

利用 CHEMSPEC 软件计算某铀矿浸出液中铀和其他特征元素的种态分布

陈亚雯¹, 周万强^{1,2}, 刘正邦³, 郭 宁¹, 牛玉清³, 王祥云¹, 翁海成³, 刘春立^{1,*}

1. 北京分子科学国家研究中心, 放射化学与辐射化学重点学科实验室, 北京大学 化学与分子工程学院, 北京 100871;

2. 铜陵学院 建筑工程学院, 安徽 铜陵 244061; 3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149

摘要: 在地浸采铀过程中, 浸出液的化学组分和现场水文地球化学条件共同影响了铀的存在形式, 即铀的化学种态。铀的化学种态对其在地浸过程中的物理化学行为具有重要的影响。本工作利用北京大学自主编写的种态分析软件 CHEMSPEC 计算了某铀矿浸出液中铀和其他特征元素的种态及种态分布, 并研究了 pH 和铀初始浓度等因素对种态及其分布的影响。计算结果表明, 铀的化学种态受 pH 和铀的初始浓度影响较大: 铀可以在酸性条件下 ($\text{pH} \approx 5.0$) 生成菱铀矿 (rutherfordine) 沉淀, 沉淀量随铀初始浓度的增加而增大; 当 pH 增大到 5.5 时, 菱铀矿沉淀会发生溶解。钙和镁在强酸性条件下以游离的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 形式存在, 在 $\text{pH} > 6.6$ 时会生成白云石 (dolomite) 和菱镁石 (magnesite) 沉淀。含有碳酸氢根类盐的优势种态在酸性条件下为水溶性 CO_2 , 在碱性条件下转变为 CO_3^{2-} ; 在碱性条件下参与生成菱镁石沉淀和白云石沉淀的碳酸根只约占总量的 5%。在所研究的 pH 范围内, 硫元素在地浸溶液体系中均以游离的 SO_4^{2-} 形式存在, pH 对其种态分布的影响较小。本工作计算的某真实地浸溶液中铀与其它特征元素的种态分布, 及可能生成的沉淀物种, 对提高铀的浸出率有重要意义。

关键词: 地浸采铀; 种态分布; 铀; 地球化学计算

中图分类号: TL12

文献标志码: A

文章编号: 0253-9950(2024)06-0587-07

doi: 10.7538/hhx.2024.46.06.0587

Predicted Chemical Speciation Distribution of Uranium and Other Elements in Leaching Solution From Specific Uranium Deposit by Using CHEMSPEC Software

CHEN Ya-wen¹, ZHOU Wan-qiang^{1,2}, LIU Zheng-bang³, GUO Ning¹, NIU Yu-qing³,
WANG Xiang-yun¹, WENG Hai-cheng³, LIU Chun-li^{1,*}

1. Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, Fundamental Science Laboratory on Radiochemistry & Radiation Chemistry, College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. College of Civil Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China; 3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, China National Nuclear Corporation, Beijing 101149, China

Abstract: During the *in-situ* leaching process of uranium, both the chemical composition of the leaching solution and the *in-situ* hydrogeochemical conditions can affect the chemical speciation of uranium. The

