

高含泥低品位铀矿浸出工艺研究

孔凡峰¹, 梁耕宇², 刘会武², 李甜甜³

(1. 新疆中核天山铀业有限公司 新疆 伊宁 835000;

2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

3. 中核甘肃铀业有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:某高含泥低品位砂岩型铀矿以泥质细砂岩为主, 矿区含水层与隔水层厚度变化大, 砂体渗透性较差, 地下水矿化度高, 难以采用地浸开采。为全面评价该矿石的浸出性能, 系统探究了酸/碱法搅拌浸出及柱浸的可行性。研究表明, 采用酸法搅拌浸出工艺时, 在硫酸用量 16%、 MnO_2 用量 1%、液固体积质量比 1.6 : 1~1.8 : 1、浸出温度 60 °C、浸出时间 4 h 条件下, 铀浸出率达 95%, 但采用酸法柱浸工艺时, 因矿石碳酸盐含量高, 易引发泥化及气堵现象, 导致浸出试验无法稳定运行; 采用碱法搅拌浸出工艺时, 在 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ 用量 2.5%、液固体积质量比 1.0 : 1~1.2 : 1、温度 80 °C、浸出时间 16 h 条件下, 铀浸出率达 88%, 而采用碱法柱浸工艺时, 拌碱-熟化可维持矿堆渗透性, 但因粗粒级矿石浸出率较低, 导致整体浸出率偏低。综合对比, 推荐采用碱法搅拌浸出工艺处理该矿石, 并需强化粗粒级预处理, 以进一步提高铀浸出率。

关键词:高含泥铀矿; 铀; 搅拌浸出; 拌碱-熟化; 柱浸

中图分类号: TL212; TF803.21

文献标识码: A

文章编号: 1009-2617(2026)04-0599-08

DOI: 10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.017

砂岩型铀矿广泛分布于我国华东、中南、西北和西南地区的中、新生代陆相红色碎屑建造盆地中^[1-3]。该类矿石通常由碎屑物和胶结物组成, 其中泥质属于胶结物中的一种^[4-6]。部分砂岩型铀矿因泥质含量高且碳酸盐含量较大, 导致开采成本高、铀浸出率低, 目前尚未得到有效开采利用。铀在此类矿石中与胶结物关系密切, 主要以吸附形式赋存, 仅少数以独立铀矿物、类质同象或有机物配合物形式存在。针对高碳酸盐铀矿的处理, 乌兹别克斯坦曾采用微酸浸出工艺取得了良好的地浸效果, 铀浸出率可达 70% 以上^[7-8], 表明酸法工艺在此类矿石中具有可行性; 此外, 已有研究表明, 高碳酸盐砂岩型铀矿中铀浸出率与 HCO_3^- 浓度呈正相关, 且静态试验已证实 NH_4HCO_3 - H_2O_2 体系对铀的浸出具有较好效果^[9], 表明碱法工艺在此类矿石中也有一定可行性。但不同浸出工艺会诱发脉石矿物的竞争反应, 对浸出选择性及试剂消耗产生显著影响^[10], 因此有必要借助工艺矿物学研究优化浸出剂配方, 以实现针对性工艺设计。某高含泥砂岩型铀矿, 其矿石岩性以

泥质粉砂岩、泥质细中砂岩为主, 偶见灰色粗砂岩, 泥质含量高于 15%, 矿层渗透系数小于 0.1 m/d; 同时, 含水层结构发育不完善, 含水层与隔水层厚度变化大, 层位不稳定, 砂体渗透性较差, 地下水矿化度较高, 致使该矿难以采用地浸开采。若改用常规酸法或碱法工艺, 则面临试剂成本高、经济性较差等问题。因此, 提高此类矿石的铀浸出率是其开发利用的关键。为全面评价该矿石的浸出性能, 系统探究了酸法与碱法浸出工艺的适用性, 开展了搅拌浸出试验及柱浸验证试验, 以期为该类矿产资源的高效利用提供技术参考。

1 试验部分

1.1 矿石特征

铀矿石: 取自某含泥砂岩型铀矿, 为层状和块状构造, 较疏松, 有细砂-极细砂结构。碎屑矿物主要为石英、长石和云母, 结构较疏松。矿石胶结物以泥质为主, 还有少量钙质, 胶结形式以孔隙式胶结为主。矿石主要元素化学组成见表 1。

