

移动式喷淋技术在某铀矿堆浸中的试验研究

邓建国¹, 师留印², 康佳红¹, 熊伟斌¹, 曹 彪¹, 黄炎平¹, 董宏真¹

(1. 中核韶关锦原铀业有限公司, 广东 韶关 512328;

2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 为解决微喷带布液系统存在的易被杂物堵塞、浸出剂喷淋不均匀等问题, 提高堆浸过程的均匀性与浸出效率, 开展了移动式喷淋技术在某铀矿堆浸中应用的可行性研究。考察了移动式布液方式的喷淋量、喷淋机移动速度、瞬时喷淋强度等参数对矿堆渗透性的影响。结果表明: 采用孔径 3.6 mm 喷头进行喷淋, 当喷淋机运行速度为 8~10 m/min 时, 单排喷淋管线流量在 6.7~13.8 m³/h 范围内均能达到均匀的布液效果; 相较于微喷带喷淋, 采用移动式喷淋, 可实现矿堆均匀浸出, 全堆铀平均浸出率(渣计)达 92.55%。本研究为移动式喷淋技术在铀矿堆浸中的工业化应用提供了技术支持。

关键词: 移动式喷淋; 堆浸; 铀矿; 渗透性; 喷淋均匀性; 浸出效率

中图分类号: TL212.1; TD868; TF111.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0063-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.11.06

堆浸技术具有投资少、成本低、工艺简单、建设周期短等优点, 在金、银、铜、铀等矿山生产中被广泛应用^[1-10]。堆浸工艺主要包括筑堆、布液、集液、强化浸出^[11-15]等技术环节, 其中布液环节在堆浸工艺中尤为重要。目前, 堆浸布液系统主要有堰塘灌溉式、喷淋器式、微型喷淋器式、滴灌式等^[16-18], 其中, 喷淋器式、滴灌式^[19-20]是国内铀矿堆浸中较为常用的布液方式。但现有喷淋器式布液系统喷淋强度不均匀, 容易造成淋浸死角, 影响矿堆浸出均匀性; 滴灌式布液对淋浸剂要求较高, 淋浸剂中固含量及钙离子浓度过高时容易造成出液孔堵塞, 从而导致喷淋不均匀, 浸出率降低。

某铀矿堆浸工艺流程为矿石破碎—堆浸—密实移动床离子交换吸附—酸洗—氯化钠淋洗—产品沉淀—产品过滤洗涤。该堆浸工艺过程中采用微喷带进行喷淋浸出, 微喷带的出液孔小(直径约 0.3 mm), 易被浸出剂中的杂物堵塞, 从而导致浸出剂喷淋不均匀。针对原有布液系统存在的问题, 结合堆浸场三面均为混凝土挡墙的结构特点, 为在浸出过程中保持矿堆疏松状态和良好渗透性, 提出采用桥式移动

布液系统进行喷淋, 以提高布液均匀性和铀浸出率。

1 原料性质

矿样取自放射性检查站矿石运输汽车, 混合均匀后作为每个矿堆的入堆矿石。矿样经缩分处理后, 取样进行粒级筛析与主要成分分析, 结果见表 1~表 2。可以看出, 该铀矿石中主要耗酸杂质元素为铁、钙、镁、铝等, 各粒度矿石产率及 U 分布率相对平均。

表 1 矿石粒级筛析结果
Table 1 Results of particle size screening analysis

粒级/mm	质量/g	产率/%	U 品位/%	U 分布率/%
>4	478.2	13.07	0.187	13.99
>3~4	602.6	16.47	0.196	18.49
>2~3	486.7	13.30	0.180	13.71
>1~2	739.2	20.20	0.138	15.97
>0.15~1	807.4	22.07	0.151	19.08
≤0.15	544.7	14.89	0.220	18.76
合计	3 658.8	100	0.174	100

表 2 矿石化学成分分析结果

Table 2 Chemical composition analysis results of the ore

%

U	U(VI)	Fe	Fe(II)	Ca	Mg	Al	P	C	SiO ₂	S
0.181	0.08	0.834	0.26	148	0.556	4.12	0.178	0.039	78.13	0.5

