

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.014

煤矿酸性矿井水达地表水准Ⅲ类标准处理工艺设计

李国东

(煤炭工业太原设计研究院集团有限公司, 山西 太原 030000)

摘要: 山西某煤矿缺少矿井水处理设施,故需新建矿井水处理站,其设计处理规模为200 m³/h。煤矿酸性矿井水处理采用“预沉调节池+曝气氧化反应池+混凝反应除氟高效沉淀池+除铁除锰滤池+复合滤料生物滤池+超滤”组合工艺,有效去除矿井水中SS、COD、BOD₅、氨氮、铁、锰、氟、石油类等污染物,出水水质(TN除外)达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准,尾水回用或排放。该组合工艺运行成本约1.574元/m³,其中高效除氟药剂费占41.93%,高效除氟药剂用于矿井水中低浓度氟的去除,克服了传统除氟技术的不足,且具备运行管理简单的优势。此外,超滤系统对矿井水出水水质稳定具有重要保障作用。

关键词: 矿井水; 酸性; 除氟; 高效沉淀池; 生物滤池; 超滤

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0090-06

Design of a Treatment Process for Acidic Mine Water in Coal Mines to Meet Quasi-class III Limit for Surface Water

LI Guo-dong

(Taiyuan Design Research Institute for Coal Industry Group Co. Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: A coal mine in Shanxi Province currently lacks adequate mine water treatment facilities. Therefore, it is necessary to construct a new mine water treatment station with a designed treatment capacity of 200 m³/h. The treatment of acidic mine water in the coal mine employed a combined process consisting of pre-sedimentation regulating tank, aeration oxidation reaction tank, coagulation and fluoride removal high-efficiency sedimentation tank, iron and manganese removal filter, dual media biological filter, and ultrafiltration. This integrated approach effectively removed key pollutants such as SS, COD, BOD₅, ammonia nitrogen, iron, manganese, fluoride, and petroleum from the mine water. The monitoring indicators of the effluent (excluding TN) met the quasi-class III limit specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The resulting tailwater can either be reused or safely discharged. The operating cost was approximately 1.574 yuan/m³, with high-efficiency defluoridation reagent accounting for 41.93% of the total. These reagents were specifically employed to remove low-concentration fluoride from the mine water, effectively addressing the limitations of traditional fluoride removal methods while offering the advantages of straightforward operation and ease of management. Furthermore, the ultra-filtration system played a critical role in maintaining the consistent quality of treated effluent.

Key words: mine water; acidity; fluoride removal; high-efficiency sedimentation tank; biological filter; ultra-filtration

煤炭开采过程会产生大量矿井水^[1],其水质受地层岩性,巷道煤粉,岩粉和开采活动排出的油脂、乳化液、废弃物及人类排泄物等多种因素影响,具有污染物组分复杂的特性^[2]。矿井水经传统混凝+沉淀+过滤、重介质混凝沉淀+过滤、超磁分离以及短程陶瓷膜净化等技术^[2-3]处理后水质可符合《煤矿井下消防、洒水设计规范》(GB 50383—2016)、《煤炭工业给水排水设计规范》(GB 50810—2012)中表2.2.11-1及《煤炭工业污染物排放标准》(GB 20426—2006)要求。随着环保政策日趋严格,山西省某矿井水处理站的出水水质(TN除外)须满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准后回用或排放。根据矿井水中污染物超标情况,并结合项目用地、工人操作水平、建设投资及运行成本等因素,选择运行灵活、可靠稳定、节能高效的处理工艺以保证矿井水经处理后达标。

1 项目概况

某煤矿位于山西省临汾市,属于兼并重组矿井,缺少矿井水处理设施,故需新建矿井水处理站。处理站设计规模为200 m³/h,设计每天运行20 h,矿井水经处理,出水水质须达到GB 3838—2002准Ⅲ类标准后回用或排放。同时矿井水处理站存在用地紧张、进水水质复杂、工人操作管理水平低等诸多不利因素,选择合理的矿井水处理工艺并保障出水水质稳定达标是需重点解决的问题。设计进、出水水质见表1,其中,设计进水pH为4,设计出水pH为6~9。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L⁻¹

项目	COD	SS	BOD ₅	NH ₃ -N	Fe	Mn	氟化物	溶解性总固体	石油类
进水	120	1 000	15	4.0	20	5	2.0	1 200	8.0
出水	≤20		≤4	≤1.0	≤0.3	≤0.1	≤1.0	≤1 500	≤0.05

