doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.12.011

某高碳酸盐砂岩铀矿的碱法浸出

马成翠[1],魏学斌[2],陈功新[1],岑丽[1],孔德悬[1],陈诗峰[1]

(1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院,南昌 330013;
2. 中国石油青海油田分公司 勘探开发研究院,甘肃 敦煌 736200)

摘要:为探究某高碳酸盐砂岩型铀矿的浸出工艺参数,在室内进行了不同碱性试剂、不同氧化剂条件下的静态浸出试验,运用PHREEQCI软件计算了碳酸盐矿物的饱和指数及浸出液中铀的存在形式,并进行了浸出动力学分析。结果表明,铀浸出率与溶浸液中HCO_3^-浓度呈正相关,并且NH_4HCO_3的浸出效果要优于$NaHCO_3$;H_2O_2氧化效果明显强于$KMnO_4$和$K_3Fe(CN)_6$,铀浸出率随H_2O_2质量浓度的增加而增长,综合考虑效益、成本等因素,最佳浸出条件为800 mg/L NH_4HCO_3+2 g/L H_2O_2,最终铀浸出率为21.04%;整个浸出过程方解石和白云石均处于超饱和状态,应控制体系pH以避免碳酸盐发生饱和沉淀;浸出过程中铀的溶解反应主要受表面化学反应控制,扩散影响相对较小。

关键词:砂岩型铀矿;高碳酸盐;碱法浸出;氧化剂;PHREEQCI

中图分类号:TL212.1+2 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-7545(2022)12-0067-10

Alkaline Leaching of a High Carbonate Sandstone Uranium Ore

MA Cheng-cui[1], WEI Xue-bin[2], CHEN Gong-xin[1], CEN Li[1], KONG De-xuan[1], CHEN Shi-feng[1]

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Qinghai Oilfield Research Institute of Exploration and Development, Dunhuang 736200, Gansu, China)

Abstract: In order to investigate the leaching process parameters of a high carbonate sandstone type uranium ore, tatic leaching tests were carried out indoors with different alkaline reagents and different oxidants, the saturation index of carbonate minerals and the form of uranium present in leachate were calculated using PHREEQCI software, and leaching kinetic analysis was performed. The results show that leaching rate of uranium is positively correlated with the concentration of HCO_3^- in leachate, and the leaching effect of NH_4HCO_3 is better than that of $NaHCO_3$. The oxidation effect of H_2O_2 is significantly stronger than that of $KMnO_4$ and $K_3Fe(CN)_6$, and the leaching rate of uranium rises with increase of mass concentration of H_2O_2, and the best leaching conditions is 800 mg/L NH_4HCO_3+2 g/L H_2O_2, with a final uranium leaching rate of 21.04%. The pH value of the system should be controlled to avoid saturation precipitation of carbonate; the dissolution reaction of uranium during the leaching process is mainly controlled by surface chemistry, and the influence of diffusion is relatively small.

Key words: sandstone uranium ore; high carbonate; alkaline leaching; oxidant; PHREEQCI

随着全球总体平均铀矿品位的持续下降,低品位铀矿资源的开发必将成为未来的发展趋势[1-2],研究低品位砂岩型铀矿浸出提高我国铀产能迫在眉睫。地浸砂岩型铀矿是我国目前主要的铀矿开采类

收稿日期:2022-08-21

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20202BABL203033);国家自然科学基金资助项目(U1967209);放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室基金项目(2020RGET08);横向科研基金项目(H202100029)

作者简介:马成翠(1997-),女,硕士研究生;**通信作者**:陈功新(1975-),男,博士,教授,硕士生导师

型，是今后一段时间里铀矿开采的主要方向。由于该类型矿石碳酸盐矿物含量高，铀品位低、渗透性差，限制了该类铀矿石的开发和利用[3]。大量研究和工业实践表明，对于该类矿石需要碱法浸出技术才能更好的回收[4-6]。

碱法浸出是指利用 CO_3^{2-} 与六价铀在弱碱性环境下反应形成易溶的络合物从而将铀从固相迁移至液相的过程[7-8]，具有选择性好、浸出液矿化度低、铀纯度高等特点，但相较于酸法浸出，对矿石破坏小，浸出过程碳酸盐矿物容易沉淀，造成矿层的堵塞。碱法浸出铀矿最早是以美国为代表的碳酸盐加氧化剂共同浸出砂岩铀矿石中的铀[9]。我国碱法地浸试验最早应用于新疆某砂岩型铀矿，其矿体通过加压氧气进行氧化的碱法原地浸出铀矿的浸出率提高[4,10]。碱法浸出过程中，碱性溶浸液的种类及浓度、氧化剂种类及浓度对浸出效果的影响较大[11]。常用的碱性浸出剂有钠、钾、铵的碳酸盐和碳酸氢盐。肖志海[12]为探讨不同浸出剂对矿石浸出的影响，对某高碳酸盐型铀矿石进行了室内柱浸试验，结果表明，该矿石采用碱法浸出，铀浸出率在80%左右，且使用 $(NH_4)_2CO_3$ 作为浸出剂的浸出效果优于 Na_2CO_3。GHORBANI[13]以 Na_2CO_3 和 $NaHCO_3$ 为浸出剂，对高碳酸盐铀钒矿石的浸出效果及浸出剂消耗情况进行了研究，结果表明，碱性浸出液可以有效浸出矿石中的铀，浸出剂的流速对实际消耗和浸出效果都具有显著影响；基于柱浸试验结果拟合的动力学模型与柱浸结果具有极高的吻合度。刘迎九等[14]采用不同质量分数的 Na_2CO_3 或 $NaHCO_3$ 溶液为溶浸剂，对某铀矿床进行室内碱法浸出试验，最终铀浸出率随溶浸剂质量分数的增加逐渐提高，且相同质量分数时，Na_2CO_3 条件下浸出率高于 $NaHCO_3$。

在地浸开采过程中，稳定的 U^{4+} 很难从原矿中浸出，通常需要加入氧化剂将 U^{4+} 氧化为易浸出的 U^{6+}。在进行碱法浸出时，氧化剂一般选择双氧水、高锰酸钾、次氯酸钠等。BRODNAX 等[15]对 H_2O_2、NaOCl 和过硫酸钾的氧化性进行比较，发现 H_2O_2 的氧化能力明显高于另两者。但是 H_2O_2 在碱性溶液中不稳定，易分解成氧气和水[16]。高锰酸钾在中性、酸性和碱性溶液中稳定性较好[17]，但是在碳酸盐介质中用过锰酸盐浸出时，会在铀矿上形成二氧化锰膜层，铀浸出的效果可能较差。GILLIGAN 等[18]认为铁氰化物对铀的氧化更有效，因为它的再生能力与硫酸浸出中铁的作用相似，且铁氰化钾已在新墨西哥州的一铀矿浸出成功试用。科罗拉多矿业学院研究所(CSMRI)测试了次氯酸钠、空气和过氧化氢三种不同氧化剂对铀浸出的影响，与使用空气作为氧化剂相比，过氧化氢的浸出率平均提高了10%，次氯酸钠平均增加了25%[19]。

