

## 红外无损检测的数值模拟及其对比性研究

陈 林<sup>1</sup>, 杨 立<sup>1</sup>, 范春利<sup>1</sup>, 王为清<sup>1</sup>, 吕事桂<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 92419 部队,  
辽宁 兴城 125106)

**摘 要:** 红外无损检测技术是一种新型的无损检测技术, 具有非接触、检测面积大、检测速度快等优点, 现已发展出许多有不同的检测方法, 为了研究不同检测方法的优缺点, 根据传热学的理论, 对比分析红外无损检测的不同检测方法, 建立了一个二维导热模型; 并利用建立的模型, 模拟计算出了试件在不同热激励条件下的温度场, 在此基础上实现了对红外无损检测中的脉冲检测法、锁相检测法和脉冲相位检测法的数值模拟, 从理论计算的角度比较了这三种红外无损检测方法的优缺点, 得出了这三种红外检测技术的最佳使用范围, 为红外无损检测的检测方法的选取提供了理论依据。

**关键词:** 对比研究; 脉冲; 锁相; 脉冲相位; 无损检测

**中图分类号:** TN21    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2330-06

## Numerical simulation and comparative study of infrared technology for nondestructive testing

Chen Lin<sup>1</sup>, Yang Li<sup>1</sup>, Fan Chunli<sup>1</sup>, Wang Weiqing<sup>1</sup>, Lv Shigui<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;  
2. Unit 92419 of PLA, Xingcheng 125106, China)

**Abstract:** Infrared thermography is a nondestructive testing and evaluating technique that allows the non-contact inspection and quick monitor large area. There are different detection methods of infrared technology for nondestructive testing. In order to study the advantages and disadvantages of different detection methods, different detection methods of infrared technology for nondestructive testing were comparatively analyzed according to the theory of heat transfer. A two-dimensional heat conduction model was established. The temperature fields of the specimen under different heat source excitation conditions were simulated by using the established model, based on this, PT LT and PPT of infrared technology for nondestructive testing were numerically simulated, from the theoretical point of view, the merit and demerit of the three kinds of methods were compared, the best useful range of three infrared technology for nondestructive testing were obtained, a theoretical basis for the selection of detection method of infrared technology for nondestructive testing was provided.

**Key words:** comparative study; pulse; lock-in; pulsed phase; nondestructive testing

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(50906099)

作者简介: 陈林(1986-), 男, 博士生, 主要从事定量红外缺陷检测方面的研究。Email: chenlinhonghu@163.com

导师简介: 杨立(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事传热传质热流体学应用及量测方面的研究。

Email: lyang39@hotmail.com

## 0 引言

红外检测由于其非接触、无损伤、可靠性高、适用于大面积检测等独特的优势在缺陷检测、故障诊断等领域取得了日益广泛的应用。而目前,脉冲检测法、锁相检测法和脉冲相位检测法这三种主动式红外检测方法是红外无损中应用最为广泛的检测技术。1988年,英国 J. M. Milne<sup>[1]</sup>提出用瞬态热流可以测得金属的厚度并可探测浅表面缺陷,指出探测深度限制在距表面几毫米范围内;1992年,德国斯图加特大学 G. Busse 教授<sup>[2]</sup>提出并发展调制红外锁相法无损检测技术;1996年,加拿大 Laval 大学 Maldague 教授<sup>[3]</sup>提出脉冲相位热成像检测技术。参考文献[4-5]研究了二维情况下的脉冲检测方法,参考文献[6-8]研究了一维情况下的锁相检测方法,参考文献[9-10]研究了一维情况下脉冲相位检测方法;然而参考文献[1-10]在进行红外无损检测的研究时都是对每个检测方法进行单独的研究,对红外无损检测技术的不同检测方法的对比研究较少,并且参考文献[6-10]在对锁相和脉冲相位检测方法进行研究时,都是将问题简化为一维的导热问题来进行研究的,显然大多数情况下热传递不能简化为一维的情况,因此,需要对多维情况下的问题进行研究,并对不同检测方法进行对比研究,比较它们的优缺点,研究不同检测方法的最佳应用范围,为红外无损检测的检测方法的选取提供理论依据,对促进红外检测技术的应用具有重要的意义。

文中以对铸铝材料进行无损检测为背景,对带有内部缺陷的长方体试件进行不同检测方法的对比研究。针对假设试件,建立了二维导热模型,并利用建立的模型,对试件进行不同热源激励条件下的温度场模拟计算,在此基础上利用 MATLAB 软件对红外无损检测中的脉冲检测法、锁相检测法和脉冲相位检测法进行模拟实现,分析对比了这三种不同检测方法的检测能力和效果,比较了他们各自的优缺点,得出了这三种红外检测技术的最佳使用范围。

