

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.10.007

内蒙古巴彦乌拉铀矿地浸采区地下水示踪试验

何挺^{1,2}, 刘金辉^{1,2}, 阳奕汉³, 姚光怀³, 邢拥国⁴, 胡鹏飞³,
王如意³, 梁大业³, 王晓伟³, 张锋³

- (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;
4. 中核矿业科技有限公司, 北京 101149)

摘要: 酸法地浸采铀是砂岩型铀矿最常用的开采方式之一, 地浸中由于高酸溶浸液注入于地下含矿层, 往往因化学沉淀堵塞导致含矿层渗透性下降, 降低浸铀效率。为此, 十分有必要探讨地浸过程中地下水(溶浸液)流速变化特征。以巴彦乌拉铀矿 C10 采区试验单元为试验场所开展了地下水示踪试验。试验结果表明, 溶浸液从注液孔到抽液孔有多条(至少二条)渗流通道, 较快通道的溶浸液流速为 1.95~2.06 m/d, 较慢通道溶浸液流速为 1.35~1.44 m/d。KI 示踪试验与 SO_4^{2-} 示踪试验得到的溶浸液流速特征具有较好的一致性。

关键词: 地下水示踪; 地浸采区; 铀矿; 巴彦乌拉

中图分类号: TL212.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2021)10-0050-08

Tracer Test of Groundwater in In-situ Leaching Area of Bayanwula Uranium Mine in Inner Mongolia

HE Ting^{1,2}, LIU Jin-hui^{1,2}, YANG Yi-han³, YAO Guang-huai³, XING Yong-guo⁴,
HU Peng-fei³, WANG Ru-yi³, LIANG Da-ye³, WANG Xiao-wei³, ZHANG Feng³

- (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. Inner Mongolia Mining Co., Ltd., CNNC, Huhhot 010010, China;
4. China Nuclear Mining Technology Co., Ltd., Beijing 101149, China)

Abstract: Acid in-situ leaching of uranium is one of the most commonly used mining methods for sandstone-type uranium deposits. Due to high acid solution injected into underground ore-bearing layer in in-situ leaching, permeability of ore-bearing layer is often reduced by chemical precipitation blockage, and efficiency of uranium leaching is reduced. Therefore, it is necessary to explore variation characteristics of groundwater (solution) flow rate during in-situ leaching. Groundwater tracer test was carried out in C10 mining area of Bayanwula uranium mine. The test results show that there are multiple (at least two) seepage channels from injection hole to extraction hole. Flow rate of solution in faster channel is 1.95—2.06 m/d, and that in slower channel is 1.35—1.44 m/d. Flow velocity characteristics of leaching solution obtained by KI tracer test and SO_4^{2-} tracer test corresponds to each other.

Key words: groundwater tracer; in-situ leaching area; uranium ore; Bayanwula

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金核技术创新联合基金项目(U1967209)

作者简介: 何挺(1996-), 男, 云南宣威人, 硕士研究生; 通信作者: 刘金辉(1961-), 男, 江西抚州人, 教授, 博士生导师

铀广泛应用于军工与核电领域。砂岩型铀矿由于采用成本低、见效快、环境友好的地浸工艺开采,已成为当前我国铀金属产能的主要来源^[1-3]。地浸采铀不改变矿石埋藏条件,通过钻井向含矿层中注入溶浸剂溶解矿石中的铀,再把含铀的溶浸液抽出处理形成产品^[4-7]。对地浸采铀来说,铀矿体处于饱水的含水层中,地浸场是一个复杂的受人为控制的水动力场与水化学场^[8]。地浸采铀过程中,当配置好的溶浸液从注液孔注入地下含矿含水层后,溶浸液与各种矿物发生作用,在溶浸液运移过程中,其矿化度不断增高,当增高到一定程度后,某些难溶矿物则会达到饱和,甚至发生沉淀,从而堵塞含矿层孔隙。为避免这种沉淀现象的产生,开展溶浸液-矿物反应速度及溶浸液运移速度研究,使溶浸液在抽出地表之前不产生沉淀。为此,本文通过示踪试验对铀矿地浸采区溶浸液运移特征进行了系统探讨。

