

中性地浸采铀全流程溶液中颗粒粒径分布及过滤建议

王亚安¹, 原渊¹, 程威¹, 李光辉², 张欢², 赵利信¹, 邹玉涵¹, 霍建党¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;
2. 中核内蒙古矿业有限公司, 内蒙古 呼和浩特 014010)

摘要: 掌握中性地浸采铀全流程溶液中颗粒大小, 对调控浸出过程、优选过滤器、确定除固位置、缓解矿层堵塞、恢复抽注液量和减轻树脂床层板结等具有指导意义。以内蒙古纳岭沟矿床中性地浸采铀全流程溶液为对象, 基于激光粒度仪测试数据, 获取了全流程溶液中颗粒粒径分布规律。结果表明, 浸出液中颗粒粒径频率分布曲线呈非对称性, 累计分布曲线呈“S”型, 粒径分布范围窄, 最大颗粒粒径 $<100\ \mu\text{m}$; 树脂床层对颗粒物有较强的过滤作用, 吸附尾液过滤器的滤袋精度应根据树脂粒径大小和系统压力确定; 中性体系中加入的 O_2 或 CO_2 对颗粒粒径影响微弱; 淋洗合格液和沉淀罐中母液的颗粒粒径频率分布曲线均呈“双峰”型, 贫液中颗粒粒径频率则呈正态分布; 母液槽中颗粒最大粒径约为 $40\ \mu\text{m}$ 。建议该矿床原液袋式过滤器的滤袋精度选用 $10\sim 50\ \mu\text{m}$, 同时在母液槽与淋洗剂配制罐之间增加 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 精度的过滤器。

关键词: 中性地浸采铀; 全流程; 粒径; 频率分布; 累计分布; 地表过滤

中图分类号: TD853; TQ028; TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0039-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.12.02

砂岩铀矿是中国主要的天然铀资源类型, 原地浸出采铀(简称地浸采铀)是砂岩铀矿开发的首选工艺^[1-2]。中性地浸采铀以 O_2 和 CO_2 配制浸出剂, 具有浸出环境温和、资源回收率高、对地下水环境影响小等优点^[3-5], 已成为中国第三代铀矿采冶技术的核心工艺。

掌握中性地浸全流程溶液中颗粒大小, 对调控浸出过程、优选过滤器、确定除固位置、缓解矿层堵塞、恢复抽注液量和减轻树脂床层板结等具有指导意义。碳酸盐、黏土矿物、中性地浸过程中的化学堵塞是影响含矿层渗透性的主要因素^[6]; 物理/机械堵塞也是造成含矿层堵塞的重要原因, 尤其是在浸出前期, 颗粒物在水动力作用下经由钻井内过滤器进入井管, 被提升至地表, 并经地表过滤器和离子交换塔树脂床分离后残留的碎屑仍会引起含矿层堵塞^[7]。利用颗粒计数器对某地浸采区的注液袋式过滤器前后及注液砂滤塔前后尾液中颗粒的研究表明, 尾液中颗粒粒径主要集中在 $5\sim 10\ \mu\text{m}$,

砂滤塔对 $20\ \mu\text{m}$ 以上颗粒物的过滤性能更优^[8]。

截至目前, 尚未见对中性浸出全流程溶液中颗粒物粒径的研究报道。为此, 以内蒙古纳岭沟矿床中性地浸采铀全流程溶液为研究对象, 利用激光粒度仪获取溶液中颗粒粒径分布, 旨在揭示纳岭沟矿床全流程溶液中颗粒粒径分布规律, 丰富对中性地浸采铀颗粒物粒径认识, 为矿山优化地表过滤技术提供指导。

1 地浸采铀固体颗粒物的影响

地浸采铀整体流程体系可用“两个循环”简要描述(图1)。在地浸采铀全流程工序中, 固体颗粒物的存在严重影响工艺运行, 主要体现在: 1) 造成矿层堵塞^[9-11], 增大注液压力, 降低抽注液量; 2) 进入离子交换塔包裹树脂球, 降低树脂吸附性能; 3) 使树脂床层板结^[12], 升高离子交换塔塔压, 降低交换塔处理能力; 4) 过滤设备(袋式过滤器或砂滤塔)滤袋更换或反冲洗操作频繁。

