

退役铀矿山渗出水可渗透反应墙处理工艺研究

袁道和¹, 熊庭安², 唐海东²

(1. 中核韶关锦原铀业有限公司, 广东 韶关 512000;
2. 广西南宁新原核工业有限责任公司, 广西 南宁 530000)

摘要: 中国南方某退役铀矿山渗出水具有低铀浓度、高硫酸根、高悬浮物的水质特征, 使用原有树脂吸附工艺除铀时存在处理效果不稳定、树脂易饱和板结、运维成本高等问题。针对该问题, 结合矿山喀斯特地貌背景下铀赋存状态的季节性变化规律, 开展了渗出水水质特征分析与治理工艺优化研究。在探明铀“雨季活化迁移、旱季局部富集”循环模式及冬夏季赋存状态差异的基础上, 提出铁基可渗透反应墙 (PRB) 分季节组合处理方案, 并进行了工艺流程设计、工程设施规划及分季工艺参数优化。该工程设计处理量 400 m³/d, 可适配矿山渗出水水量与铀赋存形态的季节性波动特征, 预计运行周期达 10 年, 材料再生后可循环使用。应用结果表明, 该工艺对天然铀、²²⁶Ra、²¹⁰Pb、²¹⁰Po 等放射性污染物去除效率显著, 出水水质长期稳定达标, 可为同类型喀斯特地区退役铀矿山渗出水治理提供技术参考。

关键词: 退役铀矿山; 渗出水; 喀斯特地貌; 铀赋存状态; 可渗透反应墙 (PRB); 除铀工艺; 铁基材料

中图分类号: TL941 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0158-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2026.04.05

核能作为清洁低碳能源体系的重要组成部分, 是实现“双碳”目标的重要支撑。铀资源作为核能发展的战略原料, 其开采利用的全生命周期环境保护尤为重要^[1-2]。铀矿退役后, 受水文地质、气候条件等因素影响, 采场及废石场易产生渗出水, 渗出水中的低浓度铀、镭、铅、钋等放射性污染物, 可通过水文循环持续污染周边水体与土壤, 对区域生态环境和人体健康构成长期潜在威胁^[3-6]。

中国硬岩型铀矿区多分布于降雨量丰富、季节差异大的南方, 这使得退役铀矿山渗出水呈现水量季节性波动大、铀赋存形态动态变化显著等特征, 给渗出水治理带来更大挑战。当前, 国内部分退役铀矿山采用传统阴离子树脂吸附工艺处理渗出水, 该工艺虽能实现铀的去除, 但在高硫酸根、高钙、高悬浮物水质条件下, 易出现树脂板结、处理效果不稳定等问题, 且树脂更换频繁、运维成本高, 难以适配喀斯特地区铀赋存状态的季节性变化^[7-8]。

中国南方某退役铀矿山地处广西喀斯特地貌区, 2015 年完成退役治理后, 渗出水存在固定渗出处, 水质呈低铀浓度、高硫酸根、高悬浮物特征, 且受冬夏季水热条件影响, 铀赋存形态与渗水量

呈现明显的季节性周期变化。本研究以该矿山为研究对象, 在系统分析其渗出水水质特征、铀赋存状态季节性变化规律及原有工艺弊端的基础上, 结合可渗透反应墙 (Permeable Reactive Barrier, PRB) 修复技术的优势, 设计铁基 PRB 分季节组合除铀工艺, 并进行监测验证, 以期为喀斯特地区同类型退役铀矿山渗出水治理提供技术支撑。

1 项目概况

1.1 基本情况

南方某退役铀矿山为单面山坡露天开采的中型铀矿山, 位于华南准地台桂南岛屿式褶皱系与桂南格状断裂系构造单元内, 地质构造复杂, 属典型喀斯特地貌发育区, 区域内石灰岩等碳酸盐岩广泛分布。矿山于 2015 年完成退役治理, 转入监护阶段, 监护范围包括露天采场废墟和两处废石场, 废石场内堆存大量铀矿开采遗留的围岩废石。

区域降水充沛、地下水活动频繁, 水文地质特征受构造控制显著, 加之石灰岩地区岩溶裂隙与构造破碎带发育, 治理后矿山渗出水随降水沿岩溶通道及构造破碎带渗流, 在采场低洼处溢出而形成固定渗水点。渗水点主要分布于原采场西部

