

文章编号: 0258-7025(2009)02-0426-04

压电技术测量热扩散率的精度分析

高椿明 毕艳芳 孙启明 周 鹰 王占平

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 根据测量热扩散率的光声压电(PAPE)技术简化热弹理论,分析了该方法中样品厚度、热扩散率大小对测量结果的影响以及 PAPE 技术的适用范围。介绍了基于简化热弹模型理论的 PAPE 技术,得出了简化的光声压电信号幅度和相位与调制频率的相互关系;根据 PAPE 技术理论分别对相同厚度不同材料热扩散率测量的灵敏度和不同厚度同一材料热扩散率的测量误差进行理论分析;通过实验分别对厚度约为 2 mm 的紫铜、铝、黄铜、铁和碳钢(含碳 0.5%)以及不同厚度的铝和黄铜进行测量,验证理论分析结果。结果表明,PAPE 技术测量热扩散率较大、厚度较厚的材料更加精确、有效。

关键词 光学测量;精度分析;光声压电技术;热扩散率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0426

Measurement Accuracy Analysis of Thermal Diffusivities Determined by the Photoacoustic Piezoelectric Technique

Gao Chunming Bi Yanfang Sun Qiming Zhou Ying Wang Zhanping

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

Abstract Influence of the length and the diffusivities of the samples on measured results and the applicability of the photoacoustic piezoelectric (PAPE) technique have been studied according to a simplified thermoelastic theory of the PAPE method. The PAPE technique based on a simplified thermoelastic theory was proposed. The relationship between the amplitude and phase of the PAPE signal and the frequency modulation were confirmed. Simulations were performed to investigate the measurement accuracy of the different materials with the same thickness and the identical materials with different thicknesses. For proving theoretic results the experimental system was developed to research for thermal diffusivities of red copper, aluminum, brass, iron and steel (C: 0.5%) whose thicknesses of is 2 mm. In addition, the thermal diffusivities of aluminum and brass with different thicknesses were also investigated by the experimental system. It shows that the PAPE technique can be employed for the accuracy measurement of the samples of the better heat conductivity properties and the thicker length.

Key words measurement; accuracy analysis; photoacoustic piezoelectric technique (PAPE); thermal diffusivities

1 引言

近年来,激光与物质的相互作用引起了人们的广泛关注^[1~4],光声光热效应是物质吸收强度调制的光能而产生热波和声波的效应,其中利用光声光热效应的光声压电法是材料热性能研究的重要方法之一。1976年,Ronsencwaig等^[5]提出固体光声信号的理论公式及R-G理论。接着,他们将压电换能器直接贴到样品或样品池上来检测固体或液体内的光声信号^[6]。1980年,Jackson和Amer推导出应用光声压电(PAPE)技术检测固体内光声信号的理

论^[7],但计算过程较为复杂,后来,Blonskij^[8]等对此理论进行改善,提出了简化的理论模型。基于Blonskij的简化热弹模型理论,PAPE技术已经成功测量了短纤维增强复合材料^[9]和生物组织^[10]的等效热扩散率。对PAPE技术进行理论分析,通过建立相应的实验系统完成理论分析结果的验证,最终得出PAPE技术的适用范围。

2 PAPE理论

PAPE技术的基本原理为:一束经调制的激光

收稿日期:2008-08-28;收到修改稿日期:2008-10-28

基金项目:国家自然科学基金(50506006)和电子科大青年基金(JX05024)资助课题。

作者简介:高椿明(1973-),男,博士,副教授,主要从事光声学和光声光热等方面的研究。E-mail: gaocm@uestc.edu.cn

照射到样品表面,在样品中激发出热波和声波,热波在传播过程中很快衰减,而声波则被粘贴在样品背面的 PZT 压电换能器检测到。

柱坐标下 PAPE 技术的理论模型如图 1 所示。其中 L, R 分别为样品的厚度、半径、 l 为 PZT 压电换能器的厚度。

样品中的温度场 $T(r, z, t)$ 分布满足热传导方程:

$$\begin{aligned} \nabla^2 T(r, z, t) - \frac{1}{D} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} &= -\frac{Q(r, z, t)}{\kappa}, \\ D &= \kappa / \rho c, \\ Q(r, z, t) &= I \beta \exp(-r^2/b^2) \exp[-\beta(L/2 - z)] \times \\ &\quad \exp(i\omega t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 D, κ, ρ, c 分别为样品的热扩散率、热传导率、密度、比热, Q 为热源强度, β 为光吸收系数, b, I 和 ω 分别为入射光的半径、强度和调制角频率。

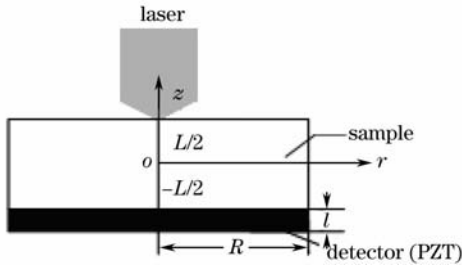


图 1 PAPE 技术理论模型

Fig. 1 Theoretical model of PAPE

假设样品半径足够大,热量无法传到样品边缘,样品边界满足绝热条件及 $\partial T / \partial r = 0$ 。对同一平面的温度场求平均,并结合样品边界条件,得出样品内的平均温度场分布:

$$\begin{aligned} \langle T(z) \rangle &= \frac{I \pi b^2 \beta}{\kappa \sigma (\beta^2 - \sigma^2) \sinh(\sigma L)} \times \\ &\quad \{ \beta \cosh[\sigma(L/2 + z)] - \\ &\quad \beta \exp(-\beta L) \cosh[\sigma(L/2 - z)] \\ &\quad - \sigma \exp[-\beta(L/2 - z)] \sinh(\sigma L) \}, \\ \sigma^2 &= i\omega / D, \end{aligned} \quad (2)$$

从(2)式可以看出,平均温度场 $\langle T(z) \rangle$ 随着 z 轴变化,因此样品的上下表面温度不同引起上下表面的应力不平衡,从而使样品产生弯曲振动。

假设样品的半径远远大于其厚度,则可以采用薄板理论来解决样品内部的热弹性形变问题,样品的法向应力分量 σ_z 和切向应力分量 τ_{rz} 满足

$$\sigma_z \approx 0, \quad \tau_{rz} \approx 0. \quad (3)$$

质点在 r 方向的位移 u 可以表示为

$$u = -z \frac{d w(r)}{dr} + f(r), \quad (4)$$

式中 u 和 $w(r)$ 分别为质点在 r, z 方向的位移, $f(r)$ 为待定函数。根据应变到位移以及应力到应变的关系,并结合边界条件(3),可以求出 $f(r)$ 和 $w(r)$,得出应变分布。

假设 PZT 并不影响样品的形变且样品的光吸收系数较大,根据压电效应 PZT 输出电压为^[8]

$$V = -\frac{4\alpha I \pi b^2 e l}{\kappa L \sigma^2 \epsilon S} \left[1 + \frac{3 - 3 \cosh(\alpha L)}{\alpha L \sinh(\alpha L)} \right], \quad (5)$$

式中 α 为样品的线性热膨胀系数, S, e 和 ϵ 分别为 PZT 压电换能器的表面积、压电常数和介电常数。

3 PAPE 理论研究

理论上根据 PZT 压电换能器输出电压的振幅和相位均可以得到材料的热扩散率,但由于实验中振幅信号更多的依赖于激光光强和电子系统的稳定性^[10],实验误差较大,同时在计算中需要对热扩散率和归一化因子两个未知参数分别拟合^[11],过程较为繁琐,因此一般仅采用 PZT 输出电压的相位计算材料的热扩散率。

理论上对同一厚度的不同材料热扩散率测量的灵敏度进行研究,定义两曲线 φ_1 和 φ_2 之间标准差的公式为

$$s_{21} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\varphi_{2i} - \varphi_{1i}}{\varphi_{1i}} \right)^2}, \quad (6)$$