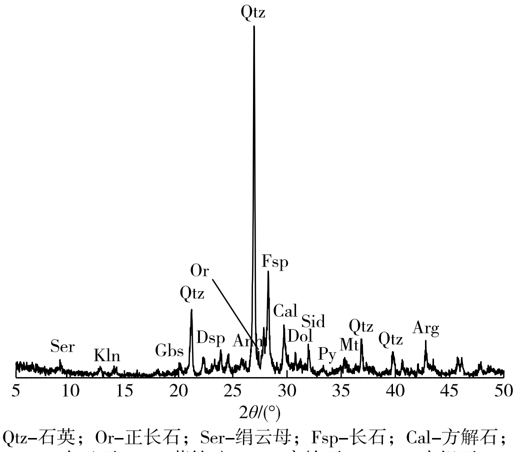
某砂岩型铀矿是我国新发现的又一典型铀矿，具有泥质有机质含量高、碳酸盐含量高、渗透性低和品位较低等特征，目前虽已开展大量勘探[20-21]，但如何有效提取铀资源还处空白阶段。为此，本文选取该铀矿石开展了不同碱性试剂种类和质量浓度、不同氧化剂种类和质量浓度静态浸泡试验，研究溶浸剂类型对铀浸出的影响及碱法浸出工艺对该铀矿石的浸出性能，确定柴西南区跃进砂岩型铀矿采铀工业化生产的工艺技术，为该铀矿的合理、经济、高效开采提供一定的理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验所用铀矿石取自柴达木盆地西区跃进铀矿六个钻孔的若干原状岩心，岩性为绿灰色粉泥质砂岩。将野外现场采集的岩芯样品进行去泥质，自然破碎，过筛后得到不同粒级样品，其中+5、-5+2.5、-2.5+1、-1+0.5、-0.5+0.2、-0.2 mm 所占比例分别为 6.63%、9.98%、12.27%、33.00%、25.23%、12.89%。对混合形成的综合样品进行XRD、SEM 分析。

分析显示，矿石成分主要为石英，硅酸盐矿物含量较多，还含有少量高岭土等黏土矿物(图1)。矿石表面结构松散，粒径和孔隙粒径较小，形状不规则，并且富含大小、形状不一棱角薄片状形态矿物，主要



Qtz-石英；Or-正长石；Ser-绢云母；Fsp-长石；Cal-方解石；Dol-白云石；Sid-菱钛矿；Kln-高岭石；Gbs-三水铝石；Dsp-硬水铝石；Anh-硬石膏；Py-黄铁矿；Arg-文石；Mt-磁铁矿

图1　矿石样品的 XRD 谱

Fig. 1　XRD pattern of ore sample

为绢云母(图 2)。矿石铀品位较低,铀矿物主要为钛铀矿、铀石和少量沥青铀矿,多呈不规则颗粒状产出。铀石、钛铀矿均属较难浸出铀矿物,铀矿物与黄铁矿的共生关系明显。

不同粒级矿石样品按粒级占比充分混合均匀后,用缩分法取混合样 100 g,磨至过 200 目标准筛,送化学成分分析,矿样化学成分分析结果见表 1。矿石铀品位为 0.0139%,其中 U(Ⅳ)占 63.6%,U(Ⅵ)占 36.4%,为高还原性矿石。矿石主要成分为 SiO_2,占比 60.115%,CaO 含量为 5.955%,CO_2 为 3.90%,表明矿石碳酸盐含量(以 CO_2 计)较高。Al_2O_3 含量为 11.885%,含量较高,表明矿石以硅铝酸岩为主,硅铝酸岩在浸出过程中容易产生泥化。总铁含量高,对于碱法浸出不利。

