

# 矿井下用光纤光栅水压传感器及系统\*

刘小会, 王昌, 刘统玉, 魏玉宾, 吕京生

(山东省科学院 激光所, 济南 250014)

**摘 要:** 研究了一种基于光纤 Bragg 光栅的弹簧管式新型水压传感器. 利用 ANSYS 软件对传感器的灵敏度进行模拟计算, 并对传感器性能进行了标定和测试, 达到了很好的效果. 将传感器安装到煤矿井下进行水压远程在线监测, 与压力表测量数据进行对比, 进一步验证了传感器用于煤矿水压监测的可行性.

**关键词:** 煤矿突水; 水压监测; 光纤 Bragg 光栅传感器; 压力传感器

**中图分类号:** TP212.14

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)01-0112-3

## 0 引言

近几年来, 由于开采深度的延伸和开采范围的扩大, 矿井生产向纵深发展, 水患威胁日益严重, 防治任务更加艰巨, 矿井水灾严重威胁煤矿安全生产和矿工的生命安全<sup>[1]</sup>, 对煤矿水害的预测与防治研究已经被提高到越来越重要的地位. 目前, 突水的预测方法主要有: 突水系数法、阻水系数法、突水指数法和经验公式法等<sup>[2-5]</sup>. 在这些方法中, 承压水的压力是研究和预测突水问题最重要参量, 所以对它的实时监测是预测突水事故的重要依据. 目前我国煤矿水压监测主要使用的是电类压力传感器, 由于电信号远距离传输不方便, 需要在井下增加许多二次仪表、中继器和电源等设备, 传输成本高且可靠性差, 严重限制了该类传感器的实际应用.

光纤压力传感器具有远距离信号传输和安全可靠等优点, 主要有强度调制型、波长调制型、干涉仪型和偏振型四种. 强度和干涉型的传感单元通常是一个压力膜片或其他弹性元件, 在压力作用下, 膜片发生变形, 光纤发出的光照射到膜片后, 返回到接受光纤的光能量发生变化<sup>[6]</sup>, 或通过由光纤断面与膜片中心构成的 Fabry-Perot 干涉腔的腔长来回实现对压力的测量<sup>[7]</sup>. 本文采用新型光纤 Bragg 光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 作为传感元件, 它采用波长调制, 不受光强影响, 抗干扰能力强, 能对波长进行编码, 易于复用、组成系统, 并且具有体积小、重量轻、耐高电压、耐腐蚀、本质防爆等特点<sup>[8]</sup>. 将 FBG 用于煤矿下水压监测, 可在井下无需供电的情况下非常方便地组成准分布式全光纤传感网络, 简单可靠地实现远距离实时监测.

## 1 传感器设计

用强度在空间上周期变化的强紫外线激光照射掺锗光纤就可在纤芯内、沿轴向形成一个折射率周期变化的光栅. 当一束宽光谱光通过 FBG 时, FBG 反射回一束单色光, 波长  $\lambda$  满足<sup>[9]</sup>

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中  $n$  为光纤光栅的有效折射率,  $\Lambda$  为 FBG 的周期. 由于  $n$  和  $\Lambda$  都与 FBG 的温度和应变状态有关, 所以波长  $\lambda$  随温度和应变变化而变化. 在一定温度下, 当 FBG 受应力产生轴向应变  $\epsilon$  时,  $n$  和  $\Lambda$  随之变化, 则 FBG 波长的变化量  $\Delta\lambda$  为<sup>[10]</sup>

$$\Delta\lambda = (1 - P_e)\lambda\epsilon \quad (2)$$

式中有有效弹光常量  $P_e$  为

$$P_e = -n^2[p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})]/2 \quad (3)$$

式中  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为光纤的弹光常量,  $\mu$  为泊松比, 对普通的石英光纤,  $P_e$  约为 0.22.

