

太阳能电池阵基板锁相红外检测中的缺陷特征分析

郑金华 盛涛 向苹 徐红杰 陈超

(上海复合材料科技有限公司, 上海 201112)

文 摘 针对太阳能电池阵基板在制造过程中产生的脱黏缺陷产生的质量问题,开展锁相红外热成像检测研究。通过设计与电池阵基板脱黏类型一致的对比试块,分析含胶均匀性、碳纤维网格致密性对检测图像的影响,获取真实脱黏缺陷特征信息及参数,实现自动筛选缺陷。测试结果表明,锁相红外热成像能够有效检出太阳能电池基板脱黏缺陷,可以有效提高产品检测效率,减少检测人员的工作强度。

关键词 基板,锁相红外,脱黏缺陷,自动筛选

中图分类号: TG115.28

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.01.012

Analysis of Defect Characteristics in Phase-locked Infrared Detection of Solar Array Substrate

ZHENG Jinhua SHENG Tao XIANG Ping XU Hongjie CHEN Chao

(Shanghai Composite Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201112)

Abstract To address the quality problems caused by the debonding defects of the solar array substrate during the manufacturing process, the phase-locked infrared thermal imaging detection research was carried out. By designing a reference block that was consistent with the debonding type of the battery array substrate, the influence of the uniformity of the adhesive content and the density of the carbon fiber mesh on the detection image was analyzed, and the real debonding defect feature information and parameters were obtained, so as to realize automatic defect screening. The test results show that phase-locked infrared thermography can effectively detect the debonding defects of the solar cell substrate, effectively improve the product detection efficiency and reduce the work intensity of the inspectors.

Key words Substrate, Phase-locked, Debond defect, Automatic screening

0 引言

太阳能电池阵基板作为太阳翼的主要结构部件之一,是卫星电源分系统的重要组成部分。太阳能电池阵基板为碳纤维/环氧网格面板+铝蜂窝的三明治结构,四周用矩形梁和铰链支座加强,板内胶接各种预埋件及压紧套,并在其中一面碳纤维网格面板上粘贴聚酰亚胺薄膜,采用此膜包装基板使其表面绝缘满足粘贴电池片的要求,太阳能电池阵基板结构示意图如图1所示^[1-4]。在基板中网格规格通常为6 mm×6 mm,加密区为3 mm×6 mm,碳纤维束的宽度为1 mm,厚度为0.2 mm,聚酰亚胺薄膜的厚度为0.05 mm。

基板是太阳翼的主承力结构,在制造过程中有可能存在聚酰亚胺薄膜同网格面板之间的脱黏(以下简称薄膜脱黏),以及碳纤维网格面板的正交节点

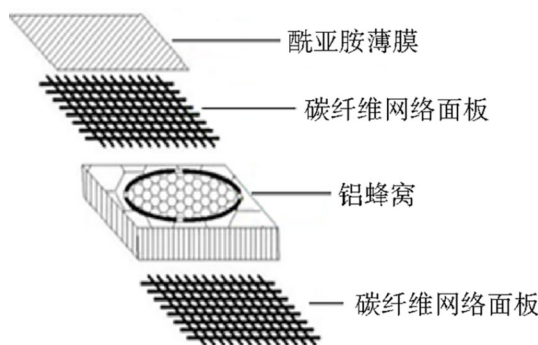


图1 太阳能电池阵基板结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of solar array substrate

脱黏(以下简称节点脱黏),这些缺陷严重影响了产品质量。针对此类问题通常采用非接触式的红外热

收稿日期:2022-09-22

第一作者简介:郑金华,1988年出生,硕士,高级工程师,主要从事超声、射线、红外检测的研究工作。E-mail:464996467@qq.com

成像检测。冯君伟等人^[5]使用了锁相红外技术检测了CFRP网格面板蜂窝夹层结构。江海军等人^[6]使用了锁相红外热波成像技术检测了碳纤维蜂窝夹层网格面板。聂旭萌^[7]在航天器用网格面板蜂窝夹层结构中使用了闪光灯红外热成像检测技术对网格面板蜂窝夹层结构进行了检测。测试结果表明红外热成像检测技术能够有效地发现网格面板蜂窝夹芯结构中的脱黏缺陷。

