

文章编号 1004-924X(2014)11-2923-07

## 干涉法测量双层树脂基材料内部的压缩位移场分布

周延周\*, 刘运红, 刘羽飞, 徐金雄, 章 云  
(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**建立了基于迈克尔逊干涉结构的深度分辨倾斜激光波数扫描干涉测量系统,对双层树脂基复合材料样品的压缩位移场分布进行了测量及分析。首先,采用分布反馈(DFB)半导体激光器对双层树脂基复合材料样品进行波数扫描干涉测量;然后,采用随机采样傅里叶变换(RSFT)计算双层树脂基复合材料样品加载前后的相位差;最后,运用解卷绕算法对材料样品加载前后的相位差进行解卷绕,计算出各表面压缩位移场的分布。实验结果表明,压缩位移场分布的测量精度达到 $\pm 100$  nm,深度方向的轮廓分辨率约为 0.41 mm,最大测量深度约为 52 mm。该方法能够准确测量出树脂基复合材料的压缩位移场分布,测量时不受树脂基复合材料内部切面弹性模量的影响,具有测量精度高,系统稳定,抗干扰能力强等特点。

**关键词:**波数扫描干涉术;树脂基复合材料;压缩位移场

**中图分类号:** TB332; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.2923

### Measurement of compression displacement fields in dual layer epoxy composites by interferometry

ZHOU Yan-zhou\*, LIU Yun-hong, LIU Yu-fei, XU Jin-xiong, ZHANG Yun

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

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

**Abstract:** A tilt depth-resolved wavenumber-scanning Michelson interferometer was built up to measure and analyze the compression displacement field distributions on the fore, middle and rear surfaces of dual layer epoxy composites. A Distribution Feedback (DFB) diode laser whose wavenumber could be modulated by the temperature was used to perform the wavenumber-scanning interferometric measurement for the dual layer epoxy composites. A Random-Sampling Fourier Transform (RSFT) was designed to evaluate the phase differences of the dual layer epoxy composite samples before and after applying loads. Finally, the unwrapping algorithm was used to unwrap the phase differences for the samples before and after applying loads and the compression displacement field distributions of every surfaces on or inside the epoxy composites were given out. Experimental results indicate that measurement resolutions of the compression displacement field distribution are  $\pm 100$  nm, and the profile resolution in depth and the maximum measurement depth are 0.41 mm and 52 mm, respectively. This method accurately measures the compression displacement field distribution, and its measurement is independent on the internal plane elastic modulus size of resin

收稿日期:2013-11-29;修订日期:2014-01-11.

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)

matrix composites. It is characterized by higher measuring accuracy, stable system and stronger resisting disturbance.

**Key words:** wavenumber-scanning interferometry; epoxy composite; compression displacement field

## 1 引言

随着复合材料制造技术的发展,具有高比模量、高比强度、耐高温等多功能的复合材料越来越多,这些材料在航空航天及各种工业领域中的应用也越来越广泛<sup>[1]</sup>,因此复合材料的力学性能测量变得尤为重要。由于压缩或拉伸是材料的基本力学性能指标,所以在材料力学性能测量时特别关注材料表面或内部的压缩或拉伸位移量的变化。

目前,载荷下复合材料构件的压缩或拉伸位移场的测量方法主要分为两类:一类是传统的应变片法;另一类是高精度的光学测量法,如数字散斑干涉、数字图像及数字体相关算法(DIC/DVC)<sup>[2-3]</sup>。其中,光学测量法具有非接触,高精度等优点,因此越来越多地被应用到复合材料力学性能的检测中。相移干涉测量技术(PSI)于1966年由Carre提出,并在1990年用于被测物体表面的离面与面内位移测量中<sup>[4]</sup>。该技术具有结构简单,调制方便,精度高等优点,但它容易受到外界扰动而产生测量误差<sup>[5]</sup>。ZHOU等提出了电子散斑干涉测量技术(ESPI),利用干涉法,通过测量散斑干涉信号的相位变化来精密测量粗糙物体表面的变形<sup>[5]</sup>。2004年,英国拉夫堡大学J. M. Huntley小组提出波长扫描干涉技术(WSI)测量物体内部的位移场分布。该方法利用半导体激光器的波长可调性质对被测样件进行波长干涉扫描后,提取干涉光强序列的相位信息,测量出被测样件的微小位移量,不仅能进行全场测量而且系统的抗干扰能力强<sup>[6]</sup>。2006年,该研究小组又提出光学干涉谱域相位对照B扫描技术(PCOCT),该技术利用宽带光源的空间调制和干涉光谱的相频特性来测量材料内部的三维变形场,其优点是轴向分辨率高,可进行动态测量<sup>[7]</sup>。2012年,英国拉夫堡大学的P. R. Ruiz等人使用激光波

