

基于分布式光栅传感网络的矿井坍塌监测研究

张燕君, 贾冰冰, 黄保凯, 苏玉玲
(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:针对矿井坍塌事故的发生设计了一种用于对矿井进行监测的分布式光纤光栅传感器。首先利用 ANSYS 软件对矿井模型进行有限元分析, 找出矿井中的不稳定点进行实时监测。将经过特殊设计的光纤光栅位移传感器安装在矿井中的不稳定点处, 当矿井中的不稳定点发生异常时就会表现为反射回来的光纤光栅的中心波长发生偏移, 根据反射光中心波长的偏移量与矿井不稳定点的位移成明显的线性关系的特点, 可以计算出不稳定点的位移值, 进而了解矿井的安全状况。实验结果表明光纤光栅传感器的测量精度可达 $\pm 0.01\%$ 。

关键词: 光纤光栅; 有限元; 矿井; 位移

中图分类号: TP212.4⁺4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.017

Research on mine collapse monitoring based on distributed grating sensor network

ZHANG Yan-jun, JIA Bing-bing, HUANG Bao-kai, SU Yu-ling
(Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at mine collapse, we design a Fiber Bragg Grating (FBG) sensor network to monitoring the mine. Firstly finite element analysis is made to the mine model to get the instable point in real-time. Then specially designed FBG sensors are installed at the instable points of the mine. When an instable point of the mine is abnormal, the reflected grating center wavelength will change. According to the center shift of the reflected light, the security situation of the mine can be well mastered. Experimental results show that the measurement accuracy of the FBG sensor can reach $\pm 0.01\%$.

Key words: Fiber Bragg Grating; finite element; mine; displacement

1 引 言

塌方是建筑物、山体、路面、矿井等在自然力非人为的情况下, 出现塌陷下坠的自然现象^[1-3]。在地下工程(尤其是煤田地质开发)中, 矿井坍塌成为地下工程的主要隐患。

目前对矿井松动区的测量方法主要有地质雷达探测法和位移测量仪探测法。但是地质雷达的体积太大, 而且成本较高, 这就加大了安装的难度和费用^[4-5]。而位移测量仪则由于其对测量点数量的限制和对工作环境温度的要求, 使得它在使用时具有很大的局限性。本文针对地质雷达和位移测量仪的缺点采用光纤光栅传感器来进行测量, 由于光纤光栅传感器具有体积小、灵敏度高、易于制造、成本低、而且不受电磁干扰的特点, 所以具有很高的实用价

值^[6]。本文在利用 ANSYS 有限元分析的方法对矿井的稳定性进行分析的基础上, 设计了一种适用于矿井监测的新型光纤光栅传感器对矿井中的不稳定区进行实时监测。

2 隧道模型的分析

有限元分析(finite element analysis, FEA)是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成, 对每一单元假定一个合适的(较简单的)近似解, 然后推导求解这个域总的满足条件(如结构的平衡条

作者简介: 张燕君(1973-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感, 光电检测与信号处理等方面的研究。

收稿日期: 2011-08-01; **修订日期:** 2011-09-06

件),从而得到问题的解。有限元不仅计算精度高,而且能适应各种复杂形状,因而成为行之有效的工程分析手段。有限元分析中的有限元是指集合在一起能够表示实际连续域的离散单元。基于有限元分析的种种优点,在此,采用有限元分析法对矿井隧道进行分析。

选用某一正在使用的矿井进行分析,其中矿井隧道主要由粉砂岩和泥岩组成,主要土体参数如表 1 所示,利用 ANSYS 软件对矿井隧道受力情况所做的隧道土体 y 轴方向上的受力分析结果如图 1~图 4 所示。

表 1 矿井隧道主要土体参数

Tab. 1 main parameters of soil in mine tunnel

参数	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
粉砂岩	28.95	0.23	2.721
泥岩	26.92	0.27	2.735