隧道西出口处和东部平台边坡处,均为采场边坡岩层裂隙渗水。该渗水点渗出水流量受季节性变化影响较大,日均渗水量为 20~380 m³。

1.1.1 渗出水水质特征分析

渗出水呈现低铀浓度、高硫酸根、高钙、高悬

浮物的典型特征,其主要参数范围见表 1。可以看出,除 pH 外,其他主要水质参数浓度波动较大,特别是浊度,在丰水期(雨季)达到 18.8 NTU,水体呈现淡乳白色;在枯水期(冬季)时,浊度低,水体清澈。

表 1 渗出水主要水质参数
Table 1 Main water quality parameters of seepage water

水质参数	$\rho(\text{U}_{\text{天然}})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg/L})$	浊度/NTU	pH
数值范围	0.10~1.2	326~1 230	85.6~723	2.90~18.8	7.48~8.33

1.1.2 渗出水铀赋存状态季节性变化

在夏季,降水充沛、水温高,驱动 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ 反应向右进行,水体中碳酸钙过饱和并大量沉淀。铀酰离子被石英、黏土矿物、新生碳酸钙吸附/共沉淀,形成微米级载铀胶体/颗粒(Z-均粒径约 2 650~3 650 nm),随渗流大量迁出。此时渗出水中总铀浓度偏高,但溶解态铀占比低,以胶体/颗粒态为主。

在冬季,低温、水量小,碳酸钙沉淀反应被显著抑制,水体中 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 相对富集。碳酸氢根与 U(VI) 形成高稳定、易溶解的碳酸铀酰配合物,使铀以溶解态存在为主,迁移性强、直接超标风险高。

1.2 原有渗出水处理工艺及设施

原有渗出水处理工艺采用阴离子树脂吸附法,利用树脂官能团与含铀阴离子的强亲和力,通过离子交换作用选择性去除铀。设计目标为将渗出水铀浓度稳定控制在《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)^[9] 限值

(0.3 mg/L)以下,确保达标外排。

原有渗出水处理设施包含 2 座离子交换树脂吸附池,单池有效容积 10 m³;采用并联方式建设,进、出水管相互连通,各池可独立运行。标准工况下,单座吸附池承担日常处理任务,当其树脂吸附饱和时,系统可在不中断处理流程的情况下切换至备用池,确保渗出水处理的连续性,避免树脂更换过程中的环保风险。

1.3 渗出水收集、处理及监测情况

依据《辐射环境监测技术规范》(HJ 61—2021)^[10]、《铀矿冶放射性废物辐射环境管理技术规定》(GB 14585—2024)^[11] 等要求,配备了监测人员和监测设备,对渗出水进行取样和特征污染物浓度水平监测。放射性特征污染物主要为 $\text{U}_{\text{天然}}$ 、²²⁶Ra、²¹⁰Pb、²¹⁰Po,监测频次为 1 次/月(一般在每月最后一周进行采样),采取内部监测与外部监测相结合的方式。监测发现, $\rho(\text{U}_{\text{天然}})$ 在 0.135~0.253 mg/L 波动(表 2)。该浓度区间处于现有阴离子树脂处理设施的敏感运行区间。

表 2 2023—2024 年渗出水处理后的特征污染物检测结果

Table 2 Detection results of characteristic pollutants in leachate after treatment in 2023—2024

年度	$\rho(\text{U}_{\text{天然}})/(\text{mg/L})$		$C(^{226}\text{Ra})/(\text{Bq/L})$		$C(^{210}\text{Pb})/(\text{Bq/L})$		$C(^{210}\text{Po})/(\text{Bq/L})$		pH	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
2023	0.194~0.253	0.227	0.151~0.235	0.194	0.010~0.020	0.015	0.014~0.031	0.023	7.10~7.50	7.26
2024	0.135~0.249	0.204	0.115~0.191	0.154	0.010~0.040	0.025	0.001~0.063	0.032	6.82~7.41	7.14

通过对原有阴离子树脂吸附工艺运行情况及监测数据的综合分析,结合矿山喀斯特地貌下铀赋存状态的季节性变化特征,发现该工艺存在以下核心问题,难以满足长期稳定达标要求:1)处理效果不稳定,接近工艺瓶颈。处理后铀浓度处于处理设施敏感运行区间,水质小幅波动易引发超