式中 $\varphi_{1i}, \varphi_{2i}$ 分别为 φ_1, φ_2 两根曲线上的点, N 为比较的点数。样品厚度 L 为 2 mm, 调制频率 f 为 0.01 ~ 300 Hz, 热扩散率 D 为 20 mm²/s 时, 根据(5)式画出相位曲线 φ_1 ; 再由(5)式得出 D 值在 0 ~ 2D 范围内变化时分别对应的相位曲线 φ_2 , 由(6)式计算出 φ_1 和 φ_2 曲线之间的标准差, D 为 20 mm²/s, 40 mm²/s, 80 mm²/s, 160 mm²/s 时, 标准差与热扩散率 D 之间的关系曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 被测材料的热扩散率值 D 越大灵敏度越高, D 越小灵敏度越低。这是因为激光入射到样品表面, 对于 D 值较大的材料来说, 温度能从样品中心很快传到边缘, 利用 PAPE 技术理论中对同一平面的温度场求平均得到材料的热扩散率值更加准确。

另外, 理论上研究不同厚度的同一种样品, 由于厚度的测量误差所引起的测量偏差。在采用 PAPE 技术测量材料热扩散率的过程中, 用游标卡尺来测量样品的厚度引入的测量误差为 ± 0.01 mm。两条曲线之间标准差的计算过程为, 假定热扩散率 D 为 20 mm²/s, 调制频率 f 为 0.01 ~ 300 Hz, 当样品厚度 L 在 0 ~ 3 mm 范围内取定一个值时, 将 $L = L -$

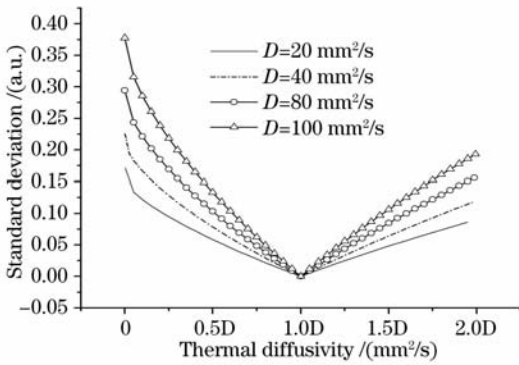


图2 标准差与热扩散率的关系曲线

Fig. 2 Curve of standard deviation vs thermal diffusivity
 0.01 mm 代入(5)式计算得出的相位曲线为 φ_1 , 而 $L=L+0.01$ mm 时得到的相位曲线为 φ_2 , 由(6)式计算得出 φ_1 和 φ_2 之间的标准差。D 为 20 mm²/s, 40 mm²/s, 80 mm²/s 和 180 mm²/s 时, 厚度 L 和标准差之间的关系曲线如图 3 所示。图 3 中由于波峰所对应的厚度小于相应的热波长 L_1 , 所以曲线波峰的部分无意义。从图 3 中可以看出, 在满足薄板理论的条件下, 对于同一种样品来说厚度越大误差越小, 这是因为厚度越大时要满足薄板理论的条件, 对应的半径也要增大, 当样品无限大时 PAPE 技术理论更加实用。

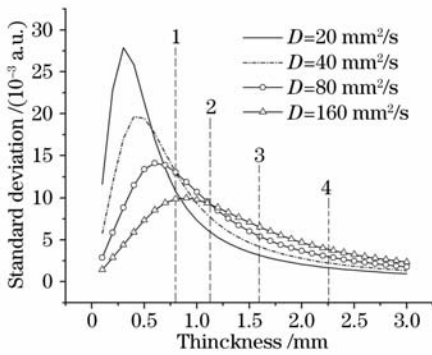


图3 标准差与厚度的关系曲线

Fig. 3 Curve of standard deviation vs thickness

4 实验研究

为了验证理论分析的结果, 通过建立相应的实验系统, 开展对厚度为 2 mm 的紫铜、铝、黄铜、铁和碳钢(含碳 0.5%) 以及不同厚度的铝和黄铜热扩散率的测量研究。