由于基板结构比较特殊,纤维束含胶量不均匀以及网格致密性不一致会影响检测图像。如果只是单纯的从温度差异上判断是否存在脱黏容易产生误判。本文研究脱黏缺陷的特征,排除含胶量不均匀以及网格致密性不一致造成的干扰,从而减少误判。

1 锁相红外热成像技术

锁相红外热成像检测技术是20世纪末发展起来的新型数字化无损检测技术,该技术是将红外热成像技术同数字锁相技术相结合,采用强度按正弦规律变化的外激励源对试件进行激励。激励源激励后在试件表面引起的温度变化也为正弦规律变化,温度震荡变化的频率同激励源激励的频率一致^[8-9]。温度的幅值、相位与材料特性有关,当材料内部存在缺陷(结构不连续)时,因不连续界面的两侧材料的热导率、比热容、密度不同,导致温度在材料连续处和不连续处的热扩散系数不同,引起对应表面温度的幅值、相位存在差异。因此可以通过计算材料表面温度变化的相位图和幅值图判断内部缺陷特征^[10-11]。锁相红外热成像检测系统示意如图2所示。

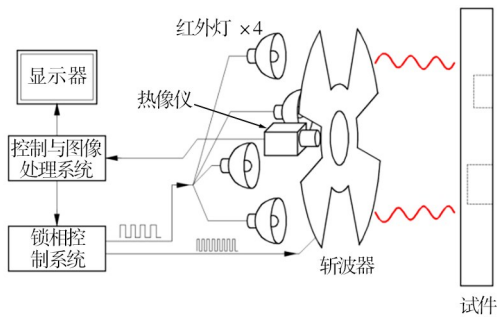


图2 锁相红外热成像检测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase-locked infrared thermal imaging detection system

锁相算法采用的是双路数字锁相相关处理算法,该算法利用噪声信号与参考信号不相关的原理,提取特定频率信号,针对周期信号,能够抑制噪声和其他直流分量。

同相相关函数为式(1),正交相关函数为式(2),如下所示。

$$c(t)^0 = \cos 2\pi ft \quad (1)$$

$$s(t)^0 = \sin 2\pi ft \quad (2)$$

使用同相相关函数和正交相关函数分别与采集到的热波信号序列运算得到式(3)和式(4)。

$$U_{01} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U(n) \cdot c(n)^0 = \frac{U_s}{2} \cos \varphi \quad (3)$$

$$U_{02} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U(n) \cdot s(n)^0 = \frac{U_s}{2} \sin \varphi \quad (4)$$

求解式(3)和式(4)得到:

$$\varphi = \arctan \frac{U_{02}}{U_{01}} \quad (5)$$

$$U_s = 2 \sqrt{U_{01}^2 + U_{02}^2} \quad (6)$$

式(1)–式(6)中, f 为激励源的激励频率, U 为系统采集到的热波信号序列, φ 为所求的相位, U_s 为所求的幅值^[12]。

2 对比试块的制作

为了验证锁相红外热成像技术对太阳能电池阵基板中脱黏缺陷的检测能力,通常需要制作对比试块。设计的薄膜脱黏缺陷对比试块示意图如图3所示。其中第一行为铣去碳纤维网格,第二行为涂脱模剂,第三、四行的第一第二列为夹一层聚四氟乙烯薄膜,第三、四行的第三第四列为夹两层聚四氟乙烯薄膜。对比试块实物如图4所示。

