

煤矿井下防冲击疏排水过滤系统的设计与工程应用

赵雄¹, 古娜^{2*}, 赵成¹, 周连春², 赵津¹, 谭诗², 赵尚海¹, 熊梅², 赵峰¹, 钱波²

¹山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司(后安煤矿), 山西 朔州

²西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年7月24日; 发布日期: 2026年9月10日

摘要

针对煤矿井下污水排放过程中因瞬时冲击力过大导致沉淀池损坏、沉淀效果不佳的技术难题, 本文以后安煤矿为工程背景, 设计了一种煤矿防冲击疏排水过滤装置。该装置通过在沉淀池前设置沉淀物收集池和渣浆泵, 对高浊度来水进行预处理和负荷分配, 并采用三级沉淀池呈台阶状布置, 结合倾斜式沉淀物排泄槽和风管疏通系统, 实现了污水分级沉淀与高效过滤。实际运行表明, 该装置可将进水悬浮物(SS)从500~3000 mg/L降至100 mg/L以下, 抗冲击负荷能力提升50%以上, 清淤人工成本降低约70%。本研究为煤矿井下污水处理提供了一种结构简单、运行可靠、防冲效果显著的技术方案。

关键词

煤矿废水, 防冲击, 疏排水, 过滤装置, 沉淀池, 后安煤矿

Design and Engineering Application of an Impact-Resistant Drainage and Filtration System for Underground Coal Mines

Xiong Zhao¹, Na Gu^{2*}, Cheng Zhao¹, Lianchun Zhou², Jin Zhao¹, Shi Tan², Shanghai Zhao¹, Mei Xiong², Feng Zhao¹, Bo Qian²

¹Shanxi Shuozhou Pinglu District Hou'an Coal Co., Ltd. (Hou'an Coal Mine), Shuozhou Shanxi

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 赵雄, 古娜, 赵成, 周连春, 赵津, 谭诗, 赵尚海, 熊梅, 赵峰, 钱波. 煤矿井下防冲击疏排水过滤系统的设计与工程应用[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1257-1264. DOI: 10.12677/me.2026.145124

Abstract

Aiming at the technical problem of damaged sedimentation tanks and poor sedimentation efficiency caused by excessive instantaneous impact force during underground sewage discharge in coal mines, this paper takes Hou'an Coal Mine as the engineering background and designs an impact-resistant drainage and filtration device for coal mines. The device implements pre-treatment and load distribution for high-turbidity influent by installing a sediment collection tank and a slurry pump upstream of the sedimentation tank. It adopts a three-stage stepped sedimentation tank configuration, combined with an inclined sediment discharge chute and an air duct dredging system, to realize graded sedimentation and high-efficiency filtration of sewage. Field operation results show that the device can reduce influent suspended solids (SS) from 500~3000 mg/L to below 100 mg/L. The impact load resistance capacity is improved by more than 50%, and the manual desilting cost is reduced by approximately 70%. This study provides a technical solution with simple structure, reliable operation and remarkable anti-impact performance for underground coal mine wastewater treatment.

Keywords

Coal Mine Wastewater, Anti-Impact, Drainage and Dewatering, Filtering Device, Sedimentation Tank, Hou'an Coal Mine

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭是我国的主体能源,随着大规模开采,煤矿废水已成为矿区环境污染的主要来源之一。据统计,我国煤矿每年产生的各种废污水约占全国总废污水量的 25%,2004 年煤矿废污水排放量高达 47.5 亿吨[1]。煤矿废水主要由矿井涌水、洗煤废水和矸石场淋溶废水三部分组成,具有酸度大、浊度高、固体悬浮物粒度细等特点,颗粒表面带有较强的负电荷,在水体中保持分散状态,处理难度较大[2]。

