

# JH-1 树脂在高氯根高矿化度浸出液体系中的 铀提取工艺研究

沈红伟, 师振峰, 赖 磊, 任华平, 谢希良

(新疆中核天山铀业有限公司, 新疆 伊宁 835000)

**摘要:** 新疆某铀矿床的浸出液体系中,  $\rho(\text{Cl}^-)$  高、矿化度高, 采用传统 D382 弱碱性阴离子交换树脂处理该体系时, 铀动态吸附容量低 (15~30 mgU/mL, 以湿树脂计)、铀分离富集效率差。本研究系统评估了 JH-1 大孔弱碱性丙烯酸系树脂对该体系的吸附性能。结果表明: JH-1 树脂对“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”中性浸出液中的碳酸铀酰配合离子 (如  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ ) 表现出优异的选择性, 其饱和吸附容量达 60 mgU/mL, 较 D382 树脂的吸附容量提升了 2.6 倍。在动态吸附工艺中, JH-1 树脂对铀的吸附效率达 98.85%, 淋洗效率为 99%, 铀总回收率达 82%。该树脂通过抑制  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等竞争性离子的干扰, 有效解决了高矿化度体系中树脂吸附位点竞争及设备结垢问题, 显著降低了盐酸、工业盐等原材料的消耗, 生产成本降低了 2.3 万元/tU, 为砂岩铀矿高效开发提供了技术支撑。

**关键词:** 浸出液; 高氯根; 高矿化度; 树脂; 吸附性能; 吸附容量; JH-1 大孔弱碱性丙烯酸系树脂; D382 弱碱性阴离子树脂

**中图分类号:** TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0082-09

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2025.07.04

新疆某可地浸砂岩型铀矿床的地层条件复杂、开采环境差。该矿床含矿含水层的地下水处于亚饱和和动态平衡状态, 为浸出过程带来了不确定性。该矿床的地下水及浸出液矿化度极高, 浸出液中  $\rho(\text{Cl}^-)$  达 3.4 g/L (一般浸出液  $\rho(\text{Cl}^-) \leq 0.5$  g/L), 总矿化度达 12.16 g/L<sup>[1]</sup>。溶解盐类浓度高, 尤其是  $\text{Cl}^-$  含量高, 会引发盐效应, 破坏水分子结构或改变离子间的静电作用力, 导致难溶或微溶物质的溶解度异常增大<sup>[2]</sup>。在此矿床中, 盐效应使得地下水及浸出液中的多种组分 (如钙、镁、硫酸盐等) 呈过饱和状态, 严重干扰铀的吸附回收, 还会诱发设备结垢 (板结)。在采用离子交换法回收铀的工艺中, 过饱和的杂质离子 (尤其  $\text{SO}_4^{2-}$  等多价阴离子) 会与铀酰阴离子配合物 (如  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ ) 竞争树脂上的吸附位点; 且高离子强度环境会压缩树脂吸附铀酰配合物的双电层, 降低其吸附亲和力, 从而显著抑制和降低铀在阴离子交换树脂中的吸附容量与吸附效率<sup>[3]</sup>。溶液中的过饱和盐类 (如  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 极易在工艺管道、吸附塔布液系统或树脂床层中结晶析出并沉积, 形成坚硬垢层, 增加浸出液进入吸附塔的阻力, 堵塞流道, 降低溶液流速, 甚至迫使生产中断, 严重影响生产的连续

性和效率<sup>[4]</sup>。

针对高氯根、高矿化度、组分复杂, 且铀主要以碳酸铀酰配合物形态存在的中性含铀浸出液, 离子交换工艺是目前进行铀回收的主流技术路线<sup>[5-6]</sup>。其中, 弱碱性大孔阴离子交换树脂因其对碳酸铀酰配合阴离子具有一定的选择性和较好的抗有机物污染能力<sup>[7]</sup>, 在采用“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸工艺的矿山中被广泛使用。在地浸采铀工艺中, 传统上主要采用大孔弱碱性阴离子和强碱性阴离子树脂; 然而在高氯根浸出液体系中, 传统树脂对铀的吸附性能显著下降。如 D382 树脂在该高氯根、高矿化度浸出液体系中的铀饱和和吸附容量低, 仅为 15~30 mg/mL (以湿树脂计, 下同); 且在吸附过程中, 该树脂消耗的  $\text{HCO}_3^-$  较多, 当浸出液中  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度较高 (大于 520 mg/L) 时, 其吸附容量进一步降低至 25 mg/mL。

针对以上问题, 开展了多种类型树脂 (D231-YT、JH-1 和 D382 等) 吸附容量及其再生性能等关键指标测试, 旨在优选出在含有高浓度竞争杂质离子的浸出液环境中, 对碳酸铀酰配合阴离子具有高效选择吸附能力的树脂, 进而满足该复杂

矿床工业化回收铀的工艺要求。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料

JH-1 树脂是大孔结构的丙烯酸体系共聚交联高分子聚合物,经胺解制得的多胺基弱碱性阴离子交换树脂,出厂形式为游离胺型,JH-1 树脂结构见图 1,试验用树脂主要性能指标见表 1。

