

# GFRP层压板脱黏缺陷的红外脉冲热波成像检测

钟佳岑, 徐浩军, 魏小龙, 韩欣珉, 常怡鹏

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 针对玻璃纤维增强塑料层压板脱黏缺陷的红外无损检测问题, 首先制备了一种人工脱黏缺陷试样, 采用红外脉冲热波成像检测技术对脱黏缺陷进行检测, 分析了层压板脱黏区和非脱黏区的表面热信号瞬态响应过程, 以图像信噪比和标准化对比度作为评价指标, 定量对比了热信号重构、复调制 Zoom-FFT、改进的独立分量分析和主分量分析 4 种热图重构算法在脱黏缺陷识别中的作用。在此基础上, 提出基于热信号重构增强的主分量分析算法, 并验证了该算法在脱黏缺陷识别中的作用。研究表明: 4 种热图重构算法均可提高层压板脱黏缺陷定量识别能力, 其中以热信号重构对提高缺陷区与非缺陷区对比度最为显著, 主分量分析对热图噪声的抑制能力最强, 基于热信号重构增强的主分量分析能够显著提高深度分别为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 的脱黏缺陷定量识别能力。

**关键词** 玻璃纤维增强塑料; 层压板脱黏缺陷; 脉冲热波成像检测; 热图重构

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.04.08

**中图分类号** V250.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)04-0047-08

## Detection of Unbounded Defects in GFRP Laminates by Infrared Pulse Thermal Wave Imaging

ZHONG Jiachen, XU Haojun, WEI Xiaolong, HAN Xinmin, CHANG Yipeng

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract** In view of the problem of infrared non-destructive testing for unbounded defects of glass fiber reinforced plastic laminates, a kind of artificial unbounded defect sample is prepared firstly. The unbounded defects are detected by infrared pulse thermal wave imaging technology, and the transient response process of surface thermal signals in unbounded area and non debonding area of laminates is analyzed. The image signal-noise ratio and normalized contrast are used as evaluation indexes to quantitatively analyze the effects of four thermal image reconstruction algorithms, including thermography signal reconstruction, complex modulation Zoom-FFT, improved independent component analysis (ICA) and principal component analysis (PCA), and the function of the unbounded defect recognition. On this basis, the PCA algorithm based on thermal signal reconstruction enhancement is proposed, and the effect of the algorithm in unbounded defect recognition is verified. The results show that the four thermal image reconstruction algorithms can improve the quantitative identification ability of unbounded defects, in which the thermal signal reconstruction is the most significant to improve the contrast between the defect area and the non defect ar-

**收稿日期:** 2021-03-09

**作者简介:** 钟佳岑(1995—), 男, 四川广汉人, 硕士生, 研究方向: 航空复合材料红外无损检测。E-mail: zhongjiachen1@163.com

**通信作者:** 魏小龙(1988—), 男, 陕西咸阳人, 副教授, 研究方向: 隐身涂层损伤智能检测。E-mail: wei18892022001@163.com

**引用格式:** 钟佳岑, 徐浩军, 魏小龙, 等. GFRP层压板脱黏缺陷的红外脉冲热波成像检测[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(4): 47-54. ZHONG Jiachen, XU Haojun, WEI Xiaolong, et al. Detection of Unbounded Defects in GFRP Laminates by Infrared Pulse Thermal Wave Imaging[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(4): 47-54.

ea, and the principal component analysis has the strongest ability to suppress the thermal image noise; and the principal component analysis based on the enhancement of thermal signal reconstruction can significantly improve the quantitative identification ability of unbounded defects with the depth of 0.5 mm, 1.0 mm and 1.5 mm.

**Key words** glass fiber reinforced plastic; unbounded defects of laminates; pulsed thermal wave imaging detection; thermal image reconstruction

玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)在航空航天飞行器制造领域的应用已经十分广泛,采用 GFRP 制备的层压板由于重量轻、强度高和耐腐蚀等特点,广泛应用于飞机的雷达罩、进气道和机翼前缘<sup>[1-2]</sup>。由于 GFRP 层压板结构和制备工艺上的特殊性,其在制造和服役过程中极易产生脱黏缺陷<sup>[3]</sup>。当 GFRP 层压板发生明显脱黏时,无法通过肉眼从层压板表面判断其内部缺陷状态,同时,由于需要在外场检测中快速识别出缺陷,而传统无损检测技术(如超声、射线检测等)难以满足外场技术保障要求<sup>[4]</sup>。GFRP 层压板脱黏的本质是层间胶接界面结合失效,红外脉冲热波成像检测技术对该类缺陷具有较好的检测能力<sup>[5]</sup>,其原理如图 1 所示:以闪光灯产生的瞬时光能热流加热试样表面,热量传递至脱黏区时,由于脱黏区形成的空气隙阻隔了热传导,致使热传导速率变慢,热量在空气隙上方发生堆积,引起脱黏区对应试样表面温度场异常,采用红外热像仪实时记录试样表面热异常区变化过程,从而检测和识别试样脱黏缺陷。由于红外脉冲热波成像检测技术具有非接触、检测速度快、效率高、适合在线检测等突出优势<sup>[6]</sup>,近年来,该技术在复合材料无损检测应用方面的发展十分迅速<sup>[7]</sup>。

