

砂石矿山露天开采绿色施工环保技术实践

和阳阳

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000

摘要: 针对砂石矿山开采引致的大气、水土及生态破坏,立足绿色矿山零排放标准,梳理污染成因,重点阐述湿法爆破抑尘、粉尘全量收集、废水零排放闭环、固废全资源化及边坡动态修复四大技术,阐明实现零排放的精细化管理路径。结合工程实践,分析体系综合效益,剖析落地瓶颈,提出优化对策并展望智能化趋势,为绿色低碳施工提供参考。

关键词: 砂石矿山; 露天开采; 零排放; 绿色施工; 湿法爆破; 资源全利用

引言: 砂石是城乡基建的重要物质基础,露天开采为主。传统粗放模式重产能轻治理,引致粉尘超排、水土流失、固废堆存、生态退化。当前环保法规趋严、绿色矿山标准升级,“零排放”已成行业准入门槛。实践表明,仅靠末端抑尘、沉淀、覆绿难以达标,须从开采源头系统性重构。本文融合工程实践与技术创新,探讨露天开采零排放绿色施工的关键技术及应用路径,为行业绿色低碳发展提供参考。

1 砂石露天开采施工污染与生态问题分析

1.1 大气污染问题

(1) 开采作业粉尘污染。爆破、凿岩、剥离、破碎等工序产生大量无组织粉尘,其中爆破瞬间冲击波扬起细微岩尘最为集中,凿岩与破碎过程中机械挤压生成大量微细颗粒,剥离作业翻动岩土亦造成粉尘逸散。上述粉尘以无组织形式排放,扩散范围大、控制难度高,对矿区及周边空气质量造成持续性影响。(2) 运输及堆存扬尘污染。运输车辆往返碾压路面导致积尘反复扬起,排土场松散渣土在风力作用下发生风蚀起尘,料场裸露堆料受气流扰动亦产生扬尘,三者叠加形成面源与线源复合污染,影响范围可扩至矿区外围数公里^[1]。(3) 机械尾气污染。挖掘机、装载机等施工机械以柴油为燃料,作业中排放 CO、HC、NO_x 及 PM 等污染物,矿区机械数量多、作业时间长,尾气在局部地形条件下不易扩散,导致区域污染物浓度累积升高。

1.2 水土污染与生态破坏问题

(1) 水体污染与水土流失。雨季雨水冲刷采掘面及排土场,形成携带高浓度悬浮物的矿区径流,直接排入周边水体导致浊度飙升、淤积加重,破坏水生态系统自净能力。大规模剥离地表植被与腐殖土层使土壤母质裸

露,失去植被固持后抗蚀性显著降低,遇强降雨易发生片蚀、沟蚀等严重水土流失。(2) 固体废弃物污染。开采剥离废石及施工废渣大量堆存,不仅侵占土地资源、改变地形地貌,且堆积体结构松散,遇强降雨或外力扰动易发生滑移垮塌,对下游构成安全隐患。(3) 生态功能退化。原生灌草群落被大面积清除,动物迁移通道中断,物种多样性明显下降,区域生态系统结构完整性与功能稳定性遭受不可逆损害。高陡边坡稳定性不足,叠加爆破震动与降雨入渗影响,滑坡、崩塌等地质灾害风险显著上升。

1.3 传统治理模式与零排放标准的差距

当前绿色矿山建设标准已明确要求工业废水零外排、粉尘有组织达标排放、固废合规处置率 100%。然而大量矿山仍采用“末端沉淀+洒水降尘+事后覆绿”的传统治理模式,存在三大结构性短板:一是治理理念滞后,将环保措施视为生产之外的可选项;二是技术集成不足,各环节措施相互割裂;三是标准执行参差,距零排放要求差距显著。传统路径已无法满足日趋严格的环保合规要求,亟需从开采工艺源头进行系统性重构。

2 砂石矿山露天开采零排放绿色施工核心技术及实践应用

2.1 粉尘全量收集与湿法爆破源头控尘技术

(1) 湿法爆破源头控尘技术:传统干式爆破扬尘量大,本技术通过炮孔注水浸润、设置水袋或水封,爆破时水幕接触岩体破裂面,水汽化膨胀捕获微尘,水蒸气削弱扩散动能,扬尘削减 85% 以上。已形成注水参数设计、水封优化及爆破网路调整等成套工法,获省部级节能工奖,实现从末端降尘向源头抑尘转变。(2) 开采全过程粉尘收集技术:凿岩采用湿式工艺,源头抑尘;

