

# 不同电场模式强化碱法浸出砂岩型铀矿的 规律及机制研究

李如宾<sup>1,2</sup>, 李春光<sup>1,2,3,\*</sup>, 刘振中<sup>1</sup>, 李咏梅<sup>1,2</sup>, 黄子贤<sup>1,2</sup>, 陈汝康<sup>2</sup>, 张生栋<sup>3</sup>, 刘龙成<sup>2</sup>

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学 放射性废物处理处置与数学模型研发中心, 湖南 衡阳 421001;

3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 我国铀矿资源以低品位砂岩铀矿为主, 当碳酸盐含量较高时, 常规的酸法地浸气堵或中性地浸效率不足等问题制约其高效开发。本研究提出了一种利用电场强化碱法浸出砂岩型铀矿的方法, 首先通过摇瓶实验确定了优势浸出剂浓度配比, 即 35 g/L 碳酸钠+15 g/L 碳酸氢钠+3 g/L 高锰酸钾。在此配比下基于自主设计的电场强化浸出实验装置, 进行了稳压电场、交变电场(方波)、间歇电场以及无电场 4 种电场模式强化碱法浸铀实验, 系统研究了不同电场强化碱法浸铀时铀的行为与规律。结果表明: 交变电场作用下, 铀的浸出率约为 51.28%, 是对照组无电场的 2.81 倍。交变电场能有效降低硅酸盐矿物在铀矿表面的沉积, 提升铀矿表面活性。ICP-OES、SEM-EDS、Zeta 电位、BET 分析结果表明, 电动作用主要通过促进铀矿物及脉石矿物溶蚀与浸出元素的迁移强化碱法浸铀的效率。电场强化碱法浸出砂岩铀矿有效提升了铀的浸出率, 可为现场应用提供一定的理论基础和技术支撑。

**关键词:** 电动强化; 电场模式; 砂岩型铀矿; 碱法浸出

中图分类号: TL212.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)05-0988-12

doi: 10.7538/yzk.2025.youxian.0297

## Law and Mechanism of Different Electric Field Modes Enhancement Alkaline Leaching Sandstone-type Uranium Ore

LI Rubin<sup>1,2</sup>, LI Chunguang<sup>1,2,3,\*</sup>, LIU Zhenzhong<sup>1</sup>, LI Yongmei<sup>1,2</sup>, HUANG Zixian<sup>1,2</sup>,

CHEN Rukang<sup>2</sup>, ZHANG Shengdong<sup>3</sup>, LIU Longcheng<sup>2</sup>

(1. School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. R&D Center of Radioactive Waste Treatment, Disposal and Modeling, University of South China, Hengyang 421001, China;

3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** China's uranium resources are rich in reserves and deposits, but they are mainly low-grade uranium ores with low content of uranium. Sandstone-type uranium ores are mainly mined by *in-situ* leaching (ISL), but when the carbonate content is high, their efficient development is often limited by problems such as gas plugging in acid leaching or insufficient neutral leaching efficiency. In this paper, a method for electric field enhancement alkaline leaching sandstone-type uranium ores was proposed.

收稿日期: 2025-04-05; 修回日期: 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(52204139); 湖南省自然科学基金(2024JJ5330)

\* 通信作者: 李春光

Firstly, shake flask experiments were conducted using different concentrations of sodium carbonate, sodium bicarbonate and potassium permanganate as lixiviant, and the concentration of the optimal lixiviant as 35 g/L sodium carbonate + 15 g/L sodium bicarbonate + 3 g/L potassium permanganate is obtained. At this ratio, through a self-designed electric field enhancement leaching experimental device, the effects of four different electric field modes in enhancing the alkaline leaching of sandstone-type uranium ores were compared within 40 d to systematically study the behavior and laws of uranium in alkaline leaching under different electric field conditions, namely stabilized electric field (continuously energized), alternating electric field (continuously energized but exchanging the direction of the electric field every other day, and the initial electric field direction is the same as the stabilized electric field), intermittent electric field (de-energized for one day followed by re-energized for another day, with a duty cycle of 50%), and non-electric field (not energized). The results show that under the effect of alternating electric field, the leaching efficiency of uranium is the highest, about 51.28%, which is 2.81 times higher than that of the no electric field group. And the leaching mass of the gangue mineral (silicon) is the least under the alternating electric field, which is about 71% that of the no electric field group. The alternating electric field can effectively reduce the deposition of silicate minerals on the surface of uranium ore and enhance the surface activity of uranium ore. The analysis results by inductively coupled plasma emission spectrometer (ICP-OES), field emission scanning electron microscope with energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), Zeta potential analyzer, and specific surface area analyzer (BET) demonstrate that the electrokinetic effect primarily enhances the efficiency of alkaline uranium leaching by promoting the dissolution of uranium minerals and gangue minerals, as well as the migration of leached elements. The electric field enhancement alkaline leaching of sandstone-type uranium ores effectively improves the leaching efficiency of uranium, providing a theoretical foundation and technical support for practical field applications.

**Key words:** electrokinetic enhancement; electric field mode; sandstone-type uranium ore; alkaline leaching

铀作为最具潜力的非化石燃料资源,比高污染的传统化石燃料(例如煤炭)能源收益更大,碳排放量更少,较传统的火力发电更环保。基于STEELA模型的估算,国内铀资源的需求量正在以每年7.69%的增速稳步上升,将是持续生产量的3倍以上<sup>[1]</sup>,已经查明的铀资源量与长期需求量之间存在较大差异,必须加大自有资源的开采力度<sup>[2]</sup>。

我国平均品位低于0.3%的铀矿床(包括低品位的砂岩型铀矿)占96.7%<sup>[3]</sup>,其中砂岩型铀矿主要通过地浸(ISL)方式开采。该方法是将浸出剂注入地下铀矿层,使其在渗透过程中氧化、溶解铀矿物,生成含铀络合物溶液,再经抽出井泵送至地表。这种方法无需挖掘和破碎铀矿石,生产成本低,对地表无污染。根据浸出剂的不同,常规ISL可分为酸性浸出、碱性浸出及CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>中性浸

出。在低品位高碳酸盐铀矿开采中易出现酸法地浸气堵和中性地浸效率不足的问题<sup>[4]</sup>,因此亟需更新生产技术,开发难浸铀矿的强化浸出方法。近年来研究人员主要探索了加压法<sup>[5-6]</sup>、微波预处理法<sup>[7]</sup>、表面活性剂法<sup>[8]</sup>、微生物浸出法<sup>[9-10]</sup>等强化技术,均取得了较好的结果。

