

我国铀水冶技术现状与展望

苏学斌^{1,2}, 原 渊^{2,3}, 贾秀敏³, 程 威^{2,3}, 刘 辉³, 邓锦勋^{2,3},
任 宇^{1,2}, 许 影^{2,3}, 胥国龙^{2,3}, 孟运生³, 易爱飞^{2,3}

1. 中核铀业有限责任公司, 北京 100013; 2. 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 北京 101149;
3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149

摘要: 铀是重要的战略资源和能源矿产。随着核电的快速发展, 对天然铀的需求量逐年增加。我国铀水冶技术历经 70 余年发展, 建立了适合我国铀资源特点的技术体系。本文系统地阐述了我国铀水冶工艺的发展历程, 对硬岩型铀矿、砂岩型铀矿、多金属伴生铀矿、煤岩型铀矿等典型铀水冶工艺进行了分析对比。20 世纪 50 年代起步阶段, 硬岩型铀矿主要采用搅拌浸出工艺, 通过矿石破碎-酸法浸出-离子交换的流程提取铀, 但存在能耗高、尾渣量大等缺陷。20 世纪 80 年代以来, 通过堆浸技术推广, 在我国多个铀矿山筑堆喷淋实现铀的渗滤浸出, 南方花岗岩型铀矿回收率提升至 85%。20 世纪 90 年代以来, 北方砂岩型铀矿开发催生原地浸出采铀技术, 通过注液并将浸出剂直接注入矿层, 实现“采铀不见矿”的绿色开采, 资源利用率提高至 75% 以上, 生产成本降低 40%。21 世纪以来, 针对复杂铀矿床的技术攻关取得了系列突破: 在内蒙古鄂尔多斯盆地, 研发的 CO₂+O₂ 地浸技术, 破解了高碳酸盐型砂岩的浸出难题; 在新疆伊犁盆地, 突破了疏干铀矿、多层铀矿协同高效开采技术, 破解了该类型铀资源难以地浸开采的世界级难题, 建成了我国首座千吨级绿色铀矿山; 针对南方硬岩型铀矿, 细粒级精细化堆浸技术使堆浸周期从 300 d 缩短至 70 d; 在多金属伴生铀矿领域, 氧压酸浸技术成功应用于河北沽源难浸原生铀钼矿, 铀浸出率达 90% 以上, 钼浸出率从不足 30% 提升至 80% 以上。当前铀矿建设呈现三大趋势: 一是绿色化升级, 二是智能化转型, 三是集约化发展。未来需重点突破 1000 m 左右地浸开采技术、复杂伴生放射性矿产资源开发技术、智能化铀矿山建设和智能调控等核心技术, 形成新一代铀水冶技术体系, 推动我国铀矿采冶技术向原创技术策源地迈进的重大跨越。

关键词: 天然铀; 铀水冶; 搅拌浸出; 堆浸; 地浸采铀

中图分类号: TD868 文献标志码: A 文章编号: 0253-9950(2025)04-0313-14

doi: 10.7538/hhx.2025.47.04.0313

Review and Prospect of Uranium Hydrometallurgy in China

SU Xue-bin^{1,2}, YUAN Yuan^{2,3}, JIA Xiu-min³, CHENG Wei^{2,3}, LIU Hui³, DENG Jin-xun^{2,3},
REN Yu^{1,2}, XU Ying^{2,3}, XU Guo-long^{2,3}, MENG Yun-sheng³, YI Ai-fei^{2,3}

1. China Nuclear Uranium Corporation, Beijing 100013, China;

2. National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 101149, China;

3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China

Abstract: Uranium is an important strategic resource and energy mineral. With the rapid development of nuclear power, the demand for natural uranium has been increasing year by year. After more than 70 years of iteration and upgrading, China's uranium hydrometallurgy technology has established a first, second,

and third generation uranium hydrometallurgy technology system with Chinese characteristics. This article systematically elaborates on the development process of uranium hydrometallurgy in China, with a focus on analyzing typical uranium hydrometallurgy processes such as hard rock type uranium deposits, sandstone type uranium deposits, polymetallic associated uranium deposits, and coal rock type uranium deposits. In the early stages of the 1950s, hard rock type uranium mines mainly used the agitation leaching process, which extracted uranium through a process of ore crushing acid leaching ion exchange. However, there were drawbacks such as high energy consumption and large tailings volume; in the 1980s, heap leaching technology was promoted, and static leaching of uranium was achieved through heap spraying, which increased the recovery rate of granite type uranium deposits in the south to 85%; in the 1990s, the development of sandstone type uranium mines in northern China has given rise to revolutionary in-situ leaching technology. By injecting leaching agents directly into the ore layer through injection wells, green mining with “no uranium visible” has been achieved, increasing resource utilization to over 75% and reducing production costs by 40%. Since the 21st century, a series of breakthroughs have been made in the technological research and development of complex uranium deposits. In Ordos basin, CO_2+O_2 in-situ leaching technology has solved the problem of high consumption of leaching agents for high carbonate sandstone uranium deposits. In Yili basin, we have broken through the efficient mining technology of sparse uranium mines and multi-layer uranium mines, solved the world-class problem of difficult in-situ leaching of such uranium resources and built China's first thousand ton level green uranium mine. For the hard rock type uranium deposits in the south China, the fine-grained fine heap leaching technology has shortened the heap leaching cycle from 300 days to 70 days. For polymetallic associated uranium deposits in Guyuan, the oxygen pressure acid leaching technology has been successfully applied to the difficult to leach primary uranium molybdenum ore. Uranium leaching rate increased above 90% and molybdenum leaching rate increased from less than 30% to above 80%. The current construction of uranium mining bases presents three major trends: green upgrading, intelligent transformation and intensive development. In the future, it is necessary to focus on breakthroughs in core technologies, such as deep immersion mining technology about 1000 meters, complex cooccurring radioactive mineral resource development technology, and intelligent uranium mine construction and regulation technology. In the future, the fourth generation uranium hydrometallurgy technology system will be established and will promote China's great leap for a source of original technology.

Key words: natural uranium; uranium hydrometallurgy; stir leaching; heap leaching; in-situ leaching of uranium

天然铀是无可替代的紧缺战略资源,也是关键的能源矿产,是核工业发展的重要物质基础。世界天然铀供应主要来源于一次铀源(铀矿山生产),占比约90%,少量来自于二次铀源(铀库存、高浓铀稀释、贫铀尾料再浓缩和乏燃料再处理),占比约10%^[1]。

天然铀的生产工艺主要包括原地浸出、地下开采、露天开采和从副产品中回收等^[2]。根据国际原子能机构(IAEA)和经合组织核能机构(NEA)的数据,2022年,占主导地位的铀生产工艺为原地浸出,占全球产量的60%,主要应用于哈萨克斯

坦、乌兹别克斯坦、澳大利亚和中国;其次为地下开采和露天开采,占全球产量的35%,主要应用于纳米比亚和尼日尔;最后为从副产品中回收,主要应用于澳大利亚和南非,占全球产量的5%。世界天然铀生产量排名前十的国家分别为:哈萨克斯坦、加拿大、纳米比亚、澳大利亚、乌兹别克斯坦、俄罗斯、尼日尔、中国、印度和南非。

1 我国铀矿资源及生产概况

1.1 我国铀矿资源

我国已探明300多个铀矿床,主要分布在江

西、内蒙古、新疆、广东、湖南、广西等省、自治区。铀矿类型较多,但以砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型等“四大类型”为主^[3]。截至2022年,已探明的铀资源量中,砂岩型占52.6%,花岗岩型占20.31%,火山岩型占15.72%,碳硅泥岩型占7.36%,其他类型(伟晶岩型、碱性岩型、泥岩型、煤岩型、磷块岩型等)约占4.01%^[4]。已探明的铀矿床以中、小型规模为主。大型及其以上的矿床占矿床总数的8.7%,资源储量却占58%;中型矿床占矿床总数的20.3%,资源储量占23.8%;小型矿床占矿床总数的71%,资源储量只占18.2%。

我国已探明花岗岩型铀矿床140多个,约占全国铀矿床总数的40%;已探明火山岩型铀矿床80多个,约占铀矿床总数的22%。铀水冶工艺中,通常把花岗岩型和火山岩型铀矿床统称为硬岩型铀矿。硬岩型铀矿床是天然铀资源的重要组成部分。主要特点为:矿床数量多,单个矿床规模小,产状多变且厚度薄,工业类型多样、矿性复杂,矿体埋藏深度一般在100~500 m,大部分矿床只能井下开采,处于偏僻落后的山区,建矿条件差。

