

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312354

基于非接触光声成像的碳纤维增强复合材料冲击损伤检测方法^{*}

丁凯旋¹, 陈冀景¹, 皮一涵¹, 李 娇^{1,2}, 田 震^{1,2}

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 天津大学佐治亚理工深圳学院 深圳 518067)

摘 要: 为了探究碳纤维增强复合材料 (CFRP) 的损伤机制并对其制造过程进行质量监控, 对 CFRP 的冲击损伤区域进行了高分辨无损检测。构建了全光式非接触光声显微 (AONC-PAM) 成像系统, 利用自主开发的光学吸收结合背向散射的双对比度成像模式, 对 CFRP 在不同冲击能量下的损伤区域进行高分辨率无损检测。实验结果显示, AONC-PAM 系统的空间分辨率为 $2.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$; 双对比度成像策略能以 2 s/帧的速率同时获得基于光学吸收和表面散射特性的图像及两者叠加的双对比度图像; AONC-PAM 系统显示了比通用明场显微镜系统更多的成像细节, 包括碳纤维分布和其他微观缺陷如纤维断裂、错位、缺束和褶皱, 可检测的微观缺陷尺寸达 $10 \sim 20 \mu\text{m}$, 并实现了损伤区域的精准量化。

关键词: 无损检测; 非接触光声显微镜; 双对比度成像; 碳纤维增强复合材料; 冲击损伤

中图分类号: TH742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Non-contact photoacoustic imaging-based detection of impact damage in carbon fiber reinforced plastic composites

Ding Kaixuan¹, Chen Jijing¹, Pi Yihan¹, Li Jiao^{1,2}, Tian Zhen^{1,2}

(1. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Georgia Tech Shenzhen Institute, Tianjin University, Shenzhen 518067, China)

Abstract: To investigate the damage mechanism of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and monitor its manufacturing process quality, high-resolution non-destructive testing was conducted on the impact-damaged areas of CFRP. An all-optical non-contact photoacoustic microscopy (AONC-PAM) imaging system was constructed, utilizing a self-developed dual-contrast imaging mode combining optical absorption with backscattering, for high-resolution non-destructive testing of CFRP's damage areas under different impact energies. Experimental results showed that the spatial resolution of the AONC-PAM system was $2.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$. The dual-contrast imaging strategy enabled acquisition of images based on optical absorption and surface scattering characteristics simultaneously, as well as their overlay, at a rate of 2 seconds per frame. The AONC-PAM system revealed more imaging details compared to the conventional brightfield microscopy system, including carbon fiber distribution and other microscopic defects such as fiber breaks and delamination, missing bundles, and wrinkles, with detectable defect sizes ranging $10 \sim 20 \mu\text{m}$, facilitating precise quantification of damaged areas.

Keywords: non-destructive testing; non-contact photoacoustic microscopy; dual-contrast imaging; carbon fiber reinforced plastics; impact damages

收稿日期: 2024-01-04 Received Date: 2024-01-04

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (82171989, 62235013)、天津市杰出青年学者基金 (20JCJC00190)、深圳市国际科技自主合作基金 (GJHZ20210705142401004)、深圳市自然科学基金重点项目 (JCYJ20200109150212515)、2022 年深圳市高校稳定支持计划 (20220618114319001) 项目资助

0 引 言

碳纤维增强复合材料 (carbon fiber reinforced plastics, CFRP) 作为航空^[1] 和汽车^[2] 等行业中至关重要的复合材料, 容易在上述应用场景中受到意外的冲击损伤。在这种情况下, 全面掌握冲击损伤区域的整体微观结构信息例如纤维分布、纤维错位、缺束、褶皱以及干燥碳纤维组织中的缝隙对于深入了解导致局部材料结构断裂、增强元件失效、基体开裂和破坏等损伤机制以及监控材料制备的质量至关重要^[3]。通常情况下, 这些微观结构会出现在由碳纤维丝组成的微米至亚毫米尺寸的纤维束增强体单元中。因此, 实现对 CFRP 冲击损伤区域微观细节的高分辨率检测, 包括纤维分布和其他微小缺陷 (如纤维错位、缺束、褶皱、间隙等), 不仅为 CFRP 的结构寿命评估提供了科学基础, 同时也为制造工艺提供了精准的材料学信息, 从而提高 CFRP 结构的完整性和安全性, 使其更广泛应用于高要求的航空和汽车工业领域^[4]。

目前, 针对 CFRP 冲击损伤的无损检测已经成为广泛研究的重点。超声技术被应用在 CFRP 的制造和操作阶段检测冲击损伤^[5]。低频电磁波技术, 包括毫米波和太赫兹技术, 能够非接触地检测 CFRP 中的冲击损伤和表面以下的缺陷^[6]。此外, 红外热成像作为一种有前景的在线检测方法, 也已成功应用于 CFRP 冲击损伤的检测^[7]。涡流技术^[8] 提供了对 CFRP 表面或近表面缺陷的非接触检测^[9]。然而, 上述技术在实现 CFRP 冲击损伤区域高分辨率的无损检测方面仍存在挑战。超声技术和低频电磁波技术的分辨率大都分别限制在几十微米和亚毫米级别。此外, 红外热成像的温度灵敏度可能会受到环境因素的影响。尽管涡流技术在检测 CFRP 的微观缺陷方面具有潜力, 但该技术容易受探测器与样品间的恒定距离以及样品表面条件变化的影响, 从而影响其检测精度。

