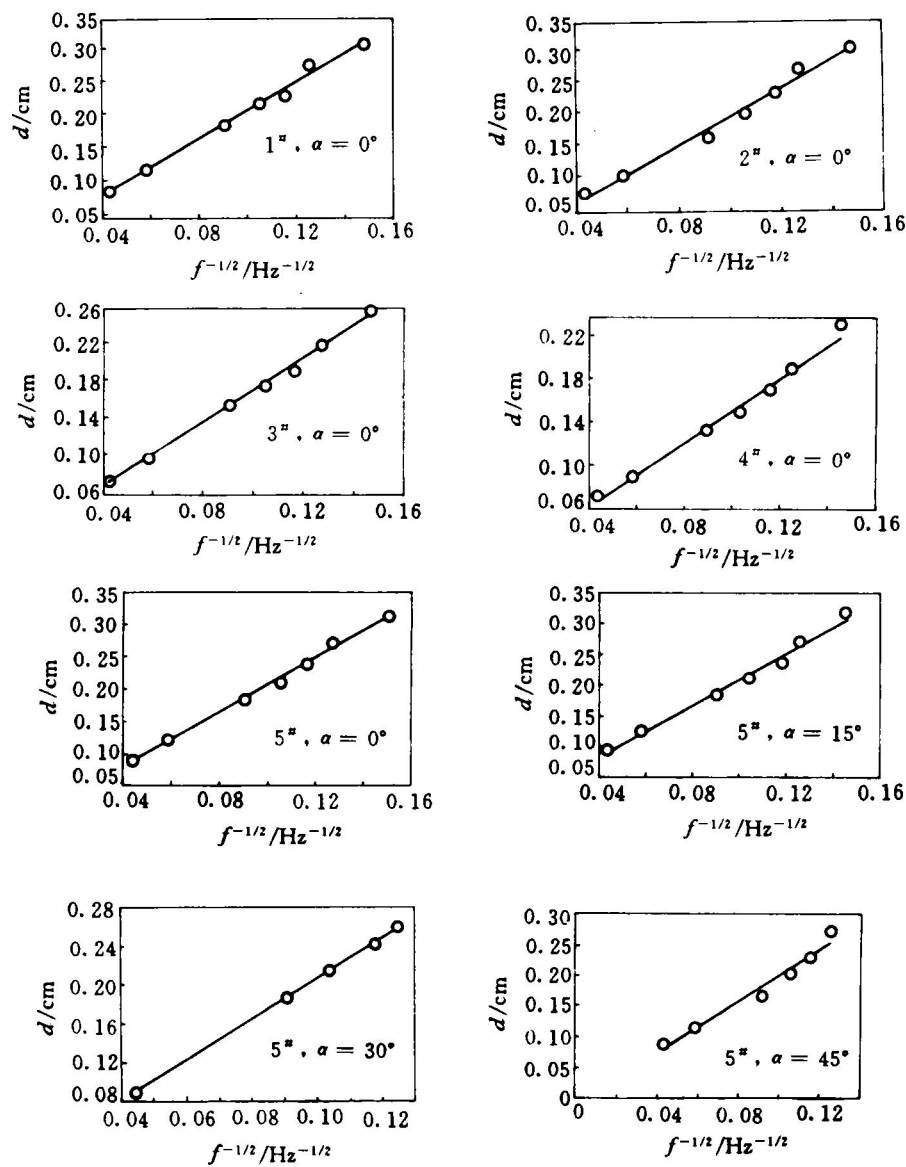


图 5 部分 $d \sim f^{1/2}$ 线性回归曲线

根据 γ_{SiC_p} 和 γ_{cf} 的值,可求得其它试样各方向的热扩散率值,见表 3。

从表 3 可以发现:单向纤维增强的复合材料,其热扩散性能各向异性明显。纤维正交对称排布增强复合材料,在 $(x-y)$ 面内,它的热扩散性能各向异性较小。原因是:纤维的横向导热性能差,界面热阻大,所以单向纤维增强复合材料的横向热扩散率要比轴向低得多。

正交对称排布的复合材料在 $(x-y)$ 面内各方

表 2 材料热物理性能

材料	$C_p / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\lambda_{//} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\lambda_{\perp} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
SiC _p	936	3.17	70	70
Sc	711	1.75	12	9.5
M40	711	1.81	80	7.4
ZL109	880	2.7	150	150

向界面热阻差别不大，轴向和横向分量之和基本一样。

我们同时还用激光脉冲法测试了它们的热扩散率，结果见表 4。

表 3 热扩散率值

试样	$\alpha/(^{\circ})$	$K_s/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1 [#]	0	0.37
2 [#]	0	0.41
3 [#]	0	0.39
	45	0.24
	90	0.09
4 [#]	0	0.30
	15	0.32
	30	0.33
	45	0.29
5 [#]	0	0.58
	15	0.59
	30	0.57
	45	0.59

表 4 激光脉冲法测定的热扩散率

试样	$\alpha/(^{\circ})$	$K_s/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1 [#]	0	0.33
2 [#]	0	0.38
3 [#]	0	0.37
4 [#]	0	0.33
5 [#]	0	0.63

表 3 与表 4 比较后可知：Mirage 法与激光脉冲法测出的热扩散率相差不大，进一步证明了 Mirage 法用于复合材料是可行的。

3 结论

(1) 有关匀质材料的热扩散理论适用于复合材料热扩散研究，蜃景效应法可用于复合材料热扩散率测定。

(2) 复合材料热扩散系数可用 $m = (\gamma \times \pi \times K_s)^{1/2}$ 公式计算，只不过 γ 值不是 1，也不是 1.44，必须重新确定。

(3) 单向纤维增强的复合材料，其热扩散性能各向异性明显。纤维正交对称排布增强复合材料，在 $(x - y)$ 面内，它的热扩散性能各向异性较小。SiC_p/Al 随体积分数增加而其热扩散性能下降。

参考文献

1 Boccara A C *et al.* Appl Phys Lett, 1980, 36: 130.
2 Jackson W B *et al.* Applied Optics, 1981, 20: 1333.
3 Warren H Hunt Jr, Premkumar M K. JOM, 1992, July: 8.
4 Kuo P K *et al.* Rev of Progress in Quantitate Non-destructive Evalution, Plenum Press, 1985: 746; Thomas R L *et al.*, Rev of Prog in Q N E, Plenum Press, 1985.
5 Salazar A, Sancher-Lavega A, Fernandez J. JAP, 1989, 65: 4150.
6 Pilling M W, Yates B, Black M A, Tattsrall P. J Mater Sci, 1979, 14: 1326.
7 Klemens P G. International Journal of Thermophysics, 1990, (5): 971.

(编辑 彭超群)