微孔曝气加氧技术在地浸采铀中的应用

任华平，李 德，贾志远，师振峰，王红义，何慧民

（新疆中核天山铀业有限公司，新疆 伊宁 835000）

摘要：新疆某砂岩铀矿床采用“CO_2+O_2”中性浸出采铀工艺，存在含矿含水层渗透性差、水量小的采区。在该类采区采用单孔加氧方式，存在气堵、氧气流量计返水、维修工作量大、氧气溶解度低等问题。以 5# 采区为对象，采用微孔曝气加氧技术进行的研究显示，单孔浸出液余氧量平均提升了 226.85%，浸出液铀浓度平均提升了 43.29%，吨金属氧气单耗降低了 30.77%，采区开拓加氧设施成本降低了 96.09%。微孔曝气加氧技术解决了“CO_2+O_2”中性浸出过程氧气配加难度大的问题，为砂岩铀矿地浸开采氧气配加提供了参考。

关键词：微孔曝气；CO_2+O_2；地浸采铀

中图分类号：TD868 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0029-07

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.03.01

“CO_2+O_2”中性浸出具有地球化学干扰小、工艺简单、基建投资少、生产成本低、环境友好和安防条件好、资源利用率高等优点[1-3]，该工艺在新疆某砂岩型铀矿床应用效果较好。该砂岩型铀矿床属于辫河沉积砂岩，矿床地质及水文条件复杂。在采区开拓过程中，各采区渗透性变化较大，在含水层渗透性差、水量小的采区，单孔加氧方式存在气堵、氧气流量计返水、维修工作量大、氧气溶解度低等问题，导致矿层中四价铀氧化不充分，浸出液铀浓度低，开采年限长，生产成本高。

以低渗透性、低水量砂岩型铀矿为研究对象，在“CO_2+O_2”中性浸出时，采用微孔曝气加氧技术，以期提高氧气的溶解度和对四价铀的氧化效果。

1 采区概况

1.1 水文地质特征

某砂岩铀矿床 5# 采区共施工 57 口生产井，布局为五点型；其中抽液井 24 口，注液井 33 口，矿体平均厚度为 2.40 m，铀品位为 0.042 3%，平米铀量为 2.43 kg/m^2。矿石主要呈疏松、次疏松结构，为灰色、深灰色砂(砾)岩矿石及少量的泥岩矿石和致密的钙质胶结砂(砾)岩矿石。矿石中铀以吸附态和铀矿物形式存在[4]，占比各为 50%；矿石中四价铀与六价铀的占比约为 50%。吸附态铀主要与矿石中黏土矿物、粉末状黄铁矿和岩屑物相关[5]。

5# 采区含矿含水层为侏罗系下统西山窑组第一岩性段第四含矿含水层，含水层厚度为 10.8～59.9 m，平均厚 27.4 m。岩性为砾岩、砂质砾岩、中粗砂岩等，以泥质胶结为主，夹钙质胶结碎屑岩透镜体。水文地质孔 ZK13W4 的静水位为 52.62 m，单位涌水量为 27.48 m^3/d，导水系数为 2.506 m^2/d，渗透系数为 0.145 m/d。水化学以 $Cl\cdot SO_4$—Na 型为主，矿化度为 8.46～9.02 g/L，pH 为 7.10～7.33，水温为 18～20 ℃，含矿含水层与矿层厚度比主要为 1～10(占比 78.9%)。

1.2 采区浸出现状

5# 采区于 2013 年 7 月投入生产，已运行 8 年。在注液压力 0.80 MPa 时，单孔注液量为 0.3～0.7 m^3/h，单孔抽液量为 0.6～1.6 m^3/h(图 1)，累计浸出金属 22.136 t，资源回采率 24.59%；浸出液最高 ρ(U)为 17.24 mg/L，平均 ρ(U)为 13.43 mg/L，按照理论计算其浸出液平均 ρ(U)为 21.97mg/L；$\rho(HCO_3^-)$为 540.00～685.58 mg/L，平均为 598.80 mg/L。目前浸出液 ρ(U)为 13.55 mg/L(图 2)，余氧量为 5.64～7.25 mg/L，总抽液量为 12.0 m^3/h，日浸出金属为 3.902 kg/d。

