



宁东煤田枯竭油层回注存储高矿化度矿井水技术思路

马莲净 王颂 杜松 赵宝峰 张阳 卢才武

引用本文:

马莲净, 王颂, 杜松, 等. 宁东煤田枯竭油层回注存储高矿化度矿井水技术思路[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 149–158.
MA Lianjing, WANG Song, DU Song. Depleted petroleum reservoirs reinjection and storage technical thinking of highly-mineralized mine water in Ningdong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 149–158.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西部矿区高矿化度矿井水膜蒸馏处理技术

Technology of membrane distillation treatment for highly-mineralized mine water in western mining area

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 295–300 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6dd899b8-faf6-4aeb-9d5a-fc1deac01489>

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>

真空膜蒸馏处理高矿化度矿井水试验研究

Experimental research on treatment of highly-mineralized mine water by vacuum membrane distillation

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 284–290 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/20a72b12-7879-4f07-8397-7430288a0e8c>

深部开采高盐矿井水减排治理技术体系构建与实现

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

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 208–219 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0876>

呼吉尔特矿区矿井水回灌模拟的水化学演化研究

Hydrochemical evolution of mine water injection in Hojirt Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 470–476 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1601>

矿井水水化学特征及资源化利用研究

Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: taking Zhangji Coal Mine as an example

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 254–263 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0927>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

马莲净, 王 颂, 杜 松, 等. 宁东煤田枯竭油层回注存储高矿化度矿井水技术思路[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 149–158.

MA Lianjing, WANG Song, DU Song, *et al.* Depleted petroleum reservoirs reinjection and storage technical thinking of highly-mineralized mine water in Ningdong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 149–158.

宁东煤田枯竭油层回注存储高矿化度矿井水技术思路

马莲净¹, 王 颂¹, 杜 松², 赵宝峰^{3,4}, 张 阳¹, 卢才武¹

(1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国煤炭地质总局 勘查研究总院, 北京 100039; 3. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 4. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710177)

摘 要: 宁东煤田地处我国西北干旱-半干旱区, 是我国批准建设的 14 个亿吨级大型煤炭基地之一, 目前存在高矿化度矿井水量大、处理技术成熟但成本高、综合利用率低等问题。为实现宁东煤田高矿化度矿井水的低成本资源化回注存储和水生态环境保护, 结合宁东煤田 13 座煤矿矿井水矿化度高的典型特征, 因地制宜地提出在煤油资源重叠区, 利用枯竭油层回注存储高矿化度矿井水这种宝贵的非常规水资源的技术思路, 即利用枯竭油层孔-裂隙双重结构中储水空间、油田关停初期地层压力亏空和废弃油井/注水井低成本处置高矿化度矿井水经资源化利用后的余量水; 系统阐述枯竭油层选择、回注工艺、储水潜力、预处理水质要求和环境的可行性; 凝练出基础理论、法律法规政策和实时监测监管的研究展望。结果表明, 提出的枯竭油层回注存储技术具有可行性, 可实现宁东煤田高矿化度矿井水的低成本资源化处置, “如何精细刻画注水渗流过程”是回注处置技术瓶颈问题, 科学实质是高矿化度矿井水-砂岩耦合化学作用下孔裂隙介尺度的枯竭油层注水渗流演化机理。同时, 相关法律法规政策和实时监测监管方面亟需完善, 以保障枯竭油层回注存储技术的顺利实施。研究旨在为高矿化度矿井水资源化回注存储提供新思路, 为煤油气资源开发中二次水资源保护提供参考。

关键词: 高矿化度矿井水; 枯竭油层; 回注存储; 煤油资源重叠区; 宁东煤田

中图分类号: TD741; X752

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)12-0149-10

Depleted petroleum reservoirs reinjection and storage technical thinking of highly-mineralized mine water in Ningdong Coalfield

MA Lianjing¹, WANG Song¹, DU Song², ZHAO Baofeng^{3,4}, ZHANG Yang¹, LU Caiwu¹

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Exploration and Research Institute, CNACG, Beijing 100039, China; 3. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 4. Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Disaster Prevention and Control Technology, Xi'an 710177, China)

Abstract: The Ningdong Coalfield is located in the arid and semi-arid region of northwest China, which is one of the 14 approved large-scale coal bases with a reserve of over 100 million tons in China. Currently, it faces challenges such as a large volume of highly-mineralized mine water, mature but costly treatment technology, and a low comprehensive utilization rate. To achieve the low-cost efficient reinjection and storage of highly-mineralized mine water in the Ningdong Coalfield and to protect the hydrological and ecological environment, this study, based on the typical characteristics of high mineralization in the mine water of 13 coal mines in the Ningdong coalfield, proposes a technical approach for the reinjection and storage of highly-mineralized mine water in depleted petroleum reservoirs in the coal and oil resources overlapping area. This approach utilizes the valuable unconventional water resource by making use of the pore-fracture dual structure and water storage space in the depleted petroleum reservoirs, the initial reservoir pressure vacuum during the shutdown of the oilfield, and the low-cost disposal of highly-mineralized mine water after resource utilization. The study systematically elaborates on the selection of depleted petroleum reservoirs, reinjection processes, water storage potential, pre-treatment water quality requirements, and the feasibility analysis of the environment. It also outlines prospects for fundamental theoretical research, legal regulations, policies, and

收稿日期: 2023-07-13

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1024

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42307073); 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBSF-345)

作者简介: 马莲净(1986—), 女, 河北衡水人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: 860909mlj@163.com

real-time monitoring and control. The results indicate the feasibility of the proposed reinjection and storage technology in depleted petroleum reservoirs, which can achieve the low-cost efficient treatment of highly-mineralized mine water in the Ningdong Coalfield. “How to finely characterize the water injection seepage process” is identified as a bottleneck issue in the reinjection treatment technology. In essence, it involves the evolution mechanism of water injection and seepage in the pore-fracture scale of the depleted petroleum reservoir under the coupled chemical action of highly-mineralized mine water and sandstone. Furthermore, there is an urgent need for improvement in related legal regulations, policies, and real-time monitoring and control to ensure the smooth implementation of the reinjection and storage technology in depleted petroleum reservoirs. This study aims to provide new insights into efficiently reinjecting and storing highly-mineralized mine water and to offer references for the protection of secondary water resources in the development of coal, oil, and gas resources.

