

煤矿地下水库技术原创试验平台体系研制及应用

顾大钊^{1,2,3,4}, 曹志国^{1,2,3,4}, 李井峰^{1,2,3,4}, 吴宝杨^{1,2,3,4}, 张勇^{1,2,3,4}, 蒋斌斌^{1,2,3,4}, 郭强^{1,2,3,4},
王汉鹏⁵, 武洋^{1,2,3,4}, 史小萌^{1,2,3,4}, 王路军^{1,2,3,4}, 杨毅^{1,2,3,4}, 查尔晟^{1,2,3,4}

(1. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211; 2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211; 3. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 4. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西榆林 719315; 5. 山东大学齐鲁交通学院, 山东济南 250061)

摘要:煤炭是我国主体能源, 西部是我国煤炭主产区, 矿井水保护利用是煤炭开发面临的重大技术难题。国家能源集团煤炭绿色开采技术研发团队经过20多年持续技术攻关, 首创了煤矿地下水库技术, 在西部神东矿区推广应用, 为矿区开发提供了95%以上用水, 确保了矿区可持续开发。为进一步丰富完善煤矿地下水库理论和技术体系, 在西部煤炭主产区不同地质和工况条件下推广应用该技术, 保障国家能源安全和水资源安全, 研发团队构建了煤矿地下水库原创技术试验平台体系, 包括煤炭开采地下水运移与保护综合智能试验平台、多煤层开采煤矿地下水库模拟试验平台、煤矿地下水库坝体结构试验平台、西部深部井工矿井筒施工模拟试验台、地下水库水岩耦合机理试验、水处理工艺集成试验平台、煤矿地下水库冲击试验平台等, 能够开展西部矿区不同煤层赋存条件下地下水运移规律、坝体结构参数优化、水库安全稳定性、水岩耦合作用机理、矿井水处理工艺参数优化、垮落岩体垮落冲击对坝体影响等研究, 为煤矿地下水库建设、运行和安全提供理论支撑和技术验证。利用上述试验平台, 开展了多煤层开采煤矿地下水库稳定性及渗流规律模拟、煤矿地下水库坝体结构安全、煤矿地下水库水岩耦合机理等多项试验研究, 相关研究成果已应用于现场工程实践, 确保了煤矿地下水库安全稳定运行。

关键词:煤矿地下水库; 地下水运移; 坝体结构; 冲击试验; 水岩耦合

中图分类号: TD74 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0100-14

Original experimental platform system and application of underground coal mine reservoirs

GU Dazhao^{1,2,3,4}, CAO Zhiguo^{1,2,3,4}, LI Jingfeng^{1,2,3,4}, WU Baoyang^{1,2,3,4}, ZHANG Yong^{1,2,3,4},
JIANG Binbin^{1,2,3,4}, GUO Qiang^{1,2,3,4}, WANG Hanpeng⁵, WU Yang^{1,2,3,4}, SHI Xiaomeng^{1,2,3,4},
WANG Lujun^{1,2,3,4}, YANG Yi^{1,2,3,4}, ZHA Ersheng^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China; 2. National Institute of Clean and Low-carbon Energy, Beijing 102211, China; 3. China Energy Investment Corporation Limited, Beijing 100011, China; 4. CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, China; 5. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Coal is the main energy source in China, and the western region in China is the main coal production area. The protection and utilization of coal mine water is the major technical challenge in the coal mining. The coal green mining research team of China Energy Group has pioneered the technology of underground coal mine reservoirs, which has been

收稿日期: 2023-10-20 修回日期: 2023-12-08 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0689

基金项目: 国家重大科研仪器研制资助项目(52227901); 国家能源集团试验平台资助项目(SHJT-17-37, SHJT-16-25)

作者简介: 顾大钊(1958—), 男, 江苏盐城人, 中国工程院院士。E-mail: dazhao.gu@chnenergy.com.cn

通讯作者: 曹志国(1980—), 男, 山西灵石人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: zgcao2008@163.com

引用格式: 顾大钊, 曹志国, 李井峰, 等. 煤矿地下水库技术原创试验平台体系研制及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 100-113.

GU Dazhao, CAO Zhiguo, LI Jingfeng, et al. Original experimental platform system and application of underground coal mine reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 100-113.



移动阅读

widely implemented in the Shendong mining area in Western China, providing over 95% of water needed for mining and ensuring the sustainable development of the mining area. To further enrich and improve the theoretical and technical system of underground coal mine reservoirs, this technology has been promoted and applied under different geological and working conditions in the western coal mining areas to ensure national energy security and water resources protection. The research team has built the original technology experimental platform system for coal mine underground reservoirs, including the comprehensive intelligent experimental platform for underground water transport and protection, the physical modelling platform for coal mine underground reservoirs under multiple coal seams, the dam structure experimental platform for coal mine underground reservoirs, the simulation experimental platform for deep well construction in western areas, the water-rock coupling mechanism experimental platform for underground water reservoirs, the integrated water treatment process experimental platform, and the impact experimental platforms for coal mine underground reservoirs, etc. On these platforms, the researches can be carried out consisting of the transport law of underground water, the optimization of dam structure parameters, the safety and stability of reservoirs, water-rock coupling mechanism, the optimization of mine water treatment, and the impact of caving rock mass on the dam structure under different coal seam occurrence conditions in the western mining areas of China. These platform systems provide a theoretical support and technical verification for the construction, operation, and safety of coal mine underground reservoirs. By utilizing these experimental platforms, various experimental research studies have been conducted, including the stability and seepage of coal mine underground reservoirs under multiple coal seams, the structural safety of coal mine underground reservoirs dam, and the water-rock coupling mechanism of coal mine underground reservoirs. These research results have been applied in actual engineering practice to ensure the safe and stable operation of coal mine underground reservoirs.

Key words: underground coal mine reservoirs; groundwater migration; dam structure; impact test; water-rock coupling

煤炭是我国主体能源, 2022 年全国煤炭产量 45.6 亿 t, 占能源消费总量的 56.2%。相关研究表明, 我国吨煤产生矿井水 2 t 左右, 每年产生矿井水约 80 亿 m^3 , 利用率约 40%, 每年约 50 亿 m^3 矿井水未得到有效利用, 相当于我国年工业和民用缺水的 50%(100 亿 m^3)^[1-4]。西部(晋陕蒙宁新)是我国煤炭主产区, 煤炭储量及煤炭产量分别占全国的 80% 及 70% 以上, 但水资源量仅占全国的 6.7%, 占全球的 0.3%^[5-6]。西部煤炭主产区水资源短缺和矿井水保护矛盾突出。

习近平总书记 2014-06-13 在中央财经领导小组第六次会议上指出, 煤炭大规模开发带来的主要问题是对地下水的破坏和对地表生态损伤。2019 年 8 月至 2020 年 6 月, 习近平总书记先后赴甘肃、陕西、山西、宁夏等省份考察, 提出了“四水四定”原则, 即以水定城、以水定地、以水定人、以水定产, 扎实实施黄河流域生态保护和高质量发展国家战略。《中华人民共和国黄河保护法》第五十七条要求, 黄河流域县级以上地方人民政府应当将矿井水等非常规水纳入水资源统一配置, 提高非常规水利用比例。

为保护利用矿井水资源, 不同研究机构开展了大量研究, 形成了 2 种思路: 一种是以“堵截法”为代表的原位保护技术, 采用限高开采、充填开采、分区开采等技术, 确保煤炭开采覆岩裂隙不导通含水层, 实现地下水保护^[7-17]; 另一种是“疏导法”为代表的水资源

保护技术, 将矿井水在井下安全储存利用起来, 避免外排地表蒸发损失, 以煤矿地下水技术为核心^[18-21]。西部矿区井工开采规模均在 300 万 t 以上甚至千万吨级, 限高开采丢弃大量煤炭资源, 充填开采效率较低(当前最高充填效率 100 万 t/a), 难以满足工程需求。国家能源集团煤炭绿色开采技术团队经过 20 余年持续技术攻关和工程实践, 首次提出了将矿井水储存于井下的理念, 创建了煤矿地下水理论框架和技术体系, 在神东等矿区推广应用, 成功进行了工程推广, 累计建成 35 座煤矿地下水库, 最大储水量 3 500 万 m^3 , 为矿区供应了 95% 以上的生产、生活和生态用水, 并为周边电厂和煤制油工程供水, 实现了由用水大户向供水大户转变, 变“水害”为“水利”。

煤矿地下水技术工程实践领先于技术研究、技术领先于理论探索, 为进一步在西部不同地质和工况条件下, 应用该技术保护利用矿井水资源, 需进一步加大技术探索和理论研究, 国内外缺乏相应的试验研究装置, 特别是面向工程尺度的相似模拟平台, 为此煤炭绿色开采技术团队构建了煤矿地下水原创技术试验平台系统, 聚焦煤矿地下水水量预测、库容计算、水库选址、坝体构筑、安全防控、水质控制六大关键技术^[22-26]。充分借鉴煤炭、水利和岩土工程领域试验平台研制经验, 研制煤炭开采地下水运移与保护综合智能试验平台、多煤层开采煤矿地下水模拟试

