

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.05.011

新疆某铀矿床酸法浸出试验

吴冰,周义朋,王廷健,徐玲玲,黎广荣

(东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌330013)

摘要:为探究新疆某砂岩铀矿床矿石的浸出性能,获得不同硫酸浓度条件下矿石的最优浸出条件及参数,对砂岩型铀矿石进行室内不同硫酸浓度(0.2~10 g/L)摇瓶浸出对比试验,液固比为5:1,浸出环境温度为17℃,浸出周期96 h,一组添加300 mg/L双氧水,另一组不加氧化剂。试验结果表明,未添加氧化剂时,硫酸浓度为8 g/L时浸出率最大,酸度增加到10 g/L,铀浓度反而下降了5.78 mg/L,浸矿在48 h便几乎达到了平衡;酸度低于0.4 g/L时,浸出5 h便出现峰值,继续浸出,浸出率下降。添加氧化剂时,浸出率与硫酸浓度呈正相关,且添加氧化剂后浸出速率加快,但浸出平衡点无明显变化,当酸度低于0.6 g/L时,浸出后期出现铀浓度下降,硫酸浓度为8 g/L时,浸出率可达97.17%,硫酸浓度增加到10 g/L,浸出率并无明显增加。酸法浸出可应用于此铀矿床,且最佳浸出剂硫酸浓度为8 g/L。

关键词:砂岩型铀矿;酸法浸出;氧化剂

中图分类号:TL212.1⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2021)05-0058-09

Study on Acid Leaching of a Uranium Deposit in Xinjiang

WU Bing, ZHOU Yi-peng, WANG Ting-jian, XU Ling-ling, LI Guang-rong

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to explore leaching properties of a sandstone-type deposit in Xinjiang and obtain optimal leaching conditions and parameters under different sulfuric acid concentrations, uranium ore was leached in shake flask under different sulfuric acid concentration (0.2—10 g/L) with L/S of 5:1, temperature of 17℃, leaching time of 96 h, and with 300 mg/L or without hydrogen peroxide. The results show that: 1) For the group without hydrogen peroxide, the highest uranium leaching rate is obtained when concentration of sulfuric acid is 8 g/L, whereas it drops to 5.78 mg/L with 10 g/L concentration of sulfuric acid. While acidity is lower than 0.4 g/L, peak value of uranium concentration will appear after 5 hours of leaching and drops later when leaching continues. Leaching almost reaches equilibrium within 48 hours. 2) For the group with hydrogen peroxide, uranium leaching rate is positively correlated with concentration of sulfuric acid, and leaching rate rises with addition of oxidant, but leaching equilibrium point does not change significantly. While the acidity is lower than 0.6 g/L, the uranium concentration decreases in the later stage of leaching. Uranium leaching rate can reach 97.17% when sulfuric acid concentration is 8 g/L. When sulfuric acid concentration rises to 10 g/L, uranium leaching rate does not increase significantly. Therefore, 8 g/L of acidity is the optimal concentration for this uranium deposit.

Key words: sandstone-type uranium deposit; acid leaching; oxidant

收稿日期:2021-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42072285)

作者简介:吴冰(1996-),男,广西柳州人,硕士研究生;通信作者:周义朋(1974-),男,博士,教授

随着铀矿资源合理开发、有效开采的能源结构调整,如何集高效、经济、环保于一体的开发铀矿资源变得越来越重要,酸法因其浸出率高、浸出周期短、浸出液便于提取目标元素等优势而被广泛应用于碳酸盐含量低于0.2%(以CO₂含量计算)铀矿山的开采^[1-3]。

从铀酰离子配位原理来说,SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻等阴离子的无机酸都可以与UO₂²⁺结合生成稳定的配合物^[4-7],硝酸浸出能力强,铀酰离子最稳定,但是价格昂贵,浸出中引入的NO₃⁻难处理,对矿山环境造成严重污染,降低了其在矿山开发中的应用价值^[8-9]。盐酸价格介于二者之间,且浸出过程不产生沉淀,但盐酸易挥发、极易造成管道设备腐蚀,增加了成本。相对来说,硫酸在酸法开采中应用最广泛^[10-11]。在浸出过程中,加入酸不但可以提供配位离子有效结合铀酰离子,还有效控制浸出体系pH,为H₂O₂、三价铁等提供稳定的氧化环境,有利于铀从稳定状态活化到易溶状态^[1,12-15]。但是酸法浸出中,目标元素浸出的同时,钙、铁、镁、铝等离子也浸出,容易造成硫酸钙等沉淀,不利于浸出,在浸出过程中需要对沉淀饱和指数、浸出率、pH等进行综合分析,最终确定最优的浸出参数^[16-23]。

本文对新疆某砂岩铀矿进行了不同酸度的室内批次试验研究,为现场矿区开采提供一定的指导依据,对于矿区的高效经济开采具有一定指导意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验用矿样取自新疆某待开发砂岩型铀矿山,矿样保存完整运回实验室后,自然晾干、脱泥、破碎,然后过筛得到不同粒径样品,其中-0.25 mm、0.25~

0.5 mm、0.5~1 mm、+1 mm所占比例分别为46%、18%、26%、10%。对矿石中铀的赋存状态和微观形貌进行扫描电镜分析,结果如图1所示。为了保证试验平行样品的一致性^[20],将矿样充分混合均匀后,用缩分法取混合样50 g,磨至-74 μm,送化学成分分析,剩余矿样按级配比称取单样150 g若干备用。为了还原矿山浸出条件、环境,保证室内试验对现场开采具有指导意义,此次试验的浸出液取自新疆铀矿床矿层水,根据浸出液条件,加入不同量的硫酸溶液配制。配制浸出液前取矿层水测量初始条件值。