数扫描法来测量内部混有少量微米级TiO<sub>2</sub>的树脂基复合材料构件内部的位移场分布,其深度方向的轮廓分辨率达到0.068 mm,位移场测量精度为±100 nm,但其视场狭小,仅为1.5 mm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。2013年,广东工业大学XU等人提出了断续波长扫描法测量三维位移场分布<sup>[10]</sup>。本文在此研究的基础上提出了一种深度分辨波数扫描干涉法(DRWSI),通过设计倾斜激光波数扫描干涉的系统 and 算法,透视测量了双层树脂基复合材料样品前后表面及内部中间面的压缩位移场分布。

## 2 实验系统

激光波数扫描干涉测量系统基于迈克尔逊干涉原理,其光路如图1所示。激光控制器控制带有温控模块的激光器发出激光,经过准直透镜变成平行光束,再由50:50的正方体分光棱镜分为两束光,一束光倾斜照射到树脂样品的散斑表面上,另一束光经过偏振片的衰减垂直照射到厚度为6 mm、倾角为6'的参考光楔表面。树脂基复合材料样品散斑表面的反射光束和光楔反射光束再次分别经过正方体分光镜的透射和反射最终在CCD相机(1 024 pixel×1 024 pixel,12 bit)的像平面上叠加形成干涉图形。为了获取更好的干涉图形,在参考光路中通过调节偏振镜P,使光楔的反射光光强与树脂基复合材料样品的反射光光强相匹配。

系统光源为DFB半导体激光器,将它安装在温度控制模块上,并通过激光控制器来驱动。激光器输出的中心波长为860 nm,当工作温度从42℃调节到约20℃时,其输出波长能连续调制1.2 nm,CCD相机连续采集500幅干涉图。系统波数的扫描范围约为 $1.517 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ ,深度方向的轮廓分辨率为0.41 mm,最大测量深度为52 mm,压缩位移的测量精度为±100 nm。

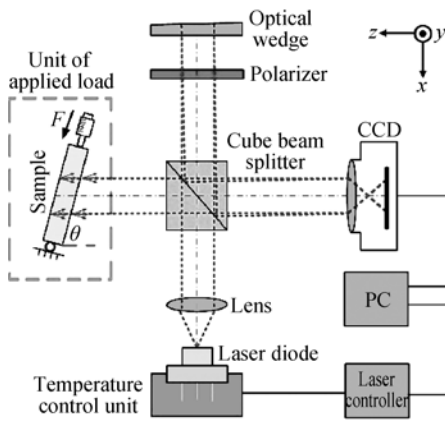


图 1 激光波数扫描干涉测量系统的结构

Fig. 1 Optical configuration of laser wavenumber-scanning interferometry

实验中测量样品为双层树脂基复合材料。树脂基复合材料样品是由环氧树脂和固化剂按 3 : 1 的比例制作,在室温下放置 8 h 固化而成的,尺寸为 70 mm × 55 mm。双层树脂基复合材料样品的制作过程如下:先制作一层 2 mm 厚的环氧树脂,固化后在上面再浇筑一层 2 mm 厚的环氧树脂,固化后制作成为总厚度为 4 mm,有 3 个反射面的树脂基复合材料样品。在实验中被测双层树脂基复合材料样品前后两表面用 2500 目,砂粒大小约为 0.59 μm 的干磨砂纸进行打磨,使其表面散斑点细腻且呈均匀分布。测量视场约为 10.12 mm × 10.12 mm。

