

# 光纤光栅 CFRP 混凝土复合拱裂缝监测实验研究

岳 音 王 源 段建立 张清华

解放军理工大学国防工程学院, 江苏 南京 210007

**摘要** 针对碳纤维复合材料(CFRP)混凝土复合拱裂缝监测问题,尝试了使用裸光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器监控 CFRP 混凝土复合拱初始开裂。从力学角度分析并确定粘贴位置,并对点粘和满粘(点粘是指只粘贴栅区两端点,而满粘将胶涂满整个栅区)两种不同粘贴方法开展研究。对比光纤光栅和应变片测量数据,验证光纤光栅测量应变的准确性和稳定性。运用 $K$ 值标准差准则,将开裂规律定量化。实验结果表明通过合理布设光纤光栅,可以监测结构的初始开裂,并且光纤光栅和应变片测量数据具有较好的一致性。

**关键词** 光栅; CFRP 混凝土复合拱; 初始开裂; 点粘和满粘;  $K$  值标准差准则

中图分类号 TP212.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0805004

## Experimental Study on Fiber Bragg Grating Monitoring the Crack of CFRP Concrete Composite Arch

Yue Yin Wang Yuan Duan Jianli Zhang Qinghua

College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

**Abstract** To the crack monitoring of the carbon fibre reinforced plastics (CFRP) concrete composite arch, an experiment is conducted to monitor the appearance of the crack with bare fiber Bragg grating (FBG) strain sensors. The location of fiber Bragg grating (FBG) is determined via mechanic analysis, two kinds of pasting method is studied: local and distributed coupling (in the first case the measurement fiber is attached to the host structure at two points, in the second case the measurement fiber is attached along the whole active region). A comparison between the data of FBG and strain gauge is conducted to validate the precision and stability of FBG. The test results show the quantitative rule of crack initiation via  $K$  value standard deviation criterion. The initial cracking can be monitored by arranging the FBG sensors appropriately, good consistency can be achieved between FBG and strain gauge.

**Key words** gratings; CFRP concrete composite arch; initial cracking; local and distributed coupling;  $K$  value standard deviation criterion

**OCIS codes** 050.2770; 060.3735; 130.6010

### 1 引 言

开裂是影响结构物正常使用和安全运营的主要原因之一,裂缝开展过程监测是评估裂缝危害程度的重要手段<sup>[1]</sup>。传统的裂缝监测手段具有易受环境影响、施工埋设复杂、耐久性和稳定性差等缺点<sup>[2]</sup>。布拉格光栅(FBG)传感器对波长进行编码,不受电磁辐射影响,传感特性稳定<sup>[3]</sup>。重量轻,易组网<sup>[4]</sup>,响应速度快,对裂缝的监测具有一定的优越性。通过裂缝的产生、发展情况的分析,可以对混凝土结构的损伤状况定位<sup>[5]</sup>。及早发现结构的损伤可以及时维护,减少费用<sup>[6]</sup>。

目前,布里渊散射(BOTDR)技术在裂缝的监测方面应用较多,但是BOTDR系统中布里渊散射信号非常

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-04-01

基金项目: 国家973计划(2010CB732003,2013CB036005)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13071)

作者简介: 岳 音(1992—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感监测方面的研究。E-mail: 15251895292@163.com

导师简介: 王 源(1970—),男,教授,硕士生导师,主要从事国防工程勘察与安全监测方面的研究。

E-mail: tdg62@163.com

微弱,常常导致传感距离受限,进而影响系统的测量精度<sup>[7]</sup>,具有一定的局限性。随着光纤传感技术的发展,FBG成为研究热点之一<sup>[8]</sup>。FBG传感器的成功研制,为长期的结构健康监测提供了强有力的技术支持,在土木工程实验中具有广泛的应用<sup>[9]</sup>。Marzouk等<sup>[10]</sup>将FBG传感器埋入结构监测板柱连接处的初始开裂以及裂缝宽度,传感器在长期健康监测中显示出良好的性能。包腾飞等<sup>[11]</sup>研究了基于FBG传感的分布式裂缝监测技术,通过模型实验发现FBG能准确监测到裂缝发生和扩展过程中的定量规律。

