

拌酸熟化—低温焙烧协同强化酸法堆浸低品位铀钼矿

马郡男¹, 夏庆银¹, 贾秀敏¹, 师留印¹, 郭尔华¹, 王金辉², 吴汶骏²

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:针对洁源低品位铀钼矿堆浸渗透性差、钼浸出率低及搅拌浸出固液分离困难等问题,提出“拌酸熟化—低温焙烧”协同强化酸法堆浸的工艺路径,并在柱浸条件下优化了拌酸浓度、熟化温度与时间、焙烧温度与时间及喷淋强度等关键参数。综合考虑能耗与工艺效果,推荐条件为:矿石粒度—1 mm,拌酸质量分数 12%, 90 °C 熟化 3 h, 300 °C 焙烧 30 min, 酸化水质量浓度 10 g/L, 喷淋强度 76 L/(m²·h)。在该条件下,钼渣计浸出率可达 82.89%, 尾渣钼品位降至 0.038%、铀品位降至 100.33×10⁻⁶。多批次矿石验证试验结果表明,该工艺流程对品位和性质波动的铀钼矿石具有一定适应性,不同低品位铀钼矿的钼浸出率稳定在 72.51%~77.37%,能够实现工艺目标。研究结果可为低品位复杂铀钼矿资源的高效提取提供技术支撑。

关键词:低品位铀钼矿;钼;浸出;拌酸熟化;低温焙烧;酸法堆浸

中图分类号:TF803.21;TF841.2;TL212

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)04-0492-08

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.005

堆浸因流程相对简单、投资与运行成本较低,常用于处理低品位矿及难选矿,同时可与萃取、电积/沉淀等过程耦合,从而形成连续化生产体系^[1-3]。但对于含泥量高或细粒级占比大的矿石,堆内易发生细泥迁移、孔道堵塞与板结,进而造成渗透性快速衰减,继而带来浸出周期延长、液固比增大和浸出率降低等弊端^[4]。为改善堆浸渗透性与传质条件,工业上常采用造粒团聚^[5]、拌酸熟化^[6-7]、表面活性剂助渗^[8]等预处理手段,其中“拌酸—熟化—堆浸”在铀等放射性金属与铜、锌等有色金属的湿法冶金中已形成较为成熟的工程实践,相关研究表明,拌酸熟化与造粒可通过增强颗粒强度、改善孔隙结构和渗流均匀性,显著提高矿堆渗透性、缩短浸出周期并提升金属回收率^[3-4]。

针对低品位铀钼矿,早期曾尝试单钼矿与铀钼矿配矿以实现综合回收,但配矿后铀品位过低,不仅难以经济回收,还会造成铀资源浪费。而传统酸法加温搅拌浸出工艺存在生产成本低、固液

分离难度较大等问题,导致低品位铀钼矿长期堆存而难以有效利用。为此,研究人员围绕低品位铀钼矿先后开展了氧化焙烧^[9-10]、拌酸常温/高温熟化^[4]及浸出液铀钼萃取分离^[11-12]等系列研究,扩大试验结果表明,铀、钼浸出率分别为 60%和 72%^[4,13]。但该工艺流程在工程化应用中仍受到两方面限制:一是对矿石性质变化的适应性不足,随开采深度增加,矿石性质改变,部分矿石出现钼浸出率急剧下降现象;二是喷淋过程中矿石泥化严重,矿堆渗透性差、表面积液明显,喷淋强度远低于设计预期,且尾渣含水率高导致卸堆困难。上述问题表明,仅依赖单一熟化或常规堆浸强化,难以在复杂含泥、细嵌布、强氧化低品位铀钼矿体系中同时实现高效浸出与稳定渗流。

基于上述工程痛点,针对洁源低品位铀钼矿,提出在拌酸熟化基础上叠加低温焙烧的协同强化新思路。即在拌酸熟化阶段利用酸-矿反应与团聚效应促进细粒黏附与造粒、提升颗粒强度并形

收稿日期:2026-01-26; **修订日期:**2026-04-29

基金项目:国家自然科学基金(42407333);中核铀业青年创新基金(NKLUR-2024-QN-014);北京市科协青年人才托举工程(BYESS2024071)。

第一作者简介:马郡男(1998—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为铀矿水冶技术。

通信作者简介:夏庆银(1995—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为环境地球化学、湿法冶金。