关于地浸铀矿地下水示踪问题,前人开展过不少研究工作。程永进等^[9]在某地浸矿山以荧光黄钠为示踪剂开展示踪试验,获得了溶浸液流速。王晓东等^[10]在新疆某地浸采铀矿山开展示踪试验,计算了投源孔到各监测孔的渗流速度,并对抽注液量调整给出了建议。陈梅芳等^[11]以 NaNO_3 和 NaCl 为示踪剂在新疆某砂岩型矿山开展了多元示踪试验,较好地验证抽注孔间的连通性。谢廷婷等^[12]在某砂岩型铀矿酸化试验前后以4种有机醇为示踪剂开展了示踪试验,并用 Visual Modflow 软件进行示踪试验的溶质迁移数值模拟,结果表明酸化有利于地浸开采。

含矿含水层渗透性是决定一个地浸铀矿山是否可以进行地浸采铀的最重要因素,地浸采铀过程中含矿层渗透性通常会随时间而下降。本文以巴彦乌拉矿床 C10 采区地浸单元为研究基地,通过现场地下水示踪试验,分析溶浸液运移特征并进而探讨含矿层渗透性特征。

1 水文地质背景

巴彦乌拉铀矿含矿含水层为承压含水层,位于下白垩统赛汉组上段,岩性以砂砾岩和中粗砂岩为主,

渗透性好,富水性强,涌水量一般 $100 \sim 1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。矿层位于含水层底部,与下白垩统赛汉组下段平行不整合接触。下白垩统赛汉组下段岩性为灰色、灰黑色泥岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩夹砂岩,构成稳定的隔水底板^[13-17]。

巴彦乌拉铀矿地下水类型属于碎屑岩类孔隙水,铀矿区北西、南东部的基岩裂隙水和北东部邻区的碎屑岩类孔隙水是地下水的主要补给源。地下水从北东向南西迳流,最终排泄于南西部的准达来诺尔—巴润达来诺尔一带^[17-18]。

天然条件下含矿含水层地下水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型, TDS $1 \sim 3 \text{ g/L}$ 。阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主。这种水化学特征有利于铀矿的地浸开采。

2 地下水示踪试验

2.1 试验目的与意义

地下水示踪试验是确定地下水水力联系,探明地下水流向、计算地下水流速最常用手段之一^[19-21]。通过示踪试验可以判断地浸采区钻孔间的连通性,确定地下溶浸剂流动方向、流速、扩散范围等^[9-11]。本次示踪试验的目的是定量确定地浸开采前地下水(溶浸液)流速,分析相关元素溶质运移特征,试验结果对确定含矿层渗透性变化特征具有重要现实意义。

2.2 试验单元

巴彦乌拉铀矿地浸钻孔采用1抽4注的“五点式”抽注单元井型。为开展示踪试验,在 C10 采区选择一个“一注四抽”地浸单元作为试验单元。试验单元位于 C10 采区西部,抽注孔间距离及抽孔间距离如图1所示。

根据测井资料绘制了试验单元地层剖面(图2),从剖面图上看,在深度 $45 \sim 65 \text{ m}$ 发育有一套稳定连续的粉砂质泥岩构成含矿含水层隔水顶板,其下部为砂岩与含砾砂岩互层的含矿含水层,铀矿体位于含矿含水层底部;矿层底板为炭质泥岩、泥质煤层隔水层。

