

文章编号: 1672-8785(2017)11-0027-07

脉冲红外热波检测技术的影响因素分析

周 杨 蔡 静*

(北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 利用 ANSYS 有限元仿真与试验研究了脉冲红外热波检测技术的影响因素。以玻璃钢、碳纤维及热障涂层三种材料为例进行了仿真, 重点研究了环境、被测材料自身缺陷等因素对脉冲红外热波检测的影响, 并对玻璃钢和碳纤维两种材料的检测能力进行了判定。对碳纤维和玻璃钢材料进行了试验, 研究了实验条件对检测效果的影响, 并给出了玻璃钢和碳纤维两种材料的最佳实验参数。

关键词: 脉冲红外热波检测技术; 影响因素; 仿真; 玻璃钢; 碳纤维; 热障涂层

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.006

Analysis of Influence Factors of Pulse Infrared Heat Wave Detection Technology

ZHOU Yang, CAI Jing*

(Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The influence factors of pulse infrared heat wave detection technology were studied through ANSYS finite element simulation and experiment. Taking glass fiber reinforced plastics, carbon fiber and thermal barrier coating as examples, simulation was carried out. The influences of environment and material defects on pulse infrared thermal wave detection were studied mainly. The ability of the detection technology for glass fiber reinforced plastics and carbon fiber was determined. Test was carried out for carbon fiber and glass fiber reinforced plastics. The influence of experiment condition on detection was studied. The optimum experimental parameters for glass fiber reinforced plastics and carbon fiber were also given.

Key words: influence factor; pulse infrared thermal imaging detection technology; simulation; glass fiber reinforced plastics; carbon fiber; thermal barrier coating

0 引言

现代化武器装备在制造过程中采用了大量的复合材料以及各种夹层、涂层结构, 其在运输和服役中经常会出现各类损伤, 如脱粘、分层、开裂、脱焊等, 这会极大地影响武器设备的使用寿命。对于复合材料的缺陷, 过去一直采用超声、X 射线、磁粉等传统检测方式, 这些检测

方式存在接触、污染以及低效率等缺陷, 如超声探伤对复合材料的分层脱粘难以准确检测; X 射线检测周期较长; 磁粉检测设备庞大, 不便于在线检测等。

脉冲红外热波检测技术是 20 世纪 90 年代开始发展的一项新型无损检测技术。由于其具有非接触、检测速度快、检测精度高等优势, 现已广泛应用于航空航天、汽车、军工、新型材

收稿日期: 2017-08-13

作者简介: 周杨 (1991-), 女, 吉林白山人, 硕士, 主要研究领域为红外检测、红外光电技术。

E-mail: zhousally1117@163.com * 通讯作者 E-mail: caijing@cimm.com.cn

料研究、石油化工、核工业及电力等领域^[1]。文献 [2-4] 表明, 该技术可对固体火箭发动机的钢筒、风电叶片、航空发动机的涡轮叶片等的缺陷和损伤进行快速有效的检测。与其他无损检测方法一样, 脉冲红外热波检测容易受到各种因素的影响。文献 [3] 分析了缺陷特性因素对该检测方法的影响。本文利用数值仿真手段, 通过研究环境、被检对象以及实验技术等因素对脉冲红外热波检测技术的影响程度, 可对实际检测过程提供参考, 以减少不利因素的影响。另外, 通过深度研究被检对象的特性, 发现了不同的缺陷参数和材料特性对检测结果的影响程度, 为定量分析奠定了基础。

