

# 瓦斯抽采钻孔变形塌孔规律及精准监测技术研究

肖 鹏<sup>1</sup>, 黄晓昇<sup>1,\*</sup>, 刘潇潇<sup>1</sup>, 李秉昆<sup>1</sup>, 陈丽萍<sup>1</sup>, 陈紫溪<sup>1</sup>, 张 超<sup>1</sup>, 程仁辉<sup>1</sup>, 赵亚婕<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 兵器工业卫生研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为推进瓦斯抽采钻孔精准智能化发展水平, 基于分布式光纤监测和布里渊光学时域分析技术(BOTDA), 以山西某矿为工程背景, 开展了不同粒径配比下的钻孔堵孔模拟实验; 构建了试验矿井堵孔率计算数学模型, 揭示了钻孔变形塌孔发育规律, 提出了适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测现场实施技术工艺, 并通过现场试验对技术工艺的可行性和准确性进行了验证。结果表明: (1) 光纤耦合体应变、模拟煤样堆积质量与钻孔变形塌孔间具有线性关系, 随质量增加应变变化趋势相近, 呈“陡-缓-陡”三阶段变化。通过分段拟合构建了适用于试验矿井的钻孔堵孔率计算数学模型。(2) 通过误差分析, 发现随着应变增加最大绝对误差先变大后变小再变大, 中期最大绝对误差为 19.48%, 后期完全堵孔状态下的质量极值越接近不同配比煤样的平均质量极值误差越小。(3) 基于上述数学模型解算, 揭示了模拟堵孔过程中煤块首先在钻孔底部呈“凸”状堆积, 随后滑向两侧, 最后又在顶部聚集的塌孔演化规律, 以应变值 0、 $45.95 \times 10^{-6}$ 、 $72.19 \times 10^{-6}$  为临界值区分塌孔前、中、后期, 构建了适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测技术。通过现场应变监测结果分析, 发现在孔周应力、扰动等因素作用下, 失稳孔段孔周裂隙更易发育, 塌孔程度随时间加剧。结合钻孔沿程堵孔率计算结果, 对钻孔沿程变形塌孔情况进行了判断, 对比钻孔窥视图可得, 该精准监测技术判断结果基本符合实际观测情况。提出的以分布式光纤耦合体和 BOTDA 技术为基础的钻孔精准监测技术工艺可行、可靠, 可为推进瓦斯抽采钻孔精准智能化发展水平提供参考。

**关 键 词:** 分布式光纤监测; 塌孔; 数学模型; 钻孔精准监测; 瓦斯抽采

**中图分类号:** TD166; TD163

**文献标志码:** A

## Deformation and collapse patterns of gas extraction boreholes and a precise monitoring technology

XIAO Peng<sup>1</sup>, HUANG Xiaosheng<sup>1,\*</sup>, LIU Xiaoxiao<sup>1</sup>, LI Bingkun<sup>1</sup>, CHEN Liping<sup>1</sup>, CHEN Zixi<sup>1</sup>,  
ZHANG Chao<sup>1</sup>, CHENG Renhui<sup>1</sup>, ZHAO Yajie<sup>2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.  
Institute for Hygiene of Ordnance Industry, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** This study aims to promote the precise and intelligent monitoring of gas extraction boreholes. In the engineering background of a coal mine in Shanxi Province, this study conducted simulation experiments on the plugging of gas extraction boreholes under varying particle size ratios of simulated coal samples using distributed optical fiber monitoring and the Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA). Then, this study established a mathematical model for calculating the borehole plugging rate of the test mine, revealing the deformation and collapse patterns of gas extraction boreholes. Furthermore, this study proposed a precise in-situ monitoring technology for the gas extraction boreholes in the test mine and verified its feasibility and accuracy through field tests. Key findings are as follows: (1) There existed a linear correlation between the strain measured by fiber couplers, the mass of simulated coal samples, and the deformation and collapse of the boreholes. With an increase in the coal sample mass, the strain exhibited similar variation trends, increasing sharply, generally, and sharply in sequence. A mathematical model for calculating the borehole plugging rate was established through segmented fitting; (2) The error analysis revealed that with an increase in the strain, the maximum absolute error between the actual and theoretical borehole plugging rates manifested a trend of initial increase, followed by decrease and then increase, equaling 19.48% in the middle collapse stage. Under complete borehole plugging in the late collapse stage, the local maximum of the coal sample mass closer to the average local maximum of the mass of coal samples with different

收稿日期: 2023-09-25; 接收日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52074216, 52374231); 陕西省自然科学基础研究计划项目(2020JM-530)

第一作者: 肖鹏, 1982 年生, 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事矿井瓦斯动力灾害及煤与瓦斯安全共采研究。

E-mail: xiaopeng@xust.edu.cn

\* 通信作者: 黄晓昇, 1994 年生, 男, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事瓦斯抽采钻孔防治研究工作. E-mail: huangxiaosheng1994@qq.com

particle size ratios corresponded to a smaller error; (3) Based on calculations using the mathematical model, this study revealed the boreholes' collapse pattern during the borehole plugging simulation. Specifically, coal blocks first accumulated in a convex shape at the bottom of a borehole, then slid toward both sides, and finally accumulated at the borehole's top. With strain values of  $0, 45.95 \times 10^{-6}$ , and  $72.19 \times 10^{-6}$  as critical values, this study determined the early, middle, and late stages of borehole collapse, developing the precise monitoring technology for the gas extraction boreholes in the test mine. As indicated by the analysis of in-situ strain monitoring results, fractures are prone to form around the boreholes in their unstable segments under the action of factors such as stress and disturbance, with borehole collapse intensifying over time. By combining the calculated plugging rates along the boreholes, this study determined the deformation and collapse along the boreholes. Comparison with the boreholes' inside images reveals that the results obtained using the precise monitoring technology are roughly consistent with actual observations. Therefore, the precise borehole monitoring technology based on the distributed fiber optic coupler and the BOTDA is feasible and reliable, serving as a reference for advancing the precise and intelligent monitoring of gas extraction boreholes.

**Keywords:** distributed optical fiber monitoring; borehole collapse; mathematical model; precise borehole monitoring; gas drainage

随着煤矿开采深度增加,瓦斯事故频发,防治瓦斯灾害的根本方法是进行煤层瓦斯抽采<sup>[1]</sup>。然而,受地应力及扰动等因素影响,钻孔极易产生变形、坍塌,严重影响瓦斯抽采效果<sup>[2]</sup>。全孔段筛管护孔技术<sup>[3-4]</sup>虽可有效解决上述问题,但当塌孔长度和频率较低时,反而会浪费大量人力物力,如何实现精准支护成为主要研究方向。其中,钻孔变形塌孔动态演化规律和精准监测技术研究是实现钻孔精准支护亟待解决的重要前提。