验平台、煤矿地下水库坝体结构试验平台、西部深部井工矿井筒施工模拟试验台、地下水库水岩耦合机理试验、水处理工艺集成试验平台、煤矿地下水库冲击试验平台等7个原创试验平台,开展相应理论研究和探索,为煤矿地下水库建设、运行和安防提供理论支撑和技术验证。

1 试验平台体系及定位

以煤矿地下水库水量预测、库容计算、水库选址、坝体构筑、安防、水质控制等六大技术为重点,针对性开发相似模拟试验平台,开展相应的理论研究和探索。一是开展基础理论研究,如煤炭开采地下水运移规律,应力场、裂隙场和渗流场演化机理,坝体破坏损伤机理,水岩耦合机理等;二是面向现场工程需求,开展工程尺度相似模拟试验,为工程实施提供技术支撑。

各原创性相似模拟试验平台与煤矿地下水库六大关键技术关系如图1所示。

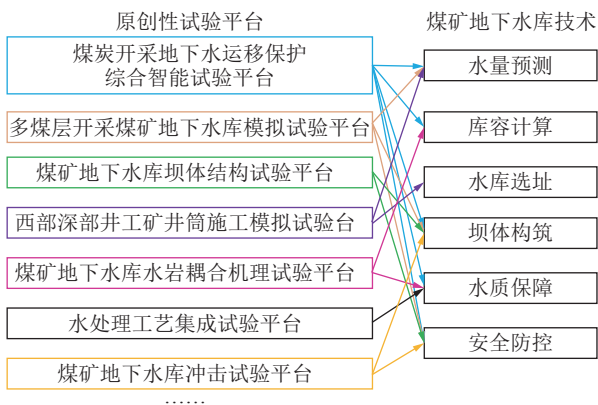


图1 原创性试验平台与地下水库技术对应关系

Fig.1 Correspondence between original experimental platform and coal mine underground reservoir technology

其中,煤炭开采地下水运移与保护综合智能试验平台可以开展大尺度多煤层多工况条件下的地下水运移模拟,揭示煤炭开采上覆岩层应力场、裂隙场、渗流场三场演化机理,首次实现了超大尺度(10 m×3 m×3 m)煤炭开采条件下矿井水产生、运移、存储的全过程模拟,首次将智能开采理念运用到相似模拟试验中,实现了相似模拟试验全过程智能化控制,能够为地下水库提供全方面的理论研究和探索平台支撑,是综合性相似模拟试验平台。

多煤层开采煤矿地下水库模拟试验平台可用于开展二维条件下煤矿地下水库煤柱坝体损伤破坏机理及地下水在采空区覆岩裂隙中渗流规律研究,为煤矿地下水库煤柱坝体稳定性分析及水量预测提供理论指导。该试验平台主要有2方面创新:一是通过研

制模型内部水平加载装置,实现了模拟储水压力对煤柱坝体的侧向作用,可为分析煤矿地下水库不同储水高度条件下的煤柱坝体稳定性问题提供指导;二是通过注水系统模拟地下含水层,可以分析煤炭开采对含水层的影响规律,获取地下水在采空区覆岩裂隙带中运移路径。

煤矿地下水库坝体结构试验平台主要用于煤矿地下水库结构模拟、坝体结构与参数优化模拟、侧向水压作用对坝体安全性的影响模拟及矿震和地震(地震烈度10度以上)等对坝体稳定性影响分析,能够为地下水库坝体结构设计提供理论基础,为煤矿地下水库长期运营过程的安全稳定性提供支撑。

西部深部井工矿井筒施工模拟试验台主要模拟在井筒施工穿越富含水层,煤层开采引起顶板垮落、上覆地层沉降变形以及对斜井井筒结构稳定性和涌水量的影响,能够为地下水库来水量预测提供依据。

煤矿地下水库水岩耦合机理试验通过模拟长距离(总距离42 m)条件下岩体与矿井水的水-岩耦合作用,揭示煤矿地下水库对矿井水净化机理,提出增强净化效果的技术方法,为实现矿井水大规模低成本处理和利用提供理论和技术支撑。

水处理工艺集成试验平台能够针对不同种类矿井水,研究和开发不同的处理技术、关键设备和处理工艺,结合实验研究和计算模拟,实现矿井水分级净化模拟,制定最优化方案,为矿井水的高效低成本处理利用提供技术支撑,其他水处理领域具有较好的通用性,也可用于其它类型工业废水和市政废水的处理。

煤矿地下水库冲击试验平台主要针对地下水库顶板突然垮落引起的冲击波对坝体影响,开展相似模拟试验研究,研究冲击荷载作用下地下水库坝体的力学响应特征及变形破坏规律,揭示煤矿地下水库坝体冲击动力灾害孕育致灾机理,为地下水库安防提供理论和技术支撑。

上述平台均属国内外首创,在矿井水保护和利用领域处于国际领先水平,应用这些平台,能够开展西部煤炭主产区不同工况条件下,煤矿地下水库建设、运行和安防方面的理论研究和探索,为煤矿地下水库工程建设提供有力理论和技术的全方位支撑,为保护利用西部生态脆弱矿区宝贵水资源提供技术支持。

2 各试验平台组成和功能

2.1 煤炭开采地下水运移保护综合智能试验平台

该平台由主体框架系统、材料铺设与废料回收系统、数据获取与可视化仿真、平台联合调试等组成(图2),主要是针对西部矿区煤炭大规模开采地下水运移和保护技术难题,开展多尺度(10 m×3 m×3 m、6 m×

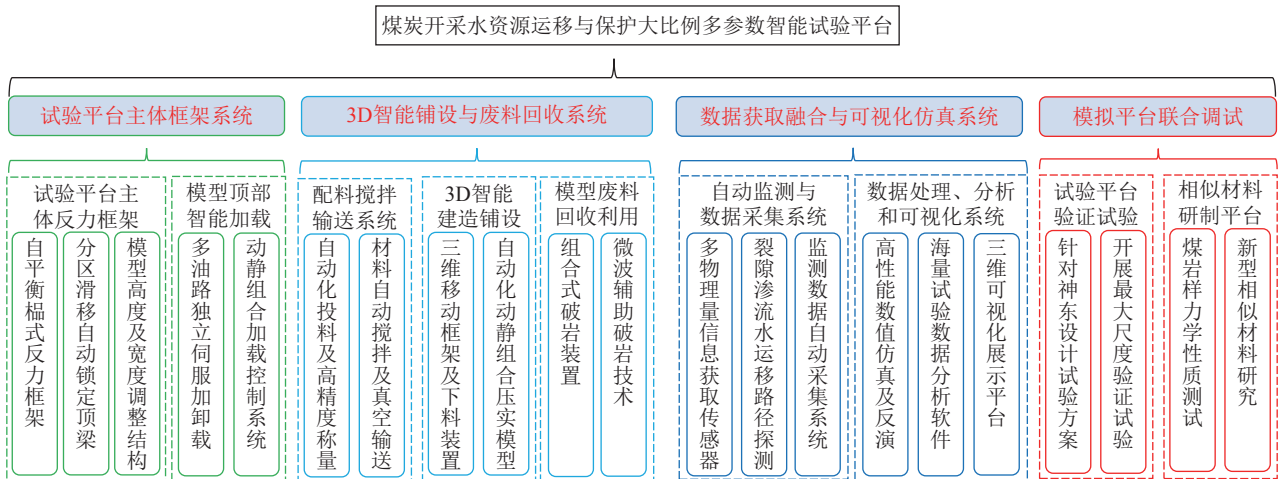


图 2 煤炭开采地下水运移保护综合智能试验平台组成

Fig.2 Composition of the comprehensive intelligent experimental platform for underground water transport and protection

3 m×3 m、3 m×3 m×3 m) 相似模拟试验, 以相似原理为基础, 可实现不同地质多种工况条件下, 煤炭开采矿井水运移和存储的全过程模拟, 为井下储水提供技术支持, 具备基础研究和工程辅助设计两大功能。

平台主体框架系统采用模块化设计理念, 通过隔板设置, 顶部 1 MPa 液压油缸加载, 能够实现西部煤炭主产区多工况条件的地下水运移保护全过程模拟, 为煤矿地下水库建设提供全方位指导。相似材料铺设方式模仿 3D 打印的技术原理, 即以数字模型为基础, 通过逐层叠加压实的方式来构造相似模型实体, 实现了材料自动输送、搅拌、铺设、夯实等工序, 极大提高了模型铺设效率。根据测算, 若采用人工铺设, 最大尺度 10 m×3 m×3 m 的模型需要铺设近 2 个月时间, 采用本系统, 最快可以在 1 周之内完成铺设, 极大降低人工成本和提高试验效率, 为大型相似平台材料铺设的发展提供了方向。数据获取融合与可视化仿真系统, 将攻克岩层裂隙探测技术, 综合运用分布式光纤、雷达等多种方法, 实现煤炭开采应力场、裂隙场和渗流场“三场”数据采集, 研发多源数据采集分析和处理系统, 实现数据统一化处理, 开发模拟平台三维可视化系统, 实现模型三维可视化表达, 各项监测数据能够实时在三维模型实时展示, 采用多种插值算法实现地下水流场的量化表达, 为地下水库设计提供理论依据。搭建模拟平台联合调试系统, 包括研制新型的水岩耦合相似材料, 开展大尺度的验证性试验, 提高平台可靠性, 该平台主体框架和各系统已完成安装 (图 3)。

