

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.004

复合材料缺陷的脉冲热成像有限元模拟研究*

林隆荣¹, 钟舜聪^{1,2,*}, 伏喜斌³, 余金³, 黄学斌³

(1. 福州大学 机械工程及其自动化学院光学/太赫兹及无损检测实验室, 福建 福州 350108; 2. 福建省
医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000)

摘要: 针对脉冲红外热成像对复合材料的无损检测能力问题, 利用有限元数值分析法模拟了脉冲加热红外成像无损检测过程。建立了“在复合材料上表面施加不同的热流边界条件”, 而在其下表面施加自然对流换热边界条件的有限元模型, 研究了不同复合材料内部缺陷对材料表面温度分布产生的差别, 具体研究了脉冲形状、脉冲加热时间、缺陷类型等因素对含有平底孔缺陷复合材料表面温差变化和对比度变化的影响。研究结果表明, 缺陷深度越浅且越大, 表面温差和对比度会越大; 而热流量越大, 表面温差越大, 但对比度不变。该有限元模拟为研究脉冲加热红外热成像的复合材料缺陷检测提供了数值模型。

关键词: 红外热成像; 有限元分析; 无损检测; 缺陷检测

中图分类号: TH74; TN214

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)01-0018-06

Finite element analysis of pulsed infrared imaging of defects in composites

LIN Long-rong¹, ZHONG Shun-cong^{1,2,*}, FU Xin-bin³, YU Jin³, HUANG Xue-bin³

(1. Laboratory of Optics, Terahertz and Non-destructive Testing, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350002, China; 3. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

Abstract: In order to ensure the detection capability of pulsed infrared thermography (PIT) for composites, finite element method (FEM) was employed to mimic non-destructive testing (NDT) of composites using pulsed infrared thermography. FEM models with different heat flux boundary conditions applied to the upper surface of the sample and with natural convective heat transfer boundary condition applied to the bottom surface, were established. Different temperature distributions on the surface of composites were investigated due to different internal defects. The parameters such as pulse shape, heating time, and defect material, in term of their influence on the temperature distribution and contrast on the surface of defective composites was discussed. The experimental results demonstrate that the temperature difference and contrast of composites surface would increase with the increasing of flaw depth and size whilst larger heat flux density would result in larger temperature difference but no effect on the contrast. FEM can provide the numerical model for PIT based defect detection of composites

Key words: infrared thermography; finite element analysis; non-destructive testing; flaw inspection

0 引 言

红外热成像无损检测作为一种非接触的检测技术,已经广泛应用于航空航天、机械、医疗、石化等领

域。与常规五大无损检测手段相比,它具有快速、检测面积大、无需耦合等特点^[1-2]。目前,红外热成像无损检测分为主动红外热成像和被动红外热成像,已成功应用于金属、合金、塑料、陶瓷以及复合材料的无损检

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005077); 国家卫生和计划生育委员会科研基金(WKJ-FJ-27); 国家质检总局科技计划项目(2011QK216); 教育部高等学校博士学科点科研基金(博导类, 20133514110008); 福建省杰出青年基金滚动资助项目(2014J07007); 福建省质量技术监督局科技项目(FJQI201408, FJQI2013024); 福建省高等学校学科带头人培养计划(闽教人[2013]71号); 福建省自然科学基金项目(2015J01234)。

作者简介: 林隆荣(1991-), 男, 福建泉州人, 主要从事无损检测及相关仪器方面的研究。E-mail: 1448136467@qq.com

通信联系人: 钟舜聪(1976-), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: zhongshuncong@hotmail.com

