

文章编号: 1671-251X(2023)12-0012-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023050093

# 一种改进型光纤压力传感器设计

杨永亮<sup>1</sup>, 张羽<sup>2</sup>, 李雪佳<sup>1</sup>, 于振<sup>2</sup>, 关丙火<sup>1</sup>, 吴则功<sup>3</sup>

(1. 中国神华能源股份有限公司 神东煤炭分公司, 陕西 榆林 719315;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015;

3. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250104)

**摘要:** 针对现有光纤压力传感器压力监测范围小、灵敏度低、成本高的问题, 设计了一种改进型光纤压力传感器。在悬臂梁粘贴一支应变光纤光栅, 悬空一支温度光纤光栅(使其不受应力)。悬臂梁下方的限位罩将弹簧、波纹管压罩、波纹管罩于其内部, 限位罩内侧上平面与弹簧上平面接触, 弹簧下平面与波纹管压罩接触。当外界压力通过波纹管底部的管道到达波纹管时, 高压使其产生轴向的形变, 进而压缩弹簧, 最终弹簧发生形变, 将力传至悬臂梁, 改变应变光纤光栅的受力情况。在单层波纹管增加了劲度系数更大的弹簧, 以限制外界产生压力时单层波纹管发生形变, 使波纹管与弹簧共同传递压力到悬臂梁。实验结果表明: 改进后传感器的压力监测量程为 0~5 MPa, 相比改进前提升 5 倍, 传感器的灵敏度为 0.379 98 nm/MPa, 测量误差在 0.02 MPa 之内。将改进后的压力传感器应用于某井下输水管道进行验证, 结果表明: 与高精度电子压力计测量结果相比, 该传感器的压力解调误差在 0.02 MPa 之内。

**关键词:** 光纤压力传感器; 应变光纤光栅; 温度光纤光栅; 单层波纹管; 悬梁臂; 限位罩; 弹簧

中图分类号: TD326.2

文献标志码: A

## Design of an improved fiber optic pressure sensor

YANG Yongliang<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, LI Xuejia<sup>1</sup>, YU Zhen<sup>2</sup>, GUAN Binghuo<sup>1</sup>, WU Zegong<sup>3</sup>

(1. Shendong Coal Branch, China Shenhua Energy Company Limited, Yulin 719315, China;

2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China;

3. Laser Institute, Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250104, China)

**Abstract:** In response to the problems of small pressure monitoring range, low sensitivity, and high cost of existing fiber optic pressure sensors, an improved fiber optic pressure sensor is designed. A strain fiber optic grating is stuck on the cantilever beam and a temperature fiber optic grating is suspended (to make it stress free). The limit cover below the cantilever beam places the spring, corrugated pipe pressure cover, and corrugated pipe cover inside it. The inner upper plane of the limit cover contacts the upper plane of the spring, and the lower plane of the spring contacts the corrugated pipe pressure cover. When external pressure reaches the corrugated pipe through the pipeline at the bottom of the corrugated pipe, the high pressure causes it to undergo axial deformation. The deformation in turn compresses the spring. Finally, the spring undergoes deformation and transmits force to the cantilever beam, changing the stress situation of the strain grating. A spring with a larger stiffness coefficient is added to the single-layer corrugated pipe to limit its deformation when external pressure is generated, allowing the corrugated pipe and spring to jointly transmit pressure to the cantilever beam. The experimental test results

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-12-03; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(GJNY-21-26-03)。

作者简介: 杨永亮(1982—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 硕士, 现主要从事煤矿采掘安全技术研究工作, E-mail: yangyongliang\_01@163.com。

引用格式: 杨永亮, 张羽, 李雪佳, 等. 一种改进型光纤压力传感器设计[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 12-17.

YANG Yongliang, ZHANG Yu, LI Xuejia, et al. Design of an improved fiber optic pressure sensor[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 12-17.



扫码移动阅读

show that the improved sensor has a pressure monitoring range of 0-5 MPa, which is 5 times higher than before. The sensitivity of the sensor is 0.379 98 nm/MPa, and the measurement error is within 0.02 MPa. The improved pressure sensor is validated in a water pipeline underground. The results show that compared with the measurement results of high-precision electronic pressure gauges, the pressure demodulation error of the sensor is within 0.02 MPa.