混合矿样化学成分(%):Ba 0.053 8、CaO 0.136、FeO 0.614 U 0.075 9、SO₃ 0.84、TiO₂ 0.336、S 0.320、K₂O 2.539、TF_e₂O₃ 1.071 Al₂O₃ 5.109、MgO 0.156、CO₂<0.20、BaO 0.054、Na₂O 0.082、SiO₂ 81.03。矿层水化学分析结果(mg/L):CO₃²⁻ 6.05、HCO₃⁻ 136.86、Ca²⁺ 71.87、K⁺ 17.5、Na²⁺ 11.16、Mg²⁺ 9.43、Al³⁺ 0.21、U<0.05、Fe²⁺<0.10、Fe³⁺<0.10。

铀矿粒径主要在-0.25 mm和0.5~1 mm。从图1可以看出,铀矿物主要有沥青铀矿、钛铀矿及部分以铀的六价钒酸盐存在的铀矿(钒钠铀矿)。沥青铀矿在矿床中的分布形式主要为星点状的亚微米颗粒,钛铀矿在洪海沟矿床中的存在相对较少,它主要存在于金红石的周围。从混合矿样化学成分可以看出,铀矿石品位为0.0759%,矿石主要成分为石英,占比81.03%,碱性物质含量不高,初步预测可用酸法浸出。矿层水中铁离子浓度很低,主要是因为矿层中铁含量低,在水-岩作用过程中铁溶解弱。Ca²⁺和HCO₃⁻背景值分别为71.87、136.86 mg/L,相对其他离子较高。矿层水pH为8.14,偏碱性, Eh为246 mV,有一定氧化性。

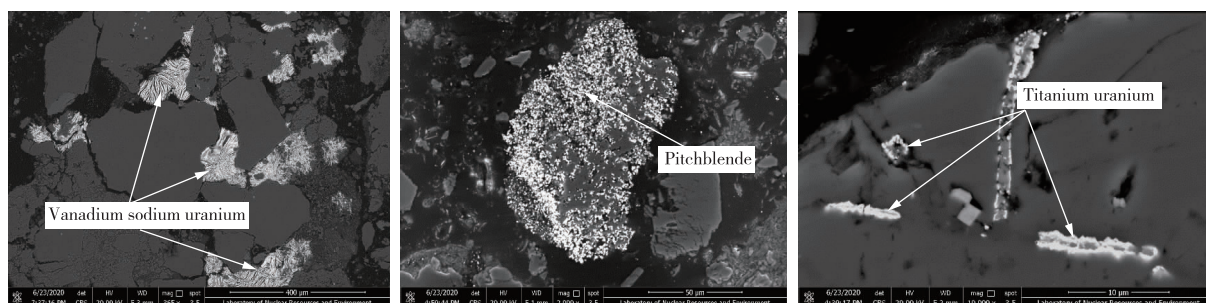


图1 不同赋存形态铀矿 SEM图

Fig. 1 SEM morphologies of uranium deposits with different occurrence patterns

1.2 试验方法

试验在可控温自动摇床中进行。转速设置为

120 r/min,温度17℃。分别将矿体岩心矿石样品按粒级配比称取各粒径矿样、混匀,按设计试验量制

成平行样品,每份 150 g 置于 1 000 mL 锥形瓶中,以该矿床矿层水加入分析纯硫酸,配制浓度分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.2、4、6、8、10 g/L 的酸性浸出剂 750 mL(液固比 5 : 1),静态浸泡 96 h 后抽滤分析滤液和渣样铀含量。各层位矿石浸出试验按氧化条件分两组进行,一组不加氧化剂,一组各加入 0.3 mL 的 H_2O_2 作氧化剂。

在 0、0.5、2.5、12、24、48、72、96 h 时间点取样进行化学元素分析。按时间节点取样后,为了避免样品放置过程中继续发生反应,取样结束后及时测 pH、 Eh 、 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 浓度等,剩余样过滤后,加硝酸保存,用 ICP 测定。试验结束后,用离心机进行固液分离,分离后矿渣用纯净水水洗一遍再离心,根据离心液样中的铀含量计算最终浸出率。试验渣样分类自然烘干后,每个试验样品取 50 g 送分析,对比试验前后矿石化学元素变化。综合分析铀矿浸出的最优条件及最佳浸出方式。

2 结果与讨论

2.1 pH 的变化

无论是何种铀矿山开发方式,浸出液 pH 的变化都携带了许多化学信号^[22],首先,矿山环境中铁离子会随着 pH 的不同而存在形式不同^[21],若发生铁沉淀,容易造成通道堵塞,影响浸出效果。再者,

铀酰离子的存在形式也与体系的 pH 相关,酸法浸出中,当 pH 升高到一定值时,会出现氢氧铀酰沉淀,同样降低了浸出率。由此可见,在浸出流程中合理控制 pH 变化会更加利于铀的浸出。试验中 pH 变化如图 2 所示。从图 2 可以看出,pH 随时间的变化总体上先急剧上升、然后缓慢上升,最终呈稳定状态,并且在添加氧化剂的试验组中,pH 的变化幅度和变化值大于未添加氧化剂试验组的,说明添加的氧化剂不但参与了四价铀向六价铀的转化,还可能氧化了矿物中的还原性物质,使其溶解耗酸。总体而言,图 2 中 pH 变化趋势相差不大,在前 5 h 内,pH 上升幅度较大, ΔpH 为 1~2。主要原因是浸矿开始初期,不止浸矿耗酸,矿物中其他碱性物质也会消耗酸,导致 pH 迅速升高,在 5~72 h 内,pH 缓慢上升,说明耗酸一直在持续,并且添加氧化剂变化趋势更明显。当加入硫酸浓度低于 0.4 g/L 时,当试验进行到 72 h 后,pH 有下降趋势,其原因可能是,pH 升高后,浸出的铀酰离子结合了部分 OH^- 生成氢氧铀酰离子,消耗了 OH^- ,导致 pH 下降。综合来看,适量的酸度可以调整 pH 来控制浸出因素,pH 过高时,不但有氢氧铀酰沉淀生成,有铁离子浸出时,还会有铁沉淀出现,沉淀的生成可能会造成通道堵塞,还会有部分浸出铀酰离子被吸附,影响浸出效果,可见合理控制 pH 对浸出是有益的。

