

细粒级铀矿石喷淋堆浸试验研究

孙家红, 师留印, 贾秀敏, 马郡男, 夏庆银, 高 尚

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要:针对铀矿堆浸工艺存在浸出周期长、浸出效率低等问题,开展了细粒级矿石现场喷淋最佳工艺流程及参数淋堆浸工业优化试验,确定了矿石破碎、拌水造粒,以及喷淋堆浸等关键环节的最佳工艺参数,结果表明:闭路破碎筛分工艺能有效控制入料粒度在 4 mm 以下;在转筒造粒机转速 30 r/min、矿石进料量为 40 t/h 条件下,造粒成球效果良好;堆浸试验证实,在液固体积质量比 4.86 : 1、硫酸用量 8.56%、浸出周期 78 d 条件下,该工艺成功地将铀品位从 0.158% 降至 0.011 5%,获得了 92.72% 的渣计铀浸出率。

关键词:铀;细粒级铀矿石;硫酸;破碎;造粒;喷淋;堆浸

中图分类号:TL212 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2026)03-0364-08

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.011

堆浸作为传统湿法冶金技术之一,因具有投资少、效率高等优点,广泛应用于从低品位矿石中提取金、银、铜、铀和镍等金属^[1-9]。该工艺通常将破碎后的矿石进行造粒制成密实球团颗粒,再筑堆在防渗垫层上形成稳定矿堆,随后采用特定的浸出剂(通常为酸性或碱性溶液),自上而下以滴灌或喷淋方式浸出,使目标金属在化学作用下溶解进入溶液,再经收集系统富集回收并进一步提纯^[10-14]。堆浸技术常被用于低品位表外矿石浸出,存在占地面积大、生产周期长、回收率偏低,以及环境污染风险高等缺点^[15-18]。

为克服传统堆浸的局限性,细粒级堆浸技术应运而生。该技术通过处理粒度更细的矿石,能显著增加矿物暴露面积与反应接触界面,从而强化浸出反应过程,提高金属浸出速率和回收率,尤其适用于复杂难处理氧化矿及尾矿资源的综合回收利用^[19-22]。如在对不同粒度条件下的低品位高钙镁铜矿进行柱浸时,矿石粒度从 <40 mm 减小至 <10 mm,浸出过程的限制步骤由固体层扩散控制转向化学反应与扩散混合控制,浸出速率显著加快。但细粒矿堆技术在浸出周期内易发生沉降与板结,使结构堵塞,导致传质效率降低,进而影响矿堆的长期浸出稳定性与工艺连续性^[23]。

目前,国内铀矿企业普遍采用的堆浸工艺虽能基本满足生产需要,但现有堆浸生产线上破碎后矿石粒度通常为 -8 mm 甚至更大,若要使铀浸出率达到 90% 的目标,生产周期需延长至 300 d,生产效率较低;此外,在筑堆过程中,粗细粒矿石分级现象明显,严重影响矿堆整体渗透性及浸出均匀性。针对这些问题,本课题组在前期研究中通过试验研究并验证了移动式喷淋方式的可行性,该方式有助于在浸出过程中保持矿堆疏松状态,实现均匀浸出。为在较短浸出周期内提高铀浸出率、降低尾渣铀品位,进一步开展了细粒级铀矿石现场喷淋堆浸工业试验,并研究确定了矿石破碎、拌水造粒、喷淋堆浸等关键环节的最佳工艺流程及参数,以期为其他铀矿堆浸工艺的改进提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 原料性质

试验选用的铀矿石为贫钙镁高硅酸盐单铀矿石类型,由热矿物和围岩残留矿组成。其中沥青铀矿含量较高,其次为铀的次生矿物,沥青铀矿与石英、赤铁矿、萤石、方铅矿等矿物共生。直接选取破碎生产线成品矿石作为工业试验用原矿石,其主要化学元素组成及粒级筛析结果见表 1、2。

收稿日期:2026-01-19;修订日期:2026-03-30

第一作者简介:孙家红(1999—),男,硕士,工程师,主要研究方向为铀矿水冶技术。

通信作者简介:师留印(1982—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为铀矿水冶工艺研发及工程设计。

表 1 原矿主要化学元素组成
Table 1 Composition of major chemical elements in raw ore

U	U(VI)	Fe	Fe(Ⅱ)	Ca	Mg	Al	P	C	SiO ₂	S
0.158	0.059	1.04	0.554	3.7	0.44	3.94	0.025	0.75	73.98	0.28

