

文章编号: 1001-4888(2010)04-0373-06

FRP 加固 RC 梁界面疲劳损伤红外检测分析^{*}

邓江东¹, 黄培彦², 宗周红³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640;

3. 东南大学土木工程学院, 南京 210096)

摘要: FRP-混凝土界面剥离损伤的探测是界面力学分析的一个难点。基于三个标准试件探讨了红外检测方法对 FRP-混凝土界面剥离探测的精度、可行性以及剥离判断的标准, 并对常幅疲劳荷载下 FRP 加固钢筋混凝土(RC)梁界面的疲劳行为进行了跟踪记录, 分析了界面的疲劳破坏过程。试验结果表明, FRP 加固 RC 梁界面存在初始的未粘结区, 在疲劳加载的初期界面剥离快速增加, 随后在大部分疲劳寿命期内保持稳定, 在最后数千次加载循环内界面损伤失稳发展导致整个加固构件的破坏。文中基于红外数据给出了每个阶段的疲劳加载次数和界面剥离损伤的面积。

关键词: FRP; 混凝土; 加固; 界面破坏; 红外检测

中图分类号: O346.2 **文献标识码:** A

0 引言

由于 FRP(纤维布、纤维板等)具有高强质轻等优点, 粘贴 FRP 加固钢筋混凝土(RC)结构的方法已在土木工程领域得到了广泛的应用, 国内外许多研究人员对 FRP 加固混凝土结构的性能进行了探讨^[1-3], 以往的研究多针对加固构件的整体力学性能, 而 FRP-混凝土之间粘结界面的性能往往决定了加固的成败和实际的使用效果, 目前在界面剥离探测上有一定的难度, 有关 FRP-混凝土界面剥离行为的研究也比较少, 界面疲劳损伤的形成机理、演化过程都非常复杂, 因此有必要作进一步的探讨。

本文分析了红外探测技术在 FRP-混凝土检测中的可行性, 并结合常幅疲劳试验, 探讨了抗弯加固 RC 梁中 FRP 与混凝土界面的疲劳破坏过程, 对界面疲劳损伤扩展规律进行了定量分析研究。

1 界面剥离的红外探测方法

一直以来, FRP-混凝土粘结界面剥离情况的检测是界面力学性能研究的难点之一。工程中 FRP 与混凝土之间的粘结质量一般用小锤轻轻敲击或手压纤维片材表面的方法来检查, 这种检测方法带有很大的随机性和不确定性, 难以准确地评价界面的实际情况^[4]。红外检测技术提供了一种非接触式的探测手段, 近年来在土木工程领域得到迅速的推广应用, 特别是岩石力学、复合材料和混凝土结构火灾鉴定方面^[5-9]。这项技术主要是形成物体表面红外辐射能量强弱的图像, 当物体内部存在裂缝或其它缺陷时将改变物体的热传导模式, 物体表面的红外辐射就会出现差异或不均匀变化。红外无损检测就是通过测量这些差异或不均匀变化, 直观地查出物体缺陷的位置、大小和形状。

^{*} 收稿日期: 2010-01-18; 修订日期: 2010-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(10802023); 福建省自然科学基金(2009J05122); 福州大学科研基金(XRC-0841); 工程结构福建省重点实验室基金(MEL200901)

通讯作者: 邓江东(1979-), 博士, 助理研究员, 主要从事桥梁加固领域的研究。E-mail: dengjdong@fzu.edu.cn

本次试验采用 HY-5000 监控型红外热像仪摄像机,该系统的探测器采用第三代非致冷焦平面技术,主要性能参数:温度分辨率 0.07°C (在 30°C 时),响应波段 $8\sim 14\mu\text{m}$,像素 320×240 [10]。

