

碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外检测*

霍雁¹⁾ 张存林^{2)†}

1) (北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

2) (首都师范大学物理系, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2011年11月9日收到; 2011年12月26日收到修改稿)

利用脉冲红外热成像技术对碳纤维复合材料试件内部的模拟脱黏缺陷的深度进行测量, 研究在被测物热属性参数未知情况下, 碳纤维增强塑料中缺陷深度的测量方法. 分析了平板材料在脉冲热源激励下的一维热传导模型; 给出了内部缺陷深度的红外测量原理; 选用对数温度二阶微分峰值时刻作为特征时间测量缺陷深度; 考虑单点标定测量深度可能产生较大的随机误差, 提出利用最小二乘法多项式拟合建立阶梯件中阶梯深度与其对应的对数温度时间二阶微分曲线峰值时间两者之间的标定关系式的方法, 选择在相对误差平方和最小情形下的拟合关系式作为脱黏缺陷深度测量的标定关系式. 实验结果表明, 利用该方法测量脱黏缺陷深度的精度优于单点法标定测量结果, 实现了在被检测材料热属性参数未知的情况下仍能较准确地测量脱黏缺陷深度.

关键词: 复合材料, 脉冲热源, 特征时刻, 脉冲红外热成像

PACS: 42.30.-d

1 引言

碳纤维增强塑料 (CFRP) 由于具有高比强度、高比模量、耐高温等优异特性, 广泛应用于航空航天、汽车制造等领域. 由于复合材料制造过程的复杂性、不可逆性以及使用过程中各种环境的复杂性, 使得复合材料可能产生脱黏缺陷^[1]. 脱黏缺陷的边缘容易产生应力集中, 影响结构的承载性能, 增加结构损坏的可能性^[2]. 当脱黏面积超过允许时, 会引起复合材料强度的降低, 从而导致进一步破坏, 对构件的整体安全性能造成重大隐患. 目前, 国内主要采用超声 C 扫描以及 X 射线对其进行检测^[3]. 超声 C 扫描检测效率较低^[4], 检测时需要耦合剂, X 射线检测成本高且需考虑防护问题^[5]. 因此, 如何利用无损检测技术对复合材料质量状况进行检测是复合材料质量控制的重要问题.

脉冲红外热波检测技术利用高能脉冲热源激励待测物, 通过求解逆散射问题来获得缺陷的分布信息^[6]. 对于脉冲红外检测, 当材料的热属性系数

已知, 通过获取待测物表面温度场变化的特征时间即可计算缺陷深度. 但由于复合材料的内部成分通常较为复杂, 其热属性参数不容易确定, 通常难以实现复合材料内部缺陷深度测量. 因此, 本文利用脉冲红外热成像技术对内部预埋平底洞缺陷的碳纤维复合材料进行检测, 通过分析平板材料在脉冲热源激励下的一维热传导模型, 给出缺陷深度的红外测量原理; 选取表面对数温度的二阶微分峰值时间为缺陷深度测量的特征时间, 在被测材料热扩散系数未知情况下, 利用基于单点标定和多点多项式拟合标定两种方法, 建立复合材料内部缺陷深度与特征时间的关系式, 实现缺陷深度的计算, 为复合材料内部缺陷深度定量测量提供检测手段.

2 缺陷深度脉冲红外检测原理

利用脉冲红外检测技术测量缺陷深度常用的特征时间有温差峰值时间、对数温度偏离时间、表面温度对数二阶微分峰值时间等.

* 国家自然科学基金联合基金 (批准号: 61079020) 资助的课题.

† E-mail: cunlin.zhang@mail.cnu.edu.cn

2.1 温差峰值时间测量深度原理

在脉冲红外检测中, 无缺陷区域看成由半无限大材料组成, 缺陷相当于介质内部某深度处存在与介质特性不同的有限厚区域, 有限厚介质与半无限厚均质材料受脉冲热源的作用如图 1 所示.

