

# 孔隙率对碳纤维增强复合材料光热辐射信号的影响

吴恩启<sup>1</sup> 徐紫红<sup>1</sup> 郭新欣<sup>2</sup> Andreas Mandelis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海 200093

<sup>2</sup>多伦多大学扩散波先进技术中心, 多伦多 M5S 3G8

**摘要** 为了研究碳纤维增强复合材料(CFRP)孔隙率与光热辐射(PTR)信号的影响,建立了四层PTR理论模型,并搭建了相应的实验平台。采用三种不同直径的激光束分别对9种孔隙率的CFRP样品进行了实验,以玻璃碳为参考材料,对所得PTR幅值和相位信号进行了规格化处理。实验结果表明,在功率一致的条件下,相同调制频率下的PTR相位随着激光直径的减小而增加,而幅值刚好相反。激光束直径为0.2 mm时,低频率扫描的PTR相位信号随着孔隙率的增加而降低。

**关键词** 材料; 碳纤维增强复合材料; 光热辐射; 孔隙率; 热性能

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0706006

## Influence of Porosity on Photothermal Radiometry of Carbon Fiber Reinforced polymers

Wu Enqi<sup>1</sup> Xu Zihong<sup>1</sup> Guo Xinxin<sup>2</sup> Andreas Mandelis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineer, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

<sup>2</sup>*Center for Advanced Diffusion-Wave Technologies, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 3G8, Canada*

**Abstract** To study the influence of porosity on photothermal radiometry (PTR) signals of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs), a four-layered PTR model is developed and PTR measurements are performed. Three laser beams with different diameters are used to measure 9 CFRP samples with varied porosity levels. The measured amplitudes and phases of the PTR signals are normalized. The result shows that the phase of PTR signal increases with decreased beam size if the laser power are kept constant. For a beam size of 0.2 mm, the PTR phase increases when the CFRP sample porosity decreases.

**Key words** materials; carbon fiber reinforced polymer; photothermal radiometry; porosity normalization; thermal properties

**OCIS codes** 160.1245; 160.2750; 140.3330

## 1 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)作为一种高性能结构材料,具有重量轻、强度高、热膨胀系数小等优点,被广泛应用于航空航天、汽车和国防等领域<sup>[1-2]</sup>。以波音B787和空客A350为代表的大型商用飞机,其复合材料在飞机结构重量中的占比已经达到或超过了50%<sup>[3]</sup>。随着耐湿热性和强度的提高,CFRP在飞机上的应用已由次承力机构发展到主承力结构。CFRP以碳纤维或其编织物为增强体,以树脂或橡胶为基体制备而成。由于特殊的工艺,在CFRP材料中会存在一定数量的微小孔隙。孔隙的存在不但降低了材料强度和刚度,而且对热性能产生影响<sup>[4-5]</sup>。因此研究孔隙率对热性能的影响对CFRP的应用有重要的意义。

利用光热辐射(PTR)技术可以实现均匀材料涂层热传导系数和热扩散系数的测量<sup>[6-7]</sup>,而对非均匀材料的测量理论研究报道较少,Wang等<sup>[8]</sup>利用三维PTR技术实现了硬化钢表层热传导系数进行测量,Torres等<sup>[9]</sup>对牙用数值的热扩散系数进行了研究。目前国内外对复合材料的孔隙率检测方法研究较多,但对孔隙率对热

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(51205255)

作者简介: 吴恩启(1972—),男,博士,副教授,主要从事无损检测方面的研究。E-mail: weqsd@163.com

性能影响研究报道不多。本文根据PTR原理和CFRP的结构,建立了四层光热辐射理论模型,并对9种不同孔隙率的复合材料试件进行了实验。入射光束直径分别采用了0.2、1和3 mm三种尺寸,激光扫描频率从0.1~100 Hz。并以玻璃碳为参考材料对实验数据进行了规格化,分析了光束尺寸对幅值及相位的影响,建立了孔隙率和PTR信号的定性关系。

## 2 原 理

光强为  $(I_0/2)[1 + \cos(\omega t)]$  的调制激光照射到样品的表面,则照射区域温度将随着激光强度的变化而变化,如果样品为均匀材质,则其温度为:

$$T(0, t) = \frac{I_0}{2k\sigma} \exp\left[j\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)\right], \quad (1)$$

