

环境因素对闪光灯激励红外热成像外场检测的影响

刘颖韬^{1,2,3,4}, 许路路⁵, 何方成^{1,2,3,4}, 李硕宁^{1,2,3,4}, 杨党纲^{1,2,3,4}

- (1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;
2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095;
3. 中国航空发动机集团 材料检测与评价重点实验室, 北京 100095;
4. 材料检测与评价航空科技重点实验室, 北京 100095;
5. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了研究外场环境下实施红外热成像检测时, 环境温度、日照、风速等外场环境因素对检测的影响机理及规律, 文中以闪光灯激励红外热像法检测玻璃纤维增强塑料层压板分层缺陷为例, 通过轴对称分层缺陷的物理建模、有限元仿真计算和基于试块的实验研究, 得到了温差、温差最大值、温度对比度和温度对比度最大值等可检信息参数随各个环境因素变化的规律。文中对比了 25 °C 和 30 °C 环境温度下的仿真结果和实验结果, 对比了日照不均和均匀温度下的仿真结果和实验结果, 对比了对流换热系数为 10 W/(m²·K) 与 100 W/(m²·K) 的仿真结果和正常散热与强制散热的实验结果。基于以上仿真结果和实验结果, 得出了如下结论: 随着环境温度的升高, 温度对比度最大值下降, 缺陷清晰度下降, 不利于缺陷的检出; 日照不均使得温差最大值和温度对比度最大值或者增大或者减小, 会造成误判或缺陷漏检; 随着风速的增大, 温差最大值和温度对比度最大值变小, 缺陷的可检性变差, 缺陷的清晰程度下降, 不利于缺陷检测。

关键词: 红外热像无损检测; 外场检测; 在役检测; 红外热波; 无损检测

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210711

Effects of environmental factors on infrared flash thermography nondestructive testing in outfield detection

Liu Yingtao^{1,2,3,4}, Xu Lulu⁵, He Fangcheng^{1,2,3,4}, Li Shuoning^{1,2,3,4}, Yang Danggang^{1,2,3,4}

- (1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;
3. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;
4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;
5. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To reveal mechanism of influence of environmental factors such as ambient temperature, sunshine and wind velocity on infrared thermographic nondestructive testing, modeling of a delamination in a glass fiber reinforced plastic specimen in infrared flash thermography testing was made and studied. The model was an axial symmetry model. Thermal signals to be detected in infrared thermographic nondestructive testing, such as temperature difference, the maximum temperature difference, temperature contrast and the maximum temperature

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2021-10-26

基金项目: 国家自然科学基金 (U1433122, 61571028); 国防基础科研计划 (JSZL2019205C003)

作者简介: 刘颖韬, 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为红外无损检测技术和设备研发。

contrast, were calculated and analyzed using finite element method in that model. Several experiments with special process treatment on that specimen were carried out. Evolution of the thermal signals with changes of those environmental factors was researched. Comparison of results from modeling and experiment in ambient temperature 25 °C and 30 °C was made. Results from modeling and experiments in uneven sunshine and in homogeneous temperature were compared too. Results in deferent wind speed were presented at the end of this paper. Convective heat transfer coefficients in the model were 10 W/(m²·K) and 100 W/(m²·K). The simulation results and the experiment results show that the maximum temperature contrast declines with increase of ambient temperature. Decline of the maximum temperature contrast means that clarity of defect gets worse, and detection of defect becomes more difficult. The maximum temperature difference and the maximum temperature contrast increase or decrease due to uneven sunshine on the specimen. Those changes lead to misjudgment or missing detection. Increase of wind velocity may reduce the maximum temperature difference and the maximum temperature contrast, and result in worse detectability and clarity of defect.

Key words: infrared thermographic nondestructive testing; outfield detection; testing in service; infrared thermal wave; nondestructive testing

0 引言

无损检测是保障飞机飞行安全的重要手段之一。在飞机的在役检测和维修检测中,目视、敲击、超声、渗透、磁粉、涡流、X射线等多种无损检测方法根据实际需要都有着大量的应用^[1-6]。譬如,利用渗透及磁粉检测技术可以有效检查出飞机结构表面缺陷及损伤,如疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹等^[3]。可以采用涡流检测法对飞机结构外R区进行在役原位检测^[4]。对于航空发动机涡轮叶片,可以采用内窥镜荧光渗透方法对其内腔裂纹进行原位检测^[5]。对于机翼油箱整体壁板,可以采用超声相控阵技术进行快速化原位检测^[6]等。

