



采空区积水对邻近巷道围岩稳定性分析研究

金长宇, 魏振林, 陈天宇

Stability of surrounding rock with water accumulation in goaf

引用本文:

金长宇, 魏振林, 陈天宇. 采空区积水对邻近巷道围岩稳定性分析研究[J]. [矿业科学学报](#), 2024, 9(5): 759–766.

JIN Changyu, WEI Zhenlin, CHEN Tianyu. Stability of surrounding rock with water accumulation in goaf[J]. [Journal of Mining Science and Technology](#), 2024, 9(5): 759–766.

您可能感兴趣的其他文章

1. 煤矿开采损伤数值模拟量化表征与应用

引用本文: 张村, 任赵鹏, 兰世勇, 等. 煤矿开采损伤数值模拟量化表征与应用[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(3): 398–408.

2. 回坡底煤矿回采巷道非对称底鼓机理及防治措施

引用本文: 赵洪宝, 刘一洪, 程辉, 等. 回坡底煤矿回采巷道非对称底鼓机理及防治措施[J]. [矿业科学学报](#), 2020, 5(6): 638–647.

3. 垮落带破碎煤岩样循环加卸载渗流特征实验研究

引用本文: 王伟, 张村, 吴山西, 等. 垮落带破碎煤岩样循环加卸载渗流特征实验研究[J]. [矿业科学学报](#), 2020, 5(4): 374–381.

4. 玲珑矿区多阶段遗留采空区群稳定性分析及治理

引用本文: 王炳文, 熊庭永, 雷强, 等. 玲珑矿区多阶段遗留采空区群稳定性分析及治理[J]. [矿业科学学报](#), 2019, 4(5): 425–433.

5. 深孔爆破切顶对沿空留巷围岩稳定性影响的研究

引用本文: 胡涛, 侯公羽, 李子祥, 等. 深孔爆破切顶对沿空留巷围岩稳定性影响的研究[J]. [矿业科学学报](#), 2019, 4(4): 299–307.

金长宇,魏振林,陈天宇. 采空区积水对邻近巷道围岩稳定性分析研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(5): 759-766. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.05.010

JIN Changyu, WEI Zhenlin, CHEN Tianyu. Stability of surrounding rock with water accumulation in goaf[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(5): 759-766. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.05.010

采空区积水对邻近巷道围岩稳定性分析研究

金长宇,魏振林,陈天宇

东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室,辽宁沈阳 110819

摘要:以山西某煤矿采空区为背景,针对采空区积水对邻近巷道围岩稳定性的影响,采用现场测试、室内试验、数值模拟等方法进行了研究分析。首先基于三维激光扫描和声呐建立了含水采空区的三维几何模型;然后对不同损伤程度下煤岩开展渗透率试验,获得了渗透率的变化规律;最后在充分考虑渗透率的动态变化基础上,采用数值软件对邻近巷道围岩的稳定性进行了模拟分析。结果表明:孔隙水压力已经影响到邻近巷道围岩和上覆岩体;采空区赋水后,围岩极易出现渗水和透水情况;受开采扰动和积水渗透的双重影响,采空区与巷道的煤柱出现大范围塑性区,其稳定性较差。为了保证井下生产安全,建议增加井下临时性排水设施,及时将积水排出,避免透水事故的发生。

关键词:采空区积水;三维激光扫描;渗透率

中图分类号:TD 12

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)05-0759-08

Stability of surrounding rock with water accumulation in goaf

JIN Changyu, WEI Zhenlin, CHEN Tianyu

Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China

Abstract: This study investigates the influence of water accumulation in goaf on the stability of surrounding rock in a coal mine in Shanxi Province via field test, laboratory experiment and numerical simulation. Specifically, we established 3D geometric models of water bodies and goaf in water-bearing goaf based on 3D laser scanning and sonar. We then conducted permeability test on coal rock under different degrees of damage, and obtained permeability variation patterns. We then analyzed the stability of surrounding rock near water-cut goaf using numerical software by considering the dynamic changes of permeability. Results show that: ① pore water pressure exerts significant impact on the surrounding rock and overlying rock mass. ② The surrounding rock is prone to water seepage and percolation after the old goaf is flooded. ③ A large range of plastic zone with low stability is observed in the coal pillar between the goaf and roadway due to mining disturbance and water seepage. Therefore to ensure the safety of underground production, it is suggested to increase temporary underground drainage facilities for in-time water discharge to avoid flooding accidents.