国内外学者通过煤心采取法<sup>[5]</sup>、超声波技术<sup>[6]</sup>、测井技术<sup>[7]</sup>和钻屑法<sup>[8]</sup>等手段间接开展钻孔监测。LI Wei 等<sup>[9]</sup>通过对煤心坚固性系数、孔隙体积等参数的测定,结合原位应力测试和数值模拟,得到了钻孔经过断裂带时的沿程应力分布。WANG Jinchao 等<sup>[10]</sup>提出了多阵列超声扫描技术,通过该技术可获取不同深度钻孔形状数据,实现对孔壁的三维检测。HUANG Dan 等<sup>[11]</sup>基于随钻测井技术,通过多个定向钻孔提取矿区地质信息,建立的断裂带分段识别法可实现对断裂带的精准定位。Liu Du 等<sup>[12]</sup>基于煤心取样、地质强度指数(GSI)和测井数据,构建了 GSI 预测模型,对煤层气井壁的煤体结构进行识别判断,为水力压裂提供指导。部分学者<sup>[8,13]</sup>通过钻屑和钻进参数对钻孔煤体应力分布进行了研究。岳立新等<sup>[14]</sup>发现转速与煤体应力负相关,钻屑量与煤体应力正相关,并基于现场数据对钻孔应力分布状态和集中区域进行了判断。QI Qingjie 等<sup>[15]</sup>通过瓦斯抽采钻孔蠕变模型,结合实测钻屑量,研究得到了钻屑量和围岩应力随钻孔深度的变化规律。

部分学者通过钻孔照相<sup>[16]</sup>和负压监测技术<sup>[17]</sup>实现了对钻孔变形塌孔情况的直接判断。自 1958 年 Dempsey 提出钻孔照相技术后,该技术数十年间经历了:钻孔照相(BPC)<sup>[18]</sup>、钻孔摄像(BVC)<sup>[19]</sup>和数字光学成像(DBOT)<sup>[20]</sup>三个发展阶段。刘小雄等<sup>[21]</sup>根据钻孔窥视结果绘制了定向钻孔柱状图,直观展示了煤岩岩性和裂隙分布,可为工作面煤层透明化地质模型构建提供依据;张玉军等<sup>[22]</sup>通过钻孔窥视直接捕获不同深度地质构造和裂隙发育特征图像,为全空间多参量协同监测提供参考;通过负压监测技术,杨宏民<sup>[23]</sup>对钻孔不同位置的瓦斯和负压参数进行了测定,实现了对封孔段裂隙发育区、漏风地点的准确定位;张学博<sup>[17,24]</sup>建立了多因素影响下

的负压计算耦合数学模型,提出了基于抽采负压分布测试的抽采钻孔失稳坍塌特性探测技术,并通过现场应用确定了钻孔失稳坍塌区域。

尽管国内外学者在钻孔监测领域开展了广泛研究,但仍存在间接技术工艺繁琐、影响因素复杂,直接技术精度低、准确性差的缺点。仍需一种全新的钻孔监测技术,方便准确地判断钻孔变形塌孔位置及严重程度。分布式光纤传感技术,因其灵活高效、高精度和高灵敏的技术优势,在煤矿监测各领域获得了广泛应用和认可<sup>[25-27]</sup>。笔者基于分布式光纤监测和布里渊光学时域分析技术(Optical Time Domain Analysis Technique, BOTDA 技术, 研制光纤耦合体, 结合堵孔率计算数学模型研究, 构建了适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测技术, 并通过现场监测数据对钻孔变形塌孔时期进行了准确判断和验证, 这对瓦斯抽采钻孔变形塌孔精准防治、推进瓦斯高效抽采具有重要意义。

## 1 技术原理及现场概况

### 1.1 基于 BOTDA 技术的分布式光纤监测原理

布里渊光学时域分析技术(BOTDA)是一种利用布里渊散射效应来测量光纤中温度和应变分布的技术<sup>[28]</sup>。在光纤一端输入泵浦光脉冲,另一端输入连续光谱,当两者频率差与布里渊频移值相同时,连续光将被放大。此时,基于布里渊散射光频率变化量  $v_B$ (频移)同光纤温度  $T$  和应变  $\varepsilon$  成正比, 可确定光纤沿线的温度和应变,原理如图 1 所示。

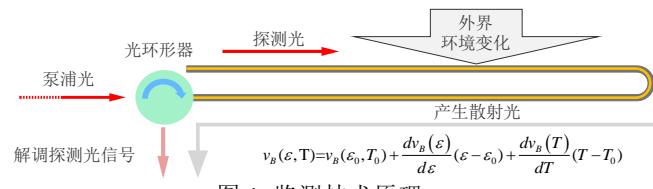


图 1 监测技术原理

Fig.1 Principle of monitoring technology

### 1.2 矿井现场概况

山西某矿埋深约 500~600 m, 地应力约 8 MPa, 开采煤层厚 5.2~6.7 m, 上覆顶板为泥岩平均厚 3.5 m, 煤

层局部夹矸，且存在砂岩和泥岩互层，夹杂粉末状砂岩、泥岩和块状砂岩的陷落柱，取样工作面煤体密度  $\rho=1.451 \text{ g/cm}^3$ ，平均瓦斯含量  $9.52 \text{ m}^3/\text{t}$ ，属高瓦斯矿井。

瓦斯抽采顺层钻孔采前预抽作为该矿采取的瓦斯治理主要手段，设计孔深为 120 m，成孔直径 12 cm，钻孔间距 2.5 m。但在地应力、瓦斯压力、地质构造和扰动等因素作用下，瓦斯抽采顺层钻孔变形塌孔频发，严重影响瓦斯抽采效果。

为了解该矿瓦斯抽采顺层钻孔变形塌孔情况，精准判断塌孔地点，并给钻孔塌孔精准防治提供参考。基于上述 BOTBA 技术和分布式光纤监测原理，构建适用于该矿的瓦斯抽采钻孔精准监测技术工艺，并在该矿开展现场试验，对监测效果进行验证和评价。

## 2 模拟堵孔实验

### 2.1 实验平台及方案

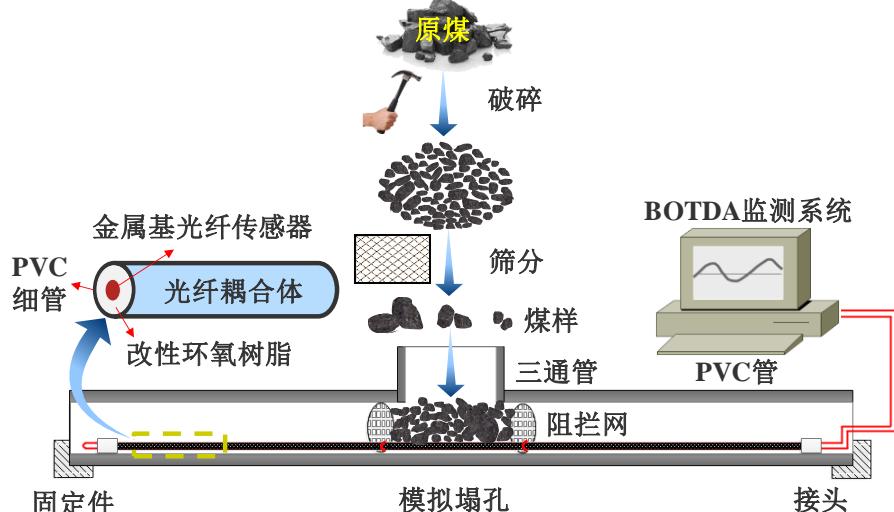


图 2 模拟堵孔实验平台示意  
Fig.2 Schematic diagram illustrating the experimental platform of borehole plugging simulation

