

文章编号:1001-5078(2026)02-0257-06

· 红外技术及应用 ·

激光与红外在隐身贴片中的检测研究

罗永健¹, 贺亚军¹, 董志鹏¹, 张东升²

(1. 国营长虹机械厂, 广西 桂林 541002; 2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 激光散斑与红外成像都是非接触式的无损检测方法, 本文探索了采用这两种检测技术对新型隐身贴片内部缺陷的检测灵敏度。在热加载的条件下, 使用两种检测方法同时对隐身贴片构件开展了检测试验, 同时, 在使用激光散斑检测时, 也使用真空舱进行加载, 研究不同加载形式对测量结果的影响。检测结果表明两种检测方法都能够较好地检测出紧贴型和孔洞型缺陷, 但是由于材料热扩散属性和力学性能影响, 孔洞型缺陷的检测尺寸会偏大, 这个结论为后续的缺陷检测提供了宝贵的经验。

关键词: 激光散斑; 红外成像; 隐身贴片

中图分类号: TN97; TJ765.5 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.016

Detection research of laser and infrared in stealth patch

LUO Yong-jian¹, HE Ya-jun¹, DONG Zhi-Peng¹, ZHANG Dong-sheng²

(1. State-owned Changhong Machinery Factory, Guilin 541002, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Shearography and infrared thermography are contactless non-destructive testing methods. The capability of these methods on inspecting defects in stealth coating components is studied in this paper. Under thermal loading, detection experiments are simultaneously conducted on stealth patch components utilizing both methods. In addition, vacuum loading is also applied when shearography is used in order to study the impact of different loading methods on the inspection results. The test results show that both methods can effectively identify close-contact and hole-type defects. However, due to the thermal diffusion properties and mechanical properties of the material, the detected defect size of the hole-type defects tends to be larger. This exploration provides valuable experiences for subsequent defect detection.

Keywords: shearography; infrared thermography; stealth coatings

1 引言

随着先进制导武器的不断发展, 现代战争进入了“发现即摧毁”的战争模式。隐身技术作为提高武器系统的生存能力和突防能力, 已成为现代战争中最重要、最有效的突防战术技术手段。隐身贴片属于一种涂敷型吸波复合材料, 它是将电磁波吸收剂与粘结剂混合后涂敷于目标表面形成吸波复合涂

层, 电磁波吸收剂是具有衰减电磁波性能的功能材料, 基体材料提供粘接或承载作用^[1]。涂敷型吸波复合材料具有工艺简单、使用和维护方便的优点, 目前已经在我国尖端武器上大量采用。隐身贴片与基体的粘接质量对吸波复合材料的隐身性能有重要影响。首先, 粘接能力下降会直接导致吸波材料在外力作用下从基体上脱落, 失去隐身效果, 其次, 吸波

作者简介: 罗永健(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 仪器仪表工程、激光散斑检测、红外热成像检测。

E-mail: 1103461174@qq.com

收稿日期: 2025-08-20

材料的粘接缺陷会导致对电磁波的反射率上升,从而降低隐身效果。激光散斑干涉基于光学干涉原理,用于检测结构内部缺陷所引起的表面微小变形;而红外热成像技术则通过分析热波在结构内部的传播规律,结合图像分析技术,可检测出复合材料结构内部缺陷。本文采用激光散斑与红外成像技术对典型的隐身贴片构件进行了检测,并对测试结果进行了分析,对比检测灵敏度。对探索这类新型材料的缺陷检测技术及可靠性具有重要意义。

2 方法及原理

2.1 激光散斑无损检测

剪切散斑干涉技术是一种高效的非接触性光学检测方法,已经应用在工业无损检测领域,是传统无损检测方法的重要补充^[1-2]。基于力学的原理,当在机械载荷激励下,物体内部缺陷会产生应力集中,在物体表面产生局部变形。这个变形虽然很小,但可以使用光学干涉方法检测。剪切散斑采用单光束照射物体表面,有效降低环境抖动带来的影响。迈克尔逊干涉光路的应用为时间相移技术的应用创造了条件。应用实时相移技术可提高检测图像的对比度,有利于缺陷的定位和尺寸测量^[3]。检测原理如图1.2所示。