电动技术作为一种较先进的技术广泛应用于土壤修复领域<sup>[11-13]</sup>。近年在金属矿开采方面的研究发现,该技术可大幅提高金、铜浸出效率,并有效增强溶质的迁移<sup>[14-15]</sup>。在稀土矿开采方面,外加电场作用后稀土元素的浸出率较不加电场增长了2.6倍,浸出剂用量减少了80%<sup>[16]</sup>。在铀矿浸出方面,吴培生等<sup>[17-18]</sup>使用地电化学法首次开展了在含盐地下水为电解液条件下铀矿中铀的浸出研究,研究中不加任何试剂,3个月内铀的浸出率可达19.05%,并证明了在外加电场情况下电化学

法具有氧化作用和促进离子迁移的效果。近两年, Li等<sup>[19-20]</sup>通过实验和数值模拟研究证明, 电动技术可强化酸法地浸采铀过程, 促进铀溶蚀、迁移, 同时提升矿层孔隙度及其连通性。

本研究针对我国大量低品位高碳酸盐砂岩铀矿<sup>[21]</sup>, 将电动技术引入碱法地浸采铀中, 提出一种电场强化碱法浸铀的方法, 通过对比不同电场与常规浸出的浸出率等参数来揭示电场强化碱法浸铀的行为规律与机理, 为砂岩型铀的碱法浸出工艺升级提供理论基础和技术支撑。

## 1 方法

### 1.1 实验材料

实验所用砂岩型铀矿石取自内蒙古某砂岩型铀矿床, 在 80 ℃ 下烘干 48 h。全反射 X 射线荧光光谱(S4 T-star, 德国 Brook)分析显示, 矿石的主要成分为硅(Si)(含量为 254 100 mg/kg)、铀(U)(139.1 mg/kg), 矿物组合以硅酸盐类矿物为主, 长石次之, 碳酸盐平均含量为 4.2%。

### 1.2 电场强化碱法浸铀实验

电场强化浸出实验装置模型如图 1 所示。

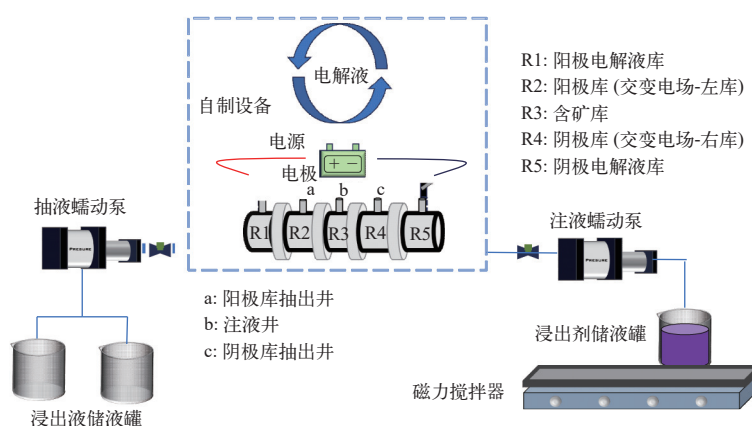


图 1 电场强化浸出实验装置模型

Fig. 1 Model of electric field enhanced leaching experimental device

首先通过摇瓶实验确定以 35 g/L 碳酸钠+15 g/L 碳酸氢钠+3 g/L 高锰酸钾作为浸出剂, 然后基于此浸出剂在图 1 所示的装置内进行电场强化碱法浸铀实验。整体实验装置由直流电源(DC)、自主设计的柱浸设备、蠕动泵、磁力加热搅拌器、浸出剂储液罐以及浸出液储液罐组成。柱浸设备分为 5 个腔室: 阳极电解液库(R1)、阳极库(交变电场下装置的左库, R2)、含矿库(R3)、阴极库(交变电场下装置的右库, R4)和阴极电解液库(R5)。在 R2 和 R4 设置阳极库抽出井(a)和阴极库抽出井(c), 在 R3 设置注液井(b)。

实验采用 4 种电场, 分别为稳压电场(持续通电)、交变电场(持续通电但每隔 1 d 交换电场方向)、间歇电场(周期性通电, 断电 1 d 再通电 1 d)和无电场(不加电, 对照组), 实验时间为 40 d。

实验开始前在 R3 中放入 80 g 按粒径分级(表 1)并混合均匀的铀矿石颗粒, 并在 R3 两端添加滤网与滤纸, 以防止固体小颗粒移动并允许流

体渗透。在 R1 与 R2、R4 与 R5 之间分别放入阳离子交换膜与阴离子交换膜, 以防止铀酰离子过度迁移, 然后在这 4 个库中填充 0.1 mol/L NaCl 电解液, 在 R3 中注入纯水使各库之间液面平齐。

表 1 矿石颗粒粒径分布

Table 1 Particle size distribution of ore

粒径/目	占比/%	矿石颗粒质量/g
4	40	32
8	20	16
16	10	8
30	10	8
50	10	8
100	10	8

实验开始时在 R1 和 R5 中放入钛电极棒, 稳压电场、间歇电场与交变电场实验组均通入电势梯度为 1.25 V/cm 的直流电源, 无电场组不通电。且 R1 和 R5 库中的电解液通过蠕动泵进行交替循

环,中和两端电极附近由于水解产生的  $H^+$ 和  $OH^-$ 。4个实验组均通过蠕动泵以  $94 \mu\text{L}/\text{min}$  的速度向 b 孔注入浸出剂,以  $47 \mu\text{L}/\text{min}$  的速度从 a 孔与 c 孔抽出浸出液。采用 ICP-OES(电感耦合等离子光谱仪, Avio220max, 美国 PE 公司)测试浸出液中铀的浓度,采用式(1)计算浸出率。采用酸度计(S400-k, METTLER TOLEDO)动态监测浸出液的 pH 及电导率( $E_c$ )。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{40} C_i V_i}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $X$  为铀浸出率, %;  $i$  为取样次数(1~40);  $C_i$  为第  $i$  次取样时浸出液中的铀浓度,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;  $V_i$  为第  $i$  次取样时浸出液的体积,  $\text{mL}$ ;  $m$  为矿石中铀的质量,  $\mu\text{g}$ 。

实验结束后取出浸出渣,用超纯水浸泡后离心、烘干,采用 SEM-EDS(Pharos G2, 荷兰 Phenom)、Zeta 电位仪(Nano Brook Omni, 美国 Brookhaven)、BET 比表面积测试仪(ASAP2460, 美国 Micromeritics)进行固相表征。

