

中国铀矿采冶技术发展展望

阙为民¹, 王海峰¹, 牛玉清¹, 张飞凤², 谷万成¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149; 2. 中国核工业集团公司金原铀业有限责任公司, 北京 100822)

[摘要] 对中国铀矿采冶工业的发展作了全面的回顾, 重点介绍了中国铀矿地浸、堆浸、原地爆破浸出技术的研究进展与应用水平; 在对中国铀矿采冶形势和存在的问题分析的基础上, 结合矿床资源的特点, 指出了中国铀矿采冶技术发展的方向。21 世纪中国铀矿冶工业面临新的发展机遇和挑战, 只有开发新的采、选、冶技术, 提高铀资源的利用水平, 减少铀矿采冶对环境的影响, 才能实现铀矿冶的可持续发展和经济与环境的协调发展。

[关键词] 铀矿开采; 地浸; 堆浸; 提取; 纯化; 发展

[中图分类号] TD801 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)03-0044-10

1 前言

铀资源是关系国家安全的重要战略资源, 是我国核大国地位的基础保障。铀矿冶是核工业的基础。通过 50 年的不懈努力, 先后在全国十几个省、市、自治区建设了若干座铀矿山和铀水冶厂, 以及铀矿冶研究所、设计院、机修厂、建筑公司等, 建立了完整的中国铀矿冶工业体系, 为我国核工业发展打下了坚实基础。其业务范围包括铀矿开采、铀矿选冶、铀纯化、铀氧化物的生产、机械加工、放射性辐射防护、放射性环境评价、矿山退役治理等, 目前主要生产的铀产品有重铀酸钠(铀)、三碳酸铀酰铵、过氧化铀、八氧化三铀、二氧化铀等。进入 21 世纪, 核电的发展为中国铀矿采冶业的发展提供了新的契机。

2 中国铀矿采冶工业的发展历程^[1,2]

中国铀矿冶工业创建于 50 年代末, 1958 年建立了主管铀矿冶工作的二机部十二局, 同时成立了新疆矿冶公司和中南矿冶公司, 组建了北京铀矿选冶研究所、铀矿冶设计研究院和铀矿开采研究所。第一批建设的铀矿冶企业, 即: 三矿(郴州铀矿、衡山大浦铀矿和上饶铀矿)一厂(衡阳铀水冶厂)于 1962 年 9 月至 1963 年 10 月陆续建成并顺利投产,

实现了从矿石到 UO_2 的工业生产, 成功地解决了原子能工业的原料问题。在此期间, 北京铀矿选冶研究所(现核工业北京化工冶金研究院)的科技人员, 在国家还没有建成铀矿冶工业的情况下, 用最快速度生产出制备第一颗原子弹需要的 UO_2 和 UF_4 , 为 1964 年 10 月我国第一颗原子弹爆炸成功做出了贡献。

1963 年国家决定建立第二批铀矿冶企业, 到 1967 年先后建成了广东和抚州两个铀矿冶联合企业, 开发建设了新的铀矿、放射分选厂和铀水冶厂, 包括: 衢州铀矿、本溪铀矿(草河口)、修水铀矿、兴城铀矿和伊宁铀矿及水冶厂等。第二批铀矿冶企业的铀矿开采和提取的工艺流程都是我国自行研究设计的, 采矿工艺方面, 试验采用了水泥隔离墙代替人工矿柱, 水泥垫板代替木垫板, 研究解决了含铀煤矿的开采技术, 改进了缓倾斜薄矿层的采矿工艺; 水冶工艺方面, 成功研究了处理各种不同类型矿石的多种工艺流程, 包括: 处理花岗岩型矿的固液分离-清液萃取流程, 处理含铀煤矿的低温燃烧发电和从煤灰中浸出并用萃取法提取铀的流程, 处理泥质矿的流态化分级洗涤技术, 处理火山岩矿的半连续逆流离子交换和用磷类萃取剂萃取合格解吸液的淋萃流程, 处理碱交代型花岗岩铀矿和含碳酸盐较多的碳

[收稿日期] 2007-08-18

[作者简介] 阙为民(1965-), 男, 湖南安化县人, 研究员级高级工程师、博士, 长期从事铀矿采冶研究工作

硅泥岩铀矿的加压碱浸流程。

到 70 年代末,建设了第三批铀矿冶企业。在铀矿冶科研方面推广了喷锚支护等高效率的施工技术,开展了原地浸出采铀试验,成功研究了从矿石浸出液直接制备三碳酸铀酰胺或四氟化铀的新工艺,突破了从含磷、钼等复合矿石中提取铀的技术和从含铀富矿中提取镭的工艺流程。

从 20 世纪 80 年代中期开始,随着核工业的战略转移,铀产品由面向国防建设而转移到面向核工业,国家对铀工业进行了大幅度的调整,部分生产线下马、关停,天然铀产量一度降到历史最低水平,整个行业出现了阶段性的萧条。要改变我国铀矿冶企业的面貌,提高经济效益,必须采用新的工艺技术对传统的采冶工艺进行改造。为此开展了地浸、堆浸、原地爆破浸出等新技术及其工业化应用研究,经过不懈努力,取得了多方面的技术成果,铀矿冶全行业的生产工艺流程和主要装备得到了更新,虽然铀矿冶企业大大减少,但总的产能还有所提升,企业劳动生产率、经济效益得到了大幅度的提高。铀矿冶生产已经形成了以地浸、堆浸、原地爆破浸出等工艺为主的新格局。目前,天然铀生产产量常规开采占 25%~30%,堆浸占 35%~40%,原地爆破浸出占 10%~15%,地浸占 20%~25%。

进入 21 世纪,随着核电的发展,天然铀的需求日益增长,同时国际铀价也持续攀升,给我国铀矿冶工业带来了新的发展机遇。作为国内唯一从事天然铀生产的企业——中核金原铀业有限责任公司正在抓紧实施天然铀生产大基地的战略,采用新工艺、新技术,进一步提升天然铀生产能力,满足核电发展的需要。