如图 2 所示,压缩位移场加载装置主要由两个金属槽和一个金属底板组成,一侧金属槽内安装有圆头千分丝杆,另一侧金属槽内中心分别固定有两个直径为 5 mm,中心距离为 40 mm 的金属钢珠。两个金属钢珠和圆头千分丝杆构成三点负荷加载机构。实验测量前使用圆头千分丝杆对树脂基复合材料样品进行轻微预紧,然后利用底部的高精度旋转平台使树脂基复合材料样品与光轴方向成 80°角,如图 3 所示。通过圆头千分丝杆能对树脂材料样品进行高精度的微小位移量加载,并使样品在加载方向上产生微小的面内位移。因为外加负荷装置在树脂基复合材料样品上产生的只是单纯压缩量,所以实际测量面内位移场分布相当于测量压缩位移场分布。

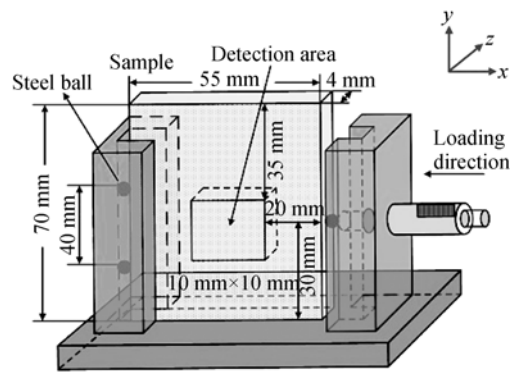


图 2 压缩位移场加载装置

Fig. 2 Unit of applied load on compression displacement

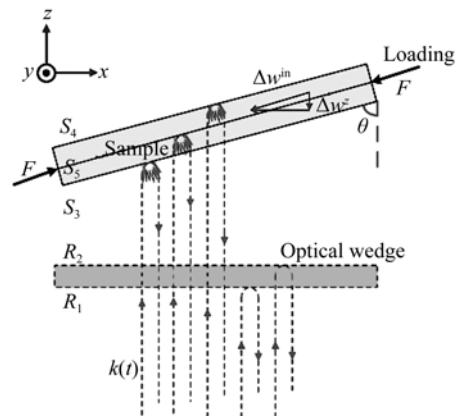


图 3 倾斜干涉原理

Fig. 3 Principle of tilt Michelson interferometry

### 3 激光波数扫描倾斜干涉测量原理

激光波数扫描倾斜干涉原理如图 3 所示。其中,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$  分别代表光楔前后表面和双层树脂基复合材料样品的前、中和后表面,  $\theta$  是树脂基复合材料样品与光轴之间的夹角。激光照射在各表面分别反射,最终在 CCD 相机的像平面上形成干涉图形,通过 CCD 相机连续拍摄的干涉图形序列为:

$$I(x, y, k) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M \sqrt{I_p(x, y) \cdot I_q(x, y)} \cdot \cos \left[ 2\pi \cdot \frac{\Delta_{pq}(x, y)}{\pi} \cdot k + \varphi_{pq0} \right], \quad (1)$$

其中:  $x$ ,  $y$  为空间坐标;波数  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  是激光的波长;  $M$  为反射面的数量,此处  $M$  为 5;  $I_p$ ,  $I_q$  分别为  $p$ ,  $q$  面反射光的光强;  $p$ ,  $q$  分别为深度方向上  $p$  和  $q$  表面;  $\Delta_{pq}(x, y)$  为  $p$  和  $q$  表面之间的光

