

绿色矿山

# 铁矿山尾矿减排方法、潜在安全风险及对策研究

陈玉国 李刚 王连松

(首钢集团有限公司矿业公司水厂铁矿, 河北 迁安 064400)

**[摘要]** 随着国家对尾矿库监管的力度不断加大, 矿山企业的尾矿库面临着新建、加高、扩容审批困难局面, 影响到企业可持续发展。为此, 必须大力推行尾矿减排, 本文介绍了铁矿山企业实施尾矿减排的方法, 并针对不同的减排方法, 分析潜在的安全风险, 提出安全应对措施, 从而达到减少入库尾矿量或无尾排放的目标, 并降低尾矿库安全风险, 有效缓解尾矿库库容不足的问题。

**[关键词]** 尾矿减排; 方法分析; 安全风险; 对策研究

**[中图分类号]** TD981

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2423(2024)03-0015-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.003

## 0 前言

2020年, 国家应急管理部等八部委共同下发了《防范化解尾矿库安全风险工作方案》(应急[2020]15号), 明确自2020年起, 在保证紧缺和战略性矿产矿山正常建设开发的前提下, 全国尾矿库数量原则上只减不增, 确定了“三个严格”, 即严格实行尾矿库总量控制, 尾矿库数量原则上只减不增; 严格准入条件审查, 严格控制新建独立选矿厂尾矿库, 严禁新建“头顶库”、总坝高超过200m的尾矿库; 凡不满足国家有关法律法规、标准和政策要求的, 一律不予批准, 严禁审批“头顶库”、运行状况与设计不符的尾矿库加高扩容项目。

随着国家对尾矿库监管的力度不断加大, 众多尾矿库库容不足的矿山企业面临着发展瓶颈。为解

决尾矿库制约生产的难题, 各企业全面开展入库尾矿减排、无尾排放等研究, 多措并举, 达到降低尾矿库安全风险、延长尾矿库服务年限、满足企业可持续发展的目的。

为此, 本文介绍了铁矿山企业实施尾矿减排的方法, 并针对不同的减排方法分析了潜在的安全风险, 提出了安全应对措施。这些措施不仅有助于实现入库尾矿减排或无尾排放的目标, 还可降低安全风险, 有效缓解尾矿库库容不足的问题, 可为各铁矿山企业提供参考。

## 1 尾矿减排方法

目前铁矿山企业主流的尾矿减排方案主要有以下6种。

### 1.1 选矿流程改造

选矿流程改造是通过选矿流程进行改造, 加大抛废量, 降低选矿比, 减少尾矿量。

#### 1.1.1 高压辊磨+湿式(干式)预选

首钢某铁矿在三段一闭路破碎流程后, 增加高压辊磨+筛分+湿式(干式)预选流程, 预选后抛尾产率和精矿铁品位大幅提高。研究表明, 0~3mm湿式磁选抛尾产率可达28.78%, 精矿铁品位达到30.9%, 高于给矿6.95个百分点<sup>[1]</sup>。马钢某矿山采用两段高压辊磨串联+预选新工艺, 二段高压辊磨筛下粒度分别为0~2mm、0~1mm、0~0.5mm

**[收稿日期]** 2023-12-19

**[作者简介]** 陈玉国(1980—), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 主要从事选矿、尾矿、科技创新等技术管理工作。

**[引用格式]** 陈玉国, 李刚, 王连松. 铁矿山尾矿减排方法、潜在安全风险及对策研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(3): 15-19.

CHEN Yuguo, LI Gang, WANG Liansong. Research on emission reduction methods, potential safety risks and countermeasures of iron ore mine tailings[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(3): 15-19.

时,经湿式预选可抛出作业产率 26.13% ~ 31.47%,精矿铁品位分别提高到 45.58% ~ 48.48%<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 破碎后干式预选设备升级

随着大块干式磁选机、上吸式干选机、旋转磁场干式磁选机等预选设备的发展,可对原干式磁选机进行设备升级,提高抛废率。首钢某铁矿细破后干选设备升级为 XCT-0812 型旋转磁场干式磁选机后,抛尾产率达 18.78%,较原 CT-0812 型永磁磁力滚筒的抛尾产率 14.21%,提高了 4.57 个百分点<sup>[3]</sup>。