## 1 红外无损检测原理

### 1.1 脉冲检测原理

脉冲检测是研究最多、最成熟、也是使用最广

泛的方法。它利用短时、高能量的脉冲注入被测物体,考察随后发生的物体表面的温度变化,根据热传导的理论反求缺陷的定量化信息,检测原理如图1所示。

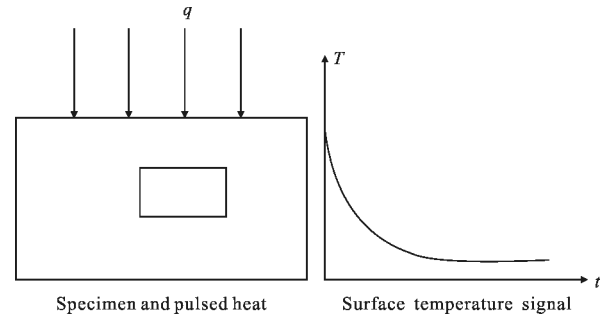


图1 脉冲检测原理

Fig.1 Theory of pulsed thermography

### 1.2 锁相检测原理

锁相检测是利用调制谐波激励源激励被测物体,采用数字锁相技术在激励周期内的特定时刻记录检测物体表面温度,得到被测物体表面的温度变化信号,并提取被测物体表面各点温度变化的相位图和幅值图,然后由相位图和幅值图判定缺陷的存在和缺陷尺度等特征,检测原理如图2所示。

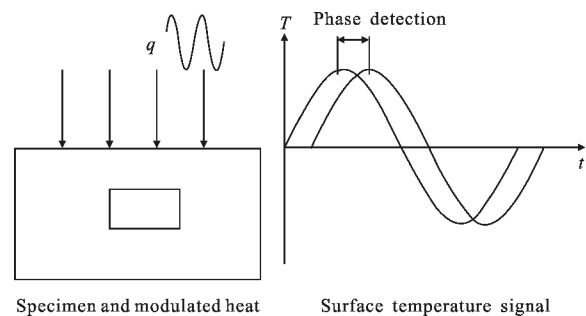


图2 锁相检测原理

Fig.2 Theory of lock-in thermography

### 1.3 脉冲相位检测原理

脉冲相位检测是将脉冲检测方法和锁相检测方法相联系而建立起的检测方法。记录脉冲激励下整个过程的温度,通过傅里叶变换提取温度波动的相位信息。与调制技术相比,一次脉冲检测实验可获得多个频率下的检测结果,在合理的采样间隔和采样时间下,可得到完整的相位变化曲线,可通过相位差定义有损区域,检测原理如图3所示。

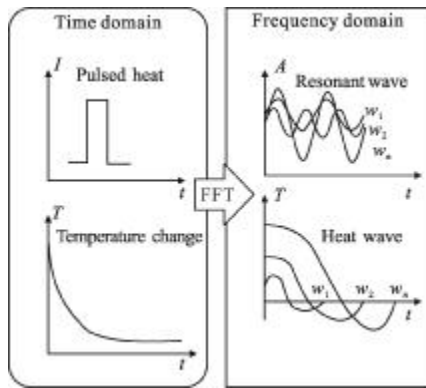


图 3 脉冲相位检测原理

Fig.3 Theory of pulsed phase thermography

## 2 模型的建立

选择一个含有内部缺陷的铸铝(ZL109)平板材料, 长为 1000mm, 宽为 80mm, 高为 50mm( $\rho=2680\text{kg/m}^3$ ,  $k=117\text{W/m}^2$ ,  $c=963\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ )。考虑到平板宽度、厚度和其长度相比较小, 所以选择二维模型, 如图 4 所

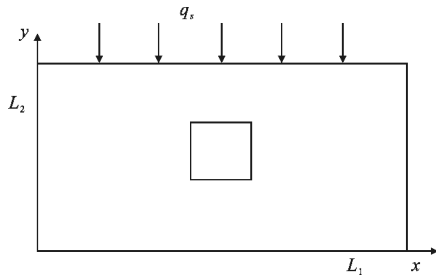


图 4 二维热传导模型

Fig.4 Model of two-dimensional heat conduction

示,  $L_1=80\text{mm}$ ,  $L_2=50\text{mm}$ , 内部缺陷的大小为  $20\text{mm}\times 10\text{mm}$ , 距左侧面的距离为  $30\text{mm}$ , 缺陷内充满空气 ( $\rho_a=1.2\text{kg/m}^3$ ,  $k_a=0.0257\text{W/m}^2$ ,  $c_a=1005\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ )。根据热力学第一定律和傅里叶定律, 假设物体是均匀的, 各向同性, 忽略表面的热辐射和对流, 可以建立二维瞬态导热偏微分方程:

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

式中:  $T$  为试件内部不同时刻各个位置点的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $k_x, k_y$  分别为试件  $x, y$  方向上的热传导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  为试件的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  为试件的比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $q_v$  为材料的内热源强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

初始条件:

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

边界条件:

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_2} = \alpha_q q_s \quad (3)$$

$$-k_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_1, 0} = 0 \quad (4)$$

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (5)$$

式中:  $T_f$  为环境温度, 取  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_q$  为热量的吸收系数, 取  $0.9$ ;  $q_s$  为加载的热源。

网格的划分: 采取等间距对模型进行网格划分, 经过网格无关性检验, 在  $x, y$  方向上的网格数分别选取  $80, 50$ 。

公式(1)~(5)即为平板的二维热传导模型, 利用全隐格式的有限体积法, 公式(1)可以化为:

$$a_p T_p = a_w T_w + a_E T_E + a_S T_S + a_N T_N + a_p^0 T_p^0 + S_u \quad (6)$$

式中:  $a_w = \frac{k_x dy}{dx}$ ,  $a_E = \frac{k_x dy}{dx}$ ,  $a_S = \frac{k_y dx}{dy}$ ,  $a_N = \frac{k_y dx}{dy}$ ,  $a_p^0 = \rho c \frac{dx dy}{dt}$ ,  $a_p = a_w + a_E + a_N + a_S + a_p^0 - S_p dx, dy$  分别为  $x, y$  方向上单个网格的大小,  $T_p^0$  为  $t-dt$  时刻点的温度。

## 3 模拟计算结果及分析

### 3.1 不同缺陷深度下的检测结果

为了对比研究三种检测方法的检测能力, 选取不同的缺陷深度, 对三种检测方法的检测进行数值模拟。在保持缺陷距左侧面的距离为  $30\text{mm}$ , 缺陷的大小为  $20\text{mm}\times 10\text{mm}$  不变的情况下, 取缺陷深度为  $5, 10, 15, 20\text{mm}$ , 进行模拟计算。

脉冲检测中, 在时间  $t=0-0.1\text{s}$ , 对试件加载  $q_s = 10^6\text{W}/\text{m}^2$  的瞬态热源, 得到不同深度下试件表面温差如图 5 所示, 从图中可以看出: 所有缺陷的温差-时间曲线形状大致一致, 深度越浅的缺陷, 表面温差越高, 越容易检测, 其最佳检测时间出现得越早。

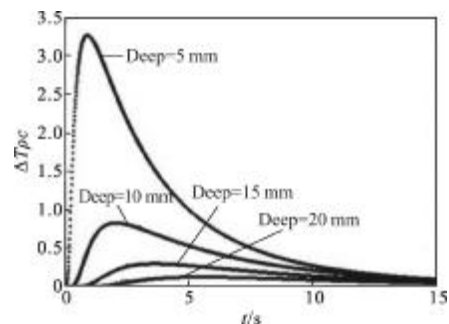


图 5 不同缺陷深度下表面温度差的时间变化

Fig.5 Time variation of the temperature difference between different defect depths

锁相检测中,不同的加载频率会得到不同的检测结果,因此,需要计算在不同加载频率下的相位差,对试件加载调制的周期热源  $q_s=1000\sin(2\pi \cdot f \cdot t)$  (其中  $f$  为加载的调制热源的频率),计算得到不同深度下的相位差随频率变化情况如图 6、7 所示(由于锁相检测中,与幅度差相比更关心相位差的变化情况,因此在此只给出了相位差的变化,采用四点平均算法计算相位,具体计算方法见参考文献[7]),从图中可以看出:所有缺陷的相位差-频率曲线形状大致一致,随着缺陷深度的增加,相位差最大值向左上方移动,即不同缺陷深度对应不同的最佳激励频率及最大相位差(指绝对值)。利用图中结果,可以根据缺陷深度预测最佳检测调制频率,同时,也可以根据最佳调制频率粗略地估计缺陷深度;所以在锁相检测中,需要进行不同频率下的多次检测,检测周期长。