根据取样现场情况和相关学者钻孔窥视结果<sup>[33~34]</sup>，发现钻孔堵孔一般以中、小型煤块为主，煤块较大时，难以侵入孔内空间，作为一个整体挤压钻孔。故参考 GB/T 17608—2022《煤炭产品品种和等级划分》标准<sup>[35]</sup>，将钻孔塌孔可能出现的不同尺寸煤块分为：中块煤(2.5~5.0 cm)、小块煤(1.3~2.5 cm)、混粒煤(0.6~1.3 cm)三类。采用控制变量法，设置中、小块和混粒煤占比按 20 % 变化梯度均匀变化，具体见表 1。

从试验矿井采集实验所需煤样，密度  $\rho=1.451 \text{ g/cm}^3$ ，将其破碎成大小不一的煤块，使用 1 目、2 目网晒进行筛分后，测量剩余破碎煤块尺寸，按上述标准分类，制成不同配比煤样。实验时单次称取 150 g 模拟煤样(如若单块煤质量超过 150 g 或无法恰好称取 150 g 时，可一次性称取 300 g)经三通管送进模拟堵孔孔段，同时记录光纤耦合体应变随煤样质量增加的变化过程，直至煤样填满模拟孔段。

基于上述技术原理和试验矿井关键参数，对前期搭建的模拟堵孔实验平台<sup>[29]</sup>进行改建，并再次开展实验室实验。

实验平台由钻孔模拟及光纤监测系统两部分构成。钻孔模拟系统所用聚氯乙烯(PVC)管长 120 cm，直径与试验矿井工作面  $\varnothing 12 \text{ cm}$  大直径顺层瓦斯抽采钻孔一致。16 目阻拦网可围挡形成模拟堵孔段；光纤监测系统中光纤耦合体<sup>[30~32]</sup>作为监测主体，由外径 1.5 cm 内径 0.9 cm 长 100 cm 的 PVC 细管和 0.25 cm 金属基光纤传感器，在注入改性环氧树脂 48 h 后固化形成，可直观反映煤样质量增加造成的应变变化。ForeSight™ 系列 BOTDA 监测系统空间分辨率可达到 20 cm，应变精度为  $2 \times 10^{-6}$ ，可精准监测光纤耦合体各位置应变大小。平台具体构造如图 2 所示。

表 1 不同粒径配比模拟煤样  
Simulated coal samples with different particle size ratios

编 号	配比/%		
	中块煤 (2.5~5.0 cm)	小块煤 (1.3~2.5 cm)	混粒煤 (0.6~1.3 cm)
A1	100	0	0
B2	80	20	0
B3	80	0	20
C1	60	40	0
C2	60	0	40
C3	60	20	20
D1	40	60	0
D2	40	0	60
D3	40	40	20
D4	40	20	40
E1	20	80	0
E2	20	0	80
E3	20	60	20
E4	20	20	60
E5	20	40	40
F1	0	100	0
F2	0	0	100
F3	0	80	20
F4	0	20	80
F5	0	60	40
F6	0	40	60

## 2.2 模拟堵孔实验结果

基于试验矿井所采模拟煤样堵孔实验结果,分析钻孔变形塌孔过程中模拟煤样质量与应变间的表征关系。不同配比情况下的模拟煤样完全堵孔时的质量和应变极值,如图3所示。

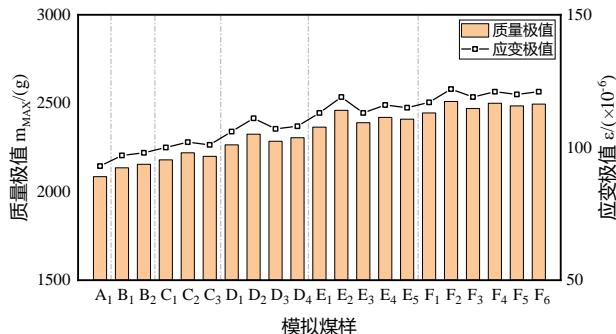


图3 不同配比模拟煤样完全堵孔时的质量及应变极值  
Fig.3 Local maxima of the mass and strain of simulated coal samples with different particle size ratios under complete borehole plugging

由图3可知,随着模拟煤样配比变化,质量和应变整体呈逐渐增长趋势。这是由于模拟堵孔过程中,中煤块体积较大,形状也不规则,高占比时煤块间的

间隙、空间体积较大,可容纳模拟煤样质量较小,应变极值也较低。整体上随着模拟煤样配比变化,模拟堵孔质量和应变极值同步变化,这表明试验矿井模拟煤样质量与监测应变间存在显著相关性,两者呈比例变化。

## 3 钻孔变形塌孔数学模型构建及误差分析

取所有实验不同配比和质量下的应变均值,绘制随质量增长的光纤应变趋势如图4所示。可以发现,在不同配比模拟煤样堵孔过程中,随质量增加应变变化趋势相近,呈三个阶段。第一阶段随质量增加光纤耦合体应变迅速增长,第二阶段应变增长随质量变化较为平缓,第三阶段应变再次陡增。试验矿井模拟煤样质量、监测应变和钻孔变形塌孔间存在明显线性关系。结合前期模型研究工作<sup>[29]</sup>,分析光纤耦合体应变 $\varepsilon$ 、模拟煤样堆积质量 $m$ 与钻孔变形塌孔间的表征关系,并构建适用于试验矿井的数学模型,可基于现场试验实测应变结果确定塌孔煤样质量,判断塌孔严重程度,形成适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测新技术。

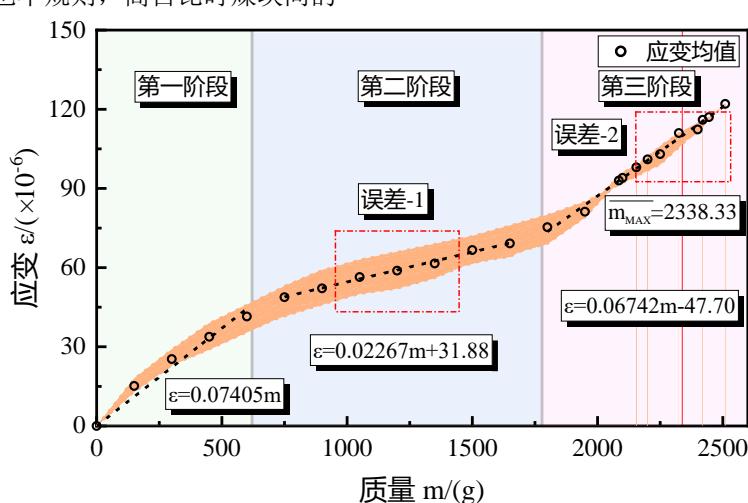


图4 分布式光纤应变随质量变化的趋势

Fig.4 Strain measured by distributed optical fiber varying with the mass of simulated coal samples

根据质量-应变三阶段的变化趋势,对其进行分段拟合,可得:

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.07405m & (0g < m < 620.47g) \\ \varepsilon = 0.02267m + 31.88 & (620.47g < m < 1778.32g) \\ \varepsilon = 0.06742m - 47.70 & (1778.32g < m < 2510g) \end{cases} \quad (1)$$

