

“CO₂ + O₂”中性浸出铀水冶一体化工艺研究

沈红伟, 师振峰, 任华平, 谢希良, 赖 磊

(新疆中核天山铀业有限公司, 新疆 伊宁 835000)

摘要: 新疆某铀矿床采用“CO₂ + O₂”中性浸出工艺, 在用固定床处理浸出液时, 随着运行时间的延长, 伴随树脂吸附性能降低、淋洗与转型操作周期长、工序衔接性差等问题。为解决此类问题, 开展了树脂“饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗”一体化工艺研究。分析发现, 树脂污染物主要含 Ca、Fe、Al 等元素, 采用工业盐酸可有效解毒。该一体化工艺利用低浓度酸性合格液破坏离子交换平衡, 促使 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{4-}$ 转化为 $\text{UO}_2\text{Cl}_2^{2-}$, 实现饱和再吸附; 通过盐酸转型, 使树脂转化为氯铀酰型并得到活化; 当用水淋洗时, 随着 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的降低, $\text{UO}_2\text{Cl}_2^{2-}$ 逐步离解为 UO_2^{2+} 。试验表明, 该工艺使树脂容量提升 1 倍以上, 淋洗效率提高 37%, 操作时间缩短 58.3%, 水冶成本降低 6.17 万元/tU, 实现了树脂解毒、再生转型和铀淋洗的协同操作。研究结果为“CO₂ + O₂”中性浸出铀水冶工艺提供了高效解决方案。

关键词: “CO₂ + O₂”中性浸出; 铀水冶; 树脂; 饱和再吸附; 盐酸转型再生; 水淋洗; 一体化工艺

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0034-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.07.03

在地浸采铀过程中, 固定床吸附铀水冶工艺具有树脂磨损小、吸附周期长等优点^[1-2]。然而, 在实际操作过程中, 树脂结垢和中毒问题不仅会导致吸附系统效率下降、运行周期缩短, 还会显著增加生产成本和设备维护负担^[3-4]。树脂结垢主要指物理性或机械性杂质在树脂表面或内部孔隙中的积累现象。这些杂质包括颗粒物、胶体、聚合物和其他不溶性物质, 它们会堵塞树脂孔隙, 增加床层压降, 并阻碍传质过程, 最终导致系统性能下降。而树脂中毒则是一种化学性失活过程, 指某些化学物质(如重金属离子、有机硫化物、硅酸盐等)与树脂活性位点发生强烈吸附或反应, 形成不可逆或难以解吸的复合物, 从而使树脂失去活性。与结垢不同, 树脂中毒通常涉及特定的化学相互作用, 且更难通过物理方法恢复^[5-6]。值得注意的是, 结垢和中毒并非完全独立的现象。物理结垢可能会加剧化学中毒, 因为孔隙堵塞会阻碍解吸剂或再生剂与中毒物质的接触, 导致标准再生程序效果降低^[7]。

新疆某铀矿床采用“CO₂ + O₂”中性浸出、密实固定床吸附工艺^[8], 在工业化应用中存在树脂

结垢、树脂中毒导致的吸附性能衰减问题。一般采用反冲洗工艺破除树脂床层表面垢层, 采用盐酸溶液浸泡、大流量清水冲洗方式, 实现树脂解毒和中性转化。然而, 该工艺存在单元操作碎片化、工序衔接匹配度低、人力成本高和原料消耗大等问题。

为解决此类问题, 技术人员通过工艺优化与工程验证, 提出了改良型盐酸转型工艺, 并经工业化试验与参数迭代, 构建了完整的“饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗”一体化工艺参数体系。

1 树脂中毒污染物分析及解毒试验

1.1 树脂中毒污染物分析

取吸附原液过滤袋泥样、吸附尾液过滤袋泥样及树脂层沉淀物, 对其烘干处理后, 分析沉淀物组分, 结果见表 1。可以看出, 原液过滤袋、尾液过滤袋以及树脂层沉淀物的主要组成为钙、镁、铁、铝、钾、钠、钛、锰等元素, 这些元素综合占比约为 20%。这些元素均会对树脂产生一定的中毒污染作用。

