

激光与光电子学进展

一种基于光纤布拉格光栅的顶板离层传感器

吴则功¹, 曹鲁², 宁雅农², 杨青山², 刘统玉^{1,2*}¹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;²山东微感光电子有限公司, 山东 济南 250103

摘要 研究了一种光纤布拉格光栅顶板离层传感器, 其具有结构简单、安装方便、成本较低等优点。光纤传感器自身不带电, 适合应用在煤矿生产环境, 传感器内部由机械结构组成, 通过机械联动实现了传感器测量位移的转换, 便于采用钢丝绳与顶板固定, 同时也为实际应用中改变量程和灵敏度提供了便利。传感器使用了 3 个光栅, 其多光栅的设计满足了对多点实时监测的需求, 也提供了一种温度补偿的方法, 在多个温度下的实验结果验证了该传感器具有可靠的线性系数, 精度可以在 ± 2 mm 之内, 量程可达 300 mm。

关键词 光纤布拉格光栅; 顶板离层; 光纤传感; 量程; 精度

中图分类号 TP212.14 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222686

Roof Separation Sensor Based on Fiber Bragg Grating

Wu Zegong¹, Cao Lu², Ning Yanong², Yang Qingshan², Liu Tongyu^{1,2*}¹Laser Institute, Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250104, Shandong, China;²Shandong Micro-Sensor Photonics Ltd., Jinan 250103, Shandong, China

Abstract This study investigates a roof separation sensor based on fiber Bragg grating. Simple structure, easy installation, and low cost are the advantages of this fiber optic sensor. This sensor does not exhibit charged characteristics, and it is suitable for coal mine applications. The sensor consists of mechanical structures and shifts the displacement of a wire rope through the rotation of multiple mechanical structures. Thus, it is convenient to use the wire rope to connect to the roof separation and vary the range and sensitivity. The sensor has three fiber gratings, which not only satisfies the requirements for monitoring multiple points but also provides a method for eliminating the temperature effects. The experimental results verify the reliable linearity of the sensor at multiple temperatures, and the accuracy can reach ± 2 mm with a range of up to 300 mm.

Key words fiber Bragg grating; roof separation; optical fiber sensor; range; precision

1 引言

据了解,近十年国内煤矿安全事故中,由于顶板灾害造成死亡的人数仅少于瓦斯事故,但顶板事故的发生率却是瓦斯事故的 4 倍^[1]。在煤矿巷道顶部,从下至上依次为伪顶、直接顶、老顶^[2]。老顶比较牢固不易塌陷,但在直接顶、伪顶区域,岩层结构逐渐变得不稳定,易塌陷。如果顶板离层不能稳定、实时地监测会对煤矿生产造成重大安全威胁^[3]。目前,比较常见的是电子式顶板离层传感器,但电子式顶板离层传感器在传

输信号时会衰减,电子式顶板离层传感器的元件还需要防爆处理,并且在煤矿恶劣环境下使用容易受到潮湿和粉尘环境的影响^[4],加速器件老化。尤其是当前很多的电子式顶板离层传感器,采用了位移带动电位器的方式来改变电信号,电位器的动触点滑触簧片与固定触点电阻体之间在恶劣的煤道环境中更容易氧化,造成传感器失灵。当前电子式顶板离层传感器的精度在 3~4 mm 范围内,误差也较大。

为着力于改善顶板离层事故的发生率,设计了一款光纤布拉格光栅(FBG)顶板离层传感器。相比于

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2022-11-14; 录用日期: 2022-11-22; 网络首发日期: 2022-12-02

基金项目: 山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KC012)、济南市高校二十条项目(2020GXRC032)、济南市高校新二十条项目(2021GXRC037)