近年来, 光声技术因其出色的光学分辨率和较大的穿透深度而受到广泛关注与研究^[10]。目前已有研究充分验证了传统光声方法在高分辨率成像方面的有效性^[11]。然而, 传统光声设备对液体耦合剂的依赖性限制了其在干燥碳纤维结构或湿预制件中的适用性^[12]。为此, 一种备选方法是全光式非接触光声显微镜 (all-optical non-contact photoacoustic microscopy, AONC-PAM), 该技术基于弹光效应, 并采用快速扫描技术, 已成功实现在特定工业环境中的非接触高分辨率成像^[13-15]。因此, 利用基于弹光效应的 AONC-PAM 高分辨无损检测 CFRP 的冲击损伤是一种具有潜力的可行途径。

为此, 本文搭建了一套用于高分辨率无损检测 CFRP

冲击损伤以及微观缺陷的 AONC-PAM 系统并自主开发了基于 AONC-PAM 的双对比度成像模式。针对不同冲击能量下的损伤区域, 本文分别使用 AONC-PAM 系统和通用明场显微镜进行成像。在每种冲击能量下, AONC-PAM 的双对比度成像模式仅需 2 s 即可获取三幅包含样品不同特性的图像: 包括基于光学吸收特性的光声图像、基于表面散射特性的背向散射图像以及结合前两者的双对比度图像, 以深入了解冲击损伤区域的情况。将所搭建系统的成像结果与通用明场显微镜的成像结果进行对比, 可以发现 AONC-PAM 系统的双对比度图像不仅可以量化不同冲击能量下损伤区域的大小, 并且展现了更精细的细节, 覆盖了冲击损伤区域的纤维分布和其他微观缺陷, 如纤维断裂和错位、缺束以及褶皱。该技术以其非接触、高分辨率成像的能力, 并结合双对比度的成像策略显示出在高分辨无损检测飞机和汽车复合材料方面的潜力。

1 弹光效应的基本原理

弹光理论是指当吸收介质受到一定声压时, 该声压会改变介质的折射率。折射率的变化大小能够反应声压的强度, 若该声压是由于光声效应引起的, 则折射率的变化能反映吸收介质对光的吸收系数, 该系数体现了物质固有的光学吸收特性。在 AONC-PAM 系统中, 这一原理的应用表现为将脉冲激发光与连续探测光束共同聚焦到样品上。在这种情况下, AONC-PAM 中生成的初始压力可由下面的公式计算:

$$p_0(z) = \Gamma \eta_{th} \mu_a u(z) e^{-\mu_a z} \quad (1)$$

式中: Γ 是 Grüneisen 因子, η_{th} 表示被吸收的光转化为热的比例, μ_a 是光学吸收系数, $u(z)$ 是一个阶跃函数, 表示可忽略的吸收系数。在考虑传播距离较大的情况下, 传播的压力可以用以下形式表示:

$$p(z, t) = \begin{cases} 0 & z < -v_s t \\ \frac{1}{2} p_0 & -v_s t \leq z < v_s t \\ p_0 & z \geq v_s t \end{cases} \quad (2)$$

此时, 产生的压力遵循弹光关系:

$$\delta n(z, t) = \frac{\varepsilon n_0^3 p(z, t)}{2 \rho v_s^2} \quad (3)$$

式中: $\delta n(z, t)$ 表示介质中初始折射率 n_0 的调制^[13], ε 表示局部的弹光系数, ρ 代表局部质量密度, 而 v_s 则代表介质中的声速。为了直观的表述弹光过程, 此处假设一个吸收介质的折射率为 n_1 , 经过初始压力 $p(z, t)$ 调制后, 它在一个具有常数折射率 n_2 的非吸收介质的界面处产生的折射率扰动为 δn , 在经过脉冲激光激发后, 边界处产

生的强度反射率变化为:

$$\Delta R = \left| \frac{n_1 + \delta n - n_2}{n_1 + \delta n + n_2} \right|^2 - R \quad (4)$$

式中: $R = \left| \frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)} \right|^2$ 是未受调制的强度反射率, ΔR 是由光声初始压力引起的变化量。为了更直观地了解 ΔR 与 δn 以及介质边界处静态折射率分布 $\Delta n = n_1 - n_2$ 的关系,这里做了更进一步地假设: δn 为实数,则由光声初始压力引起的反射率变化可表示为:

$$\Delta R = \delta n \left(\frac{2Re\{\Delta n\}}{|n_1 + n_2|^2} - \frac{2Re\{n_1 + n_2\}}{|n_1 + n_2|^2} \left| \frac{\Delta n}{n_1 + n_2} \right|^2 \right) + O(\delta n^2) \quad (5)$$