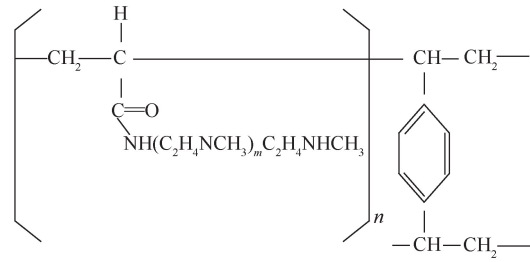


图 1 JH-1 树脂分子结构图

Fig. 1 Molecular structure of JH-1 resin

表 1 JH-1 树脂与国内地浸矿山常用树脂主要性能指标对比

Table 1 Comparison of the main performance indexes of JH-1 resin with domestic resin commonly used in in-situ leaching mines

| 树脂类型    | 含水率/% | 质量交换容量/<br>[mmol/g(干)] | 体积交换容量/<br>(mmol/mL) | 湿视密度/<br>(g/mL) | 湿真密度/<br>(g/mL) | 粒度/%                | 渗磨圆<br>球率/% |
|---------|-------|------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------------|
| D231-YT | 50~60 | ≥4.00                  | ≥1.20                | 0.65~0.73       | 1.05~1.12       | 0.4~0.9 mm, ≥95%    | ≥90         |
| D382    | 50~60 | 3.60                   | ≥1.80                | 0.78            | 1.06            | 0.6~1.4 mm, ≥95%    | ≥90         |
| JH-1    | 52~60 | 8.50                   | ≥2.75                | 0.68~0.76       | 1.05~1.14       | 0.315~1.25 mm, ≥95% | ≥90         |
| 国家标准    | 50~60 | ≥3.70                  | ≥1.10                | 0.65~0.75       | 1.06~1.10       | 0.4~0.9 mm, ≥95%    | ≥90         |

由表 1 可看出,与其他树脂相比,JH-1 树脂的质量交换容量、体积交换容量均较高,树脂物理及化学性能满足固定床吸附需要。

静态条件试验用吸附原液由某采区含铀浓度相对较高的浸出液配制而成,其组分见表 2。

表 2 静态吸附原液组分

Table 2 Composition of static adsorption stock solution

|  | U      | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> |
|--|--------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------------|
|  | 117.56 | 556                           | 0                             | 2 550                         | 2 960           | 728              | 256              |

### 1.2 JH-1 树脂吸附铀机理

在碳酸盐体系中,六价铀主要存在形式为  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ ,同时也存在着  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  等离子。因此,JH-1 弱碱性阴离子树脂吸附碳酸盐浸出液中铀的离子交换反应为<sup>[6]</sup>



### 1.3 试验方法

新疆某铀矿高氯根、高矿化度浸出液中的铀质量浓度一般较低,选用 JH-1 树脂进行吸附性能试验,液固比(溶液与树脂的体积比,下同)均取 250:1。在振荡器上恒温 25℃ 条件下振荡一定时

间,进行固液分离,分析吸附尾液中铀质量浓度以及  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量,研究接触时间、吸附原液中离子对 JH-1 树脂吸附铀的影响。

## 2 JH-1 树脂吸附试验结果与讨论

### 2.1 接触时间对 JH-1 树脂吸附性能的影响

取 JH-1 树脂 6 份,每份 2 mL,将树脂放入装有吸附原液的试剂瓶中,在室温条件下,分别振荡 2、4、6、8、10、12 min 后进行固液分离,分析吸附尾液  $\rho(\text{U})$ ,研究接触时间对 JH-1 树脂吸附性能的影响(图 2)。可以看出,随着接触时间的增加,液相中的  $\rho(\text{U})$  越来越低,接触时间由 10 min 增加至 12 min, $\rho(\text{U})$  的降幅开始变缓。10 min 时吸附尾液  $\rho(\text{U}) = 98.86 \text{ mg/mL}$ ,12 min 时吸附尾液  $\rho(\text{U}) = 98.12 \text{ mg/mL}$ ,因此接触时间以 10 min 为宜。

### 2.2 吸附原液中离子对 JH-1 树脂吸附性能的影响

液固比 250:1,在恒温 25℃ 条件下振荡反应 60 min 条件下,研究吸附原液中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  对 JH-1 树脂吸附铀的影响。

#### 2.2.1 $\rho(\text{Cl}^-)$ 对 JH-1 树脂吸附性能的影响

取 6 份 250 mL 吸附原液,用固体氯化钠调

节吸附原液中  $\rho(\text{Cl}^-)$  分别为 3、4、5、6、7、10 g/L，每份吸附原液加入 1 mL JH-1 贫树脂进行吸附试验，分析吸附尾液  $\rho(\text{U})$  随吸附原液  $\rho(\text{Cl}^-)$  的变化趋势(图 3)。

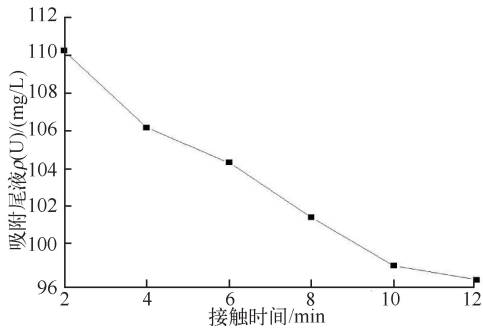


图 2 吸附尾液  $\rho(\text{U})$  随接触时间的变化

Fig. 2 Variation of adsorption tail fluid  $\rho(\text{U})$  with contact time

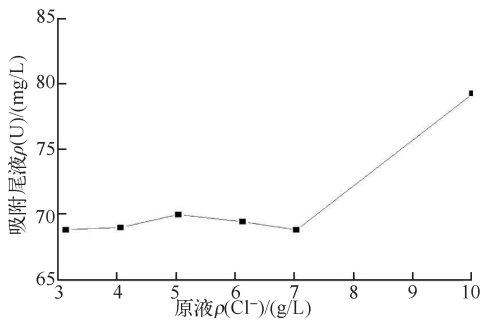


图 3 吸附尾液  $\rho(\text{U})$  随原液  $\rho(\text{Cl}^-)$  的变化

Fig. 3 Variation of adsorbed tail liquid  $\rho(\text{U})$  with the original liquid  $\rho(\text{Cl}^-)$

