

doi:10.3788/gzxb20174602.0206003

活塞式菱形结构光纤布喇格光栅渗压传感器

谢涛,孙恩钊,李川,赵振刚,李英娜,刘爱莲,张长胜

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院,昆明 650500)

摘 要:为了适应矿井、大坝对渗压监测的需要,提出一种活塞和菱形传压结构相结合的光纤布喇格光栅渗压传感器,活塞把测试压力传递到菱形传压结构,菱形传压结构拉动其上下对称连接的弹性钢片,导致粘贴在弹性钢片上的光纤布喇格光栅中心波长产生变化.利用有限元方法在 500 kPa 的测试环境中对顶角分别为 90° 、 110° 、 130° 、 150° 情况下菱形传压结构的应力特性进行分析,根据仿真参量研制了渗压传感器,并对该传感器进行了压力标定试验和温度补偿试验.实验结果表明:传感器对渗压的灵敏度为 2.04 nm/MPa,拟合度为 0.997,重复性为 0.9%,两个测压光栅温度灵敏度分别为 $0.023\ 33\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 、 $0.021\ 68\ \text{nm}/^\circ\text{C}$,温补光栅为 $0.009\ 916\ \text{nm}/^\circ\text{C}$.

关键词:光纤布喇格光栅;渗压传感器;菱形结构;活塞式;有限元分析

中图分类号:TP212

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0206003-7

FBG Seepage Pressure Sensor Based on Piston Diamond Structure

XIE Tao, SUN En-zhao, LI Chuan, ZHAO Zhen-gang, LI Ying-na,
LIU Ai-lian, ZHANG Chang-sheng

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: In order to adapt to the seepage pressure monitoring's need of the mine and the dam, a kind of fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on the combination of the piston and the diamond structure was proposed. The piston passes the test pressure to the diamond structure and the diamond structure pulls elastic steel sheet, leading the center wavelength of the fiber Bragg grating bonded on the elastic steel sheet to change. In the 500 kPa test environment, the stress characteristics of the diamond structure were analyzed by using the finite element method when the vertex angle was respectively 90° , 110° , 130° and 150° . According to the simulation parameters, the seepage pressure sensor was developed and pressure calibration test and temperature compensation test were carried out on the sensor. Experimental results show that, the sensitivity of the sensor to the seepage pressure is 2.04 nm/MPa, the fitting degree is 0.997 and the repeatability is 0.9%. The temperature sensitivity of pressure measuring grating is $0.023\ 33\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ and $0.021\ 68\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ respectively, and the temperature compensation grating is $0.009\ 916\ \text{nm}/^\circ\text{C}$.

Key words: Fiber Bragg grating; Seepage pressure sensor; Diamond structure; Piston; Finite element analysis

OCIS Codes: 060.2370; 060.3735; 060.3738

0 引言

矿井突水事故在死亡人数和发生次数上仅次于煤矿瓦斯事故,其造成的经济损失一直居各类煤矿灾害

基金项目:国家自然科学基金(Nos. KKG201503106, KKG201203004)资助

第一作者:谢涛(1974—),男,讲师,博士,主要研究方向为光纤传感技术、监测检测技术、通信工程等. Email:13577029689@163.com

收稿日期:2016-08-28;录用日期:2016-11-22

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

之首,承压水的压力是研究突水问题最重要的参量,对它的实时监测是预测突水事故的重要依据^[1-2].目前用于渗压测量的主要是电类压力传感器,但是由于电类传感器是有源器件,防水性能、长期稳定性能与抗腐蚀性能较差,在地下工程复杂环境下长期使用易损坏或发生零漂等现象,严重影响了监测信息的有效性、稳定性与置信度.光纤光栅传感器^[3-7]有抗电磁干扰、防水性能强、动态范围宽、灵敏度高、便于组网、可实现分布式测量等优点^[8-10],为实现矿井灾害监测与预测提供了可行的途径^[11].因此,研究适用于矿井渗压检测的光纤光栅渗压传感器具有重要的科研和现实意义^[12-14].刘小会等^[15]设计了一种基于光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的弹簧管式新型水压传感器,并将其运用到矿井渗压监测中,但灵敏度不高;王静等^[16]设计了一种基于拉杆结构的 FBG 渗压传感器,测量准确度高,但光纤光栅容易疲劳受损,测量范围不大;肖元强等^[17]设计了一种差动式 FBG 渗压、温度双参量传感器,但体积和重量过大.

