

doi: 10.3788/gzxb20164512.1228001

基于光纤光栅的结构体裂缝三维应变传感

王丽丽¹, 忻向军², 郝金光¹

(1 鲁东大学 信息与电气工程学院, 山东 烟台 264025)

(2 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘 要:利用光纤光栅的反射谱设计了一种用于混凝土纵向裂缝三维应变传感信号的检测及分析处理的方法. 利用 ANSYS 软件自底向上采用构造法构建混凝土三维断裂模型, 分析径向均匀作用力下光纤光栅三轴的应力大小, 由三维受力模型拟合光栅传感器的三轴应变函数, 给出径向作用力下 x 和 y 偏振方向谐振波长与三轴应力间的关系, 并且由传输矩阵法计算三轴应力作用下光栅反射谱的变化规律; 理论分析和模拟计算光纤光栅传感光谱反射峰的分裂规律. 结果表明: 在均匀的 20N 作用力下, 10 cm 长光栅 x 偏振方向的波长偏移量最大值为 10.1 nm, y 偏振方向的波长偏移量最大值为 12 nm, 此时光纤光栅的谐振峰产生明显分裂, 形成两个谐振峰, 随着载荷的不断增大, 两个谐振峰不断地向两边分开, 反射峰的分裂点从短波长向长波方向移动, 分裂出来的两个谐振峰中短波谐振峰的反射率高于长波谐振峰, 但短波谐振峰的带宽小于长波谐振峰带宽; 当光栅长度增加至 15 cm 时, 在相同的作用力下, 光栅两个反射峰的半高宽度均增加, 但两个反射峰的间距几乎不变, 灵敏度达 0.14 nm/N. 本文研究可将单根光栅结构传感器的二维传感扩展到三维传感.

关键词: 光纤光栅; 径向作用力; 反射谱; 传输矩阵法; 三维应变传感

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)12-1228001-5

Mechanism of Three-dimension Sensing with Fiber Gratings for Structure Cracks Detection

WANG Li-li¹, XIN Xiang-jun², HAO Jin-guang¹

(1 School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

(2 School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: A method using for the detection and analysis of the three-dimension strain sensing signals of the longitudinal concrete cracks was proposed by utilizing the reflectance spectrum of fiber gratings. The fracture model of three-dimension finite element using bottom-up method based on ANSYS was given. The three-axis stress applied on the fiber grating under uniform and radial force was presented, the three-axis strain function was derived on the basis of above-mentioned stress field, and the relation curve between resonance wavelength of x -polarization, y -polarization and three-axis stress was given. The variation of reflective spectrum of fiber grating of 10 cm length is calculated using transfer matrix method under three-axis strain based on theoretical analysis and numerical calculation, the results show that, the peak wavelength shifts of x -polarization and y -polarization are 10.1 nm and 12 nm respectively under uniform and radial force of 20N. At the same time, the reflection spectra of the fiber Bragg grating split into two main peaks and the spectral difference of the two peaks increases linearly, and the split point shifts to long-wavelength, the reflectivity of shorter wavelength is higher than the long-wavelength but the bandwidth of shorter wavelength is less than the long-wavelength when the load increases. The (Full Width Half Maximum, FWHM) of the two splitted reflection peaks increases but the spectral peaks

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205014)和山东省自然科学基金(Nos. ZR2016FM36, ZR2012FL21)资助

第一作者: 王丽丽(1978-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: txjiaoyanshi@163.com

收稿日期: 2016-05-21; 录用日期: 2016-09-06

<http://www.photon.ac.cn>

space remains unchanged almost when the length of grating increases to 15 cm under same force compared to grating of 10 cm length. The sensitivity of the grating proposed in the paper is up to 0.14 nm/N. The two-dimension sensing is extended to three-dimension sensing based on single grating with the method proposed in this paper.

