

面向国家矿山安全现代化的智能筑坝关键技术突破 ——极端气候环境下“三化融合”尾矿处置范式创新

余小军¹ 解明亮¹ 李奇² 荣德龙² 张德仁²

1.伊春鹿鸣矿业有限公司；2.吉林省华冶环境治理有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i10.8488

[摘要] 针对极端气候条件下尾矿库安全防控的技术瓶颈，本研究首创模块化智能堆存技术体系，实现三项关键突破：（1）革新传统湿式堆存与固定干排工艺参数阈值；（2）构建尾矿处置全流程智能协同操作系统；（3）开发环境耦合响应动态调控模型。该技术体系显著提升尾矿库在热带暴雨日降水>200mm、高寒年均冻融循环>50次及风速>10m/s的干旱风蚀复合作用下的工程适应性，关键指标较传统工艺提升50%，破解刚性结构渗透破坏率<3‰、年冻胀失效率<1.5%及PM10排放量<15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 等技术难题。湿输干堆智能筑坝机技术体系入选“国家矿山安全技术推广目录”，为实现《“十四五”矿山安全生产规划》目标提供关键技术支撑。

[关键词] 湿输干堆智能筑坝机；尾矿库安全；极端气候环境；模块化设计；智能感知与动态调控；生态环境治理修复；资源化利用

Key Breakthroughs in Intelligent Dam Construction Technologies for National Mine Safety Modernization: Innovation in "Three Convergences" Tailings Disposal Paradigm Under Extreme Climatic Conditions

Yu Xiaojun¹ Xie Mingliang¹ Li Qi² Rong Delong² Zhang Deren²

1.Yichun Luming Mining Co., Ltd.; 2. Jilin Huayi Environmental Management Co., Ltd.

[Abstract] Addressing the technical bottlenecks in tailings pond safety prevention under extreme climate conditions, this study pioneered a modular intelligent stacking technology system, achieving three key breakthroughs: (1) innovating traditional wet stacking and fixed dry discharge process parameter thresholds; (2) establishing an intelligent collaborative operation system for the entire tailings disposal process; (3) developing an environmental coupling response dynamic regulation model. This technology system significantly enhances the engineering adaptability of tailings ponds under combined effects of tropical rainstorms with daily precipitation >200mm, high-altitude annual freeze-thaw cycles >50 times, and wind speeds >10m/s in arid wind erosion conditions, with key indicators improving by 50% compared to traditional methods. It resolves technical challenges such as rigid structure permeation damage rates <3‰, annual frost heave failure rates <1.5%, and PM10 emissions <15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The intelligent wet transfer-dry stacking dam construction machine technology system was included in the "National Mine Safety Technology Promotion Catalog," providing critical technical support for achieving the objectives of the "14th Five-Year Plan for Mine Safety Production."

[Key words] Wet Transport and Dry Stacking Intelligent Dam Construction Machine; Tailings Dam Safety; Extreme Climate Environment; Modular Design; Intelligent Sensing and Dynamic Regulation; Ecological Environment Governance and Restoration; Resource Utilization

引言

随着我国矿业规模的持续扩大和环保要求的日益严格，尾矿库作为矿山生产链中的关键环节，其安全性与环境风险防控已成为行业关注的焦点。传统尾矿处理技术普遍采用湿式堆存或固定式干排工艺，虽在一定程度上满足了生产需求，但在投资规模、灵活适应性及安全效能等方面存在短板，难以满足复杂地形、极端气候下的高效堆存，且普遍面临建设和运维成本居高不下的压力。

在我国矿业集约化发展背景下，尾矿库正面临热带极端降雨 (>2000mm)、高寒冻融 (-30℃交变)、干旱区风蚀 (8级+) 等复合环境挑战。近五年全球 63% 尾矿事故集中发生于这三类极端环境区，暴露出传统湿式堆存与固定干排工艺在极端气候下的系统性缺陷：刚性结构难以抵御强降雨渗透链式反应、冻胀应力累积破坏及风沙侵蚀扬尘污染。