在国内,许多高等院校和科研院所正在开展基于光纤传感技术的结构损伤和裂缝定位监测<sup>[12]</sup>。周智等<sup>[13]</sup>将7个管式封装FBG应变传感器与2个裸光栅以及1个温补光栅布设于2根实验梁上监测结构的开裂和破坏,实验结果和理论值相符。欧进萍等<sup>[14]</sup>在黑龙江省呼兰河大桥布设FBG传感器监测车辆荷载下的应变历程和大桥温度变化过程,为桥梁结构的健康诊断提供依据。大量实验表明FBG在裂缝监测和结构健康监测中有独特的优势,可以在工程中广泛应用。

考虑到封装传感器布设不方便,不容易粘贴在弧形拱表面,本文通过实验研究裸光纤光栅裂缝监测的可行性,监测结构的初始开裂。通过对比点粘和满粘两种不同粘贴方法,定量分析开裂规律,为后续研究提供参考。

## 2 实验方案

### 2.1 加固拱材料与结构模型

实验拱尺寸如图1所示,采用C30混凝土和HRB335钢筋。环向、轴向、拉结筋尺寸和规格分别为 $\Phi 8@100$ , $\Phi 8@120$ , $\Phi 6@120 \times 120$ 。

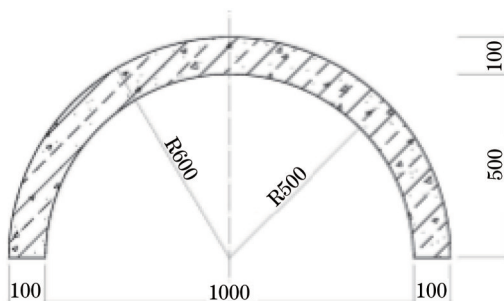


图1 结构尺寸图(mm)

Fig.1 Dimension of the arch (mm)

表1 碳纤维复合材料(CFRP)复合拱加固方式及分组

Table 1 Reinforcing and grouping of CFRP composite arch

Group	Type of the arch	Pasting way of CFRP	Composite reinforcement
Arch 1	CFRP composite arch	Two CFRP plates pasted on the arch ring	No
Arch 2	CFRP composite arch	One CFRP plate pasted on the arch ring	Steel plate

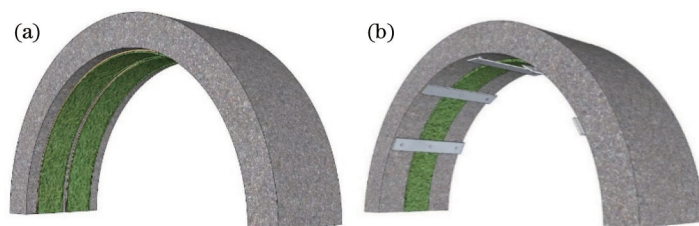


图2 实验拱示意图

Fig.2 Schematic diagram of the arch

### 2.2 实验原理与测试仪器

光纤布拉格光栅的工作原理是通过改变纤芯区折射率,从而产生小的周期性调制。应变和温度是光纤光栅最直接的两个传感参量。布拉格光栅会对入射的宽带光进行选择性的反射,反射波长的表达式为<sup>[15]</sup>:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为反射中心波长,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。

当光纤附近出现裂缝时,应变产生变化进而导致反射波长的变化,变化量为:

$$\Delta\lambda = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda, \quad (2)$$

当温度变化不大时,忽略温度的影响,可得:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - p)\varepsilon, \quad (3)$$

(3)式是光纤传感的基本关系式。  $p$  为光纤的弹光系数,约为0.22。

采用311.4型MTS高荷载液压伺服实验机,应变通过电阻应变片接入静态应变仪读取。使用美国MOI公司生产的sm125解调仪,可以实现四通道实时测量,频率为2 Hz。接入扩展模块,可以实现八通道实时测量。

### 2.3 实验过程

实验采用控制位移的方式进行加卸载,使用MTS机进行0-2 mm-0,0-4 mm-0,0-6 mm-0,0-8 mm-0,0-10 mm-0五个加卸载循环,阶段六从0加载直到结构破坏。拱1、拱2加卸载曲线如图3和图4所示。

