



# 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

张云 刘永孜 来兴平 宋天奇 张雷铭 孙浩强 万培峰 詹睿

## 引用本文：

张云, 刘永孜, 来兴平, 等. 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[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 155–172.

ZHANG Yun, LIU Yongzi, LAI Xingping. Mechanism of short-wall block backfill water-preserved mining based on water-conducting fractures development-heavy metal ions migration[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 155–172.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1796>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 我国大水矿山侧向帷幕截水技术及水资源保护效果研究

Lateral curtain interception technology and water conservation effect in groundwater abundant mines of China  
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 207–223 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.QN21-014>

#### 保水采煤技术规范的技术要点分析

Analysis on technical points of water-preserving coal mining technical specifications  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 81–87 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7c8064bf-3c45-40fb-8099-9271ccecf50e>

#### 保水采煤研究30年回顾与展望

Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining  
煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bd941a47-c39c-4c30-adcc-9a7fb376f449>

#### 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>

#### 基于保水采煤的煤炭开采带与泉带错位规划问题

Dislocation planning of coal mining belt and spring belt based on water-preserved coal mining  
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4a778e5d-454b-49a3-8bd2-3d8044239040>

#### 渭北煤田地下水特征及保水采煤研究进展

Hydrogeological characteristics and progress of water-preserved 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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张云, 刘永孜, 来兴平, 等. 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[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 155-172.

ZHANG Yun, LIU Yongzi, LAI Xingping, et al. Mechanism of short-wall block backfill water-preserved mining based on water-conducting fractures development-heavy metal ions migration[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 155-172.

## 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

张云, 刘永孜, 来兴平, 宋天奇, 张雷铭, 孙浩强, 万培烽, 詹睿  
(西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 短壁块段式充填采煤技术可有效解决煤炭资源浪费、水资源流失和矸石堆积等问题, 然而, 采空区矸石充填材料受到矿井水的长期作用后, 其内部重金属离子可能会发生浸出, 对矿区水资源造成一定潜在污染影响。为此, 结合短壁块段式充填采煤技术, 系统地对采动造成的水资源流失和水资源污染综合防治展开研究。首先, 针对矿区水资源流失防治, 基于“煤柱、充填体-阻隔层-隔水层”的层位组合关系, 研究短壁块段式充填采煤导水裂隙发育特征, 揭示短壁块段式充填采煤诱发的覆岩结构演变下水资源保护的控制机理。其次, 针对矿区水资源污染防治, 建立采空区矸石充填材料重金属离子迁移模型, 揭示矸石充填材料对水资源的污染机理, 分析矸石充填材料重金属离子迁移规律。并由此总结矿区水资源流失-污染综合防治技术, 提出基于水资源流失-污染防治的充实率设计方法。结果表明: 在水资源流失防治方面, 真石材料作为充填体充入采空区后, 作为永久承载体与块段间保护煤柱共同承担上覆岩层的载荷, 有效阻止了低位岩层组的垮落, 限制覆岩导水裂隙贯穿隔水层, 确保高位岩层组的完整性; 在水资源污染防治方面, 真石充填材料重金属离子在渗流、浓度、应力的耦合作用下, 以矿井水为载体, 在重力势能和水头压力的驱动下沿着煤柱侧向以及底板下方进行迁移运动, 且重金属离子迁移距离随底板岩层渗透率、重金属离子浸出浓度/污染源强、底板裂隙深度和水位高度的增大而增大, 随真石粒径和围岩应力的增大而减小。基于此, 总结了矿区水资源流失-污染综合防治技术, 包括开采参数调控技术、充填参数调控技术、污染源头调控技术、传播途径调控技术以及水体原位调控技术, 并提出基于水资源流失-污染防治的充实率设计方法, 实现矿区水资源流失-污染综合防治。研究成果对综合防治煤炭开采造成的矿区水资源破坏问题提供一定的科学理论依据和工程指导。

**关键词:** 水资源保护; 导水裂隙; 真石重金属离子; 保水开采; 短壁块段式充填采煤

**中图分类号:** TD82; X52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2023)02-0155-18

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

ZHANG Yun, LIU Yongzi, LAI Xingping, SONG Tianqi, ZHANG Leiming, SUN Haoqiang, WAN Peifeng, ZHAN Rui

(College of Energy Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Short-wall block backfill mining (SBBM) technology can effectively solve the problems of coal resources waste, water resources loss and gangue waste accumulation. However, after the long-term effect of mine water, the internal heavy metal ions in the gangue backfill materials may be leached, which have a certain potential impact on the groundwater environment in the mining area. Therefore, according to the technical characteristics of SBBM technology, comprehensive prevention of water resources loss and water re-

收稿日期: 2022-10-30      责任编辑: 黄小雨      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1796

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004201, 51874284); 中国博士后科学基金特别资助项目(2021T140551)

作者简介: 张云(1990—), 男, 陕西铜川人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: zhangyun@xust.edu.cn

sources pollution during SBBM was studied systematically. First, prevention and control of water resources loss in the mining area. Based on the combination relationship of “coal pillar, backfill body-barrier layer-aquifuge”, The development of water-conducting fractures in overlying strata under SBBM were analysed. The control mechanism of water resources protection under the evolution of overlying strata structure induced during SBBM was revealed. Secondly, prevention and control of water resources pollution in mining areas. The migration model of heavy metal ions in the gob was established. Then, the pollution mechanism of gangue backfill materials to water resources was revealed, the migration law of heavy metal ions in gangue backfill materials was analyzed, the comprehensive prevention and control technology of water resources destruction in mining area was summarized, the comprehensive prevention and control technology of water resources loss-pollution in mining area was summarized, and the design method of filling ratio based on water resources loss-pollution prevention was put forward. The results show that the gangue materials were filled into the gob as the backfill body, the gangue materials would be the permanent bearing body, which bore the load of the overlying strata accompanied with the protective coal pillar among the blocks, which could greatly prevents the collapse of the low-level stratum, restrict the water-conducting fractures to penetrate the barrier layer and protect the integrity of the high-level stratum. In addition, the heavy metal ions in gangue backfill materials were subjected to the coupled action of seepage, concentration, and stress and then driven by water head pressure and gravitational potential energy to migrate along the side of the coal pillar and below the floor stratum, during which mine water served as the carrier. The migration distance of heavy metal ions increased with increasing of the permeability of floor strata, leaching concentration of heavy metal ions/pollution source intensity, depth of floor breaks and water level heights, and decreases with the increase of gangue particle size and surrounding rock stress. Based on this, the comprehensive prevention and control technology of water resources loss-pollution in mining area was summarized, it included mining parameter control technology, backfill parameter control technology, pollution source control technology, transmission route control technology and in-situ water control technology. and the design method of filling ratio based on water resource loss-pollution prevention and control was put forward, which can realize the comprehensive prevention and control of water resource loss-pollution in mining area. This study will provide scientific theoretical basis and guidance for the comprehensive prevention and control of the water resources destruction problems caused by coal mining.

**Key words:** water resources protection; water-conducting fractures; heavy metal ions in gangue; water-preserved mining; short-wall block backfill mining

## 0 引言

我国“十四五”规划和2035年远景目标纲要中明确指出要提高矿产资源的开发利用效率,坚持矿产资源绿色开发仍是我国“十四五”期间的重要方向。近年来,我国经济建设快速发展,煤炭的需求和产量快速增长,促使矿井煤炭资源的枯竭日益加速,“三下”压煤、工业广场煤柱、边角煤柱以及不规则块段等煤炭资源的回收迫在眉睫<sup>[1]</sup>,据统计,我国“三下”压煤量由于受历史开采技术水平所限已高达137.9亿t,压煤储量极大,造成了资源的严重浪费<sup>[2-3]</sup>。而采用传统的长壁垮落法开采水体下煤炭资源时,会造成上覆岩层大范围的破坏,并可能引发地下水水源的大量流失<sup>[4-8]</sup>。此外,随着煤矿开采强度和开采规模不断增大,大量的矸石排放并堆积至地表,不仅占用大量土地,而且对矿区的生态环境造成了一定的污染<sup>[9-10]</sup>。针对上述问题,提出采用短壁块段式充填开采方法,旨在从根本上解决煤炭资源浪费、矸石堆积、水资源流失等问题,从而为解决上述难题提供一种有效可行的环境友好型开采方法<sup>[11-14]</sup>。然而,在短壁块段式充填开采过程中,矸石材料在大规模充填至采空区或井下储存时,处于一个长期相对封

闭、阴暗潮湿的环境,受到采深、地热及矿井水等影响,矸石内部含有的以重金属离子为主的可溶性有害物质会浸出释放,对矿区地下水环境造成潜在的影响<sup>[15-17]</sup>。

目前,针对矿区水资源保护的研究,国内外学者主要是从水资源保护开采或水资源污染防治单一角度出发,取得了丰富的研究成果。其中,针对矿区水资源保护开采的研究,刘建功等<sup>[18-19]</sup>构建了充填采煤含水层稳定性力学模型,并运用相似模拟试验进行验证,提出基于充填采煤的保水开采理论和技术;马立强等<sup>[20-21]</sup>提出“采充并行”的开采模式,有效控制了覆岩移动,解决了采动引起的水资源流失问题;李猛等<sup>[22-23]</sup>基于固体充填采煤理论,分析固体充填开采覆岩导水裂隙演化特征,建立含水层下固体充填开采临界充实率计算模型,为解决矿区水资源流失问题提供一种新途径。针对矿区水资源污染问题,肖利萍等<sup>[24-25]</sup>设计煤矸石静态浸泡试验,探究矸石中污染物的成分以及浸出规律,发现矸石中的污染物以重金属离子为主,且固液比越小污染物浓度越低,越有利于煤矸石中污染物的溶解;杨建等<sup>[26]</sup>利用室内淋溶试验,发现矸石山经雨水淋溶作用下,浸出的重金属离子会对附近的地下水造成污染影响;王

岩等<sup>[27]</sup>基于溶质运移理论,针对矸石山淋滤液对地下水的污染情况进行研究,发现随着时间的延长,污染的范围不断扩大,对区域内的地下水以及潜水含水层造成了污染。上述研究成果多集中于采动影响下矿区水资源的流失防治以及地表矸石堆积造成的环境污染防治,研究角度较为单一,并没有考虑到矸石充填材料充入采空区后带来的矿区水资源污染问题,因此,亟需对矿区水资源流失与污染的综合防治进行进一步研究探索。

为此,笔者针对矿区水资源流失问题,结合短壁块段式充填采煤技术,探究块段式充填采煤诱发的覆岩结构演变下水资源保护的控制机理。针对矿区水资源污染问题,建立采空区矸石充填材料重金属离子迁移模型,揭示矸石充填材料对水资源的污染机理,分析矸石充填材料重金属离子迁移规律。并由此总结矿区水资源流失-污染防治技术,提出基于水资源流失-污染防治的充实率设计方法,实现矿区水资源的综合防治。该研究成果对提高煤炭采出率、矿区水资源综合防治、矸石回收利用具有重要借鉴意义。

## 1 短壁块段式充填采煤技术

### 1.1 块段式充填采煤技术原理

块段式充填开采技术主要适用于回收“三下”压煤,工业广场煤柱,边角煤柱以及不规则块段等煤炭资源。它是在块段式垮落法开采工艺的基础上,待

一个块段回采完后,将矸石材料作为充填体充入采空区,同时回采下一个块段,保证该技术实施过程中采煤、充填工艺在时间上的连续性与空间上的独立性,不仅扩大了矿井可采储量,延长了矿井生命周期,同时,把地表堆积的矸石充入采空区内减少了对生态环境的危害,减低了企业对环境保护所产生的成本。此外,块段式充填开采技术对上富含水层、地表水等矿区水资源具有较强的保护作用,利用充填体与块段间保护煤柱的双重承载作用,来控制上覆岩层的移动,阻止覆岩导水裂隙贯通隔水层,防治采动造成的上富含水层、地表水等矿区水资源的大量流失,实现煤炭资源采出率、矿区水资源保护和废弃矸石处理的有效兼顾。

