

# 基于三维非均质模型的地浸过程特征分析与方案优化<sup>①</sup>

骆桂君<sup>1,2</sup>, 贾明滔<sup>1,2</sup>, 张传飞<sup>3</sup>, 阳奕汉<sup>3</sup>, 陈梅芳<sup>4</sup>

(1.中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2.金属资源开发利用碳减排教育部工程研究中心, 湖南长沙 410083; 3.中核内蒙古矿业有限公司, 内蒙古呼和浩特 010020; 4.核工业北京化工冶金研究院, 北京 101100)

**摘要:** 基于巴彦乌拉铀矿床 C6<sup>#</sup>采区构建三维非均质性数值模型, 分析过滤器段不同水平渗透率对溶质运移、pH 值、铀矿物浸出性能的影响。模拟结果表明, 第 450 d 过滤器布置段垂直 30 m 处铀矿浸出率为 13.56%, 35 m 处铀矿浸出率为 11.05%, 30 m 处铀矿浸出率较 35 m 处铀矿浸出率高出 22.71%; 根据空间砂岩渗透性、铀矿层品位以及非均质化程度, 可以优化过滤器段的垂直布置位置和过滤器段长度, 从而有效提高经济可采金属量。

**关键词:** 铀矿开采; 溶浸法; 酸法采铀; 非均质化; 溶质运移; COMSOL 模型; 浸出性能; 地浸

中图分类号: TD868

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.003

文章编号: 0253-6099(2025)04-0014-08

## Analysis of In-Situ Leaching Characteristics and Scheme Optimization Based on 3D Heterogeneous Model

LUO Guijun<sup>1,2</sup>, JIA Mingtao<sup>1,2</sup>, ZHANG Chuanfei<sup>3</sup>, YANG Yihan<sup>3</sup>, CHENG Meifang<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Engineering Research Center for Carbon Emission Reduction in Metal Resource Exploitation and Utilization, Ministry of Education, Changsha 410083, Hunan, China; 3. CNNC Inner Mongolia Mining Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 4. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101100, China)

**Abstract:** A 3D heterogeneous numerical model was established based on the C6<sup>#</sup> mining area of the Bayan-Uul uranium deposit to analyze the effects of different horizontal permeability in the filter section on solute transport, pH value and uranium mineral leaching performance. The simulation results show that after 450 days, the uranium leaching rate is 13.56% at the vertical depth of 30 m in the filter section, presenting 22.71% higher compared to the leaching rate of 11.05% at the depth of 35 m. According to the sandstone permeability, grade of uranium in the stratum and heterogeneity, the vertical arrangement position and length of filter section can be optimized, so as to effectively improve the economically recoverable metal quantity.

**Key words:** uranium extraction; solution leaching method; acid leaching of uranium; heterogeneity; solute transport; COMSOL model; leaching performance; in-situ leaching

原位浸出成本低、环境影响小,已成为砂岩铀矿的重要开采方法<sup>[1]</sup>。其中,酸性浸出是常用方法之一,该过程涉及复杂的水动力学和化学动力学。数值模拟作为常用研究工具,在预测溶浸范围、优化浸出参数(如流速、酸浓度、溶解速率)方面取得显著进展<sup>[2-3]</sup>。数值模拟也被广泛应用于分析复杂反应传输过程<sup>[4-5]</sup>,

如耦合不同软件实现高效模拟,探究渗透性能的影响,以及基于 APro 框架、iCP 平台等进行核素迁移、溶质运移模拟及浸铀过程研究等<sup>[6-9]</sup>。然而现有模型仍存在不足,一是多物理场(水流场、溶质运移场)与地球化学反应的耦合精度和计算效率有待提升;二是对地层非均质性(孔隙度、渗透率等)及其动态变化的考虑

① 收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52034001)

作者简介: 骆桂君(2000—),女,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为地浸采铀技术和数值模拟。E-mail:225511042@csu.edu.cn

通信作者: 贾明滔(1973—),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事数字矿山与矿山安全研究。E-mail:mingtiao\_jia@csu.edu.cn

不足,难以准确模拟真实浸出过程。

砂岩铀矿的非均质性(孔隙度、渗透率、铀品位空间变化)对开采效率具有关键影响。近年来在表征非均质性方面的研究取得进展,建模方法从简单模型发展到三维模拟<sup>[10-11]</sup>。但现有方法主要依赖随机场模拟,面对复杂地质结构时可靠性和确定性可能不足。

针对上述问题,本文基于 iCP 平台和现场数据,利用有限元法建立高精度三维非均质溶质运移模型;完善酸法浸矿热力学数据库,实现多物理场-化学反应高效耦合;量化分析浸出性能,揭示渗透性、铀品位等非均质对浸出的影响机制;并提出依据非均质性特征调整过滤器段在垂直位置的布置,以提升开采效益。

## 1 研究方法 with 条件

### 1.1 研究区域地质概况

巴彦乌拉铀矿床 C6# 采区位于内蒙古盆地中央低洼地带,地势呈南北高、中部低、东北部略高并向南及西南部缓缓降低的特征,属一级阶状高平原地貌,海拔 954~978 m,总体平缓,局部略有波状起伏。

该矿床地层岩性复杂,自上而下为下白垩统赛汉组下段、赛汉组上段及古近系伊尔丁曼哈组。矿区地处马尼特拗陷西部自流水区的径流区,地下水总体从北东向南西缓慢径流,含矿含水层水温在 9℃ 左右。水文地质孔分析显示,含矿层地下水中 Cl<sup>-</sup> 含量 411.96~517.60 mg/L, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量 179.82~423.00 mg/L, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量 357.32~512.00 mg/L, Na<sup>+</sup> 含量 425.27~516.81 mg/L, Ca<sup>2+</sup> 含量 27.09~63.00 mg/L, Mg<sup>2+</sup> 含量 19.46~55.00 mg/L。

### 1.2 矿物地球化学反应速率

化学反应速率用于描述化学反应过程中矿物的反应速率与反应物浓度之间的关系,其计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$R_{K_i} = k_1 \frac{A}{V} \left( \frac{m}{m_0} \right)^n \left[ 1 - \left( \frac{B_{IAP}}{K} \right)_{K_i} \right] \quad (1)$$