Key words: goaf water; 3D laser scanning; permeability

收稿日期:2024-03-06 修回日期:2024-05-22

基金项目:国家自然科学基金(52374084)

作者简介:金长宇(1979—),男,辽宁鞍山人,教授,主要从事岩石力学与数值模拟方法等方面的研究工作。Tel:18609836281, E-mail:jinchangyu@mail.neu.edu.cn

近几年汛期时,山西多地出现大降雨,导致地下水赋存于煤矿老旧采空区;采空区邻近巷道的岩壁上有明显的渗水现象,表明采空区内部已经存在大量积水,并通过钻探法进行了验证。含水采空区给邻近采场与巷道围岩稳定性造成了重大安全隐患,同时也影响矿山的生产运行。

传统的测绘方法很难精准获得水下采空区的三维形态,采用充水采空区三维数字声呐测量系统 TBG 2000 进行水下探测。水上部分探测采用 C-

ALS 三维激光扫描仪,具体探测位置如图 1 所示(红色区域)。

将原始数据解算为空间点云后,依次在 Cloud Compare 和 3Dresaper 中进行建模,得到赋水采空区的三维模型(图 2)。赋水采空区长 203 m、宽 25 ~ 35 m、高度为 1.53 ~ 4.6 m,水深最大处可达 2.3 m,采空区体积达 22 533 m³。水域体积 13 094 m³,水域体积占比 58%。

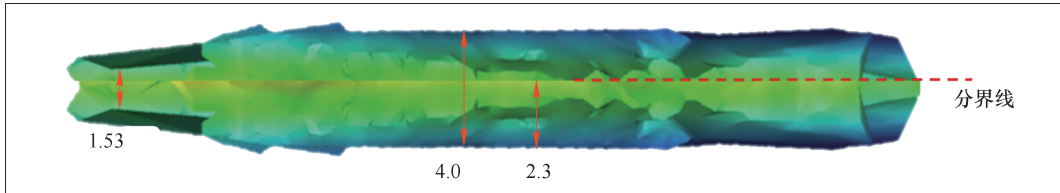


图 2 赋水采空区模型(单位:m)

Fig. 2 Model of water goaf(unit:m)

2 煤岩的渗透性试验

受埋藏深度、煤化程度、煤体的孔隙裂隙结构、应力状态、开采扰动等因素的影响,不同区域不同状态的煤岩渗透性有很大差别。为了能够准确获得 2101 采空区与巷道之间煤岩的渗透率,对巷道和采空区间柱进行钻孔取样。按照现场的实际应力与渗透方向,开展了室内试验研究。巷道和采空区之间的煤柱近似单向压缩的一维应力状态,即煤柱可近似看作仅受垂直方向上的垂直应力,如图 3 所示;采空区进水后,煤体的裂隙会在孔隙水压力的作用下进一步扩展,煤体损伤加剧,而且水的润滑、潜蚀、水解等物理化学作用也会降低煤体的强度。如果水头压力过高,空区和巷道之间的煤体极易在应力-渗流耦合作用下发生失稳破坏,积水涌入同层邻近巷道,造成突水灾害。

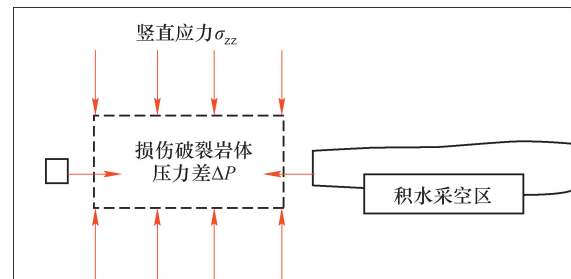


图 3 煤柱受力情况

Fig. 3 Stress situation of coal pillar

试验设备 Rock Top 多场耦合试验仪(图 4)由

法国 TOP 公司生产的常规多场耦合三轴流变仪,以及东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室自主搭建的渗流系统(进气端、出气端以及真空泵)组成。Rock Top 多场耦合试验仪主要包括数据控制采集系统、三轴压力室、围压系统、轴压系统、渗流系统、恒温系统和高精度传感器。围压和轴向荷载分别可达到 60 MPa、600 kN,系统最高温度可达 90 ℃。

