

蒙陕接壤区典型煤层开采顶板周期性变形破坏及涌水响应特征

周振方 董书宁 董阳 罗生虎 薛建坤 王治宙 王淑璇 尚宏波 王甜甜 王昱同 王同

引用本文:

周振方, 董书宁, 董阳, 等. 蒙陕接壤区典型煤层开采顶板周期性变形破坏及涌水响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(8): 101–110.

ZHOU Zhenfang, DONG Shuning, DONG Yang, et al. Periodic roof deformation and failure and associated water inflow characteristics during the mining of typical coal seams in the Inner Mongolia–Shaanxi contiguous area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(8): 101–110.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0218>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蒙陕接壤区煤层顶板涌水水源智能判别方法

An intelligent water source discrimination method for water intrusions from coal seam roofs in the Inner Mongolia–Shaanxi border region

煤田地质与勘探. 2024, 52(4): 76–88 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.01.0083>

煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用

Application of microseismic monitoring system for coal mines to the prevention and control of water disasters on working face roofs

煤田地质与勘探. 2024, 52(6): 1–13 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0230>

蒙陕深埋矿区工作面涌水量全生命周期演化规律

Evolution law of water inflow in full life cycle of working face in deep buried Inner Mongolia–Shaanxi mining area

煤田地质与勘探. 2022, 50(12): 152–158 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.03.0136>

蒙陕接壤区浅埋煤层矿井水水化学特征及来源分析

Hydrochemical characteristics and source analysis of mine water in shallow coal seams in Shaanxi and Inner Mongolia contiguous area

煤田地质与勘探. 2023, 51(4): 85–94 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.07.0553>

蒙陕矿区深部煤层开采顶板含水层失水特征与钻孔注水帷幕保护分析

Analysis on water loss characteristics of roof aquifer and borehole hydraulic curtain protection in deep coal mining in Inner MongoliaShaanxi mining area

煤田地质与勘探. 2023, 51(5): 88–98 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0486>

蒙陕接壤区煤矿采空区水岩系统中氟来源及释放规律

Source and release law of fluorine in water–rock system of coal mine goaf in contiguous area of Shaanxi and Inner Mongolia

煤田地质与勘探. 2023, 51(2): 252–262 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.11.0855>



移动阅读

周振方,董书宁,董阳,等.蒙陕接壤区典型煤层开采顶板周期性变形破坏及涌水响应特征[J].煤田地质与勘探,2024,52(8):101-110. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0218

ZHOU Zhenfang, DONG Shuning, DONG Yang, et al. Periodic roof deformation and failure and associated water inflow characteristics during the mining of typical coal seams in the Inner Mongolia-Shaanxi contiguous area[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(8): 101-110. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0218

蒙陕接壤区典型煤层开采顶板周期性变形破坏及涌水响应特征

周振方^{1,2,3,4}, 董书宁^{2,3,4,*}, 董阳⁵, 罗生虎⁶, 薛建坤^{2,3,4}, 王治宙^{2,3,4}, 王淑璇^{2,3,4},
尚宏波^{2,3,4,7}, 王甜甜^{2,3,4}, 王昱同^{2,3,4}, 王同⁸

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077; 4. 陕西省“四主体一联合”黄河流域中段矿区(煤矿)生态环境保护与修复校企联合研究中心, 陕西 西安 710077; 5. 陕西省现代建筑设计研究院有限公司 生态环境一所, 陕西 西安 710024; 6. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054; 7. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 8. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:【目的】煤矿开采扰动破坏覆岩含/隔水层结构,造成集中涌水,影响矿井安全生产。【方法】以面临典型顶板砂岩水影响的蒙陕接壤区主采煤层 3-1 煤开采涌水过程为研究对象,采用物理相似材料模拟、数值仿真模拟、现场原位监测 3 种方法,并通过周边地质和开采条件相似矿井实测数据对比,分析 3-1 煤典型工作面开采煤体支承压力周期性演变规律、采空区覆岩垂直位移演变规律,定量获取实验室尺度顶板周期来压瞬间微震能量事件变化特征,综合确定顶板导水裂隙带随采发育特征,以及顶板涌水随覆岩周期来压变化趋势。【结果和结论】结果表明:工作面开采覆岩初次来压步距约 40 m,周期性来压步距 12~28 m,覆岩破断瞬间围岩周期性来压呈现“先增后稳定”的趋势,在推进至第 5 次周期来压(推进距离约 140 m)时,超前支承压力达到最大,覆岩周期性来压、破断瞬间垂直位移峰值随采呈现“之”字型变化特征,同样,位移监测数据、微震事件总能量、事件频次等综合指标指示,在第 5 次周期来压瞬间,覆岩垂直位移变幅达到最大值,塑性区发育高度基本稳定;导水裂隙带发育最大高度在 120 m 左右,将直接沟通顶板直罗组砂岩含水层,地下水随采涌入过程呈现两种波动变化趋势,工作面全局尺度上呈现长周期“阶梯式”增长趋势,“阶梯式”增长周期约 800 m,局部尺度呈现短周期“振荡”变化趋势,振荡周期 16~48 m,并表现出与覆岩来压周期之间的较强关联性。研究结果为工作面涌水量预测以及防排水系统布设提供参考。

关键词: 蒙陕接壤区; 水害防治; 涌水量变化; 顶板破坏; 周期来压; 数值模拟; 微震

中图分类号: TD742 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)08-0101-10

Periodic roof deformation and failure and associated water inflow characteristics during the mining of typical coal seams in the Inner Mongolia-Shaanxi contiguous area

ZHOU Zhenfang^{1,2,3,4}, DONG Shuning^{2,3,4,*}, DONG Yang⁵, LUO Shenghu⁶, XUE Jiankun^{2,3,4}, WANG Zhizhou^{2,3,4},
WANG Shuxuan^{2,3,4}, SHANG Hongbo^{2,3,4,7}, WANG Tiantian^{2,3,4}, WANG Yutong^{2,3,4}, WANG Tong⁸

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. CCTEG Xi'an Research

收稿日期: 2024-03-30; 接收日期: 2024-05-28

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2022-2-TD-ZD005); 陕西省青年科技新星项目(2023KJXX-094); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2023-JC-ZD-27); 国家自然科学基金项目(41807221)

第一作者: 周振方, 1988 年生, 男, 河南兰考人, 博士研究生, 副研究员, 从事矿山水文地质方面的研究工作. E-mail: zhouzhenfang@cctegxian.com

