

文章编号: 0253-2239(2008)11-2143-05

# 岩层变形检测的光纤光栅多点传感理论与工程应用

刘金瑄<sup>1</sup> 柴敬<sup>1,3</sup> 朱磊<sup>1</sup> 张广文<sup>2</sup> 杨建华<sup>2</sup> 王振平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; <sup>2</sup> 兖州煤业股份有限公司, 山东 邹城 273500)  
<sup>3</sup> 教育部西部矿井开采与灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要** 为了监测松散地层沉降变形, 提出了一种用于钻孔中植入式光纤 Bragg 光栅传感器 (FBG) 的结构和传感网络系统。基于室内实验结果, 给出了用于岩层变形检测的传感光栅波长带宽为 6 nm, 分析了多点传感信号分辨因子, 由光源带宽决定的测试系统最大实际复用能力为 6 个传感器。设计并实现了一个由 18 个光纤光栅组成的具有特色的光纤 Bragg 光栅波分复用/空分复用混合阵列。工程实践表明, 光纤光栅传感系统采用双回路布置, 可提高系统下放后光纤光栅传感器的成活率。

**关键词** 光纤光学; 岩层变形; 多点传感; 光纤光栅传感器; 监测

**中图分类号** TD325<sup>+</sup>.4; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2143

## Theory of Fiber Bragg Grating Multi-Point Sensing of Rock Deformation and Its Engineering Application

Liu Jinxuan<sup>1</sup> Chai Jing<sup>1,3</sup> Zhu Lei<sup>1</sup> Zhang Guangwen<sup>2</sup> Yang Jianhua<sup>2</sup> Wang Zhenping<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Energy, Xian University of Science and Technology, Xian, Shaanxi 710054, China  
<sup>2</sup> Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China  
<sup>3</sup> Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xian, Shaanxi 710054, China

**Abstract** In order to monitor the subsidence and deformation of the unconsolidated strata, a monitoring structure with fiber Bragg grating (FBG) sensors embedded in the borehole and the sensing network system are proposed. With the results from laboratory, the 6 nm wavelength bandwidth of the FBG sensors used for rock strata deformation monitoring is presented. By analyzing the signal resolution factor of the multi-point sensor, the maximum practical six-channel multiplexing of the testing system determined by dominated optical source bandwidth has been researched. A distinctive FBG array composed of 18 FBGs based on wavelength division multiplexing/spatial division multiplexing is designed and implemented. Engineering practice shows the double-loop design can improve the survival rate of FBGs in mines.

**Key words** fiber optics; rock deformation; multi-point sensing; fiber grating sensor; monitoring

## 1 引言

光纤光栅作为传感器的一个重要的用途就是埋入复合材料或者结构中实现材料、结构内部应变分布的实时监测<sup>[1,2]</sup>。在岩土工程中, 有基于微弯损耗原理的光纤传感器、光纤与岩石裂隙相互作用的微弯调制机制和基于布里渊 (Brillouin) 光时域反射仪 (OTDR) 的隧道光纤分布式传感网络, 这些方法对应的变形相对较大, 可用于位移测试, 对微变形易

出现漏报或不敏感的情形。而光纤光栅适用于变形的精确、绝对测量, 在树脂锚杆的内部植入光纤光栅传感器, 长期监测隧道变形过程中不同范围的岩石应变, 同时感应温度变化<sup>[3]</sup>。T. Sato 等<sup>[4]</sup>用光纤 Bragg 光栅制作铝板测试装置进行地应力测量; 开发了一种在地下挖掘过程中测试应变的光纤光栅传感器, 即在地脚螺栓中植入光纤光栅, 它在石油工程、岩石力学性能测试<sup>[5~7]</sup>和光纤传感器应变传递

收稿日期: 2008-01-30; 收到修改稿日期: 2008-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (50774060) 和陕西省岩层控制重点实验室项目 (02JS43) 资助课题。

作者简介: 刘金瑄 (1968—), 女, 工学硕士, 副教授, 主要从事工程制图、计算机应用及监测技术的教学和科研工作。

E-mail: liujx@xust.edu.cn

分析<sup>[8]</sup>中得到了应用。本课题组把光纤光栅传感器用于相似模拟实验的检测<sup>[9, 10]</sup>,但由于岩石材料的复杂性,目前对岩石材料的内部应力、应变测试仍处于理论探索阶段。