利用 FBG 的反射波长对应变敏感的原理可以设计压力传感器. 传感器采用弹簧管结构, 如图 1. 将 FBG 预拉伸粘接在弯曲的弹簧管两端, 当管内承受压力  $P$  时, 弹簧管伸长, 拉伸 FBG 并使其产生纵向应变, FBG 波长变大. 利用 ANSYS 软件可计算出一定压力  $P$  下弹簧管的伸长量, 然后根据两粘接点的距离  $l$  及伸长量  $\Delta l$ , 可得 FBG 上的应变  $\epsilon$ . 再根据式(2)得  $\Delta\lambda$ , 由此可设计传感器的灵敏度系数  $K_p^p = \Delta\lambda/P$ . 图 2 为使用 ANSYS 模拟计算弹簧管不同点的位移量图, 计算时参量  $l = 30 \text{ mm}$ ,  $P = 20 \text{ MPa}$ , 计算得  $\Delta l \approx 0.019 \text{ mm}$ ,  $K_p^p \approx 38 \text{ pm/MPa}$ .

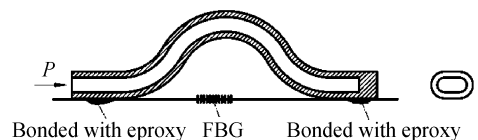


图 1 传感器结构原理

Fig. 1 The principle of the sensor

\* 山东省重大专项基金(2006ZZ13)资助

Tel: 0531-88799236 Email: windnuua@126.com

收稿日期: 2007-09-14



图 2 弹簧管不同点的位移量(@20 MPa)  
Fig. 2 The deformation of the spring tube(@20 MPa)

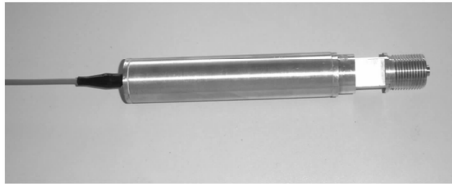


图 3 传感器照片  
Fig. 3 Sensor photo

改变弹簧管的大小、形状、壁厚等参量,利用上述计算方法可设计出灵敏度系数更高的传感器.图 3 为封装好的压力传感器外观照片.传感器采用全不锈钢结构,压力接口与普通压力表一致,因此便于安装.

在安装使用前,需对传感器进行标定.本文采用上海自动化仪表四厂的活塞式压力计 YU-600 对传感器进行加压并测量压力值,用 HP86120C 波长计测量 FBG 波长,标定结果如图 4.从图中可以看出压力传感器的线性度很好,压力灵敏度系数  $K_P^P$  为 34 pm/MPa,与 ANSYS 计算值相差不大,其误差主要来自弹簧管的加工准确度不高.如采用分辨率为 1pm 的解调仪设备,由于  $K_P^P=34$  pm/Mpa,所测得压力的分辨率约为 0.03 MPa.另外测得传感器的重复性小于 0.2 MPa,温度系数  $K_T^P$  为 30 pm/°C.

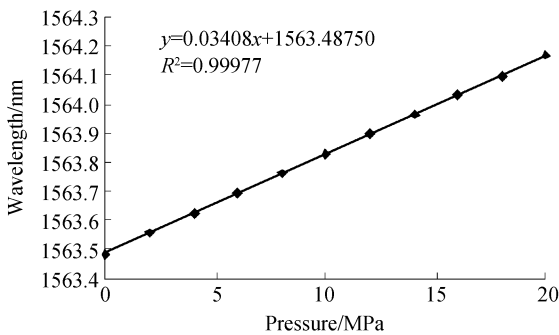


图 4 传感器典型标定结果  
Fig. 4 The scaled-result of typical sensor

## 2 矿井下用 FBG 水压实时监测系统

2007 年 7 月在某煤矿安装一套水压监测系统,结构如图 5.将水管打进地下含水层,水管另一端安装一个 FBG 压力传感器.每个 FBG 压力传感器都有另外一个 FBG 温度传感器对其进行温度补偿,两

者安装在同一处并通过单芯光缆串接到终端盒上.然后通过多芯光缆连接到地面调度室中的解调设备(采用山东微感光电子技术有限公司的 MS-FBG-6000 解调仪,分辨率:1 pm,重复性:±5 pm),解调设备再通过网线将数据传输到监测计算机上.这样,监测系统煤矿井下部分是全光纤网络,无须供电,安全可靠.

