

# 有色金属尾矿库水工环地质风险评估与防控技术

朱 正

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 有色金属尾矿库水工环地质风险评估需综合工程地质、水文地质及环境地质特征, 识别坝体失稳、渗流破坏、重金属污染等风险源。采用模糊综合评价、数值模拟及GIS-机器学习耦合模型进行风险量化评估, 划分低、中、高风险等级。防控技术涵盖坝体加固、渗流控制、生态修复等工程措施, 结合智能监测预警系统与应急预案, 辅以全生命周期管理规范与责任主体划分, 实现风险动态管控与生态环境协同保护。

**关键词:** 有色金属尾矿库; 水工环地质; 风险评估; 防控技术

引言: 有色金属产业蓬勃发展下, 尾矿库数量与规模持续攀升, 其水工环地质问题愈发凸显。尾矿库特殊的工程地质结构、复杂的水文地质条件以及潜在的环境地质危害相互交织, 使得坝体失稳、渗流异常、重金属污染等风险频发, 严重威胁周边生态环境与安全。深入开展有色金属尾矿库水工环地质风险评估, 并构建科学有效的防控技术体系, 已成为保障矿业可持续发展与区域生态安全的迫切需求。

## 1 有色金属尾矿库水工环地质特征与风险识别

### 1.1 尾矿库工程地质特征

(1) 尾矿堆积体结构与物理力学性质: 有色金属尾矿堆积体多呈层状分布, 颗粒级配不均, 常含细砂、粉土及黏粒夹层, 结构松散且孔隙率高。物理力学性质表现为天然含水率高(多在20%-35%)、干密度低(1.4-1.7g/cm<sup>3</sup>), 抗剪强度参数黏聚力c值通常小于15kPa, 内摩擦角φ值多在18°-25°, 易因受力变形引发沉降或滑动。

(2) 坝体稳定性影响因素: 渗流方面, 尾矿颗粒渗透性差异导致坝体内部易形成集中渗流通道, 引发管涌、流土等问题, 降低坝体抗滑稳定性; 地震液化方面, 饱和松散尾矿在地震动作用下(加速度≥0.15g), 孔隙水压力骤升, 有效应力急剧降低, 易发生液化失稳, 尤其坝前松散堆积区风险更高。

### 1.2 水文地质条件分析

(1) 地下水系统与尾矿库的相互作用: 尾矿库周边地下水多为孔隙水或基岩裂隙水, 尾矿堆积体与地下水存在双向补给关系。地下水入渗会抬高尾矿体内水位, 增加渗流压力; 而尾矿水中的污染物(如重金属离子)会随地下水迁移, 污染周边含水层。(2) 降雨-径流-渗流耦合作用机制: 强降雨(日降雨量≥50mm)时, 地表径流携带尾矿颗粒冲刷坝坡, 同时雨水入渗尾矿堆积体, 导致孔隙水压力升高、有效应力降低, 加剧渗流风

险。当降雨入渗量超过尾矿体渗透能力时, 易引发坝体漫顶或边坡失稳<sup>[1]</sup>。

### 1.3 环境地质问题

(1) 尾矿中有害元素迁移规律: 有色金属尾矿含铅、镉、锌等重金属元素, 在雨水淋滤作用下, 重金属离子溶解并随渗流迁移, 污染周边土壤和地下水。迁移距离受土壤渗透性、地下水水力梯度影响, 一般在尾矿库周边500-1000m范围内污染风险较高。(2) 酸性废水生成与土壤酸化风险: 尾矿中的硫化矿物(如黄铁矿)与空气、水接触后, 经微生物氧化生成硫酸, 形成pH值≤4.5的酸性废水。酸性废水渗透至土壤, 会降低土壤pH值, 破坏土壤团粒结构, 导致土壤肥力下降, 同时加剧重金属元素的溶出与迁移。

### 1.4 风险源识别与分类

(1) 自然因素: 地震灾害易引发尾矿坝液化失稳, 地震烈度≥Ⅶ度区域需重点防控; 强降雨易导致坝体渗流、漫顶, 年均降雨量≥1200mm的地区风险显著; 滑坡多发生于坝坡坡度≥25°的区域, 松散尾矿堆积体易沿软弱夹层滑动。(2) 人为因素: 设计缺陷如坝体防渗结构不完善、坝坡坡度设计过陡, 会增加渗流与滑坡风险; 管理失当如未定期监测坝体位移、渗压, 易延误风险处置时机; 违规操作如超量堆存尾矿、随意排放废水, 会加剧坝体荷载与环境污染风险。

## 2 有色金属尾矿库水工环地质风险评估模型构建

### 2.1 评估指标体系设计

(1) 指标筛选原则: 遵循科学性原则, 确保指标能客观反映水工环地质风险本质, 如选用“坝体边坡稳定系数”“地下水重金属超标倍数”等基于地质力学与环境科学理论的指标; 坚持可操作性原则, 选取数据易获取、量化的指标, 避免使用难以监测的抽象参数, 例如以“年最大降雨量”替代“区域气候脆弱性”, 通过