2023年9月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》，指出要强化矿山安全科技支撑体系建设^[1]，加快矿山升级改造，推动矿山“三化建设”^[2]。

为持续增强矿山技术装备安全保障能力，推动矿山安全科技进步、装备升级和成果转化，依法淘汰危及生产安全的工艺及设备，预防矿山生产安全事故^[3]，依据《安全生产法》等法律法规，国家矿山安全监察局制定了《矿山安全先进适用技术及装备推广目录 (2024年)》和《矿山安全落后工艺及设备淘汰目录 (2024年)》并于2024年6月17日印发。特别将智能化尾矿处置系统列为重点推广项目，拟实现一种充分利用现有设施，投资小、快速灵活、适应各种极端环境和堆存场景的先进技术及装备，减少尾矿库建设和运行成本，从技术根源响应《意见》提出的“三化建设”战略要求。

极端环境尾矿处置是制约行业集约化发展的核心难题。本研究针对传统工艺在极端气候条件下的系统性缺陷，基于《矿山安全先进适用技术装备推广目录 (2024)》政策指引，提出融合模块化设计和智能感知与动态调控的堆存体系。通过突破强降雨渗透链式阻断、冻融界面应力消解及风蚀扬尘协同控制技术，实现“三化”深度融合的工艺革新。研究成果为构建适配复合极端环境的低成本、高可靠尾矿处置提供理论支撑，切实响应矿山安全治理体系现代化建设需求，助力绿色矿山发展战略实施。

1. 多气候环境下矿山尾矿湿式排放工艺的局限性及干式堆存对比分析

1.1 湿式排放对库容的影响

湿式排放工艺通过水力输送尾矿浆至尾矿库自然沉积，受悬浮细颗粒尾泥影响，有效库容利用率仅达 75%~85%。积水区长期存在悬浮态尾泥，导致滩面软弱、承载力不足，闭库时需额外投入高成本治理，且滩面治理难度随库龄增加而加剧。尾矿沉积呈现粒度分选特性，坝前粗颗粒与库区细颗粒分布不均，进一步降低库容利用效率。

水污染：尾矿库渗滤液渗透系数为 $2 \times 10^{-2} \sim 1.25 \times 10^{-4}$ cm/s^[7]，易迁移至地下水和地表水，导致重金属（如砷、铅）及氰化物超标。

1.2 热带雨林地区对筑坝的影响

热带雨林地区极端降雨与氧化污染一年均降雨量超 2000mm 其高耗水特性与细尾矿的物理特性叠加，导致尾矿筑坝面临洪水漫顶风险。

湿式排放工艺依赖上游式筑坝方式（占比约 80%），其逐级堆筑特性导致坝体浸润线高、抗剪强度低，易在强降雨或地震条件下发生液化溃坝。据统计，国内 80% 尾矿库事故发生于坝高不足 30m 的小型库，溃坝事故率高达 1.2%，远超常规水坝。典型案例包括溃坝引发的泥石流灾害，如 2015 年巴西 Samarco（萨马尔科）尾矿库溃坝事件（国内类似风险库占比高）^[5]。此外，尾矿库闭库后长期渗流风险仍存在，需持续监控与维护。

1.3 干旱地区对环境的影响

扬尘扩散与资源矛盾—低含水率 (<15%) 尾矿干滩扬尘污染周边环境；高蒸发量造成在水资源匮乏下，减少了水资源利用率；高蒸发量引发表层盐渍化，阻碍闭库生态修复。高温环境加速尾矿氧化，导致酸性废水及重金属离子析出。

湿式排放工艺中，尾矿浆携带重金属、选矿药剂等污染物，通过渗滤液与扬尘双重途径污染环境。干燥尾矿细颗粒随风扩散，形成区域性扬尘污染，影响周边空气质量及居民健康。

1.4 高寒地区对坝体稳定性的影响

夏季筑坝时间短暂，无法满足冬季放矿的库容需求，导致冬季在冻层上筑坝。冬季冻融侵蚀主导的坝体劣化—长达 5 个月的严寒期 (11月-次年3月) 形成独特的冻融损伤机制：1) 极端低温 (-35℃) 导致尾矿浆中 25%~30% 孔隙水冻结形成冰透镜体，使坝体干密度降至 $1.45 \sim 1.55$ g/cm³ (低于设计标准 23%)；2) 高频冻融循环 (年 35~40 次) 产生的膨胀压力 (峰值 2.1 MPa) 诱发网状裂隙发育^[6]，实测最大裂隙深度达 0.8m；3) 冰层挤压导致排水系统失效，渗透系数增加 4~6 倍，浸润线异常抬升 1.2~1.8m，显著削弱坝体渗透稳定性。

