复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

纤维增强树脂复合材料–钢界面缺陷涡流热成像检测

邹星星 马浩 解社娟 仝宗飞 胡黎俐 王辰昕 王立彬

Nondestructive testing of fiber reinforced polymer-steel interfacial defects based on eddy current thermography

ZOU Xingxing, MA Hao, XIE Shejuan, TONG Zongfei, HU Lili, WANG Chenxin, WANG Libin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220829.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于涡流成像的碳纤维增强树脂基复合材料细观结构可视化

Visualization of meso–structure of carbon fiber reinforced polymer based on eddy current imaging

复合材料学报. 2018, 35(8): 2074–2083 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170927.001

基于激光热激励红外热成像纤维增强聚合物复合材料加固混凝土结构界面损伤无损检测

Nondestructive debonding detection of fiber reinforced plastics strengthened concrete structure based on infrared thermal imaging with laser thermal excitation

复合材料学报. 2020, 37(2): 472–481 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190428.001

纺织复合材料预制体成型过程无损检测技术研究进展

Research progress in nondestructive testing technologies for textile composite preform forming process

复合材料学报. 2021, 38(4): 1029–1042 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201021.002

基于连续小波变换的玻璃纤维增强树脂复合材料太赫兹特征增强及缺陷成像

Glass fiber reinforced polymer terahertz feature enhancement and defect imaging based on continuous wavelet transform

复合材料学报. 2021, 38(12): 4190–4197 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210317.001

基于空耦换能器的碳纤维增强环氧树脂编织复合材料激光超声检测技术

Laser ultrasonic testing technology for carbon fiber reinforced resin braided composites based on air–coupled transducer

复合材料学报. 2021, 38(9): 2829–2838 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.003

强噪声下碳纤维增强树脂复合材料结构Lamb波层析损伤成像方法

Lamb wave tomography damage imaging of carbon fiber reinforced polymer composite structures in strong noise environment

复合材料学报. 2020, 37(4): 886–895 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190628.004

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 11 期 11 月 2022 年
Vol. 39 No. 11 Nov 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20220829.001

纤维增强树脂复合材料-钢界面缺陷涡流热成像检测

分享本文

邹星星[1]，马浩[1]，解社娟[2]，仝宗飞[2]，胡黎俐[3]，王辰昕[1]，王立彬*[1]

（1. 南京林业大学 土木工程学院，南京 210037；2. 西安交通大学 航天航空学院，西安 710049；
3. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室，上海 200240）

摘 要：纤维增强树脂 (Fiber reinforced polymer，FRP) 复合材料已在钢结构加固中得到有效应用，但 FRP-钢界面脱粘可能触发结构破坏，需无损检测以保证安全运营。基于自研涡流热成像 (Eddy current thermography，ECT) 系统对 FRP-钢界面缺陷成像规律进行试验，并通过多物理场数值模拟揭示其内部生热和传热机制。试验测试了 1 个带缺陷试件在 ECT 下的温度响应，同时模拟了多个不同形状、位置和深度的界面缺陷对热成像的影响。试验表明：ECT 系统能在 80 s 内精确检测试件中 328 mm^2 的界面缺陷；边缘效应影响试件边缘和角部在加热阶段的检测精度，但在冷却阶段由于热量重分布而影响变小；热量沿深度方向传导造成的模糊效应降低了深层缺陷检测精度。本文的多物理场数值模型与试验结果吻合较好，并重现了 ECT 的边缘效应和模糊效应。基于数值模型的参数化分析，揭示了变化加热速率在一定范围内可克服边缘效应和模糊效应，提高 FRP-钢内部缺陷探测精确度。

关键词：涡流热成像；界面缺陷；纤维增强树脂；无损检测；模糊效应

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5465-09

Nondestructive testing of fiber reinforced polymer-steel interfacial defects based on eddy current thermography

ZOU Xingxing[1], MA Hao[1], XIE Shejuan[2], TONG Zongfei[2], HU Lili[3], WANG Chenxin[1], WANG Libin*[1]

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) has been effectively used in strengthening steel structures, but FRP-steel interfacial debonding may trigger structural failure. Hence nondestructive testing is required to ensure structural safety. Herein one specimen with FRP-steel interfacial debonding was detected based on a self-developed eddy current thermography (ECT) system, and its heat generation and heat transferring mechanism was revealed through multi-physical numerical simulation. The effect of different shapes, locations and shapes of the defect on the temperature response under ECT was investigated through simulation. The results show that the ECT system can accurately detect 328 mm^2 in the specimen within 80 s. The edge effect affects the detection accuracy of the edges and corners of the specimen in the heating stage, but it has little effect due to heat redistribution in the sample in the cooling stage. The blur effect caused by heat conduction along the depth direction reduces the detection accuracy of deep defects. Numerical simulation shows good agreement with the experimental temperature response, and reproduces the edge effect and blur effect of ECT. Parametric study using numerical simulation reveals that the heating rate can overcome the edge effect and blur effect in a certain range and improve the accuracy of FRP-steel interfacial defect detection.

收稿日期：2022-05-05; **修回日期**：2022-07-13；**录用日期**：2022-08-08；**网络首发时间**：2022-08-30 09:57:22
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220829.001
基金项目：江苏省自然科学基金-青年项目 (BK20210620); 江苏省高校基金面上项目 (21KJB560007)
通信作者：王立彬, 博士, 教授, 研究方向为桥梁加固与检测 E-mail: jhwlb@163.com
引用格式：邹星星, 马浩, 解社娟, 等. 纤维增强树脂复合材料-钢界面缺陷涡流热成像检测 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5465-5473.
ZOU Xingxing, MA Hao, XIE Shejuan, et al. Nondestructive testing of fiber reinforced polymer-steel interfacial defects based on eddy current thermography[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5465-5473(in Chinese).

