

# 基于加热截断数据的周期性还原赝热流红外热成像中加热时间对缺陷检测效率的影响

BOUH Yacoub Harred<sup>1</sup>, 王洪金<sup>1</sup>, 文 灿<sup>1</sup>, GIRON-PALOMARES Benjamin<sup>2</sup>, 吕浩源<sup>1,3</sup>, 何贊泽<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 安阳工学院 工程培训中心, 安阳 455099;  
3. 北京林业大学 林学院, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种能够重构基于加热截断数据的周期性还原赝热流算法, 并测试了该方法下加热周期对分层和插入异物可检测性的影响。对不同试件分别进行了加热周期为 10, 20, 30 s 的周期性方波热成像检测, 再依据所提出的算法反演试件的还原赝热流, 对比不同单波周期长度下缺陷的信噪比和最小可检出缺陷。研究表明, 总加热时长相同时, 单波周期越长, 红外热成像技术检测埋深缺陷的能力越强。

**关键词:** 周期方波热成像; 加热周期; 碳纤维增强聚合物; 还原赝热流算法

中图分类号: TH878; TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)05-0028-09

## Effect of heating period on defect detection efficiency of periodic RPHF thermography based on heating-truncated data

BOUH Yacoub Harred<sup>1</sup>, WANG Hongjin<sup>1</sup>, WEN Can<sup>1</sup>, GIRON-PALOMARES Benjamin<sup>2</sup>, LÜ Haoyuan<sup>1,3</sup>, HE Yunze<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Hunan 410082, China;  
2. Engineering Training Center, Anyang Institute of Technology, Anyang 455099, China;  
3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A new algorithm of restored pseudo heat flux(RPHF) based on heating-truncated data was proposed and its effect of heating period on the detectability of two kinds of defects, delamination and foreign insertions was tested. Periodic square waved thermography was conducted on the plates with heating periods of 10, 20, and 30 s respectively. The data collected from the inspections was processed by the proposed algorithm to obtain the restored pseudo heat flux. The signal to noise ratio of the RPHFs from the experiments with different heating periods were contrasted. The results show that longer heating periods, with the same total heating length, increase infrared detectability for the defects of high buried depths.

**Key words:** periodic square wave thermography; heating period; CFRP; restored pseudo heat flux algorithm (RPHF)

风机叶片通常由玻璃纤维增强聚合物(GFRP)或碳纤维增强聚合物(CFRP)<sup>[1-2]</sup>组成, 这些叶片在运行过程中极易出现各种损伤, 因而需要进行持续的监测。为了提高碳纤维增强材料的缺陷检测能

力, 各种无损检测(NDT)技术被用于风机叶片<sup>[3]</sup>的检测(如超声检测和声发射检测)。然而, 这些方法要求检测装置安装在距叶片很近的位置。此外, 还有一些检测方法需要拆卸风机叶片, 导致检测成本和风险增加。因此, 为了降低成本, 急需研发能够远距离无接触的原位无损检测技术。在纤维复合材料的非接触无损检测方面, 红外热成像, 尤其是基于光激励的脉冲热成像无损检测技术具有巨大的潜力, 能够成功地用于识别复合材料中的缺陷<sup>[4-6]</sup>。该技术使用闪光灯将短脉冲的热能加载到被测试件的表

收稿日期: 2023-02-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61901167); 湖南省自然科学基金杰青项目(2022JJ10017)

作者简介: Yacoub Harred Bouh(1998—), 男, 非裔硕士留学生, 主要研究方向为新能源设备红外热成像检测

通信作者: 王洪金, hjwang\_2018@hnu.edu.cn

面,采集到试件表面的热图像后,通常对热信号进行主成分分析(PCA)<sup>[7-8]</sup>、热信号重建(TSR)<sup>[9-10]</sup>和独立成分分析(ICA)<sup>[11-12]</sup>等算法处理。但是这类方法仅仅能够检测埋藏在浅表层下的缺陷,对于埋深较深缺陷的检测能力有限。

为了提高热成像的可检测埋深,锁相热像、调频热像和周期性方波热像等周期性热激发热像技术也被用于 CFRP 缺陷的检测<sup>[13-16]</sup>。不同于脉冲热成像,其在被测元件表面输入的能量呈周期性。BAI 等<sup>[17]</sup>证明,在主成分热像(PCT)处理图像后,该方法具有良好的缺陷检测效果,利用快速傅里叶变换成功提取了锁定热像中的振幅和相位信息<sup>[18-19]</sup>。ZIEGLER 等<sup>[20]</sup>使用高功率激光器进行锁定热成像,该激光器避免了卤素灯的低调制带宽,增加了锁相热像检测的通用性。PALUMBO 等<sup>[21]</sup>通过使用方波激励热响应与相位数据的信噪比形式的耦合,证实了其对缺陷有良好检测效果。WANG 等<sup>[14]</sup>构建了一种名为还原赝热流(RPHF)的反卷积算法对方波激励的数据进行后处理,通过比较相同相位角下不同加热时间的 RPHF 值,提高了异物嵌入径深比的可探测性。

WANG 等提出的还原赝热流算法在实际应用中存在两方面的挑战,一是算法要求输入数据包含完整的冷却数据,这在实际操作中时间成本非常高,二是研究者尚不清楚加热过程对锁相 RPHF 可探测性的影响规律。根据 IBARRA 等的说法,响应信号的频率和形状通过使用正弦信号得以保留,只有振幅和相位延迟可能会发生变化。HUH 等<sup>[22]</sup>利用基于卤素灯的长波红外热像技术研究了混凝土试件中分层的识别,证实了较长时间的连续加热可以识别更深的缺陷。同样,周期热像法加热时间的长短和加热总时间的长短也会影响检测不同深度缺陷的能力。因此,必须确定这两个暂态参数中哪一个对周期 RPHF 的缺陷检测能力起主要作用。