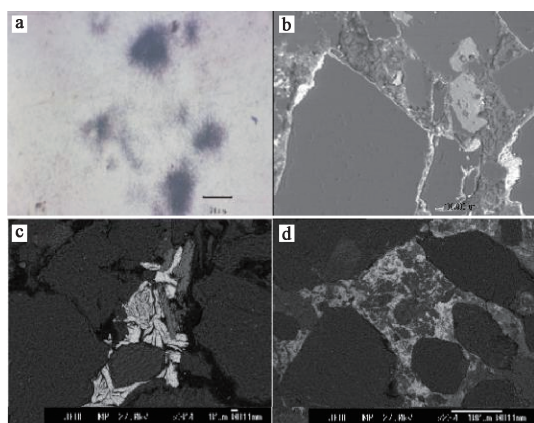
收稿日期: 2026-06-03; 修订日期: 2026-07-06

第一作者简介: 孔凡峰(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为铀水冶。

表 1 矿石主要元素化学组成
Table 1 Composition of major chemical elements in uranium ore

U	U ⁶⁺	SiO ₂	CaO	烧失量/%
0.057	0.026	55.32	7.76	8.59
MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	C _{有机}	CO ₂
2.50	3.26	1.04	1.63	5.17

由表 1 可知:矿石中铀品位为 0.057%,属于低品位铀矿石,六价铀占比达 45.6%。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值为 3.13,反映出属氧化环境产物;矿石中主要耗酸杂质元素为钙、镁、铁、无机碳等,其中 CaO、MgO 质量分数分别为 7.76%和 2.50%;含无机碳 5.17%(CO₂计),烧失量为 8.59%,说明碳酸盐含量较高。铀矿物的主要形式如图 1 所示。可以看出,铀的赋存形式主要为吸附态,少量以独立铀矿物形式出现;铀矿物主要包括沥青铀矿、硅钙铀矿及钒酸盐铀矿等。



a—吸附态铀;b—沥青铀矿;c—钒酸盐铀矿;d—硅钙铀矿

图 1 铀矿物的主要形式

Fig. 1 Occurrence state of uranium minerals

1.2 试剂及设备

主要试剂:硫酸、碳酸钠、碳酸氢钠、二氧化锰和高锰酸钾,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。水为去离子水。

主要设备:水浴恒温磁力搅拌器,SHT-6C 型,金坛市美特仪器制造有限公司;JJ224BFYC-R50 型精密分析天平;PHSJ-3F 型 pH 计;MPC601T 型三级隔膜真空泵,德国伊尔姆真空泵制造有限公司;三角瓶(250,500 mL);漏斗和滤纸等。

1.3 试验方法

搅拌浸出试验:将矿石破碎至—100 目,称取

50 g 矿石样品置于 250 mL 三角瓶中;同时,利用浓硫酸或碳酸钠、碳酸氢钠和去离子水配制成一定浓度的酸/碱浸出剂,再将酸/碱浸出剂按照一定液固体积质量比加入到三角瓶中;然后将三角瓶置于恒温磁力搅拌器中,在设定温度下开启搅拌,浸出一定时间;待浸出结束后真空抽滤,对浸出矿浆进行固液分离,得浸出液和尾渣。采用电感耦合等离子体发射光谱法分析浸出液和尾渣中铀及其他元素含量,计算浸出率。

柱浸试验:将矿石破碎至—5 mm;同时将 Na₂CO₃、NaHCO₃ 按一定质量比加入 250 mL 清水中溶解,之后倒入矿粉中拌和均匀、制粒;制粒后矿石密封、放入干燥箱中,在 90 °C 下熟化 24 h;再将熟化后矿石置于柱浸装置中,用清水淋洗,单级淋洗液体积 210 mL。

2 试验结果与讨论

2.1 酸法搅拌浸出

2.1.1 硫酸用量对铀浸出的影响

在不添加氧化剂条件下,用硫酸对矿样进行浸出。试验条件:矿样质量 50 g,液固体积质量比 5/1,浸出温度 25 °C,浸出时间 2 h,搅拌转速 200 r/min。硫酸用量对铀浸出的影响试验结果如图 2 所示。

