

引文格式: 袁丽华, 洪康, 朱言臻, 等. 基于红外序列独立成分分析的复合材料冲击损伤缺陷表征[J]. 航空制造技术, 2022, 65(20): 83-91.
YUAN Lihua, HONG Kang, ZHU Yanzhen, et al. Impact damage characterization of composite materials based on independent component analysis for infrared sequences[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(20): 83-91.

基于红外序列独立成分分析的复合材料冲击损伤缺陷表征*

袁丽华¹, 洪康¹, 朱言臻¹, 刁腾彦¹, 李喆²

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室, 南昌 330063;
2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 采用独立成分分析方法研究了基于脉冲红外图像的复合材料冲击损伤的缺陷表征问题。首先依据试块脉冲红外试验的先验知识和缺陷与非缺陷之间的温差特性为红外序列图像选取合适的区间段; 然后对构建的数据矩阵进行中心化与白化预处理, 采用梯度下降法进行独立成分分析, 由重构矩阵可得到独立成分特征图像; 最后, 选择合适的图像分割方法可以获得最大损伤长径和损伤短径的缺陷表征量。以两块不同厚度的碳纤维增强型复合层合板分别在 30 J 和 40 J 的冲击能量下的损伤缺陷为例, 成功提取了冲击损伤的最大损伤长径和损伤短径, 并与超声 F 扫描的结果进行对比, 误差在可接受的范围内, 尤其是厚度为 2 mm 的层合板, 误差在 5% 以内。研究结果表明, 独立成分分析能够有效区分噪声与缺陷, 并且获得的特征图像比原始图像的信噪比更高、对比度更大以及图像质量更好, 有利于缺陷的提取和表征。

关键词: 独立成分分析; 脉冲红外无损检测; 复合材料; 冲击损伤; 图像分割

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.20.083



袁丽华

副教授, 博士, 研究方向为红外无损检测技术。

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fibre reinforced plastics, CFRP) 因其结构重量轻、比强度高、抗疲劳性强等优异的性能被广泛运用到航空制造工业领域, 逐步成为目前最重要的航空结构材料^[1]。使用 CFRP 的机身、机翼等大型主承力部件在制造和服役期间, 可能会因各种意外坠落和外物撞击而造成结构性损伤, 对飞机的整体结构造成巨大的安全隐患^[2-3]。在冲击载荷作用下, CFRP 层压板易产生基体裂纹, 逐步扩展到层间从而形成分层损伤, 低能量的冲击在 CFRP 层压板表面目视并不明显^[4-5]。因此, 提升 CFRP 的冲

击损伤缺陷表征能力已成为航空构件复合材料缺陷检测的主要研究热点之一。

脉冲红外热成像技术 (Pulsed infrared thermography) 作为一种快速有效的无损检测技术, 通过红外序列图像监测材料结构的健康状况, 被广泛应用于复合材料结构件的外场、在线、在役检测^[6-7]。但由于检测过程中易受到表面受热不均或发射率局部变化等因素影响, 采集的红外序列图像存在低分辨率、低对比度、低信噪比等问题。因此, 为提升检测结果的信噪比以及量化精度, 相关学者提出了许多能够降低噪

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51865638); 南昌航空大学研究生创新专项资金 (YC2021-086)。

声干扰、增强缺陷对比度的基于图像序列的处理算法,比如热信号重构法(Thermographic signal reconstruction, TSR)^[8]、独立成分分析法(Independent component analysis, ICA)^[9]、奇异值分解法(Singular value decomposition, SVD)^[10]、主成分分析法(Principal component analysis, PCA)^[11]、脉冲相位法(Pulse phase thermography, PPT)^[12]、最大温度对比度法^[13]、相关系数法等。Wang等^[14]采用脉冲热成像技术对包覆层高硅氧酚醛树脂板材缺陷进行检测,对比了ICA、PCA和PPT等不同算法处理结果,结果表明ICA算法能显著提高信噪比。Liu等^[15]针对复合材料平底孔缺陷,采用ICA算法将热图像序列分解为多个独立的非高斯信号,减少不均匀背景和噪声的影响,同时突出缺陷特征。王昵辰等^[16]采用多模式红外热成像对碳纤维布加固混凝土界面黏结缺陷进行检测,分析了脉冲、锁相、脉冲相位等模式对检测效果的影响,采用PCA和ICA算法对红外热像图序列进行处理,对比了几种算法的检测效果,证明红外热成像可以对加固混凝土界面黏结缺陷进行有效检测。Lu等^[17]采用涡流脉冲压缩热成像技术检测CFRP人工分层缺陷,用PCA、ICA 3种算法对原始序列图像进行处理,结果表明ICA算法在处理深度缺陷时表现更好。王晨聪^[18]针对CFRP平底孔试件缺陷采用脉冲热成像技术,提出了马尔科夫-独立成分分析法,与多项式拟合、SVD、PPT等算法相比,此方法对缺陷检测的灵敏度更高,噪声抑制能力更强且视觉效果最好。因此独立成分分析算法是红外序列图像增强过程中重要的技术方法之一。

本文通过脉冲热成像技术对含有冲击损伤的CFRP试块进行试验研究,采用独立成分分析算法对采集的热图序列进行处理,依据熵、均方根误差和峰值信噪比3种评价指

标选取合适的区间提取特征图像,并通过不同的图像分割算法,提取缺陷的最大损伤长径和短径,并与超声F扫描结果进行对比,验证了独立成分分析算法在CFRP冲击损伤缺陷的热图序列特征图像选取的可行性。

