

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.02.011

地浸采铀过程中含矿层渗透性演化的示踪试验

王伟豪^{1,2}, 刘金辉^{1,2}, 阳奕汉³, 王如意³, 梁大业³, 闫学锐³, 何挺^{1,2}

(1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;

3. 中核内蒙古矿业有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 铀资源既是核军工基石又是核电发展的粮仓, 在当前复杂国际形势与大力发展核电的时代, 更是一种不可或缺的重要资源。随着内蒙古巴彦乌拉铀矿地浸采铀的运行, 矿层堵塞、铀浸出量下降等问题逐渐浮现。为探明地浸采铀过程中含矿层渗透性的演化特征, 在巴彦乌拉铀矿床 C10 采区某试验单元开展了井间示踪试验。试验结果表明, 地浸一年后含矿层砂岩孔隙度与渗透性降低, 其原因与含矿层砂岩孔隙发生堵塞有关。地浸二年后各方向渗流通道溶浸液流速较地浸一年均有不同程度降低, 且下降幅度相较于前一年更大。但在试验单元三个渗流方向即 KZ13238-KC13036、KZ13238-KC13038 和 KZ13238-KC13438 方向均产生了优势渗流通道。表明随着采区的运行, 含矿层孔隙堵塞情况日益严重, 含矿层渗透性不断降低。研究结果可以为地浸中含矿层渗透性演化特征提供示踪证据。

关键词: 地浸采铀; 渗透性; 演化特征; 井间示踪试验

中图分类号: TL212.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2024)02-0072-11

Tracer Test of Permeability Evolution of Ore-bearing Layer during In-situ Leaching of Uranium

WANG Weihao^{1,2}, LIU Jinhui^{1,2}, YANG Yihan³, WANG Ruyi³,

LIANG Daye³, YAN Xuerui³, HE TING^{1,2}

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

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

3. CNNC Inner Mongolia Mineral Co., Ltd., Huhhot 010010, China)

Abstract: Uranium resources are not only the cornerstone of nuclear military industry but also the granary for the development of nuclear power. In the current complex international situation and the era of vigorously developing nuclear power, it is an indispensable and important resource. With the operation of in-situ leaching of uranium at Bayanwula uranium mine in Inner Mongolia, problems such as ore bed blockage and decreased uranium leaching amount are gradually emerging. In order to explore the evolution characteristics of the permeability of ore bearing layers during in-situ leaching of uranium, a cross-well tracer test was conducted in a certain experimental unit of the C10 mining area of the Bayanwula uranium deposit. The experimental results indicate that after one year of in-situ leaching, the porosity and permeability of the sandstone in the ore bearing layer decrease, which is related to the blockage of the pores in the sandstone in the ore bearing layer. After two years of in-situ leaching, the flow rate of the

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金核技术创新联合基金资助项目(U1967209)

作者简介: 王伟豪(1998-), 男, 硕士研究生; **通信作者:** 刘金辉(1961-), 男, 教授, 博士生导师

solution in the seepage channels in all directions decreases to varying degrees compared to that in the first year of in-situ leaching, and the downward decrease is greater than the previous year, but the test unit has developed advantageous seepage channels in three seepage directions, namely KZ13238-KC13036, KZ13238-KC13038, and KZ13238-KC13438. It indicates that with the operation of the mining area, the pore blockage of the ore bearing layer is becoming increasingly serious, and the permeability of the ore bearing layer is continuously decreasing. The research results can provide tracer evidence for the evolution characteristics of the permeability of ore-bearing layer in in-situ leaching.

Key words: in situ leaching of uranium; permeability; evolutionary characteristics; cross-well tracer test

铀资源既是核军工基石又是核电发展的粮仓,在当前复杂国际形势与大力发展核电的时代,更是一种不可或缺的重要资源^[1]。因此,加强我国铀矿勘查开发,提高铀资源自给能力,确保我国天然铀安全供应具有十分重要的现实意义。当前我国已发现的铀矿床类型中,砂岩型铀矿所占资源量最大^[2-4]、生产成本最低,主要分布在北方的各大沉积盆地^[5-7],采用具有可开采低品位矿床、施工便易、污染小、低成本、见效快的地浸开采方式,目前全球每年地浸开采的铀矿资源已占到约 50%^[8]。事实证明,地浸采铀工艺能否正常实施,或地浸采铀过程中能否产生良好效益的一个最关键因素是含矿层的渗透性是否满足地浸要求,地浸中含矿层渗透性的变化是影响地浸采铀效益的重要因素。为此,十分有必要对地浸采铀过程中含矿层演化特征进行探讨^[9]。

地浸过程中,含矿层渗透性能是决定浸出效率的重要因素。关于含矿层渗透性,前人做了很多研究工作。吉宏斌等^[10]指出,对低渗透性砂岩型铀矿,影响砂岩渗透性的主要因素是碳酸盐、黏土矿物、夹层和隔层的物性,为进一步研究砂岩渗透性提供了依据。陈亮等^[11]在新疆某砂岩铀矿利用压汞试验数据得出,大孔隙结构的分维值可判定含矿层的渗透性,并且其高值指示渗透性低,而小孔隙结构的分维值不能判定含矿层的渗透性。杜超超等^[12]认为,可以借鉴石油、煤层的增渗机理进行适用于砂岩型铀矿的增渗方法研究,从而增加矿层的渗透性。赵海军^[13]提出,在钻孔成井后,采用如泡沫洗井和焦磷酸钠洗井等合理的洗井方法可以有效改善矿层的渗透性。苏学斌^[14]通过分析低渗透矿层特征和钻孔涌水量影响因素,认为缩短钻孔间距、提高注液压力、优化钻孔过滤器结构和利用高压气体脉冲方法可有效改善矿石的渗透性。本文试图通过示踪试验为含矿层渗透性(溶浸液流速)演化提供科学依据。

