



移动扫码阅读

李延河, 杨战标, 朱元广, 等. 基于弱光纤光栅传感技术的围岩变形监测研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 11-19.

LI Yanhe, YANG Zhanbiao, ZHU Yuanguang, *et al.* Research on deformation monitoring of surrounding rock based on weak fiber grating sensing technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 11-19.

基于弱光纤光栅传感技术的围岩变形监测研究

李延河¹, 杨战标², 朱元广³, 王 升³

(1. 中国平煤神马控股集团有限公司, 河南 平顶山 467000; 2. 平顶山天安煤业股份有限公司 煤炭开采利用研究院, 河南 平顶山 467099; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 煤矿深部地层高地应力与围岩低强度间的突出矛盾导致巷道开挖后极易发生大变形失稳灾害。为及时掌握巷道开挖支护前后围岩内部的变形情况, 研究基于弱光纤光栅传感技术, 研制了一种准分布式大量程应变传感器光缆, 实现了围岩内部变形测点的 1 m 级间距布置。通过室内标定试验掌握了传感器光缆的测试性能, 测试结果表明: 研制的应变传感光缆应变量程不低于 0.04, 灵敏度为 1.23 pm/ $\mu\epsilon$, 精度等级为 0.5, 属于高精度传感器并具有良好的重复性和线性度。依托平煤股份四矿深部岩石巷道开展了现场工业性试验, 试验结果表明: 巷道围岩应变随孔深增加而减小, 4 m 范围内围岩应变数值较大, 7 m 外应变数值较小且渐趋稳定; 巷道围岩应变激增主要发生在前 30 d 内, 随后巷道围岩应变增加量逐渐减小并趋于稳定; 取应变速率迅速向 0 收敛位置作为围岩松动区边界, 确定巷道帮部和顶部松动区边界为 5 m, 肩部松动区边界为 4 m。该应变光缆通过弱光纤光栅技术与时分复用技术的综合应用, 极大地提高了光纤传感网络的复用容量, 满足了煤矿深部巷道围岩变形监测的大量程、精细化在线监测需求。通过技术应用, 可及时掌握煤矿深部巷道围岩内部变形特征及松动圈时空演化规律, 为深部巷道围岩稳定控制决策提供科学基础数据。

关键词: 煤矿; 弱光纤光栅; 光纤传感; 松动圈; 巷道变形; 地应力

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)06-0011-09

Research on deformation monitoring of surrounding rock based on weak fiber grating sensing technology

LI Yanhe¹, YANG Zhanbiao², ZHU Yuanguang³, WANG Sheng³

(1. China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China; 2. Pingdingshan Tianan Coal.Mining Co., Ltd., Coal Mining and Utilization Research Institute, Pingdingshan 467099, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: The prominent contradiction between high ground stress and low strength of surrounding rock in deep strata of coal mine leads to large deformation and instability disaster after roadway excavation. In order to grasp the internal deformation of surrounding rock before and after roadway excavation and support in time, this study developed a quasi-distributed large-range strain sensor cable based on weak fiber grating sensing technology, and realized the 1 m-level spacing arrangement of deformation measuring points in surrounding rock. The test performance of the sensor cable is mastered through the indoor calibration test. The test results show that the strain range of the developed strain sensing cable is not less than 0.04, the sensitivity is 1.23 pm/ $\mu\epsilon$, and the accuracy level is 0.5. It belongs to the high-precision sensor and has good repeatability and linearity. Field industrial test was carried out in deep rock roadway of No. 4 Coal Mine of Pingdingshan Tian'an Coal Shares. The results show that: The strain value of surrounding rock decreases with the increase of hole depth. The strain value of surrounding rock within 4 m is larger, and the strain value outside 7 m is smaller and tends to be stable. The strain of roadway surrounding rock mainly occurs within 30 days after roadway repair, and then the strain increase of roadway surrounding rock gradually decreases and tends to be stable. Taking the rapid convergence position of strain rate to 0 as the boundary of surrounding rock

收稿日期: 2022-05-20 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0510

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51874275, 51974289)

作者简介: 李延河 (1973—), 男, 河南焦作人, 教授级高级工程师, 硕士。Tel: 0375-3591731, E-mail: 102010842@hbut.edu.cn

通讯作者: 王 升 (1997—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生。E-mail: 202082010032@sdust.edu.cn

loose zone, the boundary of roadway side and top loose zone is 5 m, and the boundary of shoulder loose zone is 4 m. Through the comprehensive application of weak fiber grating technology and time division multiplexing technology, the strain optical cable greatly improves the multiplexing capacity of optical fiber sensing network and meets the large range and fine online monitoring requirements of surrounding rock deformation monitoring in deep roadway of coal mine. Through technical application, the internal deformation characteristics of surrounding rock of deep roadway in coal mine and the spatio-temporal evolution law of loose circle can be mastered in time, which provides scientific basic data for the stability control decision of surrounding rock of deep roadway.