测中。

陈珏^[3]利用一维物理模型,对红外无损检测技术进行了传热学分析。Vladimir P Vavilov^[4]采用旋转坐标系建立了红外检测的二维和三维模型。任鹏飞等^[5]对含不同缺陷形状大小、深度的碳纤维复合材料进行瞬态温度场有限元数值模拟。李大鹏^[6]对缺陷形状大小和深度缺陷用有限元方法在单面热流加热进行红外热像检测。陶宁等^[7]用脉冲红外热像法对表面下缺陷类型的识别进行了有限元模拟。Carosena Meola 等^[8]探究了红外热成像对不同形状的缺陷的碳纤维和玻璃纤维复合材料的检测能力。王艳武等^[9]从理论上对材料内部热阻性、热容性两类缺陷的平板进行了二维温度场的数值模拟,并根据模拟的温度场,对缺陷进行了模拟再现研究。在复合材料检测上,现有的模拟基本上是采用简化的一维或二维的热传导进行研究,求解热传导的过程由于只考虑了一维方向的传热,导致对小缺陷的模拟误差比较大。本研究利用三维热传导方法,对不同大小的缺陷均可较真实地模拟。

本研究利用有限元数值分析法模拟脉冲加热红外成像无损检测过程,分析几个因素(如脉冲形状、脉冲加热时间、被测材料、缺陷类型等)对含有平底孔缺陷试件表面温差变化和对比度变化的影响,进而找到表面温差和对比度随时间变化的规律,为进一步研究脉冲加热红外无损检测提供参考。

1 脉冲加热红外无损检测原理

脉冲加热红外无损检测是利用高能热流脉冲 $q(t)$ 照射被检测实验试件,脉冲持续时间从几十毫秒到十几秒不等,观察其加热和冷却过程。当热在被检测试件中传导时,若试件中存在缺陷就会导致在缺陷上方和无缺陷上方的试件表面出现温度差异。脉冲加热红外无损检测机理示意图如图 1 所示。

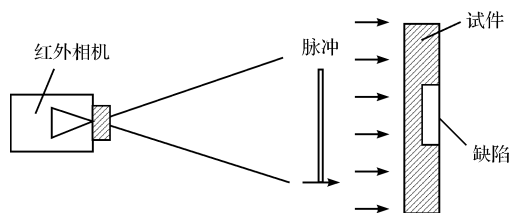


图 1 脉冲加热红外无损检测原理

研究者利用红外相机获取试件表面的温度分布,通过分析不同的表面温度分布可以确定一些具体的缺陷信息。要获取缺陷大小和深度定量信息,需要结合传热学的一些基本理论才能对脉冲红外无损检测进行研究。

2 脉冲加热红外热成像无损检测模型

2.1 物理模型

研究者通过有限元法进行仿真模拟脉冲加热红外无损检测过程,在未进行实验的基础上初步判断实验结果,避免在实际脉冲加热红外热成像采集中的噪声干扰,被检试件的加热不均等复杂因素的影响,更清楚地看到各参数对检测结果的影响。脉冲加热红外无损检测数学模型可对真实的红外无损检测提供理论依据及最佳的检测方式,提高检测效率和精度。

研究者利用一维热传导来求解热传导的过程,由于只考虑了一维方向的传热,对小缺陷的模拟误差比较大。通过采用直角坐标的形式可以更好地对试件缺陷进行三维建模,看到试件表面的温度变化便于温度信号的提取。脉冲加热红外无损检测模型如图 2 所示(为了方便标注尺寸,图 2 仅显示试件的一半体积)。

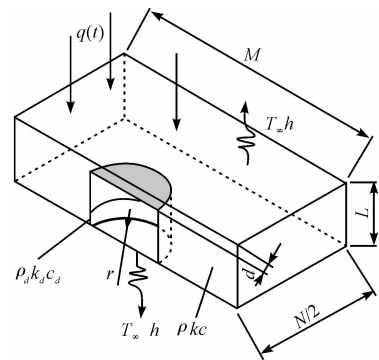


图 2 脉冲加热红外无损检测模型

检测试件的厚度为 L ,长和宽分别为 M 和 N ,缺陷深度为 d 。导热系数为 k ,密度为 ρ ,比热容为 c ,试样与周围空气的换热系数为 h ;内部距加热表面 A 处有一圆柱状缺陷,半径为 r ,导热系数为 k_d ,密度为 ρ_d ,比热容为 c_d ;试件表面的温度变化为 T ,初始温度为环境温度 T_0 , $z=L$ 处的边界受到脉冲热流 $q(t)$ 的作用。脉冲热流为:

$$q(t) = q\delta(t)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

根据热传导基本理论和能量守恒,假设侧面边界 $x=0$ 或 M 、 $y=0$ 或 N 是绝热,对于无缺陷处热传导有:

$$-k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{x=0 \text{ 或 } M} = 0 \quad (3)$$

$$-k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \Big|_{y=0 \text{ 或 } N} = 0 \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_{z=0} = q(t) - h(T - T_0) \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_{z=L} = h(T - T_0) \quad (6)$$

