

文章编号: 1672-8785(2018)09-0001-07

复合材料红外热波检测图像 处理技术的研究进展

徐亚军¹ 刘炳伟¹ 钟 勉^{1*} 孙 鹏¹ 付杭君²
郑 勇² 周 斌² 熊凤军²

(1. 中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307;

2. 北京飞机修理工程有限公司成都分公司检测中心, 四川 成都 610202)

摘 要: 目前复合材料已被广泛应用于航空领域。通常采用红外热波检测技术对其内部缺陷进行检测。通过对获取的红外热波图像序列进行处理, 可以精确、定量地获取复合材料的缺陷信息。基于红外热波检测技术的需求, 对国内外关于复合材料红外热波图像序列的多种处理技术进行了分析与比较, 综述了这些技术的研究及应用情况, 展望了该领域今后的发展方向, 从而为红外热波图像序列处理技术的选择提供一定的依据。

关键词: 红外热波检测; 复合材料; 热波图像序列; 图像处理

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.09.001

Research Progress of Image Processing Technology for Infrared Thermal Wave Testing of Composites

Xu Ya-jun¹, Liu Bing-wei¹, Zhong Mian^{1*}, Sun Peng¹, Fu Hang-jun²,
Zheng Yong², Zhou Bin², Xiong Feng-jun²

(1. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. Non-Destructive Testing Center, Aircraft Maintenance and Engineer Corporation Chengdu Branch, Chengdu 610202, China)

Abstract: Currently, composites have been widely used in the field of aviation. The inner defects of composites are usually detected by infrared thermal wave detection technologies. By processing the infrared thermal wave image sequences acquired, the defect information of composites can be obtained accurately and quantitatively. According to the demands of infrared thermal wave testing technologies, several processing technologies for thermal wave image sequences of composites at home and abroad are analyzed and compared with each other. The research and applications of these image processing technologies are reviewed. The future development trend in this field is forecasted. Thus, a certain basis is provided for the selection of infrared thermal wave image sequence processing technologies.

收稿日期: 2018-08-14

基金项目: 民航发展基金项目(0251818);中国民用航空飞行学院面上项目(BJ2016-04; J2018-56);民航飞行技术与飞行安全科研基地开放课题项目(F2017KF06);大学生创新创业训练项目(201810624057)

作者简介: 徐亚军(1970-), 女, 四川邛崃人, 教授, 主要从事红外无损检测技术研究。

***通讯作者:** E-mail: mianzhong@cafuc.edu.cn

Key words: infrared thermal wave testing; composite; thermal image sequence; image processing

0 引言

随着航空制造技术的不断发展,复合材料以其高比强度、高比刚度以及良好的抗疲劳性和耐腐蚀性在航空领域得到了广泛应用,而且在航空器结构重量中的占比也越来越高。例如,空客 A350 飞机结构中的复合材料占比高达 52%。在役飞机复合材料构件中的损伤缺陷(如板与板分层、板与蜂窝脱粘、蜂窝塌陷等)都会导致飞机存在安全隐患,因此必须采取有效手段以通过对这些损伤缺陷进行识别与诊断来确保飞机的安全运行。由于具有快速、直观、准确、非接触、观测面积大等优点,红外热波检测技术已经在飞机复合材料部件的检测过程中得到了广泛应用^[1-4]。

1 红外热波检测技术概述

1.1 红外热波检测原理

红外热波检测是一种基于红外辐射原理,通过红外摄像机记录和观察被测材料表面的温度变化来检测材料损伤缺陷的无损检测技术。图 1 为红外热波检测的原理图。根据激励源的不同,红外热波检测方法可分为闪光灯激励红外热像法、光学调制热像法、超声激励红外热像法、电磁激励热像法和太赫兹波激励热像法。由红外摄像机获得的热波图像序列包含了大量的材料损伤缺陷信息,如脱粘、分层和塌陷等。

