

矿井水井下就地回用技术的应用研究

刘晴

中煤科工集团南京设计研究院有限公司, 中国·江苏 南京 210031

摘要: 矿井水是煤炭开采伴生的主要废水, 未经处置直排会造成水资源浪费与生态污染。在我国水资源短缺与环保政策趋严的背景下, 矿井水井下就地回用成为煤炭行业绿色转型的核心路径, 可实现“井下处理—就地回用”闭环, 降低地面处理压力与输水成本, 缓解井下生产用水缺口。本文结合国内外研究与工程实践, 梳理矿井水井下就地回用发展现状、主流净化工艺及应用案例, 分析该模式的应用瓶颈与制约因素, 展望技术发展方向, 为矿井水井下原位回用的规模化推广提供理论支撑与实践参考。

关键词: 矿井水; 井下原位回用; 井下就地回用水处理技术

Application research on in-situ reuse technology in underground mine wells

Liu Qing

Middling Coal Technology&Industry Group Nanjing Design&Research Institute Co., Ltd., China Jiangsu Nanjing 210031

Abstract: Mine water is the main wastewater associated with coal mining, and untreated direct discharge can cause water resource waste and ecological pollution. Against the backdrop of water scarcity and stricter environmental policies in China, on-site reuse of underground mine wells has become the core path for the green transformation of the coal industry. It can achieve a closed-loop system of "underground treatment on-site reuse", reduce surface treatment pressure and water transmission costs, and alleviate the shortage of water for underground production. This article combines domestic and international research and engineering practice to review the current development status, mainstream purification processes, and application cases of in-situ reuse in mine wells. It analyzes the bottlenecks and limiting factors of this model's application, looks forward to the direction of technological development, and provides theoretical support and practical reference for the large-scale promotion of in-situ reuse in mine wells.

Keywords: Mine water; In-situ reuse underground; Underground on-site reuse water treatment technology

0 引言

我国作为煤炭生产与消费大国, 煤矿年涌水量约 80 亿吨, 年外排量达 20~30 亿吨, 水资源浪费问题突出^[6]。矿井水含悬浮物、溶解性固体、重金属及微量有机物, 直排会破坏水体与土壤生态, 威胁地下水安全。我国煤炭主产区多位于北方干旱半干旱及西部缺水区域, 井下防尘、设备冷却、煤层注水等生产用水供需矛盾尖锐, 过度开采地下水易引发地面沉降等地质灾害^[7]。

2024 年国家八部门联合印发《关于加强矿井水保护和利用的指导意见》, 明确推动水质适宜的矿井水井下处理、就地复用, 为井下回用提供政策依据^[1-4]。矿井水井下就地回用指在井下搭建净化系统, 将废水处理达标后直接用于井下生产, 无需地面往返输送, 可大幅降低能耗、管道投资与占地, 是煤炭行业节水、环保、节能的关键技术模式^[9]。

目前该技术已在国内部分矿区试点应用, 但受井下空间受限、水质复杂、装备适配性不足等因素制约, 规模化

推广仍存挑战。本文系统分析井下回用技术现状、工艺应用、现存问题与发展趋势, 为技术标准化、规模化应用提供支撑。

1 矿井水井下就地回用研究与应用现状

1.1 国内外研究应用概况

国外矿井水回用起步于 20 世纪 70 年代, 美国、德国、澳大利亚等煤炭强国已形成成熟的井下回用技术体系与管理模式。欧美煤矿针对差异化水质采用定制化井下净化工艺, 处理后水主要用于井下防尘、冷却与煤层注水, 回用率超 80%, 部分矿井实现零排放; 澳大利亚利用井下采空区作为天然沉淀池, 搭配简易过滤实现低成本就地回用, 适配井下狭小空间^[3]。