对于缺陷区域除了满足以上无缺陷区域传导的方程外,在两个介质接触面上满足两个边界条件,即边界温度连续条件和边界能量守恒条件有:

$$T_1 = T_d \quad (7)$$

$$-k \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} \Big|_{z=d} = -k_d \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} \quad (8)$$

2.2 脉冲加热红外无损检测有限元模型

本研究根据上述物理模型建立有限元实体模型,模型选用热实体 8 节点单元 solid70 进行分析,模型试样大小为 $160 \times 120 \times 10$ mm,缺陷半径分别设置 4 mm、5 mm、6 mm,缺陷深度分别设置 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm。有限元仿真的时候环境温度设置为 25°C ,分析时长为 60 s。材料与周围环境的对流换热系数为 $h = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。热扩散系数为 $\alpha = k/(\rho \cdot c)$ 。实验材料的热物理参数^[10-14]如表 1 所示。

表 1 模型所用材料的热物理参数

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$k/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$
碳纤维层合板	1 620	760	$k_{xx} = 1.5$ $k_{yy} = 1.5$ $k_{zz} = 0.8$	0.650
玻璃纤维	1 910	1 060	0.527	0.260
不锈钢	7 860	460	14	3.872
铝	2 710	902	230	94.1
空气	1.177	1 005.7	0.020 6	17.43
聚四氟乙烯	1 600	900	0.18	0.125
水	998.2	4 183	59.9	14.3

2.3 信号处理方法

脉冲加热红外无损检测传热过程通常是一个比较复杂的三维瞬态传热问题,一般没有解析解。但是在工程问题中,为了说明某些主要规律或特征,可采用简化的一维传热模型来分析。对无缺陷区,本研究将试件看成半无限大物体,且边界都是绝热条件。根据导热方程和边界条件可求出无缺陷区表面的温度为:

$$T(t) - T(0) = \frac{q}{\rho c \sqrt{\pi \alpha t}} \quad (9)$$

对于有缺陷区域,笔者利用镜像法,将试件看作是有限厚度的无限大平板,且边界 $z = 0$ 和 $z = d$ 处绝热,忽略 2 次及以上反射分量^[15]。得到的有缺陷区表面温度为:

$$T_d(t) - T_d(0) = \frac{q}{\rho c \sqrt{\pi \alpha t}} (1 + e^{-\frac{L^2}{4\alpha t}}) \quad (10)$$

则有缺陷区和完好区的表面温差 $\Delta T(t)$ 为缺陷区节点处温度 $T_d(t)$ 减去完好区节点温度 $T(t)$:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T(t) = \frac{q}{\rho c \sqrt{\pi \alpha t}} e^{-\frac{L^2}{4\alpha t}} \quad (11)$$

对比度 $C(t)$ 为缺陷区节点温与完好区节点温度分别减去该区初始温度后,两者相除的比值与 1 的差:

$$C(t) = \frac{T_d(t) - T_d(0)}{T(t) - T(0)} - 1 \quad (12)$$

当 $T_d(0) = T(0) = 25$ 时,式子可简化为:

$$C(t) = \frac{T_d(t) - T(t)}{T(t) - T(0)} \quad (13)$$

相比温差,对比度是一个无量纲,施加的不同热流量对对比度的结果可以忽略不计。研究者可以通过温差判断结果是否能被热像仪捕捉到,并可以通过对比度判断热像图中缺陷的识别的难易程度。