通过水质监测可知,矿井水水温在20℃左右,且相对稳定,随季节变化不大。煤层中含有的硫铁矿在煤炭开采过程中与空气、水及微生物作用,并发生一系列物化、生化反应形成H₂SO₄和Fe³⁺,这是矿井水偏酸性的主要原因;同时酸性矿井水的侵蚀作用使煤层、岩层中含有的铁、锰、氟等析出并溶于水,进而导致矿井水中铁、锰、氟等指标偏高;煤炭开采过程中排放的油脂、乳化液、废弃物及人类排

泄物等导致矿井水中COD、BOD₅、氨氮、石油类等污染物超标。

2 处理工艺选择

矿井水处理工艺流程见图1。

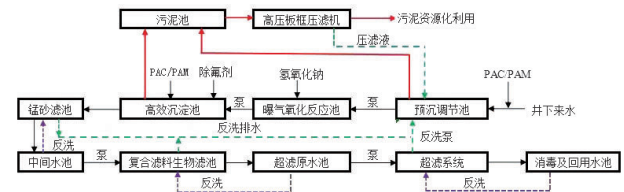


图1 矿井水处理工艺流程

Fig.1 Process flow chart of mine water treatment

《煤矿安全规程》要求应在20 h内排出矿井24 h正常涌水量,矿井排水集中在每日用电低峰期,每次排水时间为3~4 h^[4],导致井下排水水质、水量与矿井水处理站工况不匹配,为调节水质、水量,降低后续污染物负荷和加药量,并确保该处理站安全稳定运行,需设置预沉调节池。矿井水呈酸性且铁锰含量较高,而pH是影响铁锰去除的关键因素,pH>7时铁可以顺利去除,pH≥7.5时采用接触氧化滤池的除铁除锰效果较好^[5],同时鉴于石灰调节pH具有加药量及污泥产量大、工作环境条件差的缺点,故采用投加氢氧化钠的方式将pH调节至7.5以满足除铁除锰要求。由于矿井水中COD主要由还原性煤粉、二价铁、二价锰及少量有机污染物等组成,随着大量煤粉、铁、锰等指标的去除,COD会大幅下降。该处理站进水中氟超标,常用的除氟方法包括化学沉淀法、混凝沉淀法、吸附法和膜法等^[6]。化学沉淀法利用石灰、氯化钙与水中氟离子反应形成氟化钙沉淀以完成对水中氟的去除,适用于高浓度含氟水的处理,但无法将出水氟浓度降至10 mg/L以下^[7];吸附法可将水中氟降至1 mg/L以下,但存在吸附滤料再生较困难以及含氟再生废液需进行处理等不足;反渗透膜法除氟效果好,但存在反渗透浓水需妥善处置的难题,较少用于矿井水单独除氟^[7]。研究^[8]表明,混凝反应阶段投加新型高效除氟药剂,经混凝沉淀等工序可将水中氟有效去除。矿井水中溶解性BOD₅和氨氮主要受煤炭开采过程中人为活动影响,需采用生物处理工序对其进行去除。研究^[9]表明,采用曝气生物滤池可去除微污染水中的氨氮并保证出水氨氮<1 mg/L。

综上,采用“预沉调节池+曝气氧化反应池+混

凝反应除氟高效沉淀池+除铁除锰滤池+复合滤料生物滤池+超滤”工艺对矿井水进行净化处理。

3 主要建(构)筑物及工艺参数

3.1 预沉调节池及曝气氧化反应池

预沉调节池及曝气氧化反应池合建,1座共2格,采用地下钢筋混凝土结构。预沉调节池单格尺寸28.4 m×6.0 m×5.0 m,有效调节时间7.5 h,进水端设穿孔花墙配水和污泥斗。刮泥系统采用便于维护检修的桁车式刮泥机1套,将底部沉淀的煤泥刮至泥斗,并通过潜水排泥泵($Q=40\text{ m}^3/\text{h}$, $H=220\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$, 2用1冷备)排至污泥池。出水端设提升泵,2用1备,单台 $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$,将矿井水提升至曝气氧化反应池进行处理。曝气氧化反应池单格尺寸6.0 m×5.5 m×5.0 m,有效停留时间1.5 h,内设穿孔曝气管和防短流导流墙,其出水端设提升泵,2用1备,单台 $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$, $H=180\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$,将水提升至混凝反应除氟高效沉淀池处理。