标风险,且²²⁶Ra、²¹⁰Pb 等污染物浓度存在小幅波动,处理效果稳定性不足。2)树脂与渗水中悬浮物板结,吸附效率衰减快,易饱和。渗出水的高硫酸根、高钙、高悬浮物特征,使硫酸钙悬浮物易附着于树脂表面,堵塞树脂孔隙,导致树脂吸附效率快速衰减,易出现板结。3)运维成本高,环保管理

压力大。树脂吸附周期短(仅1~2年),需频繁更换;且饱和树脂的处理处置需专业资质,费用高;而且工艺对监测频次、人员专业能力要求高,长期运行需持续投入大量人力、物力。4)无法适配铀赋存状态的季节性变化。原有工艺为固定离子交换模式,未考虑矿山冬夏季铀赋存状态(夏季以胶体态为主、冬季以溶解态为主)差异,对不同形态铀的去除效率存在明显短板。

2 渗出水处理工艺设计

2.1 可渗透反应墙修复技术

2.1.1 技术概述

可渗透反应墙修复技术是一种高效的地下水污染原位修复技术。自1994—1995年在美国加利福尼亚州桑尼维尔完成首次商业规模工程应用以来,全球范围内已建成投用的PRB工程系统超200个,应用项目主要集中在北美与欧洲地区^[12]。PRB的工程布设走向,通常与受污染地下水的水流方向垂直。受污染水在自然水力梯度的驱动下被动迁移并穿过反应墙体,与墙内填充的活性反应介质发生吸附、沉淀、氧化还原等物理化学反应,最终实现目标污染物的固定化或无害化分解^[13-14]。该技术运行稳定、运维成本低、对场地原生环境扰动小,是地下水污染修复领域的成熟可靠技术,目前已在重金属、放射性核素等各类污染场地的修复治理中得到了广泛应用^[15-16]。

2.1.2 作用机理

结合矿山渗出水铀赋存形态特征,选择零价铁作为PRB核心反应介质。零价铁易被氧化,其失去的电子可传递给氧化性污染物,使其还原沉淀。同时,其腐蚀产物可通过吸附、共沉淀作用进一步去除铀,对溶解态、胶体态铀均具有良好去除效果。PRB核心作用机理包括^[17-19]:1)还原沉淀。零价铁将可溶性U(VI)还原为不溶性U(IV),并将其固定于反应墙中,这是冬季去除溶解态U(VI)的核心机制。2)表面吸附。零价铁腐蚀生成的铁氧化物/氢氧化物[如 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$]具有大比表面积和强吸附性,可通过表面配合、静电引力吸附铀酰离子及胶体态铀。3)共沉淀。铀酰离子与零价铁腐蚀产物形成共沉淀,被包裹于铁氧化物晶格中,进一步降低铀的迁移能力。

可渗透反应墙使用的除铀活性介质材料主要包括氧化还原型和吸附型两类。其中,氧化还原型介质材料主要有零价铁(ZVI)、 $\text{Fe}(\text{II})$ 矿物和双金属等还原剂,以零价铁最为常见,主要是利用介质材料的还原性与废水中的铀发生氧化还原反应,将U(VI)还原生成 UO_2 ,达到除铀目的;吸附型介质材料包括颗粒活性炭、沸石、膨润土、粉煤灰、铁的氢氧化物、铝硅酸盐等吸附剂,主要利用介质材料的吸附性,通过吸附和离子交换作用而达到除铀目的^[20]。

2.1.3 技术优势

与传统的树脂吸附除铀技术相比,PRB技术具有明显优势(表3)。

表3 技术优势对比

Table 3 Comparison of technical advantages

项目	树脂吸附除铀技术	可渗透反应墙技术(PRB)
运行成本	投资大、树脂费用、维护费大	一次性投资,运行维护费用低
地面设施	需建设收集、吸附和淋洗设施等处理设施	仅需地下构筑反应墙体,无需额外地面设施
运行周期	树脂1~2年更换1次,更换频繁	反应介质寿命10~20年

2.2 总体工艺方案

铁基PRB分季节组合除铀工艺设计处理能力 $400\text{ m}^3/\text{d}$,可完全适配矿山夏季渗水量峰值与冬季低水量的波动特征,适配进水铀质量浓度 $0.1\sim 1\text{ mg/L}$ 的全工况。装置预计运行周期10年,到期后反应介质经化学洗脱再生后可继续使用。工艺整体遵循“集水均质—分季节处理—过