Key words: Fiber gratings; Radial force; Reflection spectrum; Transfer matrix method; Three-dimension sensing

OCIS Codes: 060.3735; 060.2370; 060.2310; 060.3510

0 引言

近年来,随着城市、交通等的快速发展,工程建设的规模越来越大,具有复杂受力特点的大型混凝土结构中的缺陷会直接影响整个结构的强度,造成结构的变形,严重时甚至会破坏整体结构.因此,通过一定的应力检测方法,及时掌握混凝土内部三维应力状态及其变化规律成为当前研究的热点之一.

目前,针对混凝土内部复杂应力状态的测试方法中,借助光纤光栅的波长敏感特性制成的传感器受到了极大关注^[1-3].以均匀光纤光栅、长周期光纤光栅、啁啾光纤光栅等为主要器件的传感器埋入混凝土结构中^[4-6],检测混凝土结构的应力和应变,然而实际工程中大型混凝土板具有非常复杂的力学特性,其对传感光栅施加的作用力往往不是简单的径向或轴向作用力,此时传感器产生多参量交叉敏感^[7-8]现象,表现出一系列的非线性效应,因此利用光栅进行应力分析时,多数文献会根据关注的参量进行相应的假设. Gafsi 和 El-Sherif^[9]对光栅径向负载下的双折射进行的分析,是在平面应变($\epsilon_z=0$)和平面应力($\sigma_z=0$)近似情况下把三维受力简化为二维受力模型进行分析; C. M. Lawrence 等^[10]利用偏振保持光纤光栅对二维横向应变 ϵ_2, ϵ_3 (ϵ_1 为轴向应变)进行测量时,前提假设为其轴向应变为 0,即 $\epsilon_1=0$;但早在 1993 年 James S. Sirkis 等^[11-12]就发表文章称利用光栅反射谱进行应力应变分析时,横向应力、纵向应力以及温度等参量间的相互作用会对测量的结果造成很大的影响;有文献采用多根光纤光栅对三维应力进行检测^[13],亦有文献采用干涉型传感器如迈克尔逊干涉仪对二维及三维^[14-15]应力进行检测,但是利用单根光栅反射谱特性进行三维应力检测的研究较少.本文根据混凝土工程安全监测关键特征参量的测量需求,充分考虑传感器结构形式等因素,采用有限元力学仿真与性能试验相结合的方法,对裂缝的三维应变探测机理进行研究.

1 三维有限元模型的建立

利用 ANSYS 软件自底向上采用构造法创建的混凝土三维断裂模型如图 1,其中混凝土部分利用 SOLID65 单元进行模拟,该单元用来构建三维实体模型;光纤部分采用 SOLID45 单元模拟,ANSYS 中的

SOLID45 单元用于构造三维实体结构,单元通过 8 个节点来定义,每个节点有 3 个沿着 x, y, z 方向的平移自由度,该单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力,用来模拟视作各向同性材料的光纤部分.光纤光栅和混凝土板相关参量见表 1,模型采用体扫描划分网格,综合模型中的光纤尺寸(125 μm)和混凝土板尺寸(140 mm \times 40 mm \times 20 mm),选取适当的网格划分密度,得到如图 2 的三维有限元模型和图 3 的裂缝作用下光纤光栅应力分布图.

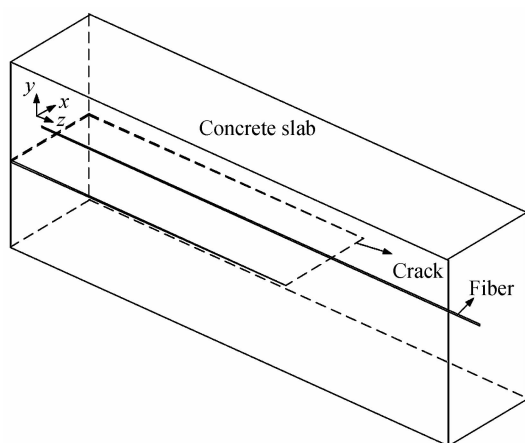


图 1 混凝土断裂三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimension finite element model of concrete fracture

