

GFRP 损伤 X 射线和超声无损检测的融合方法*

张 瑾 李 洁 魏子璇 王晓璐 张 莉

(吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130061)

摘 要:针对玻璃纤维复合材料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)无损检测中 X 射线和超声技术检测效果不佳的问题,利用 X 射线图像的高分辨率和超声图像的高对比度特点进行互补成像融合,通过整合 X 射线图像的缺陷边缘细节信息和超声图像的高对比度大致轮廓信息,形成新图像以提高缺陷显示效果。将基于十字扇形滤波器的频域算法用于去除 X 射线图像中的横、竖条纹噪声,采用形态学滤波算法去除超声图像中的椒盐噪声,并提出了基于区域分割和静态小波变换的图像融合算法,用以融合 X 射线和超声图像特征。测试结果表明,相较于处理前的 X 射线和超声图像,融合后的图像标准差 SD 值平均提高 154.1%,熵 H 值平均降低 92.2%,缺陷检测图像对比度有所提高且边缘细节清晰。算法有效除去了两种图像中的条纹噪声和椒盐噪声,能改善 X 射线图像对比度低、超声图像分辨率差的不足,为复合材料缺陷检测提供了新思路。

关键词: X 射线无损检测;超声无损检测;图像融合;玻璃纤维复合材料

中图分类号: TH391; TN06

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.40

Fusion method of X-ray and ultrasonic nondestructive detection of GFRP

Zhang Jin Li Jie Wei Zixuan Wang Xiaolu Zhang Li

(College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor effect of X-ray and ultrasonic technologies in non-destructive detection of glass fiber reinforced plastic (GFRP), characteristics of high resolution of X-ray images and high contrast of ultrasound images are used for complementary imaging fusion, and by integrating the detail information of the defect edge of X-ray images and the high contrast outline information of ultrasonic images, new images are formed to improve the defect display effect. The frequency domain algorithm based on cross sector filter is used to remove the horizontal and vertical fringe noise of X-ray images, the morphological filtering algorithm is used to remove the salt and pepper noise of ultrasonic images, and the image fusion algorithm based on region segmentation and static wavelet transform is proposed to fuse X-ray and ultrasonic image traits. The test results show that the standard deviation SD of the fused images is increased by 154.1% on average, the entropy H is decreased by 92.2% on average, and the contrast of defect detection images is higher and the edge details are clear. The algorithm can effectively remove the fringe noise and pepper and salt noise in the two kinds of images, and can effectively improve the weakness of low contrast of X-ray images and poor resolution of ultrasonic images, and provide a new idea for the defect damage detection of composite materials.

Keywords: X-ray nondestructive testing; ultrasonic nondestructive testing; image fusion; glass fiber composites

0 引 言

玻璃纤维复合材料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)具有耐腐蚀性好、抗压强度高、优良特性,在航空

航天、装饰和建材等多个领域中应用广泛,发挥着重要作用^[1]。但在生产和服役阶段,由于生产工艺参差不齐、使用疏忽和环境等因素,无法避免材料包含不同类型缺陷,如表面损伤、分层、异物夹杂、脱粘和孔隙等^[2-4],降低材料的使用特性和承载能力,带来隐患和危害。因此,使用

无损检测方法,对 GFRP 结构完整性进行检测至关重要^[5]。

在复合材料缺陷检测技术中,X 射线和超声无损探伤技术是两种比较成熟的检测方法,各有其优缺点。目前,国内外已有学者将 X 射线和超声技术联合用于改善复合材料缺陷检测。2014 年,蒋福棠等^[6]联合运用超声 C 扫描法和软 X 射线法,有效检测出 SiC 增强 Al 基复合材料中的缺陷。2020 年,Katunin 等^[7]在碳纤维增强复合材料的结构冲击损伤分析上联合采用超声和 X 射线无损检测,提高材料内部损伤检测的精度。2022 年,Chen 等^[8]采用 X 射线 CT 和透射超声检测方法测量碳纤维增强聚合物材料的孔隙率,提高孔隙率预测精度。2023 年,Juan-Ignacio 等^[9]提出半自动缺陷分割方法,通过 X 射线计算机断层扫描和相控阵超声检测数据,利用卷积神经网络分割三维超声数据,监测超声检测技术缺陷评估情况。杨玉森等^[10]采用 X 射线检测法和高分辨率超声脉冲反射法对单向铺层复合材料层压板的冲击损伤进行无损检测与评估,以此阐述层压板冲击损伤机制。以上研究都是通过 X 射线和超声两种检测方法配合来改善缺陷检测效果,但是未见基于 X 射线和超声无损检测结果成像融合的研究报道。

