

酸法地浸采铀过程中矿物组成变化对孔隙堵塞的影响

曾 晟 李 浩 李春光 宋佳音
(南华大学 资源环境与安全工程学院 衡阳 421001)

摘要 为了研究地浸采铀过程中矿物组成变化对孔隙堵塞的影响,以新疆某铀矿砂岩为例,借助灰色关联度理论分析了酸法浸出采铀过程中矿物组分变化对孔隙度与浸出铀浓度的影响。研究表明:1)浸出过程中孔隙堵塞的原因主要是由于多种矿物在物理化学作用下的结果,它会影响铀矿砂岩中其他矿物的溶质运移过程,从而对矿物组成与铀浸出产生影响;2)通过灰色关联分析发现孔隙堵塞对铀浸出的影响较大,硫酸钙与硅酸镁是对孔隙堵塞的主要原因,黏土矿物的物理吸附作用多表现在微孔方面,对大孔隙通道堵塞的影响要小于硅酸镁与硫酸钙。根据浸出过程中矿物组成变化规律与孔隙堵塞之间的关系,对地浸采铀工艺进行改进以解决孔隙堵塞问题,从而实现铀资源的高效开采。

关键词 酸法地浸采铀, 矿物组成, 孔隙堵塞, 灰色关联分析

中图分类号 TD868

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120301

Effect of mineral composition change on pore blockage in the process of acid in-situ leaching of uranium

ZENG Sheng LI Hao LI Chunguang SONG Jiayin

(School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract [Background] In the process of in-situ leaching of uranium, pore blockage greatly limits the leaching efficiency of uranium, and the pore blockage is mainly due to the complex physical and chemical action of minerals and leaching agents in in-situ leaching of uranium. [Purpose] This study aims at the influence mechanism of each mineral composition on pore blockage under the action of leaching agent in the process of in-situ leaching of uranium to realize the efficient exploitation of uranium resources. [Methods] First of all, sandstones of uranium mine in Xinjiang were taken as the experimental samples, the relationship between the mineral composition and porosity in the process of acid in-situ leaching of uranium was studied through acid in-situ leaching experiment, and nuclear magnetic resonance experiment was employed every other period of time to obtain the porosity change curve in the process of uranium sandstone leaching. Then, the mineral characteristics of uranium sandstone were analyzed by X-ray diffractometer to find the changes of the mineral composition during uranium sandstone leaching. Finally, the influence of different minerals on porosity change was analyzed with the help of grey relational theory. [Results] The results show that the pore blockage in the leaching process is mainly due to the complex physical and chemical action of many kinds of minerals, which will affect the solute transport process of other minerals in uranium sandstone and not only lead to the change of mineral composition but also affect the leaching of uranium. Through grey correlation

国家自然科学基金(No.11775107)资助

第一作者: 曾晟, 男, 1977年出生, 2011年于南华大学获博士学位, 研究领域为原地浸出采铀, E-mail: usczengs@126.com

收稿日期: 2022-08-02, 修回日期: 2022-10-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11775107)

First author: ZENG Sheng, male, born in 1977, graduated from University of South China with a doctoral degree, focusing on in-situ leaching of uranium, E-mail: usczengs@126.com

Received date: 2022-08-02, revised date: 2022-10-06

analysis, it is found that calcium sulfate and magnesium silicate as plugging materials have a correlation degree of over 0.781 for porosity and uranium leaching rate. The physical adsorption of clay minerals can block the micropores of uranium sandstone, so its correlation with porosity and uranium leaching is 0.831 and 0.842 respectively, indicating that pore plugging has an impact on uranium leaching. **[Conclusions]** According to the relationship between the change of mineral composition and pore blockage in the process of leaching, making appropriate adjustment can solve the problem of pore blockage, so as to realize the efficient exploitation of uranium resources.