1.2 红外热波检测能力的影响因素

红外热波成像与检测结果容易受到环境、检测设备、被测试件材料和缺陷特性等因素的影响。针对这些不利因素,一方面可以在检测前选择检测灵敏度和成像分辨率高的红外检测设备^[5],另一方面可以在检测过程中利用计算机控制加热过程以保证检测精度。例如,预先采用有限元分析软件(ANSYS)排除噪声、加热不均匀等因素的干扰,可使缺陷数据的计算结果变得更为准确(见图 2)^[6]。因此,通过对

影响检测的因素进行分析与控制,可使热波成像更为清晰,从而有利于提高检测能力^[7]。

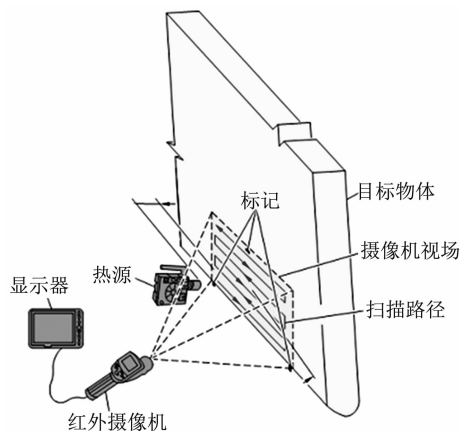
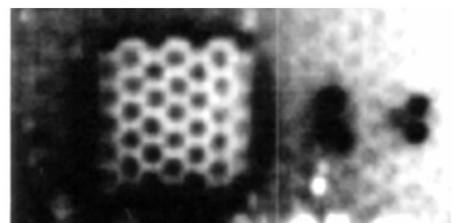
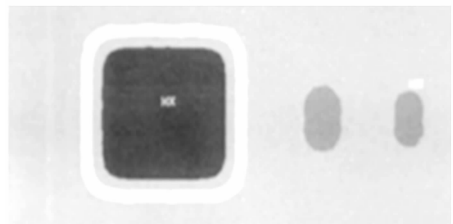


图 1 红外热波检测的原理图



(a) 实验热图



(b) ANSYS 模拟热图

图 2 实验热图和 ANSYS 模拟热图

红外热波检测包括主动热激励、红外热波图像采集和红外热波图像处理等三个重要步骤。而如何进行红外热波图像处理则是提高红外热波检测能力的关键环节。因此,我们对国内外复合材料红外热波检测领域中所涉及到的多种图像处理技术进行了研究、分析和比较,综述了这些技术的研究及应用情况,展望了复合材料红外热波检测领域今后的发展方向,为该领域中对热波图像处理技术的选择提供一定的依据。

2 红外热波检测图像处理技术

在技术发展的驱动下, 利用高灵敏度、高分辨率、高采集速率的红外成像设备获取的红外热波图像数据愈加庞大。而在大多数情况下, 又需要对红外热波图像进行实时快速处理以满足相应的检测需求^[8]。同时, 红外热波检测过程容易受到不利因素的影响, 所获得的热波图像中会产生热噪声、散粒噪声以及电子噪声等。这些干扰会导致热波图像的信噪比低、对比度差, 从而影响缺陷的精确识别与定量分析^[9]。此外, 红外热波图像是灰度图像, 而人眼对灰度图像的分辨能力低于可见光图像。

综上所述, 对原始的热波图像进行处理是非常有必要的。这样做能够滤除热图中的背景噪声信号、增强缺陷显示, 以提高缺陷辨识能力, 从而有利于从热图中提取精确、丰富的缺陷信息。目前, 红外热波检测图像处理技术的主要研究方向包括热波图像的配准与增强, 热波图像的融合、分离与分割, 热波图像序列的处理以及热波图像中缺陷的定量分析与三维重构。

2.1 热波图像的配准与增强

当使用手持式热像仪进行检测时, 操作人员手的抖动与移位都会造成热波图像序列的帧间形变, 进而增加缺陷识别的干扰。这种干扰可通过热波图像序列配准来加以消除。热波图像序列配准主要包括单组热像不同时刻的配准以及多组热像之间的配准。经常使用的图像配准方法有基于变换域的配准和基于特征的配准。Lazaridis G 等人^[10]将沃尔什变换引入基于变换域的配准方法中, 对存在旋转和平移的图像进行了配准, 得到了较为准确的图像结果。黄小荣等人^[11]运用遗传算法对热图序列进行了配准(基于特征)。结果表明, 该方法在保留热图序列信息完整、消除干扰和提高精度上具有较好效果(见图 3)。