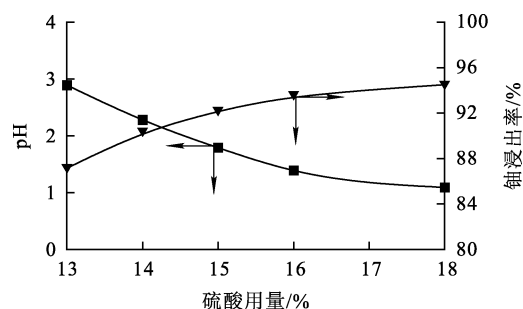


图 2 硫酸用量对铀浸出的影响

Fig. 2 Effect of sulfuric acid dosage on leaching of uranium

由图 2 可知,随硫酸用量增大,浸出液 pH 降低,铀浸出率升高:硫酸用量增至 15%时,浸出液 pH 降至 2.0 以下,铀浸出率升至 92.2%;随硫酸用量增加,铀浸出率升高趋势变缓,硫酸用量增至 18%时,铀浸出率仅提高至 94.5%,反应基本达到平衡状态。综合考虑,初步确定硫酸用量以 16%为宜。

2.1.2 氧化剂用量对铀浸出的影响

从矿石分析结果可知,矿石中六价铀占比仅为 45.6%,因此在未添加氧化剂条件下,铀浸出效果不理想。 U^{6+} 在酸性及中性介质中可快速溶解,而 U^{4+} 主要赋存于沥青铀矿和铀石中,在稀酸中溶解极慢,须通过添加氧化剂将其氧化为 U^{6+} 才能快速浸出。为此,选用软锰矿(MnO_2)作为氧化剂,并考察其对铀浸出的影响。试验条件:矿样质量 50 g,液固体积质量比 5/1,浸出温度 25 °C,硫酸用量 16%,浸出时间 2 h,搅拌转速 200 r/min。软锰矿用量对铀浸出的影响试验结果如图 3 所示。

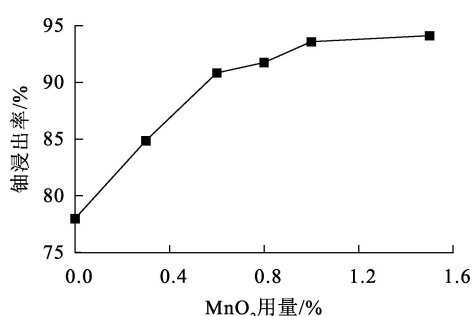


图 3 软锰矿用量对铀浸出的影响

Fig. 3 Effect of pyrolusite dosage on leaching of uranium

由图 3 可知:随软锰矿用量增加,铀浸出率显著升高;但铀浸出率增幅随氧化剂用量增加而逐渐变缓;当软锰矿用量增至 1% 以上时,铀浸出率升幅不明显。考虑到软锰矿用量过大不仅增加其自身消耗量,还会增加硫酸消耗量^[11]。综合考虑,确定氧化剂软锰矿用量以 1% 为宜。

2.1.3 浸出温度对铀浸出的影响

试验条件:矿样质量 50 g,液固体积质量比 5/1,硫酸用量 16%,软锰矿用量 1%,浸出时间 2 h,搅拌转速 200 r/min。浸出温度对铀浸出的影响试验结果如图 4 所示。

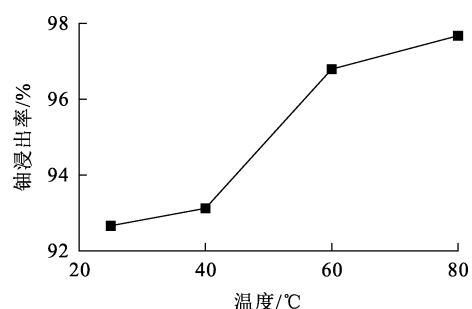


图 4 浸出温度对铀浸出的影响

Fig. 4 Effect of leaching temperature on leaching of uranium

由图 4 可知,随温度升高,铀浸出率呈升高趋势;温度为 25 °C,铀浸出率为 92.66%;温度升至 60 °C 时,铀浸出率升至 96.79%,升高幅度较大;继续升温至 80 °C 时,铀浸出率仅有小幅升高,趋于稳定。由此可见,温度是提升该矿浸出率的重要影响因素,但温度过高,能耗显著增加,影响整体经济效益。综合考虑矿石品位与矿浆加温成本,确定浸出温度以 60 °C 为宜。

2.1.4 液固体积质量比对铀浸出的影响

试验条件:矿样质量 50 g,浸出温度 25 °C,硫酸用量 16%,软锰矿用量 1%,浸出时间 2 h,搅拌转速 200 r/min。液固体积质量比对铀浸出的影响试验结果如图 5 所示。