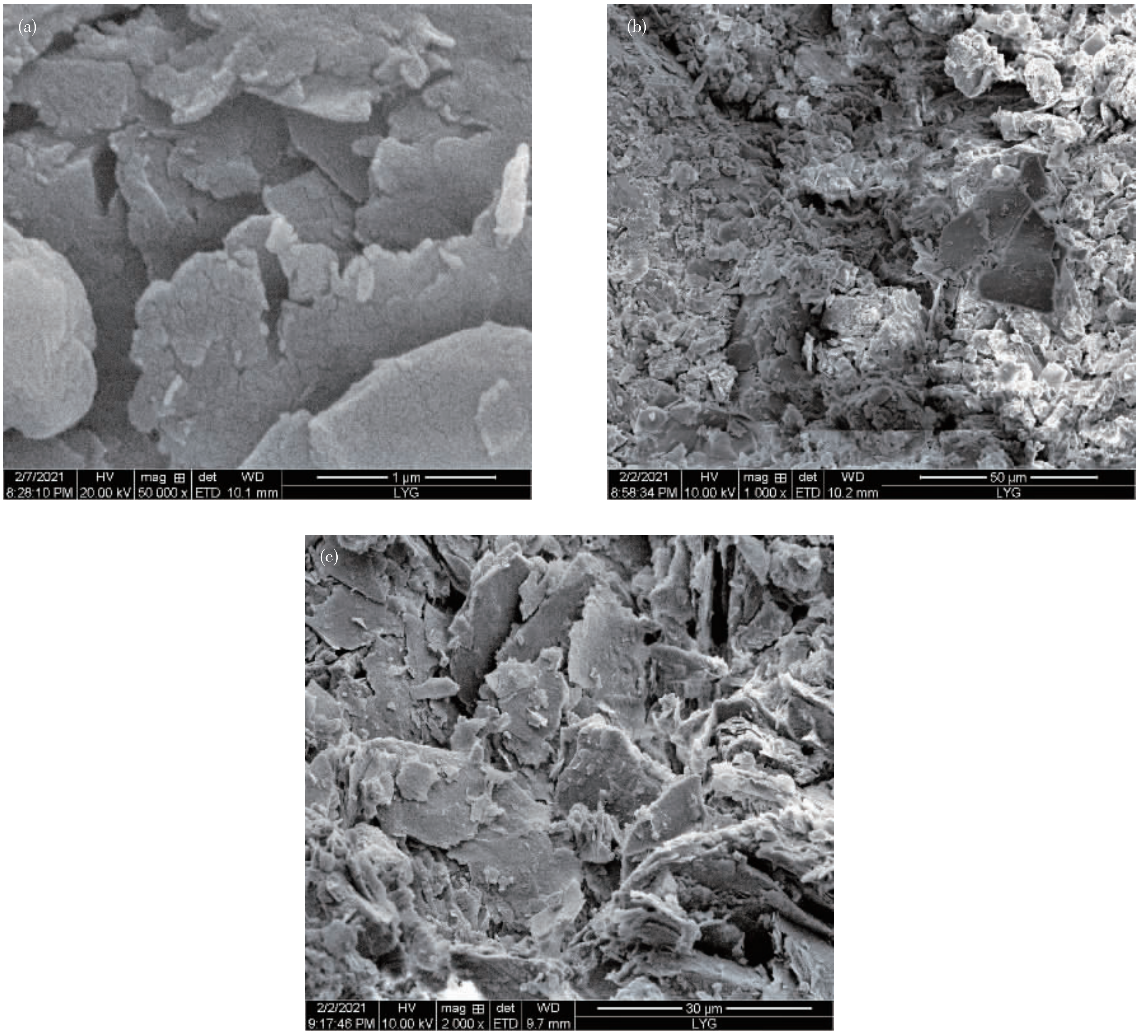


图 2　矿石样品的扫描电镜图像

Fig. 2　SEM micrograph of ore sample

表 1 铀矿石样品化学成分

Table 1 Chemical composition of uranium ore samples　　/%

名称	U	U^{4+}	U^{6+}	SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	MgO	Na_2O	P_2O_5	TFe_2O_3	TiO_2	LOI	CO_2	有机碳
含量	0.013 9	0.008 8	0.005 1	60.115	11.885	5.955	2.740	1.800	3.565	0.110	3.825	0.445	6.580	3.900	0.070

1.2　试验方法

1.2.1　不同碱性试剂条件试验

单次试验称取 100 g 矿样置于 1 000 mL 锥形瓶中,分别加入碳酸氢铵和碳酸氢钠配备的不同浓度碱性溶浸液(HCO_3^- 浓度分别为 600、800、1 000、1 200 mg/L),液固体积质量比 5 mL/g,然后将锥形瓶封口静置。在 0、24、48、72、96、120、144、168 h 时间点取样进行化学元素分析,浸出液 pH、*Eh* 由

FE28型精密酸度计测定，HCO_3^- 及 CO_3^{2-} 采用双指示剂中和法现场滴定，U、Ca^{2+}、K^+、Na^+、Mg^{2+} 等含量采用 ICP-OES 测定。

1.2.2 不同氧化剂条件试验

准确称取100 g矿样置于1 000 mL锥形瓶中，在碱性试剂条件试验选定最佳碱性溶浸液的基础上，分别加入不同浓度的过氧化氢、高锰酸钾、铁氰化钾溶液作氧化剂，浓度分别为0.5、1.0、1.5、2.0 g/L，液固体积质量比5 mL/g，封口静置。在0、24、48、72、96、120 h时间点取样进行化学元素分析，分析方法同上。

2 结果与讨论

2.1 不同碱性试剂条件试验

2.1.1 铀浸出特征

铀的浸出率变化情况如图4所示，在试验进行168小时后，不同浓度(600、800、1 000、1 200 mg/L) NH_4HCO_3 条件下(图3a)，铀浸出率分别为15.65%、16.91%、17.63%、18.17%，不同浓度(600、800、1 000、1 200 mg/L) $NaHCO_3$ 条件下(图3b)，铀浸出率分别为14.68%、16.01%、16.91%、17.45%，表明在碱性浸出条件下，铀浸出率随着 HCO_3^- 浓度的增大而提高。在试验进行72小时内，铀的浸出速度较慢，在试验进行72小时后，铀浸出率大幅度上升，之后由于没有添加氧化剂，随着固相可溶铀的减少，铀浸出速率开始减缓，并在144小时后逐渐达到平稳。两组试验的最高铀浸出率均未超过矿石中六价铀百分含量(36.44%)，表明浸出的大部分是矿石中的六价铀。

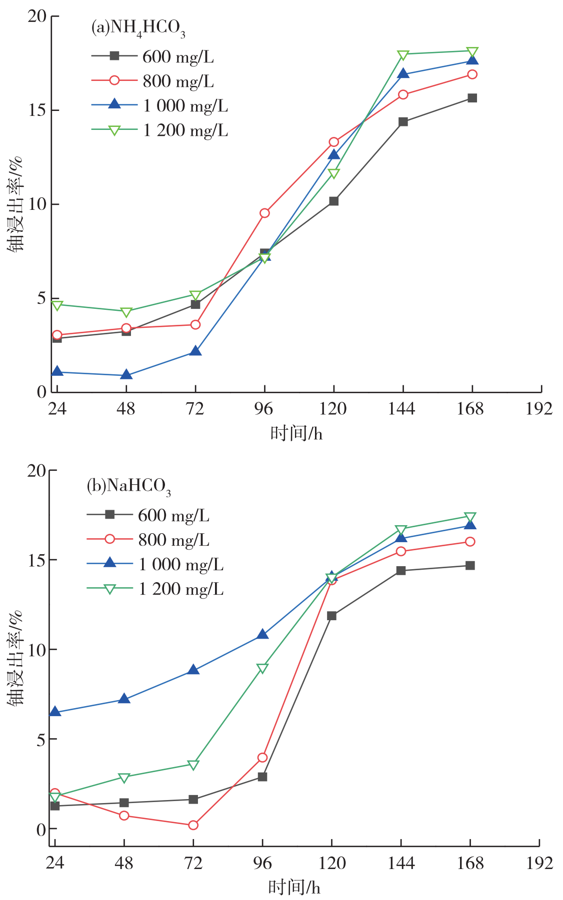


图3 不同碳酸氢盐浸出下铀浸出率随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of uranium extracted with time under different bicarbonate leaching

2.1.2 铀浸出与 HCO_3^- 浓度关系

矿石在不同碱性溶液不同 HCO_3^- 浓度下浸泡168小时后，铀浸出率随 HCO_3^- 浓度的变化特征如图4所示。从图4可以看出，相同溶浸时间的铀浸出率与其 HCO_3^- 浓度呈正相关关系。经过168 h的浸出，在1 200 mg/L的 NH_4HCO_3、$NaHCO_3$ 浸出条件下铀浸出率分别为18.17%、17.45%，NH_4HCO_3 条件下铀浸出率比 $NaHCO_3$ 条件下高0.72个百分点，这可能是由于浸出过程中钠离子黏土中的阳离子发生交换反应，造成黏土膨胀，导致矿石渗透系数降低[22-23]。随着 HCO_3^- 加入量从600 mg/L增加到800 mg/L，NH_4HCO_3 条件下铀浸出率从15.65%增加到16.91%，当 HCO_3^- 加入量从800 mg/L增加到1 000 mg/L时，铀浸出率增加0.72个百分点，800 mg/L后，随着 HCO_3^- 加入量的增加，铀浸出率增长减缓。综合铀浸出率和碳酸盐试剂的消耗成本，选择浓度为800 mg/L的 NH_4HCO_3 溶液进行不同氧化剂条件试验[24]。