从图 3 可看出，当吸附原液  $\rho(\text{Cl}^-)$  由 3 g/L 逐渐升至 7 g/L 时，吸附尾液  $\rho(\text{U})$  变化不明显；当  $\rho(\text{Cl}^-)$  由 7 g/L 升至 10 g/L 时，JH-1 树脂吸附尾液  $\rho(\text{U})$  有较大幅度的上升。这说明，当原液  $\rho(\text{Cl}^-)$  在 7 g/L 以下时，基本不影响 JH-1 树脂对铀的吸附性能；当原液  $\rho(\text{Cl}^-)$  超过 7 g/L 时，JH-1 树脂吸附容量大幅下降。

### 2.2.2 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 对 JH-1 树脂吸附性能的影响

向吸附原液中加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，调整  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  分别为 3、4、5、6、7、10 g/L，进行 JH-1 树脂吸附试验，观察  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  增长对 JH-1 树脂吸附铀性能的影响，吸附尾液  $\rho(\text{U})$  变化见图 4。可以看出，随着原液  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  的升高，吸附尾液  $\rho(\text{U})$  逐渐上升，但在  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  小于 7 g/L 时，变化趋势较小；当

$\rho(\text{SO}_4^{2-})$  由 7 g/L 增至 10 g/L 时， $\rho(\text{U})$  有较大幅度的上升。这说明原液  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  越高，树脂吸附效果越差，但当  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  小于 7 g/L 时， $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  对吸附效果的影响较小；当  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  大于 7 g/L 时，树脂吸附效果下降明显。

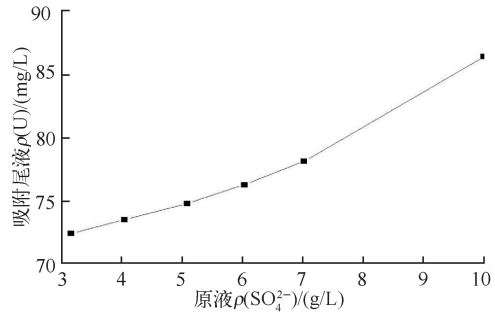


图 4 吸附尾液  $\rho(\text{U})$  随原液  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  增长的变化

Fig. 4 Variation of adsorbed tail liquid  $\rho(\text{U})$  with the increase of original liquid  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$

### 2.2.3 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 对 JH-1 树脂吸附性能的影响

向吸附原液中加入  $\text{NaHCO}_3$  或盐酸，调节  $\rho(\text{HCO}_3^-)$  分别为 300、400、500、600、700 mg/L，进行 JH-1 树脂吸附试验，观察吸附尾液  $\rho(\text{U})$  变化趋势，见图 5。

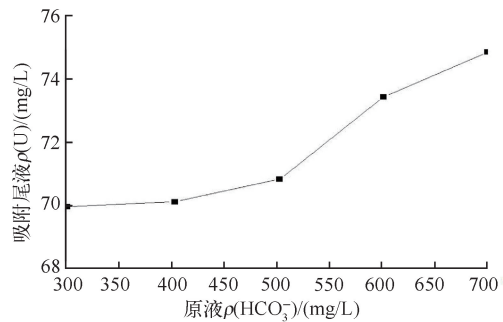


图 5 吸附尾液  $\rho(\text{U})$  随  $\rho(\text{HCO}_3^-)$  增长的变化

Fig. 5 Variation of adsorbed tail fluid  $\rho(\text{U})$  with the increase of original fluid  $\rho(\text{HCO}_3^-)$

从图 5 可看出，随着原液  $\rho(\text{HCO}_3^-)$  的升高，吸附尾液  $\rho(\text{U})$  小幅度升高，说明 JH-1 树脂抗  $\text{HCO}_3^-$  干扰能力较强，在  $\text{HCO}_3^-$  存在的溶液中其对碳酸铀酰的选择性吸附能力仍较强。

### 2.3 JH-1 树脂动态吸附性能

在 JH-1 树脂条件试验基础上，进行动态吸附性能试验。取 JH-1 树脂和 D382 树脂各 60 mL，填充至相应的有机玻璃柱 ( $\phi 11 \text{ mm} \times$

100 cm);将有机玻璃树脂柱垂直悬挂于进塔原液总管处,以浸出液为进液进行单柱吸附,进液方式为下进上出,控制相同的进液流速(1.27 mL/min);试验过程控制浸出液 pH 低于 6.9,确保无解析现象发生<sup>[6]164</sup>。浸出液参数: $\rho(\text{U}) = 25 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{Cl}^-) = 2.88 \text{ g/L}$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+}) = 767 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+}) = 268 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 2.53 \text{ g/L}$ 、 $\rho(\text{HCO}_3^-) = 450 \text{ mg/L}$ 、 $\text{pH} = 6.25$ 。试验确定参数见表 3 和图 6。

表 3 JH-1 与 D382 树脂吸附性能

Table 3 Adsorption performance of JH-1 and D382 resins

| 树脂型号           | JH-1  | D382  |
|----------------|-------|-------|
| 吸附时间/d         | 80    | 47    |
| 饱和床体积倍数/BV     | 5 950 | 3 850 |
| 树脂吸附容量/(mg/mL) | 80.30 | 48.12 |