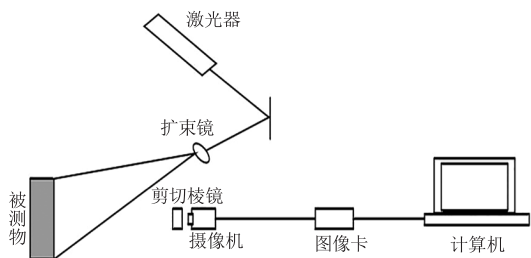


图1 激光错位散斑检测光路系统

Fig. 1 Laser misalignment speckle detection optical path system

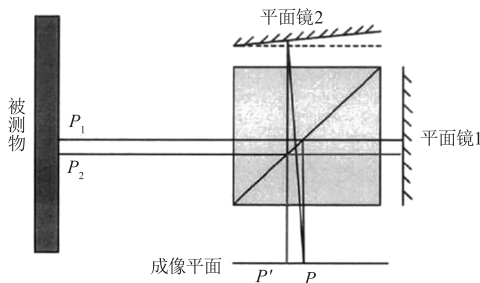


图2 迈克尔逊型错位装置

Fig. 2 Michelson-type misalignment device

时间相移法可以显著提升干涉条纹的对比度,并实现变形的自动解算。以4步相移为例(每一步移动 $\pi/2$ 相位),通过采集得到散斑干涉图像。前4幅干涉图像的光强表达式为:

$$I_{01} = a + b\cos(\phi) \quad (1)$$

$$I_{02} = a + b\cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$I_{03} = a + b\cos(\phi + \pi) \quad (3)$$

$$I_{04} = a + b\cos(\phi + \frac{3\pi}{2}) \quad (4)$$

(1) ~ (4) 式中, a 为背景强度; b 为条纹调制度; ϕ 为随机相位分布。通过一系列运算可得变形前散斑相位表达式:

$$\phi_0 = \tan^{-1} \frac{I_{04} - I_{02}}{I_{01} - I_{03}} \quad (5)$$

检测物体变形后的相位表达式:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{I_{14} - I_{12}}{I_{11} - I_{13}} \quad (6)$$

根据相同方法,得到受检物体表面变形的相位差为受力前后相位差为:

$$\phi = \phi_1 - \phi_0 = \tan^{-1} \frac{I_{14} - I_{12}}{I_{11} - I_{13}} - \tan^{-1} \frac{I_{04} - I_{02}}{I_{01} - I_{03}} \quad (7)$$

式中, I_{01} 、 I_{02} 、 I_{03} 、 I_{04} 分别为物体变形前的4幅图像; I_{11} 、 I_{12} 、 I_{13} 、 I_{14} 分别为物体变形后的4幅图像。应用实时相移技术可提高检测图像的对比度,同时有利于缺陷的定位和尺寸测量^[4]。

2.2 红外成像无损检测

红外线是介于微波和可见光之间的电磁波,波长范围在 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间。当同一物体各部分温度不同时,其辐射的红外线能量和波长也会有所不同^[5]。红外热成像无损检测技术是以红外辐射原理作为基础,利用红外辐射分析的方法对零件、仪器/设备等进行检测。其核心是采用激励热源对被检测零件的表面进行加载,再依据由红外热像仪记录的红外辐射差异探测物体内部缺陷^[6]。由于外部热加载的热流通常是均匀的,对无缺陷的零件,经过物体热传导或反射后,在其表面的温度场分布基本上也是均匀的。而当物体内部存在隔热性缺陷时,热传导一定时间后,零件表面的温度分布会出现不均匀性,由于零件中缺陷处热量的堆积会导致从正面测得该位置的表面温度较高,形成“热点”。而对于内部存在导热性缺陷的物体,热传导一定时间后,正面和背面的温度分布也将不均匀,由于缺陷处传热较快,使得从正面测得的表面温度较低,形成“冷点”。根据物体表面的温度信息即可推导材料