成相对稳定的孔隙结构^[4];在低温焙烧阶段则通过脱除矿粒吸附水/部分层间水、促进包裹体结构松动与孔隙连通度提升^[6],进一步抑制泥化、改善床层渗透性并增强浸出剂对难浸相的可达性,从而实现钼的高效浸出。基于上述工艺思路,通过多因素柱浸试验系统考察了拌酸浓度、熟化温度与时间、焙烧温度与时间及喷淋强度等关键参数对钼浸出的影响,以确定工艺参数适宜范围与推荐条件,并结合矿物学赋存特征深入讨论了协同强化机制及工程放大要点,旨在为低品位铀钼矿资源的经济化、规模化开发提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 低品位铀钼矿表征及预试验

洁源低品位铀钼矿为中低温热液斑岩型铀钼矿,赋矿岩石为火山碎屑岩,氧化程度高、矿泥含量多,目的矿物嵌布极其微细且以胶状矿物为主,可浮性差;主要矿物包括褐铁矿、黄铁矿、钼钙矿与铀钼矿,脉石矿物以石英、黏土矿物和长石为主^[14-15]。该类矿石原矿氧化率可达 54.2%,钼主要以氧化物形式赋存于褐铁矿中,约占总钼量的 80%^[14,16]。褐铁矿多呈细脉与微细脉充填于裂隙中,粗磨难以单体解离,而细磨又易泥化^[17],会在湿法回收铀、钼过程中形成“矿物相难浸出”与“矿堆渗透性难维持”的双重瓶颈。遵循代表性原则,试验用矿石取自洁源露天矿区不同部位的低品位铀钼矿,涵盖不同堆位与不同批次的矿石差异,最终选取 6 个不同样点矿石作为研究对象(表 1),以尽可能采用不同品位矿石进行试验。

表 1 低品位铀钼矿样品信息
Table 1 Summary of information on low-grade uranium-molybdenum ore samples

混合样 批次	钼品位/%	铀品位/10 ⁻⁶	试验用途
第 1 批	0.178	122	预试验及工艺适应性验证
第 2 批	0.263	123	预试验及工艺适应性验证
第 3 批	0.199	138	参数优化试验
第 4 批	0.145	91	预试验及工艺适应性验证
第 5 批	0.124	128	预试验及工艺适应性验证
第 6 批	0.203	115	预试验及工艺适应性验证

对采集的矿石样品,利用颚式破碎机与对辊破碎机逐级破碎后充分混匀,按缩分程序制备试

样,用于后续柱浸试验与表征分析。在参数系统优化试验中,选用第 3 批混合样作为主试样,其余样点样品用于预试验及工艺适应性验证,在保证试验可比性的同时,兼顾结论的工程适用性与代表性。

针对采集的低品位铀钼矿,选取代表性样品制备矿物光片,用于矿物性质研究。采用自动矿物分析(AMICS)及扫描电子显微镜(SEM)对低品位铀钼矿的矿物组成与赋存特征进行了系统表征^[18]。

前期预试验采用 12%的硫酸和 10%的水拌矿,在 90℃下熟化后于 300℃下焙烧,之后进行喷淋浸出,结果见表 2。可知,矿石粒度由—3 mm降至—1 mm,钼渣计浸出率由 71.40%提升至 80.81%,铀渣计浸出率由 31.54%提升至 34.36%,说明对该低品位铀钼矿石而言,提高破碎细度有利于暴露有用矿物与缩短扩散路径。但细粒级增加亦会带来泥化与渗透性风险,造成堆内堵塞与板结,并导致后续固液分离困难的问题。因此,本浸出工艺研究的核心并非要求矿石粒径越细越好,而是在最优破碎粒度下通过拌酸熟化与焙烧热处理,实现“细粒受控、孔隙可达、渗透可维持”的结构重构。后续工艺参数优化试验中,矿石粒度均确定为—1 mm。

表 2 矿石粒度对柱浸效果的影响预试验结果
Table 2 Preliminary test results for effect of ore particle size on column leaching performance

组别	粒度/ mm	钼品位/%	铀品位/10 ⁻⁶	钼渣品位/%	铀渣品位/10 ⁻⁶	钼渣计浸 出率/%	铀渣计浸 出率/%
1	—1	0.199	138	0.042 5	100.33	80.81	34.36
2	—2	0.199	138	0.053 2	104.33	76.24	32.50
3	—3	0.199	138	0.063 3	104.67	71.40	31.54