1 ICA理论

ICA是一种用于盲信号分离的信号处理方法。混合信号 x 与源信号 S 之间的关系可表示为

$$x = As \quad (1)$$

式中, A 是未知的混合矩阵。独立成分分析是式(1)的反演问题,由于信号的不确定性,常用估计量 Y 来表征 s 。假设 A 的逆矩阵为 W ,称为分解矩阵,可定义源信号 s 的估计值为

$$Y = Wx \quad (2)$$

假设 w 是混合矩阵 A 的逆矩阵 W 中的一个未知的行向量,基于单个独立成分的线性组合为

$$y = w^T x = \sum w_i x_i \quad (3)$$

由于在独立成分分析中独立成分不能是高斯分布的,那么根据中心极限定理,式(3)转变成 y 关于 S 的线性组合关系为

$$y = w^T X = w^T A s = z^T s \quad (4)$$

其中,定义 $z^T = w^T A$ 。只要使 z 中任何一个元素不为0, $z^T s$ 的非高斯性就是最大的,等同于单个独立成分的线性组合关系 $w^T s$ 是非高斯性最大的,符合了ICA的基本要求^[7]。

非高斯性的度量是利用非高斯性方法对ICA估计的关键,一般有峰度(Kurtosis)与负熵(Negentropy)两种标准。其中,峰度是可以由四阶累积量来定义的,而且假如随机变量取到单位方差 $E\{y^2\}=1$,则独立成分峰度能简化为

$$\text{kurt}(y) = E\{y^4\} - 3(E\{y^2\})^2 = E\{y^4\} - 3 \quad (5)$$

峰度的优点是计算简便,但容易受到异常值的干扰。相比于峰度,负熵是一种计算稍显复杂但有利于非

高斯性的度量。随机变量的分布情况越分散、越随机,负熵的值就越大,反之如此。离散自由变量熵 $H(y)$ 与负熵 $J(y)$ 定义如下所示。

$$H(y) = -\sum P(y=a_i) \log P(y=a_i) \quad (6)$$

$$J(y) = H(y_{\text{gauss}}) - H(y) \quad (7)$$

式中, $P(y=a_i)$ 为 y 取 a_i 时概率密度; y_{gauss} 定义为与 y 具有相同协方差矩阵的高斯变量。

2 脉冲红外无损检测试验

2.1 冲击损伤试块

脉冲红外检测试验所涉及的两块碳纤维增强型复合层板试块如图1所示,两块试块的具体参数统计如表1所示。试块1的尺寸为150 mm × 120 mm × 2.0 mm,在30 J冲击能量下造成的损伤缺陷,其表面的凹坑深度为0.22 mm。试块2的尺寸为150 mm × 100 mm × 4.8 mm,在40 J的冲击能量下造成的损伤缺陷,其表面的凹坑深度为1 mm。

2.2 同步采集系统

红外无损同步检测系统主要由热激励源、图像采集系统(红外热像

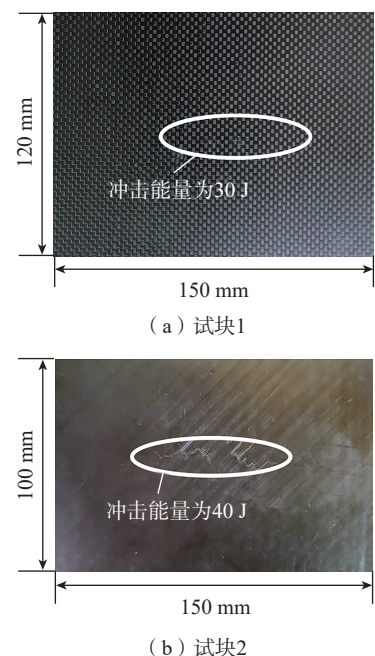


图1 冲击损伤试块实物图

Fig.1 Physical drawing of impact damage test block

仪)、同步控制器和数据处理系统(计算机)构成,相关的软件实现和控制激励源和红外热像仪同步工作。整个检测系统结构示意图和平台实物图如图2所示,选用的是德国 Infratec生产的采集与热激励同步的红外无损检测系统。当热激励采用的是脉冲激励时,则构成脉冲红外无损检测方式。

2.3 冲击损伤序列图像

红外无损检测试验采用反射脉冲法,主要试验参数设置如下:探测距离 600 mm、采集频率 15 Hz、采集帧数 600 帧、激励功率 1600 W,试块 1 和试块 2 激励时间分别为 5 s 和 6 s。采集得到 2 块试块的冲击损伤红外图像序列,这两个序列中代表时刻图像分别如图 3 和 4 所示。序列图像记录了试块表面的温度变化过程,由于缺陷处与非缺陷处热传导存在差异,导致对应处的表面存在温差,从而检测出缺陷。

3 试验数据处理与分析

3.1 试块热性能分析

依据红外图像序列,可以绘制缺陷处的平均温度随时间的变化曲线和非缺陷处的平均温度随时间的变化曲线,如图 5 (a) 和(b) 所示,分别对应试块 1 和试块 2 的温度时间历程曲线。可以看出温度时间历程曲线分为温度上升沿和温度下降沿两部分。试块受到脉冲热激励后,物体温度从室温迅速上升,由于存在缺陷,导致物体材质分布不连续,内部热传导存在差异,表面的热辐射能力也有差异,因此非缺陷温度上升大于缺陷处的升温,但上升的步调是一致的,同时到达各自的峰值。随后,温度近似双曲线下降,在 200 帧后,近似线性缓慢下降。由时间历程曲线可以得到非缺陷处和缺陷处的温差随时间的变化曲线,试块 1 和试块 2 的温差曲线分别如图 5 (c) 和(d) 所示。

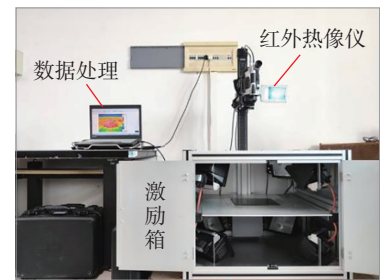
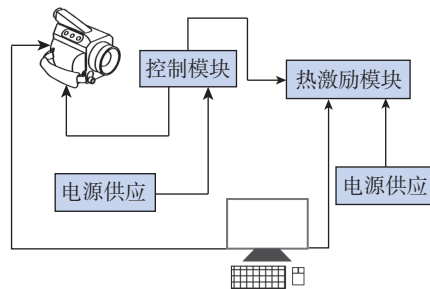
3.2 ICA 数据处理