4.1 PAPE 实验系统

实验系统如图 4 所示, 氩离子激光器功率约为 130 mW; 氩离子激光器发出的光为绿光, 波长为 514 nm; 声光调制器的中心频率为 110 MHz; PZT

压电换能器直径为 17 mm, 厚度为 0.2 mm。所有的测量均在室温下进行。

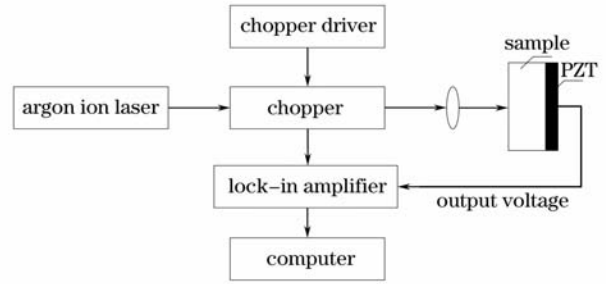


图4 实验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

4.2 拟合一致性

利用实验值与拟合曲线的一致性来衡量实验的正确性。一致性的公式为^[12]

$$V_{ar} = \frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^m - \varphi_i^f)^2}{\left[\sum_{i=1}^N (\varphi_i^f)^2 \right]}, \quad (7)$$

式中 φ_i^f 和 φ_i^m 分别为相位的理论值和实验值, N 为实验测量的频率点数。V_{ar} 的值越小表示实验曲线与理论曲线的拟合精度越高, 一般来说, 当 V_{ar} 值小于 10⁻³ 时, 测量的实验值有效^[13]。

4.3 灵敏度

利用图 4 所示的实验系统开展对各种样品的测量研究。实验中紫铜、铝、黄铜、铁和碳钢(含碳 0.5%) 的直径均为 17.00 mm, 厚度分别为 1.90 mm, 2.00 mm, 2.00 mm, 2.04 mm 和 2.00 mm。实验测得各种样品的热扩散率、一致性 V_{ar}、参考值和相对误差如表 1 所示。由表 1 可以看出, 在相同的实验条件下, 样品厚度都约等于 2.00 mm 时, 热扩散率值大的样品实验测量值的相对误差较小。由此说明: 利用 PAPE 技术测量材料的热扩散率, 样品热扩散率值较大时灵敏度较高。

表1 热扩散率的实验值、一致性、参考值和相对误差

Table 1 Experimental value, V_{ar}, reference value, relative error of thermal diffusivity

	Experimental value / (mm ² /s)	V _{ar} /10 ⁻⁴	Reference value / (mm ² /s)	Relative error / %
Red copper	116.30	3.71	117.00 ^[14]	0.60
Aluminum	85.75	1.14	85.00 ^[15]	0.88
Brass	38.90	2.37	38.00 ^[15]	2.37
Iron	21.45	7.99	20.30 ^[16]	7.88
Steel (C:0.5%)	15.95	2.02	14.70 ^[16]	8.50

4.4 厚度

为了研究 PAPE 技术中厚度的测量误差对样品

热扩散率测量带来的影响,利用实验系统开展对不同厚度的铝和黄铜的测量。

实验中测量的铝和黄铜直径均为 17.00 mm,铝的厚度分别为 1.06 mm,1.56 mm 和 2.00 mm,黄铜的厚度分别为 1.00 mm,1.50 mm 和 2.00 mm,铝和黄铜热扩散率的实验值、一致性和相对误差如表 2 所示。

表 2 不同厚度的材料热扩散率实验值、一致性和相对误差

Table 2 Experimental value, V_{ar} , relative error of thermal diffusivity with different thickness

