

编织碳纤维复合材料平面内热传导规律研究

吴恩启¹ 石玉芳^{1*} 李美华¹ Andreas Mandelis²

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

摘要 利用红外热成像技术,研究了编织碳纤维复合材料(CFRP)在纤维束编织平面内的热传导规律。根据激光调制加热原理,推导了纤维束平面内热扩散系数和相位梯度的关系,并搭建了相应的实验平台,对 CFRP 试件进行实验。以玻璃碳作为参考材料,将测得的红外辐射相位信号进行规格化处理,并利用高斯滤波去除红外热图像的噪声。实验结果表明,碳纤维复合材料的各向异性使其在纤维束编织平面各方向上的热传导呈现一定的规律,且与传导方向相关。当激光调制频率小于 2 Hz 时,可以测量得到 CFRP 试件在平面不同方向上的热扩散系数。

关键词 材料; 红外热成像; 编织碳纤维复合材料; 热传导; 各向异性; 热扩散系数

中图分类号 TN219

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0703004

In-Plane Thermal Conduction of Woven Carbon Fiber Reinforced Polymers

Wu Enqi¹ Shi Yufang¹ Li Meihua¹ Andreas Mandelis²

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

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

Abstract Infrared thermography is introduced to measure the in-plane thermal conduction of woven carbon fiber reinforced polymers (CFRP). According to the principle of modulated laser heating, the relationship between the in-plane thermal diffusivity and the phase gradient is deduced, and the experiment platform is established to test the CFRP samples. Glassy carbon is used as the reference material, and the measured infrared radiation signal is normalized. The Gaussian filtering is applied to removing the noise of infrared thermal images. The experiment results show that the in-plane thermal conduction in various directions is related to the conduction direction owing to the anisotropy of CFRP. When the modulated frequency is lower than 2 Hz, the in-plane thermal diffusivity of samples in each direction can be measured.

Key words materials; infrared thermography; woven carbon fiber reinforced polymers; thermal conduction; anisotropy; thermal diffusivity

OCIS codes 160.1190; 160.2290; 140.3070

1 引 言

碳纤维复合材料(CFRP)是一种高性能结构材料,具有强度高、重量轻、热膨胀系数小等诸多优点,广泛应用于民用、军事领域,尤其是在航空航天领域^[1-2],如美国的三叉戟 II 导弹和 ACTS 卫星(先进通信技术卫星)等。自从 1984 年我国东方红 I 号卫星首次使用了碳纤维/环氧复合材料后,CFRP 在我国卫星的大型运载火箭和结构件上相继获得广泛应用。CFRP 是以树脂或橡胶为基体、碳纤维或其编织物为增强体制备而成。纤维编织结构是影响 CFRP 热物理性能的重要因素之一,其各向异性导致材料在各个方向上热性能参数不同^[3],因此研究材料内部热扩散分布情况对 CFRP 的使用可靠性具有重要意义。

红外热成像(IRT)无损检测技术能够采集物体表面的红外热辐射信号,通过信号处理和热图像分析等手段,获取物体的热传导系数和热扩散系数等信息,此项技术已逐步用于航空领域复合材料开胶、脱胶、断层

收稿日期: 2016-03-31; **收到修改稿日期:** 2016-04-29

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,主要从事无损检测方面的研究。E-mail: weqsd@163.com

* **通信联系人.** E-mail: shinorway@163.com

等无损检测^[4-6]。美国学者开始尝试将该技术运用于航天航空领域中多种设备的在役实时监测;欧洲各国开展了对建筑物中大型受力支撑件敏感部位的疲劳损伤检测、钢棒材连接件内部缺陷的检测等^[7-9]。

本文利用红外热成像技术,对编织 CFRP 试件进行热传导规律实验研究,将光源调制激光扫描频率控制在 0.1~100 Hz。实验结果表明,热波在 CFRP 平面内的热扩散分布与纤维束编织方向有密切关系,在整个平面内呈同心椭圆的规律变化。当激光调制频率小于 2 Hz 时,可以计算出 CFRP 各平面方向上的热扩散系数。