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 中核集团青年英才项目(地浸采铀新型地表固液分离系统研发及应用)。

第一作者简介: 王亚安(1994—), 男, 山西介休人, 博士, 高级工程师, 主要从事地浸采铀和化工机械科研工作。

通信作者简介: 程威(1979—), 男, 河南郑州人, 学士, 正高级工程师, 主要从事铀矿地浸技术研究。

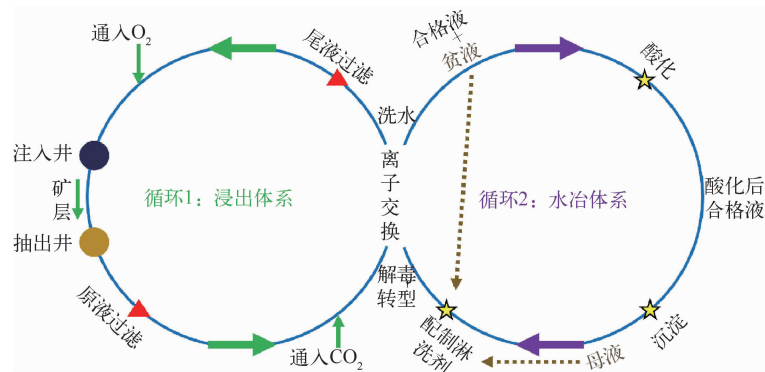


图 1 中性地浸采铀全流程溶液体系

Fig. 1 Whole process solution system of neutral in-situ leaching of uranium

通常认为,固体颗粒物的主要来源是抽出井。当含矿层地下水从天然流场条件转变为抽注浸出流场条件时,其流速可快速提高几十、上百倍,造成抽出井周边含矿层中失稳碎屑的迁移和析出,并被浸出液夹带;若地表过滤器分离效果不高,颗粒物则会在地浸全流程体系中循环。同时,伴随体系中水与围岩作用、溶液酸碱度、压力、温度等变化,还会有部分化学沉淀物的溶解或析出。

2 试验方法

2.1 试验样品

内蒙古纳岭沟铀矿地浸试验采用中性浸出工艺,当前注液压力为 0.8 MPa,浸出原液和吸附尾液均利用快开式袋式过滤器,滤袋精度为 100 μm 。该试验点采用闭式循环系统,各单井浸出液进入集液总管后,直接进入原液过滤器分离固相,滤液随后进入吸附塔进行铀的吸附和后续水冶工序。

根据图 1 所示的中性地浸体系,在纳岭沟铀

矿地浸试验点按流程取水样。为保证取样具有代表性,取样量统一为 150 mL,通过设置的管路取样嘴或将设备内介质搅拌均匀(如酸化槽、沉淀罐等)后利用取样器取样。

2.2 试验设备

粒度测试的仪器和方法较多^[13-14],激光粒度仪具有速度快、量程宽、操作简便、重现性和准确性好等特点,是最广泛的粒度测量仪器。Mie 散射理论定量描述了颗粒直径及含量与其产生的散射光角度和强度的关系,颗粒越小,产生散射光的角度越大,激光粒度仪根据 Mie 散射理论^[15]测量粒度分布。

激光粒度仪型号:BT-9300S,技术指标见表 1。其是采用双镜头光学系统的一种高性能激光粒度仪,由半导体激光器发出的一束激光,经滤波、扩束、准值后变成一束平行光;在该平行光束中放置样品池,在准直透镜焦平面的前向、侧向和后向分别放置一组散射光探测器,并将探测器的信号传输到计算机中进行反演计算,便可得到所测样品的粒度分布。基本原理见图 2。

