

尾矿库生态修复关键技术与工程应用研究

樊宇姣

中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司 河北 秦皇岛 066004

摘要：随着工业化进程的加速，尾矿库对生态环境的破坏日益严重。本研究深入探讨了尾矿库生态修复的关键技术，包括物理、化学、生物及综合修复方法。通过工程应用实践，验证了这些技术在提高尾矿土地利用效率、降低环境污染风险方面的有效性。研究还着重关注了技术集成的创新应用，以及智能化、自动化技术在修复过程中的辅助作用。本研究为尾矿库生态修复提供了科学依据和技术支撑。

关键词：尾矿库生态修复；关键技术；工程应用

引言：尾矿库作为矿山开采后废弃物的主要储存场所，其环境问题日益凸显，对周边生态系统构成严重威胁。尾矿中的重金属和其他有害物质可通过水体、土壤和大气等途径扩散，影响人类健康和生态环境安全。因此，开展尾矿库生态修复关键技术与工程应用研究，旨在探索高效、经济的修复方法，以实现尾矿库土地的再利用和生态环境的改善，对于促进矿山可持续发展和保障区域生态安全具有重要意义。

1 尾矿库生态修复的现状与背景

1.1 尾矿库的定义与分类

尾矿库是筑坝拦截谷口或围地构成，用于贮存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿（或其他工业废渣）的场所。按地形条件，可分为山谷型、傍山型、平地型和截河型。山谷型初期坝短、库容大，我国大、中型尾矿库多属此类；傍山型多在低山丘陵地区的中小矿山；平地型在平原或沙漠戈壁地区较多；截河型采用率不高。按堆存方式，有干式和湿式，湿式工艺简单、管理方便，应用广泛。

1.2 尾矿库对生态环境的影响

（1）土地占用与破坏：尾矿库占地面积大，大量尾矿堆积改变原有地形地貌，破坏植被，导致土地退化，失去农业或其他利用价值。（2）水资源污染：尾矿中含重金属和有害物质，随雨水冲刷或渗滤液进入地表水和地下水，如云南宁蒗县三鑫矿业白牛厂尾矿库，致使周边水体和底泥重金属浓度偏高，污染严重。（3）大气污染与地质灾害风险：尾矿干燥后易产生扬尘，污染大气。同时，尾矿库具有高势能，是人造泥石流危险源，坝体失稳可能引发溃坝等地质灾害，威胁下游安全。

1.3 国内外尾矿库生态修复的发展历程与现状

（1）技术进展与趋势：从技术路径看，有自然恢复、化学修复、物理修复和生物修复等模式。当前，新

技术不断涌现，如人工智能用于实时监测和预测，优化修复策略；微型机器人进行深度探测和修复。未来，尾矿库生态修复将更注重可持续性，采用绿色技术和循环经济模式。（2）成功案例与经验借鉴：国外在技术推广和政策支持层面成果显著。国内起步晚但进展快，部分企业采用先进技术，如利用生物修复技术对尾矿堆场进行生态修复，改善矿区环境。政策上，国内通过税收减免和生态补偿机制，为修复提供经济保障。

2 尾矿库生态修复的关键技术

2.1 物理修复技术

（1）物理隔离与土壤置换：物理隔离是通过铺设防渗膜、黏土防渗层等材料，阻断尾矿中污染物与周边环境的接触，防止其扩散。例如在尾矿库底部及边坡铺设高密度聚乙烯防渗膜，能有效阻挡渗滤液下渗污染地下水。土壤置换则是将受污染的尾矿及表层土壤移除，换上清洁的土壤，适用于污染程度较深、范围较小的区域，可快速改善土壤质量，但成本较高，且需妥善处理置换出的污染土壤。（2）植被覆盖与地形重塑：植被覆盖是在尾矿库表面种植耐旱、耐贫瘠、抗污染的植物，如沙打旺、紫花苜蓿等，利用植物根系固定土壤，减少扬尘和水土流失，同时植物的蒸腾作用可降低尾矿库湿度，抑制污染物释放。地形重塑是通过削坡、填谷等工程手段，调整尾矿库的坡度、高程等地形特征，使其更符合生态恢复的需求，比如将陡峭的边坡修整为平缓的坡地，便于植被种植和后期维护^[1]。

2.2 化学修复技术

（1）化学沉淀与氧化还原：化学沉淀是向受污染的尾矿或水体中投放化学药剂，如石灰、硫化钠等，使污染物形成难溶性沉淀，降低其迁移性和生物有效性。例如向含重金属的尾矿渗滤液中投放石灰，可使重金属离子形成氢氧化物沉淀。氧化还原是通过添加氧化剂（如

