

新疆某砂岩型铀矿中性浸出试验研究

贾志远,任华平,师振峰,王红义,何慧民,张子叶,李家全

(新疆中核天山铀业有限公司,新疆吐鲁番 838000)

摘要: 新疆某砂岩型铀矿床地质提交资源为详查阶段,勘探网度为 200 m×200 m,勘探程度较低,且矿层厚度薄,铀品位低。另外,该矿床存在含矿含水层渗透性差(渗透系数仅为 0.045 m/d)、承压水头高等复杂水文地质条件,在该矿床区域还未开展任何浸出试验工作。为研究该矿床的铀资源浸出情况,通过采取中性浸出试验及提高下注压力浸出工艺方法,开展了现场浸出试验研究,获得单孔平均抽液量 1.7 m³/h、浸出液平均铀质量浓度 40.37 mg/L、单孔最高铀质量浓度 390.22 mg/L、年浸采率 13.39% 的效果。研究结果为该矿床铀资源开发提供了技术支撑。

关键词: 南矿带西段;砂岩型铀矿;中性浸出;渗透性;承压水头

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)02-0071-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.09.01

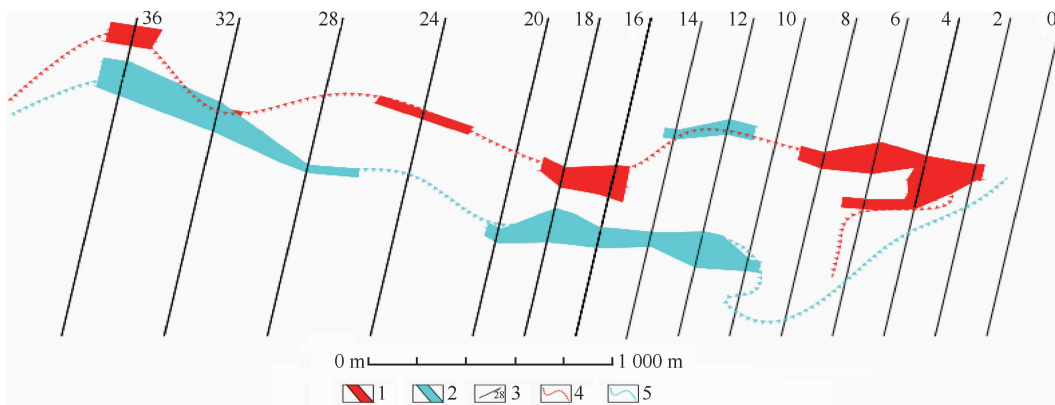
砂岩型铀矿床是中国主要的铀资源类型,中性地浸采铀技术是砂岩型铀矿的主要开采方法之一^[1-6]。新疆某砂岩型铀矿床存在勘探程度低、矿体平面分布零散、矿体地质及水文地质条件复杂等问题。前期仅在该矿床区域开展了勘查工作,初步提交了一定资源量,但还未开展现场浸出试验。

为有效掌握该区域的铀资源变化情况和现场浸出效果,在该矿床选取 2-8 线区域矿体块段开展中性浸出条件试验,研究该矿床浸出效果及经济性,解决低渗透、低铀品位、水文地质情况复杂条件下的砂岩型铀矿床现场经济开采问题,旨在获得该

矿床采用中性浸出工艺时的最佳浸出剂配制参数。

1 矿床特征

新疆某砂岩铀矿床赋存于西山窑组第一岩性段上亚段(J_2x^1)砂体中,由东向西、由南向北含矿砂体埋深逐渐变深;矿体总体上呈蛇曲状、断续状分布(图 1),矿体剖面主要呈板状、卷状(图 2)。主矿层分别为 I 和 II 矿体^[7],埋藏深度为 110.0~140.0 m,矿层厚度一般为 1.55~10.95 m(平均厚度 3.37 m),铀品位为 0.017 4%~0.082 5%(平均品位 0.034 5%)。



1— I 号矿体;2— II 号矿体;3—勘探线及编号;4— I 号矿体氧化还原界线;5— II 号矿体氧化还原界线。

图 1 新疆某砂岩型铀矿床矿体平面投影

Fig. 1 Plane projection of ore body of a sandstone-type uranium deposit in Xinjiang