通信作者: *tongyu.liu@vip.iss-ms.com

电子式传感器, 光纤类传感器在煤矿环境应用时更具优势, 光纤类传感器具有本质安全、稳定性高、抗电磁干扰能力强等优点。当前, FBG 位移传感器研究方案有很多, 孙丽等^[5]提出一种高精度压杆式 FBG 位移传感器。在传感器的设计中, 通过弹簧将结构产生的位移转化成 FBG 上的应力, 引起 FBG 中心波长的变化。彭星玲等^[6]设计了一种基于 FBG 的微力与微位移双物理量传感单元, 采用矩形悬臂梁型弹性体结构以及两片 FBG 布片方式, 提高了力和位移灵敏度, 实现了温度补偿。郑勇等^[7]基于光纤弯曲损耗传感原理, 设计了一种可用于位移测量的大量程、结构简单的线性传感器。从理论上证明了测量位移与光纤弯曲损耗之间的线性关系, 并推导出表达式, 开展了一系列标定试验和性能试验。但以上传感器都不能实现灵敏度和量程的同时调节, 本文所提的传感器结构较为简单、灵敏度可调、量程可改, 便于开展批量生产, 其采用了多光栅的设计方式, 便于对深、浅基点实时监测。通过锚爪将深基点固定在老顶区域、浅基点固定在直接顶区域, 传感器固定在伪顶, 对比解调出的位移变化来监测顶板岩层。

2 FBG 传感器设计

2.1 FBG 的传感原理

当宽带光源入射 FBG 时, FBG 将满足条件的波长反射, 其余的光波将继续向后传输^[8-9]:

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

式中: n_{eff} 为光纤内部纤芯的有效折射率; Λ 为相位掩模光栅的周期; λ_B 为 FBG 反射波的中心波长。当 FBG 受到温度变化、轴向应变时, 由于热光效应、弹光效应

的影响会使 n_{eff} 、 Λ 发生改变, 进而使反射中心波长漂移^[10]:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = k_\epsilon\Delta\epsilon + k_T\Delta T, \quad (2)$$

式中: k_ϵ 为应变光栅的应变系数; k_T 为应变光栅的温度系数; $\Delta\epsilon$ 为轴向应变的变化量; ΔT 为温度的改变量; $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的漂移量。先通过测试得到了温度光栅、应变光栅的温度系数^[11-12], 然后以交叉解耦的方法实现温度补偿, 从而获得准确的位移变化。

2.2 FBG 顶板离层传感器设计

FBG 顶板离层传感器的结构设计如图 1 所示, 从上至下依次为 FBG、悬臂梁、精密螺杆轴、精密螺母、绕线轮和涡卷弹簧, 该传感器依靠安装有预紧阀门的钢丝绳与顶板连接。

悬空一只温度 FBG 作温度补偿, 另外使用 353 胶水将应变 FBG 粘贴在悬臂梁上, 粘贴时需给应变光栅一个轴向的预紧力, 使其在胶封时就受到一个轴向的应力, 从而消除监测盲区, 一旦悬臂梁受到应力就会使应变 FBG 产生波长漂移。

传感器内部的联动方式较为简单, 外界对钢丝绳拉伸将直线距离伸缩带动绕线轮转动, 进而使精密螺杆轴转动。由于精密螺母被固定, 精密螺母与精密螺杆轴内外丝连接, 所以精密螺杆轴会产生轴向位移, 从而将长距离的钢丝绳伸缩位移转变为精密螺杆轴对悬臂梁发生的短位移。另外, 通过固定预紧阀门在钢丝绳上, 防止涡卷弹簧拉入太多钢丝绳导致涡卷弹簧没有预紧, 此机械结构可提前预紧涡卷弹簧, 传感器在初始状态时, 精密螺杆轴就对悬臂梁有预应力, 一旦钢丝绳产生拉伸可以立刻改变悬臂梁的受力情况。