由碳纤维冲击损伤试块的脉冲红外无损检测的试验结果(图 3 和 4) 可知,红外序列图像记录了复合材料内部分层缺陷的显现和扩散消退过程。缺陷从无到部分显现至完整清晰,然后再逐渐扩散、消退,最终消失达到热平衡。用整个序列来做 ICA 数据分析显然不适合。考虑到缺陷

和非缺陷之间的温差是重要的性能指标,结合试验结果的先验知识,沿温差曲线的下降沿,从峰值到半峰值对应的序列段作为 ICA 处理的数据。因此,试块 1 和试块 2 选择的序列图像帧数区间分为 [77, 118] 和 [92, 123],如图 5 (c) 和(d) 所示。图 6 (a) 和(b) 是采用 ICA 算法处理后得到的最佳特征图像,分别为试块 1 和试

表 1 冲击损伤试块相关参数
Table 1 Relevant parameters of impact damage test block

编号	尺寸	冲击能量/J	凹坑深度/mm
试块 1	150 mm × 120 mm × 2.0 mm	30	0.22
试块 2	150 mm × 100 mm × 4.8 mm	40	1.00



(a) 同步采集示意图

(b) Infratec 主动式同步检测平台

图 2 红外无损同步检测系统

Fig.2 Infrared nondestructive synchronous detection system

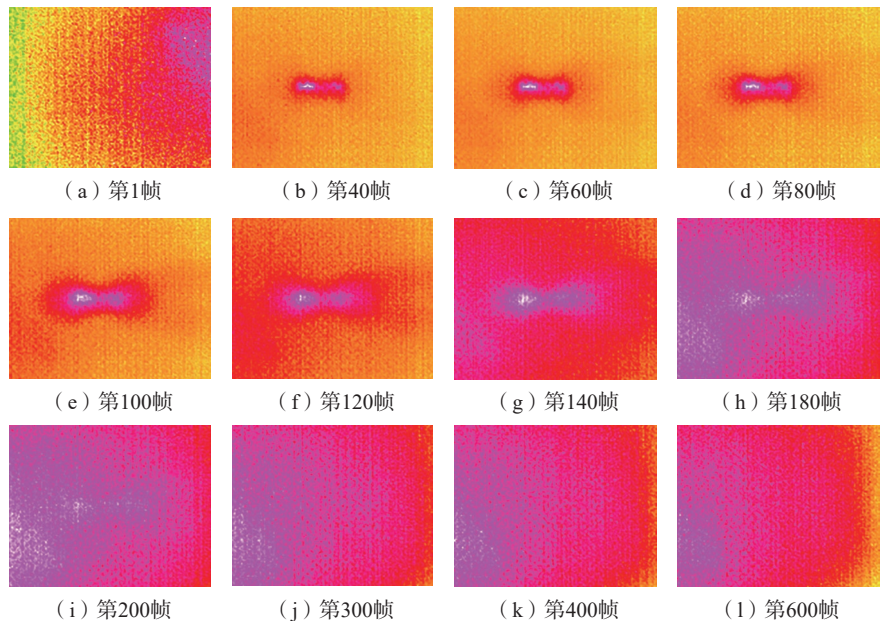


图 3 试块 1 红外序列图像代表帧图

Fig.3 Representative frame of infrared sequence image of test block 1

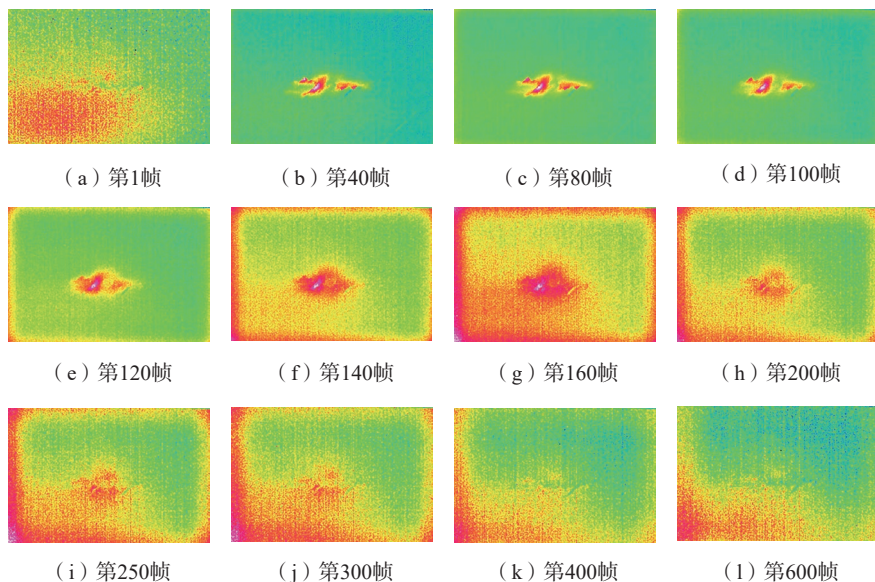
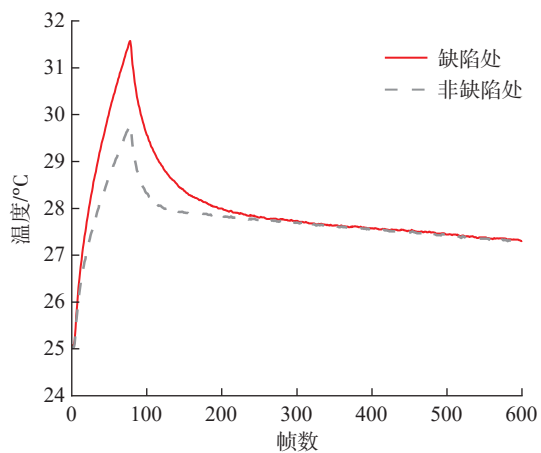


