

红外热像法识别粘钢法加固混凝土结构空鼓缺陷研究

罗元丰¹, 杨英武^{2*}, 王茜茜², 孙 列³

(1.宁波市建设检测有限公司, 浙江 宁波 315032; 2.浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300;

3.宁波市建筑工程安全质量监督总站, 浙江 宁波 315040)

摘要: 基于 ANSYS 有限元方法, 模拟分析胶粘层不同缺陷尺寸和类型, 分类研究钢板内侧粘结层缺陷尺寸与钢板表面温度分布的关系。结果表明: 在同一热激励下, 当粘结空鼓缺陷远离钢板, 且空鼓与钢板之间存在结构胶夹层时, 长时间的激励才能在钢板外表面形成粘结空鼓中心与边缘的较大温差。由于热量向空鼓方向传递的同时也沿钢板平面向周围传递, 造成钢板外表面温度变化不明显, 因此检测识别较为困难。

关键词: 粘钢加固混凝土结构; ANSYS热学有限元; 红外热像法; 无损检测

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0081-04

目前红外热像检测技术在粘结层的质量检测应用中处于定性研究阶段, 仅能用于粘结缺陷定位, 这方面的定量分析研究鲜有报道^[1]。利用无外加热源检测时, 由于物体与外界趋近于热平衡, 温度梯度较小, 对小面积的缺陷检测比较困难^[2], 红外热像图的缺陷边界的识别需要进一步探讨^[3]。因此, 研究基于主动热激励的红外热像检测技术在用粘钢加固混凝土结构粘结层质量检测中的应用具有重要意义。

本文通过 ANSYS 热学有限元方法, 模拟分析胶粘层的不同缺陷尺寸和类型, 分类研究钢板内侧粘结层缺陷尺寸与表面温度分布的关系。结合工程设计中常用的钢板厚度, 研究粘结层缺陷与表面温度分布规律, 分析主动热激励辐射能量、最佳热像采集时机与缺陷大小之间的联系, 得到了钢板内侧粘结层空鼓缺陷的显著热像与主动热激励能量、持续时间之间的关系。

1 热学模型

1.1 模型建立

假设主动热激励均匀辐射至钢板表面, 钢板表面的吸热涂层吸收全部热量。由于板内热各向

同性, 三维的热传递问题可以退化为二维^[4], 通过二维热传导分析, 了解热传递规律。假设模型长度为 L , 厚度为 D , 如图1所示。在 $z=0$ 处加载由钢板外表面吸热涂层吸收主动热激励的热流密度 q , 随着加载时间的增加, $z=0$ 处的温度将发生变化, 因此可以通过钢板外表面的红外热像, 得到该温度场的变化。

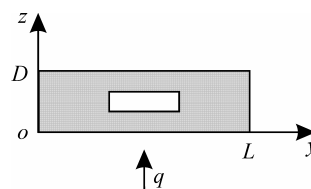


图1 二维热传递示意图

假设钢板和原结构混凝土为导热匀质材料, 缺陷仅存在于粘结空鼓位置, 那么二维无内热源的非稳态导热微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为时间。当导体中无内热源时热扩散系数 $\alpha = \lambda / (\rho C)$, 其中 λ 为导热系数, ρ 为材料密度, C 为比热容。

微分方程的初始条件和边界条件为:

收稿日期: 2018-04-12. 宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 住房和城乡建设部软科学研究项目(2017-K9-015)。

第一作者: 罗元丰(1975—), 男, 浙江临海人, 高级工程师, 主要研究方向: 建筑工程及材料检验检测。E-mail: 417524970@qq.com

*通信作者: 杨英武(1975—), 男, 陕西澄城人, 博士/高级工程师, 主要研究方向: 结构检测与加固等。E-mail: yangyw06@163.com

$$\begin{aligned}
 T(y, z, 0) &= T_0, \\
 y=0, y=L \text{ 处为绝热面,} \\
 -\lambda(\partial T / \partial y) &= 0, z=0, q = -\lambda(\partial T / \partial z), \\
 z=D, h(T_D - T_0) &= -\lambda(\partial T / \partial z),
 \end{aligned}$$

式中: T_0 为初始温度; T_D 为试件背侧混凝土表面温度; λ 为导热系数; h 为试件表面与周围环境的换热系数; q 为钢板涂层外加热流。

根据导热微分方程和初始及边界条件, 可以得到物体表面 $z=0$ 处各点随时间变化的温度分布。利用红外热像仪采集物体表面热辐射, 进而得到表面温度分布。分析模型表面温度分布, 可以得到内部粘结层缺陷分布。