式中:  $R_{K_i}$  为矿物  $K_i$  的反应速率, mol/(cm<sup>2</sup>·s);  $k_1$  为速率常数, 9℃ 下  $k_1 = 1 \times 10^{-16}$  mol/(cm<sup>2</sup>·s);  $A$  为矿物比表面积, m<sup>2</sup>/g;  $V$  为活化体积, cm<sup>3</sup>/mol;  $n$  为指数常数;  $m$  为反应物物质的量, mol;  $m_0$  为反应物初始物质的量, mol;  $B_{IAP}$  为离子活度积;  $K$  为平衡常数;  $B_{IAP}/K$  为相对饱和比。

### 1.3 数值模拟平台及原理

构建均质多场耦合铀矿酸性浸出数值模型时,首先用有限元法建立 COMSOL 输入模型,设置几何特性、边界条件、溶浸液流动特性等参数,经网格剖分确定用于

浓度计算的网格节点。同时,通过 PHREEQC 设置溶浸液与矿层水的化学反应参数。模型运行中,浓度数据经节点介质传输至 PHREEQC 执行化学计算且节点按 COMSOL 对应化学域分组,计算每个域节点浓度并取算术平均值后,结果回传至 COMSOL。本研究基于 iCP 耦合平台的原理如图 1 所示。算子分裂法能分离化学反应项与溶质运移项,且适用于高度非线性问题,被广泛用于溶质反应运移求解。该方法在建模中会将溶质运移方程与化学反应方程分离后依次求解<sup>[13]</sup>。

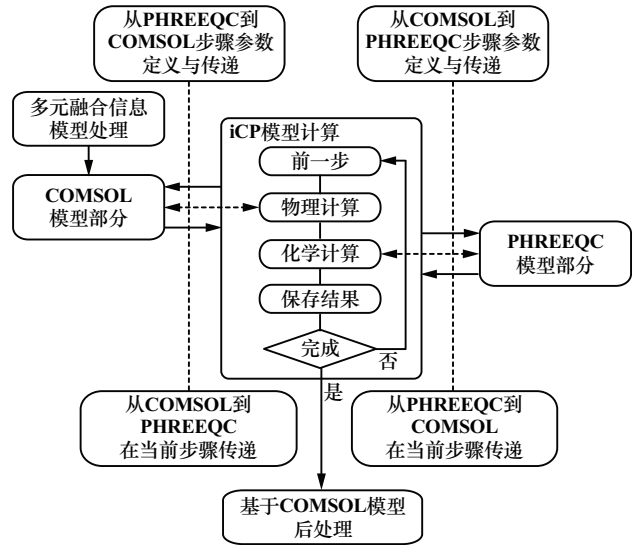


图 1 基于 iCP 耦合平台的原理

Fig. 1 Principle based on iCP coupling platform

反应性传输步骤使用算子分裂技术和顺序非迭代方法将其分为两部分,以顺序非迭代算法的时间步长为例,计算原理如下。

溶质运移步骤<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \omega = \frac{\partial v_a}{\partial t} = L_l(v_a) + f_w u_a^* \\ v_a(0) = u_a^n \end{cases} \quad (2)$$

化学步骤:

$$\begin{cases} \frac{dw_g}{dt} + \frac{dw_m}{dt} + \frac{dw_a}{dt} + \frac{dw_d}{dt} = r_{kin} \\ f(w, c, r_{kin}, t) = 0 \\ w_a(0) = v_a(\Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

更新解决方案:

$$u_a^{n+1} = w_a(\Delta t) \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为液相中水的质量分数;  $u$  为组分矢量, mol/kg;  $f_w$  为外部水源, kg/(m<sup>3</sup>·s);  $L$  为线性算子,它考虑了液相的平流、扩散/弥散和非化学汇源项,化学组分被定义为质量不受平衡反应影响的物质的线性组合;

$v$  和  $w$  为内变量,  $w_g$ 、 $w_m$ 、 $w_a$  和  $w_d$  分别对应于气相、矿物相、水相和吸附相的子组分;  $c$  为所有物种的浓度向量, mol/kg;  $r_{kin}$  为由动力学反应引起的反应速率向量;  $t$  为可以解决非等温的情况;  $u_a^n$  和  $u_a^{n+1}$  分别是时间  $n$  和  $n+1$  的分量向量。

## 2 模型构建

### 2.1 采区 COMSOL 数值模型

C6<sup>#</sup>采区岩性模型依托钻孔数据库采用径向基函数插值方法进行空间反演与构建, 将地层依次分为 8 类, 处理后岩性分布如图 2 所示, 处理后岩性匹配度统计如图 3 所示。采区岩性匹配度达 90% 以上, 可为后期非均质溶质运移模型提供精确化参数依据。

