

〈无损检测〉

基于相位和表面温度的缺陷定量识别及其对比研究

陈林¹, 黎敏谦¹, 高峰¹, 刘敏², 张弛¹

(1. 海军士官学校兵器系, 安徽 蚌埠 233000; 2. 海军 92957 部队, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为了提高红外检测的精度, 实现缺陷深度和大小同步检测, 将共轭梯度反演算法分别与脉冲检测技术和脉冲相位检测技术相结合, 实现了基于相位和表面温度的红外定量识别, 通过数字算例对比分析了不同因素对识别结果的影响。研究表明: 在无测温误差时, 基于相位和表面温度的识别都能准确地识别缺陷的位置大小; 基于相位和表面温度的识别结果精度都会因随机误差的增大而降低; 基于表面温度的识别结果精度会因均匀误差的增大而降低, 但是均匀误差对基于相位的识别无影响。

关键词: 定量识别; 对比研究; 红外检测; 共轭梯度

中图分类号: TK38 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2022)02-0635-06

Quantitative Identification and Comparative Study of Defects Based on Phase and Surface Temperatures

CHEN Lin¹, LI Minqian¹, GAO Feng¹, LIU Min², ZHANG Chi¹

(1. *Weaponry Department, Naval Petty Officer Academy, Bengbu 233000, China;*

2. Unit 92957 of Navy, Zhoushan 316000, China)

Abstract: To improve the accuracy of infrared detection and realize synchronous detection of defect depth and size, a conjugate gradient recognition algorithm is integrated with pulsed thermography and pulsed phase thermography. Quantitative identification of infrared technology is achieved based on the phase and surface temperatures. The influence of these factors on the identification result is analyzed using numerical examples. The results show that without temperature errors, the defect is accurately identified based on the phase and surface temperature. The random temperature error decreases the accuracy of the identification result based on the phase and surface temperature. The uniform temperature error decreases the accuracy of the identification result based on the surface temperature. However, the uniform temperature measurement error does not affect the identification result based on the phase.

Key words: quantitative identification, comparative study, infrared detection, conjugate gradient

0 引言

红外检测作为一种新型无损检测技术, 具有快速、直观等优点, 其常见的检测方法有: 脉冲检测法、锁相检测法和脉冲相位检测法^[1-3]。其中, 脉冲检测法是基于表面温度的检测方法, 锁相检测法和脉冲相位检测法是基于相位的检测方法, 作为新型检测技术, 正得到广泛的研究和应用。例如, 文献[4-5]利用脉冲检测法对复合材料的内部缺陷检测进行了研究; 文献[6-7]采用脉冲检测技术对固体火箭发动机绝热层的

脱粘缺陷检测进行了研究; 文献[8-10]采用锁相检测技术分别对碳纤维夹层结构、平底钢材料和囊体布的缺陷检测进行了研究; 文献[11-12]对提高脉冲相位检测法的检测效果和效率进行了研究。文献[4-12]在进行红外检测的研究时, 被检测材料缺陷的大小, 主要是通过对其红外图像的处理得到, 而每种红外图像处理算法都有局限性; 对于缺陷深度的确定, 主要是通过构建缺陷深度与检测表面的温度差或者相位差间的拟合关系来实现的, 但是检测表面的温度差或者相位差的大小不仅会受到缺陷深度的影响, 还会受到缺

收稿日期: 2020-11-09; 修订日期: 2021-02-28.

作者简介: 陈林 (1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事红外跟踪识别及检测方面研究。E-mail: chenlinhonghu@163.com.

基金项目: “十三五”军队重点院校和重点学科专业建设计划资助。

陷大小的影响,因而在确定缺陷深度与检测表面的温度差或者相位差间的拟合关系时,需要在相同的缺陷大小下进行。但是,实际检测时,不可能准确地识别缺陷的大小,会存在一定偏差,因此,为了提高缺陷深度的检测精度,构建的拟合关系往往需要根据经验添加一个修正系数,而修正系数会受材料特性的影响,对于不同材料需要通过相应的实验来确定,增加了缺陷定量检测的复杂度,并且在实际检测时,往往会因修正系数的不准确而带来较大的检测误差。为了提高红外检测的精度,本文将共轭梯度算法与脉冲相位法和脉冲检测法相结合,实现了对缺陷深度和大小同步检测,并通过数字算例对检测方法进行了验

