



区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究

柴敬 王佳琪 杨健锋 高登彦 高奎英 陈建华 刘泽宇 杨磊

引用本文:

柴敬, 王佳琪, 杨健锋, 等. 区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 126–137.

CHAI Jing, WANG Jiaqi, YANG Jianfeng. Research on the application of fiber bragg grating monitoring for deformation of coal pillar in sections[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 126–137.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1413>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤光栅采动应力测试的冲击地压预警技术研究

Study on early warning technology of rock burst based on mining stress monitoring by fiber-grating

煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6439bad9-aeee-4930-8639-e5ece584c58f>

上覆遗留区段煤柱对下伏煤层开采的扰动影响研究

Study on disturbing influence of overlying remaining coal pillars on underlying coal seam mining

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9a1740d2-5a23-4e99-a696-41d5dfc59e5c>

动压巷道区段煤柱合理留设宽度研究

Study on reasonable width of coal pillar in dynamic pressure roadway

煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/59b0b3e2-266e-47b7-992c-f75cf0ad9fc3>

基于光纤光栅的刮板机直线度感知关键技术研究

Research on key technique of straightness perception of scraper conveyor based on fiber grating

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/37023a1a-ddbf-4175-b285-f5c9e5dbfcce>

倾斜煤层区段煤柱爆破卸压工程应用

Application of blasting and pressure relief of reserved coal pillars along the inclined coal seam

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 104–111 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2d39f4c7-380e-43bb-8980-38b5b3eb7a7e>

基于煤岩应力监测的深井沿空掘巷煤柱宽留设研究

Research on width of coal pillar of roadway driving along goaf based on coal-rock stress monitoring

煤炭科学技术. 2017(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b345f9e1-ba03-430e-9000-79694c70d6b3>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

柴敬, 王佳琪, 杨健锋, 等. 区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 126–137.

CHAI Jing, WANG Jiaqi, YANG Jianfeng, *et al.* Research on the application of fiber bragg grating monitoring for deformation of coal pillar in sections[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 126–137.

区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究

柴敬^{1,2}, 王佳琪¹, 杨健锋¹, 高登彦³, 高奎英³, 陈建华³, 刘泽宇¹, 杨磊¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 国家能源集团 神东煤炭集团, 陕西 神木 719315)

摘要: 针对近距离煤层下伏工作面过上覆遗留煤柱时, 发生动静载叠加诱发强矿压显现, 导致区段煤柱发生变形失稳造成人员伤亡和设备破坏。为探索基于光纤光栅实时监测区段煤柱变形发育特征, 分析进、出遗留煤柱阶段矿压显现机理, 将FBG、光栅应力计的光测方法相结合, 结合现场实测的区段煤柱变形应力应变水平参量变化规律, 研究煤柱应变空间分布规律及回采过程中工作面前方煤柱内部应变时域响应特征, 验证光测方法在煤体应变水平观测的可行性。结果表明: 工作面回采经过上覆遗留煤柱期间, 区段煤柱顶板受集中应力影响, 上部岩层块体破断并发生回转导致煤柱载荷增加, 随着工作面推进覆岩断裂进一步向上传递, 关键层断裂回转发生导致工作面来压, 最终导致区段煤柱变形失稳。根据现场光栅应变增量幅度判断煤柱内局部变形的剧烈程度, 在集中应力作用下, 区段煤柱变形时发生最大应变为 650×10^{-6} , 上覆岩层集中应力造成煤柱应变水平峰值位置为煤柱宽度 11.5 m, 沿煤柱宽度方向应变表现出先增加后减小然后趋于稳定的趋势, 内部应变随采动过程中影响范围在 5 m 左右。综合研究工作面回采经过上覆遗留煤柱时应变对区段煤柱发生变形失稳的特点和规律, 以及应变水平变化和煤柱物理力学性质, 得到煤柱破坏的前兆特征, 在外力作用下达到变形峰值前对煤柱提前进行卸压和防护的安全处理。

关键词: 区段煤柱; 遗留煤柱; 矿压显现; 光纤光栅; 光栅应力计; 实时监测

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)01-0126-12

Research on the application of fiber bragg grating monitoring for deformation of coal pillar in sections

CHAI Jing^{1,2}, WANG Jiaqi¹, YANG Jianfeng¹, GAO Dengyan³, GAO Kuiying³, CHEN Jianhua³,
LIU Zeyu¹, YANG Lei¹

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of West Mines Exploitation and Hazard Prevention of Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. China Energy Group Shendong Coal Group, Shenmu 719315, China)

Abstract: When the coal mine passes through the overlying coal pillars in close proximity to the coal seam, the superposition of dynamic and static loads induces strong mining pressure, leading to deformation and instability of the coal pillars in the section, resulting in casualties and equipment damage. In order to explore the real-time monitoring of deformation and development characteristics of coal pillars in sections based on fiber Bragg grating, and analyze the mechanism of rock pressure manifestation in the stage of entering and exiting residual coal pillars, the optical measurement methods of FBG and grating stress meters are combined with on-site measurement to study the spatial distribution law of coal pillar strain and the time-domain response characteristics of internal strain of coal pillars in front of the working face during the mining process. Feasibility study on verifying the optical measurement method for observing the strain level of coal bodies. The results indicate that during the process of mining the overlying coal pillars, the roof of the section coal pillars is affected by concentrated stress, and the upper rock block is broken and rotated, resulting in an increase in the load on the coal pillars. As the work-

收稿日期: 2023-11-20

责任编辑: 常琛

DOI: 10.12438/cst.2023-1413

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52004203)

作者简介: 柴敬(1964—), 男, 宁夏平罗人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: chajj@xust.edu.cn

ing face advances, the overlying rock fracture further propagates upwards, and the key layer fracture recurs, causing pressure on the working face. The overlying rock rotates downward, ultimately leading to deformation and instability of the section coal pillars. Based on the amplitude of on-site grating strain increment, the severity of local deformation inside the coal pillar is determined. Under the influence of concentrated stress, the maximum strength that occurs during the deformation of the section coal pillar is $650\text{ }\mu\text{e}$ on the left and right sides, the concentrated stress in the overlying strata causes the peak horizontal strain of the coal pillar to be located at the 11.5 m position of the coal pillar width. The strain along the width direction of the coal pillar shows a trend of first increasing, then decreasing, and then stabilizing. The internal strain field has an impact range of about 5 m during the mining process. A comprehensive study is conducted on the characteristics and laws of deformation and instability of coal pillars in the section caused by strain when the mining face passes through the overlying coal pillars. Combined with changes in strain level and physical and mechanical properties of the coal pillars, the precursor characteristics of coal pillar failure are obtained. Before reaching the peak deformation under external force, safety measures are taken to relieve pressure and protect the coal pillars before lifting them.