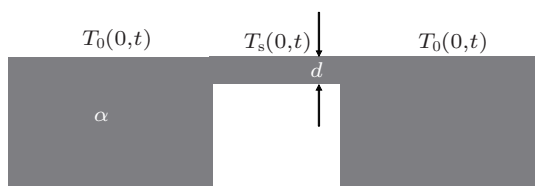


图 1 有限厚度与半无限厚模型

假设有有限厚介质内部两个表面均为绝热边界, 利用镜像法^[7]可解决该类热传导问题. 综合各个热源的作用, 得到在 $x = 0$ 处表面温度场随时间的变化关系为

$$T_s(0, t) = \frac{C}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(2nd)^2}{4\alpha t}} \right], \quad (1)$$

式中, α (m^2/s) 为材料的热扩散系数, C 为材料的热容量, d 为有限厚介质的深度.

由于热波在介质中的衰减很快, 对于 $n > 1$ 的高次项忽略不计^[8], (1) 式可写为

$$T_s(0, t) = \frac{C}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \left[1 + 2e^{-\frac{d^2}{\alpha t}} \right]. \quad (2)$$

在脉冲红外检测中, 无缺陷区域相当于内部均匀的半无限大区域, 无缺陷区域的表面温度随时间的变化关系为

$$T_0(0, t) = \frac{C}{\sqrt{4\pi\alpha t}}. \quad (3)$$

对 (2) 与 (3) 两式相减, 得到有缺陷区域与无缺陷区域表面温差为

$$\Delta T = \frac{C}{\sqrt{\pi\alpha t}} e^{-\frac{d^2}{\alpha t}}. \quad (4)$$

对 (4) 式求极值得到表面温差达到最大值时对应的峰值时间为

$$t_p = \frac{2d^2}{\alpha}. \quad (5)$$

从 (5) 式可以看出, 当被检测物材料一定时, 缺陷深度的平方与其表面温差的峰值时间成正比, 通过确定峰值时间就可以定量测量缺陷深度.

2.2 对数温度偏离时间测量深度原理

基于一维热传导模型, 由以上分析可知, 在脉冲热源激励作用下, 被测物中无缺陷区域的表面温

度随时间的变化关系满足 (3) 式, 将 (3) 式两边取自然对数, 得到

$$\ln T(t) = \ln(C) - \frac{1}{2} \ln(4\pi\alpha) - \frac{1}{2} \ln(t). \quad (6)$$

根据 (6) 式可知, 在对数坐标系里, 被测物中无缺陷区域受脉冲激励后的表面温度随时间呈斜率为 -0.5 的线性变化.

若被检测物内部含有缺陷, 热量在试件表面与缺陷之间传导时, 对数温差曲线按斜率为 -0.5 线性变化. 当热量传导到缺陷处, 由于热波在缺陷的界面发生反射^[9], 对应表面的对数温差曲线偏离线性变化. 据文献报道^[10], 从实验数据中得到偏离时间与缺陷的深度的平方成正比, 即

$$d^2 \propto t_{\text{break}}. \quad (7)$$

已知被测物的热扩散系数, 根据不同深度缺陷对应的特征偏离时间即可以实现缺陷的深度定量测量.

2.3 表面温度的对数二阶微分峰值时间测量深度原理

对厚度为 d 的均质平板材料, 设材料初始温度为 $T(x, 0)$, t 时刻材料温度分布可写为^[11]

$$T(x, t) = \frac{1}{d} \int_0^d T(x, 0) dx + \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2\pi^2\alpha t}{d^2}\right) \times \cos \frac{n\pi x}{d} \int_0^d T(x, 0) \cos \frac{n\pi x}{d} dx. \quad (8)$$

对平板材料表面施加一瞬时脉冲热源, 红外热波检测原理图如图 2 所示.

