

原地浸出采铀钻井集成洗井装置的设计与应用

王春霞, 段柏山, 陈立, 秦淦, 王旨儒, 徐丽文

(中核新疆矿业有限公司, 新疆 伊宁 835000)

摘要: 地浸采铀钻井一般通过洗井实现解堵增渗, 但该方法存在洗井作业频率高、操作繁琐等问题。为克服现有洗井技术的局限性, 本研究根据各种洗井方法的工作原理, 基于集成技术理念, 设计了一套集成洗井装置, 将高压空气洗井、风活塞洗井、水活塞洗井、高压水旋转喷射洗井、高压水钻进洗井和化学洗井等洗井技术集成于一套多功能管柱, 并将其搭载于拖车钻机。该装置可在不提出管柱的情况下, 在井内实现各种洗井方法的自由切换。试验结果表明, 使用该集成洗井装置后, 钻井出水量平均提高 153.4%, 有效提升了洗井效率与适应性, 为解决复杂水文地质条件下的洗井难题提供了可行方案。

关键词: 地浸采铀; 集成洗井装置; 多功能管柱; 洗井; 解堵; 增渗技术; 洗井效率

中图分类号: TL212; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0044-10

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.11.09

原地浸出采铀是中国铀矿开采的主要工艺之一。然而, 中国砂岩型铀矿床渗透性普遍偏低^[1-2], 导致钻井抽注液能力偏小。经过多年的技术实践与改进, 地浸采铀工艺已实现了规模化工业生产。随着地浸开采年限的延长, 抽注液量下降、注水压力升高等问题逐渐显现, 已成为制约持续生产的技术瓶颈。目前, 洗井是恢复或提升地浸采铀钻井抽注液能力的主要方法^[3-6]。常用的洗井方法有物理洗井和化学洗井。其中, 物理洗井包括空压机洗井、活塞洗井(机械活塞、气活塞)、高压射流洗井、泡沫洗井、空化射流洗井、超声波洗井、旋转射流冲砂洗井等; 化学洗井一般利用酸与含水层(段)孔(裂)隙内及井内的碳酸岩屑、岩块、含钙质成分的杂质发生反应, 生成可溶性盐类、气体, 或利用化学溶液溶解、破坏泥浆对井壁岩石的吸附能力, 从而疏通渗水通道^[7-18]。

据统计, 2021 年新疆某地浸采铀钻井洗井约 3 500 井次, 其中有效洗井时间仅占 41.9%, 而洗井设备搬运、安装、更换洗井方式等辅助作业时间占比高达 58.1%。洗井后水量提升幅度(f , 水量提升倍数)变化较大, 其中: $0.5 \leq f < 1$ 占 42.72%; $1 \leq f < 2$ 占 25.24%; $2 \leq f < 3$ 占 10.68%; $3 \leq f < 5$ 占 12.62%; $5 \leq f < 7$ 占 6.80%; $f \geq 10$ 占 1.94%。水量增幅较大的钻井

初始水量均较小($0.2 \sim 0.4 \text{ m}^3/\text{h}$); 73.6% 的钻井洗井后水量维持时间不足 40 d。洗井作业可在一定程度上缓解堵塞, 但重复作业量较多, 且作业过程繁琐、成本高; 此外部分生产井的堵塞机理复杂, 采用常规单一洗井技术时处理效果不理想。

为降低洗井重复率, 提高系统效率, 本研究在传统洗井方法基础上, 提出了一种适用于地浸矿山的集成洗井工艺。通过优化整合各类洗井技术, 构建了系统化的洗井工艺体系, 并配套研发了集成洗井装置, 旨在提高洗井作业的效率与工况适应性。

1 洗井装置设计

1.1 技术特点

系统集成洗井装置的总体设计满足大深度、高承压地浸工艺钻井等复杂工况的要求。该装置将高压空气洗井、风活塞洗井、水活塞洗井、高压水旋转喷射洗井、化学洗井等洗井技术搭载在同一套管柱上, 在不提出管柱的情况下, 各种洗井方法在井内可实现自由切换, 从而提高洗井效率。其外形尺寸满足现有钻井套管内径要求, 通过密封装置将压力传递至井下 50 m 处, 不仅有效保护井口装置、降低其受损频率, 并将能量(压力)集中于目的层位, 减少了能量耗散。该密封装置可

收稿日期: 2025-11-30; 修回日期: 2026-04-28

通信作者: 陈立

以承受 3.5 MPa 以上压力。

1.2 总体结构

一套管柱(图 1)上搭载了气液换向封隔器、活塞旋喷洗井器,实现了气活塞洗井、活塞洗井、水力旋转喷射洗井、活塞喷射联动洗井、回转钻进清理沉砂、空气旋转喷射洗井、化学洗井的综合应用。活塞旋喷洗井器(图 2)由旁通阀、径向喷射钻头、合金水嘴等构成。