Key words: section coal pillar; remaining coal pillars; mine pressure; fiber bragg grating; grating stress gauge; real time monitoring

0 引言

我国主要矿区浅部煤炭资源逐年减少,逐渐进入下位煤层开采的阶段。然而,下位煤层开采中伴随着动力灾害现象,成为阻碍矿山安全生产和威胁工作人员生命安全的重要因素之一^[1-2]。在回采过程中,工作面受上覆采空区遗留煤柱影响,导致下部煤层矿压显现明显,局部帮鼓、煤柱变形严重等事故频发,且随着近距离煤层群开采比例扩大,下层煤的工作面开采控制面临巨大难题,给矿山高效生产带来新的挑战^[3-5]。

针对工作面强矿压显现与回采巷道之间区段煤柱稳定性的作用关系,研究遗留煤柱和下位工作面空间关系耦合影响下工作面巷道强矿压显现,分析回采阶段区段煤柱的损伤变形特性,进而提出相应的合理控制理论和技术手段。蔡武等^[6]构建断层活化模型力学机制及诱冲机理,分析出其诱发冲击矿压的机理。于斌等^[7]理论分析煤层开采遗留煤柱对强矿压显现影响,得到了遗留煤柱对下煤层应力传递模型。鞠金峰等^[8]通过模拟实验和理论分析,对回采时出煤柱阶段动载矿压发生的机理和规律进行了深入研究。岳喜占等^[9]通过理论分析和数值模拟,计算了遗留煤柱影响下煤层底板附加应力载荷,并构建上覆煤层椭圆应力拱模型。赵猛等^[10]分析深部矿井坚硬厚岩层下工作面冲击矿压事故诱因,总结矿压规律并提出有效治理方案。张华磊等^[11]采用断裂损伤理论、弹塑性理论建立了巷帮围岩层裂板结构力学模型,分析了煤矿回采中巷道帮部围岩失稳机制。王家臣等^[12]采用室内试验、理论分析及现场实测综合手段对硬煤煤壁破坏形式、发生机理及影响因素进行分析。于远祥等^[13]对深埋煤层巷道煤帮变形破坏特征进行分析,得到了煤帮极限平衡区及

其破裂区宽度的理论计算公式。孙利辉等^[14]针对强动压作用下巷帮变形破坏问题,分析巷帮变形破坏特征和影响因素,建立巷帮受力破坏模型。贾后省等^[15]现场实测得到巷帮变形破坏规律,通过数值模拟和理论分析对巷道变形进行可行性分析。

有效的监测预警是预防此类情况的重要保障,光纤传感技术由于损耗低、线径小、距离长、精度高等特点,在各种工程现场得到成果应用,如煤矿、桥梁和核电站等,在分布面积广的大型应用平台也被用于检测结构健康状态。其中光纤光栅(FBG)技术传感器、体积小、线状设计灵活多样可被制成光纤光栅埋入式应变传感器,钻孔应力计作为采动应力监测成熟及常见仪器,基于光纤光栅与应力计相结合布设工艺,实现采动过程中区段煤柱支撑压力在线监测。

光测技术联合应用于现场的研究已经逐渐成熟。笔者^[16-17]综合利用光纤传感技术对采场上覆岩层运移过程中的内部应变,覆岩垮落形态、关键层载荷等实时联测监测。顾春生等^[18]基于光纤光栅传感器设计一种布设工艺,实现采动过程中对矿压的在线监测。梁敏富等^[19-20]设计一种新型光纤光栅锚杆测力计实现锚杆载荷变化的实时监测。李丽君等^[21]提出适用于煤岩体埋入的矿用液压支架压力测量的光纤光栅矿压传感器。卢毅等^[22]通过FBG技术对地裂缝发育及预测进行监测。张丁丁等^[23]利用光纤传感技术对采动影响下断层活化进行研究。

笔者将FBG、光栅应力计技术应用于回采过程中煤柱内部变形开展现场试验,用FBG进行结构内部应变实时监测,用应力计进行煤柱内部应力测试,分析了煤柱空间、时间应变场分布规律,研究了工作面推进过程中煤柱应力应变时域演化规律,验证了应变法在煤柱内部变形观测和矿压监测预警的可行性。

1 光测方法原理

1.1 光纤光栅应变

FBG, 即光纤布拉格光栅, 利用内部写入法或激光在光纤上形成周期性缺陷从而改变纤芯区域折射率, 当外界参量 (温度、应力) 改变时, 会改变光栅折射率, 导致传感器波长发生漂移, 通过检测波长漂移得出应变、温度。由光纤模式耦合理论可知, 当光栅折射率周期变换造成波导条件改变, 导致一定波长发生相应的模式耦合, 使得反射光对该波长出现奇异变换, 此时反射光最大值 λ_B (布拉格波长) 为

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

式中, n_{eff} 为纤芯折射率; Λ 为光栅反射周期。经过反射后的光栅中心波长与其折射率和周期关联密切, 当任一物理量发生变化时, 从而引起光栅反射光中心波长可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \varepsilon - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2}\right)(p - \nu p)\varepsilon \quad (2)$$

式中, ν 为光纤的泊松比; ε 为光纤应变值; p 为光纤的弹光系数, 定义 P_r 为合理弹光性系数, 则有:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_r)\varepsilon \quad (3)$$

式(3)即为光纤光栅波长量与应变的关系式。当光纤光栅材料确定时, 光纤光栅的应变传感系数为一常数。引入常数 K_λ 为光纤光栅应变灵敏度系数, 则有:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\lambda\varepsilon \quad (4)$$

式(4)即为波长漂移量与应变间的关系式, 若考虑环境温度对光纤光栅的影响, 则有:

$$\varepsilon = K_\lambda[(\lambda - \lambda_0) - K_T(T - T_0)] \quad (5)$$

得出光纤光栅应变与波长、温度之间的关系式, 其中, K_λ 为应变与波长变化量的比例系数; K_T 为波长变化量与温度的比例系数, $\text{nm}/^\circ\text{C}$; λ_0 为栅点波长的初始测量值, nm ; λ 为栅点波长的测量值, nm ; T 为 λ 测量时的环境温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为 λ_0 测量时的环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.2 光栅应力计应力

光栅应力计利用压力变化转换为光纤光栅波长漂移量的解析技术, 将光纤光栅钻孔应力计植入钻孔并施加初始应力, 当围岩受到扰动时会挤压压力枕, 压力枕会感受到压力并通过压力枕内的液压油传送到光纤光栅压力计。此时与之连接的光纤光栅会同步受到挤压使栅区发生变化, 光纤光栅压力计

会将压力变化转换为波长的漂移量, 通过波长信号解调设备将这部分变化解析出来便可以测得钻孔内部的应力值。

波长与应力之间满足以下关系式:

$$P = \left[(A_1 - A_0) - \frac{(B_0 - B_1)}{K_3} K_2 \right] \times 100 K_1 \quad (6)$$

其中, K_1 为压力与波长变化量的比例系数, MPa/nm ; K_2 为温度补偿系数, $^\circ\text{C}/\text{nm}$; K_3 为波长变化量与温度的比例系数, $^\circ\text{C}/\text{nm}$; A_0 为压力传感器测量的初始波长, nm ; A_1 为压力传感器实时采集的波长, nm ; B_1 为温补传感器实时采集的波长, nm ; B_0 为温补传感器采集的初始波长, nm 。

1.3 传感器测试精度

光缆传输线路距离、光纤熔接点数、输出光的能量、线缆弯折角度与激光路径损耗之间的差异性都会影响到测试精度。为保证光测系统数据的测量精准, 排查影响系统精度因素, 在进行光测精度测试过程中, 需要结合仪器性能和系统参数进行优化。采用高频连续测试来检验系统精度。

测试方法及实施步骤如下:

- 1) 开展测试煤柱的编号, 记录各传感器的坐标位置。
- 2) 在井下利用激光笔打出红色激光, 地面线路端头接受激光信号, 确保光缆线路通畅。
- 3) 为最大化减小因采动对精度的影响, 工作面检修期间开展短时连续测量, 分析系统的重复测试精度, 每个测孔 FBG、光纤光栅应力计, 均连续采集 200 组数据。
- 4) 将初次采集的数据作为初值, 后续测试结果与初值作差后的波动, 作为重复测试精度。
- 5) 将测量精度与传感器精度的数值对比, 对比二者是否满足允许误差范围内。

光测系统精度测试结果见表 1、图 1。

如图 1 所示, 1-1F 号, 2-1F 号钻孔的 FBG 重复测量 200 组数据得出波长漂移量误差在 $\pm 2 \text{ pm}$; 光栅应力计分别为 $\pm 3 \text{ pm}$ 、 $\pm 2 \text{ pm}$ 。由表 1 可以看出, 光栅与应力计精度误差范围均在 $\pm 5 \text{ pm}$ 之内, 波长漂移量转换为应变误差在 $\pm 1.69 \times 10^{-6}$, 应力误差分别为 0.075 MPa 和 0.05 MPa , 以上传感器均满足工程允许误差范围。