3 铀资源状况

我国自 1955 年开展铀矿地质勘查工作以来,已探获的主要铀矿床类型有:

1) 花岗岩型。此类型主要分布在桃山—诸广山矿化带,大多数与燕山期花岗岩有空间和成因关系。铀矿化多产于构造断裂的低级别构造中,其中以含沥青铀矿及晶质铀矿的硅酸盐单铀型矿床为主;其次为含沥青铀矿、萤石的硅酸盐铀—铅—铀矿床。

2) 火山岩型。此类矿床主要分布在赣—杭矿化带,成矿时代多为侏罗纪及白垩纪。含矿岩石为熔岩、次火山岩、火山碎屑岩。矿化受区域断裂及火

山构造控制。以沥青铀矿、硅钙铀矿的硅酸盐单铀矿床为主。此外也有一些含有较多的钛铀矿、铀石、钍铀矿的硅酸盐铀钍型矿床及铀铜矿床。

3) 砂岩型。此类矿床产于中生代、新生代,赋存于含长石、石英砂岩及花岗质砂岩、砂砾岩,少数为粉砂岩、泥岩。岩石中常含有一定的有机质及黄铁矿。矿床以含沥青铀矿及吸附铀的硅酸盐型单铀矿床为主,其次为含沥青铀矿的碳酸盐铀铜矿床。

4) 碳硅泥岩型。此类矿床含矿岩石复杂,一般富含有机质、泥质及黄铁矿。铀多以吸附状态存在。有震旦—寒武纪的含沥青铀矿的碳硅泥岩型矿床及泥盆纪的受构造控制的硅酸盐、碳酸盐型铀钼矿床。

5) 含铀煤型。此类矿床主要产于中生代、新生代的陆相盆地中的劣质煤及碎屑岩,分布于滇西及西北地区。矿床受岩性控制,有含铀煤型及含铀—锆煤型。

6) 其他类型。包括碳酸盐岩型、碱性岩型、石英岩型及磷块岩型等。

我国铀矿床以前四种类型为主。已探明铀资源中,各类型矿床储量所占比重为:花岗岩型 38%,火山岩型 22%,砂岩型 19%,碳硅泥岩型 16%,其他类型共 5%。在已开采的铀矿山中,花岗岩型铀矿床的储量占总储量的 37%,火山岩型占 24%,碳硅泥岩型占 22%,而砂岩型铀矿床占 17%。

据已提交的近 200 多个矿床地质储量报告统计,现已探明铀金属数十万吨,其中矿床金属量大于 2 000 t 的占矿床总数的 12.9%,金属量约占一半;矿床金属量在 1 000~2 000 t 的占矿床总数的 17.5%,金属量占 26%,而矿床金属量在 1 000 t 以下的占矿床总数的 69.6%,金属量占 27.2%。铀矿床规模普遍偏小,单个矿床储量在万吨(金属)以上的甚少。铀矿床矿体的埋藏深度较浅,一般小于 300 m,个别矿体向地下延伸达 800 m。

据铀矿地质系统 1989 年统计,矿床的平均品位 0.115%。全国一半左右的矿床,其地质品位在 0.10%~0.20% 之间。矿床平均品位大于 0.3% 的只占矿床总数的 6%,矿床平均品位小于 0.1% 的占矿床总数的 33% 左右。

综上所述,中国铀资源的特点是,矿化类型多、规模小,埋藏浅、品位低。

4 常规开采

生产铀的第一步是铀矿开采,我国铀矿开采技

术在过去 50 年时间里通过移植、改进、推广、独创的过程逐步得到提高。50 年代铀矿山建设起步时,采掘技术主要是移植有色金属矿山及煤矿的工艺及设备。60 年代中期,为了提高速度、效率和产量,结合铀矿特点,进行了采矿工艺的改进和推广小型机械化,采掘技术有了提高。70 年代后期,推广国际上的新工艺,新技术,引进了无轨开采设备,同时开始推广应用全面质量管理、网络技术、线性规划、计算机应用等科学管理方法。在 80 年代又推行了矿石按质计价、合理选用边界品位、资源经济评价等技术及经济管理工作,提高了矿山生产的经济效益。通过这些工作,铀矿山的开采技术及技术管理有了进一步的发展^[1]。

4.1 露天开采

露天开采,开拓采用中小型矿山常用的汽车运输方式,个别露天矿采用斜坡道卷扬进行开拓。穿孔设备初期使用冲击钻(CZ-1 型、CZ-1 型),以后主要使用潜孔钻(YQ-150A),有的采用牙轮钻(HYZ-250 型),产量很小的露天矿曾用风动凿岩机(YG-65 型及 YG-80 型)打小炮孔。挖掘设备多用 1~3 m³ 的挖掘机(W1-1001-A 型、W-1002 型及 W-3 型),小露天矿个别曾用 0.5 m³;电铲(W-502 型)。运输用 3.5~15 t 翻斗车(CA-40 型、JN-351 型)。

为了加快剥离、提高效率,大新铀矿等采用定向抛掷大爆破;为稳定边坡,采用预裂爆破。有的矿山适当增大边坡角,逐步推行陡帮开采。

4.2 井下开采

地下开采,竖井下掘初期多采用手持式凿岩机(YT-25、YT-30、YSP-5)打眼,防水炸药、电雷管爆破,小抓岩机及小吊桶出渣,潜水泵抽水,木模浇灌混凝土砌壁及单层吊盘,单行作业方法施工。60 年代中期逐步采用环形钻架(HD-1 型)及伞形钻架打眼;中型抓岩机(HK-4 型)及大吊桶(最大为 4 m³),井口自动翻矸装置出渣;金属滑动模板及掘砌并行交叉作业方式施工;同时推广了激光指向、光面爆破及锚喷支护等技术。在涌水量大的郴县铀矿采用超前注浆堵水、帷幕隔水的办法控制井筒涌水量然后下掘的施工方法。天井施工最初采用方框支护、手持式凿岩机凿岩、电雷管爆破的施工方法。以后逐步发展为吊罐法打天井。有的矿山还采用分段爆破的天井施工方法。