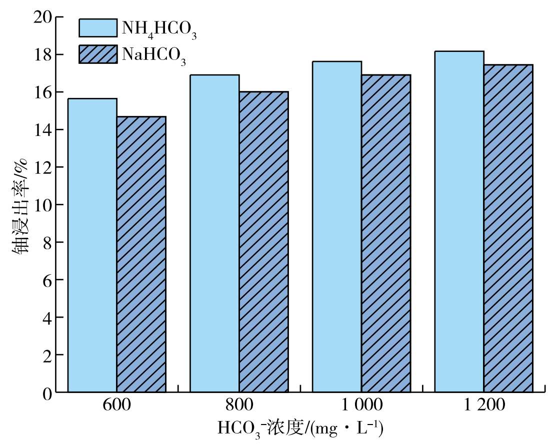


图4 铀浸出率随 HCO_3^- 浓度的变化

Fig. 4 Variation of uranium extracted with HCO_3^- concentration

2.2　不同氧化剂条件试验

2.2.1　铀浸出特征

跃进矿石总铀中四价铀占比为 63.55%，矿石还原性强。无氧化剂碱法浸出只能将矿石中的 U^{6+} 浸出，而矿石中的 U^{4+} 则需使用氧化剂将其氧化为 U^{6+} 才能实现铀的浸出。图 5 为跃进矿石在三种不同浓度氧化剂下铀浸出率随时间的变化。由图 5 可以看出，不同氧化剂下铀浸出率随时间变化不同，使用 H_2O_2 为氧化剂进行碱法浸出，浸出率随着 H_2O_2 浓度的增大而增大，在 0～1.5 g/L 浓度下，浸出 72 小时内铀的浸出速度较慢，72 小时后铀浸出率逐渐上升，2.0 g/L 浓度下，浸出 48 小时后铀浸出率便大幅上升，最终铀浸出率最高，为 20.14%，比无氧化剂条件下提高 6.83 个百分点。高锰酸钾作氧化剂时，最终铀浸出率均低于无氧化剂的碱法浸出，这是因为高锰酸钾被还原，在铀上覆盖了一层二氧化锰，从而减慢了铀的氧化速度和降低了铀矿的渗透性[25]。使用铁氰化钾为氧化剂进行碱法浸出，随着铁氰化钾浓度的增大矿石铀浸出率逐渐降低，质量浓度为 1.5 g/L 和 2.0 g/L 时，最终矿石铀浸出率分别为 10.25%、7.73%，均低于无氧化剂条件下铀浸出率，这可能是因为在氧化过程中，铁氰化钾被还原为亚铁氰化钾覆盖在矿石表面，降低了矿石的渗透性能。

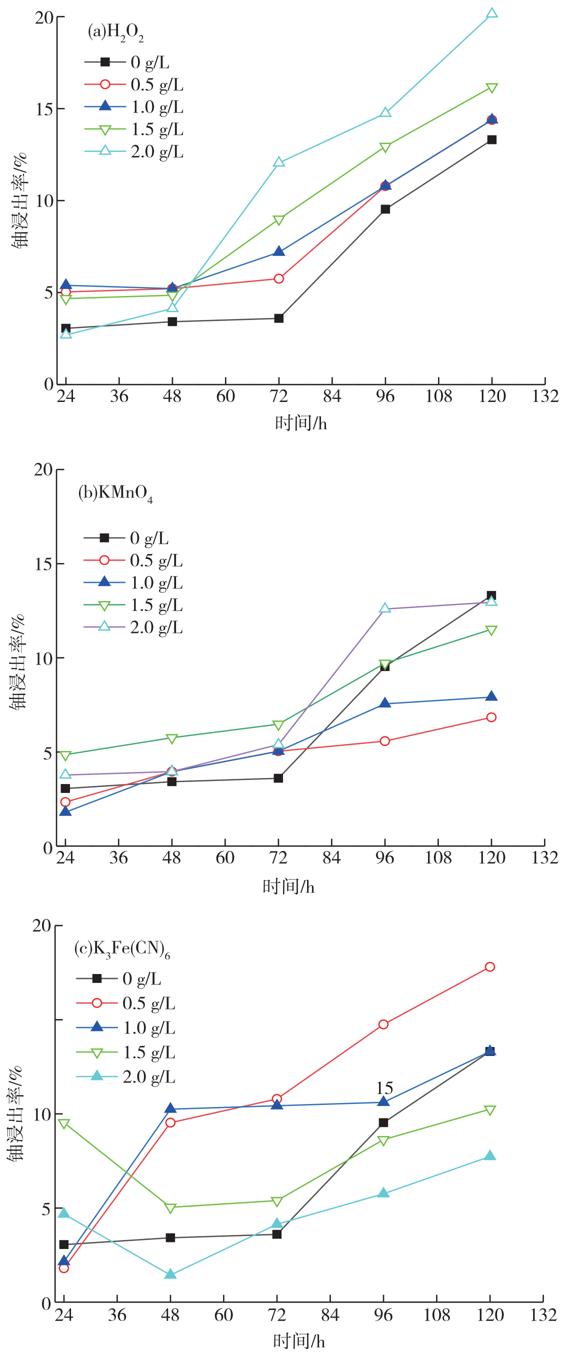


图 5　不同氧化剂浸出下铀浸出率随时间变化曲线

Fig. 5　Variation of uranium extracted with time under different oxidant leaching

2.2.2　铀的浸出与氧化剂浓度关系

矿石在不同浓度不同氧化剂浸泡 120 小时后，铀浸出率随氧化剂浓度的变化特征如图 6 所示。由图 6 可知，H_2O_2 作氧化剂时，铀浸出率与氧化剂浓度呈正相关，H_2O_2 浓度从 0 g/L 增加到 2.0 g/L 时，铀浸出率从 13.31%增加到 20.14%，铀浸出率比无氧化剂条件下提高了 6.83 个百分点。$KMnO_4$ 作氧化剂时，铀浸出率也随着 $KMnO_4$ 浓度的增加而升高，但浸出率均低于未加氧化剂条件下的浸出率，$KMnO_4$ 浓度为 2.0 g/L 时，铀浸出率为 12.95%，比无氧化剂条件下低 0.36 个百分点，这是由于 $KMnO_4$ 在氧化过程中被还原为 MnO_2，而 MnO_2 覆盖在矿石表面使矿石渗透性变差[25]。$K_3Fe(CN)_6$ 作氧化剂时，铀浸出率与 $K_3Fe(CN)_6$ 浓度呈负相关，加入 0.5 g/L的 $K_3Fe(CN)_6$ 碱法浸出下，铀浸出率最高，为

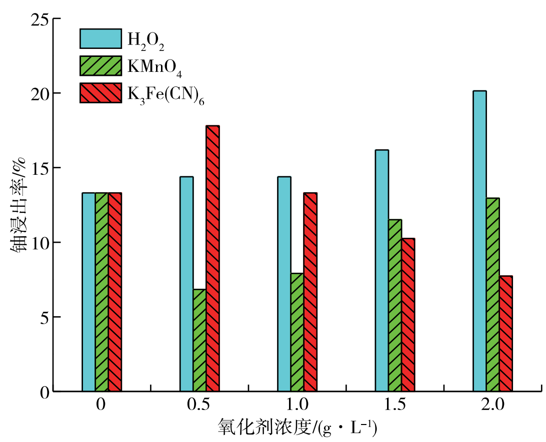


图 6　铀浸出率随氧化剂浓度的变化

Fig. 6　Variation of uranium extracted with oxidant concentration

17.81%，比未使用氧化剂时的铀浸出率高4.5个百分点，这是由于$K_3Fe(CN)_6$与矿石中的还原性物质反应被还原为亚铁氰化钾蓝色沉淀，影响了矿石的渗透性能，$K_3Fe(CN)_6$浓度越高，氧化性越强，但沉淀物越多，矿石的渗透性越差，铀的浸出率则越低。