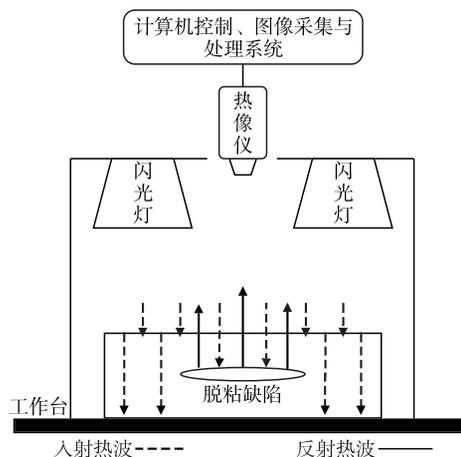


图 1 红外脉冲热波成像检测原理

提高表面热图中缺陷区和非缺陷区的对比度是识别 GFRP 层压板脱黏缺陷的关键手段<sup>[8]</sup>。红外脉冲热波成像检测技术发展初期,由于热波图像序列处理难度较大,要直接通过热像仪采集的原始热

图识别缺陷,研究人员主要关注热激励方式、材料热物理参数、缺陷参数和检测参数等对试样表面热响应的影响<sup>[9]</sup>。Fernando Lopez<sup>[10]</sup>等认为,对于脱黏缺陷,缺陷的可检测性与缺陷参数、材料的物性参数和检测参数均有关系,而其中影响最大的是缺陷深度和热像仪采集频率。随着热波图像序列处理技术的迅速发展,通过从原始热图序列中提取的各种特征信息对图像序列进行重构,极大地提高了缺陷区和非缺陷区的对比度<sup>[11]</sup>。从原始热图序列中提取表面热信号特征信息以重构热图,即提高图像对比度和信噪比,使缺陷边缘轮廓更加清晰,能更加有效地识别缺陷边缘的几何特征,因此,近年来,热波图像序列处理算法成为了红外脉冲热波成像检测技术的研究热点<sup>[12]</sup>。如图 2 所示,对热图序列进行重构主要有 2 种基本方法,一是对热图序列中每个像素点所对应温度随时间变化的表面热信号进行处理,即提取表面热信号的时域特征和频域特征进行热图重构。热信号重构(thermography signal reconstruction, TSR)<sup>[13]</sup>是利用时域特征对热图进行重构最典型的算法;基于频谱细化的复调制 Zoom-FFT<sup>[14]</sup>是利用频域特征对热图进行重构最特殊的方法;二是将热图序列中单帧热图作为一个数据单元进行处理,其中最典型的方法是独立分量分析(independent component analysis, ICA)<sup>[15-16]</sup>和主分量分析(principal component analysis, PCA)<sup>[16-17]</sup>。

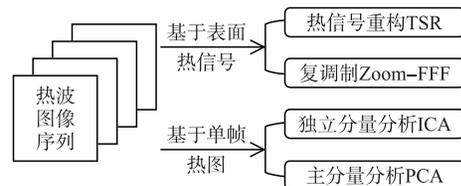


图 2 热图序列重构处理流程

目前,上述 TSR、ICA 和 PCA 算法在不同类型缺陷检测中均取得了较为理想的结果,2017 年李晓青<sup>[18]</sup>采用量化准确率评估指标 F-Score 参数定量评估了 TSR、ICA 和 PCA 等热图重构算法在材料表面裂纹检测中的效果,研究表明:ICA 算法对材料表面裂纹的检测效果最好。重构算法已经成为影响检测结果的关键因素,然而针对 GFRP 层压板脱黏缺陷识别问题,将上述 4 种热图重构算法进行对比

并通过结合以充分挖掘热图序列在空间、时间上的异常信息来实现分离并强化缺陷信息的研究仍较少。

本文研究了闪光灯激励下 GFRP 层压板脱黏区的表面热信号瞬态响应规律和原始热图序列变化过程,采用标准化对比度(normalized contrast, NC)和信噪比(signal-noise ratio, SNR)对 TSR、Zoom-FFT、ICA 和 PCA 重构热图序列进行对比评价,最终获得了一种能够显著提高 GFRP 层压板脱黏缺陷定量识别能力的方法。

## 1 试验方法与过程

由于制备 GFRP 层压板自然脱黏的试样十分困难,因此在试验研究中采用人工脱黏缺陷代替自然脱黏缺陷。试验过程中采用低树脂密度玻璃纤维增强塑料制备的层压板,长 355 mm,宽 190 mm,高 3 mm,在 GFRP 层压板中制备了 15 个不同形状、深度、尺寸的人工脱黏缺陷,如图 3 所示。为了方便表述,将 15 个缺陷命名为 A1、A2、A3、A4、A5、B1、B2、B3、B4、B5、C1、C2、C3、C4、C5,其中 A、B、C 分别表示缺陷深度为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm,人工脱黏缺陷的空气隙厚度均为 0.5 mm。