1.2 模型参数

文献[5]研究了红外热像法检测建筑物外墙饰面砖粘贴质量的影响因素, 指出了空鼓距离表面的深度、大小及厚度对试验结果有影响, 空鼓埋置越浅、尺寸和厚度越大, 表面测得空鼓处温度越高, 越容易检测到空鼓的存在; 文献[6]探讨了粘结层缺陷。参考文献[5-6], 结合设计规范中手工涂胶施工的最大钢板厚度限值, 在有限元模型中取粘钢厚度为5 mm, 环氧树脂层厚度为2 mm, 空鼓厚度为1 mm和2 mm, 且位于钢板内侧。

本文的研究对象为3层复合结构, 第1层为钢板, 尺寸为5 mm×100 mm×500 mm; 第2层为环氧树脂胶, 尺寸为2 mm×100 mm×500 mm; 第3层为混凝土, 尺寸为100 mm×100 mm×500 mm。钢板换热系数为125 W·(m²·K)⁻¹, 涂黑色吸热体后其辐射率取0.85, 具体热工参数见表1。

表1 热工参数

材料	比热容/ (J·(kg·K) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)
混凝土	840	2 500	0.790
环氧树脂胶	1 200	5 500	0.925
钢板	460	7 850	36.100
空气	1 009	1.205	0.030

应用 ANSYS 软件, 各种材料的单元类型均选择 SOLID70 实体热单元, 单元具有8个节点, 而且具有三向热传导能力, 模型可以进行三维稳态或瞬态热分析。其中空鼓用空气模拟, 钢板外表面吸热黑体选择 SURF152 表面效应单元, 用于施加热辐射荷载。

2 粘结层空鼓有限元分析

2.1 有限元模型

有限元模型的空鼓分别是直径为1、2、3 cm的圆柱体, 以此分析用红外热像法检测空鼓的最佳时间, 并模拟用红外热像技术能检测到的最小缺陷。ANSYS几何分层及有限元模型如图2和图3所示。

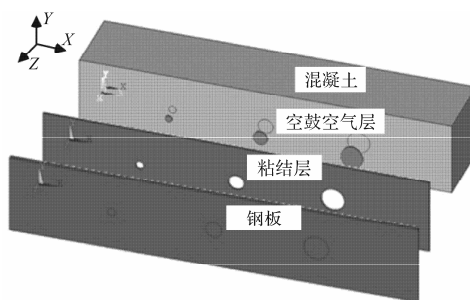


图2 几何分层

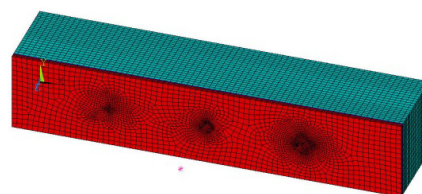


图3 有限元模型

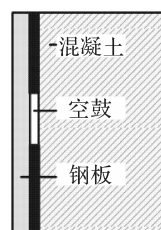
钢板厚度为5 mm, 环氧树脂胶粘层厚度为2 mm。空鼓厚度分为2类: (1)混凝土与钢板间完全无胶, 形成2 mm厚的空鼓; (2)结构胶厚度不均, 导致部分结构胶未与混凝土连结, 形成1 mm厚的空鼓。

模型的初始温度为303 K, 对流温度为343 K, 空间辐射节点温度为673 K。在数值模拟过程中, 假设外加热源仅施加在钢板面对辐射加热源这一面, 模型的其他面绝热。