收稿日期: 2024-09-01

第一作者简介: 贾志远(1985—),男,河北保定人,本科,工程师,主要研究方向为地浸采铀。

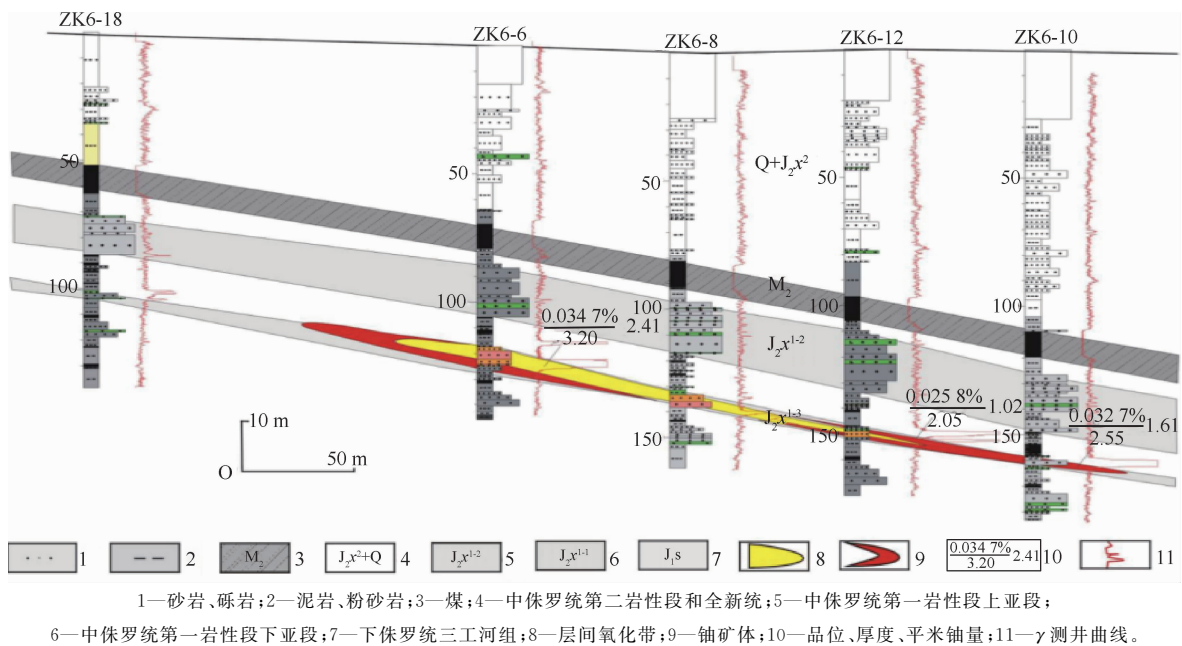


图2 新疆某砂岩型铀矿床南矿带西段剖面图

Fig. 2 Profile of the west section of the south ore zone of a sandstone-type uranium deposit in Xinjiang

2 试验区域地质概况

在该矿床2~8勘探线I号矿体块段开展试验,勘探网度为200 m×100 m,矿体平均厚度为3.11 m,平均铀品位为0.028 1%。采用“CO₂+O₂”中性浸出工艺^[8-11],研究适合该矿床的最佳地浸开采条件及浸出剂配制参数。

2.1 试验块段钻孔布置

在试验区设计施工25个抽注液孔(“9抽16注”)和3个监测井。结合矿体平面分布特征,试

验钻孔采用“五点型”布置^[12-14](图3),抽注液孔间距为30 m。该区域矿体变化复杂,在试验期间,为确保抽注单元钻孔过滤器均在同一主矿层,实现抽注液孔可调功能,试验钻孔施工工艺采用“开窗式内置过滤器”结构,在所有钻孔施工结束后,根据揭露矿层剖面确定试验钻孔过滤器安装位置。由于地下水 $\rho(\text{Cl}^-)$ 较高(3.4 g/L),若采用传统不锈钢材质内置过滤器,会出现内置过滤器被Cl⁻腐蚀问题,本次试验钻孔过滤器采用U-PVC材质环形骨架。

