

不同分压 CO_2 对方解石的溶蚀作用

谢宇帆, 张辉, 李峰, 曾天泽, 操茜, 丁德馨

(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 方解石是砂岩型铀矿床中重要的碳酸盐矿物, 其溶解-沉淀行为直接影响矿床的渗透性。为了深入理解砂岩型铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀过程中渗透性下降机制, 采用不同分压 CO_2 对方解石开展高压反应釜搅拌浸出研究。结果表明: CO_2 分压越高, 溶液的 pH 越低、 HCO_3^- 浓度越高, 对方解石的溶蚀作用越显著, 但溶蚀过程中产生的 Ca^{2+} 会导致次生方解石沉淀的产生; 方解石表面出现了差异性溶蚀, 产生了明显的溶蚀坑; 方解石的孔隙结构发生了明显改变, 表现为微孔消失、孔隙减少以及平均孔径变大。基于上述发现, 针对地浸现场提出了“高压疏通-低压维持”的动态调控策略, 为优化“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺提供了理论依据和工程指导。

关键词: “ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”; 地浸采铀; CO_2 分压; 方解石; 孔隙; 溶蚀; 渗透性

中图分类号: TD868; TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0051-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.04.15

铀资源作为核能发电的核心战略资源, 在全球能源结构转型与低碳发展背景下, 其战略价值与日俱增^[1]。在当前全球碳中和进程加速推进的关键时期, 铀资源的稳定供应直接关系到清洁能源体系的构建与可持续发展目标的实现^[2]。

自 21 世纪初, 全球铀矿资源开发逐渐转向资源规模大、经济效益好的砂岩型铀矿床^[3-4]。中国的砂岩型铀矿床大多渗透性低^[5], 主要采用“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺进行开采^[6]; 在实际开采过程中出现的矿床渗透性下降问题, 严重影响了“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀的正常进行^[7-8]。

方解石是砂岩型铀矿中主要的碳酸盐矿物, 其胶结作用会显著降低含矿层的孔隙度和渗透性^[9-13]。在“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺中, 溶浸液与方解石发生反应生成的大量 Ca^{2+} , 会引发碳酸钙的二次沉淀, 是导致含矿层堵塞的主要原因之一^[14-18]。碳酸钙沉淀的形成主要受 pH、 HCO_3^- 浓度和 Ca^{2+} 浓度共同影响, 降低 pH 能有效预防

和缓解堵塞^[19-22]。在“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”浸铀体系中, CO_2 是控制体系 pH 和 HCO_3^- 浓度的关键因素^[23-24], 向浸出剂中加入适量 CO_2 能够有效降低体系 pH, 防止碳酸钙沉淀并促进碳酸钙结垢溶解, 从而缓解矿层堵塞问题^[25-26]。前人针对砂岩型铀矿床开采过程中出现的渗透性下降问题开展的系统研究较多, 但对于不同分压下 CO_2 对方解石的溶蚀作用规律的研究较少。笔者开展不同 CO_2 分压 (0.02、0.06、0.10、0.14、0.18 MPa) 下的方解石高压搅拌浸出试验, 研究金属离子的释放量、次生矿物生成条件以及孔隙结构的演化, 旨在了解砂岩型铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀过程中渗透性下降的原因。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的方解石购于山麟石语矿产品有限公司, 为高纯度天然矿物, 平均粒径 0.075 mm。

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42277264, 浸出剂关键水文地球化学因子作用下含铀含水层浸出特性参数演化规律及调控模型研究); 核技术研发科研项目 (HNKF202311(48), 内蒙古某砂岩铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀防堵解堵关键技术研究)。

第一作者简介: 谢宇帆 (1999—), 男, 湖南益阳人, 在读硕士, 主要研究方向为地浸采铀理论与技术。

通信作者简介: 丁德馨 (1958—), 男, 湖南常德人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为地浸采铀理论与技术。

试验所用 CO_2 气体为高纯气体, 纯度大于 99.5%。

1.2 试验装置与仪器

试验用砂岩型铀矿床地浸模拟装置由课题组自主设计, 由江苏拓创科研仪器有限公司生产。其中高压反应釜带有磁力搅拌器, 容积为 500 mL, 该反应釜可控制气体的输入流量、实时监测高压搅拌反应釜内的压力。

