

〈红外应用〉

基于红外锁相法的涂层脱粘缺陷检测与识别

张金玉，马永超

(火箭军工程大学，陕西 西安 710025)

摘要：通过建立涂层的三维非稳态导热模型，对涂层脱粘缺陷模型的正弦调制加热过程进行了数值计算。在不同涂层厚度与缺陷尺寸下，分别提取缺陷中心处与无缺陷处表面温度相位并进行差值计算；沿缺陷半径方向均匀取点，并对涂层表面平均温度曲线进行一阶差分。研究结果表明：通过缺陷处与无缺陷处相位差可有效检测缺陷，通过温度一阶差分可对缺陷进行定量识别。

关键词：红外锁相；涂层缺陷；相位差；定量识别

中图分类号：TQ630.72, O657.33 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2016)10-0894-05

Detection and Recognition of the Debonding Defect of Coating Based on Lock-in Thermography

ZHANG Jinyu, MA Yongchao

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In this paper, the 3D unsteady heat conduction model of coating is established, and the sinusoidal modulation heating process of the debonding defect model of coating is analyzed numerically. The phase of temperature changes on coating surface of defect center and no defects are extracted respectively and the difference with different coating thickness and defect size is calculated. First order difference is used for the processing of average temperature curves of coating surface which were extracted along the defect radius direction. The results show that coating defect could be detected and recognized well by phase difference and the first order difference of temperature.

Key words: lock-in thermography, coating defect, phase difference, quantitative recognition

0 引言

目前，特种功能涂层在现代工程机械设备上使用尤为广泛，这些具有特定功能的涂层对于机械设备的寿命以及可靠性有极大的作用。但是在使用过程中，涂层极易出现各种缺陷损伤，一旦发生则将大幅度影响涂层功能的实现，进而引发事故。因此，能够及时检测到涂层的缺陷损伤对于机械设备的寿命及性能保证具有重要意义。其中，脱粘则是特种功能涂层极易产生的一种缺陷。而目前常用的无损检测方法，如超声、涡流、射线等均存在很大的局限性，对于厚度极小的特种功能涂层的脱粘缺陷，无法进行有效地检测与识别，因此，涂层检测技术引起了国内外学者的广泛关注^[1]。

红外热波无损检测技术是近年来美国航空航天和国防领域兴起的一种新的无损检测技术。该技术克服了传统无损检测一些局限性，具有效率高、精确率高、结果直观、检测范围大等优点^[2]，非常适合涂层质量检测。红外热波无损检测通过施加主动激励的方式对试件材料进行加热，采集探伤过程中的热图像和后期的图像处理技术实现对缺陷的检测。

红外无损检测技术按照激励方式分为脉冲法与锁相法，相比于脉冲法，锁相法具有对光源要求低、受光照不均匀影响小和对表面发射率变化不敏感、抗干扰能力强、对试件表面防反射处理要求低等优点^[3]。目前国内针对锁相法与涂层检测的研究还很少，国内研究中，文献[4]通过脉冲法对试件缺陷进行检测，对缺陷的大小识别受影响因素较多，效果不明显；文

收稿日期：2016-05-27；修订日期：2016-08-06。

作者简介：张金玉（1964-），男，副教授，硕士研究生导师，研究方向为热波无损检测，智能故障诊断。

基金项目：国家自然科学基金（51275518）。

献[5]通过锁相法对涂层厚度进行了检测,没有分析涂层缺陷的检测;文献[6]对涂层孔洞、脱粘缺陷进行了检测,但是对缺陷大小没有进行识别。国外研究中,文献[7]通过锁相法对玻璃纤维增强材料试件的缺陷进行了有效检测,但是没有对缺陷进行定量识别;文献[8]通过脉冲法对铁轨上的裂纹缺陷进行了分析,存在信噪比低、误差大等缺点。因此,本文采用红外锁相法对涂层脱粘缺陷进行检测与定量识别的仿真研究具有现实的学术价值和工程应用价值。

1 红外锁相无损检测原理

红外锁相无损检测是对涂层表面施加功率随时间变化的热激励^[9],热量由涂层表面向内部传到,当遇到涂层与基体之间的脱粘缺陷时,由于材料的热属性改变,热波反射到涂层表面后,表面的温度序列会发生改变^[10-11]。用红外热像仪记录表面的温度,利用相位提取法,提取出涂层表面温度变化的相位。根据涂层表面的相位分布,即可推断出缺陷的位置与尺寸相关信息。检测原理如图1所示。