表 1 过滤袋泥样及树脂层分析数据

Table 1 filter bag mud samples and sediment in the resin layer

编号	w(Al)	w(Ca)	w(Fe)	w(K)	w(Mg)	w(Mn)	w(Na)	w(Ti)	w(Co)
原液过滤袋泥样	1.97	2.33	19.66	0.44	0.64	0.023	2.30	0.071	1.29×10^{-3}
尾液过滤袋泥样	1.33	2.06	6.20	0.44	0.77	0.014	3.41	0.058	1.31×10^{-3}
树脂层	3.44	5.19	7.42	1.25	0.48	0.090	1.34	0.280	6.35×10^{-2}

1.2 解毒试验

1.2.1 不同浓度 HCl 溶液对树脂解毒

分别取 4 份 100 mL 贫树脂装入各烧杯中,将 5%、10%、15%、20% (浓度以体积分数计,下同)的 HCl 溶液各 200 mL 分别加入盛有贫树脂的烧杯中;浸泡 24 h 后,用自来水反复清洗树脂,直至洗水 pH 达到 5,树脂解毒完毕。分析解毒后树脂的 Cl⁻ 容量,并开展树脂吸附 U 容量试验(树脂与吸附原液固液体积比 1:250。在恒温振荡器上震荡,每 1 h 取吸附液分析 U 质量浓度至浓度不再变化),结果见表 2。可以看出,采用不同浓度 HCl 对树脂解毒再生后,树脂中大部分铁离子被溶解,贫树脂 Cl⁻ 容量大于 80 mg/mL;树脂平均饱和吸附 46 d,平均饱和 U 容量达 48.0 mg/mL,较未解毒树脂的吸附 U 容量(37.5 mg/mL)提升 28%。

表 2 不同浓度 HCl 溶液对树脂解毒结果

Table 2 Resin detoxification results by HCl with different concentrations

HCl 浓度/ %	解毒液 ρ(ΣFe)/ (mg/L)	贫树脂 Cl ⁻ 容量/ (mg/mL)	吸附 时间/d	饱和树脂 U 容量/ (mg/mL)
5	35.3	81.2	45	47.6
10	37.2	82.3	46	48.2
15	37.5	84.5	46	47.8
20	40.1	86.2	47	48.2
平均	37.5	83.6	46	48.0

注:树脂容量以湿树脂计,下同。

1.2.2 不同浓度 NaOH 溶液对树脂解毒

用清水洗净贫树脂床层的沉淀物后,分别取 4 份 100 mL 贫树脂装入烧杯中;将 5%、10%、15%、20%的 NaOH 溶液各 200 mL,分别加入盛有贫树脂的烧杯中;浸泡 24 h 后,用自来水反复清洗树脂,直至洗水 pH 达到 8,树脂解毒完毕;用 15%的 HCl 溶液对树脂进行转型后,分析贫树脂 Cl⁻ 容量,并测试其吸附 U 容量,结果见表 3。可以看出,采用 5%~20% NaOH 溶液对树脂解毒后,树脂平

均饱和吸附 46 d,平均饱和树脂 U 容量为 45.85 mg/mL,树脂解毒效果与 HCl 溶液接近。

表 3 不同浓度 NaOH 溶液对树脂解毒结果

Table 3 Resin detoxification results by NaOH with different concentrations

NaOH 浓度/%	贫树脂 Cl ⁻ 容量/ (mg/mL)	吸附 时间/d	饱和树脂 U 容量/(mg/mL)
5	82.4	46	45.3
10	83.1	46	46.2
15	83.6	46	45.8
20	85.2	47	46.1
平均	83.6	46	45.9

1.2.3 NaCl+NaOH 混合液对树脂解毒

用清水洗净贫树脂床层的沉淀物后,分别取 4 份 100 mL 的贫树脂装入烧杯中;配制 5%NaCl+10% NaOH 溶液、10% NaCl+10% NaOH 溶液、15% NaCl+10% NaOH 溶液、20% NaCl+10%NaOH 溶液各 200 mL,分别加入盛有贫树脂的烧杯中;浸泡 24 h 后,用自来水反复清洗树脂,直至洗水 pH 达到 8,树脂解毒完毕;用 15%的 HCl 溶液对树脂进行转型后,分析贫树脂 Cl⁻ 容量,并测试其吸附 U 容量。结果见表 4。可以看出,使用 NaCl+NaOH 混合液对树脂解毒、HCl 溶液进行转型后,贫树脂 Cl⁻ 容量达 85 g/L,树脂平均饱和吸附 47 d,平均饱和树脂 U 容量为 47.3 mg/mL;采用不同配方的 NaCl+NaOH 溶液解毒后树脂的吸附性能接近。