2 区段煤柱光测试验

2.1 试验工作面概况

测试选在陕西某矿压显现剧烈煤层, 测试工作

表 1 光测传感器精度
Table 1 Precision of optical sensor

钻孔编号	类型	FBG	光栅应力计
1-1号	波长/pm	±2	±3
	应变/ 10^{-6}	±1.69	—
	应力/MPa	—	±0.075
	允许波长误差范围/pm	±5	±5
2-1号	波长/pm	±2	±2
	应变/ 10^{-6}	±1.69	—
	应力/MPa	—	±0.05
	允许波长误差范围/pm	±5	±5

面为南翼盘区第 3 个回采工作面,位于上覆近距离煤层采空区下,上覆煤层中相邻工作面之间留设 30 m 宽度煤柱,造成该工作区段煤柱位于上覆近距离煤层遗留煤柱下方。该工作面距上覆煤层平均层间距为 30 m,区段煤柱长度 295 m,煤层厚度 4.04 ~ 5.2 m,平均厚度 4.5 m。如图 2 所示,工作面受上覆遗留煤柱影响,工作面回采过程中矿压显现强烈,区段煤柱

发生了严重的帮鼓、底鼓现象。

2.2 光测方法测试系统及装备

光测系统主要包括光纤光栅解调仪、光纤布拉格光栅传感器、光纤光栅传感光缆、光纤光栅应力计等。光纤光栅传感器数据采集利用 16 通道的光纤光栅解调仪进行测量,波长测量范围 1 510 ~ 1 590 nm,该便携式仪器体积较小,监测精度高,扫描频率为 1 ~ 50 Hz 可调,能实时监测应变信号(图 3、图 4)。

测试传感器为定点式光纤光栅光缆,与金属索状光缆连接,如图 3a 所示。试验前将传感器标定参数与钻孔编号相对应,便于测试植入钻孔后与出厂标定值对比判断传感器良好与否。图 3e 为外径厚度 50 mm 的 PVC 管,其作用是将光缆推送至测试孔内,光缆两端连接红色激光笔,随时根据光强确定光缆弯折与否,安装结束后孔口预留尾纤接入通讯光缆,线路集成至地面可进行长时数据监测。

2.3 遗留煤柱影响区域

近距离煤层群开采强矿压显现的机理相比单煤层开采更加复杂,引起局部静载应力集中的力源更

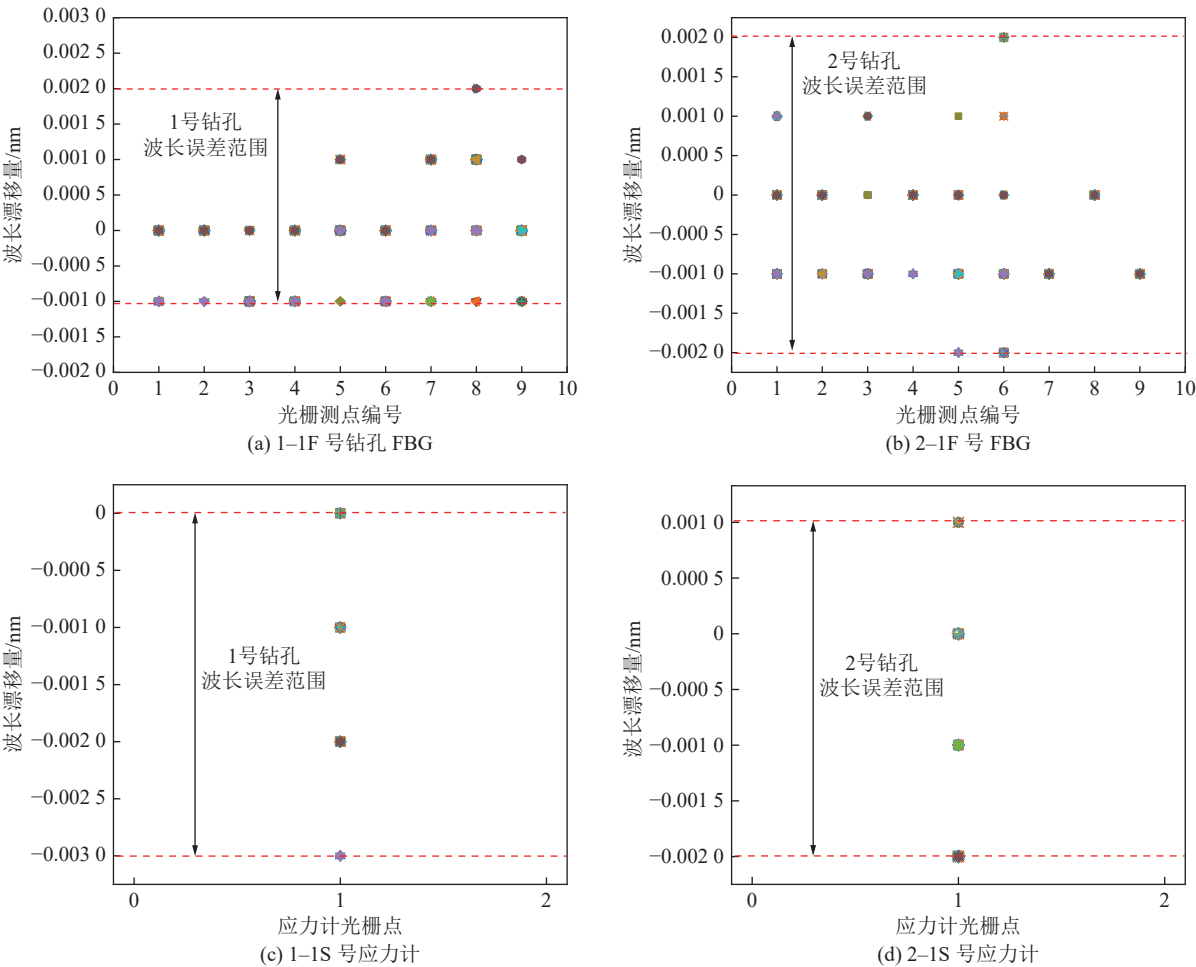


图 1 不同监测系统精度误差范围
Fig.1 Precision error range of different monitoring systems

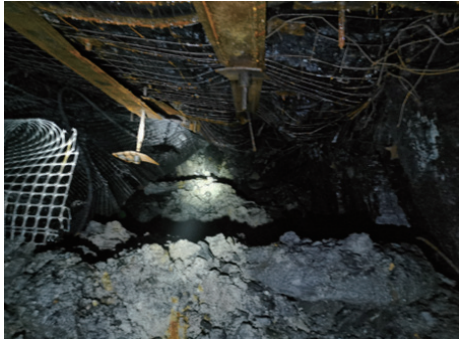


图 2 现场区段煤柱变形
Fig.2 Deformation of coal pillars in site section

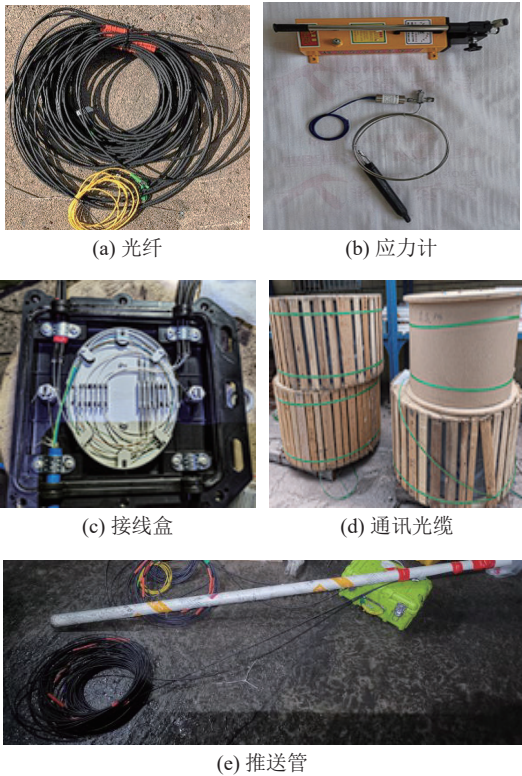


图 3 煤柱测试附属装置
Fig.3 Auxiliary device for coal pillar testing

加丰富,在浅部开采条件下也会出现较高的局部应力集中区。区段煤柱处于上覆采空区遗留煤柱下,受顶板自重和上覆煤柱集中应力的静态力源影响,工作面回采时,一侧采空或两侧采空的煤柱受采空区侧向的支撑压力的叠加作用,使得工作面危险程度上升。同时,煤柱上的集中应力可能向下传递,当煤柱下方进行采掘作业时,引起遗留煤柱附近煤岩变形失稳破坏,产生的动载扰动将与局部静载叠加诱发强矿压显现^[24]。