收稿日期：2023-03-01

第一作者简介：任华平(1984—)，男，甘肃庆阳人，大专，工程师，主要从事砂岩型地浸采铀工作。

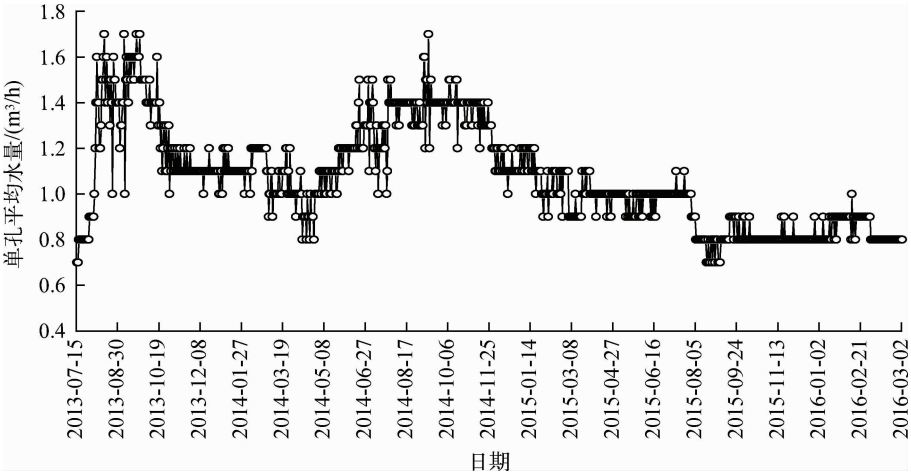


图 1 5# 采区单孔平均水量

Fig. 1 Average water volume of single hole in 5# mining area

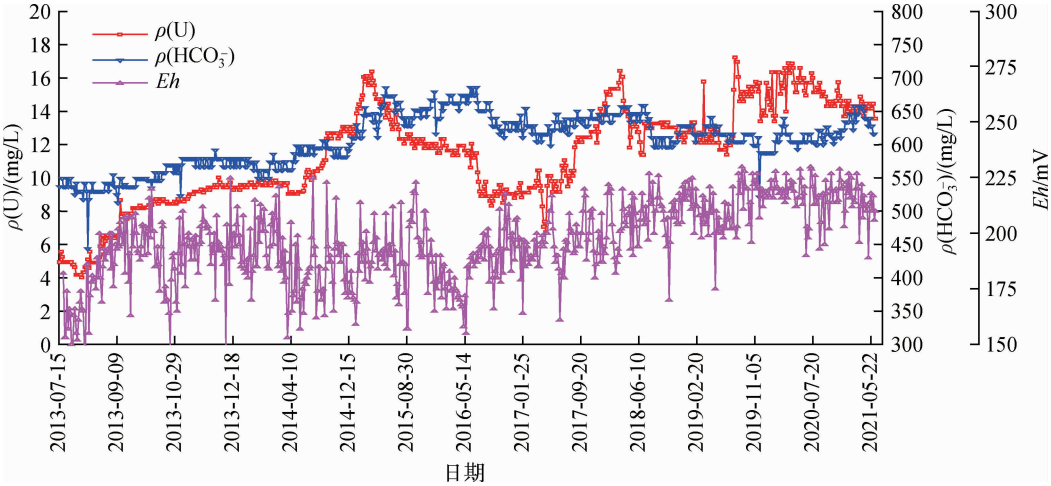


图 2 5# 采区浸出液 $\rho(U)$ 与 $\rho(HCO_3^-)$ 变化

Fig. 2 Change of $\rho(U)$ and $\rho(HCO_3^-)$ in the leachate of 5# mining area

1.3 存在的问题

该采区原加氧方式为单孔直接加氧，在注液压力 0.80 MPa 下，单孔注液量为 0.3～0.7 m^3/h，单孔抽液量为 0.6～1.6 m^3/h。在该压力条件下理论溶解氧计算公式[6]为

$$Q=\frac{192H}{33.5+T}(0.073-0.07\lg H), \quad (1)$$

式中：H 为绝对水柱，m；T 为温度，℃；Q 为氧气溶解量，mg/L。

浸出剂中的溶解氧含量主要由矿层的静水压力（矿层顶板至静水位的水柱压力）决定[7]，5# 采区矿层顶板底部平均埋深为 132.6 m，静水位为 52.62 m，地下水温度为 22 ℃。根据公式(1)计算得出 5# 采区浸出剂中理论溶解氧量为 277.63 mg/L。实际生产中，在氧气最大加入量为 100.00 mg/L 时，出现浸出剂注液管道及钻孔气堵、氧气溶解能力差、四价铀被氧化不足、浸出液铀浓度低等问题。另外，在排气过程会造成部分氧气浪费，增加氧气消耗和影响生产成本。