Material	Thickness /mm	Experimental		Relative error /%
		value /(mm ² /s)	$V_{ar}/10^{-4}$	
Aluminum	1.06	89.25	0.25	5.00
	1.56	88.25	0.72	3.82
	2.00	85.75	1.14	0.88
Brass	1.00	34.45	1.68	9.34
	1.50	36.60	2.25	3.68
	2.00	38.90	2.37	2.37

由表 2 可以看出,采用 PAPE 技术测量不同厚度的同种材料,厚度越厚,实验值的测量误差越小,测量值越准确。

5 结 论

从理论和实验上研究利用 PAPE 技术测量金属材料的热扩散率时,材料热扩散率值和厚度值分别变化对测量结果造成的影响,得到结论为

1) 在 PAPE 技术中,热扩散率值较大的材料实验测量值的相对误差较小,灵敏度较高,所以 PAPE 技术更加适用于导热性能较好的金属材料热扩散率的测量。

2) 使用 PAPE 技术测量不同厚度的材料,样品的厚度值越大,测量得到热扩散率值的相对误差越小,说明 PAPE 技术测量中,在满足薄板理论条件下应该使被测样品的厚度值足够大,从而使热扩散率的测量值更加准确有效。

总之,PAPE 技术可以用来准确有效的测量导热性较好,厚度较厚的材料的热扩散率值,而对于一些导热性能较差、厚度很薄的材料,测量得到的热扩散率值相对误差较大,甚至 PAPE 技术不再适用于这些材料热扩散率的测量。

参 考 文 献

- Ding Haifeng, Huang Meizheg, Tong Yaxing *et al.*. Research on opto-thermal response of human skin irradiating by CW and pulsed laser based on FEM simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1983~1988
丁海峰,黄梅珍,童雅星等. 激光辐照下皮肤组织光热响应有限元分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1983~1988
- Hao Honggang, Li Bincheng, Liu Mingqiang. Pulsed laser photothermal detuning technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1942~1946
郝宏刚,李斌成,刘明强. 脉冲激光光热失调技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1942~1946
- Qiu Yang, Li Shengwen, Zhang Yi *et al.*. Ho: YAG laser interaction with bio-tissue and its remained thermal effect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1105~1110
邱阳,李胜文,张翼等. 脉冲 Ho:YAG 激光与生物组织相互作用效果与残留热效应的分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1105~1110
- Chen Qingning, Heng Zuhai, Zhu Haihong. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulse laser in water[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 341~344
陈清明,程祖海,朱海红. 脉冲激光在水中激发声脉冲的光声能量转换效率[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 341~344
- A. Rosencwaig, A. Gersho. Theory of the photoacoustic effect with solids[J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**(1): 64~69
- A. Rosencwaig. Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy [M]. New York: Wiley,1980. Chaps. 9 and 10
- W. Jackson, N. M. Amer. Piezoelectric photoacoustic detection; theory and experiment[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(6): 3343~3353
- I. V. Blonskij, V. A. Tkhoryk, M. L. Shendeleva. Thermal diffusivity of solids determination by photoacoustic piezoelectric technique[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(7): 3512~3516
- Li Sun, Shuyi Zhang, Yanzhu Zhao *et al.*. Thermal diffusivity of composites determined by photoacoustic piezoelectric technique [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(1): 834~836
- 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
- 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
- J. Rantala, L. Wei, P. K. Kuo *et al.*. Determination of thermal diffusivity of low-diffusivity materials using the mirage method with multiparameter fitting[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(6): 2717
- L. Bincheng, L. Pottier, J. P. Roger *et al.*. Thermal characterization of thin superconducting films by modulated thermoreflectance microscopy[J]. *Thin Solid Films*, 1999, **352**: 93
- D. P. Almond, P. M. Patel. Photothermal Science and Techniques[M]. London: Chapman & Hall, 1996. 16~17
- A. P. Smirjagin, N. A. Amirjagina, A. V. Belova. Commercial Nonferrous Metals and Alloys Handbook [M]. Moscow: Metalurgija, 1974
- 侯振冰,何绍杰,李恕先. 固体热传导[M]. 上海: 上海科技出版社, 1984. 132