收稿日期: 2023-06-13; 修订日期: 2023-09-22

作者简介: 陈亚雯、周万强为共同第一作者

* 通信联系人: 刘春立

chemical speciation of uranium significantly impacts its physicochemical behaviors during the *in-situ* leaching process. In this study, a speciation analysis software called CHEMSPEC, developed by Peking University, was used to calculate the speciation and speciation distribution of uranium and other specific elements in the leaching solution of a certain uranium mine. The effects of key factors was investigated such as pH and initial uranium concentration on uranium speciation and its distribution. The results show that the chemical speciation of uranium is greatly influenced by pH and initial uranium concentration. Uranium can precipitate as rutherfordine at acidic conditions($\text{pH} \approx 5.0$), and the amount of precipitation increases with the increment of initial uranium concentration. The rutherfordine precipitation can dissolve when pH increases to 5.5. Calcium and magnesium exist in the form of free Ca^{2+} and Mg^{2+} under strong acidic conditions, and they can form dolomite and magnesite precipitates when $\text{pH} > 6.6$. The dominant speciation of bicarbonate salts exists as water-soluble CO_2 under acidic conditions, and they transform into CO_3^{2-} under alkaline conditions. The carbonate species that participate in the precipitation of magnesite and dolomite under alkaline conditions constitute only about 5% of the total amount. Sulfur is in the form of free SO_4^{2-} in the *in-situ* leaching solution system under the studied pH conditions, and its speciation distribution is less relevant to pH. The speciation distribution of uranium and other characteristic elements in the *in-situ* leaching solution and the possible precipitates that may form are of great significance in improving the leaching efficiency of uranium.

Key words: *in-situ* leaching of uranium; speciation distribution; uranium; geochemical modeling

核能被认为是一种能够实现经济和环境可持续发展的清洁能源^[1]。随着世界范围内核能的发展,地球上可开采的铀资源呈现出急剧下降的趋势。我国的铀资源产量与需求量之间存在较大的差距,且产量的增加速率跟不上高速增加的需求量。因此,核工业的发展对铀矿资源的开发提出了更高的要求。中国的铀矿开采始于20世纪50年代,采冶方式从搅拌浸出转变为堆浸,再发展到20世纪90年代开始广泛使用的地浸技术。“地浸”是“原地浸出采铀”的简称,是指铀矿处于天然埋藏条件下,不改变其空间位置,将配制好的溶液直接注入注液孔中,与矿物充分混合后形成含铀的溶液,再选择性地浸出有用组分得到铀的过程^[2]。目前,地浸采铀工艺主要包括酸法与碱法两种。酸法浸出有较高的浸出效率,产物硫酸铀酰能够直接通过阴离子交换树脂富集,具有成本低的优势。但酸法浸出会导致伴生矿物溶解,对铀的选择性较差,且酸液会对地下水造成一定程度的污染。碱法浸出的原理是铀酰离子在弱碱性条件下易形成配合物,这类配合物可随溶液迁移^[3]。具体方法是:用氧气和碳酸盐的复合体系将含铀矿物氧化溶解为稳定的水溶性碳酸铀酰,所用的碳酸盐主要是碳酸钠和重碳酸钠等。碱法浸出适用于碳酸盐含量较高的矿床,对环境造

成的污染较小,但浸出率相比于酸法浸出约低10%。水溶性配合物的形成能够增强铀在含氧天然水体中的溶解度与迁移速率,并且能够改变铀酰离子的反应性质。因此,结合矿物的组成成分与基本性质,以及地浸井场相关浸出剂和浸出液中的pH和相关离子浓度等数据,利用种态分析软件模拟计算真实环境条件下铀的种态分布情况,对提高铀的浸出效率有重要的指导意义。

自20世纪80年代起,国际上已经开发了多款化学种态分析软件,如PHREEQC、EQ3/6、MINTEQA2等。国内用户使用这些软件进行了一些计算,如2017年王妍力等^[4]利用PHREEQC软件计算了上海近海洋山海水中铀的种态,结果表明在 $\text{pH}=8 \sim 10$ 的海水中铀的主要存在种态是 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 。徐真等^[5]使用PHREEQC软件模拟计算了我国高放废物地质处置库重点研究区甘肃北山、西南某地 and 新疆准噶尔盆地等特定场址地下水中铀的种态分布,并分别讨论了pH、温度对研究区域地下水中铀种态分布的影响。研究发现,地下水中U呈VI价,且主要以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 和 UO_2CO_3 形式存在。同时发现pH的变化能够引起碳酸体系的解离,从而影响U的种态;温度的变化改变了水作为溶剂的性质而影响U的种态分布。