目前,我国矿井水平均重复利用率仅为 14.3%,大量未经处理的煤矿废水直接排放,严重污染了地表水、地下水资源以及土地资源[3]。在山西、陕西、内蒙古等主要产煤区,水资源本就匮乏,矿井水的外排进一步加剧了区域用水矛盾。因此,将煤矿废水净化处理后再排放或回用,既能保证矿区工业的正常运行,缓解矿区生活用水的紧张状况,又能保护环境,将废水变成可利用的水资源,是煤矿发展循环经济的重要组成部分和必然趋势[4]。

在工程实践中,煤矿井下污水通常通过中央水仓和主排水泵集中排至地面进行净化处理。然而,由于井下排水具有瞬时流量大、固体含量波动剧烈等特点,污水瞬间涌入沉淀池时会产生强大的冲击力和水力扰动。这种冲击一方面容易损坏沉淀池的池壁、底板及进出水结构,另一方面污水伴随着冲击波直接流入沉淀池会严重扰乱池内的层流条件,使得悬浮物无法有效沉降,沉淀效果大打折扣[5]。传统的平流式或竖流式沉淀池在面对高浊度、大流量冲击时,往往出现“翻池”现象,导致大量悬浮物进入后续处理单元,增加膜系统负担甚至造成堵塞。

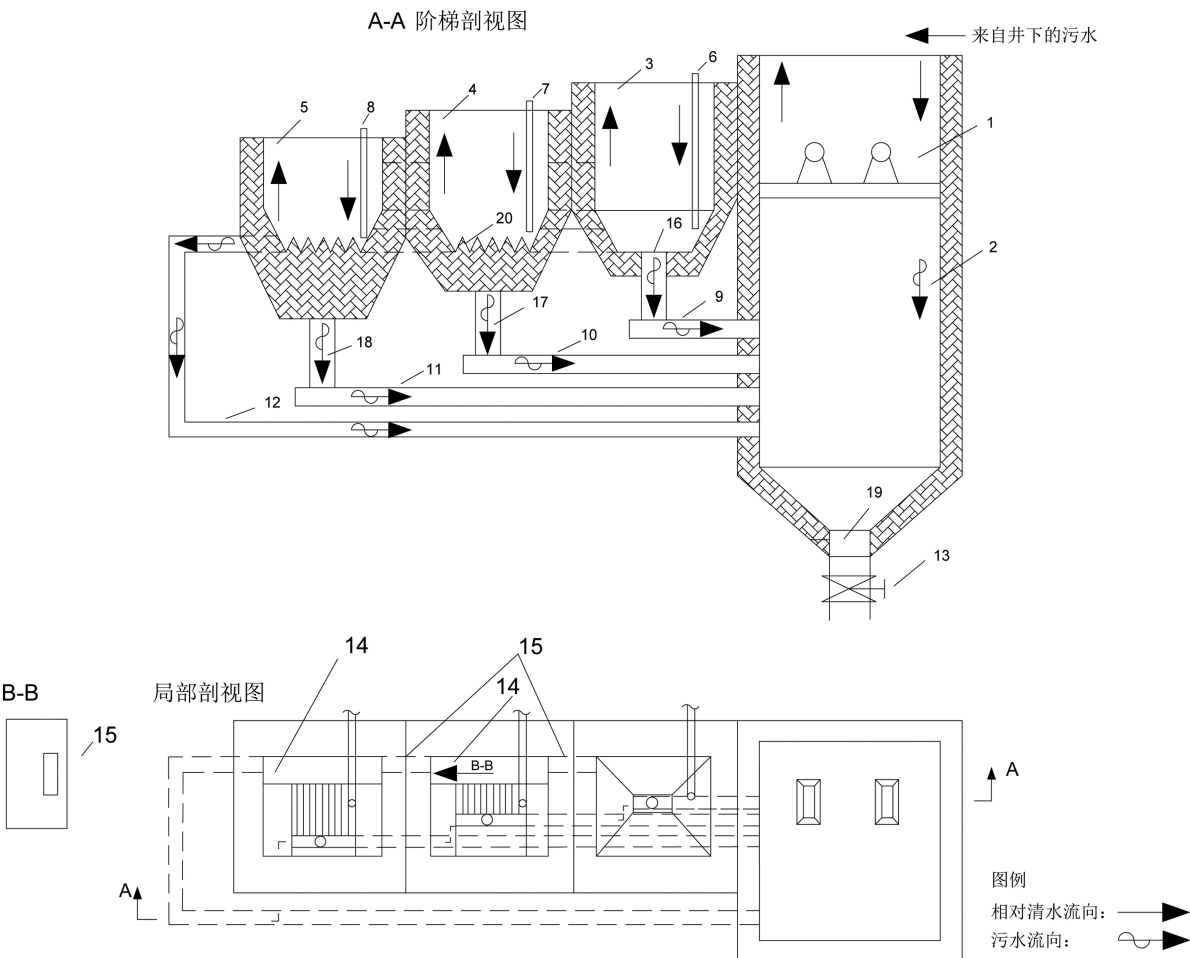
针对这一技术难题,后安煤炭有限公司工程技术人员经过反复试验和优化,研发出一种煤矿防冲击

