

某古河道型地浸铀矿后期生产问题及开采建议

李建东,高 涵,田德强,徐 喆

(中广核铀业发展有限公司,北京 100029)

摘要: 哈萨克斯坦某古河道砂岩型铀矿浸出液铀质量浓度下降至 15~20 mg/L,部分开采单元回收率达不到设计要求,钻孔超期服役率超过 50%,严重制约矿山经济效益及可持续运营。针对上述问题,提出并实施了技术改进措施:在酸化期引入氧化剂,以加快达到铀浓度峰值并延长高铀浓度持续时间;建立钻井全生命周期质量管理体系,提高钻井使用寿命;实施超前勘探工程,新增控制级及探明级资源量;对回收率低的单元或存在多层矿体的单元进行二次开发。研究表明,所采取的强化浸出措施行之有效,可显著提升资源利用率,降低单位生产成本,延长矿山服役年限,从而保障矿山的经济可行性与可持续发展。

关键词: 地浸采铀;资源枯竭;渗透系数;残余矿体;超前勘探;强化浸出

中图分类号: TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0098-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.05.02

地浸采铀工艺具有开采品位低、无需矿石破碎和磨矿工序、不产生地表尾矿且经济效益显著等优势,是目前成本最低且环境友好的采矿方法^[1-7]。哈萨克斯坦可地浸铀矿山是其天然铀的主要来源^[8],位于北哈萨克斯坦某古河道的地浸砂岩型铀矿(简称谢矿山)是 2008 年由中国广核集团有限公司与哈萨克斯坦原子能工业公司(简称哈原工)合作开发的矿山之一,2009 年投产,2012 年达到设计产能(500 t/a)。经过 16 年的开采,该铀矿已进入资源开发后期。目前,矿区面临的主要问题有:1)C1 级资源已基本枯竭;2)远离主矿体的 3、4、5、6 号矿体勘查级别低,C2 级资源占比较大;3)矿区面临 C2 级资源及残余矿体分布零散、渗透性较差($K < 0.5$ m/d)及局部底板缺失等复杂地质和水文地质问题。在以往的矿山开采过程中,仅对与 C1 级毗邻的 C2 级资源和经过加密勘探升级到 C1 级的资源进行了开采。目前,矿山缺乏大范围开采 C2 级资源的经验。因此,有效开采剩余资源并提高资源回收率成为当前面临的主要问题。

1 矿床概况

1.1 矿床地质条件

该铀矿床赋存于古河道中,河道东西延伸

40 km,宽度为 1.5~8.0 km(图 1)^[9]。该铀矿床基底是奥陶-泥盆纪花岗岩;含矿层分为上谢米兹拜伊和下谢米兹拜伊 2 个亚层,其中 83% 铀资源量集中在下谢米兹拜伊亚层中。下谢米兹拜伊矿层厚 15~60 m,埋藏深度约 25~100 m,渗透系数 0.5~2 m/d;顶板由粉砂岩及泥质粉岩组成,大部分矿层缺失底板。

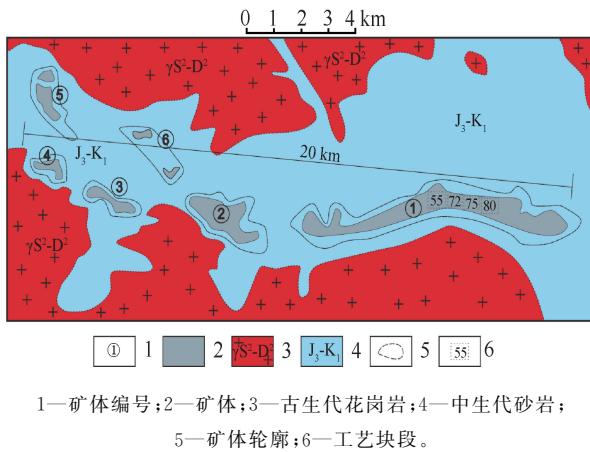


图 1 某古河道型矿床主矿体平面分布图

Fig. 1 Plan view of the main ore body of a paleo-river type deposit

1.2 矿床水文地质条件

根据岩性-地层学特征及含水层赋存条件,在

本区矿体赋存构造范围内划分含水层及含水层组;主要由松散的砂、粉砂及黏土质沉积物组成上第四系及现代冲洪积-湖相冲洪积沉积物含水层组;由粉砂岩及局部泥岩组成姚林沃尔始新统含水层;由细-中粒砂岩及泥质砂岩组成波库尔下-上白垩统含水层;由泥岩、粉砂岩及局部砂岩组成第一谢米兹拜上侏罗统-下白垩统含水层组(矿体上覆含水层);由砂岩、粉砂岩夹薄层泥岩组成第二上谢米兹拜上侏罗统-下白垩统含水层(上含矿

