

## 基于 FBG 反射谱特征的铁路道岔损伤识别试验研究

叶肖伟<sup>1,2</sup>, 姜洋<sup>3</sup>, 倪一清<sup>2</sup>, 苏娟<sup>3</sup>, 董小鹏<sup>3</sup>, 肖杰灵<sup>4,5</sup>

- (1. 浙江大学 建筑工程学院 杭州 310058; 2. 香港理工大学深圳研究院 智能结构健康监测研发中心 广东 深圳 518057;  
3. 厦门大学 信息科学与技术学院光波技术研究所 厦门 361005; 4. 西南交通大学 土木工程学院 成都 610031;  
5. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室 成都 610031)

**摘要:** 针对道岔结构性能及安全状态对列车(尤其高速列车)行车安全与运行质量的重要性,提出基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术,利用 FBG 传感器反射谱特征对铁路道岔钢轨结构进行损伤(裂纹)识别。在带裂纹的道岔钢轨上安装 FBG 传感器进行静、动态加载室内实验。通过分析 FBG 传感器反射谱形状精细变化,实现对裂纹的识别。实验结果表明,该基于 FBG 反射谱特征的损伤识别方法可有效识别铁路道岔钢轨裂纹。

**关键词:** 铁路道岔; 光纤布拉格光栅; 反射谱; 损伤识别; 裂纹监测

中图分类号: TU317

文献标识码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.06.013

### Experimental study on damage detection of railway turnouts based on characteristics of FBG reflective spectra

YE Xiao-wei<sup>1,2</sup>, JIANG Yang<sup>3</sup>, NI Yi-qing<sup>2</sup>, SU Juan<sup>3</sup>, DONG Xiao-peng<sup>3</sup>, XIAO Jie-ling<sup>4,5</sup>

- (1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
2. Intelligent Structural Health Monitoring R&D Centre, The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China; 3. Institute of Light-wave Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
5. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The structural performance and safety condition of the railway turnout has a significant impact on the running safety and operation quality of the trains, especially the high-speed trains, and it is therefore of great importance to conduct the research of damage detection and crack monitoring for the railway turnout. A fiber Bragg grating (FBG) sensing technology-based method for damage detection of turnout rail-tracks was proposed with the aid of the characteristics of reflection spectra of FBG sensors. The FBG sensors were installed on the turnout rail-track with cracks, and the static and dynamic experiments in the laboratory were carried out to verify the method of damage detection by analyzing the structure of reflection spectra of FBG sensors. The experimental results show that the proposed damage identification method based on the characteristics of FBG reflective spectra can effectively identify the cracks on the turnout rail-tracks.

**Key words:** railway turnout; fiber Bragg grating; reflective spectrum; damage detection; crack monitoring

铁路在我国已成运输量最大交通工具。其运量的增加及列车速度提高会对路轨(尤其较薄弱的道岔区域)提出严峻挑战。道岔作为车辆由一条线路转向或越过另一条线路连接设备<sup>[1]</sup>,是整个铁轨系统中结构最复杂、养护维修工作量最大部件,亦是最薄弱环节<sup>[2]</sup>。道岔结构安全性能已成列车行车安全、列车过

站速度的决定因素。对铁路道岔结构损伤实时监测,可确保列车通过道岔时的行车安全及速度,降低维护成本。传统铁轨损伤探测多为人工推行超声波探伤小车,探测速度 80 km/h<sup>[3]</sup>。但超声波探伤只能对较规则铁路基本轨进行,无法对铁路轨道结构较复杂道岔部位损伤探测;只能对已发生裂纹的铁轨探测,而无法实现损伤的在线实时监测。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度及测试精度高、体积小、重量轻、耐久性强、多路复用、信号传输距离远等优点。已广泛应用于如桥梁、铁路、隧道、航空、边坡安全监测等<sup>[4-7]</sup>工程领

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013QNA4023); 国家自然科学基金(51108392, U1234201)