表 2 细碎前矿石粒级筛析结果
Table 2 Size analysis of ore before fine crushing

粒级/mm	质量/g	占比/%	U 品位/%	U 分布率/% ^①
+6	1 605.9	33.12	0.172	31.99
-6~+4	477.2	9.84	0.161	8.90
-4~+3	547.7	11.29	0.199	12.62
-3~+2	161.8	3.34	0.203	3.80
-2~+1	664.4	13.70	0.131	10.08
-1~+0.15	799.7	16.49	0.152	14.08
-0.15	592.6	12.22	0.27	18.53
合计	4 849.3	100.00	0.178	100.00

注:①U 分布率为该粒级矿石铀品位占总铀品位的比值,计算公式为:(该粒级矿石质量×该粒级矿石 U 品位)/(矿石总质量×矿石平均 U 品位)×100%。

由表 1 可知:矿石中铀品位为 0.158%,其中 U(VI)质量分数为 0.059%;矿石中耗酸杂质元素为铁、钙、镁、铝等,其中钙、铝质量分数分别为 3.7%和 3.94%,是主要消耗元素。由表 2 可知,现有破碎生产线出料矿石粒度偏大(-8 mm),其中粒度-4 mm 以下矿石占比仅为 57%,入堆矿石粒度偏大会导致堆浸周期过长、浸出率偏低,不能满足细粒级铀矿石堆浸入堆矿石粒度工艺要求,因此仍须进一步细碎处理。

1.2 破碎工艺

为评估不同破碎流程对产品粒度分布与系统效率的影响,设计了开路与闭路 2 种破碎工艺并进行对比试验。2 种工艺共用相同的给料(粒度-8 mm)与核心设备(振动筛与液压对辊破碎机),其区别关键在于筛上物的循环方式。

1)闭路破碎工艺:给料经振动筛筛分后,

筛下合格粒度矿石(-4 mm)直接输出。筛上粗料则返回液压对辊破碎机进行再破碎,破碎后物料重新输送至振动筛进行二次筛分,形成闭路循环。

2)开路破碎工艺:此工艺为单向流程,给料经振动筛筛分后,筛上粗料经液压对辊破碎机进行一次破碎,不再返回筛分机,而是与当次筛下合格粒度矿石合并,一同进入后续造粒系统。

2 种破碎工艺均通过调节料仓出料口开度与皮带输送机运行速度控制破碎站矿石进料量。破碎过程中分别对振动筛筛下物料、筛上物料、返回物料及破碎后矿石取样,分析其粒度分布情况。

1.3 造粒方法

造粒试验在破碎所得合格粒度矿石基础上进行。合格粒度矿石经皮带输送机运送至转鼓造粒机的给料矿仓,随后通过皮带输送机输送到转鼓造粒机中。转鼓造粒机内设有可控喷水装置,在滚筒转动作用下,矿石颗粒与一定量的水分得以充分混合、挤压团聚,形成均匀球团颗粒产品,最终由转鼓造粒机尾端排出。造粒过程中喷水量通过流量计进行计量,矿石进料量则采用刮皮带称重方法进行测定。

1.4 浸出试验

工业堆浸试验在堆浸池中进行,该堆浸池规格为:长 55 m、宽 19 m、高 3.5 m,坡度 0.5%。在该堆浸池原有基础上,重新铺设渗滤层,并在原鹅卵石层之上增加 2~5 cm 鹅卵石,使渗滤层厚度达到 30~40 cm,以确保浸出液在底部疏流。所有试验用矿石均经细碎筛分与拌水造粒处理,具体工业喷淋堆浸试验参数见表 3。

表 3 工业喷淋堆浸试验参数
Table 3 Parameters of industrial spray heap leaching experiment

矿量/t	铀品位/%	粒度/mm	堆高/m	喷淋方式	喷淋强度/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	浸出剂酸度/(g·L ⁻¹)
4 350	0.158	<4	3.5	连续喷淋	15~30	20~30(前期),5~10(中后期)

