

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0324-04

压电光声技术对材料热性能的研究

赵斌兴 王亚非 高椿明 周 鹰 王占平

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 利用光声压电(PAPE)技术测量研究材料的热扩散率,开展了对钇铝石榴石(YAG)新型复合材料热扩散率的测量研究。介绍了基于简化热弹模型理论的光声压电法,对利用简化热弹模型建立的光声压电理论进行推导,根据简化的热弹模型,建立了运用光声压电法检测材料热扩散率的实验系统;运用光声压电法,在不同的测试条件下,对参考样品热扩散率进行检测,完成了对实验系统的校准;对 YAG 等新型复合材料的热扩散率开展测量研究。研究结果显示,光声压电法是可以用来准确测量金属材料的热扩散率。在适当的实验条件下,光声压电技术可以有效地测量新型复合材料的等效热扩散率。

关键词 光学测量;热扩散率;光声压电法;钇铝石榴石

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0324

Thermal Properties of the Material Studied by the Photoacoustic Piezoelectric Technique

Zhao Binxing Wang Yafei Gao Chunming Zhou Ying Wang Zhanping

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The thermal diffusivity of the materials has been studied by the photoacoustic piezoelectric (PAPE) technique. The thermal diffusivity of yttrium aluminum garnet (YAG) composite material has been studied. The PAPE method based on a simplified thermoelastic theory was proposed. The PAPE theory based on a simplified thermoelastic theory has been analyzed. The experimental system has been set up according to the simplified thermoelastic model. The experimental system was calibrated by investigating the diffusivities of many referential materials. The effective thermal diffusivity of the YAG composite material was investigated by the PAPE technique. The results were shown that the PAPE technique can be used to measure the thermal diffusivity of metal materials accurately. The measurement of YAG's thermal diffusivity was shown that the PAPE method can effectively measure the thermal diffusivity of new composite materials in the appropriate experimental conditions.

Key words optical measurement; thermal diffusivity; photoacoustic piezoelectric (PAPE) method; yttrium aluminum garnet (YAG)

1 引 言

热性能是材料的重要性能之一,对材料热扩散率的研究测量在许多学科和技术领域尤为重要。利用光声光热效应测量热扩散率的方法是材料热扩散率测量的重要手段,如光热辐射测量法(PTR)^[1]、光热偏转法^[2,3]、光热位移法^[4,5]、瞬态热栅法^[6]和光声压电法(PAPE)^[7]等。其中,光声压电技术在 20 世纪 70 年代由 Rosencwaig^[7]提出,即把压电换能器直接贴在样品或样品池上以检测固体或液体内的光声

信号。1980 年,Jackon 等^[8]对应用该技术检测固体内光声信号的理论进行了推导。1996 年,Blonskij 等^[9]对 Jackon 等的工作进行了简化,得到简化的热弹理论模型,可以用简单的解析方法计算出热扩散率。近年来,国内运用光声压电技术已经成功测量了短纤维增强复合材料和生物组织的等效热扩散率^[10,11]。

钇铝石榴石(YAG)^[12]复合材料光学、热学、机械性能优良,化学稳定性好,是一种优质的激光材料

基金项目:国家自然科学基金(50506006)和电子科技大学青年基金(JX05024)资助项目。

作者简介:赵斌兴(1986—),男,硕士研究生,主要从事光声技术方面的研究。E-mail:zhaobxing@uestc.edu.cn

导师简介:王亚非(1963—),男,教授,主要从事光声和微波声学领域的研究。

和基质材料,是固体激光器技术及产业的基础支撑材料,在固体激光器应用中对其热扩散特性的研究十分必要,其热扩散特性直接影响激光器一些特性和寿命。

利用 PAPE 法开展了对 YAG 新型复合材料热扩散率的测量研究,结果表明,PAPE 法为测量新型复合材料的等效热扩散率提供了一种有效的手段。

2 理 论

采用的光声压电检测理论模型如图 1 所示,试样为圆片状,具有相同半径的压电陶瓷(PZT)压电换能器粘贴在样品的背面。 L, R, κ, ρ, c 分别为样品的厚度、半径、热传导率、密度和比热, l 为 PZT 压电换能器的厚度。经过周期性调制的激光垂直入射样品表面,表面吸收光能,形成周期性的热源,导致试样内应变和应力周期性的变化而产生声波,该声信号被粘附背面的压电换能器所检测。