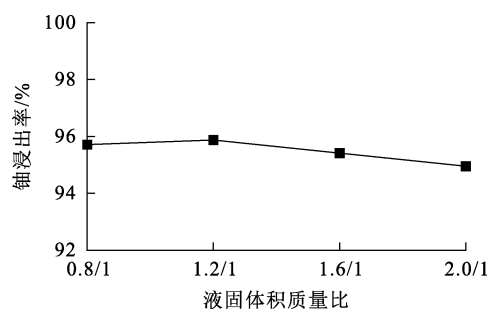


图 5 液固体积质量比对铀浸出的影响

Fig. 5 Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching of uranium

由图 5 可知,液固体积质量比对铀浸出率影响不大。但试验过程发现,液固体积质量比低于 1.6/1 时,矿浆黏稠,难以搅拌均匀;且液固体积质量比对矿浆过滤也有一定影响,液固体积质量比越大,过滤速度越快。因此,确定液固体积质量比控制在 1.6/1~1.8/1 为宜。

2.1.5 浸出时间对铀浸出的影响

试验条件:矿样质量 50 g,硫酸用量 16%,软锰矿用量 1%,液固体积质量比 1.6/1,浸出温度 60 °C,搅拌转速 200 r/min。浸出时间对铀浸出的影响试验结果如图 6 所示。可知,矿石中的铀主要以吸附态存在,采用酸法工艺浸出动力学较快,浸出 1 h 时,铀浸出率即可达 91.74%;随浸出时间延长,铀浸出率升高;浸出 4 h 时,铀浸出率达 95.4%;继续浸出,铀浸出率没有明显变化。因此,确定浸出时间以 4 h 为宜。

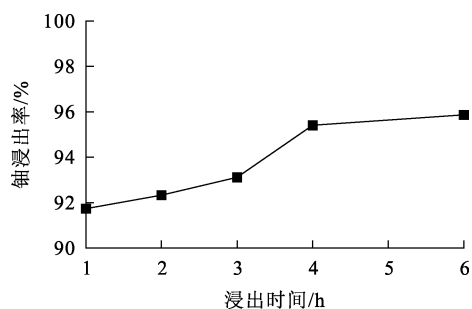


图 6 浸出时间对铀浸出的影响

Fig. 6 Effect of leaching time on leaching of uranium

根据上述单因素试验结果,确定优化后的酸法浸出工艺参数为:硫酸用量 16%,软锰矿用量 1%,液固体积质量比 1.6/1~1.8/1,浸出温度 60℃,浸出时间 4 h。在此工艺参数下,铀浸出率稳定在 95%左右。

2.2 碱法搅拌浸出

2.2.1 碱用量对铀浸出的影响

在不添加氧化剂条件下,采用 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 对矿样进行浸出。试验条件: Na_2CO_3 与 NaHCO_3 质量比为 2:1,矿样质量 50 g,液固体积质量比 1/1,浸出温度 90℃,浸出时间 24 h,搅拌转速 200 r/min。碱用量对铀浸出的影响试验结果如图 7 所示。

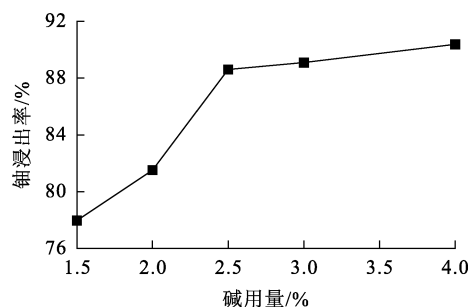


图 7 碱用量对铀浸出的影响

Fig. 7 Effect of alkaline dosage on alkaline leaching of uranium

由图 7 可知:随碱用量增加,铀浸出率逐渐升高;碱用量增至 2.5%时,铀浸出率达 88.6%;继续增加碱用量,铀浸出率升幅不大。因此,推荐碱用量为 2.5%。

2.2.2 氧化剂用量对铀浸出的影响

为将四价铀氧化为六价铀,加入适量 KMnO_4 氧化剂,并研究其对碱法浸出铀效果的影响。试

验条件:矿样质量 50 g,碱用量 2.5% (Na_2CO_3 与 NaHCO_3 质量比为 2:1),液固体积质量比 1/1,浸出温度 90℃,浸出时间 24 h,搅拌转速 200 r/min。 KMnO_4 用量对铀浸出的影响试验结果如图 8 所示。可知,高锰酸钾用量对铀的浸出影响较小,用量从 0 增至 0.4%时,铀浸出率仅提升 2.5 个百分点,升幅很小。综合考虑,确定进行碱浸试验时不必添加氧化剂。