我国已探明的砂岩型铀矿床有60余个,约占全国铀矿床总数的18%。矿床多产于大陆内部或其边缘陆相沉积盆地中,与陆缘碎屑沉积建造成因有关,铀矿化赋存于砂岩、细砂岩、粉砂岩中。按其成因的不同可划分为层间氧化带、潜水氧化带、沉积成岩和复合成因等4个亚类^[5]。主要特点为:赋存于中生代陆相沉积盆地(如鄂尔多斯、伊犁盆地),受拉张构造控制,容矿层多为渗透性中粗粒砂岩,发育“泥-砂-泥”结构形成氧化还原障;铀矿化以层间氧化带型为主,形成卷状、板状矿体;资源分布不均,主要位于北方六大盆地中。

1.2 我国铀矿生产

1963年,我国第一批铀矿山与铀水冶厂建成投产。到1980年,先后在湖南、江西、广东、广西、浙江、新疆等16个省市自治区建成一批铀矿山、铀水冶厂和铀矿冶联合企业^[6]。硬岩矿石的水冶工艺流程主要由矿床条件和矿石性质决定,按照浸出方式可分为三种水冶技术:搅拌浸出、堆浸和原地爆破浸出,另外还有细菌浸出、渗滤浸出等。我国硬岩水冶工艺由搅拌浸出逐渐过渡至堆浸和原地爆破浸出等工艺,降低了生产成本^[7],

并且使低品位、难处理铀矿成为经济可采资源^[8]。

砂岩型铀矿床的开发通常采用地浸采铀。1984年,地浸采铀技术在云南381铀矿床取得条件试验成功。1998年,伊犁盆地酸法地浸采铀工业性试验工程顺利通过国家验收,标志着我国已初步掌握了地浸采铀技术^[9]。2009年,松辽盆地钱家店铀矿床建成了我国第一座CO₂+O₂地浸生产矿山。我国成为首个掌握该技术的国家^[10]。2022年,地浸采铀在我国伊犁盆地、松辽盆地、鄂尔多斯盆地和二连盆地得到广泛应用,产量占比达到90%以上,成为天然铀生产最为重要的工艺。

截至2022年12月,先后建成了82座铀矿山,正在运行9座,形成了常规搅拌浸出、堆浸、地浸等多种铀水冶工艺并存的新格局,保障了国防建设和核能发展对天然铀的重大战略需求。

2 我国铀水冶技术现状

2.1 搅拌浸出提铀技术

搅拌浸出提铀技术是将采至地表的铀矿石破磨至合适的粒度,和浸出剂按一定的液固比置入搅拌装置内,控制浸出条件,将铀元素从固相转移至液相。搅拌浸出提铀技术通常用于品位较高的矿石,具有适应性强、浸出率高、生产稳定性好等特点^[11-12]。

1980年以前,几乎所有的天然铀均是通过搅拌浸出技术生产的,先后研发出酸法搅拌浸出-离子交换、酸法搅拌浸出-清液萃取、酸法搅拌浸出-矿浆吸附-淋洗-萃取、碱法搅拌浸出-季铵盐萃取等多种水冶技术。在专用装备方面,先后研制了高效混合澄清器、流态化沉淀器和多功能沉淀槽等新型设备。在专用材料方面,研制了201×7等多种新型树脂,满足了清液吸附和矿浆吸附的需要。

1) 酸法搅拌浸出提铀技术

搅拌浸出提铀技术通常包括破磨、浸出、固液分离、离子交换、淋洗、萃取、沉淀七大工序。搅拌浸出一般在常压下进行,主要影响因素为浸出剂的种类和用量,氧化剂的种类和用量,矿石粒度,矿浆液固比和反应时间等。当铀矿石含CO₂总量小于2%时,一般采用酸法浸出,用硫酸作浸出剂。矿石粒度要求在0.5~1.5 mm,矿浆液固比一般在1~1.5 kg/L,浸出时间3~5 h。对于大多数铀矿,采用搅拌浸出技术可以得到85%以

上的浸出率。搅拌浸出技术基本不受外部环境影响,可以实现稳定生产。矿石的充分破磨和搅拌,使含铀矿物与浸出剂充分接触,部分情况可以通过搅拌槽加温,进一步提升回收率^[13]。浸出液中铀的回收一般采用离子交换或溶剂萃取技术实现。

固液分离是搅拌浸出的一个关键工序,酸性浸出矿浆尤其是高余酸浸出矿浆,其过滤和洗涤比较困难。通常的固液分离方法有分级、逆流倾析和过滤。分级有水力旋流器、螺旋分级机和流态化设备等。逆流倾析通过多级浓密机串联,洗水和矿浆以逆流方式实现预先将粗砂分离。近年来,国内高效浓密技术在给矿方式、絮凝剂添加、自动控制等方面有了创新性进展^[14-15]。

我国铀矿搅拌浸出生产规模小,国外矿山生产规模最大已经达到每年数千万吨,而我国最大的生产线只有每年20万吨的生产能力;矿石破磨、浸出、固液分离等设备的能耗,工作效率等指标与先进水平相比存在较大差距。与此同时,搅拌浸出技术存在投资大,操作复杂,磨矿费用高昂,浸出反应完成后固液分离操作难度大等问题。

江西抚州铀矿山长期应用常压酸法搅拌浸出技术,技术流程为:酸法搅拌浸出→矿浆吸附→淋洗→萃取→重铀酸钠产品,该技术能够处理多种复杂矿石,生产较稳定,可获得高质量的产品。该矿山曾采用淋萃技术回收铀,采用的萃取剂为磷类萃取剂。

2) 碱法搅拌浸出提铀技术

我国碱交代型花岗岩型铀矿与热液蚀变的碳硅泥型铀矿中含碳酸盐较多,酸法浸出试剂消耗大,铀浸出率低,为此研发了碱法搅拌浸出技术,形成了加压碱法浸出→浓密→酸化→溶剂萃取和加压碱法浸出→浓密→季铵盐萃取两套技术流程,并得到工业应用。

碱法搅拌浸出的浸出剂适宜质量浓度为25~

60 g/L Na₂CO₃和10~20 g/L NaHCO₃。矿石粒度对浸出速率有很大影响,一般要求将矿石磨得足够细,使铀充分暴露出来,以提供与浸出剂有最大的接触表面。如将高碳酸盐含量铀矿石磨细到约0.18 mm时,加压碱法浸出,浸出率可以达到95%。

碱法搅拌浸出设备常采用空气搅拌加压釜。为进一步提高经济性,先后研制了哨式加压釜和充气式管式釜等设备。哨式加压釜中,矿浆通过漩涡哨与加压的空气混合,形成气液固混合物进入釜内,然后从釜顶排出。792 矿水冶厂采用碱法搅拌浸出流程^[16],其哨式加压釜直径0.8 m,高11 m,浸出剂为21.0 g/L NaHCO₃+20.0 g/L Na₂CO₃,反应釜内压力1.7 MPa,空气流速5.0 m³/min,浸出温度130~150 ℃,浸出时间3 h,铀浸出率可以达到97.0%,运行结果列入表1。

充气式管式釜采用球形顶和锥形底的直立圆筒,从釜顶进料、釜底排料^[17]。与哨式加压釜进行了工业试验对比,在浸出工艺参数大致相同的条件下,两种釜的铀浸出率基本相当,但碱耗下降30%,压缩空气消耗量下降50%。

我国276厂采用碱法搅拌浸出提铀技术,工艺流程为:加压碱法浸出→CCD洗涤→酸化→P204萃取→碳酸铵反萃取结晶→三碳酸铀酰铵产品。碱法搅拌浸出技术在工业应用上存在主要问题有:碱法浸出-酸法萃取并存,酸碱相互消耗导致原材料消耗大;硫化物对碱消耗量大;浸出液中的有机物影响后续萃取工艺;针对碱性废水和碱性废渣,没有经济合理、技术可行的处理工艺。因此,建成的三座碱法提铀工厂先后于20世纪90年代停产关闭。

3) 多金属共伴生资源提铀

我国已探明的铀资源中有相当量为共伴生资源,如钼、镍、钒、铅、锌、铋、锆、稀土等。多数的多金属共伴生铀资源需要经过选矿进行分类富集,精矿分别处理回收。在重选、浮选、磁选、

表1 碱法搅拌浸出试验结果^[16]

Table 1 Results of pressure alkaline leaching^[16]

	浸出条件							
	温度/℃	釜压力/(kg·cm ⁻²)	空气流速/(m ³ ·min ⁻¹)	$\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NaHCO}_3)/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{U})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	渣含U/%	铀浸出率/%
最高值	150	18.0	5.0	27.0	22.5	3.49	0.008	96.4
最低值	131	16.0	5.0	13.5	17.0	2.30	0.004	98.0
平均值	145	17.0	5.0	21.0	20.0	2.79	0.007	97.0