Key words: highly-mineralized mine water; depleted petroleum reservoirs; reinjection and storage; coal and oil resources overlapping area; Ningdong Coalfield

0 引 言

煤炭作为我国的基本能源,极大地保障了国家经济社会发展和能源稳定补给,在未来一段时间内仍将保持主体能源地位^[1-5]。宁东煤田是我国“能源金三角”之一,目前已探明煤炭储量 270 亿 t,是我国重要的大型煤炭基地^[6]。但是,宁东煤田地处于干旱-半干旱区毛乌素沙漠西南缘,具有干燥、降水量少而蒸发量大,水资源短缺,且呈现明显的沙漠化、荒漠化趋势等特点^[7]。因此,矿井水资源浪费严重制约着煤炭工业可持续发展和生态文明建设,并得到国家各部委的高度重视。

早在 2013 年国家发展改革委、国家能源局联合印发了《矿井水利用发展规划》,明确指出:“矿井水是宝贵的非常规水资源,针对各地区矿井水资源及利用基础和条件,因地制宜选择矿井水利用发展方向和重点”^[8]。2014—2021 年我国连续发布了《能源“金三角”发展战略研究》《水污染防治行动计划》(水十条)、《扩大水资源税改革实施办法》《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》和《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》等文件,都要求加强矿井水资源的保护与利用^[9-10]。各煤矿企业在积极响应国家政策的同时,仍存在诸多亟需解决的问题,尤其是在鄂尔多斯盆地宁东煤田、黄陇煤田和陕北煤田,普遍存在着高矿化度矿井水量大、处理技术成熟但成本高、综合利用率低的窘迫现状,导致水资源短缺、水生态环境恶化等问题日益加剧^[11-14]。两会期间,全国政协委员、中国工程院院士武强教授也提出:“2022 年,沿黄河 9 省煤炭产量 35.9 亿 t,矿井涌水量约为 65 亿 m³,接近南水北调西线工程一期设计调水量。高强度的煤炭开发,矿井水的大量涌出,使该区域面临的生态环境退化风险增加。”

为切实解决高矿化度矿井水低成本处理处置的问题,许多学者开展了深入研究。顾大钊院士^[15-17]

提出“地下水库原位存储”的技术思路,并在大柳塔煤矿、灵新煤矿、万利一矿等开展了工程实践^[18-21],已有相关理论研究主要包括采空区矿井水储存机理^[22-26]和水岩相互作用对地下水库水质影响机理^[27-28]。孙亚军教授提出煤矿“三减一治”的矿井水异位回灌-存储技术思路^[29-30]。目前在回灌层深部转移存储机理、存储介质特征及影响机制和水动力演化规律方面的研究取得丰富的成果^[31-34],并在母杜柴登煤矿、纳林河二号矿等证实了区域性井漏现象的三叠系下统刘家沟组回注存储高矿化度矿井水的可行性^[35-38]。但是,上述技术方法还存在一些基础理论需要更深入研究,主要是高矿化度矿井水与岩体的水岩耦合化学作用机理、矿区地下水运移机制^[39]、回灌潜力精细评价以及可持续回灌能力形成条件^[40]等方面。

基于此,针对宁东煤田高矿化度矿井水处理处置现状,因地制宜地提出“枯竭油层回注存储”的高矿化度矿井水资源保护技术新思路,即利用枯竭油层孔-裂隙双重结构中储水空间、油田关停初期地层压力亏空、地下水矿化度垂向分布规律和废弃油井/注水井,回注存储预处理后的高矿化度矿井水。进而针对该技术思路进行了可行性分析,并提出关键问题的解决思路。研究为实现高矿化度矿井水的低成本资源化回注存储和矿区水文生态环境保护提供了新思路,也为煤油气资源开发中二次水资源保护提供参考。

1 宁东煤田矿井水资源现状

1.1 矿井水水质特征

宁东煤田属于国家建设的 14 个大型煤炭基地之一,包括灵武、鸳鸯湖、横城、马家滩、积家井、萌城、韦州 7 个矿区和石沟驿 1 个独立井田,位于宁夏回族自治区灵武市、盐池县、同心县、红寺堡区 4 个市(县区),规划总面积为 3 484 km²。通过各个矿区

资料收集、取样检测等工作,共分析研究了红柳、麦垛山、白芨沟、红石湾、金凤、金家渠、灵新、梅花井、清水营、石槽村、双马一矿、羊场湾和枣泉具有代表性的 13 座煤矿共 125 组水质数据,探明了宁东煤田矿井水的水化学特征(图 1)。

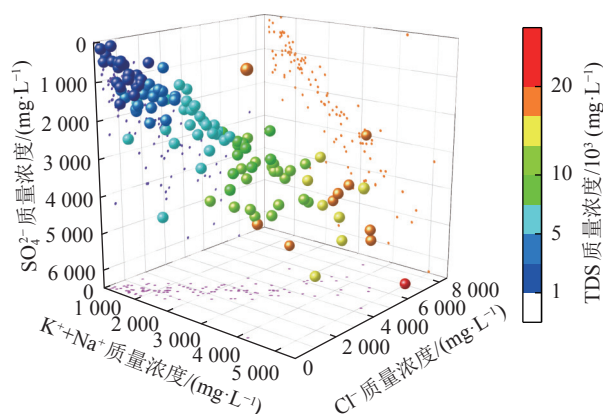


图 1 宁东煤田矿井水水化学特征

Fig.1 Mine water hydrochemical characteristics in Ningdong Coalfield

由图 1 可知,宁东煤田各煤矿矿井水的溶解性总固体(TDS)均大于 1 000 mg/L,其中 28.8% 超过 10 000 mg/L,都属于高矿化度矿井水^[14]。宁东煤田矿井水 TDS 主要以 K^++Na^+ 、 SO_4^{2-} 以及 Cl^- 为主,且矿化度随着这些离子含量的增加而增大,矿化度高是由地下水长期与含有丰富矿物质的岩石进行水岩作用所致。宁东煤田东北部矿井水 TDS 平均值为 5 500 ~ 6 000 mg/L,远大于高矿化度矿井水界定标准,其中高矿化度矿井水所占比例高达 96.84%;煤田南部、西部及北部也存在高矿化度水异常区^[6,31]。综上,宁东煤田矿井水具有矿化度高的典型特征。