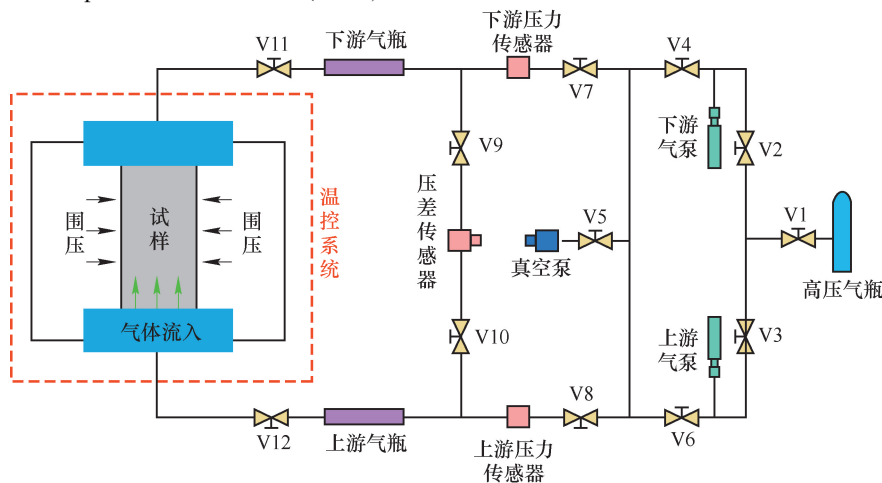


图 4 Rock Top 多场耦合试验仪原理图

Fig. 4 Rock Top multi-field coupling test equipment

渗透率的测量采用瞬态法。该方法在试样的上下端部施加气体压差,试验过程中记录上下游压差的衰减,将压力差衰减与容器体积相结合,确定通过样品的流量^[12-13]。

实验过程中固定围压值,峰前采用应力加载,每加载一级应力(1 MPa),测其渗透率;峰后采用位移加载,测其残余时的渗透率;之后以1 MPa一级进行卸荷,测量在卸荷过程中的渗透率。结合国内外关于损伤变量的定义^[14-19],将轴向应力与抗压强度之比(损伤百分比)作为损伤变量,分析渗透率的突变性。

煤样在三轴压缩过程中的渗透率变化可分为3个阶段(图5)。

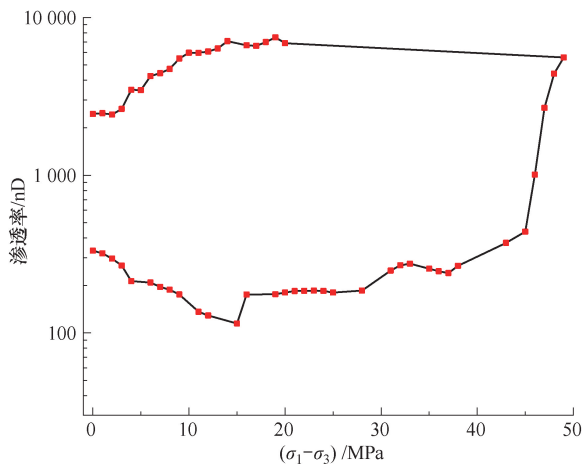


图5 渗透率-主应力差图

Fig. 5 Permeability and principal stress difference diagram

(1) 逐渐下降阶段。对应三轴压缩过程中的压密阶段。由于煤样内孔隙裂隙逐渐被压密,渗透率呈逐渐下降的趋势。

(2) 基本稳定阶段。对应三轴压缩过程中的弹性阶段和微裂隙稳定发展阶段。随着煤样内孔隙裂隙进一步压密以及少量微裂隙的产生,渗透率基本稳定,同时有所增加。

(3) 显著上升阶段。对应三轴压缩过程中的屈服破坏阶段。随着煤样内部微裂隙快速产生与非稳定扩展,渗流通道由微裂隙转向宏观裂隙(破裂面),渗透率显著增加。

该煤样表现出极强的弹脆性,当损伤达到93%,渗透率剧增,增幅近130%,之后渗透率更是持续上涨,残余阶段的渗透率可达 $6.876 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$,与初值 $3.32 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 相比,增大近20倍;峰后卸荷渗透率略有下降,但仍保持较高水平,如图6所示。因此,宏观裂隙(破裂面)一旦产生,将极大增加煤岩的渗透性,而且不可恢复。数值模拟中必须考虑损伤对渗透率的影响。