筑堆采用移动式筑堆皮带输送机完成,以避免造粒后物料颗粒受外力碾压破坏,并确保筑堆相对均匀。采用移动式喷淋机进行喷淋浸出,避免在喷

淋过程中机械或人工对矿堆表面的碾压或踩踏,使矿堆始终保持较好的渗透性。喷淋过程中,根据浸出液酸度变化(保持在 2~8 g/L),调节浸出剂中硫

酸浓度,酸化期浸出剂酸度控制在 20~30 g/L,浸出中后期浸出剂酸度为 5~10 g/L。喷淋强度控制在 15~30 L/(m²·h),并根据堆体表面积液情况进行调整。试验中期观察到矿堆出现板结、压实等现象,且浸出率持续下降,故采用铲车进行翻堆处理,使矿堆上下矿物倒置,疏松堆体。

1.5 分析方法

试验中铀离子浓度均采用钒酸铵容量法测定。其核心步骤为:试样经处理制备成溶液后,在约 35%的磷酸介质中,用硫酸亚铁将 U(VI)还原为铀 U(IV);过量的硫酸亚铁用亚硝酸钠氧化,同时 U(IV)形成稳定的配合离子[U(HPO₄)₃]²⁻而不被氧化;在尿素催化下,过剩的亚硝酸钠被去除。以二苯胺磺酸钠为指示剂,用钒酸铵标准溶液滴定 U(IV),至溶液呈紫色即为终点。根据标准溶液消耗量计算待测样品中铀质量分数,计算公式如下:

$$w(U) = \frac{T \times V}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:w(U)—待测样品中铀质量分数,%;T—钒酸铵标准溶液对铀的滴定度,g/mL;V—滴定时消耗的钒酸铵溶液体积,mL;m—待测样品称样量,g。

2 试验结果与讨论

2.1 破碎工艺对比分析

在生产中,原矿破碎后的矿石粒度为-8 mm,但其中粒度-4 mm 以下的矿石占比仅为 40%~50%,无法满足工业试验入堆矿石粒度要求。由于控制入堆矿石粒度为-4 mm 是提高铀浸出率及缩短浸出周期的前提条件,因此须对入堆矿石进行进一步细碎处理。对比试验结果分别见表 4、5。

表 4 闭路破碎产品粒级筛析结果

Table 4	Size analysis of closed-circuit crushing product			
粒级/mm	质量/g	占比/%	U 品位/%	U 分布率/%
-4~+3	429.3	11.00	0.216	13.56
-3~+2	527.6	13.52	0.145	11.19
-2~+0.9	1 266.9	32.46	0.155	28.71
-0.9~+0.15	1 061.1	27.20	0.158	24.51
-0.15	617.5	15.82	0.244	22.03
合计	3 902.4	100.00	0.175	100.00

表 5 开路破碎产品粒级筛析结果

Table 5	Size analysis of open-circuit crushing product			
粒级/mm	质量/g	占比/%	U 品位/%	U 分布率/%
+4	561.3	14.53	0.130	10.10
-4~+3	512.4	13.26	0.215	15.25
-3~+2	532.9	13.79	0.174	12.83
-2~+1	775.4	20.07	0.145	15.56
-1~+0.15	858.2	22.21	0.158	18.77
-0.15	623.5	16.14	0.297	25.63
合计	3 863.7	100.00	0.187	100.00

由表 4、5 可知:2 种破碎工艺均能显著降低原矿石粒度,但闭路破碎工艺在产品粒度控制效果更佳,经处理后产品粒度全部小于 4 mm,且粒度在 2 mm 以下的产品占比高达 75%,而铀元素主要富集于此粒度区间,这为后续浸出作业创造了有利条件;相较而言,开路破碎工艺虽因减少一次筛分环节而缩短了破碎时间,但产品粒度合格率较低,其中粒度大于 4 mm 的矿石占比仍达 14%以上,而粒度在 2 mm 以下的产品占比相较于闭路破碎工艺降低了 17%,前期条件试验已明确表明粒度大于 4 mm 的矿石会延长堆浸周期并降低浸出率。因此,为确保工业化堆浸效果,本次试验确定采用闭路破碎工艺,并将入堆矿石粒度严格控制在 4 mm 以下。

2.2 造粒工艺条件分析

造粒的核心目的是通过团聚细粒物料以改善堆浸渗透性。造粒机处理能力与造粒效果关系如图 1 所示。

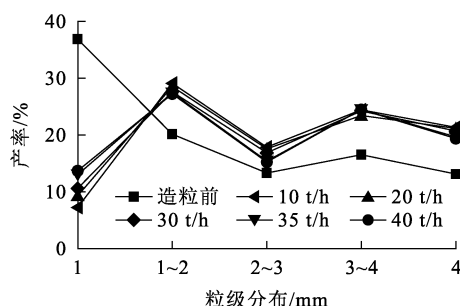


图 1 造粒机处理能力与造粒效果的关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between granulator capacity and granulation quality

