



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

深部开采高盐矿井水减排治理技术体系构建与实现

张雷 徐智敏 袁慧卿 孙亚军 郭娟 陈天赐 李鑫 刘琪

引用本文:

张雷, 徐智敏, 袁慧卿, 等. 深部开采高盐矿井水减排治理技术体系构建与实现[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 208–219.
ZHANG Lei, XU Zhimin, YUAN Huiqing. Construction and implementation of emission reduction and treatment technology system in deep mining of high salt mine water[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 208–219.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0876>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高矿化度矿井水节能脱盐新技术

New energy-saving desalination technology of highly-mineralized mine water

煤炭科学技术. 2018(9) [http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/\\${suggestArticle.articleId}](http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/${suggestArticle.articleId})

基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统构建

Construction of pumped storage peak shaving system for mine water based on abandoned coal mine goaf

煤炭科学技术. 2018(9) [http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/\\${suggestArticle.articleId}](http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/${suggestArticle.articleId})

高矿化度矿井水纳滤膜适度脱盐技术研究

Research on technology and process for moderate desalination of high-salinity mine water by nanofiltration

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 208–214 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.029>

深部开采矿井水害区域治理关键技术研究及发展

Research and development on key technology of mine water disaster regional control in deep mine

煤炭科学技术. 2017(8) [http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/\\${suggestArticle.articleId}](http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/${suggestArticle.articleId})

高矿化度矿井水零排放工艺研究

Research on zero discharge process of highly-mineralized mine water

煤炭科学技术. 2018(9) [http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/\\${suggestArticle.articleId}](http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/${suggestArticle.articleId})

煤矿矿井水零排放处理技术与应用

Zero liquid discharge treatment technology and application for coal mine drainage water

煤炭科学技术. 2017(11) [http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/\\${suggestArticle.articleId}](http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/${suggestArticle.articleId})



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张雷, 徐智敏, 袁慧卿, 等. 深部开采高盐矿井水减排治理技术体系构建与实现[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 208–219.

ZHANG Lei, XU Zhimin, YUAN Huiqing, *et al.* Construction and implementation of emission reduction and treatment technology system in deep mining of high salt mine water[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 208–219.

深部开采高盐矿井水减排治理技术体系构建与实现

张雷^{1,2}, 徐智敏^{3,4}, 袁慧卿³, 孙亚军^{3,4}, 郭娟³, 陈天赐³, 李鑫³, 刘琪³

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿, 江苏 徐州 221616; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 矿山水害防治技术基础研究国家级专业中心实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:近年来, 随着我国煤矿矿井水排放标准的不断提高, 针对高盐矿井水处理及资源化利用方面的技术创新需求进一步提升。减少矿井水尤其是高盐矿井水的排放、提高矿井水的可利用性是提高煤炭生产安全、加快绿色矿山建设、促进煤炭企业可持续发展的重要保障。针对张双楼煤矿深部开采过程中面临的矿井水涌水量大、矿化度高、处理利用成本高等问题, 提出了该矿高盐矿井水以“减量、储存、净化”为核心的减排治理技术体系, 即: 通过底板涌水封堵减量技术对已有残余涌水点进行减量封堵, 从源头上减少高盐矿井水的排放; 通过矿井水深层回灌储存与保水修复技术将高盐矿井涌水进行深部转移储存, 助力实现矿井水“零排放”与深层地下水的保水修复; 通过采空区煤岩自净与调蓄技术进行高盐矿井水的煤岩自净预处理, 并进一步通过地面深度脱盐处理技术, 实现高盐矿井水净化处理以及资源化利用或达标排放。同时, 结合该矿的水文地质背景、矿井涌水规律以及矿井水处理利用现状, 对以上技术在该矿应用实现的可行性和途径进行了综合分析评价: 通过底板涌水封堵减量技术的实施, 实现了 188 m³/h 的底板四灰涌水减量治理; 通过深层回灌储存技术, 西翼采区能够实现对奥灰含水层 200 m³/h 的回灌储存与保水修复; 通过采空区煤岩自净预处理与调蓄技术, 东翼采区可蓄存约 165 万 m³ 矿井水并进行特征组分的井下预处理; 通过地面深度脱盐处理技术, 矿井水处理能力达到 700 m³/h, 每年可减少盐排量 14 271.5 t。最后, 提出并形成了张双楼煤矿高盐矿井水减排治理的综合技术思路。张双楼煤矿高盐矿井水减排治理技术体系的提出, 可为该矿及其他类似深部开采煤矿高盐矿井水的减量治理以及资源化利用提供理论基础与技术借鉴依据。

关键词: 高盐矿井水; 减量治理; 回灌; 矿井水调蓄; 节能减排

中图分类号: TD74

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)12-0208-12

Construction and implementation of emission reduction and treatment technology system in deep mining of high salt mine water

ZHANG Lei^{1,2}, XU Zhimin^{3,4}, YUAN Huiqing³, SUN Yajun^{3,4}, GUO Juan³, CHEN Tianci³, LI Xin³, LIU Qi³

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Zhangshuanglou Coalmine, Xuzhou Coal Mining Group Corporation, Xuzhou Jiangsu 221616, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Fundamental Research Laboratory for Mine Water Hazards Prevention and Controlling Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: With the improvement of mine water discharge standards, the demand for technological innovation in mine water treatment and resource utilization has been further enhanced. Reducing the discharge of mine water, especially high salt mine water, and improving the availability of mine water are important guarantees for improving coal production safety, accelerating green mine construction, and promoting sustainable development of coal enterprises. Focused on the problems of high water inflow, high salinity and high cost of treat-

收稿日期: 2023-06-14 责任编辑: 常琛 DOI: 10.12438/cst.2023-0876

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFC1805400); 国家自然科学基金面上资助项目 (42172272); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2020ZDPY0201)

作者简介: 张雷 (1980—), 男, 山东微山人, 博士研究生。E-mail: 18332762@qq.com

通讯作者: 孙亚军 (1963—), 男, 安徽涡阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: syj@cumt.edu.cn

ment and utilization during deep mining of Zhangshuanglou Coalmine, a treatment technology system of mine water emission reduction in high salt mine with “reduction, storage and purification” as the core was put forward: Blocking the water inflow points through the floor water inflow blocking reduction technology to reduce the discharge of high salt mine water from the source; Through the deep reinjection technology of mine water, some mine water will be transferred and stored in depth to realize the “zero discharge” and water conservation of mine water; Through the technology of coal and rock self-purification in goaf, the high-salt mine water is carried out by regulation and storage; Through surface deep desalting treatment technology, high salt mine water purification treatment, resource utilization or standard discharge can be realized. Further, combined with the hydrogeological background of the mine, the law of mine water gushing and the status quo of mine water treatment and utilization, the feasibility of the application of the above technology in the mine was comprehensively analyzed and evaluated: Through the implementation of floor water gushing plugging reduction technology, the reduction treatment of 188 m³/h floor four ash gushing water was realized; Through deep reinjection technology, 200 m³/h recharge storage and water conservation restoration of Ordovician limestone aquifer can be realized in the west wing mining area; About 1.65 million m³ of mine water can be stored in the east wing mining area through self-cleaning pretreatment of coal and rock in goaf and regulation storage technology, and the underground pretreatment of characteristic components can be carried out; Through the surface deep desalination treatment technology, the mine water treatment capacity reaches 700 m³/h, and the annual salt discharge can be reduced by 14 271.5 t. Finally, the comprehensive technical idea of water emission reduction treatment of high salt mine in Zhangshuanglou Coalmine is put forward. The proposal of the water emission reduction treatment technology system of the high-salt mine in Zhangshuanglou Coalmine can provide a theoretical basis and technical reference for the water reduction treatment and resource utilization of high-salt mine in Zhangshuanglou Coalmine and other similar deep mining coal mines.

