

矿区整体疏干排水、水处理系统平衡的研究

孙志勇

国能宝清煤电化有限公司 黑龙江 双鸭山 155600

摘要：针对北方干旱半干旱地区露天煤矿疏干排水与水处理系统失衡问题，本研究分析矿区水文地质条件及水害特征，找出水量时空匹配失衡等四大核心矛盾。提出以精准水量核算与调蓄缓冲优化为基础、水质分级分类处理为核心、一体化联动调度为保障、源头截水防护为延伸的技术路径。通过构建“分级收集—分类处理—分质回用”体系及“削峰填谷、时序适配”机制，可实现系统协同平衡，提升水资源回用效率，降低能耗与环境风险，提供参考。

关键词：露天煤矿；矿区疏干排水；水处理系统；水量平衡；水资源回用

引言：露天煤矿大规模开采需持续疏干排水以保障采场边坡稳定与作业安全，但北方干旱半干旱生态脆弱区水资源极度匮乏，疏干排水若处理不当，既造成宝贵地下水资源浪费，又可能引发区域地下水位下降、土地荒漠化等生态问题。同时，矿坑水中悬浮物、重金属及有机污染物若直接外排，将严重威胁周边水环境安全。因此，系统研究矿区疏干排水与水处理系统的平衡机制，实现水资源高效回用与污染协同管控，已成为露天煤矿绿色开采亟需解决的关键技术难题。

1 露天煤矿矿区水文地质及水害排水基础概况

1.1 矿区基础水文地质条件

研究选取北方干旱半干旱地区典型露天煤矿，其地貌以缓坡丘陵与滩地相间为主，地形平缓，植被覆盖率低，水土涵养差。区域地层自上而下依次为第四系风积沙层等，砂砾石含水层渗透性强、储水大，是地下水主要补给源。煤系地层整体完整，局部有小型断层等，导水性中等，地下水接受多种补给，径流缓慢，天然状态下循环平衡。露天煤矿开采破除隔水屏障，形成临空面，地下水向采场汇集，影响范围扩大，涌水总量递增。矿区降水年内不均，汛期短时强降雨集中，非汛期干旱少雨，形成汛期涌水集中、枯水期偏少的水文特征，给疏干排水与水处理系统运行带来挑战。

1.2 矿区水害及排水核心特征

露天煤矿矿区水体来源主要分为两类，一是天然地下水常年渗流补给形成的常态疏干涌水，水质较好、污染物含量低，仅含少量泥沙悬浮物；二是大气降水、地表径流汇集形成的季节性汇流水，水体裹挟大量煤泥、岩土碎屑，浊度极高、固体悬浮物超标，短时水量峰值激增。相较于井工煤矿，露天煤矿排水具备三大鲜明特征，一是排水范围广、作业点位分散，采场、排土场、边坡平台多处需同步排水，难以集中统一管控；二是排

水时序波动大，汛期与枯水期水量差值悬殊，系统峰谷运行负荷差异极大；三是水质水量匹配复杂，常态涌水水质优可直接回用，季节性汇流水污染程度高需深度处理。若疏干排水管控不到位，采场积水会淹没采掘设备、软化边坡基底岩土，诱发边坡滑坡、坍塌等地质灾害，威胁现场施工人员及设备安全；若水处理系统与排水工况不匹配，未经达标处理的矿坑水外排，会造成周边土壤盐碱化、地表水体悬浮物超标，破坏区域生态环境，同时大量可回用疏干水资源白白浪费，加剧矿区生产用水供需矛盾^[1]。

1.3 现有疏干排水及水处理系统建设现状

该露天煤矿建成基础疏干排水网络，含采场临时排水泵站等，水处理系统仅有一级混凝沉淀处理站，无深度净化及回用设施。疏干排水系统采用传统刚性强排模式，泵站按汛期峰值水量配置，枯水期能耗高，且排水调度无精准管控，各点位独立运行，常出现失衡现象。水处理系统按平均水量设计，未考虑汛期冲击负荷，汛期处理能力不足，枯水期运行不稳定，水质不达标。同时，排水与水处理系统独立运行，无联动调控机制，水量水质波动冲击水处理工艺，系统运行效率低，无法满足安全生产和环保达标要求。

2 露天煤矿疏干排水与水处理系统失衡核心问题及成因分析

2.1 水量供需时空匹配失衡，调蓄缓冲能力不足

水量时空匹配失衡是当前两大系统运行不协调的核心首要问题。露天煤矿开采周期逐年推进，开采深度与作业范围持续扩大，矿区地下水疏干涌水量动态增长，但现有疏干排水设施为前期一次性建成，未按照开采时序动态优化升级，排水能力与现阶段实际涌水总量不匹配。时间维度上，汛期短时强降雨引发地表汇流叠加地下水涌水，总排水量瞬间飙升，排水泵站、输水管道及