井间示踪试验是确定试验单元各钻孔间连通性、地下溶浸剂的流动方向和流速的有效手段^[15-18]。巴彦乌拉铀矿含矿含水层结构稳定,厚度大,矿层渗透性好^[19-23]。从地质找矿到矿山建设和运营,许多学者做过大量研究工作。祝虎林^[24]通过总结区域地下水赋存条件及分布规律,证明了马尼特坳陷具备有利的可地浸砂岩型铀矿水文地质条件。陈万利^[25]对巴彦乌拉铀矿石物质组成及浸出液成分进行系统分析,认为引起巴彦乌拉铀矿化学堵塞的主要矿物为石膏。郑和秋野等认为,酸法地浸工艺适合巴彦乌拉铀矿床,并对溶浸液酸度和抽注液量以及布孔方式给出了合理建议^[26-27]。随着巴彦乌拉铀矿地浸采铀的生产运行,含矿层堵塞导致含矿层渗透性以及铀浸出量下降等问题逐渐浮现。本文以该铀矿 C10 采区某单元为试验单元开展井间示踪试验,探讨地浸采铀过程中溶浸液流速与含矿层渗透性演化特征。

1 井间示踪试验概况

1.1 试验场地

在巴彦乌拉铀矿 C10 采区中部选择一个有代表性的“1 注 4 抽”单元开展井间示踪试验,获得地浸过程中(地浸初期、地浸一年与地浸二年)地浸采区溶浸液流速变化特征与含矿层渗透性演化特征。

现场示踪试验试验钻孔为五点式井间示踪,将 2020 年开始运行的 C10 采区中部一个“1 注 4 抽”单元作为地下水示踪试验单元。抽液孔与抽注孔间距见图 1 所示。该单元分别在地浸开采初期(2020 年 8 月 5 日至 2020 年 11 月 8 日),地浸一年(2021 年 8 月 5 日至 2021 年 10 月 31 日)和地浸两年(2022 年 8 月 4 日至 2022 年 11 月 26 日)进行了三组井间示踪试验。注液孔(示踪剂投源孔)孔号为 KZ13238,抽液孔(示踪剂接收孔)孔号分别为 KC13036、KC13038、KC13436、KC13438(图 1)。

表 1 地下水示踪试验单元基本情况

Table 1 Basic information of groundwater tracer test units							
投源孔	投放日期	结束日期	试验时间/d	观测孔	投源孔至观测孔距离/m	投放KI量/kg	投放方式
KZ13238	2020-08-05	2020-11-08	96	KC13036	35.85	50 (纯度 90%)	5 min 瞬时投放
				KC13038	34.95		
				KC13436	34.90		
				KC13438	35.15		
KZ13238	2021-08-05	2021-10-31	88	KC13036	35.85	25 (纯度 99%)	
				KC13038	34.95		
				KC13436	34.90		
				KC13438	35.15		
KZ13238	2022-08-04	2022-11-26	114	KC13036	35.85	25 (纯度 99%)	
				KC13038	34.95		
				KC13436	34.90		
				KC13438	35.15		

2 含矿层渗透性演化特征

溶浸液中 I⁻ 浓度低,其含量主要来自示踪剂 KI 的溶解;溶浸液中 K⁺ 浓度相对较高,其含量来自示踪剂 KI 的溶解与含矿层中含钾矿物溶解的共同结果。因此,地下水流速与含矿层渗透性演化特征主要以 I⁻ 浓度变化特征进行研究。

2.1 KZ13238-KC13036 之间渗透性演化特征

2.1.1 I⁻ 迁移特征

含矿层渗透性演化特征主要根据地下水流速(示踪剂 I⁻ 迁移速度)进行定量刻画来确定。KZ13238-KC13036 方向上 I⁻ 浓度变化特征如图 2 所示。

据 2020 年 I⁻ 浓度数据,I⁻ 浓度呈现出两个明显峰值。试验 0~6 d,I⁻ 浓度呈波动式上升,I⁻ 浓

度为 0.10~0.36 mg/L。第 6 天时,浓度小幅上升至 0.36 mg/L,表明示踪剂前锋已经到达监测孔 KC13036,计算得到示踪剂前锋运移速度为 5.97 m/d。试验 7~18 d,I⁻ 浓度从 0.36 mg/L 上升到 17.4 mg/L(第一个峰值浓度),表明沿较快通道运移的示踪剂主体已到达监测孔 KC13036,计算得到地下水流速为 1.95 m/d。随后 I⁻ 浓度持续下降,在试验第 23 天时降至波谷(9.43 mg/L),I⁻ 浓度第一峰结束。随后溶浸液 I⁻ 浓度又开始上升。试验第 26 天,I⁻ 浓度到达第二个峰值(浓度为 29.8 mg/L),计算得到地下水流速为 1.35 m/d,表明沿第二条主要通道运移的示踪剂主体已到达监测孔 KC13036。之后浸出液 I⁻ 浓度又快速下降,在试验第 30 天时浓度降至 0.057 mg/L,随后 I⁻ 浓度保持在较低水平,示踪试验结束(91 d)时浓度降至 0.009 mg/L。

