

基于微通道分离技术的地浸采铀浸出液 净化中试研究

刘天印¹, 李喜龙¹, 阮志龙¹, 董惠琦¹, 杨丹卉², 吕文杰²

(1. 中核通辽铀业有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000;

2. 华东理工大学 工业废水无害化与资源化国家工程研究中心, 上海 200237)

摘要: 中性地浸采铀工艺产生的浸出液中常含有大量微细颗粒物, 易导致离子交换树脂出现交换速度下降、吸附容量降低、清洗频次增加等问题。针对传统固液分离技术对微细颗粒去除效率低、运行稳定性不足的瓶颈, 本研究引入了一种基于“微通道粘附分离—振荡脱附”耦合强化机制的微通道分离技术, 并开展了现场中试试验。试验结果表明, 该系统对粒径 $>1\ \mu\text{m}$ 颗粒物的去除效率高于 94%, 对粒径 $>5\ \mu\text{m}$ 颗粒物的去除效率接近 100%; 在不同进水浊度(6~33 NTU)条件下, 出水浊度稳定在 2~9 NTU, 去除率维持在 60%~75%。系统运行压差随颗粒物累积而缓慢上升, 装置平稳运行 8 d 后, 对粒径 $>1\ \mu\text{m}$ 颗粒物的去除效率下降至 70%; 为恢复系统分离性能, 对装置进行反冲洗, 反冲洗后其对粒径 $>5\ \mu\text{m}$ 颗粒的去除能力迅速恢复。与常规布袋过滤器相比, 微通道分离器出口颗粒物主要分布在亚微米至微米尺度, 中、大粒径颗粒显著减少。本研究为微通道分离技术在地浸采铀浸出液预处理中的工程应用提供了试验依据与技术支持。

关键词: 地浸采铀; 浸出液; 微通道分离; 振荡脱附; 固液分离; 颗粒粒径; 微细颗粒物; 压降; 浊度; 体积分布

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0035-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2026.03.04

在能源结构转型、气候治理与国际战略竞争交织的背景下, 铀资源已由基础矿产资源转变为保障能源安全与拓展战略纵深的关键要素^[1]。中性地浸采铀作为一种环境友好的绿色采矿技术, 通过向含铀层注入 CO_2 与 O_2 , 实现铀的原位溶解与回收^[2-3]。然而, 该工艺产生的浸出液中常含有大量微细固体颗粒^[4-5], 其进入吸附系统易造成树脂吸附塔等后续设备堵塞与污染, 导致吸附容量下降、清洗频次增加、运行成本上升^[6-7]。因此, 为保障后续铀吸附工艺的稳定运行, 开发用于去除浸出液中颗粒物的高效、稳定预处理技术, 已成为地浸采铀流程优化中的关键问题^[8]。研究表明, 地浸采铀浸出液中粒径 $\leq 25\ \mu\text{m}$ 的颗粒占比超过 98%, 而常规袋式过滤器受限于截留精度和运行稳定性, 难以实现微米级及以下颗粒的长期高效去除^[9]。通过提高树脂清洗频率或设置外排工序虽可在一定程度上缓解该问题, 但未能从根本上解决微细颗粒控制不足

的问题^[10-11]。

近年来, 微通道分离技术在工业废水处理中展现出良好的微细颗粒去除能力和运行稳定性^[12-13]。微通道分离技术对甲醇制烯烃废水中微细催化剂颗粒的平均去除率达 84.6%, 且可稳定运行两年以上^[14-15]。两级串联微通道系统对悬浮物的去除率超过 80%, 实现了废水的高效回用^[16-17]。综上, 微通道分离技术在多种复杂水体系中均可实现较高的颗粒去除效率, 且具备在线再生和长周期运行的优势, 这为其应用于地浸采铀浸出液预处理提供了可行性基础^[18-19]。

基于此, 本研究将微通道分离技术引入地浸采铀浸出液净化过程, 通过现场中试试验, 系统评估其颗粒去除性能、运行稳定性及反冲洗再生效果, 并与传统布袋过滤工艺进行对比分析, 以期地为地浸采铀微细颗粒分离问题提供新的解决方案。