本团队^[11-12]在进行 GFRP 板的缺陷检测时观察到,X 射线的缺陷检测图像分辨率高、对比度较差,相反超声的缺陷检测图像对比度高、分辨率较差。基于以上两种技术的互补性,将 X 射线和超声无损检测数据进行成像融合^[13],以改善缺陷表征,提高对复合材料结构的诊断能力。提出基于区域分割和静态小波变换的图像融合算法,对 X 射线和超声图像进行融合。前期选择十字扇形滤波器除去 X 射线缺陷检测图像的横竖条纹噪声,采用形态学滤波除去超声缺陷检测图像的点状椒盐噪声,再对 X 射线和超声图像进行区域分割,最后进行静态小波图像融合。经检测测试,融合后的图像相比处理前,标准差平均提高 154.1%,熵平均降低了 92.2%,该结果有效提高了缺陷检测效果,为 GFRP 的缺陷损伤检测提供了新的研究方向与基础。

1 X 射线和超声无损检测

1.1 样本制备

参照国内外最新文献报道^[14-16]和行业标准^[17-18],设计一批含有人为设置缺陷的标准样品,样品缺陷信息如表 1 所示。该批样品是由多层玻璃纤维布经环氧树脂粘合而成的层压板,其三维尺寸均为 100 mm(长)×100 mm(宽)×3 mm(高),共有 15 层 0.2 mm 厚的玻璃纤维布,每层玻璃纤维布沿着 0°或 90°的方向交叉堆叠。堆叠过程中,通过在玻璃纤维布之间放入不同形状和厚度的聚

四氟乙烯薄膜异物来模拟缺陷。图 1(a)和(c)是对应含有不同形状和厚度缺陷 GFRP 的设计图,图 1(b)和(d)分别是对应缺陷的尺寸。

表 1 样品缺陷信息(注:厚度、深度、长度单位:mm)

Table 1 Sample defect information (Note: thickness, depth, length unit: mm)

样本	缺陷信息				
	材质	形状	厚度	深度(距离样本上表面)	长度
不同形状	聚四氟乙烯膜	圆形	0.10	1.50	20.00
		五角星			
		正方形			
		三角形			
不同厚度	聚四氟乙烯膜	五角星	0.50	1.50	20.00
			0.20		
			0.10		
			0.05		

1.2 X 射线装置

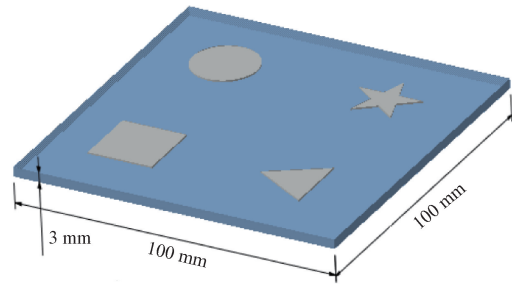
X 射线无损探伤是将被检件的某一截面经 X 射线照射,射线能量发生不同程度衰减,被探测器采集后传输给电脑,再采用图像重建算法获得被检件截面的二维图像^[19]。使用的 X 射线计算机层析成像系统实物和原理图分别如图 2 和 3 所示,系统包括辐射源、旋转样品台、阵列探测器和上位机软件。FXE-225 kV 管是辐射源,工作电压和电流分别是 80 kV 和 2 mA,样本放在旋转台上,台面距辐射源 380 mm。辐射源产生并辐射 X 射线,在穿透样品过程中被样品吸收一部分,剩余 X 射线被阵列探测器检测。由于样品缺陷处和非缺陷处的密度差异会导致不同的 X 射线透射率,最终在成像时表现为不同灰度。通过旋转样品台调整方向,获得层压板在多个角度下的二维切片图像,最后使用 PARREC 软件对二维切片进行重建。

1.3 超声装置

超声脉冲反射法中,超声波在被检样品中传播时碰到声阻抗不同介质层部分产生反射回波并由探头接收,再以此信号幅度、相位和接收时间不同来衡量材料损伤情况^[20-21]。使用的超声 C 扫描成像系统实物图和原理图分别如图 4 和 5 所示,系统主要包括多通道超声仪、三维导轨探头、水箱以及上位机软件。多通道超声仪可以发射频率高达 20 kHz 脉冲,经聚焦浸没式探头发射超声波,透过水箱中的水进入水底样品,遇到样品内部不同界面时产生反射,并由水箱上方探头接收。当探头随着导轨在样品上方移动时,就可完成样品的二维扫描。

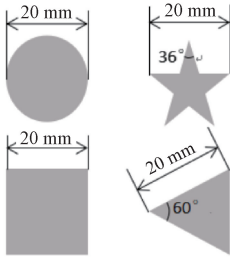
1.4 X 射线和超声检测结果

图 6(a)和(c)分别是含有不同形状和厚度缺陷的层压板 X 射线成像检测结果,图 6(b)和(d)分别是含有不同形状和厚度缺陷的层压板超声成像检测结果。从图 6