我国井下回用研究始于 20 世纪 90 年代, 初期以大型煤矿试点为主。近年在政策驱动与水资源压力下快速发展, 国家明确 2025 年黄河流域矿井水利用率力争达 68% 以上^[1-4]。当前技术主要应用于晋、陕、蒙、新等煤炭主产区, 大型

煤矿回用率超 50%，先进矿井达 80% 以上；但中小煤矿受资金、技术、管理限制，回用率偏低，整体水平与发达国家仍有差距^[6]。

1.2 国内回用区域差异

我国矿井水井下回用呈现显著区域分化，与水资源禀赋、开采规模、技术水平高度相关。北方缺水矿区（陕北、晋西、蒙西、宁东等）生产用水缺口大，回用需求迫切，回用率多在 50%~70%，宁东基地曾低至 26%，提升空间较大^[6-7]。南方多雨矿区水资源充足，回用动力不足，回用率仅 20%~40%^[6]。东部老矿矿井水高矿化度、高重金属，处理难度大，回用率偏低；西部矿井水以高悬浮物为主，处理简单，回用率相对更高^[5]。

1.3 井下回用主要途径

矿井水井下就地回用以井下生产刚需为导向，核心途径包括：（1）井下防尘用水：最主要回用场景，用于采掘工作面喷雾降尘，改善作业环境；（2）设备冷却用水：用于水泵、风机、液压支架等设备冷却，要求水质洁净、无腐蚀性；（3）煤层注水用水：提升煤层透气性、降低瓦斯涌出，对水质污染物含量有严格限制；（4）井下消防及辅助用水：用于火灾防控、巷道与卫生间冲洗等^[4,9]。当前我国井下回用以防尘与冷却用水为主，煤层注水、消防用水因水质要求高、处理难度大，规模化回用比例较低^[3]。

2 矿井水井下净化工艺应用现状

井下处理工艺需适配水质特征、空间条件与回用标准，优先选择占地小、易操作、低能耗、稳定性强的技术。目前主流工艺分为物理净化、化学净化、物理化学耦合三类，其中物理与物理化学工艺应用最广泛^[3]。

2.1 物理净化工艺

物理工艺主要去除悬浮物、煤尘、泥沙等固体杂质，具备操作简单、无二次污染、运行成本低的优势，是井下预处理核心技术。沉淀工艺分为自然沉淀与强化沉淀，井下常用斜管沉淀池，占地小、运行稳，适配井下复杂空间^[3]；过滤工艺以石英砂、活性炭、纤维滤料为主，用于深度除油；聚酰胺超滤技术：新型无药膜分离工艺，膜组件耐 SS 浓度达 10000 mg/L，出水 SS < 1 mg/L、浊度 < 1 NTU，仅设高压预处理与常压过滤单元，可无人值守，特别适合用于矿井水的井下处理就地复用^[3]。陕北某大型煤矿应用该工艺后，年节水超 100 万 m³，节约输水投资约 300 万元^[3,7]。

2.2 化学净化工艺

化学工艺用于去除溶解性杂质、重金属、硬度、硫酸盐等，适配高矿化度、高重金属复杂矿井水^[1]。中和工艺

处理酸性矿井水，投加石灰、氢氧化钠调节 pH，使重金属生成氢氧化物沉淀；化学沉淀工艺可高效去除硬度与重金属，但药剂投加量需精准控制，污泥处置难度大，易增加运行成本^[7]。