2 微孔曝气加氧技术研究

2.1 曝气方式选择

目前国内外采用的人工微孔曝气技术主要有机械曝气、扬水曝气以及鼓风曝气，主要应用在污水净化及河流湖泊治理工程方面[8-10]，优缺点对比见表 1。

铀矿“CO_2+O_2”中性浸出工艺对溶解氧的要求较高，借鉴鼓风曝气微孔扩散器原理，结合现有带压供氧设备及设施，研究微孔曝气技术。微孔曝气头最常见的形式有盘式、板式及膜片式，制作

材料多采用橡胶、刚玉、陶瓷及不锈钢。从待研究铀矿床含矿含水层矿化度高、对设备腐蚀严重、安装及操作方便等方面考虑，选择采用 316 不锈钢粉末烧结而成的微孔曝气头，进行“CO_2+O_2”中性浸出工艺微孔曝气加氧探索研究。

表 1　机械曝气、扬水曝气以及鼓风曝气优缺点对比

Table 1　Comparison of advantages and disadvantages of mechanical aeration, lift aeration and blast aeration

曝气方式	优点	缺点	应用范围
机械曝气	曝气兼搅拌功能，曝气均匀	能耗高，溶氧率低，推流效果差	大型污水厂、氧化沟、曝气池等
扬水曝气	可有效去除水中的细小悬浮颗粒、藻类，以及固体杂质和磷等污染物	需要大型设备，投资及能耗高	人工湖、公园、别墅区、城市河流等景观处理
鼓风曝气	通过微孔扩散器将气体分散为气泡，增大气体和溶液的接触面积，将氧气溶解于溶液中	微孔扩散板或扩散管孔眼直径为微米级，易被溶液中的杂质堵塞	水产养殖，污水处理等

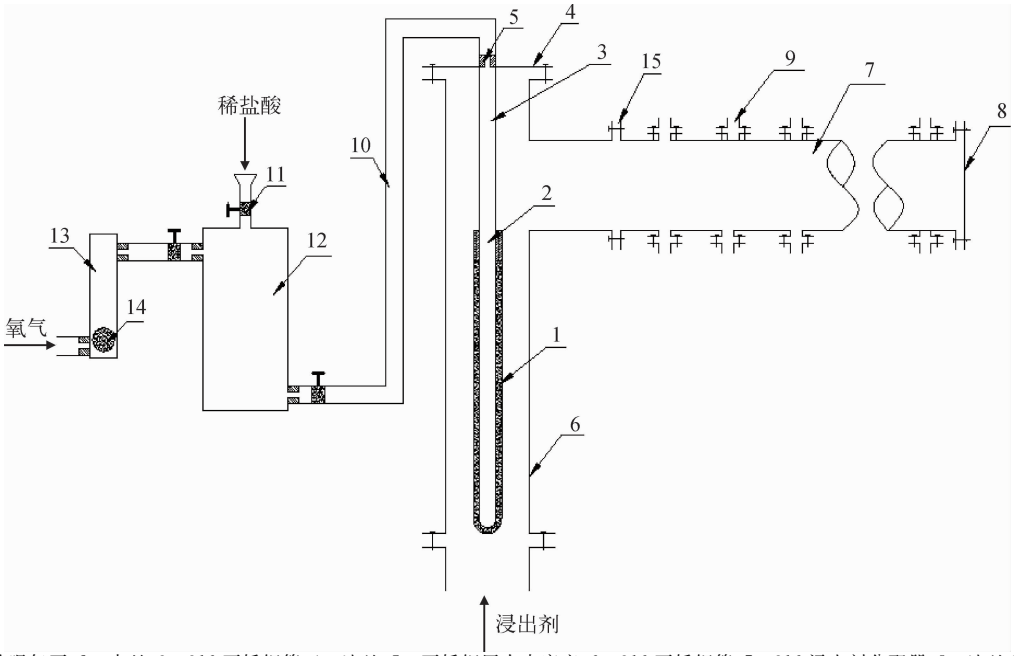
2.2　微孔曝气氧传质理论

微孔曝气氧传质是物质分子在具有浓度差的两相间的传递过程。在气泡-水界面的氧传质主要发生在液相内部，曝气产生的气泡对这一传质过程起到关键作用，而气泡的物理参数决定了气泡的运动特性。增加供氧压力和氧气与液体的接触面积，可提高氧在水中的浓度梯度，有利于氧气向水中传质。