1.2 拌酸熟化试验

为改善低品位铀钼矿细泥迁移导致的孔道堵塞与渗透性衰减问题,采用“拌酸—熟化”预处理方法,通过酸-矿反应与团聚造粒作用提高矿粒强度与堆体孔隙稳定性,并在柱浸条件下对拌酸浓度、熟化温度与时间参数进行优化。拌酸熟化试验采用单因素法,即在考察某一因素时,其他条件保持不变,以“渣计浸出率(Mo、U)+渗流可操作性(是否堵柱/积液)”作为综合判据。

试验方法:取—1 mm 矿样 2 kg,分别加入一定量浓硫酸,拌酸均匀后再拌入 10% 的常温水,随后在一定温度下熟化一定时间;熟化后样品在 300 ℃ 下低温焙烧 30 min,之后喷淋 10 g/L 酸化水,在总液固体积质量比 2 : 1、喷淋强度 76 L/(m² · h)、喷淋时间 20 h 条件下浸出,计算钼、铀、铁渣计浸出率。

1.3 低温焙烧试验

为进一步解决熟化后矿粒因吸附水/孔隙水引起的泥化与渗流不稳问题,并促进包裹体结构松动与孔隙连通度改善,在拌酸熟化基础上引入低温焙烧工序,并在柱浸条件下对焙烧温度与焙烧时间进行优化。焙烧试验同样采用单因素法,在优化后的拌酸熟化条件下,单一改变焙烧参数,其他柱浸参数保持一致。

试验方法:取—1 mm 矿样 2 kg,先在优化后拌酸熟化条件下预处理,再在一定温度下焙烧一定时间。焙烧结束后,在适宜条件下喷淋柱浸,并计算钼、铀、铁渣计浸出率。

1.4 喷淋柱浸试验

经过拌酸熟化—低温焙烧预处理后的矿石整体渗透性已得到明显改善,但进入喷淋柱浸阶段,喷淋强度还会直接影响矿堆的渗流状态、传质效率及浸出周期,因此在该阶段以“保证渗流稳定与缩短浸出周期”为目标,重点考察喷淋强度对柱浸过程的影响。喷淋参数以喷淋强度(L/(m² · h))表征,并通过调节进液流速实现。

试验方法:取—1 mm 矿样 2 kg,在优化后拌酸熟化及低温焙烧条件下进行预处理,再以 10 g/L 酸化水进行喷淋柱浸,在总液固体积质量比为 2 : 1 条件下,将喷淋强度分别设置为 22、42、59、76 L/(m² · h),记录浸出时间及渗流现象(如积液/堵柱)。

1.5 多批次验证试验

为验证最优参数组合对矿石品位波动的适应性,除了参数优化试验中的第 3 批混合样,另选取来自不同堆位/批次的其他 5 组低品位铀钼矿样品(表 1)开展验证试验。验证试验采用与优化结论一致的工艺路线与关键参数,对各批次的钼渣计浸出率、铀渣计浸出率与尾渣品位进行对比,以评价工艺稳定性与工程可实施性。

2 试验结果与讨论

2.1 低品位铀钼矿性质

基于 SEM 观察(图 1)及 AMICS 分析(表 3)结果可知,洁源低品位铀钼矿矿物组成复杂、脉石占比高且含泥量(黏土矿物)显著;石英、长石等铝硅酸盐脉石合计占比超过 75%,伊利石、高岭石等黏土矿物约占 20%,总体脉石矿物占比达 95% 以上,而有用矿物占比仅约 5%。该矿石特征决定了堆浸过程黏土/细泥在酸性浸出液作用下易分散迁移,诱发孔道堵塞与板结,导致渗透性快速衰减,造成严重的水力学受限。

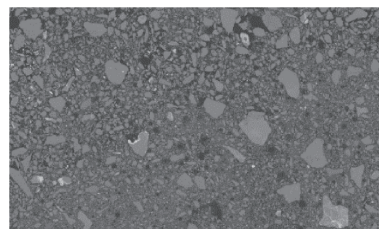


图 1 低品位铀钼矿样品的 SEM 照片

Fig. 1 SEM image of low-grade uranium-molybdenum ore sample

表 3 自动矿物分析定量结果
Table 3 Quantitative results of advanced mineral identification and characterization system %

石英	伊利石	正长石	高岭石	黑云母	褐铁矿	钠长石	黄钾铁矾
67.50	14.39	6.52	4.59	2.81	2.40	1.22	0.57

从钼赋存形态看,除辉钼矿等硫化物外,更关键的是大量钼与褐铁矿等铁氧化物/氢氧化物密切伴生或赋存其中,这对浸出剂的有效接触与氧化—浸出提出了更高要求。工艺矿物学分析结果进一步表明,矿石中约 80% 的钼主要赋存在褐铁矿中,说明“先解离褐铁矿、再释放钼”是提升钼浸出率的关键路径。