近些年来,由于红外热成像检测方法具有非接触、可视化、检测效率高等特点,并得益于方法本身的日渐成熟和设备的不断迭代升级,该技术逐渐成为新的在役检测和维修检测方法。

波音、空客等公司都将红外热成像检测技术列为蜂窝积水的重要检测手段。尤其是空客公司在飞机方向舵、升降舵的积水检测中大量采用红外热成像检测技术。电吹风加热和电热毯加热是常见的蜂窝积水检测加热手段^[1]。此外,在飞机冲击损伤、复合材料层压板结构件分层、夹层结构件脱粘、涂层脱粘等缺陷的检测中,红外热成像检测方法也给出了良好的检测结果^[7-10],其中以闪光灯加热为激励手段的红外热成像检测是发展较为成熟的一种红外检测方法。

在役检测中,避免不了需要在外场环境下实施原

位检测的情况,而外场环境的复杂性对红外热成像检测存在一定影响,尤其是外场强热辐射源会明显干扰对检测结果的分析。此外,环境温度、日照不均、环境风速等都可能对检测结果产生不利影响,但是目前针对这些环境因素如何影响红外热成像检测的研究还未见报道。文中以闪光灯激励红外热像法为例,通过建模仿真分析和基于试块的实验研究探究外场检测环境对红外热成像检测方法的影响机理及规律。

1 仿真模型的建立与特征量的定义

用于仿真计算的缺陷模型如下:

含分层缺陷的三维模型如图1所示时,因为具有轴对称性,当采用具有轴对称特性的ANSYS单元进行解算时,该模型可以等同为如图2所示的二维模型。为了便于计算,文中接下来采用二维模型进行仿真研究。模型中画有网格的区域为分层缺陷,为空

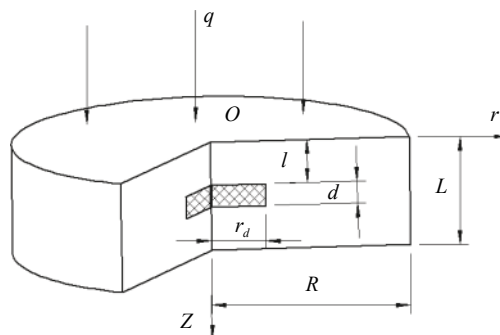


图 1 三维柱状模型图

Fig.1 3D cylindrical model

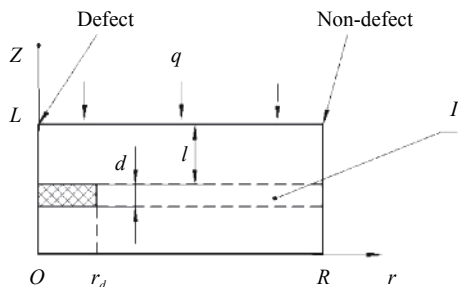


图 2 三维柱状模型简化后的二维模型

Fig.2 2D model simplified from 3D cylindrical model

气, 本底材料为玻璃纤维增强塑料 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)。这里 L 为试件厚度, l 为缺陷埋深, d 为缺陷厚度, R 为圆柱形试件半径, r_d 为缺陷半径, q 为加热热流密度。

对于脱粘缺陷的情况, 需要将缺陷区域右侧的 I 区换成胶层, 缺陷和 I 区的上方换为 GFRP 蒙皮或涂层, 缺陷和 I 区的下方换为芯材或基体, 来模拟夹层结构或涂层的脱粘缺陷。文中以上述模型为基础着重研究分层缺陷的仿真。仿真对比分析的主要参数见表 1。25 °C 空气的热物理性质参数由其 20 °C 和 30 °C 的数值插值得到。

研究中涉及两种材料: GFRP 和空气, 它们的热物理性质参数见表 2。

表 1 主要模型参数

Tab.1 Main parameter in the model

Specimen thickness L/m	Defect thickness d/m	Defect depth l/m	Specimen radius R/m	Defect radius r_d/m	Heating pulse duration t/s	Heating flux density $q/W \cdot m^{-2}$
0.0025	0.00005	0.0005	0.020	0.0075	0.002	0.84×10^7