收稿日期: 2013-02-07 修改稿收到日期: 2013-04-19

第一作者 叶肖伟 男,博士,副教授,1980年11月生

域。已有文献报道利用 FBG 反射谱特征对复合(如 CFRP)材料进行损伤探测<sup>[8-10]</sup>。FBG 传感器已用于铁路钢轨应变及温度监测、列车计轴、车速测量等<sup>[11-13]</sup>。黄红梅等<sup>[14-15]</sup>利用 FBG 光谱特征对航空材料及修补结构中修补片裂纹扩展进行研究。闫连山等<sup>[16]</sup>利用 FBG 反射谱展宽效应实现列车计轴、定位、车重计算。董小鹏等对利用光谱展宽、分裂、分裂峰强度及分裂峰个数实现裂纹检测的可行性进行理论分析及实验验证,结果证明,据 FBG 反射谱或透射谱特性,不仅能实现裂纹检测,且能实现裂纹定位及预测裂纹发展。本文基于该方法,对将该方法用于铁路道岔损伤监测进行实验研究。在实验室道岔钢轨上安装 FBG 传感器,通过静、动态加载实验,研究裂纹扩展对 FBG 反射谱影响。

## 1 理论分析

### 1.1 FBG 在均匀应力场作用下特性

FBG 为通过紫外光照射通信光纤,使纤芯折射率发生周期性调制制作而成。一宽波段光在刻有光栅的光纤中传播时,满足布拉格条件的中心波长  $\lambda_B$  窄波段光会被反射。布拉格波长满足关系式<sup>[17]</sup>为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0 \quad (1)$$

式中:  $\lambda_B$  为反射中心波长;  $n_{\text{eff}}$  为纤芯有效折射率;  $\Lambda_0$  为光栅调制周期。

应变、温度等物理量均会对纤芯有效折射率、光栅调制周期产生影响,作用于光纤光栅上的温度或应变发生改变时,布拉格波长会发生漂移,且该波长漂移量  $\Delta\lambda_B$  在一定测量范围内与温度或应变变化量近似呈线性关系:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon\Delta\varepsilon + K_T\Delta T \quad (2)$$

式中:  $K_\varepsilon$  为应变敏感系数;  $\Delta\varepsilon$  为应变变化量;  $K_T$  为热敏系数;  $\Delta T$  为温度变化量。若 FBG 传感器未受温度影响,则其应变变化量可表示为:

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K_\varepsilon} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

若 FBG 传感器只受温度影响,其波长漂移与温度关系可表示为:

$$\Delta T = \frac{1}{K_T} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

实际中,FBG 传感器在测量应变时会同时受温度影响。本文采用不受应变影响的 FBG 传感器在同一温度场中监测温度变化,对同时受温度、应变作用的 FBG 应变传感器进行温度补偿。

### 1.2 FBG 在不均匀局部应力场作用下特性

应变场  $\varepsilon(z)$  沿 FBG 轴向(设  $z$  方向)发生变化时,

从 FBG 不同位置反射回波长  $\lambda$  函数表达式为<sup>[18]</sup>:

$$\lambda(z) = zn_{\text{eff}}(z)\Lambda(z) = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0 [1 + (1 - p_e)\varepsilon(z)] \quad (5)$$

$$p_e = \frac{1}{2}n_{\text{eff}}^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (6)$$

式中:  $p_e$  为有效弹光常数;  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  为弹光系数;  $\nu$  为泊松比。

裂纹会在光栅某特定区域产生非均匀局部应力  $\varepsilon(z)$ 。因局部应力长度小于光栅长度,光栅被分为受应变影响光栅段(裂缝区域)、两端未受应变影响光栅段。传输光在受裂缝区域影响的光栅段中传输会产生相移,且在两端均匀光栅形成的腔体中反射、干涉,最终使光栅传输谱线展宽、甚至分裂。