斜井掘进从手持式凿岩机打眼、人工装岩、台车

或矿车运渣发展到箕斗提升。

平巷掘进初始是手持式或气腿式凿岩机打眼、人工装渣到小型装岩机(华-I 型)出渣、矿车运渣,发展到凿岩台车(CTC-10.2)打眼、斗式转载机装渣、电机车运输的掘进生产线。有的矿山已推广应用钻车(L832C 型)打眼、铲运机(LF4.1 型)运输的无轨设备施工方法。1991 年核工业第六研究所与七一〇厂等单位合作制成了 WJD-0.4 型电动铲运机,现已在一些矿山应用。巷道支护由初始的木支架、钢轨支架、混凝土支架发展到锚杆支护、喷浆支护及锚喷支护。爆破从人工点火到电雷管爆破、再到微差爆破及用导爆索爆破。

4.3 采矿方法

如何根据我国铀矿床特点选择合适的采矿方法是我国铀矿开采中十分重要的问题,针对不同矿床先后采用过充填法、壁式进路法、分层崩落法、留矿法、方框支柱法等十余种采矿方法。从上向水平分层充填、常规的矿房矿柱二步骤回采改进为混凝土间柱、混凝土假底假巷,发展到按矿块回采,不设房间矿柱、相邻矿房超前回采、矿房间敷设隔离墙的一步骤回采。采场凿岩也由气腿凿岩到采场台车凿岩,支护从木支柱、混凝土支柱改进到锚杆、锚喷及长锚索支护。运矿从人工运搬到电耙(2DPJ-13 型)运搬,进而应用风动装运机(T2G 型、T4G 型)及无轨铲运机运矿。充填料面铺设木垫板改进为水泥砂浆垫板。充填由干式充填发展到水砂充填、尾砂充填。

为了开采围岩及矿石都松软的矿体及位于水体下、公路下、建筑物下的“三下”矿床,完善与总结了合理确定防水矿柱参数,制定防止抽冒措施,采取上行开采顺序,采用下向胶充工艺一整套三下开采技术,确保了湖南某铀矿顺利建成投产。

对砂岩型矿床的薄矿体从采用壁式采矿法发展到高进路低采幅的回采方法。含铀煤型矿床原设计用分层崩落法回采,但因煤中含硫高易着火;岩层节理、层理发育易坍塌,矿体难于安全回采,经过试验,摸索出一套适用的回采方法,即当矿体倾角大于 45°时,采用倾斜分层充填法回采;倾角小于 45°时,采用短壁式或进路式采矿法,或壁式进路选别回采。

5 铀矿堆浸

堆浸是堆置浸出法的简称,是将配制好的溶浸液喷洒到预先堆置好的矿石堆上,选择性地溶解

(浸出)矿石中的目标成分,形成离子或络合离子并使之转入溶液,以便进行进一步的提取或回收的浸出方法;堆浸的矿石仅需粗碎即可,溶液在矿堆中处于非饱和流状态。我国堆浸提铀技术研究始于20世纪60年代,经过几代铀矿冶科技工作者的不断努力探索,已经在许多技术领域取得了突破,一大批科研成果已成功应用于堆浸提铀工业生产,并且取得了显著的经济效益。堆浸提铀工艺是中国铀矿冶生产的主要工艺之一^[3]。

5.1 浓酸熟化——高铁淋滤堆浸技术

该技术的特点是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,铀大部分转化为可溶性盐,然后采用含硫酸高铁的清水进行淋浸。此工艺既缩短了矿石的浸出周期,也提高了浸出合格液的铀浓度。经多年的工业应用表明,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,浸出合格液铀浓度可达7~9 g/L。

5.2 低渗透性矿石制粒堆浸技术

低渗透性含泥矿石化学粘合进行酸法制粒,该粘合剂通过参与化学反应,可在矿粒内部形成以水化物晶核为基础的结晶结构网,从而大幅度提高了矿堆的渗透性。工业生产表明,矿石经过制粒预处理以后进行堆浸,金属的浸出率95%以上,与直接堆浸相比较,浸出周期缩短70%,浸出合格液铀浓度提高50%。

5.3 细粒级矿石堆浸技术

经过对堆浸传质机理及浸出过程进行深入分析研究,提出了细粒级矿石堆浸的概念,认为堆浸矿石的破碎应该存在一个最佳经济粒度,在充分试验的基础上,推导出了堆浸矿石破碎的经济粒度计算模型。目前,该研究成果已经在多个堆浸铀矿山得到了应用。

5.4 串联堆浸技术

为了尽可能提高矿石堆浸合格液铀浓度,降低原材料消耗,针对多种铀矿石进行了系统的串联堆浸技术试验研究,开发了计算矿石串联堆浸各阶段操作参数的数学模型。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,浸出过程的酸、氧化剂以及金属回收工序的材料消耗可降低20%~30%。

5.5 细菌氧化堆浸技术

中国对于细菌氧化堆浸提铀技术的研究始于20世纪60年代,主要是利用氧化亚铁硫杆菌对矿

石中的黄铁矿或吸附尾液中的 Fe^{2+} 进行氧化,使 Fe^{2+} 转变成 Fe^{3+} ,从而完成对矿石中低价铀的氧化浸出。已进行了4 000 t规模的工业试验。工业试验结果表明,采用细菌氧化堆浸与常规氧化堆浸相比,硫酸消耗可降低12.5%,浸出时间可缩短32%~45%、浸出液铀浓度可提高88.2%。

5.6 伴生铀矿综合堆浸回收技术

目前已探明的铀矿资源中,铀钼共生矿床占有一定的比例,此类型矿床在常规浸出时往往浸出时间长、钼的浸出率低,并且浸出液中铀钼的分离效果不够理想。采用拌酸熟化及活化浸出技术对矿石进行堆浸处理,使矿石的浸出周期缩短了一半以上,铀的浸出率达到90%,钼的浸出率达到70%以上,并采用新型的离子交换树脂从浸出液中同时吸附铀钼,通过分步淋洗使铀钼的分离系数达到2 000以上。