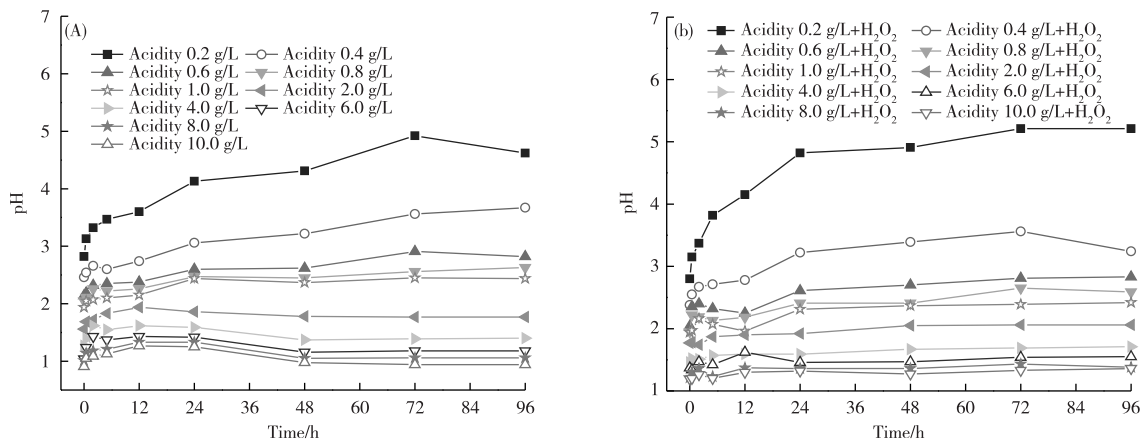


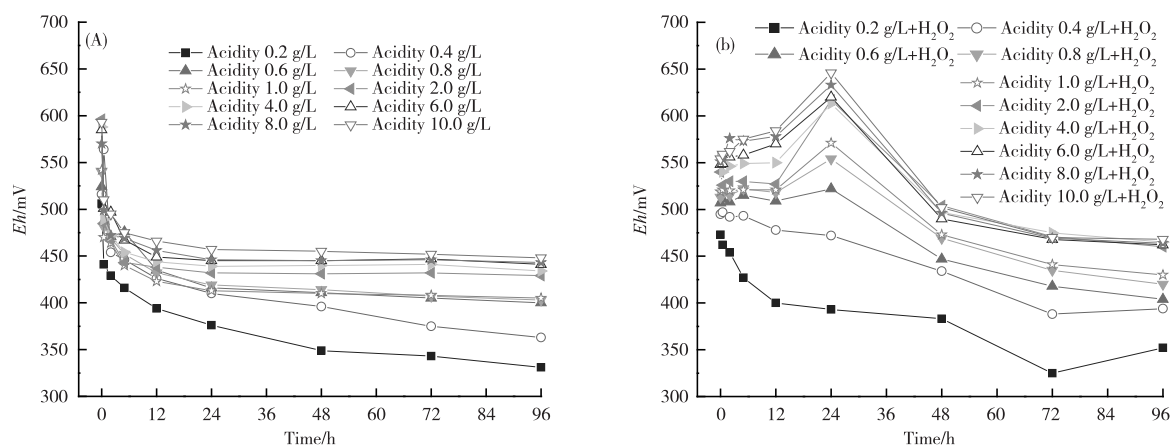
图 2 无氧化剂(a)和添加氧化剂(b)时浸出液的 pH 曲线

Fig. 2 Diagrams of pH value of leach solution without addition of oxidant (a) and with addition of oxidant (b)

2.2 Eh 值的变化

Eh 值是体系氧化还原电位的具体体现,铀矿浸出过程中氧化还原伴随全过程, Eh 值高有利于铀矿浸出^[21-22]。试验过程中 Eh 值随时间变化如图 3 所示。从图 3a 可以看出,添加的硫酸浓度越高, Eh 值

越高,随着浸矿时间的增加, Eh 值在逐渐下降,最终趋于平稳。图 3b 中,由于添加了氧化剂,可以看出 Eh 值先是上升,然后下降,总体变化趋势依然与加入硫酸浓度呈正相关关系,并且 Eh 最终水平值明显高于未添加氧化剂试验组,表明添加氧化剂促进了铀的浸出。

图3 无氧化剂(a)和添加氧化剂(b)时浸出液的 Eh 值曲线Fig. 3 Diagrams of Eh value of leach solution without addition of oxidant (a) and with addition of oxidant (b)

2.3 其他组分变化特征与分析

在酸法浸出体系中,选择性较低,矿化度偏高。当浸出体系中有沉淀时,沉淀不但会吸附部分浸出铀酰离子,还会造成地浸通道堵塞等工艺难题,同时,在浸出过程中,金属阳离子的变化迁移对铀酰离子浸出会产生离子竞争、耗酸等问题,所以分析金属阳离子的变化情况对铀酰离子高效浸出有重要的指导意义。