证,比较了两种检测方法的优缺点,为促进缺陷定量检测的发展提供了一定的理论指导。

1 正问题模型

本文研究的是二维导热下的识别问题,如图1所示,试件内部含有矩形缺陷,缺陷内充满空气,试件大小为 $L_1=80\text{mm}$ 、 $L_2=20\text{mm}$,缺陷的位置大小通过参数 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 来确定(参数 Ly_2 决定了缺陷的深度,参数 Lx_1 、 Lx_2 决定了缺陷的宽度大小,参数 Ly_1 、 Ly_2 决定了缺陷的高度大小), q_s 为加载到表面的热流强度。

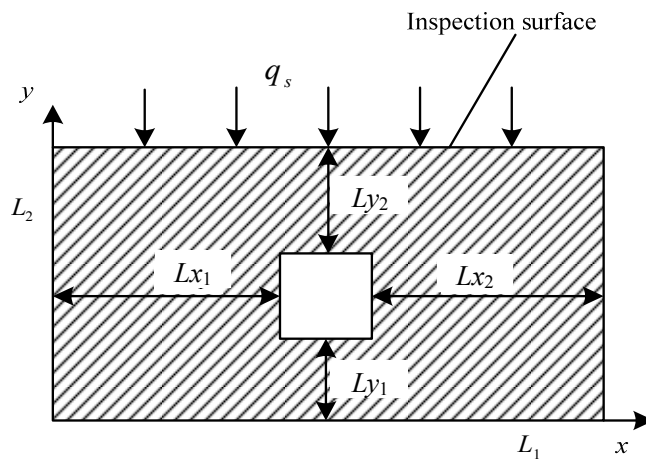


图1 二维热传导模型

Fig.1 The model of two-dimensional heat conduction

二维试件的导热微分方程可写为:

$$\lambda \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} = \rho c \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件:

$$T|_{t=0} = 20^\circ\text{C} \quad (2)$$

边界条件:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_2} &= q_s + \alpha(T_f - T) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_1} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; T 为温度, $^\circ\text{C}$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ρ 为密度, kg/m^3 ; q_s 为热流强度,在 $t=0\sim 0.1\text{s}$, $q_s=2\times 10^7\text{W}/\text{m}^2$,在 $t>0.1\text{s}$ 时, $q_s=0$; $\alpha=10\text{W}/\text{m}^2$ 为换热系数; $T_f=20^\circ\text{C}$ 为环境温度。试

件及其内部空气的物性参数如表1所示。正问题求解是为了得到检测外表面的温度分布和相位分布信息,从而为反问题的求解提供依据。

表1 材料的物性参数

Material	Specific heat capacity / $(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	Conductivity $/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	Density / (kg/m^3)
Test-piece	117	963	2680
Air	0.0257	1005	1.2

2 反演识别求解过程

2.1 共轭梯度算法

共轭梯度算法(conjugate gradient method, CGM)通过使目标函数 $S(\mathbf{P})$ 达到极小化来确定识别结果,即 $S(\mathbf{P}) < \varepsilon$ (ε 为给定的极小正数)。

$$S(\mathbf{P}) = [\mathbf{Y} - \mathbf{U}(\mathbf{P})]^T \cdot [\mathbf{Y} - \mathbf{U}(\mathbf{P})] = \sum_{i=1}^m [Y_i - U_i]^2 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{P}=(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ 是待识别的参数向量,对于本

文 $\mathbf{P}=(Lx_1, Lx_2, Ly_1, Ly_2)$; m 为 x 方向上的离散网格数; Y_i 为实际测量得到的值; U_i 为在参数向量 \mathbf{P} 下通过公式(1)~(3)计算得到的理论值 (基于表面温度检测时, Y_i 、 U_i 为表面温度值; 基于相位检测时, Y_i 、 U_i 为相位值)。