热波图像的增强是指对序列内热波图像的边缘轮廓及对比度进行调整。它可以进一步增强缺陷信息显示以便检测人员诊断并进行计算

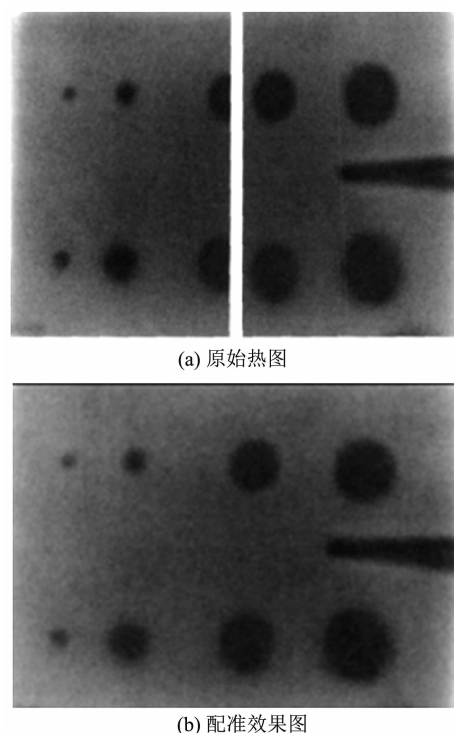


图 3 原始热图和配准效果图

机处理。其中, 热波图像序列频域增强方法最为常用, 包含低通滤波法、高通滤波法以及同态滤波法等。王冬冬^[12]对基于同态滤波的热图序列增强技术进行了研究。结果表明, 该方法能够较好地抑制热图序列中的噪声, 从而提高缺陷信息的对比度。在玻璃纤维复合材料的红外检测图像序列处理中, 武翠琴等人^[13]采用了低通滤波、高通滤波、巴特沃斯同态滤波和指数同态滤波等频域图像增强方法。结果表明, 巴特沃斯同态滤波方法抑制缺陷周围噪声的效果最好, 可获得最大对比度。此外, 基于微分的热波图像序列增强方法在国内是一个研究热点。在复合材料蜂窝结构的热图序列处理中, 刘颖韬等人^[14-15]先后采用基于一阶微分图像灰度翻转和二阶微分温度对比度图像翻转的图像增强方法剔除了热图序列中的大量冗余信息, 使缺陷显示得到了明显增强(见图 4)。

热图序列的增强效果还可采用熵、空间频率、均方根误差和峰值信噪比等参数进行客观评价。这将有利于检测人员在特定情况下选用合适的图像增强方法。

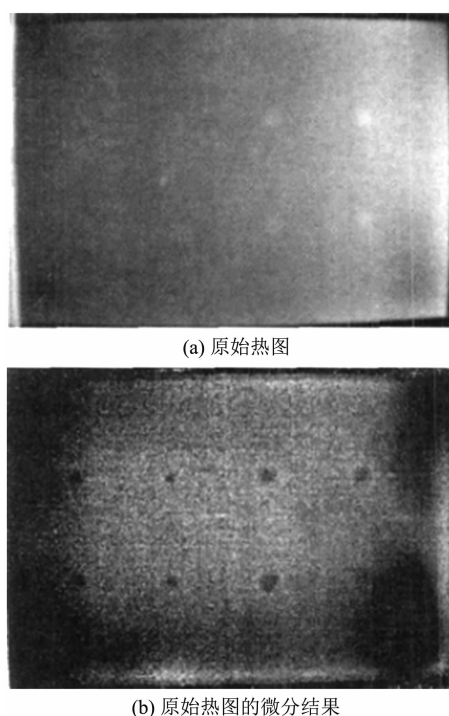


图 4 原始热图及其微分结果

2.2 热波图像的融合、分离与分割

通过对热波图像中含有的噪声等干扰信息进行有效分离,并将其与缺陷相关信息进行融合,可以提高信息的纯度。热图序列融合通常采用基于图像差值和基于小波变换的融合技术。热图序列分离通常采用基于小波变换的盲源分离技术。黄建祥等人^[16]采用基于小波变换的盲源分离技术将热图中的噪声信号有效分离,使缺陷显示更加明显。