2 试验装置与方法

2.1 主要试验设备

移动喷淋系统跨度为 19.6 m,运行速度为 0~25 m/min,双电机驱动(单机功率 1.1 kW),喷淋管双排布置,配备移动式供液系统及运行控制系统。采用内嵌螺旋钢丝及聚酯纤维网的双排热塑性硫化橡胶(TPV)软管($\phi 50\text{ mm}\times 5\text{ mm}$)供液,双排软管被安装在 316L 材质的拖链内,并随喷淋机同步运行。堆场采用高位池自流供液,供液软管内溶液流速可达 3 m/s,即单排喷淋管的喷淋量为 13.6 m³/h。与之相对应,采用双排管喷淋,每排喷淋管由 1 条供液主管及 4 条喷淋支管组成,供液主管和喷淋支管均装设阀门,每条喷淋支管安装 18 个喷头,供液主管及支管材质均为 UPVC,管线型号分别为 $\phi 50\text{ mm}\times 3.7\text{ mm}$ 、 $\phi 32\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$ 。

2.2 试验方法

堆浸池为钢筋混凝土结构,长 51.5 m、宽 19.0 m、平均深度 3.2 m。造粒后的矿石经皮带输送机运送至堆浸池,矿石粒径为-10 mm,平均含水率为 7%,堆密度为 1.4 t/m³,堆浸池装矿量为 4 200 t。矿石筑堆完成后开始喷淋浸出,通过变频器控制喷淋机运行速度;待喷淋机运行稳定后,通过调节浸出剂输送管上阀门的开度控制喷淋量。在喷淋浸出过程中,浸出剂的酸度控制、取样及分析检测工作,均按统一的生产调度指令进行。

喷淋过程共 85 d,分 3 个阶段:1)酸化期。喷淋酸度 30~50 g/L,喷淋时间 5 d,喷淋量为 20~25 m³/h。2)浸出中期。喷淋酸度 30 g/L,喷淋时间 20 d,喷淋量为 20~25 m³/h。3)浸出后期。喷淋酸度 5~10 g/L,浸出时间 60 d,喷淋量约为 20 m³/h。

2.3 瞬时喷淋强度计算方法

在固定矿堆宽度(19.0 m)的前提下,瞬时喷淋强度仅与浸出剂喷淋量有关,与喷淋机运行速度无关。按喷淋机运行距离为 1 m 计算,瞬时喷

淋强度可表示为 $C=1\,000Q/B$ 。式中: Q —浸出剂喷淋量,L/h; C —瞬时喷淋强度,L/(m²·h); B —矿堆宽度,取 19 m。

3 试验结果及讨论

将浸出剂均匀分布于矿堆表面,是堆浸工艺中的关键环节之一。浸出剂在矿堆表面的分布均匀性主要取决于布液方式和布液装置的性能。通过提升浸出剂布液的均匀性,可有效消除浸出死角,从而提高堆浸过程的整体效率。

3.1 喷淋机布液均匀性分析

316L 材质的广角实心喷头内置螺旋叶片,可实现伞形喷射,喷射角度为 100~125°,覆盖范围广,喷洒均匀。经对不同类型喷头进行对比测试,孔径 3.6 mm 的喷头内置螺旋孔直径达 1.6 mm,在使用中不易堵塞;即使在低流量条件下,该喷头仍能保持伞形液滴状出液形态。

通过供液主管及喷淋支管将浸出剂输送至喷头,再喷洒到矿堆表面,喷头喷洒效果直接影响布液的均匀性。当供液主管的浸出剂输送量发生变化时,4 条喷淋支管的布液是否均衡,将直接影响矿堆布液的均匀性。因此,当喷淋机运行速度为 12.5 m/min 时,通过调整供液主管内浸出剂的输送量,考察每条支管浸出剂喷淋量。按一定间隔在每条支管上各选 8 个喷头,每个喷头按 2 min 计时取样,统计得到每个支管的喷淋量平均值,结果见表 3。可以看出,当单排管的喷淋量在 6.7~13.8 m³/h 时,各支管间出液量的最大相对极差为 4.35%,表明该系统在不同喷淋量下均可实现矿堆布液均匀分布。因此,在实际堆浸作业中,可根据浸出工艺的要求,在此流量范围内调整所需的喷淋量。

