

基于FBG的阻水帷幕墙力学 - 渗流稳定性监测云平台构建

孙 翔

究矿新疆矿业有限公司硫磺沟煤矿, 新疆 昌吉

收稿日期: 2025年4月22日; 录用日期: 2025年5月30日; 发布日期: 2025年7月9日

摘 要

随着帷幕注浆阻水工艺的不断发展, 阻水帷幕结构稳定性监测已成为保障煤矿安全生产的关键研究课题之一。针对传统监测方法在渗流稳定性监测、抗干扰能力及长期监测可靠性等方面存在的局限性, 本研究创新性引入光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感技术, 构建了基于多参数融合的力学-渗流稳定性监测云平台。以硫磺沟煤矿既有阻水帷幕墙为研究对象, 通过钻探施工的3个监测钻孔(JC-2、JC-3、JC-4), 系统地布设了光纤渗压计、埋入式应变计、缆式应变计及温度补偿装置, 实现了阻水帷幕墙内部渗透压、应变、位移及温度场的多维度长期动态监测。基于物联网架构开发的监测云平台具备实时数据可视化、趋势分析等功能, 成功实现了阻水帷幕墙稳定性状态的可视化诊断。监测数据显示: 既有阻水帷幕墙目前处于动态平衡状态, 本研究可为后续同类工程的相关研究提供力学-渗流双场分析的智能化监测案例参考。

关键词

阻水帷幕墙, 稳定性监测, 光纤布拉格光栅, 云平台

A Cloud Platform for Mechanical-Seepage Stability Monitoring of Water-Resistant Curtain Walls Based on FBG Sensing Technology

Xiang Sun

Yankuang Xinjiang Mining Co., Ltd. Liuhuanggou Coal Mine, Changji Xinjiang

Received: Apr. 22nd, 2025; accepted: May 30th, 2025; published: Jul. 9th, 2025

Abstract

With the continuous development of the curtain grouting water barrier process, the structural stability monitoring of water-resistant curtain walls has become one of the key research topics that ensure the safe production of coal mines. Aiming at the limitations of traditional monitoring methods in seepage stability monitoring, anti-interference ability and long-term monitoring reliability, this study innovatively introduces the Fiber Bragg Grating (FBG) sensing technology, and constructs a mechanical-seepage stability monitoring cloud platform based on multi-parameter fusion. Taking the existing water-resistant curtain wall of Liuhuanggou Coal Mine as the research object, three monitoring boreholes (JC-2, JC-3, JC-4) constructed by drilling were systematically deployed with fiber optic seepage manometers, embedded strain gages, cable strain gages, and temperature compensating devices, realizing multi-dimensional and long-term dynamic monitoring of the internal seepage pressure, strain, displacement, and temperature fields of the water-resistant curtain wall. The monitoring cloud platform developed based on the Internet of Things architecture has the functions of real-time data visualization and trend analysis, successfully realizing the visual diagnosis of the stability status of the water-resistant curtain wall. The monitoring data show that the existing water-resistant curtain wall is in dynamic equilibrium, and this study can provide an intelligent monitoring case reference of mechanics-permeability double-field analysis for the related research of similar projects in the future.

Keywords

Water-Resistant Curtain Wall, Stability Monitoring, Fiber Bragg Grating, Cloud Platform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内外相关学者对大水矿山堵水排水的不断探索,发现采用注浆止水工艺来进行帷幕注浆止水,可以取得很好的效果[1]。帷幕注浆已成为国内外矿山地下水防治的主要手段之一,主要通过注浆技术对矿区周围存在的导水通道进行封堵形成阻水帷幕墙体以达到减小井下涌水量的目的,并且在多个大水矿山实践应用,取得了良好的堵水效果[2]-[8]。但是随着井下开采和老空水侵蚀等因素的影响,帷幕注浆工程堵水效果的持续稳定性监测就显得尤为重要。一般的监测方法主要围绕阻水帷幕墙的力学稳定性展开,包括变形及应力状态的现场测量、数值模拟技术和微震监测技术等,同时由于矿区阻水帷幕的特殊性,还可以在阻水帷幕墙周边布设水文观测孔,通过分析水位和水温的变化规律从而间接地达到阻水帷幕墙稳定性监测的目的[9]-[12]。