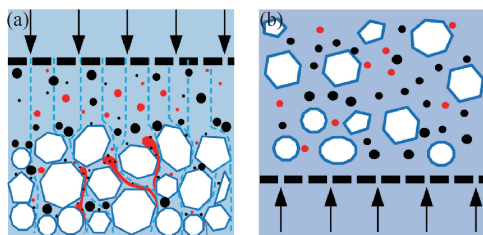
收稿日期: 2026-03-10; **修回日期:** 2026-03-28

通信作者: 李喜龙

1 工艺路线与原理

1.1 技术原理

微通道分离技术的核心机理为“微通道粘附—振荡脱附”耦合作用(图1)。在分离阶段,含悬浮颗粒的流体通过结构精密的微通道床层,颗粒在受限流道与高比表面作用下,通过惯性拦截、表面吸附及物理滞留等机制被高效捕获^{[20]108}。随着运行时间的延长,床层孔隙逐渐被颗粒堵塞,导致压差上升、分离效果变差。此时进行反冲洗,引入外部反冲洗水和气源(如空气/ N_2),通过调控气体流量使装置内颗粒物达到流化状态,将颗粒从分离媒介表面快速振荡脱附,从而实现床层的原位再生。该过程可避免人工更换分离媒介所造成的辐射危害,同时保障分离过程的长期连续稳定运行。



(a)粘附分离;(b)振荡脱附。

图1 微通道分离—振荡脱附过程

Fig. 1 Microchannel separation-oscillation desorption process

1.2 中试试验系统

1.2.1 主要设备与仪器

中试试验主要设备:布袋过滤器 JHD/3-DN65-1.6/30 μm ,购自江海化工机械厂,安装在离子交换吸附塔前,用于拦截浸出液中的大颗粒泥沙和悬浮物。微通道分离器,处理量 50 m^3/h ,由上海华畅环保设备发展有限公司提供;在中试时,用微通道分离器替换布袋式过滤器进行对比试验,其内部设置旋流分离装置(结构与 Chen 等^{[20]108-116}的研究一致),用于强化微通道床层的再生。试验中微通道内分离媒介为纤维束,采用自然堆叠方式形成过滤床层。

试验主要测定仪器:浊度仪 WAB-175,上海雷磁仪器厂;激光粒度仪 LS-609,珠海欧美克仪器有限公司;便携式颗粒计数器 KB-3A,天津市罗根科兴科技有限公司。

1.2.2 试验物料与分析方法

中性地浸采铀全流程溶液中的颗粒物粒径分布范围较窄,浸出液中颗粒物最大粒径小于 100 μm ,其中原液颗粒粒径(D_{50})为 7.23 μm ,98.64%的颗粒粒径小于 25 μm ,整体以细颗粒为主。添加 O_2 或 CO_2 对粒径分布影响不显著,而母液槽中颗粒最大粒径约 40 μm ^{[9]41}。基于粒径分析结果,将过滤精度优化至 10~50 μm ,以有效拦截主导粒径范围的颗粒物,从而缓解矿层堵塞、树脂床层板结及系统压力升高等工艺问题。

浊度测定采用 WAB-175 型浊度仪。检测前,仪器预热 15~30 min,使用 0、10、100 NTU 的福尔马肼标准液进行零点与多点校准;检测时,先用待测浸出液清液润洗比色皿,再装入样品进行测定,平行测量 3 次,取平均值。

粒径分布测定采用 LS-609 型激光粒度仪。依次开启激光器、主机及配套软件,向分散池中加入分散介质,预热 20 min。待测样品稀释至遮光率 10%~20%,添加分散剂并超声分散以破除团聚,设置粒径范围等参数后扣除空白基线,注入样品后启动测量,重复 2~3 次以确保数据重复性。

颗粒计数采用便携式颗粒计数器(KB-3A)。开机后根据样品黏度选择离线检测(直接取样或连接气压瓶式取样器)或在线检测模式。设置冲洗体积(0~90 mL可调),对管路进行自动冲洗,取样体积为 10 mL/次,检测时间约 30 s,仪器自动完成颗粒计数。

1.2.3 试验流程

在某地浸采铀现场进行中试试验,设计处理能力为 50 m^3/h 。工艺流程见图2。试验开始时,井口抽出的浸出液经缓冲罐调节后被送至微通道分离器,去除其中的颗粒物,得到浸出液清液。随后将清液送入吸附塔进行离子吸附,获得的饱和树脂送入后续淋洗工段,吸附尾液去尾液处理工段。

中试试验通过监测微通道出口粒径变化、压差变化来监测装置运行情况。当微通道分离器压差达到一定数值后,系统启动反冲洗程序,在反冲洗水和气源(N_2 /空气)的作用下,使微通道内的分离媒介达到流化状态,实现颗粒的快速脱附和床层的原位再生。该流程集成了微通道技术与吸