破碎、筛分等产生点全封闭,配高效布袋除尘器,排放浓度 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$;剥离作业分层分序开采,减少翻动逸散;料仓采用全封闭筒仓,配仓顶脉冲除尘器,仓储无外逸。两项技术协同构建矿区开采全流程粉尘控制体系。(3)运输环节全密闭与道路抑尘。运输车辆出矿前经全自动冲洗平台清理车身及轮胎,冲洗废水沉淀处理后循环使用;运输全程采用密闭篷布或全封闭车厢覆盖,杜绝沿途遗撒。矿区主干道全硬化处理,两侧布设固定式高压微雾喷淋系统,辅以机械化清扫车辆每日定时作业^[2]。(4)在线监测与智能联动管控。在场界关键点位部署 β 射线法扬尘在线监测系统,实时采集PM10、PM2.5浓度数据,监测值接近预警阈值时自动联动启动雾炮、喷淋等降尘设备,形成“监测—预警—处置”闭环管理,确保任何工况下场界无组织排放满足标准要求,实现“生产不见尘”目标。

2.2 水资源保护与废水零排放闭环循环技术

(1)“雨污分流”排水体系。沿采场边坡顶部及各级台阶修建永久截排水沟,有效拦截上游汇水进入采掘面,清洁雨水经独立导排系统外排,从源头减少污水产生量;采场底部及工业场地分别设置初期雨水收集池和生产废水收集池,受污染水全部泵送至处理系统,严禁外排。(2)高效废水处理工艺。含高悬浮物废水经调节池进入“高效混凝沉淀+多介质过滤+pH调节”三级处理系统,通过投加PAC与PAM加速絮凝沉降,配合石英砂过滤器与活性炭吸附罐去除残余悬浮物,出水悬浮物稳定控制在 $20\text{mg}/\text{L}$ 以下,达回用水标准。(3)水资源闭环循环体系。处理达标的再生水通过独立回用水管网分质供水:高品质再生水供给湿式凿岩、湿法爆破注水及喷淋降尘;一般品质再生水用于道路洒水、绿化灌溉及车辆冲洗。配套建设不少于总用水量10%的应急事故池,确保突发工况无外溢。全矿区实现“取水—用水—处理—回用”闭环循环,工业废水零外排,新鲜水取用量较传统模式削减80%以上。

2.3 固废全资源化利用与无害化处置技术

(1)剥离废石梯级分选全利用。对开采剥离物按岩性与品质实施三级筛分:一级优质硬质废石进入骨料加工系统,经破碎筛分后作为精品砂石骨料销售;二级中等品质废石用于矿区道路路基填筑;三级低品质废石与土状剥离物用于采空区回填、边坡基质层构建。通过梯级利用实现废石“吃干榨净”,废弃物排放总量归零。(2)尾矿与废渣无害化处置。施工尾矿及废渣按岩性分区集中堆存,底部铺设复合防渗层(HDPE土工膜+压实黏土层),经分层压实整平后覆土绿化或作为回填

材料,严禁随意堆弃。建立固废产生—转运—处置全过程电子台账,实现可追溯管理^[3]。(3)表土资源剥离保护。开采前将表层腐殖土与耕植土专项剥离保护,集中堆存于专用表土场,采取播撒草籽、苫盖防护等措施维持其肥力,后期全部用于边坡覆土与土地复垦,实现表土资源100%循环利用。

2.4 边坡动态生态修复与“边采边复”一体化技术

(1)边坡稳定性精准加固。按自上而下顺序对最终边坡全面清理,清除松动危岩与浮石,采用机械刷坡使平整度达标;局部破碎带实施锚杆挂网加固,系统布设排水孔释放坡体内水压力;推广生态混凝土格构梁护坡技术,在保障长期稳定性同时为植被提供附着基床。(2)立体生态护坡技术。稳定后坡面采用液压喷播工艺,将乡土灌草种子、营养土、保水剂与黏合剂混合均匀喷射覆盖;坡脚及马道堆叠生态袋形成挡土固根结构,选用耐旱耐瘠薄乡土灌草(刺槐、紫穗槐、结缕草等)混种,形成“草本固表、灌木固深”的立体植被体系。(3)“边采边复”动态修复。依据开采进度将矿区划分为采掘作业区、新形成边坡区、终了边坡区及排土场复垦区,制定差异化修复方案:采掘区保障正常生产并实施即时覆盖;新形成边坡区稳定加固后3个月内启动护坡施工;终了边坡及排土场达设计标高后立即覆土绿化,做到“开采完一片、修复一片”,修复周期较传统模式缩短60%以上,实现开发与保护协同推进。

3 零排放绿色施工技术应用保障与综合效益分析

3.1 全过程精细化管理体系构建

(1)施工前期方案编制。动工前组织地质、生态、环保专业人员踏勘矿区地形、水文及环境敏感点,编制零排放专项方案,逐项明确粉尘排放浓度限值、废水零外排保障措施、固废全利用消纳途径及生态修复时序,目标逐月量化分解。(2)施工过程精细化管理。将零排放要求嵌入凿岩、爆破、破碎、运输等每道工序,制定岗位操作卡,明确抑尘启停参数、湿法爆破注水时长、废水处理设施运行指标等量化标准,落实“谁施工、谁负责”责任制。配备专职环保巡检员每日巡查,推行视频监控与关键数据联网上传。(3)智能能耗管控。建立能耗在线监测平台,实时采集各环节电力、柴油、新水消耗,通过数据分析识别高耗能环节并优化工艺;变频技术在破碎线全面应用,按负荷自动调节转速;运输路线经智能调度优化,有效降低单位产品能耗。(4)完工后长效管护。复垦绿化后建立不少于三年的植被管护制度,定期补种、追肥、灌溉,确保存活率 $\geq 85\%$ 、覆盖率 $\geq 90\%$;同时建立常态化巡查,对边坡稳定性、排水