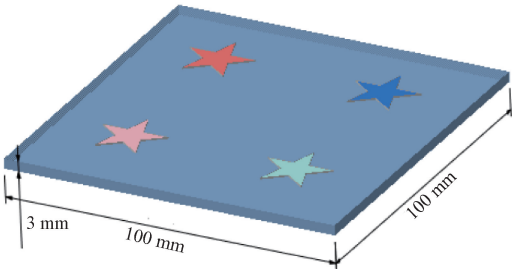
(a) 不同形状缺陷层压板

(a) Laminate with defects of different shapes



(b) 不同形状缺陷尺寸图

(b) Dimensional drawing of defects with different shapes



(c) 不同厚度缺陷层压板

(c) Laminate with defects of different thicknesses



(d) 不同厚度缺陷尺寸图

(d) Dimensional drawing of defects with different thicknesses

图 1 含有不同形状和厚度缺陷的 GFRP 板
Fig. 1 Glass fiber composite panels containing defects of different shapes and thicknesses

可以看出,X 射线检测结果能观察到三角形和五角星等缺陷的尖角,较好地保留缺陷细节,分辨率高但对比度较差。超声检测结果无法观察到缺陷尖角,缺陷细节信息丢失,分辨率低但对比度较高。此外,X 射线检测图像具有横竖条纹噪声,是由于生产层压板过程中将玻璃纤维布以 90°方向交叉铺叠方式形成的。超声检测结果存在不同亮度的椒盐噪声,是因为超声扫描成像过程中超声波经过样品形成反射波和散射波的干涉效应导致的。条纹和椒盐噪声会降低两种成像技术的缺陷扫描效果,需要在融合前去除,避免噪声对融合结果的影响。

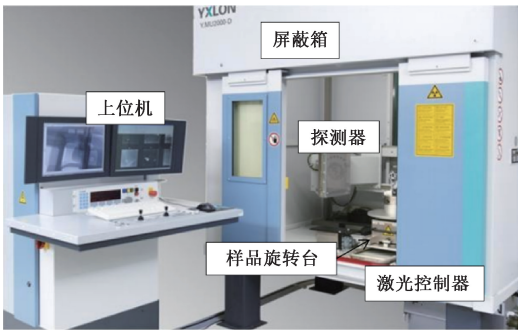


图 2 X 射线计算机层析成像系统实物图

Fig. 2 Physical image of X-ray computed tomography system

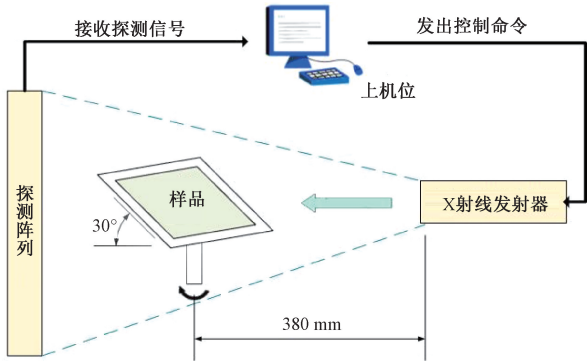


图 3 X 射线计算机层析成像系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of X-ray computed tomography system

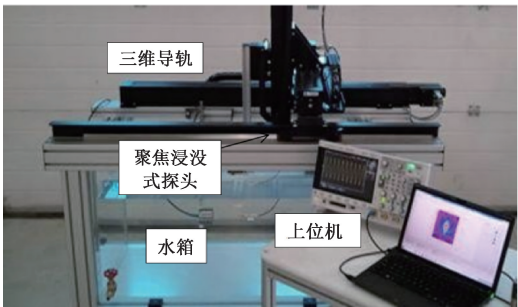


图 4 超声扫描成像系统实物图

Fig. 4 Physical image of ultrasound scanning imaging system

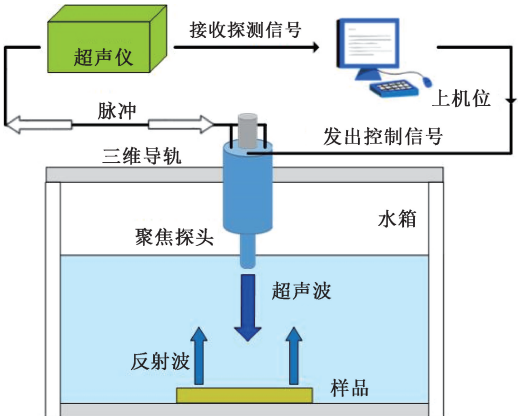


图 5 超声扫描成像系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of ultrasound scanning imaging system