表 1 BT-9300S 激光粒度仪部分性能指标

Table 1 Partial performance indicators of BT-9300S laser particle size analyzer

项目	技术指标	项目	技术指标
测试范围	0.1~1 200 μm	光路系统	双镜头
重复性误差	$\leq 1\%$	激光光源	半导体,波长 635 nm
准确性误差	$\leq 1\%$	光电探测器个数	86 个
进样方式	自动循环分散系统	超声波功率	1~50 W

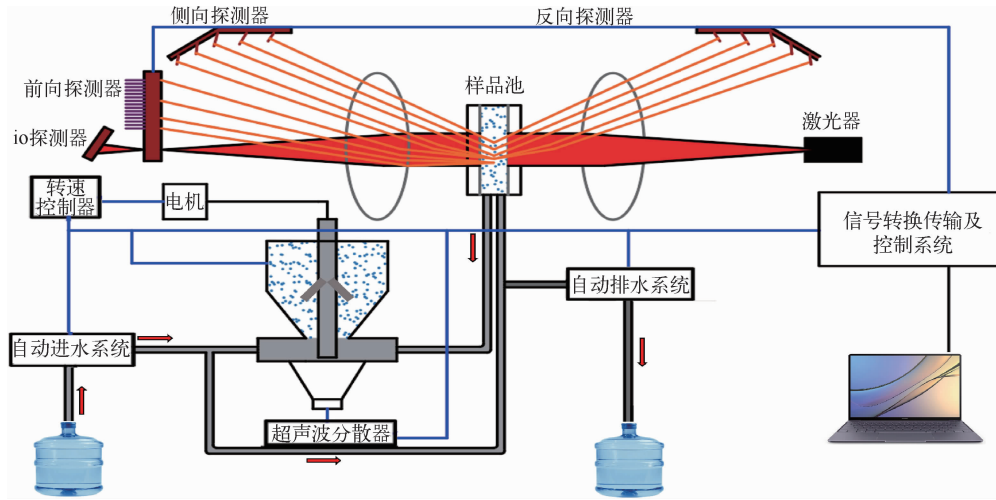


图 2 激光粒度仪测试原理图

Fig. 2 Testing principle diagram of laser particle size analyzer

3 试验结果与讨论

溶液中颗粒物受重力作用会沉降到容器底部,测试前需利用磁力搅拌器将溶液搅拌均匀,并利用滴管吸取被测物少量多次地滴入激光粒度仪样品池,使被测物处于设备预设的遮光率范围内;同时开启测试设备的“循环”通道和“超声波分散”通道,通过“实时窗口”查看关键粒径参数是否稳定;待数值稳定后开启“测量”通道进行测量并保存数据。

3.1 抽出井浸出原液中颗粒粒径

抽出井(SYC-2C)浸出原液中颗粒粒径频率分布和累计分布见图 3,各粒径区间的详细数据见表 2。可以看出,该钻井浸出原液中颗粒粒径频率分布曲线呈非对称性,累计分布曲线呈“S”型;粒径范围为 0.195~41.91 μm ,体积平均径为 8.731 μm ,粒径 $\leq 7.232 \mu\text{m}$ 的颗粒数占总颗粒数的 50%,粒径 $\leq 25 \mu\text{m}$ 的颗粒数占总颗粒数的 98.64%。从单井数据看,该矿床原液袋式过滤器采用 100 μm 规格滤袋并不合适。

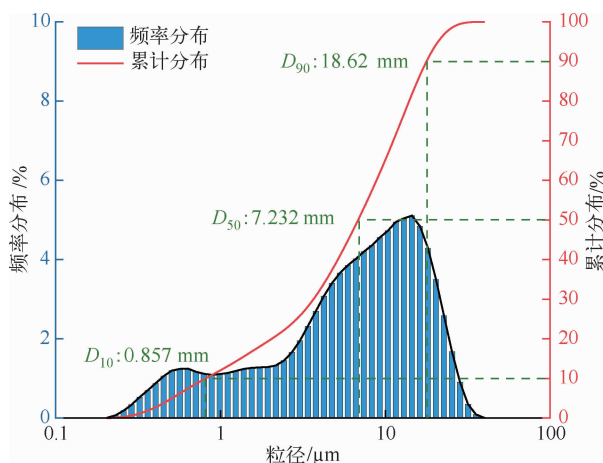


图 3 抽出井(SYC-2C)浸出液颗粒粒径频率分布和累计分布
(D_x 指累计分布达 $x\%$ 时对应的粒径值)