2.3 物理化学耦合工艺

物理化学耦合工艺是结合物理处理和化学处理的优点，用于处理复杂水质的矿井水，常用的技术包括吸附、离子交换、膜分离等，具有处理效果好、适用范围广等优点，但运行成本相对较高，适合对水质要求较高的回用场景^[5]。其中吸附技术主要用于去除矿井水中的有机物、重金属离子等，但是吸附剂需要定期更换，增加了运行成本；离子交换技术主要用于去除矿井水中的硬度和重金属离子，但离子交换树脂需要定期再生，操作复杂^[7]；膜分离技术是近年来发展较快的水处理技术，包括超滤、反渗透、纳滤等，具有过滤精度高、处理效果稳定、无二次污染等优点，适合井下就地回用中对水质要求较高的场景。山煤国际鹿台山煤矿采用“收集-处理-回用”全流程闭环体系，选用反渗透工艺，结合精准钻孔引流、管路优化布局，对顶板裂隙水进行井下就地处理，工程运行后，不仅减少排水能耗 20%，更将处理后的水全部用于井下生产，每年节约工业用水成本 32 万元，同时减少液压支架维修频次，延长高精过滤器的使用周期，实现了水资源的“零排放”与“零浪费”，为中小煤矿矿井水井下就地回用提供了可行案例^[9]。宁东某煤矿高矿化度矿井水采用“预处理+纳滤适度脱盐”组合工艺对矿井水进行井下处理，工程运行后矿井水回用率达到 75% 以上，每年可节约地下水开采量 60 万 m³，同时减少高矿化度矿井水外排对周边环境的污染，处理成本控制在 12 元/m³ 以下，为黄河流域高矿化度矿井水井下就地回用提供了示范^[7]。

3 矿井水井下就地回用推广瓶颈

3.1 技术层面制约

（1）复杂水质处理技术不成熟：高矿化度、酸性、高有机物矿井水净化效果差、能耗高，反渗透脱盐投资与运行成本高^[7]，酸性水污泥井下处置易造成二次污染；水质波动大，系统适配性不足，出水稳定性差^[1-3]。

（2）井下专用装备研发滞后：现有设备多为地面装备改造，缺乏小型化、模块化、防爆、耐腐蚀专用装备^[3,6]，密封与防腐性能不达标，易故障；新型膜装备规模化产能不足，成本偏高^[5]。

（3）集成化与智能化水平低：以单一工艺为主，多技术集成优化不足^[3]；缺乏实时监测与自动调控系统，人工

依赖度高, 运维成本高^[7]; 与井下生产系统协同性差, 无法按需调节水量水质^[4]。

3.2 经济层面制约

(1) 初始投资高: 中等规模系统投资 500~1000 万元, 大型系统达数千万元^[3], 投资回报周期长, 煤炭市场波动下企业投资意愿不足^[7]。

(2) 运行成本偏高: 高矿化度水处理成本 10~15 元 / m³, 普通悬浮物水处理成本 1.3~2.0 元 / m³, 电费、药剂费占比大^[7]; 中小煤矿资金有限, 难以承担运维成本, 先进膜工艺的高运维费用进一步限制推广^[3,5,6]。

3.3 管理与标准层面制约

(1) 管理体系不完善: 企业重视不足, 制度不健全, 系统运维不规范^[7]; 井下运维人员专业能力不足, 故障处置能力弱; 行业技术经验共享机制缺失^[3,6]。

(2) 发展不均衡, 推广难度大: 南北、东西、大小煤矿回用水平差异显著^[6,7], 复杂水质矿区处理难度大, 进一步加大推广阻力^[1]。

4 矿井水井下就地回用发展趋势

4.1 高效低成本净化技术研发

聚焦复杂水质, 研发低耗、低成本井下净化工艺^[7]: 开发新型混凝剂、吸附剂, 降低药剂消耗; 优化聚瓷膜、纳滤膜性能, 提升抗污染能力、降低组件成本^[3,5]; 研发小型化生物处理技术, 适配高有机物矿井水^[3]。针对高矿化度矿井水, 利用矿区余热、太阳能等新能源, 开发光热蒸发、低温多效蒸发等绿色脱盐技术, 降低能耗^[1,7]。