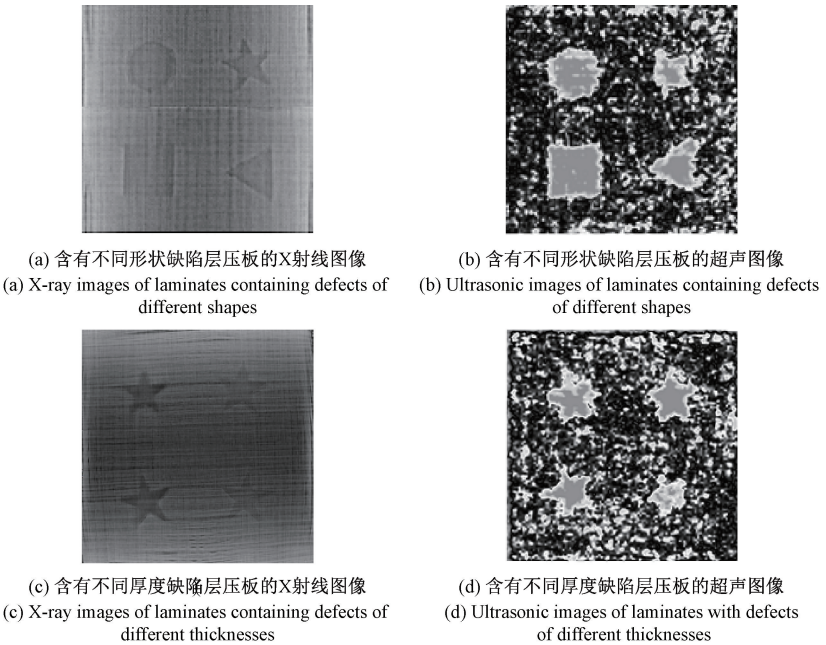


图 6 未过去噪处理的成像检测结果
Fig. 6 Imaging results without denoising processing

2 基于区域分割和静态小波分解的图像融合算法

算法流程图如图 7 所示,主要包括 X 射线图像条纹噪声去除、超声图像椒盐噪声去除、基于区域分割和静态小波分解的图像融合 3 部分。

2.1 X 射线图像条纹噪声去除

采用十字扇形滤波器频域法去除 X 射线图像中的条纹噪声^[22],共包括 4 个步骤:1) 依据傅里叶变换原理对含噪图像进行预处理,变换后傅里叶频谱图会出现十字亮线,亮线位于频谱图正中间水平和垂直位置。二维傅里叶变换计算如式(1)所示。

$$F_{uv} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f_{ij} e^{-j2\pi(\frac{u_i}{M} + \frac{v_j}{N})} \tag{1}$$

其中, F_{uv} 是经二维傅里叶变换后的图像数据, f_{ij} 是原图像数据, $M \times N$ 是图像的横纵像素数。2) 根据噪声频域特点建立十字扇形滤波器,并调整滤波器的水平和垂直中心角。3) 对图像采取傅里叶逆变换操作。4) 利用线性扩展法对去除条纹噪声后的 X 射线图像增强整体对比度,方便后期图像融合。经过条纹去噪后的 X 射线图像缺陷细节清晰,但缺陷和背景对比度仍然较差。

2.2 超声图像椒盐噪声去除

通过形态学滤波去除超声图像的椒盐噪声^[23],包括 3 个步骤:1) 利用最大类间距离法确定阈值,对超声灰度图像进行阈值分割,获得二值化图像。2) 利用开运算

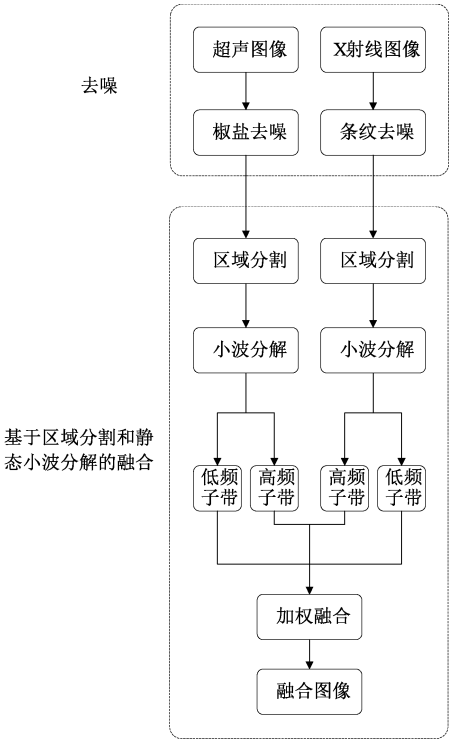


图 7 算法流程图

Fig. 7 Algorithm flow diagram in this paper

(先腐蚀后膨胀)滤除目标中的噪声。3) 利用闭运算(先膨胀后腐蚀)填充目标中的狭窄裂缝和长细窄沟,消除小孔洞。去除椒盐噪声后的超声图像缺陷有大概的轮廓,

并且缺陷和背景对比鲜明,但是仍然缺少缺陷的边缘细节信息。

2.3 图像融合

采用基于区域分割和静态小波变换的图像融合算法^[24],共 3 个步骤:1)根据缺陷分布情况,将 X 射线和超声图像均分成上下左右 4 个区域。分区域后,依据缺陷情况单独设置各区域的小波基、小波分解层数以及对对应子带的融合比例。2)对两种图像按区域进行静态小波分解,得到高频和低频系数。静态小波变换计算如式(2)所示。

$$WT(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi^* \left(\frac{t - \tau}{\alpha} \right) dt \quad (2)$$

