

孔隙率对编织碳纤维增强聚合物热扩散系数的影响

吴恩启¹, 李美华¹, 高 倩¹, Mandelis Andreas²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海 200093;

²多伦多大学扩散波先进技术中心, 多伦多 M5S 3G8, 加拿大

摘要 提出了一种四层光热辐射模型,研究了编织碳纤维增强聚合物(CFRP)的热扩散系数。以玻璃碳为参考材料,标定了实验装置,完成了孔隙率为0~18.32%的14组CFRP样品的检测实验。构造了最小二乘目标函数,利用遗传算法求出了最优解,得到了不同孔隙率下的CFRP热扩散系数。结果表明,14组CFRP样品的热扩散系数为 $3.01 \times 10^{-7} \sim 8.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,且随着孔隙率的增大整体呈下降趋势;当孔隙率小于1.00%时,热扩散系数的下降趋势较明显,但当孔隙率大于1.00%后,下降速度趋于平缓。

关键词 材料; 热扩散系数; 光热辐射; 编织碳纤维增强聚合物; 孔隙率

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111601

Effect of Porosity on Thermal Diffusivity of Woven Carbon Fiber Reinforced Polymers

Wu Enqi¹, Li Meihua¹, Gao Qian¹, Mandelis Andreas²

¹*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

²*Center for Advanced Diffusion-Wave Technologies, University of Toronto, Toronto M5S 3G8, Canada*

Abstract A four-layer photothermal radiometry model is proposed and the thermal diffusivity of woven carbon fiber reinforced polymers (CFRP) is researched. The experimental device is calibrated with the glass carbon as the reference material, and the detection tests of the fourteen groups of CFRP samples with porosities of 0 to 18.32% are accomplished. The least-square objective function is constructed, the optimal solution is obtained by the genetic algorithm, and the thermal diffusivities of CFRP with different porosities are acquired. The results show that the thermal diffusivities of the fourteen group of CFRP samples are within the range of $3.01 \times 10^{-7} \sim 8.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, which decrease with the increase of porosity. When the porosity is smaller than 1.00%, the thermal diffusivity shows an obvious downtrend, while when the porosity is larger than 1.00%, the descent speed slows down.

Key words materials; thermal diffusivity; photothermal radiometry; woven carbon fiber reinforced polymers; porosity

OCIS codes 160.1190; 160.2290; 140.3518

1 引言

由于具有强度大、弹性模量高、热膨胀系数小、耐腐蚀等优点,编织碳纤维增强聚合物(CFRP)成为了发展最迅速、应用最广泛的一类复合材料^[1],已在航空航天等领域得到广泛应用^[2]。CFRP以环氧树脂为基体、碳纤维为增强体,由于加工工艺特殊,材料中存在孔隙,相应的孔隙率、孔的大小和形状、气体在孔内的热传导情况等都会影响材料的力学性能和热物理性能^[3]。热扩散系数是材料重要的热物理参数之一,表征了材料的导热能力^[4]。因此,分析孔隙率对CFRP热扩散系数的影响具有重要意义^[5]。

收稿日期: 2017-06-09; 收到修改稿日期: 2017-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(51205255)、国家科技支撑计划(2015BAK16B04)

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

关于碳纤维含量、碳纤维编织形式和树脂材料对 CFRP 热性能影响的研究已有大量报道^[6-9],其中关于孔隙率的研究主要集中在检测方法及其对材料力学性能影响等方面^[10-13]。Mayr 等^[14]利用主动红外技术测量了 CFRP 的热扩散系数,并讨论了孔的形状和含量对热扩散系数的影响。Wróbel 等^[5]利用激光闪光法测量了两种不同纤维含量的复合材料的热扩散系数,但测量结果受限于样品的厚度和热损失。吴恩启等^[15]研究发现,CFRP 各方向的热扩散系数存在一定的差别,但未研究叠层厚度方向的热性能。

本文在文献[15]的基础上,利用光热辐射(PTR)技术研究了 CFRP 叠层厚度方向的热物理性能。根据 PTR 原理和 CFRP 结构,建立了叠层厚度方向上的 4 层光热辐射理论模型。入射光束直径为 0.2 mm^[16],在 0.1~158 Hz 区间选取了 16 个扫描频率,分别对每个样品进行实验。以玻璃碳为参考材料对实验数据进行了规格化处理,利用遗传算法计算了相应孔隙率下的热扩散系数,建立了 CFRP 热扩散系数和孔隙率之间的关系。