图4 试块2红外序列图像代表帧图

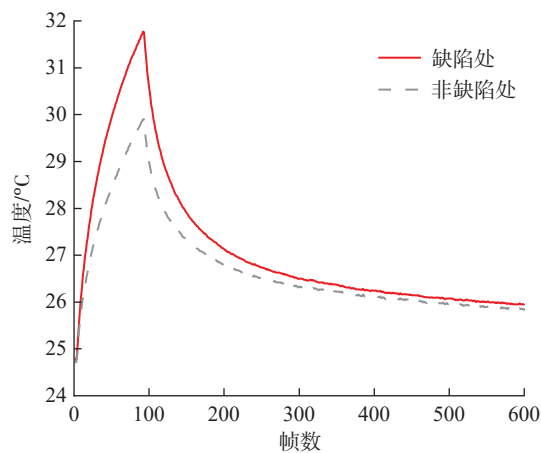
Fig.4 Representative frame of infrared sequence image of test block 2

块2的特征图像。

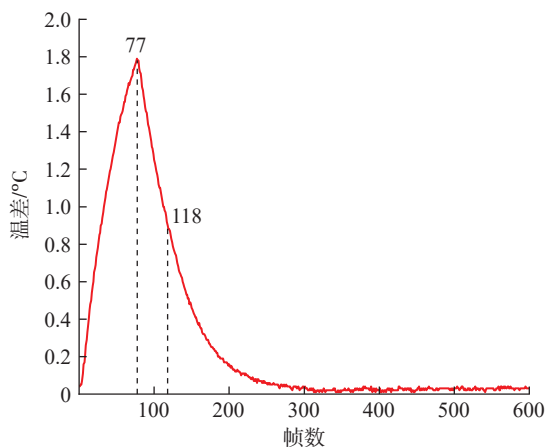
经ICA处理后得到的特征图像,主观上看图像的视觉效果得到了明显增强,改善了加热不均匀带来的影响,图像对比度优于原始序列图像。采用图像评价指标,如熵、峰值信噪比、均方根误差对特征图像做进一步的客观评价^[19-20],并与对应的序列图像中的最佳指标值进行对比,各指标值统计如表2所示。从表2中数据得出,ICA处理得到的特征图像的均方误差小于对应的序列图像的均方误差,峰值信噪比要优于原始序列图像,说明ICA方法能够有效除噪,提高峰值信噪比。但是特征图像的熵值较大幅度小于原始序列图像。由信息论可知,熵是度量混乱程度的,



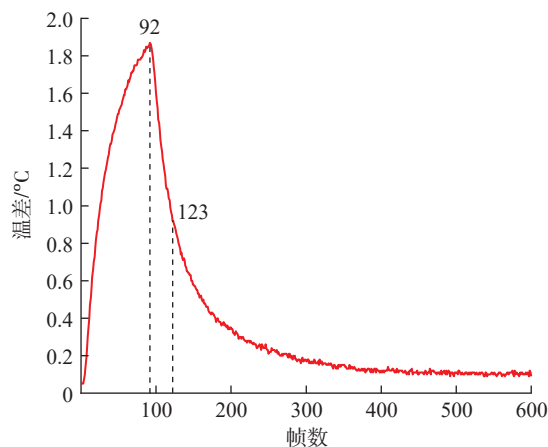
(a) 试块1缺陷处与非缺陷处的平均温度-时间历程变化曲线



(b) 试块2缺陷处与非缺陷处的平均温度-时间历程变化曲线



(c) 试块1温差变化曲线



(d) 试块2温差变化曲线

图5 试块的温度性能曲线

Fig.5 Temperature performance curve of test block

熵越大表明信息量越大则混合信号越多。因此,处理后的图像熵减小,表明信号分布得更集中,缺陷分离的效果更好。

3.3 缺陷特征提取

以图 6 所示的 ICA 特征图像作为图像处理的原图像,采用了基于阈值、边缘和区域的 9 种分割方法进行图像分割,其中包括迭代全局阈值法、Otsu 最佳阈值法、区域生长法、标记符控制分水岭分割法、Sobel 算子法、Roberts 算子法、Prewitt 算子法、Laplacian 算子法和 Canny 算子法,试块 1 和试块 2 的缺陷提取结果分别如图 7 和 8 所示。

利用形态学中膨胀与腐蚀的方法填充图 7 和 8 中经过分割算法处理的图像,实现缺陷区域完整的二值图像化分割,试块 1 与试块 2 的缺陷提取结果分别如图 9 和 10 所示。图 7 和 8 中 Roberts 算子、Prewitt 算子与 Laplacian 算子缺陷提取的边缘结构不完整、连接性差,无法满足缺陷定量提取要求,因此不对这 3 种算子进行进一步的缺陷量化评估。进一步编程寻找对应缺陷的最大损伤长径和最大损伤短径两个损伤特征值,参见对应图的标注尺寸,结果如表 3 所示。

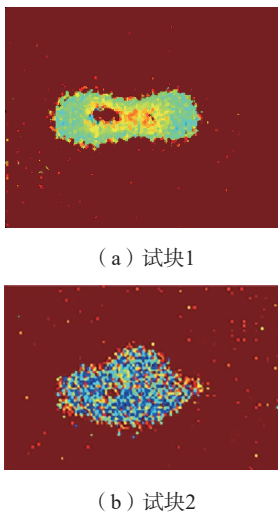


图 6 ICA 特征图
Fig.6 ICA feature images

通过以上试块 1、试块 2 不同算法的二值图像填充后的效果对比可以看出,迭代阈值法采用闭运算将中心孔洞填充完整,但缺陷边缘噪声依然有影响;Otsu 将中心细小孔洞填充,相比其他几种算法对背景噪声去除效果更好,边缘连接较平滑、噪声影响较少;区域生长法与 Otsu 类似,但其对干扰噪声较敏感,背景与缺陷边缘存在许多细小点;填充后的标记符控制分水岭法的边缘相较未填充时则稍显平滑;两种边缘检测算