Key words: high salt mine water; reduction governance; recharge; mine water storage; energy saving and emission reduction

0 引 言

在煤炭开采过程中,为保障安全生产而开展的必要疏排水工程必然产生大量矿井水^[1]。在 2022 年,我国煤矿产生的矿井水超过 70 亿 m³,这些矿井水如果不能得到有效处置或资源化利用,不仅白白浪费大量宝贵的地下水资源,还可能引发一系列的水环境效应或生态环境风险。为此,国务院颁发的《水污染防治行动计划》(简称“水 10 条”)就明确将矿井水资源保护列为我国煤炭工业绿色可持续发展和我国生态文明建设中的重大关键问题^[2]。同时,我国总体上属于贫水国家,2021 年全国水资源总量 29 638.2 亿 m³(水利部 2021 年水资源公报),地下水资源量 8 195.7 亿 m³,人均占有量仅为全世界的 1/4^[3]。在我国水资源短缺的情况下,矿井水作为一种非常规水资源,加强对矿井水的减排与治理是未来发展的必然选择^[4]。据统计,我国吨煤开采产生矿井水约 2.1 m³,每年矿井水排水量超过 70 亿 m³^[5-6]。在我国目前的矿井水分类中,一般根据矿井水的水质可分为洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水(或高盐矿井水)、酸性矿井水、含特殊污染物矿井水这 5 类。高盐矿井水是指全盐量高于 1 000 mg/L 的矿井水,若不加处理直接排放可能产生一系列的水环境效应。根据笔者课题组前期对全国矿井水水质现状的统计结果,高盐矿井水在我国矿井水中分布较为普遍,主要分布在水资源较为短缺的西北型煤

田以及华北型煤田。例如,位于西北型煤田的新疆大南湖矿区矿井水含盐量最高可达 40 g/L、位于宁夏的宁东矿区一般可达 3~12 g/L;而位于华北型煤田的鲁西、徐州等矿区矿井水的含盐量也总体较高,例如位于鲁西地区的新巨龙煤矿一般在 4~8 g/L、李楼煤矿高达 4 g/L,而位于徐州丰沛矿区目前在产的张双楼煤矿、姚桥煤矿、徐庄煤矿、龙东煤矿矿井水含盐量一般在 4~5 g/L,属于典型的高盐矿井水水质特征。另据统计,在我国上述矿区,尤其是华北型煤田 2022 年产生的约 20 亿 t 矿井水中,高盐矿井水约占 6 亿 t,占比约 30%。可见,高盐矿井水问题在我国西北地区、华北地区较为典型,开展相关的针对性治理研究意义重大^[7]。可见,在华北地区,大量深部开采煤矿面临的高盐矿井水减排治理问题亟待开展,实现高盐矿井水的减量治理和资源化利用是实现煤炭企业高质量发展和矿区生态文明建设双重目标实现的重要推力^[8]。然而,高盐矿井水的治理或处理成为众多煤矿面临的重大难题,高昂的排放费用、巨额的矿井水处理成本、排放去向的选择等均成为煤矿企业需要解决的痛点,因此,若能实现高盐矿井水的减排治理,将大幅降低煤矿企业的经济负担。

近年来,国内外学者在矿井水减排与治理研究方面取得了一系列成果^[9-14],对于高盐矿井水的治理思路主要集中在脱盐处理排放及转移存储 2 方面。孙亚军等^[15]在鄂尔多斯盆地东部某矿实施回灌试验井工程后,获取了矿井水高压持续回灌封存的水文

于煤层开采对四灰含水层的长期疏降,断层带西侧目前尚未揭露或人工疏降,基于矿井已揭露的四灰含水层水文地质参数及井下采掘资料,当采掘活动延伸至 13 采区西翼后,预计该区域底板四灰涌水量将达到约 $200 \text{ m}^3/\text{h}$,以疏降至突水系数 $<0.06 \text{ MPa/m}$ 为 13 采区西翼区域疏放目标,利用非稳定流 Jacob 式(式(1)),对该区域疏降情况进行预计,具体见表 2。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2S} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2S} \quad (1)$$

式中, s 为观测点的水位降深, m ; Q 为放水孔的流量, m^3/h ; T 为导水系数, m^2/h ; t 为自放水开始到计算时刻的时间, h ; r 为计算点到放水井的距离, m ; S 为含水层的贮水系数,无量纲。

表 1 近 5 年矿井涌水量情况
Table 1 Water inflow of mine in recent 5 years

年份	2018	2019	2020	2021	2022
月均涌水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	769	748	671	695	540

表 2 13 采区西翼四灰含水层疏降情况预计
Table 2 The dewatering of four limestone aquifer in the west wing of 13 mining area

时间/ t/d	总疏降强度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	总降深/ m
1	200	132.8
2		141.6
5		146.8
7		153.3
14		157.6
20		170.9
40		179.8
60		184.9
⋮		⋮
120		193.7
180		198.9

根据上表预算结果可以看出,当井下采掘活动至 13 采区西翼,由于矿井四灰含水层富水的区块化特征及该区域含水层补给条件情况,底板四灰含水层在 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 的较大疏降强度下,初期便表现出较大的水位降深,后期降深逐渐下降,但仍需约 180 d 时间可将含水层疏降至安全水头以下。

目前,张双楼煤矿总体矿井涌水量较大,尤其是西翼 13 采区尚未揭露,初步预计该采区单个工作面疏降水量达到 $200 \text{ m}^3/\text{h}$,且在 180 d 疏降周期后方能

实现安全开采,这必将导致该矿在 13 采区西翼揭露后矿井涌水量的进一步增大。

1.4 矿井水处理利用现状

据统计,2022 年张双楼煤矿矿井涌水量达到 490 万 t ,矿化度一般为 $3\,112 \sim 4\,418 \text{ mg/L}$,其中 156 万 t 矿井水用于井下防尘喷淋,其余 334 万 t 矿井水需排至地面工业广场水处理厂处理后排放,由于张双楼煤矿矿井水的全盐量大部分为较难处理的 SO_4^{2-} , Cl^- 与 Na^+ ,使矿井水处理成本高达 15 元/ t 以上。矿井现有的矿井水处理厂采用调节+微涡旋澄清工艺,矿井水处理站采用加药混凝、沉淀处理工艺,对矿井水中的悬浮物、化学需氧量进行去除,实现了矿井水的全处理、全达标排放。