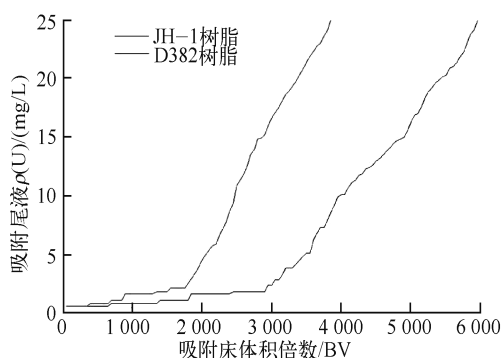


图 6 JH-1 与 D382 树脂吸附曲线

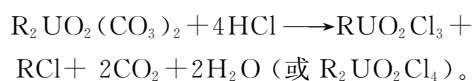
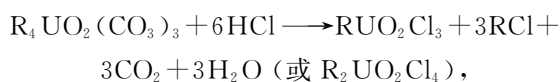
Fig. 6 Adsorption curves of JH-1 and D382 resins

从表 3 和图 6 知,与 D382 树脂相比,JH-1 树脂穿透体积大,吸附周期长,铀吸附容量更高(高出约 30 mg/mL),表现出较大的优势。

## 2.4 JH-1 树脂盐酸转型及淋洗剂选择

### 2.4.1 JH-1 盐酸转型淋洗原理

当用一定浓度的工业盐酸溶液处理吸附了碳酸铀酰配合物的树脂时,并不能将铀淋洗下来,这是由于发生了新的配合作用,生成被树脂强烈吸附的  $\text{UO}_2\text{Cl}_3^-$ 、 $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-}$ 。在这种情况下,可以采用能使其离解的条件进行淋洗(如用水洗涤)<sup>[7]</sup>。吸附碳酸铀酰的饱和树脂用一定浓度的工业盐酸处理时,该过程中的主要反应为



使用含  $\text{Cl}^-$  的溶液(如 HCl 或 NaCl)作为淋洗剂,将吸附在树脂上的铀酰碳酸配合物洗脱。淋洗过程中发生离子交换反应,树脂上的铀酰碳酸配合物被  $\text{Cl}^-$  取代,使树脂再生,而铀进入淋洗液。在淋洗液中,铀酰碳酸配合物迅速离解。铀主要以  $\text{UO}_2\text{CO}_3$  和  $\text{UO}_2^{2+}$  形态存在, $\text{UO}_2\text{CO}_3$  在酸性条件下与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{H}^+$  反应,转化为稳定的  $\text{UO}_2\text{Cl}_2$ ,并释放  $\text{CO}_2$  气体。淋洗液中的  $\text{H}^+$  同时将过程中产生的  $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$  中和,分解生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[8-10]</sup>。

### 2.4.2 饱和树脂预处理

取 1 000 mL 酸性合格液( $\rho(\text{U}) = 9.9 \text{ g/L}$ 、 $\text{pH} = 2.52$ ),加入 1 000 mL 饱和树脂(饱和铀容量 78.9 mg/mL),在磁力搅拌器 25 °C 条件下进行搅拌反应,用工业 HCl 调节反应体系 pH,控制终点 pH 在 1.2~1.3;当 HCl 用量约 130 mL 时,最终 pH=1.28,酸化液体积 1 130 mL,转型液  $\rho(\text{U}) = 24.8 \text{ g/L}$ 。

淋洗试验参数:酸化液与已转型饱和树脂比为 1:3.5(每柱一样);接触时间 30 min;流量(1.27 mL/min);常温;用蠕动泵进料,用自动取样器每 0.5 BV 取一个样。

### 2.4.3 同酸度条件下 $\text{Cl}^-$ 选择淋洗试验

在淋洗剂酸度均为 3.5 g/L、淋洗剂  $\rho(\text{Cl}^-)$  分别为 0、10、20、30、40、50、60、70 g/L 条件下进行淋洗,淋洗合格液分析结果见图 7。

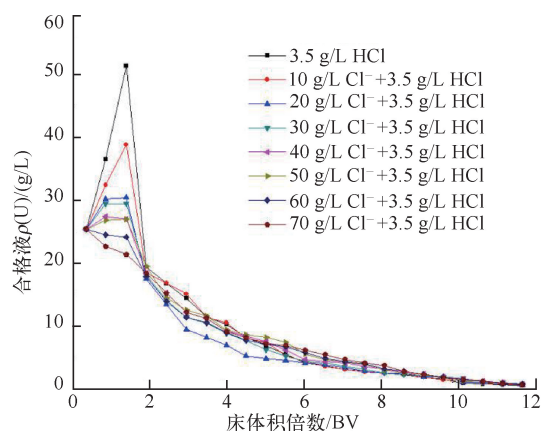


图 7 同一酸度条件下淋洗效果对比

Fig. 7 Comparison of leaching effects under the same acidity conditions

从图 7 可知,在淋洗剂酸度均为 3.5 g/L 时,随着淋洗剂  $\rho(\text{Cl}^-)$  的上升,合格液中  $\rho(\text{U})$  峰值逐渐降低,合格液  $\rho(\text{U})$  降至同样浓度(1 g/L)时的淋洗比增大,淋洗效果变差。这说明当酸度相同时,淋洗剂中  $\rho(\text{Cl}^-)$  越低,淋洗效果越好。这是因为液相中  $\text{Cl}^-$  浓度越低,根据 Le Chatelier (勒夏特列)原理,氯化铀酰配合物发生离解反应  $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-} \longrightarrow \text{UO}_2^{2+} + 4\text{Cl}^-$ ,配合稳定性破坏,阴离子交换树脂对  $\text{UO}_2^{2+}$  无吸附能力,铀以  $\text{UO}_2^{2+}$  进入溶液,随水流被淋洗<sup>[11-13]</sup>。

