



采空区防水密闭墙稳定性监测与抗水压能力研究

杜明泽 孔繁龙 费宇 王东昊

引用本文:

杜明泽, 孔繁龙, 费宇, 等. 采空区防水密闭墙稳定性监测与抗水压能力研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 200–208.

DU Mingze, KONG Fanlong, FEI Yu. Stability monitoring and bearing pressure capacity of waterproof sealing wall in underground goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 200–208.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–2025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ：防水闸墙围岩

Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass Ⅲ: a review of water retention bulkhead

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 36–43 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–2138>

缓倾斜煤层沿含水采空区掘巷煤柱稳定性研究

Study on stability of coal pillars of roadway excavated along gob with water in gently inclined coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9366feae-488d-4ad4-a678-0e83b089c541>

孔隙型含水岩层中封水衬砌的水力荷载试验研究

Study on hydraulic load test of waterproof lining in pore type water-bearing rock

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/389bebe1-26fb-4f1d-b4f0-14d70326fcfa>

鄂尔多斯盆地侏罗系煤田保水开采技术与应用

Technology and application of water-preserving mining in Jurassic coalfield in Ordos Basin

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 159–168 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.019>

渭北煤田地下水特征及保水采煤研究进展

Hydrogeological characteristics and progress of water-preserving coal mining of northern Shaanxi Coalfield

煤炭科学技术. 2020, 48(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/643b8bc6-ed5a-40ac-b46b-0b12b547c59b>

基于导水裂隙扩展重金属离子迁移的短壁块段式充填保水采煤机理研究

Mechanism of short-wall block backfill water-preserved mining based on water-conducting fractures development-heavy metal ions migration

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 155–172 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–1796>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杜明泽, 孔繁龙, 费宇, 等. 采空区防水密闭墙稳定性监测与抗水压能力研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 200–208.

DU Mingze, KONG Fanlong, FEI Yu, *et al.* Stability monitoring and bearing pressure capacity of waterproof sealing wall in underground goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 200–208.

采空区防水密闭墙稳定性监测与抗水压能力研究

杜明泽^{1,2}, 孔繁龙³, 费宇⁴, 王东昊^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国电建投内蒙古能源有限公司 察哈素煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 井下采空区储水是西部生态脆弱区保水开采的重要手段之一, 防水密闭墙的稳定性关系到采空区储水的安全性。针对采空区防水密闭墙稳定性难以监测、抗水压能力难以预测这一关键问题, 以察哈素煤矿井下采空区防水密闭墙为背景, 采用理论分析、数值模拟和现场实测等方法, 测试了煤层及顶底板力学性能, 获得了煤体及顶底板最小抗压强度; 考虑密闭墙结构的受力特点, 计算推导了不受采动影响情况下防水密闭墙的最大承压能力; 建立了防水密闭墙数值模型, 分析了超前采动影响和不同水头高度(6、9、12、15 m)下密闭的受力状态、变形及破坏情况; 研发了井下采空区防水密闭墙应力、位移监测系统, 并基于理论分析, 合理布设监测点, 且在现场进行了应用。在此基础上, 结合理论分析与数值模拟结果, 确定了防水密闭墙的最大安全水头高度和警戒水位线的水头高度。结果表明: 超前采动对防水密闭墙损伤有一定的影响, 且水压作用加大了密闭墙与煤柱接触面间裂隙滑移范围; 采终防水密闭墙承受的最大水头高度为12 m, 防水密闭墙的警戒水位线的水头高度为9.6 m; 防水密闭墙在墙体与煤柱的接触面以及密闭墙体顶底角位置为结构弱面, 易发生破坏, 应注意加强密闭墙相嵌与煤岩体位置以及密闭墙体顶底角位置处的监测或观测, 必要时可采用注浆封堵手段对结构弱面或渗漏部位进行加固处理。研究结果可为类似矿井防水密闭墙的稳定性监测与抗水压能力评估提供理论基础与应用参考。

关键词: 防水密闭墙; 采空区储水; 承压能力; 保水开采

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)05-0200-09

Stability monitoring and bearing pressure capacity of waterproof sealing wall in underground goaf

DU Mingze^{1,2}, KONG Fanlong³, FEI Yu⁴, WANG Donghao^{1,2}

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. Chahasu Coal Mine, Guodian Construction Investment Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Ordos 017000, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Underground water storage in goaf is one of the important means of water conservation and mining in the western ecologically fragile area. The stability of waterproof sealing wall is related to the safety of water storage in goaf. In view of the key problem that the stability of the waterproof sealing wall in the goaf is difficult to monitor and the water pressure resistance ability is difficult to predict, under the background of underground mining end sealing in Chahasu Coal Mine, by means of theoretical analysis, numerical simulation and field measurement, the mechanical properties of coal seam and roof and floor are tested, and the minimum compressive strength of coal body and roof and floor is obtained. Considering the stress characteristics of the sealing wall structure, the maximum bearing capacity of the waterproof closed wall without the influence of mining is calculated and deduced. The numerical model of waterproof sealing wall is estab-

收稿日期: 2022-11-25

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2025

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104196); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2019-ZD004); 煤科院科技发展基金资助项目(2021CX-I-06)