放选等选矿方法的组合与联合应用方面取得一定成果。同时,在强化浸出、矿石预处理等方面开展了相应的研究工作,形成了铀钼、硼铁铀、铀稀土、铀钒等多金属综合回收技术。

河北沽源460铀钼矿属于大型铀钼共伴生矿床^[18],工业开发利用价值高,但矿性复杂,选冶难度极大^[19],在业界公认属世界性难题。该矿于2009年建成投产时,采用的是常压酸法搅拌浸出工艺,但随着矿山开采深度的逐渐增加,原生带矿所占的比例越来越高,导致钼浸出率逐年降低,部分难浸矿石的钼浸出率甚至不足20%^[20-21]。后工艺升级为铀钼原矿酸法加压氧浸,一是提高浸出温度,降低化学反应的活化能;二是增加氧

气在液体中的溶解度及持续供给,保障还原态矿物的充足有效氧化。反应方程式见式(1)。



形成了“原矿球磨→氧压酸浸→改性过滤→萃取分离→产品制备→工艺水循环”的工艺生产流程,工艺流程图示于图1。铀浸出率达90%以上,钼浸出率从不足30%提升至80%以上,且浸出时间只有1.5h^[22-23],降低成本的同时,大幅提高了浸出效率。以氧压技术为核心的沽源460复杂铀钼矿工业化项目实现了我国铀钼矿开发历史性突破,促进了铀钼矿、低品位复杂钼矿湿法冶炼行业的技术进步。

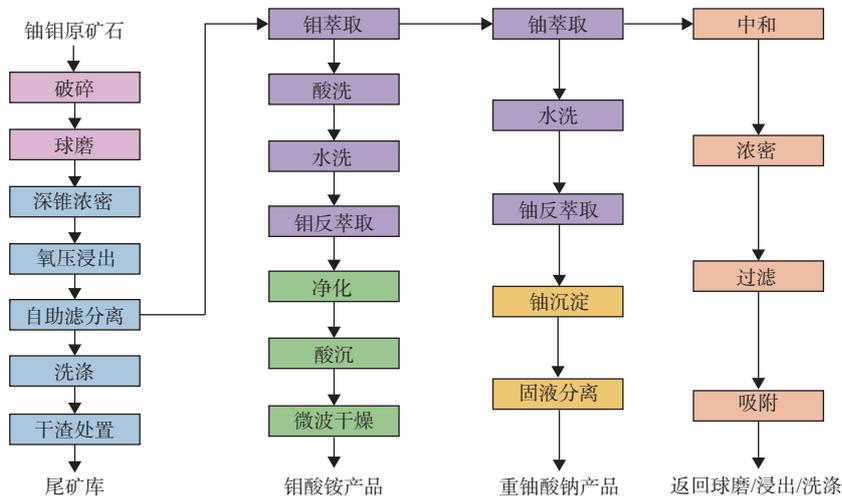


图1 460铀钼矿综合回收工艺流程

Fig. 1 Comprehensive recovery process of 460 uranium-molybdenum deposit

4) 煤岩型铀矿提铀

煤岩型铀矿是在煤的吸附和强还原作用下铀被吸附固定下来形成富铀煤层。由于铀在煤层中以非常分散的吸附态形式存在,所以很难通过选矿的方法将煤层和铀进行分离^[24]。我国研发了从煤岩型铀矿中提取铀的工艺。主要流程为:煤低温燃烧→含铀煤灰硫酸搅拌浸出→三脂肪胺矿浆萃取→NaCl溶液反萃取→反萃取合格液NaOH沉淀→重铀酸钠产品。

硫酸浸出时,酸耗为煤灰量的30%以上,浸出率可以达到92%~94%。煤灰中含有较多的四价铀,加入氧化剂可以提升浸出率7%~10%。浸出液中SiO₂质量浓度达到15~20g/L,使用二段恒pH值浸出,可促进硅胶聚沉,溶液中SiO₂含量

减少70%以上^[25]。获得的酸法矿浆稀释后,送大孔筛板脉冲萃取塔进行矿浆处理。矿浆直接用0.1mol/L三脂肪胺进行矿浆萃取,饱和有机相使用1.0mol/LNaCl溶液反萃取,贫有机相使用Na₂CO₃清洗钼后,返回萃取工序使用。反萃取合格液使用NaOH沉淀,得到最终产品重铀酸钠。

2.2 堆浸提铀技术

堆浸是堆置浸出法的简称,是指在不渗漏的场地上堆置适宜粒度的矿石,采用矿堆顶部向下喷洒浸出剂的方法,通过浸出剂在矿石堆中的渗滤过程,选择性溶解矿石中的铀,得到含铀浸出液。堆浸与搅拌浸出相比,具有流程短、设备简单、试剂消耗少、能量消耗低、基建投资和生产成本低的优点,处理低品位矿石、表外矿和废石

时有较好的经济效益。

我国铀矿堆浸的研究始于20世纪60年代,当时为扩大铀资源利用范围,基本是用堆浸法处理低品位的表外矿。20世纪90年代中期以后,堆浸技术取得重大突破,堆浸已成为当时天然铀生产的主要水冶工艺^[26]。典型矿山堆浸工艺流程示于图2。国际上,堆浸技术的研究与应用相对较少,主要是巴西卡埃蒂特(Caetite)和俄罗斯的Priargunsky铀矿的低品位矿石采用堆浸工艺。纳米比亚的罗辛铀矿和湖山铀矿正在开展低品位铀矿的堆浸工业试验。

针对我国复杂铀矿的特点,我国科研人员先后研发出浓酸熟化-高铁淋滤堆浸技术、活化堆浸技术、细粒级堆浸技术、酸法制粒堆浸技术、

复杂铀矿渗滤浸出技术、细菌堆浸技术、多堆串联堆浸技术、堆冶联合浸出提铀技术以及低渗透性矿石表面活性剂助渗浸出等技术,形成了独具特色的硬岩铀矿精细化堆浸提铀的技术体系,并实现了大规模工业化应用。我国的铀矿堆浸技术整体上达到了国际先进水平,部分单项技术达到国际领先水平。

浓酸熟化-高铁淋滤堆浸工艺,首先将破碎矿石进行浓酸熟化预处理,使矿石中的铁氧化为三价,铀大部分溶解,然后采用清水进行淋浸^[27]。既缩短了矿石的浸出周期,也提高了浸出合格液的铀浓度。工业生产的数据表明:采用浓酸熟化-高铁淋滤技术进行强化堆浸,矿石浸出周期仅60~100 d,浸出合格液铀质量浓度可达7~9 g/L。

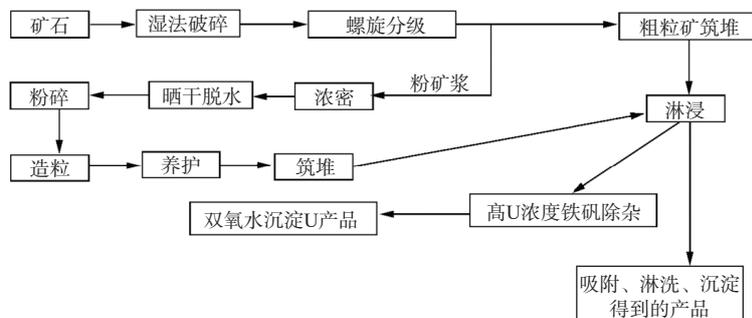


图2 典型铀矿山堆浸工艺流程

Fig. 2 Heap leaching of uranium deposit

对于含泥低渗透性酸性矿石,酸法制粒堆浸技术成功应用于提铀工业生产^[28]。工业应用的结果表明:矿石经过制粒预处理以后进行堆浸,金属的浸出率可达到95%以上,与直接堆浸相比较,浸出周期可缩短70%,浸出合格液铀浓度可提高50%。

细粒级堆浸技术是将入堆矿石粒度由20~30 mm破碎至5~10 mm^[29],甚至更低进行浸出,可有效提高铀浸出率、缩短浸出周期,也打破了以前国外专家推断堆浸的矿石粒度不能小于10 mm的说法。目前正在运行的锦原铀业公司棉花坑铀矿采用细粒级精细化堆浸技术,浸出周期由300多天缩短至90 d,铀浸出率达到93%。

为提高矿石堆浸合格液的铀浓度,降低提铀过程的材料消耗,开发了串联堆浸技术。多个堆浸提铀矿山的应用结果表明:在使用该技术以后,堆浸合格液的铀浓度可提高2~3倍,浸出过程的硫酸以及水冶回收的材料消耗可降低20%~

30%,显著地提高了经济效益。

2.3 原地爆破浸出提铀技术

对于一些品位很低的硬岩铀矿,将矿石采出地表处理是不经济的。针对此类铀矿资源,研发出原地爆破浸出提铀技术。原地爆破浸出提铀技术可在地下将矿石破碎,随后通过溶浸直接提取回收铀元素,具有工艺简单、投资小、建设周期短和能耗低等优点^[30]。

首先,在井下矿体内采切出必要的采空区,然后采用不同爆破方法在落矿筑堆的同时对矿石进行破碎,进行布液浸出,浸出液输送到地表进行处理,浸出率可达70%以上^[31]。由于矿石不用运出地表,极大地减少了矿石出笼量,节约了矿石的采运和提升成本。

