

压力条件对铀矿堆浸浸出效果的影响研究

李 妲, 李敬阳, 曾 晟, 孟凡非

(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 加压是调控反应速率的重要手段。为探讨压力条件对铀浸出效果的影响, 以南方某矿的硬岩型铀矿石为研究对象, 通过自制的室温加压浸出装置, 开展了铀矿堆浸室内模拟试验。结果表明: 常温加压浸出可以加快反应速率, 但不能提升铀的最终浸出率; 在铀浸出率达到 60% 之前, 通过加压可促进铀的浸出; 在铀浸出率达到 85% 之前, 40 kPa 压力下的浸出效果最好。经过 15 d 加压浸出, 铀浸出率最高为 94.66%, 最低为 85.90%。研究显示, 根据常温加压浸出过程中压力与浸出效果的关系, 能以可控且低成本的调控压力方式对堆浸采铀技术进行优化, 从而实现铀资源的高效开采。

关键词: 铀矿堆浸; 酸浸; 加压堆浸; 压力调控; 浸出率; 浸出效率; pH

中图分类号: TD868; TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0069-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.12.14

天然铀是重要的能源和战略资源, 硬岩型铀矿床是天然铀资源的重要组成部分。目前, 堆浸采铀是处理硬岩型铀矿最经济、最常用的方法^[1-2]。但在实际生产中, 受矿石品位低、浸出工艺粗放、堆场环境条件复杂等因素影响, 铀矿堆浸普遍存在浸出率低、浸出周期长等问题^[3-4]。铀矿浸出效果大多与浸出工艺参数密切相关, 因此研究并优化相关参数对提高铀浸出效率、缩短浸出周期、发挥堆浸工艺经济性优势具有重要意义。

铀浸出的效果和经济性由一系列相互关联的物理和化学参数共同决定^[5-7]。近年来, 为提高铀矿堆浸浸出效果, 学者们进行了大量的研究与探讨。在浸出剂优化方面, Asta 等人研究发现, 与单独使用硝酸盐相比, 在厌氧条件下向浸出剂中加入氧化剂(亚硝酸盐)可使 UO_2 的溶解速率提高 5~10 倍^[8]。Li 等研究表明, 在常压堆浸和加压地浸工艺中, 加入表面活性剂可提高铀的浸出率^[9]。Zhou 等通过在高氟低硫铀矿石中加入耐氟中温嗜酸菌及黄铁矿来提升生物浸出效率, 取得较好效果^[10]。在物理化学强化方法创新方面, Liu 等发现微波作用可增加大孔隙的比例, 进而通过化学和生物方式强化铀的浸出效果^[11]。Hu

等提出一种新型高效的低温氯化—焙烧—酸浸提铀工艺, 发现微波氯化焙烧能有效破坏溶解渣的脉石矿物结构, 使铀元素充分暴露, 从而提高铀浸出效果^[12]。在矿堆水力学特性研究方面, 郭建平等研究温度和液固体积质量比对南方某铀矿生物浸出的影响, 发现在温度 30 °C、液固体积质量比 2:0 条件下, 铀矿微生物浸出效果最佳^[13]。尹升华等研究表明矿石粒径分布对孔隙尺寸和连通性影响较为显著^[14]。此外, 浸出过程关键工艺参数, 如浸出剂 pH^[15-16]、氧化还原电位^[17]、浸出周期^[18]、喷淋强度^[19]等, 也已被广泛研究。

目前, 关于压力条件在堆浸过程中对铀浸出效果影响的研究较少。加压浸出技术的研究主要集中于搅拌浸出提铀, 通常采用加温加压协同方式提升浸出效果, 在实际现场应用中经济性和安全性较低。从基础物理化学规律来看, 增大压力一般能加快化学反应速率, 提高气体在液体中的溶解度, 促进电子在固液界面的转移。为此, 本研究基于实际堆场结构特征, 自主研制了室温加压浸出试验装置, 用于系统研究压力条件对铀矿石浸出效果的影响,

收稿日期: 2025-12-23; **修回日期:** 2026-01-28

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目资助(LXBZZ2024246, 含铀砂岩多孔介质多相渗流过程中溶浸液流体渗流路径研究)