层);由致密砂岩、粉砂岩组成下谢米兹拜上侏罗统-下白垩统含水层组(下含矿层);由基底结晶岩系(片麻岩、花岗岩等)组成结晶基底岩石裂隙-孔隙裂隙水含水层组(矿体下伏含水层)^[10]。

上含矿层分布广,含水岩性为砂、砂岩和粉砂岩,具有厚度稳定的区域泥岩隔水顶板;下含矿层全区分布,岩性为砂岩、砾岩和结晶基底泥质、风化壳上部碎石,无稳定隔水底板。水文地质特征见表 1。

表 1 某古河道型矿床上、下含矿含水岩组水文地质特征

Table 1 Hydrogeological characteristics of the upper and lower ore-bearing aquifer formations of a paleo-river type deposit

岩性参数	盆地西北部		盆地西部		盆地东部	
	上含矿层	下含矿层	上含矿层	下含矿层	上含矿层	下含矿层
顶板埋深/m	13.1~25.6	34.0~54.3	6.0~23.5	44.2~62.0	33.8~82.4	75.6~138
底板埋深/m		58.9~84.0	31.6~50.0	64.6~91.0	50.8~110	115~183
水位埋深/m	2.6~4.5	0.7~5.7	2.6~14.4	2.5~16.0	1.7~9.1	12.4~14.9
厚度/m	1.0~12.2	22.5~38.5	25.6~53.2	20.4~36.8	16.6~37.2	14.4~72.0
顶板水头/m	0~3.6	28.3~50.3	19.1	36.8~69.5	25.1~80.6	69.5~137
钻孔流量/(m ³ /d)	14.0~125	141.6~648	1.7~254	123~734		119~199
水位降深/m		11.1~30.0		9.4~25.2		5.4~46.3
渗透系数/(m/d)	0.1~6.0	1.3~10.0	0.1~6.0	1.3~10.0	0.1~6.0	1.3~10.0
导水系数/(m ² /d)		12		26~28		41~49
矿化度/(g/L)	1.6~3.9	1.0~2.0	0.7~1.7	1.0~2.0	3.8~4.5	1.4~4.7
pH	6.9~7.1	7.0~7.9	7.0~7.9	7.5~8.2	7.0~7.9	7.1~7.7
水化学类型	Cl·HCO ₃ ·SO ₄ ⁻ Na·Mg	Cl·SO ₄ ⁻ Na·Mg	Cl-Na Cl·SO ₄ -Na	Cl-Na Cl·SO ₄ -Na	Cl-Na	Cl-Na

某古河道型矿体下方缺失稳定的隔水层,矿体渗透性低,而矿体上覆和下伏围岩层具有相对较高的渗透性。约 50%的铀资源集中在下谢米兹层的中上部的中-细粒砂岩中,矿石主要呈“悬垂”状。对 1 439 个砂岩原状样做渗透性测试,渗透系数为 1.5 m/d;对 14 个抽出井做渗透性试验,渗透系数为 1.7 m/d。其他层(粗砂及砾岩层)渗透系数为 2.88~3.51 m/d。总体上,水文地质条件适宜于采用地浸工艺开采。

1.3 矿床资源状况

哈萨克斯坦国家矿产储量委员会 2005 年确认了苏联国家储量委员会 1989 年批准的储量,并计入国家储量平衡表(表 2)中,确认铀储量为 17 416.4 t,平均品位为 0.055%。20 世纪 80 年代已开采 308 t,目前保有储量为 17 108 t。

2019 年,基于先前的勘查孔数据,考虑了层间氧化的主导作用、地下水运动方向、伽马测井数据和矿层渗透性,以及平面和剖面上的矿化位置和形状,确定了古层间氧化带尖灭边界,在亚层内确定了不同的矿化等值线;去掉单孔或少于 3 个孔控制的 C2 级单元和相邻剖面只有一个孔的情况,沃尔可夫钻探公司对谢矿山储量的计算结果为 12 880 t^[11]。

经过多年开采实践验证,该矿床在空间展布上呈现以下特征:1)平面展布特征。矿体形态复杂,地质单元和工艺开拓单元形态吻合度较低;矿化面积较前期勘探明显减少;矿体厚度和铀品位变化幅度大,地质单元内普遍存在“天窗”式无矿区域。2)剖面分布特征。矿体呈多层分布,以小型透镜体(透镜体面积≥400 m²)结构为主;缺乏