### 1.2 块段式充填采煤工作面布置

块段式充填采煤工作面与块段式垮落法开采工作面布置相同,根据回采区域范围设计若干个块段,每个块段通过布置4条支巷将其划分为多个待采煤柱,并对其进行回收,相邻的块段之间设有一定尺寸的块段间保护煤柱。每个块段中的待采煤柱采用自上而下顺序后退式进行回收,在待采煤柱回收过程中,与块段式垮落法开采相同,每个采硐(长度一般小于11 m,宽度约为3 m)之间留有临时煤柱(宽度一般为0.5~1.5 m)。当一个块段回收完后,将矸石材料自上而下充入采硐、支巷以及联巷内,采硐间煤柱和密闭墙起到挡板作用以保证充实率达到设计要求。块段式充填工作面布置如图1所示。

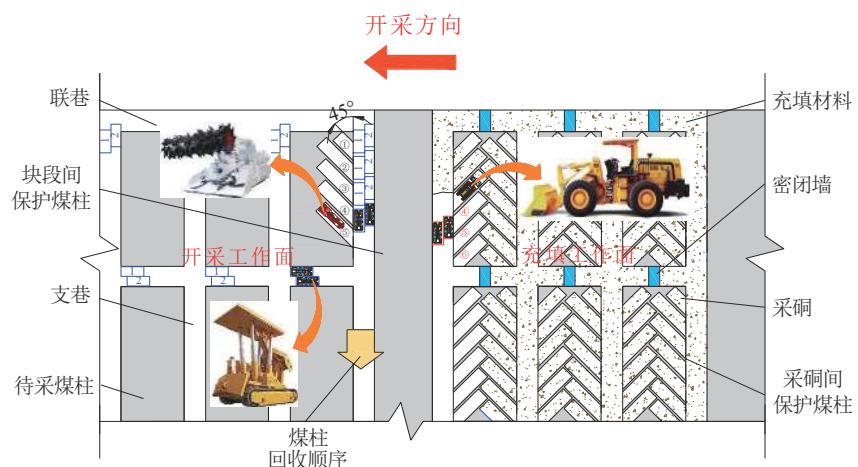


图1 短壁块段式充填采煤工作面布置及设备

Fig.1 Layout and equipments of working face in short-wall block backfill mining

### 1.3 块段式充填采煤工艺

在短壁块段式充填采煤回采过程中,块段式充填工作面的采煤工艺主要包括开采工艺与充填工艺2种。

其中,工作面的开采工艺为:与块段式垮落法开采相似,在煤炭的回收过程中,选用4台行走液压支架配合连续采煤机,来保障工作面割煤和装煤工序的安全进行,行走液压支架分2组布置(支架1、2为

一组,3、4为一组),一组布置在支巷内,另一组布置在相邻2条支巷间的联巷内(支巷和联巷的宽度均为5 m),当一个块段的煤柱回收完毕后,在支巷内部需要沿支巷走向打3排至4排的单体支柱,用来加强对顶板的支撑,间排距约为1.0 m×1.0 m或1.5 m×1.5 m,同时,将连接相邻支巷的联巷用密闭墙隔开,为后续充填工序能够安全和高质量的完成提供了有效的保障。

工作面的充填工艺具体如下:在充填过程中,首先对需要充填的支巷内的单体支柱移去,同时将2台行走液压支架布置在支巷内,并采用输送机和抛研机将运输来的研石材料抛投至支巷或采硐内,当充填研石堆积至一定高度后,停止输送机和抛研机,并将抛研机后移,利用推土机对松散充填研石堆向支巷和采硐内部方向进行推压,并最终使充填材料

接顶,以满足设计的充实率要求;当推土机完成夯实接顶工艺,将其放置邻近采硐内,并重新启动输送机和抛研机,进而完成下一个步距内充填工艺,当一个支巷的充填工序完成后,按照上述相同的工序进行重复操作来实现整个块段的充填。具体的充填工艺流程如图2所示。

综上所述,短壁块段式充填采煤技术作为一种环境友好型开采技术,通过将地表废弃研石充入采空区的方式,可以有效解决煤炭资源浪费、水资源流失和研石堆积等问题,然而,由于研石充填材料长期处于高应力和潮湿的封闭采空区内,在受到矿井水的作用后,内部重金属离子可能会发生浸出迁移,对矿区水资源造成了潜在污染风险。因此,结合短壁块段式充填采煤技术,系统地对采动造成的水资源流失以及污染进行研究。

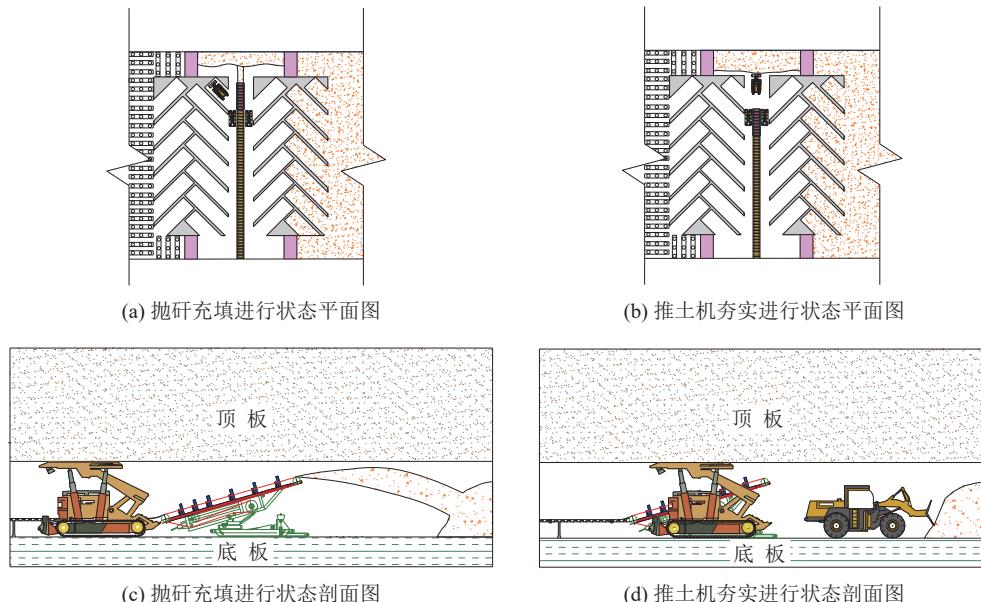


图2 短壁块段式充填工作面充填工艺

Fig.2 Backfilling process of working face in short-wall block backfill mining

## 2 短壁块段式充填采煤水资源流失防控效果

### 2.1 工程背景

试验矿井位于陕西省延安市南部,井田东西宽约13.0 km,南北长约23.0 km,批准面积约197.5 km<sup>2</sup>,设计生产能力为420.0万t/a。根据试验工作面附近S81钻孔可知,该区域煤层结构简单且稳定,隔水层主要为地表黄土层,整体较为完整,无断层、陷落柱等特殊构造,煤层厚度平均约为4.0 m,平均倾角约为2.0°,属于近水平煤层,该区域煤层平均埋深约为141.6 m,所受原岩应力为3.8 MPa。试验区域潜在的

保护水源为地表水,位于黄土层上方,需避免采动引起的水资源破坏。该河流全长约100.0 km,流域面积3 392.0 km<sup>2</sup>,观测流量为0.584~11.111 m<sup>3</sup>/s。

该矿块段式充填试验工作面位于406长壁工作面以东,其回采长度约为230 m,试验面积约为25 300 m<sup>2</sup>,预计可回收总原煤量14.5万t。为保护地表水资源,矿方计划采用3个块段对试验区域进行回收,设计采高为4.0 m,块段长度为70 m,块段间保护煤柱宽度为10 m以及工作面充实率为80%,以抑制导水裂隙发育至地表,进而造成水资源的流失。试验工作面布置如图3所示。

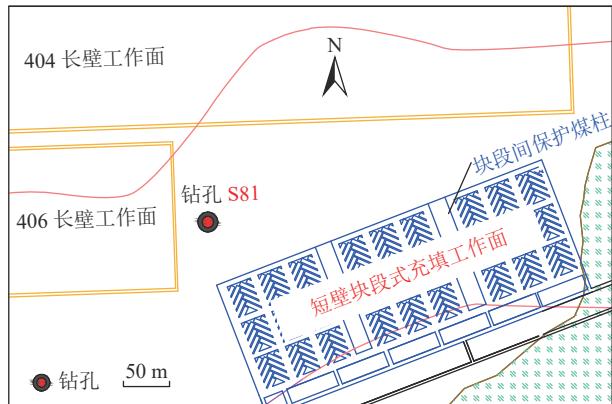


图3 短壁块段式充填试验工作面布置

Fig.3 Layout of experimental short-wall block backfill mining working face

## 2.2 物理模型参数及方案

为研究短壁块段式充填开采对水资源的保护效

果,结合“煤柱、充填体-阻隔层-隔水层”的层位组合关系,选用物理相似模拟试验的方法,分别对长壁垮落法开采和短壁块段式充填开采后覆岩移动变形及导水裂隙发育特征进行了对比和分析。试验以试验矿井地质条件为背景,建立模型尺寸为 $2.5\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.99\text{ m}$ 的平面应变模型,以沙子、碳酸钙、石膏、水等材料铺设模型,模型包括自煤层底板(4.0 m的砂质泥岩)直至地表,共13层,具体参数和材料配比见表1,其几何相似比为1:150,应力相似比为1:250。设计2组对比试验进行研究:①长壁垮落法开采;②短壁块段式充填开采,其中充实率设为80%。物理相似模型自下层向上层铺设,每层铺设时,首先将砂子、碳酸钙、石膏和水按照表1中给出的质量混合在一起并均匀搅拌,然后将搅拌后的材料平整的铺设在模型架上。

表1 相似模拟实验材料配比参数  
Table 1 Proportional parameters of materials for simulation experimental

| 序号 | 岩层   | 模拟厚度/cm | 模拟强度/kPa | 砂质量/kg | 碳酸钙质量/kg | 石膏质量/kg | 水质量/kg |
|----|------|---------|----------|--------|----------|---------|--------|
| 1  | 黄土   | 22.8    | 0.2      | 179.55 | 17.96    | 7.69    | 22.8   |
| 2  | 泥岩   | 7.3     | 70.0     | 57.49  | 5.75     | 2.46    | 7.3    |
| 3  | 粗粒砂岩 | 20.9    | 174.4    | 161.23 | 8.06     | 18.81   | 20.9   |
| 4  | 泥岩   | 2.2     | 70.0     | 17.33  | 1.73     | 0.74    | 2.2    |
| 5  | 细砂岩  | 3.3     | 202.0    | 22.28  | 3.71     | 3.71    | 3.3    |
| 6  | 砂质泥岩 | 9.5     | 103.2    | 74.81  | 5.34     | 5.34    | 9.5    |
| 7  | 泥岩   | 11.3    | 70.0     | 89.0   | 8.9      | 3.8     | 11.3   |
| 8  | 粉砂岩  | 3.3     | 180.0    | 25.46  | 1.27     | 2.97    | 3.3    |
| 9  | 泥岩   | 3.9     | 70.0     | 30.71  | 3.07     | 1.32    | 3.9    |
| 10 | 粉砂岩  | 8.5     | 180.0    | 65.57  | 3.28     | 7.65    | 8.5    |
| 11 | 泥岩   | 1.3     | 70.0     | 10.24  | 1.02     | 0.44    | 1.3    |
| 12 | 煤    | 2.6     | 63.2     | 20.48  | 2.05     | 0.87    | 2.6    |
| 13 | 砂质泥岩 | 2.0     | 129.2    | 15.75  | 0.68     | 1.57    | 2.0    |