**Key words:** fiber optic pressure sensor; strain fiber optic grating; temperature fiber optic grating; single layer corrugated pipe; cantilever beam; limit cover; spring

## 0 引言

煤矿生产作业过程中可能会存在高温、高压等,不合理的压力变化可能导致爆炸、火灾等严重事故<sup>[1-2]</sup>。通过对压力进行实时监测,能够提前发现异常情况,提供及时的预警,有助于预防事故,减少风险。近几年我国能源、化工领域压力监测事故频发,造成较大人员伤亡及财产损失<sup>[3-6]</sup>。严峻的形势对压力传感器提出了高精度、大量程的要求。

常见的压力传感器包括压阻式传感器<sup>[7]</sup>、石英式传感器<sup>[8]</sup>和压电式传感器<sup>[9]</sup>等。压阻式传感器是通过测量电阻变化来检测压力变化。然而,煤矿环境中温度、湿度变化较大,压阻式传感器的测量精度易受到影响。石英式传感器采用石英膜作为敏感元件,具有较高的耐腐蚀性和耐磨性。然而,在石英式传感器中,传感部分与被测介质直接接触,易受到介质中固体颗粒或腐蚀性介质的损坏。压电式传感器通过压电效应将压力转换为电信号,具有较高的灵敏度和较宽的测量范围。然而,压电式传感器对温度和湿度的变化比较敏感,导致测量结果不稳定。传统的压力传感器无法满足监测环境的特殊要求。

近几年,许多学者对光纤压力传感器进行了研究。梁敏富等<sup>[10]</sup>基于光纤光栅传感原理及弹性膜片结构,设计了一种新型的温度补偿压力传感器。测试结果表明该传感器具有良好的线性度,但该传感器的灵敏度较低,仅为 37.62 pm/MPa。梁磊等<sup>[11]</sup>设计了一种使用膜片和 L 型悬臂梁作为压力转换单元的光纤布拉格光栅压力传感器,该传感器的压力灵敏度为 1 185.621 pm/MPa,但压力监测范围仅为 0~2 MPa,在使用上具有一定局限性。Chen Ningning 等<sup>[12]</sup>设计了一种倾角和压力融合的传感器,基于采场支护与围岩耦合模型,将支护倾角和压力确定为支护姿态传感的研究对象。光纤光栅压力传感器的压力监测范围为 0~30 MPa,但压力灵敏度仅为 35.6 pm/MPa。杨耀忠等<sup>[13]</sup>基于波纹管的压力传感特性及悬臂梁的杠杆放大结构,设计了一种高灵敏度的光纤布拉格光栅压力传感器。该传感器在

0.1 MPa 的压力监测范围内有较高的灵敏度,导致其使用范围较窄。赵林等<sup>[14]</sup>采用波纹管、悬臂梁相结合的结构,设计了一种光纤光栅压力传感器,解决了温度对压力测量的交叉敏感问题,最后通过试验验证了传感器的线性度。但该传感器为了增强波纹管的强度,采用了成本较高的双层波纹管,当外界压力过大时双层波纹管易导致传感器线性度下降甚至损坏,且该传感器的压力监测范围仅为 0~1 MPa。

针对现有光纤压力传感器压力监测范围小、灵敏度低、成本高的问题,本文在光纤压力传感器中增添了限位罩、弹簧,通过改变温度补偿方式简化制作工艺。使用成本更低、制作更简单的单层波纹管,设计了以悬臂梁、波纹管和弹簧为主要弹性元件的光纤压力传感器。

## 1 光纤压力传感器设计

### 1.1 光纤光栅传感原理

根据光纤光栅的反射原理可知,当宽带光源入射光纤光栅时,光纤光栅会把满足条件的波长反射,反射波的中心波长与光纤光栅的有效折射率及周期相关<sup>[15]</sup>。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中:  $\lambda_B$  为光纤光栅反射波的中心波长;  $n_{\text{eff}}$  为光纤光栅的有效折射率;  $\Lambda$  为光纤光栅的周期。

光纤光栅反射中心波长受外界温度、应变的影响。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k_\varepsilon\Delta\varepsilon + k_T\Delta T \quad (2)$$

式中:  $\Delta\lambda_B$  为中心波长的改变量;  $k_\varepsilon$  和  $k_T$  分别为光纤光栅的应变系数及温度系数;  $\Delta\varepsilon$  和  $\Delta T$  分别为应变、温度的改变量。