2 激光调制加热原理

当光源调制激光投射到材料表面时,材料表面会产生温度场分布,即热波,忽略其厚度方向的热传递,只考虑热波沿着平面方向上的传递,其照射区域内温度 T_{AC} 将随着与热源距离 x 的远近而变化,可表示为^[10-15]

$$T_{AC} = T_0 \exp[i(2\pi ft - lx - \pi/4) - lx]x^{-1}, \quad (1)$$

式中 T_0 为常数, f 为光源调制激光的扫描频率。

热波在材料内部的传播衰减很快,其传播距离与调制频率有关,可表示为

$$\mu = \sqrt{\alpha/\pi f} = l^{-1}, \quad (2)$$

式中 μ 为热扩散长度, α 为热扩散系数, l 为 μ 的倒数。

在所测任一点处,相位 θ 与热源距离 x 成反比,可表示为

$$\theta = -lx - \pi/4. \quad (3)$$

根据(2)式和(3)式,可将热扩散系数 α 表示为

$$d\theta/dx = -\sqrt{\pi f/\alpha}. \quad (4)$$

在理想状态下,红外辐射相位信号呈高斯分布,其平面内分布函数为

$$\begin{cases} f_T(x) = \frac{\theta_{\max}}{2\pi\omega_z^2} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\omega_z}\right)^2\right], \\ \omega_z = |X_{\nu_{\max}} - X_{\nu_{\max}/e^2}| \end{cases}, \quad (5)$$

式中 θ_{\max} 为红外辐射相位信号的最大值, ω_z 为等效高斯宽度, $X_{\nu_{\max}}$ 和 X_{ν_{\max}/e^2} 分别为红外辐射相位信号在 ν_{\max} 和 ν_{\max}/e^2 处 X 方向的坐标位置。

若已知 θ_{\max} , 可算出 ω_z 处的相位值,进而根据一次多项式拟合求出相位峰值到等效高斯宽度处相位曲线的斜率 $d\theta/dx$, 代入(4)式即可算出热扩散系数 α 。

3 实 验

3.1 实验材料

实验所用 CFRP 试件由 20 层平纹编织碳纤维预浸料制作而成,其示意图如图 1 所示。定义平行于纬纱的方向为横向(0°),平行于经纱的方向为纵向(90°),沿着左上往右下方向为主对角线方向(45°),沿着右上往左下方向为副对角线方向(135°)。考虑到编织 CFRP 的具体结构,选取 CFRP 试件上 A 和 B 两个点进行实验,这两个点都位于纵向纤维束和横向纤维束的交点中心,区别在于 A 点处热波沿着纤维束第一层横向第

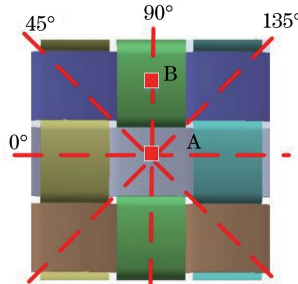


图 1 纤维预制体结构示意图

Fig. 1 Structure of fiber preform

二层纵向传导,而 B 点处热波沿着纤维束第一层纵向第二层横向传导,依此类推。CFRP 试件中环氧树脂约占总质量的 40%,孔隙率为 5.30%,尺寸为 40 mm×20 mm×4.66 mm。

3.2 实验装置

用于 CFRP 试件的热性能检测实验装置如图 2 所示,该系统主要由红外热像仪(SU320KTSW-1.7 RT/RS170)、激光器(JENOPTIK,808 nm)、激光驱动器(LDC210 C,Thorlabs)、锁相放大器(SR850)、冷却控制器和数据采集处理系统组成。激光经驱动器调制后,直接投射到试件表面,试件产生的红外辐射相位信号由红外热像仪接收,锁相放大器直接和电脑相连,采集的信号由电脑记录处理。