模型的监测主要包括对上覆岩层的导水裂隙发育监测和位移监测。试验采用Vic-2D非接触应变监测系统对模型进行监测,该系统利用模型表面随机分布的散斑点作为信息载体,跟踪变形前后时刻的散斑图像中相同形状的散斑点,通过DIC数字图像相关性运算法则得出模型表面的变形场,同时可观测模型的裂隙发育情况。系统主要包括CDC工业像机、光学镜头、照明系统、配套笔记本、VIC 2D系统等,如图4所示,同时还具有非接触、操作简单、环境适应性强与高精度等优点,被广泛应用到力学试验等领域。

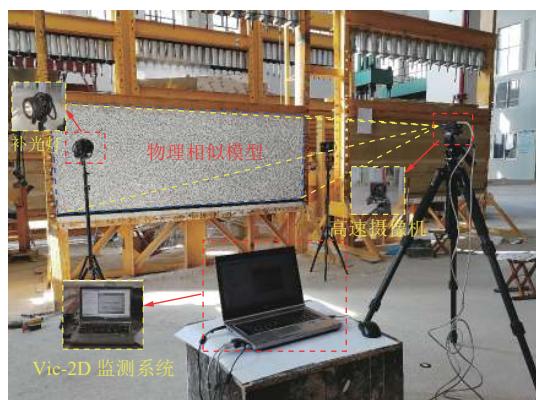


图4 模型监测实物  
Fig.4 Physical objects of model monitoring

### 2.3 充填相似材料的确定

为确保充填相似材料和真实矸石材料应满足应力应变过程相似,结合现场筛选好的原始矸石材料,通过分级筛制备均匀粒径级配、大粒径为主的级配和小粒径为主的级配矸石试样各3组,共9组,级配方案见表2,各粒径范围矸石试样如图5所示,并将实验室中的矸石试样放置于自制钢桶中,对不同级配方案下的矸石材料的应力应变特征进行测试分析,取3次试验的平均值作为最终试验结果。由图6可知,当应力达到3.8 MPa时,级配方案1,2,3对应的应变分别约为0.2,0.24和0.27,因此,确定采用级配方案1时,工作面充实率可以达到80%左右,进而选择级配方案1的矸石应力-应变特征与后期充填相似材料进行对比。

表2 矮石试样级配方案

Table 2 Gradation scheme of gangue sample

| 级配方案 | 各粒径范围的矸石体积占比/% |          |          |
|------|----------------|----------|----------|
|      | 0~15 mm        | 15~30 mm | 30~50 mm |
| 1    | 70.0           | 30.0     | —        |
| 2    | 30.0           | 40.0     | 30.0     |
| 3    | —              | 30.0     | 70.0     |

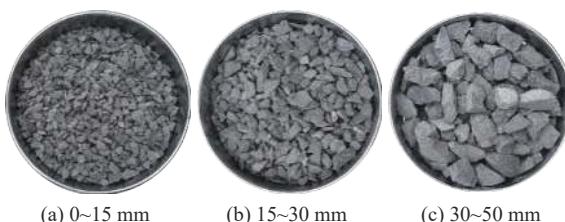


图5 各粒径范围矸石试样

Fig.5 Gangue sample of each particle size

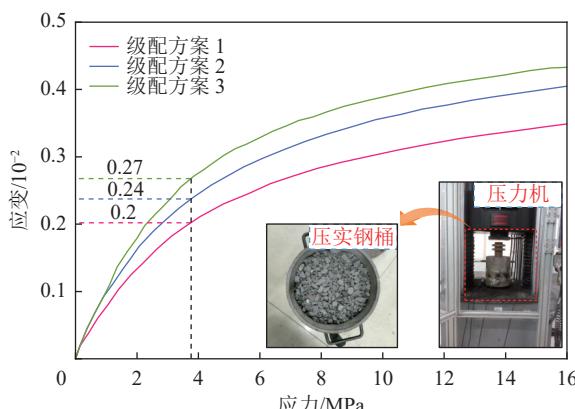


图6 不同级配矸石试样压实应力-应变曲线

Fig.6 Compaction stress-strain curve of different gradations of gangue sample

根据相似条件及模拟经验,确定采用纸张、珍珠棉、海绵以及薄木板等材料组合充填相似材料并进行实验室压实特性匹配试验,通过与矸石材料的应力应变曲线对比,以确定最佳充填相似材料组合。图7所示为充填相似材料与矸石材料的应力应变关系对比图,据此确定了充填相似材料的具体组合为:5 mm 珍珠绵+5 mm 海绵+10 mm 纸张+6 mm 簿木板及组合材料3。

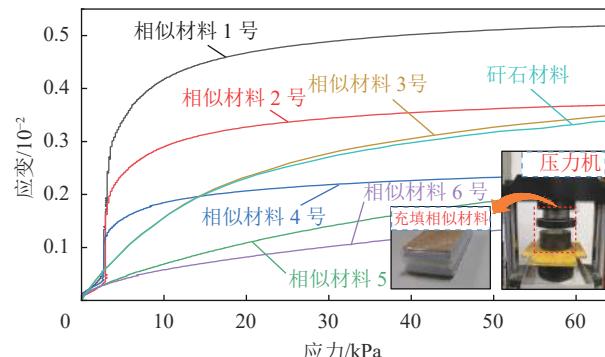


图7 充填相似材料与矸石材料压实应力-应变曲线

Fig.7 Compaction stress-strain curve of similar material and gangue material

### 2.4 水资源保护效果对比分析

根据模拟方案,分别采用块段式充填开采和长壁垮落法开采对相同的开采区域进行回收,分析开采过程中不同开采方法条件下采场覆岩变形、导水裂隙发育及隔水层采动破坏特征,模型开挖完全遵循以上2种采煤工艺。

#### 2.4.1 采场上覆岩层变形特征

利用Vic-2D非接触应变监测系统,分析得到不同采煤方法下的采场覆岩垂直云图如图8所示,从中可知:块段式充填开采引发的覆岩变形量及范围远小于长壁垮落法。当开采区域的煤层开挖完毕后,长壁工作面覆岩垂直位移V最大值为36.0 mm,地表有明显的下沉变形,而块段式充填工作面覆岩垂直位移最大值仅约2.48 mm,相比较长壁垮落法降幅高达93.1%。可以看出当矸石材料作为充填体充入采空区后,降低了上覆岩层的下沉空间,同时矸石材料和块段间保护煤柱共同作为承载体对上覆岩层进行支撑,有效控制了采场上覆岩层的变形。

#### 2.4.2 采场上覆岩层导水裂隙发育特征

图9为不同采煤方法下的采场覆岩导水裂隙发育特征,从中可知:当采用长壁垮落法开采时,其采场覆岩导水裂隙带高度约为97.0 cm,导水裂隙已发育至地表,地表水层遭到破坏,进而会导致水资源大量流失;而短壁块段式充填开采引发的覆岩导水裂

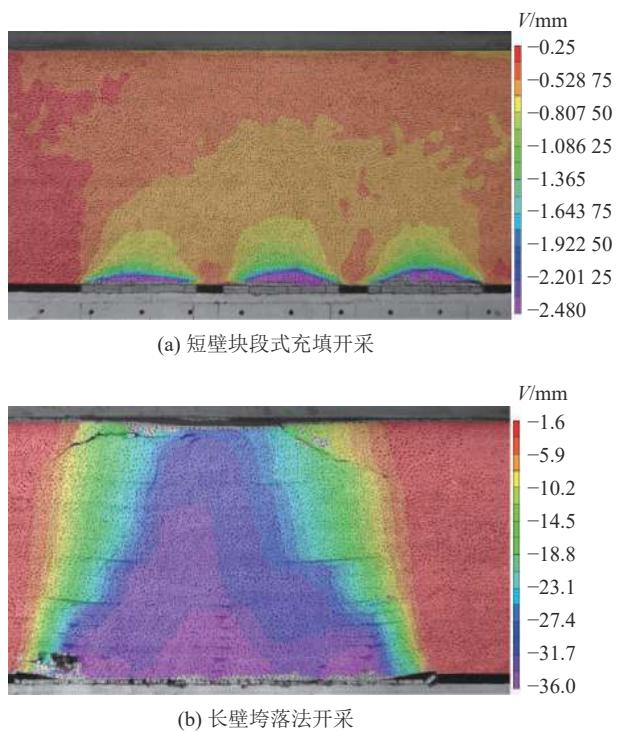


图 8 煤层开采过程中采场上覆岩层的垂直变形

Fig.8 Vertical deformation of overlying strata during coal seam mining

隙带高度仅为 5.3 cm, 相比较长壁垮落法降幅高达 94.5%, 导水裂隙最高位置远低于地表水层, 其未受到采动影响。通过物理相似模拟试验的结果可以看

出, 短壁块段式开采对科学有效地保护工作面上方地表水资源有着显著效果。

#### 2.4.3 隔水层采动破坏特征

由图 8、图 9 可知, 在采用长壁垮落法开采时, 上覆岩层破坏范围较大, 导水裂隙分布广、宽度大, 且导水裂隙已完全贯穿隔水层, 隔水层处于裂隙带内, 出现明显的下沉变形现象, 不再具有隔离保护地表水资源的作用; 采用短壁块段式充填开采时, 覆岩导水裂隙扩展距离较短, 隔水层受采动影响较小, 仍能保持其完整性, 防止地表水资源出现大量流失现象。可以看出短壁块段式充填开采对隔水层的影响程度较小, 能够继续维持隔水层的完整性, 保证其隔离保护水资源的作用。

从试验结果可以看出, 在块段式充填开采过程中, 煤炭被采出后, 上覆岩层受自身重力作用会发生一定破坏, 但由于矸石材料被作为充填体及时充入采空区, 其可作为永久承载体与块段间保护煤柱共同承担上覆岩层的载荷, 从而控制覆岩的移动和破断, 保证隔水层的完整性。此外, 当充实率达到一定程度时, 可以发现充填体和块段间保护煤柱可有效阻止低位岩层组的垮落, 防止覆岩导水裂隙贯穿隔水层, 确保高位岩层组的完整性, 从根本上防止了矿区水资源的流失。因此, 短壁块段式充填采煤技术可对采动造成的水资源流失问题进行有效防治。

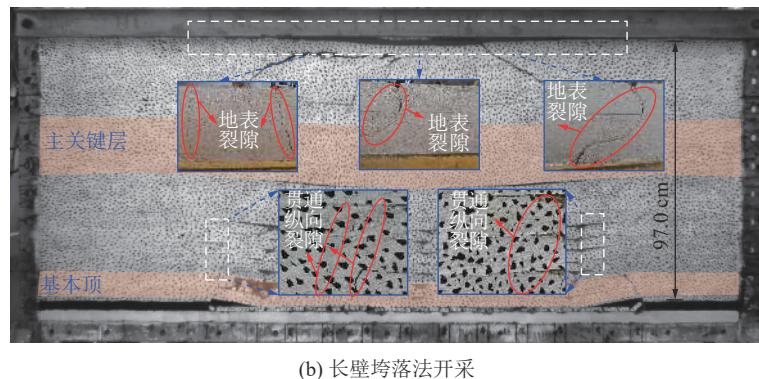
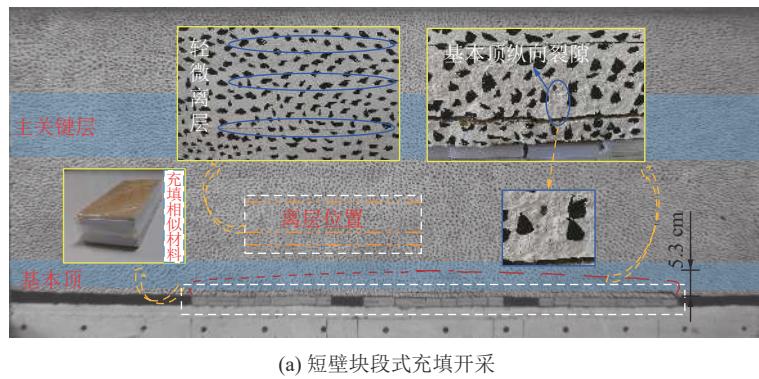


