

基于工业CT和激光剪切散斑干涉的复合材料气瓶分层缺陷检测研究

刘昶辰 王守龙 应凯迪 马利

Detection study of delamination defects in composite cylinders based on CT scanning and digital shear speckle interferometry

LIU Changchen, WANG Shoulong, YING Kaidi, MA Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240910.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维增强树脂复合材料齿槽加工中分层缺陷的形成机制

Formation mechanism of the slotting delamination of carbon fiber reinforced plastics

复合材料学报. 2021, 38(12): 4042–4051 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210526.004>

基于冲击损伤的复合材料气瓶铺层顺序优化设计

Optimal design of laying sequence of composite gas cylinders based on impact damage

复合材料学报. 2022, 39(2): 777–787 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210323.001>

基于Puck理论的复合材料层合板横向剪切失效分析

Failure analysis of composite laminates with Puck's theory under transverse shear load

复合材料学报. 2019, 36(10): 2286–2293 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190226.002>

基于高阶剪切理论的复合材料格栅夹层板弯曲特性

Bending characteristic of composite grid sandwich plate based on high-order shear theory

复合材料学报. 2019, 36(12): 2745–2755 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.002>

基于CT图像深度学习的三维编织C/C复合材料微观组分与缺陷智能识别

Intelligent identification of micro components and defects of 3D braided C/C composites based on deep learning of X-ray CT images

复合材料学报. 2024, 41(7): 3540–3547 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231101.001>

C/C复合材料销钉准静态和动态剪切性能

Quasi-static and dynamic shear properties of C/C composite pins

复合材料学报. 2021, 38(5): 1604–1610 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

基于工业 CT 和激光剪切散斑干涉的复合材料气瓶分层缺陷检测研究



分享本文

刘昶辰, 王守龙, 应凯迪, 马利*

(浙江工业大学 机械工程学院, 应用力学研究所, 杭州 310023)

摘要: 碳纤维增强复合材料储氢气瓶是氢能汽车燃料电池的核心组件, 然而针对气瓶制造成型过程中产生的缺陷仍缺少高效可靠的检测评价方法。本文针对碳纤维增强复合材料储氢气瓶开展了工业计算机断层扫描(CT)扫描和激光剪切散斑干涉测量实验研究。实验结果表明, 分层缺陷是气瓶纤维缠绕层中最主要的制造缺陷类型, 通过分析气瓶内部分层缺陷引起的局部力学响应特征, 揭示了不同严重程度分层缺陷引起的剪切条纹以及离面位移的变化规律。激光剪切散斑干涉捕捉到的“蝴蝶斑”条纹区域与 CT 扫描发现的纤维缠绕层内部的分层缺陷在位置尺寸和影响范围上具有高度的重叠一致性。激光剪切散斑干涉技术与气瓶水压试验相结合, 能够为气瓶的服役性能和安全性评估提供有力支持, 对储氢装备的发展具有重要意义。

关键词: 复合材料储氢气瓶; 分层缺陷; 工业 CT; 激光剪切散斑干涉; 剪切干涉; 离面位移

中图分类号: TB332; TH49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)07-4143-09

Detection study of delamination defects in composite cylinders based on CT scanning and digital shear speckle interferometry

LIU Changchen, WANG Shoulong, YING Kaidi, MA Li*

(Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced composite hydrogen storage cylinders are the essential components for hydrogen fuel cell vehicles. However, it is still lack of efficient and reliable methods for detecting and evaluating manufacturing defects that occurred in the processing and forming of these cylinders. In this study, industrial computed tomography (CT) scanning and digital speckle interferometry experiments based on shearography were conducted on the carbon fiber reinforced composite hydrogen storage cylinders. The experimental results reveal that delaminations are the predominant type of manufacturing defect in the fiber wound layer of the cylinders. By analyzing the local mechanical response characteristics caused by delaminations inside the cylinders, the study elucidates the variation of the interferometry fringes and out-of-plane displacements induced by delaminations with different severity. The regions of fringe pattern with "butterfly shape" captured in shearography are highly consistent with the positions, sizes, and influence ranges of delaminations found by CT scanning within the fiber wound layer. Employing shearography technology in hydrostatic testing provides a strong support for the assessment of the service performance and safety of the cylinders, thus holding significant implications for the development of hydrogen storage equipment.

Keywords: composite hydrogen storage cylinder; delamination; industrial CT; digital speckle interferometry; shearography; out-of-plane displacement

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-08-12; 录用日期: 2024-08-30; 网络首发时间: 2024-09-11 09:46:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240910.006>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB4000903)

National Key Research and Development Program of China (2021YFB4000903)

通信作者: 马利, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料力学、光学无损检测、冲击动力学和极端承压设备等 E-mail: malizjut@zjut.edu.cn

引用格式: 刘昶辰, 王守龙, 应凯迪, 等. 基于工业 CT 和激光剪切散斑干涉的复合材料气瓶分层缺陷检测研究 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 4143-4151.
LIU Changchen, WANG Shoulong, YING Kaidi, et al. Detection study of delamination defects in composite cylinders based on CT scanning and digital shear speckle interferometry[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7): 4143-4151(in Chinese).