子 Sobel、Canny 算子的图像背景噪声很多,但边缘定位较准确。

另外,也可以采用提取缺陷长短径进行对比。缺陷长径可以定义为缺陷区域内相距最远的两点之间的距离,短径则是垂直于长径并与缺陷外轮廓相交的最长的垂线段。由图 9 和 10 可知,Sobel 算子法与 Canny 算子法二值图像填充后求得缺陷长短径较前面 4 种方法更大。

为了进一步定量分析图像分割算法对冲击损伤缺陷提取的有效

表 2 图像评价指标对比
Table 2 Image evaluation index comparison

评价指标	试块 1		试块 2	
	图像序列中的最优值	ICA 特征图像	图像序列中的最优值	ICA 特征图像
熵	6.36	1.78	6.17	2.61
均方误差	3.97	2.27	4.06	2.55
峰值信噪比	42.14	44.41	42.05	43.86

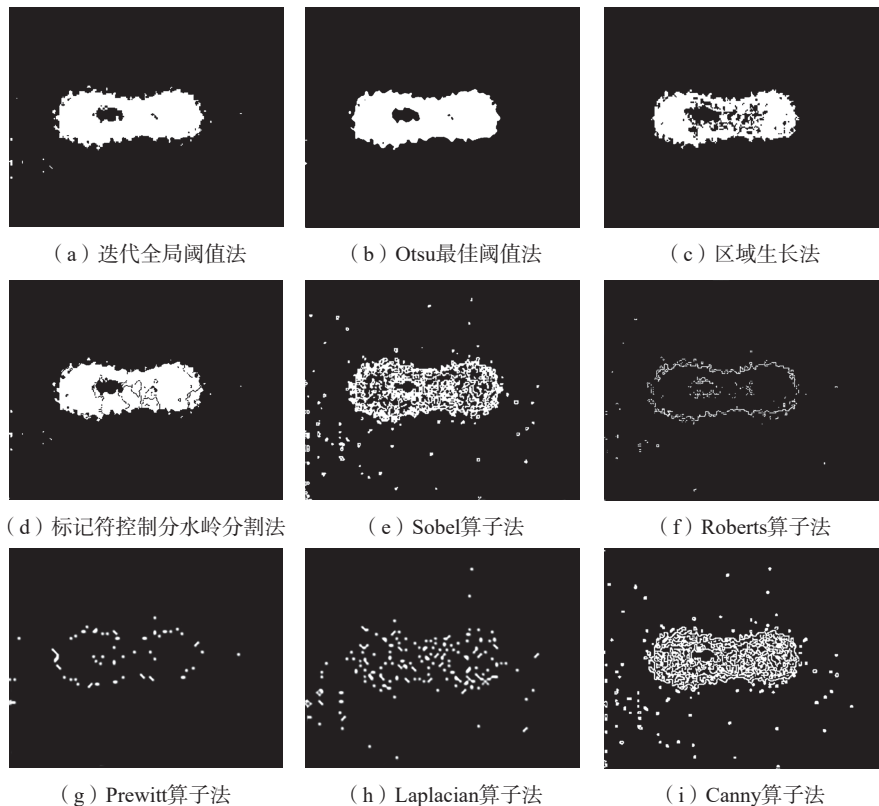


图 7 试块 1 特征图像分割处理结果
Fig.7 Segmentation results of test block 1 feature image

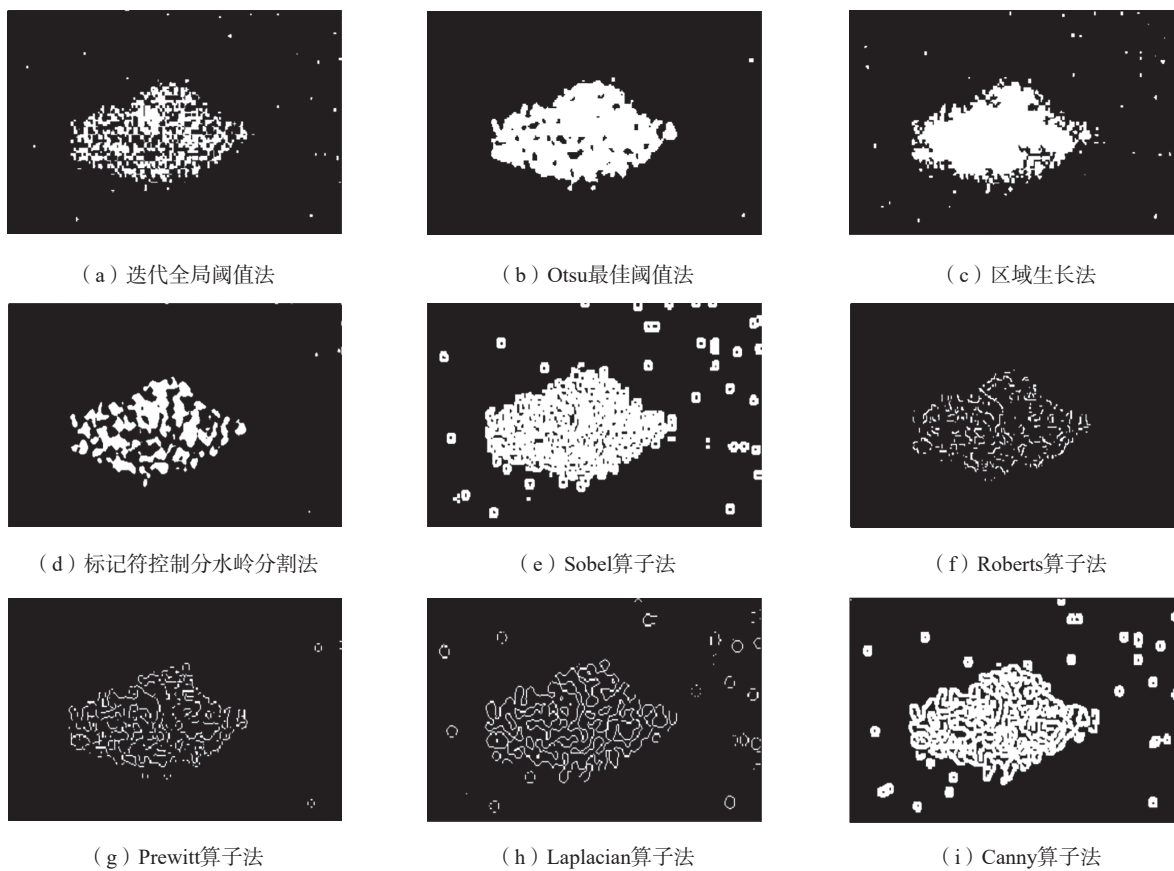


图8 试块2特征图像分割结果
Fig.8 Segmentation results of test block 2 feature image

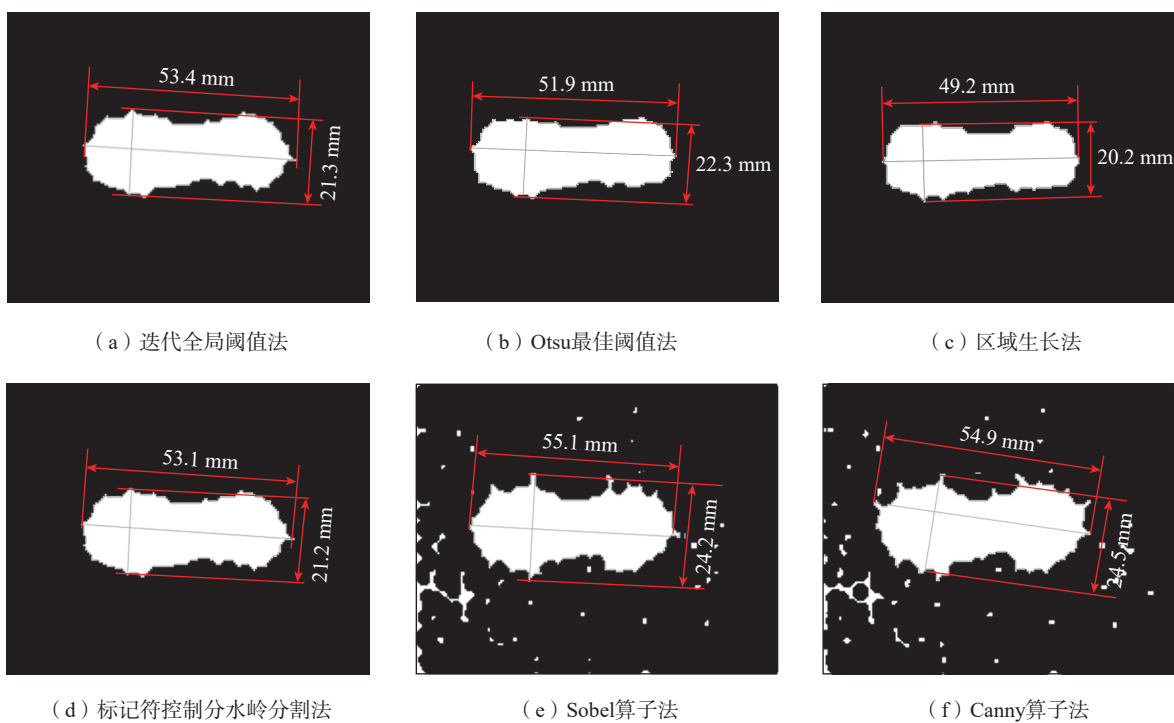