作者简介: 杜明泽(1989—), 男, 山东枣庄人, 博士。Tel: 010-84264744, E-mail: dumingze0910@163.com

lished, and the stress state, deformation and damage of sealing wall under the influence of advanced mining and different water head heights (6, 9, 12 and 15 m) were analyzed. The stress and displacement monitoring systems of the waterproof sealing wall in the underground goaf has been developed. Based on the theoretical analysis, the monitoring points had been reasonably arranged and applied in the field. On this basis, combined with theoretical analysis and numerical simulation results, the maximum safe head height of the waterproof sealing wall and the head height of the warning water line are determined. The results showed that the advance mining has a certain impact on the damage of the waterproof sealing wall, and the water pressure increases the sliding range of the cracks between the sealing wall and the coal pillar contact surface. The maximum water head height borne by the waterproof sealing wall at the end of mining is 12 m, and the water head height of the warning water level line of the waterproof sealing wall is 9.6 m. The contact surface between the wall and the coal pillar as well as the top and bottom corners of the closed wall are structural weak surfaces, which are prone to damage. Attention should be paid to strengthening the monitoring or observation of the position of the sealing wall embedded in the coal and rock mass and the top and bottom corners of the sealing wall. If necessary, grouting and plugging can be used to reinforce the weak surface or leakage part of the structure. The research results can provide theoretical basis and application reference for stability monitoring and water pressure resistance evaluation of similar mine waterproof sealing walls.

Key words: waterproof sealing wall; water storage in goaf; pressure bearing capacity; water-preserved mining

0 引言

我国煤矿水文地质条件复杂, 是世界上矿山水害最严重的国家之一^[1]。近年来, 随着能源战略向西部转移、西部煤炭资源开发步伐的加快, 煤炭资源开采深度、开采规模、开采范围及开采强度不断加大, 水害危害程度将更加突出, 突水频率和突水强度将不断加大, 矿井水害防治也面临着巨大的挑战^[2-3]。尤其是西部煤炭资源开采效率的提高以及中小型矿井资源整合, 形成了大量的煤矿采空区, 随着时间的延长采空区积水逐渐增多, 由此引发的水害问题也日益严重^[4-5]。

西部矿区煤层厚度大, 开采强度高, 围岩破坏剧烈, 矿压显现加剧^[6-7]。为防止工作面开采后采空区积水对本工作面开采造成威胁, 通常在工作面采终位置修建防水密闭墙, 以防止采空区积水过多引发水害。另外, 西部作为我国煤炭主要生产基地, 侏罗纪煤田处于干旱、半干旱气候区, 生态环境脆弱, 因此, 利用井下采空区进行储水成为保水开采的重要手段^[8-9]。然而, 井下采空区储水需要对采空区防水密闭墙的抗水压能力进行评估, 一方面实现井下储水, 另一方面保证井下安全, 为井下采空区疏放水提供参数指导。

防水密闭墙与常规矿井设计的防水闸墙结构形式及功能均有所区别, 矿井井下施工的防水密闭墙主要作为储水复用而用, 其主要承受的是缓慢注入采空区的水压作用, 而非瞬间突水造成的集中水压^[10]。国内外学者对密闭墙的稳定性进行了大量的研究, 刘兆祥等^[11]采用理论分析方法分析了采空区储水的安全性, 确定了采空区储水的限制水位和安

全警戒线; 黄建君等^[12]推导出了密闭墙受力计算模型, 优化墙体受力计算和结构; 景一等^[13]以神华集团的抗冲击密闭墙为对象, 采用数值模拟软件建立了密闭墙计算模型, 分析了墙体在4种不同持续性的爆炸载荷作用下的受力状态; 杨志斌等^[14]构建了平板式防水密闭墙承压强度计算的物理模型和数学模型, 校核李家壕煤矿防水密闭墙硐室安全性; 李永勤等^[15]采用理论分析和数值模拟, 研究了哈拉沟煤矿不同掏槽深度下防水密闭墙的承压能力; 王小虎等^[16]对采空区防水密闭墙的设计和强度进行了分析, 确定了防水密闭墙可承受的安全水头高度。部分学者研究了地下水库坝体的稳定性, 也为密闭墙体的研究提供了参考^[17-20]。

然而, 现有的研究多集中在理论计算和数值模拟上, 采矿工程力学影响因素众多, 各矿山采矿技术复杂多变, 特别是受采动和水压影响, 防水密闭墙会发生损伤, 承压能力会发生变化, 仅单凭简化后的理论计算和数值模拟是难以真实反映出防水密闭墙的受力状态和变形情况, 且数值模拟多未考虑水头高度的影响。鉴于此, 笔者在理论分析的基础上, 研发井下采空区防水密闭墙应力和位移监测系统, 并结合理论分析和数值模拟, 探索了采终防水密闭墙的稳定性, 以期防水密闭墙抗水压能力提供理论基础与应用参考。

1 工程概况

1.1 矿井地质条件

察哈素煤矿位于东胜煤田南缘的中深部, 井田内地层由老至新发育有三叠系上统延长组(T_{3y})、侏罗系中下统延安组(J_{1-2y})、侏罗系中统直罗组(J_{2z})、

白垩系下统志丹群(K_1zh)、第四系(Q)。

1.2 工作面开采情况

31311 工作面开采煤层为近水平厚煤层,采用走向长壁式后退式采煤法,采用大采高一次采全高综合机械化采煤工艺,自然垮落法管理采空区顶板。

31311 工作面煤层厚度 5.11~6.90 m, 平均煤厚 6.04 m。煤层底板标高+941.045~+956.40 m, 工作面斜长 290.08 m, 31313 回风巷与 31311 采空区之间煤柱宽度 35 m。31311 工作面防水密闭墙位置如图 1 所示。

