

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003651

# CFRP/Al 蜂窝结构缺陷红外热图特征的多结构形态学-PCNN 识别\*

卜迟武 刘涛 赵博 李锐

(哈尔滨商业大学 轻工学院 哈尔滨 150028)

**摘要:**CFRP/Al 蜂窝结构在制备和长期服役过程中易产生脱粘、分层、积水等缺陷,因此采用红外热波无损检测技术对其状态进行检测尤为重要。在采集 CFRP/Al 蜂窝结构缺陷红外热图像序列的过程中,存在着较大的背景噪声,容易产生对缺陷的检测效率低、对比度差等问题。为了提高缺陷检测效果,采用主成分分析算法对去除背景后的红外图像序列进行缺陷特征信息降维处理,有效滤除红外图像序列中的不均匀背景噪声。结合多结构形态学和脉冲耦合神经网络(PCNN)混合算法对缺陷区域进行图像增强和图像分割来提取缺陷区域。实验结果表明,采用上述方法,能够进一步地滤除红外图像的不均匀背景噪声,改善缺陷区域提取效果,有效提高缺陷检出率。

**关键词:**CFRP/Al 蜂窝结构缺陷;红外热成像;主成分分析;多结构形态学;PCNN 图像分割

**中图分类号:** TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

## Recognition of defects in CFRP/Al honeycomb structure by multi-structure morphology-PCNN

Bu Chiwu Liu Tao Zhao Bo Li Rui

(School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**Abstract:**In the process of preparation and long-term service, CFRP/Al honeycomb structure is prone to debonding, delamination, ponding and other defects, so it is very important to detect its state by infrared thermal wave nondestructive testing technology. And In the process of collecting the infrared thermal image sequence of CFRP/Al honeycomb structure defects, there is a large background noise, which easily leads to low detection efficiency and poor contrast. In order to improve the defect detection effect, principal component analysis (PCA) algorithm is used to reduce the dimension of defect feature information of the infrared image sequence after background removal, which can effectively filter out the uneven background noise in the infrared image sequence. Combined with multi-structure morphology and PCNN hybrid algorithm, the defect area is extracted by image enhancement and image segmentation. The experimental results show that the proposed method can further filter out the uneven background noise of the infrared image, improve the defect area extraction effect, and effectively improve the defect detection rate.

**Keywords:**CFRP/Al honeycomb structure defects; infrared thermal imaging; principal component analysis; multi structure morphology; PCNN image segmentation

## 0 引言

CFRP/Al 蜂窝结构具有重量轻、比强度高、刚度大、稳定性好、承载能力高、隔热性好等一系列优点,在航空航天等工业领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。在制备和长期服役过程中,CFRP/Al 蜂窝结构易产生脱粘、分层、积水等

缺陷,从而影响相关部件的性能与运行稳定性,因此对 CFRP/Al 蜂窝结构状态开展检测显得尤为必要。红外热成像(infrared thermography, IRT)作为一种新兴的无损检测(non-destructive testing, NDT)技术,自 20 世纪 60 年代初以来,IRT 凭借着一种快速的非接触式大面积可视化检查的优点越来越受到人们的认可,已成功地在许多领域中用作 NDT 技术<sup>[3-4]</sup>。其原理在于通过对被测材料主

收稿日期:2020-11-12 Received Date: 2020-11-12

\* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51775175)、黑龙江省自然科学基金(LH2021E088)、黑龙江省省院合作项目(YS18A18)资助