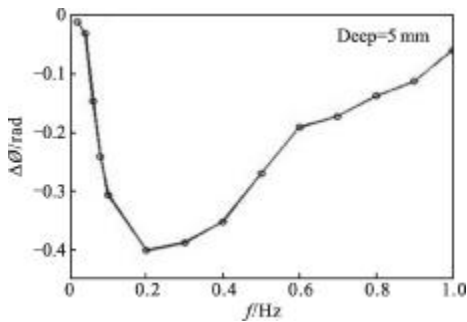


图 6 缺陷深度为 5 mm 时相位差随频率变化

Fig.6 Phase difference varies with frequency when defect depth is 5 mm

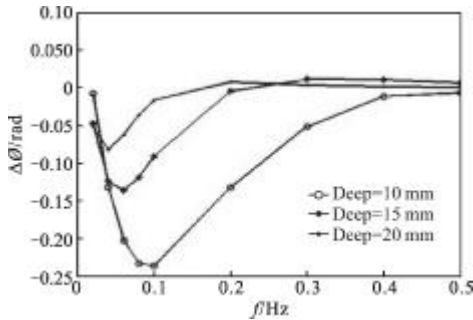


图 7 不同缺陷深度下相位差随频率的变化

Fig.7 Phase difference varies with frequency between different defect depths

脉冲相位检测中,在时间  $t=0\sim 0.1\text{ s}$ ,对试件加载  $q_s=10^6\text{ W/m}^2$  的瞬态热量,计算得到缺陷表面和无缺陷表面的温度信号,在保持采集频率为 2 Hz、采样窗

口大小为 50 s 不变的情况下,将试件的表面温场信息进行快速傅里叶变换,得到相位变换情况,计算得到不同缺陷深度下的相位差-频率分布情况如图 8 所示,从图中可以看出:所有缺陷的相位差-频率曲线形状大致一致,随着缺陷深度增大,相位差最大值向左移动并且随缺陷深度的增加,相位差的绝对值的最大值减小(与锁相检测情况相同),但是其相位差的绝对值的最大值小于锁相检测结果,可见其检测能力要低于锁相检测,但其一次能进行多种频率的检测,所以检测时间要大大小于锁相检测。

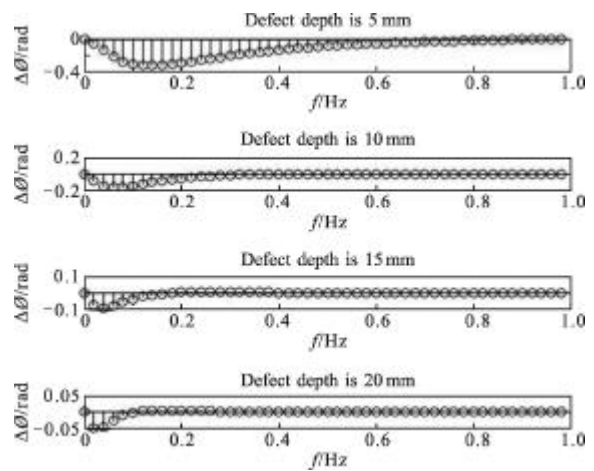


图 8 不同缺陷深度下的相位差-频率曲线图

Fig.8 Phase difference varies with frequency between different defect depths

### 3.2 热流强度对检测的影响

为了研究热流强度对检测结果的影响,选取不同的热流强度,对三种检测方法进行数值模拟,保持距缺陷距左侧面的距离为 30 mm,缺陷的大小为 20 mm×10 mm,缺陷深度 5 mm 不变。

脉冲检测中,选取热流强度  $q_s=10^6\text{ W/m}^2$ 、 $8 \times 10^5\text{ W/m}^2$  和  $6 \times 10^4\text{ W/m}^2$  三种情况,热流加载时间仍然为  $t=0\sim 0.1\text{ s}$ ,计算得到缺陷表面温度和温差时间曲线如图 9、10 所示,从图中可以看出,随热流强度的增加,温差最大值呈线性增大,同时缺陷表面温度的最大值也线性增大,可见在脉冲检测中加载的热流强度的大小决定了其检测能力,热流强度越大,检测能力越大,为了提高检测能力,应提高热流强度,但同时表面温度线性增大,高温可能损坏试件;并且加载的瞬态能量越大,其实现越困难,因此,脉冲检测时脉冲能量不易加载过大。