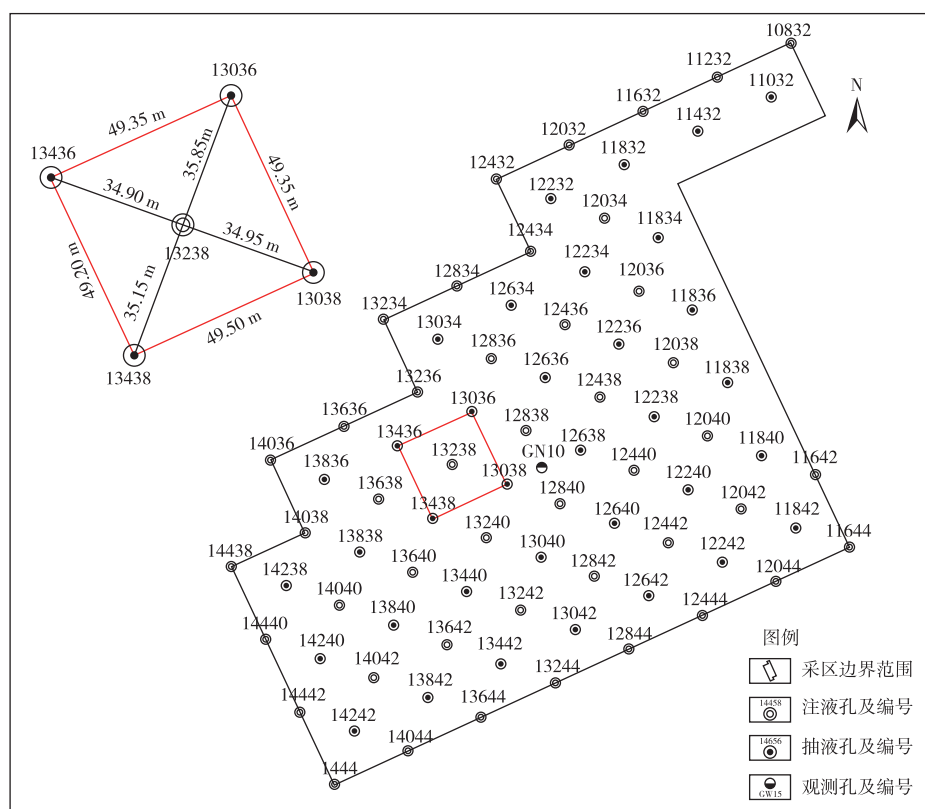


图 1 示踪试验单元位置图

Fig. 1 Location diagram of tracer test unit

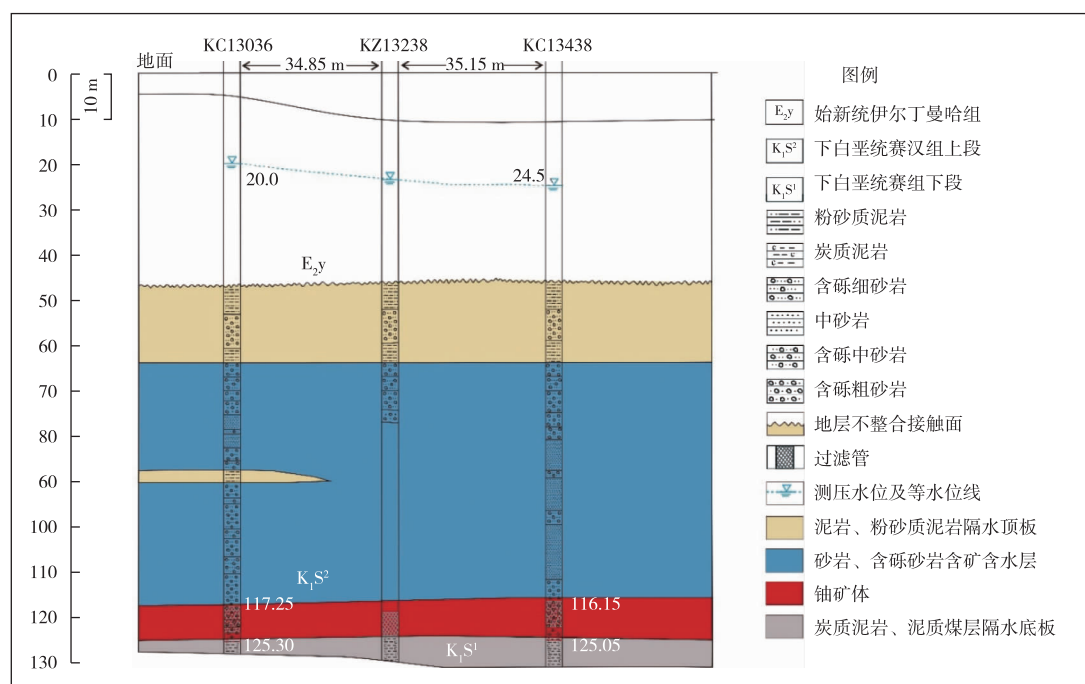


图 2 试验单元地层剖面简图

Fig. 2 Stratigraphic profile of test unit

2.3 试验过程

如图1所示,本次地下水示踪试验示踪剂投源孔(注液孔)为KZ13238,周围相邻的4个抽液孔为示踪剂监测孔,分别为KC13036、KC13038、KC13436、KC13438。由于巴彦乌拉铀矿地下水中 I^- 浓度较低(小于0.1 mg/L),本次示踪试验选择工业碘化钾作为示踪剂。示踪试验于2020年8月5日开始,现场将50 kg碘化钾溶于100 L塑料桶中,5 min内向投源孔KZ13238完成投放。投放结束后持续向含矿含水层注液并启动抽注系统。从4个监测孔中取样,测试 I^- 浓度,取样时间为每天8:00、16:00、23:00,取样时同时记录投源孔与观测孔流量。示踪试验持续3个月,共计取样144