图 9 煤层开采过程中采场上覆岩层的导水裂隙发育特征

Fig.9 Development characteristics of water-conducting fractures in overlying strata during coal seam mining

### 3 研石充填材料对水资源的污染机理

在块段式充填开采过程中,研石充填材料受到矿井水的长期作用后,内部重金属离子可能会发生浸出迁移,对矿区水资源造成一定污染风险,为此,对研石充填材料对水资源的污染机理展开研究。

#### 3.1 研石静态浸泡试验

试验选取2.3节所制备的研石试样作为试验材料,并以粒径15~30 mm为例,如图6所示,详细分析研石充填材料重金属离子含量及其浸出行为。首先将研石充填材料置于105 °C的干燥箱中进行干燥处理,并采用SY/T 5163—2018《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》<sup>[28]</sup>对研石充填材料组分及重金属离子含量进行测定。随后根据试验矿井内矿井水pH=5的测试结果,调制相同pH值的酸性去离子水,并将干燥后的1 000 g研石充填材料以及10 000 mL的酸性去离子水置于容器之中进行浸泡。同时,每隔48 h取一次浸泡液样品密封储存,待溶液收集完毕后,利用等离子体发射光谱仪对浸泡液样品进行检测,分析研石充填材料重金属离子的浸出行为,等离子体发射光谱仪如图10所示。



图10 等离子体发射光谱仪

Fig.10 Plasma emission spectrometer

图11为研石充填材料XRD测试谱图,表3为其化学成分测试结果,可以发现,研石充填材料由多种矿物成分所组成,其中以石英和高岭石的成分最高,并同时伴随有少量的黄铁矿、伊利石和菱铁矿等其他矿物成分。因此,其内部化学成分主要为SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,重金属离子主要为Mn<sup>2+</sup>、Be<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、As<sup>3+</sup>、Cd<sup>2+</sup>。

根据研石充填材料重金属离子浸出浓度的测试结果以及GB/T 14848—2017《地下水质量标准》<sup>[29]</sup>,发现浸泡液中Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、As<sup>3+</sup>、Cd<sup>2+</sup>的浸出浓度均未超标,属于地下水质量Ⅲ类标准,超标的重金属离子为Be<sup>2+</sup>和Mn<sup>2+</sup>,最终浸出浓度分别为0.24×10<sup>-5</sup>、3.20×10<sup>-5</sup> mol/L,其中,Be<sup>2+</sup>属于地下水水质

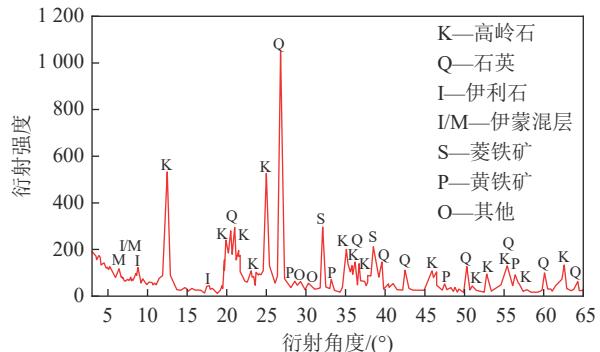


图11 研石充填材料XRD测试谱图

Fig.11 XRD test spectrum of gangue backfill materials

表3 研石中离子或化合物成分及含量

Table 3 Composition and content of ions or compounds in gangue

| 化学成分                           | 含量/%  | 化学成分 | 含量/%    |
|--------------------------------|-------|------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 59.90 | Ba   | 0.10    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.70 | Mn   | 0.094   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.70  | F    | ≤0.045  |
| K <sub>2</sub> O               | 2.40  | Be   | 0.011   |
| CaO                            | 2.00  | Zn   | 0.009   |
| MgO                            | 1.80  | Cu   | 0.0006  |
| S                              | 1.53  | Pb   | <0.0002 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.65  | As   | <0.0001 |
| P                              | 0.05  | Cd   | <0.0001 |
| Ti                             | 0.50  |      |         |

量IV类标准,Mn<sup>2+</sup>属于地下水质量V类标准,因此,以浸出浓度较高、污染风险较大的Mn<sup>2+</sup>为例,对研石充填材料重金属离子浸出行为进行分析。

图12为不同时间影响下Mn<sup>2+</sup>浸出浓度的变化柱状图,可以发现在重金属离子浸出的过程中,Mn<sup>2+</sup>浸出浓度随时间的增长不断增加,当时间为4、6、8、10、12 d时,Mn<sup>2+</sup>浸出浓度分别为1.55×10<sup>-5</sup>、2.31×10<sup>-5</sup>、2.88×10<sup>-5</sup>、3.17×10<sup>-5</sup>、3.20×10<sup>-5</sup> mol/L。此外,

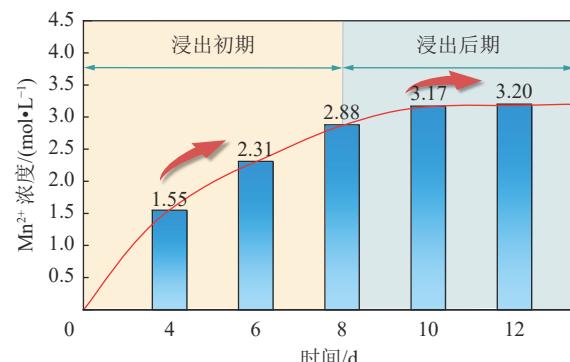


图12 不同时间下Mn<sup>2+</sup>浸出浓度

Fig.12 Mn<sup>2+</sup> leaching concentration under different time

根据重金属离子浸出速率, 可将其浸出行为分为2个阶段, 0~8 d为浸出初期, 当时间从4 d升至8 d时, 其浸出浓度增加了 $1.55 \times 10^{-5}$  mol/L, 增幅85.8%; 8~12 d为浸出后期, 浸出浓度增加了 $0.32 \times 10^{-5}$  mol/L, 增幅11.1%。

### 3.2 采空区研石充填材料重金属离子迁移模型

#### 3.2.1 控制方程

1)基本假设。结合研石静态浸泡试验, 对研石充填材料重金属离子的迁移问题进行研究。为简化求解过程, 在建立模型前提出基本假设: 底板岩层与煤柱处于等温状态; 底板岩层与煤柱均为各向同性、均质的多孔弹性介质; 重金属离子在岩层中的迁移运动主要以矿井水为载体; 重金属离子以分子扩散和机械弥散的方式进行迁移运动; 渗流符合Richards方程。

2)渗流场控制方程。根据上述假设, 在重力势能的影响下, 重金属离子以矿井水为载体的迁移运动可以视为非饱和渗流流动, 其流体流速 $u$ 符合Darcy定律, 可表示为

$$u = -\frac{\kappa_s}{\mu} k_r (\nabla p + \rho g \nabla D) \quad (1)$$

式中:  $\kappa_s$ 为饱和渗透率;  $k_r$ 为相对渗透率;  $\nabla$ 为梯度算子;  $\mu$ 为流体的动力黏度;  $p$ 为压力;  $\rho$ 为流体密度;  $g$ 为重力加速度;  $D$ 为高程。

其渗流运动可分为基质流与裂隙流, 基质中流体的质量守恒方程为

$$\rho_m \left( S_e S_m + \frac{C_m}{\rho_m g} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \rho_m u_m = Q_m \quad (2)$$

裂隙中流体的质量守恒方程为:

$$\rho_f S_f \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla (d_f \rho_f u_f) = d_f Q_f \quad (3)$$

式中,  $m$ 为基质; 下标 $f$ 为裂隙;  $S_e$ 为饱和度;  $S$ 为储水系数;  $C$ 为容水度;  $t$ 为时间;  $u$ 为流体流速;  $Q$ 为流体的源项;  $d$ 为裂隙开度。

3)浓度场控制方程。重金属离子在多孔弹性介质中的迁移运动主要以分子扩散和机械弥散为主, 符合Fick第二定律, 可表示为

$$J = -\nabla(D_{D,i} + D_{e,i}) \nabla c_i \quad (4)$$

式中:  $J$ 为扩散通量;  $D_{D,i}$ 为弥散张量;  $D_{e,i}$ 为有效扩散系数。

则其浓度场控制方程为:

$$\frac{\partial(\epsilon_p c_i)}{\partial t} - \nabla(D_{D,i} + D_{e,i}) \nabla c_i + u \nabla c_i = R_i + S_i \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_p$ 为孔隙率;  $c_i$ 为物质的浓度;  $R_i$ 为反应速率表达式;  $S_i$ 为任意源项。

4)应力场控制方程。对于多孔弹性体, 其不会发生塑性变形, 基于弹性力学理论, 并考虑到围岩应力对流体、底板岩层与煤柱属性的影响, 其应力场控制方程为:

$$\rho' \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \nabla \sigma + F_v \quad (6)$$

式中:  $\rho'$ 为多孔介质密度;  $x$ 为位移;  $\sigma$ 为应力张量;  $F_v$ 为体积力。

#### 3.2.2 模型建立

基于短壁块段式充填采煤工艺特征, 利用COMSOL Multiphysics建立采空区研石充填材料重金属离子迁移模型, 其中, 渗流场控制方程、浓度场控制方程以及应力场控制方程的求解分别采用Richards方程、多孔介质的稀物质传递以及固体力学3个物理接口。模型的具体参数如下: 模型总尺寸为330.0 m×210.0 m×44.0 m, 其中, 短壁块段式充填工作面为70.0 m×110.0 m×4.0 m, 边界煤柱宽50.0 m, 块段间保护煤柱宽10.0 m, 底板岩层深40.0 m。该模型采用自由四面体网格进行剖分, 网格总数为57 773, 如图13所示。同时, 根据研石静态浸泡试验结果, 设置污染风险较高的Mn<sup>2+</sup>为研究对象, 研石粒径为15~30 mm, 底板岩性为泥岩, 底板裂隙深度为0, 所受围岩应力为6.5 MPa, 时间为100年, 并假定采空区内矿井水的水位高度为3.8 m, 从而模拟不同时间影响下重金属离子的迁移行为。

### 3.3 研石充填材料对水资源潜在污染分析

为探究研石充填材料重金属离子的迁移扩散对矿区水资源的污染影响, 引入污染源强即重金属离子浸出总量, 并结合重金属离子浸出浓度对重金属离子的迁移扩散进行更加准确的分析, 污染源强与重金属离子浸出浓度紧密相关, 其计算公式如下:

$$\sigma_w = c_i V \quad (7)$$

式中:  $c_i$ 为物质的浓度,  $i$ 为物质的种类;  $\sigma_w$ 为污染源强;  $V$ 为浸出液体积。

则在重金属离子浸出浓度为 $3.20 \times 10^{-5}$  mol/L的情况下, 3个短壁块段式充填工作面内的污染源强为2 809.0 mol。

图14为不同时间影响下Mn<sup>2+</sup>迁移距离变化图, 由图可知, 当Mn<sup>2+</sup>浸出浓度和污染源强恒定时, 不同时间下底板与煤柱中的Mn<sup>2+</sup>浓度分布呈现相同的特征: 底板与充填体交界处以及煤柱与充填体交界处