与传统的化石能源相比，氢能具有原料丰富、热值高、零碳排放等优点，是一种极具潜力的清洁能源^[1-2]。目前，高压气态氢作为最成熟的储氢技术，广泛应用于氢能汽车等领域。碳纤维增强复合材料储氢气瓶作为氢能汽车燃料电池的核心组件，具有质量轻、储氢密度高、耐疲劳性能好等优点^[3-5]。但由于复杂的制造工艺，不可避免地会产生孔隙、分层、褶皱等制造缺陷^[6-7]，导致气瓶在服役过程中产生复杂的局部力学响应，影响气瓶整体的结构强度，降低气瓶的使用寿命。

针对碳纤维增强复合材料储氢气瓶内部缺陷的无损检测技术主要有：工业计算机断层扫描^[8-9]、超声检测技术^[10-12]、声发射技术^[13-15]。但由于复合材料储氢气瓶的多层结构，声信号会发生衰减，导致难以进行具体的缺陷分析，增加缺陷漏检的概率。基于X射线的工业计算机断层扫描技术(工业CT)因其具有非接触、穿透能力强、检测精度高等特点，广泛应用于汽车制造、航空航天等领域的零部件内部结构检测和尺寸测量^[16-18]。针对气瓶纤维缠绕层中存在的分层缺陷，工业CT可以准确地对缺陷进行尺寸测量和定位，但其检测费用高、效率低，并且存在一定的辐射剂量，很难直接用于生产/工作现场的实时检测。

然而，基于光学干涉成像技术的激光剪切散斑干涉技术(Shearography)可以直接测量物体表面的应变信息^[19-22]，捕捉缺陷诱导的力学响应特征，能够用于工程现场的实时测量。目前，该技术应用于缺陷检测方面，Huang等^[23]对内部含有缺陷的铝板、钢管等试样进行高能热流加载，通过开展剪切散斑干涉测量对缺陷进行定性和定量评估。Liu等^[24]对聚合物和金属材料内部的孔洞和裂纹缺陷进行检测，研究了不同剪切方向对检测效果的影响。Tao等^[25-26]改进了剪切散斑干涉测量装置，对热加载下厚玻璃纤维层合板(厚度51 mm)内部缺陷进行检测，并通过有限元法(FEM)对检测结果开展定量分析，研究了剪切散斑干涉技术对厚层压板内部缺陷的检测能力。Farshi等^[27]建立了用于定量评估玻璃纤维增强环氧树脂基(GRE)管道不同位置裂缝的模型，结合有限元法和剪切散斑干涉技术研究了GRE管道裂纹尺寸和位置对表面应变分量的影响。但仍鲜有针对工业级复合材料储氢气瓶开展激光剪切散斑干涉技术相关的实验研究，该技术在气瓶水压试

验阶段进行应用，能够非接触地监测气瓶表面变形，有助于对气瓶的服役性能和安全性评估提供有力的技术支持。

本文开展了气瓶的工业CT扫描，发现了分层缺陷是气瓶纤维缠绕层最主要的缺陷类型。通过激光剪切散斑干涉测量实验研究了缠绕层内部分层缺陷所引起的局部力学响应特征，揭示了不同严重程度的分层缺陷所引起的剪切条纹以及离面位移的变化规律。CT扫描发现的分层缺陷与激光剪切散斑干涉测量的条纹畸变区域在位置上高度重叠，验证了激光剪切散斑干涉技术在气瓶无损检测方面的适用性。

1 工业CT检测

1.1 实验流程

X射线的强穿透特性使其能够对物体进行断层扫描，精确地测量物体内部结构的三维数据，从而准确直观地观测结构内部存在的缺陷(如分层、气孔、夹杂等)^[9]。本文实验过程中采用三英精密仪器有限公司型号为 nanoVoxel-4000 的工业CT设备主要由3个部分组成，如图1所示，包括：X射线源、试样旋转控制台以及探测器。其中，CT扫描的几何放大倍数以及重建后三维模型的体素大小取决于X射线源与探测器的距离以及X射线源与扫描目标的距离。

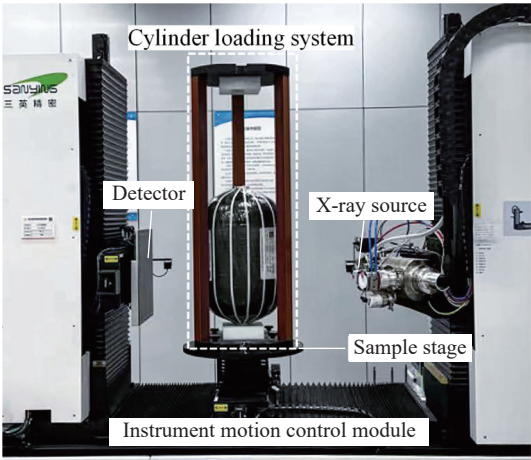


图1 储氢气瓶计算机断层(CT)检测

Fig. 1 Computed tomography (CT) testing of the hydrogen storage cylinder

被测气瓶为一只型号为 CHG3-383-55-35S/A 两端开口的铝内胆碳纤维增强复合材料储氢气瓶。气瓶工作压力为 35 MPa，公称容积为 55 L，外径为 420 mm，轴向长度为 700 mm。气瓶直筒段缠

绕层数为 40 层，封头段起增强作用的螺旋缠绕层数为 18 层，最外层有约 2 mm 厚的玻璃纤维保护层。为了便于对气瓶缺陷检测数据展开统计分析，将气瓶划分成如图 2(a) 所示的 A、B、C、D、E 5 个区域。

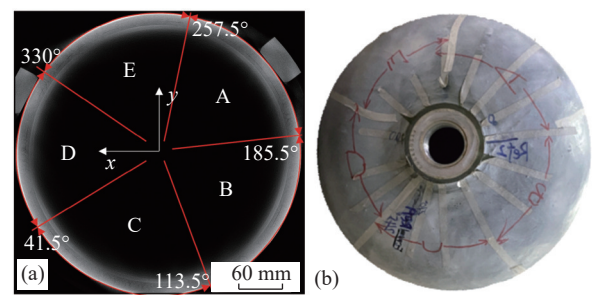


图 2 (a) 气瓶轴向断面图; (b) 气瓶轴向视图

Fig. 2 (a) Axial cross-section of cylinder; (b) Axial view of the cylinder

1.2 检测结果

一般来说，CT 图像中的亮度与材料的密度成正比，因此不同材料所呈现出来的亮度会略有不同，更易分辨出分层缺陷。图 3 和图 4 分别展示了气瓶封头段和直筒段部分 CT 断层扫描图像。由图 3 可见，在封头段与直筒段的过渡区域存在大量小尺寸的分层缺陷，封头段存在的分层缺陷轴向尺寸小但环向尺寸大，而图 4 直筒段上的分层缺陷轴向尺寸大，且在轴向位置上分布较为随机，由图 5 可知，直筒分层缺陷的尺寸范围为轴向 0~77 mm，周向 0~123 mm。气瓶内部分层缺陷沿厚度方向主要分布在纤维缠绕层中间或者靠近铝合金内胆的一侧，靠近气瓶表面一侧的分层缺陷较少。