虽然用于种态计算的软件已较为成熟,但是,鉴于计算软件的著作权问题,国内用户往往不能得到种态计算软件的源程序,计算结果也只是假定计算条件或程序给定条件下的收敛值,用户并不能对计算结果的合理性和可靠性进行进一步分析。北京大学核环境化学课题组在王祥云教授的鼎力协助下从2008年开始编写种态分析软件CHEMSPEC,在十余年内不断更新数据库、改进理论模型以及优化程序计算条件^[6-13]。当前该软件计算能力趋于成熟,能胜任多种复杂体系下的元素种态计算。

在地浸采铀过程中,地下水与其周围的岩石矿物能够发生复杂的化学反应,且整个化学反应处于动态变化之中。溶浸液化学组分和水文地球化学参数决定了铀的种态,而存在形式又是决定铀浸出效率的重要因素。地浸采铀过程会因地下水和矿物组分的相互作用产生碳酸钙沉淀,造成浸出系统堵塞,降低浸出效率^[14]。使用种态分析软件对地浸采铀过程中铀及其它特征元素的种态及可能生成的沉淀物种进行计算分析,增强了人们对地浸过程的认识,对提高铀的浸出率有重要意义。本工作基于核工业北京化工冶金研究院提供的某地浸井场浸出液中的pH和相关离子浓度等数据,使用CHEMSPEC软件计算铀和其他关键元素在浸出液中不同条件下的化学种态,旨在揭示地浸过程中随着浸出液条件的变

化,铀和其他关键元素的化学种态之间的转换关系,进而预测铀在地浸溶液中的种态分布以及可能生成的含铀沉淀。据此评估常规地浸方法的浸铀效果并提出解决/预防产生沉淀堵塞等问题的措施。

1 模拟计算原理及条件

作为种态分析软件,CHEMSPEC、PHREEQC和EQ3/6的原理是类似的,是以质量平衡为基础,根据元素的分析浓度,结合现有的热力学数据库搜索出可能形成的所有种态直至计算收敛。目前,CHEMSPEC收录了PSI/Nagra和LLNL两个数据库,用户可以根据需要自行选用。PSI/Nagra数据库包含125个组分和555个种态,LLNL数据库包含265个组分和3017个种态。这些数据已经转换成CHEMSPEC的数据格式,即组分文件components.dtb、物种文件species.dtb和化学计量矩阵文件stoichiometry.dtb。CHEMSPEC还将某些离子交换和表面配位反应的种态包含在内。目前为止,CHEMSPEC已是一款完善的用于计算各种溶液体系中元素种态分布的软件。

本工作使用CHEMSPEC计算了CO₂+O₂浸出条件下,某地浸井场浸出液中元素的种态分布。溶液样品由核工业北京化工冶金研究院提供,表1为浸出液的离子组分和浓度。由表1可知,该浸出液是一种高盐度和强氧化性的地浸体系。

