

西乡县五里坝硫铁矿矿区水处理污泥治理措施研究

马超, 朱淼, 王晓宇

陕西省现代建筑设计研究院有限公司, 陕西 西安 710016

DOI:10.61369/ME.2025110025

摘要 : 西乡县五里坝硫铁矿 2 号尾矿坝堆存的 6779m³ 水处理污泥 (Ⅱ类一般工业固体废物), 因渗水外溢导致周边形成褐红色污染条带, 锰等重金属超标, 对汉江一级支流牟子河水质构成威胁。针对传统污泥治理技术 (填埋、堆肥、焚烧) 在该矿区的适用性局限, 本文基于地质聚合物的结构特性与固化机理, 提出“地质聚合物改性 – 矿硐协同充填”治理技术。通过系统分析污泥理化特性, 优化地质聚合物配合比, 明确其固化重金属的微观机制, 并结合矿硐充填工艺实现污泥资源化与酸性水源头控制。实验表明, 污泥经地质聚合物改性后, 重金属浸出浓度显著降低, 远低于《污水综合排放标准》(GB8978–1996) 的限值要求。结果表明, 地质聚合物作为一种新型胶凝材料, 对尾砂或底泥的改性效果十分显著, 具有良好的环境风险控制潜力。

关键词 : 硫铁矿污泥; 地质聚合物; 重金属固封; 矿硐充填; 酸性水治理

Research on Sludge Treatment Measures for Water Treatment in Wuliba Pyrite Mining Area, Xixiang County

Ma Chao, Zhu Miao, Wang Xiaoyu

Shaanxi Modern Architectural Design & Research Institute Co., LTD, Xi'an, Shaanxi 710016

Abstract : The 6,779 cubic meters of water treatment sludge (Class II general industrial solid waste) stored in the No. 2 tailings dam of Wuliba Pyrite Mine in Xixiang County has overflowed due to water seepage, forming a brownish-red pollution band around it. The content of heavy metals such as manganese exceeds the standard, posing a threat to the water quality of the Muzi River, a first-level tributary of the Han River. In view of the applicability limitations of traditional sludge treatment technologies (landfill, composting, incineration) in this mining area, based on the structural characteristics and solidification mechanism of geopolymers, this paper proposes the "geopolymer modification – mine tunnel collaborative filling" treatment technology. By systematically analyzing the physical and chemical properties of sludge, optimizing the proportion of geopolymers, clarifying the microscopic mechanism of their solidification of heavy metals, and combining the mine tunnel filling process to achieve sludge resource utilization and source control of acidic water. Experiments show that after the sludge is modified by geopolymers, the leaching concentration of heavy metals is significantly reduced, far below the limit requirements of the "Integrated Wastewater Discharge Standard" (GB8978–1996). The results show that geopolymers, as a new type of cementitious material, have a very significant modification effect on tailings or sediment and possess good potential for environmental risk control.

Keywords : pyrite sludge; geological polymer; heavy metal solid sealing; mine tunnel filling; treatment of acidic water

引言

面对陕南核心水源地西乡县五里坝硫铁矿遗留的 6779m³ 污泥 (锰浸出浓度超标), 传统填埋、堆肥、焚烧等技术存在高成本、高占地及二次污染风险。依据“以废治废”的治理导向, 研究聚焦地质聚合物稳定化技术。该材料由硅铝酸盐经碱激发形成, 具备高强度、耐酸和高效固化重金属的特性, 且碳排放较传统水泥低 80% 以上。通过针对矿区污泥特性与酸性水形成机理, 优化地质聚合物的配比与工艺参数, 将污泥改性为稳定固化体, 并最终作为充填骨料回填至井下采空区。此方案旨在同步实现污泥无害化、固废资源化及采空区隐患治理, 为同类中风险硫铁矿区提供经济可行的技术范式。

一、西乡县五里坝硫铁矿污泥现状分析

(一) 污泥来源与堆存特征

五里坝硫铁矿 2 号尾矿坝为 M10 浆砌石拱坝，总库容 33.81 万 m³，污泥主要源于矿硐涌水处理过程：矿硐涌水 (pH2.77–6.96, 铁超标 0–471.3 倍) 经混凝沉淀 (添加 PAC、PAM) 后，污泥通过尾矿输送管道泵入坝内，形成平均厚度 1m 的底泥层。现状堆存呈长方形展布，表面灰白色，局部可见褐红色渗水