通过对气瓶开展工业 CT 扫描，可以发现气瓶

内部存在大量尺寸分散、位置随机的分层缺陷，且分布面积较大，对气瓶整体性能的影响不能忽略。

鉴于工业 CT 检测效率低且存在一定的辐射剂量，难以作为一种可嵌入制造流程的现场检测方法，因此有必要寻找一种兼具高效与高精度且能够实现现场检测的方法。

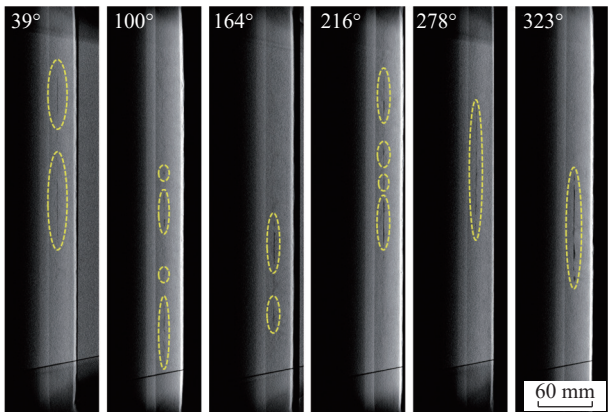


图 4 气瓶直筒段的分层缺陷

Fig. 4 Delamination defects in cylindrical part

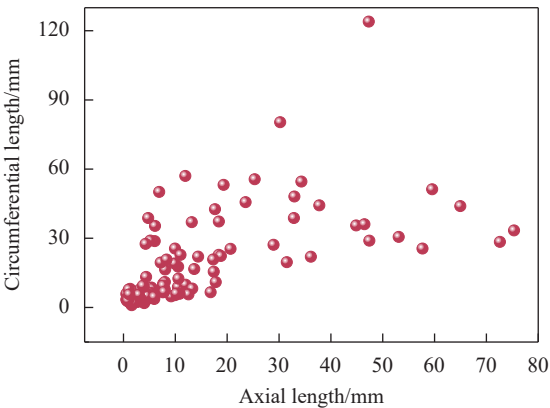


图 5 直筒段分层缺陷的尺寸分布

Fig. 5 Distributions of delamination defect size in cylindrical part

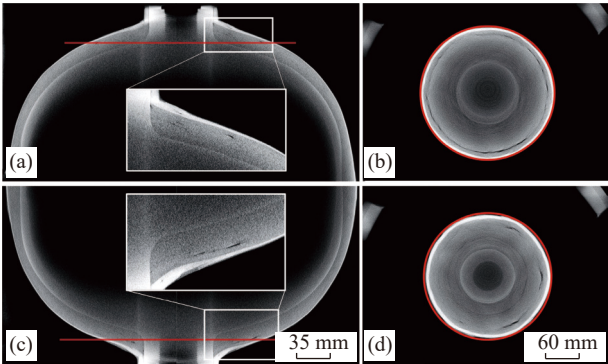


图 3 气瓶封头段的分层缺陷：((a), (b)) 上封头以及对应的轴向截面；((c), (d)) 下封头以及对应的轴向截面

Fig. 3 Delamination defects in dome: ((a), (b)) Forward dome and its axial section; ((c), (d)) Afterward dome and its axial section

2 激光剪切散斑干涉实验

本文测量采用德国 ISI 公司的激光剪切散斑干涉测量设备，主要包括：SE4 剪切成像传感器与激光源、信号发生器和移动式工作站。

2.1 激光剪切散斑干涉技术原理

剪切量的引入是激光剪切散斑干涉测量技术实现的关键。近些年国内外学者研究了多种可以引入剪切量的装置或方法^[9]，如：通过光学楔形棱镜引入剪切量、采用双折射棱镜引入剪切量、通过迈克尔逊干涉光路引入剪切量等。图 6 为基于迈克尔逊干涉原理的激光剪切散斑干涉仪，通

过将迈克尔逊干涉光路中的反射镜 2 倾斜较小的角度实现剪切量的引入，图中红色和蓝色的线条分别代表被测物表面上相邻两点反射光的传播路径，通过测量系统最终落在 CCD 相机成像靶面上的同一点，发生干涉。

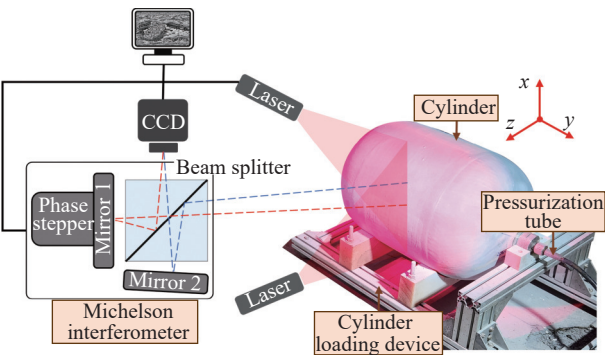


图 6 基于迈克尔逊干涉原理的激光剪切散斑干涉仪

Fig. 6 Digital shearography based on the Michelson interferometer

假设在 x 方向设置剪切量为 Δx ，则两束光干涉后的波前 U 为

$$U = u(x, y) + u(x + \Delta x, y) = a_0 e^{i\varphi(x, y)} + a_i e^{i\varphi(x + \Delta x, y)} \quad (1)$$

式中： $u(x, y)$ 为参考光的波前； $u(x + \Delta x, y)$ 为物光的波前； a_0 、 a_i 分别为参考光和物光的振幅； $\varphi(x, y)$ 和 $\varphi(x + \Delta x, y)$ 分别为两束光的相位。

