

激光光热辐射技术测量不透明 复合材料的热扩散率

王培吉 范素华

(山东建材学院物理系 济南 250022)

提要 报道了一种用激光光热辐射技术测量不透明材料热扩散率的方法。根据红外探测器在不同频率下测得试样光热信号的振幅和相位,采用非线性拟合法,由振幅和相位分别对频率进行非线性拟合,由此可得材料的热扩散率,并对单向氧化铝纤维基复合材料进行了测量,给出了任一方向上的热扩散率的实验结果。

关键词 激光光热辐射技术, 复合材料, 热扩散率

1 引 言

激光光热检测技术是近几年发展起来的一种测量手段,作为激光光热技术中的激光光热辐射技术,在测量材料热扩散率的问题上,克服了光热技术中其他方法(如蜃景效应)的两光束调节及数据处理环节多、误差大的缺点^[1-3]。由于它只用一台激光器,具有实验简单、调节方便等特点,而且采用调制光照射样品,使样品吸收光能后,引起周期性温升和热辐射,在不同的频率下同时测量试样光热信号的振幅与相位,由非线性拟合直接拟合出试样的热扩散率,因而可对振幅和相位各自拟合的结果进行比较,提高了测量结果的准确度,加上采用了响应快的红外探测器,可进行非接触检测,因而特别适用于真空、高温、高压等环境的测量,已在表面科学、光热光谱分析等方面得到了广泛的应用。本文就激光光热辐射技术测量不透明材料热扩散率的原理、实验技术进行了研究,除测量了横、纵方向的热扩散率外,还测量了任一方向上的热扩散率,并对实验结果进行了理论分析。

2 原 理

当一束被频率 f 调制的能量较大的激光入射到试样后,试样由于吸收光能而引起局部性和周期性的温度涨落和红外辐射的变化,利用适当的红外探测器,即可检测到试样产生的光热信号。对单层试样,若入射激光被频率 f 调制后,其强度按下式变化

$$I = I_0 [1 + \exp(i\omega t)] \quad (1)$$

其中, I_0 为入射激光强度的幅值, $\omega = 2\pi f$ 为调制圆频率, i 为虚数,则由斯忒藩-玻尔兹曼辐射定律,得到试样热辐射的变化为

$$\delta W = 4\sigma\epsilon T^3 \delta T \quad (2)$$

式中, σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, ϵ 为试样发射率, T 为试样表面热力学温度, W 为试样的辐射出射度。

由于红外检测器输出的光热信号正比于 δW , 在试样为强吸收的条件下, 利用一维热传导模型处理, 可得到试样的散射光热信号的振幅与相位为^[4]

$$A = \frac{\sqrt{2} I_0}{kx} [\exp(2lx) + \exp(-2lx) - 2\cos(2lx)]^{-1/2} \quad (3)$$

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\exp(lx) + \exp(-lx)}{\exp(lx) - \exp(-lx)} \tan(lx) \right] - \frac{\pi}{4} \quad (4)$$

式中, k 为试样热导率, $x = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$, α 为试样的热扩散率, l 为试样厚度。

在不同频率下测得试样光热信号的振幅与相位, 根据(3), (4)两式, 利用最小二乘法非线性拟合, 即可得到材料的热扩散率。

3 实 验

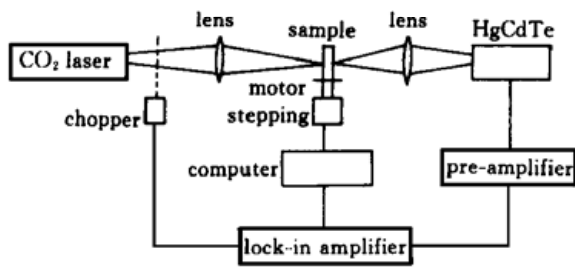


图 1 激光光热辐射技术检测示意图

Fig. 1 Schematic of the laser photothermal radiometry technique for measuring the diffusivity

铝纤维, 基体为铝, 其中纤维体积分数为 50%, 利用压铸法制备而成, 切割成尺寸为 $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的试样, 其表面经过抛光。

4 结 果

实验时通过调节步进电动机, 使入射激光在试样表面沿直线移动, 且每间隔 1 mm 为一测量点, 根据不同频率下在每个点上测得的振幅与相位, 由(3), (4)两式, 利用最小二乘法非线性拟合, 即可得到每个测量点上的热扩散率, 取其各点的平均值, 得到试样在该方向上的热扩散率。图 2 给出了试样沿纤维方向某点上的振幅与相位随频率变化的拟合曲线, 表 1 给出了复合材料在各个方向上的热扩散率的拟合结果。

实验结果表明, 采用激光光热辐射技术沿复合材料横、纵向所测得的热扩散率, 与常规方法给出的结果是一致的, 这说明激光光热辐射技术在测量材料热扩散率上是可行的; 同时也可看出由振幅与相位分别拟合所得到的结果非常接近, 且二者的拟合误差都很小, 说明这种方法具有较高的精确度; 由于可对振幅与相位的拟合结果进行比较, 因而提高了实验结果的可靠

整个实验测量系统如图 1 所示, 入射激光采用功率为 5 W 的 CO_2 激光器, 输出光束经 PAR192 型斩波器调制后, 经透镜聚焦在试样表面上, 试样所产生的热辐射信号被红外探测器 HgCdTe 检测, 检测到的热信号经前置放大器后进入 PAR5204 型锁相放大器, 最后由计算机对数据进行处理。试样固定在步进电动机的调节平台上, 并保证激光入射到样品上时为单层试样; 利用计算机控制的步进电动机, 可对试样的测量方向进行控制。