2.2 拌酸熟化试验参数的优化

2.2.1 拌酸浓度对柱浸的影响

在熟化温度 90 ℃、熟化时间 3 h 条件下,考察拌酸浓度对低品位铀钼矿柱浸的影响,结果如图 2 所示。可以看出:拌酸浓度由 8% 增至 10% 时,钼渣计浸出率由 68.53% 提升至 80.08%;拌酸浓度大于 10% 后,钼渣计浸出率提升幅度较小,趋于稳定;铀渣计浸出率则随拌酸浓度增大而

小幅升高,当拌酸浓度由 8% 增至 14% 时,钼渣计浸出率由 31% 提升至 35%。

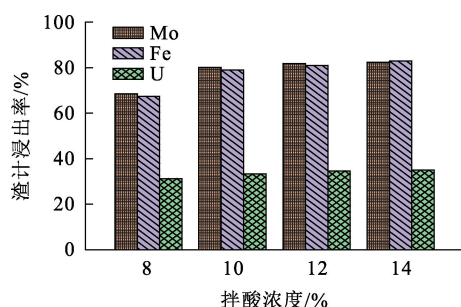


图 2 拌酸浓度对低品位铀钼矿柱浸的影响

Fig. 2 Effect of mixing-acid concentration on column leaching of low-grade uranium-molybdenum ore

结合工艺矿物学结果,低品位铀钼矿中的钼主要赋存在褐铁矿中,约占总钼量的 80%,因此提高钼浸出率的关键在于促进褐铁矿的解离以释放钼。从图 2 看出,拌酸浓度由 8% 增至 14% 时,铁渣计浸出率由 67.44% 提升至 82.91%,其变化趋势与钼浸出率基本一致,这也进一步印证了钼浸出受褐铁矿解离程度的控制。而褐铁矿在常温、低酸条件下难以有效解离,通过拌酸熟化工艺可提高局部酸强度与反应程度,从而有利于褐铁矿的解离及钼的浸出。

然而,拌酸浓度并非越高越有利。试验表明,当拌入 16% 的浓硫酸时,矿石颗粒明显变硬、黏度增大,易发生板结,并在喷淋过程中出现柱体堵塞现象,因此该条件未纳入与 8%~14% 拌酸浓度梯度之间的规律性对比。综合考虑浸出效果与渗透稳定性,确定低品位铀钼矿的适宜拌酸浓度为 12%。在此条件下,钼浸出率已接近稳定平台,既可保持较高浸出水平与良好的运行可控性,又能避免高酸条件下板结堵塞的风险。

2.2.2 熟化温度的影响

在拌酸浓度为 12%、熟化时间 3 h 条件下,考察熟化温度对低品位铀钼矿柱浸的影响,结果如图 3 所示。可以看出:熟化温度由 50 °C 升至 70 °C 时,钼渣计浸出率逐步提高,由 73.65% 升至 79.17%;继续升高熟化温度至 90 °C 时,钼渣计浸出率提升至 80.81%,提升幅度较小,后趋于稳定;钼渣计浸出率随熟化温度升高,变化不大,在 31%~35% 之间波动。试验过程中观察到熟化温度与制粒矿石强度密切相关:温度偏低时,矿粒强度较差,浸出后

完好率不高,易影响矿堆渗透性;而适当升高熟化温度有利于矿粒结构稳定,浸出过程更易保持通液。综合考虑钼浸出效果、矿粒完好率及渗透性等因素,确定低品位铀钼矿的熟化温度以 90 °C 为宜。

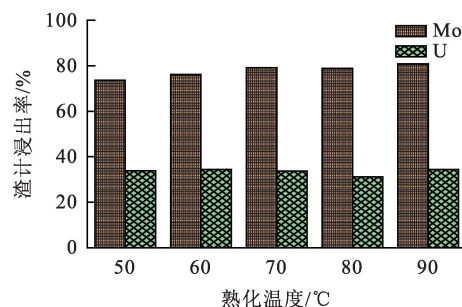


图 3 熟化温度对低品位铀钼矿柱浸的影响

Fig. 3 Effect of curing temperature on column leaching of low-grade uranium-molybdenum ore