滤达标—材料再生”核心流程,包括4个主要环节,各环节根据冬夏季铀赋存形态差异优化工艺参数与辅助单元,实现全季节稳定除铀。

在渗流水收集与均质环节,依据矿山水文地质条件和渗水点分布特征,布设引水沟、集水池、调节池等集水设施,通过重力自流将各渗水点渗出水统一收集至调节池。调节池可均衡渗水量、

稳定进水负荷,缓解夏季强降雨带来的水量冲击,保障后续处理系统连续稳定运行。

在分季节组合处理环节,以地下铁基 PRB 反应池为核心,夏季采用“物理截留铀胶体+PRB 吸附还原”组合工艺,强化胶体态铀截留;冬季采用铁基 PRB 还原铀酰离子工艺,强化溶解态铀还原,实现不同形态铀的高效去除。

在过滤达标排放环节,经分季节处理后的出水进入后置过滤池,通过物理过滤方式,去除水中悬浮颗粒、反应介质碎屑及未沉淀的胶体颗粒。过滤出水经人工采样检测,确认铀浓度等关键指标达到国家限值后外排。

在材料再生与更换环节,建立铁基 PRB 反应介质及辅助滤料定期检测制度,通过监测进出水铀浓度、材料吸附容量、过滤效率等指标,评估材料性能状态。当吸附能力下降至设定阈值时,采用反冲法对介质等进行再生处理,以恢复其性能,再生后材料可循环使用;对无法有效再生的材料予以更换,确保系统平稳运行。

2.3 工程设计及工艺参数

采用地埋式结构,主要设施分为缓冲区、核心反应区、沉降区和过滤区。其中,核心反应区由 4 个并联的独立单元构成,单格尺寸为 4 m(长)×

2 m(宽)×2 m(高)。缓冲区布置在核心反应区的前端,用以去除水中的大部分悬浮物,特别是在丰水期,能够保障核心反应区运行稳定。在核心反应区,通过装填大空隙率的复合材料以去除污染物,每个单元出水处均设置监测取样口。在丰水期,4 个单元并联运行处理渗出水;在枯水期,根据实际监测情况对部分单元材料进行再生处理。核心反应区的出水再经过沉降池,进一步去除水中的悬浮物;最后流经布置在末端的过滤区(装填过滤材料),可去除水中残留的少量悬浮物,以保障出水浊度符合要求。

3 应用效果分析

3.1 铁基 PRB 技术应用效果

应用铁基 PRB 技术后,对渗出水处理系统开展了为期一年(2025 年)的连续监测,监测频率为每月一次,监测指标包括 $U_{\text{天然}}$ 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 、pH 及浊度,具体监测情况见表 4。可以看出,铁基 PRB 处理出水中各项放射性特征污染物的浓度均处于低水平、窄波动状态,且显著低于《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)的限值要求,处理效果稳定可靠,没有出现超标现象;pH 稳定在中性范围,未出现酸碱失衡。

表 4 2025 年铁基 PRB 处理出水特征污染物检测结果
Table 4 Detection results of characteristic pollutants in leachate after PRB treatment in 2025

项目	$\rho(U_{\text{天然}})/(\text{mg/L})$	$C(^{226}\text{Ra})/(\text{Bq/L})$	$C(^{210}\text{Pb})/(\text{Bq/L})$	$C(^{210}\text{Po})/(\text{Bq/L})$	pH	浊度/NTU
最小值	0.058	0.043	0.010	0.001	6.90	2.20
最大值	0.153	0.135	0.007	0.004	7.43	3.60
均值	0.086	0.071	0.009	0.003	7.13	2.90
排放限值	0.3	1.1	0.5	0.5		

3.2 主要污染物浓度变化

可渗透反应墙的结构设计与核心处理材料的选用,使丰水期的渗出水通过可渗透反应墙不同部分后,含铀的高悬浮物得到逐级去除,高空隙率的材料防止了堵塞与板结;在枯水期时,处理材料使其得到再生与恢复,从而良好地应对了丰水期和枯水期的渗出水处理需求。