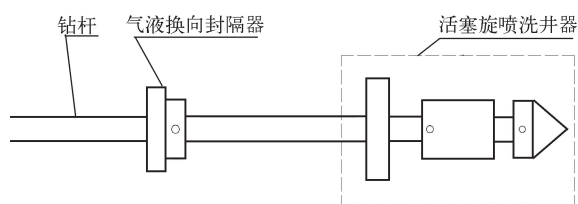


图 1 管柱组装设计示意图

Fig. 1 Assembly design diagram of pipe string

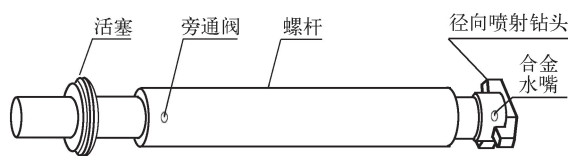


图 2 活塞旋喷洗井器

Fig. 2 Piston-type rotary jet well cleaner

气液换向封隔器安装在井内静水位上方约 50 m 处,通过旋转管柱可实现气、水活塞工况切换。工作时,阀芯动作关闭垂向水路、打开径向气路,同时密封套膨胀封闭环空,为高压气提供密闭空间。它能控制高压气在环空内积聚升压,推动水柱压入地层,再快速泄压排气,使地层水回流至井内;依靠反复气压变化形成活塞效应,高效完成气活塞洗井作业。根据井径大小,气液换向封隔器可分为抽液井用和注液井用两种类型,见图 3~图 4。

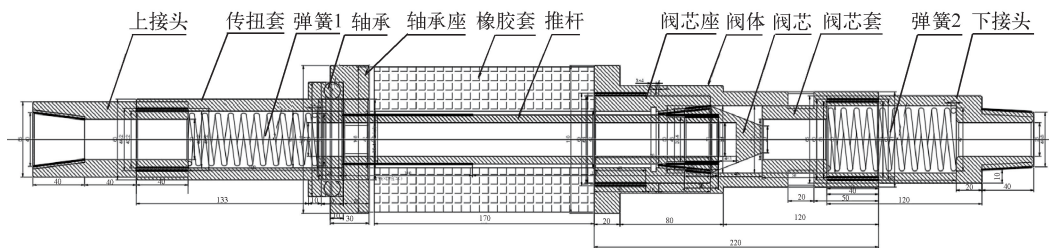


图 3 气液换向封隔器(抽液井)

Fig. 3 Gas-liquid switching packer(pumping well)

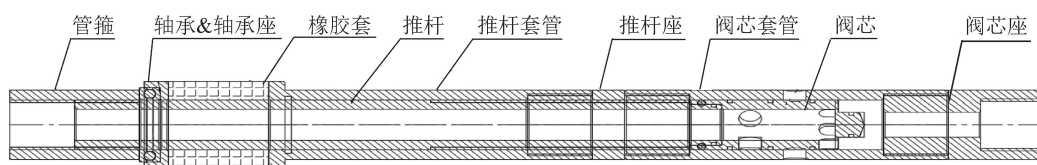


图 4 气液换向封隔器(注液井)

Fig. 4 Gas-liquid switching packer(injection well)

1.2.1 气活塞洗井

气活塞洗井是通过安装在井内管柱上的气液换向封隔器实现的,其工作原理见图 5。该封隔器通常位于井内静水位上方约 50 m 处。洗井时,顺时针缓慢旋转管柱,使气液换向封隔器内部的阀芯向下移动,进而关闭垂向水路并打开径向气路。同时,封隔器的压盘下压,促使橡胶密封套径向膨胀,从而封闭封隔器与井壁之间的环形空间。然后,在地表切换至供气模式,向管柱内注入

高压气体。高压气沿管柱下行至气液换向封隔器后,通过其径向阀孔进入封隔器与静水位之间的环空区域。随着气体不断积聚,环空内气压逐渐升高,推动井内水柱向下移动,并经由过滤器进入地层。当环空气压达到预设值时,打开排气阀,使环空内的高压气体迅速通过封隔器的径向阀孔返回管柱,并沿管柱上行排出地表。此时环空气压迅速下降,地层水在水头压力作用下快速经过滤器回流至井内。反复进行上述操作,即可实现空

气活塞洗井。整个过程可实现地表高压气体的自动切换与气压设定。

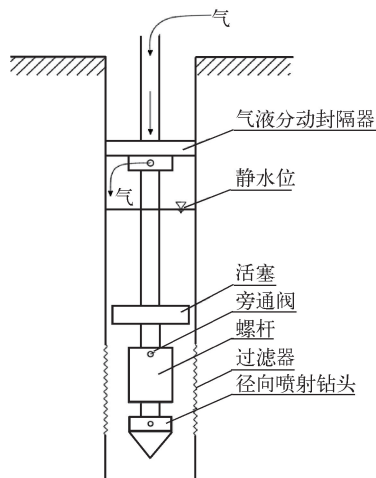


图5 气活塞洗井

Fig. 5 Pneumatic piston well washing

气液换向封隔器,设计密封套径向自由膨胀直径130 mm,最大密封压力为4 MPa。气活塞憋气压计算公式: $P=0.1+H/10$,式中: P —压强,MPa; H —静水位,m;0.1—大气压,MPa。