垂向分布上,由于深部含水层难以接收到上覆岩含水层的越流补给,导致深层地下水更新能力弱,水环境处在封闭空间,而上部含水层受大气降水补给较多,水环境更新较快,因此宁东煤田来自各含水层的矿井水随着含水层埋深的增加,矿化度也在随之升高。纵向分布上,受鄂尔多斯台地逆冲推覆构造带前缘拗陷的影响,宁东煤田来自各含水层的矿井水总体呈现由东向西矿化度逐渐减小的趋势。受水岩作用影响,同时存在深部地下水滞流、排泄困难、循环能力不足等问题,导致侏罗-白垩系和石炭-二叠系含水层的矿井水矿化度普遍偏高^[6]。

1.2 高矿化度矿井水处理处置现状

目前国内外高矿化度矿井水水处理技术主要包括化学法、热法和膜分离法^[14]。化学法是通过化学

反应去除高矿化度矿井水中的盐分,其中使用最多的是离子交换法。该方法通过固体交换剂交换出高矿化度矿井水中的盐离子,从而达到去除盐的目的。但当矿化度大于 500 mg/L 时,该方法会增加成本,不利于实施^[41]。热法采取热力源作为推动力,通过蒸发结晶进行水盐分离,适用于矿化度大于 3 000 mg/L 的矿井水。但此方法需要大量热能作为补充,具有一定的局限性^[42]。膜分离技术是使高矿化度矿井水在压力作用下透过分离膜,从而去除水中的无机离子。该技术是目前处理高矿化度矿井水的主流技术^[43],但该技术不能彻底解决盐的问题,处理后产生 TDS 超高的浓水。

综上所述,虽然国内外学者在高矿化度矿井水水处理技术中已经取得了一定的成效^[44-47],但其大多仍处于试验或小规模推广阶段。对于宁东煤田高矿化度矿井水现状而言,仍然缺乏工程上大规模利用、低成本、易实施的水处理技术,目前亟需高矿化度矿井水资源保护的新技术思路。

据调查,宁东煤田目前在高矿化度矿井水处理上存在预处理规模较大、深度处理能力不足和工程实际利用率偏低等问题。以 2018 年为例,宁东煤田集中处理矿井水只占全年矿井水量的 7.77%,实际矿井水处理量为工程设计处理规模的 13.47%^[48],处理成本 1.6 ~ 3.0 元/t^[12],矿井水利用率仅为 23%^[11],大部分高矿化度矿井水面临着未深度处理、无法有效利用的问题。同时,由于对高矿化度矿井水进行深度处理成本过高,宁东煤田大部分煤矿目前未实施规模化高矿化度矿井水处理工程,仅将高矿化度矿井水进行预处理符合 GB 20426—2006《煤炭工业污染物排放标准》后排入“永久蓄水工程”进行暂存。目前高矿化度矿井水预处理成本为 0.4 ~ 1.2 元/t,若将预处理后的高矿化度矿井水利用枯竭油层进行回注存储,即可低成本消纳充分利用后剩余的矿井水,又能实现矿井水低成本资源化处置。

宁东煤田石槽村、红柳、双马一矿、麦垛山、金凤、金家渠煤矿无法综合利用的高矿化度矿井水量已达 430.10×10^4 、 $1\,195.56 \times 10^4$ 、 685.02×10^4 、 482.04×10^4 、 420.48×10^4 、 529.18×10^4 m³/a,均排入大、小南湖“永久蓄水工程”,其位于灵武市马家滩镇马家滩村,总库容 1.3×10^9 m³,压占土地面积达 2 539.8 hm²(图 2),导致强蒸发作用下的水资源损失与周边大面积土壤盐碱化。灵新煤矿高矿化度矿井水产生量为 450 m³/h,在已有采空区建设库容量 300×10^4 m³ 以上的煤矿地下水库,以存储井下矿井水处理产生的浓水^[20]。

据调查双马一矿井田范围内广泛分布枯竭油层,并有长庆油田采油三厂的废弃油井 130 个和新施工探油井 3 个(图 2),其矿井水矿化度为 3 340 ~ 13 410 mg/L,目前高矿化度矿井水的低成本处理处