图9 试块1最大长轴和短轴缺陷特征提取
Fig.9 Defect feature extraction of maximum long axis and short axis of test block 1

性,对试块 1、试块 2 进行超声 F 扫描成像,结果如图 11 所示。定量提取得到试块 1 的缺陷长径为 55.9 mm,缺陷短径为 25.3 mm;试块 2 的缺陷长短径分别为 56.8 mm、36.3 mm。以超声 F 扫描检测的缺陷提取特征参数为标准,多种分割算法包括迭代阈值、Otsu、区域生长、标记符分水岭以及两种边缘检测算子的处理特征参数包括缺陷长径、缺陷短径与超声检测值进行对比,计算得出相对误差统计如表 3 所示。可以看出,同种检测方法试块 1 的检测结果优于试块 2 的检测结果,

说明脉冲反射热成像检测适合薄板的检测;处理同一检测试块, Sobel 算子法和 Canny 算子法提取缺陷最大长短轴的特征优于其他方法。

4 结论

采用脉冲反射法对碳纤维增强复合材料的冲击损伤进行了研究,并探讨了 ICA 的红外序列图像的处理方法,得到如下研究结论:

(1) 脉冲红外无损检测适合探测复合材料的缺陷,其具有快速、直观的特点,尤其是对薄板材料的缺陷定量检测,检测精度较高;

(2) 可依据脉冲红外序列图像的先验知识和温差特性确定有效的图像序列区间,提高数据处理效率和精度;

(3) ICA 方法适合处理红外序列图像,得到的特征图像评价性能指标优于原始序列图像,便于缺陷分割和特征提取;