20世纪80年代以来,我国已有上百个井筒发生了变形破坏,严重地影响了煤矿的安全生产,在灾害频发、突发的煤矿中,岩石所处的应力环境更加复杂,将光纤光栅埋入岩层内部,光纤光栅阵列与波分复用(WDM)、时分复用(TDM)和空分复用(SDM)技术相结合,构建多点准分布式传感系统,从而可以实现对岩体大尺度的多点测量。本文采用光纤光栅多点传感理论和技术,研究钻孔中埋入光纤光栅的岩层应变过程实时监测的技术。

## 2 光纤 Bragg 光栅传感器

设计的传感器结构如图1所示,将光纤 Bragg 光栅(FBG)嵌入玻斑纤维增强聚合物材料中,由光纤 Bragg 光栅和碳钢组成直径8 mm、长度220 mm、端部扩径为16 mm的圆柱状结构,光纤为铠装结构,形成光纤光栅-玻璃纤维增强聚合物-水泥砂浆-岩层的力学传递系统。

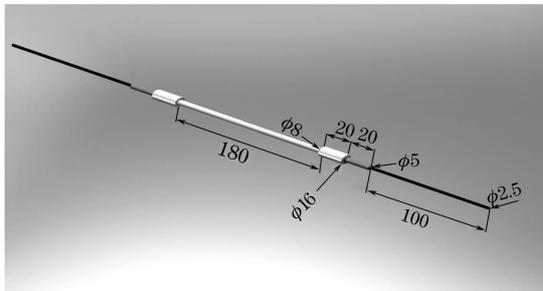


图1 光纤 Bragg 光栅传感器结构

Fig.1 Structure of fiber Bragg grating sensor

光纤光栅波长漂移量是实现检测的主要指标,室内大量实验研究表明<sup>[10, 11]</sup>,上述结构的传感器埋入水泥砂浆试件做实验的传感光栅其光波长漂移量最大值为1.92 nm,而裸露的粘贴于砂岩试件表面的传感光栅波长漂移量最大值达4.02 nm,裸露传感光栅埋入相似材料模型检测沉降变形的波长漂移量最大值达2.8 nm。

## 3 光纤光栅多点传感原理

### 3.1 系统光纤 Bragg 光栅复用能力

作为彼此串联的一维光子器件的光纤光栅<sup>[12]</sup>,设光源的光谱范围(或可调范围)为 $\Delta\lambda_L = \lambda_b - \lambda_a$ ( $\lambda_a$ 和 $\lambda_b$ 分别为起始波长和终止波长)。对于线阵

中相邻的第*i*个与第*j*个光纤光栅,设其受外场作用时波长的“红移量”分别为 $\Delta\lambda_{i+}$ 和 $\Delta\lambda_{j+}$ ,”蓝移量”分别为 $\Delta\lambda_{i-}$ 和 $\Delta\lambda_{j-}$ ,则两个传感光栅传感信号互不串扰必须满足的条件为

$$\lambda_i + \Delta\lambda_{i+} < \lambda_j - \Delta\lambda_{j-}, \quad (1 \leq i < j) \quad (1)$$

式中 $\lambda_a < \lambda_1 < \dots < \lambda_i < \lambda_j < \dots < \lambda_b$ 。

为使两个传感光栅传感信号能够分辨,定义多点传感的信号分辨因子 $\delta_{ij}$ 为

$$\delta_{ij} = (\lambda_j - \lambda_i) - (\Delta\lambda_{i+} + \Delta\lambda_{j-}) = \Delta\lambda_{ji} - \Delta\lambda_{i+,j-}, \quad (1 \leq i < j) \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_{ji}$ 为相邻两个光纤光栅的波长差, $\Delta\lambda_{i+,j-}$ 为相邻两个光纤光栅波长的相对漂移量。(2)式表明,只有当 $\delta_{ij} > 0$ 时,探测器才能够分辨出两个传感信号, $\delta_{ij}$ 主要由相邻光纤光栅的波长差、相邻光纤光栅波长的相对漂移量、传感光栅的带宽及传感系统的探测器分辨率决定。

根据多点传感系统对信号分辨率的要求,由光源带宽决定的预期复用能力为

$$M = \Delta\lambda_L / \Delta\lambda_{ji}. \quad (3)$$

常用的光纤光栅网络解调仪, $\lambda_a = 1525$  nm, $\lambda_b = 1565$  nm,光纤光栅传感器的波长动态范围设计为 $\Delta\lambda_i = \pm 3$  nm,相邻两个光纤光栅的波长带宽取 $\Delta\lambda_{ji} = 6$  nm,得预期复用能力为 $M = 6.67$ ,取 $M = 6$ 。