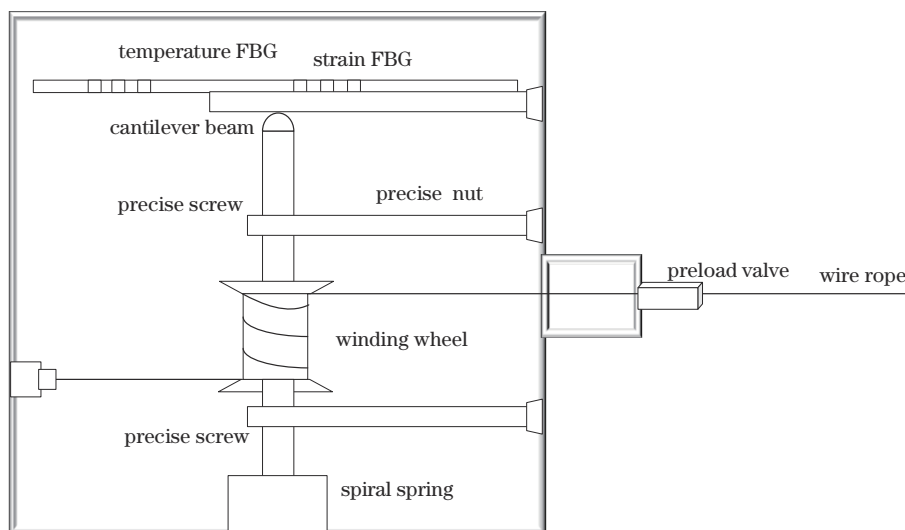


图 1 顶板离层传感器内部简化模型

Fig. 1 Simplified diagram of the internal objects for roof separation sensor

传感器内部实物设计如图 2 所示, 使用了 2 个绕线轮、悬臂梁。另外, 传感器使用多光栅的设计方式, 悬臂梁使用螺丝固定在传感器内部。

2.3 温度补偿方法

由于温度光栅悬空不受应力, 可通过以下方式消除温度变化带来的干扰:

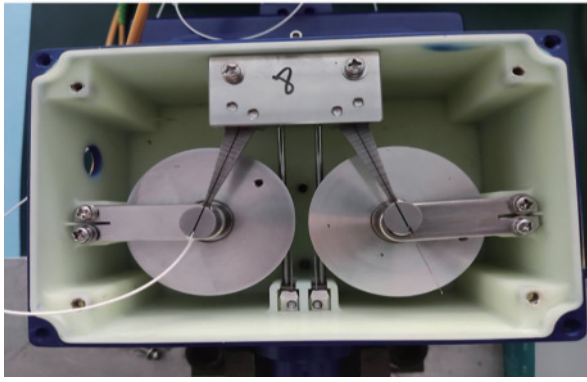


图 2 顶板离层传感器内部实物图

Fig. 2 Interior physical drawings for roof separation sensor

$$\Delta x = \left\{ (\lambda_{a1} - \lambda_{a0}) - [(\lambda_{b1} - \lambda_{b0})k_3] / k_2 \right\} k_1, \quad (3)$$

式中: Δx 为解调出的位移量; λ_{a1} 、 λ_{a0} 分别为应变光栅的改变后波长值、原始波长值; λ_{b1} 、 λ_{b0} 分别为温度光栅的改变后波长值、原始波长值; k_2 为温度光栅的温度系数; k_3 为应变光栅的温度系数; k_1 为应变光栅通过波长和拉伸距离变化拟合出的系数。

2.4 FBG 顶板离层传感器线性度分析

传感器使用单线螺纹的精密螺杆轴,根据螺距机械原理^[13],可得:

$$l = np, \quad (4)$$

式中: l 为精密螺杆轴向的移动距离; p 为精密螺杆轴的螺距,其值为常数^[14];精密螺杆转动的圈数为 n 。精密螺杆轴的轴向移动对悬臂梁产生的应变,可表示为

$$\epsilon = kl, \quad (5)$$

式中: ϵ 为悬臂梁受到的应变值; k 为悬臂梁的应变系数,其值为常数。结合式(4)、式(5)可得:

$$\Delta\epsilon_1 = kp\Delta n, \quad (6)$$

式中: $\Delta\epsilon_1$ 为应变的改变量; Δn 为精密螺杆圈数的改变量。 $\Delta\epsilon_1$ 又可以表示为

$$\Delta\epsilon_1 = (kp\Delta s) / (\pi d), \quad (7)$$

式中: Δs 为钢丝绳得伸缩位移变化量; d 为绕线轮的直径。由式(7)可知, Δs 与 $\Delta\epsilon_1$ 具有线性关系(即在 Δs 一定时,通过改变 p ,可以改变 $\Delta\epsilon_1$,进而影响传感器的灵敏度)。另外,通过增加 d ,绕线轮在旋转相同的圈数时,产生的应变量不变,但却提升了传感器的监测量程。