痕迹，坝外渗水收集池深 4m，污泥厚度 1.3m，丰水期渗水量达 6.5m³/h，存在外溢风险。

(二) 污泥理化特性

根据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB5085.3-2007) 和《污水综合排放标准》(GB8978-1996) 等规范，对 2 号尾矿坝内污泥采用硝酸法和水平震荡法进行检测分析。结果显示，污泥含水率较高，重金属含量存在超标风险，浸出液中部分指标超出限值，需进一步评估其环境风险并采取相应处置措施。

表1 污泥硫酸硝酸法检测数据统计表 (单位: mg/L)

序号	采样地点	物探编号	铜	锌	镉	铅	总铬	铬	汞	镍	砷	总银	钡	铍	硒
	《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》		≤ 100	≤ 100	≤ 1	≤ 5	≤ 15	≤ 5	≤ 0.1	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 100	≤ 0.02	≤ 1
1	2#尾矿库污泥	鸳鸯池 -6	0.02L	0.02	0.0002L	0.0026	0.34	0.004L	0.0002L	0.04L	0.018	0.03	0	0.0004	0.0348
			0.02L	0.02	0.0002L	0.0027	0.05	0.004L	0.0002L	0.04L	0.0221	0.03	0.021	0.0003	0.0079L

表2 污泥水平震荡法检测数据统计表 (单位: mg/L)

序号	采样地点	物探编号	锰	镉	铜	铅	锌	总铬	铬(六价)	汞	砷	pH
	《污水综合排放标准》		≤ 2.0	≤ 0.1	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 0.5	≤ 0.05	≤ 0.5	≤ 6-9
1	2#尾矿坝污泥	鸳鸯池 -6	4.14	0.0016	0.02L	0.0006L	0.324	0.05L	0.004L	0.00011	0.0057	8.35
			2.72	0.0021	0.02L	0.0006L	0.454	0.05L	0.004	0.0001	0.0014L	8.45

(三) 治理难点

水源保护约束：污泥堆存区距牟子河仅 260m，属汉江一级支流汇水区，禁止采用可能产生渗滤液的填埋技术；

重金属固封要求：污泥中锰离子易在酸性环境下溶出（矿区矿硐水 pH 最低 2.77），需长效抗酸固封技术；

固废协同处置：矿区同时存在 11 处废弃矿硐需充填，需实现污泥与废渣的协同消纳，避免二次转运。

而地质聚合物技术可实现“污泥无害化 – 矿硐封堵 – 固废资源化”三重目标，契合矿区实际需求。

三、地质聚合物改性污泥的技术原理与实验验证

(一) 地质聚合物的结构与固化机制

地质聚合物由 [Al-O₄] 与 [Si-O₄] 四面体通过共用氧交替键合形成的三维无定形网络结构，其固化重金属机制包括：

1. 物理包裹：污泥颗粒被地质聚合物凝胶体包裹，阻断与水接触；

2. 离子交换：地质聚合物中的 Na⁺、K⁺ 与污泥中 Mn²⁺、Zn²⁺ 交换，降低游离态重金属浓度；

3. 化学键合：重金属离子与 [Al-O₄] 四面体形成稳定配位化合物，进入聚合物骨架^[4-5]。

与传统水泥相比，地质聚合物水化过程无 Ca(OH)₂ 生成（水泥水化会产生 Ca(OH)₂，在酸性环境下易溶解导致重金属释放），在 5% 硫酸溶液中分解率仅为水泥的 1/13，适用于矿区酸性水环境^[6]。

(二) 改性实验验证

1. 实验材料与配比

污泥：2 号尾矿坝污泥经板框压滤脱水（含水率 45%），破碎至粒径 < 5mm；

地质聚合物：采用地质聚合物胶凝材料（主要成分为偏高岭土、碱激发剂）；

配合比：基于正交实验，确定最佳质量比为脱水污泥：地质聚合物：水 = 1:0.22:0.6。

2. 实验结果

本次对五里坝硫铁矿尾矿库内堆存的尾砂（污泥）利用新型

二、污泥治理技术比选

基于五里坝矿区“水源保护优先、以废治废”的治理原则，对比传统技术与地质聚合物技术的适用性，结果如下表所示：

治理技术	核心原理	优势	五里坝矿区适用性局限	单位成本 (元/m ³)
卫生填埋	防渗层隔离 + 渗滤液处理	工艺成熟	需征地 3.36hm ² ，渗滤液 (COD 850mg/L) 风险高，不符合水源保护要求	180–220
堆肥处理	微生物降解有机质	可资源化	需添加 2 倍体积秸秆（成本超 50 元/m ³ ），锰富集率达 15%，易污染土壤	230–280
焚烧处理	高温氧化减容	减容率 90%	烟气含 SO ₂ (120mg/m ³)，需配套脱硫设备，成本高，能耗大	350–400
地质聚合物改性 – 矿硐充填	三维网状结构固封重金属，协同充填矿硐	无渗滤液，固废消纳率 100%，抗酸腐蚀	需预处理脱水，对施工设备有一定要求	150–180

