

文章编号: 0258-702X(2002)01-0076-03

激光光热释电效应测量材料热扩散率的研究

王培吉, 张 仲, 范素华

(山东建材学院物理系, 山东 济南 250022)

摘要 报道了一种利用光热释电效应检测材料热扩散率的原理与实验方法, 通过光热释电技术, 测量材料热释电信号的相位, 根据非线性拟合, 可拟合出材料的热扩散率, 设计了测量系统, 并对单向 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料进行了测量, 其结果与其他方法相一致。

关键词 光热释电技术, 热扩散率, 复合材料

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Study on Measuring Diffusivity of Materials by Pyroelectric Effect

WANG Pei-ji, ZHANG Zhong, FAN Su-hua

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

Abstract An experiment of measuring thermal diffusivity of material by laser pyroelectric effect is reported. The phase of pyroelectric signal is detected by photothermal pyroelectric technique, then the thermal diffusivity of material is determined by nonlinear fitting. The detection system is designed. Single-arrange composite $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ is measured, and thermal diffusivity at arbitrary direction was measured by this method.

Key words photothermal pyroelectric technique, thermal diffusivity, composite

1 引 言

激光光热技术是近几年来发展起来的一种非接触式无损检测技术, 由于它具有实验简单, 调节方便的特点, 已被广泛应用于光谱分析、材料的性能测量与结构分析等各方面的检测, 根据其测量方法与手段的不同, 又可将其分为光热热波技术与光热辐射技术, 但是, 光热热波技术在测量材料性能时, 其数据处理环节过多, 造成不必要的误差^[1~3]; 光热辐射技术又可分为透射技术与反射技术, 透射测量技术仅适用于薄的不透明试样^[4], 反射测量技术中光线经多次反射与折射后, 光热信号较弱^[5]。本文研究了利用光热释电技术测量材料性能的原理与实验技术, 并测量了单向 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的热扩散率, 与其他的测量方法进行了比较, 其测量结果相一致。

2 原 理

热释电效应是指某些晶体、陶瓷或聚合物因温度的变化而引起自发极化强度发生变化, 并在特定的方向上产生表面电荷; 光热释电检测即是利用材料的热释电效应而做成探测器来检测其热释电信号, 因而, 当一束强度经调制的光束入射到试样后, 试样部分或全部吸收其光能, 在试样内引起的热波传播到热释电探测器上, 使探测器的温度升高, 并引起探测器材料极化强度的变化, 在探测器表面产生电荷, 并在外电路上形成正比于入射光能的输出信号, 这就是热释电信号; 对于不透明热厚试样, 其光热释电信号为^[6]

$$V = M \frac{P_0}{i\omega\rho c} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \times \frac{(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2} - 2b_2}{(b_1 - 1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 + 1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}} e^{-\sigma_1 l_1} \quad (1)$$

收稿日期 2000-11-29; 收到修改稿日期 2001-02-12

作者简介 王培吉(1965—), 男, 山东建材学院物理系副教授, 硕士, 主要从事激光检测技术的研究。E-mail: Li.tong@sina.com.cn

式中, M 为与热释电材料有关的常数, P_0 为入射光强功率, $\omega = 2\pi f$ 为调制光圆频率, f 为频率, ρ 为试样密度, c 为试样比热, α_j 为各区域材料的热扩散率, l_j 为各区域材料的厚度, $\sigma_j^2 = i\omega/\alpha_j$, $b_1 = \frac{k_2\sigma_2}{k_1\sigma_1}$, $b_2 = \frac{k_3\sigma_3}{k_2\sigma_2}$, $j = 1, 2, 3$ 其中, 1 为试样, 2 为热释电材料, 3 为背衬, i 为虚数。

通过求解(1)式, 得到光热释电信号的相位表达式为

$$\Phi = -\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan x_1) - \arctan \frac{[(b_2 - 1)e^{-x_2} - (b_2 + 1)e^{x_2}] \sin x_2}{[(b_2 - 1)e^{-x_2} + (b_2 + 1)e^{x_2}] \cos x_2 - 2b_2} + \arctan \left[\frac{(b_1 - 1) \Im(b_2 - 1)e^{-x_2} - (b_1 + 1) \Re(b_2 + 1)e^{x_2}}{(b_1 - 1) \Re(b_2 - 1)e^{-x_2} + (b_1 + 1) \Im(b_2 + 1)e^{x_2}} \tan x_2 \right] \quad (2)$$

式中, $x_j = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} l_j$

因而, 通过检测试样热释电信号的相位, 在试样厚度已知的条件下, 根据(2)式由非线性拟合, 即可得到试样的热扩散率。

3 实 验

图 1 为激光光热释电技术测量材料热扩散率的实验装置图, 约 1.5 W 的 Ar^+ 激光(514 nm)经 PAR192 型斩波器调制后入射到平面反射镜上, 光束经反射和聚焦后入射到试样上, 试样所产生的热波传播到热释电材料偏聚二氟乙烯(PVDF)膜检测器