附-再生工艺的优势,具备操作连续性强、分离效率高、易于放大等特点。

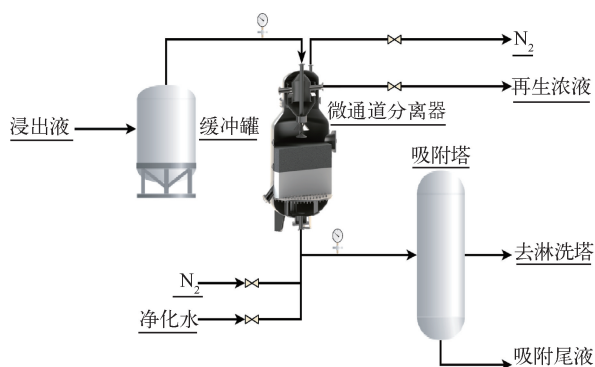


图2 中试试验工艺流程

Fig. 2 Pilot test process and equipment

运行时,将通入布袋过滤器的管道切换到微通道分离器,浸出液经过床层过滤后进入树脂吸附塔进行离子交换。随着处理量累积,当压降升高,且观察到出口视镜水样浑浊时,将管道切换到布袋过滤器,对微通道分离器进行反洗。再生反洗分为两个阶段:先进行单独气洗,以 $75 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量通入 N_2 ,持续 30 min;随后切换为气-水协同反洗,在保持上述气量不变的同时,以 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量注入反洗水,历时 1 h。反洗结束后,关闭进水阀与进气阀。

2 结果与讨论

首次中试运行时间为 5 d,随着颗粒物的累积,床层压降增大,当观察到视镜出口水样出现浑浊时进行反洗,将浸出液切换到布袋过滤器进行过滤。气泵从微通道分离器底部注入 N_2 ,气压为 0.4 MPa,气量为 $75 \text{ m}^3/\text{h}$,水量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,气液混合反冲洗 1 h 后床层反洗完成。将浸出液切换到微通道分离器进行液固分离,运行时观察出水口视镜情况,并检测出口水样中的颗粒去除情况,当观察到视镜出口水样清澈,并且稳定运行无浑浊时,反洗效果良好。

2.1 微通道分离系统运行过滤特性

2.1.1 颗粒物去除性能

在装置稳定运行阶段(2025 年 8 月 16 日至 19 日),微通道分离系统对地浸采铀浸出液中的颗粒物展现出持续且高效的去除性能(表 1)。系统进水颗粒物主要集中在 $1\sim 5 \mu\text{m}$ 粒径段,浓度

范围为 $1.5\times 10^4\sim 2.7\times 10^4$ 个/ 10 mL 。经处理后,粒径 $> 1 \mu\text{m}$ 的颗粒去除效率稳定在 $94.29\%\sim 97.45\%$,粒径 $> 2 \mu\text{m}$ 的颗粒去除率可达 $97.79\%\sim 99.52\%$,而粒径 $> 10 \mu\text{m}$ 的颗粒在出口处基本处于检测下限。尽管进水颗粒浓度波动幅度达 175%,系统整体去除率仍保持在 94% 以上,表明其在颗粒负荷波动条件下具有良好的运行稳定性和工程适用性。

微通道系统对细颗粒物的高效去除得益于其内部受限流动与多机制协同作用。对于 $1\sim 2 \mu\text{m}$ 细颗粒,惯性效应较弱,主要通过表面粘附与局部滞留等机制实现捕集,去除率超过 90%;而对粒径 $> 5 \mu\text{m}$ 的颗粒,惯性碰撞、重力沉降与拦截等机制协同增强,使其接近完全截留。该系统能够为后续吸附工序提供颗粒负荷低且波动可控的进水,有助于降低树脂污染风险、延长吸附系统的运行周期。

2.1.2 浊度去除性能

在连续运行过程中,系统进、出水浊度情况见表 2。结果表明,在整个稳定运行周期内,系统对浸出液浊度具有持续且稳定的削减能力。进水浊度在 $6\sim 33 \text{ NTU}$ 范围内波动,其中 2025-08-17 进水浊度最高,为 32.80 NTU,反映了地浸采铀现场水质受地层条件及运行工况影响较为显著。经系统处理后,出口浊度稳定在 $2.50\sim 9.30 \text{ NTU}$,对应浊度去除率为 $60.13\%\sim 75.00\%$,且出水水质波动幅度明显小于进水水质波动幅度,表明系统对原水水质波动具有一定的缓冲与调节能力。浊度的有效降低主要归因于微通道床层对悬浮颗粒及絮体结构的高效截留作用,系统优先去除对浊度贡献较大的中、大粒径颗粒,即使在高浊度进水条件下,浊度去除率仍保持在 70% 以上,未出现明显性能衰减。