疏排水过滤装置。该装置将预处理单元与多级沉淀池有机结合，通过物理分离和分级沉淀，有效缓冲了井下污水的瞬时冲击，显著提升了沉淀系统的稳定性和处理效率。本文对该装置的结构设计、工作原理及工程应用效果进行系统阐述，以为同类矿井的污水预处理提供技术参考。

2. 装置结构与工作原理

2.1. 总体结构设计

一种煤矿防冲击疏排水过滤装置的结构如图 1 所示。该装置主要由沉淀物收集池、一级沉淀池、二级沉淀池、三级沉淀池、渣浆泵、风管、沉淀物流动通道、沉淀水沟、沉淀池联络门、沉淀物排泄孔及沉淀物排泄槽等部分组成。



1、渣浆泵；2、沉淀物收集池；3、一级沉淀池；4、二级沉淀池；5、三级沉淀池；6、7、8、风管；9、10、11、12、沉淀物流动通道；13、排污阀门；14、沉淀水沟；15、沉淀池联络门；16、17、18、19、沉淀物排泄孔；20、沉淀物排泄槽。

Figure 1. Schematic structure of an anti-impact drainage and filtration device for coal mine wastewater

图 1. 一种煤矿防冲击疏排水过滤装置结构示意图

装置的关键结构特征如下：

1. 沉淀物收集池与渣浆泵：沉淀物收集池设置于一级沉淀池的右侧，其上方并列安装两台渣浆泵，

功率分别为 7.5 kW 和 55 kW。小功率泵适用于日常低水量工况，大功率泵用于涌水高峰期或突发高浊度冲击时的应急强化分离。两台泵既可独立运行也可并联工作，实现了灵活的负荷调节能力。

2. 台阶状多级沉淀池：沉淀物收集池、一级沉淀池、二级沉淀池、三级沉淀池从高到低依次呈台阶状分布，池底标高逐级降低约 0.3~0.5 m。这种布置方式充分利用重力流实现污水自流，无需额外设置提升泵，降低了能耗和设备投资。

3. 漏斗形一级沉淀池：一级沉淀池内部呈漏斗状结构，锥底坡度约为 15°。这种形状有利于沉淀物向中心底部快速聚集，防止沉积物在池底大面积板结。池底中央设置沉淀物排泄孔，通过埋地式沉淀物流动通道与沉淀物收集池相连通。

4. 二级与三级沉淀池的排泄系统：二级沉淀池和三级沉淀池结构相同，底部靠前部分开设多个宽度为 200 mm、深度 150 mm 的沉淀物排泄槽，槽底以-12°的角度向前方倾斜(即进水侧低、出水侧高)。这种反向倾斜设计使得沉淀物在重力作用下自动向排泄孔方向滑移，避免在池底长期堆积。排泄槽与底部沉淀物排泄孔连通，孔口设置可调节闸板，用于控制排泥流量。