3.2 综合净化间

综合净化间1座,尺寸24.0 m×29.1 m×8.5 m,局部二层,使用门式钢架结构。采用高度集成化布置,设置净化间、污泥处理车间、地下泵房、组合水池、配电室、中央集中控制室、化验室、药剂库、在线监测室、危废存储间等。

3.2.1 混凝反应除氟高效沉淀池

混凝反应除氟高效沉淀池共2套,单套处理水量 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 。混合区尺寸1.0 m×1.0 m×3.0 m,停留时间1.5 min,投加PAC和新型高效除氟药剂;絮凝区尺寸2.0 m×2.0 m×6.0 m,停留时间13.2 min,投加PAM;沉淀区尺寸4.5 m×4.5 m×7.0 m,表面负荷为 $6.1\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,设置直径4.5 m的中心传动刮泥机,单套设置污泥回流及排泥泵,2用1冷备,单台 $Q=15\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=4\text{ kW}$,污泥排出量以及回流量可根据进水水质通过变频调速电机调节。高效沉淀系统同时具有污泥浓缩功能,污泥含固率可达3%以上。

3.2.2 除铁除锰滤池

高效沉淀池出水自流进入具有除铁除锰功能的滤池(2套),单套尺寸4.5 m×4.0 m×4.0 m,滤速 5.56 m/h ,采用含锰量(以 MnO_2 计) $>35\%$ 的天然锰砂滤料,粒径 $0.6\sim 1.2\text{ mm}$,滤层厚1.5 m。为保证

反冲洗效果并减少耗水量,采用气水联合反冲洗,气冲洗强度 $15\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,水冲洗强度 $5\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 。滤池反冲洗通过自动化控制,当滤池运行液位达到最高设定液位时启动反冲洗程序。配置PAC、PAM、新型高效除氟药剂加药系统,三者的最佳投加量分别为50、1.5、220 mg/L。

3.2.3 复合滤料生物滤池

除铁除锰滤池出水进入中间水池,经泵($Q=100\text{ m}^3/\text{h}$, $H=180\text{ kPa}$, $N=7.5\text{ kW}$, 2用1备)提升至上向流复合滤料生物滤池(2套)进一步去除水中的各类污染物。复合滤料生物滤池单套尺寸4.5 m×4.0 m×5.8 m,处理水量 $100\text{ m}^3/\text{h}$,滤速 5.56 m/h ,采用活性炭及天然沸石复合滤料。活性炭滤料厚1.5 m,粒径 $2\sim 4\text{ mm}$,碘吸附值 $\geq 800\text{ mg/g}$,比表面积 $900\sim 1100\text{ m}^2/\text{g}$,含水率 $<10\%$,强度 $>90\%$,充填密度 $0.35\sim 0.55\text{ g}/\text{cm}^3$;天然沸石滤料厚2 m,粒径 $2\sim 4\text{ mm}$ 。按照气水比2:1并考虑曝气氧化反应池所需曝气量配置风机2台,1用1备,单台 $Q=13.81\text{ m}^3/\text{min}$, $H=58.8\text{ kPa}$, $N=22\text{ kW}$,变频控制。复合滤料生物滤池亦采用气水联合反冲洗,其与除铁除锰滤池共用反冲洗水泵和风机,其中反冲洗风机2台,1用1备,单台 $Q=17.18\text{ m}^3/\text{min}$, $H=58.8\text{ kPa}$, $N=30\text{ kW}$,变频控制;反冲洗水泵3台,2用1备,单台 $Q=250\text{ m}^3/\text{h}$, $H=220\text{ kPa}$, $N=22\text{ kW}$,变频控制。

3.2.4 超滤系统

超滤系统由进水增压泵($Q=110\text{ m}^3/\text{h}$, $H=260\text{ kPa}$, $N=11\text{ kW}$, 2用1备)自超滤原水池取水,并经自清洗过滤器(过滤精度 $100\text{ }\mu\text{m}$)进入超滤膜组件。超滤系统2套,单套处理水量 $100\text{ m}^3/\text{h}$,采用孔径 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 、有效膜面积 75 m^2 的外压式超滤膜(PVDF材质)36支,总通量 $37.04\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,采用错流过滤,回收率 $>90\%$ 。超滤系统反冲洗由水冲洗和空气擦洗组成,反冲洗周期30 min,反冲洗总历时3 min,反冲洗排水进入预沉调节池,空气擦洗气源来自空压机系统。按照水冲洗强度 $100\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 配置超滤反冲洗水泵2台,1用1备,单台 $Q=270\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=22\text{ kW}$;按照气冲洗强度 $0.1\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 并考虑气动阀门控制系统用气量配置空压机及储气罐。超滤膜在运行过程中不断受到微生物、物理、化学等污染,根据其污染程度进行维护性清洗(CEB)和恢复性清洗(CIP),CEB通过在反冲洗管路上自动投加化学药剂实现,其清洗周期约3~7 d,CIP清洗