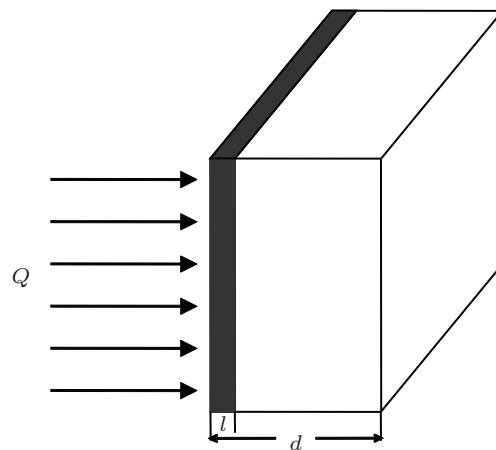


图 2 脉冲红外检测原理示意图

只考虑热量在厚度方向上的一维传导, 脉冲能量 Q 在试件前表面较小深度 l 范围内被吸收, 温度分布的初始条件可写为

$$\begin{aligned} T(x, 0) &= Q/\rho Cl \quad (0 < x < l), \\ T(x, 0) &= 0 \quad (l < x < d). \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ρ 为材料的密度.

利用初始条件, (8) 式可写成

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \frac{Q}{\rho Cd} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{d} \frac{\sin(n\pi l/d)}{n\pi l/d} \right. \\ &\quad \left. \times \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2}{d^2} at \right) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

对于不透明材料而言, l 很小, 此时满足 $\sin(n\pi l/d) = n\pi l/d$. 在 $x = 0$ 时, 被测物表面的温度分布可写成

$$T(0, t) = \frac{Q}{\rho Cd} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2}{d^2} at \right) \right]. \quad (11)$$

令 $w = \pi^2 at/d^2$, 在对数坐标下对 (11) 式求解二阶导数, 得到

$$\frac{d^2(\ln T)}{d(\ln t)^2} = \frac{t}{T} \frac{dT}{dt} - \frac{t^2}{T^2} \left(\frac{dT}{dt} \right)^2 + \frac{t^2}{T} \frac{d^2 T}{dt^2}. \quad (12)$$

对 (11) 式求解一阶导数和二阶导数, 得到

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= -\frac{Q}{\rho Cd} \frac{2w}{t} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 e^{-n^2 w}, \\ \frac{d^2 T}{dt^2} &= \frac{Q}{\rho Cd} \frac{2w^2}{t^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^4 e^{-n^2 w}. \end{aligned} \quad (13)$$

将 (13) 式代入 (12) 式, 利用数值方法求解 (12) 式对应的峰值时间为^[12]

$$t_{2d} = \frac{d^2}{\pi a}. \quad (14)$$

从 (14) 式可以看出, 当被检测物材料一定时, 缺陷深度的平方与其表面对数温度的二阶微分峰值时间成正比, 因此, 通过确定特征时间就可以定量测量缺陷深度.

由本节理论分析可知, 利用温差峰值时间、对数温度偏离时间、对数温度二阶微分峰值时间三种特征时间均可计算缺陷深度. 通过选取代表缺陷区域与无缺陷区域对应的表面温度时间数据, 对两数据做差并求对应的峰值时间可得到温差峰值时间; 分别对两数据做取对数处理, 两曲线由重合到开始偏离的时刻即是对数温度偏离时间; 在对数坐标内求缺陷数据的二阶导数即可得到缺陷表面的

温度时间二阶微分曲线, 提取其峰值时间即可确定对数温度二阶微分峰值时间.

温差峰值时刻和对数温度偏离时刻的提取都需选择无缺陷区域为参考区域, 特征时间的提取易受参考区域选取的影响. 但是利用二阶微分对数时间曲线的峰值时间则不需要选取参考区域, 使得特征时刻提取的重复性较好, 适合工程化检测需求. 因此本文选用对数温度二阶微分峰值时间作为碳纤维复合材料分层深度测量的特征时间.

3 试件制备及实验设备介绍

脱黏是一种被黏物件间有胶黏剂, 但没有黏合的间歇性缺陷, 其间隙厚度小于胶层厚度的一种缺陷类型. 碳纤维层压板内部脱黏缺陷可能出现在层与层之间, 由于碳纤维复合材料生产成本高, 不适用于利用现实产品进行实验研究, 故选用与产品所使用的相同材料, 通过在试件内部制作模拟脱黏缺陷来模拟真实缺陷, 其材料厚度、制作工艺完全与实际产品一致. 通过在碳纤维复合材料中设计不同形状、不同深度的平底洞来模拟不同宽深比的脱黏缺陷. 选取的碳纤维板厚度为 6 mm, 大小为 450 mm×240 mm, 在其内部设计两排八列的平底洞缺陷, 平底洞的埋深范围为 0.5 mm—5 mm, 两排平底洞的大小为 $\Phi 10$ mm 和 10 mm×10 mm, 见图 3 所示.