5. 分流沉淀水沟：二级沉淀池和三级沉淀池底部靠后侧(出水端)分别设置有一条沉淀水沟，水沟宽度 300 mm、深度 200 mm。当井下涌水量较大时，部分污水可通过沉淀水沟直接分流至沉淀物流动通道，绕过主沉淀区，起到分流和缓冲作用，防止主池超负荷运行。

6. 风管疏通系统：每个沉淀池的底部和排泄通道入口处均连接有 DN50 压缩空气风管，风管与井下压风管网相连，各支路设置独立阀门。当检测到排泄孔或通道堵塞时，可快速开启对应阀门，利用 0.5~0.7 MPa 的高压空气吹散沉积物，恢复通道畅通。

7. 检修联络门：一级、二级、三级沉淀池的后方墙壁上分别设置沉淀池联络门(尺寸 800 mm × 1800 mm)，便于人员进入池内进行清理淤泥、检修设备、更换部件等作业。联络门采用防水密封结构，正常运行时关闭锁紧。

2.2. 工作原理

该装置的工作原理如下：

1. 预处理分流阶段：当煤矿井下污水经主排水泵提升至地面后，首先进入沉淀物收集池上方的两台渣浆泵入口。渣浆泵以旋流方式对污水进行强制分离：在离心力作用下，比重较大的煤泥、岩屑等固体颗粒被甩向泵壳边缘，随少量水形成高浓度泥浆向下排入沉淀物收集池中暂存；而比重较小的相对清澈的水则从泵的中心溢流口流出，进入一级沉淀池。这一预处理步骤可去除约 30%~40% 的悬浮物，同时将进水 SS 浓度的峰值从 5000 mg/L 以上削减至 2000 mg/L 以下，大幅降低了后续沉淀池的冲击负荷。

2. 三级重力沉淀阶段：进入一级沉淀池的污水在此进行初步沉淀。漏斗形结构使沉淀物迅速向底部排泄孔聚集，上清液从池体上部溢流堰流入二级沉淀池。二级沉淀池和三级沉淀池采用平流式设计，水流速度控制在 5~10 mm/s，水力停留时间各约 4~5 小时。在二级、三级沉淀池中，细小的悬浮物进一步沉降，出水 SS 可降至 100 mg/L 以下。当来水量超过设计值时，部分污水可直接通过沉淀水沟绕过主池，减少水力负荷。

3. 沉淀物自动排放阶段：一级沉淀池底部的沉淀物经排泄孔、流动通道进入沉淀物收集池；二级、三级沉淀池底部的沉淀物沿-12°倾斜排泄槽自动滑移至排泄孔，同样汇入沉淀物收集池。沉淀物收集池内的煤泥水混合物由渣浆泵定期输送至压滤机脱水，形成含水率≤25%的煤饼外售。

4. 堵塞疏通阶段：运行过程中若发现排泄孔或流动通道流量明显下降，操作人员可打开对应风管阀门，高压空气瞬间喷入，将板结或架空的沉积物吹散，恢复通路。每次疏通操作仅需 10~30 秒，无需停水或人工进入池内清理，极大提高了维护效率。