程差;  $\varphi_{pq0}$  为  $p$  和  $q$  表面之间的初始相位。

对式(1)进行空间 2 维傅里叶变换, 得到:

$$F[I(u, v, k)] = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M \delta[u \pm \Omega_{pq_u}(k), v \pm \Omega_{pq_v}(k)] \cdot \sqrt{I_p \cdot I_q} \cdot \exp[\pm j \cdot \Psi_{pq}(k)], \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Omega_{12_u}(k) = (\Delta\Lambda_{12_x}/\pi) \cdot k \\ \Omega_{12_v}(k) = (\Delta\Lambda_{12_y}/\pi) \cdot k, \\ \Psi_{12}(k) = 2\Lambda_{120} \cdot k + \varphi_{120} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $F$  表示傅里叶变换,  $u$  和  $v$  分别代表  $x$  和  $y$  方向上的 2 维空间频率;  $\delta(u, v)$  是 2 维的狄拉克函数;  $\Omega_{pq_u}(k)$  和  $\Omega_{pq_v}(k)$  分别表示在  $x, y$  方向上  $pq$  面所对应干涉信号峰值处的空间频率;  $\Psi_{pq}$  表示  $pq$  面干涉的空间相位;  $\Lambda_{120}$  为光楔在坐标原点处的光程差,  $\Delta\Lambda_{12_x}$  和  $\Delta\Lambda_{12_y}$  分别为光楔每个像素在  $x$  和  $y$  方向上的光程差变化量;  $\Omega_{12_u}(k)$ ,  $\Omega_{12_v}(k)$  分别是光楔在  $x, y$  方向上的空间频率;  $\Psi_{12}(k)$  是光楔的空间相位;  $\varphi_{120}$  表示光楔表面之间的初始相位。

由式(3)可知, 光楔的空间相位  $\Psi_{12}(k)$  与波数  $k$  成正比关系, 波数  $k$  可以表示为:

$$k = \frac{\Psi_{12}(k) - \varphi_{120}}{2 \cdot \Lambda_{120}}. \quad (4)$$

半导体激光器波数扫描存在非线性。因此采用随机采样傅里叶变换(Random-Sampling Fourier Transform, RSFT)来解决非线性问题<sup>[10]</sup>。

$$\tilde{I}(x, y, f) = F[I(x, y, k)] \otimes F[\omega(k)] \otimes F\left[\sum_{s=1}^S \delta(k - k(s))\right], \quad (5)$$

其中:  $\tilde{I}$  是经 RSFT 后的光强序列;  $\omega(k)$  和  $\sum_{s=1}^S \delta(k - k(s))$  分别是窗口函数和采样函数;  $F$  表示傅里叶变换;  $\otimes$  表示卷积符号;  $S$  表示通过 CCD 相机拍摄到的干涉图形的总数;  $k(s)$  表示 CCD 相机拍摄到的第  $s$  张干涉图形对应的波数值;  $f$  是  $k$  空间傅里叶变换后的频率变量。

根据傅里叶变换的线性性质及狄拉克函数的性质, 式(5)表示为:

$$\tilde{I}(x, y, f) = \sum_{s=1}^S I[x, y, k(s)] \cdot \omega[k(s)] \cdot \exp[-j \cdot 2\pi f \cdot k(s)]. \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)可得:

$$\tilde{I}(x, y, f) = \sum_{s=1}^S I(x, y, k(s)) \cdot \omega(k(s)) \cdot \exp\left[-j \cdot 2\pi f \cdot \left(\frac{\Psi_{12}(k)}{2 \cdot \Lambda_{120}} - \frac{\varphi_{120}}{2 \cdot \Lambda_{120}}\right)\right]. \quad (7)$$

在式(7)中,  $2\pi f \varphi_{120} / (2\Lambda_{120})$  不影响幅频特性, 仅与系统几何结构决定的频率  $f$  呈比例关系; 干涉光强频谱与时间序列空间相角  $\Psi_{12}(k)$  的采样和排列无关。

将光强序列式(1)代入式(7)可得:

$$\tilde{I}(x, y, f) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M \sqrt{I_p(x, y) \cdot I_q(x, y)} \cdot \tilde{W}[f(x, y) \pm f_{pq}(x, y)] \cdot \exp[\pm j \cdot \varphi_{pq}(x, y)], \quad (8)$$

$$f_{pq}(x, y) = \frac{\Lambda_{pq}(x, y)}{\pi}, \quad (9)$$

$$\varphi_{pq}(x, y) = 2\Lambda_{pq}(x, y) \cdot k_0 + \varphi_{pq0}(x, y), \quad (10)$$