表1 CO₂+O₂地浸法浸出液的离子组分和浓度

Table 1 Ionic composition and concentrations in CO₂+O₂ leaching solution

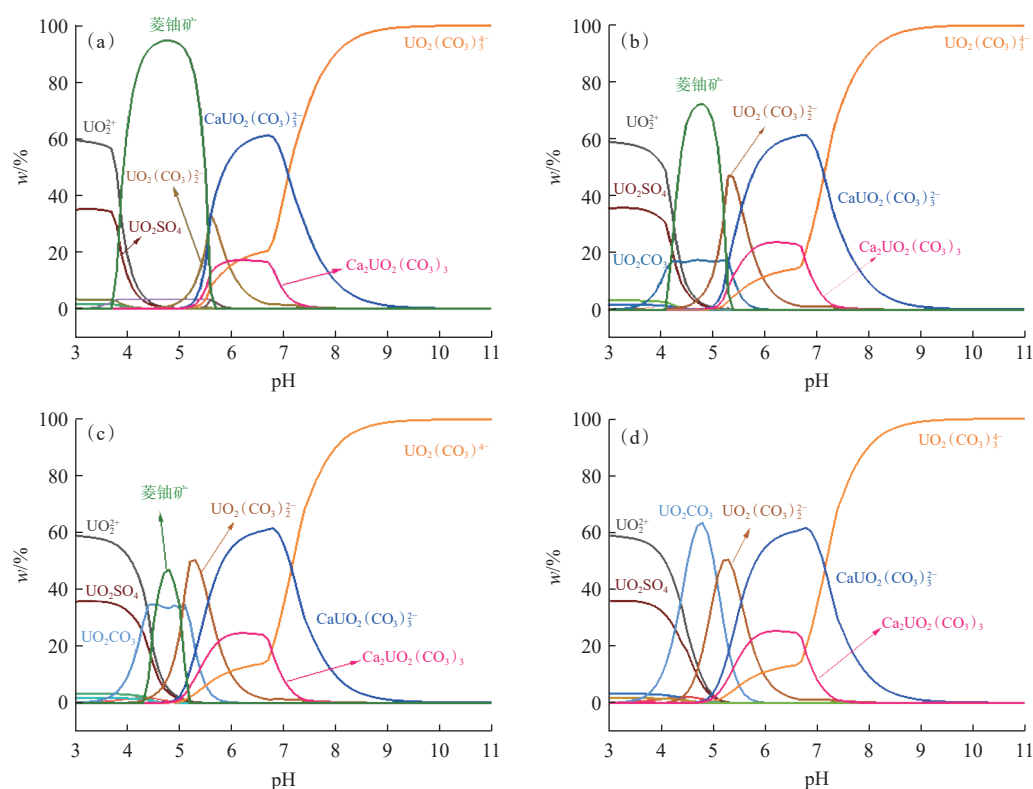
$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$						电位/mV	pH
HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ ²⁺		
3 700	50	37	149	605	4.09	323	7.18

2 结果与讨论

2.1 铀的种态分布

图1为CO₂+O₂浸出条件下pH对不同浓度铀种态分布的影响结果。如图1(a)所示,当铀初始浓度为 5.0×10^{-4} mol/L时,在酸性条件下,随着pH的增大,铀的优势种态从游离的UO₂²⁺逐渐变为菱铀矿沉淀(rutherfordine, UO₂CO₃)。菱铀矿是目前唯一已知的具有矿物晶型的碳酸铀酰矿物:铀原子赤道面与6个氧原子进行配位,其中4个氧原子来自于两个双齿配位的碳酸根,另外2个

氧原子来自于两个单齿配位的碳酸根^[15]。在本研究体系中,当pH>3.6时,菱铀矿沉淀开始生成;在4.0<pH<5.5时,菱铀矿沉淀成为优势种态,且在pH≈5左右,菱铀矿沉淀的质量分数超过90%。在弱酸性到中性条件下,即5.5<pH<7.1时,铀在溶液中的优势种态变为CaUO₂(CO₃)₂²⁻。在碱性条件下,铀在溶液中的优势种态为UO₂(CO₃)₃⁴⁻。说明随着pH值的升高,UO₂²⁺会产生菱铀矿沉淀,沉淀的生成可能会造成浸出体系堵塞。而随着pH的继续增大,沉淀产物又会溶解,整个溶液渗透通道又会畅通^[16]。



$c_0(\text{U})$, mol/L: (a) 5.0×10^{-4} , (b) 1.0×10^{-4} , (c) 5.0×10^{-5} , (d) 1.0×10^{-5}

图1 CO_2+O_2 浸出条件下 pH 对不同浓度的铀种态分布的影响

Fig. 1 Effect of pH on distribution of uranium species in CO_2+O_2 leaching solution