3.2 喷淋机运行速度对矿堆渗透性的影响

喷淋机运行系统由 PLC 控制柜、驱动系统、限位系统等组成。其运行速度通过调节驱动电机工作频率实现,运行范围则依靠安装在驱动基座两端的限位行程开关与阻挡块控制,喷淋机能够在设定范围内自动往返运行。堆浸过程中,单排喷淋管的

喷淋量相对稳定,喷淋强度主要由喷淋机运行速度决定,不同的喷淋强度对矿堆表面造成的冲刷程度不同,进而影响矿堆的渗透性能。试验中,将单排

喷淋管的喷淋量固定为 $12\text{ m}^3/\text{h}$,通过调整喷淋机运行速度,考察喷洒溶液对矿堆表面不同部位的冲刷作用及渗透效果,试验结果见表 4。

表 3 不同供液流量下各支管喷淋量统计

Table 3 Statistics of sprinkling volume for each branch pipe under different liquid supply flow rates						
单排管 总喷淋量/ (m^3/h)	支管 1 流量/ (m^3/h)	支管 2 流量/ (m^3/h)	支管 3 流量/ (m^3/h)	支管 4 流量/ (m^3/h)	支管喷淋量平均值/ (m^3/h)	相对极差/ %
6.7	1.65	1.72	1.68	1.65	1.68	4.17
9.6	2.38	2.43	2.37	2.42	2.40	2.50
12.4	3.14	3.08	3.12	3.10	3.11	1.93
13.8	3.37	3.52	3.50	3.41	3.45	4.35

表 4 喷淋机运行速度对矿堆渗透性及稳定性的影响

Table 4 Influence of the operating speed of the sprinkler on permeability and stability of ore heap				
运行速度/ (m/min)	瞬时喷淋强度/ $[\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$	平均停留时间/ min	对矿堆水平面渗透性影响	对矿堆边坡渗透性影响
8.0	631	6.44	无	酸化期出现边坡滑落
10.0	631	5.15	无	酸化期出现边坡滑落
12.5	631	4.12	无	相对较小
14.5	631	3.55	无	无
17.0	631	3.03	无	无
20.5	631	2.51	无	无

从表 4 可知,喷淋机运行速度的变化会影响喷淋液对矿堆边坡的渗透性。尽管喷淋机喷头出液集中、流速快,在矿堆表面形成较强的瞬时冲刷力,但其出液对矿堆水平面渗透性的影响很小。这主要是因为矿堆表面在持续喷淋作用下已形成粗颗粒保护层,而矿堆内部结构保持稳定且渗透性良好,溶液能快速向矿堆内部扩散。然而,喷淋机对矿堆边坡渗透性的影响则不同。当喷淋机运行速度较低时,短时间内大量溶液集中喷撒在边坡上,容易引起细颗粒矿石随浸出剂下滑,特别是在酸化期浸出剂(硫酸)浓度较高、矿石化学反应剧烈的情况下,这种情况会进一步加剧边坡的塌落与失稳。因此,需将矿堆末端挡墙修建齐平,以

消除运行速度对矿堆边坡渗透性的影响,并将喷淋机运行速度控制在 $8.0\sim 10.0\text{ m}/\text{min}$ 。这一速度范围不仅有利于减轻拖链磨损、降低动力消耗,也便于实现对往返运行的稳定控制。

3.3 瞬时喷淋强度对矿堆渗透性的影响

与堆场常用的微喷带全场均匀喷淋模式不同,移动式喷淋利用有限数量的喷头,将浸出剂喷洒在矿堆局部表面。由于喷头出液集中、瞬时流量大,溶液在矿堆表层的瞬时入渗速率成为影响浸出周期与浸出效率的关键因素。本试验在控制喷淋机运行速度为 $10.0\text{ m}/\text{min}$ 、矿堆表面平均停留时间为 5.15 min 的条件下,考察瞬时喷淋强度对矿堆渗透性的影响,结果见表 5。