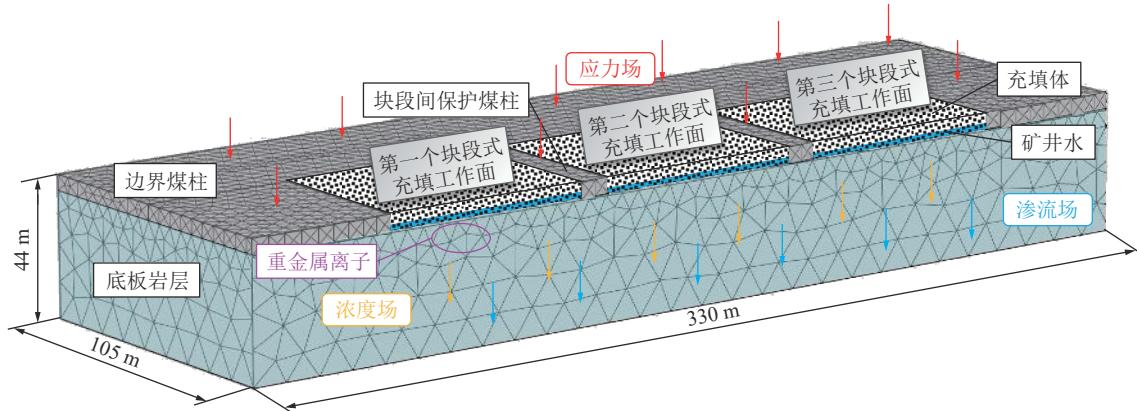
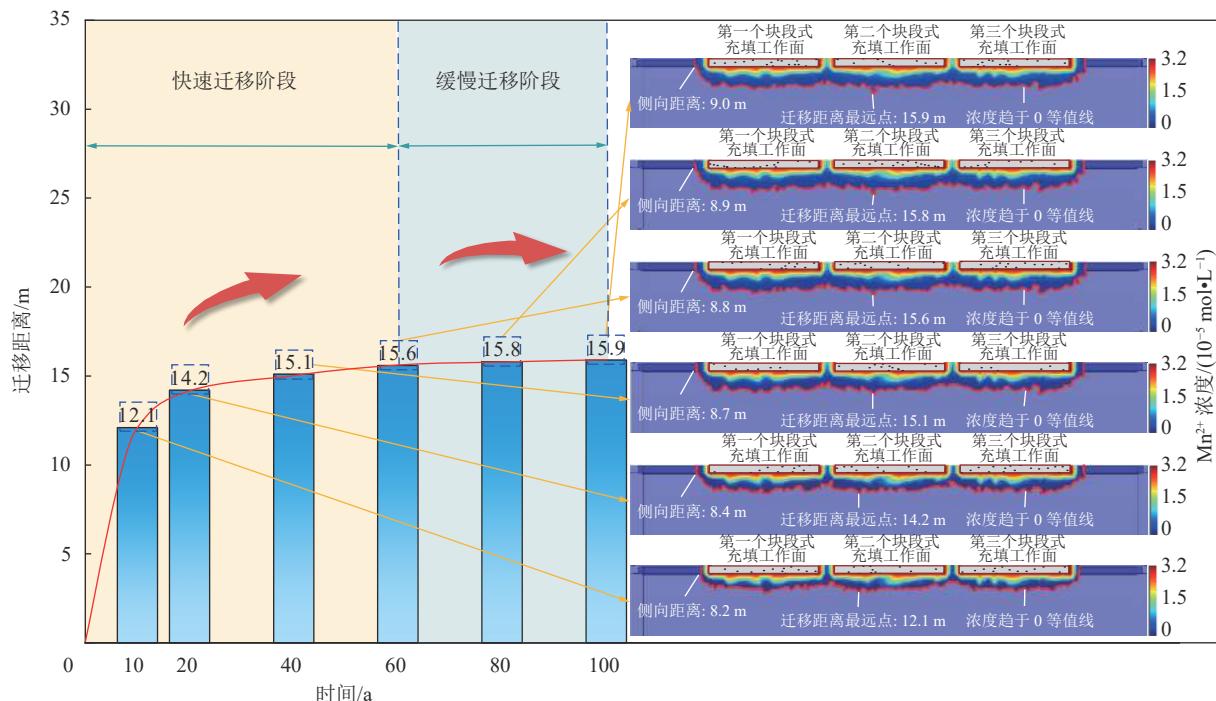


图 13 采空区矸石充填材料重金属离子迁移模型

Fig.13 Migration model of heavy metal ions in gangue backfill materials in the gob

图 14 不同时间下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化Fig.14 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under different time

的浓度最高,接近于 $Mn^{2+}$ 浸出浓度,并随底板深度和煤柱侧向距离的增加不断减小,表明在重金属离子的迁移过程中,其迁移能力在不断弱化。同时,可以发现重金属离子迁移最远点始终处于第二个短壁块段式充填工作面下方,这是由于第一个和第三个短壁块段式充填工作面的部分重金属离子会向第二个短壁块段式充填工作面下方渗透扩散,导致第二个短壁块段式充填工作面的重金属离子迁移距离相对更远。此外,在第10、20、40、60、80、100年时, $Mn^{2+}$ 的最远迁移距离分别为12.1、14.2、15.1、15.6、15.8、15.9 m,在煤柱处的侧向迁移距离分别为8.2、8.4、8.7、8.8、8.9、9.0 m,说明重金属离子迁移距离

随时间的增长在不断增加。因此,根据重金属离子的迁移速率,可将其迁移行为分为2个阶段,0~60年为快速迁移阶段,在时间从10年上升至60年时,最远迁移距离增加了3.5 m,增幅28.9%;60~100年为缓慢迁移阶段,最远迁移距离增加了0.8 m,增幅5.3%。

根据上述试验结果及模拟结果的分析,可以得到:在矸石充填材料重金属离子的浸出-迁移过程中,矸石充填材料经矿井水的长期浸溶作用后内部重金属离子大量浸出,并在渗流、浓度、应力的耦合作用下,重金属离子以矿井水为载体,在重力势能和水头压力的驱动下沿着煤柱侧向以及底板下方进行迁移

运动。此外, 研石充填材料重金属离子的浸出浓度及迁移距离均随时间的增长不断增加。综上所述可以发现, 当研石充填材料重金属离子迁移距离过大时, 将会导致重金属离子进入下伏含水层中, 对矿区水资源造成一定污染风险, 时刻威胁矿区地下水环境的安全。

#### 4 研石充填材料重金属离子迁移规律

研石充填材料重金属离子的迁移行为由多因素共同作用决定, 且各因素所造成的影响效果也具有一定的差异性, 因此, 基于研石充填材料对水资源的污染机理, 研究分析不同影响因素下重金属离子的迁移规律。

##### 4.1 模拟方案

通过研石静态浸泡试验, 可以发现研石粒径对研石充填材料重金属离子的迁移行为具有一定影响, 为此, 需明确0~15、15~30、30~50 mm三种粒径下重金属离子的浸出浓度, 为模拟方案的建立提供数据支撑, 结果如图15所示, 当研石粒径为0~15、15~30、30~50 mm时,  $Mn^{2+}$ 最终的浸出浓度分别为 $4.0 \times 10^{-5}$ 、 $3.2 \times 10^{-5}$ 、 $1.9 \times 10^{-5}$  mol/L。此外, 结合研石充填材料对水资源的污染机理, 确定了底板岩性、重金属离子浸出浓度、研石粒径、围岩应力、底板裂隙深度以及水位高度为影响研石充填材料重金属离子迁移行为的主要因素, 因此, 基于已建立的采空区研石充填材料重金属离子迁移模型, 采用正交试验方法模拟6种主要因素对研石充填材料重金属离子迁移的影响效果, 具体模拟方案见表4。

##### 4.2 不同因素作用下重金属离子迁移规律

1)底板岩性的影响分析。图16为不同底板岩性下 $Mn^{2+}$ 迁移距离变化。由图16可知, 当底板岩性为灰岩、细粒砂岩、泥岩、中粒砂岩时, 采空区 $Mn^{2+}$ 浸出浓度( $3.2 \times 10^{-5}$  mol/L)和污染源强(2 809.0 mol)保持不变, 而 $Mn^{2+}$ 的最远迁移距离分别为9.9、14.7、15.9、17.8 m, 侧向迁移距离均为9.0 m。这是由于底

板岩层渗透率的不同导致岩层内部孔隙数量不同, 进而造成重金属离子最远迁移距离产生了明显的差异, 而煤柱的渗透率保持一致, 其侧向迁移距离不发生变化, 其中, 底板岩层渗透率表现为中粒砂岩>泥岩>细粒砂岩>灰岩, 可见底板岩层渗透率越大, 重金属离子的迁移距离越远。

2)重金属离子浸出浓度的影响分析。图17为不同重金属离子浸出浓度下 $Mn^{2+}$ 迁移距离变化图。从图中可以发现, 在 $Mn^{2+}$ 的迁移过程中, 当 $Mn^{2+}$ 浸出浓度较小为 $1.2 \times 10^{-5}$  mol/L, 即污染源强为1 053.4 mol时,  $Mn^{2+}$ 的最远迁移距离为11.0 m, 侧向迁移距离为8.4 m, 而当 $Mn^{2+}$ 浸出浓度升高至 $4.2 \times 10^{-5}$  mol/L, 即污染源强升高至3 686.8 mol时, 其最远迁移距离明显增大, 达到17.7 m, 同比增长了60.9%, 侧向迁移距离为9.4 m, 增长了11.9%, 说明重金属离子浸出浓度和污染源强对其迁移距离产生了显著影响, 即随着重金属离子浸出浓度和污染源强的升高, 重金属离子迁移距离明显增大。

3)研石粒径的影响分析。图18为不同研石粒径级配下 $Mn^{2+}$ 迁移距离变化。由图18可知, 在不同研石粒径的影响下,  $Mn^{2+}$ 迁移距离发生显著变化, 在研石粒径为0~15、15~30、30~50 mm时,  $Mn^{2+}$ 浸