其中:  $\tilde{W}$  是窗口函数的频谱表达式;  $f_{pq}(x, y)$  和  $\varphi_{pq}(x, y)$  分别是  $p, q$  面所对应的干涉信号的频率和相位;  $k_0$  是中心波数。

根据正切函数特性, 式(10)中的相位  $\varphi_{pq}(x, y)$  卷绕在  $[-\pi, \pi]$ , 因此称之为卷绕相位。假设加载进给前后的卷绕相位分别是  $\varphi_{pq}^A(x, y)$  和  $\varphi_{pq}^B(x, y)$ , 它们的相位差是:

$$\Delta\varphi_{pq}^{\text{wrp}}(x, y) = \tan^{-1}\left[\frac{E_1}{E_2}\right], \quad (11)$$

$$E_1 = \sin[\varphi_{pq}^B(x, y)] \cdot \cos[\varphi_{pq}^A(x, y)] - \cos[\varphi_{pq}^B(x, y)] \cdot \sin[\varphi_{pq}^A(x, y)], \quad (12)$$

$$E_2 = \cos[\varphi_{pq}^B(x, y)] \cdot \cos[\varphi_{pq}^A(x, y)] + \sin[\varphi_{pq}^B(x, y)] \cdot \sin[\varphi_{pq}^A(x, y)]. \quad (13)$$

$\Delta\varphi_{pq}^{\text{wrp}}(x, y)$  也卷绕在  $[-\pi, \pi]$ , 因此需要对加载前后的相位分别解卷绕, 得到相位差:

$$\Delta\varphi_{pq}^{\text{unwrp}}(x, y) = \text{unwrap}[\Delta\varphi_{pq}^{\text{wrp}}(x, y)]. \quad (14)$$

解卷绕的方法参考文献[11]。由式(10)和式(14)可得加载前后的树脂基复合材料样品内部  $z$  轴方向的位移场分布:

$$\Delta w_{pq}^z(x, y) = \frac{\Delta\varphi_{pq}^{\text{unwrp}}(x, y)}{2k_0 \cdot n_{pq}}, \quad (15)$$

其中:  $n_{pq}$  是  $p, q$  两表面之间的折射率。

如图 3 所示, 树脂基复合材料样品与参考光

轴之间的夹角为  $\theta$ 。加载进给沿着树脂基样件的表面只产生压缩的位移场,因为压缩位移在树脂基样件内是面内位移,所以压缩位移  $\Delta w_{pq}^{in}(x, y)$  通过  $z$  方向上的位移量推出:

$$\Delta w_{pq}^{in}(x, y) = \frac{\Delta w_{pq}^z(x, y)}{\cos \theta}. \quad (16)$$

系统深度方向的轮廓分辨率及最大测量深度分别为:

$$\delta \Delta = \frac{2\pi}{\Delta k}, \quad \Delta_M = \frac{S \cdot \pi}{2 \cdot \Delta k}, \quad (17)$$

其中:  $\Delta k$  为波数扫描范围;  $S$  为波数扫描范围内 CCD 相机拍摄的干涉图像总数。

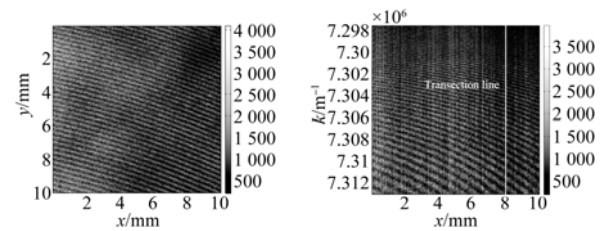
### 4 实验与结果分析

首先将双层树脂基复合材料样品安装在压缩位移场加载装置上,用圆头千分尺对它进行轻微预紧,利用加载装置上的旋转平台使样品与光轴方向成一个角度  $\theta = 80^\circ$ ; 然后通过千分尺对样品进行 4 组加载进给实验,加载进给量分别为 0, 5, 10, 15  $\mu\text{m}$ 。在这 4 组实验中,都需将激光器的当前工作温度从 40  $^\circ\text{C}$  调制到 20  $^\circ\text{C}$ ,期间 CCD 相机分别采集到 500 幅干涉图形,接着对采集到的双层树脂基复合材料样品的各组干涉信号数据进行分析 and 处理,进而得出压缩产生的面内位移场的分布。