其中, τ 是平移因子, $\alpha (\alpha > 0)$ 是尺度因子, φ 是小波基函数, $*$ 是复共轭。 $f(t)$ 是待分析数据, $WT(\alpha, \tau)$ 是不同尺度和时间平移因子下的连续小波系数。低频系数决定缺陷大致轮廓,超声图像对比度高、轮廓更清晰,图像融合过程中可加大超声图像的低频融合系数,由超声图像来决定缺陷的大致轮廓。高频系数决定缺陷的细节和边缘,X 射线图像分辨率较高、细节和边缘信息保留较为完整,图像融合过程中可以加大 X 射线图像的高频融合系数,由 X 射线图像来决定缺陷的细节和边缘。3)对 4 个区域分别进行小波逆变换,拼接各区域融合后的图像,得到融合后的完整图像。

2.4 融合图像效果评价

为客观评价融合后的图像,对融合后图像的标准差 SD、熵 H 和空间频率 SF 进行计算。标准差 SD 表示图像灰度的分布程度,值越大说明图像对比度越高,表明图像融合效果越佳。熵 H 用于评价图像平均信息量的多少,值越小说明融合后图像含有除缺陷信息外的冗余信息越少,进而表明融合后图像显示缺陷效果越好。空间频率 SF 表示图像在空间域的总体活动水平,值越大说明图像越符合人类视觉感知系统。SD、H 和 SF 的计算公式分别如式(3)~(5)所示。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij} - \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij})^2} \quad (3)$$

$$P_{ij} = f_{ij} / M \times N$$

$$H = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$RF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - f_{i+1,j})^2}$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - f_{i,j+1})^2}$$

$$SF = \sqrt{RF^2 + CF^2} \quad (5)$$

其中, SD 是图像的标准差, H 是图像的信息熵, SF 是图像的空间频率, f_{ij} 代表待计算图像任一像素的灰度值, $M \times N$ 是图像的横纵像素数。

3 结果与讨论

图 8 和 9 分别为针对不同形状和厚度的缺陷层压板的图像处理结果。图 8(a) 和 9(a) 是经过条纹去噪增强后的 X 射线图像,可以看出十字扇形滤波器有效去除了条纹噪声。图 8(b) 和 9(b) 为经过形态学滤波的超声图像,能够看到该方法有效去除了椒盐噪声。图 8(c) 和 9(c) 是采用基于区域分割的小波算法的融合图像,结果表明融合后的图像,既含有 X 射线图像相对完整的缺陷边缘细节信息,又没有失去超声图像对比度高的优势。图 8(d) 和 9(d) 采用了未分区域的静态小波变换算法进行融合^[25],明显有部分缺陷未被检测出来,且检测出的缺陷边缘细节信息还原效果较差。图 8(e) 和 9(e) 是基于拉普拉斯金字塔变换算法融合后的图像^[26],能够看到缺陷边缘细节信息与超声图像几乎一致,说明该算法未能将 X 射线图像的缺陷边缘细节信息融合到结果图像中。

表 2 对比了算法融合前后图像标准差 SD 值的变化,可以看出,相比 X 射线图像,融合后图像的标准差明显增大,相比超声图像,融合后图像的标准差也有所增大,表明融合后图像的对比度提高,能更清晰地显示缺陷。表 3 比较了算法融合前后图像熵 H 值的变化,可以看出,相比 X 射线和超声图像,融合后图像的熵值均显著减小,说明融合后图像几乎不包含影响缺陷分析的噪声信息,缺陷的显示效果不受干扰。表 4 比较了算法融合前后空间频率 SF 值的变化,相较于 X 射线图像,融合后图像的空间频率大幅度增大,表明融合后图像更符合人类视觉感知系统,而融合后图像相较于超声图像空间频率有所减小,是因为超声图像中的白色椒盐噪声会提高像素点间的整体差值水平,影响空间频率值。

表 2 融合前后图像标准差 SD 值比较
Table 2 Comparison of standard deviation
SD before and after fusion

样本	X 射线 图像	超声 图像	融合后 图像	相比 X 射线 图像,融合后 变化率	相比超声 图像,融合 后变化率
不同形状	23. 818 7	67. 351 2	94. 600 3	+297. 2%	+40. 5%
不同厚度	19. 643 8	69. 535 7	72. 179 8	+267. 4%	+3. 8%

