

中国铀资源采冶技术发展现状与展望

王海峰

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 在几十年的科研和生产中, 中国铀资源采冶技术展现了从无到有、从弱到强的发展历程, 推出了无轨采矿、“三下”矿床开采工艺, 突破了地表堆浸和地下堆浸; 创新了原地爆破浸出和细菌堆浸; 实践了酸法、碱法和中性地浸采铀工艺; 探索和改进了钻孔施工、地下浸出方法、水冶工艺; 建成了新疆和内蒙古数字化矿山; 验证了溶浸范围控制、废弃钻井液处理和再利用、反渗透处理废液、退役试验矿山地下水修复; 实施了铀钼和铀煤等共生矿的合理化采冶, 探索了海水提铀工艺。所实践的铀资源采冶新技术和新工艺, 已成为中国天然铀生产的有力保障。展望未来, 中国铀资源采冶技术必将推陈出新, 取得更大的突破。

关键词: 铀资源; 采冶技术; 常规开采; 堆浸; 原地爆破浸出; 地浸; 发展现状

中图分类号: TL211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0010-13

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.08.02

目前, 铀主要用于核电、核武器、医疗、工业、科学研究, 以及太空探索等领域^[1], 其中核电消耗的铀占比达 99%。与化石燃料相比, 铀是一种高效能源, 可以产生大量电力, 且碳排放量低。因此, 全球核电装机容量日益增大。1991 年秦山核电站并网发电, 实现了中国核电零的突破。为满足经济发展和环境保护形势的需要, 中国商运核电机组和在建机组数量不断增加^[2]。

随着核电建设的发展, 铀的需求量持续增加^[3]。目前, 地浸开采已成为世界天然铀产能的主导工艺^[4], 并将持续。中国核电发展对天然铀的需求极大刺激了中国铀资源采冶工业, 近几十年探索并实践了常规开采、堆浸、原地爆破浸出、原地浸出、环境保护与污染治理、铀共生元素的综合回收和海水提铀等先进工艺, 极大地推动了中国铀矿采冶工业的技术进步。目前, 中国天然铀产量 90% 以上来自地浸开采。随着中国铀矿找矿工作重点向砂岩型矿床的转移, 特别是在 2025 年 7 月 12 日“国铀一号”成功投产的驱动下, 地浸采铀工艺的主导地位将持续巩固^[5]。

可以预见, 中国铀资源采冶工业将在应对未来挑战的过程中, 持续推进技术创新与产业升级, 实现可持续发展。

1 铀资源特点及常规采冶工艺发展

1.1 铀矿床种类特点及分布

中国自 1955 年开始开展铀矿床地质勘查工作, 早期找矿发现类型主要为砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型, 同时还发现了含铀煤型、碳酸盐岩型、碱性岩型、石英岩型及磷块岩型等^[6]。中国铀矿床普遍成矿年代较新, 大半为中生代, 铀矿品位多属于中等或偏低水平, 与铀共伴生的元素种类多、数量多^[7]。全国铀成矿单元主要划分为 4 个区域、11 个省、49 个矿带, 分布具有严重的不均匀性。目前, 中国铀资源的找矿重点聚焦于适宜地浸开采的砂岩型矿床。2025 年 7 月 18 日中国在新疆塔里木盆地 1 820 m 地下发现全球最深的砂岩型工业铀矿化^[8]。

1.2 铀资源采冶工业发展历程

中国铀矿冶工业创建于 20 世纪 50 年代末, 建成了郴州铀矿、衡山大浦铀矿和衡阳铀水冶厂等。在此期间, 北京铀矿选冶研究所(核工业北京化工冶金研究院)生产出制备第一颗原子弹需要的 UO_2 和 UF_4 ^[9]。1967 年兴建了衢州铀矿、本溪铀矿和伊宁铀矿及水冶厂等。20 世纪 70 年代末开展了原地浸出采铀现场试验, 并随后在新疆建成中国首个地浸采铀生产矿山。20 世纪 80 年代

中期,国家对铀矿业进行了大幅度调整,部分生产线关停,天然铀产量一度降到历史最低水平。目前,中国在产的常规开采铀矿山仅有两座,天然铀生产主要来源于地浸采铀。

2 铀矿床常规开采

2.1 铀矿床地下开采

根据铀矿床特点,地下开采方法包括充填法、壁式进路法、分层崩落法、留矿法、方框支柱法等^[10]。在常规开采鼎盛时期,80%~85%的铀矿山采用地下开采,且以上向水平分层充填法为主(占75%)。20世纪80年代初,探索了无轨机械化开采工艺,并在浙江771矿大茶园矿井、辽宁本溪铀矿和江西赣州鹿井铀矿应用,加快了铀矿床开采机械化进程,提高了铀矿生产能力,降低了采矿成本。此外,中国还探索了水体下、公路下、建筑物下的“三下”矿床开采工艺,并在湖南716矿成功应用,解决了受限条件下矿床开采的难题^[11]。在产的地下矿山,广东棉花坑矿床针对南部7号带破碎矿体采用无间柱分段连续采矿法,采矿效率高、成本低、采切工程量小^[12]。当前结合棉花坑矿井的实际生产现状,构建了设备配置优化模型,并提出了铲运设备无线远程控制和掘进设备精准导向控制等智能化矿山建设方案^[13]。

在多年的地下开采实践中,中国铀矿开采行业持续开展新技术、新工艺的探索和应用,不断推动技术进步。在巷道掘进、支护、爆破、矿石运输和止水方面探索先进工艺,诸如凿岩台车和环形钻架钻孔施工,光面、电雷管和微差爆破,喷锚支护,电耙和无轨铲运机运输,超前注浆和帷幕止水,矿井施工吊罐法和箕斗提升等,为采矿生产开启了新的发展阶段。

2.2 铀矿床露天开采

至20世纪70年代初,中国露天开采铀产量占全部铀产量的近1/3,如广西、湖南、江西、广东等省(自治区)的露天铀矿山都得到了较大的发展。露天铀矿山广泛采用大爆破技术,对加快矿山建设速度和降低剥离成本起到了极其重要的作用^[14]。中国85%的露天铀矿为山坡露天,其余为深凹露天。开采中主要采用汽车和斜坡道卷扬运输方式,大型铀矿采用定向抛掷大爆破和预裂爆破,并推行陡帮开采。某矿65号矿床和390矿床采用露天与坑采相结合的工艺生产^[15]。河北沽

源铀钼矿山于2009年投产,一期露天开采,采用公路开拓,挖掘机、汽车运输;二期将采用地下开采,无轨斜坡道开拓,铲运机装载配合卡车运输^[16]。在露天铀矿生产中,通过布置防渗帷幕可最大限度地减小矿坑水涌水量^[17]。

2.3 铀矿床堆浸开采

2.3.1 地表堆浸与搅拌浸出

中国堆浸提铀技术研究始于20世纪60年代,在多年的生产实践中取得了技术突破,如浓酸熟化—高铁淋滤堆浸技术、细菌氧化堆浸技术和伴生铀矿综合堆浸技术等。这些成果的应用取得了显著的经济效益。在几十年的细菌堆浸实践中,完成了由粗放型向精细型堆浸工艺的转化,并在世界上首次实现低渗透性铀矿石酸法制粒堆浸,填补了国际湿法冶金领域的一项技术空白。

