

文章编号 1004-924X(2014)12-3217-07

## 树脂基复合材料内部离面位移场和 应变场分布的动态测量

周延周\*, 朱文卓, 董博, 白玉磊, 彭义  
(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为了快速动态测量树脂基复合材料内部的受力变形情况, 利用光学干涉谱域相位对照 B 扫描方法, 对存在孔洞缺陷的树脂基复合材料样件内部的离面位移场和应变场进行了测量。分别对机械载荷和热载荷作用下的复合材料样件进行了弯曲变形和热变形实验, 然后对实验中得到的相位差数据进行解卷绕, 计算得出了材料内部的离面位移场分布和应变场分布。实验显示: 得到的结果能够清晰反映复合材料内部缺陷周围受力变形的动态过程, 观测到的材料应力集中区域的位移和应变明显大于完好部分, 透视得到了测量材料表层以下 1 mm 连续深度的变形情况。该方法能够实现亚微米级的位移场测量精度, 并可对材料的变形过程进行动态测量, 是一种进行材料力学特性分析的有效手段。

**关键词:** 树脂基复合材料; 力学测量; 位移场; 应变场; 光学干涉; B 扫描

**中图分类号:** TB332; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3217

## Dynamical measurement of out-of-plane displacement field and strain field inside resin composite

ZHOU Yan-zhou\*, ZHU Wen-zhuo, DONG Bo, BAI Yu-lei, PENG Yi

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

\* Corresponding author, E-mail: optics.zhouyanzhou@qq.com

**Abstract:** To measure the stress and deformation inside resin composites rapidly and dynamically, a B-scan method based on phase contrast spectral optical coherence tomography was employed to measure the out-of-plane displacement field and strain field of the resin composites with voiding defect. A bending experiment and a thermal deformation experiment were conducted for composite samples through mechanical loading and thermal loading. Then the phase difference data from experiments were unwrapped and the out-of-plane displacement field distribution and strain field distribution were obtained. The results show that the experiments describe clearly of the dynamical deformation course around the voiding defect inside composites, from which bigger displacement and strain have been observed in the stress concentration region rather than the undamaged part, and an area with the depth 1 mm below the sample surface is measured. Moreover, this method is able to measure the displacement field in a sub-micro meter level and the deformation courses of composites in dynamics, and is an effective

收稿日期: 2014-03-13; 修订日期: 2014-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11072063); 广东省自然科学基金资助项目 (No. S2012010010327)

tive analysis method for mechanical properties of composites.

**Key words:** resin composite; mechanical measurement; displacement field; strain field; optical interferometry; B-scan

## 1 引言

近年来,高聚物复合材料以其轻质高强、加工成型方便等特点逐步取代了金属合金及木材,在航空航天、电子电气、汽车等领域得到了广泛的应用。然而受其制作工艺的限制,高聚物复合材料内部极易产生气孔、分层、界面分离、钻孔不良等缺陷<sup>[1]</sup>。实际应用中,处于机械载荷和热载荷环境下的复合材料在受力变形时,这些缺陷附近会发生应力集中现象,从而大大降低了构件的机械性能及使用寿命。

因为高聚物复合材料具有各向异性的特点,难以在理论上分析其性能,所以复合材料构件的力学性能测量就显得尤为重要。传统的超声检测、射线检测等测量方法主要通过检测轮廓来判断缺陷,不仅测量精度低,而且无法测量材料的受力变形<sup>[2-3]</sup>。云纹干涉法,散斑干涉法和数字图像相关等方法虽然可以描述材料表面的变形情况,但却无法测量材料内部的变形情况,因此通常用来测量材料表面的面内位移以及膨胀系数<sup>[4-6]</sup>。近年来,国外学者为了研究散射介质内部的变形情况,对散斑干涉测量方法做了进一步的拓展<sup>[7-9]</sup>。本课题组以此为基础提出了两种测量复合材料内部变形的的方法:(1)断续波长扫描干涉测量方法。该方法能够测量材料内部的离面位移场,具有亚微米的测量精度,但是测量速度慢,需要拍摄数百甚至上千帧图样才能完成一次测量<sup>[10]</sup>;(2)光学干涉谱域相位对照 B 扫描方法。该方法以波长扫描干涉测量为基础,只需对被测对象变形前后分别拍摄一帧干涉图样即可完成测量,在保证高精度测量的同时,大大提高了测量速度,并实现了动态测量<sup>[11]</sup>。因此,光学干涉谱域相位对照 B 扫描测量方法是目前唯一一种能够对材料内部变形情况进行动态测量的方法,在树脂基复合材料力学性能测量和无损检测领域具有很好的应用前景。