## 2 静态加载实验

裂纹的开裂方向大多情况无法预知。因此,需在 FBG 传感器与裂纹相交处及角度不同时反射谱特性及裂纹识别效果进行研究。图 1 为静态加载实验装置。带裂纹的实验道岔钢轨全 1.2 m,FBG 传感器安装于道岔钢轨变截面区。采用液压加载设备可输出最大载荷为 300 kN,可模拟列车轮对的静态荷载。所用光纤光栅解调设备为 MOI sm125 型光纤光栅解调仪,可对 FBG 传感器反射谱进行高精度采集。



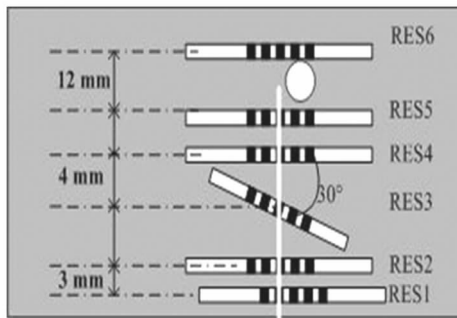
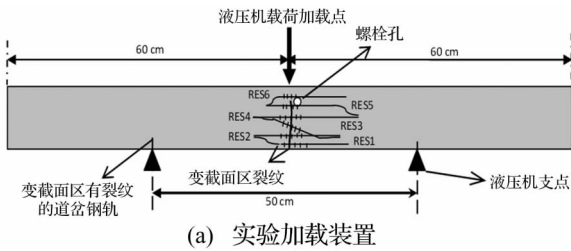
图 1 静态加载实验装置

Fig. 1 Experimental setup for static loading tests

### 2.1 FBG 传感器布置

静态加载实验系统见图 2,液压机加载处位于裂纹正上方,即实验道岔钢轨中点上方,裂纹与钢轨成  $90^\circ$ ,自下而上扩展,此为实际道岔常见的变截面区裂纹类型。实验道岔钢轨置于液压机两支点,两支点间距 50 cm,两支点距裂纹均 25 cm; RES1 ~ RES6 为 FBG 传感器编号,RES1 代表 1 号 FBG 传感器,依此类推。图 2(b)中,RES6 未粘在裂纹上,与钢轨平行,距裂纹上端 5 mm; RES5 贴在裂纹上,与钢轨平行,与裂纹垂直,与裂纹交点为 FBG 中心,RES5,RES6 的垂直距离 12 mm; RES4 贴在裂纹上,与钢轨平行,与裂纹垂直,与裂纹的交点为 FBG 中心; RES3 贴在裂纹上,与钢轨成  $30^\circ$  与裂纹成  $60^\circ$ ,与裂纹的交点为 FBG 中心,RES3、

RES4 的垂直距离 4 mm; RES2 贴在裂纹上,与钢轨平行,与裂纹垂直,与裂纹的交点为 FBG 中心; RES1 贴在裂纹上,与钢轨平行,与裂纹垂直,与裂纹的交点距离 RES1 栅区左端 4 mm, RES1 与 RES2 的垂直距离 3 mm。



(a) 实验加载装置

(b) FBG 传感器布置图

图 2 静态加载实验系统图

Fig. 2 System architecture of static loading tests

本实验所用 FBG 传感器栅区长 15 mm, 栅区无涂层保护, 光栅参数见表 1。胶水为美国乐泰环氧树脂 AB 胶, FBG 栅区全部用胶水涂覆。

表 1 光纤光栅参数  
Tab.1 FBG parameters

波长公差 /nm	+ / - 0.3
3 dB 带宽 /nm	≤ 0.25
反射率 /%	≥ 95
隔离度(边模抑制比) /dB	≥ 15
光纤类型/涂覆类型	SMF-28e 光纤/无涂覆
栅区长度 /mm	15

