

铅锌选矿厂尾矿综合利用途径的研究

李红刚 林祥利

陕西铅铜山矿业有限公司 陕西 宝鸡 721707

摘要: 全球铅锌矿资源分布广泛,选矿以破碎、磨矿、浮选为核心工艺,尾矿排放量大且累积存量持续增加。尾矿堆存占用土地,重金属迁移造成土壤污染,扬尘影响大气环境。尾矿库渗漏导致地下水和周边水体受到重金属及残留选矿药剂的污染。尾矿坝存在溃坝安全隐患。治理途径包括有价金属回收与非金属矿物利用的资源化技术,干式堆存与充填采矿等工程化处置手段,以及植被恢复与微生物修复等生态修复策略。多技术耦合的集成化模式可实现尾矿全量利用与矿山生产闭环运行。

关键词: 铅锌选矿;尾矿污染;综合利用

引言:铅锌选矿厂是全球有色金属工业的重要组成部分,其生产过程产生大量尾矿。随着铅锌矿石品位逐渐降低,尾矿排放量与累积存量持续增加,带来严重的生态环境压力。尾矿堆存占用土地资源,所含重金属及残留选矿药剂可通过风化、淋溶和渗漏等途径迁移扩散,对土壤、水体和大气造成污染风险。同时,尾矿库存在溃坝等安全隐患。为实现铅锌选矿厂的可持续发展,亟需探索尾矿治理的有效途径,包括资源化利用、工程化处置、生态修复及多技术集成的综合模式,推动尾矿减量化与无害化处理。

1 铅锌选矿厂的基本情况

1.1 铅锌矿资源分布与选矿工艺概述

全球铅锌矿资源分布较为广泛,成矿区域相对集中。铅锌矿床多与热液活动有关,常见赋存于碳酸盐岩、碎屑岩等围岩中。矿石类型以硫化矿为主,氧化矿次之。开采方式依据矿体埋深与产状,采用露天开采或地下开采。总体来看,铅锌矿石品位呈现逐渐降低的趋势,开采难度与规模不断扩大。铅锌选矿厂常规工艺流程主要包括破碎、磨矿、浮选及产品脱水等环节。破碎阶段采用多段闭路流程,将原矿破碎至适宜粒度。磨矿作业通过球磨机或棒磨机与分级设备配合,使有用矿物与脉石矿物充分解离。浮选是核心工序,依据矿物表面物理化学性质差异,采用优先浮选或混合浮选流程,依次分离铅矿物、锌矿物及伴生硫矿物。浮选后的精矿经浓缩、过滤脱水后成为最终产品,尾矿则输送至尾矿库或进行后续处置。

1.2 尾矿的产生与特性

铅锌选矿过程中,由于原矿品位有限,大量入选物料最终成为尾矿。尾矿的化学组成以脉石矿物为主,主要包括石英、方解石、白云石、长石及云母等。同时残留少量未充分回收的铅、锌、硫等有用组分,以及浮选

过程中添加的有机与无机药剂。矿物相特征方面,硫化矿尾矿中常见黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等残余硫化物,氧化矿尾矿中则多见碳酸盐、硅酸盐等稳定矿物相。尾矿的物理性质表现为粒度分布较细,多数颗粒集中在细砂至粉砂范围,部分细泥含量较高^[1]。含水率受脱水工艺影响,通常在百分之二十至四十之间波动,尾矿浆呈流塑状态。尾矿的年排放量与累积存量分析表明,单座选矿厂尾矿年排放量可达数十万至数百万吨。

2 铅锌选矿厂面临的环境问题

2.1 尾矿对生态环境的直接影响

铅锌选矿尾矿的大量堆存直接占用大面积土地资源。尾矿库及临时堆场的建设使原有地表植被覆盖被彻底清除,土壤结构遭受重型机械碾压与尾矿覆盖后发生严重压实与板结,土壤孔隙度下降,透气性与透水性减弱,土壤生物活动受到抑制,土地的自然恢复能力基本丧失。尾矿中含有的铅、锌、镉等重金属元素在长期风化与雨水淋溶作用下具有较高的迁移活性。这些重金属可从尾矿颗粒表面发生解吸作用进入土壤溶液,并通过分子扩散、重力下渗及地表径流等方式向周边土壤环境持续迁移,导致尾矿库周边大面积土壤重金属含量超出背景值。重金属进入土壤后易被植物根系吸收并转运至地上部分,对植物细胞代谢、光合作用及养分吸收产生毒害效应,抑制植物正常生长发育,同时重金属通过食物链传递对动物及人体健康构成长期潜在风险。尾矿长期暴露于地表,在干燥多风气象条件下,细颗粒尾矿粉尘极易扬起形成扬尘污染。扬尘颗粒表面吸附有重金属离子及残留选矿药剂,可随风扩散至尾矿库周边数公里范围内,沉降后污染周边土壤、地表水体与植被。扬尘在干旱少雨季节尤为严重,不仅降低大气环境能见度,还对周边生物呼吸系统产生不良刺激,细颗粒物可进入肺泡组织。