组。所有样品均用MP523型pH/离子浓度测量仪测试。

3 试验结果与讨论

3.1 抽注孔间溶浸液运移特征

试验单元采用酸法地浸工艺,酸化期间溶浸液酸度由3 g/L逐渐上调至15 g/L,酸化结束后稳定在8 g/L左右。抽注孔初始水量9~11 m³/h,运行900 h后水量下降(图3),表明含矿层中出现了化学沉淀物,造成含矿层孔隙堵塞,抽注液量降低。另一方面,在抽注条件下,孔隙不断被溶浸液冲刷,溶浸液与矿石发生反应,形成连通性好、孔喉较大的优势通道,示踪剂可在这些优势通道中快速运移。

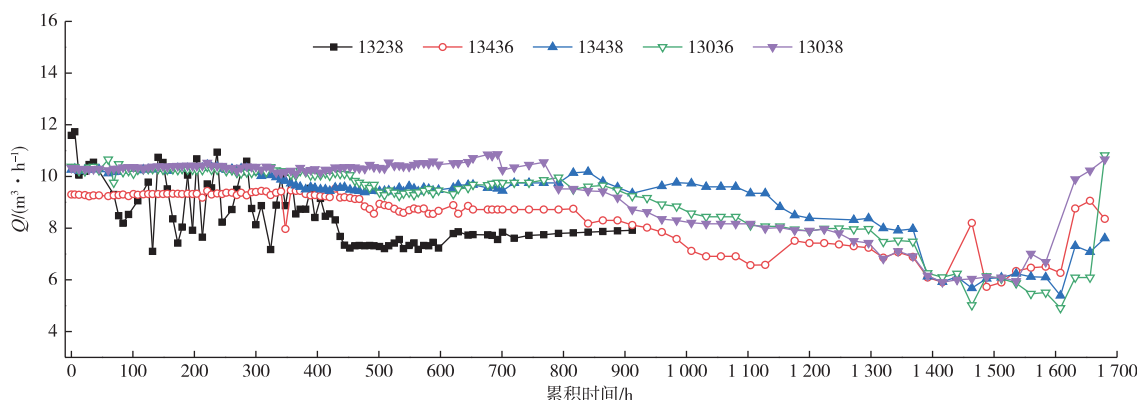


图3 试验单元流量随时间变化

Fig. 3 Flow rate of test unit varying with time

根据地下水示踪试验结果(图4),溶浸液在抽孔与注孔间的运移具有以下特征:

1) 监测孔浸出液 I^- 浓度显示有两个明显的峰值

从KC13036监测孔 I^- 浓度数据看,示踪试验140 h,浸出液 I^- 浓度从不到0.2 mg/L升至0.5 mg/L左右(图4a中①处),表明已有少量示踪剂到达KC13036监测孔,运移方式以对流为主。试验290 h(图4a中②处)时,溶浸液中的 I^- 开始大量到达监测孔附近, I^- 随溶浸液不断被抽出, I^- 浓度持续上升,表明示踪剂主体开始到达观测孔。试验430 h,浸出液 I^- 浓度到达第一个峰值(19.67 mg/L,图4a中③处)。示踪试验运行到290 h时,沿第一个峰值运移路径运移的 I^- 陆续到达监测孔。随后 I^- 浓度逐渐降低,当试验进行到460 h时, I^- 浓度降低到低值,表明沿较快通道运移的 I^- 基本到达监测孔。试验460 h以后,监测孔中的 I^- 浓度又随时间持续升高,这是 I^- 沿另一渗流通道从投源孔到达监