5.7 渗滤浸出提铀

对于一些铁、镁、钙、铝等杂质含量高的复杂铀矿,常规堆浸过程中,堆内溶液的酸度随着溶液的运移会不断消耗,导致铁、镁、钙、铝在堆内不断地迁移—积累—沉淀,使矿堆板结,降低了矿堆的渗透性。渗滤浸出工艺由于改变了溶液与矿石的接触方式,可保持溶液酸度的相对稳定,有效地避免矿堆板结。工业试验表明,采用渗滤浸出工艺代替堆浸工艺以后,矿石的浸出周期从300 d以上降低到了60 d以内,铀浸出率从60%左右提高到90%以上。

6 原地爆破浸出采铀

原(就)地爆破浸出开采是利用井巷工程和挤压爆破技术,就地崩落矿石,构筑矿石微细裂隙发育、级配合理、孔隙度均匀适度、渗透性良好的采场矿堆,然后向矿堆布洒溶浸剂,有选择性地浸出矿石中的有价金属,浸出的含金属溶液被收集转输至地面加工回收金属,矿渣留采场就地处置。其特点是:80%左右的矿石留在原采场就地布液浸出,20%左右的附产矿石出窿地面堆浸。采切工程量少,废石、尾渣排放量少,是一种少废料的矿床开采方法。我国60年代末开始在铀矿山开展3 000 t级的浅孔落矿筑堆的原地爆破浸出开采试验研究,80年代末在爆破落矿筑堆、采场布液浸出和集液防渗堵漏三大关键技术及相关理论有所突破之后,在陕西某铀矿进行了万吨级的中深孔爆破落矿筑堆的原地爆破浸出开采工业性试验,并将该矿山建成我国第一座

全溶浸型原地爆破浸出开采矿山^[4]。

6.1 爆破落矿筑堆技术

要使硬岩铀矿石内部的铀矿物以离子或配合离子形式从固相转入液相而被浸出,首先要根据矿石结构构造特征和矿石浸出性能解决爆破落矿筑堆技术。因为浸出工艺不仅要求所筑矿堆矿石块度适当,级配合理,孔隙度均匀,渗透性良好,而且还要求矿石微细裂隙发育。因而常规凿岩爆破参数无法满足要求。经多年研究,通过计算机模拟和现场试验,开发了“原地爆破粒度控制计算机模拟系统——BLAST系统”,研究了原地爆破落矿筑堆的凿岩爆破参数优化方法、爆破落矿筑堆补偿空间系数及补偿空间布置形式、装药结构及起爆网络。从而使中深孔和深孔爆破落矿筑堆矿石-150 mm的块度产率达75%~86%,其他指标也都达到布液浸出要求,为采场布液浸出创造了前提条件。

6.2 采场布液浸出技术

受地质构造影响,矿体产状、形态多种多样,尤其是矿体倾角、厚度对布液浸出影响极大;加之采场布液受岩性和布液空间的限制,厚度对布液浸出影响极大;再则采场布液受岩性和布液空间的限制,原地爆破浸出采场布液较地面堆浸布液要复杂一些,难度也大。解决不好,不仅布液很不均匀,且容易出现浸出死角,直接影响浸出效果,影响金属回收。根据采场具体情况,研究出不同条件下的堰塘布液技术、钻孔注液技术、微喷淋布液技术和预埋管网布液技术。并研究开发出在松散矿堆内部施工注液钻孔的专用钻具及钻孔注液的溶液分配技术。

6.3 采场集液及防渗堵漏技术

与地表堆浸相比,井下原地爆破浸出采场很难构筑堆场底垫,即使能够构筑,成本也较高,而且不能像地面堆场底垫那样可以反复使用。所以原地爆破浸出采场一般不构筑底垫,但必须解决溶液渗漏流失问题,否则将功亏一篑。不过,只要掌握矿堆溶液运动规律和矿床地质构造特征,采取相应措施,集液问题还是不难解决的。目前较为有效的集液方法为井巷集液和钻孔集液。因地质构造和开拓采准的影响,浸出采场围岩往往发育一些程度不同的构造和次生裂隙。为避免浸出溶液沿构造或裂隙渗漏流失,影响浸出溶液收集,造成金属损失,污染井下和矿区环境,集液井巷要尽可能布置在无构造裂隙的地段,下中段开拓采准工程最好推迟施工,避免浸出采场下面出现降落(水)漏斗。如上述条件无法满

足,则必须提前作好构造裂隙的防渗堵漏处理。至于钻孔集液,作好构造及裂隙防渗处理只是一个方面,更为重要的是如何根据浸出采场形态,合理确定集液钻孔位置、孔口及采场通道封堵措施和抽注液压力,否则很难达到集液要求。

7 地浸采铀

原地浸出采铀(简称地浸采铀)是一种在天然埋藏条件下,通过溶浸液与矿物的化学反应选择性溶解矿石中的铀,而不使矿石产生位移的集采、冶于一体的新型铀矿开采方法。它一改过去常规矿山的生模式,没有昂贵而繁重的井巷或剥离工程,也没有矿石运输、选矿、破碎和尾矿坝建设等工序;被采的是矿石,但采出的是含有有用组分的溶液。地浸采铀具有工艺简单,基建投资少、生产成本低、环境保护和安防条件好,资源利用率高等优点,这一采矿新领域已受到世界采矿业的普遍关注。

地浸采铀是通过从地表钻进至含矿层的注液井将按一定比例配制好的溶浸液注入到矿层,注入的溶浸液与矿石中的有用成分接触发生化学反应,生成的可溶性化合物在扩散和对流作用下离开化学反应区进入沿矿层渗透迁移的溶液液流中形成浸出液;浸出液经过矿层从抽液井提升至地表,抽出的浸出液输送至回收车间进行离子交换等工艺处理,最后得到合格产品。原地浸出采铀原理如图1所示^[5]。