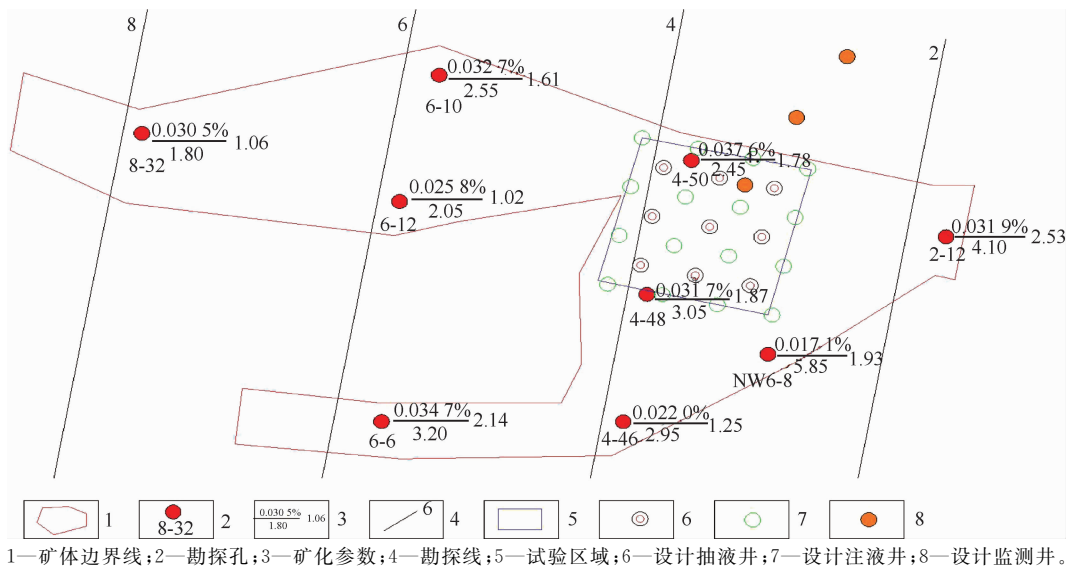
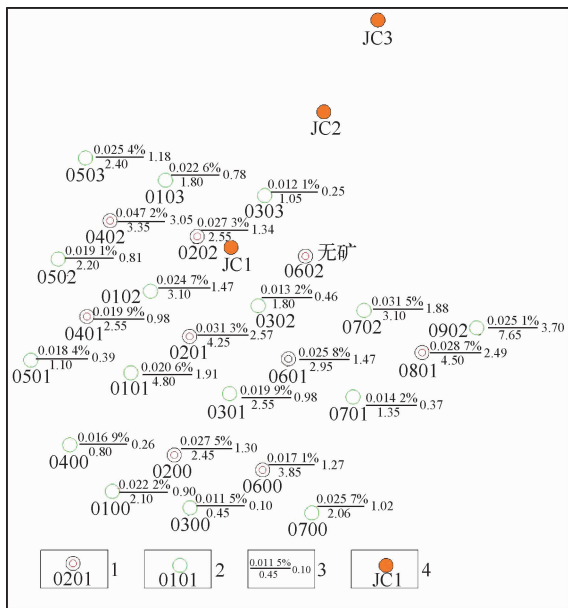


图3 试验区域钻孔平面布置图

Fig. 3 Drilling plane layout in the test area

2.2 试验钻孔见矿情况

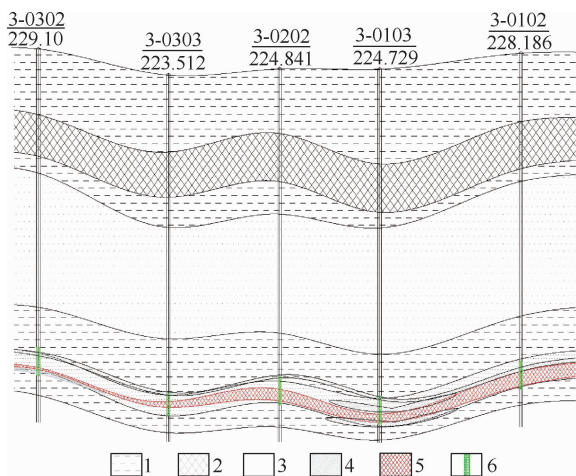
试验区域共施工 25 个抽注液孔,图 4 为钻孔见矿平面图,图 5 为钻孔剖面图。根据施工钻孔揭露矿层可知,该区域矿层为 1~4 层矿体,矿体厚度为 0.45~7.65 m,平均厚度为 2.56 m;铀品位为 0~0.047 2%,平均铀品位为 0.021 6%(表 1)。与该矿体块段相比,试验区域矿体平均矿层厚度、铀品位变化不大;矿体厚度变化较大,这主要是由于局部受沉积砂岩岩性变化而导致的。