热波图像的分割是指将目标有效区域从其背景中分离出来,实质上就是一个对图像有效特征信息进行聚类提取的过程。阈值分割法是一种计算量小且性能稳定的算法,目前已在航空复合材料红外无损检测上得到了广泛应用^[17]。刘鑫^[18]将基于结构元素算子改进与基于阈值化改进的数学形态学滤波算法相结合,对飞机复合材料层合板构件的红外热图进行了分割。结果表明,故障损伤区域与背景区域被清晰地分割出来,而且图像中缺陷信息的视觉效果更好。金国锋等人^[19]运用基于粒子群优化的智能分割方法对复合材料层合板缺陷热图进行了分割。结果表明,处理后的图像更为清

晰,缺陷信息明显增强。近年来,基于尖点突变理论的红外热图边缘检测与分割方法也在国内得到了应用。李胤等人^[20]采用尖点突变理论对复合材料层合板缺陷热图进行了分割处理,得到了更为准确的缺陷显示数据(见图 5)。

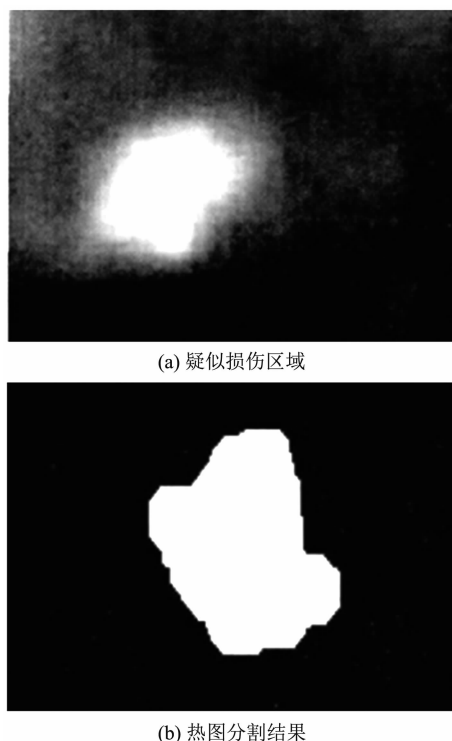


图 5 疑似损伤区域与热图分割结果

2.3 热波图像序列的处理

在实际检测过程中,热波图像序列数据的处理速度和压缩率等是几项重要的性能指标。因此,通过对其进行适当的拟合、压缩与重建来减少信息丢失和排除随机干扰显得尤为重要。受红外热像仪噪声、激励源加热不均匀性、材料表面吸收率不同的影响,单帧红外图像中缺陷信息的可靠性较低,部分细微缺陷信息甚至会被噪声淹没。同时,热波图像序列能够更准确地反映其缺陷在不同时刻的温度变化特征。因此,有必要对热波图像序列进行帧间处理。

2.3.1 热波图像序列的拟合、压缩与重建

当热波图像序列原始数据中存在较多的随机干扰时,需要对其进行拟合、压缩与重建等预处理工作。这样能够提高缺陷的对比度,减少加热不均匀的影响,降低时频域噪声,减少

存储空间, 排除随机干扰, 提高处理速度与检测效率。Shepard S M 等人^[21-22]提出了一种基于多项式拟合的 TSR 图像重建理论。该方法在热图序列数据拟合、压缩与重建上取得了较好的效果。Vavilov V^[23]采用基于多项式的数据拟合技术对玻璃纤维复合材料的热图序列进行了处理, 降低了图像的噪声干扰。其达拉图等人^[24-27]运用多项式拟合方法对复合材料损伤缺陷的热图序列进行了处理。结果表明, 图像质量得到了较大改善, 缺陷的对比度明显提高(见图 6)。

