

## 投影辅助的数字剪切散斑干涉扫描检测技术

李欣<sup>1</sup>, 陈永<sup>2</sup>, 李伟仙<sup>1</sup>, 李洋洋<sup>3</sup>, 郑磊<sup>2</sup>, 吴思进<sup>1</sup>

- (1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;
2. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
3. 大恒新纪元科技股份有限公司, 北京 100080)

**摘要:** 数字剪切散斑干涉技术已被广泛应用于复合材料无损检测, 但常规检测面积有限, 难以完成大尺寸复合材料的缺陷检测。提出了一种投影辅助数字剪切散斑干涉大尺寸复合材料扫描检测方法, 该方法基于数字剪切散斑干涉技术并利用辅助投影引入额外表面特征, 通过分视场间投影图的单应性矩阵计算分视场间实物图和散斑干涉图的全局匹配和坐标统一, 完成了投影图-实物图-干涉图的多视场扫描与匹配拼接, 同时在单视场检测引入  $4f$  光路及超广角镜头扩大单次检测面积。实验结果表明: 此扫描检测系统能够实现缺陷位置、尺寸较精确的测量, 位置定位均方根误差为 7.0 mm, 尺寸测量误差的均方根值为 4.9 mm。在 1.2 m 的工作距离下单次检测面积可达 600 mm×500 mm, 全局扫描检测面积高达 3.5 m×4.0 m。此方法具备抗刚体位移干扰强, 缺陷检测灵敏度高的优点, 适合大尺寸高性能复合材料无损检测现场使用。

**关键词:** 数字剪切散斑干涉; 大尺寸; 投影辅助; 无损检测; 复合材料

**中图分类号:** TH741      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210509

## Projection aided digital shearography scanning detection technology

Li Xin<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>2</sup>, Li Weixian<sup>1</sup>, Li Yangyang<sup>3</sup>, Zheng Lei<sup>2</sup>, Wu Sijin<sup>1</sup>

- (1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
3. Daheng New Epoch Technology, Inc, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Digital shearography has been widely used in non-destructive testing of composite materials. But the conventional detection area is limited and the defect detection of large-size composite materials is difficult to achieve. A digital shearography assisted with projection scanning detection for large-size composite materials was introduced. Based on digital shearography and the auxiliary projection which could project additional surface features, global matching and coordinate unification of the sub-view original images and the speckle interferograms were calculated by the homography matrix of the corresponding projection images to realize the multi-field scanning and matching stitching of projection, origin, and interferogram images. At the same time, a  $4f$  optical path and an ultra-wide-angle lens were imported for the one detection to expand the detection area. Experimental results show that the scanning detection system can achieve more accurate measurement of the

收稿日期: 2021-05-05; 修订日期: 2021-06-11

基金项目: 国家自然科学基金 (52075044, 52075045)

作者简介: 李欣, 男, 硕士生, 主要从事数字剪切散斑干涉等方面的研究。

导师简介: 李伟仙, 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事机器视觉、数字散斑干涉等方面的研究。

defect position and size. The root mean square error of location positioning is 7.0 mm, and the root mean square value of dimension measurement error is 4.9 mm. At a working distance of 1.2 m, the single detection area can reach 600 mm×500 mm and the global scanning detection area can reach 3.5 m×4.0 m. This method has the advantages of strong resistance to rigid body displacement interference and high sensitivity of defect detection, which is suitable for non-destructive testing of large-size and high performance composite materials.

**Key words:** digital shearography; large-size; projection assistance; non-destructive testing; composite materials

## 0 引言

随着材料加工生产工艺的成熟及制造工业的快速发展,复合材料以其质量轻、强度高和良好的耐腐蚀性能等优点逐渐取得了市场的普遍认可。尤其是在航空航天领域,使用需求显著增长,在航天结构件中的复合材料占比获得大幅度提升<sup>[1-2]</sup>。比如波音公司的 B787 梦想飞机复合材料的用量达到了 50%,比 B777 增加 40%;“风云二号气象卫星”和“神舟”系列飞船的主承力结构件也是碳纤维/环氧复合材料。近年来复合材料在各行各业快速发展,大面积复合材料的需求和使用也将会越来越广泛,如飞机机身机翼、太空卫星帆板、火箭发动机外壳、风力发电机的巨大扇叶等<sup>[3-5]</sup>。针对大尺寸复合材料使用占比的提升,为了充分发挥重量轻和机械性能优的特点,需要可靠的无损检测方法避免复合材料缺陷引发事故。