1—抽液孔;2—注液孔;3—矿化参数;4—监测井。

图 4 试验区域钻孔见矿平面图

Fig. 4 Borehole ore plan in the test area



1—泥岩;2—煤层;3—砂岩;4—钙质胶结层;5—铀矿层;6—过滤器。

图 5 试验区域钻孔剖面图

Fig. 5 Borehole profile in the test area

表 1 试验区施工钻孔见矿统计

Table 1 Mining statistics of drilling holes in the test area

孔号	矿层序号	厚度/m	铀品位/%	岩性描述
0202	1	2.55	0.027 3	细砂
0302	1	0.45	0.012 2	细砂
0303	1	1.05	0.012 1	细砂
0102	1	3.10	0.024 7	中砂
0103	1	1.80	0.022 6	粗砂
0201	1	4.25	0.031 3	细砂
0101	1	4.80	0.020 6	细砂
0402	2	3.35	0.047 2	细砂
0502	4	2.20	0.019 0	中砂、钙质泥岩
0401	2	2.55	0.020 0	细砂
0501	2	1.10	0.018 4	细砂、泥岩
0301	2	2.55	0.019 9	细砂
0503	1	2.40	0.025 4	细砂
0400	1	0.80	0.016 9	细砂
0601	1	2.95	0.025 8	细砂
0200	2	2.45	0.027 4	细砂
0702	1	3.10	0.031 5	细砂
0100	2	2.10	0.022 2	细砂
0300	2	0.45	0.011 0	细砂
0701	3	1.35	0.014 4	细砂岩、钙质泥岩
0602	0	0	0	细砂
0700	4	2.60	0.020 3	细砂
0801	2	4.50	0.028 7	细砂
0902	2	7.65	0.025 1	细砂
0600	2	3.85	0.017 1	粗砂
平均		2.56	0.021 6	
变异系数/%		63.45	40.32	

注:0602 孔为无矿孔。

2.3 水文地质概况

2.3.1 水文地质参数

试验区域钻孔静水位为 17.1~24.4 m,平均静水位为 22.27 m;含矿含水层厚度为 4.72~8.96 m,平均厚度为 7.25 m;井内可抽水位高度为 106.7~124.9 m,平均可抽水位高度为 113.7 m(表 2)。含矿含水层岩性主要为细砂岩,局部含有 1~3 层不连续透镜状钙质胶结层。

2.3.2 地下水化学特征

该试验区域含矿含水层水样本底 $\rho(U)$ 为 0.56 mg/L; $\rho(HCO_3^-)$ 为 258.28~394.32 mg/L,平均 $\rho(HCO_3^-)$ 为 330.77 mg/L; $\rho(Ca^{2+})$ 为 749.52~818.92 mg/L,平均 $\rho(Ca^{2+})$ 为 785.88 mg/L; pH 为 6.38~7.31,平均为 7.03。

表2 试验区域已完成钻孔水文地质参数统计

Table 2 Statistics of hydrogeological parameters of completed boreholes in the test area

IV-1 含矿含水层位置			静水位/m	过滤器上沿位置/m	可抽水头高度/m	钙质胶结层厚度/m	渗透系数/(m/d)
起/m	止/m	厚度/m					
136.52	143.78	7.25	22.27	137.00	113.70	1.28	0.045

3 现场浸出试验

通过现场试验,研究中性浸出工艺对该矿床的浸出效果,现场试验运行分为加氧抽注循环和“CO₂+O₂+NH₄HCO₃”浸出2个阶段。

3.1 加氧抽注循环

对已施工试验钻孔的剖面岩性分析表明,铀主要分布在粒径小于0.25 mm的细砂中,占比达36%;在粗砂岩和中砂岩次之,分别占27.81%和23.67%。矿石中铀主要以吸附态和铀矿物形式赋存,两者各占约50%,矿石中U(VI)占比约为