当溶液中铀的初始浓度为 1.0×10^{-4} mol/L 时, 铀的种态分布发生了明显变化。如图 1(b) 所示, 强酸性条件下铀的主要存在形式依然是 UO_2^{2+} 。但当 $4.2 < \text{pH} < 5.2$ 时, 菱铀矿沉淀虽为铀的优势种态, 但其占比明显降低, 并在此区间内生成了新的种态—— $\text{UO}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ 。说明随着 pH 的增大, UO_2^{2+} 大部分转化成了菱铀矿沉淀, 少部分转化成了溶解态的 UO_2CO_3 。

随着溶液中铀初始浓度的降低, 菱铀矿沉淀在 $4.0 < \text{pH} < 5.5$ 区间内的占比进一步降低, 而 UO_2CO_3 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 的占比显著上升(图 1(c—d))。当溶液中铀的初始浓度为 5.0×10^{-5} mol/L 时, 在 $\text{pH} \approx 4.8$ 左右, 菱铀矿沉淀的百分比达到最大值, 但也不超过 50%, 可见体系中铀初始浓度降低, 会导致菱铀矿沉淀含量占比下降。碱性条件下的铀依然是以溶液态的多碳酸根配位的配合物为主。当溶液中铀的初始浓度为 1.0×10^{-5} mol/L 时, 在整个 pH 范围内溶液中没有固相沉淀生成。与其他浓度的铀溶液中的种态分布相比, 在 $\text{pH} = 4.4 \sim 5.1$ 时, 溶液中 UO_2CO_3 的比例高达 65%, 说明随着

溶液中铀初始浓度的降低, 大部分的菱铀矿沉淀可能转化为溶解态的 UO_2CO_3 。由此可见, 浸取液中铀的存在形式和各个种态的含量占总量的比例与浸取液的 pH 值有关, 当浸取液的 pH 值升至铀水解沉淀的临界 pH 值时, 溶解状态的铀逐渐沉淀^[17]。因此, 地浸生产过程中的铀酰离子与浸出液中的碳酸根反应生成的沉淀可造成暂时性堵塞, 控制溶液的 pH 可有效防止铀沉淀的生成。

2.2 钙的种态分布

已有研究表明, “ CO_2+O_2 ” 地浸法浸出液中, 石膏、方解石和白云石沉淀是最常见的造成浸出体系堵塞的原因^[18], 且石膏、方解石、白云石的饱和程度受体系中的 pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 浓度、矿化度等因素共同控制。因此采用 CHEMSPEC 计算了溶液中其他离子在不同 pH 下的种态分布。计算结果表明, 铀浓度的变化对其他离子的种态分布的影响极小, 因此这里只讨论含铀初始浓度为 1.0×10^{-4} mol/L 的浸出液中其他离子的种态分布。钙离子的种态分布示于图 2。如图 2 所示, 在 $\text{pH} < 6.9$ 的酸性条件下, 钙的优势种态为游

离的 Ca^{2+} , 由于此时硫酸根和碳酸氢根离子的浓度较高, 还存在相应的配合物种态(例如 CaSO_4 和 CaHCO_3^+)。当 $\text{pH} > 6.9$ 时, 优势种态由溶液中的钙离子转变为白云石沉淀(dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)。理想的白云石是一种由钙离子和镁离子交替排列的、具有有序晶格结构的碳酸钙镁矿物, 其中具有等量的钙和镁^[19]。白云石沉淀在 $\text{pH} \approx 6.6$ 开始生成, 从 $\text{pH} = 6.9$ 起成为优势种态, 在 $\text{pH} = 8.5$ 左右质量分数接近 100%。这是因为随着溶液 pH 的增大, 硫酸根与矿层中的矿物作用, 使得溶液中的白云石的饱和指数增大, 白云石的沉淀明显增多。在 $\text{pH} = 7.18$ 的浸出液中, 必然会有白云石沉淀生成造成系统堵塞, 因此需要采取必要的过滤措施除去溶液中的白云石沉淀, 方能使浸出体系正常运行。