Fig. 3 Frequency and cumulative distribution of particle size in leaching solution of the extraction well (SYC-2C)
(D_x refers to the particle size value corresponding to a cumulative distribution of $x\%$)

表 2 抽出井(SYC-2C)浸出液颗粒粒径区间分布
Table 2 Particle size distribution of leaching solution in the extraction well (SYC-2C)

粒径范围/ μm	频率/%	累计/%
<5	37.26	37.26
5~<10	24.66	61.92
10~<15	19.83	81.75
15~<20	12.63	94.38
20~<25	4.26	98.64
25~<30	0.91	99.55
30~<35	0.35	99.90
35~<40	0.09	99.99
40~<45	0.01	100
体积平均径/ μm	8.731	

其他典型抽出井浸出液中颗粒粒度参数见表 3。可以看出,1-0-12C 井浸出液颗粒粒径分布最广,最大粒径达 280 μm ;但 90% 的颗粒粒径在 90 μm 以下,粒径大于 100 μm 的颗粒数不及 7%。该矿床浸出液总体较为清洁,最大颗粒粒径小于 50 μm ,即便 1-12-1C 井水样为刚洗井(洗井方式:双氧水+稀盐酸)后进入系统的较为浑浊的浸出液,其最大粒径也小于 100 μm 。因此,建议该矿床原液袋式过滤器滤袋精度选用 10~50 μm 规格;若考虑系统压力降,可选择 30 μm 或 50 μm 精度。

3.2 其他过程溶液的颗粒粒径

采用相同测量方式对其他过程溶液进行粒度

测试,结果见表 4。可以看出,浸出液集合样经过滤后,颗粒粒径<50 μm ,体积平均径<10 μm ;溶液中加入 CO_2 后,其颗粒粒径范围与加气体前基本一致。由于时间尺度小,碳酸盐类物质尚未溶解。事实上,过滤后的原液在进塔吸附前加注 CO_2 是为了降低溶液 pH,以减轻离子交换塔中树脂板结程度;而经过吸附塔树脂床层的强化过滤作用,尾液清澈透亮,颗粒粒径也低于仪器检测下限。换言之,尾液过滤器的作用主要是拦截固定床离子交换塔内逃逸的树脂球,这也说明尾液过滤器滤袋精度应根据水冶工艺所选用的树脂球粒径来确定。该矿山使用的树脂型号为 D231-YT 型,粒径为毫米级,故当前尾液过滤器滤袋精度选 100 μm 理论上可行。

注液过滤后颗粒增多,其原因是:为使洗井水不外排,纳岭沟铀矿将某一吸附塔当作过滤塔使用,洗井水抽出地表后直接进入该塔进行过滤,过滤后的洗井水则直接汇入尾液总管,再通过尾液过滤器过滤后注入钻井。本次取样时,尾液过滤器滤袋并未更换,尽管系统中其他吸附塔的尾液较为洁净;但尾液过滤器由于此前拦截了部分洗井水颗粒,因此在尾液过滤器后检测到少部分颗粒物。另外,尾液加入 O_2 后,检测到的颗粒数也有所增多,其主要原因是:该部分样品取自地浸井场注入井排气口,由于 O_2 属非极性气体,溶解度低,常规运行时存在“气堵”致使注入井注液流量下降的现象,地浸矿山几乎都在井场注入井套管外设置了排气口;而从排气口取样时,容易取到注入井套管内存在的颗粒物。