69.91%。于2022年10月15日开始试验,加氧抽注循环浸出现场试验运行11个钻孔(“3抽8注”),在浸出剂总管采用微孔曝气加氧,根据钻孔深度,利用理论计算公式^[15]得出最大溶解氧为215.50 mg/L。

由于该试验区域矿层渗透性差,试验初期单孔平均抽液量为1.5 m³/h,单孔平均注液量为0.6 m³/h。由于注液孔水量较小,在浸出剂氧气加入量过高时,钻孔出现气堵现象。试验期间氧气质量浓度为150 mg/L,试验浸出结果见表3。

表3 加氧抽注循环浸出液各离子浓度

Table 3 Ion concentration in leachate of oxygen pumping circulating test

孔号	运行天数	$\rho(\text{U})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{g/L})$	$\rho(\Sigma\text{Fe})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{Fe}^{2+})/(\text{mg/L})$	pH	余氧量/(mg/L)
0201	25	10.13	483.36	838.24	3.14	1.34	0.96	6.64	4.50
0202	15	14.31	352.20	770.34	3.13	0.24	0.2	7.09	2.38
0402	31	9.83	419.76	811.2	3.48	0.07	0.01	6.81	5.80
平均		11.42	418.44	806.59	3.25	0.55	0.39	6.85	4.23

从表3可看出,试验加氧抽注循环15~31 d时,浸出液各项离子发生变化,铀质量浓度从0.56 mg/L(本底)上升至11.42 mg/L(平均), $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 从3.05 g/L上升至3.25 g/L,说明浸出剂中的氧气已氧化了矿层中的黄铁矿^[16]。

3.2 “CO₂+O₂+NH₄HCO₃”浸出试验

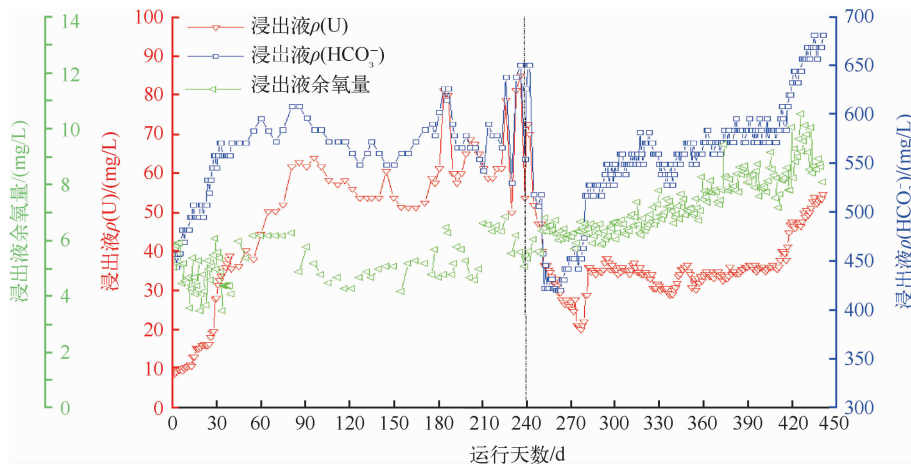
当pH过高时,地下水溶液与Ca²⁺易形成CaCO₃沉淀,堵塞矿层。为减缓矿层堵塞,2022年11月11日起,开展“CO₂+O₂+NH₄HCO₃”浸出试验。加入氧气质量浓度为150 mg/L,通过加入NH₄HCO₃溶液,控制浸出剂中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为560~580 mg/L;采用微孔曝气在浸出剂总管补加CO₂气体,控制浸出剂pH为6.6~6.8。2023年6月20日,又投入新施工的12个钻孔,试验共形成25个钻孔(“9抽16注”)。截止2023年12月31日,单孔平均抽液量为1.7 m³/h,单孔平均注液

