

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.08.008

CO₂+O₂ 地浸采铀中 CaCO₃ 沉淀堵塞条件模拟

杨诗琪¹, 刘金辉¹, 阳奕汉², 李鹏², 张传飞², 李光辉², 徐奇², 陈婷¹

(1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013;

2. 中核内蒙古矿业有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: CO₂+O₂地浸工艺是我国第三代铀矿采冶技术,地浸过程中溶浸液与含矿层矿物反应后,在将铀从矿石中浸出的同时,由于地下水矿化度增高又会产生化学沉淀,导致含矿层堵塞。CaCO₃沉淀是CO₂+O₂地浸采铀过程中含矿层堵塞的重要原因。为探索CaCO₃沉淀堵塞条件,根据内蒙古纳岭沟铀矿CO₂+O₂浸铀过程中浸出液化学成分数据,通过水文地球化学模拟,对含矿层堵塞的水文地球化学条件进行了系统研究。结果表明,CaCO₃沉淀是造成CO₂+O₂地浸中含矿层化学堵塞的重要原因。当溶浸液pH>6.5时,CaCO₃将发生沉淀,溶浸液的pH、HCO₃⁻浓度、Ca²⁺浓度是影响CaCO₃沉淀的主要因素,过高的pH与HCO₃⁻浓度、Ca²⁺浓度都会造成CaCO₃沉淀的产生。根据模拟结果获得了不产生CaCO₃沉淀条件下pH、HCO₃⁻浓度、Ca²⁺浓度三者之间的关系,并由此认为,维持溶浸液较低的Ca²⁺浓度与较低的pH是预防与缓解CaCO₃沉淀堵塞的有效途径。

关键词: CO₂+O₂地浸采铀; CaCO₃沉淀; 含矿层堵塞; 饱和指数; 边界值; 纳岭沟铀矿

中图分类号: TL212.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2023)08-0050-10

Simulation on CaCO₃ Precipitation and Blockage Conditions in CO₂+O₂ In-situ Leaching of Uranium

YANG Shi-qi¹, LIU Jin-hui¹, YANG Yi-han², LI Peng²,
ZHANG Chuan-fei², LI Guang-hui², XU Qi², CHEN Ting¹

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. CNNC Inner Mongolia Mining Co., Ltd., Huhhot 010010, China)

Abstract: CO₂+O₂ in-situ leaching of uranium process is the third generation of uranium mining and metallurgical technology in China, during the in-situ leaching process, the dissolved liquid reacts with the ore-bearing seam minerals to extract uranium from the ore, at the same time, chemical precipitation will occur due to the increase of groundwater mineralization, resulting in ore-bearing seam blockage. CaCO₃ precipitation is an important cause of ore layer blockage during in uranium leaching in CO₂+O₂. In order to explore the conditions of CaCO₃ precipitation and blockage, the hydrogeochemical conditions of ore-bearing seam blockage were systematically studied through hydrogeochemical simulation, according to the chemical composition data of CO₂+O₂ uranium leaching solution from uranium ore in Nalinggou in Inner Mongolia. The results show that CaCO₃ precipitation is the important cause of chemical blockage of ore-

收稿日期: 2023-04-11

基金项目: 中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(NRE2021-17); 国家自然科学基金核技术创新联合基金资助项目(U1967209)

作者简介: 杨诗琪(1999-),女,硕士研究生; **通信作者:** 刘金辉(1961-),男,教授,博士生导师

bearing seams in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium. When the pH value of the leaching solution 6.5 above, CaCO_3 will precipitate, the pH value, concentration of HCO_3^- and Ca^{2+} of the immersion solution are the main factors affecting CaCO_3 precipitation, and excessive pH value and concentration of HCO_3^- and Ca^{2+} will cause the production of CaCO_3 precipitation. According to the simulation results, the relationship between pH value, and concentrations of HCO_3^- and Ca^{2+} without CaCO_3 precipitation is obtained, and it is concluded that maintaining the lower Ca^{2+} concentration and lower pH value of the leaching solution is an effective way to prevent and alleviate CaCO_3 precipitation blockage.

Key words: $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium; CaCO_3 precipitation; blockage of the ore-bearing seam; saturation index; boundary value; Nalinggou uranium mine

地浸采铀是指矿石处于天然埋藏状况下,通过向砂岩型铀矿层注入溶浸液后,溶浸液与矿石发生化学反应形成含铀浸出液,经抽液钻孔将浸出液抽到地表并进行水冶回收的一种采铀工艺^[1]。在地浸采铀过程中,由于持续循环注入溶浸剂和抽出浸出液,溶浸液矿化度不断上升造成的含矿层堵塞问题普遍突出^[2],例如,我国新疆 512 铀矿采用酸法地浸导致化学堵塞严重^[3];511 铀矿采用酸法地浸引起严重气堵和化学堵塞^[4];蒙古古尔矿床采用 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸工艺产生 CaCO_3 等堵塞^[5];十红滩铀矿采用碱法地浸引起 CaCO_3 沉淀堵塞^[6];内蒙古巴彦乌拉矿铀采用酸法地浸产生石膏和赤铁矿等沉淀^[7];开鲁盆地钱二块铀矿采用“无试剂”地浸工艺亦产生大量 MgCO_3 、 CaCO_3 及少量 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 FeCO_3 沉淀堵塞物^[8];美国 Highland^[9] 和 Smith Ranch^[10] 铀矿采用碱法地浸产生化学堵塞;哈萨克斯坦 ChuSarysu 铀矿采用酸化地浸产生难溶的胶体和 CaSO_4 堵塞^[11]。可见,酸法、碱法及 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 法,甚至“无试剂”地浸工艺均出现含矿层堵塞,堵塞已成为严重影响天然铀产能的瓶颈问题。

针对含矿层堵塞问题,许多学者做了大量的研究工作,原渊等^[12]对 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 铀浸出过程中出现碳酸盐结垢堵塞问题进行探讨,认为 CaCO_3 堵塞与溶液 pH、 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 浓度有关;张泽贵^[2]对 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀中含矿层化学堵塞进行了探索,认为其化学堵塞物主要是 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和再生方解石;田新军等^[13]通过碱法地浸条件试验认为化学沉淀物主要成分是针铁矿 $\text{FeO}(\text{OH})$;吉宏斌等^[14-15]对影响含矿层渗透性主要因素进行了探讨,指出碳酸盐、黏土矿物等堵塞物会影响含矿层渗透性;高柏等^[16]认为 Ca^{2+} 含量对碳酸盐沉淀的 HCO_3^- 浓度阈值有很大影响;祝永进等^[17]得出碳酸盐沉淀属于暂时性堵塞,可通过降低 Ca^{2+} 浓度和适当减小 pH 来避免碳