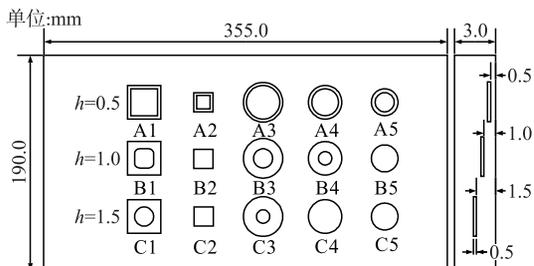


图3 含脱黏缺陷的 GFRP 层压板示意图

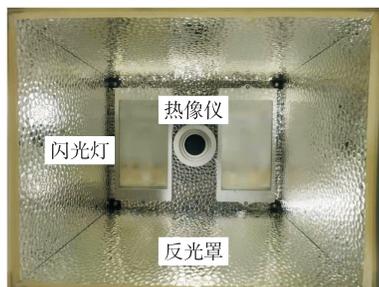
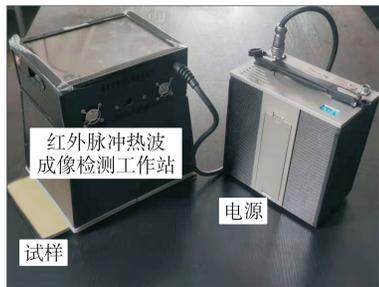


图4 红外脉冲热波成像检测工作站

采用的红外脉冲热波成像检测工作站如图 4 所示,主要包括 2 个 ThermPusle C6100 型高能闪光灯,一个非制冷焦平面红外热像仪以及数据采集、处理系统。采用闪光灯对试样表面进行脉冲激励,2 个闪光灯单次脉冲输出能量为 0~6 kJ,闪光脉冲宽度为 1~50 ms。采用红外热像仪采集试样表面热图,其热灵敏度: $\leq 0.045\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;光谱响应范围:8~14  $\mu\text{m}$ ;空间分辨率:300×400,单帧热图最高采集频率:100 Hz。试验时,热像仪从脉冲激励结束后采集试样表面热图,持续采集 40 s 直至热图中缺陷信号消失。

## 2 层压板表面热信号瞬态响应过程及热图序列预处理

### 2.1 层压板表面热信号瞬态响应

试验过程中,热像仪共采集 256 帧热图,试验结束后,提取热像仪采集的热图序列并对其进行处理。图 5 为 256 帧热图序列中的部分原始热图。

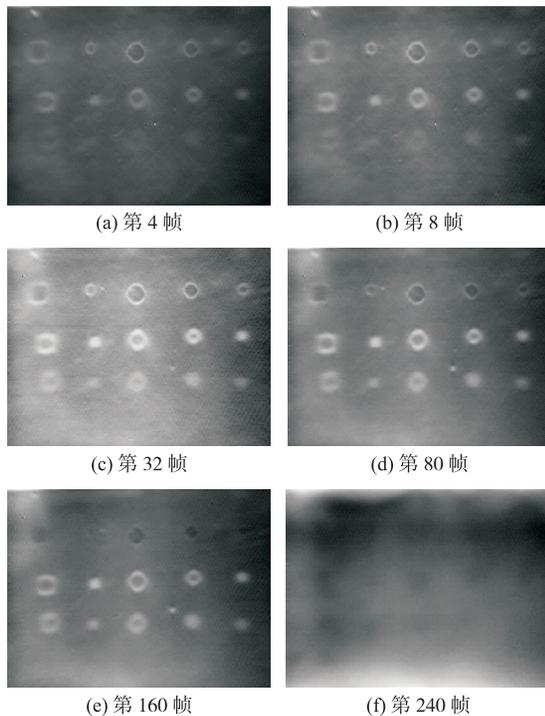


图5 脉冲激励结束后不同时刻试样表面热图

由图所示,在脉冲激励结束后,不同深度的脱黏缺陷由弱到强逐渐显示在表面热图中,其中缺陷 A1~A5 和 B1~B5 最早出现在原始热图中,在第 32 帧缺陷显示最清晰,可以清楚识别深度为 0.5 mm 和 1.0 mm 的 10 个缺陷,而深度为 1.5 mm 的缺陷 C1~C5 显示较模糊。从第 32 帧之后,随着降温过程进行,缺陷 C1~C5 逐渐显示在表面热图中,但缺陷特征较弱,A1~A5 位置处的缺陷特征逐渐变弱直至消失。

图6为降温过程中,原始热图序列中不同深度的缺陷A2、B2、C2的中心点与非缺陷区任意一点对应的试样表面热信号变化趋势。由图所示,脉冲激励后不同深度的缺陷区和非缺陷区热信号衰减速率不同,相比非缺陷区,缺陷区热信号衰减速率更慢,且缺陷深度越深,热信号衰减速率越慢,最终缺陷区热信号衰减到与非缺陷区热信号相当。