Key words: coal mine; weak fiber bragg grating; sensor; loose ring; roadway deformation; ground stress

0 引言

随着浅部煤炭资源日益枯竭,我国中东部煤矿大多已进入深部开采开拓阶段^[1-2]。进入深部后,巷道围岩在高地应力、高地温、高渗透压以及强烈开采扰动等因素作用下,其力学行为表现、变形破裂机理更为复杂,大变形灾害问题也更为突出^[3-4]。为实现深部巷道围岩的长期稳定,保证矿井的安全可持续生产,除制定科学合理、经济可行的支护方案之外,还需要对支护后的围岩移动变形进行长期监测,从而在围岩局部发生破裂时能够及时采取措施进行补强支护,避免巷道整体失稳。

目前围岩松动圈测试方法主要有声波法、多点位移计法、地质雷达法、地震波法、电阻率法和渗透法等^[5]。其中,声波法^[6-7]目前应用最为广泛,该方法通过声波波速在介质中传播速度的变化反映介质裂隙发育及围岩质量的变化,将波速峰值作为松动圈边界,但该方法很难用于围岩松动圈范围的长期测试,而且对于巷道顶板垂直孔测试非常困难。多点位移计法^[8]通过对围岩内部不同深度测点位移的记录,取位移变化最大两点间作为松动圈的大致位置,该方法的突出优势是能够实现在线监测,而且能定量获取两个锚点间围岩的变形值,但是该方法孔内锚点过少,深 20 m 的钻孔一般测点为 4~5 个,因此其确定的松动圈范围精度较低。其他一些测试方法^[9]虽然也可以用于围岩松动圈测试,但一般用于围岩掌子面前方围岩结构探测。总体而言,目前的测试技术大多用于围岩某一阶段的松动圈测试,难以对围岩松动圈进行长期和精细化测试,常导致松动圈测试结果无法及时指导巷道支护决策。

光纤传感技术始于自 20 世纪 70 年代,随着光纤制造、光电子和计算机技术的不断发展,近些年来光纤传感技术在采矿、水利水电、土木交通等工程领域得到了广泛的应用^[10-11]。光纤传感技术以光波为载体,光纤为传输媒介,通过对外界的温度、应力、振动、磁场等物理量引起的光波特征参量(如波长、相位、光强、偏振态等)变化进行检测,从而实现对这

些物理量的测量^[12]。为了提高传感网络资源,通常采用波分、时分、频分、空分等网络复用技术提高带宽利用率,实现大容量传输^[13]。本研究将基于弱反射光纤光栅传感(Ultra-weak Fiber Bragg Grating)技术原理^[14],研制一种准分布式大量程应变传感器光缆,并通过室内标定试验掌握传感器光缆的测试性能。在此基础上,依托平煤股份四矿深部岩石巷道,开展现场工业性试验,掌握深部巷道围岩的围岩移动变形数据进而确定松动圈范围,为矿井深部巷道围岩稳定性分析与支护控制决策提供数据支持。

1 弱反射光纤光栅传感原理

1.1 FBG 传感原理

FBG 传感器是利用光纤的光敏感特性,在纤芯内部成空间相位光栅,其本质是光纤纤芯中的一种周期性或者非周期性扰动有效折射率的反射结构^[15](图 1)。当光纤发生受应变扰动时,满足 Bragg 条件的反射光中心波长也会发生位移,利用解调出的反射光中心波长位移变化量,结合已标定的应变灵敏度系数就可以计算出具体的应变扰动数值。对于普通 FBG 传感网络,由于其高反射率,后续光纤光栅无法与该波长的光谱产生反射现象,导致光纤传感网络的复用容量受到极大的限制,这也是普通 FBG 传感网络无法实现大范围应变测试的最主要原因。

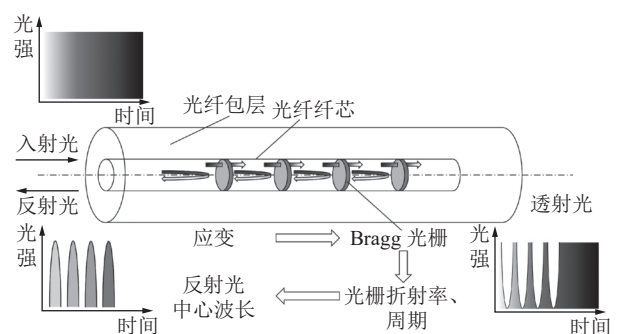


图 1 FBG 测试原理示意

Fig.1 Schematic diagram of FBG test principle

相较于普通 FBG,弱光纤光栅反射率一般低于 1%,且光栅长度较短^[16]。当入射光进入弱光纤光栅

传感网络后,由于其低反射率,满足 Bragg 光栅条件波长的光波的一部分会反射回去,其余的大部分光波会沿着光纤继续传输至下一个光栅,如此通过光纤内部多次弱反射以及对反射光的解调,最终实现弱光纤传感网络测试容量的大幅提升。为确定光纤上每个光纤光栅的位置,还需要利用光纤光栅的时分复用技术^[17],其传感原理如图 2 所示。当光源发出的脉冲光射入弱反射光纤光栅传感器阵列中后,每个阵列传感器都会反射脉冲光信号,该信号包含着不同的时间信息与光谱信息,而解调系统则会接收该信号并根据相邻光栅的时间延迟确定光谱信息对应的光栅位置及编号。时分复用技术使整个光纤传感网络不再受系统光源带宽限制以及外界环境因素范围的约束,且这种由反射率较低的光栅组成的传感网络,其传输的特性与分布式光纤传感网络较为相似,但光纤光栅传感网络反射率要比分布式传感网络高,因此实现的传感精度比后者高出许多。