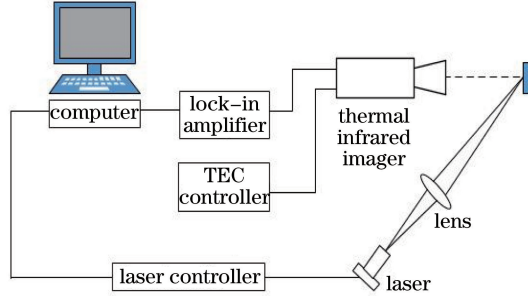


图 2 IRT 实验装置

Fig. 2 IRT experimental setup

为了提高采集信号的灵敏度和信噪比,应适当增大光源强度,控制调制激光扫描频率范围为 0.1~100 Hz,激光功率为 20 mW,光束直径为 0.2 mm。为了消除实验系统对采集信号的影响,以玻璃碳作为参考材料进行相同的实验,并作规格化处理;再对得到的图像信号进行高斯滤波,去除噪声。

4 实验结果分析

当激光调制频率为 0.1 Hz 时,CFRP 试件在 A 点处的三维及灰质相位图像如图 3 所示。从图中可以看出,红外热图像由 160×128 个像素点组成,激光加热点热源处的红外辐射相位值最大,随着与热源的距离增大,相位值呈抛物线状逐渐减小。

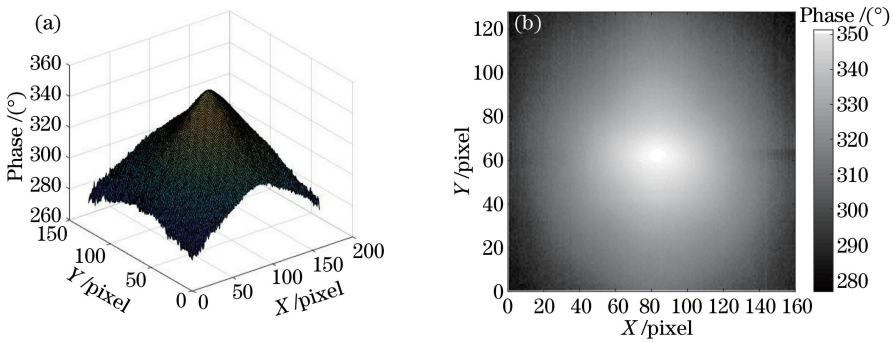


图 3 红外辐射相位图。(a) 三维图像; (b) 灰质图像

Fig. 3 Infrared radiation phase images. (a) Three-dimensional image; (b) gray image

4.1 热扩散与激光调制频率的关系

分析 CFRP 试件 A 点处的横向热扩散,红外辐射相位信号在不同激光调制频率下的分布如图 4 所示。从图中可以看出,不同激光调制频率下的相位梯度和等效高斯宽度都不同,高频状态下的相位梯度明显大于低频状态,而低频状态下的等效高斯宽度明显大于高频状态。

4.2 热扩散与传导方向的关系

图 5 所示为 CFRP 试件 A 点处在不同激光调制频率下的相位等高线图,从图中可以看出,热辐射面积随着调制频率的增加而减小,并呈现同心椭圆的形状分布。这是由于 CFRP 是典型的各向异性材料,热扩散长度 μ 随着调制频率 f 增加而减小,因此椭圆等高线的离心率随着调制频率的增加而降低,相位等高线也逐渐形成分布集中的同心圆。