无损检测技术利用材料内部存在的缺陷所引起的物理特性变化来实现材料内部或表面缺陷检测,并对缺陷的位置、类型、数量或尺寸等做出判断和评价,主要包括超声检测、X 射线检测、红外热成像检测、电涡流检测等。超声检测利用超声波在材料传播时产生的携带材料内部信息的回波进行缺陷评估<sup>[6]</sup>,该方法需要使用耦合剂,不仅容易破坏材料表面特性而且检测效率不高。X 射线检测是通过 X 射线源及其配备的检测器得到材料的可视化散射图像来评估缺陷<sup>[7]</sup>,但该方法要求安全防护等级高,不适合现场检测。红外热成像检测利用检测材料内部热梯度分布来评估缺陷损伤<sup>[8-9]</sup>,此方法对被测工件的传热性能有较高的要求,适用范围不大。电涡流检测通过线圈接近导电被测物时测得阻抗和存在缺陷建立的关联来进行缺陷评估<sup>[10]</sup>,该方法要求被测材料有良好的导电性,适用范围仍然不大。综上,传统的超声波、X 射线、红外热成像、电涡流等无损检测

存在检测效率低、现场要求高或材料适用性较差等问题,难以满足大尺寸复合材料的测试需求。因此,研究大尺寸复合材料的快速无损缺陷检测方法具有重要的意义。

数字剪切散斑干涉技术具有对刚体位移不敏感、检测灵敏度强等优点,近年来在应变测量、振动分析、无损检测等方面得到了广泛应用<sup>[11-13]</sup>。剪切散斑干涉技术通过探测被测物加载前后缺陷部位的条纹来检测其缺陷位置、尺寸,尤其适用于复合材料的夹杂、脱粘等内部缺陷以及外部冲击损伤检测。在航空器部件、复合材料结构中的脱粘、裂纹和气孔等缺陷检测中发挥了重要的作用<sup>[14]</sup>。然而传统迈克尔逊剪切散斑干涉技术由于受光学结构视场角的限制,单次检测面积很小,尽管 4f 光学系统设计将视场角进行了提高,视场角超越了理论值 28°这一限制,也依然无法直接满足大尺寸测量需求<sup>[15-16]</sup>。

文中提出了一种基于数字剪切散斑干涉技术的投影辅助大尺寸复合材料扫描检测方法,通过投影辅助进行不同视场间的匹配使全场缺陷定位精确,同时利用 4f 光路并配备超广角镜头扩大单次检测面积,更好地提升扫描检测效率。投射辅助与二维位移台配合可实现多视场扫描拼接,全局检测面积高达 3.5 m×4 m,能够满足大尺寸的复合材料全场无损检测需求。

## 1 检测原理

### 1.1 缺陷检测

当复合材料表面及浅表面层存在夹杂、脱粘等内部缺陷时,随着外部负载的变化,缺陷和材料本身性质不同,在缺陷所在的材料外表面会产生变形,使得缺陷处空间位移梯度发生变化。传统数字剪切散斑干涉光路一般为迈克尔逊剪切结构,如图 1 所示。激光器输出的相干光照射到被测物表面产生漫反射,反