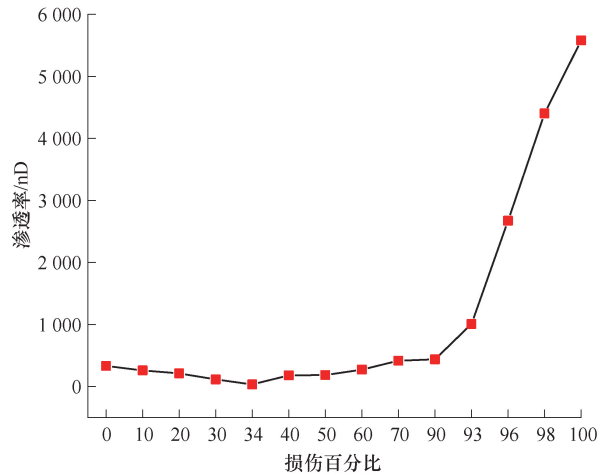


图6 渗透率-损伤曲线

Fig. 6 Permeability damage curve

3 数值模拟

3.1 计算模型

分析2101赋水采空区对同层邻近巷道围岩的影响,结合煤矿的生产施工,采用部分探测数据建立数值模型。模型的顶板和底板均为砂岩,中部为煤岩。模型尺寸为 $167 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 37 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),共划分节点79 761个,单元141 700个;模型中包含一个采空区和巷道,二者相距20 m;采空区的宽度为30 m,高度为2.8~4.5 m;模型的四周和底面为法向约束,顶面施加11.6 MPa的均布荷载,用来模拟上覆岩层的自重应力,如图7所示。

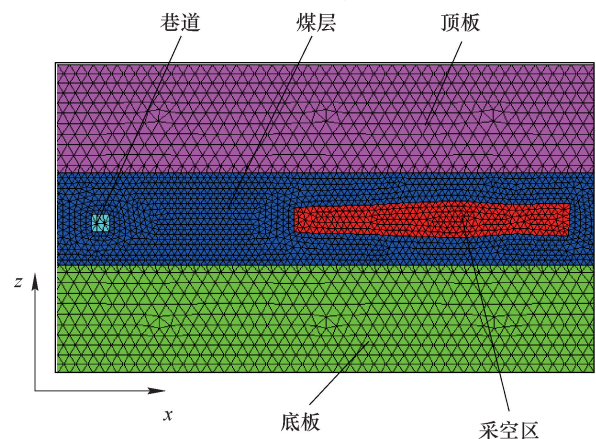


图7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

3.2 岩体参数

3.2.1 岩体的物理力学参数

煤层的顶板和底板为砂岩,模拟时采用Mohr-Coulomb本构模型;煤层采用应变软化模型,各岩层的物理力学参数见表1,同时假定空区内水体压强为静水压强。

表 1 模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of the model

| 种类 | 密度/(kg · m ⁻³) | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 内聚力/MPa | | 内摩擦角/(°) | | 抗拉强度/MPa |
|----|----------------------------|----------|------|---------|-----|----------|------|----------|
| | | | | 初始 | 残余 | 初始 | 残余 | |
| 顶板 | 2480 | 8.6 | 0.22 | 5.6 | — | 22.5 | — | 0.5 |
| 煤层 | 1380 | 2.9 | 0.25 | 1.9 | 1.3 | 16.4 | 12.3 | 0.0 |
| 底板 | 2487 | 9.2 | 0.21 | 6.2 | — | 23.6 | — | 0.7 |