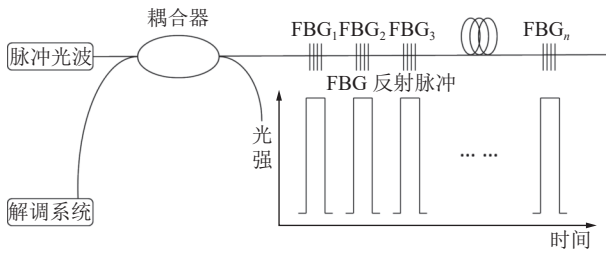


图 2 时分复用传感网络原理

Fig.2 Principle diagram of time division multiplexing sensor networks

1.2 光纤光栅应变传感模型

由光纤耦合理论知,在相位匹配条件达到满足时,光纤光栅 Bragg 波长方程^[18]为

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

其中, λ_b 为中心波长; n_{eff} 为纤芯折射率; Λ 为光栅周期。当 Bragg 光栅受到影响时,其光栅周期和折射率都会发生改变,从而引起反射光波中心波长位移:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \quad (2)$$

定义 P_e 为光纤的有效光弹性系数; ε 为光纤应变值,则有:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - P_e)\varepsilon \quad (3)$$

即为光纤光栅波长变化量与应变的关系式。当光纤纤芯的材料一定时,理论上光纤光栅的应变传感系数为一常数,可以通过应变传感标定实验计算出来具体的数值。定义 K_e 为 FBG 传感器应变灵敏

度系数,则有:

$$\Delta\lambda_b = K_e\varepsilon \quad (4)$$

式 (4) 即为波长变化与应变间的关系式。由于光纤光栅的材质、光栅刻录技术及光纤传感器封装时环境等因素的影响,不同光纤光栅的应变灵敏度系数会有相应的差别,因此在 FBG 传感器内部封装完成后,还需进行室内传感器试验,对光纤布拉格光栅传感器进行标定以确定应变灵敏度系数。

2 弱光纤光栅阵列传感器研制

2.1 弱光纤光栅传感光缆结构

如图 3 所示,给出了弱光纤光栅应变传感光缆结构设计图。光缆由内到外依次为光纤裸线、金属螺旋铠、钢绞线和聚乙烯外护套,其中在锚点处利用黏结剂填充金属螺旋铠和光纤裸线间的空隙固化成锚点。锚点设计间距为 1 m,光缆外径为 6 mm,光纤 Bragg 光栅设计在两个锚点中间,栅区长度 < 10 mm,中心波长为单波长 1 532 nm,光纤光栅反射率为 0.05%,应变量程 0 ~ 0.04。

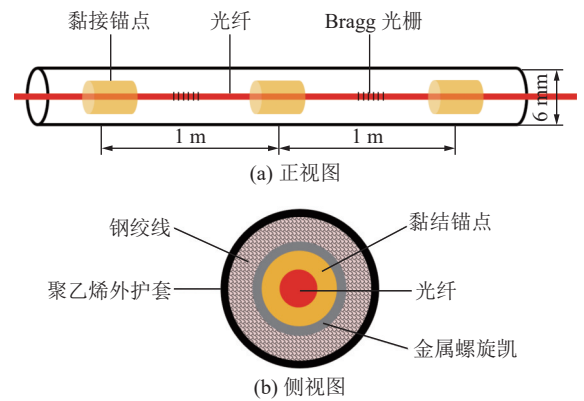


图 3 弱光纤光栅应变传感光缆示意

Fig.3 Schematic diagram of weak fiber grating strain sensing cable

如图 4 所示,给出了弱光纤光栅应变传感光缆实物图,由应变光缆和光纤接头组成。为保证外护套、钢绞线、金属螺旋铠间的协同变形,在光缆加工时金属螺旋铠跟钢绞线间通过绞合咬紧,外护套层通过高温挤塑到钢绞线上。在实际使用中,当被监测介质发生变形时,会通过应变光缆外护套、钢绞线、金属螺旋铠以及锚点处光纤的协同变形引起锚点间的光纤产生形变,引起 Bragg 光栅的中心波长发生位移。因此,弱光纤光栅应变传感光缆实际测量得到的是 2 个锚点间的平均应变值。

2.2 应变光缆标定试验

标定试验是掌握传感器测量性能并确定传感器

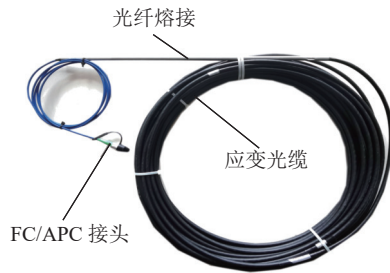


图4 弱光纤光栅应变传感光缆实物

Fig.4 The physical figure of the weak fiber grating strain sensing cable

标定系数的重要方法。为掌握弱光纤光栅应变传感光缆的测量特性与误差指标,参考JJF 1305—2011《线位移传感器校准规范》和JG/T 422—2013《土木工程用光纤光栅应变传感器》,在光纤位移试验平台上对研制的传感光缆开展了的应变与Bragg光栅波长漂移量关系标定试验,如图5所示。