表 2 材料热物理性质参数

Tab.2 Thermal properties of materials

Material	Density $\rho/kg \cdot m^{-3}$	Specific heat $c_p/kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Thermal conductivity $\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
GFRP ^[11]	1900	1.2	0.3
Air(20°C) ^[12]	1.205	1.005	0.0259
Air(30°C) ^[12]	1.165	1.005	0.0267

在进行仿真计算之前, 需要定义如下可检信息参数, 同一时刻缺陷和无缺陷的温差 $\Delta T(t)$ 可表示为:

$$\Delta T(t) = \theta_d(t) - \theta_{nd}(t) \quad (1)$$

同一时刻温度对比度 $C(t)$ 可表示为:

$$C(t) = \frac{\Delta T(t)}{\theta_{nd}(t)} \quad (2)$$

式中: $\theta_d(t)$ 为有缺陷区的表面温升; $\theta_{nd}(t)$ 为无缺陷区的表面温升。选取缺陷中心点作为缺陷区的参考点, 模型边缘处的点作为无缺陷区的参考点, 见图 2。温差 $\Delta T(t)$ 反映的是缺陷可检性, 如果 $\Delta T(t)$ 小于、等于环境噪声, 则缺陷很难被检测到。温度对比度 $C(t)$ 反映的是温差 $\Delta T(t)$ 相对于无缺陷信号的大小, 在图像上反映的是缺陷的清晰程度。

2 实验验证采用的试块

试块为 GFRP 层压板, 长×宽为 200 mm×150 mm, 总厚度 2.5 mm, 不锈钢插片厚度为 0.05 mm, 试块制

作完成后, 将其拔出。中间一行分层缺陷埋深 0.3 mm, 左数第一列分层缺陷埋深 0.5 mm, 左数第二列分层缺陷埋深 1.0 mm, 左数第三列分层缺陷埋深 1.5 mm, 最后一列分层缺陷埋深 2.0 mm。缺陷布置图见图 3。

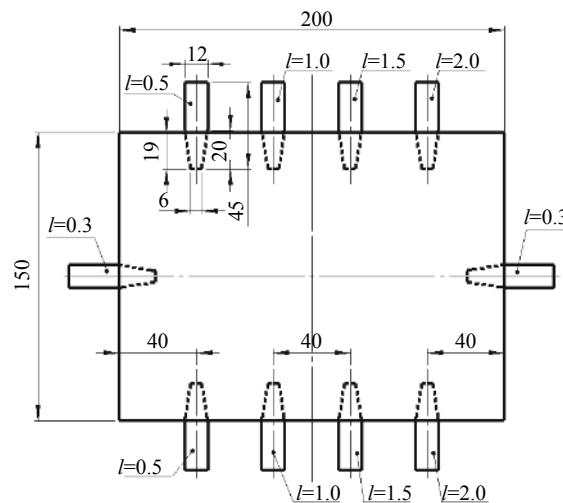


图 3 试块分层缺陷布置图

Fig.3 Arrangement of defects in the specimen

3 环境温度的影响

3.1 建模分析

为了考察环境温度对闪光灯激励红外热成像检

测的影响,设环境温度分别为 25 °C 和 30 °C。由于只考虑环境温度的影响,在环境温度稳定的情况下,由于热平衡,可以推算出被检测试块的初始温度也分别为 25 °C 和 30 °C。加热阶段除加热面外其他边界均为绝热边界条件,冷却阶段原加热面为对流换热边界条件,对流换热系数设为 10 W/(m²·K),其他边界仍然为绝热边界条件。

利用 ANSYS 软件进行建模仿真计算,得到环境温度分别为 25 °C 和 30 °C 的缺陷区和无缺陷区温差 $\Delta T(t)$ 曲线,见下图 4,对应的温度对比度 $C(t)$ 曲线见图 5。仿真过程的总时间为 10 s,加热过程为 0.002 s。

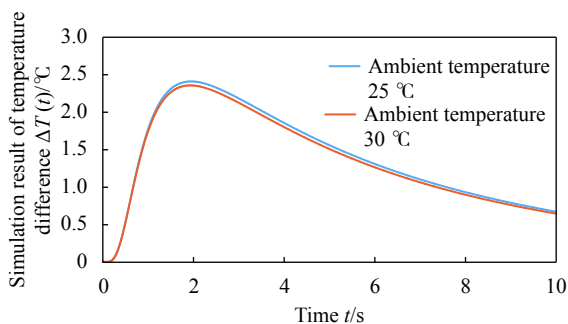


图 4 不同检测环境温度下温差 $\Delta T(t)$ 的仿真结果

Fig.4 Simulation result of temperature difference $\Delta T(t)$ in different testing ambient temperature