3.2.2 渗透系数的动态调整

相关研究^[10,20]表明,渗透率(渗透系数)与应力之间的关系可用指数函数来表示。考虑到渗透率变化趋势为先减后增,将指数函数与二次函数结合起来表征。经拟合发现,函数 $y = \exp(a + bx + cx^2)$ 可以很好地表示渗透率和主应力差之间的关系(图 8)。同时,结合水的密度和动力黏滞系数,将渗透率转化为渗透系数,在数值模拟过程中依据主应力差进行调整。

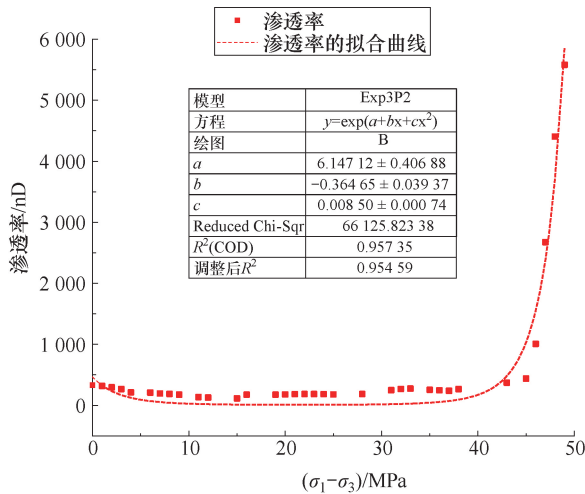


图 8 渗透率-主应力差拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of permeability and principal stress difference

3.3 计算结果

模拟分为巷道开挖、煤体开采和赋水渗透 3 个阶段,结合位移、应力、孔隙水压力和塑性区等指标,对煤岩体稳定性进行评价。

3.3.1 位移场分析

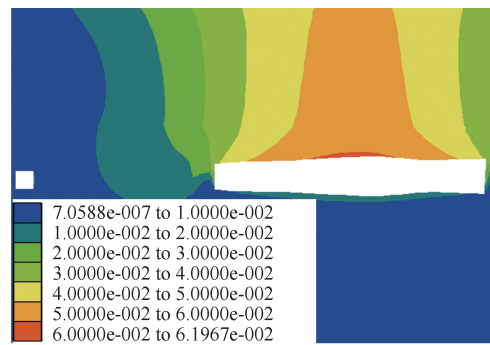
该煤层长度可达 290 m,采用放顶煤开采而采区端部的煤层顶板没有完全垮落,形成一定范围的空区,因此煤体开采后空区顶板的变形量不大。数值模拟的位移值也说明了这一点,巷道开挖后,四周岩体的水平位移为 0.1~0.48 cm,竖直位移为 0.2~0.63 cm;煤体开采后,端部的水平位移为 1.5~2.76 cm,顶板竖向位移为 3.0~6.2 cm。二者开挖后位移量总体不大,竖直位移大于水平位移(表 2)。

表 2 各个阶段的位移情况

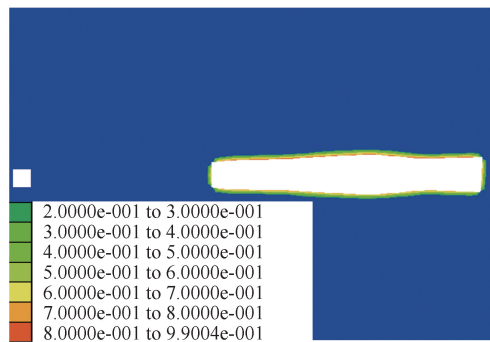
Table 2 Displacement at each stage

| 阶段 | 水平位移 | 竖直位移 | 总位移 |
|------|----------|----------|----------|
| 巷道开挖 | 0.1~0.48 | 0.2~0.63 | 0.4~0.63 |
| 煤体开采 | 1.5~2.76 | 3.0~6.2 | 4~6.2 |
| 赋水渗透 | 20~80 | 30~90 | 30~90 |

空区赋水后,顶板竖直位移最大值可达 90 cm,端部的水平位移可达 80 cm,二者较赋水之前都有大幅增加,如图 9 所示。可见,本已处于极限稳定状态下的煤岩体,在遇水软化和渗流的作用下位移大幅度增加;采空区积水会对顶板和端部位产生重大的影响,应将空区内的积水及时排出。