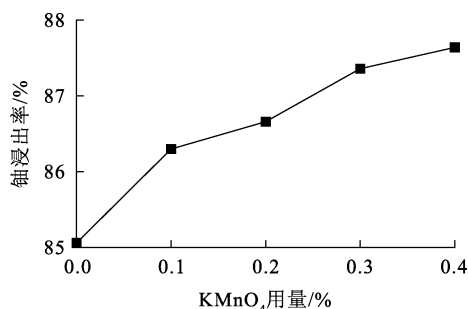


图 8 高锰酸钾用量对铀浸出的影响

Fig. 8 Effect of potassium permanganate dosage on leaching of uranium

2.2.3 浸出温度对铀浸出的影响

试验条件:矿样质量 50 g,液固体积质量比 1/1,碱用量 2.5% (Na_2CO_3 与 NaHCO_3 质量比为 2:1),浸出时间 24 h,搅拌转速 200 r/min。浸出温度对铀浸出的影响试验结果如图 9 所示。

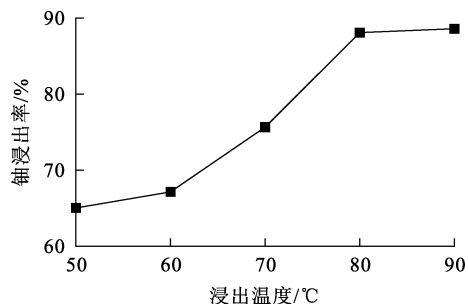


图 9 浸出温度对铀浸出的影响

Fig. 9 Effect of leaching temperature on leaching of uranium

由图 9 可知:随浸出温度升高,矿石中铀浸出率明显升高,说明温度是影响该类型铀矿石浸出率的关键影响因素;温度升至 80℃后,铀浸出基本稳定,浸出率达 88%左右。综合考虑,确定浸出温度以 80℃为宜。

2.2.4 浸出时间对铀浸出的影响

试验条件:矿样质量 50 g,液固体积质量比

1/1,碱用量 2.5%(Na_2CO_3 与 NaHCO_3 质量比为 2:1),浸出温度 80℃,搅拌转速 200 r/min。浸出时间对铀浸出的影响试验结果如图 10 所示。

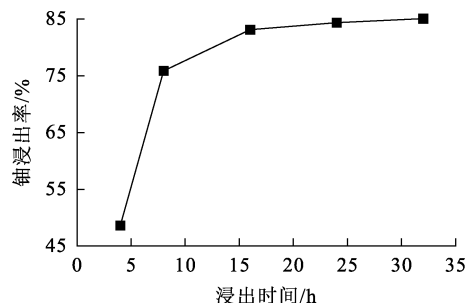


图 10 浸出时间对铀浸出的影响

Fig. 10 Effect of leaching time on leaching of uranium

由图 10 可知:浸出初期,铀浸出率随浸出时间延长而显著升高,之后升幅缓慢,直至浸出 16 h,铀浸出率才能升至 83%,浸出渣中铀品位才能降至 0.01%左右;继续延长浸出时间,铀浸出率无明显提升。这说明碱法浸出动力学较慢,需要较长时间才能达到浸出平衡。这是因为碱法浸出需经历“氧化-配合”2 个步骤,且高碳酸盐环境使溶液处于 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 缓冲体系,pH 升高速度较慢,导致反应动力学受限。综合考虑,确定浸出时间以 16 h 为宜。

2.2.5 液固体积质量比对铀浸出的影响

试验条件:矿样质量 50 g,碱用量 2.5%(Na_2CO_3 与 NaHCO_3 质量比为 2:1),浸出温度 80℃,浸出时间 16 h,搅拌转速 200 r/min。液固体积质量比对铀浸出的影响试验结果如图 11 所示。

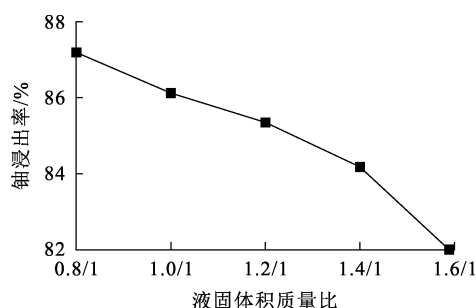


图 11 液固体积质量比对铀浸出的影响

Fig. 11 Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching of uranium

由图 11 可知:液固体积质量比对铀浸出的影响相对较小,控制液固体积质量比在 1.2/1 以下时,铀浸出率均可维持在 85%左右,液固体积质

量比越小,铀浸出率越高。主要原因是随液固体体积质量比减小,浸出剂中碱浓度升高,有利于铀浸出。综合考虑成本与效率,确定液固体体积质量比以控制在 1.0/1~1.2/1 为宜。