周期约30~60 d。按照CIP清洗通量 $50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 设2台化学清洗泵,1用1备,单台 $Q=135 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=200 \text{ kPa}$ 、 $N=11 \text{ kW}$,变频控制;设清洗水箱1座, $V=5 \text{ m}^3$,配置清洗加热系统;设清洗保安过滤器1台, $Q=135 \text{ m}^3/\text{h}$,过滤精度 $5 \mu\text{m}$ 。同时配置清洗所需的次氯酸钠、柠檬酸、氢氧化钠加药系统各1套。超滤系统进出水设置压力传感器、流量计等仪表,根据进出水压差、水量等变化实现超滤系统精准反冲洗、CEB及CIP,降低系统药剂消耗和水耗。

3.2.5 组合水池及地下泵房

组合水池为地下钢筋混凝土结构,由中间水池、超滤原水池、消毒回用水池、污泥池组成。中间水池接收滤池出水并储存过滤反冲洗水量,尺寸 $7.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$, $V=126 \text{ m}^3$ 。超滤原水池接收复合滤料生物滤池出水,尺寸 $7.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$, $V=126 \text{ m}^3$ 。污泥池接收预沉调节池及高效沉淀池排泥,尺寸 $7.0 \text{ m} \times 7.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$, $V=220 \text{ m}^3$,内设 $N=3 \text{ kW}$ 潜水搅拌机2台以防止污泥沉积。消毒回用水池接收超滤产水并储存超滤反冲洗和回用消毒水量,尺寸 $7.0 \text{ m} \times 7.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$, $V=220 \text{ m}^3$,采用10%的成品次氯酸钠进行消毒,加药量为 2 mg/L 。超滤系统的高精度过滤作用降低了出水微生物等含量,从而减少了消毒药剂投加量。设地下干式泵房1座,尺寸 $29.1 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$,泵房内设置超滤原水提升泵、过滤反冲洗水泵、超滤反冲洗水泵、风机、污泥提升泵等。

3.2.6 污泥处理系统

污泥处理采用程控自动拉板厢式压滤机,置于综合净化间局部二层的污泥处理间。地下泵房设3台污泥泵,2用1备,单台 $Q=30 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=600 \text{ kPa}$ 、 $N=11 \text{ kW}$,将污泥自污泥池提升至厢式压滤机,压滤液返回至预沉调节池循环处理,泥饼通过泥斗落入运泥小车后外运综合利用。设过滤面积 120 m^2 的程控自动拉板厢式压滤机2台,单台参数如下:滤板尺寸 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$,滤室容积 $V=1777 \text{ L}$, $N=4.0 \text{ kW}$ 。两台设备每天累计运行8次,每次运行时间2.5~3.0 h,泥饼含固率 $>30\%$ 。

3.2.7 智能化控制系统

综合净化间的中央集中控制室设矿井水处理系统智能化监控平台,包括设备层、设施层、平台层、应用层和展示层。采用企业级别的系统架构,结合现场控制系统数据和视频监控设备,通过双端

模式实现远程运维和监管模式的双向运行。智能化控制系统架构见图2。



图2 智能化控制系统架构

Fig.2 Architecture of intelligent control system

设备层设置必要的水质水量监测仪表、阀门等,其监测仪表布置位置及监测指标见表2。

表2 设备层监测仪表布置位置及监测指标

Tab.2 Monitoring instrument locations and monitoring indicators at the equipment level

监测单元	位置	监测指标
预沉调节池	进水	进水流量、COD、氨氮、TP、氟化物、浊度
	池内	出水流量、液位、pH、污泥液位
曝气氧化反应池	池内	液位、pH、曝气量、DO
混凝反应除氟高效沉淀池	进水	进水流量、氟化物、浊度
	出水	氟化物、污泥液位、浊度
除铁除锰滤池	出水	液位、浊度
复合滤料生物滤池	进水	进水流量、曝气量、DO
	出水	浊度
	反冲洗系统	反冲洗气量
超滤系统	进水	进水流量、压力
	出水	出水流量、压力、浊度
	反冲洗系统	反冲洗水流量、压力
回用水池	出水	COD、氨氮、TP、氟化物
污泥池	池内	污泥液位
污泥压滤系统	进口处	压力、进泥流量

