

文章编号: 0258-7025(2003)03-0252-03

# 利用激光光热技术研究材料应力 对热扩散率的影响

王培吉, 张 仲, 范素华

(济南大学理学院, 山东 济南 250022)

**摘要** 根据光热光谱技术中的激光光热平行检测技术测量了材料具有应力时的热扩散率, 根据所检测到的光热信号的振幅, 由非线性拟合, 确定出材料的热扩散率; 由于入射光束移动的方便性, 可实现对材料的点点测量, 进而测量了材料在应力作用区域不同点上的热扩散率, 结果发现当材料内存在应力时, 造成材料的热扩散率变小, 且随应力起伏变化而变化。同时设计了数据采集软件与双差电路, 提高了测量精确度。

**关键词** 激光技术; 热扩散率; 光热检测; 应力

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Influence of Stress on Thermal Diffusivity by Laser Photothermal Technique

Wang Pei-ji, Zhang Zhong, Fan Su-hua

(School of Science, Ji'nan University, Ji'nan, Shandong 250022, China)

**Abstract** A method of measuring thermal diffusivity by laser photothermal parallel detection technique is introduced when materials possess stress. According to amplitude of photothermal signal, thermal diffusivity can be determined by nonlinear fitting. The results show that diffusivity become small under stress existing. The software of collecting data and the double-difference circuit are designed, and the measurement accuracy is raised.

**Key words** laser technique; thermal diffusivity; photothermal detecting; stress

## 1 引言

激光光热技术是近几年来发展起来的一种新的无损检测技术, 它具有实验简单、灵敏度高等特点, 因而在材料热物性的测量、光谱分析等方面具有广泛的应用; 但这些应用基本上均采用了光热检测技术中的垂直检测方式, 所测量的试样都是均匀材料, 且在测量过程中具有数据处理环节过多、误差大的缺点<sup>[1~3]</sup>。本文研究了光热检测技术中的另一种检测方式——平行检测的原理和方法, 并根据平行检测的特点, 将光热信号与材料应力联系起来, 通过检测光热信号的振幅, 由非线性拟合, 确定出材料的热物性, 并且测量了环氧树脂材料存在应力时非均匀材料的热扩散率。

## 2 原理

当一束被频率  $f$  调制的激光入射到试样表面后, 试样部分或全部吸收其光能, 从而使试样受到加热, 并在试样中产生温度梯度, 由于介质折射率是温度的函数, 因而造成试样加热区域内形成折射率梯度, 当用另一束功率较小的检测光束, 通过具有折射率梯度的试样区域时, 检测光将不再沿原来的直线传播, 而是发生偏转。

在光热技术中, 若采用平行检测方式, 则试样一定为透明。因而, 在试样具有应力且为透明的前提下, 检测光束的偏转角度为<sup>[4]</sup>

$$\Phi = \frac{4lrI_0\alpha}{in\omega ka^2} \frac{dn}{dT} \exp(-2r^2/a^2) \quad (1)$$

收稿日期: 2001-12-20; 收到修改稿日期: 2002-10-25

作者简介: 王培吉(1965—), 男, 济南大学理学院副教授, 硕士, 主要从事激光理论与检测技术的研究。E-mail: wziran@sina.com.cn

式中,  $T$  为材料吸热后的温度变化量,  $\rho$  为材料密度,  $a$  为入射光束的高斯半径,  $i$  为虚数,  $\omega = 2\pi f$  为圆频率,  $r$  为入射激光与检测光的相对位置,  $I$  为入射光的光强,  $l$  为试样厚度,  $n$  为材料的折射率,  $k$  为材料的热导率,  $\alpha$  为材料具有应力时的热扩散率。

由于材料应力造成折射率的变化, 因而将影响光束的偏转角, 这样, 通过测量光束偏转角的大小, 即可分析出材料内的应力对热扩散率的影响。

### 3 实验

实验装置如图 1 所示, 入射激光由功率约为 1.5 W 的氩离子激光器发出, 其光束经 PAR192 型斩波器调制后, 入射到试样应力区域; 检测光为单模偏振氦氖激光, 其特点是性能稳定, 功率偏差小, 目的是为了增加稳定性, 降低噪声。当检测光束通过试样后发生偏转, 其偏转角由自制的四像限位置检测器测量, 检测器中的 A/D 转换采用了 AD574, 并具有两个像限的差动输出, 使检测光束的强度起伏对偏转角的影响得以抵消, 提高了检测信号的稳定性。检测到的数据经 PAR5204 型锁相放大器后再送入计算机进行处理。试样固定在三维扫描平台上, 扫描平台通过步进电动机由计算机控制, 这样, 由步进电动机带动试样移动, 激光光束即可在试样的不同位置上进行扫描, 因而, 可以检测到试样应力区域内不同位置处的光束偏转角。

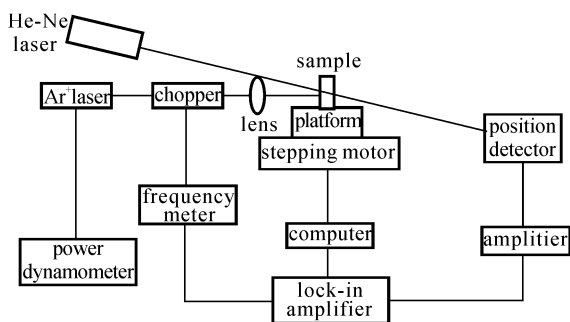


图 1 激光光热平行检测系统装置图

Fig. 1 Schematic of laser photothermal parallel detection system

实验中光学仪器部分放在光学防震台上, 其他的仪器如锁相放大器、频率计、计算机等放在另外的台子上, 整个实验系统安排力图紧凑, 并加防护罩; 同时为避免步进电动机在工作时产生的振动影响测量数据, 利用软件控制计算机的采样速度, 使每次采样都是在马达转动停止之后, 待整个系统稳定时进