通信作者: 曾晟

以期为矿区铀资源的开采提供试验数据支撑与理论参考。

1 堆浸浸出试验

1.1 试验材料

试验所用铀矿石取自中国南方某铀矿山的地浸堆场。铀矿石表面常覆有质地软且遇水易粘的

细粉杂质颗粒。为减少其对试验装置浸出液收集孔的堵塞,利用 200 目(74 μm)标准筛对岩样进行筛分以去除粉状颗粒;然后将剩余岩样充分混合,并采用缩分法取样用于后续试验。每组试验样品质量为 7 kg。另取出部分铀矿石使用玛瑙研钵研磨至粒径小于 74 μm,用于 X 射线荧光分析,分析结果见表 1。

表 1 铀矿石样品化学组分
Table 1 Chemical components of uranium ore samples

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	F	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	U ₃ O ₈	SO ₃	其他
59.859	13.258	12.693	4.856	3.833	2.204	1.547	0.561	0.314	0.301	0.619

1.2 试验装置

堆浸试验在室温条件下进行,所用试验装置见图 1。该装置为利用亚克力材料自制的顶部开口的加压浸出池,可实现溶液在受压条件下的渗流与浸出过程。装置尺寸参照南方某铀矿堆浸场,按 1 : 75 等比例缩小,浸出池内部尺寸为 340 mm×210 mm×120 mm。在浸出池底部,沿浸出液流动方向设有 8°的斜坡。在矿石待浸区与浸出液收集区中间架设隔板,隔板底部开孔装设滤网。在矿石待浸区底部铺设 50 mm 厚卵石层,卵石层上方铺设滤布垫层,垫层上方为待浸矿石。利用蠕动泵将浸出剂由进液口泵入装置内部上方的喷淋管,浸出剂经喷淋管喷淋于矿石,通过恒压装置保持浸出装置内部压力。

1.3 试验方法

将 7 kg 矿石样品装入浸出池后依次放置橡胶密封圈、顶部盖板与金属盖板,对浸出装置进行密封,开展酸性浸出试验。试验以 20 g/L 的硫酸

溶液作为浸出剂,通过 BT100-2J 蠕动泵(转速 66.6 r/min)持续泵入池中,在 15 d 的试验周期内循环使用,不进行任何形式的补充或更换。每日布液 12 h,维持矿内饱和液面高度约为 66.7 mm。试验采用间歇喷淋方式,淋停比设置为 1 : 1。浸出装置内部增压气体为空气,试验设定常压条件为 0 kPa。试验设置了不同的压力值(0、40、60、80 kPa),分别对应试验组 1、试验组 2、试验组 3 和试验组 4,其余操作参数保持一致。

试验周期为 15 d,为减小矿堆板结现象的影响^[20],在试验第 7 天(开始喷淋前)进行一次翻堆操作。考虑到浸出前期反应速率较快,每组试验第 1 天取样 3 次,取样间隔分别为 3、3、6 h;第 2 天和第 3 天取样 2 次,取样间隔为 6 h;之后每 24 h 取样一次。以每次取样品多次测定后的平均值作为试验最终数据,分析浸出过程中浸出液铀质量浓度、铀浸出率、pH 的变化,探索压力条件对铀矿石浸出效果的影响。

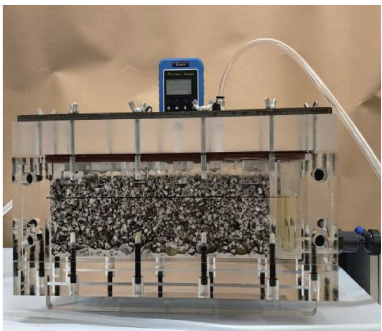
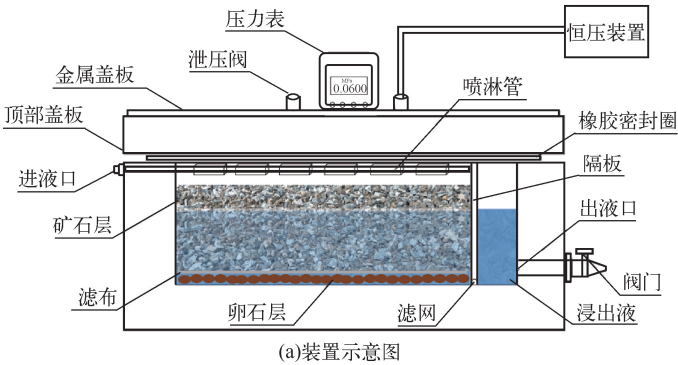