提出了一种根据周期性热响应中加热部分数据恢复冷却阶段热像数据的方法,使得还原赝热流算法能够适用于只包含加热数据的周期性热响应序列。基于该算法,在保持每次方波周期无损红外热像检测的总能量不变的情况下,使用了 3 个不同的加热周期来研究加热周期对该算法检测能力的影响。采用卤素灯产生的周期性方波作为激发源对试件进行加热,通过对获得的瞬态热数据实施锁相恢复热流,来量化和研究不同周期加热程序的影响。

## 1 理论与方法

### 1.1 基于截断加热数据的周期性还原赝热流 (PRPHF) 算法

WANG 等提出的还原赝热流算法要求较为完整的输入数据,在输入的热响应中需要包括完全冷却数据,即没有任何热源条件下被测表面温度恢复到初始温度的过程中所采集的数据,否则会因为数据截断引入明显的频谱混叠。然而,在实际操作中,部分试验条件下(例如以昼夜为周期的日光加热)的完全冷却过程是不可得的或者耗时很长。因此提出了通过周期性热响应加热截断数据来重构和恢复完全冷却阶段数据的方法,其具体原理和流程如图 1 所示<sup>[14]</sup> [ $T_{rc}(n)$  为通过周期性热响应激励重构的第  $n$  个周期内的相应单方波激励响应,图中其余变量释义依次见下文]。

红外热成像中的热响应是指被测表面对热激励在给定时间和空间范围内表面温度的变化,其服从热扩散方程的描述。因而根据文献<sup>[14]</sup>中的理论可知

$$T(\mathbf{x}, t) = \iint \frac{q(x', \tau)}{\sqrt{t - \tau}} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{4\alpha(t - \tau)}\right) dx' d\tau \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为空间坐标向量  $(x_1, x_2, x_3)$ ;  $T$  为温度, 表面温度指  $x_3 = 0$  平面上的温度;  $t$  为时间;  $q$  为热激励即热流密度;  $\alpha$  为材料的热扩散系数;  $\tau$  为时间积分变量;  $x'$  为空间坐标积分变量。

由式(1)可知,重构算法的原理在于周期性热激励  $q_m(\mathbf{x}, t)$  等同于  $n$  个在时间上有推移周期  $t_0$  的单个方波热激励  $q_s(\mathbf{x}, t - i \cdot t_0)$  的加和(见图 1),即

$$q_m(\mathbf{x}, t) = \sum_n q_s(\mathbf{x}, t - i \cdot t_0) \quad (2)$$

式中:  $i$  为不同单个方波热激励对应需要推移的周期个数。

因而,周期性脉冲对应的周期性热响应  $T_p(\mathbf{x}, t)$  也等效于这些具有  $t_0$  时移的一系列单个方波单独作用得到的热响应  $T_R(\mathbf{x}, t - i \cdot t_0)$  之和,即

$$T_p(\mathbf{x}, t) = \sum_n T_R(\mathbf{x}, t - i \cdot t_0) \quad (3)$$

那么周期性热激励作用下各个周期之间的热响应差则为对应单个方波作用下对应时间内的热响应,在第一个周期内,因为只有第一个方波热激励  $q_s(\mathbf{x}, t)$  作用在被检表面,多方波周期响应  $T_p(\mathbf{x}, t), t \in [0, t_0]$  与  $q_s(\mathbf{x}, t)$  单波作用下的热响应  $T_R(\mathbf{x}, t)$ ,

$t \in [0, t_0]$  完全相同,而在多方波周期激励下,第二个周期内的热响应  $T_p(\mathbf{x}, t), t \in [t_0, 2t_0]$  与其在第一个周期内的热响应之差就等同于单个方波脉冲下热响应在  $t \in [t_0, 2t_0]$  的变化规律[即图 1 中的  $T_{rc}(2)$ ]。其他时间段内的单方波激励热响应可以用类似的方法求得,直到第  $n$  个周期。当然,该方法无法获知  $n$  个周期以外单方波激励下的热响应。鉴于  $n$  个周期以后单方波激励下热响应趋于恢复