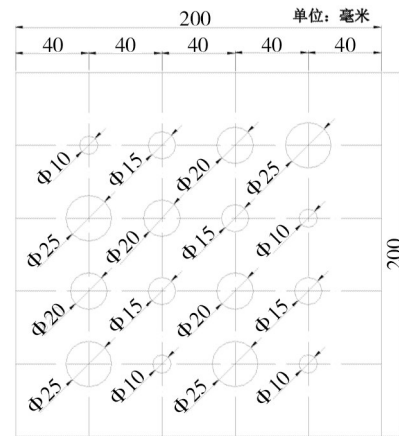


图3 薄膜脱黏示意图

Fig. 3 Schematic diagram of film debonding

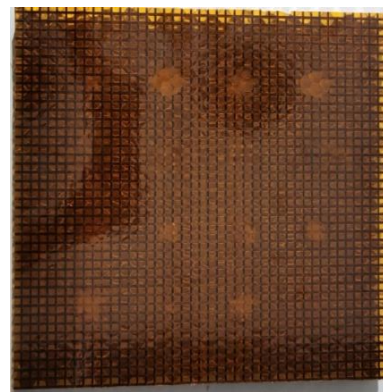


图4 薄膜脱黏对比试块

Fig. 4 The reference block of film debonding

碳纤维网格节点之间的脱黏则采用手术刀片将节点挑开的方式制作,如图5所示。



图5 节点脱黏试块

Fig. 5 The reference block of node debonding

3 薄膜脱黏试块的检测

试验所使用的锁相红外热成像自动检测系统的像仪为非制冷型,其工作波段为 $7 \sim 14 \mu\text{m}$,使用320个LED灯珠作为热激励源,总功率为1 600 W,采集帧频为30 Hz,图像分辨率为 640×512 。通过实验发现,在锁相频率为0.75 ~ 1 Hz,锁相周期个数为3时,所检测的图像质量已经能够满足产品中脱黏缺陷的判断要求。

采用上述参数使用锁相红外热成像设备对薄膜脱黏试块进行检测,得到的振幅图和相位图分别如图6和图7所示。

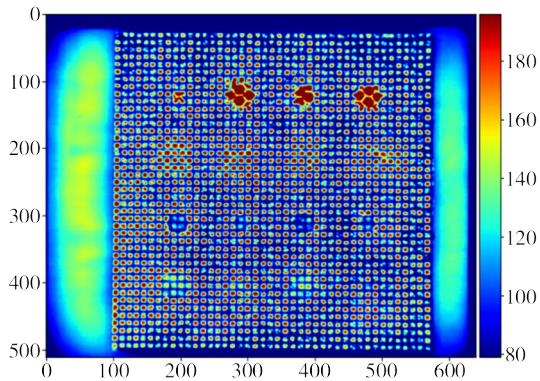


图6 薄膜脱黏振幅图

Fig. 6 The amplitude diagram of film debonding

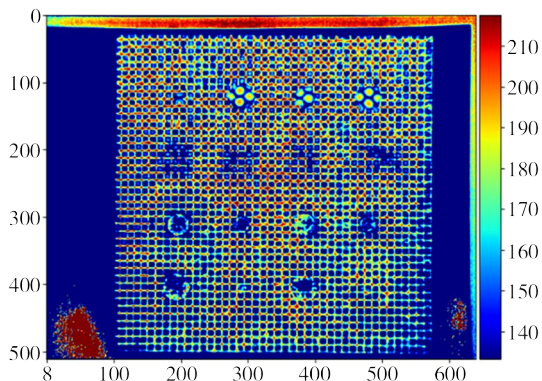


图7 薄膜脱黏相位图

Fig. 7 The phase diagram of film debonding

从图6和图7中可以发现,振幅图和相位图对缺少碳纤维网格和夹层缺陷都有较高的检测灵敏度,但是

对于涂脱模剂模拟脱黏缺陷,振幅图检测效果明显不如相位图。然而实际产品中所出现的脱黏缺陷类型往往和涂脱模剂模拟的脱黏缺陷类似,而不会有另外两种缺陷,因此对于薄膜脱黏缺陷只能采用相位法对其进行检测。因薄膜脱黏,导致脱黏处的热扩散系数明显区别于黏接良好处,产生明显的相位变化,导致相位图上的碳纤维网格显示不连续。因此可以通过观察相位图中碳纤维网格是否连续来判是否存在薄膜脱黏。

4 薄膜脱黏的自动筛选

通过上述分析可以发现,当黏接良好时,碳纤维网格连续,每个网格孔都有明显的边界线。当存在脱黏时,由于碳纤维网格的不连续,导致网格孔的边界扩大,横跨了至少2个网格孔,其轮廓面积也将至少扩大2倍。因此能够通过图像处理对检测到的图像进行轮廓查找,并根据轮廓面积是否大于等于2倍的单个网格孔轮廓面积来判断是否存在脱黏。查找的流程是先将原始图像进行二值化,再根据二值化结果使用opencv的轮廓查找函数查找轮廓,并将轮廓绘制在原始图像中。图7的二值化结果和轮廓查找结果分别如图8和图9所示。