图 1 加压堆浸装置
Fig. 1 Pressurized heap leaching device

2 结果与讨论

2.1 铀质量浓度变化特征

4组压力条件下,浸出液的累计铀质量浓度(通过分光光度法测得)随时间的变化见图2。可以看出,与常压浸出相比,加压浸出在0~3 d阶段铀质量浓度增幅更大。经线性拟合计算可得,该阶段4组铀质量浓度曲线对应的切线斜率从高到低依次为试验组2、试验组3、试验组4、试验组1,说明压力可提高铀的浸出反应速率;但压力与其对铀浸出的促进作用之间未呈现显著的正相关或负相关关系,表明该体系下铀浸出过程受多因素耦合作用影响,而非单一变量主导。

浸出液铀质量浓度随浸出时间的延长而升高,可分为3个阶段:第一阶段(0~3 d),浸出液铀质量浓度快速上升,增幅明显,此时酸性浸出剂与矿石的反应主要集中于矿物颗粒表面,快速溶解表面的铀。第二阶段(3~12 d),浸出液铀质量浓度继续上升,但增幅趋缓,此阶段浸出剂向矿石内部扩散,与更多矿石内部的孔隙、裂隙接触,促使内部难溶铀矿物的溶解;这一过程受矿石粒度、粉尘含量、堆积密度等因素的影响,所以浸出液铀质量浓度持续波动式上升。第三阶段(12 d后),浸出液铀质量浓度增长缓慢,并逐渐趋于平稳;在4组压力条件下,浸出液铀质量浓度增量均明显降低,仅为3.9~6.0 mg/L。

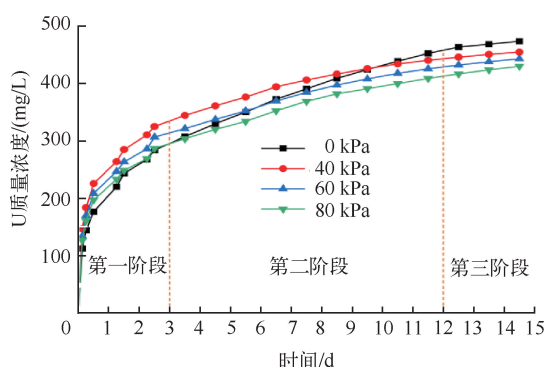


图2 不同压力下浸出液铀质量浓度随时间的变化

Fig. 2 Changes of uranium mass concentration in leachate with time under different pressures

2.2 浸出液 pH 变化特征

本浸出试验以 H_2SO_4 作为浸出剂,不同压力下,浸出液 pH 随时间的变化见图3。从浸铀反

应原理分析,浸出前期,硫酸与含铀矿石中易溶的 U(VI) 反应,铀快速溶解,酸耗大,pH 快速上升,浸出液铀质量浓度与铀浸出率显著增加;浸出中后期,矿石中易溶的 U(VI) 含量降低,此时浸出反应中的矿石以较难溶的 U(IV) 为主,反应速度下降,pH 增长变慢^[21]。从图3可看出,在压力对浸出过程起促进作用的阶段,与常压浸出相比,加压条件下的反应速率更高,意味着更多的 H^+ 参与了铀的氧化还原反应,单位时间内酸耗更大,pH 上升更快。

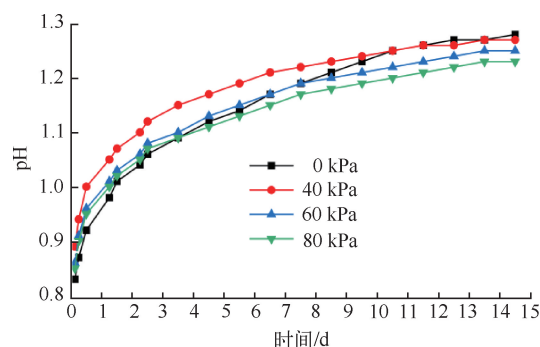


图3 不同压力下浸出液 pH 随时间的变化

Fig. 3 Changes of pH of leachate with time under different pressures

在4种压力条件下,浸出液 pH 变化趋势基本相同:浸出前期反应速率快、耗酸多,pH 增长趋势明显;随着反应由矿石表面向矿石内部延伸,反应速率下降,pH 缓慢上升。该 pH 变化规律与浸出原理相符。在试验过程中,溶液 pH 一直处于适合铀浸出的“工作窗口”,浸出初期无效耗酸阶段对溶液 pH 的影响有限,反应体系主要处于有效酸耗阶段。酸与铀矿物反应消耗 H^+ ,生成可溶的硫酸铀酰离子,导致 H^+ 浓度下降、pH 上升。与此同时,浸出液铀质量浓度增量呈波动式下降趋势,铀浸出率的增速先快后慢。在酸量充足的循环浸出条件下,铀浸出率与 pH 呈正相关。