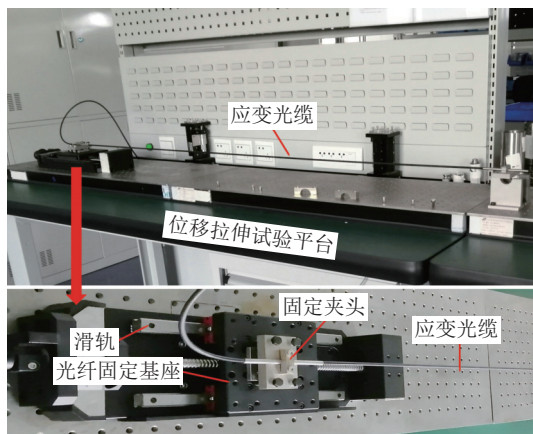


图5 光纤位移实验平台

Fig.5 Fiber optic displacement experimental platform

由于应变光缆使用的光纤是特种光纤,其裸纤最大应变超0.04,超出了国内常用弱光纤光栅解调仪的测试带宽(1528~1568 nm,图6),因此本次标定试验应变光缆的最大拉伸应变值为0.03,设置16个标定点,0,0.002,0.004,⋯,0.028,0.030对应的拉伸位移分别为0,2,4,⋯,28,30 mm。具体试验步骤如下:①调整位移平台,固定应变光缆的锚点,稳定10 min后记录下弱光纤光栅解调仪显示的初始波长。②逐级缓慢调整位移平台至预设拉伸位移量,稳定10 min后记录各级位移下的波长数值。③当拉伸位移量达30 mm后,按照原路径逐级缩减位移量,稳定10 min后记录相应的波长数值。④重复步骤②③,累计循环3次。试验过程中,室内温度需控制在20℃左右。

如图7所示,给出了试验过程中应变光缆拉伸



图6 弱光纤光栅解调分析仪

Fig.6 Weak fiber grating demodulation analyzer

应变与解调波长的实验特性曲线。根据规范中传感特性和计量误差指标的定义(表1),得到应变光缆的各技术参数(表2)。其中,满量程输出值为应变光缆测量范围的上限和下限输出值之间的代数差;应变灵敏度反映传感单元在外荷载作用下的波长变化程度;基本误差是稳定整个仪表测量精确度的指标;回程误差是指在相同条件下,被测量值不变,应变光缆受载方向不同时其示值之差的绝对值;线性度是应变光缆实测过程与模型拟合情形的吻合程度度量;重复性是指被标定的仪器在各标定点上的输出数据的重复程度。

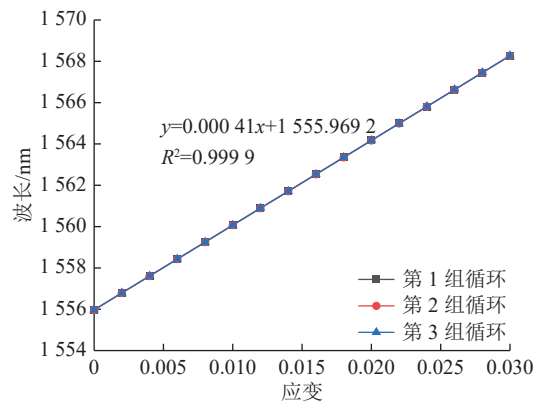


图7 应变拉伸实验特性曲线

Fig.7 Characteristic curve of strain tensile test

表1 准确度等级和相应允许误差

Table 1 Accuracy level and corresponding allowable errors

准确度等级	允许误差/%(以满量程输出值的百分数示)
0.01	±0.01
0.02	±0.02
0.05	±0.05
0.1	±0.1
0.2/0.25	±0.2/±0.25
0.5	±0.5
1.0	±1.0

表2 应变光缆标定参数
Table 2 Calibration parameters of strain cable

性质	指标	数值
传感特性	最大应变	0.03
	满量程输出值 Y_{FS}/nm	36.9
	应变灵敏度 $K_T/(\text{pm}\cdot\mu\text{e}^{-1})$	1.23
	基本误差 δ	-0.74% (0.1)
计量误差(准确度等级)	回程误差 h	0.26% (0.5)
	线性度 l	-0.44% (0.5)
	重复性 r	0.28% (0.5)

3 现场应用

3.1 测点概况

平煤四矿位于平顶山矿区西部,井田东西走向约2 km,南北倾斜约5.5 km。井田内煤层赋存较稳定,已组煤层倾角为 $8^\circ\sim 12^\circ$,平均煤厚4 m,整体地质条件比较简单。本次弱光纤光栅应变传感光缆的试验地点位于已16_23110运输巷片盘外段(图8)。运输巷掘进过程中可能将揭露11条断层,落差在0.4~1.5 m。其中F4为逆断层,对掘进有不同程度的影响;在断层附近顶板较破碎,需加强顶板管理。