式中: $O(\delta n^2)$ 代表了依赖于 δn 的高阶无穷小。此时, ΔR 与 δn 可以直接根据等式(4)进行建模,如图1所示。

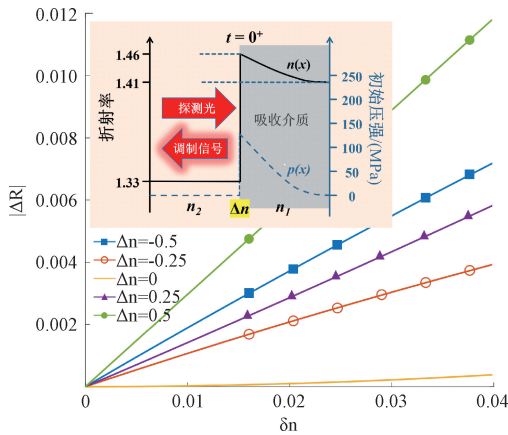


图1 不同 Δn 下,强度反射率扰动 ΔR 与折射率调制 δn 的关系

Fig. 1 Relationship between intensity reflection coefficient perturbation ΔR and refractive index modulation δn at different Δn

根据图1以及等式(5)可知,在 δn 相同时,折射率匹配层 ($n_1 \approx n_2$) 的反射率扰动要远小于折射率失配层 ($|\Delta n| > 0$),这表明在初始压力产生后不久,有限振幅的压力波会向界面外传播,此时在边界处和远离边界处的反射率调制会迅速衰减。在 AONC-PAM 中由于没有干涉式的结构,这保证了系统只能测试到焦点区域附近的初始声压,从而避免了焦点之外其他区域的干扰。

2 系统与方法

2.1 AONC-PAM 系统的搭建

本文基于弹光理论所构建的 AONC-PAM 系统如图2所示。整个系统共由4部分构成:分别是激发光模块,探测光模块,扫描模块和数据处理模块。激发光模块由

1 064 nm、重复频率为 200 kHz 的纳秒脉冲激光器以及光束整形系统构成。探测光模块由中心波长为 1 310 nm、线宽 45 nm 的超辐射发光二极管以及光电探测器构成。在扫描模块中,扫描装置自上而下由二维扫描振镜、物镜以及电动平移台构成。数据处理模块中采用高速数据采集卡进行数据处理。通过光学二向色镜将激发光与探测光合束,然后进入扫描模块中的二维扫描振镜,最终经过物镜共聚焦于样品上。样品反射的探测光最终被探测光模块中的光电探测器检测。整个的信号处理过程通过数据处理模块完成。

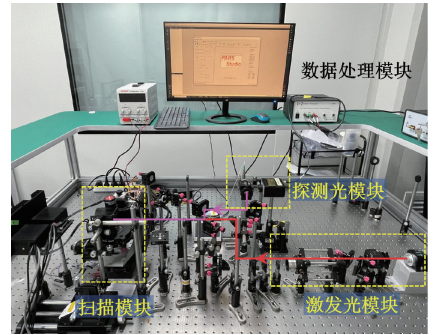


图2 AONC-PAM 系统结构实物图

Fig. 2 Photograph of the AONC-PAM system

本文的 AONC-PAM 系统从光电探测器中采集了两个独立的输出并同时使用四通道高速数据采集卡捕获,两个独立的输出分别对应了双对比度成像策略中的背向散射对比度以及光学吸收对比度。首先是未经放大和滤波的输出,对应于 1 310 nm 探测光源所产生的 AONC-PAM 的背向散射对比度,这个信号包含在由光电探测器捕获的光信号的低频(接近直流)分量中。第二个输出是经过带通滤波(1.8~22 MHz)后的输出,用于隔离探测光后向反射分量中纳秒级的调制,这个信号表现为典型的 AONC-PAM 的光学吸收对比度。两种对比度的原理示意图如图3所示,利用数据采集卡同时对两个输出进行采集以及重建,即可获得样品的背向散射图像以及光学吸收图像。

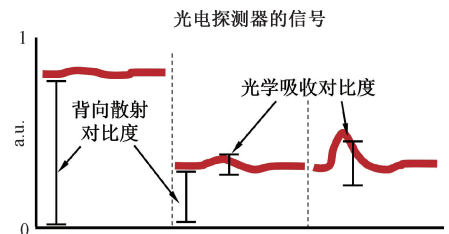


图3 AONC-PAM 的散射和吸收信号编码在探测光的后向反射分量中

Fig. 3 Encoding of scattering and absorption signals in the backward reflected component of AONC-PAM interrogation beam

2.2 AONC-PAM 系统的成像方法

为了构建一幅清晰完整的 CFRP 冲击损伤图像,本文的 AONC-PAM 系统采用了二维扫描振镜与三维电动位移台相结合的方法。其中,三维电动位移台具备 500 nm 的步进精度,能够有效控制样品的移动,确保其精确定位于镜头的焦点附近。当背向反射强度达到最大值时,表明样品位于 AONC-PAM 的焦点附近。此时,使用二维扫描振镜对样品的局部进行扫描,以获取更为详细的图像信息。具体实现方法为二维扫描振镜通过改变光束进入物镜的入射角度,进而调整了从物镜出射后的焦点位置,实现二维扫描的目的,如图 4 所示。