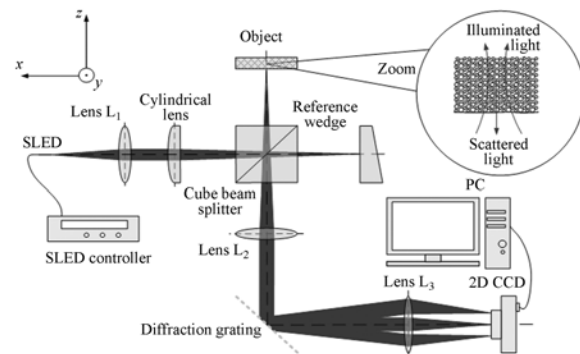
然而文献<sup>[11]</sup>只完成了光学干涉谱域相位对照 B 扫描方法可行性的研究和树脂、空气、玻璃材料交界面离面位移的初步实验测量,并未对树

脂材料内部的变形情况进行测量。本文在进一步研究该测量方法的基础上,以内部存在孔洞缺陷的树脂基复合材料为被测对象,分别进行弯曲变形以及热变形实验,得到了连续深度下材料内部的离面位移场和应变场分布。

## 2 测量系统

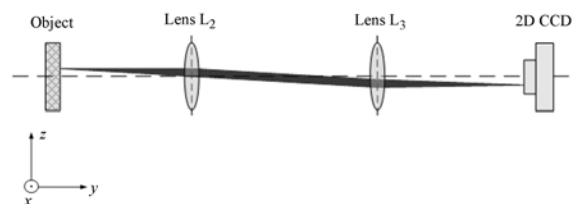
### 2.1 系统构成

光学干涉谱域相位对照 B 扫描系统以迈克尔逊干涉仪为基本结构,利用宽带光源空间调制的原理来实现材料内部变形情况的动态测量,其系统结构如图 1 所示。



(a) 系统结构及  $-y$  方向的光路原理

(a) Optical setup and light path in  $-y$  direction



(b)  $-x$  方向的光路原理

(b) Light path in  $-x$  direction

图 1 光学干涉谱域相位对照 B 扫描系统结构图

Fig. 1 Configuration of optical setup of B-scan based on phase contrast spectral optical coherence tomography

图 1(a) 所示的  $-y$  方向光路中, SLED 在其控制器作用下发出的宽带光经过凸透镜  $L_1$  准直

后,在分光镜的作用下被柱透镜分别聚焦于被测对象和参考光楔的参考面上。来自被测对象内部的背向散射光和参考面的反射光,在分光镜上分别透射和反射之后相互叠加产生干涉,被凸透镜  $L_2$  准直后平行入射到反射式衍射光栅上。根据衍射光栅的衍射原理,相同波长的光在衍射光栅作用下以相同的角度衍射,并经过凸透镜  $L_3$  后聚焦于面阵 CCD 的像平面上。因为不同波长的光的衍射角度不同,因此 CCD 相机像平面上的干涉光沿  $z$  方向按照波长连续展开。

在  $-x$  方向的光路中,由于衍射光栅相当于一个平面反射镜,因此凸透镜  $L_2$  和  $L_3$  组成的是一个如图 1(b) 所示的成像光路。综合图 1(a) 和 1(b) 两个方向的光路可知,CCD 相机的像平面上形成的是沿波长展开的干涉光谱。