### 1.2 光纤压力传感器内部结构

光纤压力传感器内部包括粉末冶金、温度光纤光栅、应变光纤光栅、悬臂梁、限位罩、波纹管压罩、波纹管和弹簧,如图 1 所示。在上方的悬臂梁粘贴一支应变光纤光栅,悬空一支温度光纤光栅(使其不受应力)。悬臂梁下方的限位罩将弹簧、波纹管压罩、波纹管罩于其内部,限位罩内侧上平面与弹簧上

平面接触,弹簧下平面与波纹管压罩接触。当外界压力通过波纹管底部的管道到达波纹管时,高压使其产生轴向形变,进而压缩弹簧,最终弹簧发生形变并将力传至悬臂梁,改变应变光纤光栅的受力情况。

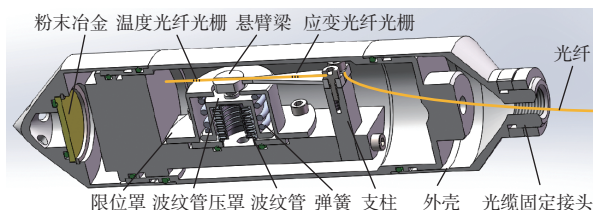


图 1 光纤压力传感器内部结构

Fig. 1 Internal structure of the optical fiber pressure sensor

### 1.3 温度补偿方法

原始光纤压力传感器双面粘接光栅的方式要求正反两面光栅的位置必须一致<sup>[16-18]</sup>,这对光栅的粘接工艺提出了较高的要求。因此,本研究对温度补偿方式进行了改进,通过悬空一支温度光纤光栅,保证温度光纤光栅不受应力<sup>[19-21]</sup>,只需在悬臂梁的一侧粘接应变光纤光栅,操作简单且易于量产,温度补偿后的实际压力改变量为

$$\Delta x = \left[ \lambda_1 - \lambda_0 - \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{k_2} k_3 \right] k_1 \quad (3)$$

式中:  $\lambda_1$  为悬臂梁粘接的应变光纤光栅改变后的波长;  $\lambda_0$  为悬臂梁粘接的应变光纤光栅原始波长;  $\lambda_3$  为悬空的温度光纤光栅改变后的波长;  $\lambda_2$  为悬空的温度光纤光栅原始波长;  $k_2$  为温度光纤光栅的温度系数;  $k_3$  为应变光纤光栅的温度系数;  $k_1$  为应变光纤光栅通过波长和压力变化拟合出的系数。

### 1.4 光纤压力传感器的线性分析

采用悬臂梁作为光纤光栅传感器的直接受力元件,悬臂梁自由端的抬升高度  $t_e$  与悬臂梁产生的应变  $\varepsilon$  具有线性关系。

$$\varepsilon = K_e t_e \quad (4)$$

式中  $K_e$  为悬臂梁的应变系数。

波纹管是一种管状的弹性材料,其受到内部压力时会改变自身轴向的长度,针对波纹管的这一特性,将其作为敏感材料,根据波纹管的自身机械原理,可得

$$z = A_F \frac{mF(1-\mu^2)R_0^2}{Eh^3} \quad (5)$$

式中:  $z$  为波纹管的轴向位移;  $A_F$  为修正系数;  $m$  为波纹管的波数;  $F$  为外界压力;  $\mu$  为材料的泊松比;  $R_0$  为波纹管的原始半径;  $E$  为材料的弹性模量;  $h$  为波纹管的高度。

当波纹管确定后,波纹管的轴向位移  $z$  只与外界压力  $F$  有关。

原始光纤压力传感器使用双层波纹管,其成本较高,且压力大时易出现线性度下降甚至损坏等问题,因此,本研究在单层波纹管中增加了劲度系数更大的弹簧,以限制外界产生压力时单层波纹管发生形变,使波纹管与弹簧共同传递压力到悬臂梁。