量为1.0 m³/h,浸出液平均铀质量浓度为40.37 mg/L,单孔最高铀质量浓度为106.20 mg/L,浸出液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为657.38 mg/L,pH为6.77,余氧量为8.65 mg/L,年回采率为13.39%。浸出试验结果见表4。

在试验运行90 d时,浸出液平均铀质量浓度达50.24~85.41 mg/L,浸出液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 上升至550.00~600.00 mg/L,稳定运行150 d。在投入新施工的12个抽注孔(“5抽7注”)开展扩大试验时,起始浸出液铀质量浓度下降至20.13 mg/L,浸出液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 下降至442.18 mg/L。然后控制浸出剂 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 仍为550.00~580.00 mg/L,截止2023年底,浸出液铀质量浓度上升至54.90 mg/L,浸出液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为683.20 mg/L,余氧量为8.13 mg/L。试验结果见图6。

表4 “CO₂+O₂+NH₄HCO₃”浸出试验浸出液各离子浓度Table 4 Ions concentration in leachate of “CO₂+O₂+NH₄HCO₃” leaching test

孔号	运行天数/d	抽液量/(m ³ /h)	浸出液			
			铀质量浓度/(mg/L)	$\rho(\text{HCO}_3^-)$ /(mg/L)	pH	余氧量/(mg/L)
西 3-0201	438	1.2	63.03	768.8	6.85	7.88
西 3-0202	452	1.1	102.20	768.6	6.67	6.80
西 3-0401	205	1.6	9.64	549.0	6.75	7.98
西 3-0402	395	1.7	31.54	500.2	6.74	7.60
西 3-0200	168	2.6	5.55	646.6	6.76	11.51
西 3-0601	168	1.8	47.89	646.6	6.79	9.68
西 3-0801	82	1.5	85.26	695.4	6.78	8.53
西 3-0602	134	1.5	91.10	695.4	6.78	8.53
西 3-0600	102	2.7	5.26	645.8	6.84	9.32
平均	238	1.7	40.37	657.38	6.77	8.65

图6 试验孔浸出液铀浓度与HCO₃⁻及余氧量变化Fig. 6 Change of uranium concentration, HCO₃⁻ and residual oxygen in test drilling leachate

当试验区域 0202 抽液钻孔运行 210 d 时,浸出液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 高达 1 268.40 mg/L, 铀质量浓度峰值为 390.22 mg/L(图 7), 说明含矿层矿物碳酸盐含量高。在浸出剂加入 CO₂ 后, 与碳酸盐矿物发生反应, 生成含有 HCO₃⁻ 的溶液, 使得浸出液中的 HCO₃⁻ 高于浸出剂中的 HCO₃⁻ 浓度; 这有助于六价铀的配合, 提高了浸出液铀浓度且降低了碳酸钙等碳酸盐堵塞矿层风险, 稳定了钻孔运行水量。浸出液铀质量浓度随 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 的下降而下降, 当稳定运行 60 d 时, 铀质量浓度约为 106.20 mg/L, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 768.60 mg/L, 单孔

平均抽液量为 1.0 m³/h。

2023 年扩大试验新投入运行 12 个抽注井后, 在试验运行 185 d 时, 浸出液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 达 550 mg/L, 但 0200、0600 抽液孔浸出液铀质量浓度为 5.26~5.55 mg/L, 一直未出现上升趋势, 而单孔抽液量较大, 约为 2.5~3.0 m³/h(图 8)。这主要是因为这 2 个试验单元的矿体属于翼部矿体, 含矿含水层厚度较厚, 且铀品位较低, 对浸出剂有一定稀释作用, 导致浸出液铀质量浓度较氧化还原前锋线低。