本文提出了一种新型的 FBG 渗压传感器,通过活塞与菱形传压结构相结合把压力转化为拉力,加入温度补偿光栅,降低环境温度对渗压的影响,以实现渗压的高灵敏度检测.

1 传感器原理与分析

1.1 传感器结构与理论计算

如图 1 所示,FBG 渗压传感器由进压口、承压活塞、上支撑架、压力导杆、菱形传压结构、上弹性钢片、下弹性钢片、温补光纤布喇格光栅 FBG₃、下支撑架、测压光纤布喇格光栅 FBG₁ 与 FBG₂、导出光纤、引出孔组成.上下支撑架焊接在外壳上,上支撑架的中间连接承压活塞,承压活塞的底部连接压力导杆的一端,其另一端与菱形传压结构的上端相连,上下弹性钢片对称固定在菱形传压结构的上半部和下半部,温补光栅的一端与上支撑架相连,下支撑架与菱形传压结构的下端相连,分别把两根光纤光栅 FBG₁、FBG₂ 粘贴在上下弹性钢片上,光栅的导出光纤通过引出孔引出,菱形传压结构的四个顶点由活动铰链连接.承压活塞把压力仓中的渗压通过压力导杆传递给菱形传压结构,菱形传压结构拉动弹性钢片的两端,带动粘贴在弹性钢片上的 FBG 拉伸,将被测环境渗压的检测转化为对 FBG 波长的调制.

令传感器检测的环境渗压为 P ,活塞横截面积为 S ,活塞施加给传压杆的压力可表示为

$$F = P \cdot S \quad (1)$$

F 即为传压杆传递给菱形传压结构的力,菱形传压结构的受力方程可表示为

$$F_1 = \frac{F}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} F \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

式中, F_1 为作用到菱形传压结构左连接节点水平向左方向的力, α 为菱形传压结构的左上杆与垂直方向的夹角.

如图 2 所示,以菱形传压结构上连接节点 1 为支点的力矩,平衡方程可表示为

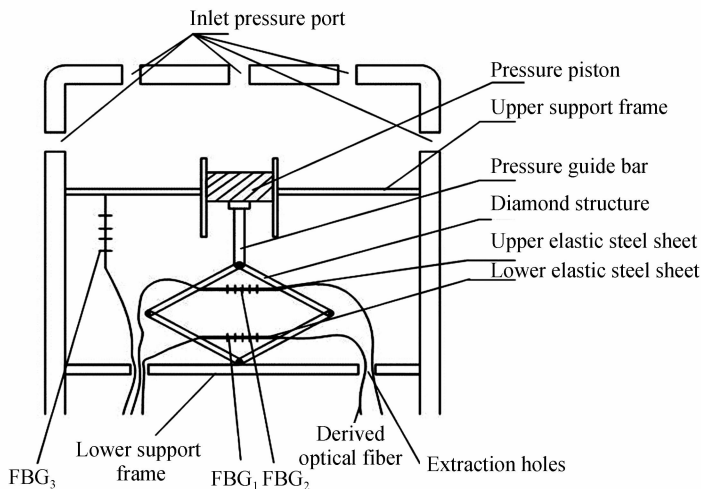


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure diagram

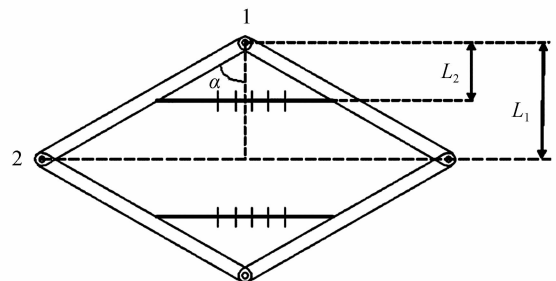


图 2 菱形传压结构示意图

Fig. 2 Diamond structure

$$F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2 \quad (3)$$

式中, F_2 为弹性钢片对菱形传压结构的反作用拉力, L_1 、 L_2 分别为 F_1 、 F_2 的力臂,把式(2)带入式(3)可得

$$F = \frac{2F_2 \cdot L_2}{\tan \alpha \cdot L_1} \quad (4)$$

将式(1)带入式(4)可得

$$F_2 = \frac{\tan \alpha \cdot L_1 \cdot S}{2 \cdot L_2} \cdot P \quad (5)$$

令弹性钢片的弹性模量为 E ,横截面积为 S_2 ,长度为 l ,变形量为 Δl ,则

$$E = \frac{F_2/S_2}{\Delta l/l} \quad (6)$$

将式(5)带入式(6)得

$$P = \frac{2 \cdot E \cdot L_2 \cdot S_2}{\tan \alpha \cdot L_1 \cdot S} \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (7)$$