2.2 多煤层开采煤矿地下水库模拟试验平台

该平台包括顶部反力框架、垂直加载系统、水平加载系统、煤层开挖模拟装置、地下水模拟系统及监测系统等模块, 平台长宽高分别为 2.1、1.8 和 0.3 m (图 4)。该平台能够对不同工况条件煤炭开采地下水渗流规律进行模拟, 开展不同水压对煤柱坝体侧向作用



图 3 煤炭开采地下水运移保护综合智能试验平台

Fig.3 Comprehensive intelligent experimental platform for underground water transport and protection

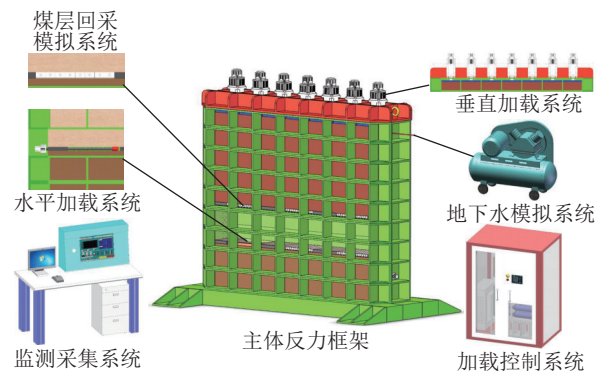


图 4 多煤层开采煤矿地下水库模拟试验平台组成

Fig.4 Composition of the physical modelling platform for coal mine underground reservoirs under multiple coal seams

模拟, 为地下水库煤柱坝体尺寸优化设计提供理论支撑。

主体反力框架采用模块化设计理念, 采用榫式结构, 方便安装、保养与维修。垂直加载系统由伺服电缸、加载板及密封装置组成, 系统高度不超过 30 cm, 加载行程 150 mm, 应力控制精度±0.01 MPa, 位移控制精度±0.1 mm, 加载应力 0~0.5 MPa 内可调。水平

加载装置由水平加载伺服电机、丝杠、水平加载板、密封装置等组成,加载应力 $0\sim 0.5\text{ MPa}$,加载位移 $0\sim 50\text{ mm}$ 内可调。煤层回采模拟系统主要包括上承载板、下承载板、楔形板、高度调整螺杆、限位螺杆、左右固定板。其工作原理是旋转螺杆便可通过螺纹使上部楔形结构沿倾斜面移动,从而降低了整体结构的高度,进而模拟煤层的回采过程。通过更换楔形板,能够实现不同厚度煤层回采模拟,机械结构较简单,适用于不同厚度、不同进刀长度、不同回采速度的煤层回采模拟,具有很强的适用性(图5)。

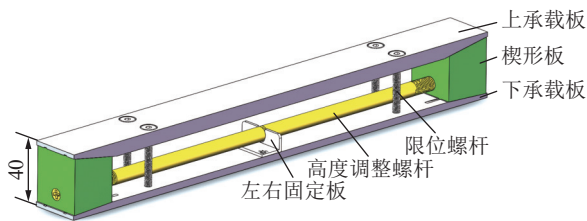


图5 煤层回采模拟装置

Fig.5 Coal mining simulation device

地下水模拟系统可与实验室已有的 3 m^3 水箱相配合,共同完成试验过程中地下水模拟;模拟注水系统由硬件部分、软件控制部分、管路组成,可与主体反力框架密封连接。地下水模拟系统各连接管路稳定可靠,无泄漏,可实现模型试件上部各位置注水,可实时监测流量及注水量;可使水沿模型试件中的裂隙自由运移。

该平台已投入使用(图6),围绕现场工程需求,累计开展10余台模拟试验,有力支撑了项目研究,指导了现场工程实践。

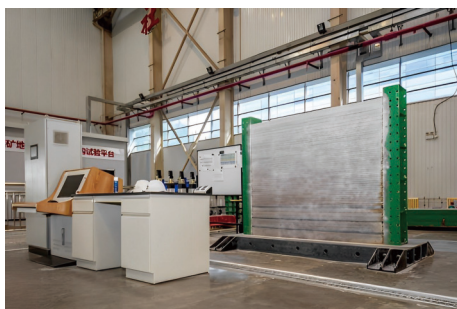


图6 多煤层回采煤矿地下水模拟试验平台

Fig.6 Physical modelling platform for coal mine underground reservoirs under multiple coal seams

2.3 煤矿地下水坝体结构试验平台

该平台包括振动台(振动台面尺寸 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,最大载重 3 t ,XY二向四自由度,最大加速度 $1.5g$)和试验台架2部分。针对地下水坝体、人工坝体及二者连接部位受力复杂特征,能够开展地下水工结构(煤矿地下水坝)相似模拟和动力分析,评估震动条件下坝体安全稳定性,为人工坝体结构和参数优化提供技术支撑。同时,也可以开展振动条件下,地下水坝

库底渗透性、不同煤层地下水坝水平距离内垂直管道结构安全和岩层裂隙演化模拟,是煤炭行业高校科研院所首台套振动模拟装置。

振动台台面尺寸为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,能够实现3自由度振动,最大载荷为 3 t ,振动台质量(包括移动部件质量)约 2 t ,工作频率为 $0.1\sim 50\text{ Hz}$,振动波可以为周期波,随机波或地震波,采用数字控制方式。其基本原理为:采用2组作动器连接载台与地基,对振动台的载物台进行固定,通过系统控制作动器内的油压来进行的加速度振动激励,实现载物台的往复振动,达到模拟地震荷载的效果,如图7所示。坝体结构试验台采用模块化设计理念,由底板、中部反力框架、顶部反力框架组成,底板为厚 20 mm 的钢板,通过螺栓与振动台面连接;中部反力框架由5根水平环向结构叠加而成,每根高 200 mm ,每根厚度为 100 mm ,组成框式结构板材厚 10 mm ;顶部反力框架板厚 15 mm ,肋板高 85 mm ,肋板厚度 10 mm ;加载油缸采用嵌入式安装在顶部反力框架内,共计8个加载油缸,额定加载应力 1 MPa ,行程为 100 mm 。

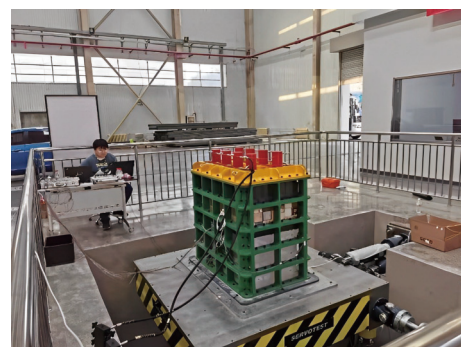


图7 煤矿地下水坝体结构试验平台

Fig.7 Dam structure experimental platform for coal mine underground reservoirs

目前,该平台已投入使用(图7),围绕地震对地下水坝体影响,开展了10余台试验;按照实验室仪器开放共享原则,北京科技大学和清华大学等均利用该平台开展多项试验,试验平台可靠性得到了充分验证。

2.4 西部深部井工矿井筒施工模拟试验台

西部深部井工矿井筒施工模拟试验台为一个闭合的箱体,箱体四周由立柱、有机玻璃板和门扇围成,整体尺寸为 $4.0\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。平面模型框架由背部及两侧钢板、前部2块高度分别为 0.5 m 和 1.2 m 的玻璃板组成。在模型顶部分布5个伺服加载电机,电机与控制台相连,每个电机的设计额定加载力为 500 kN ,总加载力为 2500 kN 。

该平台已投入使用(图8),针对国内首次盾构施工斜井工程过富含水层进行了模拟,未来可模拟竖井施工过含水层模拟,亦可为地下水坝水量预测提供理论支撑。

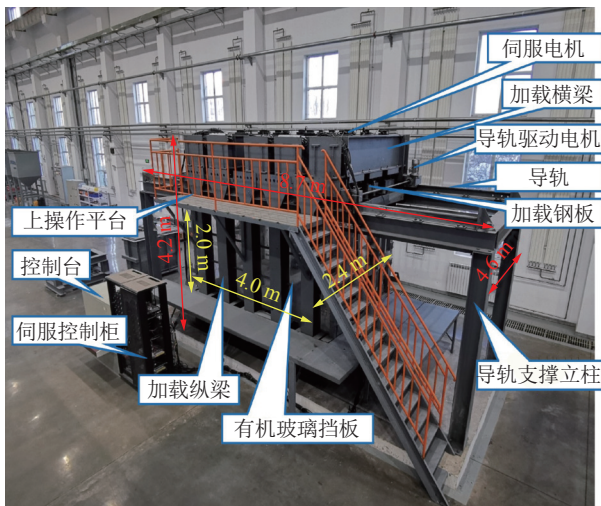


图 8 西部深部井工矿井筒施工模拟试验台

Fig.8 Simulation experimental platform for deep well construction in western areas