堆浸生产周期一般较长,规模相对较大,投资及生产成本相对较低。搅拌浸出常用于处理品位较高的矿石,通过充分破碎和搅拌矿石,使含铀矿物与浸出剂充分接触,且易于控制浸出温度和浸出剂浓度,因而资源回收率高。

2.3.2 原地爆破浸出

中国在20世纪60年代末实践了浅孔爆破浸出采铀试验,铀浸出率达80%。20世纪90年代在陕西蓝田铀矿开展原地爆破浸出工业性试验,取得重大突破,建成了中国第一座原地爆破全堆浸型铀矿山。为获得原地爆破浸出矿石破碎最佳效果,中国研发了“原地爆破粒度控制计算机模拟系统——BLAST”^[18]。在模拟与实践的基础上,将块度小于150 mm的矿石产率控制在75%以上。该研究成果在江西赣州等多个铀矿推广应用。原地爆破浸出将80%开采剩余的低品位和表外矿石就地布液浸出,20%的高品位矿石出窿地面堆浸,使金属回收率达93%,并降低了“111”产品的生产成本^[19]。经过几十年的实践,中国探索并掌握了浅孔落矿筑堆、采场布液浸出和集液防渗堵漏三大关键技术,对采矿业的发展产生了积极的影响。

3 原地浸出采铀

3.1 地浸采铀工艺在中国的突破

中国地浸采铀试验于20世纪70年代开始,于1984年在云南获得成功,并于1991年建成试验性地浸采铀矿山,地浸采铀工艺在中国获得突

破。随后,在新疆 512 矿床建成中国第一个地浸采铀生产矿山,标志着中国已进入利用地浸工艺开采铀矿床的新时代^[20]。为激励地浸采铀工艺的发展,在国际原子能机构的资助下,中国研发了“铀矿床地浸评价专家系统——ESILU”,使铀矿床地浸开采可行性评价跨上新台阶^[21]。

3.2 钻孔结构、过滤器与成井工艺的进步

早期中国地浸采铀试验和生产中采用易脱落的托盘式钻孔结构^[22]。2000 年后,托盘式结构逐渐被填砾式结构所取代,并随后在生产中普遍采用^[23]。为增大钻孔抽注液量,1980 年在云南 381 地浸采铀现场试验中曾采用扩孔式结构^[24]。另外,新疆 737 厂曾对钻孔矿层段切割扩径,使注液量和抽液量分别提升 37.8% 和 52.7%^[25]。

包网式过滤器因加工简单、成本低,早期曾在中国使用,而后被外骨架过滤器替代。2000 年之后,探索并应用了贴砾过滤器,并在内蒙古通辽钱 II 矿山首次使用^[26]。在新疆 735 厂郎卡矿段水平井地浸采铀现场试验中,曾尝试割缝式过滤器^[27]。另外,中国最早在云南 381 矿床进行了可更换式过滤器的试验,并随后在内蒙古和新疆地浸矿山推广应用^[28]。

早期,中国地浸采铀矿山钻孔成井一直采用正向注浆;进入 21 世纪,在新疆洪海沟矿段和郎卡矿段开展了逆向注浆试验,消除了混浆段,有效提高了成井质量^[29-30]。为提高钻孔抽注液量,20 世纪 70 年代和 90 年代分别在广东河源和黑龙江省山市开展了原地爆破增渗地浸采铀试验,渗透性有所增加^[31-32]。内蒙古矿业公司在巴音青格利铀矿床开展了高能气体致裂增渗试验,使近井地带渗透能力明显改善^[33]。近些年,中国基于数字化建井理念和技术实现了钻井工程的数字化。

3.3 洗井工艺的多样化

中国地浸砂岩型铀矿床渗透性普遍偏低,因此,在试验和生产中洗井已成为矿山维持钻井效能的重要常规工序^[34]。随着科学技术的进步,地浸采铀矿山洗井从单一的压缩空气洗井、活塞洗井、化学洗井等方法发展为当今的活塞—压缩空气、气动脉冲—高压储气罐、移动式洗井装置和自动化洗井等方法,并在多个矿山得到应用^[35]。除此之外,新疆 735 厂探索了超声波洗井方法,研制了复合解堵剂(活化剂+综合解堵剂+多氢酸+防膨胀剂),取得了很好的应用效果^[36-37]。内蒙

古通辽钱 II 矿山试验了负压洗井工艺,提高了钻孔抽注液量,且洗井效果保持时间更长^[38]。

3.4 地浸采铀新工艺的探索与应用

3.4.1 无承压和弱承压地下水条件下地浸采铀

新疆 511 矿床 16 号勘探线以西地段地下水处于无承压或弱承压状态,为了有效开采资源,在此地段开展了注水提高地下水水位的地浸采铀试验,并在获得成功后投入生产^[39]。该试验采取的措施,打破了地浸开采工艺的水文地质条件限制,为类似地质环境下铀资源的开发利用提供了参考。

3.4.2 抽注液闭路循环与集控室分压注液

中国地浸采铀试验和生产矿山大多建设集液池和配液池,这不仅占用土地资源、增加矿山建设投资,也存在潜在的渗漏风险。为探索抽注液闭路循环系统,2003 年在新疆 513 矿床条件试验和 2012 年内蒙古纳岭沟矿山条件试验均未设计配液池和集液池,成功形成抽注液闭路循环系统,并随后在工业生产矿山推广应用^[40]。

内蒙古通辽铀矿实践了分压输送浸出剂的注液系统,即各集控室由独立的注液泵输送浸出剂,有效降低了注液泵工作压力和运行费用^[41]。另外,该矿山成功应用了可移动模块化集控室,实现集控室分模块建造、移动和组合、重复使用,减少了矿山建设投资^[42]。

3.4.3 残余资源二次开发与钻孔探采结合

在中国,某些铀矿山退役采区仍残留一定的资源。为回收更多资源,提出了二次开发,并首先在内蒙古通辽钱 II 矿山、新疆 512 矿床和内蒙古巴彦乌拉矿山进行,均获得较好效果^[43-44]。2003 年在新疆 513 矿床条件试验补充勘探过程中,首次提出利用勘探孔作为生产孔的想法,但因见矿孔与设计的试验孔位置不一致而失败。2021 年针对在 735 厂生产钻孔施工时实施探采结合技术,钻孔利用率达 61.68%,加快了建设进度,降低了生产成本^[45]。

3.4.4 递进式注酸流程与酸法氧气浸出工艺

中国地浸采铀砂岩型矿床渗透性普遍偏低,在生产过程中,若直接注入高浓度的酸性浸出剂,常造成严重的堵塞,降低钻孔抽注液量。为此,2001 年在新疆 511 矿床地浸采铀条件试验中采用递进式注酸方法,有效防止了 CO₂ 气体堵塞及由铁和铝氢氧化物所导致的堵塞^[46]。生产期间,

新疆739厂针对不同采区注酸浓度的控制,首先推行集控室加酸工艺,可方便、灵活掌握注酸效果。

中国酸法地浸采铀矿山前期使用 H_2SO_4 和 H_2O_2 做浸出剂,为探索酸法氧气浸出的可行性,在新疆738厂和737厂开展了酸法氧气浸出现场试验^[47-48]。结果表明, O_2 作为氧化剂,有较好的浸出效果,可以明显降低 Fe^{3+} 沉淀风险,大幅降低成本,减轻矿层化学堵塞和对地下水的污染。