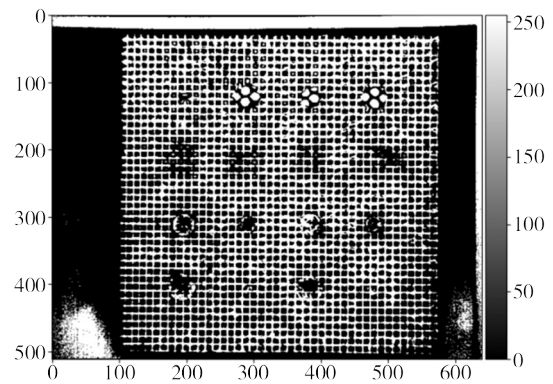


图8 图7的二值化

Fig. 8 Binary of Fig. 7

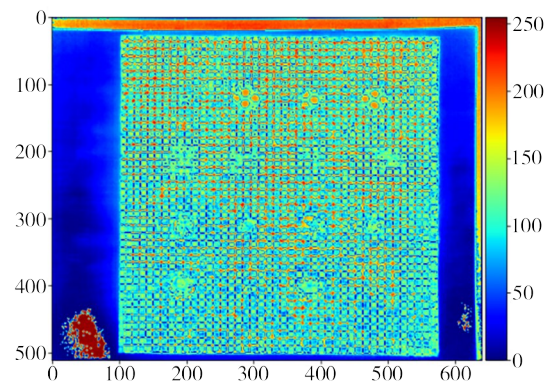


图9 图7的轮廓查找结果

Fig. 9 Contour search results of Fig. 7

通过计算得知正常区域网格孔眼轮廓边长为10像素的正方形,其面积为100像素。如果存在脱黏其轮廓像素面积最小为200像素,轮廓长度方向最小为20像素。通过这两个条件对查找到的轮廓进行筛选得到的结果如图10所示,已经实现了对脱黏缺陷的筛选。

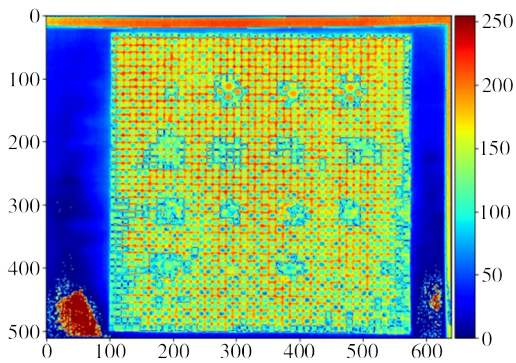


图10 图9的轮廓筛选结果

Fig. 10 Contour screening results of Fig. 9

5 节点脱黏试块的检测

在碳纤维网格面板中,当碳纤维网格节点之间存在脱黏时,脱黏处的温度会高于黏接良好处的温度。通常情况下可以通过观察检测区域的温度异常来判断是否存在脱黏。而碳纤维束表面的温度不仅受到黏接情况的影响,同样受到碳纤维束本体的含胶量和碳纤维网格致密程度的影响。当碳纤维束本体含胶量非常少时,碳纤维束本体非常亮,导致该节点处的温度也非常高。而加密区由于其温度的热扩散性比非加密区的热扩散性小,导致加密区的温度也会相对较高,因此只是单一地通过温度异常来判断网格节点之间是否存在脱黏容易产生误判。在碳纤维束本体含胶量均匀,碳纤维网格致密性一致时,其锁相红外热成像振幅检测结果如图11所示,图像中网格显示非常清楚,且灰度值基本一致。当碳纤维网格含胶量不均匀和致密性不一致时,其锁相红外热成像振幅检测结果如图12所示。因此在图12中碳纤维网格灰度值不均匀,容易产生误判。