由表 1 可知，传统技术或存在二次污染风险，或成本过高，

胶凝材料进行改性实验相关数据，试验结果见表4。

表4 尾矿库尾砂（污泥）改性回填固结体配比实验结果

指标	地质聚合物固结体 - 尾砂（污泥）	标准 (mg/L)
检测项目	检测结果	
汞 ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.02ND	0.05
砷 ($\mu\text{g}/\text{L}$)	1.97	0.5
硒 ($\mu\text{g}/\text{L}$)	21.1	/
铜 (mg/L)	0.01ND	0.5
锌 (mg/L)	0.01ND	2.0
铅 (mg/L)	0.03ND	1.0
镉 (mg/L)	0.01ND	0.1
铬 (mg/L)	0.06	1.5
镍 (mg/L)	0.02ND	1.0
铍 (mg/L)	0.004ND	0.005
钡 (mg/L)	0.17	/
银 (mg/L)	0.01ND	0.5
六价铬 (mg/L)	0.040	0.5
pH值	8.53	6~9

(三) 工程实施流程

1. 污泥预处理

(1) 脱水：采用板框压滤机（过滤面积 200m²，工作压力 0.8MPa）将污泥含水率从 68% 降至 45%，脱水后污泥含水率每降低 10%，可减少地质聚合物用量 15%；

(2) 破碎筛分：通过颚式破碎机（处理能力 50t/h）破碎至粒径 < 5mm，筛除杂质（如矿石碎屑），避免影响改性效果。

2. 改性混合搅拌

在 2 号尾矿坝附近设临时搅拌站，配置双轴螺旋搅拌机（容积 5m³，搅拌转速 30r/min），按配比依次投入脱水污泥、地质聚合物、水，搅拌时间 ≥ 5min，确保料浆均匀度（坍落度 180 ± 20mm）。

3. 矿硐协同充填

将改性污泥料浆通过 HGBS100.10.320 充填工业泵（工作压力 9MPa，流量 80m³/h），经 Φ150mm 耐磨管道输送至 P1006 斜井（高程最低矿硐，需充填容积 13300m³），具体充填方案：

分段充填：每隔 50m 修筑 1m 厚钢筋混凝土挡墙（预埋注浆花管），避免料浆流失^[7]；

加压注浆：通过注浆花管加压（压力 1.2MPa），使料浆渗透至矿硐围岩裂隙，阻水率达 98% 以上；

协同消纳：改性污泥与矿区 II 类废渣（54120.6m³）混合充填，共消纳污泥 6779m³，占矿硐充填量的 12.9%。

四、治理效果评估体系

(一) 监测方案

本方案构建“地表水 – 地下水 – 土壤”三维监测体系。于牟子河设地表水背景断面、风险管控断面、质量控制断面、消减断面。监测流量、pH、汞、铅、镉、铬、砷、铜、锌、镍、铍、锰、铁、硫酸根等。在尾矿坝下游新建地下水监测井，监测地下水水位、pH、汞、铅、镉、铬、砷、铜、锌、镍、锰、铍、铁、

硫酸根等^[8]。在尾矿坝附近布设壤监测点，监测 pH、汞、铅、镉、铬、砷、铜、锌、镍、锰、铁等。

(二) 预期效果

项目实施后，有效改善泡桐沟地表水入牟子河的水质，风险管控断面泡桐沟汇入五里坝河前硫酸盐、锌、锰浓度得到下降。6779m³ 污泥全部安全消纳，杜绝二次污染并节省征地费 80 万元^[9]。通过覆土及播撒草籽，尾矿坝原址植被覆盖度从 15% 提升至 85% 以上，有效恢复生态。^[1-3]

五、效益分析

(一) 环境效益

本项目将产生显著环境效益。其采用地质聚合物稳定化技术，可实现对污泥中重金属的有效固封，固封率超 99%，从根本上阻断了重金属经雨水淋滤迁出污染水体的风险，有力保护牟子河生态。同时，通过对 P1006 斜井等关键点位进行封堵，预计每日可削减约 1716 立方米的酸性矿井水涌出，从源头大幅减少污染物输入，直接护卫“南水北调”中线工程水源水质，生态价值巨大。^[10]

