

微纳米溶氧技术在地浸采铀中的应用研究

任华平¹, 柯平超², 师振峰¹, 贾志远¹, 李 德¹, 周义朋², 谢希良¹, 张子叶¹

(1. 新疆中核天山铀业有限公司, 新疆 吐鲁番 838000;

2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 新疆某砂岩型铀矿床含矿含水层渗透性差, 钻井运行水量小。采用“CO₂ + O₂”中性浸出工艺时, 氧气加入困难, 矿层中的 U(IV) 氧化效率低, 导致铀资源浸采率低。为解决该问题, 研制了一种高效微纳米加氧装置。研究表明, 该装置可为低渗透、低水量钻井稳定持续加入氧气。在浸出剂补加 NH₄HCO₃ 和 CO₂ 浓度不变的条件下, 与传统单井加氧相比, 采用微纳米加氧时, 浸出液铀浓度提升了 35.95%, 增加了矿层的氧化能力, 氧气单耗降低了 20.16%, 月度浸采率提升了 60.00%。

关键词: 微纳米加氧; 砂岩型铀矿; 中性浸出; “CO₂ + O₂”; 地浸采铀

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0068-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.07.02

地浸采铀是通过化学氧化还原反应实现铀资源原位提取的过程, 其核心是将矿层中不溶于水的 U(IV) 氧化为可溶性的 U(VI), 这一氧化过程依赖于浸出剂中的氧化剂。氧气加入环节是“CO₂ + O₂”地浸采铀过程的关键工序, 直接影响砂岩铀资源的溶浸效率^[1-3]。“CO₂ + O₂”地浸采铀工艺具有效率高、流程短、对环境影响小^[4-5]等优势, 已在中国松辽、鄂尔多斯、伊犁等盆地的铀矿中应用, 其产能达全国天然铀总产能的 63%^[6]。目前, 在国内外“CO₂ + O₂”地浸采铀矿山中, O₂ 加入仍采用传统方式(通过高压氧气管将 O₂ 直接注入注液支管), O₂ 与溶液在管内混合后进入矿层^[7]。该方式存在单井加氧气体析出^[8]、氧气溶解不充分^[9-10]、容易气堵^[11], 及溶液可能回流至加氧管形成难溶结晶等问题, 影响铀的氧化效果。

为此, 根据“CO₂ + O₂”中性浸出工艺加氧现状及存在的问题, 通过优化氧气加入方式, 提升氧气溶解效果及氧气利用率, 进而提高铀资源溶浸效率, 进一步推动中国砂岩型铀矿的高效经济开发。

1 微纳米氧气泡特征

微纳米气泡是指气泡直径小于 100 μm 的气

泡, 这种气泡具有常规气泡所不具备的物理与化学特性。与普通氧气泡相比, 微纳米氧气泡具有比表面积大、上升速度慢、自身解压溶解、表面带电、产生大量自由基、传质效率高、气液溶解度高等特征。

当氧气泡直径大于 100 μm 时, 上升浮力作用显著; 随气泡自发上升, 浮力降低, 内压逐渐降低, 进一步增加了上升浮力, 加速了上升过程, 最终气泡在气液界面破裂; 而介质中的活性氧含量主要决定于平衡态氧气溶解度。当氧气泡直径小于 50 μm 时, 微气泡在水中受到的浮力远远小于自身重力, 在水中上升缓慢, 驻留时间长。由于气泡直径较小, 微气泡受到表面张力的影响, 使气泡内部压力远大于外界液体压力, 从而气泡内部气体受到压缩形成了自增压效应, 此时内部压力不断增大, 促进了气泡内部气体穿过气液界面溶解到液相中。压力的上升会增加气体的溶解度, 伴随着比表面积的增加, 气泡缩小速度越来越快, 最终溶解到水中^[12]。

在气液界面上, 氧气泡一般带负电; 这是由于气液界面较易吸附 H⁺ 和 OH⁻, 一般情况下 H⁺ 比 OH⁻ 更容易从气液界面上脱附, 进而使气泡带负电荷^[13-16]。带负电荷的气泡表面倾向于吸附溶液中高价反电荷离子, 进而构成稳定的双电层

结构。当大量微气泡在溶液中体积不断缩小时,狭小的气泡界面上的电荷离子会快速浓缩聚集,导致双电层结构的电位显著增大。在微气泡破裂瞬间,富集在界面上的高浓度离子释放出大量化学能,产生大量活性氧,可显著提高介质氧化能力,实现矿物的高效氧化浸出。