Key words Acid in-situ leaching of uranium, Mineral composition, Pore blockage, Grey relational analysis

地浸采铀技术作为我国铀资源开采的重要技术手段,在我国铀矿采冶领域有着举足轻重的地位,但其浸出过程中的孔隙堵塞问题却大大地限制了地浸采铀技术的进一步发展^[1]。在地浸采铀现场实验中,铀矿砂岩孔隙的堵塞会导致抽注液量下降,严重的还会导致钻孔报废,虽然可以通过洗井来对抽注液量进行恢复,但针对永久的化学堵塞问题目前还缺乏有效的解决办法^[2-3]。为了解决该技术难题,我国原地浸出采铀技术从最开始单一的酸性浸出逐步发展到以酸性浸出、碱性浸出、中性浸出以及微生物浸出等多种浸出工艺共同发展的阶段^[4-6]。孔隙堵塞的问题虽然得到缓解,但并没彻底解决,而且浸出过程中也产生一些其他的问题,如碱性浸出不仅浸出速度比酸法低,浸出周期较长,还可能产生其他的环境污染问题^[7]。

国内外学者围绕地浸采铀孔隙堵塞问题做出了大量的研究。Zhao等^[8]认为铀矿床中矿物的溶解与蚀变是造成浸出过程中孔隙堵塞的重要原因。李衡等^[9]认为地浸采铀溶质运移过程中部分矿物的沉淀作用也会导致孔隙的堵塞。针对地浸采铀造成孔隙堵塞问题,曾圣男^[10]提出从控制沉淀形成途径和淡化高矿化地下水采区两个方面来减少孔隙堵塞的产生。张勇等^[11]针对蒙古古尔矿床的碳酸盐沉淀问题,通过微酸处理控制pH的方法来避免沉淀的产生。陈梅芳等^[12]在此基础上提出了“O₂预氧化+低酸浸出”工艺,通过减少浸出剂、分段酸化的方法来避免沉淀堵塞矿层,为实现铀的高效浸出提供了支撑。江国平等^[13]针对高碳酸砂岩铀矿提出了有机酸来进行酸性浸出,并提出了在CO₂浸出的过程中利用有机酸进行辅助来酸化增渗的可行性。这些方案的提出都为地浸采铀孔隙堵塞问题的解决提供了思路,而不论采区哪种解堵措施,铀矿物与浸出剂之间反应过程中各矿物的变化是否会对孔隙结构造成堵塞都应该是被优先考虑的,所以研究浸出过程中矿物组成变化对孔隙堵塞的影响对原地浸出采铀相关理论的发展具有重要的指导意义^[14]。因此,本文通过借助灰色关联分析研究酸法地浸采铀过程中矿物组成变化对孔隙堵塞的影响,从而为地浸过程中孔

隙堵塞问题的解决提供理论依据。

1 酸法地浸采铀过程中含矿层孔隙堵塞影响机理

1.1 酸性地浸采铀化学反应机理

地浸采铀在浸出过程中孔隙堵塞与矿物组成改变有着十分密切的关系。以新疆某铀矿砂岩为例,利用硫酸作为浸出剂,浸出过程中铀矿砂岩中参与化学反应的矿物与它们的化学反应如表1所示。根据表1可知,地浸开采过程中伴随着多种矿物的溶解与产生,它们都与含矿层孔隙的堵塞有着密不可分的关系。

1.2 浸出过程中孔隙堵塞与各矿物关系

目前,孔隙堵塞并没有特定的指标进行表示,考虑到孔隙堵塞对铀浸出的影响,由于孔隙度与大孔径存在某种关系^[15]。因此,把孔隙度作为衡量孔隙堵塞的重要指标。通过对铀矿砂岩进行酸性浸出实验,然后每隔一段时间用核磁共振实验对铀矿砂岩的孔隙度进行测试,得到铀矿砂岩浸出过程中孔隙度变化曲线如图1所示,同时用X射线衍射仪对铀矿砂岩的矿物特征进行分析,得到铀矿砂岩浸出过程中矿物组成变化情况如表2所示。在研究浸出过程中孔隙堵塞与各矿物关系时,根据课题组已有研究成果将酸性浸出过程分为浸出前期、浸出中期、浸出后期三个阶段^[16],并对这三个阶段各矿物含量的变化及它们对孔隙度变化的关系进行了分析,从而深入研究酸法浸出采铀过程中的孔隙堵塞机理。