2 原 理

当光强为 $I_0 [1 + \cos(\omega t)]/2$ 的调制激光照射不透明样品的表面时,照射区域的温度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 t 为光照时间, I_0 为入射光强度, k 为样品的热传导系数, ω 为调制激光的圆频率。

实验中 CFRP 由 20 层预浸料板叠加而成,每层预浸料板均由环氧树脂和碳纤维组成,其间夹杂着孔隙。采用等效热性能的方法求解其热扩散系数,将 CFRP 等效为铺叠而成的 4 层匀质薄层材料,如图 1 所示,其中 κ, α, ρ, c 分别代表各层的热传导系数、热扩散系数、密度和比热,下标 0, 1, 2, 3, 4 分别代表空气层、第 1 层碳纤维、第 2 层环氧树脂和孔隙融合层、第 3 层碳纤维和第 4 层基体。基体层的热扩散系数即为对应样品的热扩散系数,且

$$\begin{cases} R_i = \frac{1 - b_{i,i+1} p_{i+1}}{1 + b_{i,i+1} p_{i+1}} \\ p_{i+1} = \frac{1 - R_{i+1} \exp(-2\sigma_{i+1} L_{i+1})}{1 + R_{i+1} \exp(-2\sigma_{i+1} L_{i+1})} \\ b_{i,i+1} = \frac{k_{i+1} \sigma_{i+1}}{k_i \sigma_i} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 R_i 为第 i 层和第 $(i+1)$ 层分界面处的热波反射系数, L_i 为各理论分层的厚度, $i=0, 1, 2, 3, p, b$ 为参数。当 $i=3$ 时, $R_{i+1}=0, p_{i+1}=1$ 。

根据 Mandelis 的多层热传导理论^[17]有

$$T_1(0, \omega) = \frac{I_0}{2k_1 \sigma_1} \frac{1 + R_1 \exp(-2\sigma_1 L_1)}{1 - R_1 \exp(-2\sigma_1 L_1)}, \quad (3)$$

式中 T_1 为样品表层温度。

对于由环氧树脂和孔隙融合形成的第 2 层,根据混合定律,其有效的热容 $C_{(\rho c)_{\text{eff}}}$ 为

$$C_{(\rho c)_{\text{eff}}} = v_{\text{er}} \rho_{\text{er}} c_{\text{er}} + v_{\text{p}} \rho_{\text{p}} c_{\text{p}}, \quad (4)$$

式中 $\rho_{\text{er}}, c_{\text{er}}$ 和 $\rho_{\text{p}}, c_{\text{p}}$ 分别为环氧树脂和孔隙的密度和比热, v_{er} 和 v_{p} 分别为环氧树脂和孔隙的体积分数。

根据串联-并联热阻模型,垂直方向的热传导系数和热扩散系数^[18]分别满足

$$\frac{1}{\kappa_{\perp}} = \frac{v_{\text{er}}}{\kappa_{\text{er}}} + \frac{v_{\text{p}}}{\kappa_{\text{p}}}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\alpha_{\perp}} = \frac{C_{(\rho c)_{\text{eff}}}}{\kappa_{\perp}}, \quad (6)$$

