

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2020.12.010

# CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> 地浸采铀强化浸出试验

张青林<sup>1</sup>, 周义朋<sup>2</sup>, 穆志军<sup>1</sup>, 阳晓宇<sup>1</sup>, 黎广荣<sup>2</sup>

(1. 新疆中核天山铀业有限公司, 新疆 伊宁 835000;

2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

**摘要:**新疆蒙古尔铀矿床 CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> 地浸采铀过程中, 铀浓度与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度呈显著的正相关关系, 但经过浸出初期后, 提高 CO<sub>2</sub> 加入量不能有效提升体系 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度, 而对多数地浸单元的矿化条件而言, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度也尚未达最佳浸出需求。为此在该矿床某采区, 采用补加碳酸氢铵和提高 CO<sub>2</sub> 加入量相配合的工艺, 开展了强化浸出试验。结果表明, 强化浸出效果显著, 该采区浸出液中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 从 850 mg/L 提升至 1 200 mg/L, 单孔铀浓度提升 1.73~44.33 mg/L, 集合样铀浓度提升 8 mg/L。将 pH 调控在 6.2~6.3 和降低 O<sub>2</sub> 加入量稳定 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度, 能避免强化浸出过程中发生碳酸钙和硫酸钙的沉淀, 抽、注流量也并未受到影响。该强化浸出技术在多采区应用取得了良好的浸出效果和经济效益, 是对该矿床 CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> 浸出工艺的进一步优化。

**关键词:**砂岩型铀矿; CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> 地浸; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 强化浸出

**中图分类号:** TL212.1<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7545(2020)12-0048-06

## Field Trial on Enhanced In-situ Leaching of Uranium by CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> Leaching

ZHANG Qing-lin<sup>1</sup>, ZHOU Yi-peng<sup>2</sup>, MU Zhi-jun<sup>1</sup>,  
YANG Xiao-yu<sup>1</sup>, LI Guang-rong<sup>2</sup>

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

2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Uranium concentration has a significant positive correlation with HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> during CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> in-situ leaching of uranium process from Mengqiguer sandstone type uranium deposit in Xinjiang. However, after the initial stage of leaching, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration of leaching solution can be not increased effectively by adding more CO<sub>2</sub>. For most leaching units of Mengqiguer deposit, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration does not yet meet the optimal leaching requirement. So, in a selected mining area of the deposit, a trial of supplementing bicarbonate ammonia combined with increasing of CO<sub>2</sub> amount was carried out to enhance leaching intensity. The study results show that effect of enhanced leaching is significant; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration rises from 850 mg/L to 1 200 mg/L, which results in that uranium concentration of pregnant solution of single-well rises by 1.733 - 44.33 mg/L, and that of mix pregnant solution by 8 mg/L. While pH value of leaching solution is controlled at 6.2 - 6.3 and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration stabilized by reducing O<sub>2</sub>, precipitation

**收稿日期:** 2020-08-30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41572231)

**作者简介:** 张青林(1984-), 男, 湖南衡阳人, 工程师

of calcium carbonate and calcium sulfate will not happen during enhanced leaching process. In addition, pumping and injection capacities are not affected passively. This enhanced leaching technology is a further optimization of  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  leaching process in Mengqiguer deposit, and good leaching effect and economic benefits result from its applications in mining areas.

**Key words:** sandstone type uranium deposit,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in-situ leaching, intensive leaching by  $\text{HCO}_3^-$

$\text{CO}_2 + \text{O}_2$  中性地浸作为一种相较于酸法地浸更加绿色环保的采铀工艺已经在我国新疆和内蒙古等多个铀矿山实现了工业化应用<sup>[1-4]</sup>,该工艺作为一种从碱法地浸基础上发展形成的铀矿地浸工艺,其原理大体上与碱法地浸采铀方法一致,即四价铀经氧化后以碳酸铀酰络合物形式溶解浸出<sup>[5]</sup>。新疆蒙其古尔铀矿床碳酸盐及黄铁矿含量高,酸法和碱法浸出易发生硫酸钙和碳酸钙沉淀<sup>[6-7]</sup>,为避免产生化学堵塞,采用  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  地浸工艺。 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  中性地浸面临着与碱法地浸一样的问题,即就采铀效率而言尚不如酸法地浸,尤其是采铀的中后期<sup>[8-9]</sup>。蒙其古尔矿床即是如此,部分采区运行 6~12 个月后,浸出液铀浓度出现下降趋势显著。本文以该矿床某采区为例,开展以提升  $\text{CO}_2$  的配加浓度以及补加碳酸氢铵为主要技术手段的强化浸出试验,研究铀的强化浸出特征和相关工艺参数。