(a) 赋水前



(b) 赋水后

图 9 空区赋水前后的总位移

Fig. 9 Total displacement of empty area before and after water injection

3.3.2 应力场分析

煤体开采后,空区和巷道之间出现一定的应力

集中区,最小主应力极值接近 17.1 MPa(开挖前为 11 MPa);空区赋水后,最小主应力极值有所降低,但应力集中范围有所增加,同时空区四周的应力值也有所增大,如图 10 所示。究其原因,当煤体遇水后,煤体的强度和刚度减小,从而容易对应力集中进行缓冲,将较小范围的应力集中扩展到较大范围。

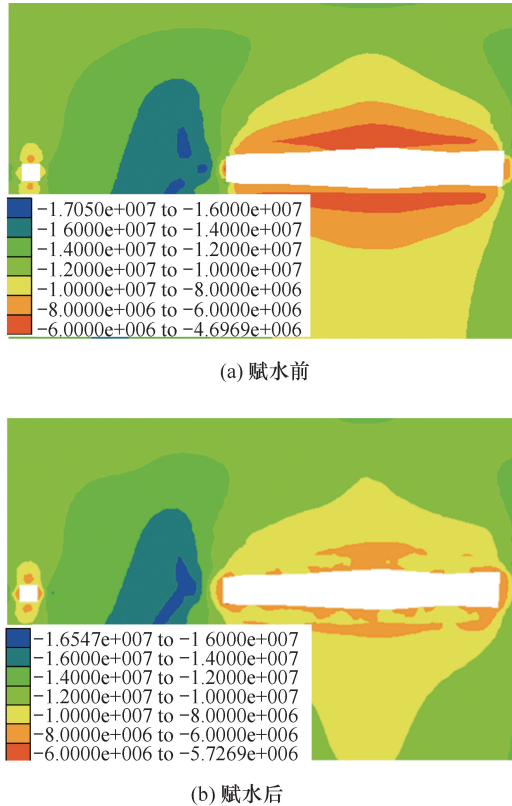


图 10 空区赋水前后的最小主应力云图
Fig. 10 Nephogram of the minimum principal stress in the void before and after water filling

由图 11 看出,一段时间后,空区四周的水压力为 4 MPa,巷道周围也出现了 1.5 MPa 的孔隙水压力。此外,还对上覆岩体产生一定的影响,应当及时将空区内的水排出,避免对更大范围内的围岩产生影响。