水处理站处理容量达到极限,无大型调蓄池进行水量缓冲滞蓄,超额水量只能未经处理直接外排;枯水期涌水量大幅缩减,排水与水处理设备低负荷低效运行,设备损耗与电能消耗持续增加。空间维度上,矿区排水点位布局分散,边坡截水、采场集水、排土场排水各环节衔接不畅,高处排水汇流过快冲刷边坡,低处集水点位排水能力不足长期积水,各区域排水水量无法均衡调配,水处理系统进水水量忽高忽低,工艺运行参数难以稳定调控,直接导致水处理净化效果大幅波动,系统整体运行始终处于无序失衡状态。

2.2 水处理工艺适配性不足,水质处理分级管控缺失

露天煤矿不同来源矿坑水水质差异悬殊,常态地下水疏干水水质优良,悬浮物、污染物含量极低,仅需简单沉淀处理即可满足矿区采掘降尘、设备冷却、绿化养护等生产回用需求;汛期地表汇流裹挟大量煤泥、岩土颗粒及少量淋溶污染物,水体浊度、固体悬浮物、化学需氧量指标大幅超标,需经过混凝、沉淀、过滤、消毒等多工序深度处理方可达标外排或回用^[2]。目前矿区水处理系统采用单一化处理工艺,未实施水质分级分类处理管控模式,优质疏干净水与高污染汇流污水混合统一处理,优质水资源过度加工浪费处理能耗,高污染污水处理工序不足难以达标,工艺适配性严重不足。同时,现有水处理设备老旧落后,自动化调控水平偏低,无法根据进水水质、水量实时调整药剂投加量、沉淀停留时间、过滤运行负荷等核心工艺参数,面对汛期水质水量突发冲击负荷时,系统抗干扰能力极差,出水水质波动超标,既增加水处理运行成本,也无法满足环保管控硬性要求。

2.3 两大系统联动机制缺失,运维管理体系不完善

疏干排水系统与水处理系统分设运维管理班组,未建立一体化联动调度管控机制,排水只管快速抽水外排,水处理只管来水净化处理,两端运行数据不互通、工况调度不同步,形成各自独立运行的管理孤岛。排水泵站启停调度未结合水处理站实时处理能力,盲目强排导致水处理站进水拥堵积压;水处理站运维未提前对接排水水量预判,设备启停调整滞后,应对水量水质变化响应不及时。日常运维管理工作粗放,无常态化水量水质动态监测点位,未定期开展排水管道、泵站设备、水处理构筑物检修维护,管道淤积堵塞、水泵老化低效、水处理池积泥堵塞等问题频发,进一步加剧系统运行失衡。此外,矿区未建立完善水资源回用调配体系,处理达标后的矿坑水未统筹分配至生产作业、生态补水等环节,回用管网配套不完善,优质再生水资源闲置,生产

运营仍大量取用新鲜地表水或地下水,水资源利用效率低下,形成排水、处理、回用全链条资源浪费恶性循环。

2.4 边坡截排水防护薄弱,次生水害防控衔接不足

露天煤矿边坡稳定性防控与疏干排水工作深度绑定,现阶段矿区重采场底部排水、轻边坡源头截水,边坡外围截水沟、导水渠建设标准偏低,部分沟渠破损渗漏、断面尺寸不足,无法有效拦截外部地表径流与边坡浅层地下水,大量水体直接汇入采场内部,额外增加疏干排水与水处理系统运行负荷。边坡排水与采场排水、水处理工作衔接脱节,未形成源头截水、中途导水、末端排水、集中处理的全链条防控体系,边坡渗水长期软化岩土体,不仅提升排水处理压力,还诱发边坡失稳滑坡隐患。同时,系统规划设计阶段未结合露天煤矿长远开采时序,未预留排水扩容、水处理升级改造空间,随着开采推进水害防控压力递增,现有系统无法适配后期生产需求,失衡问题持续加剧且整改难度逐年加大。

3 露天煤矿疏干排水及水处理系统平衡优化核心技术路径

3.1 精准开展水量平衡核算,优化调蓄缓冲设施布局

以矿区水文地质勘察数据、历年降水监测数据、开采时序规划为基础,采用水量均衡法与数值模拟法相结合的方式,精准核算露天煤矿常态地下水涌水量、汛期降水汇流量、枯水期最小排水量及水处理系统有效处理水量,编制年度、季度、月度三级水量平衡测算台账,明确不同时段排水与水处理负荷峰值、谷值区间。按照“削峰填谷、时序适配、空间均衡”原则,优化疏干排水空间布局,升级改造采场底部集水主泵站、边坡分区辅助排水泵站,更换适配不同水量工况的变频节能水泵,实现水泵负荷随涌水量动态自动调节,杜绝设备低负荷空转能耗浪费。新增分级调蓄缓冲水池,分为汛期高浊度污水调蓄池与常态清水缓冲池,汛期超额排水先存入调蓄池滞蓄,错峰输送至水处理系统分步处理,避免水量峰值冲击水处理工艺;枯水期归集常态优质疏干水存入清水池,保障水处理系统稳定连续运行。同步疏通扩容边坡截水沟、采场导水渠,完善排水管网互联互通体系,实现各区域排水水量均衡调配,从源头解决时空水量匹配失衡问题,筑牢两大系统平衡运行基础^[3]。