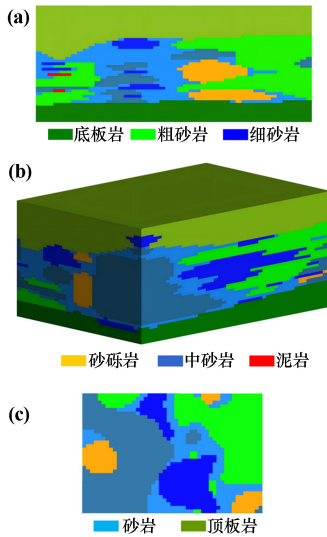


图 2 处理后岩性分布图

Fig. 2 Lithologic distribution map after processing

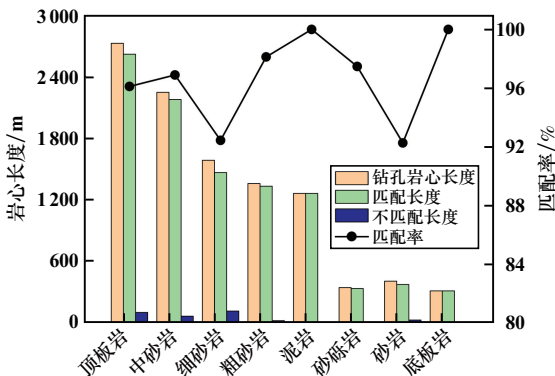


图 3 模型岩性匹配度统计

Fig. 3 Lithology matching statistics after processing

根据图 2(b) 构建 COMSOL 数值模型, COMSOL 计算模型构建流程如图 4 所示。

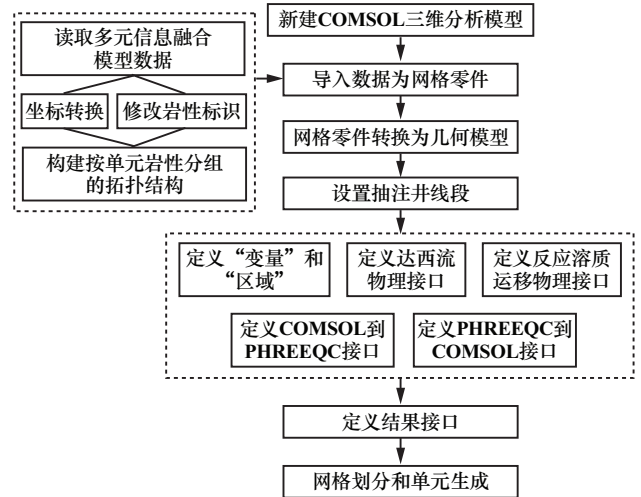
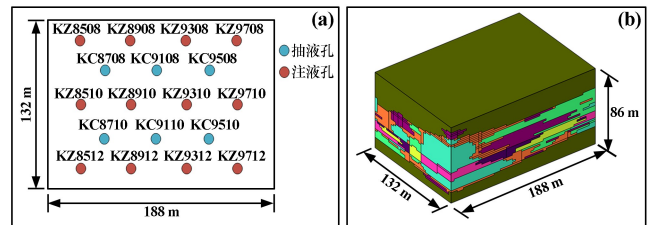


图 4 COMSOL 计算模型构建流程

Fig. 4 COMSOL modeling workflow

根据岩性以过滤器段内和段外为界限划分了 9 个不同区域的非均质岩性分布子域, 以过滤器段为依据划分为过滤器段外的泥层 sel1、粗砂层 sel2、细砂层 sel3、中砂层 sel4、砂层 sel5, 以及过滤器段内的泥层 sel6、粗砂层 sel7、中砂层 sel8、砂层 sel9。模型尺寸为 188 m × 132 m × 86 m, 包含 C6<sup>#</sup>采区南部的 6 个抽注单元。主要涉及的抽、注孔和三维非均质模型如图 5 所示。



(a) 抽、注孔; (b) 三维非均质模型

图 5 COMSOL 计算模型构建

Fig. 5 Construction of COMSOL computational model

根据地质融合模型, 过滤器段布置坐标和长度见表 1,  $Z_0$  表示过滤器段靠近底板垂直方向坐标,  $Z_1$  表示过滤器段靠近顶板垂直方向坐标。砂岩铀矿的地质赋存条件复杂, 依托多源地质模型, 设计了采区内 9 个不同子区域的孔隙率、渗透系数、扩散系数、纵向弥散性和横向弥散性, 见表 2。

### 2.2 采区 iCP 耦合数值模型

考虑到地下水复杂赋存状态以及不同子区域铀矿品位非均质性特征, 以地质模型为基础, 对不同非均质子区域内铀矿品位进行换算, PHREEQC 子区域参数设置见表 3, 计算如下:

$$n_i = \frac{1\ 000M_i}{m} \quad (5)$$

式中: $n_i$  为子区域铀矿物质的量, mol; $M_i$  为对应计算子区域内的铀矿物质量, g; $m$  为铀矿物的相对分子质量。

表1 过滤器段布置情况  
Table 1 Filter section arrangement

过滤器段钻孔	X/m	Y/m	Z <sub>0</sub> /m	Z <sub>1</sub> /m	长度/m
KZ8508	16.37	113.65	23.47	33.47	10
KZ8908	65.86	113.74	23.72	35.72	12
KZ9308	115.27	113.67	22.69	32.69	10
KZ9708	164.77	113.69	28.27	36.27	8
KZ8510	16.25	64.15	24.36	36.36	12
KZ8910	65.79	64.18	19.34	31.34	12
KZ9310	115.32	64.19	27.27	37.27	10
KZ9710	164.78	64.15	30.16	38.16	8
KZ8512	16.2	14.64	26.40	36.40	10
KZ8912	65.77	14.67	25.25	35.25	10
KZ9312	115.33	14.70	28.91	36.91	8
KZ9712	164.78	14.72	29.16	37.16	8

表2 C6# 采区数值模型各子区域参数

Table 2 Parameters of sub-regions in numerical model for mining area C6#

区域名称	孔隙率	渗透系数/ (m·d <sup>-1</sup> )	扩散系数/ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	纵向弥散性/m	横向弥散性/m
sel1	0.10	0.02	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.20	0.04
sel2	0.35	3.50	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.20	0.04
sel3	0.20	0.10	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.50	0.10
sel4	0.30	0.18	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.50	0.10
sel5	0.25	0.15	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.50	0.10
sel6	0.10	0.02	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.20	0.04
sel7	0.35	3.50	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.20	0.04
sel8	0.30	0.18	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.50	0.10
sel9	0.25	0.15	1.8×10 <sup>-12</sup>	0.50	0.10

模拟非均质情况下砂岩铀矿的浸出情况,对耦合模型边界进行定义,溶浸液以0.2 kg/(m·s)的单位长度质量流率注入过滤器所在含矿层,并以0.5 kg/(m·s)的单位长度质量流率从抽液孔抽出。地下水自北东向西南缓慢流动,北东设置压力水头60 m,西南设置压力水头50 m,地下水达西流速为8.311 3 m/s。C6#采区参照450 d实际浸出率变化情况开展模拟实验,确定物理模拟时长为450 d。

表3 溶浸液主要参数及地下非均质子区域主要参数

Table 3 Key parameters of leaching solution and underground heterogeneous sub-regions

PHREEQC 文件分类	区域 名称	温度/°C	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量/ (mol·kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> 含量/ (mol·kg <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> 含量/ (mol·kg <sup>-1</sup> )	Na <sup>+</sup> 含量/ (mol·kg <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> 含量/ (mol·kg <sup>-1</sup> )	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 含量/ (mol·m <sup>-3</sup> )
溶浸液化学成分	Solution0	9	0.108 3	—	—	—	—	—
各地下非均质子区域	sel1	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.107
	sel2	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.143
	sel3	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.125
	sel4	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.127
	sel5	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.148
	sel6	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.283
	sel7	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.245
	sel8	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.272
	sel9	9	4.89×10 <sup>-3</sup>	1.39×10 <sup>-3</sup>	1.46×10 <sup>-4</sup>	2.01×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-2</sup>	0.263