2.2.3 熟化时间

在拌酸浓度为 12%、熟化温度 90 °C 条件下,考察熟化时间对低品位铀钼矿柱浸的影响,结果如图 4 所示。可以看出:熟化时间由 1 h 延长至 3 h 时,钼渣计浸出率持续提高,由 74.41% 升至 78.94%;继续延长熟化时间,钼渣计浸出率提升幅度不大,趋于稳定;钼渣计浸出率随熟化时间延长,变化不大,基本在 32%~38% 范围内波动。考虑到熟化时间越长能耗越高,同时,熟化超过 3 h 后钼浸出率已稳定在 80% 以上,继续延长熟化时间带来的增益有限,因此确定低品位铀钼矿熟化时间以 3 h 为宜。

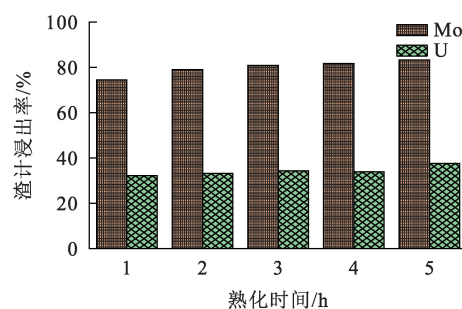


图 4 熟化时间对低品位铀钼矿柱浸的影响

Fig. 4 Effect of curing duration on column leaching of low-grade uranium-molybdenum ore

2.3 低温焙烧试验条件的优化

2.3.1 焙烧温度对柱浸的影响

将矿样在拌酸浓度为 12%、熟化温度 90 °C、熟化时间 3 h 下预处理后,再在不同焙烧温度下

焙烧 30 min, 考察焙烧温度对低品位铀钼矿柱浸的影响, 结果如图 5 所示。

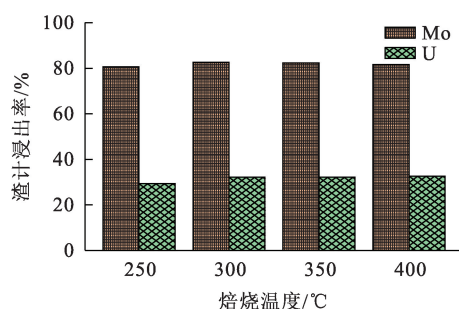


图 5 焙烧温度对低品位铀钼矿柱浸的影响

Fig. 5 Effect of roasting temperature on column leaching of low-grade uranium-molybdenum ore

由图 5 看出, 焙烧温度在 250~400 °C 考察范围内, 铀、钼渣计浸出率变化均不大; 钼渣计浸出率维持在 80.65%~82.58%, 铀渣计浸出率维持在 29.31%~36.61%。试验过程中发现: 焙烧温度过低时, 矿石未完全烧干, 喷淋时渗透性差, 易堵柱; 此外, 焙烧温度偏低时矿石氧化不彻底, 易挥发成分逸出有限, 脱水不充分, 矿石孔隙结构改善不明显, 渗透性提升较弱; 而随焙烧温度升高, 附着在矿粒表面的氧能更有效地向颗粒内部扩散, 挥发成分大量逸出, 形成较多连通孔隙且无明显烧结, 颗粒形态相对稳定, 有利于浸出剂渗透与传质。因此, 为避免矿石未烧干导致堵塞, 并防止过度烧结引起孔隙减少及渗透性下降, 确定低品位铀钼矿焙烧温度以 300 °C 为宜。

2.3.2 焙烧时间的影响

将矿样在拌酸浓度为 12%、熟化温度 90 °C、熟化时间 3 h 下预处理后, 再在 300 °C 条件下进行低温焙烧, 考察焙烧时间对低品位铀钼矿柱浸的影响, 结果如图 6 所示。

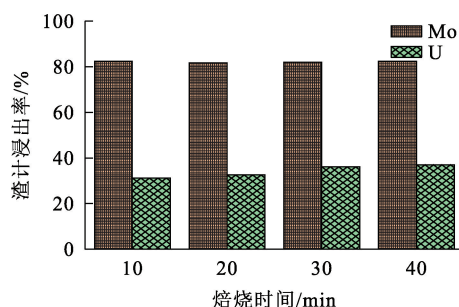


图 6 焙烧时间对低品位铀钼矿柱浸的影响

Fig. 6 Effect of roasting duration on column leaching of low-grade uranium-molybdenum ore

