

安全科学与工程



移动扫码阅读

张超,程仁辉,黄晓昇,等.基于光纤光栅的煤层瓦斯钻孔塌孔位置表征试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(11):95-103.

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]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 95-103.

基于光纤光栅的煤层瓦斯钻孔塌孔位置表征试验研究

张超^{1,2},程仁辉^{1,2},黄晓昇^{1,2},范富槐^{1,2},段晨辉^{1,2}

(1.西安科技大学安全科学与工程学院,陕西西安 710054;2.西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西西安 710054)

摘要:钻孔瓦斯抽采是解决瓦斯超限问题的重要手段,受地应力、钻进扰动等影响矿井瓦斯抽采钻孔易塌孔变形,严重影响瓦斯治理效果。针对煤层瓦斯抽采钻孔塌孔位置难以监测的问题,提出了一种基于光纤光栅智能传感技术的钻孔塌孔监测技术。首先从光纤光栅传感器应力监测理论出发阐述了光纤光栅钻孔塌孔监测原理,在此基础上构建了基于光纤光栅的塌孔表征实验平台,开展了不同塌落煤量下3种光栅布置方式(0°、90°、180°)的钻孔塌孔监测模拟试验,研究了光栅测量波长偏移量、抽采流量随塌落煤量的变化规律,划分了钻孔塌孔等级。结果表明:光栅测点位于基体材料下方布置方式的塌孔监测准确度最高,此时中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 与塌落煤量 m 的关系为 $m = 3.017\Delta\lambda$,抽采流量 Q 与波长偏移量 $\Delta\lambda$ 的关系为 $Q = 8.72E - 7x^3 + 2.30E - 4x^2 - 0.18x + 30$ 。以抽采流量衰减率为塌孔评判标准划分三级塌孔标准:Ⅰ级塌孔抽采流量衰减至90%,Ⅱ级塌孔抽采流量从90%衰减至50%,Ⅲ级塌孔抽采流量衰减至50%以下。最后,通过在潞安集团漳村煤矿2802工作面的现场试验验证了光纤光栅塌孔监测技术的有效性,发现钻孔30d后塌孔位置分布与钻孔打钻完成后的初期期情况相近;在现场试验中,基于所提出的塌孔监测技术成功定位并修复了5个钻孔,修复后钻孔瓦斯抽采纯量较未修复前提升了37.79%。

关键词:瓦斯抽采;钻孔塌孔;光纤光栅;波长偏移量;塌孔监测

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)11-0095-09

Experimental study on hole collapse characterization of gas drainage holes in this coal seam based on fiber bragg grating

ZHANG Chao^{1,2}, CHENG Renhui^{1,2}, HUANG Xiaosheng^{1,2}, FAN Fuhuai^{1,2}, DUAN Chenyue^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Drill hole gas extraction is an important method to solve the problem of gas overrun. However, the mine gas extraction drilling hole is prone to collapse and deformation due to the influence of ground stress and drilling disturbance, which seriously affects the effect of gas treatment. Aiming at the problem that it is difficult to monitor the location of collapsed hole in the gas extraction drillhole of coal seam, a monitoring technology for collapsed hole based on fiber grating intelligent sensing technology was proposed. Firstly, the principle of monitoring drilling hole collapse by fiber grating was explained from the theory of stress monitoring by fiber grating sensors. Based on this, an experimental platform for the hole collapse characterization based on fiber grating was built. The hole collapse monitoring experiments of three types of grating arrangements (0°, 90° and 180°) under different amount of collapsed coal were carried out, the changes of grating measurement wavelength offset and extraction flow rate with the amount of collapsed coal were studied, and the collapse level of drillhole was classified. The experimental results shown that, the accuracy of collapsed hole monitoring was the highest when the grating measurement point was located below the substrate material, the relationship between the central wavelength offset $\Delta\lambda$ and the amount of collapsed coal m was $m = 3.017\Delta\lambda$, and the relationship between the extraction flow rate Q and the wavelength offset $\Delta\lambda$ was

收稿日期:2023-01-16

责任编辑:宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2023-0071

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51974241, 52174203)

作者简介:张超(1986—),男,山西长治人,教授,博士生导师,博士。E-mail: zc@xust.edu.cn

$Q = 8.72E - 7x^3 + 2.30E - 4x^2 - 0.18x + 30$. The decay rate of extraction flow was used as the criterion of collapsing hole to divide the three levels of collapsed hole: Class I collapsed hole with the extraction flow decayed to 90%, Class II collapsed hole with the extraction flow decayed from 90% to 50%, and Class III collapsed hole with the extraction flow decayed to less than 50%. Finally, the effectiveness of fiber grating collapsed hole monitoring technology was verified through a field test in 2802 working face of Zhongcun coal mine of Lu'an Group, and it was found that the distribution of collapsed-hole locations after 30 days of drilling was similar to that of the initial period after the drilling was completed. In the field test, five drill holes were successfully located and repaired based on the proposed collapsed hole monitoring technique, and the pure volume of gas extraction from the repaired drill holes was improved by 37.79% compared to that before the repair.