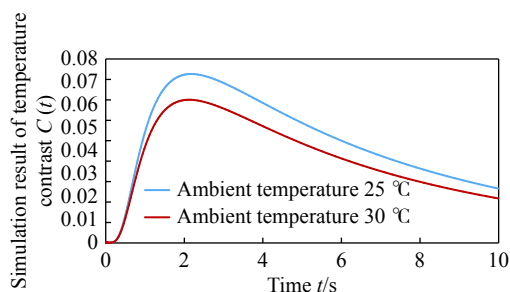


图 5 不同检测环境温度下温度对比度 $C(t)$ 的仿真结果

Fig.5 Simulation result of temperature contrast $C(t)$ in different testing ambient temperature

可见,虽然环境温度相差 5 °C,但是两种环境温度下的 $\Delta T(t)$ 曲线几乎一致, $\Delta T(t)$ 的最大值 ΔT_m 也是非常接近的,只是高环境温度下的 ΔT_m 及 $\Delta T(t)$ 曲线后半段略低。然而,温度对比度 $C(t)$ 曲线却差异明显,随着环境温度的升高,温度对比度 $C(t)$ 的最大值 C_m 明显减小。这对检测有一定负面影响,缺陷清晰度下降。

3.2 实验验证

分别在环境温度为 25 °C 和 30 °C 的条件下,对试块进行了检测。由于 GFRP 层压板具有半透明性^[13-14],所以检测表面事先喷涂了水溶性黑漆(以下实验同样处理)。检测参数为:加热能量 9.6 kJ,采集频率 95 Hz,采集时间 20 s。为了与仿真结果进行对比,对实验结果中前 0.15~10 s 的数据进行了截取,并按照公式 (1) 和公式 (2) 进行计算。0.15 s 之前的数据存在闪光时的饱和影响和闪光灯热辐射的明显干扰,所以将其舍去。图 6 为在检测结果中的取点位置,图 7 为试块的缺陷和无缺陷温差 $\Delta T(t)$ 曲线,图 8 为试块温度对比度 $C(t)$ 曲线。

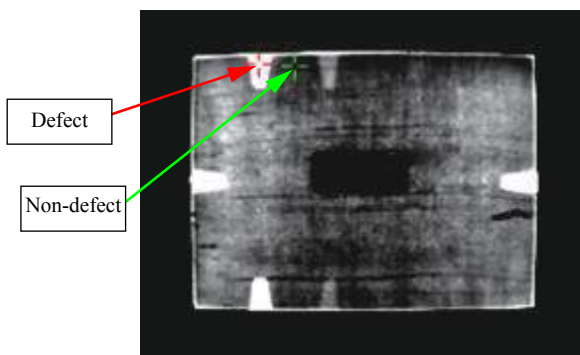


图 6 红外热成像检测结果中缺陷与无缺陷的取点位置

Fig.6 Positions of defect point and reference non-defect point in thermal image

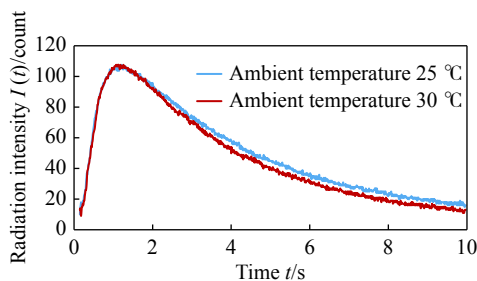


图 7 不同检测环境温度下温差 $\Delta T(t)$ 的实验结果

Fig.7 Experiment result of temperature difference $\Delta T(t)$ in different testing ambient temperature

由于实验中实测得到的数据是直接来自红外热像仪读取的裸数据,无明确单位,它代表了辐射强度的强弱,与温度之间的换算需要进行黑体标定,又加之文中主要研究变化趋势和规律,具体温度是多少并无影响,所以下列实验结果均直接以从红外热像仪读取的辐射强度来表示。