的均匀性和材料内部的结构信息,进而对其内部是否存在缺陷做出判断。

为了获得高质量的红外检测图像,本文采用了本课题组开发的红外图像分析方法^[7],通过长脉冲热激励和序列图像分析,获得高质量检测图像。

对于长脉冲热激励方式,利用图像预处理方式去除背景噪声,采用傅里叶变换将采集的一维温度信号像素从时域转化到频域,从而得到每个像素点的相位数据。

$$\phi_{i,j}(f_k) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N \Delta T_{i,j}(t_n) \cos(2\pi kn/N)}{\sum_{n=1}^N \Delta T_{i,j}(t_n) \sin(2\pi kn/N)} \quad (8)$$

$$n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$t_n = (n - 1)\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (10)$$

式中, $\phi(f_k)$ 是傅里叶变换后第 K 个频率分量的相位信息; N 为红外序列图像总帧数; $\Delta T(t_n)$ 为 t_n 时刻采集到的温度数据; Δt 是红外热像仪采集的间隔; f_s 是红外热像仪的采集帧率。本方法通过结构厚度考虑热量的传播。

3 对比试块

3.1 对比试块设计及制作

采用某型快速粘接剂将隐身贴片粘接在碳纤维复合材料(T700/XX)表面,对比试块的表面缝隙使用吸波密封胶腻子进行刮平处理,最后在对比试块的表面喷涂上相应的油漆涂层。为了到达更好的吸波屏蔽效果,在贴片粘接中还埋入了大量的金属细状颗粒。隐身贴片的具体参数见表1所示。

表1 隐身贴片规格和参数

Tab. 1 Specifications and parameters of stealth patch

基体纤维材料	厚度/mm	面密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	附力/MPa	冲击强度/ $\text{kg} \cdot \text{cm}$	韧性
T700/XX	1	≤ 3.4	≥ 3	≥ 40	3mm

隐身贴片粘贴试件的制作采用厚度为 1.5 mm 和 2 mm 的碳纤维增强复合材料作为基体,贴片厚度为 1 mm,外形尺寸为 150 mm × 160 mm。采用快速粘接剂在碳纤维增强复合材料的表面上粘贴某型隐身涂层材料,为了保证粘结剂的均匀性,需将隐身贴片压实,并在表面缝隙用吸波密封胶腻子刮平,最后在表面喷上相应油漆涂层。设计制作了两种类型的缺陷试件,每块试件上共两列缺陷。其中图3(a)

中左列为紧贴型缺陷,在隐身贴片与碳纤维板之间嵌入2层聚四氟乙烯薄膜(单层厚度小于0.05 mm);在图3(a)中右列为空洞型缺陷,空洞型缺陷采用机加工的方式进行挖孔,在碳纤维板上机加0.5 mm深度的平底孔作为下陷缺陷。对比试件设计图见图3所示,实物图见图4和图5所示。

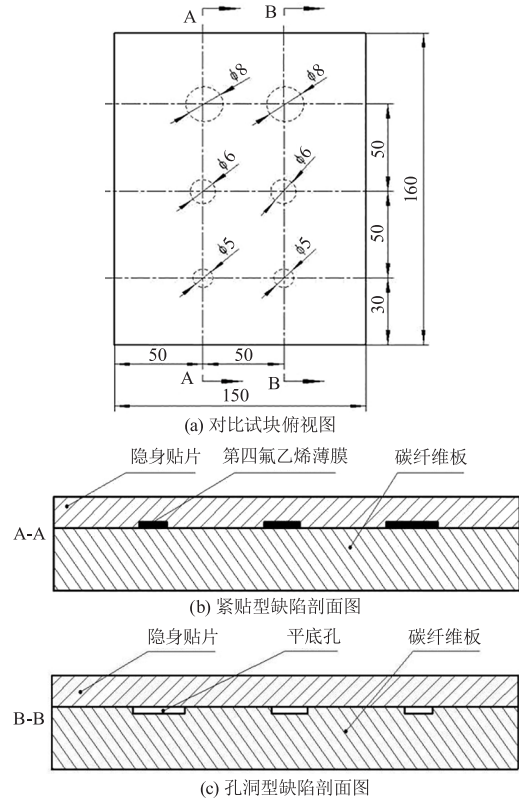


图3 对比试块设计图

Fig. 3 Comparison test block design diagram

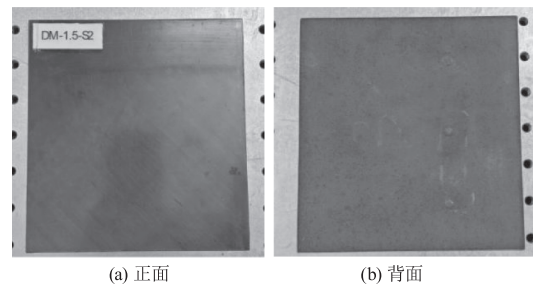


图4 对比试块实物图(DM-1.5-S2)