2.2 共轭梯度算法的迭代原理

共轭梯度反演识别算法的迭代公式为:

$$\mathbf{P}^{k+1} = \mathbf{P}^k - \beta^k d^k \quad (5)$$

式中: \mathbf{P}^k 为第 k 次迭代的结果; d^k 、 β^k 分别为第 k 次迭代的共轭搜索方向和搜索步长, 其计算公式为:

$$d^k = \nabla S(\mathbf{P}^k) + \gamma^k \cdot d^{k-1} \quad (6)$$

$$\beta^k = \frac{[\mathbf{J}^k \cdot d^k]^T \cdot [U(\mathbf{P}^k) - Y]}{[\mathbf{J}^k \cdot d^k]^T \cdot [\mathbf{J}^k \cdot d^k]} \quad (7)$$

式中: $\nabla S(\mathbf{P}^k)$ 为共轭梯度方向; γ^k 为共轭系数; \mathbf{J}^k 为

敏感系数矩阵; 其表达式分别为:

$$\nabla S(\mathbf{P}^k) = -2(\mathbf{J}^k)^T [Y - U(\mathbf{P}^k)] \quad (8)$$

$$\gamma^k = \begin{cases} \frac{\nabla S^T(\mathbf{P}^k) \cdot \nabla S(\mathbf{P}^k)}{\nabla S^T(\mathbf{P}^{k-1}) \cdot \nabla S(\mathbf{P}^{k-1})} & (k = 1, 2, \dots) \\ 0 & (k = 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$J(\mathbf{P}) = \left[\frac{\partial U^T(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}} \right]^T \quad (10)$$

2.3 迭代求解过程

对于本文缺陷的识别问题, 其识别过程可描述为: 通过共轭梯度算法不断修正缺陷参数 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 的初始假设值, 以期找到一组 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 值, 使得在此组 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 值下通过公式(1)~(3)计算得到的理论值与实测值相吻合(基于表面温度检测时, 理论值与实测值为表面温度; 基于相位检测时, 为相位), 求解流程如图2所示。