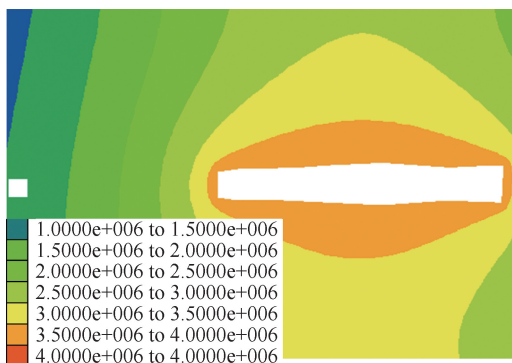


图 11 孔隙水压力
Fig. 11 Pore water pressure diagram

3.3.3 塑性区分析

巷道开挖后,形成一定的塑性区;煤体开采后,出现大面积塑性区,如图 12(a)(b)所示。

随着积水的不断渗透,空区四周的塑性区均有所增加,其中顶板增加最为明显,邻近采空区一侧巷道塑性区也有所增加,如图 12(c)所示。

可见,开采扰动和赋水渗透的双重作用,极大地促进了采场煤岩的塑性区发育,甚至出现了部分交错贯通,该煤层煤岩体的稳定性较差,具有垮落的危险。

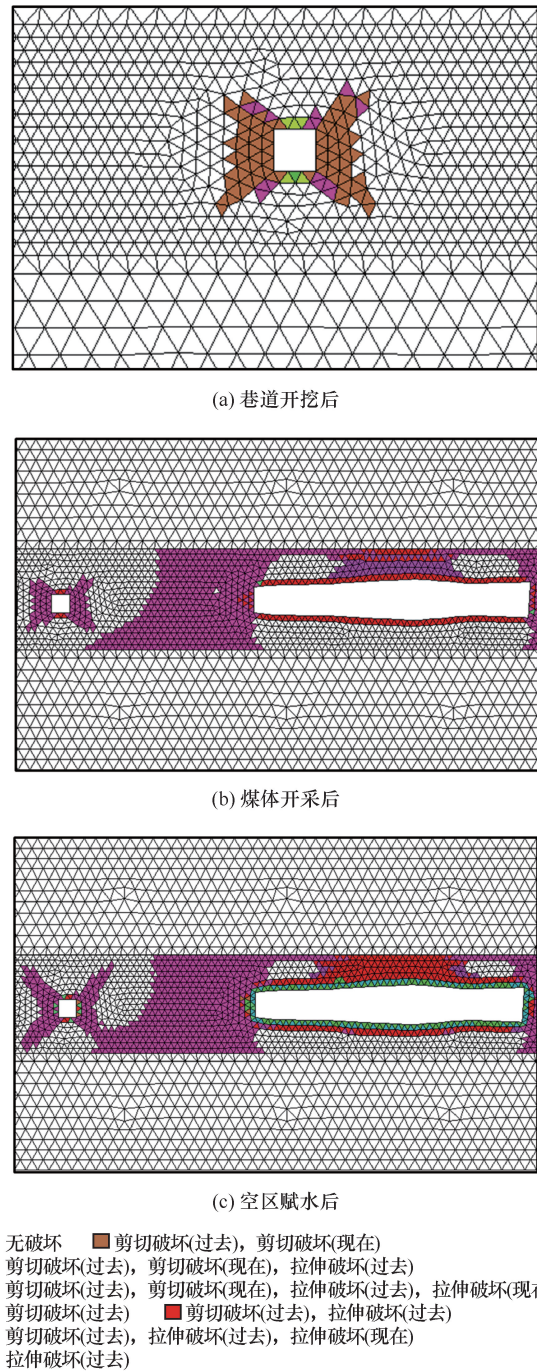


图 12 不同阶段的塑性区
Fig. 12 Plastic zone at different stages

4 结 论

以山西某煤矿 2101 采空区为背景,采用现场测试、室内试验、数值模拟等方法对其赋水前后邻近煤岩体的应力、位移、塑性区、孔隙水压力进行了分析,主要结论如下:

(1) 煤岩在三轴压缩过程中渗透率变化剧烈且具有极强的突变性;

(2) 孔隙水压力已经影响到邻近巷道围岩和上覆岩体;

(3) 采空区赋水后,其顶板和端部的位移量急剧增加且巷道和采空区之间的塑性区出现了交错贯通;表明老旧空区赋水后,在损伤累计和赋水渗透的共同作用下,围岩极易出现渗水和透水情况。

