

线性调频激励的红外无损检测及其数值模拟

陈 林, 杨 立, 范春利, 吕事桂, 石宏臣

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 线性调频激励的红外检测是一种新型的红外检测技术, 能弥补传统红外检测方法存在的不足, 对不同的缺陷都具有较好检测的能力, 为了研究相位检测法在线性调频激励下的红外检测中的应用, 利用有限体积法数值模拟计算出二维瞬态导热模型, 得出所建立模型在线性调频激励条件下的温度场, 利用 FFT 变换法对模拟计算得到的材料表面温度进行信号处理, 从而得到相位变化信息, 得出了 Chirp 调制时间、加热强度、材料、缺陷深度、高度、以及宽度等因素对检测结果的影响, 为线性调频激励下的红外检测法的应用提供理论支撑。

关键词: 线性调频; 无损检测; 数值模拟; 相位检测

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)05-1385-05

Numerical simulation of infrared technology for nondestructive testing under linear frequency modulation excitation

Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, Lv Shigui, Shi Hongchen

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Infrared technology for nondestructive testing under linear frequency modulated excitation is a new detect technology. The shortcomings of the traditional infrared NDT methods can be avoided and different detects can be defected by this method. In order to research the application of infrared technology for nondestructive testing under linear frequency modulated excitation, a two-dimensional heat conduction model was established by finite volume method. The temperature field of the model was obtained under linear frequency modulated excitation. The FFT algorithm was applied to the surface temperature of the model and then the phase was obtained. The influences of Chirp modulation time, heating intensity, material depth, height and width on the phase difference were respectively revealed. It is important for the application of infrared technology for nondestructive testing under linear frequency modulated excitation.

Key words: linear frequency modulation; nondestructive testing; numerical simulation; phase detect

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-10-24

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

红外无损检测因其非接触、无损伤、适应于大面积检测等优势在航空、电力、化工等领域取得了日益广泛的应用。传统的红外无损检测方法主要有脉冲检测法(Pulsed Thermography, PT)^[1]、锁相检测法(Lock-in Thermography, LT)^[2]和脉冲相位检测法(Pulsed Phase Thermography, PPT)^[3-4]。PT是具有快速检测的特点,但存在易受表面发射率变化的影响、表面加热均匀的要求高等缺点,并且加热温度高,可能损坏被检测物体;LT具有热激励强度低、对材料表面加热不均和发射率变化不敏感等优点,但是需要进行重复多次的实验,检测周期长,PPT具有PT和LT的特点,但其与PT一样,需要高强度的瞬态热源,可能损坏被检测试件。参考文献[5]提出了利用线性调频激励下的热源进行红外检测的方法,并将其应用到平板材料的缺陷检测;参考文献[6-7]分别将线性调频激励下的红外检测法应用到材料的粘合性能的检测和内部缺陷的检测;参考文献[8]将线性调频激励下的红外热像检测法与锁相检测等方法进行了对比研究,显示在大的图像噪声时线性调频激励下的红外热像检测仍具有良好的检测结果,然而参考文献[5-8]的研究都在一维的导热下进行,对多维导热情况下的检测未做研究,并且参考文献[5-8]是研究了不同深度对检测结果的影响,而对未其他影响因素进行分析研究,主要是采用相关函数法来进行的研究,而对相位法的研究只作了简单的介绍,未作深入分析研究。文中采用相位法进行二维导热情况下的研究,分析了Chirp调制时间、加热强度、材料、缺陷深度、高度以及、宽度等因素对线性调频激励条件下红外检测法的影响,为线性调频激励下的红外检测法的应用提供理论支撑。