2.4.4 同  $\text{Cl}^-$  浓度条件下不同酸度淋洗试验

为验证高浓度氯离子淋洗剂中酸度对铀的解析影响,取  $\rho(\text{Cl}^-)$  为 40 g/L 和 70 g/L 淋洗剂,分别进行 3.5 g/L 和 7.0 g/L 酸度的淋洗剂组分对比试验,试验结果见图 8。

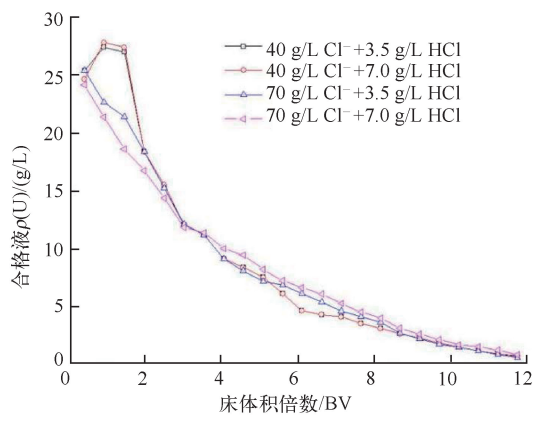


图 8 不同酸度淋洗剂淋洗效果对比  
Fig. 8 Comparison of rinsing effects of different acidity leaching agents

由图 8 可知,在淋洗剂  $\rho(\text{Cl}^-)$  相同时,盐酸加入量由 3.0 g/L 上升至 7.0 g/L 后,淋洗合格液  $\rho(\text{U})$  变化基本在同一曲线上,没有明显变动;这说明当淋洗剂中  $\rho(\text{Cl}^-)$  相同时,在一定范围内酸度的变化对淋洗效果的影响较小。

各淋洗剂组分条件下,淋洗后 2R(贫树脂)铀容量及  $\text{Cl}^-$  含量见表 4。可以看出,JH-1 型树脂的可淋洗性较好,在各种淋洗剂组分条件下,铀淋洗效率均较高,均可使其 2R 残余铀容量低于 1 mg/mL。本着节约成本理念,最终确定选用 3.5 g/L 的盐酸溶液作为 JH-1 饱和树脂的淋洗剂。

表 4 不同淋洗剂组分淋洗后贫树脂参数对比

Table 4 Comparison of 2R resin parameters after rinsing with different rinse components

| 淋洗剂组分                              | 贫树脂铀容量/<br>(mg/mL) | 2R 树脂 $\text{Cl}^-$<br>含量/(mg/mL) |
|------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 3.5 g/L HCl                        | 0.02               | 96                                |
| 50 g/L $\text{Cl}^-$ + 3.5 g/L HCl | 0.14               | 105                               |
| 60 g/L $\text{Cl}^-$ + 3.5 g/L HCl | 0.57               | 155                               |
| 70 g/L $\text{Cl}^-$ + 3.5 g/L HCl | 0.24               | 91                                |
| 40 g/L $\text{Cl}^-$ + 7.0 g/L HCl | 0.02               | 81                                |
| 50 g/L $\text{Cl}^-$ + 7.0 g/L HCl | 0.12               | 147                               |
| 60 g/L $\text{Cl}^-$ + 7.0 g/L HCl | 0.33               | 153                               |
| 70 g/L $\text{Cl}^-$ + 7.0 g/L HCl | 0.06               | 134                               |

2.5 现场试验

2.5.1 现场试验流程

根据 JH-1 树脂提铀工艺试验结果以及原工艺后续生产“111”流程,确定浸出液扩大试验工艺流程(图 9):浸出液→吸附→反冲脱泥→淋洗→沉淀→抽滤→“111”产品。

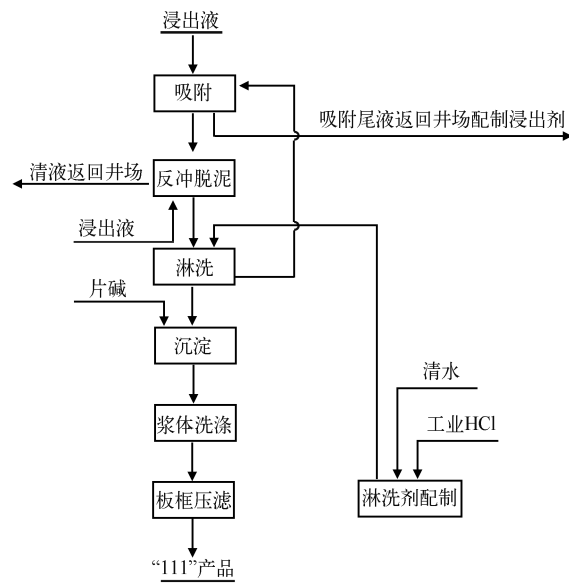


图 9 JH-1 树脂对高氯根高矿化度浸出液处理流程  
Fig. 9 Resin treatment process for high chloride ion and high mineralization leachate

2.5.2 吸附

现场试验吸附塔规格  $\phi 200 \text{ mm} \times 6\,000 \text{ mm}$ , 吸附塔有效高度为 5 500 mm,浸出液采用上进下出方式。吸附塔共 4 个,据现场实际情况,每塔装

树脂 70 L,树脂床层高度为 2.6 m。

吸附工序流程:首先进行单塔吸附,吸附原液采用上进下出方式,吸附尾液至尾液池;当尾液穿透时,接入第二塔,当首塔出液铀浓度等于或大于进口浓度时,“切断”首塔。利用原液以下进上出方式对饱和塔进行冲洗,至流出液没有悬浮物后停止冲洗,并排出树脂中的残余溶液,然后转入淋洗工序<sup>[14-16]</sup>。JH-1 树脂、D382 树脂扩大试验吸附工序主要试验参数见表 5。