2.5 煤矿地下水库水岩耦合机理试验平台

该平台包括主体及框架、调斜系统、水质在线监测模块、管路电气控制系统, 面积 37 m^2 , 模拟最大水流长度 42 m (单个长度为 10.5 m), 截面尺寸 0.5 m , 容积 11 m^3 。平台角度可调, 可模拟倾斜煤层水岩耦合机理, 可调节水体运移路径长度, 实时观察水库淤积情况, 研究地下水库的淤积效应和清库方法, 是同领域最大尺度相似模拟平台。

平台主体框架采用模块化设计理念, 包括 4 段长度分别为 10.5 m 的槽体, 可以根据试验内容要求, 分别组合开展试验。在主体框架不同位置设置多个水质在线监测模块, 能够实现浊度、水质硬度、氟化物等监测数据上传并做记录。平台配套系统包括进水泵、循环水泵、阀门和管道, 以及自动化电气控制系统。

平台试验过程中矿井水从储水池进水管自流进入试验平台, 沿槽体内部缓流并与填充岩石发生水-岩耦合净化作用后, 从出水管自流入循环水池, 再由循环水泵将循环水池内的矿井水泵送到储水池, 如此往复来实现矿井水的循环净化。该平台已投入运行 (图 9), 开展一台 10 m 大尺度水-岩耦合模拟试验, 完



图 9 煤矿地下水库水岩耦合机理试验平台

Fig.9 Water-rock coupling mechanism experimental platform for underground water reservoirs

成了系统升级改造, 后续将开展氟化物去除机理研究和不同工况下水岩耦合作用机理及强化技术研究。

2.6 水处理工艺集成试验平台

该平台由便携式水质分析测试仪器、矿井水处理小试实验装置、矿井水处理中试设备和水处理模拟计算及分级处理系统四大模块组成, 可用于实验室或现场条件下矿井水预处理、深度处理、检测分析和数值模拟等全过程研究。其中中试系统模块包括微砂沉淀预处理装置 (5 t/h)、旋流+陶瓷膜预处理装置 (5 t/h)、反渗透脱盐装置 (1 t/h) 和低温多效蒸发装置 (1 t/h) 4 套中试装置, 分别用于矿井水去除悬浮物和脱盐处理。针对不同种类矿井水, 利用平台可研究和开发不同的单元处理技术、关键设备和处理工艺, 同时结合实验研究和计算模拟, 实现矿井水分级净化模拟, 制定最优方案, 为矿井水的高效低成本处理利用提供技术支撑。平台的装置与其他水处理领域具有较好的通用性, 也可用于其它类型工业废水和市政废水的处理。目前, 该平台已经投入运行 (图 10), 在宁东矿区、神东矿区等煤矿开展连续中试试验, 平台运行可靠。

2.7 煤矿地下水库冲击试验平台

该平台由主体框架、加载装置、行走顶梁、冲击装置、监测系统等模块组成。其中, 主体框架用于煤矿地下水库模型铺设, 内部空间长 2.4 m 、宽 2 m 、高 1.5 m ; 加载装置配有 3 个 5 t 核定压力的电动缸, 可对坝体结构施加静态载荷; 行走顶梁由伺服电机驱动行走, 可精准实现主体框架平面内任一点位移动; 冲击装置采用摩擦式加速发射方式, 配置冲击锤质量为 122 kg 、面积 0.25 m^2 , 最大发射初速度可达 13.4 m/s , 锤体最大冲击能量可达 11965 J 。按几何相似比 0.02 , 载荷相似比 2.56×10^{-5} , 最大可模拟面积 625 m^2 、厚度 14 m 的岩层从 12 m 高度垮落产生的冲击; 监测系统可实时监测静态和高速动态应变、应力、位移、温度等参数。

煤矿地下水库是一种新型地下水工构筑物, 坝体由煤柱和人工构筑物连接组成, 储水介质为顶板冒落岩石。煤矿地下水库长期运行过程中受多相、多场复杂环境影响, 储水区上覆岩层关键块体存在垮落风险。煤矿地下水库为密闭空间, 垮落岩块冲击储水体及储水介质产生冲击扰动, 进而威胁地下水库坝体结构安全。由此, 研制该平台, 模拟覆岩垮落冲击、动力扰动等工况条件, 研究冲击扰动作用下水库坝体核心结构的破坏特征、变形规律, 揭示煤矿地下水库坝体冲击致灾机理, 评价煤矿地下水库核心结构的稳定性, 优化坝体结构及尺寸。

目前, 该平台已在厂家完成组装调试, 正在组织开展验证性试验。



图 10 水处理工艺集成试验平台组成

Fig.10 Integrated water treatment process experimental platform

3 各平台试验产出

针对西部矿区煤矿地下水库和矿井水规模化高效低成本处理,利用上述试验平台(图 11),开展了多面向现场工程难题的试验,取得了一系列结论,验证了平台运行可靠性,有力支撑了煤矿地下水库建设、运移和安全防控技术研发。

3.1 多煤层开采煤矿地下水库模拟试验平台试验

利用该平台,以神东上湾、大柳塔和布尔台及新街台格庙矿区煤矿地下水库为例,开展了不同工况条件下煤柱坝体稳定性及地下水渗流规律研究(表 1)。相关结论如下:

(1) 研究表明,煤矿地下水库煤柱坝体在覆岩压力垂直作用下的破坏分为“压缩—拉伸—剪切—卸载”4 个阶段,煤柱坝体在拉伸阶段表现为变形的快速增大,当应力超过阈值时,煤柱坝体连同顶板发生整体滑移破坏;在储水压力侧向作用下小煤柱失稳模式沿

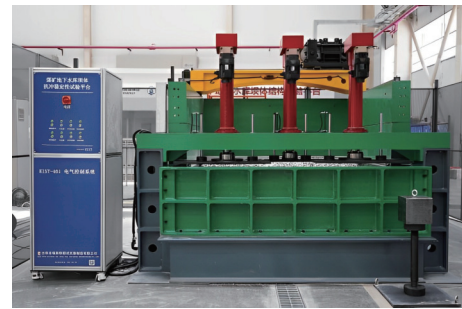


图 11 煤矿地下水库冲击试验平台

Fig.11 Impact experimental platforms for coal mine underground reservoirs

着煤层与顶底板的交界面发生平面滑移(图 12(a)),大煤柱滑移失稳模式是连带煤柱顶底板岩层的圆弧滑移(图 12(b))。根据煤柱受力情况和尺寸大小,可确定不同的注浆加固方案,如埋深较大时应注重防止煤柱片帮;埋深较小的小煤柱注浆加固应沿着煤岩层交接面,大煤柱的注浆加工范围应更深。

表 1 多煤层开采煤矿地下水库模拟试验平台开展的主要试验

Table 1 Main experiments by physical modelling platform for coal mine underground reservoirs under multiple coal seams

序号	试验名称	工程背景	试验简介
1	煤矿地下水库煤柱坝体破坏特征参数及渗流场分布特征分析	上湾煤矿	分析煤柱坝体在不同尺寸及受载方式条件下的多种失稳破坏特征参数(变形、应力、裂隙等分布状态);通过注水实验研究分析煤层开采后地下水向采空区的渗流特征
2	多煤层大埋深开采对上覆含水层和隔水层的扰动规律研究	布尔台煤矿	研究大埋深多煤层开采条件下,逐层开采覆岩应力场和裂隙场演化规律,分析埋深对煤柱坝体稳定性的影响
3	跨盘区错层采动煤矿地下水库安全距离物理试验	大柳塔煤矿	分析不同水平距离条件下层间岩层裂隙扩展对煤矿地下水库底板及煤柱坝体稳定性影响规律
4	多煤层采动影响覆岩含水层破坏特征物理试验	大柳塔煤矿	分析多煤层采动条件下的覆岩含水层破坏特征,以及水运移规律研究