1 脉冲红外热波的检测原理

脉冲红外热波检测技术利用高能闪光灯对试件表面进行瞬时激励, 热波在试件内部进行传导, 由于缺陷的热物性参数与基体材料有所不同, 缺陷会阻挡或者加快热波的传导, 这样就会造成材料表面温度场的差异。用红外热像仪实时记录这一变化, 并用图像序列处理系统进行处理, 可以识别出试件内部的缺陷, 如图 1 所示。脉冲红外热波检测系统由激励系统、红外成像系统和红外图像处理系统三部分组成。脉冲红外热波检测装置如图 2 所示^[4]。其中, 激励系统采用两个最大能量为 9.6 kJ、脉冲为 2 ms 的高能脉冲氙气灯。激励光源由两个规格相同、功率可以调节的电容提供九个等级的能量, 根据实验需要可选择不同级别的能量。红外成像系统选用 FLIR 公司的 SC7300 焦平面阵列式红外热像仪。该热像仪采用制冷型量子阱红外光电探测技术, 工作波段为 1.5~5.1 μm , 可提供分辨率为 320×256 像素的图像, 探测器的灵敏度可达到 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 。该仪器具有高灵敏度和快速响应的优势。检测时, 可根据需要选用不同的镜头, 同时该热像仪的配置软件 Cirrus 可完成自身的非均匀性校正。红外图像处理系统采用配套专用软件 MOSAIQ, 该软件可完成激励能量、激励时间、采集频率、采集时间等实验条件控制及数据处理和分析功能。

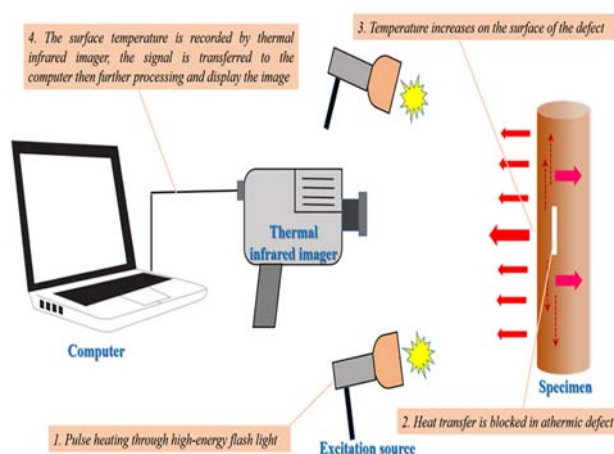


图 1 脉冲红外热波检测技术原理图



图 2 脉冲红外热波检测系统

2 环境影响因素分析

对流换热系数 h 的大小可反映对流传热的快慢, 其单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。材料表面与周围环境的对流换热将加剧材料内部的热平衡, 影响表面的温度变化。因此, 需研究对流换热对材料表面温差的影响程度。脉冲红外热波检测是在 1 个标准大气压、自然空气对流的情况下进行的, 因此选取 $h=2\sim 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 从而进行有限元仿真, 计算不同对流条件下缺陷处对应的表面温差。提取 ANSYS 的计算结果, 再经 MATLAB 二次处理, 得出在不同 h 情况下温差的变化情况, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 对流换热系数越大, 材料表面的温差越小, 从而最佳检测灵敏度降低, 最佳检

测时间减小, 不利于发现缺陷。同时, 在自然对流的情况下, 对流换热系数对检测结果的影响非常小, h 从 $2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 变化到 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时, 最大表面温差仅减少了 $0.01279\text{ }^\circ\text{C}$, 小于最大温差的 14.6% 。

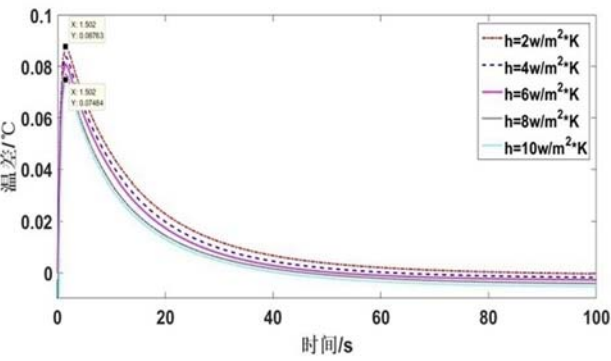


图 3 对流换热系数对检测表面温度差的影响

3 检测对象影响因素分析

为了研究不同缺陷性参数对脉冲红外热波检测效果的影响, 模拟了不同基体的缺陷类型。缺陷参数及分析项目见表 1。

以热障涂层为例进行仿真, 探究缺陷厚度对检测结果的影响。图 4 给出了不同缺陷厚度的最佳温度场云图。由图 4 可知, 在相同检测条件、相同缺陷直径和相同缺陷深度下, 随着缺陷厚度的增加, 其对应的表面温差也相应增加, 同时最佳检测时间也逐渐增加, 检测灵敏度增大。图 5 为表面温差随时间的变化曲线, 厚度从 0.5 mm 增加到 2 mm , 厚度增加了 4 倍, 但其对应的表面温差仅增加了 $0.0485\text{ }^\circ\text{C}$, 增加量较小。