## 1 试验采区概况

### 1.1 钻孔及抽注单元

强化浸出试验采区位于矿床 P15-P19 勘探线之间,目标层为三工河组下段矿体。采用“五点式”井型,共 30 个抽注单元,抽注液井距 30 m,钻孔分布如图 1 所示。

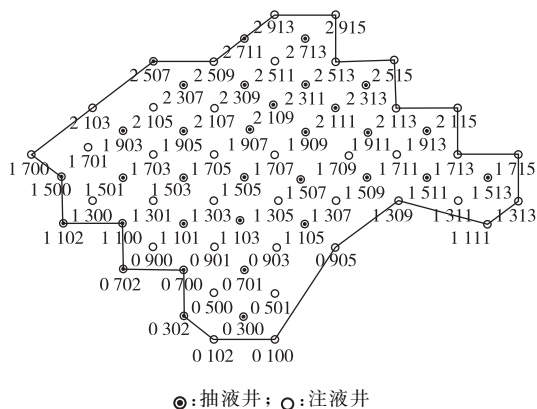


图 1 试验采区钻孔平面分布图

Fig. 1 Plane distribution of boreholes in field leaching trial

### 1.2 含矿层地质与水文地质条件

采取矿层埋深介于 455~483 m,有稳定的泥岩顶、底板,砂体厚度 11.63~20.38 m,平均厚度 14.99 m。砂体岩性以粗粒砂岩、含砾粗粒砂岩为主,胶结疏松,局部砂体中存在一层泥岩夹层,厚度 0.3~1.2 m。矿体平均厚度 5.64 m,平均品位 0.0619%,平均平米铀量 7.6 kg/m<sup>2</sup>。含矿主岩碳酸盐含量 0.05%~4.15%,其中矿石中含量 0.21%~8.04%,铀含量较高的矿石中沥青铀矿常与黄铁矿伴生。含矿层渗透系数 0.61~1.28 m/d,导水系数 4.39~11.24 m<sup>2</sup>/d。

### 1.3 试验前采区地浸生产情况

试验采区强化浸出前,经历了三个不同控制条件的浸出阶段,历时 329 d。

第一阶段,92 d, $\text{O}_2$  加入量为 300~400 mg/L, $\text{CO}_2$  为 450~600 mg/L。浸出 45 d 后大部分孔溶解氧达到 20 mg/L 以上,集合样浸出液  $\text{HCO}_3^-$  浓度至 967 mg/L,pH 趋于 6.50,集合样铀浓度达到最高 89.04 mg/L,单孔铀浓度峰值相继出现。

第二阶段,127 d,对  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  中性浸出工艺参数进行了调整优化,将  $\text{CO}_2$  的加入量提高至 600~800 mg/L, $\text{O}_2$  加入量不变。浸出液 pH 下降至 6.3~6.4, $\text{HCO}_3^-$  和铀浓度短期小幅上升后开始下降。

第三阶段,110 d,鉴于浸出液铀浓度及  $\text{HCO}_3^-$  均开始下降,将  $\text{O}_2$  提高至 550~650 mg/L, $\text{CO}_2$  提高至 800~1 200 mg/L。浸出液溶解氧一度达到 42 mg/L 以上,pH 下降至 6.20, $\text{HCO}_3^-$  维持在 850 mg/L 左右,铀浓度仍然处于下降的趋势。