弹性钢片的横向应变为

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7)得

$$P = \frac{2 \cdot E \cdot L_2 \cdot S_2}{\tan \alpha \cdot L_1 \cdot S} \cdot \Delta \epsilon \quad (9)$$

粘贴在弹性钢片上的 FBG 随弹性钢片拉伸,其反射峰值波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (10)$$

式中, λ_B 为 FBG 的中心波长, Λ 为光栅周期, n_{eff} 为光栅有效折射率. 温度和应变是直接引起布喇格波长移位的外界参量,分别对式(10)进行应变和温度求导,整理后可得布喇格中心波长变化量与温度变化量、应变变化量的关系为^[18]

$$\Delta \lambda_B = (S_\epsilon \cdot \Delta \epsilon + S_T \cdot \Delta T) \cdot \lambda_B \quad (11)$$

式中, S_ϵ 为应变敏感系数, S_T 为温度敏感系数, $\Delta \epsilon$ 为横向应变变化量, ΔT 为温度变化量, λ_B 为 FBG 的中心波长. 通过温补光栅确定 ΔT ,在式(11)中消除温度的影响,可得

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B \cdot S_\epsilon} \quad (12)$$

将式(12)带入式(9)得

$$P = \frac{2E \cdot L_2 \cdot S_2}{\tan \alpha \cdot L_1 \cdot S \cdot S_\epsilon \cdot \lambda_B} \cdot \Delta \lambda_B \quad (13)$$

为了使测量更准确,用 FBG_1 和 FBG_2 消除温度影响后的波长变化量 $\Delta \lambda_{B1}$ 、 $\Delta \lambda_{B2}$ 的平均值带替代 $\Delta \lambda_B$,可得

$$\Delta \lambda_B = (\Delta \lambda_{B1} + \Delta \lambda_{B2})/2 \quad (14)$$

式(13)、(14)表明了被测环境的渗压与 FBG 波长移位之间的数学模型,通过测量 FBG 波长移位就可以计算出被测环境的渗压.

1.2 有限元分析

运用有限元法对所设计的传感器进行仿真,设定弹性钢片的厚度为 1 mm,宽度为 2 mm,对称地连接到菱形传压结构上下两半的中部,菱形传压结构的顶部角度分别取 90° 、 110° 、 130° 、 150° ,活塞横截面积 S 为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. 图 3 为菱形传压结构在不同顶部角度,环境压强为 500 kPa 时,应力的分布情况.

从图 3 可以看出,应力主要集中在上下弹性钢片上,且分布均匀. 当顶部角度为 90° 时,上下弹性钢片的应力分布在中心附近为 49.5 到 50.5 MPa 之间,菱形传压结构的其它部位应力分布不大于 18 MPa,通过理论公式求出的弹性钢片应力为 50 MPa;当顶部角度为 110° 时,上下弹性钢片的应力分布在中心附近为 70.3 到 72.5 MPa 之间,菱形传压结构的其它部位应力分布不大于 30 MPa,通过理论公式求出的弹性钢片应力为 71.4 MPa;当顶部角度为 130° 时,上下弹性钢片的应力分布在中心附近为 104 到 108 MPa 之间,菱形传压结构的其它部位应力分布不大于 35 MPa,通过理论公式求出的弹性钢片应力为 107.2 MPa;当顶部角度

为 150° 时,上下弹性钢片的应力分布在中心附近为 180 到 190 MPa 之间,菱形传压结构的其它部位应力分布不大于 65 MPa,通过理论公式求出的弹性钢片应力为 186.6 MPa.