表 4 NaCl+NaOH 混合液对树脂解毒结果

Table 4 Resin detoxification results by NaOH with NaCl and NaOH mixed solutions

解毒剂配方	贫树脂 Cl ⁻ 容量/(mg/mL)	吸附 时间/d	饱和树脂 U 容量/(mg/mL)
5%NaCl+10%NaOH	85.1	47	46.8
10%NaCl+10%NaOH	86.2	48	47.4
15%NaCl+10%NaOH	85.8	48	47.2
20%NaCl+10%NaOH	87.3	47	47.6
平均	86.1	47	47.3

1.2.4 解毒试验结果

3 种解毒剂对中毒树脂均能有效解毒并提升其吸附性能,饱和吸附容量提升幅度在 22%~28%,其中 HCl 溶液解毒效果最好。基于此,为了与现场工艺相匹配,并尽可能减少化工原材料的消耗,后续采用 HCl 溶液对中毒污染树脂进行解毒试验。

2 饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗—体化工艺研究

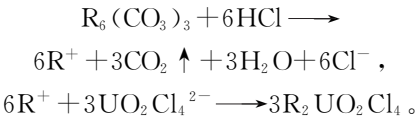
2.1 树脂饱和和再吸附工艺研究

2.1.1 饱和和再吸附机制

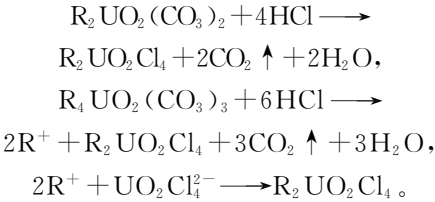
试验矿床当前选用的是一种高抗氯性大孔结构丙烯酸体系弱碱性阴离子交换树脂(JH-1 树脂)。在“CO₂+O₂”中性浸出中,该树脂主要吸附溶液中 UO₂(CO₃)₂²⁻和 UO₂(CO₃)₃⁴⁻,离子交换达到平衡时视为饱和。当饱和树脂吸附低浓度酸性淋洗合格液时,离子交换平衡被破坏,进一步进行离子交换达到新的平衡点,实现提升树脂吸附容量的目的。在饱和再吸附过程,低浓度淋洗合格液中的盐酸中和已吸附的碳酸根,生成 CO₂ 气体逸出,增加树脂的吸附点位;已吸附的 UO₂(CO₃)₃⁴⁻转变为低电荷密度的 UO₂Cl₄²⁻,可增加对铀酰离子的吸附,进而显著提升树脂的饱

和 U 容量^[9-10]。

吸附态碳酸根的解离和铀的再吸附反应:



铀的配合形态转换和铀的再吸附反应:



2.1.2 饱和和再吸附试验

取 3 份 100 mL JH-1 饱和树脂(饱和容量 54.77 mg/mL)分别放入 3 个锥形瓶中,再分别加入 100、200、300 mL 酸性合格液 [$\rho(\text{U}) = 24.28 \text{ g/L}$ 、 $\rho(\text{HCl}) = 14.32 \text{ g/L}$ 、 $\rho(\text{Cl}^-) = 16.36 \text{ g/L}$ 、 $\text{pH} = 0.79$],置于磁力搅拌器上搅拌吸附 2.5 h,反应后分析吸附尾液铀质量浓度、HCl 质量浓度和 pH,结果见表 5。可以看出,在饱和再吸附过程中,随着液固体积比的增加,饱和树脂 U 容量相应增加;液固体积比为 3 时,饱和树脂容量达 121.76 mg/mL。

表 5 JH-1 饱和树脂再吸附试验吸附尾液分析

Table 5 Analysis of adsorption tailing liquid of JH-1 saturated resin readsorption test

液固体积比	吸附时间/h	尾液 $\rho(\text{U})/(\text{mg/L})$	尾液 $\rho(\text{HCl})/(\text{g/L})$	尾液 pH	饱和树脂 U 容量/ (mg/mL)
1:1	2.5	18.91	0	5.15	78.95
2:1	2.5	120.4	0.18	4.09	91.18
3:1	2.5	3 848	0.72	3.57	121.8

