

神府矿区高硫酸盐矿井废水厌氧生化处理应用研究

刘聪 董茹 杜娟

榆林学院 建筑工程学院

DOI:10.32629/eep.v8i10.2924

[摘要] 陕北神府矿区作为我国陕北能源化工基地的核心区域,地处神府煤田腹地,在大规模煤炭开采过程中,该区域会产生大量高浓度硫酸盐矿井废水,也会夹杂重金属、有机物等有害物质,未经处理直接排放废水,将会严重破坏地下水与地表水生态系统,继而威胁水资源安全以及生态环境的稳定性。本文聚焦于陕北神府矿区高硫酸盐矿井废水厌氧生化处理技术的应用,以期有效降低废水中的硫酸盐浓度,确保矿井排出废水的品质满足相关排放标准,推动矿区生态环境修复。

[关键词] 陕北神府矿区; 高硫酸盐矿井废水; 厌氧生化处理; 硫酸盐还原菌

中图分类号: X703 文献标识码: A

Application of Anaerobic Biochemical Treatment to High Sulfate Mine Water in Shenfu Mining Area

Cong Liu Ru Dong Juan Du

Yulin University, School of Architecture and Engineering

[Abstract] As the core area of China's Northern Shaanxi Energy and Chemical Industry Base, the Shenfu Mining Area in northern Shaanxi is located in the heart of the Shenfu Coalfield. During large-scale coal mining, this region generates substantial high-concentration sulfate mine wastewater containing harmful substances such as heavy metals and organic compounds. Direct discharge of untreated wastewater would severely damage groundwater and surface water ecosystems, thereby threatening water resource security and ecological stability. This study focuses on the application of anaerobic biochemical treatment technology for high-sulfate mine wastewater in the Shenfu Mining Area, aiming to effectively reduce sulfate concentrations in the wastewater, ensure that discharged mine wastewater meets relevant discharge standards, and promote ecological restoration in the mining area.

[Key words] Shenfu Mining Area in Northern Shaanxi; High-sulfate mine wastewater; Anaerobic biochemical treatment; Sulfate-reducing bacteria

引言

在西部大开发战略持续推进的背景下,我国陕北神府矿区煤炭开采规模不断扩大,不仅保障国家能源安全,也承受日益突出的生态环境压力。矿井废水排放是矿区核心环境问题,其中高硫酸盐矿井废水的成分复杂、处理难度相对较高,是制约矿区生态保护与可持续发展瓶颈^[1]。神府矿区的水文地质条件特殊,地下水赋存与循环系统相对敏感,高浓度硫酸盐矿井废水进入水体环境后将会发生迁移转变,不仅会改变地下水化学性质,也会诱发土壤出现盐碱化、水体富营养化等系列生态问题,甚至会与其他污染物产生协同效应,放大对动植物生存及人体健康的潜在危害。厌氧生化处理技术具备成本低廉、能耗较低的优势,可有效提升矿区废水处理效能、守护区域生态环境,满足能源开发与生态保护协同发展的需求^[2]。

1 矿区高硫酸盐矿井废水特征分析

1.1 废水来源与生成机制

陕北神府矿区坐落于鄂尔多斯盆地东北部,作为国家级能源化工基地的核心区域,其煤炭开采规模位居全国前列。该矿区矿井废水的生成,与煤炭开采工艺、区域水文地质条件及配套产业活动紧密相关,主要来源可归纳为三个方面。

其一为采空区积水,煤层顶板基岩含水层经长期水岩相互作用,形成高矿化度地下水;采矿活动破坏含水层结构后,这类地下水汇集于采空区,成为矿井废水的核心来源;其二是采掘过程中硫化矿物氧化产水,煤矿开采打破了煤体及围岩中黄铁矿、菱铁矿等硫化物原本的还原稳定环境;在空气、地下水与微生物的协同作用下,硫化物发生氧化反应,持续释放硫酸盐离子,导致废水中硫酸盐浓度显著升高;其三为辅助生产活动排水,综采设备检修期间的设备用水、润滑油泄漏以及人类活动排放的污染物,不仅增加废水的污染负荷,还引入了