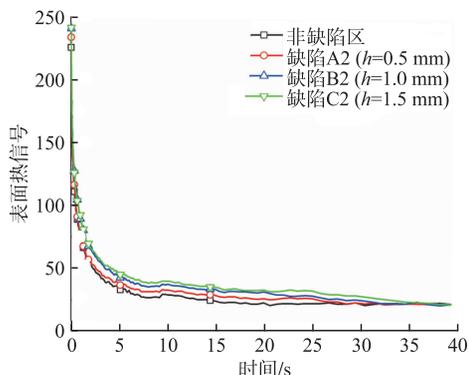


图6 表面热信号变化

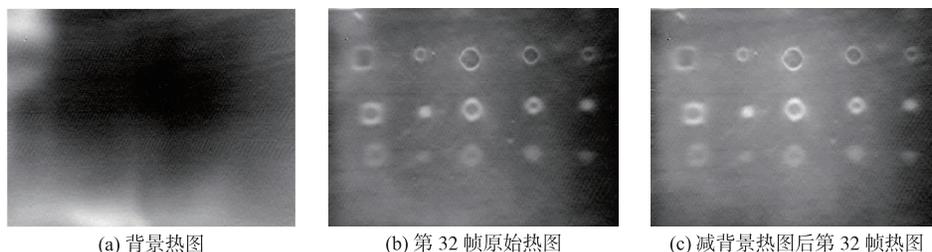


图7 原始热图减背景热图的结果

### 3 热图重构及重构效果定量评价

采用 TSR、Zoom-FFT、ICA 和 PCA 分别对原始热图序列进行特征提取和重构。为了对热图序列重构效果进行定量评价,采用2种客观评价指标:信噪比 SNR 和标准化对比度 NC 对原始热图和重构热图进行对比评价。

1) 信噪比的计算方法<sup>[19]</sup>:

$$SNR = |\bar{T}_d - \bar{T}_s| / \sqrt{\sum_{i=1}^{n_s} (T_s - \bar{T}_s)^2 / (n_s - 1)} \quad (1)$$

式中:  $\bar{T}_d$  和  $\bar{T}_s$  分别表示1帧热图中缺陷区和非缺陷区热信号平均值;  $T_s$  表示非缺陷区内各像素点的热信号值;  $n_s$  表示非缺陷区的像素个数。

$\bar{T}_d$ 、 $\bar{T}_s$ 、 $T_s$  和  $n_s$  取值如图8所示,以缺陷B2中心位置一个  $5 \times 5$  区域内25个像素点的热信号值取平均作为缺陷区热信号平均值;以周围非缺陷区一个  $5 \times 5$  区域内25个像素点的热信号值取平均作

### 2.2 热图序列预处理

由于热像仪采集的原始热图序列中包含大量噪声,同时为了消除红外镜头反射影响以及背景本身亮或暗区域影响,因此从采集的256帧热图序列中减去背景热图,将相减的结果作为原始热图序列进入后处理过程,进行热波特征提取和分析。图7为了减去背景热图的效果;图7(a)为脉冲激励开始前,试样在环境温度下的背景热图;图7(b)为采集的热图序列中第32帧热图;图7(c)为图7(b)减图7(a)的结果。由图所示,减背景处理后热图整体质量更加清晰,热图整体噪声明显降低,而且热图中缺陷也更加清晰,然而,减背景后的热图中缺陷C1~C5仍然较模糊。下文中所有试验涉及的原始热图序列,均指从闪光灯激励结束时刻开始采集的256帧热图减背景后的热图序列。

为非缺陷区热信号平均值,并计算该区域内25个像素点的热信号标准差以此获得整张热图的信噪比。SNR值衡量了去噪前后的热图质量,其值越大,热图质量越好。

2) 标准化对比度的计算方法<sup>[20]</sup>:

$$NC = (\bar{T}_d - \bar{T}_s) / (\bar{T}_d + \bar{T}_s) \quad (2)$$

式中:  $\bar{T}_d$  和  $\bar{T}_s$  取值同式(1)。NC值定量表征了热图中缺陷区和非缺陷区的对比度,其值越大,缺陷区域越清晰。

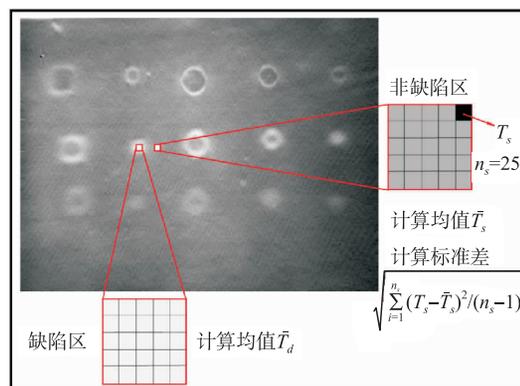


图8 缺陷区与非缺陷区选择

### 3.1 TSR 重构表面热图序列

TSR 算法将原始热图序列中每一像素点对应热信号随时间变化曲线变换到对数域中,使用对数多项式近似拟合热信号在对数域上随时间的演变,并计算其一阶导,采用一阶导对热图序列进行重构。图 9 为 TSR 重构热图序列的标准化对比度和信噪比结果。由图 9(a)所示,重构热图序列的标准化对比度总体高于原始热图序列,随着降温过程进行,在约第 192 帧之后,标准化对比度迅速减小;由图 9(b)所示,在第 128 帧之前,重构热图序列的信噪比略低于原始热图序列,在第 128 帧之后,重构热图序列的信噪比高于原始热图序列。