表 5 瞬时喷淋强度对矿堆渗透性影响

Table 5 Effect of instantaneous sprinkling intensity on ore heap permeability		
喷淋量/ (m^3/h)	瞬时喷淋强度/ $[\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$	试验现象
8	421	酸化期矿堆表面无积液,浸出中后期矿堆表面低洼处有积液
12	631	酸化期矿堆表面无积液,浸出中后期矿堆表面低洼处有积液,积液面积无明显扩大
15	789	酸化期矿堆表面无积液,浸出中后期矿堆表面低洼处有积液,积液面积无明显扩大
20	1 052	酸化期矿堆表面无积液,浸出中后期矿堆表面低洼处有积液,积液面积略扩大
25	1 315	酸化期矿堆表面无积液,浸出中后期矿堆表面低洼处有积液,积液面积略扩大

由表5及现场实际运行结果可知,在喷淋过程中矿堆的渗透性较好,喷淋量变化对矿堆渗透性没有明显影响。在酸化期内,浸出剂喷淋量对矿堆渗透性基本无影响,矿堆表面未出现积液,溶液可通过矿堆表面颗粒空隙快速渗入矿堆内部。随着喷淋持续和雨水冲刷,矿堆表面空隙逐渐减小;在瞬时大流量喷淋条件下,溶液会沿着矿堆表面向低洼处径流并形成暂时性积液,但停止喷淋3 h后积液可自行消退。在浸出中后期,矿堆表面低洼处会形成积液。这归因于移动式筑堆设备存在操作限制,难以精确监控与均衡堆浸池各部位的实际筑堆矿石量,导致局部入堆矿石量偏少;在平堆完成后,矿堆表面呈现高低起伏现象,局部筑堆平整度相对较差。因此,根据矿堆喷淋过程中的渗透情况,酸化期建议采用不低于 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 大流量喷淋,中后期则根据矿堆渗透情况调整喷淋量,但不宜低于 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 。同时,为缓解喷淋过程中矿堆表面局部积液的问题,建议在筑堆过程中保持矿石入堆均匀,确保矿堆表面平整,以利于维持其渗透性。

3.4 移动式喷淋浸出均匀性分析

浸出完成后,为评估堆场浸出均匀性,对浸出渣进行取样分析。在矿堆表面布置16个取样点(图1)。各点从堆顶向下,分别于0.6、1.7、2.8 m深度采集20~30 kg样品。分析结果表明,3个深度浸出渣U平均品位分别为0.013%、0.013%、0.014%,对应的U浸出率平均值分别为92.74%、92.74%、92.18%。尽管不同取样位置和深度的浸出渣铀含量略有差异;但矿堆整体浸出均匀性良好,未出现板结现象,仅在矿堆底部发现零星红褐色与黄褐色沉淀物。全堆铀平均浸出率(渣计)达92.55%。结果表明,移动式喷淋浸出工艺能使浸出剂在矿堆表面相对均匀分布,可有效保障矿堆的整体浸出均匀性。

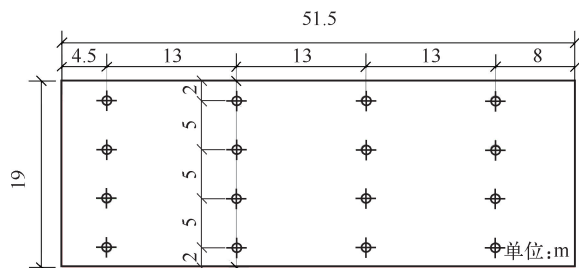


图1 浸出渣取样位置

Fig. 1 Sampling location of leaching residue

4 结论

1)在堆浸采铀工艺中,采用移动式喷淋方式,喷淋管线实现了集成化布置,仅需两排布液管线便可满足矿堆浸出剂用量需求。与微喷带布液方式相比,这种布液方式维护及使用更方便。