由图 1 可知:物料经转筒造粒机处理后,颗粒粒度显著增大,危害堆体渗透性的细颗粒

(-1 mm)质量占比由未处理前的 41%降至 10%左右,细粒级含量显著减少。这主要是因为细颗粒物料分散度高、比表面积大,在造粒机滚动过程中,因水的润湿作用而发生碰撞团聚,使矿粒不断“长大”^[24];同时,造粒后的矿石颗粒之间形成并保持了良好的孔隙通道,有利于后续喷淋浸出过程中浸出剂的渗透与扩散。此外,随造粒机处理能力(t/h)的提高,除粒度小于 1 mm 的矿石质量占比略有增加外,其他粒度区间的分布变化相对较小。其主要原因是处理能力提高后,物料在造粒机内的停留时间缩短,单位时间内需混合的物料量增多,导致粗颗粒在筒体内抛洒时粘附细颗粒概率降低,细颗粒自身成核与滚动成球时间不足,影响细粒级的进一步团聚。综上可知,在保证造粒产品孔隙结构满足浸出要求的前提下,选用处理能力 40 t/h 作为造粒控制参数。

造粒机转速与处理能力的关系曲线如图 2 所示。可知:造粒机处理能力先随转速增大而增加,但在转速大于 30 r/min 后下降。主要原因是在转速低于临界值(约 30 r/min)时,物料能在筒体内被有效翻滚并顺利向前输送,保障了较高处理能力;而当转速超过临界状态时,强大离心作用会使物料附着筒壁,丧失相对运动,无法有效向前输送,使处理能力下降,此时若强行增加进料量,筒内易积料过多,会造成电机停机或烧毁等故障。为确保处理效率和设备稳定运行,建议操作转速略低于临界值,故试验确定 30 r/min 为最佳造粒机转速。

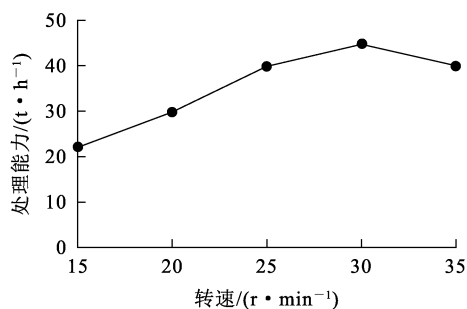


图 2 造粒机转速与处理能力的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between granulator speed and capacity

2.3 喷淋浸出过程分析

在浸出过程中,因喷淋机运行状况不佳及水冶厂生产调配不合理等因素,浸出剂喷淋量整体

偏低,致使酸化期矿堆喷淋强度及酸度均未达到工艺参数要求,进而造成整个堆浸喷淋周期延长。此外,因浸出剂配置贮池输送泵无法耐高酸,在喷淋浸出试验中,将酸化期酸度控制在 30 g/L,浸出中后期,则依据浸出液 pH 调节浸出剂酸度,并根据喷淋机运行状况,将喷淋强度控制在 15~30 L/(m² · h)。喷淋浸出试验结果如图 3 所示。

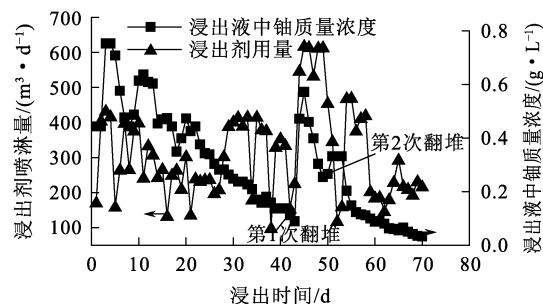
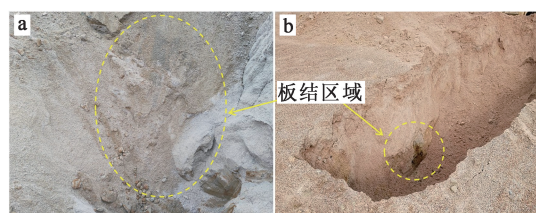


图 3 浸出剂喷淋量与浸出液中铀质量浓度随浸出时间的变化

Fig. 3 Variation of extractant dosage and uranium mass concentration in leaching solution with leaching time