设施层以项目具备的调度网络资源、硬件资源、数据资源及其他信息系统为基础,通过对各类资源深度挖掘、高效整合与优化配置,实现系统快速构建与灵活部署。平台层以数据中枢建设为核心,通过搭建远程集控中心,构建统一的实时数据中心与关系型数据中心,实现数据资源的集约化管理。应用层实现整个远程集控中心所有板块的业务逻辑支撑。展示层依托统一门户/集成平台为用户提供统一的访问入口,实现多角色权限分级管理与数据按需呈现。同时其通过可视化大屏动态展示矿井水处理全流程关键指标、设备运行状态及异

常预警信息,支持用户实时查看水质数据曲线、远程启停设备、调整运行参数等操作,以直观友好的交互方式满足多样化监管与运维需求。矿井水处理站智能化控制系统通过部署于处理构筑物及设备层的传感器,实时采集进水及出水水质(COD、氨氮、浊度等)、流量、液位、压力、DO和曝气量等数据,深度融合大数据分析 with 人工智能算法,构建动态数学模型。系统基于实时数据完成智能逻辑计算,并通过闭环反馈控制机制,自动精准调节加药

泵投加量、风机转速、刮排泥设备启停频率等运行参数,实现精准加药、按需曝气及智能排泥的精细化管理,有效减少药剂与能源消耗,最终实现降本增效与绿色可持续运营目标。

4 运行效果

该项目自2023年6月开工建设,于2024年4月竣工,系统经调试并稳定运行2个月,对主要工序出水水质进行10次监测。进水及主要工序平均出水水质见表3。

表3 进水及主要工序平均出水水质

Tab.3 Influent and average effluent quality of main processes

项目	pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	Fe/ (mg·L ⁻¹)	Mn/ (mg·L ⁻¹)	氟化物/ (mg·L ⁻¹)	石油类/ (mg·L ⁻¹)
进水	4.2	115.00	11.95	4.00	15.00	5.10	2.50	8.00
高效沉淀池出水	7.5	35.20	11.20	3.85	1.96	3.92	1.35	2.20
除铁除锰滤池出水	7.5	27.50	10.75	3.80	0.20	0.08	0.92	0.95
复合滤料生物滤池出水	7.5	21.80	3.52	0.83	0.15	0.05	0.82	0.04
超滤系统出水	7.5	17.53	2.24	0.76	0.14	0.04	0.75	0.02

由表3可知,通过曝气氧化反应、混凝反应除氟高效沉淀及过滤工序,COD、铁、锰、氟化物、石油类指标的去除率分别为76.1%、98.7%、98.3%、63.2%和88.1%;混凝沉淀过滤工序对氨氮、BOD₅去除效果较差。曝气氧化反应及混凝反应除氟高效沉淀工序对铁去除效果较好(去除率达86.9%),对锰去除效果较差,锰主要通过除铁除锰滤池去除。复合滤料生物滤池通过沸石、活性炭生物吸附和附着微生物降解对BOD₅、氨氮、石油类进行去除,效果较好,同时其对COD、铁、锰、氟化物等指标均有一定的去除效果。