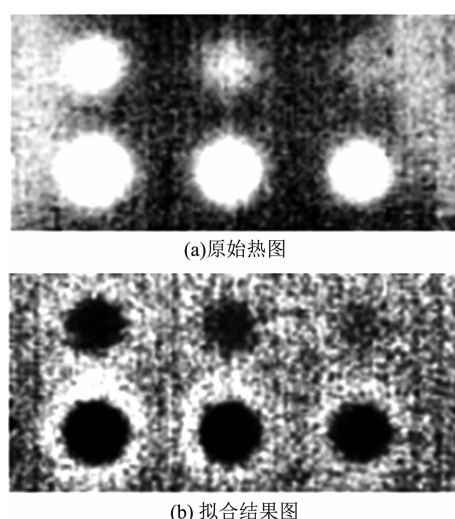


图 6 原始热图与拟合结果图

张鸿燕等人^[28]对 Marquardt 算法进行了深入研究。与多项式拟合法相比, 该算法能够减少热图序列的拟合系数, 提高压缩效率。张勇等人^[29]提出一种基于红外热波检测理论模型的数据拟合方法, 并对复杂的非线性热图序列进行了较好的拟合处理。赵艳丽^[30]运用差分进化算法对红外热图序列进行了拟合处理, 取得了较好的图像拟合效果。在热图序列数据的压缩与重建方面, Zhang J Y 等人^[31-32]使用基于 K-means 算法的压缩与重建方法保证了原始热图特征信息的完整性, 实现了热图序列的高效压缩。

在实际检测过程中, 通过将方差、均方差和均方根等作为拟合优度评价参数, 可以较好地判断红外热波图像序列拟合、压缩与重建的

质量好坏, 从而选取效果最优的方法。

2.3.2 热波图像序列的多帧处理

在对热波图像序列进行拟合、压缩与重建后, 通过采用多帧处理技术可以更好地反映热图帧间的变化关系, 即被测试件表面在不同时刻的温度分布变化特征。另外, 该方法还能实现更加完整的缺陷显示, 提高热图的可靠性并去除噪声。热图序列多帧处理技术包括多帧累加平均法、脉冲相位法、比值热图法和正则法等^[33], 其中脉冲相位法的综合表现最好。作为一种改进的脉冲相位法, 复调制 Zoom-FFT 法具有分析精度高、容易实现和计算效率高等特点, 可在缺陷的定性和定量检测上取得更好的效果(见图 7)^[34-35]。

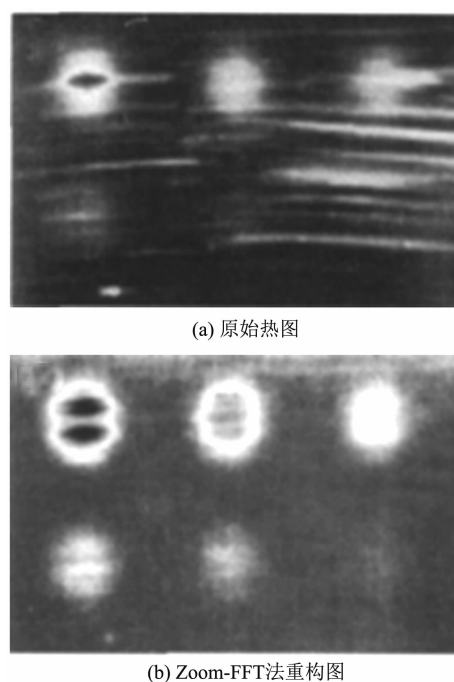


图 7 原始热图和 Zoom-FFT 法重构图

此外, 赵延广等人^[36]采用锁相热像法从多帧图像中提取出了较好的相位与幅值信息, 使得复合材料中缺陷信息的显示变得更加完整。而利用主成分分析法^[37-38]也能够有效去除多帧图像数据中的噪声与冗余信息。