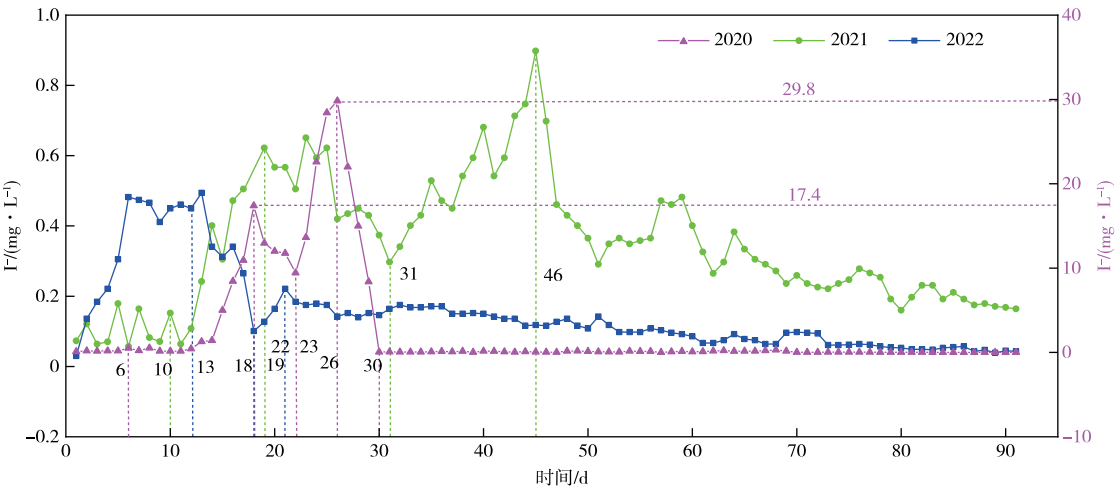


图 2 KC13036 监测井 I⁻ 浓度随时间变化特征

Fig. 2 Characteristics of I⁻ concentration change over time in KC13036 monitoring well

该方向上 2021 年与 2022 年浸出液 I^- 浓度同样呈现出两个峰值。所不同的是,2021 年 I^- 浓度前锋在试验第 10 天到达监测孔, I^- 浓度分别在第 19 天与第 46 天到达峰值。2022 年 I^- 浓度未出现明显的前锋,直接在试验第 13 天与第 22 天到达峰值。

2.1.2 地浸初期、地浸一年与地浸两年溶浸液运移特征对比分析

在溶浸液从 KZ13238 至 KC13036 方向,地浸初期、地浸一年与地浸二年示踪试验中溶浸液渗流速度参数和渗流速度变化特征见表 2。

表 2 KZ13238-KC13036 地浸期间地下水示踪试验流速计算结果
Table 2 Calculation results of groundwater tracer test flow rate during KZ13238-KC13036 in-situ leaching period

I^- 迁移通道节点	示踪试验							
	地浸初期		地浸一年			地浸二年		
	出现的 时间/d	对应的溶浸液 流速/($m \cdot d^{-1}$)	出现的 时间/d	对应的溶浸液 流速/($m \cdot d^{-1}$)	速度变化 幅度/%	出现的 时间/d	对应的溶浸液 流速/($m \cdot d^{-1}$)	速度变化 幅度/%
示踪剂前锋	6	5.97	10	3.49	-41.54			
第一渗流通道	18	1.95	19	1.86	-4.62	22	1.63	-12.37
第二渗流通道	26	1.35	46	0.76	-43.70			
优势通道						13	2.76	

根据井间示踪试验结果,含矿层渗透性演化具有如下特征:

1)注液孔 KZ13238 与抽液孔 KC13036 之间存在二条主要渗流通道。2020 年、2021 年和 2022 年示踪试验浸出液 I^- 浓度均出现 2 个峰,表明从投源孔到监测孔溶浸液渗流方向上发育有 2 条不同的渗流通道。

2)同一渗流通道在不同时间示踪剂出现的时间不同。示踪剂沿第一条渗流通道在 2020 年、2021 年与 2022 年到达监测孔时间分别为 18、19 与 22 d。沿第二条渗流通道在 2020 年、2021 年到达时间分别为 26、46 d。

3)地浸过程中,各通道渗流速度呈下降趋势,存在含矿层堵塞现象且随时间堵塞趋于严重。 I^- 经第一条渗流通道的溶浸液流速在 2020 年、2021 年与 2022 年分别为 1.95、1.86、1.63 m/d,呈现下降趋势,且下降幅度逐年增加,表明该渗流通道出现堵塞情况,且堵塞随时间趋于严重。经第二条渗流通道溶浸液流速 2021 年比 2020 年降低 43.7%,表明在地浸过程中该渗流通道同样出现堵塞现象。

4)采区运行二年后,出现溶浸液优势流,产生了优势通道。2022 年示踪试验浸出液 I^- 浓度的第 1 个峰值出现时间仅 13 d,远早于 2021 年,表明该溶浸液流动方向上渗流通道出现短路(即优势通道),

使该方向含矿层中产生了新的优势渗流通道,示踪剂沿该通道迁移速度为 2.76 m/d。

2.2 KZ13238-KC13038 之间渗透性演化特征

2.2.1 I^- 迁移特征

KZ13238-KC13038 方向上 I^- 浓度变化特征如图 3 所示。2020 年示踪试验浸出液 I^- 经过 8 d 抵达监测孔,经计算 I^- 前锋抵达监测孔的速度为 4.41 m/d。浸出液 I^- 浓度在第 8 天后增高,在 17 d 出现第一个 I^- 浓度峰值(13.32 mg/L),沿该通道 I^- 运移速度为 2.05 m/d,第 21 天第一个峰结束。试验 21~26 d,浸出液 I^- 浓度又持续增高,从 21 d 的 8.58 mg/L 增加到 26 d 的 29.69 mg/L 峰值,第 30 天降至低值。计算得到 I^- 运移速度为 2.05 m/d。随后 I^- 浓度持续下降,试验结束时(91 d)为 0.565 mg/L。