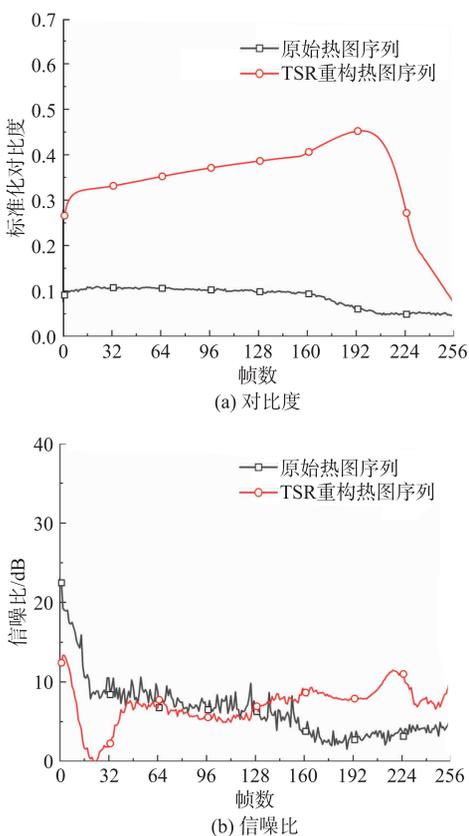


图 9 TSR 重构热图序列结果

### 3.2 Zoom-FFT 重构表面热图序列

复调制 Zoom-FFT 算法基于频谱细化的思想,通过对缺陷信号的局部频带进行细化放大,使局部频带获得较高的频率分辨率,以此对缺陷信号进行精确估计。图 10 为第 1 频率分量对应相位重构热图序列的标准化对比度和信噪比结果。由图 10(a)所示,重构热图序列的标准化对比度整体高于原始热图序列,受缺陷区与非缺陷区相位差的影响,重构热图序列的标准化对比度稳定性较差;由图 10(b)所示,第 64 帧之前,重构热图序列的信噪比略低于原始热图序列,第 64 帧之后,重构热图序列的信噪

比高于原始热图序列。

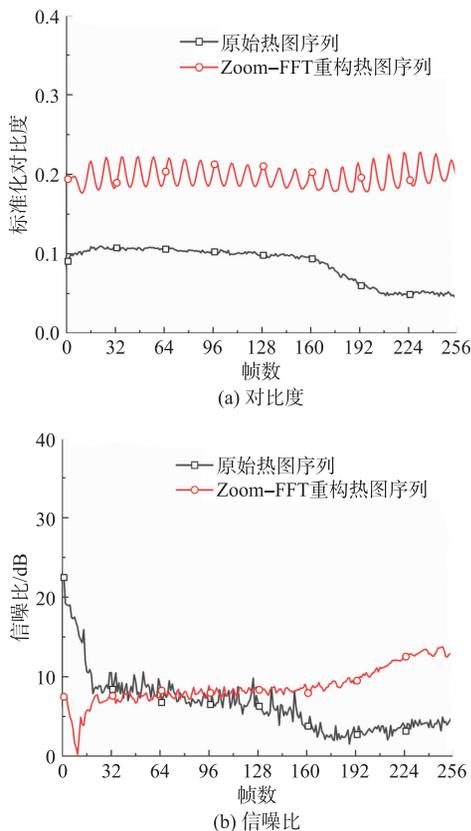
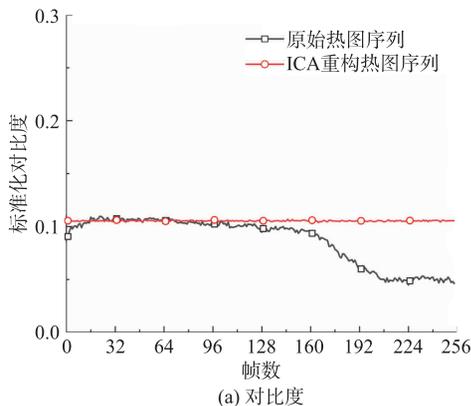


图 10 Zoom-FFT 重构热图序列结果

### 3.3 ICA 重构表面热图序列

独立分量分析基于盲源分离理论,通过一定的判决准则对混叠矩阵进行寻优计算,最后将样本数据在解混矩阵方向投影,以此将原始热信号从混合信号中分离出来。本文采用最大负熵作为判决准则对混合信号进行解混,以  $G = y^3$  作为判别准则中的非线性函数,相比  $G = \tanh(y)$  等函数,加快运算速度的同时提高了 ICA 算法解混精度。

图 11 为 ICA 重构热图序列的标准化对比度和信噪比结果,由图 11(a)所示,重构热图序列的标准化对比度曲线趋于水平且略高于原始热图序列;由图 11(b)所示,重构热图序列的信噪比呈现先增大后减小的趋势,且整体高于原始热图序列。