冬季冻融损伤与夏季筑坝缺陷形成正反馈机制—冻融裂隙为夏季尾矿水下渗提供通道，而夏季未达标坝体又加剧冬季冻胀破坏。监测数据显示，该叠加效应使年有效运行周期压缩至120~140天，坝体稳定性维持成本较常温地区提高2.3~2.8倍。这种气候-工艺耦合作用导致高寒地区尾矿坝长期处于“冬季损伤积累—夏季修复不足”的恶性循环状态。

2.多气候环境下矿山尾矿干式堆存工艺的技术瓶颈与运行挑战

2.1 工艺复杂性及成本问题

干式堆存需通过浓缩、压滤等环节降低尾矿含水率，此类设备初期投资成本高。运营成本较传统湿排工艺增加30%~50%，滤饼运输依赖皮带机或汽车，运输效率受场地条件限制，进一步推高综合成本。

高频振动脱水筛在处理细粒级物料时，筛网磨损速率加快，需每周更换筛板，压滤机液压系统在高频率压缩作业下故障率增加30%，导致维护成本上升，高于粗粒级尾矿处理成本的2倍。

2.2 地理与气候适应性不足

国内尾矿干式堆存工艺在热带季风与多雨气候区面临系统性技术困境，尤其赤泥库工程问题最为典型。在江西、贵州等年降水量>1200mm的矿区，降雨频次与强度已突破现行工艺设计阈值。以广西某赤泥库为例，雨季连续降雨日数达15~20天/月，导致库区日均有效施工时长不足4小时，碾压筑坝作业被迫中断达60%工期，降雨期间无法筑坝，赤泥物料的高持水性（自然晾晒后含水率仍>28%）与强碱性（pH>12）特性叠加，使碾压层间形成弱结合面，坝体压实度长期低于0.86，显著弱化结构稳定性，无法扩大生产用于筑坝。

频繁降雨引发双重失效机制：表层浸润效应使干堆体渗透系数骤降2个数量级（ 10^{-4} ~ 10^{-6} cm/s），形成厚度>3m的滞水带，诱发赤泥库特有的碱液管涌现象。2021年江西某铜矿在连续5日暴雨后，坝体出现渗透破坏连锁反应，48小时内形成贯穿式塌陷坑（直径2.8m×深度4.2m），碱性渗滤液（电导率>5000 μ S/cm）严重污染下游水体。施工层面，传统粗粒级筑坝材料在南方红壤区天然匮乏，迫使用料单位外购砂石比例超70%，运输半径扩大至150km，既推高建设成本，又因物料含水率波动导致碾压参数失控。

青海等高寒区域则面临低温连锁效应：压滤机脱水效率下降使尾矿含水率达25%~30%，冻融循环削弱颗粒间粘结力，分层碾压后压实度低至0.87且局部液化；残留选矿药剂（如氰

化钠）低温结晶导致滤饼脆性增加，破碎率提升15%~20%，加剧坝体松散风险。

2.3 环境风险与二次污染

干式堆存虽减少尾矿库积水，但未能彻底解决污染物迁移问题。滤饼在长期堆存中仍会发生渗透，含重金属的尾矿颗粒随雨水淋滤进入地下水系统。以云南某铁矿为例，干堆场周边土壤中铜、铅含量较背景值分别超标3.2倍和2.7倍。此外，干堆坝体表层长期裸露，在风力作用下易产生扬尘污染，实测PM10浓度可达150~300 μ g/m³，远超矿区环境标准。