表 3 其他典型抽出井浸出液激光粒度测试结果

Table 3 Laser particle size test results of leaching solution from other typical extraction wells

名称	关键指标/ μm				
	粒径范围	D_{10}	D_{50}	D_{90}	体积平均径
浸出液(井号 1-0-12C)	0.195~280.4	1.490	16.40	89.99	32.90
浸出液(井号 SYC-2C)	0.195~41.91	0.857	7.232	18.62	8.731
浸出液(井号 1-7-14C)	0.382~23.96	0.710	1.294	4.967	2.210
浸出液(井号 1-8-1C)	0.427~41.91	0.678	1.116	2.369	1.768
浸出液(井号 1-12-1C)	0.382~91.67	0.799	1.834	5.841	3.186

表4 纳岭沟铀矿床全流程溶液激光粒度测试结果

Table 4 Laser particle size test results of the whole process solution of the Nalinggou uranium deposit

名称	关键指标/ μm				
	粒径范围	D_{10}	D_{50}	D_{90}	体积平均径
浸出液过滤后	0.195~31.47	1.054	7.538	21.04	9.638
浸出液过滤后加 CO_2	0.244~42.41	0.728	3.624	19.14	7.983
吸附塔尾液	低于仪器检测下限(折光率低)				
注液过滤后	0.218~65.55	1.241	16.15	38.34	18.20
注液过滤加 O_2	0.218~73.30	3.443	22.06	47.21	21.56
酸化前合格液	0.305~2.047	0.464	0.769	1.395	0.859
贫液	0.427~3.201	0.657	0.967	1.504	1.033
酸化后合格液	0.218~1.636	0.282	0.795	1.170	0.722
母液-沉降罐上层	0.218~1.636	0.292	0.888	1.215	0.812
母液-母液槽	0.218~37.47	0.753	19.49	27.52	16.35
淋洗剂	0.273~15.32	1.293	4.386	8.290	4.644
淋洗后反冲液	0.244~52.41	1.936	3.624	19.14	6.983
解毒剂	低于仪器检测下限(折光率低)				
解毒后反冲液	0.244~102.5	0.861	4.557	26.69	9.886

纳岭沟铀矿采用的离子交换塔属密实固定床,其树脂床层紧密压实,树脂间隙则为浸出液通道,可过滤部分细颗粒,也易造成树脂污染(图4)。对离子交换塔进行反冲洗可缓解该现象,这也进一步说明选择合适原液过滤器的重要性。此外,不排除部分细颗粒仍会穿过离子交换塔塔底内部的过滤器(如绕丝过滤器)再次进入含矿层造成堵塞。因此,从这个角度考虑,尾液过滤器的过滤精度应适度提高。

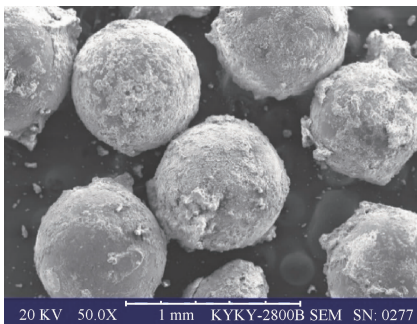


图4 离子交换树脂表面粘附泥砂现象

Fig. 4 Adhesion of mud and sand on the surface of ion exchange resin

3.3 淋洗合格液和贫液中颗粒粒径

淋洗合格液和贫液中的颗粒粒径分布见图5。可以看出,合格液在酸化前后,其最大粒径($<5 \mu\text{m}$)、体积平均径($<1 \mu\text{m}$)基本不变,频率分布曲线均呈“双峰”型;但酸化后峰值粒径有所增大。贫液中颗粒粒径频率分布曲线呈典型的正态分布,峰值粒径为 $0.922 \mu\text{m}$ 。