干涉后形成的初始散斑图的光强为

$$\begin{aligned} I &= UU^* = a_0^2 + a_i^2 + 2a_0a_i \cos(\varphi_0 - \varphi_i) \\ &= I_0(1 + \gamma \cos \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中： U^* 为 U 的共轭复数； $I_0 = a_0^2 + a_i^2$ 为散斑图的背景光强； $\gamma = 2a_0a_i / (a_0^2 + a_i^2)$ 为图像的条纹调制度； $\varphi = \varphi_0 - \varphi_i$ 为剪切方向上参考光和物光的相位差。

对被测物进行加载，其表面产生的微小变形会使两束相干光产生光程差，对应产生的相位变化量为 $\Delta\varphi$ ，则变形后的散斑图的光强可以表示为

$$\begin{aligned} I' &= a_0^2 + a_i^2 + 2a_0a_i \cos(\varphi + \Delta\varphi) \\ &= I_0[1 + \gamma \cos(\varphi + \Delta\varphi)] \end{aligned} \quad (3)$$

则被测物体表面变形后产生的剪切条纹图为

$$\Delta I = I' - I = I_0\gamma[\cos(\varphi + \Delta\varphi) - \cos \varphi] \quad (4)$$

式中：当 $\Delta\varphi = 2n\pi$ ， $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ 时， $|\Delta I|_{\min} = 0$ ，剪切条纹图上表现为暗条纹；而当 $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi$ ， $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ 时， $|\Delta I|_{\max} = 2I_0\gamma \cos \varphi$ ，为亮条纹。剪切条纹图中的条纹疏密程度显示了对应区域离面位移的一阶导数变化情况，即反映应变信息的变化。

图 7 为物体表面位移与光程差之间的关系。在外部载荷的作用下，被测物体内部含缺陷区域对应的表面发生畸变，光路改变产生的光程差为表面对应区域的变形量。物体表面相邻两点 P_1 和 P_2 ，分别移动至 P'_1 和 P'_2 ，对应产生的位移量分别为 (u, v, w) 和 $(u + \delta u, v + \delta v, w + \delta w)$ 。则变形引起的光程差为

$$\Delta l = \sin \alpha \delta u + (1 + \cos \alpha) \delta w \quad (5)$$

其中， α 为激光光源的入射角度。

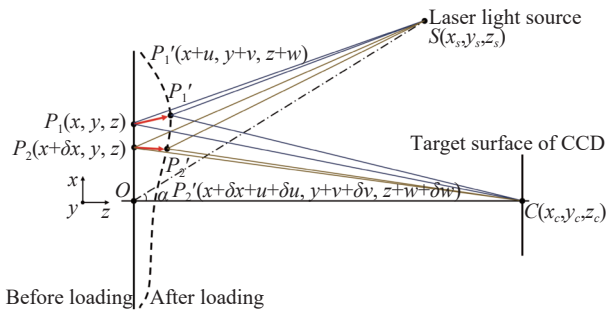


图 7 物体表面位移与光程差的关系

Fig. 7 Relationship between the surface displacement and the optical path difference

实际测量中，相机的采集方向与激光光源的照射方向夹角较小，即： $\alpha \approx 0$ ，因此当剪切量设置为 $\delta x = \Delta x$ 时，相位差与位移梯度之间的关系为

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \delta x \quad (6)$$

同理，当设置剪切量为 δy 时，对应的关系为

$$\Delta\varphi_y = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \delta y \quad (7)$$

本实验中采用的激光剪切散斑干涉测量装置的激光波长 λ 为 658 nm，则由式 (8) 可知，该设备相对变形的检测灵敏度 Δw 约为 33 nm。

$$\Delta w = \frac{\lambda}{4\pi} \times \frac{2\pi}{10} = \frac{\lambda}{20} = \frac{658}{20} \approx 33 \quad (8)$$

2.2 实验测量

针对上述气瓶开展激光剪切散斑干涉测量，因为该测量设备的检测区域不能完全覆盖气瓶的外表面，同时实验测量获取的边缘区域图像信息存在数据缺失，所以将被测气瓶沿环向划分成如图 2(b) 所示的 A、B、C、D、E 5 个测量区域。

图 8 为气瓶 D 面-直筒段测量过程中的条纹演化过程，其中图 8(a)~8(d) 为加载过程中的剪切图像，取 y 方向为剪切方向，剪切量 $\Delta y = 5 \text{ mm}$ ；图 8(e)~

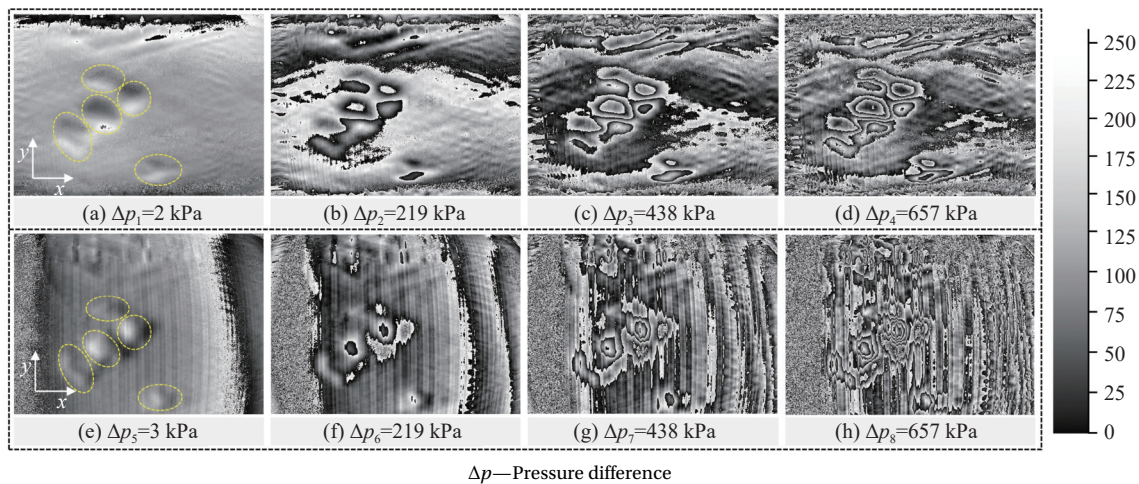


图 8 剪切条纹演化情况：((a)-(d)) 加载过程 ($\Delta y=5\text{ mm}$) ($\Delta p_1\sim\Delta p_4$)；((e)-(h)) 卸载过程 ($\Delta x=5\text{ mm}$) ($\Delta p_5\sim\Delta p_8$)