## 2 强化浸出试验方法与过程

在  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  中性浸出工艺的基础上,补加碳酸氢铵以提高浸出体系的  $\text{HCO}_3^-$  含量。鉴于碳酸氢铵水溶液呈碱性(25 °C 时 0.1 mol/L 溶液的 pH 为 7.8),相应适当提高  $\text{CO}_2$  的加入量,将浸出体系的 pH 调节在补加碳酸氢铵之前的原有水平,从而避免体系 pH 过高而引起碳酸钙的沉淀堵塞。

试验历时 110 d,在溶浸液中配加  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,同时提升  $\text{CO}_2$  加入量,控制溶浸液 pH 在 6.6~6.8。初期在溶浸液中配加  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  溶液, $\text{CO}_2$  加入量在 750 mg/L 左右,溶浸液 pH 控制在 6.6~6.8,溶浸液中  $\text{HCO}_3^-$  从本底 850 mg/L 左右提高至 1 200 mg/L 左右。鉴于浸出液中的溶解氧( $\text{D}_0$ )及硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )较高, $\text{O}_2$  加入量降至 200 mg/L。从第 40 d 开始,将  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  配加量提升, $\text{CO}_2$  加入量提高至 850 mg/L 左右,溶浸液 pH 与  $\text{O}_2$  加入量控制不变,溶浸液中  $\text{HCO}_3^-$  提高至 1 500 mg/L 左右。运行 12 d 后,单孔浸出液  $\text{HCO}_3^-$  开始出现提升,运行 52 d 后,采区浸出液集合样  $\text{HCO}_3^-$  提升最高至 1 200 mg/L 以上。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 铀浸出状况

该采区投入运行以来集合液铀浓度变化情况如图 2 所示。图中,区间①浸出初期  $\text{HCO}_3^-$  及铀浓度快速上升;区间②铀浓度及  $\text{HCO}_3^-$  下降,提高了  $\text{CO}_2$  的加入量, $\text{HCO}_3^-$  在 900 mg/L 左右,pH 下降至 6.35;区间③提高  $\text{O}_2$  及  $\text{CO}_2$  的加入量, $\text{HCO}_3^-$  仍在 850 mg/L 左右,pH 下降至 6.2,铀浓度持续下降;区间④补加碳酸氢铵强化浸出,铀浓度及  $\text{HCO}_3^-$  有所回升。

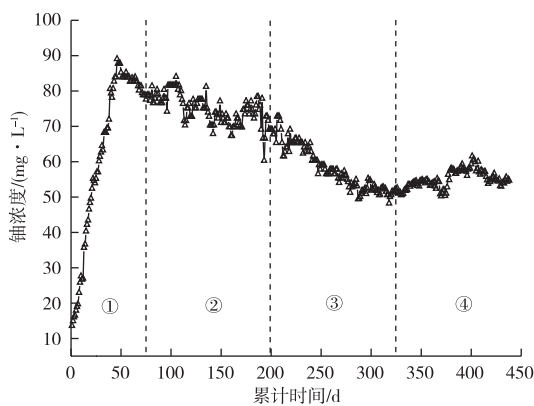


图 2 采区浸出集合液铀浓度变化图

Fig. 2 Bivariate graph between time and uranium concentration of pregnant solution in field trial

试验开始 10 d 后,集合液铀浓度开始提升;75 d 后,碳酸氢根升高至 1 200 mg/L,集合样铀浓度从 50.29 mg/L 提升至 61.5 mg/L,此后开始呈下降趋势。在强化浸出阶段,30 个抽液孔中有 25 个的铀

浓度出现不同程度的提升,强化浸出前后的铀浓度变化情况如图 3 所示(25 个铀浓度上升的抽孔中的 8 个),单孔铀浓度提升 1.73~44.33 mg/L,集合样铀浓度提升 8 mg/L。