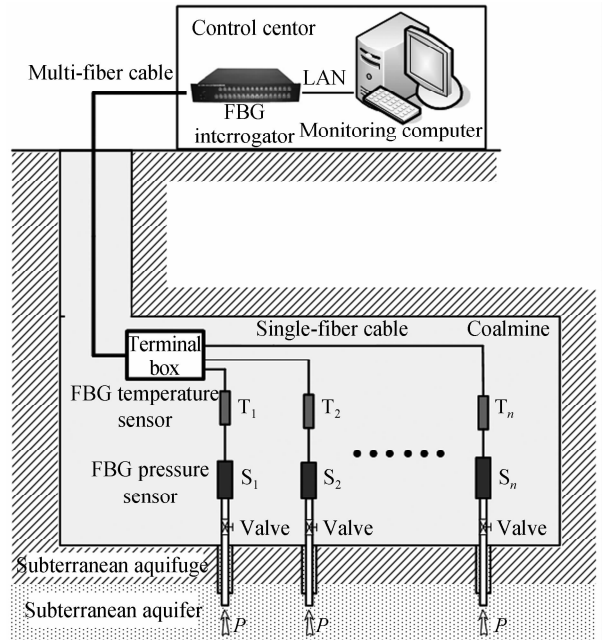


图 5 FBG 煤矿水压监测系统  
Fig. 5 FBG coalmine water pressure monitoring system

监测系统的采样速率为 9 次/min,24 h 保存数据,图 6 为 2007 年 7 月 11 日由一传感器所获得的

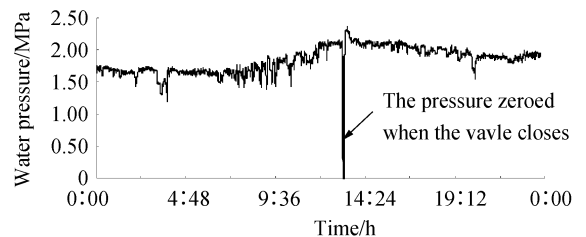


图 6 2007 年 7 月 11 日一 FBG 水压传感器数据  
Fig. 6 A FBG sensor data on July 11 2007

数据.根据光纤光栅温度补偿原理,水压  $P$  用式(4)计算<sup>[11]</sup>

$$P = \frac{(\lambda^P - \lambda_0^P) - (\lambda^T - \lambda_0^T) \frac{K_T^P}{K_T^T}}{K_P^P} \quad (4)$$

式中,  $\lambda_0^P$ 、 $\lambda_0^T$  分别是在安装前压力和温度补偿传感器同一温度下的波长;  $\lambda^P$ 、 $\lambda^T$  分别是在安装后压力和温度补偿传感器同一温度下的波长;  $K_T^T$  是温度补偿传感器的温度系数.为检验 FBG 传感器的准确性,定期用压力表检测压力并与 FBG 传感器进行对比.由于在压力表装卸时需关闭水压阀门,所以图 6 中 13 h 左右的水压突然降为零,此时装上的压力表

读数为 2.0 MPa,与此对应的 FBG 压力传感器的读数为 2.1 MPa,现场试验很好验证了 FBG 传感器所测得压力数据的准确性。

### 3 结 论

本文报道了基于光纤光栅的光纤压力传感器的设计与实验结果.进行了基于 FBG 水压监测系统对煤矿井下含水层水压的实时远程监测,该系统对煤矿突水的防治有重要的意义.与当前煤矿上用的电子类监测系统相比,FBG 监测系统结构简单,并且在煤矿井下部分是无源的光纤网络,安全可靠.到目前为止,FBG 水压监测系统已在煤矿上连续运行且未出现故障,达到了实用要求,值得推广应用。