置方法较少。

基于此,利用宁东煤田煤油资源重叠区双马一矿井田范围内的枯竭油层、创新性地提出利用废弃油井处置高矿化度矿井水的地质环境学技术思路。

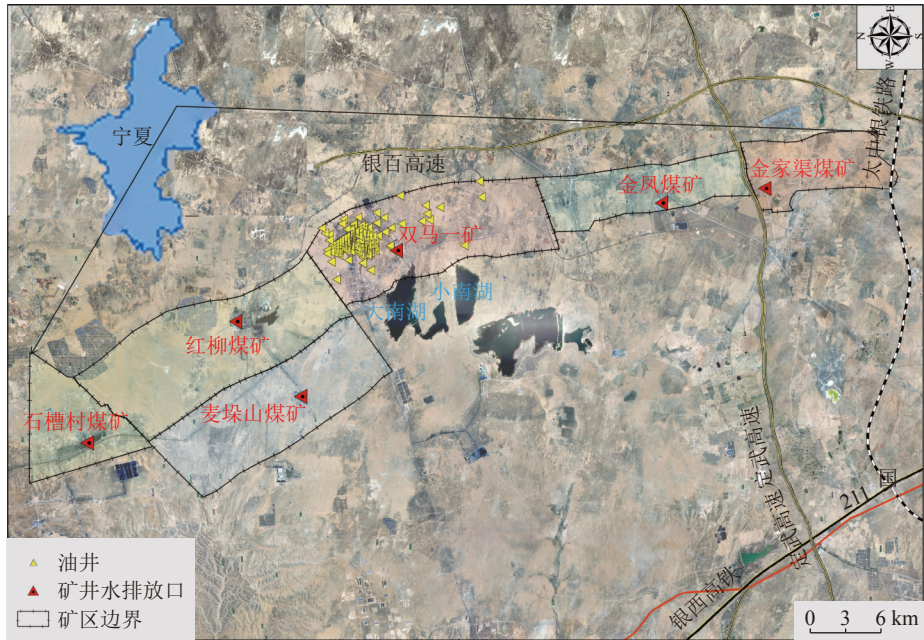


图 2 宁东煤田煤油资源重叠区地域分布

Fig.2 Regional distribution of coal and oil resources overlapping areas in Ningdong Coalfield

2 枯竭油层回注存储技术思路

为减少矿井水资源的浪费和蒸散消耗同时保护矿井水资源,借鉴“地下水原位存储”和“异位回灌-存储”技术方法,笔者因地制宜提出在煤油资源重叠区,利用枯竭油层孔-裂隙双重结构中储水空间回注存储高矿化度矿井水这种宝贵的非常规水资源的技术思路。该技术旨在利用枯竭油层孔-裂隙双重结构中储水空间、油田关停初期地层压力亏空、地下水矿化度垂向分布规律和废弃油井/注水井(图 3),低成本处置煤矿开采产生的高矿化度矿井水经过资源化处置利用之后的余量水。其主要优势条件在于:①既可以充分利用枯竭油层典型孔-裂隙双重结构的地下空间资源和废弃油井/注水井,又能有效降低高矿化度矿井水处理处置成本。②油田开采关停初期地层亏空,高矿化度矿井水回注处置有利于地层压力恢复,且地层亏空有效减少回注处置的耗能。③煤油资源重叠区的枯竭油层位于潜水含水层、具有饮用水意义的承压含水层和含煤地层以下,依据地下水矿化度垂向上的分布规律与采样调查分析,采煤产生的矿井水回注枯竭油层具有一定可靠性。目前回注水无明确的预处理标准,部分项目参照

Q/SY 01004—2016《气田水回注技术规范》^[29-30],其管理体系和相关规范标准尚待填补。枯竭油层并非原生地下水含水层,不存在回注高矿化度矿井水污染枯竭油层的问题。但实施回注存储工程前,必须对废弃油井/注水井测试,确认井结构、套管状态与固井质量及深度都达相关标准,以防止串层污染枯竭油层以上具有供水意义的含水层。若废弃油井/注水井完全不符合回注要求,必须根据回注要求施工回注井。④在井筒施工、巷道掘进、工作面回采等阶段,将煤矿水害防治过程中的疏放水回注存储在煤层以下具有稳定盖层的枯竭油层,有效降低了水害风险,从而保障了煤层开采工作安全正常开展。

3 枯竭油层回注存储可行性分析

3.1 枯竭油层选择

选择合适的枯竭油层是矿井水回注技术的保障,同时还要考虑对其他自然资源的安全保护。具体内容为:收集包含枯竭油层的油田地质勘探、油井钻探以及采油期间的测井资料和水力压裂监测数据,从而确定枯竭油层砂岩孔裂隙双重结构特征。然后,依据岩层中裂隙网络的分布特征判断岩层是否具有储水条件,一般来说,当枯竭油层的渗透系数 $K>$

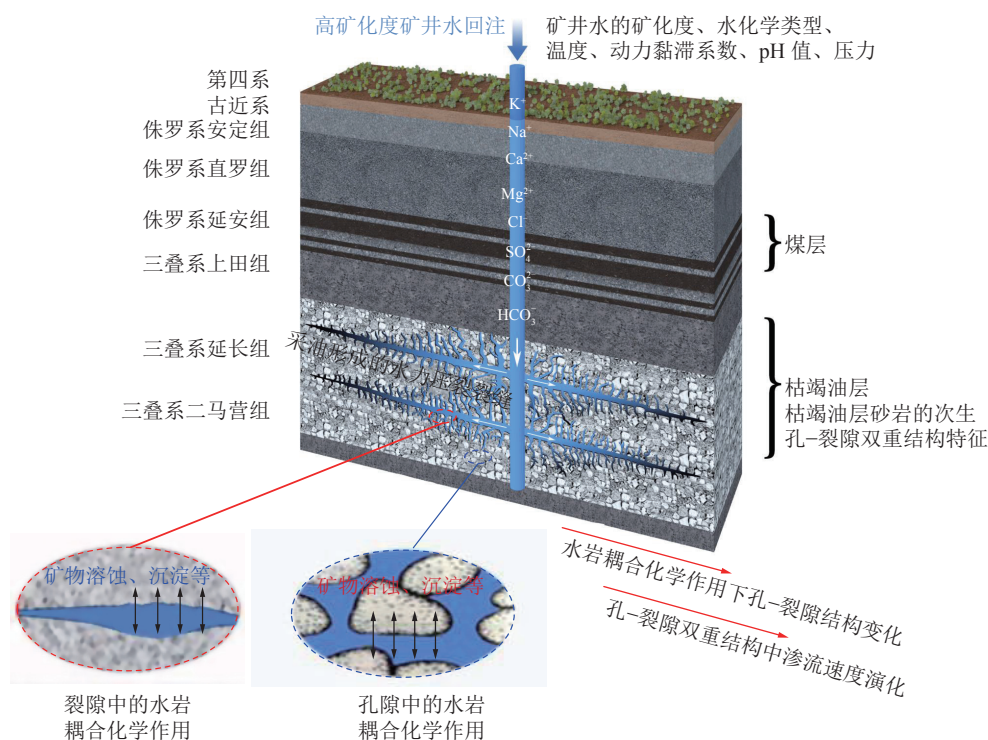


图 3 枯竭油层回注存储高矿化度矿井水概念

Fig.3 Conceptual of highly-mineralized mine water reinjection and storage in depleted petroleum reservoirs