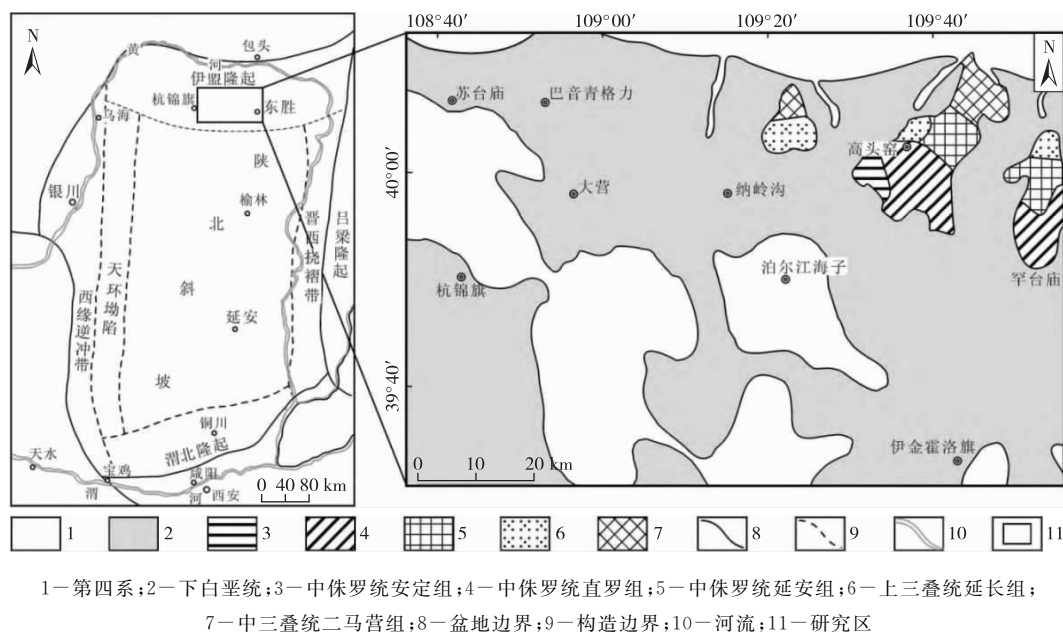
酸钙堵塞的发生;陈建昌等^[18]通过室内中性浸出试验得出矿层水 + $\text{O}_2 + \text{CO}_2$ 可以较好避免碳酸盐沉淀;许根福^[19]研究表明, HCO_3^- 含量相同情况下, pH 越高则 CO_3^{2-} 活度越高,产生 CaCO_3 沉淀可能性越大;张青林等^[20]发现,浸出液 SO_4^{2-} 含量会逐渐提高,虽然未达到石膏饱和状态,但需要时刻关注浸出液的 SO_4^{2-} 和 pH,及时采取必要措施降低石膏沉淀风险。

综上所述,由于含矿层堵塞导致铀产量降低这一难题目前尚未得到很好的解决,如何解决这个难题是摆在广大铀矿科技工作者面前的重要课题和义不容辞的任务和职责。 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸工艺是我国第三代铀矿采冶技术,具有十分广阔的应用前景,本文通过 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸铀试验,对内蒙古纳岭沟铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸铀过程中含矿层堵塞的水文地球化学条件进行研究,探究影响堵塞物产生的主要因素,揭示堵塞机制。研究成果对于预防与缓解矿层堵塞、提高地浸采铀效益均具有十分重要的现实意义和学术价值。

1 纳岭沟铀矿地质、水文地质背景

1.1 地质背景

纳岭沟铀矿位于鄂尔多斯东北部三级构造单元伊盟隆起的中北部(图 1)。三叠系、侏罗系和下白垩统构成了该区沉积盖层的主体^[21],三叠系在区东部、东北部呈三角形状大面积出露;侏罗系在盆地东部呈南北向带状大面积出露;下白垩统在盆地中部大部分地区分布,是盆地北部出露最广泛的地层。古近系、新近系和第四系极不发育,仅分布于盆地北部边缘^[22]。根据中侏罗统直罗组沉积时期古气候和岩性发育特征,将其分为下段($J_2 z^1$)和上段($J_2 z^2$)^[23]。纳岭沟铀矿主要成矿层位于直罗组下段下亚段砂体中^[24]。

图1 鄂尔多斯盆地东北部东胜地区地质图^[24]Fig. 1 Geological map of Dongsheng area in northeast Ordos Basin^[24]

1.2 水文地质背景

纳岭沟铀矿位于鄂尔多斯高原西部水文地质亚区(Ⅱ2)乌家庙-杭锦旗自流水区(Ⅱ2-1)的东北部,主要成矿层位于直罗组下段下亚段砂体中。依据直罗组沉积过程中不同阶段的沉积特点及其岩性-岩相特征,自下而上可划分为两个含水层,即直罗组下段(J_2z^1)含水层和直罗组上段(J_2z^2)含水层^[25]。其中直罗组下段(J_2z^1)含水层为含矿含水层^[25]。含矿含水层在矿床内发育稳定,岩性主要由河流相绿色、灰色中砂岩、中粗砂岩、粗砂岩构成。赋存的地下水类型为碎屑岩类裂隙孔隙水,分布稳定,为层间承压水^[26]。

2 CaCO_3 沉淀的水-岩平衡模拟

本文探讨的 CaCO_3 沉淀(含矿层堵塞)的水-岩平衡模拟的基本思路是根据纳岭沟铀矿浸出液化学成分,运用 PHREEQC 软件对难溶矿物饱和指数, CaCO_3 沉淀的 pH 边界值及 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度边界值进行计算。在此基础上,经过综合分析,得到不产生 CaCO_3 沉淀的条件,以及控制 CaCO_3 沉淀的主要因素。

2.1 浸出液化学成分特征

纳岭沟铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀试验区北部抽注液孔布置如图 2 所示。选择试验区北部六个有代表性的抽液孔(1-16-9C、1-8-9C、1-12-5C、1-12-1C、SYC-1、SYC-2)浸出液化学成分数据进行模拟计算,浸出液化学成分如表 1 所示。由表 1 可知,浸出液温度为 19.5°C , pH 为 $6.52 \sim 6.61$, 平均为 6.55。Eh 值为 $272.45 \sim 277.26 \text{ mV}$ (平均 275.51 mV)。