由图 6 看出: 焙烧时间对钼浸出率影响不大, 在 10~40 min 范围内, 钼渣计浸出率均维持在 81.71%~82.47% 之间, 焙烧 10 min 以上钼浸出率即可达 82% 左右; 铀渣计浸出率基本在 31.23%~37.06% 之间波动。铀、钼浸出率对焙烧时间虽不敏感, 但充分焙烧对柱浸渗流稳定性影响显著。试验过程中发现: 未经焙烧或者焙烧不充分(即焙烧时间较短)时, 喷淋后柱内矿石沉降严重且易出现堵塞; 焙烧时间偏短时, 矿石内部矿物分解与孔隙形成不充分, 渗透性难以达到较佳状态; 而随焙烧时间延长, 矿物分解更彻底、颗粒结构更稳定, 既不易因未分解物质残留影响溶液流通, 也能较好维持颗粒机械强度; 但焙烧时间过长, 会加剧热应力作用, 使颗粒过度破碎产生细粉, 柱浸时细粉填充孔隙反而导致堵塞, 使渗透性下降。综合考虑浸出效果、渗透性稳定及工业化过程风险控制等因素, 确定低品位铀钼矿焙烧时间以 30 min 为宜。

2.4 喷淋强度对柱浸的影响

将矿样在优化拌酸熟化—低温焙烧条件(拌酸浓度为 12%, 熟化温度 90 °C, 熟化时间 3 h, 焙烧温度 300 °C, 焙烧 30 min)下预处理后, 再以 10 g/L 酸化水进行喷淋柱浸, 在总液固体积质量比为 2:1 条件下, 考察喷淋强度对低品位铀钼矿柱浸的影响, 结果如图 7 所示。

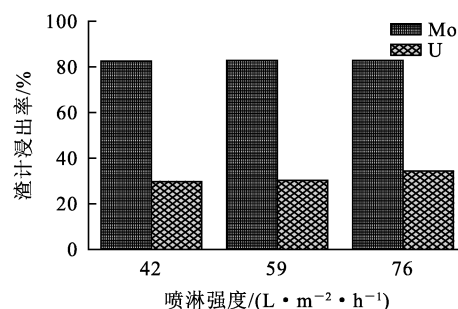


图 7 喷淋强度对低品位铀钼矿柱浸的影响

Fig. 7 Effect of sprinkling intensity on column leaching of low-grade uranium-molybdenum ore

由图 7 看出, 喷淋强度在 42~76 L/(m²·h) 范围内, 钼渣计浸出率均保持在 82% 左右。需要注意的是, 喷淋强度过低或过高均会带来运行风险。试验中发现: 当喷淋强度为 22 L/(m²·h) 时, 出现明显积液和堵柱现象, 因此图中未给出, 这可能与浸出液黏度较大、流动性较差有关。此外, 当

喷淋强度过大、超出矿堆的渗透能力上限时,同样可能引发局部积液和渗流不稳定。综合考虑浸出效率、运行稳定性及浸出周期等因素,确定低品位铀钼矿柱浸的喷淋强度以 76 L/(m²·h)为宜。

2.5 最优工艺条件及适应性验证

在多因素优化基础上,确定“拌酸熟化—低温焙烧”酸法柱浸最优条件为:矿石粒度—1 mm,拌酸浓度为 12%,熟化温度 90 ℃,熟化时间 3 h,焙

烧温度 300 ℃,焙烧时间 30 min,酸化水质量浓度 10 g/L、总液固体积质量比为 2:1,喷淋强度 76 L/(m²·h)。洁源低品位铀钼矿矿石性质波动明显且分布规律性不强,为验证该工艺对矿石的适应性,在上述最优条件下,对主试样(第 3 批混合样)及其他 5 个矿样(钼品位 0.124%~0.263%,铀品位(9.1~12.8)×10⁻⁵)进行适应性验证试验,结果见表 4。

表 4 不同批次矿样的铀、钼浸出结果
Table 4 Uranium and molybdenum leaching results of different batch ore samples

矿样批次	矿样 质量/g	矿样中钼 品位/%	矿样中铀 品位/10 ⁻⁶	浸出 时间/h	渣质量/g	尾渣中钼 品位/%	尾渣中铀 品位/10 ⁻⁶	钼渣计 浸出率/%	铀渣计 浸出率/%
第 1 批	2 000	0.178	122	20	1 780.53	0.046	63.28	76.99	53.82
第 2 批	2 000	0.263	123	20	1 800.22	0.117	71.34	59.96	47.79
第 3 批	2 000	0.199	138	20	1 805.60	0.038	100.33	82.89	34.36
第 4 批	2 000	0.145	91	20	1 812.23	0.039	31.00	75.82	69.00
第 5 批	2 000	0.124	128	20	1 842.57	0.037	69.67	72.51	49.85
第 6 批	2 000	0.203	115	20	1 815.16	0.051	58.33	77.37	53.97

