

红外热波检测复合材料时缺陷深度的自动测量

先明乐¹, 徐振高², 杨小林¹

(1. 空军第一航空学院, 信阳 464000; 2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 红外热波检测复合材料的缺陷深度计算中, 由于其热扩散系数随材料铺层方式及材料温度的不同而不同, 致使缺陷深度不易实现自动测量。为此, 依据一维热传导理论模型, 用非线性拟合方法, 从红外热图序列获取了被测材料的热扩散系数, 结合缺陷深度计算公式, 最终实现对复合材料缺陷深度的自动测量。

关键词: 红外热波检测; 复合材料; 缺陷深度; 非线性拟合; 自动

中图分类号: TN219; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)06-0460-04

Automotive Measurement for Defect Depth of Composite Material in Infrared Nondestructive Testing

XIAN Ming-Le¹, XU Zhen-Gao², YANG Xiao-Lin¹

(1. The First Aviation Institute of Air Force, Xinyang 464000, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To the composite material, its thermal diffusivity is always changed with layer orientations and material temperatures, which makes it difficult to realize the automatic measurement of defect depth of composite material. To solve this problem, a method was provided, the thermal diffusivity of the detected material could be obtained from infrared thermal imaging series with non-linear fitting based on one-dimensional thermal conduction theoretical model, then combining the formula of depth calculation, automatic measurement of defect depth of composite material was easy to be achieved.

Keywords: Infrared thermal testing; Composite material; Defect depth; Non-linear fitting; Automation

在脉冲红外热波检测中, 通过对红外热图序列的定量分析, 可以获得缺陷深度信息。在基于一维热传导理论模型推导出的缺陷深度的计算公式中, 缺陷深度 d 与被测材料的热扩散系数 α 和峰值时间 t_{peak} 相关, 其关系为 $t_{\text{peak}} = \frac{2d^2}{\alpha}$ ^[1], 其中 t_{peak} 是红外热图序列中缺陷中心处像素点灰度值 $G(t)$ 和无缺陷处像素点灰度值 $G_0(t)$ 的最大差值出现时所对应的热传导时间。而对于热扩散系数 α , 不同的材料是不同的。若被测材料为常见的单相材质, 可通过建立热扩散系数数据库, 检索对应材料对应测量温度下的热扩散系数值来获取。但对于复合材料(如层

合板), 即使是由相同的单层板组成, 不同的铺层方式, 也会导致热扩散系数不同。因此, 对于复合材料的红外热波检测, 要实现对缺陷深度的自动测量, 必须解决热扩散系数的自动获取问题。

1 复合材料热扩散系数 α

热扩散系数 α 的表达式如下:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (1)$$

式中 λ ——材料热导率, J/(m · K);

ρ ——材料密度, kg/m³;

C ——材料比热容, J/(kg · K)。

以飞机复合材料结构中最常用的层合板结构材料 HT3/QY8911 为例, 其材料密度 ρ 不随材料温度和纤维走向等因素影响, 可认为是固定值, ρ = 树脂

收稿日期: 2008-06-13

作者简介: 先明乐(1979—), 女, 讲师, 硕士研究生, 从事飞机修理及无损检测专业的教学及科研工作。

含量%×树脂密度+纤维含量%×纤维密度=40%×1 250+60%×1 100=1 160 kg/m³。不同铺层方式下 HT3/QY8911 的比热容 C 和热导率 λ 见表 1^[1]。

表 1 HT3/QY8911 的比热容 C 和热导率 λ

试验平均温度 /℃	[O] ₁₆		[±45] ₈	
	$C/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$\lambda/(J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$C/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$\lambda/(J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
60	1 050	0.740	1 080	0.541
75	—	0.768	—	0.588
95	—	0.785	—	0.569
115	—	0.851	—	0.599