2.2 尾矿对水环境的潜在威胁

铅锌尾矿库底部通常铺设防渗层以阻隔污染物下渗,但长期运行过程中防渗材料可能发生老化、破损或接缝处失效,导致含高浓度重金属及残留选矿药剂的尾矿水发生渗漏。渗滤液垂直下渗进入包气带后,在重力与毛细力共同作用下继续向下迁移直至到达潜水面,形成污染羽。重金属在地下水中的迁移过程受介质颗粒的吸附截留、沉淀反应及地下水水力条件等多因素综合控制,污染范围随渗漏时间延长而逐渐向四周及深部扩展。铅、锌、镉等重金属进入地下水环境后难以通过自然降解作用消除,长期累积可造成区域地下水水质持续恶化,使地下水失去饮用水及灌溉用水功能。尾矿中残留的选矿药剂主要包括黄药类、黑药类、起泡剂及各类调整剂等有机化合物,这些药剂在尾矿库内长期浸泡条件下可发生部分溶解并释放进入渗滤液。有机选矿药剂随渗滤液进入水体后,在微生物作用下分解消耗水中溶解氧,导致水体化学需氧量显著升高,溶解氧浓度下降^[2]。部分选矿药剂及其降解产物具有生物毒性,可对水生生物产生急性致死效应或慢性亚致死效应,干扰水生生物的生长、繁殖及行为活动。

2.3 尾矿库的安全隐患

尾矿坝作为人工堆筑的土石结构物,其稳定性受筑坝材料的物理力学性质、施工压实质量、日常运行管理维护以及坝基工程地质条件等多方面因素综合影响。坝体内部渗流场的变化可能导致浸润线位置升高,孔隙水压力增大,从而降低坝体有效应力,使坝体材料的抗剪强度下降,削弱坝体的抗滑稳定性。坝体材料在长期自重荷载、干湿交替循环及冻融循环作用下可能发生力学性能的逐步劣化,局部产生纵向或横向裂缝、不均匀沉降或管涌等变形破坏迹象。当坝体稳定性不足且变形累积超过临界值时,可引发坝坡整体滑动、坝顶塌陷乃至坝体整体溃决事故。尾矿库发生溃坝后,大量液化尾矿浆以高速向下游方向倾泻而出,形成具有强大冲击力和携带能力的泥石流状流动体,冲刷并掩埋下游河谷、沟道及平原地带,造成土地及地面设施的严重损毁。尾矿库的防洪能力主要依据设计洪水标准进行确定,但在极端气候条件下实际降雨强度可能超过设计重现期标准。暴雨引发的地表径流大量汇入库区后,库水位迅速抬升,若泄洪设施的排洪能力不足,可导致洪水漫过坝顶。漫顶水流沿坝体下游坡面高速下泄,对坝坡产生强烈冲刷侵蚀作用,逐步形成冲沟并不断加深拓宽,最终可能引发坝体局部或整体失稳溃决。

3 铅锌选矿厂尾矿的有效治理途径

3.1 尾矿资源化利用技术路径

有价金属回收方面,铅锌尾矿中仍残留一定品位的铅、锌及伴生的金、银、铜、镉等金属。二次选矿技术采用重选、磁选、浮选及其联合工艺,针对尾矿粒度细、解离度高的特点进行再选。浮选是回收硫化金属矿物的主要手段,通过调整药剂制度与浮选流程,可有效富集尾矿中的残余金属矿物。化学浸出技术适用于氧化矿及难选矿物,利用酸性或碱性溶液浸取金属组分,浸出效率较高但药剂消耗量较大。生物浸出技术利用特定微生物的氧化与代谢作用,将硫化物矿物中的金属溶解出来,具有成本低、环境友好的优势,但浸出周期较长且对温度等条件敏感^[3]。非金属矿物利用主要针对尾矿中的石英、长石、方解石、云母等。通过分级、磁选、擦洗等提纯工艺可分离出硅、钙、铁等成分。尾矿作为建筑材料具有较大潜力,细粒尾矿可用作水泥生料配料或混合材,亦可替代部分黏土制砖或作为陶瓷原料。农业领域应用中,尾矿所含的锌、铜、锰等微量元素对部分缺素土壤具有补充作用。尾矿基肥料通过将尾矿与有机物料或微生物菌剂复配制成,可提供缓效养分。