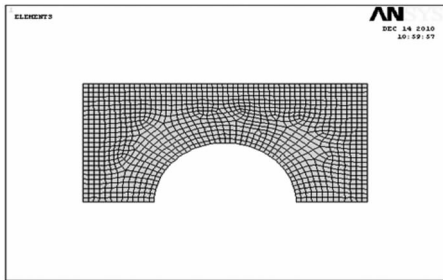


图 1 隧道的有限元模型

Fig. 1 the finite model of diagram tunnel

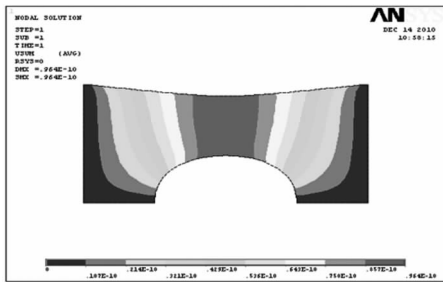


图 2 垂直方向上总的位移分布云图

Fig. 2 the total vertical displacement contours

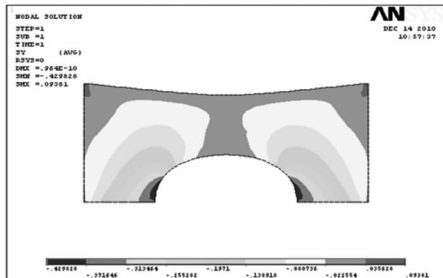


图 3 y 轴方向上所受的应力分布云图

Fig. 3 the stress contours of y-axis direction

一般的矿井内部都会采取支架保护,可以采用砌碛支护,架拱支护,架蓬支护,锚杆支护,锚喷支护,锚网喷支护,锚索支护,金属拱形支架支护,料石

支护,钢筋混凝土支护,以及各类支护之间的联合支护。矿井支护上所受的力,主要是来自于土体自身的重力。由图 2~图 4 可以看出土体最大的位移和所受的最大的力均分布在拱形隧道的正上方。这是隧道最容易坍塌的地方,也是最需要重点监测的地方。

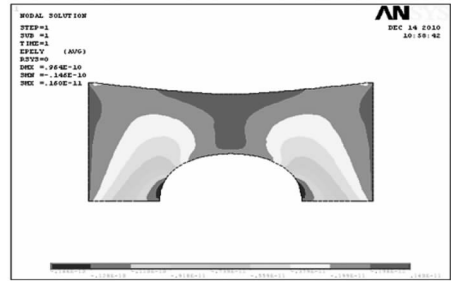


图 4 y 轴方向上弹性应力分布云图

Fig. 4 the elastic stress contours of y-axis direction

3 分布式双光纤光栅位移传感器的原理分析

光纤光栅的特性:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \right) \Delta\varepsilon + (\alpha + \varepsilon) \Delta T \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅反射波中心波长的变化量; λ_B 为光纤光栅反射波的中心波长; ρ_{11} 和 ρ_{12} 为光纤应变张量的分量; ν 为泊松比; α 为光纤材料的热膨胀系数; ε 为光纤的热光系数; n 为光纤光栅的折射率; $\Delta\varepsilon$ 为光纤光栅所受的应力变化; ΔT 为光纤光栅所受的温度变化。

由式(1)可以看出光纤光栅传感器对温度和应力同时敏感,所以对于单参量应变的测量总是伴随有较大的环境温度变化,对由于温度变化而造成的反射波长波动的补偿,大体上分为两种方法:温度的测量过程补偿和温度的测量结果补偿。其中温度的测量过程补偿是指通过对传感单元进行特殊的设计与布置,使其对温度不敏感从而达到测量应变的目的。温度的测量结果补偿是指在测量后使用某种运算和处理对温度效应进行剥离从而达到测量应变的目的^[6-9]。在本文中是采用后者方法使用双光纤光栅法,传感器的内部结构如图 5 所示。

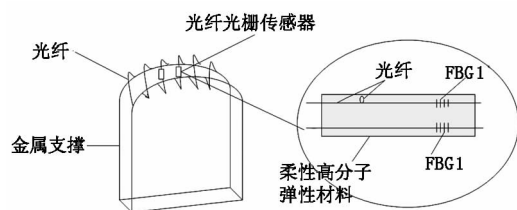


图 5 光纤光栅传感器的内部结构

Fig. 5 Fiber Bragg Grating sensor structure

FBG1 和 FBG2 是两个中心波长完全相同的光纤光栅,其中 FBG1 为参考光纤光栅,因为光纤处于弯曲状态,所以当温度和应力同时改变时它只受到温度的影响而不受应力的作用,FBG2 由于本来就处于自然的绷直状态(此时所受到的应力为 0),当它受到温度和应力的同时作用时,反射波长将发生变化,其中既有温度的影响部分也有应力作用的部分。由于 FBG1 和 FBG2 处于相同的温度环境中,所以温度变化给它们造成的波长的变化是相同的,FBG1 可以起到很好的温度补偿的作用。