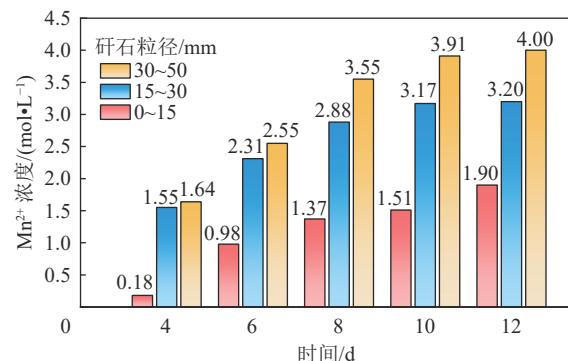
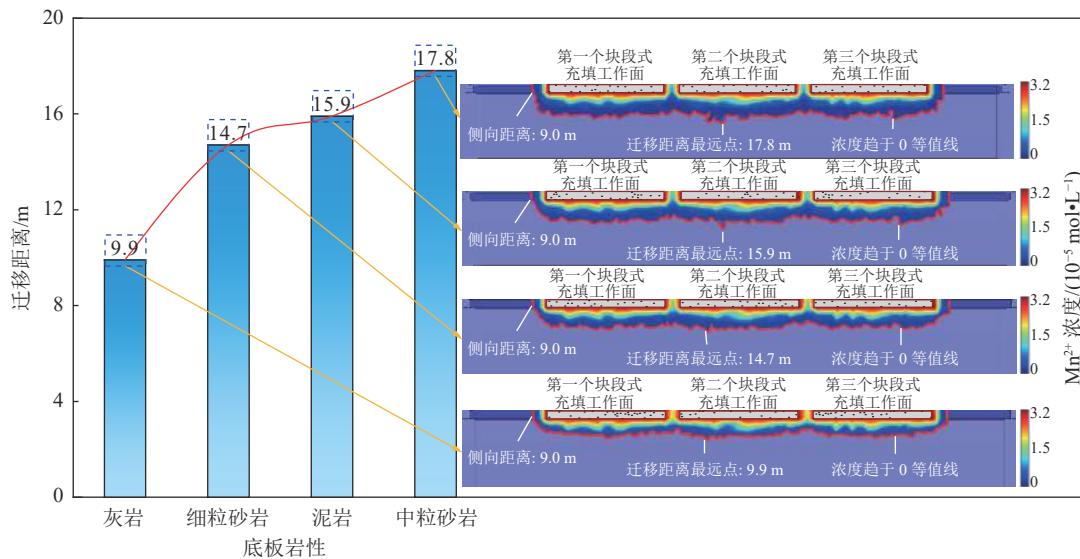
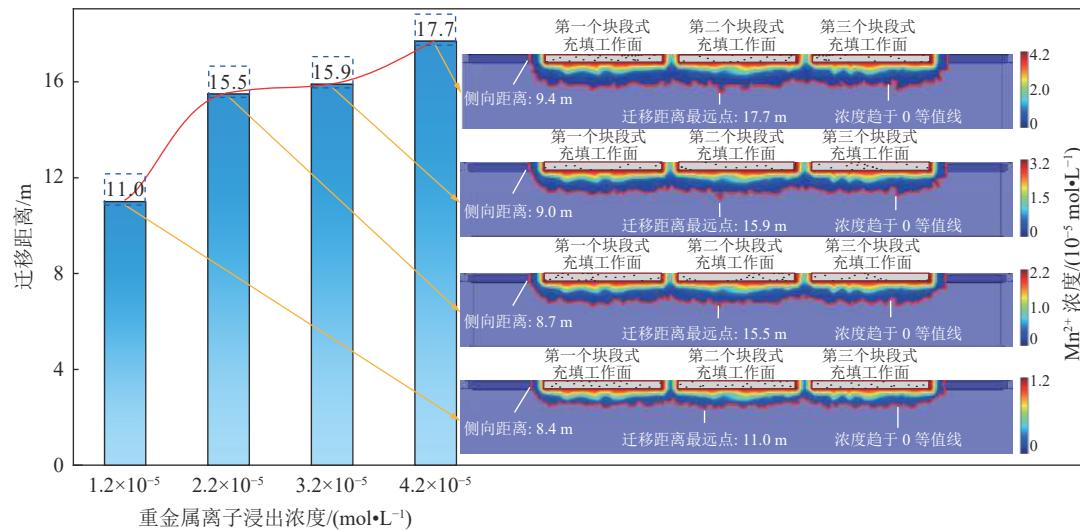
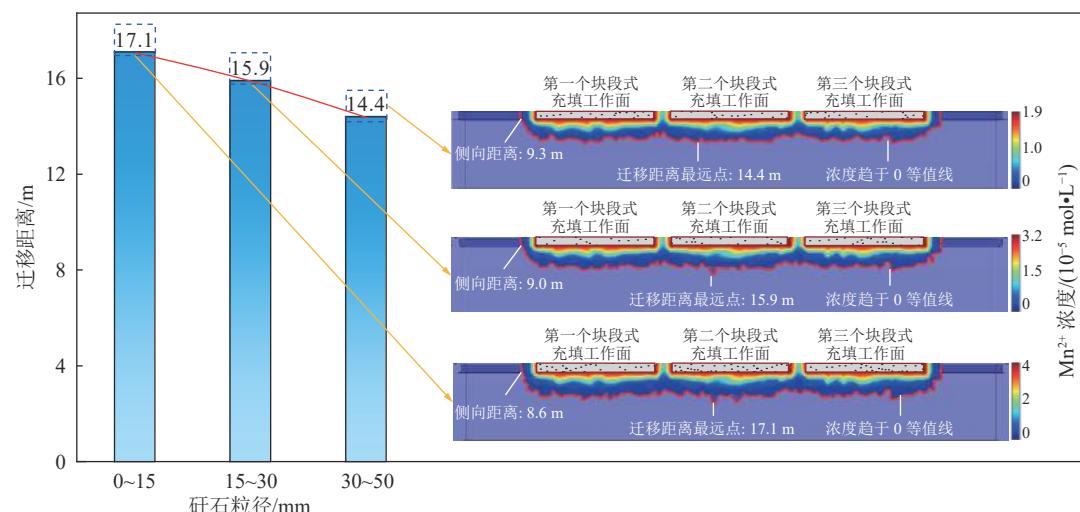
图15 不同粒径下 $Mn^{2+}$ 浸出浓度Fig.15  $Mn^{2+}$  leaching concentration under different particle sizes

表4 模拟方案

Table 4 Simulation program

| 序号 | 底板岩性            | 重金属离子浸出浓度/(mol·L⁻¹)   | 研石粒径/mm          | 围岩应力/MPa        | 底板裂隙深度/m      | 水位高度/m          |
|----|-----------------|---|------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1  | 灰岩/细粒砂岩/泥岩/中粒砂岩 | $3.2 \times 10^{-5}$  | 15~30            | 6.5             | 0             | 3.8             |
| 2  | 泥岩              | $1.2 \times 10^{-5}$ / $2.2 \times 10^{-5}$ / $3.2 \times 10^{-5}$ / $4.2 \times 10^{-5}$ | 15~30            | 6.5             | 0             | 3.8             |
| 3  | 泥岩              | $3.2 \times 10^{-5}$  | 0~15/15~30/30~50 | 6.5             | 0             | 3.8             |
| 4  | 泥岩              | $3.2 \times 10^{-5}$  | 15~30            | 5.0/6.5/8.0/9.5 | 0             | 3.8             |
| 5  | 泥岩              | $3.2 \times 10^{-5}$  | 15~30            | 6.5             | 0/5.0/10/15.0 | 3.8             |
| 6  | 泥岩              | $3.2 \times 10^{-5}$  | 15~30            | 6.5             | 0             | 0.8/1.8/2.8/3.8 |

图 16 不同底板岩性下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化Fig.16 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under different floor lithology图 17 不同重金属离子浸出浓度下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化Fig.17 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under leaching concentration of different heavy metal ions图 18 不同矸石粒径下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化Fig.18 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under different gangue particle size

出浓度为  $4.0 \times 10^{-5}$ 、 $3.2 \times 10^{-5}$ 、 $1.9 \times 10^{-5}$  mol/L, 污染源强为 3 511.2、2 809.0、1 667.8 mol,  $Mn^{2+}$  的最远迁移距离分别为 17.1、15.9、14.4 m, 侧向迁移距离分别为 9.3、9、8.6 m, 其中, 在研石粒径从 0~15 mm 增大至 30~50 mm 时, 采空区内的  $Mn^{2+}$  浸出浓度和污染源强明显减小,  $Mn^{2+}$  最远迁移距离减小 2.7 m, 同比降低了 15.9%, 侧向迁移距离减小 0.7 m, 同比降低了 7.5%。可见重金属离子迁移距离随研石粒径的增大具有逐渐减小的趋势。

4) 围岩应力的影响分析。图 19 为不同围岩应力下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化。从图 19 中可以发现, 在  $Mn^{2+}$  的迁移过程中, 采空区  $Mn^{2+}$  浸出浓度 ( $3.2 \times$

$10^{-5}$  mol/L) 和污染源强 (2 809.0 mol) 保持不变, 随着围岩应力的不断增大,  $Mn^{2+}$  迁移距离逐渐降低, 且高围岩应力 (9.5 MPa) 作用下的  $Mn^{2+}$  最远迁移距离为 13.7 m, 侧向迁移距离为 8.5 m, 相较于低围岩应力 (5.0 MPa), 其最远迁移距离降低了 4.0 m, 同比降低了 22.6%, 侧向迁移距离降低了 1.0 m, 同比降低了 22.6%。同时, 在围岩应力的增大过程中,  $Mn^{2+}$  最远迁移距离的降幅分别为 10.2%、6.8%、5.6%, 侧向迁移距离的降幅分别为 5.3%、3.2%、2.1%, 表明随着围岩应力的不断增大, 其对重金属离子迁移的影响逐渐减小。

5) 底板裂隙深度的影响分析。图 20 为不同底

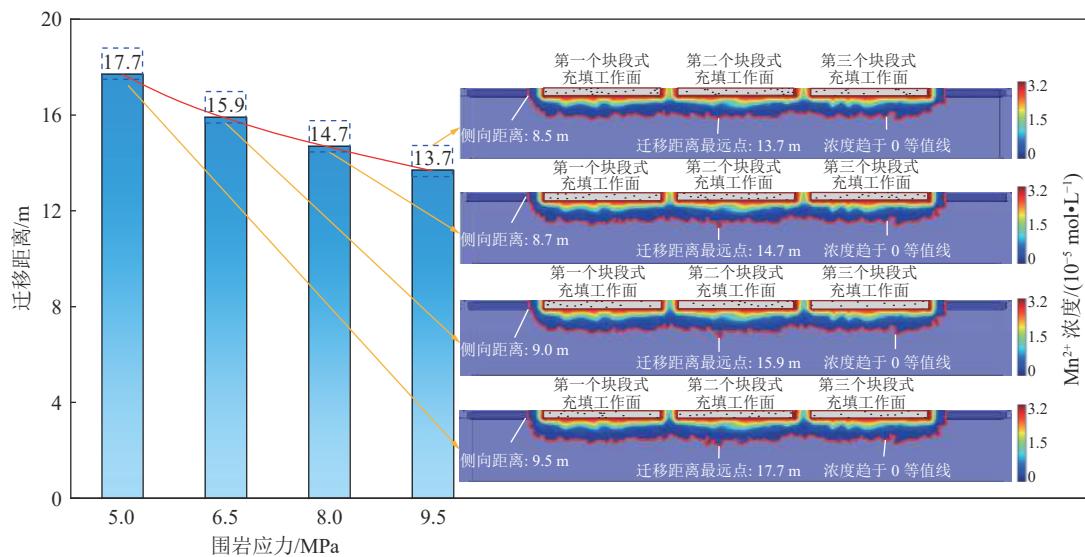


图 19 不同围岩应力下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化  
Fig.19 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under different surrounding rock stress

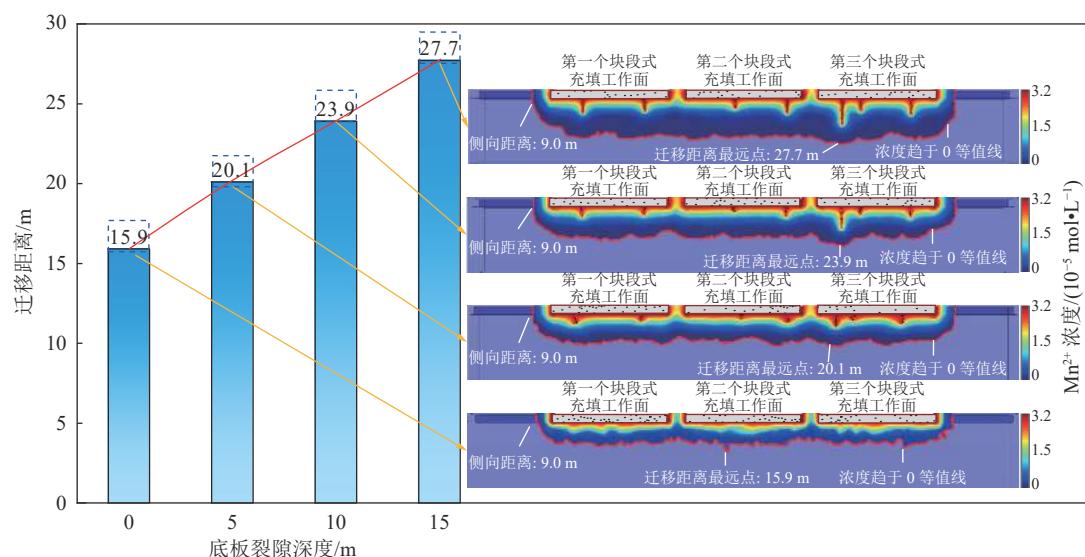


图 20 不同底板裂隙深度下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化  
Fig.20 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under different depth of floor breaks