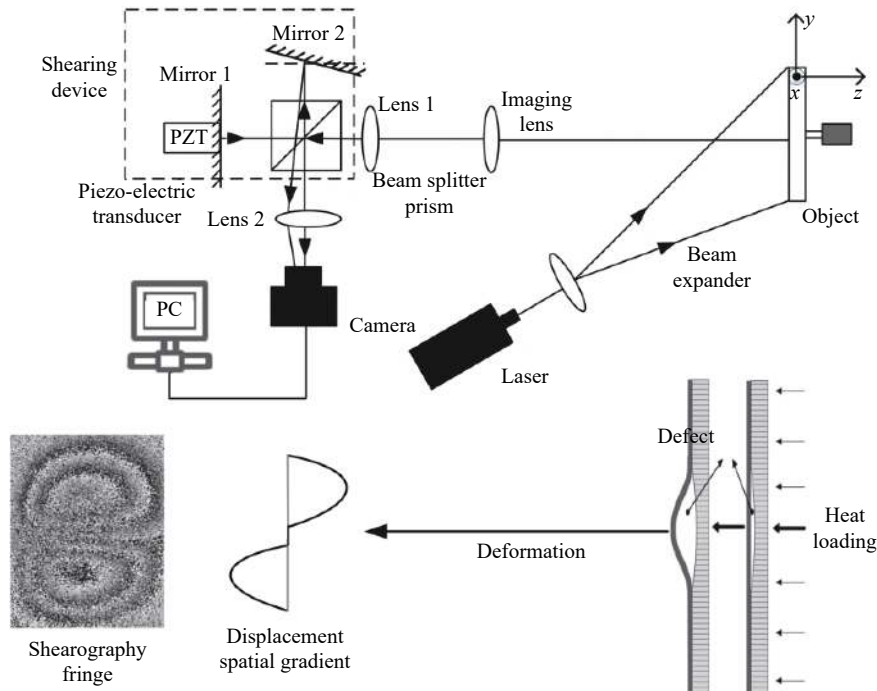


图 1 缺陷检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of defect detection

射光进入迈克尔逊结构后在倾斜的平面镜 2 处与入射光产生一个微小的角度错位, 最终在图像传感器前发生干涉。文中在迈克尔逊剪切结构前后嵌入焦距相互匹配的透镜 1、2 组成 4f 光路, 透镜 1 的前焦面作为输入面, 透镜 2 的后焦面作为输出面, 两透镜焦距相匹配, 图像大小比例不变, 图像能够完整复原<sup>[6]</sup>。检测视场角为:

$$\alpha = 2\arctan \frac{h}{2f} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为视场角度;  $h$  为相机靶镜尺寸;  $f$  为成像镜头的焦距, 通过选取合适的焦距可以扩大视场角。当激光器和相机被布置在  $xoz$  平面, 且剪切量在  $x$  轴上时, 假设入射光与中心轴的夹角很小, 根据剪切散斑干涉原理, 位移空间梯度可近似表示为:

$$\Delta_{\varphi}(x, y) \approx \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \cdot \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \quad (2)$$

式中:  $\Delta_{\varphi}(x, y)$  为平面上某一点  $(x, y)$  的干涉相位差;  $\lambda$  为激光器的波长;  $\delta x$  为  $x$  轴上的剪切量;  $\partial w(x, y)/\partial x$  为点  $(x, y)$  处  $z$  轴位移分量  $w$  在  $x$  方向上的空间位移梯度。当剪切图像  $(x, y)$  处存在图 1 所示的剪切散斑条纹时, 则表明此处位置存在相位差, 空间梯度不为零, 存在材料缺陷。这就是剪切散斑干涉技术进行缺

陷位置和尺寸检测的基本原理。通过公式 (2) 可以发现, 相位差只和空间位移梯度有关, 而与位移量无关, 因此剪切散斑干涉测量具有对刚体位移不敏感的优点, 抗干扰能力强, 适合实际现场应用。

### 1.2 大尺寸扫描与拼接

剪切散斑干涉单次检测范围有限, 利用二维移动台进行分视场扫描检测是扩大检测面积的有效手段。然而复合材料表皮多为铝蒙皮和碳纤维板, 实物图缺乏能匹配的纹理, 见图 2(b); 剪切干涉图的散斑效应明显, 也缺乏能匹配的特征, 见图 2(c); 因此, 无法直接利用实物图和散斑图进行多视场间的视场匹配, 完成多视场缺陷坐标位置的全局统一。文中利用辅助投影引入额外表面特征, 见图 2(a), 通过分视场间投影图的单应性矩阵计算分视场间实物图和散斑干涉图的全局匹配和坐标统一, 形成了投影图—实物图—干涉图的多视场扫描与匹配拼接检测原理。

对于一个分视场  $V_i$ , 通过光源切换可以依次采集投影图  $T_i$ , 实物图  $S_i$  和干涉图  $I_i$ , 如图 2 所示。由于采集过程只切换光源, 不改变相机与被测物的相对位置关系, 因此如果分视场  $V_i$  的投影图  $T_i$  和分视场  $V_j$  的投影图  $T_j$  之间的单应性变换矩阵是  $H_{ij}$ , 则对应的实物图  $S_i$  和实物图  $S_j$ , 以及干涉图  $I_i$  和干涉图  $I_j$  之