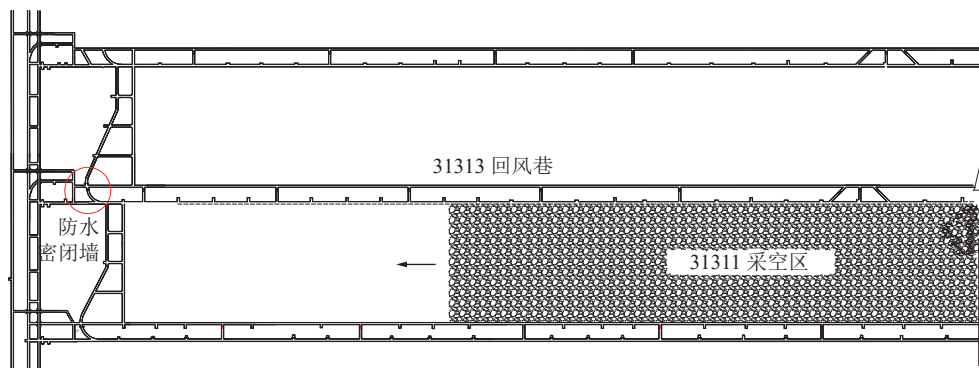


图 1 采终防水密闭墙位置

Fig.1 Location of end mining waterproof sealing wall

1.3 31311 防水密闭墙结构

31311 采终密闭结构为滤浆墙+正式密闭(内墙+充填层+外墙), 滤浆墙为砖混墙结构, 厚度为 1 m; 内外墙为钢筋砼墙结构, 内墙厚度为 1 m, 外墙厚度为 1.5 m; 充填层为黄土+生石灰+罗克休充填, 长度为 5 m。正式密闭内外墙在浇筑前需要掏槽, 实帮实底后帮槽、底槽、顶槽均为 0.75 m。正式密闭的砼浇筑部分掏槽后在顶、底及两帮根据掏槽宽度及深度打设 $\phi 18 \times 1\ 800$ mm 锚杆(锚杆外露 500 mm)并挂网。防水密闭墙结构如图 2 所示。

2 煤岩体力学性质

煤体取样地点为 31311 回采工作面, 顶、底板岩样取样地点为 31311、31313 工作面主回撤通道。试验共加工煤岩标准试样 124 块, 根据煤层取样的相对位置分为 3 煤_上、3 煤_中和 3 煤_下, 3-1 煤煤岩加工试件如图 3 所示。

通过岩石力学测试, 得出 3-1 煤单轴抗压强度最小值为 9.979 MPa, 最大值为 19.567 MPa; 3-1 煤顶板岩层单轴抗压强度最小值为 30.601 MPa, 最大值为 97.779 MPa, 单轴抗拉强度为 1.185~3.081 MPa; 3-1 煤底板岩层单轴抗压强度最小值为 60.168 MPa, 最大值为 62.770 MPa, 单轴抗拉强度为 2.908~3.267 MPa。

3 防水密闭墙安全水压理论分析

影响井下密闭墙可靠性的主要因素除了墙体自身的强度外, 还与墙体周边围岩工程地质性质, 水体

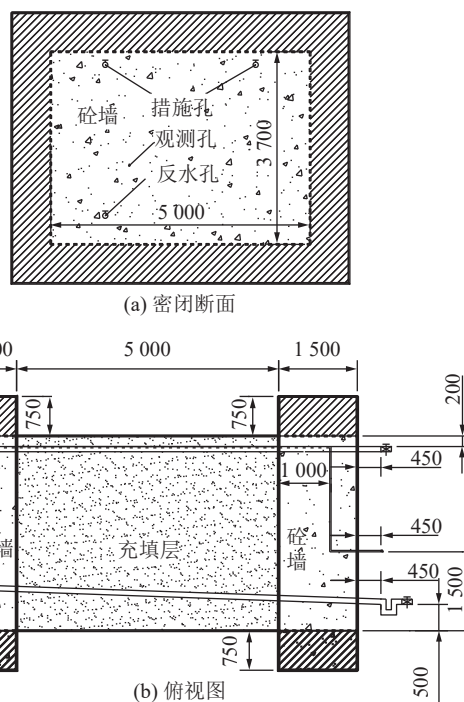


图 2 采终防水密闭墙结构

Fig.2 Structural of end mining waterproof sealing wall

性质及压力大小, 防水煤柱留设尺寸, 墙体施工质量及维护情况等主要因素有关。

从防水密闭墙结构受力出发, 通过对物理模型的简化, 将密闭墙体与煤柱看成整体, 推导计算密闭墙体抗压强度、墙体与煤柱相嵌固定的四周抗剪强度以及抗渗的安全水头^[11]。

察哈素煤矿井下防水密闭墙主体受力结构为混凝土/砼墙体, 混凝土/砼墙强度等级为 C20。防水密



(a) 岩样试件



(b) 煤样试件

图 3 3-1 煤煤岩加工试件

Fig.3 No. 3-1 coal rock processing test piece

闭墙的稳定性的除与密闭墙有关,还与密闭墙相嵌于煤柱内部的煤体强度有关。不考虑采动影响,理论计算结果见表 1。由表 1 可知,墙体与煤岩柱相嵌的四周抗水压能力最小,即墙体与煤岩柱接触面容易受剪切作用而破坏。因此,墙体与煤岩柱相嵌的接触面易为结构弱面,应注意加强防水密闭墙与煤岩柱相嵌位置的监测或观测。通过理论计算,得出防水密闭墙承压的安全水头最大值为 13.1 m。

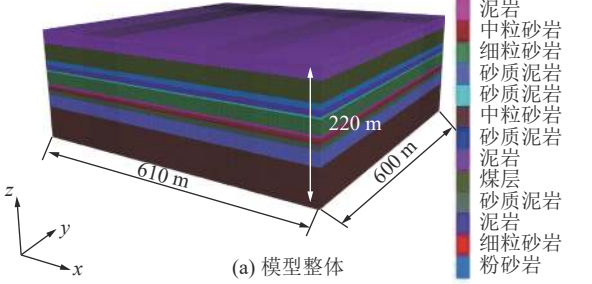
表 1 防水密闭墙承压能力理论计算结果
Table 1 Theoretical calculation results of pressure bearing capacity of waterproof sealing wall

