

十年来铀水冶科学技术的新进展

王 金 堂

(核工业北京化工冶金研究院)

本文重点介绍了十年来国内铀水冶科学技术的新进展。就世界铀水冶科学技术的发展趋势,简述了十年来的重大新进展。

介绍了它的发展背景,对铀工艺矿物学、溶液采矿、铀矿分选、浸出、由浸出液及矿浆提铀、铀化合物沉淀的新进展作了说明。还描述了由磷块岩、褐煤、碳质页岩、含铀多金属矿及海水提铀的重大新进展,扼要阐述铀水冶的废水及尾矿处理和铀水冶的无废物工艺流程研究的新进展。对铀水冶科学技术的今后发展作了讨论。

关键词 铀, 水冶, 进展。

一、前 言^[1-4]

铀水冶科学技术作为一门应用科学和工艺学是为铀水冶工业服务的,而铀水冶工业则是核燃料工业的一个组成部分。因此铀水冶科学技术的发展就与核能工业的发展紧密联系在一起。

现代铀水冶工业的发展至今只40多年,早期是为军事服务的,1960年以后才逐渐为核电工业服务。根据1988年发表的红皮书,1987年西方国家的铀产量为36790t,而其核电的铀需要量为37650t,已超过生产量,其差额用库存补足。随着温室效应的威胁及环保要求的加大,核电发展将加快,铀的需要量将增加,铀资源的消耗将加速。从近十年的铀市场情况看,铀水冶工业却面临严峻形势。自1973年所谓“能源危机”使铀交易价格由8美元/磅 U_3O_8 上升至1976年的40美元/磅 U_3O_8 ,1980年却由45美元/磅 U_3O_8 突降至1982年的16美元/磅 U_3O_8 ,1988年底降至11美元/磅 U_3O_8 。同时能、劳工、材料设备费用不断上升,使铀水冶工业的成本问题成为OECD及IAEA的一个专题组的研究课题并于1983年发表了专题报告。此外,与其它金属的水冶工业一样,面临日益严格的环境保护要求。

鉴于上述情况,近十年来铀水冶科学技术的发展主要针对解决如下三个方面的问题。

1.降低生产成本。(1)缩短流程中的一个或几个单元或步骤,如就地浸出(化学采矿,井下堆浸,井上堆浸),矿浆吸附、矿浆萃取等;(2)提高技术及设备效能,如采用自磨机或半自磨机,高效浓密机、带式过滤机、连续离子交换设备、改进型混合澄清器、微机自控

1989年5月19日收到。

强化最佳操作等；(3) 提高矿石品位，如利用放射分选机、浮选分组、高强度磁选机等。

2. 扩大利用铀资源。据1978年统计，西方国家利用的铀矿床类型44%为砂岩(0.1—0.2% U_3O_8)，22%为脉矿床(0.17—0.34% U_3O_8 ，有些高达38% U_3O_8)，19%为砾岩(0.014—0.10% U_3O_8)。目前如美国重点研究和开发了由磷矿(湿法磷酸)、铜矿坑水提铀及溶液采矿(地浸)；日本着重研究和开发由海水提铀；澳大利亚着重由铀钼矿提铀等。

3. 保护环境，控制和消除污染源。如处理或消除水冶厂外排废水，改进铀尾矿的处置方法及其处理方法和无废物工艺流程。

现仅按铀水冶工序对我国及国外十年来的发展作如下简单介绍。

二、铀工艺矿物学研究

一般，铀水冶过程的原料是铀矿石。根据铀在矿石中的不同赋存状态及共生矿物类型应采取不同处理方法，以达到经济的目的。因此铀工艺矿物学的研究日益受到重视。我国于1978年发表了《金属硫化物、粘土矿物浸出性能研究》，1983年发表了《我国火山岩和沉积岩型铀矿石的浸出特性及其分类》^[5]，国际原子能机构于1980年发表了《铀的冶金矿物学与铀矿加工》^[6]。上述这些研究提出把矿物学特性与矿石行为联系起来的基本概念，从而由正确的岩矿分析所得的资料形成总的水冶流程的最初设想。这些设想可成为试验研究和技术经济研究的基础，最后导致选定一种特定的流程和水冶厂的设计。我国为了进行此项系统研究，装备了最新的电子探针扫描电镜、X光衍射分析设备等，并采用科学的浸出反应研究方法，使我国铀矿石浸出研究走上科学的阶段，取得了很好的效果。