2.3.1 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度的变化

铁离子在浸出体系中存在形式与 pH 相关, pH 过高时,铁离子可能形成沉淀,影响浸出。浸出过程中酸度及铁离子变化如表 1~4 所示。

由于原矿石铁含量较低,酸度低于 2 g/L 时浸出液中未检测到 Fe。从表 1~4 可以看出,在相同浸出条件下, Fe^{2+} 较 Fe^{3+} 先被浸出。随着酸度增加, Fe^{2+} 离子在 5 h 后出现,而 Fe^{3+} 在 72 h 后才出现。在表 1、2 中可以看出,添加氧化剂后,亚铁离子的出现时间明显滞后。表 3、4 中 Fe^{3+} 相对于未添加氧化剂的试验组则提前出现,且酸度越大, Fe^{3+} 出现越快,一方面说明添加氧化剂以后,由于氧化作用,浸出的 Fe^{2+} 被氧化 Fe^{3+} ,另一方面说明铁离子出现也与硫酸浓度呈正相关关系。但由于离子间共同竞争关系,加入的氧化剂有限,最终体系中还是有 Fe^{2+} 存在。当硫酸浓度过低时,铁离子无法浸出,硫酸浓度高时,虽然有铁离子出现,但此时 pH 很低,铁离子不会出现沉淀,避免了堵塞影响金属铀的浸出。

2.3.2 浸出液中 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度的变化

浸出过程中 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度

的变化趋势如图 4 所示。从图 4 可见,在浸出过程中,各离子浓度都有上涨幅度,并且浸出过程中离子浸出优势排序为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Al^{3+} > Na^+ > K^+$,

表 1 未添加氧化剂不同酸度时 Fe^{2+} 浓度Table 1 Concentrations of Fe^{2+} under different acidity without oxidant addition

	/(g · L ⁻¹)				
时间/h	2	4	6	8	10
0	—	—	—	—	—
0.5	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	0.06
5	—	—	0.06	0.06	0.13
12	0.06	0.06	0.13	0.13	0.13
24	0.85	0.13	0.13	0.13	0.19
48	0.13	0.13	0.19	0.13	0.19
72	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
96	0.13	0.19	0.13	0.19	0.19

注:“—”表示浓度低于检测限,下同

表 2 添加氧化剂不同酸度时 Fe^{2+} 浓度Table 2 Concentrations of Fe^{2+} under different acidity with oxidant addition

	/(g · L ⁻¹)				
时间/h	2	4	6	8	10
0	—	—	—	—	—
0.5	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—
24	0.06	0.13	0.06	0.06	0.06
48	0.13	0.13	0.06	0.13	0.06
72	0.13	0.13	0.06	0.13	0.13
96	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

表3 未添加氧化剂不同酸度时 Fe³⁺ 浓度

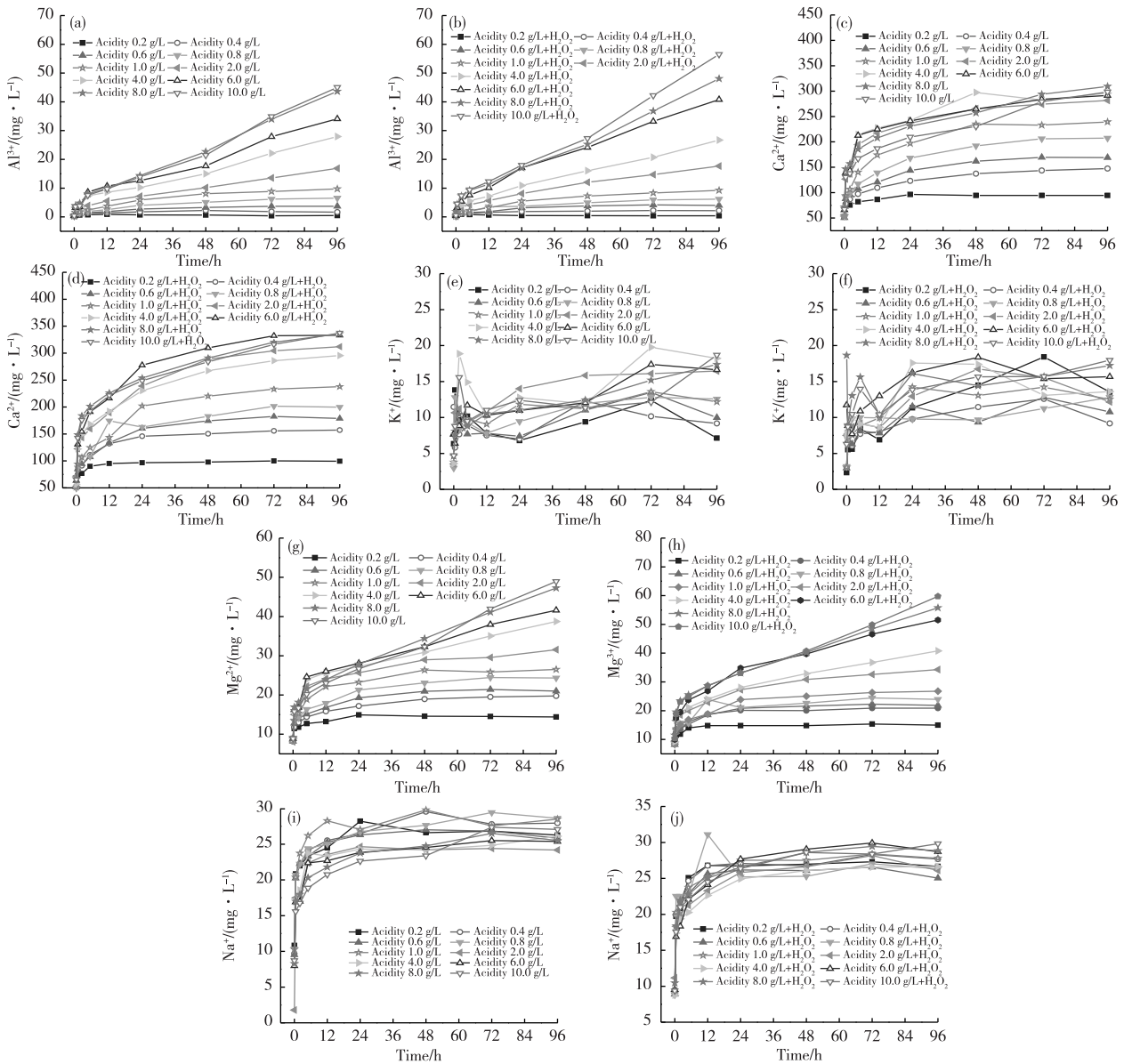
Table 3 Concentrations of Fe³⁺ under different acidity without oxidant addition

