

吸波涂层缺陷的锁相法红外检测

葛 丽¹ 秦 雷² 朱军辉¹ 伍 颂¹ 刘哲军¹

(1 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(2 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

文 摘 利用有限元仿真和试验研究相结合的方法, 对方形和圆形模拟缺陷的吸波涂层试件开展检测研究。从而探索红外锁相热波技术检测吸波涂层内部缺陷的参数范围和检测能力。研究表明, 通过有限元仿真分析为检测试验提供理论依据, 使用 5~10 MHz 调制频率的锁相法可有效检测到 3 mm×3 mm 面积当量的缺陷, 缺陷处的相位比无缺陷处的相位滞后, 并且缺陷面积越大, 相位滞后越大。

关键词 吸波涂层, 缺陷, 锁相红外检测

中图分类号: TQ 630

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.017

Detecting of Defects in Radar Absorbing Coating Using Lock-in Thermography

GE Li¹ QIN Lei² ZHU Junhui¹ WU Song¹ LIU Zhejun¹

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

(2 Harbin University of Science and Technology, Harbin 150001)

Abstract In this study, in order to explore the ability and experimental parameters to detect the internal defects of radar absorbing coating using the lock-in thermography technology, the method, which combined the finite element (FE) simulation and experimental research, is used to study for the square and circular simulated defects testing of the coating specimens. The analysis results show that the finite element simulation provides theoretical support for experiment and the defect of the equivalent area which is 3 mm×3 mm can be detected when the range of modulation frequency is 5 to 10 MHz. In addition, the phases of defects are lagged compared to defects cerea, and phase delay get bigger with the area of the defects increasing.

Key words Radar absorbing coating, Defect, Lock-in thermography

0 引言

吸波涂层能大大提高先进武器的机动、隐蔽和突防等性能, 已经在新型战略战术武器中使用。涂层质量是保障武器突防技术的重要性能指标之一。吸波涂层具有厚度薄、涂覆面积大, 使用环境恶劣, 使用性能要求高等特点^[1], 在成型过程中有可能产生界面脱粘等缺陷, 为保证大面积涂层质量必须进行涂层无损检测。

吸波涂层主要成分是铁磁性材料, 基体多为碳纤维复合材料。受涂层材料导电、不能污染、结构件尺寸大、形状复杂等特点的限制, 涡流、超声和射线等技术均不适用于涂层质量检测。因此, 目前国内还没有

实现吸波涂层质量无损检测的工程应用。

红外热波检测技术作为一种快速、非接触、适于现场检测的无损检测技术, 已日益成为保证产品质量和安全运行的重要方法和手段^[2-4]。红外锁相热波检测技术融合了红外和数字锁相技术, 能够排除检测中试件表面形状、辐射率等的影响^[5], 是目前红外检测技术中具有巨大应用潜力的技术。美国已经利用红外技术成功应用于热障涂层^[6]和抗氧化涂层^[7]等的检测, 近几年国内部分单位探索了脉冲法红外技术检测涂层质量适用性研究^[8-9], 研究表明红外技术检测涂层质量是可行的, 但对于其检测能力还未研究, 另外还没有锁相法红外技术在吸波涂层方面的成功

收稿日期: 2014-02-07

作者简介: 葛丽, 1981 年出生, 硕士, 主要从事无损检测研究。E-mail: lige_311@126.com

案例。

本文通过有限元仿真和试验研究相结合的方法,对含有模拟脱粘缺陷的吸波涂层试验件进行研究,分析锁相热波技术检测吸波涂层脱粘类缺陷的参数范围和检测能力,为吸波涂层材料缺陷的检测提供一定参考依据和技术支持。

1 理论模型

锁相法红外热波检测技术是一种主动式的红外热波检测技术,其工作原理是:采用按正弦规律变化的热激励对被测试件进行加热,外激励热流在试件内部发生热传导,当试件内部存在缺陷时,则有缺陷处与无缺陷处的试件表面引起的温度变化将产生幅值和相位的差异。采用红外热像仪记录试件表面的红外热波辐射,并通过锁相运算和傅里叶变换得到试件各位置的幅值和相位信息,从而实现试件内部缺陷的判定与识别。

调制的正弦热流由下式表示

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

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

$$T_a(0) = \frac{P}{2} \times \frac{(h_r + k\gamma) \exp(2\gamma L) - (h_r + k\gamma)}{(h_r + k\gamma)(h_r + k\gamma) \exp(2\gamma L) - (h_r + k\gamma)(h_r + k\gamma)} \quad (5)$$