### 3 结果与讨论

#### 3.1 过滤器的不同水平反应溶质运移特征分析

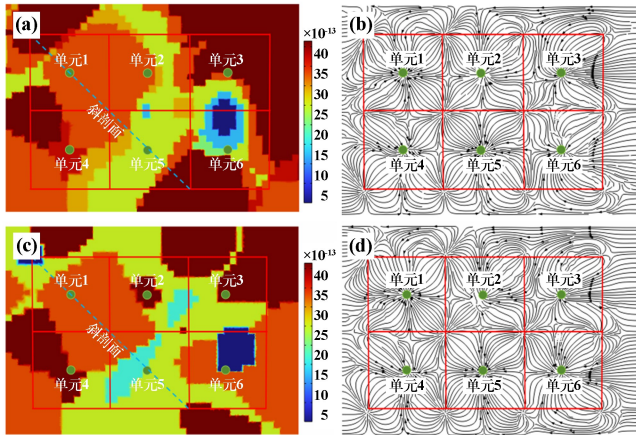
图6为过滤器布置段垂直30 m和35 m处横剖面截水平渗透率与流线分布图。图7为斜剖面抽、注孔的压力水头变化情况。渗透率云图由深色过渡至亮色,表明岩层渗透性由极好变为较差。

地下水流场自左向右从流入到流出,在单元1至单元5的斜剖面所在单元中,35 m水平的渗透率整体较30 m水平差。两个水平的溶质运移均呈现溶浸液从注入孔向抽出孔流动的状态。由于这2个水平的高

渗透性岩层主要分布在单元1、单元4和单元6,这3个区域的流线分布较为密集,溶浸液通道丰富。而在极差岩层集中的区域,如30 m水平的单元2、单元5以及35 m水平的单元2、单元3和单元5,流线通道则相对稀疏。

在浸出过程中,随着液体的持续注入,渗透压会不断变化<sup>[14]</sup>。根据文献<sup>[15-16]</sup>对较大、较小抽注压差在铀矿浸出的研究可知,较低的压差通常意味着在注入孔开始注入之前,液体的流动受到了限制,这可能导致浸出剂无法有效渗透到矿物质中,降低了浸出速率;较高的压差则可促进液体的快速流动,使浸出剂在矿

物中更快地扩散。这种情况下,矿物质与浸出剂的接触时间增加,反应更加充分,从而提高了浸出速率;在特定的地质条件下,注入孔的深度和位置也会影响压差的大小和流体流动的方向。在“巢状矿体”中,适当深度的注入孔用于控制浸出剂的流速和流向,有助于优化浸出过程。因此,对于渗透率分布较为均匀的抽、注孔,考虑到抽、注孔附近渗透性对压差的影响,压差可能较小,其流量分布也会比较均匀,可能会影响前期浸出率;对于渗透率分布差距较大的区域,压差可能较大,其流量分布也会比较不均匀,可能会提高前期浸出率。但不是渗透率越好,流量就会越集中往抽液井流出,因为外围渗透率可能强于抽液孔,此时溶浸液会往外围扩散或弥散,从而造成浸出效果没有均匀分布区好的情况,这与地下水流场抽、注孔压力水头影响有关。



(a) 30 m, 渗透率; (b) 30 m, 流线;  
(c) 35 m, 渗透率; (d) 35 m, 流线

图6 过滤器布置段垂直30 m和35 m处横剖面截水平渗透率与流线分布图

Fig. 6 Horizontal permeability and streamline distribution at 30 m and 35 m depths of filter section

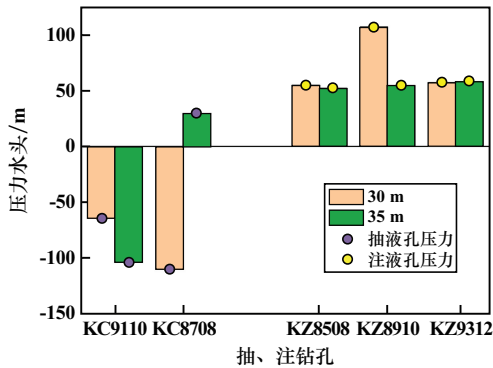
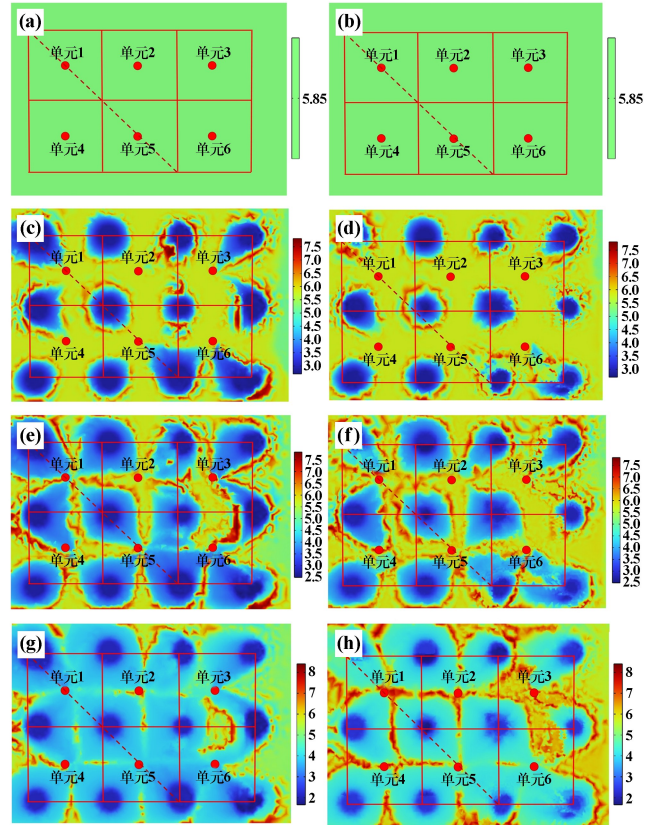


图7 斜剖面抽、注孔的压力水头变化情况

Fig. 7 Variation in piezometric head at extraction and injection wells on a diagonal cross-section

### 3.2 过滤器段不同水平 pH 值特征分析

过滤器段不同水平 pH 值时空变化特征如图8所示,斜剖面抽、注孔 pH 值变化情况如图9所示,不同水平平均 pH 值随着时间变化特征如图10所示。



(a) 30 m, 初始; (b) 35 m, 初始;  
(c) 30 m, 第50 d; (d) 35 m, 第50 d;  
(e) 30 m, 第100 d; (f) 35 m, 第100 d;  
(g) 30 m, 第450 d; (h) 35 m, 第450 d