由表 1 可见,HT3/QY8911 的比热容 C 随铺层方式的变化不大(变化率<3%),可用一近似值来代替,但热导率 λ 随铺层方式及材料温度的变化很大(最大变化率约为 57%),不能用近似值替代,必须依据被测材料的温度及具体铺层方式来测定。

通过上述对复合材料热扩散系数的分析可知,依据红外热图序列获取复合材料热扩散系数的问题,可转换成对复合材料热导率 λ 的求解问题。

笔者依据一维热传导理论模型,尝试用非线性拟合方法^[3],从红外热图序列获取热扩散系数 α 相关的热导率 λ ,结合式(1),实现对复合材料缺陷深度的自动测量。

2 非线性拟合

由一维热传导模型,红外热波检测中,被测试件缺陷中心处和无缺陷处的表面温差可表示为:

$$\Delta T(0, t) = T_d(0, t) - T_0(0, t) = \frac{2I_0}{\sqrt{\pi\rho C\lambda t}} \exp\left(-\frac{d^2}{\alpha t}\right) \quad (2)$$

式中 $T_d(0, t)$ ——缺陷中心处表面温度;

$T_0(0, t)$ ——无缺陷处表面温度;

I_0 ——热流密度;

t ——热波在材料中的传导时间;

d ——缺陷深度。

设红外热图序列的总帧数为 P ,图像采集频率为 f ,则第 i 帧红外热图像对应的热波传导时间 $t=i/f$ 。

对于固定采集频率的红外热图序列,可将式(2)离散化为:

$$\Delta T(i) = \frac{2I_0}{\sqrt{\pi\rho C\lambda i}} \exp\left(-\frac{d^2 f}{\alpha i}\right) \quad (3)$$

设 $\frac{2I_0}{\sqrt{\pi\rho C\lambda/f}} = a, -\frac{d^2 f}{\alpha} = b$, 则:

$$\Delta T(i) = ai^{-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{b}{i}\right) \quad (4)$$

$\Delta T(i)$ 与由红外热图序列获得的缺陷中心处和无缺陷处像素灰度差值 $\Delta G(i)$ 成正比。将红外热图序列帧数 i 和对应的灰度差 $\Delta G(i)$ 作为输入量,通过非线性回归,利用最小二乘估计,可估计出式(3)中的待定参数 a 和 b 。求解过程如下:

设 $\theta=[a, b]$, $y_i = \Delta G(i)$, 期望值 $\eta_i = f(i) = ai^{-\frac{1}{2}} \exp(\frac{b}{i})$, 则 $y_i = f(i, \theta) + Z_i$, 其中 Z_i 为残差。

设 $\eta_i(\theta) = f(i, \theta) (i=1, 2, 3, \dots, P)$, 可得:

(1) 给定待估计参数 θ 一个迭代初值 θ^0 。

(2) 通过在 $\eta^0 = \eta(\theta^0)$ 处的泰勒展开式,得到近似的 $\eta(\theta) = f(i, \theta) \approx f(i, \theta^0) + v_{i1}(\theta_1 - \theta_1^0) + v_{i2}(\theta_2 - \theta_2^0)$, 其中 $v_{ik} = \frac{\partial f(i, \theta)}{\partial \theta_k} \Big|_{\theta=\theta^0} (k=1, 2)$ 。设 $V^0 = \{v_{ik}\}_{P \times 2}$, 则 $\eta(\theta) \approx \eta(\theta^0) + V^0(\theta - \theta^0)$ 。

(3) 导出残差向量 $z^0 = y - \eta^0$, $z(\theta) = y - \eta(\theta) \approx y - [\eta(\theta^0) + V^0(\theta - \theta^0)] = z^0 - V^0(\theta - \theta^0)$, 设 $\delta = \theta - \theta^0$, 则 $z(\theta) \approx z^0 - V^0\delta$ 。

