

文章编号: 0258-7025(2010)10-2588-04

# 改进后的光声压电技术对工程塑料热扩散率的测量

万 丹 高椿明 孙启明 鲁 旭 赵斌兴

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 利用改进后的光声压电技术对常用工程塑料的热扩散率进行了测量研究。介绍了改进后的光声压电理论模型,并搭建相应的实验系统。通过对参考样品铝和聚四氟乙烯的检测,完成了实验系统的校准和验证,并对 8 种常用工程塑料的热扩散率进行了测量,测量结果显示其热扩散率均小于  $0.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,具有良好的隔热性能。通过理论和实验研究结果表明,改进后的光声压电法可以准确测量工程塑料的热扩散率。

**关键词** 测量;热扩散率;光声压电技术;工程塑料

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2588

## Thermal Diffusivities of Engineering Plastics Studied by the Revised Photoacoustic Piezoelectric Technique

Wan Dan Gao Chunming Sun Qiming Lu Xu Zhao Binxing

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

**Abstract** The thermal diffusivities of engineering plastics had been studied by the revised photoacoustic piezoelectric (PAPE) technique. Firstly, the revised PAPE method was proposed and the corresponding experimental system was set up. The experimental system was calibrated and tested by investigating the diffusivity of pure aluminum and polytetrafluoroethylene(PTFE). The thermal diffusivities of eight kinds of engineering plastics were measured by the revised PAPE method. The results showed that engineering plastics have excellent insulation properties and the diffusivities are under  $0.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ . The theoretical and experimental results showed that the revised PAPE method can be used to accurately measure the thermal diffusivity of engineering plastics.

**Key words** measurement; thermal diffusivity; photoacoustic piezoelectric technique; engineering plastics

### 1 引 言

工程塑料是一种用作工程结构材料的塑料<sup>[1]</sup>。从国内公开发表的文献来看<sup>[2]</sup>,工程塑料热扩散特性的研究十分必要,如用于制造机械设备的零部件,其热扩散特性直接影响整个设备的使用寿命。热扩散率的测量方法种类繁多,传统方法包括光热辐射测量法(PTR)<sup>[3]</sup>、光热偏转法<sup>[4]</sup>、光热位移法<sup>[5]</sup>、瞬态热栅法<sup>[6]</sup>和光声压电法(PAPE)<sup>[7,8]</sup>等。其中光声压电技术在 20 世纪 70 年代由 Rosencwaig 提出,1980 年,Jackon 等<sup>[9]</sup>对应用该技术检测固体内光声信号的理论进行了严格推导。1996 年,Blonskij 等<sup>[10]</sup>提出了基于简化热弹模型的光声压电理论。

近年来,国内运用该简化理论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<sup>[11,12]</sup>,并对光声压电技术测量材料热扩散率的方法进行了精度分析<sup>[13]</sup>。2008 年,光声压电双层理论模型<sup>[14]</sup>的提出使材料热扩散率的测量更精确。

本文利用改进后的 PAPE 技术对各种常用工程塑料的热扩散率进行了测量研究,结果表明,改进后的 PAPE 法可以有效地测量工程塑料等绝缘材料的热扩散率。

### 2 理 论

传统的理论模型如图 1(a)所示,厚度为  $l$  的圆

收稿日期: 2010-01-06; 收到修改稿日期: 2010-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(50506006)资助课题。

作者简介: 万 丹(1985—),女,硕士研究生,主要从事光声技术方面的研究。E-mail: danwan20@126.com

导师简介: 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

形样品粘贴在厚度为  $h$  的锆钛酸铅换能器 (PZT) 上,理论中忽略 PZT 对样品振动的影响,样品相当于自由振动。而实际上,PZT 一般比较硬,对样品特别是软质或薄样品的自由振动影响很大,因此忽略 PZT 的影响会造成测量误差。针对以上问题,高椿明课题组对双层模型进行了分析<sup>[14]</sup>,但双层模型复杂,需进行多参数拟合,因此提高了测试的难度。由此,提出了一种简单的方法对双层模型(样品和 PZT)进行简化计算。

