

碳纤维铺放缺陷识别定位研究

谢艺璇, 刘志强, 李胤杞, 宗岳岳

(江苏科技大学机械工程学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 碳纤维复合材料在航空航天和汽车制造业中的应用越来越广泛。然而, 由于组成材料和成型工艺的复杂物理和化学性质, 复合材料中制造缺陷的概率非常高。因此, 研究复合材料的制造缺陷及其检测方法, 对于评价复合材料的质量具有重要意义。采用红外热成像技术对碳纤维铺放过程中的缺陷进行识别, 单层两侧最小边缘检测率达到 94.3%, 层间间隙测量值低于 10%, 完成了对碳纤维铺放过程中缺陷的可视化识别检测。

关键词: 红外热成像; 自动纤维铺放; 缺陷识别; 铺层缺陷; 铺放区域温差

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.05.018



全文在线

Research on carbon fiber placement defect identification and localization

XIE Yixuan, LIU Zhiqiang, LI Yinqi, ZONG Yueyue

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, CHN)

Abstract: Carbon fiber composites are increasingly applied in the aerospace and automotive industries. However, due to the complex physical and chemical properties of the constituent materials and molding processes, the probability of manufacturing defects in composites is very high. Therefore, studying the manufacturing defects and detection methods of composites is crucial for assessing their quality. Infrared thermography technology was used to identify the defects in the process of carbon fiber placement. The minimum edge detection rate on both sides of a single layer reaches 94.3%, and the interlayer gap measurement is below 10%, achieving visual identification and detection of defects in the carbon fiber placement process.

Keywords: infrared thermography; automated fiber placement (AFP); defect identification; defect layering; temperature difference in placement area

碳纤维复合材料是由两种或多种不同特性材料组成的高性能材料, 通过多种加工方法制成, 具有特定的机械性能。它具有高比强度、高比模量, 能够有效抵抗高温和疲劳, 表现出显著的热稳定性^[1]。近年来, 凭借轻质、高比强度、高温抗性、耐腐蚀性和良好的设计性等优异特性^[2-6], 碳纤维复合材料被广泛应用于飞机机身、高速列车、地铁车体及转向架等领域^[7-8], 其使用质量比已成为衡量高端设备先进程度的重要指标之一。然而, 在复杂的制造过程中, 碳纤维丝束的组分存在性能差异, 在微观上不均匀, 宏观上各向异性显著。同时, 由于碳纤维铺层层间结合力较差, 加工工件上下表面易出现毛刺、撕裂等缺陷^[9]。在长期服役过程中, 碳纤维复合结构可能因外界冲击或疲劳负荷作用出现分

层和疲劳裂纹, 导致性能退化, 威胁运行安全。测量和检测表面形貌是质量控制的重要手段, 若无法全面检测工件表面形貌, 就不能准确地反映工件的使用特性^[10]。因此, 研究复合结构的结构健康监测和损伤检测技术具有重要意义^[11-13]。

常用的无损检测 (non-destructive testing, NDT) 技术包括声发射、超声波检测、涡流检测、红外热成像、太赫兹检测和 X 射线计算机断层扫描等。其中, 声发射成本较高, 但具有检测速度快、实时健康监测和灵敏度高的特点, 需样品结构允许应力波传播; 超声检测检测速度快, 但数据处理耗时, 难以检测检测探头附近的缺陷, 适用于便携式设备现场检查; 涡流检测成本相对较低、检测速度快, 可检测小缺陷、损伤及复杂结构, 但仅限于导电复合