1.2.2 活塞+水力旋转喷射洗井

通过安装在井内管柱最下端的径向喷射钻头、钻头上方的螺杆和螺杆上方的活塞实现活塞洗井和水力旋转喷射洗井,即用螺杆使喷射钻头旋转,实现径向喷射,其工作原理见图6。

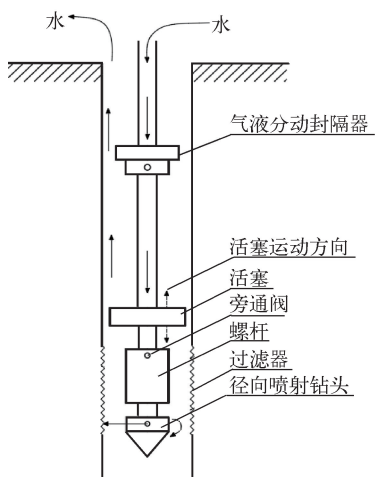


图6 活塞+水力旋转喷射洗井

Fig. 6 Piston and hydraulic rotary jet well washing

在水力旋转喷射洗井时,通过地面水泵输送

高压水,经井内管柱向下驱动螺杆转动;螺杆带动喷射钻头旋转,并径向喷射高压水束,冲射过滤器进行洗井,洗下的浊水经管柱外环空流至井外。在活塞洗井时,用卷扬机牵引井内管柱上下往复运行,即带动安装在井内管柱螺杆上方的活塞上下往复运动实现干活塞洗井。

若采用地面水泵(流量小于1.26 L/s)输送高压水,管柱内下行的水从螺杆顶部的旁通阀流出,不进入螺杆(螺杆不转动),此时用卷扬机牵引井内管柱上下往复运动,可实现单一的水活塞洗井。若采用地面水泵(流量大于1.26 L/s)输送高压水,并用卷扬机牵引井内管柱上下往复运动,则实现活塞+水力旋转喷射联动洗井。

1.2.3 回转钻进洗井

当井内沉砂较厚(覆盖过滤器)时,可通过清水回转钻进洗井法高效清理沉砂,其工作原理见图7。径向喷射钻头为三翼刮刀PDC复合片钻头,可通过螺杆(井下动力钻具)回转驱动钻头向下钻进,将沉砂掀起洗出井外。冲洗液可用清水、盐水、聚丙烯酰胺水溶液。

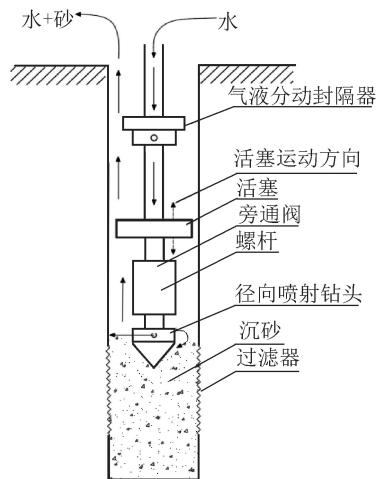


图7 回转钻进洗井

Fig. 7 Rotary sand cleaning and well washing

1.2.4 高压空气旋转喷射洗井

在地面切换气路,以井内管柱为风管,通过管柱内下行的高压空气驱动螺杆旋转,进行空气旋转喷射洗井。若通过卷扬机牵引井内管柱上下往复运动,可进一步实现高压空气旋转喷射+活塞联动洗井。

1.2.5 化学洗井

采用井下专用管柱+螺杆钻具+侧向喷射钻

头一体化作业装置,实现洗井药剂的精准投放。作业过程中,通过地面高压泵将化学洗井剂(如土酸体系洗井液)经井下管柱持续泵入,高压流体进入螺杆钻具后,驱动钻具转子高速旋转,进而带动底端侧向喷射钻头同步转动,使化学洗井剂以径向旋转射流形式喷出,同步在过滤器段缓慢上下活动管柱,实现全段均匀喷淋洗井。

相较于传统井口直接加注药剂的化学洗井方式,该工艺实现了药剂的精准定量输送,可避免井口加药时药剂被井筒水柱稀释,保证了药剂高浓度作用;同时以动态旋转喷淋替代静态浸泡,强化固液接触与化学溶蚀效果,可快速疏通过滤器及周边堵塞通道。洗井剂泵注完成后,切换三通,泵入定量清水,顶替管柱及地面管线中的残留药剂至过滤器段,可提升药剂利用率。

2 集成洗井装置地表调试

2.1 气液换向封隔器调试

将气液换向封隔器组装好后,测量密封胶套外径(膨胀本底数)、气液换向器密封套上下压盘间距离(行程本底数);测量并记录气液换向封隔器旋进距离(即气液换向封隔器推杆向下行程)、橡胶密封套径向膨胀外径;将气液封隔器放置在套管内,测量并记录不同推杆向下行程时其密封性及击穿压力(通过测漏水和摩擦拉力)。所选密封胶套自然外径 114 mm,密封胶套环空面积 0.002 3 m²。调试数据见表 1。

表 1 气液换向封隔器调试数据
Table 1 Commissioning data for gas-liquid directional packers

推杆向下 行程/mm	胶套膨胀 外径/mm	侧漏水 情况	摩擦 拉力/kg
5	114.4	漏	0
10	115.5	漏	0
15	119.2	漏	0
20	121.0	漏	0
25	122.5	漏	0
30	124.3	漏	0
35	126.2	不漏	3
40	127.8	不漏	31
45	129.7	不漏	90

在气液换向封隔器推杆行程为 45 mm 时,密封胶套击穿压强为^{[19]29-38}

$$P = \frac{f}{A} = \frac{90 \times 9.8}{0.0023} = 3.84 \text{ MPa},$$

式中: P —压强,MPa; f —摩擦力,N; A —密封胶套环空面积,m²。

2.2 水力旋转喷射器调试

2.2.1 调试方法

将直径 60 mm 螺杆与旋转喷射钻头连接,并将直径 60 mm 螺杆的上端通过高压管与 NBB390 泥浆泵连接。在管路装设水表,测试泵压、泵量、喷射钻头回转速度,计算射流速度、射流冲力。