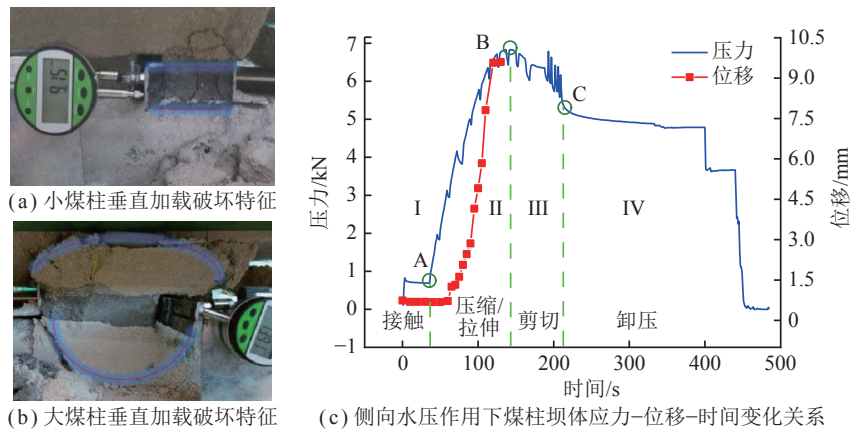


图 12 垂直加载条件下煤柱坝体力学特性及破坏规律

Fig.12 Mechanical properties and failure mechanism of coal pillar dam under vertical loading condition

(2) 研究表明,在荷载和水浸的双重作用下,煤柱坝体塑性区不断扩展,其核心承载区的强度不断减小,故煤柱坝体发生大范围破坏失稳前,煤柱坝体内部应力会产生连续陡增现象(图 13),尤其是煤柱上方顶板左侧(靠近采空区一侧)发生应力陡增现象更加明显。基于此,建议现场采取应力监测预警时,除了煤柱坝体内部,还应在煤柱上方临近采空区侧的顶板岩层中布置监测点。

(3) 通过分析煤层开采后地下水向采空区的渗流

特征(图 14),地下水的运移路径分为 4 个阶段,根据渗流场裂隙发育维度不同,渗流通道可分为 3 类;采空区和离层裂隙为主要储水区域,垂向裂隙储水较弱,边界垂向裂隙为贯通上下岩层的主要通道。

(4) 分析研究了布尔台煤矿煤炭分层开采对覆岩含水层和隔水层的扰动破坏规律(图 15),揭示了煤矿地下水水库水源补给规律。布尔台煤矿的水文地质概况为:从地表至煤层,依次为第 1 含水层、第 1 隔水层、第 2 含水层、第 2 隔水层、22 煤、42 上煤。当 22 煤

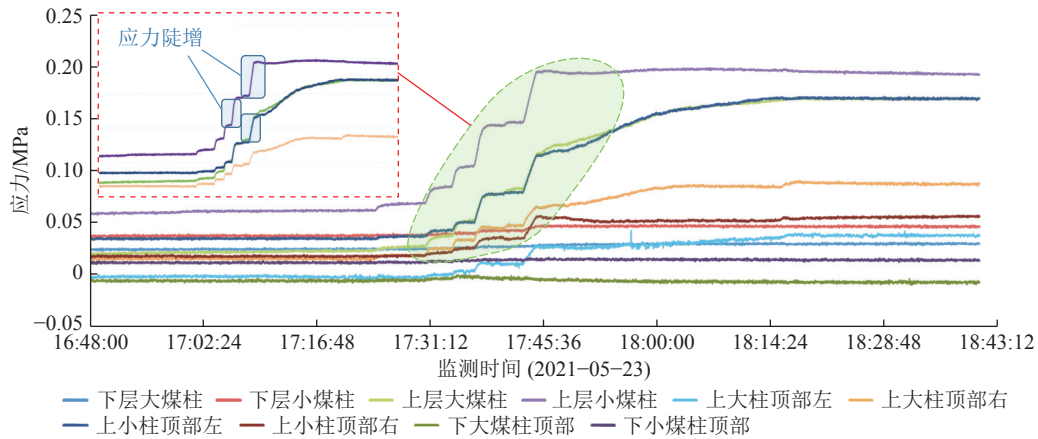


图 13 煤柱坝体应力变化特征

Fig.13 Stress variation in coal pillar dam body

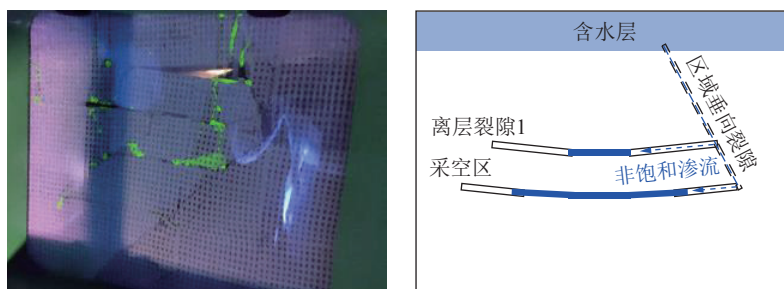


图 14 地下水渗流试验结果及示意

Fig.14 Results and schematic diagram of underground water seepage test

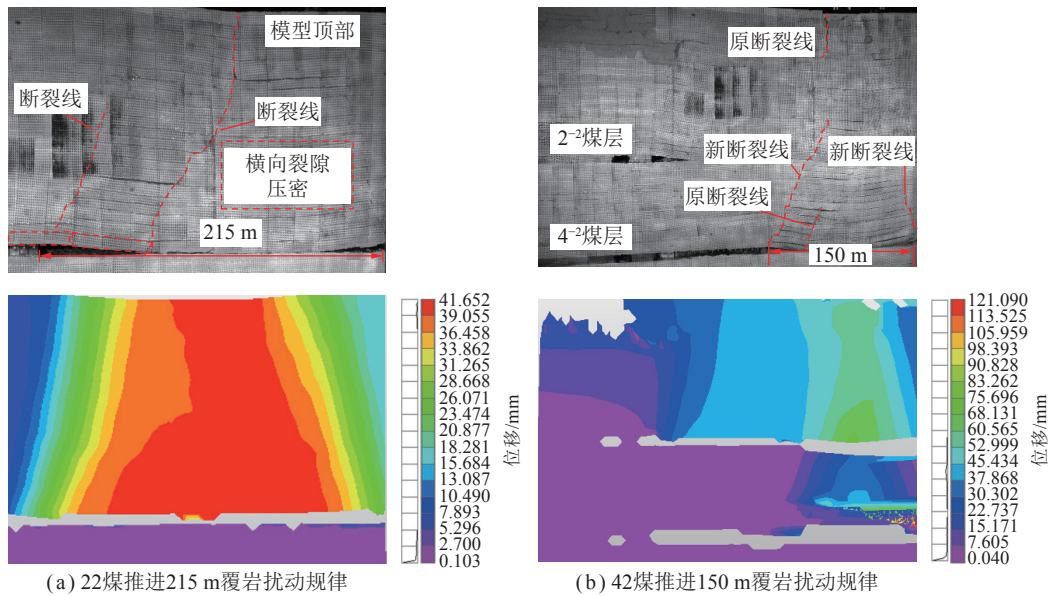


图 15 布尔台煤矿煤炭分层开采对覆岩扰动破坏规律

Fig.15 Disturbance and damage evolution of overlying strata induced by slice mining in Buertai Coal Mine

推进 215 m 时,覆岩裂隙贯通第 2 隔水层,隔水效果基本失效,沟通第 2 含水层,涌水量增大。42 上煤推进 150 m 时,再次沟通第 2 含水层,第 2 含水层成为 42 煤采空区的主要水源;推进 450 m 时,第 1 隔水层发生破坏,沟通第 1 含水层,第 1 含水层成为重要的水源补给通道。

(5) 开展了多煤层采动煤矿地下水库安全距离试验(图 16),揭示了下煤层采动条件下地下水库底板裂隙扩展的几何拓扑特征,基于逾渗理论构建了采动岩体突渗方程。以大柳塔多煤层煤矿地下水库为例,试验表明在下煤层采动条件下,上煤层地下水库底板和煤柱坝体未产生明显的张拉裂隙,安全距离为 70 m。

(6) 以大柳塔煤矿为例,开展了多煤层采动对覆岩含水层破坏试验(图 17),揭示了煤炭开采对含水层的破坏特征,采动初期基岩层关键层未完全垮落时,导水裂隙带主要沿工作面前后方持续发育,采空区上方发育缓慢;关键层上覆岩层离层量动态变化,松散层含水层底板离层量持续增加,松散层含水层结构完整,未破坏;随着采动范围的不断扩大,关键层破断后,松散层含水层随覆岩整体切落,含水层结构破坏,水径流方向改变,大量涌入离层空间,离层空间成为重要聚集区域,并沿高角度导水优势裂缝向下运移。

3.2 煤矿地下水库坝体结构试验平台

针对煤矿地下水库的结构安全问题,利用该平台,以神东矿区大柳塔煤矿地下水库为例,开展了不同地震烈度条件下地下水库坝体稳定性试验研究(表 2)。

以煤矿地下水库抗震安全为研究背景开展振动台试验,如图 18 所示。试验过程中采用分布式光纤

进行坝体应变监测,采用散斑系统进行表面位移监测,监测结果如图 19、20 所示。研究表明,一是大柳塔煤矿地下水库内岩体压实沉降固结,有助于提升地下水库结构的抗震性能,地震烈度超过 10 度条件下(垂直荷载 0.3 MPa、加速度 1.5g 条件下),坝体结构整体安全(未发生塑性变形,测点残余应变仍然很小,不超过 200 微应变)。二是大柳塔地下水库坝体可抵抗 10 级以上地震,地震过程中水库侧应力大于巷道侧应力约 10%,垂向上应力分布为底部 > 腹部 > 顶部。同一地震波作用下人工坝体位移大于煤柱坝体 1.14 倍,煤柱坝体和人工坝体连接处应力集中,是坝体薄弱位置。