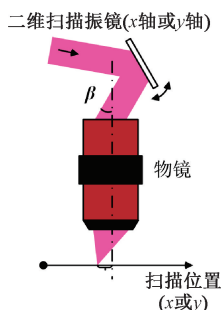


图 4 二维扫描振镜扫描示意图

Fig. 4 Diagram of two-dimensional galvanometer mirrors for scanning

3 实验结果与分析

3.1 CFRP 冲击损伤实验的设计

本文采用自主设计的冲击测量仪对商用的 CFRP 样品(吉林宝旌炭材料有限公司, JLB4524-25K)进行了不同能量的冲击损伤实验,如图 5 所示。该装置中,钨钢针的轴向运动由千分尺控制,当钨钢针接触到样品表面时进行零点校正。随后,钨钢针下移的距离经过力学传感器转换为相应的公斤力,该公斤力通过数显表进行实时显示。最后,结合力学公式,可以推算出每次实验的冲击能量。

本文选择了同一批次的 CFRP 样品进行了不同冲击能量下的冲击实验。在每次冲击实验后,利用明场显微镜观察样品表面的形态变化,典型的实验效果如图 5 所示。在冲击实验后,显微镜观察到样品表面明显出现了冲击损伤。值得注意的是,在每种冲击能量下,冲击损伤的直径均小于 300 μm ,肉眼无法在 CFRP 中观察到。

3.2 AONC-PAM 系统的性能验证

本文通过对 AONC-PAM 系统的空间分辨率进行测算,评估了其成像性能。使用搭建的 AONC-PAM 系统对直径为 7 μm 的碳纤维网络进行了截面扫描(B-scan),以

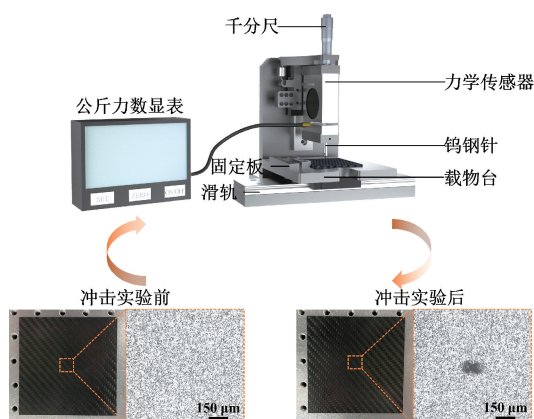


图 5 利用冲击测量仪对 CFRP 进行冲击实验并表征

Fig. 5 Impact experiment and characterization of CFRP using an impacting instrument

获取碳纤维网络的信号分布。利用 AONC-PAM 系统对水中碳纤维网络进行成像的结果如图 6 所示。该图像采集时,激发光脉冲能量约为 20 nJ,探测光功率为 6 mW。成像过程采用二维振镜扫描方式,其快轴和慢轴扫描速率分别固定在 115 Hz 和 0.5 Hz。

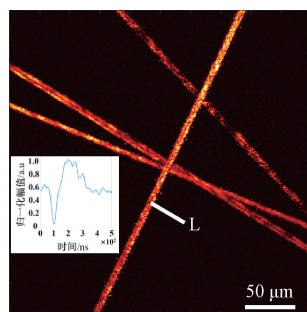


图 6 碳纤维网络的 AONC-PAM 图像及信号

Fig. 6 Image and signal of carbon fiber networks in AONC-PAM system

接着,本文通过获取系统的线扩散函数 LSF 来测定系统的空间分辨率。在扫描过程中,截取了碳纤维边缘处的信号幅值分布(如图 7 中蓝色圆圈所示,扫描步进为 0.5 μm),该分布显示了 B-scan 中信号从无到有的变化过程。通过使用误差高斯函数对该分布进行拟合,可以获得系统的边缘扩散函数 ESF,对 ESF 进行微分即可得到高斯型 LSF,如图 7 所示。本文中 LSF 的半高全宽(full width at half maxima, FWHM)值为 $2.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$,代表了所构建的 AONC-PAM 系统的空间分辨率。

