CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构锁相红外检测方法

冯君伟[1]　盛　涛[1]　汪丽丽[2]　钱云翔[1]　郑金华[1]
（1　上海复合材料科技有限公司，上海　201112）
（2　上海材料研究所，上海　200437）

文　摘　依据 CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构、成型工艺、使用环境，以有效检测其内部脱粘、分层、纤维断裂缺陷为目标，设计并制作了含有典型缺陷试块，通过试验确定了锁相红外热成像检测的锁相周期、锁相频率等检测参数，建立了锁相红外热成像检测方法。试验表明：该方法能够有效的检测并分别出 CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构中的脱粘缺陷、分层缺陷、纤维断裂。

关键词　CFRP 网格面板，蜂窝夹芯结构，锁相红外热成像，脱粘，分层，纤维断裂
中图分类号：TN219　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2019.06.013

Lock-in Infrared Thermography Testing Method for Honeycomb Sandwich Structure of CFRP Grid Panel

FENG Junwei[1]　SHENG Tao[1]　WANG Lili[2]　QIAN Yunxiang[1]　ZHENG Jinhua[1]
（1　Shanghai Composite Materials Technology Co.,Ltd, Shanghai　201112）
（2　Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai　200437）

Abstract　According to the honeycomb sandwich structure of CFRP grid panel and the forming technology and application environment, a test block containing typical defects is designed and made, aiming at effectively detecting the internal debonding, lamination and fiber fracture defects. The detection parameters such as phase-locked period and frequency of lock-in infrared thermography are determined by the test method, and the detection method of lock-in infrared thermography is established. The experimental results show that this method can detect and separate the debonding defects, delamination defects and fiber fracture in the honeycomb sandwich structure of CFRP grid panels.

Key words　CFRP Grid Panel, Honeycomb Sandwich Structure, Lock-in infrared thermography, Debonding defect, Lamination defect, Fiber fracture

0　引言

复合材料被广泛运用，其制件内部易存在影响其使用性能与可靠性的缺陷，对这些缺陷进行无损检测具有非常重要的意义。

CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构，表面的碳纤维网格面板为空心结构，因为采用传统的超声检测，无法避免检测用的耦合剂流入产品内部，且超声探头无法稳定接触产品表面，故常用的检测方法不适合。

本文采用锁相红外热成像技术对 CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构产品检测，制作了相应结构和缺陷类型的试块，确定了检测系统的参数，实现了缺陷的检测。

1　锁相红外热成像检测技术

1.1　成像检测方法

如图 1 所示，使用 LED 阵列光源对 CFRP 网格面板进行周期性调制热激励。

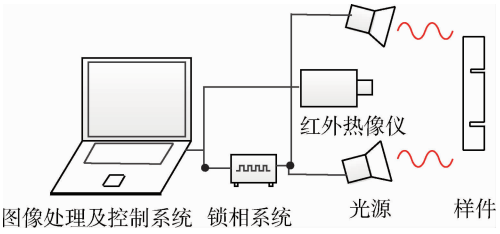


图 1　锁相红外热成像技术示意图

Fig.1　Phase-locked infrared thermal imaging technology

利用高能量脉冲光加热产品表面，热波传播至产品内部，在无缺陷区域，热波均匀传播，最终表面温度

收稿日期：2019-02-18

第一作者简介：冯君伟，1991 年出生，硕士，主要从事超声检测技术研究。E-mail：13818138483@163.com

均匀;在有缺陷区域,热传导被缺陷阻断,最终表面呈现温差[1]。对红外热像仪记录的序列热图像加以处理得到振幅和相位信息图像,其中,振幅表征了反射和入射热波的矢量和,相位则表征了反射和入射热波之间的相位差。锁相红外热成像检测技术(LT),受环境影响小,空间分辨率高,成像效果清晰,灵敏度较高[2]。