全爱国等^[32]开展了原地爆破浸出采铀试验,采用阶段深孔微差挤压爆破落矿筑堆方法,矿堆垂直高度为27 m,75%以上矿石块度小于150 mm。采用微喷淋布液技术,浸出468 d,渣计浸出率为

79.26%。寇子顺等^[33]进行了深孔挤压爆破浸出试验研究,矿堆高度为40 m,矿堆上部喷淋布液和矿体上盘钻孔补充布液相结合,浸出265 d,渣计浸出率为71.88%。

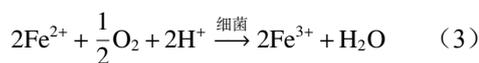
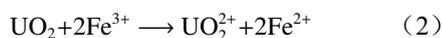
王省民^[34]采用浅孔留矿与原地爆破浸出联合采铀技术,对高品位矿石出窿地表堆浸,低品位矿石就地爆破落矿筑堆浸出。结果表明:采场低品位矿石浸出38个月后,浸出率达81%;地表堆场矿石浸出20个月后,浸出率达96%。与常规采冶技术比较,该工艺技术可减少矿石出窿量和运输量70%以上。我国先后在蓝天铀矿、706铀矿、大茶园铀矿、草桃背铀矿、大布铀矿、香草铀矿开展了原地爆破浸出开采技术研究,并在蓝天铀矿建成我国首座原地爆破浸出采铀矿山。

目前,原地爆破浸出提铀技术同样存在问题,需要进一步攻关。比如矿石块体过大,破碎不完全,矿块微裂隙不发育,因凿岩和出矿频繁造成预埋管网破坏,受矿体形态影响形成溶浸死角,布液技术尚待完备等问题。

2.4 生物浸铀技术

生物浸铀技术是指利用微生物或其代谢产物对铀矿石进行氧化、还原、溶解或吸附,从而提取铀金属的一种生物冶金方法^[35]。与传统化学浸出相比,该技术具有显著的环境与经济优势,特别适合处理低品位、复杂成分的铀矿床。

生物浸铀的化学本质是铀的氧化溶解过程。在酸性环境中,铀主要以4价和6价两种价态存在。生物浸铀的核心目标就是将溶解度低的4价铀氧化为易溶的6价铀,微生物通过不断再生 Fe^{3+} 维持反应的持续进行。这一过程可由反应式(2)和(3)表示。



所用浸铀微生物主要包括嗜酸硫杆菌属(*Acidithiobacillus*)、钩端螺旋菌属(*Leptospirillum*)、硫化杆菌属(*Sulfobacillus*)等^[36-37]。这些微生物通过协同作用形成复杂的生态网络,其中铁氧化菌负责将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,硫氧化菌则将还原态硫化物氧化为硫酸,共同维持浸出体系的高氧化电位和酸性环境。

生物堆浸工艺是处理低品位铀矿石(通常铀含量低于0.1%)的经济有效方法。该工艺将破碎

后的矿石堆积在防渗垫层上,通过喷淋系统循环喷洒含有特定微生物群的浸出剂溶液。浸出液自上而下渗透矿石堆,微生物及其代谢产物与铀矿物发生作用,富含铀的溶液收集后送至后续处理厂进行铀的回收,工艺流程图示于图3。生物堆浸技术的优势在于投资成本低、能耗小,且适用于大规模处理,但其浸出周期较长,通常需要数月才能完成。

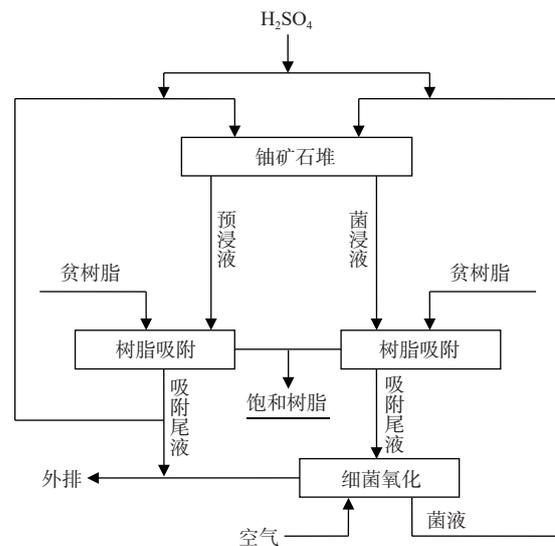


图3 生物堆浸工艺流程图

Fig. 3 Process of biological heap leaching

为提高效率,现代生物堆浸技术常采用多段堆浸技术,即根据浸出进程调整喷淋液的微生物组成和化学参数。有研究表明,通过优化堆内通气条件和温度控制,可使铀浸出率提高15%~20%。该技术显著改善了铀浸出动力学,提高了浸出率,可节省氧化剂和硫酸,降低生产成本^[38-40]。细菌堆浸技术在江西赣州硬岩型铀矿山进行了工业化应用,铀浸出速率明显提高,浸出时间节省25%~50%,酸耗降低42%。

生物槽浸工艺主要适用于高品位或难处理铀矿石,是一种强化生物浸出技术^[41]。该工艺在可控的反应槽中进行,通过精确调节温度、pH、通气量等参数为微生物创造最佳生长条件。现代生物槽浸工艺常采用多级串联反应器系统,不同反应器可培养特定功能的菌群以实现浸出过程的分段优化。

2.5 原地浸出采铀技术

原地浸出采铀,即地浸采铀(in-situ leaching, 简称ISL)是通过钻孔工程,借助化学试剂,从天

然埋藏条件下把矿石中的铀溶解出来,而不使矿石产生位移的集采、选、冶于一体的铀矿开采方法,具有生产成本低、建设周期短、环境友好等优点。

地浸采铀工艺主要由浸出工艺和浸出液处理工艺两大部分组成^[42-43]。浸出工艺是指用浸出剂将矿石中的铀从固相转移至液相、形成浸出液的过程。浸出液处理工艺是指对浸出液进行处理,最终形成铀浓缩物的一系列化工操作过程。按浸出剂的不同分类,常见地浸采铀工艺分别为酸法地浸工艺和 CO_2+O_2 地浸工艺。酸法地浸常用浸出剂为 H_2SO_4 ,浸出过程 $\text{pH}\leq 2$ 。 CO_2+O_2 地浸,浸出剂为 HCO_3^- ,浸出过程 pH 值为 $6.5\sim 7.5$ 。

截至2022年12月,我国已建成、运行酸法地浸矿山3座, CO_2+O_2 地浸矿山3座, CO_2+O_2 工业性试验工程1座。正在运行的6座地浸矿山均位于我国北方盆地,其中新疆伊犁盆地3座,内蒙古二连盆地1座,内蒙古通辽盆地2座。先进地浸产能已占国内天然铀总产能90%以上。

基础理论方面,构建了多场多组分耦合溶质运移模型,揭示了铀浸出、吸附和沉淀机理,确立了中性配位浸出铀的优势场。地浸工艺方面,深部钻井施工,研制了可更换过滤器、随钻纠斜装置,研发了微伤二次成井技术与井网集中控制系统,钻孔施工深度达到800 m。多层矿开发,提出“一套钻井、分层注液,同井同采”方法,研发了分层分液控制与低压智能封隔等关键技术与设备,开采效率提高50%。研发了铀资源动态评价软件,创建了数字建井、虚拟建造等技术,开发出Umine全寿期运行设计与管控系统。

2.5.1 酸法原地浸出采铀技术

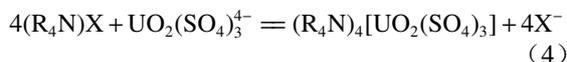
1) 浸出工艺

酸法地浸采铀一般以稀硫酸溶液作为浸出剂^[44]。浸出剂硫酸质量浓度 $\leq 15\text{ g/L}$,氧化剂普遍使用氧气和过氧化氢。通过向矿层注入一定酸度的浸出剂,使铀矿物随着浸出剂在矿层中运移, pH 值降低,逐渐从沉淀态变为溶解态,生成硫酸铀酰^[45]。浸出剂酸浓度是决定铀浸出速率和浸出液中铀浓度的关键因素之一。

龙红福等^[46]采用 $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{O}_2$ 浸出工艺,分三个阶段逐步增加浸出剂酸度:首先加入 $2.0\text{ g/L H}_2\text{SO}_4$,为期30 d;接着将 H_2SO_4 质量浓度增加到 4.0 g/L ,为期30 d;最终将 H_2SO_4 质量浓度调至 5.5 g/L ,进行正常生产。氧化剂为 O_2 ,通过喷嘴以射流方式

使 O_2 与浸出剂充分混合,浸出液 Eh 稳定于 410 mV ,能满足酸法地浸采铀的需要。

H_2SO_4 浸出时,铀主要为 $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$ 形式存在于浸出液中,一般采用强碱性阴离子交换树脂回收浸出液中的铀。反应方程式见式(4)。