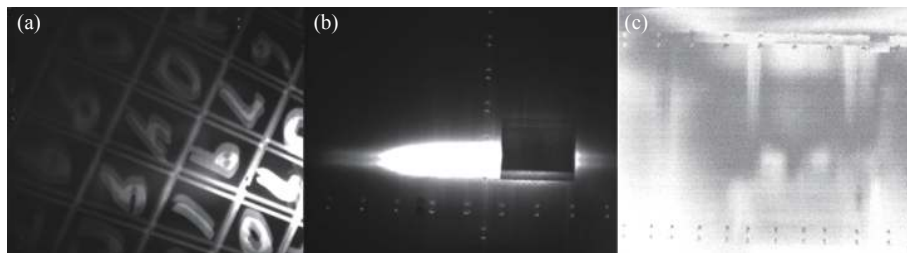


图 2 图像特征。(a) 实物图; (b) 散斑干涉图; (c) 投影图

Fig.2 Image feature. (a) Physical picture; (b) Speckle pattern interferometry; (c) Projection pattern

间的单应性变换矩阵仍然是  $H_{ij}$ , 即:

$$T_j = H_{ij}T_i \quad (3)$$

$$S_j = H_{ij}S_i \quad (4)$$

$$I_j = H_{ij}I_i \quad (5)$$

有共同视场的投影图  $T_i$  和  $T_j$  利用投射的辅助图案, 通过图像特征提取 (如 Surf 特征, Sift 特征等<sup>[17-18]</sup>) 及其匹配算法可以计算投影图之间的单应性矩阵  $H_{ij}$ , 再根据公式 (4) 和 (5) 建立实物图以及干涉图的多视场匹配与拼接。

## 2 实验与分析

### 2.1 测量系统

如图 3~4 所示, 剪切散斑干涉测头、激光光源以

及加热灯 (加载组件) 等三部分作为移动测头被安装在一个二维位移平台上。实验系统中的迈克尔逊剪切装置由两个直径为 12.7 mm 的反射镜和一个边长为 12.7 mm 的分光棱镜组成, 其中平面镜 1 后安装一个压电陶瓷作为相移器, 4f 系统则由两个焦距均为 40 mm 相互匹配的平凸透镜组成。工业相机采用北京凯视佳光电设备有限公司的 MU3HS500M 黑白工业相机, 相机的靶面尺寸为 2/3 inch (1 inch=2.54 cm), 成像镜头是日本尼康超广角镜头 (尼克尔系列), 焦距为 14 mm。结合所述器件的参数信息与公式 (1) 可得, 剪切散斑干涉测头在水平方向上的实际视场角可达 33.8°, 垂直方向上的实际视场角可达 28.5°, 突破了传统 28° 的理论值。当工作距离在 1.2 m 左右时, 它

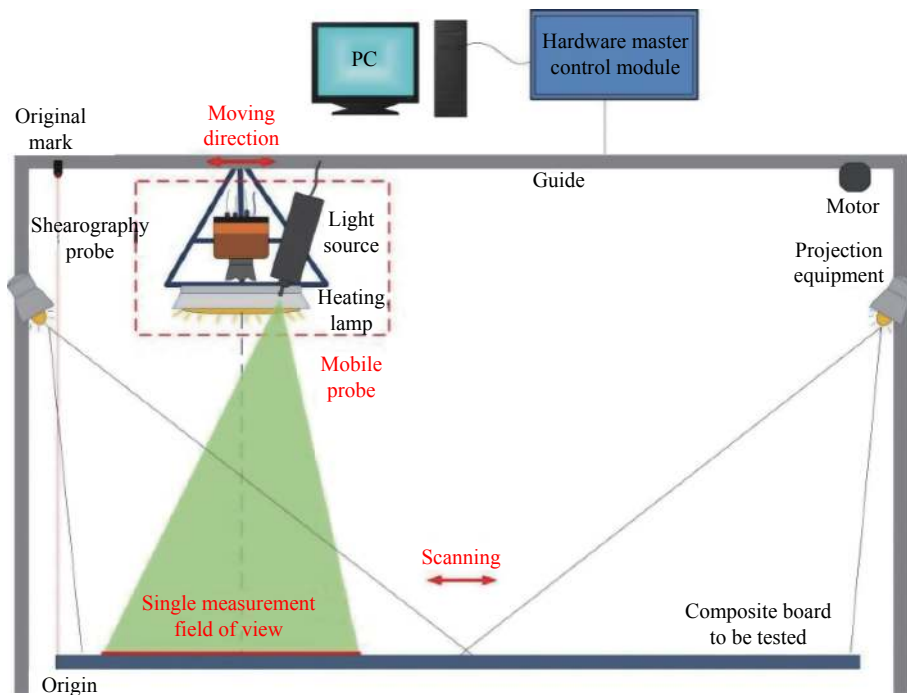


图 3 测量系统

Fig.3 Measuring system





图 4 系统实物

Fig.4 Physical system

能够直接完成被测样件尺寸为 600 mm×500 mm 面积的缺陷检测。激光器采用的是 200 mW 单纵模固体激光器(长春新产业 MSL 系列),中心波长 532 nm。在二维移动台视场不受遮挡的支架处固定 30 W 的投影灯投影设备,投射图案如图 5 所示,当工作距离为 1.5 m 左右时投射面积约为 2 m<sup>2</sup>。结合投影辅助及二维运动台通过移动测头系统可实现被测件无损检测