10^{-2} m/d 且具有封闭或半封闭性特征时,则认为具有储水条件,可以作为目的枯竭油层,如不满足条件可采用高压回注方法对油层进行压裂增透。此外,考虑到长期存储的要求,目的枯竭油层还应具备足够的储水空间,以达到可持续回灌的能力,并需满足在高压注水情况时水力影响范围内不存在断层、地表露头以及出露点,确保持存储高矿化度矿井水后对其他地层地下水无影响。

据研究区地质资料分析,图 2 宁东煤田石槽村、红柳、双马一矿、麦垛山、金凤、金家渠煤矿区域内,枯竭油层及其废弃油井/注水井主要分布于双马一矿东北部,废弃油井一般深度 700~1500 m,面积达 9.677 km²。含煤地层为侏罗系延安组(3-2、4-1、4-2、4-3、6、10、12、16、18 煤层),枯竭油层主要为三叠系延长组 T3Y2 油页岩段(长 2、长 3,层厚 250~350 m),T3Y3 含油段(长 4、长 5、长 6、长 7,层厚 250~360 m),T3Y4 黄铁矿结核段(长 8、长 9,层厚 140~200 m)(图 3)。

T3Y3 段枯竭油层位于 18 煤下部约 400 m,主要为砂岩含水层组,为河流体系的冲积平原相,整体呈现下粗上细的沉积特点。根据钻孔资料分析,该含水层富水性为弱-中等,含水层上岩层为宝塔山砂岩隔水层,下岩层为厚层状砂岩隔水层,两者在井田内分布较稳定,具备足够的储水空间,上覆三叠系上田

组隔水性相对较好。因此选择 T3Y3 段枯竭油层作为目的回注层是可行的。

3.2 回注工艺

在选择到目的枯竭油层后,根据高矿化度矿井水的回注要求对废弃油井/注水井进行改造,为后续回注工作的开展提供基础条件。采用自然伽马能谱测井勘测废弃油井/注水井套管的完整性,防止回注过程中形成串层污染和安全事故。若套管有破损、变形的情况,则不能用于高矿化度矿井水的回注工程。按照《气田水回注技术规范》中有关回注水建井要求,通过改造套管完整的废弃油井/注水井,使其成为一个完整的回注井。这样可以有效防止高矿化度矿井水在回注过程中串层污染,以影响到枯竭油层以上具有供水意义的潜水和承压水含水层,引发饮用水安全事故;同时防止对枯竭油层以上含煤地层的采煤生产活动产生影响,导致煤矿水害事故的发生。据调查双马一矿井田范围内的 130 个废弃油井中,套管完整且具备改造条件的油井所占比例较大,具备改造条件。但若区域内废弃油井/注水井完全不符合回注要求,必须根据回注要求施工回注井。

3.3 储水潜力

采用枯竭油层孔裂隙双重结构特征研究、地下水数值模拟以及注水试验等方法,阐明枯竭油层在回注过程中的孔裂隙变化规律和注水渗流演化机理,

为后续工作提供理论指导。依据研究区水文地质条件,对不同回注条件下的储水量和回注参数进行计算,并对枯竭油层回注可行性进行评估,以形成回注井布置和回注工艺的初步方案。然后,开展现场不同条件下的注水试验,获取枯竭油层水动力场、水化学场演化特征。再构建枯竭油层回注高矿化度矿井水的量质耦合数值模型,以精准预测枯竭油层储水参数和判定储水潜力。由于目前未实施现场注水试验,通过对双马一矿枯竭油层储水潜力估算表明回注目的枯竭油层具备良好的储水能力。

3.4 预处理水质要求

目前尚无高矿化度矿井水回注的水质要求,可参考 Q/SY 01004—2016《气田水回注技术规范》、GB 20426—2006《煤炭工业污染物排放标准》等标准,同时经预处理的矿井水水质必须优于枯竭油层含水层水质。高矿化度矿井水在进行回注存储前需要进行预处理,以降低地下水环境风险。矿井水区别于其他的工业污染水,其本质为地下水,宝贵的非常规水资源,环境风险较低^[49]。常规的高矿化度矿井水预处理方法包括混凝、沉淀以及过滤等。矿井水经预处理后,主要监测指标包括 pH 值、SS、COD、氟化物、石油类、重金属、TDS 等。据现场调查,研究区各煤矿均配备矿井水处理站,矿井水经预处理后基本满足回注要求。

3.5 环境可行性

采用现场勘探、数值模拟、预测评价等方法,研究回注前枯竭油层地下水环境现状,及其水质演化规律,为后续评价提供对照基础。制定回注井地下水监测方案,通过布设传感器实时监测地下水水量、水压、水温以及水质等参数变化,重点监测回注过程对地下水环境产生的影响。综合环境背景值和实时监测结果,对回注后地下水环境影响进行综合评价,依据评价结果开展核查回注水源质量标准、优化回注工艺等工作,以实现高矿化度矿井水的无害化回注处置。

在枯竭油层回注存储高矿化度矿井水后,为确保对枯竭油层上部煤层开采无影响,需进行影响评价工作。首先,采用相似材料模拟、数值模拟试验等方法分析上部煤层的底板岩层结构,计算采动破坏后其破坏发育高度,研究回注矿井水能否对采煤工作面产生充水影响。然后,对原有防水煤(岩)柱进行稳定性与安全性评价,分析其抗破坏能力和高度能否满足要求。综合以上分析结果,对回注后煤层开采的影响进行综合评价,按照评价结果实施相应