行, 每个数据点均是 5 次采样的平均值。

实验样品为两块环氧树脂材料, 厚度为 0.6 cm, 直径为 4 cm, 其中一块样品的加载方式如图 2 所示, 在加载点 ( $x = -2$ ,  $x = 2$  cm) 分别对称地施加 2 kg 的力后, 放到应力冻结箱内加温到 150℃, 再进行冻结。未加载试样用来测量初试应力为零时的偏转角及观测试样的均匀性。两试样均经过抛光, 目的是为了消除表面划痕及缺陷的影响, 同时也消除了加压冻结过程中试样表面的变形。

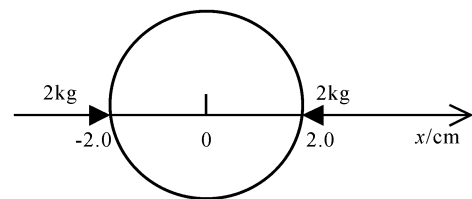


图 2 加载试样示意图

Fig. 2 Schematic of loading sample

实验中的参数选择是: 锁相放大器的锁定时间, 在读数稳定的前提下尽可能缩短, 信号幅值的范围在 0~10 mV。计算机采样控制参数中的扫描范围 10000, 代表 1 mm×1 mm, 步长 200, 代表 2 μm。

### 4 结果

实验时, 保持入射激光与检测光的相对位置不变, 调整检测光, 使它与入射光有相同的高度后, 再平移检测光与入射光靠近; 首先放置未加载试样, 使激光束入射到试样上, 在不同的频率下可测得试样的光热信号。由于未加载时试样热扩散率已知, 由此可对(1)式中的参数进行归一化; 然后再放置加载试样, 调节步进电动机, 使激光束入射到试样中心位置上, 由于试样所加负载不大, 因而可认为中心点的热扩散率与未加载时相等, 这样, 通过计算机调节步进电动机, 使激光束从试样中心开始沿加载方向移动, 电动机每移动一个步长采集一次数据, 因而, 通过光束的扫描, 实现了对加载区域的点点测量。而热扩散率的计算则是根据光热信号的变化, 选取了一些特殊点, 这样, 在每个点上于不同的频率下, 可测得试样光热信号的振幅, 根据(1)式由最小二乘法非线性拟合, 即可得到在该点的热扩散率。图 3 给出了加载试样光热信号的振幅随光束移动距离的变化曲线。同时利用熟悉的光热垂直检测技术对材料的热扩散率亦进行了测量, 表 1 给出了两种方法在一些点上测量热扩散率的实验结果。

表 1 加载试样在一些点上的热扩散率的实验结果

Table 1 Experimental results of thermal diffusivity at some points for loading sample

Detection place/mm	0	1.0	5.0	7.5	10.0	13.2	16.5	19.2	20.0
Parallel detection/ $\times 10^{-4}/\text{cm}^2/\text{s}$	8.83	7.32	3.65	6.86	5.28	3.52	2.96	2.26	2.18
Fitting errors/ $Q\%$	2.36	1.98	2.78	2.56	2.28	1.67	1.93	2.06	2.89
Perpendicular detection/ $\times 10^{-4}/\text{cm}^2/\text{s}$	8.81	7.22	3.57	6.72	5.14	3.58	3.11	2.21	2.09

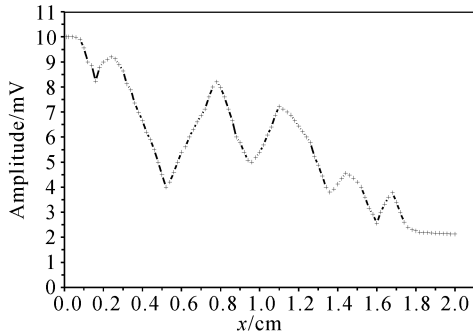


图 3 加载试样光热信号的振幅随光束移动距离的变化曲线

Fig. 3 Varying curve of photothermal signal amplitude with moving distance for loading sample

实验结果表明,采用激光光热平行检测技术所测得的热扩散率,与垂直检测技术所给出的结果是一致的,说明这种方法在测量材料的热扩散率上是可行的。同时从图 3 及表 1 可以看出,光束在中心点附近,其光热信号基本不变,且信号幅值最大,热扩散率最大。随着光束从试样中心沿加载方向向边缘移动,光热信号的幅值的变化趋势是逐渐减少的,信号也起伏不定。由于文章内容涉及到材料的热行为、应力与应变等综合效应,理论较为复杂,因而光热信号随着应力变化的原因有待于进一步研究。

## 5 结 论

利用激光光热平行检测技术在材料具有应力的条件下,测量了材料应力区域内各点的热扩散率,其测量结果与其他方法一致,表明了光热平行技术在材料热物性的测量上是一种十分有效的测量手段,并测量材料有应力时的热扩散率,结果发现由于材料应力的存在,造成了材料热扩散率变小,应力越大,热扩散率越小;同时通过调节聚焦透镜的位置,使入射光束聚集在试样的表面,且实验过程中扫描步长最小可达  $2 \mu\text{m}$ ,为微应力区域的检测提供了实验保证,可望成为材料性能检测中一种新的测量方法。

## 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 Wang Peiji, Fan Suhua. Using laser photothermal technique measurement the initial stress of material [J]. *Applied Laser* (应用激光), 1999, **19**(6):353~355 (in Chinese)