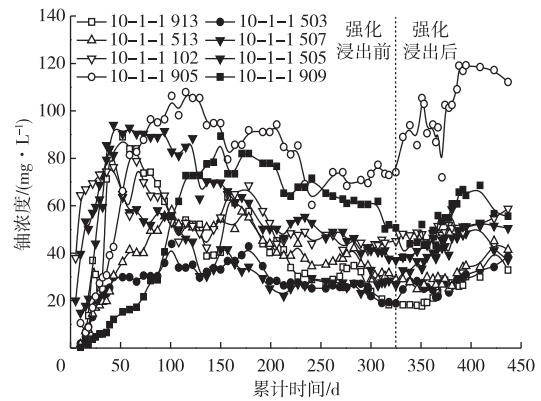


图 3 抽液井浸出液铀浓度变化图

Fig. 3 Variation diagram of uranium concentration in leaching solution of pumping well

#### 3.2 强化浸出结果分析

##### 3.2.1 $\text{HCO}_3^-$ 对提高浸铀效果的作用分析

整个浸出期间,集合液铀浓度与  $\text{HCO}_3^-$  的关系如图 4 所示。作为碳酸铀酰的配位离子提供者, $\text{HCO}_3^-$  的浓度在中性地浸工艺中对铀的浸出而言是关键因素。在图 4 的①、②和③所示区间,铀浓度的变化都与  $\text{HCO}_3^-$  浓度的升降有密切的正相关:①区是浸出最初期,矿层水化学条件快速从地下水背景状态向地浸状态转变,浸出液铀浓度与  $\text{HCO}_3^-$  浓度的上升和变化步调高度协同,当  $\text{HCO}_3^-$  浓度趋稳时,铀浓度则不再升高,随后在  $\text{HCO}_3^-$  浓度相对稳定的条件下开始下降;②区  $\text{HCO}_3^-$  浓度小幅度提升,虽未能使得铀浓度止降回升,但持续下降的趋势得到控制,出现短期趋稳的态势;③区(即强化浸出阶段)在  $\text{HCO}_3^-$  浓度大幅度提升时,铀浓度出现明显回升,两者相关性显著:强化浸出 15 d 后,浸出液  $\text{HCO}_3^-$  浓度从 850 mg/L 提升到 1 100 mg/L,铀浓度从 49 mg/L 提升到 54 mg/L,随后提高碳酸氢铵配加量,浸出液  $\text{HCO}_3^-$  浓度从 850 mg/L 提升到 1 200 mg/L,铀浓度从 54 mg/L 提升到 60 mg/L;而在后期暂停补加碳酸氢铵后,铀浓度及  $\text{HCO}_3^-$  浓度开始回落,铀浓度也随即开始下降。可以看出, $\text{HCO}_3^-$  浓度在整个浸出期间都对铀的浸出具有重要影响。

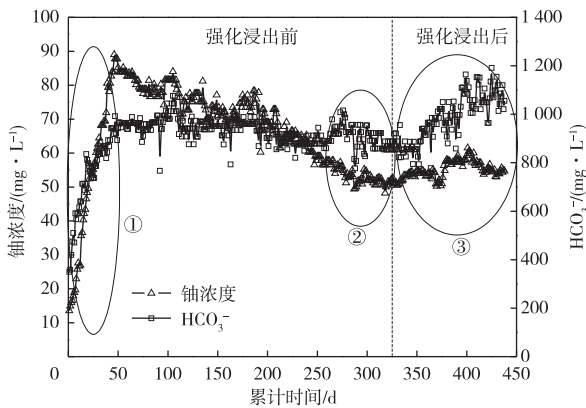


图4 集合液铀与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度变化曲线

Fig. 4 Bivariate graph between uranium concentration and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in collecting solution