试验仪器: AL104 型电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; TGL18M 型台式冷冻高速离心机, 长沙英泰仪器有限公司; DZF-6050AB 型真空干燥箱, 北京中兴伟业世纪仪器有限公司; ICP-5000 型电感耦合等离子体发射光谱仪, 聚光科技股份有限公司; HQ430D 型 pH 计, 美国哈希公司; Smartlab SE4 型 X 射线衍射仪, 日本理学公司; Tescan MIRA3 型扫描电子显微镜, 泰思肯贸易(上海)有限公司; ASAP2460 型表面表征分析仪, 美国麦克仪器公司。

1.3 试验方法

内蒙古某砂岩型铀矿床矿层水主要组分: $\text{pH}=8.60$, $\rho(\text{U}) < 0.05 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{Ca}^{2+}) = 15.9 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{Mg}^{2+}) < 1 \text{ mg/L}$, $\rho(\Sigma\text{Fe}) < 0.4 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{K}^+) = 2 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{Na}^+) = 398 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{Cl}^-) = 360 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{Al}^{3+}) < 5 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 45 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{HCO}_3^-) = 242 \text{ mg/L}$ 。根据该组分配制模拟地下水, 再将其与不同分压的 CO_2 混合配制成含不同浓度 CO_2 的浸出液。

试验在容积为 500 mL 的高压搅拌反应釜中进行, 试验步骤: 1) 分别将 200 mL 模拟地下水加到反应釜内, 向釜内通入 CO_2 气体, 调节釜内压力到设定值(0.02、0.06、0.10、0.14、0.18 MPa); 2) 开启磁力搅拌器, 以 200 r/min 的速度进行搅拌, 维持釜内压力于设定值, 待釜内压力不变后, 取样测定浸出液的 pH 和 HCO_3^- 浓度; 3) 打开高压搅拌反应釜, 加入 20 g 方解石, 保证液固体积质量比为 10:1, 关闭高压搅拌反应釜并通入 CO_2 维持釜内压力在设定值, 基于预试验结果设计取样间隔, 在加入方解石后 0.5、1、2、4、8、12 h 分别取样 5 mL, 测定样品的 pH、 HCO_3^- 以及 Ca^{2+} 浓度; 4) 反应结束后对样品进行离心及干燥, 再对溶蚀前后的样品进行 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和比表面积(BET, Brunauer-Emmett-Teller)表征分析。