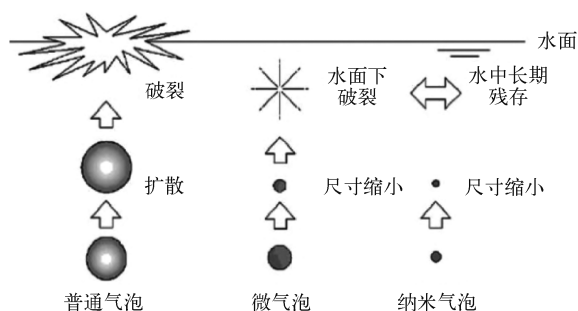


图 1 不同气泡上升过程状态变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the state change during the ascent of different bubbles

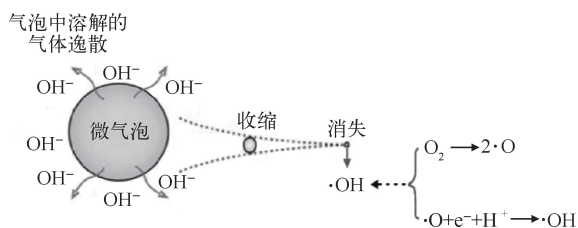


图 2 微纳米气泡形成自由基过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the process of free radical formation by micro-nano bubbles

2 高效微纳米混氧原理及特征研究

目前,尚未发现适宜于“CO₂+O₂”地浸采铀工艺微纳米加氧的气泡发生器,笔者采用虹吸原理机械破碎方式研究微纳米气泡的生成方法,首先通过高速水流作用将氧气吸入,实现气液充分混合;然后在高速旋转的叶轮切割或者喷射撞击作用下,将气泡打碎至微纳米尺寸,实现微纳米气泡发生。

2.1 虹吸机械法混氧原理

微纳米发生器混氧装置见图 3。其工作原理:水流通过渐缩式喷嘴进入吸入室,由于喷嘴半径逐渐缩小,根据伯努利方程(式 1)^[17],随着喷嘴半径缩小,压力增大,喷射速度加快;水流在喷嘴末端高速喷出,进入吸入室,形成负压,致使气体通过

吸气管吸入,在吸入室实现气液混合后,通过喉管段进一步加速喷出至扩散段;在虹吸管道泵的作用下,气水溶液进一步均匀混合后进入安装不规则形状挡板的混氧储罐,在撞击力作用下被打碎为微纳米气泡;最后通过增压管道泵进入浸出下注液管,逐步将气液混合物输送至含铀矿层。

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g d = c, \quad (1)$$

式中: p 为进水压力,MPa; v 为水的流速,m/s; ρ 为水的密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; d 为管道直径,m。

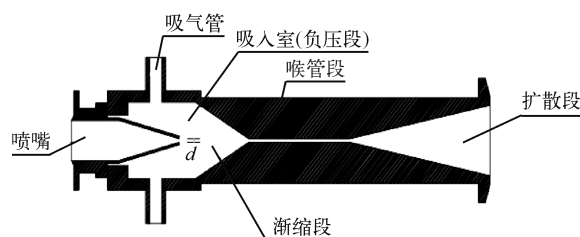


图 3 混氧原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of oxygen mixing principle

2.2 地浸采铀微纳米气泡特征研究

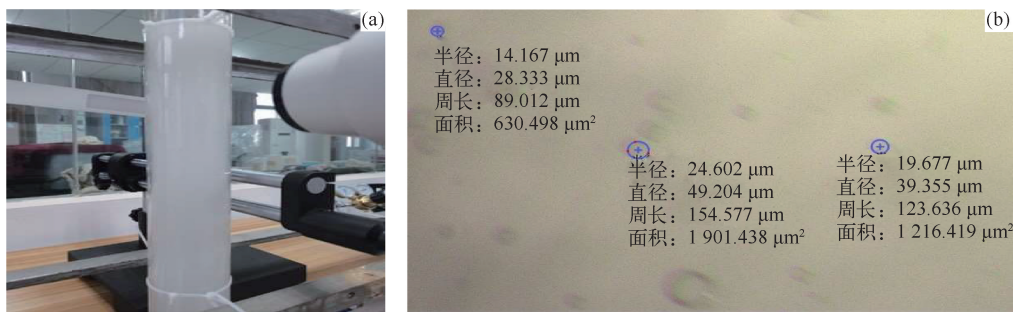
本研究结合“CO₂+O₂”地浸采铀工艺,基于虹吸机械混氧及微纳米气泡发生原理,研制了一套集混氧和微纳米气泡发生于一体的试验装置(图 4)。微纳米气泡发生器设计参数:电压 220 V,水流速 2 L/min,气体流量 0~200 mL/min,压力 101 325 Pa。将体积比为 1/10 的 CO₂/O₂ 混合气体通入微纳米发生装置,采用可旋转高精度光学显微镜(型号 NSZ608T,在镜头下可观测到 5 μm 以上的气泡)检测微纳米气泡的尺寸及运动状态,并研究氧气的溶解度与氧气加入量、溶液温度及 pH 的变化关系。