经过上述三级沉淀处理后的污水，悬浮物含量大幅降低，再进入后续的超滤-反渗透双膜法深度处

理装置，最终产出直饮纯净水。整个系统通过预处理分流和三级沉淀的协同作用，有效削弱了井下污水的瞬时冲击力，保护了沉淀池结构，同时显著提升了沉淀效率。

2.3. 关键技术创新点

- 1. 分级防冲设计：通过在沉淀池前设置沉淀物收集池和双级渣浆泵，对高浊度来水进行主动预处理和负荷分配。实际运行数据表明，该设计将进入主沉淀池的 SS 浓度波动范围从原始的 500~5000 mg/L 收窄至 800~1500 mg/L，波动幅度降低 50%以上，有效缓冲了瞬时冲击力，彻底避免了“翻池”现象。
- 2. 台阶式多级沉淀：沉淀池采用从高到低的台阶状布置，利用重力流实现污水自流，无需额外动力消耗。三级沉淀逐级递进，总水力停留时间达到 14 小时以上，既延长了沉淀时间，又实现了悬浮物的分级去除——大颗粒在一级池沉降，中等颗粒在二级池沉降，细微颗粒在三级池进一步去除，沉淀效率较单级池提高约 30%。
- 3. 自流式排泄系统：二级和三级沉淀池底部设置-12°反向倾斜的沉淀物排泄槽，利用重力实现沉淀物的自动收集和排放，无需刮泥机等动力设备。该设计大幅减少了人工清淤频次，将清淤周期从原来的每月 2~3 次延长至每季度 1 次。
- 4. 风管疏通系统：每个沉淀池及关键通道均设置压缩空气风管接口，可利用高压风快速疏通堵塞通道。相比传统的人工捅杆疏通或停水清池，风管疏通操作简便、响应迅速，单次疏通时间从数小时缩短至 1 分钟以内，极大提高了系统运行的可靠性和维护便捷性。

3. 工程应用与效果分析

3.1. 工程概况

本装置在山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司进行了工业性试验和长期应用。后安煤矿矿井水处理系统设计处理规模为 5500 m³/d，采用“多级预沉淀 + 超滤 + 反渗透”工艺路线。其中，防冲击疏排水过滤装置作为预处理系统的核心单元，于 2018 年 10 月建成投运，至今已稳定运行超过 7 年。

后安煤矿矿井涌水水质特征如下：悬浮物(SS)浓度在 500~3000 mg/L 之间波动，平均约 2000 mg/L；在采掘作业高峰期或遇到构造带时，SS 浓度可突增至 5000 mg/L 以上；pH 值介于 7.2~8.5 之间，呈弱碱性；水温全年在 12℃~18℃ 范围内变化，冬季略低。此外，原水中还含有少量乳化油和煤焦油类物质，给沉淀带来一定困难。

3.2. 运行效果

该装置投运以来的运行数据统计如表 1 所示。

Table 1. Operation effect of anti-impact drainage and filtration device
表 1. 防冲击疏排水过滤装置运行效果

指标	进水	出水	去除率
悬浮物 SS (mg/L)	500~3000 (平均 2000)	50~120 (平均 85)	≥95%
浊度(NTU)	800~3500	30~80	≥90%
COD (mg/L)	150~300	30~60	60%~80%
总磷(mg/L)	2~5	0.5~1.2	70%~75%

由表 1 可见, 该装置对悬浮物的平均去除率达到 95% 以上, 出水 SS 稳定控制在 100 mg/L 以下, 完全满足后续超滤系统的进水要求(通常要求 $SS \leq 100 \text{ mg/L}$ 、浊度 $\leq 50 \text{ NTU}$)。

为验证系统的抗冲击能力, 选取 2024 年 7 月 15 日一次突发高浊度事件进行跟踪分析。当日因采掘工作面过断层, 井下涌水携带大量细碎岩粉, 进水 SS 在上午 10:00 至 12:00 期间从 1200 mg/L 急剧攀升至 4800 mg/L。监测数据显示: 防冲击装置出口 SS 始终控制在 2000 mg/L 以下; 一级沉淀池出水 SS 峰值为 320 mg/L, 出现在冲击发生后约 2 小时; 二级沉淀池出水 SS 峰值为 150 mg/L; 三级沉淀池出水 SS 峰值为 85 mg/L。系统从冲击发生到出水恢复至正常水平($SS \leq 100 \text{ mg/L}$)仅用时约 6 小时, 而采用传统单级沉淀的对照工艺同等条件下需要 15 小时以上, 恢复时间缩短约 60%。