***通信作者:** 董书宁, 1961 年生, 男, 陕西蓝田人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事矿山水害防治与水资源保护利用方面的研究工作.

E-mail: dongshuning@cctegxian.com

Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Preventing and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China; 4. Shaanxi Engineering Research Center of Mine Ecological Environment Protection and Restoration in the Middle of Yellow River Basin, Xi'an 710077, China; 5. Ecological Environmental Impact Assessment Institute, Shaanxi Modern Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710024, China; 6. College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 7. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 8. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] The disturbance of coal mine mining damages the aquifer/aquiclude structures of the overburden, causing concentrated water inflow and further affecting safe production in mines. **[Methods]** Using methods of the physical simulation of similar materials, numerical simulation, and on-site in situ monitoring, this study investigated the water inflow during the mining of the dominant 3-1 coal seam, typically influenced by water in sandstones on the coal seam roof, in the Inner Mongolia-Shaanxi contiguous area. By comparing the measured data of mines with similar geological and mining conditions in the surrounding area, this study delved into the periodic evolutionary patterns of both the coal support pressure and the vertical displacement of the overburden in the goaf during the mining of typical mining faces of the 3-1 coal seam. Accordingly, this study quantitatively analyzed the variations of microseismic events at the moment of periodic roof weighting on the laboratory scale. Finally, this study comprehensively determined the development characteristics of the hydraulically conductive fracture zones on the coal seam roof with mining, along with the trend of water inflow from the roof varying with the periodic weighting of the overburden. **[Results and Conclusions]** Key findings are as follows: (1) With the mining face advancement, the overburden exhibited a step distance of about 40 m in the initial weighting and of 12-28 m in periodic weighting. At the moment of the overburden fracturing, the periodic weighting of surrounding rocks first increased and then stabilized. As the mining face advanced to the fifth periodic weighting (advancement distance: 140 m), the advanced support pressure peaked, with the peak vertical displacement of the overburden at the moment of both periodic weighting and fracturing showing zigzag-shaped variations with coal mining. Similarly, comprehensive indicators, such as displacement monitoring data, total energy of microseismic events, and event frequency, indicate that at the moment of the fifth periodic weighting, the vertical displacement amplitude of the overburden peaked, while the height of the plastic zone remained roughly stable. (2) The hydraulically conductive fracture zone, with a maximum height of about 120 m, would be directly connected to the sandstone aquifer of the Zhiluo Formation on the coal seam roof. The groundwater inflow with coal mining manifested two wavy changing trends. The groundwater inflow displayed stepped growth with a long cycle of about 800 m on the global scale of the mining face but, locally, exhibited oscillatory changes with short cycles of 16-48 m and a strong correlation with the weighting period of the overburden. The findings of this study provide a reference for both the prediction of the water inflow of mining faces and the arrangement of the water prevention and drainage system.

Keywords: Inner Mongolia-Shaanxi contiguous area; prevention and control of water hazards; change in water inflow; roof failure; periodic weighting; numerical simulation; microseism

煤层开采扰动顶板岩层结构, 围岩应力场重新分布, 引起顶板一定高度内岩层发生变形破坏, 沟通上覆含水层, 地下水沿导水裂隙进入采场, 形成工作面涌水。根据开采沉陷相关理论, 工作面开采过程覆岩应力重分布、结构变形与结构破坏呈现周期性。受到随采覆岩周期性破断的影响, 顶板含水层单位时间进入工作面的涌水量也在不断变化, 并且呈现出波动性特征。

大量观测数据表明, 工作面随采涌水量周期性波动现象在生产实际中是客观存在的^[1-4], 但以往针对煤层开采顶板覆岩结构周期性损伤、破坏致灾方面的研究成果, 大多聚焦在周期性来压诱发的煤岩动力灾害^[5-7], 工作面涌水量随采周期性波动研究并不多见。过去的近 70 a, 矿山水文地质领域关于矿井/工作面开采涌水方面的研究多集中在预测方法的创新, 以地下水渗流运动的基本微分方程发展形成的解析法^[4,8-9]、数值法^[10], 以及围绕统计学原理发展起来的水文地质比拟法^[11]、

机器学习模型^[12-13], 几乎一致性将煤层开采顶板破坏过程视为连续变化, 由此预测的涌水量呈现随采连续变化特征。“十三五”以来, 不断涌现形成的随采数值法^[14-16]、动力系统模型法^[17-18]等动态预测方法虽然考虑了随采顶板周期性破断问题, 但均未提及周期性破断瞬间涌水量突变现象, 对于工作面开采顶板周期来压与涌水量变化关系的研究关注度较低。实际上, 作为煤矿水害防治工作的基本单元, 工作面开采顶板周期来压诱发的覆岩规律性变形破坏与采动顶板含水层集中涌水, 甚至顶板溃水灾害关系密切, 掌握二者之间的关系对于工作面顶板水害精准防治具有重要作用。

蒙陕接壤区地跨我国神东、陕北两大煤炭基地, 地层发育稳定、平整、延展性好, 开采过程普遍面临顶板充水影响, 分别在开采扰动带来的顶板岩层破坏^[19-20]、涌水量变化规律^[21-23]以及涌水量预测^[8,24-25]等方面, 开展过一些研究工作, 但对覆岩运动与涌水特征在伴随推

采距变化之间的关系没有进一步发掘。基于此,笔者以这一地区典型煤层开采带来的顶板含水层扰动过程为研究对象,借助物理实验和数值仿真手段分析开采顶板扰动破坏规律,研究工作面开采顶板涌水规律,探索涌水过程的周期性、阶变性与顶板扰动破坏之间的定量关系,以期为顶板水害精准防控提供依据。

1 研究区概况

蒙陕接壤区位于鄂尔多斯聚煤盆地北部,煤层埋深相对较浅,地质构造简单。区内地层由上至下依次发育有第四系、新近系、白垩系、侏罗系及三叠系,三叠系

延长组为基底,地表多被渗透性较好的第四系萨拉乌苏组松散层和全新统风积沙所覆盖。侏罗系延安组为主要含煤地层,3 煤组是目前广泛开采的主要煤层之一,埋深从 100 m 以浅至 600 m 以深不等。

选取的研究矿井采用下行开采井巷开拓方式,现主采最上部的 3-1 煤层,研究对象 301、302 工作面为相邻工作面,开采深度 250~280 m,全程俯采,工作面涌水量通过两侧巷道排水沟进行监测,开采顶板主要充水含水层为直罗组厚层砂岩含水层,均厚 65 m,富(导)水性较好(图 1)。