1 检测原理

线性调频变化的热流是指加热热源的热流强度是随时间变化的Chirp函数,如公式(1)~(3)所示。

$$q_s(t) = q_m(1 + \sin(2\pi f_m(t)t)) \quad (1)$$

$$f_m(t) = f_s + Bt \quad (2)$$

$$B = \frac{f_e - f_s}{t_m} \quad (3)$$

式中: q_m 为加载热流强度; $f_m(t)$ 为线性调频函数; f_e 为

终止频率; f_s 为初始频率; B 为Chirp扫描速率; t_m 为Chirp调制时间; t 为时间。

加热热源的直流分量的作用是保证加热热流不出现负值,在实际应用中需要剔除直流分量的影响(具体方法参考文献[8]),因而文中在进行模拟计算时对加载热源采取进行去直流的处理,热源形式直接采用 $q_s(t) = q_m \sin(2\pi f_m(t)t)$ 的形式进行模拟计算。

线性调频激励下的红外检测是指利用线性调频变化的热流激励被测物体,记录Chirp调制时间内被检测物体的表面温度,并利用相关函数法或相位法处理得到的温度信号,进而对被检测物体内部缺陷情况进行判断,检测原理如图1所示。文中主要考虑采用相位法来研究问题,相位法是记录被检测物体表面在整个激励过程下的温度,通过对温度进行FFT变换得到相位信息,再由相位差定义有损区域。

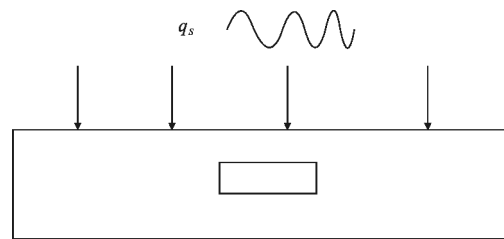


图1 线性调频激励下的检测原理

Fig.1 Detection principle of linear frequency modulated excitation

2 模型的建立

文中以含内部缺陷的二维平板模型为研究对象,如图2所示,缺陷内为空气。忽略材料表面的对流换

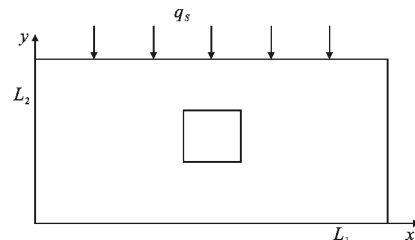


图2 二维热传导模型

Fig.2 Model of two-dimensional heat conduction

热和辐射换热,建立的二维瞬态导热偏微分方程:

$$k_x \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} = \rho c \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad (4)$$

式中: k_x 为 x 方向的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; k_y 为 y 方

向的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; T 为温度, $^\circ C$; c 为材料比热容, $J/kg \cdot ^\circ C$; ρ 为材料的密度, kg/m^3 。

初始条件:

$$T|_{t=0} = 20^\circ C \tag{5}$$

边界条件:

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=L_2} = a_q q_s \tag{6}$$

$$-k_x \frac{\partial T}{\partial x} |_{y=L_1, 0} = 0 \tag{7}$$

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0} = 0 \tag{8}$$

式中: q_s 表示加热热源; $a_q = 0.9$ 为材料表面对加热热量的吸收系数。

公式(4)~(8)即为平板的二维瞬态导热模型, 利用全隐格式的有限体积法, 公式(4)可以化为:

$$a_p T_p = a_w T_w + a_e T_e + a_s T_s + a_n T_n + a_p^0 T_p^0 + S_u \tag{9}$$

式中: $a_e = \frac{k_x dy}{dx}$, $a_w = \frac{k_x dy}{dx}$, $a_n = \frac{k_y dx}{dy}$, $a_s = \frac{k_y dx}{dy}$, $a_p^0 = \rho c \frac{dx dy}{dt}$, $a_p = a_w + a_e + a_n + a_s + a_p^0 - S_p$; T_p 为控制体积点的温度; dx, dy 分别为 x, y 方向上单个网格的大小; T_p^0 为 $t - \Delta t$ 时刻点的温度; T_w, T_e, T_s, T_n 分别为 T_p 左、右、上、下方向相邻节点的温度; S_u, S_p 为等效源项, 其值根据边界条件计算得到。