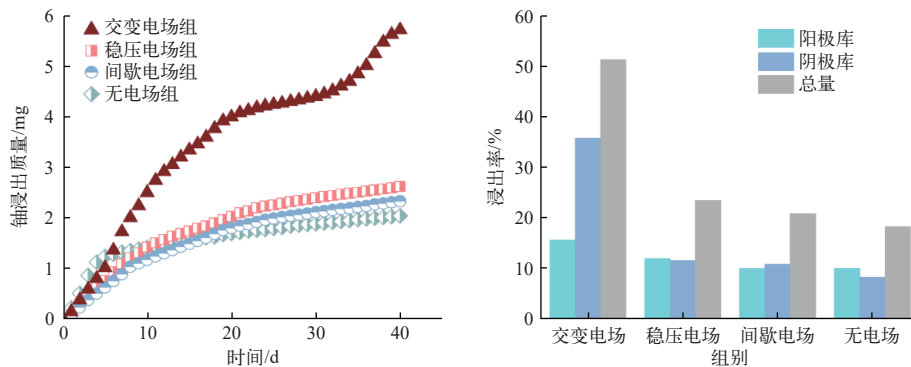


图2 各实验组铀的总体浸出质量与浸出率

Fig. 2 Leaching mass and leaching rate of uranium in different experiment groups

根据缩核模型理论,浸出速度由两个因素决定:一是浸出剂从液体中向固体矿物内部的扩散速度(扩散控制);二是浸出剂与固体矿物接触面的化学反应速度(化学控制)<sup>[22]</sup>。缩核模型表达式如式(2)、(3)所示。利用缩核模型,基于非线性最小二乘法对各实验组铀的浸出率进行拟合,结果如图3所示。分析图3可知,交变电场前期(0~6 d)浸出速度主要受固-液界面的化学反应控制,中期(20~32 d)由扩散控制主导,后期(32 d)

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同电场对铀浸出与迁移的影响

#### 1) 铀浸出结果与动力学分析

不同电场下铀的总体浸出曲线如图2所示。由图2可见,所有加电组(交变电场、稳压电场与间歇电场)铀浸出质量均高于无电场组,其中交变电场组铀累积浸出质量为  $5\,707.14 \mu\text{g}$ ,浸出率为 51.28%,为浸出最优电场,较稳压电场(浸出质量  $2\,606.99 \mu\text{g}$ 、浸出率 23.42%)、间歇电场(浸出质量  $2\,316.85 \mu\text{g}$ 、浸出率 20.82%)及无电场组(浸出质量  $2\,030.69 \mu\text{g}$ 、浸出率 18.26%)分别提升 2.19 倍、2.46 倍和 2.81 倍。交变电场浸出曲线可分为 3 个阶段:第 1 阶段(0~20 d),呈线性快速浸出(平均速度  $210.36 \mu\text{g}/\text{d}$ );第 2 阶段(20~30 d),浸出速度减缓(平均速度  $30.49 \mu\text{g}/\text{d}$ );第 3 阶段(30 d 后),浸出速度上升(平均浸出速度  $119.02 \mu\text{g}/\text{d}$ )。在浸出前期(0~6 d),无电场组累积浸出质量最高,为  $1\,381.26 \mu\text{g}$ ,随后浸出速度降低。表明前期充分的化学反应有利于铀的浸出。

表面化学反应速度减慢。稳压电场与间歇电场整体均主要受扩散控制主导,浸出剂向内部扩散的速度较慢;无电场组前期(0~6 d)主要在扩散控制作用下快速浸出了 11.45% 的铀,之后浸出速度下降。

扩散控制模型:

$$k_d t = 1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) \quad (2)$$

化学控制模型:

$$k_r t = 1 - (1 - X)^{1/3} \quad (3)$$

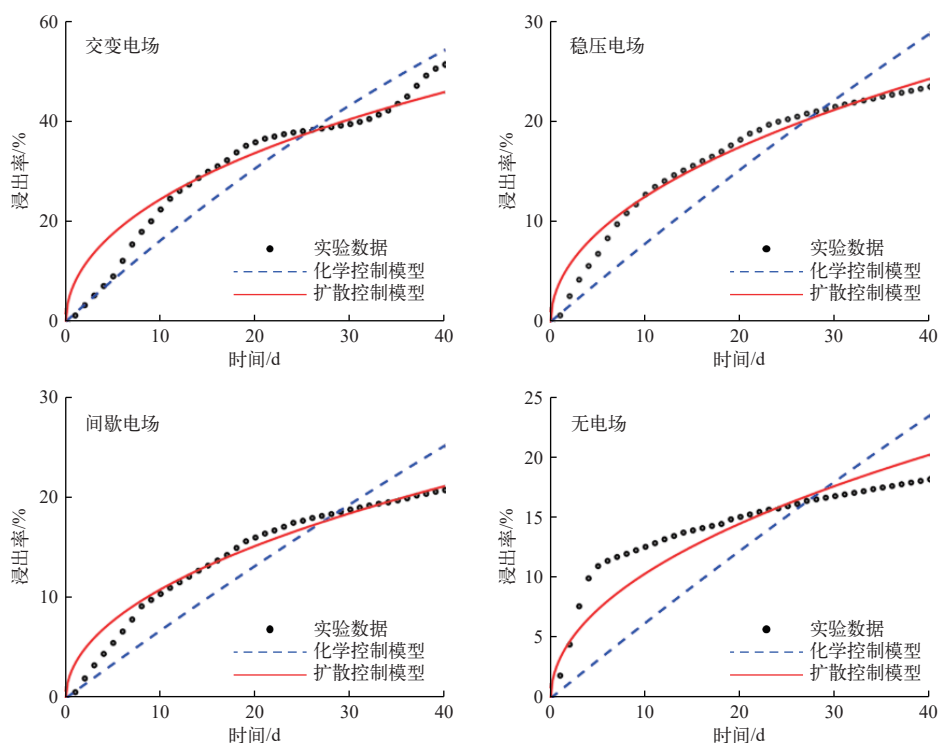


图3 基于缩核模型下的铀浸出动力学曲线

Fig. 3 Uranium leaching kinetic curves based on shrinking core model

式中:  $t$  为时间, d;  $k_d$  为扩散控制表观速度常数;  $k_r$  为化学控制表观速度常数;  $X$  为浸出率, %。

2) 电场下铀的迁移机理

液相中的传质主要有迁移、对流和扩散<sup>[23]</sup>, 电场导致的迁移作用主要包括电迁移与电渗透。其中电迁移是指离子在电场作用下向与电荷相反的电极移动的现象。电渗透是指矿石表面的负电荷与溶液中的阳离子形成双电层, 在外部电场作用下, 这些阳离子向阴极迁移的同时带动溶液向阴

