

矿山水工环问题综合治理技术

尹弼君

湖南省工程地质矿山地质调查监测所 湖南长沙 410000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18499

[摘要] 矿产资源大规模开采引发的水文地质、工程地质与环境地质复合问题日益严峻,突出表现为地下水突水、边坡失稳、采空区塌陷及土壤生态破坏,严重威胁矿山安全生产与区域生态可持续性。本文旨在构建科学系统的矿山水工环综合治理技术体系,采用文献调研、多学科交叉与案例分析方法,整合水文地质、工程地质、环境工程等领域技术成果,提出“三维协同+六级递进+四维保障”的综合治理技术框架。该框架以“技术—空间—时间”三维协同为核心逻辑,涵盖基础调查、源头阻断、过程治理、监测预警、应急处置、后期修复六级递进技术体系,辅以技术标准、管理机制、资源保障与创新驱动四维支撑。研究成果为不同类型矿山水工环问题提供标准化、可操作的治理方案,助力实现安全开采、生态保护与资源可持续利用的有机统一。

[关键词] 矿山水工环; 综合治理技术; 三维协同; 生态修复; 矿山生态保护

引言

矿产资源作为工业发展核心支撑,其大规模开采导致水文地质、工程地质与环境地质复合问题愈发严峻,地下水突水、边坡失稳、土壤污染等灾害频发,不仅威胁矿山生产安全,更破坏区域生态平衡,造成巨大经济损失。当前国内外虽已研发各类单一治理技术,但存在体系碎片化、时空适配性不足、多问题协同治理能力薄弱等局限,缺乏系统性技术框架支撑。基于此,本文立足多学科交叉视角,通过文献调研、案例分析等方法,厘清矿山水工环问题演化规律,构建“三维协同+六级递进+四维保障”综合治理技术框架,明确各阶段核心技术与实施路径,为不同类型矿山提供标准化、可操作的治理方案,助力矿山绿色可持续发展。

1. 矿山水工环问题核心内涵与分类

矿山水工环问题是矿产资源开采过程中,水文地质、工程地质与环境地质问题的统称,三者相互耦合、协同演化,构成复杂的复合地质环境问题体系。核心内涵体现为人类采矿活动对矿山地质环境的扰动,打破了地下水、岩土体与生态系统的原有平衡,引发连锁性灾害与环境破坏。其主要分类包括:水文地质问题(地下水突水、水位异常升降、水质污染)、工程地质问题(边坡失稳滑坡、采空区塌陷、岩土体变形破坏)、环境地质问题(土壤重金属污染、地表植被退化、水土流失与土地沙化)。不同类型问题在开采前、中、后各阶

段呈现差异化演化特征,需针对性施策。

2. 矿山水工环六级递进式综合治理技术体系

六级递进式综合治理技术体系是矿山水工环治理的核心实施路径,按“前提—防控—响应—管控—兜底—保障”逻辑分层推进。第一级为基础调查与精准诊断,通过多尺度勘察与智能建模明确问题边界;第二级源头风险阻断,采用水文调控、工程加固等技术从根源降低隐患;第三级过程动态治理,依托智能化手段实时响应开采中动态问题;第四级立体监测预警,构建全空间网络实现风险预判;第五级应急处置,针对突水、滑坡等突发灾害快速处置;第六级后期修复与长效运维,完成生态恢复并建立长期管护机制。六级技术环环相扣、动态适配,形成覆盖全周期的闭环治理体系。

3. 框架实施保障体系

3.1 基础调查与精准诊断技术

基础调查与精准诊断技术是矿山水工环综合治理的前提与核心,通过“多尺度勘察—全参数测试—智能建模”三维技术路径实现问题精准定位。采用遥感普查(1:5万尺度)摸清区域水工环背景,结合高密度电法、瞬变电磁法等物探技术(1:1万尺度)锁定异常区域,再通过定向钻探取芯验证(孔距50-100m)获取精准数据。同步开展水文(渗透系数、水质)、工程(岩土体力学性质)、环境(污染物浓度)全参数测试,借助GIS空间分析与Modflow/FLAC3D数值模

拟,构建水工环问题耦合模型。基于模型实现风险分级(高/中/低)与问题清单梳理,明确灾害诱发因子、空间分布及演化趋势。某煤矿实践表明,该技术可将问题诊断准确率提升至 92% 以上,为后续针对性治理提供科学依据,避免盲目施策造成的资源浪费。