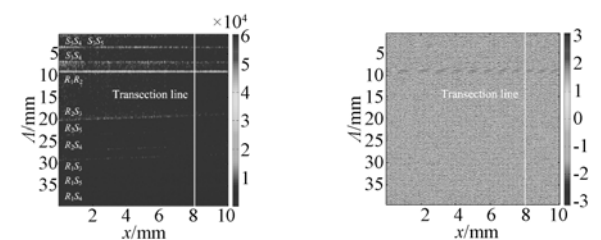
在进行数据的分析和处理时,先对拍摄的所有干涉图形进行空间 2 维傅里叶变换,通过提取每幅干涉图中光楔干涉信号峰值处的相位,根据式(4)得到波数  $k$  的变化序列,从而得到波数扫描范围,再运用式(17)即可得到系统深度方向的轮廓分辨率及最大测量深度。然后将测得的波数序列代入到式(7)中,再对双层树脂基复合材料样品的全视场干涉图形上所有像素对应的  $R_2 S_3$ ,  $R_2 S_5$ ,  $R_2 S_4$  两表面之间的干涉信号进行 RSFT,提取峰值处的相位,构成对应其峰值处的卷绕相位图,其中  $R_2$  为光楔的后表面,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$  分别为样品的前表面、后表面、中间面。这些相位的值都卷绕在  $[-\pi, \pi]$ 。接着根据式(11)~式(13)得到加载前后对应峰值处的卷绕相位差  $\Delta \varphi_{pq}^{wrp}(x, y)$ ,

利用公式(14)及参考文献[11]的方法对它进行解卷绕,得到解卷绕相位差  $\Delta \varphi_{pq}^{wrp}(x, y)$ ,最后根据式(15)~式(16)得到压缩位移。

图 4 (b) 是双层树脂基复合材料样品  $y = 5 \text{ mm}$  这一行的干涉信号,对它进行 RSFT 后的幅频和相频图分别如图 4 (c)、(d) 所示。尽管树脂基复合材料样品是散斑表面,但在图 4 (c) 中峰值点处的幅值分别代表双层树脂基复合材料样品中  $S_5 S_4$ ,  $S_3 S_5$ ,  $S_3 S_4$ ,  $R_1 R_2$ ,  $R_2 S_3$ ,  $R_2 S_5$ ,  $R_2 S_4$ ,  $R_1 S_3$ ,  $R_1 S_5$  和  $R_1 S_4$  表面的干涉信号清晰可见,其中在图 4 (c) 中可以明显看到第一个峰值位置处  $S_5 S_4$ ,  $S_3 S_5$  表面干涉信号重合,这是因为双层树脂基复合材料样品的中间面  $S_5$  在正中间,与前表面  $S_3$  和后表面  $S_4$  的距离均为 2 mm,所以干涉信号对应的光程差相同。



(a) 激光干涉图  
(a) Fringe pattern  
(b)  $y = 5 \text{ mm}$  处的干涉光强序列  
(b)  $k$ -domain interference pattern at line  $y = 5 \text{ mm}$



(c) (b)图 RSFT 后的幅频特征图  
(c) Amplitude map after RSFT at line  $y = 5 \text{ mm}$   
(d) (b)图 RSFT 后的相频特征图  
(d) Phase map after RSFT at line  $y = 5 \text{ mm}$