浸出前期:岩样中的含铀矿物、方解石与白云石最先开始与硫酸反应,产生了铀酰离子、CaSO₄与CO₂,其主要化学反应见表1中(1)与(9)。CaSO₄主要以沉淀形式堵塞孔隙,CO₂一方面以气体形式堵塞在孔隙中,另一方面CO₂溶于孔隙水后与黏土矿物反应产生了大量CO₃²⁻,CO₃²⁻水解释放出OH⁻,从而形成了一个局部强碱微环境造成石英的溶解^[17],溶解的石英会与白云石溶解产生的Mg²⁺结合形成硅酸镁沉淀再次造成孔隙堵塞,其化学反应方程可以用

表1 浸出过程中的化学反应
Table 1 Chemical reaction in the process of leaching

铀矿物组分 Uranium mineral composition	参与反应的主要物质 The main substances involved in the reaction	化学反应 Chemical reaction
石英 Quartz	SiO ₂	(1) CaCO ₃ +2H ⁺ +SO ₄ ²⁻ →CaSO ₄ ↓+CO ₂ ↑+H ₂ O (2) MgCO ₃ +2H ⁺ →Mg ²⁺ +CO ₂ ↑+H ₂ O (3) Mg ²⁺ +H ₂ O+SiO ₂ →MgSiO ₃ ↓+2H ⁺
白云石 Dolomite	CaCO ₃ 、MgCO ₃ 、Fe ₂ O ₃ 、FeO	(4) Fe ₂ O ₃ +6H ⁺ →2Fe ³⁺ +6H ₂ O (5) FeO+2H ⁺ →2Fe ²⁺ +H ₂ O
方解石 Calcite	CaCO ₃	(6) Fe ³⁺ +3OH ⁻ →Fe(OH) ₃ ↓ (7) Fe ²⁺ +2OH ⁻ →Fe(OH) ₂ ↓ (8) Al ₂ O ₃ +6H ⁺ →2Al ³⁺ +6H ₂ O
黏土矿物 Clay mineral	Al ₂ O ₃ 、MgO、UO ₂	(9) UO ₂ +2Fe ³⁺ →UO ₂ ²⁺ +2Fe ²⁺ (10) CaO+2H ⁺ +SO ₄ ²⁻ →CaSO ₄ ↓+H ₂ O (11) Al ³⁺ +3OH ⁻ →Al(OH) ₃ ↓
矿物杂质 Mineral impurities	CaO、Fe ₂ O ₃ 、FeO、Al ₂ O ₃ 、MgO、UO ₂	(12) MgO+2H ⁺ →Mg ²⁺ +H ₂ O

表2 矿物组成及含量 (%)
Table 2 Mineral composition and content (%)

时间 Time / d	石英 Quartz	方解石 Calcite	白云石 Dolomite	黏土矿物 Clay mineral	矿物杂质 Mineral impurities	硫酸钙 Calcium sulfate	硅酸镁 Magnesium silicate
0	62.5	9.5	17.9	8.0	2.1	0.0	0.0
1	56.4	1.3	2.2	14.4	1.5	14.2	10.0
3	48.6	0.0	1.1	20.4	2.0	17.2	10.7
5	50.9	0.0	0.0	19.0	1.4	18.4	10.3

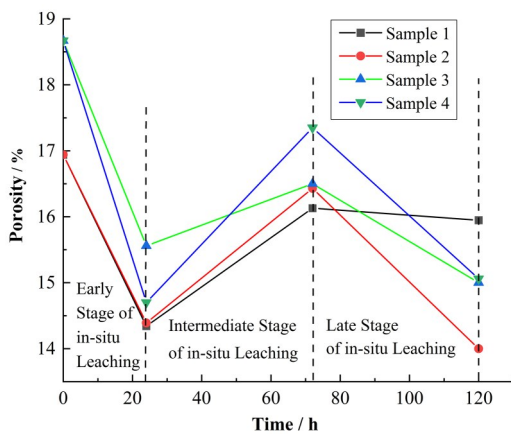


图1 地浸过程中孔隙度变化
Fig.1 Change of porosity during in-situ leaching

表1中的(3)表示。黏土矿物具有强大的物理吸附作用,它能够吸附孔隙中的微小颗粒,这也是造成孔隙堵塞的重要原因^[18]。因此,浸出前期各矿物经过复杂的物理化学作用,铀矿砂岩的孔隙度降低。