2.3　碳酸盐矿物沉淀分析

在碱法浸铀水岩体系中，影响碳酸钙盐溶解—沉淀过程的因素主要有pH、HCO_3^-和Ca^{2+}，其中pH是关键性因素[26]。根据不同浸出条件下浸出液中U、Ca^{2+}、K^+、Na^+、Mg^{2+}、HCO_3^-等数据，运用地球化学模拟软件PHREEQCI对各试验浸出过程中方解石($CaCO_3$)和白云石($CaMg(CO_3)_2$)的饱和指数进行计算，结果如图7所示。从图7可以看出，不同浸出条件下体系pH在7～9内，方解石和白云

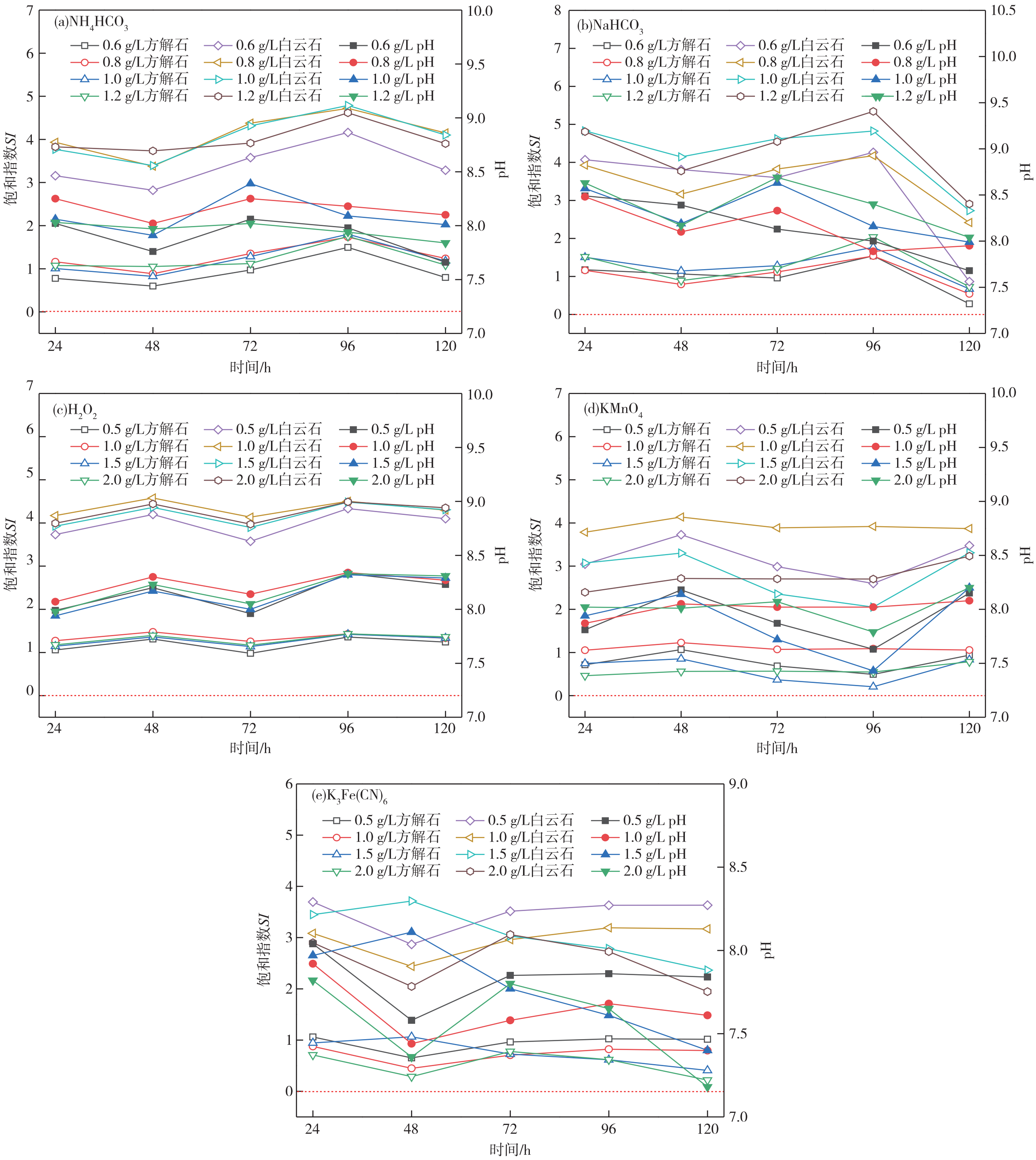


图7　方解石和白云石饱和指数随时间变化曲线

Fig. 7　Calcite and dolomite saturation index curves with time

石的饱和指数均大于 0，表明浸出过程溶液中的 Ca^{2+}(Mg^{2+})与 HCO_3^- 均饱和或过量，方解石和白云石已经过饱和。方解石和白云石的饱和指数与初始 HCO_3^- 浓度和氧化剂浓度无明显相关关系，但与 pH 线性正相关关系显著。为防止堵塞，可以通过加入适量 CO_2 控制地下水系统 pH 在 6～7，控制 H_2CO_3、HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 在溶液中的浓度比例，抑制 CO_3^{2-} 生成和避免碳酸盐沉淀的产生，同时能补充溶浸剂中 HCO_3^- 的消耗[27-28]。

2.4　铀形态分析

根据各试验浸出液铀浓度及化学条件，运用地球化学模拟软件 PHREEQCI 计算不同浸出条件下浸出液中铀的存在形式，结果如图 8 所示。计算结果表明，在无氧化剂碱法浸铀初期，溶液中的铀以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 形式存在，随着浸出时间的增加，$UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 逐渐向 $U(OH)_4$ 转化，中期主要以 $U(OH)_4$ 为主，$U(OH)_4$ 为沉淀，阻碍了铀的浸出，导致了未加氧化剂时铀浸出率低，浸出速率较慢。144 小时后 $U(OH)_4$ 迅速下降，$UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 迅速上升，最终以 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 形式存在。以 600 mg/L 和 1 200 mg/L NH_4HCO_3 为例(图 9a)，浸出初期，浸出液中的铀主要为 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$(20.35%)和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$(79.65%)，$U(OH)_4$ 含量基本为零，中期 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 含量下降，$U(OH)_4$ 含量增长，后期相反，两者呈此消彼长的趋势。加入氧化剂后，不同氧化剂种类浸出液中的铀均主要以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 形式存在，且整个浸出期间，含量基本保持不变。