测孔的结果,并在试验620 h时 I^- 浓度到达峰值,峰值浓度为34.9 mg/L(图4a中④处)。

综上所述,示踪剂从投源孔到监测孔 I^- 浓度出现2个明显的峰值,表明其运移过程中分别经过了2个渗流通道到达监测孔。同样,监测孔KC13038、KC13436、KC13438浸出液的 I^- 浓度分别于试验后的430与630 h、430与580 h以及410与620 h到达峰值。为此,我们有理由认为,在地浸采铀生产运行过程中,溶浸液从注液孔到抽液孔的运移至少有2个甚至更多的渗流通道(途径)。

2) 溶浸液以不同的速度从投源孔到达监测孔,不同方向运移速度基本相同

根据 I^- 浓度随时间变化特征计算了4个溶浸液流速,分别为首次监测到示踪剂时的流速(图4中①处)、示踪剂主体到达监测孔时的流速(图4中②处)、示踪剂第一个峰值出现时的流速(图4中③处)和示踪剂第二个峰值出现时的流速(图4中④处)。各流速计算结果见表1所示。4个监测孔的二个峰

值流速较为接近,并显示出相同的特征。示踪剂第一个峰值浓度到达时的流速为 1.95~2.06 m/d,第

二个峰值到达时的流速为 1.35~1.44 m/d,表明溶浸液在不同方向的运移速度基本相同。

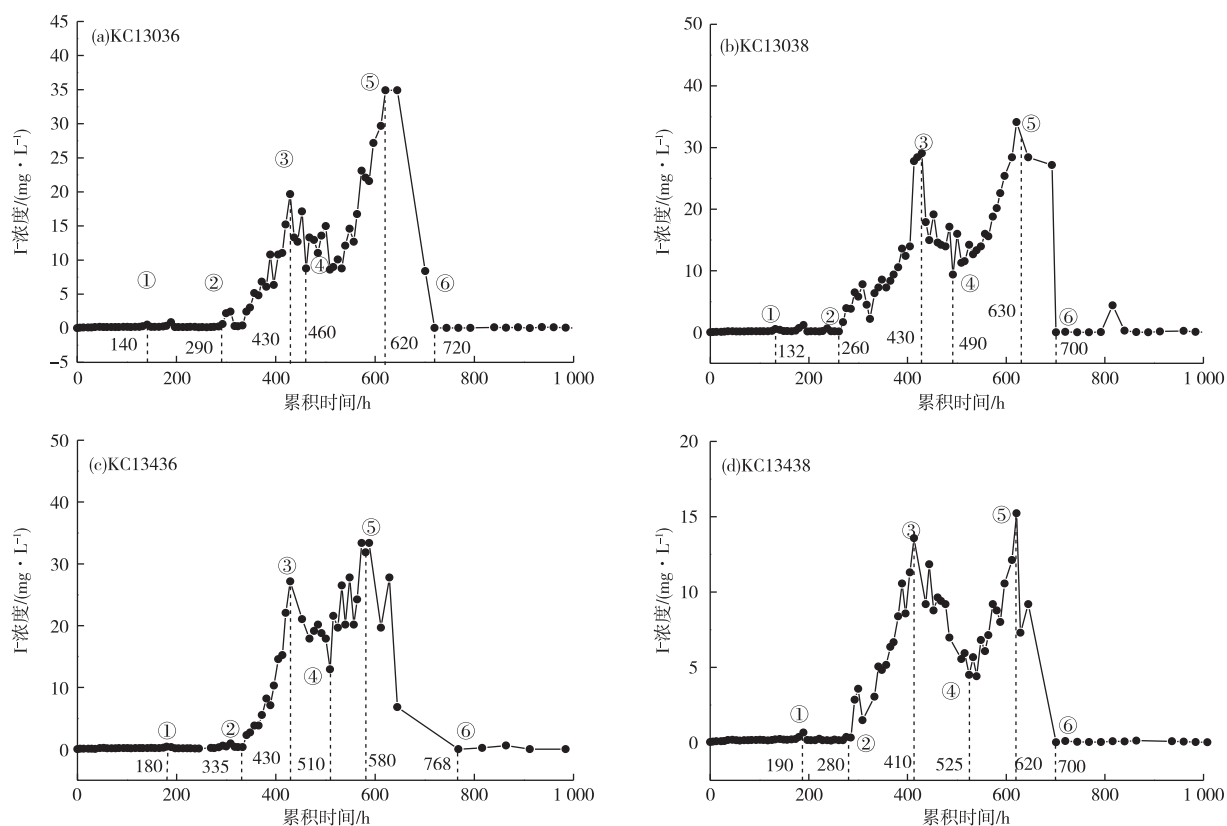


图 4 地下水示踪试验监测孔 I^- 浓度随时间变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of I^- in groundwater tracer test monitoring hole with time