但是目前针对阻水帷幕墙稳定性监测技术的研究,很少考虑帷幕墙体的渗流稳定性,并且传统微震监测技术虽然能捕捉岩体破裂信号,但其空间分辨率受传感器布设密度限制;水文观测孔监测虽可反映区域渗流场变化,却难以直接表征帷幕墙体内部状态。相较于这些方法,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感技术展现出独特优势:其波长编码特性赋予传感器抗电磁干扰能力,多路复用技术可实现单光纤通道百级测点同步监测,这为帷幕墙体内部多参数实时监测提供了技术可行性,并且FBG传感技术已在边坡监测、管道检测等领域取得进展[13][14]。

本文基于光纤布拉格光栅(FBG)感测技术,以新疆硫磺沟煤矿既有阻水帷幕墙为研究对象,对阻水帷

幕墙体内部的应变、位移和渗透压等参数进行实时监测，并以此构建自动化监测云平台，实现对阻水帷幕墙体力学-渗流稳定性的长期动态监测。

2. 既有阻水帷幕工程简述

2.1. 矿井概况

新疆硫磺沟煤矿位于我国西北部矿区，煤层浅部的老废采空区广泛分布，大小不一、形状各异；井田东部为头屯河，属于区域性地表水系，由南西流向北东[15]，如图1所示(其中编号1~15为已关停浅部矿井)。其中部分老采空区与地表头屯河存在水力联系，接受头屯河补给，导致在雨季时硫磺沟煤矿井下老空区涌水量剧增，矿井突水风险显著增加。

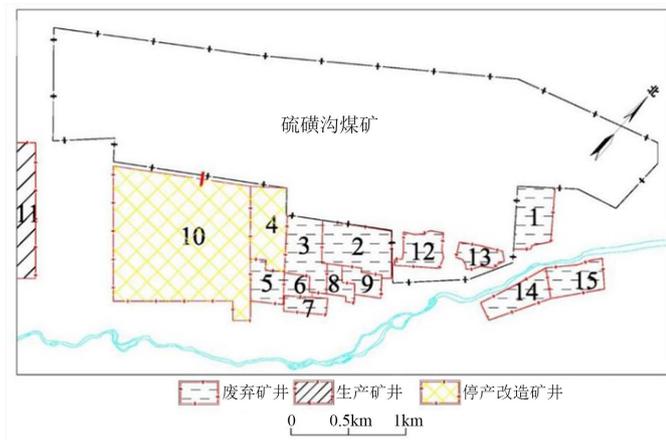


Figure 1. Schematic location of Liuhuanguo Coal Mine and the surrounding old airspace area [15]
图1. 硫磺沟煤矿及周边老空区位置示意图[15]

2.2. 阻水帷幕工程概述及当前存在问题

硫磺沟煤矿于2019年实施了头屯河河床地面帷幕注浆老空水害治理工程(见图2)，对所探查出的关键导水通道进行注浆封堵处理，在矿区东侧形成平均厚度6m的地下阻水帷幕墙体，隔断了矿区井下与东侧采空区之间的水力联系，使矿井老空涌水量急剧降低至约10 m³/h，经过3个水文年(2019~2021年)检验，雨季时涌水量不受影响。

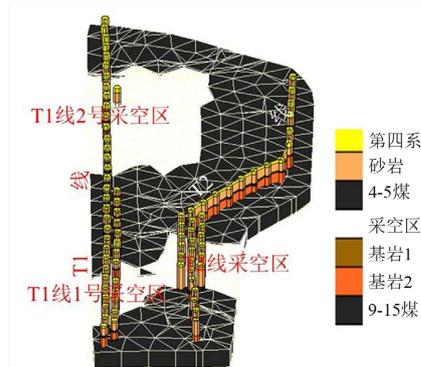


Figure 2. Schematic diagram of key water-conducting channel and water-blocking curtain wall in the air-mining area of Liuhuanguo Coal Mine
图2. 硫磺沟煤矿采空区关键导水通道及阻水帷幕墙示意图

但是在阻水帷幕墙构建完成 3 年后即 2021 年 7 月, 根据井下监控数据显示硫磺沟煤矿井下涌水量出现明显增长(最高达约 $60 \text{ m}^3/\text{h}$), 对矿井安全生产存在威胁。因此亟需对既有阻水帷幕墙展开监测, 分析当前帷幕墙的稳定情况, 为后续治理措施提供参考依据。