板裂隙深度下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化图。由图 20 可知, 在  $Mn^{2+}$  浸出浓度 ( $3.2 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ ) 和污染源强 (2 809.0 mol) 不变, 而底板裂隙深度变化的情况下,  $Mn^{2+}$  最远迁移距离变化显著, 当底板裂隙深度为 0、5.0、10.0、15.0 m 时,  $Mn^{2+}$  的最远迁移距离分别为 15.9、20.1、23.9、27.7 m, 侧向迁移距离始终为 9.0 m, 其中, 在底板裂隙深度从 0 增大至 15.0 m 时,  $Mn^{2+}$  最远迁移距离增大了 11.8 m, 同比升高了 74.2%。此外, 重金属离子迁移距离最远点从第二个短壁块段式充填工作面下方转移到发育最深的裂隙下方。可见底

板裂隙深度对重金属离子的迁移具有显著影响。

6) 水位高度的影响分析。图 21 为不同水位高度下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化图。从图中可以发现, 在  $Mn^{2+}$  浸出浓度保持恒定的情况下, 水位高度为 0.8、1.8、2.8、3.8 m 时, 污染源强分别为 591.4、1 330.6、2 069.8、2 809.0 mol,  $Mn^{2+}$  最远迁移距离分别为 11.8、13.0、13.7、15.9 m, 侧向迁移距离分别为 7.8、8.1、8.6、9.0 m, 可见随着水位高度的不断增加, 污染源强在不断增大, 导致重金属离子迁移距离也随之逐渐增加。

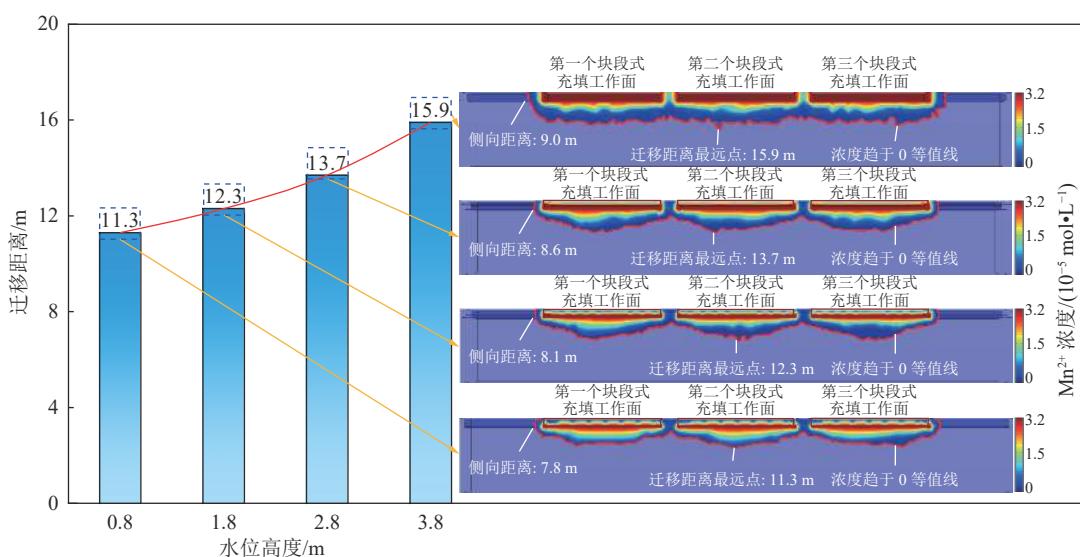


图 21 不同水位高度下  $Mn^{2+}$  迁移距离变化  
Fig.21 Change of  $Mn^{2+}$  migration distance under different water level heights

根据上述 6 种因素对重金属离子迁移的影响效果可得出: 污染源强与重金属离子浸出浓度紧密相关, 底板岩层渗透率、重金属离子浸出浓度/污染源强是影响矸石充填材料重金属离子迁移距离的关键因素, 且重金属离子迁移距离随底板岩层的渗透率、重金属离子浸出浓度/污染源强的增大而增大。此外, 在重金属离子的迁移过程中, 底板岩层受围岩应力的增大影响, 其内部的采动裂隙与孔隙不断闭合, 导致重金属离子迁移的孔隙通道减少, 渗透率逐渐降低, 进而使其迁移距离变小; 当矸石粒径越小时, 真石充填材料与矿井水的接触面积增加, 在受到矿井水的长期浸溶作用后, 导致重金属离子浸出浓度增加, 污染源强增大, 迁移距离更远; 底板裂隙深度越大, 利于重金属离子迁移的裂隙通道越长, 裂隙内的重金属离子越多, 重金属离子迁移距离越远; 当水位高度越高时, 表明矿井水越多, 被浸泡的真石充填材料增加, 真石充填材料与矿井水的接触面积增大, 重金

属离子浸出总量变多, 污染源强增加, 迁移距离更远。

## 5 矿区水资源流失-污染综合防治技术

矿区水资源的破坏问题主要集中于水资源流失与污染两方面。根据短壁块段式充填采煤水资源流失防控效果以及矸石充填材料重金属离子迁移规律的研究, 发现工作面开采参数和充填参数是决定矿区水资源流失的关键性因素, 底板岩层渗透率、重金属离子浸出浓度/污染源强是决定矿区水资源污染的关键性因素。基于此, 总结了矿区水资源流失-污染综合防治技术以保证矿区水资源的环境安全, 防治技术具体如图 22 所示。

### 5.1 水资源流失防治技术

1) 开采参数调控技术。工作面开采参数对矿区水资源流失防治的影响主要体现在块段长度和块段间保护煤柱宽度, 其中, 当块段长度越长时, 采空区的范围越大, 将导致采场上覆岩层破坏程度越高, 矿

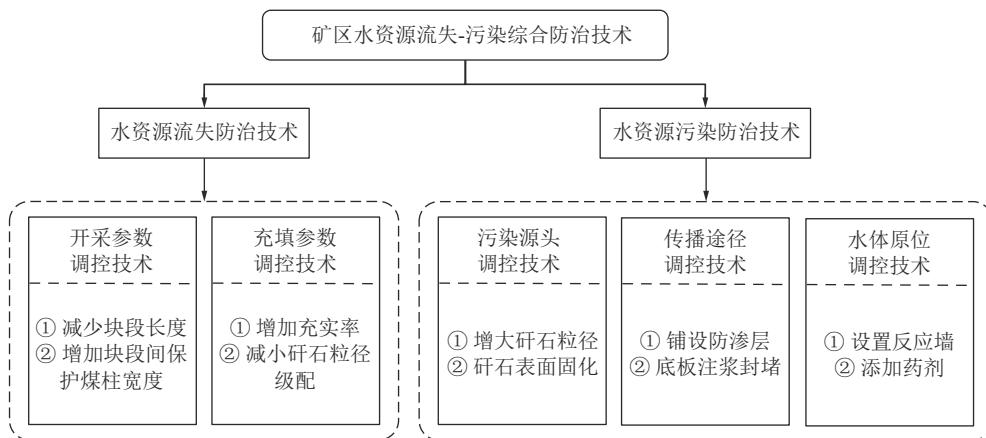


Fig.22 Comprehensive prevention technology of water resources loss - pollution in mining area

区水资源流失越严重；当块段间保护煤柱宽度越窄时，其所能承受的载荷越小，采场围岩稳定性越差，导水裂隙发育程度越强。针对这一特点，可以通过改变块段长度和块段间保护煤柱宽度的开采参数调控技术达到水资源流失防治的目的。该技术的主要内涵是在工作面开采参数设计合理的前提之下，尽可能增加块段长度和块段间保护煤柱宽度，对开采布局进行优化，降低导水裂隙带发育高度，抑制矿区水资源的流失。

2)充填参数调控技术。在短壁块段式充填采煤过程中，充填体作为承担上覆岩层载荷的主要承载体之一，其充实率的大小直接影响上覆岩层破坏范围以及最终的充填效果，此外，矸石粒径级配与充实率也紧密相关，对水资源流失防治产生间接性影响。基于此，提出充填参数调控技术，该技术一方面是根据矿井地质条件以及工作面布局，在适当增加充实率的基础之上对充实率进行合理设计，使充填体可以完全达到支撑上覆岩层载荷的目的，从而有效控制覆岩移动破坏；另一方面是通过减小矸石粒径级配，间接性地增大充填体充实率，阻止低位岩层组的垮落，确保高位岩层组的完整性，实现矿区水资源流失防治。

## 5.2 水资源污染防治技术

1)污染源头调控技术。根据矸石充填材料重金属离子迁移规律，提出以降低重金属离子浸出浓度和污染源强的污染源头调控技术，该技术包括增大矸石粒径和矸石表面固化两方面。增大矸石粒径是指在保证充实率符合要求的情况下，选择大粒径矸石作为充填材料，从而减少矸石与矿井水的接触面积，降低重金属离子浸出浓度和污染源强，限制其迁移距离；矸石表面固化是指在抛矸机将矸石材料抛

投至支巷或采硐的过程中，将水泥喷射至矸石表面，使水泥包裹矸石材料，在矸石与矿井水之间形成一道不透水隔离层，从而避免矸石与矿井水的直接接触，抑制重金属离子的浸出，降低污染源强，将重金属离子固化在矸石内部，对矿区水资源污染进行有效防治。

2)传播途径调控技术。矸石充填材料重金属离子主要在下方底板和侧向煤柱内的孔隙裂隙进行迁移运动，从而对矿区水资源造成一定污染风险，因此，根据底板岩层渗透率对重金属离子迁移的影响，提出传播途径调控技术，该技术包括铺设防渗层和底板注浆封堵2种方法，其中，铺设防渗层分为2个方面，一方面是在充填体与底板之间铺设一层由黏土物质组成的防渗层，利用黏土物质的低渗透特性，将充填体与底板隔绝，减少重金属离子迁移所需的孔隙通道，抑制重金属离子的迁移能力，另一方面则是在充填作业前，在煤柱的煤壁侧铺设土工膜，土工膜主要由聚乙烯树脂材料制成，具有防渗性能强、适应变形能力高、耐腐蚀、耐高温等特点，根据GB 50108—2008《地下工程防水技术规范》<sup>[30]</sup>，所铺设防渗层的防渗等级需保持在二级，从而能有效阻止重金属离子在煤柱和底板的迁移运动；底板注浆封堵则是通过钻孔技术将浆料注入底板裂隙中，对采动造成的底板裂隙进行封堵，降低底板岩层的渗透率，达到矿区水资源污染防治的目的。

3)水体原位调控技术。水体原位调控技术主要是针对工作面下方已污染的含水层水体和可能受污染的含水层水体，通过设置反应墙和添加药剂对含水层水体进行合理调控实现水资源的污染防治<sup>[31]</sup>。其中，设置反应墙是在工作面开采前，在工作面下方的含水层水体四周构筑可渗透反应墙，可渗透反应

墙主要由反应介质(零价铁、有机黏土等)组成,当含水层水体通过可渗透反应墙时,反应介质与水体中的重金属离子发生还原反应而达到阻截重金属离子和修复水体的目的;添加药剂是在工作面下方已受污染的含水层水体中加入化学药剂,例如添加中和药剂以中和酸性或碱性水体,去除重金属离子,添加还原剂可与水体中的重金属离子产生还原反应,从而将重金属离子沉淀可有效净化已受污染的含水层水体。