的措施方案,以期保障枯竭油层上部煤层开采工作的安全开展。

据调查双马一矿煤层开采过程中,针对严重影响采煤的极少量废弃油井进行了立体封闭和防水煤柱布设,因此回注对上部煤层开采影响较小。

4 展 望

4.1 基础理论

提出的枯竭油层回注存储技术思路具有低成本、易实施、水文地质环境风险小等优点,但具体工程实施中仍有难点问题。高矿化度矿井水深部回注存储的两大关键问题是“污染扩散”和“注水渗流”。对于“污染扩散”问题,综合前期宁东煤田研究区矿井水采样调查结果和地下水矿化度垂向上的分布规律研究结果可知,煤层以下枯竭油层水的矿化度大于待回注矿井水,采煤产生的矿井水经预处理符合相应标准后再回注枯竭油层,属于“良水回注”^[29-30],污染扩散的环境风险较小。因此“如何精细刻画注水渗流过程”是回注处置技术瓶颈问题。注水渗流特征与孔-裂隙介质的结构特点、运动在孔-裂隙介质中水的性质密切相关^[50]。枯竭油层通过水力压裂和注水驱油过程已具有典型的次生孔-裂隙双重结构,介于宏观与微观之间的介尺度下水相渗流规律研究才能将孔隙和裂隙中的渗流有机结合。而在回注过程中,在压力、温度等外环境作用下,基于高矿化度矿井水特殊性质的水岩耦合化学作用直接影响枯竭油层砂岩孔-裂隙储水空间的结构参数和渗流速度变化^[51]。因此深入剖析注水渗流过程的科学实质是“高矿化度矿井水-砂岩耦合化学作用下孔裂隙介尺度的枯竭油层注水渗流演化机理”。通过调研分析国内外研究现状及发展动态可知,在枯竭油层注水渗流过程中,随着水岩耦合化学作用下的枯竭油层孔裂隙结构参数变化,枯竭油层注水渗流速度的变化规律及其影响因素尚不明确,基于此凝练出 2 个关键的基础理论问题(图 4):①探明高矿化度矿井水渗流过程中水岩耦合化学作用下枯竭油层客观实在的孔裂隙变化规律;②揭示孔裂隙介尺度的枯竭油层注水渗流演化机理,实现枯竭油层注水渗流演化过程的精细刻画。枯竭油层注水渗流过程包括矿井水在孔隙和裂隙结构中的渗流,而细观尺度下孔隙与宏观尺度下裂隙中水的运移满足不同的渗流定律,利用注水流固耦合实验、数值模型和理论分析方法,将孔-裂隙双重结构中的渗流有机结合是刻画枯竭油层注水渗流过程的关键。