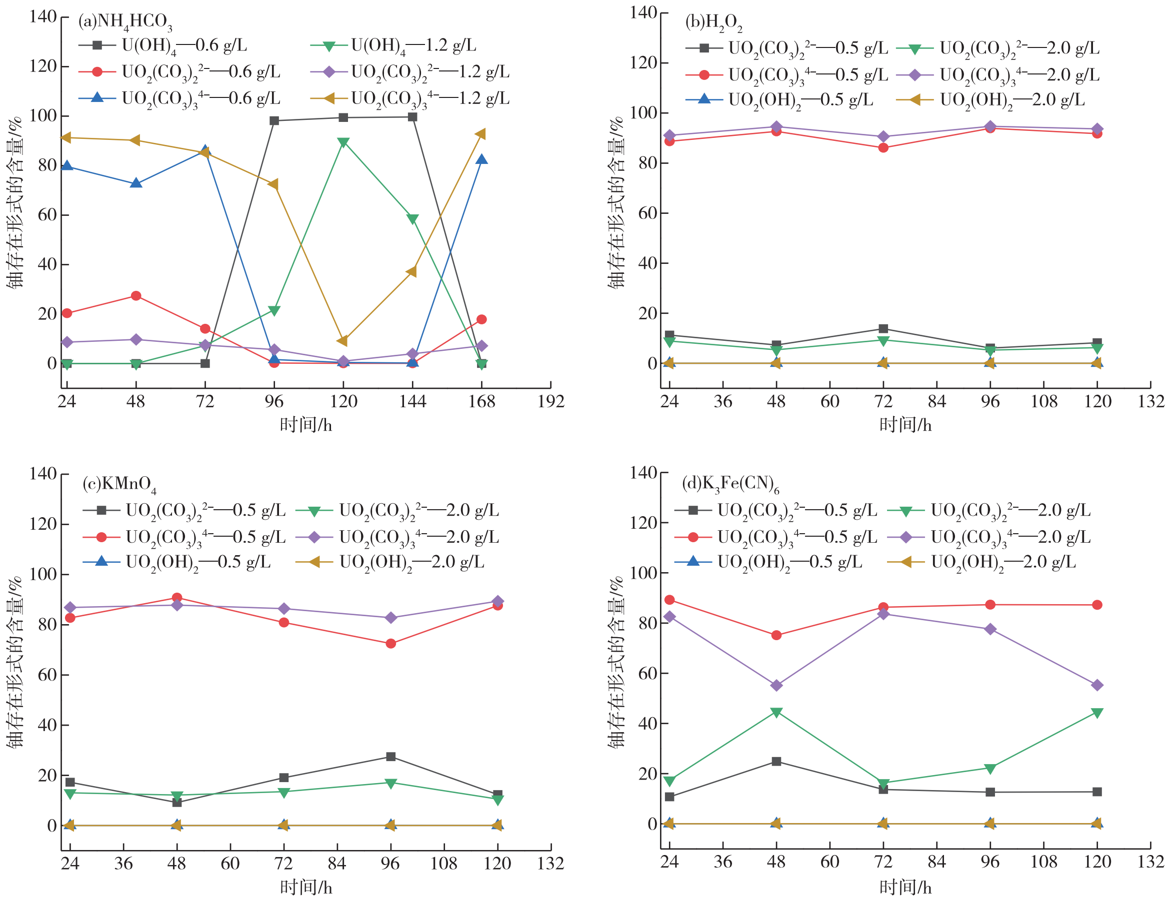


图 8　不同浸出条件下铀主要存在形式

Fig. 8　Main forms of dissolved uranium present under different leaching conditions

2.5　浸出动力学分析

使用缩核模型对不同浓度 NH_4HCO_3 和 H_2O_2 浸出条件下的铀浸出动力学进行研究，结果如图 9、图 10 和表 2 所示。由图 9 和图 10 可以看出，在不同浓度 NH_4HCO_3 和 H_2O_2 浸出条件下，图 9 的线性拟合程度均明显高于图 10 的线性拟合程度，其中不同浓度 NH_4HCO_3 浸出条件下化学反应控制的相关系数 R^2 分别为 0.941 77、0.915 23、0.915 65 和

0.847 77,扩散控制的相关系数 R^2 相应分别为 0.854 92、0.901 41、0.844 71 和 0.773 18;不同浓度 H_2O_2 浸出条件下化学反应控制的相关系数 R^2 分别为 0.788 56、0.856 71、0.934 33 和 0.953 73,扩散控制的相关系数 R^2 相应分别为 0.737 24、0.788 12、0.884 41 和 0.889 78。这表明浸出反应主要受化学反应控制,扩散的影响相对较小。表明溶浸剂的种类和浓度是影响铀浸出效果的主要因素。

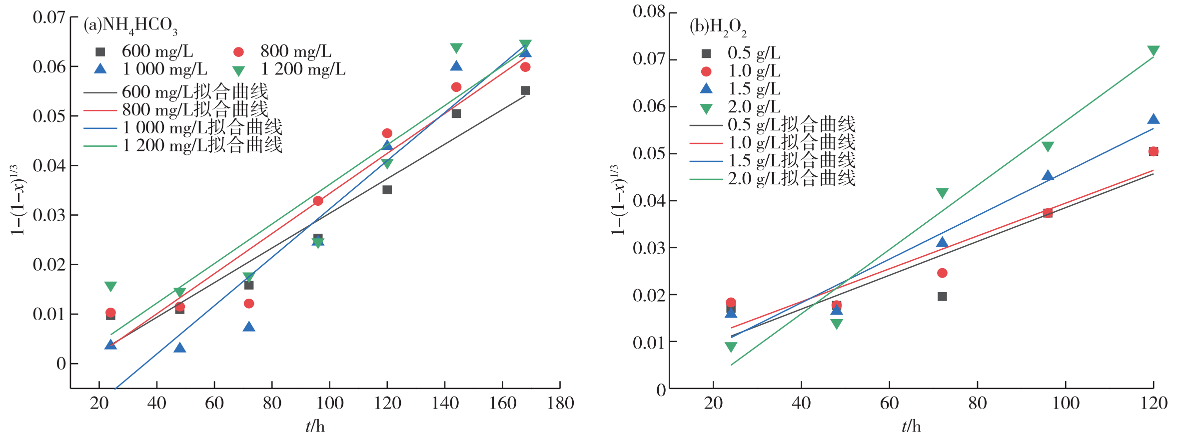


图9 不同浸出条件下浸出时间与$[1-(1-x)^{1/3}]$的线性关系

Fig. 9 Linear relationship between leaching time and $[1-(1-x)^{1/3}]$ for different leaching conditions