实验选用焦平面制冷型热像仪, 温度分辨率为 0.02 K, 图像大小为 320×240 像素, 敏感波段为 8 μ m—9 μ m.

由于辐射量与温度成正比, 温度越高辐射量越大, 本文均用辐射温度值代替温度值. 实验时, 由于闪光灯内置于遮罩中, 热像仪的最小工作距离等于遮罩的高度, 在此高度下, 热像仪单次成像面积为 22 cm×27 cm, 因此实验时将待测件分成四个区, 实验结果由不同分区拼接而成.

4 实验结果

利用高能闪光灯提供脉冲热源, 热激励能量为 9.6 kJ, 采集频率为 60 Hz, 采集时间为 15 s. 由于脱黏缺陷所处深度不同, 缺陷越浅, 在红外热图中显现的时间越早. 图 4 为 0.3 mm 深的缺陷显现时的原始红外图像.

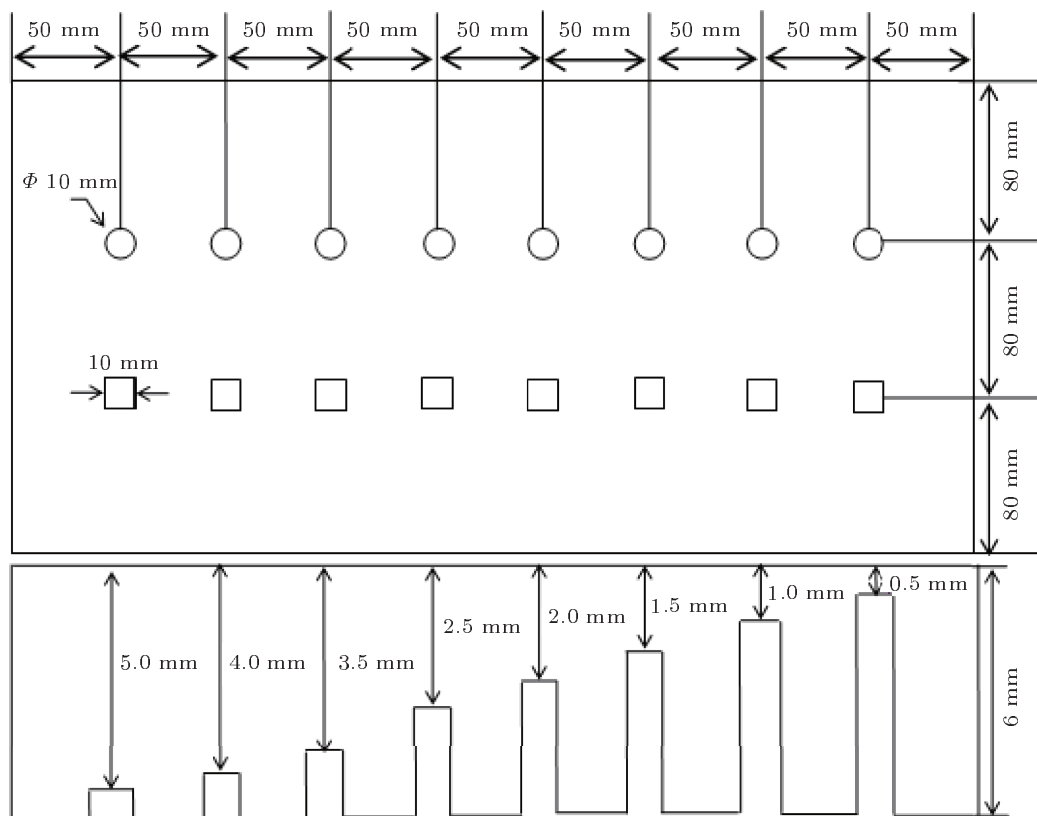


图3 不同深度脱黏缺陷试件设计图

提取各缺陷区域表面的温度时间信号, 为了减少误差, 在缺陷区域选取 3×3 像素数据的平均值代表该区域的温度数据. 在对数坐标内求二阶导数即可得到缺陷表面的对数温度时间二阶微分曲线, 大小为 $\Phi 10$ mm. 深度不同的缺陷对应的对数温度时间二阶微分曲线如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 不同深度缺陷对应的峰值时