Keywords: eddy current thermography; interfacial defect; fiber reinforced polymer; nondestructive evaluation; blur effect

钢结构建筑与桥梁量大面广，服役过程中腐蚀与疲劳破坏不可避免，影响结构使用寿命，甚至导致灾难性事故，因此，需及时加固钢结构以保证安全服役。纤维增强树脂 (Fiber reinforced polymer，FRP) 复合材料因其耐腐蚀性好、强度高等优点在钢结构加固上应用较广泛[1-3]。同时，新建 FRP-钢组合结构也由于高性能、轻量化而得到了一定应用且增长迅速。在 FRP 加固钢结构和 FRP-钢组合结构中，脱粘会导致加固效率大幅度降低，引发结构破坏[4-6]。施工阶段残留界面气泡及服役阶段的高应力、温度、疲劳、潮湿等因素为脱粘产生的主要原因[7-9]。因此，亟需无损检测技术精确探测 FRP-钢界面初始缺陷与服役阶段的界面破坏，及时预警 FRP-钢界面脱粘，降低结构失效风险。

钢结构无损检测方法包括超声波检测、射线检测、磁粉检测和渗透检测等。虽然这些方式在检测结构内部缺陷方面具有一定优势，但也有自身局限性[10]。例如，超声波检测要求构件表面光滑且检测速度慢，效率较低[11-12]；射线检测设备安装复杂、成本较高、经济性差[13]；磁粉检测只能检测开口缺陷，却无法获取缺陷深度等[14]。红外热成像无损检测技术近年来发展迅速，它通过外部激励加热被检测物体，由物体表面温度分布间接推断被检测构件的内部缺陷[15-16]。以往研究与应用中，外部热激励源有卤素灯、微波、激光和涡流等[17-19]。宋培源[20] 以卤素灯作为热激励源，发现 FRP 加固混凝土浅层缺陷的升温速度较快，可被检测，边长小于 1 cm 的缺陷无法被检测到。Tashan 等[21]、Xie 等[22] 对 FRP-钢界面脱粘进行试验发现：卤素灯热成像难以区分脱粘和 FRP 分层，虽能在短时间内将大量能量传递到被检测试件表面，导致温度快速升高，但可能改变材料性质。许颖等[23] 提出了一种线激光热源检测 FRP 加固混凝土界面剥离的热成像方法，可迅速加热结构表面，实现远距离检测，但需将各个时刻成像结果叠加。综上所述，卤素灯的作用范围有限，且仅能加热结构表面，成像效果不好，激光加热效率高，但仅能线性加热且设备复杂，同样仅能加热结构表面，难以检测深层缺陷。

与上述加热方法相比，涡流利用了电磁感应原理，可穿透钢材厚度方向实现较均匀的加热，涡流热成像 (Eddy current thermography，ECT) 无损检测技术具有检测效率高、速度快、成像直观等优势[24-29]。ECT 原理为涡流在钢材内部产生热量并跨越界面向 FRP 层传导，FRP-钢界面缺陷处热量传导受阻，导致该处 FRP 表面温度较低，从而被热摄像仪探测到温度异常，间接推断出缺陷存在。众多学者基于 ECT 进行了金属腐蚀、钢材裂缝和 FRP 内部缺陷等单一材料缺陷无损检测研究，但对 FRP-钢界面缺陷研究较少[30-31]。Zou 等[32] 利用涡流对 4 个 FRP 加固钢结构试件进行了试验研究，发现涡流热成像技术可以检测到界面脱粘和界面气泡的存在，感应涡流对钢板进行加热后，由于试件多种材料组成，加重了边缘效应和模糊效应对缺陷精确定位的影响。Li 等[33] 利用多物理场数值模型发现 ECT 对界面裂缝十分敏感，损伤区域上方的 FRP 纹理会影响热成像效果。

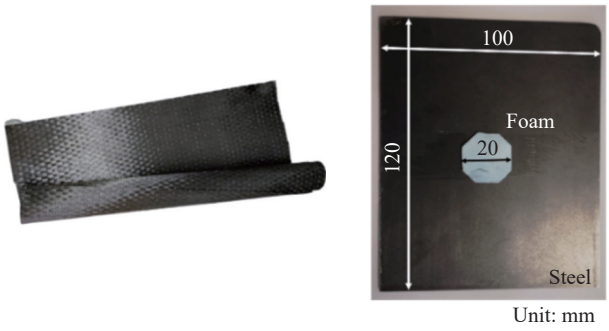
FRP-钢结构含热学和电磁学性能完全不同的材料层，会在热激励期间出现和单一材料完全不同的电磁和热响应，对于不同界面缺陷面积、不同缺陷位置的热成像规律探索尤为重要。现有研究针对 FRP-钢结构的界面脱粘多停留在试验阶段，利用有限元进行多物理场耦合分析的研究较少。本文进行了涡流热成像技术检测一块预置八边形缺陷的 FRP-钢结构，同时进行多物理场数值仿真。模拟了多个不同面积、位置和形状的缺陷的试件在 ECT 下的温度响应，研究了不同位置的界面缺陷对热成像图像的影响。为今后定量分析实际缺陷的大小、缺陷的准确定位做了基础工作。

1 FRP-钢界面缺陷检测试验

1.1 试件概况

试验包括 1 个含界面缺陷 FRP 粘贴钢板试件，界面由环氧树脂粘贴。钢板长×宽×厚为 100 mm×120 mm×4 mm，环氧树脂层厚 2 mm，FRP 层厚 0.168 mm，采用碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)，如图 1(a) 所示。因泡沫的传热、导电和介电常数等特性和空气相似，故选用泡沫来模拟界面缺陷，如图 1(b) 所示，面积为 328 mm^2 八边形缺陷。

试验所用材料属性如表 1 所示，FRP 布为 FYFE 公司的 Tyfo®SCH-41，弹性模量为 82.0 GPa，极限抗拉强度为 834 MPa，极限拉应变为 0.0085[32]。钢板极限抗拉强度为 250 MPa，弹性模量和泊松比分别为 200 GPa 和 0.26，在 20℃ 下电阻为



(a) CFRP composite (b) Defect layout

图 1 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-钢试件构造

Fig. 1 Structure of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel specimen

表 1 试件材性参数[32]

Table 1 Material properties of specimens[32]

Material	Electromagnetic properties	k/(W·(m·K)$^{-1}$)	c/(J·(g·K)$^{-1}$)	ρ/(kg·m^{-3})
Foam	$\varepsilon_r = 1$	0.026	1.005	1.204
Epoxy	$\varepsilon_r \approx 6-0.6j$	1.000	3.700	1 100
Steel	$\varepsilon_r \approx 4.7-0.7j$	1.700	0.800	2 400
CFRP‖	$\sigma = 10^4$	7.000	1.200	1 600
CFRP⊥	$\varepsilon_r \approx 7-2.5j$	0.800	1.200	1 600

Notes: j—Imaginary unit; k—Thermal conductivity; c—Specific heat; ρ—Density; ε_r—Relative permittivity; σ—Electrical conductance; ‖ and ⊥ represent the horizontal and vertical directions of the fibers, respectively.