酸法浸出液处理工艺的树脂饱和容量较低,淋洗合格液铀浓度偏低,直接进入后续的加碱沉淀工序,存在碱耗高和沉淀浆体过滤比较困难等问题。俄罗斯等独联体国家提出了饱和再吸附工艺,通过饱和再吸附增加树脂饱和容量,进而提高淋洗合格液铀浓度。国内则提出了淋萃工艺,通过萃取工艺提高淋洗合格液铀浓度。

2) 浸出液处理工艺

(1) 密实移动床处理浸出液

地浸矿山通常使用密实移动床处理酸法浸出液。本工艺主要流程为:密实移动床单塔吸附→密实移动床饱和再吸附→密实移动床多塔串联淋洗→密实移动床多塔串联转型→密实移动床单塔回收吸附→ NaOH 沉淀→重铀酸钠(“111”)产品。密实移动床运行中,树脂在塔内从塔顶向下流动,与从塔底向上流动的铀浸出液进行逆流接触,实现铀的吸附,密实移动床结构图示于图4。

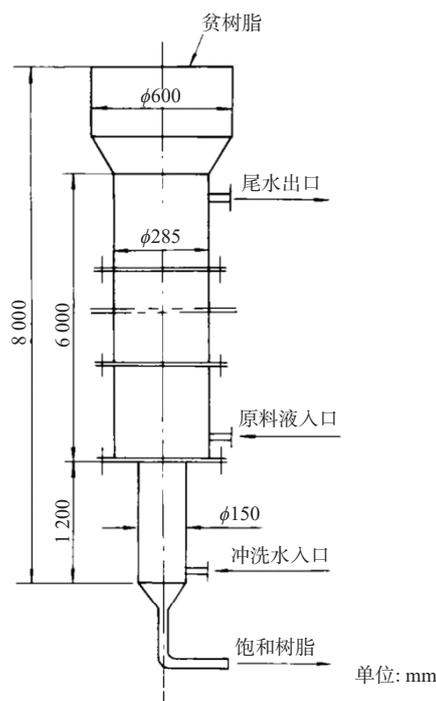


图4 密实移动床吸附塔结构

Fig. 4 Adsorption column structure with moving bed

当树脂接近饱和时,通过塔底排出,进入淋洗工序,淋洗-转型后的贫树脂重新从塔顶加入,形成一个连续的循环过程^[47-48]。设备可以连续操作,结构简单、且易于实现自动化控制。

早期酸法地浸采铀试验过程中,采用的浸出液处理工艺流程为:密实移动床单塔吸附→密实固定床多塔串联淋洗→NaOH沉淀→“111”产品。验证了密实移动床处理能力大,吸附空塔线速率可达40~50 m/h。以直径1.8 m密实移动床吸附塔为例,空塔线速率达到47 m/h时,处理量达到112 m³/h。针对酸法地浸采铀浸出液的特点,合成了D263树脂,其交换容量高,交换速率快,耐渗透压性能好。相同试验条件下,D263树脂饱和容量为24.37 g/L湿树脂(WR),为201×7树脂饱和容量的1.26倍。

后期引进了饱和再吸附工艺,即把吸附工序获得的饱和树脂,转移至饱和再吸附塔,用具有一定浓度的合格液进行第二次吸附,进一步提升饱和容量^[49-50]。饱和再吸附流程图示于图5。改进后的饱和再吸附工艺有如下技术进步:(1)饱和再吸附可大幅度提升树脂的饱和容量,容量可以达到22 g/L湿树脂以上;(2)使用酸性NaNO₃溶液代替酸性NaCl溶液作为淋洗剂,淋洗合格液铀质量浓度可达到20 g/L以上,为原有工艺的2~3倍,沉淀工艺得到简化。例如,将1.0 mol/L NaCl+0.1 mol/L H₂SO₄淋洗改为1.0 mol/L NH₄NO₃+0.5 mol/L H₂SO₄淋洗,使合格液铀浓度提升约

30%;(3)饱和再吸附的尾液到回收吸附进一步回收铀,回收吸附工序和转型工序相衔接,解决了硝酸盐淋洗工艺长期运行中出现的浸出液NO₃⁻累积问题。密实移动床及饱和再吸附工艺,在新疆伊犁盆地多座矿山得到工业应用,水冶回收率可以达到94%~96%。

(2) U型塔处理浸出液

密实移动床处理工艺,需要吸附塔、淋洗塔、转型塔、饱和再吸附塔和回收吸附塔等多种塔器,以及相应的树脂提升和存储设备^[51],工艺流程复杂,设备占地和投资较大。针对以上问题,研发了U型塔饱和再吸附与淋洗一体化工艺技术(简称U型塔工艺)。

U型塔是一种特殊的离子交换设备,其结构呈U型,塔体分为吸附段与淋洗段,通过底部弯头设计将饱和再吸附和淋洗工序集成于一个设备内^[52]。设备通过0.2~0.5 MPa压缩空气推动树脂在U型管道内循环移动。一次饱和树脂从吸附段顶部加入U型塔后向下移动,与淋洗液逆流吸附提高容量,通过底部弯头从吸附段转移到淋洗段后向上移动,与淋洗液逆流交换后,生成贫树脂并从淋洗段顶部出塔。淋洗剂从淋洗段顶部进入U型塔,淋洗液一部分从塔底作为合格液出塔去沉淀,一部分通过塔底弯头进入吸附段,与树脂进行交换后从塔顶排出。U型塔结构示意图示于图6。

影响U型塔淋洗效果的主要因素为淋洗线速率和合格液-淋洗剂分液比例,淋洗适宜的线速率约为0.7~1.8 m/h,分液比例约为18%~25%。采用U型塔饱和再吸附-淋洗一体化技术对实际酸法地浸矿山16~17 g/L WR的饱和树脂进行处理,流程图见图7。再吸附后树脂容量能够达到48 g/L WR,淋洗合格液质量浓度达到43~50 g/L,贫树脂容量低于1.0 g/L WR。U型塔尾液铀质量浓度约为1~2 g/L,需要回收吸附。

通过1个U型塔替换水冶厂原工艺中饱和再吸附、淋洗首、中、末塔等4个离子交换塔及每塔配套树脂提升罐和输送管道,简化了工艺流程,减小占地面积,更有利于大规模浸出液后处理水冶厂排布和生产控制,且一次性树脂投入量减少20%以上。运行成本方面,淋洗剂用量减少,硝酸铵和H₂SO₄投入减少10%~18%,沉淀试剂消耗少。从工艺先进性以及经济性方面有显

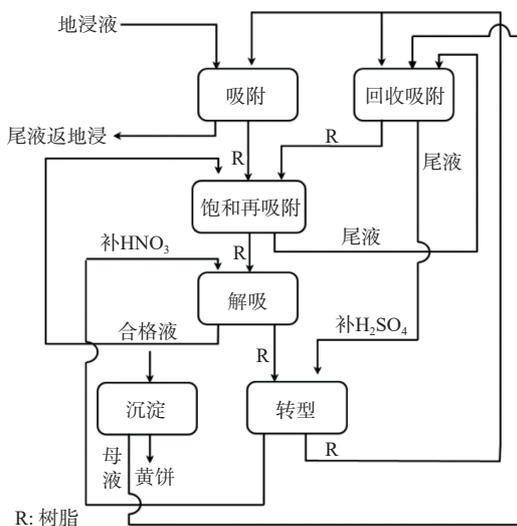


图5 饱和再吸附流程

Fig. 5 Process of resin saturated readsorption

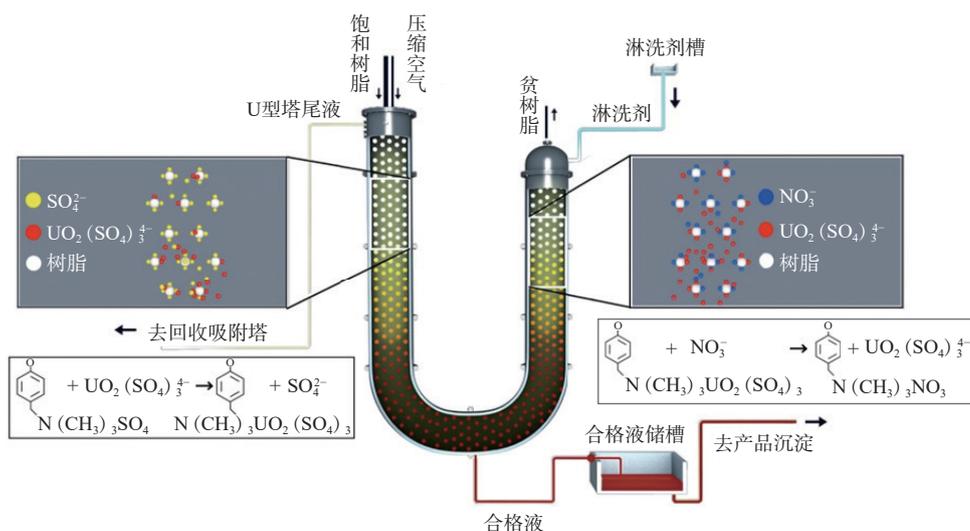


图6 U型塔结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of U-shaped tower structure