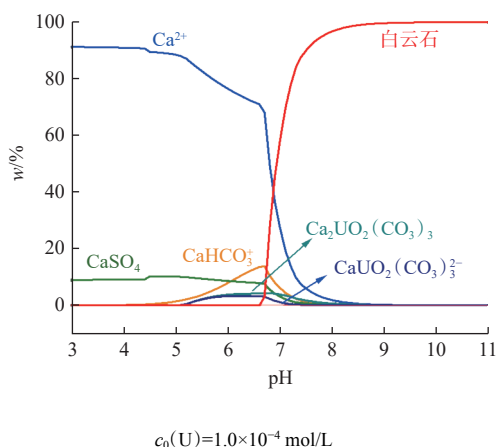


图2 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸出条件下浸出液中钙离子的种态分布

Fig. 2 Species distribution of calcium ions in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ leaching solution

2.3 镁的种态分布

在地浸体系中, 镁离子的种态分布(图3)与钙离子非常相似。如图3所示, 当 $\text{pH} < 7.0$ 时, 镁主要以游离的镁离子为主, 由于硫酸根离子和碳酸氢根离子浓度较高, 此时还存在相应的配合物种态(MgSO_4 和 MgHCO_3^+)。当 $\text{pH} > 7.0$, 优势种态由溶液中的镁离子转变为白云石沉淀(dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), 白云石沉淀在 $\text{pH} \approx 6.6$ 时开始生成, 从 $\text{pH} = 7.0$ 时成为优势种态, 在 $\text{pH} = 8.5$ 左右其质量分数达到最大值, 接近 80%。除此之外, 菱镁石沉淀(magnesite, MgCO_3)在 $\text{pH} \approx 7.4$ 左右开始生成, 在 $\text{pH} > 8.5$ 之后质量分数达到最大值, 接近 20%。当 $\text{pH} > 8.5$ 时, 几乎所有的镁离子都生成了

沉淀, 沉淀的主要形式为白云石和菱镁石。与钙离子不同的是, 镁离子并没有以三元碳酸铀酰配合物形式显著存在的种态。因此在碱性条件下, 通过过滤就可除去溶液中所有的镁离子。

模拟计算结果表明, 在该溶液体系中, 钙离子和镁离子在中性和碱性条件下会逐渐水解产生白云石沉淀, 环境条件稍微发生变化时, 便可能促发硫酸盐、碳酸盐沉淀的临界状态, 易产生石膏、碳酸钙的沉淀。因此用“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸法浸出铀时需考虑沉淀引起的堵塞问题。若想要避免因白云石沉淀和菱镁矿沉淀造成的堵塞现象, 需保持浸出液 pH 在 6.6 以下, 该结论与此前模拟计算结果^[18]一致。

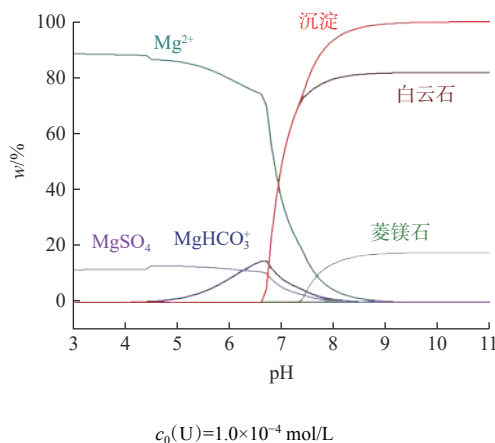


图3 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸出条件下浸出液中镁离子的种态分布

Fig. 3 Species distribution of magnesium ions in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ leaching solution