2)采用移动式喷淋方式,孔径3.6 mm喷头自适应能力强,在喷淋机运行速度为 $8 \sim 10 \text{ m/min}$ 时,单排管线喷淋量在 $6.7 \sim 13.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 均能达到均匀的布液效果,全堆铀平均浸出率(渣计)达92.55%。

参考文献:

- [1] 霍玉宝,刘辉,刘永涛,等.低品位复杂钼矿拌酸熟化堆浸工艺研究[J].山东化工,2024(53):42-49.
Huo Yubao, Liu Hui, Liu Yongtao, et al. Research on low grade complex molybdenum ore acid curing and heap leaching process [J]. Shandong Chemical Industry, 2024(53):42-49.
- [2] 杨剑飞,师留印,黄永,等.堆浸法从某低品位难选含铀钼矿中回收钼[J].有色金属(冶炼部分),2023(2):73-76.
Yang Jianfei, Shi Liuyin, Huang Yong, et al. Molybdenum recovery from one uranium ore by heap leaching method [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(2):73-76.
- [3] 李建华,向秋林.破碎花岗岩型铀矿石的酸法制粒堆浸[J].有色金属,2004,56(1):63-65.
Li Jianhua, Xiang Qiulin. Acidic heap leaching with agglomeration for cracked granite uranium ore [J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(1):63-65.
- [4] 曾毅君,李建华,李铁球,等.中国含泥铀矿酸法堆浸制粒技术的应用[J].铀矿冶,2002,21(4):182-186.
Zeng Yijun, Li Jianhua, Li Tieqiu, et al. Technical application of agglomerated acidic heap leaching of clay bearing uranium ore in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2002, 21(4):182-186.
- [5] 黄永,刘会武,师留印,等.某铀矿石酸法浸出工艺条件试验研究[J].铀矿冶,2018,37(2):88-92.
Huang Yong, Liu Huiwu, Shi Liuyin, et al. Technology conditional experiment study on acid leaching process for a uranium ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018, 37(2):88-92.
- [6] 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.
- [7] 沈鑫.有效面积滴淋法在堆浸工艺中的应用实践[J]. *黄金*, 2023, 44(8): 48-51.
- Shen Xin. Application practice of effective area dripping method in heap leaching process [J]. *Gold*, 2023, 44(8): 48-51.
- [8] 张海亮,王建文,李彦礼,等.低品位金矿永久性堆浸法及其应用[J]. *矿冶*, 2018, 27(增刊1): 168-173.
- Zhang Hailiang, Wang Jianwen, Li Yanli, et al. Permanent heap leaching technology and application for low-grade gold mine [J]. *Mining and Metallurgy*, 2018, 27(S1): 168-173.
- [9] 刘李,侯彦群,陈礼明,等.莱比塘铜矿堆浸场汽车筑堆超径矿石控制[J]. *现代矿业*, 2022, 38(8): 252-255.
- Liu Li, Hou Yanqun, Chen Liming, et al. Control of over-diameter ore of vehicle stacking in Laypitang copper mine heap leaching yard[J]. *Modern Mining*, 2022, 38(8): 252-255.
- [10] 周飞舟,付延涛,辜小川. GPS 在自移桥式布料机控制系统中的应用[J]. *黄金*, 2022, 43(3): 50-54.
- Zhou Feizhou, Fu Yantao, Gu Xiaochuan. Application of GPS to the control system of self-mobilized bridge spreader[J]. *Gold*, 2022, 43(3): 50-54.
- [11] 张珏.矿用布料机的筑堆和移设[J]. *机械管理开发*, 2020, 201(1): 60-62.
- Zhang Yu. Stacking and shifting of the mobile conveyor bridge system in mine [J]. *Mechanical Management and Development*, 2020, 201(1): 60-62.
- [12] 杨雨山,喻清,胡南,等.微波加热预处理堆浸铀矿石[J]. *稀有金属*, 2016, 40(3): 280-286.
- Yang Yushan, Yu Qing, Hu Nan, et al. Heap leaching uranium ore pretreated by microwave radiation [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2016, 40(3): 280-286.
- [13] 陈向,阳俊,廖德华.某硬岩铀矿磁场强化浸出试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(3): 45-49.
- Chen Xiang, Yang Jun, Liao Dehua. Experimental study on intensified leaching of a hard rock uranium ore by magnetic field [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021(3): 45-49.
- [14] 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.
- [15] 胡凯建,吴爱祥,尹升华,等.电场改善细粒级尾矿浸出渗透效果试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(10): 3989-3994.
- Hu Kaijian, Wu Aixiang, Yin Shenghua, et al. Experimental study on effect of electric field on permeability of fine tailings [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(10): 3989-3994.
- [16] 唐泉,雷泽勇,符辰湛.堆浸雾化布液与滴淋布液的比较[J]. *金属矿山*, 2006, 358(4): 23-25.
- Tang Quan, Lei Zeyong, Fu Chenzhan. Comparison between atomizing irrigation and drip irrigation in heap leaching [J]. *Metal Mine*, 358(4): 23-25.
- [17] 曾莹莹.某铀矿石雾化布液堆浸性能的研究[J]. *矿产综合利用*, 2007(3): 21-24.
- Zeng Yingying. Research on the heap leaching performance of an uranium ore by spray sprinkling solution distribution technology [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2007(3): 21-24.
- [18] 曾莹莹,雷泽勇.低品位铀矿石堆浸布液新工艺的试验研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2007, 21(1): 30-33.
- Zeng Yingying, Lei Zeyong. Experiment research on heap leaching of low content uranium ore with new solution distribution technology [J]. *Journal of University of South China: Science and Technology*, 2007, 21(1): 30-33.
- [19] 徐建平,王雁,李连明.滴淋堆浸技术处理氧化贫金矿[J]. *山东冶金*, 2015(3): 15-17.
- Xu Jianping, Wang Yan, Li Lianming. Extracting of low grade oxidation gold ore by dripping heap leach technology [J]. *Shandong Metallurgy*, 2015(3): 15-17.
- [20] 杨天国.滴淋技术在高海拔地区金矿堆浸中的应用[J]. *四川地质学报*, 1998(4): 75-77.
- Yang Tianguo. The application of drop-leaching technique to heap leaching of gold in high altitude area [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1998(4): 75-77.