表 1 仿真参数及分析目的

基体类型	缺陷参数	分析项目
热障涂层	$\alpha=2.25\times10^{-7}$ (空气), $l=0.2, r=6, d=0.5、1、1.5、2$	缺陷厚度
碳纤维板	$\alpha=2.25\times10^{-7}$ (空气), $l=2, r=2、2.5、3、4、6$	缺陷尺寸
玻璃钢板	$\alpha=2.25\times10^{-7}$ (空气), $r=6, l=0.3、0.5、1.0、1.5、2.5、3.0、3.7$	缺陷深度
碳纤维板	$r=6, l=0.5, \alpha=2.25\times10^{-7}$ (空气), 0.91×10^{-7} (油), 1.46×10^{-4} (水), 1.07×10^{-7} (聚四氟乙烯),	缺陷类型

注: l —缺陷深度 (mm); r —缺陷半径 (mm); d —缺陷厚度 (mm); α —材料热扩散系数 (m^2/s)

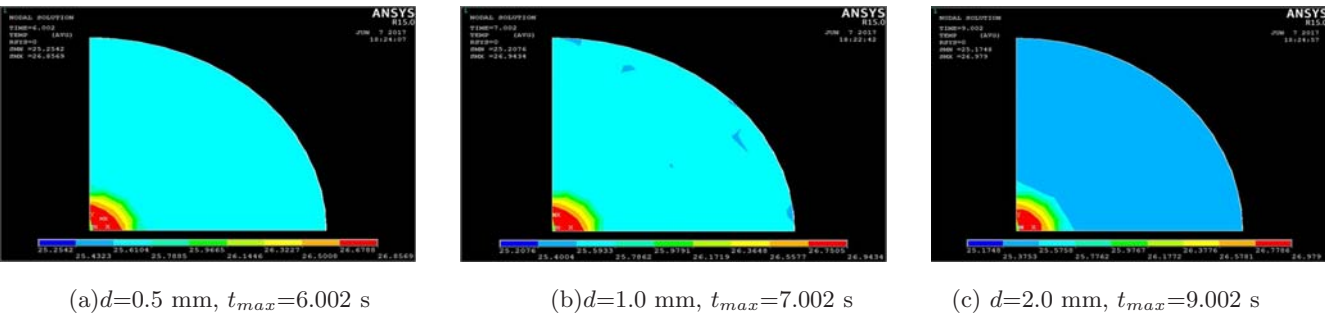


图 4 不同缺陷厚度 TBC 温度场云图

自碳纤维蒙皮结构受到高速飞机的青睐以来, 对碳纤维材料的缺陷检测也越来越严格。在生产飞机碳纤维蒙皮的过程中经常会发生脱粘等缺陷, 脱粘缺陷的深度是固定的。图 6 为仿真数据经 MATLAB 二次处理后不同缺陷尺寸对应的表面温度差。由图 6 可知, 缺陷的尺寸越大, 最大表面温差、最佳检测时间以及检测灵敏度逐渐增加。因此, 缺陷尺寸越大, 越容易被检测

出来。缺陷能否被识别, 主要取决于缺陷温差的最大值, 只要其最大值超过红外热像仪的温度分辨率, 该缺陷就会被检测出来。本实验所用热像仪的温度分辨率为 $0.02\text{ }^\circ\text{C}$, 理论上只要仿真结果中的最大温差大于 $0.02\text{ }^\circ\text{C}$, 在实际检测中就能被检测出来。但实际检测中会有横向扩散和外界等干扰。依据经验值, 仿真数据的最大温差需在 $0.06\text{ }^\circ\text{C}$ 以上才可被检测出来。由图 6 可