3.2 推行水质分级分类处理,优化水处理工艺适配升级

结合矿坑水不同来源水质差异,构建**分级收集、分类处理、分质回用**的水处理平衡体系,划分两大水处理处置线路,精准匹配不同水质水体处理需求。针对地下水常态疏干清水,仅设置简易旋流沉淀、砂石过滤

预处理工序,去除少量泥沙悬浮物后,直接接入生产回用管网,用于采掘设备冷却、工作面降尘、矿区道路洒水、排土场绿化灌溉等环节,简化处理流程、降低运行能耗与药剂成本。针对汛期地表高浊度汇流污水,升级改造水处理核心工艺,优化采用“混凝絮凝+高效斜板沉淀+石英砂过滤+活性炭深度净化+消毒杀菌”一体化处理工艺,配套自动化药剂投加系统、在线水质水量监测设备,实时根据进水浊度、污染物浓度调整PAC、PAM药剂投加量及处理运行参数,保障出水水质稳定达标。淘汰老旧低效水处理设备,加装智能化自动化调控模块,提升水处理系统抗冲击负荷能力,实现优质水资源高效回用、污染水体达标处置,兼顾处理效果与运行经济性。

3.3 构建一体化联动调度机制,健全常态化运维管理体系

整合疏干排水与水处理系统运维管理职能,成立专项一体化调度管理班组,搭建远程在线监控调度平台,在排水泵站、调蓄水池、水处理构筑物、进水管网布设在线水量、水质、压力实时监测点位,实现排水运行工况、水处理处理负荷、水质达标情况数据实时共享、同步管控。建立排水与水处理联动调度预案,汛期提前预判降水汇流趋势,提前下调水处理设备运行负荷、开启调蓄池备用容量,有序管控排水强排节奏;枯水期统筹归集疏干清水,稳定水处理连续运行,最大化提升水资源回用比例。制定设备常态化检修维护台账,定期清理排水管网、调蓄池、水处理池淤积杂物,定期检修水泵、加药设备、监测仪表,及时更换老化破损配件,保障全系统设备完好率与运行稳定性。完善水资源回用管网配套建设,打通水处理达标水与矿区生产、绿化、生态补水衔接通道,构建“疏干排水—分级处理—循环回用—达标外排”闭环水循环体系,实现水资源集约高效利用。

3.4 强化源头截水防护,统筹水害防控与系统长效平衡

坚持源头防控、标本兼治原则,强化露天煤矿边坡源头截排水工程建设,加高加固边坡外围截水沟、修复

破损导水设施、扩大沟渠过流断面,有效拦截外部地表径流与边坡浅层渗水,减少无效汇流进入采场,从源头降低疏干排水与水处理系统运行压力。结合露天煤矿中长期开采规划,提前预留疏干排水扩容、水处理系统升级改造建设用地与管网接口,根据开采深度推进节奏,分阶段分步升级排水能力、优化水处理工艺,保障系统适配开采时序动态需求。同步将边坡稳定性监测与排水水处理系统运行监测联动,及时排查积水浸泡、管网渗漏、设备故障等安全隐患,统筹水害安全防控、生态环保治理与水资源平衡利用^[4]。建立系统运行效果定期评估机制,每年度核算水量平衡达标率、水处理出水合格率、水资源回用率,针对性优化调整调度方案与工艺参数,保障疏干排水与水处理系统长期稳定平衡运行。

结束语

本研究识别了露天煤矿疏干排水与水处理系统失衡的核心症结,提出了涵盖水量核算、调蓄缓冲、分级处理、联动调度及源头截水的系统性平衡技术路径。该体系强调“排一处一用”全链条协同,通过削峰填谷调节水量时空分布、分级分类匹配水质处理需求、一体化管控打破管理孤岛,实现水资源集约利用与环境风险可控。研究成果对北方干旱半干旱区露天煤矿具有工程指导价值,可提升回用率、降低能耗、保障达标。未来应探索大数据与人工智能在涌水量预测及智能调度中的应用,推动矿区水资源管理向智慧化、近零排放演进。

参考文献

- [1]梅傲霜,曾一凡,武强,等.西部矿区地下水系统水化学过程及其采动激发效应[J].煤炭学报,2024,49(6):2769-2784.
- [2]李福勤,王丛,郑斐州,等.煤矿矿井水处理技术现状与展望[J].工业水处理,2024,44(9):1-8.
- [3]王晓平.基于“三水共保”在承压水矿井中的应用研究——以龙泉矿区为例[J].科技和产业,2024,24(4):262-267.
- [4]骆新宇.煤矿矿井水处理常规法与晶种法工艺路线浅析研究[J].陕西煤炭,2021,40(z2):56-58.