## 2.2 测量原理

根据参考文献[11],在干涉信号的采集过程中,若 CCD 相机采样窗口对应的波数带宽为  $\Delta k$ ,采样点之间的波数带宽为  $\delta k$ ,采样后干涉光谱的频率为:

$$f = \frac{\Delta R_p}{\pi} \cdot \frac{\Delta k}{2}, \quad (1)$$

其中:  $\Delta R_p$  为材料内部任意一点  $p$  到参考面  $R$  的光学长度。由式(1)可知,干涉光谱的频率与  $p$  点到参考面  $R$  的光学长度成正比。

当  $p$  点发生了光学长度为  $w$  的离面位移时,位移前后参考面  $R$  和  $p$  点之间的相位差为:

$$\Delta\phi_{Rp} = 2k_c \cdot w = 2\pi/(\lambda_c/2) \cdot w, \quad (2)$$

其中:  $k_c$  为光源的中心波数,  $\lambda_c$  为中心波长。由式(2)可知,相位差每变化  $2\pi$  对应着  $p$  点发生了  $\lambda_c/2$  的位移。光源的中心波长  $\lambda_c$  为 840 nm,即相位差每变化  $2\pi$  对应的离面位移变化为 0.42  $\mu\text{m}$ ,该系统的测量精度为  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ [7]。

根据式(2)和正应变的定义计算出正应变在  $z$  方向的分量为:

$$\epsilon_z = \frac{\partial(\Delta\phi_{Rp}/2k_c)}{\partial z}. \quad (3)$$

## 3 实验

### 3.1 复合材料样件的制备

实验的被测样件是一块存在孔洞缺陷的树脂

基复合材料,图 2 为其结构简图。样件为粘合在一起的三层复合材料薄板,从左到右的厚度依次为 0.46, 0.66, 0.52 mm, 中间层有一孔径约为 3 mm 的孔洞缺陷。本实验以绿循化工的 GCC135 环氧树脂为基体、杜邦 R902+钛白粉作为填料制备被测样件。其中,钛白粉的粒径为 400 nm,以增强其内部的背向散射光。

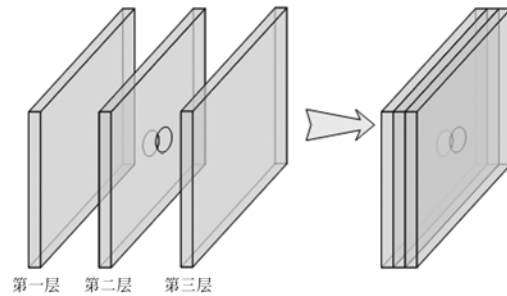


图 2 被测样件结构简图

Fig. 2 Sketch of test sample

### 3.2 机械载荷下复合材料样件的弯曲变形实验

将制备好的被测样件放置在如图 3 所示的加载装置上并预紧。加载装置是由两个横向固定杆和一个球头千分尺组成的三点加载装置,其中两个固定杆的直径均为 6 mm,间隔为 30 mm,千分尺为大恒光电生产的 GCM-4011TM 精密测微丝杆,其精刻度为 0.001 mm,分辨率为 1  $\mu\text{m}$ 。该装置除了能够对样件进行固定之外,还能进行最小为 1  $\mu\text{m}$  的步进加载。在被测样件处于预紧状态时,首先使用 CCD 相机拍摄一张干涉光谱,然后使用加载装置对被测样件施加 1  $\mu\text{m}/\text{step}$  的加载,共加载 5 次,并在每次步进加载后拍摄一张干涉光谱。最终,实验测量得到在施加了 1, 2, 3, 4, 5  $\mu\text{m}$  进给量后被测样件内部的离面位移场分布。