2.2 矿物饱和指数(SI)特征

饱和指数(SI)是评价难溶矿物溶解与沉淀的重要水文地球化学参数,可通过水文地球化学模拟计算获得。根据表 1 浸出液化学成分,对不同 pH 条件下部分矿物 SI 进行了计算。计算结果(图 3)表明,随着溶浸液 pH 的增高,SI 随之增高。当浸出液 $\text{pH} < 4.5$ 时,各相关矿物 SI 均小于 0,浸出液中不会发生矿物沉淀;当 $\text{pH} = 4.5 \sim 6.5$ 时,浸出液中的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 AlHO_2 、 AlO_2H 等含铝矿物 SI 大于 0,具备沉淀的可能性;当 $\text{pH} > 6.5$ 时, CaCO_3 的 SI 大于 0,浸出液中的 CaCO_3 将发生沉淀(图 3)。由此可见, pH 是影响难溶矿物溶解与沉淀极为重要的水文地球化学参数。

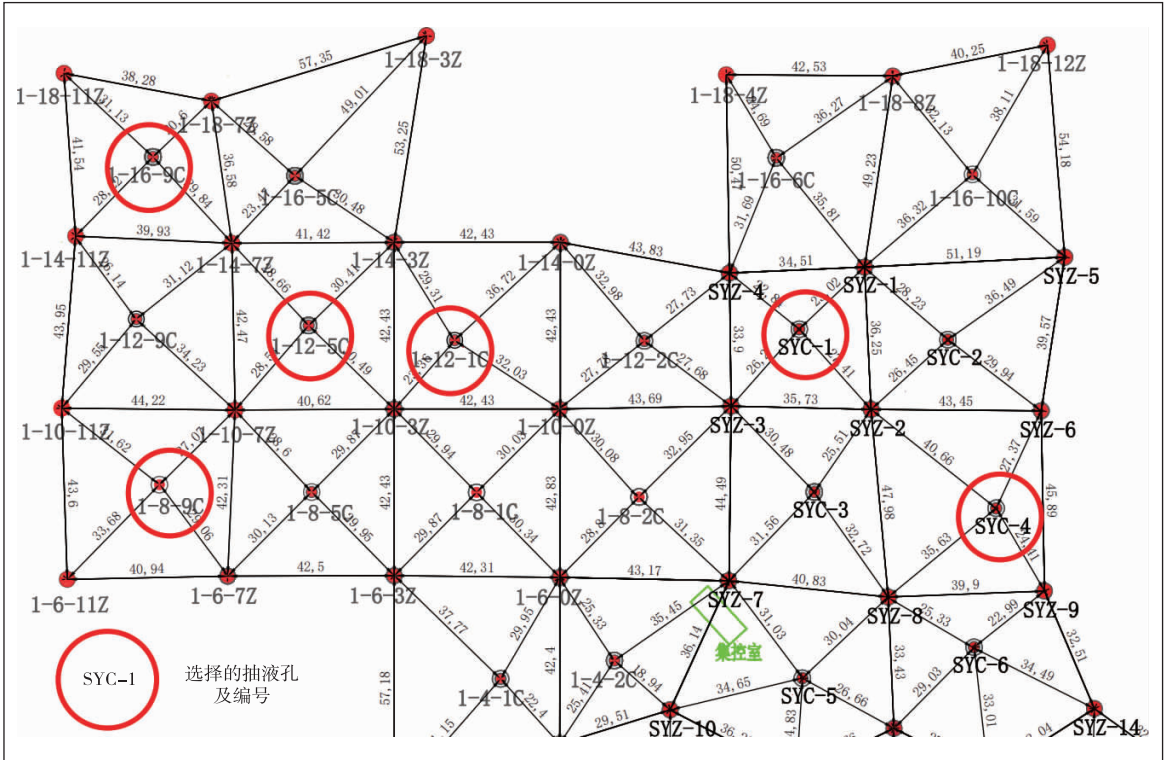


图 2 纳岭沟铀矿地浸试验区北部抽注液孔布置图

Fig. 2 Layout of pumping holes in the northern part of the Nalinggou uranium leaching test area

表 1 抽液孔浸出液化学成分数据

Table 1 Chemical composition data of leachate from the extraction hole													/(mg · L ⁻¹)	
取样钻孔	温度 *	pH**	Eh***	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	U ⁴⁺	U ⁶⁺	Al ³⁺	总 Si
1-16-9C	19.4	6.56	275.52	9.16	1 096	175	30.31	1 672	799	489	0.029	16.37	0.52	34.70
1-8-9C	19.8	6.53	277.14	10.67	1 122	192	30.41	1 722	806	487	0.023	19.88	0.62	34.01
1-12-5C	19.5	6.61	272.45	8.18	1 048	145	18.45	1 598	705	466	0.019	7.62	0.23	35.82
1-12-1C	19.9	6.52	276.17	10.22	1 029	158	23.51	1 695	768	470	0.009	10.06	0.31	34.34
SYC-1	19.8	6.52	277.24	9.92	1 059	179	34.46	1 672	803	486	0.008	6.12	0.20	28.53
SYC-4	19.2	6.52	277.26	9.76	1 029	162	31.15	1 682	757	470	0.007	7.28	0.23	30.32

注: * 单位为℃, ** 没有单位, *** 单位为 mV

2.3 CaCO₃ 沉淀的 pH、Ca²⁺ 与 HCO₃⁻ 浓度边界值

在 CO₂+O₂ 地浸采铀过程中, CaCO₃ 沉淀与否与溶浸液 pH、Ca²⁺ 浓度及 HCO₃⁻ 浓度具有十分密切的关系, 涉及到这些因素的边界条件。本文以抽液孔 1-12-1C 浸出液化学成分为例, 对 CaCO₃ 沉淀的 pH、Ca²⁺ 浓度及 HCO₃⁻ 浓度的边界值进行计算和讨论。

2.3.1 不同 Ca²⁺ 浓度条件下 HCO₃⁻ 浓度与 SI_{CaCO₃} 的关系

由于纳岭沟铀矿地浸采铀试验发生 CaCO₃ 沉淀的 pH 在 6.52 左右, 为此, 根据 1-12-1C 孔浸出

液化学成分(表 1), 计算了在 pH=6.52 时, 不同 Ca²⁺ 浓度条件下, CaCO₃ 沉淀的 HCO₃⁻ 浓度边界值, 以及 HCO₃⁻ 浓度与 CaCO₃ 饱和指数(SI_{CaCO₃})的关系, 计算结果如图 4、图 5 所示。可以看出, 在 pH=6.52 条件下, 当 Ca²⁺ 浓度分别为 120、140、160、180 mg/L 时, CaCO₃ 沉淀的 HCO₃⁻ 浓度边界条件分别为 2 959、2 470、2 100、1 859 mg/L。也就是说, 在相同 pH 条件下, 溶浸液 Ca²⁺ 浓度越高, CaCO₃ 沉淀的 HCO₃⁻ 浓度边界值就越低(图 5), 即地浸过程中 CaCO₃ 则越容易发生沉淀。