3 实验验证

3.1 标定实验方法

如图 3 所示,将解调仪、位移测试台放置到高温箱的左侧,其左侧有圆形开口便于引出钢丝绳及光纤,高温箱内部固定传感器。通过对高温箱设定不同的温度,使传感器工作的温度产生变化。实验标定所用的标准电子位移计型号为 GA-12,测量分辨率为 0.01 mm。实验时,使用金属压板固定钢丝绳,通过转动把手来模拟钢丝绳被拉伸的情形。解调仪为山东微感光电子有限公司的 YGSJ-12C 解调仪,可实现 1528~1568 nm 大范围的波长解调,其解调精度为 ± 1 pm,具有 16 个通道及下位机显示屏幕。

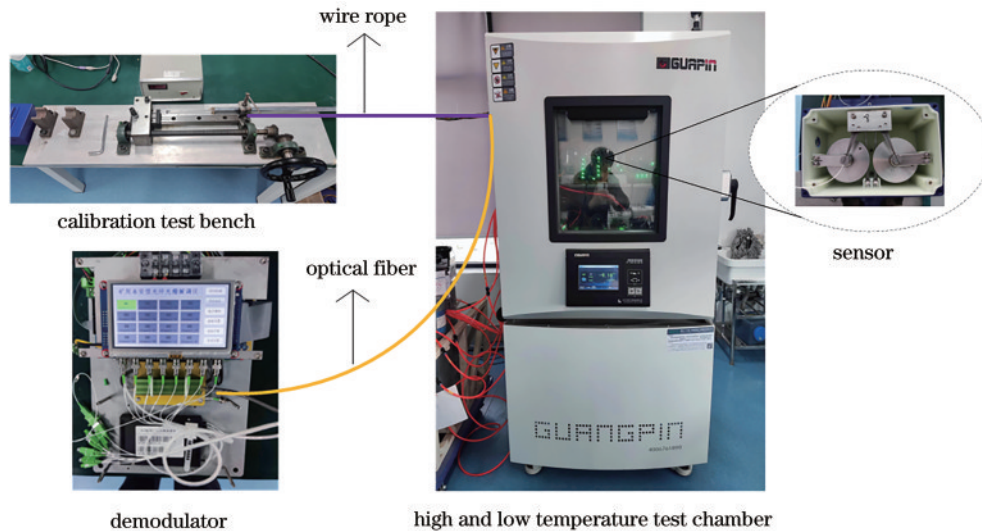


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

3.2 测试过程与数据分析

对不受拉力的传感器进行 10 次高低温实验标定,通过标定实验确定温度光栅的温度系数为 10.15 pm/°C,应变光栅的温度系数为 23.64 pm/°C。单次实验的原始数据如图 4 所示。

为验证该传感器在不同温度下的线性度,在每一温度下针对同一只传感器的浅基点,进行 10 次实验,并记录标准位移计的示数及解调波长来得到线性系数。采用温度补偿公式,消除由于温度变化导致的应变光栅波长漂移。

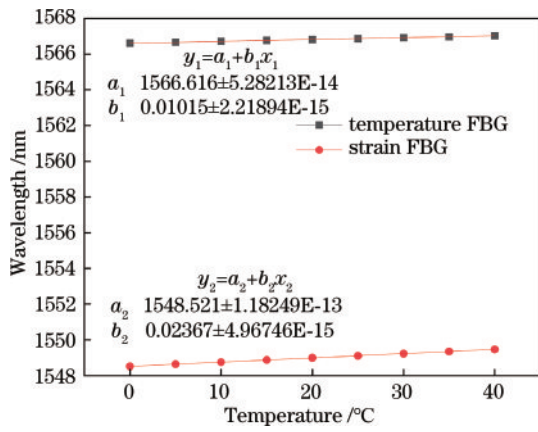


图 4 温度和波长关系图

Fig. 4 Temperature and wavelength diagram

较好的线性度是低误差值的保证。经测试,在 27 °C 下的线性系数为 3.39 pm/mm;在 0 °C 下的线性系数为 3.40 pm/mm;在 40 °C 下的线性系数为