3.3 煤矿地下水库水岩耦合机理试验平台

以大柳塔矿井下岩体及矿井水为试验对象,利用煤矿地下水库水岩耦合机理试验平台,搭建中试试验系统,开展煤矿地下水库岩体对矿井水 10 m 长净化中试模拟试验(表 3),对试验过程中矿井水水质指标进行测试分析,获取试验前后矿井水中悬浮物变化特征,掌握煤矿地下水库对矿井水中悬浮物的去除规律。

相关结论如下:

(1) 根据矿井水进水流量和时间,计算进入平台的矿井水体积,记录水深高度,经计算可得储水系数,研究发现:试验过程中在多个时刻待水位稳定后,记录水深高度和注水体积。储水系数为注水体积和水深高度对应的平台体积之比,其变化曲线如图 21 所示,可得中试试验的储水系数为 0.52。

(2) 中试试验的总水样体积为 4.032 m³,已知流量为 0.6 m³/h,可得全部水样在试验系统内完成单次循环的理论时间为 6.72 h,结合本次试验的储水系数(0.52)和岩样铺设高度的平台总体积(2.25 m³),可知

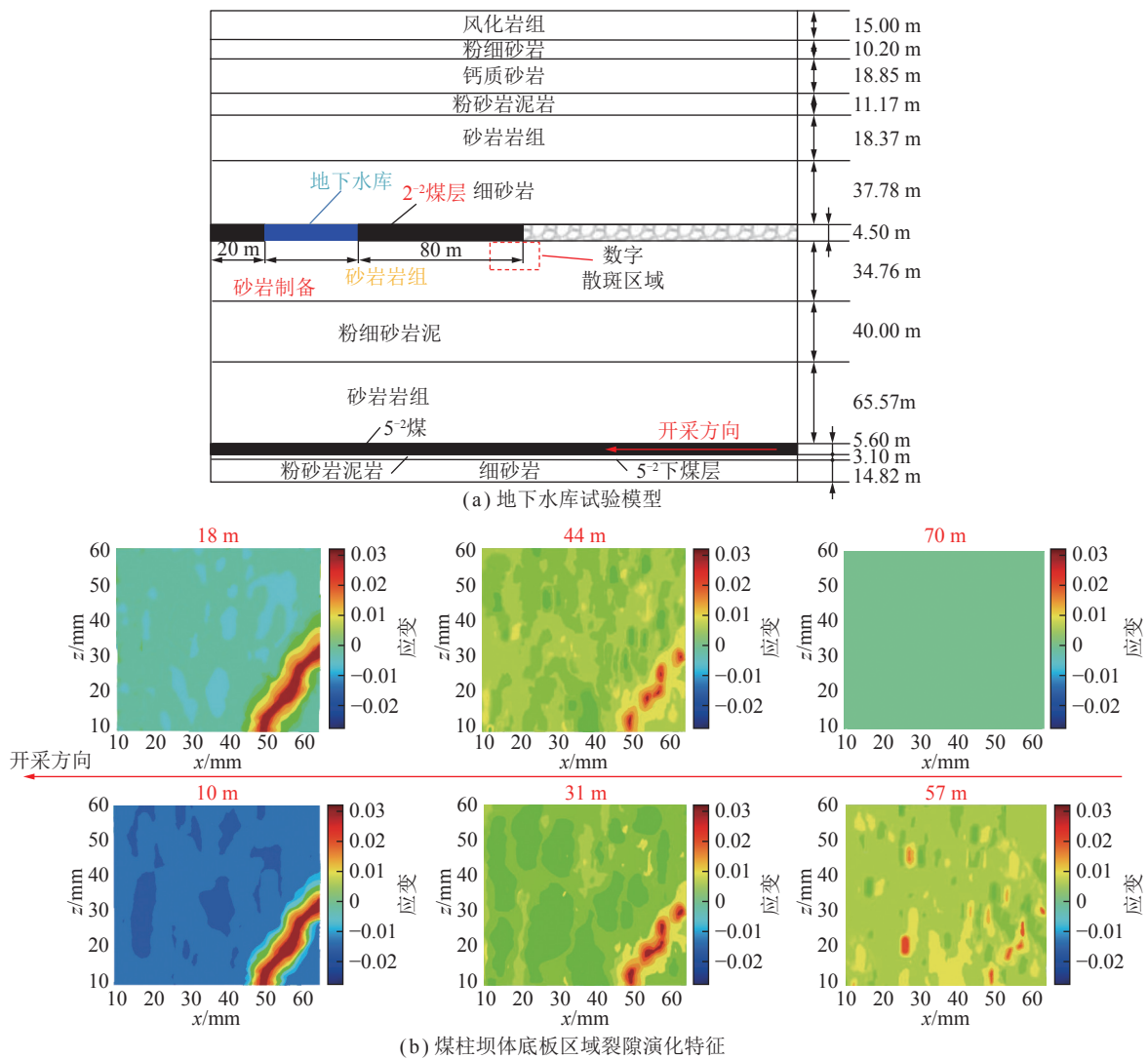


图 16 模型试验方案及试验结果分析

Fig.16 Modelling test methodology and results analysis

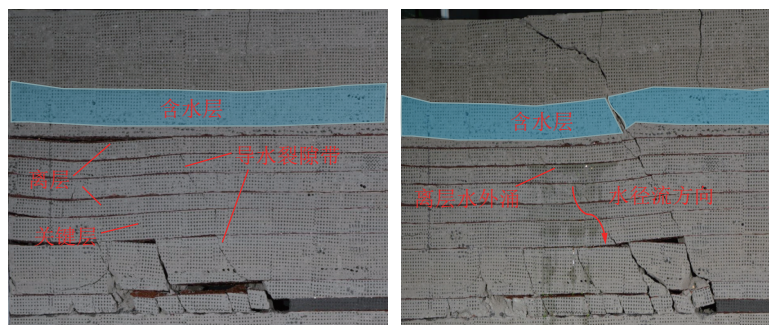


图 17 松散层含水层破坏特征

Fig.17 Failure characteristics of loose aquifer layer

矿井水在试验平台内的体积为 1.17 m³, 水力停留时间为 1.95 h。通过分析试验前后矿井水悬浮物质量浓度, 掌握了煤矿地下水库矿井水悬浮物去除规律, 研究发现: 对于大柳塔煤矿地下水库矿井水净化中试试验, 悬浮物质量浓度与沉降距离的关系如图 22 所示, 矿井水悬浮物质量浓度去除率可达 89.5%, 中试试验第

10 m 出口处悬浮物质量浓度为 90 mg/L, 比进水口的质量浓度降低了 88.5%, 降幅显著, 且悬浮物质量浓度与沉降距离的关系满足函数关系式: $y = ae^{bx} + ce^{dx}$, 其中, y 为悬浮物质量浓度; x 为沉降距离; a 和 c 为与矿井水初始质量浓度相关的待定系数, b 和 d 为与沉降距离相关的待定系数。

表 2 煤矿地下水库坝体结构试验平台开展的主要试验

Table 2 Main experiments by the dam structure experimental platform for coal mine underground reservoirs

序号	试验	工程背景	试验简介
1	地震条件下煤矿地下水库坝体连接位置动力特征分析	神东矿区大柳塔矿2 ⁻² 煤层的煤矿地下水库坝体结构	模型尺寸1.0 m×0.6 m×0.6 m, 加载不同强度的地震波(地震烈度6~11度), 监测坝体内部应力应变、位移及加速度等数据, 分析坝体连接位置在不同地震强度下的动力响应特征
2	不同地震作用煤矿地下水库平板型人工坝体抗震性能分析		