浸出中期:随着浸出初期对方解石、白云石与硫酸的消耗,浸出液中pH稍微升高,但由于浸出的不断进行,pH开始呈现出不断降低的趋势。此时方解石与白云石基本溶解完毕,黏土矿物与矿物杂质开始与硫酸反应,它们之间的化学反应见表1中的

(8)~(12),黏土矿物的减少导致了其吸附能力的减弱,且该过程岩样中的含铁与含铝氧化物逐渐与硫酸发生反应,产生絮状胶体,其化学反应方程见表1中的(6)、(11)。此时孔隙多被硫酸钙与硅酸镁等物质堵塞,除此之外,絮状胶体的产生对孔隙的堵塞也起到了一定的作用^[19-20]。但此时硫酸与含铀矿物仍在发生置换反应,溶解形成大量微小的孔洞,从而导致含铀砂岩的孔隙度增大。

浸出后期:未完全溶解的白云石会继续与硫酸发生反应,它们的化学反应方程见表1中的(1)、(2)、(4)、(5),但这些化学反应并不是影响孔隙堵塞的主要原因。此时含铀矿物基本完成浸出,化学反应趋近于平衡状态,反应速率极其缓慢。并且由于化学溶蚀反应形成的黏土状矿物比例升高,液体流动容易造成颗粒运移。因此,在砂岩内部主要是溶液流动带动微小颗粒堵塞部分细小孔隙,但是仍有部分矿物随着溶液流动流出孔隙,所以颗粒运移在堵塞孔隙降低孔隙度的同时伴随着矿物组成的变化。

2 矿物组成变化对孔隙堵塞的相关性分析

2.1 灰色关联分析原理

灰色关联分析来源于20世纪80年代初邓聚龙教授提出的灰色系统理论,是指对一个系统发展态

势的定量描述和比较的方法。在系统发展过程中,如果部分因素变化趋于一致时,则成它们关联程度较高,反之则较低^[21-22]。灰色关联分析基本思想是通过确定参考数据列和若干个比较数据列的几何形状相似程度来判断其联系是否紧密,它反应的曲线的关联程度。简单而言,就是在一个灰色系统中,用来了解其中某个因变量受其他自变量影响的相对强弱。

2.2 各矿物对孔隙堵塞的影响分析

由于酸法地浸采铀过程中孔隙堵塞与浸出铀浓度变化均受到多种矿物的影响,利用灰色关联度理论可以对各矿物对孔隙度和浸出铀浓度的影响进行分析,从而分析酸法地浸采铀过程中各矿物对孔隙堵塞的影响。灰色关联分析主要包括:确定特征序列以及母序列、对指标数据进行无量纲化处理、计算关联系数、计算关联度与分析计算结果等步骤。首先,将4个样品的孔隙度与浸出铀浓度作为母序列,把浸出过程中的各原生矿物与二次沉淀含量(表2)作为特征序列,对其进行归一化处理后逐个计算每个比较序列与母序列的绝对差值,确定两级最小差与两级最大差,然后根据两级最小差与两级最大差分别计算每个比较序列与母序列对应元素的关联系数,将各个指标与参考序列对应元素的关联系数进行加权平均,得到各个指标的关联度。由于酸法浸出过程中原生矿物和二次沉淀物对孔隙堵塞都会产生影响,因此,本文将引起孔隙堵塞的这些矿物成分放在一起进行综合分析。从而得到酸法浸出采铀过程中各原生矿物、二次沉淀物含量的变化与孔隙度和浸出铀浓度的关联度大小情况如图2与图3所示。根据图2与图3可得,黏土矿物、硫酸钙与硅酸镁对孔隙度与浸出铀浓度的影响较大,这是由于浸出过程这三种物质导致孔隙堵塞,从而造成浸出铀浓度