2.4 热波图像中缺陷的定量分析与三维重构

热波图像处理是对复合材料中的缺陷进行定性与定量识别分析的必要工作。采用改进的遗传

算法或 BP 神经网络算法^[39]可对红外热波图像中的缺陷进行定量分析;运用二值链码技术可获得热波图像中缺陷的具体面积。对于导热系数较小的复合材料,则可计算出其缺陷深度^[40]:

$$h = \sqrt{\frac{\lambda t_{peak}}{2\rho c}} \quad (1)$$

式中, h 为缺陷深度; λ 为热导率; t_{peak} 为缺陷相应表面温差达到峰值的时刻; ρ 为材料密度; c 为材料的比热容。

此外,在完成对缺陷的精确定量识别后,可利用计算机实现对缺陷的三维重构^[41-43]。

3 结束语

现有研究表明,在复合材料红外热波检测图像处理技术方面,基于微分的热波图像序列增强技术具有最为成熟的应用水平;基于小波变换的盲源分离技术和基于尖点突变理论的图像分割方法能够更好地凸显损伤区域;Marquardt 算法、差分进化算法以及 K-means 算法在热波图像序列拟合、压缩与重建上表现更好;复调制 Zoom-FFT 法更适合热波图像的多帧处理。在此基础上,采用改进的遗传算法或 BP 神经网络算法对复合材料损伤缺陷进行了精确定量识别,并利用计算机对其进行了三维显示与重构。

在复合材料红外热波检测领域,面对未来复合材料损伤缺陷多样化与复杂化的挑战,各种表现优异的图像处理技术将会被交叉综合运用,人工智能算法结合计算机技术将会得到进一步的研究,并向缺陷的快速、精确和智能的定量化识别与可视化三维重构方向发展。未来红外热波检测图像处理技术的研究及应用前景将会十分广阔。

参考文献

- [1] Almond D P, Peng W. Thermal Imaging of Composites [J]. *Journal of Microscopy*, 2001, **201**(2): 163-170.
- [2] Meola C, Carlomagno G M. Recent Advances in the Use of Infrared Thermography [J]. *Measurement Science & Technology*, 2004, **15**(9): 27-58.
- [3] Avdelidis N P, Almond D P, Dobbinson A, et al. Aircraft Composites Assessment by Means of Transient Thermal NDT [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2004, **40**(3): 143-162.
- [4] 罗英, 张德银, 彭卫东, 等. 民航飞机主动红外热波成像检测技术应用进展 [J]. *激光与红外*, 2011, **41**(7): 718-723.
- [5] 李慧娟, 霍雁, 蔡良续, 等. 不同光学方法对蜂窝结构中脱粘缺陷检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 89-94.
- [6] 黄新萍, 陶宁, 蒋玉龙, 等. 蜂窝缺陷的红外无损检测及有限元模拟 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(6): 95-101.
- [7] 周杨, 蔡静. 脉冲红外热波检测技术的影响因素分析 [J]. *红外*, 2017, **38**(11): 27-33.
- [8] 冯贞, 马齐爽, 马说邯. 红外无损检测图像处理算法的研究 [J]. *红外*, 2009, **30**(6): 5-10.
- [9] 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.
- [10] Lazaridis G, Petrou M. Image Registration Using the Walsh Transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(8): 2343-2357.
- [11] 黄小荣, 张金玉. 基于遗传算法的红外热波图像配准技术研究 [J]. *红外*, 2010, **31**(8): 33-37.
- [12] 王冬冬. 红外热波探伤图像非均匀校正及缺陷重建方法研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2010.
- [13] 武翠琴, 洪新华, 王卫平, 等. 复合材料脱粘缺陷的红外热像无损检测 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(12): 3271-3274.
- [14] 刘颖韬, 郭广平, 杨党纲, 等. 脉冲热像法在航空复合材料构件无损检测中的应用 [J]. *航空材料学报*, 2012, **32**(1): 72-77.
- [15] 刘颖韬, 郭广平, 温磊, 等. 红外热像检测技术应用于蜂窝结构复合材料的检测能力评价 [J]. *无损检测*, 2011, **33**(12): 81-85.
- [16] 黄建祥, 张金玉, 张勇. 基于小波变换的独立分量分析及其在红外热波图像中的应用 [J]. *无损检测*, 2012, **34**(5): 40-43.
- [17] Zhang J Y, Yan C, Huang X X. Edge Detection of Images Based on Improved Sobel Operator and Genetic Algorithms [C]. Taizhou: International Conference on Image Analysis & Sign Processing, 2009.
- [18] 刘鑫. 基于复合材料缺陷检测中的红外图像分