Fig. 8 Interferometric fringe evolution: ((a)-(d)) Loading process ($\Delta y=5\text{ mm}$) ($\Delta p_1\sim\Delta p_4$)；((e)-(h)) Unloading process ($\Delta x=5\text{ mm}$) ($\Delta p_5\sim\Delta p_8$)

8(h) 为卸载过程中的剪切图像，取 x 方向为剪切方向，剪切量 $\Delta x=5\text{ mm}$ 。气瓶内压加载/卸载速率约为 34.23 kPa/s ，相邻两幅剪切图像压差变化约为 219 kPa 。从剪切条纹的演化过程可以看出，随着气瓶压差的增加，被测气瓶内部分层缺陷诱导的表面变形畸变区域逐渐显现，对应的剪切条纹密度逐渐增加，可以清晰地看到多个成对出现且明暗相间的“蝴蝶斑”状剪切条纹图样。

图 9 解释了成对出现且明暗相间的“蝴蝶斑”状剪切条纹，当被测表面产生凹陷或凸起时，位移等高线表现为圆环状，沿剪切方向 (图示为 x 方向) 的离面位移梯度呈现反对称形式，状如蝴蝶。对离面位移梯度沿剪切方向进行积分，即可获得相应压差下的离面位移。

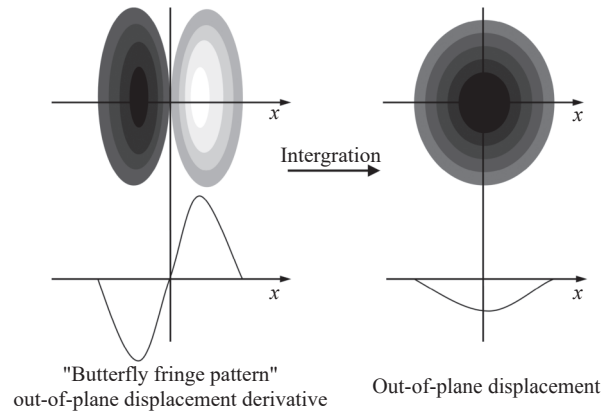


图 9 分层缺陷诱导的离面位移梯度和离面位移
Fig. 9 Out-of-plane displacement derivative and displacement induced by delamination defect

此外，图 8 不同剪切方向的剪切条纹演化过程也表明，当压差 Δp_2 约为 219 kPa 时就能够较为

清晰地观测到分层缺陷所导致的剪切条纹畸变信号；同时通过对比两种剪切方向采集的条纹图像，可以看出无论是引入 x 方向剪切还是 y 方向剪切，成对出现且明暗相间的“蝴蝶斑”均出现在被测气瓶表面的相同位置处。

2.3 结果数据处理

激光剪切散斑干涉测量所采集的剪切条纹图像为被测物体离面位移梯度信息 (应变)，沿剪切方向积分可以获得离面位移分布。

图 10 为气瓶 D 面测量结果的定量分析，剪切方向为 y 向。其中，图 10(a)~10(d) 为气瓶 D 面剪切条纹的演化过程；图 10(e)~10(g) 分别为不同压差下沿参考线 A-A、B-B、C-C 提取的离面位移梯度和离面位移变化曲线。当压差为 $\Delta p_3=438\text{ kPa}$ 时，图示缺陷 II 处呈现一级条纹，对应的离面位移为 $-0.69\text{ }\mu\text{m}$ ；缺陷 III 处呈现二级条纹，对应的离面位移为 $-2.69\text{ }\mu\text{m}$ ，因此可以直接根据条纹级数对缺陷的严重程度作出初步的判断。

由图 11 可知，在同等压差条件下，不同位置的缺陷呈现出不同的条纹级数。当压差 $\Delta p_2=766.752\text{ kPa}$ 时，可以看出缺陷 III 呈现了 2 级条纹，对应产生了 $3.29\text{ }\mu\text{m}$ 的离面位移，而同一路径下的缺陷 II 呈现了 1 级条纹，对应产生了 $1.23\text{ }\mu\text{m}$ 的离面位移。可以发现，缺陷 III 产生的离面位移是缺陷 II 产生的离面位移的 267%。其中，缺陷尺寸决定缺陷在坐标位置上的跨度，而严重程度决定离面位移梯度波动的幅值。随着压差的增大，其对应的离面位移梯度差以及离面位移差值与压差呈线性增长关系，在相同的压差下显示出不同