3 模拟计算结果及分析

3.1 试验系统及参数

以铸铝材料为研究对象, 对试件加载线性 Chirp 调频变化的热源 $q_s(t) = q_m \sin(2\pi f_m(t)t)$ (2), 模拟试验参数为: 热流强度 $q_m = 10^3 W/m^2$; 初始频率 $f_s = 1.1 Hz$; 终止频率 $f_e = 2.1 Hz$; Chirp 调制时间 $t_m = 50 s$; Chirp 扫描速率 $B = 0.02 Hz/s$, 材料内部缺陷的大小为 $20 mm \times 10 mm$, 缺陷距材料上表面的距离为 $5 mm$, 距左侧面的距离为 $30 mm$ 不变。

3.2 热流强度对检测的影响

选取不同强度的热流, 加载的热源分别为 $q_s(t) = 10^3 \sin(2\pi f_m(t)t)$ 、 $q_s(t) = 10^4 \sin(2\pi f_m(t)t)$ 和 $q_s(t) = 10^5 \sin(2\pi f_m(t)t)$, 其他参数如 3.1 节所示, 得到缺陷对应表面和无缺陷对应表面的温度信号, 经 FFT 变换得到不同频率下的相位, 取差不同频率下的相位差, 如图 3 所示。

从图中可以看出, 其热源强度对不同频率下的

相位差大小无影响, 因此在线性调频激励下的红外无损检测中, 较小的热流强度就能达到较好的检测能力, 避免了高强度的热流损伤被检测试件。

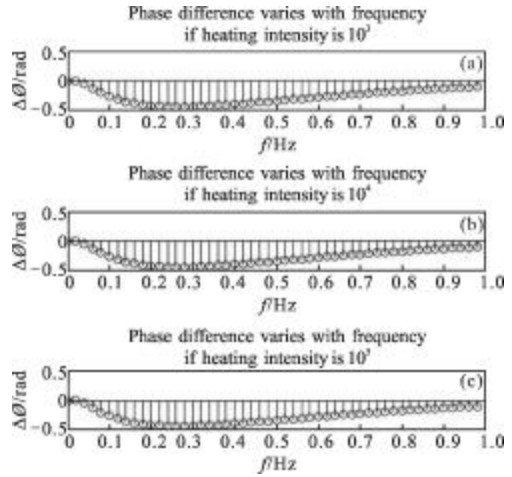


图 3 不同加热强度时相位差-频率曲线变化

Fig.3 Phase difference varies with frequency in different heating intensity

3.3 Chirp 调制时间对检测结果的影响

加载的热源的 Chirp 调制时间分别选择为 $10 s$ 、 $30 s$ 和 $50 s$, 其他参数如 3.1 节所示, 模拟计算得到的不同频率下的相位差, 如图 4 所示。

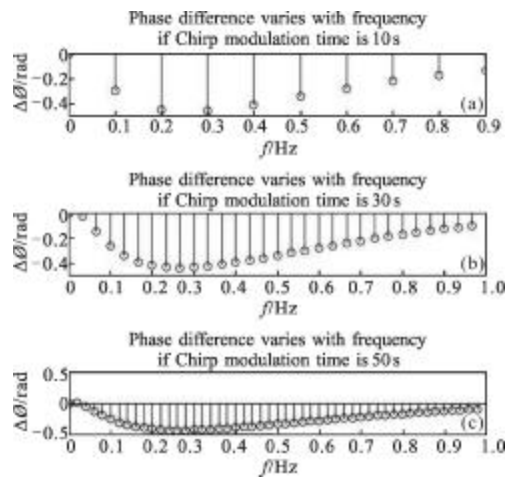


图 4 不同 Chirp 调制时间下相位差-频率变化曲线

Fig.4 Phase difference varies with frequency in different Chirp modulation time

从图中可以看出, Chirp 调制时间越长, 得到相位差信息越多, 可见为了保证足够的相位差信息, 应该适当延长 Chirp 调制时间。

3.4 不同材料对检测结果的影响

试验材料分别选取铸铝、黄铜、钢,材料的物性参数如表 1 所示;其他参数如 3.1 节所示,模拟计算得到不同频率下的相位差,如图 5 所示。

表 1 材料的热物性参数

Tab.1 Thermal parameters of the material

Material	Density/kg·m ⁻³	Specific heat capacity /J·(kg·°C) ⁻¹	Conductivity /W·(m·°C) ⁻¹
Steel	7 850	512.9	27.63
Cast aluminum	2 680	963	117
Brassiness	8 600	377	85.5
Air	1.2	1 005	0.025 7

