负压洗井工艺在地浸采铀矿山的应用

刘晓奎，张 渤，闫纪帆，田志宇，冯小刚，田 爽

（中核通辽铀业有限责任公司，内蒙古 通辽 028000）

摘要：地浸采铀矿山常用的洗井方法存在洗井效果不理想、洗井成本高等问题，采用负压洗井工艺在内蒙古某地浸采铀矿山开展了试验研究。结果表明，封隔器下放深度越大，洗井效果越明显；与压缩空气洗井工艺相比，负压洗井工艺更能提高钻孔瞬时流量，且瞬时流量保持时间更长。

关键词：地浸采铀；负压；洗井工艺；压缩空气

中图分类号：TL212.12 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0046-04

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.02.08

随着能源需求的增加和传统化石燃料的减少，铀矿开采和核能开发受到各国重视[1]。中国的铀矿冶起步于 20 世纪 50 年代，经过核工业人的不断努力，地下开采、露天开采、原地爆破浸出等技术取得了很大进步。地浸采铀矿山已逐步取代常规矿山，成为主要的铀矿来源。

地浸采铀工艺[2]在开采过程中通过注液井注入化学试剂，在注液井使用一段时间后，会出现矿层孔隙堵塞、瞬时流量下降等问题。通过洗井可把过滤器段周围的堵塞物洗掉，疏通进水通道，改善矿层的渗透性，达到提高流量的目的[3]。目前，国内地浸采铀常用的洗井方法主要有压缩空气洗井、活塞洗井、化学洗井和 CO_2 洗井。压缩空气洗井是应用最广泛的洗井方式之一，可有效去除过滤器及套管壁上的泥浆等物理堵塞物，但不能破坏化学堵塞物[4-5]。活塞洗井可将过滤器及沉砂管上的泥沙清洗干净，主要用于成井水泥固化后洗井；活塞洗井强度高，易对套管造成损伤，应用较少。化学洗井工艺可有效溶解矿层化学堵塞物，改善矿层的渗透性，达到提高流量的目的；但其洗井耗时较长，易腐蚀套管和过滤器[6-7]。CO_2 洗井效果较好；但洗井成本较高，对化学堵塞的洗井效果不理想。

负压洗井能在石油开采领域较好地解决油层堵塞问题，显著提高油井产量[8-9]；但该技术在地浸采铀领域的应用较少。笔者以内蒙古某地浸采铀矿山为对象，进行了负压洗井技术试验研究，以期解决地浸采铀过程中出现的矿层堵塞问题，改善矿层渗透性，提高铀产量。

1 负压洗井工艺原理及过程研究

1.1 工艺原理

利用封隔器将目的层与上水层分开，再利用空压机将压缩空气输送至井内。经充气管线进入的压缩空气使封隔器膨胀，进而将水层分开，使封隔器下的水层达到密封状态。压缩空气被传送至封隔器中心管后以高速喷出，造成的水气混合物在井内形成涡流，实现对过滤器段的冲涮，达到疏通堵塞物的目的。由于气水混合物的密度比水小，从而井内污水随着气流一起从井口排出[10-11]。

1.2 工艺方案设计

选取瞬时流量低于 1.5 m^3/h 的注液井作为试验研究对象，采用的封隔器直径 110 mm、膨胀比 1.2、承压 8 MPa，充气管线外径 8 mm、壁厚 2 mm、最大承压 10 MPa，管汇配件、压力表、阀门、接头等的耐压大于 10 MPa。

研究封隔器下放深度分别为井内 150、200、250、300 m 时，密封性能对洗井效果的影响；并在封隔器下放深度为 300 m 时，与传统压缩空气工艺的洗井效果进行对比，采用 2 组空压机并联方式工作，单组空压机风量为 1.7 m^3/h。

收稿日期：2023-02-17

第一作者简介：刘晓奎(1992—)，男，内蒙古赤峰人，硕士，助理工程师，主要从事铀矿地浸科研工作。

1.3　工艺过程介绍

首先将封隔器中心管的侧上端通过风管与空压机连接,并将中小管上端与排水管连接;将充气管线一端与带保压装置的空压机连接,另一端与封隔器的橡胶套环连接;然后通过绞车缓慢将封隔器下入目标井内的目标位置。工作时,先打开 1 台空压机给保压装置供气,当保压装置的压力表示数达到 2.8 MPa 时,停止供压,此时井内封隔器橡胶套环已经完全撑开与井壁密封;然后再打开另外 1 台空压机进行洗井。负压洗井装置见图 1。