极流动, 溶液中的阴离子由于对流会产生反向运输的作用力<sup>[24]</sup>。单一通电方向下基于实验装置的铀迁移机理如图4所示。在实验条件下, 铀的迁移主要受流体运动(由抽注液形成)和电动作用的影响。各实验组的抽注液速度与通电时的电势梯度均保持一致。在单一通电方向(稳压电场、间歇电场)下, 电动作用需通过比较电渗透与电迁移作用的强弱来确定离子迁移方向。而在交变电场下, 反转电场方向后会对离子施加反向驱动力, 导

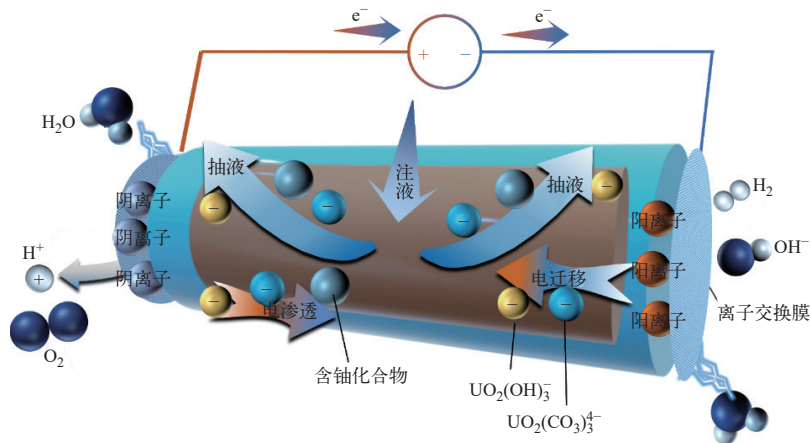


图4 单一通电方向下铀的迁移机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electrokinetic mechanism of uranium under single direction of electrification

致离子产生反向加速度, 按原方向缓慢减速后逆转运动方向。

为更好地理解浸出的铀在不同电场下的迁移规律, 采用 PHREEQC 软件对铀在不同 pH 下的形态进行了模拟, 结果如图 5 所示。由于实验中动

态监测的各组不同库的 pH 整体稳定在 10 左右 ( $\Delta\text{pH} < 0.5$ ), 基于模拟结果可知, 大部分铀酰离子为  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  和  $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$  等阴离子, 其电迁移行为应遵循阳极定向移动规律, 电渗透行为会产生反向运输的作用力。

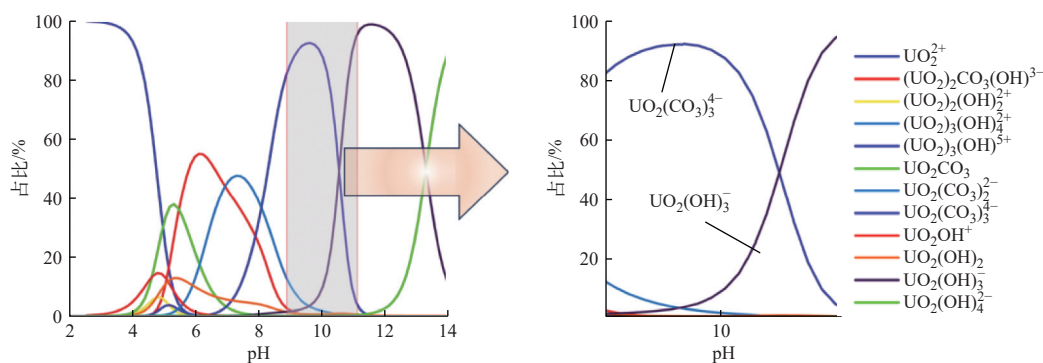


图 5 PHREEQC 软件模拟的不同 pH 下铀络合物的形态分布

Fig. 5 U species distribution simulated by PHREEQC software under different pH

### 3) 不同电场对铀浸出方向的影响

各电场组阳极库和阴极库中浸出铀质量的动态监测结果如图 6 所示。从图 6a 可看出, 交变电场组的阳极库和阴极库浸出铀的累积质量有显著差异, 0~4 d 内阳极库浸出铀的累积质量 (453.73  $\mu\text{g}$ ) 高于阴极库 (335.65  $\mu\text{g}$ ), 但随后 (5~20 d) 阴极库

浸出铀的速度加快 (148.68  $\mu\text{g}/\text{d}$ ), 而阳极库浸出速度减缓 (37.49  $\mu\text{g}/\text{d}$ )。在 20~32 d 内阴极库浸出速度减缓 (27.21  $\mu\text{g}/\text{d}$ )。在 32~40 d 内阳极库与阴极库的铀浸出速度均再次提升, 这表明交变电场显著增强了阴极库中铀的富集。