典型的地球化学控矿边界及与之相关的“卷头”构造特征^[12]。3) 矿石特性。砂岩呈灰色, 无灰黄色分界线; 若不使用氧化剂四价铀很难溶解^[13-14]; 地层中铁主要以 Fe^{2+} 形式存在。

表2 铀储量评估对比

Table 2 Comparison of uranium reserve evaluations

矿体编号		铀储量/t		
		1989 年国家 储量委确认 的储量	2021 年 1 月 1 日 重新评估的 储量	储量增减 (+/-) 变化/%
①	C1+C2	10 493	8 560	-18.4
②	C1+C2	4 362	2 859	-34.5
③	C1+C2	582	306	-47.4
④	C1+C2	514	254	-50.6
⑤	C1+C2	1 169	752	-35.7
⑥	C1+C2	296	159	-46.3
总计	C1+C2	17 416	12 880	-26.0

2 矿床开采方法

2.1 地浸开采浸出过程

该矿床采用酸法地浸工艺进行开采, 浸出剂为硫酸。2012 年前, ②号矿体采用 7 点型(井距 25 m)布井方式。但该矿体形态变化大, 对于条带状分布的矿体采用行列式布井方式, 钻孔布置相对灵活, 在矿体边缘布置万能孔或采用单排列式井型, 可适当减少钻井间距, 减少溶浸死角, 提高资源回收率。2012 年后, 所有矿体均采用行列式井型, 井间距为 20 m(注液井)×30 m(抽液井)×25 m(抽注液井间), 钻井采用填砾式结构^[15], 套管为 PVC 材质, 采用潜水泵提升浸出液, 潜水泵下入深度约 60 m(静水位 15 m), 见图 2。

酸化方式可采用直接酸化和超前酸化, 浸出剂酸度一般从 5 g/L 逐步提高到 25 g/L。为加快投产速度, 一般采用超前酸化, 超前酸化法可分为以下阶段: 酸度 5~7 g/L 的酸化液注入期为 3 d; 酸度 10~12 g/L 的酸化液注入期为 3 d; 酸度 15~17 g/L 的酸化液注入期 3 d; 酸度 20~25 g/L 的酸化液注入期长短取决于酸化前锋线达到时间和酸化体积, 当酸化前锋到达钻井间距一半处或矿岩量酸化体积已达 1/2 时停止。超前酸化后, 再用酸度 5~7 g/L 的吸附尾液将抽出井近

过滤器带的溶液挤出, 3 d 后, 进入地浸采铀正常抽注生产。生产过程中, 根据浸出液分析结果调整配酸浓度。

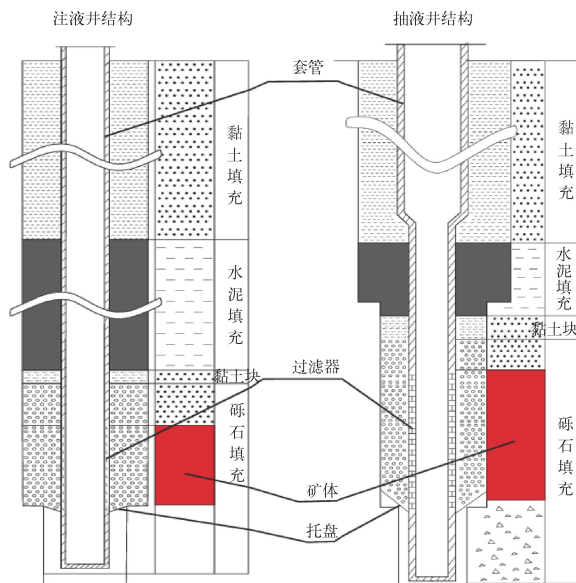


图2 抽出井与注入井结构

Fig. 2 Structure of extraction and injection wells

根据矿物成分及浸出液化学成分分析, 浸出液铀质量浓度上升较慢、浸出周期长、酸耗和动能消耗较高, 因此浸出时须加入氧化剂。当酸化期加入氧化剂时, 可显著提高浸出液铀质量浓度, 加快浸出周期, 减少硫酸消耗。将以滴灌形式从孔口加入氧化剂(双氧水)改为直接从酸化站管道加入氧化剂, 取得了较好的效果。55 号采区开拓储量 53.2 t, 采区面积 10 007 m², 平米铀量 4.98 kg/m², 是由 13 个抽液井和 30 个注液井组成的行列式型抽注单元。酸化期加入氧化剂的参数变化见图 3。可以看出, 当加入氧化剂后, 浸出液铀质量浓度上升快, 峰值过后铀质量浓度继续保持高位运行; 在酸化期, 双氧水加入量为 1.5 g/L; 在浸出期, 双氧水加入量逐渐减少至 0.5 g/L。