如图 5 所示,测试区段煤柱与上覆煤层底板垂直距离为 30 m,遗留煤柱宽度 30 m,垂距与煤柱宽度比值为 1。工作面受上覆煤柱影响范围 L 可通过式(7)计算:

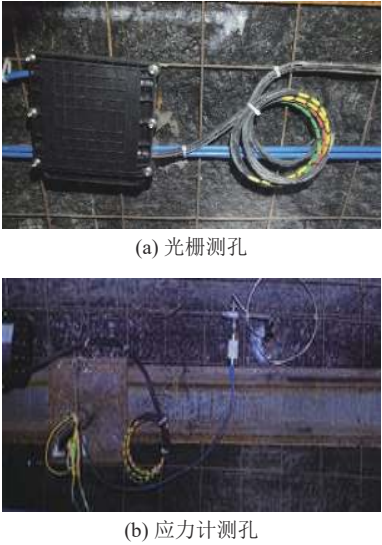


图 4 煤柱光测系统布置及监测实物
Fig.4 Layout and monitoring physical of coal pillar optical measurement system

$$L = b + 2(h_1 + h_2)\tan \varphi \quad (7)$$

式中, φ 为煤柱影响角度; h_1 为两层煤间距; h_2 为煤柱厚度; b 为上覆煤柱宽度。研究的区段煤柱,处于上覆遗留煤柱正下方,在上覆遗留煤柱影响下,煤柱长度范围内应力呈现出中间大,两侧小分布特征,在该载荷影响下,工作面回采推过该区段煤柱位置时,强矿压显现明显,冲击危险性将大幅提高。在该范围内布置传感器便于分析工作面回采对该煤柱的影响。

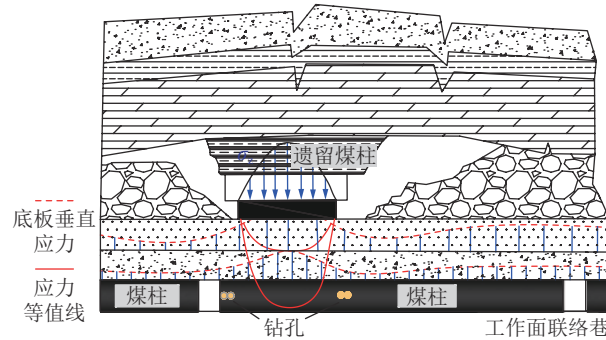


图 5 遗留煤柱下区段煤柱应力分布
Fig.5 Stress distribution of coal pillars in lower section of remaining coal pillars

2.4 测试方案

试验测试场所选定在上覆遗留煤柱下,按图 6 所示方式在 30 m 遗留煤柱下部两侧 10 m 处各布置 2 组测试钻孔,传感器钻孔编号分别为光纤光栅(F)、应力计(S)沿着工作面推进方向,测试钻孔编号分别为 1-1F 号,1-1S 号,2-1F 号,2-1S 号。

确定位置在遗留煤柱下,根据煤柱长度确定测

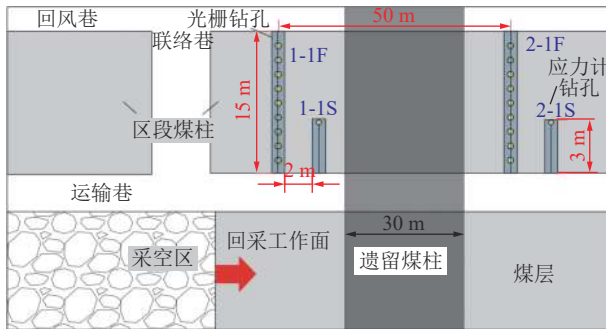


图6 区段煤柱测试钻孔布置平面示意

Fig.6 Layout plan of drilling holes for section coal pillar testing

孔位置,从回风巷向运输巷打直径94 mm、深度15 m的钻孔,并清理钻孔中煤屑。用抱箍将测试光缆固定在管上,将测试光缆推送至预定位置。固定好传感器后不断续接PVC管植入钻孔中,通过红光笔随时检查传感器状态,并用便携式解调仪监测光栅数据情况。按照以上步骤完成测试钻孔的光缆布置,如图7所示。

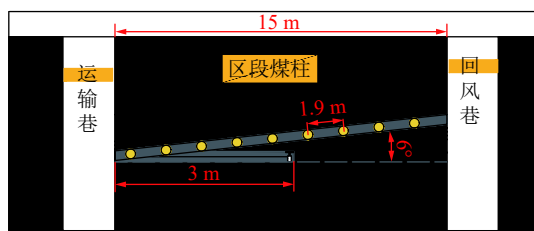


图7 区段煤柱FBG应变测试钻孔布置示意

Fig.7 Schematic of borehole layout for strain testing of section coal pillars

光纤测试钻孔孔径94 mm,角度6°,孔深15 m,测孔内分别有FBG传感器,孔内光纤光栅布设9个测点,主测点4个,剩下5个为备用测点,间距0.9 m,能实现不同深度处煤体水平应变信号监测。

应变测试为光纤光栅测试,光纤光栅测试是指栅区受到拉伸或压缩引起折射率变化,是通过波长改变转化公式,用应变表征被测物体变形量。在工作面回采期间,首先依次对光纤光栅进行测试,频率为每小时采集一次,按照上述步骤连续进行每日长时间测试,测试时间为下煤层回采经过上覆遗留煤柱总过程,进而能够测试煤层回采过程中煤柱内部的应变。

采用应力法监测工作面回采区域的强矿压显现。区域监测采用KSE型液压式应力监测系统监测工作面回采时矿压事件。布置位置与光纤光栅测孔类似,按照工作面回采方向在煤柱内部布置依次为应力计测孔、光栅测孔,测孔间距为2 m,从运输巷煤壁打

孔深3 m、角度0°的钻孔,测试时间与上述光纤光栅测孔同步进行,根据工作面回采进度定期检查保证传感器正常运行。

3 区段煤柱光测响应结果规律

3.1 区段煤柱空间分布规律

由于安装工艺铺设钻孔为近水平,FBG测得主要为水平应变,后文描述应变均为水平应变。为研究区段煤柱内FBG空间分布规律,分别测试工作面推进至2-1号测孔前-20、-10 m,经过2-1号测孔时及滞后测孔10、21、35 m。测试结果表明,煤柱未受到扰动应变值会稳定在 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 范围内。