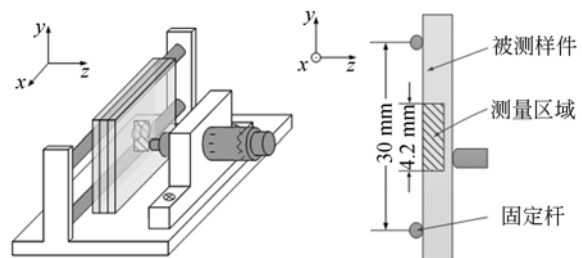


图 3 加载装置及测量区域切面图

Fig. 3 Loading device and slice of measuring area

### 3.3 热载荷下复合材料样件的弯曲变形实验

在室温 17 °C 时,用吹风机将被测样件加热至 45 °C 以上,利用红外热像仪测量其降温过程,重复测量 5 次,记录 40 °C 至 30 °C 降温过程中的降温曲线。把被测样件置于图 3 所示的加载装置上并预紧,加热后待其温度降为 37 °C 时开始进行连续测量。设置相机的曝光时间为 250 ms,连续拍摄张数为 100,测量得到 37~34.5 °C 降温过程中被测样件内部的离面位移场分布。

## 4 数据处理与实验结果

根据式(1),干涉光谱沿波数轴傅里叶变换后的幅频特性描述了材料内部的轮廓。拍摄样件预紧时干涉光谱的幅频特性图,对干涉光谱的横轴进行变换,如图 4 所示。其中  $y$  轴长 4.20 mm,代表视场高度; $z$  轴长 5.98 mm,代表光学长度;图像中每一点灰度值表示该点的幅值大小。从图 4 中可以看到被测样件的前表面及孔洞缺陷。根据实验测量数据,材料第一层和中间层厚度的光学长度分别为 0.690 mm 和 0.645 mm,分别除以复合材料的折射率(1.5)和空气的折射率(1.0),得到的结果与其实际尺寸一致。

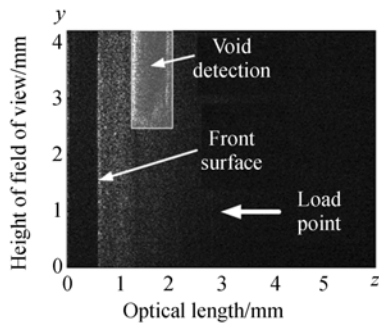


图 4 样件断层轮廓图像

Fig. 4 Sectioned tomographic image

### 4.1 弯曲变形实验

根据式(2),干涉光谱的相频特性描述了材料内部的离面位移场。在对样件施加 5  $\mu\text{m}$  进给后得到其相位差图并取样件内部 A, B 两点进行分析,如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出, $z$  方向深度为 0.6~1.2 mm 的区域内有连续变化的相位信号,提取此区域的相位如图 6(a)所示。由于傅里叶变换得到

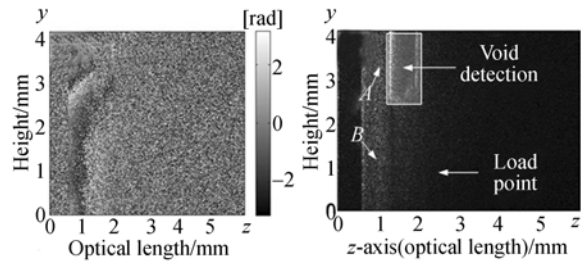
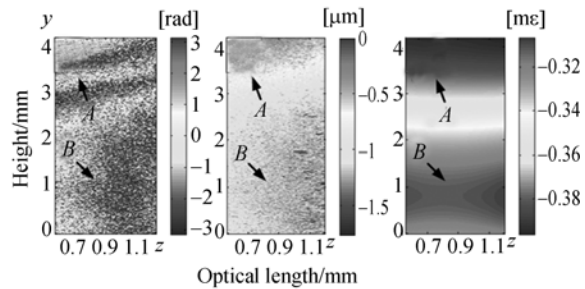


图 5 相位差图(a)及样件内部 A, B 两点(b)

Fig. 5 Phase difference map (a) and positions of points A and B (b)



(a)卷绕相位差分布 (b)离面位移场分布 (c)应变场分布  
(a)Distribution of wrapped phase difference (b)Distribution of out-of-plane displacement field (c)Distribution of strain field