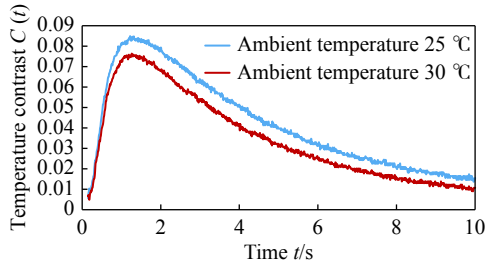


图 8 不同检测环境温度下温度对比度 $C(t)$ 的实验结果

Fig.8 Experiment result of temperature contrast $C(t)$ in different testing ambient temperature

从基于试块实验结果得到的两种不同检测环境温度下温差 $\Delta T(t)$ 曲线和温度对比度 $C(t)$ 曲线可以看出:随着检测环境温度的升高,曲线的后半段都有下降的趋势,与仿真结果相一致。而温差 $\Delta T(t)$ 曲线随着检测环境温度的升高,后半段在检测实验结果中出现了更为明显的下降。温度对比度 $C(t)$ 的最大值 C_m 随着检测环境温度的升高,明显减小,与仿真结果一致。

4 日照的影响

日照均匀的情况下,日照造成检测前被检测部位的初始温度相同,同前面的环境温度影响相近似。文中主要研究日照造成被检测部位初始温度不均匀的影响。

4.1 建模仿真

为了模拟由于日照造成的检测部位初始温度不均匀,首先取地面接受到的太阳辐射热流密度为 $q = 150 \text{ W/m}^2$ ^[15],在模型上表面左半部分施加该热流,加热时长为 60 s,见图 9 模型中左上红线部分。然后,再于模型的上表面全部施加热流 $q = 0.84 \times 10^7 \text{ W/m}^2$,加热时长为 0.002 s,即闪光灯激励加热,此后开始正常检测过程,这一过程总时长为 10 s。模型上表面左半部分施加的热流情况参见公式 (3),右半部分施加的热流情况参见公式 (4)。对应的环境温度为 25 °C。均匀温度条件下进行的常规检测中,对应的环境温度和试块温度同为 25 °C。两种模型下加热面在冷却阶段的对流换热系数均为 $10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$,其他边界在加热阶段和冷却阶段均为绝热边界条件。两种模型中温度差 $\Delta T(t)$ 和温度对比度 $C(t)$ 的对比分别见图 10 和图 11。

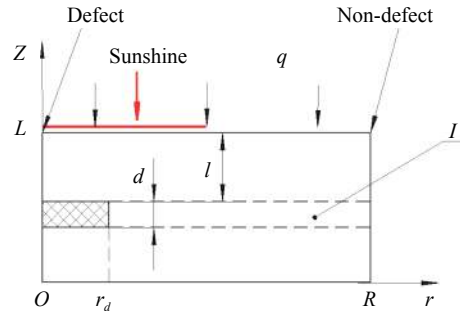


图 9 日照不均的二维模型

Fig.9 2D model of uneven sunshine

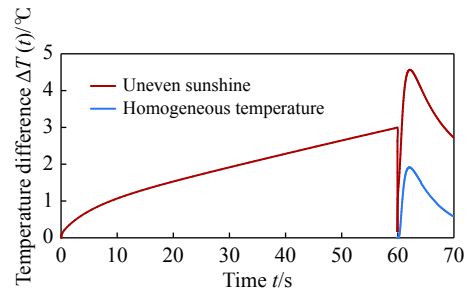


图 10 日照不均与均匀温度下温差 $\Delta T(t)$ 的仿真结果

Fig.10 Simulation result of temperature difference $\Delta T(t)$ in uneven sunshine and in homogeneous temperature

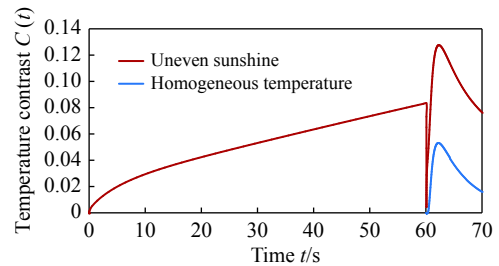


图 11 日照不均与均匀温度下温度对比度 $C(t)$ 的仿真结果

Fig.11 Simulation result of temperature contrast $C(t)$ in uneven sunshine and in homogeneous temperature

$$q(t) = \begin{cases} 150, & 0 \leq t \leq 60 \text{ s} \\ 8.4 \times 10^6, & 60 \text{ s} < t \leq 60.002 \text{ s} \\ 0, & 60.002 \text{ s} < t \leq 70 \text{ s} \end{cases} \quad (3)$$

$$q(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 60 \text{ s} \\ 8.4 \times 10^6, & 60 \text{ s} < t \leq 60.002 \text{ s} \\ 0, & 60.002 \text{ s} < t \leq 70 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