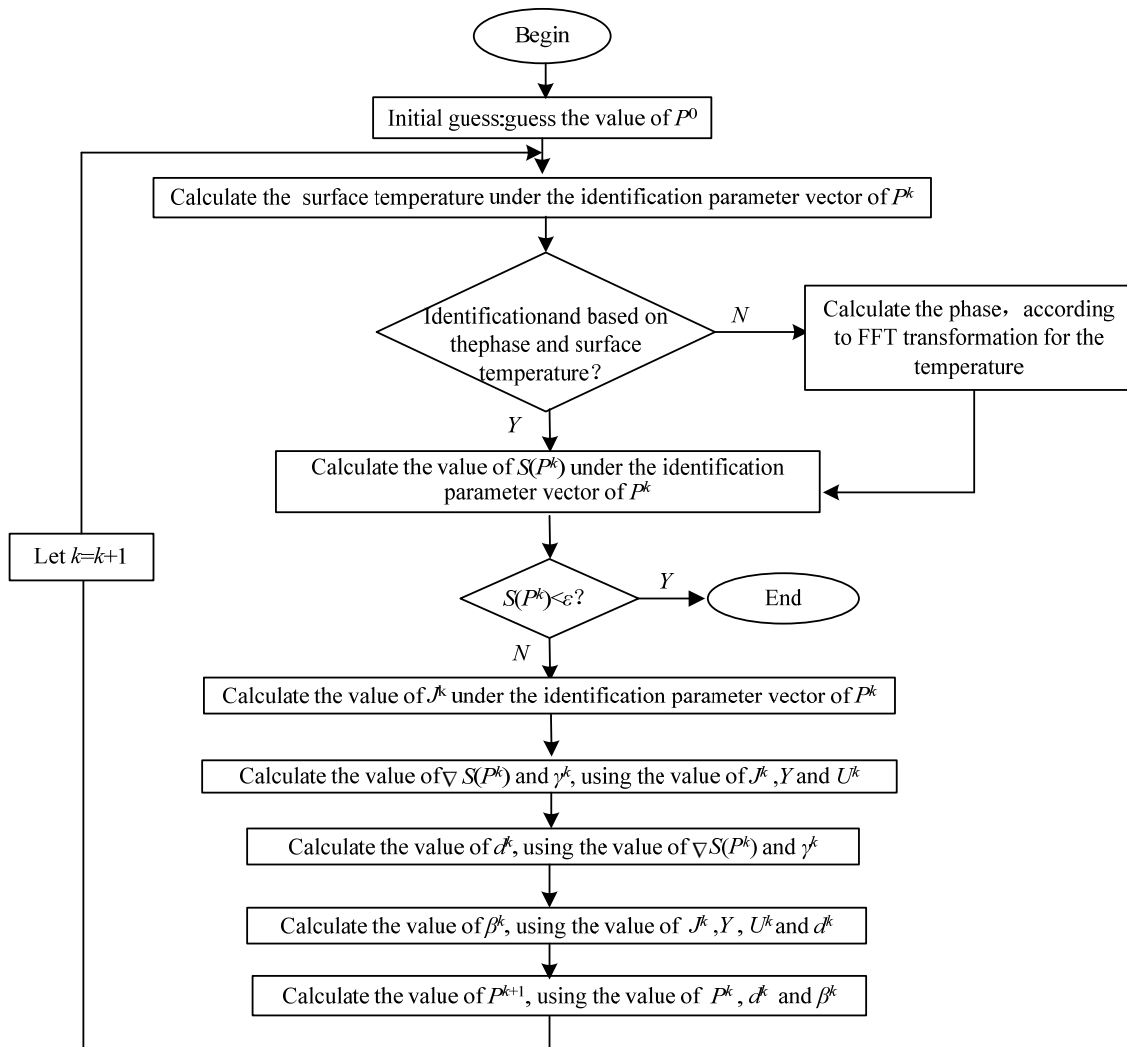


图2 基于相位和表面温度的CGM反演识别算法流程图

Fig.2 The flow chart of CGM inversion algorithm based on phase and surface temperature

3 算例及其分析

在进行定量识别的数字验证过程中,首先假定一组 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 值,通过方程(1)~(3)计算得到表面的真实温度值,然后依据公式(11)提出的测温误差模拟方法,将测温误差添加到由方程(1)~(2)计算得到的理论温度值上,以此作为实际检测时表面的温度值,对温度进行 FFT 变换,得到检测表面的相位,然后再假设一组 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 的初始值,以表面温度或者相位为依据,利用共轭梯度法迭代求解出 Lx_1 、 Lx_2 、 Ly_1 、 Ly_2 的最终值。

$$Y = Y_{true} + e + \omega\sigma \quad (11)$$

式中: Y 为实测温度; Y_{true} 为真实温度; e 为均匀误差; ω 为随机数 ($-1.0 \sim 1.0$), σ 为偏差程度。

为了评价识别的准确性,定义识别结果的相对误差:

$$E_r = \left| \frac{P^e - P}{P} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中: E_r 为相对误差; P^e 为识别结果; P 为真实值。

表2为不考虑测温误差时在不同初始假设下的识别结果(材料内部缺陷的真实值为 $Lx_1=35$ mm、 $Lx_2=25$ mm、 $Ly_1=10$ mm、 $Ly_2=5$ mm)。由表2可以看出,当不存在测温误差时,在不同的初始假设下,基于相位和表面温度的识别方法都能准确地识别缺陷位置大小。

表3为不同随机误差下的识别结果,材料内部缺陷的真实参数值为 $Lx_1=35$ mm、 $Lx_2=25$ mm、 $Ly_1=10$ mm、 $Ly_2=5$ mm,初始假设为 $Lx_1=15$ mm、 $Lx_2=35$ mm、 $Ly_1=5$ mm、 $Ly_2=10$ mm。从表中可以看出,

当测温误差较小时,基于相位和表面温度的识别结果都有较高的精度,但当随机误差增大时,识别结果的精度都会降低,可见基于相位和表面温度的识别精度都对随机误差敏感,识别精度会随着随机误差的增大而降低。

在实际测温时,如果选取的发射率与物体表面的发射率存在偏差,或者背景辐射较复杂时,会导致测得的温度值与被测物体的实际温度间出现均匀误差^[13-14]。表4为不同的均匀误差下的识别结果,材料内部缺陷的真实参数值为 $Lx_1=35$ mm、 $Lx_2=25$ mm、 $Ly_1=10$ mm、 $Ly_2=5$ mm,初始假设为 $Lx_1=15$ mm、 $Lx_2=35$ mm、 $Ly_1=5$ mm、 $Ly_2=10$ mm。由表4可以看出,基于相位的识别都能准确地识别出材料内部缺陷的位置,识别结果精度不随均匀误差的增大而增大;而基于表面温度的识别在均匀误差较小时有较好的识别精度,随均匀误差的增大识别精度将降低,特别是参数 Ly_1 的识别精度较差。可见均匀误差对基于相位的识别无影响,而对基于表面温度的识别影响较大。因此,在实际检测时,如果采用基于表面温度的检测,应当尽量减小均匀误差;如果发射率误差较大或者背景辐射较复杂,应当采用基于相位的检测方法。