0.142 μΩ·m。环氧树脂型号为 Master Brace P3500，抗拉强度为 17.2 MPa[32]。

试件制作步骤 (图 2)：(1) 打磨钢板后用酒精清洁表面；(2) 在钢板中心粘贴泡沫，并将环氧树脂涂抹在缺陷以外的钢板表面；(3) FRP 布摊铺在环氧树脂表面直至完全浸渍 FRP 布；(4) 在 FRP 布外部涂环氧树脂层；(5) 待树脂固化后剪切掉边缘多余环氧树脂。

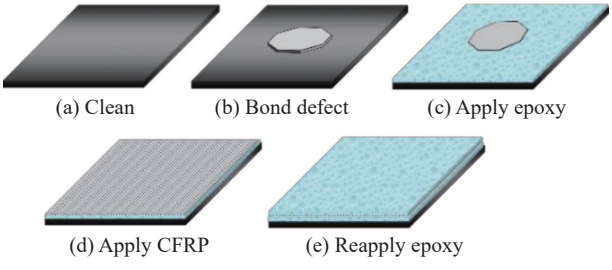
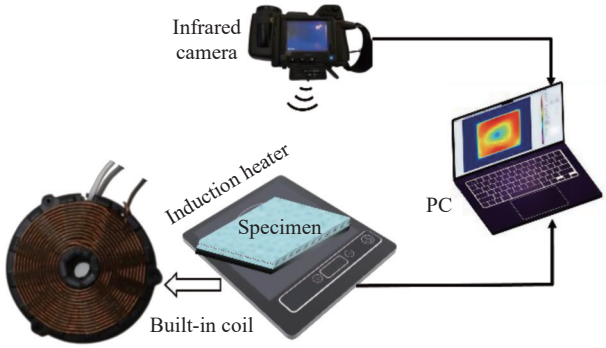


图 2 CFRP-钢试件制造过程

Fig. 2 Manufacturing process of CFRP-steel specimen

1.2 试验过程

图 3 为试验所采用涡流热成像检测系统，电磁感应加热器功率为 400 W，试件置于加热器表面中心。红外相机和试件之间距离为 500 mm。红外相机型号为菲力尔的 FLIR T430 sc 热像仪，像素为 320×240，温度采集频率为 2 Hz。本试验选取 0~20 s 为观测时间段，记录未加热前试件状态，涡流热激励时间段为 20~60 s，冷却时间段为 60~120 s。



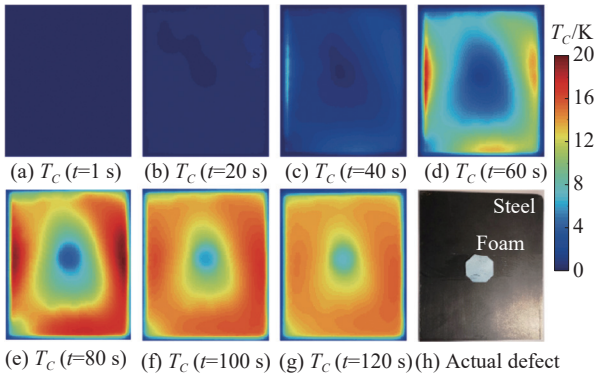
PC—Personal computer

图 3 涡流热成像 (ECT) 检测纤维增强树脂 (FRP)-钢界面缺陷示意图

Fig. 3 Illustration of eddy current thermography (ECT) test on fiber reinforced polymer (FRP)-steel interfacial debonding

2 试验结果

为消除室温影响，以温度变化 T_C 为研究量。图 4 显示了预置缺陷试件和 T_C 图比较。可以看到，缺陷上方 FRP 区域温度明显低于表面其他部分，红外热像图所显示缺陷位置与实际缺陷位置匹配较好。本试验所采用涡流热成像系统可检测到 FRP-钢组合结构界面缺陷存在，但无法检测缺陷“泡沫”的棱角，无法准确检测缺陷实际形状，这种现象称为模糊效应，在钢材裂缝探测和 FRP 层间缺陷探测中亦被观测到[34]。从 20 s 到 50 s，



(a) T_C (t=1 s) (b) T_C (t=20 s) (c) T_C (t=40 s) (d) T_C (t=60 s)
(e) T_C (t=80 s) (f) T_C (t=100 s) (g) T_C (t=120 s) (h) Actual defect

T_C—Temperature variation; t—Time

图 4 人造缺陷和温度变化 T_C 对比图

Fig. 4 Comparison between the man-made defect and temperature variation T_C field

试件边缘先加热，随后热量向中心扩散。由于电磁感应加热器加热不均匀，边缘效应使温度分布极不均匀。界面缺陷模糊不清，但仍可见。从 60 s 停止加热后，试件表面温度随时间逐渐升高，缺陷区域形状越来越清晰，最后与预制初始缺陷位置几乎完全吻合。

试件 x 和 y 方向中心线不同时间的温度分布如图 5 示。在时间 t=40 s，T_C 分布相对均匀，在试件边缘具有相对较高温度。当试验持续到 80 s 左右，边缘温度最高，和中间温差最大。当 t=120 s 时，在冷却阶段边缘热量逐渐传导至中间，并在缺陷区域形成 T_C 分布的谷底。

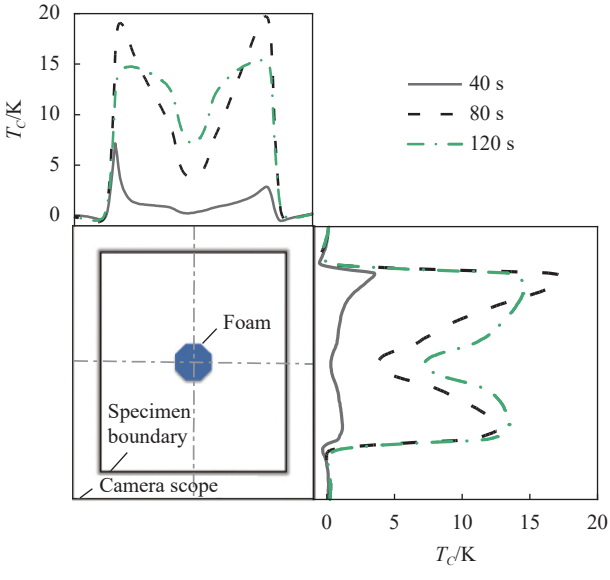


图 5　CFRP-钢试件在 x 和 y 方向的中心线的温度分布

Fig. 5　Distribution of T_C along the centerlines in x and y direction of the CFRP-steel specimen