微纳米氧气泡经过发生及混氧后,得到微纳米气泡水;通过调节气泡发生器有机玻璃柱底部的球阀,使液面处于稳定,实现水的稳定循环。通过气泡探测器的探测镜头可以观测到大量微纳米气泡在柱子中运动,当气体加入量分别为 13、64、97 mg/L 时,利用气泡分析系统测定气泡的尺寸(图 5)。试验表明,加入氧气量越大,总体上微纳米氧气泡直径越小。大部分微纳米氧气泡直径小于 100 μm,其中当氧气加入量为 64、97 mg/L 时,生成的微纳米气泡直径基本小于 50 μm,最小可测量至 28.33 μm。



图 4 微纳米气泡混氧试验模型

Fig. 4 Experimental model of micro-nanobubbles mixed with oxygen



(a)混氧效果;(b)气泡直径。

图 5 微纳米氧混氧效果及气泡直径

Fig. 5 Micro-nano oxygen mixing effect and bubble diameter

在常压条件下,模拟地下水环境,配制 0.25 g/L 碳酸氢铵溶液,研究了溶液中溶解氧浓度、pH 及氧化还原电位与时间的变化关系。在试验开始 5 min 时,溶解氧达 40.00 mg/L;随时间的增加,溶解氧上升,氧化还原电位下降,pH 上升,10 min 后趋于稳定。另外,研究了在 0.25 g/L 碳酸氢铵溶液加入不同浓度的 O₂ (比例为 70%~90%) 和 CO₂ (比例为 10%~30%) 气体,试验发现加入的氧气浓度越高,溶液中的溶解氧含量越高。

3 高效微纳米现场混氧装置设计研发

3.1 矿床水文地质参数

在上述室内试验基础上,结合新疆某铀矿床地下水高矿化度及“CO₂+O₂”地浸采铀工艺要

求,设计了一套高效微纳米混氧装置。该矿床地下水化学类型为 Cl·SO₄-Na,地下水矿化度为 8.46~12.16 g/L,其中 ρ(Cl⁻) 高达 3.4 g/L,地下水对设备材质的耐 Cl⁻ 腐蚀要求较高。另外,含矿含水层渗透性较低(最低 0.045 m/d),需要在高压条件下(注液压力大于 1.2 MPa)向矿层注入浸出剂,对设备承压要求较高。矿床水文地质参数及含矿含水层地下水化学组分见表 1~表 2。

3.2 高效微纳米溶氧装置设计原理

高效微纳米混氧装置主要由浸出剂缓冲罐、虹吸管道泵、微纳米气泡发生器、混氧储罐、均流储罐及增压管道泵组成,材质均为 316L 不锈钢,装置设计承压为 1.0~1.5 MPa,设计水量为 20.0 m³/h。该高效微纳米混氧装置的关键部位主要包括加压溶气和溶气释放与气泡生产两个系统。

表 1 新疆某铀矿床水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of a uranium deposit in Xinjiang

参数	静水位/m	水头高度/m	渗透系数/(m/d)	单位出水量/[L/(s·m)]	矿化度/(g/L)	pH	水温/℃
数值	39.95~42.62	87.69~93.45	0.045~0.145	0.076~0.015	8.46~12.16	6.9~7.5	18~25