3.2 源头风险阻断技术

源头风险阻断技术是矿山水工环综合治理的核心防控环节,聚焦“从根源削减隐患”目标,整合水文调控、工程加固、环境预处理三大技术方向。水文调控方面,通过截水廊道、排水孔群构建地下截排系统,结合地面帷幕注浆或巷道局部注浆阻断导水通道,搭配截洪沟、蓄水池实现地表水科学导流,避免水资源扰动引发灾害。工程加固采用锚杆-锚索-格构梁联合支护稳定高陡边坡,以膏体、高水材料等充填采空区消除塌陷风险,借助水泥搅拌桩防渗墙、土工膜铺设强化地基防渗性能。环境预处理通过石灰、磷酸盐等钝化剂改良土壤重金属,在矿山周边种植乡土植物构建植被缓冲带,拦截地表污染物入渗。该技术体系需根据矿山水文地质条件、开采方式动态适配,某金属矿应用表明,可使水工环灾害发生率降低 65% 以上,大幅缩减后续治理成本。

3.3 过程动态治理技术

过程动态治理技术是矿山水工环六级递进体系的核心执行环节,聚焦开采过程中问题动态演化特征,以“实时响应、精准调控、协同增效”为目标,构建多技术联动的动态治理系统。地下水治理方面,依托实时水位、水质监测数据,通过智能泵组调控排水强度,结合人工补给实现地下水动力场平衡;针对污染水体,采用渗透反应墙、原位化学氧化等原位修复技术,搭配生物炭注入等灵活工艺,避免治理滞后性。岩土体稳定性控制采用随采随支护模式,掘进工作面超前注浆加固,采动影响区通过卸压钻孔释放应力,结合液压支架自适应调整技术,动态匹配岩土体变形规律。污染物处理推行“实时净化+循环利用”模式,扬尘通过智能喷雾降尘系统(根据粉尘浓度自动启停)控制,矿山废水经移动处理设备达标后用于井下洒水、绿化灌溉,实现水资源循环。该技术体系嵌入智能化控制逻辑,通过物联网实现监测数据与治理设备联动,某露天铁矿应用表明,可使岩土体变形控制精

度提升至 $\pm 5\text{mm}$,地下水污染修复效率提高 40%,污染物排放达标率保持 100%,有效破解传统静态治理适配性不足的难题。

3.4 立体监测预警技术

立体监测预警技术是矿山水工环治理的“感知中枢”,构建“地表-地下-空中”全空间、全天候监测网络,实现风险精准预判与快速响应。地表布设 GNSS 位移监测站(精度 $\pm 2\text{mm}$)、水质自动监测仪,实时捕捉沉降变形与污染物浓度变化;地下安装巷道收敛计、地下水水位传感器(数据传输间隔 ≤ 1 小时),跟踪岩土体变形与水文动态;空中依托无人机每周巡检、InSAR 月度监测,实现大范围地表沉降与生态状况排查。设备选型聚焦高精度、低功耗,根据矿山规模优化布设密度(高风险区监测点间距 $\leq 50\text{m}$)。通过物联网将多源数据接入智能预警平台,运用机器学习算法构建预测模型,结合水工环问题演化规律,建立蓝、黄、橙、红四级预警机制。预警信息通过短信、APP 实时推送至责任主体,同步触发分级响应流程(如黄色预警启动加密监测、红色预警启动应急处置)。该技术可将灾害预警提前量延长至 24-72 小时,某高边坡矿山应用后,滑坡灾害误报率降至 3% 以下,为风险防控赢得关键时间。

3.5 应急处置技术

应急处置技术是矿山水工环综合治理的风险兜底环节,针对突水、边坡滑坡、污染物泄漏等突发灾害,构建“快速响应-精准处置-隐患消除”的闭环技术体系。突水应急采用“先堵后排”策略,运用气囊快速封堵装置+高强度聚氨酯注浆材料实现导水通道紧急阻断,搭配大流量应急排水泵组降低水位,同步利用水文监测数据动态调整处置参数。边坡滑坡应急通过削坡减载削减下滑力,布设临时锚索+沙袋反压快速加固坡体,结合无人机实时监测滑坡体位移,避免灾害扩大。污染物泄漏应急依托应急围油栏、防渗膜构建围堵屏障,采用活性炭、膨润土等高效吸附材料吸附污染物,针对重金属泄漏启用应急化学沉淀药剂快速降解。同时建立标准化应急物资储备库(按矿山规模配置 3-5 套应急设备),制定季度常态化应急演练机制,明确“预警启动-现场指挥-技术实施-善后评估”四级响应流程。某金属矿突水事故

