

红外无损检测技术粘接结构产品应用

林 鑫 葛 丽 程茶园 伍 颂 陈 颖

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 介绍了红外无损检测技术的检测原理和对粘接结构产品的试验应用。试验结果表明,红外无损检测技术可以有效的对玻璃钢泡沫夹层、软木粘接、碳纤维蒙皮蜂窝夹层等粘接结构进行产品质量检测,具备广阔的应用前景。

关键词 红外热成像,粘接质量,无损检测

中图分类号:TN215

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.017

Application of Infrared Non-Destructive Testing Technology in Adhesive Structure Products

LIN Xin GE Li CHENG Chayuan WU Song CHEN Ying

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The principle and the applications of infrared thermography non-destructive testing (NDT) technology are described in this paper. Experiment results show that, the infrared thermography NDT technology is an effective method for several adhesive products quality testing, such as, glass-fiber-reinforced-foam bonding structure, cork bonding structure, composite honeycomb sandwich structure. It is believed that infrared thermography NDT technology has widely application potential in future.

Key words Infrared thermography, Adhesive quality, Non-destructive testing

0 引言

随着新材料、新工艺的发展,粘接结构产品^[1]广泛使用,如运载火箭整流罩锥段及筒段表面用于防隔热的玻璃钢泡沫夹层粘接结构、软木粘接结构;卫星支架上使用的碳纤维蒙皮蜂窝粘接结构,铝蒙皮蜂窝粘接结构;等。针对粘接结构产品的检测工作,已有超声、散斑这两种较为成熟的无损检测方法,应用于金属粘接结构,胶片粘接结构等。

2003年开始,我国有多家单位开始进行红外无损检测技术基础研究,如航天材料及工艺研究所,北京航空材料研究院、哈尔滨工业大学、首都师范大学等相关单位利用红外热像技术对涂层材料红外检测,多层结构材料分层缺陷检测、材料冲击损伤检测与评估研究、疲劳裂纹检测等方面进行基础性研究工作。至2013年8月,航天材料及工艺研究所利用红外无

损检测技术对玻璃钢泡沫夹层、软木粘接、碳纤维蒙皮蜂窝夹层等粘接结构,逐步开展了工程化应用。

红外热成像无损检测技术按照引起温差的手段不同可以分为主动式和被动式方法^[2],工程应用中主要采用主动式无损检测方法^[3],对被检件表面进行热激励,当粘接面上存在脱粘缺陷时,脱粘缺陷区域表面处与粘接良好区域表面处之间形成了温度差,从而利用这一热传导不均匀性引起的表面温场分布差异来进行无损检测^[4]。

目前,随着红外无损检测在产品检测过程中逐步实现工程化应用,在新材料粘接结构件的检测工作中显示出更大的技术优势^[5]。本文开展了红外无损检测产品试验件检测工作,包括玻璃钢泡沫粘接结构、软木粘接结构、碳纤维蒙皮蜂窝粘接结构。

1 红外无损检测原理

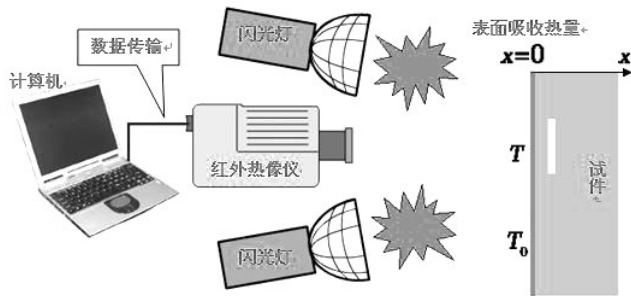
1.1 脉冲加载法

脉冲法红外热波无损检测原理如下,利用高能闪光灯发出可见光脉冲照射在被检测的物体表面,脉冲激励热传导方程可写为:

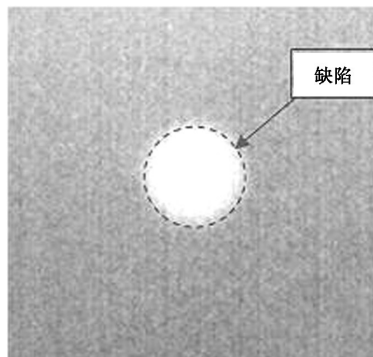
$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -\frac{q}{k} \delta(x) \delta(t) \quad (1)$$

式中, $T(x,t)$ 为温度; κ 为材料的热导率; α 为热扩散系数; q 表示检测件表面单位面积的热量。

如图1(a)所示,当热源在物体内部进行传播过程中遇到不同 α 、厚度为 x 的材料层,引起的表面温差最大的时间 t 为:



(a) 脉冲加载原理



(b) 缺陷的典型检测结果

图1 脉冲加载方法

Fig.1 Method of infrared pulse testing

1.2 锁相加载法

锁相法红外热波无损检测原理如下,利用正弦变化的激励热流对被检物体进行激励,所用调制正弦热流:

$$I(t) = \frac{P}{2} [1 - \cos(2\pi f_c t)] \quad (3)$$

式中, $I(t)$ 为激励热流强度, P 为激励加载的功率, f_c 为调制激励加载频率。

如图2(a)所示,热流在被检物体内部传播,当材料结构内部存在一定厚度的不均匀区域时,被检物体表面热波信号的幅值发生变化,同时相位也发生延迟或超前:

$$\text{Amplitude} = \text{Abs}(T_a(0,t)) \quad (4)$$

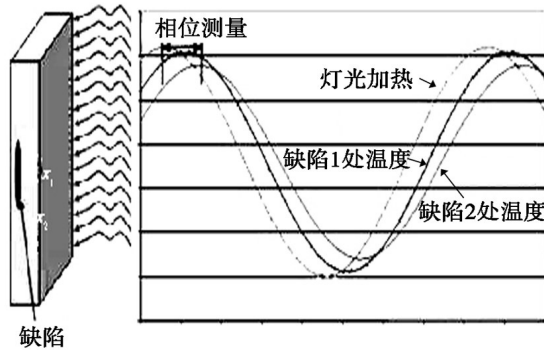
$$\text{Phase} = \text{Arg}(T_a(0,t)) \quad (5)$$

式中, $T(x,t)$ 为位于 x 处 t 时刻的温度。

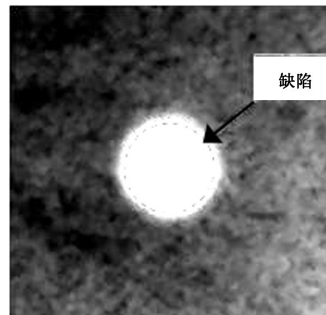
$$T(x,t) = T_a(0,0) e^{-\frac{x}{\Lambda}} e^{i(2\pi f_c t - \frac{x}{\Lambda})} \quad (6)$$

式中, $T_a(0,0)$ 为 f_c 分量温度幅值, $\Lambda = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_c}}$ 为热扩散长度。这一结果表明,对于红外检测技术而言,热传导系数及加载热源频率一定时,被检缺陷所处深度超过热扩散长度时,将给不出红外热图幅值和相位异常信息,因此,被检测物体缺陷位置不宜太深。当缺陷处于可检范围内,利用幅值图以及相位图中的热异

常对缺陷区域进行分析判定,从而达到无损检测目的。图2(b)为一典型的检测结果图像,缺陷清晰可见。



(a) 锁相加载原理



(b) 典型检测结果

图2 锁相加载方法

Fig.2 Method of infrared lock-in testing

2 粘接结构产品检测应用

2.1 玻璃钢泡沫粘接结构

该人工缺陷试样尺寸为 500 mm×600 mm, 泡沫厚度 20 mm, 玻璃钢蒙皮厚度 1.3 mm, 其预置缺陷分布如图 3(a) 所示, 缺陷尺寸为: 1# $\Phi 35$ mm、2# $\Phi 20$ mm、3# $\Phi 35$ mm、4# $\Phi 30$ mm、5# $\Phi 30$ mm、6# $\Phi 40$ mm、7# $\Phi 30$ mm、8# $\Phi 80$ mm、9# $\Phi 60$ mm。图 3(b) 为红外热成像检测结果, 红外热像结果显示 9 个预置缺陷都

清晰可见, 轮廓虽不是严格的圆形, 但尺寸大小与预制缺陷基本一致, 这一结果说明红外检测技术对玻璃钢泡沫粘接结构的检测精度可以达到 $\Phi 10$ mm 量级。图 3(c) 为错位散斑检测结果, 从检测结果可以看出, 有 8 个预制缺陷被发现, 其分布位置及大小与预制缺陷、红外检测结果相互吻合印证, 但尺寸最小的缺陷并未显示。这一结果说明, 红外技术对于该产品具有更高的检测灵敏度, 因而也更加适用。