3 有限元模拟结果与分析

3.1 缺陷深度的影响

被检测试件材料为碳纤维层压板,缺陷类型为空气。固定试件缺陷半径 $r_d = 6$ mm,热流密度为 $q = 6\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,脉冲加热时间为 $t_d = 1$ s,缺陷深度 d 按 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm 变化,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,随着缺陷深度的增加,试件表面温差和对比度的最大值都变小,且变小的幅度越来越小。缺陷深度为 2.5 mm 的最大温差和最大对比度为 0.64°C 和 0.83。说明随着缺陷深度的增加,一定的热量只能传递的深度有限,难以检测到更深的缺陷,且检

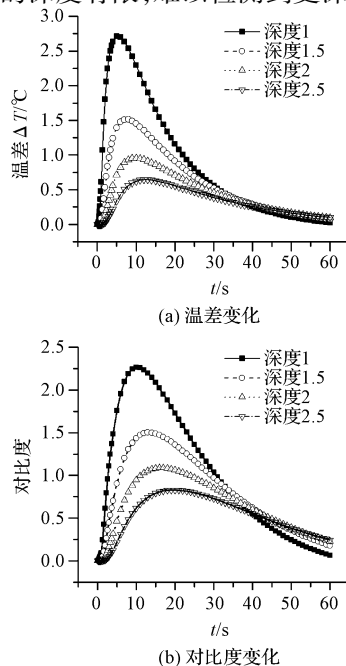


图 3 缺陷深度对温差和对比度的影响随时间变化曲线

测的对比效果越不明显。

3.2 缺陷大小的影响

固定碳纤维层压板缺陷深度 $d = 1 \text{ mm}$, 热流密度为 $q = 6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 脉冲加热时间为 $t_d = 1 \text{ s}$, 缺陷半径 r_d 按 4 mm 、 5 mm 、 6 mm 变化。缺陷大小对温差和对比度的影响随时间曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 随着缺陷半径的增大, 试件表面温差和对比度的最大值都变大, 变大的幅度近似相等。缺陷半径为 6 mm 的最大温差和最大对比度为 $2.71 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 2.26 。说明随着缺陷半径的增大, 缺陷处集聚更多热量(空气属于热阻型缺陷), 缺陷越大使得表面温度更高, 越容易检测到缺陷, 且检测到的对比效果越明显。

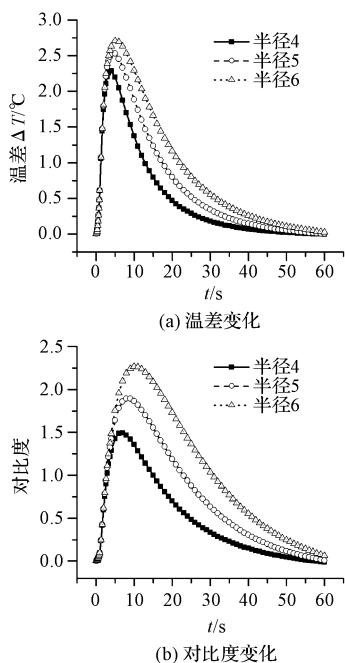


图 4 缺陷大小对温差和对比度的影响随时间变化曲线

3.3 热流密度和脉冲加热形状的影响

固定试件的缺陷深度 $d = 1 \text{ mm}$, 缺陷半径 $r_d = 6 \text{ mm}$, 脉冲加热时间为 $t_d = 1 \text{ s}$, 热流密度按 q 按 $4000000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $5000000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $6000000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $7000000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 变化。不同热流密度对温差的影响随时间的变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出热流密度对温差有影响很大, 对对比度几乎没有影响, 说明对比度的变化是与对热流量变化无关。因为在式(5)中, $T_d(t) - T(t)$ 和 $T(t) - T(0)$ 都和热流密度成正比, 对比度大小不受热流密度的影响。随着热流密度增大, 输入试件表面的热流量增大, 缺陷表面最大温差值逐渐增大且每次增大幅度相等为 $0.44 \text{ }^\circ\text{C}$, 出现时间都在 5 s 。最大对比度为 2.21 , 出现时间都在 11 s 。