石油类、多环芳烃等有机污染物,进一步加剧废水成分的复杂性^[3-4]。

1.2 污染迁移与生态影响

高硫酸盐矿井废水排放对神府矿区本就脆弱的生态环境构成多重威胁。在水环境领域,废水中的硫酸盐进入地表水后,会降低水体溶解氧含量,抑制水生生物呼吸功能;同时硫酸盐还会与底泥中的重金属发生络合反应,增强重金属迁移能力。当这类废水渗入地下水后,会改变地下水化学类型,引发地下水酸化、硬度升高问题,进而破坏区域地下水循环系统的稳定性。在土壤环境方面,酸性废水通过灌溉或渗漏进入土壤后,会诱发土壤盐碱化,降低土壤肥力,阻碍植被正常生长;而硫酸盐与重金属的协同作用,会进一步加剧土壤生态系统的破坏程度^[5]。

从污染迁移路径来看,神府矿区地形起伏平缓,地下水径流速度缓慢,污染物主要以弥散形式迁移,在含水层中形成持续扩散的污染雨带。此外,若废水处理不当,会产生硫化氢气体,该气体不仅会腐蚀处理设备,还会污染周边大气环境,最终形成水—土—气多介质污染链条,对矿区生态安全及人体健康构成潜在危害。

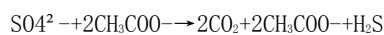
2 厌氧生化处理关键技术原理与适配性分析

2.1 核心处理原理

厌氧生化技术处理高硫酸盐废水的核心机制,是借助硫酸盐还原菌的异化硫酸盐还原作用,将废水中的硫酸盐转化为硫化氢,同时以有机物作为电子供体完成污染物降解。这一处理过程包含三个关键阶段。

第一阶段,发酵细菌将废水中的复杂有机物分解为乙酸、丙酸等挥发性脂肪酸;

第二阶段,硫酸盐还原菌以挥发性脂肪酸为底物,把硫酸盐还原为硫化氢,对应的反应式如下:



第三阶段,产甲烷菌将乙酸、氢气等物质转化为甲烷。

但这一过程存在明显的微生物竞争与抑制问题。硫酸盐还原菌与产甲烷菌对底物存在直接竞争关系,且硫酸盐还原菌对底物的亲和力更强,在低有机质环境下会抑制产甲烷过程的进行;与此同时,反应生成的硫化氢对两类微生物均具有毒性,当硫化氢浓度达到2.5mM时,就会显著抑制脱氮菌等功能微生物的活性,浓度超过5mM则会完全阻断生化反应。结合神府矿区废水低有机质的特性,需要通过工艺设计强化硫酸盐还原菌与产酸菌的协同作用,同时构建有效的H₂S解毒机制,保障处理过程稳定高效。

2.2 技术适配性优化方向

神府矿区废水的独特性质对厌氧生化处理技术提出了针对性要求。传统单相厌氧工艺在处理神府矿区废水时存在显著短板,主要体现在三大核心挑战:其一,低有机质环境加剧硫酸盐还原菌与产甲烷菌的底物竞争,直接导致硫酸盐还原效率与甲烷产率同步下滑;其二,高浓度硫酸根还原过程中产生的硫化氢易发生累积,对微生物活性形成强烈抑制;其三,采矿活动导致

废水水质波动剧烈,尤其在设备检修期间,有机污染物种类会出现突变,使得处理系统的抗冲击能力难以满足实际运行需求。

鉴于神府矿区废水有机物含量偏低,为规避硫酸盐还原菌与产甲烷菌之间的基质竞争问题,两相厌氧工艺成为适配性优选方案,该工艺可将硫酸盐还原过程严格控制在产酸阶段,借助发酵型细菌对硫化物的耐受特性,实现产酸与硫酸盐还原的协同进行,同时为后续产甲烷环节提供优质底物。与此同时,废水本身的酸性特质有助于硫化氢脱除,结合气体吹脱技术可进一步降低硫化物对微生物的抑制效应,提升整个处理系统的运行稳定性。