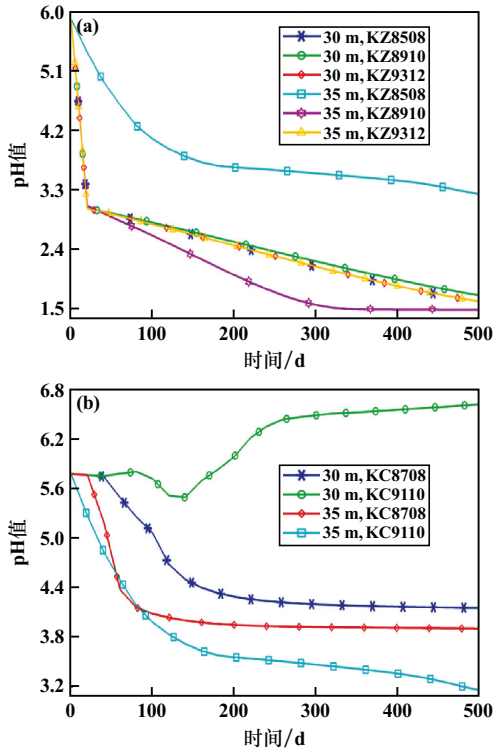
图8 过滤器段不同水平 pH 值时空变化特征

Fig. 8 Spatiotemporal variations of pH at different level of filter section

30 m 水平矿层整体 pH 值平均值高于 35 m 水平,可见整体浸出环境 30 m 水平优于 35 m 水平。随着溶浸液逐渐从注入孔注入含矿层,单元内呈现 pH 值由注液孔往抽液孔方向升高的趋势。结合图6,对过滤器段不同水平分析显示,渗透率均匀的区域(如 30 m 水平抽注单元1)前期 pH 值变化缓慢,溶质运移稳定;渗透率分布极端的区域(如 30 m 和 35 m 水平抽注单元3、6)因渗透性剧烈变化导致地下压差大,前期 pH 值空间变化急速,溶质运移强烈。模拟至 450 d 时,30 m 水平的强酸范围大于 35 m 水平。

### 3.3 过滤器段不同水平轴矿物浸出特征分析

图11为过滤器段不同水平剩余轴量的时空变化规律。取抽注单元1到抽注单元5斜剖面为研究目标,



(a) 不同水平注液孔; (b) 不同水平抽液孔

图 9 斜剖线抽、注孔 pH 值变化情况

Fig.9 Variation of pH in extraction and injection wells on a diagonal cross-section

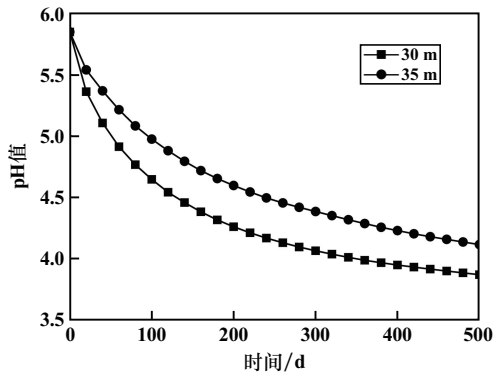


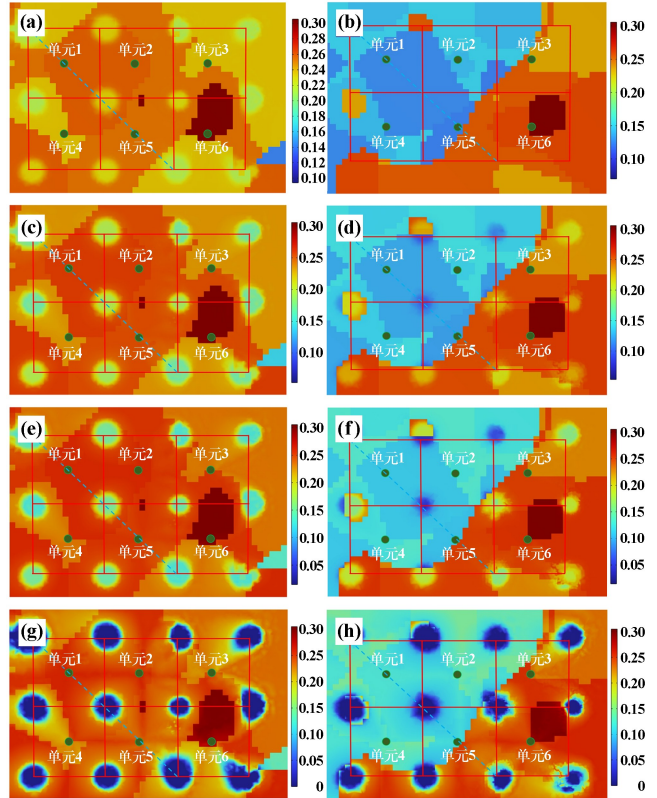
图 10 不同水平平均 pH 值随时间变化特征

Fig. 10 Temporal variation of average pH at different levels

分析非均质条件下抽、注孔铀浓度变化规律。由图 11 可知,在溶浸范围内,30 m 水平的抽注单元 3、4、6 最先形成扇形溶浸区;35 m 水平则是单元 3 最先形成扇形溶浸区。这是由于这些区域存在渗透率梯度变化,能提供较大渗流压差,从而促进地下水流动,与前文 pH 值变化与渗透率相关的分析结论一致。

斜剖线上不同平面抽液孔、注液孔铀浓度变化情况如图 12 所示。由图 12 可知,注液孔周围铀矿溶浸分为 3 个过程,每个注液孔周围矿物浸出阶段时间分布

情况不一,这受到 pH 值、地下水流动方向、矿层渗透性等多种因素的影响。据文献[10]对铀反应运移模拟的分析,对流和弥散作用使上游和中游地下水中的铀浓度逐渐降低,而在下游地下水中则导致溶解铀聚集。这与前文分析的情况一致,说明岩层渗透性和岩层非均质程度共同影响铀矿的浸出效果。



(a) 30 m,初始; (b) 35 m,初始;

(c) 30 m,第 50 d; (d) 35 m,第 50 d;

(e) 30 m,第 100 d; (f) 35 m,第 100 d;