动施加外部热激励,热波会使得材料内部缺陷导致的不连续性会造成激励能量在材料不连续处上表面产生明显温度对比,这种表面异常温度分布被红外热像仪所获取,进而将其转化为随时间分布的红外图像序列。采用红外图像序列处理算法提取异常温度变化区域,进而获得材料内部缺陷特征,达到检测缺陷的目的<sup>[5]</sup>。理论上,材料内部的任何不连续都会导致这种温度变化。这种变化可以通过红外热像仪来检测。然而在采集红外图像序列的过程中,会受到周围环境、实验人员、材料受热不均和仪器自身的红外辐射等影响,造成采集的红外图像序列背景噪声大、冗余信息多等问题,严重影响序列热图信号的分析精度及其处理分析结果,增加了后续红外图像处理的难度。因此,基于红外图像序列的处理方法,如快速傅里叶变换(FFT)、脉冲相位(PPT)、多项式拟合(PF)、热波信号重构法 TSR 等,都被用来降低因实验所产生的背景噪声,提高对后续单帧图像的处理效果<sup>[6-8]</sup>。在单帧图像中,一些微小缺陷或者深层缺陷所导致的表面温度相对于背景温度来说非常小,因此与之相应的众多图像处理方法也被广泛应用在红外热图像的增强和分割中,特别是对缺陷图像进行有效分割是识别缺陷以及缺陷量化分析的关键<sup>[9-10]</sup>。诸如 Otsu 阈值分割算法、模糊 K 均值算法、粒子群算法、迭代法等,但这些方法对复合材料的红外图像分割效果并不理想,其原因是面对新型的复合材料,这些分割方法对缺陷的细节信息提取较差,导致缺陷有效检出率低。而且大多数分割方法都是基于阈值分割,而阈值的选择需要人为设定,容易产生缺陷过度分割与欠分割。为了弥补上述的不足,本文采用 IRT 技术实现对 CFRP/Al 蜂窝结构红外图像序列的采集,采用主成分分析算法(PCA)对去除背景后的红外图像序列进行缺陷特征信息降维处理,滤除红外图像序列中的不均匀背景噪声。提出采用多结构形态学-脉冲耦合神经网络(PCNN)图像分割混合算法,对单帧图像的缺陷区域进行图像增强和图像分割来提取缺陷区域,实现对 CFRP/Al 蜂窝结构缺陷的有效检测。

## 1 理论

### 1.1 PCA

PCA 最初由 Rajic<sup>[11]</sup> 在 2002 年提出,用来提取图像特征并减少噪声信号<sup>[12]</sup>。PCA 依赖于奇异值分解<sup>[13]</sup>(SVD),是一种通过将原始红外数据投影到正交分量系统,又称为经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)上,以紧凑的方式从矩阵中提取空间和时间数据的工具。SVD 不是依赖于基函数,而是一种基于特征向量的变换,该变换形成了正交空间。通常,一帧红外图像可由一个  $M \times N$  的矩阵  $F_i$  来表示:

$$F_i = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

式中: $l$  为红外图像序列帧数。

而使用 PCA 算法,需要对红外图像序列进行向量化处理,转化为列向量矩阵,进而计算得到尺寸为  $M \times N$  ( $M > N$ ) 协方差矩阵  $A$ ,对矩阵  $A$  进行 SVD 分解,得到其特征值:

$$A = URV^T \quad (2)$$

式中: $U$  是维数  $M \times N$  的特征向量矩阵; $R$  是  $N \times N$  对角矩阵,其正或零元素代表矩阵  $A$  的奇异值; $V^T$  是  $N \times N$  矩阵的转置。要将 SVD 应用于热成像数据,代表时间和空间变化的 3D 热成像图矩阵必须转换为 2D  $M \times N$  矩阵  $A$ <sup>[14]</sup>。这可以通过每次将热谱图重新排列为  $A$  中的列来完成此操作,如图 1 所示。

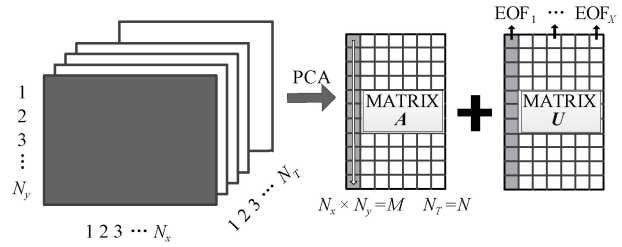


图 1 从 3D 序列到 2D  $A$  矩阵的热成像数据转换,以便应用奇异值分解,最后将 2D  $U$  矩阵转换为包含经验正交函数的 3D 矩阵

Fig. 1 Thermal imaging data conversion from 3D sequence to 2D  $A$  matrix in order to apply singular value decomposition, and finally the 2D  $U$  matrix is converted into a 3D matrix containing empirical orthogonal functions

对求解得到的特征向量矩阵  $U$  进行向量化逆过程转化,可得到经过 SVD 分解得到的各个主成分图像特征向量  $P_i$ :

$$P_i = \begin{pmatrix} a_{11,i} & \cdots & a_{1n,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1,i} & \cdots & a_{mn,i} \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