2021 年与 2022 年 I^- 浓度同样呈现出两个峰值。2021 年 I^- 浓度前锋在试验开始第 10 天到达监测孔(I^- 浓度为 0.080 mg/L),计算得到示踪剂前锋运移速度为 3.50 m/d。 I^- 浓度在第 21 天与第 45 天到达峰值,峰值浓度分别为 0.401、0.985 mg/L,计算得到地下水流速分别为 1.64、0.78 m/d。2022 年 I^- 浓度在示踪试验进行到第 8 天时开始出现增高波动,在试验第 13 天与第 49 天到达第一峰值与第二峰值,峰值浓度分别为 0.103、0.080 mg/L,计算得到此时地下水流速分别为 2.69、0.71 m/d。

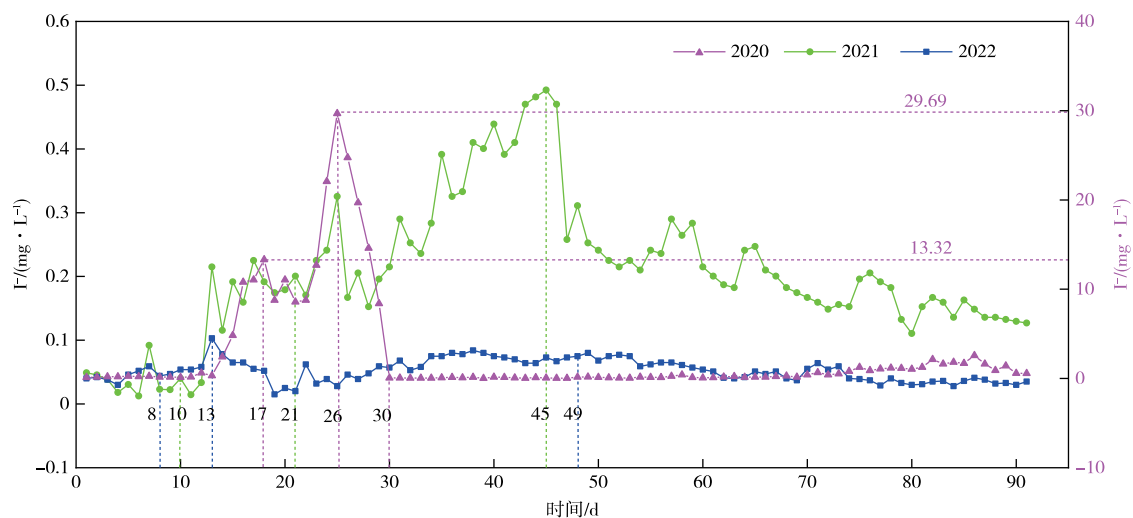


图 3 KC13038 监测孔 I⁻ 浓度随时间变化特征

Fig. 3 Characteristics of I⁻ concentration change over time in KC13038 monitoring well

2.2.2 地浸初期、地浸一年与地浸二年溶浸液运移特征对比分析

期与运行一年、运行二年示踪试验中溶浸液渗流速度参数和渗流速度变化特征见表 3 所示。

溶浸液从 KZ13238 至 KC13038 方向,运行初

表 3 KZ13238-KC13038 地浸期间地下水示踪试验流速计算结果

I ⁻ 迁移通道节点	示踪试验						
	地浸初期		地浸一年			地浸二年	
	出现的 时间/d	对应的溶浸液 流速/(m·d ⁻¹)	出现的 时间/d	对应的溶浸液 流速/(m·d ⁻¹)	速度变化 幅度/%	出现的 时间/d	对应的溶浸液 流速/(m·d ⁻¹)
示踪剂前锋	8	4.41	10	3.50	-20.63	13	2.69
第一渗流通道	17	2.05	21	1.64	-20.00	49	0.71
第二渗流通道	26	1.35	45	0.78	-42.22		
优势通道						8	4.37

根据井间示踪试验结果,含矿层渗透性演化具有如下特征:

1)注液孔 KZ13238 与抽液孔 KC13038 之间存在两条主要的渗流通道。

2)示踪剂前锋在不同时间到达时间不同。示踪剂前锋在 2020 年、2021 年与 2022 年到达监测孔时间分别为 8、10、13 d,呈逐年推迟趋势。

3)同一渗流通道在不同时间示踪剂出现的时间不同。示踪剂沿第一条渗流通道在 2020 年、2021 年与 2022 年到达监测孔时间分别为 17、21、49 d。沿第二条渗流通道在 2020 年、2021 年到达时间分别为 26、45 d。

4)地浸过程中,该方向各通道渗流速度呈下降趋势。地浸一年后,示踪剂前锋流速由 4.41 m/d 下降到 3.50 m/d,下降了 20.63%。通过第一、第二渗流通道溶浸液流速分别降低 20.00% 和 42.22%。

地浸二年后,示踪剂前锋流速下降 12.14%,通过第一渗流通道溶浸液流速降低 56.71%。表明该方向上存在含矿层堵塞现象。

5)采区运行二年后,出现溶浸液优势流,产生了优势通道。2022 示踪试验浸出液 I⁻ 浓度出现增高的时间为 8 d,远远早于 2021 年,表明含矿层产生了新的优势渗流通道,示踪剂沿该优势通道到达监测孔时间为 8 d,示踪剂沿该通道迁移速度为 4.37 m/d。

2.3 KZ13238-KC13436 之间渗透性演化特征

2.3.1 I⁻ 迁移特征

KZ13238-KC13436 方向上 I⁻ 浓度变化特征如图 4 所示。从图 4 可知,2020 年示踪试验抽液孔 KC13436 浸出液 I⁻ 浓度出现 2 个峰。试验 0~7 d, I⁻ 浓度为 0.096~0.220 mg/L。试验第 7.5 天示踪剂抵达监测孔,计算 I⁻ 前锋抵达监测孔的速度为 4.65 m/d。在试验 18 d 出现第一个 I⁻ 浓度峰值