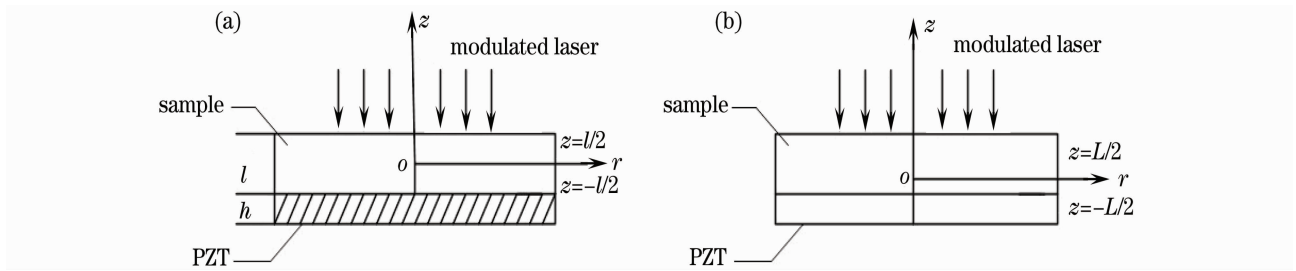


图 1 光声压电检测技术理论模型。(a)传统理论模型,(b)改进后的理论模型

Fig.1 Theoretical model of PAPE. (a) traditional theoretical model, (b) revised theoretical model

假设样品的半径远大于激光光束半径,对同一平面的温度场求平均得到了平均温度场的表达式为  $\frac{d^2 \langle T \rangle}{dz^2} - \sigma^2 \langle T \rangle = -\frac{I\beta\pi b^2}{k} \exp[-\beta(L/2 - z)]$ , (1) 式中  $\langle T \rangle = \iint_S T(r, z) dS$ ,  $\sigma^2 = i\omega / D$ ,  $D, \omega, k$  和  $\beta$  分别为样品材料的热扩散率、调制角频率、热传导率和光吸收系数,  $S$  为压电换能器的表面积,  $b$  和  $I$  分别为入射激光的半径和强度。

考虑到很大的光吸收系数  $\beta l \rightarrow \infty$ ,  $\langle T \rangle$  可简化为

$$\langle T \rangle = \frac{I\pi b^2}{k\sigma} \frac{\cosh \sigma(L/2 + z)}{\sinh \sigma L}. \quad (2)$$

根据薄板理论,样品中  $r$  向和  $z$  向的应变  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_\theta$  之和满足

改进后的理论模型如图 1(b)所示。在薄板理论中,中立面是一个很重要的概念<sup>[10]</sup>。对于单层材料,中立面就位于样品的几何中心,而对于样品-PZT 双层模型,通过引入等效厚度参数  $p$ ,双层模型可简化为单层模型。PZT 的厚度  $h$  由等效厚度  $ph$  代替,这里  $p$  反应了上下层弹性性质的差异。令厚度  $L = l + ph$ ,则简化后模型的中立面位于  $L/2$  处,样品材料相较于 PZT 材料愈软,  $p$  的值愈大,中立面愈靠近 PZT。

$$\epsilon_r + \epsilon_\theta = (1 + \nu)\alpha(T_0 + \tau) + \frac{2(1 - \nu)\alpha}{R^2} \left( \int_0^R T_0 r dr + z \int_0^R \tau r dr \right), \quad (3)$$

式中  $T_0 = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T(r, z) dz$ ,  $\tau = \frac{12}{L^3} \int_{-L/2}^{L/2} T(r, z) z dz$ ,  $\nu$  为泊松比,  $\alpha$  为线性热膨胀系数,  $R$  为薄板半径。

根据压电效应,得到压电换能器的输出电压为

$$V_o = \frac{e}{\epsilon S} \int_{-L/2}^{-L/2+ph} \langle \epsilon_r + \epsilon_\theta \rangle dz, \quad (4)$$

式中  $e$  和  $\epsilon$  分别为压电换能器材料的压电常数和介电常数。根据(3),(4)式可以得到

$$V_o = \frac{eph}{\epsilon S} 2\alpha \left( \langle T_0 \rangle - \frac{l}{2} \langle \tau \rangle \right). \quad (5)$$

由(2),(3)和(5)式得到压电换能器输出电压的表达式为

$$V_o = \frac{eph}{\epsilon S} \frac{I\pi b^2}{kL\sigma^2} 2\alpha \left[ 1 - 3 \frac{l}{L} - 3 \frac{l}{L} \frac{2 - 2\cosh(\sigma L)}{(\sigma L) \sinh(\sigma L)} \right]. \quad (6)$$

从而得到了光声压电信号相位  $\varphi$  的表达式

$$\tan \varphi = \frac{\left[ 1 + \frac{ph}{2l} - \frac{(ph)^2}{2l^2} \right] - \frac{3}{2al} \frac{\sin a(l+ph) + \sinh a(l+ph)}{\cos a(l+ph) + \cosh a(l+ph)}}{\frac{3}{2al} \frac{\sin a(l+ph) - \sinh a(l+ph)}{\cos a(l+ph) + \cosh a(l+ph)}}, \quad (7)$$

式中  $a = [\omega/(2D)]^{1/2}$  是热扩散系数,很明显,在  $p = 0$  时,这个结果与 Blonskij 等<sup>[10]</sup>的结果一致。