式中  $k$  为样品的热传导系数,  $\omega = 2\pi f$  为调制激光的圆周频率。

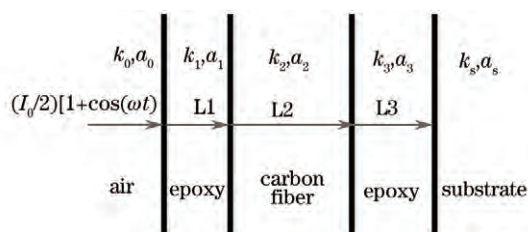


图1 CFRP的四层模型

Fig.1 Four layers model of CFRP

CFRP复合材料是由若干层预浸料组成的非均质材料,根据其具体结构组成,可以将其简化成一个具有三个涂层的均匀材料,如图1所示。第一层和第三层为树脂,第二层为碳纤维,而剩余部分看作基体。根据Mandelis的多层热传导理论<sup>[10]</sup>有:

$$T(0, \omega) = \frac{I_0(1 - \gamma_{01})}{2k_1\sigma_1} \left[ \frac{1 + \rho_2 \exp(-2\sigma_1 L_1)}{1 - \rho_2 \exp(-2\sigma_1 L_1)} \right], \quad (2)$$

上式中各参数定义如下:

$$\rho_2 = -\gamma_{21} \left[ \frac{1 + (\rho_3/\gamma_{21}) \exp(-2\sigma_2 L_2)}{1 + (\rho_3 \gamma_{21}) \exp(-2\sigma_2 L_2)} \right], \quad (3)$$

$$\rho_3 = -\gamma_{32} \left[ \frac{1 + (\gamma_{43}/\gamma_{32}) \exp(-2\sigma_3 L_3)}{1 + (\gamma_{43} \gamma_{32}) \exp(-2\sigma_3 L_3)} \right], \quad (4)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{b_{ij} - 1}{b_{ij} + 1}, \quad (5)$$

$$b_{ij} = \frac{k_i \sigma_i}{k_j \sigma_j}, \quad (6)$$

$$\sigma_i = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}, \quad (7)$$

式中  $\alpha_j, k_j$  为热扩散系数和热传导系数,下标  $j = 0, 1, 2, 3, 4$  分别代表空气、第一层的树脂、碳纤维、第三层的树脂和基体材料。

为了消除实验系统对信号的影响,需要对实验数据进行标定。选取一均匀材料,则其温度场信号可以根据(1)式计算得到。将(2)式除以(1)式,就得到规格化的PTR信号。PTR信号是一个复数,可以用幅值和相位表示。从前述可知,PTR信号的变化是材料热扩散系数和热传导系数的反应,因此PTR信号反应了材料的热性能。

## 3 实 验

### 3.1 实验材料

实验所用CFRP试件为平纹编制碳纤维预浸料制作而成,环氧树脂约占总质量的40%。试件平面尺寸

为 40 mm×20 mm,厚度方向包含 20 层层压板,相关参数如表 1 所示。从表中可以看出,试件厚度随着孔隙率的增加而增大,孔隙率为 0% 的试件厚度为 4.25 mm,孔隙率为 18.32% 的试件厚度为 5.3 mm。

表 1 CFRP 试件的孔隙率和厚度

Table 1 Porosity and thickness of CFRP specimens

| NO.           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Porosity /%   | 0.00 | 0.45 | 0.86 | 0.94 | 1.55 | 3.74 | 5.30 | 10.00 | 18.32 |
| Thickness /mm | 4.25 | 4.36 | 4.35 | 4.36 | 4.42 | 4.60 | 4.66 | 4.83  | 5.30  |

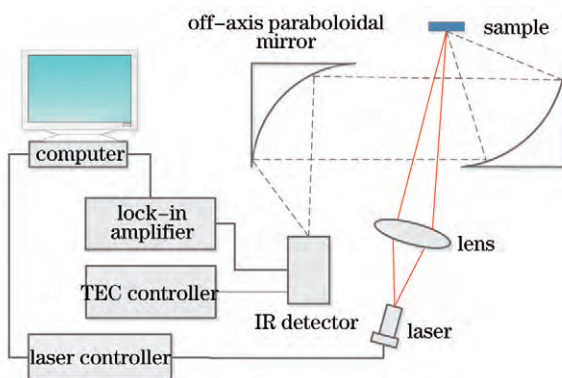


图 2 PTR 实验装置

Fig.2 PTR experiment set up

### 3.2 实验装置

用于 CFRP 材料的热性能检测的 PTR 实验系统如图 2 所示。该系统主要包括激光器(最大功率 5 W),激光驱动器(Thorlabs),检测器(MCZT IR Detector, Model PVI 2TE),冷却控制器(TEC controller),锁相放大器(SR830)和数据采集系统等组成。激光经驱动器调制后,再通过透镜聚焦,直接投射到试件的表面。试件产生的红外辐射信号通过两个抛物面镜,最后由检测器接收。试件加热区域位于一个抛物面镜的焦点上,而检测器位于另一个抛物面镜的焦点上。锁相放大器直接和电脑相连,采集的信号由电脑记录处理。