3. 阻水帷幕墙力学-渗流稳定性监测平台

3.1. FBG 监测技术原理

光纤布拉格光栅(FBG)传感器可以同时对待测变量进行静态的实时监测, 与传统电磁传感器相比其具有抗电磁干扰、传感性能强、抗腐蚀等优点, 应用前景十分广泛[16] [17]。

FBG 传感器是一种沿纤芯折射率周期变化的结构, 其主要原理为: 温度或应变的变化会导致光纤轴向变形, 从而增加光栅的周期, 减小纤芯和包层的半径, 间接导致光纤的折射率和光栅的波长发生变化[18]-[23]。如图 3 所示。

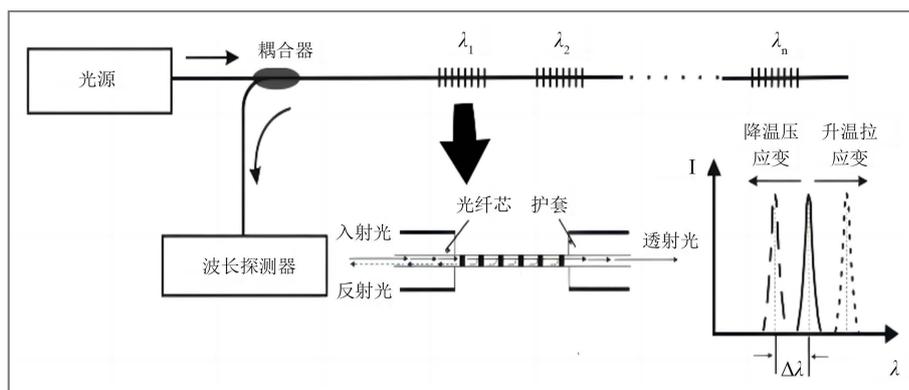


Figure 3. Principle of FBG sensing system

图 3. FBG 传感系统原理

相关实验研究可知, 应变和温度均与中心波长 λ_B 存在很好的线性关系, 且相互独立, 通过测量波长 λ_B 漂移量, 即可得光纤的变形量或温度变化量。假设纤芯折射率为 n_{eff} , 周期 Λ , 则

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

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon\varepsilon + \alpha_T\Delta T \quad (2)$$

式中, α_ε 为光纤光栅应变灵敏系数, α_T 为光纤光栅的温度灵敏度系数, ΔT 为温度变化值, ε 为应变。

FBG 传感器可测量材料的微变形, 并可连接到弹性组件上, 以制作为压力、位移和应变等多种传感器, 用于多种类型的变量监测[24] [25]。

3.2. 光纤监测云平台

为实现对硫磺沟煤矿既有阻水帷幕墙体力学 - 渗流稳定性的实时监测, 本文基于光纤布拉格光栅 (FBG) 感测技术通过墙体内钻孔对帷幕墙体可能存在变形或者渗漏的危险区域安装布设多种传感器对既有阻水帷幕墙稳定性进行监测, 并使用无线光纤光栅解调仪解调光纤数据, 结合云计算、物联网等技术构建自动化监测云平台。

1) 监测钻孔

基于钻探技术沿帷幕墙体走向方向按照适当间距分别钻进 3 个光纤监测钻孔用于下文所述传感器的布设, 分别记作 JC-2、JC-3、JC-4 孔, 如图 4、图 5 所示。

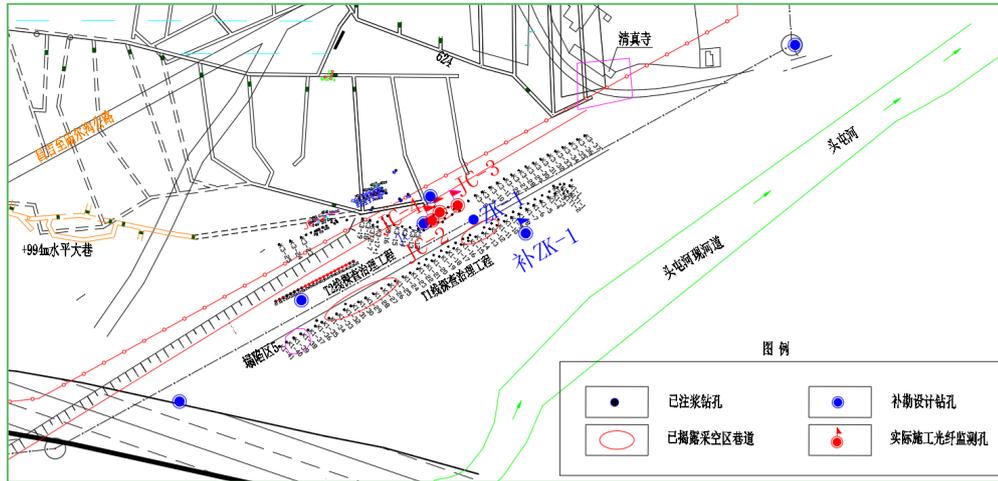


Figure 4. Schematic diagram of optical fiber monitoring drilling plane position
图 4. 光纤监测钻孔平面位置示意图