根据前人研究,由于质量 $m$ 大小取决于物质的堆积密度 $\rho_b$ 和体积 $V$ ,而煤样堆积密度 $\rho_b$ 与组分块度级配相关, $\rho_b$ 与取样点煤体密度 $\rho$ 之间存在倍率关系,具体为 $m=\rho_b \cdot V=\alpha \cdot \rho \cdot V$ ,其中 $\alpha$ 为填充率,可表示两密度间的倍率关系<sup>[36-37]</sup>。代入式(1)可得:

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.07405 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot V & (0g < \alpha \cdot \rho \cdot V < 620.47g) \\ \varepsilon = 0.02267 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot V + 31.88 & (620.47g < \alpha \cdot \rho \cdot V < 1778.32g) \\ \varepsilon = 0.06742 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot V - 47.70 & (1778.32g < \alpha \cdot \rho \cdot V < 2510g) \end{cases} \quad (2)$$

$\rho_b$ 可由完全堵孔状态下的质量极值 $m_{MAX}$ 与体积极值 $V_{MAX}$ 确定( $V_{MAX}$ 为模拟堵孔孔段圆柱体体积, $V_{MAX}=2260.8\text{ cm}^3$ ),不同配比模拟煤样的堆积密度 $\rho_b$ 如

图5所示。

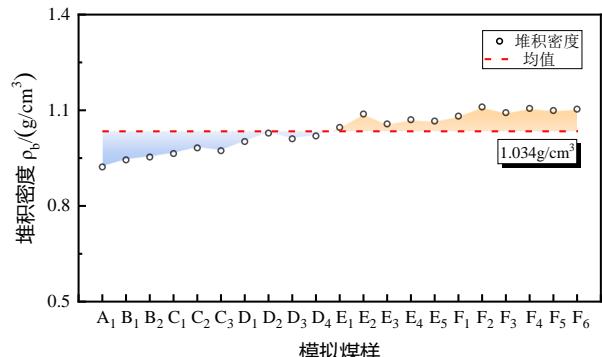


图5 不同配比模拟煤样的堆积密度

Fig.5 Bulk density of simulated coal samples with different particle size ratios

本文开展了覆盖全面、不同配比模拟煤样的堵孔实验,但实际钻孔变形塌孔过程中,无法判断剥落煤体的尺寸、粒径,同时部分学者认为填充率在一定范

围内变化时造成的影响较小或趋同<sup>[38-39]</sup>, 故忽略填充率变化造成的 $\rho_b$ 变化。假设:  $\alpha$ 为定值, 取不同配比模拟煤样完全堵孔时的 $m_{MAX}$ 均值为标准值, 经计算 $\rho_b=1.034\text{ g/cm}^3$ ,  $\alpha=0.71$ 。为满足在实际监测过程中, 通过钻孔沿程应变大小, 即可判断塌孔地点堵孔严重程度的目的。因此, 首先将式(2)转化为用 $\varepsilon$ 表示 $V$ 的函数, 随后通过计算实际堵孔体积 $V_{actual}$ 与理论单位体积 $V_{theory}$ 的比值, 确定钻孔单位长度(20 cm)内的堵孔率 $\omega$ (即:  $\omega=\frac{V_{actual}}{V_{theory}}$ , 其中 $V_{theory}=\pi r^2 \cdot d=\pi \cdot r^2 \cdot 20\text{ cm}$ ), 以直观反映钻孔堵孔程度。转化、计算后可得:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \omega = \frac{\varepsilon}{0.07405 \cdot \alpha \cdot \rho} & (0 \times 10^{-6} < \varepsilon < 45.95 \times 10^{-6}) \\ \omega = \frac{\varepsilon - 31.88}{0.02267 \cdot \alpha \cdot \rho} & (45.95 \times 10^{-6} < \varepsilon < 72.19 \times 10^{-6}) \\ \omega = \frac{\varepsilon + 47.70}{0.06742 \cdot \alpha \cdot \rho} & (72.19 \times 10^{-6} < \varepsilon < 121.52 \times 10^{-6}) \end{array} \right. \quad (3)$$

基于式(3)可通过钻孔应变监测结果, 计算试验矿井( $\rho=1.451\text{ g/cm}^3$ ,  $r=6\text{ cm}$ )瓦斯抽采钻孔沿程各位置的堵孔率, 并以应变临界值为依据对钻孔沿程变形塌孔情况进行判断。根据上式将钻孔变形塌孔分为塌孔前、塌孔中、塌孔后共三个时期, 即:  $0 < \varepsilon < 45.95 \times 10^{-6}$  为塌孔初期,  $45.95 \times 10^{-6} < \varepsilon < 72.19 \times 10^{-6}$  为塌孔中期,  $72.19 \times 10^{-6} < \varepsilon < 121.52 \times 10^{-6}$  为塌孔后期。

将应变临界值  $45.95 \times 10^{-6}$ 、 $72.19 \times 10^{-6}$  和  $121.52 \times 10^{-6}$  代入式(3)可得理论堵孔率临界值: 26.64 %、76.34 % 和 107.76 %。理论堵孔率极值超过 100 %, 这是因为 $\rho_b$ 和 $\alpha$ 由单位空间不同配比煤样模拟堵孔实验的 $m_{MAX}$ 均值确定, 导致不同配比情况下的实际堵孔率与理论值存在必然误差。为验证式(3)的准确性, 对实际和理论堵孔率间的必然误差进行分析。通过不同配比煤样模拟堵孔过程 $m$ 与 $m_{MAX}$ 的比值确定实际堵孔率 $\omega_{actual}$ , 即 $\omega_{actual}=\frac{m}{m_{MAX}}$ , 根据式(3)绘制理论堵孔率 $\omega$ , 实际、理论堵孔率和最大绝对误差变化如图 6 所示。

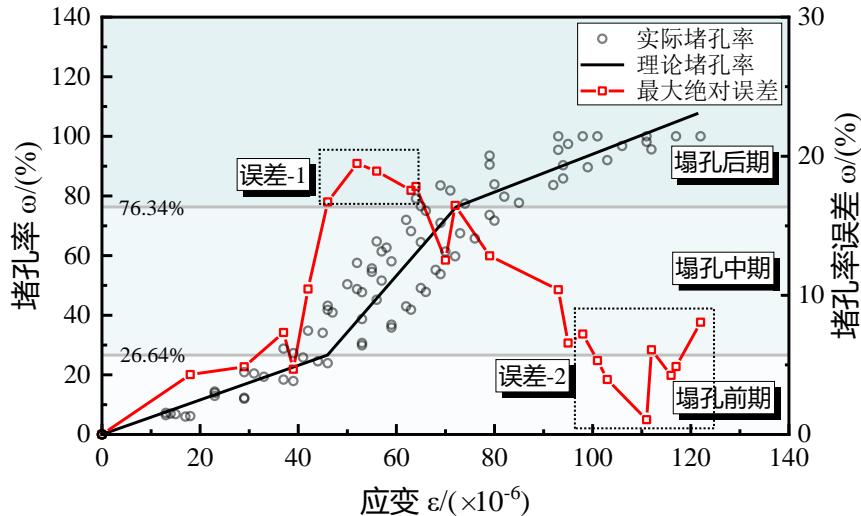


图 6 实际、理论堵孔率对比和最大绝对误差

Fig.6 Comparison and the maximum absolute error between actual and theoretical borehole plugging rates