在实际中不容易达到矩形脉冲信号, 采用不同形

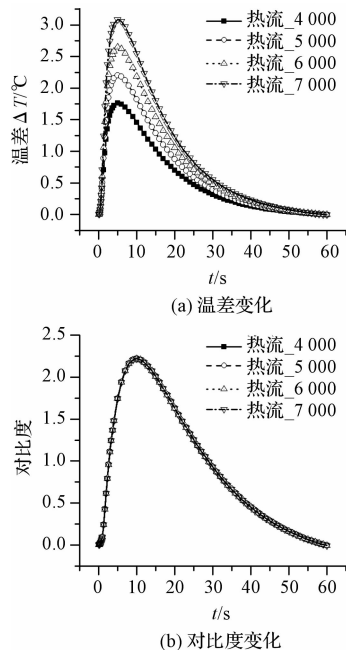


图 5 不同热流密度对温差的影响随时间的变化曲线

式的脉冲加热信号如图 6 所示。

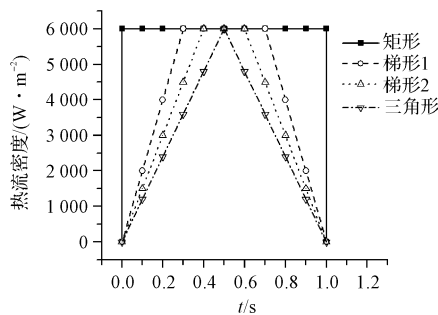


图 6 不同形式的脉冲加热信号

加热后结果如图 7 所示。由图 7(a)可以看出不同形式的脉冲加热信号只影响缺陷表面温差的最大值并不影响出现最大值的时间。缺陷温差最大值由大到小分别为 $2.71 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.90 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.62 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1.36 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

由图 7(b)可以看出不同的脉冲加热信号对对比度也没有影响。虽然脉冲加热信号形式不同, 对加热信号曲线积分后得到是不同的总热流量, 相当于改变了总热量, 对比度对热流量并不敏感, 所以只有温差变化较大, 对比度几乎没什么影响, 这与前面的阐述一致。

3.4 脉冲加热时间

固定热流密度为 $q = 6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 缺陷深度 $d = 1 \text{ mm}$, 半径 $r_d = 6 \text{ mm}$, 脉冲加热时间 t_d 按 0.5 s 、 1 s 、 1.5 s 、 2 s 变化。脉冲加热时间对温差和对比度的影响随时间变化曲线如图 8 所示。由图 8(a)可以看出, 随着脉冲加热时间的增加, 温差最大值逐渐升高, 且最大值的出现时间越晚; 另外, 由图 8(b)可知, 脉冲加热 2

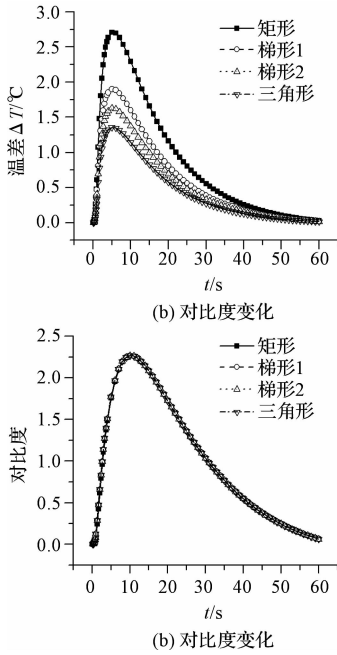


图 7 不同脉冲加热形式对温差和对比度的影响随时间变化曲线

s 时最大温差和最大对比度可以达到 5.41 °C 和 2.25。由图 8 可以看出脉冲加热时间的增加对对比度的影响仅稍微延迟出现最大对比度的时间,没有影响其最大值。脉冲宽度增加,增加了脉冲施加的热量,如果把脉冲宽度 0.5 s、1 s、1.5 s、2 s 都换算成一致的宽度,那么仅是延迟了脉冲的施加时刻,所以不同脉冲宽度的对比度图形都是一致的,仅仅稍微延迟出现时间。