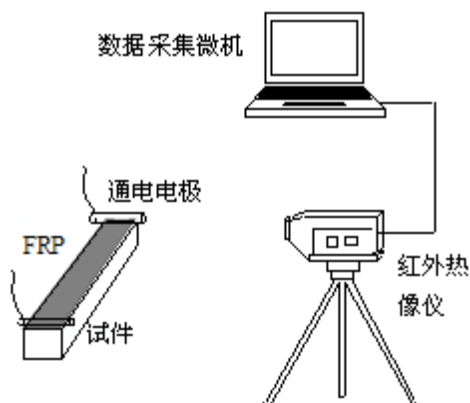


图 1 试验系统

Fig. 1 Thermal images test system

为了提高对比度,对 FRP (试验中具体采用的是碳纤维薄板) 通以低压交流电进行均匀加热,整个试验系统见图 1。加热电压控制在 12V 左右,保证 FRP 粘结良好区域的温度在 $34^{\circ}\text{C}\sim 37^{\circ}\text{C}$ 之间,避免加热温度过高造成 FRP 及粘结界面的损伤。由于 FRP 板上的热传导,FRP 表面的加热温度基本上是均匀的。混凝土的热导率 $1.51\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [11],空气的热导率 $0.025\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,FRP 加热后,界面剥离区域由于存在空洞,散热效率较低,温度会比粘结区域高,这个温差通过红外热像仪摄像机来记录分析。

加载前对 FRP 预加热 4 小时以上使试件的温度场稳定,在试验过程中开启空调来维持一个恒定的环境温度,以消除气温波动对测量精度的影响。红外热像仪镜头焦点对准 FRP 跨中中心点,通过几何转化来还原拍摄的红外图片(透视图)和真实物体之间的形状差异。试验中红外图像的采集速率为 1 帧/s。

2 界面剥离判定

FRP-混凝土界面剥离的判定标准是试验中一个首先要解决的问题,也是检测分析的难点。红外图像普遍存在着目标与背景对比度较差、边界模糊等现象,给界面剥离的判定带来了困难,需要大量的试验数据来统计分析。

三个经精细制作的标定界面剥离的标准试件长 $\times$ 宽为 $200\text{mm}\times 100\text{mm}$,FRP 剥离区和粘结区长度各 100mm ,见图 2。加热后某一时刻标准试件 FRP 表面的红外图像和对应的温度沿长度方向的分布示于图 3。界面剥离的检测精度主要取决于剥离区和粘结区温度差异的大小,从图 3 可以看出温度曲线变化均匀连续,两个区域之间有明显的温度梯度。

由于红外数据离散性较大,为了消除个别点的温度偏差对界面剥离判断标准造成的影响,分析采用粘结区域以及分界线上所有点温度的平均值。界面剥离标准试件的分界线温度随粘结区温度的变化规律示于图 4。

分界线温度与粘结区温度试验数据的 3 次拟合关系式为:

$$T = 0.0033 T_0^3 - 0.39 T_0^2 + 15.97 T_0 - 181.15$$

式中, T_0 表示粘结区域温度; T 表示分界线温度或称为剥离温度。

试验数据与拟合曲线的相关系数 $R^2 = 0.993$,平均残差 0.05°C ,显示数据拟合精度较好,分界线和粘结区温度的规律性是稳定可靠的,可以较为精确地判定界面的剥离情况。 $\sum_{i=1}^n (T_i - T_{0i})/n = 5.60^{\circ}\text{C}$, $(T_i - T_{0i})_{\min} = 3.09^{\circ}\text{C}$,均远大于红外热像仪器的分辨温度,易于准确判断界面剥离与否。

在以下分析中,采用上式作为 FRP 加固 RC 梁界面剥离的判断标准,对应于一个特定的初始温度 T_0 ,当加载后 FRP 表面温度等于或超过剥离温度 T ,则认为此点区域的界面已经发生了剥离破坏。从结果来看根据试验数据回归得到的判断标准离散性较小,可以较为精确地判定界面的剥离情况。