Key words: gas extraction; borehole collapse; fiber grating; wavelength shift; hole collapse monitoring

0 引言

我国煤层赋存条件复杂多变, 矿井瓦斯灾害严重, 以大柳塔、上湾、保德等为代表的千万吨级高强度开采矿井群相继出现了深部开采动力现象^[1-3]。在瓦斯治理过程中, 瓦斯抽采钻孔的成孔质量是决定瓦斯抽采效率的重要因素^[4-6]。受地应力、采动等影响, 瓦斯抽采钻孔易塌孔变形, 常用的“注浆加固技术”“筛管护孔技术”“机械式疏通技术”和“水射流疏通技术”等钻孔修复技术对钻孔的支护修复存在盲目性, 造成大量的时间及经济成本浪费^[7-9]。钻孔监测是解决钻孔塌孔问题的先决条件, 对钻孔进行塌孔监测可掌握钻孔的状态信息, 有效预防钻孔塌孔情况的发生, 同时可为钻孔优化布置提供服务, 对加深钻孔精细化作业进程, 大大提高钻孔瓦斯抽采效果起到积极作用。为实现钻孔精准支护目标, 钻孔孔内塌孔情况的精准监测至关重要。

随着钻孔精细化作业进程的推进, 传统的钻孔塌孔监测技术无法达到钻孔精细化目标。目前针对钻孔监测的研究多聚焦于孔周裂隙方面, 如钻孔冲洗液法及声波法等。钻孔冲洗液法^[10]主要是通过钻进过程中所消耗的钻进冲洗液的量、钻进速度、卡钻等情况判断孔内裂隙发育情况。杨荣明等^[11]通过钻孔冲洗液法监测了神东矿区覆岩破坏情况。声波法是根据声波在不同介质中传播情况不同确定介质的内部情况, 常用来通过钻孔判断顶底板裂隙发育情况。张凯等^[12]研究了声波速度与煤样孔隙的关系, 为声波波速预测煤层孔隙率提供基础。王云刚等^[13]利用次声波监测低围压下煤样破裂失稳过程。任敏等^[14]通过阵列声波资料预测了煤系地层压裂裂缝高度。对于瓦斯抽采钻孔孔内情况的监测研究较少, 主要为内窥法, 如赵洪宝等^[15]研发了一种瓦斯抽采钻孔稳定性动态监测装置, 通过采集地应力间接判断钻孔的稳定性情况。崔峰等^[16]运用超高清全智能孔内电视对孔内情况进行实时监测, 分析不同阶段孔壁破坏情况, 研究孔内裂隙发育演化规律。内窥法监测钻孔情况可以直观准确反映孔内裂隙的发育

情况, 但下放与回收设备较为困难, 且易受孔内煤体的干扰, 视频拍摄不清晰, 同时钻孔内窥法是在钻孔钻进完成后对钻孔进行监测。上述对钻孔监测的方法均不适合对本煤层瓦斯抽采钻孔塌孔情况进行监测。亟需提出一种适用于钻孔的精准监测技术, 动态掌握钻孔信息, 采取相应措施提前对钻孔易失稳区域预支护, 提高瓦斯抽采率。

光纤光栅应变传感器是一种以光学信号为传输载体的高精度监测元件, 具有极强的抗电磁干扰、耐腐蚀、防水防潮、传输损耗小等优点, 在岩石及煤矿等地下工程领域应用广泛。魏世明等^[17]利用光纤光栅有效监测了采动下围岩三维应力状态及其变化规律。文献^[18-20]将光纤光栅监测技术应用于煤层顶底板突水等矿压监测方面。文献^[21-24]将光栅传感器应用于巷道锚杆受力监测。闫文超等^[25]采用应变光栅传感器监测钻孔围岩压力。目前对于光纤光栅监测技术应用于钻孔塌孔监测方面研究较少, 上述学者研究均表明了光纤光栅在煤矿井下乃至钻孔中应用的可行性。

基于上述分析, 笔者针对孔内塌孔情况不明, 提出了一种基于光纤光栅的钻孔塌孔监测技术, 阐述了光纤光栅塌孔监测原理, 搭建物理模拟试验平台开展了不同塌落煤量下3种光栅布置方式(0°、90°、180°)的钻孔模拟试验, 研究了光栅测量波长偏移量及抽采流量与塌落煤量的变化规律, 划分了钻孔塌孔等级, 并在现场进行验证。

1 光纤光栅监测塌孔原理

光纤光栅的形成是光使光纤产生轴向的折射率周期性变化, 形成永久性空间的相位光栅^[26-28]。整体结构主要由纤芯、包层及涂覆层3层结构组成, 如图1所示。当光纤光栅受到外部环境的刺激, 内部纤芯上的光栅栅距发生变化, 致使反射光的传播途径发生变化, 引起接收光信号的波长偏移量变化, 以这种接收的波长偏移量的变化可以表征影响栅距变化的外部刺激给与的物理信号。

光纤光栅传感器对塌孔情况的监测主要通过塌

落煤量掉落在传感器上,使光纤光栅栅距发生变化,引起光信号的变化,从而达到监测目的。为了实现对钻孔孔内塌孔情况的监测,确保煤样塌落会直接与光纤光栅传感器进行接触,选取光纤光栅传感器保护性封装中的表贴封装式结构,如图2所示。通过在基体材料上等距离串联多个表贴式光纤光栅传感器,如图3所示,并将串联好的传感器与基体材料一起送入钻孔中,当孔内发生塌孔变形时,塌落煤量引起传感器基体材料发生变形,距离该形变不同位置的光栅测点所反射回的光信号中心波长偏移量不同。如图3所示,当测点B附近发生煤体垮落,测点B反射回的光信号中心波长偏移量明显较大,相邻测点A、C的测量波长偏移量较小。在钻孔中通过测点点位的布置及定位发生偏移量的测点位置即可确定钻孔塌孔位置,同时根据测点反射回的波长偏移量变化值及应变传递效率解算公式可以推断该测点附近钻孔塌落煤体质,从而实现钻孔塌孔位置的监测。