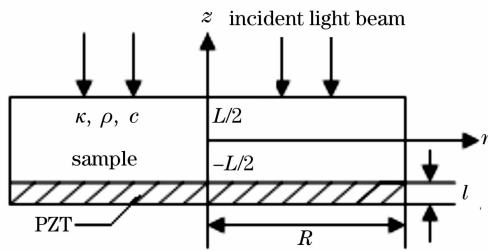


图 1 光声压电检测技术理论模型

Fig. 1 Theoretical model of photoacoustic piezoelectric technique

在简化的平均温度场和薄板理论的前提下,得出了样品简化的光声压电信号幅度和相位公式^[9]。光声压电信号幅度 $|V|$ 的公式为

$$|V| = \frac{p\alpha}{kLa^2} \left\{ \left[\frac{3 \sinh(aL) - \sin(aL)}{2La \cosh(aL) + \cos(aL)} \right]^2 + \left[1 - \frac{3 \sinh(aL) + \sin(aL)}{2La \cosh(aL) + \cos(aL)} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中 α 为样品线性热膨胀系数, $p = 2I\pi b^2 \frac{eI}{\epsilon S}$, I 为入射激光光强, b 为光束半径, l, S, e, ϵ 分别为换能器的厚度、表面积、压电模量、介电常数。光声压电信号的相位公式 φ 为

$$\varphi = \tilde{\varphi} + \pi/2, \quad (2)$$

式中 $\tan \tilde{\varphi} = \frac{3 \sinh(aL) - \sin(aL)}{2La \cosh(aL) + \cos(aL)}$, $1 - \frac{3 \sinh(aL) + \sin(aL)}{2La \cosh(aL) + \cos(aL)}$

$a = 1/l_t = (\omega/2D)^{1/2}$, l_t 为样品的热扩散长度, $D = k/\rho c$ 为热扩散系数。

因此,测得不同频率下光声压电信号的振幅和相位,利用(1)和(2)式对实验结果进行拟合计算,即可确定样品的热扩散率。

3 实验系统

光声压电检测材料热扩散率的实验系统如图 2 所示,样品和压电换能器良好粘合,光源为氩离子激光器,激光经声光调制器调制后入射到样品表面,在样品中激发出交变的热波,由于热弹效应,交变的热波导致声波的产生,热波在样品中很快被衰减,其中声波被粘贴在样品背面的 PZT 压电换能器转换成电信号输入锁相放大器,得到的数据经计算机处理后拟合出材料热扩散率。函数发生器控制声光调制器的调制频率并提供同频的参考信号给锁相放大器。其中激光器功率为 200 mW,发出 514 nm 的激光;PZT 直径为 18.2 mm,厚度为 0.1 mm。

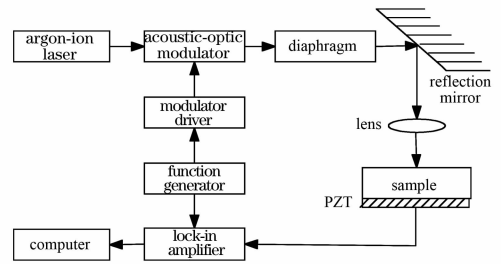


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

4 结果及讨论

4.1 实验系统验证

(1)和(2)式表明了热扩散率和光声压电信号的关系,根据(1)和(2)式可以求出光声压电信号随频率变化的理论曲线,利用最小二乘法将实验曲线和理论曲线进行拟合得出样品的热扩散率。为了验证实验系统的有效性,分别对标准样品紫铜、铝进行热扩散率的测量。测量得到压电信号实验数据及理论拟合曲线如图 3 所示,拟合得到的热扩散率及其参考值如表 1 所示。从图 3 中可以看出光声压电信号的相位随频率的增加单调减小,这是因为光声压电信号是样品中热扩散长度内所有声源信号的叠加,在低频时样品中热扩散长度比较大,热扩散长度内所有声源信号相位滞后大,进而光声压电信号的相位大,随着频率的增加,样品中的热扩散长度减小,所有声源信号相位滞后变小,使得光声压电信号相位变小。光声压电信号的幅度随频率的增加单调减小,这是因为低频时光吸收充分,温度梯度较大,声

激发效率较高,使得光声压电信号幅度较大,随着频率的增加,温度梯度变小,声激发效率变低,进而光声压电信号幅度变小,图 3(a)中绘出了振幅与频率的乘积随频率变化的曲线。由于振幅信号更多的依

赖于激光光强和电子系统的稳定性,采用相位-频率关系测量热扩散率所得值比采用振幅-频率关系所得值更准确更有效,可从图 3 和表 1 中看出。本文均采用相位-频率关系计算热扩散率。