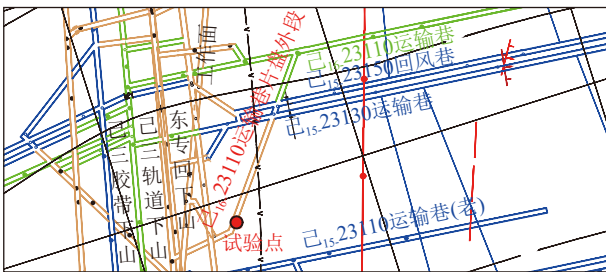


图8 测点平面位置

Fig.8 Plane position map of measuring points

试验巷道巷宽约5.1 m,顶底板距离约3.6 m(净断面 16.2 m^2)。基本顶为中粒砂岩,厚度约15 m,灰白色,成分以石英为主,下部为细砂岩和粉砂岩,局部夹煤线。直接顶为粉砂质泥岩,厚度约8.7 m,灰~深灰色,块状,含砂量不均,偶见煤屑。直接底为砂质泥岩,厚度约1.2 m,灰~深灰色,块状,含砂量不均,层间距由西向东变厚,变厚处岩性为泥岩。基本底为粉砂质泥岩,厚度约12 m,灰~深灰色,块状,含砂量不均。巷道原有支护结构失效,对巷道进行巷修支护,巷道修护采用36U型钢+锚网喷+锚索+深浅孔注浆联合支护。

3.2 测试方案

巷道测试钻孔布置方案如图9所示。测孔1号,

2号,3号分别布置在巷道帮部、顶板和拱肩位置,其中测孔1号倾角 0° 、测孔2号倾角 90° 、测孔3号倾角 45° 。测孔孔深均为21.0 m,孔径均为73 mm,为使注浆材料充分包裹应变光缆,应变光缆实用部分仅为测孔近巷道20 m。应变光缆顶端安装固定锚头并使用锚固剂将应变光缆与岩体锚固,在应变光缆两端各引出一条光纤跳线,两根光纤跳线均可作为数据采集光纤,当应变光缆破断时可以从另一条跳线采集数据。

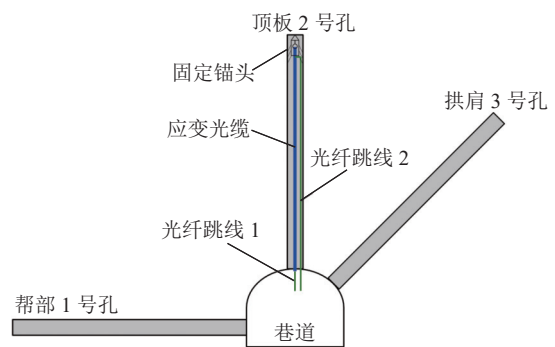


图9 传感器布置示意

Fig.9 Sensor layout schematic

在应变传感光缆安装前,应对测试所用的仪器与装置进行外观及工作状态检查。检查主要包括应变传感光缆信号输出是否正常、应变传感光缆密封性是否完好、应变传感光缆安装定位装置所需的杆件数量是否足够及连接是否牢固、弱反射光纤光栅解调仪显示与读数是否正常等。具体测试步骤如下:

1) 巷道测点位置钻孔。在选定的测试地点,在巷道帮部、顶部及肩部分别打测试钻孔,如图10所示。钻孔的设计深度为21 m。钻孔选用地质型钻机,采用风动煤钻钻进,钻头规格选择 $\phi 73\text{ mm}$ 。待钻至设计深度后,清洗孔内残渣,并保证孔内基本无积水。



图10 巷道测点位置钻孔

Fig.10 Drilling at measuring point position of roadway

2) 应变传感光缆安装。由于光缆式传感器相较于传统应变传感器可塑性较强,埋入测试孔内需要

保持绷直状态。因此应变传感光缆需要与转轴连接管配套使用,将传感器的一端固定于第1个连接管的前端。随后通过人力推送缓慢向前推移。随深度增加,在转轴连接管末端续接短杆,直至送入传感器的预定位置,如图11所示。传感器另一端的跳线接头留出测试孔口,并通过传输光纤与法兰连接至弱光纤光栅解调仪处。



图11 应变传感光缆安装

Fig.11 Installation of strain sensor cable

3) 封孔注浆。完成应变传感光缆安装后,通过推送过程使用的转轴连接管作为注浆管,利用注浆泵将浆液注入测试钻孔,直至全孔致密填充,使应变传感光缆与孔周岩体充分接触,如图12所示。注浆材料选择具有膨胀性的速凝水泥浆液。注浆泵的压力控制为1 MPa,在注浆过程使用囊袋进行封孔,待反浆管流出浆液后结束注浆。



图12 封孔注浆

Fig.12 Grouting sealing

4) 应变监测。在完成钻孔注浆后,将钻孔留出的传感器接头通过传输光缆及光纤法兰与光纤解调仪连接。测试钻孔内的浆液凝固后,立即开始波长数据采集,如图13所示。在测试时间内,以逐次测得波长数据的变化量作为围岩应变数值的解算依据,以此分析围岩内部变形长期演变规律,得到深部巷

道围岩移动变形数据,进而推测围岩松动圈的范围,为实现深部巷道围岩的稳定性控制提供应变数据支撑。



图13 监测波长数据采集

Fig.13 Data collection of monitoring wavelength

3.3 测试数据分析

在巷道巷修后,完成了现场应变传感光缆安装,并开始进行数据采集,累计测试时间约90 d。根据弱反射光纤光栅解调仪获得的波长信号变化、应变传感光缆的标定系数,计算得到巷道围岩帮部、肩部以及顶部传感器的应变曲线图,如图14、图15所示,围岩各位置绝对位移曲线如图16所示。