1.2 成像检测系统

锁相红外热成像检测系统如图 2 所示,主要由红外热像仪、机械传动系统、锁相控制系统、LED 阵列光源、控制与图像处理系统组成。系统软件功能包括图像采集、图像处理、运动控制和参数设置[3]。数据采用 1 024 点/2 048 点 FFT 进行处理,得到振幅图像和相位图像。

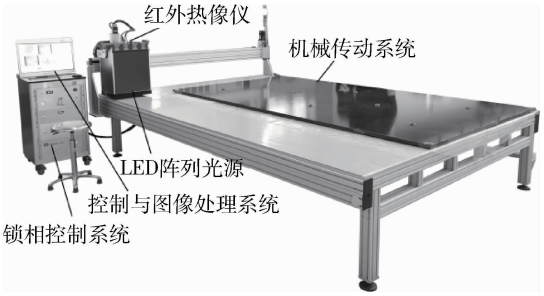


图 2 锁相红外成像系统图

Fig.2 Phase-locked infrared thermal imaging system

2 缺陷识别及试样制备

2.1 结构中的缺陷类型

本文所检测的产品 CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构如图 3 所示,主要包含 3 个部分:聚酰亚胺薄膜、碳纤维网格面板、铝蜂窝芯。具体胶接方式为:首先在网格面板胶接面使用毛刷涂刷胶液,然后铝蜂窝芯正面和背面粘贴网格面板,接着上下表面铺不透气脱模布和均压板,抽真空并进固化炉几小时;紧接着脱模,再在基板胶接面涂刷胶液,铺贴聚酰亚胺薄膜并铺透气脱模布和均压板,最后抽真空进固化炉。此种结构的材料不仅具备碳纤维蒙皮蜂窝夹芯结构的特性,还具有其他更多的优势,如隔热性、绝缘性以及整体质量更轻。此种结构的产品是卫星太阳能电池的部件之一。

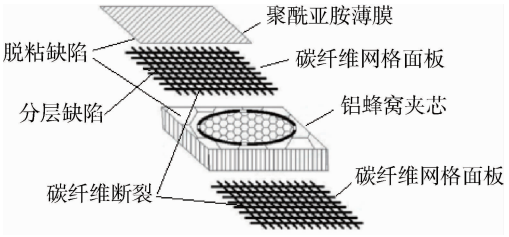


图 3 结构及缺陷位置示意图

Fig.3 Structure and defect location diagram

碳纤维网格面板由碳纤维正交缠绕而成,宽度为 2 mm,厚度为 0.2~0.3 mm[4]。正交缠绕的粘接区域小,整体结构相对碳纤维蒙皮质地更轻。碳纤维网格面板的胶接质量决定了产品质量的稳定性。产品的整体结构存在 3 类缺陷,碳纤维网格面板断裂缺陷、碳纤维网格面板内部的分层缺陷、脱粘缺陷。根据脱粘缺陷出现的位置不同可分为:(1)聚酰亚胺薄膜与碳纤维网格面板之间脱粘,(2)碳纤维网格面板与铝蜂窝之间脱粘[5]。

2.2 试块制备

根据产品在生产和使用中可能会出现的三种缺陷类型,设计并制作了 4 块试块(图 4),试块 1 为制作的过程中加入不同大小的聚四氟乙烯薄膜来模拟不同位置的缺陷。其余 3 块试块是在已经成型的产品中切割出来的一部分,试块 2 局部不涂刷胶液,模拟产品中的缺陷;试块 3、试块 4 和试块 5 根据缺陷的不同使用刀片在不同位置进行切割,让产品产生缺陷,真实模拟产品中的缺陷。