实践表明,该技术体系可将突发灾害处置时间缩短至 4-6 小时,灾害损失降低 70% 以上,有效保障矿山人员安全与区域生态稳定。

3.6 后期修复与长效运维技术

后期修复与长效运维技术是矿山水工环综合治理的收尾保障环节,聚焦闭坑矿山生态恢复与长期风险管控,构建“修复 - 运维 - 开发”一体化技术体系。地表生态修复采用“覆土改良 + 乡土植物混播”模式,结合喷播绿化、边坡生态格网等技术,重建植被群落;针对地下水与土壤污染,运用人工湿地净化、生物反应器原位修复等技术,降低污染物浓度至达标水平。采空区通过回填覆土或改造为蓄水池、生态公园,实现空间资源化利用。长效运维体系以“定期监测 + 精准维护 + 档案管理”为核心,季度开展水质、土壤污染物检测,年度实施地表沉降观测与防渗工程检修,建立全周期治理档案。创新推行闭坑矿山“治理 - 修复 - 开发”模式,如光伏电站、生态旅游等复合利用形式,实现生态效益与经济效益双赢。某闭坑煤矿应用表明,该技术可使地表植被覆盖率提升至 85% 以上,地下水水质达标率稳定在 98%,为矿山可持续转型提供坚实支撑。

4. 案例研究: 某矿山水工环综合治理实践

4.1 矿山概况与水工环问题特征

某地下煤矿位于华北富水矿区,开采深度 800-1200m,年产能 300 万吨,属高瓦斯、高压水矿山。区域水文地质条件复杂,含 3 层主要含水层,地下水富水性强;露天采场边坡最大高度 150m,坡度 35°,存在滑坡隐患;开采历史超 20 年,形成大面积采空区(累计体积 120 万 m^3),引发地表沉降(最大沉降量 80cm),同时地下水出现轻度污染(COD 浓度 35mg/L,超标 1.2 倍),周边土壤重金属(铅、镉)含量超出标准限值 0.8-1.5 倍,呈现“水文 - 工程 - 环境”复合问题特征。

4.2 基于本文框架的综合治理方案设计

依托“三维协同 + 六级递进”框架,定制专项方案:基础调查阶段采用“遥感普查 + 瞬变电磁法 + 定向钻探”精准定位含水层分布与采空区边界;源头阻断通过地面帷幕注浆构建防渗墙,采空区采用膏体充填技术,边坡实施锚杆 -

锚索 - 格构梁联合支护;过程治理部署智能排水系统调控地下水水位,配套渗透反应墙修复污染水体;立体监测网络涵盖 12 个地表 GNSS 监测站、30 个地下水传感器及无人机每周巡检;应急储备聚氨酯注浆材料、应急排水泵组等设备;后期规划覆土绿化与人工湿地建设,建立年度运维机制。

4.3 实施过程与关键技术应用

项目分三期实施:一期(6 个月)完成基础调查与源头治理,钻探验证孔 32 个,注浆量达 8.5 万 m^3 ,充填采空区 60 万 m^3 ;二期(10 个月)构建过程治理与监测体系,安装智能排水泵组 15 台,布设渗透反应墙 3 处(总长 120m),监测网络实现全区域覆盖;三期(8 个月)推进应急能力建设与生态修复,完成边坡绿化面积 5 万 m^2 ,建成人工湿地 1.2 万 m^2 。实施中创新采用“注浆堵水 + 智能排水”协同技术,及“采空区充填 - 地表沉降控制”联动机制,确保治理与开采同步进行。

总结

本文围绕矿山水工环综合治理技术展开研究,构建“三维协同 + 六级递进 + 四维保障”技术框架。以技术 - 空间 - 时间三维协同为核心,通过基础调查、源头阻断、过程治理、监测预警、应急处置、后期修复六级递进体系,实现全周期闭环治理。结合华北某富水煤矿案例,整合多学科技术精准应对复合问题,治理后矿山安全生产周期延长,地下水与土壤环境达标,植被覆盖率显著提升,较传统治理节约 30% 成本。研究表明,该框架兼具系统性与实操性,核心在于技术精准适配、数据动态联动及治理与生产协同,为矿山水工环治理提供了标准化解决方案。

[参考文献]

- [1]陈俊杰. 矿山水工环地质灾害危险性及其治理措施研究[J]. 中国金属通报, 2025, (10): 52-54.
- [2]李维欣, 袁世冲, 夏荣辉, 等. 金属矿山水工环自动化监测预警平台开发及应用[J]. 勘察科学技术, 2025, (05): 39-45+59.
- [3]项扬. 水工环地质在矿山地质灾害治理中的应用研究[J]. 中国金属通报, 2025, (09): 192-194.