通过图 6 也可发现, 随着应变的增加, 实际与理论堵孔率间最大绝对误差先变大后变小再变大。这是由于钻孔底部“凹”中部“扩展”顶部“凸”的结构组成, 导致钻孔堵孔过程中, 煤样首先在底部集中堆积, 达一定角度后滑向孔壁两侧, 最后随着空间变小又在顶部聚集, 故最大绝对误差先变大后变小。在误差-1 处(塌孔中期)达到最大, 通过计算可得最大绝对误差为: 19.48 %。虽与理论结果差距较大, 但此处实际堵孔率仍处塌孔中期界限内(26.64 %~76.34 %), 对判断钻孔发育时期和塌孔程度实际并无影响。在误差-2 处, 堵孔率误差呈“V”型变化, 这是由于表征公式建立过程中理论 100% 堵孔时的 $m_{MAX}$ 、 $\rho_b$  和 $\alpha$ 由不同配比煤样模拟堵孔实验的 $m_{MAX}$ 均值确定, 这就导致实际上情况下, 不同配比煤样完全堵孔时,  $m_{MAX}$ 越接近

$m_{MAX}$ 均值误差越小。误差-2 处理论和实际堵孔率均超过塌孔后期下限(76.34 %), 同样对判断钻孔发育时期和塌孔程度并无影响。

## 4 现场试验

### 4.1 现场试验方案

基于研制的光纤耦合体和 BOTDA 监测系统, 结合上述模型, 形成了适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测技术(煤体密度  $\rho=1.451\text{ g/cm}^3$ , 钻孔半径  $r=6\text{ cm}$ )。为对该技术的可行性和准确性进行验证, 采用该技术在矿井开展现场试验, 现场施工工艺和设备连接如图 7 所示。

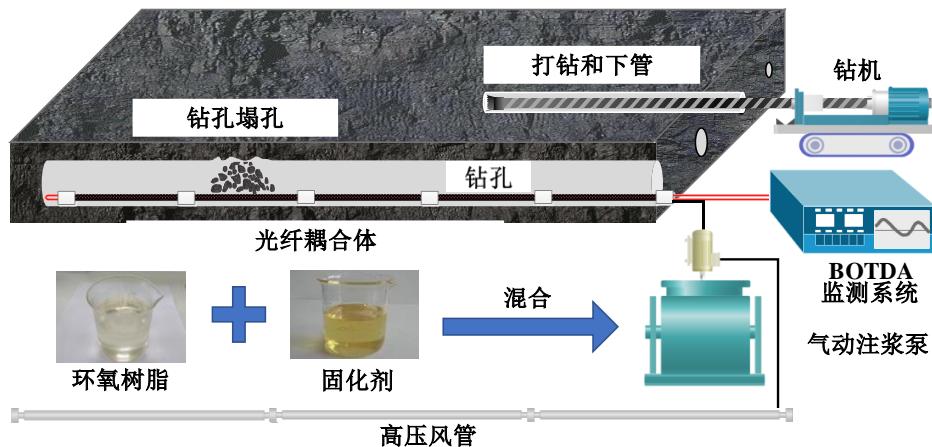


图 7 瓦斯抽采钻孔精准监测现场工艺

Fig.7 In-situ precise monitoring technology for gas extraction boreholes

瓦斯抽采钻孔精准监测技术现场施工具体试验步骤包括：

(1) 现场打钻完成后参考下筛管技术，将 1.5 cm 含光纤 PVC 细管随空心钻杆送入 120 m 钻孔，PVC 细管间通过速凝胶水和快插接头连接，孔底 PVC 细管端头加装透水不透浆的纤维布，内部需注浆约 6452.7 cm<sup>3</sup>。

(2) 为防止注浆不到位、过程材料损耗，称取所需 120 % 的材料，将 5.4 kg 环氧树脂和 2.7 kg 固化剂按 2 : 1 比例倒进气动注浆泵，搅拌 5 min，通过变径接头-注浆管-软橡胶锥头将气动注浆泵与 PVC 细管连接后注浆，全过程需在 45 min 内完成。

(3) 待改性环氧树脂浆液全部注进 PVC 细管后，用软橡胶塞封堵端口，等待 48 h 环氧树脂完全凝固，

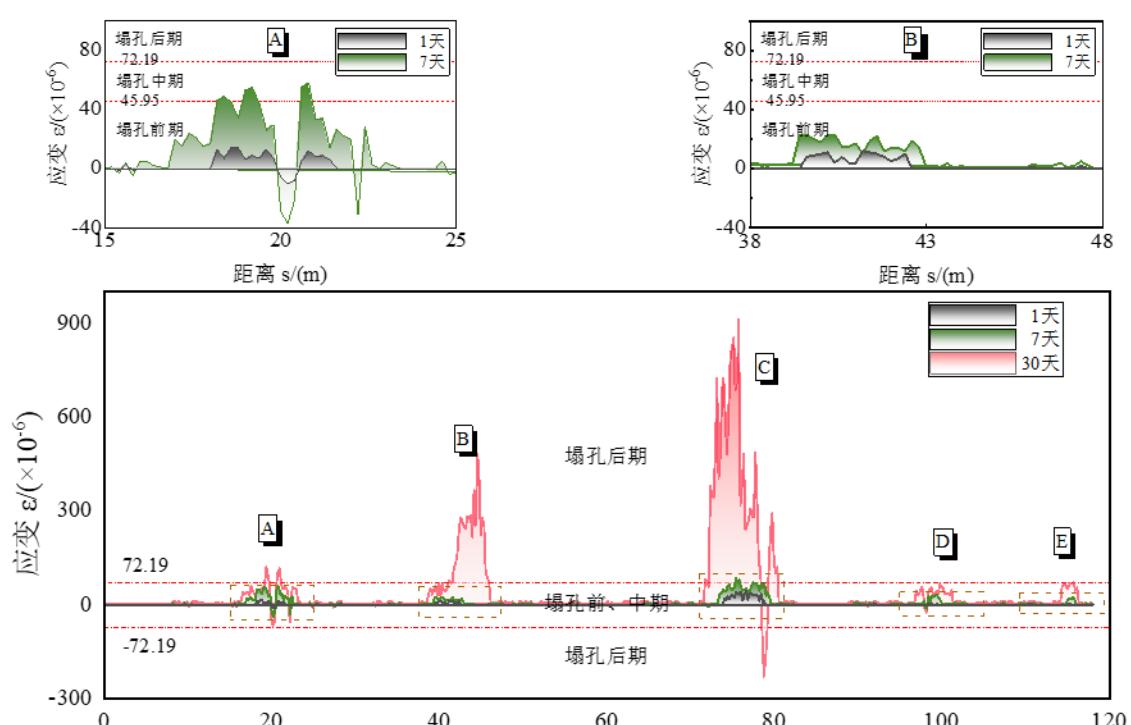
连接 BOTDA 系统记录初始应变。

(4) 随后开展退钻作业将空心钻杆撤出钻孔，再次连接 BOTDA 系统，开展长时间钻孔应变监测工作。

(5) 根据钻孔沿程应变监测结果，结合适用于试验矿井的堵孔率计算数学模型式(3)，计算钻孔沿程堵孔率，判断钻孔沿程变形塌孔情况，为后续钻孔塌孔精准防治提供参考。

#### 4.2 实验结果及分析

采用上述适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔监测技术对现场 120 m 顺层瓦斯抽采钻孔变形塌孔情况进行监测，第 1、第 7、第 30 天钻孔沿程应变监测结果如图 8 所示。