3.3 AONC-PAM 系统对 CFRP 冲击损伤的高分辨率成像验证

利用 AONC-PAM 对四种不同冲击能量(39.4, 33.9, 22.9, 5.2 J)下 CFRP 冲击损伤成像的结果如图 8

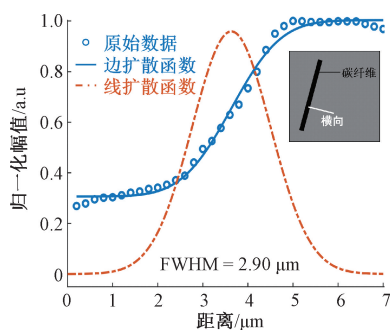


图7 AONC-PAM系统的空间分辨率表征

Fig. 7 Characterization of lateral resolution in AONC-PAM system

所示。在进行成像实验时,系统能够在2 s内获得基于表面散射特性的背向散射图像、基于光学吸收特性的光声图像以及两者线性叠加的双对比度图像,结果如图8(a)~(c)所示。在本文中,背向散射图像是通过捕获较低频的背向散射强度形成的,显示了样品的局部散射特性,如图8(a)所示。在背向散射图像中,冲击损伤的轮廓被完整展现,并且与通用明场显微镜(光学电子显微镜1 000倍同轴光,深圳市三锡泰达光学仪器有限公司)获得的成像结果高度相似,如图8(d)所示。然而,背向散射图像以及明场显微图像的形成机制是基于样品表面对光的散射或者反射,这导致两类图像都无法深入体现出样品的特征信息。另一方面,在背向散射成像中,较长的探测光波长限制了背向散射图像分辨率的进一步提高。因此为了获得CFRP中更加详细的特征信息,需要获取由激发光吸收产生的高分辨率光声图像。

如图8(b)所示的光声图像反映了CFRP对激发光的吸收信息,这些信息包含在被纳秒量级光声压力调制的探测光反射强度中。在光声成像的过程中,由于CFRP中碳纤维材料对激发光产生了显著的吸收并且由于激发光波长短于探测光波长,因此从光声图像中可以清晰地观察到CFRP中碳纤维的排列情况,并且这些图像还揭示了CFRP内部缺陷的更多细节,展现了比背向散射图像以及明场显微图像更高的成像分辨率。如图8(b)所示的第一列图像显示了在冲击损伤周围相对完整的碳纤维排列,并且从该图中可以观察到CFRP中纤维束的尺寸大约为11.5 μm左右。此外,第二列中展现出可能是由于冲击过程中的挤压应力引起的纤维断裂和错位现象。第三和第四列显示了一些更为显著的缺陷,分别是缺束和褶皱并且AONC-PAM可以检测到这些缺陷的最小尺寸分别近似为13.8 μm以及10.3 μm,这些缺陷可能与CFRP的制造过程相关。

为了能够量化观察CFRP冲击损伤的尺寸变化以及其周围的细节,本文从背向散射图像中提取了各种能量

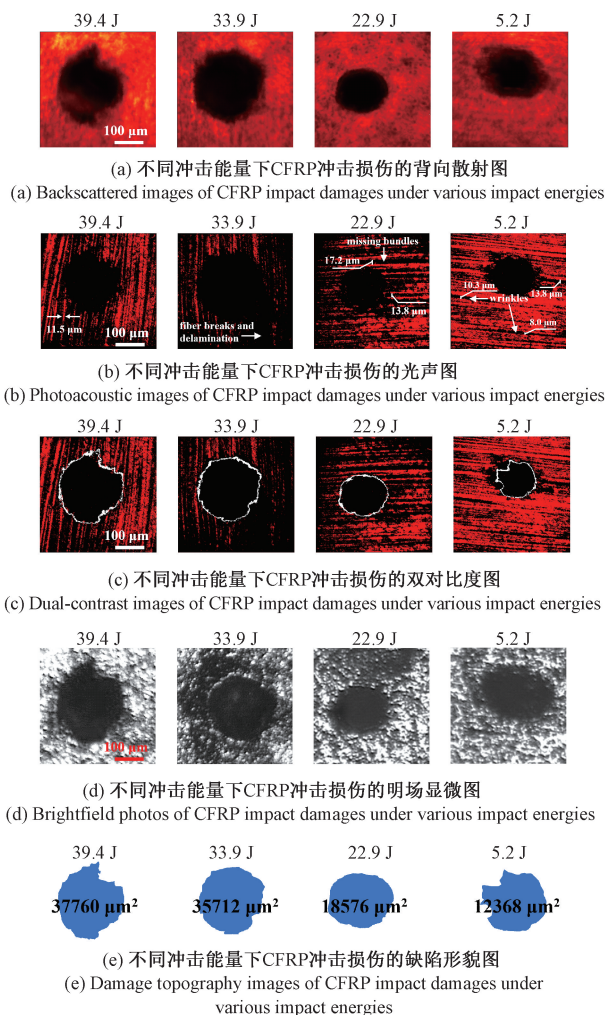


图8 不同冲击能量下CFRP冲击损伤的成像结果

Fig. 8 Results of CFRP impact damages under various impact energies

下冲击损伤的轮廓信息,并将其线性叠加到光声图像上,最终构成了双对比度图像,如图8(c)所示。从图中可以明显观察到,随着冲击能量的减小,CFRP冲击损伤区域的大小在逐渐减小,各种冲击损伤区域的面积计算结果如图8(e)所示。如图8(c)所示的第二列图像清晰展示了冲击损伤区域外侧碳纤维的排列以及走向,然而在与之对应的明场显微图像中,由于样品表面的粗糙度导致CFRP损伤周围区域出现了暗区,这种暗区的出现可能会被误判为局部的凹陷或者纤维断裂。在第三列的双对比度图像中,可以观察到在接近冲击损伤区域处出现了缺束的现象,而在相应的背向散射以及明场显微图像中,由于样品表面的不规则性和缺陷周围结构的复杂性,并没有直观体现出缺束特征的存在。在第四列的双对比度图像中,更小的轮廓信息可以体现出更小的冲击能量,然而由于样品表面的形变以及轮廓周边的粗糙结构导致无