时间/h	2	4	6	8	10
0	—	—	—	—	—
0.5	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—
24	—	—	—	—	—
48	—	—	—	—	—
72	—	—	0.06	0.06	0.06
96	—	0.06	0.06	0.13	0.13

表4 添加氧化剂不同酸度时 Fe³⁺ 浓度

Table 4 Concentrations of Fe³⁺ under different acidity with oxidant addition

时间/h	2	4	6	8	10
0	—	—	—	—	—
0.5	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	0.06
24	—	0.06	0.06	0.06	0.13
48	0.13	0.13	0.06	0.13	0.13
72	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
96	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19



(a)、(c)、(e)、(g)、(i) — 未添加氧化剂；(b)、(d)、(f)、(h)、(j) — 添加氧化剂

图4 Al³⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺ 浓度变化图

Fig. 4 Changes of Al³⁺, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ and Na⁺ concentrations

添加氧化剂后离子浸出优于未添加氧化剂的。因为这些碱性离子浸出需要耗酸,所以离子浓度变化趋势大致与pH变化趋势一致。整体来看,钙离子浓度值最高,这是由于钙离子初始背景值比较高,约50~60 mg/L,当硫酸浓度低于8 g/L时, Ca^{2+} 随硫酸浓度增加而增加,但从图4c可看出,当硫酸浓度从8 g/L增加到10 g/L时, Ca^{2+} 浓度从309.4 mg/L下降到298.43 mg/L。

2.4 铀浓度及浸出率变化情况

2.4.1 铀浓度及液计浸出率变化

铀作为浸出的目标产物,铀浓度的变化不但是我们调整浸出参数、工艺条件,了解化学元素迁移情况等的基本指导数据,还是优化矿山开发结构的基本指导数据,铀浓度高,说明浸出效果好,浸出条件适宜,铀浓度低,说明浸出参数有待调整。浸出率是指从铀矿资源中浸出目标产物的百分比,其变化趋势与铀浓度变化呈正相关,也是浸出效果的代表值。在浸出过程中,铀浓度及浸出率随时间变化如图5~6所示。

从图5a可以看出,未添加氧化剂时,在浸出过程中,当硫酸浓度低于8 g/L时,铀浓度随硫酸浓度变化呈正相关变化,硫酸浓度为10 g/L时,铀浓度并没有升高,从原来的142.76 mg/L下降到133.83 mg/L,但从图5b可以看出,添加氧化剂后,铀浓度随酸度增加一直呈上升趋势,最大浸出浓度达到160.835 mg/L。当酸度小于0.6 g/L时,铀浓度随时间变化先是上升,达到峰值后出现缓慢下降趋势,酸度在0.2 g/L

时,在5 h便出现峰值,其变化原因可能是硫酸浓度低,无法持续浸出铀,但耗酸矿物会消耗酸,导致pH升高,浸出的铀酰离子与 OH^- 结合呈氢氧铀酰沉淀,导致液相中铀浓度降低^[21];添加氧化剂时,可以看出铀浓度降低更明显,并且铀浓度的峰值时间点向前推移,说明氧化剂在体系中可能不止参与了四价铀向六价铀的转化,还促进了铀酰离子的沉淀反应。

从图6可以看出,添加氧化剂后的浸出率明显要高。未添加氧化剂时,硫酸浓度在8 g/L时达最大浸出率94.04%,硫酸浓度为10 g/L时,最大浸出率为90.62%;当添加氧化剂后,最大浸出率可达98.22%,相较于未添加氧化剂的试验组提升了4.18个百分点。

2.4.2 渣计浸出率

渣计浸出率是表征矿石中残余铀量的参数,渣样中铀含量越高,说明浸出效果越差。如图7所示,渣计浸出率变化与初始酸度和是否添加氧化剂存在一定的关系。渣计铀含量与初始酸度呈负相关,酸度越大,渣样铀含量越低,添加氧化剂时,铀含量相较于未添加氧化剂的降低了29.9 $\mu\text{g/g}$,渣样中铀含量只有79.6 $\mu\text{g/g}$,渣计浸出率达到90.4%。当酸度低于1 g/L时,渣样铀含量都在258~652 $\mu\text{g/g}$,随着酸度继续增大,渣样铀含量最终降到100 $\mu\text{g/g}$ 左右。从图7还可以看到,在未添加氧化剂时酸度从8 g/L增加到10 g/L时,渣样铀含量上升了4.5 $\mu\text{g/g}$,与液计浸出率相吻合,可能是因为钙、镁沉淀,吸附了铀,使得渣样中铀含量上升。