材料,且无法检测表面缺陷;红外热成像价格适中,检测速度快,可实时和全视野呈现缺陷,安全易操作,但一般只能检测表面缺陷;太赫兹检测设备复杂且昂贵,速度较慢但精确度高;X射线计算机断层扫描成本较高,速度慢,测试范围有限且辐射有害,但适用于各种材料,具有较高的空间分辨率和灵敏度^[14]。BROBERG P^[15]指出,在热成像研究中利用激光加热的点式方法可精确控制加热区域和时间,且光纤传输激光更加便携。KEO S A等^[16]比较了长激光脉冲加热和卤素灯加热的光学锁相热成像,发现激光加热的单向光束特性使其精准加热特定位置。孙雅凡等^[17]应用ISRA外观缺陷检测系统进行预浸料丝束外观缺陷检测,试验表明该系统缺陷检出率高、误检率低,具有较高的实用价值。黄曼等^[18]利用人为制造的含裂纹缺陷的碳纤维板索设计试验的同时,也对缺陷处信号幅值和磁通密度模型进行仿真。通过对涡流场进行有限元仿真与试验的交互验证,表明了试验结果准确性。何志艺^[19]通过联动扫描激光热成像技术对缺陷检测技术进行研究,实现了碳纤维基底材料涂层体系内部分层缺陷检测。FEDALA Y等^[20]指出激光锁相热成像可定位金属样品中某些特定区域的裂纹,而这在传统无损检测方法(如涡流、超声波)中难以实现。郭兴旺等^[21]以碳纤维增强塑料试件的脉冲热像检测为对象,研究了加热不均时的热像序列处理方法。宋远佳等^[22]采用超声红外热成像技术,对某飞行器的复合材料壳体损伤进行了检测研究,根据表面温度的分布实现了对损伤的定量识别。MOUSTAKIDIS S等^[23]将覆盖3个检测波段的热像仪组成了红外热成像检测系统,对航空复合材料内部多种类型的缺陷进行了检测,分析了激励源等因素对试验结果的影响,结果表明该检测系统对复材的检测效果非常显著。红外热波无损检测技术的工作原理是对被测物体施加热激励,由于物体缺陷的存在,使得热波的传递出现异常^[24-25],进而导致物体表面温度分布不均且随时间变化,利用红外热像仪对这一温度变化过程进行记录,对采集红外图像序列进行分析与处理,实现缺陷的检测。因其适用范围广、检测面积大、检测速度快、非接触测量和安全可靠等优点,红外热波无损检测技术在碳纤维复合材料缺陷检测中得到了广泛应用。

1 基于热成像的碳纤维铺放缺陷试验装置

红外热成像是一种非接触技术,具有测量范围

广、测量速度快和采集频率高的特点,可以记录复合材料的温度场^[26]。一个典型的红外热成像系统包含一个红外辐射计、能量源、同步和控制面板以及显示软件^[27]。红外热成像技术的应用可分为被动热成像和主动热成像。在被动热成像中,热辐射直接从测试对象表面发出^[28];在主动热成像中,产生加热或冷却流并传播到测试对象中,并依据 Stefan-Boltzmann 定律检测热响应^[29]。通过分析能量耗散,红外热成像技术能够识别碳纤维自动铺放过程中可能产生的各种缺陷。因此,本研究引入了一种基于检测铺放过程中温度变化的监测方法。此外,提出了一种利用红外相机的新型检测系统。通过整合铺放轨迹的空间位置、坐标定位和特定的异常温度读数,可实现对铺放缺陷的检测和定位。

热成像装置布置如图1所示,铺放缺陷检测系统主要由红外摄像设备(FLIRA615)、计算机、碳纤维铺放头和模具组成,缺陷识别试验中出于减少试验复杂性的要求,采用平面模具(亚克力板)进行层合板的铺放;铺放设备主要由机器人、铺放头组成。