Fig. 4 Physical image of the comparison test block

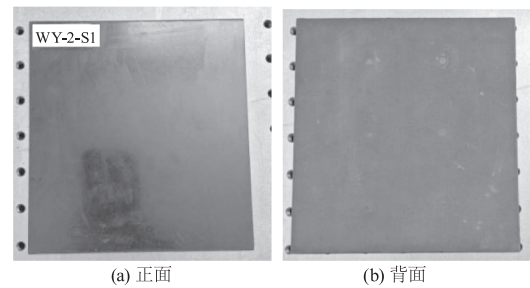


图5 对比试块实物图(WY-2-S1)

Fig. 5 Physical image of the comparison test block

3.2 对比试块试验验证

对比试块制作完成后,使用数字 X 射线进行了检测,进一步验证预埋缺陷的尺寸大小。采用便携式数字 X 射线对两块试件分别进行透照检测。

对比试块的主要检测参数设置为:①管电压 160 kV;②管电流 1 mA;③曝光时间 7000 ns。检测结果如图 6 和表 2 所示,缺陷的有效直径从上到下分别为 8 mm,6 mm,5 mm,与预埋缺陷相符。在图 6 中左列为紧贴型缺陷的 X 射线检测结果,右列为孔洞型缺陷的 X 射线检测结果。

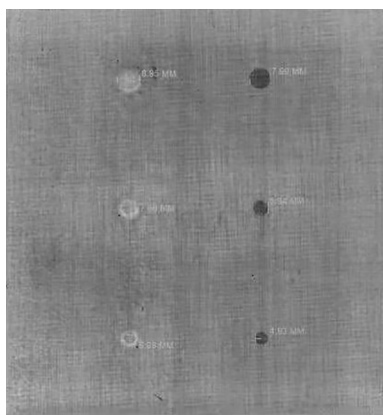


图 6 数字射线检测图像

Fig. 6 Digital radiographic image

表 2 缺陷尺寸对比

Tab. 2 Comparison of defect sizes

缺陷位置	预埋缺陷大小/mm	实际检测尺寸/mm
1	8	8
2	6	6
3	5	5

4 试验

4.1 检测设备

本论文采用国营长虹机械厂和上海大学共同研发的 LST-IRT18 型激光散斑与红外复合无损检测系统,通过一体化设计,把激光散斑检测和红外成像检测两种方法进行了优化组合,将热辐射加载、激光投射和干涉功能等模块集成到一台设备上,形成激光与红外成像复合智能检测装备。使该系统操作便捷,降低了检测劳动强度,提高了检测效率和检测准确度。

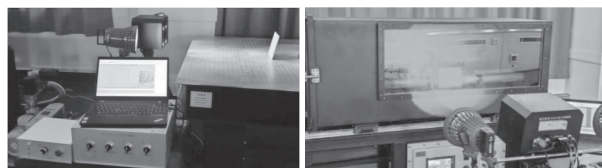
此激光与红外成像复合智能检测装备获得机械工业仪器仪表综合技术经济研究所和智能检测装备产业发展联盟颁发的全国第一批智能检测装备创新

产品名录。

激光散斑检测的图像分辨率为 1600×1200 像素,实时相移帧率为 25 f/s。有效检测面积为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,激光功率为 400 mW,热加载灯功率为 2000 W。可检测最小缺陷直径为 3 mm;红外热像检测的激励源是两个功率为 1000 W 的卤素灯发光,热辐射时间可调,实验使用的红外热像仪的工作波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,图像分辨率 640×512 像素,温度响应范围为 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$,热灵敏度在室温下为 20 mK。