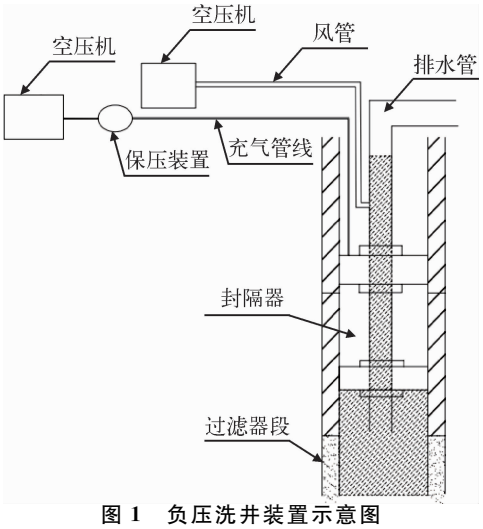


图 1　负压洗井装置示意图

Fig. 1　Diagram of the negative pressure well washing device

2　现场应用效果

2.1　洗井方法对洗井效果的影响

对相同的低流量井分别进行了压缩空气洗井和负压洗井试验,试验结果见表 1。

表 1　压缩空气洗井与负压洗井效果对比

Table 1　Comparison of well washing effect between compressed air and negative pressure

井号	压缩空气洗井时流量/(m^3/h)				负压洗井时流量/(m^3/h)			
	洗井前	第 1 天	第 7 天	第 15 天	洗井前	第 1 天	第 7 天	第 15 天
3-7460	1.02	2.61	2.36	1.96	0.60	4.41	3.66	2.86
3-7359	0.68	2.50	2.00	1.98	0.69	2.25	2.89	1.84
3-6653	0.59	2.11	2.38	1.94	0.75	3.91	2.76	2.68
3-6753	1.11	2.49	1.91	1.83	1.48	2.58	2.44	2.32
2-8070	1.28	3.52	2.04	1.76	0.98	4.13	3.31	3.23
2-7970	1.11	2.40	2.12	1.66	0.42	3.43	2.55	2.48
3-7455	0.79	2.67	2.30	1.60	0.52	3.16	3.03	2.83
2-7868	0.58	2.64	1.45	1.55	0.57	3.21	2.89	1.96
平均值	0.90	2.62	2.07	1.79	0.75	3.38	2.94	2.52

由表 1 可看出,压缩空气洗井后第 1 天的平均瞬时流量较洗井前提升了 1.72 m^3/h,提升率为 191.11%;洗井后第 15 天的平均瞬时流量较洗井前提升了 0.89 m^3/h,提升率为 98.89%,洗井后瞬时流量下降速度较快。负压洗井洗后第 1 天的平均瞬时流量较洗井前提升了 2.63 m^3/h,提升率为 350.67%;洗井后第 15 天平均瞬时流量较洗井前提升了 1.77 m^3/h,提升率为 236.00%。采用负压洗井的效果优于压缩空气洗井。

2.2　封隔器下放深度对洗井效果的影响

封隔器下放深度对洗井效果的影响见表 2。可以得出,当封隔器分别下放至井内 150、200、250、300 m 时,洗井后第 15 天的平均瞬时流量较洗井前分别提升了 1.11、1.62、1.78、1.84 m^3/h;封隔器下放深度为 300 m 的钻井,洗井后的流量提升幅度、维持时间均高于其他下放深度的钻井,洗井效果更明显。随着封隔器下放深度的增加,负压洗井对钻孔矿层段的作用增大,洗井效果更明显。

2.3　封隔器密封性能对洗井效果的影响

洗井过程中,使用加拿大 Solinst 公司生产的地下水水位记录仪(Levelogger)对封隔器上部水位变化进行监测,结果见表 3。

表 2 封隔器下放深度对洗井效果的影响

Table 2 Effect of packer depth on well washing

井号	封隔器下放深度/m	洗井前流量/(m^3/h)	洗井后流量/(m^3/h)			
			第 1 天	第 5 天	第 10 天	第 15 天
2-7566	150	0.58	2.20	2.12	1.78	1.65
6-7263		0.69	2.25	2.82	1.81	1.84
6-7163	200	0.75	2.91	2.85	2.60	2.28
3-6753		0.60	2.58	2.19	2.38	2.32
2-7466	250	0.68	2.78	2.71	2.55	2.27
6-6862		0.52	3.13	2.63	2.56	2.48
3-7357	300	0.61	3.16	2.68	2.54	2.43
3-7054		0.63	2.94	2.82	2.60	2.50

表 3 洗井过程中的水位下降最大深度与洗后效果

Table 3 Maximum depth of water level drop during well washing and washing effect

井号	水位下降/m	洗井前流量/(m^3/h)	洗井后流量/(m^3/h)			
			第 1 天	第 5 天	第 15 天	第 30 天
5-7340	30.16	0.62	1.56	1.26	1.06	0.80
2-7869	0.03	1.26	2.82	2.66	2.42	1.79
5-7341	3.96	1.05	2.91	2.34	1.99	1.72
3-7455	1.29	0.22	2.16	2.36	2.17	1.63
2-7868	0.01	0.37	2.21	2.09	1.88	1.50
5-7137	0.19	0.79	2.75	2.27	2.14	1.95