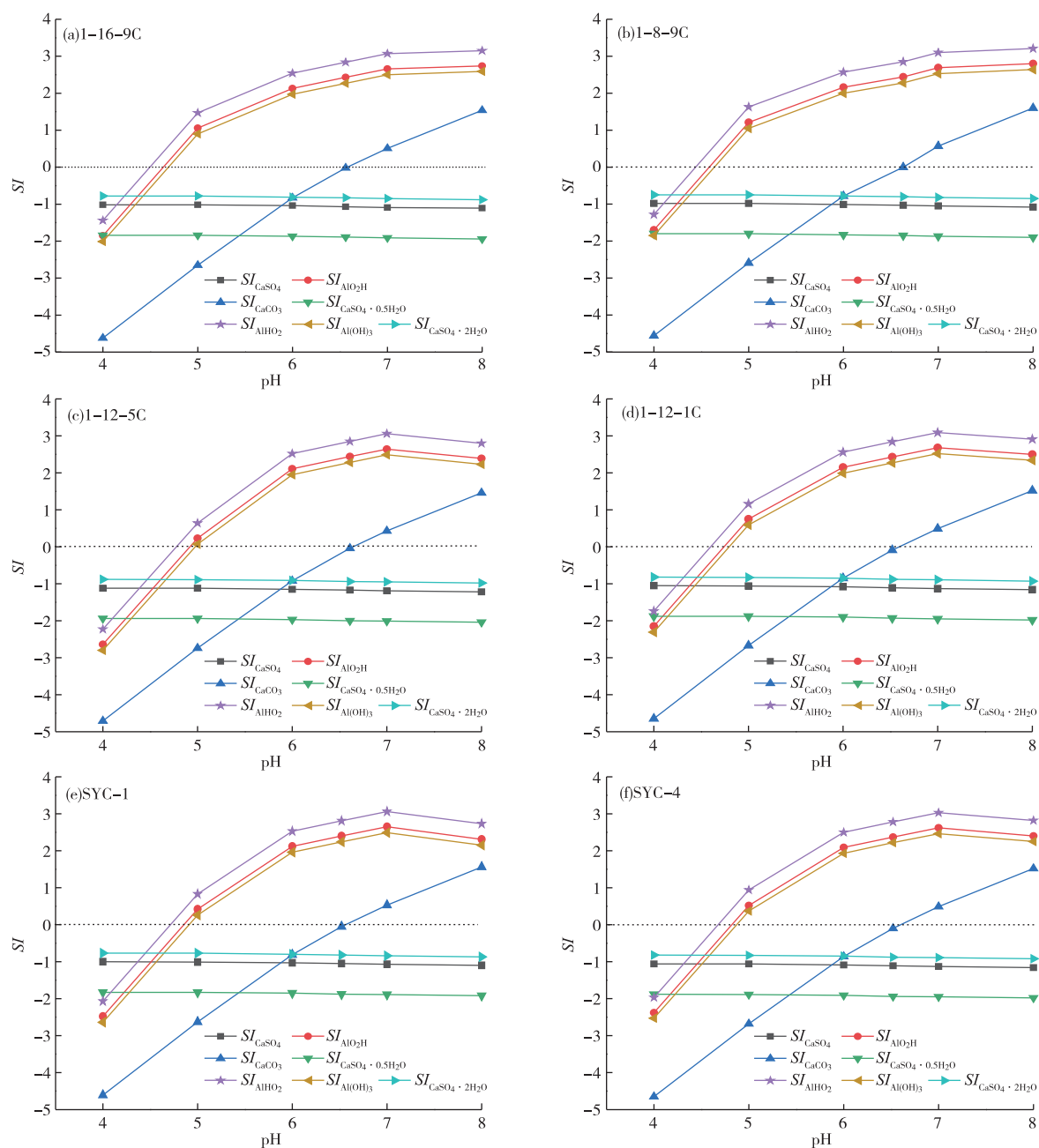


图3 不同抽液孔浸出液计算的矿物饱和度指数(SI)

Fig. 3 Mineral saturation index (SI) calculated leachate from different extraction hole

由图5可知,在 $\text{pH}=6.52$ 条件下, Ca^{2+} 浓度对 CaCO_3 沉淀的 HCO_3^- 浓度边界条件有很大影响。随着 Ca^{2+} 浓度的增高, CaCO_3 沉淀的 HCO_3^- 浓度边界值(HCO_{3b}^-)降低。地浸采铀过程中, Ca^{2+} 浓度增高是一种极为普遍的现象。因此,十分有必要查明 Ca^{2+} 对碳酸钙沉淀的 HCO_3^- 浓度边界条件的影响。碳酸钙不发生沉淀的 HCO_3^- 浓度边界值即浸出液中 HCO_3^- 浓度的临界值。该临界值受浸出液中 Ca^{2+} 浓度和 pH 控制。

2.3.2 不同 Ca^{2+} 浓度条件下 pH 与 SI_{CaCO_3} 的关系

由于纳岭沟铀矿下注溶浸液 HCO_3^- 浓度为

1 700 mg/L左右,为此,根据1-12-1C浸出液化学成分数据,对 $\text{HCO}_3^- = 1\,700\text{ mg/L}$ 条件下, CaCO_3 饱和度指数(SI_{CaCO_3})与其沉淀的 pH 边界值进行了计算。计算结果如图6所示。图6显示,假如浸出液 Ca^{2+} 浓度分别为120、140、160、180 mg/L,则碳酸钙沉淀的 pH 边界值分别为6.68、6.63、6.58和6.53,表明随着浸出液 Ca^{2+} 浓度降低,浸出液的 pH 边界值升高。因此,降低溶浸液 Ca^{2+} 浓度或者在 Ca^{2+} 浓度一定的情况下,适当降低 pH 有利于防止 CaCO_3 沉淀。