由图 3 可知:在浸出初期,浸出液中铀质量浓度可达到较高水平(0.4~0.7 g/L);但随浸出时间延长,铀质量浓度呈逐渐下降趋势;喷淋约 40 d 后,浸出液中铀质量浓度降至 0.1 g/L,这主要有三方面原因:一是酸化期喷淋工艺参数控制未完全达到设计要求;二是易溶铀已被大量浸出,剩下难浸矿物导致铀浸出速率自然下降;三是同期矿石中钙含量升高,在浸出过程中易生成硫酸钙等沉淀物,造成浸出过程中矿堆内部局部板结,影响浸出剂渗透和铀的持续浸出。

为改善堆体渗透性、提升浸出效果,在整个浸出周期内进行了 2 次翻堆操作,矿堆翻堆内部状况如图 4 所示。可知:第 1 次翻堆是在喷淋 41 d 后进行,翻堆后改用广角扇形喷头,其喷洒范围更大、流量分布更均匀,使得浸出剂喷淋量可达 600 m³/d,从而增强了液剂分布均匀性;第 2 次翻堆于喷淋第 50 d 后进行,旨在通过再次物理松动,进一步改善堆体板结、恢复堆体均匀渗透性并评估第 1 次翻堆效果,确认板结区域的消除程度,由图 4(b)可知,此时矿堆内部板结基本溶解、堆体结构更疏松。经翻堆及后期喷淋参数调整,翻堆后浸出液铀质量浓度出现明显峰值,表明翻堆使矿堆内部板结物较好溶解,促进了浸出剂与未反应矿物接触,进而使铀浸出率提升。



a—第 1 次翻堆;b—第 2 次翻堆

图 4 矿堆翻堆内部状况

Fig. 4 Internal conditions of ore heap during turning

浸出液中铀质量浓度与铀累计浸出率随浸出时间的变化如图 5 所示。可知:随浸出时间延长,铀累计浸出率整体呈逐步上升趋势,表明反应过程可持续浸出铀;铀累计浸出率在 2 次翻堆前、后增速均提升,且第 1 次翻堆比第 2 次效果更为明显,说明翻堆操作不仅能在短期内提升浸出液中铀质量浓度,还能对铀的总回收率具有显著促进作用;第 1 次翻堆前,累计浸出率上升较为缓慢,仅 70% 左右,这可能是因为受板结影响,浸出剂难以充分接触包裹态或滞留区域的铀矿物,限制了浸出率上限;第 1 次翻堆后,累计浸出率曲线斜率增大,说明铀浸出速率加快,这是因为板结状况得到缓解,且喷淋条件得到改善,使浸出过程中可被浸出剂接触反应的矿物量增加,进而为提升最终浸出率创造了条件;至浸出后期,累计浸出率曲线逐渐趋于平稳,同时浸出液中铀质量浓度处于较低水平,这充分表明可浸出的铀基本被全部浸出,浸出反应已基本结束。但最终铀累计浸出率超过 100%,这是露天堆浸中的常见表现现象,主要由蒸发浓缩和死液释放 2 个物理过程引发:在露天环境中,水分持续蒸发,收集液体积减少、铀离子浓度被物理浓缩,导致计算出的铀浸出率偏高;翻堆作业会扰动堆体结构,使原本滞留在死区的高浓度铀浸出液集中释放,短期内造成铀浓度异常升高,显著提升了铀的累计浸出率计算值。

铀累计浸出率与累计硫酸用量随浸出时间的变化如图 6 所示。可知:随浸出时间延长,铀累计浸出率与累计硫酸用量均呈升高趋势,且二者变化相似,表明硫酸消耗与铀的浸出过程具有显著的正相关性;在浸出初期,随硫酸用量逐步增加,铀累计浸出率也快速升高,说明该阶段的硫酸主要用于溶解可浸出的铀矿物,进而推动浸出反应持续进行。整个堆浸试验的喷淋时间共计

70 d, 2 次翻堆共计 8 d, 因此喷淋周期共计 78 d, 在此期间,喷淋浸出剂总量达 20 899 m³ (含串堆溶液), 累计硫酸用量为 8.56% (折合 372.5 t)。