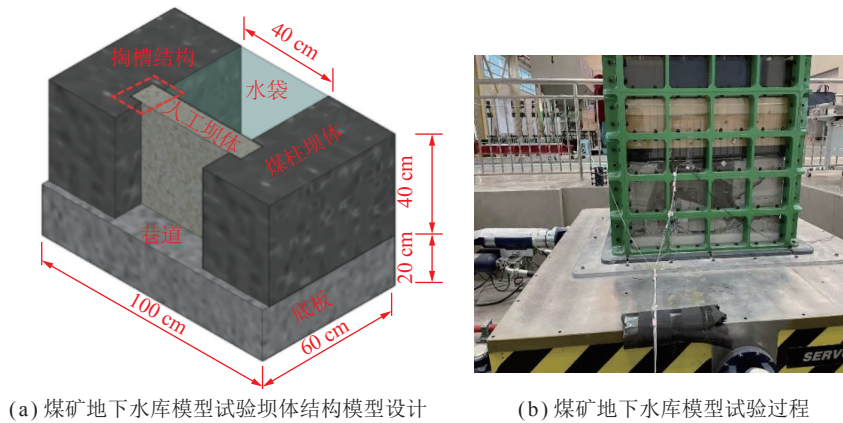


图 18 煤矿地下水库物理模型试验

Fig.18 Physical model experiment of coal mine underground water reservoir

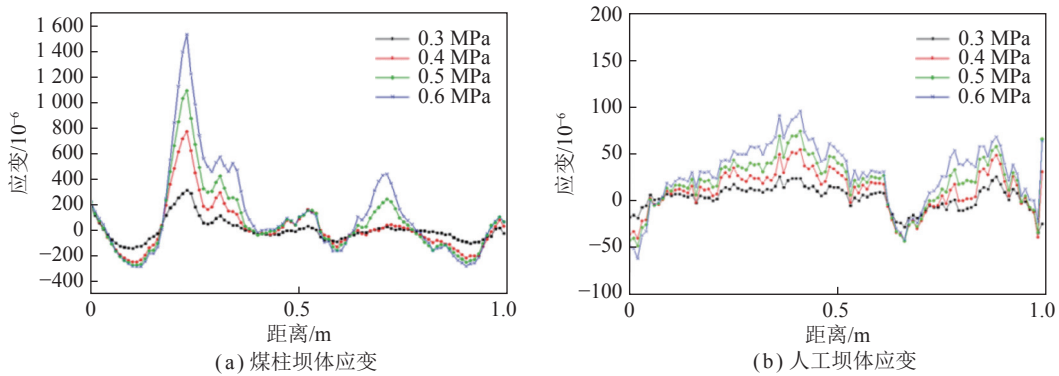


图 19 煤柱坝体与人工坝体结构应变分布

Fig.19 Strain distribution of coal pillar dam and artificial dam structure

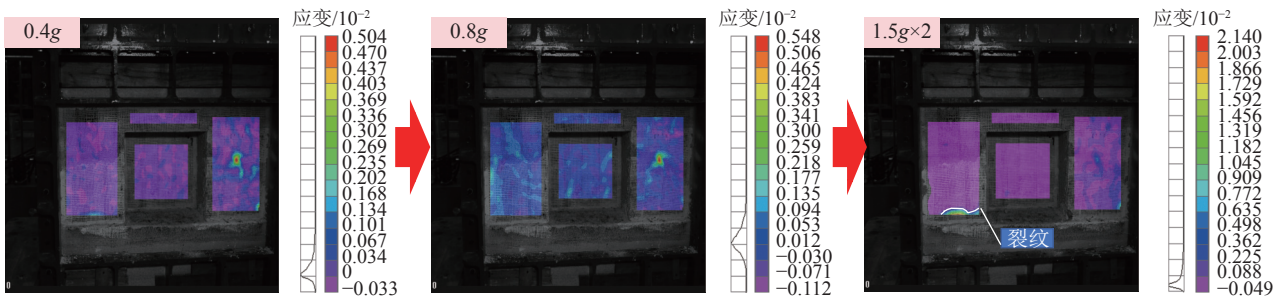


图 20 相似模拟实验散斑监测结果

Fig.20 Speckle monitoring results in the physical modelling experiment

表 3 煤矿地下水库水岩耦合机理试验平台开展的主要试验

序号	试验	工程背景	试验简介
1	储水系数模拟实验		测试实验过程中岩石在装置中的储水系数, 是所有矿井水净化循环实验的基础参数
2	矿井水悬浮物动态净化循环模拟实验	神东矿区大柳塔矿 2 ⁻² 煤层的 煤矿地下水库	模拟煤矿地下水库对矿井水中悬浮物的净化效果, 揭示其去除规律及机理
3	水-岩耦合动态循环中试试验		大尺度条件下模拟地下水库对矿井水的净化作用, 揭示煤矿地下水库水-岩耦合作用机理

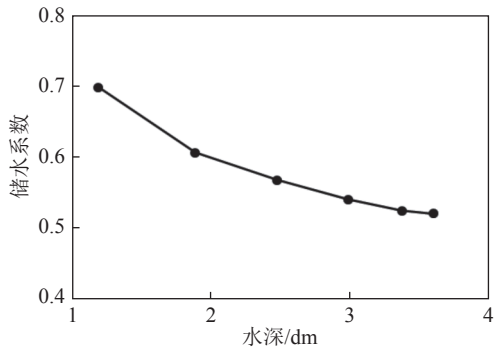


图 21 储水系数随注水深度的变化曲线

Fig.21 Variation of the water storage coefficient with water depth

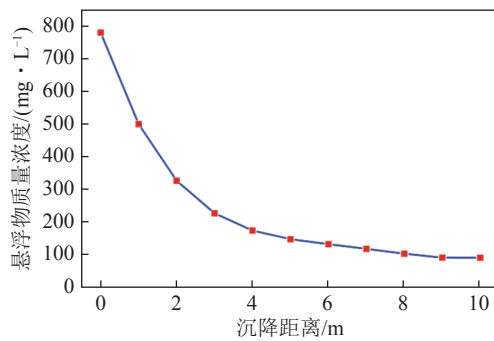


图 22 悬浮物质量浓度随沉降距离变化曲线

Fig.22 Variation of the suspended solids concentration with settling distance

(3) 对中试试验稳态条件下悬浮物浓度随沉降距离变化数据进行拟合, 如图 23 所示, 利用达西定律, 推导了能更好的适用于煤矿地下水库去除悬浮物的经验函数模型。

将达西定律方程转换后得

$$L = \frac{k\Delta H}{v} \tag{1}$$

式中, L 为长度 (沉降距离); v 为渗流速度; k 为渗透系数; ΔH 为水头损失, $\Delta H=H_1-H_2$ 。

将式 (1) 转变为 $v=k\Delta H/L$ 代入式 $y=ae^{bx}+ce^{dx}$ 中, 可得

$$y = ae^{bk\Delta H/v} + ce^{dk\Delta H/v} \tag{2}$$

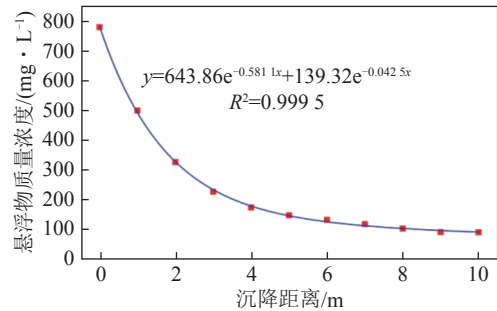


图 23 稳态条件下悬浮物质量浓度随沉降距离变化关系

Fig.23 Correlation between the suspended solids concentration and the settling distance under steady-state conditions

式 (2) 中 y (悬浮物质量浓度) 与 v (渗流速度) 之间的关系可令 $bk\Delta H$ 为 b_1 , $dk\Delta H$ 为 d_1 , 则得到

$$y = ae^{-b_1/v} + ce^{-d_1/v} \tag{3}$$

式 (3) 能更好的适用于煤矿地下水库实际应用, 可对某一位置矿井水悬浮物浓度进行预测, 并得到悬浮物在地下水库内发生沉降的主要范围, 为现场地下水库预防淤堵及开发清淤技术提供理论依据。

3.4 水处理工艺集成试验平台

针对国能集团宁煤公司某煤矿高矿化度矿井水处理技术难题, 利用平台中试系统模块中的微砂澄清、旋流+陶瓷膜、超滤反渗透和多效蒸发等多套矿井水吨级处理设备, 设计了“旋流+陶瓷膜+反渗透+多效蒸发”和“微砂澄清+超滤+反渗透+多效蒸发”2 套集成工艺并实现了连续稳定运行, 出水水质均优于煤炭工业回用及地表三类水体的水质标准。矿井水原水悬浮物质量浓度 5 000 mg/L, 矿化度 4 500 mg/L, 处理量 2 m³/h。旋流回砂采用 1 台 50 mm 级旋流器, 底流口直径采用 8 mm。通过 50 mm 级旋流器对矿井水进行预处理, 溢流经过陶瓷膜进行物理过滤后出水浊度达到 0.03 NTU, 底流高浓矿井水由澄清器进行絮凝处理, 澄清器出水 SS (悬浮物质量浓度) 稳定小于 10 mg/L, 浊度稳定小于 10 NTU。2 种预处理工艺药剂用量比传统工艺减少 25% 以上, 占地面积缩小 50% 以上, 适用于井下处理。陶瓷膜装置产水进入超滤系统做进

一步预处理,超滤产水作为一级反渗透原水,经输水泵输送并经高压泵增压后进入反渗透膜组,一级反渗透产水进入RO产水箱,一级反渗透浓水进入二级反渗透作为进水,进行二次浓缩,浓水外排,产水回至RO产水箱。连续运行期间,一级反渗透产水平均电导率 $79.3 \mu\text{s}/\text{cm}$,二级反渗透产水平均电导率 $113.6 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。“超滤+反渗透”段矿井水回收率可达到 85%(图 24);反渗透膜浓水(矿化度 $30\,000 \text{ mg}/\text{L}$)进入三效顺流蒸发装置,经蒸发处理后,产水 $\text{TDS} < 10 \text{ mg}/\text{L}$,浓水矿化度达 $90\,000 \text{ mg}/\text{L}$,全流程矿井水总回收率可达 92%(图 25)。