3.2.2 CO<sub>2</sub> 对浸出体系 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup> 及 pH 的影响

采区运行以来,注液 CO<sub>2</sub> 加入量与浸出液 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度变化关系见图 5。如图 5 中①区所示,采区运行初期,随着 CO<sub>2</sub> 注入含矿含水层且加入量逐步增加,与地层碳酸盐矿物相互作用促使体系 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 从初始背景含量快速上升,当 CO<sub>2</sub> 加入量开始稳定在 600 mg/L 左右时(第 36 d 开始,持续至第 86 d),浸出液 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量也在随后达到 950 mg/L 左右开始稳定(第 46 d 开始稳定,比 CO<sub>2</sub> 加入量的变化滞后 10 d);然而,当 CO<sub>2</sub> 的加入量从稳定状态再次提高时,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量并不能如初期那样出现显著并持续的上升(图 5 中的②区和④区),而降低 CO<sub>2</sub> 的加入量却能导致 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的下降(图 5 所示③区和⑤区),反映出岩石孔隙中能与溶液接触并被溶蚀的碳酸盐已经显著减少,在这种情况下,提高 CO<sub>2</sub> 的加入量会促使体系 pH 持续降低,受此影响,体系 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量也将会下降。强化浸出阶段,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的上升则来自于补加碳酸氢铵和 CO<sub>2</sub> 加入量提高的共同贡献,一方面增加了 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的绝对量,另一方面碳酸氢铵的加入在一定程度上抑制了体系 pH 的降低,有利于提高 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的相对含量。

过量的 CO<sub>2</sub> 会导致地层碳酸盐(主要是方解石)的溶解强度增加,引起溶液中 Ca<sup>2+</sup> 含量过高,并在运移过程中发生沉淀;CO<sub>2</sub> 的加入量过低,则无以获得足量的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 满足浸铀要求。在强化浸出期间,碳酸氢铵和 CO<sub>2</sub> 的配合使用要达到有效提高 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的目的,也需要将溶液 Ca<sup>2+</sup> 含量和 pH 控制在合理范围内,避免发生碳酸钙沉淀。强化浸出前后,CO<sub>2</sub> 加入量和浸出液 Ca<sup>2+</sup> 浓度、pH 变化情况如图 6 所示。

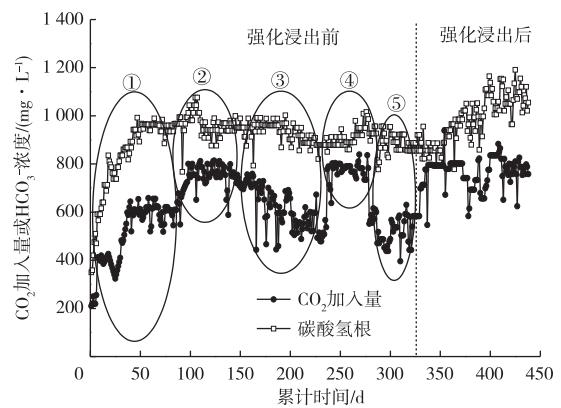


图5 浸出液 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度与注液 CO<sub>2</sub> 加入量的关系图

Fig. 5 Relationship between HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration of leaching solution and CO<sub>2</sub> content of injection solution

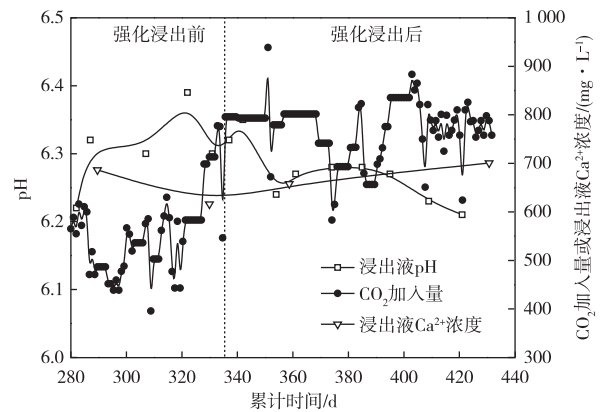


图6 配加碳酸氢铵前后 CO<sub>2</sub> 加入量、钙离子与 pH 变化图

Fig. 6 Changes of added CO<sub>2</sub>, Ca<sup>2+</sup> and pH value before and after adding ammonium bicarbonate

强化浸出期间,CO<sub>2</sub> 加入量从之前的 600 mg/L 调至 800 mg/L,浸出液 pH 从 6.3~6.4 降至 6.2 左右,Ca<sup>2+</sup> 浓度略有升高,从 630 mg/L 升至 700 mg/L。Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度的上升促进碳酸钙的沉淀,而 pH 的下降有助于抑制碳酸钙沉淀,因此,根据浸出液化学组分分析数据,运用地球化学模式软件对强化浸出期间的方解石(碳酸钙)和白云石(碳酸镁)的饱和指数进行计算,以分析两者是否具有发生沉淀的可能。计算结果如图 7 所示,试验前后方解石、白云石饱和指数均为负值,两者都未达到饱和,表明未发生碳酸盐的沉淀。