通过引入等效厚度参数对传统理论进行了改进,得到了 PAPE 信号的相位信息随调制频率的变

化曲线。因此,测得光声信号的相位,并已知样品与PZT厚度 $l, h$ ,即可通过双参拟合 $p, a$ 得到该样品的热扩散率。

### 3 实 验

利用光声压电技术测量材料热扩散率的实验框图如图2所示。样品和PZT良好粘接,使用功率约为130 mW的氩离子激光器作为光源。出射激光由声光调制器进行调制后照射到样品表面,激发出同频的热波和声波,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,并转换成电信号输入至锁相放大器,测得的实验数据经计算机处理后得到材料的热扩散率。声光调制器的调制信号和锁相放大器的参考信号均由函数发生器提供,所有测量均在室温下进行。

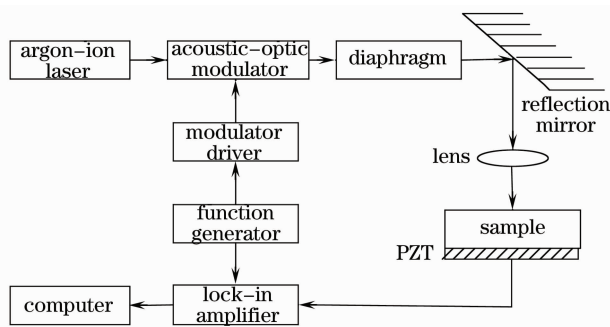


图2 实验系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

## 4 结果与讨论

### 4.1 实验系统验证

#### 4.1.1 改进模型提高精度验证

在测量工程塑料样品之前,先验证实验系统的有效性。使用纯铝作为参考样品,其厚度为1.9 mm,直径为17 mm。测量得到的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值为 $85.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,参考值为 $85 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,相对误差为0.2%。传统理论方法的拟合结果为 $76.8 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,相对误差为9.6%。很明显,改进后的光声压电理论比传统理论具有更高的精度。

#### 4.1.2 工程塑料类材料测量验证

目前还没有简便的方法对常用工程塑料的等效热扩散率进行系统的测量。利用改进后的光声压电

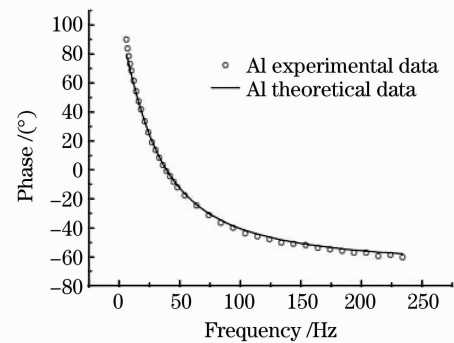


图3 纯铝样品的光声信号拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of pure Al

法对聚四氟乙烯(PTFE)样品进行验证测试,实验数据与理论拟合曲线如图4所示,实验与理论符合较好。测量结果显示,聚四氟乙烯的热扩散率参考值为 $0.08 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,测量值为 $0.082 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,相对误差为2.5%, $p$ 值为3.56。而传统单层理论模型的拟合结果为 $3.6 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,远大于参考值 $0.08 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。 $p$ 值大于1,这不仅表明PZT比PTFE硬,而且表明在这类实验中PZT的影响不能忽略,传统的单层理论模型不再适用。验证实验证明了该技术可以准确地对工程塑料的热扩散率进行测量。

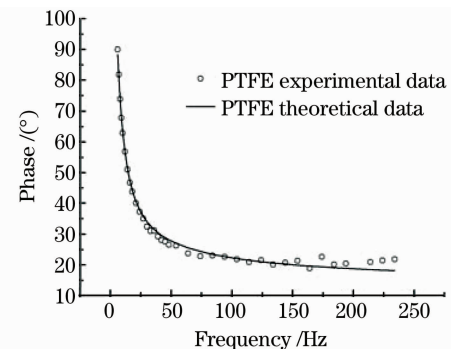


图4 聚四氟乙烯的相位-频率关系拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of PTFE (response versus modulation frequency)

### 4.2 工程塑料热扩散率测量及分析

利用改进后的光声压电法对聚乙烯(PE),聚氯乙烯(PVC),聚甲醛(POM),聚砜(PSF),尼龙6(PA-6),聚丙烯(PP),ABS,有机玻璃(PMMA)8种常用工程塑料的热扩散率进行了测量,样品直径为5.5 mm,厚度为1 mm。根据实验结果,使用(7)式对测量数据进行最小二乘法拟合,拟合结果如表1所示。