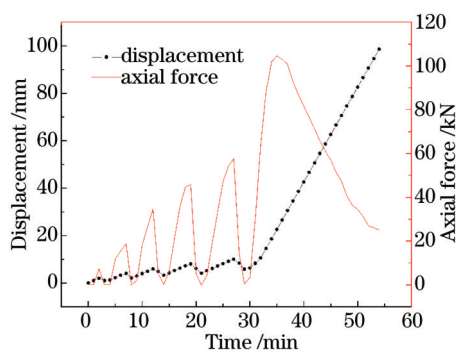


图3 拱1加卸载曲线

Fig.3 Arch 1 loading and unloading curve

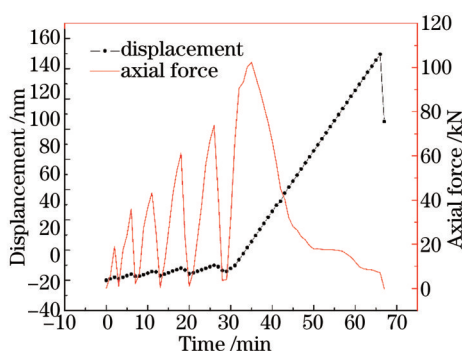


图4 拱2加卸载曲线

Fig.4 Arch 2 loading and unloading curve

### 2.4 有限元分析

使用Abaqus模拟钢筋混凝土拱分别在拱顶发生1 mm位移和受到1 kN集中荷载作用下的变形结果如图5所示。

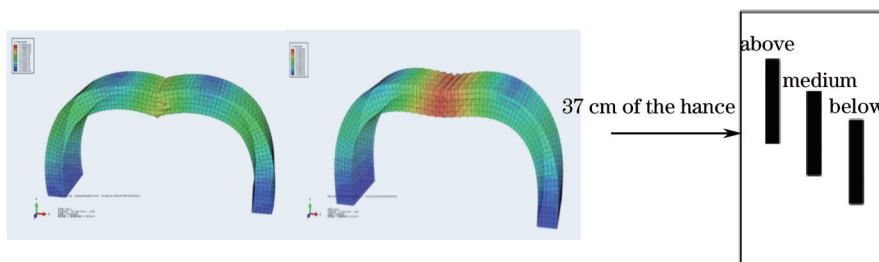


图5 Abaqus模拟结果及光栅粘贴示意图

Fig.5 Simulation results of Abaqus and FBG pasting location

分析结果显示,除拱顶外,最大变形出现在拱腰37 cm处。在拱腰37 cm及附近平行粘贴三根裸光纤光栅(上、中、下),中间位置光栅的中心位于拱腰37 cm处,相邻光栅彼此错开2 cm,采用点粘和满粘两种粘贴方法。

## 3 实验结果分析

### 3.1 初始开裂监测(拱1)

拱腰处光纤光栅满粘,波长分别为1540 nm(下)、1556 nm(上)、1545 nm(中),接入解调仪1、2、3通道。实验开始6~7 min后,可在CFRP复合拱拱腰发现细小裂缝,通道3所接光栅覆盖了此裂缝区域,测得开裂应变为198  $\mu\varepsilon$ 。将从实验开始到500 s时间内三通道光纤光栅应变增量绘制如图6,横轴表示时间,纵轴为应变增量(后一时间点测得应变和前一时间点测得应变差值),依次为1540、1556、1545 nm波长光栅。