图14为巷道围岩帮部、顶部、肩部在不同时间各测点应变随孔深变化的监测曲线。可以看出,在监测过程中,孔口处的应变最大,在1~7 m孔深范围内的应变值随孔深的加深而减小,且在1~4 m内变化较为剧烈,在孔深7 m外的测点应变数值较小且较为稳定。说明越靠近巷道表面,围岩变形越剧烈,随着孔深的加深,巷道围岩受巷修过程中巷道围岩变化的影响逐渐减弱,围岩产生的应变也就逐渐减小。这是因为巷修过程中对巷道围岩也存在一定程度的破坏,巷道围岩的原有应力状态被打破,在巷道径向应力差的作用下围岩发生变形,越接近巷道表面的围岩受巷修影响越显著,导致测孔孔口处应变值最大,并随着孔深的加深,应变逐渐减小。同时,在围岩原岩应力与巷道断面形状的影响下,导致巷道帮部围岩应变最大,肩部围岩应变最小。

图15分别为围岩帮部、顶部、肩部在不同孔深的应变变化曲线。因为巷道7 m外的测点应变值较小,所以仅绘制0~7 m内测点的应变曲线。从测孔应变数据可以看出,巷道围岩应变变化总体表现为前期剧烈,随着时间的增加逐渐减缓最后达到稳定的规律。以帮部测点为例,孔口处测点应变在21 d之前迅速增加,随后增长速率减慢,到测试90 d时孔口处应变只有微量增长。同时,围岩应变的变化也呈现一定随机性,这是由巷道围岩应力状态、岩体的非均质性和各向异性导致的。并且孔深越深的