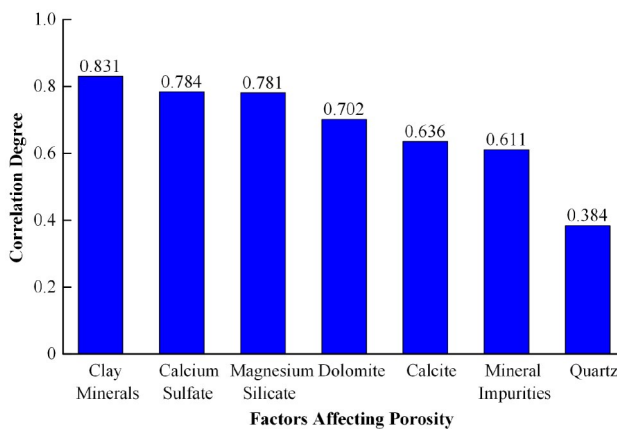


图2 矿物组分与孔隙度的关联度
Fig.2 The correlation between mineral composition and porosity

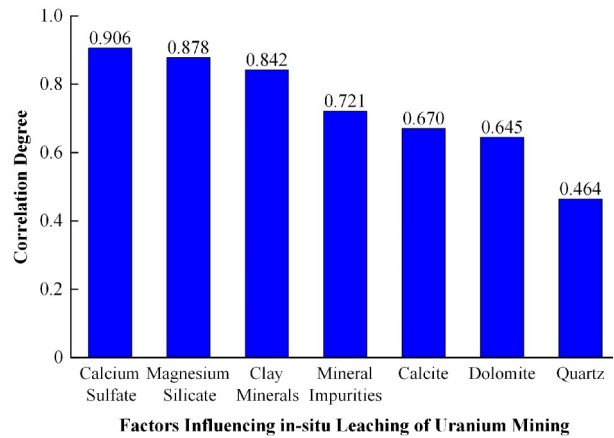


图3 矿物组分与铀浸出的关联度
Fig.3 The correlation between mineral composition and uranium leaching

的降低。矿物杂质对孔隙度的影响不如白云石与方解石,但其对浸出铀浓度的影响大于白云石与方解石,主要是由于矿物杂质中含有部分铀矿物造成的,石英对孔隙度和浸出铀浓度的影响都是最小的,这是由于石英在酸性环境中比较稳定,不会发生溶蚀,仅在碱性环境下开始溶解产生微孔,所以其对孔隙度与浸出铀浓度的影响都不如其他矿物。

将黏土矿物、硫酸钙、硅酸镁与浸出铀浓度随时间变化特征用图4与图5所示,根据图4与图5可得,铀的浸出过程其速率不断减小,硫酸钙与硅酸镁在浸出前期与浸出中期的大量产生导致孔隙堵塞是影响铀浸出的关键,而黏土矿物对孔隙度的影响可能由于其强大的物理吸附作用使铀矿砂岩中的微孔产生堵塞,但微孔对铀浸出的影响有限。浸出后期硅酸镁与硫酸钙的大量减少是由于它们随孔隙流出的原因,而黏土矿物的增加的原因是由于石英等矿物发生化学溶蚀造成的。研究表明,酸法地浸采铀过

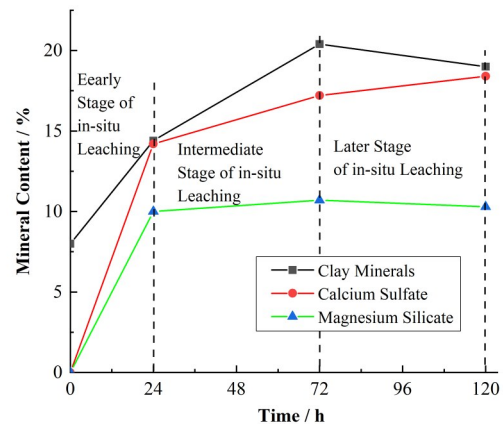


图4 矿物含量随时间变化
Fig.4 Mineral content changes with time

程中孔隙堵塞问题是限制铀浸出效率的重要原因，而且孔隙的堵塞与流通对矿物组成也会产生一定的影响。

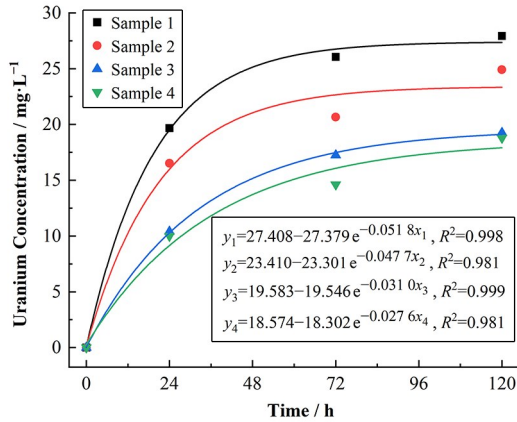


图5 铀浓度随时间变化

Fig.5 Uranium concentration varies with time

3 结语

1)酸法地浸采铀过程中由于复杂物理化学作用下造成其矿物组成产生变化,这种变化能够导致孔隙度发生变化,使孔隙堵塞,且不同阶段堵塞产生的原因也是不同的。除此之外,孔隙堵塞会对浸出过程的溶质运移产生影响,从而会对矿物组成产生影响。