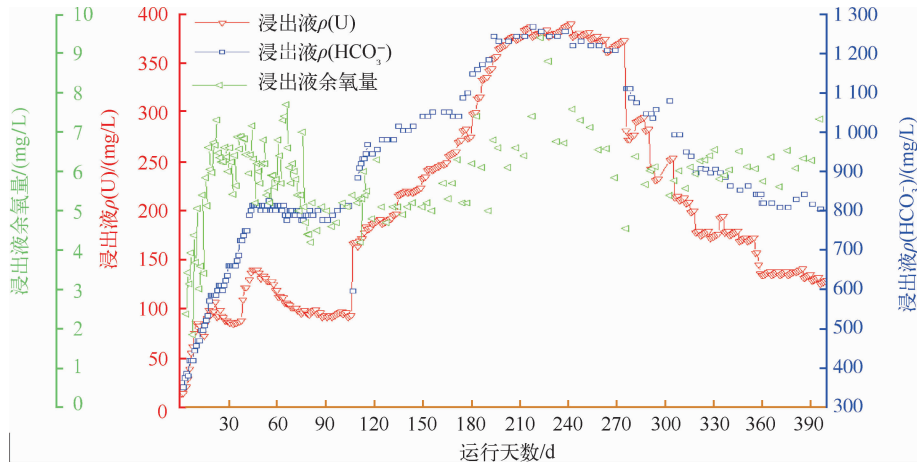


图7 0202 钻孔浸出液铀浓度与 HCO_3^- 及余氧量变化

Fig. 7 Change of uranium concentration, HCO_3^- and residual oxygen in 0202 borehole leachate

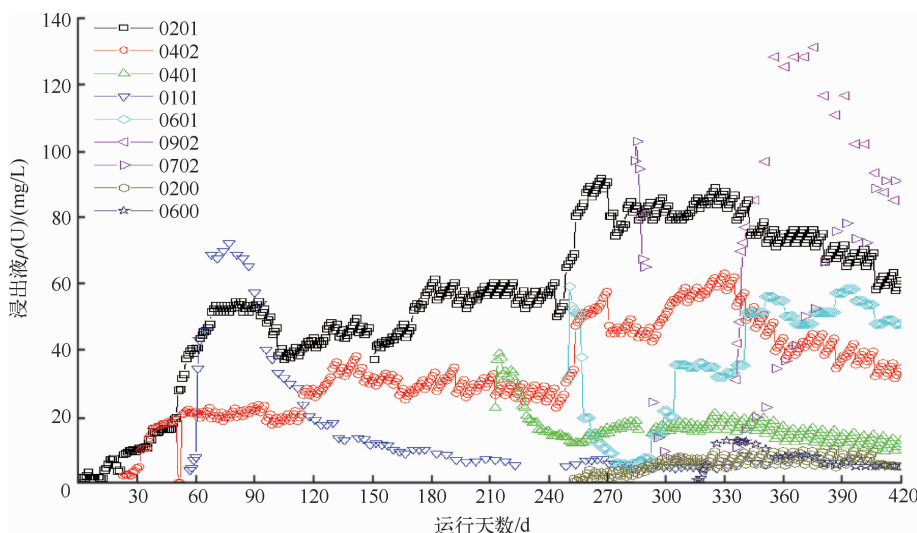


图8 试验抽液孔浸出液铀浓度变化

Fig. 8 Change of uranium concentration in the leachate of the test extraction borehole

4 结论及建议

1) 根据试验区域已施工的 25 个试验孔揭露矿层可知, 矿体厚度变异系数为 63.45%, 矿体卷头延伸距离短, 歼灭较快, 翼部矿体夹层厚度较大, 最大为 9 m。含矿岩性为细砂岩, 局部含有断续透镜状钙质胶结层。

2) 针对试验区域低渗透、高水位、复杂水文地质条件, 采用总管泵前虹吸加入氧气, 确保了抽注液量稳定和氧气正常加入。在矿床 I 号矿体采用“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”浸出时, 通过补充 NH_4HCO_3 溶液控

制浸出剂 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 在 560~580 mg/L, 浸出液平均 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 可达 657.38 mg/L, 单孔最高达 1268.40 mg/L; 浸出液平均铀质量浓度为 40.37 mg/L, 单孔最高为 390.22 mg/L; 单孔平均抽液量为 1.7 m^3/h , 浸出效果较好, 且维持了抽注系统稳定运行。

参考文献:

- [1] 王亚安, 原渊, 程威, 等. 中性地浸采铀全流程溶液中颗粒粒径分布及过滤建议[J]. 铀矿冶, 2024, 43(2): 39-46.