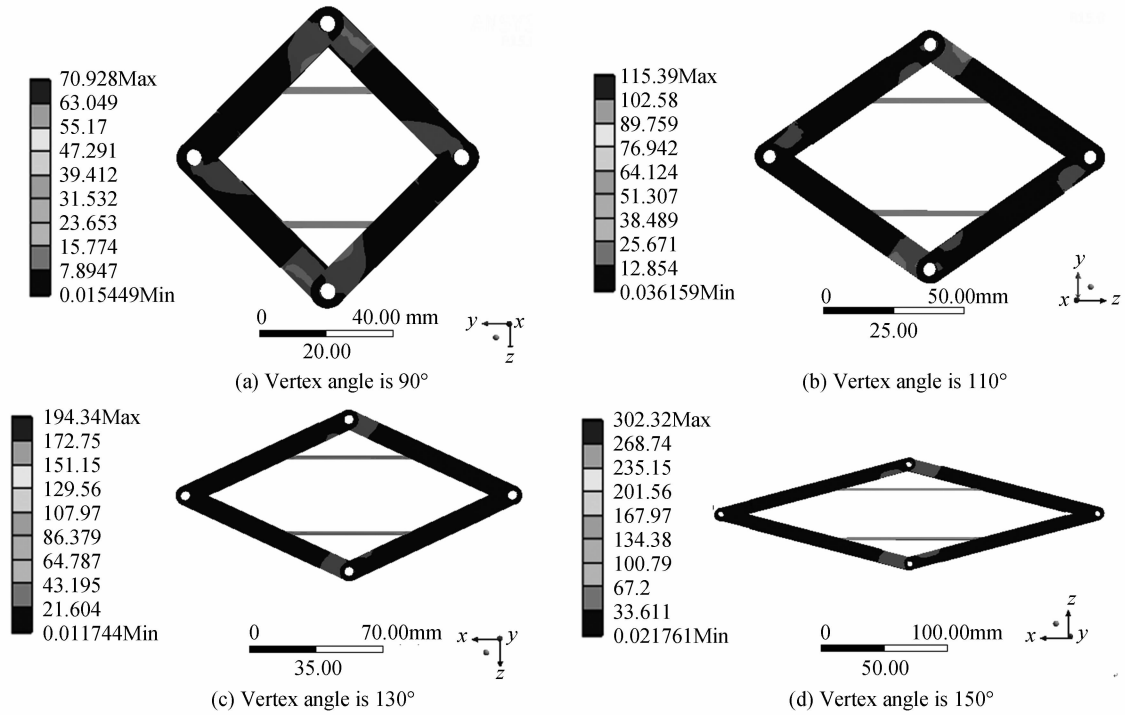


图3 500 kPa 条件下菱形传压结构应力云图

Fig. 3 Stress cloud image of diamond structure in 500 kPa

由以上分析可知,菱形传压结构可以有效地把加到其顶部的压力转化为对弹性钢片的拉力,应力主要集中在弹性钢片上,仿真值非常接近理论值,且结构性能稳定.

2 实验及结果分析

根据仿真数据,选择菱形传压结构的顶角为 150° ,加工了FBG渗压传感器,如图4. 通过压力加载装置和恒温箱,研究压力与温度对光栅中心波长的影响,并分析其渗压敏感特性与温度敏感特性,通过重复加载试验来研究传感器重复使用中的稳定性.



图4 传感器结构照片

Fig. 4 Photo of the sensor structure

2.1 传感器渗压敏感特性

在保持室温不变的情况下,对传感器进行渗压标定实验. 实验测试系统由压力加载装置、FBG 渗压传感

器与光纤解码仪组成.每 50 kPa 为一步,通过压力加载装置逐步向传感器增大测试压强,最大压强为 500 kPa,实验得到传感器压力光栅 FBG₁、FBG₂ 中心波长随压力变化曲线,如图 5.对实验数据进行拟合,得到 FBG₁ 与 FBG₂ 中心波长 λ_B 与压强 P 的关系分别为 $\lambda_B=0.00202 \cdot P+1542$ 和 $\lambda_B=0.00206 \cdot P+1545$,拟合度 R^2 分别为 0.9986 和 0.9988.为了使测量结果更稳定,用 FBG₁ 和 FBG₂ 波长变化的平均值 $\Delta\lambda_B$ 与测试压强 P 进行数据拟合,得到二者的关系为 $\Delta\lambda_B=0.002039 \cdot P+0.00485$,如图 6.