### 1.1.3 磁选机场强升级

对选厂磁选机进行场强升级,提高磁选机磁场强度,多回收精矿,降低尾矿量。首钢某铁矿实施选矿工艺设备升级改造,增大二段磁选机磁系包角到 150°,采用 10 个磁极,磁感应强度定为 3 000 mT,磁选机尾矿 TFe 品位降低 1.13 个百分点,尾矿抛尾率降低 0.19 个百分点,金属回收率提高了 0.24 个百分点<sup>[4]</sup>。

## 1.2 尾矿充填井下采空区

近年来,尾矿胶结充填技术的发展对金属矿山地下开采产生了巨大的影响。随着矿产资源开采所带来的一系列环境问题,采用以选矿全尾砂为骨料的绿色无废充填采矿法已经成为矿业发展的必须趋势<sup>[5]</sup>。许多黑色金属矿山也逐渐由崩落法开采转为充填法开采,如已建成的白象山铁矿、李楼铁矿、石人沟铁矿、大冶铁矿、程潮铁矿等。采用充填采矿法时,选矿厂的全尾砂或分级尾砂全部或部分充填到井下采空区,不仅实现了资源的充分利用,也可避免矿区地表产生塌陷,保证了安全。

尾砂充填分为胶结充填和非胶结充填<sup>[6]</sup>,全尾砂一般不适用非胶结充填,分级尾砂可应用于胶结充填和非胶结充填。胶结充填一般为尾矿浓缩后与胶凝材料混合,由泵或自流充填到井下采空区。该工艺可使入库尾矿量大幅降低或实现无尾入库,如河南安钢舞阳矿业公司赵案庄铁矿采取全尾充填,经济效益明显<sup>[7]</sup>。

### 1.3 尾矿生产建材产品

尾矿生产建材产品是对尾矿进行分级,形成不同粒级尾砂,进而生产不同的建材产品,实现尾矿的大规模资源化利用<sup>[8]</sup>。尾矿含有 Si、Al 等元素,将尾矿用作建材原料可以减少传统建筑材料开发,实现尾矿的大宗消纳,产生一定的经济效益和社会效

益。目前,在建筑材料方面,尾矿主要应用于分选机制砂、生产加气块、加气条板、免烧砖、透水砖、干混预拌砂浆、特种砂浆、混凝土掺合料、微晶玻璃、发泡陶瓷、陶粒轻骨料及路基等领域。

例如,首钢某铁矿根据当地的建材市场需求,对尾矿进行分级,产生模数为 1.6 ~ 2.3 mm 的粗粒级、模数为 0.6 ~ 1.2 mm 的细粒级、模数 0.6 mm 以下的极细粒级三种尾砂。粗粒级尾砂作为建筑砂销售,细粒级尾砂作为生产水泥的辅料或直接用于生产无水泥免烧砖销售,极细粒级尾砂则直接入库。

### 1.4 尾矿充填废弃采坑或地表塌陷区

将全尾砂或分级尾砂充填到废弃采坑或地表塌陷区,恢复采坑或塌陷区生态,形成景观或新耕地。这种方式一般为企业与地方政府联合,对废弃采坑进行生态恢复,满足“绿水青山”的环境要求。根据企业尾矿量及可行性等综合分析,全尾砂或分级尾砂脱水后,采用胶带或汽车运输到采坑,经采坑排水、自然晒干、覆盖黄土等程序,可形成自然或人工景区。例如,河北省武安市某矿山为恢复多年地采形成的塌陷区环境,利用尾矿固结技术将尾砂回填至塌陷区,并进行生态环境绿化<sup>[9]</sup>,最终实现塌陷区环境治理,降低了塌陷区对周围环境的影响。

### 1.5 尾矿用于排土场生态修复

尾矿用于排土场生态修复是将全尾砂或分级尾砂脱水后,用胶带或汽车运输到排土场外坡及各平台,形成有一定厚度的覆盖层,并在覆盖层上种植草木,达到排土场绿化的目的。例如,首钢某铁矿开发尾矿大规模高效固化技术,采用低成本或零成本的脱硫灰和尾矿作为固化体代替覆土,成功在固化体表面种植草木,实现生态修复的同时还可以消纳大量特细尾矿,并延长尾矿库的服务时间。

### 1.6 尾矿多方法联合处置

根据实际情况,还可采取多种方法联合处置尾矿。例如,尾矿分级生产建材产品外销的同时,极细粒级尾矿脱水后与胶凝材料混合后排到排土场,细粒级尾矿用于井下充填等<sup>[10]</sup>。