可见,日照不均使得检测实施前有缺陷处被阳光加热升温,参考的无缺陷区没有被阳光加热,因而造成缺陷区与无缺陷区的温差 $\Delta T(t)$ 和温度对比度 $C(t)$ 发生明显变化。此例中温差 $\Delta T(t)$ 最大值 ΔT_m 和温度对比度 $C(t)$ 最大值 C_m 较均匀温度模型下的最大

值均明显增大,不利于红外热成像的缺陷检测与识别。

4.2 实验验证

将试块第一列埋深为 0.5 mm 的缺陷右侧用铝箔遮盖,然后放到太阳下直晒 1 min,然后迅速拿回到室内进行检测实验。将埋深为 0.5 mm 缺陷的 0.15~10 s 范围内温差 $\Delta T(t)$ 曲线和温度对比度 $C(t)$ 曲线与试块温度均匀 (25 °C) 时的检测结果进行对比。图 12 为 $t=1.102$ s 时刻的红外热成像图,图中左侧区域明显要亮于(温度高于)右侧区域。图 13 为日照不均引起温差 $\Delta T(t)$ 变化的实验结果。图 14 为日照不均引起温度对比度 $C(t)$ 变化的实验结果。

通过日照不均和均匀温度下实验结果对比,可见日照不均引起 ΔT_m 和 C_m 明显增高,这与仿真结果得到的变化趋势相一致。这样的变化易造成太阳直射区域无缺陷区与参考的未被阳光加热的无缺陷区之间出现明显的 ΔT_m 和 C_m ,易将该无缺陷区误判为缺陷。

若被阳光直接照射的不是缺陷区,而是参考的无

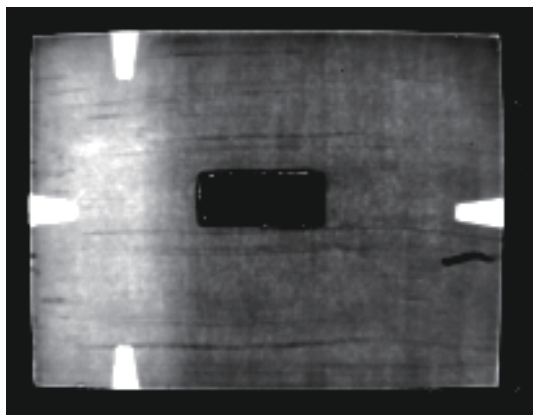


图 12 实验前日照不均的热像图 $t=1.102$ s

Fig.12 Thermal image $t=1.102$ s of the specimen in uneven sunshine before experiment

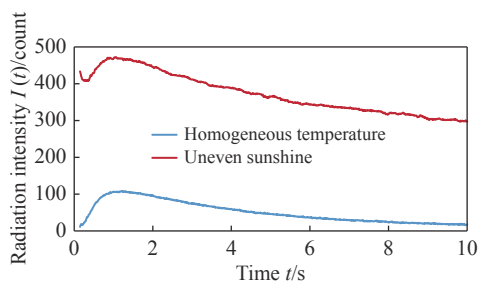


图 13 日照不均与均匀温度下温差 $\Delta T(t)$ 的实验结果

Fig.13 Experiment result of temperature difference $\Delta T(t)$ in uneven sunshine and in homogeneous temperature

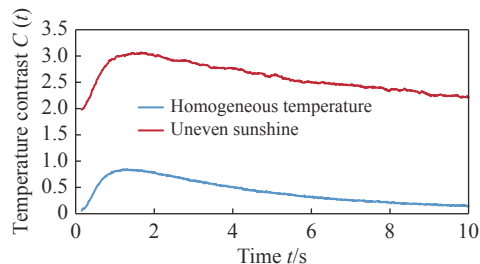


图 14 日照不均与均匀温度下温度对比度 $C(t)$ 的实验结果

Fig.14 Experiment result of temperature contrast $C(t)$ in uneven sunshine and in homogeneous temperature