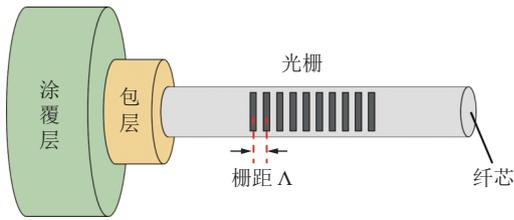


图1 光纤光栅结构示意图

Fig.1 Schematic of fiber bragg grating structure

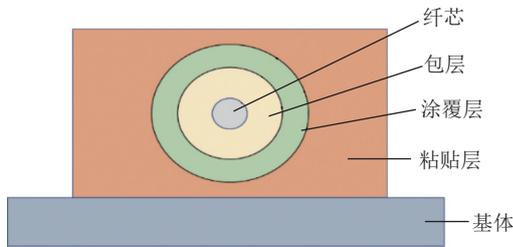


图2 表贴式光纤光栅结构

Fig.2 Structure of surface mounted fiber grating

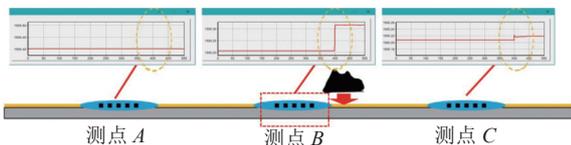


图3 光纤光栅传感器定位原理

Fig.3 Positioning principle of fiber grating sensor

应变传递效率解算公式:

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{\varepsilon}_f(x)}{\varepsilon} = \frac{2 \int_0^l \varepsilon_f(x) dx}{2l\varepsilon} = 1 - \frac{\sin h(kx)}{kl \cos h(kd)}$$

式中: $\varepsilon = \frac{\lambda - \lambda_b - (\lambda_t - \lambda'_t) \frac{b}{a}}{K}$ 为光纤光栅应变传感器

产生的应变方程。 λ 为应变光栅测量波长; λ_b 为光纤光栅初始中心波长; λ_t 为温度补偿光栅测量波长; λ'_t 为温度补偿光栅初始中心波长; a 为温度补偿光栅温度灵敏度系数; b 为应变光栅温度系数; K 为应变一次项系数,均为常数。

2 光纤光栅塌孔表征试验

2.1 试验系统搭建

根据上述光纤光栅塌孔监测原理,搭建光纤光栅塌孔表征试验模拟平台,如图4所示。该平台由钻孔塌孔模拟系统、抽采模拟系统及光纤光栅监测系统构成,如图5所示。塌孔模拟系统及抽采模拟系统,能够实现钻孔塌孔以及抽采过程的模拟试验,光纤光栅监测系统用于监测试验过程中煤样质量引起的光纤光栅测量波长偏移量。

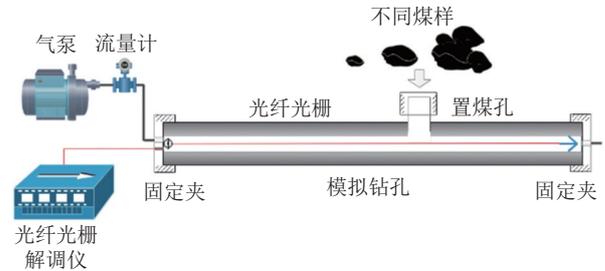


图4 试验平台系统示意

Fig.4 Schematic of experimental platform system



图5 试验平台系统实物

Fig.5 Physical diagram of experimental platform system

1) 光纤光栅监测系统。光纤光栅监测系统主要由表贴式光纤光栅传感器、解调仪及上位机构成。

使用的光纤光栅测点栅区长度 L 为 10 mm, 中心波长 λ_b 介于 1 555 ~ 1 565 nm, 反射率 n_{eff} 为 93.69%, 边膜抑制比为 15 ~ 16 dB(图6)。在光纤光栅传感器实际应用中,光栅监测精度受光栅封装效果影响极大,表面粘贴封装式的光栅测量精度主要受基体材料及粘贴层特性影响。表贴式光纤光栅的基体材料选用 PVC 管,粘贴层选用双组分热固化环氧树脂胶(353ND)。固化后胶层长度约为 20 mm,宽度约为



图 6 光纤布拉格光栅及连接方式

Fig.6 Fiber bragg grating and connection mode

10 mm, 胶层厚度约为 1 mm。

光纤光栅解调仪可以直接检测出外界物理量变化引起的波长偏移量变化,从而推算物理量变化情况。选用 ZX-FP-C04 便携式高精度解调仪,在解调监测系统中设有温度补偿标准具,能够实现温度补偿自动校准,降低温度对光纤光栅监测数据的影响。

上位机主要是通过软件控制解调仪,调节试验参数,实现对压力、应变等参数的实时监测。

2) 钻孔塌孔模拟系统及抽采模拟系统。钻孔模拟系统由 PVC 管、三通及密封堵头组成。选用直径为 120 mm 的 PVC 管模拟钻孔,在管中间位置加装三通接头用于模拟钻孔的塌孔,管内设有固定夹固定光栅基体,在管的每个接口处均设有堵头便于密封钻孔,避免后期钻孔抽采试验漏气,影响试验效果。试验目的为模拟塌落煤量对光纤光栅传感器的影响,因此选取 PVC 管 1:1 模拟钻孔孔径即可满足试验要求,同时 PVC 管易加工,便于加装固定夹等装置。