2.2 洗井工艺

抽注井工作一段时间后, 易出现物理和化学堵塞, 每天由专人进行洗井处理。目前, 洗井方式主要为空压机洗井和化学洗井, 其中化学洗井有 2 种方式: 直接用管道注入 200 g/L 硫酸, 12 h 后抽出溶液输送到水冶厂; 用氟化氢铵洗井^[16-18], 该法明显提高了洗井效果。

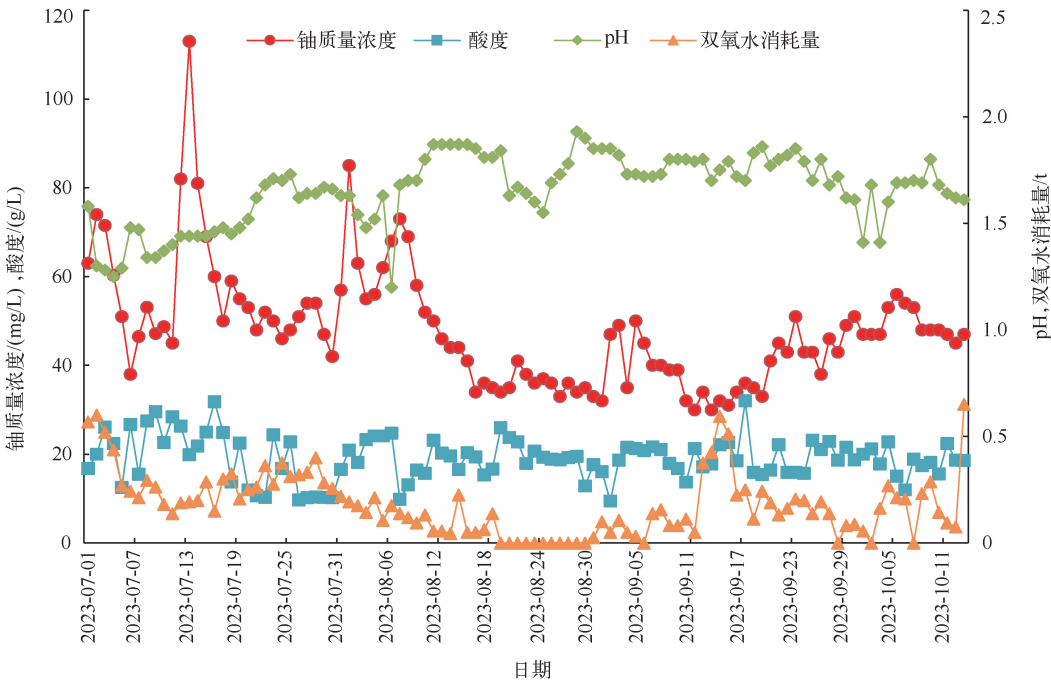


图 3 酸化期加入氧化剂的参数变化

Fig. 3 Parameter changes with oxidant addition during the acidification stage

3 开采中存在的问题

3.1 资源量

目前,该矿山共开拓了 63 个地质单元(C1 级 33 个、C2 级 30 个),其中②号矿体开拓了 22 个地质单元,计划开拓储量 3 678.9 t,实际开拓储量 2 578.2 t;①号矿体开拓了 41 地质单元,计划开拓储量 8 117.4 t,实际开拓储量 5 945.9 t(表 3~表 4)^[19]。可以看出,开拓储量较地质储量减少了约 30%,可能是由矿体面积的变化导致

的。根据 2007—2024 年开采经验,由于矿体形态复杂,实际情况与地质单元基本不重合。

3.2 回收率

②号矿体开拓了 17 个地质单元,9 个地质单元位于下谢米兹含矿层,8 个地质单元位于上谢米兹含矿层。而生产中共建造了 27 个工艺单元,其中 15 个工艺单元回收率达到 85%,12 个工艺单元回收率未达到 85%,设计的开拓储量还有 464 tU 未被回收。②号矿体目前已停止抽注。

表 3 ②号矿体实际开拓储量与地质储量对比

Table 3 Comparison of actual developed reserves and geological reserves in orebody No. 2