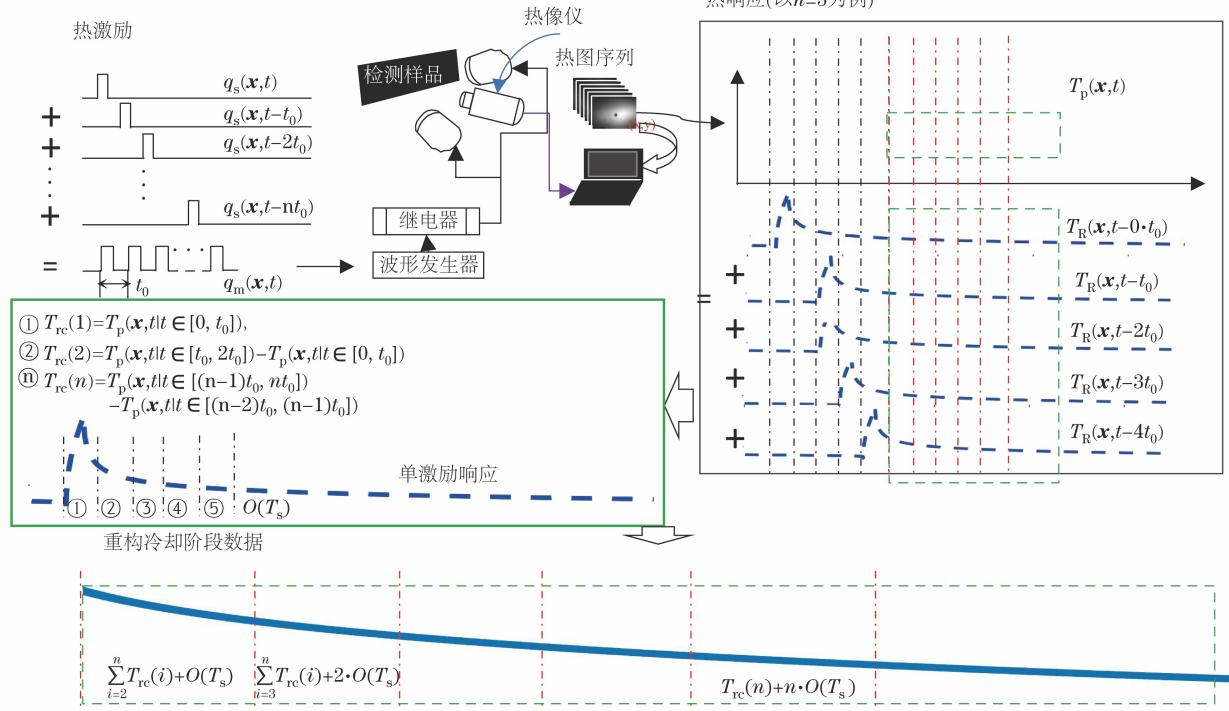


图 1 基于加热截断数据的冷却数据重构过程示意

随后,将重构数据作为输入代入周期性 RPHF 算法当中<sup>[21]</sup>。根据文献[21]中的算法描述及所关心缺陷的大小,对三维热响应数据进行了  $5 \times 5$  邻域高斯低通滤波器处理并去除噪声,然后对序列数据进行空间维度填充,以减少 RPHF 计算过程中数据截断而产生的混叠效应。接下来,对填充数据进行傅里叶-汉克尔域变换,得到该变换域内温度  $T(\xi, \omega)$  与热流  $\dot{Q}(\xi, \omega)$  之间的关系

$$T(\xi, \omega) = \frac{\dot{Q}(\xi, \omega)}{\sqrt{\xi^2 + \frac{i\omega}{\alpha}}} [1 + G(\xi, \omega)] \quad (4)$$

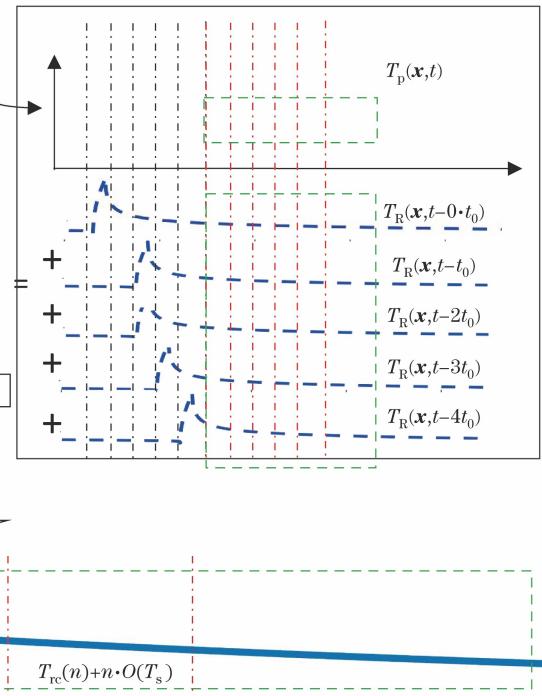
式中:  $G(\xi, \omega)$  为缺陷引起的单位赝热流响应;  $\xi, \omega$  分别为空间、时间对应在汉克尔变换和傅里叶变换中的频率。

对于埋深为  $d_0$  的半无限大绝热缺陷有

$$G(\xi, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-2nd_0\sqrt{\xi^2 + \frac{i\omega}{\alpha}}\right) \quad (5)$$

平衡,即温升趋于 0,多方波周期性激励下的完全冷却阶段可以根据图 1 中的热响应加和原理及公式(3)进行重构,该方法得到的重构数据误差不超过  $n \cdot T_s$ ,  $T_s$  为单波响应在  $nt_0$  处的最大残余温升。至此,通过截断加热数据恢复多方波周期性热激励下热响应在完全冷却阶段数据的方法,能够保障得到的重构数据误差不超过  $n \cdot T_s$ , 实际误差会更小,为  $n \cdot O(T_s)$ [ $O(T_s)$  即在  $T_s$  的量级之内]。

热响应(以  $n=5$  为例)



在实际应用中,首先将填充后的数据进行傅里叶域变换,用二维快速傅里叶变换的结果代替汉克尔变换的结果,因为当系统具有圆对称性时,汉克尔变换等价于二维快速傅里叶变换,可以得到类似于式(5)的公式。此外,当被检物体的热扩散系数在  $xOy$  平面各项同性时,其扩散格林函数必然具有圆对称性。随后,如果热流密度  $Q$  的空间分布也具有轴对称性,其最大半径为  $R$ ,则可依据上一步获得的数据和反卷积核,转换回以  $r$  为半径坐标的柱坐标时空域,通过式(6)的方程获取缺陷赝热流数据  $\zeta_R$ <sup>[14]</sup>

$$\zeta_R = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^R \frac{d_0 Q(\tau, r')}{2[\sqrt{\alpha(t-\tau)}]^5} \eta^n(\xi, \omega) \cdot \exp\left(-\frac{n^2((r-r')^2 + d_0^2)}{\alpha(t-\tau)}\right) dr' d\tau \quad (6)$$

式中:  $\eta = \frac{1-\chi_m}{1+\chi_m}$ ,  $\chi$  为被检材料与缺陷材料之间

的热传导率比,  $m$  为两者的热扩散系数比;  $r$  为柱坐标下的半径坐标;  $r'$  为以  $r$  为参考点的柱坐标中的半径坐标比。

在无缺陷区域中, 蕴热流的空间分布  $\zeta$  值等于热激励空间分布的值, 所以只要热激励的周期为  $t_0$ , 蕴热流  $\zeta$  的空间分布将在周期  $t_0$  之后周期性地重复。

$$\zeta(t+t_0, r) - \zeta(t, r) = \begin{cases} 0, & \text{当 } r \notin \Omega_D \\ B, & \text{当 } r \in \Omega_D \end{cases} \quad (7)$$

$$B = \zeta_R(t+t_0, r) - \zeta_R(t, r)$$

式中:  $\Omega_D$  为表面缺陷投影面积;  $B$  为缺陷蕴热流空间分布的周期性估计。

如果  $\zeta$  可以视为时间从  $(-\infty, +\infty)$  具有连续频率  $\omega$  的波的总和, 那么  $\zeta$  在  $t$  时刻的值与之后一个周期的值的差值就显示了缺陷引起的相移。该差异即缺陷蕴热流值。在实践中, 缺陷蕴热流值可以通过从头部截断数据中减去尾部截断数据来获得。尾部截断的数据包括除最后一个加热周期数据外的所有数据, 头部截断包括除第一个加热周期数据外的所有数据。该研究中, 头部截断数据要从尾部截断数据中减去。最后, 利用低通滤波器<sup>[14]</sup> 对周期数据进行降噪处理。