3　电磁-热-结构多物理场数值模拟

为进一步研究涡流热成像生热规律和 FRP-胶-钢多层传热机制，并研究不同界面缺陷大小、位置对热成像的影响，进行涡流加热的电磁-热-结构多物理场数值模拟。

3.1　多物理场数值模型设置

选取试验试件 OC (图 1(b)) 进行多物理场数值模拟。采用 COMSOL 软件中的 AC/DC 模块，添加“磁场”和“固体传热”接口，进行电磁热多物理场耦合。图 6(a) 是数值模拟建立模型示意图，各材料参数同表 1。为简化计算模型，线圈采用圆形均匀多匝线圈模拟实际线圈，提离为 2 mm。线圈激励为频率 200 kHz、电流大小 10 A 的交流电。线圈和被检测试件外围被空气包裹，大气压为 101.3 kPa 、环境温度为 22℃(295 K)。设置空气边界为磁绝缘，热通量设置为试件外侧边界，对流热通量 q_0 满足下式：

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \tag{1}$$

其中：T_{ext} 为外部温度；T 为试件温度；h 为传热系数，取为 h=10 W/(m·K)。网格划分如图 6(b) 所示，本文将试件部分设置为精细化自由四面体网格，其他部位网格较稀疏。

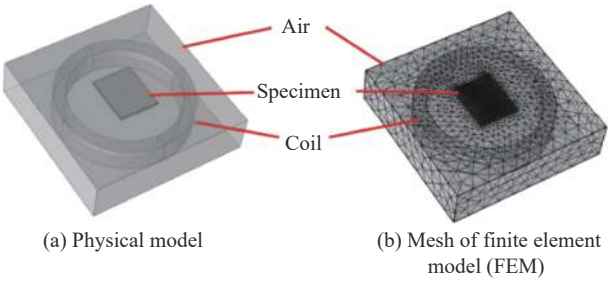


图 6　多物理场数值分析模型示意图

Fig. 6　Illustration of multi-physical numerical simulation

3.2　试验与数值模拟结果对比

标记了试件表面 A~E 共 5 个点绘制时间-温度曲线图 (图 7)：A 点和 E 点在加热阶段温度上升速率最快，且加热和冷却阶段温度都明显高于其他点，说明边缘加热速度高于其他部位；缺陷距离越近的点温度上升越慢；当停止加热后 A 和 E 点温度开始下降，B、C 和 D 点温度仍缓慢上升，这是由于热量重分布，试件四周和钢板的热量会逐渐传递到中心。

对比数值模拟和试验中 A~E 点温度-时间变化曲线，可知数值分析可较好模拟出各点温度变化趋势：在 0~20 s 的观察阶段温度不变；20~60 s 的加热阶段各点温度均线性上升；60~120 s 的冷却阶段 A 和 E 点温度逐渐降低，B、C 和 D 点缓慢上升，最终 T_C 在 15 K 左右。其中，在 60~70 s 内 A 和 E 点在数值模拟和试验中均为升温，但试验过程中温度上升持续时间较长，这可能是由于数值模拟无法准确还原实际环境的热通量、每层材料厚度及材料各向异性所致。

图 8 显示试件边缘先被加热，然后逐渐扩散到中心位置，缺陷处温度始终低于其他部位。由于模糊效应影响，在加热阶段可观测到缺陷存在但并不明显，降温阶段尤其是 80 s 左右能够较好地反映出缺陷存在。综上所述，本次模拟能够较好反映出试验中不同时间段的热成像规律，设置

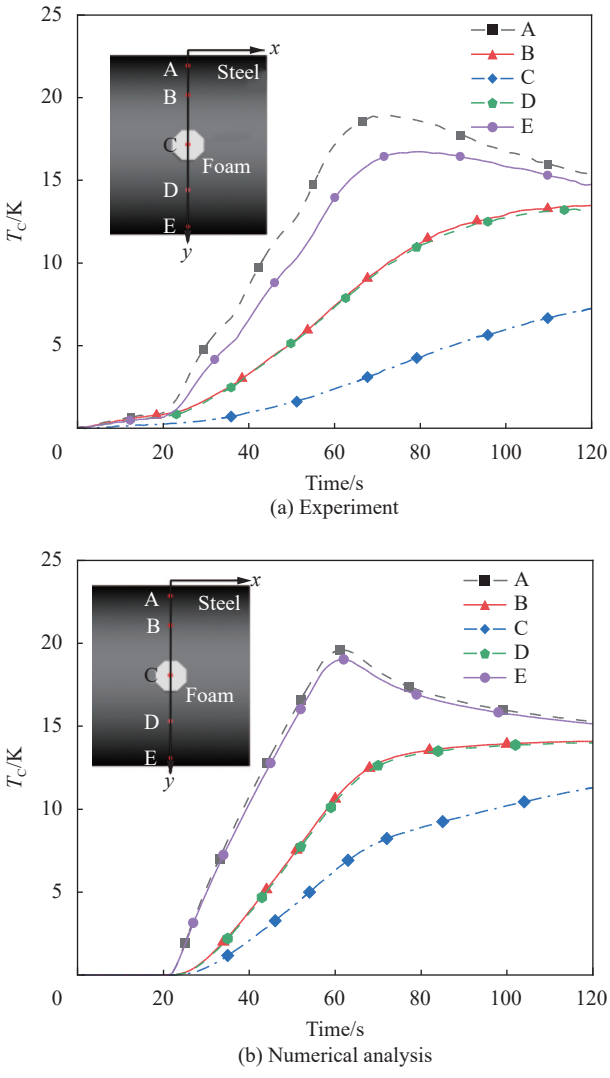


图 7　CFRP-钢试件温度-时间曲线的试验和数值分析对比

Fig. 7　Experimental and numerical analysis of temperature-time curves for CFRP-steel specimen