- 割技术研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2015.
- [19] 金国锋, 张炜, 杨正伟, 等. 界面贴合型缺陷的超声红外热波检测与识别 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, **45**(2): 167–175.
- [20] 李胤, 田干, 杨正伟, 等. 复合材料低速冲击损伤超声红外热波检测能力评估 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, **17**(5): 1124–1130.
- [21] Shepard S M, Lhota J R, Rubadeux B A, et al. Enhancement and Reconstruction of Thermographic NDT Data [C]. *SPIE*, 2002, **4710**: 531–535.
- [22] Shepard S M, Lhota J R. Flash Duration and Timing Effects in Thermographic NDT [C]. *SPIE*, 2005, **5782**: 123–129.
- [23] Vavilov V. Evaluating the Efficiency of Data Processing Algorithms in Transient Thermal NDT [C]. *SPIE*, 2004, **5405**: 336–347.
- [24] 其达拉图, 郭兴旺. 基于多项式拟合的脉冲红外热像无损检测数据处理方法 [J]. *机械工程师*, 2009, **37**(2): 41–44.
- [25] 郭兴旺, Vavilov V, Shiryaev V. 飞机铝板腐蚀的热无损检测及数据处理方法 [J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(3): 208–214.
- [26] 郭兴旺, 许文浩. 复合材料蜂窝板脉冲热像检测和调制热像检测的比较研究 [J]. *复合材料学报*, 2012, **29**(2): 172–179.
- [27] 郭兴旺, 邵威, 郭广平, 等. 红外无损检测加热不均时的图像处理方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, **31**(11): 1204–1207.
- [28] 张鸿燕, 耿征. Levenberg-Marquardt 算法的一种新解释 [J]. *计算机工程与应用*, 2009, **45**(19): 5–8.
- [29] 张勇, 张金玉, 黄建祥. 基于红外热波检测理论模型的红外热像数据拟合方法 [J]. *红外*, 2012, **33**(4): 38–41.
- [30] 赵艳丽. 差分进化算法在图像处理中的应用研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- [31] Zhang J Y, Xu W, Zhang W, et al. A Novel Compression Algorithm for Infrared Thermal Image Sequence Based on K-means Method [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, **64**(3): 18–25.
- [32] Zhang J Y, Zhang W, Yang Z W, et al. A Novel Algorithm for Fast Compression and Reconstruction of Infrared Thermographic Sequence Based on Image Segmentation [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, **67**(1): 296–305.
- [33] 张金玉, 杨正伟, 田干. 红外热波检测及其图像序列处理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [34] 马说邯, 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.
- [35] Ishikawa M, Hatta H, Habuka Y, et al. Detecting Deeper Defects Using Pulse Phase Thermography [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, **57**(57): 42–49.
- [36] 赵延广, 郭杏林, 任明法. 基于锁相红外热成像理论的复合材料网格加筋结构的无损检测 [J]. *复合材料学报*, 2011, **28**(1): 199–205.
- [37] Tang Q, Liu J, Wang Y, et al. Experimental Study of Inspection on SiC Coated High-temperature Alloy Plates with Defects Using Pulsed Thermographic Technique [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, **57**: 21–27.
- [38] Tang Q, Liu J, Wang Y, et al. Inspection on SiC Coated Carbon-carbon Composite with Sub-surface Defects Using Pulsed Thermography [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, **60**: 183–189.
- [39] 刘涛, 李永峰, 黄威. BP 神经网络在红外热波无损检测定量识别中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(9): 2304–2310.
- [40] 李艳红, 金万平, 杨党纲, 等. 蜂窝结构的红外热波无损检测 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 45–48.
- [41] Shepard S M, Lhota J R. Reconstruction and Enhancement of Active Thermographic Image Sequences [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(5): 1337–1342.
- [42] Saxena A, Chung S H, Ng A Y. 3-D Depth Reconstruction from a Single Still Image [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, **76**(1): 53–69.
- [43] 宋远佳, 张炜, 王冬冬, 等. 热波检测缺陷定量识别与图像重建研究 [J]. *材料工程*, 2012, **23**(5): 39–46.