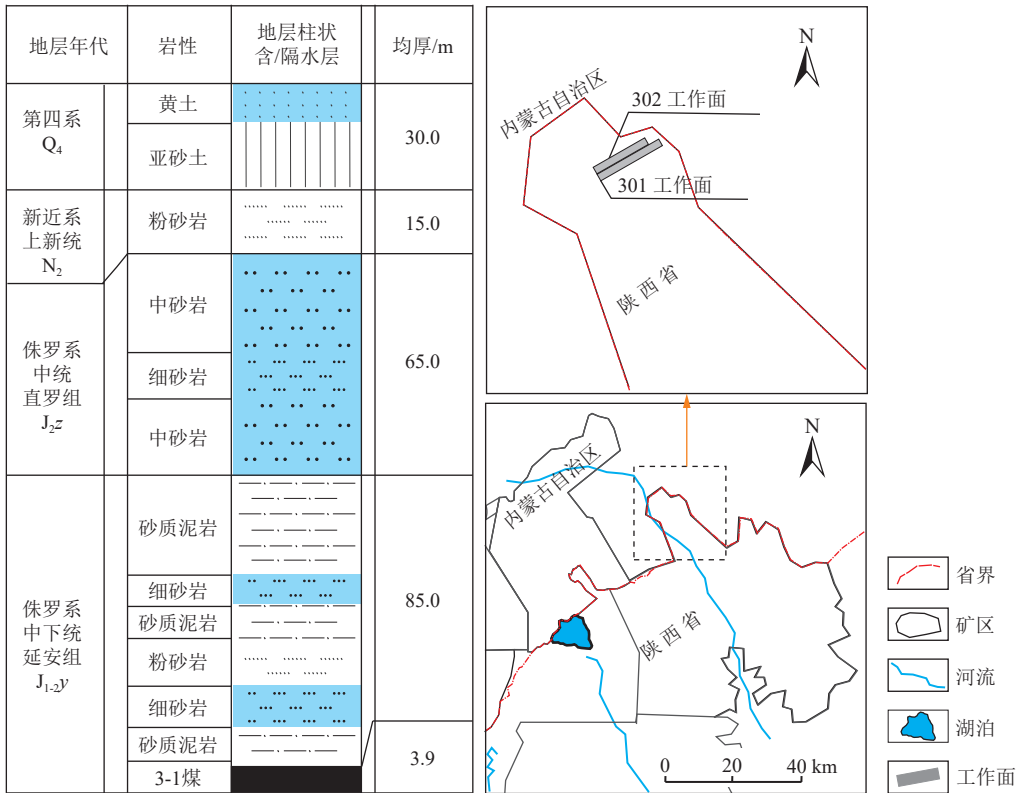


图 1 研究工作面所在位置及典型钻孔柱状

Fig.1 Locations of the mining faces and the typical borehole-revealed stratigraphic column of the Inner Mongolia-Shaanxi contiguous area

2 研究方法

根据实测主采 3-1 煤层及上覆岩层厚度、岩石力学参数等(表 1),选取物理相似材料模拟和计算机数值

仿真两种手段,综合研究工作面开采覆岩石力学行为。

2.1 物理相似材料模拟设计

1) 基础模型搭建相似参数

根据地质资料、煤岩层特征和实验室岩石力学的

表 1 煤/岩层力学参数
Table 1 Mechanical parameters of coals and rocks

地层岩性	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
黄土	1 760	1.90	1.90	0.27	12	0.50
粉砂岩	2 400	1.53	1.05	1.20	38	1.25
中砂岩	2 500	1.37	1.02	1.10	37	1.01
细砂岩	2 300	1.52	1.05	1.10	38	0.65
炭质泥岩	2 530	3.80	1.60	0.73	30	2.10
砂质泥岩	2 600	1.07	0.37	0.57	34	0.86
3-1 煤	2 100	1.60	1.50	1.20	34	0.90

主要物理力学参数等,选取河沙、煤灰作为骨料,石膏、大白粉作为黏结材料,2.36~0.83 mm 的云母粉为分层材料,由相似理论确定的相似条件为 1 : 100 (p 表示原型, m 表示模型):

容重相似常数:

$$C_r = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = \frac{2\ 500}{1\ 600} = 1.6 \quad (1)$$

应力相似常数:

$$C_\sigma = C_r C_l = 160 \quad (2)$$

载荷相似常数:

$$C_F = C_\sigma C_l^2 = 1.6 \times 10^6 \quad (3)$$

时间相似常数:

$$C_t = \sqrt{C_l} = \sqrt{100} = 10 \quad (4)$$

根据模拟实验要求,选用 300 cm×100 cm×20 cm 相似模拟实验架,并按照材料相似、力学环境相似基本准则进行材料配比。

2) 模拟开采环境参数监测仪器

在模型底部铺设压力传感器,结合压力计算机数据采集系统,在模型开挖过程中实时监测工作面支撑压力和顶板垮落矸石压力分布特征;利用 PENTAXR-322NX 光学全站仪监测开挖过程中模型表面测点变形运移规律。对于距离煤层较近的岩层,测点排间距、行间距分别为 10、5 cm;对于距离煤层较远的岩层,测点排间距、行间距均为 10 cm。在模型背面 4 个拐角位置处(距离模型架边界 15 cm)安装微震拾震传感器(图 2),采用 SOS 微震监测系统采集开挖过程中围岩破裂产生的微震信号,定位微震事件发生位置(图 3)。

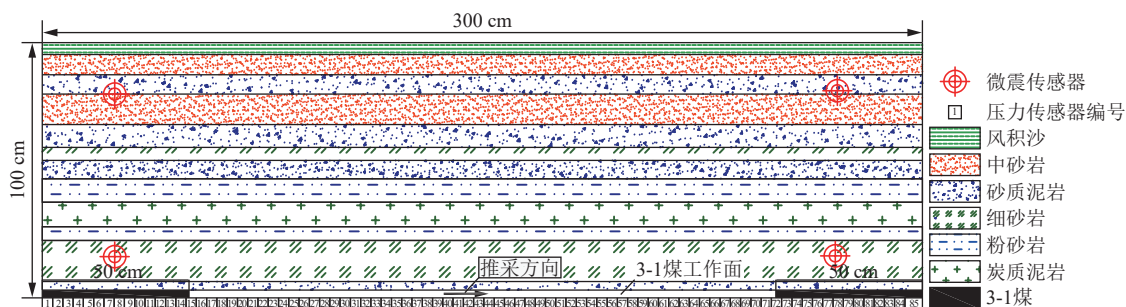


图 2 覆岩扰动物理相似模拟试验设计

Fig.2 Design of physical simulation experiments on overburden disturbance using similar materials

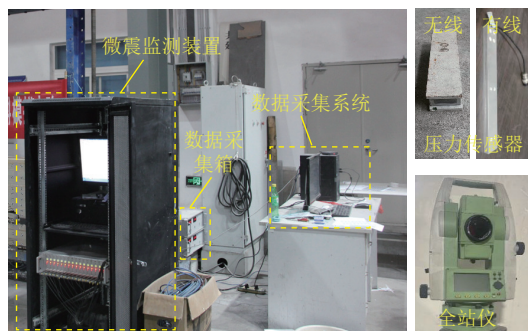


图 3 覆岩扰动物理相似模拟试验主要参数测试设备

Fig.3 Testing equipment for primary parameters in the physical simulation experiments on overburden disturbance using similar materials

3) 环境参数获取频次

工作面推采过程中,模型两端各留设 50 cm 煤柱,从模型左侧端开挖,开切眼 4 cm,开挖步距 2 cm/刀,围岩压力、表面位移、微震测点数据均按照每推采一刀记录一次的频次记录。

2.2 数值模拟方案

计算采用 Mohr-Coulomb 屈服准则刻画岩体的变形破坏:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (5)$$

当 $f_s > 0$ 时,材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下,岩体的抗拉强度很低,因此,可根据抗拉强度准则($\sigma_3 \geq \sigma_t$)判断岩体是否产生拉破坏。