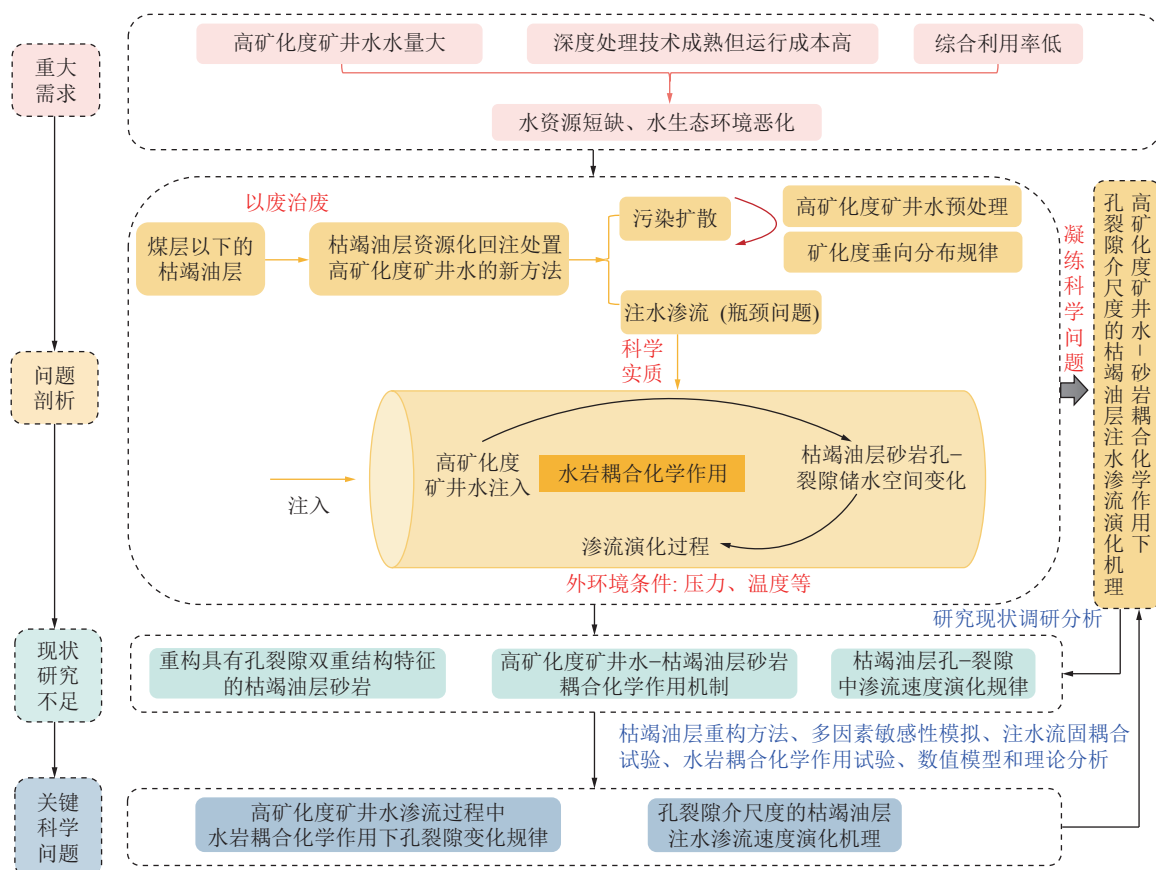


图4 基础理论研究思路

Fig.4 Basic theoretical research thinking

4.2 相关法律法规政策

提出的利用枯竭油层回注存储高矿化度矿井水技术思路,利用地层特性,实现所存储的矿井水与浅层含水层隔绝而不参与生物圈循环进而对生态环境无影响,但是目前我国尚未制定控制深井灌注技术的法律法规。因此需要开展相关示范研究,完善相关标准和政策,以便于更好实施高矿化度矿井水回注存储工程。在技术法律法规方面,由于目前油气田采出水回注工艺成熟,对文中提出的枯竭油层回注存储高矿化度矿井水具有重要的指导意义,因此其法律法规政策可参照 SY/T 6596—2016《气田水注入技术要求》、SY/T 6596—2004《气田水回注方法》,以及延长油田股份有限公司企业标准 Q/YCYTJ 0301—2019《油田采出水回注技术指标》等技术规范进行完善。

同时,我国主要煤炭省区需要加强对矿井水回注存储技术的引导推广工作,在矿井水回注存储工程的落地实施过程中提供支持帮助,从而实现高矿化度矿井水的低成本资源化处置。

4.3 实时监测监管

地下水环境污染具有典型的隐蔽性、长期性和

难恢复性。若高矿化度矿井水回注地层密闭性不好、回注井结构不合理、回注井破裂等均会导致地下水环境串层污染。因此,高矿化度矿井水回注存储工程必须重点关注回注过程控制有效性、风险防控系统性等,提出从源头到末端的全过程生态环境保护及风险防控措施、监控要求。此外,相关单位还需制定合理的隐患排查方案和事故应急预案,定期组织风险隐患排查工作,最大程度保障回注存储工程的顺利实施。

5 结 论

1)基于对宁东煤田13座煤矿125组TDS值的统计分析,探明了宁东煤田矿井水矿化度高的典型特征,并分析了煤田垂向纵向分布以及煤层顶底板水质特征及成因。

2)提出了枯竭油层回注存储高矿化度矿井水技术思路,即利用枯竭油层孔-裂隙双重结构中储水空间、油田关停初期地层压力亏空、地下水矿化度垂向分布规律和废弃油井/注水井,回注存储高矿化度矿井水,以实现高矿化度矿井水的低成本资源化回注存储和矿区水文生态环境保护。

3)系统阐述了枯竭油层回注存储的可行性分析,主要包括枯竭油层的选择、回注工艺、储水潜力以及环境可行性分析。

4)进行了利用枯竭油层回注存储相关研究展望,分别在基础理论研究、法律法规政策以及实时监测监管方面凝练出了具体思路。

参考文献(References):

- [1] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795–805.
- [2] 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367–2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, *et al.* Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367–2375.
- [3] 尹尚先, 王玉国, 李文生. 矿井水灾害: 原因·对策·出路[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 214–221.
YIN Shangxian, WANG Yuguo, LI Wensheng. Cause, counter-measures and solutions of water hazards in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 214–221.
- [4] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538–550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538–550.
- [5] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, *et al.* Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [6] 靳德武, 王甜甜, 赵宝峰, 等. 宁东煤田东北部高矿化度地下水分布特征及形成机制[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 118–127.
JIN Dewu, WANG Tiantian, ZHAO Baofeng, *et al.* Distribution characteristics and formation mechanism of high salinity groundwater in northeast Ningdong Coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 118–127.
- [7] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术 with 战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [8] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 矿井水利用规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2013.
- [9] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于进一步
- 加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知[EB/OL]. (2020-10-30)[2023-07-13]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201202_811127.html.
- [10] 中共中央、国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[EB/OL]. (2021-10-08)[2023-07-13]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 孙文洁, 任顺利, 武强, 等. 新常态下我国煤矿废弃矿井水污染防治与资源化综合利用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2161–2169.
SUN Wenjie, REN Shunli, WU Qiang, *et al.* Waterpollution's prevention and comprehensive utilization of abandoned coal mines in China under the new normal life[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2161–2169.
- [14] 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.
- [15] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架与技术体系[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.
- [16] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1–7.
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1–7.
- [17] 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.
- [18] CHIM, LI Q, CAO Z, *et al.* Evaluation of water resources carrying capacity in ecologically fragile mining areas under the influence of underground reservoirs in coal mines[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379: 134449.
- [19] ZHANG C, WANG F, BAI Q. Underground space utilization of coalmines in China: a review of underground water reservoir construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103657.