气象站数据即可直接获取；注重代表性原则，每个指标需能覆盖一类风险核心特征，如用“硫化矿物含量”代表酸性废水生成潜力，避免指标重复或冗余<sup>[2]</sup>。（2）多层次指标框架：从工程地质维度，选取坝体边坡稳定系数、尾矿堆积体干密度、渗透系数等指标，反映坝体结构与力学稳定性；水文地质维度，纳入地下水水力梯度、降雨入渗量、渗流压力等指标，体现水文条件对风险的影响；环境地质维度，设置土壤重金属污染超标率、酸性废水pH值、有害元素迁移距离等指标，评估环境污染风险；人类活动维度，选取尾矿堆存速率、监测频率、违规操作次数等指标，量化人为因素的风险贡献，形成“目标层-准则层-指标层”三级框架，确保全面覆盖风险来源。

## 2.2 风险评估方法

（1）定量评估方法：模糊综合评价法通过建立隶属函数，将“坝体稳定性”等模糊指标量化，结合权重计算风险值，适用于多因素耦合的复杂场景；层次分析法将评估目标分解为递阶层次，通过两两比较构建判断矩阵，确定各指标权重，如区分“地震影响”与“降雨影响”的重要程度；数值模拟法借助FLAC3D、MODFLOW等软件，模拟尾矿坝渗流场、应力场变化，预测边坡失稳时间或污染物迁移路径，为风险防控提供精准数据支撑。（2）定性评估方法：专家打分法邀请地质工程、环境科学等领域专家，依据经验对“管理完善度”“设计合理性”等指标打分，综合形成风险等级结论，适用于基础数据不足的情况；风险矩阵法以“风险可能性”（如强降雨发生概率）为横轴、“风险后果严重性”（如溃坝经济损失）为纵轴，划分风险矩阵象限，快速判定风险等级，便于现场初步筛查。（3）耦合评估模型：GIS-机器学习耦合模型将GIS空间分析能力与机器学习算法结合，通过GIS叠加工程地质、水文地质等空间数据，提取风险因子；利用随机森林、神经网络等算法，对历史风险案例进行训练，构建风险预测模型，可动态输出尾矿库风险空间分布图，实现风险的可视化与精准预测，尤其适用于区域尺度的多尾矿库风险评估。

## 2.3 风险等级划分标准

（1）低风险、中风险、高风险的量化阈值：基于评估指标综合得分（满分100分），低风险阈值设定为0-30分，对应坝体稳定系数 $\geq 1.25$ 、地下水重金属无超标、无酸性废水生成，风险发生概率 $\leq 5\%$ ；中风险阈值为31-60分，表现为坝体稳定系数1.15-1.24、局部土壤重金属超标1-3倍、偶发pH值4.0-4.5的酸性废水，风险发生概率6%-20%；高风险阈值为61-100分，对应坝体稳定系数

$\leq 1.14$ 、地下水重金属超标 $\geq 3$ 倍、持续产生pH值 $< 4.0$ 的酸性废水，风险发生概率 $\geq 21\%$ ，需启动应急响应机制<sup>[3]</sup>。（2）动态调整机制：考虑气候变化影响，当区域年均降雨量较历史均值变化超过20%、极端降雨频次增加30%时，上调水文地质维度指标权重，如提高“降雨入渗量”的风险贡献占比；结合开采活动变化，若尾矿堆存速率超出设计值15%、周边新增采矿作业区，增加人类活动维度指标得分，如将“违规操作次数”的评分标准从严；每3年基于监测数据与风险案例更新模型参数，确保评估结果与实际风险状况同步，提升模型适用性与准确性。

## 3 有色金属尾矿库水工环地质风险防控技术体系

### 3.1 工程防控技术

（1）坝体加固与渗流控制技术：针对坝体稳定性不足与渗流风险，可采用垂直防渗墙技术，选用混凝土防渗墙、高压喷射注浆防渗墙等类型，墙深需穿透尾矿堆积体至不透水层，厚度控制在0.8-1.2m，有效阻断坝体垂直渗流通道；设置减压井时，井间距根据尾矿体渗透系数确定，一般为15-30m，井管采用滤水管，底部深入承压水层，通过降低坝体内部孔隙水压力，提升坝体抗滑稳定性。此外，还可对坝坡进行混凝土护坡或浆砌石护坡处理，坡度控制在1:2.5-1:3.0，减少雨水冲刷对坝坡的破坏。（2）尾矿库扩容与生态修复技术：尾矿库扩容需结合工程地质条件，采用上游法、中游法或下游法堆坝，扩容区域需进行地质勘察，确保地基承载力满足堆存要求，同时新增坝体需同步建设防渗与排水系统；生态修复方面，在尾矿库周边及坝坡实施覆土绿化，覆土厚度不小于0.5m，选择耐重金属、耐旱的植物品种，如紫花苜蓿、黑麦草等，形成植被覆盖层，减少水土流失；对尾矿堆积体表面进行植被固坡，通过植物根系的固土作用，增强边坡稳定性，同时改善区域生态环境，降低尾矿扬尘污染风险<sup>[4]</sup>。