表 5 两种树脂主要试验参数对比

Table 5 Comparison of main test parameters of two resins

| 树脂         | 吸附原液                           |                                      |                                        |                                   |      | 瞬时流量/<br>(m³/h) | 体积/m³ |
|------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|------|-----------------|-------|
|            | $\rho(\text{U})/(\text{mg/L})$ | $\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg/L})$ | $\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg/L})$ | $\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg/L})$ | pH   |                 |       |
| JH-1 树脂平均值 | 18.5                           | 556                                  | 2 850                                  | 2 910                             | 6.62 | 0.77            | 7 350 |
| D382 树脂平均值 | 18.5                           | 556                                  | 2 850                                  | 2 910                             | 6.62 | 0.61            | 352   |

| 树脂         | 吸附线速度/<br>(m/h) | 穿透床体积/<br>BV | 饱和床体积/<br>BV | 吸附金属<br>量/kg | 树脂容量/<br>(mg/mL) | 吸附时间/h |
|------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------|
| JH-1 树脂平均值 | 29              | 3 973        | 8 408        | 7.01         | 78.29            | 759    |
| D382 树脂平均值 | 23              | 1 575        | 5 430        | 2.1          | 30.05            | 576    |

由表 5 可看出,与 D382 树脂相比,JH-1 树脂吸附原液体积、树脂饱和铀容量等参数均更大,饱穿比平均为 2.1(D382 树脂饱穿比为 3.4),JH-1 树脂的吸附效率比 D382 树脂高。

JH-1 树脂在吸附过程中为二塔串联,首塔饱和时,末塔不会穿透;与 D382 树脂的三塔串联吸附相比,减少了一个塔,降低了吸附塔的运行压力,运行更加安全,JH-1 树脂两塔串联吸附曲线见图 10。

比达 4.5 且首塔淋洗液中铀质量浓度不高于 800 mg/L,树脂残余铀质量浓度不高于 1.5 mg/mL 时,切换首塔至吸附工序。可以看出,与室内台架试验数据(图 7~图 8)相比,扩大试验合格液铀质量浓度最高峰值达 80 g/L,远远超过了室内试验的合格液铀质量浓度(50 g/L),而且淋洗首塔中淋洗液铀浓度下降速度很快,当淋洗床体积倍数约为 2.6 时,淋洗首塔中淋洗液铀质量浓度可降至 600 mg/L。

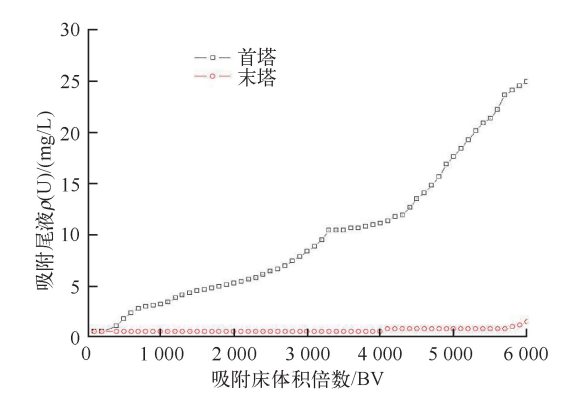


图 10 JH-1 树脂两塔串联吸附曲线

Fig. 10 JH-1 resin two-tower series adsorption curve

2.5.3 淋洗

采用两塔串联淋洗(图 11)。淋洗前用盐酸酸化树脂以除去碳酸根<sup>[17-18]</sup>。采用 3.5 g/L 稀盐酸溶液为淋洗剂。收集约 2.5 BV 合格液后,当淋洗

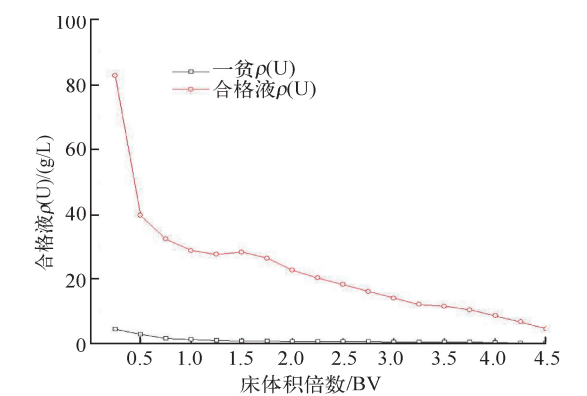


图 11 两塔串联淋洗曲线

Fig. 11 Two-tower series washing curve

JH-1 树脂淋洗合格液  $\rho(\text{U})$  达 30 g/L,与 D382 树脂淋洗合格液  $\rho(\text{U})$ (约 12.0 g/L)相比,有大幅提高。扩大试验淋洗合格液平均铀浓度与生产同期数据的对比见图 12。

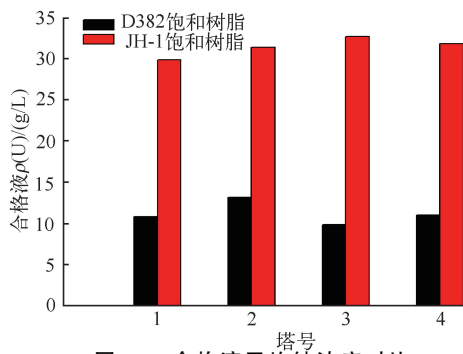


图 12 合格液平均铀浓度对比

Fig. 12 Comparison of average uranium concentration of qualified liquid

与 D382 贫树脂相比,JH-1 贫树脂铀容量和  $\text{Cl}^-$  含量均略好,铀容量低 0.09 mg/mL, $\text{Cl}^-$  含量高 18.3 mg/mL; 但 D382 树脂吸附容量较低。所以后续试验及现场应用均选用 JH-1 型树脂,选取 3.5 g/L HCl(表4)做淋洗剂,可同步实现对