目前地浸采铀供氧设备为高压液氧储罐，气化后的氧气具有一定的压力（一般在 1.5 MPa）[11]。笔者主要通过增加氧气与浸出剂的接触面积来提高 5# 采区“CO_2+O_2”中性浸出的加氧效果。

2.3　微孔曝气加氧装置设计

试验选用的微孔曝气头由 316 不锈钢粉末烧结而成，孔隙度 0.5～1.0 μm，长 500 mm，直径 50 mm。微孔曝气头与加氧管道连接并安装在采区浸出剂的注液总管上，微孔曝气头全部沉浸在注液管内的浸出剂中，加入的氧气通过微孔曝气头的微孔形成微小气泡并附着在曝气头表面，增加氧气与浸出剂的接触面积（图 3）。



1—微孔曝气石；2—内丝；3—316 不锈钢管；4—法兰；5—不锈钢压力表底座；6—316 不锈钢管；7—316 浸出剂分配器；8—法兰（盲板）；9—ϕ32 mm 不锈钢法兰；10—橡胶高压软管；11—316 不锈钢针型阀；12—316 盐酸储罐；13—玻璃转子氧气流量计；14—316 不锈钢管浮球；15—ϕ110 mm 不锈钢法兰。

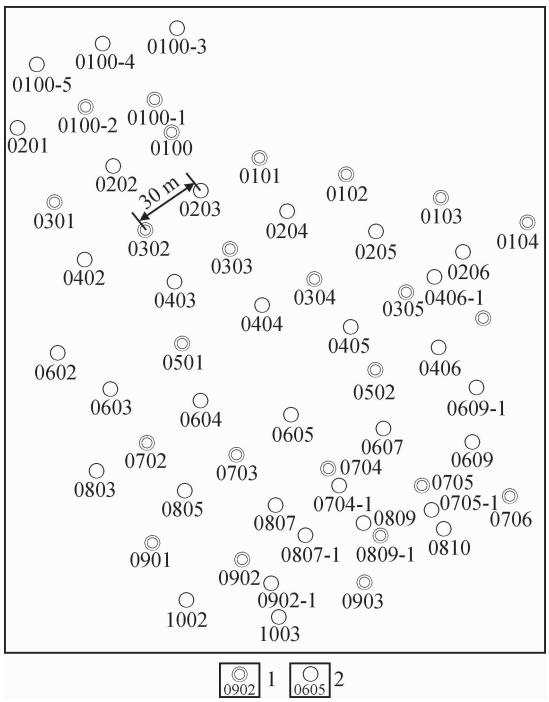
图 3　“CO_2+O_2”中性浸出微孔曝气头安装示意图

Fig. 3　Installation diagram of micro-aeration head in "CO_2+O_2" neutral leaching uranium

在浸出剂向钻孔输送过程中，可将微小氧分子输送至矿层，进而将含铀矿层中四价铀氧化为六价铀，六价铀与碳酸铀酰配合，从而实现提升铀资源回采效率的目的。在微孔曝气加氧装置的氧气加入管上设计安装了解堵设施，当微孔曝气头孔隙出现堵塞时，关闭供气和出气阀，向解堵设施中加入少许 10%的稀盐酸，可实现疏通解堵。这种解堵方式的解堵效率高，且对浸出剂注液影响较小。

2.4 微孔曝气试验方法

选择在某砂岩铀矿床 5# 采区“CO_2+O_2”中性浸出采区进行微孔曝气加氧试验，该采区注液总管控制 24 个抽注单元，子单元钻孔呈五点型分布，抽液井与注液井间距为 30 m(图 4)，采区钻孔布局、数量、以及矿体地质特征与其他采区基本一致。为对比微孔曝气加氧的氧气溶解效果，氧气加入量与原单孔一致，为 100.00 mg/L。根据采区总注液水量，调整气体质量计控制氧气加入流量，定期在采区注液总管、注液井口、以及抽液井取样，分析氧气溶解浓度和浸出液铀浓度变化情况。