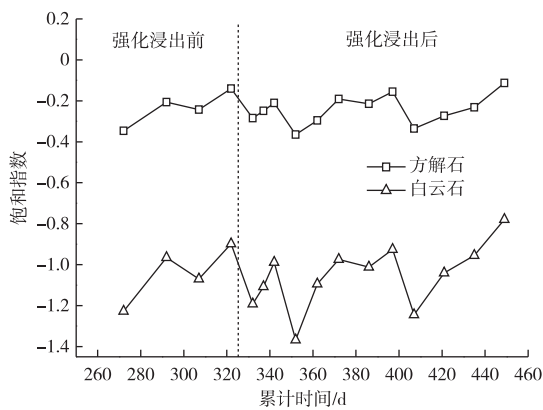


图7 强化浸出前后方解石、白云石饱和指数  
Fig.7 Saturation index of calcite and dolomite before and after enhanced leaching

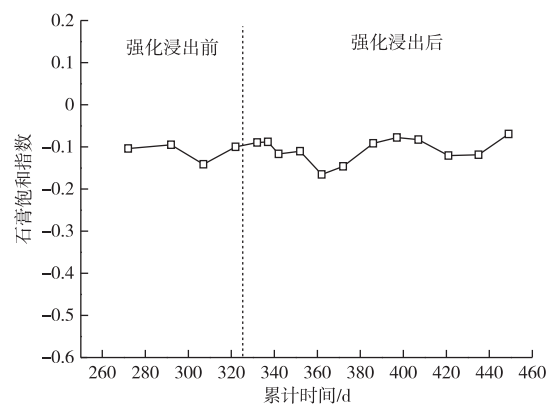


图9 强化浸出前后石膏饱和指数  
Fig.9 Saturation index of gypsum before and after enhanced leaching

### 3.2.3 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度的变化及硫酸钙沉淀的控制

强化浸出期间,考虑到CO<sub>2</sub>加入量的提高会使溶液Ca<sup>2+</sup>浓度上升,由此增加溶液渗流过程中硫酸钙发生沉淀的可能性。鉴于Ca<sup>2+</sup>浓度上升不可避免,有必要对SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度进行控制以降低硫酸钙沉淀的风险。蒙其古尔矿床中性浸出体系中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主要来自于O<sub>2</sub>对黄铁矿的氧化,因此,在强化浸出期间将O<sub>2</sub>的加入量逐步调低至200 mg/L,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>保持在1 150~1 350 mg/L,如图8所示。

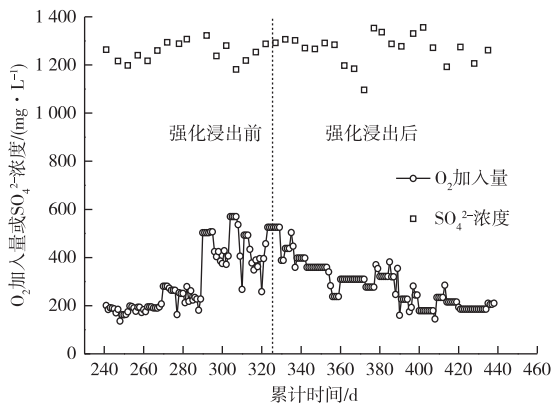


图8 强化浸出前后O<sub>2</sub>加入量与浸出液SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度变化图  
Fig.8 Changes of added O<sub>2</sub> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration in leaching solution before and after enhanced leaching

根据强化浸出前后浸出液水化学分析数据,运用地球化学模式软件PHREEQCI对浸出体系硫酸钙饱和指数进行计算,结果如图9所示,结果表明,强化浸出前后石膏饱和指数都为负值,且基本保持稳定,未达到发生石膏沉淀的临界条件。