2.1.3 运行压差随时间变化规律

系统运行压差随时间变化规律见图 3。运行初期压差为 0.043 MPa,随后随颗粒在床层内逐步累积导致压差缓慢上升,在运行末期压差约为 0.061 MPa,整体呈连续、平稳增长趋势。尽管运行后期压差增长速率有所加快,但整个运行周期内未出现压差突增或剧烈波动,表明微通道床层内部通道结构保持通畅,未发生局部严重堵塞。压差的逐步升高主要与颗粒在过滤介质表面及孔隙内

持续截留、有效孔隙率降低有关,而微通道分离器良好的结构均匀性与抗堵塞能力使颗粒呈分散累积状态,从而将压差变化控制在合理范围内,保障了系统在稳定运行阶段的处理安全性与可靠性。

表 1 稳定运行阶段进出口颗粒物浓度及其去除率
Table 1 Particulate matter concentration at import and export and their removal rate during stable operation stage

粒径/ μm	颗粒物(2025-08-16)			颗粒物(2025-08-17)		
	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%
>1	1.716×10^5	9.017×10^4	94.74	2.178×10^5	555	97.45
>2	1.499×10^5	4.532×10^3	96.98	1.971×10^5	3.558×10^3	98.19
>5	7.398×10^4	357	99.52	1.102×10^5	696	99.37
>10	2.583×10^4	58	99.78	4.160×10^4	153	99.63
>15	1.092×10^4	18	99.84	1.770×10^4	65	99.63
>25	2.151×10^3	3	99.86	3.608×10^3	13	99.64
>50	89	0	100.00	290	1	99.65
>100	0	0	100.00	0	0	100.00

粒径/ μm	颗粒物(2025-08-18)			颗粒物(2025-08-19)		
	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%
>1	2.756×10^5	1.573×10^4	94.29	1.896×10^5	6.468×10^3	96.59
>2	2.409×10^4	9.816×10^3	95.92	1.579×10^5	4.422×10^3	97.20
>5	9.468×10^4	1.416×10^3	98.50	5.282×10^4	1.169×10^3	97.79
>10	1.714×10^4	245	98.57	8.654×10^3	186	97.85
>15	3.637×10^3	50	98.63	2.534×10^3	51	97.98
>25	301	4	98.67	301	6	98.01
>50	19	2	89.47	17	0	100.00
>100	0	0	100.00	0	0	100.00

表 2 不同运行日期进、出水浊度及浊度去除率
Table 2 Turbidity and turbidity removal rate of inlet and outlet water at different operation dates

日期	进水/NTU	出水/NTU	浊度去除率/%
2025-08-16	10.20	3.16	69.02
2025-08-17	32.80	9.21	71.92
2025-08-18	12.00	3.00	75.00
2025-08-19	8.30	2.57	69.04
2025-08-20	6.32	2.52	60.13

2.2 微通道分离系统床层再生特性

系统累计运行至第 6 天后,微通道床层内颗粒物显著累积,分离性能开始明显衰减。装置于 2025 年 8 月 22—23 日的运行结果见表 3,在连续运行条件下,不同粒径的颗粒物在出口处浓度均显著升高,各粒径段去除效率普遍下降至约 75%~80%。其中,粒径 1~2 μm 颗粒物出口浓度升高至 $2.5\times$

$10^4\sim 4.0\times 10^4$ 个/10 mL,出水出现明显浑浊现象。上述结果表明,此阶段微通道床层内有效孔隙结构已受到较大程度堵塞,系统难以维持稳定、高效的颗粒物控制状态,亟需通过反冲洗恢复分离性能。

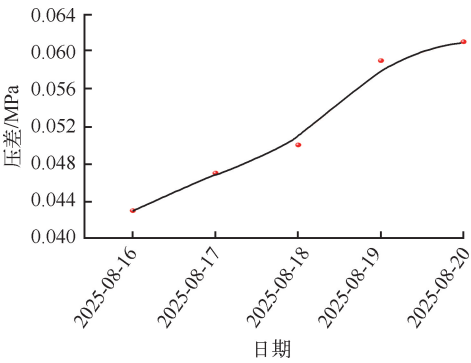


图 3 系统运行压差随时间变化情况
Fig. 3 Changes in system operating pressure differential over time

表 3 2025 年 8 月 22—23 日进出口颗粒物浓度及其去除率

Table 3 Import and export particulate matter concentration and their removal rate from August 22nd to 23rd,2025