3.4.5 细菌氧化浸出试验和应用

1990年开始,中国开展了细菌氧化浸出研究,并在云南381矿进行了中间试验和扩大试验^[49]。1996年起在新疆737厂开展了现场试验,并建设了大型细菌培养池^[50]。直至2018年,在新疆739厂研制了高效生物反应器,随之投入生产应用。该生物反应器借助耐冷嗜酸硫杆菌氧化,效果良好,大幅降低了氧化成本^[51-52]。

3.5 地浸采铀数字化矿山建设

中国于2017年提出“智能化+地浸采铀”技术,借以提高信息化、数字化和智能化水平^[53]。2021在中国内蒙古建成首个地浸铀矿山智能化示范工程,与千里外的生产现场实现无缝对接^[54]。该工程的建成标志着中国地浸采铀信息化、数字化和智能化矿山建设迈上了一个新台阶。整个地浸矿山生产动态场景、设备运行状况和重点工艺参数都可在中心大屏幕上显示和远程控制,实现了公司总部与矿山资源共享,提升了经济效益和企业核心竞争力,开创了中国地浸采铀矿山生产新纪元。

4 铀水冶工艺

4.1 常规水冶流程进展

常规水冶工艺常用于处理品位较高的矿石。从含铀溶液中提取铀通常采用离子交换和溶剂萃取法,而后将合格液沉淀得到重铀酸盐产品。经过多年的研究和生产,掌握了大通量固定床和密实移动床离子交换和饱和再吸附工艺,突破了从浸出液直接制备三碳酸铀酰铵或四氟化铀,实现了铀纯化流程的工业化。

河北沽源铀钼矿在酸浸矿浆处理过程中,开发了混凝-絮凝改性过滤技术,过滤速度比原酸性矿浆提高了1~3倍^[55]。内蒙古巴彦乌拉地浸矿山首次采用淋萃流程,大幅提高了合格液铀浓度,酸

耗低,效果良好^[56]。特别是在淋萃流程中,通过稀释器利用配制 H_2SO_4 浸出剂时散发的热量对饱和和有机相加热,缩短了分相时间,提高了贫有机相和合格液的温度,消除了夹带混相现象,大幅降低了贫有机相浓度和萃余水铀浓度。新疆737厂在对饱和树脂进行水冶处理时,使用硝酸盐淋洗剂,以硝酸根为氧化剂,大幅节省了氧化剂费用^[57]。

4.2 浸出液分布式处理

内蒙古通辽钱Ⅳ矿床试验阶段,首次实践了将卫星厂饱和树脂运送至钱Ⅱ矿山水冶厂处理的流程^[58]。特别是新疆513矿床将碳酸铀酰型饱和树脂运送至739厂酸法水冶流程处理,这种分布式浸出液处理流程效果良好,对于主矿体周围存在若干支矿体且同时开采的条件更加适用^[59]。

5 铀煤、铀钼等共伴生矿床的开发

5.1 含铀煤型矿床协同开采

新疆509和510矿床是中型含铀煤型矿床,在多年的生产中实践了短壁柱式、倾斜分层充填采矿法和削壁充填采矿法,获得较好效果^[60]。针对含铀煤型矿床具有放射性、容易自然着火的特点,开采中各采区独立通风,并装配矿用防爆电气设备。为了预防瓦斯和煤尘积聚引起爆炸,采用带反风装置的抽出式通风方式,同时还配备了瓦斯检测仪器^[61]。

内蒙古塔然高勒矿区铀矿与煤层处于同一空间,铀矿在上,煤层在下。开采面临的问题是:1)铀矿开采后的地下水修复效果能否保证煤矿正常开采;2)煤矿地下开采的排水是否破坏地浸开采的基本条件。为协调铀煤矿床的开采,近些年开展了水幕分隔、铀的迁移和开采顺序等多项研究。经过铀煤单位的协商,决定先采铀后采煤。目前,所建设的铀矿山已投入生产^[62]。

5.2 铀钼矿床综合开采

中国已发现大量铀钼矿床,江西赣南某火山岩型铀钼矿的浸出液用离子交换法分离铀和钼,树脂共同吸附、分别淋洗。河北沽源460铀钼矿床露天开采采用高酸、高温、强氧化剂浸出,隔膜板框压滤机固液分离,“TFA+TBF+煤油”萃取,间隙式浆体循环沉淀和中和沉淀工艺^[63]。另外,在露天和地下工程开挖过程中,研发了预裂爆破技术,并得到广泛应用^[64]。该铀钼矿山实现了分期开采,降低了前期生产剥采比,提高了矿山经

经济效益^[65]。江西上饶毛洋头铀钼矿床采用三脂胺萃取,负载有机相分别采用酸性溶液反萃取铀、碱性溶液反萃取钼,实现铀钼有效分离^[66]。在云南、贵州和湖南建设了2个铀矿石提取钼和铈的车间和1个回收铀和锆的车间。另外,中国还实践了从含铀富矿中提取镭的工艺。

5.3 海水提铀工艺研究进展

5.3.1 海水提铀研究的起步与规划

海水中蕴含了约45亿吨铀,相当于陆地铀资源量的1 000倍;如果能实现经济可行的开发利用,海水或将成为用之不竭的铀资源库^[67]。而且,相较于陆地铀矿石的开采,海水提铀最大优点是对生态环境的影响小。从20世纪60年代开始研究海水提铀,英国是最早研究海水提铀的国家,日本的研究水平较高,并建成了一座海水提铀小批量生产示范工厂^[68]。

中国高度重视海水提铀技术的开发,已投入大量资源,推动形成了由众多科研单位和大专院校共同参与的研究体系。以中国核工业集团有限公司领衔的“海水提铀技术创新联盟”在“关于海水提铀的前景规划与展望”中,制定了2021年至2050年“三步走”的技术战略路线,到2050年突破制约海水提铀工业化的关键技术瓶颈^[69]。

5.3.2 海水提铀吸附剂研究

海水提铀面临盐度高、铀浓度低、提取成本高等诸多问题,吸附法作为海水提铀中最有前景的方法受到国内外广泛关注^[70]。近年来,涌现出大量的海水提铀吸附材料和吸附工艺,诸如:超支化聚酰胺、合成聚合物吸附剂、无机吸附剂和纳米结构材料、电容去离子(CDI)技术、脉冲式进样-赋能动力学色谱柱、多孔芳香框架材料、膜分离、金属有机骨架(MOF)等^[71-76]。在规模化试验中,吸附剂的吸附能力已从早期的1.5 mg/g(日本)提升至3.63 mg/g(中国)^[77]。但海水提铀吸附剂的工业化应用,并不是指日可待的事情^[78]。

5.3.3 海水提铀前景

海水提铀成本是其工业化的核心关注点,当成本降低到150美元/(kgU)时,会有非常好的市场竞争力^[79]。美国最新的研究成果显示,海水提铀成本已低于陆地采铀成本的上限。海水提铀研究还有很大的进步空间和前景,若取得突破性进展,将可能成为引发世界能源革命的重要技术^[80]。加强海水提铀基础研究和科技成果转化,

对提升中国铀资源战略储备、推进核工业强国建设具有重要意义^[81],海水提铀必将成为一项具有市场竞争力的铀提取技术^[82]。

5.4 太空采铀进展

苏联火箭之父康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基1903年提出了开采太空资源的想法,随着近年来地球资源日益枯竭以及航天航空技术的发展,太空采矿再次迎来热潮^[83]。地球之外资源极其丰富,特别是月球克里普岩蕴藏有巨量的铀、钾、磷和稀土资源^[84]。