4.2 检测过程

将被测试块放置在光学防震平台上,检测距离为 1 m,使用 2000 W 卤素灯对试块进行热加载,加载时间为 10 s,然后再用激光散斑与红外复合无损检测系统对试块缺陷分别进行激光散斑检测和红外成像检测。检测现场见图 7 所示。



(a) 热加载

(b) 真空加载

图 7 实验现场

Fig. 7 Experimental site

为了研究不同加载形式对测量结果的影响,在使用激光散斑检测的同时,也使用真空舱对隐身贴片粘贴试件进行了加载检测,获得真空加载的激光散斑检测图像。在负压舱内的真空度为 90 kPa 时对其停止抽气,采集一幅参考图像,然后再缓慢放气,获得检测图像。

5 试验结果与分析

5.1 红外热成像检测结果

在本次测试中,红外检测视场范围为 $200 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$,在 10 s 长脉冲加载结束后,热像仪以 10 Hz 的采集帧率采集 400 张红外原始热图,并用序列图增强算法进行分析。不同厚度隐身贴片的红外图像检测结果如图 8 所示,从图 8 中可知全部预制缺陷均清晰可见,左侧紧贴型缺陷测量的缺陷直径准确,但右侧挖孔型缺陷测量的缺陷尺寸比实际缺陷尺寸稍大。考虑到热量传导不仅沿厚度方向,而且也面内扩散,这种性质导致了缺陷检测尺寸偏大。同时也可以看到,随着缺陷深度的增加,图像噪声随机增大。

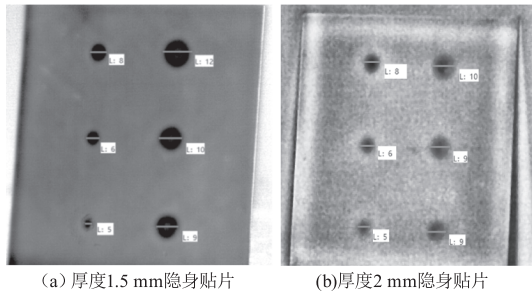


图8 红外检测图像

Fig.8 Infrared detection image

5.2 激光散斑检测结果

考虑到试块尺寸的较小,本次测试视场范围为320 mm×260 mm。在红外检测的同时,开展了在热激励下的激光散斑检测,两种厚度隐身贴片干涉条纹和相位的检测结果如图9、图10所示。结果表明:检测的缺陷尺寸与实际结果相近。

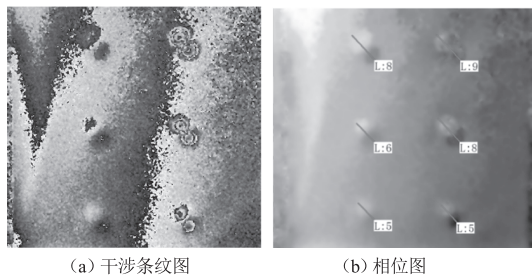


图9 厚度1.5 mm 隐身贴片检测图像

Fig.9 Detection image of stealth patch with a thickness of 1.5 mm

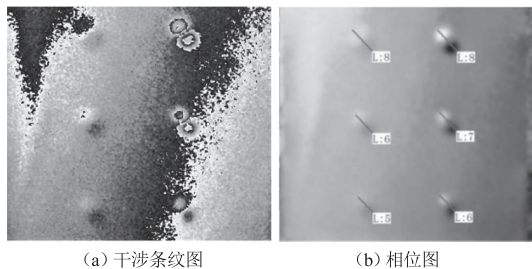


图10 厚度2 mm 隐身贴片检测图像

Fig.10 Detection image of stealth patch with a thickness of 2 mm

采用真空加载时,两种厚度隐身贴片干涉条纹和相位检测结果见图11、图12。从真空加载的激光散斑检测结果可以看出,两种厚度隐身贴片的缺陷全部可以检出。紧贴型缺陷尺寸与实际相符,但孔洞型缺陷尺寸远大于实际尺寸。这主要是由于孔洞型缺陷内部存在较多的空气,在真空作用下内部空气膨胀带动周边隐身贴片一起变形,导致局部变形的区域较大。