位置	安全水头高度			
	按墙体抗压强度计算	按墙体抗剪强度计算	按煤层抗剪强度计算	按墙体抗渗性计算
防水密闭墙	562	162	13.1	41.2

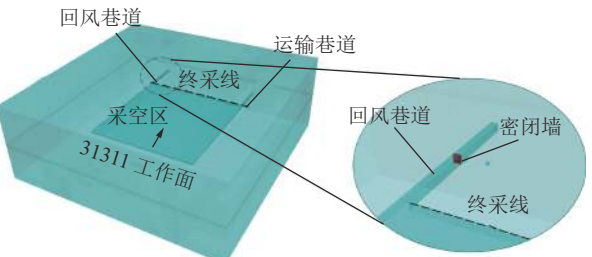
4 防水密闭墙抗水压能力数值模拟分析

4.1 数值模型的建立与力学参数

根据矿井工作面生产地质条件,建立煤层开采密闭墙的数值模型,模型尺寸为 610 m×600 m×220 m,工作面长度 290 m,采高 5.6 m,密闭墙建在工作面综采线回风外回风巷道 50 m 处。模型上方有约 180 m 岩层未建立,以均布载荷形式施加到模型上部边界,大小为 4.5 MPa。密闭墙数值模型如图 4 所示,煤岩体物理力学参数见表 2。



(a) 模型整体



(b) 模型内部

图 4 防水密闭墙数值模型

Fig.4 Numerical model of waterproof sealing wall

表 2 煤岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of coal and rock mass

岩性	单轴抗拉强度/MPa	单轴抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
泥岩	1.85	25	15	5
砂质泥岩	1.90	28	16	5
细粒砂岩	4.04	70	18	25
中粒砂岩	2.43	65	24	20
粉砂岩	2.13	35	16	10
3-1煤	1.12	13	37	1.5

4.2 模拟方案

为方便计算,对模型进行了简化,设计回风巷采线外 50 m 建立密闭墙,简化后的模拟推进方向和密闭墙的相对位置如图 5 所示。模拟分为 2 步:①工作面开切眼推采至终采线,分析采动过程中密闭墙的受力状态和变形情况;②考虑采空区储水水头高度对密闭墙稳定性的影响,采空区进行储水,设置采空区储水或积水水头高度分别为 6、9、12 和 15 m 时对密闭墙稳定性的影响,即水头从采空区底板起水头梯度(1 m 水头高度≈0.01 MPa)依次梯度减小,分析密闭墙在应力和水压耦合作用下密闭墙的破坏情况。

4.3 模拟结果分析

1)采动超前影响结果分析。工作面开采后,采终密闭的受力状态、变形和塑性破坏情况如图 5 所示。由图 5 可知,工作面开采后,密闭在工作面停采线 50 m 受到采动超前影响,最大应力达到 33 MPa,