## 2.2 试验结果分析及讨论

### 2.2.1 RES5 及 RES6 光谱特征对比分析

液压机对实验道岔钢轨进行 0 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN 加载时, RES5、RES6 的光谱结构见图 3, 横坐标为波长, 纵坐标为光谱功率。图 3(a) 为液压机未对实验道岔钢轨加载时, RES5、RES6 的原始光谱结构图。图 3(b) 为液压机加载荷载达到 10 kN 时, RES5、RES6 的光谱结构图与原始光谱结构图特征一致, 在荷载作用下发生中心波长漂移。图 3(c) 为液压机加载荷载达

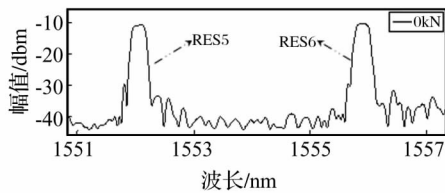
到 20 kN 时 RES5 的光谱结构与原始光谱结构一致, 未发生改变, 而 RES6 的光谱结构发生明显展宽、分裂现象。图 3(d) 为液压机加载荷载达到 30 kN 时 RES5 的光谱结构与原始光谱结构仍一致, 亦未发生改变, 而 RES6 的光谱结构展宽、分裂现象更明显。分析两 FBG 传感器安装位置看出, 因 RES6 未贴在裂纹上, 距裂纹 5 mm, 故在液压机加载到 30 kN 时, 其光谱结构未发生改变, 仅在荷载作用下发生一定的中心波长漂移。RES5 贴在裂纹上, 且与裂纹垂直, 与裂纹交点为 FBG 中心, 因此在荷载作用下其光谱结构发生明显展宽、分裂现象。

### 2.2.2 RES3 与 RES4 光谱特征对比分析

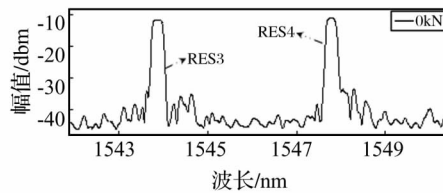
液压机对实验道岔钢轨进行 0 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN 加载时, RES3 与 RES4 光谱结构见图 4。图 4(a) 为液压机未对实验道岔钢轨加载时, RES3 与 RES4 原始光谱结构图。图 4(b) 为液压机加载荷载达 10 kN 时 RES3 与 RES4 光谱结构图与原始光谱结构图特征一致, 在荷载作用下, 发生中心波长漂移现象。图 4(c) 为液压机加载荷载达 20 kN 时, RES3 与 RES4 光谱结构均发生展宽、分裂现象, RES4 较 RES3 光谱结构展宽、分裂现象更明显。图 4(d) 为液压机加载荷载达 30 kN 时, RES3 与 RES4 光谱结构均发生明显展宽、分裂现象, RES4 较 RES3 光谱结构展宽、分裂现象更明显。分析两 FBG 传感器安装位置看出, 由于 RES3 与裂纹成 30°, 减弱了光谱结构的展宽、分裂现象。此与 FBG 的敏感方向有关, FBG 对沿轴向应力反应较灵敏, 沿 RES3 轴向应力可分解为与钢轨垂直、平行的力, 只有与钢轨平行的力才会引起光谱结构的展宽、分裂现象, 纵向力不会导致该现象。

### 2.2.3 FBG 传感器 RES1 与 RES2 光谱特征对比分析

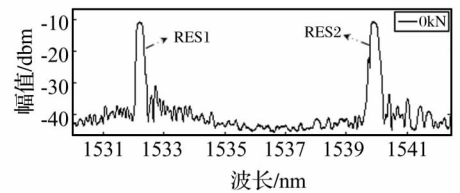
液压机对实验道岔钢轨进行 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN 加载时, RES1 与 RES2 光谱结构见图 5。图 5(a) 为液压机未对实验道岔钢轨加载时, RES1 与 RES2 原始光谱结构图。图 5(b) 为液压机加载荷载达 5 kN 时, RES1 与 RES2 光谱结构图与原始光谱结构图特征一致, 在荷载作用下, 发生中心波长漂移现象。图 5(c) 为液压机加载荷载达 10 kN 时, RES1 与 RES2 光谱结构均发生展宽、分裂现象, RES2 较 RES1 光谱结构展宽、分裂现象更明显。图 5(d) 为液压机加载荷载达 15 kN 时, RES1 与 RES2 光谱结构均发生明显展宽、分裂现象, RES2 较 RES1 光谱结构展宽、分裂现象更明显, RES2 光谱结构分裂峰宽度更宽, 总体展宽度更大。分析两 FBG 传感器安装位置看出, 因 RES1 与裂纹交点不在中心位置, 而在端部, 因此光谱结构的分裂、展宽现象不太明显。