### 1.2 多结构形态学图像去噪

红外缺陷图像在进行数学形态学去噪时,适当地选取结构元素的形状和维数可以提高滤波去噪的效果<sup>[15]</sup>。根据 CFRP/Al 蜂窝结构噪声特征采用同一维数、不同结构的结构元素进行处理,进而达到有效滤除不同方向上同种噪声的目的,更多地保持 CFRP/Al 蜂窝结构红外图像的缺陷特征。设构建  $k$  种结构元素  $g(m, n)$ ,对图像进行腐蚀运算:

$$I(x, y) = \min_{(m, n)} [f(x + m, y + n) - g(m, n)] \quad (4)$$

式中: $f(x, y)$  为输入图像; $g(m, n)$  为结构元素。

其中,  $k$  种同一维数不同结构的结构元素  $g(m, n)$  构造如下:

$$g_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, g_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$g_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, g_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

计算  $k$  种结构元素的权值  $\alpha_k$ , 公式如下所示:

$$\alpha_k = \frac{\beta_k}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k} \quad (6)$$

式中:  $\beta_k$  为  $k$  种结构元素对应的匹配图像次数。

通过计算  $k$  种结构元素所腐蚀后图像与原始灰度红外图像的差异值, 对差异值和腐蚀图像进行加权求和, 得到多结构元素去噪图像:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^k \alpha_k \varphi_k(x, y) \quad (7)$$

式中:  $\alpha_k$  为  $k$  种结构原始的权值;  $\varphi_k(x, y)$  为差异值向量;  $\Phi(x, y)$  为去噪后图像。

### 1.3 PCNN 图像分割

近些年来, PCNN 方法作为一种高效的智能处理算法, 广泛应用在图像处理领域, 且处理效果良好<sup>[16, 17]</sup>。PCNN 是根据对动物的大脑视觉皮层神经元脉冲串同步振荡现象的研究结果进一步分析所得到的神经网络数学模型。通过对相似的神经元输入进行处理, 产生同步脉冲输出, 将具有相似特征的神经元进行同步激发, 不相似特征的神经元进行分离。PCNN 基本的数学模型公式如下:

$$F_{ij}(n) = e^{-\alpha_F} F_{ij}(n-1) + V_F \sum_{kl} W_{ij} Y_i(n-1) + I_{ij}(n) \quad (8)$$

$$L_{ij}(n) = e^{-\alpha_L} L_{ij}(n-1) + V_L \sum_{kl} W_{ij} Y_i(n-1) \quad (9)$$

$$U_{ij}(n) = F_{ij}(n) (1 + \beta L_{ij}(n)) \quad (10)$$

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1, & (U_{ij}(n) > E_{ij}(n-1)) \\ 0, & (U_{ij}(n) \leq E_{ij}(n-1)) \end{cases} \quad (11)$$

$$E_{ij}(n) = e^{-\alpha_E} E_{ij}(n-1) + V_E Y_{ij}(n) \quad (12)$$

式中:  $F_{ij}(n)$  表示神经元的反馈输入;  $I_{ij}(n)$  表示外部输入刺激, 即输入图像的灰度像素值;  $L_{ij}(n)$  表示神经元耦合连接输入项;  $Y_i(n-1)$  表示上一次迭代时神经元  $i$  的输出;  $W_{ij}$  表示耦合连接层的连接系数矩阵;  $\beta$  表示突触间的连接强度系数;  $U_{ij}(n)$  表示内部活动项;  $Y_{ij}(n)$  表示神经元的脉冲输出;  $E_{ij}(n)$  表示神经元内部活动项  $U_{ij}(n)$  能否激发脉冲所需的动态门限值;  $\alpha_F, \alpha_L, \alpha_E$  表示输入层、耦合连接层与脉冲发生器层的衰减时间常数;  $V_F, V_L, V_E$  表示输入层、耦合连接层与脉冲发生器层的放大系数。

由于传统的神经元模型参数较多, 包含  $V_F, V_L, V_E, \alpha_F, \alpha_L, \alpha_E$  等, 具体应用在不同图像缺陷分割时需要进行不同的参数设定。为了保证 PCNN 对图像进行缺陷分割时具有较高的准确率, 减少迭代次数, 因此需要对 PCNN 神经元模型进行改进优化, 简化后的 PCNN 神经网络模型如图 2 所示, 其包含输入层、耦合连接层、脉冲发生器层 3 部分, 据简化后的 PCNN 模型, 将图像的灰度像素值  $I_{ij}(n)$  直接作为输入信号, 将连接输入项的时间衰减项  $e^{-\alpha_L} L_{ij}(n-1)$  与置为 0, 放大系数  $V_L$  置为 1, 脉冲发生器项的时间衰减项  $e^{-\alpha_E} E_{ij}(n-1)$  置为 0, 则式(8)、(9)与(12)简化为:

$$F_{ij}(n) = I_{ij}(n) \quad (13)$$

$$L_{ij}(n) = \sum_{kl} W_{ij} Y_i(n-1) \quad (14)$$

$$E_{ij}(n) = V_E Y_{ij}(n) \quad (15)$$

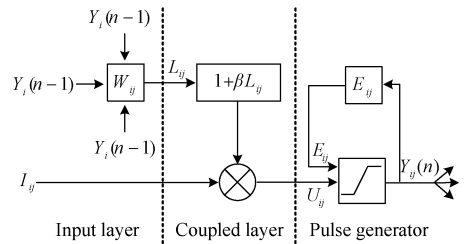


图 2 改进的简化 PCNN 模型

Fig. 2 Improved simplified PCNN model diagram

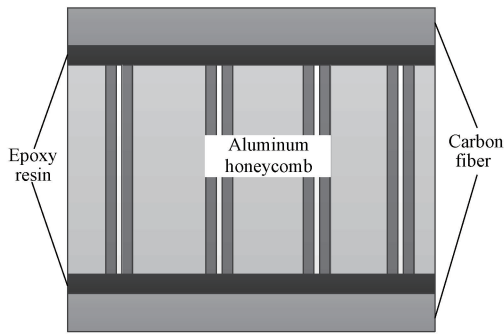
当 PCNN 用于图像缺陷区域分割时, 在输入  $I_{ij}(n)$  时, 首先对图像进行多结构形态学增强处理, 使得输入的  $I_{ij}(n)$  具有较高的灰度对比度, 模型中的每一个神经元对应一个增强的灰度像素值。当神经元点火时, 兴奋的神经元获得脉冲响应, 输出脉冲, 若相邻区域的神经元也兴奋点火, 则判定两者同为缺陷区域, 输出脉冲, 否则为健康区域。

## 2 试件制备与实验研究

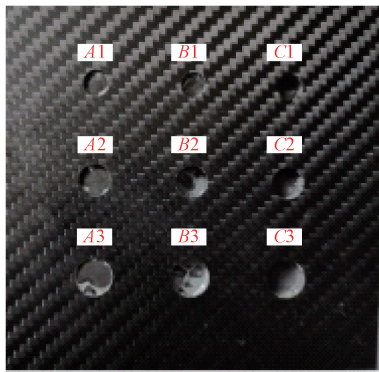
### 2.1 铝蜂窝试件的制备

如图 3(a) 所示, 选用的铝蜂窝板试件包括蒙皮、粘接剂、蜂窝芯; 其中蒙皮为碳纤维、粘接剂为环氧树脂、蜂窝芯为铝合金。蜂窝芯厚度为 3.8 mm, 网格边长为 5 mm 的六边菱形; 环氧树脂有两层, 厚度为 0.1 mm; 碳纤维有两层, 厚度为 0.5 mm。几何尺寸为 120 mm × 120 mm × 5 mm。加工的实物试件如图 3(b) 所示。所钻削加工 9 个孔用于模拟脱粘缺陷, 孔 A1 ~ A3, B1 ~ B3, C1 ~ C3 深度分别为 0.6、4.5 和 4.7 mm, 直径分别为 8、10、12 mm。其中, 孔深代表钻孔深度, 深度为 4.7 mm 的缺陷模拟蒙皮与树脂胶膜的上脱粘缺陷; 深度为 4.5 mm

的缺陷模拟树脂胶膜与铝蜂窝芯的下脱粘缺陷;深度为 0.6 mm 的缺陷模拟下表面树脂胶膜脱粘缺陷。



(a) 结构示意图  
(a) Schematic diagram of structure



(b) 制备实物图  
(b) Picture of preparation

图 3 铝蜂窝板的结构示意图和制备实物图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the aluminum honeycomb panel and the actual preparation diagram

其试件所设缺陷的直径以及深度信息具体如表 1 所示。

表 1 铝蜂窝试件的模拟缺陷孔的深度及直径

Table 1 Depth and diameter of simulated defect holes of aluminum honeycomb specimen

Defect simulation hole (图 3)	Depth/mm	Diameter/mm
A1, A2, A3	0.6	8, 10, 12
B1, B2, B3	4.5	8, 10, 12
C1, C2, C3	4.7	8, 10, 12