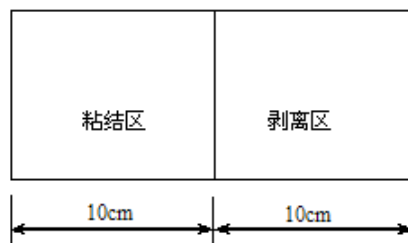


图 2 标准试件设计

Fig. 2 Specimens design

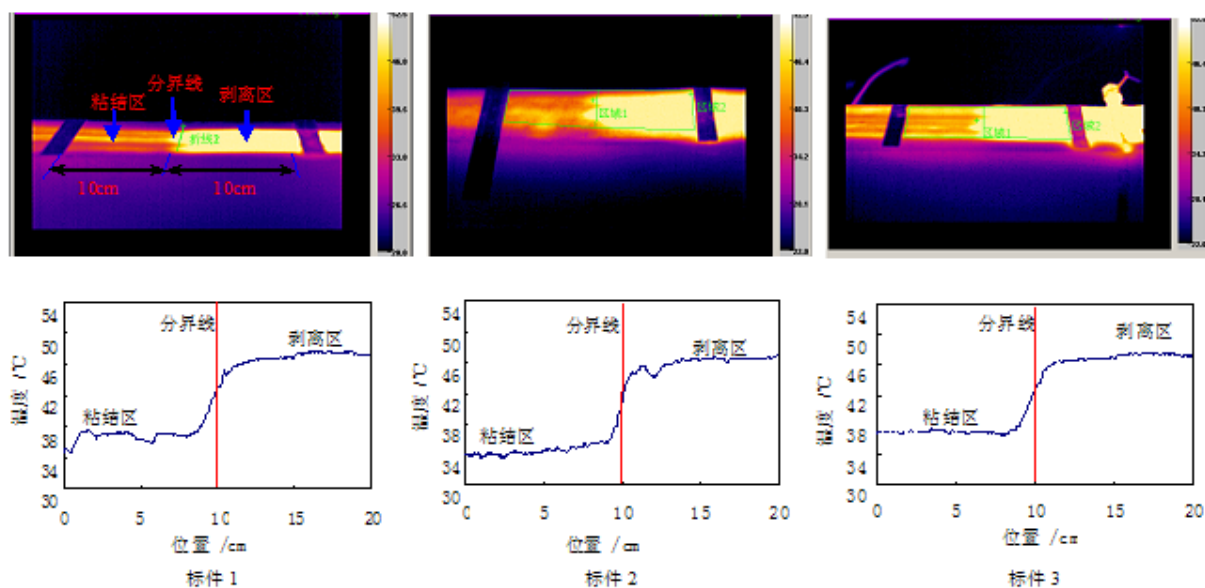


图3 标准试件温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution along length direction of standard specimens

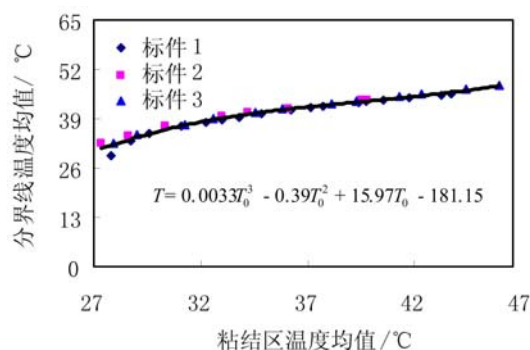


图4 分界线温度均值与粘结区温度均值的关系

Fig. 4 Relation between temperature of dividing line and that of bonding area



图5 FRP 增强 RC 梁的三点弯曲试验

Fig. 5 Three-point bending experiment for FRP strengthened RC beam

3 FRP 加固 RC 梁界面疲劳破坏过程

试验用 RC 梁尺寸为 $1850\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。所用混凝土材料为 C40 中砂碎石混凝土, 配置 $2\phi 10$ 的 II 级纵向钢筋; 箍筋 $\phi 8@100\text{mm}$ 。在试验梁的底部受弯拉区域粘贴 1.6m 长的碳纤维薄板, 粘贴方向沿 RC 梁的纵向。