知,碳纤维材料在缺陷深度保持在 2 mm 的情况下,利用上述条件,气孔缺陷在 0.2 s 左右出现了温差小于 0 的情况。这可能是由于在加热前夕热量刚传导到此,该处缺陷过小,因此阻碍热量传导的能力小,造成该处的温度低于表面直接接触热激励的参考点温度。在降温阶段,该处的温度渐渐大于参考点的温度,但是最大温差只有 0.02857 °C,因此半径小于 2 mm 时无法被检测到。缺陷半径为 2.5 mm 时,最大温差为 0.08819 °C。在实际检测中,此缺陷可能刚被热像仪识别。因此,对于碳纤维材料,在缺陷深度为 2 mm 的情况下,缺陷半径大于 2.5 mm 时或径深比大于 2.5 时,利用该法才可能被识别到。

玻璃钢具有质轻、高强、防腐、保温、绝缘、隔音等优点,因此玻璃钢材料被广泛用于航空航天工业。但玻璃钢易出现分层等缺陷,为了研究脉冲热波检测对玻璃钢材料的检测能力,在保持其检测参数、缺陷大小、缺陷类型及缺陷厚度不变的情况下,分别计算出了不同缺陷深度对应的表面温差的变化情况,如图 7 所示。由图 7 可知,随着缺陷深度的增加,最佳检测时间增大,表面温差减少,最佳检测灵敏度也随之减小。当缺陷深度为 2.5 mm 时,最大表面温差仅为 0.05863 °C,此时已经很难被热像仪分辨。因此,在实际检测中,对于玻璃钢材料,只有径深比大于 2.4 时才可能被该法检测到。另外,当缺陷深度从 0.3 mm 增加到 0.5 mm 时,表面最大温差却从 0.8555 °C 下降到 0.5591 °C,下降了 0.2964 °C。下降幅度较大,可见缺陷深度是影响热波检测灵敏度的关键因素。