综上所述,张双楼煤矿目前井下涌水量大、矿化度高、矿井水处理成本巨大。此外,由于矿井开采水平向深部拓展后,采掘活动受底板高承压含水层的影响将进一步加剧,尤其是西翼采区回采后将进一步增大矿井涌水量,从而导致矿井排水费用及处理成本进一步升高。因此,亟待研究和解决高盐矿井水的低成本减排及治理关键技术,为矿井高盐矿井水的低成本处理提供技术依据。

2 高盐矿井水治理的技术框架

目前,张双楼煤矿高盐矿井水达标排放和资源化利用的关键是要进行除盐处理,但仅靠矿井水的深度处理一条途径必然导致矿井的经济成本大增,可见,通过必要的技术途径实现矿井涌水的源头减量,进而减少矿井水的总排放量同样至关重要。因此,有必要构建一套减少矿井总排水量、保护矿区地下水资源、降低高盐矿井水处理成本的技术框架体系,进一步优化该矿高盐矿井水的处理途径。

2.1 技术思路及框架

针对张双楼煤矿深部开采过程中面临的矿井涌水量大、矿化度高、处理利用费用高等问题,提出该矿高盐矿井水以“减量、储存、净化”为核心的减排治理技术体系,即对井下残余涌水点进行源头封堵减量,对高盐矿井水进行回灌储存并实现保水修复,利用井下采空区煤岩自净以及地面脱盐深度处理实现高盐矿井水的净化处理,提高高盐矿井水的可利用性,从而形成高盐矿井水的减排治理技术体系,其技术框架结构如图 3 所示。

2.2 主要技术原理

2.2.1 底板涌水封堵减量技术

底板涌水封堵减量技术是一种源头减少矿井涌

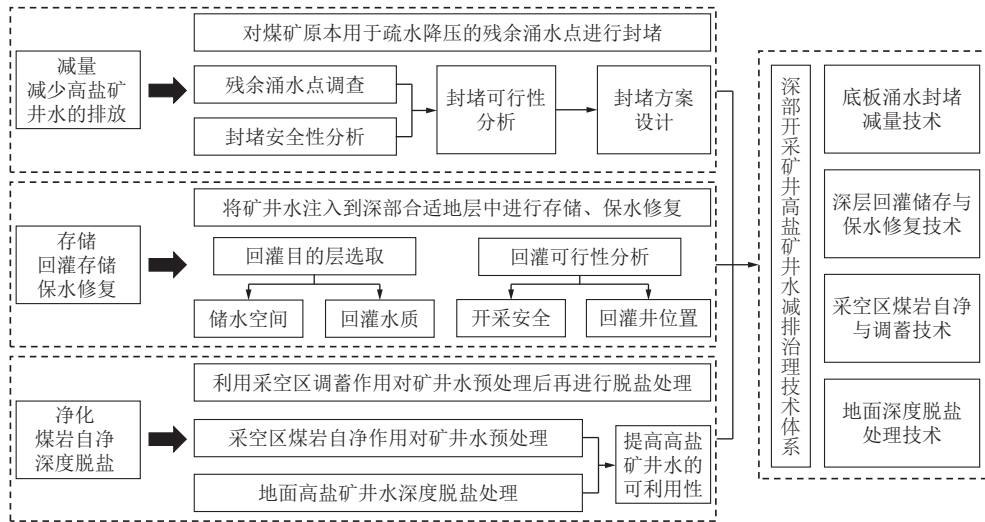


图 3 高盐矿井水的减排治理技术思路与框架

Fig.3 Technical system for emission reduction and treatment of high salt mine water

水量的技术手段,主要方式是将原有井下疏水降压的残余涌水点进行源头封堵。但底板涌水的封堵需要保证底板含水层水位恢复抬升后的突水系数不超过 0.1 MPa/m,并且水位抬升范围不会影响到周围生产工作面^[18-19],以保证煤矿开采的安全性,如图 4 所示。运用底板涌水封堵减量技术需满足的条件有:

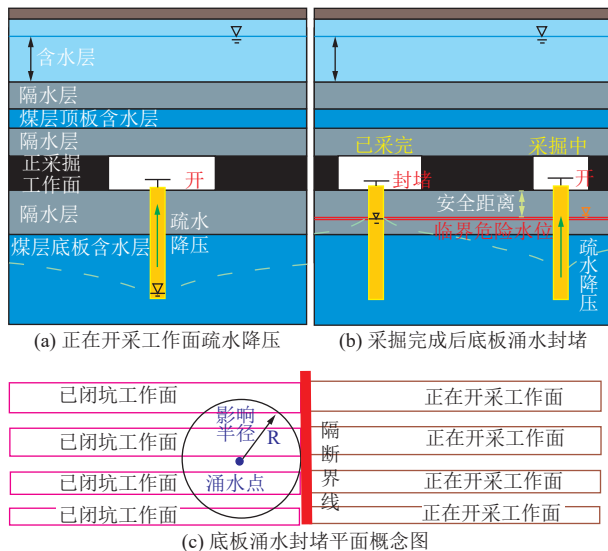


图 4 底板涌水封堵减量技术示意

Fig.4 Schematic of water inrush plugging and reduction technology of floor

①煤层底板含水层富水性相对较弱,在前期疏水降压工作中区域水位已有大幅降低;②与邻近含水层水力联系差;③当前底板含水层水压远小于安全水压。

2.2.2 深层回灌储存与保水修复技术

目前,针对高盐矿井水处理的工艺一般较为复杂、成本高、投资巨大^[20]。为促进实现矿井水资源

的“零排放”和低成本处理,提出一种高盐矿井水深层回灌储存与保水修复技术,将高盐矿井水通过高压泵及回灌井注入到深部合适地层中,以实现矿井水资源保护和绿色矿山建设的目标,技术原理如图 5 所示。该技术的前提是回灌目的层的选取,以防止引起顶底板涌水等水害问题。矿井水深层回灌技术成功与否,取决于 2 个方面,①回灌目的层的厚度和透水性,②回灌的水质^[21]。选取回灌目的层时,选取对煤矿开采安全基本没有影响的深部含水层或储水空间;选择构造相对简单的区域,没有贯通上下含水层的深大断裂^[22];选择和水资源利用没有关系的含水层或储水空间;选择与周围水文地质单元水力联系弱的含水层或储水空间。回灌的水质通常要优于回灌目的层的水质,主要是为了防止回灌目的层被污染。回灌还应当对回灌参数指标,如岩性、裂隙率、渗透系数、贮水系数、岩石力学相关参数等^[23-24]进行专题分析。