(g) 30 m,第 450 d; (h) 35 m,第 450 d

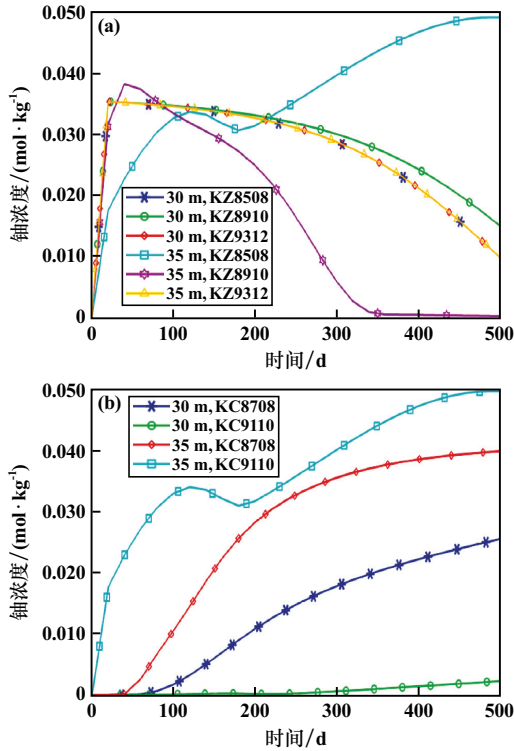
图 11 过滤器段不同水平剩余铀量的时空变化图 (mol/m<sup>2</sup>)

Fig. 11 Spatiotemporal variation of residual uranium content at different level of filter section

不同过滤器段浸出率如图 13 所示。前 450 d,30 m 水平所模拟的砂岩铀矿浸出率为 13.56%,35 m 水平铀矿浸出率为 11.05%,30 m 水平铀矿浸出率较 35 m 水平铀矿浸出率高出 22.71%,过滤器布置存在最优位置,应根据空间砂岩渗透性动态布置过滤器段垂直位置,以提高经济可采金属量。

### 3.4 过滤器某纵剖面 pH 值与溶质运移特征分析

图 14 为 Y 轴 16.30 m 和 41.04 m 处抽液孔和注液孔纵剖面渗透率的分布情况。剖面上注液孔和抽液孔渗透率分布较集中,主要为极好、好和一般的渗透率,整体表现为左边的渗透率高于右边的渗透率,下方的渗透率高于上方的渗透率。



(a) 不同水平注液孔; (b) 不同水平抽液孔

图 12 抽、注孔铀浓度变化特征

Fig. 12 Variation of uranium concentration in extraction and injection wells

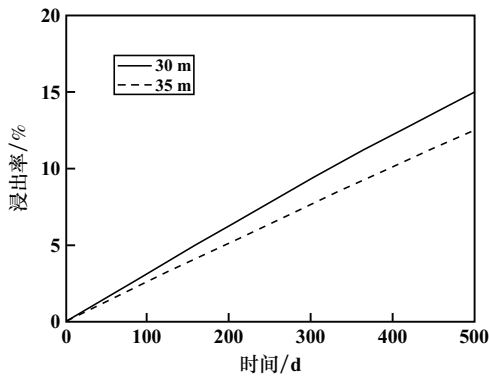
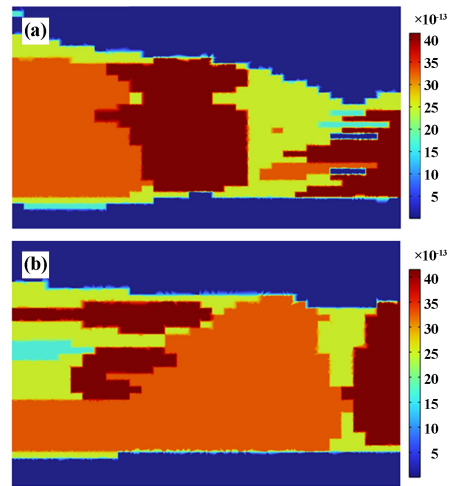


图 13 不同过滤器段浸出率

Fig. 13 Leaching rate at different level of filter section

砂岩铀矿地下溶质运移受多种因素的影响,分析YZ平面纵剖面上X轴16.30 m处和41.04 m处的第0、50、100和450 d砂岩铀矿浸出变化情况和pH值变化情况。图15为抽液孔KC8708和KC8710的溶质运移和pH值时空变化特征,图16为注液孔KZ8508、KZ8510和KZ8512的溶质运移和pH值时空变化特征。由图15和图16可见,抽液孔流线通道分布较为集中的区域是左下方和右下方区域,注液孔的流线通道分布较为均匀,明显集中在中间部分和右下方区域,

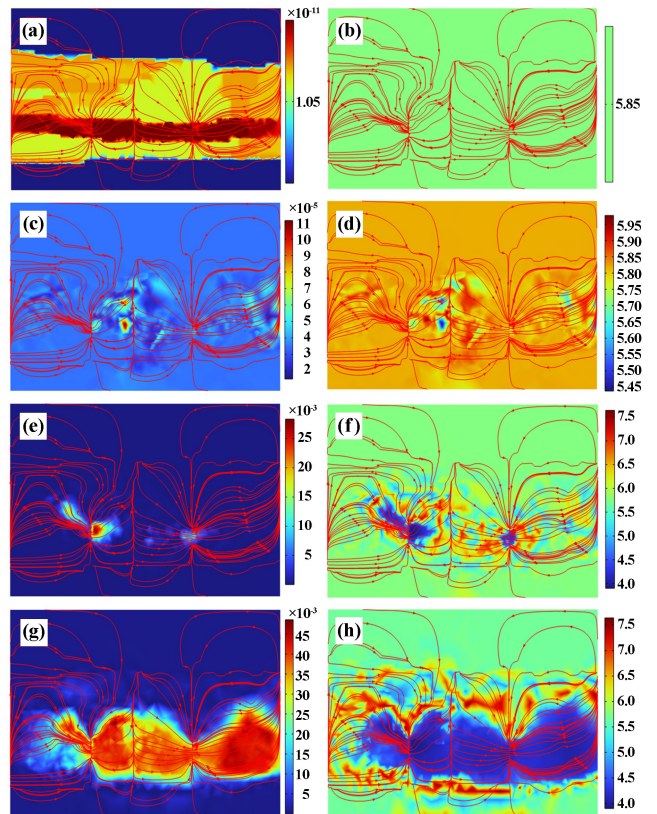
这和渗透率的分布情况契合。



(a) 16.30 m 注液孔; (b) 41.04 m 抽液孔

图 14 Y轴上抽、注孔渗透率分布(单位: m²)