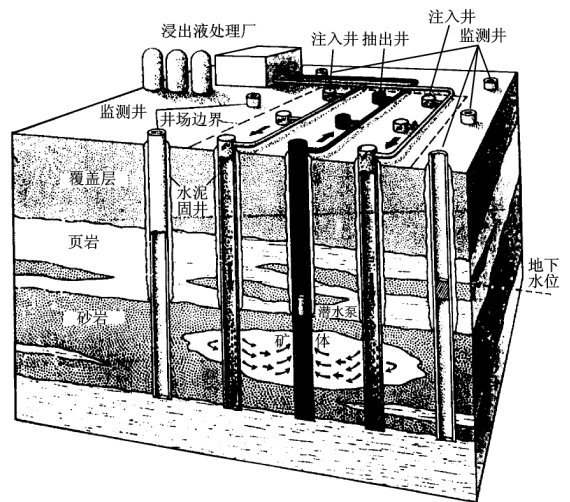


图1 原地浸出采铀原理示意图

Fig. 1 Schematic drawing of in-situ leaching of uranium

我国地浸采铀技术的研究始于 70 年代初,通过多年的试验研究,地浸采铀已成为我国铀矿采冶的重要方法,主要工艺技术指标达到国际水平。形成了一套以地浸铀资源评价、溶浸液配方和使用方法、地浸钻孔结构与施工工艺、钻孔排列方式和钻孔间距的确定、溶浸范围控制、浸出液处理工艺技术、地浸矿山环境保护等为主体的地浸采铀技术体系^[6]。

7.1 矿床地浸开采地质和水文地质条件评价技术

影响原地浸出采铀的矿床条件是多方面的,用单一的或某几个条件很难正确地评价,只有通过矿床地质、水文地质、浸出工艺和外部开发条件等的综合评价,才能对矿床地浸开采的技术经济可行性作出客观评价。在总结多年地浸采铀试验研究和生产经验的基础上,研制开发了“铀矿床地浸开采评价专家系统”(ESILU)和“地浸铀矿资源经济评价数学模型和计算机系统软件”(EEISLU),运用系统软件对影响地浸采铀产品成本的地质工艺因素作了敏感性分析和优化,对我国已探明的地浸铀矿资源进行了经济评价和分类。此外,还根据矿山需要研制了“地浸工艺信息系统”(GTSILU),推动了我国地浸矿山现代化管理的进程。

7.2 地浸钻孔结构和施工工艺

原地浸出采铀钻孔是地浸工艺系统的主要环节。地浸开采时钻孔不仅是揭露矿层的唯一工程,溶浸液的注入与浸出液的抽出都是通过钻孔来实现的。通过多年的研究,研发了低密度流体钻井技术、负压钻进、逆向灌浆技术、防渗堵塞技术、溶浸液注入钻孔后的定量分配技术和过滤器更换技术等,研制了地浸钻孔新型过滤器,改进和完善了填砾式钻孔结构和施工工艺,使地浸钻孔结构和施工工艺技术水平进一步提高。

7.3 地浸采铀钻孔合理井网布置技术

原地浸出采铀是通过在平面上按一定方式和间距布置的钻井井网来实现的,钻井的布置形式和间距(井网密度)就其作用来说相当于地浸法开采时矿床的开拓方式。在一个新的矿床投入开发时,合理确定适合于矿床地质特点的开拓方式(井网布置)是科学开发可地浸砂岩铀矿床的重要内容。通过对影响井型与井距的各种因素分析研究,建立了地下浸出过程的流体动力学模型和井型与井距技术经济评价模型,提出了确定井型与井距的原则与方法。建立了地浸铀矿床经济极限开发指标单井平均

日产量、浸出液浓度、单井可采储量、单井地质储量、井网密度、井距和平米铀量等的计算方法,提出了地浸采铀合理实用井网密度的确定方法。

7.4 地下浸出工艺技术

溶浸液配方和使用方法是地浸采铀关键技术之一,针对我国砂岩铀矿资源的特点开展了酸法地浸和碱法地浸浸出工艺的研究,建成了我国第一个酸法地浸采铀矿山;研发了低酸酸化浸出工艺和以淋洗残余硝酸根作为浸出氧化剂的工艺。碱法地浸主要关键技术已经突破。与此同时,针对酸法和碱法浸出存在的不足,开展了中性(或弱碱性)浸出和微酸浸出工艺的探索性试验研究。

7.5 地下流体控制技术

注入矿层的溶浸液要控制在一定的范围内,既不漏失又不被大量稀释,同时又要使控制范围内的所有矿石尽可能与溶浸液接触而不出现“溶浸死角”,由此所采取的一切技术措施统称溶浸范围控制。通过多年的研究,掌握了地浸溶浸范围控制技术,开发了地浸溶浸范围和污染范围圈定的计算机模拟软件系统,并在新疆伊犁等地浸工程中应用。通过优化浸出地球化学环境和水动力学环境,做到溶浸液的合理分配,消除了溶浸死角,溶浸液覆盖率大于 90%。

7.6 地浸采铀矿层伤害评价技术

地浸采铀时为了使钻井的抽注液能力最大化,必须使地层至井筒的流动通道阻力最小。地浸开采过程中,当各种外来流体(入井液)侵入矿层后,最容易与其所含流体作用,其结果是降低钻孔生产能力或注入能力,即发生矿层伤害。如何有效地预防伤害、保护矿层,最大限度地提高钻井产能、增强注液井注液能力,成为低渗透砂岩铀矿地浸开采必须解决的一个技术关键;在对地浸采铀地层伤害进行分类的基础上,结合地浸采铀实践,提出了地层伤害实验与评价的方法。