根据上述单因素试验结果,确定碱法浸出的最佳工艺参数为: $m(\text{Na}_2\text{CO}_3):m(\text{NaHCO}_3)=2:1$,碱用量 2.5%,浸出温度 80℃,浸出时间 16 h,液固体体积质量比 1.0/1~1.2/1。

2.3 柱浸验证试验

堆浸技术因工艺简单、投资少、效率高且管理便捷,在低品位铀、铜、金等资源的处理中得到了广泛应用^[12-14]。综合对比酸/碱法搅拌浸出试验结果可知,2 种工艺各有优缺点:酸法搅拌浸出在优化条件下的铀浸出率可达 95%,具有浸出速度快、效率高等优势,但当前硫酸价格偏高、酸耗量较大,且对设备腐蚀较严重;碱法搅拌浸出在优化条件下的铀浸出率为 88%,虽略低于酸法,但其试剂成本低、对设备腐蚀小,且环境友好性更优。综合考虑,最终确定选用碱法浸出工艺,并在此基础上开展拌碱-熟化柱浸试验,以模拟堆浸过程。

试验条件:矿样质量 2 kg,矿石品位 0.057%,矿石粒度—5 mm。将 3.2% Na_2CO_3 、1.6% NaHCO_3 、加入 250 mL 清水加热溶解后,倒入矿粉中拌和均匀、制粒,之后密封、放入干燥箱中,于 90℃下熟化 24 h 后装入柱浸装置,用清水进行淋洗。柱浸试验结果如图 12 所示。柱浸试验中发现,碱法柱浸矿石渗透性保持良好,可满足柱浸操作渗透性要求。由图 12 可知,喷淋初期铀浓度较高,随后迅速降低,说明矿石熟化过程基本已完成铀的浸出,喷淋浸出只是柱内已溶出铀的洗涤、置换过程。对浸出渣化学成分进行分析得知,累积铀浸出率较低,最高仅为 64.48%。

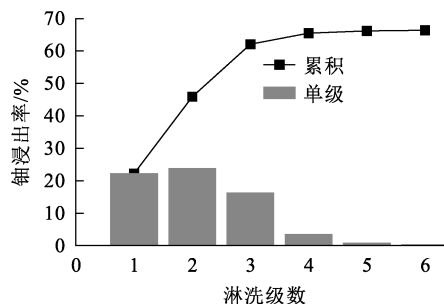


图 12 拌碱-熟化柱浸试验结果

Fig. 12 Results of alkali mixing-aging column leaching test

为进一步探明不同粒级矿石的浸出行为,对析结果见表 2。
浸出前原矿及浸出渣样品分别进行粒级筛析,分

表 2 浸出前后各粒级矿石的分布及铀浸出率
Table 2 Particle size distribution and uranium leaching rate of ore before and after leaching

粒级/mm	原矿			浸出渣			铀浸出率/%
	质量占比/%	铀品位/%	铀分布率/%	质量占比/%	铀品位/%	铀分布率/%	
—5.0+3.2	5.32	0.126	11.61	4.43	0.116	24.25	7.94
—3.2+2.0	12.54	0.130	28.23	11.61	0.071	38.87	45.38
—2.0+1.0	5.40	0.089	8.33	4.14	0.050	9.76	43.82
—1.0+0.45	6.90	0.083	9.93	4.64	0.037	8.10	55.42
—0.45+0.25	5.67	0.053	5.21	4.59	0.011	2.38	79.25
—0.25	64.17	0.033	36.69	70.59	0.005	16.64	84.85
合计	100.00	0.058	100.00	100.00	0.021	100.00	64.48

由表 2 可知:矿石中细粒级矿石占比较大,说明含泥量较高;随矿石粒度变细,原矿石中铀品位也明显降低,—5.0 mm+3.2 mm 粒级矿石中铀品位是—0.25 mm 粒级矿石的 3.8 倍;不同粒级矿石的铀浸出率差异明显,表现为细粒级矿石浸出效果较好,粗粒级矿石铀浸出率较低;—0.25 mm 粒级矿石渣中铀品位可降至 0.005%,这与搅拌浸出试验结果相一致。综上推断,导致柱浸铀浸出率较低的原因是高品位粗粒级矿石铀浸出率较低。但进一步细破矿石未必能有效提升铀浸出率,原因在于该矿石中含黏土矿物及碳酸盐矿物,过度细破会产生大量矿泥,使矿堆内部流道堵塞,导致部分区域铀矿物无法与淋洗液接触,从而造成致浸出率下降。同时,细破作业还会增加破碎磨矿工序,电耗及钢球损耗显著上升,且细粒级矿石易悬浮于浸出液中,需增设过滤工序,进而增加设备投资及运行成本。