2)通过利用灰色关联分析矿物组成变化对孔隙度以及铀浸出的影响发现,硫酸钙、硅酸镁与黏土矿物对孔隙度与铀浸出都会有较大的影响,说明孔隙堵塞对浸出铀浓度的影响较大。硫酸钙与硅酸镁是孔隙堵塞的主要原因,黏土矿物吸附作用主要表现在微孔上,从而造成其对孔隙度的影响较大,但其对铀浸出的影响较小。

3)孔隙堵塞问题是制约地浸采铀技术发展的重要原因,而无论采区何种方法来解决这个问题,都需要准确的认知浸出过程中各矿物在物理化学复杂作用下的变化规律及其对孔隙堵塞的影响。针对酸法地浸采铀过程中孔隙堵塞的主要物质—硫酸钙与硅酸镁,可以通过阻止浸出过程中硫酸钙与硅酸镁的产生,最大程度的从源头上解决孔隙堵塞问题。

作者贡献声明 曾晟:负责研究内容的提出、实验的指导、论文的修订和研究项目经费的支持;李浩:参与实验,负责文章的起草、修改及最终版本的修订;李春光:参与实验过程的指导;宋佳音:负责实验数据及文献资料的搜集与整理。

参考文献

- 1 苏学斌,杜志明.我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J].中国矿业,2012,21(9):79-83. DOI:10.3969/j.issn.1004-4051.2012.09.021.
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in situ leaching technology[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79 - 83. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4051.2012.09.021.
- 2 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.
- 3 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):180-184. DOI:10.13426/j.cnki.yky.2005.04.003.
ZHANG Zegui. Solving the jamming of ore bed during in situ leaching of uranium by chemical method[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(4): 180 - 184. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2005.04.003.
- 4 Wen Z Q, Huang K H, Yao Y X, et al. Analysis and processing of sulfate accumulation in uranium hydrometallurgy for acid in situ leaching[J]. Separation Science and Technology, 2020, 55(18): 3447 - 3454. DOI: 10.1080/01496395.2019.1679835.
- 5 邱文杰,刘正邦,杨蕴,等.砂岩型铀矿CO₂+O₂地浸采铀的反应运移数值模拟[J].中国科学:技术科学,2022,52(4):627-638.
QIU Wenjie, LIU Zhengbang, YANG Yun, et al. Reactive transport numerical modeling of CO₂+O₂ in-situ leaching in sandstone-type uranium ore[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(4): 627 - 638.
- 6 Zhou Z K, Yang Z H, Sun Z X, et al. Enhanced uranium bioleaching high-fluorine and low-sulfur uranium ore by a mesophilic acidophilic bacterial consortium with pyrite [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, 321(2): 711 - 722. DOI: 10.1007/s10967-019-06608-4.
- 7 李孝君.地浸采铀方法研究及展望[J].绿色科技,2018(6):54-56. DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2018.06.020.
LI Xiaojun. Present situation and prospect of In-situ leaching uranium mining[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(6): 54 - 56. DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2018.06.020.

