

矿区水环境修复与污水治理一体化技术研究

郑丽辉

中国市政工程西北设计研究院有限公司福州分公司, 福建 福州 350001

DOI:10.61369/ME.2025040017

摘 要 : 矿区水环境受到矿产资源开采, 存在重金属超标、酸性化等复合型污染问题, 特别是锰污染因其降解难、高毒性, 成为了矿区水环境治理难点。本文以华南地区某铁矿矿区为研究对象, 针对该矿山存在的生态环境问题及矿洞涌水锰超标问题, 提出综合性生态修复措施和废水“石灰中和+除锰反应+除锰过滤+特种树脂吸附”一体化技术方案。实践表明, 该一体化技术可将锰浓度降至0.1mg/L以内, 实现稳定达标排放。本文研究旨在为矿区生态环境修复和高浓度含锰废水深度处理提供技术参考。

关 键 词 : 矿区水环境; 锰污染治理; 一体化技术; 重金属去除; 铁矿废水

Research on Integrated Technology of Water Environment Restoration and Sewage Treatment in Mining Areas

Zheng Lihui

China Municipal Engineering Northwest Design and Research Institute Co., Ltd. Fuzhou Branch, Fuzhou, Fujian 350001

Abstract : The water environment in mining areas is affected by the exploitation of mineral resources, and there are complex pollution problems such as excessive heavy metals and acidification. In particular, manganese pollution has become a difficult point in the treatment of water environment in mining areas due to its difficult degradation and high toxicity. This article takes a certain iron ore mining area in southern China as the research object, and proposes comprehensive ecological restoration measures and an integrated technical solution for wastewater "lime neutralization+manganese removal reaction+manganese removal filtration+special resin adsorption" to address the ecological environment problems and excessive manganese content in the mine. Practice has shown that this integrated technology can reduce manganese concentration to within 0.1mg/L and achieve stable and compliant emissions. The purpose of this study is to provide technical references for ecological environment restoration in mining areas and deep treatment of high concentration manganese containing wastewater.

Keywords : mining area water environment; manganese pollution control; integrated technology; heavy metal removal; iron ore wastewater

引言

矿产资源开发作为推动我国市场经济发展的支柱型产业, 但在矿区开发期间对自然环境会造成一定程度的生态破坏和水环境污染。矿区水体因矿石风化、氧化、水温地质等条件影响, 会产生重金属超标、pH值异常等问题, 特别是锰污染因其降解难、具有生物累积性等特点, 成为制约矿区生态修复的一大瓶颈^[1]。华南地区某铁矿矿区开采历史已超过50年, 历史遗留的露采区存在较为严重的生态破坏和淋溶水锰浓度超标问题, 硐采区产生的矿洞涌水中锰浓度达到60mg/L, 且酸性条件加剧了金属元素的溶出与迁移, 对周边土壤、水体、生物链构成严重威胁。传统处理工艺主要针对单一污染或某个环节, 存在成本高、效率低、二次污染风险大等情况。对此, 本文提出“修复-减量-治理”的一体化技术, 实现矿区生态治理与废水处理同步提升的目标, 实现矿区的可持续发展。

一、矿区环境污染的特点与危害

（一）矿区环境污染的特点

1. 水土流失。矿区上部进行露天开采数十年，已形成露天采场，多个堆矿区、选矿场、排土场，地形地貌改变较大，露天开采的北矿和南矿附近发生滑坡；排土场冲沟裸露，易形成水土流失。

2. 水量波动大。矿区主要产生地表淋溶水、矿硐涌水，受气候影响较大，雨季水量大，旱季水量小，水量变化系数超过5.0。

3. 重金属超标。铁矿企业停产后排矿硐涌水持续排放，水体中重金属铁、锰含量较高，高浓度矿硐涌水中锰含量高达115mg/L，远超2.0mg/L的排放标准，并且水中锰以溶解态 Mn^{2+} 为主，自然沉淀难度大。