地质单元		计划		实际		绝对偏差		相对偏差		面积比
		面积/km ²	储量/t	面积/km ²	储量/t	面积/km ²	储量/t	面积/%	储量/%	
下谢米兹层	C1	0.734 2	3 180.6	0.540 9	2 246.5	-0.193 3	-934.1	-26.3	-29.4	0.74
	C2	0.059 2	173.8	0.027 9	112.4	-0.031 3	-61.4	-52.9	-35.3	0.47
	C1+C2	0.793 4	3 354.4	0.568 8	2 358.9	-0.224 6	-995.5	-28.3	-29.7	0.72
上谢米兹层	C1	0.068 8	180.0	0.036 4	93.0	-0.032 4	-87.0	-47.0	-48.3	0.53
	C2	0.069 2	144.5	0.052 0	126.3	-0.017 2	-18.3	-24.9	-12.6	0.75
	C1+C2	0.138 0	324.5	0.088 4	219.3	-0.049 6	-105.3	-35.9	-32.4	0.64
②号矿体										
C1+C2		0.931 4	3 678.9	0.657 2	2 578.2	-0.274 2	-1 100.8	-29.4	-29.9	0.71

表 4 ①号矿体实际开拓储量与地质储量对比

Table 4 Comparison of actual developed reserves and geological reserves in orebody No. 1

地质单元		计划		实际		绝对偏差		相对偏差		面积比 (实际:计划)
		面积/km ²	储量/t	面积/km ²	储量/t	面积/km ²	储量/t	面积差/%	储量差/%	
下谢米兹矿层	C1	1.766 4	7 017.0	1.215 3	5 148.4	-0.551 1	-1 869.0	-31.2	-26.6	0.69
	C2	0.018 4	30.6	0.010 5	23.8	-0.007 9	-6.9	-42.9	-22.4	0.57
	C1+C2	1.784 8	7 047.6	1.225 8	5 172.2	-0.559 0	-1 875.9	-31.3	-26.6	0.69
上谢米兹矿层	C1	0.263 7	589.8	0.137 7	384.6	-0.126 0	-205.2	-47.8	-34.8	0.52
	C2	0.207 7	480.0	0.150 5	389.1	-0.057 1	-90.9	-27.5	-18.9	0.72
	C1+C2	0.471 4	1 069.8	0.288 3	773.7	-0.183 1	-296.1	-38.9	-27.7	0.61
①号矿体 C1+C2		2.256 2	8 117.4	1.5140	5 945.9	-0.742 1	-2 171.5	-32.9	-26.8	0.67

①号矿体开拓了 40 个地质单元,其中 18 个地质单元位于下谢米兹含矿层,22 个地质单元位于上谢米兹含矿层。而生产中共建造了 82 个工艺单元,有 47 个工艺单元回收率达到 85%,35 个工艺单元回收率未达到 85%,其中生产 3 年以上的单元占比 45%。这些钻井仍在继续工作,总体回收率还会提高。

①号矿体 77 号采区已开采了 8 年,超出了钻孔服务年限。该采区参数变化见图 4。77 号采区液固体积质量比(简称液固比)达 10.39:1,铀回收率为 69.6%。目前,该采区已停止工作,并计划用中子测井确认剩余铀储量,分析回收率低的原因,必要时进行二次开发。

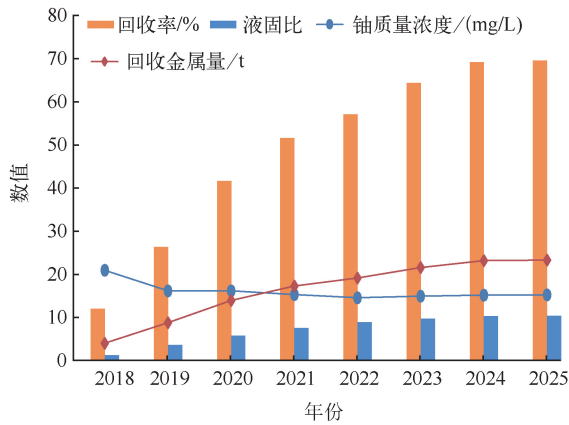


图 4 77 号采区参数变化趋势
Fig. 4 Parameter variation trend in mining area 77

3.3 浸出液铀质量浓度

在矿山地浸开采过程中,多个采区或单元的铀质量浓度未达到设计要求。①号矿体 75

号采区参数变化见图 5。可以看出,铀质量浓度始终在 15 mg/L 左右,持续时间较长。生产中液固比较低,可能是由注液量小导致的。由于 75 号采区剖面上存在多层矿,浸出剂可能窜层流失导致浸出效果差,且采区未采用中子测井进行铀资源量的确定,目前该采区已停止了抽注工作。