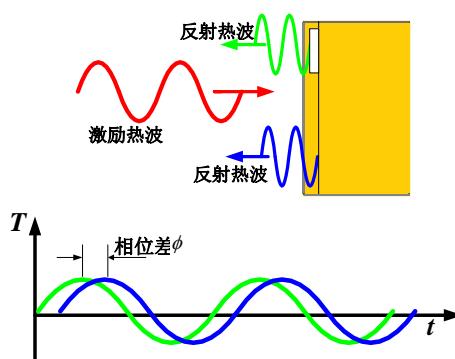


图1 锁相法检测脱粘缺陷原理

Fig.1 The principle of phase locked method for detection of debonding defects

2 红外锁相法的热波理论分析

在使用锁相法对涂层进行检测时,需要对涂层施加一个随时间变化的正弦激励。

$$I(t) = P[1 - \cos(2\pi ft + \phi)] \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为周期性变化的热流强度; P 为热源的加热功率; f 为热源激励加载频率。

热波在涂层中传递时,满足傅里叶热扩散方程:

$$\begin{aligned} \alpha_x \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial X^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial Y^2} + \\ \alpha_z \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial Z^2} = \frac{\partial T(X, Y, Z, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: α_x , α_y , α_z 分别为 3 个坐标方向上的热扩散率, $\alpha = \rho c / k$ 为材料的导热系数或热扩散率, k 为涂层材

料的热传导率, ρ 为涂层的密度, c 为涂层材料的比热容。

其初始条件为:

$$T(X, Y, Z, t) = T_{am} \quad (3)$$

式中: T_{am} 为环境温度。

边界条件为:

$$-K_{top} = \frac{\partial T}{\partial Z} = I(t) - h_c(T - T_{am}) \mid Z = l_z \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0 \mid X = l_x, x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Y} = 0 \mid X = l_y, y = 0 \quad (6)$$

式中: h_c 为材料表面热交换系数; l_x , l_y , l_z 分别为涂层的长度、宽度、厚度。

由以上可以看出,通过解析法求解是比较困难的,因此本文通过有限元法对问题进行分析。

3 缺陷的检测

为探索红外锁相无损检测对于脱粘缺陷的检测与识别的有效办法。建立如图 2 所示的数学模型。其中基体长 250 mm, 宽 150 mm, 厚度 5 mm; 涂层厚度 2 mm, 涂层和基体的接触面处以不同大小空气柱模拟不同的脱粘缺陷; 从左到右, 从上到下缺陷直径分别为 1 mm、4 mm、7 mm、10 mm、13 mm、15 mm、17 mm、20 mm。其中环境温度为 25°C 不变, 试件初始温度与环境温度相同, 表面对流换热系数为 10 W/(m²·°C), 忽略表面辐射传热。涂层和基体的热特性参数如表 1 所示。

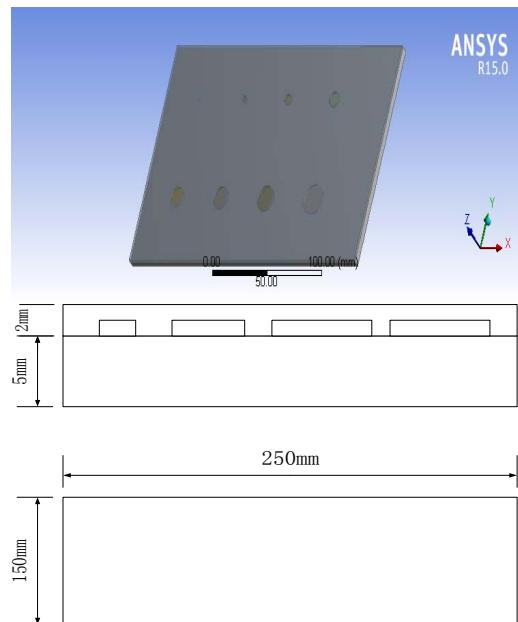


图2 涂层脱粘缺陷模型

Fig.2 Coating debonding defect model

表1 材料的热特性参数

Table 1 Thermal properties of materials

	热传导系数/ (W/(m·K))	比热容/ (J/(kg·°C))	密度/ (kg/m ³)
涂层材料	0.221	1720	1256
基体材料	0.78	1378	2160
空气	0.0242	1006.4	1.225