粒径/ μm	颗粒物(2025-08-22)			颗粒物(2025-08-23)		
	进口浓度/(个/10 mL)	出口/(个/10 mL)	去除率/%	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%
>1	1.609×10 ⁵	3.745×10 ⁴	76.73	1.481×10 ⁵	3.097×10 ⁴	79.09
>2	1.207×10 ⁵	2.698×10 ⁴	77.65	1.108×10 ⁵	2.260×10 ⁴	79.61
>5	2.464×10 ⁴	5.445×10 ³	77.90	2.288×10 ³	4.612×10 ³	79.84
>10	2.498×10 ³	551	77.94	2.724×10 ³	526	80.69
>15	501	109	78.24	709	126	82.23
>25	47	1	78.72	80	12	85.00
>50	5	1	80.00	5	0	100.00
>100	0	0	100.00	0	0	100.00

针对系统性能衰减问题,采用气-液联合反冲洗方式对微通道床层进行原位再生。反冲洗条件为气压 0.4 MPa、充气 30 min,气量 75 m³/h,并在保持气量条件下以 15 m³/h 水量进行气-液联合反冲洗 1 h。反冲洗完成后系统恢复连续运行,并对不同运行阶段颗粒物去除特性进行监测(表 4)。可以看出,反冲洗结束后,在运行初期(2025-08-24),系统颗粒物去除性能较反洗前有所改善,但整体仍处于恢复阶段,粒径>1 μm 颗粒去除效率为 71.29%;粒径>5 μm 颗粒去除效果尚未完全恢复。这是由于反冲洗后滤料的堆叠

不太紧密,导致过滤效果较差。随着运行时间延长,床层逐渐压实,系统分离性能迅速提升,至 2025-08-25,粒径>1 μm 颗粒去除效率提高至 91.54%,粒径>2 μm 与粒径>5 μm 颗粒去除率分别达到 93.25%和 97.18%;在 2025-08-26、2025-08-27 运行阶段,各粒径段颗粒去除率进一步趋于稳定,其中粒径>1 μm 颗粒去除率维持在 84.59%~91.54%,粒径>5 μm 颗粒去除率普遍超过 95%,部分粒径段接近 99%,整体呈现出“逐步恢复-快速提升-稳定维持”的变化特征。

表 4 2025 年 8 月 24—27 日进出口颗粒物浓度及系统颗粒物去除率

Table 4 Import and export particulate matter concentration and their removal rate from August 24th to 27th,2025

粒径/ μm	颗粒物(2025-08-24)			颗粒物(2025-08-25)		
	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%
>1	1.044×10 ⁵	2.998×10 ⁴	71.29	1.522×10 ⁵	1.288×10 ⁴	91.54
>2	7.637×10 ⁴	2.160×10 ⁴	71.72	1.234×10 ⁵	8.326×10 ³	93.25
>5	1.626×10 ⁴	4.452×10 ³	72.62	4.224×10 ⁴	1.193×10 ³	97.18
>10	2.414×10 ³	552	77.13	8.316×10 ³	153	98.16
>15	769	159	79.32	2.190×10 ³	39	98.22
>25	118	16	86.44	246	4	98.37
>50	10	1	90.00	10	0	100.00
>100	0	0	100.00	0	0	100.00

粒径/ μm	颗粒物(2025-08-26)			颗粒物(2025-08-27)		
	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%	进口浓度/(个/10 mL)	出口浓度/(个/10 mL)	去除率/%
>1	7.855×10 ⁴	1.211×10 ⁴	84.59	1.714×10 ⁵	1.768×10 ⁴	89.69
>2	5.900×10 ⁴	8.896×10 ³	84.92	1.492×10 ⁵	1.018×10 ⁴	93.18
>5	1.993×10 ⁴	2.604×10 ³	86.93	6.953×10 ⁴	875	98.74
>10	6.019×10 ³	755	87.46	1.822×10 ⁴	143	99.22
>15	2.436×10 ³	286	88.26	5.376×10 ³	38	99.29
>25	509	59	88.41	566	3	99.47
>50	24	2	91.67	22	0	100.00
>100	0	0	100.00	0	0	100.00

反冲洗对不同粒径颗粒物的恢复效果存在一定差异。反冲洗后,粒径 $>10\text{ }\mu\text{m}$ 中、大粒径颗粒在出口处迅速降至检测下限,而 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 细颗粒仍存在一定残留,但其浓度明显低于反冲洗前水质恶化阶段,并随着运行时间的延长而逐渐下降。该现象表明,气-液联合反冲洗可通过两相耦合扰动在微通道内形成周期性旋流与脉动剪切力,有效削弱颗粒与通道壁面的粘附作用,促使颗粒脱附并被带出系统,从而恢复床层有效孔隙率与通流能力。反冲洗完成后的运行初期,由于床层结构与局部流场尚未完全重构,细颗粒去除效果相对滞后;随着运行持续,稳定截留结构逐步形成,各分离机制重新协同作用,使系统颗粒物去除性能快速恢复并保持稳定。