2 试验结果与分析

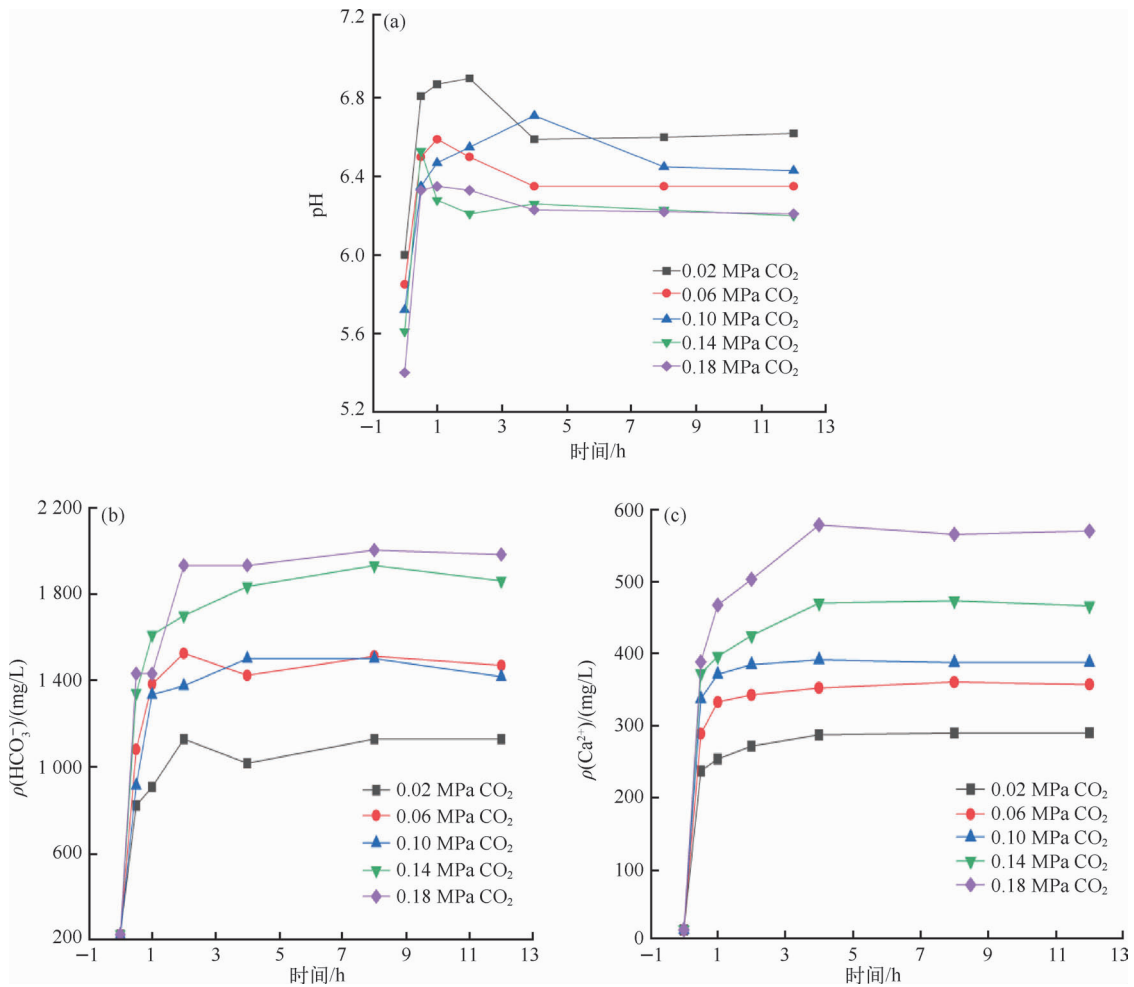
2.1 CO_2 对方解石的溶蚀规律

2.1.1 关键水文地球化学因子变化

方解石是碳酸钙(CaCO_3)的稳定形态, 是砂岩型铀矿床中的主要脉石矿物之一。方解石与 CO_2 在溶液中反应使溶液的 pH 发生了变化, 同时也使溶液中的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的浓度升高(图 1)。可以看出, 在不同分压 CO_2 对方解石的溶蚀作用下, 溶液 pH 随时间的变化呈现“先上升后下降”趋势(图 1a)。先上升是由于方解石溶蚀消耗溶液中 H^+ 的速率大于 CO_2 溶解生成 H^+ 的速率, 降低了溶液中的 H^+ 浓度; 后下降是由于 CO_2 持续溶入溶液中, 直到溶液中的反应达到平衡, 且各 CO_2 分压条件下的 pH 均在 8 h 后基本不变。同时对比不同 CO_2 分压条件下初始 pH 和平衡后的 pH 可以发现, CO_2 分压越高, 溶液初始 pH 越低, 最终平衡后的 pH 也越低。这是由于高 CO_2 分压下, CO_2 更易溶入溶液中, 具体表现为: 在 0.02 MPa CO_2 分压条件下, 初始 pH 为 6.00, 平衡后 pH 稳定在 6.6 左右; 在 0.18 MPa CO_2 分压条件下, 初始 pH 为 5.40, 平衡后 pH 稳定在 6.2 左右。

$\rho(\text{HCO}_3^-)$ 的变化见图 1(b)。可以看出, 在 0.02、0.06 MPa CO_2 分压条件下, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 在 0~2 h 内迅速上升, 2 h 后小幅下降并进入波动平衡状态; 在 0.10、0.14 MPa CO_2 分压条件下, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 在反应的前 4 h 内均上升, 之后进入波动平衡状态; 在 0.18 MPa CO_2 分压条件下, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 在 0~2 h 内上升后就进入波动平衡状态。这说明 CO_2 分压越高, 高压反应釜中的反应速度越快; CO_2 分压越低, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 波动越大, 高压反应釜中的反应平衡越容易被打破。