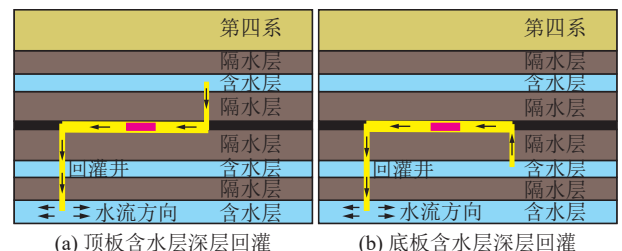


图 5 矿井水深层回灌顶板含水层和底板含水层示意

Fig.5 Schematic of the roof aquifer and floor aquifer of the deep reinjection of mine water

2.2.3 采空区煤岩自净与调蓄技术

采空区矿井水调蓄技术是指利用采空区进行水资源转移储存,同时利用采空区煤岩自净作用达到

初步净化矿井水中特征污染物的目的,适用于高盐矿井水的治理。该技术可实现井下矿井水的预处理,可以根据煤矿涌水量波动情况,进行控制性储水和放水,发挥涌水量的调蓄作用。为保证煤矿开采安全,在进行采空区矿井水调蓄技术地址选择时,需考虑 4 个技术依据^[25]: ①需考虑采空区是否能够储存矿井开采产生的涌水;②选择构造相对较少、地层标高相对较低的区域;③选择安全性高、工程费用低的区域;④距地面矿井水处理站尽可能近。采空区矿井水调蓄概念如图 6 所示。

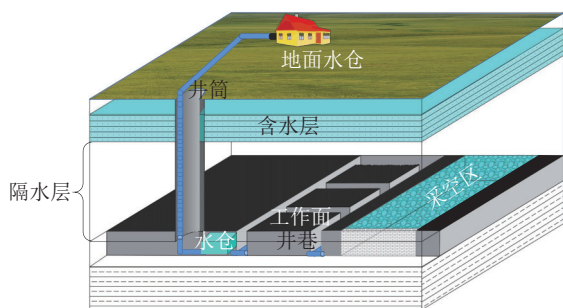


图 6 采空区矿井水调蓄简图

Fig.6 Schematic of mine water regulation and storage in goaf

2.2.4 地面深度脱盐处理技术

地面深度脱盐处理技术是一种降低矿井水中硫酸盐和全盐量最直接的手段,使水质达到矿井水外排要求。该技术的关键是脱盐,主要有药剂法、蒸馏法、离子交换法、膜分离法和生物处理法等,据调研,在鲁西、徐州矿区深部开采煤矿针对高盐矿井水的处理成本普遍较高,一般超过 10 元/t。其中,药剂法通过投加药剂使溶解盐形成沉淀,从而达到除盐的目的。蒸馏法利用热能达到脱盐淡化的目的,适用于含盐量大于 4 000 mg/L 的矿井水。离子交换法主要是通过离子交换剂交换水中溶解离子,适用于含盐量 100~300 mg/L 的矿井水。膜分离法是在压力的作用下,将水中的不同离子通过膜以进行分离,主要有反渗透和纳滤技术等。

3 高盐矿井水减排治理技术的实现

长期以来,张双楼煤矿一般采用将井下涌水排出地面后再进行深度处理,成本投入巨大。为降低高盐矿井水的处理成本,张双楼煤矿近年来一直探索和寻求新方法、新技术以改善高盐矿井水的处理现状,在上述高盐矿井水治理技术框架体系的指导下,目前已开展实施了井下残余涌水点的减量封堵,应用效果显著。因此,还亟待开展相关技术体系的

进一步论证与实施,以减少高盐矿井的外排水量及治理成本。

3.1 底板涌水封堵减量技术的实现

3.1.1 残余涌水点概况

张双楼煤矿针对底板四灰水的治理一直采取积极、主动的“疏水降压”防治水手段,自 2005 年以来,张双楼矿已累计疏放四灰水约 2 700 万 m^3 ,四灰水位明显下降。目前张双楼煤矿 22、23 采区已采掘完成,在有效保障现有采掘工程安全生产的前提下,部分底板涌水点存在封堵或减量治理的可行性。

通过对张双楼煤矿井下实地调查,目前已采掘完成工作面内共有 9 处出水钻孔,总涌水量共计 240 m^3/h 。通过对井下涌水点水质特征进行分析,已明确涌水点补给源均为底板四灰含水层,存在封堵可行性^[26]。

3.1.2 封堵可行性评价及方案

在明确各涌水点的涌水规律及补给水源的基础上,对于影响半径内无采掘工作面的涌水点进行全封堵设计。对于影响半径内有计划采掘工作面的涌水点,根据其所处水文地质单元的水文地质参数特征,建立了计算四灰流场的地下水流数学模型,对涌水点附近回采工作面(9800 工作面)下隅角处水位抬升情况进行了预测评价。不同减量治理方案下水位恢复情况如图 7 所示。

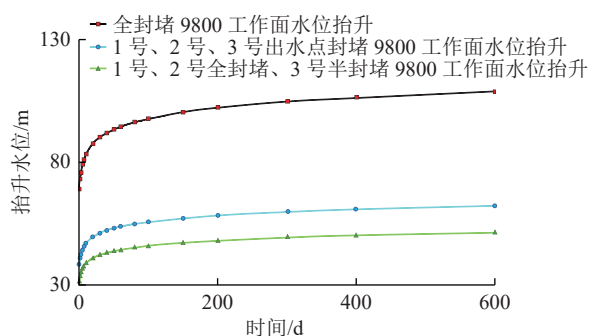


图 7 不同减量治理方案下水位恢复预测趋势

Fig.7 Prediction trend of water level recovery under different reduction control schemes

根据不同封堵条件下四灰水位抬升情况,在保障工作面安全生产(底板四灰带压开采不超过 1 MPa 的原则)的前提下设计出最佳封堵方案:①对不影响采掘工作面的涌水点进行 100% 完全封堵;②对影响采掘工作面的涌水点进行引流封堵,即封堵后预留一定的放水量以消减水压。对完全封堵钻孔进行注浆封堵,其余钻孔采用修复套管和孔口装置的治理措施,做到各涌水点“水量可放可控、水压

实时监测”。上述方案所设计的四灰涌水点理论上的最大可封堵水量为 188 m³/h,大幅减少了矿井底板四灰的涌水量。

此外,结合各采区近 5 年的采掘计划安排,拟采取分阶段对各四灰涌水点进行减量治理的思路,即先封堵对采掘活动无影响的涌水点,再分批次封堵有限影响涌水点,最后预采掘活动结束后封堵剩余涌水点。

3.1.3 减排治理效果

在上述评价基础上,张双楼煤矿已于 2022-05-15 封堵完成了-290 m 回风巷底板四灰疏放水钻孔,减少矿井涌水量 50 m³/h;于 2022-06-09 封堵完成了东 11 采区-500 m 大巷底板四灰疏放水钻孔,减少矿井涌水量 40 m³/h。截止目前,因上述残余涌水点的封堵减量,累计已节省高盐矿井水的排水电费、处理费用超过 1 200 万元,经济效益极为显著。