## 1.2 信噪比评估

信噪比( $S_{NR}$ )由下式计算

$$S_{NR} = 20 \log_{10} \left( \frac{|S - N|}{\sigma_{noise}} \right) \quad (8)$$

式中:  $S$  为缺陷区域中心  $4 \times 4$  区域的像素平均值,  $N$  为相邻无缺陷区域像素值的平均值;  $\sigma_{noise}$  为相邻无缺陷区域内像素值的标准差。

## 2 试验方法和材料

### 2.1 试验流程

红外热成像试验装置如图 2 所示。检测系统由功能发生器、继电器、两盏 500 W 的卤素灯、MAG62000 型红外摄像机和笔记本电脑组成。红外相机具有  $640 \times 480$  的像素分辨率和  $50 \text{ mK}$  的热灵敏度。在试件 1 的试验中, 红外摄像机设置为每 2 秒记录 1 帧, 在试件 2 的试验中, 相机采样率设置为每秒记录 8 帧。波形发生器用于产生特定频率和振幅的正弦波, 其输出输入与卤素灯的开关继电器相连。加热卤素灯与试件相距 0.3 m, 卤素灯和相机的安装方式使得灯不在相机的视野内(见图 2)。检测过程包括获取热图像, 同时用周期性热流对试件表面进行热激励。检测中使用笔记本电脑采集数据, 以便于后续利用软件 MATLAB 中进行数据分析。红外热成

像检测参数如表 1 所示, 分别对试件 1,2 依照测试 1, 2,3 的热成像检测参数进行了 3 次测试。

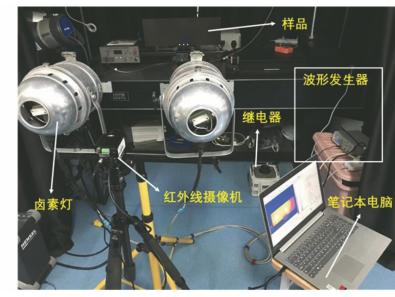


图 2 红外热成像试验装置

表 1 红外热成像检测参数

项目	测试 1	测试 2	测试 3
持续时间/min	3	3	3
加热时间/s	5	10	15
冷却时间/s	5	10	15
加热功率/W	420	420	420

由于缺陷性质不同, 两个试件使用了不同的视场进行检测。采用周期为 10, 20, 30 s, 占空比均为 50% 的 3 种周期性方波激励进行试验, 以研究加热周期对提出算法检测能力的影响。在所有试验中, 卤素灯的电压均为 65 V。试件 1 和试件 2 的检测时间分别为 180 s 和 60 s。试件 1 使用了一个尺寸为  $520 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ (长  $\times$  宽, 下同) 的视场覆盖整个试件, 试件 2 使用了 3 个视场: 试件右侧(包含深度从 0.5~2 mm 的浅缺陷)用  $270 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  的视场覆盖; 埋深为 2~3.5 mm 的缺陷中间部分用  $265 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  的视场覆盖; 埋深为 3.5~5 mm 的缺陷左侧部分用  $270 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  的视场覆盖, 热源与试件的距离保持不变。

### 2.2 材料

两个试件的结构及外观如图 3 所示( $x$  坐标位置相同的缺陷具有相同深度,  $y$  坐标位置相同的缺陷具有相同直径)。这两个试件由成都联科航空技术有限公司生产, 且材料、成型工艺相同, 均为耐高温纤维与热固性环氧树脂在高压容器中结合的预浸体系制成。两个试件均为  $530 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ (长  $\times$  宽  $\times$  高)的平板。试件 1 在底部加工有圆柱形孔洞, 模拟分层缺陷, 直径分别为 5, 10, 15 mm, 其底部到试件完整表面的深度为 0.5~5 mm(增量为 0.5 mm)。试件 2 在不同位置插入厚度为 0.15 mm 的聚四氟乙烯盘(以模拟缺陷), 缺陷被分为 3 组不同的直径(5, 10, 20 mm), 埋藏深度为 0.5~5 mm(增量为 0.5 mm)。