最大位移在密闭右上顶角位置,这是由于采动影响下,密闭受超前应力的影响,在密闭处形成相对应力

集中,右上角靠近工作面侧,导致应力在右上角最大,位移也相对增大。塑性区受密闭集中应力的影响,

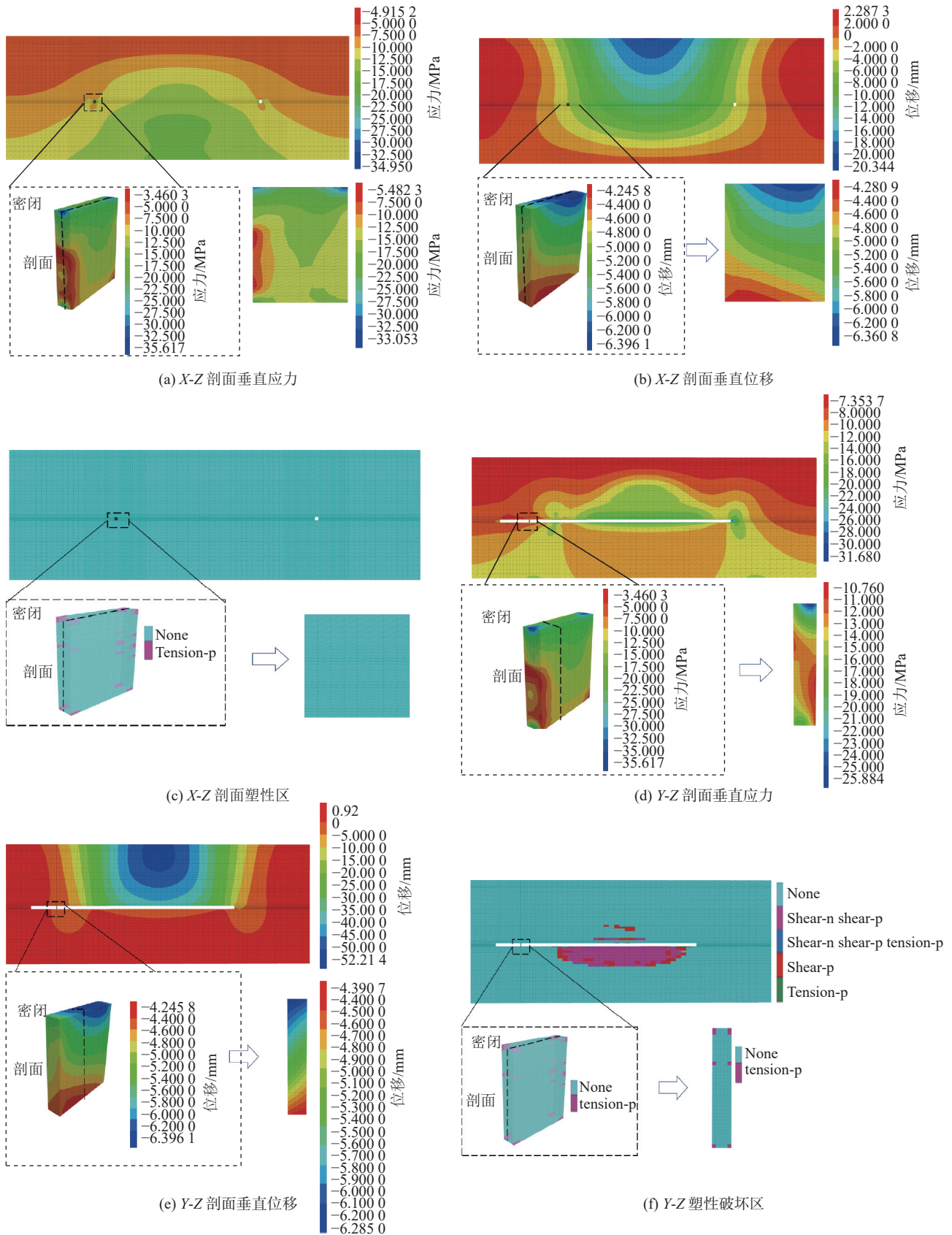


图5 工作面开采采终密闭墙破坏情况

Fig.5 Sealing wall damage after mining of the 31311 working face

在顶底角处出现,局部受拉伸破坏,但范围小,未贯通,密闭整体完整性较好,密闭整体处于稳定状态。

总体来看,密闭墙处于稳定状态,但受超前采动的影响,密闭墙体易出现应力集中,除在密闭与煤柱接触面易为结构弱面外,在密闭顶底角位置也容易成为结构弱面,在观测过程中应加强监测或观测。

2) 水头高度的影响分析。考虑到采空区内进行储水,因此,设置水头高度分别为 6、9、12 和 15 m 情况下,密闭的接触滑移情况如图 6 所示。由图 6 可

知,水压作用下加剧了密闭墙体破坏的概率。当水头高度为 6 m 时,在水压作用下最大剪切应力在顶部两角出现,剪切破坏也发生在顶部两角,切向虽发生局部滑移,但未贯通,密闭处于安全状态;当水头高度为 9 m 时,剪切破坏继续发展,局部滑移更进一步加剧,但仍没有完全沟通,因此,水头高度为 9 m 时,密闭整体处于安全状态,但趋于危险的走势明显;当水头高度为 12 m 时,剪切破坏继续发展,剪切应力下降,局部滑移再次扩大,且密闭顶角进一步