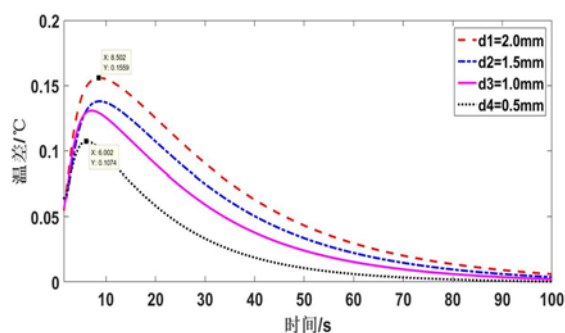


图 5 缺陷厚度对检测表面温差的影响

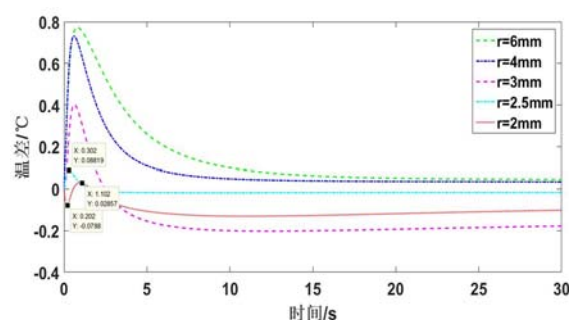


图 6 缺陷类型对检测表面温差的影响

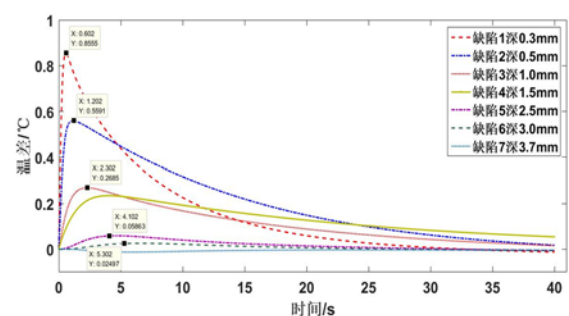


图 7 缺陷深度对检测表面温差的影响

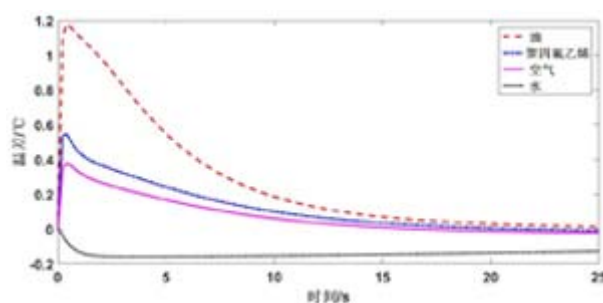


图 8 缺陷类型对检测表面温差的影响

热扩散系数 α 代表了材料的热扩散能力, $\alpha = \lambda / \rho c$ (单位: m^2/s)。不同的 α 可表征不同的缺陷。因此,以碳纤维板为基体,在其内部设计了 4 种不同类型的缺陷,分别为空气、油、水、聚四氟乙烯,除水以外其他 3 种缺陷的 α 均小于碳纤维板。4 种缺陷的检测参数、缺陷大小及深度均一致。图 8 给出了材料内部含有不同类型缺陷所对应的表面温差随时间的变化关系。由图可知,当缺陷的 α' 大于基体材料的 α 时 (导热性缺陷),缺陷处的热量传导得更快,使得缺陷处的热量低于周围的热量,反映到热图中时该处就会成为暗斑。反之,当缺陷的 α' 小于基体材料的 α 时 (隔热性缺陷),缺陷会阻碍热量的

传导,使得该处的热量高于周围的热量,反映到热图中时该处就会成为亮斑。由图 9 可以清楚地看出,缺陷与基体二者热扩散系数的相对关系对材料表面温度场分布的影响。

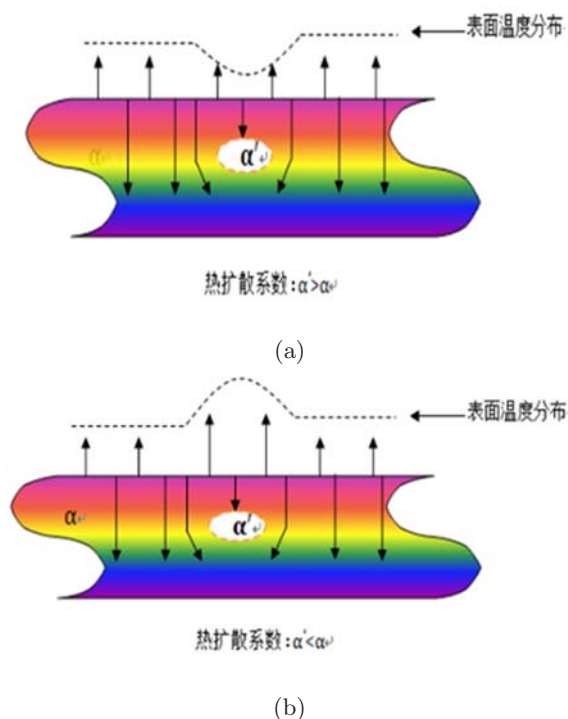


图 9 热扩散系数对缺陷材料表面的温度影响

4 实验技术影响因素分析

依据上述仿真结果,本文选取了碳纤维与玻璃钢两种材料进行试验,二者的实物图及结构示意图分别如图 10 与图 11 所示。表 2 给出了含缺陷的碳纤维板的加工参数。由于玻璃钢属半透明材料,其发射率偏低,因此在其表面涂有水溶性黑漆,以增大其表面发射率。