从图 6b 可看出, 稳压电场组阳极库的铀浸出

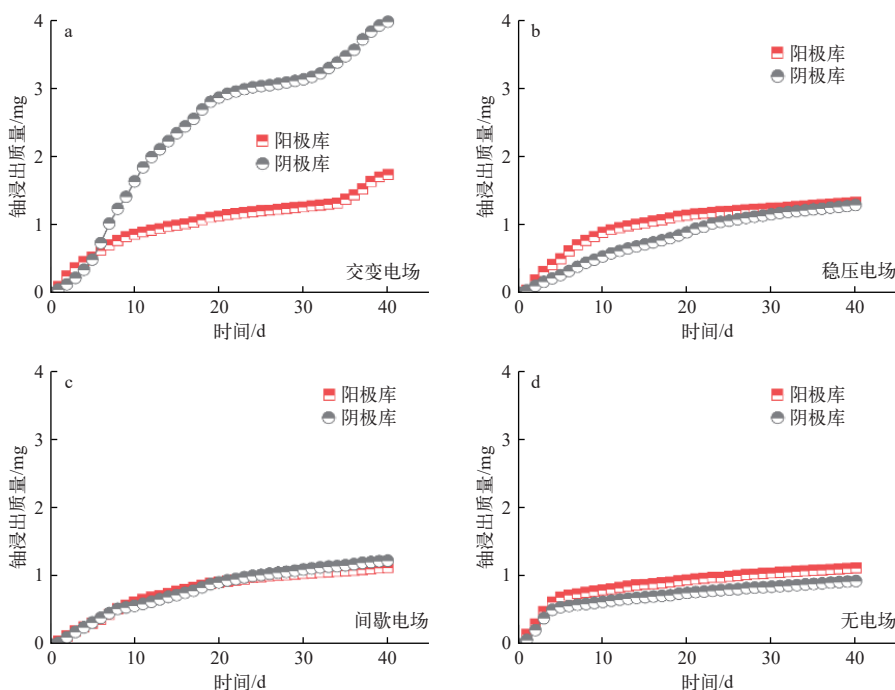


图 6 各实验组不同区域中的铀浸出质量

Fig. 6 Mass of leached uranium in different regions of each experimental group

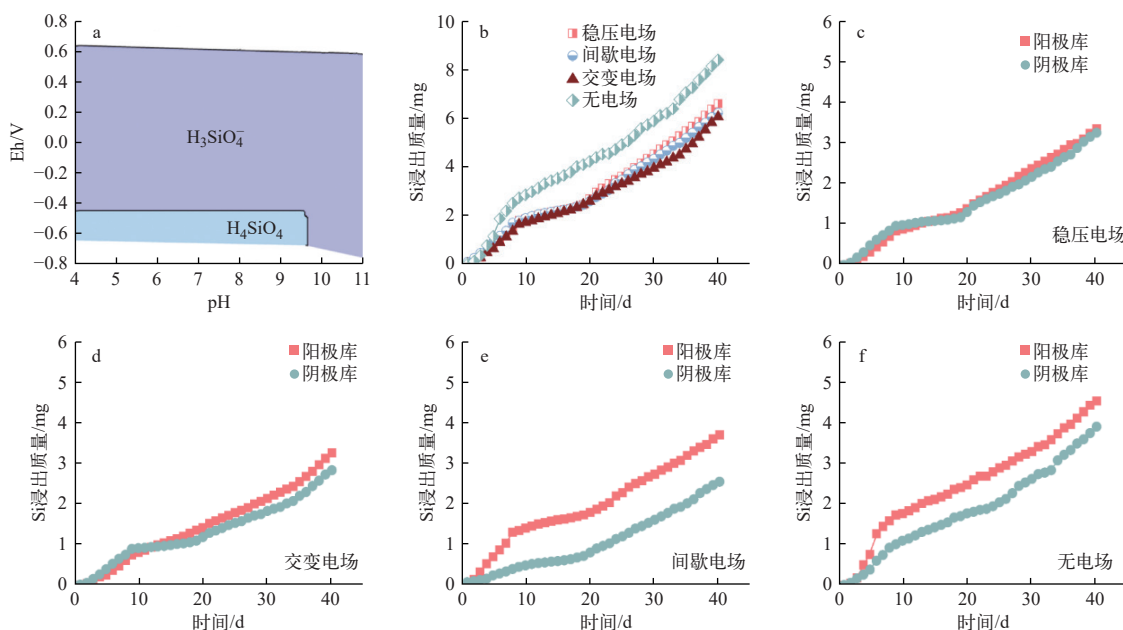
质量在 0~30 d 内显著高于阴极库。观察不同库中铀的累积质量可以发现,阳极库浸出速度呈先增后减的趋势,而阴极库的浸出速度近乎呈线性增长。这表明长期条件下阴极库的铀浸出潜力大。间歇电场组(图 6c)的阴阳极库铀浸出质量呈同步波动趋势,两库浸出质量差异小。

从图 6d 可以看出,无电场组的阴阳极库铀浸出质量的波动趋势几乎相同,均呈初期浸出速度迅速上升然后迅速下降后保持稳定,长期浸出能力弱。两库的铀浸出质量无明显差异。这表明在无电场条件下,铀的富集能力弱化。

## 2.2 不同电场对脉石矿物浸出的影响

脉石矿物的浸出行为直接影响铀的提取效率,本实验选择 Si 元素为研究对象。Si 元素作为铀矿石中含量最高的脉石组分,主要以石英( $\text{SiO}_2$ )及硅酸盐矿物(长石、云母等)形式赋存。在浸出中 Si 元素以胶体形式释放,硅胶体的生成会吸附铀酰离子或堵塞矿物孔隙,抑制浸出剂扩散<sup>[25]</sup>。

采用 PHREEQC 软件对 Si 元素在不同 Eh-pH 下的形态进行了模拟,所得 Si 元素的种态优势图如图 7a 所示。结合实验的液相参数可知,溶液中 Si 元素大部分以  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  形式存在。不同电场下的硅浸出质量曲线如图 7b 所示。由图 7b 可见,无电场组 Si 累积浸出质量最高(8 379.67  $\mu\text{g}$ ),远高于其他 3 组,表明充分的化学反应时间对 Si 的浸出有利,电场作用对降低溶液中 Si 元素的浓度有利。交变电场的累积浸出质量最低(6 044.87  $\mu\text{g}$ ),为无电场组的 0.72 倍。结合铀的浸出质量可知,交变电场对铀的选择性提取更好。稳压电场与交变电场的浸出曲线趋势相近,阳极库浸出速度保持稳定,波动幅度小,阴极库浸出速度在前期(0~10 d)较快,中期(11~20 d)浸出速度减缓,后期(>20 d)浸出速度再次增长。这表明在持续通电情况下,初始通电方向对 Si 的浸出规律影响较大。间歇电场与无电场组均表现出阳极库浸出质量高于阴极库浸出质量。



a——PHREEQC 模拟 Si 元素的 Eh-pH 种态优势图; b~f——各电场 Si 累积浸出质量

图 7 各实验组不同区域中 Si 元素的浸出质量

Fig. 7 Leaching mass of Si element in different regions of each experimental group

对比不同区域 Si 浸出质量曲线(图 7c~f)可以发现,持续通电强化了靠近阴极库区域浸出 Si 的能力。结合铀浸出质量(图 2)可知,在 4 种电场模式下,交变电场下铀的浸出质量最多,而 Si 的浸出质量最小,说明交变电场对于铀的选择

性更好。

## 2.3 不同电场下溶液离子强度的变化

电导率作为溶液离子强度变化的宏观表征参数,其动态演变反映了浸出过程中矿物溶解-传质的协同效应。4 种电场模式下阴阳极库电导率

$E_c$  的分布特征如图 8 所示。从整体来看,各组溶液的电导率趋势表现相同,且数值差异较小,各组阴阳极库的电导率也相近,说明各组阴阳极库间的浓度梯度较小。这是由于溶液主要由注入的浸