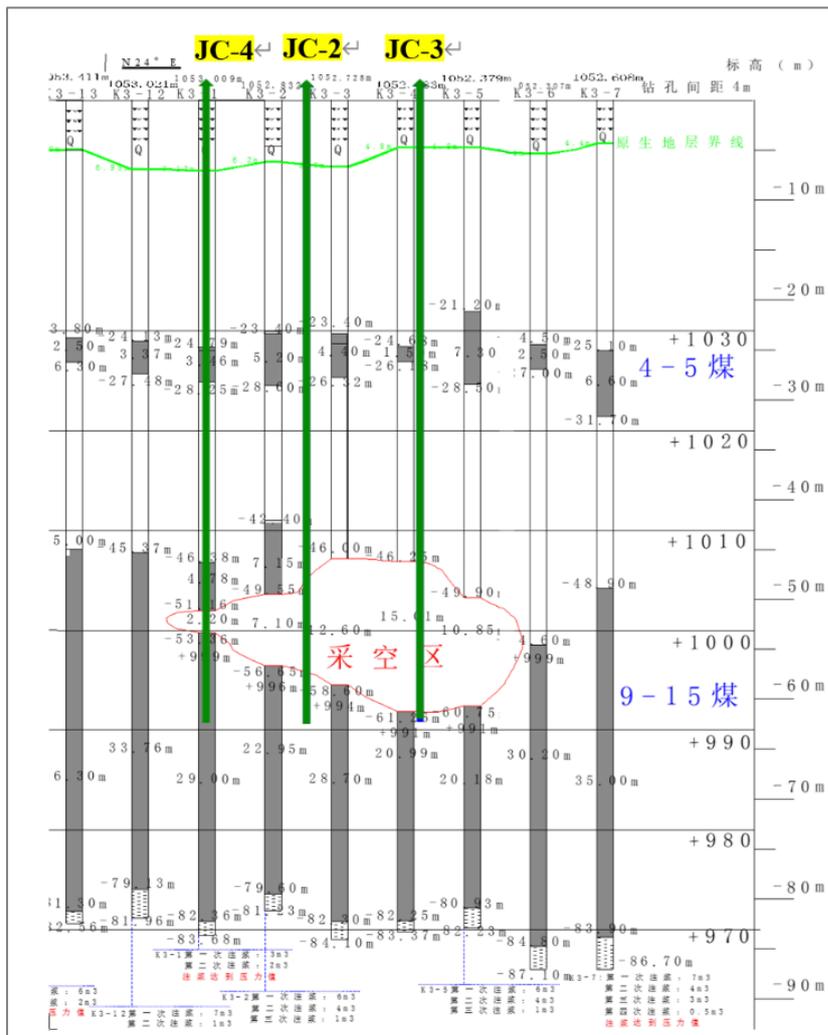


Figure 5. Optical fiber monitoring borehole profile
图 5. 光纤监测钻孔剖面图

2) 传感器布设

基于布拉格光栅(FBG)传感技术,利用单点式光纤光栅渗压计、光纤光栅埋入式应变计、光纤光栅缆式应变计和温度传感器(渗压计外置温补)分别监测钻孔内渗压、变形、温度信息。光纤光栅传感器安装采用配重导头将传感器下放至指定位置,采用7mm塑封铠装通讯光缆作为回路,渗压计所在层部分用中粗砂回填,其余孔层采用素水泥孔底返浆的方式注浆回填封孔,JC-2、JC-3、JC-4监测孔内部传感器具体布设方式如图6所示。