2.3 铀浸出率变化特征

由4种压力条件下、不同时间段取样所得的浸出液铀质量浓度,通过式(1)^[22]计算得到铀浸出率。4组压力条件(0、40、60、80 kPa)下,铀浸出率和浸出时间的关系见图4。随着压力增大,铀的最终浸出率呈下降趋势,分别为94.66%、90.86%、88.54%和85.90%。

$$x = \frac{cV}{mk} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: x —铀浸出率,%; c —浸出液的铀质量浓度,mg/L; V —浸出液的体积,L; m —试验样品的质量,kg; k —样品的铀质量分数,%。

在浸出第0~3天时,4组样品的铀浸出率由高到低依次为试验组2(40 kPa)、试验组3(60 kPa)、试验组4(80 kPa)、试验组1(0 kPa),说明此时加压对浸出均有促进作用。第4天,4组样品铀浸出率由高到低依次为试验组2、试验组3、试验组1、试验组4,4种压力条件下浸出液铀浸出率分别达68.83%、64.24%、61.44%、60.72%;第7天,4组样品铀浸出率由高到低依次为试验组2、试验组1、试验组3、试验组4,4种压力条件下浸出液铀浸出率分别达78.78%、74.48%、73.84%、70.48%。与常压相比,在第4~7天时,40 kPa、60 kPa的压力对浸出仍有促进作用,80 kPa的压力对浸出显现出抑制性;在第7~10天时,只有40 kPa的压力对浸出有促进作用;第10天后,此时常压浸出的铀浸出率达85%,40 kPa、60 kPa、80 kPa的压力对浸出均显现出抑制作用,且随压力增加,抑制作用增强。常温条件下,40、60、80 kPa的压力对铀浸出呈现短期物理促进、长期物理抑制的特征。

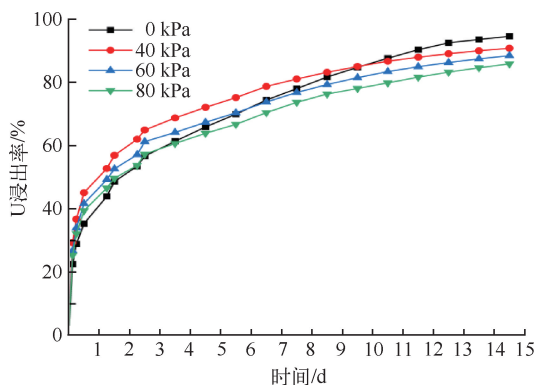


图4 不同压力下铀浸出率随时间的变化

Fig. 4 Changes of uranium leaching rate with time under different pressures

理论上,加压浸出可提高化学反应速率,加快电子在固液界面的转移速率,能够有效提升铀浸出率^[23]。试验结果仅体现出压力条件对铀矿石浸出速率的正向影响,不能达到提升最终铀浸出率的目的,与理论不完全一致。可能的原因是:加压可提高气体在液体中的溶解度,从而提供更充足的氧化剂浓度,加快离子在固液界面的扩散,缩

短达到平衡所需的时间,直接促进浸出前期铀矿物表面的快速溶解,因而使得前期加压试验组的铀浸出率增幅有绝对优势。然而,压力属于外部物理条件,压力的增加改变不了矿石本身的坚固结构和铀的赋存状态。同时,随着浸出过程的持续进行,过高的压力会导致矿堆逐渐被压实,且部分离子发生水解并产生沉淀,进而引起矿堆板结与渗透性能的持续劣化。这使得浸出剂在矿石内部的溶解与扩散更难实现,后期反应速率进一步减缓,从而导致最终浸出结果不如常压组。