试验所用的加载设备为 MTS 810 型电液伺服加载系统(图 5), 三点弯曲常幅疲劳加载, 加载频率设为 10Hz, 正弦波形, 应力比 $r = S_{\min}/S_{\max} = 0.1$; $S_{\max}$ 取为 30.0kN。

本次试验中两个 FRP 加固 RC 梁试件(I-1、I-2)的疲劳寿命分别为 1950120 次和 902876 次, 界面的失效过程相似, 可简述如下:

从红外图像(图 6)上可以看出在加载前 FRP 上就存在一些较高温区, 这些区域是由于粘结施工质量不佳造成的界面空洞或未粘结处, 敲击时明显有空洞声, 属于界面初始损伤。

在开始疲劳加载的数百次到数千次循环内, 混凝土梁中产生大量裂缝, 造成界面局部区域的剥离, 是界面损伤的萌生阶段。接下来的界面剥离稳定扩展阶段是一个长期的过程, 红外图像在界面剥离失

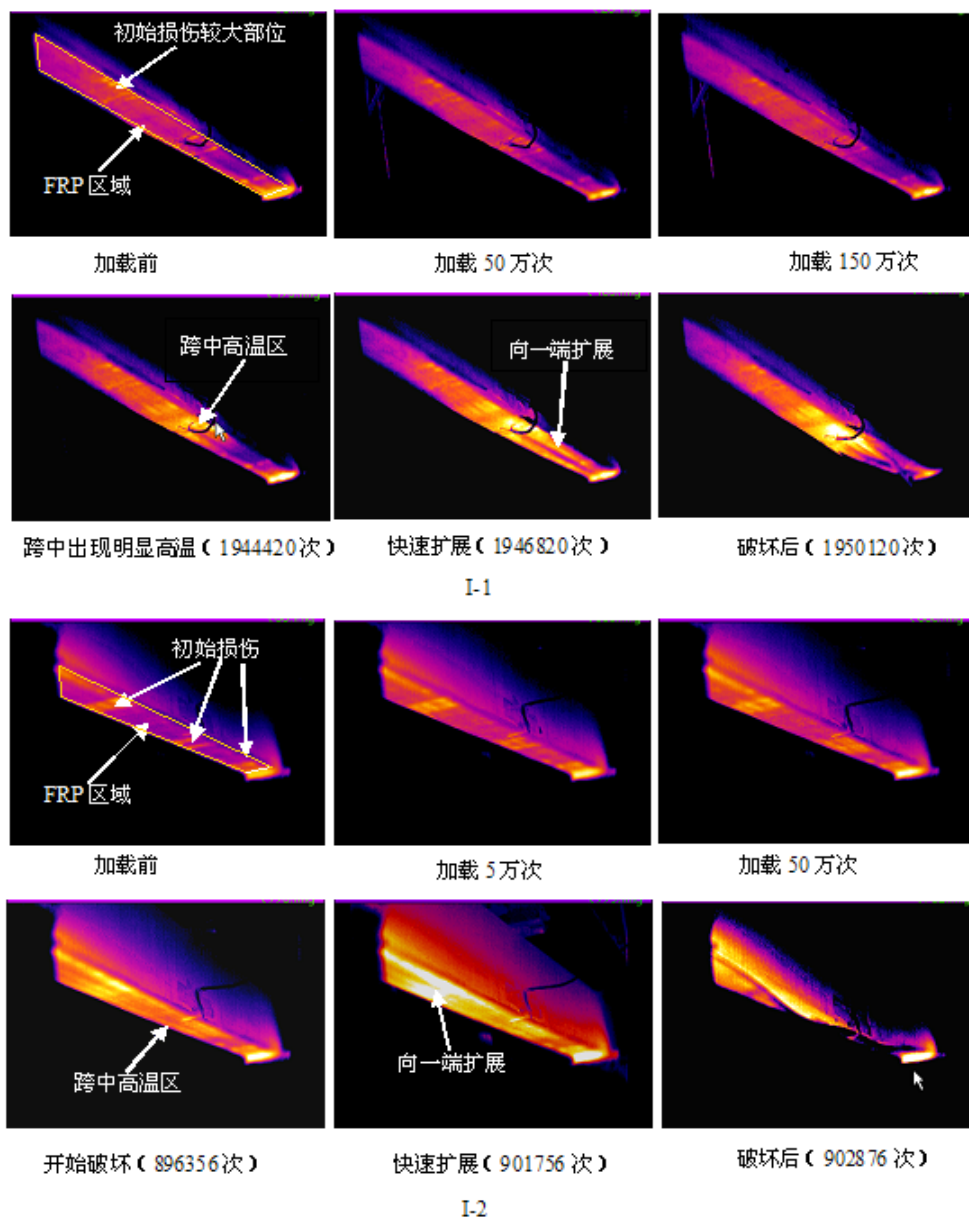


图 6 不同加载阶段红外图像

Fig. 6 Temperature thermograms at different loading phases

稳发展前没有明显的变化。整体来看这个阶段是界面软弱层微裂纹的产生、发展、相互作用以及最终形成一个界面宏观剥离裂纹的过程,但此阶段界面裂纹非常的细小,界面剥离发展缓慢,FRP 表面的红外温度场只有局部的变化,主要发生在跨中附近和有初始损伤的区域。

当界面微裂纹逐渐贯通连接在一起时,就进入下一个界面剥离失稳发展的阶段。从红外图像的变化可以看出,跨中部位 FRP 温度首先明显升高,高温条带向梁一端发展,界面的有效承载面积不断减少,界面持续剥离,最后当粘结面积较小时,界面发生突然的脆性断裂,粘结面从梁一端完全分离,整个构件失效。