2.1.3 饱和和再吸附现场应用

为提升饱和和再吸附效率,2021 年起采用 2 倍床体积(BV)合格液进行饱和和再吸附,表 6 列出了饱和和再吸附工艺应用前后的树脂容量变化。可以

看出,采用该工艺后,JH-1 树脂的 U 吸附效率达 99%,树脂吸附饱和和铀容量提升了 78%,较原工艺具有明显优势,说明饱和和再吸附工艺在该铀矿床应用是可行的。

表 6 JH-1 树脂饱和和再吸附工艺前后的饱和容量

Table 6 Saturation capacity before and after JH-1 resin saturation readsorption process

年份	浸出液中主要 $\rho_{\text{B}}/(\text{mg/L})$						饱和 U 容量/ (mg/mL)	贫树脂 U 容量/ (mg/mL)	U 吸附 效率/%
	U	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻			
2012—2020	18.14	591.48	775.66	293.79	2 930	2 500	53.55	0.63	98.82
2021	17.12	678.96	762.39	298.60	3 070	2 340	95.12	0.88	99.07
2022	16.06	626.31	774.44	297.30	3 180	2 860	95.52	0.81	99.15

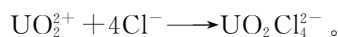
2.2 盐酸转型再生—水淋洗工艺研究

“CO₂+O₂”中性浸出铀水冶工艺中,一般采用 NaCl+NaHCO₃ 溶液对饱和树脂进行淋洗。如新疆中核天山铀业有限公司七三五厂以及内蒙古通辽铀业,均采用该工艺对饱和树脂进行淋洗。由于该铀矿床浸出液具有高 Cl⁻ 浓度、高矿化度特性,为避免常规淋洗中 Cl⁻ 进入浸出液体体系破坏浸出平衡,并防止高 Cl⁻ 溶液腐蚀设备设施,有必要优化淋洗工艺。

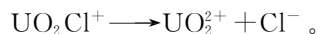
2.2.1 JH-1 饱和树脂盐酸转型—水淋洗机制

采用盐酸(12 mol/L)转型时,主要配合反应产物是更为稳定的 UO₂Cl₄²⁻,该产物和 JH-1 树脂的吸附更牢固。当被水淋洗时,Cl⁻ 浓度降低,配合平衡被破坏,UO₂Cl₄²⁻ 转化为 UO₂²⁺、UO₂Cl⁺、UO₂Cl₂^[11-16]。

工业盐酸转型机制:



水淋洗溶解机制:



2.2.2 饱和再吸附树脂盐酸转型—水淋洗试验

取饱和再吸附树脂 100 mL,加入约 80 mL 酸性合格液[ρ(U)=13.46 g/L、ρ(HCl)=6.09 g/L、ρ(Cl⁻)=7.82 g/L、pH=1.34],在磁力搅拌器上酸化循环 6 h 后,用工业 HCl 调节酸度为 13.0~18.0 g/L。经盐酸彻底转型后,进行水淋洗试验。将 55 mL 树脂和 15 mL 酸化液[ρ(U)=48.58 g/L、ρ(HCl)=14.52 g/L、ρ(Cl⁻)=16.82 g/L、pH=0.86],装入直径 1 mm、长 100 mm 的有机玻璃柱中,淋洗剂与树脂接触时间控制在 30 min,在进液流量 0.73 mL/min 条件下,采用不同淋洗剂对盐酸转型饱和树脂进行淋洗。用恒流泵进料,每 0.5 BV 流出液取一个样,用部分自动取样器收集样品。淋洗合格液结果见图 1。用各组分淋洗剂淋洗后贫树脂铀残余容量及 Cl⁻ 质量浓度见表 7。可以看出,3 种淋洗剂对饱和树脂的淋洗峰值浓度影响较小,说明经盐酸转型后,仅需要清水就可以对树脂中的铀达到高效淋洗。从表 7 可看出,JH-1 型树脂经盐酸转型后各淋洗剂均可实现贫树脂 U 容量低于 1 mg/mL。考虑到经济性和污染问题,现场选用清水直接淋洗。