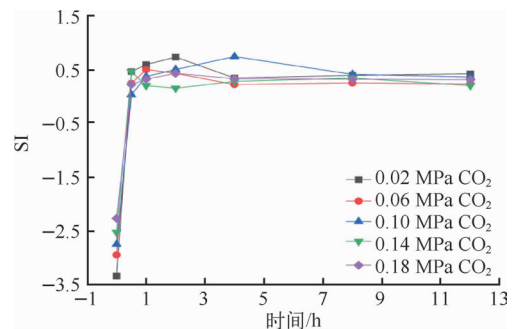
$\rho(\text{Ca}^{2+})$ 均在前 4 h 快速上升, 4 h 后 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 基本不变; 且 CO_2 分压越高, 平衡后 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 就越高(图 1c)。具体表现为: 在 0.18 MPa CO_2 分压下, 平衡后 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 约为 2 000 mg/L, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 约为 570 mg/L; 在 0.02 MPa CO_2 分压下, 平衡后 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 仅为 1 128.87 mg/L(图 1b), $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 约为 290 mg/L(图 1c)。在 0.18 MPa CO_2 分压下, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 理论值应为 655 mg/L ($2\ 000 \text{ mg/L} \div 61 \text{ g/mol} \times 40 \text{ g/mol} \div 2$), 试验值误差为 13%。这是由于采用滴定法测定 HCO_3^- , 会产生一定的误差, 同时微量方解石沉淀可能消耗部分 Ca^{2+} 。

图1 CO₂溶蚀方解石过程中 pH、 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 变化Fig. 1 Variations in pH, $\rho(\text{HCO}_3^-)$, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ during the corrosion of calcite by CO₂

这些溶蚀规律表明,在此 CO₂ 分压范围内更高 CO₂ 分压下,CO₂ 更容易溶入溶液中,导致溶液的 pH 更低,因此更利于方解石的溶解,释放更多的 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺。

2.1.2 方解石饱和指数变化

方解石的饱和指数(SI)是表征水环境中方解石化学反应平衡程度的重要参数^[27-28]。利用 PHREEQC 软件对反应过程中方解石的饱和指数进行计算,得到了方解石被 CO₂ 溶蚀过程中饱和指数随时间的变化(图 2)。可以看出,溶液初始阶段方解石的饱和指数小于零;在加入方解石后,饱和指数迅速上升,并随后在 0~1 之间波动。方解石的饱和指数大于 0,表明溶液中存在方解石沉淀的可能性,这与在反应后期会出现 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 小幅下降的现象相吻合。

图2 CO₂溶蚀过程中方解石饱和指数随时间的变化Fig. 2 Variation of saturation index on time during calcite corrosion by CO₂

2.2 CO₂对方解石溶蚀机理

2.2.1 XRD 分析

采用 X 射线衍射仪,测定了溶蚀前后方解石

样品的 XRD 图谱(图 3)。使用 jade 6.5 软件将被 CO_2 溶蚀前后样品的 XRD 图谱与标准卡片对比,其中的特征峰 $3.854\ 8\ \text{\AA}$ (012)、 $3.035\ 6\ \text{\AA}$ (104)、 $2.843\ 5\ \text{\AA}$ (006)、 $2.494\ 8\ \text{\AA}$ (110)、 $2.284\ 6\ \text{\AA}$ (113)、 $2.094\ 4\ \text{\AA}$ (202)、 $1.912\ 4\ \text{\AA}$ (018)、 $1.875\ 3\ \text{\AA}$ (116) 等皆与方解石标准卡片 (PDF # 83-1762) 相匹配,且未出现杂峰,说明试验所用方解石为高纯度样品。对比溶蚀前后特征峰强度可以看出,溶蚀后 $3.035\ 6\ \text{\AA}$ (104) 特征峰强度显著降低,但未出现新衍射峰,说明优先溶解 (104) 晶面导致表面结晶度下降,且未产生新的物相。