## 6 基于水资源流失-污染防治的充实率设计方法

上述研究表明,充实率对短壁块段式充填采煤水资源流失防控效果具有直接影响,同时,充实率的大小也决定了研石充填材料的粒径级配,与重金属离子的浸出迁移紧密相关。因此,提出基于水资源流失-污染防治的充实率设计方法,充实率设计流程如图23所示。

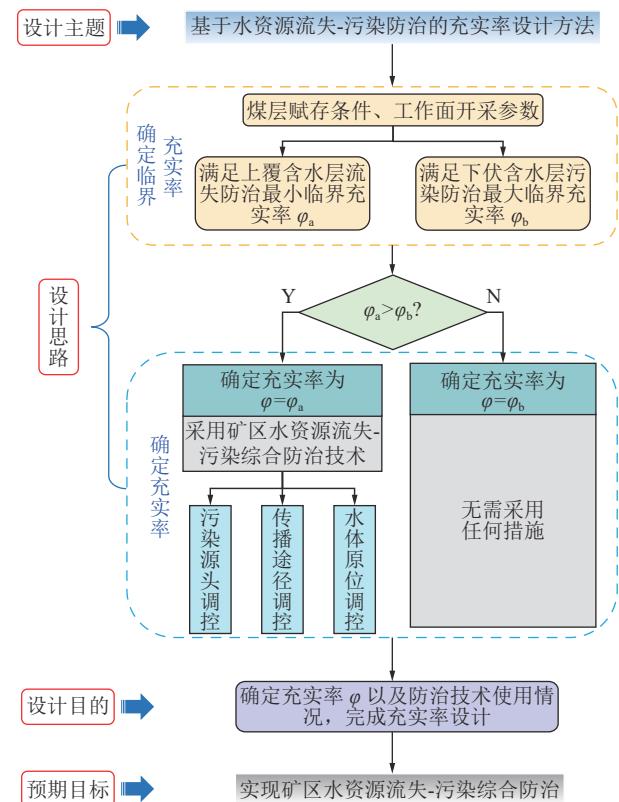


图23 充实率设计流程

Fig.23 Design flow of enrichment rate

首先,根据煤层赋存条件以及工作面开采参数,确定满足上覆含水层流失防治时的最小临界充实率 $\varphi_a$ 以及满足下伏含水层污染防治时的最大临界充实率 $\varphi_b$ 。进而对 $\varphi_a$ 与 $\varphi_b$ 的大小关系进行判断:当 $\varphi_a > \varphi_b$ 时,表明充实率的大小并不能完全兼顾水资源流失防治与污染防治,此时,以水资源流失防治为主,

确定充实率为 $\varphi = \varphi_b$ ,保证上覆含水层环境安全,同时采用矿区水资源流失-污染综合防治技术对下伏含水层进行有效保护,包括污染源头调控技术、传播途径调控技术以及水体原位调控技术,在重金属离子迁移距离较近时可只单独使用污染源头调控技术或传播途径调控技术,在重金属离子迁移距离较远时可同时采用污染源头调控技术、传播途径调控技术以及水体原位调控技术以达到水资源污染防治的目的;当 $\varphi_a \leq \varphi_b$ 时,确定充实率为 $\varphi = \varphi_b$ ,此时,充实率 $\varphi$ 可以同时保证上覆含水层与下伏含水层的安全,不需采取任何防治措施。最终,确定充实率 $\varphi$ 以及矿区水资源流失-污染综合防治技术的使用情况,从而实现矿区水资源流失-污染综合防治。

## 7 结 论

1)短壁块段式充填采煤过程中,充填体可以作为永久承载体与块段间保护煤柱共同承担上覆岩层的载荷,控制岩层的移动和破断,防止导水裂隙贯穿隔水层,且相较于长壁垮落法开采,其覆岩垂直位移与导水裂隙带高度的降幅分别高达93.1%、94.5%,可有效阻止矿区水资源流失。

2)建立了采空区研石充填材料重金属离子迁移模型,揭示了研石充填材料对水资源的污染机理,即在渗流、浓度、应力的耦合作用下,研石充填材料重金属离子以矿井水为载体,在重力势能和水头压力的驱动下沿着煤柱侧向以及底板下方进行迁移运动,对矿区水资源造成了一定污染风险。

3)基于研石充填材料对水资源的污染机理,阐明了研石充填材料重金属离子迁移规律:污染源强与重金属离子浸出浓度紧密相关,底板岩层渗透率、重金属离子浸出浓度/污染源强是影响研石充填材料重金属离子迁移距离的关键因素,且重金属离子迁移距离随底板岩层的渗透率、重金属离子浸出浓度/污染源强、底板裂隙深度及水位高度的增大而增大,随研石粒径以及围岩应力的增大而减小。

4)总结了矿区水资源流失-污染综合防治技术,包括开采参数调控技术、充填参数调控技术、污染源头调控技术、传播途径调控技术以及水体原位调控技术,并以充实率作为关键点提出了基于水资源流失-污染防治的充实率设计方法,实现矿区水资源流失-污染综合防治。

### 参考文献(References):

- [1] 郭文兵,赵高博,杨伟强,等.高耸构筑物采动变形特征与地基精

- 准注浆加固机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1908–1920.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, YANG Weiqiang, et al. Deformation characteristics of high-rise structures due to coal mining and their precise grouting reinforcement mechanisms[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1908–1920.
- [2] 张彦禄, 王步康, 张小峰, 等. 我国连续采煤机短壁机械化开采技术发展40a与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 86–99.
- ZHANG Yanlu, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Forty years development and future prospect on mechanized shortwall mining technology with continuous miner in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 86–99.
- [3] 曹鑫. 唐口煤矿深部充填开采地表变形规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CAO Xin. Study on surface deformation law of deep filling mining in Tangkou Coal Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [4] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2010.
- [5] 高保彬, 刘云鹏, 潘家宇, 等. 水体下采煤中导水裂隙带高度的探测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3384–3390.
- GAO Baobin, LIU Yunpeng, PAN Jiayu, et al. Delection and analysis of height of water flowing fractured zone in underwater mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014, 33(S1): 3384–3390.
- [6] SUN Kui, FAN Limin, XIA Yucheng, et al. Impact of coal mining on groundwater of Luoh Formation in Binchang mining area[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(1): 88–102.
- [7] 张云, 曹胜根, 郭帅, 等. 含水层下短壁块段式采煤导水裂隙带高度发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 106–111.
- ZHANG Yun, CAO Shenggen, GUO Shuai, et al. Study on the height of fractured water-conducting zone under aquifer for short wall blocking mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 106–111.
- [8] WU Qiang, SHEN Jianjun, LIU Weitao, et al. A RBFNN-based method for the prediction of the developed height of a water-conductive fractured zone for fully mechanized mining with sublevel caving[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(7): 1–9.
- [9] LI Jiayan, WANG Jinman. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
- [10] XUE Qiang, LU Haijun, ZHAO Ying, et al. The metal ions release and microstructure of coal gangue corroded by acid-based chemical solution[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(7): 3235–3244.
- [11] 张云, 曹胜根, 来兴平, 等. 短壁块段式充填采煤覆岩导水裂隙发育机理及控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1086–1092.
- ZHANG Yun, CAO Shenggen, LAI Xingping, et al. Study on the development mechanism and control of water-conducting frac-
- tures in short-wall block backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1086–1092.
- [12] 周茂普. 连续采煤机块段式开采工艺与围岩控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- ZHOU Maopu. Research on continuous mining methods and rock control technology[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2014.
- [13] 曹胜根, 曹洋, 姜海军. 块段式开采区段煤柱突变失稳机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 907–913.
- CAO Shenggen, CAO Yang, JIANG Haijun. Research on catastrophe instability mechanism of section coal pillars in block mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 907–913.
- [14] 张云, 曹胜根, 来兴平, 等. 短壁块段式采煤覆岩导水裂隙发育力学特性分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 551–560.
- ZHANG Yun, CAO Shenggen, LAI Xingping, et al. Analysis on the mechanical properties of water-conducting fractures development during the shortwall block mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 551–560.
- [15] BAI Haibo, MA Dan, CHEN Zhanqing. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars[J]. Engineering Geology, 2013, 164: 101–106.
- [16] 董霁红, 卞正富, 王贺封. 矿山充填复垦场地重金属含量对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 37(4): 531–536.
- DONG Jihong, BIAN Zhengfu, WANG Hefeng. Comparison of heavy metal contents between different reclaimed soils and the control soil[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 37(4): 531–536.
- [17] LI Meng, RUI Zuo, WANG Jinshen, et al. Apportionment and evolution of pollution sources in a typical riverside groundwater resource area using PCA-APCS-MLR model[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, 218: 70–83.
- [18] 刘建功, 赵利涛. 基于充填采煤的保水开采理论与实践应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1545–1551.
- LIU Jiangong, ZHAO Litao. Theory of water based protection and practice application in mining on the backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1545–1551.
- [19] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141–150.
- LIU Jiangong, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141–150.
- [20] 马立强, 张东升, 王烁康, 等. “采充并行”式保水采煤方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 62–69.
- MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, WANG Shuokang, et al. Study on the method of water conservation and coal mining in para-llel with mining and charging[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 62–69.
- [21] MA Liqiang, JIN Zhiyuan, LIANG Jimeng, et al. Simulation of water resource loss in short-distance coal seams disturbed by repeated mining[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5653–5662.
- [22] 李猛, 张吉雄, 邓雪杰, 等. 含水层下固体充填保水开采方法与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 127–133.

- LI Meng, ZHANG Jixiong, DENG Xuejie, et al. Method of water protection based on solid backfill mining under water bearing strata and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 127–133.
- [23] 李猛, 吴晓刚, 姜海强, 等. 基于充实率控制的导水裂隙带发育高度研究[J]. 中国煤炭, 2014, 40(1): 50–57.
- LI Meng, WU Xiaogang, JIANG Haiqiang, et al. Study on development height of water fracture zone based on the control of filling rate[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2014, 40(1): 50–57.
- [24] 肖利萍, 梁冰, 陆海军, 等. 煤矸石浸泡污染物溶解释放规律研究-阜新市新邱露天煤矿不同风化煤矸石在不同固液比条件下浸泡实验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 151–155, 163.
- XIAO Liping, LIANG Bing, LU Haijun, et al. Releasement of contaminants within coal gangue based on soaking experiment-A case study of coal gangue in Xinqiu Coal Mine, Fuxin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard & Control, 2006, 17(2): 151–155, 163.
- [25] 肖利萍. 煤矸石淋溶液对地下水系统污染规律的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- XIAO Liping. Study on pollution laws of coal gangue leaching solution to groundwater system[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007.
- [26] 杨建, 陈家军, 王心义, 等. 演马矿煤矸石堆周围环境中重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 90–96.
- YANG Jian, CHEN Jiajun, WANG Xinyi, et al. Yamma coal mine coal gangue in the surrounding environment of the distribution characteristics of heavy metals[J]. Environmental Science Research, 2008, 21(1): 90–96.
- [27] 王岩, 梁冰. 煤矸石淋滤液中多组分溶质对地下水污染的研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(2): 81–86.
- WANG Yan, LIANG Bing. Study on the multi-component solute in coal gangue leachate for groundwater pollution[J]. Journal of Hunan university of science & technology (natural science edition), 2006, 21(2): 81–86.
- [28] SY/T5163-2018. 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社.
- [29] GB/T 14848-2017. 地下水质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- [30] GB 50108-2008. 地下工程防水技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社.
- [31] 张豪哲, 李文, 杜明泽, 等. 闭坑矿山地下水污染防治技术研究现状和展望[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 170–176.
- ZHANG Haozhe, LI Wen, DU Mingze, et al. Progress and prospect of groundwater pollution control technology for closed mine[J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 170–176.