抽采模拟系统由流量计及抽气泵组成。流量计型号为 LZB-10WB,量程为 5~45 L/min;抽气泵选用 XP-105 系单级油循环旋片式真空泵,最大抽气速率 30 L/min,通过软管与钻孔模拟平台连接,实现对钻孔实际抽采过程的模拟。笔者仅研究钻孔塌孔导致的抽采流量变化情况。

2.2 试验方案

选取的表贴式光纤光栅传感器与基体材料在不同位置监测应力变化时,试验的监测结果不同。试验为了探究传感器位于基体材料不同位置对监测结果的影响,选取 3 种典型角度设计光纤光栅偏转 0°、90°、180° 三组试验,如图 7 所示。

在试验开始前需要先调试光纤光栅解调仪,首先将准备好的光纤光栅传感器与解调仪进行连接,同时打开上位机设置通道检测阈值为 9 000;其次根据设备自带的温度补偿设置相关参数完成温度补偿自动校正;最后以光纤光栅应变与应变传递效率方程计算光纤光栅应变参数,进行应变参数设置。

基于上述光纤光栅塌孔监测原理,试验以波长

偏移量表征塌落煤量的质量。解调仪调试完成后,实时监测光纤光栅波长的曲线变化情况,曲线变化前后光栅测量波长的差值即为光纤光栅测量波长偏移量。在试验开展过程中,塌落煤量的不同所监测得到的波长偏移量有正负之分,为了便于后期数据的统计分析,文中波长偏移量的值均取其绝对值。

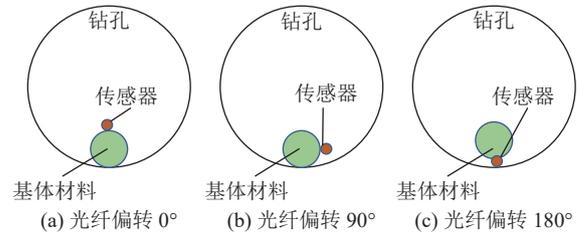


图 7 表贴式光纤光栅

Fig.7 Surface mounted fiber grating

在上述试验方案及设备调试工作完成后,进行塌孔表征试验,具体步骤如下:

1) 设备连接。将附有光纤光栅传感器的 PVC 管固定在钻孔模拟平台中,光栅封装区域位于直接落煤点一侧,光纤通过堵头上的 FC 接口与调试好的光纤光栅解调仪相连;用堵头封堵钻孔模拟平台两端,检查试验系统整体气密性。

2) 模拟钻孔煤块塌落。从钻孔模拟平台上方开口投放煤样,用密封管堵住煤样投放管道,用堵头密封,尽可能避免在投放管道下缘产生涡流,减少对抽采数据的影响;开启抽气泵,抽气速率为 30 L/min。

3) 记录数据。当检测到光纤光栅返回光信号中心波长稳定以后,记录此时的光栅中心波长,同时记录本次试验抽气流量变化。

4) 设备整理。暂停抽采模拟系统,从另一侧倒出煤样,清理细碎煤屑,准备进行下一组试验。

2.3 煤样制备

煤样取样地点位于山西潞安集团漳村煤矿 2802 工作面。将煤样进行随机破碎,粒径大小不一,与钻孔垮落煤块相仿,以此模拟钻孔实际塌孔情况。

将煤样按照表 1 设计塌落煤量,用于 3 种不同光

表 1 各组煤样质量分组

Table 1 Classification of quality of coal samples in each group

组号	质量/g	组号	质量/g	组号	质量/g
1	10	6	60	11	150
2	20	7	70	12	200
3	30	8	80	13	300
4	40	9	90	14	400
5	50	10	100	15	500

光纤光栅偏转角度的塌孔表征试验,分为A、B、C3组。同时,为研究煤样粒径差距导致的监测数据差异,将相同重量级的煤样分为粒径较大组和粒径较小组。

3 试验结果分析

3.1 塌孔表征试验结果

A组试验(光纤光栅偏转 0°)所使用光纤光栅封装后的反射率为93.69%,初始中心波长为1555.077 nm。各煤样的测量波长与初始波长的差值即为中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 。B组试验(光纤光栅偏转 90°)所使用光纤光栅封装后的反射率为94.36%,初始中心波长为1555.198 nm。C组试验(光纤光栅偏转 180°)所使用光纤光栅封装后的反射率为92.78%,初始中心波长为1555.207 nm。试验过程中,将3组煤样实际质量与测量波长偏移量绘制成散点图,如图8所示。

由文献[29]可知,当光纤光栅材质一定时,光栅测量中心波长偏移量与监测到的应变具有良好的线性关系,而煤样质量与引起的应变之间也具有良好的线性关系,可以得出光栅测量波长偏移量与煤样质量之间线性相关,故选用线性函数对各组试验数据的散点图进行拟合分析。

A组试验数据散点图拟合曲线的拟合度 $R^2=0.94002$,显然,试样质量 m 与中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 有着较好的线性关系,用波长偏移量 $\Delta\lambda$ 表征试样质量 m 的方程为: $m=4.353\Delta\lambda$ 。A组试验中,在煤样质量位于100~200 g时,监测结果变化幅度较大,这是由于煤样直接敲击传感器导致数据变化明显。

B组试验数据散点图拟合曲线的拟合度 $R^2=0.86839$,显然,试样质量 m 与中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 有着一定的线性关系,用波长偏移量 $\Delta\lambda$ 表征试样质量 m 的方程为: $m=11.001\Delta\lambda$ 。在B组试验中,煤样质量低于100 g时,监测结果有极大的不确定性,即使进行重复试验也无法消除这种影响。由图8b可以看出,监测数据波动较大,与拟合曲线之间较为离散,拟合度不高。