2023—2024 年原有工艺与 2025 年铁基 PRB 工艺处理结果对比见表 5。

1)铁基 PRB 技术应用后,铁基材料中的低价态铁将游离态的 $U(\text{VI})$ 还原为稳定态的 $U(\text{IV})$,

生成的铁基氢氧化物对铀酰离子和铀胶体进行吸附和配合生成共沉淀混合物,最后剩余的含铀悬浮物通过过滤除去。处理出水中 $\rho(U_{\text{天然}})$ 为 0.058~0.153 mg/L,均值 0.086 mg/L;与改造前 $\rho(U_{\text{天然}})$ 均值(0.216 mg/L)相比,改造后 $\rho(U_{\text{天然}})$ 均值下降 60.2%,远低于国家限值(0.3 mg/L),表明铁基 PRB 技术对 $U_{\text{天然}}$ 具有良好的去除效果。

2)处理出水中 $C(^{226}\text{Ra})$ 为 0.043~0.135 Bq/L,均值 0.071 Bq/L;与改造前 $C(^{226}\text{Ra})$ 均值(0.174 Bq/L)相比,改造后 $C(^{226}\text{Ra})$ 均值下降

59.2%,远低于国家限值(1.1 Bq/L),说明铁基PRB技术对镭的去除效果显著。

3)处理出水中 $C(^{210}\text{Pb})$ 为0.007~0.010 Bq/L,均值0.009 Bq/L;与改造前的 $C(^{210}\text{Pb})$ 均值(0.020 Bq/L)相比,改造后 $C(^{210}\text{Pb})$ 均值下降55.0%,所有监测结果均远低于国家限值(0.5 Bq/L),最大值仅为限值的1/50,表明铁基PRB技术对 ^{210}Pb 具有稳定的去除能力。

4)处理出水中 $C(^{210}\text{Po})$ 为0.001~0.004 Bq/L,均值0.003 Bq/L,与改造前的 $C(^{210}\text{Po})$ 均值

(0.027 5 Bq/L)相比,改造后 $C(^{210}\text{Po})$ 均值下降89.1%。该指标降幅最为显著,最大值仅为国家限值(0.5 Bq/L)的1/125,均值仅为限值的1/200,表明铁基PRB技术对 ^{210}Po 的去除效果极为突出。

可以看出,采用铁基PRB工艺后,各放射性特征污染物浓度均显著下降,去除效率优异;且铁基PRB工艺完全脱离原有工艺的敏感运行区间,系统长期稳定运行的缓冲空间得到大幅提升。

表5 改造前后渗出水处理后特征污染物检测结果均值及降幅对比

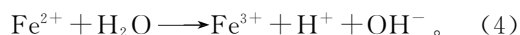
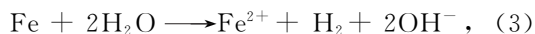
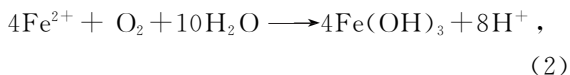
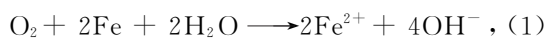
Table 5 Comparison of average detection results and reduction rate of characteristic pollutants in leachate treatment

污染物	$\rho(\text{U}_{\text{天然}})/(\text{mg/L})$			$C(^{226}\text{Ra})/(\text{Bq/L})$			$C(^{210}\text{Pb})/(\text{Bq/L})$			$C(^{210}\text{Po})/(\text{Bq/L})$		
	改造前	改造后	降幅 ^①	改造前	改造后	降幅	改造前	改造后	降幅	改造前	改造后	降幅
浓度	0.216	0.086	60.2	0.174	0.071	59.2	0.02	0.009	55.0	0.0275	0.003	89.1

注:①降幅单位为%。

3.3 pH稳定性分析

铁基PRB技术应用后,由于溶解氧的参与,铁基材料主要有如下反应:



渗出水与铁基材料接触后,随着溶解氧浓度的变化,在不同点位与铁基材料发生不同反应,有氧时主要按照(1)和(2)反应式反应,无氧时可按照(3)和(4)反应式反应。由于可在不同阶段分别产生 H^+ 和 OH^- ,在反应速率和流量的相互影响下,经每月一次的监测,处理出水的pH为6.90~7.43,均值7.13,处于中性范围,符合国家限值(6~9)要求,说明处理过程未对酸碱平衡造成不利影响,pH稳定性较好。