过氧化氢)或还原剂(如铁粉),改变污染物的化学价态,使其转化为毒性较低或更易去除的形态,如将六价铬还原为三价铬,降低其毒性。(2)离子交换与酸碱中和:离子交换是利用离子交换树脂等材料,吸附尾矿或水体中的污染物离子,从而达到净化目的,适用于去除水中的重金属离子。酸碱中和则是针对酸性或碱性尾矿,投放相应的中和剂,如向酸性尾矿中撒播石灰石粉,调节其pH值至中性范围,为后续的生物修复创造适宜环境。

2.3 生物修复技术

(1)微生物修复与植物修复:微生物修复是利用特定微生物(如细菌、真菌)的代谢作用,将尾矿中的污染物分解转化为无害物质。例如某些细菌可将土壤中的石油烃类污染物降解为二氧化碳和水。植物修复是筛选和种植对污染物具有吸收、富集或降解能力的植物,如蜈蚣草对砷有较强的富集能力,可吸收尾矿中的砷元素,通过收割植物将污染物移出土体。(2)动物修复与生态系统重建:动物修复是利用土壤动物(如蚯蚓、线虫)改善土壤结构,促进污染物的转化和迁移,蚯蚓的活动可增加土壤透气性,提高微生物活性,间接促进污染物降解。生态系统重建是在修复后期,构建由植物、动物、微生物组成的完整生态系统,恢复尾矿库的生态功能,如在修复后的区域种植乔木、灌木,投放昆虫、鸟类等,形成稳定的生态链。

2.4 综合修复技术

(1)技术集成与创新:综合修复技术并非单一技术的简单叠加,而是根据尾矿库的污染特征、地形条件等,将物理、化学、生物修复技术有机结合,实现优势互补。例如先采用物理隔离阻止污染物扩散,再通过化学修复降低污染物毒性,最后利用生物修复实现生态系统的长期稳定。同时,不断创新技术组合模式,如将电动力学修复与生物修复结合,提高修复效率^[2]。(2)智能化与自动化在修复中的应用:随着科技发展,智能化与自动化技术在尾矿库生态修复中得到广泛应用。通过安装传感器实时监测尾矿库的温度、湿度、污染物浓度等指标,数据传输至控制系统进行分析,为修复方案调整提供依据。自动化设备如无人机可用于植被生长状况巡查、药剂精准投放,智能化控制系统可实现修复过程的远程操控,提高修复的精准性和效率,降低人工成本。

3 尾矿库生态修复的工程应用

3.1 工程应用的原则与目标

(1)最小干预与生态优先:最小干预原则要求在修复过程中尽量减少对原有生态系统的破坏,避免过度工

程化操作。例如在地形重塑时,优先利用现有地形条件进行微调,而非大规模开挖。生态优先则强调以恢复生态功能为核心,确保修复后区域能形成稳定的生态系统,如优先保障植被恢复和生物多样性提升,而非单纯追求景观效果。(2)经济性与可持续性:经济性原则要求在修复方案设计中兼顾成本控制,优先选择性价比高的技术和材料,如在土壤改良时,采用本地易得的有机肥替代高价化学改良剂。可持续性则注重修复效果的长期维持,通过构建自我循环的生态系统,降低后期维护成本,例如选择乡土植物品种,减少人工灌溉和施肥需求。

3.2 工程设计的关键要素

(1)污染源识别与评估:通过现场采样、实验室分析等手段,明确尾矿库中的主要污染物种类(如重金属、有机物)、浓度及分布范围。同时评估污染物的迁移路径和潜在危害,如分析渗滤液对周边地下水的污染风险,为后续修复方案制定提供科学依据。例如某铅锌矿尾矿库,需重点检测铅、锌等重金属含量及在土壤和水体中的扩散情况。(2)修复方案的设计与选择:结合污染源评估结果、场地条件及生态目标,设计多种修复方案并进行比选。方案需涵盖技术可行性、成本效益等方面,如对于重金属污染严重的区域,可比较化学沉淀与植物修复的综合效果及成本,选择最适合的方案。同时需考虑与周边环境的协调性,避免修复工程对周边居民生活造成影响。

3.3 工程实施的步骤与方法

(1)前期准备与施工安排:前期准备包括场地清理、设备采购、人员培训等。施工安排需制定详细的进度计划,明确各工序的先后顺序,如先进行物理隔离施工,再开展土壤改良和植被种植。例如在施工前清理尾矿库表面的杂物,搭建临时排水系统,防止施工期间雨水冲刷造成二次污染。(2)过程监控与效果评估:在施工过程中,通过安装监测设备实时监控污染物浓度、植被生长状况等指标,及时调整施工参数。效果评估则在工程完工后进行,采用土壤采样、生物多样性调查等方法,判断修复是否达到预期目标。如通过测定土壤中重金属含量是否降至安全标准,评估修复效果的持久性^[3]。