数值模型构建过程中,考虑到模型计算时边界效应的影响,使主要研究区域处于边界效应影响范围以外,以达到更接近实际的计算结果。在模型底部施加垂直位移约束,在模型前、后、左、右面施加水平位移约束。模型上表面到达地表,模型上表面属于自由边界。

采用 FLAC^{3D} 有限差分三维数值软件进行问题求解,通过 Generate 命令生成,模拟模型尺寸为 $X(\text{宽}) \times Y(\text{厚}) \times Z(\text{高}) = 500 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 194.3 \text{ m}$,工作面沿 Y 轴方向推进。工作面采宽设计 300 m,工作面前后、左右边界煤柱留设 100 m,推进步距为 20 m,总共沿 Y 轴方向推进 400 m。

3 工作面开采覆岩变形破坏特征

3.1 煤体支撑压力演变规律

物理相似材料实验模拟了案例工作面切眼至第 8

次周期来压段。从工作面初次来压至第 8 次周期来压期间,工作面前方和切眼煤壁后方支承压力数据不断变化,工作面从初次来压至第 5 次周期来压(距离约 140 cm,代表实际推进距离 140 m)之前,超前支承压力峰值不断增大,由 4.7 MPa 增至 7.3 MPa,此后,随着工作面推进距离的继续增加,超前支承压力峰值基本稳定在 7.3 MPa 左右(图 4a)。在此基础上,利用 FLAC^{3D} 数

值软件模拟了工作面推进过程围岩支承压力变化特征,在工作面推进 0~140 m 过程中,工作面前方超前支承压力峰值呈现不断增加的趋势,从 4.98 MPa 不断增至 9.19 MPa;工作面推进距离大于 140 m 之后,周期来压各阶段支承压力峰值趋于稳定,保持在 9.18 MPa 上下(图 4b)。

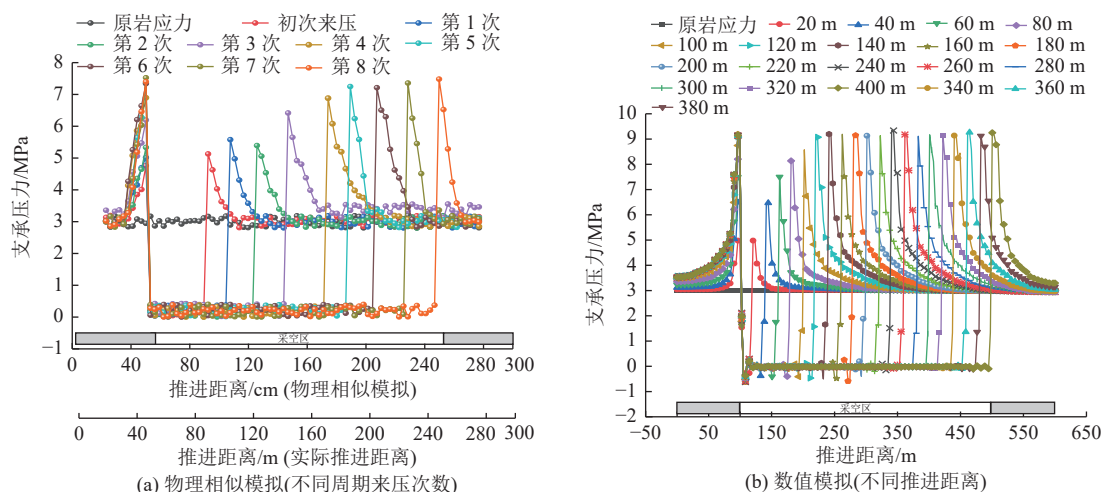


图 4 工作面推进过程中围岩支承压力演化规律

Fig.4 Evolutionary patterns of the support pressure of surrounding rocks during the mining face advancement

物理相似材料模拟和覆岩破坏数值模拟综合结果指示,随着工作面推进距离的不断增加,覆岩破断瞬间围岩来压呈现“先增加后稳定”的变化特征,在工作面推进至第 5 次周期来压(推进距离约 140 m)时,采空区上覆岩层载荷传递到采空区两侧的幅度达到最大,导致工作面两侧支承压力峰值达到最大,此后,随着工作面推进距离的继续增加,覆岩垮落矸石的压实程度不断升高,采空区支承压力增大,传递到采空区两侧煤体上的覆岩载荷增加幅度有限,工作面前方煤壁超前支承压力峰值趋于稳定。

3.2 覆岩位移演变规律

根据物理相似材料模拟结果,工作面顶板岩层垂直位移随推采过程不断增加。当工作面推进至不同来压阶段时,顶板岩层所对应的最大位移从 0.72 cm(代表实际下沉量 0.72 m)增至 2.48 cm(代表实际下沉量 2.48 m),最大值出现在第 8 次周期来压,顶板最大垂直位移变化幅度在 1%~82% 波动,最大变幅出现在工作面推进至第 5 次周期来压,之后随着推进距离继续增加,顶板岩层垂直位移增加幅度显著减小,趋于稳定(图 5a)。覆岩位移演变数值模拟结果表现出与物理相似模拟结果的一致性,顶板岩层垂直位移随推采距离不断增大,在工作面推进距离 400 m 时达到最大值,顶板岩层最大垂直位移峰值为 2.81 m。当工作面推进距离约 140 m 时,

顶板岩层垂直位移峰值为 1.53 m,垂直位移峰值增长比例达到最大值 194.2%,围岩受扰动作用最为强烈。随着工作面推进距离的继续增加,顶板垂直位移增长比例显著减小(图 5b)。

综合上述分析,随着工作面推进距离不断增加,顶板岩层垂直位移呈现“之”字型变化趋势,开采初期,顶板岩层垂直位移随开采缓慢增大,在第 5 次周期来压瞬间,垂直位移变幅达到最大值,随着推进距离的继续增加,顶板岩层塑性破坏区逐渐形成了稳定的采动位移角,采动影响逐步趋于稳定,垂直位移变化不再向上扩展。

3.3 顶板来压微震监测能量事件特征

SOS 微震监测系统捕捉了工作面推采过程中覆岩变形破断过程微震能量事件数、能量级数以及位置信息(图 6),据此对比分析不同来压阶段覆岩扰动程度。

从工作面推进不同来压阶段微震事件空间分布(图 6)可以看出,初次来压阶段,微震事件空间上主要集中在直接顶岩层和基本顶岩层,微震量级主要集中在 0~50 J,能量波动幅度较小。随着推进距离的不断增加,有少量微震事件分布于工作面煤壁前方和切眼煤壁侧,大部分微震事件分布在采空区中心位置的基本顶岩层及其上覆岩层,揭示工作面推进过程中,采空区上覆岩层是主要变形破坏区,同时,由于受到采空区两侧支承压力升高作用影响,切眼煤壁后方和工作面煤壁前方