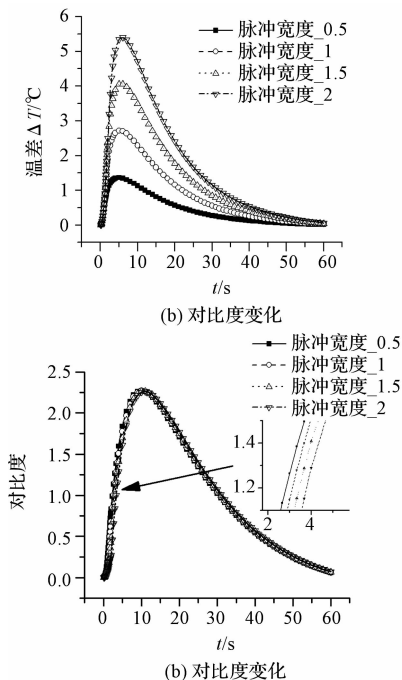


图 8 脉冲加热时间对温差和对比度的影响随时间变化曲线

3.5 被检测材料的影响

固定脉冲加热时间 $t_d = 1$ s,热流密度为 $q = 6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,缺陷深度 $d = 1$ mm,半径 $r_d = 6$ mm,缺陷类型为空气,被检测材料分别为玻璃纤维层合板、碳纤维层合板、不锈钢板、铝板。不同被测材料对温差和对比度的影响随时间变化曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出,随着被测材料导热系数变大,热传导的速度加快,出现最大温差和对比度的时间明显变短,铝板的最大温差最小而且在脉冲结束后就有很大温度落差,且最大对比度出现的时间极短,说明要测量导热系数越大材料上的缺陷需要更高速度的红外热像仪,才能捕捉到需要的信息。

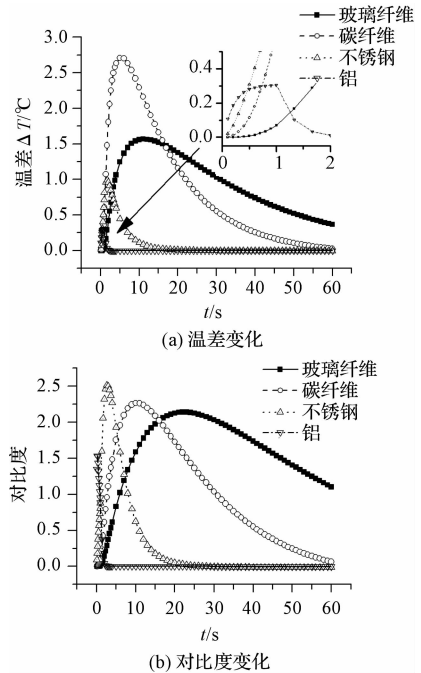


图 9 不同被测材料对温差和对比度的影响随时间变化曲线

3.6 缺陷材质的影响

固定脉冲加热时间 $t_d = 1$ s,热流密度为 $q = 6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,缺陷深度 $d = 1$ mm,半径 $r_d = 6$ mm,被检测试件为碳纤维板,试件上的缺陷材质分别为空气、水、聚四氟乙烯。虽然聚四氟乙烯材料常用于近似代替气孔缺陷,而作为缺陷内置到层压板内。不同缺陷材质对温差和对比度的影响随时间变化曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出,两者所表现出的温差变化还有一定差距。两者出现的最大温差分别 2.71 °C 和 0.80 °C。在航空复合材料结构的构件中会出现积水缺陷,由图 10 可以看出缺陷中含有积水,会在试件表面出现负的温差和负的对比如,分别为 -0.22 °C 和 -0.43 ,出现负温差是因为水做缺陷类型的热导率要比被检测试件本身热导率