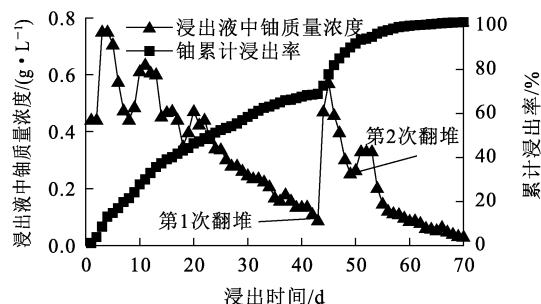


图 5 浸出液中铀质量浓度与累计浸出率随浸出时间的变化

Fig. 5 Variation of uranium mass concentration in leaching solution and cumulative leaching rate of uranium with leaching time

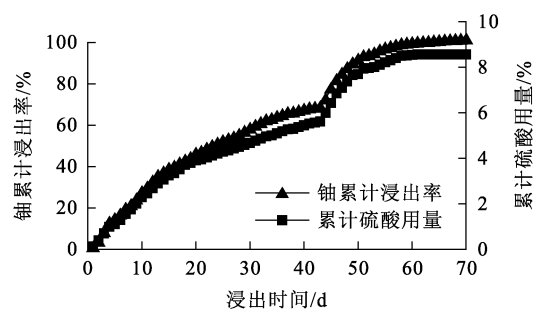


图 6 铀累计浸出率与累计硫酸用量随浸出时间的变化

Fig. 6 Variation of cumulative uranium leaching rate and cumulative sulfuric acid dosage with time

2.4 堆浸尾渣分析

浸出完成后,为获取具有代表性的堆场浸出渣样品,进行取样分析。在矿堆表面均匀布置 4×3 个取样点,针对每个取样点,沿垂直方向从距矿堆顶部 0.7、1.7 和 2.7 m 处进行分层取样,控制各取样点矿石取样量为 20~30 kg。之后将所有样品于 120 ℃ 下烘干,破碎。将同一水平层的 12 个样品等质量合并、充分混匀后进行缩分,最终得到 3 个层复合浸出渣样。之后再用容量法测定这 3 个层复合浸出渣样中铀含量,分析结果见表 6。

表 6 不同浸出渣样品分析结果

Table 6 Analysis of different leaching residue samples

取样深度/m	铀品位/%	渣计铀浸出率/%
0.7	0.009 9	93.73
1.7	0.011 3	92.85
2.7	0.013 3	91.58
平均	0.011 5	92.72

由表 6 可知:3 个层复合浸出渣样的平均渣计铀浸出率达 92.72%,尾渣中铀平均品位降至 0.011 5%,表明减小矿石粒度可提升铀浸出率,使尾渣中的铀品位更低。根据浸出动力学经典理论(如收缩核模型),矿石粒度减小主要通过两种机制强化浸出过程:一是增加固液反应表面积,使浸出剂与矿石颗粒能够更充分地接触,提高浸出反应发生的概率和速率;二是缩短浸出剂与产物离子在颗粒内的扩散路径,降低扩散阻力,加快浸出剂向矿石内部、产物离子向外部溶液的扩散速度,从而在整体上显著强化铀浸出过程。

2.5 工艺性能对比分析

为评估细粒级铀矿石堆浸工艺的改进效果,将其与处理同类矿石的现有常规堆浸生产工艺进行系统对比,结果见表 7。

表 7 试验堆与生产堆堆浸主要技术指标对比 Table 7 Comparison of main technical parameters for heap leaching between pilot heap and production heap		
技术指标	生产堆	试验堆
堆浸矿石量/t	4 500	4 350
矿石铀品位/%	0.190	0.158
入堆矿石粒度/mm	—8	—4
瞬时喷淋强度/(L·h ⁻¹ ·m ²)	15~30	15~30
酸用量/%	8	8.56
浸出时间/d	300	78
总液固体积质量比/(m ³ ·t ⁻¹)	10:1	4.86:1
尾渣铀品位/%	0.019	0.011 5
渣计铀浸出率/%	90.0	92.72

由表 7 可知,细粒级铀矿石堆浸工艺的多个技术指标均更优:一是浸出效率与资源回收率显著提升。通过“细粒级破碎(—4 mm)→优化造粒→可控翻堆堆浸”的协同技术路线,最终渣计铀浸出率由现有生产工艺的 90%提升至 92.72%,相应地尾渣铀品位大幅降低,这标志着对矿石中有价金属的提取更为彻底。二是生产周期显著缩短。该工艺虽包含必要的翻堆操作时间(8 d),但总浸出周期仍较传统工艺的浸出周期(300 d)缩短约 70%。这对于扩大产能或节约固定资产投资具有重大意义。三是溶液消耗与处理成本大幅降低。总液固体积质量比从 10 m³/t 降至 4 m³/t,这使得浸出液处理负荷降低约 30%,后续需要处理的废水总量减少约 20%,与此同时,溶液输送系