7.7 地下水污染的防治技术

原地浸出采铀与常规采冶相比,环境保护和安防条件好,虽然没有对环境造成污染的尾矿坝和废石场,但是地浸开采同样存在着环境保护与治理方面的问题。地浸矿山的环境保护与治理主要是地下水污染的防治。地下水治理的方法通常有地下水抽除法、反渗透法、自然净化法、化学处理和细菌还原法。针对新疆伊犁盆地铀矿床地浸开采的特点,开展了地下水治理的实验室膜处理试验和电渗析现场

试验。

8 天然铀提取工艺

从铀矿石的酸性或碱性浸出液中分离提取铀通常采用离子交换法和溶剂萃取法,目的是使浸出液中的铀与其它杂质元素分离,最后制备合格的铀化合物(重铀酸盐,俗称“黄饼”)。至此可见,铀矿石的加工工艺是完全的湿法冶金过程。我国的铀矿加工工业是在独立自主自力更生的方针指导下发展起来的,建立了具有一定特色的我国独立的铀矿加工工业体系。

8.1 离子交换法

离子交换法是利用离子交换树脂对不同金属离子亲和力的区别,使铀与其他金属离子分离。采用阴离子交换树脂从硫酸溶液中吸附铀,是铀与大量其他金属离子分离的有效方法。离子交换法的适应能力比萃取法强,特别适用于处理低浓度铀溶液和矿浆。

离子交换树脂是实现离子交换分离过程的基础。如何合理有效地使用树脂,充分发挥每一粒树脂在操作中的交换作用,是离子交换设备设计的关键。经过多年的研究,我国已经掌握了一系列离子交换树脂的合成技术,生产出苯乙烯、乙烯吡啶、多乙烯胺等体系的多种类型离子交换树脂;合成出凝胶结构和不同网孔结构的离子交换树脂;研制并生产了单一官能团、多官能团的阴、阳离子交换树脂和两性离子交换树脂等。离子交换工艺的发展经历了固定床清液离子交换、筐篮式矿浆吸附、流化床连续离子交换、连续逆流矿浆吸附和密实移动床与密实固定床吸附。

20世纪90年代地浸采铀技术的发展推动了浸出液处理工艺技术的创新。离子交换工艺和设备如何适用地浸生产浓度低、流量大特点的需要是生产中致力解决的问题,也是提高地浸铀矿山工艺与装备水平的形象工程。为了适合于地浸浸出液的处理,研制了大通量固定床和密实移动床离子交换设备、大孔离子交换树脂和饱和再吸附工艺等,并在新疆地浸生产中应用,效果良好。

8.2 溶剂萃取法

溶剂萃取法是采用有机萃取剂从含铀水溶液中选择性萃取铀,使铀与其它金属分离。对于一些硬度较大的花岗岩矿石,由于破磨后粗砂较多,泥砂沉降性能较好,容易得到清液,采用溶剂萃取法比采用

离子交换法更合适。与离子交换法比较,反应速度快、处理量大和处理溶液铀浓度高是溶剂萃取法的突出优点。在铀的水冶工艺中,目前应用于 H_2SO_4 浸取液中的萃取剂,主要是磷类与胺类,如二乙基己基磷酸(D_2EHPA 或 $P204$),三脂肪胺(TFA 或 $N-235$)。

到70年代,出现了用溶剂萃取法处理离子交换解吸液的新工艺,使离子交换和溶剂萃取两个工艺过程前后衔接,优势互补,称为 $Eluex$ 流程(淋萃流程),成为可以适应各种矿石浸出液的纯化要求,制备核纯铀产品的最经济的流程。 $Eluex$ 流程的进一步发展,就是采用有机萃取剂取代水溶液作为离子交换树脂的解吸剂,使离子交换和溶剂萃取在一个设备中同时进行,缩短了 $Eluex$ 流程,节省了设备。用有机萃取剂从离子交换树脂上直接解吸铀的工艺,称为“溶剂解吸”。

9 铀纯化技术

铀的纯化,是核燃料加工过程中的一个重要组成部分。铀的纯化其主要目的是使“黄饼”中的铀与杂质进行分离,除去那些热中子俘获截面大的杂质元素和影响后续铀冶金性能的杂质元素。铀与杂质元素的分离,除铀矿石经水冶加工除去与铀共生的绝大部分杂质外,还要在纯化阶段对铀进一步提纯。目前世界各国的方法是利用对铀的选择性高,对杂质特别是对中子有效俘获截面大的元素净化能力强的 TBP 溶剂萃取法。我国的铀纯化亦不例外。

我国的铀纯化技术研究与我国的核工业同时起步,均始于50年代末。在建国后的几十年中,我国的铀纯化技术研究大致经历了3个阶段^[7]。

第一阶段是核工业建立的初期(即20世纪50年代末60年代初),对我国第一套为生产堆用金属燃料元件制造系统供料的铀纯化流程(代号为414流程)的工业化,进行了大量的验证试验与系统的基础性研究工作。为我国第一套铀纯化生产线在1962年底建成投产并顺利运行,为我国核工业的发展奠定了基础。我国第一套铀纯化装置工艺流程的主要过程如图2所示。

第二阶段是在我国建成第一套铀纯化生产线后,生产规模需要进一步扩大,在60年代中期开始进行的第二套铀纯化生产线(代号为273程)的工艺研究,我国第二套铀纯化装置工艺流程的主要过程如图3所示。这阶段的研究是依靠自己的力量,

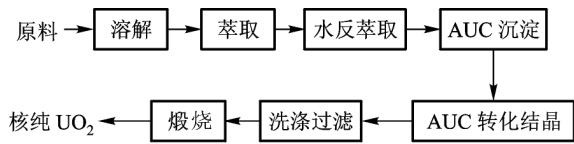


图2 中国第一套铀纯化生产线的主要过程

Fig. 2 First production line of uranium purification in China

研究了具有自己特色的流程。这项技术经进一步深化,后来转让到国外。这一时期的研究为后来的研究打下了坚实的基础。

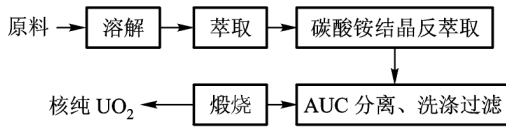


图3 中国第二套铀纯化生产线的主要过程

Fig. 3 Second production line of uranium purification in China

第三阶段则是从90年代初开始的。这个时期先后研究了2个过程类似、但起始原料和最终产品纯度完全不同的流程。铀纯化生产线以我国铀矿山生产的重铀酸盐为原料,生产出符合重水堆天然铀质量标准要求的核电级硝酸铀酰溶液,流程的主要过程如图4所示。铀纯化工工艺采用的设备为填料塔或脉冲筛板塔。