表 1 示踪试验各监测孔地下水流速计算结果

Table 1 Calculation results of groundwater flow velocity of each monitoring hole in tracer test

监测孔	投源孔-观测孔距离/m	最初到达时间/h	最初到达速度/ ($m \cdot d^{-1}$)	主体开始到达时间/h	主体到达时流速/($m \cdot d^{-1}$)	第一个峰值到达时间/h	第一个峰值处流速/($m \cdot d^{-1}$)	第二个峰值到达时间/h	第二个峰值处流速/($m \cdot d^{-1}$)
KC13036	34.85	140.0	5.97	290.0	2.88	430.0	1.95	620.0	1.35
KC13038	34.95	190.0	4.41	280.0	3.00	410.0	2.05	620.0	1.35
KC13436	34.90	180.0	4.65	335.0	2.50	430.0	1.95	580.0	1.44
KC13438	35.15	190.0	4.44	280.0	3.01	410.0	2.06	620.0	1.36

3.2 酸化过程中的 SO_4^{2-} 示踪试验

为进一步确定溶浸液流速,验证 KI 示踪试验数据,开展了酸化过程中的 SO_4^{2-} 示踪试验。 SO_4^{2-} 示踪试验借助 C10 采区地浸酸化进行。酸化是用一定浓度的硫酸溶液趋替新采区的地下水,使地下水 pH 降到 2 以下,溶解含矿层中的耗酸物质,达到溶解矿层中六价铀的目的。

3.2.1 取样与测试

C10 采区自 2020 年 8 月 4 日开始酸化,酸化期间每日在抽液孔中取样,取样后测试样品中的 SO_4^{2-} 浓度。由于含矿层天然地下水 SO_4^{2-} 浓度为

300~500 mg/L,为便于分析浸出液中 SO_4^{2-} 的来源, SO_4^{2-} 浓度测试值超过 1 g/L 时便认为从注液孔注入的酸性溶浸液已到达抽液孔,即 SO_4^{2-} 浓度超过 1 g/L 后则停止取样。

3.2.2 溶浸液运移特征

SO_4^{2-} 示踪试验结果如图 5 所示。图 5a 显示,酸化后 C10 采区抽液孔 SO_4^{2-} 浓度持续升高,其特征是:试验 1~7 d,C10 采区南部 SO_4^{2-} 浓度上升较缓慢,上升速度为 25.36~81.11 mg/(L·d),浓度为 350~795 mg/L;试验 7 d 后 SO_4^{2-} 浓度以较快速度明显上升,上升速度为 118.23~349.60 mg/(L·d)

(表 2),表明 7 d 后大量的酸性溶浸液从抽液孔到达监测孔附近。C10 采区南部溶浸液到达监测孔的时间约为 7~9 d(168~216 h),浸出液浓度达到 878~1 700 mg/L,与 KI 示踪试验示踪剂到达监测孔的时间(140~190)基本吻合。C10 采区北部 SO_4^{2-} 浓度自酸化开始逐渐升高(图 5b),8 月 6 日至 8

月 11 日,浸出液 SO_4^{2-} 上升速度为 62.50~222.00 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$;8 月 11 日至 8 月 14 日,浸出液 SO_4^{2-} 上升速度为 70.36~346.37 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$,上升特征和趋势与南部监测孔较为一致。这些特征表明,溶浸液从注液孔到抽液孔所需时间与流速相近。