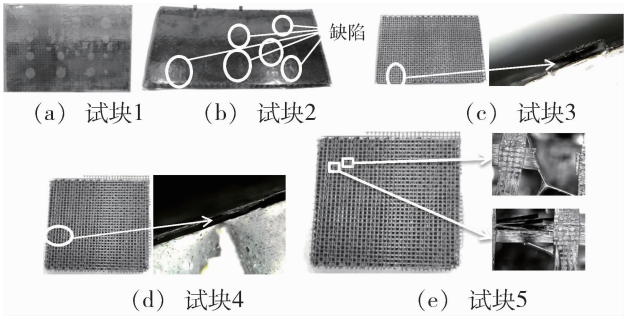


图 4 试块 1~试块 5

Fig.4 Testing blocks

试块 1 中的人工缺陷薄膜为聚四氟乙烯薄膜。在碳纤维网格内部及两侧加入直径分别为 40、30、20、10 mm 的缺陷各 5 个。自左向右,第一列为碳纤维网格面板内部加 2 层 0.03 mm 厚的薄膜;第二列为聚酰亚胺薄膜与碳纤维网格面板之间加 2 层 0.03 mm 厚的薄膜;第三列为铝蜂窝与碳纤维网格面板的粘接面,加薄膜处不涂刷胶液,同时加 2 层 0.03 mm 厚的薄膜;第四列为碳纤维网格面板与铝蜂窝之间加 2 层0.03 mm 厚的薄膜;第五列为聚酰亚胺薄膜与碳纤维网格面板的粘接面,加薄膜处不涂刷胶液,加 2 层0.03 mm 厚的薄膜[6]。

试块 2 为聚酰亚胺薄膜与碳纤维网格面板之间的脱粘缺陷试块,试块 3 为碳纤维网格面板内部的分层缺陷试块,试块 4 为碳纤维网格面板与铝蜂窝之间的脱粘缺陷试块,试块 5 为碳纤维断裂缺陷试块。

3 参数选择与结果分析

在检测的过程中,通常先设置较高的锁相频率,再逐渐降低频率,较低的频率能够增加材料的热扩散长度和检测更深的区域,增强检测效果[7]。

3.1 锁相频率参数选择

对试块 1 采用锁相周期为 7 个,锁相频率为 0.5、0.3、0.1 Hz 分别进行检测,得到结果如表 1 和图 5 所示。分析差异后选择锁相频率 0.3 Hz。

表 1　不同锁相频率的检测结果数据统计

Tab.1　Data statistics of detection results of different phase-locked frequencies

f_e/Hz	缺陷数量		检测结果差异
	振幅图	相位图	
0.1	17	19	图像模糊、噪声大、信噪比小、有漏检
0.3	19	20	图像清晰、噪声小、信噪比大、无漏检
0.5	19	20	图像清晰、噪声小、信噪比小、无漏检

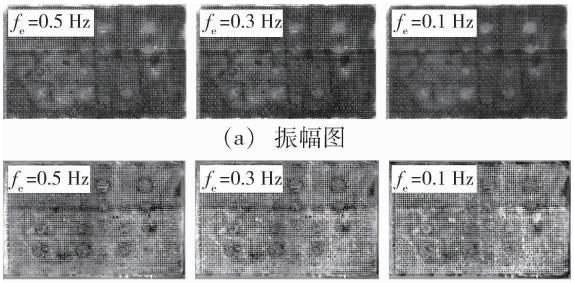


图 5　不同锁相频率检测结果

Fig.5　Different phase-locked frequency detection results

3.2　锁相周期参数选择

对试块 1 使用锁相频率为 0.3 Hz，采用 4、7、10 三种不同的锁相周期分别进行检测，得到结果如图 6 所示。得到的振幅图(a)和相位图(b)的检测结果(表 2)基本一致，说明锁相周期对产品检测结果影响较小。

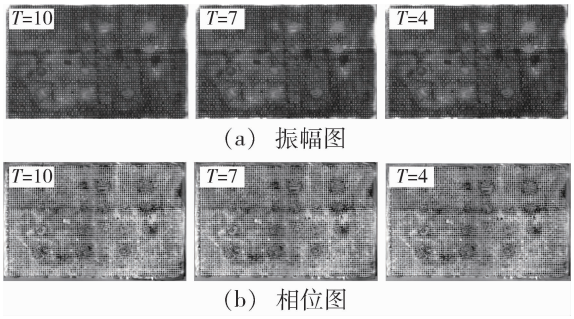


图 6　不同锁相周期的检测结果

Fig.6　Detection results of different phase lock cycles

表 2　不同锁相周期的检测结果统计

Tab.2　Results of different phase lock cycles

图像	锁相周期	缺陷个数			
		Φ10mm	Φ20mm	Φ30mm	Φ40mm
振幅	4	5	5	5	5
	7	5	5	5	5
	10	5	5	5	5
相位	4	5	5	5	5
	7	5	5	5	5
	10	5	5	5	5