的各项参数合理。

4　基于多物理场数值模拟的参数分析

基于上述数值模型进行不同缺陷大小、位置和形状的参数分析，试件名称和几何尺寸见图 9。其中，OC 含义是缺陷形状为八边形，M 含义是研究缺陷面积，W 含义是研究缺陷位置，SQ、RH、CI 含义分别是缺陷形状正方形、菱形和圆形，试件缺陷详细尺寸见表 2。

4.1　不同钢板厚度涡流热成像规律

选取缺陷中心布置，钢板厚度分别为 4、6、8、10、12、16 mm 进行模拟，绘制非缺陷处和缺陷处 (点 B、C) 温差 ΔT，如图 10 所示。图 10(a) 显示随着钢板厚度增加，斜率减小，温差最大值

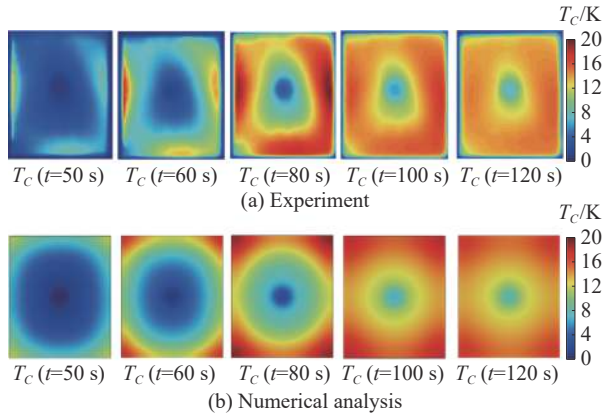


图 8　CFRP-钢试件热成像图像对比图

Fig. 8　Comparison of thermal imaging images of CFRP-steel specimen

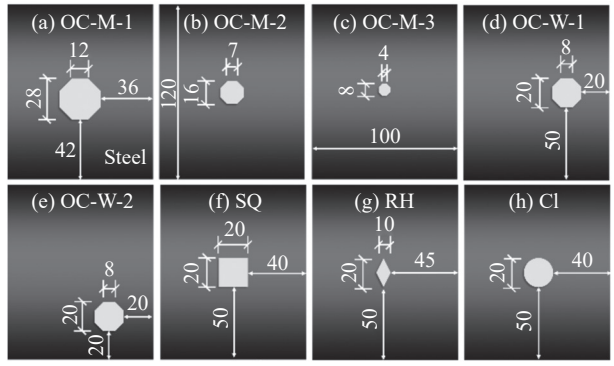


图 9　CFRP-钢试件缺陷布置 (单位：mm)

Fig. 9　Defect arrangement of CFRP-steel specimen (Unit: mm)

表 2　试件缺陷详细尺寸

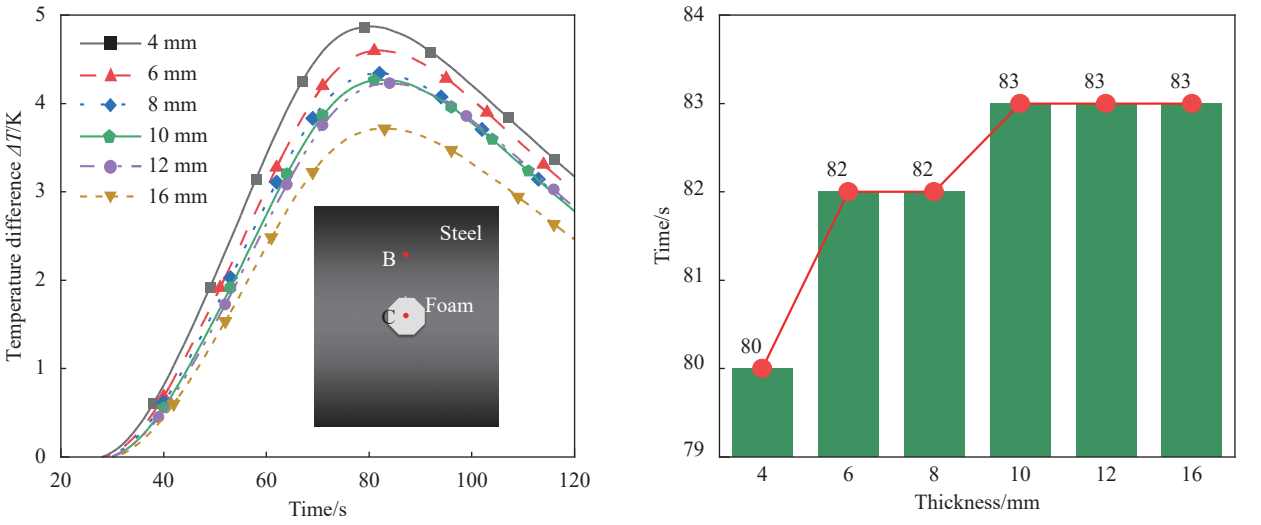
Table 2　Specimen detail size

Specimen	Defect types	Location	Area/mm^2
OC	Octagon	Center	328
OC-M-1	Octagon	Center	656
OC-M-2	Octagon	Center	216
OC-M-3	Octagon	Center	56
OC-W-1	Octagon	Right	328
OC-W-2	Octagon	Lower right	328
SQ	Square	Center	400
RH	Rhombus	Center	100
CI	Circle	Center	314

(ΔT_{max}) 减小，说明钢板越厚，热成像效果越差，越不容易发现缺陷存在；图 10(b) 为不同厚度钢板达到温差最大值所对应的时间，可以发现，随厚度增加，达到最佳检测的时间延长。但不同钢板厚度的最佳检测时间和 ΔT_{max} 差距并不大，说明钢板厚度对缺陷检测效果的影响较小。