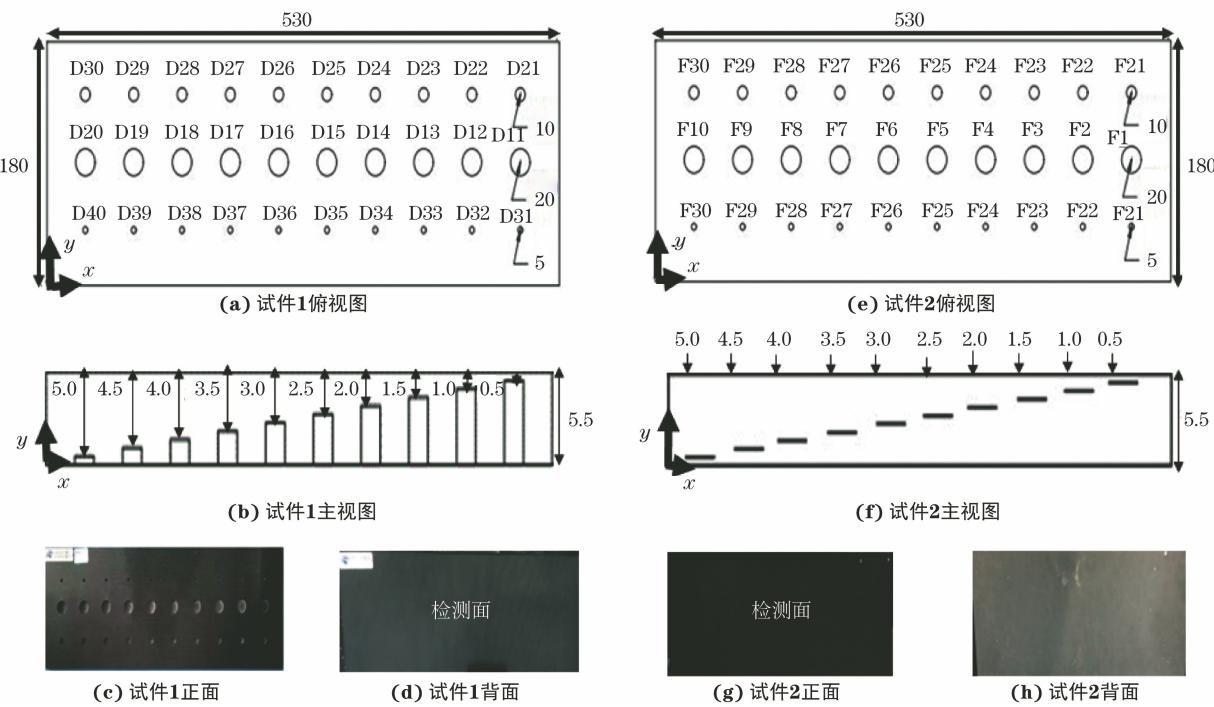


图 3 两个试件的结构及外观

### 3 结果与分析

#### 3.1 试验的原始结果

试件 2 的原始热图像如图 4 所示(图中加热时间均指加热周期)。由于整个加热周期占空比为 50%，所以实际加热时间为加热周期的一半。这些

温度分布图都来自于最后一个加热周期的结尾。在试件 2 的右侧视场中, 整个加热过程中仅直径 20 mm 缺陷中的两个浅缺陷(深度小于 1.5 mm)依稀可辨, 而其余缺陷则不可见。在试件 2 的中间和左边视场中, 3 个不同加热周期得到的热成像均没有发现缺陷。

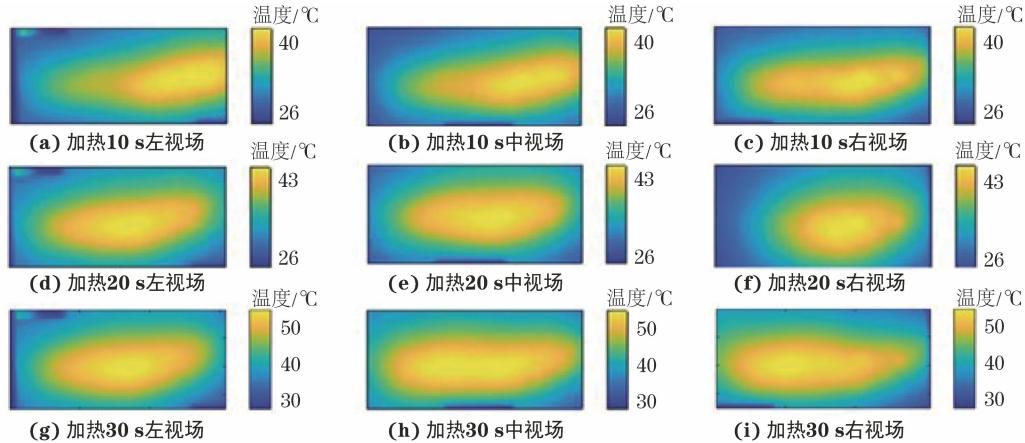


图 4 试件 2 在不同加热周期下的原始热图像

利用 MATLAB 软件生成了检测过程中温度的瞬态曲线, 选择温度增量最大的像素进行曲线生成, 对瞬态热响应的比较[特别是第一个加热周期的温度增量( $h$ )和总温度增量( $H$ )]对于确定加热过程对缺陷检测效率的影响是有意义的。

试件 1 表面热中心点的瞬态温度响应如图 5 所示, 总的来说, 热瞬态响应清楚地显示了在多波周期

性激励下的温度变化过程[图 5(a)中有 18 个周期, (b)中有 9 个周期, (c)中有 6 个周期]。试件的第一次加热周期温度增量  $h$  为 0.5, 0.9, 4 °C, 加热周期分别为 10, 20, 30 s; 加热 10, 20, 30 s 时, 总温升  $H$  分别为 2.40, 3.45, 5.8 °C, 两种温度增量参数均随加热周期的增大而增大, 然而在 30 s 的加热周期内, 温度增量明显更高。这可能是由于较长的加热