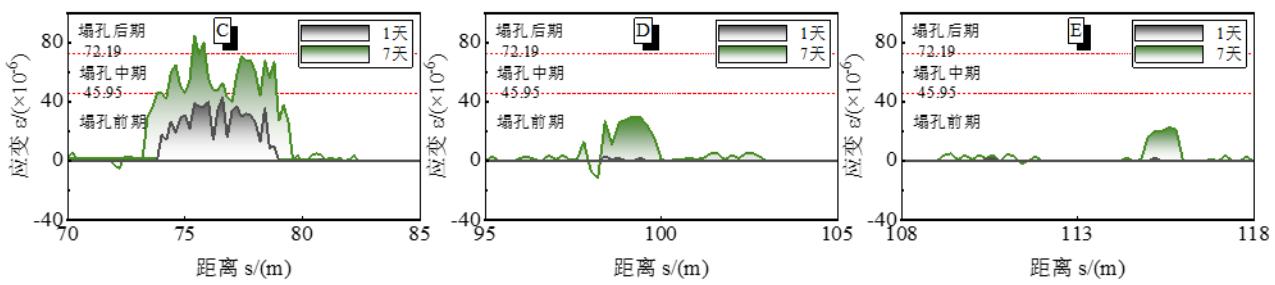


图 8 第 1、第 7、第 30 天钻孔沿程应变监测结果  
Fig.8 Monitoring results of strain along boreholes on the 1st, 7th, and 30th days

如图 8 所示, 第 1 天空心钻杆退出钻孔后, A、B、C 三处均有明显应变产生, C 处信号最强, 应变峰值为  $43 \times 10^{-6}$ , 远超 A、B 的  $14 \times 10^{-6}$  和  $12 \times 10^{-6}$ , 但均处塌孔前期, 并且 A 处应变出现负值, 表示有压应变产生; 第 7 天 A、B、C 三处垮落长度分别增长 2.2 m、0.6 m 和 1.2 m, 应变峰值增长到  $58 \times 10^{-6}$ 、 $23 \times 10^{-6}$ 、 $85 \times 10^{-6}$ , A 处孔周破坏恶化最为显著, C 处破坏最为严重, 均进入塌孔中期。同时 D、E 孔段监测到明显应变, 表明 7 天内两位置孔周煤体从稳定状态逐渐失稳塌孔, 但尚处塌孔前期。

第 30 天 B 和 C 两处塌孔范围和应变激增, 应变峰值 ( $481 \times 10^{-6}$ 、 $912 \times 10^{-6}$ ) 远超塌孔后期理论上限  $121.52 \times 10^{-6}$ 。表明钻孔完全塌孔后在地应力作用下仍被进一步挤压, 煤块间隙压缩消失, 此时钻孔处完全

堵孔状态, 仍可将其视为塌孔后期, 堵孔率视为 100% 恒定。

钻孔沿程部分孔段应变始终为 0, 表明此位置孔壁完整, 基本无煤体脱落, 积聚的地应力尚未超过煤体破坏阈值, 将应变、堵孔率始终为 0 的孔段视为仍处塌孔初期。

结合前文分析对钻孔变形塌孔的前、中、后三个时期的界定进一步完善, 即:  $0 \leq \epsilon < 45.95 \times 10^{-6}$  为塌孔初期,  $45.95 \times 10^{-6} \leq \epsilon < 72.19 \times 10^{-6}$  为塌孔中期,  $72.19 \times 10^{-6} \leq \epsilon$  为塌孔后期。基于上述应变监测结果, 通过式(3)计算钻孔沿程堵孔率, 确定变形塌孔程度, 结果如图 9 所示。结合钻孔约 20 m 位置第 1、第 7、第 30 天钻孔窥视图, 对钻孔应变和堵孔率随时间的变化规律及其内在机理进行分析。

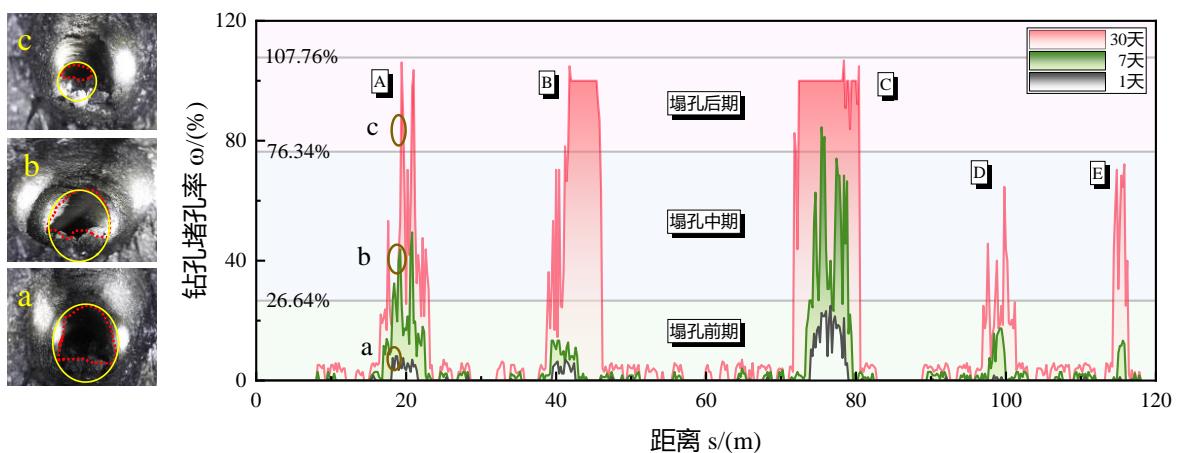


图 9 第 1、第 7、第 30 天钻孔沿程堵孔率及钻孔窥视图  
Fig.9 Plugging rate along boreholes on the 1st, 7th, and 30th days of monitoring and the borehole's inside images

通过图 9 发现, 钻孔沿程均发生变形塌孔, 且堵孔率随时间缓慢增长, 除 A、B、C、D、E 五处孔段产生明显塌孔外, 其他孔段堵孔率随时间变化较小, 远小于 26.64% 均处塌孔初期。A、D、E 孔段塌孔状况随时间增长不断加剧, 第 1 天 D、E 尚未发生明显塌孔, 第 7 天 3 处孔段均处塌孔初期, 仅 A 处部分孔段进入中期, 且在 30 天后进入塌孔后期, D、E 尚处塌孔中期。

与 A、D、E 相比, B、C 处钻孔塌孔破坏更加严重, 从图 8 也可发现两孔段部分位置 30 天后应变远超  $121.52 \times 10^{-6}$  钻孔被完全破坏处塌孔后期。尤其是 C 处大