此传感器采用的是柔性高分子弹性材料封装,将两根光纤光栅并排黏贴在柔性高分子弹性材料上,因为柔性高分子弹性材料封装的传感器具有很好的重复性和线性,而且可以测量曲面等形状复杂的被测面。由图 2 ~ 图 4 可以看出我们在本实验中主要的监测部位是拱形的顶部所以我们采用此类封装将光纤光栅能够和拱形顶部很好的黏贴,能较好的监测出其位移变化。在本实验中将光纤光栅传感器直接黏贴在金属拱形支架上来对土体的位移进行测量。

基于上述的传感器装置,利用光谱仪做了相关的实验,实验结果如图 6 ~ 图 9 所示。

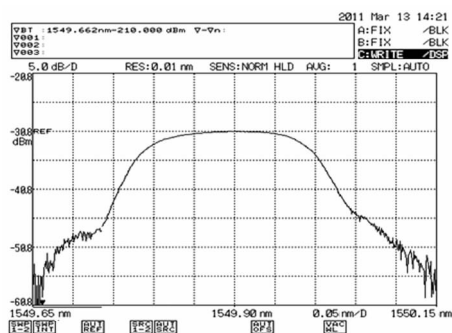


图 6 常温下传感器的反射波长图

Fig. 6 the reflected wavelength of the sensor at the room temperature

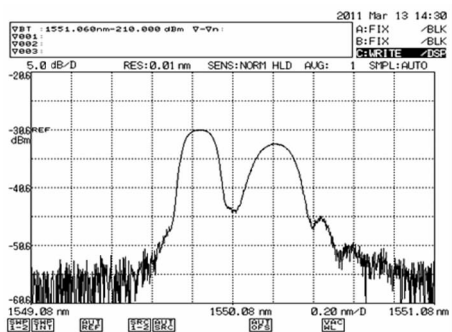


图 7 常温时在一定应力下的反射波长图

Fig. 7 the reflected wavelength of the sensor under a certain stress at the room temperature

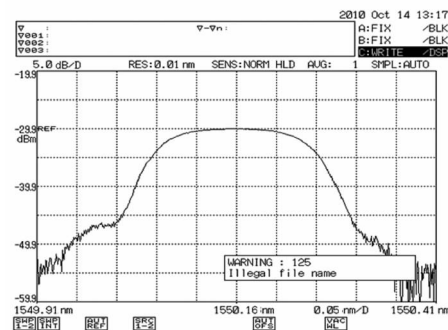


图 8 温度为 51 °C 时传感器的反射波长图

Fig. 8 the reflected wavelength of the sensor under 51 °C

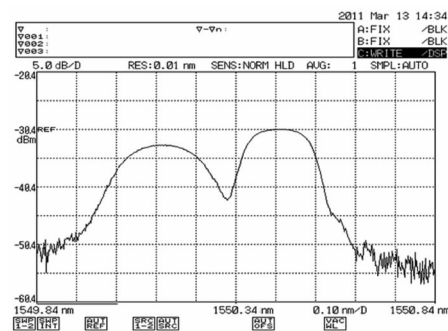


图 9 温度为 51 °C 且在一定应力下的反射波长图

Fig. 9 the reflected wavelength of the sensor under a certain stress at 51 °C

由图 6 和图 8 可以看出在相同的温度下光纤光栅传感器中两根光纤光栅的反射波长是完全重合的。图 7 和图 9 所示的是在相同的温度下对传感器施加一定的压力,此时 FBG2 的反射波长发生了明显的变化而 FBG1 的反射波长没有变化,所以可以分别根据图 7 和图 9 中两个反射波的中心波长的差求出 FBG2 所受的应力。由传感器的结构特征可知所设计的传感器可以很好的在测压力的同时进行温度补偿。

由于光纤光栅传感器的体积比较小将其黏贴在矿井隧道支撑的拱形顶上时可以将每个光纤光栅传感器上的拱形顶近似看成是一个小的矩形平面,于是利用悬臂梁模型可以得出拱形顶的位移 y 与光纤光栅中心波长的变化关系为:

$$\Delta\lambda = \frac{3\lambda_0(1-p_e)(L-\delta)h}{2L^3}y \quad (2)$$

式中, y 为拱形顶的位移; λ_0 为光纤光栅的中心波长; p_e 为光纤光栅的弹光系数; L 为光纤光栅传感器总的长度; δ 为光纤光栅中心距离封装左端的距离; h 为总共的土体的厚度; $\Delta\lambda$ 为光纤光栅反射波中心波长的变化量,由于 λ_0 , p_e , L , δ 和 h 均为常数,我们可以令:

$$\frac{3\lambda_0(1-p_e)(L-\delta)h}{2L^3} = A \quad (3)$$

所以 A 也为常数,由 $\Delta\lambda = Ay$ 可知光纤光栅中心波长的变化量与拱形顶的位移成线性关系。

4 矿井监测系统的组成

在本实验中使用的是宽带光源,由宽带光源发出的宽带光经过可调谐法布里-珀罗滤波器后经过

耦合器进入光纤光栅传感器,从光纤光栅传感器返回的反射光再一次经过耦合器后经由光电探测器让光信号转换为电信号,经过一个放大电路进行信号的放大,然后再经过 A/D 转换为数字信号后进入 ARM 处理器进行处理分析得出相应的位移变化量。其中,可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的驱动电压由 ARM 处理器控制的锯齿波发生电路产生。

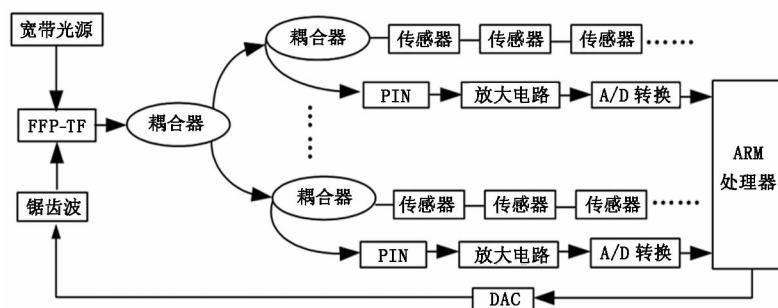


图 10 矿井监测系统的组成图

Fig. 10 mine monitoring system diagram

5 实验结果与分析

由前面的 ANSYS 模型的分析结果可知土体的最大位移处位于拱形顶的顶部,在拱形顶的顶部布置 9 个光纤光栅探测点,其中 1~3 点安放于拱形顶的最中间部位,4~6 点安放于拱形顶的偏左边位置,7~9 点安放于拱形顶的偏右边位置。在每个点处分别安放光纤光栅传感器,以对每个实验点的位移进行检测,同时,在每个试验点处放置了一个测量精度为 0.03 mm 的固定位移测量仪,用以和光纤光栅传感器所测的位移变化进行比对。实验进行的时间为 7 月 1 日到 10 月 1 日,每天在中午 12 时左右进行数据的记录,其中有一个半月的时间处于雨季,我们可以很好地对矿井土体的大位移进行观测。将这九个试验点每天所记录的数据进行平均并且绘出位移曲线图,分别如图 11~图 14 所示。

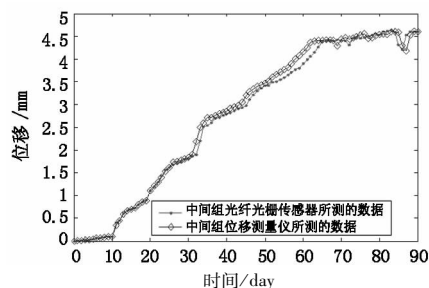


图 11 中间组光纤光栅传感器与位移测量仪所测数据

Fig. 11 the displacement of intermediate group sensor and the displacement measuring instrument

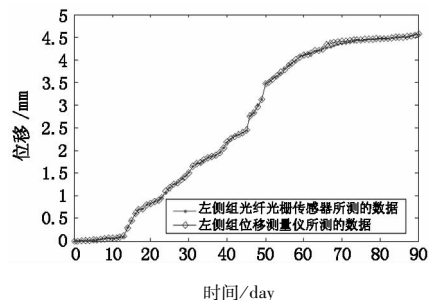


图 12 左侧组光纤光栅传感器与位移测量仪所测数据

Fig. 12 the displacement of left group sensor and the displacement measuring instrument

由实验所得的位移曲线图可知从第 11 天开始位移有了明显的变化,是由于从第十天开始就进入了雨季,降雨量的增加会使矿井的土体压力增大所以位移就有了明显的变化,因此可以根据位移的变化量以及位移是否突然变大等方面来进行及时的支撑防护或者撤离安排,从而来进一步的保护人民的生命财产安全。