3.39 pm/mm。以上系数的偏差都在 ±0.15 pm/mm 内,不同温度下的单次实验结果如图 5 所示。

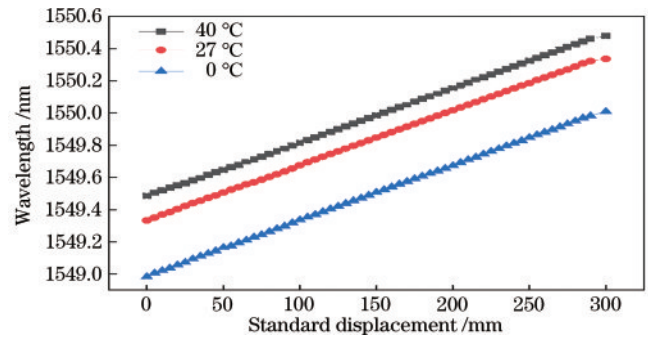


图 5 波长和标准位移关系图

Fig. 5 Wavelength and standard displacement diagram

实验数据的部分点如表 1~表 3 所示,通过温度补偿公式解调出钢丝绳拉伸的位移量,实验结果表明,传感器精度均在 ±2 mm 之内。

表 1 在 40 °C 下误差分析

Table 1 Error analysis at 40 °C

Standard /mm	Temperature FBG /nm	Strain FBG /nm	Demodulation /mm	Error /mm
0.00	1567.022	1549.477	0.000	0.000
30.00	1567.021	1549.578	30.476	0.476
60.00	1567.022	1549.678	59.299	-0.701
90.00	1567.022	1549.781	89.686	-0.314
120.00	1567.022	1549.883	119.778	-0.222
150.00	1567.021	1549.985	150.549	0.549
180.00	1567.022	1550.087	179.962	-0.038
210.00	1567.022	1550.189	210.054	0.054
240.00	1567.022	1550.291	240.146	0.146
270.00	1567.022	1550.393	270.238	0.238
300.00	1567.022	1550.495	300.330	0.330

表 2 在 27 °C 下误差分析

Table 2 Error analysis at 27 °C

Standard /mm	Temperature FBG /nm	Strain FBG /nm	Demodulation /mm	Error /mm
0.00	1566.890	1549.333	0.000	0.000
30.00	1566.890	1549.440	31.567	1.567
60.00	1566.891	1549.540	60.382	0.382
90.00	1566.891	1549.637	88.999	-1.001
120.00	1566.891	1549.745	125.876	0.876
150.00	1566.891	1549.847	155.968	0.968
180.00	1566.891	1549.949	181.045	1.045
210.00	1566.891	1550.051	211.137	1.137
240.00	1566.891	1550.153	241.229	1.229
270.00	1566.891	1550.255	271.321	1.321
300.00	1566.889	1550.342	298.363	-1.637

表 3 在 0 °C 下误差分析
Table 3 Error analysis at 0 °C

Standard /mm	Temperature FBG /nm	Strain FBG /nm	Demodulation /mm	Error /mm
0.00	1566.616	1548.949	0.000	0.000
30.00	1566.616	1549.049	29.502	0.498
60.00	1566.615	1549.146	58.797	1.203
90.00	1566.616	1549.252	89.391	0.609
120.00	1566.616	1549.353	119.188	0.812
150.00	1566.616	1549.458	150.165	-0.165
180.00	1566.616	1549.558	179.667	0.333
210.00	1566.616	1549.660	209.759	0.241
240.00	1566.616	1549.761	239.556	0.444
270.00	1566.616	1549.868	271.123	-1.123
300.00	1566.616	1549.969	300.920	-0.920