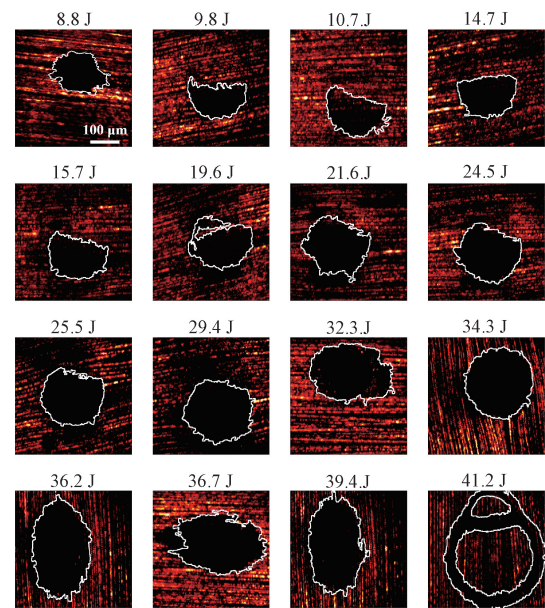
法准确从背向散射以及明场显微图像中观察出轮廓的信息。综上,由背向散射与光声图像叠加成的双对比度图像可以比明场显微图像展示出更加精准的损伤范围以及细节信息。

为验证 AONC-PAM 成像系统的可重复性以及双对比度成像策略的可靠性,本文深入研究了不同冲击能量下 CFRP 的冲击损伤,并进行量化表征。本次实验涵盖 7 种不同冲击能量的范围,分别为 9.8 ± 2.7 , 14.7 ± 1.5 , 19.6 ± 2.9 , 24.5 ± 1.0 , 29.4 ± 1.5 , 34.3 ± 2.0 , 39.4 ± 2.9 J, 在每种冲击能量范围内进行了 5 次独立的冲击实验,并利用 AONC-PAM 系统对造成的缺陷进行检测。在进行 CFRP 冲击实验时,需要通过手动操作螺旋测微计来施加冲击能量,这使得实现冲击能量的严格一致较为困难。因此,每组重复实验中施加的冲击能量存在一定范围的波动。具有代表性的 AONC-PAM 检测结果如图 9(a) 所示。

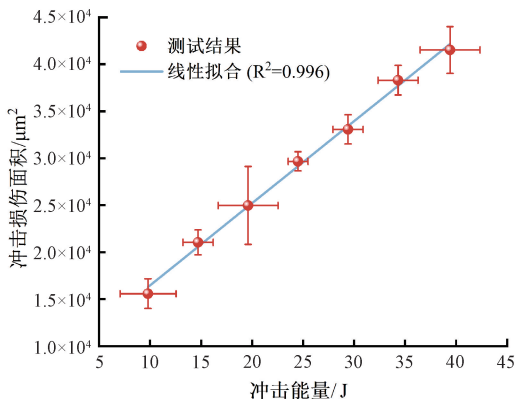
进一步地,本文研究了 AONC-PAM 系统检测到的损伤面积随冲击能量的分布情况,将每个冲击能量范围内的五组实验结果进行统计计算获得其对应的均值以及标准差,结果如图 9(b) 所示。该图的结果表明,在冲击能量从 9.8~39.4 J 的范围内,损伤面积与冲击能量之间呈现出线性关系。

3.4 检测结果的综合讨论

本文构建的 AONC-PAM 系统成功实现了对 CFRP 冲击损伤的非接触式高分辨无损检测。一方面,这种非接触式的成像模式克服了传统超声技术对液体耦合剂的需求^[5,16],从而避免了潮湿因素对 CFRP 材料力学性能、导电特性以及树脂基体降解的不利影响^[12]。另一方面,相较于非接触式超声^[17-18]和基于长波成像的红外热成像技术^[19-20],AONC-PAM 系统实现了 3 μm 以下的高空间分辨率。这使得 AONC-PAM 系统能够在碳纤维束中对亚毫米和微米级别的缺陷(10~20 μm)进行精准量化以及成像。这样的分辨率可以揭示 CFRP 中细小缺陷如隐痕形冲击损伤、纤维分布、纤维错位、缺束、褶皱以及干燥碳纤维组织中的缝隙、裂纹或其他隐蔽问题,三种技术的成



(a) 不同冲击能量下CFRP冲击损伤的检测图像
(a) Detection images of CFRP impact damage at various impact energies



(b) CFRP冲击损伤面积随冲击能量的变化
(b) Variation of CFRP impact damage areas with impact energies

图 9 AONC-PAM 成像系统的可重复性验证
Fig. 9 Validation of the reproducibility for the AONC-PAM system
像性能总结如表 1 所示。