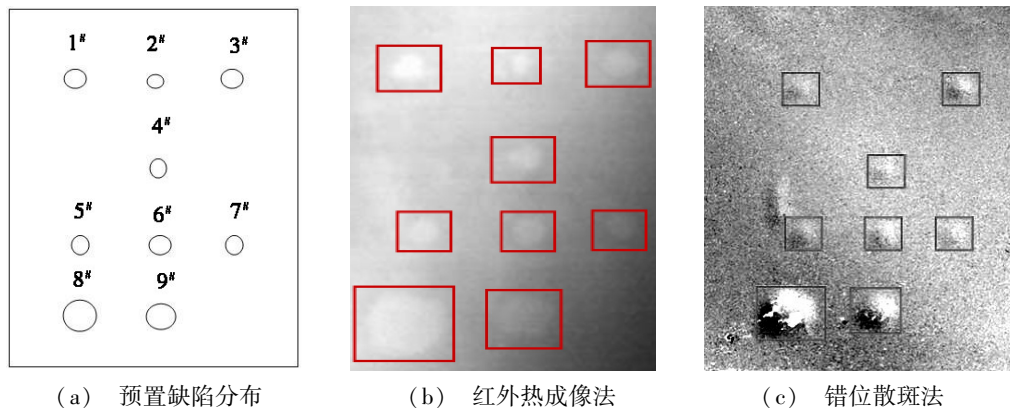


图 3 玻璃钢泡沫粘接结构

Fig. 3 Glass-fiber-reinforced-foam bonding structure

2.2 软木粘接结构

软木粘接结构的人工缺陷试样板尺寸为 500 mm×400 mm, 基材为钢板, 软木层厚度为 1.2 mm; 预埋缺陷共 9 个, 如图 4(a) 所示, 缺陷面积大小从第一排往下分别为 20 mm×20 mm、25 mm×25 mm、30 mm×

30 mm。图 4(b) 为该试验件红外热成像结果图, 从中可以看出 9 个缺陷都被清晰的显示出来, 这一结果说明红外检测技术能够对软木粘接结构中大于 20 mm×20 mm 的缺陷进行有效检测。

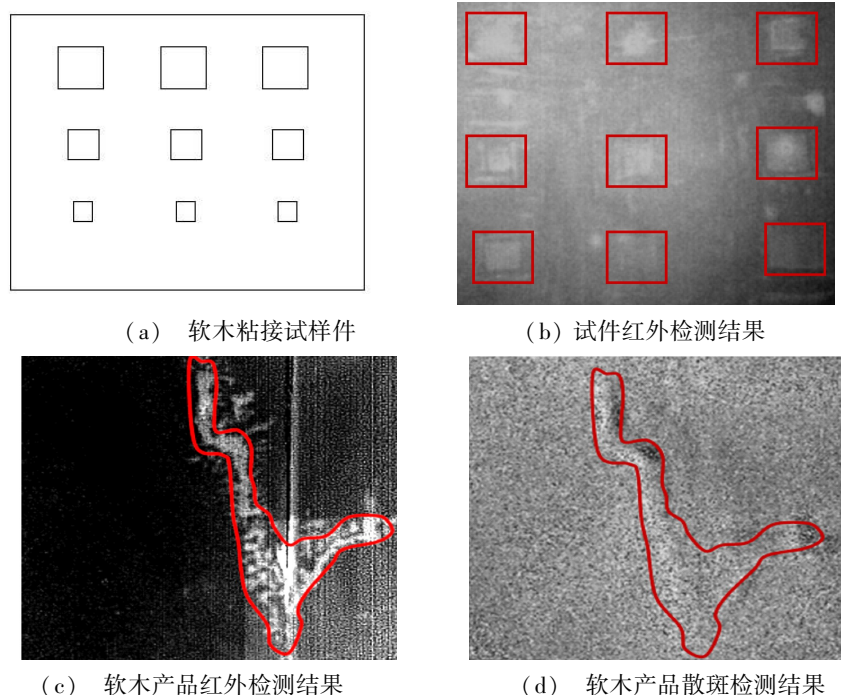


图 4 软木粘接结构

Fig. 4 Cork bonding structure

图4(c)(d)分别为实际产品上一块250 mm×250 mm区域红外检测和散斑检测的结果,图4(c)中可以看出红线区域内存在热异常,判定为脱粘缺陷;通过散斑检测方法进行复验,图4(d)同样可发现一块外型轮廓类似的脱粘区域,这一区域与红外检测的结果相互印证,证明红外检测技术对软木粘接结构的检测结果是可靠的。