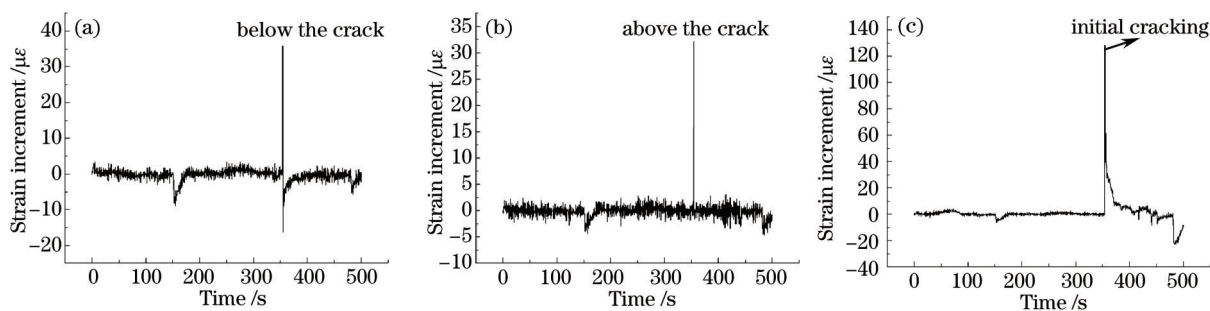


图6 拱1应变增量曲线

Fig.6 Strain increment curve of arch 1

当拱腰处产生裂缝时,裂缝下方、上方以及覆盖裂缝处的光栅应变增量分别为  $35.938$ 、 $32.115$ 、 $128.266 \mu\epsilon$ , 在此之前应变增量变化幅度较小,绝对值不超过  $10 \mu\epsilon$ 。可见当拱腰初始开裂时,会对附近的混凝土应变产生扰动,光纤光栅满粘,即使测量区域未能覆盖裂缝位置,也能通过裂缝附近光纤光栅应变增量的变化来判断混凝土是否开裂。结构开裂图像如图7。



图7 初始开裂示意图

Fig.7 Initial cracking of the arch

### 3.2 初始开裂监测(拱2)

拱腰处光纤光栅点粘,波长分别为  $1557 \text{ nm}$ (下)、 $1575 \text{ nm}$ (上)、 $1545 \text{ nm}$ (中),接入解调仪 1.1、2.1、3.1 通道。实验开始  $6\sim 7 \text{ min}$  后,可在 CFRP 复合拱拱腰发现细小裂缝,通道 3.1 所接光栅覆盖了此裂缝区域,测得开裂应变为  $207 \mu\epsilon$ 。将从实验开始到  $500 \text{ s}$  时间内三通道光纤光栅应变增量绘制如图8,横轴表示时间,纵轴为应变增量(后一时间点测得应变和前一时间点测得应变差值),依次为  $1557$ 、 $1575$ 、 $1545 \text{ nm}$  波长光栅。

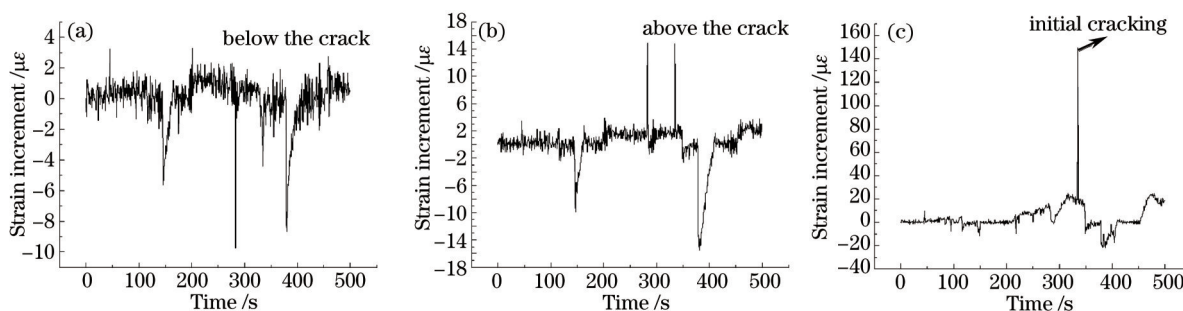


图8 拱2应变增量曲线

Fig.8 Strain increment curve of arch 2

由图8可见,采用点粘的方式,裂缝出现时覆盖裂缝的光纤光栅应变增量有明显增加,为  $149.494 \mu\epsilon$ ,而附近光栅无此现象。

由此可见,对于钢筋混凝土结构的初始开裂,裂缝处的光栅应变会产生突变。裂缝附近的光栅满粘,结构开裂时应变有明显变化,而点粘相当于将测量标距内的应变平均化,效果不明显。