### 3.2 多点应变传感原理

光纤光栅多点传感是以光纤光栅单点传感为基础,同时亦必须满足分辨因子 $\delta_{ij} > 0$ 条件的一类广义传感方式。对于多点传感系统只有应变的外场作用, $\Delta T_i = 0$ ,考虑由*N*个光纤布拉格光栅制成的光栅串在材料表面粘贴或内部埋植,则有

$$\sum_{i=1}^N \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{i0}} = \sum_{i=1}^N (1 - p_e) \Delta\epsilon_i, \quad (4)$$

式中 $p_e$ 为光纤的有效光弹系数, $\lambda_{i0}$ 为光纤光栅串中的第*i*个光栅的自由中心波长, $\Delta\lambda_i$ 为第*i*个光栅的反射(或透射)波长的漂移量, $\Delta\epsilon_i$ 是为第*i*个光栅的受外场作用产生的应变。

## 4 光纤 Bragg 光栅监测系统

地层沉降变形观测方法就是将光纤光栅传感器形成的阵列安装在钻孔中,并用水泥砂浆封孔,由钻孔引出的光纤线路直接接入地面监控室的计算机。根据矿井地质条件和松散层沉降变形,光纤光栅传感器主要布置在砂砾层和松散层与基岩交接处。在距地面104.33~176.50 m的距离内分别在10个位置处设置光纤光栅传感器,钻孔深度180 m。

光纤光栅测试系统包括 3 个光纤光栅传感器阵列(编号 I、II、III 号光路)、光纤光栅解调仪和计算机,由光电转换系统、数据采集系统、波长计算、数据分析、数据接收设备和数据后处理等部分组成。光纤光栅传感器监测系统如图 2 所示。每个光纤光栅

阵列设计由 6 个光纤光栅传感器依次连接串联构成 1 根线性阵列,使用光纤光栅传感器 18 个。每个光纤光栅测试线路为双回路布置,有 2 个接头,系统共计有 6 个接头即 6 根引出光纤通道(编号 1~6)。

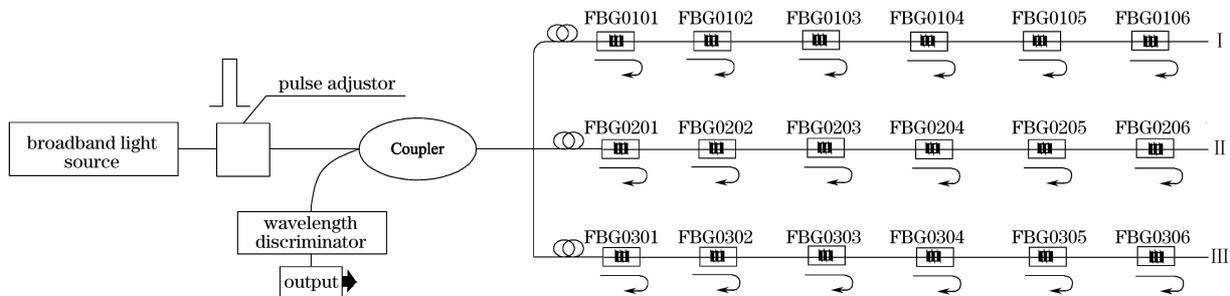


图 2 光纤光栅多点传感网络系统

Fig. 2 Multi-point sensing network system with fiber grating

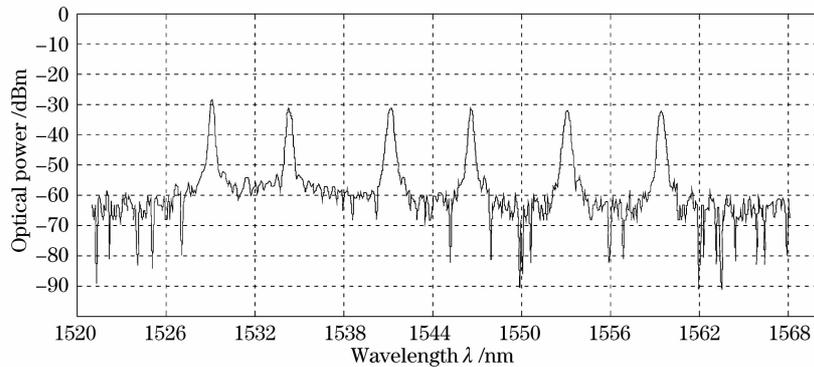


图 3 II 号光路线性阵列光纤光栅反射谱示意

Fig. 3 Reflection spectrum of linear fiber grating array in light channel II

采用的传感光栅是高掺锗光敏光纤,以相位掩模法制作的,长度 15 mm。I、II、III 号光路的 FBG0101~FBG0306 波长分别为

1528.843 nm,	1534.463 nm,	1540.726 nm,
1546.100 nm,	1552.980 nm,	1559.300 nm,
1528.951 nm,	1534.200 nm,	1541.146 nm,
1546.577 nm,	1552.933 nm,	1559.290 nm,
1528.712 nm,	1534.863 nm,	1540.322 nm,
1546.837 nm,	1552.744 nm,	1558.123 nm.