JH-1 树脂的转型。

2.5.4 贫树脂再吸附

前期试验中,用工业盐酸调整吸附原液  $\text{HCO}_3^-$  浓度,研究其对树脂吸附性能的影响。为了验证在高  $\text{HCO}_3^-$  条件下 JH-1 树脂的吸附情况,后期试验直接用泵输送原液到吸附塔进行吸附。试验数据表明,JH-1 树脂在未酸化原液中的吸附容量(66.98~73.25 mg/mL)较前期在酸化原液中的吸附容量(77.25~84.63 mg/mL)有所降低,但仍高于 66 mg/mL;比现在生产中使用的 D382 树脂的容量高约 30 mg/mL,且可以节约大量酸化所需的盐酸,降低生产成本。

2.5.5 原材料消耗

JH-1 树脂与 D382 树脂相比,酸性淋洗原材料消耗见表 6。

表 6 两种树脂淋洗原材料消耗对比

Table 6 Comparison of raw material consumption of two resin washing processes

| 树脂类型        | 工业盐酸      |          | 片碱        |          | 工业盐       |          |
|-------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|             | 用量/(t/tU) | 单价/(元/t) | 用量/(t/tU) | 单价/(元/t) | 用量/(t/tU) | 单价/(元/t) |
| D382        | 23.15     | 1.107    | 1.15      | 2.936    | 3.50      | 450      |
| JH-1        | 5.50      |          | 1.00      |          | 0         |          |
| 节约成本/(元/tU) | 20.827    |          | 587       |          | 1.575     |          |
| 合计/(元/tU)   |           |          | 22.989    |          |           |          |

2.6 JH-1 树脂在生产中应用

JH-1 型树脂自 2012 年投入生产,至 2020 年近 9 年的生产运行表明,其吸附性能参数稳定(表

7)。JH-1 树脂的铀吸附效率均高于 98%,平均饱和铀容量为 53.55 mg/mL(以湿树脂计),变化系数仅为 9.64%,JH-1 树脂的吸附性能长期稳定。

表 7 JH-1 树脂生产运行吸附性能

Table 7 Adsorption performance of JH-1 resin production operation

| 年份   | 浸出液中 $\rho_B$ /(mg/L) |                  |                  |                  |               |                    | 饱和树脂铀容量/<br>(mg/mL) | 贫树脂铀容量/<br>(mg/mL) | 铀吸附<br>效率/% |
|------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------|
|      | U                     | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ |                     |                    |             |
| 2012 | 19.83                 | 462.33           | 738.51           | 266.71           |               |                    | 59.06               | 0.51               | 99.14       |
| 2013 | 17.51                 | 544.63           | 762.13           | 276.49           | 2.94          | 2.57               | 56.45               | 0.49               | 99.13       |
| 2014 | 13.24                 | 561.10           | 784.88           | 289.38           | 3.04          | 2.63               | 54.47               | 0.63               | 98.84       |
| 2015 | 16.90                 | 574.97           | 794.01           | 297.40           | 3.07          | 2.72               | 55.70               | 0.88               | 98.42       |
| 2016 | 18.53                 | 620.45           | 780.27           | 281.01           | 3.07          | 2.68               | 56.64               | 0.54               | 99.05       |
| 2017 | 17.83                 | 635.11           | 814.01           | 317.82           | 3.11          | 2.54               | 56.07               | 0.63               | 98.88       |
| 2018 | 20.22                 | 636.5            | 808.16           | 324.54           | 3.08          | 2.63               | 55.22               | 0.58               | 98.95       |
| 2019 | 21.38                 | 637.52           | 801.33           | 318.8            | 2.13          | 1.72               | 44.79               | 0.65               | 98.55       |
| 2020 | 17.82                 | 650.75           | 697.62           | 271.94           | 3.03          | 2.47               | 43.53               | 0.79               | 98.19       |
| 平均值  | 18.14                 | 591.48           | 775.66           | 293.79           | 2.93          | 2.50               | 53.55               | 0.63               | 98.82       |

### 3 结论

1)JH-1树脂凭借其特殊的叔胺基官能团及大孔骨架结构,对某铀矿高氯根(3.4 g/L)、高矿化度(12.16 g/L)浸出液体系中的碳酸铀酰配合阴离子展现出显著的选择性吸附能力,其铀饱和吸附容量高达60 mg/mL,吸附效率达98.85%。JH-1树脂的淋洗效率达99%,铀回收率为82%。与D382树脂相比,JH-1树脂的淋洗合格液铀浓度提高2.5倍,显著提升了铀的回收效率。

2)JH-1树脂在高浓度竞争性杂质离子(如 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 等)环境中,对碳酸铀酰配合阴离子的选择性吸附能力优异,可有效抑制 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等的干扰,解决了高矿化度体系中树脂吸附位点竞争难题。

3)JH-1树脂通过减少盐酸和工业盐的消耗,显著降低了原材料成本。与D382树脂相比,使用JH-1树脂可降低生产成本约2.3万元/tU,具有显著的经济效益。其高氯根高矿化度体系中连续运行9年,平均铀饱和容量为53.55 mg/mL,容量变化系数仅为9.64%,其吸附性能稳定可靠。