### 2.2 实验研究

采用锁相热像法进行实验,通过卤素灯发出的热激励源调制为正弦波形信号,施加在试件背面。热激励的输出功率设置为 2 kW,调制频率设置为 0.05、0.1、0.2、0.3 Hz,使用 FLIR 系列的非制冷式红外热像仪 A655SC,采集试件背面热图,采集时间设定为 30 s。对比分析了在不同的调制频率下的原始红外热图。最后选用最优的  $P=2\ 000\ W, f=0.1\ Hz$  下所采集的红外热图序列,如图 4 所示。

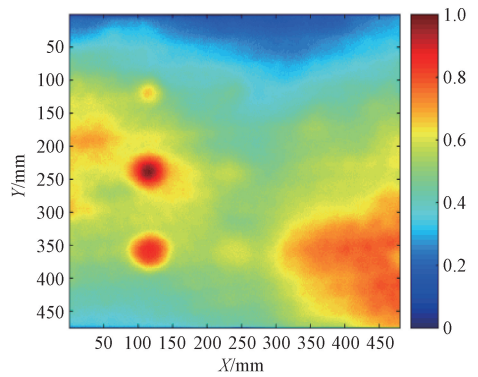


图 4  $P=2\ 000\ W, f=0.1\ Hz$  下的某一帧原始红外热图像

Fig. 4 Infrared thermal images at different frequencies

### 3 结果分析

经过 PCA 算法处理后的缺陷 A1~A3 列中心点的图像如图 5 所示。从图 5 可以看出,未处理前的缺陷列 A1~A3 信号受背景噪声影响严重,经 PCA 算法处理后,红外图像中不均匀的受热背景得到了一定的抑制,处理前在曲线中被覆盖的缺陷信息在处理后的曲线中显现出来,对比度得到了显著增强。

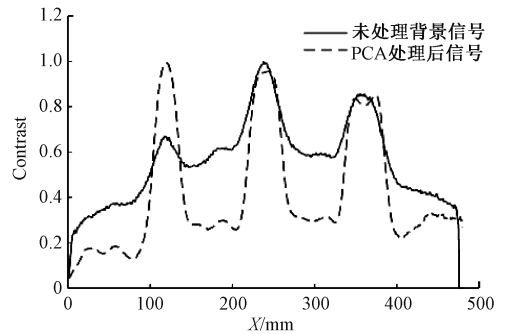
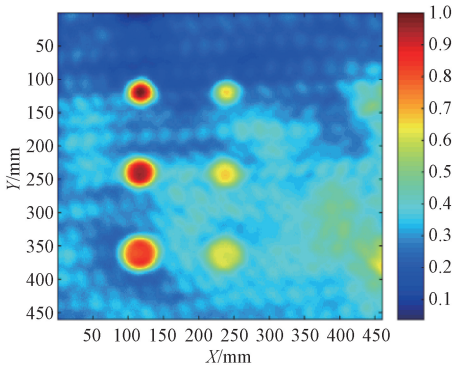


图 5 PCA 算法处理前后的缺陷中心点数据对比

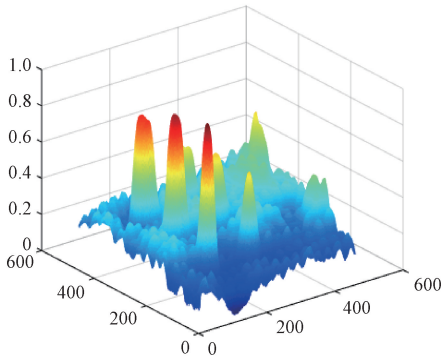
Fig. 5 Comparison of defect center point data before and after PCA algorithm processing

PCA 算法可提取整个红外图像序列中包含的缺陷信息进行降维处理,达到去除图像噪声,增强图像对比度的目的。图 6 所示为对原始图像序列进行背景减去后采用 PCA 处理得到的结果(图 6 为所有主成分中缺陷显示效果最好的第 2 主成分图)。对比图 4 和 6 发现,PCA 算法处理可以显著提高缺陷的检测率。此外,对于缺陷 C1~C3,经过实验检测与算法处理分析,在图 6(a)并未显现出来,其原因是由于蜂窝与蒙皮之间的复合层粘接部位的环氧树脂热阻抗较大,隔热性高,导致反射的热波被阻碍,使得 C1~C3 列缺陷表面与健康区域表面的温差非常低,导致缺陷在视图中不可见。