式中 α_{\perp} 和 κ_{\perp} 分别为垂直方向的热扩散系数和热传导系数, κ_{er} 和 κ_{p} 分别为环氧树脂和空隙的热传导系数。

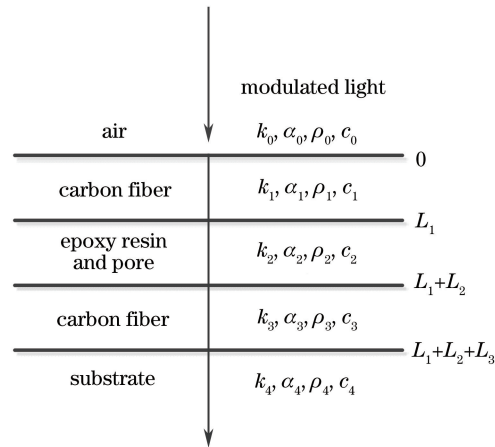


图 1 CRFP 光热辐射四层模型

Fig. 1 Four-layer PTR model of CFRP

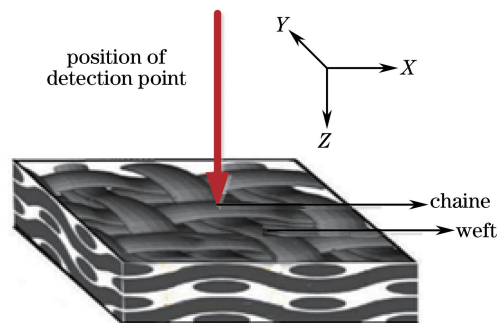


图 2 样品材料示意图

Fig. 2 Schematic of specimen material

3 实 验

3.1 实验材料

实验所用的 CFRP 样品材料如图 2 所示,定义样品叠层厚度方向为 Z 向,经纱方向为 X 向,纬纱方向为 Y 向,检测点位置位于经纱和纬纱的交织点处。样品平面尺寸为 $40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,其中环氧树脂的体积分数为 40% ,所检测 14 组样品的厚度及对应孔隙率见表 1。样品的厚度随着孔隙率的增加而增大,孔隙率为 0 时,样品厚度为 4.25 mm ;孔隙率为 18.32% 时,样品厚度为 5.30 mm 。

表 1 CFRP 样品的参数

Table 1 Parameters of CFRP specimens

| Specimens No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Porosity /% | 0.00 | 0.01 | 0.32 | 0.86 | 0.94 | 1.49 | 1.55 | 3.64 | 3.74 | 4.51 | 5.30 | 5.62 | 9.99 | 18.32 |
| Thickness /mm | 4.25 | 4.34 | 4.32 | 4.35 | 4.36 | 4.51 | 4.42 | 4.56 | 4.60 | 4.48 | 4.66 | 4.56 | 4.82 | 5.30 |

3.2 实验装置

用于检测 CFRP 热性能的 PTR 实验装置如图 3 所示。该系统主要包括最大功率为 5 W 的激光器、激光驱动器、检测器、冷却控制器、锁相放大器 and 数据采集系统。激光依次经驱动器调制和透镜聚焦后,投射到样品表面。样品产生的红外辐射经过两个抛物面镜,最后由检测器接收。样品加热区域位于一个抛物面镜的焦点处,而检测器位于另一个抛物面镜的焦点处。锁相放大器直接和电脑相连,采集的信号由电脑记录处理。