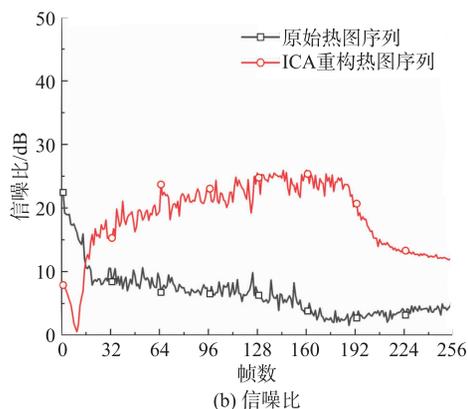


图 11 ICA 重构热图序列结果

表 1 不同主分量的贡献率

类型	主分量 1	主分量 2	主分量 3	主分量 4	主分量 5	主分量 6
贡献率/%	80.14	16.18	0.92	0.73	0.24	0.1

由图 12 所示,在各主分量重构热图中,缺陷 C1~C5 与非缺陷区对比度较弱,缺陷细节特征较模糊。

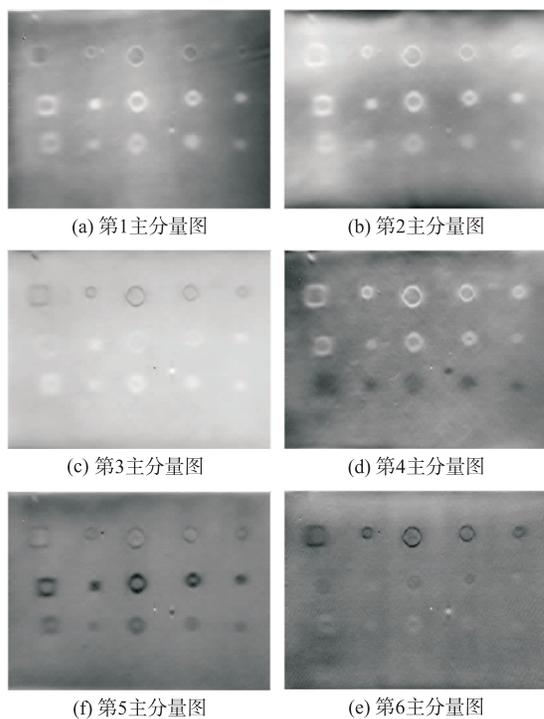


图 12 前 6 个主分量重构热图对比

图 13 为前 6 个主分量重构热图序列的标准化对比度和信噪比结果。由图 13(a) 所示,重构热图序列的标准化对比度变化趋势与原始热图序列相似,且整体高于原始热图序列,随着降温过程进行,在第 160 帧之后迅速减小到与原始热图序列相当;由图 13(b) 所示,重构热图序列的信噪比整体高于原始热图序列,但其波动较大,原因在于现实过程中受噪声和外界干扰等因素的影响,使部分热信号为一混叠信号,不同时间段的噪声成分在混叠信号中所占权重有差异,各混叠成分相互独立且无法通过

### 3.4 PCA 重构表面热图序列

主分量分析基于数据降维的思想,不同主分量对应降温过程中不同时间范围的热图特征,提取最能代表缺陷特征的主分量对热图序列进行重构,以达到增强缺陷显示效果的目的。

表 1 为前 6 个主分量的贡献率,而其余主分量代表噪声信息,因此未进行展示。选取代表缺陷特征的前 6 个主分量对热图序列进行重构并与另外 3 种热图重构算法进行对比。图 12 为前 6 个主分量重构热图序列中标准化对比度最高的一张。

协方差矩阵的特征向量对噪声成分进行有效分离,进行热图序列重构后,在权重系数较低的时间段其信噪比较高;而在权重系数较高的时间段其信噪比较低。

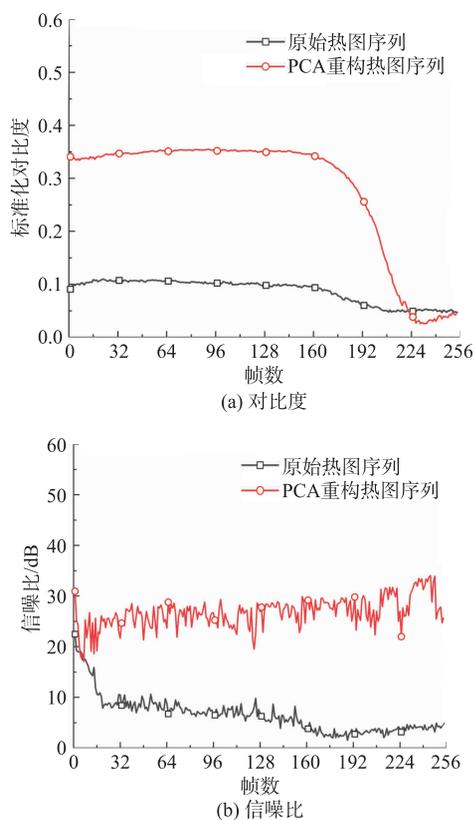


图 13 前 6 个主分量重构热图序列结果

综上所述,TSR 重构热图序列的标准化对比度先逐渐增大,随着降温过程进行又迅速减小,且整体高于原始热图序列;Zoom-FFT 重构热图序列的标准化对比度整体高于原始热图序列,但稳定性较差;ICA 重构热图序列的标准化对比度趋于平稳且略高于原始热图序列;PCA 重构热图序列的标准化对比度整体高于原始热图序列。这说明,4 种重构热