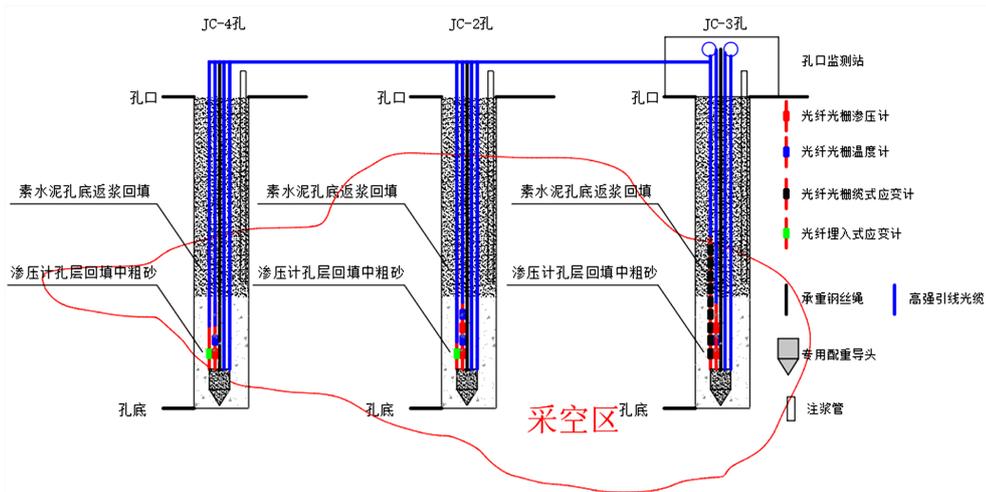


Figure 6. Overall layout diagram of monitoring borehole sensor
图 6. 监测钻孔传感器总体布设示意图

3) 自动化监测云平台

根据不同位置埋设的光纤光栅埋入式应变计、缆式应变计、渗压计和温度计,通过无线光纤光栅解调仪解调光纤数据,构建形成了阻水帷幕墙体的应变、位移、渗压和温度自动化监测云平台,便于对监测数据进行展示与分析。

监测云平台是基于云计算、物联网等技术,用于安全监测的数据平台,能够为用户提供安全可靠、即用即得的云系统服务。其优势主要体现在低成本、免运维、系统扩展性、轻松升级、可靠安全性、数据实时性,支持大数据场景、弹性服务等。云平台监测系统的主要功能包括项目管理、实时数据监测、风险预警及预警信息查询,数据导出、日志记录、报表导出、数据 API 接口服务等;主要界面如图 7 所示。

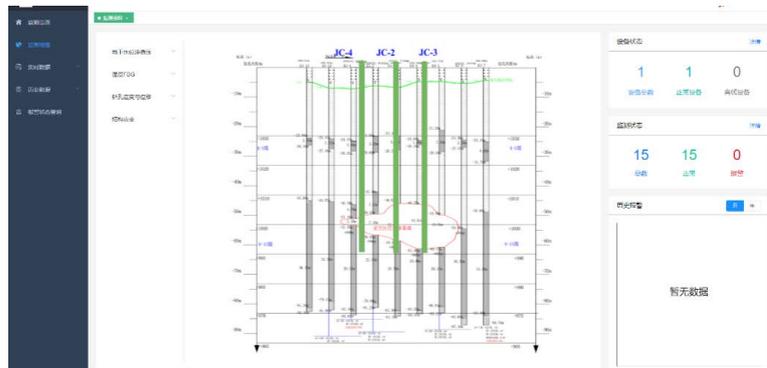


Figure 7. Monitoring view of stability of existing curtain wall in Liuhuanggou Coal Mine
图 7. 硫磺沟煤矿既有帷幕墙稳定性监测视图

4. 监测数据分析

为研究当前阻水帷幕墙体内部状态,针对从监测云平台系统构建完成至 2025 年 4 月的监测数据进行整理,分析既有阻水帷幕墙当前的稳定性状态。既有阻水帷幕墙墙体内部各监测参数变化及具体分析如下:

1) 渗透压监测

渗透压监测数据显示(图 8),不同埋深的渗压计记录的渗透压值呈现出显著的分层特征:JC-3 孔内渗透压数值维持在 0.125~0.175 MPa, JC-2 孔介于 0.150~0.210 MPa, 而埋深最浅的 JC-4 孔稳定在 0.275 MPa 附近。这一分布规律与静水压力理论($P = \rho gh$)的预期结果存在偏差,可能由两方面因素导致:一是帷幕墙体材料渗透系数的非均匀性引起水力梯度的空间差异;二是深层岩体受构造应力作用形成的微裂隙网络对渗流路径产生局部扰动作用。监测期内各测点压力波动幅度均在 ± 0.05 MPa 以内,说明既有阻水帷幕墙体整体阻水性能稳定,未出现明显的渗透失稳现象。