建议矿山人员在汛期期间增设井下空区排水系统,保证雨水尽快排出,防止煤岩体的垮落。

参考文献

- [1] 周逸文,张涛,段隆臣,等. 我国矿山采空区综合治理研究综述[J]. 安全与环境工程,2022,29(04): 220-230.
ZHOU Yiwen, ZHANG Tao, DUAN Longchen, et al. Summary of research on comprehensive treatment of mine goaf in China[J]. Safety and Environmental Engineering,2022,29(04): 220-230.
- [2] 郑建烽. 山西省和善煤矿老窑采空区及富水性瞬变电磁探测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京),2019.
ZHENG Jianfeng. The detecting research of transient electromagnetic in goaf of old mine and water-rich area in Heshan Coal Mine of Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2019.
- [3] 谭政. 地下充水空间对隧巷工程的危害模拟与控制研究[D]. 长沙: 中南大学,2007.
TAN Zheng. Study on simulation and control of damage resulted from the underground space with water for the tunneling[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [4] 师维刚,张嘉凡,张慧梅,等. 防水隔离煤柱结构分区及合理宽度确定[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(5): 1227-1237.
SHI Weigang, ZHANG Jiafan, ZHANG Huimei, et al. Structural division and determination of rational width for waterproof partition coal pillar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(5): 1227-1237.
- [5] 卢伟宁. 西铭煤矿采空区积水对防水煤岩柱稳定性影响的试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2021.
LU Weining. Experimental study on the influence of water accumulation in the mined-out space on the stability of water proof coal and rock pillar in Ximing Coal Mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2021.
- [6] 杨天鸿,唐春安,朱万成,等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(4): 489-493.
YANG Tianhong, TANG Chunan, ZHU Wancheng, et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(4): 489-493.
- [7] 钱瑞鹏. 掘巷影响下积水采空区隔水煤体损伤破坏规律及失稳致灾机理研究[D]. 太原: 太原理工大学,2022.
QIAN Ruipeng. study on failure and disaster mechanism of water-resisting coal mass under influence of roadway excavation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2022.
- [8] 崔国政,杨天鸿,刘洪磊,等. 基于应力-渗流-损伤耦合作用的煤矿突水模拟[J]. 中国矿业,2021,30(5): 136-142.
CUI Guozheng, YANG Tianhong, LIU Honglei, et al. Simulation of coal mine water inrush based on stress seepage damage coupling[J]. China Mining Magazine, 2021,30(5): 136-142.
- [9] 薛熠. 采动影响下损伤破裂煤岩体渗透性演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2017.
XUE Yi. Study on the permeability evolution of fractured coal under the influence of mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2017.
- [10] 刘明,章青,徐康,等. 考虑损伤作用的岩体流固耦合分析[J]. 中国农村水利水电,2011(8): 132-135,138.
LIU Ming, ZHANG Qing, XU Kang, et al. An analysis of coupled fluid solid of the rockmass with damage effects[J]. China Rural Water and Hydropower,2011(8): 132-135,138.
- [11] 李竹,樊建宇,冯国瑞,等. 隔水煤柱采动渗流耦合失效特征及其合理宽度[J]. 煤炭学报,2023,48(11): 4011-4023.
LI Zhu, FAN Jianyu, FENG Guorui, et al. Failure characteristics and reasonable width of water-resisting pillar under the coupling effect of mining and seepage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4011-4023.
- [12] PAN Z J, CONNELL L D, CAMILLERI M. Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for pri-

- mary and enhanced coalbed methane recovery[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3-4): 252-261.
- [13] PAN Z J, MA Y, CONNELL L D, et al. Measuring anisotropic permeability using a cubic shale sample in a triaxial cell[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 26: 336-344.
- [14] 王永康. 损伤变量的定义与测量[J]. 强度与环境, 1989, 16(6): 28-33.
WANG Yonglian. Definition and measurement of damage variables[J]. Structure & Environment Engineering, 1989, 16(6): 28-33.
- [15] 王涛. 非对称荷载下煤岩力学行为与损伤破裂机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
WANG Tao. Study on mechanical behavior and damage mechanism of coal and rock under asymmetric loading [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2021.
- [16] 胡楠. 深部高地应力条件下采场围岩损伤机理与稳定性分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
HU Nan. Damage mechanism and stability analysis of stope surrounding rock under deep high in-situ stress condition [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [17] 张培森, 侯季群, 赵成业, 等. 不同围压不同损伤程度红砂岩渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2405-2415.
ZHANG Peisen, HOU Jiqun, ZHAO Chengye, et al. Experimental study on seepage characteristics of red sandstone with different confining pressures and different damage degrees[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2405-2415.
- [18] 胡建华, 董喆喆, 马少维, 等. 应力-渗流耦合作用下损伤岩石渗流特性[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(3): 355-363.
HU Jianhua, DONG Zhezhe, MA Shaowei, et al. Seepage characteristics of damaged rock under stress-seepage coupling[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(3): 355-363.
- [19] 王军祥, 姜谔男, 宋战平. 岩石弹塑性应力-渗流-损伤耦合模型研究(I): 模型建立及其数值求解程序[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 626-637, 644.
WANG Junxiang, JIANG Annan, SONG Zhanping. Study of the coupling model of rock elastoplastic stress-seepage-damage(I): Modelling and its numerical solution procedure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 626-637, 644.
- [20] 张英, 李鹏, 郭奇峰, 等. 水力耦合裂隙岩体变形破坏机制研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 21-41.
ZHANG Ying, LI Peng, GUO Qifeng, et al. Research progress of deformation and failure mechanism in fractured rock mass under hydromechanical coupling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 21-41.

(责任编辑: 王晓玲)