出剂构成,浸出的离子由于体量小,仅产生了微小的波动。在 0~4 d 内,电场组电导率升高的速度远大于无电场组,这表明施加电场显著强化了浸出剂的迁移速度。

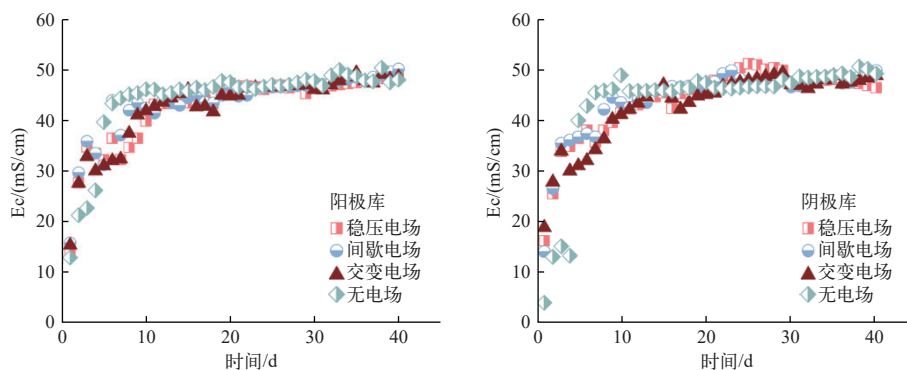


图 8 各组阳极库与阴极库电导率变化曲线

Fig. 8 Conductivity curves of anode and cathode libraries in each group

#### 2.4 不同电场下铀矿石 Zeta 电位的演化特征

Zeta 电位作为表征胶体颗粒表面电荷状态的关键参数,反映的是溶液中胶体分散体系的稳定性,可通过界面静电作用调控离子迁移行为。具体表现为高 Zeta 电位绝对值下,矿石颗粒分散性好,不易团聚,增大浸出剂与矿石的接触面积;低 Zeta 电位绝对值下,矿石颗粒易团聚、沉降,降低浸出剂与矿石的接触面积。

Zeta 电位受 pH 的影响较大,碱性条件下一般为负值,砂岩表面的 Zeta 电位一般也为负值<sup>[26]</sup>。本实验溶液体系的 pH 一直保持在 10 左右,所以 pH 对各实验组的 Zeta 电位造成的差异可以忽略不计。

原始矿石及各实验组浸出渣的 Zeta 电位如表 2 所列。Zeta 电位测试前对浸出渣的不同区域进行了命名。靠近阳极库(交变电场下装置的左库)一端,浸出渣各组对应名称分别为:稳压电场,

W1; 交变电场, T1; 间歇电场, J1; 无电场组, Y1。靠近阴极库(交变电场下装置的右库)一端的浸出渣各组对应名称分别为:稳压电场, W2; 交变电场, T2; 间歇电场, J2; 无电场组, Y2。

由表 2 可见,原始矿石表面初始 Zeta 电位呈现弱负电性,反应活性低。由于浸出剂中  $\text{CO}_3^{2-}$  阴离子的加入,浸出渣各区域的 Zeta 电位绝对值基本均增大。稳压电场 W1 端与交变电场 T1 端的 Zeta 电位绝对值显著大于 W2 端与 T2 端,表明在持续通电条件下,初始通电方向对矿石表面 Zeta 电位的演化影响较大。稳压电场组的 W1 端 Zeta 电位绝对值较大,同时增大了对阴离子的静电排斥力。W2 端 Zeta 电位绝对值较低,此时浸出渣表面颗粒易团聚沉降钝化矿物表面。交变电场 Zeta 电位绝对值较稳压电场显著增大,颗粒间稳定性相对更好。交变电场 T1 端表面充斥大量的负性基团,具有良好的稳定性,但负值过高增强了铀酰阴离子向阳极库移动的静电斥力。间歇电场采用周期性断电的方式,在通电时负性基团( $\text{CO}_3^{2-}$ )在电迁移作用下向阳极聚集,断电后会由于静电斥力反向驱动负性基团。无电场组基于浓度梯度与对流进行运移,两端 Zeta 电位值无明显差异。

#### 2.5 不同电场下铀矿石结构的演化特征

##### 1) 微观形貌与元素组成及分布

原始矿石与各实验组浸出渣的微观形貌和元素分布及 EDS 能谱分别如图 9~11 所示,可以看

表 2 原始矿石与各实验组不同区域浸出渣的 Zeta 电位  
Table 2 Zeta potential of initial ore and slag from different regions in each experimental group

区域	Zeta 电位/mV	区域	Zeta 电位/mV
原始矿石	-4.99	W2	-3.15
W1	-26.42	T2	-6.83
T1	-44.73	J2	-35.53
J1	-18.57	Y2	-16.30
Y1	-14.20		

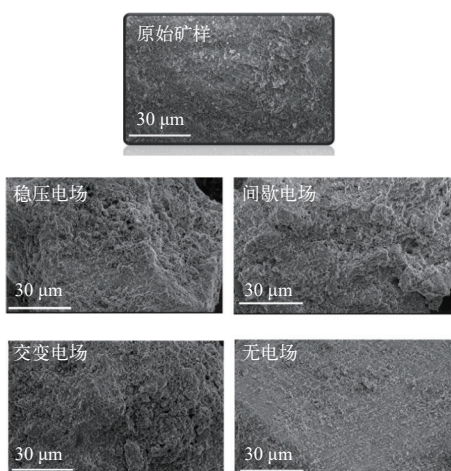


图9 原始矿石和浸出渣的微观形貌  
Fig. 9 Microstructure of initial ore and slag

出原始矿石的表面多附着片状和层状结构颗粒。浸出渣表面多附着近似球状的颗粒。稳压电场、

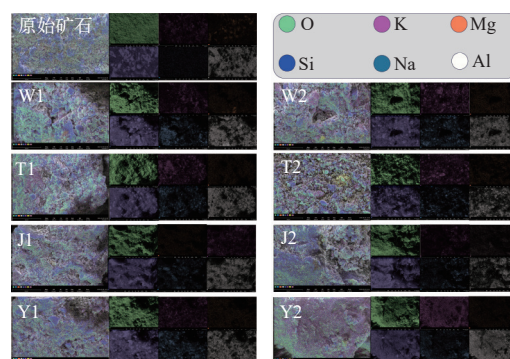


图10 原始矿石和不同区域浸出渣的元素分布  
Fig. 10 Elemental distribution of initial ore and different areas of slag