表 1 三维有限元模型中的相关参量

Table 1 Property of three-dimension finite element model

Parameters of concrete slab	Values
Elastic modulus	3×10^{10} Pa
Poisson ratio	0.2
Size	140 mm \times 40 mm \times 20 mm
Parameters of fiber grating	
elastic modulus	6.9×10^{10} Pa
Poisson ratio	0.17
Length	140 mm
Diameter	125 μm
Length	10 mm
Period	534.5 nm
Photoelastic coefficient	$P_{11}=0.121, P_{12}=0.270$
Compressive strength	1.5 GPa
Parameters of crack length	
Maximal width	0.5 mm

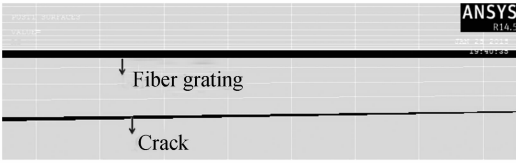


图2 有限元模型网格划分后的光纤光栅和裂缝相对位置示意图

Fig. 2 Relative position of fiber grating and fracture in finite element model after meshing

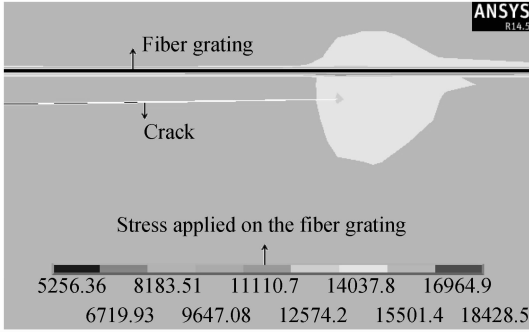


图3 光纤光栅受力分析

Fig. 3 Stress analysis of fiber grating

当在混凝土板的上表面施加均匀作用力 ($F=20\text{N}$)时,如图4,由于存在裂缝(图4中横坐标 $0 \leq \text{Fiber length} \leq 0.1\text{ m}$),光纤所受应力 σ_x 、 σ_y 均为负值(x 、 y 、 z 坐标轴方向如图1), σ_z 从 1.44×10^5 逐渐减小至小于0.从图中可以看出,光纤三轴所受应力曲线在裂缝终点(Fiber length=0.1 m)位置出现凹陷,随着裂缝的消失, σ_x 、 σ_y 逐渐增加至大于零, σ_z 增加至大于零后又逐渐减小至小于零.

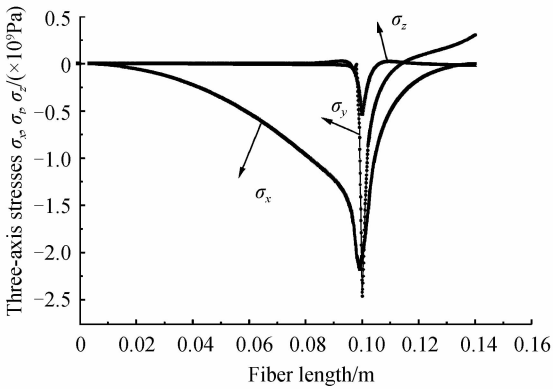
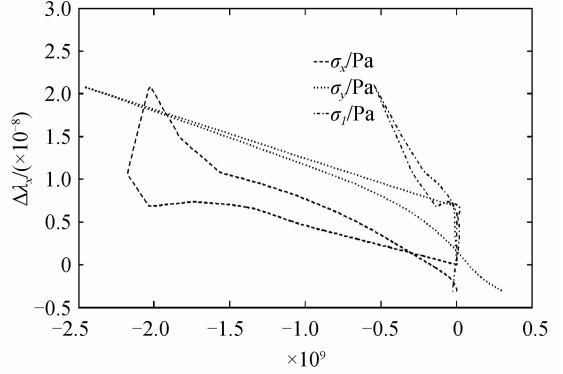