合格液和贫液中的颗粒粒径,与饱和树脂外表面粘附的泥砂或板结现象,以及淋洗塔内底部过滤器有关,同时受淋洗剂中颗粒的影响。在中性地浸中,淋洗剂由“ $\text{NaHCO}_3 + \text{NaCl} + \text{母液}$ ”配制。由表4可知,淋洗剂中颗粒粒径分布范围为 $0.273 \sim 15.32 \mu\text{m}$,平均粒径 $<5 \mu\text{m}$ 。

3.4 母液中颗粒粒径

沉降罐上层母液和母液槽中母液的颗粒粒径频率分布和累计分布曲线见图6。可以看出,沉降罐中母液颗粒粒径频率分布为“双峰”型,粒径范围较窄,为 $0.218 \sim 1.636 \mu\text{m}$;母液槽中母液颗粒最大粒径接近 $40 \mu\text{m}$,峰值粒径为 $22.91 \mu\text{m}$,曲线分布不规则。

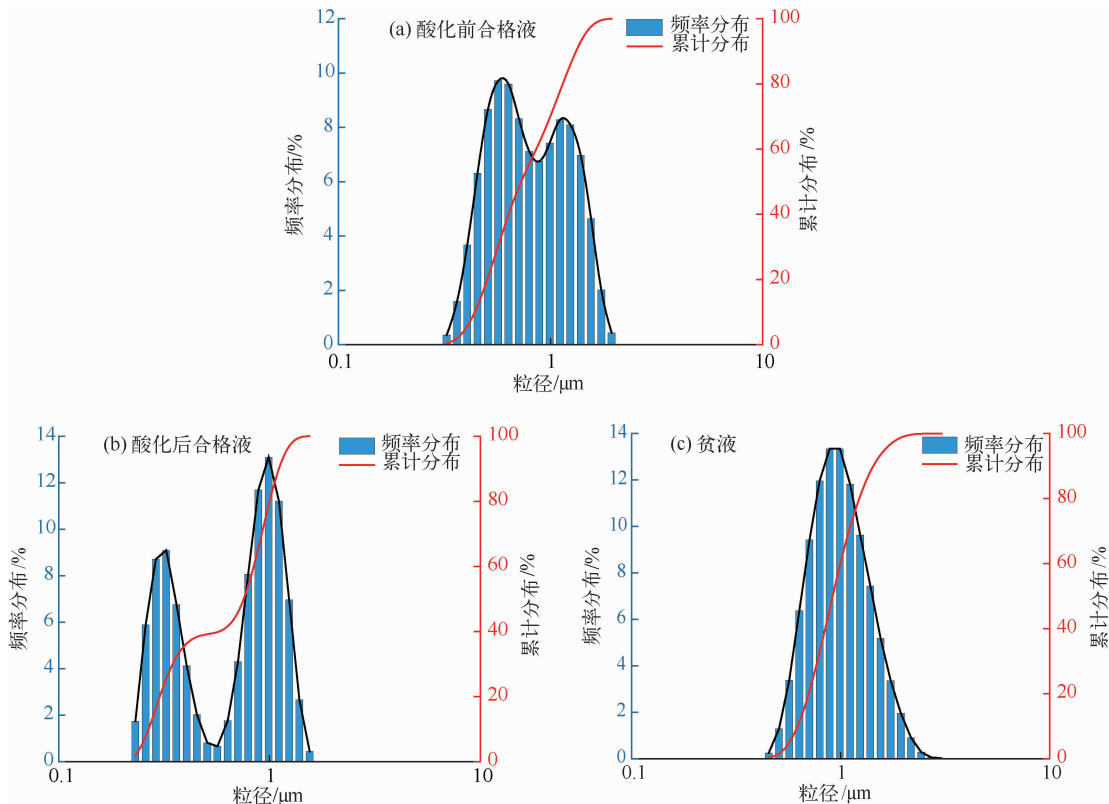


图 5 合格液与贫液中颗粒粒径频率分布和累计分布

Fig. 5 Frequency and cumulative distribution of particle size in qualified and lean solutions