3.1 热激励加载与相位差的获取

1) 热激励加载

由于实验中无法加载负的热流强度,因此我们对涂层表面加载强度为 $500[1-\cos(2\pi ft)] \text{ W/m}^2$ 的热激励并进行仿真,获取涂层表面的温度变化曲线。其中, $f=0.01 \text{ Hz}$, 加载时间 $t=200 \text{ s}$, 共两个周期, 每个周期取 100 个点, 共 200 帧温度图像。

图 3 为涂层表面温度曲线,由图可以看出,在激励加载初期,温度会异常快速增加,为了不影响提取温度的稳定性,取第 101~200 帧的温度,由于是周期性截取,因此相位也不会发生改变。

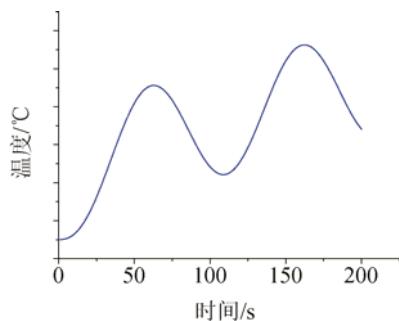


图3 涂层表面温度曲线

Fig.3 Surface temperature curve of coating

分别取 8 个缺陷中心所对应涂层表面的点,以及无缺陷处共 9 个点,求出每个点温度序列的相位,无缺陷处相位为 -0.6631 rad ,各缺陷中心相位如表 2 所示。

表2 缺陷中心相位

Table 2 Defects center phase

缺陷直径/mm	1	4	7	10
相位/rad	-0.672	-0.7545	-0.8504	-0.8857
缺陷直径/mm	13	15	17	20
相位/rad	-0.8805	-0.8702	-0.8612	-0.8553

用无缺陷处表面相位分别减去各缺陷中心表面相位,结果如图 4 所示。由结果可以看出,缺陷小于 10 mm 时,相位差随着缺陷尺寸的增大稳定增长,大约在 10

mm 处取得最大值。缺陷尺寸大于 10 mm 后,相位差会逐渐减小,并且减缓速度也越来越小,根据曲线预估,在缺陷大于 20 mm 后,相位差基本不会再变化。

3.2 涂层厚度与相位差

在模型结构与材料参数不变的情况下,将涂层厚度分别定为 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm, 分别对各个模型进行仿真计算,不同模型各缺陷处与无缺陷的相位差如图 5 所示。

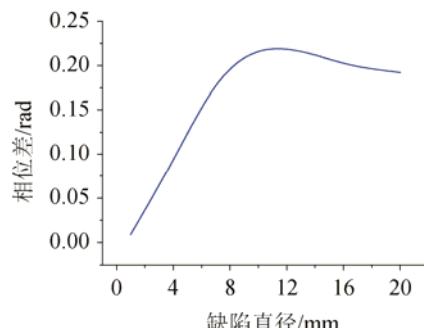


图4 曲线尺寸与相位差

Fig.4 Curve dimension and phase difference

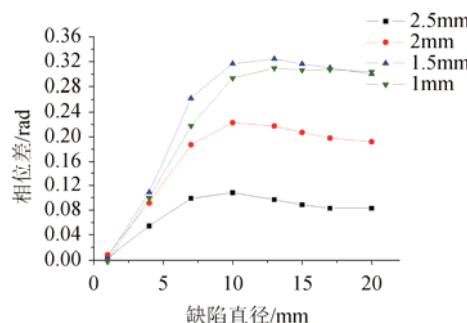


图5 涂层厚度与相位差曲线图

Fig.5 Coating thickness - difference diagram

由图 5 可以看出,不同涂层厚度之间,缺陷尺寸和相位差之间的曲线走势是一样的,区别在于变化幅度不同;当缺陷尺寸一定时,随着涂层厚度的增加,相位差会先增大后减小,当缺陷直径小于 1 mm 时,难以检测到缺陷的存在;由曲线走势看出,当涂层厚度大于 3 mm 时,相位差会非常小,难以检测到缺陷,在厚度为 1~2 mm 之间,检测效果最为明显;在缺陷尺寸较小时,缺陷尺寸对于相位差影响更大,而在缺陷尺寸较大时,涂层厚度对于相位差影响较大。