4. 协同污染突出。水体中的除了有锰，还有铜、铁、锌等重金属，在酸性条件下多种污染物的协同作用下，加大了治理难度。

（二）矿区存在的环境危害

1. 生态破坏。开采活动破坏原有植被和土壤结构，加剧水土流失。矿区的土壤因重金属污染和肥力丧失，难以自然恢复植被。

2. 水环境污染。含硫铁矿氧化产生酸性废水，pH值可低至2-4，溶解大量重金属（如铁、锰、锌），严重威胁周边水体安全。

3. 健康威胁。含重金属废水下渗污染地下水，存在通过食物链进入人体的隐患，对周边居民健康存在较大威胁。

二、矿区常用的生态修复及废水处理工艺

（一）常用的生态修复工艺

1. 物理修复

物理修复是通过改变地表形态、土地利用方式、重建地质景观等方式，恢复矿山区域的自然形态和地貌，减轻环境影响。常用的物理修复手段有：

填平法：通过填充矿渣、煤矸石等废弃物来改变地表形态和地貌，提高土地利用效率。

土壤覆盖法：在地表上覆盖一层肥沃的土壤，利用其改善植被生长条件和土地生态功能。

贴岩法：在大风、干旱、缺土等困难立地的矿山治理区域铺设矸（块）石或岩石，重建地质景观和生态环境，利于区域扬尘控制以及地被物种入驻自然修复。

地形削减法：通过削减矿山区域的地形高度，减轻矿区对环境的影响，同时增加土地利用面积。

2. 化学修复

化学修复是通过添加化学物质，改善土壤结构和提高土壤质量，使其具有生态功能的修复方法。主要包括土壤改良、污染物吸附和中和等手段。

常用的化学修复方法有：

营养元素添加法：在矿山治理区域内添加有机肥料（腐殖

质）或土壤改良与调理材料，改善土壤质量和提高植物生长量。

中和法：利用酸碱反应原理，将酸性土壤中的酸性物质中和掉，减少对环境的危害。

吸附法：利用化学物质吸附污染物，减少其对环境的危害，如添加粘土、石灰、人工合成材料等吸附性物质。

3. 生物修复

生物修复是利用植物、微生物等生物体，改善矿山区域的生态环境和土壤质量的修复方法。生物修复可以提高矿山区域的生态系统稳定性和土壤肥力，促进植被恢复和生物多样性的增加。

植物修复是指利用具有抗逆性、快速生长和适应性强的植物，修复受损的生态系统。植物修复的主要目标是恢复植被，增强土壤稳定性，防止土壤沙化与水土流失，提高生态系统的自我调节能力。

微生物修复是利用微生物对有害物质进行降解、转化和吸附，以达到修复矿山环境的目的。

4. 综合修复

综合修复是指采用多种修复手段，结合具体情况，全面、系统地修复矿山采矿迹地生态环境和土地资源。常用的综合修复方法有：

生态工程法：结合物理、化学和生物修复手段，进行综合修复。

生态农业法：通过发展生态农业，恢复农业生产和生态环境。

生态旅游法：通过发展生态旅游，促进经济发展和生态修复共同进步。

空间利用法：因地制宜的生态修复 +（4.0），促进产业提升和空间综合利用。

（二）常用的含锰废水处理工艺

1. 化学法除重金属

化学法作为高浓度重金属废水的重要处理手段，技术较为成熟。是通过向水体中投入化学药剂，使重金属离子形成沉淀或络合物分离。在中和沉淀法中，通过投加石灰、氢氧化钠等碱剂，将水体pH值调节到8-9，使 Mn^{2+} 转化为 $Mn(OH)_2$ 沉淀（溶度积 $K_{sp}=1.9 \times 10^{-13}$ ），并去除 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 等金属离子。该方法操作简单、成本低，但对低浓度锰（10mg/L以内）去除效果有限，容易产生大量污泥。在硫化物沉淀法中，通过向水体中加入 Na_2S 等硫化剂，生成 MnS 沉淀（ $K_{sp}=2.5 \times 10^{-13}$ ），该方法适用于高浓度锰废水，但硫化剂过量易生成 H_2S 有毒气体，需严控反应条件^[4]。

2. 生物法除锰

该方法是利用锰氧化细菌等微生物的代谢作用，将 Mn^{2+} 氧化成 MnO_2 沉淀，具有环保、成本低等优势。在生物滤池法中，通过在滤料表面上培养锰氧化细菌，一旦废水流经，会通过胞外酶将 Mn^{2+} 氧化成不溶性 MnO_2 ，附着在滤料表面上。该方法适用于低浓度锰废水（5mg/L以内），且会受到pH值、温度等因素影响，启动周期约为1-3个月。在生物膜法中，通过载体固定微生物，形成生物膜，强化对 Mn^{2+} 氧化效率。但对高浓度锰耐受性较差，需配合预处理降低其负荷。