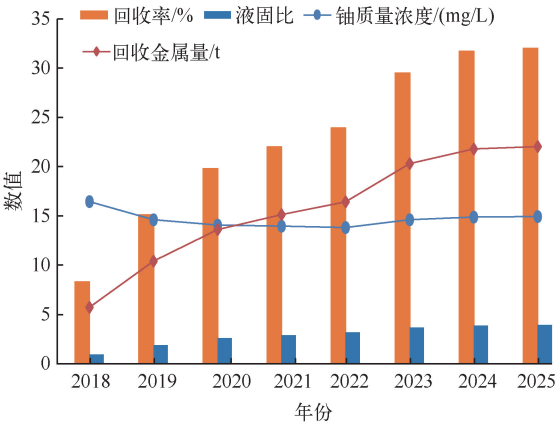


图 5 75 号采区参数变化趋势
Fig. 5 Parameter variation trend in mining area 75

①号矿体 80 号采区参数变化见图 6。可以看出,5 年内,大部分单元的铀回收率达到 85%,铀质量浓度从峰值逐步下降到 10 mg/L,液固比约 5:1;在 2~3 年内,极少数单元的铀回收率达到 85%,液固比约 3:1。在这种情况下,通过增加酸度来提高浸出液铀质量浓度,效果不明显,且会增大单位成本。井场中大部分采区与 80 号采区情况类似。

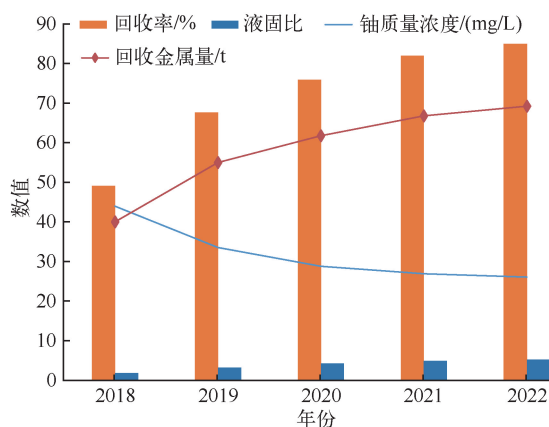


图 6 80 号采区参数变化趋势

Fig. 6 Parameter variation trend in mining area 80

3.4 生产中耗酸

多年的生产实践发现,酸化和浸出酸耗约为 170 kg/kgU,酸耗较高。在实际浸出中,碳酸盐并不是影响酸耗的主要因素,酸耗高的主要原因是矿体“悬垂”在上部且局部底板缺失,浸出剂在矿层中的有效滞留时间缩短,从而造成浸出剂稀释扩散,降低了溶浸效率^[20]。图 7 为①号矿体 72 号工艺单元剖面图,该单元下层矿体底板缺失,含矿含水层厚度大,浸出剂在运移过程中稀释严重。尽管部分单元的米百分数较高,且注液量达到了设计值;但浸出液铀质量浓度及 pH 长时间达不到设计值。

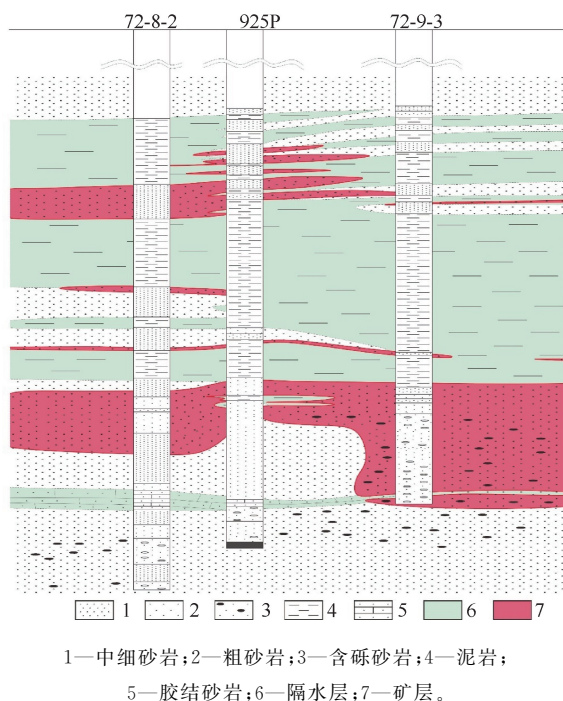


图 7 72 号工艺单元剖面图

Fig. 7 Cross-section of process block 72

在浸出过程中,当 pH 为 1.3 时,浸出液铀质量浓度最高、持续时间长;降低 pH 可有效提高浸出液铀质量浓度,但树脂吸附能力下降。长时间高酸度浸出,使围岩中无定形二氧化硅部分溶解,用氟化氢铵洗井增加了二氧化硅在浸出液中溶解的风险,易导致树脂硅中毒,进一步降低树脂吸附容量。因此,必须兼顾井场和水冶厂工艺参数,得到最佳的配酸浓度。