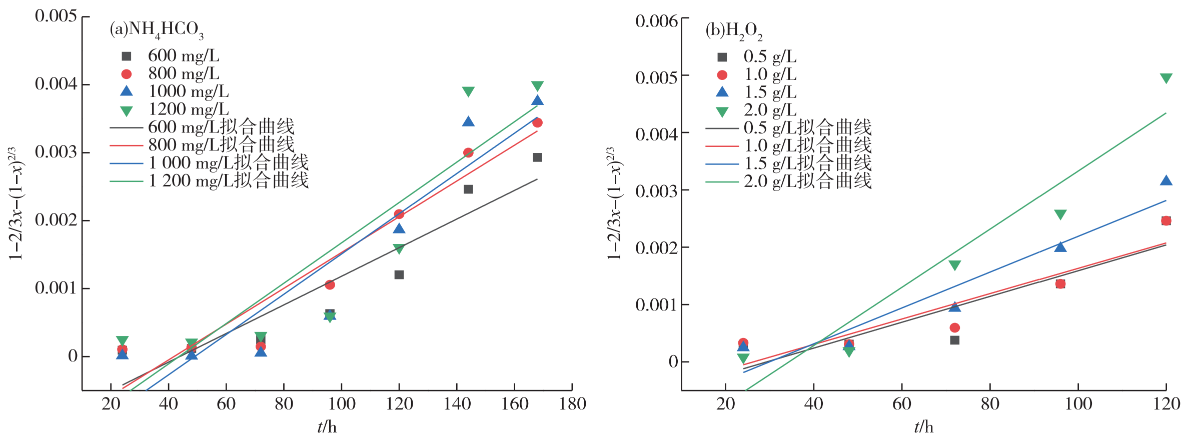


图10 不同浸出条件下浸出时间与$[1-2/3x-(1-x)^{2/3}]$的线性关系

Fig. 10 Linear relationship between leaching time and $[1-2/3x-(1-x)^{2/3}]$ for different leaching conditions

表2 不同浸出条件下铀矿碱浸动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of alkaline leaching of uranium ore under different leaching conditions

序号	溶浸液	化学反应控制		扩散控制	
		k/h^{-1}	R^2	k/h^{-1}	R^2
1	600 mg/L NH_4HCO_3	3.49309×10^{-4}	0.941 77	2.10528×10^{-5}	0.854 92
2	800 mg/L NH_4HCO_3	4.04240×10^{-4}	0.915 23	2.63259×10^{-5}	0.901 41
3	1 000 mg/L NH_4HCO_3	4.87013×10^{-4}	0.915 65	2.96162×10^{-5}	0.844 71
4	1 200 mg/L NH_4HCO_3	3.98831×10^{-4}	0.847 77	2.96928×10^{-5}	0.773 18
5	800 mg/L NH_4HCO_3+0.5 g/L H_2O_2	3.60123×10^{-4}	0.788 56	2.24846×10^{-5}	0.737 24
6	800 mg/L NH_4HCO_3+1.0 g/L H_2O_2	3.49767×10^{-4}	0.856 71	2.21245×10^{-5}	0.788 12
7	800 mg/L NH_4HCO_3+1.5 g/L H_2O_2	4.64039×10^{-4}	0.934 33	3.12549×10^{-5}	0.884 41
8	800 mg/L NH_4HCO_3+2.0 g/L H_2O_2	6.83925×10^{-4}	0.953 73	5.06968×10^{-5}	0.889 78

3 结论

1)碱法浸出试验中,碱性试剂种类和质量浓度对矿石铀浸出率影响较大。HCO_3^- 质量浓度越大,铀浸出率越高,相同浓度下,NH_4HCO_3 浸出效果优于 $NaHCO_3$。由于矿石四价铀占比高,还原性强,

未加氧化剂条件下铀浸出率较低，经过 168 小时静态浸出，1 200 mg/L NH_4HCO_3 和 $NaHCO_3$ 浸出条件下浸出率分别为 18.17%、17.45%。

2)氧化剂种类和质量浓度对铀浸出影响较大。H_2O_2 浸出效果最佳，铁氰化钾作氧化剂浸出率次之，使用高锰酸钾为氧化剂影响矿石的渗透性导致铀浸出率低于无氧化剂浸出率。

3)浸出过程溶液中的 Ca^{2+}(Mg^{2+})与 HCO_3^- 均饱和，方解石和白云石处于饱和或超饱和状态。方解石、白云石的饱和指数与 pH 线性正相关关系显著。可通入 CO_2 调节体系 pH，减少沉淀的产生，防止堵塞。

4)浸出液中铀存在形式模拟结果表明，有无氧化剂条件下浸出液中的铀均主要以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 形式存在，但在无氧化剂碱法浸出中期铀络合生成 $U(OH)_4$ 沉淀，导致了未加氧化剂时铀浸出率低。

5)浸出动力学表明，有无氧化剂碱法浸出条件下铀的溶解均主要受化学反应控制，扩散的影响相对较小，表明溶浸剂的种类和浓度是影响铀浸出效果的主要因素。

参考文献

[1] 张海青. 世界铀资源概况[J]. 世界核地质科学，2007，24(4)：212-215.
ZHANG H Q. Survey of world uranium resources[J]. World Nuclear Geoscience，2007，24(4)：212-215.

[2] 黄春梅. 酸碱联合浸出低品位铀矿中铀的实验研究[D]. 湖南 衡阳：南华大学，2019.
HUANG C M. Research on leaching of uranium by dilute alkali-pretreatment combined with acid leaching from low-grade uranium ore[D]. Hengyang：University of South China，2019.

[3] 李昊，胡凯光，马晋芳，等. 含硫-碳酸盐铀矿石中铀、黄铁矿综合浸出试验研究[J]. 有色金属工程，2021，11(1)：56-61.
LI H，HU K G，MA J F，et al. Experiment study on the comprehensive leaching of uranium and pyrite from a sulfur-carbonate uranium ore[J]. Nonferrous Metals Engineering，2021，11(1)：56-61.

[4] 周根茂，曾毅君，孟舒，等. 碳酸盐型铀矿浸出方法的探讨[C]//中国核科学技术进展报告(第三卷)：中国核学会 2013 年学术年会论文集第 2 册(铀矿冶分卷、核能动力分卷(上)). 北京：中国原子能出版社，2013：96-102.
ZHOU G M，ZENG Y J，MENG S，et al. Study on the leaching process of carbonate type uranium ore[C]//Progress Report on China Nuclear Science & Technology(Vol 3)：Proceedings of the 2013 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society，Volume 2(Uranium Mining and Metallurgy Sub-volume，Nuclear Power Sub-volume Ⅰ). Beijing：China Atomic Energy Press，2013：96-102.

[5] 蒋小辉，叶善东，陈国贞，等. 新疆某高耗酸矿床碱法地浸采铀试验研究[J]. 中国矿业，2012，21(增刊 1)：301-305.
JIANG X H，YE S D，CHEN G Z，et al. Alkaline in-situ leaching test of a high-acid-consumption uranium mineral deposit in Xinjiang[J]. China Mining Magazine，2012，21(S1)：301-305.