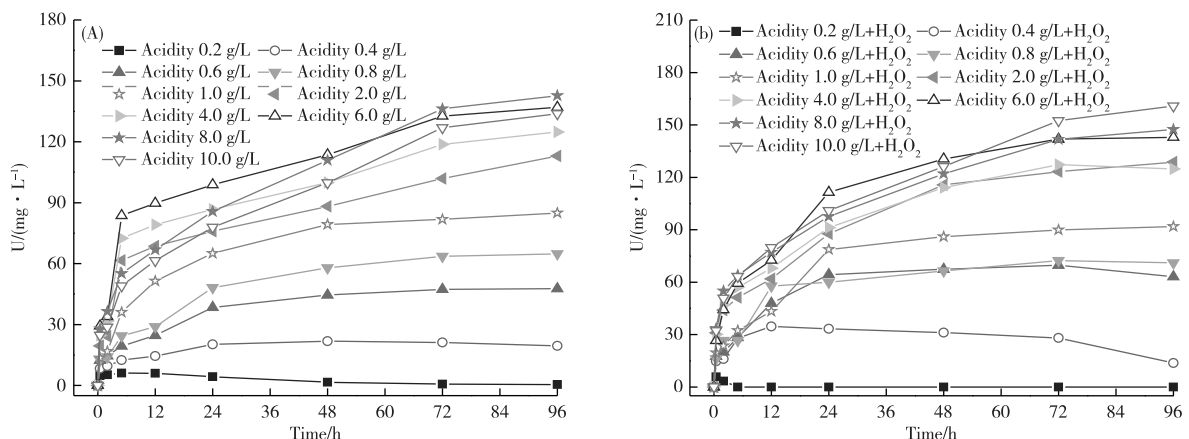


图5 无氧化剂(a)和添加氧化剂(b)时铀浓度随时间变化曲线

Fig. 5 Diagrams of uranium concentration varies over time without addition of oxidant (a) and with addition of oxidant (b)

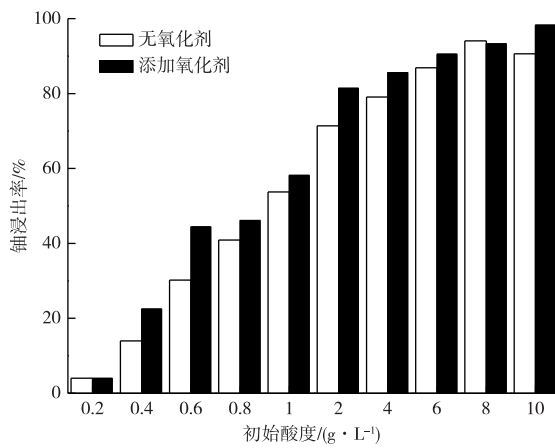


图6 铀浸出率随酸度的变化

Fig. 6 Changes of leaching rate of uranium with acidity

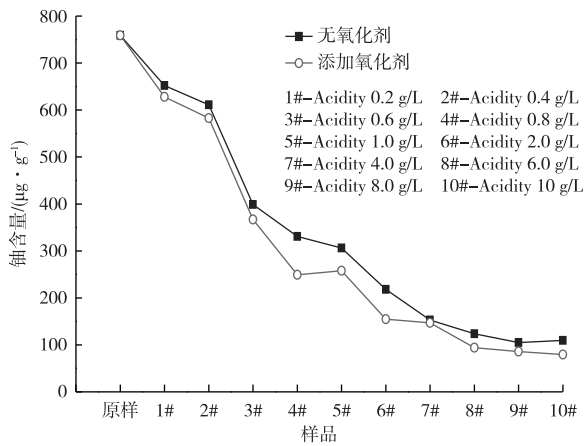
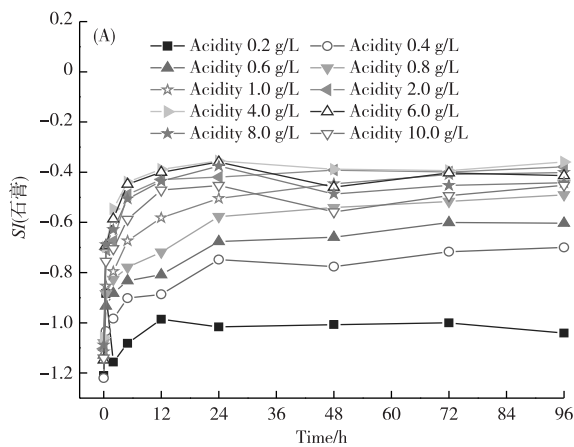


图7 渣计铀含量变化

Fig. 7 Changes of uranium content in slags



2.5 石膏饱和和指数模拟计算

酸法地浸体系中,解决石膏堵塞一直是一个工艺难点,浸出时为了避免产生石膏沉淀、需严格关注石膏饱和指数,从而调整浸出参数。利用 PHREEQC 对浸出液的 pH、电子活度、化学组分(主要为 Fe、Fe²⁺、Fe³⁺、Al³⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、U、Cl⁻、SO₄²⁻)进行模拟计算,得到石膏饱和和指数变化如图 8 所示。从 PHREEQC 模拟结果来看,各浸出体系下石膏的饱和系数 SI 皆小于 0,说明在各酸度条件下无 CaSO₄ 沉淀生成,且可以看出,随着浸矿时间持续延长,石膏饱和指数增大,其原因是,浸出过程的中水岩作用使得矿化度增大,其变化与酸度呈正相关,添加氧化剂后,石膏饱和指数略高,但最终都在 0 以下变化。在浸出 72 h 后都趋于平衡。