(15.23 mg/L), 计算得到沿该通道 I^- 运移速度为 1.95 m/d, 第一峰持续时间为 13~21 d。在试验 24 d 出现第二个 I^- 浓度峰值 (31.85 mg/L), 计算得到

I^- 运移速度为 1.44 m/d, 第二峰持续时间为 21~32 d。随后 I^- 浓度持续下降, 试验结束时 (91 d) 为 0.35 mg/L。

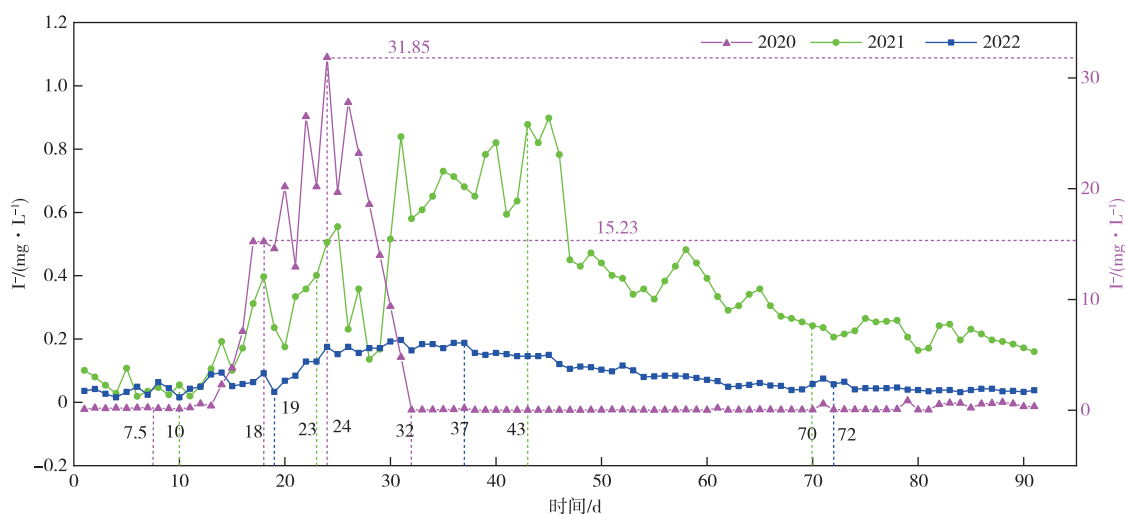


图4 KC13436 监测孔 I^- 浓度随时间变化特征

Fig. 4 Characteristics of I^- concentration change over time in KC13436 monitoring well

2021 年与 2022 年 I^- 浓度同样呈现两个峰值。2021 年 I^- 浓度前锋在试验 10 d 到达监测孔, 计算得到示踪剂前锋运移速度为 3.49 m/d。且分别在第 23 天与第 43 天分别到达第一峰值浓度 (0.401 mg/L) 和第二峰值浓度 (0.878 mg/L)。计算得到相应地下水流速分别为 1.52、0.81 m/d。2022 年 I^- 浓度前锋到达时间为 19 d, 其迁移速度为 1.84 m/d。 I^- 浓度在试验第 37 天与第 72 天分别到达第一峰值 (0.188 mg/L) 与第二峰值 (0.075 mg/L), 计算得到相应地下水流速分别为 0.94、0.48 m/d。

2.3.2 地浸初期、地浸一年与地浸两年溶浸液运移特征对比分析

在溶浸液从 KZ13238 至 KC13436 方向, 运行

初期与运行一年、运行二年示踪试验中溶浸液渗流速度参数和渗流速度变化特征见表 4。

根据井间示踪试验结果, 含矿层渗透性演化具有如下特征:

1) 注液孔 KZ13238 与抽液孔 KC13436 之间存在两条主要的渗流通道。

2) 同一渗流通道示踪剂出现时间随采区运行逐年推迟。示踪剂前锋在 2020 年、2021 年与 2022 年到达监测孔时间分别为 7.5、10、19 d。示踪剂沿第一条渗流通道在 2020 年、2021 年与 2022 年到达监测孔时间分别为 18、23、37 d。示踪剂沿第二条渗流通道在 2020 年、2021 年与 2022 年到达时间分别为 24、43、72 d。

表4 KZ13238-KC13436 地浸期间地下水示踪试验流速计算结果

Table 4 Calculation results of groundwater tracer test flow rate during KZ13238-KC13436 in-situ leaching period

I^- 迁移通道节点	示踪试验							
	地浸初期		地浸一年			地浸二年		
	出现的时间/d	对应的溶浸液流速/($m \cdot d^{-1}$)	出现的时间/d	对应的溶浸液流速/($m \cdot d^{-1}$)	速度变化幅度/%	出现的时间/d	对应的溶浸液流速/($m \cdot d^{-1}$)	速度变化幅度/%
示踪剂前锋	7.5	4.65	10	3.49	-24.95	19	1.84	-47.28
第一渗流通道	18	1.95	23	1.52	-22.05	37	0.94	-38.16
第二渗流通道	24	1.44	43	0.81	-43.75	72	0.48	-40.74

3) 地浸过程中, 溶浸液渗流速度呈下降趋势, 存在含矿层堵塞现象且随时间堵塞趋于严重。地浸一年后, 示踪剂前锋流速由 4.65 m/d 下降到 3.49 m/d, 下降了 24.95%。通过第一、第二渗流通道的溶浸液

流速分别降低了 22.05% 和 43.75%。地浸二年后, 示踪剂前锋流速下降了 47.28%, 通过第一、第二渗流通道溶浸液流速分别降低了 38.16% 和 40.74%。表明该方向上存在含矿层堵塞现象且堵塞逐渐