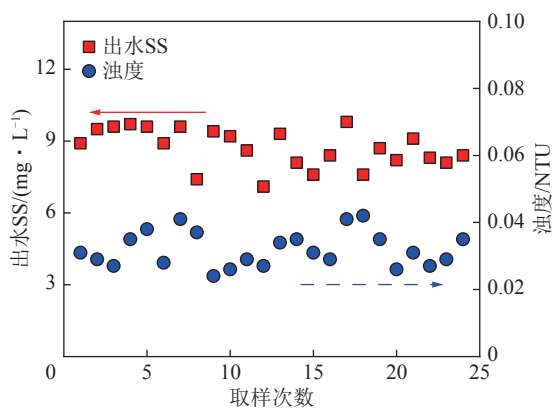


图 24 预处理出水 SS 和浊度变化

Fig.24 Changes in suspended solids concentration and turbidity for pre-treated water

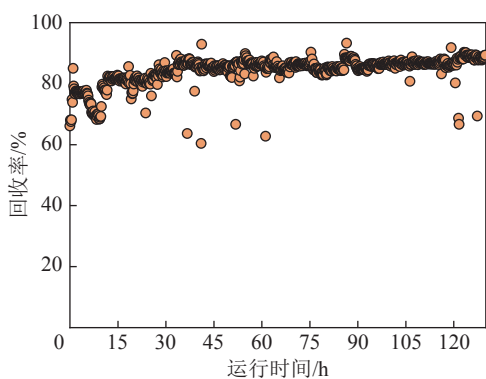


图 25 膜浓缩深度处理回收率变化

Fig.25 Changes in recovery rate of membrane concentration with deep treatment

4 结 论

(1) 煤矿地下水库作为一项原创性技术,理论和技術需要不断丰富完善,相似模拟试验是重要的研究手段之一。煤炭开采水资源保护和利用全国重点实验室自主研发了 7 个试验平台,并经过一系列试验研究,验证了平台可靠性,能够有效支撑煤矿地下水库理论技术体系完善。

(2) 充分利用上述试验平台,开展西部矿区不同地质和工况条件下,煤矿地下水库煤柱坝体尺寸优化、人工坝体结构参数优化、水岩耦合机理等理论研究和技术研发,为推广应用地下水库提供技术支撑。

(3) 开展多工况条件下煤矿地下水库安全设计和评价,如矿震和地震、冒落岩体突然垮落等特殊工况下,煤矿地下水库整体安全评价分析,为地下水库安全运行提供依据。

(4) 依托上述平台,制定煤矿地下水库建设、运行和安全标准体系,规范地下水库选址、水量预测、坝体结构参数优化设计、水质控制、安全保障等方面,形成煤矿地下水库建设运行成套技术体系,在西部缺水煤炭主产区推广应用。

参考文献(References):

- [1] 顾大钊,李井峰,曹志国,等.我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J].煤炭学报,2021,46(10):3079-3089.
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079-3089.
- [2] 谢克昌.中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究[M].北京:科学出版社,2014,11.
- [3] 谢和平,王金华,中国煤炭科学产能[M].北京:煤炭工业出版社,2014,5.
- [4] 中国科学院地理科学与资源研究所. 噬水之煤—煤电基地开发与水资源研究[M].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [5] 顾大钊.能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J].中国工程科学,2013,15(4):102-107.
GU Dazhao. Water resource and surface ecology protection technology of modern coal mining in China's energy “Golden Triangle” [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(4): 102-107.
- [6] 顾大钊,李庭,李井峰,等.我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2021,49(1):11-18.
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11-18.
- [7] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007,32(1):1-7.
QIAN minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [8] 钱鸣高.煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2010,35(4):529-534.
QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [9] 许家林,朱卫兵,王晓振.基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J].煤炭学报,2012,37(5):762-769.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.

- [10] 缪协兴, 王安, 孙亚军. 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 217–227.
MIAO Xiexing, WANG An, SUN Yajun. Research on basic theory of mining with water resources protection and application to arid and semi-arid mining areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 217–227.
- [11] 张帅, 冯国瑞, 张东升, 等. 榆神矿区导水裂隙带高度多因素影响规律及保水采煤分区[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(2): 301–312.
ZHANG Shuai, FENG Guorui, ZHANG Dongsheng, et al. Multi-factor contribution to the height of water-conducting fracture zone and mine zoning for water protection in Yushen Coalfield[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(2): 301–312.
- [12] 黄庆享. 浅埋煤层覆岩隔水性与保水开采分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3622–3627.
HUANG Qingxiang. Impermeability of overburden rock shallow buried coal seam and classification of water conservation mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3622–3627.
- [13] 师本强, 侯忠杰. 陕北榆神府矿区保水采煤方法研究[J]. 煤炭工程, 2006: 63–65.
SHI Benqiang, HOU Zhongjie. Research on coal mining method with water conservation in Yushen Mining Area[J]. Coal Engineering, 2006: 63–65.
- [14] 范立民, 马雄德, 吴群英, 等. 保水采煤技术规范的技术要点分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 81–87.
FAN Limin, MA Xiongde, WU Qunying, et al. Analysis on technical points of water-preserving coal mining technical specifications[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 81–87.
- [15] 马立强, 余伊何, SPEARING A J S. 保水采煤方法及其适用性分区——以榆神矿区为例[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1079–1085.
MA Liqiang, YU Yihe, SPEARING A J S. Water conservation mining method and its applicability: A case study in Yushen mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1079–1085.
- [16] 白海波, 缪协兴. 水资源保护性采煤的研究进展与面临的问题[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 253–262.
BAI Haibo, MIAO Xiexing. Research progress and major problems of water preserved coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 253–262.
- [17] 张东升, 范钢伟, 张世忠, 等. 保水开采覆岩等效阻水厚度的内涵、算法与应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 128–136.
ZHANG Dongsheng, FAN Gangwei, ZHANG Shizhong, et al. Equivalent water resisting overburden thickness for water conservation mining: Conception, method and application[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 128–136.
- [18] 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.
- [19] 顾大钊, 张建民. 西部矿区现代煤炭开采对地下水赋存环境的影响[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 114–117.
GU Dazhao, ZHANG Jianmin. Modern coal mining affected to underground water deposit environment in West China Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(12): 114–117.
- [20] 曹志国, 李全生, 董斌琦, 等. 煤矿地下水库技术标准体系构建与制定[J]. 煤矿安全, 2016, 47(10): 242–245.
CAO Zhiguo, LI Quansheng, DONG Binqi, et al. Construction and formulation of technical standards for underground reservoir of coal mine[J]. Safety in Coal Mine, 2016, 47(10): 242–245.
- [21] 庞义辉, 李鹏, 周保精. 8.0 m 大采高工作面煤矿地下水库建设技术可行性研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(2): 6–9, 15.
PANG Yihui, LI Peng, ZHOU Baojing. Underground reservoir construction technical feasibility analysis in 8.0 m large mining height working face[J]. Coal Engineering, 2018, 50(2): 6–9, 15.
- [22] 姜琳婧, 方杰, 杨宗, 等. 基于 GIS 与 CAD 的煤矿地下水库库容计算平台开发研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 166–171.
JIANG Linjing, FANG Jie, YANG Zong, et al. Study on precision computing platform development of coal mine underground reservoir capacity based on GIS and CAD[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 166–171.
- [23] 吴宝杨. 煤矿分布式地下水库煤柱坝体合理布置方式[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 68–72, 78.
WU Baoyang. Reasonable arrangement mode about coal pillar dam of distributed groundwater reservoir in coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 68–72, 78.
- [24] 曹志国. 煤矿地下水库不同人工坝体结构抗震性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 237–243.
CAO Zhiguo. Study on aseismic performance of different artificial dam structures of coal mine underground reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 237–243.
- [25] 孔祥松, 方杰, 蒿晓林, 等. 煤矿地下水库人工坝体安全多层次模糊综合评价研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(9): 158–161.
KONG Xiangsong, FANG Jie, HAO Xiaolin, et al. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation of artificial dam safety of coal mine groundwater reservoir[J]. Coal Engineering, 2019, 51(9): 158–161.
- [26] 武洋, 姚强岭, 吴宝杨, 等. 矿震动载影响下的储水结构坝体损伤破坏特征研究[J/OL]. 采矿与安全工程学报, 2023: 1–11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.TD.20230506.1652.002.html>.
WU Yang, YAO Qiangling, WU Baoyang, et al. Damage and fracture characteristics of the dam body under the vibration load [J/OL]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023: 1–11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.TD.20230506.1652.002.html>.