统的功耗也随之下降,在极大程度上降低了溶液的消耗与处理成本,这不仅直接减少了试剂与能源成本,也在一定程度上减轻了环保压力。

综上所述,与现有生产实践相比,本研究提出的精细化细粒级堆浸工艺,在“提取效率、生产强度、运营成本”三个维度实现了协同优化。该技术路径可为同类低品位矿石或难处理资源的高效、经济、环境友好型开发提供具有明确工业应用前景的解决方案。

3 结论

针对铀矿堆浸工艺存在浸出周期长、浸出效率低等问题,开展了细粒级矿石现场喷淋堆浸工业优化试验研究,结论如下:

- 1)提出采用闭路破碎筛分工艺,能有效控制产品粒度,降低破碎产品中粒度+4 mm 矿石占比,有利于后续浸出对粒度的要求。
- 2)控制入料粒度为—4 mm、转筒造粒机转速为 30 r/min、矿石进料量为 40 t/h 时,造粒后矿石成球效果好,球团颗粒密实,粒径分布均匀。
- 3)通过减小入堆矿石中粗粒级矿石(+4 mm)占比,进一步降低了尾渣铀品位、提高渣计铀浸出率。其中尾渣铀品位降低至 0.011 5%,渣计铀浸出率达 92.72%,喷淋周期为 78 d,液固体积质量比为 4.86:1,硫酸用量为 8.56%。
- 4)相较于传统粗粒级堆浸工艺,细粒级铀矿石堆浸工艺在渣计铀浸出率提升至 92.72%的同时,总体浸出周期缩短约 70%,并降低约 30%浸出液处理负荷,使后续废水总量减少约 20%,能大幅提高资源利用率,节约生产成本,提高企业经济效益。该法为其他铀矿石处理提供了一条新途径。

参考文献:

[1] MAHAMBA K, MASAMVU J M, MABWE N, et al. Gold recovery in heap leaching of old mine tailings using chloride solution[J]. JOM, 2025, 77(9): 6852-6861.

[2] YIN J Q, ZENG D D, TIAN J, et al. Mass transfer in heap leaching of weathered crust elution deposited rare earth ore with Al₂(SO₄)₃ solution[J]. Journal of Rare Earths, 2024, 42(6): 1175-1181.

[3] MENG X Y, ZHAO H B, ZHAO Y, et al. Heap leaching of ion adsorption rare earth ores and REEs recovery from leachate with lixiviant regeneration[J]. Science of the Total Environment, 2023, 898: 165417.