3 结论

针对高含泥低品位铀矿石的浸出性能进行了系统地研究,获取了碱法浸出最佳工艺参数,验证了拌碱-熟化柱浸的可行性。主要结论如下:

1) 该高含泥低品位铀矿属于含铀碎屑岩矿石类型,主要岩性为泥质细砂岩及少量泥质粉砂岩、中砂岩;矿石中有机质、黄铁矿等还原物质含量较高;铀主要以吸附态存在且品位较低。

2) 酸法搅拌浸出在硫酸用量 16%、软锰矿用量 1%、液固体积质量比 1.6/1~1.8/1、浸出温度

60℃、浸出时间 4 h 条件下,铀浸出率达 95%左右。但由于矿石碳酸盐含量较高,易造成酸耗量较大;同时黏土含量较高,易导致酸法柱浸时发生堵塞,严重影响矿石渗透性,不利于堆浸。

3) 碱法搅拌浸出在碱用量 2.5% (Na_2CO_3 与 NaHCO_3 质量比为 2:1)、液固体积质量比 1.0/1~1.2/1、浸出温度 80℃、浸出时间 16 h 条件下,铀浸出率为 88%。拌碱-熟化柱浸试验中,矿堆渗透性保持良好,但因粗粒级矿石浸出率偏低,致使累积铀浸出率最高仅为 64.48%,由此确定粗粒级矿石铀浸出率低是制约整体浸出效果的关键因素。

4) 酸法搅拌浸出工艺浸出率虽较高,但受硫酸价格上涨影响,工艺成本偏高,经济性较差;碱法柱浸面临粗粒级矿石浸出率低、细磨易泥化的问题,且铀浸出率偏低;相比之下,碱法搅拌浸出工艺具有试剂成本低、设备腐蚀小、铀浸出率较高等优势,有一定工业应用潜力。因此,推荐采用碱法搅拌浸出工艺处理该类矿石。

参考文献:

- [1] 宋继叶,秦明宽,蔡煜琦.世界超大型砂岩铀矿床形成环境分析与找矿方向[J].铀矿地质,2021,37(5):901-912.
Song Jiye, Qin Mingkuan, Cai Yuqi. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. Uranium Geology, 2021, 37(5): 901-912.
- [2] 王飞飞,刘池洋,邱欣卫,等.世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J].地质学报,2017,91(9):2021-2046.
Wang Feifei, Liu Chiyang, Qiu Xinwei, et al. Characteristics and distribution of world's identified sandstone-type