18 个 FBG 形成波分复用/空分复用混合阵列型,相邻两光栅间带宽超过 5.5nm。在传感阵列的各支路内采用波分复用技术,支路之间采用空分复用技术,采用光开关切换各传感支路,各支路互不串扰,其对应的光纤光栅波长可一致,使相同波长的光纤光栅可大量用于同一传感网络系统之中。

## 5 光纤光栅多点应变监测结果分析

2007 年 9 月 30 日地层沉降观测完成钻孔和下

放光纤光栅监测系统,10 月 4 日开始对地层进行监测。

图 3 为下放后 II 号光路的 6 个线性阵列光纤光栅传感器反射谱,可见光纤光栅测试系统下放后完好。I、III 号光路的光纤光栅反射谱如图 4 所示, I 号光路光纤光栅测试系统在 152 m 左右和 158.6~170.1 m 处出现 2 次断纤情况,致使编号 FBG0104 光栅失效,可测试光栅传感器为 5 个,图 4(a)、图 4(b); III 号光路光纤光栅测试系统在 164.2~174.1 m 处出现 1 次断纤,可测试光栅传感器为 6 个,如图 4(c)、图 4(d)。观测孔设置的光纤光栅传感器 18 个,系统下放后 17 个光纤光栅传感器成活,成活率 94.4%。

由于这样深度的地层处于恒温状态,因此应用试验中未考虑温度对光纤光栅的影响以及补偿。

2007 年 10 月至 2008 年 1 月部分监测数据变化趋势如图 5 所示,横坐标表示各光纤光栅的观测日期,纵坐标为光纤光栅波长漂移量。

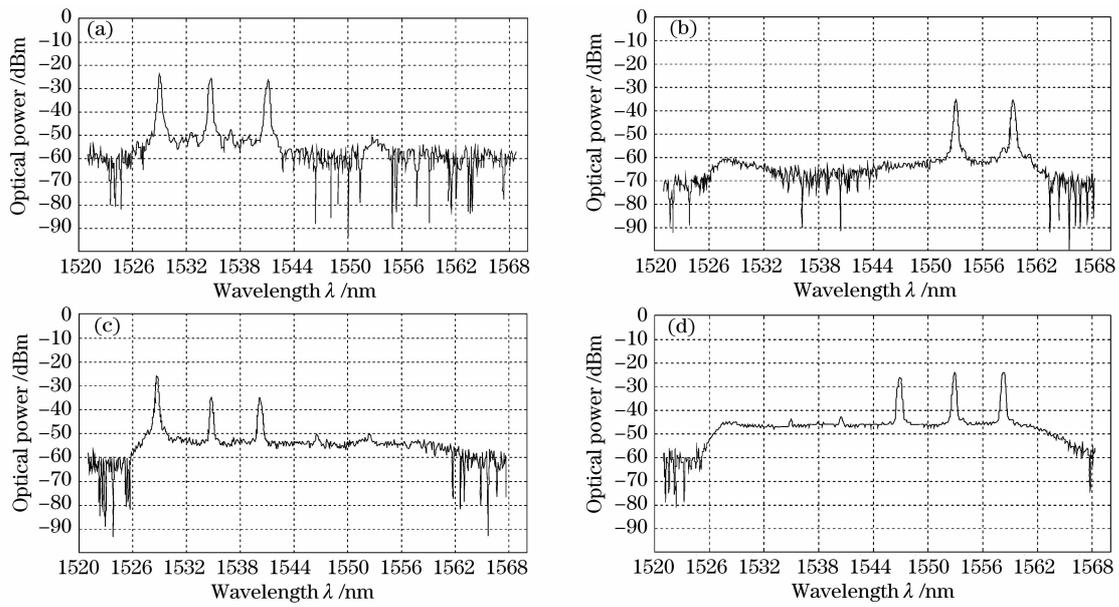


图 4 I、III号光路线性阵列光纤光栅反射谱示意

Fig. 4 Reflection spectrum of linear fiber grating array in light channel I and III