(二) 经济效益

项目具备突出的经济效益。创新使用地质聚合物替代传统水泥，材料成本降低约 40%，结合污泥资源化利用等措施，使总治理成本较传统填埋方案降低 22%，总计节省投资 1380 万元。将改性污泥作为充填骨料，实现了“以废治废”，不仅减少了固废外运处置量，还直接节约了约 60 万元的转运处置费用，达成了成本控制与废物利用的双赢。

(三) 社会效益

项目的社会效益显著。其成功实践为同类中风险矿区的污泥治理提供了经济可靠的技术范式，已在陕西省内相关治理工程中推广。通过对废弃矿硐进行充填，彻底消除了地下采空区可能导致的地面塌陷隐患，有力保障了矿区周边约 1400 名居民的生命财产安全，提升了社区安全感与人居环境，促进了区域和谐稳定发展。

六、结论与建议

(一) 结论

西乡县五里坝硫铁矿 2 号尾矿坝污泥采用地质聚合物改性 – 矿硐协同充填技术可行，改性后重金属浸出达标，抗压强度满足工程要求；

该技术实现“污泥无害化 – 矿硐封堵 – 固废资源化”协同，解决了传统技术二次污染或成本过高的难题；

治理后可保障牟子河水质安全，为南水北调水源地周边硫铁矿污泥治理提供创新路径。

(二) 建议

1. 优化配比

建议后续研究与应用中，建立污泥含水率与地质聚合物投加量的快速响应模型，实现根据物料特性动态调整固化剂配方。此

举可在保证固封效果的前提下，精准控制材料消耗，避免过度投加，从而进一步降低工程成本，提升项目的经济优化空间。

2.智慧监测

建议引入无人机高精度航拍与物联网传感技术，构建天地一体化的实时监控网络。无人机可定期巡检地表位移与植被恢复，而布设于矿硐内部及河流断面的传感器能实时回传充填体应力、地下水位及关键水质指标数据，实现从“季度抽检”到“全过程预警”的跨越，提升环境风险管控的智能化水平。

3.技术拓展

鉴于本项目在地质聚合物固化/稳定化技术上的成功经验，建议系统总结技术参数与适用条件，积极探索其在铅锌矿、铜矿等产生的其他类型重金属污泥治理中的可行性。通过针对性配方改良与中试验证，有望形成一套可复制的技术体系，扩大该创新技术的适用范围，为解决更广泛的矿山环境污染问题提供新方案。

参考文献

- [1] 贺俊,赵强,杨建强,等.陕南硫铁矿矿山酸性水形成机理及治理方法探究:以西乡五里坝硫铁矿为例[J].西北地质,2025,58(1):219-230.
- [2] 唐爽,钟昌茂,徐云张,等.某废弃矿区水环境污染特征及酸性矿井涌水成因研究[J].环境科技,2025,38(05):23-28.
- [3] 马荣.陕南硫铁矿区矿渣理化特征分析及生态风险评价[J].煤炭加工与综合利用,2025,(08):137-141.
- [4] 杨孟华.某矿山周边环境重金属污染分析及环境风险评价[D].合肥工业大学,2024.
- [5] 邓杏彬,黄深,任坤,等.马面硫铁矿矿区水体水化学和同位素特征及环境指示意义[J].地球科学,2025,50(04):1531-1544.
- [6] 徐建中,唐然肖,周云龙,等.用粉煤灰和制革废水污泥等制备地聚合物材料[J].建筑材料报,2007,10(1):105-109.
- [7] 陕西省生态环境厅.陕西省汉江丹江流域涉金属矿产开发生态环境综合整治规划(2021-2030年)[Z].2022.
- [8] 韦旭东,张伟龙,殷美玲,等.某硫铁矿区农田铊等重金属污染及其来源示踪研究[C]//中国质谱学会(中国物理学会质谱分会),中国化学会质谱分析专业委员会,中国仪器仪表学会分析仪器分会质谱仪器专业委员会.2018年中国质谱学术大会(CMSC 2018)论文集,2018:499.
- [9] 刘娟,张伟龙,蔡静敏,等.硫铁矿冶炼废渣和尾矿中铊等重金属富集特征的研究[C]//中国质谱学会(中国物理学会质谱分会),广州大学环境科学与工程学院;,2018:507.
- [10] 钟开发,张通,张海平,等.云浮硫铁矿配矿和选矿分析[J].中国金属通报,2016,(07):109-110.