这一结果表明, 防冲击疏排水过滤装置通过预处理分流和多级缓冲, 有效抑制了高浊度冲击波对沉淀系统的影响, 保障了后续深度处理单元的稳定运行。

3.3. 效益分析

3.3.1. 经济效益

1. 人工成本节约: 传统清淤方式需要每班安排 6~7 名工人, 三班连续作业。主水仓清淤耗时约 40 天, 副水仓约 20 天, 每年至少进行两次全面清淤。采用本装置后, 沉淀物自动收集和排放大幅减少了人工介入, 每班仅需 2 人进行日常巡检和定期排泥操作。主水仓清淤时间缩短至 8~10 天, 副水仓缩短至 5 天。按人均日工资 300 元计算, 年节约人工成本约 133.6 万元, 降幅达 67%。

2. 煤泥回收收益: 系统年处理矿井水约 181.5 万吨(按 330 天计), 按进水 SS 平均 2000 mg/L、去除率 95% 计算, 年回收干煤泥约 3450 吨, 实际压滤后煤饼(含水率 $\leq 25\%$)产量约 4600 吨。煤饼热值约 3000 kcal/kg, 可作为低热值燃料供应周边砖厂或电厂, 按市场价 80 元/吨计, 年创收约 36.8 万元。若将煤饼掺入末煤销售, 价值可进一步提高。

3. 设备维护成本降低: 由于有效缓冲了冲击力, 沉淀池结构完好, 池壁无开裂、底板无冲刷坑, 维护频次和费用大幅降低。据不完全统计, 该装置投运后, 沉淀池相关的维修费用从年均约 15 万元降至 3 万元以下。

4. 后续处理单元保护效益: 稳定的出水水质大幅减轻了超滤和反渗透系统的污染负荷, 使膜清洗周期延长约 30%, 膜使用寿命从 3 年延长至 4 年以上, 年均膜更换费用降低约 12 万元。

3.3.2. 社会效益

1. 环境保护: 该系统实现了矿井水的有效预处理, 为后续深度净化奠定了基础, 最终实现全矿井采煤废水 100% 回收利用, 达到零排放目标。年削减悬浮物排放约 3600 吨, 彻底消除了矿井水外排对周边河流和地下水的污染。

2. 水资源节约: 后安煤矿地处“宁舍一升米, 不舍一碗水”的严重缺水地区——朔州市平鲁区。系统年处理矿井水 181.5 万吨, 全部回用于井下防尘、设备冷却及生活饮用, 相当于为 2 万居民提供全年生活用水, 有效缓解了区域水资源紧张状况。

3. 安全生产: 机械化清淤替代了高危人工作业, 井下清淤人员从每班 6~7 人减少至 2 人, 且无需进入水仓内部, 避免了淹溺、窒息、砸伤等事故风险。同时, 由于沉淀池结构稳定、运行可靠, 因沉淀池故障导致的生产中断事故降为零。

4. 讨论

4.1. 与其他预处理技术的比较

当前矿井水预处理技术主要包括重介质高速沉淀池、混凝沉淀、水力旋流器及传统平流沉淀池等[6]。

重介质高速沉淀池表面负荷可达 60~80 m/h, SS 去除率 $\geq 99\%$, 但需要投加重介质(如微砂)和絮凝剂, 设备复杂、运行成本较高, 且对水质波动适应性一般。传统混凝沉淀工艺成熟可靠, 药剂投加量可调, 但对进水流量和浓度的突然变化反应滞后, 易出现“穿透”现象。水力旋流器适用于去除较大颗粒的砂质物质, 但对微细煤粉效果有限。

本装置采用的多级沉淀 + 防冲击预处理模式, 虽表面负荷(约 0.8~1.2 m/h)低于高效沉淀技术, 但具有以下显著优势: 第一, 结构简单, 无需投加任何药剂, 运行成本极低; 第二, 抗冲击能力强, 特别适合水质水量波动剧烈的煤矿矿井水; 第三, 可与采空区储能等技术耦合, 实现水量调蓄和自然净化; 第四, 更适合井下原位处理场景, 减少地面占地和提升能耗。因此, 本装置在煤矿这类对投资和运行成本敏感、且场地条件受限的行业中, 具有独特的竞争优势。