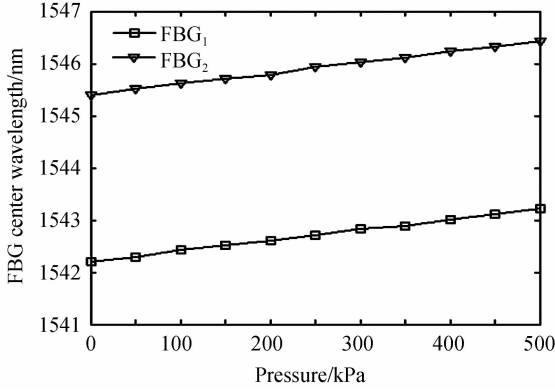


图 5 传感器中心波长随压力变化曲线

Fig. 5 The curves of sensor center wavelength with pressure

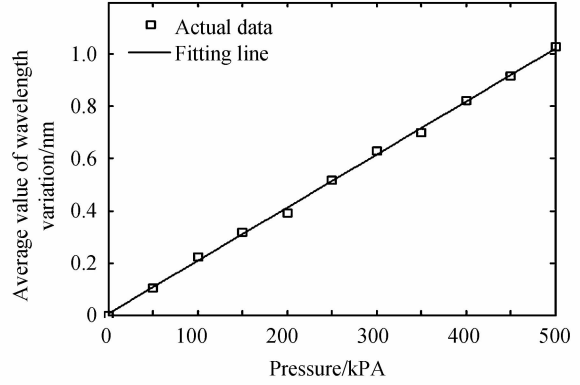


图 6 传感器中心波长变化平均值随压力变化曲线

Fig. 6 The curves of average value of sensor center wavelength variation with pressure

当测试压强为 500 kPa 时,FBG₁ 的波长变化量为 1.01 nm,FBG₂ 的波长变化量为 1.03 nm,平均波长变化量为 1.0244 nm;理论值为 1.122 3 nm 和 1.124 7 nm;仿真值为 1.125 6 nm 和 1.126 1 nm.比较实验值、理论值及仿真值可知,实验值要稍微小于理论值与仿真值,这主要是由于菱形传压结构的四个活动铰链连接处有摩擦所致.

2.2 传感器温度敏感特性

传感器中 FBG₁、FBG₂ 是测量压强变化的压力光栅,由于 FBG 有温度和应变交叉敏感的特性,并且 FBG₁ 和 FBG₂ 同时受到其宿主弹性钢片的应力作用和热膨胀的影响,所以为了能够对传感器的压力测量值进行有效的温度补偿,有必要对传感器进行温度标定.

将传感器放入恒温箱中,逐渐加温,温度范围为 10~45℃,得到传感器中心波长随温度变化曲线,如图 7.对实验数据进行拟合,得到传感器的中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 与温度 T 的关系,FBG₁ 为 $\Delta\lambda_B=0.02333 \cdot T-0.002984$,FBG₂ 为 $\Delta\lambda_B=0.02168 \cdot T+0.006924$,FBG₃ 为 $\Delta\lambda_B=0.009916 \cdot T+0.001252$,拟合度 R^2 分别为 0.998 1、0.998 2、0.994 5,其关系曲线如图 8. FBG₁ 和 FBG₂ 粘贴到弹性钢片上,在加温过程中,除了自身的温度特性以外还要受到其宿主弹性钢片热膨胀的影响,所以其温度灵敏度系数要明显大于 FBG₃ 的温度灵敏度系数.