大,加速了热量的流动。可以通过正、负温差的初步判断缺陷是属于热容型还是阻热型缺陷,但是温差和对比度都不大,所以对于积水性热容型缺陷试件,更难以检测出缺陷。

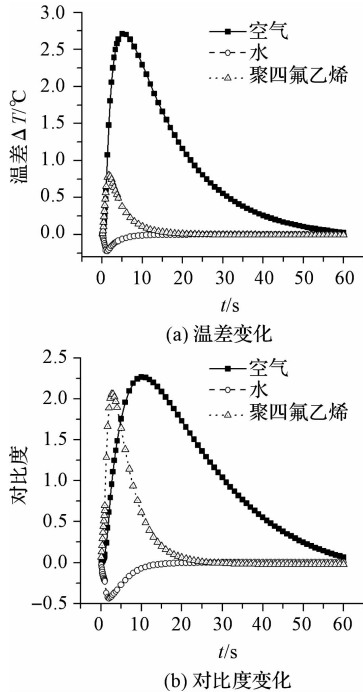


图 10 不同缺陷材质对温差和对比度的影响随时间变化曲线

4 结束语

本研究通过有限元方法模拟了三维脉冲加热红外无损检测过程,分析了几个参数对脉冲加热红外无损检测的影响。

对于相同材质的检测试件,缺陷深度对最大温差和最大对比度的影响最大,缺陷大小次之;热流密度大小和脉冲加热形状仅对温差有影响而对对比度几乎没有影响;脉冲加热时间长短对温差和对比度都有影响,加热时间越长,温差和对比度的最大值出现的时间越晚。

不同的试件材料和不同的缺陷类型对缺陷的表面温差和对比度影响很大,可能会出现负的温差和对比度。研究者可以根据其正负初步判材料断缺陷类型。对于不同的材料和不同类型的缺陷,应选择合适的检

测设备和合适的参数,才能使得温差和对比度都大于设备最小分辨率,达到较佳检测效果。

参考文献 (References):

- [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.
- [2] 段绍辉,丁 庆,夏 晶,等. 基于红外图像识别的电气设备温升检测[J]. 机电工程,2014,31(1):7-11.
- [3] 陈 珏. 红外无损检测技术的传热学分析[J]. 红外与毫米波学报,2000,19(4):285-288.
- [4] VAVILOV V P. Three-dimensional analysis of transient thermal NDT problems by data simulation and processing [C]//AeroSense 2000. International Society for Optics and Photonics, Orlando; [s. n.],2000:152-163.
- [5] 任鹏飞,陈芙蓉,解瑞军,等. 碳纤维复合材料红外无损检测的数值分析[J]. 电子测量技术,2009(4):138-140.
- [6] 李大鹏,杨治东,孙丰瑞. 有限元方法在单面热流加热红外无损检测中的应用[J]. 机电工程,2005,22(2):24-29.
- [7] 陶 宁,曾 智,冯立春,等. 基于脉冲红外热像法的表面下识别的有限元模拟[J]. 中国激光,2013,39(11):142-147.
- [8] MEOLA C, CARLOMAGNO G M, GIORLEO L. Geometrical limitations to detection of defects in composites by means of infrared thermography [J]. **Journal of Nondestructive Evaluation**,2004,23(4):125-132.
- [9] 王艳武,杨 立,孙丰瑞. 材料内部热阻热容型缺陷的红外检测模拟研究[J]. 激光与红外,2006,36(8):657-660.
- [10] 许 鑫. 复合材料脱粘的红外无损检测及数值模拟[J]. 航天制造技术,2014(3):15.
- [11] 史宏伟,王俊平,刘守明,等. 基于红外测温技术的开关柜非接触式监测系统研究[J]. 机电工程技术,2014(1):73-76.
- [12] 邢 莎,吉 林,雍 杨,等. 基于惊讶局部边缘梯度的红外舰船目标检测[J]. 兵工自动化,2014(5):65-68.
- [13] 梅 林,陈自强. 脉冲加热红外热成像无损检测的有限元模拟及分析[J]. 西安交通大学学报,2000,34(1):66-70.
- [14] 邱 旭,钟舜聪,朱志彬,等. 聚乙烯管道缺陷的红外热成像模拟及实验研究[J]. 机电工程,2014,31(12):1513-1517.
- [15] 霍 雁,张存林. 碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外检测[J]. 物理学报,2012,61(14):1-7.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

林隆荣,钟舜聪,伏喜斌,等. 复合材料缺陷的脉冲热成像有限元模拟研究[J]. 机电工程,2016,33(1):18-23.

LIN Long-Rong, ZHONG Shun-Cong, FU Xin-bin, et al. Finite element analysis of pulsed infrared imaging of defects in composites[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(1):18-23.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>