图 6 弯曲变形后缺陷材料内部变化

Fig. 6 Maps of defective material with a bending deformation

的相位是 $[-\pi, \pi]$ 的卷绕相位,因此对图 6(a)使用文献[12]的方法进行解卷绕后,乘以式(1)的比例系数即可得到如图 6(b)所示的离面位移场,再根据式(3)得到如图 6(c)所示的应变场分布。从图 6(c)可以看出:(1)应变量为负值,表明材料正处于压缩当中;(2)应变以加载点处为最大,向两侧逐渐减小;(3)孔洞缺陷周围部分的应变最小,即压缩程度最剧烈。由于材料孔洞缺陷周围部分的应变与其他部分不同,因此取样件内部孔洞缺陷周围部的一点 A 及其他部分的一点 B 进行分析。实验过程中加载了 1, 2, 3, 4, 5  $\mu\text{m}$  后, A, B 两点的应变如图 7 所示。

由图 7 中可知,随着进给量的不断增大, A, B 两点的应变均沿  $-z$  方向不断增大。沿  $-z$  方向,图中 A 点的应变变化量为 0.29  $\text{m}\epsilon$ ,而 B 点的应变变化量为 0.24  $\text{m}\epsilon$ ,可见孔洞缺陷周围部分的应变变化量更大。

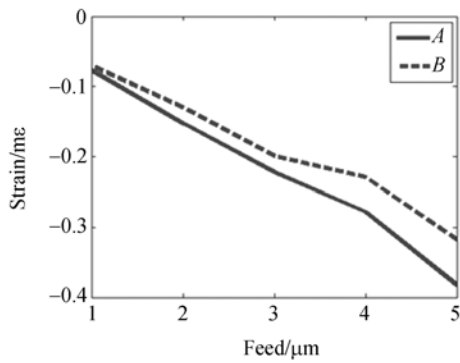


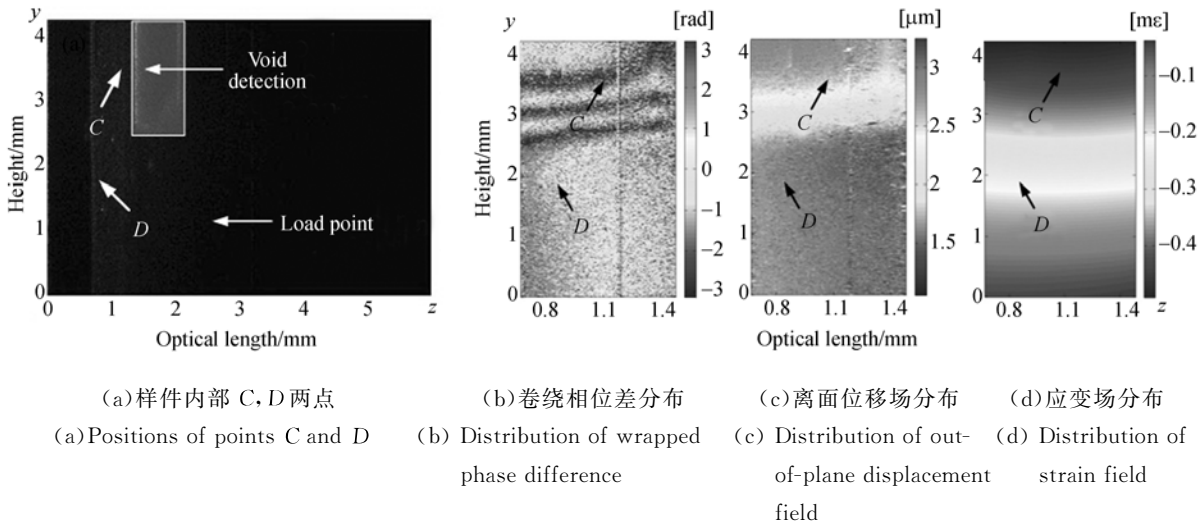
图 7 被测样件内部 A, B 两点的应变曲线  
Fig. 7 Strain variation curves at A and B inside sample

