

文章编号: 1672-8785(2022)05-0028-07

粘钢加固混凝土脱粘缺陷的 红外相位检测

陈 林¹ 黎敏谦¹ 罗 兵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: 为了实现对粘钢加固混凝土脱粘缺陷的红外相位检测, 依据传热学原理建立了相应的检测模型, 利用有限体积法得到了检测表面温度, 然后通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)获得了相位分布数据, 并研究了检测表面相位差与钢材厚度、缺陷宽度、缺陷厚度以及热流强度的关系。结果表明, 在一定的缺陷大小下, 当钢材厚度增大时, 检测表面相位差的最大值将减小; 在一定的钢材和缺陷厚度下, 当缺陷宽度增加时, 检测表面相位差的最大值将增大; 在一定的钢材厚度和缺陷宽度下, 当缺陷高度增大时, 检测表面相位差的最大值会有一定程度的增大, 但是增加量较小; 在一定的钢材厚度和缺陷大小下, 当热流强度增大时, 检测表面的相位差基本无变化。研究结果为粘钢加固混凝土脱粘缺陷的红外相位检测提供了理论依据。

关键词: 混凝土; 脱粘缺陷; 无损检测; 相位检测

中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.05.005

Infrared Phase Detection of Debonding Defect of Concrete Strengthened by Bonded Steel Plate

CHEN Lin¹, LI Min-qian¹, LUO Bing¹, LIU Min², ZHANG Chi¹

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

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

Abstract: In order to realize the infrared phase detection of debonding defects of concrete strengthened by bonded steel plate, the detection model is established according to the theory of heat transfer. The surface temperature is obtained by using the finite volume method, and the phase distribution is obtained by FFT. The relationship between phase difference and steel thickness, defect width, defect thickness as well as heat flux intensity is studied. The results show that the maximum value of phase difference decreases when the steel thickness increases with a certain defect size. For a given thickness of the steel plate and defect, the maximum value of phase difference increases with the increase of defect width. With a certain thickness of steel plate and defect width, when the defect height increases, the maximum value of detected surface phase difference increa-

收稿日期: 2022-02-12

基金项目: “十三五”军队重点院校和重点学科专业建设计划项目

作者简介: 陈林(1986-), 男, 湖北洪湖人, 博士, 讲师, 主要从事红外跟踪识别及检测方面的研究。

E-mail: chenlinhonghu@163.com

ses to a certain extent, but the increase is small. Under certain steel thickness and defect size, the phase difference of the detected surface is almost unchanged when the heat flux increases. The results provide a theoretical basis for infrared phase detection of debonding defects of concrete strengthened by bonded steel plate.

Key words: concrete; debonding defect; nondestructive test; phase detect

0 引言

混凝土是当代土木工程最主要的材料之一。为了提高混凝土结构的承载力, 往往采用在混凝土上粘结钢材的方法来加固混凝土。但是在使用的过程中, 粘钢加固混凝土结构会因钢材与混凝土间粘结层的脱落而出现缺陷, 导致混凝土结构的承载力变弱。因此, 对粘钢加固混凝土结构的脱粘缺陷进行检测具有重要的意义。

目前, 粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测方法主要有冲击回波检测法、超声检测法、人工敲击检测法等^[1-3]。相比于冲击回波法、超声法等检测方法, 红外检测法具有非接触、适用于大面积普查、检测自由度大、检测过程和结果快速准确直观、操作过程安全等优点。因此, 红外检测技术在粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测中得到越来越多的重视。例如, 文献[4]利用红外热像技术对粘钢加固混凝土的脱粘缺陷进行了试验研究; 文献[5]利用 ANSYS 有限元模拟的方法对粘钢加固混凝土脱粘缺陷的红外检测进行了数值模拟; 文献[6]采用被动式和主动式热激励方法对粘钢加固混凝土的脱粘缺陷进行了试验研究; 文献[7-8]将红外检测与超声检测相结合, 实现了对粘钢加固混凝土内部缺陷和脱粘缺陷的检测; 文献[9]在涡流热激励下, 利用红外检测技术对粘钢加固混凝土结构的脱粘缺陷进行了试验研究; 文献[10]设计了专用的感应加热电源和线盘, 并在此基础上实现了对粘钢加固混凝土结构脱粘缺陷的红外热像检测。文献[4-10]都是利用表面温度来实现对粘钢加固混凝土脱粘缺陷的红外检测。但是, 在实际检测过程中, 基于表面温度的红外检测存在对热激励强度要求高、对加热不均和检测表面发射率敏感、抗反射干扰弱