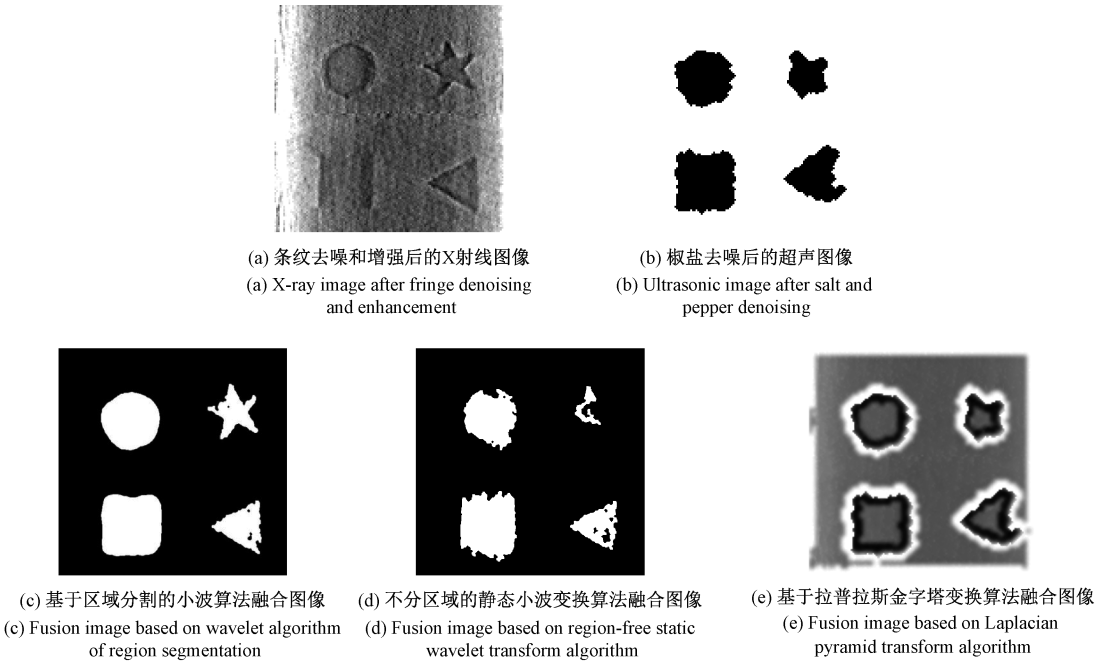


图 8 含有不同形状缺陷的 GFRP 板
Fig. 8 GFRP panel with defects of different shapes

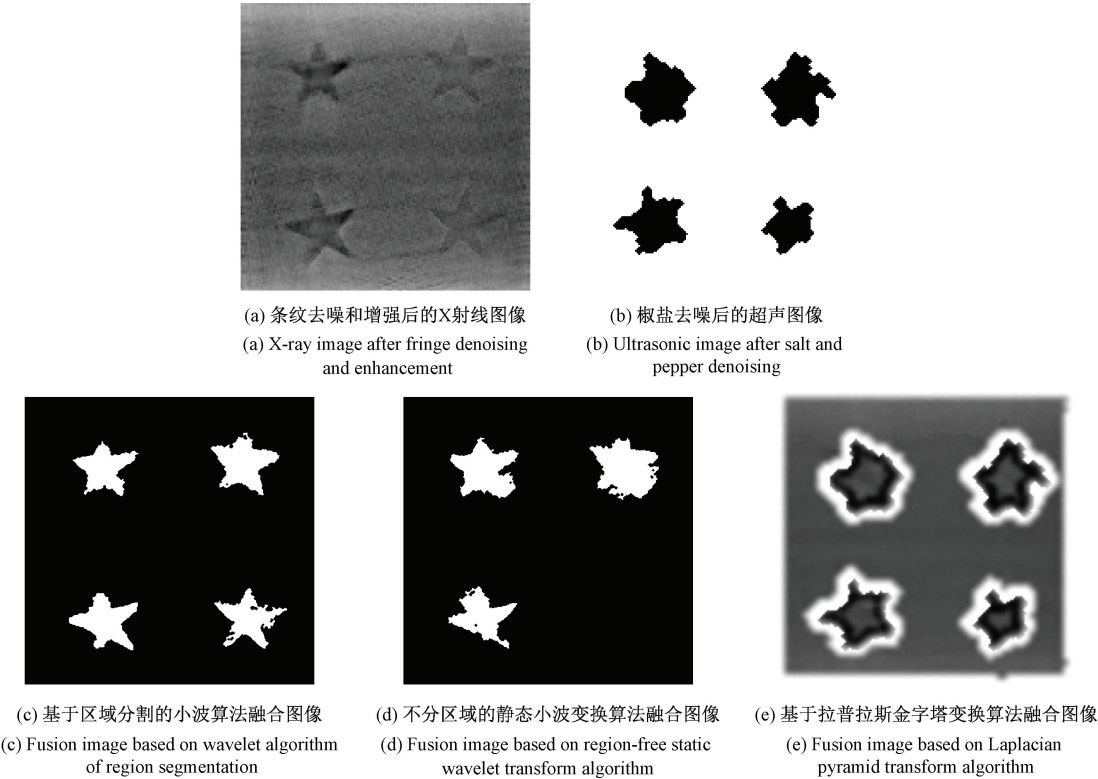


图 9 含有不同厚度缺陷的 GFRP 板
Fig. 9 GFRP plate with defects of different thicknesses

表 3 融合前后图像熵 H 值比较

Table 3 Comparison of image entropy H before and after fusion

样本	X 射线图像	超声图像	融合后图像	相比 X 射线	相比超声
				图像,融合 后变化率	图像,融合 后变化率
不同形状	6.463 6	7.500 2	0.645 6	-90.0%	-91.4%
不同厚度	6.183 4	7.712 1	0.429 2	-93.1%	-94.4%

表 4 融合前后图像空间频率 SF 值比较

Table 4 Comparison of spatial frequency SF before and after fusion

样本	X 射线图像	超声图像	融合后图像	相比 X 射线	相比超声
				图像,融合 后变化率	图像,融合 后变化率
不同形状	11.580 3	58.535 8	24.439 8	+111.0%	-58.2%
不同厚度	9.735 4	56.595 8	26.013 1	+167.2%	-54.0%

4 结 论

采用 X 射线和超声无损检测法对内含不同缺陷的玻璃纤维层压板进行检测,在分别利用十字扇形滤波器和形态学滤波去除 X 射线图像的条纹噪声和超声图像的椒盐噪声后,提出基于区域分割和静态小波变换的图像融合处理方法,有效规避单独使用 X 射线和超声法进行缺陷检测的短处,使得在融合后的图像中缺陷细节完整、对比度高。此研究成果为不同复合材料无损检测方法的融合提供了新的思路和方法。

参考文献

[1] 牛忠旺,曹丽丽,李其朋. 玻璃纤维增强复合材料的应用及研究现状[J]. 塑料工业, 2021, 49(201): 9-17.

NIU ZH W, CAO L L, LI Q B. Application and research status of glass fiber reinforced composites [J]. China Plastics Industry, 2021, 49(201): 9-17.

[2] WANG X, WANG B, ZHANG Y, et al. Dispersion of mechanical properties of high-strength glass fibre composites in hygrothermal environment [J]. Polymers, 2022, 14(17): 351401-351438.

[3] SUKUR E F, ELMAS S, SEYYEDNOURANI M, et al. Effects of meso- and micro-scale defects on hygrothermal aging behavior of glass fiber reinforced composites [J]. Polymer Composites, 2022, 43(11): 8396-8408.

[4] 覃尹星,姜世强,高斌,等. 缺陷类型对纤维复合材

料力学性能的影响[J]. 西南科技大学学报, 2022, 37(1):37-42.

QIN Y X, JIANG SH Q, GAO B, et al. Effect of defect types on mechanical properties of fiber composites [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2022, 37(1): 37-42.