### 3.3 K值标准差公式分析

在工程实际中,由于测量者的疏忽或者仪器故障等原因,会使得测量数据中含有粗大误差,从而影响测



量精度,所以必须将含有粗大误差的数据剔除。 $K$ 值标准差准则处理数据的基本思想是以 $k$ 倍标准差为依据,凡超过此界限的数据均认为它属于粗大误差,称为异常值,将会从样本中予以剔除。

实验处理数据参照 $K$ 值标准差准则寻找异常值,公式为

$$|x_i - \bar{x}| > k\sigma, \quad (1)$$

式中 $x_i$ 为样本数据, $\bar{x}$ 为样本平均值, $\sigma$ 为标准差, $k$ 值取5,将拱1通道3所接光栅前400 s获得的应变增量数据分析计算如表2所示。

表2 拱1数据分析表  
Table 2 Arch 1 data analysis table

Time interval /s	Average value / $\mu\epsilon$	Standard deviation / $\mu\epsilon$	Outlier
(0, 50)	0.52	1.03	No
[50, 100)	1.56	1.25	No
[100, 150)	-0.16	0.73	No
[150, 200)	-1.09	0	No
[200, 250)	0.14	0.67	No
[250, 300)	0.82	0.71	No
[300, 350)	0.10	0.72	No
[350, 400]	13.89	17.19	Yes

由上表可知,光栅在350~400 s期间出现异常数据。将此区间划分为更小的时间区间,重复此算法,可以找到第一个异常值,此数据即对应拱腰初始开裂时刻的应变增量128.266  $\mu\epsilon$ ,从而可以据此确定初始开裂时间。

将拱2通道3.1所接光栅前350 s获得的应变增量数据分析计算如表3所。

表3 拱2数据分析表  
Table 3 Arch 2 data analysis table

Time interval /s	Average value / $\mu\epsilon$	Standard deviation / $\mu\epsilon$	Outlier
(0, 50)	0.59	1.63	No
[50, 100)	1.86	2.00	No
[100, 150)	-0.96	3.24	No
[150, 200)	-0.26	1.87	No
[200, 250)	4.37	3.98	No
[250, 300)	8.32	4.52	No
[300, 350)	20.15	19.24	Yes

由表3可知,光栅在300~350 s期间出现异常数据,同理可以确定初始开裂时刻。

将此算法编程应用在实际工程中,可以实现结构自监测。通过监测裂缝的发生,可以发现结构的损伤并做出及时、正确的评价,了解结构的健康状况,从而采取一定的措施。

### 3.4 应变片、光纤光栅数据对比

选取CFRP板某一通道应变片和对应光纤光栅测量数据进行对比,结果如图9所示。

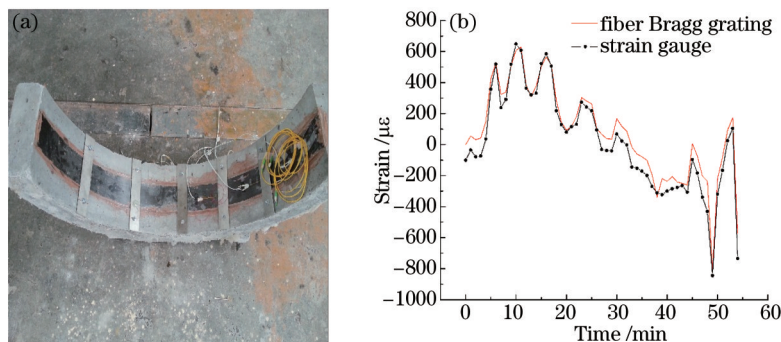


图9 光栅和应变片数据对比

Fig.9 Data comparison between FBG and strain gauge

由图9可见,光纤光栅和应变片测量数据比较吻合,并且能更好地反映应变变化趋势。在大部分时间,光栅测得的应变较应变片大,即光栅感应应变灵敏度较高。部分应变片在应变达到 $2000\ \mu\epsilon$ 时通道无读数,说明此时应变片已经破坏,而对应的光栅读数正常,证实光栅具有优于应变片的抗破坏能力。