第 17 层为浅灰绿色-灰白色砂砾层,成分以石英、长石为主,较松散,透水性较好,埋藏深度 122.67~135.15 m,共布置 4 个光纤光栅,光纤光栅

传感器间距为 2.4 m。图 5(a)中,各光纤光栅波长漂移量均在逐步减小,整体上处于受压的状态,波长漂移量变化规律一致,表明松散层变形属正常。截至目

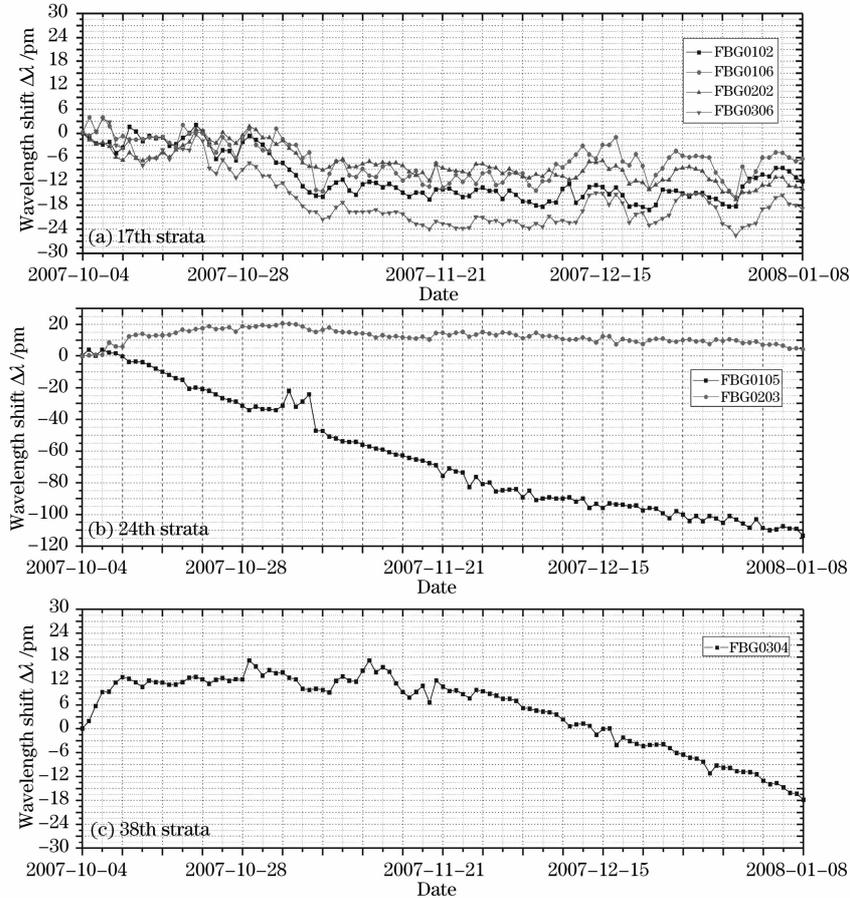


图 5 不同埋设层位的光纤光栅波长漂移量随时间变化曲线

Fig. 5 Wavelength shift of fiber gratings embedded in different strata with time

前各光纤光栅波长漂移量在  $\Delta\lambda_i = -25$  pm, 光纤光栅设计波长漂移量  $\Delta\lambda_i = \pm 3$  nm, 说明光纤光栅工作正常, 信息稳定。

第 24 层为浅灰白色砂砾层, 成分以石英、长石为主, 局部含少量粉砂质, 埋藏深度 146.45 ~ 149.81 m, 布置 2 个光纤光栅, 两光栅间距为 0.7 m。光纤光栅 FBG0203 的波长漂移量几乎不变, 而 FBG0105 的波长漂移量在逐步减小, 变化量达到 -113.39 pm, 可初步判断光纤光栅 FBG0105 处于受压的状态, 光纤光栅 FBG0203 基本不受力, 此处具有异常现象, 图 5(b)。

第 38 层为浅灰绿色-褐黄色粘土层, 局部夹砂

浆块及少量砂质。埋藏深度 167.90 ~ 176.50 m, 布置 2 个光纤光栅, 光栅间距 4 m, 其中该层上部光栅 (FBG0104) 在下放后失效。图 5(c) 中, 光纤光栅的波长漂移量在 10 月 10 日前逐步增大, 此后处于稳定状态, 11 月 20 日后呈递减规律变化, 表明整体上处于受压的状态, 光纤光栅波长漂移量在 -17.79 pm。10 月 10 日前的增大是由于水泥砂浆凝固所致。