3 陕北神府矿区高硫酸盐矿井废水厌氧生化处理系统应用

3.1 系统整体架构

结合神府矿区高硫酸盐矿井废水的水质特征及技术适配性优化方向,构建预处理、两相厌氧、深度净化三级组合处理系统。各单元通过功能协同形成完整处理链路,保障出水水质稳定达标;系统设计同步兼顾矿区地形条件,采用地埋式布置压缩占地面积,配套沼气回收与脱硫装置实现能源资源化利用,提升处理系统的综合效益。

预处理单元承担水质均化与负荷削减功能,主要由格栅、调节池和沉淀池构成。格栅负责拦截废水中的悬浮物与大块杂质,避免后续设备堵塞;调节池通过均质均量调控进水水质,将进水pH稳定在4.5至6.0区间,为后续厌氧反应创造适宜条件;沉淀池投加聚合氯化铝和聚丙烯酰胺,通过絮凝沉淀去除部分重金属与悬浮物,显著降低后续工艺处理负荷。

核心处理单元采用两相厌氧反应器,通过物理分隔实现功能微生物的专性富集,分别完成产酸—硫酸盐还原与产甲烷两大核心过程。其中,产酸—硫酸盐还原反应器内接种硫酸盐还原菌优势菌群,强化硫酸盐还原反应与有机物酸化转化;产甲烷相选用上流式厌氧污泥床反应器形式,依托颗粒污泥提升甲烷产率,同时减少硫化氢残留对产甲烷菌的抑制作用。

3.2 关键工艺参数设计

预处理阶段参数以保障水质均化与负荷削减效果为核心。调节池水力停留时间控制在6至8小时,确保进水水质水量稳定;沉淀池絮凝剂投加量设定为聚合氯化铝100至150mg/L、聚丙烯酰胺5至8mg/L,沉降时间控制在2至3小时,将出水悬浮物浓度可稳定控制在50mg/L以下。

产酸—硫酸盐还原反应器参数围绕强化硫酸盐还原菌活性设计。反应器有效容积根据实际处理规模配置为500至800m³,水力停留时间8至12小时,反应温度维持在28至35℃的中温区间,pH调控在4.5至6.0。进水SO₄²⁻负荷控制在3.0至4.0kg/(m³·d)每天,通过间歇投加乙酸钠维持碳硫摩尔比2.5至3.0。该参数组合下硫酸盐还原菌活性达到最优,硫酸盐还原率可提升至70%以上。

产甲烷相上流式厌氧污泥床反应器参数聚焦提升甲烷产率与三相分离效率。反应器有效容积设定为800至1200m³,水力停

留时间24至36小时, pH调节至7.0至7.5的适宜范围, 上升流速控制在0.6至0.8m/h, 颗粒污泥浓度维持在30至50g/L。依托三相分离器实现气液固三相高效分离, 系统甲烷产率可达0.25至0.35m³/kgCOD, 确保沼液中甲烷含量为60%至70%。

深度净化阶段参数以强化污染物终端去除为目标。气体吹脱塔采用逆流操作模式, 气液比控制在100:1至150:1, 废水pH调节至6.6及以下, 保障硫化物高效分离; 氯化亚铁投加量根据进水硫酸盐浓度动态适配, 维持铁硫摩尔比2.0至2.5, 反应时间控制在30至45分钟; 过滤单元选用石英砂滤料, 滤速设定为6至8m/h, 反冲洗周期为12至24小时, 确保出水水质清澈达标。

3.3 系统运行控制要点

为保障处理系统稳定高效运行, 项目构建监测—反馈—调整闭环运行控制机制。技术人员设定全流程在线监测体系, 重点监测进出水硫酸根浓度、化学需氧量、pH值、温度、悬浮物、重金属含量, 同时实时追踪反应器内溶解氧、氧化还原电位及微生物活性等核心指标, 通过指标数据动态反馈指导运行参数调整。针对矿区废水水质季节性波动特征, 技术团队优化调节池缓冲容量设计, 丰水期采用部分出水回流方式稀释进水浓度, 避免负荷冲击; 枯水期则适当提升碳源投加量, 确保进水负荷维持稳定水平。