等不足之处^[11-12]。因此, 本文利用基于相位的检测方法来实现对粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测, 以期为其进一步优化提供理论依据。

本文首先依据传热学的原理建立了粘钢加固混凝土脱粘缺陷的红外相位检测模型, 然后利用有限体积法计算出检测表面的温度变化, 并对所得温度进行 FFT 变换来得到相位值, 最后比较缺陷和非缺陷所对应检测表面的相位差别, 从而实现粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测。

1 脉冲相位检测原理

在脉冲相位检测中, 将短时、高能量的脉冲热流注入被测物体, 并记录脉冲激励下检测表面的温度变化; 通过对检测表面的温度进行傅里叶变换得到相位信息, 再依据相位差来确定缺陷位置(见图 1)。

2 模型建立

本文的研究问题为二维导热下粘钢加固混凝土脱粘缺陷的脉冲相位检测。如图 2 所示, 试件由下至上分别为混凝土、粘结层和钢材。在粘结层中有脱粘缺陷(其间充满空气)。表 1 列出了各材料的物性参数。试件长度 L_x 为 500 mm, 混凝土厚度 L_c 为 50 mm, L_b 和 L_s 分别为粘结层和钢材的厚度, L_y 为试件在 y 方向上的高度($L_y = L_c + L_b + L_s$), L_w 为缺陷宽度, q_s 为加载在钢材表面上的脉冲热流强度。

在二维导热情况下, 其微分方程为

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

初始条件为

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

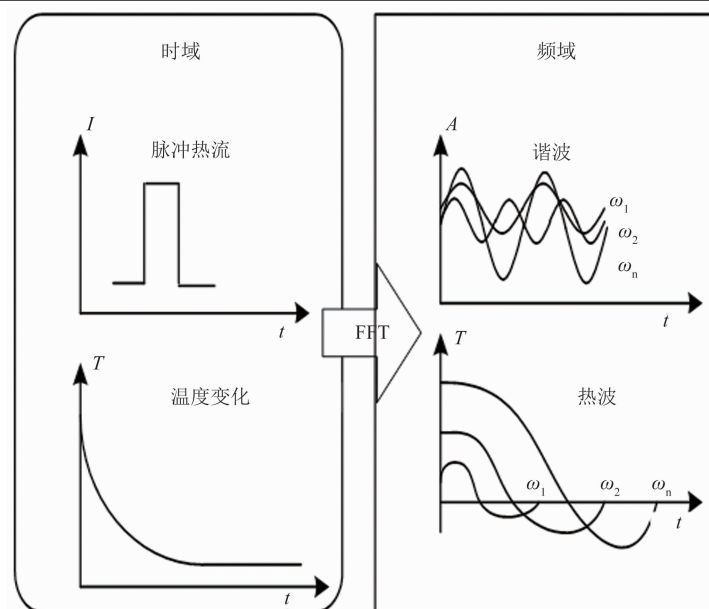


图 1 脉冲相位检测原理

表 1 不同材料的物性参数

材料	密度/(kg/m ³)	比热容 J/(kg·°C)	热导率/(W/m·°C)
混凝土	2500	840	0.79
粘结层	5500	1200	0.925
钢材	7850	460	36.1
空气	1.2	1005	0.0257

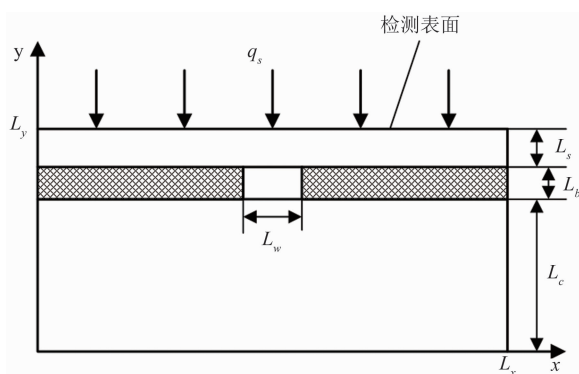


图 2 正问题模型

边界条件为

$$\begin{aligned}
 -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L_y} &= q_s + \alpha(T_f - T) \\
 -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} &= 0 \\
 -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0 \\
 -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} &= 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, λ 为导热系数; ρ 为密度; c 为比热容;