式中, h_r 为平板后表面换热系数, h_f 为平板前表面换

热系数, L 为板厚, $\gamma = (1 + j) \left(\frac{2\pi f_c}{2\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$ 。

则红外锁相法得到信号的幅值和相位为:

$$\text{Amplitude} = \text{Abs}(T_a(0)) \quad (6)$$

$$\text{Phase} = \text{Arg}(T_a(0)) \quad (7)$$

当涂层结构内部含有缺陷时,求解热流在材料中的热传导模型解析解比较困难,此时通过借助有限元仿真方法进行研究。

2 有限元模拟

2.1 有限元仿真模型

试验件以碳纤维复合材料为基体,按照实际工艺表面涂覆吸波涂层。试件尺寸为 140 mm × 115 mm × 5 mm,涂层的厚度为 1 mm,并采用基体加工正方形和圆形盲孔并添加脱膜材料的方法制作模拟缺陷,如图 1 所示,有限元模型采用 4 面体网格,为保证计算精度,在缺陷处网格划分较细,考虑到计算机资源有限和保证计算速度,非缺陷处网格划分较为稀疏,有限元网格模型如图 2 所示。试件材料热物性参数如

当热流在有限厚度平板中传递时,传递过程可由傅里叶热传导模型进行描述:

$$\rho c \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中, c 为试件材料的比热容, ρ 为试件材料的密度, k 为试件材料的热导率。

假定材料具有各项同性,不考虑热量热流部分引起的热积累,对(2)式进行解析求解,可得稳定或准稳态状态下的温度随时间和厚度的变化::

$$T(Z,t) = A_m \exp\left(\frac{-Z}{\Lambda}\right) \exp(i(2\pi f_c t - \frac{Z}{\Lambda})) \quad (3)$$

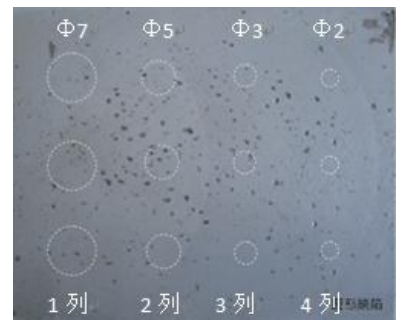
式中, $T(Z,t)$ 为位于 Z 处 t 时刻的温度, A_m 为温度信号谐波分量幅值, $\Lambda = \sqrt{\frac{k}{\rho c \pi f_c}}$ 为热扩散长度。采用红外锁相热波检测技术对构件或材料进行无损检测时,温度由常量热流和振荡热流组成,可表示为:

$$T(Z,t) = T_d(Z) + T_a(Z) e^{(j2\pi f_c t)} \quad (4)$$

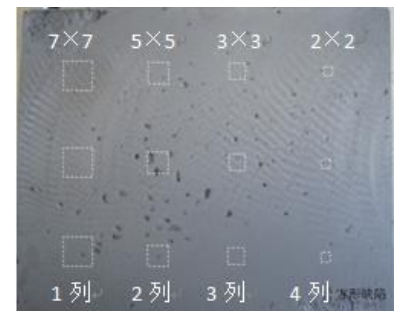
式中, $T_d(Z)$ 为常量热流, $T_a(Z)$ 为振荡热流。

红外锁相法检测时,主要分析试件表面温度的周期性变化,在前表面入射热流、前后表面的对流散热边界条件下可解得表面的温度为:

表 1 所示。



(a) 圆形缺陷



(b) 方形缺陷

图 1 试件实物照片

Fig. 1 Specimen picture

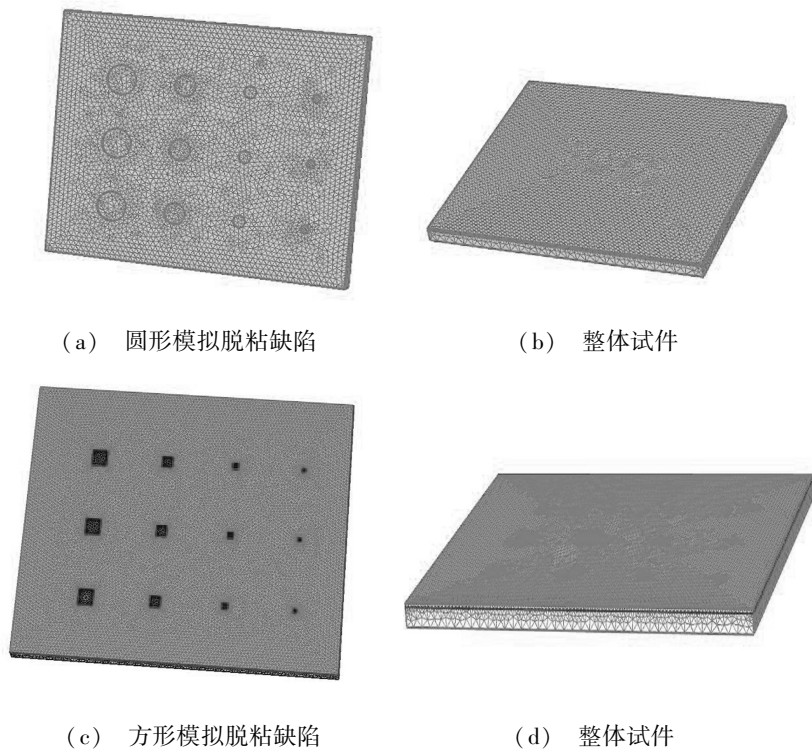


图2 试件有限元模型

Fig. 2 Specimen structure

表1 材料热物性参数

Tab. 1 Thermal properties of materials

材料	热导率 /W (m·K) ⁻¹	比热容 /J (kg·K) ⁻¹	密度 /kg·m ⁻³
碳纤维 复合材料	0.72	970	1600
吸波涂层	1.21	602	4500
空气	0.024	700	1.1774

边界条件:

$$-k \frac{dT_a(Z)}{dZ} = \frac{P}{2} - h_f T_{af} \quad (8)$$

$$-k \frac{dT_a(Z)}{dZ} = h_r T_{ar} \quad (9)$$

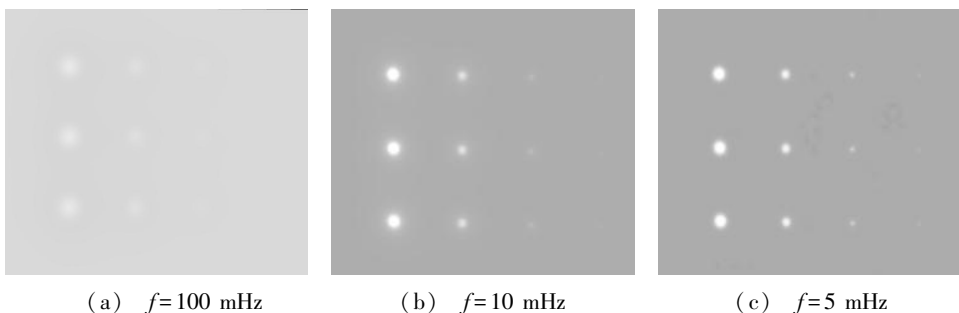
初始条件:

$$T_a(Z) = T_{am} \quad (10)$$

式中, h_f 、 h_r 分别为试件上下表面与周围环境之间的对流换热系数, 取 $h_f = h_r = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; T_{am} 为周围环境温度, $T_{am} = 293 \text{ K}$, 其他表面绝热。

2.2 仿真结果及分析

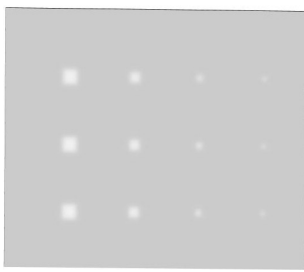
图3给出了圆形缺陷和方形缺陷在不同调制频率下相位图仿真结果, 由图3(a)~(c)可知, 对于圆形缺陷, 调制频率为100 mHz时, 试件上第1、2列缺陷开始显现, 为了检测到直径更小的缺陷, 需要降低调制频率, 当降低到10 mHz时, 第3列缺陷出现在热图中, 降低到5 mHz时, $\Phi 2 \text{ mm}$ 缺陷略有显现, 但不易分辨。图3(d)~(f)为方形缺陷的仿真结果, 可以看到在100、10和5 mHz频率下均可观察到4列缺陷, 说明能够成功检测到2 mm×2 mm以上的缺陷。