3.4 稳定性与达标分析

铁基PRB运行期间,在丰水期后期,材料的处理效果降低,进行了1次反冲,并评估了材料在反冲前后的效果。结果显示,反冲后材料的处理效果明显提升,基本能够恢复到初始状态,铁基PRB能够稳定运行。

从监测数据的波动范围来看,应用铁基PRB技术后各污染物浓度均呈现低水平、窄波动的特

征,表明该技术对水质波动的适应能力强,处理效果稳定可靠。改造前铀浓度已处于阴离子树脂吸附工艺敏感运行区间,说明处理能力接近工艺瓶颈。改造后 $\rho(\text{U}_{\text{天然}})$ 普遍低于0.15 mg/L,远离工艺敏感区间,为系统长期稳定运行提供了更大缓冲空间。

4 结论

铁基PRB技术作为一种新型地下水修复技术,在铀矿冶退役矿山渗出水处理中展现出显著优势。通过对原有处理工艺进行优化替代,该技术有效提升了系统对放射性特征污染物的去除效率,保障了出水水质的长期稳定达标,并在运行成本、空间占用及环境影响等方面表现出良好的综合效益。

1)铁基PRB技术应用后,渗出水处理系统对 $\text{U}_{\text{天然}}$ 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 等放射性特征污染物的去除效率显著提升,出水水质稳定达标,各项指标均远低于国家限值,充分验证了该技术在铀矿冶退役矿山渗出水处理中的有效性与可靠性。

2)该技术有效解决了原有阴离子树脂吸附工艺存在的铀浓度敏感运行区间问题,为渗出水处理提供了更为稳定、高效的技术方案。

3)铁基PRB技术兼具运行成本低、占地面积小、环境扰动小等优点,是处理退役铀矿山放射性废水的有效技术手段,可为国内同类型退役铀矿

山渗出水治理工程提供有益参考。

参考文献:

- [1] 张金带,李子颖,苏学斌,等.核能矿产资源发展战略研究[J].中国工程科学,2019,21(1):113-118.
Zhang Jindai, Li Ziyang, Su Xuebin, et al. Development strategy of nuclear energy mineral resources [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1):113-118.
- [2] Lopez-Solis R, François J L. The breed and burn nuclear reactor: A chronological, conceptual, and technological review[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(3):953-965.
- [3] 张晶,王运,赵海波,等.铀矿山酸性废水的治理方法和研究进展[J].能源研究与管理,2010(3):34-36.
Zhang Jing, Wang Yun, Zhao Haibo, et al. Treatment and research development of acid mine drainage of uranium mine[J]. Energy Research and Management, 2010(3):34-36.
- [4] 张越男,李忠武,陈志良,等.大宝山尾矿库区及其周边地区地下水重金属健康风险评价研究[J].农业环境科学学报,2013,32(3):587-594.
Zhang Yuenan, Li Zhongwu, Chen Zhiliang, et al. Assessment of health risk from heavy metals in groundwater of the Dabaoshan tailing zone and its surrounding areas, Guangdong Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3):587-594.
- [5] Morrison S J, Metzler D R, Carpenter C E. Uranium precipitation in a permeable reactive barrier by progressive irreversible dissolution of zerovalent iron [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(2):385-390.
- [6] 赵计伟,张庆海,王宁涛,等.酸性矿山废水处理技术研究进展与展望[J].矿产勘查,2021,12(4):1049-1055.
Zhao Jiwei, Zhang Qinghai, Wang Ningtao, et al. A review for acid mine drainage treatment technology [J]. Mineral Exploration, 2021, 12(4):1049-1055.
- [7] 赵春,王彬,汪时沛,等.离子交换树脂吸附法去除某铀矿山废水中的铀[J].矿冶,2020,29(6):83-86.
Zhao Chun, Wang Bin, Wang Shipai, et al. Removal of uranium from a uranium mine wastewater by ion-exchange resin adsorption[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(6):83-86.
- [8] 蒙萍,李江,李琪航,等.铀矿开采及铀污染地下水修复技术研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2025(10):39-52.
Meng Ping, Li Jiang, Li Qihang, et al. Progress on uranium mining and remediation technologies of uranium-contaminated groundwater [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2025(10):39-52.
- [9] GB 23727—2020 铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定[S].
- [10] HJ 61—2021 辐射环境监测技术规范[S].
- [11] GB 14585—2024 铀矿冶放射性废物辐射环境管理技术规定[S].
- [12] Singh R, Chakma S, Birke V. Performance of field-scale permeable reactive barriers: An overview on potentials and possible implications for in-situ groundwater remediation applications [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858:158838.
- [13] Xiao J, Pang Z H, Zhou S K, et al. The mechanism of acid-washed zero-valent iron/activated carbon as permeable reactive barrier enhanced electrokinetic remediation of uranium contaminated soil[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 244:116667.
- [14] Budania R, Dangayach S. A comprehensive review on permeable reactive barrier for the remediation of groundwater contamination[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 332:117343.
- [15] 陈梦舫,钱林波,晏井春,等.地下水可渗透反应墙修复技术原理、设计及应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [16] Obiri-Nyarko F, Grajales-Mesa J S, Malina G. An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation [J]. Chemosphere, 2014, 111(1):243-259.
- [17] 贺桂成,王湘雷,黄炳香,等.草酸化纳米零价铁对铀污染地下水的修复行为及机理研究[J].铀矿冶,2025,44(4):100-111.
He Guicheng, Wang Xianglei, Huang Bingxiang, et al. Research progress and mechanism analysis of OA-NZVI remediation of uranium contaminated groundwater[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(4):100-111.
- [18] 贺桂成,崔佳欣,张辉,等.STPP-nZVI修复铀污染地下水的性能及机理研究[J].铀矿冶,2024,43(3):74-85.
He Guicheng, Cui Jiaxin, Zhang Hui, et al. Performance and mechanism study of STPP-NZVI for remediation of uranium-contaminated groundwater [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):74-85.