(4) 将残差向量 z^0 投影到期望曲面的切平面上,以确定 η^1 。在此利用 QR 分解得到 $V^0 = QR_1$, 其中 Q 为 $P \times P$ 阶矩阵,满足 $QQ^T = I$; R 为 $P \times 2$ 阶矩阵,可表示为 $R = \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。 R_1 为 2×2 上三角矩阵, $Q = [Q_1 | Q_2]$, Q_1 和 Q_2 分别为前 2 列和后 $P-2$ 列。由此可得 $V^0 = QR = Q_1 R_1$, $w_1 = Q_1^T z^0$, $\eta^1 = Q_1 w_1$ 。

(5) 求得增量 δ^0 , $R_1 \delta^0 = w_1$ 。

(6) 转移到 $\eta(\theta^1) = \eta(\theta^0 + \lambda \delta^0)$, 利用步长因子 λ , 以使新的近似残差平方和 $S(\theta^1)$ 达到最小。即 $S(\theta^1) = \sum_{i=1}^P [y_i - \eta(\theta^0 + \lambda \delta^0)]^2$, 当 $\frac{\partial S(\theta^1)}{\partial \lambda} = 0$, 求出步长因子 λ 。与 $\eta(\theta^0)$ 相比,现在 $\eta^1 = \eta(\theta^1) = \eta(\theta^0 + \lambda \delta^0)$ 应更靠近 y 。

(7) 迭代收敛:当 $\delta^0 < 0.01$ 时,认为迭代收敛。此时使近似残差平方和 $S(\theta^1)$ 达到最小的 $\theta^0 + \lambda \delta^0$, 即为待求参数 θ 的估计值。可得:

$$\theta_1 = a = \frac{2I_0}{\sqrt{\frac{\pi\rho C\lambda}{f}}} \quad (5)$$

式(5)中,对于特定功率、特定形状的热激励源, I_0 是固定值;由前所述,对指定被测复合材料,其材料密度 ρ 、比热容 C 也是可以确定的;对指定的红外热图序列,其采集频率 f 也是确定的。故由式(5)

可得复合材料热导率 λ 为:

$$\lambda = \left(\frac{2I_0}{\theta_1} \right)^2 \cdot \frac{f}{\pi \rho C} = \frac{4fI_0}{\pi \rho C \theta_1^2} \quad (6)$$

将 λ 代入式(1),即可求得材料热扩散系数 α ,进而求得损伤埋藏深度 d 。

3 编程实现

用非线性拟合来估计式(4)中的参数值,虽然算法非常复杂,但利用 Matlab 软件来辅助计算^[4]则非常简便。利用 Matlab 工具箱中的非线性最小二乘法数据拟合函数 `nlinfit()`,结合 VC 编程来实现对式(4)中参数值的估计。