2.4 产能扩容困境

产能固化困局源于压滤系统“初始设计—永久锁定”模式：压滤车间依据设计产能一次性建成，设备性能阈值形成刚性约束，压滤系统按初始产能固化建设，后期受土地、资金及工艺重构多重制约。

2.5 产能刚性约束下的含水率

在压滤系统产能恒定的工况下，含水率调控与处理能力呈现负相关：当强制将成品含水率从基准30%降至20%时，因压滤周期需延长40%以上，实际处理量将缩减至设计值的65%~70%。此时系统面临两难抉择—若维持原处理量则被迫接受含水率反弹10%的工艺劣化；若坚持低含水率标准则必须额外增设压滤机组，但将引发边际效益塌陷。案例显示，某矿山为达成含水率降低3%的技术指标，在未扩容情况下日均处理量从300t骤降至195t，最终不得不追加2台压滤机恢复产能，导致吨处理成本攀升28%。这揭示出传统工艺框架内，含水率优化必然以处理量让渡或扩产投资为代价的物理本质。

3.湿输干堆智能筑坝工艺设计理念

3.1 模块化与移动式设计

湿输干堆智能筑坝工艺采用模块化设计理念，通过标准化组件的快速拆装与运输，快速适应极端环境下矿山尾矿库不同区域的生产需求。相较于传统固定式干堆工艺，移动式设计具备无需建设永久性基础设施的能力，适用性和灵活性强等特点，提升了整体经济性。

3.2 灵活配置产能设计

传统固定式干堆工艺中，压滤车间的规模按照设计产量一次性建厂，产量及产能固定，后期产能提升受限于土地征用、资金投入及工艺改造等约束条件。

针对传统固定式干堆工艺产能刚性的行业痛点，基于上述模块化架构与移动式设计，湿输干堆智能筑坝工艺的设计具备灵活配置产能，支持模块化组合与参数调整的能力，可针对不

同的尾矿(渣)、不同的产量、不同的时期,实现设备的个性化配置,灵活调配。

为达到上述目的,设计考虑到通过增减压滤单元数量、调整进料泵功率或更换滤板类型,快速匹配不同工况需求,在保障输出质量的同时,实现产能的动态调整,确保资源利用率最大化。来解决传统工艺中的资源配置问题,实现全生命周期产能弹性适配与设备利用率最大化。

3.3 含水率精准控制设计

传统固定式干堆工艺因产能约束,导致压滤车间建设多基于产量与产率的理论平衡点设计,但在实际运行中存在局限:当面临环保标准升级、生产规模扩张或工艺路线转型时,系统既难以保障连续稳定的产率输出,又缺乏对尾矿含水率的精准调控能力,易引发实际产量或实际含水指标与设计存在差别的情况。

针对上述行业痛点,湿输干堆智能筑坝机工艺具备灵活控制产物含水率的能力。智能感知与动态调控的系统设计,具备实时采集滤饼含水率、滤液浊度及运行参数等数据的能力,建立含水率预测—压力补偿—时序优化的闭环控制机制。通过实时反馈滤饼含水率数据,动态优化压滤压力曲线及保压时长,在保障单体设备产量的同时,确保含水率控制在设定范围内,满足环保与安全堆存要求。

3.4 自动化、智能化设计

无论湿式排放还是固定式干堆工艺,大多依赖于人的操作。为保证产量,企业多采用倒班制度实现连续作业,操作人员多且负荷大。压滤机缺乏实时监控和自适应控制功能,无法动态调整压力、转速等参数。

针对以上劳动密集型作业特征,湿输干堆智能筑坝工艺的设计具备自动化、智能化的特点。实现进料、压滤、卸料、清洗等环节的无人化操作,具备远程监控、异常反馈与故障诊断功能,有优化运行方案,实现无人值守或减少操作人员的能力。

3.5 全场景适应性设计

在传统工业固废处理领域,湿式排放工艺与固定式干堆工艺基于不同的物理原理构建了相对独立的技术体系,二者在物料输送、脱水控制、装备应用等核心环节存在显著差异性。在特定气候条件下(如寒冷冻土区、强降雨频发区及干旱半干旱区),即便采用同一种基础排放工艺,呈现出的效果却有着巨大差异。