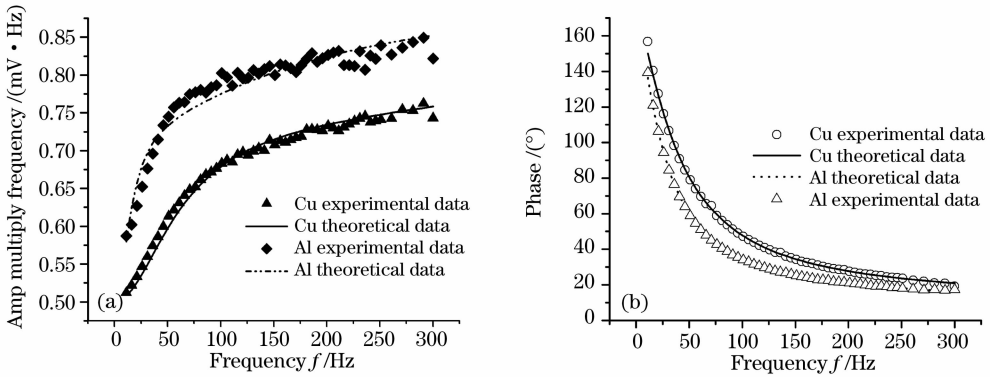


图 3 紫铜、铝光声信号的实验数据和理论拟合曲线。(a) 振幅×频率-频率关系;(b) 相位-频率关系

Fig. 3 Curves of experimental and theoretical data of red copper and Al sample. (a) product of the amplitude of PA response by modulation frequency versus modulation frequency; (b) phase of PA response versus modulation frequency

表 1 紫铜、铝的热扩散率

Table 1 Thermal diffusivity of red copper and Al sample

Sample	Experimental value (from amplitude data) / (mm ² /s)	Experimental value (from phase data) / (mm ² /s)	Referential value / (mm ² /s)	Relative error (from phase data) / %
Red copper	157.6	116.3	117	0.59
Aluminum	44.65	85.75	85	0.88

4.1.1 误差分析

误差的大小反映测量的正确性和准确性,相对误差能够反映对不同测量效果的好坏。由于基于简化热弹模型的 PAPE 技术以薄板理论和平均温度场为前提假设,这就要求样品厚度要符合薄板理论,入射光斑的大小满足使样品表面温度均匀,且样品和 PZT 需紧密耦合,PZT 厚度较样品很薄不影响样品内应变。这些要求实验条件能基本满足,但必然会对测量引起一定误差。从表 1 中可以看出,实验系统测试紫铜的相对误差为 0.59%,测试铝的相对误差为 0.88%;可见两种样品的测量误差都在 3% 以内,传统的测量方法其相对误差为 5%~10%,说明 PAPE 实验系统是能够比较准确的测量材料热扩散率的。

4.1.2 一致性分析

一致性能反映实验曲线与理论曲线拟合的好坏。一致性越好表示实验数据越正确。用 $V_{ar} = \frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^{exp} - \varphi_i^{th})^2}{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^{th})^2}$ 来定义一致性^[13], V_{ar} 越小表示一致性越好。其中 φ_i^{exp} 为实验所测相位, φ_i^{th} 为理论相位, N 为实验所测的数据个数。通过计算可得紫铜、铝的一致性参数 V_{ar} 如表 2 所示。

表 2 紫铜、铝的一致性参数

Table 2 Uniformity parameter of the red copper and Al sample

Sample	Red copper	Aluminum
V_{ar}	0.0258	0.0063

从图 3 中可以看出紫铜、铝的实验点和理论曲线拟合的都比较好。表 2 中进一步显示这两种样品的一致性参数 V_{ar} 都很小,表明拟合都很好。说明 PAPE 法测量试样热扩散率理论和实验是相符合的,PAPE 实验系统是能够比较准确的测量材料热扩散率的。

4.2 复合材料等效热扩散率测量

YAG 属于石榴石相结构的材料,具有良好的物理化学性质,对其热扩散率的计算较复杂,其等效热扩散率的确定一般都依赖于实验测量。利用 PAPE 法对 YAG 复合材料的热扩散率进行测量,样品直径为 25.1 mm,厚度为 0.8 mm,其压电信号相位-频率关系的实验数据和理论拟合曲线如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,YAG 复合材料的实验曲线和理论曲线拟合的比较好,一致性参数 V_{ar} 比较小,为 0.0822,表明实验值有效,得到等效热扩散率为 6.3 mm²/s。