为了消除实验系统对信号的影响,选取玻璃碳为参考材料,在相同参数下进行实验,以标定实验装置。玻璃碳样品的直径为 60 mm ,厚度为 15 mm 。

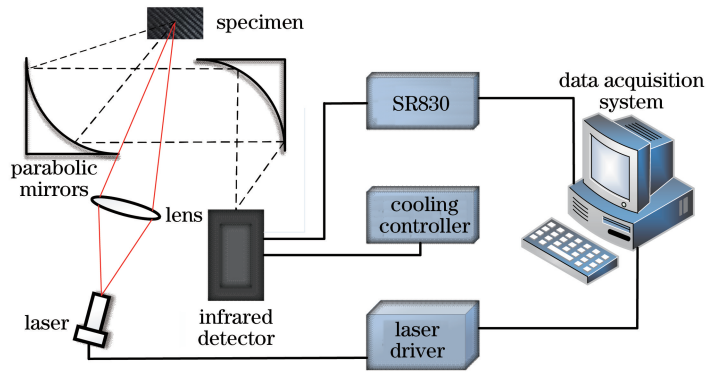


图 3 PTR 实验装置

Fig. 3 Experimental setup of PTR

表 2 CFRP 优化计算参数

Table 2 Optimal calculation parameters of CFRP

| Material | Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | Thermal diffusivity / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) | Heat capacity / ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$) |
|---------------|--|---|---|
| Carbon fiber | 8.40 | 5.15×10^{-6} | 1.63×10^6 |
| Epoxy resin | 0.20 | 9.05×10^{-8} | 2.21×10^6 |
| Pore | 0.06 | 4.79×10^{-5} | 1.21×10^3 |
| Glassy carbon | 5.80 | 5.45×10^{-6} | 1.06×10^6 |
| S_1 | 0.2000 | 9.0500×10^{-8} | 2.2100×10^6 |
| S_2 | 0.2000 | 9.0488×10^{-8} | 2.2098×10^6 |
| S_3 | 0.1985 | 9.0117×10^{-8} | 2.2029×10^6 |
| S_4 | 0.1961 | 8.9489×10^{-8} | 2.1910×10^6 |
| S_5 | 0.1957 | 8.9397×10^{-8} | 2.1892×10^6 |
| S_6 | 0.1933 | 8.8781×10^{-8} | 2.1771×10^6 |
| S_7 | 0.1930 | 8.8715×10^{-8} | 2.1758×10^6 |
| S_8 | 0.1843 | 8.6564×10^{-8} | 2.1296×10^6 |
| S_9 | 0.1839 | 8.6468×10^{-8} | 2.1274×10^6 |
| S_{10} | 0.1810 | 8.5748×10^{-8} | 2.1104×10^6 |
| S_{11} | 0.1780 | 8.5045×10^{-8} | 2.0929×10^6 |
| S_{12} | 0.1768 | 8.4770×10^{-8} | 2.0859×10^6 |
| S_{13} | 0.1622 | 8.1533×10^{-8} | 1.9893×10^6 |
| S_{14} | 0.1401 | 7.7609×10^{-8} | 1.8053×10^6 |

4 实验结果及分析

考虑到实验材料为各向异性材料,每个样品选择 12 个点进行检测,取测量数据平均值作为该样品在对应激光扫描频率下的测量数据,以减小实验误差。14 组样品的 PTR 幅值和相位由实验直接测得,其中相位信号仅为激光扫描频率的函数,因此在模型求解时选择相位信号较为理想。计算中使用的相关参数见表 2,其中 $S_1 \sim S_{14}$ 表示理论模型中 14 组样品对应的第 2 层,构造最小二乘目标函数:

$$\min: \chi = \sum_{i'=1}^{16} [\varphi_{i'} - \varphi(f_{i'})]^2, \quad (7)$$

式中 $f_{i'}$ 为激光扫描频率, $\varphi(f_{i'})$ 为各激光扫描频率下测得的相位值, $\varphi_{i'}$ 为不同激光频率下 T_1 所对应的理论相位值, χ 为构造的目标函数的取值, i' 为激光扫描频率个数。

将模型求解问题转化为多目标函数优化问题,选用遗传算法进行最优化求解,计算得到各样品的热扩散系数。孔隙率和热扩散系数的关系如图 4 所示。可以看出,CFRP 的热扩散系数随着孔隙率的增大而减小,孔隙率为 0.00% 时,热扩散系数为 $8.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; 孔隙率为 18.32% 时,热扩散系数为 $3.01 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

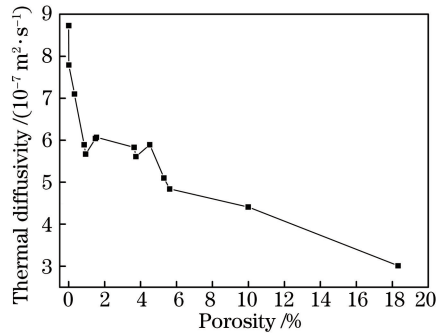


图 4 CFRP 的热扩散系数与孔隙率的关系

Fig. 4 Thermal diffusivity versus porosity of CFRP

孔隙率小于 1.00% 时, 下降趋势比较明显; 当孔隙率超过 1.00% 后, 随着孔隙率的增大, 下降速度趋于平缓。孔隙率增大的同时, 孔随机性分布和孔形状也发生改变。

表 3 样品各方向上的热扩散系数

Table 3 Thermal diffusivity in each direction

| Sample | $\alpha_a / (10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | $\alpha_b / (10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | $\alpha_c / (10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----------------|--|--|--|
| S ₁₁ | 5.46 | 4.58 | 5.10 |

研究了孔隙率为 5.30%、厚度为 4.66 mm 的 CFRP 样品叠层厚度方向的热扩散系数 α_c , 对比文献[15]中相同参数下样品平面方向的热扩散系数 α_a 、 α_b , 结果见表 3, 可以看出, CFRP 样品在三个方向上的热扩散系数相近但略有不同, 沿着上层纤维束编织方向的热扩散系数最大, 这也说明了 CFRP 在热物理性能上的各向异性。因此, CFRP 的热扩散系数不仅受孔隙率的影响, 还与碳纤维的编织结构及热传导方向相关。

5 结 论

根据 PTR 原理, 搭建了实验平台, 并对不同孔隙率下 14 组样品进行了实验。对实验数据进行了规格化处理, 建立了 CFRP 厚度方向上的光热辐射四层理论模型, 并利用遗传算法得到了最优解。所测 CFRP 样品的热扩散系数在 $3.01 \times 10^{-7} \sim 8.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。实验结果表明, 热扩散系数随着孔隙率的增大整体呈下降趋势, 孔隙率较小时下降趋势比较明显; 随着孔隙率的增大, 下降速度趋于平缓。