矿山企业具体采用哪种方法或哪几种方法组合,要根据企业的实际情况和尾矿性质等因素综合论证后确定,通常是几种方法组合使用。

## 2 尾矿减排产生的安全风险

尾矿减排给矿山企业带来了可持续发展,使尾矿库库容得到释放。但不同的减排方法实施后,对

尾矿库、废弃采坑、地下开采、排土场均会产生一定安全影响,需要企业高效统筹考虑,提前防范。

## 2.1 尾矿减排对尾矿库安全影响

### 2.1.1 全尾矿粒级减排

全尾减排只是入库尾矿量发生了变化,入库尾矿物化特性没有变化,不属于《非煤矿山建设项目安全设施重大变更范围》,不需要做重大设计变更。实施此方法,子坝上升速度降低,尾矿固结时间延长,沉积滩上的尾砂更加密实,有利于尾矿库的安全。

### 2.1.2 分级尾砂减排

采取粗粒级尾砂提取、细粒级尾砂入库减排方法后,入库尾矿物化特性发生变化,即入库尾矿粒级变细。如首钢某铁矿尾矿分级后,入库尾矿-200目粒度含量由减排前的40.6%提高至80.47%,降低39.87个百分点<sup>[11]</sup>。入库尾砂粒度变细对尾矿库主要有以下几方面的影响:

1)影响防洪安全。入库尾矿粒度变细后,原冲积法放矿工艺沉积滩坡度难以达到原设计要求。在原设计要求的干滩长度条件下,尾矿库调洪库容变小,将会减弱防洪能力,因此尾矿库运行防洪能力需要进行复核。

2)影响坝体稳定安全。入库尾矿粒度变细会改变尾矿的沉积规律,并引起沉积尾矿力学特性(如尾砂渗透系数、内聚力或内摩擦角等)发生改变,可能导致尾矿堆积坝出现渗透变形破坏,严重时甚至会造成尾矿坝坍塌失稳,对坝体的稳定性产生不利影响。

综上所述,分级尾砂减排后,对尾矿库的安全影响大,需要对尾矿库安全控制参数进行重新核算,并进行重大设计变更,报尾矿库原审批部门审批后才能运行。

## 2.2 对排土场边坡安全的影响

尾矿分级后,极细粒级尾砂脱水后与胶凝材料混合,可构成具有一定力学性质的复合物,作为复垦土用于排土场的生态复垦。表土层厚度、堆置高度、边坡角度等参数均影响排土场安全稳定,有失稳可能。因此,需要对排土场在不同工况下的稳定性进行专项研究,并且要考虑不同性质的覆土与排土场原堆砌岩土体的耦合作用。通过专项研究以及对排土场稳定性复核后,确定表土层厚度、堆置高度、边坡角度等关键参数。

## 2.3 对地下开采的影响

使用充填采矿法回采矿石的矿山,存在的主要危险因素与其他地下开采矿山相类似,包括冒顶片帮、火药爆炸、中毒窒息、高处坠落与物体打击、机械伤害、车辆伤害、透水、空压机及压力容器爆炸、触电与雷击、火灾、淹溺、粉尘、噪声等<sup>[12]</sup>。

尾砂胶结充填采空区时,胶结充填体作为采场结构单元,对采场的稳定性发挥着重要作用,是确定采场充填方案的基本依据,因此快速、准确地确定充填体抗压强度值,对于保障采场安全意义重大<sup>[13]</sup>。

## 2.4 尾矿充填采坑或塌陷区的影响

废弃采坑或塌陷区在充填过程中,其存在的安全隐患主要是外排水、尾砂充填体沉降造成汽车、前装机、推土机等设备侧翻或下沉。废弃采坑如作为尾矿库使用,需要按尾矿库相关规定组织实施。

## 3 尾矿减排过程中安全对策

尾矿减排过程中的安全对策是矿山行业中至关重要的一环,旨在确保尾矿处理过程中的安全性和可靠性。下文将从政策、现行和创新技术、现场实践经验三个方面提出相应的安全对策,以期对尾矿减排过程中的安全管理提供指导和参考。