由于增加了弹簧作为辅助弹性材料,将波纹管、弹簧作为整体来分析,可得

$$F = K_1 t_e \quad (6)$$

式中  $K_1$  为弹簧、波纹管结合后的劲度系数。

结合式(4)及式(6)可得

$$\varepsilon = \frac{K_e}{K_1} F \quad (7)$$

由于波纹管和弹簧相结合增大了  $K_1$ ,在同样外界压力  $F$  下更不易产生应变  $\varepsilon$ ,同时,可看出应变与外界压力之间存在线性关系。通过调整  $K_1$  或  $K_e$  改变传感器的灵敏度,进而改变量程,如果悬臂梁参数不变,就可只通过改变弹簧的劲度系数来影响量程。

## 2 实验验证

### 2.1 温度标定实验

对传感器内部光纤光栅的温度系数进行标定,得到相关的温度参数作为温度补偿。使用 YGSJ-12C 解调仪可实现 1 528~1 568 nm 大范围波长解调,其解调精度为  $\pm 1$  pm。利用解调仪对高低温箱内的传感器实时解调,高低温箱型号为 T260-50。温度标定实验装置如图 2 所示。

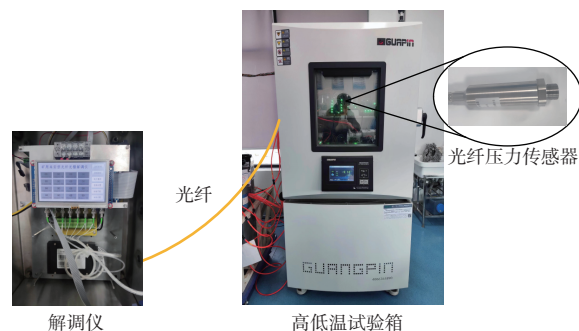


图 2 温度实验

Fig. 2 Temperature experiment

设定高低温箱的温度为  $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,待高低温箱内温度稳定后对解调仪读数。为确保温度系数准确,开展 10 次实验,得到双光栅的温度系数。单次实验数据如图 3 所示,可看出应变光纤光栅的温度系数为  $0.022\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ,温度光纤光栅的温度系数为  $0.013\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。



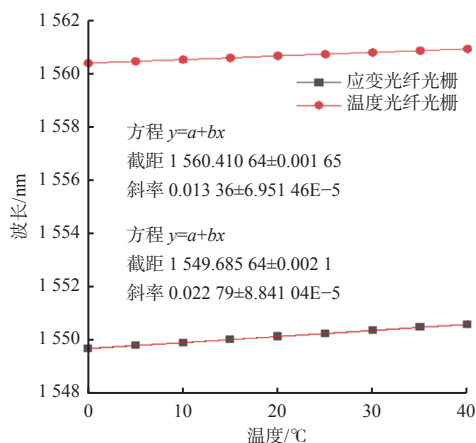


图3 温度测试结果

Fig. 3 Result of temperature test

## 2.2 压力测试与数据分析

为测量改进后传感器应变光纤光栅的应变参数,对比改进前后压力监测量程变化,搭建了压力测试装置,如图4所示。其中压力测试仪实验装置为活塞压力计,待电子压力计示数稳定后可读取标准的压力值。

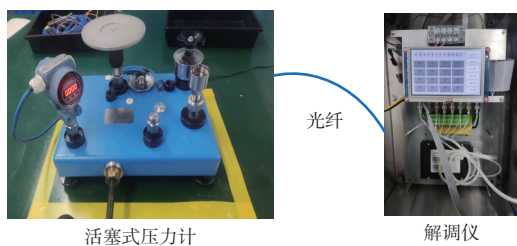


图4 压力测试装置

Fig. 4 Pressure test device

改进前光纤压力传感器的单次实验数据如图5所示。改进前的传感器采用双光纤光栅(正、反两面粘结的光纤光栅)波长差分的方式来补偿温度,消除温度对压力监测的干扰,所以图5中的纵坐标显示的是双光纤光栅的波长差。因为改进前的压力传感器量程太小,仅为0~1 MPa,在大于1 MPa的压力下可能会出现损坏,所以只给出了1 MPa内的测试数据。