3.4 工程应用中的风险管理与应对措施

(1)技术风险与经济风险:技术风险可能源于修复技术不成熟或不适用,应对措施包括在小范围试点验证技术效果后再推广,如某生物修复技术需先进行小区试验。经济风险主要涉及成本超支,可通过制定详细的预算、选择价格波动小的材料等方式规避,如与供应商签订长期供货协议锁定材料价格。(2)环境风险与社会风

险：环境风险可能有修复过程中污染物二次扩散，需加强施工过程中的防渗和防尘措施，如对运输车辆进行密闭处理。社会风险包括周边居民对修复工程的不理解，应通过公众参与、宣传教育等方式化解，如召开听证会说明工程意义和环保措施，争取居民支持。

4 尾矿库生态修复面临的挑战与对策

4.1 技术挑战与对策

(1) 尾矿成分复杂与技术成熟度不足：尾矿中常含有多种重金属、酸碱物质及有毒有机物，成分复杂且地域差异大，单一修复技术难以适配。部分新兴技术如微生物联合修复，因环境适应性弱、效果不稳定，成熟度不足。对策需推动“靶向修复”技术研发，针对不同尾矿成分定制组合技术，例如将化学淋洗与植物萃取结合处理多金属污染；同时建立技术验证平台，通过中试工程积累数据，加速技术落地。(2) 技术创新与研发支持：现有技术多停留在实验室阶段，转化效率低，且科研投入分散，缺乏跨学科协作。需构建“产学研用”协同机制，鼓励高校、企业、科研机构联合攻关，如设立尾矿修复技术创新联盟；加大财政专项资金支持，对突破关键技术的团队给予奖励，同时引导社会资本参与技术研发^[4]。

4.2 经济挑战与对策

(1) 投资成本高与资金筹集难：尾矿库修复涉及场地整治、污染治理等多环节，动辄数千万元甚至上亿元投入，而矿山企业因盈利下滑难以承担，政府财政压力也较大。对策可建立多元化融资体系，推广PPP模式吸引社会资本，如通过特许经营允许企业参与修复后土地开发；设立省级尾矿修复基金，对贫困地区项目给予补贴。(2) 经济效益与生态效益的平衡：短期修复工程经济效益不明显，企业参与动力不足。需探索“生态+产业”模式，如将修复后的尾矿库改造为光伏电站、生态公园，通过发电收益、旅游收入反哺修复成本；对开展生态修复的企业给予税收减免、碳汇交易优先资格等政策激励。

4.3 管理挑战与对策

(1) 监管体系不健全与法规政策缺失：尾矿库修复责任主体不明确，部分废弃尾矿库存在“无主”状态，

且缺乏全国统一的修复标准和验收规范。需明确“谁污染谁治理、谁受益谁负责”原则，建立尾矿库终身责任制；加快制定《尾矿库生态修复条例》，统一技术标准和评估体系，将修复纳入地方政府绩效考核。(2) 管理机制创新与法规完善：跨区域、跨部门协调不畅，易出现监管真空。可建立跨行政区联席会议制度，由生态环境部门牵头，自然资源、水利等部门协同；推行“修复+认证”制度，对达标项目发放生态修复认证，作为土地再开发的前置条件，强化法规执行力。

4.4 社会挑战与对策

(1) 公众认知度低与社会接受度不高：公众对尾矿库污染危害及修复意义了解甚少，部分人担心修复过程引发二次污染，对修复后土地利用持怀疑态度。需开展“进社区、进学校”科普活动，通过案例展示（如某尾矿库转型为湿地公园）直观呈现修复效果；在项目规划阶段公开信息，邀请公众实地考察，消除认知误区。

(2) 公众参与与宣传教育：现有修复项目多由政府主导，公众参与渠道有限。应建立公众参与机制，在方案设计、效果评估等环节引入公众投票；将尾矿库修复纳入环境教育课程，培养大众生态保护意识，同时鼓励媒体报道成功案例，营造全社会支持修复的氛围。

结束语

尾矿库生态修复关键技术与工程应用研究对于解决矿山环境问题和推动可持续发展具有重要意义。本研究通过系统地探讨和分析，提出了一系列有效的修复技术和工程应用策略。未来，需进一步加强技术创新与实践应用，构建完善的法规体系和监管机制，提升公众参与度和环保意识，共同推动尾矿库生态修复事业的发展。

参考文献

- [1]安如意,王辉,李晟洲,等.“双碳”背景下铁尾矿库生态修复技术方向与策略[J].有色金属,2022,(06):82-83.
- [2]张计武,王秀梅,马文强.尾矿库生态修复实践及效果分析[J].世界有色金属,2021,(13):174-175.
- [3]梁钜鑫,范国庆.关于尾矿库闭库的问题研究[J].世界有色金属,2020,(07):79-80.
- [4]张锐,毕婷婷,袁信.尾矿库环境风险管理问题及对策[J].环境保护,2021,(14):152-153.