使用 `nlinfit()` 函数进行非线性回归参数估计时,参数初值的选定非常关键。因此在编写调用该函数时,采用多初值,以保证迭代收敛,程序流程如图 1 所示。

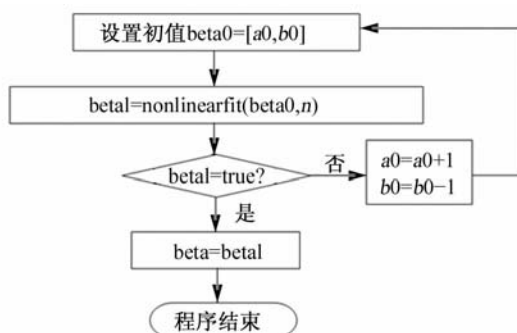


图 1 估计系数 a, b 的计算流程图

4 实例验证

试验采用由空军第一航空学院研制的 ITTAF 飞机红外热波检测设备完成。该设备采用脉冲氙灯加热,热源采用双灯头平行布置方式,安装于 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$ 的检测盒中,脉冲单灯功率为 3000 J 。测试对象为 HT3/QY8911 层合板标准试块,试块尺寸为 $300 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 4.2 \text{ mm}$ (图 2)。红外热像仪的采集频率为 50 Hz ,采集的红外热图序列总帧数为 229 帧。在红外热图序列 2 号缺陷孔附近无缺陷处取 3 点 SP1, SP2, SP3,作为参考点,缺陷中心处取一点 SP4 为测量点(图 3)。将 4 点对应的灰度值分别保存在一维数组 $T(\text{SP1})$, $T(\text{SP2})$, $T(\text{SP3})$ 和 $T(\text{SP4})$ 中,设 $\Delta T = T(\text{SP4}) - [T(\text{SP1}) + T(\text{SP2}) + T(\text{SP3})]/3$,以 ΔT 为纵坐标,红外热图序列帧数为横坐标,得到帧数-温差曲线图(图 4)。

对图 4 曲线进行非线性拟合,设初值为 $[1,$

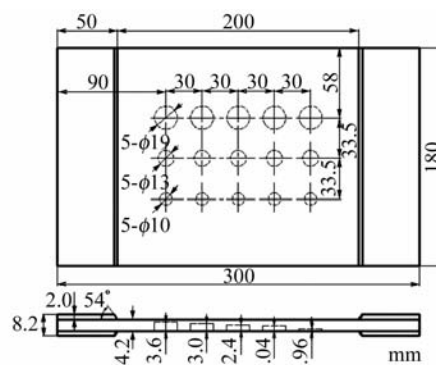


图 2 标准试块尺寸

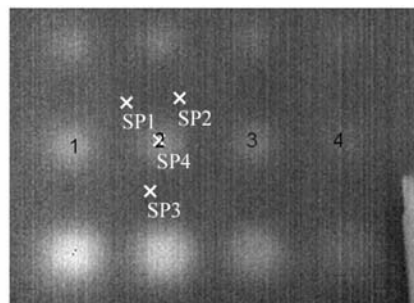


图 3 参考点(无缺陷点)及测量点(缺陷点)的选取

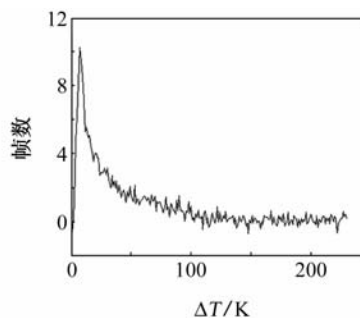


图 4 2 号缺陷孔帧数-温差曲线

—1],拟合结果 $\text{beta} = [15.6964, -3.4037]$,即:

$$\begin{cases} \text{beta}(1) = a = 14.5964 \\ \text{beta}(2) = b = -3.4037 \end{cases}$$

4.1 热导率计算验证

由式(6)得:

$$\lambda = \left(\frac{2I_0}{a} \right)^2 \cdot \frac{f}{\pi \rho C} = \frac{4fI_0^2}{\pi \rho C a^2} \quad (7)$$

文献[5]表明,层合板复合材料在厚度超过 3 mm 后,其表面反射率将趋向一个定值,透射率趋近于 0。笔者所用标准试块厚度为 4.2 mm ,其表面反射率为 0.4,则:

$$I_0 = (1 - 0.4) \times \frac{2 \times 3000}{0.33 \times 0.33} \times 0.18 \times 0.30 = 1785.124 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

标准试块中 $0^\circ, \pm 45^\circ$ 和 90° 铺层方式分别占总层数的 30%,55%和 15%,故该试块的比热容 $C =$

$$1\ 050 \times 30\% + 1080 \times 70\% = 1\ 071 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}。$$

材料密度 $\rho = 1\ 160 \text{ kg/m}^3$, 红外热图序列采集频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 。

将上述参数带入式(7), 得 $\lambda = 0.663 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。拟合所得热导率符合表 1 中热导率值分布规律。

4.2 峰值时间计算验证

t_{peak} 与式(4)中的拟合系数 b 的关系为:

$$t_{\text{peak}} = \frac{2d^2}{\alpha} = - \left(-\frac{d^2 f}{\alpha} \right) \cdot \frac{2}{f} = -\frac{2b}{f}$$