为测得该测孔不同孔深的应变值,连续采集测孔波长变化15 min,取该段时间内波长变化的平均值。2-1号测孔内测试结果如图8所示,工作面推进未到达测孔应变略有波动,推过钻孔变化明显,应变大小随孔深的变化规律基本一致,随着工作面推进,峰值应变逐渐增大,即应变随钻孔增加呈先增大后减小的变化规律。如图8所示,在孔深10.3~13.1 m,应变较大,分布在 $(169 \sim 337) \times 10^{-6}$,且应变值最大均出现在孔深13.1 m处,分别为 170×10^{-6} (滞后工作面10 m)、 315×10^{-6} (滞后工作面21 m)、 338×10^{-6} (滞后工作面35 m);在距孔口0~8.9 m范围内,FBG测点测得应变值较小,分布在 $(3 \sim 97) \times 10^{-6}$,在 37×10^{-6} 附近平稳变化,即应变随孔深呈现先增加后减小的趋势。综上所述,由煤柱“弹塑性理论”分布规律可知^[25],煤柱依次存在破碎区、塑性区、弹性区、原岩应力区,如图9所示,区段煤柱受超前支承压力和侧向支承压力影响,煤柱宽度方向发生弹塑性变形,0~10 m范围内煤柱基本处于弹性变形阶段,应变峰值在距煤壁13 m左右,随工作面推进整体水平应变降低,表明此位置煤体发生塑性破坏,13 m处塑性变形阶段应变水平整体较低。以上分析表明,煤柱内部应变大小的分布与“弹塑性区”分布有很好的对应性^[26]。

3.2 工作面回采过程中时域演化规律

随着工作面接近上覆遗留煤柱影响区域,在进煤柱阶段前,区段煤柱受超前支承压力影响,顶板破断成块相互铰接结构稳定,区段煤柱载荷增加但仍保持稳定,如图10a所示,内部光栅受到径向压缩产生横向应变,导致横截面由圆形变成椭圆形,光纤光栅的反射特性也随之产生偏振特性,产生的应变呈减小状态,如图10b所示。水平光纤光栅在岩层断裂弯曲下发生弯曲形变,岩层两侧存在水平张拉裂

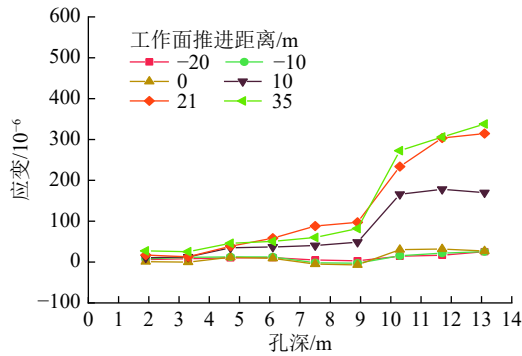


图8 2-1F号FBG不同孔深处应变曲线

Fig.8 No. 2-1F FBG strain curve at different hole depths

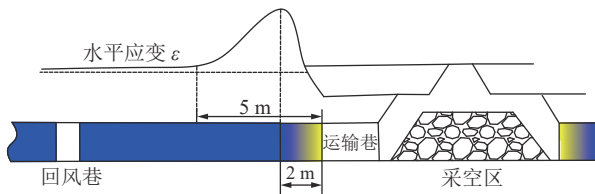
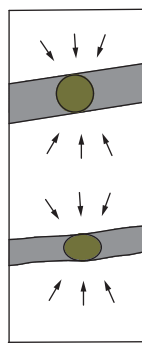
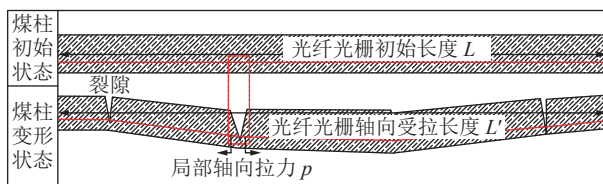


图9 煤柱侧向支承压力分布

Fig.9 Lateral support pressure distribution of coal pillars



(a) 径向受力



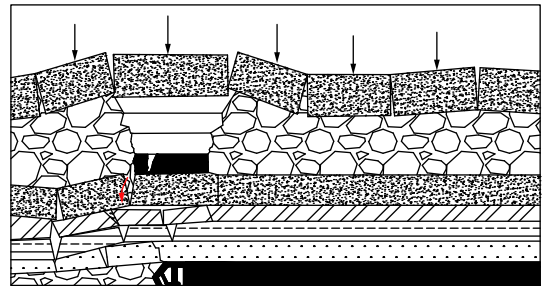
(b) 轴向受力

图10 光纤光栅受力

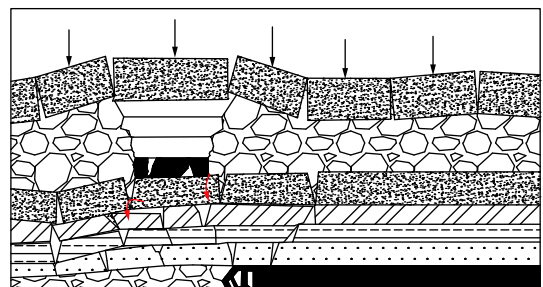
Fig.10 Radial force diagram of fiber bragg grating

隙,岩层弯曲造成的光纤受力可视为施加在光纤上的轴向拉力,存在水平张拉裂隙时,光纤光栅的中心波长向长波方向移动,分布在光纤光栅上的拉应力将在裂隙产生的对应位置产生突变,产生应变呈增大状态。如图11所示,进煤柱阶段覆岩结构发生改变,在采动影响下,顶板发生破断,块体铰接处因应力集中进一步破坏发生回转,导致区段煤柱上覆载荷增加,内部出现裂隙,光栅产生受拉应力影响产生横向水平应变。随着工作面继续推进,覆岩破断回

转上传递,关键层破断导致来压,煤柱内部裂隙进一步发育,加速扩张形成裂缝,水平应变也随之迅速增大。



(a) 进煤柱阶段



(b) 出煤柱阶段

图11 上覆遗留煤柱变形失稳模型

Fig.11 Deformation and instability model of overlying residual coal pillars

图12为2022-11-12—11-29工作面推进情况,为直观看应变测试曲线效果,此处将横坐标工作面推进期间的日期,按实际工况转化为工作面至测孔推进距离。以测试孔为基准0点,工作面推进至钻孔前-25 m至滞后钻孔100 m测试孔期间,FBG 2-1F号测点处应变时域变化曲线、光栅应力计2-1S号测点处应力时域变化曲线。为了详细全面分析应变、应力与生产进度之间的关系,分别对推进过程中期间的水平应变进行分析。由图12可以看出,在工作面推进期间,应变整体呈现出阶梯式上升趋势,FBG受到横向拉力影响,煤柱内部应变逐渐增大 650×10^{-6} 左右趋于稳定状态。

如图13a所示,工作面至测孔-29 m前,应变呈平稳波动状态,至工作面至测孔-30 m开始,应变曲线开始波动,直至-19 m时,应变曲线出现“尖峰”状突变,但应变变化值较小,在推进至距测孔-10 m时,应变曲线变化明显,表明光纤光栅监测超前支承范围在-30 m左右,并在煤壁前方-10 m支承压力达到峰值。