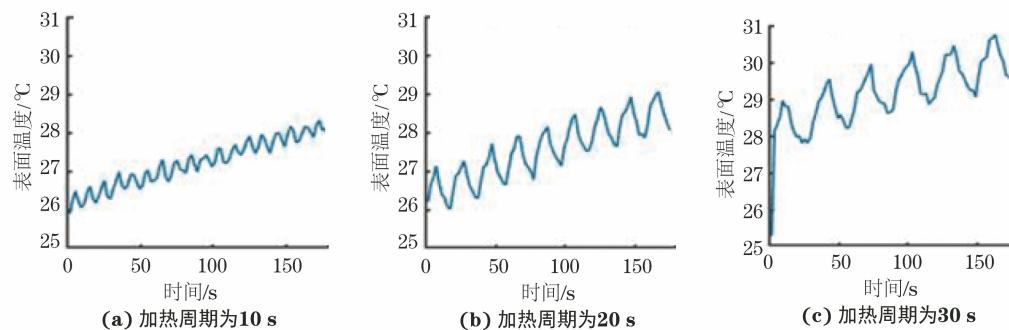


图 5 试件 1 表面热中心点的瞬态温度响应

周期对应的单个周期内的加热时间更长,从而热波的穿透距离更长,特别是在第一个加热周期内,试件的初始温度为环境温度时。

试件 2 表面热中心点的瞬态温度响应如图 6 所示,图中显示了 6 个方波(10 s 加热周期)、3 个方波(20 s 加热周期)和 2 个方波(30 s 加热周期)激励下的热响应。试件 2 的加热周期为 10 s 时,第一个加热周期温度增量  $h$  分别为 6 °C(左侧)、5 °C(中间)、7 °C(右侧),总温度增量  $H$  分别为 15 °C(左侧)、13 °C(中间)、15 °C(右侧);加热周期为 20 s 时,第一个加热周期温度增量  $h$  分别为 11 °C(左侧)、8 °C(中间)、10 °C(右侧),总温度增量  $H$  分别为左侧 8 °C、中间 14 °C、右侧 116 °C;加热周期为 30 s 时,第一个加热周期温度增量  $h$  为 16 °C(左侧)、12 °C(中部)和 14 °C(右侧),总温度增量  $H$  为 20 °C(左侧)、15 °C(中部)和 18 °C(右侧)。与试件 1 相似的是,两种温度增量参数均随加热周期的增大而增大。试件视场位置具有一定的对称性,左右视场的温度增量始终高于中间视场的温度增量。这可能并不是缺陷特性造成的,而是整个试件的特性造成的,与左侧缺陷相比,右侧缺陷非常浅,且试件 2 是一个完整的固体(没有被空气填充的圆柱形孔),减少了侧面热泄漏。然而,左右两侧的温度增量仍然存在差异,这可能是缺陷位置、传导和对流的综合影响造成的。

### 3.2 分析

#### 3.2.1 试件 1

试件 1 应用 truncated-RPHF 算法后得到的归一化缺陷赝热流分布如图 7 所示(直径 10 mm 缺陷位于图像的底部,5 mm 缺陷位于顶部),与试件 1 的原始热像图相比,可以看到算法处理后的图像可以更好地识别缺陷区域。一般来说,直径为 20 mm 的缺陷具有更好的可见性。应用 RPHF 算法后可以观察到直径 10 mm 的缺陷,却观察不到直径 5 mm 的缺陷。加热周期为 10 s 的热激励作用下,

直径为 20 mm 的缺陷清晰可见,而加热周期为 20 s 的多方波热激励下,部分直径为 10 mm 的缺陷依稀可见;当加热周期延长至 30 s 时,部分直径为 20 mm 的缺陷和少数直径为 10 mm 的缺陷能够分辨。这表明高加热时间对缺陷的可检测性可能有积极影响。通过研究信噪比数据能够定量地分析加热时间对缺陷可检测性的影响。

试件 1 各缺陷的赝热流分布信噪比如表 2 所示(Nd 表示无法检测),可见,任何加热周期都能检测出直径为 20 mm 的缺陷(D11~D17),20 s 的加热周期能够显示部分直径为 10 mm 的缺陷(D21 和 D22),而 10 s 的加热周期则不能。这表明加热周期的增大对缺陷的可检测性有积极影响;30 s 的加热周期也能够检测出更小的缺陷(D21~D24, D31, D32),包括两个直径为 5 mm 的缺陷。这证实了延长方波周期对缺陷可检测性有积极影响。表 2 还体现了信噪比改善缺陷表征的能力,即通过信噪比数据可发现更多的缺陷。

表 2 试件 1 各缺陷的赝热流分布信噪比 dB

缺陷编号	加热方波周期		
	10 s	20 s	30 s
D11	22.36	22.36	24.82
D12	18.43	18.43	20.24
D13	20.07	20.07	20.51
D14	13.43	13.43	13.10
D15	9.31	9.31	8.60
D16	22.51	22.51	21.15
D17	17.84	17.84	18.84
D18	Nd	Nd	17.68
D19	10.50	10.50	12.16
D21	Nd	17.55	12.20
D22	Nd	11.10	15.28
D23	Nd	Nd	11.98
D24	Nd	Nd	11.20
D31	Nd	Nd	8.34
D32	Nd	Nd	7.53
D33	Nd	Nd	Nd