3.2 深层回灌储存与保水修复技术的实现

3.2.1 煤层底板充水含水层概况

张双楼煤矿主采 9 号煤层底板主要充水含水层为太原组四灰含水层,且经过多年疏排,四灰水位有明显下降。经过全矿区对断层、陷落柱等地质构造的多年勘察,证明开采范围内四灰含水层与下部奥陶系岩溶地层无水力沟通,水文地质结构如图 2 所示。

3.2.2 回灌可行性评价

张双楼井田范围内中奥陶统石灰岩含水层区内埋藏较深,隐伏于煤系地层之下,距太原组四灰含水层距离约 160 m。根据前期揭露成果,该区内奥陶系地层岩性以灰白色、灰色灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩为主,裂隙充填物较多,多为方解石,一般底界深度 2 200 m,地层厚度大于 500 m,与下伏寒武系地层不整合接触,是回灌目的层的良好选择。

根据前文所述矿井水深层回灌相关技术要求,张双楼煤矿矿井水回灌目的层选取应遵循以下原则:

1)不受矿井各主采煤层回采影响。根据“下三带”理论经验公式:① $h=0.700\ 7+0.107\ 9\ L$;② $h=0.303\ L^{0.8}$ 。矿井主采下部 9 煤底板破坏带范围一般为 12.1~21.0 m,9 煤底板与太原组四灰充水含水层平均距离约 48.9 m、与奥灰含水层顶板平均距离约 207 m,9 煤回采底板破坏带远未沟通底板四灰与奥灰含水层,奥灰含水层对 7、9 煤回采无影响。

2)具备一定厚度及储水空间。奥陶系地层包括八陡组、阁庄组、马家沟组和肖县组地层,其中阁庄组、马家沟组为岩溶裂隙承压含水层,其平均厚度分

别可达到 113.33、198.53 m,渗透系数分别为 0.32~4.83 m/d,0.55~1.70 m/d,奥灰含水层各类指标见表 3。奥灰含水层厚度发育稳定及其较大的渗透性,为矿井水回灌提供了良好的储水空间。

表 3 奥灰含水层各指标情况
Table 3 Indicators of Ordovician limestone aquifer

含水层	组	与9煤 距离/m	层厚/m	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
奥灰含水层	阁庄组	207	(105.5~121.16 m)/113.33	0.32~4.83
	马家沟组		198.53	0.55~1.70

3)不会对煤层安全开采造成威胁。9 煤与奥灰含水层之间具备平均厚度约 207 m 泥岩、砂泥岩段稳定隔水层段,厚隔水底板且无地质构造异常,进一步保证了奥灰含水层对 9 煤回采无影响。

根据西翼 13 及 24 采区采掘工程规划,拟设计奥灰回灌井位置于-500 m 水平西翼大巷处,如图 8 所示。

以上述计算西翼 13 采区首采面疏降水量作为回灌量进行评价,对该区域设计 200 m³/h 回灌量并回灌至奥灰含水层,利用承压含水层非稳定流公式反向推算出回灌后 $r=500$ m(目前正在回采的 13902 工作面)及 $r=200$ m(下一步计划回采的 24901 工作面)两处奥灰水位。依据计算结果,预计奥灰水位 2 年内抬升 30 m 以内并基本趋于稳定,表明上述回灌强度下不会引起奥灰水位的剧烈抬升,初步表明区域内奥灰具有较好的回灌可行性。具体计算结果见表 4。

另据统计,在 2019 年以来,位于山东省郯城市某社区(距张双楼煤矿直线距离 105 km)进行了部分工业尾水的无压回灌监测,监测数据表明,回灌层位同为奥陶系马家沟组灰岩,回灌量为 90.52 m³/h,回灌前回灌井水位埋深平均为 42.69 m,回灌期间回灌井水位埋深平均为 6.28 m,水位抬升 36.41 m,该项目目前已稳定回灌超过 3 年。张双楼煤矿奥灰含水层的水文地质条件与上述案例相似,对比分析结果具有一定的参考价值,从水位抬升预测结果分析认为,张双楼矿将矿井水回灌至奥灰含水层具备安全实施的可行性,而具体的工程实现其他文献再做详细讨论。

4)矿井水各项指标整体优于回灌层的背景值。据水质分析资料,张双楼矿奥灰含水层地下水 TDS 为 4 447 mg/L,四灰含水层地下水 TDS 为 1 926~3 384 mg/L,四灰含水层地下水水质整体优于奥灰地下

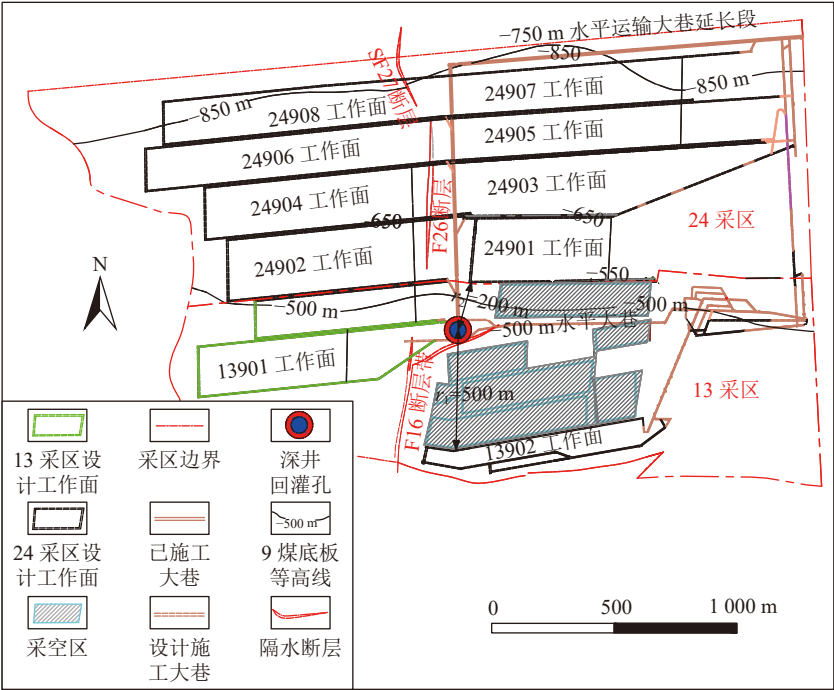


图 8 回灌井位置示意
Fig.8 Schematic of reinjection well location

水。由于井下生产活动及较复杂的各含水层地下水混合作用,导致矿区西翼矿井水 TDS 达到 4 418 mg/L,部分离子含量略高于奥灰水,但总体上水质差异不大,可通过地面或井下预处理或微处理使其水质优于奥灰水后再进行地面深井无压回灌或井下-500 m

大巷有压回灌。当矿井采掘活动延伸至 13 采区西翼及深部,超过 200 m³/h 的四灰含水层涌水及预处理后的矿井水,各项指标优于奥灰含水层地下水。总体上,四灰含水层水质满足回灌对水质的要求,矿井水经过简单的预处理后也可达到回灌的要求,具有回灌的可行性。各含水层具体水质指标见表 5。