2.3 微通道分离与布袋过滤器分离效果对比

为进一步评估微通道分离技术在地浸采铀浸出液预处理中的应用优势,将其与现场常用的布袋过滤器从出口颗粒物粒径分布特征及样品宏观形态两个方面进行了对比分析,结果见图4。可以看出,两种装置在出口颗粒物粒径组成上存在显著差异。微通道分离器出口颗粒物主要集中于亚微米至微米尺度,其体积分布峰值主要位于 $400\text{ nm}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$,且分布范围相对集中;当粒径 $>2\text{ }\mu\text{m}$ 时,颗粒物体积分数迅速降低,表明中、大粒径颗粒在微通道分离过程中已被有效截留。相比之下,布袋过滤器出口颗粒物粒径分布整体向大粒径方向偏移,主要集中在 $1\sim 20\text{ }\mu\text{m}$,并在约 $10\sim 11\text{ }\mu\text{m}$ 处出现明显峰值,表明在布袋过滤工况下,中、大粒径颗粒仍有一定比例进入出口侧。对微通道分离器出口和布袋过滤器出口水进行取样,对比发现,微通道分离器出口样品整体透明度较高,仅在局部区域观察到少量细小颗粒沉积,颗粒尺寸较小且分布分散,未形成明显团聚结构;而布袋过滤器出口样品中可见较多颗粒附着与沉积现象,样品整体浑浊度较高,反映出其出口水体中仍含有一定比例的中、大粒径颗粒。

上述宏观形态特征与粒径分布分析结果具有良好的 consistency,进一步验证了两种装置在颗粒控制效果上的差异。

两种技术在出口颗粒物特征上的差异,本质上源于其分离机理的不同。微通道分离技术依托微尺度通道结构及受限流动条件,通过惯性偏移、几何拦截及表面粘附等多种机制的协同作用,对

颗粒物表现出显著的粒径选择性分离效应。其中,中、大粒径颗粒因惯性效应更为显著,易在微通道内发生偏移、碰撞与沉积,从而被高效去除,仅有少量细颗粒随流体进入出口侧。相比之下,布袋过滤器主要依赖纤维孔隙结构对颗粒物进行机械拦截,其过滤效果对滤袋孔径及运行状态高度敏感。在长期运行或局部再释放条件下,中、大粒径颗粒可能因滤料变形、局部穿透或再悬浮等原因进入出口侧,导致出口颗粒物粒径分布向较大尺度延伸。

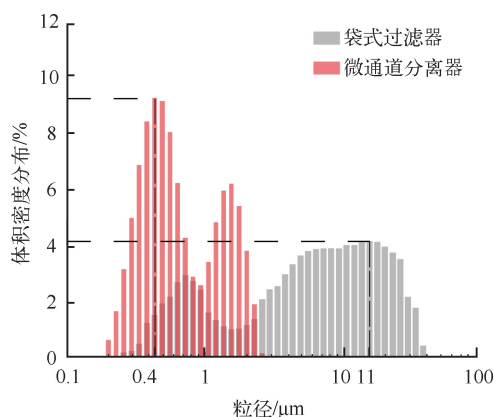


图4 微通道分离器与袋式过滤器出口颗粒体积密度分布对比

Fig. 4 Comparison of particle volume density distribution at outlet of microchannel separator and bag filter

综合粒径分布与宏观形态分析结果可以看出,微通道分离技术在降低出口中、大粒径颗粒含量方面具有显著优势,其出口颗粒物以亚微米级细颗粒为主,更有利于后续吸附单元的稳定运行;而布袋过滤器出口仍存在一定比例的微米级及以上颗粒,在高要求工况下可能对离子交换树脂造成污染风险,缩短吸附系统的有效运行周期。

3 结论与展望

3.1 结论

围绕微通道分离系统的运行性能,系统研究了不同运行阶段的颗粒物粒径去除特性、浊度变化规律、运行压差演变特征,以及反冲洗过程对系统性能恢复的影响,并对微通道分离与传统布袋过滤的出口粒径特性进行了对比分析,主要结论如下:

1)微通道分离系统在地浸采铀浸出液净化中

表现出优异的颗粒物去除能力,在稳定运行阶段,对粒径 $>1\ \mu\text{m}$ 颗粒物去除效率高于94%,对粒径 $>5\ \mu\text{m}$ 颗粒物去除效率接近100%。