参 考 文 献

- [1] Li Jinwei. The discussion of the carbon fiber reinforced composite material performance characteristics and application fields[J]. Chemical Industry, 2015, 33(8): 13-18.
李进卫. 碳纤维增强复合材料性能特点及其应用领域[J]. 化学工业, 2015, 33(8): 13-18.
- [2] Gu Zhuoqi, Perton Mathieu, Kruger Silvio E, *et al.* Bonding quality detection of composite structure by laser shock wave[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0308002.
谷卓伟, Perton Mathieu, Kruger Silvio E, 等. 利用激光冲击波检测碳纤维材料中的粘接质量[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308002.
- [3] Tan Xianghu, Shan Jiguo, Tang Lei, *et al.* Study on laser surf-sculpt of GMW2 autobody sheet steel for carbon fiber reinforced polymer/steel dissimilar joint[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303002.
谭向虎, 单际国, 唐磊, 等. 面向碳纤维增强树脂基复合材料/钢异质结构连接的汽车钢板高速激光毛化工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303002.
- [4] Zhou Yabin, Zeng Jie, Zhang Qianyun, *et al.* Measurement of the thermal diffusivity of carbon composite by water-heat balance method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1108001.
周雅斌, 曾捷, 张倩韵, 等. 基于光纤传感水热平衡法测量碳纤维圆筒结构的热扩散系数[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1108001.
- [5] Wróbel G, Pawlak S, Muzia G. Thermal diffusivity measurements of selected fiber reinforced polymer composites using heat pulse method[J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2011, 48(1): 25-32.

- [6] Wróbel G, Rdzawski Z, Muzia G, *et al.* Determination of thermal diffusivity of carbon/epoxy composites with different fiber content using transient thermography[J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, 37(2): 518-525.
- [7] Wróbel G, Rdzawski Z, Muzia G, *et al.* Quantitative analysis of the fibre content distribution in CFRP composites using thermal non-destructive testing[J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2010, 41(1): 28-36.
- [8] Wróbel G, Pawlak S, Muzia G. Thermal diffusivity measurements of selected fiber reinforced polymer composites using heat pulse method[J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2011, 48(1): 25-32.
- [9] Kuribara M, Nagano H. Anisotropic thermal diffusivity measurements in high-thermal-conductive carbon-fiber-reinforced plastic composites[J]. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2015, 5(1): 15-25.
- [10] Ramosa M E, Bonelli P R, Cukierman A L, *et al.* Influence of thermal treatment conditions on porosity development and mechanical properties of activated carbon cloths from a novel nanofibre-made fabric[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 116(2/3): 310-314.
- [11] 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 Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(5): 116-138.
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*, 2004, 21(5): 116-138.
- [12] Fuente R, Mendioroz A, Apinaniz E, *et al.* Simultaneous measurement of thermal diffusivity and optical absorption coefficient of solids using PTR and PPE: a comparison [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2012, 33(10/11): 1876-1886.
- [13] Fuente R, Apinaniz E, Mendioroz, *et al.* Simultaneous measurement of thermal diffusivity and optical absorption coefficient using photothermal radiometry. I. Homogeneous solids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(3): 033515.
- [14] Mayr G, Plank B, Sekelja J, *et al.* Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(7): 537-543.
- [15] Wu Enqi, Shi Yufang, Li Meihua, *et al.* Research on in-plane thermal conduction of woven carbon fiber reinforced polymers[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0703004.
吴恩启, 石玉芳, 李美华, 等. 编织碳纤维复合材料平面内热传导规律研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0703004.
- [16] Wu Enqi, Xu Zihong, Guo Xinxin, *et al.* Influence of porosity on thermal properties of carbon fiber reinforced polymers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0706006.
吴恩启, 徐紫红, 郭新欣, 等. 孔隙率对碳纤维增强复合材料光热辐射信号的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0706006.
- [17] Stratoudaki T, Edwards C, Dixon S, *et al.* Optical absorption of epoxy resin and its role in the laser ultrasonic generation mechanism in composite materials[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, 657(1): 965-972.
- [18] Salazar A. On thermal diffusivity[J]. *European Journal of Physics*, 2003, 24(4): 351-358.