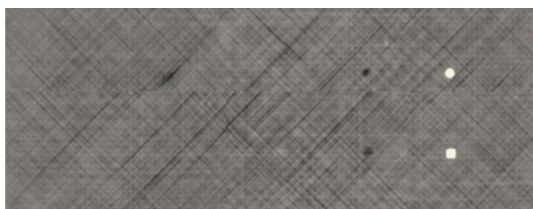


图4 深 0.3 mm 处缺陷的原始红外图像

间不同, 深度越深, 峰值时间出现越晚. 各缺陷对应的对数温度二阶微分曲线的峰值时间与其厚度的平方成正比, 通过确定缺陷对应的对数温度二阶微分曲线的峰值时间即可实现缺陷深度的测量. 各设计缺陷的对数温度二阶微分曲线的峰值时刻 (单位/s) 见表 1.

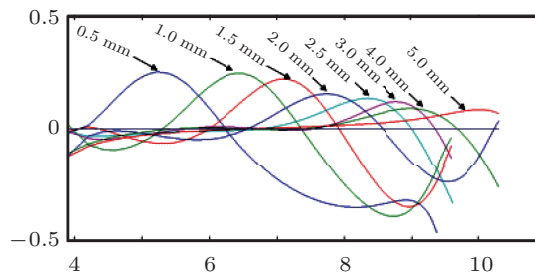


图5 不同深度缺陷的对数温度二阶微分峰值时间曲线

表 1 不同大小、深度缺陷的对数温度二阶微分峰值时刻

缺陷大小/mm	缺陷深度/mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0
$\Phi 10$		0.183	0.633	1.217	2.269	4.037	6.523	8.075	11.428
10×10		0.200	0.684	1.368	2.285	3.820	5.355	8.775	13.246

4.1 单点法标定测量深度

根据测厚理论, 缺陷深度与其对应的对数温度二阶微分曲线的峰值时间成正比, 比例系数取决于材料的热扩散系数. 当被检测物的热扩散系数 a 已知, 确定特征时间即可计算缺陷的深度. 在实际检测中, 由于碳纤维复合材料及制作工艺的复杂性, 其热扩散率不易获取. 对于这种情况, 可以以任一已知厚度作为参考厚度, 根据该参考厚度值与其对应的峰值时间来建立深度与特征时间两者的比例关系式, 根据该关系式计算其他缺陷的深度. 选用最大深度作为参考已知厚

度, 得到其他缺陷深度的测量结果与测量误差见表 2.

由表 2 数据可以看出, 利用单点法标定测量的深度误差较大. 主要有两个原因: 一是选用某一已知深度缺陷的峰值时刻为参考, 随机性较大, 当该参考点随机误差较大时, 直接影响其他缺陷深度的测量精度; 二是缺陷深度平方与对应的二阶微分峰值时间成正比例关系是建立在一维热传导模型基础上. 由于碳纤维材料是由多层碳纤维布铺织而成, 不是各向同性的均质体, 对于实际被检测件的检测, 不可避免地受三维热扩散的影响, 导致缺陷的峰值时间与对应的深度不能严格遵守正比例关系.