3 结论

1)在常温条件下,加压浸出在一定阶段内可缩短浸出周期,提高铀浸出效率。与常压浸出相比,在溶液铀浸出率低于85%时,40 kPa条件下的浸出效果最好,能在短时间内达到最高的浸出率;而80 kPa条件下的浸出效果最差,仅在铀浸出率低于60%的初期对铀浸出表现出一定的促进作用。然而,在浸出后期,40、60、80 kPa条件下的铀浸出效果均低于常压浸出的铀浸出效果,表明压力对铀浸出的影响并非呈正相关或负相关关系。

2)在酸量充裕的情况下,循环浸出的浸出液pH与铀浸出率呈现正相关。在0、40、60、80 kPa下,铀浸出率越高,浸出液的pH越高;随着时间的延长,pH均呈上升趋势,但增幅不断减缓。

3)在常温条件下,加压浸出不能提高最终的铀浸出率。4组压力条件下,常压浸出的最终铀浸出率最高,达94.66%。加压浸出只能一定程度上加快铀浸出过程的反应速率,但不能破坏矿石内部结构或改变铀的赋存状态,也不能从低品位铀矿资源中提取更多的铀。

参考文献:

- [1] 焦智伟,王亚飞,邱崇涛.天华山火山盆综合物探特征及铀成矿有利区预测[J].中国矿业,2025,34(增刊1):620-624.
Jiao Zhiwei, Wang Yafei, Qiu Chongtao. Comprehensive geophysical characteristics and prediction of favorable uranium mineralization areas in Tianhuashan Volcanic Basin[J]. China Mining Magazine, 2025, 34 (S1): 620-624.
- [2] 苏学斌,原渊,贾秀敏,等.我国铀水冶技术现状与展望[J].核化学与放射化学,2025,47(4):313-326.

- Su Xuebin, Yuan Yuan, Jia Xiumin, et al. Review and prospect of uranium hydrometallurgy in China[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2025, 47(4):313-326.
- [3] 刘辉,孟运生,程浩,等.某铀矿石堆浸周期长的原因分析与应对措施[J].铀矿冶,2020,39(1):21-26.
Liu Hui, Meng Yunsheng, Cheng Hao, et al. Cause analysis and countermeasures for long heap leaching period of uranium ore[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(1):21-26.
- [4] 刘泓伟,王学刚,龙杰,等.难处理铀矿外场预处理强化生物浸出研究进展[J].稀有金属,2022,46(7):965-974.
Liu Hongwei, Wang Xuegang, Long Jie, et al. External field pretreatment to enhance bioleaching of refractory uranium ore: A review[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(7):965-974.
- [5] Abdel-Azeem M M, Harpy N M, Alshami A S, et al. Mineralogical and radiological studies on some paleozoic yellow ochre deposits in Southwestern Sinai, Egypt [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):22902.
- [6] Kaksonen A H, Lakaniemi A M, Tuovinen O H. Acid and ferric sulfate bioleaching of uranium ores: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264:121586.
- [7] Than V L, Tran T D, Nguyen T K D. Study on leaching systems and recovery for Palua-Parong low grade uranium sandstone ores[J]. Hydrometallurgy, 2020, 191:105164.
- [8] Asta M P, Beller H R, O'Day P A. Anaerobic dissolution rates of U(IV)-oxide by abiotic and nitrate-dependent bacterial pathways [J]. Environmental science & technology, 2020, 54(13):8010-8021.
- [9] Li J H, Feng J H, Xue J F, et al. The influence of surfactants on the acid leaching process of a uranium mine in Inner Mongolia[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2024, 333:5845-5855.
- [10] 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.
- [11] Liu C, Liu H W, Long J, et al. Interaction of dry and water-saturated uranium ore with microwave and enhanced extraction of uranium[J]. Minerals Engineering, 2023, 196:108047.
- [12] Hu J M, Song J W, Hu T, et al. Low-temperature chlorination-roasting-acid-leaching uranium process of uranium tailings: Comparison between microwave roasting and conventional roasting [J]. Processes, 2025, 13(1):82.
- [13] 郭健平,周仲魁,葛玉波,等.温度和液固比对某铀矿生物浸出的影响[J].有色金属(冶炼部分),2022(7):62-68.
Guo Jianping, Zhou Zhongkui, Ge Yubo, et al. Effects of temperature and L/S on bioleaching of a uranium mine [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(7):62-68.
- [14] 尹升华,陈勋,刘超,等.矿石颗粒级配对堆浸体系三维孔隙结构的影响[J].工程科学学报,2020,42(8):972-979.
Yin Shenghua, Chen Xun, Liu Chao, et al. Effects of ore size distribution on the pore structure characteristics of packed ore beds[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(8):972-979.
- [15] Kretzschmar J, Wollenberg A, Chiorescu I, et al. Uranyl(VI) interaction with 2-phosphonobutane-1, 2, 4-tricarboxylic acid (PBTC): A spectroscopic and computational study over a wide pH range[J]. Molecules, 2025, 30(20):4144.
- [16] Kirby M E, Watson J S, Najorka J, et al. Experimental study of pH effect on uranium (VI) particle formation and transport through quartz sand in alkaline 0.1 M sodium chloride solutions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 592:124375.
- [17] Hua Y L, Li D H, Zou J L, et al. Evolutional solid phase and solid-liquid interface uranium immobilization mechanisms by nanoscale zero-valent iron and enhanced uranium stability control strategy [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 453(P2):139924.
- [18] 袁嘉懋,周仲魁,史维浚,等.高速渗流对浸铀周期的影响[J].中国有色冶金,2023,52(1):146-153.
Yuan Jiamao, Zhou Zhongkui, Shi Weijun, et al. Effect of high velocity percolation on uranium leaching period [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(1):146-153.
- [19] 康佳红,邓建国,曹彪,等.硬岩铀矿淋浸工艺参数优化[J].铀矿冶,2025,44(3):35-40.
Kang Jiahong, Deng Jianguo, Cao Biao, et al. Optimization of leaching process parameters of hard rock uranium ore[J]. Uranium Mining and Metal-