表 1 3 种成像技术的性能总结
Table 1 Summary of performances for three imaging techniques

成像技术	激励方式	分辨率	成像模式	检测冲击损伤类型	成像最小缺陷尺寸
超声	超声波	0.06~4 mm ^[5,16-18]	液体耦合剂 ^[5,16] 或非接触 ^[17-18]	表面冲击凹痕,深层分层、脱粘 ^[5,16-,17,21]	0.05~1 mm ^[5,16-18]
红外热成像	热辐射或机械振动	>1 mm ^[7,19-20]	非接触 ^[7,19-20]	分层损伤,基体开裂,纤维断裂 ^[7,19-20]	>1 mm ^[7,19-20]
ANOC-PAM	红外激光	2.9 μm	非接触	纤维断裂、错位缺束和褶皱,表面冲击压痕	10~20 μm

在使用 200 kHz 的重频时,实验中激发光脉冲能量为 60 nJ,探测光功率保持在 6 mW,在这种条件下未观察

到样品表面因高功率而产生的烧伤现象。在这一激光重频下,本文的 AONC-PAM 系统将分辨率控制在 3 μm 以

下以达到对碳纤维束中亚毫米以及微米尺寸缺陷的高分辨率成像。更进一步地,将背向散射图像轮廓信息与光声图像吸收信息结合的双对比度成像策略实现了对冲击损伤区域精准的表征以及量化。此外,针对样品上的每个冲击损伤,本文利用自主开发的基于Qt框架的AONC-PAM Studio在2 s内同时获取了背向散射图像、光声图像和双对比度图像。这种单次采集中获得多个对比度和高分辨率图像的模式具有实现CFRP在线无损检测的潜力。

目前的AONC-PAM系统已经实现了对CFRP材料浅表层微观结构高分辨以及非接触式的快速检测,而将AONC-PAM与激光超声^[21]或光学相干断层扫描技术^[22]相结合,有望在设备使用过程中检测应力和内部缺陷如内部纤维排列角度以及层间错位^[18-19],从而进一步延长设备的使用寿命。除此,AONC-PAM具有全光式的系统结构、成熟的样品扫描模式以及实时的图像处理平台,因此对AONC-PAM系统进行工业化封装,即采用非标机械结构设计将激发光模块、探测光模块、扫描模块以及数据处理模块集成于一体并且结合高重频的(MHz级)脉冲激发光和基于图形处理单元的并行加速算法,不仅可以提升系统的鲁棒性,同时可以在未来实现如汽车电子以及航空工业等户外场景的在线无损检测。

4 结 论

本研究引入AONC-PAM技术并利用自主开发的双对比度成像策略成功实现了对CFRP材料中冲击损伤及微观缺陷的高分辨率非接触检测。采用二维振镜扫描成像方法,AONC-PAM系统仅在2 s内完成了 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 成像范围内的光学吸收与背向散射双对比度成像,呈现了比传统显微镜更为详尽的成像信息,包括碳纤维分布、断裂、错位和褶皱等细节。系统以 $2.9 \mu\text{m}$ 的空间分辨率非接触成像不同冲击能量下的CFRP损伤区域,并准确量化了损伤程度。AONC-PAM系统通过非接触和高空间分辨能力为呈现更多CFRP微损伤细节提供了有效工具,不仅为航空和汽车复合材料的精密无损检测开辟新技术途径,同时在深入研究CFRP性能和结构损伤机制方面具备广泛的应用前景。

参考文献

- [1] KARSANDIK Y, SABUNCUOGLU B, YILDIRIM B, et al. Impact behavior of sandwich composites for aviation applications: A review[J]. *Composite Structures*, 2023, 314: 116941.
- [2] HE D, KIM H C, SOMMACAL S, et al. Improving mechanical and life cycle environmental performances of recycled CFRP automotive component by fibre architecture preservation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 175: 107749.
- [3] ZAKARIA K A, JIMIT R H, RAMLI S N R, et al. Study on fatigue life and fracture behaviour of fibreglass reinforced composites[J]. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2016, 10(3): 2300-2310.
- [4] WANG Z, XIAN G J. Impact performances of fiber reinforced polymer composites and cables: A review[J]. *Composite Structures*, 2023, 319: 117128.
- [5] MOROKOV E, LEVIN V, CHERNOV A, et al. High resolution ply-by-ply ultrasound imaging of impact damage in thick CFRP laminates by high-frequency acoustic microscopy[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113102.
- [6] DORBATH B, SCHÜR J, VOSSIEK M. Transmission loss analysis of unidirectional carbon fiber-reinforced polymers for millimeter waves for linear and circular polarization[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023: 1-10.
- [7] LIU G, GAO W, LIU W, et al. Low-velocity impact damage detection in CFRP composites by applying long pulsed thermography based on post-processing techniques[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2023: 1-14.
- [8] 陈自然, 张桁潇, 刘小康, 等. 基于组合测量方式的新型磁场式时栅位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 107-115.
CHEN Z R, ZHANG H X, LIU X K, et al. Novel magnetic-field type time-gating displacement sensors based on a combined measurement method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 107-115.
- [9] YI Q, WILCOX P, HUGHES R. Modelling and evaluation of carbon fibre composite structures using high-frequency eddy current imaging[J]. *Composites Part B:*