T_f 为环境温度, $T_f = 20^\circ\text{C}$; α 为换热系数, $\alpha = 10 \text{ W/m}^2$ 。

3 模拟计算结果及分析

在进行粘钢加固混凝土脱粘缺陷红外相位检测的模拟计算时, 先依据式(1)~式(3)计算出检测表面的温度变化, 再经 FFT 变换得到相位值, 然后通过比较缺陷和非缺陷所对应检测表面的相位差别来分析相位差的影响因素和规律。

3.1 钢材厚度对相位差的影响

当粘结层厚度(即缺陷高度) L_b 为 1 mm, 缺陷宽度 L_w 为 5 mm, 钢材厚度 L_s 分别取 1 mm、2 mm、3 mm 且加载在钢材表面上的脉冲热流强度 q_s 为 10^6 W/m^2 (加载时间为 0.1 s) 时, 计算得到的相位差随频率的变化关系如图 3 所示。可以看出, 在一定的缺陷大小下, 当钢材厚度增大时, 检测表面相位差的最大值将变小。由于脉冲相位检测是利用检测表面的相

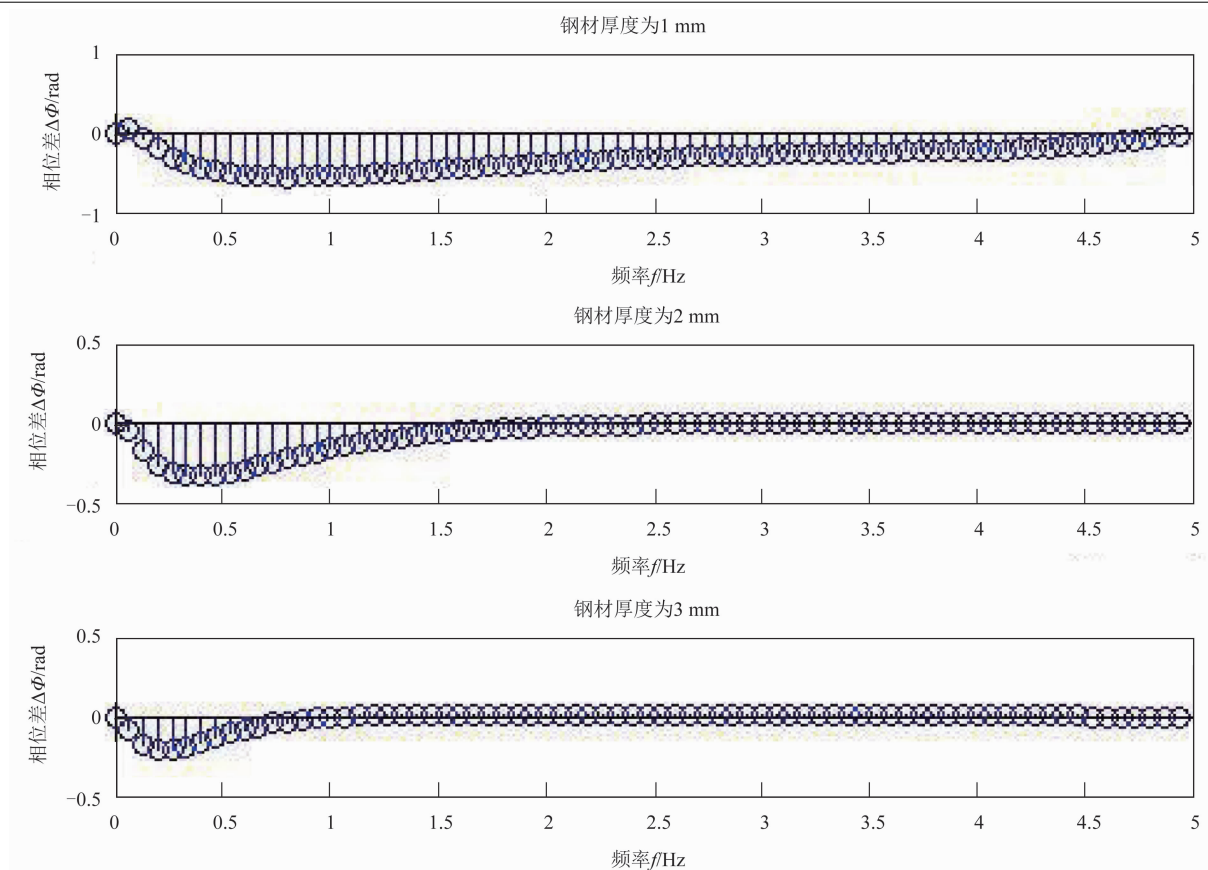


图 3 不同钢材厚度下相位差随频率的变化图

位差来实现对缺陷的检测, 所以粘结在混凝土上的钢材厚度越小, 基于相位的检测就越容易识别出钢材与混凝土之间的脱粘缺陷。

3.2 缺陷宽度对相位差的影响

当粘结层厚度(即缺陷高度) L_b 为 1 mm, 钢材厚度 L_s 为 2 mm, 缺陷宽度 L_w 分别取 2 mm、5 mm、8 mm 且加载在钢材表面上的脉冲热流强度 q_s 为 10^6 W/m²(加载时间为 0.1 s) 时, 计算得到的相位差-频率分布情况如图 4 所示。可以看出, 在一定的钢材厚度和缺陷厚度下, 随着粘钢与混凝土间脱粘缺陷宽度的增大, 检测表面的相位差将变大, 表明缺陷宽度越大, 越容易识别出粘钢与混凝土之间的脱粘缺陷。