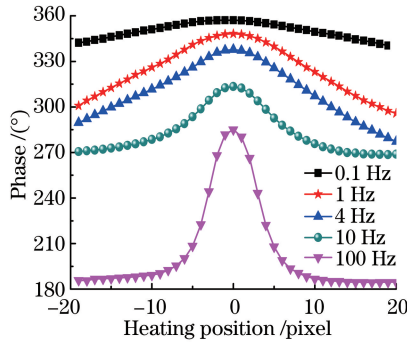


图 4 不同调制频率下的相位分布

Fig. 4 Phase distribution under different modulation frequency

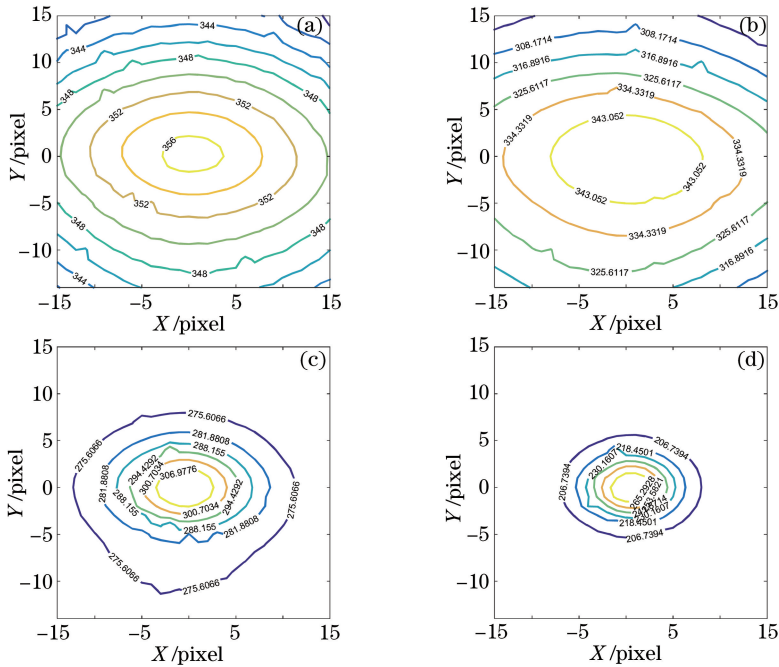


图 5 不同频率下的相位等高线。(a) 0.1 Hz; (b) 1 Hz; (c) 10 Hz; (d) 100 Hz

Fig. 5 Phase contour maps at different frequency. (a) 0.1 Hz; (b) 1 Hz; (c) 10 Hz; (d) 100 Hz

当激光调制频率为 10 Hz 时,CFRP 试件 A 点处的红外辐射相位信号在 4 个方向上的分布如图 6 所示,从图中可以看出,热波沿着横向、纵向、主对角线方向及副对角线方向上的热扩散分布都不同,证明了层压会导致 CFRP 材料内部的不均匀性,符合 CFRP 各向异性的特点,并且横、纵方向上相位梯度接近,主、副对角线方向上相位梯度接近。

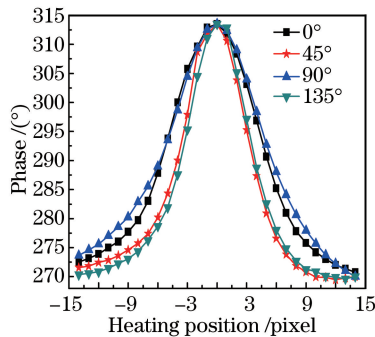


图 6 4 个方向上的相位分布

Fig. 6 Phase distribution in four directions

4.3 CFRP 热扩散系数的计算

分析 CFRP 试件在 A 点处的横向和纵向热扩散系数 α 与激光调制频率 f 之间的关系,结果如图 7 所示。从图中可以看出,当 $f > 2$ Hz 时,热扩散系数 α 急剧增大。实际上,热扩散系数只与材料导热系数、密度和比热容有关,在温度变化不大的情况下,热扩散系数不会发生突变。根据文献[12]求得的 CFRP 在厚度方向的热扩散系数,由(2)式计算出调制频率为 2 Hz 和 4 Hz 时的热扩散长度 μ 分别为 0.25 mm 和 0.17 mm,而试件的单层预浸料叠层厚度为 0.23 mm,因此当激光调制频率大于 4 Hz 时,激光不能穿透一个 CFRP 碳纤维预浸料叠层,此时所得红外辐射信号不能完整地反映 CFRP 的热传导性质。调制频率 $f < 2$ Hz 时,激光可以至少穿透一个叠层。取 0.1~2 Hz 内 4 个调制频率下计算的热扩散系数的平均值作为试件的热扩散系数。

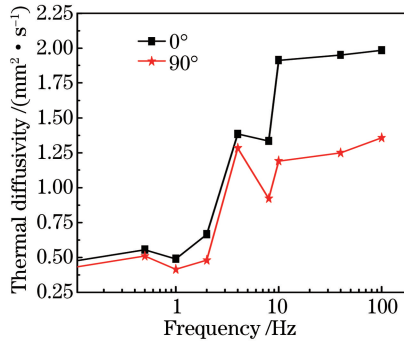


图 7 热扩散系数和扫描频率的关系

Fig. 7 Thermal diffusivity versus scanning frequency

分析 CFRP 试件 A 和 B 两点的的数据,得到 4 个方向上的热扩散系数 α 如表 1 所示。从表中可以看出,试件在纤维束编织平面内各方向上的热扩散系数都不相同,其中沿预浸料上层纤维束编织方向的热扩散系数最大,沿预浸料下层纤维束编织方向次之,沿 45° 和 135° 方向最小,说明热波传导方向上树脂及空隙的多少对热扩散系数有直接的影响。另外,A 点处 0° 和 90° 方向的 α 值分别与 B 点处 90° 和 0° 方向 α 值一致,可见碳纤维编织方式会影响材料编织平面内的热传导。