2.4 硫酸根的种态分布

在铀的初始浓度为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, 计算得到的硫酸根离子在溶液中的种态分布示于图4。在所研究的整个 pH 范围内, 浸出液体系中硫酸根离子种态最为稳定, pH 对硫酸根种态分布的影响较小; 除此之外, 溶液体系中还存在镁、钙和钠离子与硫酸根的配合物种态。因此, 溶液中的 SO_4^{2-} 不太可能造成堵塞现象的发生。

2.5 碳酸氢根的种态分布

在 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸铀过程中, HCO_3^- 作为浸铀剂, 为 UO_2^{2+} 的配位溶解提供配体, 因此, 在碳酸盐浸铀体系中的 HCO_3^- 浓度是影响铀浸出浓度的关键因素^[20]。在铀的初始浓度为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, 碳酸氢根离子在浸出液中的种态分布示于图5。酸性条件下其优势种态以水溶的 CO_2 为主, 因此酸性

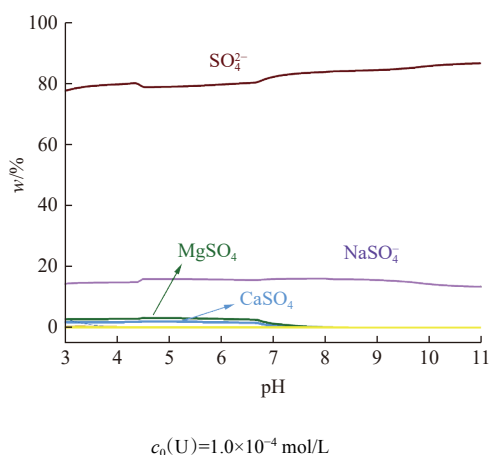


图4 CO_2+O_2 浸出条件下浸出液中硫酸根离子的种态分布

Fig. 4 Species distribution of sulfate ions
in CO_2+O_2 leaching solution

条件下可以不考虑 HCO_3^- 的影响。在 $\text{pH}=6.0$ 左右 HCO_3^- 开始成为优势种态。当 $\text{pH}>10.0$, CO_3^{2-} 逐渐成为优势种态,此时溶液中还有一定量的 NaCO_3 存在;由于碳酸氢根离子浓度较高,生成的菱镁石沉淀和白云石沉淀只占碳酸根组分的一小部分(约5%)。

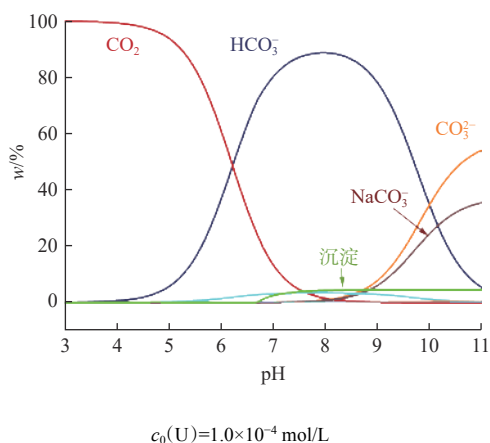


图5 CO_2+O_2 浸出条件下浸出液中碳酸氢根离子的种态分布

Fig. 5 Species distribution of hydrogencarbonate ions
in CO_2+O_2 leaching solution

3 结 论

主要计算了某 CO_2+O_2 体系浸出液中铀的种态分布,并同时计算了该体系中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的种态分布。结果表明:

(1) 铀可以在酸性条件下 ($\text{pH}\approx 5$) 生成菱铀矿 (rutherfordine) 沉淀,其含量随铀初始浓度的增大而增大;

(2) 钙离子和镁离子在碱性条件下 ($\text{pH}>6.6$) 生成白云石 (dolomite) 和菱镁石 (magnesite) 沉淀,酸性条件下钙和镁在浸出液中均以游离的钙镁离子形式存在;