由表 3 可看出，除 5-7340 洗井后流量提升效果较差外，其他井在洗井后流量提升均比较明显，而且维持时间较长。而只有 5-7340 井在洗井过程中，封隔器上端水位下降大（超过 30 m），封隔器未能完全撑开，未能达到对钻孔下部密封的状态，因此导致洗井效果不明显。

2.4 保压装置对洗井效果的影响

为了保证洗井过程中封隔器完全撑开，以及降低使用过程中对封隔器橡胶套环弹性造成损伤，在洗井过程中采用了保压装置对封隔器的充气管线进行单独供气，保证封隔器的密封性能，保压装置使用前后的洗井效果见图 2。

经多次试验发现，当充气管线的压力示数维持在 2.8 MPa 时，封隔器上层的水位几乎无变化，表明此时封隔器的密封性能较好。故在洗井过程中，使保压装置的压力始终保持在 2.8 MPa 以上，以提高封隔器的密封性能，进而提高洗井效果。采用保压装置和未采用保压装置的钻井在洗井后运行变化情况基本一致，但采用保压装置的钻井洗井后的流量提升始终高于未采用保压装置的钻井（图 2），使用保压装置可以提高洗井效果。

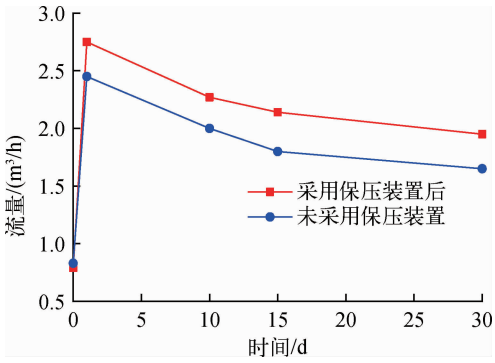


图 2 保压装置使用前后洗井效果对比

Fig. 2 Comparison of well washing effect before and after using pressure retaining device

3 结论

采用负压洗井工艺时，封隔器下放深度越大，洗井效果越明显。负压洗井工艺与压缩空气洗井

工艺相比，洗井后流量提升更明显，而且洗井后瞬时流量能保持较长时间。

参考文献：

[1] 苏学斌，胥建军. 中国铀矿山绿色安全的现状与发展思路[J]. 铀矿冶，2017，36(2)：119-125.

[2] 王海峰. 原地浸出采铀技术与实践[M]. 北京：中国原子能出版社，2002.

[3] 苏学斌，王海峰. 钱家店矿床原地浸出采铀工程与实践[M]. 北京：中国原子能出版社，2017.

[4] 李建东，原渊，利广杰，等. 空化射流洗井方法在地浸采铀中的应用[J]. 铀矿冶，2012，31(2)：70-73.

[5] 曲洪娜，黄中伟，李根生，等. 水平井旋转射流冲砂洗井水力参数设计方法[J]. 石油钻探技术，2011，39(6)：39-43.

[6] 原渊，江国平，邓锦勋，等. 稀盐酸解堵工艺及其在提高注液井流量中的应用[J]. 中国矿业，2020，29(1)：120-122.

[7] 梁大业，胡鹏飞，王晓伟，等. 某地浸铀矿山 NaOH 洗井工艺探索与应用[J]. 有色金属(冶炼部分)，2021(11)：71-74.

[8] 张立新，沈泽俊，李益良，等. 我国封隔器技术的发展与应用[J]. 石油机械，2007(8)：58-60.

[9] 步玉环，马明新，李建华，等. 封隔器的密封性判据及结构设计方法研究[J]. 润滑与密封，2011，36(11)：75-78.

[10] 晏耿成，魏立军，杨会丰. 大压差可洗井封隔器研制与应用[J]. 石油矿场机械，2014，43(1)：69-71.

[11] 申煜亮，吴频，李艳霞，等. 水平井封隔器分段洗井解堵工艺在吐哈油田的应用[J]. 钻采工艺，2011，34(4)：100-102.

Application of Negative Pressure Well Washing Technology at In-situ Leaching Uranium Mines

LIU Xiaokui, ZHANG Bo, YAN Jifan, TIAN Zhiyu, FENG Xiaogang, TIAN Shuang

(Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

Abstract: There are some problems such as unsatisfactory well washing effect and high cost of well washing in the common washing methods of in-situ leaching uranium mines. The negative pressure well washing technology is used to carry out an experimental study in a leaching uranium mine in Inner Mongolia. The results show that the deeper the packer is, the more obvious the washing effect is. Compared with the compressed air washing process, the negative pressure washing process can improve the instantaneous flow rate of the borehole more, and the instantaneous flow retention time is longer.

Key words: in-situ leaching uranium; negative pressure; well washing process; compressed air