- Engineering, 2023, 248: 110343.
- [10] CAO R, ZHAO J, LI L, et al. Optical-resolution photoacoustic microscopy with a needle-shaped beam[J]. Nature Photonics, 2023, 17(1): 89-95.
- [11] LIU Z, LIN B, LIANG X, et al. Multimode photoacoustic characterization of subsurface damage in ground thin wafers [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 238: 107845.
- [12] XU J, EL MANSORI M. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks[J]. Composite Structures, 2016, 157: 461-482.
- [13] HAJIREZA P, SHI W, BELL K, et al. Non-interferometric photoacoustic remote sensing microscopy [J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(6): e16278.
- [14] RESTALL B S, CIKALUK B D, MARTELL M T, et al. Fast hybrid optomechanical scanning photoacoustic remote sensing microscopy for virtual histology [J]. Biomedical Optics Express, 2022, 13(1): 39-47.
- [15] CHEN J, LI S, LONG Y, et al. Nondestructive inspection of metallic microstructure chips based on photoacoustic remote sensing microscopy [J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(18).
- [16] YANG X, KERSEMANS M. On the ultrasonic characterization of the stacking sequence of CFRP laminates[J]. NDT and E International, 2023, 138: 102897.
- [17] WOJTCZAK E, RUCKA M. Damage imaging algorithm for non-destructive inspection of CFRP/steel adhesive joints based on ultrasonic guided wave propagation[J]. Composite Structures, 2022, 297: 115930.
- [18] 王丙泉, 赵勃. 复合材料板的空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 100-108.
- WANG B Q, ZHAO B. In-situ stress measurement method for composite plate based on air-coupled ultrasonic Lamb wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 100-108.
- [19] TONG Z, CHENG L, XIE S, et al. A flexible deep learning framework for thermographic inspection of composites [J]. NDT & E International, 2023, 139: 102926.
- [20] KIDANGAN R T, UNNIKRISHNAKURUP S, KRISHNAMURTHY C V, et al. Induction thermography for unidirectional CFRP composites: A novel inspection approach through global current path integration [J]. Composite Structures, 2024, 327: 117678.
- [21] 颜江涛, 赵纪元, 訾艳阳, 等. 激光超声信号变分模式分解与裂纹定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 223-230.
- YAN J T, ZHAO J Y, ZI Y Y, et al. Variational mode decomposition of laser ultrasonic signal and crack quantitative detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 223-230.
- [22] HE B, ZHANG Y, ZHAO L, et al. Robotic-OCT guided inspection and microsurgery of monolithic storage devices[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5701.

作者简介



丁凯旋, 2021 年于天津工业大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为基于光声显微成像的缺陷检测技术。

E-mail: 2021202138@tju.edu.cn

Ding Kaixuan received his B.Sc. degree from Tiangong University in 2021. He is currently a M. Sc. candidate at Tianjin University, focusing on photoacoustic microscopy imaging-based defect detection technology.



陈冀景, 2019 年于南京邮电大学获得学士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为基于非接触光声显微成像的无损检测技术。

E-mail: 2019202049@tju.edu.cn

Chen Jijiang received his B.Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2019. He is currently a Ph.D. candidate at Tianjin University. His main research interest includes non-contact photoacoustic microscopy imaging-based non-destructive testing technology.



皮一涵, 2019 年于天津大学学士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为非接触光声显微成像技术。

E-mail: pp0525@tju.edu.cn

Pi Yihan received her B.Sc. degree from

Tianjin University in 2019. She is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University. Her main research interest includes non-contact photoacoustic microscopy for biological imaging technology.



李娇(通信作者),2008 年于天津大学获得学士学位,2013 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学副教授,博士生导师。同时兼任天津大学佐治亚理工深圳学院副教授,主要研究方向为多尺度光声成像及其在肿瘤生物学中的转化应用,以及利用各种功能纳米材料和纳米技术进行肿瘤治疗的高级分子成像。

E-mail: jiaoli@tju.edu.cn

Li Jiao (Corresponding author) obtained her B.Sc. degree from Tianjin University in 2008 and her Ph.D. degree in 2013 from the same institution. She is currently an associate professor and doctoral supervisor at Tianjin University. She also serves as an associate professor at Georgia Tech Shenzhen Institute, Tianjin University. Her main research interests include multi-scale optoacoustic imaging with translational applications to tumor

biology, and advanced molecular imaging with various functional nanomaterials and nanotechnologies for tumor theragnostic.



田震,2004 年于天津大学获得学士学位,2010 年于天津大学获得博士学位,现任天津大学精密仪器与光电子工程学院副院长,教授,博士生导师。同时兼任天津大学佐治亚理工深圳学院教授,主要研究方向为主要研究方向为太赫兹光子学、太赫兹超材料与器件、太赫兹应用、太赫兹光声成像。

E-mail: tianzhen@tju.edu.cn

Tian Zhen received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2004 and his Ph.D. degree from Tianjin University in 2010. He is currently the vice dean of School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, as well as a professor and doctoral supervisor. He also holds a position as a professor at Georgia Tech Shenzhen Institute, Tianjin University. His main research interests include terahertz photonics, terahertz metamaterials and devices, terahertz applications, and terahertz photoacoustic imaging.