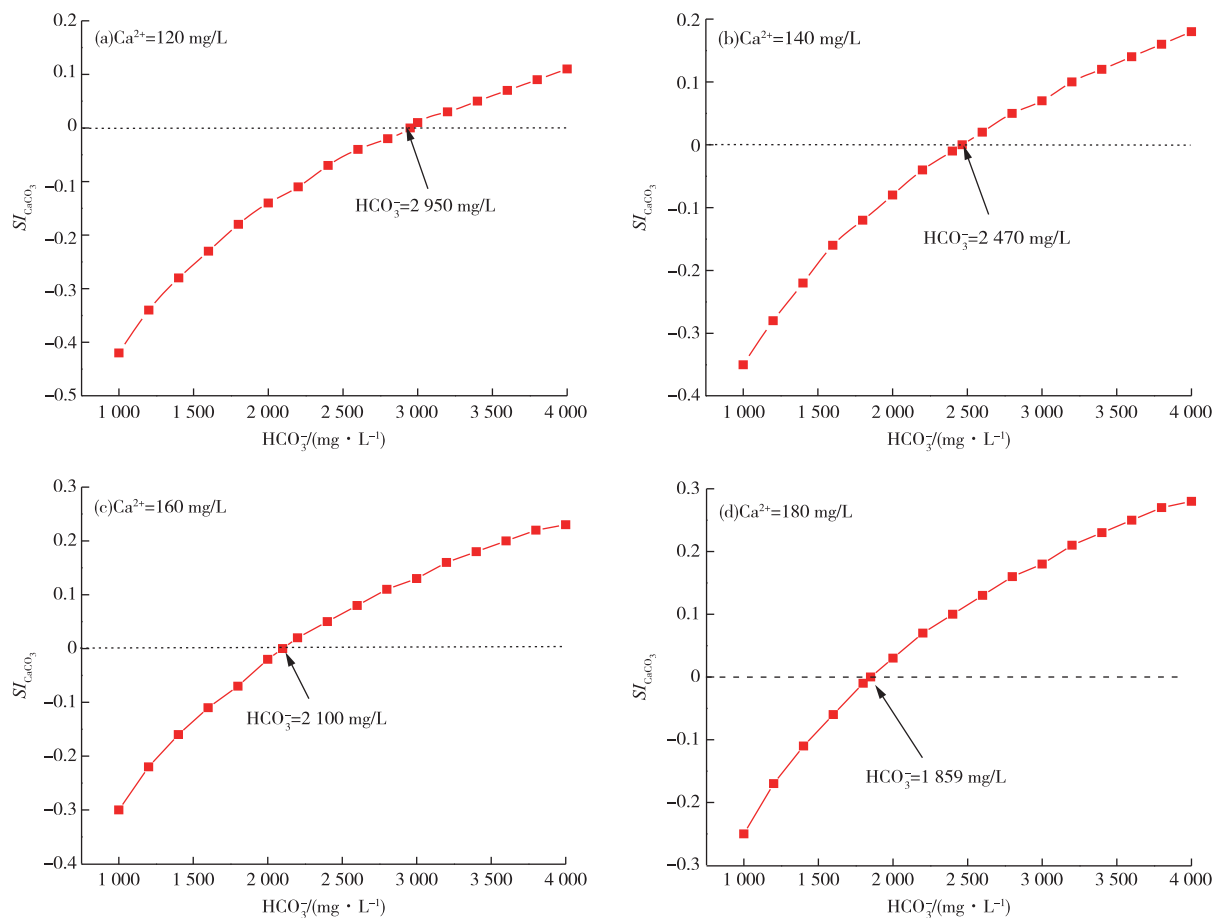
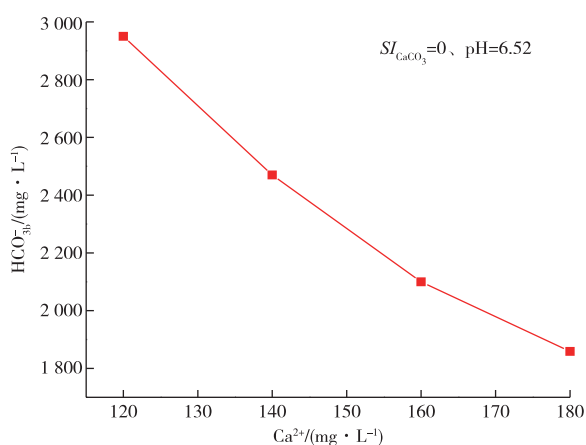
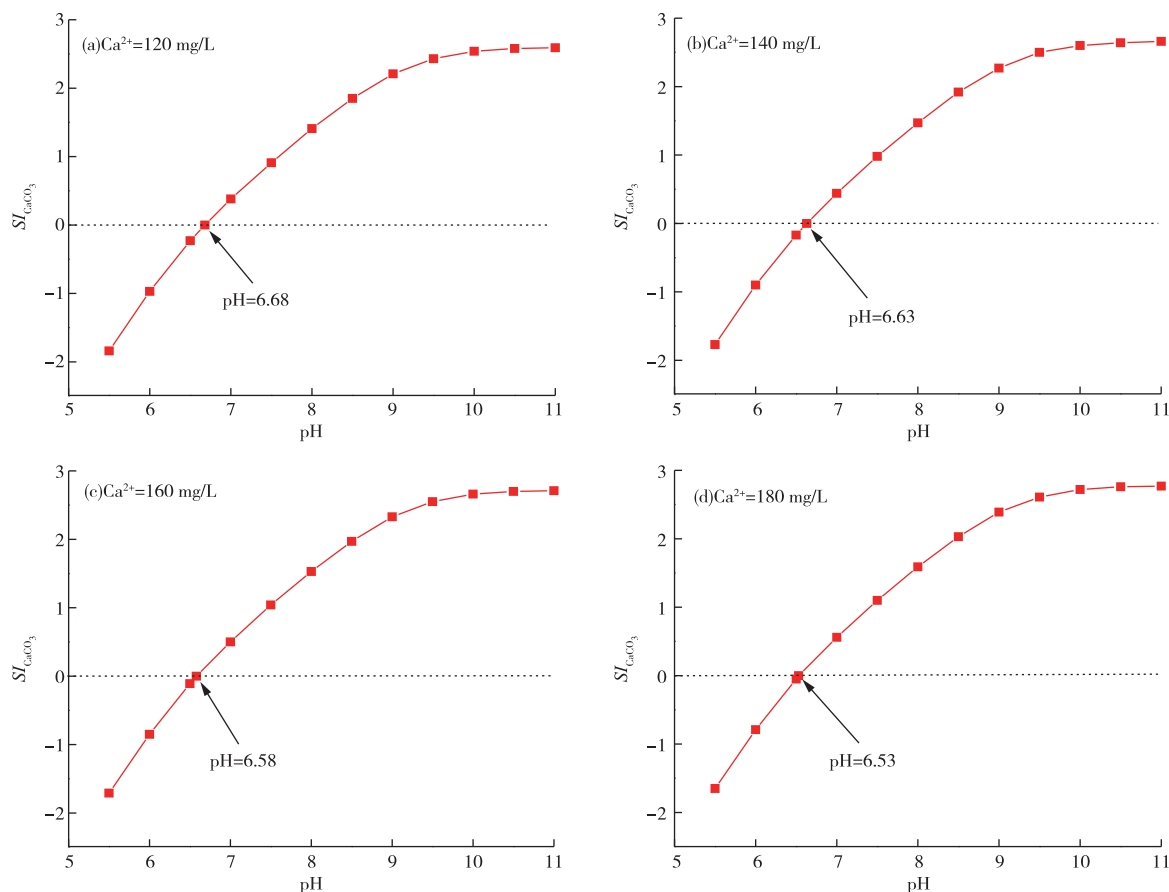
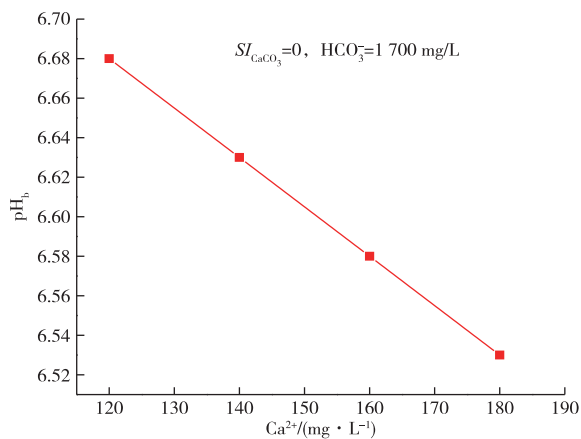
图4 不同 Ca^{2+} 浓度条件下 HCO_3^- 浓度— SI_{CaCO_3} 曲线图 ($\text{pH}=6.52$)Fig. 4 HCO_3^- concentration— SI_{CaCO_3} curves under different Ca^{2+} concentration ($\text{pH}=6.52$)图5 HCO_3^- — Ca^{2+} 浓度关系Fig. 5 HCO_3^- — Ca^{2+} concentration relationship