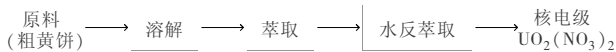


图4 中国第三套铀纯化生产线的主要过程

Fig. 4 Third production line of uranium purification in China

10 发展方向

当前铀矿冶所面临的最大问题是矿石品位不断降低和开采深度日益加深,处理矿性日益复杂,采冶难度加大,生产成本越来越高。大量品位低、难处理的边际经济、次边际经济以及内蕴经济型的铀资源将逐渐成为开发利用的主体,这些低品位资源采用常规的开采技术难以经济利用,只有依靠新工艺、新技术、新设备、新材料的开发应用,在不断降低我国天然铀提取生产的投资和成本、提高提铀生产效率的基础上,才能逐步扩大铀矿资源的开发利用范围,拓展我国可供开发提取的铀资源量。根据中国铀矿资源的现状,铀矿采冶技术研究发展方向和重点将

集中在以下几个方面。

10.1 开展硬岩铀矿采冶新技术研究,提高硬岩铀矿采冶技术水平和资源利用率

目前所开发使用的硬岩铀矿所占的资源量还不足已探明硬岩铀矿总资源量的23%,因此,我国硬岩铀矿资源储量的开发潜力很大。硬岩铀矿床主要有花岗岩型、火山岩型铀矿床、碳硅泥岩型铀矿床以及交代岩、侵入岩、硅角砾岩、褐煤、磷灰岩和碳酸盐型的矿化物等类型,矿石种类多,矿性复杂,大部分矿床中的铀与其他元素伴生,并且与矿物连生的围岩性质多变。这不仅制约了铀的浸出、增加了浸出过程的试剂消耗,对铀的分离提纯带来了难度,而且用常规法开采成本较高。

根据我国硬岩铀矿提取技术的研究和应用现状,并结合下阶段我国铀矿冶规划开发的硬岩铀矿资源情况,开发有针对性的矿石开采技术、强化堆浸技术、水冶加工技术、自动控制技术及分析技术。在角砾岩型铀矿原地爆破浸出、低品位高耗酸矿石堆浸、含硫包裹型铀矿破膜浸出、难采矿床采矿技术、多金属伴生铀矿浸出与回收技术、生物浸出等方面取得突破,开发出资源利用率高、流程简单、生产成本合理、环保可靠、适用于不同类型铀矿石的综合回收工艺流程,进一步提高我国铀矿资源的利用水平。

10.2 开展低渗透砂岩铀矿床地浸采冶技术研究,提高砂岩铀矿资源的利用水平

砂岩型铀资源开发是我国天然铀生产稳定发展的最重要潜力之一,采用地浸工艺开发利用疏松砂岩型铀矿资源是今后一个时期内铀生产的重要目标。在我国初步探明的数万吨砂岩型铀资源中低渗透资源占一半以上,而且随着勘探工作的不断深入这一比例还有增大的趋势。面对这种形势,低渗透砂岩铀资源的开发对铀矿冶的作用愈来愈大。低渗透砂岩铀矿富含矿含水层的孔隙结构和表面物理性质极为复杂,其渗透机理、溶液运移规律、开发模式及开采工艺技术等方面都与一般渗透性较好的砂岩铀矿床有很大不同。由于低渗透砂岩铀矿的客观地质特点(主要是生产能力低),造成了开采过程中的诸多突出矛盾,采用现有地浸采铀工艺开采速度和采出程度低,开发效果差。因此,应尽快开展低渗透砂岩铀矿地浸开采试验,提高我国资源利用水平。

根据我国地浸采铀科研及生产现状,低渗透砂岩铀资源地浸采冶工艺技术研究,应在深入认识低渗透矿层地质特点和渗流机理的基础上,研究低渗

透砂岩铀矿的开发程序、开发方式、井网密度、布井方式,重点突破提高钻孔生产能力的主要工艺技术。

10.3 开发深部开采技术,实现深部铀矿资源高效利用

目前,我国铀矿山面临的形势是:1)经过几十年的开采,已探明的浅部铀矿资源逐渐枯竭,开采条件大大恶化;2)开采品位下降,采掘工程量急剧上升,废弃物处理量大幅度增加;3)矿山机械化装备水平及配套程度不高,严重制约矿山生产规模和劳动生产率的提高。不少矿山开采逐渐向深部开采过渡,同时为了延长矿山的服务年限,应科学地探索和总结矿床地质理论,攻深找盲,积极开展矿区深部及外围找矿,进一步扩大资源。因此,矿床向深部开发是铀矿开采的必然趋势。

随着铀矿开采向深部延伸,出现井巷和采场中的地压增大、温度升高、通风困难导致氡浓度上升等问题。深部开采技术的研究应针对深部高应力、高地温、高井深的特殊环境,从深井高应力条件下的硬岩致裂理论与技术、深井的热环境控制、深井充填系统与管道输送技术、深井通风降氡技术等方面开展研究,突破深部铀矿开采关键技术。

10.4 发展铀矿采冶过程控制的基础理论,推动铀矿采冶技术创新

从矿岩爆破破裂、矿岩结构损伤破坏及采矿工程可靠性分析等方面,深入探讨铀矿开采过程中矿岩爆破破裂与结构失稳机理和矿岩结构灾变控制技术,为确保资源安全高效回收,为深部矿体、复杂难采和低品位铀矿资源的开采技术创新提供理论支撑。开展铀矿地浸、堆浸和原地爆破浸出中铀化学行为、浸出机理和动力学研究,结合已取得的应用研究成果和实践经验,揭示和分析铀溶浸过程的内在规律,建立溶浸提铀学科基础理论体系,为我国溶浸提铀技术的研究与应用提供理论基础。