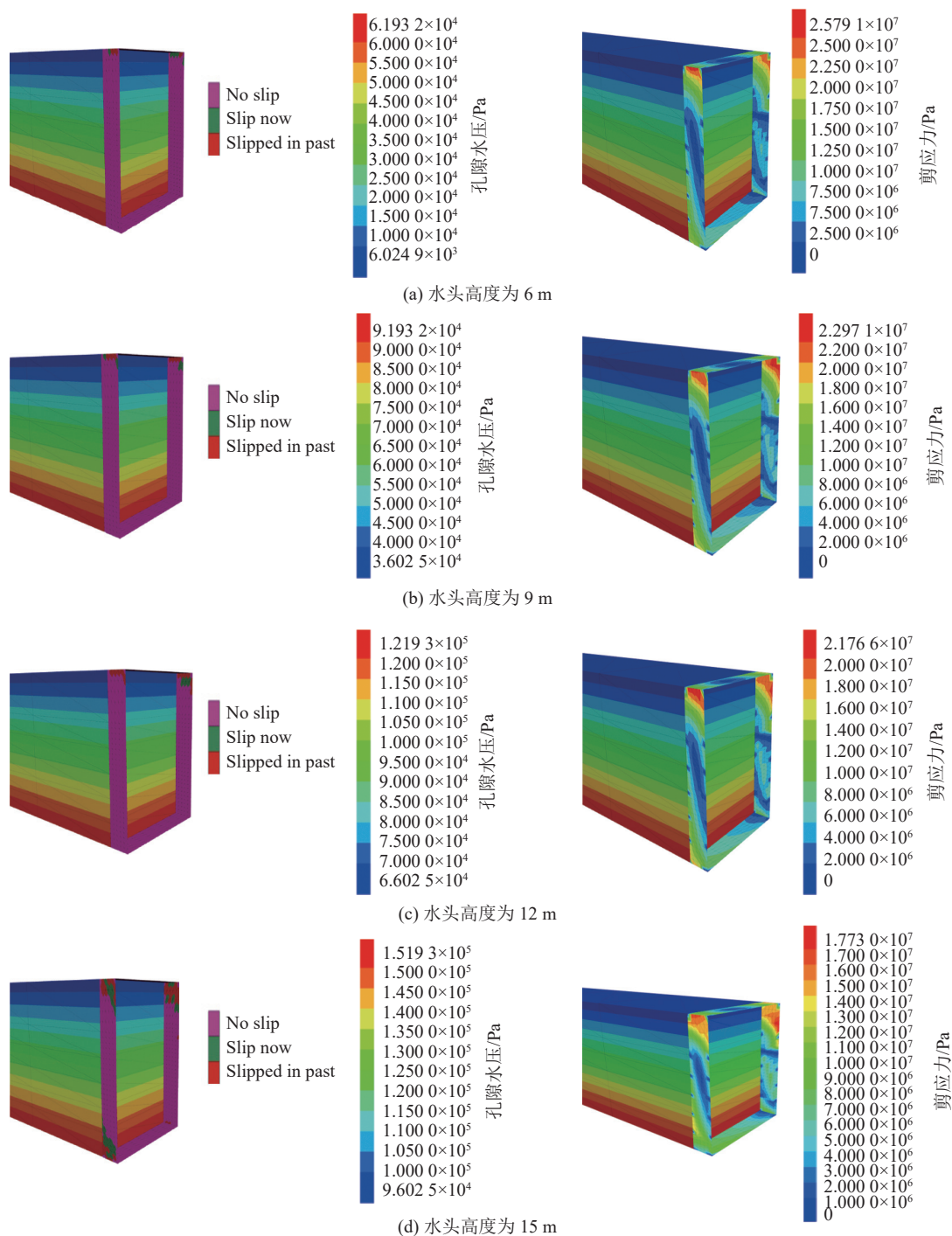


图 6 水压作用下防水密闭墙破坏情况

Fig.6 Damage of waterproof sealing wall under water pressure

发生滑移, 密闭在顶角已经相嵌滑移, 几乎贯通, 密闭处于危险边缘; 当水头高度为 15 m 时, 发生大范围的剪切破坏, 滑移再次扩大, 且发生贯通, 密闭在顶角发生滑移相嵌, 表明裂隙已经贯通, 密闭处于危险状态。因此, 密闭在水压和应力的作用下, 水头高度极限状态在 12 m。

5 防水密闭墙应力位移监测系统及其监测结果

5.1 防水密闭墙应力、位移监测系统介绍

井下采空区防水密闭墙应力监测系统, 包括应力监测装置、采集装置和分析装置, 应力监测装置与防水密闭墙相接触, 以监测防水密闭墙上的应力; 所述采集装置包括存储器和采集器, 存储器与应力监测装置相连, 以存储应力监测装置形成的应力数据;

采集器与存储器电连接, 以接收存储器中的监测数据; 分析装置与采集装置相连, 以用于接收和分析采集器采集的监测数据并根据监测数据判断当前防水密闭墙的受力状态。

井下采空区防水密闭墙位移监测系统, 包括位移监测装置、采集装置和分析装置, 位移监测装置与防水密闭墙相接触, 以监测防水密闭墙的位移; 采集装置包括存储器和采集器, 存储器与位移监测装置相连, 以存储位移监测装置形成的位移数据; 采集器与存储器电连接, 以接收存储器中的位移数据; 分析装置与采集装置相连, 以用于接收和分析采集器采集的位移数据并根据位移数据判断当前防水密闭墙的变形情况。防水密闭墙应力、位移监测系统示意如图 7 所示。

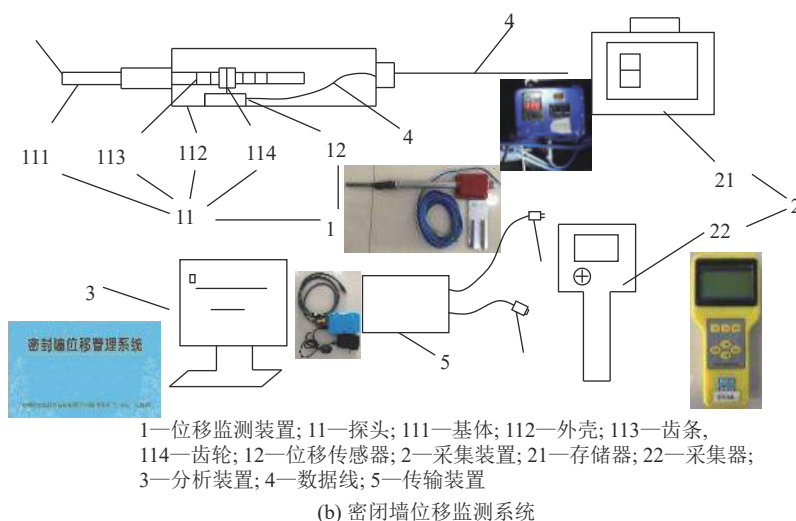
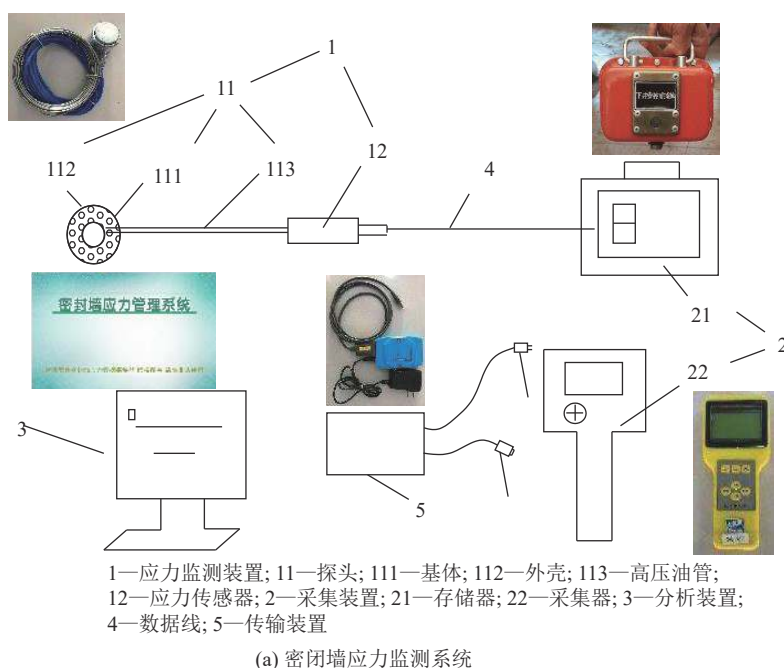


图 7 防水密闭墙应力、位移监测系统示意

Fig.7 Schematic of stress and displacement monitoring system of waterproof sealing wall