(4) Sobel 算子法和 Canny 算子法提取缺陷最大长短轴的特征上优于其他分割方法。

参考文献

[1] 邱超,马心旗,王亚震,等.薄层碳

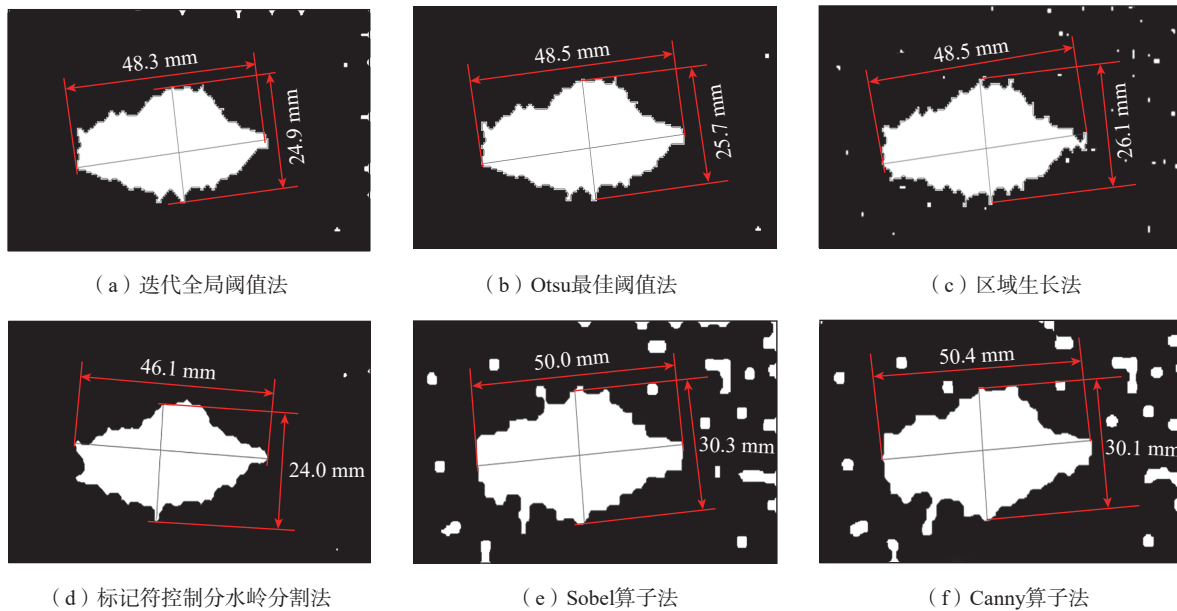


图 10 试块 2 最大长轴和短轴缺陷特征提取

Fig.10 Defect feature extraction of maximum long axis and short axis of test block 2

表 3 各种算法缺陷特征参数与相对误差

Table 3 Defect characteristic parameters and relative errors of various algorithms

算法	试块 1				试块 2			
	缺陷长径/mm	缺陷短径/mm	长径相对误差/%	短径相对误差/%	缺陷长径/mm	缺陷短径/mm	长径相对误差/%	短径相对误差/%
全局阈值	53.4	21.3	4.5	15.8	48.3	24.9	15.0	31.4
Otsu	51.9	22.3	7.2	11.9	48.5	25.7	14.6	29.2
区域生长	49.2	20.2	12.0	20.2	48.5	26.1	14.6	28.1
分水岭	53.1	21.2	5.0	16.2	46.1	24.0	18.8	33.9
Sobel	55.1	24.2	1.4	4.3	50.0	30.3	12.0	16.5
Canny	54.9	24.5	1.8	3.2	50.4	30.1	11.3	17.1

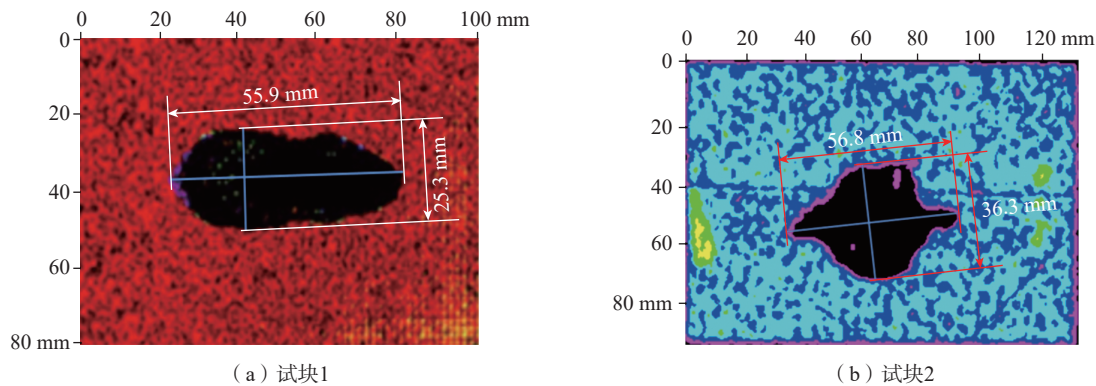


图 11 缺陷特征超声 F 扫描检测结果

Fig.11 Ultrasonic F scan test results of defect characteristics

纤维增强树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(14): 22–31.

QIU Chao, MA Xinqi, WANG Yazhen, et al. Research and application progresses of thin-ply carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(14): 22–31.

[2] 包建文, 蒋诗才, 张代军. 航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 52–63.

BAO Jianwen, JIANG Shicai, ZHANG Daijun. Current status and trends of aeronautical resin matrix composites reinforced by carbon fiber[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(19): 52–63.

[3] RAUT N P, KOLEKAR A B, GOMBI S L. Methods of damage detection on composites under low velocity impact: Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 2823–2827.

[4] 于哲峰, 朱嶠. 航空复合材料壁板低速冲击损伤阻抗分析与测试实践[J]. 航空制造技术, 2021, 64(14): 14–20.

YU Zhefeng, ZHU Qiao. Analysis and measurement on damage resistance to impact of aeronautical composite panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(14): 14–20.

[5] 刘松平, 傅天航, 刘菲菲, 等. 复合材料冲击损伤超声回波特性及其成像检测[J]. 航空制造技术, 2011, 54(15): 82–85.

LIU Songping, FU Tianhang, LIU Feifei, et al. Evaluation of impact damages in composites laminates based on pulsed ultrasound reflection and imaging method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(15): 82–85.

[6] ALMOND D P, ANGIIONI S L, PICKERING S G. Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2017, 87: 7–14.