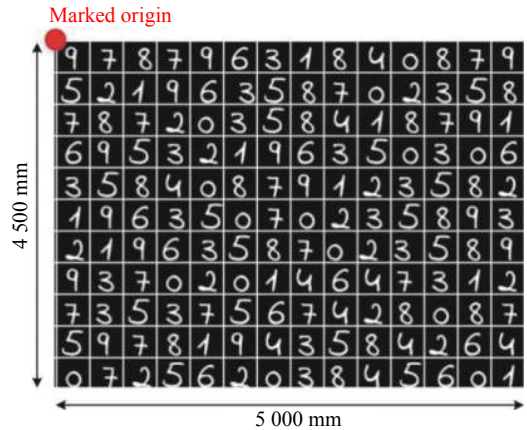


图 5 投影图案

Fig.5 Projection pattern

的覆盖面积为 3.5 m×4.0 m。

### 2.2 缺陷检测实验

实验的复合材料由蒙皮厚度 0.3 mm 的铝薄板,边长为 5 mm 的铝蜂窝芯格制作而成,样品尺寸 600 mm×500 mm,见图 6(a);图 4 实物系统采集的散斑干涉图像检测结果见图 6(b)。

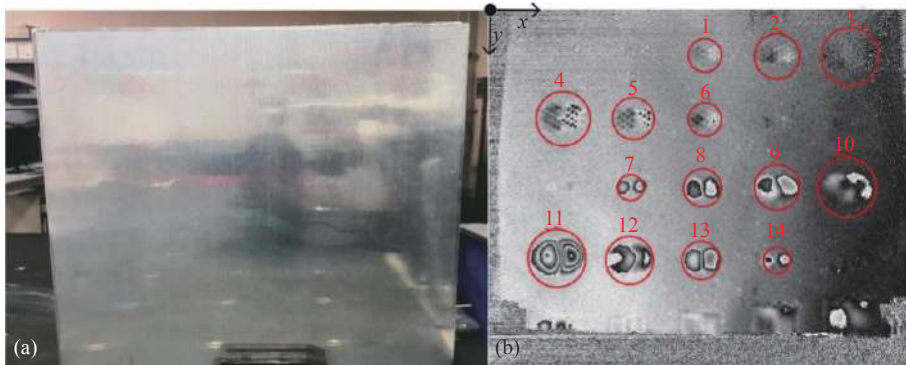


图 6 样品与检测结果。(a) 样品;(b) 检测结果

Fig.6 Samples and test results. (a) Sample; (b) Test result

图 6(b) 所示实物系统检测效果良好,获得的缺陷条纹平滑流畅、背景清晰、缺陷位置和相对大小一目了然。其中缺陷 7 经图像滤波和解包裹获得的离面位移空间梯度如图 7 所示,离面位移空间梯度峰峰值为  $1.36 \times 10^{-4}$ 。通过系统标定,图 6(b) 中的 14 处缺陷的位置和尺寸如表 1 第 2 列和第 5 列所示,这些预制缺陷的实际位置和尺寸如表 1 第 3 列和第 6 列所示。结果表明,缺陷定位的均方根误差为 7.0 mm,此方法能够实现缺陷相对精确的定位;缺陷尺寸测量的均方根误差为 4.9 mm,由于缺陷引起的变形不可能小于缺陷所占面积,因此测量结果会略大于真实值,实