### 4.2 热变形实验

根据式(2)和式(3),当被测样件从 37 °C 降温至 35.5 °C 时,材料内部的卷绕相位差、离面位移场和应变场分别如图 8(b)、(c)、(d)所示。

取材料内部两点 C, D 进行分析,被测样件从 37 °C 降温至 34.5 °C 过程中的离面位移、应变的变化情况如图 9 所示。

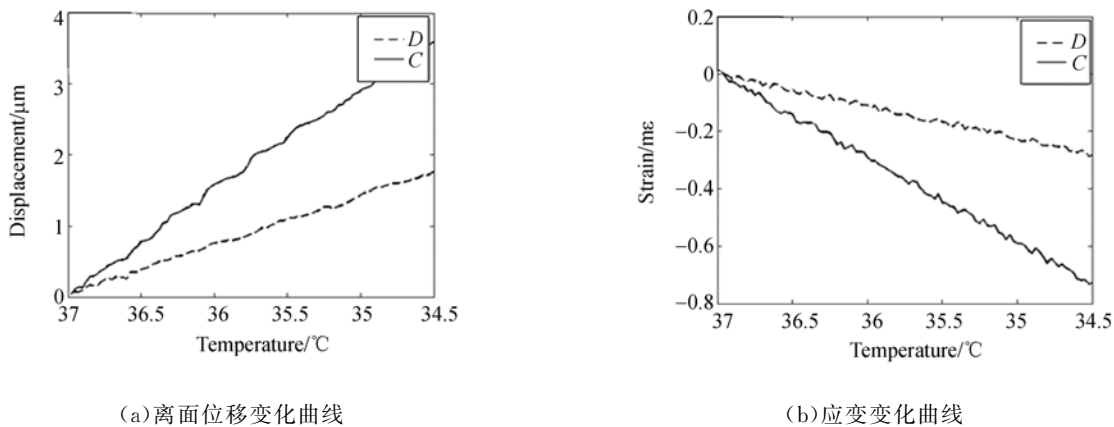
在图 9(a)中,随着温度的不断降低, C 点和 D 点的离面位移分别变化了 3.7 μm 和 1.8 μm,可见降温过程中孔洞缺陷周围部分的离面位移明显大于完好部分;而图 9(b)中,沿 -z 方向 C 点和 D 点的应变分别变化了 0.73 mε 和 0.28 mε,可见降温过程中孔洞缺陷周围部分的应变也明显大于完好部分。



(a) 样件内部 C, D 两点 (b) 卷绕相位差分布 (c) 离面位移场分布 (d) 应变场分布  
(a) Positions of points C and D (b) Distribution of wrapped phase difference (c) Distribution of out-of-plane displacement (d) Distribution of strain field

图 8 热变形后缺陷材料内部变化

Fig. 8 Maps of defective material with a thermal deformation



(a) 离面位移变化曲线 (b) 应变变化曲线  
(a) Variation curves of out-of-plane displacement (b) Strain variation curves

图 9 样件从 37 °C 降温至 34.5 °C 过程中材料内部 C, D 两点的位移和应变变化

Fig. 9 Out-of-plane displacement and strain variation curves at points C and D as temperature varying from 37 °C to 34.5 °C

## 5 结 论

本文使用光学干涉谱域相位对照 B 扫描方法,对机械载荷/热载荷作用下树脂基复合材料的变形进行了离面位移场和应变场的动态测量。实验结果显示,与其他完好部分相比,材料孔洞缺陷周围区域在受力变形时的位移量和应变明显更大,特别是在材料热变形过程中表现得更为明显。实验结果表明,该测量方法具有透视测量材料内部的能力,能够测量树脂基复合材料表层以下 1 mm 深度的连续变形情况;测量精度高,能达到亚微米量级;测量速度快,能对材料的变形过程进行

动态测量。系统的测量速度主要取决于拍摄过程中相机的曝光时间,曝光时间设置为 50 ms 以上就能够观测到材料的内部信号,即最快的测量速度为 10 Hz。但是当曝光时间较短时,可观测到的材料内部信号较弱,测量深度也较浅,因此为了保证足够的测量深度,本文设置完成一次测量的时间为 250 ms,测量速度为 2 Hz。未来使用高灵敏度和高速相机( $>2\ 000$  frame/s)可以使测量速度达到 1 000 Hz。但是该测量方法能够穿透材料的深度较浅,约为 1~1.5 mm。