通畅性、粉尘反弹等跟踪监测,巩固绿色施工成果。

3.2 技术集成应用保障措施

(1) 制度保障。修订完善零排放绿色施工管理制度,涵盖环保准入、过程考核、整改追责全环节;建立环保绩效考核机制,零排放指标纳入班组及个人月度考核,达标奖励、违规处罚,形成刚性约束。(2) 技术保障。引入无人机航测与三维建模进行动态监测;安装智能水电表接入能耗管控平台;配备远程智能控制雾炮、自动冲洗及废水处理中控系统;持续优化爆破参数、喷淋布置及排水设计,推动技术迭代升级^[4]。(3) 人员与资金保障。定期组织环保法规、湿法爆破、除尘系统运维、废水处理管理等专项培训,关键岗位持证上岗;设立绿色施工专项资金,足额计提生态治理基金,专款用于设备更新、生态修复及后期管护。

3.3 工程应用综合效益分析

(1) 生态效益。湿法爆破与全封闭除尘协同应用使颗粒物浓度较传统模式削减 90% 以上;废水闭环循环实现零外排,彻底消除水体污染风险;固废梯级全利用与表土保护使废弃物排放归零;“边采边复”推进使可绿化区域植被覆盖率提升至 90% 以上,水土流失有效遏制,区域生态环境质量根本好转。(2) 经济效益。废石梯级分选加工为精品骨料直接创造附加值;废水零排放循环利用削减新水采购与排污费用;节能设备与变频应用降低电力单耗;湿法爆破提高炸药能量利用率;叠加环保税减免、生态赔偿规避等因素,综合运营成本显著降低,同时延长排土场服务年限^[5]。(3) 社会效益。零排放技术体系全面达到并部分超越绿色矿山标准,为同类型矿山提供可复制、可推广的技术范本,引领行业绿色低碳转型;同时彻底消除粉尘、噪声、污水引发的周边投诉,改善矿地关系,显著提升企业社会形象与合规运营水平。

3.4 现存问题与优化对策

(1) 当前瓶颈。偏远矿区供电容量不足,大型环保设备难以稳定运行;小型矿山资金有限,全封闭料仓、高效除尘器等投入高,推进缓慢;部分矿山仍重末端治理、轻源头减量,湿法爆破等源头工艺推广不足;专业

化运维人员短缺,设施运行效果未达设计指标。(2) 优化对策。分区施策:高海拔偏远矿区优先采用太阳能辅助供电配储能,降低电网依赖;小型矿山推行模块化撬装式低成本装备,通过设备租赁、环保托管等减轻投入压力;将零排放工艺前置嵌入采矿设计阶段,从源头减少产污;加强与科研院所、环保公司合作,引入第三方专业化运维;强化常态化监管,推行视频监控与在线数据联网,实现环保设施运行状态实时可查。(3) 发展趋势。物联网、AI 与大数据深度融入,绿色施工向智能化演进。数字孪生平台实现能耗与排放最优控制;无人化智能喷淋与水质在线监测反馈调节日趋成熟;基于全生命周期评价的生态治理体系正在形成,推动矿山绿色施工从“达标排放”向“趋零排放”、从“末端治理”向“源头预防—过程智能控制—系统修复”一体化模式全面升级。

结束语

本文立足绿色矿山零排放要求,整合湿法爆破抑尘、全过程粉尘收集、废水闭环循环、固废全资源化利用及边坡生态修复,构建“源头减量—过程全收—末端资源化”全链条体系。实践表明,零排放可通过源头重构与精细化管控实现。针对执行、配套、运维短板提出优化。未来依托智能化迭代,绿色施工将从“被动合规”转向“主动创优”,推动砂石矿山迈向绿色低碳、安全高效的高质量发展。

参考文献

- [1] 李磊,王景涛,张恒.露天砂石矿山绿色施工关键环保技术及工程实践[J].中国矿业,2024,33(06):112-118.
- [2] 陈敬收.气承式膜结构封闭技术在砂石骨料堆场的研究与应用[J].云南水力发电,2023,39(03):331-336.
- [3] 赵博文,刘军,孙明.露天砂石矿山扬尘综合治理与绿色施工管控技术[J].矿产保护与利用,2025,35(02):156-162.
- [4] 黄超,周健,吴浩.砂石矿山开采固废资源化利用及生态修复绿色技术[J].金属矿山,2024,23(08):189-195.
- [5] 张鑫,李洪伟.露天矿山绿色施工噪声与振动污染防治技术实践[J].矿业安全与环保,2023,50(04):98-103.