中国矿业大学成立了国内首个太空采矿国际研究中心,开展了太空采矿项目研究,并于2025年开发了太空采矿机器人。同时,中国实现了嫦娥四号着陆器和巡视器的月面着陆和巡视,为开采月球上的矿产资源奠定了基础。

6 环境保护与绿色铀矿山建设

6.1 辐射防护措施及效果

铀矿采冶工业形成后,中国政府和相关部门制定了《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》《铀矿冶设施退役整治工程设计规定》等辐射防护系列法规。依据这些法规,矿山采取密封井下采空区、岩壁和巷道,矿井水处理,覆盖露天采场废墟和尾矿库,增大换风次数等措施,保护矿山及周围环境。广西某露天铀矿山关停后,为了避免其对环境的污染,于2000年进行残矿资源回收^[85]。2010年开始退役治理,实施边坡稳定、覆盖、植被和清污等措施后,减少了氡的析出,切断了污水源,达到了铀矿退役治理目标。目前,中国铀矿山建立了完善的抽出式机械通风系统,铀矿工人年平均有效剂量持续降低^[86]。

6.2 废液无害化处理与循环利用

内蒙古通辽钱Ⅱ矿山应用反渗透系统处理转型废水,无二次废水排放,淡水产率达75%,且水质稳定^[87]。该工艺将地下水治理与水冶工艺有机结合,为矿山退役地下水修复创造了良好条件。同时,该矿山对废弃钻井液实施净化、转化和固化处理,效果良好。净化处理后,60%废弃钻井液可循环再利用;未能净化的废弃钻井液(15%~20%)转化为性能与水泥浆相当或更好的固井液;净化和转化处理后剩余的废弃钻井液(20%~25%)转化为类似土壤的固体,而后进行掩埋^[88],节省了用水,保护了环境。同样,新疆735厂和新

疆739厂也对废弃钻井液进行净化处理和再利用^[89-90]。

内蒙古通辽钱Ⅳ矿山对洗井废水通过气液分离、固液分离、袋式过滤等无害化处理工序,最终将处理后的洗井水注入抽出井,降低了对地下水资源的消耗,保护了环境^[91]。新疆739厂和内蒙古巴彦乌拉矿山研制了由计算机控制的洗井废水铀回收和处理移动装置,消除洗井废水中的大量泥砂等杂质,效果良好^[92]。针对自然蒸发法效果差的缺点,通辽钱Ⅱ矿山提出并实践了蒸发池风能增效蒸发和雾化蒸发,有效利用风能和太阳能,扩大液面的蒸发面积,加快蒸发速度^[93]。

6.3 溶浸范围测定与退役矿山地下水修复

为科学划定地浸采铀矿山溶浸范围,建立了地下水数值模型。模拟结果给出了抽液量大于注液量比例对溶浸范围的影响,并为井场外围监测井的布置提供了依据。以此,规定外围监测井宜布置在50~150 m处;下游监测井至少应延伸至300 m^[94]。

云南381地浸采铀试验基地于2010年关停,2016年全面启动地下水修复工程。修复期间采用包括清除法、反渗透、抽注井互换和还原沉淀在内的综合工艺。至2023年,全面完成地下水修复工作,并通过国防科工局的验收。该矿山开辟了中国地浸采铀地下水修复的新纪元,为退役矿山修复奠定了坚实基础。同时,中国还在新疆737退役采区进行了地下水修复现场试验。

7 铀资源采冶面临的挑战与展望

7.1 大埋深、低品位、低渗透铀矿床的开采

目前,中国铀矿床开采深度已超过500 m,随着勘探深度的加大,大埋深矿床会不断被发现。因此,中国铀资源的采冶将面临大埋深矿床的挑战。由于铀矿床的品位低,内蒙古2座地浸采铀矿山浸出液铀质量浓度一直低于10 mg/L,严重影响企业的经济效益。如何有效开发低品位矿床,增大资源回收率是当前主要的研究课题。矿床低渗透造成的矿层堵塞一直是地浸矿山面临的难题,虽然研发了多种洗井方法,但并未解决根本问题,如何通过物理方法和化学方法增大矿层渗透性有待深入的研究和探索。

7.2 提高矿山产能和生产效率

中国铀矿山产能普遍偏低,目前在产规模最

大的矿山为“国铀一号”地浸采铀矿山。矿山规模与矿床资源量密切相关,但也取决于规划设计。因此,在立足寻找大规模矿床的基础上,须统筹资源开发理念,提高矿山产能和生产效率。

虽然中国地浸采铀矿山人均产能已从原来的不足1 t/(人·年)提高到5 t/(人·年),但与美国地浸采铀矿山相比尚存在较大差距^[95]。目前,中国地浸采铀数字矿山已处于世界领先地位,但管理层仍有优化余地。展望未来,提高矿山人均产能是必然发展之路。

7.3 实施退役矿山污染治理和地下水修复

对于已关闭的常规铀矿山,均已完成污染治理和矿山退役工作。但对于中国地浸采铀退役生产矿山的地下水修复尚属空白。随着生产的持续进行,将有越来越多的采区或地浸采铀矿山退役,特别是在国家对环境保护和污染治理要求日益严格的形势下,地下水修复工作将是企业不可推卸的责任。而且,在矿山退役后必须立即开始地下水修复工作,改变目前无限制推延状况^[96]。一方面,应突破中国退役地浸矿山钻孔无法利用,阻碍地下水修复的瓶颈;另一方面,国家环保部门应根据中国地浸开采地下水污染物状况和复原趋势,制定适宜的规范和标准,推动中国地下水修复技术的发展创新。

7.4 铀资源采冶技术展望

2025年,中国在鄂尔多斯盆地泾川地区发现特大型铀矿床,并在深度1 820 m发现了全球最深的砂岩型工业铀矿化^[97-98]。目前,中国已查明了万吨级铀矿床20余个,预测铀资源潜力巨大。铀资源的发现为采冶奠定了坚实基础,特别是中国最大规模的地浸采铀矿山“国铀一号”于2025年7月12投产,更加激发了中国铀资源采冶技术的研究^[99]。经过几十年的研究与实践,中国铀资源采冶技术取得重大成绩,铀钼矿床综合回收、含铀煤型矿床协调开采、无承压及弱承压地下水条件下地浸开采等技术的应用,极大地推动了中国铀资源采冶技术的进步。特别是地浸采铀数字矿山远程控制系统的实现,引领了世界。展望未来,中国铀资源采冶行业将继续推陈出新,为推动新技术的发展做出更大努力。

8 结语

自1954年在广西发现中国首块铀矿石以来,

中国铀资源采冶工业历经长期探索与持续发展,已取得显著成就。在常规采冶方面推陈出新,逐步推广并完善了搅拌浸出、堆浸、原地爆破浸出工艺,并研发了“三下”开采和无轨开采工艺,为开采条件受限矿床提供了有效技术途径。地浸采铀突破弱承压和无承压地下水条件开采限制,建成了分布式浸出液处理系统,实践了酸法矿山淋萃流程。特别是在地浸采铀数字矿山建设上,实现了生产自动化、信息化、数字化和智能化,建成公司和矿山的网络监控系统,在世界上处于领先水平。分析中国铀资源采冶现状,更多、更高端的技术和工艺尚需探索和实践,以推进大埋深、低品位、低渗透铀资源,以及非常规铀资源的高效开采,进而建设更多环境友好、智能高效的现代化铀矿山。

参考文献:

- [1] 王海峰.原地浸出采铀技术发展与展望[R].北京:核工业北京化工冶金研究院,2025.
- [2] 顾彦,徐曼曼.《中国核能发展报告(2025)》:全球核能发展迎来全面复兴,建议积极有序推进项目开发[Z/OL].(2025-04-27)[2025-08-01].
<http://www.xinhuanet.com/digital/20250427/23ffe7146363482e9fb851cfbb2acab9/c.html>.
- [3] SRIDHAR C N, THIRUMURUGAN M, SUBRAMANI T, et al. Global distribution and sources of uranium and fluoride in groundwater: A comprehensive review[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2025:270.
- [4] 王海峰,李建东,王清良,等.酸法地浸采铀矿山地下水修复技术应用与探讨[J].*南华大学学报(自然科学版)*, 2023, 37(1):24-33.
WANG Haifeng, LI Jiandong, WANG Qingliang, et al. Application and discussion on groundwater remediation technology of acid in-situ leaching uranium mine[J]. *Journal of University of South China: Science and Technology*, 2023, 37(1):24-33.
- [5] 中核集团.我国规模最大的天然铀产能项目成功生产出第一桶铀产品[Z/OL].(2025-07-12)[2025-08-01].
<http://www.xinhuanet.com/20250712/0e8dc0c019034df6b4506a48023ca932/c.html>.
- [6] 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:《中国矿产地质志·铀矿卷》研编[J].*地球学报*, 2025, 46(1):52-68.
CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Metallogenic regularity, centennial exploration results of uranium deposits in China, and suggestions for a new round of prospecting: Research and compilation of “Geology of Mineral Resources of China·Uranium Deposits Volume” [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2025, 46(1):52-68.
- [7] WANG H F, FENG F X, WANG S D. Exploitation des mines d'uranium chinoise et orientation du développement d'avenir[J]. *Congrès mondial sur l'exploitation de l'uranium*, IAEA, Montpellier, France, 1997.
- [8] 中核铀业有限责任公司.地下 1820 米!我国在新疆塔里木盆地发现全球最深砂岩型工业铀矿化[Z].(2025-07-27).
<http://www.nea.gov.cn/20250727/35eb8f30ba794816a682372a3033f61e/c.html>.
- [9] 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.
- [10] 孙占学, Fiaz Asghar, 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.
SUN Zhanxue, ASGHAR Fiaz, ZHAO Kai, et al. Review and prospect of uranium mining and metallurgy in China [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(8):1-8.
- [11] 朱家华,欧阳建功.铀矿床“三下”开采试验采场地压和岩层移动观测研究[J].*铀矿冶*, 1989, 8(4):1-11.
ZHU Jiahua, OUYANG Jiangong. Observation of ground pressure and rock movement in uranium mine under river and buildings[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 1989, 8(4):1-11.
- [12] 谢国森,罗春梧,宋丽霞,等.棉花坑矿床破碎矿体深孔连续采矿工艺研究[J].*铀矿冶*, 2022, 41(4):394-400.
XIE Guosen, LUO Chunwu, SONG Lixia, et al. Study on deep hole continuous mining technology of broken ore body in Mianhuakeng deposit[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2022, 41(4):394-400.
- [13] 秦旭忠,宋丽霞,李祖荣,等.棉花坑矿井采掘设备配置优化方案探讨[J].*铀矿冶*, 2023, 42(3):57-62.
QIN Xuzhong, SONG Lixia, LI Zurong, et al. Discussion on optimization scheme of mining equipment allocation in Mianhuakeng mine[J]. *Uranium*

- Mining and Metallurgy, 2023, 42(3):57-62.
- [14] 李开文. 我国铀矿露天开采的技术状况及发展方向[J]. 铀矿冶, 1986, 5(1):1-6.
LI Kaiwen. Discussion on technical status and development direction of uranium open-pit mining in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1986, 5(1):1-6.
- [15] 乔允芝. 浅谈中小型露天铀矿的生产建设[J]. 铀矿冶, 1995, 14(2):79-83.
QIAO Yunzhi. About construction and production of middle and small uranium open-pit mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1995, 14(2):79-83.
- [16] 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.
LIU Zhiyong, SHAO Changliang, LI Zongjin, et al. Discussion on mining scheme of 460 uranium-molybdenum deposit [J]. Modern Mining, 2015, 31(7):25-27.
- [17] 雷明信, 张群, 冯张生. 某露天开采铀矿床注浆帷幕防治水效果分析[J]. 铀矿冶, 2021, 40(4):294-299.
LEI Mingxin, ZHANG Qun, FENG Zhangsheng. Analysis of the effect of water control on the curtain of a open-pit mining bed[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(4):294-299.
- [18] 王海峰, 易卫平, 李羽, 等. 原地破碎浸出爆破粒度模拟系统的研制[J]. 金属矿山, 1998, 27(1):4-7.
WANG Haifeng, YI Weiping, LI Yu, et al. Development of fragmentation simulation system used for crushing and leaching in site[J]. Metal Mine, 1998, 27(1):4-7.
- [19] 钟永明, 谢国森, 李凌波, 等. 我国原地爆破浸出采铀工艺技术研究与应用[J]. 中国矿业, 2004, 13(6):63-65.
ZHONG Yongming, XIE Guosen, LI Lingbo, et al. The researching and applying state of stope leaching of uranium in China[J]. China Mining Magazine, 2004, 13(6):63-65.
- [20] 王海峰. 原地浸出采铀技术与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1998:3-5.
- [21] 王海峰, 易卫平, 余云珍, 等. 铀矿床地浸评价专家系统 ESILU 的研制[J]. 铀矿冶, 1996, 15(3):145-151.
WANG Haifeng, YI Weiping, YU Yunzhen, et al. Development of expert system ESILU for evaluation of in-situ leaching uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1996, 15(3):145-151.
- [22] 王海峰, 李建东, 刘正邦, 等. 中国地浸采铀钻孔施工与成井技术研究进展[J]. 铀矿冶, 2022, 41(3):195-201.
WANG Haifeng, LI Jiandong, LIU Zhengbang, et al. Research progress on drilling and well completion technology of in-situ leaching uranium in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3):195-201.
- [23] 张勇, 黄群英, 肖作学, 等. 填砾工艺在地浸钻孔施工中的应用[J]. 铀矿冶, 2009, 28(3):113-116.
ZHANG Yong, HUANG Qunying, XIAO Zuoxue, et al. Application of gravel filling to completion of hole drilling for in-situ leaching[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2009, 28(3):113-116.
- [24] 胡柏石, 刘国福, 易卫平, 等. 矿层部位局部扩径是地浸井场提高钻孔涌水量的根本途径[J]. 铀矿冶, 2000, 19(4):222-227.
HU Baishi, LIU Guofu, YI Weiping, et al. Local reaming at ore-bearing horizon is the fundamental way to increase water yield of drill holes in in-situ leaching well field[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(4):222-227.
- [25] 王晓斌, 王旨儒. 采用裸孔切割技术提高地浸注液井注液能力: 以某矿床 23[#] 采区为例[J]. 铀矿冶, 2022, 41(S1):15-18.
WANG Xiaobin, WANG Zhiru. Improve injection capacity of injection well for in-situ leaching by bare hole cutting technology: A case study of 23[#] mining area of a deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(S1):15-18.
- [26] 张万亮, 张勇, 闫纪帆, 等. 可更换过滤器式地浸采铀钻孔施工技术[J]. 铀矿冶, 2022, 41(1):36-42.
ZHANG Wanliang, ZHANG Yong, YAN Jifan, et al. Drilling technology of replaceable filter for in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(1):36-42.
- [27] 李坡, 周根茂, 李召坤, 等. 地浸采铀水平井过滤器建造技术研究[J]. 铀矿冶, 2022, 41(3):215-223.
LI Po, ZHOU Genmao, LI Zhaokun, et al. Filter construction technology of horizontal well for in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3):215-223.
- [28] 易志刚, 路乾乾, 熊威, 等. 新疆某铀矿床钻井内置过滤器技术研究[J]. 铀矿冶, 2020, 39(1):6-10.
YI Zhigang, LU Qianqian, XIONG Wei, et al. Research on built-in filter technology in a uranium de-