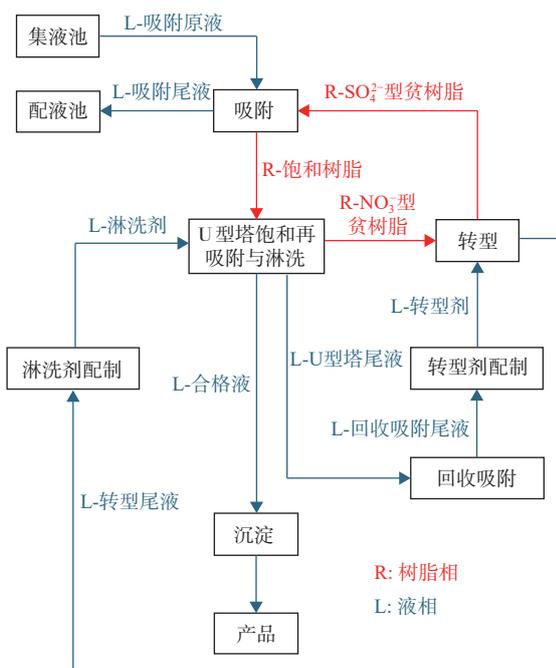


图7 U型塔饱和再吸附与淋洗一体化工艺流程

Fig. 7 Integrated process of resin saturated re-adsorption and resin elution

著优势, U型塔饱和再吸附与淋洗一体化工艺技术具备良好的应用前景。

(3) 淋萃流程处理浸出液

淋萃流程是一种处理铀矿浸出液的联合工艺, 先采用 H₂SO₄ 对吸附了铀的饱和树脂进行淋洗, 再从淋洗液中萃取铀, 从而达到回收铀的目的。该工艺流程不引入 NO₃⁻ 或 Cl⁻, 降低了试剂消耗, 减少了废水量, 并且适用于从低品位矿石浸

出液中提取铀。2013年, 我国首次将其应用在砂岩型铀矿地浸开采中。

支梅峰等^[53]研究了适用于砂岩型铀矿酸法地浸采铀的淋萃流程, 确定了工艺参数, 并探索了萃余水循环使用对地浸采铀过程的影响, 淋萃流程图见图8。研究表明: 当淋洗剂为 100 g/L H₂SO₄、淋洗接触时间为 40 min 时, 淋洗合格液铀质量浓度为 4.65 g/L; 当有机相组成为 0.2 mol/L P204+0.1 mol/L 磷酸三丁酯+煤油、混合时间为 5 min、温度 20 °C、萃取流比为 1 : 2 时, 经 8 级萃取, 萃余水铀质量浓度降低至 5 mg/L 以下, 负载有机相中铀质量浓度达到 8.9 g/L; 用碳酸钠溶液对负载有机相进行反萃, 反萃液中铀质量浓度约为 50 g/L。

随着浸出液铀浓度缓慢降低, 导致淋洗合格

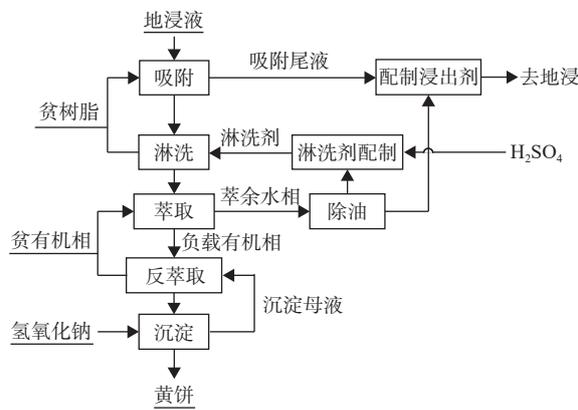


图8 酸法浸出液处理淋萃流程图

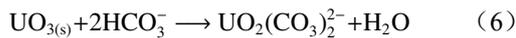
Fig. 8 Eluex process of acid uranium leaching solution

液浓度逐渐降低。李世俊等^[54]对该工艺参数进行改进。当萃原液铀质量浓度为 1.01 g/L、有机相组成为 5%(质量分数,下同) P204+10% TBP+85% 煤油、固定相比为 1:1、固定流比为 4:1 时,经 4 级萃取,萃余水铀质量浓度低于 10 mg/L,负载有机相中铀质量浓度达到 3.98 g/L;用 50 g/L NaHCO₃+20 g/L NaOH 对负载有机相进行单级反萃,反萃液中铀质量浓度为 25.36 g/L。

2.5.2 CO₂+O₂ 原地浸出采铀工艺

1) 基本原理及流程

CO₂+O₂ 地浸采铀是以 CO₂ 和 O₂ 为主要化学试剂,CO₂ 加入质量浓度为 200~1 200 mg/L,O₂ 加入浓度根据矿床含矿含水层地下水中重碳酸根含量确定,一般为 150~600 mg/L,浸出剂 pH 值为 6.8~7.5^[55-56]。CO₂+O₂ 浸出反应见式(5)和(6)。



杜志明等^[57]针对我国内蒙古通辽地区铀矿床地下水 Ca²⁺和 Mg²⁺含量均较低、HCO₃⁻质量浓度高达 2 200 mg/L、有利于 CO₂+O₂ 地浸的特点,于 2006 年 10 月至 2007 年 4 月,在现场开展了 CO₂+O₂ 浸出条件试验,浸出液平均铀质量浓度达到 35 mg/L,单孔平均抽液量达到 10.5 m³/h,同时获得了主要化学试剂消耗等参数。CO₂+O₂ 地浸采铀浸出液处理工艺具有原液铀浓度低、处理量大、溶液成分简单等特点,因此普遍选用离子交换工艺来处理 CO₂+O₂ 地浸的浸出液^[58]。浸出液处理流程一般包括浸出液离子交换吸附、饱和树脂淋洗、合格液沉淀和产品压滤干燥等工序,工艺流程图示于图 9。

CO₂+O₂ 地浸采铀技术在含矿含水层中最大程度创造类似于砂岩型铀矿成矿逆过程的环境,选择性强、试剂消耗少、生产成本低、地下水环境影响小,广泛适用于高碳酸盐、高矿化度、低渗透和低品位的铀矿床。该技术是一种环境友好型铀矿水冶新工艺,代表了世界砂岩型铀矿床地浸水冶技术发展的主要方向。

2) 浸出液处理工艺

(1) 密实固定床处理工艺

固定床离子交换设备具有树脂磨损小、使用寿命长、树脂床层稳定、传质效率高、树脂操作容量高、运行平稳等优点^[59]。吸附和淋洗等工序均在一个塔中进行。浸出液和淋洗剂从塔顶部

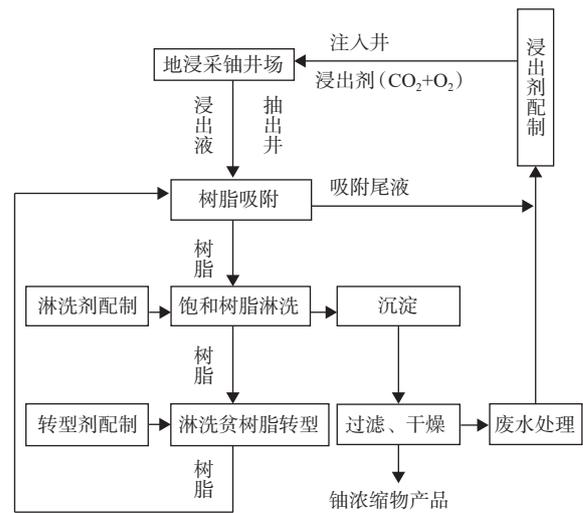


图 9 CO₂+O₂ 地浸采铀工艺示意图
Fig. 9 Flow chart of CO₂+O₂ in-situ leaching

进入,从底部排出。塔中的离子交换树脂呈密实固定状态,传质效率高。树脂不需要在各塔设备之间转移,磨损小,操作简单。吸附空塔线速率在 10~40 m/h 范围内均能稳定运行,能适应变化的浸出液量和浸出液铀浓度。

主要流程为:2 塔串联吸附→单塔淋洗→单塔转型→合格液 HCl 酸化 NaOH 沉淀→压滤得到重铀酸钠产品。浸出液的吸附-淋洗工序由每组 3 个吸附塔串联构成,2 塔串联吸附,单塔淋洗。浸出液进入吸附塔前加入 CO₂ 气体,调节浸出液 pH 值,可以达到提升树脂吸附容量的目的。树脂吸附饱和后,使用淋洗剂淋洗。常见淋洗剂有 NaCl+NaHCO₃、NaCl+Na₂CO₃ 和 Na₂CO₃+NaHCO₃ 等。当树脂饱和容量为 90~110 g/L 湿树脂时,淋洗合格液铀质量浓度可达 40 g/L 以上。淋洗合格液加 HCl 调节 pH 值到规定范围,再加 NaOH 并通过沉淀槽搅拌机搅拌,进行老化沉淀,沉淀浆液经压滤机压滤得到“111”产品。