2.6 原样、渣样表征分析

砂岩型铀矿原矿 SEM 图显示矿样表面疏松多孔,有明显的孔隙发育,但可以看出矿样仍具备完整性、块状结构(图 9a),能谱图数据显示主要原子成分为 C、O,占比分别为 39.57%、47.02%、矿石中 U 占比 4.07%(图 9b)。渣样中可以明显看出矿石完整性被局部破坏,碎屑增多,表面孔隙相较于原矿表现为数量增多,面积扩大(图 9c),其主要原因是,加入的硫酸介质与矿石中的可溶性盐岩相互作用,部分矿物质从固相迁移至液相中,而难溶性矿物成分依旧保留,导致矿样渣样的表面结构发生变化,从能谱图中可以看出渣样中主要原子成分为 O,占比为 45.12%(图 9d),U 占比相较于原矿降低了 4.03 个百分点,含量只有 0.04%。

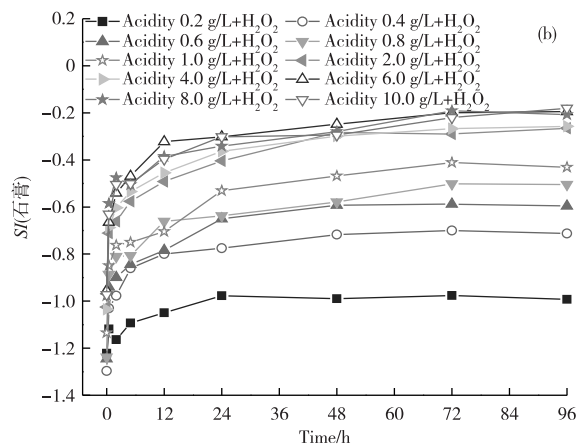
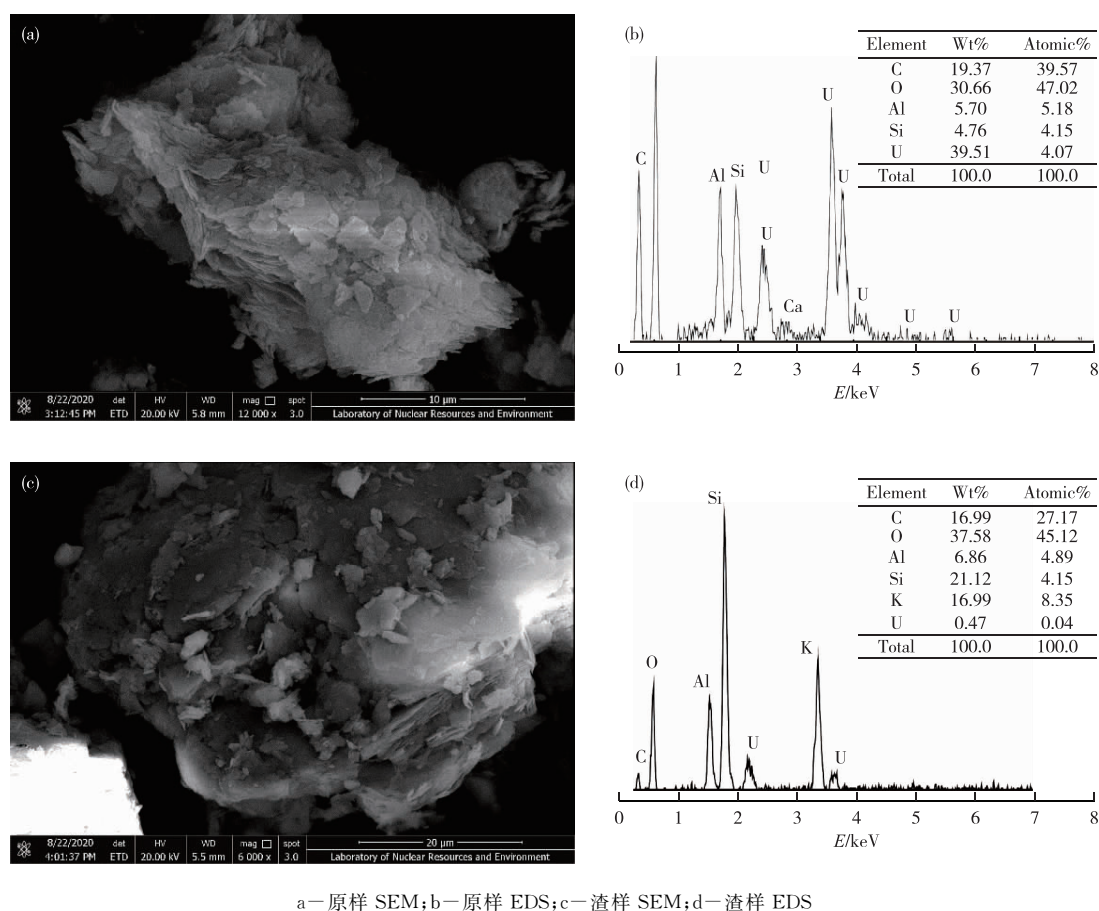


图8 无氧化剂(a)和添加氧化剂(b)SI模拟计算结果

Fig. 8 SI simulation results without addition of oxidant (a) and with addition of oxidant (b)



a—原样 SEM;b—原样 EDS;c—渣样 SEM;d—渣样 EDS

图9 原样和渣样的SEM形貌和EDS分析结果

Fig. 9 SEM microstructures and EDS analysis diagrams of original samples and slag samples

3 结论

1) 新疆某砂岩型铀矿的最佳浸出硫酸浓度为 8 g/L, 未添加浸出剂的试验组铀浸出率可达 94.04%, 添加氧化剂后, 铀浸出率可达 97.17%。

2) 在浸出过程中, 铀酰离子的存在形式与 pH 有关, 当 pH 大于 2.5 时, 铀浓度开始出现下降趋势, 且下降幅度随 pH 增加而增大, 此时增加酸度, 不但可以增加浸出铀浓度, 还会使得 pH 下降, 避免铀酰离子沉淀。合理控制 pH 对于提高铀产量非常重要。