图7为 Ca^{2+} 浓度边界值 (Ca_b^{2+}) 与 pH 边界值 (pH_b) 之间的关系。在 $\text{HCO}_3^- = 1700 \text{ mg/L}$ 条件

下,当 $\text{Ca}^{2+} < 180 \text{ mg/L}$, CaCO_3 沉淀的 pH_b 可以大于 6.53;当 $\text{Ca}^{2+} > 120 \text{ mg/L}$, CaCO_3 沉淀的 pH_b 必须小于 6.68。这种情况下,随着浸出液 Ca^{2+} 浓度降低,浸出液 pH 边界值升高幅度增大。因此,维持浸出液较低的 Ca^{2+} 浓度 (100 mg/L),有利于提高浸铀剂 HCO_3^- 浓度,也有利于防止 CaCO_3 沉淀。

2.3.3 不同 pH 条件下 Ca^{2+} 浓度与 SI_{CaCO_3} 的关系

同样根据 1-12-1C 浸出液化学成分数据进行计算并得出,在 $\text{HCO}_3^- = 1700 \text{ mg/L}$ 条件下,不同 Ca^{2+} 浓度下 CaCO_3 饱和指数 (SI_{CaCO_3}) 及 pH 与 CaCO_3 沉淀的 Ca^{2+} 浓度边界值关系如图 8 所示。图 8 显示,当浸出液 pH 分别为 6.5、6.6、6.7 和 6.8 时,碳酸钙沉淀的 Ca^{2+} 浓度边界值分别为 208、153、113、85 mg/L 。表明随着浸出液 pH 升高,浸出液的 Ca^{2+} 浓度边界值降低。因而降低浸出液 Ca^{2+} 浓度有利于防止 CaCO_3 沉淀。

图6 不同 Ca^{2+} 浓度条件下 pH— SI_{CaCO_3} 曲线图 ($\text{HCO}_3^- = 1\,700 \text{ mg/L}$)Fig. 6 pH value— SI_{CaCO_3} curves under different Ca^{2+} concentration ($\text{HCO}_3^- = 1\,700 \text{ mg/L}$)图7 pH_b — Ca^{2+} 浓度关系Fig. 7 pH_b — Ca^{2+} concentration relationship

2.4 不产生 CaCO_3 沉淀条件下, 溶浸液 pH、 Ca^{2+} 浓度与 HCO_3^- 浓度之间的关系

根据抽液孔 1-12-1C 浸出液化学成分数据, 对

不产生 CaCO_3 沉淀条件下的溶浸液 pH、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度三者之间的关系进行了计算, 计算结果如表 2~4 所示。

从表 2~4 和图 5、图 7 可知, 在不产生 CaCO_3 沉淀条件下, 溶浸液 pH、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度三者之间的关系是, 当 pH 为定值时, 溶浸液 Ca^{2+} 浓度越高, 则不产生 CaCO_3 沉淀的 HCO_3^- 边界值越小; 当 HCO_3^- 浓度为定值时, 溶浸液 Ca^{2+} 浓度越高, 则不产生 CaCO_3 沉淀的 pH 边界值越低; 当 Ca^{2+} 浓度为定值时, 溶浸液 HCO_3^- 浓度越高, CaCO_3 沉淀的 pH 边界值就越低。由此可见, 溶浸液 Ca^{2+} 浓度越低, 则 HCO_3^- 浓度与 pH 则可适当增高。当 pH 为定值时, 降低浸出液中 Ca^{2+} 浓度, 可使 CaCO_3 沉淀的 HCO_3^- 浓度边界值提高。因此, 降低 Ca^{2+} 浓度可减少 CaCO_3 沉淀的可能性, 有利于提高铀的浸出效率。