一方面保证探伤的精度和可靠性，另外一方面考虑检测的效率，选择锁相周期为 10 时间花费大，效率低。小于 3 个锁相周期，系统算法不能工作，因此系统算法要求锁相周期不能小于 3。当锁相周期越小时，数据样本越小，进行数据处理时，FFT 计算精度越低。锁相周期为 4 和 7 相比，在检测效率满足的情况下，尽量多的锁相周期能够相应提升图像的信噪比，达到相对较好的检测效果。因此选择锁相周期为 7 个。

3.3　试块检测结果

采用锁相红外热成像检测方法，通过确定的检测系统的参数对试块 2~试块 5 进行成像检测，结果由图 7 可见，试块 2 可以检测出聚酰亚胺薄膜与碳纤维网格面板之间的脱粘缺陷，振幅图圆圈标记的白色区域为试块中的脱粘缺陷。试块 3 可以检测出碳纤维网格面板内部的分层缺陷。相位图圆圈标记的暗黑色的区域为分层缺陷。试块 4 可以检测出碳纤维网格面板与铝蜂窝之间的脱粘缺陷。振幅图圆圈标记的暗黑色的区域为脱粘缺陷。试块 5 检测出碳纤维断裂缺陷。振幅图圆圈标记的区域为缺陷的位置。

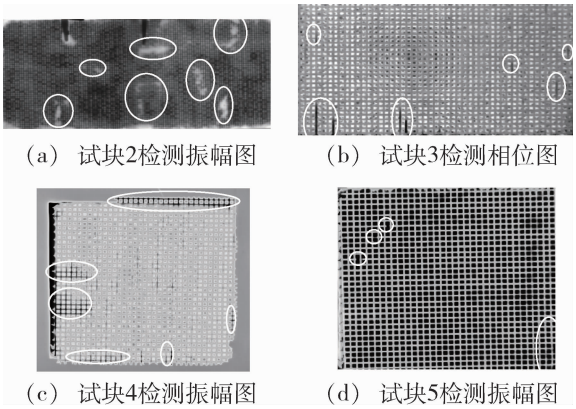


图 7　不同试块检测结果

Fig.7　Different test block results

4　结论

通过锁相红外热成像检测方法在 CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构的检测应用，表明该方法在锁相频率为 0.3 Hz 和锁相周期为 7 的条件下，能够有效检测出 CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构中的脱粘缺陷、分层缺陷和碳纤维断裂。

参考文献

[1] 刘元林，梅晨，唐庆菊，等. 红外热成像检测技术研究现状及发展趋势[J]. 机械设计与制造，2015(6):260-262.

[2] 姚中博，张玉波，王海斗，等. 红外热成像技术在零件无损检测中的发展和应用现状[J]. 材料导报，2014，28(7):125-129.

[3] 陈飞，江海军，陈力. 基于光学斩波的锁相热波成像技术[C]// 远东无损检测新技术论坛，2017.

[4] 陆晓欣. 碳纤维增强树脂基复合材料表面阻抗调制与结构吸波性能研究[D]. 哈尔滨工业大学，2014.

[5] 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].北华航天工业学院，2015.

[6] 周莉，孙建罡，邵红亮，等. 影响蜂窝结构激光错位散斑检测灵敏度的参数[J]. 无损检测，2015，37(6):33-36.

[7] ROSENCWAIG A，GERSHO A. Theory of the photoacoustic effect with solids[J]. Journal of Applied Physics，1976，47(1):64-69.