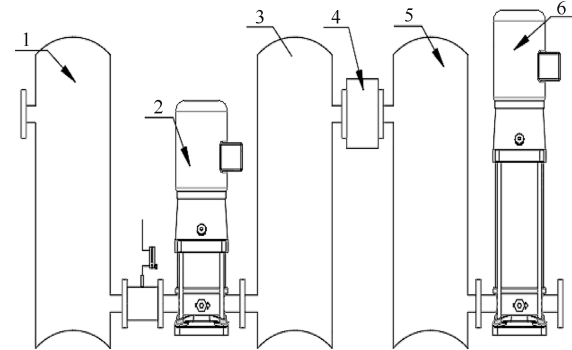
表 2 含矿含水层地下水化学组分

Table 2 Chemical composition of groundwater in ore-bearing aquifer

组分	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣFe	Fe	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
质量分数	21.17	2 033	752	365	<1	0.04	481	0	10	3 150	3 370

加压溶气系统包括浸出剂缓冲罐、混氧储罐及气泡水均流罐(图 6)。混氧储罐及气泡水均流罐是将液体与气体混合,并在高压下维持足够时间,使气体溶解达到或接近饱和。通常需要 1.0~1.5 MPa 或更高的压力,具体取决于所需溶解度和目标气泡尺寸,更高压力通常有利于生成更小气泡。流量需匹配整个系统处理量,储罐的容积需足够大,确保气液混合物在高压下有足够的停留时间(通常 30 秒)进行有效的气体溶解,一般设计高径比为 5:1 时有利于气体在液体中形成更长的上升路径,进而增加接触时间。

溶气释放与气泡生成系统使高压饱和溶气水瞬间降压,并在降压点或其附近区域施加强烈机械作用,将析出的气体粉碎成微纳米气泡。在虹吸管道泵前设计安装射流器(文丘里管),根据所需流量设计喉部直径,直径越小,喉部流速越高(可达 20~50 m/s),产生的剪切力和负压越强。氧气在文丘里管喉部负压条件下被吸入,与高速液体流充分混合,并通过虹吸管道叶轮粉碎后进入混氧储罐;然后经过微纳米气泡发生器,该发生器内部有多个锥形孔微小孔(直径为 50~200 μm),形成均匀的剪切层,进一步生成微纳米气泡;最后进入气泡水均流储罐,通过增加管道泵注入至矿层。



1—浸出剂缓冲罐;2—虹吸管道泵;3—混氧储罐;
4—气泡发生器;5—气泡水均流罐;6—增压管道泵。

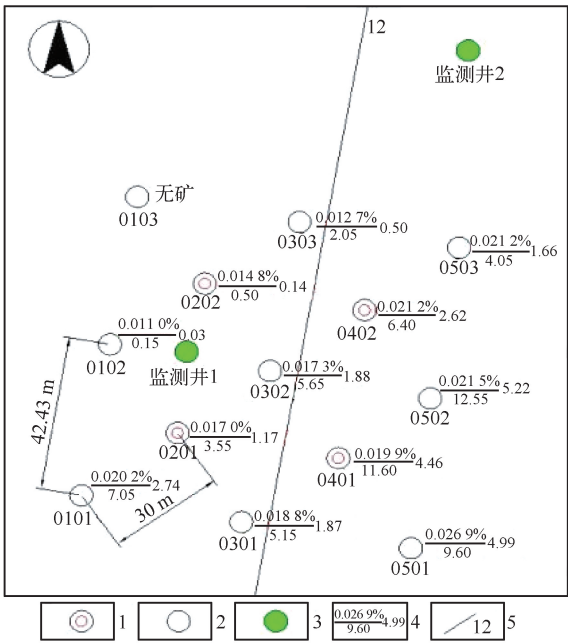
图 6 高效微纳米溶氧装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of high efficiency micro-nano oxygen mixing device

4 高效微纳米加氧技术浸出效果研究

4.1 试验区概况

为验证该高效微纳米混氧装置在低渗透、低水量砂岩型铀矿中性浸出工艺条件下的运行效果,以新疆某铀矿床“CO₂+O₂”地浸采铀工艺为依托,选取该矿床南矿带西段做试验区域。该区域共施工“4 抽 9 注”13 个试验钻井,钻井采用“五点型”布置,抽注液井间距为 30 m。该区域铀矿体水文地质条件变化复杂,含矿含水层渗透系数仅为 0.017 4 m/d,且地层中的钙元素含量较高,主要以碳酸盐(方解石)形式存在。矿层厚度 0~12.55 m,平米铀量 0~5.22 kg/m²,U(VI)占比约为 70.8%,试验区域钻井平面布置见图 7。