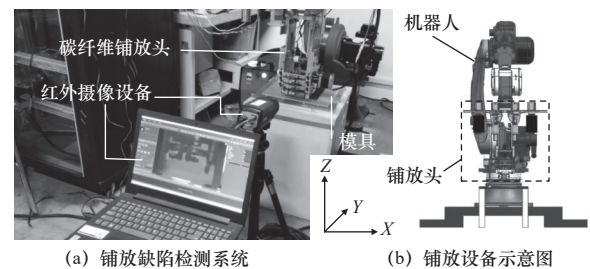


图1 热成像装置布置图

Fig. 1 Layout of the thermal imaging device

FLIRA615是一款易于控制、经济实惠且小巧便携的红外热像仪,适用于状态监控、过程控制及质量保证,可通过PC全面控制,并支持National Instruments、Cognex、Matrox、MVtec和Stemmer Imaging等第三方机器视觉软件的即插即用。机器人型号为BRTIRUS1820A,是伯朗特针对多自由度的复杂应用而开发的六轴机器人,其最大负载可达20 kg,拥有1 850 mm臂展。碳纤维预浸料丝束选用T700(sy49s)-12K,经设备裁剪为6.35 mm的标准宽度。铺放头的结构如图2所示,主要包含导送机构、步进电机、夹紧机构、重送模块、剪切机构和压辊。铺放头作用主要是针对碳纤维预浸料使其由导送模块进行牵引,途经压紧、重送、剪切和施压模块,在各模块的协同下完成从预浸料缠绕辊至压辊下放。

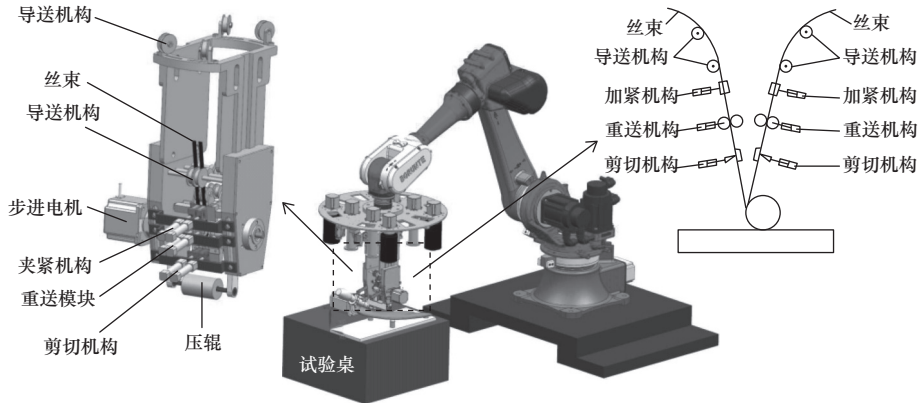


图2 铺放头空间位置及组成原理图

Fig. 2 Layout head space position and composition principle diagram

红外热像仪安装在铺放方向后方且略高于模具，模具放置在铝合金平台面上。加热装置位于铺放头底侧，且总是位于压辊前方，铺放开始后，通过红外热像仪可观察压实点相对较冷的区域存在温度差异，计算机监测页面上的色差在压辊正后方达到最大值。如果存在一定大小的间隙，可透过间隙看到表面辐射，导致局部温度的最大值。如果发生重叠，放置的材料量加倍，局部温度则降到最低。

2 基于热成像的碳纤维铺放缺陷试验流程

铺放过程监测的目的是对铺层过程中出现的缺陷进行定位和检测。检测系统根据用途分为2种检测原理：边缘检测用于确定铺放位置和几何形状；表面检测用于识别缺陷和异物。在边缘检测中，可检测区域边缘的位置，并将其保存在机器人铺放系统的坐标系中。在表面检测中，可识别铺放过程中的缺陷异常，并结合规划位置对缺陷处坐标进行定位。2种检测方法的原理相同，即在压辊施压位置和热成像监测区域内，边缘与丝束、正常区域与缺陷区域之间存在温度突变。当突变数值超出设定阈值时，可以认定为边缘或缺陷。因此，实际位置可以将规划位置与算法进行比较，从而估计铺放宽度和间隙宽度。其流程如图3所示。

碳纤维自动铺放过程中会有许多缺陷产生，如图4所示，为试验中常见的铺放缺陷，不同的铺放缺陷由于结构差异，具有不同的热性能，同种加热条件下若某处升温速度更快，则其在红外检测系统中会表现出不同的色差。