针对以上情况,湿输干堆智能筑坝工艺的设计具备全场景适应性,打破传统湿排与干排工艺的技术分野,构建具备气候

自适应能力的固废处置平台。

4. 湿输干堆智能筑坝工艺应用案例

4.1 “湿输干堆智能筑坝工艺+超细尾矿”应用案例

案例—某金属矿

问题痛点:该矿区排放尾矿中 -0.075mm 细粒级物质占比超70%以上,其高黏聚性、低渗透性显著弱化了尾矿颗粒间的骨架作用,导致筑坝材料渗透系数(实测 $\leq 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)远低于《尾矿库设计规范》中反滤料渗透系数 $\geq 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的要求,无法满足筑坝要求。受限于区域地质条件,矿区周边50km范围内缺乏合格筑坝用土石方资源,被迫采用长距离跨区域运输(年均运输距离 $\geq 120\text{km}$)黏土质填料。长期依赖外来材料筑坝,导致有效库容年损失率达22%,且浸润线埋深长期处于设计警戒值以上,存在坝体失稳风险,严重威胁尾矿库生命周期管理与连续生产目标。

工艺应用:该尾矿库部署4套湿输干堆智能筑坝机设备,实现尾矿浆高效脱水处理,使尾矿渣密度提升至 1.63g/cm^3 ,较传统工艺库容利用率提高42%。脱水产物经10%黏土掺合料级配优化后,作为新型筑坝材料应用于上游尾矿库,其渗透系数稳定控制在 $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 以下,达到《尾矿库设计规范》中I级坝体防渗要求。该技术体系成功实现年外购土方成本节约180万元,兼具工艺先进性、工程安全性和经济价值。

4.2 “湿输干堆智能筑坝工艺+多雨地区”应用案例

案例—澳大利亚某赤泥堆场

问题痛点:该赤泥堆场年降雨量高达1300mm,使用固定式干堆工艺面临多重挑战:其一,雨季赤泥含水率超限(达30%以上)显著改变物料物理性质,导致坝体浸润线抬升及孔隙水压力异常(渗透系数增大30%~50%),引发非均匀沉降及深层剪切裂缝;其二,降雨频发(年均降水日数 ≥ 180 天),赤泥因持续淋溶无法有效晾晒(自然风干效率不足30%),致使筑坝材料级配紊乱、压实度低于设计要求,进一步降低边坡稳定性(抗滑安全系数由设计值1.5降至1.1);其三,压缩筑坝施工窗口期,旱季筑坝受固定产值影响,无法扩大生产,产量无法满足后期筑坝需求。以上三点严重威胁尾矿库运行安全与环境保护目标。

工艺应用:该赤泥堆场配套部署3套湿输干堆智能筑坝机设备,实现赤泥管道输送,现场脱水系统集成高压压滤,使雨季的滤饼含水率由30%降至20%以下,抗剪强度可达35kPa。通过实施“旱季预筑宽顶子坝+雨季自然放矿”的分期施工策略,将传统连续式筑坝周期压缩30%,并依托设备的模块化快速部

署能力,使雨季停工时间由45%降至5%。

4.3 “湿输干堆智能筑坝工艺+寒冷地区”应用案例

案例一东北地区某金属矿

痛点问题:该金属矿尾矿库地处寒带,冬季漫长寒冷,尾矿库极端低温(-40℃)。导致冬季持续放矿时尾矿浆冻结膨胀显著(体积增益8%~12%)形成冻土层,压实效率降低至设计值的40%。夏季施工窗口短促,采用传统筑坝方式无法完成剩余堆筑量。企业曾采用旋流器进行筑坝,受旋流器产量限制,仍无法在短暂的时间内完成筑坝。企业为保障生产,冬季在冻层上继续筑坝,累积超载引发基底滑动及冻融循环劣化,造成趾部水平位移并发生子坝溢出。