缺陷区,则 ΔT_m 和 C_m 的变化趋势相反,都呈减小的趋势,从而降低了缺陷的可检性和清晰程度,易造成漏检。

5 风速的影响:

5.1 建模仿真

为了考察外场检测时不同风速对红外热成像检测的影响,采取改变模型中冷却阶段对流换热系数的方式进行仿真。模型中对流换热系数分别设为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其他边界条件不变。不同对流换热条件下的仿真结果见图 15 和图 16。

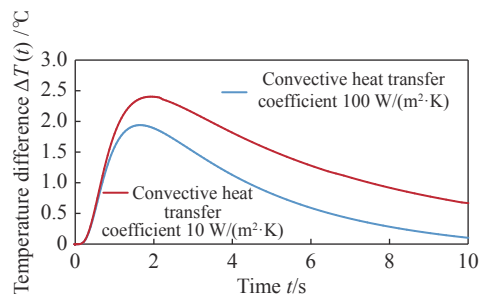


图 15 不同风速下温差 $\Delta T(t)$ 的仿真结果

Fig.15 Simulation result of temperature difference $\Delta T(t)$ in different wind velocity

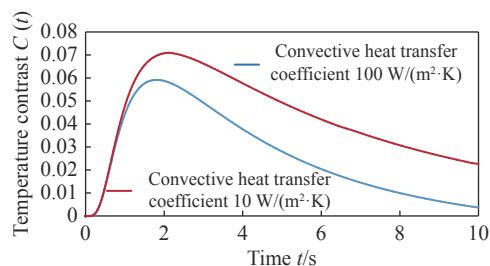


图 16 不同风速下温度对比度 $C(t)$ 的仿真结果

Fig.16 Simulation result of temperature contrast $C(t)$ in different wind velocity

从建模仿真的结果中可以发现,风速增大,对流换热系数提高,使得 ΔT_m 和 C_m 明显下降。

5.2 实验验证:

为了模拟较高风速环境的实验条件,在试块检测过程中采用电吹风直吹被检测表面的方式。检测参数同前,截取 0.15~10 s 的数据进行分析,与仿真结果进行对比。埋深为 0.5 mm 的缺陷温差 $\Delta T(t)$ 和温度对比度 $C(t)$ 变化见图 17 和图 18。

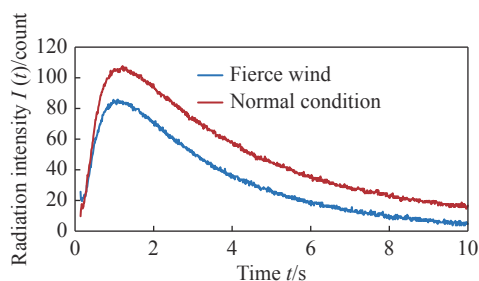


图 17 不同风速条件下温差 $\Delta T(t)$ 的实验结果

Fig.17 Experiment result of temperature difference $\Delta T(t)$ in different wind velocity

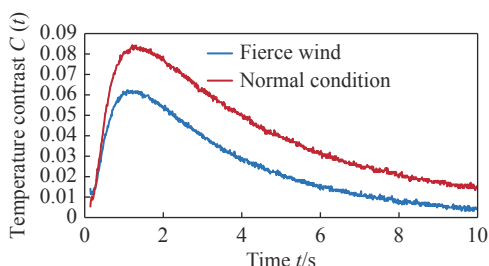


图 18 不同风速条件下温度对比 $C(t)$ 的实验结果

Fig.18 Experiment result of temperature contrast $C(t)$ in different wind velocity

实验结果中,强风条件下 ΔT_m 和 C_m 明显减小,与仿真结果中的变化一致。 ΔT_m 和 C_m 减小,反映了缺陷可检性降低,缺陷的清晰程度下降。

6 结论

基于仿真结果和试块实验结果,可以得出以下结论:

(1) 通过 25 °C 和 30 °C 两种不同环境温度下的分层缺陷建模分析和实验研究发现:不论是温差 $\Delta T(t)$ 还是温度对比度 $C(t)$ 其后半段随着检测环境温度的升高,都有下降的趋势,尤其是温度对比度 $C(t)$ 的最大值 C_m 随着检测环境温度的升高,明显变