1—注液井;2—抽液井;3—监测井;
4—钻井见矿参数;5—勘探线。

图 7 试验区域钻井平面布置图

Fig. 7 Layout of boreholes in test area

4.2 溶氧效果

4.2.1 室内试验溶氧效果

采用高效微纳米溶氧装置(图 6)和传统加氧

方式进行试验,通过现场观察及溶解氧测量结果对比加氧效果。在浸出剂总管氧气加入量均为150 mg/L时,传统加氧时肉眼明显可见大量氧气泡,且溶液呈乳白色,测得溶氧量均小于10 mg/L;而采用微纳米加氧时肉眼观察不到气泡,测得溶氧量为30 mg/L,比传统加氧时溶氧量增加了2倍。

4.2.2 试验区浸出剂溶氧效果

试验中控制浸出剂 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 550 mg/L,通过加 CO_2 控制浸出剂 pH 为 6.8^[18-19]。氧气的进气压力为 1.5 MPa,通过高效微纳米溶氧设备减压后

为 0.1~0.5 MPa。通过现场试验,得到微纳米溶氧与传统加氧条件下的浸出剂溶氧变化(图8)。可以看出,微纳米溶氧时,浸出剂中氧气加入量可上调至 250 mg/L,较单井传统加氧量(150 mg/L)提升了 66.67%。浸出剂中的溶氧量,在试验开始阶段随氧气加入量的增大而上升;在氧气加入量为 150~200 mg/L 时,浸出剂中溶氧量基本达到稳定值(平均 48.90 mg/L)。微纳米溶氧量约为传统单井加氧溶氧量(平均 6.08 mg/L)的 8 倍,微纳米溶氧技术使浸出剂中的溶氧量明显提升。

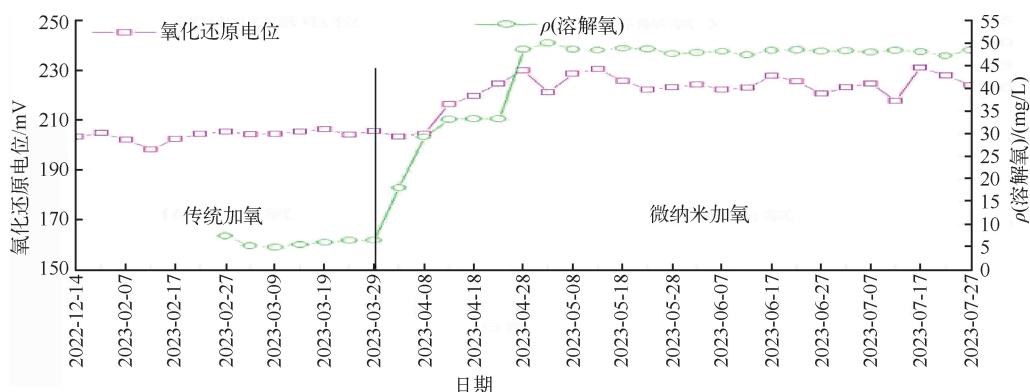


图8 微纳米加氧与传统加氧时浸出剂溶氧量变化

Fig. 8 Change of dissolved oxygen in the leaching agent during micro-nano oxygenation and conventional oxygenation

4.3 试验区浸出效果

4.3.1 浸出液铀浓度变化

以钻井 0402 为例,该钻井前期试验运行 11 个月,浸出液铀质量浓度最高上升至 20.38 mg/L,随后下降至 14.64 mg/L。微纳米加氧试验开始时,该钻井浸出液铀质量浓度为 17.27 mg/L;微纳米加氧运行 45 d 后,浸出液余氧量从 5.5 mg/L 上

升至 6.8 mg/L, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 从 530 mg/L 上升至 560 mg/L,浸出液铀质量浓度也随之上升并达到 30.19 mg/L(图9)。采用微纳米加氧后,浸出液铀质量浓度上升了 74.81%,上升幅度较大。根据对浸出液各项离子浓度变化的分析,主要是微纳米加氧后,提高了氧气加入量和溶氧量,浸出液余氧量、 HCO_3^- 浓度均有不同程度上升。