射流速度计算公式为^{[20]20-23}

$$v = \frac{Q}{3A},$$

式中: v —射流速度,m/s; Q —泵量,m³/s; A —喷射钻头水眼面积,m²。

根据压强公式推导射流冲力计算公式为

$$P_f = \frac{mv}{A},$$

式中: P_f —射流冲力,N; m —每秒射出水的质量,kg,可由 $m = \rho \cdot Q$ 计算(ρ 取 1 000 kg/m³); v —射流速度,m/s。

2.2.2 调试试验数据

所选喷射钻头为三翼片 PDC 侧向水眼钻头,共有 3 个直径 6 mm 的水眼,总面积为 8.5×10^{-5} m²;螺杆型号为 5LZ60 × 7.0V,额定排量为 1.3 ~ 3.2 L/s,额定压力为 4 MPa,额定转速为 140 ~ 344 r/min,额定功率为 16 kW。测试数据在螺杆额定工作参数内选择,试验数据见表 2。

表 2 水力旋转喷射器调试数据
Table 2 Test data for hydraulic rotary jet device

泵量/ (m ³ /s)	泵压/ MPa	钻头转速/ (r/min)	射流速度/ (m/s)	射流冲力/ MPa
80	0.5	145	15.7	0.25
100	1.2	189	19.6	0.38
150	1.7	230	29.4	0.86
200	2.5	274	39.2	1.54
250	3.5	302	49.0	2.40
300	4.2	344	58.8	3.46

2.2.3 参数选择

矿区内矿层砂岩抗压强度一般在 4 MPa 左右,在岩层及管材能够承受的范围内,选择更大的射流冲击压强对过滤器及矿层水流产生更大的扰动,以实现更好的疏通增渗效果。因此,选择喷射钻头的射流冲力在 1 ~ 3 MPa。试验参数:泵量 200 ~ 300 L/min,泵压 2.5 ~ 4.5 MPa,射流速度

40~60 m/s。水力旋转喷射现场试验现象见图 8。

A —井管截面积, cm^2 。计算结果, 见表 4。



图 8 水力旋转喷射现场试验

Fig. 8 Field test of hydraulic rotary jet

2.3 活塞调试

将安装好的活塞放在 152 井管模型内调节, 活塞为橡胶舌状圆活塞, 活塞自由外径 120 mm; 通过调节活塞压紧板紧度, 使活塞舌缘外径增大, 压紧可调外径 120~122 mm; 环空间隙 2.2~3.2 mm(表 3)。根据活塞与套管间隙和卷扬机单绳速率计算活塞产生的压力。

卷扬最大速度 0.687~5.023 m/s, 活塞水激动压强为^{[21]79-83}

$$P = \frac{SvT\rho g}{A}$$

式中: S —活塞面积, cm^2 ; v —卷扬速度, m/s ; T —活塞运行周期所用时间(活塞上下往复 1 次为 1 个周期), s ; ρ —水的密度, g/cm^3 ; g —重力加速度, m/s^2 ;

表 3 活塞调试试验数据

Table 3 Piston debugging test data

压紧行程/mm	活塞舌外径/mm	环空间隙/mm
0	120.0	3.2
2	120.5	2.9
4	121.0	2.7
6	121.5	2.5
8	122.0	2.2

表 4 活塞激动压计算参数

Table 4 Piston exciting pressure calculation parameter

卷扬单绳速/ (m/s)	活塞舌外径/ mm	环空间隙/ mm	活塞激动 压强/MPa
0.687	120.0	3.2	0.043
1.165	120.5	2.9	0.123
2.043	121.0	2.7	0.378
3.266	121.5	2.5	0.965
5.023	122.0	2.2	2.282

根据表 4 的活塞激动压参数, 在 14#-2 采区进行洗井试验。当洗井前后水量提升率超过 30% 时, 视为有明显效果。不同钻井的洗井效果对比见表 5。

表 5 不同活塞激动压洗井效果统计

Table 5 Statistics of well flushing results for different piston excitation pressures

井号	洗井前水量/(m^3/h)	活塞激动压强/MPa	洗井后水量/(m^3/h)	水量提升率/%	效果
3223	2.00	0.043	2.20	10.00	不明显
		0.123	2.51	25.50	不明显
		0.378	3.22	61.00	明显
		0.965	4.40	120.00	明显
		2.282	5.50	175.00	明显
3221	1.10	0.043	1.24	12.73	不明显
		0.123	1.33	20.91	不明显
		0.378	1.64	49.09	明显
		0.965	2.11	91.82	明显
		2.282	2.50	127.27	明显
2819	1.50	0.043	1.65	10.00	不明显
		0.123	1.84	22.67	不明显
		0.378	2.03	35.33	明显
		0.965	2.52	68.00	明显
		2.282	3.70	146.67	明显