表 1 为各光栅已测试结果的最大值, 17 个光纤光栅中有 3 个处于受拉状态, 其他均处于压应力状态, 最大波长漂移量 -113.39 pm。随埋深增大, 各传感光栅的波长漂移量有所不同, 但整体上呈增大趋势, 即以受压为主。

表 1 17 个光纤光栅波长最大漂移量

Table 1 Maximum wavelength shift of the 17 fiber gratings

	FBG0101	FBG0102	FBG0103	FBG0104	FBG0105	FBG0106
Depth /m	106.2	128.1	158.6		147.7	125.7
Maximum wavelength shift /pm	-26.35	-18.35	-24.54		-113.39	-14.33
	FBG0201	FBG0202	FBG0203	FBG0204	FBG0205	FBG0206
Depth /m	107.2	130.8	149.2	162.8	144.0	119.4
Maximum wavelength shift /pm	-17.45	-11.82	20.59	23.21	-24.46	25.98
	FBG0301	FBG0302	FBG0303	FBG0304	FBG0305	FBG0306
Depth /m	120.8	145.0	164.2	174.1	159.9	132.3
Maximum wavelength shift /pm	-7.88	-33.25	-17.81	-17.79	7.50	-25.50

## 6 结 论

设计了一种用于岩层变形的钻孔植入光纤传感器, 可以根据波长的变化判断岩层受力状态。结果表明, 用于岩层测试的相邻两个光纤光栅的波长带宽不小于 6 nm, 系统复用能力最多为 6 个传感光栅。工程实践表明, 光纤光栅监测系统采用双回路布置, 可提高光纤光栅系统下放后的成活率。光纤光栅监测系统可以应用于松散含水地层的检测, 实现对地层沉降变形的 24 h 实时监测。

### 参 考 文 献

- Whitten L. Schulz, Joel P. Conte, Eric Udd *et al.*. Static and dynamic testing of bridges and highways using long-gage fiber Bragg grating based strain sensors[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4202**: 79~86
- Y. Wang, S. C. Tjin, J. Zhao *et al.*. Determination of load-strain characteristics of concrete slabs by using embedded fiber Bragg grating sensors[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4073**: 297~304
- Philipp M. Nellen, Andreas Frank, Roif Brönnimann *et al.*. Optical fiber Bragg gratings for tunnel surveillance[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3986**: 263~270
- T. Sato, R. Honda, S. Shibata. Ground strain measuring system using optical fiber sensors[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3670**: 470~479
- Liu Haitao, Chen Jianping, H. S. U. Luke. Study on fiber grating petroleum pressure sensor and its reliability[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1243~1246  
刘海涛, 陈建平, H. S. U. Luke. 光纤光栅原油压力传感器实验及其可靠性研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1243~1246
- Cornelia Schmidt-Hattenberger, Marcel Naumann, Günter Borm. Fiber Bragg grating strain measurements in comparison with additional techniques for rock mechanical testing[J]. *IEEE Sensors J.*, 2003, **3**(1): 50~55
- Y. W. Yang, S. Bhalla, C. Wang *et al.*. Monitoring of rocks using smart sensors[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, **22**: 206~221
- Li Hongnan, Zhou Guangdong, Liang Ren. Strain transfer model of fiber sensors under non-axial stress[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 787~783  
李宏男, 周广东, 任亮. 非轴向力下埋入式光纤传感器应变传递分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 787~783
- Chai Jing, Wei Shimin, Liu Jinxuan. Study on rock deformation monitoring using fiber Bragg grating in simulation experiment [J]. *J. Coal Science & Engineering*, 2006, **12**(2): 30~33
- Chai Jing Wei Shiming. Transmission character analysis of fiber optical sensing in similar material of simulation experiments[J]. *J. China University of Mining & Technology*, 2007, **36**(4): 458~462  
柴敬, 魏世明. 相似材料中光纤传感检测特性分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, **36**(4): 458~462
- Chai Jing, Zhu Lei, Li Yi. The experiment study on sample simulation for detecting rock deformation by fiber optic grating [J]. *Xi'an University of Science & Technology*, 2008, **28**(3): 柴敬, 朱磊, 李毅. 岩石变形光纤光栅测试的试件模拟实验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2008, **28**(3):
- Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 331~336  
张伟刚, 开桂云, 董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 331~336