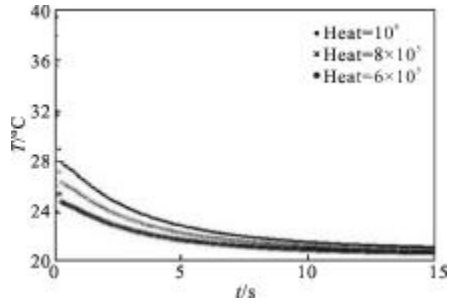


图 9 不同热源下缺陷表面温度的时间变化

Fig.9 Time variation of the surface temperature of the defects in different heat sources

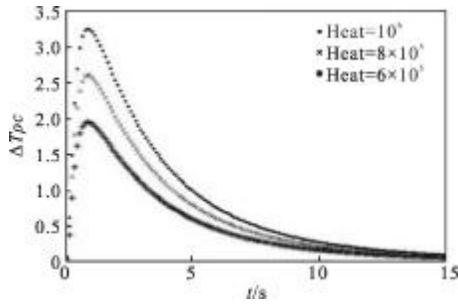


图 10 不同热源下缺陷表面温差的时间变化

Fig.10 Time variation of surface temperature difference of defects in different heat sources

锁相检测下，选择调制周期热流分别为  $q_s=10^3 \sin(2\pi \times 0.1 \times t)$ 、 $q_s=2 \times 10^3 \sin(2\pi \times 0.1 \times t)$  和  $q_s=4 \times 10^3 \sin(2\pi \times 0.1 \times t)$ 。计算三种不同热源强度下表面温度变化曲线，如图 11、12、13 所示，其相位差都为  $-0.307 \text{ rad}$ ，幅度差分别为  $0.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.16 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $0.32 \text{ }^\circ\text{C}$ ，从图中可以看出，热源强度只影响幅度差的大小，而对相位差的大小无影响，而在锁相检测中更在意的是相位差，所以可以认为热源强度对锁相检测没有影响，因此，在锁相检测中调制热流的振幅较小，加热过程中试件的温升较小。

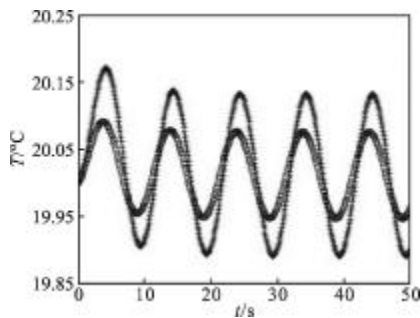


图 11 热源强度  $10^3$  下的表面温度变化

Fig.11 Surface temperature change in the heat source of  $10^3$

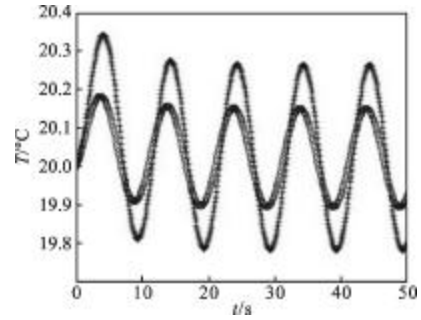


图 12 热源强度  $2 \times 10^3$  下的表面温度变化

Fig.12 Surface temperature change in the heat source of  $2 \times 10^3$

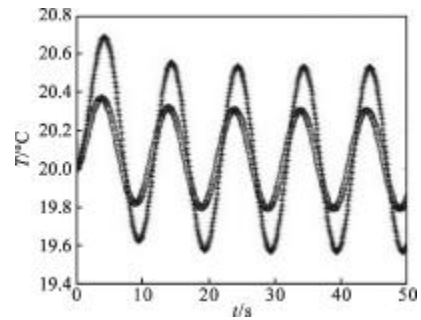


图 13 热源强度  $4 \times 10^3$  下的表面温度变化

Fig.13 Surface temperature change in the heat source of  $4 \times 10^3$

脉冲相位检测中选取热流强度  $q_s=10^6 \text{ W/m}^2$ 、 $10^5 \text{ W/m}^2$  和  $10^4 \text{ W/m}^2$  三种情况，热流加载时间仍然为  $t=0 \sim 0.1 \text{ s}$ ，不同热源下的表面温度相位差的频率曲线如图 14 所示，从图中可以看出，与锁相检测相同，其热源强度对不同频率下的相位差大小无影响，因此在脉冲检测中，较小的瞬态能量就能达到较好的检测能力。