3.2 尾矿的工程化处置技术

干式堆存技术通过尾矿脱水降低含水率以后以干态形式堆存。尾矿脱水采用浓密机与过滤设备联合工艺,将尾矿浆含水平由百分之三十左右降至百分之二十以下。干堆工艺优化包括分级脱水、压滤脱水与膏体浓缩等路径选择,依据尾矿粒度与矿物组成确定最佳脱水流程。干堆场防渗控制采用土工膜与压实黏土层组合结构,阻断渗滤液下渗通道。边坡稳定控制通过分层堆存、压实碾压与修筑拦挡坝等措施,控制堆体坡角与高度,防止滑塌失稳。充填采矿技术将尾矿作为井下采空区的充填材料,实现尾矿原位处置。尾矿与胶结材料按一定配比混合制成充填料浆,泵送至井下采场。充填配比研究依据充填体强度要求及尾矿粒度分布确定水泥或其他胶凝材料用量^[4]。充填系统由尾矿给料、胶结材料给料、搅拌制浆与管道输送等单元构成。充填采矿的协同效应体现在两方面,一方面充填体支撑采场顶板与围岩,控制地压活动,提高采矿安全水平;另一方面充填体置换出矿柱资源,提升矿石回采率,同时减少尾矿地表排放压力。

3.3 尾矿库的生态修复策略

植被恢复技术首先需筛选适生植物种类,优先选用耐重金属、耐贫瘠、根系发达的草本与灌木植物。适生植物能够在尾矿基质中正常萌发、生长并完成生活史,对尾矿中的铅、锌、镉等重金属具有较强耐受性与规避吸收机制。土壤基质改良方法包括添加有机物料、黏土

矿物或工业副产物,提高尾矿持水能力与养分水平,调节酸碱度,降低重金属活性。改良后的人工基质为植物根系提供稳定的生长环境。植被覆盖对尾矿风化的作用体现在植被冠层降低地表风速、减少扬尘,根系穿插作用促进尾矿团聚体形成,改善表层结构。重金属固定方面,植物吸收与根系分泌物的络合作用可使部分重金属转化为活性较低的形态,根际微生物的协同作用进一步增强固定效果。微生物修复技术重点筛选重金属钝化菌,包括硫酸盐还原菌、铁锰氧化菌及某些耐重金属真菌。这些菌株通过生物吸附、胞外沉淀或诱导矿物沉淀等机制,将可迁移的重金属离子转化为稳定态。微生物与植物联合修复中,微生物促进植物生长、增强根系发育,同时微生物改变根际重金属形态,提高植物吸收与固定效率,形成正向协同效应。

3.4 尾矿综合利用的集成化模式

多技术耦合的尾矿全量利用方案设计遵循分类分级原则,依据尾矿粒度、组成及性质差异,将有价金属回收、非金属矿物利用、建筑材料生产与井下充填等技术按序集成。粗粒尾矿优先用于井下充填或建筑骨料,细粒尾矿经分选后提取有价金属及非金属组分,剩余部分用于制砖或作为水泥混合材,实现尾矿全组分利用。尾矿处理与矿山生产的闭环系统构建将尾矿处置环节嵌入采矿、选矿生产链条。选厂排出的尾矿浆经浓缩、分级后,粗粒级直接制备充填料输送至井下,细粒级进入资源化利用工序或脱水干堆,废水经处理后回用至选矿流程。闭环系统减少了尾矿外排量及新鲜水取用量^[5]。技术经济性分析从设备投资、运行能耗、药剂消耗、人力成

本及产品收益等方面综合评估各技术路径的经济可行性。产业链延伸路径是将尾矿转化为建材产品、土壤改良剂或矿物肥料后,对接建筑、农业等外部产业,形成跨行业的资源循环链条,提升尾矿综合利用的经济价值与可持续性。

结束语:铅锌选矿厂尾矿的产生与堆存是制约行业可持续发展的核心问题。尾矿中残留的重金属及选矿药剂通过多种途径对土壤、水体和大气造成污染风险,尾矿库溃坝隐患进一步加剧了环境安全压力。针对上述问题,资源化利用、工程化处置与生态修复等多条技术路径已形成较为完备的治理体系。通过有价金属再选、建筑材料转化、井下充填以及植被恢复等措施,可在不同程度上实现尾矿减量化与无害化。多技术耦合的集成化模式及矿山生产闭环系统的构建,为尾矿全量利用提供了可行方向。持续推动技术优化与模式创新,是提升铅锌选矿厂环境绩效的关键所在。

参考文献:

- [1]肖婷.铅锌选矿厂尾矿库周边土壤重金属特征及影响因素[J].林业与环境科学,2025,41(6):103-109.
- [2]郑曦,乔继扬,张俊.铅锌选矿厂尾矿库废水深度处理工程实践[J].中国战略新兴产业,2021(30):31-32.
- [3]王娜,张雷.新疆宝山选矿厂尾矿干排应用实践与尾矿综合利用探索[J].能源与节能,2024,(08):81-83+87.
- [4]王忠凯.金矿选矿厂尾矿综合利用选矿工艺的分析[J].世界有色金属,2023,(23):91-93.
- [5]金川集团股份有限公司.选矿厂智慧水务管理系统建设与实践[J].中国矿业,2023,32(5):189-194.