- WANG Ya'an, YUAN Yuan, CHENG Wei, et al. Particle size distribution and filtration suggestions in the whole process solution of neutral in-situ leaching of uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2):39-46(in Chinese).
- [2] 吉宏斌,周义朋,孙占学,等. 蒙古古尔铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸浸出过程分析与探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3):55-59.
JI Hongbin, ZHOU Yipeng, SUN Zhanxue, et al. Analysis of and discussion on $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium process at Mengqiguer deposit [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018 (3):55-59(in Chinese).
- [3] 高尚,廖文胜,王立民,等. 颗粒计数器在地浸采铀中的应用研究[J]. 铀矿冶, 2022, 41(2):132-136.
GAO Shang, LIAO Wensheng, WANG Limin, et al. Study on application of particle counter in in-situ leaching uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(2):132-136(in Chinese).
- [4] 朱鹏,陈建昌,尉小龙,等. 砂岩型铀矿床地浸采铀工艺方法概述[J]. 采矿技术, 2011, 11(4):4-6.
ZHU Peng, CHEN Jianchang, YU Xiaolong, et al. Overview of uranium extraction technology for sandstone type uranium deposit [J]. Mining Technology, 2011, 11(4):4-6(in Chinese).
- [5] 王亚安,苏学斌,张翀,等. 在地浸采铀钻孔中检测潜水泵性能[J]. 铀矿冶, 2022, 41(4):454-458.
WANG Ya'an, SU Xuebin, ZHANG Chong, et al. Performance test of submersible pump in in-situ leaching of uranium mining drillhole [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4):454-458(in Chinese).
- [6] 任华平,李德,贾志远,等. 微孔曝气加氧技术在地浸采铀中的应用[J]. 铀矿冶, 2023, 42(3):29-35.
REN Huaping, LI De, JIA Zhiyuan, et al. Application of micropore aeration oxygenation technique in in-situ leaching uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(3):29-35(in Chinese).
- [7] 权建平,陈宏斌. 新疆某砂岩铀矿床(31~32线)详查地质报告[R]. 咸阳:核工业二〇三研究所, 2013.
- [8] 王海峰. 原地浸出采铀技术[R]. 北京:核工业北京化工冶金研究院, 2021.
- [9] 杜志明,牛学军,苏学斌,等. 内蒙古某铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工业性试验[J]. 铀矿冶, 2013, 32(1):1-4.
- DU Zhiming, NIU Xuejun, SU Xuebin, et al. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching test of one uranium deposit in Inner Mongolia [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1):1-4(in Chinese).
- [10] 苏学斌,韩青涛,谭亚辉,等. 新疆某铀矿床 CO_2 地浸采铀试验研究[J]. 铀矿冶, 2005(3):129-134.
SU Xuebin, HAN Qingtao, TAN Yahui, et al. A experiment of in-situ leaching of uranium with CO_2 at a uranium deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005(3):129-134(in Chinese).
- [11] 苏学斌,王海峰,刘乃忠,等. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 原地采铀工艺[M]. 北京:中国原子能出版社, 2016.
- [12] 王海峰,叶善东. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 原地浸出采铀工程技术[M]. 北京:中国原子能出版社, 2016.
- [13] 姚益轩. 原地浸出采铀井型研究[J]. 铀矿冶, 2000, 19(3):153-160.
YAO Yixuan. Study on well patterns of in-situ leaching for uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(3):153-160(in Chinese).
- [14] 王海峰,郭忠德,包成栋,等. 伊宁铀矿 511 矿床地浸采铀现场试验 [J]. 铀矿冶, 2002, 21(3):113-118.
WANG Haifeng, GUO Zhongde, BAO Chengdong, et al. A field test on in-situ leaching of uranium at No. 511 deposit of Yining uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2002, 21(3):113-118(in Chinese).
- [15] 张青林,张勇,费子琼. 新疆某铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 中性浸出试验研究 [J]. 中国矿业, 2012, 21(S1):435-438.
ZHANG Qinglin, ZHANG Yong, FEI Ziqiong. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ neutral in-situ leaching test of a uranium mineral deposit in Xinjiang [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1):435-438(in Chinese).
- [16] 马新林. 原地浸出采铀的科学试验与技术应用[J]. 铀矿冶, 2000, 19(3):145-152.
MA Xinlin. Scientific experiments and technological application of in-situ leaching for uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(3):145-152(in Chinese).