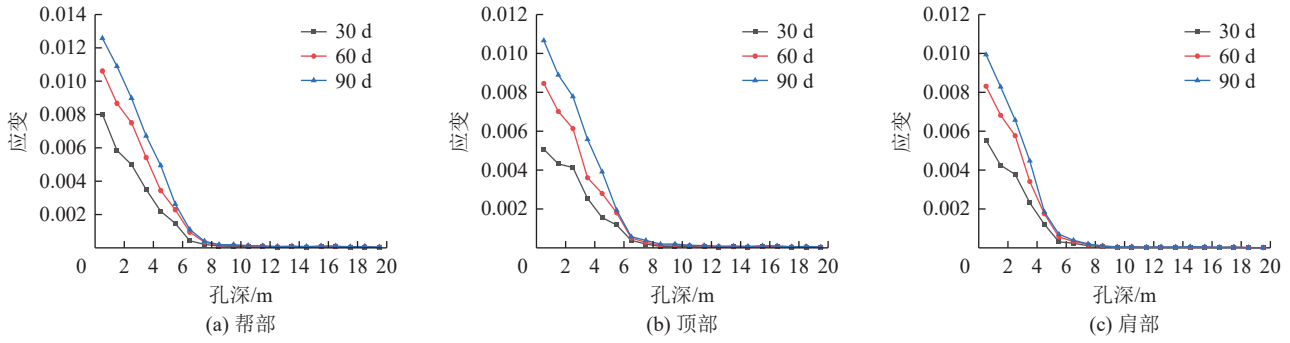


图 14 围岩应变监测曲线

Fig.14 Strain monitoring curve of surrounding rock

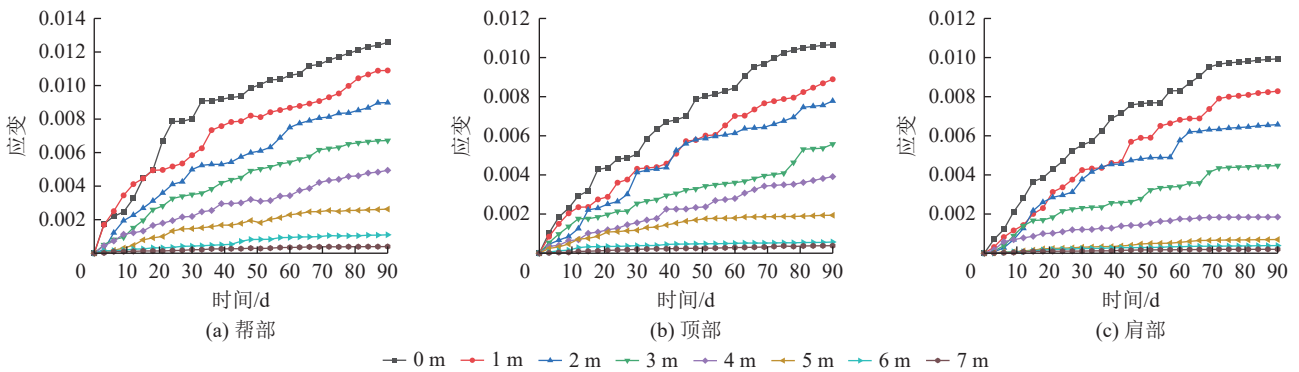


图 15 不同孔深围岩应变监测曲线

Fig.15 Strain monitoring curve of surrounding rock with different hole depth

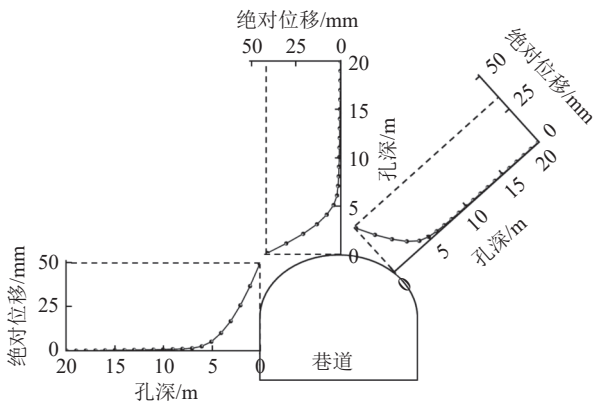


图 16 围岩各测点绝对位移 (90 d)

Fig.16 Absolute displacement map of surrounding rock (90 d)

测点应变值越小,也能更早地达到稳定,这是因为深处围岩受巷修影响较小,围岩应力更容易达到平衡。巷道不同位置的围岩应变变化也不同,以孔口位置应变为例,其中帮部应变值最大为 0.012 576 且增长时间最长,90 d 天后孔口处的测点应变仍有微量增长,且影响的范围最大,6 m 深处围岩也有少量应变产生;顶部应变值为 0.010 662,在 81 d 左右基本达到恒定,在 6 m 处围岩已经几乎没有应变产生了;肩部应变值最小为 0.009 934,在 69 d 左右就到恒定,

并且影响范围最小,在 5 m 处围岩已经几乎没有应变产生了。

图 16 为测试 90 d 巷道各测点所测得的绝对位移图。测孔深度均超过 20 m,达到巷道半跨的 5 倍以上,可认为孔内最深的 1 点不动,将其作为基点,其他各测点相对 1 点的位移即为该测点的绝对位移^[19]。根据图中所示,巷道各位置围岩绝对位移均表现出随孔深逐渐加深而减小的规律。其中,巷道帮部孔口位置处绝对位移最大为 49.1 mm,巷道顶部孔口位置处绝对位移最小为 32.5 mm。各位置围岩绝对位移主要发生在在 1~5 m 处,随着孔深的加深围岩绝对位移逐渐减小,在孔深 7 m 外的围岩绝对位移近乎为 0。

3.4 松动圈范围分析

根据应变传感光缆测试得到的 3 个不同测试孔中的应变数据,可以对该测试地点围岩的松动圈大致范围进行判定。围岩破裂后松动圈以内非连续体沿破裂面张开明显,形成或诱发控制性结构面,宏观表现为岩体该点处位移突变,在巷道围岩应变图中表现为该点之后围岩应变迅速以 0 为目标收敛^[20]。图 17 为 90 d 巷道围岩应变变化率随孔深变化图,结

合图14可以看出围岩帮部测试孔中,1~7 m孔深范围内的应变值随孔深的变化而减小,且距离孔口5~6 m处的围岩应变迅速向0收敛,表明围岩松动的区域集中在5 m左右范围内;围岩顶部测试孔中,1~7 m孔深范围内的应变随孔深的变化而减小,且距离孔口5~6 m处的围岩应变迅速向0收敛,表明围岩松动的区域集中在5 m左右范围内;围岩肩部测试孔中,1~6 m孔深范围内的应变值随孔深的变化而减小,且距离孔口4~5 m处的围岩应变迅速向0收敛,表明围岩松动的区域集中在4 m左右范围内。

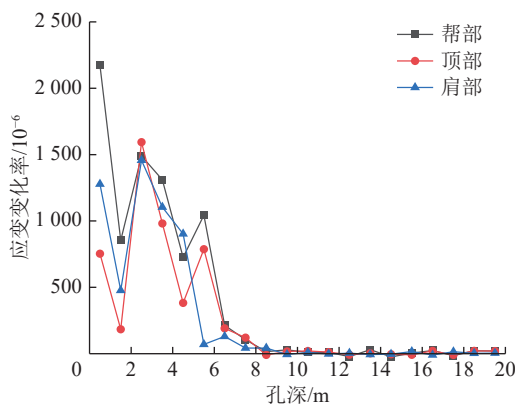


图17 巷道围岩应变变化率

Fig.17 Strain change rate of roadway surrounding rock

根据上述对巷道围岩变形区域的分析,最终确定平煤股份四矿己₁₆-23110运输巷片盘外段测试地点的松动圈范围如图18所示。综合上述分析,巷道围岩在后续的工作中应着重注意帮部和顶部的应变监测和支护工作。

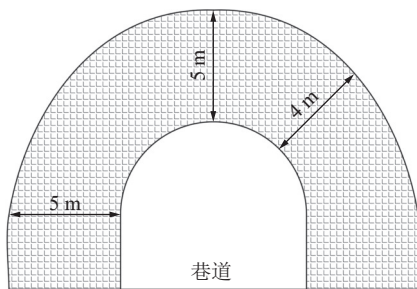


图18 测点巷道松动圈范围示意

Fig.18 Scope diagram of loose circle in measuring point roadway

4 结 论

1) 研制了一种基于弱光纤光栅传感原理的大量程准分布式应变传感光缆,光缆锚点间距为1 m,中心波长为单波长1532 nm,光纤光栅反射率为0.05%,应变量程0~4%,裸纤最大应变超0.04。