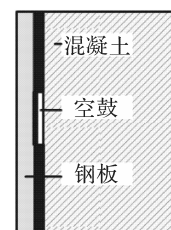
2.2 有限元计算结果

2.2.1 空鼓厚度为2 mm的有限元计算结果

第1类粘结层空鼓模型取厚度为2 mm, 直径分别为1、2、3 cm的3个圆柱体(图4(a)), 其ANSYS分析结果如图5~7所示。



(a) 第1类空鼓模型



(b) 第2类空鼓模型

图4 空鼓模型示意图

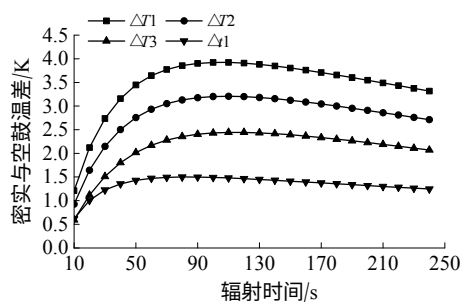


图5 3 cm 直径圆(空鼓 2 mm)温差曲线

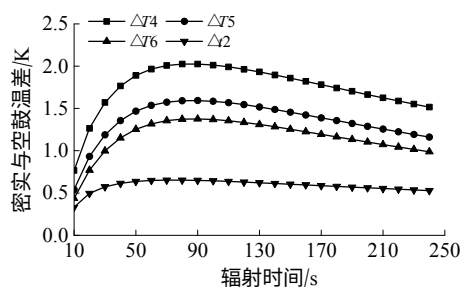


图6 2 cm 直径圆(空鼓 2 mm)温差曲线

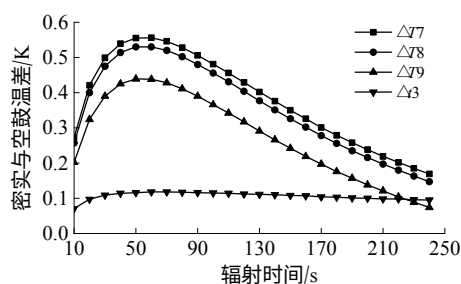


图7 1 cm 直径圆(空鼓 2 mm)温差曲线

经过分析表明, 直径为 1、2、3 cm 圆柱体空鼓的最佳检测时间分别为 60、90、110 s, 取这 3 个时刻得到的表面温度云图如图 8 所示。

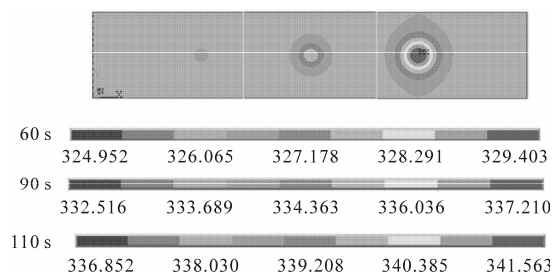


图8 2 mm 厚空鼓云图

2.2.2 空鼓厚度为 1 mm 的有限元计算结果

空鼓模拟取厚度为 1 mm, 直径分别为 1、2、3 cm 的 3 个圆柱体(图 4(b)). ANSYS 分析结果如图 9~11 所示。分析表明, 直径为 1、2、3 cm 圆柱体空鼓的最佳检测时间分别为 70、110、140 s, 取这 3 个时刻得到的表面温度云图如图 12 所示。