#### 参 考 文 献

- [1] GUI Xiang-you, YU Zhong-ming. Security evaluation research of mine in-rush forecasting[J]. *China Mining*, 2006, **15**(5): 35-37.  
桂祥友, 郁钟铭. 矿井水灾害预测的安全评价研究[J]. 中国矿业, 2006, **15**(5): 35-37.
- [2] WEI Jiu-chuan, LI Bai-ying. Security evaluation of coal mining above the confined aquifers[J]. *Coal Geology & Exporation*, 2000, **28**(4): 57-59.  
魏久传, 李白英. 承压水上采煤安全性评价[J]. 煤田地质与勘探, 2000, **28**(4): 57-59.
- [3] XU Xue-han. Research of coal mine in-rush forecasting[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1991.  
许学汉. 煤矿突水预报研究[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [4] LI Jia-xiang. The relations of in-situ rock stress and water-resisting ability for floor aquifuge [J]. *Coal Geology & Exporation*, 2000, **28**(4): 47-49.  
李家祥. 原岩应力与底板隔水层阻水能力的关系[J]. 煤田地质与勘探, 2000, **28**(4): 47-49.
- [5] LI Jin-kai. The control of the mining karst water[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1990.  
李金凯. 矿井岩溶水防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [6] TONG Cheng-guo, YANG Jun, LIU Zhi-hai, et al. Fiber optic differential pressure sensor with twin borden tubes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1172-1175.  
佟成国, 杨军, 刘志海, 等. 双弹簧管光纤差压传感器[J]. 光子学报, 2004, **33**(10): 1172-1175.
- [7] ZHAO Zhong-hua, GAO Ying-jun, LUO Yu-feng. Fiber-optic pressure sensor[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, **25**(12): 49-52.  
赵中华, 高应俊, 骆宇锋. 光纤压力传感器[J]. 传感器技术, 2005, **25**(12): 49-52.
- [8] ZHANG Dong-sheng, GUO Dan, HU Chun-chi, et al. The measurement of distributing pressure in molding cavity based on fiber bragg grating sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 848-850.  
张东生, 郭丹, 胡春池, 等. 基于光纤光栅传感的模压腔内压强分布式测量[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 848-850.
- [9] Jin Fa-hong, Dong Xiao-yi, Liu Zhi-guo, et al. Theoretical analyses of fiber bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(9): 809-812.  
金发宏, 董孝义, 刘志国, 等. 光纤布拉格光栅的理论分析[J]. 光子学报, 1996, **25**(9): 809-812.
- [10] KERSEY A D, DAVIS M A. Fiber grating sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1460.
- [11] ZHOU Hong, QIAO Xue-guang, SHAO Jun, et al. Study of the performance of the high pressure resistant FBG pressure sensor with the externally pressurized type elastic cylinder[J]. *Journal of Xidian University*, 2006, **33**(4): 646-649.  
周红, 乔学光, 邵军, 等. 外压式弹性圆筒耐高压光纤光栅压力传感器[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, **33**(4): 646-649.

## Fiber Grating Water Pressure Sensor and System for Mine

LIU Xiao-hui, WANG Chang, LIU Tong-yu, WEI Yu-bin, LÜ Jing-sheng

(Laser Reseach Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Received date: 2007-09-14

**Abstract:** A new water pressure sensor based fiber Bragg grating was fabricated. The sensitivity of the pressure sensor was calculated with ANSYS. The sensor was installed in coalmine to monitor the water pressure remotely and compared with manometer. It validated the feasibility of the sensor in the coalmine water pressure monitoring.

**Key words:** Water in-rush of coalmine; Water pressure monitoring; Fibre Bragg grating sensor; Pressure sensor



**LIU Xiao-hui** was born in 1976, and received the M. S. degree from Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. His research interests focus on fiber grating sensors and their applications.