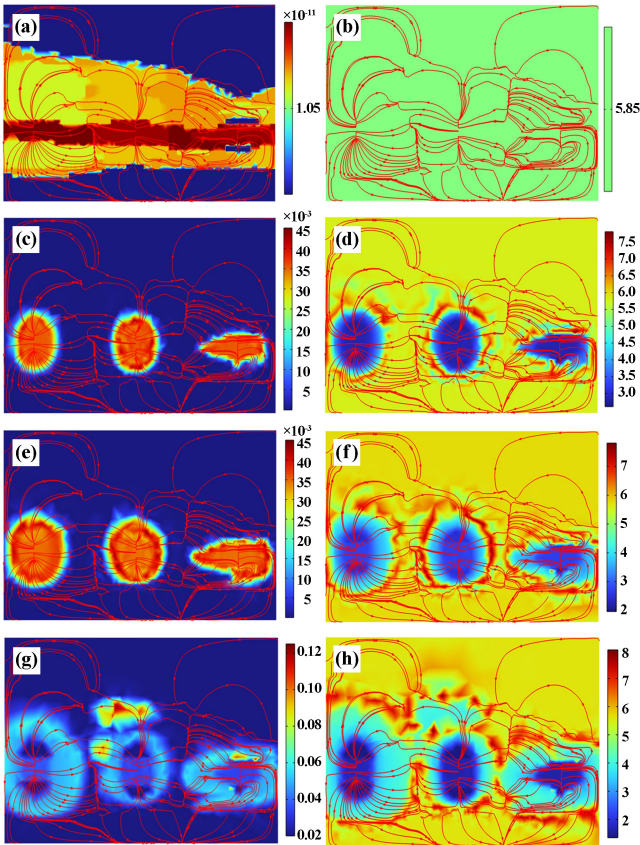
Fig. 14 Permeability distribution along Y-axis in extraction and injection wells



(a) 铀浓度,初始; (b) pH值,初始;  
(c) 铀浓度,第50 d; (d) pH值,第50 d;  
(e) 铀浓度,第100 d; (f) pH值,第100 d;  
(g) 铀浓度,第450 d; (h) pH值,第450 d

图 15 X轴41.04 m处抽液孔纵剖面溶质运移与pH值时空变化特征(铀浓度单位: mol/kg)

Fig. 15 Spatiotemporal characteristics of solute transport and pH on longitudinal section of extraction well at 41.04 m of X-axis



(a) 铀浓度,初始; (b) pH 值,初始;  
 (c) 铀浓度,第 50 d; (d) pH 值,第 50 d;  
 (e) 铀浓度,第 100 d; (f) pH 值,第 100 d;  
 (g) 铀浓度,第 450 d; (h) pH 值,第 450 d

图 16  $X$  轴 16.30 m 处注液孔纵剖面溶质运移与 pH 值时空变化特征(铀浓度单位 mol/kg)

Fig. 16 Spatiotemporal characteristics of solute transport and pH on longitudinal section of injection well at 16.30 m of  $X$ -axis

分析可知,pH 值的变化对溶质的扩散速率和溶质对土壤颗粒的吸附能力都有影响,这与文献[17]的研究结论契合,pH 值较高时,溶质渗透性可能会降低,从而减缓溶质在介质中的移动。抽液孔右下角溶质运移情况不明显,可能与 pH 值升高有关,当 pH 值发生变化时,吸附的溶质可能会被解吸回溶液中<sup>[18]</sup>。这一过程与溶质的化学性质、介质的特性以及环境条件密切相关<sup>[19]</sup>,pH 值升高时,某些金属离子可能会从固体相解吸,导致其他离子在水体中的浓度增加,铀矿物浸出减少,铀离子浓度降低。

## 4 结论

1) 过滤器段垂直方向的不同水平中,砂岩铀矿非均质性对浸出率影响显著,整体表现为渗透性强的矿层浸出率更高。

2) 不同抽注单元内,渗透率空间分布均匀度极大影响开采前期浸出效果,这主要与抽、注孔压力水头相关。含矿层渗透率分布越均匀,抽注压差越小,前期溶质运移越缓,流场越稳定;渗透率阶梯跨度大的区域,抽注压差大,溶质运移强烈,流场呈局部集中。

3) 抽、注孔周围渗透率和地下水流动方向对铀浓度影响显著,同一溶浸水平下,上游区域铀浓度通常低于下游。

4) 纵向空间内,注液孔比抽液孔先发生矿物浸出,且溶质运移通道分布与 pH 值变化密切相关,通道密集程度与渗透率分布一致。由此可见,渗透率存在最优范围,单个注孔过滤器段也存在最优布置位置和长度。未来可结合空间砂岩渗透性、铀矿层品位及非均质化程度,重点研究过滤器段垂直布置位置与长度的优化措施,以实现高效开采。

## 参考文献(References):

- [1] 陈梅芳,花明,阳奕汉,等. 循环经济视角下新疆地浸采铀浸出工艺的技术创新与实践[J]. 中国矿业, 2018,27(3):100-103.  
CHEN Meifang, HUA Ming, YANG Yihan, et al. Technological innovation and practice of in-situ leaching of uranium in Xinjiang from the perspective of circular economy[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(3):100-103.
- [2] LI H B, TANG Z H, XIANG D J. Study on numerical simulation of reactive-transport of groundwater pollutants caused by acid leaching of uranium: A case study in Bayan-Uul area, northern China[J]. Water, 2024,16(3):500.
- [3] LI C G, LIU Q, LIU L C, et al. Simulation of the natural attenuation of groundwater contaminated by acid in-situ leaching at a uranium mine[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2024, 333(10):4907-4917.
- [4] 李衡,周义朋. 地浸采铀溶质运移研究进展及展望[J]. 稀有金属, 2019,43(3):319-330.  
LI Heng, ZHOU Yipeng. Progress and prospect of research on solute transport during in-situ leaching of uranium[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019,43(3):319-330.
- [5] 刘玉龙,扶海鹰,胡南,等. 强风化强氧化砂岩铀矿工艺矿物学与浸出性能[J]. 稀有金属, 2022,46(5):665-672.  
LIU Yulong, FU Haiying, HU Nan, et al. Process mineralogical characteristics and leaching performance of heavily weathered and oxidized sandstone uranium ore[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022,46(5):665-672.
- [6] 贾明涛,金家聪,陈梅芳,等. 基于 COMSOL-PHREEQC 的砂岩型铀矿浸出性能模拟分析技术[J]. 铀矿地质, 2021,37(4):745-754.  
JIA Mingtao, JIN Jiacong, CHEN Meifang, et al. Simulation and analysis technology of leaching performance of sandstonetype uranium deposit based on COMSOL-PHREEQC[J]. Uranium Geology, 2021, 37(4):745-754.