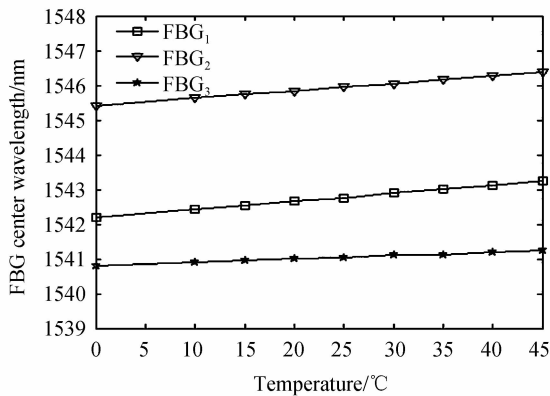


图 7 传感器中心波长随温度变化曲线

Fig. 7 The curves of sensor center wavelength with temperature

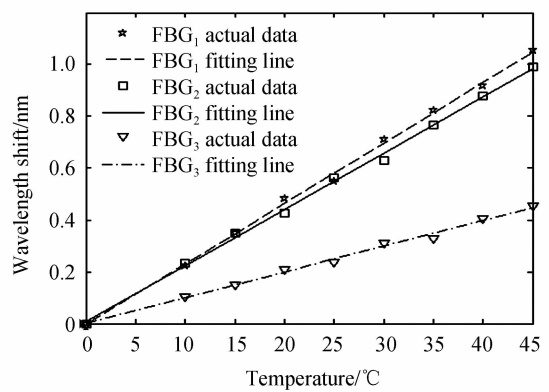


图 8 传感器中心波长变化值随温度变化曲线

Fig. 8 The curves of sensor center wavelength shift with temperature

通过实验分析可知,测压光栅 FBG_1 、 FBG_2 温度灵敏度为 $0.02333 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 $0.02168 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,温补光栅 FBG_3 温度灵敏度为 $0.009916 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. 实际渗压监测中,温补光栅不受渗压变化影响,当环境温度变化时,温补光栅的布喇格中心波长将发生改变,测量出温补光栅布喇格中心波长变化量,根据温补光栅的温度灵敏度系数求出环境温度的变化量. 测压光栅与温补光栅处于同一温度场中,测压光栅可根据环境温度的变化量以及其温度灵敏度系数计算出监测过程中温度变化造成的布喇格中心波长变化量,然后再用 FBG_1 、 FBG_2 的测量波长变化量分别减去各自的温度波长变化量,最后得到的波长变化量就是渗压引起的布喇格中心波长变化量.

2.3 传感器的重复性能分析

为了分析重复加载对传感器测试结果的影响,在相同条件下对传感器进行了多次压力灵敏度标定,用 FBG_1 和 FBG_2 波长变化的平均值 $\Delta\lambda_B$ 与测试压强 P 进行数据拟合,其关系曲线如图 9. 图 9 所示的三次测试中心波长变化量与压强的关系分别为 $\Delta\lambda_B=0.002039 \cdot P+0.00485$ 、 $\Delta\lambda_B=0.002042 \cdot P+0.0043$ 和 $\Delta\lambda_B=0.002035 \cdot P+0.0065$,拟合度 R^2 为 0.998 、 0.999 和 0.999 ,计算其重复性为 0.9% .

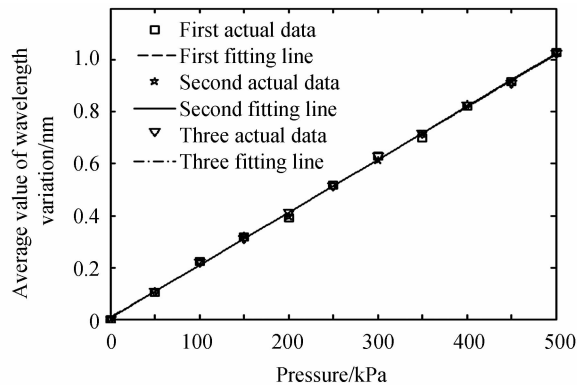


图 9 传感器重复性能测试曲线

Fig. 9 Repeat performance curve of the sensor

3 结论

设计了一种活塞式菱形结构 FBG 渗压传感器,根据设计模型对传感器做了有限元分析,在 500 kPa 的测试环境中对顶角分别为 90° 、 110° 、 130° 、 150° 情况下菱形传压结构的应力特性进行分析. 仿真结果表明,菱形传压结构可以有效地把加到其顶部的压力转化为对弹性钢片的拉力,应力主要集中在弹性钢片上,仿真值非常接近理论值,结构性能稳定. 根据仿真参量研制了渗压传感器,并通过压力加载装置、与恒温箱对传感器做了渗压标定实验、温度标定实验、重复性实验. 实验结果表明:传感器对渗压的灵敏度为 $2.04 \text{ nm}/\text{MPa}$ 、拟合度 R^2 为 0.997 、重复性为 0.9% ,测压光栅温度灵敏度为 $0.02333 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 $0.02168 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,温补光栅 $0.009916 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. 结合传感器调整菱形传压结构顶角以及弹性钢片横截面积就可以改变传感器灵敏度,以适应不同监测需求. 本文设计的传感器可用于本质安全要求极高的矿井、隧道渗压监测.