[6] 邢拥国，蒋小辉，霍建党，等. 某高耗酸砂岩型铀矿床碱法地浸采铀试验研究[J]. 湿法冶金，2017，36(6)：467-472.
XING Y G，JIANG X H，HUO J D，et al. Alkaline in-situ leaching of uranium in high-acid-consumption sandstone-type uranium deposit[J]. Hydrometallurgy of China，2017，36(6)：467-472.

[7] 朱鹏，陈建昌，尉小龙，等. 砂岩型铀矿床地浸采铀工艺方法概述[J]. 采矿技术，2011，11(4)：4-6，92.
ZHU P，CHEN J C，YUE X L，et al. An overview of ground leaching methods for uranium extraction from sandstone deposits[J]. Mining Technology，2011，11(4)：4-6，92.

[8] 王廷健，孙占学，周义朋，等. 新疆某铀矿床碱法浸出元素迁移探究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2021(1)：34-41.
WANG T J，SUN Z X，ZHOU Y P，et al. Study on element migration of alkali leaching in a uranium deposit in Xinjiang[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2021(1)：34-41.

[9] 李开文. 中国铀矿开采技术特点及发展水平[J]. 中国矿业，2002，11(1)：23-27.
LI K W. Mining technological properties and development level of Chinese uranium ore mines[J]. China Mining Magazine，2002，10(1)：23-27.

[10] 周义朋，徐玲玲，黎广荣，等. 砂岩型铀矿石无氧化剂碱法浸出特征[J]. 有色金属(冶炼部分)，2018(12)：37-42，57.
ZHOU Y P，XU L L，LI G R，et al. Alkali leaching characteristics of sandstone-type uranium ore without oxidant[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2018(12)：37-42，57.

[11] 王清良，史文革，万利平，等. 新疆某铀矿床矿石碱法地浸室内试验研究[J]. 铀矿冶，2004，23(1)：25-30.
WANG Q L，SHI W G，WAN L P，et al. Lab study on

alkaline leaching of uranium ores from Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2004,23(1):25-30.

[12] 肖志海.碳酸盐型铀矿石堆浸技术室内浸出实验研究[D].湖南 衡阳:南华大学,2017.
XIAO Z H. Study on indoor leaching experiment technology of heap leaching of carbonate-type uranium ore[D]. Hengyang:University of South China,2017.

[13] GHORBANI Y, MONTENEGRO M R. Leaching behaviour and the solution consumption of uranium-vanadium[J]. Hydrometallurgy,2016,161:127-137.

[14] 刘迎九,周泉,谢水波,等.某铀矿床碱法地浸溶浸液配方探讨[J].株洲工学院学报,2006(6):39-40,123.
LIU Y J,ZHOU Q,XIE S B,et al. Study on direction for solvent solution to alkaline leaching of uranium deposit[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology,2006(6):39-40,123.

[15] BRODNAX L F,PEPER S M. Kinetic study of the oxidative dissolution of UO_2 in aqueous carbonate media[J]. Canadian Journal of Biochemistry,2004,47(3):339-345.

[16] 天津市化工研究院.无机盐工业手册:上册[M].北京:化学工业出版社,1979:812-813.
Tianjin Research Institute of Chemical Industry. Handbook of inorganic salt industry: Ⅰ[M]. Beijing: Chemical Industry Press,1979:812-813.

[17] 廖文胜,姜岩,师振峰,等.地浸采铀搅拌浸出试验中的有关因素探讨[J].铀矿冶,2014,33(4):203-207.
LIAO W S,JIANG Y,SHI Z F,et al. Some factors affecting agitation leach test during in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2014,33(4):203-207.

[18] GILLIGAN R,NIKOLOSKI A N. Alkaline leaching of brannerite. Part 1 kinetics,reaction mechanisms and mineralogical transformations[J]. Hydrometallurgy,2017,169:399-410.

[19] HUNTER E. On the leaching behavior of uranium-bearing resources in carbonate-bicarbonate solution by gaseous oxidants[J/OL]. Dissertations & Theses-Gradworks,2013. https://hdl.handle.net/11124/78759.

[20] 时志浩,陈擎,叶雷刚,等.柴达木盆地西缘砂岩型铀矿目标层地球物理响应特征[J].地质与勘探,2022,58(2):258-273.
SHI Z H,CHEN Q,YE L G,et al. Geophysical response characteristics of the target layer of sandstone-type uranium deposits in the Western Margin of Qaidam Basin[J]. Geology and Exploration,2022,58(2):258-273.

[21] 魏学斌,杨梅,王铎,等.柴达木盆地西南区铀矿地质特征及成矿有利区预测[J].能源与环保,2022,44(3):74-80.
WEI X B,YANG M,WANG D,et al. Geological characteristics of uranium deposits and prediction of favorable metallogenic areas in southwestern area of Qaidam Basin[J]. China Energy and Environmental Protection,2022,44(3):74-80.

[22] 庞康.浅析砂岩型铀矿特征及其开采方法[J].地下水,2017,39(3):226-229.
PANG K. Analysis of the characteristics of sandstone type uranium ore and its mining method[J]. Ground Water,2017,39(3):226-229.

[23] 张建国,王海峰,姜岩,等.美国碱法地浸采铀工艺技术概况[J].铀矿冶,2005,24(1):6-13.
ZHANG J G,WANG H F,JIANG Y,et al. Introduction to the development of alkaline in-situ leaching of uranium in America[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2005,24(1):6-13.

[24] 高柏,史维浚,邢拥国,等.新疆某铀矿床淡化地下水碱法地浸试验研究[J].铀矿冶,2011,30(3):130-134.
GAO B,SHI W J,XIN Y G,et al. Alkaline in-situ leaching simulation test of a uranium deposit in Xinjiang under condition of diluting groundwater[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2011,30(3):130-134.

[25] 李密,张彪,张晓文,等.从低品位铀尾矿中氧化浸出铀[J].中国有色金属学报,2017,27(1):145-154.
LI M,ZHANG B,ZHANG X W,et al. Oxidizing leaching of uranium from low-grade uranium tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2017,27(1):145-154.

[26] ASGHAR F,周义朋,孙占学,等.新疆蒙其古尔矿床铀矿石 CO_2+O_2 中性浸出试验[J].有色金属(冶炼部分),2021(8):46-55.
ASGHAR F,ZHOU Y P,SUN Z X,et al. CO_2+O_2 neutral leaching experiment of uranium ore from Mengqiguer deposit in Xinjiang[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2021(8):46-55.

[27] 曾圣男.砂岩型铀矿地浸开采中的堵塞问题及解决方法[J].有色金属(矿山部分),2022,74(1):5-9.
ZENG S N. 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.

[28] 田新军,沈红伟,陈雪莲,等.用二氧化碳减缓碱法地浸采铀中的化学沉淀堵塞[J].铀矿冶,2006,25(1):15-20.
TIAN X J,SHEN H W,CHEN X L,et al. Using CO_2 for reducing chemical precipitation jamming in alkaline in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2006,25(1):15-20.