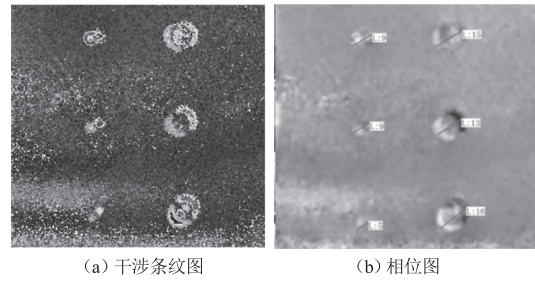


图11 厚度1.5 mm 隐身贴片检测图像

Fig.11 Detection image of stealth patch with a thickness of 1.5 mm

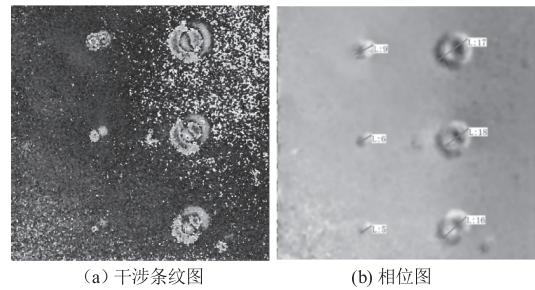


图12 厚度2 mm 隐身贴片检测图像

Fig.12 Detection image of stealth patch with a thickness of 2 mm

6 结论

本文采用自行研发的激光散斑与红外复合无损检测系统,使用激光散斑检测和红外热成像检测分别对某型隐身贴片开展了无损检测试验,同时,对隐身贴片中的紧贴型和孔洞型两种缺陷进行了系统检测及分析,得到以下结论:

(1)针对紧贴型缺陷对比试块,采用激光散斑检测和红外热成像检测方法均能较好地检测出相应的缺陷,检测结果与预埋缺陷尺寸保持一致。

(2)针对孔洞型缺陷对比试块,红外热成像检测方法和真空加载的条件下的激光散斑检测方法,检测结果与预埋缺陷尺寸比较,存在偏大的现象。使用热加载条件下的激光散斑检测方法,能较好地检测出试块中的紧贴型缺陷和孔洞型缺陷,检测结果与预埋缺陷尺寸一致。

(3)在真空加载条件下的激光散斑检测方法导致孔洞型缺陷偏大,主要是由于孔洞型缺陷内部存在较多的空气,在真空作用下内部空气膨胀带动周边隐身贴片一起变形,从而导致局部变形的区域较大。

(4)使用红外热成像检测方法导致孔洞型缺陷偏大,主要是物体热量传导不仅沿厚度方向,而且也向面内扩散,这种性质导致了缺陷检测尺寸偏大。同时,随着缺陷深度的增加,图像噪声随之增大。

参考文献:

- [1] Ye Y M, Li X D, Feng J M, et al. Dual-lens system in enlarging the viewing angle for the Michelson interferometer [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(6): 1529 – 1534.
- [2] Macedo F J, Benedet M E, Fantin A V, et al. Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 104: 100 – 108.
- [3] Ye Y M, Ma K, Zhou H, et al. An automated shearography system for cylindrical surface inspection [J]. *Measurement*, 2019, 135: 400 – 405.
- [4] Kryukov I, Böhm S. Prospects and limitations of eddy current shearography for non-destructive testing of adhesively bonded structural joints [J]. *The Journal of Adhesion*, 2019, 95(9): 874 – 886.
- [5] Georges M P. Comparison between thermographic and holographic techniques for nondestructive testing of composites: similarities, differences and potential cross-fertilization [C]//SPECKLE 2015: VI International Conference on Speckle Metrology. Bellingham, WA: SPIE, 2015: 966002.
- [6] Liu J Y, Wang F, Liu Y, et al. Inverse methodology for identification the thermal diffusivity and subsurface defect of CFRP composite by lock-in thermographic phase (LITP) profile reconstruction [J]. *Composite Structures*, 2016, 138: 214 – 226.
- [7] Wei Y J, Su Z L, Mao S S, et al. An infrared defect sizing method based on enhanced phase images [J]. *Sensors*, 2020, 20(13): 3626.