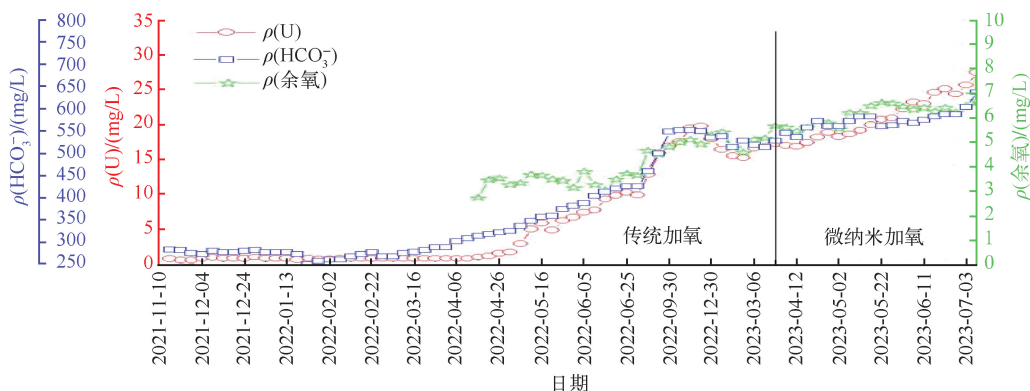


图9 0402 钻井浸出液 U、 HCO_3^- 、余氧浓度变化

Fig. 9 Variation of U, HCO_3^- and residual oxygen concentration in 0402 well leachate

4.3.2 铀浸出率变化

“CO₂+O₂”地浸采铀加氧期间,以微纳米加氧和传统单井加氧分别运行 4 个月的浸出数据进行对比,在浸出剂 HCO₃⁻和 CO₂配加浓度不变的情况下,浸出液平均铀质量浓度由 26.84 mg/L(传统单井加氧)增加至 36.49 mg/L(微纳米加氧),提升了 36.95%;月回采率由 0.35%提升至 0.56%,提升了 60.00%,见图 10~图 11。

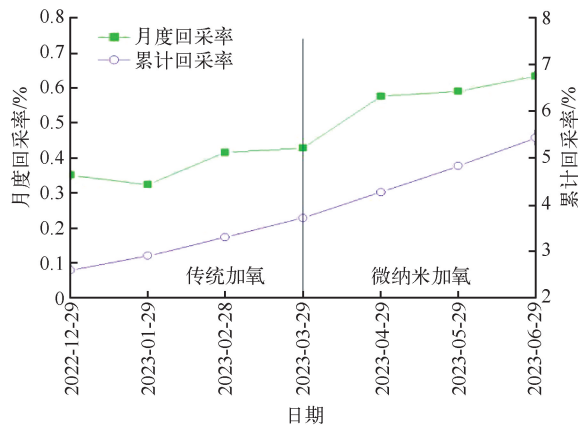


图 10 浸出金属回收率变化

Fig. 10 Leaching metal recovery rate change

4.3.3 氧气单耗变化

在同一含矿地质条件、同一试验区域条件下

进行现场氧气单耗对比研究。传统单井加氧方式在氧气加入量为 150 mg/L 时,由于氧气溶解不充分,浸出剂下注管道及钻井出现气堵现象,出现氧气加入稳定性差和氧气利用率低等问题。在微纳米加氧期间,氧气加入量可提高至 250 mg/L,较传统单井加氧提高了 66.67%;试验运行 4 个月,浸出剂管道及钻井均未出现气堵现象,可实现氧气稳定持续加入,氧气消耗量虽较单井加氧时提高了 30.47%,但浸出液铀浓度提高了 35.95%,氧气单耗降低了 20.16%。

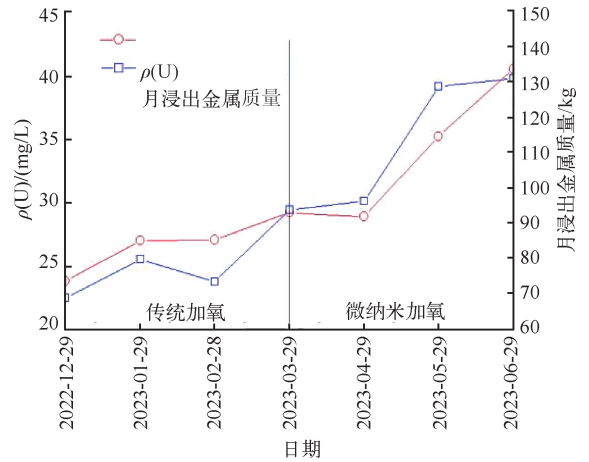


图 11 铀质量浓度与金属变化

Fig. 11 Uranium mass concentration and metal variation

表 3 微纳米加氧与传统加氧浸出过程氧气单耗对比

Table 3 Comparison of oxygen consumption between micro-nano oxygenation and traditional oxygen leaching process