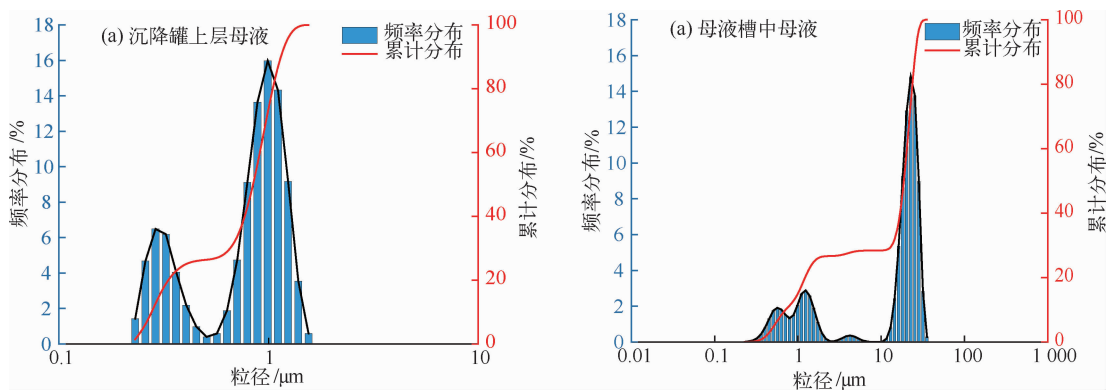


图 6 母液中颗粒粒径频率分布和累计分布

Fig. 6 Frequency and cumulative distribution of particle size in mother liquor

母液槽中的母液主要有 2 个来源:1)前序沉降罐中的上清液,相对洁净;2)后序板框压滤制备产品时产生的滤液,由于压滤初期易发生“穿滤”现象,导致有部分小颗粒浆体进入母液槽。沉降罐中重铀酸钠浆体的平均粒径为 $6.75 \mu\text{m}$,小粒径($2 \sim 5 \mu\text{m}$)占比为 33.47% ^[16]。鉴于此,建议

在母液槽与淋洗剂配制罐之间增加 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 精度的过滤器,这有利于保证母液清洁,进而保证淋洗剂洁净。

3.5 解毒剂与反冲液中颗粒粒径

饱和树脂经淋洗后循环利用,需配制解毒剂进行解毒转型,解毒剂的成分主要为 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl} +$

H₂O,本研究所取样品中颗粒粒径低于仪器检测下限。淋洗后反冲液以及解毒后反冲液中的颗粒粒径分布则较广,大粒径占比多;反冲液一般处理后排入废水罐和蒸发池。

4 结论

中性地浸采铀全流程体系可用“两个循环”表示,对内蒙古纳岭沟铀矿床全流程溶液进行了粒度测试,得到如下结论:

1)浸出液中颗粒粒径频率分布曲线呈非对称性,累计分布曲线呈“S”型,粒径分布范围窄,最大颗粒粒径<100 μm。建议该矿床原液袋式过滤器的滤袋精度为10~50 μm。

2)离子交换塔树脂床层对颗粒物有很强的过滤作用,尾液过滤器滤袋精度应根据水冶工艺所选用的树脂球粒径和系统压力来确定。

3)“循环1”加入O₂或CO₂对溶液中的颗粒粒径影响微弱。

4)淋洗合格液与沉降罐中母液的颗粒粒径频率均呈“双峰”分布,贫液颗粒粒径频率则呈正态分布;母液槽中颗粒最大粒径约为40 μm,曲线分布不规则。建议在“循环2”的母液槽与淋洗剂配制罐之间增加10~20 μm精度过滤器。

参考文献:

- [1] ELAHE KARAMI, LAURA KUHAR, ANDREJ BONA, et al. A review of electrokinetic, ultrasonic and solution pulsing methods for mass transfer enhancement in in-situ processing[J]. Minerals Engineering, 2021, 170: 107029.
- [2] 王亚安,苏学斌,张翀,等.在地浸采铀钻孔中检测潜水泵性能[J].铀矿冶, 2022, 41(4): 454-458+478.
- [3] 苏学斌,王海峰,刘乃忠. CO₂+O₂原地浸出采铀工艺[M].北京:中国原子能出版社, 2016: 5-25.
- [4] 朱鹏,陈建昌,尉小龙,等.砂岩型铀矿床地浸采铀