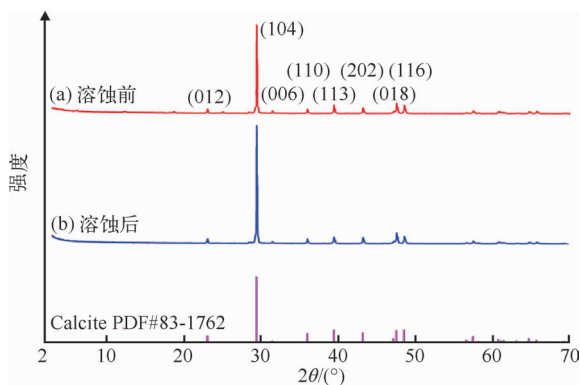


图 3 方解石被 CO_2 溶蚀前、后的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns of calcite before and after CO_2 corrosion

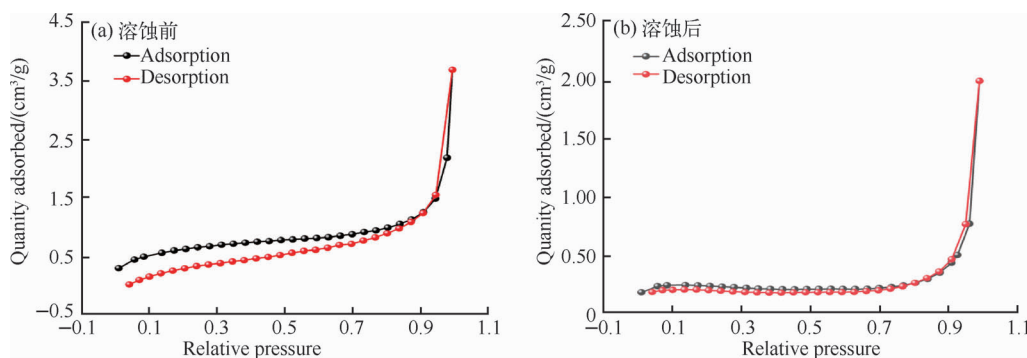


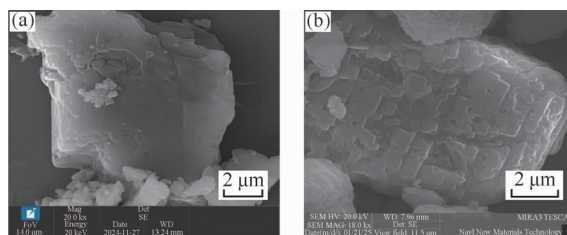
图 5 方解石被 CO_2 溶蚀前、后的氮气吸附-脱附曲线

Fig. 5 N_2 adsorption-desorption isotherms of calcite before and after CO_2 corrosion

由图 5 可看出,方解石溶蚀前后的氮气吸附-脱附等温线为典型的 III 型等温线,等温线向 x 轴凸起且没有拐点,在低压时气体吸附效果较弱,在

2.2.2 SEM 分析

采用扫描电镜对被 CO_2 溶蚀前后的方解石的形貌进行表征,结果见图 4。图 4(a)表明,溶蚀前方解石表面较为光滑平整,晶体边缘锐利;图 4(b)表明,溶蚀后方解石表面变得粗糙,形成沟壑纵横的凹坑结构,棱角也变得圆钝,说明出现了差异性溶蚀;且溶蚀后表面存在细小颗粒,可能为方解石沉淀。



(a) 溶蚀前; (b) 溶蚀后。

图 4 方解石被 CO_2 溶蚀前、后的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of calcite before and after CO_2 corrosion