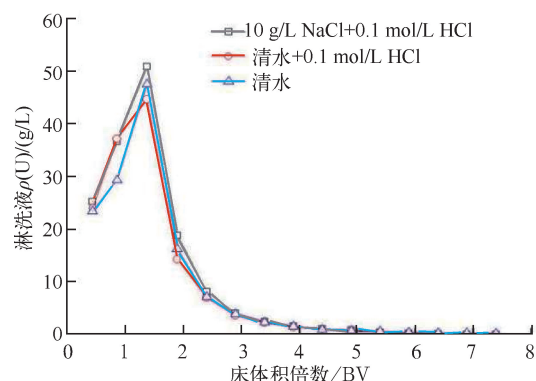


图1 不同淋洗剂对盐酸转型 JH-1 饱和树脂的淋洗曲线
Fig. 1 Elution curves of JH-1 saturated resin transformed with HCl

表7 不同淋洗剂淋洗后树脂参数对比

Table 7 Comparison of resin parameters after eluting with different eluents

淋洗剂组分	贫树脂 U 容量/ (mg/mL)	贫树脂 ρ(Cl ⁻)/ (mg/mL)
10 g/L NaCl+0.1 mol/L HCl	0.22	144
清水+0.1 mol/L HCl	0.48	105
清水	0.72	115

2.3 一体化工艺现场试验

在室内试验基础上,开展了现场试验。试验依托某铀矿床工业试验水冶厂房,利用现有吸附、转型及淋洗设备设施,进行系统的“饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗”一体化工艺试验。试验主要设备设施见表 8。

表8 JH-1 树脂饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗一体化试验设备清单

Table 8 Equipment list for the integrated test of JH-1 resin saturation readsorption-HCl transformation regeneration-water elution

设备名称	规格型号	数量/台
离子交换塔	φ2 500 mm×7 500 mm	3
转型液储槽 (饱和再吸附液储槽)	φ2 500 mm×5 000 mm	2
合格液储槽	φ2 500 mm×5 000 mm	3
化工泵	15 m ³ /h,扬程 30 m	2
电磁流量计	DN32,10 m ³ /h	1

2.3.1 JH-1 树脂饱和再吸附

在现场运行过程中,当吸附首塔出液铀质量

浓度 $\geq$ 原液铀质量浓度或者末塔尾液铀质量浓度 ≥ 1 mg/L 时,视为树脂饱和,切出首塔;然后用原液对首塔进行反冲洗,将树脂层中沉淀物冲洗至流出液无悬浮物后,排尽塔内残余溶液;注入约 36 m^3 合格液 [$\rho(\text{U}) \leq 25\text{ g/L}$, $\rho(\text{HCl}) \leq 18.0\text{ g/L}$, pH 1.10~1.40],通过管道泵从塔顶进液、塔底出液(上进下出)循环吸附;每 2 h 检测出液铀质量浓度,直至出液 $\rho(\text{U}) \leq 0.1\text{ g/L}$,停止饱和再吸附,将塔内溶液排至原液池,并压干树脂。

2.3.2 单塔循环盐酸转型再生

当饱和再吸附树脂塔排完塔液后,以 0.9 BV 的淋洗贫液加 0.3 BV 的工业盐酸为转型剂,采用上进下出方式对树脂进行循环转型再生。当出液酸度 $<13.0\text{ g/L}$ 时,适量补加工业盐酸并继续循环 2 h,直至转型进出液酸度在 $13.0\sim 16.0\text{ g/L}$,转型再生结束。饱和再吸附树脂的盐酸转型液为首段合格液,体积为 1.2 BV。

2.3.3 三塔串联淋洗

完成饱和再吸附树脂盐酸转型后,对一贫塔、二贫塔、饱和塔进行三塔串联淋洗(图 2)。通过化工泵将清水从淋洗塔塔顶泵入、塔底流出,依次经过首塔、中塔和末塔。当合格液体积达 2.0 BV 时,开始收集一次贫液;当一次贫液达 1.0 BV(淋洗终点铀质量浓度 $\leq 0.5\text{ g/L}$)时,停止淋洗,切掉首塔进入漂洗流程。待下一个饱和树脂塔饱和再吸附—盐酸转型再生后接入,进行三塔串联水淋洗,如此反复循环。

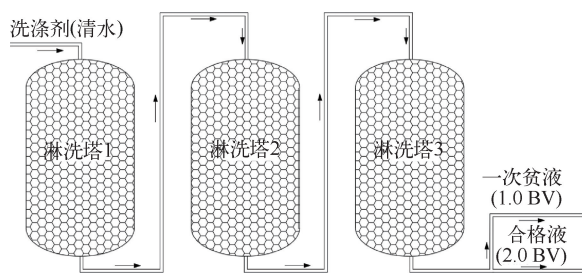


图 2 三塔串联水淋洗流程

Fig. 2 Flow chart of water elution in series with three towers

2.3.4 一体化工艺与传统工艺对比

一体化工艺与传统工艺(饱和树脂 $\text{NaCl} + \text{NaHCO}_3$ 溶液淋洗、盐酸溶液对贫树脂转型、清水漂洗)的现场应用表明(表 9),“饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗”一体化工艺,可一次实现提