5.2 防水密闭墙应力、位移监测布置与过程

基于理论分析和数值模拟结果可知,在密闭与煤岩柱相嵌的结构面以及密闭的顶底角易成为结构弱面,因此,应力和位移监测系统的监测点布置在密闭墙与煤岩柱相嵌的接触面和顶底角,同时,为保证监测范围,在密闭墙中间位置也布设应力和位移监测点,具体测点布置如图8所示。

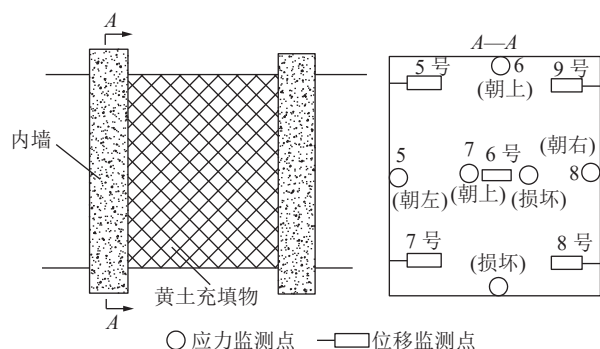


图8 防水密闭墙应力、位移监测点布置示意

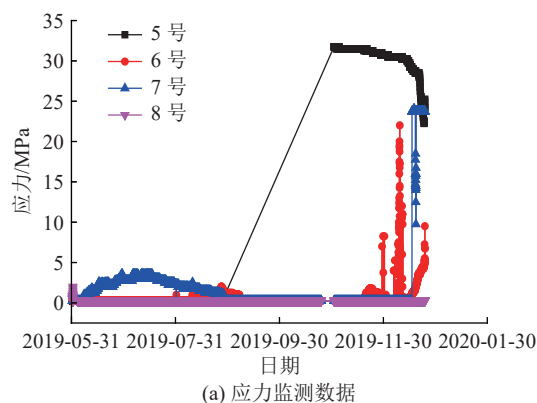
Fig.8 Layout of stress and displacement monitoring points at waterproof sealing wall

31311工作面防水密闭于2019年5月31日安装调试完成,应力和位移监测点布置在正式密闭墙的内墙,布置6个应力监测探头和5个位移计,安装过程中,1个应力监测探头线被破坏,后续又有1连接线被破坏。31311工作面应力、位移监测点布置如图8所示。

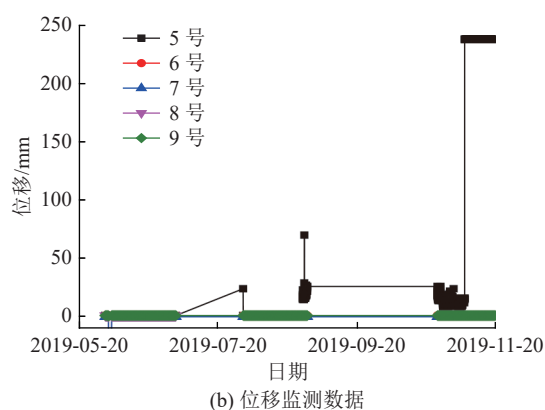
5.3 防水密闭墙应力、位移监测结果分析

防水密闭墙应力、位移随时间的变化规律如图9所示。由图9a可知,6号和7号应力测点在2019年11月底出现应力波动异常点,应力探头均朝上,说明监测点可能受到超前采动应力的影响,在密闭顶部产生应力集中,但影响不大,未出现明显持续的应力波动。8号应力点除在初期调试开始阶段有跳动(调试结果),整个监测期间未有明显的持续波动。5号应力测点在2019年10月突然增大后缓慢下降,说明密闭墙和煤柱接触面受到挤压,密闭墙与煤柱接触面为重点关注部位,其余测点基本平稳,密闭处于安全状态。

由图9b可知,5号位移监测点监测周期内有所波动,其对应位置为密闭墙与煤柱的顶角,说明受超前应力的影响,在密闭顶部产生应力集中,在顶角处产生变形,但影响较小,波动不大。2019年11月后,5号位移监测点出现异常,位移监测点已达到最大,此监测点已经失效,为异常点。除异常点外,其余位移测点基本保持稳定,较为稳定,密闭处于安全状态。



(a) 应力监测数据



(b) 位移监测数据

图9 防水密闭墙应力、位移随时间的变化规律

Fig.9 The change laws of stress and displacement of waterproof sealing wall with time

5.4 防水密闭安全水位高度确定

通过理论分析、现场监测和数值模拟结果,在不受采动影响的情况下,31311防水密闭墙承受的最大水头高度为13.1 m。考虑采动影响,防水密闭墙受超前采动影响和水压作用下密闭墙的最大水头高度为12 m,按照密闭墙所能承受的安全水头值的80%确定警戒水位线,确定31311防水密闭墙的警戒水位线的水头高度为9.6 m。

井下环境复杂,为保证密闭墙的安全,建议在日常井下采空区储水过程中,要时刻动态监测采空区水体的水位、水压,严格控制水位高度,严禁井下水位超过限制水位线;必要时采取注浆封堵等有效措施对密闭与煤岩柱接触面等结构弱面、渗漏部位进行加固处理,同时合理控制采空区内注排量,确保井下采空区矿井水复用的可持续性。

6 结 论

1)研发了防水密闭墙应力和位移监测系统,由应力或位移监测装置、采集装置和分析装置组成。系统在31311工作面采终防水密闭墙进行了应用,监测结果表明除个别异常点外,应力和位移变化不

明显,现阶段密闭墙整体处于稳定状态。

2)通过理论计算、数值模拟和现场实测表明,在不考虑采动影响的情况下,31311采终防水密闭墙承受的最大水头高度为13.1 m;考虑采动和水压作用下,确定了防水密闭墙的最大水头高度为12 m,31311采终密闭墙的警戒水位线的水头高度为9.6 m。