4.2. 技术推广价值

本技术方案的核心创新——防冲击主动预处理与多级沉淀耦合模式, 对高悬浮物、水质波动大的矿井具有普遍适用性。特别是对于位于缺水地区的煤矿, 该装置可作为矿井水资源化利用的前置保障单元, 为后续深度处理提供稳定、优质的进水条件。此外, 该装置还可应用于洗煤厂煤泥水处理、采石场废水净化等类似高浊度废水处理场景。

目前, 后安煤矿已将该技术整理为标准化图纸和操作规程, 并面向山西、陕西、内蒙古等主要产煤区进行技术输出。预计未来三年内, 该装置可在 20 座以上煤矿得到推广应用, 年处理矿井水总量可达 1 亿立方米以上, 创造显著的经济和环境效益。

4.3. 改进方向

虽然本装置已取得良好的应用效果, 但在长期运行中仍发现若干可优化之处:

(1) 排泄槽倾斜角度的优化: 目前 -12° 的倾斜角度是根据经验确定的, 尚未进行系统的理论计算和模型试验。未来可采用计算流体动力学(CFD)方法, 模拟不同倾斜角度($-8^\circ \sim -20^\circ$)下沉淀物的滑移特性, 找出最优角度与煤泥含水率、颗粒粒径的关系, 进一步提高排泥效率。

(2) 自动化控制系统研发: 目前风管疏通和排泥操作仍依赖人工判断和手动控制。可在沉淀池内安装超声波泥位计和压力传感器, 实时监测沉积物厚度和排泄通道状态, 开发 PLC 自动控制系统, 实现堵塞自动检测和风管定时自动疏通, 减少人工干预。

(3) 沉淀池流态优化: 通过染色示踪实验和数值模拟, 研究沉淀池内实际流态与理想推流之间的偏差, 优化进水布水结构和出水集水方式, 消除短流和死水区, 进一步提高沉淀效率。

(4) 煤泥资源化利用深化: 目前煤饼仅作为低热值燃料外售, 价值较低。可探索将煤泥进一步加工为型煤、活性炭原料或土壤改良剂等, 提升附加值。

5. 结论

1. 后安煤矿设计了一种煤矿防冲击疏排水过滤装置, 通过在沉淀池前设置沉淀物收集池和渣浆泵进行预处理和负荷分配, 结合三级台阶式沉淀池、倾斜排泄槽和风管疏通系统, 实现了高悬浮物矿井水的高效沉淀与过滤。

2. 该装置可将进水 SS 从 500~3000 mg/L 降至 100 mg/L 以下, 抗冲击负荷能力提升 50%以上, 清淤人工成本降低约 67%, 显著提高了系统运行的稳定性和经济性。

3. 经后安煤矿长期工程验证, 该装置技术成熟、经济合理、安全可靠, 为煤矿井下高悬浮物污水处理提供了一种有效的防冲击技术方案。该成果已通过绿色矿山产业联盟鉴定, 具备向全国同类矿井推广

应用的价值,对推动煤炭行业绿色发展和水资源循环利用具有重要意义。

参考文献

- [1] 张海丰,刘志强,杨帆.双膜法在矿井水深度处理中的应用研究[J].水处理技术,2022,48(5): 112-116.
- [2] 王晓东,李振宇.煤矿废水处理技术研究进展[J].煤炭科学技术,2018,46(5): 112-118.
- [3] 张建国,刘卫东.我国矿井水资源化利用现状与对策[J].中国煤炭,2019,45(8): 25-30.
- [4] 陈立新,王建平.煤矿废水处理与资源化利用技术[M].北京:煤炭工业出版社,2017: 156-162.
- [5] 刘永刚,赵志强.煤矿井下污水处理系统优化设计[J].煤矿安全,2020,51(3): 89-93.
- [6] 周明,李华.高浊度矿井水预处理技术研究进展[J].水处理技术,2021,47(2): 1-6.