间歇电场与交变电场组浸出渣的表面颗粒与原始矿石相比粒径较大,表面多伴有孔洞,而无电场组表面孔洞较少且附着颗粒粒径较小,溶蚀情况弱于其他3组。

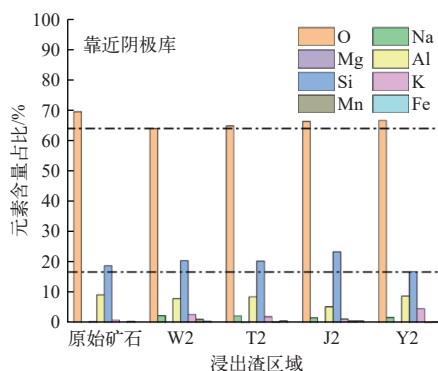
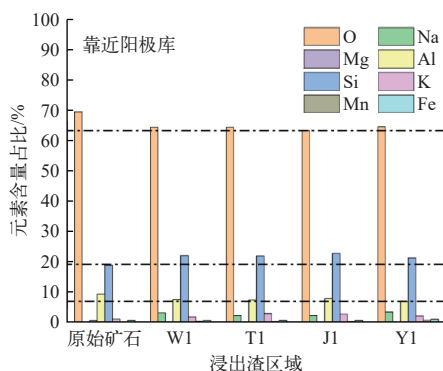


图11 原始矿石与浸出渣的EDS能谱  
Fig. 11 EDS energy spectrum of initial ore and slag

原始矿石与浸出渣表面元素分布分析(EDS面扫)(图10、11)结果表明,所有实验组不同区域的浸出渣表面硅元素的浓度较原始矿石均有提升,表明硅酸盐矿物在浸出后再沉积在矿石表面;交变电场的T2端浸出渣表面的硅酸盐矿物相比其余实验组明显覆盖更少,且相对更为分散,这说明低频次更换电场方向有利于减少矿石表面钝化。

2) 比表面积与孔隙特征

原始矿石和各实验组浸出渣的比表面积与平均孔径如表3所列。由于实验矿石采用级配的矿石颗粒组合而成,采用BET得到的浸出渣的平均孔径较小,但各实验组之间仍有明显差异。由表3可见,所有实验组浸出渣的比表面积均大于原始

矿石。持续通电电场(稳压电场与交变电场)的比表面积均大于间歇电场和无电场组,但平均孔径

表3 原始矿石与各实验组浸出后不同区域浸出渣的比表面积与孔径

Table 3 Specific surface area and pore size of initial ore and slag from different regions in each experimental group

区域	比表面积(m <sup>2</sup> /g)	孔径/nm
原始矿石	1.268 8	6.560 0
W1	13.406 7	6.031 0
T1	13.769 6	6.209 0
J1	6.196 7	7.228 9
Y1	7.422 9	8.120 6
W2	14.339 2	6.026 3
T2	12.935 9	6.256 9
J2	10.772 1	6.576 3
Y2	5.941 7	9.081 0

小,这说明持续通电对矿石的溶蚀效果具有明显的增强作用,增加了介孔的数量。间歇电场浸出渣的平均孔径均大于稳压电场和交变电场,但比表面积较小,说明间歇通电造成的孔数量少。无电场组的平均孔径明显大于加电场组,但比表面积也明显更小,这说明在不加电的情况下,浸出剂沿单一路径迁移导致孔隙数量少,溶蚀效果差。

孔隙的吸附行为因孔径而异,国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)定义的孔径以孔宽为依据,具体分类如下:<2 nm 为微孔;2~50 nm 为中孔(介孔);50~7 500 nm 为大孔;>7 500 nm 为巨孔(大气压下可灌入水银)。由表 3 可见,大多孔隙处于介孔的范围。采用脱附曲线分析所得原始矿石与各实验组不同区域浸出渣的孔径分布如图 12 所示。图 12 显示,各实验组的孔体积均大于原始矿石,表明浸出后孔隙均有提升。但加电场组与无电场组大孔部分孔体积差异不明显,说明电场对大孔发育效果影响小。稳压电场和交变电场的介孔吸附质量均大于间歇电场和无电场组,说明持续通电有助于介孔的发育。但 W2 的介孔发育明显弱于 T2,这说明单一方向的通电导致浸出的元素朝单一方向运移,减弱了该侧矿石介孔的发育。交变电场两端浸出渣的平均孔径吸附质量强于其他 3 组,表明交变电场显著加强了矿石孔隙的发育。

### 3 结论

1) 在 4 种电场模式下,交变电场优势显著。在 40 d 内,铀的浸出率为 51.28%,是无电场组的 2.81 倍。并且交变电场对于铀的选择性浸出更具优势,主要脉石矿物(Si)的浸出质量是无电场组的 72%。

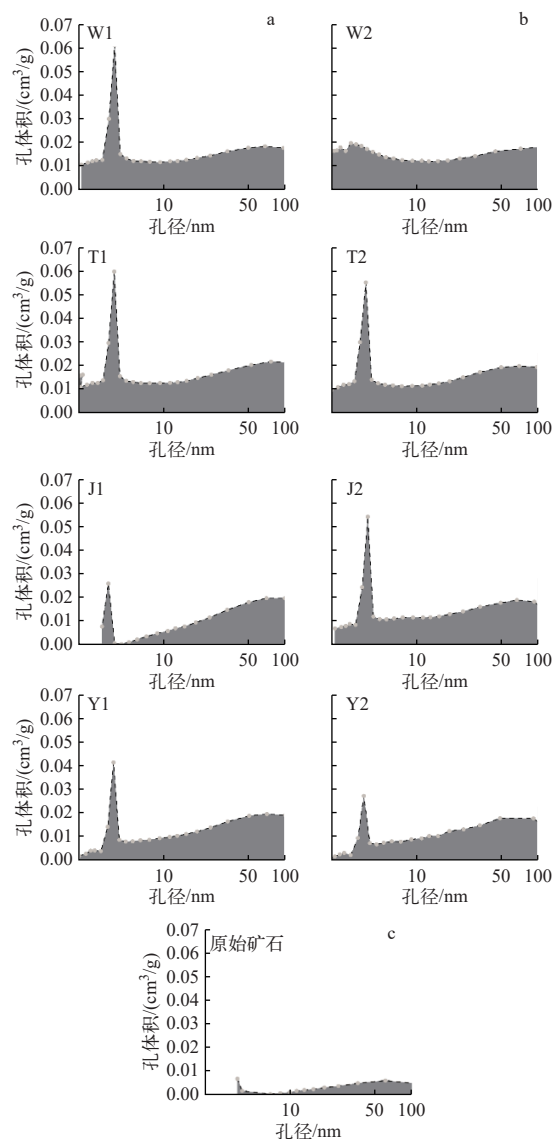
2) 交变电场因周期性的反转电场显著降低了矿物表面的钝化,对孔隙的发育作用效果显著。

3) 持续通电有利于加强浸出剂的迁移与对矿物的溶蚀效果,增强了介孔的发育。初始通电方向对浸出规律的影响较大。

4) 电场主要通过增强溶蚀作用以及元素的迁移来增强铀浸出率。

#### 参考文献:

[1] FANG J, LAU C K M, LU Z, et al. Estimating peak ura-



a——靠近阳极库一端的矿石;  
b——靠近阴极库一端的矿石;c——原始矿石

图 12 原始矿石与各实验组不同区域浸出渣的孔径吸附质量分布

Fig. 12 Pore size adsorption mass distribution of initial ore and slag from different regions in each experimental group

nium production in China—Based on a Stella model[J]. *Energy Policy*, 2018, 120: 250-258.