超滤系统进、出水COD见图3。

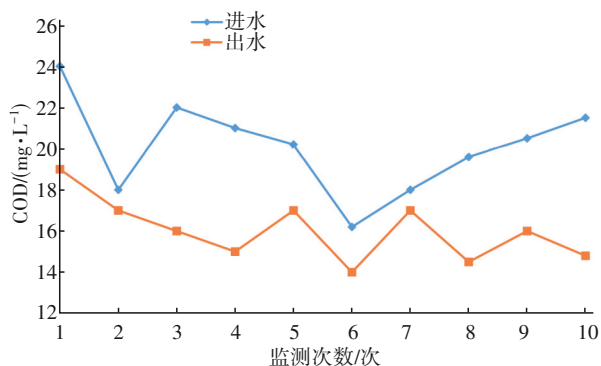


图3 超滤系统进、出水COD

Fig.3 Influent and effluent COD of ultra-filtration system

由图3可知,超滤系统进水COD无法稳定低于20 mg/L,而超滤系统可保证出水COD满足设计要

求。超滤系统通过高精度过滤作用对其他污染物指标也有去除效果,因此,其对出水水质稳定达标具有重要保障作用。

5 经济分析

该项目建设工程费1590万元,吨水投资约4000元/m³。在不考虑设备折旧及维修等其他费用的情况下,运行成本1.574元/m³,其中用于pH调节的氢氧化钠药剂费0.158元/m³,PAC及PAM药剂费0.143元/m³,新型高效除氟药剂费0.660元/m³,超滤清洗药剂费0.060元/m³,消毒药剂费0.030元/m³,人工费0.230元/m³(劳动定员7人,平均工资48000元/a),电费0.293元/m³[电价按0.6元/(kW·h)计]。该项目运行成本较高,主要由于新型高效除氟药剂费较高,占运行成本的41.93%。采用新型高效除氟药剂处理低浓度含氟矿井水,虽药剂成本较高,但克服了化学沉淀法、吸附法、反渗透法的不足,具有运行管理简单的优势。

6 结论

① 采用“预沉调节池+曝气氧化反应池+混凝反应除氟高效沉淀池+除铁除锰滤池+复合滤料生物滤池+超滤”工艺对矿井水进行处理,出水水质(TN除外)达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准,符合设计要求。

② 采用新型高效除氟药剂实现了矿井水中

低浓度氟化物的有效去除,超滤系统通过高精度过滤作用对矿井水出水水质的稳定达标具有重要保障作用。

③ 矿井水处理站智能化控制系统实现了精准加药、精准曝气、刮排泥等设施的高效运行,提高了矿井水处理效率,降低了运行成本,达到了降本增效目的。

参考文献:

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 李福勤,王丛,郑隰州,等.煤矿矿井水处理技术现状与展望[J].工业水处理,2024,44(9):1-6.
LI Fuqin, WANG Cong, ZHENG Jiongzhou, *et al.* Current situation and prospect of coal mine water treatment technology [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(9): 1-6(in Chinese).
- [3] 吕志国,易洋,肖波,等.超磁分离在煤矿矿井水井下处理工程的应用[J].中国给水排水,2018,34(20):105-108.
LÜ Zhiguo, YI Yang, XIAO Bo, *et al.* Engineering application of ultra-magnetic-separation technology in downhole treatment of coal mine water [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 105-108(in Chinese).
- [4] 李福勤,李硕,何绪文,等.煤矿矿井水处理工程存在的问题及对策[J].中国给水排水,2012,28(2):18-20.
LI Fuqin, LI Shuo, HE Xuwen, *et al.* Problems and solutions for mine water treatment works [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(2): 18-20 (in Chinese).
- [5] 陈天意,陈志和,金树峰,等.pH值对滤池处理高浓度铁、锰及氨氮地下水的影响[J].中国给水排水,2015,31(23):5-9.
CHEN Tianyi, CHEN Zhihe, JIN Shufeng, *et al.* Effect

of pH value on treatment of groundwater containing high concentrations of iron, manganese and ammonia nitrogen [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 5-9 (in Chinese).

- [6] 谯贵川,杜松,方惠明,等.煤矿矿井水中氟化物处理发展研究及展望[J].中国煤炭地质,2021,33(11):56-61.
QIAO Guichuan, DU Song, FANG Huiming, *et al.* Study on development of coalmine water fluoride treatment and prospect [J]. Coal Geology of China, 2021, 33(11): 56-61(in Chinese).
- [7] 苏双青,赵焰,徐志清,等.我国煤矿矿井水氟污染现状及除氟技术研究[J].能源与环保,2020,42(11):5-10.
SU Shuangqing, ZHAO Yan, XU Zhiqing, *et al.* Status quo of fluoride pollution of coal mine water in China and research on fluoride removal technology [J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(11): 5-10(in Chinese).
- [8] 章丽萍,吴二勇,姚瑞涵,等.高效除氟药剂对神东矿区含氟矿井水的处理研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(2):84-89.
ZHANG Liping, WU Eryong, YAO Ruihan, *et al.* Treatment of fluoride-containing mine water from Shendong coalmine with high efficiency fluoridation agent [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(2): 84-89(in Chinese).
- [9] 陆少鸣,杨立,陈艺韵,等.高速给水曝气生物滤池预处理微污染原水[J].中国给水排水,2009,25(18):64-70.
LU Shaoming, YANG Li, CHEN Yiyun, *et al.* High-rate UBAF for pretreatment of micro-polluted raw water [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(18): 64-70 (in Chinese).

作者简介:李国东(1984-),男,山西夏县人,硕士,高级工程师,主要从事煤矿矿井水及生活污水处理、市政污水处理等方面的设计研究工作。

E-mail:lgd20031609@163.com

收稿日期:2024-11-29

修回日期:2024-12-16

(编辑:沈靖怡)