4 缺陷的定量识别

由上章可知,通过缺陷中心表面相位与无缺陷处表面相位的差值可以有效地检测出缺陷的存在。而在实际检测过程中,不但要对缺陷进行检测,更重要的是对其大小进行定量识别。

由于热量在复合材料内既有厚度方向的传播又有沿平面方向的传播, 在缺陷的边沿处, 由于平面传播热阻的突变, 温度梯度也会发生变化, 因此可以对表面温度进行数据分析, 确定温度梯度发生改变的位置, 进而确定缺陷的边沿位置和大小。

建立如图 6 所示的单缺陷模型, 材料属性和缺陷类型与上章一致, 基体长 150 mm, 宽 80 mm, 厚度 5 mm, 涂层厚度 2 mm, 缺陷直径 40 mm。

调制频率为分别取 0.01 Hz、0.02 Hz 和 0.05 Hz, 均加载 3 个周期, 每个周期采 100 帧, 共 300 帧。从缺陷中心开始, 沿半径方向每 2 mm 取一个点, 共取 17 个点, 提取其温度序列。取 201~300 帧的温度平均值作为此点的值, 平均温度曲线及其一阶差分如图 7~图 9 所示。

由图 7~图 9 可以看出, 无论如何, 径向位置越大(离缺陷中心越远), 温度越低, 对应的温度一阶差分先下降而后上升, 均在 20 mm 位置处达到谷值, 由此可见, 通过计算温度分布的一阶差分谷值位置来确定缺陷半径是可行的。虽然调制频率对半径的检测结果几乎无影响, 但由图 7~图 9 可以看出, 当调制频率越大(调制周期越小), 试件表面温度的对比度和一阶差分越小, 因此, 在实际实验中, 调制频率过

大时, 试件表面温度的对比度和一阶差分容易被噪声淹没, 不利于热像仪采集, 而随着调制频率的减小, 试件表面温度的对比度和一阶差分也增大, 有利于提高信噪比和检测精度, 因此在保证试件表面温度在许可范围内的条件下, 应该减小调制频率或增大调制功率。

5 结论

本文分析了锁相法检测涂层缺陷的原理, 对涂层缺陷模型的正弦调制加热过程进行数值计算, 分析了相位差与涂层厚度、缺陷尺寸之间的关系; 并对缺陷大小进行了定量识别。主要结论如下:

- 1) 通过相位差可有效检测缺陷的存在。当涂层厚度一定时, 相位差随着缺陷尺寸的递增, 先增大, 后减小。当涂层厚度大于 3 mm 时, 相位差过小, 难以有效检测缺陷。
- 2) 对涂层表面温度进行数据分析, 确定温度梯度发生改变的位置, 进而可以确定缺陷的边沿位置和大小。
- 3) 调制频率过大时, 表面温度的对比度和一阶差分过小, 易被噪声湮灭。在保证试件表面温度许可范围内, 适当减小调制频率或增大调制功率。