由表 5 可知,在活塞激动压强为 0.043、0.123 MPa 时,对洗井的扰动过小,洗井效果不明显;当活塞激动压强大于 0.3 MPa 后,洗井效果明显。

3 集成洗井装置现场应用

3.1 14#-2 采区现场应用

14#-2 采区矿体平均埋深 180 m, 水位埋深

平均 165 m, 承压水头平均约 10 m, 含矿含水层渗透系数大于 1.5 m/d, 属低承压、高渗透矿床。采区平面布置见图 9。成井后, 采用常规洗井方法(如空压机、活塞等)进行洗井, 解堵增渗效果差。相比之下, 集成洗井技术通过多种方法的协同与切换, 表现出显著的技术优势与应用效果。

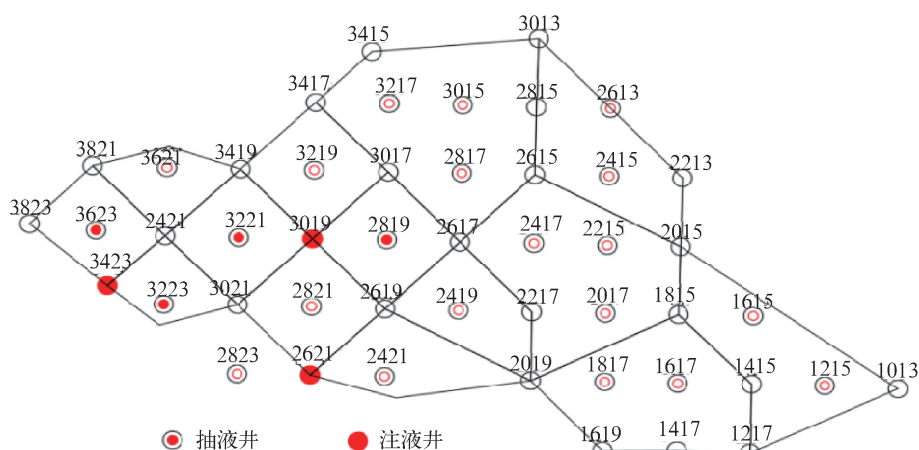


图 9 采区平面布置图

Fig. 9 Mine area layout plan

3221 钻井抽液量在 $1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,且出现断流现象,采用压气活塞+旋喷洗井组合清洗后,抽液量稳定在 $2.5\sim 2.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (图 10),清洗过程中出现了大量泥浆水。

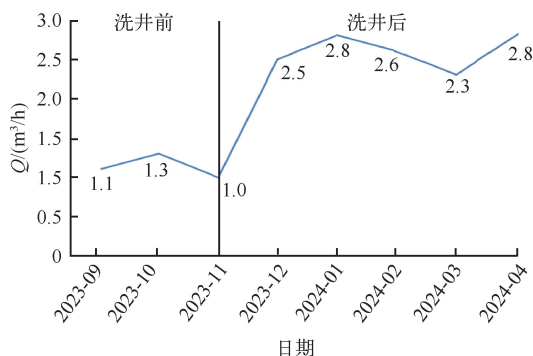


图 10 3221 钻井清洗前后水量变化

Fig. 10 Changes of water flow before and after drilling washing of well 3221

3423 钻井采用螺杆钻具+高压旋转喷射+水活塞进行清洗后,注液量由 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (图 11),清洗过程出现大量泥浆水及粉砂。

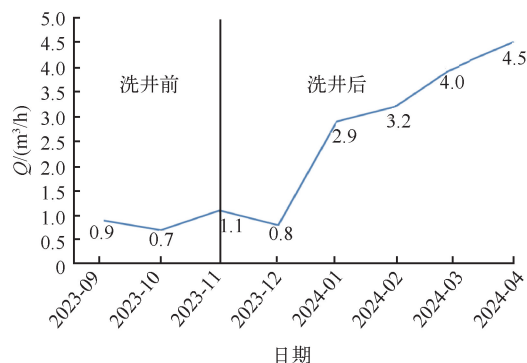


图 11 3423 钻井清洗前后水量变化

**Fig. 11 Changes of water flow before and after drilling
washing of well 3423**

3623 钻井清洗前抽液量为 $0.5 \sim 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 且出现断流现象, 采用螺杆钻具 + 高压旋转喷射 + 水活塞进行清洗后, 抽液量稳定在 $1.4 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 随着水位提升该井抽液量稳定在 $3.5 \sim 4.3 \text{ m}^3/\text{h}$ (图 12)。清洗过程中出现了大量泥浆水, 含砂量最高达 $1\,300 \text{ mg/L}$, 清洗 24 h 后含砂量小于 100 mg/L 。

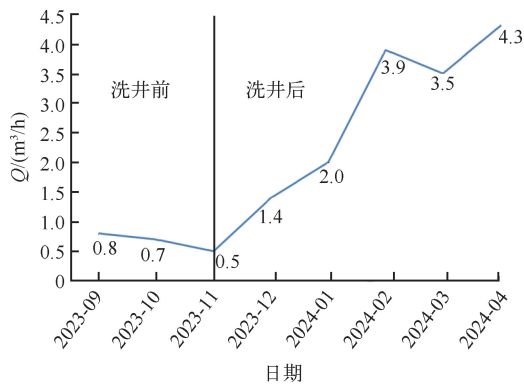


图 12 3623 钻井清洗前后水量变化

Fig. 12 Changes of water flow before and after drilling washing of well 3623

2621 钻井出现断流($0.5\sim1.0\text{ m}^3/\text{h}$),采用螺杆钻具+高压旋转喷射+水活塞进行清洗。活塞清洗 8 次,每次清洗约需要 $1.0\sim1.5\text{ h}$,每次清洗时间间隔 $10\sim30\text{ min}$ 。经过 5 次清洗后,出水含砂量从 $1\,500\sim2\,000\text{ mg/L}$ 降低至 $100\sim200\text{ mg/L}$;第 6~8 次清洗约 5 min 后,含砂量降至 100 mg/L ;钻井水量由 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 慢慢上升至 $4.0\text{ m}^3/\text{h}$,目前在 $5.0\text{ m}^3/\text{h}$ 左右稳定运行(图 13)。