图 12 给出了玻璃钢试件在脉冲强度为 9.6 kJ、采样频率为 60 Hz、采样时刻不同条件下的

热图序列。由图 13 可知, $t=0.01$ s 时只能检测出最浅 ($l=0.3$ mm) 的一组缺陷;当 $t=0.06$ s 时可检测出第二组缺陷 ($l=0.5$ mm)。随着时间的推移,检测深度逐渐增加。当 $t=1.15$ s 时, 5 组缺陷全部被检测出来。随着时间的逐渐增加,热波开始横向传导,缺陷处的边缘开始模糊,缺陷的对比度逐渐下降。当 $t=15.10$ s 时,热传导完毕,所有缺陷都在热图上消失,热图恢复到未加热前的情况。



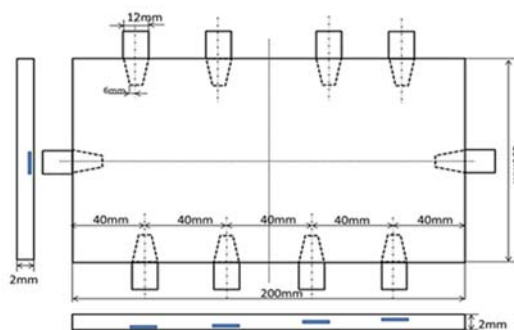
(a) 碳纤维板正面

(b) 碳纤维板反面

图 10



(a) 玻璃钢试验板 (涂漆面)



(b) 玻璃钢试验板结构示意图

图 11

表 2 碳纤维板的加工参数

	1	2	3
1	$r=2.50$ mm, $l=1.90$ mm	$r=2.50$ mm, $l=1.85$ mm	$r=2.50$ mm, $l=1.75$ mm
2	$r=5.00$ mm, $l=3.00$ mm	$r=5.00$ mm, $l=2.90$ mm	$r=5.00$ mm, $l=2.85$ mm

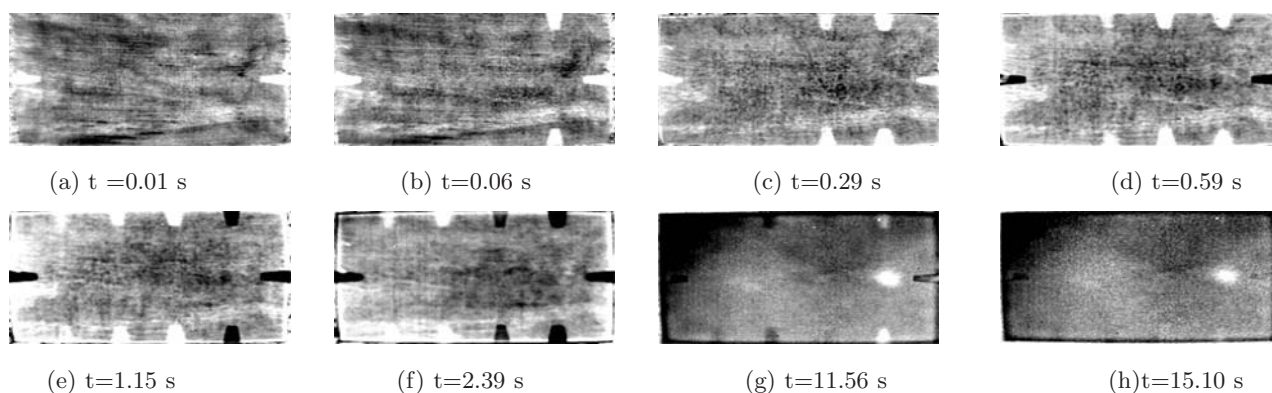


图 12 采样时刻对检测效果的影响 (玻璃钢试件)

图 13 和图 14 分别给出了玻璃钢试件的最深缺陷中心点 ($l=2.0$ mm) 与参考点的对比度随采样时间的变化关系和碳纤维试件径深比最小的缺陷中心点 ($r=2.5$ mm, $l=1.15$ mm) 与参考点的对比度随采样时间的变化关系。