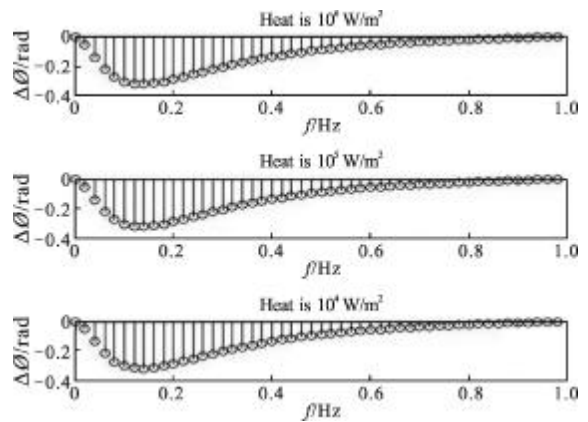


图 14 不同热源下的相位差-频率曲线

Fig.14 Phase difference varies with frequency between different heat source

## 4 结论

文中基于有限体积法的数值模拟,对比研究了红外无损检测中的脉冲检测法、锁相检测法和脉冲相位检测法,得到了它们各自的检测特点以及优缺点。主要结论如下:

(1) 脉冲检查中,缺陷深度越浅,表面温差越大,越容易检测,其最佳检测时间出现得越早;加载的热流强度的大小决定了其检测能力,热流强度越大,检测能力越大;检测方法简单,检测周期短;试件表面温升高,高温可能会损坏试件。

(2) 锁相检测中,试件表面温升较低,不同缺陷深度对应不同的最佳激励频率及最大相位差(指绝对值);可以按缺陷深度预测最佳检测调制频率,同时,也可以根据最佳调制频率粗略地估计缺陷深度;每次需要进行不同频率下多次的检测,检测周期长。

(3) 脉冲相位检测中,与锁相检测相同,缺陷深度增大,相位差最大值对应的频率减小并且随缺陷深的增加相位差的绝对的最大值减小,其一次能进行多种频率的检测,检测时间要大大小于锁相检测;试件表面温升较高,高温可能会损坏试件。

(4) 经过上述分析,脉冲检测适合缺陷深度较小、检测精度要求不高、对温度不敏感的快速检测;锁相检测适合对温度敏感、缺陷深度较大、检测精度要求高的检测;脉冲相位检测适合缺陷深度较大、检测精度要求较高、对温度不敏感的快速检测。

### 参考文献:

- [1] Milne J M, Carter P. A transient thermal method of measuring the depths of sub-surface flaws in metals [J]. *Journal of Nondestructive Testing*, 1988, 30(5): 333-336.
- [2] Busse G, Wu D, Busse W G, et al. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71: 3962-3965.
- [3] Maldague X P, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(5): 2694-2695.
- [4] Wang Yanwu, Yang Li, Liu Huikai, et al. Numerical simulation of infrared transient heating nondestructive testing based on with high energy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 44-48. (in Chinese)  
王艳武, 杨立, 刘慧开, 等. 瞬时高能量加热法的红外无损检测技术模拟[J]. *光电工程*, 2007, 34(6): 44-48.
- [5] Xiao Jingsong, Yan Tianpeng. Numerical analysis of NDT of wind turbine blades using infrared imaging [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(1): 48-52. (in Chinese)  
肖劲松, 严天鹏. 风力机叶片的红外热成像无损检测的数值研究[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(1): 48-52.
- [6] Bai W, Wong B S. Evaluation of defects in composite plate under connective environments using lock-in thermography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001 (12): 142-150.
- [7] Feng Lichun, Tao Ning, Xu Chuan. Lock-in thermography and its application in nondestructive evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1121-1123. (in Chinese)  
冯立春, 陶宁, 徐川. 锁相热像技术及其在无损检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1121-1123.
- [8] Guo Xingwang, Li Ransheng, Ding Mengmeng. Simulating modulated thermography of cladding debond in solid rockets [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 10-12. (in Chinese)  
郭兴旺, 李苒笙, 丁蒙蒙. 固体火箭包覆层脱粘调制红外热波检测法的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 10-12.
- [9] Yu Jiajie, Wu Naiming, Zeng Zhi, et al. FRP depth measurement based on pulsed phase thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1894-1896. (in Chinese)  
俞嘉捷, 伍耐明, 曾智, 等. 基于红外脉冲相位热成像技术的玻璃钢深度测量[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1894-1896.
- [10] Ma Shuohan, Ma Qishuang. Algorithm of infrared pulse phase thermography multiple modulation zoom spectrum inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2223-2225. (in Chinese)  
马说邯, 马齐爽. 红外脉冲相位复调制细化检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2223-2225.