图4 混凝土板上表面施加均匀向下($F=20\text{N}$)的径向作用力时,光纤光栅三轴所受应力大小

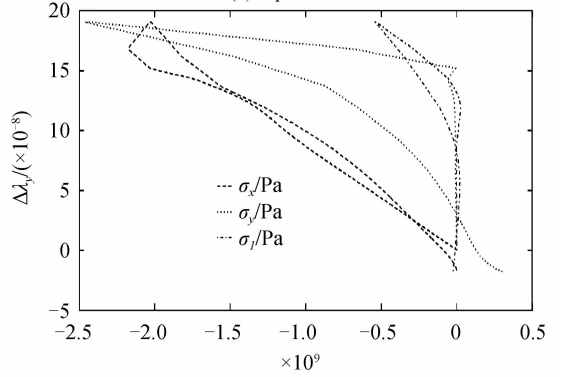
Fig. 4 Three-axis stress of fiber grating under uniform and radial force applied on the upper surface of concrete ($F=20\text{N}$)

径向均匀压力($F=20\text{N}$)作用下光纤光栅的 x 和 y 两个偏振方向谐振峰的变化情况如图5.尽管作用力是均匀的,但由于光纤三轴所受应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 如图4所示,其 x 和 y 两个偏振方向的谐振峰与 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 均相关.结合图(4)可以发现, x 偏振方向的波长偏移 $\Delta\lambda_x$ 首先随着 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 的减小(图4中横坐标 $0 \leq \text{Fiber}$

length $\leq 0.1\text{ m}$)向长波方向移动,在裂缝终点位置(图4中 Fiber length=0.1 m),又逐渐向短波方向偏移,在三轴应力作用下, x 偏振方向的波长偏移量最大值为 10.1 nm , y 偏振方向的波长偏移量最大值 $\Delta\lambda_y$ 为 12 nm .



(a) x-polarization



(b) y-polarization

图5 混凝土板上表面施加均匀向下($F=20\text{N}$)的作用力时, x 偏振和 y 偏振方向布拉格反射波长与光纤三轴所受应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 之间的关系

Fig. 5 The relationship of three-axis stress σ_x 、 σ_y 、 σ_z and x -polarization, y -polarization wavelength under uniform and radial force applied on the upper surface of concrete($F=20\text{N}$)

2 光纤光栅反射谱的分析

当裂缝对光栅施加径向作用力时,光纤光栅产生横向应变,横向应变导致光纤横截面由圆形变成椭圆形,光纤光栅的反射特性也随之产生 x 和 y 两个方向上的偏振特性,结合光弹效应,得到光纤光栅 x 和 y 方向上的折射率变化为

$$(\Delta n_{\text{eff}})_x = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu)\sigma_x + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_y + \sigma_z) \} \quad (1)$$

$$(\Delta n_{\text{eff}})_y = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu)\sigma_y + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_x + \sigma_z) \} \quad (2)$$

式中, n_{eff} 为光纤光栅有效折射率, E 为光纤材料的弹性模量, ν 为泊松系数, p_{11} 和 p_{12} 为光弹系数, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为

光纤光栅在 x, y, z 方向的应力.

根据式(1)和(2)可知,由于 $\sigma_x \neq \sigma_y$,导致 x 方向和 y 方向折射率变化量不相等,光纤光栅产生双折射现象,而且由于折射率的变化量不等,光纤光栅反射谱分裂成具有两个中心波长的反射谱.根据光纤光栅中心波长变化表达式: $\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda$,可得在径向作用下,光纤光栅在 x 和 y 方向的中心波长变化为

$$(\Delta\lambda_B)_x(x, y, z) = -\frac{(n_{\text{eff}})^3 \Lambda_0}{E} \times \{ (p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_x(x, y, z) + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_y(x, y, z) + \sigma_z(x, y, z)) \} + 2\frac{n_{\text{eff}}\Lambda_0}{E} \{ \sigma_z(x, y, z) - \nu[\sigma_x(x, y, z) + \sigma_y(x, y, z)] \} \quad (3)$$