3.3 缺陷高度对相位差的影响

当钢材厚度 L_s 为 2 mm, 缺陷宽度 L_w 为 5 mm, 粘结层厚度(即缺陷高度) L_b 分别取 1 mm、2 mm、3 mm 且加载在钢材表面上的脉冲热流强度 q_s 为 10^6 W/m²(加载时间为 0.1 s)

时, 计算得到的相位差-频率分布情况如图 5 所示。可以看出, 在一定钢材厚度和缺陷宽度下, 随着粘钢与混凝土间脱粘缺陷高度的增大, 检测表面的相位差会有一定程度的增大, 但是增加量较小, 表明缺陷高度对粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测影响较小。

3.4 热流强度对相位差的影响

当钢材厚度 L_s 为 2 mm, 缺陷宽度 L_w 为 5 mm, 粘结层厚度(即缺陷高度) L_b 为 1 mm 且加载在钢材表面上的脉冲热流强度分别 q_s 为 10^5 W/m²、 10^6 W/m²、 10^7 W/m²(加载时间为 0.1 s) 时, 计算得到的相位差随频率的变化情况如图 6 所示。可以看出, 在一定的钢材厚度和缺陷大小下, 当热流强度增大时, 相位差随频率的变化关系基本不变, 可见热流强度的改变对检测表面的相位差基本无影响。因此, 当利用脉冲相位法时, 在较小的热流强度下就可对粘钢加固混凝土脱粘缺陷进行检测, 有利于检测的有效实现。