加氧方式	时间	水量/m ³	氧气加入量/(mg/L)	浸出液 ρ(U)/(mg/L)	月浸出金属质量/kg	消耗氧气/t	氧气单耗/(t/tU)
传统单井加氧	2022 年 12 月	2 894	150	23.81	68.909	0.43	6.30
	2023 年 1 月	2 956	150	27.02	79.865	0.44	5.55
	2023 年 2 月	2 719	150	27.07	73.602	0.41	5.54
	2023 年 3 月	3 216	150	29.23	93.988	0.48	5.13
	平均	2 946	150	26.84	79.091	0.44	5.63
微纳米加氧	2023 年 4 月	3 335	80	28.90	96.390	0.27	2.77
	2023 年 5 月	3 659	150	35.23	128.911	0.55	4.26
	2023 年 6 月	3 237	200	40.50	131.103	0.65	4.94
	2023 年 7 月	3 373	250	41.52	140.063	0.84	6.02
	平均	3 401	170	36.49	124.117	0.58	4.50
变化率/%		15.43		35.95	56.930	30.47	-20.16

5 结论

以水文地质条件极其复杂的新疆某铀矿床为依托,开展了高效微纳米加氧装置研制和“CO₂+O₂”地浸采铀微纳米加氧浸出效果研究,为微纳米溶氧技术在“CO₂+O₂”地浸采铀中的工业应用奠定了技术基础。主要结论如下:

1) 基于虹吸混氧及高速撞击发生微纳米气泡技术原理,研制了微纳米气泡试验装置,氧气在溶液中的气泡直径在 50~100 μm,以微纳米气泡形式存在于溶液中。

2) 通过室内试验得出,微纳米加氧的溶氧量比传统单井加氧的溶氧量增加了 2 倍,验证了高效微纳米混氧装置的可行性。

3) 选取新疆某铀矿床南矿带西段为试验区,在微纳米加氧和传统加氧方式下分别运行 4 个月,发现在微纳米加氧时,浸出液平均铀质量浓度由 26.84 mg/L 增加至 36.49 mg/L,提升了 36.95%。

参考文献:

- [1] 王海峰,叶善东.原地浸出采铀工程技术[M].北京:中国原子能出版社,2011.
WANG Haifeng, YE Shandong. In situ leaching uranium mining engineering technology [M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2011.
- [2] 权建平,陈宏斌.新疆某铀矿床(27~39 线)补充勘查地质报告[R].长沙:核工业二〇三研究所,2012.
QUAN Jianping, CHEN Hongbin. Supplementary geological report on exploration of a uranium deposit (lines 27-39) in Xinjiang[R]. Changsha: Nuclear Industry 203 Research Institute, 2012.
- [3] 苏学斌,韩青涛,谭亚辉,等.新疆某铀矿床 CO₂ 地浸采铀试验研究[J].铀矿冶,2005,24(3):129-134.
SU Xuebing, HAN Qingtao, TAN Yahui, et al. A experiment of in-situ leaching of uranium with CO₂ at a uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3): 129-134.
- [4] 刘金辉,孙占学,周义朋,等.适合十红滩铀矿床地浸采铀的水文地球化学条件[J].金属矿山,2010,26(3):77-79.
LIU Jinhui, SUN Zhanxue, ZHOU Yipeng, et al. Hydrogeochemical conditions of in-situ leaching uranium exploration for Shihongtan deposit[J]. Metal Mine, 2010, 26(3): 77-79.
- [5] 杜志明,牛学军,苏学斌,等.内蒙古某铀矿床 CO₂+O₂ 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. CO₂+O₂ in-situ leaching test of one uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1): 1-4.
- [6] FIAI Asghar, 周义朋, 孙占学, 等. 新疆蒙其古尔矿床铀矿石 CO₂+O₂ 中性浸出试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 46-55.
ASGHAR Fiaz, ZHOU Yipeng, SUN Zhanxue, et al. CO₂+O₂ neutral leaching experiment of uranium ore from Mengqiguer deposit in Xinjiang[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(8): 46-55.
- [7] 王飞. CO₂+O₂ 浸出工艺氧气加入及计量技术的研究与应用[J]. 中国矿业, 2023, 32(2): 150-156.
WANG Fei. Research and application of oxygen addition and metering technology in CO₂+O₂ leaching process[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(2): 150-156.
- [8] 闫纪帆, 张渤, 刘佳斌, 等. 某 CO₂+O₂ 地浸采铀矿山采区浸出效果研究[J]. 铀矿冶, 2020, 39(3): 185-190.
YAN Jifan, ZHANG Bo, LIU Jiabin, et al. Study on leaching effect of in-situ leaching uranium mine by CO₂+O₂ [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(3): 185-190.
- [9] 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.
- [10] 陶峰, 张传飞, 冯国平, 等. 某砂岩型铀矿 CO₂+O₂ 地浸采铀试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(6): 56-61.
TAO Feng, ZHANG Chuanfei, FENG Guoping, et al. CO₂+O₂ in-situ leaching of uranium from a sandstone type uranium deposit [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2022(6): 56-61.
- [11] 牛庆合, 何佳彬, 王伟, 等. 基于渗流-化学-应力多场耦合的砂岩型铀矿 CO₂+O₂ 地浸开采的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(6): 144-152.
NIU Qinghe, HE Jiabin, WANG Wei, et al. Numerical simulation of CO₂+O₂ in-situ leaching of sandstone type uranium deposit based on multifield coupling of seepage-chemistry-stress [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(6):