参考文献

- [1] FENG Xian-da, LI Shu-chen, LI Shu-cai, *et al.* The development of fiber optic Bragg grating sensors and their applications to the mine water-inrush model test[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, **35**(2): 283-287.
冯现大,李树忱,李术才,等. 矿井突水模型试验中光纤传感器的研制及其应用[J]. *煤炭学报*, 2010, **35**(2):283-287.
- [2] WANG Chang-shen, SUN Ya-jun, HANG Yuan. Application of fault tree analysis to risk assessment of potential water-inrush hazards in coal mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(2): 298-305.
王长申,孙亚军,杭远. 基于事故树分析的煤矿潜在突水危险评价研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(2): 298-305.
- [3] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1263-1276.
- [4] JIANG Dend-sheng, HE Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2002, **13**(4): 420-430.
姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况 [J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4):420-430.
- [5] XIA Yuan-you, RUI Rui, LIANG Lei, *et al.* An attempt of embedding fiber optic Bragg grating sensors in freeway

- foundation to detect the pore-water pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(2): 162-166.
夏元友,芮瑞,梁磊,等. 光纤渗压传感器与公路软基监控试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2):162-166.
- [6] WU Ru-jun, FU Kun-kun, ZHENG Bai-lin, *et al.* Error modification of FBG strain sensors bonded on plates[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(4): 747-755.
吴入军,付昆昆,郑百林,等. 粘贴于薄板表面的光纤布喇格光栅应变传感器误差修正[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(4): 747-755.
- [7] XU Jian, YANG De-xing, JIANG Ya-jun, *et al.* Measurement of strain coefficient of unequal cross-section FBG sensor based on double optical levers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(2): 245-250.
徐健,杨德兴,姜亚军,等. 利用双光杠杆测量非等截面光纤布喇格光栅传感器的应变系数[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(2): 245-250.
- [8] WU Yong-hong, YAN Qi-xiang, DING Rui, *et al.* Investigation on reflective fiber-optic seepage pressure sensors[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2003, **35**(3): 26-29.
吴永红,晏启祥,丁睿,等. 反射式光纤水工渗压传感器的研究与实验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, **35**(3):26-29.
- [9] WANG Jing, LIU Bin, SUI Qing-mei, *et al.* Application of a novel fiber-optic grating seepage pressure sensor in tunnel water gushing model[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*. 2009, **20**(10): 1286-1289.
王静,刘斌,隋青美,等. 新型 FBG 渗压传感器在隧道涌水模型中的应用 [J]. 光电子·激光, 2009, **20**(10):1286-1289.
- [10] JIANG Dong-qing, LIANG Lei, XIN Si-jin. Research on FBG seepage-pressure sensing technology[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, **28**(12): 117-119.
蒋冬青,梁磊,信思金. 光纤布喇格光栅渗压传感技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(12):117-119.
- [11] HONG Cheng-yu, ZHANG Yi-fan, ZHANG Meng-xi. *et al.* Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, **244**(15): 184-197.
- [12] ZHU Hong-hu, SHI Bin, YAN Jun-fan, *et al.* Investigation of the evolutionary process of a reinforced model slope using a fiber-optic monitoring network[J]. *Engineering Geology*, 2015, **186**(24): 34-43
- [13] SCHENATO L, ANEESH R. Fiber optic sensor for hydrostatic pressure and temperature measurement in riverbanks monitoring[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **82**: 57-62.
- [14] LI Hong-cai, LIU Churr-tong, FENG Yong-bao, *et al.* Application of FBG bending sensors in landslide forecasting and monitoring[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2015, **26**(2): 309-314.
李洪,刘春桐,冯永保,等. FBG 弯曲传感在滑坡预警监测中的应用研究[J]. 光电子·激光, 2015, **26**(2):309-314.
- [15] LIU Xiao-hui, WANG Chang, LIU Tong-yu, *et al.* Fiber grating water pressure sensor and system for mine[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 112-115.
刘小会,王昌,刘统玉,等. 矿井下用光纤光栅水压传感器及系统[J]. 光子学报, 2009, **38**(1):112-115.
- [16] WANG Jing, FENG De-jun, SUI Qing-mei, *et al.* Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686-691.
王静,冯德军,隋青美,等. 基于拉杆结构的光纤布喇格光栅渗压传感器研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(3):686-691.
- [17] XIAO Yuan-qiang, LI De-li, LI Chuan, *et al.* Differential FBG sensor for simultaneous dual-measurement of pressure and temperature [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, **34**(10): 2251-2256.
肖元强,李得利,李川,等. 一种差动式光纤 Bragg 光栅渗压、温度双参量传感器[J]. 仪器仪表学报, 2013, **34**(10): 2251-2256.
- [18] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277-1294.