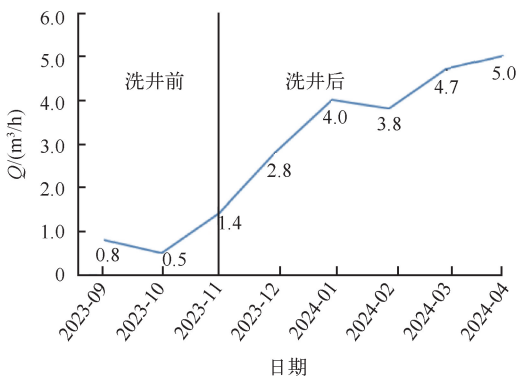


图 13 2621 钻井清洗前后水量变化

Fig. 13 Changes of water flow before and after drilling washing of well 2621

3019 注液钻井初始水量为 $1.7\text{ m}^3/\text{h}$,使用 1 个月后注液量下降严重,甚至注液困难。期间采用压气活塞+空压机、化学试剂+压气活塞+空压机、绳索活塞+水活塞洗井都没有得到明显改善;然后采用螺杆钻具+高压旋转喷射+水活塞清洗后,出现大量泥浆水和细粉砂,清洗后注液量最高达 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ (图 14)。

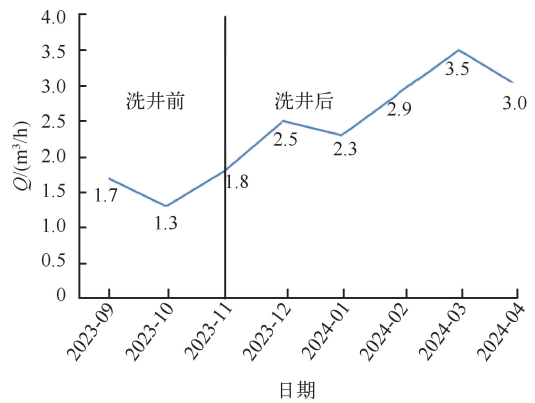


图 14 3019 钻井清洗前后水量变化

Fig. 14 Changes of water flow before and after drilling washing of well 3019

2819 钻井刚投入运行时,抽液量在 $2.5\sim3.4\text{ m}^3/\text{h}$ 范围内,运行 20 d 后抽液量下降。采用压气活塞+空压机、化学试剂+压气活塞+空压机洗井工艺进行洗井后,该现象均未得到明显改善;采用绳索活塞+水活塞进行洗井后,未见返水。为此,采用螺杆钻具+高压旋转喷射+水活塞进行洗井,清洗出大量细粉砂及黑色泥浆水,清洗后抽液量稳定在 $4.9\sim5.8\text{ m}^3/\text{h}$ (图 15)。

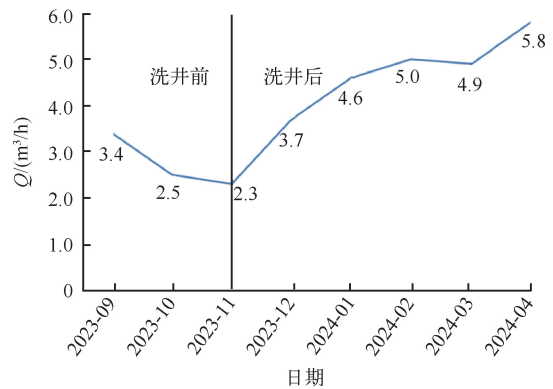


图 15 2819 钻井清洗前后水量变化曲线

Fig. 15 Changes of water flow before and after drilling washing of well 2819

3223 钻井洗前水量 $0.6\sim1.0\text{ m}^3/\text{h}$,采用绳索活塞+水活塞进行洗井,清洗过程中一直没有出现泥浆水,未达到洗井目的;然后采用螺杆钻具+高压旋转喷射+水活塞进行清洗,抽液量由 $1.0\text{ m}^3/\text{h}$ 逐渐提高至 $5.0\text{ m}^3/\text{h}$,洗井后随着地下水位的抬升,目前稳定运行水量平均为 $5.5\text{ m}^3/\text{h}$ (图 16)。

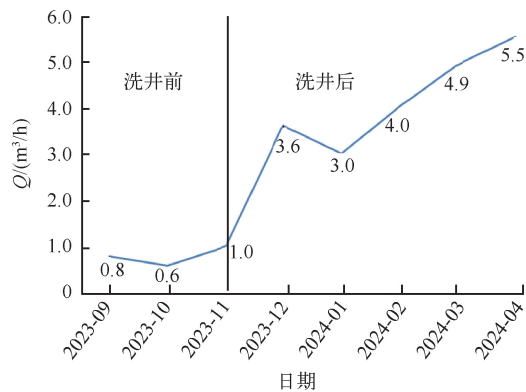


图16 3223 钻井清洗前后水量变化

Fig. 16 Changes of water flow before and after drilling washing of well 3223

在14#-2采区,采用压气活塞、化学、空压机及绳索活塞等单一洗井作业效果差的试验钻井,在采用集成洗井后均取得了明显效果,见表6。

表6 14#-2采区钻井集成洗井前后流量统计

Table 6 Flow statistics of drilling integration in mining area 14#-2 before and after well washing