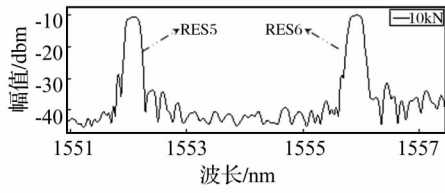
(a) 0 kN



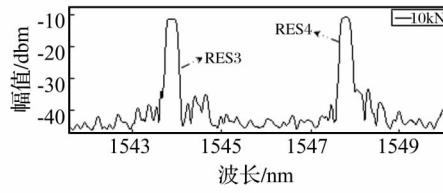
(a) 0 kN



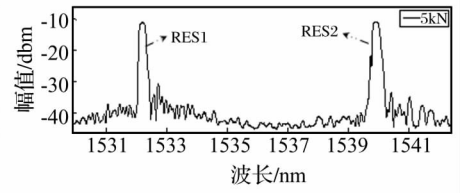
(a) 0 kN



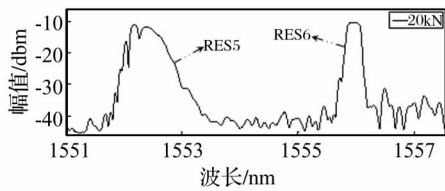
(b) 10 kN



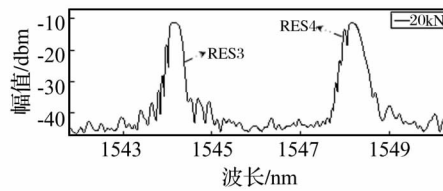
(b) 10 kN



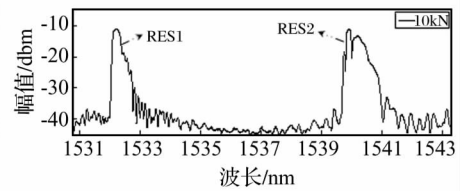
(b) 5 kN



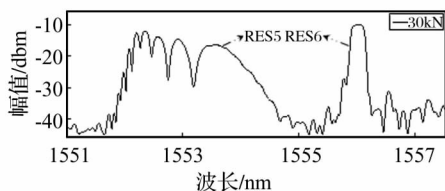
(c) 20 kN



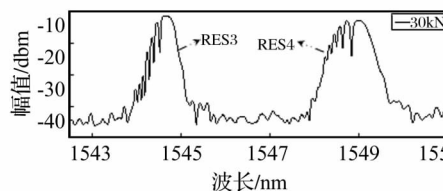
(c) 20 kN



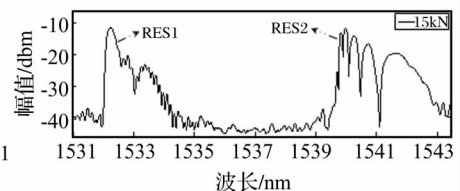
(c) 10 kN



(d) 30 kN



(d) 30 kN



(d) 15 kN

图3 静态加载实验 RES5 与 RES6 光谱结构图

Fig.3 Spectral structure of RES5 and RES6 under static loading tests

图4 静态加载实验 RES3 与 RES4 光谱结构图

Fig.4 Spectral structure of RES3 and RES4 under static loading tests

图5 静态加载实验 RES1 与 RES2 光谱结构图

Fig.5 Spectral structure of RES1 and RES2 under static loading tests

由图3~图5可知,由于RES1~RES5贴在裂纹上,在一定荷载作用下,其光谱结构图均发生展宽、分裂现象,而RES6未贴在裂纹上,其光谱结构图未发生展宽、分裂现象。因此,通过判断FBG传感器的光谱结构图是否发生展宽、分裂现象,可对贴有FBG传感器位置是否产生裂纹进行判断。粘贴在裂纹上的FBG传感器在不同荷载下会产生不同程度的展宽、分裂现象,通过分析裂纹宽度与光谱结构展宽、分裂对应情况,可实现裂纹宽度测量<sup>[14-15]</sup>。通过3组FBG传感器对比实验看出,FBG传感器粘贴方向与钢轨方向平行、与裂纹交点在中心位置时,光谱结构的展宽、分裂现象最明显。