图 4 树脂基复合材料样品干涉信号

Fig. 4 Interferometric signals of epoxy sample

在加载进给量分别为 5, 10, 15  $\mu\text{m}$  下, 样品前表面( $S_3$ )、中间面( $S_2$ )和后表面( $S_1$ )的压缩位移场分布及其等高线分布如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。图 5 中的(a)、(c)、(e)为压缩位移场分布图, (b)、(d)、(f)为压缩位移场的等高线分布图,  $x$  和  $y$  表示视场, 颜色表征压缩位移的变化值。由于在解卷绕中将左边的视场边界初始相位值都设为零, 因此测量结果是视场内相对的压缩位移场分布。在图 5 中可以发现, 树脂材料样品各表面在不同加载量下测得的由压缩产生的面内位移量要比实际加载的进给量小。根据力学原理, 在加载点附近压缩产生的面内位移量应该是最小的, 其他区域的压缩位移量延着加载点方向向左递减。而实际测量区域在被测树脂基复合材料样品的中心位置, 测量视场远离加载点区域, 所以测量得到的压缩产生的面内位移量小于实际加载量。通过压缩位移场等高线分布图可以清楚看出被测树脂基复合材料各个面受力后力的传播方向及变化规律。实验结果表明, 压缩位移场量在不同加载量下的位移场基本上呈线性变化, 由此证明了实验方法的正确性。