- uranium resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(9): 2021-2046.
- [3] 付勇,魏帅超,金若时,等.我国砂岩型铀矿分带特征研究现状及存在问题[J]. *地质学报*, 2016, 90(12): 3519-3544.
- Fu Yong, Wei Shuaichao, Jin Ruoshi, et al. Current status and existing problems of China's sandstone-type uranium deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90 (12): 3519-3544.
- [4] 宋昊,范元清,张成江,等.中国北方砂岩型铀矿床工艺矿物学研究若干进展[J]. *矿物岩石*, 2024, 44(1): 11-29.
- Song Hao, Fan Yuanqing, Zhang Chengjiang, et al. Advances in the study of process mineralogy of sandstone-type uranium deposits in Northern China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(1): 11-29.
- [5] 张博,李建国,苗培森,等.开鲁盆地钱家店铀矿床铀的赋存状态及成因探讨[J]. *华北地质*, 2021, 44(2): 40-48.
- Zhang Bo, Li Jianguo, Miao Peisen, et al. The occurrence state and origin of uranium in Qianjiadian uranium deposit, Kailu Basin[J]. *North China Geology*, 2021, 44(2): 40-48.
- [6] 马成翠,魏学斌,陈功新,等.某高碳酸盐砂岩铀矿的碱法浸出[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(12): 67-76.
- Ma Chengcui, Wei Xuebin, Chen Gongxin, et al. Alkaline leaching of a high carbonate sandstone uranium ore[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(12): 67-76.
- [7] 李旭,雷林.低酸浸出技术应用研究[J]. *矿业研究与开发*, 2005(4): 15-17.
- Li Xu, Lei Lin. Application study of weak-acid leaching technique[J]. *Mining Research and Development*, 2005(4): 15-17.
- [8] 雷林,雷泽勇.微酸地浸采铀技术应用研究[J]. *矿业工程*. 2007(2): 20-22.
- Lei Lin, Lei Zeyong. Study & application of uranium extraction by on-site leaching technology[J]. *Mining Engineering*, 2007(2): 20-22.
- [9] 黎广荣,周义朋,赵凯,等.砂岩型铀矿浸出矿物工艺学研究进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(8): 9-19.
- Li Guangrong, Zhou Yipeng, Zhao Kai, et al. Research progress on mineral leaching technology of sandstone type uranium deposits[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2021(8): 9-19.
- [10] 杨润生,原溯.复杂组分砂岩铀矿的浸出工艺优化研究[J]. *湿法冶金*, 2025, 44(4): 482-488.
- Yang Runsheng, Yuan Yuan. Optimization of leaching process for complex component sandstone uranium ore[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2025, 44(4): 482-488.
- [11] 常喜信,钟平汝,李铁球,等.一种强化碱法堆浸提铀工艺的研究[J]. *铀矿冶*, 2011, 30(1): 22-25.
- Chang Xixin, Zhong Pingru, Li Tieqiu, et al. A study of extracting uranium by intensified alkaline heap leaching [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2011, 30(1): 22-25.
- [12] 李相良,薛济来,秦树辰,等.低品位氧化铜钴矿堆浸试验研究[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(5): 105-108.
- Li Xiangliang, Xue Jilai, Qin Shuchen, et al. Heap Leaching of low-grade copper-cobalt oxide ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024, 44(5): 105-108.
- [13] 刘洋,张含之,张辉,等.硬岩铀矿堆浸工艺研究进展, *南华大学学报(自然科学版)*, 2025, 39(5): 49-55.
- Liu Yang, Zhang Hanzhi, Zhang Hui, et al. Research progress on heap leaching technology for hard-rock uranium ores[J]. *Journal of University of South China(Science and Technology)* 2025, 39(5): 49-55.
- [14] 邢晨,田雨川.堆浸工艺在低品位金矿山中的应用分析[J]. *世界有色金属*, 2022(5): 208-210.
- Xing Chen, Tian Yuchuan. Application analysis of heap leaching process in low grade gold mine[J]. *World Nonferrous Metals*, 2022(5): 208-210.

Leaching Process of High-Clay Low-Grade Uranium Ore

KONG Fanfeng¹, Liang Gengyu², LIU Huiwu², LI Tiantian³

(1. *Xinjiang Tianshan Uranium Co., Ltd., CNNC, Yining 835000, China;*

2. *Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;*

3. *Gansu Mineral Co., Ltd., CNNC, Lanzhou 730050, China)*

Abstract: A high-clay low-grade sandstone-type uranium ore, predominantly composed of clay fine sandstone, exhibits significant thickness variations in both the aquifer and aquiclude within the mining area, resulting in poor sand permeability and high groundwater salinity, which render in-situ leaching infeasible. To comprehensively evaluate the leachability of this ore, the applicability of acid/alkaline agitation leaching and column leaching processes was systematically investigated. The results show that under the acid agitation leaching conditions of sulfuric acid dosage of 16%, MnO₂ dosage of 1%,

liquid volume to solid mass ratio of 1.6 : 1–1.8 : 1, leaching temperature of 60 °C, and leaching time of 4 h, the uranium leaching rate reaches 95%. However, when the acid column leaching process is applied, the high carbonate content in the ore causes severe argillization and gas blockage, making the process unstable and difficult to operate. In contrast, under the alkaline agitation leaching conditions with a $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ dosage of 2.5%, liquid volume to solid mass ratio of 1.0 : 1–1.2 : 1, temperature of 80 °C, and leaching time of 16 h, the uranium leaching rate attains 88%. For the alkaline column leaching process, alkali-mixing and curing can maintain the permeability of the ore heap. Nevertheless, the overall leaching rate remains low owing to the poor leaching efficiency of coarse particles. Based on a comprehensive comparison, the alkaline agitation leaching process is recommended for the treatment of this ore, and enhanced pretreatment of coarse particles should be implemented to further improve the uranium leaching rate.

Key words: high-clay uranium ore; uranium; agitation leaching; alkali-mixing and curing; column leaching