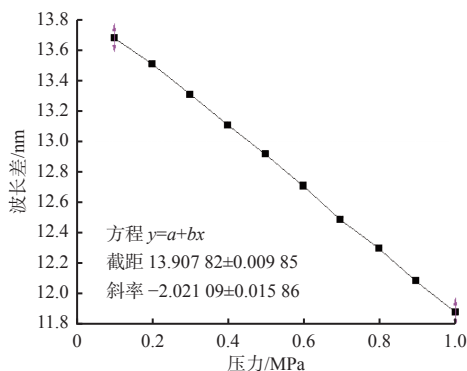


图5 改进前传感器波长与压力曲线

Fig. 5 Sensor wavelength and pressure curve before improvement

准备一支高精度温度计来读取当前温度,确保应变波长的读数是在同一温度下,营造恒温的环境。对改进后的光纤压力传感器开展10次实验,单次的实验结果如图6所示,依靠活塞压力计提供的0~5 MPa的压力,记录应变光纤光栅的波长随压力变化的数据,拟合出应变光纤光栅的应变系数。可看出传感器的应变光纤光栅的应变系数(灵敏度)为0.379 98 nm/MPa,10次实验的系数偏差不超过0.02 nm/MPa。在0~5 MPa的压力下,传感器产生了约1.9 nm的波长改变。

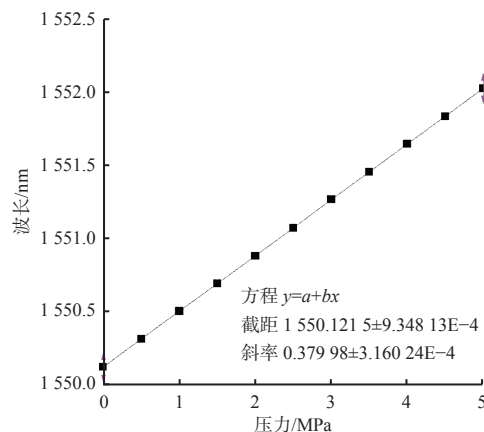


图6 改进后传感器波长与压力曲线

Fig. 6 Sensor wavelength and pressure curve after improvement

对比图5、图6可看出,通过一系列改进措施,光纤压力传感器的压力监测量程从1 MPa提升到5 MPa,提升了5倍。

在温度标定、压力测试得到具体的温度参数、应变参数之后,再利用温度补偿公式计算解调压力值,并与活塞压力计上安装电子压力计显示的标准压力值进行对比,实际验证传感器的解调精度。本次实验数据见表1,可看出传感器在0~5 MPa的外界压力下测量误差(标准压力值减去解调压力值)均在0.02 MPa之内。

## 3 现场应用

在我国西部很多矿区,由于环保的因素,成分复杂的矿井水并不能直接排放到矿区外,会存储在煤矿的水仓,且水仓处于安全隐患较大的煤矿采空区,因此水仓的水位监测显得尤其重要。为验证传感器在实际管道监测中的可靠性,本研究将改进后的光纤压力传感器在我国西部某煤矿井下的输水管道中进行了验证。传感器实物如图7所示、传感器水压监测施工如图8所示。

首先,采用高精度本安电子压力计和光纤压力传感器共同监测。运行1周,通过专业人员每天巡视5次,将电子压力计的示数和光纤压力传感器的

表 1 实验数据  
Table 1 The experimental data

压力/MPa	应变波长/nm	温度/℃	解调值/MPa	误差/MPa
0	1 550.121	1 560.675	0	0
0.5	1 550.317	1 560.675	0.516	-0.016
1	1 550.504	1 560.675	1.008	-0.008
1.5	1 550.687	1 560.675	1.490	0.010
2	1 550.886	1 560.675	2.013	-0.013
2.5	1 551.069	1 560.675	2.495	0.005
3	1 551.264	1 560.676	3.004	-0.004
3.5	1 551.449	1 560.676	3.491	0.009
4	1 551.642	1 560.676	3.999	0.001
4.5	1 551.831	1 560.676	4.496	0.004
5	1 552.027	1 560.676	5.012	-0.012



图 7 传感器实物

Fig. 7 Sensor object



图 8 传感器水压监测施工

Fig. 8 Sensor water pressure monitoring and construction

解调压力数值进行对比,发现误差在 0.02 MPa 之内。其次,使用光纤压力计对 3 个月后的水压进行监测。整理光纤压力传感器在 3 个月内的运行数据(统计了约 275 次),如图 9 所示。通过高精度本安电子压力计测出水深基本稳定处于 160 m(1.6 MPa)的压力范围下。最后,通过解调结果可看出压力解调精度为 $\pm 2$  m(0.02 MPa)之内。