(a) 去背景后经PCA处理后的结果

(a) PCA processing results after background removal



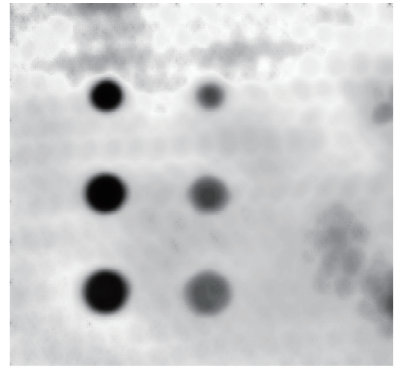
(b) PCA算法处理后图像数据三维显示效果

(b) Three-dimensional display effect diagram of image data processed by PCA algorithm

图 6 PCA 算法处理结果

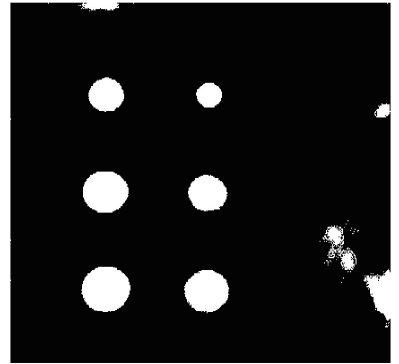
Fig. 6 PCA algorithm processing result graph

为了进一步消除噪声干扰,增强图像数据的可视性,对第 2 主成分图像(图 6(a))采用多结构形态学算法将缺陷区域与健康区域的对比度进行增强,再对增强后的灰度图像进行 PCNN 算法图像缺陷分割。图 7(a)所示是对图 6(a)进行多结构形态学算法处理增强后的灰度图像,图 7(b)所示是对图 7(a)进行 PCNN 图像分割得到的二值图像。结果表明,通过采用 PCNN 算法对增强后的灰度图像进行处理可准确地提取出各个缺陷区域。图 8 所示为常见的阈值分割算法处理结果,其中图 8(a)为 K-means 算法分割结果,图 8(b)为粒子群优化算法(PSO)分割结果。从直观可视化角度分析,与 K-means 分割算法<sup>[18]</sup>和 PSO 分割算法相比,多结构形态学与 PCNN 图像分割混合算法所取得的分割效果更加完整。然而在图 7(b)中,仍可以看到较小的非缺陷阴影区域,究其原因可能是由于原始热图 6(a)右侧存在温度较高的区域,导致这一现象可能是进行实验主动激励时,试件表面在一定程度上仍存在受热不均的现象,使得部分健康区域呈现较高温。因此,后续实验需要更多的考虑到实验设备的摆放角度,热像仪与试件之间的距离以及对实验环境的控制,此外对图像滤波算法与图像分割算法进行优化也是一大改进方向。



(a) 多结构形态学增强后的灰度图像

(a) Grayscale image enhanced by multi-structure morphology



(b) PCNN算法处理后的缺陷分割图像

(b) Defect segmentation image processed by PCNN algorithm

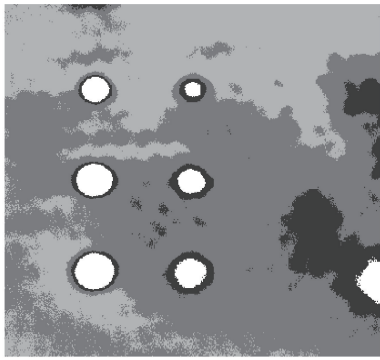
图 7 多结构形态学和 PCNN 算法处理结果

Fig. 7 Multi-structure morphology and PCNN algorithm processing result graph

除了定性分析多结构形态学与 PCNN 图像分割混合算法的分割效果之外,还对其分割结果图的缺陷直径误差比进行了定量分析。在 PCNN 分割图像中,计算 A1~A3 与 B1~B3 的 6 个缺陷区域的分割直径结果,如表 2 所示。可以看到,缺陷列 A1~A3 的测量直径结果较真实直径大,误差比<20%,缺陷列 B1~B3 的测量直径结果更加接近真实值,其误差比<10%。为了使得实验结果更加靠近缺陷直径真实值,后续实验需要对实验参数进行优化,进一步缩小有效的实验参数,得到更为精确的实验结果。