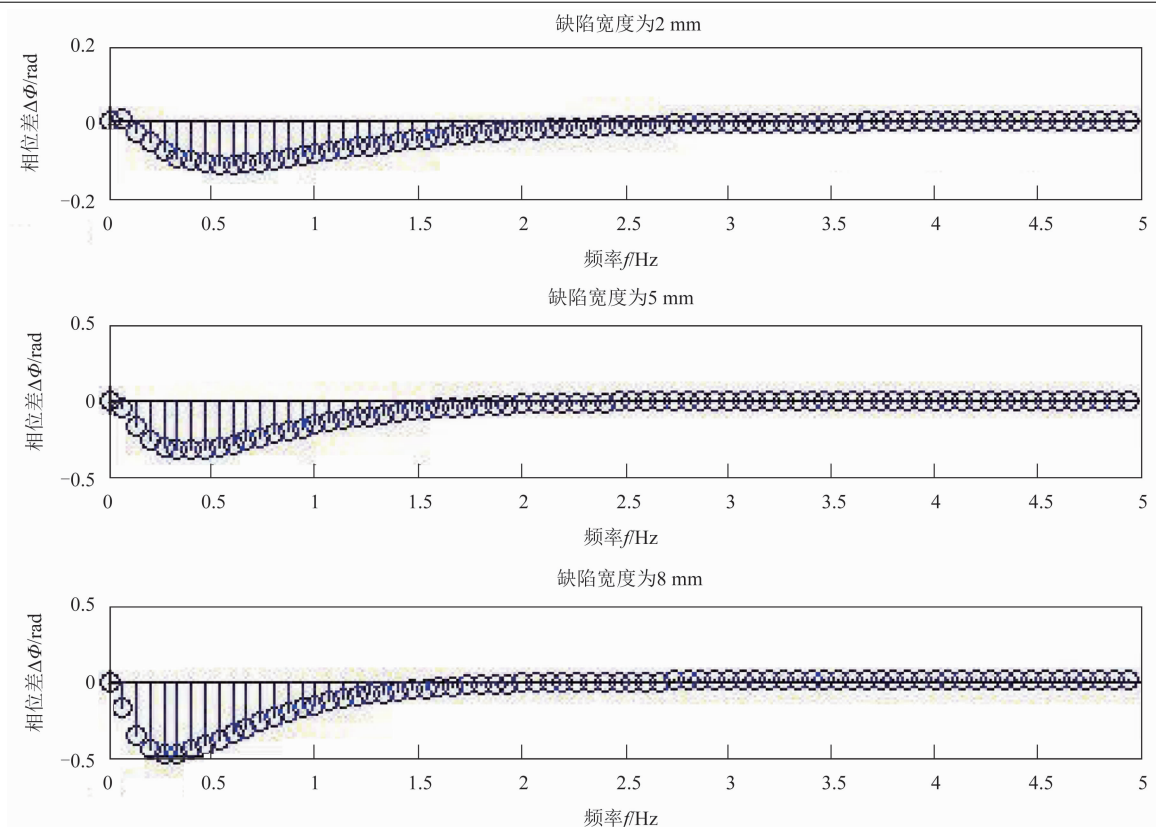


图 4 不同缺陷宽度下相位差随频率的变化图

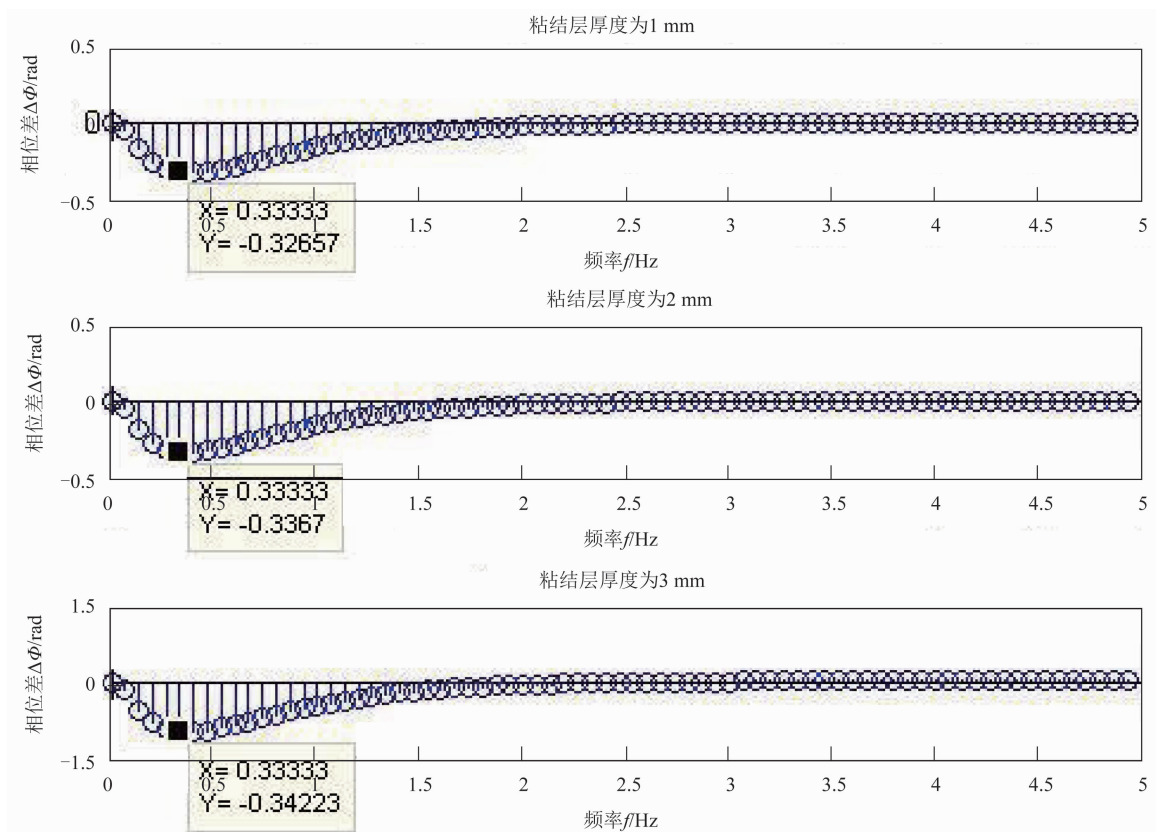


图 5 不同缺陷高度下相位差随频率的变化图

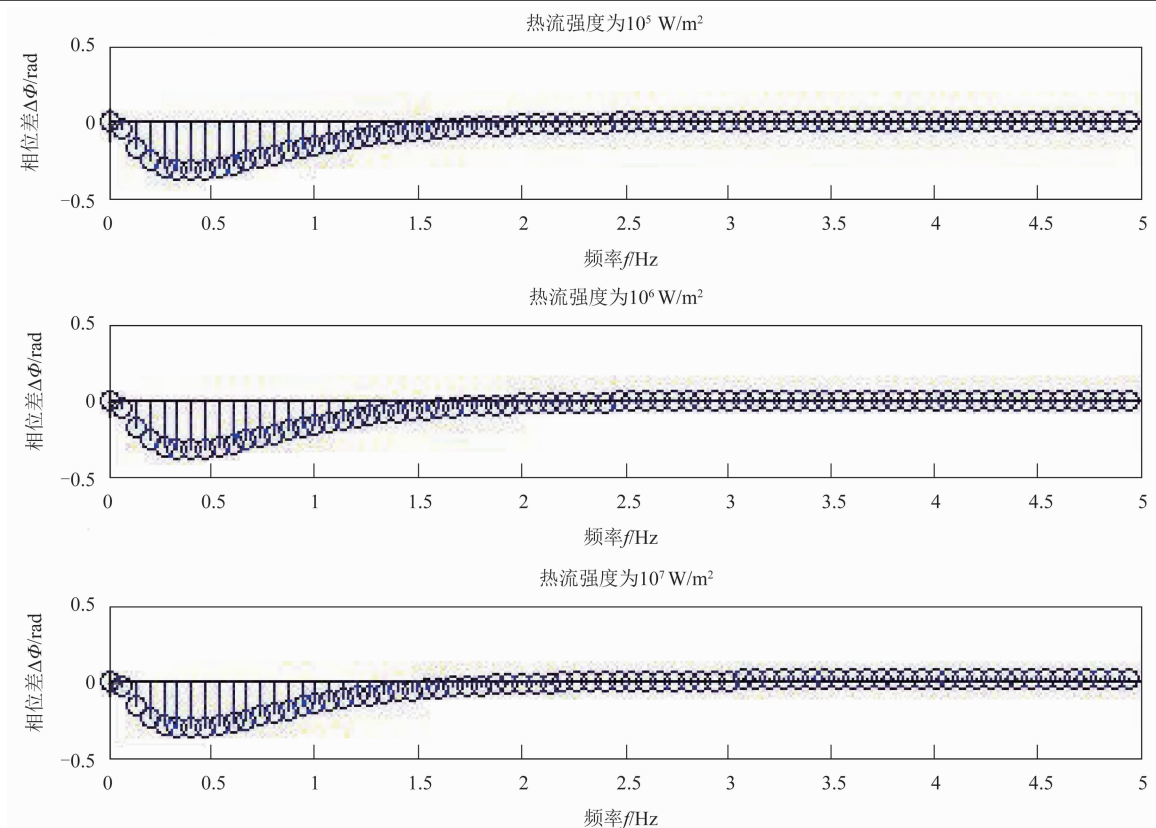


图 6 不同热流强度下相位差随频率的变化图

4 结论

本文依据传热学原理建立了粘钢加固混凝土脱粘缺陷的红外相位检测模型, 利用有限体积法计算出了检测表面的温度变化, 然后通过 FFT 变换得到相位值, 并研究了检测表面相位差的影响因素。模拟计算结果表明, 基于相位的红外检测能够有效地识别出粘钢加固混凝土结构的脱粘缺陷。得到的主要结论如下:

(1) 在一定的缺陷大小下, 当钢材厚度增大时, 检测表面相位差的最大值将减小, 表明钢材厚度越小, 越有利于粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测。

(2) 在一定的钢材和缺陷厚度下, 当缺陷宽度增大时, 检测表面相位差的最大值将变大, 表明缺陷宽度越大, 越有利于粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测。

(3) 在一定的钢材厚度和缺陷宽度下, 当缺陷高度增大时, 检测表面相位差的最大值会有一定程度的增大, 但是增加量较小, 表明缺

陷高度对粘钢加固混凝土脱粘缺陷的检测影响较小。