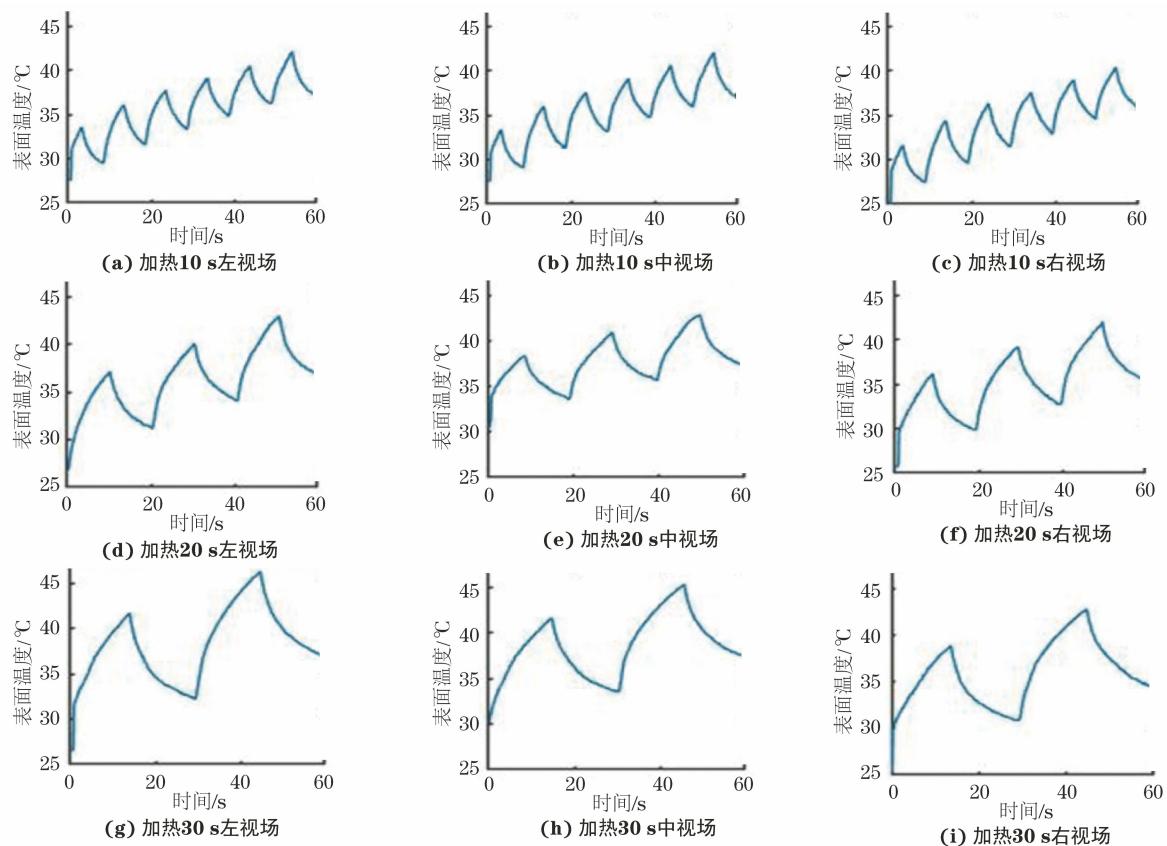


图 6 试件 2 表面热中心点的瞬态温度响应

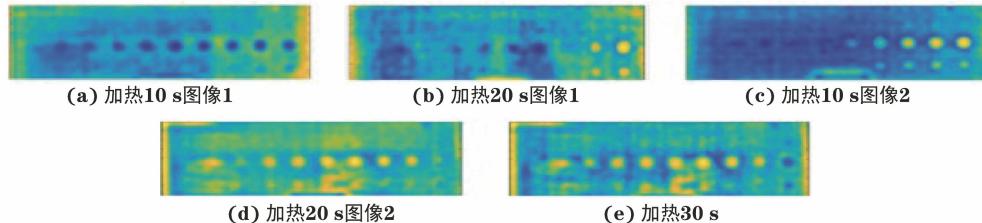


图 7 试件 1 应用 truncated-RPHF 算法后得到的归一化缺陷赝热流分布

### 3.2.2 试件 2

应用 RPHF 算法得到试件 2 的归一化缺陷赝热流分布如图 8 所示,除了试件的左侧视场,其余视场与 RPHF 算法相结合能检出更多缺陷。在试件 1 的检测参数下,直径为 20 mm 的缺陷有更好的可视性(至少能检出两个缺陷),此外,只有少数直径为 10 mm 的缺陷是可见的[图 8(f)和(i)],直径为 5 mm 的缺陷均不可见。这说明随着缺陷直径的减小,缺陷可检测性降低。此外,图 8 清楚地证明了缺陷深度增加时,缺陷可检测性的降低(缺陷检测深度从右向左减小)。由图 8 还可看出,加热时间的增加提高了缺陷的可见性:加热周期为 30 s 的热激励作用下,共 12 个缺陷可检出[图 8(g), (h)和(i)];加热周期为 20 s 的热激励作用下,共有 8 个缺陷[图 8(d), (e), (f)]肉眼可见;加热周

期为 10 s 的热激励作用下共 5 个缺陷[图 8 (a), (b)和(c)]肉眼可见。

试件 2 各缺陷的赝热流分布信噪比如表 3 所示,与试件 1 的结果相似,在任何加热时间内都可以检测到多个直径为 20 mm 的缺陷(缺陷 F1~F4 具有较高的信噪比),但是在 10 s 周期性方波激励下,整个加热过程中没有检出任何较小的缺陷;当加热周期延长至 20 s 后,虽然激励方波的个数减少了,但其检测能力一定程度上得到了提升,至少可以分辨直径为 10 mm 的缺陷(F12);加热周期为 30 s 的热激励下得到的 RPHF 信噪比通常比加热周期为 10 s 和 20 s 时的信噪比更高(缺陷 F1~F12);此外,30 s 的加热周期可检出更多直径 10 mm 的缺陷(F12 到 F14),但与试件 1 不同的是,该检测并未检出试件 2 中直径为 5 mm 的缺陷。

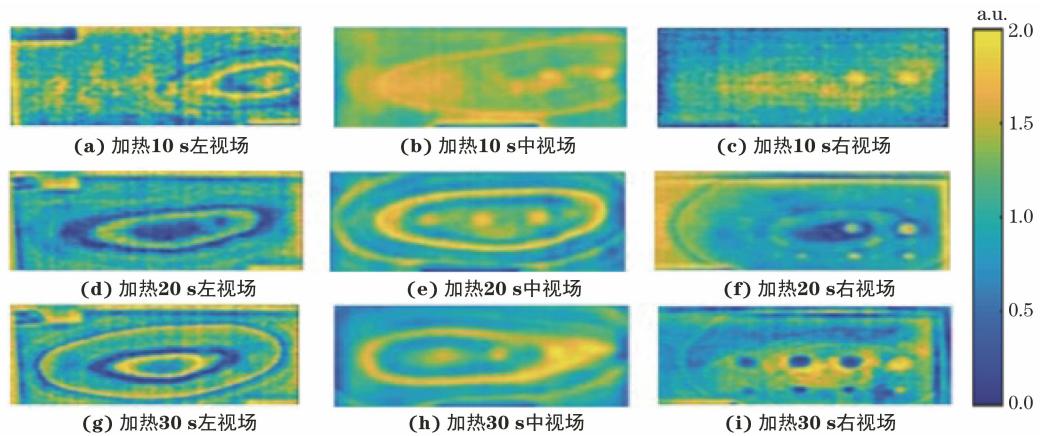


图 8 试件 2 的归一化缺陷赝热流分布

表 3 试件 2 各缺陷的赝热流分布信噪比 dB

缺陷编号	加热方波周期		
	10 s	20 s	30 s
F1	13.58	14.15	15.62
F2	10.98	9.20	14.25
F3	11.27	Nd	21.79
F4	4.14	14.28	23.95
F5	Nd	21.76	12.27
F6	Nd	6.37	4.74
F11	Nd	4.44	3.69
F12	Nd	9.17	11.82
F13	Nd	Nd	16.20
F14	Nd	Nd	11.84