4 结论

本文将共轭梯度算法与脉冲相位和脉冲检测法相结合,实现了基于相位和表面温度的缺陷定量识别,对比分析了不同因素对识别结果的影响,得到的结论主要有:

①当不存在测温误差时,在不同的初始假设下,基于相位与基于表面温度的识别方法都能准确地识别缺陷位置大小。

表2 不同初始假设下的识别结果

Table 2 Results in different initial guesses

Initial guess/mm	Identification result/mm	E_r (%)
15, 35, 5, 10	Phase detect	35.000, 25.000
		10.000, 5.000
	Temperature detect	35.000, 25.000
		10.000, 5.000
25, 15, 8, 8	Phase detect	35.000, 25.000
		10.000, 5.000
	Temperature detect	35.000, 25.000
		10.000, 5.000
45, 15, 15, 01	Phase detect	35.000, 25.000
		10.000, 5.000
	Temperature detect	35.000, 25.000
		10.000, 5.000

表3 不同随机误差下的识别结果

Table 3 Results in distinct random temperature errors

$\sigma/^\circ\text{C}$		Identification result/mm	$E_r(\%)$
0	Phase detect	35.000, 25.000	2.1×10^{-7} , 2.2×10^{-8}
		10.000, 5.000	3.3×10^{-7} , 6.6×10^{-7}
	Temperature detect	35.000, 25.000	3.4×10^{-8} , 6.3×10^{-9}
		10.000, 5.000	1.2×10^{-7} , 2.8×10^{-8}
0.2	Phase detect	34.970, 25.035	0.09, 0.14
		10.016, 4.996	0.16, 0.08
	Temperature detect	34.886, 25.017	0.33, 0.07
		9.923, 5.008	0.77, 0.16
1	Phase detect	35.159, 24.912	0.45, 0.35
		10.117, 4.960	1.17, 0.80
	Temperature detect	34.653, 24.635	0.99, 1.46
		9.764, 5.065	2.36, 1.30

表4 不同均匀误差下的识别结果

Table 4 Results in distinct uniform temperature errors

$e/^\circ\text{C}$		Identification result/mm	$E_r(\%)$
0	Phase detect	35.000, 25.000	2.1×10^{-7} , 2.2×10^{-8}
		10.000, 5.000	3.3×10^{-7} , 6.6×10^{-7}
	Temperature detect	35.000, 25.000	3.4×10^{-8} , 6.3×10^{-9}
		10.000, 5.000	1.2×10^{-7} , 2.8×10^{-8}
0.2	Phase detect	35.000, 25.000	2.1×10^{-7} , 2.2×10^{-8}
		10.000, 5.000	3.3×10^{-7} , 6.6×10^{-7}
	Temperature detect	34.780, 24.829	0.63, 0.68
		9.157, 5.028	8.43, 0.56
1	Phase detect	35.000, 25.000	2.1×10^{-7} , 2.2×10^{-8}
		10.000, 5.000	3.3×10^{-7} , 6.6×10^{-7}
	Temperature detect	34.507, 24.124	1.41, 3.50
		1.013, 5.077	89.87, 1.54

②在较小的随机测温误差下,基于相位与基于表面温度的识别都有很好的识别精度,但随测温误差的增大识别精度将降低。可见基于相位和表面温度的识别精度都对随机误差敏感。

③在不同的均匀误差下,基于相位的识别都能准确地识别缺陷位置大小;基于表面温度的识别结果在均匀误差较小时,有较好的识别精度,但随均匀误差的增大识别精度将降低。可见均匀误差对基于相位的识别无影响,而对基于表面温度的识别影响较大。因此,在实际检测时,如果采用基于表面温度的检测,应当尽量减小均匀误差;如果发射率误差较大或者背景辐射较复杂,应当采用基于相位的检测方法。

参考文献:

[1] 李艳红,张存林,金万平,等.碳纤维复合材料的红外热波检测[J].激光与红外,2005,35(4):262-264.
LI Yanhong, ZHANG Cunli, JIN Wanping, et al. IR thermal wave nondestructive inspection of carbon fiber composite material[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(4): 262-264.