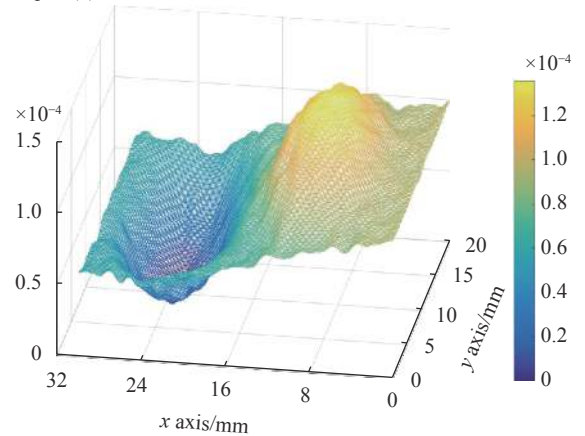


图 7 离面位移空间梯度

Fig.7 Out-of-plane displacement gradients

表 1 缺陷信息

Tab.1 Defect information

Number	Defect location/mm	True location/mm	Location error/mm	Defect size/mm	True size/mm	Size relative error
1	(306.4, 93.7)	(300.0, 100.0)	9.0	33.6	30.0	12.0%
2	(403.1, 94.6)	(400.0, 100.0)	6.2	44.7	40.0	11.8%
3	(505.1, 95.8)	(500.0, 100.0)	6.6	54.9	50.0	9.8%
4	(107.0, 198.7)	(100.0, 200.0)	7.1	52.9	50.0	5.8%
5	(206.4, 194.9)	(200.0, 200.0)	8.2	45.4	40.0	13.5%
6	(305.7, 196.8)	(300.0, 200.0)	6.5	36.7	30.0	22.3%
7	(204.5, 297.9)	(200.0, 300.0)	5.0	28.6	25.0	14.4%
8	(305.7, 294.8)	(300.0, 300.0)	7.7	34.9	30.0	16.3%
9	(406.9, 296.9)	(400.0, 300.0)	7.6	45.3	40.0	13.3%
10	(504.5, 298.7)	(500.0, 300.0)	4.7	56.5	50.0	13.0%
11	(105.1, 396.2)	(100.0, 400.0)	6.4	55.7	50.0	11.4%
12	(206.4, 396.9)	(200.0, 400.0)	7.1	44.8	40.0	12.0%
13	(305.8, 397.7)	(300.0, 400.0)	6.2	33.7	30.0	12.3%
14	(407.0, 394.9)	(400.0, 400.0)	8.6	29.0	25.0	16.0%
RMS	(5.8, 4.0)	(0, 0)	7.0	4.9	0	13.6%

际与这一基本事实相符。

2.3 大尺寸复材检测实验

采用表面光滑的铝蒙皮-铝蜂窝夹心结构材料作为复合材料实验样品。图 8~10 的 (a)~(c) 分别是采集的连续三个视场处的投影图、实物图和散斑干涉图，根据 1.2 节给出的大尺寸拼接算法，首先图 8(a) 和 (b) 通过特征点匹配，可以计算其单应性矩阵为：

$$H_{ab} = \begin{bmatrix} 0.938 1 & -0.025 3 & 284.356 8 \\ -0.030 8 & 0.981 2 & 4.227 3 \\ -0.000 1 & -0.000 2 & 1.000 0 \end{bmatrix}$$

图 8(b) 和 8(c) 通过特征点匹配，又得到两视图的单应性矩阵为：

$$H_{bc} = \begin{bmatrix} 1.061 3 & -0.009 9 & 284.310 6 \\ 0.018 1 & 1.022 5 & -0.374 7 \\ 0.000 2 & 0.000 2 & 1.000 0 \end{bmatrix}$$

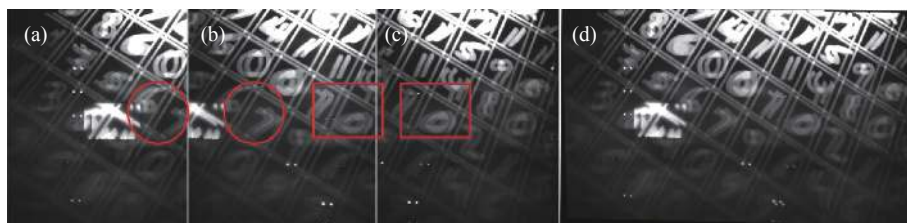


图 8 投影图。(a) 投影视场 1; (b) 投影视场 2; (c) 投影视场 3; (d) 投影全场图像

Fig.8 Projection image. (a) Projection field of view 1; (b) Projection field of view 2; (c) Projection field of view 3; (d) Full-field projection image