随着实验进行,初始开裂裂缝发展为主裂缝,和理论分析、数值模拟结果吻合。

## 4 结 论

针对结构健康监测的需要,通过CFRP混凝土复合拱实验研究裸光纤光栅监测混凝土开裂的可行性,得出以下结论:

- 1) 通过合理布设光纤光栅,可以监测结构的初始开裂,为工程实际提供参考。
- 2) 光纤光栅可通过应变增量的突变反应结构的初始开裂,实现裂缝的大致定位。
- 3) 通过 $K$ 值标准差准则分析应变增量,可以确定结构初始开裂时刻。
- 4) 和传统的电阻应变片相比,光纤光栅可以实现实时监测并且有较大的测量范围,对裂缝的监测具有一定的优越性。
- 5) 在实验过程中部分裸光纤光栅随着裂缝的扩展断裂,考虑到裸纤质地脆弱、抗剪性能差,难以适应土木工程粗犷的施工方式,应进一步考虑二次封装,并将其应用于结构内部应变监测。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Shilang. Concrete Fracture Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 3-6.  
徐世焱. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3-6.
- 2 Hu Jiang, Su Huaizhi, Zhang Yuedong. Feasibility study on application of optical fiber sensing technology for prediction and monitoring of dam cracks[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, 32(5): 52-57.  
胡 江, 苏怀智, 张跃东. 光纤传感技术在大坝裂缝预测和监测中的可行性探讨[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(5): 52-57.
- 3 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.*. Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405004.  
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405004.
- 4 Sai Yaozhang, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.*. Acoustic emission location technology research based on FBG sensor network and time reversal focusing imaging method[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805003.  
赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于FBG传感网络和时间反传聚焦成像方法的声发射定位技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805003.
- 5 Christopher K Y Leung, Niell Elvin, Noah Olson, *et al.*. A novel distributed optical crack sensor for concrete structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65: 133-148.
- 6 Tian Shizhu, Zhou Zhi, Zhao Xuefeng, *et al.*. Technology of optical fiber displacement sensor based on F-P for health monitoring of civil engineering[J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(6): 24-25.  
田石柱, 周 智, 赵雪峰, 等. 土木工程监测用光纤F-P位移测量技术[J]. 传感器技术, 2001, 20(6): 24-25.
- 7 Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, *et al.*. Forward and backward Raman amplification of brillouin scattering signal in brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205007.  
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205007.
- 8 Zhang Yanjun, Xie Xiaopeng, Bi Weihong. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405006.  
张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405006.
- 9 Cao Changcheng. Experimental Study on Deflection and Crack of Engineering Structure Based on FBG Strain Sensors[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012.  
曹长城. 工程结构基于FBG应变传感器挠度及裂缝监测的试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
- 10 E Rizk H Marzouk, A Hussein X Gu. Structural health monitoring of slab-column connections using FBG sensors[J]. Civil Struc Health Monit, 2012, 3349: 17-27.
- 11 Bao Tengfei, Qian Fei. Study on crack monitoring capability of distributed fiber Bragg grating sensors in concrete structures[J].

- Piezoelectrics and Acoustooptics, 2011, 33(4): 1004-2474.
- 包腾飞, 钱 飞. 混凝土裂缝分布式光纤光栅监测能力研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 1004-2474.
- 12 Xu Weijun, Liu Yunfei, Chen Yansheng. Study of Fiber-Optic Sensing Technology for Structure's Health Monitoring[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011.
- 徐卫军, 刘运飞, 陈彦生. 结构健康监测光纤传感技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- 13 Zhou Zhi, Wu Zhanjun, Ou Jinping, *et al.*. Intelligent monitoring of concrete structures based on FBGs[J]. Functional Materials, 2003, 34(3): 344-348.
- 周 智, 武湛君, 欧进萍, 等. 混凝土结构的光纤光栅智能监测技术[J]. 功能材料, 2003, 34(3): 344-348.
- 14 Ou Jinping, Zhou Zhi, Wu Zhanjun, *et al.*. Intelligent monitoring of Heilongjiang Hulan river bridge based on FBGs[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1): 45-64.
- 欧进萍, 周 智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 45-64.
- 15 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber Bragg grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
- 田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.

栏目编辑: 刘丰瑞