2.3 复合材料蜂窝夹芯结构板

卫星有效载荷支架复合材料蜂窝夹芯粘接结构试验板的尺寸为250 mm×450 mm,其正面复材厚度约为1.2 mm,背面加强筋复材厚度约为2.5 mm。其

预制缺陷分布如5(a)(b)所示,正面缺陷大小从左到右分别为: $\Phi 10$ mm、 $\Phi 20$ mm、 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 50$ mm、 $\Phi 80$ mm、 $\Phi 100$ mm;背面加强筋预置缺陷从上到下分别为 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 20$ mm。图5(c)(d)为该试验板红外检测的结果图,从中可以看出试样板正面的6个预制缺陷均能够被检测出来, $\Phi 10$ mm稍微不清晰;背面加强筋上的3个缺陷同样被发现,但轮廓并非规则的圆形,应该是缺陷制备过程造成的。这证明红外检测技术可对复合材料蜂窝夹芯结构中大于 $\Phi 20$ mm的脱粘缺陷进行检测。

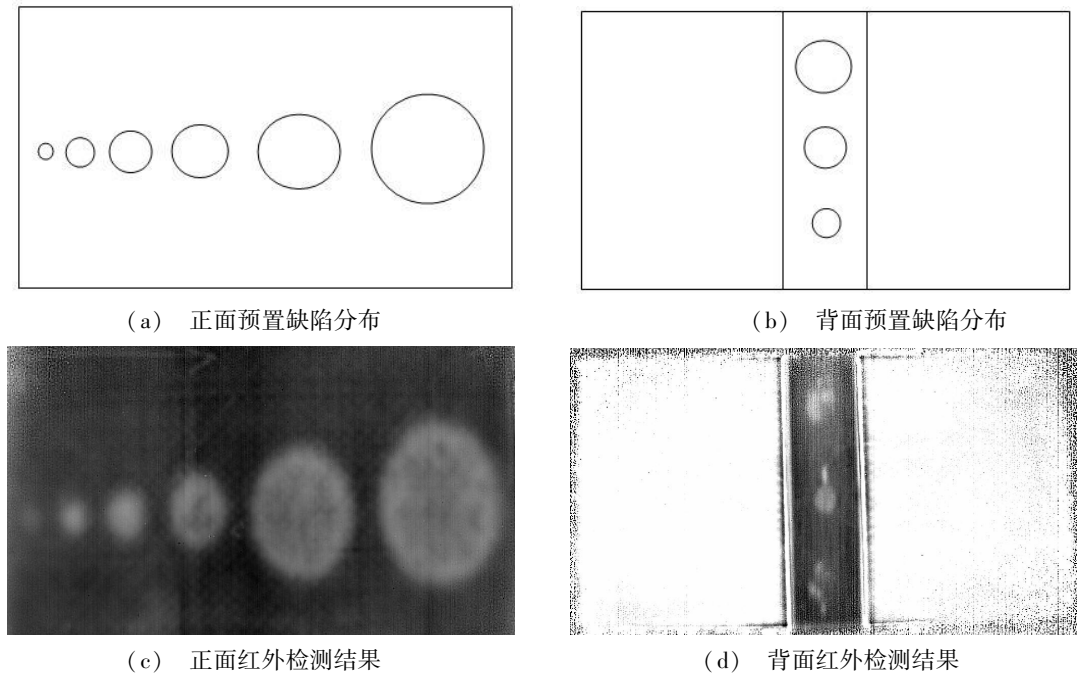


图5 复合材料蜂窝夹芯结构

Fig.5 Composite honeycomb sandwich structure

3 结论

红外热成像技术具备非接触、非破坏、直观成像的技术优势,可以有效的对航天产品粘接质量进行检测,具备优秀的检测能力;其对1.3 mm厚度的玻璃钢泡沫粘接结构,可检缺陷尺寸为 $\Phi 10$ mm,1.2 mm厚度软木粘接结构,可检测缺陷尺寸为20 mm×20 mm,1.2 mm厚度碳纤维蒙皮蜂窝夹芯粘接结构,可检缺陷尺寸为 $\Phi 20$ mm。随着红外无损检测在产品检测过程中逐步实现工程化应用,具备更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 唐见茂. 碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J]. 航天器环境工程,2010,27(3): 369-380
- [2] 朱建堂. 激光、红外和微波无损检测技术的应用与发展[J]. 无损检测,1997(11): 315-316
- [3] 刘俊岩,刘勋,王扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. 红外与激光工程,2012,41(7): 1910-1915
- [4] Maldague X P V. Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography [M]. Springer, 1993
- [5] 王迅,金万平,张存林,等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. 无损检测,2004,26(10): 497-501

(编辑 任涛)