- 8 Zhao L X, Deng J X, Xu Y, *et al.* Mineral alteration and pore-plugging caused by acid in situ leaching: a case study of the Wuyier uranium deposit, Xinjiang, NW China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, **11**(22): 707. DOI: 10.1007/s12517-018-4064-7.
- 9 李衡, 周义朋. 地浸采铀溶质运移研究进展及展望[J]. *稀有金属*, 2019, **43**(3): 319 - 330. DOI: 10.13373/j.cnki.cjrm.xy18120015.
- LI Heng, ZHOU Yipeng. Progress and prospect of research on solute transport during in-situ leaching of uranium[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2019, **43**(3): 319 - 330. DOI: 10.13373/j.cnki.cjrm.xy18120015.
- 10 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 Section)*, 2022, **74**(1): 5 - 9.
- 11 张勇, 周义朋, 张青林, 等. 蒙其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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2014.12.007.
- ZHANG Yong, ZHOU Yipeng, ZHANG Qinglin, *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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2014.12.007.
- 12 陈梅芳, 花明, 阳奕汉, 等. 循环经济视角下新疆地浸采铀浸出工艺的技术创新与实践[J]. *中国矿业*, 2018, **27** (3): 100 - 103.
- CHEN Meifang, HUA Ming, YANG Yihan, *et al.* Technological innovation and practice of in situ leaching of uranium in Xinjiang from the perspective of circular economy[J]. *China Mining Magazine*, 2018, **27**(3): 100 - 103.
- 13 江国平, 赵利信. 某高碳酸盐砂岩铀矿混合有机酸原地浸出试验研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, **55**(S2): 380 - 388. DOI: 10.7538/yzk.2021.zhuankan.0166.
- JIANG Guoping, ZHAO Lixin. Study on application of mixed organic acid in in-situ leaching of high carbonate sandstone uranium deposit[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, **55**(S2): 380 - 388. DOI: 10.7538/yzk.2021.zhuankan.0166.
- 14 阙为民, 王海峰, 田时丰, 等. 我国地浸采铀研究现状与发展[J]. *铀矿冶*, 2005, **24**(3): 113 - 117. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2005.03.001.
- QUE Weimin, WANG Haifeng, TIAN Shifeng, *et al.* Research status and development of in situ leaching uranium techniques in China[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2005, **24**(3): 113 - 117. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2005.03.001.
- 15 曾晟, 谭凯旋, 雷林, 等. 某地浸铀矿床低渗透性砂岩孔隙结构特征研究[J]. *核技术*, 2013, **36**(1): 39 - 44.
- ZENG Sheng, TAN Kaixuan, LEI Lin, *et al.* Study on the structure characteristic of the low permeable sandstone uranium ore rock[J]. *Nuclear Techniques*, 2013, **36**(1): 39 - 44.
- 16 Zeng S, Shen Y, Sun B, *et al.* Pore structure evolution characteristics of sandstone uranium ore during acid leaching[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, **53**(12): 4033 - 4041. DOI: 10.1016/j.net.2021.06.011.
- 17 刘金库, 彭军, 石岩, 等. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响: 以川中-川南过渡带须家河组为例[J]. *石油学报*, 2015, **36**(9): 1090 - 1097. DOI: 10.7623/syxb201509006.
- LIU Jinku, PENG Jun, SHI Yan, *et al.* The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: a case study of Xujiahe Formation in the transitional zone of Central-Southern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, **36**(9): 1090 - 1097. DOI: 10.7623/syxb201509006.
- 18 Zhang C, Pan Z K, Yin H W, *et al.* Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings[J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**: 10700. DOI: 10.1038/s41598-022-15063-3.
- 19 Gückel K, Rossberg A, Brendler V, *et al.* Binary and ternary surface complexes of U(VI) on the gibbsite/water interface studied by vibrational and EXAFS spectroscopy [J]. *Chemical Geology*, 2012, **326 - 327**: 27 - 35. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.07.015.
- 20 熊骁, 王清良, 李乾, 等. Fe(OH)₃胶体对铀的吸附行为[J]. *原子能科学技术*, 2016, **50**(1): 39 - 45. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.01.0039.
- XIONG Xiao, WANG Qingliang, LI Qian, *et al.* Adsorption behavior of uranium on Fe(OH)₃ colloid[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, **50**(1): 39 - 45. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.01.0039.
- 21 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, **36**(2): 267 - 272. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2004.02.027.
- LIU Sifeng. Emergence and development of grey system theory and its forward trends[J]. *Journal of Nanjing*

- University of Aeronautics & Astronautics, 2004, **36**(2): 267 - 272. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2004.02.027.
- 22 Ma Y Y, Wang X, Fan J Z. Application research on quantitative prediction of mineral resources based on the grey relational analysis algorithm with dual hesitant fuzzy information[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, **13**(10): 7333 - 7335. DOI: 10.1166/jctn.2016.5721.