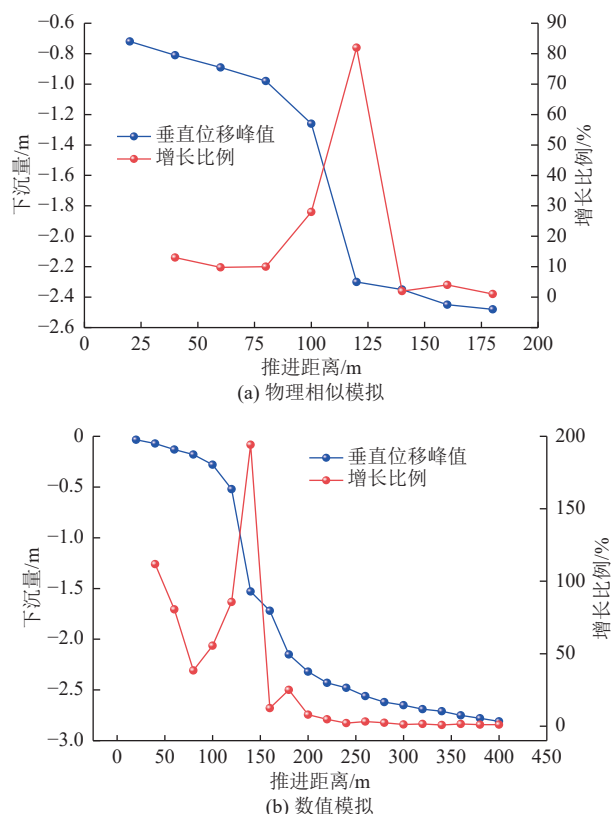


图 5 工作面推进不同距离覆岩垂直位移变化
Fig.5 Vertical displacement of the overburden varying under different advancement distances of the mining face

出现裂隙破坏区。同时,微震事件频次和能量量级不断增加,微震事件分布高度不断向上扩展。当工作面推进距离为 140 cm(第 5 次周期来压阶段)时,微震事件频次和能量量级增长幅度达到最大,微震事件高度已接近模型顶部。当工作面推进距离大于 140 cm 时,微震事件分布位置不断向工作面推进方向偏移,但大能量事件显著减少(图 6)。

通过统计工作面推进不同来压阶段微震事件总能

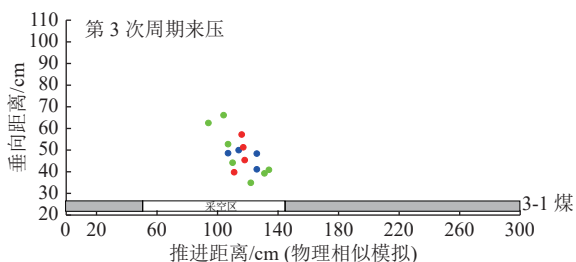
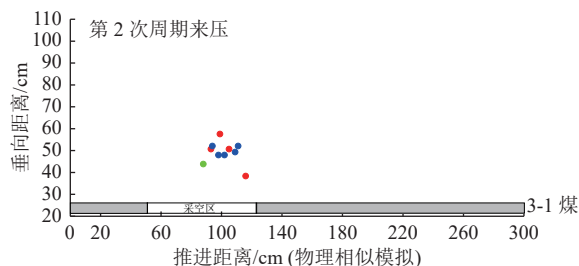
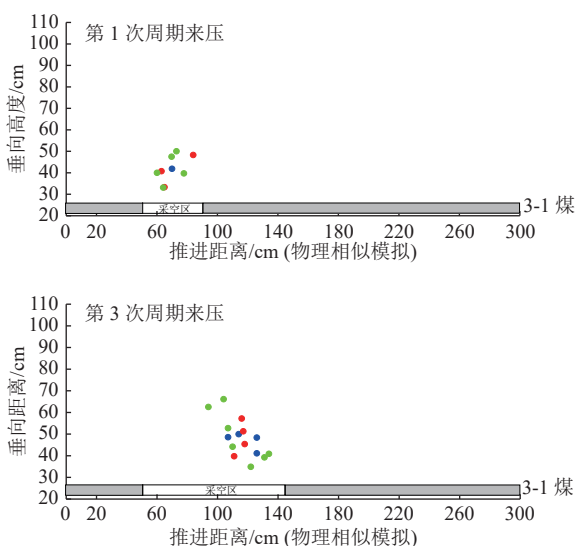
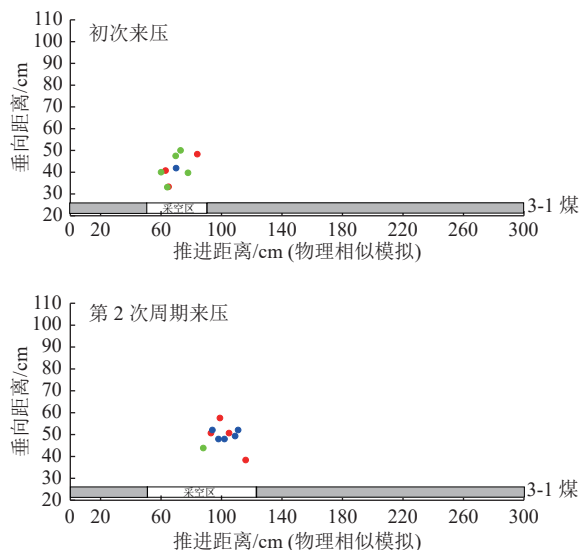
量、频次(图 7)可以看出,工作面推进不同阶段时微震事件总能量在 197.12~1 232.97 J,呈现先增后减趋势,能量峰值出现在推进距离 140 cm 位置(第 5 次周期来压阶段);微震事件频次在 6~20 次,表现出与微震事件总能量同样的变化趋势,最高频次发生在推进距离 140 cm 位置(第 5 次周期来压阶段)(图 7)。微震能量活跃事件监测统计结果一定程度上解释了顶板周期来压、顶板岩层垂直位移随采变化特征。

3.4 工作面开采导水裂隙带发育规律

1) 数值模拟结果

工作面推采覆岩应力场、位移场演变物理模拟结果指示,覆岩破断周期性来压步距 12~28 m,并且在推采至第 5 次周期来压步距时,覆岩扰动高度达到最大,为进一步确定工作面开采顶板导水裂隙带发育高度,利用 FLAC^{3D} 数值软件模拟了典型工作面开采期间顶板塑性区发育规律(图 8),以表征顶板导水裂隙带发育规律^[19]。

模拟结果显示,当工作面推进距离较小时,沿工作面走向、倾向围岩塑性区破坏范围不断扩展。当工作面推进距离为 140 m 时,顶板岩层塑性区高度达到最大(垂高约 120 m),指示导水裂隙带发育最大高度在 120 m 左右,考虑到模拟煤层厚度为 4.0 m,计算得到煤层开采采采比为 30,此时采空区顶、底板岩层破坏形式为拉伸破坏,工作面煤壁侧和采空区后方煤壁侧破坏形式以剪切破坏为主,塑性区分布形态为典型的“马鞍型”(图 8)。推采前期,工作面支承压力峰值、峰值位置、集中系数、支承压力影响范围和顶板岩层最大垂直位移均不断增大;当塑性区垂高达到一定值(约 120 m)后,随着推采距增加,围岩塑性区宽度不断增加,塑性区高度、支承压力峰值、峰值位置、集中系数、支承压力影响范围逐渐趋于稳定。