- posit in Xinjiang [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2020, 39(1): 6-10.
- [29] 王旨儒, 陈梅芳, 王春霞, 等. 地浸钻孔逆向注水泥浆试验研究[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第四卷): 中国核学会 2015 年学术年会论文集: 第 1 册. 绵阳: [出版者不详], 2015: 55-64.
- [30] 李召坤, 胡柏石, 李建华, 等. 逆向注浆工艺在超深地浸钻孔中的应用研究[J]. *铀矿冶*, 2020, 39(3): 179-190.
- LI Zhaokun, HU Baishi, LI Jianhua, et al. Application of reverse grouting technology in the deep well drilling on the ISL mine[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2020, 39(3): 179-190.
- [31] 王西文. 地浸采铀概述[J]. *铀矿开采*, 1996(1): 1-12.
- WANG Xiwen. Overview of in-situ leaching uranium mining[J]. *Uranium Mining*, 1996(1): 1-12.
- [32] 李熙琪, 史文革, 孙贵胜, 等. 东北某铀矿床原地爆破松动浸出采铀[J]. *铀矿冶*, 2006, 25(1): 47-49.
- LI Xiqi, SHI Wenge, SUN Guisheng, et al. Leaching of uranium after in-place blasting out at a uranium deposit of northeast China[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2006, 25(1): 47-49.
- [33] 张友澎, 赵利信, 王亚奴, 等. 高能气体致裂技术在低渗砂岩型铀矿地浸开采中的应用[J]. *铀矿冶*, 2024, 43(3): 1-8.
- ZHANG Youpeng, ZHAO Lixin, WANG Yanu, et al. Application of high energy gas fracturing technology in in-situ leaching of low-permeability sandstone uranium deposits [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2024, 43(3): 1-8.
- [34] 王海峰, 谭亚辉, 杜运斌, 等. 原地浸出采铀井场工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [35] 王海峰. 地浸采铀洗井工艺最新进展[R]. 北京: 核工业北京化工冶金研究院, 2024.
- [36] 易志刚, 李勇, 哈杰提, 等. 超声波洗井在地浸采铀生产过程中的解堵应用研究[J]. *世界核地质科学*, 2022, 39(1): 139-147.
- YI Zhigang, LI Yong, HA Jieti, et al. Study on the application of ultrasonic well washing in the process of in-situ leaching uranium production[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2022, 39(1): 139-147.
- [37] 木拉德江, 吉宏斌, 阳晓宇. 蒙其古尔矿床化学洗孔工艺优化及影响因素分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第六卷): 中国核学会 2019 年学术年会论文集第 2 册. 包头: [出版者不详], 2019, 165-180.
- [38] 刘晓奎, 张渤, 闫纪帆, 等. 负压洗井工艺在地浸采铀矿山的应用[J]. *铀矿冶*, 2023, 42(3): 46-49.
- LIU Xiaokui, ZHANG Bo, YAN Jifan, et al. Application of negative pressure well washing technology at in-situ leaching uranium mines[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2023, 42(3): 46-49.
- [39] 李熙琪, 张勇, 王海峰, 等. 新疆某矿床 16 号线矿体地浸钻孔洗井工艺[J]. *铀矿冶*, 2003, 22(1): 10-14.
- LI Xiqi, ZHANG Yong, WANG Haifeng, et al. Technology of drill hole and well cleaning for in-situ leaching on the 16th section line ore body[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2003, 22(1): 10-14.
- [40] 江国平, 霍建党, 王海峰, 等. 内蒙古铀矿基地纳岭沟铀矿床地浸技术研究[R]. 北京: 核工业北京化工冶金研究院, 2014.
- [41] 陈伟山, 杨彦虎, 曹永凯, 等. “叠压供水”技术在地浸采铀设计中的应用研究[J]. *铀矿冶*, 2022, 41(4): 406-411.
- CHEN Weishan, YANG Yanhu, CAO Yongkai, et al. The application research of “additive pressure water supply” in design of in-situ leaching uranium [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2022, 41(4): 406-411.
- [42] 彭方麒, 宋建, 李阳. 地浸井场可移动模块化集控室的研制[J]. *铀矿冶*, 2018, 37(4): 268-272.
- PENG Fangqi, SONG Jian, LI Yang. Development of removable modular centralized control room at in-situ leaching mine [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2018, 37(4): 268-272.
- [43] 成弘, 刘乃忠. 地浸铀矿山的“二次开发”: 以通辽钱 II 块铀矿床 C1 采区为例[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第四卷): 中国核学会 2015 年学术年会论文集: 第 1 册. 绵阳: [出版者不详], 2015: 455-461.
- [44] 桂增杰, 赵瑾, 韩杨琴. 创新实干助力中核内蒙古矿业苏尼特左旗分公司提升天然铀生产效能[Z]. 呼和浩特: 中核内蒙古矿业有限公司, 2024.
- [45] 郝以泽, 徐丽文, 赵涛. 探采结合技术在蒙其古尔铀矿床 P0 线以西的应用[J]. *铀矿冶*, 2024, 43(4): 20-24.
- HAO Yize, XU Liwen, ZHAO Tao. Application on combination of exploration with mining in west of Mengqiguer uranium P0 prospecting line[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2024, 43(4): 20-24.
- [46] 王海峰, 叶善东. 原地浸出采铀工程技术[M]. 北