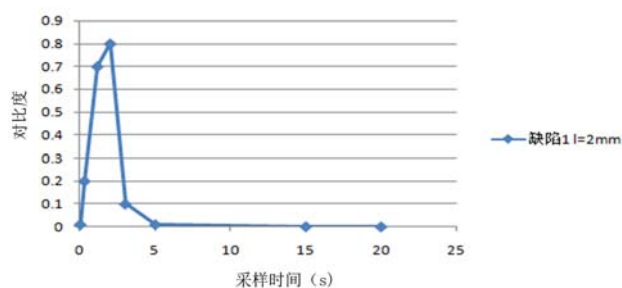


图 13 对比度与采样时间的关系 (玻璃钢试件)

由以上分析可知,两种材料都经历了模糊—清晰—模糊的过程。所以,在采集热图时,其采样时间不应小于表面温差最大值的峰值时间。

图 15 给出了激励能量为 9.6 kJ、采样时间为 10 s、采样频率分别为 5~65 Hz 时碳纤维板的

最大对比热图。由图可知,当检测频率过小 ($f=5$ Hz) 时,只能检测到缺陷较浅的第二行缺陷,这说明当采集频率小于等于 5 Hz 时会导致缺陷漏检。当 $f=15$ Hz 时,可以完全检测出 6 个缺陷,但是缺陷处的对比度较低。当 $f=39$ Hz 和 $f=65$ Hz 时,所有缺陷都被明显检测出来。

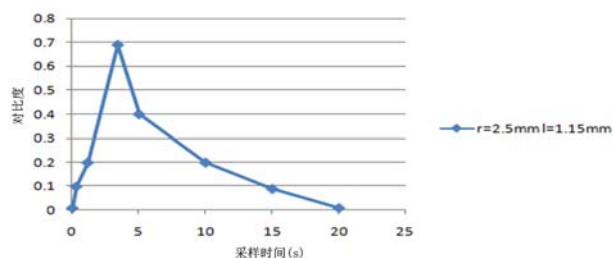


图 14 对比度与采样时间的关系 (碳纤维试件)

为了更准确地说明采集频率对检测效果的影响,图 16 和图 17 分别给出了碳纤维板试件径深比最小 / 最大缺陷的中心点与参考点的对比度随采样频率的变化关系和玻璃钢试件最深 / 最浅缺陷中心点与参考点的对比度随采样时间的变化关系。

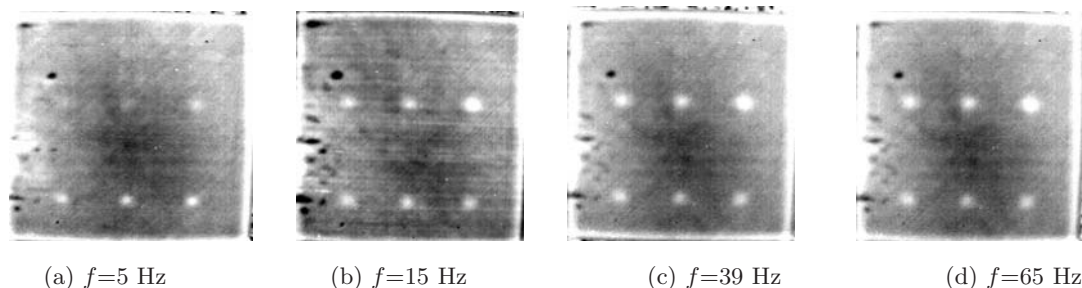


图 15 采样频率对检测效果的影响 (碳纤维试件)

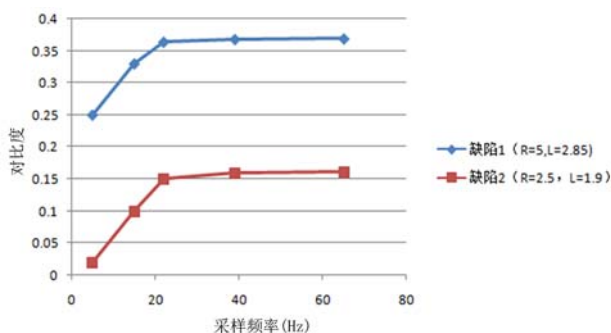


图 16 对比度与采样频率的关系 (碳纤维试件)