包含待检测区域的热成像示意图如图5所示。检测温度异常（如热点或冷点）时，将检测区域内的温度值与为每个检测区域生成的动态阈值进行比较。具体试验步骤如下。

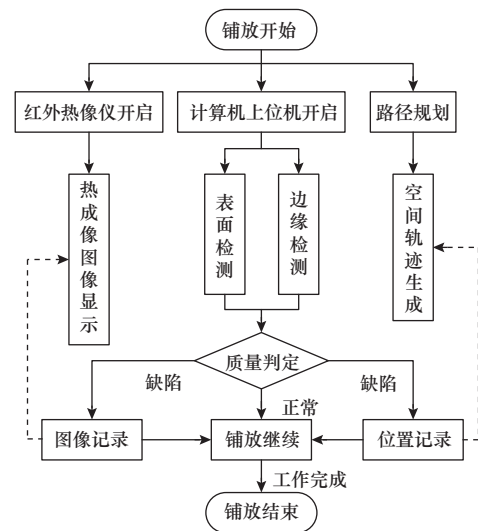
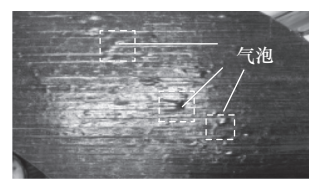
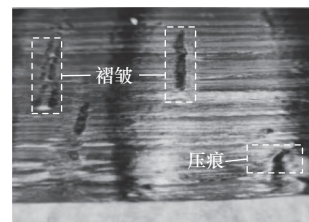


图3 缺陷识别定位流程图

Fig. 3 Defect identification and localization flow chart



(a) 铺放缺陷检测系统



(b) 铺放设备示意图

图4 常见的铺放缺陷图

Fig. 4 Common lay defect diagrams

第一步：在上位机软件中规划一个8层对称碳纤维层压板。每层铺放方向及缺陷布置如图6所示，其每层铺放方向分别为0°、90°、45°、-45°、-45°、

45°、90°和 0°，单层内铺放长度固定为 40 mm。丝束宽度为 6.35 mm，铺放温度设定为 40 °C。速度为 40 mm/s。

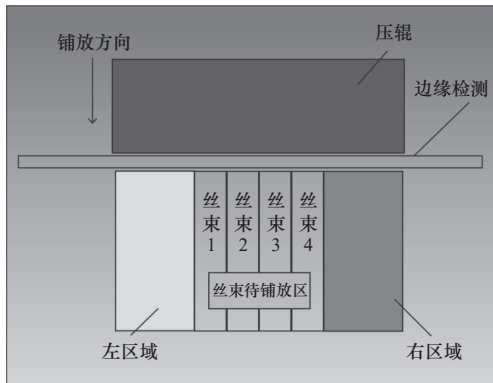


图 5 包含待检测区域的热成像示意图

Fig. 5 Thermal imaging diagram containing the area to be inspected

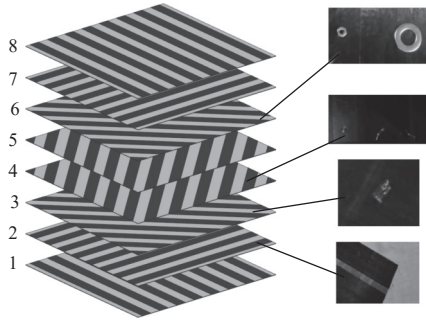


图 6 每层铺放方向及缺陷布置

Fig. 6 Placement direction and defect arrangement on each floor

第二步：在对应层里布置相应缺陷，每层铺放角度及缺陷布置见表 1。

表 1 每层铺放角度及缺陷布置

Tab. 1 The laying angle and defect arrangement of each layer

项目	铺层号码							
	1	2	3	4	5	6	7	8
偏角/(°)	0	90	45	-45	-45	45	90	0
缺陷	无	单条丝束缺失	蓝色塑料	细铜丝	无	小螺母垫片	无	无