- 京:中国原子能出版传媒有限公司,2011:84-98
- [47] 廖文胜,王立民,谭亚辉,等.酸法地浸中氧气作氧化剂的研究[R].北京:核工业北京化工冶金研究院,2007.
- [48] 陈箭光,沈红伟,陈立,等.新疆某酸法地浸采铀矿山氧气氧化效果研究[J].铀矿冶,2022,41(S1):19-24.
CHEN Jianguang, SHEN Hongwei, CHEN Li, et al. Study on oxygen oxidant in an acid in-situ leaching uranium mine in Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(S1):19-24.
- [49] 胡凯光,王清良,刘迎九,等.381矿床地浸中细菌代替双氧水试验研究[J].铀矿开采,1998,22(3):12-23.
HU Kaiguang, WANG Qingliang, LIU Yingjiu, et al. Experimental study on bacteria replacing hydrogen peroxide in in-situ leaching of 381 deposit[J]. Uranium Mining, 1998, 22(3):12-23.
- [50] 王清良,胡鄂明,李锦鹏,等.地浸采铀细菌浸出试验研究[J].矿冶工程,2010,30(4):5-8.
WANG Qingliang, HU Eming, LI Jinpeng, et al. Experimental research on bacterial leaching in in-situ leaching mining of uranium[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(4):5-8.
- [51] 蒋小辉,叶善东,陈国贞,等.新疆某高酸耗矿床碱法地浸生物采铀试验研究[J].中国矿业,2012,21(S1):301-305.
JIANG Xiaohui, YE Shandong, CHEN Guozhen, et al. Alkaline in-situ leaching test of a high-acid-consumption uranium mineral deposit in Xinjiang[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1):301-305.
- [52] 魏小辉,王清良,雷治武,等.细菌快速氧化新疆地浸采铀吸附尾液中 Fe^{2+} 现场扩大试验研究[J].矿产保护与利用,2020,40(4):9-16.
WEI Xiaohui, WANG Qingliang, LEI Zhiwu, et al. Expansion experimental study for rapid oxidation of Fe^{2+} in adsorption tail solution of in-situ uranium leaching by a bacteria in field in Xinjiang[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4):9-16.
- [53] 蔡磊.打造中国方案第三代地浸采铀技术助力世界核能发展[N].中国核工业报,2017.
- [54] 丁武,曾繁钢.国内首个地浸铀矿山远程管控中心在呼和浩特建成并投运[R].呼和浩特:中核内蒙古矿业有限公司,2021.
- [55] 刘会武,刘永涛,师留印,等.混凝-絮凝改性过滤技术在洁源铀钼矿浸出矿浆中的应用研究[J].铀矿冶,2014,33(2):94-98.
- LIU Huiwu, LIU Yongtao, SHI Liuyin, et al. Application research on modified filtration of Guyuan uranmolybdatite leaching slurry by coagulation-flocculation technology[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(2):94-98.
- [56] 李世俊,朱国明,桂增杰,等.淋萃流程在内蒙古某地浸矿山的应用研究[J].铀矿冶,2019,38(4):273-278.
LI Shijun, ZHU Guoming, GUI Zengjie, et al. Research on the application of Eluex process in a uranium mine in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(4):273-278.
- [57] 阙为民,陈祥标.地浸硝酸盐吸附淋洗试验研究[J].铀矿开采,1997,21(4):29-35.
QUE Weimin, CHEN Xiangbiao. Experimental study on adsorption and elution of nitrate in in-situ leaching[J]. Uranium Mining, 1997, 21(4):29-35.
- [58] 刘乃忠,李喜龙,王坚朴,等.分布式原地浸出采铀工艺技术与关键设备[J].铀矿冶,2015,34(2):61-67.
LIU Naizhong, LI Xilong, WANG Jianpu, et al. The distributed ISL mining uranium and its key equipment[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2015, 34(2):61-67.
- [59] 陈梅芳,阳奕汉,肖作学,等. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀饱和树脂酸化技术与应用[J].原子能科学技术,2019,53(4):618-623.
CHEN Meifang, YANG Yihan, XIAO Zuoxue, et al. Technology and application of acidified saturated resin in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leach uranium mine[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(4):618-623.
- [60] 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.
WANG Qianyu. Characteristics of mining uranium-bearing coal deposit in mine No. 509[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1997, 16(2):78-83.
- [61] 欧阳建功.含铀煤的开采[J].铀矿冶,1982(3):1-6.
OUYANG Jiagong. Mining of uranium-bearing coal[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1982(3):1-6.
- [62] 夏子通,王玮,邹兆庄,等.铀、煤共生资源有序开采研究[J].铀矿地质,2019,35(3):187-192.
XIA Zitong, WANG Wei, ZOU Zhaozhuang, et al. Technical study on mining sequence of uranium and

- coal resources[J]. Uranium Geology, 2019, 35(3): 187-192.
- [63] 沈光银. 460 铀钼矿床综合回收初步研究[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(1): 76-81.
SHEN Guangyin. The initiative research on comprehensive recovery of uranium molybdenum deposit 460[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2010, 25(1): 76-81.
- [64] 刘海洋, 闫志国, 户方远, 等. 某铀钼露天矿预裂爆破合理参数试验研究[J]. 铀矿冶, 2019, 38(4): 244-247.
LIU Haiyang, YAN Zhiguo, HU Fangyuan, et al. Study on the experiment for reasonable parameters of pre-splitting blasting in a uranium molybdenum open-pit mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(4): 244-247.
- [65] 闫志国. 某铀钼露天矿分期开采技术研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(S1): 351-353.
YAN Zhiguo. A uranium molybdenum open pit mining technology research stage[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 351-353.
- [66] 刘国生, 王速, 王家和, 等. 毛洋头铀矿床淋浸液萃取分离铀钼工艺技术研究[J]. 铀矿冶, 2000, 19(3): 205-208.
LIU Guosheng, WANG Su, WANG Jiahe, et al. Separating uranium from molybdenum in trickle leaching solution of Maoyangtou uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(3): 205-208.
- [67] 郭冀峰, 薛建新, 刘佳祥, 等. 多孔海水提铀吸附材料的应用研究与进展[J]. 化学工程, 2025, 53(6): 39-45.
GUO Jifeng, XUE Jianxin, LIU Jiaxiang, et al. Application research and progress of porous adsorbents for uranium extraction from seawater[J]. Chemical Engineering, 2025, 53(6): 39-45.
- [68] 李璐琰, 文君, 胡胜, 等. 抗生物污损型海水提铀材料研究进展[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 299-312.
LI Luyan, WEN Jun, HU Sheng, et al. Research progress of anti-biofouling materials for uranium extraction from seawater[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(3): 299-312.
- [69] 宋艳, 牛玉清, 宿延涛, 等. 未来海水提铀的前景规划与展望[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 229-232.
SONG Yan, NIU Yuqing, SU Yantao, et al. Future plan and prospect for uranium extraction from seawater[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(3): 229-232.
- [70] 敖浚轩, 徐晓, 李玉娜, 等. 海水提铀研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2019, 37(2): 3-28.
AO Junxuan, XU Xiao, LI Yuna, et al. Research progress of uranium extraction from seawater[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2019, 37(2): 3-28.
- [71] 何宁宁, 卢喜瑞, 文君. 超支化抗菌型海水提铀材料[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(1): 90-99.
HE Ningning, LU Xirui, WEN Jun. Hyperbranched modified antibacterial adsorbent for uranium extraction from seawater[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(1): 90-99.
- [72] 白震媛, 许恒斌, 王君, 等. 海水提铀的最新进展[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2020, 37(1): 61-70.
BAI Zhenyuan, XU Hengbin, WANG Jun, et al. New development of uranium extraction from seawater[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2020, 37(1): 61-70.
- [73] 严国泽, 左彬, 刘少卿, 等. 电容去离子海水提铀的机遇与挑战[J]. 物理化学学报, 2025, 41(4): 28-45.
YAN Guoze, ZUO Bin, LIU Shaoqing, et al. Opportunities and challenges of capacitive deionization for uranium extraction from seawater[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2025, 41(4): 28-45.
- [74] 付裕杰, 于涛, 叶剑华. 赋能动力学子色谱法快速海水提铀研究[J]. 核技术, 2024, 47(2): 123-138.
FU Yujie, YU Tao, YE Jianhua. Energy-endowed kinetic chromatographic columns for rapid uranium extraction from seawater[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(2): 123-138.
- [75] 郭帅帅, 陈锦路, 金梁程龙, 等. 基于海水提铀的多孔芳香框架材料研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(3): 1426-1436.
GUO Shuaishuai, CHEN Jinlu, JIN Liangcheng, et al. Research progress of porous aromatic frameworks based on uranium extraction from seawater[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(3): 1426-1436.
- [76] 张越, 刘佳鑫, 马敬, 等. 金属有机骨架膜应用于海水提铀研究进展[J]. 化工学报, 2025, 76(5): 2087-2100.
ZHANG Yue, LIU Jiaxin, MA Jing, et al. Recent