10.5 加强矿山信息技术研究,推进数字矿山建设

进入21世纪,随着计算机技术、信息技术、通讯技术、自动控制技术、3S(GIS, GPS, RS)技术、网络技术的发展,国内众多研究机构和学者提出了“数字矿山”的概念^[8]。在经济全球化的现实条件下,为在激烈的竞争环境中立于不败之地,提高铀矿冶企业的经济效益,增强市场竞争力,利用信息技术改造铀矿冶企业,通过引进和应用先进的网络技术、通讯技术、计算机软硬件技术、自动控制技术及装备建立起一个数字化的矿山系统,显得更为必要和紧迫。

数字矿山建设是一个庞大的系统工程,现阶段我国铀矿山数字化建设的思路是:

1)采用成熟的计算机软件系统,实现从矿山资源、开采方案优化、设计、生产计划与开采环境的数字化、模型化与可视化。

2)建立以光纤、泄漏电缆或无线通讯为主体的多媒体通讯网络,形成语言、视频与数据同网传输的网络体系,实现矿山数据的分布式共享。

3)采用先进传感器网络技术,实现矿山生产过程、设备、安全与开采环境监控等数据的自动采集、智能分析与可视化管理。

4)采用工业以太网、PLC智能控制及视频监视系统,实现矿井提升、运输、通风、排水、水冶加工等系统及设备的智能化集中监控。

5)采用先进的生产管理系统,实现铀矿冶企业生产人员与移动设备的定位、跟踪及生产过程智能化调度与控制,全面提升铀矿山的生产管理与决策的科学性。

10.6 加强环境保护与治理,促进铀矿冶可持续发展

可持续发展战略成为当今世界潮流,源头预防和全过程治理逐渐代替了“先污染、后治理”的末端治理。人们在不断探索和总结的基础上,以资源利用最大化和环境污染最小化为主线,逐渐将清洁生产、资源综合利用、生态设计和可持续利用集成为循环经济模式。为了最大限度地合理利用我国铀矿资源,提高资源的利用水平,减少铀矿采冶对环境的影响,实现铀矿冶的可持续发展和经济与环境的协调发展,我国铀矿冶必须逐步纳入循环经济。

实施铀矿资源从勘探、开发、加工、利用到环保的整体化或一体化,将大幅度地减少环境污染,提高资源利用率,降低生产成本和优化资源配置。因此,我国铀矿采冶工业应结合铀资源的特点,依靠科技进步开发、利用高新技术,推广新的采、选、冶技术,实行科学采矿、安全生产,减少资源浪费;坚持以人为本,促进资源开发利用与生态建设和环境保护协调发展,实行“在保护中开发,在开发中保护”的方针,依靠科技进步和加强管理,努力提高资源回收率;从过去重开发轻保护,向保护与开发并重转变,搞好废渣、废气和废水处理,做好矿山土地复垦,实现铀矿资源开发与生态环境保护的双赢目标。

11 结语

21世纪中国铀矿冶工业面临新的发展机遇和挑

战。随着核电的发展,对天然铀的需求量迅速增长,按照国务院通过的《核电中长期发展规划》,至 2020 年核电占总发电量的 4%,即核电规模将达到 40 GW,届时天然铀的年需求量将达到 8 000 t;供需矛盾十分突出。因此,为了满足国内核电发展和保持国家核威慑力量对天然铀的需求,在今后相当长一段时期内中国铀矿冶工业必须保持较大的生产能力和较强的市场竞争力。我国铀矿采冶工业应结合矿石品位不断降低和开采深度日益加深、处理矿性日益复杂、采冶难度加大的特点,发展铀矿采冶过程控制的基础理论,只有依靠科技进步,开发新的采、选、冶技术及新设备、新材料的研制与应用,提高铀资源的利用水平,减少铀矿采冶对环境的影响,才能实现铀矿冶的可持续发展和经济与环境的协调发展。

参考文献

- [1] 王 鉴. 中国铀矿开采[M]. 北京:原子能出版社, 1993
- [2] 李开文. 中国铀矿开采技术特点及发展水平[J]. 中国矿业, 2002(1): 23 - 27
- [3] 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(1): 24 - 27
- [4] 全爱国, 欧阳建功. 我国原地爆破浸出开采及其发展前景[J]. 铀矿冶, 2001(1): 1 - 4
- [5] IAEA. Guidebook on environmental impact assessment for in situ leach mining projects[M]. Vienna: IAEA - TECDOC - 1428, 2005: 36 - 38
- [6] 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(3): 113 - 117
- [7] 邓佐卿, 庄海兴, 黄伦光. 我国天然铀纯化技术研究的发展与现状[J]. 铀矿冶, 1998(4): 231 - 236
- [8] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006

Development and Prospect of China Uranium Mining and Metallurgy

Que Weimin¹, Wang Haifeng¹, Niu Yuqing¹,
Zhang Feifeng², Gu Wancheng¹

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

2. China National Uranium Corporation, CNNC, Beijing 100822, China)

[Abstract] The development of industry of uranium mining and metallurgy in China has been reviewed generally, emphasizing investigation approaches and application levels of uranium mining technologies such as in-situ leaching and heap leaching, stope leaching. On the basis of analysis on status of uranium mining and metallurgy and problems are existed, also considering the specific features of deposit resources, the development orientation of uranium mining and metallurgy in China is pointed out. The industry of China uranium mining and metallurgy is faced to new opportunity of development and challenge in 21th century, and the only way to realize sustainable development of uranium mining and metallurgy and harmonious development between economy and environment is to develop new technology on mining, ore beneficiation and metallurgy, increase the utilization level of uranium resources and low down impact on environment caused by mining and metallurgy.

[Key words] uranium mining; in-situ leaching; heap leaching; extraction; purification; development