C组试验数据散点图拟合曲线的拟合度 $R^2=0.98943$,显然,试样质量 m 与中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 有着良好的线性关系,用波长偏移量 $\Delta\lambda$ 表征试样质量 m 的方程为: $m=3.017\Delta\lambda$ 。

3.2 抽采模拟试验结果

现场实际单孔瓦斯抽采流量往往受多种因素影响,试验仅考虑塌孔对钻孔瓦斯抽采流量的影响。用各组煤样波长偏移量表征抽采流量变化,将所得的抽采模拟数据散点图进行拟合,得到A、B、C组

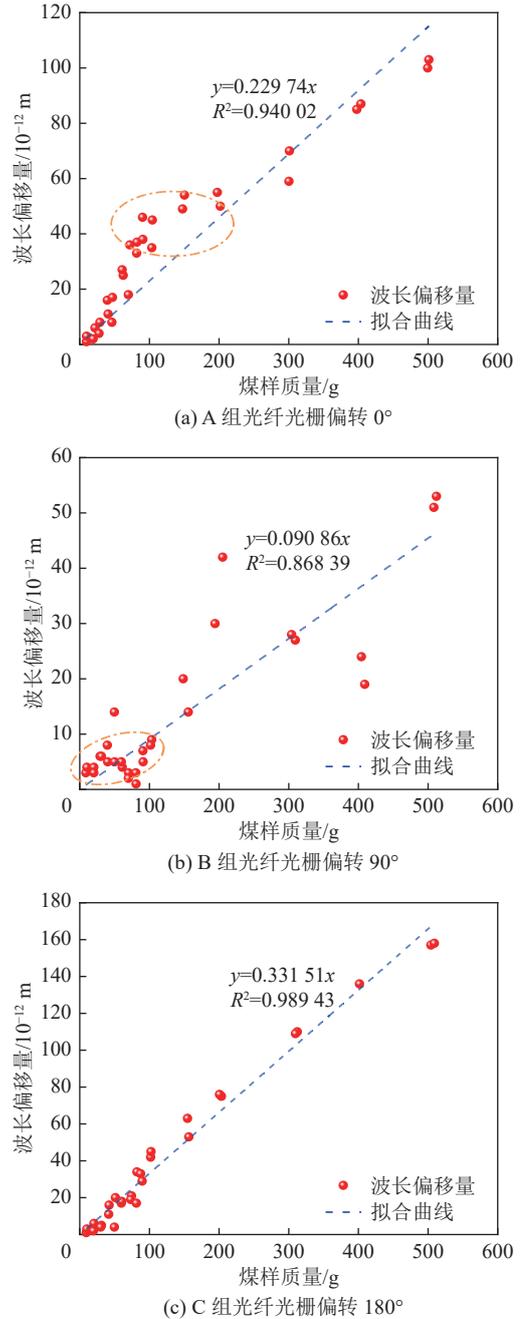


图8 3组煤样试验数据拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of experimental data of three groups of coal samples

抽采流量与波长偏移量的拟合关系如图9所示。

由图9可知,3组的拟合效果均较好,通过观察三组的拟合曲线,可以发现随着偏转角度的变化,拟合曲线的斜率也在改变,图中斜率变化为 $A>B>C$ 。同时由图9可以明显看到,C组的数据基本与拟合曲线重合。表明C组受监测结果受落煤影响较小,监测结果较其他2组更为准确。

综合分析A、B、C3组试验过程中塌落煤量的分布情况,可知,当光栅附在PVC管上布置在钻孔中时,钻孔顶部及侧孔壁所塌落的煤块往往倾向于

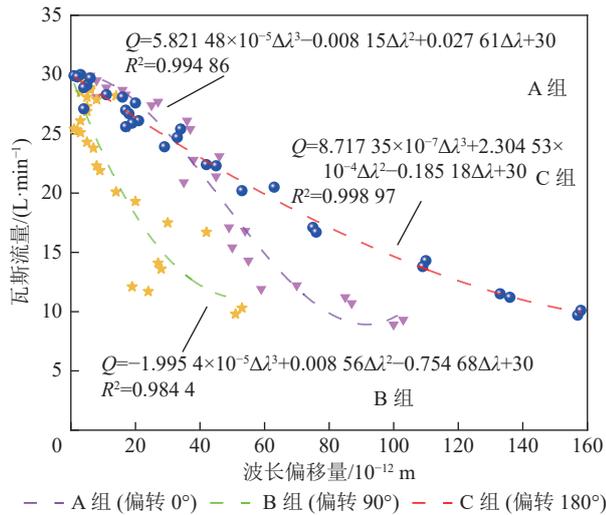


图9 模拟抽采试验数据拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of simulated pumping test data

填充PVC管两侧空间,因此,光栅测量波长偏移量所表征的塌落煤体质量仅能反映实际塌落煤量的一部分。A组光栅测点朝上布置,当有较大质量煤块垮落时,光栅测点易受损破坏;B组光栅测点布置方式在另一侧会有“监测盲区”,这也是导致B组试样监测数据线性关系较差的主要原因;C组测点布置方式能有效避免煤块垮落时破坏光栅测点,同时,从各组试验数据可知,C组试样监测数据线性关系最好,即当光栅偏转角度为180°时,中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 与试样质量 m 以及抽采流量 Q 之间函数关系最为明显,因此钻孔塌孔监测技术的采用C组光栅测点布置方式,即将光栅测点均布置在基体材料下方。