2.2.3 BET 分析

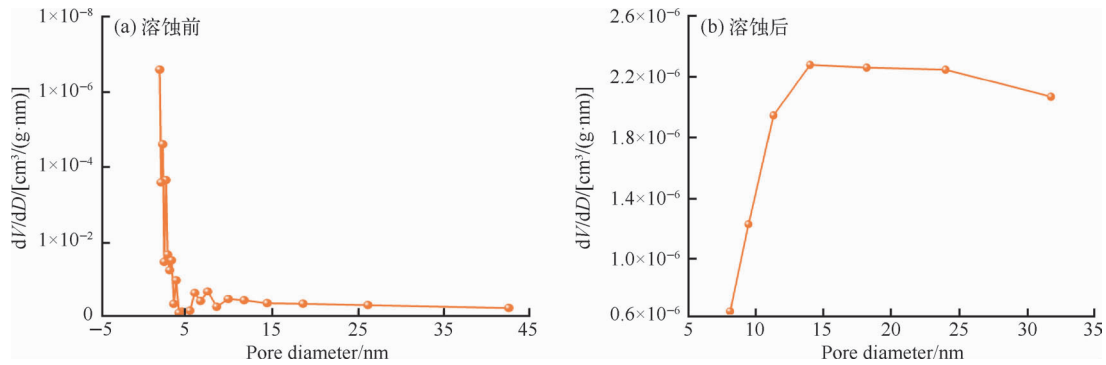
1) 方解石氮气吸附-脱附等温线

采用表面表征分析仪,对被 CO_2 溶蚀前后的方解石样品进行表征分析,获得其氮气吸附-脱附等温线,见图 5。

高压时吸附量呈指数上升,表明该样品表面与氮气相互作用较弱。由图 5(a)可知,方解石溶蚀前的氮气吸附-脱附分支在低压区未重合,表明方解

石中可能存在微孔。由图 5(b)可知,方解石溶蚀后吸附-脱附分支间距减小,接近重合,表明 CO₂ 的溶蚀导致方解石中的微孔减少或消失。

2) 方解石孔径分布



注:纵坐标 dV/dD 表示孔径的微分分布,即单位孔径范围内孔体积的变化量。

图 6 方解石被 CO₂ 溶蚀前、后的孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution of calcite before and after CO₂ corrosion

从图 6(a)可看出,溶蚀前方解石的孔隙包括介孔(2~50 nm)和微孔(<2 nm);且其集中分布峰在 2 nm 以下,说明该样品的孔隙主要为微孔。图 6(b)表明,溶蚀后方解石的孔径变大,孔径分布于 5~35 nm,且在 10~15 nm 区间形成新的集中分布峰,说明溶蚀后方解石中的微孔消失,孔隙主要为介孔。

3) 方解石表面参数

通过 BET 方程及 BJH (Barrett-Joyner-Halenda) 模型计算 CO₂ 溶蚀前后方解石的表面参数,结果见表 1。

表 1 方解石被 CO₂ 溶蚀前后的表面参数
Table 1 Surface parameters of calcite before and after CO₂ corrosion

方解石样品	比表面积/ (m ² /g)	总孔体积/ (cm ³ /g)	平均孔径/ nm
溶蚀前	2.256 9	5.388×10^{-3}	19.655 5
溶蚀后	0.879 4	2.916×10^{-3}	32.031 4

从表 1 可看出,方解石溶蚀后的比表面积及总孔体积明显小于溶蚀前的比表面积及总孔体积,但其溶蚀后的平均孔径大于溶蚀前的平均孔

径。根据 BET 分析测得的氮气吸附-脱附等温线,通过 BJH (Barrett-Joyner-Halenda) 模型计算获得了 CO₂ 溶蚀前后方解石的孔径分布(图 6)。

结合图 5 的氮气吸附-脱附等温线及图 6 的孔径分布结果可知:CO₂ 的溶蚀会使方解石中的微孔消失,从而导致溶蚀后比表面积减小;由于微孔的消失以及新产生的孔隙较少,溶蚀后的总孔体积减小;但 CO₂ 的溶蚀使方解石中部分孔径变大以及较小孔隙合并,形成了孔径更大的孔隙结构,因此溶蚀后方解石的平均孔径变大。

3 结论

采用高压反应釜开展了不同分压 CO₂ 溶蚀方解石试验,采用 PHREEQC 软件计算了沉淀物的饱和指数,采用 XRD、SEM 和 BET 对溶蚀前后的方解石进行了表征分析,得到如下结论:

1) CO₂ 对方解石有显著溶蚀作用,能降低溶液的 pH,提高溶液中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$;且 CO₂ 的分压越高,溶液的 pH 越低、 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 越高,对方解石的溶蚀作用越显著;但溶蚀过程中产生的 Ca²⁺ 会导致次生方解石的产生。

2) CO₂ 的溶蚀作用导致方解石表面出现了差异性溶蚀,产生了明显的溶蚀坑,方解石的微观形貌发生了显著的变化。CO₂ 优先溶蚀方解石中的微孔,导致方解石中的孔隙变少;但 CO₂ 溶蚀也会使方解石中较小孔隙合并与扩大,使得平均孔径明显增加,形成孔径更大的孔隙结构。