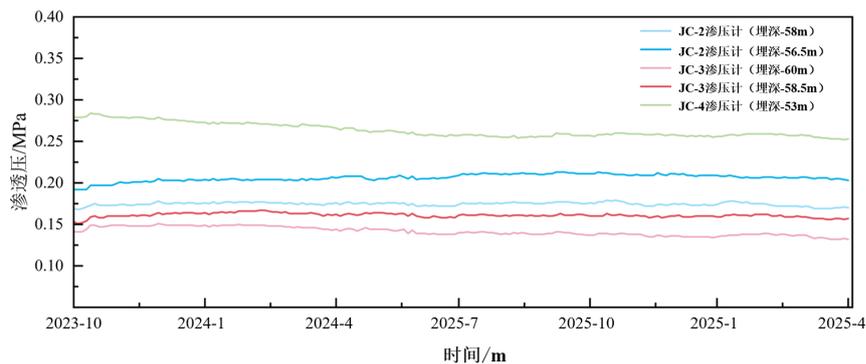


Figure 8. Variation of osmotic pressure inside the water-resistant curtain wall
图 8. 阻水帷幕墙内部渗透压变化图

2) 应变监测

应变监测数据(图 9)揭示了不同深度帷幕墙体变形特征差异显著:JC-2 孔监测点所在区域表现出持续拉伸应变,从 260 $\mu\epsilon$ 增至 450 $\mu\epsilon$, 年增长率约 100 $\mu\epsilon$ /年,这种浅层应变积累可能与采空区覆岩持续沉降产生的附加应力场相关,根据弹性力学理论,岩体在长期荷载作用下的流变特性会加剧浅部应变速率;而埋深相对较深的 JC-4 孔检查点的应变值在 50~70 $\mu\epsilon$ 区间内波动,且无趋势性变化,表明帷幕墙体底部区域处于相对稳定状态。这种应变的空间差异性特征揭示了帷幕墙体不同深度力学响应的非均匀性。

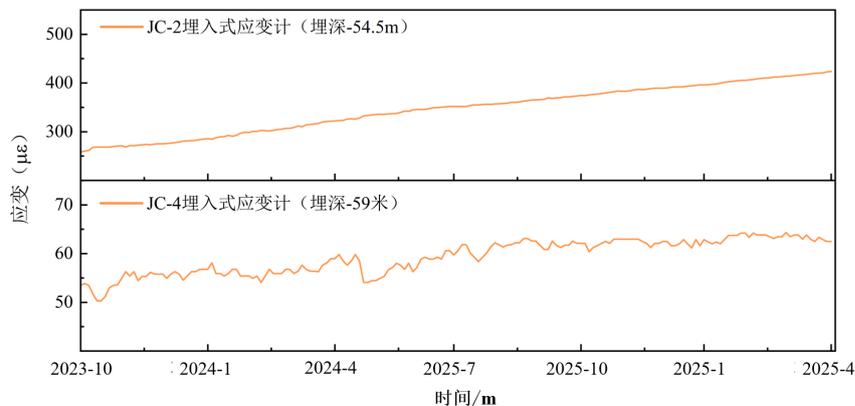


Figure 9. Plot of strain changes inside the water-resistant curtain wall
图 9. 阻水帷幕墙内部应变变化图

3) 位移监测

帷幕墙内部位移(图 10)呈周期性变化,均处于 $-0.08\text{ mm}\sim 0.06\text{ mm}$ 之间,整体变化量不大,位移的周期性波动特征与区域地下水位季节性变化(每年 7~9 月为头屯河丰水期)存在时间相关性,说明帷幕墙体的变形响应受到外部水文环境的动态调控,监测期间既有阻水帷幕墙体整体结构未发生明显变形。