(4) 在一定的钢材厚度和缺陷大小下, 当加载在检测表面上的热流强度改变时, 相位差随频率的变化关系基本不变。由此可见, 热流强度的改变对检测表面的相位差基本无影响, 即在较小的热流强度下就可对粘钢加固混凝土脱粘缺陷进行检测, 有利于检测的有效实现。

本文利用检测表面的相位差实现了对粘钢加固混凝土结构脱粘缺陷的检测, 为基于相位的红外检测方法在混凝土检测中的应用提供了理论支撑。但本文主要是分析了检测表面相位差的影响因素, 而对缺陷的定量化检测研究还不够, 后续将进一步开展这方面的工作。

参考文献

- [1] 张景奎, 郑继, 罗居刚, 等. 冲击回波法检测混凝土内部缺陷的有限元仿真分析 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(6): 164-171.
- [2] 张玉洁, 陈兴杰, 朱文发. 钢-混凝土结构弱粘

- 接界面缺陷的超声导波检测 [J]. 应用声学, 2020, **39**(3): 379–385.
- [3] 丁道红, 章青. 混凝土缺陷研究综述 [J]. 混凝土, 2009, **31**(10): 16–18.
- [4] 杨英武, 张欣, 杨小青, 等. 红外热像法识别混凝土结构粘钢加固缺陷的试验研究 [J]. 低温建筑技术, 2018, **40**(5): 21–27.
- [5] 罗元丰, 杨英武, 王茜茜, 等. 红外热像法识别粘钢法加固混凝土结构空鼓缺陷研究 [J]. 宁波大学学报, 2019, **32**(2): 81–84.
- [6] 王晓航, 雅菁, 尚静媛, 等. 钢板组合剪力墙界面脱空的红外热成像法检测 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020, **47**(4): 91–96.
- [7] 陈禾, 秦迎, 陈劲, 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试验研究 [J]. 建筑结构, 2020, **50**(S1): 890–895.
- [8] 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.
- [9] 刘茂钊, 杨博, 杨英武. 基于涡流热激励的粘钢加固混凝土结构粘结层缺陷热像识别试验研究 [J/OL]. 中国测试, 2021, **12**: 1–4 [2021–12–17]. <https://web02.cnki.net/kmobile/Journal/detail/DKCJ/SYCS20211215001>.
- [10] 刘豪, 侯德鑫, 郑刚兵, 等. 基于热成像的钢管混凝土脱空检测技术研究 [J]. 红外技术, 2021, **43**(11): 1119–1126.
- [11] 陈林, 杨立, 范春利, 等. 红外锁相无损检测及其数值模拟 [J]. 红外技术, 2013, **35**(2): 119–122.
- [12] 陈林, 杨立, 范春利, 等. 红外无损检测的数值模拟及其对比性研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9): 2330–2335.