#### 4 结论

1) 基于光纤光栅传感元件及悬臂梁、波纹管、弹簧等弹性元件提出了新型的光纤压力传感器。通

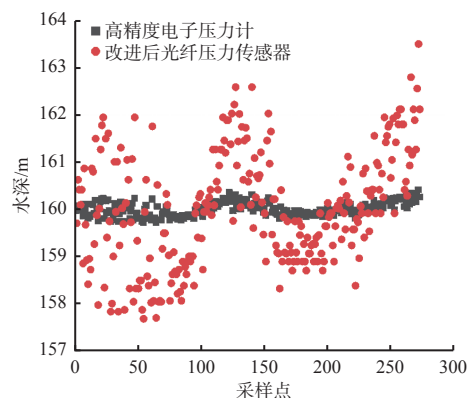


图 9 光纤压力传感器运行采样点

Fig. 9 Fiber optic pressure sensors run sampling points

过悬空一支温度光纤光栅,以保证温度光纤光栅不受应力,只需在悬臂梁的一侧粘接应变光纤光栅,操作简单且易于量产,在单层波纹管中增加了劲度系数更大的弹簧,以限制外界产生压力时单层波纹管发生形变,使波纹管与弹簧共同传递压力到悬臂梁,改进制作工艺的同时降低了光纤压力传感器生产成本。

2) 在 0~5 MPa 的监测量程下传感器的测量误差在 0.02 MPa 之内,灵敏度为 0.379 98 nm/MPa。

3) 开展了为期 3 个月的现场应用,使用该传感器监测矿区水压,压力解调精度为 $\pm 2$  m(0.02 MPa)之内,证明了其具有较高的可靠性。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵林,王纪强,侯墨语. 煤矿管道泄漏监测系统设  
计[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 12-15.  
ZHAO Lin, WANG Jiqiang, HOU Moyu. Design of  
pipeline leakage monitoring system for coal mine[J].  
Industry and Mine Automation, 2016, 42(10): 12-15.
- [2] KLAR A, NISSIM O, ELKAYAM I. A hardening load  
transfer function for rock bolts and its calibration using  
distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Rock  
Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023,  
15(11): 2816-2830.
- [3] 柴敬,刘泓瑞,张丁丁,等. 覆岩载荷扰动下平硐围岩  
变形分析及支护优化[J]. 工矿自动化, 2023, 49(3):  
13-22.  
CHAI Jing, LIU Hongrui, ZHANG Dingding, et al.  
Deformation analysis and support optimization of adit  
surrounding rock under overburden load disturbance[J].  
Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 13-22.
- [4] WANG Jiqiang, ZHAO Lin, LIU Tongyu, et al. Novel  
negative pressure wave-based pipeline leak detection  
system using fiber bragg grating-based pressure  
sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017,  
35(16): 3366-3373.
- [5] 潘越,宋佳佳,王智冲,等. 变截面悬臂梁式光纤布拉  
格光栅压力传感器设计研究[J]. 激光与光电子学进  
展, 2022, 59(1): 150-159.