### 3 动态加载实验

在实验小车上安装动态加载装置,模拟列车轮对对道岔钢轨的循环动态荷载,见图6。实验道岔为完整的18号道岔,在实验道岔钢轨较弱部位人为制造三处裂纹,分别位于道岔尖轨端部、螺栓孔周围及变截面

区。实验小车以10 Hz 振动频率对有裂纹道岔钢轨进行动态加载,本文以螺栓孔周围位置裂纹为研究对象进行损伤识别实验研究。

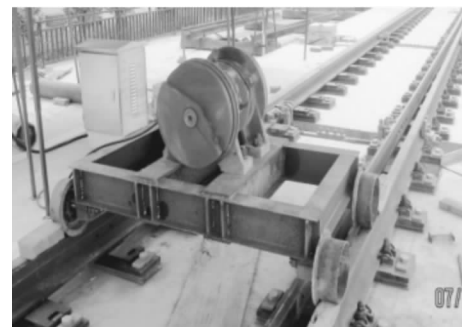


图6 动态加载装置

Fig.6 Experimental setup for dynamic loading tests

#### 3.1 FBG 传感器布置

动态实验FBG传感器布置见图7,RES2-1与

RES2-2 分别表示安装在螺栓孔周围的 FBG 传感器 1 号、2 号。螺栓孔周围裂纹由孔边缘向外扩展, RES2-1 贴在裂纹上, 与钢轨平行, RES2-2 贴在裂纹上, 与钢轨成 45°。实验所用胶水及光栅与静态加载实验相同。

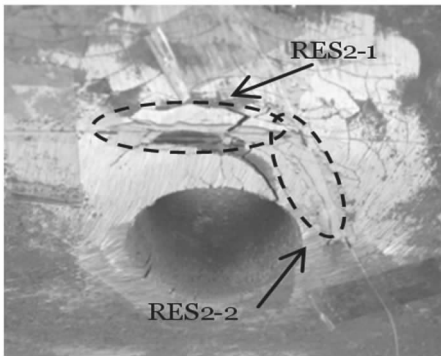


图 7 动态加载实验 FBG 传感器布置图  
Fig. 7 Deployment of FBG sensors under dynamic loading tests

### 3.2 实验结果分析及讨论

实验小车未对实验道岔钢轨进行动态加载时, RES2-1 与 RES2-2 的原始光谱结构见图 8(a); 实验小车开动后 8.5 s 光谱采集设备采集到的 FBG 传感器在实验小车动态荷载作用下光谱结构见图 8(b)。由图 8(b) 看出, RES2-1 与 RES2-2 的光谱结构在动态荷载作用下已产生光谱展宽、分裂现象。

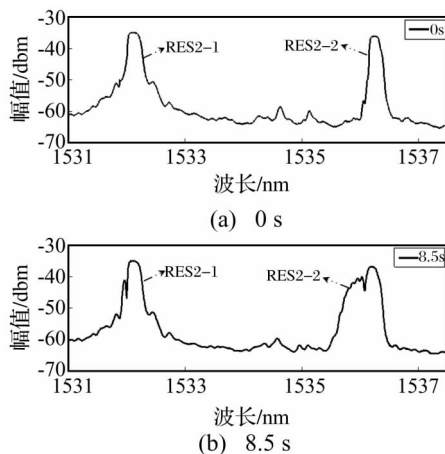


图 8 动态加载实验 RES2-1 与 RES2-2 光谱结构图  
Fig. 8 Spectral structure of RES2-1 and RES2-2 under dynamic loading tests