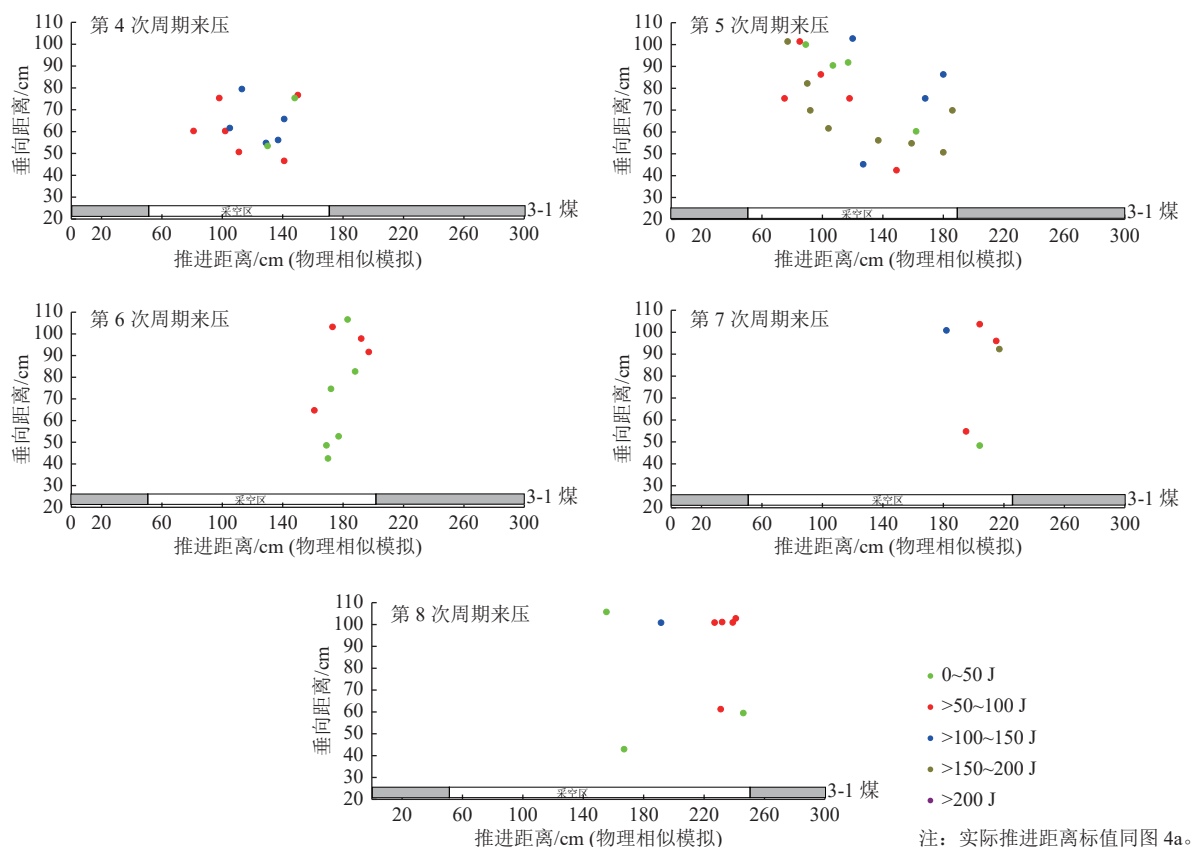


图 6 不同来压阶段瞬间微震事件分布特征

Fig.6 Distributions of microseismic events at the moment of different stages of weighting

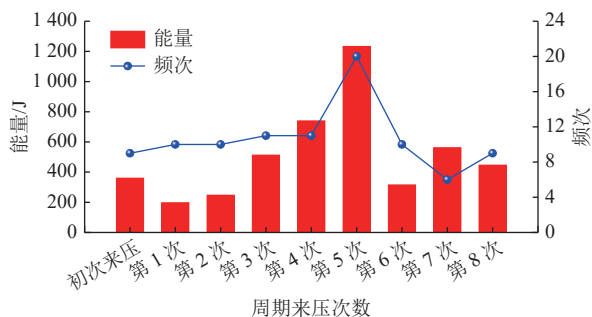


图 7 工作面推进不同来压阶段微震事件统计结果

Fig.7 Statistical results of microseismic events in different weighting stages during the mining face advancement

2) 现场实测结果

研究矿井以往并未开展导水裂隙带现场实测工作,但邻近矿井开展过较多的研究工作(表 2),综合确定研究区 3 煤组开采导水裂隙带发育裂采比在 18.4~33.5。

通过以上研究成果对比,导水裂隙带发育高度数值模拟与周边矿井以往研究成果表现出较好的一致性,可以推断,煤层开采导水裂隙带最大发育高度在 120 m 左右,推采距 140 m 左右达到最大的模拟结果是可信的。

4 工作面顶板涌水量随采变化特征

统计了研究区具有相似地质条件的 301、302 工作面涌水量随采变化的数据,可以看出,在全工作面尺度

上,涌水量随采均呈现出“阶梯式”增长趋势,长周期阶段步距约 800 m;在物理相似模拟试验段范围(工作面局部尺度上),涌水量随采表现出波动增长趋势,在对应工作面周期来压段,多数表现出一定的振荡波动性,短周期振荡步距 16~48 m(物理相似模型 16~48 cm),表明工作面涌水量随采出现的短周期振荡现象与覆岩周期来压具有较强的关联性,这与庞立宁^[26]、施龙青^[27]等的研究结果一致(图 9)。尽管如此,全工作面尺度下出现的 800 m 规律性阶变现象通过本次研究难以解释,需要结合更多的水文地质资料、开采覆岩破断规律等证据进一步探索。

5 结论

(1) 利用物理相似材料模拟、数值模拟两种方法综合确定研究工作面推进过程覆岩初次来压步距约 40 m,周期性来压步距 12~28 m,覆岩破断瞬间围岩周期性来压呈现“先增加后稳定”的趋势,在推进至第 5 次周期来压(推进距离约 140 m)时,超前支承压力达到最大。