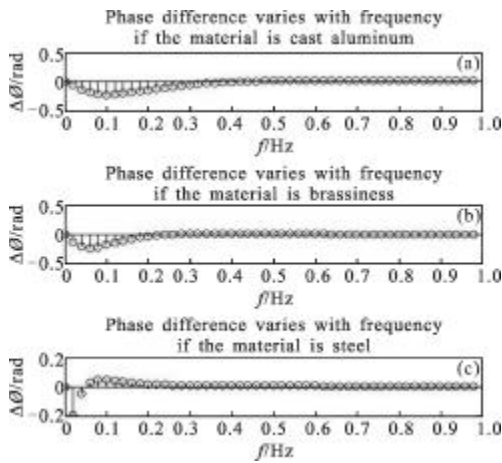


图 5 不同材料下相位差-频率变化曲线

Fig.5 Phase difference varies with frequency in different materials

从图 5 可以看出,缺陷深度和大小相同时,铸铝材料的相位差(指绝对值)最大,而钢材料的绝对值最小,黄铜介于两者之间,可见同等条件下铸铝最易检测,黄铜次之,而钢最难检测;并且不同材料的频率下达到相位差最大不同。

3.5 不同缺陷深度对检测结果的影响

取缺陷深度 Deep=5、10、15、20 mm;其他参数如 3.1 节所示,模拟计算得到的不同频率下的相位差,如图 6 所示。

从图中可以看出,随着缺陷深度增大,相位差最大值(指绝对值)随缺陷深的增加而减小,可见缺陷深度越大,越难检测,反之亦然;并且不同缺陷下的相位差最大值对应的频率不同。