74-85.

- [19] 牛洁,徐乐昌,王扬. PRB 零价铁材料处理低浓度含铀废水失效影响因素及机理初探[J]. 铀矿冶, 2022, 41(2):169-176.

Niu Jie, Xu Lechang, Wang Yang. Influencing factors and mechanism of zero valent iron permeable reactive barrier for treating low concentration uranium-containing wastewater [J]. Uranium Mining

and Metallurgy, 2022, 41(2):169-176.

- [20] 李存增,彭阳,周磊,等. 铀矿采冶放射性废水治理技术研究进展[J]. 铀矿冶, 2025, 44(2):151-160.

Li Cunzeng, Peng Yang, Zhou Lei, et al. Research progress on radioactive wastewater treatment technology in uranium mining and metallurgy[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44 (2): 151-160.

Treatment Process of Uranium Removal from Seepage Water in Decommissioned Uranium Mines Using Permeable Reactive Barrier Technology

YUAN Daohe¹, XIONG Ting'an², TANG Haidong²

(1. Shaoguan Jinyuan Uranium Industry Co., Ltd., CNNC, Shaoguan 512000, China;

2. Guangxi Nanning Xinyuan Nuclear Industry Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: Aiming at the water quality characteristics of low uranium concentration, high sulfate and high suspended solids in the seepage water of a decommissioned uranium mine in southern China, as well as the problems of unstable treatment effect, easy saturation and hardening of resin, and high operation and maintenance costs in the original resin adsorption uranium removal process, combined with the seasonal dynamic change law of uranium occurrence state under the background of the mine's karst landform, the analysis of seepage water quality characteristics and the optimization of treatment process were carried out. On the basis of finding out the cyclic mode of uranium "activation and migration in rainy season, local enrichment in dry season" and the difference of occurrence states in winter and summer, a seasonal combined treatment scheme of iron-based permeable reactive barrier (PRB) was proposed, and the process flow design, engineering facility planning and seasonal process parameter optimization were completed. The designed treatment capacity of the project is 400 m³/d, which can adapt to the seasonal fluctuation characteristics of the seepage water volume and uranium occurrence form of the mine, with an expected operation cycle of 10 years, and the materials can be recycled after regeneration. The application results show that the process has a significant removal efficiency for radioactive pollutants such as natural uranium, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po, the effluent water quality meets the standard stably for a long time, which can provide technical reference and engineering demonstration for the seepage water treatment of similar decommissioned uranium mines in karst areas.

Key words: decommissioned uranium mine; seepage water; karst landform; uranium occurrence state; permeable reactive barrier (PRB); uranium removal process; iron-based materials