4.2　不同缺陷面积涡流热成像规律

4 个面积不同的八边形缺陷 (图 9(a)~9(c)) 的模拟结果 (图 11) 显示：缺陷面积越大，检测用时



(a) ΔT of different steel plate thickness

(b) Time corresponding to maximum temperature difference ΔT_{max}

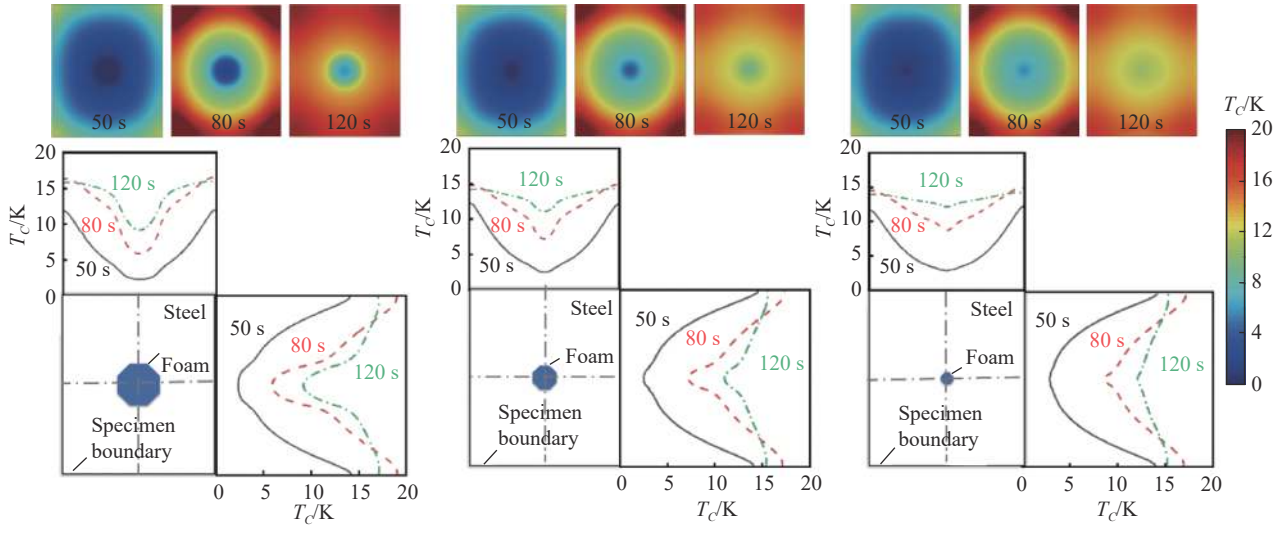
图 10　不同钢板厚度的 CFRP-钢试件温差

Fig. 10　Temperature difference of CFRP-steel specimens with different steel plate thicknesses

越短。当缺陷面积大于 206 mm² 时，在加热阶段就能发现界面缺陷存在，但并不清晰，降温阶段检测效果较好。由于边缘效应存在，温度由四角到中心逐渐降低，但仍可见缺陷处温度明显低于无缺陷处。随着试件四周热量扩散到中心，缺陷处温度慢慢升高，在 80 s 时，缺陷最小的试件已难以检测到，其他试件仍可观测到。在 120 s 时，试件 OC-M-1 的表面最高温度明显大于试件 OC-M-3 的温度，这可能是由于缺陷面积大的试件热量传递受阻较大所致。对比不同界面损伤面积的 x 与 y 的中心线分布可发现同样的规律：缺陷面积越小越难以发现。试件 x 和 y 方向温度分布会在缺陷边缘发生突变，导致温度突降，损伤面积越大则温度分布的 T_C 谷越深，在降温阶段的 T_C 谷底最深，说明降温阶段的成像效果优于加热阶段。

4.3　不同缺陷位置涡流热成像规律

选取缺陷位置不同但面积和形状相同试件 OC、OC-W-1 和 OC-W-2(图 1(b) 和图 9(d)~9(e))，进行数值模拟。图 12 显示了不同时刻不同缺陷位置 x 和 y 方向的缺陷中心线的温度分布图，可见受边缘效应影响，处于试件中心位置的缺陷最低温度在缺陷的中心，而位于试件边缘的界面缺陷处最



(a) OC-M-1　(b) OC-M-2　(c) OC-M-3

图 11　不同面积的 CFRP-钢试件 x 和 y 方向中心线的温度分布

Fig. 11　Temperature distribution of the center line in x and y directions for CFRP-steel specimens with different defect area

低温度在远离边缘的一侧。因此，可认为边缘效应降低了缺陷定位精度。处于边缘缺陷加热速度更快，在同一时刻试件边缘缺陷中心温度更高，在 t=50 s 时位于右下的缺陷中心温度比中心缺陷高 99%，比右侧缺陷高 38%。边缘缺陷的发现时间早于处于中间的缺陷，但持续时间要少于中心缺陷。

4.4 不同缺陷形状涡流热成像规律

正方形、菱形和圆形 3 种形状 (图 9(f)~9(h)) 模拟结果显示，圆形和正方形热成像效果相对较好，能准确反映出其实际形状，菱形受模糊效应影响最大，成像效果最差。因此，可以认为缺陷面积越小、缺陷越锐利，受模糊效应影响越大，热成像效果越差，越不能够准确反映出缺陷形状。图 13(a) 和图 13(c) 显示温度分布曲线会在缺陷边缘处产生拐点，产生不同深度的 T_C 谷，试件 RH 的温度变化最明显，T_C 谷底深度大于其他试件。此现象说明缺陷越细长，边缘角度越小，越容易在缺陷边角处堆积热量，导致缺陷中心处和完好处的温差更大，难以显示其真实形状，增大了检测难度。