[5] ARDEBILI A, ALAEI M H. Non-destructive testing of delamination defects in GFRP patches using step heating thermography [J]. NDT&E International, 2022, 128: 10261701-10261710.

[6] 蒋福棠,杜吉凯,何双起. 金属基复合材料的超声与射线检测[J]. 无损检测, 2014, 36(3): 44-46.

JIANG F T, DU J K, HE SH Q. Ultrasonic and radiographic testing of metal matrix composites [J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(3): 44-46.

[7] ANDRZEJ K, ANGELIKA W K, KRZYSZTORF D. Impact damage evaluation in composite structures based on fusion of results of ultrasonic testing and X-ray computed tomography [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(7): 186701-186728.

[8] CHEN D K K, ZHOU Y F, WANG W, et al. Ultrasonic signal classification and porosity testing for CFRP materials via artificial neural network [J]. Materials Today Communications, 2022, 30: 10302101-10302110.

[9] JUAN-IGNACIO C, GUILLERMO C, JORGE C, et al. A methodology to automatically segment 3D ultrasonic data using X-ray computed tomography and a convolutional neural network [J]. Applied Sciences, 2023, 13(5933): 593301-593316.

[10] 杨玉森,魏然. 复合材料层压板冲击损伤的无损检测与评估[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(1): 63-68.

YANG Y S, WEI R. Nondestructive testing and evaluation of impact damage of composite laminates [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(1): 63-68.

[11] WANG J, ZHANG J, CHANG T Y, et al. A comparative study of non-destructive evaluation of glass fiber reinforced polymer composites using terahertz, X-ray and ultrasound imaging [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(6): 963-972.