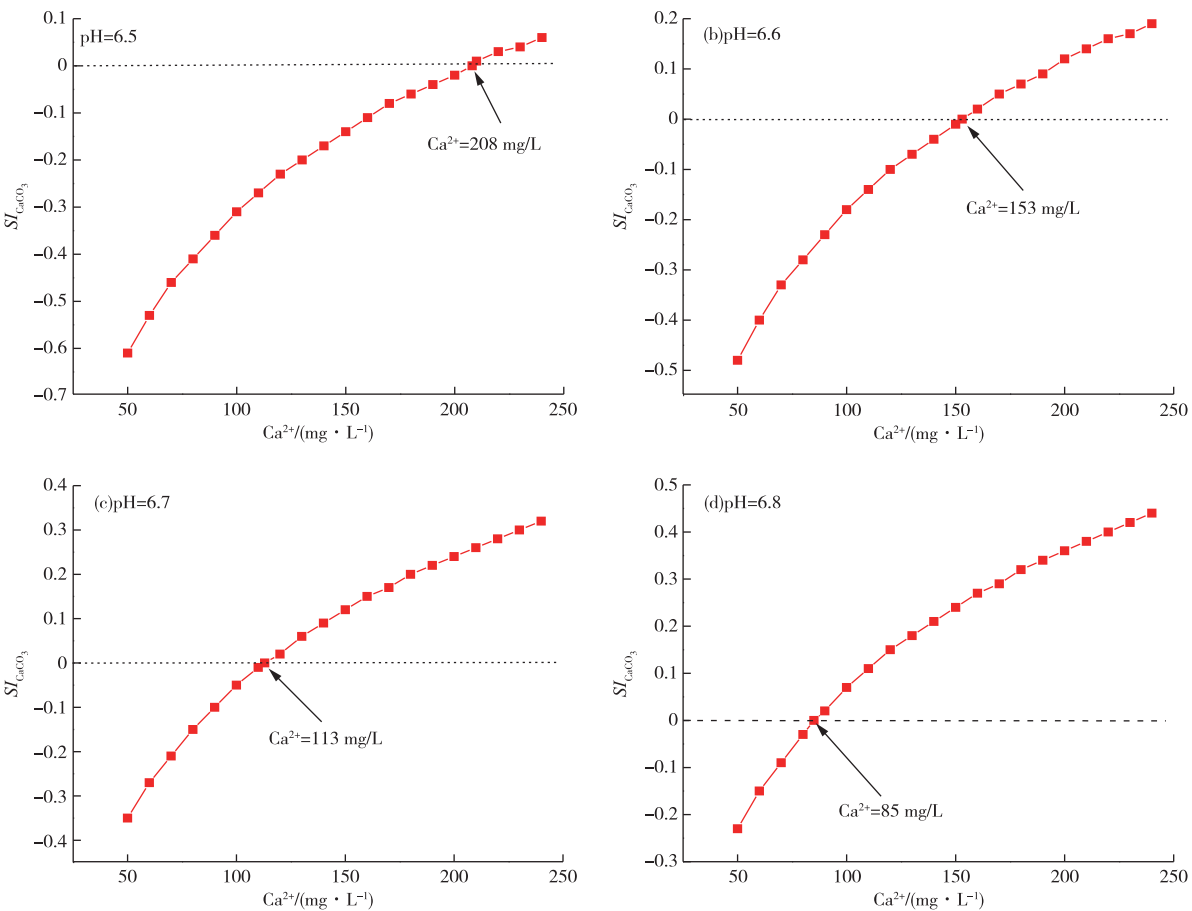


图 8 不同 pH 条件下 Ca^{2+} 浓度— SI_{CaCO_3} 曲线图 ($HCO_3^- = 1\ 700\ mg/L$)

Fig. 8 Ca^{2+} concentration— SI_{CaCO_3} curves under different pH value ($HCO_3^- = 1\ 700\ mg/L$)

表 2 溶浸液 pH、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度三者之间的关系
Table 2 Relationship between pH value, Ca^{2+} and HCO_3^- concentrations of leaching solution

试验号	pH	$Ca^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	$HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$
1-12-1C	6.52	120	2 950
	6.52	140	2 470
	6.52	160	2 100
	6.52	180	1 859

表 3 溶浸液 pH_b、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度三者之间的关系
Table 3 Relationship between pH_b value, Ca^{2+} and HCO_3^- concentrations of leaching solution

试验号	$HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$	$Ca^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	pH _b
1-12-1C	1 700	120	6.68
	1 700	140	6.63
	1 700	160	6.58
	1 700	180	6.53

表 4 溶浸液 Ca^{2+} 、pH、 HCO_3^- 浓度三者之间的关系
Table 4 Relationship between Ca^{2+} concentration, pH value and HCO_3^- concentration of leaching solution

试验号	$HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$	pH	$Ca^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$
1-12-1C	1 700	6.5	208
	1 700	6.52	195
	1 700	6.6	153
	1 700	6.7	113
	1 700	6.8	85

3 结论

根据纳岭沟铀矿 $CO_2 + O_2$ 地浸出试验浸出液化学成分数据,通过水文地球化学模拟计算,得到以下结论:

1)难溶矿物饱和指数计算结果表明,当浸出液 $pH < 4.5$ 时,各种矿物均不发生沉淀;当 $pH = 4.5 \sim 6.5$ 时, $Al(OH)_3$ 、 $AlHO_2$ 、 AlO_2H 等含铝矿物具备

沉淀的可能性;当 $\text{pH} > 6.5$ 时,将发生 CaCO_3 沉淀。

2)水-岩平衡模拟结果表明,在 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀中,在相同 pH 条件下,溶浸液 Ca^{2+} 浓度越高, CaCO_3 沉淀的 HCO_3^- 浓度边界值越低, CaCO_3 则越容易发生沉淀。在相同 HCO_3^- 浓度条件下,溶浸液 Ca^{2+} 浓度越低,则 CaCO_3 沉淀的 pH 边界值越高。当 Ca^{2+} 浓度为定值时, HCO_3^- 浓度越高, CaCO_3 沉淀的 pH 边界值越低。

3)根据模拟结果获得了不产生 CaCO_3 沉淀条件下, pH 、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度三者之间的关系,地浸采铀过程中,维持溶浸液较低的 Ca^{2+} 浓度与较低的 pH 是预防与缓解 CaCO_3 沉淀堵塞的有效途径。