[2] LIU J Y, GONG J L, QIN L, et al. Three-dimensional visualization of subsurface defect using lock-in thermography[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(5/6): 1226-1235.

[3] 高晓进,周金帅,江柏红,等. C/SiC 复合材料的红外热像无损检测研究[J]. 激光与红外,2018,48(6):720-725.
GAO Xiaojin, ZHOU Jinshuai, JIANG Baihong, et al. Research on infrared thermography nondestructive testing of C/SiC composite[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(6): 720-725.

[4] 林隆荣,钟舜聪,伏喜斌,等.复合材料缺陷的脉冲热成像有限元模

- 拟研究[J]. *机电工程*, 2016, **33**(1): 18-23.
- LIN Longrong, ZHONG Shuncong, FU Xibin, et al. Finite element analysis of pulsed infrared imaging of defects in composites[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, **33**(1): 18-23.
- [5] 林隆荣, 伏喜斌, 黄学斌, 等. 复合材料缺陷的红外热成像检测研究[J]. *机电工程*, 2019, **36**(6): 628-632.
- LIN Longrong, FU Xibin, HUANG Xuebin, et al. Defects detection of composite materials based on infrared thermography[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, **36**(6): 628-632.
- [6] 郭兴旺, 陈栋. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热像检测规律[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, **49**(4): 487-485.
- GUO Xinhwang, CHEN Dong. Regularities of infrared thermography of disbonds in insulator of solid rocket motors[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017, **49**(4): 487-485.
- [7] 郭兴旺, 陈栋. 固体火箭发动机绝热层脱粘的脉冲热像检测分析[J]. *固体火箭技术*, 2017, **40**(2): 169-175.
- GUO Xinhwang, CHEN Dong. Analysis on pulsed thermography of disbonds in insulator of solid rocket motors[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, **40**(2): 169-175.
- [8] 盛涛, 江海军, 郑金华, 等. 锁相红外热波法在碳纤维夹层结构中的应用[J]. *红外技术*, 2019, **41**(5): 489-492.
- SHENG Tao, JIANG Haijun, ZHENG Jinhua, et al. Application of phase-locked infrared thermal wave technology in carbon fiber sandwich structures[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(5): 489-492.
- [9] 李根, 翰学, 范瑾, 等. 锁相红外热像检测缺陷的定量方法[J]. *无损检测*, 2017, **39**(6): 1-7.
- LI Gen, ZHAO Hanxu, FAN Jin, et al. A defect quantification method by lock-in thermography[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, **39**(6): 1-7.
- [10] 程腾, 吴健雄, 张勇, 等. 囊体布热合缺陷的锁相热成像无损检测技术研究[J]. *实验力学*, 2015, **30**(5): 577-582.
- CHENG Teng, WU Jianxiong, ZHANG Yong, et al. On the lock-in thermography non-destructive testing of heat sealed capsule body cloth defect[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, **30**(5): 577-582.
- [11] WEI Yanjie, SU Zhilong, MAO Shuangshuang, et al. An infrared defect sizing method based on enhanced phase images[J]. *Sensors*, 2020, **20**(13): E3626- E3626.
- [12] 陶胜杰, 杨正伟, 田干, 等. 红外脉冲相位热像检测效率提高方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(5): 0504005(1)-0504005(7).
- TAO Shengjie, YANG Zhengwei, TIAN Gan, et al. Method for improving detection efficiency using infrared pulse phase thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(5): 0504005(1)-0504005(7).
- [13] 杨祯, 张士成, 杨立. 变谱法在红外热像仪测温中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(6): 1432-1437.
- YANG Zhen, ZHANG Shicheng, YANG Li. Altering spectrum method in temperature measurement using infrared imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(6): 1432-1437.
- [14] 杨祯, 张士成, 杨立. 反射温度补偿法及其实验验证[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(9): 1959-1964.
- YANG Zhen, ZHANG Shicheng, YANG Li. Reflected temperature compensation method and its experimental verification[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(9): 1959-1964.