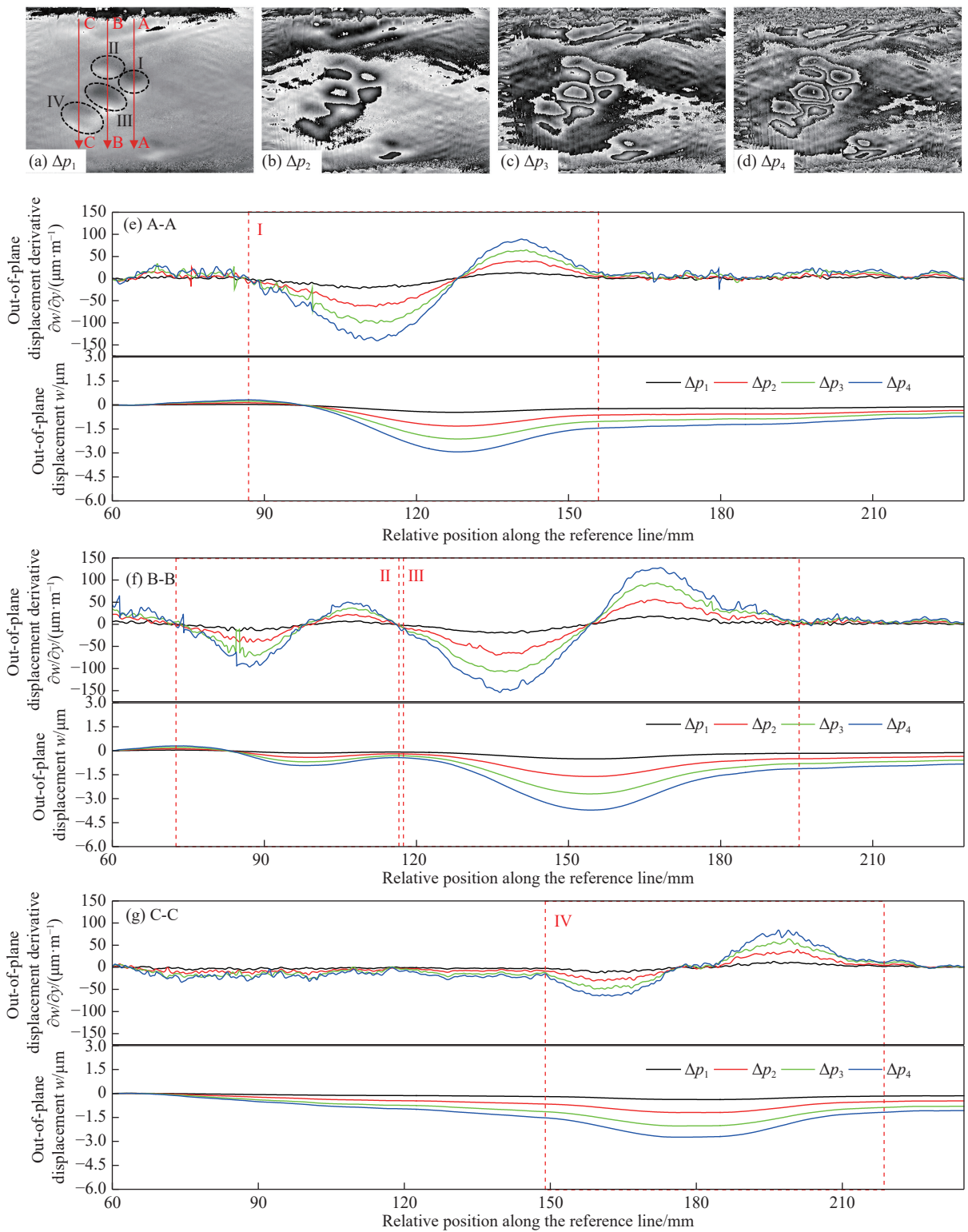


图 10 气瓶 D 面的测量结果: ((a)-(d)) 剪切条纹的演化过程; ((e)-(g)) 沿 A-A、B-B、C-C 参考线下的离面位移梯度和离面位移变化曲线
Fig. 10 Measurement results of the cylinder D-surface: ((a)-(d)) Interferometric fringe evolution; ((e)-(g)) Variations of out-of-plane displacement derivative and displacement along reference lines A-A, B-B and C-C

的剪切条纹密度，反映了内部非均匀分层缺陷对气瓶离面位移不同程度的影响。

上述结果表明，该技术在约 0.626% 工作压力

的压差下，就可以观测到分层缺陷诱导的剪切条纹畸变信号，能够反映出微米级离面位移变化特征，可以看出不同分层缺陷尺寸和严重程度对气

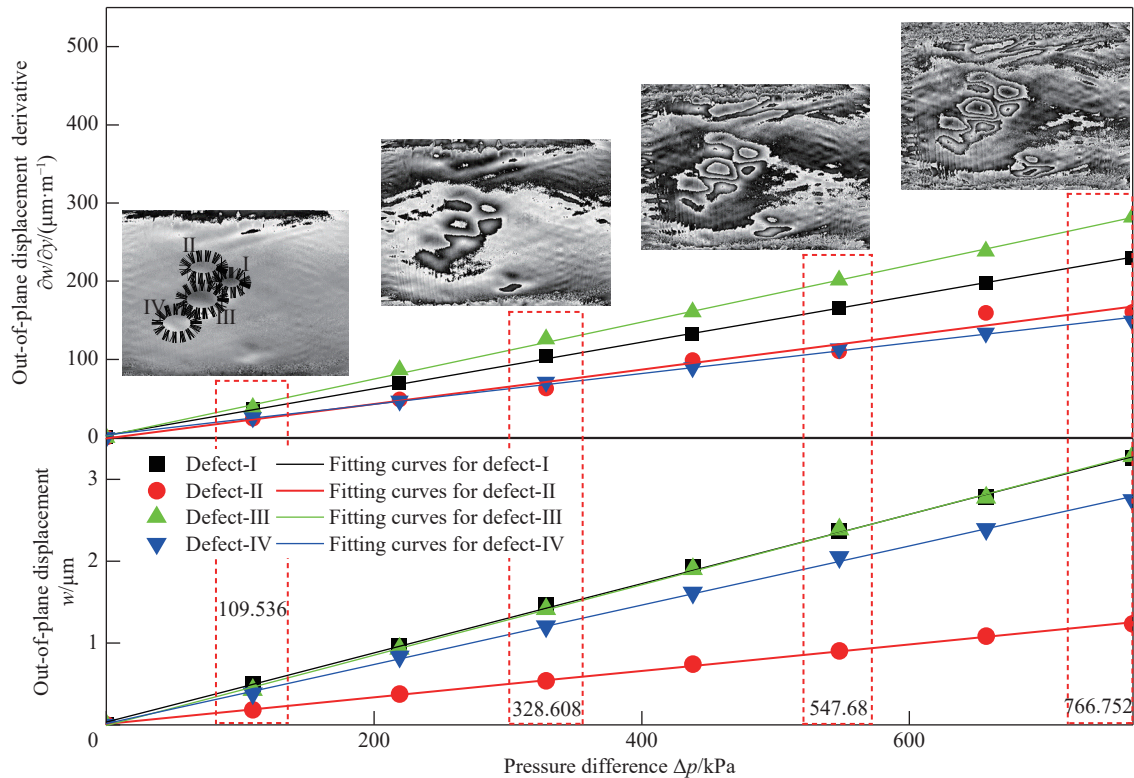


图 11 气瓶 D 面离面位移梯度和离面位移与压差的关系

Fig. 11 Relationship between out-of-plane displacement derivative and displacement of the D-surface with pressure difference