3 试验结果分析

试验设置和评估区域如图 7 所示，为评价监测系统，在层压板中间选择了一个 280 mm×280 mm 的区域。该区域内每层碳纤维布置均匀，仅包含的断层。

在试验中，在上述评价区域内取图 5 所示的区域，在丝束 1~4 区域和左右区域上选取位于同一 x 刻度的 6 个点，逐帧读取 6 个点的温度数值，以此

为标准描述这 6 个点间温差及温度随时间变化情况。各区域温度变化如图 8 所示，该位置各区域在 20 帧附近均出现明显温升，其原因是在该时间压辊压过此处（即此刻各点位于压辊正后方），赋予了这 6 个点较多的热量。在波峰处，丝束 1 和丝束 2 温度最高，因为这二点位于加热中心，热量损失低于丝束 3 和丝束 4；丝束 2 温度略高于丝束 3，丝束 1 温度高于丝束 4，左区域温度高于右区域温度，原因是除了每层首次铺放外，左区域处往往存下完成铺放的材料，这些材料保留了有铺放时残余热量，并增加了区域的隔热性，使得左侧 3 个点的温度高于右侧点。

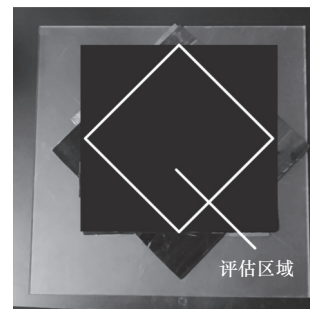


图 7 试验设置和评估区域

Fig. 7 Experimental setup and evaluation area

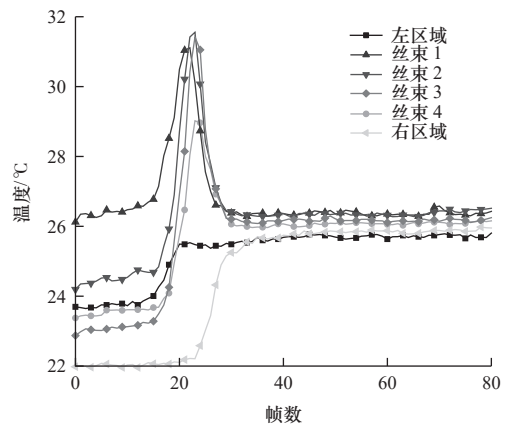


图 8 各区域温度变化

Fig. 8 Temperature changes by region

试验边缘检测时，在图 7 所示的评估区域内，沿着各层运动方向每隔 1 mm 设置一个温度采样点，使用热像仪检测这些点的温度值并绘制成图 8 所示的曲线。通过观察曲线是否存在波峰来判断边缘检测率的准确性。

为了进行边缘检测，选取压辊正后方处温度作为分析对象，对位于边缘的丝束 1 与左区域、丝束 4 与右区域的温差进行多次采集并取平均值进行分析。各层边缘温差如图 9 所示，前两层内两边缘处

的温度对比低于后面两层，原因是第一层铺放在亚克力板上，亚克力板散热能力低，能够保留更多热量。在第3~8层间，丝束1与左区域的温差整体呈降低趋势，而丝束4与右区域的温差整体呈现升高趋势。这主要是因为左区域已完成铺放，存在残余热量。

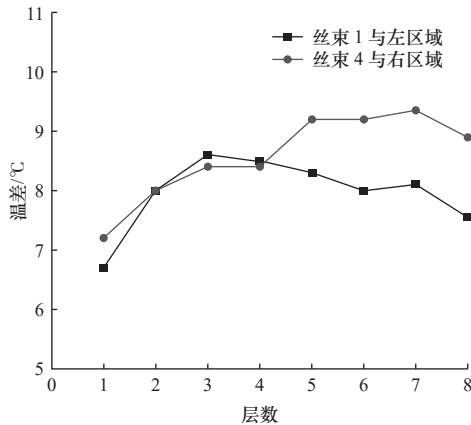


图9 各层边缘温差

Fig. 9 Temperature difference at the edge of each layer

由图9可知，前两层的温差较小，导致实际试验中的边缘检测率低于理论值。为提高第一层和第二层的边缘检测率，需调整边缘检测算法的阈值，具体见表2。调整后，可在不检测虚边的情况下，将第一层外边缘的检测率提升至94.3%。第二层和第四层的检测率已较为理想，因此，未对其他层进行阈值修改，且这些层的检测率也达到了良好水平。当铺放间隙设置为0.2 mm时，未能实现单次铺放之间的边缘检测，但可检测到大于1 mm的间隙。