升树脂饱和容量、树脂盐酸转型解毒再生和树脂铀水淋洗。一体化工艺简化了操作流程,降低了劳动量,操作时间缩短了 58.3%(从 6 d 降至 2.5 d),水冶成本降低了 6.17 万元/tU;可广泛应用于其他“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”中性浸出铀水冶流程中。

表 9 体化工艺与传统工艺对比

Table 9 Comparison of integrated process and traditional process

项目	传统工艺	一体化工艺
浸出铀质量浓度/(mg/L)	28.60	16.50
树脂饱和容量/(mg/mL)	42.48	94.72
操作时间/d	6.00	2.50
NaCl 单耗/(t/tU)	42.00	0
NH_4HCO_3 单耗/(t/tU)	3.85	0
NaOH 单耗/(t/tU)	3.00	0.60
HCl 单耗/(t/tU)	10.60	5.80
水冶回收率/%	93.20	95.00
水冶成本/(万元/tU)	6.60	0.43

3 结论

针对“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”中性浸出铀水冶工艺,开展了固定床树脂“饱和再吸附—盐酸转型再生—水淋洗”一体化工艺研究,得到如下主要结论:

1)在“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”中性浸出体系中,固定床树脂污染物主要包含 Ca、Fe、Al 等,其复合沉积导致树脂吸附位点阻塞及铀酰配合离子交换平衡偏移。采用工业盐酸溶液(浓度 $\geq 15\%$)能有效洗脱树脂表面及孔道内的金属氧化物/氢氧化物沉积层,可使树脂吸附性能提升 28%。

2)研发的“饱和再吸附—盐酸转型—水淋洗”一体化工艺,通过调控吸附环境 pH 与离子强度,促使树脂相 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 向 $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-}$ 形态转化,使饱和树脂铀吸附容量提升幅度超 100%(从 42.48 mg/mL 增至 94.72 mg/mL),淋洗效率提升 37%,实现树脂活化、铀解吸及污染物洗脱的协同处理。

3)通过三塔串联淋洗与单塔循环转型的模块化集成,使操作周期缩短 58.3%,生产成本下降 6.17 万元/tU,铀回收率提升至 95.0%,显著优化了“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”中性浸出体系的工业化效能。

参考文献:

- [1] 赖磊,师振峰,熊威,等.铀矿石中性浸出液吸附饱和和树脂酸性淋洗工艺研究[J].铀矿冶,2019,38(2):98-102.
LAI Lei,SHI Zhenfeng,XIONG Wei,et al.Study on the technology for acid eluting of saturated resin from adsorbed neutral leached solution of uranium ore[J].Uranium Mining and Metallurgy,2019,38(2):98-102.
- [2] 师振峰,陈箭光,熊威,等.饱和再吸附在CO₂+O₂中性浸出水冶工艺中的应用研究[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第七卷):中国核学会2021年学术年会论文集:第1册.2021:281-290.
- [3] 梁铁.离子交换树脂铁中毒的处理[J].现代化工,2001,21(10):42-43.
LIANG Tie.Reclamation of ion exchange resin[J].Modern Chemical Industry,2001,21(10):42-43.
- [4] 李人表,倪红.离子交换树脂的保管、使用和污染中毒后的复活[J].云南化工,1991(1/2):97-102.
LI Renbiao,NI Hong.Storage use,and revival of ion exchange resins after pollution poisoning[J].Yunnan Chemical Technology,1991(1/2):97-102.
- [5] 阮志龙,成弘,原渊,等.CO₂+O₂地浸矿山固定床树脂清洗解毒一体化工艺研究[J].铀矿冶,2019,38(4):263-266.
RUAN Zhilong,CHENG Hong,YUAN Yuan,et al.Cleaning and detoxification integrated technology for fixed bed resin at in-situ leaching uranium mine by CO₂+O₂[J].Uranium Mining and Metallurgy,2019,38(4):263-266.
- [6] 王永莲.地浸采铀工艺技术[M].长沙:国防科技大学,2007:55-56.
- [7] B.B.格罗莫夫,张楠.铀化学工艺概论[M].北京:原子能出版社,1989:100-104.
- [8] 李勇,师振峰,李德,等.中毒树脂饱和和吸附容量提升技术研究[J].铀矿冶,2022,41(S1):62-68.
LI Yong,SHI Zhenfeng,LI De,et al.Technology of increasing saturated adsorption capacity of poisoned resin[J].Uranium Mining and Metallurgy,2022,41(S1):62-68.
- [9] 王肇国,林嗣荣,潘海春,等.生产黄饼新工艺的研究:负载树脂再吸附硝酸铵淋洗—二步沉淀[J].铀矿冶,2001,20(4):273-276.
WANG Zhaoguo,LIN Sirong,PAN Haichun,et al.The research on new production technique of Yellow Cake: Loaded resin readsorption ammonium nitrate leaching two-step precipitation[J].Uranium Mining and Metallurgy,2001,20(4):273-276.
- [10] 苏学斌,王海峰,刘乃忠,等.CO₂+O₂原地浸出采铀工艺[M].北京:中国原子能出版社,2016.
- [11] 石冬梅.大孔强碱性阴离子载铀树脂氯化钠转型水淋洗方法研究[J].湿法冶金,1999,18(4):32-34.
SHI Dongmei.Research on the leaching method of sodium chloride transformation water for macro-porous strongly alkaline anion loaded uranium resin[J].Hydrometallurgy of China,1999,18(4):32-34.
- [12] 钱庭宝.离子交换剂应用技术[M].天津:天津科学技术出版社,1984:89-93.
- [13] 张镛,许根福.离子交换及铀的提取[M].北京:原子能出版社,1991:221-215.
- [14] 阳奕汉,龙红福.负载树脂饱和和再吸附工艺的生产实践[J].铀矿冶,2007,26(2):105-109.
YANG Yihan, LONG Hongfu. Application of loaded resin readsorption process in Yining uranium mine[J].Uranium Mining and Metallurgy,2007,26(2):105-109.
- [15] 王海仓,张玉田.饱和再吸附工艺在某水冶厂的应用[C]//中国核学会.中国核学会技术进展报告:中国核学会2009年学术年会论文集:第2册.2009:55-59.
- [16] 成弘,刘乃忠,苏学斌,等.CO₂酸化碱性浸出液增强吸附效果的机理分析[C]//中国核学会铀矿地质分会,中国核学会铀矿冶分会.全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集(下).2012:546-551.

Integrated Process of “CO₂ + O₂” Neutral Leaching and Uranium Hydrometallurgy

SHEN Hongwei, SHI Zhenfeng, REN Huaping, XIE Xiliang, LAI Lei

(Xinjiang Tianshan Uranium Co., Ltd., CNNC, Yining 835000, China)

Abstract: A uranium deposit in Xinjiang adopts the “CO₂ + O₂” neutral leaching process. When treating the leachate with a fixed bed, the resin’s adsorption capacity is reduced with the increase in operating time, and there are problems such as long leaching and transformation operation cycles, and poor process connection. To solve this problem, the research has been conducted on the integrated process of resin saturation readsorption, hydrochloric acid transformation regeneration and water elution. The analysis reveals that resin pollutants mainly contain elements such as Ca, Fe, Al, etc., and industrial hydrochloric acid can effectively detoxify them. This integrated process utilizes low concentration acidic qualified solution to disturb ion exchange equilibrium, promoting the conversion of $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ to $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-}$ and achieving saturation readsorption; the resin is transformed into chlorouranyl type and activated with hydrochloric acid transformation; during water washing, as $\rho(\text{Cl}^-)$ decreases, $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-}$ gradually dissociates into UO_2^{2+} . The results show that this process increases the resin capacity by more than twice, improves the leaching efficiency by 37%, shortens the operating time by 58.3%, and reduces the cost of hydrometallurgy by 61 700 yuan per ton of uranium, achieving the synergistic operation of resin detoxification, regeneration transformation, and uranium leaching. The integrated process provides an efficient solution for the “CO₂ + O₂” neutral leaching and uranium hydrometallurgy.

Key words: “CO₂ + O₂” neutral leaching; uranium hydrometallurgy; resin; saturation readsorption; hydrochloric acid transformation and regeneration; water elution; integrated process