综上所述,张双楼矿通过将矿井水回灌至奥灰含水层,可极大减少矿井水外排造成的资源浪费以及水处理成本,并具备技术、工程实践方面的可行性和较好的经济效益。

表 4 回灌后奥灰水位抬升预测
Table 4 Ordovician limestone water level rise after reinjection

时间/d	回灌量/ (m ³ ·h ⁻¹)	水位抬升/m	
		r=200 m处	r=500 m处
1	200	18.78	15.86
2		19.88	16.97
5		21.34	18.42
7		21.87	18.96
10		22.44	19.52
20		23.54	20.63
40		24.64	21.73
60		25.29	22.37
120		26.39	23.47
180		27.03	24.12
300		27.84	24.93
480		28.59	25.68
600		28.95	26.03
1 000		29.76	26.84
1 500		30.40	27.49

3.3 采空区煤岩自净与调蓄技术的实现

3.3.1 煤矿采空区概况

随着张双楼煤矿多年开采,井田东翼 11、21 采区多个工作面已完成采掘工作,并在巷道内通过设置水闸门、水闸墙等进行封闭了多年,采用容积法计算采空区面积及其储水量:

$$W = KMS / \cos \alpha$$

式中, W 为采空区储水量, m³; M 为采空区煤层平均采高, m, 依据矿井各开采煤层计算平均采高或煤厚; S 为采空区面积, m², 依据矿井分煤层采掘工程平面图圈定的水平投影面积; α 为煤层平均倾角, (°), 据矿井开采煤层计算; K 为充水系数, 与采煤方法、煤层倾角、顶底板岩性及采后间隔时间等有关, 取值范围 0.25 ~ 0.50, 取最小值 0.25 进行保守估算。

初步计算张双楼矿东翼 11 采区的采空区可蓄

表 5 不同含水层水质指标对比情况

Table 5 Comparison of water quality indicators of different aquifers

序号	水样来源	阳离子浓度/(mg·L ⁻¹)			阴离子浓度/(mg·L ⁻¹)			TDS/(mg·L ⁻¹)
		K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
1	四灰水	361.65 ~ 441.05	199.80 ~ 465.53	49.68 ~ 110.98	184.04 ~ 324.25	1 047.93 ~ 1 893.36	169.94 ~ 203.44	1 926 ~ 3 384
2	矿井水	468.33 ~ 783.32	210.76 ~ 473.86	78.64 ~ 188.95	252.7 ~ 336.6	1 638.68 ~ 2 296.21	155.29 ~ 858.69	3 112 ~ 4 418
3	奥灰水	579.41	731.38	143.91	815.84	2 066.29	219.90	4 447

水体积至少达到 165 万 m³。由于地面矿井水深度处理站直接处理高盐矿井涌水成本高昂,因此考虑利用井下采空区对高盐、高悬浮矿井水储存调蓄并进行一级净化预处理,再排至地面矿井水处理站进行 2 次处理以减少处理成本。

3.3.2 预处理效果分析

已有研究结果表明,采空区作为一种天然的过滤器,可使内部矿井积水的水化学特征产生巨大变化^[1, 5, 7, 21]。笔者团队采取了张双楼矿同水平面、位置相近的新封闭采空区水与东翼回采结束 5 年以上的采空区水进行水化学特征分析测试,经过采空区天然处理前和处理后的矿井水化学成分变化如图 9 所示。Ca²⁺、Mg²⁺离子存在小幅上升,可能与发生了阳离子吸附交换作用有关,而 Na⁺、Cl⁻、pH、TDS、浊度、悬浮物含量等化学指标得到大幅度降低,Na⁺的净化效率为 66.34%,Cl⁻的净化效率为 59.74%,SO₄²⁻的净化效率为 17.31%,TDS 的净化效率为 24.5%。除此之外,浊度由 7.1FNU 降至 0.9FNU,悬浮物含量由 55 mg/L 降至 10 mg/L,净化效率为 81.8%。可见,仅通过采空区的天然煤岩自净作用,已使矿井水含盐量和浑浊度等关键指标大幅减小。

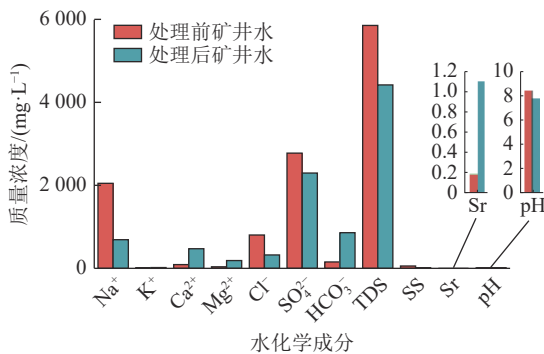


图 9 采空区调蓄系统水化学成分对比

Fig.9 Comparison of chemical composition of water in goaf regulation and storage system

可见,利用东翼 11 采区的采空区进行井下调蓄与矿井水预处理,至少可减少 165 万 m³ 矿井水的外排与处理。同时,通过利用采空区煤岩自净作用进

行高盐矿井水井下预处理后,预计东翼采区现有约 200 m³/h 矿井涌水处理成本将大幅降低,总体经济效益极为显著。

3.4 地面深度脱盐处理技术的实现

3.4.1 矿井水处理现状

目前,张双楼煤矿现有矿井水处理厂采用调节+微涡旋澄清工艺,处理后出水外排,执行 GB20426—2006《煤炭工业污染物排放标准》中新建(扩、改)生产线排放限值,出水悬浮物大部分时间可以达到 SS≤50 mg/L 的要求,少部分时间会出现超标情况。矿井水处理站采用加药混凝、沉淀处理工艺,对矿井水中的悬浮物、化学需氧量进行去除,实现矿井水的全处理、全达标,处理后的矿井水部分用于矸石山冲洗,剩余的深度脱盐处理达标后排入徐沛河。

根据淮河水利委员会的水质监测报告,张双楼煤矿原有矿井水处理厂处理工艺除盐工艺较为简单,无法满足矿井水外排水质要求,需对矿井水深度除盐处理工艺进行优化升级。此外,在实际运行过程中,矿井水处理站还存在诸如出水悬浮物不能稳定达标、没有污泥处理设施、澄清池出水悬浮物较高以及煤泥水池设计不合理等问题,亟待优化地面矿井水处理站设计,并完善矿井地面深度脱盐处理技术。

3.4.2 地面深度脱盐处理总体优化工艺设计

高盐矿井水处理工艺的选择直接关系到项目的建设投资、运行成本的高低、出水水质以及运行管理是否方便可靠。具体处理工艺设计要综合考虑设计水量、原水水质、处理水质要求、可利用场地等。技术目标要实现对张双楼煤矿高盐矿井水进行膜脱盐处理,降低水中硫酸盐及全盐量,使矿井水处理后满足达标外排或资源化利用的需求。最后,将膜脱盐产生的浓盐水进行结晶处理或无害化利用。