### 3.1 安全环境政策

尾矿减排过程中的安全对策需要建立在明确的安全环境政策基础上。安全环境政策的制定和执行对于保障尾矿减排过程中的安全至关重要。

《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)针对尾矿库在安全监管方面的要求和措施进行了详细规定,对于确保尾矿库的安全运营和环境保护具有重要意义。该规范的实施有助于矿山企业建立完善的安全管理体系,合理评估和控制尾矿库的安全风险,采取有效的安全管理措施,确保尾矿库的安全运营和环境保护。同时,该规范为相关部门和企业提供了监管和管理的依据,促进尾矿库安全监管的规范化和科学化。

《尾矿库安全规程》(GB 39496—2020)旨在规范和指导尾矿库的安全监督和管理的工作。规范要求尾矿库在减排方面要遵循国家相关法律法规和标准,实施减排措施,减少对环境的不良影响;要求建立监测系统,对尾矿库的运行情况进行定期监测和评估,确保减排措施后的尾矿库安全运行。

在尾矿减排过程中,安全环境政策是保障安全的基础和必要手段,明确了尾矿减排活动的安全要

求,为安全管理提供具体的指导和监控依据。

### 3.2 现行和创新技术

尾矿库减排后,研究安全应对措施非常重要。尽管减排措施可以降低尾矿库对环境的负面影响,但尾矿库仍然存在一定的安全隐患,需要采取措施保证其安全稳定运行。以下是一些现行和创新的技术措施,可用于应对尾矿库减排后的安全问题。

1) 建立完善的监测和预警系统,通过实时监测尾矿库的运行状况、地质条件变化、水位变化等,及时发现异常情况,并采取相应的应对措施。

2) 采取工程措施加强尾矿库的稳定性和安全性,如加固尾矿库边坡、增加防渗措施、改善排水系统等,以保持尾矿库的结构稳定。

3) 建立科学的安全管理和运营制度,包括安全管理规程、操作规范和应急预案等。加强培训和教育,提高操作人员的安全意识和技术能力,确保尾矿库的安全运营。

4) 采用环境治理技术,如湿地修复、土壤修复和水体净化等技术,处理尾矿库排放物和降低环境污染,确保尾矿库减排后的水质、土壤和生态环境的稳定和恢复。

5) 利用现代科技手段,如人工智能、无人机、遥感技术等,对尾矿库进行监测、评估和应急响应,提高监测效率、准确性和预警能力,加强对尾矿库安全的控制。

实际工程中需要根据具体的尾矿库情况和需求,制定适合的技术方案和安全措施,确保尾矿库的安全性。同时,持续改进和调整安全措施,并严格遵守相关法规和标准,加强安全意识和风险管理。

### 3.3 现场实践经验

#### 3.3.1 尾矿库变更设计

根据国家矿山安全监察局《金属非金属矿山建设项目安全设施设计重大变更范围》(矿安—[2023]147号)要求,细粒尾矿入库可能导致的重大安全变更主要涉及物化特性变化引起的重大变更。尾矿库堆坝的尾矿物化特性发生以下变化:①上游式尾矿坝或干式尾矿库入库尾矿粒度变细;②中线式、下游式尾矿坝尾矿粒度变细;③上游式尾矿坝入库尾矿排放浓度变高;④膏体堆存尾矿的入库尾矿排放浓度变化。由此引起尾矿堆积、沉积或物理力学特性发生改变。

首钢某铁矿实施分级尾矿减排后,入库量减少、入库尾矿粒度变细,-200目粒度含量由40.6%变

为80.47%。由于尾矿物化特性发生变化,经设计单位复核后尾矿库子坝高度由原来的5.0m降到2.5m,210m标高以上堆积坝外边坡的平均坡比由原1:4调整为1:5,滩顶标高210m起由冲积法放矿变为池填法放矿<sup>[11]</sup>;平均沉积滩坡度由原2%调整为1%。

#### 3.3.2 排土场边坡稳定性研究

排土场边坡稳定性直接关系到下游人民群众的生命和财产安全。采用极细粒级尾砂脱水后与胶凝材料混合作为排土场边坡和平台的复垦土,需分析其对排土场边坡稳定性产生的影响,研究和确定复垦土堆排的厚度、角度等关键参数。排土场堆排过程及边坡复垦稳定性分析主要开展以下工作:

基于排土场弃土平台的地质情况和复垦方案,构建排土场取料结束时的原始地形和堆排工况下各阶段堆积体模型;按照设计方案模拟堆排和多次覆土复垦过程,分析平台排土和复垦过程中排土场位移及应力演变过程,并得出潜在滑移面的位置;评判排土场边坡在不同状态下的长期稳定性,为露天采场开采及堆排作业的安全运行提供保障。