3. 化学氧化法除锰

使用氧化剂将 Mn^{2+} 氧化为 MnO_2 ，常见氧化剂为高锰酸钾、氯气等。其中，在高锰酸钾氧化法中，中性条件下， MnO_4^- 和 Mn^{2+} 反应生成 MnO_2 沉淀。（化学反应式为： $2MnO_4^- + 3Mn^{2+} + 2H_2O = 5MnO_2 \downarrow + 4H^+$ ），反应迅速且高效，但投入的药剂成本高，用量过多会升高水色度。在氯氧化法中， Cl_2 在碱性条件下生成 ClO^- ，氧化 Mn^{2+} 为 MnO_2 ，全程应保持 pH 值不低于 9.5，且可能产生氯代消毒副产物^[6]。

4. 解除氧化法除锰

使用天然锰砂等滤料，其表面 MnO_2 为催化剂，在曝气条件下将 Mn^{2+} 氧化成 MnO_2 并附着到滤料表面上，形成“自催化”循环。该工艺适用于浓度不超过 10mg/L 的中低浓度锰废水，具有运行稳定、工艺简单等优势。但对于浓度超过 50mg/L 的高浓度锰废水处理效果不佳，需频繁反冲洗避免滤料堵塞。

5. 深度除锰工艺

浓度低于 5mg/L 的低浓度残留锰处理难度较大，需采用深度处理工艺确保水质达标。在电化学法中，以电解的方式产生羟基自由基（ $\cdot OH$ ）或高价金属离子，将 Mn^{2+} 氧化成 MnO_2 ，去除效率高，但要消耗大量电能，适用于小水量处理。在膜分离法中，采用纳滤 NF、反渗透 RO 膜等截流 Mn^{2+} ，可截留绝大部分重金属离子，出水水质好，但会造成膜污染，需定期再生和更换，还要设置预处理系统，运行成本高。在吸附法中，使用沸石、活性炭、特种树脂等吸附 Mn^{2+} ，特种纳米吸附树脂对锰的选择性高、饱和容量大，可重复再生利用，适合深度净化^[6]。

三、矿区水环境修复与污水治理一体化措施

本项目矿区一体化治理的核心逻辑为“源头修复—过程控制—末端治理”的闭环路径，实现矿区生态修复与污水处理系统深度耦合。依据矿区所在区域的生态系统功能重要性、人居环境与经济社会发展状况，综合考虑自然条件、地形地貌条件、矿山生态环境问题及其危害程度等，系统性开展矿区生态修复及废水处理。生态修复措施遵循生态系统演替规律和内在机理，利用科学的复垦修复技术和模式，使可修复区域地质环境达到稳定、损毁土地得到复垦利用、生态系统功能得到恢复和提升，恢复矿区生物多样性，协同推进绿色矿山建设，实现人与自然和谐共生。废水处理遵循应收尽收、源头治理的思路，选用工艺稳定可靠、投资成本较低、符合用地规划的模式，将矿区超标废水处理达到《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅲ类标准（其中铁 < 0.3mg/L、锰 < 0.1mg/L），以削减排入下游流域污染负荷，进而改善流域水质。

（一）生态修复配套措施

1. 坡面治理与修复

针对露天采区坡度较陡、岩土疏松的区域，通过物理手段固定岩土体，防止坍塌和水土流失。主要措施有：对凹凸不平的坡面进行削坡（去除危岩、突出岩体），将陡坡修整为台阶状（如每 10-20 米设一个平台，宽度 1-3 米），降低坡度至安全范围（一

般 $\leq 45^\circ$ ）；用混凝土、浆砌石修建网格状梁体（如菱形、矩形）或挡土墙，包裹坡面并拦截滑落体，网格内可预留生态修复空间；在坡顶设截水沟（拦截坡外汇水）、坡面设急流槽（引导雨水沿固定路径流下，避免冲刷坡面）、坡脚设排水沟（收集并排出坡面水），沟体材质可采用混凝土或浆砌石。