根据设计进水水质可知,张双楼煤矿矿井水全盐量大部分为 SO₄²⁻、Cl⁻与 Na⁺。为了满足排放要求中的 WC SO₄²⁻≤650 mg/L,全盐量≤1 000 mg/L 的要求,将高盐矿井水水中的 SO₄²⁻、Cl⁻与 Na⁺分别以 Na₂SO₄、NaCl 结晶盐的形式析出或其他方式分离出

来,降低废水中的 TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 与 Na^+ 。为了分离矿井水中的离子成分,能够采用的处理工艺为膜处理工艺和离子交换工艺。膜处理工艺主要包括反渗透膜浓缩处理工艺、电渗析浓缩处理工艺等;用于除盐的离子交换工艺根据树脂类型主要分为阳离子交换树脂、阴离子交换树脂。虽然离子交换用于除盐具有除盐彻底,流程简单的特点,但是离子交换工艺占地面积大、投资较高、需要大量酸碱再生、消耗大量药剂、产生的再生废水处理困难。因此,设计矿井水采用多级膜浓缩处理工艺降低废水中的盐分,同时产生少量浓盐水,再进行后续处理。通过工艺比选,项目膜浓缩采用“分步协同预处理+多级耦合膜浓缩”工艺、分盐处理采用“冷冻结晶”工艺、蒸发结晶采用“MVR 蒸发结晶”工艺。所设计矿井水处理能力达到 $700 \text{ m}^3/\text{h}$,每年可减少盐排量 14 271.5 t。

优化后的工艺流程如图 10 所示。

目前,张双楼矿已完成了高盐矿井水脱盐工艺的优化论证工作,其核心是将原有高成本、低效率的离子交换工艺优化为以多级膜浓缩技术为核心的除盐处理工艺。相关配套的处理站及成套已完成优化设计与招标工作,正在建设中,预计 2024 年将可正式投入使用。建成后,高盐矿井水的地面深度脱盐处理将与上述各项技术结合,实施井下残余涌水点“能封尽封”的减量治理;工作面矿井水在清污分流后“良水回灌”、污水经采空区自净调蓄后回灌或排至地表深度脱盐后外排与资源化利用;西翼 13 采区主动疏排的底板四灰水直接“良水回灌”或排至地表深度脱盐后外排与资源化利用。通过上述综合减排治理技术的实施,可直接减少矿井水的外排量、降低矿井水的综合治理成本。

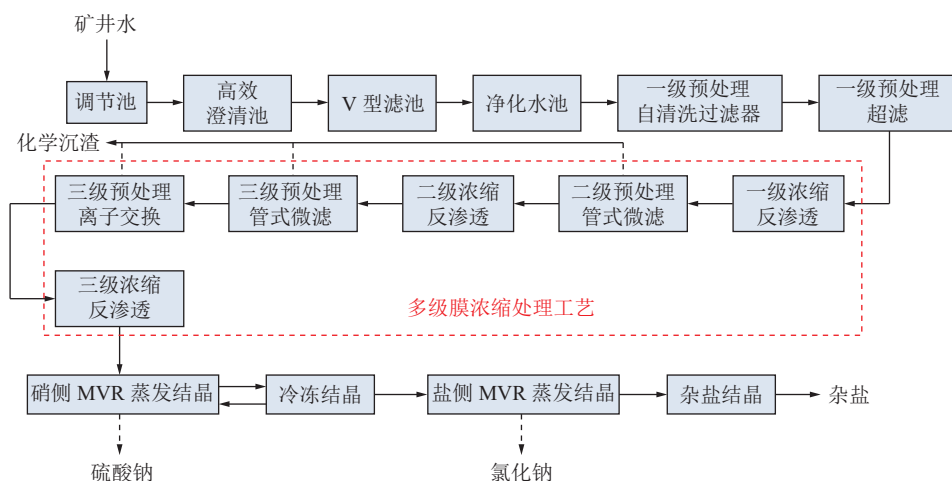


图 10 矿井水处理工艺流程

Fig.10 Flow of mine water treatment process

4 结 论

1)针对张双楼煤矿深部开采过程中的高盐矿井水排放处理问题,提出了该矿高盐矿井水以“减量、储存、净化”为核心的减排治理技术体系,即:通过底板涌水封堵减量技术对已有残余涌水点进行源头减量封堵,从源头上减少高盐矿井水的排放;通过矿井水深层回灌与保水修复技术将高盐矿井涌水进行深部转移储存,助力实现矿井水“零排放”;通过采空区煤岩自净与调蓄技术进行高盐矿井水的煤岩自净预处理,并通过地面深度脱盐处理技术,实现高盐矿井水净化处理以及资源化利用或达标排放。

2)张双楼煤矿底板涌水封堵减量技术目前已顺利实施:底板四灰残余涌水点的封堵可行性经评价后,结合涌水点所在采区近 5 年的采掘计划安排,制定了分阶段对各四灰涌水点进行减量治理的思

路,所设计的封堵方案总计可减少底板四灰涌水量 $188 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3)对张双楼煤矿深层回灌与保水修复技术的实现从回灌层位、回灌安全性、回灌水质等方面进行了综合论述。煤层底板奥陶系灰岩含水层马家沟组可作为回灌目的层,回灌后奥灰水位抬升速度缓慢,2 年内邻近采掘工作面处水位抬升在 30 m 以内,与相邻山东郓城地区已完成回灌项目对比认为从安全角度上考虑张双楼煤矿具备回灌可行性。此外,从水质对比上来看,四灰含水层水质满足回灌对水质的要求,矿井水经过简单的预处理后也可达到回灌的要求。

4)对张双楼煤矿采空区煤岩自净与调蓄技术的实现进行分析。张双楼煤矿 11、12 采区东翼多个工作面早已完成采掘工作,采空区约可蓄水 165 万 m^3 。

采取同水平面、位置相近的新封闭采空区水与东翼采空 5 年以上的采空区水进行水化学特征分析测试, 经过采空区天然处理后的矿井水 Na^+ 、 Cl^- 、pH、TDS、浊度、悬浮物含量等化学指标大幅降低, 采空区煤岩自净效果明显。

5) 目前张双楼煤矿地面矿井水处理站已针对其存在问题进行了优化方案设计, 在实施地面深度脱盐处理技术时需考虑设计水量、原水水质、水质要求、可利用场地等因素, 因地制宜选取合适处理工艺。目前张双楼煤矿所设计矿井水处理能力达到 $700 \text{ m}^3/\text{h}$, 每年可减少盐排量 14 271.5 t。

6) 提出了张双楼煤矿高盐矿井水减排治理的综合技术思路, 即实施井下残余涌水点“能封尽封”的减量治理; 工作面矿井水在清污分流后“良水回灌”、污水经采空区自净调蓄后回灌或排至地表深度脱盐后外排与资源化利用; 西翼 13 采区主动疏排的底板四灰水直接“良水回灌”或排至地表深度脱盐后外排与资源化利用。通过上述综合减排治理技术的实施, 可直接减少矿井水的外排量、降低矿井水的综合治理成本。