由表 4 看出:主矿样(第 3 批矿样)的钼渣计浸出率可达 82.89%,尾渣中钼品位降至 0.038%、铀品位降至 100.33×10⁻⁶;除主矿样外,第 2 批样品因“泥少、块状为主,”导致钼浸出率偏低(59.96%),而其他 4 个批次钼渣计浸出率为 72.51%~77.37%,表明该工艺流程对原矿品位与性质波动具有适应性。此外,在验证试验过程中发现,各批次矿堆在柱浸过程中渗透性总体良好;经计算,总酸耗约为 17%(拌酸及喷淋使用酸之和),且该流程能够缓解常规搅拌浸出固液分离困难的问题,从而为后续工程放大提供可操作性更强的工艺路径。

3 结论

采用“拌酸熟化—低温焙烧”协同强化酸法堆浸低品位铀钼矿具有可行性。该工艺对不同品位和性质的铀钼矿石适应性较好,喷淋时矿堆渗透性良好,矿石几乎无泥化现象,钼浸出率为 82.89%。该工艺能有效解决洁源铀钼矿预处理加工难度大、资源利用经济性差、铀钼浸出率低及矿石渗透性差等技术瓶颈问题,可直接服务于该地区低品位铀钼矿的资源开发。除含钼铀矿外,我国尚存在大量闲置的其他低品位伴生及共生铀

资源,该工艺也可为提高该类资源的利用率及降低水冶工艺成本提供技术参考。

参考文献:

[1] Petersen J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores;a brief overview[J]. Hydrometallurgy,2016,165:206-212.

[2] 王君,胥国龙,陈梅芳,等. 铀提取技术的演进与挑战[J]. 湿法冶金,2026,45(3):273-283.
Wang Jun, Xu Guolong, Chen Meifang, et al. Evolution and challenges of uranium extraction technology [J]. Hydrometallurgy of China,2026,45(3):273-283.

[3] 孙家红,师留印,贾秀敏,等. 细粒级铀矿石喷淋堆浸试验研究[J]. 湿法冶金,2026,45(3):364-373.
Sun Jiahong, Shi Liuyin, Jia Xiumin, et al. Spray heap leaching of fine-grained uranium ore [J]. Hydrometallurgy of China,2026,45(3):364-373.

[4] 阙为民,王海峰,牛玉清,等. 中国铀矿采冶技术发展展望[J]. 中国工程科学,2008,10(3):44-53.
Que Weimin, Wang Haifeng, Niu Yuqing, et al. Development and prospect of China uranium mining and metallurgy [J]. Strategic Study of CAE,2008,10(3):44-53.

[5] 李建华,向秋林,毛拥军. 破碎花岗岩型铀矿石的酸法制粒堆浸[J]. 铀矿冶,2004,23(3):134-137.
Li Jianhua, Xiang Qiulin, Mao Yongjun. Acidic heap leaching with agglomeration for cracked granite uranium ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23 (3):