由图13b可以发现,在工作面推进至测孔后,从工作面滞后钻孔开始,应变开始出现逐渐增加的趋势,煤柱内部应变随工作面的推进增加速率不同,不

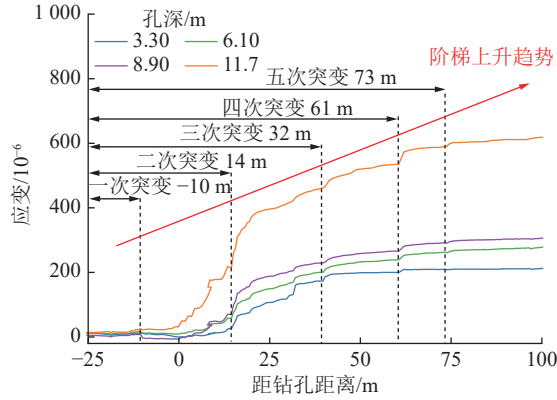


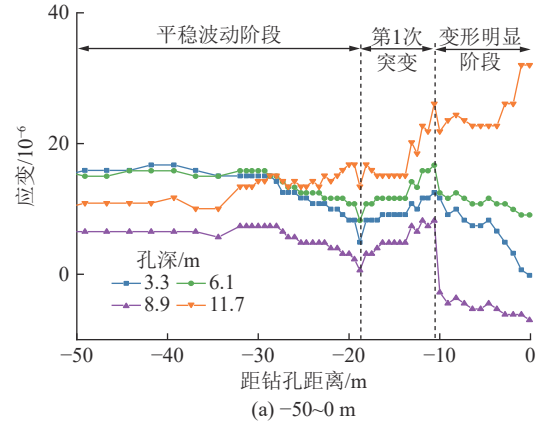
图 12 2-1F 号测孔 FBG 全周期测试结果

Fig.12 Full cycle test results of No. 2-1F measuring holes

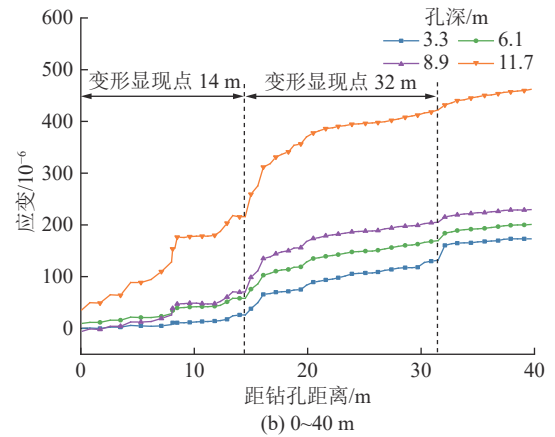
同孔深处光栅测点应变不同,例如光栅测点在孔深 11.7 m,应变量均大于其他测点的应变。工作面经过测孔开始,应变出现立刻上升的趋势,此过程持续至工作面滞后钻孔 14 m,随后煤柱内部裂隙显现,应变快速增加,于工作面推进 16 m,应变快速增加至 312×10^{-6} ,随后增减速率衰减,并随工作面推进过程中处于平稳增加状态。在第 2 次变形发育时,应变呈现先缓慢增加(滞后测孔 30 m)后快速增加的趋势,随后在工作面滞后钻孔 32 m 后,煤柱内部稳定,应变在 450×10^{-6} 附近平稳增加。

图 13c 为工作面推进过程中滞后测孔 40~100 m 应变变化曲线,在工作面正常推进过程中,应变均表现出平稳增加的状态,与之前叙述一致。由于煤柱内裂隙发育程度不同,在工作面分别测孔 47, 61, 73 m 应变分别出现小幅增长,随工作面继续推进期间,应变曲线均保持平稳波动状态,应变曲线峰值在 609×10^{-6} 附近平稳波动,此时工作面滞后测孔 90 m,煤柱内部应变趋于稳定,工作面推进对煤柱影响保持平稳。

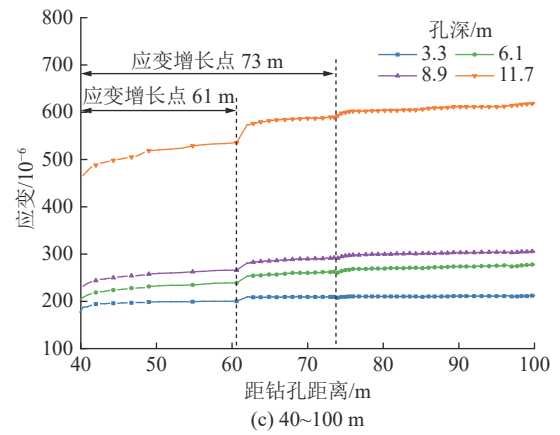
观察图 13a 可以发现,在工作面推进至煤柱前方 -20 m 出现一次波动,曲线负向增大,出现压应力,此段压应力变化即为工作面超前支承压力的变化,煤柱内部受到超前支承压力影响,在推进 -10 m 至钻孔阶段应变整体呈快速波动,应变曲线呈上升状,煤柱内部开始产生裂隙。FBG 传感器因内部裂隙扩展,由垂向应力变为在剪应力作用下产生拉伸变形,此时所受为轴向拉力,当工作面靠近钻孔处时,曲线呈下降趋势,煤体变形破碎并重新压实。图 13b 工作面推进过程中应变先呈现平稳增加状态后突然出现短暂快速增加趋势,煤体拉应力值急剧增大,达到峰值后稳定一段时间,之后随着煤体破裂变形使 FBG 产生弯曲变形,使得裂隙张开位置产生拉应力突变;



(a) -50~0 m



(b) 0~40 m



(c) 40~100 m

图 13 回采期间 2-1F 号 FBG 应变变化曲线

Fig.13 Strain variation curve of No. 2-1F FBG during mining

同理图 13c 工作面推进过程中也出现相同情况。

以上结果可以表明各测点局部变形程度剧烈,顶板破断发生回转现象,致使上覆遗留煤柱及岩层倾倒,采场覆岩周期性运动,顶板切落瞬间释放大能量,煤柱内部应变出现短暂迅速增加,区段煤柱压力叠加超出承载能力,出现变形失稳现象。结合光栅应力计与 FBG 联合分析出现该现象原因。

光栅应力计详情如图 14 所示,应力计安装后,初始值基本为 0,钻孔内部测得的应力值为煤柱垂直应力的变化量,煤柱内部应力分布情况均为煤柱应

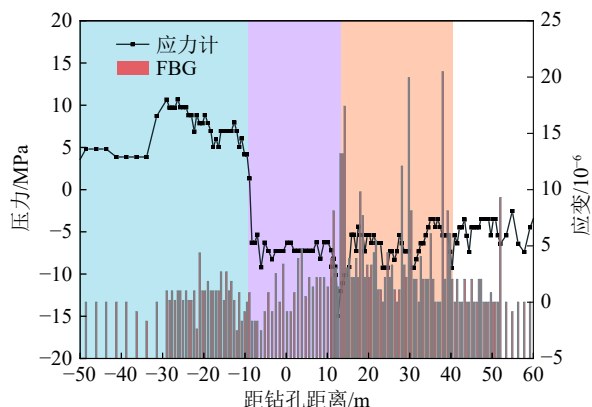


图 14 2-1 号测孔 FBG 应变梯度及应力计变形响应

Fig. 14 No. 2-1 measuring hole FBG and strain gauge deformation response

力的增量,为满足与 FBG 测量水平方向一致性,根据材料力学第一强度理论和筒体壁厚极限理论可得,孔壁对应应力计水平作用极限值为

$$f_i = \frac{2n[\sigma](1+\xi)}{n+2R} \quad (8)$$

式中, $[\sigma]$ 为应力计水平方向的应力; f_i 为孔壁对应应力计的作用力; ξ 为应力传递效率; n 为应力计的壁厚; R 为钻孔半径。

由于超前支承压力的影响,应力计测试曲线在煤柱前方 30 m 出现应力波动,此时处于应力增长区并在煤柱前-10 m 应力波动明显,煤柱受到垂向应力作用,说明超前支承压力达到峰值,此时 FBG 横向应变出现小幅增长。

当工作面推过测孔时,孔内应力计与 FBG 分别对孔内变形影响明显,在滞后测孔 14 m 左右,在矿压影响下应力计与围岩应力相互平衡状态被打破,孔内出现裂隙,应力计的支承应力出现平衡-波动-平衡的状态,此时 FBG 受到轴向拉力影响,水平应变出现突增,增量在 180×10^{-6} 。随着工作面继续推进,传感器对煤柱内部变形影响明显,该阶段内应力水平升高,应变跳跃事件增多且跳跃幅度增长,在 FBG 出现多次应变峰值之前多次出现应力增长现象,表明工作面回采过程中引起煤柱支承应力改变及矿压显现,使得煤柱内部应变的瞬间突增,进而导致应变在工作面推进期间呈现阶段性平缓后突然增加的趋势。