[7] 朱笑, 袁丽华. 基于红外热成像的碳纤维增强树脂基复合材料低速冲击损伤表征[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4177–4184.

ZHU Xiao, YUAN Lihua. Low-velocity impact damage characterization of CFRP based on infrared thermography[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 4177–4184.

[8] OTRANTA–TRANTA B. Comparative study of thermal contrast and contrast in thermal signal derivatives in pulse thermography[J]. NDT & E International, 2017, 91: 36–46.

[9] RENGIFO C J, RESTREPO A D, NOPE S E. Method of selecting independent components for defect detection in carbon fiber-reinforced polymer sheets via pulsed thermography[J]. Applied Optics, 2018, 57(33): 9746–9754.

[10] 赵璟媛, 王黎明, 刘宾. 基于 SVD 算法的红外序列图像增强技术研究[J]. 红外技术, 2009, 31(1): 47–50.

ZHAO Jingyuan, WANG Liming, LIU Bin. The research of infrared image sequence enhancement based on SVD algorithm[J]. Infrared Technology, 2009, 31(1): 47–50.

[11] VAVILOV V P, BURLEIGH D D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing[J]. NDT & E International, 2015, 73: 28–52.

[12] MONTINARO N, FUSTAINO M, PANTANO A. Carbon nanotubes dispersion assessment in nanocomposites by means of a pulsed thermographic approach[J]. Materials, 2020, 13(24): 5649.

[13] MOSKOVCHENKO A I, VAVILOV V P, CHULKOV A O. Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 107: 103289.

[14] WANG F, WANG Y H, PENG W, et al. Independent component analysis enhanced pulse thermography for high silicon oxygen phenolic resin (HSOPR) sheet with subsurface defects[J]. Infrared Physics & Technology, 2018,

92: 345–349.

[15] LIU Y, WU J Y, LIU K X, et al. Independent component thermography for non-destructive testing of defects in polymer composites[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(4): 044006.

[16] 王昵辰, 杨瑞珍, 何赞泽, 等. 多模红外热成像检测碳纤维布加固混凝土粘结缺陷[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 37–44.

WANG Nichen, YANG Ruizhen, HE Yunze, et al. Detection of interface bonding defects in carbon fiber sheet reinforced concrete using multi-mode infrared thermography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 37–44.

[17] LU X, YI Q, TIAN G Y. A comparison of feature extraction techniques for delamination of CFRP using eddy current pulse-compression thermography[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12415–12422.

[18] 王晨聪. 碳纤维复合材料红外无损检测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

WANG Chencong. A research on infrared nondestructive testing technology of carbon fiber reinforced plastic[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[19] 佟雨兵, 张其善, 祁云平. 基于 PSNR 与 SSIM 联合的图像质量评价模型[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(12): 1758–1763.

TONG Yubing, ZHANG Qishan, QI Yunping. Image quality assessing by combining PSNR with SSIM[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(12): 1758–1763.

[20] 王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438–448.

WANG Hao, ZHANG Ye, SHEN Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 438–448.

通讯作者: 袁丽华, 副教授, 博士, 研究方向为红外无损检测技术。

Impact Damage Characterization of Composite Materials Based on Independent Component Analysis for Infrared Sequences

YUAN Lihua¹, HONG Kang¹, ZHU Yanzhen¹, XI Tengyan¹, LI Zhe²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

[ABSTRACT] The independent component analysis method was used to study the defect characterization problem of composite impact damage based on pulsed infrared images. First, according to the prior knowledge of pulse infrared experiment of test block and the temperature difference between defect and non-defect, the appropriate interval segment was selected for infrared sequence image. Then, centering preprocessing and whitening preprocessing were performed on the constructed data matrix, independent component analysis was performed by gradient descent method, and the independent component feature image can be obtained by reconstructing the matrix. Finally, by choosing an appropriate image segmentation method, the defect characterization quantities of the maximum damage long diameter and damage short diameter can be obtained. Taking the damage defect extraction of two carbon fiber reinforced composite laminates with different thicknesses under the impact energy of 30 J and 40 J, as an example, the maximum damage long diameter and damage short diameter of impact damage were successfully extracted and compared with the results of ultrasonic F-scan. For comparison, the errors are within an acceptable range, especially for the laminate with a thickness of 2 mm, which errors are within 5%. The research results showed that independent component analysis can effectively distinguish noise from defects, and the obtained feature image has higher signal-to-noise ratio, greater contrast and better image quality than the original image, which is beneficial to the extraction and characterization of defects.

Keywords: Independent component analysis; Pulse infrared nondestructive testing; Composites material; Impact damage; Image segmentation

(责编 晓月)

(上接第 69 页)

Study on Shearography and thermography in Nondestructive Testing for Fairing Parts

ZHANG Dongsheng¹, LUO Yongjian², LIAO Richeng², YE Yimin¹, ZHANG Tao¹, YE Chengjiong¹

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State-Owned Changhong Machinery Factory, Guilin 541002, China)

[ABSTRACT] In this paper, shearography and thermography have been used in detecting inner defects of the fiber reinforced resin matrix composite fairing shell. Shearography and infrared thermography are contactless nondestructive testing methods based on distinct disciplines. Under the same thermal excitation, these two methods are able to be applied to nondestructive testing. In this study, an image fusion technique has been proposed to expand the dynamic range of digital camera to meet the requirement for smooth surface of the fairing shell. Based on a low-cost thermography setup, a phase enhancement scheme has also been developed for on-situ nondestructive evaluation. Shearography and infrared thermography have been conducted on the fairing by means of thermal excitation. The experimental results show that the proposed fusion method is helpful in dealing with the uneven distribution of light intensity due to laser illumination and surface condition; and the infrared phase enhancement scheme greatly improves the visibility of defects. These two methods possess individual advantages. Based on the experiment, an assessment about these two optical methods is conducted, which provides valuable experiences in subsequent defect detections.

Keywords: Infrared thermography; Shearography; Fairing; Nondestructive testing; Image analysis

(责编 晓月)