- 134-137.
- [6] 杨剑飞,师留印,刘会武,等.拌酸熟化法处理某低品位含铀钼矿试验研究[J].铀矿冶,2023,42(1):30-33.
Yang Jianfei, Shi Liuyin, Liu Huiwu, et al. Study on treating low grade uranium-bearing molybdenum ore by acid curing [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(1): 30-33.
- [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] 吴爱祥,艾纯明,王貽明,等.表面活性剂强化铜矿石浸出[J].北京科技大学学报,2013,35(6):709-713.
Wu Aixiang, Ai Chunming, Wang Yiming, et al. Surfactant accelerating leaching of copper ores [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(6): 709-713.
- [9] 刘康,向秋林,师留印,等.铀钼矿硫酸焙烧提取铀钼[J].中国有色金属学报,2019,29(4):858-863.
Liu Kang, Xiang Qiulin, Shi liuyin, et al. U and Mo extraction from U-Mo ore during sulfuric acid roasting process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 858-863.
- [10] 师留印,杨剑飞,赵磊,等.某包裹型铀钼矿沸腾焙烧工艺试验研究[J].铀矿冶,2019,38(3):171-176.
Shi Liuyin, Yang Jianfei, Zhao Lei, et al. Experimental study on fluidized bed roasting of an enclosed type of molybdenum uranium ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(3): 171-176.
- [11] 李大炳,孟晋,康绍辉,等.用分步萃取法从某铀钼矿浸出液中分离回收铀钼[J].铀矿冶,2015,34(3):178-183.
Li Dabing, Meng Jin, Kang Shaohui, et al. Separation and recovery of U-Mo by fractional extraction from leach liquor of one uranmolybdatite ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2015, 34(3): 178-183.
- [12] 孟晋,王洪明,陈儒庆,等.用离子交换法从某铀钼矿浸出液中回收与分离铀钼的研究[J].铀矿冶,2008,27(4):173-177.
Meng Jin, Wang Hongming, Chen Ruqing, et al. Study of comprehensive utilization and separation of U-Mo by ion exchange from lixivium of a uranmolybdatite ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2008, 27(4): 173-177.
- [13] 任志刚,程瑞泉,刘永涛,等.某铀钼矿尾渣特性及浸出工艺研究[J].山东化工,2022,51(20):154-156.
Ren Zhigang, Cheng Ruiquan, Liu Yongtao, et al. Study on characteristics and leaching process of tailings from a uranium molybdenum ore [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(20): 154-156.
- [14] 李随民,焦雪红,韩玉丑,等.冀北两种类型钼矿床地质特征与控矿因素差异性分析[J].地球学报,2023,44(6):967-982.
Li Suimin, Jiao Xuehong, Han Yuchou, et al. Difference analysis of the geological characteristics and ore-control factors of two types of molybdenum deposits in Northern Hebei Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(6): 967-982.
- [15] 付强,王均,贾木欣,等.一种新型钼矿床中钼的赋存状态及对选矿工艺的影响[J].矿产保护与利用,2022,42(1):123-128.
Fu Qiang, Wang Jun, Jia Muxin, et al. The study of Mo occurrence state in a new type of molybdenum deposit and its influence on mineral processing [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(1): 123-128.
- [16] 靳建平,车文芳,何亚清,等.三道庄矿区高氧化率钼矿石的工艺矿物学[J].矿产综合利用,2023(5):93-99.
Jin Jianping, Che Wenfang, He Yaqing, et al. Process mineralogy of molybdenum ore with high oxidation rate in Sandaozhuang mining area [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(5): 93-99.
- [17] 隋杰,苏学斌,刘永涛,等.新质生产力视角下复杂伴生铀钼资源开发技术创新与实践分析[J].铀矿冶,2025,44(2):142-150.
Sui Jie, Su Xuebin, Liu Yongtao, et al. Technological innovation and practice analysis in the development of complex associated uranium molybdenum resources from the perspective of new quality productivity [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2): 142-150.
- [18] 夏庆银,刘龙成,牛玉清,等.相山铀矿及其伴生稀土资源生物浸出研究[J].湿法冶金,2024,43(3):230-235.
Xia Qingyin, Liu Chenglong, Niu Yuqing, et al. Bioleaching of a uranium ore from xiangshan deposit and its associated rare earth resources [J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(3): 230-235.

Synergistic Acid Heap Leaching of Low-Grade Uranium-Molybdenum Ore via Mixing Acid Curing and Low-Temperature Roasting

MA Junnan¹, XIA Qingyin¹, JIA Xiumin¹, SHI Liuyin¹, GUO Erhua¹, WANG Jinhui², WU Wenjun²

(1. *Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC,*
Beijing 101149, China;

2. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing),*
Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor heap leaching permeability, low molybdenum leaching rate and difficult solid-liquid separation in stirring leaching of low-grade uranium-molybdenum ore in Guyuan, a process path of "mixing acid curing-low temperature roasting" synergistic enhanced acid heap leaching was proposed, and the key parameters such as acid concentration, curing temperature and time, roasting temperature and time, and spray intensity were optimized under column leaching conditions. Considering the energy consumption and process effect, the recommended conditions are as follows: ore particle size is -1 mm , acid mixing mass fraction is 12% , curing at $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 3 h , roasting at $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 30 min , acidizing water mass concentration is 10 g/L , spray intensity is $76\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Under these conditions, the leaching rate of molybdenum slag can reach 82.89% , the molybdenum grade of tailings is reduced to 0.038% , and the uranium grade is reduced to 100.33×10^{-6} . The results of multi-batch ore verification test show that the process flow has adaptability to uranium-molybdenum ore with fluctuating grade and property. The molybdenum leaching rate of different low-grade uranium-molybdenum ore is stable at $72.51\%-77.37\%$, which can achieve the process goal. The research results can provide technical support for the efficient extraction of low-grade complex uranium-molybdenum ore resources.

Key words: low grade uranium-molybdenum ore; molybdenum; leaching; mixing acid curing; low temperature roasting; acid heap leaching