3.3 上覆遗留煤柱采动变形光测特征

采动条件下,煤体随着应力水平和加载次数的增多,内部微裂隙逐步萌生、发育连接,形成宏观裂隙,最终破坏失稳。FBG 对煤体变形进行监测时,煤体表面或者内部出现微观裂隙的时候,裂隙产生位

置光栅所测得的应变会明显大于相邻区域。随着裂隙进一步发育,加速扩张,宽度增大,形成裂缝,裂缝处光纤应变也随之迅速增大,根据光栅应变增量来判断局部煤体变形的剧烈程度和实现煤体变形定位。如图 15 所示。

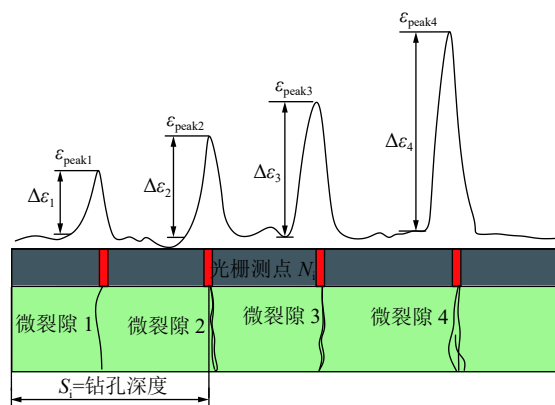


图 15 煤体内部变形光栅应变响应

Fig. 15 Strain response of deformation grating inside coal body

图 16 为工作面推进距离 1-1F 号钻孔前-20 m 至滞后测孔 100 m 期间 FBG 不同孔深处应变时域对比曲线,可以看出,应变均随煤层回采呈现逐渐增加趋势,FBG 在工作面期间,应变出现 4 次瞬时突变,瞬间突增最大应变的位置在滞后测孔 16 m 处,工作面推进滞后测孔 41~100 m 期间,应变均平缓稳定,波动幅度不明显,逐渐趋于稳定,达到应变稳定阶段。

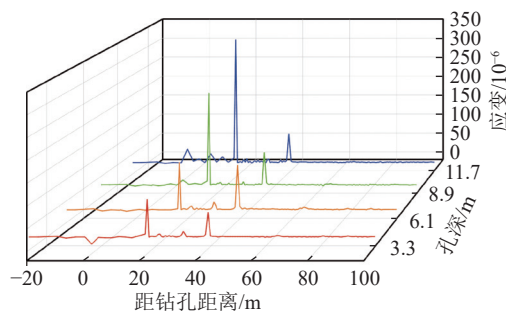


图 16 回采期间 1-1F 号应变曲线

Fig. 16 Strain curves for different hole depths of No. 1-1F during mining

图 16 中孔深 3.3 m 所示,工作面回采期间 FBG 应变均发生不同程度突增,其中在滞后钻孔 16 m 与 37 m 时瞬间增加应变量较大,增加应变量分别为 85×10^{-6} 与 62×10^{-6} ,在 30 m 处应变仅增加 19×10^{-6} ,应变呈现“阶梯”增加趋势,随后应变曲线均逐渐平缓稳定增加。在工作面回采滞后钻孔 40~100 m 期间,FBG 测得,平均应变差量 40×10^{-6} 。观察图 16 中孔深 6.1 m 可以发现,应变增加趋势与孔深 3.3 m 类

似,不同的是工作面在滞后测孔 40 m 后,应变曲线突增量大。

图 16 中孔深 8.9 m 可知,在距离测孔前-6 m, FBG 出现应变波动现象,应变增加 94×10^{-6} ,随后持续增加,该状态维持了约 20 m,随后 FBG 应变瞬间增加位置在滞后测孔 16 m 和 37 m 处,煤柱的应变分别增加为 228×10^{-6} 和 90×10^{-6} ,前者变形量约是后者的 2.5 倍。随着工作面推进,应变保持平稳增加状态,表明采动应力趋于稳定。综上可以看出应变跳跃幅度是随着孔深增大而显著增大,受工作面回采影响,变形增大幅明显,应变跳跃幅度更大。影响范围在滞后钻孔 40 m 处,在 16 m 处应变波动最为明显,此时煤柱内部出现一定程度破坏,内部变形剧烈。

图 17 为工作面距离钻孔前-10 m 至滞后 60 m 推进过程 1-1F 号测孔所测应变的时域变化,选取 FBG 测孔深度为 11.7 m 处测点。可以看出,在工作面推进未进入上覆遗留煤柱前,应变仅在平缓增长,当工作面推进至遗留煤柱下时,应变出现一次大幅度突增,在工作面推进出遗留煤柱滞后钻孔 40 m 左右,出现一次小幅突增,随后处于平稳增长状态。

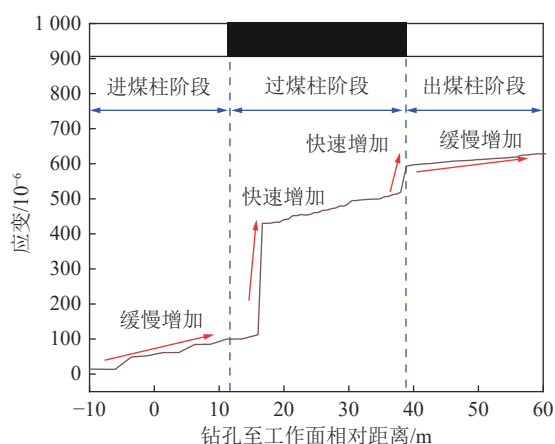


图 17 钻孔深度 11.7 m 测点 1-1F 号应变曲线

Fig.17 Strain curve of measuring point No. 1-1F at a drilling depth of 11.7 m

为详细研究工作面回采过程中进出上覆遗留煤柱应变增量规律,如图 18 所示,为便于分析,对应变突增所在阶段进行编号,分别为 1*, 2*。在回采期间经过进入和推出上覆遗留煤柱均有瞬变应变出现,不过进入期间大于推出期间。

如图 17, 18 所示,滞后测孔 10 m 初始应变为 97×10^{-6} , 1*强矿压显现时应变开始相应的起始值为 112×10^{-6} , 位置于滞后测孔 16 m 时进入遗留煤柱下方约 5 m, 此回采过程前应变波动平缓增长,应变激增,推进距离增长 1 m,应变增量为 317×10^{-6} 。明显

看出 1*应变增量大于 2*增量, 2*应变突增位置在遗留煤柱下约 38 m, 此时工作面即将推出上覆遗留煤柱下方,应变虽再一次发生突增,增量为 74×10^{-6} ,应变突增时工作面仅回采 1 m, 但前者的应变对应的增量与后者增量相差较大,后者应变增量仅为前者的 1/4。

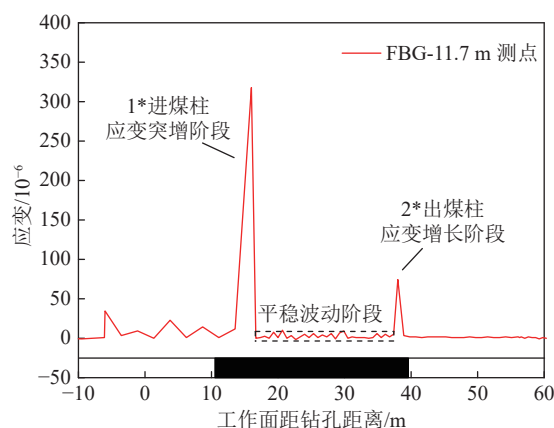


图 18 过煤柱期间 1-1F 号应变曲线

Fig.18 No. 1-1F strain change curve during coal pillar crossing

基于以上分析,煤柱内部变形呈现阶段性,仅在过煤柱阶段出现 2 次应变激增现象,且发生距离相距 22 m,说明受上覆遗留煤柱集中应力影响明显,顶板垮落应力叠加,煤体出现破裂时会伴随着应变的瞬间变化,变形突然,发生速度过快。而且受集中叠加应力影响导致煤体破裂程度时应变大小呈正相关,在煤柱宽度方向上,内部变形出现显著的分区现象,靠近受回采影响侧影响明显,在煤柱宽度方向 10 ~ 15 m 范围内水平变形量约为其他宽度的 2 倍。