表 2 利用单点参考计算的深度及误差

设计深度/mm		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0
Φ10	测量深度/mm	0.63	1.18	1.63	2.23	2.97	3.77	4.20	5.0(参考)
	测量误差/%	26.5	18	8.8	11.5	18.9	7.9	5.1	0
10×10	测量深度/mm	0.61	1.14	1.61	2.08	2.69	3.18	4.07	5.0(参考)
	测量误差/%	22.9	13.6	7.1	3.8	7.4	9.2	1.7	0

4.2 多项式拟合法测量深度

针对以上单点法选取参考点单一可能带来较大的随机误差, 设计不同深度的阶梯试件, 阶梯试件必须满足: 与实际待测试件具有相同的制作材料及工艺; 所含缺陷类型相同; 所含缺陷的深度范围应包含待检测试件的缺陷的深度范围. 在阶梯件上设计不同深度的阶梯来模拟缺陷的不同深度, 深度阶梯件如图 6 所示.

度分别为 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5 mm. 利用脉冲红外检测技术对阶梯件进行检测, 提取不同深度的阶梯表面温度对应的对数二阶微分峰值特征时间, 得到的峰值时间结果见表 3.

表 3 不同深度阶梯的对数温度二阶微分峰值时刻

阶梯设计深度/mm	0.5	1.5	2.5	3.5	5
二阶微分峰值时间/s	0.175	1.291	3.411	6.354	11.91

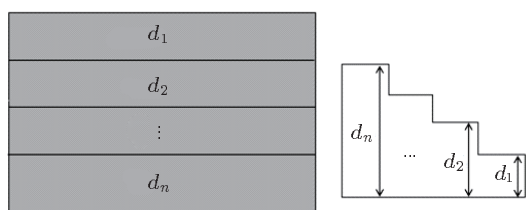


图 6 阶梯件设计图

利用最小二乘法多项式拟合求解出不同深度缺陷对应二阶微分峰值时刻与深度的关系式, 产生的相对误差平方和最小的拟合多项式能准确地预测实验数据, 因此选用此多项式为缺陷深度与峰值时间的关系表达式.

本文的阶梯件中内设五个深度阶梯, 各自的深

度分别为 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5 mm. 利用标准试件的检测结果建立特征时间与深度的标定关系式, 采用最小二乘法多项式拟合确定阶梯深度与其对应的峰值时间两者之间的标定关系式, 将表 3 中的五组阶梯深度与峰值时间进行拟合, 当拟合次数为 2 阶时, 相对误差平方和最小. 将此二次多项式拟合关系式作为该碳纤维复合材料脱黏缺陷深度测量的标定关系式, 得到二次多项式拟合表达式为

$$d^2 = 0.0297 \times t^2 + 1.748 \times t - 0.0569. \quad (15)$$

将表 1 中碳纤维复合材料试件的各个缺陷对应的对数温度二阶微分峰值时间代入上式, 即可实现脱黏缺陷深度的测量, 计算结果见表 4.

表4 利用多点法多项式拟合标定计算的深度

设计深度/mm		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0
Φ10	测量深度/mm	0.51	1.03	1.45	2.02	2.74	3.55	3.99	4.88
	测量误差/%	2	3	-3.3	1	9.6	1.4	-0.3	-2.4
10×10	测量深度/mm	0.54	1.07	1.55	2.12	2.66	3.19	4.19	5.32
	测量误差/%	8	7	3.3	6	6.4	8.8	4.9	6.4

从表4可以看出,利用多点法多项式拟合求得的峰值时间与缺陷深度的关系式来计算缺陷的深度,计算得到的碳纤维复合材料脱黏缺陷深度与设计深度的误差均能控制在±10%以内.与采用单点法标定计算得到的结果比较,该方法测量脱黏缺陷深度的精度得到了提高.

5 结论

本文分析了平板材料在脉冲热源作用下的一维瞬态热传导理论模型,给出了被测材料深度与其表面温度对数二阶微分峰值时间的关系,基于该深度测量理论,对碳纤维复合材料中模拟脱黏缺陷深

度进行了测量.在复合材料热扩散系数未知情况下,由于参考单个缺陷深度,以单点法标定得到的脱黏缺陷深度测量结果误差较大,考虑单个参考深度的随机误差以及碳纤维材料实际检测中不可避免地出现三维热扩散的影响,设计深度阶梯件,利用最小二乘法多项式拟合各不同阶梯深度与其特征时间的关系,选用相对误差平方和最小情形下的多项式为碳纤维复合材料脱黏缺陷深度测量标定关系式.实验结果表明,采用该方法测量的脱黏缺陷深度精度得到了提高.在被测件热扩散系数未知情况下,通过设计阶梯件,利用多项式拟合的方法计算深度测量标定关系式可以实现材料内部缺陷深度测量.