3) 对于此铀矿山, 由于矿石本身铁含量较低, 当酸度过低时, 铁无法浸出, 虽然避免了铁沉淀带来的影响, 但是铀浸出效果也不佳, 酸度增加后, pH 降低, 不但铁不会沉淀, 还提升了铀浸出率。

4) 氧化剂的加入促进了铀的浸出, 缩短了浸出周期, 但同时也促进了其他非目标元素的浸出。未添加氧化剂时, 其他离子浸出优势依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$, 添加氧化

剂后, 离子浸出优势依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Al}^{3+} > \text{K}^{+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$ 。添加氧化剂后, K^{+} 浸出优势增强, 但它不会发生沉淀, Al^{3+} 浸出优势被削弱, 这将降低 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀出现的可能性, 说明添加氧化剂对提高铀产量是有益的。

5) PHREEQC 模拟结果显示, 酸浓度在 0.2~10 g/L 时, 石膏饱和系数随时间变化与酸度正相关, 且都小于零, 浸出体系中无石膏沉淀出现, 在此区间内可以调整酸度来获得最佳浸出效果。

参考文献

- [1] 肖志海. 碳酸盐型铀矿石堆浸技术室内浸出试验研究[D]. 湖南衡阳: 南华大学, 2017.
XIAO Z H. Laboratory leaching experimental study on the leaching technology of carbonate uranium ore pile[D]. Hengyang: University of South China, 2017.
- [2] 赵凯, 黎广荣, 周义朋, 等. 砂岩型铀矿浸出研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(6): 40-48.
ZHAO K, LI G R, ZHOU Y P, et al. Research progress of leaching of sandstone-type uranium ore[J]. Nonferrous

- Metals(Extractive Metallurgy),2019(6):40-48.
- [3] ZHANG W C, NOBLE A, YANG X B, et al. Lithium leaching recovery and mechanisms from density fractions of an Illinois Basin bituminous coal[J]. Fuel, 2020, 268: 117319. DOI. org/10. 1016/j. fuel. 2020. 117319.
- [4] MIN M Z, CHEN J, WANG J P, et al, Mineral paragenesis and textures associated with sandstone-hosted roll-front uranium deposits, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2005, 26(1/2): 51-65.
- [5] 张林. 中国核电产业国际竞争力研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
ZHANG L. Research on the international competitiveness of China's nuclear power industry[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017.
- [6] DIRICAN A, SAHIN M. Comparison of acid leaching and fusion techniques to determine uranium in soil samples by alpha spectrometry[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, 109: 189-192.
- [7] ABHILASH, PANDEY B D. Bioreactor leaching of uranium from a low grade Indian silicate ore [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 71: 111-117.
- [8] 李孝君. 地浸采铀方法研究及展望[J]. 绿色科技, 2018(6): 54-56.
LI X J. Research and prospect of in-situ leaching of uranium[J]. Green Science and Technology, 2018(6): 54-56.
- [9] IAEA. Manual of Acid In Situ Leach Uranium Mining Technology[M]. Austria: IAEA-TECDOC-1239, 2001: 6-7
- [10] LIU J H, SHI W J, LIU Y J, et al. Comparative experiments on acid leaching and bioleaching to a sandstone type uranium ore [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1130: 247-250.
- [11] BALASUBRAHMANYAM A, ROY S B, LADOLA Y, et al. Sono-chemical leaching of uranium[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2007, 47(12), 2107-2113.
- [12] 刘红静. 511 矿床地浸采铀末期溶浸方法的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
LIU H J. Study on the end-stage leaching method for in-situ leaching of uranium from the 511 deposit [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2018.
- [13] PANFILOV M, URALBEKOV B, BURKITBAYEV M. Reactive transport in the underground leaching of uranium; Asymptotic analytical solution for multi-reaction model[J]. Hydrometallurgy, 2016, 160: 60-72.
- [14] TAN K X, LI C G, LIU J, et al. A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits [J]. Hydrometallurgy, 2014, 150: 99-106.
- [15] CHEN L, LI Y F, TAN K X, et al. Chemical speciations of uranium of a sandstone uranium deposit and their effects to in situ leaching, northwest China[J]. Advanced Materials Research, 2014, 953-954: 597-600.
- [16] 李尚远. 铀、金、铜矿石堆浸理论与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
LI S Y. Heap Leaching Theory and Practice of Uranium, Gold and Copper Ores[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997.
- [17] SCHORTMANN W E, DESESA M A. Kinetics of the dissolution of uranium dioxide in carbonate-bicarbonate solutions[C]//Process of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958.
- [18] 陈梅芳, 花明, 阳奕汉, 等. 酸法地浸采铀浸出剂的减量化控制与应用[J]. 中国矿业, 2019, 28(3): 124-128.
CHEN M F, HUA M, YANG Y H, et al. Reduction control and application of uranium leaching agent for acid leaching process [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(3): 124-128.
- [19] 杨显万, 邱定蕃. 湿法冶金[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 282.
YANG X W, QIU D F. Hydrometallurgy[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 282.
- [20] 王亮, 张建国, 赵潮娅, 等. 某砂岩铀矿石地浸适应性研究[J]. 铀矿冶, 2013, 32(2): 67-71.
WANG L, ZHANG J G, ZHAO C Y, et al. In-situ leaching adaptability of a sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(2): 67-71.
- [21] 史维浚, 孙占学. 应用水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 72-83.
SHI W J, SUN Z X. Applied Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 72-83.
- [22] 王学刚, 高旭, 孙占学, 等. 细菌接种量对铀生物浸出的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(5): 46-49.
WANG X G, GAO X, SUN Z X, et al. Effect of bacterial inoculation ratio on bioleaching of uranium[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(5): 46-49.