2. 土壤改良与植被恢复

针对矿区遗留的酸性污染土壤，使用生石灰均匀施撒中和 pH 值至 6.0-7.5。之后施加有机肥改善土壤结构，强化土壤的保水保肥能力。在植被恢复中，优选蜈蚣草、东南景天等超富集植物，利用其根系吸收作用，吸附锰、锌等重金属，定期收割植物地上部分，采取无公害处理手段，逐步降低土壤中重金属含量。并搭配黑麦草、紫花苜蓿等先锋植物，打造乔灌木相结合的植被群落，使土壤生态功能得到修复，预防水土流失。

3. 地表水及地下水导排措施

地表排水：在坡顶设截水沟（拦截坡外汇水）、坡面设急流槽（引导雨水沿固定路径流下，避免冲刷坡面）、坡脚设排水沟（收集并排出坡面水），沟体材质可采用混凝土或浆砌石。

地下排水：对地下水丰富区域，钻孔设置排水管（如透水管），降低岩土体含水率（避免因渗水导致的边坡失稳）。

（二）工艺设计原理与技术路线

本项目需处理的主要污染因子为铁、锰，工艺采用“石灰中和+除锰反应+除锰过滤+特种树脂吸附”对废水中的锰进行深度去除。

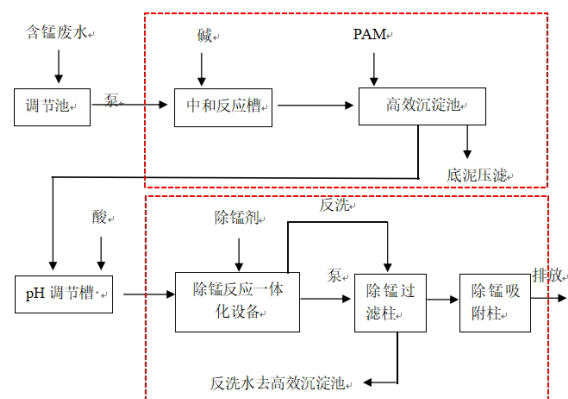


图1 工艺流程图

工艺流程说明：

含锰废水首先进入调节池均质均量，经泵提升至中和反应槽，投加碱液提高 pH 值，使锰、铁生成氢氧化沉淀物，再经絮凝及高效沉淀去除；沉淀出水加酸回调 pH 值，自流进入除锰反应一体化设备，投加除锰剂进行搅拌反应，将锰离子氧化成二氧化锰，反应出水经泵提升进入后段的除锰过滤柱，过滤柱中装填专用的除锰滤料，对废水中的锰进行过滤、附着、截留深度去除；过滤出水串联进入除锰吸附柱，通过特种纳米吸附树脂进一步对锰进行深度去除，达标排放。

高效沉淀池底泥由污泥泵定期抽至板框压滤机压滤，干渣外运处置。除锰过滤柱定期进行自动反冲洗，反冲洗水去往前端石

灰中和沉淀段的沉淀池。

本工艺设计流程简洁，技术成熟，还可实现全流程的自动化控制。整套系统除药剂配制以及板框压滤需人工操作外，其他全部自动化运行。

1. 预处理阶段：均质均量与酸碱调节

针对矿区矿硐涌水特点，为了避免对后续工艺产生冲击，该技术体系下降所有废水引入到调节池内（800m³），通过机械搅拌实现水质、水量的均质化，停留时间控制在10–12h之间。之后经提升泵将废水送到中和反应槽内，加入石灰乳将水体pH值调节至8.0–8.5，让废水中Fe³⁺快速生成Fe(OH)₃沉淀（K_{sp}=2.8×10⁻³⁹），Mn²⁺则转化为Mn(OH)₂胶体（K_{sp}=1.9×10⁻¹³），中和酸性水体，以免对后续设备造成酸性腐蚀^[8]。

2. 一级净化：絮凝沉淀去除大部分重金属

完成中和后的废水进入到絮凝反应槽内，投入混凝剂（聚合氯化铝）20–30mg/L，通过压缩双电层作用让Mn(OH)₂胶体凝结成大絮体；再加入助凝剂（聚丙烯酰胺）0.5–1mg/L，加强絮体的沉降性能。反应后混合液进入到高效沉淀池内，表面负荷为1.5m³/(m²·h)，借助斜管沉淀作用使固液快速分离，该阶段可去除80%以上的锰和90%以上的铁，出水后锰浓度下降至5–10mg/L，为后续深度处理奠定基础。