小。 C_m 的减小,反映的是缺陷清晰程度的下降,这一变化不利于缺陷的检出。因此检测环境温度较高对检测结果的评判有一定不利影响。

(2) 通过对日照不均和均匀温度 (25 °C) 两种检测条件的建模分析和实验研究发现:若含缺陷的区域被太阳直射,而参考的无缺陷区未被直射,这种日照不均使得温差 $\Delta T(t)$ 和温度对比度 $C(t)$ 的最大值 ΔT_m 和 C_m 升高,而被直射的无缺陷区也会出现相对于参考的无缺陷区明显的 ΔT_m 和 C_m ,易造成无缺陷区误判为缺陷;若参考的无缺陷区被直射,而含缺陷的区域未被直射,则这种日照不均使得温差 $\Delta T(t)$ 和温度对比度 $C(t)$ 的最大值 ΔT_m 和 C_m 降低,易造成缺陷漏检。因此,实际外场检测时日照不均需要避免。

(3) 通过对流换热系数分别设为 10 W/(m²·K) 和 100 W/(m²·K) 的建模仿真分析和利用电吹风强制散热模拟的强风条件与常规条件实验对比发现:随着风速的增加,温差 $\Delta T(t)$ 和温度对比度 $C(t)$ 的最大值 ΔT_m 和 C_m 会明显变小。 ΔT_m 和 C_m 变小对检测不利,缺陷的可检性和缺陷的清晰程度都会下降。因此,不宜在较高风速的外场条件下进行检测。

文中只是从红外热成像原始热图角度说明环境因素的影响,事实上有一些数据处理算法对个别环境因素有一定的抑制作用,该问题已经超出了文中研究范围,此处不做展开讨论。

参考文献:

- [1] Wang Yaqiong. Research on maintenance and detection of civil aircraft based on infrared thermal Image detection [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2019(11): 169-170. (in Chinese)
- [2] Cao Qiang, Han Daorong. Application of NDT in military aircraft maintenance [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2015(4): 74-77. (in Chinese)
- [3] Li Xiufen, Chen Junwen, Jiang Yang, et al. Application research of penetrant inspection and magnetic particle inspection in aircraft components in service[C]//The 11th National Conference of Penetrant Inspection and Magnetic Particle Inspection, 2017: 154-158. (in Chinese)
- [4] Huang Huabing, Xu Mao, Peng Zhiwei. In-situ testing method of R area for aircraft structure [J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(3): 38-41. (in Chinese)

- [5] Ma Jianhui, Yang Guang, Liu Yong. The in-situ detection of aero-engine turbine blade with endoscope and fluorescence penetration [J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(6): 50-53. (in Chinese)
- [6] Wang Dan, Ning Ning, Yang Pengfei, et al. In-situ nondestructive testing technology for the integral composite panel of the fuel tank [J]. *Nondestructive Testing*, 2018, 40(11): 33-36,55. (in Chinese)
- [7] Liu Bingwei, Zhong Mian, Fu Hangjun, et al. Defect extraction and quantitative analysis of composite materials based on infrared detection[C]//Proc of SPIE, 2020, 11455: 114550M.
- [8] Liu Yingtao, Mu Rende, Guo Guangping, et al. Infrared flash thermographic nondestructive testing of defects in thermal barrier coating [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2015, 35(6): 83-90. (in Chinese)
- [9] Liu Yingtao, Guo Guangping, Yang Danggang, et al. Pulsed thermography of composite components used in aerospace applications [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(1): 72-77. (in Chinese)
- [10] Wang Zhiyong, Liu Yingtao, Wang Xiaohu, et al. Application of infrared thermography in research of radar absorbing coating defects [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(3): 91-95. (in Chinese)
- [11] Maldague X. Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography[M]. London: Springer, 1993.
- [12] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 1998: 420-424. (in Chinese)
- [13] Liu Yingtao, Tang Jia, Guo Xingwang, et al. Effects of composites translucence on flash infrared thermal detection [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10): 1264-1270. (in Chinese)
- [14] Guo Xingwang, Guan Heqing, Liu Yingtao, et al. Spectrum characteristics and light source selection for infrared thermal imaging testing of semitransparent materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0104001. (in Chinese)
- [15] Lin Zhengyun. The distributions of global radiation and ground radiation balance in Fujian province [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1994, 15(3): 248-256. (in Chinese)