3.5 钻孔超期服役

目前,矿山共开采了 120 个工艺单元,有 54 个工艺单元的铀回收率达到 85%。按照钻井的设计要求,其服务年限一般为 3~5 a。当一个采区或单元退役后,新开拓的采区或单元接续工作,形成良性循环。目前,已有超过 50% 钻井在超期服役,钻井超期服役的原因是浸出液铀质量浓度未达到设计值,在规定的时间内资源回收率未达到要求。在这种情况下,提升潜水泵的抽液量,导致动能消耗大、成本高;若旧单元不能及时退役,工艺管线过长,跑、冒、滴、漏事故频发,会增加井场人员的工作压力。

4 后期开采建议

1) 超前勘探。根据生产实际情况,在①、②号矿体区域进行施工勘探,取得了良好效果。对这种古河道类型分散的透镜状小矿体,原 50 m × 50 m 的勘探网度难以精准控制矿形态。按优先级进行分类勘探,①、②号矿体近两年新增控制级资源量近 700 t。建议对③~⑥号矿体进行加密勘探。

2) 提高年保障系数。鉴于开拓①、②号矿体历史资料数据及实际情况,拟将③~⑥号矿体列入开采计划;调整开采合同,把产能降低 25%~30%,保障生产稳定性。

3) 建立钻孔质量保障体系。实践证明,当采区的资源回收率达到 85% 时,约 50% 钻井都已超期服役。钻井质量是影响资源回收率的主要因素,在成井前,对涌水量低、测井发现有瑕疵的钻井不予验收;生产期间对有异常的钻井应及时上报、做维修处理,不能使用的钻井应重新施工;对于渗透性低、相对变化较大的铀矿床要合理确定钻井间距^[21]。

4) 构建坚固、有效的输液管路。在浸出方面,酸化站采用大管径 PE 管线代替小管径金属管

线,保证高浓度硫酸溶液输送。采取必要措施,减少冬季因极寒天气导致硫酸在管道内结垢,从而保证正常生产。引进先进的洗井工艺,增加钻井抽注液量。

5)二次开发。因多层矿地带导向孔未能有效延伸到下层矿体或延伸轨迹缺乏规律,导致难以

准确计算铀储量,并可能造成部分资源量无法被可靠评估。因此,有必要在回收率低的旧开采单元施工检查井,进行中子测井确定残余铀量,确定具体层位并补充工艺钻井进行二次开发。2024年开拓的13个单元共计414 t资源中有3个单元已实施二次开发(表5),占当年开拓储量的19%。

表 5 2024 年开拓的二次开发单元参数
Table 5 Parameters for the 2024 secondary development exploration block

矿体	开拓单元编号	开拓储量/t	岩矿量/t	计划			实际		
				抽出井	注入井	总计	抽出井	注入井	总计
①	85a	20.0	143.0	9	16	25	15	20	35
①	84a	25.0	197.0	14	23	37	17	19	36
②	45a	35.2	269.0	13	18	31	21	21	42

5 结论

1)矿山进入开采后期,剩余资源利用难度增加,储量的不确定性增大,生产规划和经济效益面临挑战。矿体形态复杂,分布零散,部分区域底板缺失且渗透性较低,浸出剂易稀释,导致铀质量浓度较低,浸出周期延长,影响整体回收率。对于这种古河道型铀矿床,以100 m×50 m的勘探网度确定C1级资源量有待商榷。

2)优化钻孔布局与浸出工艺可提升回收率,采用行列式井型、万能井布置方式,并适当缩小钻井间距,有助于提高浸出剂的利用率,减少溶浸死角,增加资源回收率。

3)严格监管钻井施工质量,加强钻井维护,延长钻井工作时间,能够有效降低长期运行成本。

4)结合中子测井技术评估采区的剩余铀储量,并对具备经济价值的区域进行二次开发;同时,继续勘探区内有潜力区域,提高资源控制程度,从而有效延长矿山服务年限,维持矿山的经济可持续发展。

参考文献:

[1] 王海峰.原地浸出采铀技术与实践[M].北京:原子能出版社,1998:1-5.

[2] 张学礼,徐乐昌.地浸采铀地下水污染防治措施探讨[J].中国人口·资源与环境,2015(S2):360-364.

ZHANG Xueli, XU Lechang. Discussion on the groundwater pollution prevention and control of in-situ leaching of uranium[J]. China Population, Re-

sources and Environment, 2015(S2):360-364.

[3] 张喆安,彭智婷,白云龙,等.物理信息神经网络在地下水铀迁移对流-弥散方程中的应用[J].铀矿冶,2025,44(2):29-37.

ZHANG Zhe'an, PENG Zhiting, BAI Yunlong, et al. Application of physics-informed neural networks in solving the advection-diffusion equation of uranium migration in groundwater [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2):29-37.