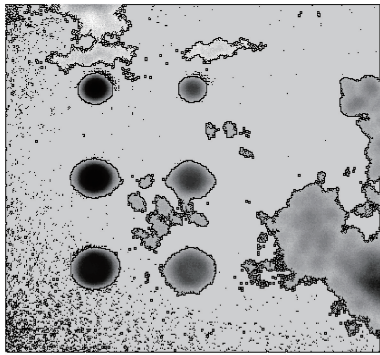
表 2 经 PCNN 分割后的图像缺陷区域测量直径与误差比  
**Table 2 Measurement diameter and error ratio of defect area in image segmented by PCNN**

Defect simulation hole (图 7(b))	True diameter/mm	Measuring Diameter/mm	error ratio/%
A1	8	9.5	18.75
A2	10	11.75	17.5
A3	12	13.25	10.42
B1	8	7.75	3.13
B2	10	10.75	7.5
B3	12	12.25	2.08



(a) K-means算法处理后的缺陷分割图像

(a) Defect segmentation image processed by K-means algorithm



(b) PSO算法处理后的缺陷分割图像

(b) Defect segmentation image processed by PSO algorithm

图8 K-means 算法和 PSO 算法处理结果

Fig. 8 Processing results of K-means and PSO algorithm

## 4 结 论

针对 CFRP/Al 蜂窝结构脱粘缺陷开展了红外热成像检测技术研究。在处理 CFRP/Al 蜂窝结构脱粘缺陷红外热图像序列过程中,针对图像存在的不均匀加热背景以及实验环境影响,导致缺陷检测较低的问题,采用了多结构形态学-PCNN 图像分割混合算法,并结合 PCA 算法处理红外图像序列,实现缺陷准确检测和缺陷区域有效分割。实验结果表明,PCA 算法可对红外图像序列进行缺陷信息提取并进行降维处理,能够有效去除红外图像序列中不均匀的加热背景以及实验环境影响;在对缺陷进行定量研究时,采用多结构形态学-PCNN 图像分割混合算法对缺陷区域进行了图像增强和图像分割。处理结果显示,对经过 PCA 算法处理后的红外图像,采用基于多结构形态学-PCNN 图像分割混合算法能够较好地抑制噪声对缺陷区域检测的影响,可以有效地提取出各个缺陷区域。此外,使用不同的图像序列背景抑制算法,如 TRR、TSR、NMF、Sparse PCA 等方法,对图像序列进行背景噪声去除,再通过多结构形态学-PCNN 图像分割混合算法对单帧图像进行分割,所得缺陷分割准确率也均有所提高。

## 参考文献

- [1] 冯君伟,盛涛,汪丽丽,等. CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构锁相红外检测方法[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(6): 69-71.  
FENG J W, SHENG T, WANG L L, et al. Phase locked infrared detection method for CFRP grid panel honeycomb sandwich structure [J]. Aerospace materials technology, 2019, 49 (6): 69-71
- [2] 盛涛,江海军,郑金华,等. 锁相红外热波法在碳纤维夹层结构中的应用[J]. 红外技术, 2019, 41(5): 489-492.  
SHENG T, JIANG H J, ZHENG J H, et al. Application of phase-locked infrared thermal wave method in carbon fiber sandwich structure[J]. Infrared Technology, 2019, 41(5): 489-492.
- [3] 郑凯,江海军,陈力. 红外热波无损检测技术的研究现状与进展[J]. 红外技术, 2018, 40(5): 401-411.  
ZHENG K, JIANG H J, CHEN L. Research status and progress of infrared thermal wave nondestructive testing technology [J]. Infrared Technology, 2018, 40 (5): 401-411.
- [4] 马炬,邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 137-144.  
MA X, ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(7): 137-144.
- [5] 邓炜,高斌,田贵云,等. 基于脉冲涡流的多层异种金属材料内部缺陷检测[J]. 无损检测, 2018, 40(4): 1-6.  
DENG W, GAO B, TIAN G Y, et al. Detection of internal defects of multi-layer dissimilar metal materials based on pulse eddy current [J]. Non-destructive Testing, 2018, 40(4): 1-6.
- [6] WANG H, WANG N, HE Z, et al. Phase-locked restored pseudo heat flux thermography for detecting delamination inside carbon fiber reinforced composites [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(5): 2938-2946.
- [7] SONG J, GAO B, WOO W L, et al. Ensemble tensor decomposition for infrared thermography cracks detection system [J]. Infrared Physics & Technology, 2020(105): 103203.
- [8] AHMED J, GAO B, WOO W L, et al. Ensemble joint sparse low rank matrix decomposition for thermography diagnosis system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 17(3): 1810-1820.
- [9] WANG H, HSIEH S J, ZHOU X, et al. Using active thermography to inspect pin-hole defects in anti-reflective