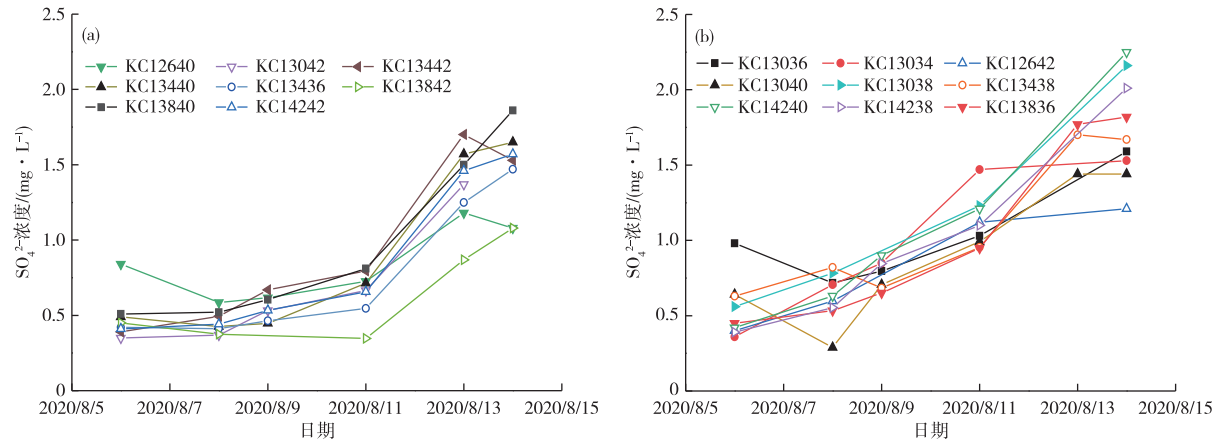


图 5 C10 采区南部(a)和北部(b)浸出液 SO_4^{2-} 浓度
Fig. 5 SO_4^{2-} concentration in leaching solution from southern (a) and northern (b) C10 mining area

表 2 SO_4^{2-} 浓度上升速度计算结果
Table 2 Calculation results of SO_4^{2-} concentration rising rate $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$

监测孔	南部抽液孔		监测孔	北部抽液孔	
	8 月 6 日至 8 月 11 日	8 月 11 日至 8 月 14 日		8 月 6 日至 8 月 11 日	8 月 11 日至 8 月 14 日
KC13842	47.98	244.32	KC13836	99.66	290.57
KC13840	60.24	349.60	KC14240	158.00	346.67
KC14242	49.30	182.70	KC14238	142.00	303.33
KC13440	44.66	187.34	KC13034	64.83	238.61
KC13436	25.36	307.73	KC12642	222.00	136.32
KC12640	27.86	118.23	KC13040	144.00	70.36
KC13042	62.86	352.84	KC13038	70.20	149.54
KC13442	81.11	244.82	KC13036	62.50	186.67
KC13438	64.83	143.166			

3.2.3 SO_4^{2-} 示踪与 KI 示踪结果对比
C10 采区示踪试验单元浸出液 SO_4^{2-} 浓度变化特征见图 6。从图 6 可知,南部抽液孔试验前 7 天 SO_4^{2-} 浓度上升相对较慢,上升速率平均为 51.58 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。

从 8 月 11 日至 14 日, SO_4^{2-} 浓度快速提升,平均提升速率为 236.75 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。 SO_4^{2-} 浓度快速上升的时间 7~9 d(168~216 h)与 KI 示踪试验示踪剂到达监测孔的时间(180 h)相吻合。

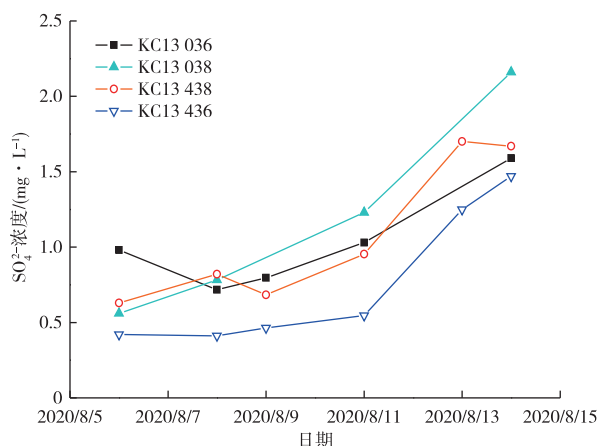


图6 C10采区示踪试验单元浸出液 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 6 SO_4^{2-} concentration of leaching solution in C10 mining area tracer test unit

4 结论

1)地浸采铀过程中,溶浸液从注液孔到抽液孔示踪剂浓度呈现出2个峰值,表明试验单元溶浸液从注液孔到抽液孔至少有两处渗流通道。

2)在示踪试验单元投源孔到监测孔示踪剂浓度第一个峰值与第二个峰值到达时的溶浸液流速分别为1.95~2.06和1.35~1.44 m/d,表明不同渗流通道溶浸液从注液孔流向抽液孔的流速不同。