严重。

2.4 KZ13238-KC13438 之间渗透性演化特征

2.4.1 I⁻ 迁移特征

KZ13238-KC13438 方向上 I⁻ 浓度变化特征如图 5 所示。2020 年示踪试验浸出液 I⁻ 浓度随时间呈现出 2 个较短的峰。示踪试验 0~7 d, I⁻ 浓度为 0.108~0.206 mg/L, 第 8 天时示踪剂前锋抵达监测孔, I⁻ 前锋运移速度为 4.41 m/d。在 17 d 出现第一个 I⁻ 浓度峰值(13.58 mg/L), 计算得到溶浸液运移速度为 2.06 m/d, I⁻ 浓度第一峰持续时段为 13~20 d。试验 20 d 后 I⁻ 浓度再次增加, 峰值浓度出现在第 26 天(20.05 mg/L), 通过计算该通道 I⁻ 运移

速度为 2.05 m/d, I⁻ 浓度第二峰持续时段为 20~29 d。随后 I⁻ 浓度持续下降, 试验结束时(91 d) I⁻ 浓度为 0.662 mg/L。

2021 年与 2022 年 I⁻ 浓度也呈现出两个峰值。所不同的是, 2021 年 I⁻ 浓度前锋(0.080 mg/L)到达时间为 8 d, 其运移速度为 4.22 m/d。I⁻ 浓度在第 24 天与第 44 天分别到达第一、第二峰值, 峰值浓度分别为 0.82、0.68 mg/L, 相应溶浸液流速分别为 1.46、0.80 m/d。2022 年 I⁻ 浓度在试验第 7 天时出现小幅增高, 在 14 d 与 37 d 分别到达峰值, 峰值浓度分别为 0.168、0.129 mg/L, 计算得到溶浸液流速分别为 2.69、0.71 m/d。

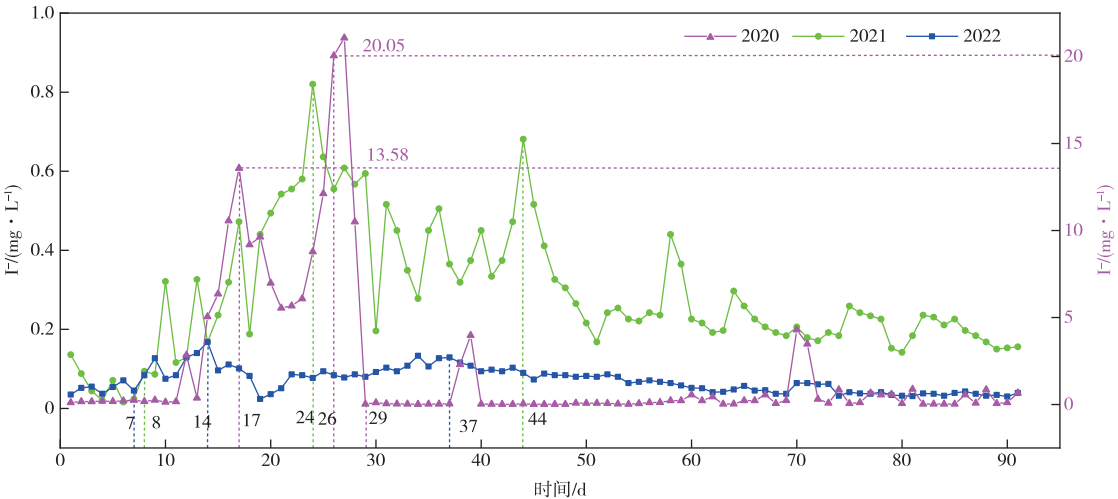


图 5 KC13438 监测孔 I⁻ 浓度随时间变化特征

Fig. 5 Characteristics of I⁻ concentration change over time in KC13438 monitoring well

2.4.2 地浸初期、地浸一年与地浸二年溶浸液运移特征对比分析

在溶浸液从 KZ13238 至 KC13438 方向, 运行初期与运行一年、运行二年示踪试验中溶浸液渗流速度参数和渗流速度变化特征见表 5。

根据井间示踪试验结果, 含矿层渗透性演化具有如下特征:

1) 采区运行初期与运行一年后, 浸出液 I⁻ 浓度峰值均为两个, 表明从投源孔到监测孔溶浸液渗流方向上发育有两条不同的渗流通道。

表 5 KZ13238-KC13438 地浸期间地下水示踪试验流速计算结果

I ⁻ 迁移通道节点	示踪试验							
	地浸初期		地浸一年			地浸二年		
	出现的时间/d	对应的溶浸液流速/(m·d ⁻¹)	出现的时间/d	对应的溶浸液流速/(m·d ⁻¹)	速度变化幅度/%	出现的时间/d	对应的溶浸液流速/(m·d ⁻¹)	速度变化幅度/%
示踪剂前锋	8	4.44	8	4.22	-4.95	14	2.51	-40.52
第一渗流通道	17	2.06	24	1.46	-29.13	37	0.95	-34.93
第二渗流通道	26	1.36	44	0.80	-41.18			
优势通道						7	5.02	

2) 地浸过程中, 采区溶浸液流速普遍下降, 表明含矿层发生了堵塞现象且随时间堵塞趋于严重。采

区运行一年后溶浸液流速普遍下降, I⁻ 浓度前锋运移速度从 2020 年的 4.44 m/d 降至 2022 年的 4.22 m/d,

下降幅度为4.95%。采区运行二年后 I^- 浓度前锋运移速度持续下降,从2021年的4.22 m/d降至2022年的2.51 m/d,降幅40.52%。表明采区经过2年的运行含矿层堵塞情况较2021年更为严重,含矿层渗透性降低幅度更大。