3)高 CO_2 分压可显著促进方解石溶蚀,有效扩大孔隙孔径,因此建议“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀现场采用“高压疏通-低压维持”的动态调控策略:在注液初期采用高 CO_2 分压条件(0.18 MPa)以快速改善孔隙连通性,待渗透性提升后切换至低 CO_2 分压(0.10 MPa)维持稳定溶蚀以及抑制方解石二次沉淀堵塞。通过实时监测浸出液中 Ca^{2+} 浓度变化并结合方解石饱和指数计算,对其参数进行动态调整。

参考文献:

- [1] 杨俊云,杨鹏,李晨曦.美国积极谋篇布局全球核能增长新周期[J].国外核新闻,2024(6):17-18.
YANG Junyun, YANG Peng, LI Chenxi. The United States is actively strategizing to dominate the new cycle of global nuclear energy growth[J]. Foreign Nuclear News, 2024(6):17-18(in Chinese).
- [2] 李强,陈擎,王继斌,等.世界铀资源现状与我国核电发展资源保障的对策建议[J].中国矿业,2023,32(3):1-9.
LI Qiang, CHEN Qing, WANG Jibin, et al. Current situation of uranium resources in the world and suggestions on resource guarantee of nuclear power development in China [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(3):1-9(in Chinese).
- [3] ORYNGOZHIN Y S, FEDOROV E V, ALI-SHEVAA Z H N, et al. In-situ leaching technology for uranium deposits[J]. Eurasian Mining, 2021(2): 31-35.
- [4] 张明林,李胜祥,刘悦,等.全球铀矿勘查进展与展望[J/OL].地质论评,1-9[2025-01-21]. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2024.10.015>.
ZHANG Minglin, LI Shengxiang, LIU Yue, et al. Progress and prospect of global uranium exploration [J/OL]. Geological Review, 1-9 [2025-01-21]. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2024.10.015>(in Chinese).
- [5] 李凡.中国砂岩型铀矿勘探开发现状调研[J].有色金属,2021,37(1):5-8.
LI Fan. Investigation on the current situation of exploration and development of sandstone-type uranium deposits in China [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2021, 37(1):5-8(in Chinese).
- [6] 苏学斌,刘乃忠,杜志明.我国 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工艺技术进展与前景[C]//中国核学会.全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集:上.北京:[出版者不详],2012:19-24.
- [7] 王伟豪,刘金辉,阳奕汉,等.地浸采铀过程中含矿层渗透性演化的示踪试验[J].有色金属(冶炼部分),2024(2):72-82.
WANG Weihao, LIU Jinhui, YANG Yihan, et al. Tracer test of permeability evolution of ore-bearing layer during in-situ leaching of uranium[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(2):72-82(in Chinese).
- [8] 吉宏斌,阳奕汉,孙占学,等.新疆某铀矿床酸化解堵增渗技术研究及现场应用[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第五卷):中国核学会2017年学术年会论文集:第2册.北京:[出版者不详],2017:365-371.
- [9] 赵利信,苏学斌,吴童盼,等.我国低渗透砂岩铀矿:分布、成因、增渗手段及开发对策[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第八卷):中国核学会2023年学术年会论文集:第1册.北京:[出版者不详],2023:202-209.
- [10] YUAN X, LIU J H, XU L L, et al. Study on the leaching conditions of the Shihongtan uranium deposit[J]. Metals 2023, 13(7):1284.
- [11] 马嘉,刘志超,唐宝彬,等.连山关铀矿床工艺矿物学研究[J].铀矿冶,2016,35(2):84-88.
MA Jia, LIU Zhichao, TANG Baobin, et al. Technological mineralogy research on Lianshanguan uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(2):84-88(in Chinese).
- [12] 廖文胜,王立民,苏学斌,等.某低渗透砂岩铀矿岩心特性分析[J].铀矿冶,2007,26(4):185-190.
LIAO Wensheng, WANG Limin, SU Xuebin, et al. Core analysis of a low permeable sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2007, 26(4):185-190(in Chinese).
- [13] 黎广荣,周义朋,赵凯,等.砂岩型铀矿浸出矿物工艺学研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2021(8):9-19.
LI Guangrong, ZHOU Yipeng, ZHAO Kai, et al. Research progress on mineral leaching technology of sandstone type uranium deposits[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8):9-19(in Chinese).
- [14] 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 Shengnan. The problem of plugging in in-situ leaching of sandstone-type uranium deposit and its solutions[J]. Nonferrous Metals (Mining Sec-