- 144-152.
- [12] TAKAHASHI M, KAWAMURA T, YAMAMOTO Y, et al. Effect of shrinking microbubble formation[J]. The Journal of Physical Chemistry, B: Condensed Matter, Materials, Surfaces, Interfaces & Biophysical, 2003, 107(10): 2171-2173
- [13] PETERSEN H B. The electrical charge on gas bubbles in aqueous electrolytes[J]. Transactions of the Faraday Society, 1950, 46: 332-336.
- [14] JUNGWIRTH P, Tobias D J. Molecular structure of salt solutions: A new view of the interface with implications for heterogeneous atmospheric chemistry[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2001, 105(43): 10468-10472.
- [15] GIBBS J W. The collected works of J Willard Gibbs [J]. Nature, 1928(3117): 124.
- [16] PETERSEN P B, SAYKALLY R J. Adsorption of ions to the surface of dilute electrolyte solutions: The jones-ray effect revisited [J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127 (44): 15446-15452.
- [17] 田春华, 薛俭雷. 基于伯努利方程的探究型教学课程设计的探讨 [J]. 中国科教创新导刊, 2011 (29): 94.
- TIAN Chunhua, XUE Jianlei. Exploration of inquiry-based teaching curriculum design based on Bernoulli' equation[J]. China Education Innovation Herald, 2011(29): 94.
- [18] 王海峰, 李建东, 刘正邦, 等. 地浸采铀生产与地下水修复环境监测指示参量 [J]. 铀矿冶, 2023, 42 (3): 81-87.
- WANG Haifeng, LI Jiandong, LIU Zhengbang, et al. Indicators for environmental monitoring of in-situ leaching uranium mining production and groundwater remediation[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42 (3): 81-87.
- [19] 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.

Study on Micro-nano Oxygenation Technology for In-situ Leaching of Uranium

REN Huaping¹, KE Pingchao², SHI Zhenfeng¹, JIA Zhiyuan¹, LI De¹,
ZHOU Yipeng², XIE Xiliang¹, ZHANG Ziye¹

(1. Xinjiang Tianshan Uranium Co., Ltd., CNNC, Turpan 838000, China;

2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology,
Nanchang 330013, China)

Abstract: The ore-bearing aquifer in a sandstone-type uranium deposit in Xinjiang has poor permeability and small amount of water in the well. When using the "CO₂ + O₂" neutral leaching process, it is difficult to add oxygen, and the oxidation efficiency of U(IV) in the ore is low, resulting in a low leaching rate of uranium resources. To solve this problem, an efficient micro-nano oxygenation device was developed. The results show that this device can add oxygen steadily and continuously to the low permeability and low water well. Under the condition that the leaching agent is supplemented with NH₄HCO₃ and the CO₂ concentration is unchanged, compared with the traditional single well oxygenation, the concentration in the leaching solution increased by 35.95%, the oxidation capacity of the ore layer was increased, the oxygen consumption was reduced by 20.16%, and the monthly leaching rate was increased by 60.00% during micro-nano oxygenation.

Key words: micro-nano oxygenation; sandstone-type uranium deposit; neutral leaching; CO₂ + O₂; in-situ leaching of uranium