[12] WANG J, ZHANG J, CHANG T Y, et al. Terahertz nondestructive imaging for foreign object detection in glass fibre-reinforced polymer composite panels [J]. Infrared Physics and Technology, 2019, 98: 36-44.

- [13] 羊肇俊, 曾理. 基于加权最小二乘滤波和引导滤波的铸件 DR 图像融合[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 211-220.
YANG ZH J, ZENG L. Casting DR image fusion based on weighted least squares filter and guided filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 211-220.
- [14] DAE-HYUN H. Inner defect detection of glass fiber reinforced polymer sandwich panel using pulsed terahertz imaging based on smoothing and derivative [J]. NDT & E International, 2023, 138: 1028621-1028629.
- [15] ERGENE B, BOLAT C, KARAKILINC U, et al. A comprehensive investigation of drilling performance of anisotropic stacked glass-carbon fiber reinforced hybrid laminate composites [J]. Polymer Composites, 2023, 44(5): 2656-2670.
- [16] 王赫楠, 任姣姣, 张丹丹, 等. 基于连续小波变换的玻璃纤维增强树脂复合材料太赫兹特征增强及缺陷成像[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4190-4197.
WANG H N, REN J J, ZHANG D D, et al. Glass fiber reinforced polymer terahertz feature enhancement and defect imaging based on continuous wavelet transform [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12): 4190-4197.
- [17] 凡丽梅, 王从科, 董方旭, 等. GB/T 38537-2020, 纤维增强树脂基复合材料超声检测方法 C 扫描法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
FAN L M, WANG C K, DONG F X, et al. GB/T 38537-2020, Ultrasonic Testing Method for Fiber Reinforced Resin Matrix Composites—C-Scan Method [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [18] 赵付宝, 王从科, 董方旭, 等. GB/T 38535-2020, 纤维增强树脂基复合材料工业计算机层析成像(CT)检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
ZHAO F B, WANG C K, DONG F X, et al. GB/T 38535-2020, Test Method on Fiber Reinforced Resin Matrix Composites by Industrial Computed Tomography (CT) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [19] 焦浩轩. 二维形貌扫描辅助 X 射线成像检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
JIAO H X. Research on two-dimensional morphology scanning assisted X-ray imaging detection technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [20] MARIA Z, ROBERT A S, PAUL D W. Suppression of front and back surface reflections in ultrasonic analytical signal responses from composites [J]. Ultrasonics, 2022, 126: 10681501-10681521.
- [21] 付磊, 韩军, 龙晋恒, 等. 35MnB 合金淬硬层深度的超声无损测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 24-32.
FU L, HAN J, LONG J H, et al. Ultrasonic nondestructive testing for the hardened layer depth of induction quenched 35MnB alloy [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 24-32.
- [22] 李明轩. 红外图像条纹噪声去除算法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
LI M X. Research on stripe noise removal algorithm for infrared images [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [23] 赵豪. 船用柴油机多孔喷雾可视化试验研究及图像处理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
ZHAO H. Visualization test and image processing of multi hole spray for marine diesel engine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [24] 莫才健, 田健榕, 武锋强, 等. 基于加权小波分析的遥感图像融合算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(3): 617-624.
MO C J, TIAN J R, WU F Q, et al. Remote sensing images fusion algorithm based on weighted wavelet analysis [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2018, 56(3): 617-624.
- [25] 常青, 杨程伟, 罗彬杰, 等. 基于小波变换的扩散焊超声 C 图像融合算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(4): 54-59, 87.
CHANG Q, YANG CH W, LUO B J, et al. Ultrasonic C image fusion algorithm for diffusion welding based on wavelet transform [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(4): 54-59, 87.
- [26] 叶银芳, 聂建英. 基于拉普拉斯金字塔变换的红外/被动毫米波图像融合[J]. 弹箭与制导学报, 2014, (2): 165-167, 171.
YE Y F, NIE J Y. Fusion of IR / PMMW image based on laplacian pyramid transform [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, (2): 165-167, 171.

作者简介



E-mail: zhangjin0109@jlu.edu.cn

Zhang Jin received her B. Sc. degree from Northeast Normal University in 2008, M. Sc. degree from Northeast Normal University in 2011, and Ph. D. degree from Jilin University in 2016, respectively. Now she is a senior engineer in College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University. Her main research interest includes non-destructive testing of

composite materials.



E-mail: zhangli0830@jlu.edu.cn

Zhang Li (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Jilin University in 2010, and M. Sc. degree from Jilin University in 2013, respectively. Now she is a senior engineer in College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University. Her main research interests include pattern recognition and signal processing.

张莉(通信作者),2010 年于吉林大学获得学士学位,2013 年于吉林大学获得硕士学位,现为吉林大学仪器科学与电气工程学院高级工程师,主要研究方向为模式识别与信号处理。