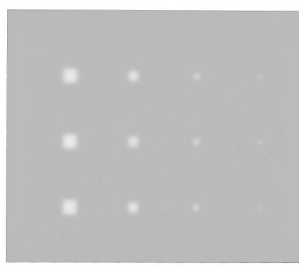
(a) $f = 100 \text{ mHz}$

(b) $f = 10 \text{ mHz}$

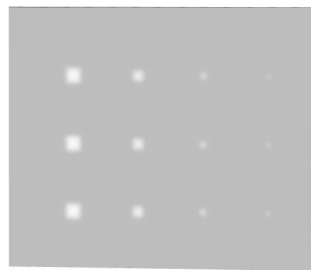
(c) $f = 5 \text{ mHz}$



(d) $f=100\text{ mHz}$



(e) $f=10\text{ mHz}$



(f) $f=5\text{ mHz}$

图3 不同调制频率下的仿真结果

Fig.3 Simulation results at different modulated frequencies

3 试验研究

3.1 试验系统及参数

试验系统如图4所示。其工作波段为2.5~5

μm , 噪声等效温差在室温下为20 mK, 空间分辨率为 320×256 像素。热激励源为双卤素灯光源, 最小调制频率为5 mHz。

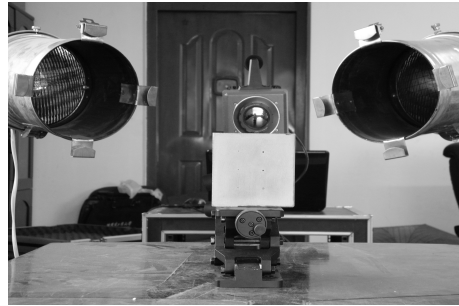


图4 试验系统照片

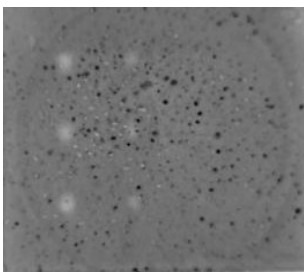
Fig.4 Photo of the experimental system

3.2 试验结果

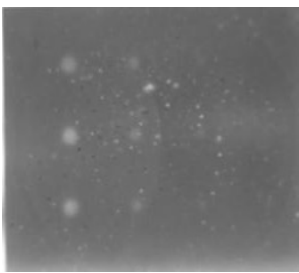
图5给出了在3.1节给定试验条件下的检测相位图, 图5(a)~(c)是圆形脱粘模拟缺陷在不同调制频率下的检测结果, 由图可知, $\Phi 7\text{ mm}$ 和 $\Phi 5\text{ mm}$ 的缺陷在各频率下均有较好的结果, 第三列 $\Phi 3\text{ mm}$ 的缺陷在5 mHz的情况下略有显现。图5(d)~(f)是方形脱粘缺陷的检测结果, 可见, 在三个频率下, 锁相法红外技术都能够成功检测 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的缺陷。实

验结果与仿真相比, 第4列缺陷未能成功检测到, 分析原因可能主要是热横向扩散和材料特性分布不均等造成的。另外, 在100 mHz的频率下试件表面的缺陷出现在相位图中, 而在较低的频率下则没有显现。因此, 在满足检测灵敏度的情况下, 应选择使用较低的频率来判定缺陷的存在, 以排除表面缺陷的影响。