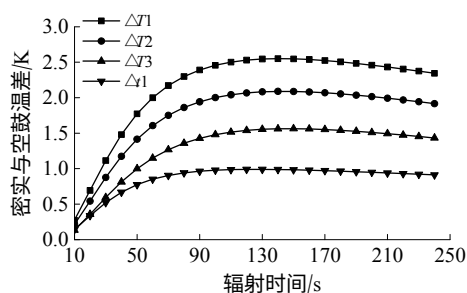


图9 3 cm 直径圆(空鼓 1 mm)温差曲线

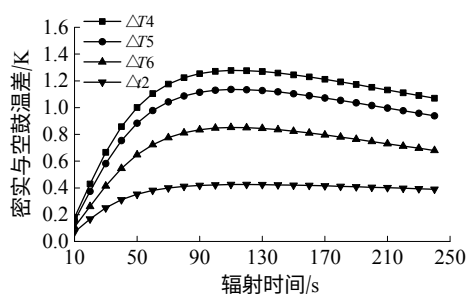


图10 2 cm 直径圆(空鼓 1 mm)温差曲线

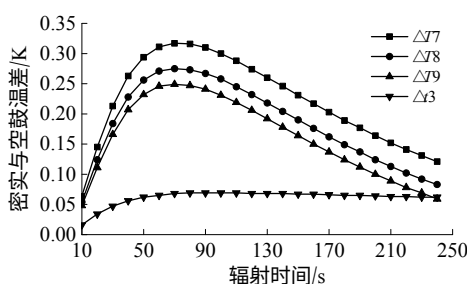


图11 1 cm 直径圆(空鼓 1 mm)温差曲线

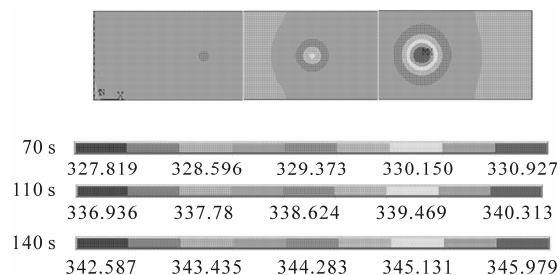


图12 1 mm 厚空鼓云图

2.3 分析与讨论

综上所述, 在加热初始阶段表面温差随时间增大, 达到一定温差后开始下降。当空鼓处于无缺陷处温差达到最大时, 即为空鼓检测的最佳时刻。

由图 5~7 可知, 当空鼓厚度为 2 mm, 即钢板与混凝土交界处完全无胶形成空鼓时, 直径为 1、2、3 cm 的圆柱空鼓, 最适宜检测时机分别为加热 60、90、110 s; 由图 8~10 可知, 当空鼓厚度为 1 mm, 即钢板与混凝土交界处有一定厚度粘胶层, 因脱

胶形成空鼓时,直径为1、2、3 cm的圆柱空鼓,最适宜检测时机分别为加热70、110、140 s。空鼓直径为3 cm和2 cm时,在最佳检测时间无量纲温差最大可达3.9,最小有1.3,通过红外热像可以检测出缺陷位置;而当空鼓直径为1 cm时,在最佳检测时间,无量纲温差最大仅为0.556,最小为0.317,而且最佳检测时间短,很容易错过。考虑实际检测过程中环境条件的变化,红外热像法识别尺寸过小的缺陷存在一定难度。

3 结论

(1)空鼓越小,红外热像最佳检测时间越短,而且最佳检测时间范围越窄。

(2)在空鼓缺陷和钢板内侧存在粘胶层时,最佳检测时间比完全无粘结层时要长,虽然空鼓中心与边缘也存在温差,但温差较小。

(3)当空鼓直径仅1 cm时,缺陷处与无缺陷处温差较小,而且因最佳检测时间范围窄容易错过;考虑到现场条件,应用红外热像仪检测尺寸过小的

缺陷有困难。

(4)根据有限元分析结果,红外热像法对缺陷宽度在2 cm及以上的空鼓有较好的检测效果,而对缺陷在1 cm及以下的空鼓检测难度较大。

参考文献:

- [1] 王裕文,梅林,张广明. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[C]//第九届激光检测技术学术会议论文集,北京:机械工业出版社,1998:78-82.
- [2] 谢春霞. 红外热像检测技术在粘钢加固法中的研究[J]. 四川建筑,2011,31(3):170-171.
- [3] 杨英武,张欣,杨小清,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.
- [4] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M],北京:高等教育出版社,2006:41-46.
- [5] 袁昕,谢慧才,陈高峰. 建筑物外墙饰面砖粘贴质量的红外热像检测试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2003,29(2):43-45.
- [6] 沈立华,孙丰瑞,杨立,等. 单面法红外检测钢板内壁缺陷温度场研究[J]. 激光与红外,2006,36(1):19-22.

Study on infrared thermography technology used for detecting the bond defects of steel-bonded reinforcement concrete structure

LUO Yuan-feng¹, YANG Ying-wu^{2*}, WANG Xi-xi², SUN Lie³

(1.Ningbo Construction Inspection Company, Ningbo 315032, China;

2.College of Landscape and Architecture of Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China;

3.Ningbo Central Supervision Station of Safety and Quality of Construction Projects, Ningbo 315040, China)

Abstract: The different defect sizes and types of the bond layer of the RC members bonded with steel plate are simulated and analyzed by ANSYS finite element method, and the relationship is classified between the layer defect sizes and the temperature distribution on the out surface of steel. According to the results, under the same thermal excitation, when bonding defects are far away from the steel plate and there is a thin bonding layer between the defects and the steel plate, longer thermal excitation time will be required to get the maximum temperature differences on the steel's outer surface between the center and the edge of the bonding defects. For the reasons that heat transfers not only to defects but also to the surroundings along the steel plate plane, the temperature variation on the steel outer surface are less obvious. All these result in the difficulties of defects detecting.

Key words: steel-bonded concrete structure; ANSYS thermal finite element analysis; infrared thermography; none-destructive test

(责任编辑 史小丽)