从光纤光栅位移传感器所测数据与位移测量仪所测数据对照曲线图 11~图 13 可以发现,光纤光栅位移传感器所测数据与位移测量仪所测结果基本一致,由图 14 可以看出光纤光栅传感器所测位移变化量与位移测量仪所测位移变化量之差在 0.05 mm 之内,可知本实验系统的测量准确度较高。所以光纤光栅传感器可以很好地被应用于对矿井塌方的实时监测中。

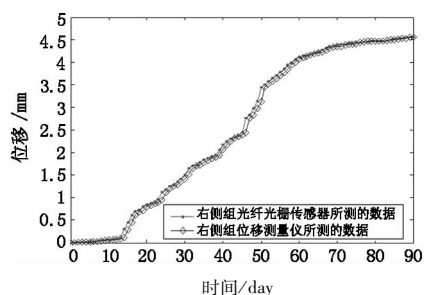


图13 右侧组光纤光栅传感器与位移测量仪位移之差

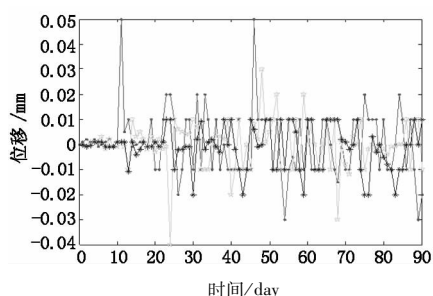
Fig. 13 the displacement of right group sensor
the displacement measuring instrument

图14 光纤光栅所测位移与位移测量仪所测的数据

Fig. 14 the displacement deviation of FBG sensor and
the displacement measuring instrument

6 结 论

本文利用 ANSYS 对矿井模型进行了精确的分析,得出矿井中的不稳定点,然后使用分布式双光纤光栅传感器对矿井中的不稳定点进行实时的监测,记录不稳定点的位移情况。实验表明,分布式双光纤光栅传感器能够很好的对矿井中的不稳定点的位移进行监测,精度可达 $\pm 0.01\%$,并且得出光纤光栅传感器的反射波长的变化量与矿井的位移变化量呈很好的线性关系,所以光纤光栅传感器可以应用在矿井中对其不稳定点进行实时的监测。

参考文献:

- [1] Sun Jiaopeng, Cai Hui, Hu Yazhong, et al. Cause of formation of collapse mechanism and prevention of underground engineering[J]. China Science and Technology, 2009, (23): 104. (in Chinese)
孙娇鹏, 柴伟, 胡忠亚, 等. 地下工程坍塌成因机理及防治[J]. 中国科技博览, 2009, (23): 104.
- [2] Klshin V I, Klshin S V. Mineral mining technology: Coal extraction from thick flat and steep beds[J]. Journal of Mining Science, 2010, 46(2): 149 - 159.
- [3] Guo Chenye, Xian Xuefu, Yao Weijing, et al. Relationship between the fracture zone and cave of coal or gas outburst caving in coal and rock seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(6): 802 - 807.
- [4] Bai Bing, Zhou Jian. The development and application of the ground penetrating testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, (4): 527 - 531. (in Chinese)
白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, (4): 527 - 531.
- [5] Tao Lianjin, Wei Guangyuan, Wei Honggu, et al. The detection application of geological radar on hollow and loose zone in mine collapse[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(7): 63 - 66. (in Chinese)
陶连金, 魏光远, 韦宏鸽, 等. 地质雷达在矿井塌方空洞及松动区检测中的应用[J]. 岩土工程界, 2008, 11(7): 63 - 66.
- [6] Wang Haiping, Chen Rong, Lin Bin, et al. Temperature compensation of FBG sensors with double fiber Bragg gratings[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(3): 218 - 220. (in Chinese)
王海平, 陈荣, 林斌, 等. 双光纤 Bragg 光栅用于 FBG 型传感器的温度补偿[J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 218 - 220.
- [7] Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun, et al. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors[J]. Acta Optical Sinica, 2009, 29(1): 208 - 211. (in Chinese)
李鸿强, 于晓刚, 苗长云, 等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 208 - 211.
- [8] Nunes L C S, Valente L C G, Lierena R W A, et al. Simultaneous measurement of temperature and press using single fiber Bragg grating and fixed filter demodulation technique[J]. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2004, 5622(2): 906 - 911.
- [9] Zhao Junrong, Yu Zhenhong, Fei Haifeng, et al. Theoretical analysis of fiber laser based all optics fiber Bragg raring sensor system[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 424 - 427.