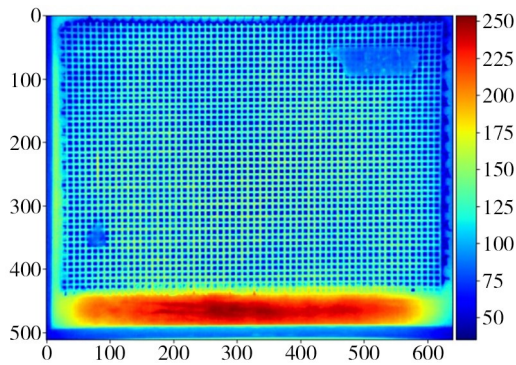


图11 含胶量均匀的振幅图像

Fig. 11 Amplitude image with uniform glue content

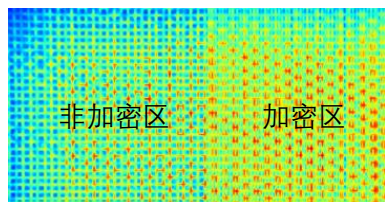


图12 含胶量和致密性不一致的振幅图像

Fig. 12 Amplitude image with inconsistent glue content and density

6 节点脱黏的自动筛选

通过分析发现真实存在脱黏的节点,其异常区域呈“一”字形,而受碳纤维本体含胶量少导致的温度异常区域的节点通常呈“十”字形或“T”形,如图13所示。因此就可以通过检测图像中的异常温度所呈现的图像形状来判断网格节点之间是否存在脱黏。有了这些明确的判断条件,就可以采用图像形态学对图像中的异常区域进行自动筛选。轮廓查找方法同上面一致,图13的二值化结果和轮廓查找结果分别如图14和图15所示。

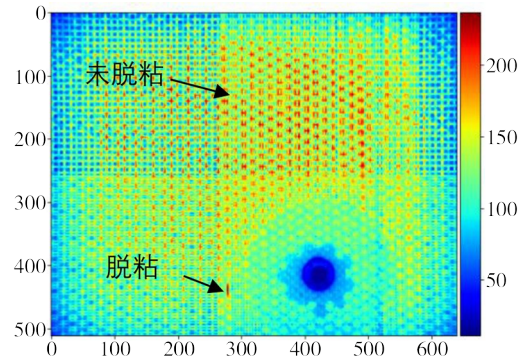


图13 真实脱黏缺陷形状

Fig. 13 The defect shape of real debonding

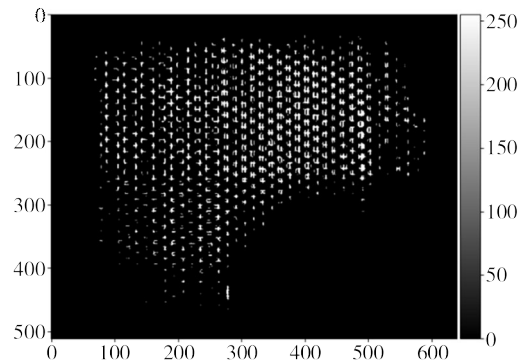


图14 图13的二值化结果

Fig. 14 Binarization result of Fig. 13

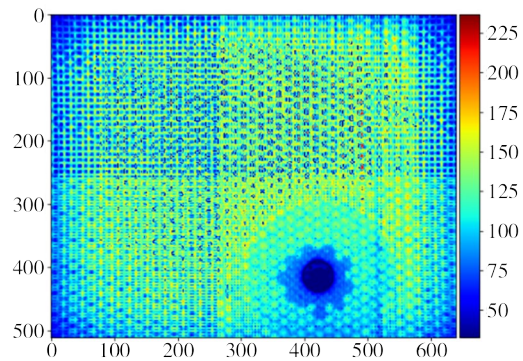


图15 图13的轮廓查找结果

Fig. 15 Contour search results of Fig.13

之后再根据前面所述的真实缺陷特征的轮廓进行筛选。碳纤维网格节点脱黏的主要筛选的参数为轮廓长度和轮廓的长宽比,通过观察,脱黏区域的轮廓长度一般大于15个像素,而长宽比大于3。根据上述条件筛选后的结果如图16所示,实现了对真实

脱黏缺陷的筛选。

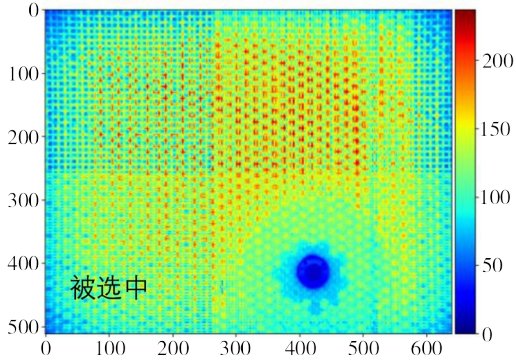


图16 图13的轮廓筛选结果

Fig. 16 Contour screening results of Fig. 13

7 影响自动筛选准确性的因素

轮廓查找的精度和准确性受到图像二值化的阈值影响,在实际检测过程需要根据不同型号产品进行调整,但是对轮廓的筛选方法一致。由于检测厂房温湿度恒定,针对同一类型的产品所得到的检测图像质量和灰度基本一致。因此可以制定统一的检测工艺参数和轮廓查找筛选参数。