参考文献(References):

- [1] 武 强, 申建军, 王 洋. “煤-水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 8-16.
WU Qiang, SHEN Jianjun, WANG Yang. Mining techniques and engineering application for “Coal-Water” dual-resources mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 8-16.
- [2] 马莲净, 赵宝峰, 吕玉广, 等. 煤矿矿井水水化学形成作用与灌溉适宜性评价[J]. 环境化学, 2023: 1-10.
MA Lianjing, ZHAO Baofeng, LYU Yuguang. Hydrogeochemical processes and irrigation applicability of mine water in coal mine[J]. Environmental Chemistry, 2023: 1-10.
- [3] YANG L, TIAN TIAN W, JIAN Y. Evaluating the quality of mine water using hierarchical fuzzy theory and fluorescence regional integration[J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, 38(2): 243-251.
- [4] 王 皓, 董书宁, 尚宏波, 等. 国内外矿井水处理及资源化利用研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 222-236.
WANG Hao, DONG Shuning, SHANG Hongbo, et al. Domestic and foreign progress of mine water treatment and resource utilization[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 222-236.
- [5] 孙亚军, 陈 歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316.
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
- [6] TONG L, FAN R, YANG S, et al. Development and Status of the Treatment Technology for Acid Mine Drainage[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38(1): 315-327.
- [7] 曾繁富, 左明星, 宋洪柱, 等. 乌审旗一带刘家沟组作为高矿化度矿井水回灌目的层的可行性分析[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(11): 59-62.
ZENG Fanfu, ZUO Mingxing, SONG Hongzhu, et al. Feasibility analysis of the Liujiagou Group in the Wushen Banner area as a target layer for water recharge in highly mineralized mine[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(11): 59-62.
- [8] 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.
- [9] 海 晶, 孙玉芳, 马永祥. 宁夏石炭井矿区矿井涌水量与充水因素关系研究[J]. 地下水, 2019, 41(6): 12-14.
HAI Jing, SUN Yufang, MA Yongxiang. Study on the relationship between well inflow and water filling factors in carboniferous mine area in ningxia[J]. Ground Water, 2019, 41(6): 12-14.
- [10] 曾一凡, 武 强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1-14.
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.
- [11] 张 保, 郝秀强, 李会强. 神东矿区采区式煤矿地下水库系统设计研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(12): 1-6.
ZHANG Bao, HAO Xiuqiang, LI Huiqiang. System design of mining area-coal mine underground reservoir in Shendong mining[J]. Coal Engineering, 2022, 54(12): 1-6.
- [12] 智国军, 鞠金峰, 刘 润, 等. 水岩相互作用对煤矿地下水库水质影响机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 779-785.
ZHI Guojun, JU Jinfeng, LIU Run, et al. Water-rock interaction and its influence on water quality in the underground reservoir[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 779-785.
- [13] 董书宁, 王 海, 黄选明, 等. 基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 49-57.
DONG Shuning, WANG Hai, HUANG Xuanming, et al. Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 49-57.
- [14] 武 文. 煤矿矿井水处理站排放达地表水Ⅲ类标准改造工艺选择[J]. 能源与节能, 2023(2): 156-158.
WU Wen. Selection of reforming process for discharging surface water up to class Ⅲ standard in mine water treatment stations[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(2): 156-158.
- [15] 李 鑫, 孙亚军, 陈 歌, 等. 高矿化度矿井水深部转移存储介质条件及影响机制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 17-28.
LI Xin, SUN Yajun, CHEN Ge, et al. Medium conditons and influence mechanism of high salinity mine water transfer and storage by deep well recharge[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 17-28.

- [16] 赵春虎, 杨 建, 王世东, 等. 矿井水深层回灌过程量质耦合模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 36–44.
ZHAO Chunhu, YANG Jian, WANG Shidong, *et al.* Coupling simulation of groundwater dynamics and solute transfer in the process of deep reinjection of mine water[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 36–44.
- [17] 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.
- [18] 汪 佩, 李 鑫, 张金陵, 等. 城郊煤矿底板太灰疏降流场演化的数值模拟与应用[J]. 煤炭科技, 2021, 42(4): 38–43.
WANG Pei, LI Xin, ZHANG Jinling, *et al.* Numerical simulation and application of the floor evolution of flow field in Chengjiao coal mine[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2021, 42(4): 38–43.
- [19] 戴 磊, 段李宏, 杨 斌, 等. 顺和煤矿工作面底板太灰水动态引流方案设计应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 106–111.
DAI Lei, DUAN Lihong, YANG Bin, *et al.* Design and application of dynamic drainage scheme for Taiyuan formation limestone aquifer in working face floor of Shunhe coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 106–111.
- [20] 孙亚军, 徐智敏, 李 鑫, 等. 我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 1–16.
SUN Yajun, XU Zhimin, LI Xin, *et al.* Mine water drainage pollution in China's coal mining areas and the construction of prevention and control technical system[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 1–16.
- [21] 刘毅涛, 王国文, 龙陆军, 等. 矿井水深部回灌运移机理及扩散规律研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(12): 36–41.
LIU Yitao, WANG Guowen, LONG Lujun, *et al.* Study on migration mechanism and diffusion pattern in mine water deep infiltration[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(12): 36–41.
- [22] 郭再峰. 煤矿矿井水净化处理与回灌治理技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(12): 79–82.
GUO Zaifeng. Water decontamination and recharge treatment in coal mine[J]. Drilling Engineering, 2011, 38(12): 79–82.
- [23] 孙亚军, 李 鑫, 冯 琳, 等. 鄂尔多斯盆地煤–水协调开采下矿区水资源异位回灌–存储技术思路[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3547–3560.
SUN Yajun, LI Xin, FENG Lin, *et al.* Technical thinking on ecotopic injection and storage of mine area water resources under the coordinated exploitation of coal and water background in Ordos basin[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3547–3560.
- [24] 赵彩凤, 杨 建. 高矿化度矿井水地下回灌对毛乌素沙漠地下水水质的影响[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 29–32.
ZHAO Caifeng, YANG Jian. Influence of groundwater recharge with high salinity mine water on groundwater quality in Mu Us desert[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 29–32.
- [25] 姜 素, 黄敬军, 徐智敏, 等. 徐州煤矿采空区地下水库建库可行性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 17–23.
JIANG Su, HUANG Jingjun, XU Zhimin, *et al.* Feasibility study of the construction of groundwater reservoir in the goaf of the Xuzhou Coal Mines[J]. Hydrology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 17–23.
- [26] 袁慧卿, 徐智敏, 罗武贤, 等. 张双楼煤矿井下四灰涌水减量治理与节能减排技术[J]. 煤炭科技, 2022, 43(4): 157–163.
YUAN Huiqing, XU Zhimin, LUO Wuxian, *et al.* Reduction treatment and energy saving and emission reduction technology of underground four limestone water inflow in Zhangshuanglou coal mine[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(4): 157–163.