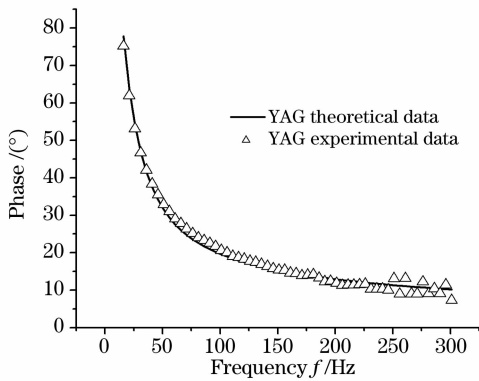


图4 YAG压电信号相位-频率关系的实验数据和理论拟合曲线

Fig. 4 Curve of experimental and theoretical data for the phase of PA response vs modulation frequency for YAG

5 结 论

利用PAPE技术测量研究材料的热扩散率,通过对铝、紫铜、YAG复合材料的热扩散率的测量得出,在压电光声法中,由于信号振幅受光学和电子系统稳定性的影响较大,用振幅-频率关系拟合得出的材料热扩散率误差比较大,实验中常采用相位-频率关系数据来计算材料的热扩散率。光声压电法测量金属材料的热扩散率,实验值与参考值相比相对误差小于5%,说明PAPE法可以用来准确测量金属材料的热扩散率,PAPE系统是稳定可靠的。对新型复合材料YAG热扩散率的测量表明,PAPE法可有效地运用于新型复合材料等效热扩散率的测量。总之,压电光声技术为研究测量新型复合材料热扩散率提供了一种有效方法。

参 考 文 献

- 1 Wang Peiji, Fan Suhua. Measurements of thermal diffusivity of opaque composite materials by photothermal radiometry technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(12):1129~1132
王培吉,范素华. 激光光热辐射技术测量不透明复合材料的热扩散率[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(12):1129~1132
- 2 Wang Conghe, Tan Jialin, Shi Boxuan. Measurements of thermal

- diffusivity of solid materials by laser photothermal deflection technique [J]. *Laser & Infrared*, 1999, **29**(1):30~33
- 王聪和,谭家麟,施柏焯. 激光光热偏转法测量固体材料的热扩散率[J]. *激光与红外*, 1999, **29**(1):30~33
- 3 W. B. Jackson, N. M. Armer, A. Nc Boccara *et al.*. Photothermal deflection spectroscopy and detection [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**:1333~1344
- 4 Yin Qingrui, Wang Tong, Qian Menglu. Photoacoustic and Photothermal Technology and Applications [M]. Beijing: Science Press, 1991. 74~90
殷庆瑞,王通,钱梦霖. 光声光热技术及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1991. 74~90
- 5 Yang Shulian. Measurement of diffusivity of nanometer material by means of laser photothermal displacement technique [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(1):31~32
杨淑连. 基于激光光热位移技术纳米材料热扩散率的测量[J]. *激光技术*, 2007, **31**(1):31~32
- 6 Luo Aihua, Zhao Chaoxian, Zhang Shuyi *et al.*. Measurement of the thermal diffusivity of solids by transient thermal gratings method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1478~1482
罗爱华,赵超先,张淑仪等. 利用瞬态热栅法测定固体材料的热扩散率[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1478~1482
- 7 A. Rosencwaig. Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy [M]. New York: Published by John Wiley&Sons Press, 1980. 51~65
- 8 W. Jackson, M. N. Amer. Piezoelectric photoacoustic detection: Theory and experiment [J]. *Appl. Phys.*, 1980, **51**(6):3343~3353
- 9 I. V. Blonskij, V. A. Tkhoryk, M. L. Shendeleva. Thermal diffusivity of solids determined by photoacoustic piezoelectric technique [J]. *Appl. Phys.*, 1996, **79**(6):3512~3516
- 10 Gao Chunming, Zhang Shuyi, Chen yan *et al.*. The thermal diffusion characteristics of the biological tissue studied by the photoacoustic piezoelectric technique [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(22):2273~2277
高椿明,张淑仪,陈妍等. 利用压电光声方法研究生物组织的热扩散特性[J]. *科学通报*, 2004, **49**(22):2273~2277
- 11 Sun Li, Zhang Shuyi, Zhao yanzhu *et al.*. Thermal diffusivity measurements of solids by photoacoustic piezoelectric technique [J]. *Acta Acustica*, 2003, **28**(4):315~320
孙利,张淑仪,赵雁竹等. 运用光声压电技术测定固体热扩散率[J]. *声学学报*, 2003, **28**(4):315~320
- 12 Chen Zhihui. On the Synthesis of YAG Nanopowders and Fabrication of Transparent YAG Ceramic [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2007
陈智慧. 钇铝石榴石纳米粉体及YAG透明陶瓷的制备研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2007
- 13 Bincheng Li, L. Pottier, J. P. Roger *et al.*. Thermal characterization of thin superconducting films by modulated thermorefectance microscopy [J]. *The Solid Films*, 1999, **352**(2):91~96