(2) 数值模拟、物理相似材料模拟及微震监测数据揭示覆岩垂直位移峰值随采不断增加,并呈现“之”字型变化特征,在第 5 次周期来压瞬间,覆岩垂直位移变幅达到最大。

(3) 综合计算确定导水裂隙带发育最大高度在 120 m 左右, 能够直接沟通顶板直罗组砂岩含水层, 顶板含水

层水随采涌入过程呈现两种波动变化趋势, 工作面全局尺度上呈现长周期“阶梯式”增长趋势(阶变周期约

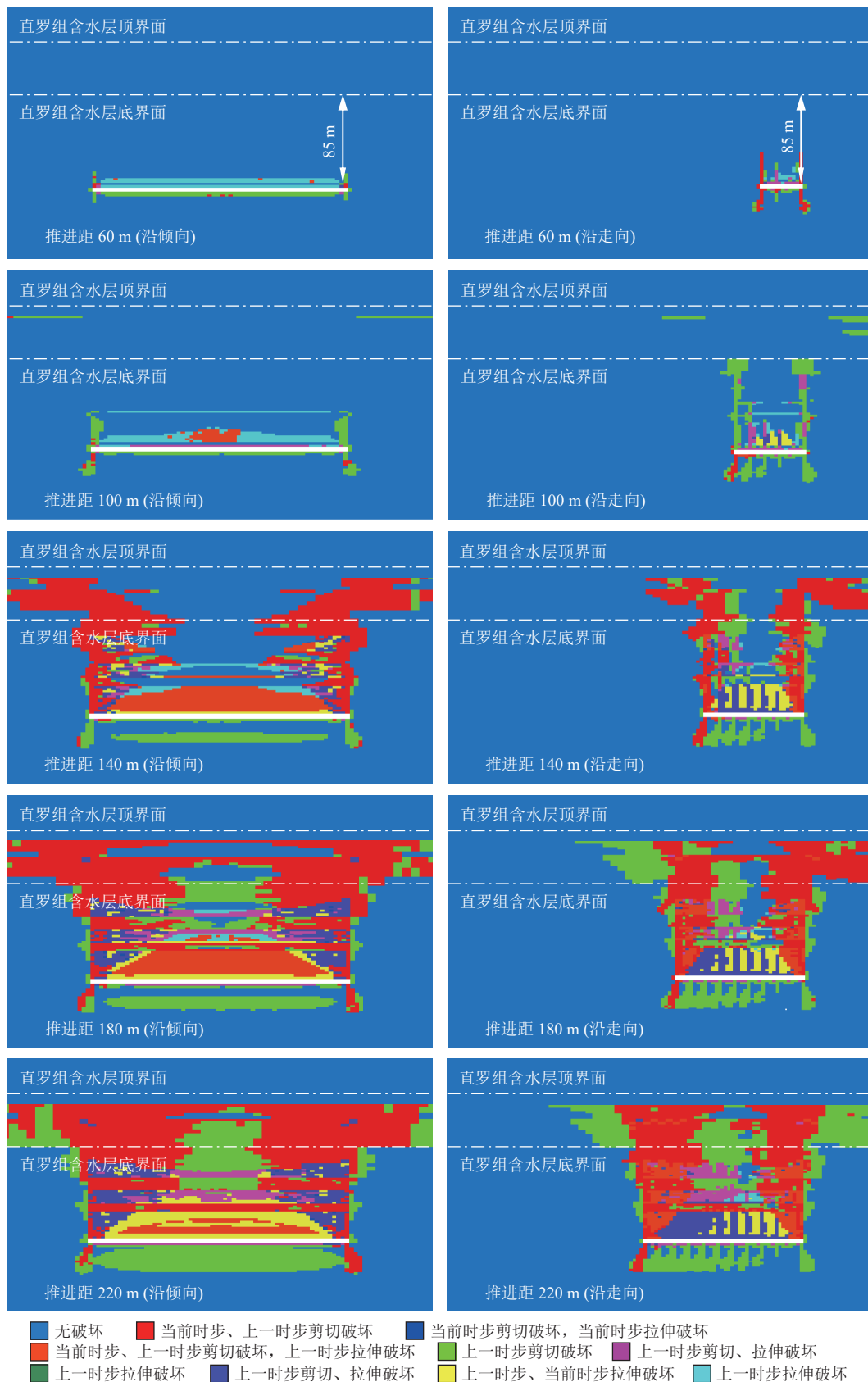
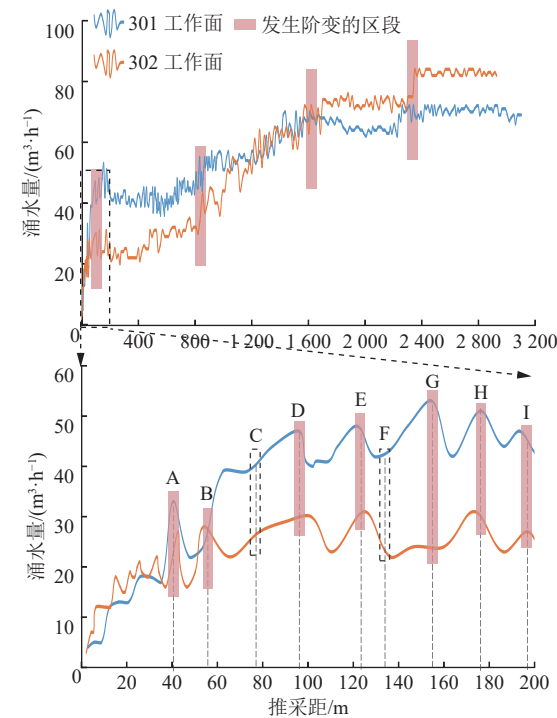


图 8 工作面推进顶板塑性区发育规律

Fig.8 Development patterns of the plastic zone on the coal seam roof during the mining face advancement

表 2 研究区邻近矿井相同煤层开采导水裂隙带发育高度
Table 2 Heights of hydraulically conductive fracture zones during the mining of the same coal seam in adjacent mines

矿井	开采煤层	煤层采高/m	导水裂隙带最大发育高度/m				裂采比
			理论值	模拟值	实测值	优选值	
B1矿 ^a	3煤组	6.0	74.1	83.5	105.0	110.3	18.4
B2矿 ^a	3煤组	4.4	69.3	72.9	140.5	140.5	31.9
B3矿 ^a	3煤组	4.0	67.7	70.0	132.9	132.9	22.1
B4矿 ^a	3煤组	3.8			128.3	128.3	33.5
均值						128.0	26.5



注：A 表示初次来压，B—I 表示第 1 至第 8 次周期性来压。

图 9 典型工作面涌水量随采变化特征

Fig.9 Variations in water inflow with mining of typical mining faces

800 m), 局部尺度上呈现短周期“振荡”变化趋势(振荡周期 16~48 m), 局部振荡现象表现出与覆岩周期来压之间的较强关联性, 长周期阶变现象的控制因素需要进一步探索。

符号注释:

c 为黏聚力, MPa; C_l 为几何相似系数; C_r 为容重相似常数; C_σ 为应力相似常数; C_F 为载荷相似常数; C_t 为时间相似常数; f_s 为岩石强度, N; γ_p 为原岩容重, N/m³; γ_m 为相似模型容重, N/m³; σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力, N; σ_T 为岩体破断所能承受的临界拉压力, MPa; φ 为内摩擦角, (°)。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

[1] 刘洋, 张幼振. 浅埋煤层工作面涌水量预测方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 116–120.
LIU Yang, ZHANG Youzhen. Forecast method for water inflow from working face in shallowly buried coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 116–120.