4.2 井下专用装备小型化、模块化、智能化

研发适配井下潮湿、防爆、腐蚀环境的小型化、模块化装备, 减少占地, 提升稳定性^[3]; 采用防腐防爆材质, 延长设备寿命^[6]; 推动装备模块化设计, 实现快速安装与维护^[5]。搭建智能管控系统, 集成水质水量监测、药剂自动投加、故障预警、远程运维功能, 适配智慧矿山建设, 降低人工依赖^[3,7]。

4.3 多技术集成优化与协同应用

整合物理、化学、生物工艺, 针对差异化水质构建定制化工艺体系, 提升处理效率、降低成本^[3]。例如, 沉淀 + 过滤 + 吸附处理高悬浮物矿井水, 中和 + 化学沉淀 + 膜分离处理高重金属、高矿化度矿井水^[1,7]。结合井下地质条件, 利用采空区作为原位沉淀池, 降低设备投资^[2]; 推动膜工艺耦合应用, 实现复杂水质高效处理^[3,5]。

4.4 管理体系与标准完善

搭建井下水质水量实时监测体系, 保障回用水安全^[7];

建立矿井水产生、处理、回用全流程统计计量制度, 将回用率纳入企业环保考核; 统一井下回用水质标准, 规范工艺选型与工程建设^[1,4]。

4.5 特殊矿井水定向处理与资源化利用

针对酸性、高氟、高砷等特殊矿井水, 研发定向净化技术, 采用井下预处理 + 地面深度处理模式, 降低管道腐蚀^[1]; 探索达标剩余矿井水地下水回补技术, 缓解超采区水资源压力, 实现水资源闭环循环^[4,7]。

5 结语

矿井水井下就地回用是实现煤炭行业水资源循环、绿色低碳转型的核心技术, 可有效节约水资源、降低污染、减少运维成本, 具备显著的经济、环境与社会效益。目前该技术已在我国大型煤矿试点应用并取得良好效果, 但仍面临复杂水质处理难、专用装备滞后、投资运行成本高、管理体系不完善等瓶颈。

未来, 需重点围绕高效低成本净化技术研发、井下专用装备小型化智能化研发、多技术集成优化、管理体系与标准完善等方向开展研究, 不断提升矿井水井下就地回用技术的成熟度和经济性, 推动其规模化、标准化应用。同时, 需要政府、企业、科研机构协同发力, 加强政策支持、技术研发和人才培养, 完善激励机制和管理体系, 破解应用过程中的各类困难, 实现矿井水的高效循环利用, 为煤炭行业绿色转型和水资源可持续利用提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委, 水利部, 自然资源部等. 关于加强矿井水保护和利用的指导意见[Z]. 2024.
- [2] 我国煤矿区矿井水水质空间分布特征及矿井水处理技术思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 584-592.
- [3] 何绪文, 王绍州, 张学伟等. 煤矿矿井水资源化利用技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 523-530.
- [4] 张宏, 李娟, 王浩. 矿井水井下就地回用技术研究进展[J]. 中国煤炭, 2022, 48(8): 102-108.
- [5] 李建明, 赵伟, 刘敏. 聚瓷膜超滤技术在矿井水井下就地回用中的应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 167-171.
- [6] 王艳, 张强, 李丽. 高矿化度矿井水井下就地回用技术研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 145-150.
- [7] 刘军, 王丽, 赵阳. 矿井水井下就地回用的优缺点及改进措施[J]. 煤矿安全, 2023, 54(3): 234-237.
- [8] 赵振国, 李雪, 王强. 矿井水井下处理设备小型化研发进展[J]. 矿山机械, 2023, 51(7): 89-93.
- [9] 孙晓峰, 刘芳, 张敏. 矿井水井下就地回用智能化系统研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 1890-1898.

[10] 周健, 李丽, 王浩. 酸性矿井水井下就地预处理技术研究[J]. 环境工程, 2023, 41(8): 123.

[11] GB/T 20922-2007 煤矿矿井水利用技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

作者简介: 刘晴 (1990.03-), 女, 汉族, 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 技术员, 主要从事水处理方面的工程设计工作。