2)系统在不同进水浊度条件下均可实现稳定降浊,运行压差随时间缓慢增长且无突变,装置具备良好的运行稳定性。

3)反冲洗操作能够有效恢复过滤介质孔隙结构,使系统颗粒物去除性能逐步回升并保持在较高水平,微通道分离技术具有在线再生优势。

4)与传统布袋过滤器相比,微通道分离技术在中、大粒径颗粒控制方面具有明显优势,可显著改善出水洁净度。

3.2 展望

后续研究可围绕长周期运行与多轮反冲洗策略优化、超细颗粒($<1\ \mu\text{m}$)控制机理、系统能耗与经济性评估,以及微通道分离与传统过滤工艺的协同耦合等方面展开,以进一步推动该技术在浸采铀工程中的规模化应用。

参考文献:

- [1] 苏学斌,原渊,贾秀敏,等.我国铀水冶技术现状与展望[J].核化学与放射化学,2025,47(4):313-326.
Su Xuebin, Yuan Yuan, Jia Xiumin, et al. Review and prospect of uranium hydrometallurgy in China[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2025, 47(4):313-326.
- [2] 苏学斌,田野,任宇,等.先进地浸采铀技术与“国铀一号”工程[J].核科学与工程,2025,45(5):819-831.
Su Xuebin, Tian Ye, Ren Yu, et al. Advanced in-situ leaching uranium technologies and the national No.1 uranium production project[J]. Nuclear Science and Engineering, 2025, 45(5):819-831.
- [3] 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),2025,25(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, 25(10):39-52.
- [4] 田爽,曹俊鹏,呼日乐,等.某地浸采铀矿山水冶体系固体颗粒物去除方法研究与工艺优化[J].铀矿冶,2026,45(1):91-97.
Tian Shuang, Cao Junpeng, Hu Rile, et al. Solid particulate removal methods and process optimization in the hydrometallurgical system of an in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2026, 45(1):91-97.
- [5] 姚益轩,王亚安,胥国龙,等.地浸采铀注液井小直径潜水泵抽水洗井试验[J].铀矿冶,2024,43(1):27-35.
Yao Yixuan, Wang Ya'an, Xu Guolong, et al. Well washing test of small diameter submersible pump in injection wells for in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(1):27-35.
- [6] 高尚,廖文胜,王立民,等.颗粒计数器在地浸采铀中的应用研究[J].铀矿冶,2022,41(2):132-136.
Gao Shang, Liao Wensheng, Wang Limin, et al. Study on application of particle counter in in-situ leaching uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(2):132-136.
- [7] 廖文胜,王立民,姚益轩,等.某低渗透砂岩铀矿层渗透性能损害因素分析[J].金属矿山,2009,38(S1):305-310.
Liao Wensheng, Wang Limin, Yao Yixuan, et al. Impact factors of permeability of low permeable sandstone uranium deposits[J]. Metal Mine, 2009, 38(S1):305-310.
- [8] 龙清,刘安琴,于素芹,等.提高某铀矿铀回收率的工艺改进措施[J].中国矿业,2017,26(9):142-147.
Long Qing, Liu Anqin, Yu Suqin, et al. Some improvement in the technologies for increasing the metal recovery in a certain uranium mine[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(9):142-147.
- [9] 王亚安,原渊,程威,等.中性地浸采铀全流程溶液中颗粒粒径分布及过滤建议[J].铀矿冶,2024,43(2):39-46.
Wang Ya'an, Yuan Yuan, Cheng Wei, et al. Particle size distribution and filtration suggestions in the whole process solution of neutral in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2):39-46.
- [10] 侯彦龙,耿龙,王伟,等.含铀废液预处理技术的研究和应用[J].铀矿冶,2025,44(1):144-150.
Hou Yanlong, Geng Long, Wang Wei, et al. Research and application of pretreatment technology for uranium containing waste liquid[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(1):144-150.
- [11] 王海峰.中国原地浸出采铀发展史:第三部分:技术进步,创新发展[J].有色金属(冶炼部分),2026(1):160-173.