上述检测结果证实了基于文章提出的算法,延长加热周期对缺陷可检测性有积极影响,随着缺陷深度增加可检测性会降低,以及随着缺陷尺寸增加可检测性得到提高。

#### 4 结语

研究提出了一种根据周期性热响应中加热部分数据恢复冷却阶段热像数据的方法,使得还原赝热流算法能够适用于只包含加热数据的周期性热响应序列。解决了 WANG 等提出的算法需要完全冷却阶段数据在实际操作中时间成本大的问题,并且利用了锁相热成像方法对碳纤维增强聚合物(CFRP)板进行无损检测。基于所提出的算法,研究了周期性方波热激励热成像中,加热周期对碳纤维板材中板中分层和层间异物两种不同缺陷检测能力的影响。通过信噪比计算,定量分析了加热周期对检测能力的影响。对信噪比数据的研究表明,缺陷的可检测性随加热时间的增加、缺陷深度的减小和缺陷尺寸的增大而提高。

#### 参考文献:

[1] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M, SONI A.

Advances researches on non destructive testing: a review [C]//ICMPC. Hyderabad, INDIA: Gokaraju Rangaraju Inst Engn & Technol, 2017: 3690-3698.

- [2] BUCUR I O, MALAEL I, BREBAN S. Horizontal-axis wind turbine blades manufacture with composite materials [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Boston: I. O. P. , 2020: 1-7.
- [3] RAJESH V, RAO P M V, SATEESH N. Investigation of carbon composites subjected to different environmental conditions [C]//ICMPC. Hyderabad, INDIA: Gokaraju Rangaraju Inst Engn & Technol, 2016: 3416-3421.
- [4] ZHENG K Y, CHANG Y S, WANG K H, et al. Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph[J]. Polymer Testing, 2015, 46:26-32.
- [5] CHUNG Y, SHRESTHA R, LEE S, et al. Thermographic inspection of internal defects in steel structures: analysis of signal processing techniques in pulsed thermography [J]. Sensors, 2020, 20 (21): 6015-6032.
- [6] PANELLA F W, PIRINU A. Application of pulsed thermography and post-processing techniques for CFRP industrial components [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40(2):1-17.
- [7] THEODORAKES P, AVDELIIDIS N P, IBARRA C C, et al. Pulsed thermographic inspection of CFRP structures: experimental results and image analysis tools [C]//Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration. San Diego:CA, 2014: 40-52.
- [8] XU C H, XIE J, WU C W, et al. Enhancing the visibility of delamination during pulsed thermography of carbon fiber-reinforced plates using a stacked

- autoencoder[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2809-2824.
- [9] ALVAREZ-RESTREPO C A, BENITEZ-RESTREPO H D, TOBÓN L E. Characterization of defects of pulsed thermography inspections by orthogonal polynomial decomposition[J]. NDT & E International, 2017, 91: 9-21.
- [10] WANG Z J, TIAN G Y, MEO M, et al. Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography[J]. NDT & E International, 2018, 99: 93-104.
- [11] RENGIFO C J, DAVID RESTREPO A, NOPE S E. Method of selecting independent components for defect detection in carbon fiber-reinforced polymer sheets via pulsed thermography[J]. Applied Optics, 2018, 57(33): 9746-9754.
- [12] FLEURET J R, EBRAHIMI S, IBARRA-CASTANEDO C, et al. Independent component analysis applied on pulsed thermographic data for carbon fiber reinforced plastic inspection: a comparative study [J]. Applied Sciences, 2021, 11(10): 4377-4408.
- [13] EKANAYAKE S, GURRAM S, SCHMITT R H. Depth determination of defects in CFRP-structures using lock-in thermography[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 147: 128-134.
- [14] WANG H J, WANG N C, HE Z Y, et al. Phase-locked restored pseudo heat flux thermography for detecting delamination inside carbon fiber reinforced composites [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(5): 2938-2946.
- [15] HEDAYATRASA S, SEGERS J, POELMAN G, et al. Vibrothermographic spectroscopy with thermal latency compensation for effective identification of local defect resonance frequencies of a CFRP with
- BVID[J]. NDT & E International, 2020, 109: 102179.
- [16] MANZANO C, ZHENG J, KUMAR V, et al. Determining subsurface defects' depth in CFRP composites using lock-in thermography [C]// International Conference on Advanced Surface Enhancement. Singapore: Springer, 2022: 114-117.
- [17] BAI L B, GAO B, TIAN S L, et al. A comparative study of principal component analysis and independent component analysis in eddy current pulsed thermography data processing[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(10): 104901.
- [18] WU C Q, WANG W P, YUAN Q G, et al. Infrared thermography non-destructive testing of composite materials [J]. Advanced Materials Research, 2011, 291/292/293/294: 1307-1310.
- [19] SHRESTHA R, CHOI M, KIM W. Thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb sandwich structure: a quantitative comparison among Lock-in thermography algorithms [J]. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2021, 18(2): 92-107.
- [20] ZIEGLER M, THIEL E, AHMADI S. Lock-in thermography using high-power laser sources [C]// In Proceedings of the 12th European Conference on Non-destructive Testing. European: ECNDT, 2018: 0139.
- [21] PALUMBO D, GALIETTI U. Damage investigation in composite materials by means of new thermal data processing procedures[J]. Strain, 2016, 52(4): 276-285.
- [22] HUH J, TRAN Q H, LEE J H, et al. Experimental study on detection of deterioration in concrete using infrared thermography technique [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016: 1-12.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告