### 3.2 监测预警技术

（1）多源数据监测系统：构建涵盖位移、浸润线、水质等参数的多源监测网络，位移监测采用GNSS自动化监测站与测斜仪结合的方式，GNSS站布设密度为每500m<sup>2</sup>1个，监测精度达 $\pm 2$ mm，实时监测坝体水平与垂直位移；浸润线监测通过布设渗压计实现，渗压计埋深根据坝体高度确定，一般每10-15m深度布设1个，实时采集坝体内部孔隙水压力数据；水质监测在尾矿库周边地下水井及地表水监测点定期采样，监测指标包括pH值、重金属含量等，采样频率为每月1次，确保及时发现水质污染问题。（2）智能预警平台构建：基于物联网技术，将

多源监测设备采集的数据实时传输至云端数据库,利用大数据分析技术对监测数据进行处理,建立风险预警模型;平台设置多级预警阈值,当监测数据超出预警阈值时,自动通过短信、平台推送等方式向管理人员发送预警信息,预警级别分为蓝色(一般)、黄色(较重)、橙色(严重)、红色(特别严重)四级;同时,平台具备数据可视化功能,通过图表、地图等形式直观展示尾矿库风险状态,为管理人员决策提供数据支持,实现风险的早发现、早预警、早处置。

### 3.3 应急管理技术

(1) 溃坝模拟与应急演练方案设计:借助FLAC3D、GeoStudio等软件开展溃坝模拟,模拟不同溃坝场景下尾矿流的扩散范围、流速及影响区域,确定危险区域划分,为应急疏散提供依据;制定应急演练方案,每年至少组织1次实战演练,演练内容包括溃坝预警、人员疏散、救援抢险等环节,明确各部门职责与协作流程,参演人员涵盖管理人员、技术人员、救援队伍及周边群众,通过演练提升应急响应能力,确保在实际溃坝事故发生时能够快速、有序开展应急处置工作。(2) 污染扩散阻断与应急处置技术:当发生酸性废水泄漏或重金属污染扩散时,迅速在污染扩散路径上设置截流坝,截流坝采用沙袋或混凝土浇筑,高度根据污染水体水位确定,阻断污染水体进一步扩散;向酸性废水中投加中和剂,如石灰、氢氧化钠等,中和剂投加量根据废水pH值计算,确保将废水pH值调节至6-9之间;对受污染土壤采用固化稳定化处理,向土壤中添加固化剂(如水泥、石灰),通过化学反应将重金属固定,降低重金属生物有效性,减少污染危害;同时,对污染区域进行隔离,设置警示标志,防止人员误入受污染区域。

### 3.4 政策与管理措施

(1) 尾矿库全生命周期管理规范:制定覆盖尾矿库建设、运行、闭库及闭库后维护的全生命周期管理规范,建设阶段要求开展详细的地质勘察与环境影响评价,确保工程设计符合相关标准;运行阶段明确尾矿堆

存速率、废水排放等操作要求,定期开展安全与环境监测;闭库阶段需编制闭库方案,对尾矿库进行生态修复与防渗处理,闭库后定期对库区及周边环境进行监测,监测周期不少于30年,确保闭库后无环境风险隐患。

(2) 责任主体划分与监管机制优化:明确尾矿库企业为风险防控第一责任主体,企业需设立专门的安全环保管理部门,配备专业技术人员,落实风险防控措施;地方政府自然资源、生态环境、应急管理等部门按照职责分工,加强对尾矿库的监管,建立联合执法机制,定期开展专项检查,对违法违规行为依法严肃查处;建立尾矿库信息共享机制,各部门共享尾矿库基本信息、监测数据及监管情况,实现监管信息互联互通,提升监管效率与精准度;同时,鼓励社会监督,设立举报电话与举报平台,对举报属实的给予奖励,形成全社会共同参与的监管格局。

### 结束语

有色金属尾矿库水工环地质风险评估与防控是保障矿业安全、生态安全的关键课题。通过系统剖析其工程地质、水文地质及环境地质特征,精准识别风险源并构建多维度评估模型,可实现风险的量化分级与动态预警。结合工程加固、生态修复、智能监测及应急管理等综合防控技术,辅以全生命周期管理与责任监管机制,能够有效降低尾矿库风险隐患,推动矿业开发与环境保护协调发展,为行业绿色转型提供坚实技术保障。

### 参考文献

- [1]蓝伟锋.金属矿山安全管理中的风险评估与控制策略研究[J].世界有色金属.2024(17):217-219
- [2]王明家,吴琼.金属矿山安全管理中的风险评估与控制策略研究[J].中国金属通报.2024(8):215-217
- [3]张国文.基于智能化技术的金属非金属矿山事故隐患治理对策研究[J].中国金属通报.2024(2):88-90
- [4]郁园园,刘恒建.水工环地质灾害风险评估方法研究[J].冶金管理.2023,(13):98-100.