试样为单向 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料, 增强体为氧化

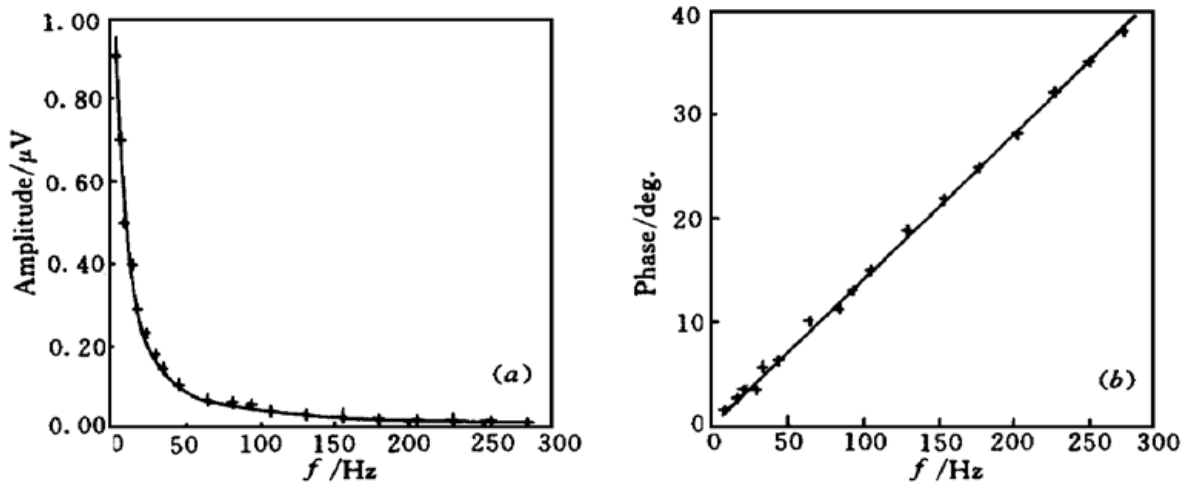


图 2 试样沿纤维方向上某点的振幅与相位随频率变化的拟合曲线

(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 2 Fitting curve of amplitude and phase vs frequency for sample at one point along fiber direction

(a) amplitude; (b) phase

性。在对复合材料的横、纵方向测量完毕后,还测量了任一方向上的热扩散率,从表 1 中还可看到,热扩散率随着离纤维角度 α 的增大而减小(其中 α 角是测量方向与纤维纵向所成的角度),这是由于角度 α 增大,阻碍电子和声子的界面面积增大,电子和声子运动阻力增加,造成复合材料在该方向上的热导性能下降;同时,氧化铝纤维的热导性能也是各向异性的,其中纵向热导性最好,横向热导性最差,因而,由氧化铝纤维制备的复合材料,其热导性必然随着角度 α 增大而减小,这与表 1 的实验结果是一致的。

表 1 复合材料 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 热扩散率的实验结果Table 1 Results of measured diffusivity at different direction for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$

Thickness/mm	Test direction α /deg.	Fitting model*	Diffusivity/ cm^2s^{-1}	Fitting errors/%
0.78	0	AM	0.42	2.23
		PH	0.43	2.34
	30	AM	0.37	2.12
		PH	0.36	2.45
	45	AM	0.26	2.08
		PH	0.28	1.98
	60	AM	0.17	1.67
		PH	0.16	1.88
	90	AM	0.06	2.43
		PH	0.07	2.56

* Fitting model: AM is amplitude fitting, PH is phase fitting.

5 结 论

利用激光光热散射技术对不透明复合材料的热扩散率进行了测量,结果表明该方法是一种十分有效的检测手段;同时测量时还可通过步进电动机,调节入射激光束位置的变化来检测试样不同位置上热辐射信号的相位与振幅,因而,除了能测量横、纵向的热扩散率以外,还能很

方便地测量任一方向上的热扩散率,比其他检测手段具有更大的优越性,所以激光光热辐射技术能够更加准确、快捷地测量出材料的热扩散率,并可望成为无损检测技术中新的有力工具。但对于激光光热透射测量技术,由于其入射调制光和测量装置位于试样的两侧,若入射光强不够强,则光热信号较弱,因而测量时试样应为强吸收的薄层材料。

参 考 文 献

- 1 Wang Peiji, Fan Suhua. Research of nanometer materials using laser photothermal effect. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(11): 981~ 984 (in Chinese)
- 2 A. Salazar, A. Sanchez-Lavega, J. Fernandez. Thermal diffusivity measurements in solids by the "mirage" technique: Experimental results. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(3): 1216~ 1223
- 3 A. C. Boccara, D. Fournier, J. Badoz. Thermo-optical spectroscopy: Detection by the "mirage effect". *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(2): 130~ 132
- 4 Guan Guoxin, Zheng Xiaoming, Li Peizan. Derivation and demonstration of the amplitude and phase angle formulae in PTR. *Chinese Journal of Infrared Research* (红外研究), 1988, **7A**(3): 201~ 205 (in Chinese)

Laser Photothermal Radiometry Technique to Measure Thermal Diffusivity of Opaque Complex Materials

Wang Peiji Fan Suhua

(Department of Physics, Shandong Institute of Building Materials, Jinan 250022)

Abstract A method to measure thermal diffusivity of opaque materials by a laser photothermal radiometry technique is introduced in this paper. The thermal diffusivity can be found by fitting the amplitude and phase of the sample photothermal signal at different frequencies. The thermal diffusivity of one-way arranged complex material is measured by the method, and experimental results of diffusivities at arbitrary direction are given.

Key words laser photothermal radiometry technique, complex material, thermal diffusivity