表 1 8 种工程塑料的测量结果

Table 1 Measurement results of eight kinds of engineering plastics

Sample	PE	ABS	PVC	PP	PMMA	POM	PA-6	PSF
Diffusivity $/(mm^2/s)$	0.111	0.371	0.165	0.176	0.300	0.096	0.091	0.157
Equivalent thickness parameter $p$	3.19	3.87	1.92	2.81	1.56	2.54	2.13	1.84
Uniform parameter	0.0035	0.0008	0.0011	0.0029	0.0031	0.0017	0.0087	0.0015

表 1 的测量结果显示,8 种样品的一致性参数都很小,拟合效果很好,说明改进后的 PAPE 法可以有效地测量工程塑料的热扩散率。

等效厚度参数  $p$  的值愈大,中立面的位置愈靠近 PZT,PZT 对测量结果的影响越大。由表 1 可以发现, $p$  的值均大于 1.0,这表明工程塑料的硬度均小于 PZT,PZT 的振动不能忽略。8 种工程塑料的测量结果表明,工程塑料的热扩散率值均低于  $0.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,具有良好的隔热性能。

## 5 结 论

利用改进后的光声压电技术测量研究常用工程塑料的热扩散率,得到如下结论:

1)通过对纯铝热扩散率的测量,验证了实验系统的正确性,并证明改进后的理论比传统理论更精确;

2)利用改进后的光声压电法测量聚四氟乙烯的热扩散率,与参考值相比,相对误差小于 5%,一致性参数小于 0.5%,表明拟合结果是有效的。结果表明改进后的 PAPE 法可以准确测量工程塑料的热扩散率。

3)工程塑料的热扩散率拟合一致性参数均在 1%以内,与模型吻合很好,测量结果有效。8 种样品的测量值虽有差异,但均小于  $0.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,表明工程塑料都具有良好的隔热性能。8 种样品的等效厚度参数  $p$  均大于 1.0,这表明它们的硬度均小于 PZT 材料,PZT 对测量的影响不能忽略。

总之,改进后的光声压电技术考虑了 PZT 材料对实验结果的影响,提高了测量精度,能够有效地测量工程塑料等较软材料的热扩散率。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Pengju, Zhang Jie. Plastic Mold Designers Handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 2008  
王鹏驹,张 杰. 塑料模具设计师手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- 2 Yang Chao, Hou Junfeng, Yan Ye. Advance in the engineering plastics application of China in 2008[J]. *Engineering Plastics Application*, 2009, **37**(7): 74~79
- 3 杨 超,侯俊峰,闫 焯. 2008 年我国工程塑料应用进展[J]. *工程塑料应用*, 2009, **37**(7): 74~79
- 3 Wang Peiji, Fan Suhua. Laser photothermal radiometry technique to measure thermal diffusivity of opaque complex materials[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
- 4 W. B. Jackson, N. M. Armer, A. Nc. Boccara *et al.*. Photothermal deflection spectroscopy and detection[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(8): 1333~1344
- 5 Yin Qingrui, Wang Tong, Qian Menglu. Photoacoustic Photothermal Technique and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 1991  
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
- 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: John Wiley & Sons Press, 1980
- 8 Sun Li, Zhang Shuyi, Zhao Yanzhu *et al.*. Thermal diffusivity measurements of solids by photoacoustic piezoelectric technique [J]. *Acta Acustica*, 2003, **28**(4): 29~34  
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): 29~34
- 9 W. Jackson, M. N. Amer. Piezoelectric photoacoustic detection: theory and experiment [J]. *Appl. Phys.*, 1980, **51**(6): 3343~3353
- 10 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
- 11 Bi Yanfang, Wang Yafei, Gao Chunming *et al.*. The thermal diffusivity of mullite composite studied by the photoacoustic piezoelectric (PAPE) technique [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, **30**(5): 601~607  
毕艳芳,王亚非,高椿明 等. PAPE 法对莫来石复合材料热扩散率研究[J]. *压电与声光*, 2008, **30**(5): 601~607
- 12 Gao Chunming, Zhang Shuyi, Chen Yan *et al.*. Using piezoelectric photoacoustic method to analyse thermal diffusivity characteristics of biological tissue[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
- 13 Gao Chunming, Bi Yanfang, Sun Qiming *et al.*. Measurement accuracy analysis of thermal diffusivities determined by the photoacoustic piezoelectric technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 426~429  
高椿明,毕艳芳,孙启明 等. 压电技术测量热扩散率的精度分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 426~429
- 14 Qiming Sun, Chunming Gao, Binxing Zhao. Thermal diffusivity of light-emitting material determination by photoacoustic piezoelectric technique[C]. *SPIE*, 2008, **7276**: 72761N