- progress on metal-organic framework membranes towards uranium separation from seawater[J]. CI-ESC Journal, 2025, 76(5):2087-2100.
- [77] 郭冀峰,薛建新,刘佳祥,等.多孔海水提铀吸附材料的应用研究与进展[J].化学工程,2025,53(6):39-45.
- GUO Jifeng, XUE Jianxin, LIU Jiaxiang, et al. Application research and progress of porous adsorbents for uranium extraction from seawater [J]. Chemical Engineering, 2025, 53(6):39-45.
- [78] 李兆龙.海水提铀吸附剂的最近进展[J].海洋通报,1985,4(4):61-65.
- LI Zhaolong. Recent advances in adsorbents for uranium extraction from seawater [J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4(4):61-65.
- [79] 李昊,文君,汪小琳.中国海水提铀研究进展[J].科学通报,2018,63(Z1):481-494.
- LI Hao, WEN Jun, WANG Xiaolin. Research advances on extracting uranium from seawater in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(Z1):481-494.
- [80] 冯健,何桂强,魏艳霞,等.海水提铀吸附材料研究进展[J].化工新型材料,2022,50(3):1-7.
- FENG Jian, HE Guiqiang, WEI Yanxia, et al. Research progress on adsorption material for U extraction from seawater[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(3):1-7.
- [81] 蓝芳芳,李贤辉,杨阳.海水提铀技术研究进展与挑战[J].广东工业大学学报,2023,40(6):139-146.
- LAN Fangfang, LI Xianhui, YANG Yang. Research progress and challenges of uranium extraction technology from seawater [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2023, 40(6):139-146.
- [82] 李璐琰,文君,胡胜,等.抗生物污损型海水提铀材料研究进展[J].核化学与放射化学,2022,41(3):299-312.
- LI Luyan, WEN Jun, HU Sheng, et al. Research progress of anti-biofouling materials for uranium extraction from seawater [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 41(3):299-312.
- [83] 张克非,李怀展,汪云甲,等.太空采矿发展现状、机遇和挑战[J].中国矿业大学学报,2020,49(6):1025-1034.
- ZHANG Kefei, LI Huaizhan, WANG Yunjia, et al. Current status, opportunities and challenges of space mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6):1025-1034.
- [84] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等.月球某些资源的开发利用前景[J].地球科学(中国地质大学学报),2002,27(5):498-503.
- OUYANG Ziyuan, ZOU Yongliao, LI Chunlai, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2002, 27(5):498-503.
- [85] 徐乐昌,张钊,张国甫,等.广西某铀矿山露天采场及废石场的退役治理[J].铀矿冶,2012,31(3):158-161.
- XU Lechang, ZHANG Zhao, ZHANG Guofu, et al. Close-out of open pit and waste rock piles of a uranium mine in Guangxi Province of China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2012, 31(3):158-161.
- [86] 施祖远.我国铀矿开采技术成就与发展对策[J].铀矿冶,2011,30(40):175-179.
- SHI Zuyuan. Achievements in uranium mining technique of China and its development countermeasures [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2011, 30(40):175-179.
- [87] 阮志龙,李喜龙,杨少武.反渗透工艺技术在 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸矿山的应用[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第三卷):中国核学会2013年学术年会论文集:第2册.哈尔滨:[出版者不详],2013:204-208.
- [88] 徐乐昌,王红英,刘乃忠,等. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工艺的废水处理方法[J].铀矿冶,2012,31(2):96-99.
- XU Lechang, WANG Hongying, LIU Naizhong, et al. Waste water treatment of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2012, 31(2):96-99.
- [89] 高险峰,李喜龙,张勇.地浸采铀废钻液无害化处理工艺研究[J].铀矿冶,2017,36(4):273-278.
- GAO Xianfeng, LI Xilong, ZHANG Yong. Research on waste drilling fluid harmless disposal in ISL mining uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(4):273-278.
- [90] 梁其深,胡柏石,秦昊.地浸钻孔废旧泥浆净化处理工艺方法[J].铀矿冶,2016,35(1):16-20.
- LIANG Qishen, HU Baishi, QIN Hao. The process technology for purification treatment of waste mud from bore drilling in situ leaching [J]. Uranium

- Mining and Metallurgy, 2016, 35(1):16-20.
- [91] 崔裕禄,段柏山,费子琼.净化钻井液在地浸钻孔中应用[J].铀矿冶,2017,36(4):267-272.
- CUI Yulu, DUAN Baishan, FEI Ziqiong. Application of the purified drilling fluid in in-situ leaching drill hole [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(4):267-272.
- [92] 毛鑫磊.地浸采铀矿山洗井废水除砂装置的研制与应用[J].铀矿冶,2024,43(2):80-83.
- MAO Xinlei. Development and application of a sand removal device for well washing wastewater in in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2):80-83.
- [93] 李喜龙,王海珍,蔚龙凤,等.地浸矿山风能增效蒸发装置的研究与应用[J].铀矿冶,2019,38(2):128-132.
- LI Xilong, WANG Haizhen, WEI Longfeng, et al. Research and application of wind energy for synergistic evaporator at in-situ leaching mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(2):128-132.
- [94] 生态环境部,国家市场监督管理总局.铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定:GB 23727—2020[S].北京:中国环境科学出版社,2020.
- [95] 王海峰.地浸采铀技术在我国应用中存在的问题[J].铀矿冶,2008,27(3):113-118.
- WANG Haifeng. The existing problems on in-situ leaching of uranium in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2008, 27(3):113-118.
- [96] 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.
- QUE Weimin, WANG Haifeng, TIAN Shifeng, et al. Research status and development of in-situ leaching uranium techniques in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3):113-117.
- [97] 我国铀矿重大突破:开启新能源时代的新篇章[Z].地球天地,2025.
- [98] 我国在新疆塔里木盆地发现全球最深砂岩型工业铀矿化!这究竟是什么?[Z].中国之声,2025.
- [99] 中核集团.我国规模最大的天然铀产能项目成功生产出第一桶铀产品[Z].新华社新闻,2025.

Current Situation and Prospect of Uranium Resources Mining and Metallurgy Technology in China

WANG Haifeng

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

Abstract: Over the past few decades, China's uranium resource mining and metallurgy technology has undergone a development process from nothing to something, and from weak to strong. It has introduced trackless mining and "three-under" mining technologies, broken through surface heap leaching and underground heap leaching, innovated in-situ blasting leaching and bacterial heap leaching, practiced acid, alkaline and neutral in-situ leaching of uranium mining technologies, explored and improved borehole drilling, underground leaching methods and hydrometallurgical processes, built digital mines in Xinjiang and Inner Mongolia, verified the control of leaching area, the treatment and reuse of waste drilling mud, reverse osmosis treatment of waste liquids, and the groundwater remediation of decommissioned test mines, and implemented the rational mining and metallurgy of uranium-molybdenum and uranium-coal deposits, and explored the technology of extracting uranium from seawater. The new technologies and processes practiced in uranium resource mining and metallurgy have become the driving force for China's natural uranium production. Looking to the future, China's uranium resource mining and metallurgy industry is bound to innovate and create greater breakthroughs.

Key words: uranium resource; mining and metallurgy technology; conventional mining; heap leaching; in-situ blasting leaching; in-situ leaching; current situation