- 工艺方法概述[J].采矿技术, 2011, 11(4): 4-6+92.
- [5] 吉宏斌,周义朋,孙占学,等. 蒙古古尔铀矿床CO₂+O₂地浸浸出过程分析与探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3): 55-59.
- [6] 杜超超,周义朋. CO₂+O₂地浸采铀矿层渗透性影响因素[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(7): 48-53.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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(S1): 305-310+323.
- [10] 周义朋,黎广荣,徐玲玲,等. 地浸采铀钻孔过滤器对溶液渗流影响的数值模拟[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 301-306.
- [11] 刘石玉,刘金辉,周义朋,等. 地浸采铀过程中含矿层堵塞特征研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(8): 65-75.
- [12] 许影,邓锦勋,成弘. CO₂+O₂地浸工艺中树脂床板结原因的探索研究[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第六卷)——中国核学会2019年学术年会论文集:第2册. 北京:中国原子能出版社, 2019: 250-256.
- [13] 程鹏,高抒,李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J]. 沉积学报, 2001(3): 449-455.
- [14] 钱磊,孙吉主,王勇,等. 两种沉积物粒度分析测试方法对比及转换关系[J/OL]. 长江科学院院报: 1-8[2024-01-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20230228.1721.008.html>.
- [15] HE L M, WU H, LI J F, et al. Solid particle swarm measurement in jet fuel based on Mie scattering theory and extinction method[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2837.
- [16] 林嗣荣,陆诗洁,刘国宏. 用多功能沉淀结晶槽沉淀重铀酸钠[J]. 铀矿冶, 2004, 23(1): 19-24.

Particle Size Distribution and Filtration Suggestions in the Whole Process Solution of Neutral In-situ Leaching of Uranium

WANG Yaan¹, YUAN Yuan¹, CHENG Wei¹, LI Guanghui², ZHANG Huan²,
ZHAO Lixin¹, ZOU Yuhan¹, HUO Jiandang¹

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China;

2. CNNC Inner Mongolia Mineral Co., Ltd., Hohhot 014010, China)

Abstract: Mastering the particle size in the solution throughout the neutral in-situ leaching process has guiding significance for regulating the leaching process, optimizing filters, determining the position of solid removal, alleviating ore bed blockage, restoring the flow rate of injection liquid, and reducing resin bed stratification. For this purpose, the whole process solution of neutral in-situ leaching of uranium from the Nalinggou deposit in Inner Mongolia was taken as the object, and based on laser particle size analyzer test data, the particle size distribution in the solution was obtained. The results show that the frequency distribution curve of particle size in the leaching solution is asymmetric, and the cumulative distribution curve is in an “S” pattern. The particle size distribution range is narrow, and the maximum particle size is less than 100 μm . The resin bed layer has a strong filtering effect on particulate matter, and the accuracy of the tail liquid filter bag should be determined based on the size of the resin ball and system pressure. The addition of O_2 or CO_2 in neutral systems has a weak effect on particle size. The particle size frequency distribution curves of both the qualified solution and the masterbatch solution in the settling tank exhibit a “double peak” pattern, while the lean solution exhibits a normal distribution. The maximum particle size in the mother liquor is about 40 μm . It is recommended to choose a precision of 10~50 μm for the leaching solution bag filter, and simultaneously add a 10~20 μm precision filter between the mother liquor tank and the eluent preparation tank. This study reveals the particle size distribution pattern in the whole process solution of the Nalinggou deposit, enriching the understanding of the particle size of neutral in-situ leaching of uranium, and providing a basis for optimizing surface filtration technology in mines.

Key words: neutral in-situ leaching of uranium; whole process; particle size; frequency distribution; cumulative distribution; surface filtration