1—抽液井；2—注液井。

图 4 5# 采区平面布置图

Fig. 4 Layout of 5# mining area

3 试验结果与讨论

3.1 溶氧效果对比

2021 年 6 月 6 日，在 5# 采区将原单孔加氧改为注液总管微孔曝气加氧，在浸出剂注液总管安装微孔曝气加氧装置，监测微孔曝气头加氧浸出效果。5# 采区单孔平均抽液量为 0.3～0.7 m^3/h，单孔平均注液量为 0.6～1.6 m^3/h；在氧气加入量为100.00mg/L时，浸出剂为乳白色，乳白色持续 1.5～2.0 min 逐渐消失。

5# 采区浸出剂注液总管微孔曝气加氧及单孔加氧时的溶氧量对比见表 2。可以看出，与单孔加氧相比，采用微孔曝气加氧时浸出剂单孔注液中心管的溶氧量提升 62.47%～84.40%，井管溶氧量提升 120.00%～134.35%，溶氧效果大幅提升，且浸出剂注液井口基本无气体排出。

表 2 微孔曝气加氧前后溶氧量对比

Table 2 Comparison of dissolved oxygen content before and after micropore aeration

井号	注液量/(m^3/h)	中心管溶氧量			井管溶氧量		
		单孔加氧/(mg/L)	总管微孔曝气加氧/(mg/L)	提升幅度/%	单孔加氧/(mg/L)	总管微孔曝气加氧/(mg/L)	提升幅度/%
0403	0.4	8.50	13.81	62.47	8.75	19.25	120.00
0100-3	0.3	7.58	13.95	84.04	7.89	18.49	134.35

3.2 浸出液铀浓度、余氧量对比

浸出液铀浓度、余氧量对比见表 3、表 4 和图 5。加氧 14 d，浸出液溶氧量上升；加氧 34 d，浸出液总管 ρ(U)从 13.55 mg/L 提高至18.61 mg/L(上升了 37.34%)，余氧量从5.21 mg/L提高至 14.36 mg/L(上升了 175.62%)，日浸出金属从 3.902 kg/d 提高至 5.360 kg/d(上升了 37.34%)。

5#采区在浸出剂注液总管采用微孔曝气加氧后，在浸出液 $\rho(HCO_3^-)$ 基本不变的情况下，余氧量大幅提升，从 3.57～6.62 mg/L 上升至 14.57～21.61 mg/L，平均上升幅度为 226.85%；单孔浸出液 $\rho(U)$ 从 7.22～19.26 mg/L 上升至 7.32～31.11 mg/L，平均上升幅度为 43.29%（表 4）。

表 3　微孔曝气加氧前后浸出液总管铀浓度与余氧量对比

Table 3　Comparison of uranium concentration and residual oxygen in leachate before and after micropore aeration

加氧方式	$\rho(U)$/(mg/L)	余氧量/(mg/L)	日浸出金属/(kg/d)
单孔直接加氧	13.55	5.21	3.902
微孔曝气加氧	18.61	14.36	5.360

表 4　微孔曝气加氧前后单孔浸出液铀浓度与余氧量对比

Table 4　Comparison of uranium concentration and residual oxygen content in single-hole leachate before and after micropore aeration

井号	单孔加氧			总管微孔曝气加氧		
	$\rho(U)$/(mg/L)	$\rho(HCO_3^-)$/(mg/L)	余氧量/(mg/L)	$\rho(U)$/(mg/L)	$\rho(HCO_3^-)$/(mg/L)	余氧量/(mg/L)
0100-1	19.26	639.00	5.95	31.11	671.00	19.58
0100-2	11.74	615.00	6.62	19.52	658.80	19.37
0302	13.44	627.48	5.13	22.88	658.80	21.61
0809-1	15.65	685.58	6.33	20.74	695.40	20.58
0102	12.94	627.48	6.48	13.42	643.80	15.68
0902	7.22	621.92	3.57	7.32	654.90	14.57
平均	13.38	636.08	5.68	19.17	664.00	18.57