- lurgy, 2025, 44(3):35-40.
- [20] 李尚远, 陈明阳, 李从奎. 铀、金、铜矿石堆浸原理与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 229-230.
- [21] 王健, 林泳钊, 申怡梦, 等. 内蒙古某砂岩铀矿床酸法浸出特征研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(12):109-122.
- Wang Jian, Lin Yongzhao, Shen Yimeng, et al. An investigation of acid leaching characteristics in a sandstone uranium deposit in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(12):109-122.
- [22] 孔德悬, 魏学斌, 陈功新, 等. 某砂岩型铀矿石浸出渣样铀钍浸出特征及机理[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(12):77-83.
- Kong Dexuan, Wei Xuebin, Chen Gongxin, et al. Leaching characteristics and mechanism of uranium and scandium from leaching residues of a sandstone type uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(12):77-83.
- [23] 常喜信, 钟平汝, 李铁球, 等. 含钛难处理铀矿石浸出工艺研究[J]. 铀矿冶, 2021, 40(2):123-127.
- Chang Xinxi, Zhong Pingru, Li Tieqiu, et al. Leaching process of titanium-bearing refractory uranium ore[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(2):123-127.

Effects of Pressure Conditions on Leaching Performance of Uranium Ore Heap Leaching

LI Da, LI Jingyang, ZENG Sheng, MENG Fanfei

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

Abstract: Pressurization serves as a critical approach for regulating reaction rate in hydrometallurgical processes. To investigate the effects of pressure conditions on uranium leaching performance, laboratory-scale simulated heap leaching tests of uranium ore were carried out using a self-made room-temperature pressurized leaching device, with hard-rock type uranium ore from a mine in southern China as the research material. The results indicate that room-temperature pressurized leaching can accelerate the leaching reaction rate, yet it exerts no positive effect on improving the final uranium leaching rate. Pressurization exhibits a significant promoting effect on uranium leaching before the uranium leaching rate reaches 60%, and the leaching performance is optimal under a pressure of 40 kPa when the uranium leaching rate is below 85%. After 15 days of pressurized leaching, the highest uranium leaching rate reaches 94.66%, while the lowest is 85.90%. This study reveals that based on the correlation between pressure and leaching performance during room-temperature pressurized leaching, the uranium heap leaching technology can be effectively optimized by regulating pressure—a physical parameter with the advantages of controllability and low cost—thereby achieving the high-efficiency recovery of uranium resources.

Key words: uranium ore heap leaching; acid leaching; pressurized heap leaching; pressure regulation; leaching rate; leaching efficiency; pH