定义界面损伤为:

$$D = \frac{A_{del}}{A_{tot}}$$

式中, A_{del} 表示界面剥离面积; A_{tot} 表示界面总面积。

根据红外试验数据,得到界面损伤与循环加载次数的关系,见图 7。试件 I-1 的初始损伤为 0.05,

I-2的初始损伤约0.03,均能满足规范剥离面积小于5%的要求。稳定发展阶段试件 I-1 损伤维持在0.1左右,I-2 维持在0.04左右。达到快速剥离阶段时,界面剥离急剧发展,由于 FRP 是从梁一端剥落下来,破坏时两个试件发生剥离的面积均约占总面积的62%。界面剥离萌生和失稳扩展阶段在数千次循环内完成,稳定扩展阶段是界面疲劳寿命的主要阶段。

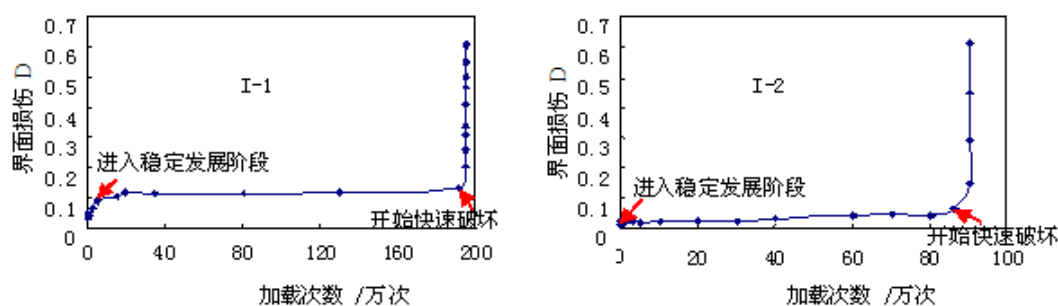


图7 界面损伤随加载次数的变化

Fig. 7 Interfacial damage versus fatigue cycles

4 结语

红外检测技术可以有效地探测 FRP 加固混凝土构件粘结界面的状况,界面粘结区和剥离区有明显的温度梯度,界面初始损伤的位置和大小可以在红外温度场中精确标定出来,具有直观性、准确性和定量性的特点,检测精度可以满足分析研究和工程应用的要求,是一种实用的界面检测方法。疲劳加载过程中界面剥离从跨中位置开始,并向梁一端发展,剥离区温度明显升高。文中基于红外数据给出了每个阶段的疲劳加载次数和界面剥离损伤的面积。