实际检测中,锁相红外热成像每次检测的区域比较小(400 mm×300 mm),而太阳能电池阵基板的尺寸通常都比较大,每件产品需要对其进行分区多次检测,所得到的检测图像较多。可以采用批处理的方式对所有检测图像进行筛选、标记,必要时可以采取人工复核的方式对筛选出的图像进行复核,当产品中缺陷较少时,所需要复核的图像较少,大大减少了检测人员的评片工作量,同时还可以将筛选出的缺陷进行脱黏率、脱黏面积、脱黏数量统计等工作,提高了检测效率。

8 结论

针对太阳能电池阵基板,采用锁相红外热成像检测,能够有效的发现薄膜脱黏缺陷以及节点脱黏缺陷,通过对脱黏缺陷的图像轮廓特征进行分析。发现薄膜脱黏缺陷的特征为脱黏缺陷的轮廓面积大于等于2倍的单个网格孔的轮廓面积。节点脱黏缺陷的特征为:(1)缺陷轮廓呈现“一”字型;(2)缺陷轮廓长度大于15个像素;(3)缺陷轮廓的长宽比大于3。通过这些特征可以有效地对图像中的脱黏缺陷进行筛选、统计等工作,大大减少了检测人员的评判工作强度,并且提高了检测效率。

参考文献

[1] 马泽策. 柔性太阳翼桅杆材料属性对热诱发振动影响分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.

MA Z C. Analysis of the influence of material properties of flexible solar wing mast on thermally induced vibration [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[2] 罗小乐. 太阳能电池阵复合材料结构改进设计及其试验验证研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.

LUO X L. Research on improved design and experimental

verification of solar array composite material structure [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.

[3] 韩晓媚. 基于微结构提高有机太阳能电池光电转换效率的研究[D]. 长春:长春理工大学, 2018.

HAN X M. Research on improving the photoelectric conversion efficiency of organic solar cells based on microstructure [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018.

[4] 张燕娜, 赵泓滨. 太阳能电池阵基板结构优化设计[J]. 空间电子技术, 2018, 15(2): 49-53, 100.

ZHANG Y N, ZHAO H B. Structural optimization design of solar array substrate [J] Space Electronics, 2018, 15(2): 49-53, 100.

[5] 冯君伟, 汪丽丽, 盛涛, 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, WANG L L, SHENG T, et al. Phase-locked infrared detection method for CFRP grid panel honeycomb sandwich structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(6): 69-71.

[6] 江海军, 陈力. 红外热波成像技术在复合材料无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2018, 40(11): 37-41.

JIANG H J, CHEN L. Application of infrared thermal wave imaging technology in nondestructive testing of composite materials [J]. NDT, 2018, 40(11): 37-41.

[7] 聂旭萌. 航天器用网格面板蜂窝夹层结构红外热像检测技术研究[D]. 廊坊:北华航天工业学院, 2015.

NIE X M. Research on infrared thermal image detection technology of honeycomb sandwich structure with grid panel for spacecraft [D]. Liangfang: North China Institute of Aerospace Technology, 2015.

[8] 王扬, 李科, 刘俊岩. CFRP复合材料层板缺陷的红外热波成像检测方法[J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 36-42.

WANG Y, LI K, LIU J Y. Infrared thermal wave imaging detection method for defects of CFRP composite laminates [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 36-42.

[9] WANG Z, LIU J, DAI J. Lock-in thermography to evaluation of destruction area and determination of depth - Art. No. 67231F [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007. DOI: 10.1117/12.783180.

[10] 伍颂, 刘哲军, 朱军辉, 等. 吸波涂层缺陷的锁相红外检测[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(4): 81-85.

WU S, LIU Z J, ZHU J H, et al. Phase-locked infrared detection of defects in absorbing coatings [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(4): 81-85.

[11] WANG X, CRUPI V, ZHAO Y, et al. Lock-in thermographic methodology for fatigue assessment and nonlinear stress measurement [J]. Proceedings of SPIE - International Conference on Experimental Mechanics, 2008: 110708051.

[12] 汪子君. 红外相位法无损检测技术及应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.

WANG Z J. Infrared phase method nondestructive testing technology and application research [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2009.