- [20] 吴宝杨, 李全生, 曹志国, 等. 煤矿地下水库高盐矿井水封存对地下水的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2360–2369.
WU Baoyang, LI Quansheng, CAO Zhiguo, *et al.* Influence of high salt mine water stored in underground reservoir of coal mine on groundwater[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2360–2369.
- [21] 陈苏社, 黄庆享, 薛 刚, 等. 大柳塔煤矿地下水库建设与水资源利用技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 21–28.
CHEN Sushe, HUANG Qingxiang, XUE Gang, *et al.* Technology of underground reservoir construction and water resource utilization in Daliuta Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 21–28.
- [22] 梁 冰, 张 柴, 刘 磊, 等. 垃圾土现场渗透性测定与土水特性反演[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1493–1500, 1511.
LIANG Bing, ZHANG Chai, LIU Lei, *et al.* Field permeability measurement of waste and inversion of soil-water characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6) : 1493–1500, 1511.
- [23] 汪北方, 武 力, 张 晶, 等. 煤矿地下水库煤岩变形特性的尺寸效应试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 810–818.
WANG Beifang, WU Li, ZHANG Jing, *et al.* Experiment on size effect of coal and rock deformation characteristics in coalmine underground reservoir[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 810–818.
- [24] 梁 冰, 尉 达, 汪北方, 等. 煤矿地下水库岩石承载变形与时效特性实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 479–485.
LIANG Bing, YU Da, WANG Beifang, *et al.* Experimental study on rock bearing deformation and time-effect characteristics of underground reservoir in coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(6): 479–485.
- [25] 刘 驰, 刘晓丽, 张 东, 等. 软岩软化的水岩界面动力学模型及其演化规律[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2280–2289.
LIU Chi, LIU Xiaoli, ZHANG Dong, *et al.* Dynamic model for water-rock interface of softening of soft rock and its evolution law[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2280–2289.
- [26] 王恩志, 张 东, 刘晓丽, 等. 裂隙岩体多结构多流态渗流模型与模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 894–902.
WANG Enzhi, ZHANG Dong, LIU Xiaoli, *et al.* Seepage model and simulation of multi-structure and multi-flow in fractured rock mass[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 894–902.
- [27] 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.
- [28] 智国军, 刘 润, 杨瑞刚, 等. 煤矿地下水库相邻采空区水力联系及渗流规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 9–15.
ZHI Guojun, LIU Run, YANG Ruigang, *et al.* Study on hydraulic connection and seepage law of adjacent goaf of underground reservoir in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 9–15.
- [29] 孙亚军, 李 鑫, 冯 琳, 等. 鄂尔多斯盆地煤-水资源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 ectopic 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.
- [30] 孙亚军, 徐智敏, 李 鑫, 等. 我国煤矿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.
- [31] 孙亚军, 张 莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1) : 423–437.
SUN Yajun, ZHANG Li, XU Zhimin, *et al.* Multi-field action mechanism and research progress of coal minewater quality formation and evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 423–437.
- [32] 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.
- [33] 刘 琪, 汪韦峻, 罗 斌, 等. 高盐矿井水深部转移存储介质特征与水动力演化规律[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 29–35.
LIU Qi, WANG Weijun, LUO Bin, *et al.* Medium characteristics and hydrodynamic evolution law of high salinity mine water recharge in deep well[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 29–35.
- [34] 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, 66.
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 mines[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(11): 59–62, 66.
- [35] 孙亚军, 张梦飞, 高 尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 56–65.
SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, *et al.* Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 56–65.
- [36] 姚宏鑫, 施立虎, 杜金龙, 等. 纳林河二号矿井高矿化度水深井回灌环境影响分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(11): 41–42.
YAO Hongxin, SHI Lihu, DU Jinlong, *et al.* Environmental im-

- pact analysis of deep well reinjection of high salinity water in Nalinhe No.2 mine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021 (11): 41–42.
- [37] 陈 歌. 鄂尔多斯盆地东缘矿井水深部转移存储机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- CHEN Ge. Study on the deep transfer and storage mechanism of mine water in the Eastern Margin of Ordos Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [38] CHEN G, XU Z, SUN Y, *et al.* Minewater deep transfer and storage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 332: 129848.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 葛光荣, 吴一平, 张 全. 高矿化度矿井水纳滤膜适度脱盐技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 208–214.
- GE Guangrong, WU Yiping, ZHANG Quan. Research on technology and process for moderate desalination of high-salinity mine water by nanofiltration[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 208–214.
- [42] 靳德武, 葛光荣, 张 全, 等. 高矿化度矿井水节能脱盐新技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 12–18.
- JIN Dewu, GE Guangrong, ZHANG Quan, *et al.* New energy-saving desalination technology of highly-mineralized mine water[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(9): 12–18.
- [43] 卞 伟, 李井峰, 顾大钊, 等. 西部矿区高矿化度矿井水膜蒸馏处理技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (3) : 295–300.
- BIAN Wei, LI Jingfeng, GU Dazhao, *et al.* Technology of membrane distillation treatment for highly-mineralized mine water in western mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50 (3) : 295–300.
- [44] 李福勤, 赵桂峰, 朱云浩, 等. 高矿化度矿井水零排放工艺研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 81–86.
- LI Fuqin, ZHAO Guifeng, ZHU Yunhao, *et al.* Research on zero discharge process of highly-mineralized mine water[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(9): 81–86.
- [45] KARPENKO T, KOVALEV N, SHRAMENKO V, *et al.* Investigation of transport processes through ion-exchange membranes used in the production of amines from their salts using bipolar electrodialysis[J]. *Membranes*, 2022, 12(11): 1126.
- [46] GONG Dian, YIN Yichen, CHEN Huiling, *et al.* Interfacial ions sieving for ultrafast and complete desalination through 2D Nanochannel defined graphene composite membranes[J]. *ACS Nano*, 2021, 15: 9871–9881.
- [47] LIU Yong, GAO Xin, WANG Ziping, *et al.* Controlled synthesis of bismuth oxychloride-carbon nanofiber hybrid materials as highly efficient electrodes for rocking-chair capacitive deionization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 403: 126326.
- [48] 李 莉, 李海霞, 马 兰. 宁东煤田矿井水资源及其利用现状分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 108–113.
- LI Li, LI Haixia, MA Lan. The mine water resources and its utilization status in Ningdong coalfield[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(8): 108–113.
- [49] 杜 松, 张 超, 吴唯民, 等. 深井灌注技术用于处理煤矿高盐废水的展望[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 40–48.
- DU Song, ZHANG Chao, WU Weimin, *et al.* Prospect of deep well injection for treatment of coal mine Drainage Brine Wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(16) : 40–48.
- [50] JAVADI A H, ENVELOPE M. Impact of salinity on fluid/fluid and rock/fluid interactions in enhanced oil recovery by hybrid low salinity water and surfactant flooding from fractured porous media[J]. *Fuel*, 2022, 329: 125426.
- [51] YANG K, GAO D. Numerical simulation of hydraulic fracturing process with consideration of fluid–solid interaction in shale rock[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 102: 104580.