3. 沉淀池出水依然保留一定量的Mn²⁺，且由于石灰中和导致水体pH值偏高，加入稀硫酸将水体pH值回调至6.5–7.0，为氧化反应创造良好条件。之后废水进入到除锰反应一体化设备中，加入氧化剂（高锰酸钾），用量为锰浓度的1/3，通过机械搅拌下发生反应：2MnO₄⁻+3Mn²⁺+2H₂O=5MnO₂↓+4H⁺，将可溶Mn²⁺氧化成不溶于水的MnO₂颗粒。完成反应后的水通过水泵传输至除锰过滤柱中，柱内装填0.8–1.2mm的改性锰砂滤料，滤料上的MnO₂涂层通过吸附和截流作用去除MnO₂颗粒，利用“自催化”效应强化Mn²⁺

的氧化性能。处理之后可将锰浓度降低至1–3mg/L^[9]。

4. 深度净化：特种树脂吸附确保达标

过滤出水进入到串联的除锰吸附柱中，柱内填充D401、0.3–1.2mm特种纳米螯合树脂，对残留锰离子有较强的吸附性，饱和吸附容量达50–60mg/g。吸附之后出水锰浓度可降低至0.1mg/L以内，满足排放标准。

5. 副产物处理与资源循环

高效沉淀池内的污泥经污泥泵输送至板框压滤机中脱水，形成含水率不超过60%的干泥饼，其中富含锰、铁等金属，统一运输至回收厂提取有价金属，也可以用作建筑材料辅料，实现污泥资源化。除锰过滤柱每隔24h进行一次反冲洗，反冲洗水中含有微量的MnO₂颗粒，回流至中和沉淀池内二次处理，以免出现二次污染问题。达标水用于矿区绿化灌溉、道路降尘，或者排入人工湿地进行深度净化后补充周边水体。

四、结束语

综上所述，矿区生态修复与污水治理是一项系统性工程，应综合考虑污染治理的高效性、生态修复的长效性、技术应用的适应性。对于高浓度锰污染及酸性水体特征，本文提出了“石灰中和+多段净化+深度吸附”的一体化技术体系，打破了单一处理工艺的局限性，不仅能高效去除水中污染物高，还能实现水资源循环利用。通过分级处理适配水质波动，借助自动化系统提升运行稳定性，并搭配污泥资源化与生态修复措施，有效解决了矿硐涌水中锰超标问题，同时使矿区生态系统的逐步得到恢复。未来，矿区水环境治理需进一步强化技术创新，建立长效监测机制，确保污染控制与生态恢复的持续性。

参考文献

[1] 郭志耀, 杨冬. 矿区地下水环境重金属污染时空变化特征及风险评估研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(03): 189–194.
[2] 毛格, 周君蕊. 某金属矿区尾矿库水环境治理方案 [J]. 能源研究与管理, 2024, 16(02): 86–91+102.
[3] 赵彩云, 温易. 贵州某矿地地表水环境现状评价与水资源化利用分析 [J]. 南方金属, 2025, (2).
[4] 苏志强. 煤矿区水环境特征研究——以柳林泉域西部某矿区为例 [J]. 经纬天地, 2024, (01): 93–96.
[5] 平措朗加, 其米多吉, 旦增罗布. 矿区水文地质勘查与环境地质评价现状及发展形势 [J]. 世界有色金属, 2024, (01): 157–159.
[6] 谢腾蛟, 张娇, 廖祿云, 等. 废弃煤矿矿区水污染特征及成因分析研究 [J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 224–229.
[7] 张宇. 库拜和哈密矿区水环境质量评价及环境容量预测 [D]. 中国矿业大学, 2023.
[8] 王秋月. 铁矿区环境地质生态调查与评价研究——以高岭铁矿区为例 [J]. 环境科学与管理, 2023, 48(04): 156–161.
[9] 牟祥国. 传统水文地质调查方法在矿区地下水环境污染调查中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2023, (03): 186–188.
[10] 倪高倩, 林元惠, 张帆洋. 水文地质工作在矿区环境污染调查中的应用 [J]. 中国金属通报, 2022, (12): 195–197.