3.3 塌孔严重程度分级

由上述试验结果可知,中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 与试样质量 m 以及抽采流量 Q 之间关系较为明显,故可通过监测波长偏移量变化值来表征塌落煤量及抽采流量。以检测到的波长偏移量为横坐标,将C组试验所得的质量及流量数据汇总,如图10所示。

C组中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 与试样质量 m 试验数据拟合曲线方程为 $m=3.017\Delta\lambda$,将钻孔抽采流量衰减比率作为评判指标,用波长偏移量表征塌落煤量,可将实际钻孔塌孔情况划分为以下3个等级:

I级塌孔:当模拟抽采流量降为27 L/min时,监测光栅波长偏移量为 19.6×10^{-12} m,对应落煤质量至少为59.2 g。此时钻孔抽采效率降至90%,钻孔内垮落煤量较少,属于轻微塌孔,对瓦斯抽采效果影响较小,无需进行处理。

II级塌孔:当模拟抽采流量降为15 L/min时,监测光栅波长偏移量为 99.8×10^{-12} m,对应落煤质量至少为301.4 g。此时钻孔抽采效率降至50%,属于较

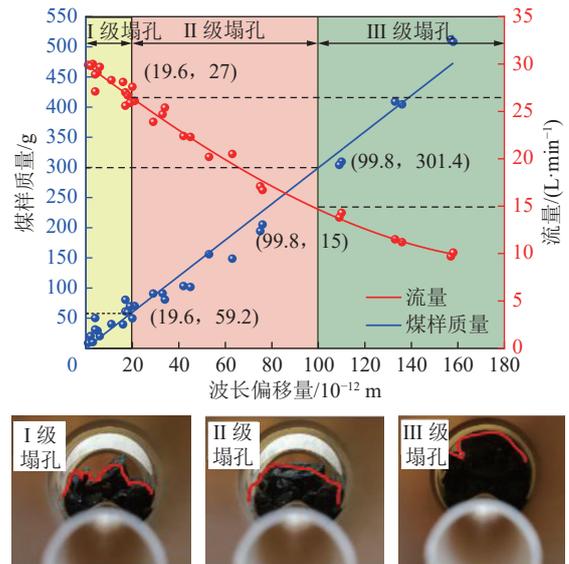


图10 C组试验数据及塌孔情况

Fig.10 Group C experimental data and hole collapse

严重塌孔,对瓦斯抽采效果影响较大。

III级塌孔:当模拟抽采流量低于15 L/min时,监测光栅波长偏移量大于 99.8×10^{-12} m,对应落煤质量远大于301.4 g。此时钻孔抽采效率降至50%以下,属于严重塌孔,严重影响瓦斯抽采效果。

4 现场试验

为了更好地验证光纤光栅塌孔监测技术,选取山西潞安环保能源开发股份有限公司漳村煤矿2802工作面开展现场试验。漳村煤矿隶属于高瓦斯矿井,煤层埋深465~585 m,其中2802工作面巷道长度2050 m,开切眼长度300 m,煤层平均厚度5.85 m。钻孔布置方式为三花布置,钻孔高位孔为2.0 m、低位孔为1.5 m;钻孔长度为160 m,钻孔直径113 mm,钻孔间距为2.5 m。

现场共监测钻孔数5个,从钻孔孔口20 m后(跳过钻孔密封段)开始监测,监测长度为140 m,平均1 m设置1个监测测点。监测的5个钻孔中,2号、5号钻孔塌孔程度较轻,仅有小段区域塌孔且最高塌孔等级达到II级;1、3、4号钻孔塌孔情况较为严重,均达到III级塌孔,其中1、3号钻孔严重塌孔段位于钻孔孔口段,4号钻孔位于钻孔中后段。文中以4号钻孔的监测数据为例进行分析,统计钻孔密封完成第1、7、30天的监测的钻孔波长偏移量结果如图11所示,其中光栅布置位置即相对钻孔孔深位置,与孔深相同。

图11中,灰色、蓝色及白色分别代表钻孔的塌孔等级为I、II、III级塌孔。由图11可知,钻孔密封

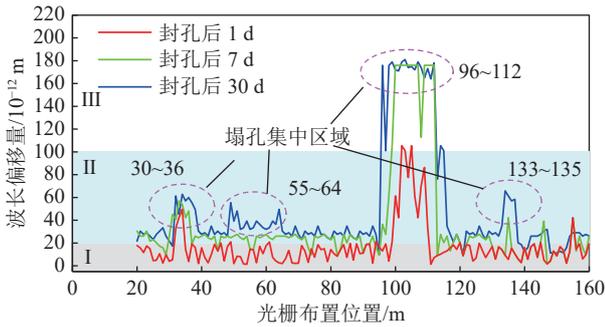


图 11 钻孔在封孔后 1、7、30 d 后波长偏移量的变化

Fig.11 Change of wavelength offset of boreholes 1, 7 and 30 days after hole sealing

完成第 1 天, 达到 II 级塌孔的主要有 2 处, 分别位于 32~34、100~110 m 处, 其中 102~105 m 测点处达到 III 级塌孔, 垮落煤体质量至少为 1 220.1 g。封孔 7 d 后达到 II 级塌孔的主要有 2 处, 分别位于 30~36、96~112 m 测点处, 其中 96~112 m 测点处达到 III 级塌孔, 垮落煤体质量至少为 8 214.4 g。封孔 30 d 后塌孔情况基本稳定, 钻孔全段基本达到 II 级塌孔, 分别在 30~36、55~64、133~135 m 处塌孔变形较大, 在 96~112 m 测点处达到 III 级塌孔, 垮落煤体质量至少为 11 098.5 g。综上所述, 该钻孔封孔后 1 个月内, 在深孔段 96~112 m 处发生严重塌孔现象。