以上分析表明,光测方法在井下抗干扰能力强,对工作面推进过程能实时监测,对煤柱变形强度响应灵敏,具有很好的前兆响应,在煤岩体应变观测和矿压预测方面应用前景广阔。实验室试验已取得大量成果,但该技术现场应用还处于试验阶段,仍需要通过大量现场试验得到进一步完善和验证。

4 结 论

1) 工作面推进过程中经过上覆遗留煤柱,水平应变峰值在煤柱宽度 11.5 m 处,煤柱塑性区宽度为 2 m,变形影响范围约在 10 ~ 15 m。

2) 受到上覆遗留煤柱影响,区段煤柱超前支承压力影响范围在距钻孔 30 m,应力计应力增量在 5 MPa,支承压力峰值在 10 m 处,滞后钻孔 90 m 左右,最大水平应变保持在 650×10^{-6} 稳定波动,区段煤柱不再受工作面推进影响。

3) 回采过煤柱阶段, 根据现场实测区段煤柱11.7 m处最大水平应变, 过上覆遗留煤柱出现2次应变突增, 进煤柱5 m时FBG测得水平应变增量 317×10^{-6} , 出煤柱前2 m时增量为 74×10^{-6} , 约是进煤柱阶段的1/4。进煤柱时顶板周期破断伴随回转运动以及出煤柱时覆岩2次运动, 顶板大面积切落造成矿压显现剧烈。

参考文献(References):

- [1] 齐庆新, 潘一山, 舒龙勇, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1801–1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, *et al.* Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801–1810.
- [2] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469–1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, *et al.* Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469–1476.
- [3] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205–213.
- [4] 吴文达, 柏建彪, 王襄禹, 等. 煤柱群下回采工作面强矿压显现机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 563–571, 577.
WU Wenda, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, *et al.* Study on mechanism of strong pressure behaviors in working face under residual coal pillars[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(3): 563–571, 577.
- [5] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 203–213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203–213.
- [6] 蔡武, 窦林名, 王桂峰, 等. 煤层采掘活动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1193–1202.
CAI Wu, DOU Linming, WANG Guifeng, *et al.* Mechanism of fault reactivation and its induced coal burst caused by coal mining activities[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1193–1202.
- [7] 于斌. 多煤层上覆破断顶板群结构演化及其对下煤层开采的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 261–266.
YU Bin. Structural evolution of breaking roof group of multiple coal seams and its influence on lower coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 261–266.
- [8] JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Longwall chock sudden closure incident below coal pillar of adjacent upper mined coal seam under shallow cover in the Shendong coalfield[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 192–201.
- [9] 岳喜占, 涂敏, 李迎富, 等. 近距离煤层开采遗留边界煤柱下底板巷道采动附加应力计算[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 246–252, 259.
YUE Xizhan, TU Min, LI Yingfu, *et al.* Study on the mechanism of strong strata behavior influenced by overlying coal pillar and control technology of ground fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 246–252, 259.
- [10] 赵猛, 张晓明, 王楠, 等. 深部坚硬顶板厚煤层开采冲击矿压规律及防治技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1): 89–93.
ZHAO Meng, ZHANG Xiaoming, WANG Nan, *et al.* Research on rock burst laws and prevention in deep hard roof coal seam mining[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(1): 89–93.
- [11] 张华磊, 王连国, 秦昊. 回采巷道片帮机制及控制技术研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1462–1466.
ZHANG Hualei, WANG Lianguo, QIN Hao. Study of spalling mechanism and control techniques of mining roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1462–1466.
- [12] 王家臣, 王兆会, 孔德中. 硬煤工作面煤壁破坏与防治机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2243–2250.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, KONG Dezhong. Failure and prevention mechanism of coal wall in hard coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2243–2250.
- [13] 于远祥, 柯达, 王京滨, 等. 基于弹性理论的煤帮极限平衡区宽度确定方法探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3340–3348.
YU Yuanxiang, KE Da, WANG Jingbin, *et al.* Discussion on determination method of the limit equilibrium zone width based on the deformation analysis of coal wall[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3340–3348.
- [14] 孙利辉, 杨贤达, 张海洋, 等. 强动压松软煤层巷道煤帮变形破坏特征及锚注加固试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 232–239.
SUN Lihui, YANG Xianda, ZHANG Haiyang, *et al.* Experimental research on characteristics of deformation and failure of roadway ribs in soft coal seams under strong dynamic pressure and bolt-grouting reinforcement[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 232–239.
- [15] 贾后省, 潘坤, 刘少伟, 等. 采动巷道煤帮变形破坏规律与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 689–697.
JIA Housheng, PAN Kun, LIU Shaowei, *et al.* The deformation and failure mechanism and control technology of mining influenced roadway sides[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 689–697.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] 顾春生, 袁 骏. 基于光纤光栅传感技术的覆岩破坏模型试验[J]. 煤炭技术, 2016, 35(3): 84–86.
GU Chunsheng, YUAN Jun. Model test of overlying rock failure based on fiber bragg grating sensing technology[J]. Coal Technology, 2016, 35(3): 84–86.
- [19] 梁敏富, 方新秋, 薛广哲, 等. FBG 锚杆测力计研制及现场试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 549–555.
LIANG Minfu, FANG Xinqiu, XUE Guangzhe, *et al.* Development of anchor dynamometer of FBG and its field test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 549–555.
- [20] 梁敏富, 方新秋, 陈宁宁, 等. 正交试验设计的 FBG 测力锚杆结构封装优化及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2950–2960.
LIANG Minfu, FANG Xinqiu, CHEN Ningning. Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal test design[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2950–2960.
- [21] 李丽君, 张 旭, 唐 斌, 等. 一种微型光纤光栅矿压传感器[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 2084–2088.
LI Lijun, ZHANG Xu, TANG Bin, *et al.* A kind of micro-fiber Bragg grating mine pressure sensor[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 2084–2088.
- [22] 卢 毅, 施 斌, 魏广庆. 基于 BOTDR 与 FBG 的地裂缝定点 BOTDR 传感监测技术研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 103–109.
LU Yi, SHI Bin, WEI Guangqing. BOTDR and FBG fixed-point distributed optical fiber sensor monitoring technology for ground fissures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 103–109.
- [23] 张丁丁, 李淑军, 张 曦, 等. 分布式光纤监测的采动断层活化特征实验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 013018.
ZHANG Dingding, LI Shujun, ZHANG Xi, *et al.* Experimental study on mining fault activation characteristics by a distributed optical fiber system[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 013018.
- [24] 王志强, 武 超, 罗健侨, 等. 特厚煤层巨厚顶板分层综采工作面区段煤柱失稳机理及控制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3756–3770.
WANG Zhiqiang, WU Chao, LUO Jianqiao, *et al.* Instability mechanism and control of section coal pillar in fully mechanized mining face with super thick roof and extra thick seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3756–3770.
- [25] 陈冬冬, 武毅艺, 谢生荣, 等. 弹-塑性基础边界—侧采空基本顶板结构初次破断研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3090–3105.
CHEN Dongdong, WU Yiyi, XIE Shengrong, *et al.* Study on the first fracture of the main roof plate structure with one side goaf and elastic-plastic foundation boundary[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3090–3105.
- [26] 涂 敏, 林远东, 张向阳, 等. 大空间孤岛采场覆岩结构演化与区段煤柱合理宽度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 857–865.
TU Min, LIN Yuandong, ZHANG Xiangyang, *et al.* Evolution of overburden structure and reasonable width of section coal pillar in large space isolated island stope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 857–865.