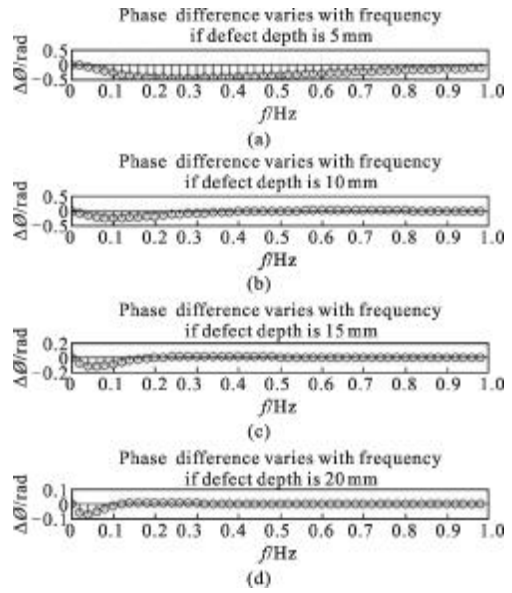


图 6 不同缺陷深度下的相位差-频率变化曲线

Fig.6 Phase difference varies with frequency in different defect depth

3.6 不同缺陷高度对检测结果的影响

取缺陷高度 Height=1、10、20 mm;其他参数 3.1 节所述,模拟计算得到的不同频率下的相位差,如图 7 所示。

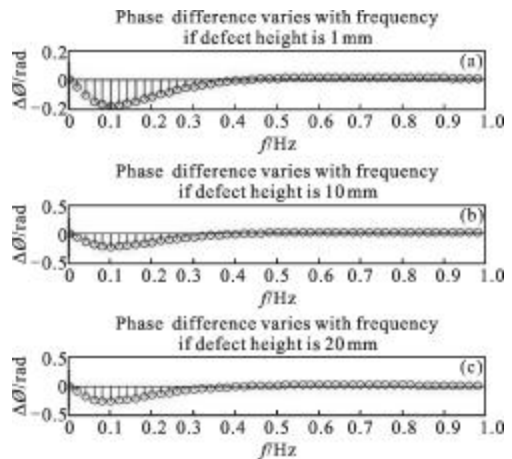


图 7 不同缺陷高度下的相位差-频率变化曲线

Fig.7 Phase difference varies with frequency in different defect height

从图中可以看出,随着缺陷高度增大,相位差最大值(指绝对值)有所增大,但是增加量较小,而与缺陷深度不同,不同缺陷高度下相位差最大值对应的频率基本不变。

3.7 不同缺陷宽度对检测结果的影响

取缺陷宽度 Width=5、10、20 mm; 其他参数 3.1 节所述, 模拟计算得到不同频率下的相位差, 如图 8 所示。

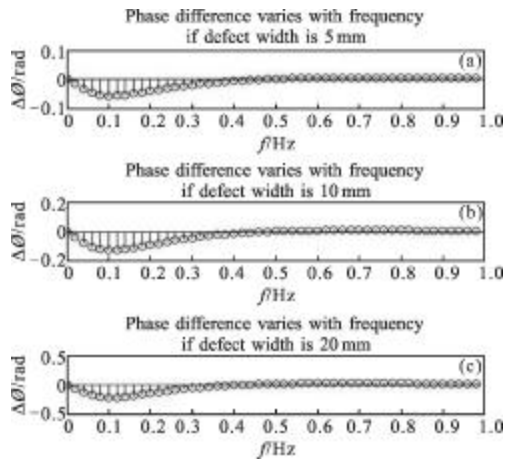


图 8 不同缺陷宽度下的相位差-频率变化曲线

Fig.8 Phase difference varies with frequency in different defect width

从图中可以看出, 随着缺陷宽度增大, 相位差最大值(指绝对值)有所增大, 但是增加量较小, 并且不同缺陷宽度下相位差最大值对应的频率基本不变。

4 结论

文中依据有限体积法, 分析了线性调频激励下相位差信息与 Chirp 调制时间、加热强度、材料等因素、缺陷深度、高度以及宽度的关系, 主要结论如下:

(1) 热源强度对不同频率下的相位差大小无影响, 因此在线性调频激励的红外无损检测中, 较小的热流强度就能达到较好的检测能力, 避免了高强度的热流损坏被检测试件。

(2) Chirp 调制时间越长, 相位差信息越多, 为了保证足够的相位差信息, 应该适当延长 Chirp 调制时间。

(3) 相同的检测条件下, 对不同材料具有不同的检测能力, 并且不同材料在不同的频率下达到相位

值最大, 即峰值频率不同。

(4) 相位差最大值(指绝对值)随缺陷深度增大而减小, 缺陷深度越大, 越难检测, 反之亦然, 并且不同缺陷对应不同的峰值频率不同。

(5) 相位差最大值(指绝对值)随着缺陷高度和宽度增大而有所增加, 但是增加量较小, 与缺陷深度不同, 不同缺陷高度和宽度下相位差最大值对应的频率基本不变。

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] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Numerical simulation of lock-in thermography for nondestructive testing [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 119-122. (in Chinese)
- [3] Maldague X P, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(5): 2694-2695.
- [4] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Numerical simulation and comparative study of infrared technology for nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2330-2335. (in Chinese)
- [5] Mulaveesala R, Tuli S. Implementation of frequency-modulated thermal wave imaging for non-destructive sub-surface defect detection [J]. *Thermal Wave Imaging*, 2005, 47(4): 206-208.
- [6] Mulaveesala R, Pal P, Tuli S. Interface study of bonded wafers by digitized linear frequency modulated thermal wave imaging sensors and actuators [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 2(9): 209-215.
- [7] Liu Junyan, Liu Xun, Wang Yang. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1418-1420. (in Chinese)
- [8] Venkata Subbarao Ghali, Mulaveesala R. Non stationary thermal wave imaging techniques for non-destructive testing [D]. Jabalpur: Indian Institute of Information Technology Design and Manufacturing, 2005.