瓶表面变形有不同程度的影响，离面位移梯度和离面位移与压差的变化呈线性关系。

3 实验结果对比

图 12 和图 13 分别为气瓶 A 面与气瓶 D 面的剪切条纹图像与 CT 扫描结果的对比。其中，图 12(a) 和图 13(a) 是在 438 kPa 压差下获取的剪切条纹图；图 12(b) 和图 13(b) 为对应的解包裹相位图，反映了其表面不同区域离面位移梯度的变化情况；图 12(c) 和图 13(c) 分别为气瓶 A 面和 D 面中 A-A、B-B、C-C 截面对应的 3 个轴向切面的 CT 扫描图像。将出现“蝴蝶斑”的区域与 CT 检测的区域图像进行对比，可以发现 CT 扫描图像

上的分层缺陷与剪切散斑干涉测量的“蝴蝶斑”状的剪切条纹在位置和尺寸上有着高度的对应关系。分层缺陷在局部区域分布较为密集，部分缺陷在相邻位置上相互交连，这些位置相近的分层缺陷使得剪切条纹图中的“蝴蝶斑”位置相邻，且在一定程度上相互干扰。

4 结论

本文针对碳纤维增强复合材料储氢气瓶开展了工业计算机断层 (CT) 扫描和激光剪切散斑干涉测量。

(1) 通过气瓶的工业 CT 扫描可以发现气瓶内部存在大量尺寸分散、位置随机的分层缺陷，且

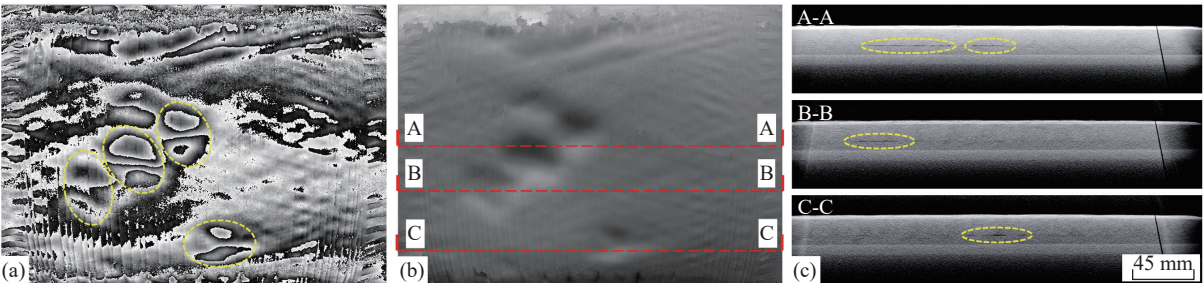


图 12 气瓶 A 面测量结果与 CT 扫描结果对比

Fig. 12 Comparison of the measurement results and CT scans of the cylinder A-surface

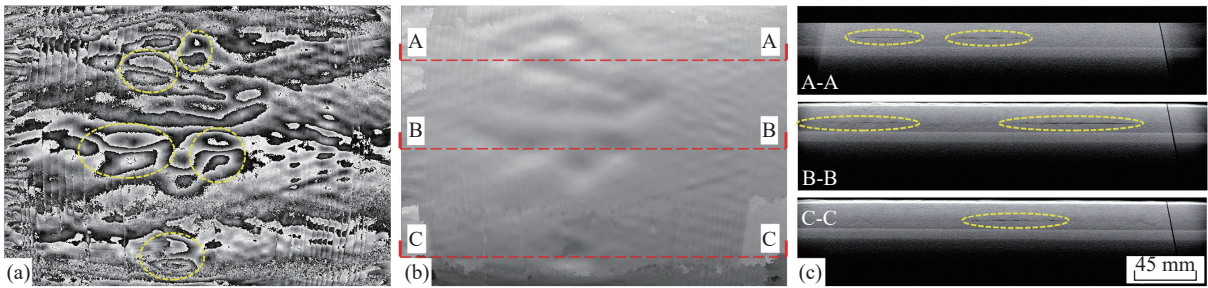


图 13 气瓶 D 面测量结果与 CT 扫描结果对比

Fig. 13 Comparison of the measurement results and CT scans of the cylinder D-surface

整体面积占比较大，是气瓶缠绕层内部最主要的制造缺陷类型。

(2) 激光剪切散斑干涉的实验结果显示，该技术在约 0.626% 工作压力的压差变化范围内，就能够较好地观测到分层缺陷所诱发的剪切条纹畸变信号，可以反映出微米级的离面位移变化特征。随着压差的增加，对应的离面位移梯度以及离面位移与压力差呈线性增长关系。在给定的剪切量和压差条件下，分层缺陷诱导的条纹级数可以定量地反映缺陷对邻域的影响程度，反映缺陷的严重程度。

(3) 实验采集的“蝴蝶斑”状剪切条纹的区域与 CT 检测的区域图像进行对比，发现该技术检测到的局部非均匀的离面位移梯度变化（“蝴蝶斑”）在气瓶缠绕层内部对应位置处确实存在尺寸相当的分层缺陷。

激光剪切散斑干涉技术能够非接触地监测气瓶表面变形，提供实时数据支持，与气瓶水压试验相结合，有助于评估气瓶的服役性能和安全性。后续将针对具体的气瓶型号和压力等级，改变剪切量和压差开展相关测量实验，建立缺陷响应图谱，为实际检测提供缺陷等级的评估依据，为复合材料储氢气瓶的检测与评价提供重要的技术支持。