## 4 应用及效果

从试验采区扩大到10个采区开展强化浸出推广应用,10 d后各采区大部分浸出液铀浓度及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度出现不同程度的提升,50 d后集合液HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度从854 mg/L提升至1 050 mg/L,强化浸出历时110 d,各采区铀浓度涨幅2.6~42.3 mg/L,平均涨幅13.30 mg/L,强化浸出效果显著。

## 5 结论

1)CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>中性地浸采铀过程中,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>对铀的浸出效果起关键作用,对蒙其古尔矿床多数浸出单元的矿化条件和浸出效果而言,800~950 mg/L的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度尚可提高。

2)随着浸出体系HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量趋稳以及地层碳酸盐不断溶蚀减少,单靠提高CO<sub>2</sub>的加入量并不能使体系HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度增高,补加碳酸氢铵是提高体系HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量的有效措施。

3)补加碳酸氢铵需配合CO<sub>2</sub>对pH的调控以提高HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量,并避免发生碳酸盐沉淀。在HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为1 200 mg/L和Ca<sup>2+</sup>达到700 mg/L的条件下,将体系pH控制在6.2~6.3,不会发生硫酸钙的沉淀。

4)当氧化达到一定程度体系溶氧持续富余时,有必要适当降低O<sub>2</sub>的加入量,以稳定体系SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度,避免因Ca<sup>2+</sup>升高而导致硫酸钙饱和沉淀。

### 参考文献

[1] 王西文.地浸采铀概述[J].铀矿开采,1996,20(1): 1-12.

- WANG X W. Overview of in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining, 1996, 20(1): 1-12.
- [2] 王永莲. 地浸采铀工艺技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007: 1-10.
- WANG Y L. The Technology of In-situ Leaching of Uranium [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2007: 1-10.
- [3] 吉宏斌, 周义朋, 孙占学, 等. 蒙古古尔铀矿床  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  地浸浸出过程分析与探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3): 55-59.
- JI H B, ZHOU Y P, SUN Z X, et al. Analysis of and discussion on  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in-situ leaching of uranium process at Mengqiguer deposit[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(3): 55-59.
- [4] 杜志明, 牛学军, 苏学斌, 等. 内蒙古某铀矿床  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  地浸采铀工业性试验[J]. 铀矿冶, 2013, 32(1): 1-4.
- DU Z M, NIU X J, SU X B, et al.  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in-situ leaching test of one uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1): 1-4.
- [5] 周义朋, 沈照理, 史维浚, 等. 地浸采铀工艺分类方法的探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(1): 37-41.
- ZHOU Y P, SHEN Z L, SHI W J, et al. Discussion on technology classification of in-situ leaching uranium mining[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(1): 37-41.
- [6] 张勇, 周义朋, 张青林, 等. 蒙古古尔矿床微酸地浸采铀碳酸钙饱和状态研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(12): 24-27.
- ZHANG Y, ZHOU Y P, ZHANG Q L, et al. Saturation state of calcium carbonate during mild acid in-situ leaching of uranium at Mengqiguer deposit[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2014(12): 24-27.
- [7] 张勇, 黄群英, 周义朋, 等. 高碳酸盐型铀矿床微酸中性地浸采铀试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(2): 33-37.
- ZHANG Y, HUANG Q Y, ZHOU Y P, et al. Low acid neutral in-situ leaching of uranium mining with high content of carbonates uranium deposit[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2016(2): 33-37.
- [8] 高柏, 胡宝群, 史维浚, 等. 新疆十红滩铀矿床碱法地浸水岩作用讨论[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(2): 101-106.
- GAO B, HU B Q, SHI W J, et al. Mechanism of water-tock interaction and its influence on alkaline leaching of Shihongtan uranium deposit in Xinjiang[J]. Journal of East China Institute of Technology(Natural Science), 2013, 36(2): 101-406.
- [9] 杜超超, 周义朋.  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  地浸采铀矿层渗透性影响因素[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(7): 48-53.
- DU C C, ZHOU Y P. Influence factors on permeability of ore layer in uranium  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in-situ leaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(7): 48-53.