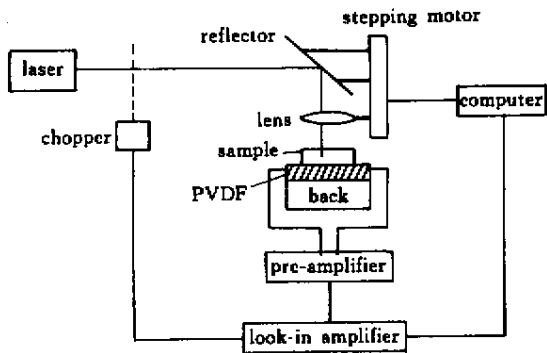


图 1 激光光热释电效应检测示意图

Fig.1 Schematic of the laser photothermal pyroelectric effect for measuring the diffusivity

上, PVDF 的热释电系数为 $2.4 \times 10^{-9} C/cm^2 \cdot K$ 相对介电常数为 11, 所检测到的热释电信号经前置放大

器后进入 PAR5204 型锁相放大器, 锁定时间为 1 s, 幅值为 $100 \mu V$, 之后再送入计算机进行数据处理; 反射镜和聚焦透镜固定在同一步进电动机上, 步进电动机由计算机控制; 这样一方面调节步进电动机在竖直方向移动, 使光束聚焦于试样表面; 另一方面, 通过调节步进电动机, 可对试样的测量方向进行控制。

试样为单向 Al_2O_3/Al 复合材料, 增强体为氧化铝纤维, 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 $15 mm \times 12 mm \times 0.8 mm$ 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, 根据不同的频率下在每个点上测得的相位, 再根据(2)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, 即可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。

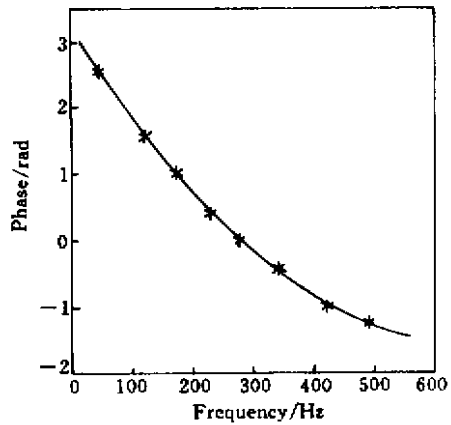


图 2 试样上某点的相位随频率变化的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of phase varied with frequency for sample at one point along fiber direction

实验结果表明, 采用激光光热释电技术所测得的热扩散率, 与文献[7]所给出的结果是一致的, 这说明激光光热释电技术在测量材料热扩散率上是可行的; 同时也可看出由相位拟合所得到的结果, 其拟合误差很小, 并且与文献[7]的拟合误差相比较, 利用激光光热释电技术的误差更小, 说明这种方法比其他方法具有更高的精确度。同时从表中还可看

到热扩散率随着离纤维角度 α 的增大而减小,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,这与表中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 at different direction for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$

Thickness /mm	Test direction α /degree	Diffusivity / cm^2s^{-1}	Fitting errors /Q%	Reference [7]	
				Results *	Errors /Q%
0.80	0	0.44	2.13	0.43	2.34
	30	0.35	1.82	0.36	2.45
	45	0.27	2.38	0.28	1.98
	60	0.15	1.17	0.16	1.88
	90	0.07	2.33	0.07	2.56

* Reference [7] results are phase fitting results.

5 结 论

利用激光光热释电技术对复合材料氧化铝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。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,测量精确度比其他方法更高。

参 考 文 献

- 1 Wang Peiji, Fan Suhua. Research of nanometer materials using laser photothermal effect [J]. *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]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(3) :

1216 ~ 1223

- 3 A. C. Boccara, D. Fournier, J. Badoz. Thermo-optical spectroscopy : Detection by the " mirage effect " [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(2) :130 ~ 132
- 4 Lin Qian, Peizan Li. Photothermal radiometry measurement of thermal diffusivity [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28) :4241 ~ 4243
- 5 Wang Peiji, Fan Suhua. Laser photothermal scattering technique to measure thermal diffusivity of opaque materials [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(8) :707 ~ 710 (in Chinese)
- 6 Yin Qingrui, Wang Tong, Qian Menglu. Technique and Application of Photoacoustic and Photothermal [M]. Beijing : Science Press. 103 ~ 107
- 7 Wang Peiji, Fan Suhua. Laser photothermal radiometry technique to measure thermal diffusivity of opaque complex materials [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(12) :1129 ~ 1132