[4] 翁海成,原渊,刘正邦,等.“CO₂+O₂”地浸开采过程中矿物溶解沉淀模拟研究[J].铀矿冶,2025,44(2):60-70.

WENG Haicheng, YUAN Yuan, LIU Zhengbang, et al. Simulation study on mineral dissolution and precipitation during the “CO₂+O₂” in-situ leaching process[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2):60-70.

[5] 贾志远,任华平,师振峰,等.新疆某砂岩型铀矿中性浸出试验研究[J].铀矿冶,2025,44(2):71-77.

JIA Zhiyuan, REN Huaping, SHI Zhenfeng, et al. Experimental study on neutral leaching of a sandstone-type uranium deposit in Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2):71-77.

[6] 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.

[7] 杨少武,原渊,阮志龙,等.中性地浸采铀水冶工艺

- 淋洗剂的优化[J]. 铀矿冶, 2023, 42(3): 41-45.
- YANG Shaowu, YUAN Yuan, RUAN Zhilong, et al. Optimization of leaching agent for metallurgy process of neutral in-situ leaching uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(3): 41-45.
- [8] 原渊, 李建东, 史红霞, 等. 哈萨克斯坦地浸采铀生产现状与进展[J]. 中国矿业, 2014, 23(11): 149-151.
- YUAN Yuan, LI Jiandong, SHI Hongxia, et al. Introduction to the status and development of in-situ leaching mines in Kazakhstan[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(11): 149-151.
- [9] ШИРЯЕ В А и др. Промышленная добыча урана методом ПСВ с 2012 по 2032 года месторождении Семизбай, Горно-геологическая часть[R]. Товарищество с ограниченной ответственностью «пв-5», 2012(3): 24-30.
- [10] 李建东, 张峰, 窦金龙, 等. 哈萨克斯坦某矿床酸法地浸采铀井场工艺技术探讨[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷): 铀矿冶分卷. 2017: 89-90.
- [11] АУБАКИРОВ Т О и др. отчёт по пересчёту запасов урана по месторождению Семизбай по состоянию на 22. 12. 2021 [R]. Министерство экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 2021: 5-35.
- [12] 王海峰, 李建东, 原渊, 等. 水成砂岩型铀矿床非铀矿物及对浸出铀的影响[J]. 铀矿冶, 2013, 32(1): 5-9.
- WANG Haifeng, LI Jiandong, YUAN Yuan, et al. Non-uranium minerals of aqueous sandstone uranium deposit and their influences to leaching [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1): 5-9.
- [13] 苏学斌, 王海峰, 刘乃忠. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 原地浸出采铀工艺[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016: 5-12.
- [14] 王海峰, 阙为民, 钟平汝, 等. 原地浸出采铀技术与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1998: 51-89.
- [15] 汤庆四, 邢拥国, 沈红伟, 等. 填砾式钻孔结构在地浸采铀现场试验中的应用[J]. 铀矿冶, 2004, 23(3): 125-129.
- TANG Qingsi, XING Yongguo, SHEN Hongwei, et al. Application of gravel-filled hole structure in the field test of in-situ leach uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23(3): 125-129.
- [16] Башилова Е С Отчёт о применении бифторида аммония для химической обработки скважин[R]. Товарищество с ограниченной ответственностью «Семизбай-У», 2015: 1-5.
- [17] 李建东, 张峰, 原渊. 氟化氢铵洗孔工艺及其在谢米兹拜伊铀矿床的应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(10): 128-132.
- LI Jiandong, ZHANG Feng, YUAN Yuan. The application of a chemical well-flushing process with ammonium hydrogen fluoride in Semizbay uranium deposit[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(10): 128-132.
- [18] 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): 174-179.
- SU Xuebing. Methods for improving flow rate of well of insitu leaching in low permeable uranium deposits [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(4): 174-179.
- [19] Цой Б В и др. Технический отчёт по месторождению Семизбай за 2009—2025 [R]. Товарищество С ограниченной Ответственностью «Семизбай-У», 2009-2025: 1-10.
- [20] 李建东, 张峰, 原渊, 等. 哈萨克斯坦某铀矿床地浸采铀现场试验研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 133-138.
- LI Jiandong, ZHANG Feng, YUAN Yuan, et al. Field test research on in-situ leaching of uranium from a uranium deposit in Kazakhstan [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(10): 133-138.
- [21] 汤庆四, 李建东, 陈梅芳, 等. 钱家店矿床分散低品位铀资源地浸工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 75-80.
- TANG Qingsi, LI Jiandong, CHEN Meifang, et al. Study on in-situ leaching technology of dispersed low-grade uranium resources in Qianjiadian deposit [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8): 75-80.