为了比较激光束尺寸对 CFRP 光热辐射信号的影响,分别采用直径为 0.2、1 和 3 mm 的激光束进行实验,激光调制频率从 0.1~100 Hz,每个样品测量 12 个点,取所有点的平均值进行处理。并用相同的参数对玻璃碳材料进行实验,所得数据用于 CFRP 光热辐射信号的规格化,以消除实验设备对采集信号的影响。

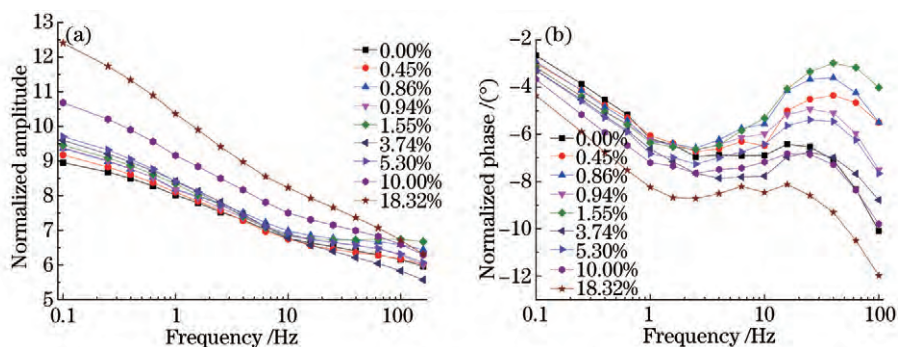


图 3 扫描频率和 PTR 信号的关系。(a) 规格化幅值和扫描频率的关系;(b) 规格化相位和扫描频率的关系

Fig.3 Plots of PTR versus frequency. (a) Normalized amplitude versus frequency; (b) normalized phase versus frequency

## 4 实验数据及分析

激光直径为 0.2 mm 时,各孔隙率不同的试件所得光热辐射幅值及相位信号和扫描频率关系如图 3 所示。从图(a)中可以看出各试件幅值信号随着扫描频率的增大而逐渐降低,同时在低频率下幅值也随着试件孔隙率的增加而降低;而当扫描频率小于 1 Hz 时,所有试件的相位都随着频率的增加而减少,而且孔隙率越小相位越大;但频率大于 1 Hz 时,相位与孔隙率没有明显的关系。

图4为扫描频率在0.1~1 Hz时孔隙率和PTR信号的关系。在该频率范围内,PTR幅值信号随着孔隙率的增加而增加,而相位则随着孔隙率的增加而降低。

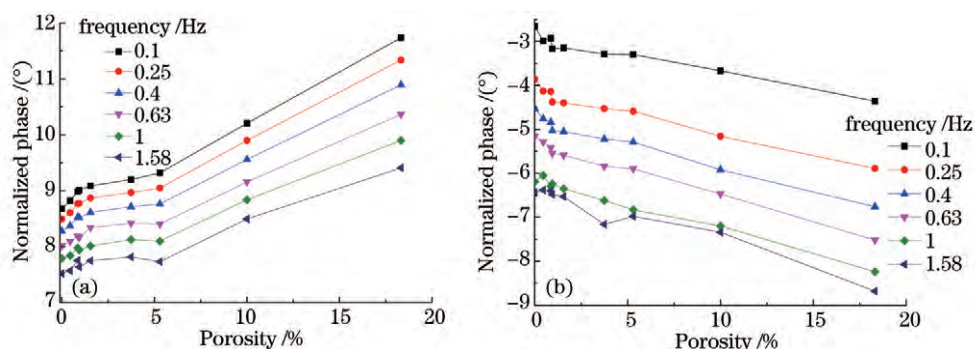


图4 0.2 mm激光束时CFRP孔隙率和PTR信号的关系。(a) PTR幅值和孔隙率的关系;(b) PTR相位和孔隙率的关系

Fig.4 Plots of PTR versus porosity of CFRP with 0.2 mm beam. (a) Amplitude versus porosity; (b) phase versus porosity