3)采区运行二年后,出现溶浸液优势流,产生了优势通道。2022示踪试验浸出液 I^- 浓度出现增高的时间仅为7 d,远早于2021年,含矿层中产生了新的优势渗流通道,示踪剂沿该通道迁移速度为5.02 m/d。

综上所述,试验单元含矿层渗透性演化特征可

概括为:

1)从投源孔到各监测孔溶浸液渗流方向上均发育有2条主要的渗流通道;

2)同一渗流通道在不同时间示踪剂出现的时间不同;

3)地浸过程中,不同方向各通道渗流速度随时间呈下降趋势,表明含矿层渗透性随时间不断降低;

4)运行2年后在3个方向上出现溶浸液优势流,产生了新优势通道。

表6为试验单元地浸期间地下水示踪试验流速计算结果。

表6 试验单元地浸期间地下水示踪试验流速计算结果

Table 6 Calculation results of flow rate of groundwater tracer test during in-situ leaching period of the test unit

观测孔	时间	前锋到达 时间/d	前锋速度/ ($m \cdot d^{-1}$)	第一个峰值 到达时间/d	第一通道流速/ ($m \cdot d^{-1}$)	第二个峰值 到达时间/d	第二通道流速/ ($m \cdot d^{-1}$)	沿优势通道 到达时间/d	优势通道流速/ ($m \cdot d^{-1}$)
KC13036	地浸初期	6	5.97	18	1.95	26	1.35		
	地浸一年	10	3.49	19	1.86	46	0.76		
	地浸二年			22	1.63			13	2.76
KC13038	地浸初期	8	4.41	17	2.05	26	1.35		
	地浸一年	10	3.50	21	1.64	45	0.78		
	地浸二年	13	2.69	49	0.71			8	4.37
KC13436	地浸初期	7.5	4.65	18	1.95	24	1.44		
	地浸一年	10	3.49	23	1.52	43	0.81		
	地浸二年	19	1.84	37	0.94	72	0.48		
KC13438	地浸初期	8	4.44	17	2.06	26	1.36		
	地浸一年	8	4.22	24	1.46	44	0.80		
	地浸二年	14	2.51	37	0.95			7	5.02

3 结论

1)从注液孔到抽液孔各溶浸液流速均出现了不同程度下降,地浸一年同一渗流通道(途经)的地下水(溶浸液)流速普遍下降,表明含矿层砂岩孔隙度减小,渗透性降低,其原因与含矿层砂岩孔隙发生堵塞有关。

2)随着地浸采区的运行,含矿层堵塞具有不断加重的趋势,导致含矿层渗透性不断降低。

3)地浸二年在某些渗流方向上产生了新优势渗流通道。

参考文献

- [1] 中国铀业技术创新展望:聚焦2017中国国际矿业大会铀论坛[J]. 中国核工业,2017(11):28-31.
Technological innovation outlook of China's uranium industry: focusing on uranium forum of 2017 China international mining conference [J]. China Nuclear Industry,2017(11):28-31.
- [2] 朱鹏飞,蔡煜琦,郭庆银,等. 中国铀矿资源成矿地质特

征与资源潜力分析[J]. 地学前缘,2018,25(3):148-158.

ZHU P F, CAI Y Q, GUO Q Y, et al. Analysis of metallogenic geological characteristics and resource potential of uranium resources in China [J]. Earth Science Frontiers,2018,25(3):148-158.

- [3] 蔡煜琦,朱鹏飞,李晓翠,等. 我国铀矿资源空间分布特征与大基地建设[C]//中国核学会铀矿地质分会,中国核学会铀矿冶分会. 全国铀矿大基地建设学术研讨会,海口,2012:70-75.

CAI Y Q, ZHU P F, LI X C, et al. Spatial distribution characteristics of uranium resources and construction of large bases in China [C]//Uranium Geology Branch of Chinese Nuclear Society, Uranium Mining and Metallurgy Branch of Chinese Nuclear Society. Academic Seminar on the Construction of National Uranium Mine Base, Haikou,2012:70-75.

- [4] 刘卫红,刘人和,邱隆伟,等. 关于石油公司发展铀矿业务的思考[J]. 石油科技论坛,2020,39(3):36-43.

LIU W H, LIU R H, QIU L W, et al. Reflections on the development of uranium mining business by petroleum companies [J]. Petroleum Science and Technology Forum,