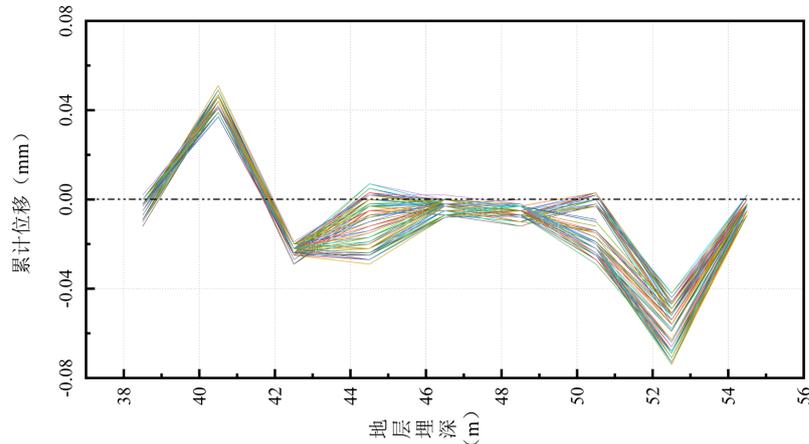


Figure 10. Plot of cumulative displacement changes within the water-resistive curtain wall
图 10. 阻水帷幕墙内部累计位移变化图

4) 温度监测

各温度监测曲线(图 11)表明不同埋深存在约 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 的温度梯度,其中 JC-2 和 JC-3 孔监测点所在区域呈现 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的缓慢降温趋势,可能与地下水流场变化相关,而 JC-4 孔监测点所在区域温度则稳定于 18°C 左右,显示出墙体内部温度场的垂向分带特征。

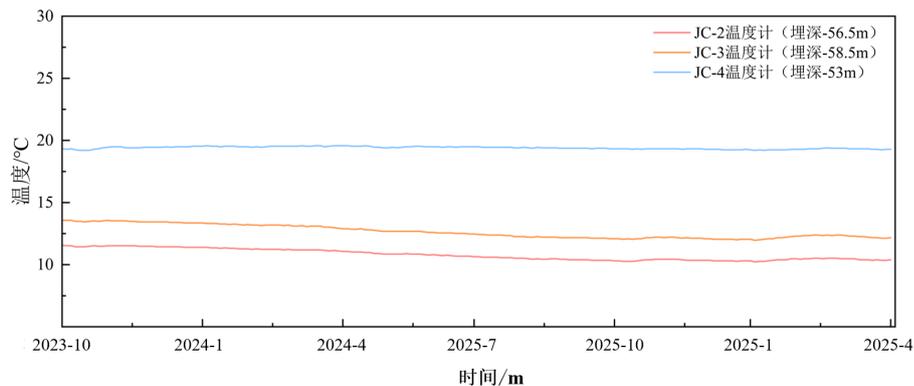


Figure 11. Temperature variation inside the water-resistant curtain wall
图 11. 阻水帷幕墙内部温度变化图

综上所述,结合井下涌水数据(稳定在 $23\text{ m}^3/\text{h}$ 左右),可知现有阻水帷幕墙体从发生渗漏情况至 2025 年 4 月为止整体结构处于暂时性平衡状态,各监测指标均在平稳区间内浮动。既有帷幕墙体内部的四组监测数据共同构建了帷幕墙体的力学-渗流稳定性响应云平台,为评价其长期稳定性提供了重要依据。

5. 结论

本文基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术,构建了阻水帷幕墙力学-渗流稳定性监测云平台,实现了

对新疆硫磺沟煤矿既有阻水帷幕墙体的长期稳定性动态监测, 主要结论如下:

1) 基于布拉格光栅(FBG)传感技术, 选取单点式光纤光栅渗压计、光纤光栅埋入式应变计、光纤光栅缆式应变计和温度传感器(渗压计外置温补), 分别对帷幕墙体内不同部位施工的3个监测钻孔(JC-2、JC-3和JC-4孔)进行孔内渗压、应变及位移等信息的长期监测, 并构建形成了阻水帷幕墙体的应变、位移、渗压和温度自动化监测云平台, 填补了传统方法在阻水帷幕墙渗流稳定性监测中的空白。

2) 通过对监测云平台系统构建完成至2025年4月的各监测指标变化情况进行分析, 可知现有阻水帷幕墙体目前整体结构处于暂时性平衡状态, 各监测指标均在平稳区间内浮动。

3) 本文所构建的云平台支持数据实时可视化、历史趋势分析, 可为阻水帷幕墙失稳风险提供早期预警, 为后续注浆加固提供指导意见。同时本研究也可为后续阻水帷幕墙体监测的相关研究提供案例参考。