图中缺陷区与非缺陷区的对比度均有所提高,对于缺陷的定量识别具有积极意义。

在降温初期,TSR和Zoom-FFT重构热图序列的信噪比小于原始热图序列,而后大于原始热图序列;ICA和PCA重构热图序列的信噪比整体大于原始热图序列。说明4种重构算法均对热图噪声有抑制作用,其中以PCA对热图噪声的抑制最为显著。

#### 4 基于TSR增强的PCA重构表面热图序列

对比上述4种热图重构算法,其中TSR和Zoom-FFT通过提取表面热信号瞬态响应以重构热图,相比Zoom-FFT,TSR对提高热图缺陷区与非缺陷区对比度最为显著,但加大了热信号的非线性混叠程度;ICA能对线性混叠信号进行解混,但对非线性混叠信号解混存在一定局限性;PCA虽不能通过协方差矩阵的特征向量对混叠信号进行分离,但从不相关混叠信号中提取尽可能多的不同时间范围的缺陷信息以此挖掘并强化缺陷信息。因此,为了提高GFRP层压板脱黏缺陷定量识别能力,本文提出基于TSR增强的PCA算法,通过提取TSR重构热图序列的主分量进行热图重构。

图14为重构热图序列的标准化对比度和信噪比结果,展示了部分原始热图与重构热图。

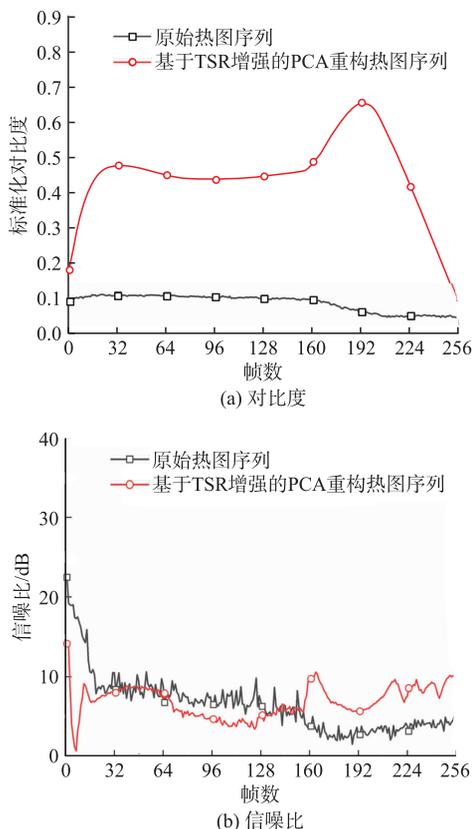


图14 基于TSR增强的PCA重构热图序列结果

由图14(a)所示,在160~192帧重构热图中,深度为1.0 mm和1.5 mm的缺陷区与非缺陷区对比度显著提高;由图14(b)所示,160帧之后重构热图序列的噪声水平略有下降,但重构热图序列整体噪声水平并未得到较大改善,原因在于TSR虽去除了加热不均噪声,但加大了热信号的非线性混叠程度,使得大量噪声难以分离。

由图15所示,与原始热图相比,重构热图中缺陷显现有所延后,该算法有效抑制了加热不均和缺陷边缘模糊,提高了深度为0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm的缺陷区与非缺陷区对比度。说明该算法能显著提高GFRP层压板不同深度脱黏缺陷定量识别能力。

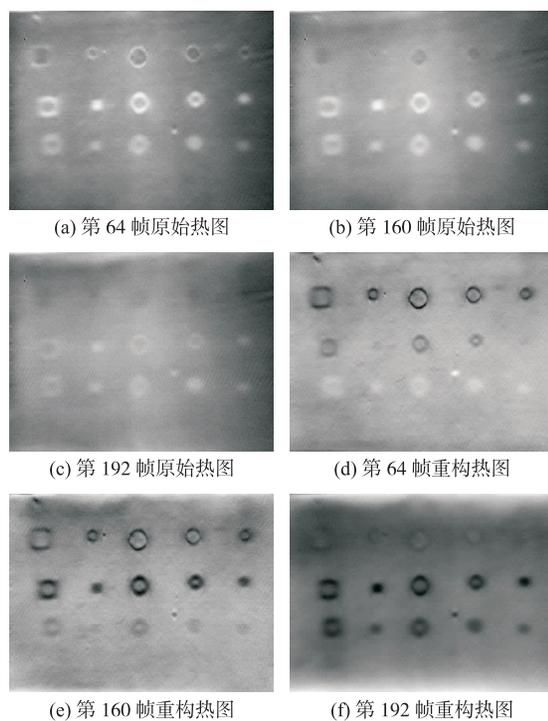


图15 原始热图与重构热图

#### 5 结论

1) 采用红外脉冲热波成像检测技术对GFRP层压板脱黏缺陷进行检测,采集了闪光灯激励下人工脱黏缺陷试样表面的原始热图序列,采用TSR、Zoom-FFT、ICA和PCA 4种重构算法对原始热图序列进行重构,并利用信噪比和标准化对比度2个指标对原始热图序列和4种重构热图序列进行对比评价。