整体观察图 11 可知, 钻孔在密封完成发生塌孔后, 随着瓦斯的抽采该段附近发生塌孔的情况会逐渐加重, 同时塌孔区域会适当加大, 由此可知第 1 天监测的塌孔数据可为后期钻孔塌孔区域提供参考。因此, 在实际矿井工程作业中, 可在钻孔作业完成时对钻孔开展监测工作, 提前确定钻孔塌孔区域, 并采取支护手段减少塌孔情况的发生。

通过对监测得到的塌孔情况进行钻孔支护处理, 如下放筛管, 水力冲孔等方法, 统计 5 个钻孔支护前后各 30 d 的抽采数据, 如图 12 所示。

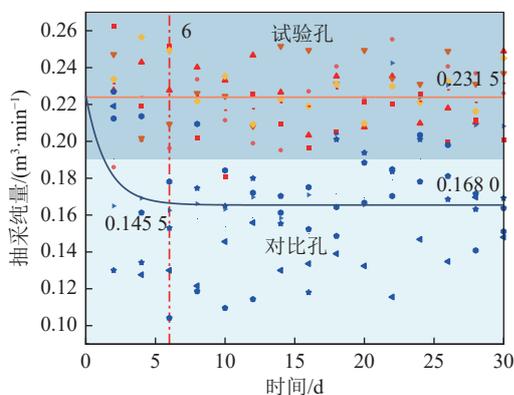


图 12 钻孔修复前后抽采数据对比

Fig.12 Comparison of extraction data before and after borehole repair

图 12 中, 黄线为钻孔支护后抽采数据的拟合曲线, 蓝线为支护前抽采数据的拟合曲线。2 号、5 号钻孔塌孔情况较轻未进行修复, 故抽采数据无明显变化; 1 号、3 号、4 号钻孔修复后抽采纯量有明显提升。综合统计监测钻孔修复前后的抽采数据, 修复后的钻孔 30 d 抽采纯量均值为 0.231 5 m³/min, 相较于修复前的 0.168 0 m³/min, 采用合适钻孔修复工艺后钻孔抽采纯量提升 37.79%。

5 结 论

1) 提出了煤层瓦斯抽采钻孔塌孔精准监测技术, 阐述了光纤光栅塌孔监测原理, 基于表贴式光纤光栅传感器基体材料变形引起光栅栅距变化原理, 以光栅测量波长偏移量表征钻孔塌落煤量, 通过在钻孔内布置光栅测点监测孔内煤体塌落量, 监测钻孔塌孔情况。

2) 搭建了钻孔塌孔表征试验平台模拟塌孔过程及抽采过程, 试验设计偏转 0°、90°、180° 3 种光栅布置方式, 得到了光栅测量波长偏移量与塌落煤量的线性关系, 抽采流量与塌落煤量呈负相关关系, 表明了波长偏移量变化值可以表征塌落煤量及抽采流量。

3) 得到了光栅测点位于基体材料下方的布置方式(C 组), 塌孔监测准确度最高, 此时中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 与试样质量 m 试验数据拟合曲线方程为 $m = 3.017\Delta\lambda$ 。并以抽采流量衰减比率作为塌孔评判标准, 按照原有抽采流量阈值 90%、50% 将钻孔塌孔情况分为 3 个等级。

4) 在潞安集团漳村煤矿 2802 工作面开展现场监测试验, 得到了钻孔后期塌孔位置分布与打钻完成后初期相近, 且试验的 5 个钻孔在修复后抽采纯量较未修复提升 37.79%。

参考文献(References):

- [1] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [2] 袁亮. 废弃矿井资源综合利用助力实现“碳达峰、碳中和”目标[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 1.
YUAN Liang. Comprehensive development and utilization of abandoned mine resources help to achieve the goal of “carbon peaking and carbon neutralization” [J]. Science and Technology Herald, 2021, 39(13): 1.
- [3] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021,