- Wang Haifeng. History of in-situ leaching of uranium in China: Part III: Technological progress, innovation and development [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(1):160-173.
- [12] Ma H P, Li J P, Hu X P, et al. On-site source-separation of microparticles and reuse of coal gasification wastewater via a micro-channel separator: Performance and separation mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 341:126565.
- [13] 付鹏波, 田金乙, 吕文杰, 等. 物理法水处理技术[J]. 化工学报, 2022, 73(1):59-72.
- Fu Pengbo, Tian Jinyi, Lyu Wenjie, et al. Physical water treatment technology [J]. CIESC Journal, 2022, 73(1):59-72.
- [14] 周渝, 田磊, 黄海涛, 等. 深层过滤运行性能调控方法及实验验证 [J]. 化工进展, 2025, 44 (7): 3737-3747.
- Zhou Yu, Tian Lei, Huang Haitao, et al. Deep filtration operation performance control method and experimental validation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(7):3737-3747.
- [15] 黄起中, 刘冰, 马红鹏, 等. 基于新型微通道分离技术的甲醇制烯烃废水处理 [J]. 化工进展, 2023, 42 (2):669-676.
- Huang Qizhong, Liu Bing, Ma Hongpeng, et al. Methanol to olefin wastewater treatment based on a novel microchannel separation technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2):669-676.
- [16] 周渝, 唐甜, 熊子悠, 等. 基于两级微通道分离工艺的甲醇制烯烃废水深度处理 [J]. 化工进展, 2025, 44(1):100-108.
- Zhou Yu, Tang Tian, Xiong Ziyu, et al. Methanol to olefin wastewater treatment based on a two-stage microchannel separation process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44 (1): 100-108.
- [17] 周渝, 夏太阳, 韦奇, 等. 微通道耦合反渗透膜串联处理甲醇制烯烃废水工艺优化 [J]. 化工进展, 2024, 43(增刊 1):43-51.
- Zhou Yu, Xia Taiyang, Wei Qi, et al. Optimization of micro-channel coupled reverse osmosis membrane series treatment of methanol to olefin wastewater[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(S1):43-51.
- [18] 林春阳, 陈建琦, 吴文锋. DMTO 与 SMTO 急冷水沸腾床过滤技术应用及对比研究 [J]. 石油炼制与化工, 2025, 56(7):39-48.
- Lin Chunyang, Chen Jianqi, Wu Wenfeng. Application and comparative study on ebullated bed filtration technology for DMTO and SMTO quench water[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2025, 56(7):39-48.
- [19] Dai L, Shan M J, Li J P, et al. Purification and reuse of carbon black wastewater of acetylene production from natural gas by microchannel filtration [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 162:219-229.
- [20] Chen J Q, Wang L, Ma S H, et al. Separation of fine waste catalyst particles from methanol-to-olefin quench water via swirl regenerating micro-channel separation (SRMS): A pilot-scale study [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 152:108-116.

Pilot Test on Purification of Pregnant Solution of In-situ Leaching Uranium Based on Microchannel Separation Technology

LIU Tianyin¹, LI Xilong¹, RUAN Zhilong¹, DONG Huiqi¹, YANG Danhui², LYU Wenjie²

(1. Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China;

2. National Engineering Research Center for Harmless and Resourceful Utilization of Industrial Wastewater, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The pregnant solution produced by the neutral in-situ leaching uranium process often contains a large amount of fine particles, which can easily lead to problems such as the decrease of ion exchange rate of subsequent ion exchange resins, the decrease of resin adsorption capacity, and frequent cleaning cycles. Aiming at the bottleneck of low removal efficiency and insufficient operation stability of traditional solid-liquid separation technology for fine particles, this study introduced a microchannel separation technology based on the coupling enhancement mechanism of microchannel adhesion separation—oscillation desorption, and carried out field pilot test. The experimental results show that the removal efficiency of particles with particle size $>1\ \mu\text{m}$ is higher than 94 %, and the removal efficiency of particles with particle size $>5\ \mu\text{m}$ is close to 100%. Under different influent turbidity (6–33 NTU) conditions, the effluent turbidity was stable at 2–9 NTU, and the removal rate was maintained 60%–75%. The operating pressure difference of the system increased slowly with the accumulation of particles. After 8 days of stable operation of the device, the removal efficiency of particles with particle size $>1\ \mu\text{m}$ decreased to 70 %. In order to restore the separation performance of the system, the device was backwashed. After backwashing, the removal ability of particles with particle size $>5\ \mu\text{m}$ was quickly restored. Compared with the conventional bag filter, the particles at the outlet of the microchannel separator are mainly distributed in the sub-micron to micron scale, and the medium and large particle sizes are significantly reduced. This study provides experimental basis and technical support for the engineering application of microchannel separation technology in the pretreatment of pregnant solution of in-situ leaching uranium.

Key words: in-situ leaching of uranium; pregnant solution; microchannel separation; oscillation desorption; solid-liquid separation; particle size; fine particles; pressure drop; turbidity; volume distribution