$$(\Delta\lambda_B)_y(x, y, z) = -\frac{(n_{\text{eff}})^3 \Lambda_0}{E} \times \{ (p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_y(x, y, z) + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_x(x, y, z) + \sigma_z(x, y, z)) \} + 2\frac{n_{\text{eff}}\Lambda_0}{E} \{ \sigma_z(x, y, z) - \nu[\sigma_x(x, y, z) + \sigma_y(x, y, z)] \} \quad (4)$$

图 6 为光栅未受径向作用力时的反射谱.在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段反射率接近 1,当具有裂缝的混凝土板受到径向作用力时,即使作用力很小(2N),光纤光栅的谐振峰在中间产生明显的凹陷,形成两个谐振峰.随着载荷的不断增大,两个谐振峰不断地向两边分开,反射谱整体带宽增加,反射谱的整体反射率下降,反射峰的分裂点从短波长方向向长波方向移动,而且其反射谱的全谱带宽起始点也逐渐向长波方向移动,分裂出来的两个谐振峰中,短波谐振峰的反射率高于长波谐振峰,但短波谐振峰的带宽小于长波谐振峰带宽.径向均匀作用力为 40N 时,两个谐振峰的波长间隔(两谐振峰中点波长间隔)接近 6 nm.当径向作用力增加至 101N 时,其谐振峰的波长间隔增至 15 nm,如图 7.

改变模型中光栅的长度为 15cm 时(图 6、图 7 中光栅长度均为 10 cm),光栅反射谱的仿真结果表明,在

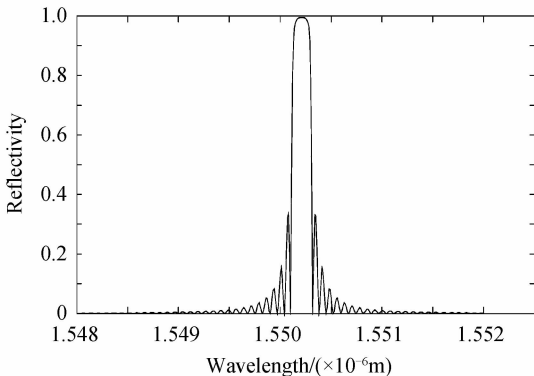
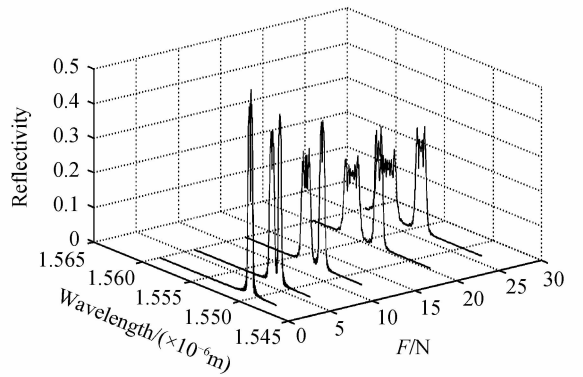
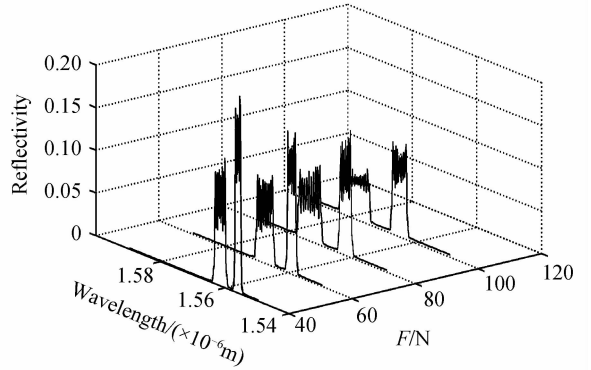