本研究为阻水帷幕墙稳定性监测提供了新方法, 未来研究可进一步探索以下方向以提升监测系统的性能与应用价值: ① 引入分布式光纤传感技术(如BOTDR)实现帷幕墙体全域应变监测, 克服单点式传感器的空间局限; ② 融合机器学习算法建立渗流-力学耦合预警模型, 通过多源数据融合提升失稳预测精度。通过技术迭代与理论创新, 推动矿山监测工程从“单参数监测”向“智能预警”转型, 为矿山灾害防控提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1] 全必刚, 黄生凯. 帷幕注浆技术在矿山岩溶涌水治理中的应用[J]. 中国水泥, 2019(7): 115-117.
- [2] 付士根. 帷幕注浆堵水隔障带稳定性及监测技术研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [3] 耿春雷, 董阳, 左然芳, 等. 煤矿注浆技术研究现状与展望[J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 416-418.
- [4] 刘广步, 王斌, 周伟. 帷幕注浆技术在地下金属矿山的应用[J]. 矿业工程, 2016, 14(6): 14-16.
- [5] 邵瑞丽. 帷幕注浆及地下水回灌工艺在大水矿床中的应用[J]. 河北冶金, 2019(2): 17-19.
- [6] 王清河, 谢安铭. 帷幕注浆技术工程在地下大水矿山应用[J]. 科技与企业, 2014(11): 267.
- [7] 杨柱, 叶强, 李阳明, 等. 复杂大水矿山近矿体帷幕注浆技术优化及应用[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(11): 157-162.
- [8] 周伟. 帷幕注浆堵水在吴庄铁矿的应用[J]. 现代矿业, 2012, 27(4): 104-105+130.
- [9] 刘超, 唐春安, 张省军, 等. 微震监测系统在张马屯帷幕区域的应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 349-353.
- [10] 秦俊德. 丙凝化学灌浆帷幕的实例与监测[J]. 水利水电技术, 1990, 21(8): 18-23.
- [11] 王孝虎. 微震监测技术在注浆帷幕稳定性监测中的应用[J]. 现代矿业, 2013, 29(6): 51-52+96.
- [12] 张省军, 唐春安, 王在泉. 矿山注浆堵水帷幕稳定性监测方法的研究与进展[J]. 金属矿山, 2008, 37(9): 84-86+162.
- [13] 周鑫磊, 张卫兵, 刘臻祥, 李晓, 雷过. 边坡变形和应力监测技术研究进展及展望[J]. 土木工程, 2022, 11(3): 261-270.
- [14] 汪涛, 陆昊, 白宇, 李晓可. 基于布里渊散射的分布式光纤监测系统在管道安全监测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2019, 41(6): 80-82.
- [15] 王涛. 实体煤岩-复杂采空区多重介质注浆封堵技术研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [16] 孙蜜雪. 光纤布拉格光栅结构设计、刻制及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [17] 田野, 赵敏, 李坤, 等. 光纤光栅技术在天然气管道安全监测中的研究进展[J]. 管道技术与设备, 2024(1): 27-33+42.
- [18] Ashraff, A.M., Harith, A., Khairrol, A.Z.M., et al. (2024) Optical fiber Bragg grating (FBG)-Based Strain Sensor Embedded in Different 3D-Printed Materials: A Comparison of Performance. *Measurement*, **225**, Article 114060. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114060>
- [19] Liu, H.-L., Zhu, Z.-W., Zheng, Y., et al. (2018) Experimental Study on an FBG Strain Sensor. *Optical Fiber Technology*, **40**, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.09.003>

- [20] Ren, Y.-W., Yuan, Q., Chai, J., *et al.* (2021) Study on the Clay Weakening Characteristics in Deep Unconsolidated Layer Using the Multi-Point Monitoring System of FBG Sensor Arrays. *Optical Fiber Technology*, **61**, Article 102432. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102432>
- [21] 陈剑, 郭永兴, 张礼朋. 一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 62-67.
- [22] 陈丽娟, 陈晓怀, 刘芳芳. 基于布拉格光纤光栅的结构体变形监测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 981-985.
- [23] 杨坤, 徐卫亚, 孟永东, 等. 滑坡地下渗流流速的光纤光栅监测装置研发[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 1-7.
- [24] 张燕君, 王光宇, 付兴虎. 长周期光纤光栅-布拉格光纤光栅多波长解调[J]. 光电工程, 2016, 43(8): 13-17.
- [25] 朱肃然, 夏豪杰, 刘芳芳, 等. 基于布拉格光纤光栅的微位移传感器的研究[J]. 工具技术, 2013, 47(8): 61-65.