#### 3.3.3 井下充填采空区和废弃采坑充填

实施井下充填采空区和废弃采坑充填时,根据地质条件等资料,对拟采用的尾砂参数和性能进行试验(全尾砂或分级尾矿),进行尾砂配比、充填料浆输送系统性能和充填体强度试验开展相关试验,根据试验结果设计充填方案。

影响充填强度的主要因素有尾砂浓度、灰砂比、骨料级配、胶结材料特性、采场抽水及时性、冲洗管路进入采场水量等<sup>[15]</sup>,需要围绕上述因素做好试验摸索工作。

## 4 结束语

尾矿减排是延长尾矿库服务年限的重要手段,是矿山可持续发展的主要途径。矿山企业要根据自身特点,选择适合的尾矿减排方法,同步考虑尾矿减排实施过程中对尾矿库、排土场、地下开采等产生的安全风险。针对不同的尾矿减排方法,实施相应的安全对策,保障尾矿减排后尾矿库、排土场、地下开采等安全稳定。

### [参考文献]

- [1] 李刚,朱建双,凌嘉鸿.某矿山高压辊磨机+湿式预选工艺研究[J].现代矿业,2022(12):156-159.

- [2] 王欢,翁金红,王荣林,等. 高压辊磨机串联工艺流程在某铁矿的应用研究[J]. 现代矿业,2021(10): 116-119.
- [3] 李刚. 水厂铁矿细碎产品干式预选设备升级研究[J]. 金属矿山,2019(7):172-175.
- [4] 李刚. 水厂铁矿选矿工艺设备改造研究与实践[J]. 中国矿山工程,2016(6):34-37,47.
- [5] 杨志强,王立杰,王社光,等. 钢渣基胶凝材料强度试验与充填料浆管输特性研究[J]. 现代矿业,2023(4):62-65.
- [6] 中华人民共和国国家标准. GB/T51450—2022 金属非金属矿山充填工程技术标准[S]. 北京:中国计划出版社,2022.
- [7] 张高飞,宋兵,高峰. 预控顶上向水平进路嗣后充填法在赵案庄铁矿的应用[J]. 现代矿业,2022(12):102-105.
- [8] 付建勋,贺茂坤,江国建,等. 绿色无尾矿山优化充填技术与关键装备研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):58-61.
- [9] 郑德彬. 尾矿固结技术在某矿山塌陷区生态环境恢复治理中的应用[J]. 现代矿业,2021(10):108-110.
- [10] 梁新民,刘明权,张爱民,等. 无废、无尾生态智能矿山建设模式探讨[J]. 中国矿山工程,2022,51(2):66-71.
- [11] 李刚. 水厂铁矿池填筑坝工艺研究[J]. 现代矿业,2021(10):105-107.
- [12] 张洪泽,刘福江,于华军. 全尾砂充填采矿法的特点安全评价要点[J]. 科技传播,2013,5(9):96-97.
- [13] 程爱平,董福松,张玉山,等. 胶结充填体波速-密度双参数强度预测模型研究[J]. 金属矿山,2019(7):26-31.
- [14] 高峰,郑学鑫,宋会彬. 基于 GEOPAK 软件的尾矿库全生命周期仿真管理系统研究[J]. 有色设备,2021,35(3):19-22.
- [15] 张永利,綦晓磊. 上向水平分层充填法在获各琦铜矿的实践及应用[J]. 有色金属(矿山部分),2016,68(4):13-16.

## Research on Emission Reduction Methods, Potential Safety Risks and Countermeasures of Iron Ore Mine Tailings

CHEN Yuguo, LI Gang, WANG Liansong

(Shougang Group Co., Ltd. Mining Company, Qian'an 064400, China)

**Abstract:** With the increasing supervision of tailings reservoirs by the state, the tailings reservoirs of mining enterprises are facing difficulties in new construction, heightening and expansion approval, which affects the sustainable development of enterprises. So it is necessary to vigorously promote tailings emission reduction. This paper introduced the methods of implementing tailings emission reduction in iron ore mining enterprises, analyzed the potential safety risks for different emission reduction methods, and put forward safety countermeasures, so as to achieve the goals of reducing the amount of tailings in storage or no tailings discharge, and reduce the safety risk of tailings pond, effectively alleviate the problem of insufficient capacity of tailings pond.

**Key words:** tailings emission reduction; method analysis; security risks; strategy research