图 6 混凝土板有裂缝,光栅未受径向作用力时的反射谱
Fig. 6 The reflective spectrum of fiber grating under concrete crack with force free



(a) $F=2\text{N}, 6\text{N}, 12\text{N}, 20\text{N}, 26\text{N}$

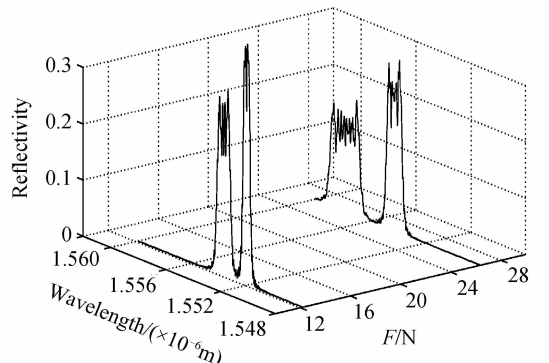


(b) $F=40\text{N}, 61\text{N}, 81\text{N}, 101\text{N}$

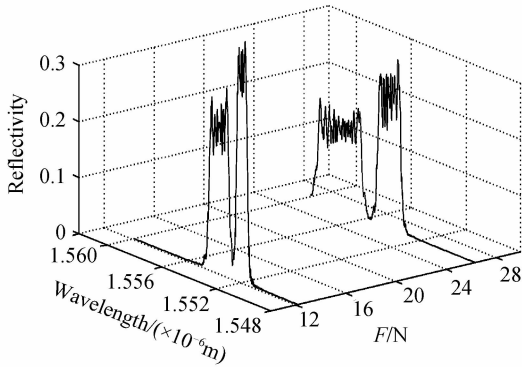
图 7 反射谱与径向载荷的三维图

Fig. 7 Three-dimension figure of reflective spectrum under radial force

同样的作用力下,两个反射峰的半高宽度均增加,但两个反射峰的间距几乎不变,如图 8.为了清楚地对比相同作用力下光栅反射谱的变化,图 8(a)中两个反射谱对应图 7(a)中 $F=12\text{N}$ 和 26N ,图 8(b)中的两个反射谱同样是 $F=12\text{N}$ 和 26N 的作用下,但是光栅长度增加至 15 cm.仿真结果表明,在 $F=12$ 作用力下,10 cm 光栅长波和短波反射峰的半高宽度近似为 1.2 nm 和 0.6 nm,15 cm 光栅长波和短波反射峰的半高宽度分别为 1.6 nm 和 0.8 nm,但两个反射峰的间距均接近于 1.5 nm,如图 9,其外力灵敏度可达 0.14 nm/N.在光栅 1.5GPa 抗压强度的假设下,光纤光栅传感器的动态范围可达 260N.



(a) Length of fiber grating is 10cm



(b) Length of fiber grating is 15cm

图8 $F=12\text{N}$, 26N 时,光栅长度分别为 10cm 和 15cm , 其反射谱与径向载荷的三维图

Fig. 8 Three-dimension figure of reflective spectrum μm under radial force with $F=12\text{N}$, 26N , the length of fiber grating is 10cm and 15cm respectively

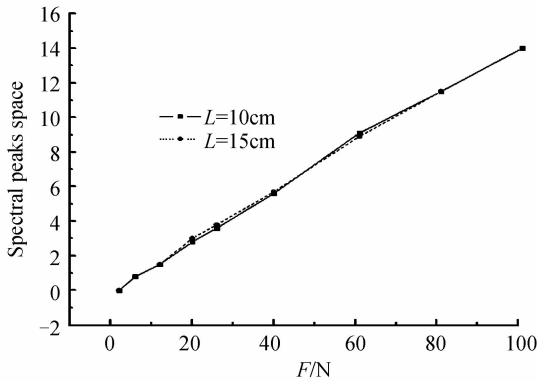


图9 光栅长度分别为 10cm 和 15cm 时,不同作用力 F 光栅反射谱双峰间距的变化

Fig. 9 Peak space of grating reflection spectrum as function of the force F applied on the upper surface of concrete