[2] 周思聪, 李子颖, 郭建, 等. 核能发展新形势下我国铀资源保障研究[J]. *世界核地质科学*, 2024, 41(4): 703-711, 731.

ZHOU Sicong, LI Ziyong, GUO Jian, et al. The security of uranium resource demand under the new development situation of nuclear energy in China[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(4): 703-711, 731(in Chinese).

[3] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 1051-1069.

- CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 1051-1069(in Chinese).
- [4] 苏学斌, 杜志明. 我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J]. *中国矿业*, 2012, 21(9): 79-83.  
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium *in situ* leaching technology[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(9): 79-83(in Chinese).
- [5] 李世俊, 刘永涛, 刘辉, 等. 铀钼共生矿加压碱法浸出试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2024(3): 90-95.  
LI Shijun, LIU Yongtao, LIU Hui, et al. Pressure alkali leaching test of uranium-molybdenum symbiotic ores[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(3): 90-95(in Chinese).
- [6] 黄晓东, 宋昊, 范元清, 等. 新疆蒙古尔铀矿床矿石 CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> 加压搅拌浸出前后含铁矿物溶蚀特征对比研究[J]. *矿物岩石*, 2024, 44(1): 132-142.  
HUANG Xiaodong, SONG Hao, FAN Yuanqing, et al. Comparison of the dissolution characteristics of Fe-bearing minerals before and after CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> pressure stirring leaching of the Mengqiguer uranium deposit, Xinjiang[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(1): 132-142(in Chinese).
- [7] LIU C, LIU H, LONG J, et al. Interaction of dry and water-saturated uranium ore with microwave and enhanced extraction of uranium[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 196: 108047.
- [8] HU P, TAN K X, LI C G, et al. Selection of the surfactants for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits[J]. *Modern Mining*, 2016, 32: 14-16, 40.
- [9] 张健, 宋晗, 邓洪, 等. 铀与微生物相互作用研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(1): 55-62, 158-159.  
ZHANG Jian, SONG Han, DENG Hong, et al. Research progress on interaction between uranium and microorganism[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(1): 55-62, 158-159(in Chinese).
- [10] LLOYD J R. Microbial reduction of metals and radionuclides[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, 27: 411-425.
- [11] ZHOU H, XU J, LV S, et al. Removal of cadmium in contaminated Kaolin by new-style electrokinetic remediation using array electrodes coupled with permeable reactive barrier[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 239: 116544.
- [12] ZHANG S, ZHANG J, CHENG X, et al. Electrokinetic remediation of soil containing Cr(VI) by photovoltaic solar panels and a DC-DC converter[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2015, 90(4): 693-700.
- [13] KIM G N, SHON D B, PARK H M, et al. Development of pilot-scale electrokinetic remediation technology for uranium removal[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 80(1): 67-72.
- [14] MARTENS E, PROMMER H, SPROCATI R, et al. Toward a more sustainable mining future with electrokinetic *in situ* leaching[J]. *Sci Adv*, 2021, 7(18): eabf9971.
- [15] MARTENS E, PROMMER H, DAI X, et al. Electrokinetic *in situ* leaching of gold from intact ore[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 178: 124-136.
- [16] WANG G, XU J, RAN L, et al. A green and efficient technology to recover rare earth elements from weathering crusts[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(1): 81-92.
- [17] 吴培生, 张宝恩, 郑英, 等. 地电化学在地浸采铀中应用可能性的探索[J]. *铀矿冶*, 2005, 24(1): 50-53.  
WU Peisheng, ZHANG Baoen, ZHENG Ying, et al. Study on possibility of application of geoelectric chemistry method in *in situ* leaching of uranium[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2005, 24(1): 50-53(in Chinese).
- [18] 吴培生, 张宝恩, 齐静. 地电化学提取铀的机制探讨[J]. *铀矿冶*, 2010, 29(1): 20-23.  
WU Peisheng, ZHANG Baoen, QI Jing. Discussion on the essence of geoelectric chemistry extracting uranium process[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2010, 29(1): 20-23(in Chinese).
- [19] WANG W, LI C, LIU L, et al. Electrokinetic-enhanced sulfuric acid leaching of uranium from sandstone uranium ores[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 642: 131869.
- [20] LI C, WANG W, LIU Z, et al. Electrokinetic *in situ* leaching of U from low-permeability uranium ore[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2025, 57(2): 103212.
- [21] 李晓翠, 李林强, 蔡煜琦. 中国天然铀资源保障策略研究[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(3): 183-189.  
LI Xiaocui, LI Linqiang, CAI Yuqi. Research on the security strategy of natural uranium resources in China[J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(3): 183-189(in Chinese).
- [22] 李家新, 王文峰, 陆青锋, 等. 新疆地区不同岩性煤矸石重金属元素释放规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S2): 328-335.

- LI Jiabin, WANG Wenfeng, LU Qingfeng, et al. Study on the release law of heavy metal elements from coal gangue with different lithology in Xinjiang[J]. China Industrial Economics, 2023, 51(S2): 328-335(in Chinese).
- [23] WEN D, FU R, LI Q. Removal of inorganic contaminants in soil by electrokinetic remediation technologies: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 401: 123345.
- [24] YAN Y Y, HULL J B. The concept of electroosmotically driven flow and its application to biomimetics[J]. [Journal of Bionic Engineering](#), 2004, 1(1): 46-52.
- [25] 张宇辰, 原渊, 荣辉, 等. 内蒙古钱家店铀矿 CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> 地浸采铀后残留铀的产状及成因[J]. 地球科学, 2024. doi:10.3799/dqkx.2024.106.
- ZHANG Yuchen, YUAN Yuan, RONG Hui, et al. The occurrence and genetic mechanism of residual uranium after CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> *in situ* leaching in the Qianjiadian uranium deposit, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 2024. doi:10.3799/dqkx.2024.106(in Chinese).
- [26] 李继山, 姚同玉, 刘先贵. 砂岩表面 Zeta 电位与渗流过程的关系[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 459-462.
- LI Jishan, YAO Tongyu, LIU Xiangui. The relationship between Zeta potential of sandstone surface and porous flow process[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(4): 459-462(in Chinese).