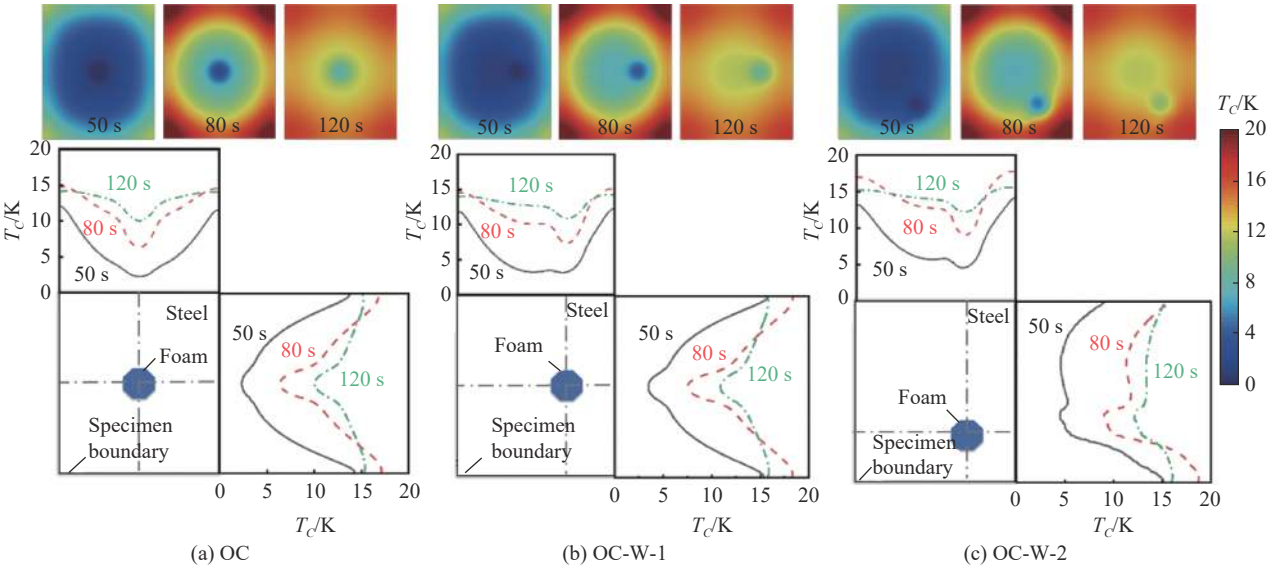


图 12 不同缺陷位置的 CFRP-钢试件 x 和 y 方向中心线的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of the center line in x and y directions at different defect locations for CFRP-steel specimens

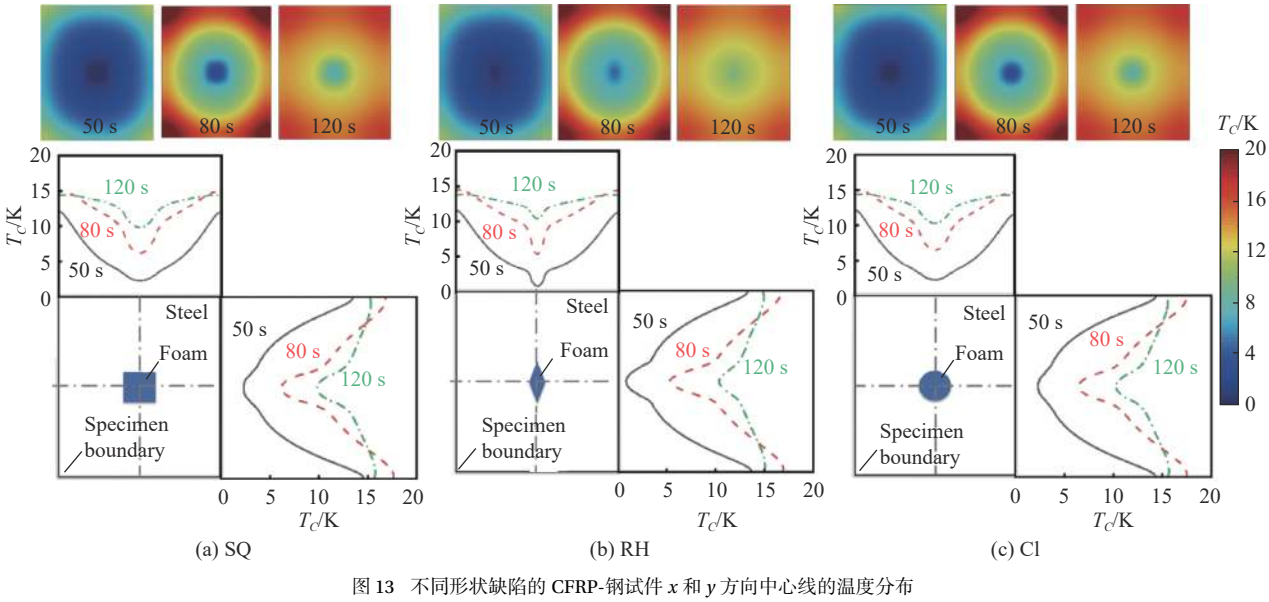


图 13 不同形状缺陷的 CFRP-钢试件 x 和 y 方向中心线的温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of the center line in x and y directions for CFRP-steel specimens with different defect shapes

5 结 论

基于自研涡流热成像 (Eddy current thermography，ECT) 系统和数值模拟对纤维增强树脂 (FRP)-钢界面脱粘的热成像规律进行了研究，结果表明：

(1) ECT 系统在 80 s 可精确检测试件中面积为 328 mm^2 的界面缺陷，但热量从内部扩散到表层造成的模糊效应降低了精度；

(2) ECT 技术的边缘效应在加热阶段突出，但冷却阶段由于热量重分布而减轻，在降温阶段检测效果优于加热阶段；

(3) 多物理场耦合数值模型与试验中涡流热成像结果吻合较好，较好地重现了 ECT 的边缘效应和模糊效应的成像规律；

(4) ECT 检测效果随着钢板厚度增加而变差，最佳检测时间也会推迟；试件缺陷面积越大，检测用时越短；

(5) 在试件边缘和角部界面损伤会受到边缘效应的影响，从而阻碍损伤区域精确定位。

参考文献：

[1] 程璐, 冯鹏, 徐善华, 等. CFRP加固钢结构抗疲劳技术研究综述[J]. 复合材料科学与工程, 2013(4)：59-63.
CHENG Lu, FENG Peng, XU Shanhua, et al. The technology and research of steel structure strengthened with CFRP[J]. Composites Science and Engineering，2013(4)：59-63(in Chinese).

[2] FENG P, HU L, ZHAO X L, et al. Study on thermal effects on fatigue behavior of cacked steel plates strengthened by CFRP sheets[J]. Thin-Walled Structures，2014，82：311-320.

[3] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. FRP加固钢结构的研究进展[J]. 工业建筑, 2005, 35(8)：20-25.
ZHENG Yun, YE Lieping, YUE Qingrui. Progress in research on steel structures with FRP[J]. Industrial Construction，2005，35(8)：20-25(in Chinese).

[4] HU L, WANG Y, FENG P, et al. Debonding development in cracked steel plates strengthened by CFRP laminates under fatigue loading: Experimental and boundary element method analysis[J]. Thin-Walled Structures，2021，166：108038.

[5] HU L, ZHAO X, FENG P. Fatigue behavior of cracked high-strength steel plates strengthened by CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction，2016，20(6)：04016043.

[6] LIU J, GUO T, HEBDON M H, et al. Behaviors of GFRP-steel bonded joints under cyclic loading after hygrothermal aging[J]. Construction and Building Materials，2020，242：118106.

[7] SCHNERCH D, RIZKALLA S. Flexural strengthening of steel bridges with high modulus CFRP strips[J]. Journal of Bridge Engineering，2008，13(2)：192-201.