[2] 刘洋, 王振荣, 牛建立. 工作面涌水量预测方法的确定[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(5): 29–30.
LIU Yang, WANG Zhenrong, NIU Jianli. Determination of prediction method for water inflow in working face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(5): 29–30.

[3] 郑纲, 何渊. 深埋矿井超大工作面顶板砂岩含水层涌水量预测方法[J]. 煤矿安全, 2015, 46(增刊 1): 76–80.
ZHENG Gang, HE Yuan. Prediction of roof sandstone water discharge at super large working face in deep mine[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(Sup.1): 76–80.

[4] 李超峰. 采煤工作面顶板巨厚层状含水层涌水量预测研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
LI Chaofeng. Prediction theory and method of water inflow from roof thick layered aquifer of coal mining face[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.

[5] 刘文超, 赵毅鑫. 红庆河矿典型工作面冲击地压灾变机理及防治[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 803–816.
LIU Wenchao, ZHAO Yixin. Mechanism and prevention of typical coal burst disaster at the working face of Hongqinghe Coal Mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(6): 803–816.

[6] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 367–379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367–379.

[7] 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.

[8] 虎维岳. 浅埋煤层回采中顶板含水层涌水量的时空动态预测技术[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 91–96.
HU Weiyue. Water inflows prediction technique of water inflow from roof aquifer during extraction of shallow seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(5): 91–96.

[9] 尹尚先, 张祥维, 徐慧, 等. “大井法”中渗透系数及含水层厚度

- 的优化[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(5): 53–56.
- YIN Shangxian, ZHANG Xiangwei, XU Hui, et al. Optimization of permeability coefficient and aquifer thickness in large-well-method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(5): 53–56.
- [10] 徐智敏, 陈天赐, 陈歌, 等. 煤层采动顶板水文地质参数演化与矿井涌水量动态计算方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 833–845.
- XU Zhimin, CHEN Tianci, CHEN Ge, et al. Hydrogeological parameter evolution of coal seam roof and dynamic calculation method of mine water inflow[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 833–845.
- [11] 连会青, 夏向学, 徐斌, 等. 矿井涌水量预测方法及适用性评价[J]. *华北科技学院学报*, 2014, 11(2): 22–27.
- LIAN Huiqing, XIA Xiangxue, XU Bin, et al. Evaluation and applicability study on prediction methods of water inflow in mines[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2014, 11(2): 22–27.
- [12] 张润畦, 商芷萱, 蒋知廷, 等. 基于灰色系统理论与 ARIMA 模型对涌水量预测研究[J]. *华北科技学院学报*, 2022, 19(1): 13–20.
- ZHANG Runqi, SHANG Zhixuan, JIANG Zhiting, et al. Research on water in flow prediction methods based on grey system theory and ARIMA model[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2022, 19(1): 13–20.
- [13] 施龙青, 王雅茹, 邱梅, 等. 时间序列模型在工作面涌水量预测中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(3): 108–115.
- SHI Longqing, WANG Yaru, QIU Mei, et al. Application of time series model in water inflow prediction of working face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(3): 108–115.
- [14] XU Lulu, CAI Meifeng, DONG Shuning, et al. An upscaling approach to predict mine water inflow from roof sandstone aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128314.
- [15] 刘基. 复合含水层疏放水钻孔与工作面涌水量预测方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
- LIU Ji. Study on the prediction method of water inflow of drainage boreholes and working faces in compound aquifers[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [16] 赵春虎, 靳德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 523–533.
- ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 523–533.
- [17] ZHOU Zhenfang, DONG Shuning, WANG Hao, et al. Dynamic characteristics of water inflow from a coal mine's roof aquifer[J]. *Mine Water and the Environment*, 2022, 41(3): 764–774.
- [18] 靳德武, 周振方, 赵春虎, 等. 西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 690–700.
- JIN Dewu, ZHOU Zhenfang, ZHAO Chunhu, et al. Dynamics process analysis of groundwater quantity loss of roof aquifer with shallow seam mining in western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 690–700.
- [19] 王皓, 周振方, 杨建, 等. 蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动的定量表征[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 83–93.
- WANG Hao, ZHOU Zhenfang, YANG Jian, et al. Quantitative characterization of the disturbance of groundwater system in typical coal seam mining in contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 83–93.
- [20] 苗彦平, 蔚波, 姬中奎, 等. 侏罗纪浅埋煤层开采典型水害模式及分区[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(8): 75–82.
- MIAO Yanping, YU Bo, JI Zhongkui, et al. Typical model of water damage in Jurassic shallow coal seam mining and its zoning[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(8): 75–82.
- [21] 周振方, 靳德武, 虎维岳, 等. 煤矿工作面推采采空区涌水双指数动态衰减动力学研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(9): 2587–2594.
- ZHOU Zhenfang, JIN Dewu, HU Weiyue, et al. Double-exponential variation law of water-inflow from roof aquifer in goaf of working face with mining process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2587–2594.
- [22] 黄海鱼, 丁湘, 吴永辉, 等. 鄂尔多斯盆地北部中侏罗统沉积相特征及其对中深部矿井涌水量的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(3): 508–518.
- HUANG Haiyu, DING Xiang, WU Yonghui, et al. Sedimentary facies characteristics of the Middle Jurassic in northern Ordos Basin and their influence on water inflow in the middle and deep mines[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(3): 508–518.
- [23] 许峰, 靳德武, 杨茂林, 等. 神府-东胜矿区高强度开采顶板涌水特征及防治技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 72–80.
- XU Feng, JIN Dewu, YANG Maolin, et al. Characteristics of roof water inflow and control technology for high intensity mining in Dongsheng mining area, Shenfu Coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 72–80.
- [24] 杨建, 王皓, 梁向阳, 等. 鄂尔多斯盆地北部深埋煤层工作面涌水量预测方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 185–191.
- YANG Jian, WANG Hao, LIANG Xiangyang, et al. Water inflow forecasting method of deep buried coal working face in northern Ordos Basin, China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 185–191.
- [25] 刘谋, 王俊杰, 吴广涛, 等. 矿井涌水量预测及其对沙漠植被的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(3): 65–75.
- LIU Mou, WANG Junjie, WU Guangtao, et al. Prediction of mine water inflow and analyses of its influence on desert vegetation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 65–75.
- [26] 庞立宁, 毛德兵, 李春睿. 富水顶板大采高综采工作面涌水与矿压关系研究[J]. *煤矿开采*, 2015, 20(6): 90–93.
- PANG Lining, MAO Debing, LI Chunrui. Study on the relationship between water inflow and mine pressure in fully-mechanized mining working face with rich water roof[J]. *Coal Mining Technology*, 2015, 20(6): 90–93.
- [27] 施龙青, 史雅迪, 李越, 等. 传递岩梁初次断裂工作面涌水量预测模型研究及应用[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(4): 110–114.
- SHI Longqing, SHI Yadi, LI Yue, et al. Prediction model of working face water inflow when transfer rock beam initially fractures[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(4): 110–114.

(责任编辑 周建军)