表 1 试件各方向上的热扩散系数

Table 1 Thermal diffusivity in four directions

Position	$\alpha / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$			
	0°	45°	90°	135°
Point A	0.546	0.214	0.458	0.201
Point B	0.443	0.193	0.572	0.174

5 结 论

根据激光调制加热原理,采用红外热成像技术对编织 CFRP 进行实验分析。结果表明,CFRP 独特的编织结构使其具有各向异性特点。CFRP 在纤维束平面方向的热传导规律与传导方向相关;红外辐射相位等高线图呈现出同心椭圆的形状分布,椭圆离心率随着调制频率的降低而增加;当调制频率为 0.1~2 Hz 时,可以测量出试件在纤维束编织平面内不同方向上的热扩散系数。结果表明,编织方式及树脂分布对热扩散系数有直接的影响。

参 考 文 献

- 1 Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212.
李 威, 郭权峰. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
- 2 Fang Haijun, Tu Bin. Stability analysis of CFRP reflecting surface in satellite antenna[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(1): 67-71.

- 房海军, 涂 彬. 碳纤维复合材料卫星天线反射面型面精度稳定性分析[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(1): 67-71.
- 3 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.
- 李开元, 徐永东, 张立同, 等. 纤维编织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.
- 4 Zeng Zhi, Tao Ning, Feng Lichun, *et al.*. Adopting the ratio of defect size over depth to quantitatively study the effect of defect size on the measurement of defect depth[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s108005.
- 曾 智, 陶 宁, 冯立春, 等. 采用缺陷宽深比系数定量研究缺陷尺寸对缺陷深度测量的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s108005.
- 5 Sun Yanchun, Ma Qishuang, Yao Hongyu. Application of energy accumulation in IR thermal image sequences processing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(3): 39-43.
- 孙延春, 马齐爽, 姚红宇. 能量累积在红外热图像序列处理中的应用[J]. 光电工程, 2008, 35(3): 39-43.
- 6 Wu Xiaoyan, Yu Yingjie, Lü Lijun. Review on non-destructive detection of inner defects of object [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040002.
- 伍小燕, 于瀛洁, 吕丽军. 物体内部缺陷无损检测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040002.
- 7 Theodorakeas P, Avdelidis N P, Hrissagis K, *et al.*. Automated transient thermography for the inspection of CFRP structures: Experimental results and developed procedures[C]. SPIE, 2011, 8013: 80130W.
- 8 Chen D P, Zeng Z, Zhang C L, *et al.*. Air-coupled ultrasonic infrared thermography for inspecting impact damages in CFRP composite[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(s1): s10401.
- 9 Zeng Z, Zhou J, Tao N, *et al.*. Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(2-3): 200-204.
- 10 Wu Enqi, Xu Zihong, Guo Xinxin, *et al.*. Influence of porosity on photothermal radiometry 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.
- 11 Zhao Yanguang, Guo Xinglin, Ren Mingfa. Lock-in infrared thermography for the non-destructive testing of fatigue specimen with defects[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2776-2781.
- 赵延广, 郭杏林, 任明法. 含缺陷疲劳试件的锁相红外热成像无损检测[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2776-2781.
- 12 Kalogiannakis G, van Hemelrijck D, Longuemart S, *et al.*. Thermal characterization of anisotropic media in photothermal point, line, and grating configuration[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(6): 2487-2490.
- 13 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.
- 14 Mendioroz A, Fuente-Dacel R, Apinaniz E, *et al.*. Thermal diffusivity measurements of thin plates and filaments using lock-in thermography[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(7): 074904.
- 15 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.