[4] 夏源,涂光远,廖骐,等. 黄金矿山生态修复:现状、挑战与展

- 望[J]. 黄金, 2024, 45(12): 1-7.
- XIA Yuan, TU Guangyuan, LIAO Qi, et al. Ecological restoration of gold mines: current status, challenges, and prospects[J]. Gold, 2024, 45(12): 1-7.
- [5] LEÓN F, ROJAS L, BAZÁN V, et al. A systematic review of copper heap leaching: key operational variables, green reagents, and sustainable engineering strategies[J]. Processes, 2025, 13(5): 1513.
- [6] 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 Metallurgy, 2025, 44(3): 35-40.
- [7] 杨润生, 原渊. 复杂组分砂岩铀矿的浸出工艺优化研究[J]. 湿法冶金, 2025, 44(4): 482-488.
- YANG Runsheng, YUAN Yuan. Optimization of leaching process for complex component sandstone uranium ore[J]. Hydrometallurgy of China, 2025, 44(4): 482-488.
- [8] 甘国贤, 马保中, 张文娟, 等. 低品位铜镍钴氧化矿堆浸扩大试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(12): 1-8.
- GAN Guoxian, MA Baozhong, ZHANG Wenjuan, et al. Expansion test on heap leaching of low-grade copper-nickel-cobalt oxide ores[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(12): 1-8.
- [9] RODRÍGUEZ J E, RAZO I, LÁZARO I. Water footprint for mining process: a proposed method to improve water management in mining operations[J]. Cleaner and Responsible Consumption, 2023, 8: 100094.
- [10] ROBERTSON S W, PETERSEN J. Modelling unsaturated dual-phase flow through crushed ores for heap leaching[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2024, 124(12): 731-736.
- [11] JIANG Q, JIA M T, YANG Y H, et al. Control of seepage characteristics in loose sandstone heap leaching with staged particle sieving-out method[J]. Minerals, 2024, 14(10): 1039.
- [12] JIA Y, RUAN R M, QU J K, et al. Multi-scale and trans-disciplinary research and technology developments of heap bioleaching[J]. Minerals, 2024, 14(8): 808.
- [13] 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(11): 5845-5855.
- [14] WANG L M, YIN S H, WU A X. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123705.
- [15] 陈永贵, 文子豪, 付俊, 等. 基于重金属形态分析的堆浸场下游农田土污染风险评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(7): 1084-1092.
- CHEN Yonggui, WEN Zihao, FU Jun, et al. Risk Assessment of farmland soil pollution downstream of pile leaching site based on heavy metal form analysis[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2025, 53(7): 1084-1092.
- [16] 曾毅君. 酸法制粒堆浸研究的现状、原理与实践[J]. 铀矿冶, 2004, 23(4): 175-181.
- ZENG Yijun. Acid agglomeration heap leaching: present status, principle and applications[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23(4): 175-181.
- [17] ZHARMENOV A A, KUSHAKOVA L B, SIZIKOVA N V, et al. Heap leaching of copper in Kazakhstan: practice, problems, and prospects[J]. Metallurgist, 2025, 68(12): 1941-1948.
- [18] XU J Y, QIN S C, ZHENG C Z, et al. Study on column leaching behavior of low-grade high calcium and magnesium copper ore[J]. Minerals, 2024, 14(8): 822.
- [19] HAO X D, LIU X D, ZHU P, et al. Responses of bacterial community to potential heap construction methods of fine-grained copper tailings in column bioleaching system[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(6): 1796-1805.
- [20] 赵娜, 臧文优, 王杰, 等. 某低品位微细粒氧化型金矿石的堆浸技术研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(4): 116-118.
- ZHAO Na, ZANG Wenyu, WANG Jie, et al. Technical study on gold extraction by heap leaching for low-grade microfine grained gold oxide ore[J]. Modern Mining, 2021, 37(4): 116-118.
- [21] WANG X, YANG H Y, ZHANG Q, et al. Effect of particle size on bioleaching of low-grade nickel ore in a column reactor[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(5): 1333-1341.
- [22] CHEN K Q, YIN W Z, RAO F, et al. Agglomeration of fine-sized copper ore in heap leaching through geopolymerization process[J]. Minerals Engineering, 2020, 159: 106649.
- [23] 陈威, 唐惠阳, 尹升华. 堆浸体系内微细颗粒在孔隙内迁移和附着规律[J]. 工程科学学报, 2024, 46(6): 994-1003.
- CHEN Wei, TANG Huiyang, YIN Shenghua. Study on migration and adhesion of fine particles in the pores of a heap leaching system[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(6): 994-1003.
- [24] HUANG Q Y, JIAN L F, HE J S, et al. DEM simulation of aggregation and growth behavior of iron ore particles in high shear granulation process[J]. Powder Technology, 2025, 466: 121409.

Spray Heap Leaching of Fine-Grained Uranium Ore

SUN Jiahong, SHI Liuyin, JIA Xiumin, MA Junnan, XIA Qingyin, GAO Shang

(*Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China*)

Abstract: Aiming at the issues of prolonged leaching cycles and low efficiency in the existing heap leaching process at a uranium mine, an on-site industrial optimization heap leaching test was conducted on fine-grained ore. The optimal process conditions and key parameters of key stages, including ore crushing, wet granulation, and spray heap leaching, on uranium extraction were systematically investigated. The results demonstrate that the closed-circuit crushing and screening process effectively regulates the feed particle size to below 4 mm. Excellent pelletisation is achieved under the conditions of drum granulator speed of 30 r/min and ore feed rate of 40 t/h. Heap leaching tests confirm that this optimised process successfully reduces the uranium from 0.158% to 0.0115%, achieving the uranium leaching rate of 92.72%, under the conditions of liquid volume to solid mass ratio of 4.86 : 1, sulfuric acid consumption of 8.56%, and spray cycle of 78 d.

Key words: uranium; fine-grained uranium ore; sulfuric acid; crushing; granulation; spray; heap leaching