2) 室内标定试验表明研制的弱光纤光栅应变传感光缆具有良好的线性度和测试精度,最大量程不低于0.03,满量程输出值为36.9 nm,灵敏度为1.23 pm/ $\mu\epsilon$,准确度等级均在0.5以内。

3) 应变传感光缆在煤矿深部巷道开展了现场试验,记录了巷道围岩帮部、拱顶及拱肩测孔中心波长数据,掌握了巷修后90 d内巷道围岩内部变形发展规律,肩部围岩优于顶部围岩优于帮部围岩,巷道围岩应变多发生在7 m范围内。

4) 取围岩应变迅速向0收敛位置作为围岩松动区边界,确定巷道帮部和顶部松动区边界为5 m,肩部松动区边界为4 m。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [2] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [3] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994(1):21-32.
DONG Fangting, SONG Hongwei, GUO Zhihong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 1994(1): 21-32.
- [4] 靖洪文,孟庆彬,朱俊福,等.深部巷道围岩松动圈稳定控制理论与技术进展[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):429-442.
JING Hongwen, MENG Qingbin, ZHU Junfu, et al. Theoretical and technical progress of stability control of broken rock zone of deep roadway surrounding rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(3): 429-442.
- [5] 杨旭旭,王文庆,靖洪文.围岩松动圈常用测试方法分析与比较[J].煤炭科学技术,2012,40(8):1-5,54.
YANG Xuxu, WANG Wenqing, JING Hongwen, et al. Analysis and comparison on conventional loose zone measuring and test methods[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 1-5,54.
- [6] 杨艳国,范楠.基于单孔声波法测试巷道围岩松动圈试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):93-100.
YANG Yanguo, FAN Nan. Experimental study on surrounding rock loosening circle by single-hole acoustic wave testing method[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 93-100.
- [7] 肖建清,冯夏庭,林大能.爆破循环对围岩松动圈的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2248-2255.
XIAO Jianqing, FENG Xiating, LIN Daneng. Influence of blasting round on excavation damaged zone of surrounding rock[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2248–2255.
- [8] 周 辉, 渠成堃, 王竹春, 等. 深井巷道掘进围岩演化特征模拟与扰动应力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1821–1831.
- ZHOU Hui, QU Chengkun, WANG Zhuchun, *et al.* Simulating the variation of surrounding rock and analyzing the disturbed stress field during excavation of deep mine roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1821–1831.
- [9] 郭 亮, 李俊才, 张志铖, 等. 地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3009–3015.
- GUO Liang, LI Juncai, ZHANG Zhicheng, *et al.* Research on surrounding rock loose zone of tunnel under unsymmetrical loading with ground penetrating radar and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3009–3015.
- [10] 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, 56(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, 56(6): 61–67.
- [11] 柴 敬, 刘永亮, 袁 强, 等. 矿山围岩变形与破坏光纤感测理论技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 208–217.
- CHAI Jing, LIU Yongliang, YUAN Qiang, *et al.* Theory-technology and its application of optical fiber sensing on deformation and failure of mine surrounding rock[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 208–217.
- [12] 柴 敬, 韩志成, 雷武林, 等. 回采巷道底鼓演化过程的分布式光纤实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 146–156.
- CHAI Jing, HAN Zhicheng, LEI Wulin, *et al.* Distributed optical fiber measurement of floor heave evolution in mining roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 146–156.
- [13] 王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2196–2201.
- WANG Yubao, LAN Haijun. Study of fiber bragg grating sensor system based on wavelength division multiplexing /time – division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2196–2201.
- [14] 黎 威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 234–241.
- LI Wei, ZHANG Yongjia. Enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer vibration sensing system based on weak grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 234–241.
- [15] 刘 胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 313–318.
- LIU Sheng, HAN Xinying, XIONG Yuchuan, *et al.* Distributed vibration detection system based on weak fiber bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 313–318.
- [16] 董小鹏, 郑俊达. 基于波分复用的光纤多防区周界传感系统[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 112–115.
- DONG Xiaopeng, ZHENG Junda. Multi-area perimeter sensing system based on optical fiber wavelength division multiplexing technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 112–115.
- [17] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29–33.
- LIU Deming, SUN Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29–33.
- [18] 廖帮全, 赵启大, 冯德军, 等. 光纤耦合模理论及其在光纤布拉格光栅上的应用[J]. 光学学报, 2002(11): 1340–1344.
- LIAO Bangquan, ZHAO Qida, FENG Dejun, *et al.* Coupled-mode theory for optical fiber and its application to fiber bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2002(11): 1340–1344.
- [19] 刘泉声, 康永水, 白运强. 顾桥煤矿深井岩巷破碎软弱围岩支护方法探索[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3097–3104.
- LIU Quansheng, KANG Yongshui, BAI Yunqiang. Research on supporting method for deep rock roadway with broken and soft surrounding rock in Guqiao Coal Mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3097–3104.
- [20] 邹红英, 肖 明. 地下洞室开挖松动圈评估方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 513–519.
- ZOU Hongying, XIAO Ming. Study of methodology for assessment of excavation disturbed zone of underground caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 513–519.