扫描频率为0.63 Hz时,激光束直径的变化对PTR信号的影响如图5所示。可以看出激光束直径越大,同一孔隙率的光热辐射信号与孔隙率的越没有规律,所以应该选取较小激光束对CFRP材料进行热性能检测。

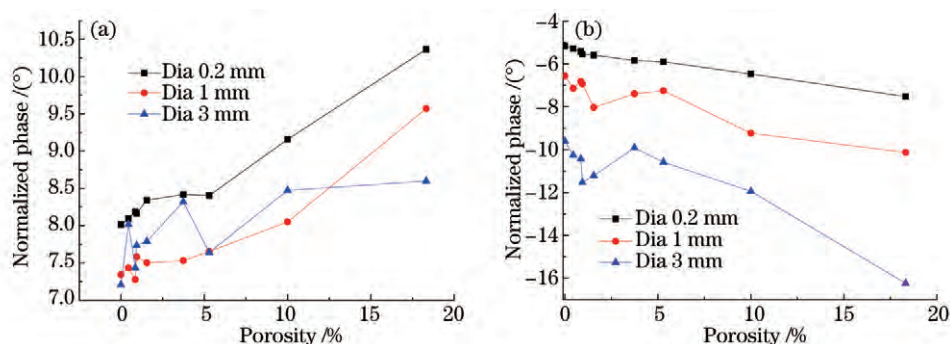


图5 激光束尺寸对PTR信号的影响。(a) PTR幅值和孔隙率的关系;(b) PTR相位和孔隙率的关系

Fig.5 Plots of PTR versus beam size. (a) Amplitude versus porosity; (b) phase versus porosity

## 5 结 论

根据PTR原理,建立了碳纤维复合增强材料的四层光热辐射理论模型,并进行了相关实验。实验结果表明,随着入射激光束尺寸的减小,光热辐射信号和孔隙率的关系越明显。激光束直径为0.2 mm时,在较低扫描频率下,随着CFRP孔隙率增加,PRT相位信号减小,而幅值信号增大。为研究孔隙率对CFRP热性能影响奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Lu Feng, Sun Zhihua, Zhong Qunpeng, *et al.*. Influence of graphite epoxy composite materials on the stress corrosion cracking of aluminum alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(1): 44-48.
- 2 陆 峰, 孙志华, 钟群鹏, 等. 碳纤维环氧复合材料对铝合金应力腐蚀性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 44-48.
- 3 Zhu Kai, Long Lianchun. Numerical simulation and experiment contrast about laminated plate under laser irradiation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103004.
- 4 朱 凯, 龙连春. 激光辐照层合板的数值模拟与试验对比[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103004.
- 5 Soutis C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 412(1): 171-176.
- 6 Li Kaiyuan, Xu Yongdong, Zhang Litong, *et al.*. Effects of fabric architectures on the thermal expansion coefficient and the thermal diffusivity of carbon fiber reinforced silicon carbide composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(11): 1564-1569.
- 7 李开元, 徐永东, 张立同, 等. 纤维编制结构对碳纤维增强碳化硅复合材料热膨胀和热扩散系数的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(11): 1564-1569.
- 8 Liu Ling, Lu Mingkun, Zhang Boming, *et al.*. Effects of porosity on the ultrasonic absorption coefficient and mechanical strength of carbon/epoxy composites[J]. Acta Material Composite Silica, 2014, 21(5): 116-121.

- 刘 玲, 路明坤, 张博明, 等. 孔隙率对碳纤维复合材料超声衰减系数和力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2014, 21(5): 116-121.
- 6 Martan J, Benes P. Thermal properties of cutting tool coatings at high temperatures[J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 539: 51-55.
- 7 Depriesster M, Hus P, Delenclos S, *et al.*. New methodology for thermal parameter measurements in solids using photothermal radiometry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(7): 1-6.
- 8 Qu H, Wang C H, Guo X X, *et al.*. Reconstruction of depth profiles of thermal conductivity of case harden steels using a three-dimensional photothermal technique[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(11): 1-6.
- 9 Torres P M, Mandelis A, Gil J J A. Photothermal determination of thermal diffusivity and polymerization depth profiles of polymerized dental resins[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(11): 1-7.
- 10 Garcia J A, Mandelis A, Farahbakhsh B, *et al.*. Thermal physical properties of thermal sprayed coatings on carbon steel substrates by photothermal radiometry[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1999, 20(5): 1587-1602.

栏目编辑: 张浩佳