将拟合所得系数 b 代入上式, 得:

$$t_{\text{peak}} \approx 0.136 \text{ s}$$

由图 4 中帧数-温差曲线可得, 其最大温差值出现在第 7 帧, 即 $t'_{\text{peak}} = \frac{7}{50} = 0.140 \text{ s}$ 。两者计算误差为:

$$e_t = \left| \frac{t_{\text{peak}} - t'_{\text{peak}}}{t'_{\text{peak}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{0.136 - 0.140}{0.140} \right| \times 100\% = 2.857\%$$

4.3 缺陷深度计算验证

将 4.1 节计算得到的热导率 λ 代入式(1), 得热扩散系数 $\alpha = 5.337 \times 10^{-7}$ 。即得标准试块测量点所在缺陷深度为:

$$d = \sqrt{\frac{\alpha \cdot t_{\text{peak}}}{2}} = 1.905 \text{ mm}$$

对比标准试块实际深度 1.8 mm, 得深度测量误差为:

$$e_d = \left| \frac{1.905 - 1.8}{1.905} \right| \times 100\% = 5.833\%$$

表 2 为采用上述深度计算方法测量图 3 所示其它缺陷孔所得的测量结果。

5 结论

通过分析复合材料热扩散系数的特点, 介绍了

表 2 标准试块缺陷深度测量值及测量误差

缺陷编号	实际埋深/mm	测量埋深/mm	测量误差/%
1	1.2	1.241	3.42
2	1.8	1.905	5.83
3	2.16	2.009	6.98
4	3.24	2.941	9.23

一种在红外热波检测中利用非线性拟合实现复合材料热扩散系数自动获取的方法, 解决了在针对复合材料缺陷深度计算中, 因热扩散系数随材料铺层方式及温度的不同而不同, 致使缺陷深度不易实现自动测量的难题。利用该方法可同时完成缺陷深度计算中两个重要参数——热扩散系数 α 和峰值时间 t_{peak} 的拟合, 简化了计算环节, 有利于编程效率的提高。整个缺陷深度测量过程无需输入中间参数, 大大提高了缺陷深度测量的自动化程度。试验表明, 完成的红外热波检测缺陷深度测量软件的深度测量结果误差不大于 10%, 可基本满足红外热波检测对缺陷定量评估的需要。

参考文献:

- [1] Lau S K, Almond D P. A quantitative analysis of pulsed video thermography[J]. NDT&E International, 1991, (24): 195—202.
- [2] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] Douglas M Bates, Donald G Watts. 非线性回归分析及其应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997.
- [4] Edward B Magrab, Balakumar Balachandran, Keith E Herold. MATLAB 原理与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 张永强, 王伟平, 唐小松, 等. 两种纤维增强复合材料与连续激光耦合规律[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(10): 1599—1602.

(上接第 450 页)

(2) 直流电磁铁的磁通 Φ 随着直流电磁铁铁心截面积 S_1 的增大而增大, 且是趋向于一个最大值 $\Phi_{\text{max}} = \frac{NI\mu_2 S_2}{L_2}$ 。这个磁通最大值 Φ_{max} 的大小基本上取决于电磁铁的磁通势和外磁路的磁阻。

(3) 铁心的截面积 S_1 不能取得太大, 也不能取得太小, 应有一定的范围, 可参考式(17)和(18)来确定。设计时, 应结合具体情况, 综合考虑各相关因素来确定。

参考文献:

- [1] 俞大光. 电工基础[M]. 第二版, 北京: 高等教育出版社, 1965.
- [2] 贺湘琰. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [3] GB/T 12604. 5—1990 无损检测术语 磁粉检测[S].
- [4] 林锡忠. 论电磁铁铁心磁导率对磁通和励磁电流的影响[J]. 无损检测, 2005, 27(6): 300—334.
- [5] 林锡忠. 交流电磁铁铁心截面积的设计[J]. 无损检测, 2007, 29(8): 465—468.