针对 CO₂+O₂ 浸出液处理,研究开发了大直径高流速固定床、酸化老化沉淀、浸出液自行转型树脂、反渗透处理高浓度转型废水以及沉淀母液再生淋洗剂技术,适应了中性地浸浸出液浓度低、流量大的特点。

(2) 移动床和固定床联合处理工艺

针对新疆 CO₂+O₂ 地浸矿山浸出液的特性,充分结合移动床和固定床两种离子交换设备的优点(表 2),提出了吸附采用移动床工艺,淋洗-转型等采用固定床工艺,即移动床吸附-固定床淋洗

表2 固定床和移动床工艺对比

Table 2 Comparison of fixed bed and moving bed adsorption processes

工艺	主要操作参数	优点	缺点
密实固定床工艺	吸附空塔线速率为15~25 m/h; 淋洗转型空塔线速率为0.5~1.0 m/h	适应于各种铀浓度的浸出液, 树脂饱和容量高; 操作稳定, 投资成本、运行成本低; 某个环节的工艺参数出错, 不会对其他工序造成影响	吸附操作时, 阻力损失较大, 操作压力高; 吸附操作中, 树脂床层上部易板结, 树脂板结时处理难度大; 树脂投入量较大, 树脂利用率较低
密实移动床工艺	吸附空塔线速率为25~50 m/h; 淋洗转型空塔线速率≤5 m/h	适合处理流量大、各种铀浓度的浸出液; 易实现全程自动化操作, 操作人员劳动强度低; 对泥沙敏感度低	树脂排放、加入频繁, 运行不够稳定, 难以保持工艺的最理想状态; 不适宜中性条件的淋洗操作; 树脂在各塔、管道中频繁移动, 树脂磨损大

转型工艺。该流程吸附处理量大, 吸附床层不板结, 树脂利用率高, 自动化程度高。

主要流程为: 移动床单塔吸附→固定床双塔串联淋洗→固定床单塔转型→合格液 HCl 酸化→NaOH 沉淀→压滤得到重铀酸钠产品。吸附工序采用密实移动床, 下进液三塔并联吸附。为了避免吸附塔树脂排放出现冲突, 通过浸出液的平均分配, 使三塔的树脂排放时间错开, 确保吸附工序运行安全有序, 吸附工序每次排放树脂体积为 10 m³。吸附塔尺寸为 DN 3 000 mm×12 000 mm, 空塔线速率为 35 m/h, 饱和树脂容量约为 100 g/L, 吸附尾液铀质量浓度控制在 1 mg/L 以下。

淋洗工序采用密实固定床, 上进液三塔串联淋洗。淋洗塔尺寸为 DN 2 000 mm×5 500 mm, NaCl+NaHCO₃ 作为淋洗剂, 淋洗合格液平均铀质量浓度为 25 g/L, 贫树脂 $\rho(U) < 0.5$ g/L; 淋洗效率 > 99%。淋洗塔底加设树脂出料口, 同时满足树脂与溶液的完全分离。

在理论分析、计算及大量实验室和现场试验的基础上, 提出了移动床吸附、固定床淋洗、沉淀、压滤回收铀的新型工艺, 充分发挥密实移动床和密实固定床两种离子交换设备的特点和优势, 并在浸出液处理生产线中实现了各工艺的有机衔接, 增大了浸出液处理通量, 创新了一种高效的浸出液处理工艺系统, 并得到生产成功的验证。

3) 地浸共伴生元素回收

我国在砂岩型铀矿勘查过程中, 发现了铷、钫等金属元素和铀存在伴生关系, 主要分布在卷形铀矿体及其前峰层间氧化带。胥国龙等^[60-61]对内蒙砂岩型铀矿 CO₂+O₂ 地浸采铀浸出液中铷进行综合回收。载铷树脂用 6 mol/L HCl 溶液淋洗, 淋洗液铷平均质量浓度为 24 mg/L, 铷淋洗率为 97% 以上。用 5% N235+1.5% 仲辛醇+93.5% 磺化煤

油对淋洗液萃取, 经 5 级萃取, 铷萃取率在 99.7% 以上。负载有机相用 1.5 mol/L NaOH 溶液反萃取, 铷反萃取率为 99.5%。蒋小辉^[62]、罗明标等^[63]采用不同种类树脂分离浸出液中的铷和铀, 工艺流程图示于图 10。使用 D302-II 树脂时, 浸出液 pH=2.0, 铷、铀分离因子为 7 965, 铷吸附率为 94.35%; 载铷树脂用 3 mol/L NH₄OH 淋洗, 淋洗液铷质量浓度为 4.5 g/L。使用 ZGT75 树脂时, 铷吸附率为 94% 以上, 淋洗率达到 98% 以上, 回收率超 93%。

3 总结及展望

目前我国在运、在建和核准建设的核电机组共 102 台、装机容量达到 1.13 亿千瓦, 核电总体规模首次跃居世界第一, 对天然铀的需求量已经跃居世界第二。我国铀资源禀赋较差, 要缓解国内天然铀供需矛盾, 必须走技术创新之路。当前铀矿大基地建设呈现三大趋势: 一是绿色化升级, 二是智能化转型, 三是集约化发展。硬岩铀资源开发主要攻关原位流态化等颠覆性技术, 实现资源绿色高效开发利用。砂岩铀资源开发重点解决低渗透铀矿床地浸开发技术, 逐步突破 1 000 m 左右深部矿床地浸开发技术。继续攻关复杂共伴生放射性矿产资源开发技术、非地浸铀资源高效开发技术、非常规铀资源开发技术等核心技术。以流态化开采、绿色开采、智能开采为发展方向, 致力于规模化、集约化开发, 提高资源回收率, 减少废石尾矿排放, 提高智能化采冶水平。

随着人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的飞速发展, 加快数字化和大数据分析应用, 提升铀矿水冶数字赋能水平, 推动其向智能化、信息化方向转型升级, 最终全面建立我国新一代铀水冶技术体系, 为我国天然铀产业的高质量发展提供强大的技术支撑。

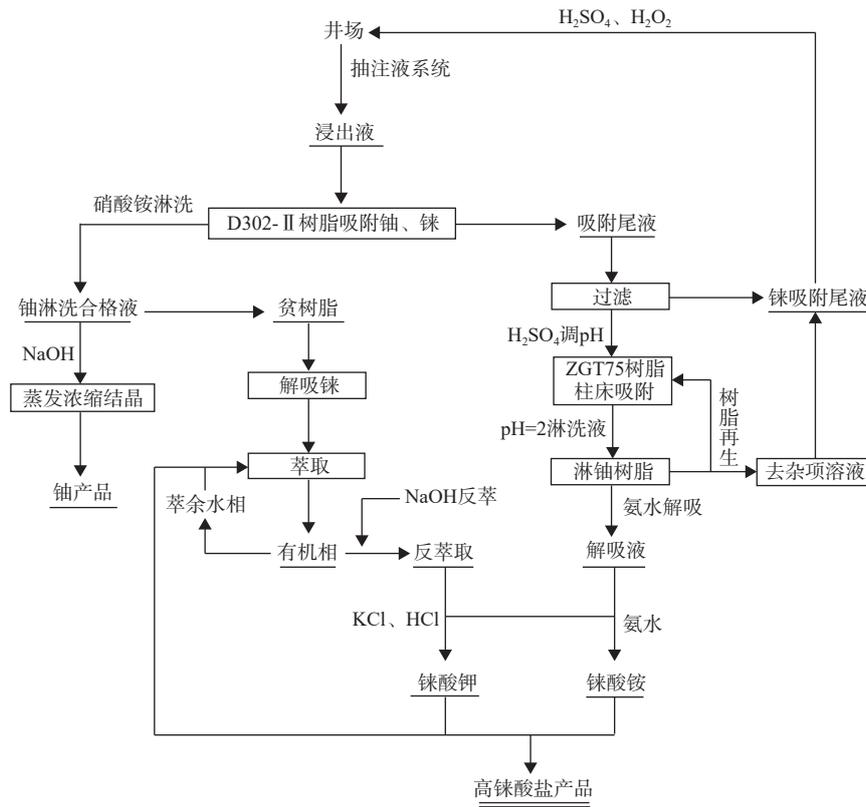


图 10 酸法地浸采铀综合回收铼工艺流程图

Fig. 10 Comprehensive rhenium recovery process of acid uranium leaching solution

参考文献:

[1] 陈军强,曾威,王佳营,等.全球和我国铀资源供需形势分析[J].华北地质,2021,44(2):25-34.