- coating with k-mean clustering [ J ]. NDT & E International, 2015(76): 66-72.
- [ 10 ] 朱占龙,刘永军,赵战民,等.用于分割无损检测图像的改进的抑制式模糊 C 均值聚类算法[J].仪器仪表学报,2019,40(8):110-118.  
ZHU ZH L, LIU Y J, ZHAO ZH M, et al. Improved suppressed fuzzy C-means clustering algorithm for segmentation of non-destructive testing images [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 ( 8 ) : 110-118.
- [ 11 ] RAJIC N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures [ J ]. Composite Structures, 2002, 58(4): 521-528.
- [ 12 ] LIU B, ZHANG H, FERNANDES H et al. Experimental evaluation of pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography on foreign object defect (FOD) in CFRP [ J ]. Sensors, 2016, 16 ( 5 ) : 743.
- [ 13 ] BU C W, LIU G Z, ZHANG X B, et al. Debonding defects detection of FMLs based on long pulsed infrared thermography technique [ J ]. Infrared Physics & Technology, 2020, 104:103074-1-7.
- [ 14 ] D'ACCARDI E, PALUMBO D, TAMBORRINO R, et al. A quantitative comparison among different algorithms for defects detection on aluminum with the pulsed thermography technique [ J ]. Metals, 2018, 8(10):859.
- [ 15 ] 桑迎平,蔡晋辉,曾九孙,等.基于形态优化滤波的轴承故障特征提取方法[J].电子测量与仪器学报,2016,30(5):757-763.  
SANG Y P, CAI J H, ZENG J S, et al. Bearing fault feature extraction method based on morphological optimization filtering [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 ( 5 ) : 757-763.
- [ 16 ] 项荣,张杰兰.基于改进 PCNN 的番茄植株夜间图像分割算法[J].农业机械学报,2020,51(3):130-137.  
XIANG R, ZHANG J L. Tomato plant night image segmentation algorithm based on improved PCNN [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 130-137.
- [ 17 ] 粟周瑜,兰全祥,袁泉,等.基于 PCNN 与形态学的坑洞图像边缘提取[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1):60-65.  
SU ZH Y, LAN Q X, YUAN Q, et al. Edge extraction of pothole images based on PCNN and morphology [ J ]. Journal of Chong Qing Jiaotong University ( Natural Science Edition ), 2016, 35 ( 1 ) : 60-65.
- [ 18 ] 郭云云,高保禄,赵子润,等.基于改进 K-means 的彩色图像分割算法[J].计算机工程与设计,2020,41(10):2849-2854.  
GUO Y Y, GAO B L, ZHAO Z R, et al. Color image segmentation algorithm based on improved K-means [ J ]. Computer Engineering and Design, 2020, 41 ( 10 ) : 2849-2854.

## 作者简介



卜迟武,分别在 2003 年和 2006 年于哈尔滨商业大学获得学士学位和硕士学位,2012 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为哈尔滨商业大学副教授,主要研究方向为红外热波无损检测技术。

E-mail: buchihu@126.com

**Bu Chiwu** (Corresponding author) received B. Sc. and M. Sc. from Harbin Commercial University in 2003 and 2006, and Ph. D. from Harbin Engineering University in 2012, respectively. Now he is an associate professor at Harbin Commercial University. His main research interest includes infrared thermal wave nondestructive testing technology.



刘涛(通信作者),2019 年于山西工程技术学院获得学士学位,现为哈尔滨商业大学硕士研究生,主要研究方向为红外热波无损检测技术。

E-mail:1308343327@qq.com

**Liu Tao**(Corresponding author) received B. Sc. from Shanxi Institute of engineering and technology in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Harbin Commercial University. His main research interest includes infrared thermal wave nondestructive testing technology.



赵博,2019 年于陇东学院获得学士学位,现为哈尔滨商业大学硕士研究生,主要研究方向为红外热波无损检测技术。

E-mail:378336085@qq.com

**Zhao Bo** received B. Sc. from Longdong University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Harbin Commercial University. His main research interest includes infrared thermal wave nondestructive testing technology.



李锐,2019 年于台州学院获得学士学位,现为哈尔滨商业大学硕士研究生,主要研究方向为红外热波无损检测技术。

E-mail:unicorn\_lr\_97@163.com

**Li Rui** received B. Sc. from Taizhou University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Harbin Commercial University. His main research interest includes infrared thermal wave nondestructive testing technology.