4 结 论

设计了一款顶板离层传感器,通过公式推导、实验验证等方式证明了传感器的可行性。在实际应用中,可更换大直径的绕线轮来提升量程,也可以增大精密螺母和精密螺杆轴的螺距来提升灵敏度。由于此传感器的锚杆部分和盒装部分通过螺丝拧紧,所以在锚杆深入钻孔之后,可通过拆解连接的螺丝取下传感器的盒装部分,如再需使用安装新的锚杆即可,这几种方式提高了传感器的实用性,同时传感器结构简单,也具有更好的推广性。实验结果表明,传感器量程可达 300 mm,精度在 ± 2 mm 之内。由于 FBG 对应力非常敏感,每一只传感器内部螺丝的松紧程度、悬臂梁胶粘厚度可能都不同,这都会影响钢丝绳的拉伸位移与应变光栅反射波长之间的线性系数,即每一只传感器都需要单独标定。

参 考 文 献

- [1] 康红普. 煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 1-11.
Kang H P. Development and prospects of support and reinforcement materials for coal mine roadways[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 1-11.
- [2] 康红普, 张镇, 黄志增. 我国煤矿顶板灾害的特点及防控技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 24-33, 38.
Kang H P, Zhang Z, Huang Z Z. Characteristics of roof disasters and controlling techniques of coal mine in China [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 24-33, 38.
- [3] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
Lan H, Chen D K, Mao D B. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [4] 路俊维, 马雪松, 马林霏. 基于光栅传感器的煤矿巷道锚杆受力监测技术[J]. 煤炭技术, 2022, 41(7): 179-181.
Lu J W, Ma X S, Ma L F. Monitoring technology of bolt's stress of coal mine roadway based on raster sensor [J]. Coal Technology, 2022, 41(7): 179-181.
- [5] 孙丽, 孙欣欣, 李闯, 等. 基于光纤光栅的高精度压杆式位移传感器[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 779-786.
Sun L, Sun X X, Li C, et al. High-precision and pressure rod type displacement sensor based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(5): 779-786.
- [6] 彭星玲, 茶映鹏, 叶建雄, 等. 基于 FBG 的悬臂梁式微力与微位移传感单元[J]. 激光与红外, 2022, 52(6): 870-874.
Peng X L, Cha Y P, Ye J X, et al. Cantilever beam type micro-force and micro-displacement sensing unit based on fiber Bragg grating[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(6): 870-874.
- [7] 郑勇, 肖旺, 朱正伟. 一种大量程光纤弯曲损耗型线性位移传感器研究[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1206002.
Zheng Y, Xiao W, Zhu Z W. Research on an optical fiber linear displacement sensor based on bending loss for use over large range[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206002.
- [8] 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): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.
- [9] 熊贤伟, 陈胜平, 朱宏田, 等. 飞秒激光直写高反射率中红外光纤布拉格光栅[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101014.
Xiong X W, Chen S P, Zhu H T, et al. High reflectivity mid-infrared fiber Bragg grating by femtosecond laser direct inscription method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101014.
- [10] 宁殿艳. 煤层底板突水光纤光栅多参数传感监测系统研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(8): 115-121.
Ning D Y. Monitoring system of coal floor water inrush based on fiber grating multi-parameter sensor[J]. Coal Engineering, 2022, 54(8): 115-121.
- [11] 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.
- Wang H P, Chen R, Lin B, et al. Temperature compensation of FBG sensors with double fiber Bragg gratings[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(3): 218-220.
- [12] 张亮, 卓仲畅, 韦占雄, 等. 光纤 Bragg 光栅温度补偿封装[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2002, 40(3): 294-295.
- Zhang L, Zhuo Z C, Wei Z X, et al. Temperature-compensating package for fiber Bragg grating[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2002, 40(3): 294-295.
- [13] 李斌, 苏明, 费根胜, 等. 螺杆钻具壳体连接螺纹结构性能分析与优化[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(6): 2617-2624, 2709.
- Li B, Su M, Fei G S, et al. Performance analysis and optimization of connecting thread structure of screw drilling tool shell[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(6): 2617-2624, 2709.
- [14] 李远清. 锚杆螺纹结构与扭矩-预紧力转化关系试验研究[J]. *煤矿现代化*, 2020(1): 108-110.
- Li Y Q. Experimental study on relationship between bolt thread structure and torque-preload force[J]. *Coal Mine Modernization*, 2020(1): 108-110.