[2] 周思聪,李子颖,郭建,等.核能发展新形势下我国铀资源保障研究[J].世界核地质科学,2024,41(4):703-711,731.

[3] 蔡煜琦,张金带,李子颖,等.中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J].地质学报,2015,89(6):1051-1069.

[4] 蔡煜琦,张金带,李子颖,等.中国铀矿成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议:《中国矿产地志·铀矿卷》研编[J].地球学报,2025,46(1):52-68.

[5] 秦明宽,李子颖,刘章月,等.新世纪以来我国铀矿地质科技创新重要进展及展望[J].铀矿地质,2024,40(2):189-203.

[6] 李开文.论中国铀资源发展潜力及天然铀工艺技术水平[J].金属矿山,2009(增刊 1):13-23.

[7] 曾毅君,牛玉清,张飞凤,等.中国铀矿冶生产技术进展综述[J].铀矿冶,2003,22(1):24-28.

[8] 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.

[9] 张飞凤,苏学斌,邢拥国,等.地浸采铀新工艺综述[J].中国矿业,2012,21(增刊 1):9-12.

[10] 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.

[11] 曾毅君,张飞凤,王廷学.我国硬岩铀矿资源开发的技术基础及研究前景[J].铀矿冶,2005,24(1):1-5.

[12] 牛学军,谭亚辉,苏艳茹,等.我国铀矿采冶技术发展方向和重点任务[J].铀矿冶,2013,32(1):22-26.

[13] 孙占学,Fiaz A,赵凯,等.中国铀矿采冶回顾与展望[J].有色金属(冶炼部分),2021(8):1-8.

[14] 徐帅,周兴龙,刘肖楚,等.浓密机发展历程、分类及其高效化改进研究现状[J].金属矿山,2021(5):167-176.

[15] 谭蔚,陈晓楠,汪洋,等.一种新型浓密机进料井结构的研究[J].化学工业与工程,2017,34(2):84-88.

[16] 朱禹钧.铀矿加压碱浸的研究与应用[J].铀矿冶,1989,8(2):7-17.

[17] 高仁喜,田原,关自斌.铀矿石加压浸出技术的进展[J].铀矿冶,1999,18(3):171-178.

[18] 芮国楨.460大型铀-钼矿床成矿地质特征及成因探讨[J].世界核地质科学,2010,27(3):149-154,163.

[19] 武翠莲,马嘉,唐宝彬.某铀钼矿石工艺矿物学研究[J].铀矿冶,2014,33(4):208-211.

[20] 刘智勇,邵长亮,李宗瑾,等.460铀钼矿开采方案探讨[J].现代矿业,2015,31(7):25-27.

[21] 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.

[22] 康绍辉,孟晋,王洪明,等.某铀钼矿强化浸出工艺研究[J].有色金属(冶炼部分),2013(9):45-48,59.

- [23] 李世俊,刘永涛,刘辉,等.铀钼共生矿加压碱法浸出试验[J].有色金属(冶炼部分),2024(3):90-95.
- [24] 陈敬忠.褐煤提铀的工艺技术和生产实践[J].铀矿冶,1991,10(1):20-25.
- [25] 王前裕.浅谈509煤型铀矿床的开采特点[J].铀矿冶,1997,16(2):78-83.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 李明,全爱国.铀矿堆浸在我国的试验研究与发展[J].铀矿冶,1990,9(4):8-12,31.
- [29] 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.
- [30] 刘立顺,吴春平,李书强,等.某铀矿床原地破碎浸出开采技术[J].有色金属(矿山部分),2016,68(5):1-4.
- [31] 全爱国.原地爆破浸出采铀的工艺技术研究及应用前景[J].铀矿冶,1998,17(1):1-6.
- [32] 全爱国,李羽,寇子顺,等.赣南某铀矿原地爆破浸出采铀试验研究[J].铀矿冶,2003,22(4):169-173.
- [33] 寇子顺,谢国森,张春晖,等.挤压爆破在原地爆破浸出中的作用[J].铀矿冶,2006,25(2):66-70,109.
- [34] 王省民.原地爆破浸出与浅孔留矿联合开采法在某铀采场的应用[J].铀矿冶,2013,32(1):13-16.
- [35] 黄海炼,黄明清,刘伟芳,等.生物冶金中浸矿微生物的研究现状[J].湿法冶金,2011,30(3):184-189.
- [36] 孟运生,郑英,刘辉,等.微生物浸矿强化技术研究进展[J].湿法冶金,2012,31(4):204-207.
- [37] 赵凯,黎广荣,周义朋,等.砂岩型铀矿浸出研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2019(6):40-48.
- [38] Wang J, Zhao H B, Zhuang T, et al. Bioleaching of Pb-Zn-Sn chalcopyrite concentrate in tank bioreactor and microbial community succession analysis[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2013, 23(12): 3758-3762.
- [39] 樊保团,蔡春晖,刘建,等.抚州铀矿石细菌渗滤浸出扩大试验[J].铀矿冶,2006,25(3):127-132.
- [40] 樊保团,孟运生,刘建,等.赣州铀矿草桃背分矿细菌堆浸工业试验[J].铀矿冶,2002,21(2):67-73.
- [41] 孟运生,樊保团,刘建,等.铀矿细菌堆浸的生物接触氧化槽[J].铀矿冶,2004,23(4):182-186.
- [42] 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.
- [43] 王仲英.铀矿原地浸出工艺概述[J].湿法冶金,1997,16(2):27-30.
- [44] 周义朋,沈照理,史维浚,等.地浸采铀工艺分类方法的探讨[J].有色金属(冶炼部分),2015(1):37-41.
- [45] 陈梅芳,花明,阳奕汉,等.酸法地浸采铀浸出剂的减量化控制与应用[J].中国矿业,2019,28(3):124-128.
- [46] 龙红福,徐屹群,阳奕汉,等.O₂氧化酸法地浸采铀工艺的研究与应用[J].铀矿冶,2022,41(增刊):41-49.
- [47] 于湘浩,刘正镛,刘素贤,等.密实移动床吸附塔吸附及多塔串联淋洗的研究[J].铀矿冶,1997,16(3):167-174.
- [48] 周意如,夏良树,张青林,等.密实移动床漂洗工序的改进[J].铀矿冶,2020,39(3):207-210.
- [49] 陈详标,刘志成.伊宁铀水冶厂的发展和新工艺的应用[J].铀矿冶,1999,18(2):112-115.
- [50] 阳奕汉,龙红福.负载树脂饱和再吸附工艺的生产实践[J].铀矿冶,2007,26(2):105-109.
- [51] 张镛,许根福.离子交换及铀的提取[M].北京:中国原子能出版社,1991:146-173.
- [52] 程威,苏学斌,阙为民,等.基于载树脂饱和再吸附:双键淋洗一体化工艺的U型塔设计研究[J].湿法冶金,2023,42(3):312-316.
- [53] 支梅峰,舒祖骏,赵凤岐,等.淋萃流程在酸法地浸中的应用研究[C]//中国核科学技术进展报告(第四卷):中国核学会2015年学年会论文集第1册(铀矿地质分卷、铀矿冶分卷).绵阳,2015:565-570.
- [54] 李世俊,朱国明,桂增杰,等.淋萃流程在内蒙古地浸矿山的应用研究[J].铀矿冶,2019,38(4):273-278.
- [55] 王亮,李喜龙,张渤.高含量碳酸氢根-碳酸盐砂岩铀矿CO₂+O₂浸出技术研究[J].铀矿冶,2016,35(4):253-260.
- [56] 董惠琦,李喜龙,张渤.内蒙古某铀矿CO₂+O₂地浸采铀浸出试验研究[J].铀矿冶,2019,38(1):8-13.
- [57] 杜志明,牛学军,苏学斌,等.内蒙古某铀矿床CO₂+O₂地浸采铀工业性试验[J].铀矿冶,2013,32(1):1-4.
- [58] 许根福.处理地(堆)浸铀浸出液离子交换装置类型的选择[J].铀矿冶,2008,27(1):14-20.
- [59] 韩青涛,赵良仁,张春雷,等.我国铀矿冶领域应用的离子交换塔[J].湿法冶金,2008,27(3):176-180.
- [60] 胥国龙,闻振乾,郑剑平,等.一种从CO₂+O₂地浸采铀浸出液中综合回收铀的方法:CN113584330A[P].2021-11-02.
- [61] 胥国龙,闻振乾,原渊,等.用N235从高浓度盐酸溶液中萃取铀[J].湿法冶金,2021,40(3):224-228.
- [62] 蒋小辉,罗明标,陈国贞,等.用D₃₀₂树脂从地浸采铀溶液中分离铀的研究[J].有色金属(冶炼部分),2013(7):44-46,50.
- [63] 罗明标,席群丽,程雪萌,等.从砂岩型铀矿中综合回收铀研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2021(8):20-27.