动态加载实验模拟运行中列车对道岔钢轨的动态荷载作用。实验结果表明, 在动态荷载作用下, 贴在裂纹上的 FBG 传感器光谱结构已产生展宽、分裂现象。通过分析 FBG 传感器光谱结构特征可对道岔钢轨裂纹实现识别。

## 4 结 论

本文利用所提基于 FBG 光谱结构特征的铁路道岔钢轨裂纹损伤识别方法, 对带裂纹的实验道岔进行静、动态加载实验, 并研究 FBG 传感器对应的光谱结构特征, 结论如下:

(1) 静态加载实验裂纹未通过 FBG 传感器时, FBG 传感器光谱结构未产生展宽、分裂; 裂纹通过 FBG 传感器且交点为中心、交角为 90° 时, FBG 传感器光谱结构展宽、分裂现象较明显; 裂纹通过 FBG 传感器, 交点不在其中心或交角不呈 90° 时, 光谱结构展宽、分裂现象会被减弱。

(2) 动态加载实验中, 贴在裂纹上的 FBG 传感器光谱结构会产生展宽、分裂现象。

(3) 通过识别 FBG 传感器光谱结构是否产生展宽、分裂, 可对贴有 FBG 传感器位置是否有裂纹产生进行识别。基于 FBG 光谱结构特征对铁路道岔损伤识别方法可行。

(4) 本文所提方法能否在环境较恶劣的铁路道岔现场应用尚需进一步测试。而所提损伤识别方法对铁路道岔易产生裂纹的特定局部区域损伤具有较好识别果, 但对较大范围内且无法预知发生位置的损伤识别, 较难实现, 尚待深入实验、研究。

### 参 考 文 献

[1] 陈鸿兴. 道岔构造与铺设[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985: 1-2.

[2] 韩迎春. 高速铁路道岔尖轨纵向残余应力实验研究与有限元分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 1-2.

[3] 石永生, 马运忠, 傅强, 等. 钢轨探伤车的检测运用模式与伤损分级探讨[J]. 钢轨探伤, 2012, 37(5): 50-53.

[4] 丁勇, 施斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 338-342.

DING Yong, SHI Bin, CUI He-liang, et al. A fiber optic sensing net applied in slope monitoring based on Brillouin scattering [J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 338-342.

[5] 朱鸿鹄, 殷建华, 靳伟, 等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 109-115.

ZHU Hong-hu, YIN Jian-hua, JIN Wei, et al. Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 109-115.

[6] 姜德生, 陈大雄, 梁磊. 光纤光栅传感器在建筑结构加固检测中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 50-53.

JIANG De-sheng, CHEN Da-xiong, LIANG Lei. Study on application of FBG sensor for structure reinforcement monitoring [J]. China Civil Engineering Journal, 2010,

37(5): 50 - 53.

[7] 张戎社, 杜彦良, 孙宝臣等. 光纤光栅压力传感器在斜拉索索力监测中的应用研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 47 - 49.  
ZHANG Xu-she, DU Yan-liang, SUN Bao-chen, et al. Application of optical fiber grating pressure sensor on monitoring of cables tension [J]. Journal of The China Railway Society, 2002, 24(6): 47 - 49.

[8] Yoji O, Tadahito M, Shigeki Y, et al. Detection of microscopic damages in composite laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors [J]. Composites Science and Technology 2002 62(7 - 8): 951 - 958.

[9] Kara P, Philip P, John B, et al. Experimental verification of response of embedded optical fiber bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 33(2): 107 - 119.