2) 对于不同深度的脱黏缺陷,从原始热图序列中均可识别深度为0.5 mm和1.0 mm的脱黏缺陷,而深度为1.5 mm的缺陷较为模糊。采用TSR、Zoom-FFT、ICA和PCA 4种热图重构算法对原始

热图序列进行重构,重构热图中缺陷区与非缺陷区对比度均有所提高。

3)与原始热图序列相比,重构热图序列的标准化对比度和信噪比均有所提高,其中以 TSR 重构热图中缺陷区与非缺陷区对比度提高最为明显,PCA 对热图噪声的抑制效果最佳。

4)对比 4 种热图重构算法,提出了基于 TSR 增强的 PCA 算法,该算法能够有效提取缺陷特征,抑制加热不均和缺陷边缘模糊,提高不同深度的缺陷区与非缺陷区对比度。

## 参考文献

- [1] LAPINA O B, KHABIBULIN D F, TERSKIKH V V. Multinuclear NMR Study of Silica Fiberglass Modified with zirconia[J]. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 2011, 39(3-4):47-57.
- [2] 高岩立,冀克俭,邓卫华,等. 高性能玻璃纤维发展研究进展[J]. *山东化工*, 2020, 49(5):78-79,81.
- [3] 王焰,张炜,杨正伟,等. 玻璃纤维复合材料分层缺陷的红外热波检测[J]. *无损检测*, 2010, 32(11):55-58.
- [4] XU C, ZHANG W, WU C, et al. An Improved Method of Eddy Current Pulsed Thermography to Detect Subsurface Defects in Glass fiber Reinforced Polymer Composites [J]. *Composite Structures*, 2020, 242:112145.
- [5] 张剑,齐暑华. 红外热成像技术在复合材料无损检测中的应用现状[J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(11):122-126.
- [6] 郭伟,董丽虹,徐滨士,等. 主动红外热像无损检测技术的研究现状与进展[J]. *无损检测*, 2016, 38(4):58-66.
- [7] 刘颖韬,郭广平,曾智,等. 红外热像无损检测技术的发展历程,现状和趋势[J]. *无损检测*, 2017, 39(8):63-70.
- [8] 张小川,李艳红,丁友福,等. 玻璃钢试件红外热波检测能力研究[J]. *无损检测*, 2006, 28(11):587-589.
- [9] CONNOLLY M P. A Review of Factors Influencing Defect Detection in Infrared Thermography: Applications to coated materials[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1991, 10(3):89-96.
- [10] LÓPEZ F, IBARRA-CASTANEDO C, MALDUE X, et al. Analysis of Signal Processing Techniques in Pulsed Thermography[C]// *Proceeding of SPIE 8705*. Baltimore, MD, USA: *Thermal Infrared Applications XXXV*. 2013.
- [11] HUANG J X, ZHANG J Y. Comparison Research on Infrared Thermal Wave Image Sequence Processing Technology[C]//2011 4th International Conference on Image and Signal Processing. Shanghai, China: IEEE, 2011:349-352.
- [12] 唐庆菊,刘元林,梅晨. 脉冲红外热波检测的图像序列处理与缺陷边缘识别[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2017, 27(2):200-204,209.
- [13] BU C, LIU G, ZHANG X, et al. Debonding Defects Detection of FMLs Based on Long Pulsed Infrared Thermography Technique [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 104:103074.
- [14] 马说那,马齐爽. 红外脉冲相位复调制细化检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8):2222-2228.
- [15] WANG F, WANG Y, 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.
- [16] BAI L, GAO B, TIAN S, et al. A Comparative Study of Principal Component Analysis and Independent Component Analysis in Eddy Current Pulsed Thermography Data Processing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(10):2213-2219.
- [17] WANG Z, TIAN G Y, MEO M, et al. Image Processing Based Quantitative Damage Evaluation in Composites with Long Pulse Thermography[J]. *NDT & E International*, 2018, 99:93-104.
- [18] 李晓青. 基于涡流脉冲热成像的表面裂纹检测及其量化评估研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
- [19] GONG J, ZHENG Y, LIU J. A Study on The Snr Performance Analysis of Laser-Generated Bidirectional Thermal Wave Radar Imaging Inspection for Hybrid C/GFRP Laminate Defects [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 111:103526.
- [20] KOSHTI A M. Infrared Contrast Data Analysis Method for Quantitative Measurement and Monitoring in Flash Infrared Thermography[C]// *Structural Health Monitoring and Infrastructure 2015*. [S. l.]: International Society for Optics and Photonics, 2015:9437.

(编辑:徐楠楠)