Experimental Study on Mobile Spray Technology in Heap Leaching of Uranium Mine

DENG Jianguo¹, SHI Liuyin², KANG Jiahong¹, XIONG Weibin¹, CAO Biao¹,
HUANG Yanping¹, DONG Hongzhen¹

(1. Shaoguan Jinyuan Uranium Co., Ltd., CNNC, Shaoguan 512328, China

2. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: In order to solve the problems of easy clogging by debris and uneven application of leaching agents in the micro-sprinkler tape liquid distribution system, and to enhance the uniformity and efficiency of the heap leaching process, a feasibility study on the application of a mobile sprinkling method in a certain uranium mine heap leaching was conducted. The effects of parameters such as the sprinkling volume, the moving speed of the sprinkler machine, and the instantaneous sprinkling intensity of the sprinkler machine on the permeability of the ore heap were investigated. The results show that when using a 3.6 mm aperture nozzle for sprinkling and the sprinkler machine running at a speed of 8 to 10 m/min, a uniform liquid distribution effect can be achieved with a single row of sprinkling pipelines within the flow of 6.7 to 13.8 m³/h. Compared with micro-sprinkler tape sprinkling, the use of mobile sprinkling results in a relatively uniform leaching of the ore heap, enabling uniform leaching of the ore heap, with average leaching rate of uranium (based on residue) reaching 92.55%. This study provides technical support for the industrial application of mobile sprinkling technology in uranium mine heap leaching.

Key words: mobile spray; heap leaching; uranium ore; permeability; spray uniformity; leaching efficiency