- 46(3): 716-725.
- YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [4] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
- YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [5] 王建强, 张杰, 杜学明. 复杂地层高位定向长钻孔成孔工艺研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 168-173.
- WANG Jianqiang, ZHANG Jie, DU Xueming. Research and application of high level directional long drilling technology in complex formation[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 168-173.
- [6] 包若羽. 松软煤层瓦斯抽采钻孔“同心环”加固密封技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 164-170.
- BAO Ruoyu. Research and application of “concentric ring” reinforcement sealing technology for gas drainage drilling in soft coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 164-170.
- [7] 王力, 姚宁平, 姚亚峰, 等. 煤矿井下碎软煤层顺层钻完孔技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 285-296.
- WANG Li, YAO Ningping, YAO Yafeng, *et al.* Research progress of borehole completion technology for broken soft coal seam in coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2021, 49(1): 285-296.
- [8] 申凯, 刘延保, 巴全斌, 等. 煤矿瓦斯抽采钻孔修护技术研究进展[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(6): 102-106.
- SHEN Kai, LIU Yanbao, BA Quanbin, *et al.* Progress in research on drilling repair and protect technology for gas drainage in coal mine[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2020, 47(6): 102-106.
- [9] 张学博, 王文元, 蔡行行. 深部煤层抽采钻孔变形失稳影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 159-166.
- ZHANG Xuebo, WANG Wenyuan, CAI Xingxing. Study on influencing factors of deformation and instability of deep coal seam drainage borehole[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 159-166.
- [10] 康永华, 王济忠, 孔凡铭, 等. 覆岩破坏的钻孔观测方法[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(12): 26-28.
- KANG Yonghua, WANG Jizhong, KONG Fanming, *et al.* Borehole survey method for overburden failure[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(12): 26-28.
- [11] 杨荣明, 陈长华, 宋佳林, 等. 神东矿区覆岩破坏类型的探测研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(1): 25-27.
- YANG Rongming, CHEN Changhua, SONG Jialin, *et al.* Detection study of overlying strata failure types in shandong mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(1): 25-27.
- [12] 张凯, 李东会, 梁雁侠. 三轴加载煤样声波速度与孔隙率关系试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 63-68.
- ZHANG Kai, LI Donghui, LIANG Yanxia. Experimental study on relationship between acoustic velocity and porosity of coal samples under tri-axial loading[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 63-68.
- [13] 王云刚, 邓万九, 张宏图, 等. 低围压煤样破裂过程次声波响应特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(2): 14-20.
- WANG Yungang, DENG Wanjiu, ZHANG Hongtu, *et al.* Infra-sonic wave response characteristics of coal samples in fracture process under low confining pressure[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(2): 14-20.
- [14] 任敏, 王力, 钟思萍, 等. 利用阵列声波测井资料预测煤系地层压裂裂缝高度[J]. 中国煤层气, 2015, 12(5): 14-18.
- REN Min, WANG Li, ZHONG Siping, *et al.* Using the array acoustic logging data to predict fracture height of the coal measures strata[J]. China Coalbed Methane, 2015, 12(5): 14-18.
- [15] 赵洪宝, 张勉, 张欢, 等. 瓦斯抽采钻孔稳定性动态监测装置研发及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 127-132.
- ZHAO Hongbao, ZHANG Mian, ZHANG Huan, *et al.* Development and application of stability dynamic monitoring and measuring device to gas drainage borehole[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 127-132.
- [16] 崔峰, 贾冲, 来兴平, 等. 缓倾斜冲击倾向性顶板特厚煤层重复采动下覆岩两带发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 514-524.
- CUI Feng, JIA Chong, LAI Xingping, *et al.* Research on development law of overlying rock two zones under repeated mining in extra-thick coal seam with gently inclined and bursting liability roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 514-524.
- [17] 魏世明, 马智勇, 李宝富, 等. 围岩三维应力光栅监测方法及相似模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 138-143.
- WEI Shiming, MA Zhiyong, LI Baofu, *et al.* Study on the monitoring method of three-dimensional stress with FBG in surrounding rock and the simulation experiment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 138-143.
- [18] 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 Dianyan. Monitoring system of coal floor water inrush based on fiber grating multi-parameter sensor[J]. Coal Engineering, 2022, 54(8): 115-121.
- [19] 兰建功, 张红俊. 基于光纤光栅传感器的巷道矿压监测方法研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(2): 121-124.
- LAN Jianguo, ZHANG Hongjun. Research on roadway ground pressure monitoring method based on grating fiber sensor[J]. Coal Technology, 2022, 41(2): 121-124.
- [20] 李虎威, 方新秋, 梁敏富. 基于光纤光栅传感技术的顶板离层监测系统[J]. 煤矿安全, 2016, 47(4): 143-145.
- LI Huwei, FANG Xinqiu, LIANG Minfu. Roof separation monitoring system based on fiber grating sensor technology[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(4): 143-145.
- [21] 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 Junwei, MA Xuesong, MA Linfei. Monitoring technology of bolt's stress of coal mine roadway based on raster sensor[J]. Coal Technology, 2022, 41(7): 179-181.

- [22] 彭泓, 刘亚飞. 基于光纤光栅技术的巷道支护锚杆受力监测[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 61–67.
PENG Hong, LIU Yafei. Stress monitoring of roadway supporting bolt based on fiber bragg grating technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 61–67.
- [23] 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.
- [24] 张楠. 基于温度补偿的光纤光栅井下锚杆受力动态监测技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(4): 146–149.
ZHANG Nan. Fiber bragg grating dynamic monitoring technology of downhole bolt stress based on temperature compensation[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(4): 146–149.
- [25] 闫文超, 蔺兑波, 南汉晨, 等. 光纤光栅应变传感器在钻孔围压监测中的应用[J]. 中国煤炭, 2020, 46(8): 44–47.
YAN Wenchao, LIN Duibo, NAN Hanchen, *et al.* Application of fiber grating strain sensor in confining pressure monitoring of borehole[J]. China Coal, 2020, 46(8): 44–47.
- [26] 吕瑞东, 陈涛, 范春松, 等. 飞秒激光制备光纤Bragg光栅在光纤激光器中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 320–336.
LYU Ruidong, CHEN Tao, FAN Chunsong, *et al.* Application of fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser in fiber lasers[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2020, 57(11): 320–336.
- [27] 郭永兴, 熊丽, 周兴林, 等. 用于机械装备的高性能光纤光栅倾斜传感器[J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 71–78.
GUO Yongxing, XIONG Li, ZHOU Xinglin, *et al.* High performance fiber bragg grating tilt sensor for mechanical equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 71–78.
- [28] 陈勇, 刘保林, 刘焕淋, 等. 基于光纤布拉格光栅的载荷定位与检测方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 8–15.
CHEN Yong, LIU Baolin, LIU Huanlin, *et al.* Load location and measurement system based on fiber bragg grating sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 8–15.
- [29] 郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50–58.
GUO Yongxing, XIONG Li, KONG Jianyi, *et al.* Sliding type fiber bragg grating displacement sensor[J]. Optical Precision Engineering, 2017, 25(1): 50–58.