参考文献：

[1] 赵永志, 蒙波, 陈霖新, 等. 氢能源的利用现状分析 [J]. 化工进展, 2015, 34(9): 3248-3255.
ZHAO Yongzhi, MENG Bo, CHEN Linxin, et al. Utilization status of hydrogen energy [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(9): 3248-3255(in Chinese).
[2] ISLAM A, ISLAM T, MAHMUD H, et al. Accelerating the green hydrogen revolution: A comprehensive analysis of technological advancements and policy interventions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 67: 458-

486.
[3] 陈学东, 范志超, 崔军, 等. 我国压力容器高性能制造技术发展 [J]. 压力容器, 2021, 38(10): 1-15.
CHEN Xuedong, FAN Zhichao, CUI Jun, et al. Progress in high-performance manufacturing technology for pressure vessels in China [J]. Editorial Office of Pressure Vessel Technology, 2021, 38(10): 1-15(in Chinese).
[4] KUMAR N, LEE S Y, PARK S J. Advancements in hydrogen storage technologies: A comprehensive review of materials, methods, and economic policy [J]. Nano Today, 2024, 56: 102302.
[5] AIR A, SHAMSUDDOHA M, GANGADHARA PRUSTY B. A review of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 253: 110573.
[6] 李泳良. 常见缺陷对碳纤维增强复合材料力学性能影响的模拟研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
LI Yongliang. Simulation study on the effect of common defects on the mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites [D]. Yantai: Yantai University, 2024(in Chinese).
[7] FU Y T, YAO X F. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites [J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 8: 100276.
[8] SHI Y, TANG P, MIAO C J, et al. Research on defect detection of fully-wrapped carbon fiber reinforced hydrogen storage cylinder with an aluminum liner by industrial computed tomography [C] // Operations, Applications, and Components; Seismic Engineering; ASME Nondestructive Evaluation, Diagnosis and Prognosis (NDPD) Division. Las Vegas: American Society of Mechanical Engineers, 2022: 5.
[9] SHI L, YANG H, WU Z Y, et al. Effect of fiber layout on low-velocity impact response of intralaminar hybrid carbon/glass fiber braided composite pipes under internal pressure [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 198: 111711.
[10] HUA F F, YOU Q Q, HUANG Q Y, et al. Exploring guided wave propagation in composite cylindrical shells with an embedded delamination through refined spectral element method [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 194: 111326.

[11] LIONETTO F, DELL'ANNA R, MONTAGNA F, et al. Modeling of continuous ultrasonic impregnation and consolidation of thermoplastic matrix composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 82: 119-129.

[12] 孟凌霄, 石文泽, 卢超, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料气瓶电磁超声在线监测方法及失效机制 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1820-1829.

MENG Lingxiao, SHI Wenze, LU Chao, et al. Electromagnetic ultrasonic on-line monitoring method and failure mechanism of carbon fiber reinforced resin matrix composite material gas cylinder[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(4): 1820-1829(in Chinese).

[13] DAHMENE F, YAACOUBI S, EL MOUNTASSIR M, et al. On the modal acoustic emission testing of composite structure [J]. *Composite Structures*, 2016, 140: 446-452.

[14] BURKS B, HAMSTAD M A. The impact of solid-fluid interaction on transient stress wave propagation due to acoustic emissions in multi-layer plate structures[J]. *Composite Structures*, 2014, 117: 411-422.

[15] DAHMENE F, YAACOUBI S, EL MOUNTASSIR M, et al. Towards efficient acoustic emission testing of COPV, without felicity ratio criterion, during hydrogen-filling[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(2): 1359-1368.

[16] WU Z Y, ZHANG P Y, QIN S, et al. Transition from folding to splaying failure of braided composite tubes subjected to axial compression hybridized by bi-axial and tri-axial laminate[J]. *Composite Structures*, 2024, 329: 117810.

[17] SU Y F, LI X G, WANG J, et al. Transverse indentation response and residual axial compressive characteristics of metal-composites hybrid tubes by deep learning-based acoustic emission and micro-CT[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 185: 110651.

[18] ZHANG P F, ZHOU W, YIN H F, et al. Progressive damage analysis of three-dimensional braided composites under flexural load by micro-CT and acoustic emission[J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111196.

[19] 王永红, 姚彦峰, 李骏睿, 等. 剪切散斑干涉关键技术研究及应用进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 53-61.

WANG Yonghong, YAO Yanfeng, LI Junrui, et al. Progresses of shearography: Key technologies and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 53-61(in Chinese).

[20] STEINCHEN W, YANG L, KUPFER G, et al. Non-destructive testing of aerospace composite materials using digital shearography[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 1998, 212(1): 21-30.

[21] WU R, LI Y, LU Y. Single-frame temporal phase-shifting shearography for real-time nondestructive testing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 110972.

[22] HU W X, XIONG C, FU Y, et al. Direct strain measurement method based on the correlation of defocused laser speckle pattern[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 176: 108051.

[23] HUANG Y H, NG S P, LIU L, et al. NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7-8): 774-781.

[24] LIU Z W, GAO J X, XIE H M, et al. NDT capability of digital shearography for different materials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(12): 1462-1469.

[25] TAO N, ANISIMOV A G, GROVES R M. Shearography non-destructive testing of thick GFRP laminates: Numerical and experimental study on defect detection with thermal loading[J]. *Composite Structures*, 2022, 282: 115008.

[26] TAO N, ANISIMOV A G, GROVES R M. FEM-assisted shearography with spatially modulated heating for non-destructive testing of thick composites with deep defects[J]. *Composite Structures*, 2022, 297: 115980.

[27] FARSHI S S, AKBARI D. Integration of digital shearography and FEM for non-destructive evaluation of internal cracks in GRE pipes[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2025, 44(7-8): 330-343.