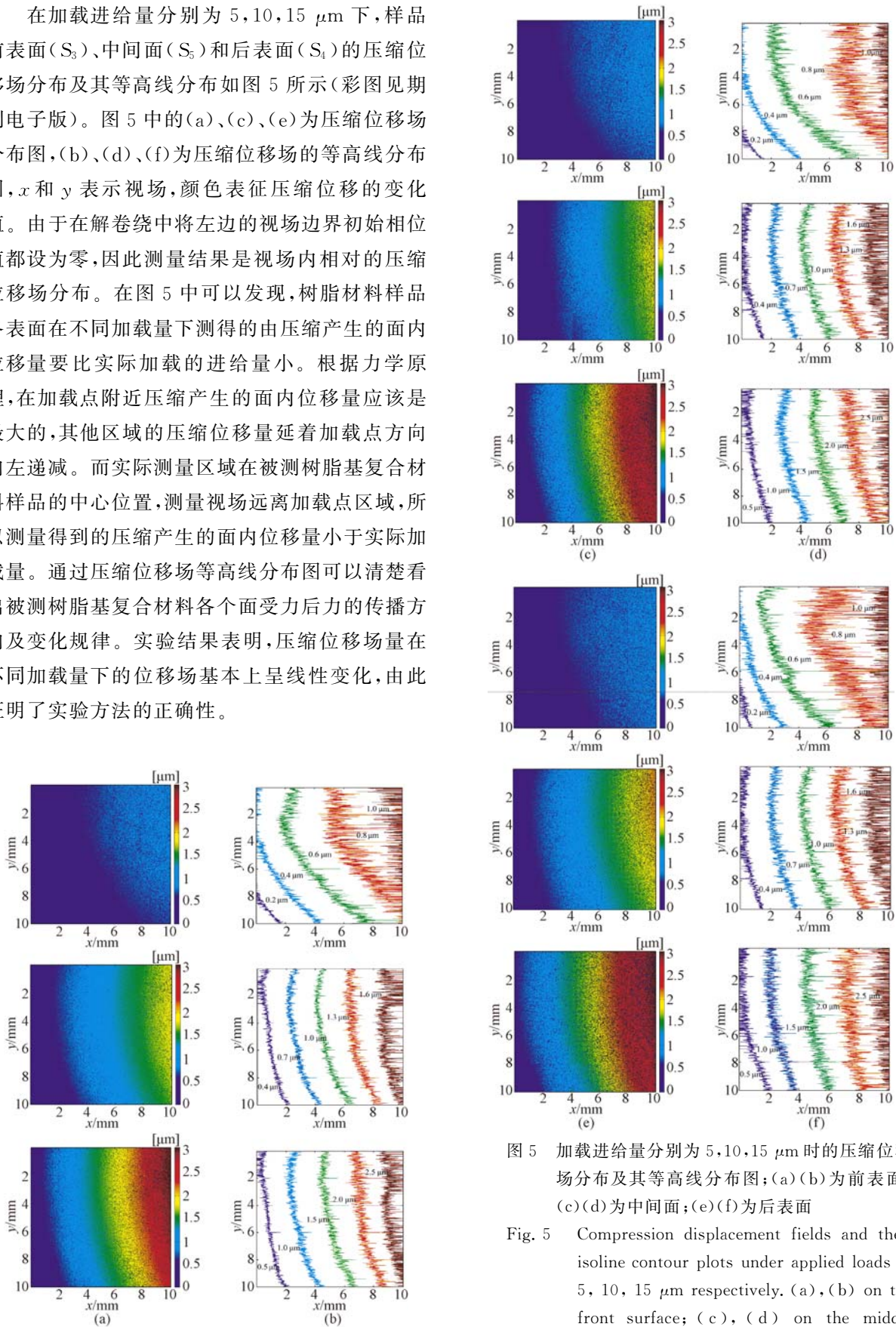


图 5 加载进给量分别为 5, 10, 15  $\mu\text{m}$  时的压缩位移场分布及其等高线分布图; (a) (b) 为前表面; (c) (d) 为中间面; (e) (f) 为后表面

Fig. 5 Compression displacement fields and their isoline contour plots under applied loads of 5, 10, 15  $\mu\text{m}$  respectively. (a), (b) on the front surface; (c), (d) on the middle surface; (e), (f) on the rear surface

## 5 结 论

本文提出了一种基于激光波数扫描倾斜干涉测量透明或半透明树脂基复合材料内部表面在不同加载量下的压缩位移场分布的方法,并构建了激光波数扫描倾斜干涉测量系统。该系统压缩位移的测量精度为 $\pm 100$  nm, $x$ 、 $y$ 方向上的测量分

辨率为 $9.88\ \mu\text{m}$ ,深度方向的轮廓分辨率为 $0.41$  mm。实验结果表明,此方法的测量精度高,不受树脂基复合材料内部切面弹性模量的影响,且系统稳定,抗干扰能力强,是一种实用性好的光学透视测量方法,在复合材料力学性能检测方面具有较好的应用前景。通过扩宽波数扫描范围来进一步提高深度分辨率是今后研究的重点。

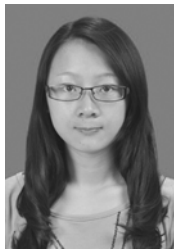
### 参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-10.  
DU SH Y. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] PAN B. Recent progress in digital image correlation [J]. *Exp. Mech.*, 2011, 51(7): 1223-1235.
- [3] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(7): 1637-1640.  
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1637-1640. (in Chinese)
- [4] RASTOGI P K. *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques* [M]. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [5] ZHOU Y, WILDMAN R D, HUNTLEY J M. Measurement of the mechanical properties of granular packs by wavelength scanning interferometry [J]. *Philos. T. R. Soc. A*, 2010, 466(3): 789-808.
- [6] RUIZ P D, HUNTLEY J M. Depth-resolved whole-field displacement measurement by wavelength-scanning electronic speckle pattern interferometry [J]. *Applied Optics*, 2004(6): 679-683.
- [7] MANUEL H, de la TORRE-LBARRA, RUIZ P D, *at al.*. Double-shot depth-resolved displacement field measurement using phase-contrast spectral optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 9643-9649.
- [8] BURLISON B S H, RUIZ P D, HUNTLEY J M. Evaluation of the performance of tilt scanning interferometry for tomographic imaging and profilometry [J]. *Optics Communications*, 2012, 285: 1654-1661.
- [9] CHAKRABORTY S, RUIZ P D. Measurement of all orthogonal components of displacement in the volume of scattering materials using wavelength scanning interferometry [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2012, 29(9): 1776-1785.
- [10] XU J, LIU Y, DONG B, *et al.*. Improvement of the depth-resolution in the depth-resolved wavenumber-scanning interferometry using multiple uncorrelated wave-number bands [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(20): 4890-4897.
- [11] HUNTLEY J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1989, 28(16): 3268-3270.

### 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,2007年于英国拉夫堡大学获得博士学位,主要从事3D机器视觉及功能成像等方面的研究。E-mail: optics.zhoyanzhou@qq.com



刘运红(1990—),女,广东梅州人,硕士研究生,2013年于北京理工大学珠海学院获得学士学位,主要从事3D机器视觉及功能成像的研究。E-mail: 754408285@qq.com