井号	初始流量/ (m ³ /h)	洗井前最低 流量/(m ³ /h)	集成洗井后 流量/(m ³ /h)	洗井后4个月 维持流量/ (m ³ /h)
3221	1.2	1.1	2.8	2.5
3423	0.9	0.8	4.5	2.9
3623	0.8	0.8	3.9	1.4
2621	0.8	0.5	4.5	2.8
3019	1.7	0.4	3.5	2.5
2819	3.4	1.5	5.5	3.7
3223	0.8	0.5	5.0	3.6

洗井过程中出现大量泥浆水,部分钻井洗井水含砂量达1 500 mg/L。集成洗井后的平均流量较初始平均流量提升了153.4%。基于2021年洗井数据,73.6%钻井采用单一方式洗井后,水量维持时间不足40 d;对比试验钻井,采用集成洗井后,4个月流量仍维持稳定,维持时间提高1.5倍以上。

集成洗井时,单井井下作业有效作业时间一般8~12 h,洗井安装等准备工作时间约5 h,井下工作有效时间由41.9%(2021年统计的洗井数据)提高至65.0%。

3.2 11#采区现场应用

11#采区0207、0208、0209钻井由于堵塞、涌

砂等原因,停用后沉砂堆积已覆盖过滤器,平均沉砂高度约30 m(表7)。采用化学洗井+空压机、压气活塞洗井+空压机洗井均未将沉砂清洗干净,而采用螺杆钻具+高压旋转喷射钻头(回转清砂洗井)进行处理后,井内沉砂已基本清除。

表7 集成洗井处理钻井信息

Table 7 Drilling information of integrated well flushing treatment

井号	孔深/m	过滤器 位置/m	沉砂 埋深/m	处理后沉砂 埋深/m
0207	425.5	415.5~421.5	386.5	425.0
0208	431.0	421.0~427.0	395.0	431.0
0209	435.5	424.5~431.5	393.5	435.2

4 经济效益评价

1)集成洗井工艺的单井有效作业时间一般为8~12 h,在井内可实现活塞洗井、化学洗井、旋转喷射洗井、回转清砂洗井等洗井方法的自由切换,避免了重复运转洗井设备,提高了洗井效率。现有洗井作业通常由3人组成一个小组,每组每日可完成1口井的洗井任务。以搬运、重复提下管耗时、人工费用计算,采用集成洗井,单井洗井可节约成本600~800元;按年洗井频次1 000次计算,全年可节约成本60~80万元。

2)回转清砂洗井可将 h_1 (沉砂+淤泥埋深)小于 h_2 (过滤器埋深)30 m以上的失效钻井完全清理并恢复生产,节约重新施工单井成本达20~35万元。目前,已处理11#采区3口井(0207、0208、0209井),节约钻井成本60万元以上。

3)部分钻井采用单一洗井作业效果差,在采用集成洗井后都取得了明显效果。以14#-2采区试验钻井为例,洗井后水量提升153.4%,维持时间提高1.5倍以上。水量提升改善了采区溶浸效果,提高了产量,缩短了浸采周期,降低了成本,产生的隐形效益可达百万元以上。

5 结论

针对复杂钻井中单一洗井方式需多次提下管、效率低下且操作繁琐的弊端,自主研制了集成洗井装置。该装置显著提升了作业效能:井下有

效工作时间由 41.9% 提升至 65.0%, 洗井后水量平均提升 153.4%, 维持时间提高 1.5 倍以上。实践证明, 该装置不仅能在洗井过程中有效排出大量泥浆水, 更从根本上解决了沉砂封堵过滤器的技术难题, 克服了单一洗井方式效果不佳的局限性。集成洗井方式具有显著的技术优势与推广应用价值, 为复杂钻井条件下高效、稳定的洗井作业提供了可靠方案。

参考文献:

- [1] 梁渲钰. 低渗透砂岩型铀矿储层爆破增渗渗透率演化机理研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2025.
- [2] 原渊, 邓锦勋, 常京涛, 等. 某低渗透铀矿床矿石微观特征分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第六卷): 中国核学会 2019 年学术年会论文集: 第 2 册, 2019: 216-220.
- [3] 王海峰, 李建东, 刘正邦, 等. 中国地浸采铀钻孔施工与成井技术研究进展[J]. 铀矿冶, 2022, 41(3): 195-201.
Wang Haifeng, LI Jiandong, Liu Zhengbang, et al. Research progress of borehole drilling and well completion technology for in-situ leaching uranium in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3): 195-201.
- [4] 毛鑫磊, 杨小宁, 滕飞. 某地浸采铀矿山洗井工艺安全环保优化[J]. 铀矿冶, 2025, 44(3): 131-135.
Mao Xinlei, Yang Xiaoning, Teng Fei. Optimization of safety and environmental protection of well washing process in an in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(3): 131-135.
- [5] 姚益轩, 王亚安, 胥国龙, 等. 地浸采铀注液井小直径潜水泵抽水洗井试验[J]. 铀矿冶, 2024, 43(1): 27-35.
Yao Yixuan, Wang Ya'an, Xu Guolong, et al. Well washing test of small diameter submersible pump in injection wells for in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(1): 27-35.
- [6] 王亚安, 李星浩, 姚益轩, 等. "CO₂ + O₂" 地浸采铀含矿层防堵技术研究[J]. 铀矿冶, 2024, 43(3): 17-24.
Wang Ya'an, Li Xinghao, Yao Yixuan, et al. Preventing blocking technology of ore-bearing layers in "CO₂ + O₂" in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3): 17-24.
- [7] 易志刚, 李勇, 哈杰提, 等. 超声波洗井在地浸采铀生产过程中的解堵应用研究[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(1): 139-147.
- [8] Yi Zhigang, Li Yong, Ha Jieti, et al. Study on the application of ultrasonic well washing in the process of in-situ leaching uranium production[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1): 139-147.
- [9] 王曉燕, 安永会, 邵新民, 等. 封隔震荡洗井新技术在水文地质勘查中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 30-33.
Wang Xiaoyan, An Yonghui, Shao Xinmin, et al. Application of the new technology of well-flushing with parker to hydrogeological exploration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 30-33.
- [10] 毛鑫磊. 地浸采铀矿山洗井废水除砂装置的研制与应用[J]. 铀矿冶, 2024, 43(2): 80-83.
Mao Xinlei. Development and application of a sand removal device for well washing wastewater in in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2): 80-83.
- [11] 刘阳, 周根茂, 刘科, 等. 液流空化技术在地浸采铀工艺中的探索研究[J]. 铀矿冶, 2025, 44(3): 28-34.
Liu Yang, Zhou Genmao, Liu Ke, et al. Exploration and research on cavitation technology of liquid flow in in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(3): 28-34.
- [12] 刘晓奎, 张渤, 闫纪帆, 等. 负压洗井工艺在地浸采铀矿山的应用[J]. 铀矿冶, 2023, 42(3): 46-49.
Liu Xiaokui, Zhang Bo, Yan Jifan, et al. Application of negative pressure well washing technology at in-situ leaching uranium mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(3): 46-49.
- [13] 徐丽文, 曾亮亮, 肖开提·依不拉音, 等. 自动压气活塞洗井在弱承压含水层地浸中的应用[J]. 铀矿冶, 2022, 41(增刊 1): 83-89.
Xu Liwen, Zeng Liangliang, Yibulayin Xiaokaiti, et al. Application of automatic pneumatic piston well washing in a weakly pressure-bearing mining area of a uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(S1): 83-89.

- [14] 赵生祥,张万亮,闫纪帆,等.超声波洗井技术在某地浸采铀矿山的试验[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第七卷):中国核学会2021年学术年会论文集:第1册.2021:301-306.
- [15] 王海峰,叶善东.原地浸出采铀工程技术[M].北京:原子能出版社,2011.
- [16] 曾圣男.砂岩型铀矿地浸开采中的堵塞问题及解决办法[J].有色金属(矿山部分),2022,74(1):5-9.
Zeng Shengnan. The problem of plugging in in-situ leaching of sandstone-type uranium deposit and its solutions[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2022,74(1):5-9.
- [17] 王海峰.原地浸出采铀技术与实践[M].北京:原子能出版社,1998.
- [18] 谢敏,许建国,张凤,等.新型水力喷射解堵技术在吉林油田的应用[J].石油机械,2010,38(9):63-64.
- [19] 人民教育出版社课程教材研究所.物理:八年级下册[M].北京:人民教育出版社,2012:29-38.
- [20] 龙天渝,蔡增基.流体力学[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2019:20-23.
- [21] 王绍符,张喜荣.从静液压强的形成解读阿基米德原理和帕斯卡定律[J].物理通报,2011,40(10):79-83.
Wang Shaofu, Zhang Xirong. Interpretation of Archimedes' principle and Pascal's law from the formation of hydrostatic pressure[J]. Physical Bulletin, 2011,40(10):79-83.

Design and Application of Integrated Well Washing Device for In-situ Leaching Uranium Mining

WANG Chunxia, DUAN Baishan, CHEN Li, QIN Gan, WANG Zhiru, XU Liwen
(CNNC Xinjiang Mining Co., Ltd., Yining 835000, China)

Abstract: In the production process of in-situ leaching of uranium, with the increase of leaching years, the pumping capacity of the wells will be accompanied by the decline, and well washing, plugging removal and permeability enhancement have become normal operations. But the well washing frequency is high, efficiency is low, and operation is complicated. In view of the limitations of well washing, this research, based on the working principles of various well washing methods and the concept of integrated technology, designed an integrated well washing device. This device integrates various well washing techniques such as high pressure air washing, air piston washing, water piston washing, high pressure water rotary jet washing, high pressure water drilling, and chemical sedimentation washing onto a multi-functional pipe string, and is mounted on a trailer drilling rig. All kinds of washing methods are freely switched in the well, and no pipe string is proposed. The test results show that the average amount of water after well washing is increased by 153.4%, which solves the limitations of the single well washing method, and improves the efficiency and effect of well washing.

Key words: in-situ leaching of uranium; integrated well washing device; multi-functional pipe string; well washing; plugging removal; permeability enhancement; well washing efficiency