- PAN Yue, SONG Jiajia, WANG Zhichong, et al. Design and research on variable cross-section cantilever fiber bragg grating pressure sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 150-159.
- [6] 李舜华, 聂泳忠, 李腾跃, 等. 片上温漂补偿的压阻式压力芯片的设计与制造[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(4): 474-479.
- LI Shunhua, NIE Yongzhong, LI Tengyue, et al. Design and fabrication of piezoresistive pressure sensor chip integrated with on-chip temperature drift compensation [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(4): 474-479.
- [7] 吴佐飞, 齐虹, 张岩, 等. SOI 压力芯片敏感电阻条蚀刻研究[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(3): 66-67, 75.
- WU Zuofei, QI Hong, ZHANG Yan, et al. Sensitive resistance bar etching research of pressure-sensitive chip based on SOI[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(3): 66-67, 75.
- [8] 李辉, 朱改博. 基于 Verilog HDL 的管道压力自测装置系统设计[J]. *电工技术*, 2018(12): 123-125, 127.
- LI Hui, ZHU Gaibo. Design of automatic detection device system for pipeline pressure based on Verilog HDL[J]. *Electric Engineering*, 2018(12): 123-125, 127.
- [9] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 9-42.
- YUAN Libo, TONG Weijun, JIANG Shan, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 9-42.
- [10] 梁敏富, 方新秋, 柏桦林, 等. 温补型光纤 Bragg 光栅压力传感器在锚杆支护质量监测中的应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 2826-2833.
- LIANG Minfu, FANG Xinqiu, BAI Hualin, et al. Application of temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor for bolting quality monitoring[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2826-2833.
- [11] 梁磊, 冯坤, 朱振华, 等. 基于 L 型悬臂梁的膜片式 FBG 压力传感器[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(9): 938-943.
- LIANG Lei, FENG Kun, ZHU Zhenhua, et al. A diaphragm FBG pressure sensor based on L-shaped cantilever structure[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2018, 29(9): 938-943.
- [12] CHEN Ningning, FANG Xinqiu, LIANG Minfu, et al. Research on hydraulic support attitude monitoring method merging FBG sensing technology and Adaboost algorithm[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2239-2239.
- [13] 杨耀忠, 段鸿杰, 牟菁. 基于波纹管杠杆组合结构的光纤光栅压力传感器设计[J]. *山东科学*, 2019, 32(2): 42-46.
- YANG Yaozhong, DUAN Hongjie, MOU Jing. Design of fiber Bragg grating pressure sensor based on bellows and lever composite structure[J]. *Shandong Science*, 2019, 32(2): 42-46.
- [14] 赵林, 姜龙, 李连庆. 一种组合结构光纤光栅压力传感器[J]. *压电与声光*, 2017, 39(1): 60-62, 66.
- ZHAO Lin, JIANG Long, LI Lianqing. An optical fiber grating pressure sensor with composition structure[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(1): 60-62, 66.
- [15] 张超, 程仁辉, 黄晓昇, 等. 基于光纤光栅的本煤层瓦斯钻孔塌孔表征实验研究[J/OL]. *煤炭科学技术*: 1-10[2023-02-28]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0071>.
- ZHANG Chao, CHENG Renhui, HUANG Xiaosheng, et al. Experimental study on hole collapse characterization of gas drainage holes in this coal seam based on fiber bragg grating[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1-10[2023-02-28]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0071>.
- [16] 李振, 王纪强, 赵林, 等. 基于差分结构的光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. *山东科学*, 2017, 30(5): 50-54.
- LI Zhen, WANG Jiqiang, ZHAO Lin, et al. Temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor based on differential structure[J]. *Shandong Science*, 2017, 30(5): 50-54.
- [17] 吴则功, 曹鲁, 宁雅农, 等. 一种基于光纤光栅的顶板离层传感器[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-11[2023-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.2023-0104.1235.013.html>.
- WU Zegong, CAO Lu, NING Yanong, et al. A roof separation sensor based on fiber bragg grating[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*: 1-11[2023-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230104.1235.013.html>.
- [18] 徐飞龙. 煤矿机电设备监测中光纤传感器的应用[J]. *煤炭与化工*, 2021, 44(10): 101-103, 106.
- XU Feilong. Application analysis of optical fiber sensor in coal mine electromechanical equipment monitoring[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2021, 44(10): 101-103, 106.
- [19] 王则力, 王淑玉, 丁镇军, 等. 光纤传感器对合金结构瞬态高温应变测量的适用性研究[J]. *航天器环境工程*, 2023, 40(1): 43-48.
- WANG Zeli, WANG Shuyu, DING Zhenjun, et al. Applicability study on optical fiber sensor for transient HT strain measurement of alloy structures[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2023, 40(1): 43-48.
- [20] 马崇玺. 基于光纤传感器地下隧洞工程结构应变监测[J]. *水利技术监督*, 2022(7): 34-37.
- MA Chongxi. Monitoring the strain of geotechnical structure in underground tunnel engineering with optical fiber sensor[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2022(7): 34-37.
- [21] 陈同彦, 蒋习民. 海底管道分布式光纤传感器安装工艺研究[J]. *中国石油大学胜利学院学报*, 2020, 34(4): 27-31.
- CHEN Tongyan, JIANG Ximin. Research on installation technology of distributed fiber optic sensor in submarine pipeline[J]. *Journal of Shengli College China University of Petroleum*, 2020, 34(4): 27-31.