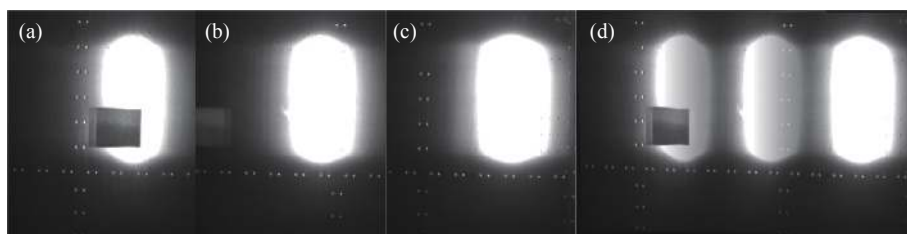


图 9 实物图。(a) 实物视场 1; (b) 实物视场 2; (c) 实物视场 3; (d) 实物全场图像

Fig.9 Physical picture. (a) Physical field of view 1; (b) Physical field of view 2; (c) Physical field of view 3; (d) Full-field physical image

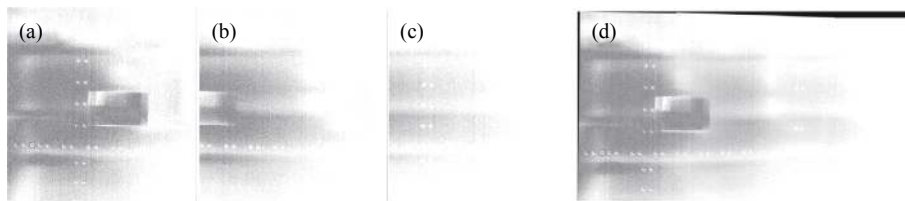


图 10 散斑干涉图。(a) 干涉图 1; (b) 干涉图 2; (c) 干涉图 3; (d) 全场干涉图像

Fig.10 Speckle pattern interferogram. (a) Interferogram 1; (b) Interferogram 2; (c) Interferogram 3; (d) Full-field interferogram

根据上述计算得到的两个单应性矩阵, 投影图进行拼接之后获得拼接后图像 (图 8(d))。同理, 利用上述两个单应性矩阵, 根据公式 (4) 和 (5), 可以拼接图 9~10 的 (a)~(c) 获得实物图和散斑干涉图的拼接后全场图像, 见图 9(d)~10(d)。

实验采用的复合材料板为实际生产成品, 内部并未预制缺陷。其检测结果显示该板被检区域部分无

缺陷分布, 产品质量良好, 检测结果与复合材料板实际情况相符。

另一被测样品为表面粗糙的碳纤维蒙皮-铝蜂窝夹心的圆盘形复合材料, 圆盘直径为  $\Phi 600$  mm。从图 11 中可以看出, 拼接图像完整地还原了整个圆盘的全貌, 并且拼接而成的图像没有错误交叉点, 实物图仍保留了系统的剪切效果。

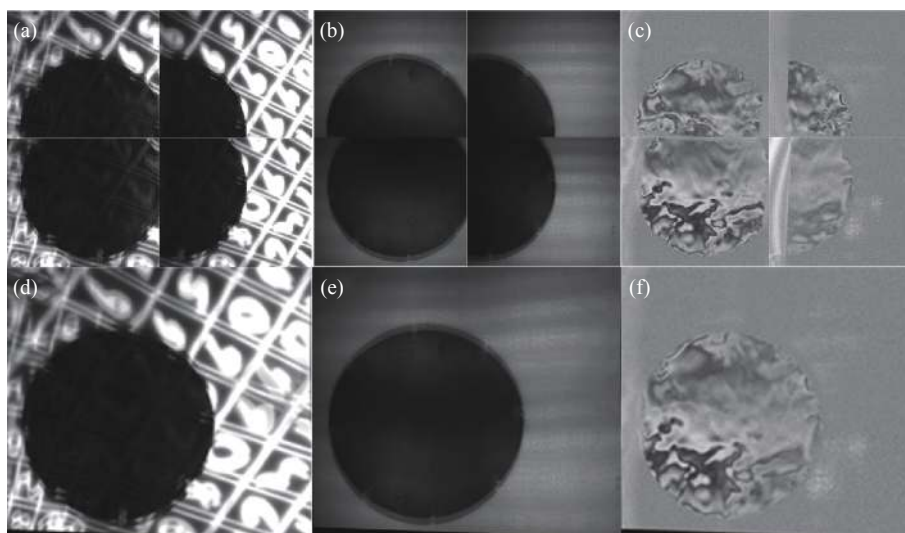


图 11 分视场及全场图像。(a) 分视场投影图像; (b) 分视场实物图像; (c) 分视场干涉图像; (e) 投影图像拼接; (f) 实物图像拼接; (g) 干涉图拼接  
Fig.11 Split field and full-field images. (a) Sub-field projection image; (b) Sub-field physical image; (c) Sub-field interferogram; (e) Projection image stitching; (f) Physical image stitching; (g) Interferogram stitching