- 2020,39(3):36-43.
- [5] 张金带. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 2016,32(6):321-332.
ZHANG J D. Innovation and development of metallogenic theory of sandstone type uranium deposits in China[J]. Uranium Geology, 2016,32(6):321-332.
- [6] 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 Y Q, ZHANG J D, LI Z Y, et al. Characteristics and metallogenic regularity of uranium deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015,89(6):1051-1069.
- [7] 李凡. 中国砂岩型铀矿勘探开发现状调研[J]. 有色矿冶, 2021,37(1):5-8.
LI F. Investigation on exploration and development status of sandstone-type uranium deposits in China[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2021,37(1):5-8.
- [8] 徐浩, 任忠宝, 刘鑫扬. 全球铀矿生产成本及供需形势展望[J]. 矿业研究与开发, 2019,39(10):148-152.
XU H, REN Z B, LIU X Y. Outlook on global uranium production cost and supply and demand situation[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(10):148-152.
- [9] 程永进, 刘金辉, 周义朋. 示踪法在地浸采铀溶浸液流速测定中的应用[J]. 现代矿业, 2010, 26(12):72-73, 112.
CHENG Y J, LIU J H, ZHOU Y P. Application of tracer method to the velocity measurement of uranium leaching solution in ground leaching[J]. Modern Mining, 2010,26(12):72-73,112.
- [10] 吉宏斌, 刘金辉, 殷蓬勃. 影响地浸采铀的矿层渗透因素[J]. 世界核地质科学, 2008(3):180-182.
JI H B, LIU J H, YIN P B. Reservoir permeability factors affecting in-situ leaching of uranium[J]. World Nuclear Geology, 2008(3):180-182.
- [11] 陈亮, 谭凯旋, 刘江, 等. 新疆某砂岩铀矿含矿层孔隙结构的分形特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 51(6):139-144.
CHEN L, TAN K X, LIU J, et al. Fractal characteristics of pore structure of a sandstone uranium deposit in Xinjiang[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition), 2012,51(6):139-144.
- [12] 杜超超, 周义朋. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀矿层渗透性影响因素[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(7):48-53.
DU C C, ZHOU Y P. Factors affecting permeability of uranium deposit by $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ leaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(7):48-53.
- [13] 赵海军. 某低渗透性铀矿床改善含矿层渗透性方法研究[C]//中国核学会. 中国核学会 2013 年学术年会, 哈尔滨, 2013:237-241.
ZHAO H J. Study on the method of improving the permeability of ore-bearing layer in a low permeability uranium deposit[C]//Chinese Nuclear Society, Academic Seminar of Chinese Nuclear Society, Harbin, 2013:237-241.
- [14] 苏学斌. 提高低渗透性矿床地浸钻孔涌水量的方法[J]. 铀矿冶, 2005,24(4):8-13.
SU X B. Methods of increasing water inflow from in-situ leaching borehole in low permeability deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005,24(4):8-13.
- [15] 孙刚友, 程光华, 付海鹏, 等. 某砂岩型铀矿床井间示踪技术应用研究[J]. 中国矿业, 2021,30(5):220-223, 236.
SUN G Y, CHENG G H, FU H P, et al. Application of cross-well tracing technology in a sandstone-type uranium deposit[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(5):220-223,236.
- [16] 陈梅芳, 于长贵, 陈箭光. 多元示踪试验在地浸采铀矿山的应用研究[J]. 矿业研究与开发, 2015,35(10):10-13.
CHEN M F, YU C G, CHEN J G. Application of multiple tracer test in ground leaching uranium mine[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(10):10-13.
- [17] 王晓东, 吴黎武, 段柏山, 等. 井间示踪在新疆某地浸采铀中的试验研究[J]. 铀矿冶, 2014,33(3):130-133.
WANG X D, WU L W, DUAN B S, et al. Experimental study on cross-well tracer leaching of uranium at a site in Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(3):130-133.
- [18] YOUSAFZAI A, ECKSTEIN Y, DAHL P S. Hydrochemical signatures of deep groundwater circulation in a part of the Himalayan foreland basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2010,59(5):1079-1098.
- [19] 何挺, 刘金辉, 阳奕汉, 等. 内蒙古巴彦乌拉铀矿地浸采区地下水示踪试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(10):50-57.
HE T, LIU J H, YANG Y H, et al. Tracer test of groundwater in in-situ leaching area of Bayanwula uranium mine in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(10):50-57.
- [20] 邢拥国, 刘金辉, 唐华章, 等. 巴彦乌拉矿床铀矿体分布与铀矿物赋存特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2017,40(1):1-6.
XING Y G, LIU J H, TANG H Z, et al. Uranium body distribution and occurrence characteristics of Bayanwula deposit [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2017,40(1):1-6.
- [21] 李强. 内蒙古巴彦乌拉砂岩型铀矿床成因[J]. 矿产勘

- 查,2019,10(8):1872-1882.
- LI Q. Genesis of Bayanwula sandstone-type uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2019,10(8):1872-1882.
- [22] 郭宏伟. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床成矿特征及成矿规律研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.
- GUO H W. Study on metallogenic characteristics and regularity of Bayan Wula uranium deposit in Inner Mongolia[D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing),2014.
- [23] 任晓平,刘晓敏,彭瑞强,等. 二连盆地巴彦乌拉铀矿床水文地质条件与铀成矿关系[J]. 世界核地质科学, 2022,39(3):554-560.
- REN X P, LIU X M, PENG R Q, et al. The relationship between hydrogeological conditions and uranium mineralization of Bayanwula uranium deposit in Erlian Basin[J]. World Science of Nuclear Geology, 2022,39(3):554-560.
- [24] 祝虎林. 内蒙古二连盆地马尼特坳陷砂岩型铀矿成矿水文地质条件分析[J]. 中国资源综合利用,2019,37(1): 59-63.
- ZHU H L. Analysis of hydrogeological conditions for mineralization of sandstone-type uranium deposit in Manite Depression, Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019,37(1): 59-63.
- [25] 陈万利. 巴彦乌拉铀矿地浸过程中含矿层化学堵塞机理研究[D]. 南昌:东华理工大学,2017.
- CHEN W L. Study on chemical plugging mechanism of ore-bearing layer during in-situ leaching of Bayanwula uranium mine[D]. Nanchang:East China University of Technology,2017.
- [26] 郑和秋野,邢拥国,刘金辉,等. 内蒙某铀矿床地浸水文地质特征[J]. 江西化工,2017(2):69-72.
- ZHENG-HE Q Y, XING Y G, LIU J H, et al. Hydrogeological characteristics of in-situ leaching of a uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Jiangxi Chemical Industry,2017(2):69-72.
- [27] 郑和秋野. 巴彦乌拉铀矿现场地浸条件试验与地浸场水动力模拟[D]. 南昌:东华理工大学,2017.
- ZHENG-HE Q Y. In-situ leaching condition test and hydrodynamic simulation of in-situ leaching site in Bayanwula Uranium Mine[D]. Nanchang:East China University of Technology,2017.