参考文献

- [1] 张飞凤,苏学斌,邢拥国,等.地浸采铀新工艺综述[J].中国矿业,2012,21(增刊1):9-12.
ZHANG F F, SU X B, XING Y G, et al. Review of new process of ground leaching uranium mining[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 9-12.
- [2] 张泽贵.地浸采铀矿层堵塞的化学解堵探索性研究[J].铀矿冶,2005,24(4):14-18.
ZHANG Z G. Exploratory study on chemical deplugging of uranium seam blockage in ground leaching [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(4): 14-18.
- [3] 何小同,陈立,谢希良,等.512矿床化学解堵及酸法地浸堵塞物形成原因分析[C]//中国核科学技术进展报告(第六卷):中国核学会2019年学术年会论文集第2册(铀矿地质分卷(下)、铀矿冶分卷).北京:中国原子能出版社,2019:346-352.
HE X T, CHEN L, XIE X L, et al. Analysis of chemical deplugging of 512 ore deposits and the formation of acid ground leaching blockage [C]// Progress Report on Nuclear Science and Technology in China (Volume 6): Proceedings of the 2019 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society, Volume 2 (Uranium Geology (Part II), Uranium Mining and Metallurgy). Beijing: China Atomic Energy Press, 2019: 346-352.
- [4] 王海峰,郭忠德,包成栋,等.伊宁铀矿511矿床地浸采铀现场试验[J].铀矿冶,2002,21(3):113-118.
WANG H F, GUO Z D, BAO C D, et al. Field test of uranium leaching in Yining uranium deposit 511[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2002, 21(3): 113-118.
- [5] 吉宏斌.蒙其古尔铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸过程中铀的浸出及溶质迁移机理研究[D].南昌:东华理工大学,2019.
- JI H B. Study on leaching mechanism of uranium and solute migration during $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ground leaching in the uranium deposit of Mengqigul[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [6] 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-rock interaction and its influence on alkaline leaching of Shihongtan uranium deposit in Xinjiang[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2013, 36(2): 101-106.
- [7] 陈万利.巴彦乌拉铀矿地浸过程中含矿层化学堵塞机理研究[D].南昌:东华理工大学,2017.
CHEN W L. Study on chemical blockage mechanism of ore-bearing seam during leaching process of Bayan Ula uranium ore[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [8] 薛海凤,朱建华,刘红研,等.钱二块铀矿床采铀注液结垢趋势的理论分析与预测[J].铀矿地质,2008,24(1):48-56,64.
XUE H F, ZHU J H, LIU H Y, et al. Theoretical analysis and prediction of scaling trend of uranium injection solution in Qian'er uranium deposit [J]. Uranium Geology, 2008, 24(1): 48-56, 64.
- [9] 钟平汝, LARRY M G. 美国 Highland 铀矿碱法地浸采铀工艺[J].铀矿冶,2004,23(2):69-72.
ZHONG P R, LARRY M G. Uranium mining process by alkali method in Highland, USA [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23(2): 69-72.
- [10] 徐乐昌,王德林,孙先荣,等.美国 Smith Ranch 铀矿地浸工艺与设施介绍[J].铀矿冶,2005,24(2):71-75.
XU L C, WANG D L, SUN X R, et al. Introduction of uranium leaching process and facilities in Smith Ranch, USA [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(2): 71-75.
- [11] 原渊,李建东,史红霞,等.哈萨克斯坦地浸采铀生产现状与进展[J].中国矿业,2014,23(11):149-151.
YUAN Y, LI J D, SHI H X, et al. Current situation and progress of uranium production in Kazakhstan[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(11): 149-151.
- [12] 原渊,江国平,廖天伟,等.地浸采铀碳酸钙结垢主要影响因素研究[J].中国矿业,2019,28(11):128-130.
YUAN Y, JIANG G P, LIAO T W, et al. Study on the main influencing factors of calcium carbonate fouling in ground leaching [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 128-130.

- [13] 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. Halting chemical precipitation blockage in alkaline uranium leaching by carbon dioxide[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(1): 15-20.
- [14] 吉宏斌,刘金辉,殷蓬勃.影响地浸采铀的矿层渗透因素[J].世界核地质科学,2008,25(3):180-182.
JI H B, LIU J H, YIN P B. Factors affecting the permeability of ore seam in ground leaching uranium[J]. World Nuclear Geology Science, 2008, 25(3): 180-182.
- [15] 吉宏斌,周义朋,孙占学,等.蒙古尔铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 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.
- [16] 高柏,邢拥国,张文,等.淡化地下水对缓解某矿床地浸化学堵塞的探讨[J].铀矿冶,2010,29(2):61-65.
GAO B, XING Y G, ZHANG W, et al. Discussion on the effect of desalinated groundwater on alleviating chemical blockage of ground leaching in a mineral deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2010, 29(2): 61-65.
- [17] 祝永进,史维浚,孙占学,等.弱酸-中-弱碱性介质中的水-碳酸钙作用:砂岩铀矿地浸过程中碳酸钙堵塞机理及其预防[J].东华理工大学学报(自然科学版),2010,33(4):369-373.
ZHU Y J, SHI W J, SUN Z X, et al. The water-calcite reaction in weakacid-neutral-weakalkality media: the mechanism of block-up by carbonate in leaching and its protect [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2010, 33(4): 369-373.
- [18] 陈建昌,朱鹏,徐巧兵,等.内蒙古某铀矿床室内中性浸出试验研究[J].铀矿冶,2013,32(2):72-75,86.
CHEN J C, ZHU P, XU Q B, et al. Laboratory test of neutral leaching of a uranium ore in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(2): 72-75, 86.
- [19] 许根福. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀主要工艺参数及化学沉淀堵塞问题分析[J].铀矿冶,2014,33(4):197-202.
XU G F. Analysis of main process parameters and chemical precipitation plugging problem of uranium leaching in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(4): 197-202.
- [20] 张青林,丁德馨.某砂岩铀矿石 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 柱浸试验[J].有色金属(冶炼部分),2017(8):35-39.
ZHANG Q L, DING D X. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ column leaching test of sandstone type uranium ore [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(8): 35-39.
- [21] 夏菲,孟华,聂逢君,等.鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义[J].地质学报,2016,90(12):3473-3482.
XIA F, MENG H, NIE F J, et al. Characteristics and geological significance of chlorite in Nalinggou uranium deposit in Ordos Basin [J]. Acta Geological Sinica, 2016, 90(12): 3473-3482.
- [22] 刘鑫扬,贺锋,剡鹏兵,等.鄂尔多斯盆地东北部铀成矿地质特征与区域成矿规律[J].铀矿地质,2022,38(3):373-393.
LIU X Y, HE F, YAN P B, et al. Geological characteristics and regional mineralization law of uranium mineralization in northeast Ordos Basin [J]. Uranium Geology, 2022, 38(3): 373-393.
- [23] 王贵,王强,苗爱生,等.鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀矿物特征与形成机理[J].矿物学报,2017,37(4):461-468.
WANG G, WANG Q, MIAO A S, et al. Characteristics and formation mechanism of uranium minerals in Nalinggou uranium deposit in Ordos Basin [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2017, 37(4): 461-468.
- [24] 易超,高贺伟,李西得,等.鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩型铀矿床常量元素指示意义探讨[J].矿床地质,2015,34(4):801-813.
YI C, GAO H W, LI X D, et al. Significance of constant element indication of sandstone-type uranium deposits in the northeast of Ordos Basin [J]. Mineral Deposit Geology, 2015, 34(4): 801-813.
- [25] 张宾,刘红旭,易超,等.鄂尔多斯盆地北部纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩岩石地球化学特征及对物源的指示[J].铀矿地质,2020,36(2):84-95.
ZHANG B, LIU H X, YI C, et al. Geochemical characteristics of sandstone rocks in the lower subsection of the lower subsection of the Zhiluo Formation in the northern Nalinggou area of Ordos Basin and indication of material sources [J]. Uranium Geology, 2020, 36(2): 84-95.
- [26] 苗爱生,王佩华,王贵,等.内蒙古达拉特旗纳岭沟铀矿床详查报告[R].包头:核工业二〇八大队,2013.
MIAO A S, WANG P H, WANG G, et al. Detailed investigation report of uranium deposits in Dalat Qinalinggou, Inner Mongolia [R]. Baotou: 208th Brigade of Nuclear Industry, 2013.