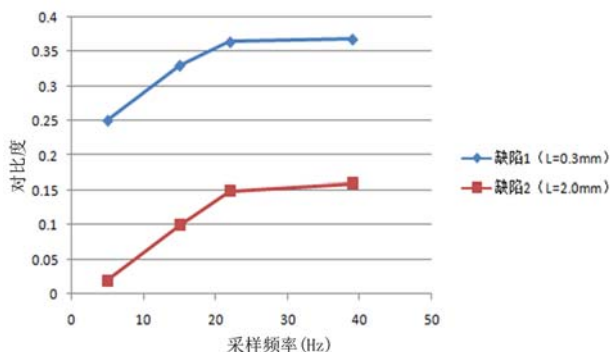


图 17 对比度与采样频率的关系 (玻璃钢试件)

由以上分析可知, 采样频率的增大会增加最佳对比热图的出现概率。但是当采集频率增大到一定值时, 缺陷处的最大对比度几乎不发生变化。

5 总结

仿真结果表明, 本文的检测方法对环境的要求不高, 在一般环境中即可进行。缺陷的深度越浅, 尺寸越大, 厚度越厚, 热扩散系数越小,

其最大表面温差就越大, 最佳检测时间就越小, 就越容易被检测出, 检测灵敏度就越高。缺陷的深度、尺寸、厚度这三个参数中, 缺陷深度是影响检测灵敏度的最主要因素。不同的缺陷类型会在热图中呈现不同的效果, 如隔热性缺陷在热图中以热斑的形式成像, 导热性缺陷在热图中以暗斑的形式出现。对于碳纤维材料与玻璃钢材料, 径深比需分别大于 2.5 与 2.4 时才能利用脉冲红外热波法检测到缺陷。

试验结果表明, 增大采样频率有利于获得更高对比度的图像和更准确的实现判定。但频率增加到一定数值后, 缺陷处的对比度不再发生实质性变化, 频率过大反而会造成计算机内存的负担。对于碳纤维材料的实验参数, 取采样时间 $t=10\text{ s}$ 左右、采样频率 $f=30\text{ Hz}$ 左右即可。对于玻璃钢材料的实验参数, 取采样时间 $t=5\text{ s}$ 左右、采样频率 $f=40\text{ Hz}$ 左右即可。

参考文献

- [1] 梅林, 吴立德, 王裕文, 等. 脉冲加热红外无损检测中的图像处理 [J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(5): 54-58.
- [2] 郭伟, 董丽虹, 王慧鹏, 等. 基于红外热像技术的涡轮叶片损伤评价研究进展 [J]. 航空学报, 2016, 37(2): 429-434.
- [3] 杨正伟, 张伟, 田干, 等. 复合材料热波检测影响因素的数值仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(13): 3918-3921.
- [4] 霍雁. 涂层涂敷质量的红外热波检测 [D]. 北京: 首都师范大学, 2008.

新闻动态 News

雷声公司为海军 MQ-4C Triton 海上监视无人机提供多光谱传感器系统

据 www.militaryaerospace.com 网站报道, 德克萨斯州海军水面作战中心 Crane 分部的负责人 11 月 2 日宣布, 与麦金尼的雷神公司空间和机载系统部门签署了一份价值 720 万美元的合同, 购买三个 AN/DAS-3 多光谱瞄准系统 (Multispectral Targeting System, MTS) 传感器, 以用于小批量试生产的 Triton 海上监视无人机。

雷声公司的负责人说, AN/DAS-4 是雷神 MTS 系列光电传感器的最新版本, 它具有更高的射击控制和目标定位精度, 可用于精确瞄准。

雷神 MST 在白天和夜间都能为有人和无人飞机提供情报、监视、侦察、探测、识别和瞄准能力。

MTS 传感器提供可见和红外光谱详细的情报数据。雷声公司的负责人说, 新的 AN/DAS-4 版 MTS 能使任务指挥官用机载传感器的高分辨率数据更准确地识别和瞄准目标。

□ 张小华