(下转第 27 页)

- istics of sandstone under the influence of water saturation and its mechanism of water rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(S2):3722-3737.
- [5] 陈康,刘先峰,蒋关鲁,等. 含水率对红层泥岩填料动力特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2024,45(12):3705-3716.  
CHEN Kang, LIU Xianfeng, JIANG Guanlu, et al. Effect of water content on dynamic properties of red mudstone fill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(12):3705-3716.
- [6] 朱传奇,王磊,张宇,等. 含水率对松软煤体波速及破坏特征影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2024,45(11):3271-3285.  
ZHU Chuangqi, WANG Lei, ZHANG Yu, et al. Effect of moisture content on wave velocity and failure characteristics of soft coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(11):3271-3285.
- [7] 杨恩光,杨立云,胡桓宇,等. 单轴压缩荷载下闭合裂纹扩展的试验和数值研究[J]. 岩土力学, 2022,43(增刊1):613-622.  
YANG Enguang, YANG Liyun, HU Huanying, et al. Experimental and numerical research on propagation of closed cracks under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(S1):613-622.
- [8] 赵延林,唐劲舟,王卫军,等. 常规三轴压缩条件下茅口灰岩流固耦合破坏行为研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018,35(1):205-212.  
ZHAO Yanlin, TANG Jinzhou, WANG Weijun, et al. Study on failure behavior of fluid-solid coupling under conventional triaxial compression for Maokou limestone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018,35(1):205-212.
- [9] 陈昊然,曹平,冉龙威. 含齿形裂隙类岩石材料单轴压缩试验研究[J]. 黄金科学技术, 2019,27(3):398-405.  
CHEN Haoran, CAO Ping, RAN Longwei. Experimental study of rock-like material with zigzag fracture under uniaxial compression[J]. Gold Science and Technology, 2019,27(3):398-405.
- 引用本文:**马燕,刘泽霖,王则. 饱水状态下含弯折裂纹岩石断裂特征试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):22-27.  
MA Yan, LIU Zelin, WANG Ze. Experimental study on fracture characteristics of rocks with bent cracks under saturated conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):22-27.

(上接第21页)

- [7] LEE D H, JANG H, CHO H H, et al. Improvement on coupling technique between COMSOL and PHREEQC for the reactive transport simulation[J]. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 2023,21(1):175-182.
- [8] KIM J W, JANG H, LEE D H, et al. A modularized numerical framework for the process-based total system performance assessment of geological disposal systems[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022,54(8):2828-2839.
- [9] ZHANG H T, ZHANG T, HE Y P. Reactive transport model of uranium by CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> in-situ leaching[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(24):65976-65989.
- [10] 张海涛,张通,李旭,等. 基于 COMSOL-PHREEQC 的 CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> 地浸采铀反应运移数值模拟[J]. 煤炭学报, 2023,48(增刊2):680-690.  
ZHANG Haitao, ZHANG Tong, LI Xu, et al. Reactive transport numerical modeling of CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> in-situ leaching based on COMSOL-PHREEQC[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(S2):680-690.
- [11] 纪文贵,罗跃,刘金辉,等. 考虑渗透系数不确定性的地浸过程溶浸范围随机模拟[J]. 原子能科学技术, 2023,57(6):1099-1110.  
JI Wengui, LUO Yue, LIU Jinhui, et al. Stochastic simulation of leaching range in in-situ leaching process considering uncertainty of permeability coefficient[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023,57(6):1099-1110.
- [12] 邱文杰,刘正邦,杨蕴,等. 砂岩型铀矿 CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> 地浸采铀的反应运移数值模拟[J]. 中国科学:技术科学, 2022,52(4):627-638.  
QIU Wenjie, LIU Zhengbang, YANG Yun, et al. Reactive transport numerical modeling of CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> in-situ leaching in sandstone-type uranium ore[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022,52(4):627-638.
- [13] LEE D H, JANG H, CHO H H, et al. Improvement on coupling technique between COMSOL and PHREEQC for the reactive transport simulation[J]. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT), 2023,21(1):175-182.
- [14] ZENG S, SONG J Y, SUN B, et al. Seepage characteristics of the leaching solution during in-situ leaching of uranium[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023,55(2):566-574.
- [15] ZHANG C, XIE T T, TAN K X, et al. Hydrodynamic simulation of the influence of injection flowrate regulation on in-situ leaching range[J]. Minerals, 2022,12(7):787.
- [16] ORYNGOZHIN E S, FEDOROV E V, ALISHEVA Z N, et al. In-situ leaching technology for uranium deposits[J]. Eurasian Mining, 2021:31-35.
- [17] DUONG P H H, SHIN Y K, KUEHL V A, et al. Mechanistic study of pH effect on organic solvent nanofiltration using carboxylated covalent organic framework as a modeling and experimental platform[J]. Separation and Purification Technology, 2022,282:120028.
- [18] RUNKEL R L, MCKNIGHT D M, BENCALA K E, et al. Reactive solute transport in streams; 2. simulation of a pH modification experiment[J]. Water Resources Research, 1996,32(2):419-430.
- [19] 满嘉乐,丁德馨,马建洪,等. 基于 PHREEQC 模拟分析铀矿退役采区地下水铀形态及其影响因素[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(12):119-128.  
MAN Jiale, DING Dexin, MA Jianhong, et al. Analysis of groundwater uranium chemical form and its influencing factors in decommissioned mining area of uranium mine based on PHREEQC simulation[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(12):119-128.
- 引用本文:**骆桂君,贾明滔,张传飞,等. 基于三维非均质模型的地浸过程特征分析与方案优化[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):14-21.  
LUO Guijun, JIA Mingtao, ZHANG Chuanfei, et al. analysis of in-situ leaching characteristics and scheme optimization based on 3D heterogeneous model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):14-21.