结合上述实验结果, 所提出的方法在现有检测技术基础上, 扩大了单次视场的检测面积, 并通过分视场投影图像完成了单视场下采集的实物图像及散斑干涉图的无缝拼接, 有效得到被测复合材料的全尺寸完整图像及对应的检测图像。

### 3 结 论

文中提出了一种投影辅助的数字剪切散斑干涉大尺寸复合材料扫描检测方法, 基于激光剪切散斑干涉技术通过  $4f$  系统及配备的超广角镜头, 剪切测头在

水平方向上的视场角能够达到  $33.8^\circ$ , 垂直方向上的视场角达到  $28.5^\circ$ 。当检测距离在 1.2 m 时, 剪切测头能够在单视场检测面积为  $600\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  下实现缺陷准确定位。缺陷定位的均方根误差为 7.0 mm, 缺陷尺寸测量的均方根误差为 4.9 mm。结合二维运动平台, 利用投影辅助通过视场扫描拼接控制仪器实现超大尺寸复合材料内部缺陷的扫描检测, 可实现最大全场检测面积为  $3.5\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ , 满足大尺寸复材的无损检测需求。该方法能准确确定缺陷的相对位置和大小, 且对检测场地的隔振条件要求不高, 适用于现场条件

下对大尺寸被检复合材料的损伤情况进行高效、高质量的评估。

#### 参考文献:

- [1] Soutis C, Moreira P. Recent advances in structural integrity of engineering composite materials [J]. *Applied Composite Materials*, 2020, 27: 447-448.
- [2] Wang B, Zhong S, Lee T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(4): 1-28.
- [3] McIlhagger A, Archer E, McIlhagger R. Polymer Composites in the Aerospace Industry [M]. 2nd ed. Britain: Woodhead Publishing, 2020: 59-81.
- [4] Harris C E, Starnes J H, Shuart M J. An assessment of the state-of-the-art in the design and manufacturing of large composite structures for aerospace vehicles[C]//Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration, 2001.
- [5] Diamanti K, Soutis C, Hodgkinson J M. Piezoelectric transducer arrangement for the inspection of large composite structures [J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2007, 38(4): 1121-1130.
- [6] El-sabbagh A, Steuernagel L, Ziegmann G. Characterisation of flax polypropylene composites using ultrasonic longitudinal sound wave technique [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45: 1164-1172.
- [7] Kolkoori S, Wrobel N, Zscherpel U, et al. A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials [J]. *Ndt & E International*, 2015, 70: 41-52.
- [8] Kou Guangjie, Yang Zhengwei, Jia Yong, et al. Detection on cracks in blades with complex profile based on ultrasonic infrared thermal imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1204002. (in Chinese)
- [9] Wang Q, Hu Q P, Qiu J X, et al. Detection of internal defects in aviation composites with differential laser infrared thermal imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0504003. (in Chinese)
- [10] Towsyfyan H, Biguri A, Boardman R, et al. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 33(3): 1-30.
- [11] Ma Y, Jiang H, Dai M, et al. Cantilevered plate vibration analysis based on electronic speckle pattern interferometry and digital shearing speckle pattern interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0403001.
- [12] Sun P. Digital phase-shifting shearography for strain measurement by using a rotating platform system [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8): 085601.
- [13] Wang Xin, Wang Yonghong, Lv Youbin, et al. Whole field optical detection method of strain distribution of SU-8 photoresist [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 379-384. (in Chinese)
- [14] Wang Yonghong, Lv Youbin, Gao Xinya, et al. Research progress in shearography and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 300-309. (in Chinese)
- [15] Zhao Q, Dan X, Sun F, et al. Digital shearography for NDT: Phase measurement technique and recent developments [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2662.
- [16] Wu S, He X, Yang L. Enlarging the angle of view in Michelson-interferometer-based shearography by embedding a 4f system [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 3789-3794.
- [17] Liu Jie, You Pinhong, Zhan Jianbin, et al. Improved SIFT fast image stitching and ghosting optimization algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 2076-2084. (in Chinese)
- [18] Di Hongzhang, Yang Wen, Lin Pengyue, et al. Mosaic of cultural relics fragments based on SURF feature extraction descriptor and Jaccard distance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 963-972. (in Chinese)