综上所述,光学干涉谱域相位对照 B 扫描方法特别适合树脂基复合材料内部变形的高精度动态测量,为材料力学特性的分析提供了新的手段。

### 参考文献:

- [1] 李志君. 先进复合材料的无损检测[J]. 宇航材料工艺, 2000(5):28-31.  
LI ZH J. Non-destructive testing of advanced composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000(5):28-31. (in Chinese)
- [2] 王成亮,杨波. 飞机复合材料超声红外无损检测实验研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 376-379.  
WANG CH L, YANG B. Experimental research on ultrasound infrared thermography nondestructive testing for aerial composite materials[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(4): 376-379. (in Chinese)
- [3] 汪星明,郭耀红,朱庆友,等. 复合材料无损检测研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012, S1:261-265.  
WANG X M, GUO Y H, ZHU Q Y, *et al.*. Progress in research of nondestructive testing technique of composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012, S1:261-265. (in Chinese)
- [4] 龚之明,叶帮础. 用云纹干涉法测定表面复合材料层板面内位移场及其导数场[J]. 实验力学, 1990, 5(4): 414-420.  
GONG ZH M, YE B CH. Application of Moire interferometry in measuring in plane displacement and its derivative of composite laminate with surface crack[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1990, 5(4):414-420. (in Chinese)
- [5] 顾国庆,王开福. 复合材料层合板低速冲击损伤激光散斑干涉无损检测研究[J]. 应用激光, 2012, 32(6):527-531.  
GU G Q, WANG K F. NDT of low-velocity impact damages in composite laminates using speckle interferometry[J]. *Applied Laser*, 2012, 32(6):527-531. (in Chinese)
- [6] 俞海,郭荣鑫,夏海廷,等. 数字图像相关法在 WC/Cu 复合材料线膨胀系数测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2696-2703.  
YU H, GUO R X, XIA H T, *et al.*. Application of digital image correlation method in measuring linear expansion coefficients of WC/Cu composites[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2696-2703. (in Chinese)
- [7] RUIZ P D, ZHOU Y, HUNTLEY J M, *et al.*. Depth-resolved whole-field displacement measurement using wavelength scanning interferometry[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(7): 679-683.
- [8] RUIZ P D, HUNTLEY J M, MARANON A. Tilt scanning interferometry: a novel technique for mapping structure and three-dimensional displacement fields within optically scattering media[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 2006, 462(2072): 2481-2502.
- [9] De la TORRE-IBARRA M, RUIZ P D, HUNTLEY J M. Double-shot depth-resolved displacement field measurement using phase-contrast spectral optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21):9643-9656.
- [10] XU J, LIU Y, DONG B, *et al.*. Improvement of the depth-resolution in the depth-resolved wavenu-

mber-scanning interferometry using multiple uncorrelated wave-number bands [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(20): 4890-4897.

- [11] 董博, 徐金雄, 白玉磊, 等. 快速和高精度透视测量玻璃纤维/树脂复合材料构件内部的离面位移 [J]. *复合材料学报*, 2014, 31(2): 331-337.  
DONG B, XU J X, BAI Y L, *et al.*. Rapid and

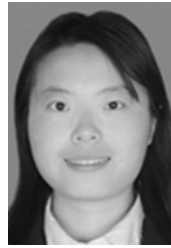
high-precision measurement of out-of-plane displacement inside the glass fiber/polymer composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(2): 331-337. (in Chinese)

- [12] CUSACK R, HUNTLEY J M, GOLDREIN H T. Improved noise-immune phase-unwrapping algorithm [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(5): 781-789.

#### 作者简介:



周延周(1964—),男,吉林长春人,教授,1985年、1992年、2000年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,2003~2007年于英国拉夫堡大学获得博士学生,主要从事3D机器视觉及功能成像等方面的研究。E-mail: optics.zhouyanzhou@qq.com



朱文卓(1988—),女,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为3D机器视觉及功能成像。E-mail: 1241447753@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)