微生物群落调控是系统高效运行的核心保障, 技术人员定期向反应器内补充硫酸盐还原菌菌剂与二价铁营养盐, 每三个月开展一次微生物群落专项分析, 根据优势菌群结构变化精准调整运行参数, 维持功能微生物活性。设备维护方面, 运行团队建立常态化维护机制: 每月对格栅与沉淀池底泥进行清理, 每六个月对反应器实施反冲洗作业, 防止硫化亚铁沉淀与污泥结垢造成设备堵塞; 同时定期更换沼气脱硫装置内的脱硫剂, 确保脱硫效率稳定在95%及以上, 保障沼气回收利用安全。

3.4 系统运行效能

陕北神府矿区高硫酸盐矿井废水经由厌氧生化处理系统处理后, 在进水硫酸根浓度1000至1500mg/L、化学需氧量浓度300至500mg/L的工况条件下, 系统硫酸盐去除率可稳定达到75%以上, 化学需氧量去除率维持在60%以上。各项指标均满足煤炭工业污染物排放标准要求, 有效降低废水排放对周边水体的污染风险。该处理系统的落地应用有效阻断高硫酸盐矿井废水对区域水环境的破坏路径, 减少污染物向地下水与地表水体的迁移扩散, 缓解矿区地下水酸化与土壤盐碱化问题, 系统运行过程中产生的沼气经脱硫处理后可回收再利用, 实现能源资源化回收, 契合矿区循环经济发展理念。同时, 处理后出水可直接用于矿区

绿化灌溉或工业循环用水, 显著提升水资源利用率。

4 结语

总而言之, 聚焦陕北神府矿区高硫酸盐矿井废水水质特征与污染现状, 明确高硫酸盐矿井废水的主要来源及污染机制, 整合物理化学控制技术与生物处理方法, 构建的厌氧生化处理系统有效缓解硫化氢对反应过程的抑制作用, 显著提升硫酸盐还原效率与有机物去除效果, 为矿区高硫酸盐废水达标处理提供切实可行的技术方案, 不仅降低废水排放对区域水环境的污染风险, 也为矿区水资源循环利用创造有利条件, 为陕北神府矿区及同类高硫酸盐废水排放区域提供更具推广价值的生态环保解决方案, 助力能源矿区绿色可持续发展。

【基金项目】

本文系2023年榆林市科技计划项目“陕北神府矿区高硫酸盐矿井废水厌氧生化处理系统的应用研究”(项目编号: 2023-CXY-157)、2024年榆林市产学研项目“榆林市能源化工企业水资源输配系统安全运行及节水环保措施研究”(项目编号: 2024-CXY-090)和2023年陕西省自然科学基金基础研究计划“基于陕北油田污染土壤导致的河流地表水环境非点源污染研究”(项目编号: 2023-JC-QN-0333)阶段性成果之一。

【参考文献】

- [1]夏侯铭安, 张莉, 徐智敏, 等. 硫酸盐还原菌修复煤矿高硫酸盐矿井水的缓释碳源筛选实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 1-14[2025-12-19].
- [2]孙亚军, 郭娟, 徐智敏. 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, 2025, 50(1): 584-599.
- [3]杜华栋, 刘云龙. 1995—2021年榆神府矿区景观生态风险时空异质性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 270-279.
- [4]申艳军, 杨博涵. 黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 104-117.
- [5]王双明, 申艳军, 孙强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(04): 5-19.

作者简介:

刘聪(1985—), 女, 汉族, 陕西渭南人, 硕士研究生, 副教授, 污废水生物处理理论与技术。

董茹(1987—), 女, 汉族, 陕西榆林人, 硕士研究生, 副教授, 长距离输水系统水力优化及安全防护研究。

杜娟(1986—), 女, 汉族, 陕西榆林人, 硕士研究生, 副教授, 河流非点源治理及石油污染土壤的修复研究。