图6给出了方形缺陷的试件结果截面相位的分布。



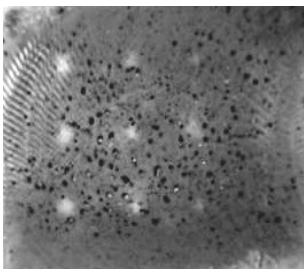
(a) $f=100\text{ mHz}$



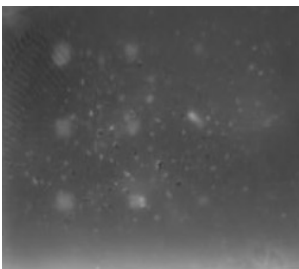
(b) $f=10\text{ mHz}$



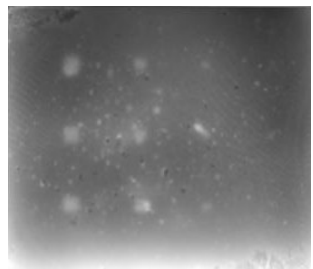
(c) $f=5\text{ mHz}$



(d) $f=100\text{ mHz}$



(e) $f=10\text{ mHz}$



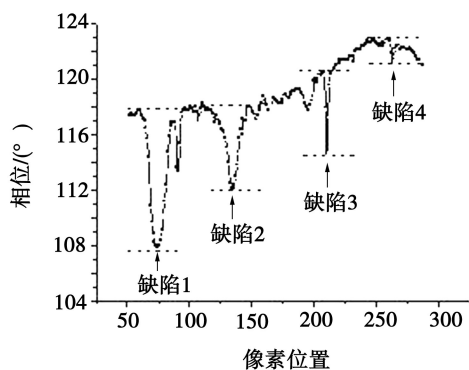
(f) $f=5\text{ mHz}$

图5 检测结果相位图

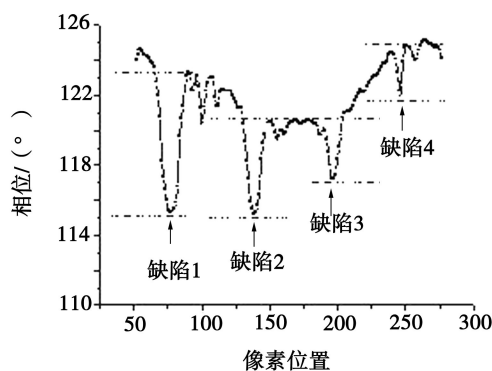
Fig.5 Phase of detection result

图5可以看出有缺陷处的相位明显滞后于无缺陷处的相位,对于 $\Phi 7$ mm的圆形缺陷或者7 mm \times 7 mm的方形缺陷在相位图中均滞后于无缺陷处约为 10° ,随着缺陷面积的减小,缺陷处与非缺陷处的相位

差在逐渐减小, $\Phi 3$ mm和3 mm \times 3 mm的缺陷,其相位滞后约为 6° ,而对于 $\Phi 2$ mm和2 mm \times 2 mm的缺陷,其相位滞后只有 2° ,所以不易检测到。



(a) 圆形缺陷



(b) 方形缺陷

图6 调制频率5 MHz时截面相位变化曲线

Fig. 6 Phase curve of modulated frequency of 5 MHz cross section

4 结论

针对含有模拟脱粘缺陷的碳纤维复合材料基体表面吸波涂层的试验件,采用红外锁相热波检测技术进行了仿真分析和试验研究,研究表明红外锁相热波技术是检测吸波涂层脱粘缺陷的一种行之有效的方法。

仿真分析表明,对于涂层厚度为1 mm的试件,红外锁相检测方法可以检测到 $\Phi 3$ mm和2 mm \times 2 mm的脱粘缺陷;并且有限元方法可以较为准确的预测实验结果,为调制频率参数的选择提供参考。试验结果表明,原始热图因材料特性分布不均、热横向扩散等多种因素影响,检测效果相比仿真分析结果较差,在5~10 MHz调制加载频率下,可以明显检测到 $\Phi 5$ mm和3 mm \times 3 mm的脱粘缺陷。缺陷处的相位比无缺陷处的相位滞后,并且缺陷面积越大,相位滞后越大。另外,不同深度的缺陷需选用不同的调制频率进行检测,调制频率的正确选择有助于排除表面缺陷在检测结果中的影响。

参考文献

[1] 李瑞琦,何世禹,初文毅. 吸波涂层材料研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2006, 29(3): 76-80

[2] Liu J Y, Wang Y, Liu H, et al. Research on CFRP materials nondestructive testing by IR lock-in thermography[C]// International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009. International Society for Optics and Photonics, 2009;

73833U-73833U-9

[3] Castanedo C I, Genest M, Guibert S, et al. Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: a comparative study [C]// Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2007: 654116-654116-9

[4] Liu J Y, Tang Q J, Wang Y. The study of inspection on SiC coated carbon-carbon composite with subsurface defects by lock-in thermography [J]. Composites Science and Technology, 2012, 72 (11): 1240-1250

[5] Liu J Y, Liu L Q, Wang Y. Experimental study on active infrared thermography as a NDI tool for carbon-carbon composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45 (1): 138-147

[6] Shepard S M., Hou Y L, Iyota J R, et al. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness [C]// Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, 2005: 407-410

[7] Madaras E I, Winfree W P, Prosser W H, et al. Non-destructive evaluation for the space shuttle's wing leading Edge [C]// 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Arizona, 2005

[8] 王智勇,刘颖韬,王小虎,等. 红外热像检测技术在吸波涂层缺陷研究中的应用[J]. 航空材料学报, 2012, 32 (3): 91-95

(编辑 任涛)