工艺应用:该尾矿库配套部署6套湿输干堆智能筑坝机设备,夏季集中施工阶段通过多机协同作业,单次完成40m宽×5m高的宽顶子坝构筑,外坡按1:3进行阶梯式放样,分层压实,形成高稳定性坝基。冬季切换至纯排矿模式,通过优化尾矿排放参数实现库区持续运行。次年解冻期通过注浆锚索与植被护坡技术对宽体子坝进行加固,全站仪连续监测,经两个冻融循环验证,坝体位移量控制在±5mm以内,未发生冻胀裂缝等结构性破坏。实现了全年连续放矿作业。

4.4 “湿输干堆智能筑坝工艺+干燥地区”应用案例

案例一甘肃某金属矿

痛点问题:其尾矿库与压滤车间直线距离仅2公里,但因地形限制导致实际运输路径迂回达5公里,显著增加了物料周转成本。更严峻的是,矿区地处常年盛行强风区域,汽车运输作业下产生严重扬尘污染,多次触发环保部门监管预警。为应对环境压力,企业被迫采取“库区覆盖+运输洒水”的联合抑尘措施,虽有效控制了粉尘扩散,但额外增加了防水材料铺设维护成本、车辆增载能耗支出及水资源消耗,致使运输成本提高20%。

工艺应用:尾矿库配套部署4套湿输干堆智能筑坝机设备,构建“管道密闭输送—现场脱水造粒—机械化摊压成型”一体化系统。采用总长约3.2公里的尾矿浆输送管道,将尾矿直接输送至尾矿库压滤干堆,彻底甩掉汽车运输环节。在该工艺下粉尘排放浓度下降60%,经第三方检测机构验证,作业面PM_{2.5}/PM₁₀颗粒物浓度分别降至18μg/m³和35μg/m³,远低于国家排放标准限值要求^[4]。

5.湿输干堆智能筑坝工艺与国家生态环境保护和先进装备推广的深度融合

生态环境部及行业统计数据显示,截至2024年4月,我国共有尾矿库4919座,每年产生10亿吨尾矿,约30%尾矿可进行综合利用。其中,现存磷石膏库120余座,长江流域现存磷石膏库超97座^[8-11]。

2025年2月国家发改委同生态环境部等部门召开磷石膏综合治理会议,会议强调各部门要深刻认识磷石膏综合治理的重大意义,充分认识磷石膏问题的严峻性和紧迫性,拿出有效举措保护长江生态环境安全。湿输干堆智能筑坝机作为治理尾矿库、磷石膏渣库的先进设备,是唯一一台入选《矿山安全先进适用技术装备推广目录(2024年)》的湿输干堆智能筑坝设备,对推动生态环境治理具有重要意义。

本研究构建极端气候区尾矿库治理体系,突破传统工艺刚性缺陷与安全阈值瓶颈。通过模块化设计与智能感知动态调控技术,系统性提升坝体在极端场景下的适应性,显著提升环境治理效能与事故防控能力,深度契合矿山安全现代化战略要求。为矿业安全治理与生态文明融合提供智能化解决方案,开创极端环境治理新范式。

[参考文献]

- [1]煤矿智能化建设中存在的问题及其对策研究,周洪军,周宗林;《中国煤炭》;2024-02-22
- [2]贵州省进一步加强矿山安全生产工作,中国矿业报;2024-04-04(版次:A2版)
- [3]黄金矿山应用的多项技术与装备作为案例推广,记者许勇;中国黄金报;2024-06-25(版次:04版)
- [4]山东省环境保护厅关于龙口南山中油天然气管道工程项目环境影响报告书的批复,山东省环境保护厅;鲁环审[2018]第3号;2018-02-13
- [5]巴西史上最惨重溃坝事件回顾,新华社、澎湃新闻、央视网2019-2
- [6]冻融循环下膨胀土物理力学特性研究,《岩土力学》第37卷增刊2,许雷等2016-10
- [7]东沟尾矿坝渗透系数反演分析论文,徐维生等2010-4-1
- [8]中国应急管理报,记者谢吉东2024-4-9
- [9]中国矿产资源节约与综合利用报告(2015)
- [10]华经产业研究院报告(2023)
- [11]生态环境部或长江流域治理专项报告(2024)