3 结论

本文利用光纤光栅的反射谱构建混凝土纵向裂缝三维应变传感信号的检测及分析处理方法,分析了均匀径向作用力下光纤光栅所受三轴应力的大小,由三维受力模型拟合光栅传感器的三轴应变函数,进而分析三维体裂纹作用下光纤光栅反射谱的变化规律,实现三维应变传感,为一些结构体的复杂应变场的研究提供有效的分析方法。

参考文献

- [1] WU Jun, CHEN Wei-min, YU Kui, *et al.* Strain sensing properties of grating ends packaged FBG sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0206004.
吴俊,陈伟民,余葵,等.非栅区封装光纤布喇格光栅应变传感特性研究[J].光子学报,2016,**45**(2):0206004.
- [2] LIANG Li-li, LIU Ming-sheng, LI Yan, *et al.* Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2015, **44**(3): 1020-1023.

梁丽丽,刘明生,李燕,等.长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究[J].红外与激光工程,2015,**44**(3):1020-1023.

- [3] SU Yang, ZHOU Hua, ZHU Yong, *et al.* Study of secondary peak of polarizatin dependent loss of locally pressed fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0305001.
苏洋,周华,朱勇,等.局部横向压力条件下光纤光栅偏振相关损耗谱次峰研究[J].光学学报,2015,**35**(3):0305001.
- [4] HUANG Jun, ZHOU Zu-de, ZHANG Dong-sheng, *et al.* Online monitoring of wire breaks in prestressed concrete cylinder pipe utilising fibre Bragg grating sensors [J]. *Measurement*, 2016, **79**: 112-118.
- [5] SAMRAJYAM K, PRASAD R L N, GUNNESWARA R T D, *et al.* Fiber Bragg Grating (FBG) sensor for estimation of Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) in concrete[J]. *Journal of Optics*, 2015, **44**(4): 346-352.
- [6] LI Wei-jie, HO S C M, SONG Gang-bing. Corrosion detection of steel reinforced concrete using combined carbon fiber and fiber Bragg grating active thermal probe[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, **25**(4): 45017-45025.
- [7] PATRIEK H J, WILLIAMS J M, KERSEY A D, *et al.* Hybrid fiber Bragg grating /long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1996, **8**(9): 1223-1225.
- [8] FENG Kui, ZHU Yong, SU yang, *et al.* Analysis of the cross sensitivity of magnetic field sensors with phase-shifted gting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 1020-1025.
冯奎,朱勇,苏洋,等.相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析[J].光学学报,2010,**30**(1):1020-1025.
- [9] GAFSI R, EI-SHERIF M A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, **6**(3): 299-322.
- [10] LAWRENCE C M, NELSON D V, UDD E, *et al.* A fiber optic sensor for transverse strain measurement[J]. *Experimental Mechanics*, 1999, **39**(3): 202-209.
- [11] SIRKIS J S. Unified approach to phase-strain- temperature models for smart structure interferometric optical fiber sensors: part 1, development [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(4): 752-761.
- [12] SIRKIS J S. Unified approach to phase-strain- temperature models for smart structure interferometric optical fiber sensors: part 2, applications[J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(4): 762-773.
- [13] SUN Li, ZHANG Bo. Monitoring of three-dimensional strains based on FBG sensors [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2015, **31**(6): 998-1004.
孙丽,张博.基于FBG传感器的三维空间应变监测[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,**31**(6):998-1004.
- [14] SIRKIS J S, HASLACH H W. Interferometric strain measurement by arbitrarily configured, surface mounted, optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, (8): 1497-1503.
- [15] SIRKIS J S, LO Y. Simultaneous measurement of two strain components using 3×3 and 2×2 coupler-based passive demodulation of optical fiber sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(12): 2153-2161.