3)通过理论分析和数值模拟表明,墙体与煤岩柱相嵌的接触面、密闭墙的顶底角易为结构弱面,应加强此处位置的监测或观测,必要时可采用注浆封堵手段对结构弱面或渗漏部位进行加固处理。

参考文献(References):

- [1] 董书宁,虎维岳.中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J].煤田地质与勘探,2007(5):34-38.
DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2007(5): 34-38.
- [2] 许延春,杜明泽,李江华,等.水压作用下防砂安全煤岩柱失稳机理及留设方法[J].煤炭学报,2017,42(2):328-334.
XU Yanchun, DU Mingze, LI Jianghua, et al. Instability mechanism and design method of coal and rock pillar under water pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 328-334.
- [3] 洪益青,祁和刚,丁湘,等.蒙陕矿区深部侏罗纪煤田顶板水害防控技术现状与展望[J].中国煤炭地质,2017,29(12):55-58,62.
HONG Yiqing, QI Hegang, DING Xiang, et al. Status quo and prospect of Jurassic coalfield deep part roof water hazard control technology in Inner Mongolia and Shaanxi mining areas[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(12): 55-58,62.
- [4] 杜明泽,李宏杰,李文,等.煤矿区场地地下水污染防控技术研究进展及发展方向[J].金属矿山,2020(9):1-14.
DU Mingze, LI Hongjie, LI Wen, et al. Study progress and development directions of the prevention and control technology of ground water pollution in coal mine sites[J]. Metal Mine, 2020(9): 1-14.
- [5] 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.
- [6] 张宏伟,朱志洁,霍利杰,等.特厚煤层综放开采覆岩破坏高度[J].煤炭学报,2014,39(5):816-821.
ZHANG Hongwei, ZHU Zhijie, HUO Lijie, et al. Overburden failure height of super high seam by fully mechanized caving method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 816-821.
- [7] 舒宗运,黎灵,李宏杰.特厚煤层综放开采覆岩“两带”高度研究[J].煤炭科学技术,2016,44(S1):52-54.
SHU Zongyun, LI Ling, LI Hongjie. Study on conducted zone and caving zone height of overlying rock with extremely thick coal in fully-mechanized caving coal face[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(S1): 52-54.
- [8] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [9] 顾大钊,张勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):1-7.
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1-7.
- [10] 中华人民共和国建设部,中国煤炭建设协会.煤矿井底车场硐室设计规范[M].北京:中国计划出版社,2007.
- [11] 刘兆祥.补连塔煤矿采空区储水安全性评价[J].煤炭工程,2016,48(S1):86-89.
LIU Zhaoxiang. Safety assessment of water storage in the goaf of Bulianta coal mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(S1): 86-89.
- [12] 黄建君,乔登攀,孙宏生,等.地下采空区充填密闭墙受力计算与优化分析[J].金属矿山,2014(10):32-36.
HUANG Jianjun, QIAO Dengpan, SUN Hongsheng, et al. Calculation and optimizing analysis of the force of filling airtight-wall for underground mined-out area[J]. Metal Mine, 2014(10): 32-36.
- [13] 景一,张西西,程健维.基于ANSYS数值模拟的密闭墙抗爆冲击安全性分析[J].煤矿安全,2017,48(11):194-197.
JING Yi, ZHANG Xixi, CHENG Jianwei. Safety analysis of anti-explosive and anti-impacted airtight wall based on ANSYS numerical simulation[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(11): 194-197.
- [14] 杨志斌.井下采空区储水复用防水密闭墙硐室安全评估[J].煤矿安全,2015,46(10):203-206.
YANG Zhibin. Safety assessment of waterproof sealing wall chamber with water storage and utilization in underground goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(10): 203-206.
- [15] 李永勤.煤矿不同储水高度下防水密闭墙的稳定性分析[J].中国煤炭,2018,44(6):123-127,144.
LI Yongqin. Stability analysis of mine waterproof sealed wall with different water storage height[J]. China Coal, 2018, 44(6): 123-127,144.
- [16] 王小虎,张世明,白新宽,等.煤矿井下采空区水复用防水密闭的设计与强度分析[J].煤炭技术,2020,39(2):104-108.
WANG Xiaohu, ZHANG Shiming, BAI Xinkuan, et al. Design and strength analysis of water reuse waterproof sealing in goaf of coal mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(2): 104-108.
- [17] 姚强岭,郝琪,陈翔宇,等.煤矿地下水库煤柱坝体宽度设计[J].煤炭学报,2019,44(3):891-899.
YAO Qiangling, HAO Qi, CHEN Xiangyu, et al. Design on the width of coal pillar dam in coal mine groundwater reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 891-899.
- [18] 姚强岭,刘亚鹏,陈田,等.地下水库人工坝体强度损伤演化特征试验研究[J].煤炭学报,2018,43(4):1111-1117.
YAO Qiangling, LIU Yapeng, CHEN Tian, et al. Experimental study of damage evolution of artificial dam strength of underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1111-1117.
- [19] 池明波,李鹏,曹志国,等.煤矿地下水库平板型人工坝体抗震性能分析[J].煤炭学报,2023,48(3):1179-1191.
CHI Mingbo, LI Peng, CAO Zhiguo, et al. Seismic performance analysis of flat artificial dam of underground reservoir in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1179-1191.
- [20] 白丽伟,吴迪,唐志新,等.应力-渗流耦合效应下煤矿地下水库坝体稳定性研究[J].中国矿山工程,2021,50(5):1-6.
BAI Liwei, WU Di, TANG Zhixin, et al. Study on the stability of coal mine underground reservoir dam under the coupling action of stress and seepage[J]. China Mine Engineering, 2021, 50(5): 1-6.