表2 各层边缘检测率

Tab. 2 Edge detection rate of each layer

铺层号码	左边缘/(%)	右边缘/(%)	层间间隙/(%)
1	99.3	94.3	8.9
2	99.6	97.5	4.1
3	100	100	1.6
4	100	98.9	2.3
5	100	100	0.8
6	100	100	1.7
7	100	100	1.3
8	100	100	0.7

每一层的铺设缺陷监测如图10所示，通过将摄像机坐标系中检测到的边缘转移到铺放坐标系中，

并利用铺放头的位置，可以在铺放坐标系中绘制检测到的边缘。使用绿线（横线）连接发现的边缘，使用红点标记（十字符号）检测到的缺陷；在第二层内，人为设置的单条丝束缺失以及未检测到缺陷的外径边缘是可见的；在第三层内，人为放置的蓝色塑料、丝束与压辊的粘结及未检测到缺陷的外径边缘是可见的；在第四层内，人为放置的铜丝及未检测到缺陷的外径边缘是可见的；在第六层内，人为放置的金属垫片及未检测到缺陷的外径边缘是可见的；其余层内随机产生的缺陷也在检测系统中显示。通过对检测系统和热成像系统的通信，可以看到坐标系内红点处对应的热成像形貌。

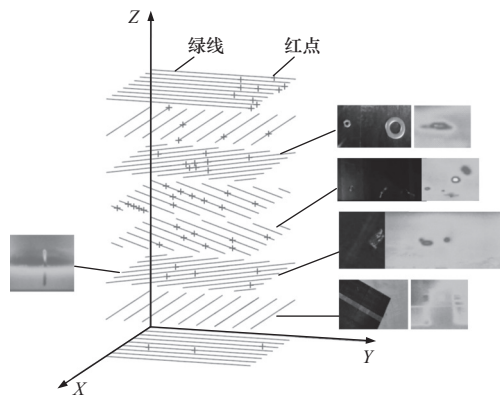


图10 对各层铺放缺陷进行监测

Fig. 10 Monitoring of laying defects in each layer

4 结语

试验结果表明，热成像检测系统能够独立于碳纤维铺放方向和前一次铺放的位置，定位每一层内单次铺放的位置。并且对铺放轨迹信息进行结合分析后，可以检测出单次铺放之间未闭合的间隙，并对间隙宽度进行监控；当异物于铺放之前出现在铺放路径旁边时或于铺放完成后异物出现在压实辊后面时，不仅可以通过热像仪直接观测到异物的温度形貌，还能在空间坐标系下对缺陷位置进行定位，方便了碳纤维铺放过程中对于铺放质量的监测。在设定阈值下，单层内两侧最低边缘检测率为94.3%，层间间隙低于10%，人为设置各缺陷在坐标系下均显示，验证了检测系统的有效性。

参考文献

[1] YANG D D, DONG S, HONG C Q, et al. Preparation, modification, and coating for carbon-bonded carbon fiber composites: a review[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(11): 14935-14958.

[2] NSENGIYUMVA W, ZHONG S C, LIN J W, et al. Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites

- and sandwich structures: a state-of-the-art review [J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 112951.
- [3] STAWIARSKI A. The nondestructive evaluation of the GFRP composite plate with an elliptical hole under fatigue loading conditions [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 112: 31-43.
- [4] ROCHA H, SEMPRIMOSCHNIG C, NUNES J P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: a review [J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112231.
- [5] ZHANG J, YAO D, WANG R Q, et al. Vibro-acoustic modelling of high-speed train composite floor and contribution analysis of its constituent materials [J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113049.
- [6] HUANG L P, ZENG L, LIN J, et al. An improved time reversal method for diagnostics of composite plates using Lamb waves [J]. *Composite Structures*, 2018, 190: 10-19.
- [7] REN Y Q, QIU L, YUAN S F, et al. Gaussian mixture model and delay-and-sum based 4D imaging of damage in aircraft composite structures under time-varying conditions [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 135: 106390.
- [8] GHOLIZADEH S. A review of non-destructive testing methods of composite materials [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 1: 50-57.
- [9] 王迎会, 朱坤, 尤源, 等. CFRP 板材钻铣加工特性及工艺参数优化 [J]. *制造技术与机床*, 2024(9): 132-141.
- [10] 王少雷, 张丽影, 梁尤宇, 等. 磨削工艺参数对 SiCp/Al 三维粗糙度的影响 [J]. *制造技术与机床*, 2024(4): 63-70.
- [11] DUCHENE P, CHAKI S, AYADI A, et al. A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53: 7915-7938.
- [12] MEMMOLO V, MONACO E, BOFFA N D, et al. Guided wave propagation and scattering for structural health monitoring of stiffened composites [J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 568-580.
- [13] CUI R, WIGGERS DE SOUZA C, KATKO B J, et al. Non-destructive damage localization in built-up composite aerospace structures by ultrasonic guided-wave multiple-output scanning [J]. *Composite Structures*, 2022, 292: 115670.
- [14] 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.
- [15] BROBERG P. Surface crack detection in welds using thermography [J]. *NDT and E International*, 2013, 57: 69-73.
- [16] KEO S A, BRACHELET F, BREABAN F, et al. Defect detection in CFRP by infrared thermography with CO₂ Laser excitation compared to conventional lock-in infrared thermography [J]. *Composites B*, 2015, 69: 1-5.
- [17] 孙雅凡, 高庆龙, 王引, 等. ISRA 外观缺陷检测系统在预浸料缺陷检测中的应用 [J]. *造纸装备及材料*, 2024, 53(1): 90-92, 159.
- [18] 黄曼, 王婕, 周伟, 等. 单向 CFRP 表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究 [J]. *电子测量技术*, 2023, 46(19): 182-187.
- [19] 何志艺. 碳纤维复合材料联动扫描激光热成像缺陷检测技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2022: 1-77.
- [20] FEDALA Y, STREZA M, SEPULVEDA F, et al. Infrared lock-in thermography crack localization on metallic surfaces for industrial diagnosis [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33: 335-341.
- [21] 郭兴旺, 邵威, 郭广平, 等. 红外无损检测加热不均时的图像处理方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2005(11): 1204-1207, 1216.
- [22] 宋远佳, 张炜, 田干, 等. 基于超声红外热成像技术的复合材料损伤检测 [J]. *固体火箭技术*, 2012, 35(4): 559-564.
- [23] MOUSTAKIDIS S, ANAGNOSTIS A, KARLSSON P, et al. Non-destructive inspection of aircraft composite materials using triple IR imaging [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(28): 291-296.
- [24] VLADIMIR P, DOUGLAS D. Review of pulsed thermal NDT: physical principles, theory and dataprocessing [J]. *NDT and E International*, 2015, 73: 28-58.
- [25] TRANTA B. Comparative study of thermal contrast and contrast in thermal signal derivatives in pulse thermography [J]. *NDT and E International*, 2017, 91: 36-46.
- [26] MEHRABIAN M, BOUKHILI R. 3D-DIC strain field measurements in bolted and hybrid bolted-bonded joints of woven carbon-epoxy composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 218: 108875-108875.
- [27] DOSHVARPASSAND S, WU C, WANG X. An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96: 366-389.
- [28] HE Y Z, DENG B Y, WANG H J, et al. Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: a review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103754.
- [29] RIPPA M, PAGLIARULO V, LANZILLO A. Active thermography for non-invasive inspection of an artwork on poplar panel: novel approach using principal component thermography and absolute thermal contrast [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, 40(1): 21-21.
- 第一作者: 谢艺璇, 男, 1999 年生, 硕士, 主要研究方向为碳纤维自动铺放。E-mail: 2306217168@qq.com
- 通信作者: 刘志强, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为碳纤维自动铺放、船海装备, 已发表论文数量 32 篇。E-mail: zhiqiangliu@just.edu.cn
- (编辑 高扬)
- (收修改稿日期: 2024-12-30)