注：0902 抽液井单元的 2 个注液井未见矿化。

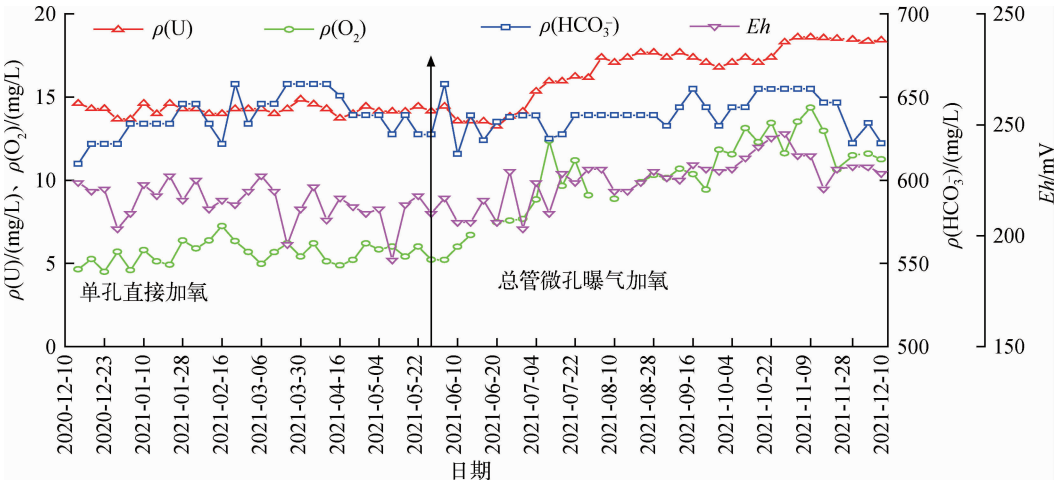


图 5　5#采区总浸出液 $\rho(U)$ 与余氧量变化

Fig. 5　The $\rho(U)$ and residual oxygen change of total leachate of 5# mining area

4　微孔曝气加氧技术经济效益分析

以 2021 年微孔曝气加氧技术在 5#采区的“CO_2+O_2”中性浸出为例，进行经济效益分析。

4.1　浸出产能分析

采用微孔曝气加氧技术后，浸出液 $\rho(U)$ 从 13.55 mg/L 提高至 18.61 mg/L，相比 2021 年增加金属 0.587 t，按每吨金属 60 万元计算，经济效

益增加 37.34%(图 6)。

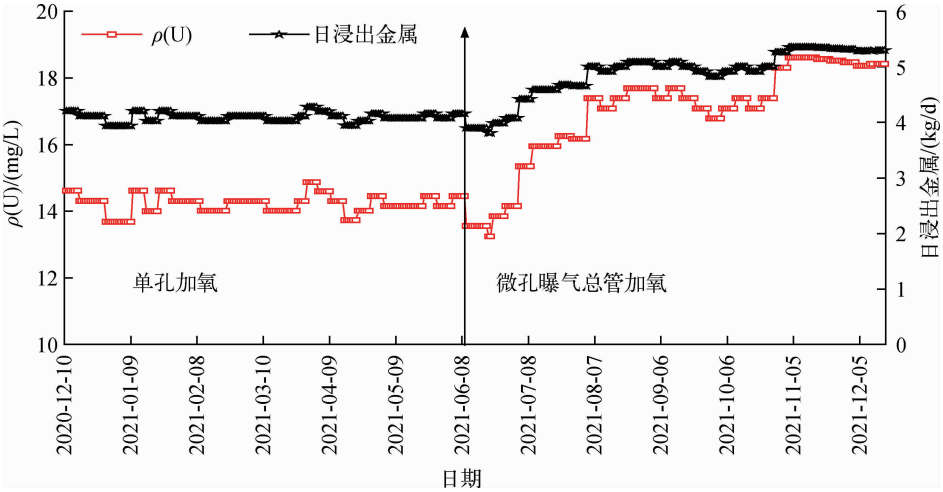


图 6 微孔曝气加氧前后浸出液铀浓度与日浸出金属变化

Fig. 6 Change of uranium concentration in leachate and diurnal leaching metal before and after micropore aeration

4.2 材料消耗分析

以 5# 采区开拓施工 33 口注液井计算,总管微孔加氧生产吨金属消耗氧气成本降低 5 032 元,降低了 30.77%(表 5);采区开拓加氧设施成本降低 32 660 元,降低了 96.09%(表 6)。