[10] Prost A, Peters K, Zikry M A, et al. Assessment of damage in composite laminates through dynamic full-spectral interrogation of fiber Bragg grating sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(1): 1 - 11.

[11] 刘云, 简水生, 裴丽, 等. 基于光纤光栅传感的新型磁悬浮列车定位方法的研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(5): 72 - 76.  
LIU Yun, JIAN Shui-sheng, PEI Li, et al. Research on the novel maglev train locating method based on fiber grating pressure sensor [J]. Journal of The China Railway Society, 2005, 27(5): 72 - 76.

[12] Massimo L F, Pedro C G, Alberto R, et al. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 85 - 92.

[13] 李维来, 潘建军, 范典. 光纤光栅列车轴测系统的数据

采集与处理[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 13 - 15.  
LI Wei-lai, PAN Jian-jun, FAN Dian. Data acquisition and processing for fiber grating train axle counting system [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 13 - 15.

[14] 黄红梅, 袁慎芳. 基于FBG光谱特性的修补结构中裂纹扩展的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(10): 1290 - 1293.  
HUANG Hong-mei, YUAN Shen-fang. Monitoring of crack propagation in repaired structure using FBG sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser 2009 20(10): 1290 - 1293.

[15] 黄红梅, 袁慎芳. 基于光纤Bragg光栅传感器的疲劳裂纹扩展的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(4): 447 - 450.  
HUANG Hong-mei, YUAN Shen-fang. Research on the fatigue crack propagation using fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(4): 447 - 450.

[16] 赵国锋, 闫连山, 王平, 等. FBG反射谱展宽效应在轨道传感器中的应用研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(12): 1755 - 1757.  
ZHAO Guo-feng, YAN Lian-shan, WANG Ping, et al. Application of FBG reflective spectrum broadening effect for rail sensors [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(12): 1755 - 1757.

[17] Othonos A. Fiber bragg gratings [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(12): 4309 - 4341.

[18] Huang S, Ohn M M, LeBlanc M, et al. Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings [J]. Smart Materials and Structures, 1998, 7(2): 248 - 256.

(上接第70页)

[4] 陈明, 卢文波, 易长平. 大型地下厂房岩锚梁爆破安全控制标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 499 - 504.  
CHEN Ming, LU Wen-bo, YI Chang-ping. Research on safety standard for rock anchor beam under blasting vibration in large underground powerhouse [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006 25(3): 499 - 504.

[5] 蒋耀港, 沈兆武, 龚志刚. 构筑物爆破拆除振动规律的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 36 - 41.  
JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, GONG Zhi-gang. Vibration law of structure blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock 2012 31(5): 36 - 41.

[6] 蒋耀港, 沈兆武, 杨昌德. 市内复杂环境下大药量爆破降振及振动监测分析的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 156 - 161.  
JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, YANG Chang-de. Big charge blasting vibration damping and vibration monitoring analysis under intracity complicated environment [J]. Journal of Vibration and Shock 2012 31(1): 156 - 161.

[7] 许红涛. 岩石高边坡爆破动力稳定性研究[D]. 武汉: 武

汉大学, 2006.

[8] 卢文波, 陶振宇. 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 140 - 147.  
LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. Theoretical analysis of the pressure variation in borehole for pre-splitting explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 140 - 147.

[9] 黄玉锋, 舒大强, 陈维炎. 爆破震动作用下地下洞室支护结构的动态响应分析[J]. 爆破, 2006, 23(1): 14 - 18.  
HUANG Yu-feng, SHU Da-qiang, CHEN Wei-yan. Effect of blasting vibration on the support structure of an underground chamber [J]. Blasting, 2006 23(1): 14 - 18.

[10] 张建华, 李世禄, 王玉杰. 爆炸扩腔数值模拟及分析[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 174 - 177.  
ZHANG Jian-hua, LI Shi-lu, WANG Yu-jie. Numerical simulation of springing blasting in stemmed hole [J]. Journal of Wuhan Uni. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2001 24(2): 174 - 177.

[11] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.