- tion), 2022, 74(1):5-9(in Chinese).
- [15] QIU W J, YANG Y, SONG J, et al. What chemical reaction dominates the CO₂ and O₂ in-situ uranium leaching? Insights from a three-dimensional multicomponent reactive transport model at the field scale[J]. Applied Geochemistry, 2023:148.
- [16] ZHAO D F, LIAO X W, YIN D D, et al. An experimental study for the effect of CO₂-brine-rock interaction on reservoir physical properties[J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(1):27-35.
- [17] 袁新, 刘金辉, 周义朋, 等. CO₂ + O₂ 地浸采铀工艺对含矿层渗透性的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(5):50-57.
- YUAN Xin, LIU Jinhui, ZHOU Yipeng, et al. Effect of CO₂ + O₂ in-situ leaching of uranium on permeability of orebearing layer[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(5):50-57(in Chinese).
- [18] 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 Yuan, JIANG Guoping, LIAO Tianwei, et al. Research on main influence factors on calcium carbonate scaling of in-situ leaching process[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11):128-130(in Chinese).
- [19] 王亚安, 李星浩, 姚益轩, 等. “CO₂ + O₂”地浸采铀含矿层防堵技术研究[J]. 铀矿冶, 2024, 43(3):17-24.
- WANG Ya'an, LI Xinghao, YAO Yixuan, et al. Preventing blocking technology of ore-bearing layers in "CO₂ + O₂" in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):17-24(in Chinese).
- [20] YUAN X, LIU J H, XU L L, et al. Study on the leaching conditions of the Shihongtan uranium deposit[J]. Metals, 2023, 13(7):1284.
- [21] 许根福. CO₂ + O₂ 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 Genfu. Analysis of the main technological parameters of CO₂ + O₂ in situ leaching uranium and problems by chemical precipitation blocking[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(4):197-202(in Chinese).
- [22] 袁新. 蒙其古尔铀矿 CO₂ + O₂ 地浸中的溶质运移与孔隙演化特征[D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
- [23] 杨岚芝, 周义朋, 徐玲玲, 等. CO₂ + O₂ 浸铀体系铀的 Eh-pH 优势场分布特征[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(12):60-66.
- YANG Lanzhi, ZHOU Yipeng, XU Lingling, et al. Pourbaix diagram of uranium in CO₂ + O₂ leaching system of sandstone type uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(12):60-66(in Chinese).
- [24] 周磊, 原渊, 江国平, 等. 某铀矿中性地浸时铀和钙的迁移与沉淀[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第四卷):中国核学会 2015 年学术年会论文集:第 1 册. 北京:[出版者不详], 2015:410-414.
- [25] ZHAO K, SUN Z X, DU C C, et al. Blockage and uranium migration via CO₂ + O₂ leaching within autoclave:A test study from Mengqiguer deposit in Yili Basin, northwest of China[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2022, 331(6):2631-2644.
- [26] 原渊, 邓锦勋, 江国平, 等. 某铀矿床地浸试验注液井堵塞的形成原因与解决措施[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷):中国核学会 2017 年学术年会论文集:第 2 册. 北京:[出版者不详], 2017:448-454.
- [27] 曹振, 吉宏斌, 邢拥国, 等. PHREEQC 软件在改善低渗透砂岩铀矿含矿层渗透性中的应用[J]. 铀矿冶, 2012, 31(1):14-18.
- CAO Zhen, JI Hongbin, XING Yongguo, et al. Application of PHREEQC in improving permeability of ore-bearing layer of sandstone-type uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2012, 31(1):14-18(in Chinese).
- [28] 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.
- MA Yao. Application of PHREEQC to in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2007, 26(2):67-71(in Chinese).

(下转第 80 页)