表 5 微孔曝气加氧前后节约氧气成本测算

Table 5 Cost calculation of saving oxygen before and after micropore aeration

单孔直接加氧耗氧			微孔曝气加氧耗氧			氧气成本降低/%
消耗量/(t/tU)	单价/(元/t)	总价/(元/tU)	消耗量/(t/tU)	单价/(元/t)	总价/(元/tU)	
13	1 258	16 354	9	1 258	11 322	30.77

表 6 微孔曝气加氧前后节约加氧设施成本测算

Table 6 Cost calculation of saving oxygenation facilities before and after micropore aeration

名称	单孔直接加氧			微孔曝气加氧			加氧设施成本降低率/%
	数量	单价/元	总价/元	数量	单价/元	总价/元	
微孔曝气设施				1 个	500	500	
氧气流量计	33 个	350	11 550	1 个	350	350	
针型阀	66 个	200	13 200	2 个	200	400	
高压软管	66 m	40	2 640	2 m	40	80	
不锈钢管材	33 套	200	6 600				
合计			33 990			1 330	96.09

5　结论

微孔曝气加氧技术提高了氧气的溶解度，实现了低渗透性、低水量钻孔的高效加氧。浸出剂溶氧量提升 62.47%～84.40%；浸出液余氧量平均上升 226.85%，铀浓度平均上升 43.29%。微孔曝气加氧技术的 tU 氧气消耗降低了 30.77%，采区开拓加氧设施成本降低了 96.09%，且操作简便，大幅降低了气体消耗和化学堵塞风险，解决了低渗透性砂岩铀矿“CO_2+O_2”中性浸出的加氧问题。

参考文献：

[1] 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，2005，24(3)：129-134.

[2] 阙为民. 原地浸出采铀几个基本问题的探讨[J]. 铀矿冶，2006，25(2)：57-60.

[3] 杜志明，牛学军，苏学斌，等. 内蒙古某铀矿床CO_2+O_2 地浸采铀工业性试验[J]. 铀矿冶，2013，32(1)：1-4.

[4] 乔海明，张复新，蔡金芳，等. 吐哈盆地十红滩铀矿床有机地球化学特征浅析[J]. 沉积学报，2007，25(1)：154-160.

[5] 王海峰. 原地浸出采铀技术[R]. 北京：核工业北京化冶金研究院，2021.

[6] 张青林，张勇，费子琼. 新疆某铀矿床 CO_2+O_2 中性浸出试验研究[J]. 中国矿业，2012(S1)：435-438.

[7] 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.

[8] 才硕. 微纳米气泡增氧灌溉技术在水稻灌区节水减排中的应用研究[J]. 节水灌溉，2016(9)：117-120+128.

[9] 潘习习，徐建平. 微纳米气泡基本特性及溶解氧的研究[J]. 安徽工程大学学报，2015，30(2)：12-16.

[10] 邓超，杨丽，陈海军，等. 微纳米气泡发生装置及其应用的研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2014.

[11] 胡湛波，陆辉，刘凯华，等. 微纳米曝气氧传质影响因素分析及经验模拟[J]. 环境科学与技术，2016，39(5)：77-79.

Application of Micropore Aeration Oxygenation Technique in In-situ Leaching Uranium

REN Huaping, LI De, JIA Zhiyuan, SHI Zhenfeng, WANG Hongyi, HE Huimin

(Xinjiang Tianshan Uranium Co., Ltd., CNNC, Yining 835000, China)

Abstract: The "CO_2+O_2" neutral leaching uranium process is adopted for a sandstone uranium deposit in Xinjiang, there are mining areas with poor permeability and low water content of ore-bearing aquifers. In this kind of mining area, there are some problems in the single-hole oxygen adding mode, such as gas blocking, water returning from oxygen flowmeter, large maintenance workload and low oxygen solubility. Taking 5# mining area as an example, the study using micropore aeration oxygenation technology shows that the residual oxygen of single hole leachate increases by 226.85% on average, and the uranium concentration of leachate increases by 43.29% on average, the unit oxygen consumption per ton metal decreased by 30.77%, and the cost of developing oxygen facilities in mining area decreased by 96.09%. The technology of micropore aeration oxygenation technology solves the difficulty of oxygen addition in the process of "CO_2+O_2" neutral leaching, and provides a reference for oxygen addition in in-situ leaching of sandstone uranium ore.

Key words: micropore aeration; CO_2+O_2; in-situ leaching uranium