部分孔段第 7 天即进入塌孔中期, 表明 C 处煤体存在大量构造和原生裂隙, 在地应力和钻孔施工扰动作用下, 孔周裂隙快速发育, 煤体破坏加剧, 剥落煤体迅速增加封堵钻孔。而 B 处前后堵孔率差异悬殊, 前半 38.8~41.4 m 处塌孔中期, 后半 41.6~46 m 进入塌孔后期, 这可能是由于 41.6~46 m 孔段被破坏的过程中释放了大量积聚的地应力, 使得 38.8~41.4 m 钻周破坏减小。除 0~8 m 封孔段在 PVC 管保护下堵孔率始终为 0 外, 其他堵孔率为 0 的孔段均未监测到应变, 均处前期, 未产生变形塌孔现象。

通过钻孔窥视仪对 20 m 位置第 1、第 7、第 30 天的钻孔变形塌孔情况进行直接观测, 结果如图 9a、图 9b、图 9c 所示, 图片显示第 1 天仅钻孔底部有少量煤块, 钻孔比较完整尚处塌孔初期; 第 7 天剥落煤体填充到钻孔中部, 钻孔进入塌孔中期; 第 30 天仅钻孔顶部存在小块空间, 钻孔堵孔严重, 进入塌孔后期。上述钻孔窥视结果与 A 处 20 m “初期—中期—后期”的变化趋势一致, 表明通过上述适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测技术可准确判断钻孔变形塌孔发育时期。

综上所述, 孔周应力分布、原生裂隙和煤体力学性质是造成钻孔塌孔失稳的主要因素, 孔周应力分布差距越大、构造和原生裂隙越显著, 钻孔越容易破坏失稳, 剥落煤体质量和监测应变也就越大, 结论与相关国学者<sup>[40-41]</sup>研究相印证。通过钻孔窥视图和现场试验证明基于分布式光纤监测、BOTDA 和堵孔率计算数学模型构建的适用于试验矿井的瓦斯抽采钻孔精准监测技术可准确判断钻孔的变形塌孔情况, 可为瓦斯和钻孔精准防治提供参考。

## 5 结 论

**a.** 基于不同粒径配比钻孔堵孔模拟实验结果, 将塌孔堵孔过程分成三个阶段。通过分段拟合构建了光纤耦合体应变、模拟煤样堆积质量与钻孔变形塌孔间的表征关系。推导出了适用于试验矿井的钻孔堵孔率计算数学模型。以应变值 0、 $45.95 \times 10^{-6}$ 、 $72.19 \times 10^{-6}$  为临界值, 将钻孔变形塌孔发育过程分为前、中、后三个时期。可分为钻孔变形塌孔监测提供理论基础。

**b.** 实际和理论堵孔率均随着应变增加先后“缓慢-快速-缓慢”增长, 且趋势一致。随着应变增加, 实际与理论堵孔率间最大绝对误差先变大后变小再变大。塌孔中期最大绝对误差最大为 19.48 %, 塌孔后期完全堵孔状态下不同配比煤样的  $m_{MAX}$  越接近  $m_{MAX}$  均值误差越小。这与煤块先在钻孔底部堆积, 随后滑向两侧, 最后在顶部聚集的堵孔过程相关。两误差处实际堵孔率均处各界限内( $26.64\% < \omega_{actual} < 76.34\%$ ,  $76.34\% < \omega_{actual} \leq 107.76\%$ ), 与理论判断一致, 对判定塌孔时期和严重程度实际并无影响。

**c.** 以分布式光纤耦合体和 BOTDA 技术为基础, 结合钻孔堵孔率计算数学模型, 形成以应变临界值为指标适用于试验矿井的钻孔精准监测和评估技术, 可为试验矿井瓦斯抽采钻孔精准智能化发展提供参考。

**d.** 开展现场试验, 对全孔段堵孔率进行了计算, 对钻孔沿程的变形塌孔发育阶段进行了评估和划分, 并结合钻孔窥视图对评估结果的准确性进行了验证, 该精准监测技术判断与钻孔窥视实际观测结果基本吻合, 该精准监测现场实施技术工艺可行、可靠。

### 符号注释:

$m$  为煤样质量, g;  $m_{MAX}$  为完全堵孔状态下的质量极值, g;  $\rho$  为试验矿井煤体密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_b$  为煤样堆积密度, g/cm<sup>3</sup>;  $r$  为试验矿井的抽采钻孔半径, cm;  $T$  为环境温度, °C;  $v_B$  为布里渊频移, MHz;  $V$  为煤样体积, cm<sup>3</sup>;  $V_{actual}$  为实际堵孔体积, cm<sup>3</sup>;  $V_{theory}$  为理论单

位体积, cm<sup>3</sup>;  $V_{MAX}$  为模拟堵孔段体积极值, cm<sup>3</sup>;  $\alpha$  为填充率;  $\varepsilon$  为光纤应变;  $\omega$  为钻孔堵孔率;  $\omega_{actual}$  为实际堵孔率。

### 参 考 文 献(References)

- [1] 王双明, 耿济世, 李鹏飞, 等. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 33–43.  
WANG Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 33–43.
- [2] 徐超平, 李贺, 鲁义, 等. 软煤瓦斯抽采钻孔失稳特性及控制技术研究现状[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 131–135.  
XU Chaoping, LI He, LU Yi, et al. Research status of borehole instability characteristics and control technology for gas extraction in soft coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 131–135.
- [3] HE Shengquan, OU Shengnan, HUANG Fengxiang, et al. Borehole protection technology of screen pipes for gas drainage boreholes in soft coal seams[J]. Energies, 2022, 15(15): 5657.
- [4] 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 drilling and borehole completion technologies in broken soft coal seam in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 285–296.
- [5] FELLGETT M W, KINGDON A, WATERS C N, et al. Lithological constraints on borehole wall failure: A study on the Pennine coal measures of the United Kingdom[J]. Frontiers in Earth Science, 2019, 7: 163.
- [6] ZHANG Yuezheng, JI Hongguang, LI Wenguang, et al. Research on rapid evaluation of rock mass quality based on ultrasonic borehole imaging technology and fractal method[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 8063665.
- [7] ZONG Chang, LIU Juntao, LIU Zhiyi, et al. A fast forward algorithm of azimuthal gamma imaging logging while drilling[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 194: 110659.
- [8] 朱丽媛, 李忠华, 徐连满. 钻屑扭矩法测定煤体应力与煤体强度研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2096–2102.  
ZHU Liyuan, LI Zhonghua, XU Lianman. Measuring stress and strength of coal by drilling cutting torque method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2096–2102.
- [9] LI Wei, REN Tianwei, BUSCH A, et al. Architecture, stress state and permeability of a fault zone in Jiulishan coal mine, China: Implication for coal and gas outbursts[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 198: 1–13.
- [10] WANG Jinchao, WANG Chuanying, HUANG Junfeng, et al. In situ stress measurement method of deep borehole based on multi-array ultrasonic scanning technology[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 933286.
- [11] HUANG Dan, LIU Zaibin, WANG Wenke, et al. The identification of fault zones in deep karst aquifer of North China coal mine using parallel directional well logs[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(22): 761.
- [12] LIU Du, WANG Yanbin, NI Xiaoming, et al. Classification of coal structure combinations and their influence on hydraulic fracturing: A case study from the Qinshui Basin, China[J]. Energies, 2020, 13(17): 4559.