- [1] Zhang W, Liu T, Yang Z W, Zhang R M 2009 *Laser & Infrared* **39** 939 (in Chinese) [张炜, 刘涛, 杨正伟, 张瑞民 2009 激光与红外 **39** 939]
- [2] Zhang J J, He J W 2008 *Aircraft Design* **28** 27 (in Chinese) [张佳佳, 何景武 2008 飞机设计 **28** 27]
- [3] Li Y H, Zhang C L, Jing W P, Yang D G, Shen J L, Chen J H, Zhang X C, Jiang S F 2005 *Laser & Infrared* **35** 262 (in Chinese) [李艳红, 张存林, 金万平, 杨党纲, 沈京玲, 陈继华, 张小川, 蒋淑芳 2005 激光与红外 **35** 262]
- [4] Zhang P T 2006 *MS Dissertation* (Haerbin: Northeast Forestry University) (in Chinese) [张澎涛 2006 硕士学位论文(哈尔滨: 东北林业大学)]
- [5] Wang X Y, Liu Z D, Cai P A, Shi X Q 2007 *NDT* **31** 1 (in Chinese) [王小永, 刘志栋, 蔡平安, 石小强 2007 无损探伤 **31** 1]
- [6] Zeng S Q, Xu H F, Li J Y, Liu X D 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1338 (in Chinese) [管惟炎, 刘体汉, 郑国光 1997 物理学报 **46** 1338]
- [7] Hou Z B, He S J, Li S X 1984 *Heat Conduction in Solid* (Vol.1) (Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press) p56 (in Chinese) [侯镇冰, 何绍杰, 李恕先 1984 固体热传导(第1卷)(上海: 上海科学技术出版社) 第56页]
- [8] Wang X 2001 *MS Dissertation* (USA: Wayne State University)
- [9] Han X Y, Favro L D, Thomas R L 1998 *The Second Joint NASA/FAA/DOD Conference on Aging Aircraft* Williamsburg, Virginia, August 31–September 3, 1998 p265
- [10] Shepard S M, Lhota J R, Rubadeux B A, Wang D, Ahmed T 2003 *Opt. Eng.* **42** 1337
- [11] Horatio S C, John C J 1959 *Conduction of Heat in Solids* (Oxford: Clarendon) p101
- [12] Sun J G 2006 *J. Heat Trans.* **128** 329

Quantitative infrared prediction method for defect depth in carbon fiber reinforced plastics composite*

Huo Yan¹⁾ Zhang Cun-Lin^{2)†}

1) (School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

(Received 9 November 2011; revised manuscript received 26 December 2011)

Abstract

In this work, we present a quantitative method of predicting defect depth within carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composite with unknown thermal property of specimen. The method discussed in this paper is derived from theoretical model of ideal one-dimensional heat conduction in a flat plate sample. The principle of depth prediction using pulsed infrared thermography is presented; the time based on the peak second-derivative of the temperature difference in the logarithmic scale is selected as the characteristic time; the calibration curve based on data of single defect depth can be easily affected by random error. The calibration curve is put forward in the paper and obtained by designing a stepped reference sample, and it can be obtained by a curve fit of different depths and corresponding characteristic time using polynomial function. The polyfitting curve is used as the calibration curve for depth prediction when the relative error square is minimum. The experimental results show that the depth measured by the calibration curve based on many reference defect depths is more accurate than by single reference defect depth. Defect depth in CFRP composite can be measured by the method without knowing thermal property of specimen.

Keywords: composites, pulsed heat source, characteristic time, pulsed infrared thermography

PACS: 42.30.-d

* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61079020).

† E-mail: cunlin_zhang@mail.cnu.edu.cn