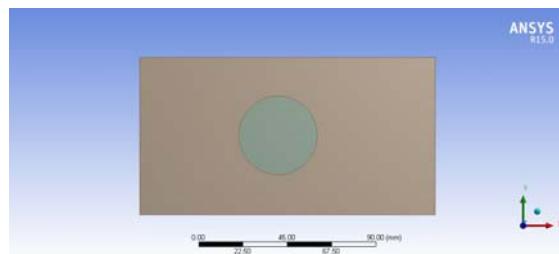


图 6 单缺陷模型

Fig.6 Single defect model

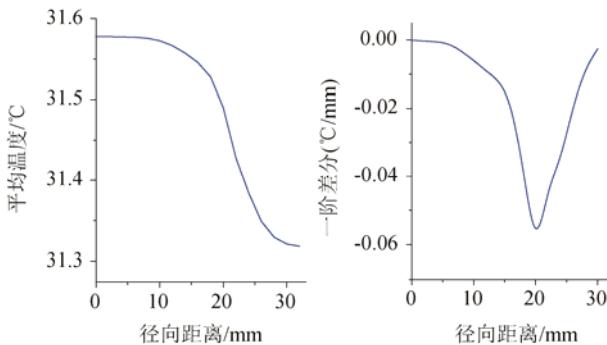


图 8 0.02 Hz 时平均温度与一阶差分

Fig.8 The average temperature and first order difference at 0.02 Hz

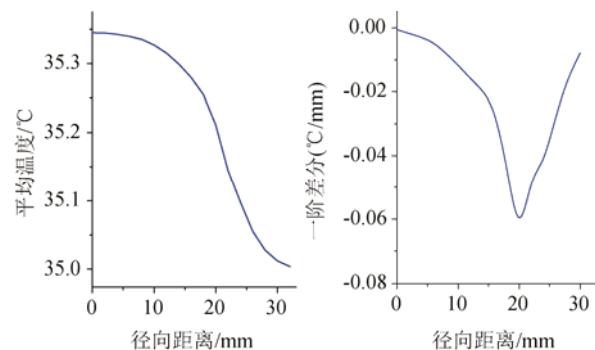


图 7 0.01 Hz 时平均温度与一阶差分

Fig.7 The average temperature and first order difference at 0.01 Hz

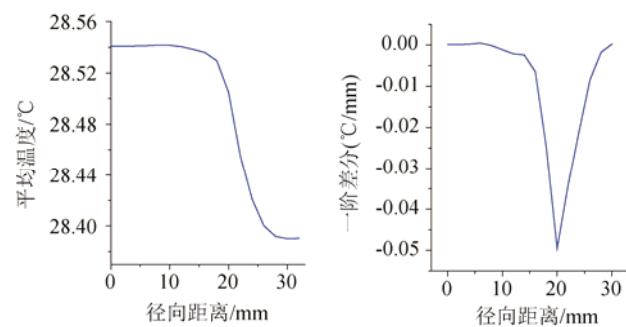


图 9 0.05 Hz 时平均温度与一阶差分

Fig.9 The average temperature and first order difference at 0.05 Hz

参考文献:

- [1] 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.
WANG xun, JIN Wan-ping, ZHANG Cun-lin, et al. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(10):497-501.
- [2] Maldague X P V. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*[M]. 2001, 4(3): 307.
- [3] 霍雁, 赵跃进, 李艳红, 等. 脉冲和锁相红外热成像检测技术的对比性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(6): 602-604.
HUO Yan, ZHAO Yue-jin, LI Yan-hong, et al. Comparison between pulse and lock-in infrared thermography technology[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(6):602-604.
- [4] 王永茂, 郭兴旺, 李日华. 红外检测中缺陷大小和深度的测量[J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 404-406.
WANG Yong-mao, GUO Xing-wang, LI Ri-hua. Measuring defect diameter and depth in infrared testing[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(6):404-406.
- [5] 张金玉, 孟祥兵, 杨正伟, 等. 红外锁相法涂层测厚数值模拟与分析[J]. 红外与激光工程, 2015(1): 6-11.
ZHANG Jin-yu, MENG Xiang-bing, YANG Zheng-wei, et al. Numerical simulation and analysis of lock-in thermography for thickness measurement of coating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015(1):6-11.
- [6] 楼森, 吕香慧, 张宇, 等. 有机防腐涂层质量的红外热波无损检测[J]. 激光与红外, 2012, 42(5): 522-525.
LOU Miao, LV Xiang-hui, ZHANG Yu, et al. IR nondestructive testing of anti-corrosion organic coating[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(5):522-525.
- [7] Roberto Montanini, Fabrizio Freni. Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography[J]. *Composites Part A*, 2012, 43: 2075-2082.
- [8] Peng D, Jones R. Modelling of the lock-in thermography process through finite element method for estimating the rail squat defects[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 28: 275-288.
- [9] 贾文抖, 范春利, 孙丰瑞, 等. 缺陷红外诊断的热激励方式对比研究[J]. 红外技术, 2014, 36(10): 849-854.
JIA Wen-dou, FAN Chun-li, SUN Feng-rui, et al. A comparative study on thermal excitations of thermographic defect inspection and identification[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(10): 849-854.
- [10] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
KONG Xiang-qian. *The Application of the Finite Element Method in Heat Transfer*[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [11] GUO X, DING M. Simulation of thermal NDT of thickness and its unevenness of thermal barrier coatings[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 198-203.