[8] HESHMATI M, HAGHANI R, AL-EMRANI M. Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges[J]. Composites Part B: Engineering，2016，92：447-462.

[9] CROMWELL J R, HARRIES K A, SHAHROOZ B M. Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures[J]. Construction and Building Materials，2011，25(5)：2528-2539.

[10] LI J, LU Y, LEE Y F. Debonding detection in CFRP-reinforced steel structures using anti-symmetrical guided waves[J]. Composite Structures，2020，253：112813.

[11] 陈劲, 陈晓东, 赵辉, 等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2)：444-453.
CHEN Jin, CHEN Xiaodong, ZHAO Hui, et al. Experimental research and application of non-destructive detecting techniques for concrete-filled steel tubes based on infrared thermal imaging and ultrasonic method[J]. Journal of Building Structures，2021，42(S2)：444-453(in Chinese).

[12] 索会迎. 超声波无损检测技术应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
SUO Huiying. The application and research of ultrasonic non-destructive testing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012(in Chinese).

[13] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X射线检测技术在复合材料检测中的应用与发展[J]. 无损检测, 2016, 38(2)：67-72.
DONG Fangxu, WANG Congke, FAN Limei, et al. Application and development of X-ray detection technology in composite material detection[J]. Nondestructive Testing，2016，38(2)：67-72(in Chinese).

[14] 徐桂荣, 刘甜甜, 关雪松, 等. 航空产品磁粉检测与渗透检测分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(6)：123-127.
XU Guirong, LIU Tiantian, GUAN Xuesong, et al. Analysis of magnetic particle testing and penetrant testing for aviation products[J]. Ordnance Material Science and Engineering，2021，44(6)：123-127(in Chinese).

[15] LI T, ALMOND D P, REES D A S. Crack imaging by scanning laser line thermography[J]. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics，2011，1335(1)：407-414.

[16] 刘颖韬, 郭广平, 曾智, 等. 红外热像无损检测技术的发展历程、

现状和趋势[J]. 无损检测, 2017, 39(8)：63-70.
LIU Yingtao, GUO Guangping, ZENG Zhi, et al. The development history, status and trends of infrared thermographic nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2017，39(8)：63-70(in Chinese).

[17] 杨正伟, 谢星宇, 李胤, 等. 激光扫描热成像无损检测关键参数影响分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11)：91-101.
YANG Zhengwei, XIE Xingyu, LI Yin, et al. Influence analysis of key parameters in laser scanning thermography nondestructive testing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019，48(11)：91-101(in Chinese).

[18] SILIPIGNI G, BURRASCANO P, HUTCHINS D A, et al. Optimization of the pulse-compression technique applied to the infrared thermography nondestructive evaluation[J]. NDT & E International，2017，87：100-110.

[19] 曾伟, 王海涛, 田贵云, 等. 基于能量分析的激光超声波缺陷检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3)：650-655.
ZENG Wei, WANG Haitao, TIAN Guiyun, et al. Research on laser ultrasonic defect signal detection technology based on energy analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2014，35(3)：650-655(in Chinese).

[20] 宋培源. 基于红外热成像的结构缺陷检测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
SONG Peiyuan. Research on structural defect detection technology based on infrared thermal technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2018(in Chinese).

[21] TASHAN J, AL-MAHAIDI R, MAMKAK A. Defect size measurement and far distance infrared detection in CFRP-concrete and CFRP-steel systems[J]. Australian Journal of Structural Engineering，2016，17(1)：2-13.

[22] XIE J, WU C, GAO L, et al. Detection of internal defects in CFRP strengthened steel structures using eddy current pulsed thermography[J]. Construction and Building Materials，2021，282：122642.

[23] 许颖, 王青原, 罗聪聪, 等. 基于激光热激励红外热成像纤维增强聚合物复合材料加固混凝土结构界面损伤无损检测[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2)：472-481.
XU Ying, WANG Qingyuan, LUO Congcong, et al. Nondestructive debonding detection of fiber reinforced plastics strengthened concrete structure based on infrared thermal imaging with laser thermal excitation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(2)：472-481(in Chinese).

[24] XU C, ZHOU N, XIE J, et al. Investigation on eddy current pulsed thermography to detect hidden cracks on corroded metal surface[J]. NDT & E International，2016，84：27-35.

[25] WU J, ZHU J, XIA H, et al. DC-biased magnetization based eddy current thermography for subsurface defect detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2019，15(12)：6252-6259.

[26] PAN M, HE Y, TIAN G, et al. Defect characterisation using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications[J]. NDT & E International，2012，52：28-36.

[27] SHI Z, XU X, MA J, et al. Quantitative detection of cracks in steel using eddy current pulsed thermography[J]. Sensors，2018，18(4)：1070.

[28] LIANG T, REN W, TIAN G Y, et al. Low energy impact damage detection in CFRP using eddy current pulsed thermography[J]. Composite Structures ，2016，143：352-361.

[29] 苏伯泰, 李强, 韩静涛, 等. 基于脉冲涡流热成像钢材表面裂纹检测效果分析[J]. 中国测试, 2018, 44(5)：147-151, 158.
SU Botai, LI Qiang, HAN Jingtao, et al. Effect analysis of steel surface crack inspection based on pulse eddy current thermography[J]. China Measurement & Test，2018，44(5)：147-151, 158(in Chinese).

[30] TIAN G Y, HE Y, CHENG L, et al. Pulsed eddy current thermography for corrosion characterization[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics，2012，39(1-4)：269-276.

[31] HE Y, TIAN G Y, PAN M, et al. An investigation into eddy current pulsed thermography for detection of corrosion blister[J]. Corrosion Science，2014，78：1-6.

[32] ZOU X, WANG L, WANG J, et al. Nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel interfacial debonding using eddy current thermography[J]. Composite Structures，2022，284：115133.

[33] LI X, LIU Z, JIANG X, et al. Method for detecting damage in carbon-fibre reinforced plastic-steel structures based on eddy current pulsed thermography[J]. Nondestructive Testing and Evaluation，2018，33(1)：1-19.

[34] 潘孟春, 何赟泽, 陈棣湘. 涡流热成像检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 65-73.
PAN Mengchun, HE Yunze, CHEN Dixiang. Eddy current thermal imaging detection technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 65-73(in Chinese).