### 参考文献:

- [1] 苏学斌,刘乃忠,马新林,等.新疆某铀矿床天然成因试剂地浸条件评价[J].铀矿冶,2007,26(4):174-179.  
SU Xuebin, LIU Naizhong, MA Xinlin, et al. Condition evaluation of in-situ leaching by natural reagent at a uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2007, 26(4): 174-179.
- [2] 胡凯光,陈祥标,谢水波,等.地浸采铀工艺中氯离子的作用及其影响[J].矿业研究开发,2006,26(3):43-45.  
HU Guangkai, CHEN Xiangbiao, XIE Shuibao, et al. The action of chlorine ion and its influence on leaching in in-situ leaching of uranium[J]. Mining Research and Development, 2006, 26(3): 43-45.
- [3] 张镛,许根福.离子交换及铀的提取[M].北京:原子能出版社,1991:4-14.
- [4] 王书民.无机化学[M].北京:科学出版社,2013:243.
- [5] 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.
- [6] 王德义,谌竞清,赵淑良,等.铀的提取与精制工艺学[M].北京:原子能出版社,1982:164-166.
- [7] 王凤菊,陈树森,宋艳,等.水杨酸螯合树脂对铀的吸附性能[J].铀矿冶,2024,43(3):40-44.  
WANG Fengju, CHEN Shusen, SONG Yan, et al. Adsorption performance of salicylic acid chelating resin for uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3): 40-44.
- [8] 许根福.某铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸液树脂吸附铀机制的探讨[J].铀矿冶,2015,34(1):8-11.  
XU Genfu. Investigation of resin adsorption uranium mechanism from one uranium mine of  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in situ leaching solution[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2015, 34(1): 8-11.
- [9] 赖磊,师振峰,熊威,等.铀矿石中性浸出液吸附饱和和树脂的酸性淋洗工艺研究[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.
- [10] 成弘,刘乃忠,苏学斌,等. $\text{CO}_2$ 酸化碱性浸出液增强吸附效果的机理分析[C]//中国核学会.全国铀矿大基地建设学术研讨会(下).北京:核工业北京化工冶金研究院,2012:546-551.
- [11] 王永莲.地浸采铀工艺技术[M].长沙:国防科技大学,2007.
- [12] B.B.格罗莫夫.铀化学工艺概论[M].北京:原子能出版社,1988:115-134.
- [13] 杜志明,牛学军,苏学斌,等.内蒙古某铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工业性试验[J].铀矿冶,2013,32(1):1-4.  
DU Zhiming, NIU Xuejun, SU Xuebin, et al.  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in-situ leaching test of one uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1): 1-4.
- [14] 段庆丰.碳酸铀酰配位化合物的组成及稳定常数测定[J].甘肃科技,2010,26(21):76-78.  
DUAN Qingfeng. Composition and stability constant determination of uranyl carbonate coordination compounds[J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(21): 76-78.
- [15] 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.
- [16] 毛雪琴,汤福隆,王颖,等. D-290 大孔阴离子交换树脂吸附机理和应用 [J]. 黄金, 1992, 13 (2): 46-50.
- MAO Xueqin, TANG Fulong, WANG Ying, et al. The mechanism and application of gold adsorption by D-290 macroporous anion exchange resin [J]. Gold, 1992, 13(2): 46-50.
- [17] 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 macroporous strongly alkaline anion loaded uranium resin [J]. Hydrometallurgy of China, 1999, 18 (4): 32-34.
- [18] 蔡萍莉,谭凯旋,史文革,等. 酸法地浸采铀废水离子交换与中和试验研究 [J]. 现代矿业, 2010, 26 (11): 21-22.
- CAI Pingli, TAN Kaixuan, SHI Wenge, et al. Experimental study of ion exchange and neutralization on acid in situ leach uranium mining wastewater [J]. Modern Mining, 2010, 26(11): 21-22.

### Research on Uranium Extraction Process of JH-1 Resin in High Chloride and High Mineralization Leaching Liquid System

SHEN Hongwei, SHI Zhenfeng, LAI Lei, REN Huaping, XIE Xiliang  
(Xinjiang Tianshan Uranium Industry Co., Ltd., CNNC, Yining 835000, China)

**Abstract:** In the leaching liquid system of a uranium deposit in Xinjiang, the content of  $\rho(\text{Cl}^-)$  is high and the mineralization degree is high. When using traditional D382 weakly alkaline anion exchange resin to treat this system, the dynamic adsorption capacity of uranium is low (15~30 mgU/mL) and the uranium separation and enrichment efficiency is poor. This study systematically evaluated the adsorption performance of JH-1 macroporous weakly alkaline acrylic resin on the system. The results show that JH-1 resin has special tertiary amine functional groups and a macroporous skeleton structure, exhibiting excellent selectivity for uranium complexes  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  and  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  in  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  neutral leachate. Its saturated adsorption capacity reaches 60 mgU/mL, which was 2.6 times higher than that of D382 resin. In the dynamic adsorption process, the adsorption efficiency of JH-1 resin for uranium reaches 98.85%, the leaching efficiency is 99%, and the uranium recovery rate is 82%. This resin effectively solves the problem of resin adsorption site competition and equipment scaling in high mineralization systems by suppressing the interference of competitive ions such as  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . It significantly reduces the consumption of raw materials such as hydrochloric acid and industrial salt, and reduces production costs by 23 000 yuan/tU, providing technical support for efficient development of sandstone uranium mines.

**Key words:** leachate; high chloride; high mineralization; resin; adsorption performance; adsorption capacity; JH-1 macroporous weakly alkaline acrylic resin; D382 weakly alkaline anion exchange resin