参考文献:

- [1] Masoud Sobhy, Soudki Khaled, Topper Timothy. Postrepair fatigue performance of FRP-repaired corroded RC beams: experimental and analytical investigation [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(5): 441—449.
- [2] Aidoo John, Harries Kent A, Petrou Michael F. Full-scale experimental investigation of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(3): 350—359.
- [3] Bizindavyi L, Neale K W, Erki M A. Experimental investigation of bonded fiber reinforced polymer-concrete joints under cyclic loading [J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(2): 127—134.
- [4] 中国工程建设标准化协会标准. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程(CECS146—2003)[S]. 北京, 中国计划出版社, 2003 (CECS. Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate(CECS146—2003) [S]. China Plan Press, 2003 (in Chinese))
- [5] Rami Haj-Ali, Bo-Siou Wei, Shane Johnson, Rani El-Hajjar. Thermoelastic and infrared-thermography methods for surface strains in cracked orthotropic composite materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(1): 58—75.
- [6] 黄芳, 聂雪媛, 江增荣, 丁桦. 利用红外热像技术快速预测材料的 S—N 曲线[J]. 实验力学, 2009, 24(4): 291—298 (Huang Fang, Nie Xue-yuan, Jiang Zeng-rong, Ding Hua. On the Use of Infrared Thermography Method for Material S—N Curve Prediction [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(4): 291—298 (in Chinese))
- [7] 黄莉, 李卓球, 宋显辉, 钱红兵. 碳纤维增强混凝土中裂纹的红外热像检测方法机理研究[J]. 实验力学, 2003, 18(3): 403—408 (Huang Li, Li Zhuo qiu, Song Xian hui, Qian Hong bing. Infrared Thermographic Inspection for the Crack in Carbon Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(3): 403—408 (in Chinese))
- [8] Choi Choul Jun, Kim Jae-Yeol, Yang Dong-Jo, Song Kyung-Seok, Ahn Yeon-Shik. A study on the application infrared thermography camera for the 7FA gas turbine blade covering crack detecting [J]. Key Engineering

- Materials, 2007, 340-341: 483-488.
- [9] 余曼丽, 潘伟, 朱若寒. 红外成像检测技术在工程中的应用及其发展[J]. 国外建材科技, 2007, 28(3): 51-54 (Yu Man-li, Pan Wei, Hu Ruo-han. Application of IR Thermograph and Its Development in Engineering [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2007, 28(3): 51-54(in Chinese))
- [10] 华中数控股份有限公司. HY-5000 红外热像仪使用手册, 武汉: 2006 (Wuhan Huazhong Numerical Control co., ltd. Manual of HY-5000 infrared camera. Wuhan, 2006(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国建设部. 民用建筑热工设计规范(GB50176-93) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1993 (Ministry of construction of the people's republic of china. Thermal design code for civil building(GB50176-93) [S]. Beijing: China Plan Press, 1993 (in Chinese))

Analysis of Interfacial Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened with FRP Based on Infrared Thermography

DENG Jiang-dong¹, HUANG Pei-yan², ZONG Zhou-hong³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: The debonding detecting of FRP-concrete interface is a difficult problem in interface mechanics analysis. Infrared detection technology was used to record interfacial fatigue behaviors and analyze the interface fatigue damage processes. Based on three standard specimens, the probe accuracy, feasibility and interface debonding criterion of infrared detection measure were studied. Results show that initial debonding areas exist in the interface of RC beams strengthened with FRP. At an early stage during cyclic loading, the interfacial debonding expands rapidly then maintains stable in most fatigue life; the instability occurred during the last thousands cyclic loading results in a complete failure of strengthening RC beams. The fatigue loading number and the debonding area at every stages are presented in this paper based on infrared data.

Keywords: fiber reinforced polymer; concrete; strengthening; interfacial failure; infrared detecting