3) SO_4^{2-} 示踪试验与KI示踪试验在确定溶浸液流速特征方面具有较好的一致性。

参考文献

- [1] 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 metallogenetic theory of sandstone-type uranium deposits in China[J]. Uranium Geology, 2016, 32(6): 321-332.
- [2] 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. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China [J]. Journal of Geology, 2015, 89(6): 1051-1069.
- [3] 苏学斌.高效绿色发展推进铀矿大基地建设[J].中国核工业,2016(11):16-19.
SU X B. Efficient and green development to promote uranium mining base construction [J]. China Nuclear Industry, 2016(11): 16-19.
- [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 X B, DU Z M. China's in-situ leaching uranium technology development present situation and prospect [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79-83.
- [5] 阙为民,王海峰,田时丰,等.我国地浸采铀研究现状与发展[J].铀矿冶,2005,24(3):113-117.
QUE W M, WANG H F, TIAN S F, et al. Research status and development of in-situ leaching uranium in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3): 113-117.
- [6] 周义朋,沈照理,史维浚,等.地浸采铀工艺分类方法的探讨[J].有色金属(冶炼部分),2015(1):37-41.
ZHOU Y P, SHEN Z L, LIU W J, et al. Discussion on the classification method of in-situ leaching uranium mining process [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(1): 37-41.
- [7] 代春艳,焦学然,韩文艳,等.地浸采铀工艺技术及发展方向[J].广东化工,2014,41(10):80,66.
DAI C Y, JIAO X R, HAN W Y, et al. In-situ leaching uranium mining technology and development research direction [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(10): 80, 66.
- [8] 史维浚,高柏,王国华.砂岩型铀矿地浸过程中的溶质迁移机理[J].东华理工学院学报,2004,27(1):24-32.
SHI W J, GAO B, WANG G H. The solute migration mechanism during in-situ leaching of sandstone-type uranium deposits [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 24-32.
- [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 in flow rate determination of in-situ leaching uranium solution [J]. Modern Mining, 2010, 26(12): 72-73, 112.
- [10] 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 interwell tracer in in-situ leaching of uranium in Xinjiang [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(3): 130-133.
- [11] 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 multivariate tracer test in in-situ leaching uranium mines [J]. Mining Research and Development, 2015, 35(10): 10-13.
- [12] 谢廷婷,丁叶,周根茂,等.某地浸采铀条件试验酸化前后同源示踪对比试验模拟分析[J].铀矿冶,2018,

- 37(1):1-8.
- XIE T T, DING Y, ZHOU G M, et al. Simulation analysis of homologous tracer comparison test before and after acidification in an in-situ leaching uranium condition test[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018,37(1):1-8.
- [13] 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. Bayanwula deposit uranium ore body distribution and uranium ore occurrence characteristics[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017,40(1):1-6.
- [14] 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.
- [15] 鲁超. 二连盆地巴彦乌拉铀矿田构造控矿机制和成矿模式[D]. 北京:中国地质大学,2019.
- LU C. Structural ore-controlling mechanism and metallogenic model of Bayanwula uranium deposit in Erlian Basin[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2019.
- [16] 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,2014.
- GUO H W. The metallogenic characteristics and metallogenic regularity of Bayanwula uranium deposit in Inner Mongolia[D]. Beijing:China University of Geosciences,2014.
- [17] 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 blocking mechanism of ore-bearing layer in in-situ leaching process of Bayanwula uranium mine[D]. Nanchang:East China University of Technology,2017.
- [18] 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 H Q Y. Field leaching condition test and hydrodynamic simulation of Bayanwula uranium mine[D]. Nanchang:East China University of Technology,2017.
- [19] 鲁程鹏,束龙仓,苑利波,等. 基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,39(4):717-721.
- LU C P, SHU L C, YUAN L B, et al. Solving hydrogeological parameters of karst aquifer based on tracer test[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2009,39(4):717-721.
- [20] 郑克勋. 地下水人工化学连通示踪理论及试验方法研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- ZHENG K X. Study on the theory and test method of groundwater artificial chemical connection tracer[D]. Nanjing:Hohai University,2007.
- [21] REIMUS P W, ARNOLD B W. Evaluation of multiple tracer methods to estimate low groundwater flow velocities[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2017,199:1-13.