(3) 酸性条件下碳酸氢盐的优势种态为水溶性 CO_2 ,随着 pH 的升高,在 $\text{pH}=6.0$ 左右碳酸氢根离子开始成为优势种态,在 $\text{pH}=10.0$ 左右碳酸根离子成为优势种态,由于碳酸氢根离子浓度较高,生成的菱镁石沉淀和白云石沉淀只占碳酸根组分的一小部分(约5%);

(4) 在所研究的 pH 范围内,浸出液体系中硫元素以游离形式存在的硫酸根离子最为稳定, pH 对硫酸根种态分布的影响较小。

本工作利用 CHEMSPEC 计算了铀在 CO_2+O_2 浸出条件下浸出液中的种态分布,讨论了铀浓度和共存离子等因素对种态分布的影响。在缺少实验测量数据的条件下可考虑使用 CHEMSPEC 预测不同元素在溶液中的溶解度数值,为避免系统堵塞提供基础参数,计算结果对提高铀的浸出效率有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 方虹,方惠.核能投资:低碳经济时代最佳选择[J].中国科技投资,2011(2):61-63.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王妍力,罗明标,杨智翔.海水中铀的形态分布模拟研究:以上海近海洋山海水为例[J].世界核地质科学,2017,34(2):92-95.
- [5] 徐真,陆春海,陈敏,等.铀在不同地区地下水中的种态模拟[J].核化学与放射化学,2015,37(3):184-188.
- [6] 王祥云,陈涛,刘春立.化学形态分析软件 CHEMSPEC 及其应用[J].中国科学 (B 辑:化学),2009,39(11):1551-1562.
- [7] 蒋美玲,王祥云,刘春立,等.Am 在两种不同地下水中的种态分布及溶解度分析[J].核化学与放射化学,2014,36(5):263-271.
- [8] 陈涛,王祥云.地球化学软件 CHEMSPEC 的新进展及应用[J].世界核地质科学,2014,31:419-423.
- [9] 周万强,蒋京呈,何建刚,等.计算模拟铀在北山地下水的种态分布及在两种不同材料上的吸附[J].核技术,2018,41(7):25-30.
- [10] 徐雪雯,周万强,董亮,等.CHEMSPEC 模拟铀在塔木素地下水中的种态分布[J].中国科学:化学,2019,49(10):1308-1314.
- [11] 陈涛.碘-129 在北山花岗岩中的迁移研究及 CHEMSPEC

- 的应用[D].北京:北京大学,2010.
- [12] 刘春立,王祥云,周万强.化学种态分析软件 CHEMSPEC 最新进展[J].核化学与放射化学,2017,39(6):397-402.
- [13] 蒋京呈,王晓丽,蒋美玲,等.利用 CHEMSPEC 模拟计算 Np 和 Pu 在北山地下水中的种态分布及其在水合氧化铁上的吸附[J].中国科学:化学,2016,46(8):816-822.
- [14] Fiaz Asghar,周义朋,孙占学,等.新疆蒙古尔矿床铀矿石 CO_2+O_2 中性浸出试验[J].有色金属 (冶炼部分),2021(8): 46-55.
- [15] Frondel C, Meyrowitz R. Studies of uranium minerals (XIX): rutherfordine, diderichite, and clarkeite[J]. Am Mineral, 1956, 41(1-2): 127-133.
- [16] 高柏,史维浚,孙占学.PHREEQC 在研究地浸溶质迁移过程中的应用[J].华东地质学院学报,2002,25(2):132-135.
- [17] 马尧.地球化学模式 PHREEQC 在地浸工艺中的应用[J].铀矿冶,2007,26(2):67-71.
- [18] 费子琼,周义朋,张勇,等.某矿床地浸采铀现场试验过程中的水化学状态分析[C]//中国核学会 2015 年学术年会论文集.绵阳,2015:368-374.
- [19] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth Sci Rev*, 2000, 52(1-3): 1-81.
- [20] 张青林,丁德馨.某砂岩铀矿石 CO_2+O_2 柱浸试验[J].有色金属 (冶炼部分),2017(8):35-39.