- [13] ZHENG Yahua, ZHAO Zhigang, ZHAO Tongbin, et al. A new method for monitoring coal stress while drilling process: Theoretical and experimental study[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(2): 3980–3993.
- [14] 岳立新, 杨全春, 郝志勇. 基于钻杆转速和钻屑量测定煤体应力实验研究[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 127–132.
- YUE Lixin, YANG Quanchun, HAO Zhiyong. Experimental study on measuring the stress of coal based on the speed of drilling rod and the amount of drilling chip[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(4): 127–132.
- [15] QI Qingjie, JIA Xinlei, ZHOU Xinhua, et al. Instability–negative pressure loss model of gas drainage borehole and prevention technique: A case study[J]. PLOS ONE, 2020, 15(11): e0242719.
- [16] 张鹏飞, 赵同彬, 马兴印, 等. 研石充填开采顶板裂隙分布及演化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 969–978.
- ZHANG Pengfei, ZHAO Tongbin, MA Xingyin, et al. Analysis on crack distribution and evolution characteristics of gangue backfilled working face roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 969–978.
- [17] ZHANG Xuebo, SHEN Shuaishuai, FENG Xiaojun, et al. Influence of deformation and instability of borehole on gas extraction in deep mining soft coal seam[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6689277.
- [18] PRENSKY S E. Advances in borehole imaging technology and applications[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 159: 1–43.
- [19] BOYER R, JACOBS A M. Borehole television for geotechnical investigations[J]. International Water Power & Dam Construction, 1986, 38(9): 16–18.
- [20] AL-SIT W, AL-NUAIMY W, MARELLI M, et al. Visual texture for automated characterisation of geological features in borehole televiewer imagery[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 119: 139–146.
- [21] 刘小雄, 王海军. 薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 67–74.
- LIU Xiaoxiong, WANG Haijun. Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 67–74.
- [22] 张玉军, 张风达, 张志巍, 等. 采动煤层底板层次性破坏特征全空间多参数协同监测[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 86–94.
- ZHANG Yujun, ZHANG Fengda, ZHANG Zhiwei, et al. Full-space multi-parameter cooperative monitoring of failure hierarchy characteristics of mining coal seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 86–94.
- [23] 杨宏民, 任发科, 王兆丰, 等. 瓦斯抽采钻孔封孔质量检测及定量评价方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 1): 164–170.
- YANG Hongmin, REN Fakai, WANG Zhaofeng, et al. Quality inspection and quantitative evaluation method for borehole sealing in gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(Sup. 1): 164–170.
- [24] 张学博, 王豪, 杨明, 等. 抽采钻孔失稳坍塌对瓦斯抽采的影响机制研究及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3102–3115.
- ZHANG Xuebo, WANG Hao, YANG Ming, et al. Study and application on influence mechanism of instability and collapse of drainage borehole on gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3102–3115.
- [25] 柴敬, 周余, 欧阳一博, 等. 基于光纤监测的注浆浆液扩散范围试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1045–1055.
- CHAI Jing, ZHOU Yu, OUYANG Yibo, et al. Experimental study of diffusion range of grouting slurry based on optical fiber monitoring[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1045–1055.
- [26] HU Yanbo, LI Wenping, CHEN Xinmin, et al. Application of brillouin optical time domain reflection technology for monitoring deformation and failure of the coal seam floor rock mass in deep underground mines[J]. Mine Water and the Environment, 2022, 41(4): 1082–1095.
- [27] HU Tao, BU Su, HU Ziyi, et al. Experimental study on the displacement sensor of coal roadways roof settlement based on distributed fiber optic sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(12): 13870–13876.
- [28] 傅芸. 光纤分布式应变传感新方法与新技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- FU Yun. Researches on novel methods and technologies of distributed fiber strain sensors[D]. Chengdu : University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [29] XIAO Peng, HUANG Xiaosheng, ZHANG Chao, et al. Research on the construction and verification of evaluation model for borehole collapse in gas extraction[J]. Fuel, 2024, 362: 130800.
- [30] 张孟喜, 褚静尘, 陈强, 等. 基于 FBG 传感技术循环荷载下的路堤模型试验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(4): 645–655.
- ZHANG Mengxi, CHU Jingchen, CHEN Qiang, et al. Model test on embankment reinforcement under cyclic loads using FBG sensing technology[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2022, 28(4): 645–655.
- [31] 孙义杰, 张强, 程刚, 等. 基于光频域反射技术的表面粘贴分布式光纤传感器应变传递特性分析与试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 46–52.
- SUN Yijie, ZHANG Qiang, CHENG Gang, et al. Optical frequency domain reflectometry technology based theoretical analysis and experiment on strain transferring of surface-attached optical fiber sensor[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 46–52.
- [32] 孟上九, 张书荣, 程有坤, 等. 光纤布拉格光栅在季节冻土路基应变检测中的应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 601–608.
- MENG Shangjiu, ZHANG Shurong, CHENG Youkun, et al. Application of fiber Bragg grating sensors to strain detection of seasonally frozen subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 601–608.
- [33] 李景涛. 深部构造煤钻孔塌孔机制及防塌技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
- LI Jingtao. Research on collapse mechanism and anti-collapse technology of borehole in deep tectonic coal[D]. Jiaozuo : Henan Polytechnic University, 2022.
- [34] 孙浩翔. 唐山矿 5 煤层卸压钻孔破坏演化规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- SUN Haoxiang. Destress drilling failed evolution law of No. 5 coal seam in Tangshan Mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [35] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 煤炭产品品种和等级划分: GB/T 17608—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [36] 邓军, 王津睿, 任帅京, 等. 声波探测技术在矿井领域中的应用及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 149–162. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.11.0903.
- DENG Jun, WANG Jinrui, REN Shuaijing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 149–162. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.11.0903.
- [37] 张锦旺, 王家臣, 魏炜杰, 等. 块度级配对散体顶煤流动特性影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 985–994.

- ZHANG Jinwang, WANG Jiachen, WEI Weijie, et al. Experimental investigation on the effect of size distribution on the flow characteristics of loose top coal[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 985–994.
- [38] 施卫星, 何斌, 李晓伟, 等. 一种新型调谐质量阻尼器的试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 207–211.
- SHI Weixing, HE Bin, LI Xiaowei, et al. Experimental study on a new type of tuned mass damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(12): 207–211.
- [39] LYU Wenyu, GUO Kai, WU Yongping, et al. Compression characteristics of local filling gangue in steeply dipping coal seam[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2022, 40(4): 1131–1150.
- [40] 马德, 赵育云, 郭德龙, 等. 孔周煤岩体渐进性破坏过程裂隙和应变能演化特征[J]. 煤矿安全, 2022, 53(3): 16–23.
- MA De, ZHAO Yuyun, GUO Delong, et al. Evolution characteristics of cracks and strain energy during progressive failure of coal and rock masses around the hole[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(3): 16–23.
- [41] SUN Xiaoyan, RAN Qican, LIU Hao, et al. Characteristics of stress–displacement–fracture multi–field evolution around gas extraction borehole[J]. Energies, 2023, 16(6): 2896.