三、溶液(化学)采矿

利用石油钻井技术，把钻孔延伸，浸出剂由一个钻孔注入，富液由另一个钻孔抽出，然后从富液中回收铀。此种方法称为溶液(化学)采矿或钻孔取铀或地浸。我国于70年代开始在几个地区进行地浸试验并已取得良好效果^[7]。美国于1973年在得克萨斯州由三个公司进行了地浸的半工业试验，目前已有多家采用地浸。

经验证明地浸的优点是明显的。由于无需常规采矿作业，水冶流程大为缩短，因而在经济上表现为投资及操作费用低，生产前期短，财务问题小；在环境上表现为对地表干扰少，对粉尘辐射的暴露小，地表尾矿少；在技术上表现为耗能少，需要维修的设备少；在安全上不存在采矿可能产生的危害。当然地浸的缺点也引人注意，例如操作者将失去对回收过程一定程度的控制，渗透性的降低和脉石反应产生的共沉淀都会对井田格局的控制造成困难，使回收率降低。研究及生产工作指出，地浸多用于砂岩矿床。一个矿体对地浸的适用性应满足下列条件^[8]：(1) 铀应溶于大多数适当的浸出剂中(加氧化剂)；(2) 矿化区对浸出液应是可渗透的；(3) 矿石围岩的地质性质应有助于把浸出剂及产品液保持在操作区内。

目前，在国内外对地浸广泛研究的基础上，已取得大量数据可供工程人员有把握地筹划某种地浸作业，并使人们借助于研制出的计算机程序来进行分析和设计。还有一些研究工作仍在进行，特别是地浸对环境的影响和降低其影响的方法。

四、铀矿分选

铀矿分选的目的在于：（1）提高矿石的铀品位，以便增加现有水冶厂或拟建水冶厂的产量，降低成本；（2）废弃干扰矿物，有利于降低试剂消耗；（3）排除低品位尾矿，保护环境。

我国利用各种矿石成分性质上的差异，如颜色、大小、形状、密度和表面性质或放射性等，对采用如放射分选、光电分选、筛选、重选、浮选和擦洗选等技术进行了大量研究工作^[9-11]。在研制应用KH分选机及201分选机的基础上，1985年研制成X77细粒级铀矿石放射分选机，用于处理+30—50mm粒级的铀矿石，六槽道平行作业，选矿处理能力为4—5t/h，分选效率为50%左右。预选厂对该机进行了选矿生产考查，结果表明，它的工作稳定可靠，各项技术指标达到了设计要求^[12]。1986年又试制成5421型放射性选矿机，它是由微型计算机及电子仪器控制，主要性能及指标接近80年代国外同类机的技术水平。此选矿机按品位选矿，经生产考查，最高灵敏度为25—30mg铀，选矿效率大于75%，处理量为10t/h，为水冶厂取得很好的经济效果。

在国外，浮选、重选也在一些水冶厂中采用。湿式高强度磁分离器已在南非试用^[13]。用低温超导制成的高容量超高强度磁选机在英国已制成，该机构造较简单，可得到高的生产率。1980年英国的Gunson Sortex公司曾推出RM161-50型放射分选机用于南非^[14]。RTZ的M-17型放射分选机经几年开发，已在澳大利亚、南非使用。法国也使用放射分选机。

五、铀的浸出工艺及设备

目前国内外的铀水冶工业的经验指出，浸出工序在整体中占投资费用的5—25%，占操作费用的10—25%，浸出率对整个回收率有决定性影响，而矿石中铀矿物及围岩矿物的类型和含量决定了浸出所采用的条件。从目前的发展情况看，对富矿（0.5—2.5%U）发展了加压酸浸，以提高浸出率；对含硫矿石发展了加压氧化自生酸浸，以利用其中的硫；对一些矿石采用浓酸熟化及薄层浸出；对低品位矿石（万分之几铀）则发展了堆浸及细菌浸出。为了从矿石中同时提取铀及镭，研究了非硫酸体系浸出（见本文第十三节）。

我国对碱法浸出早已采用哨式加压浸出塔及充气氧化管式塔^[15]。为了从铀放射分选厂洗矿后所得的含硫矿泥中提取铀，研究和开发了氧化自生酸水浸。1983年在现场完成了全流程工业试验。实践证明，在不加任何试剂的情况下，其浸出率可达到酸用量为20%硫酸的同样效果。此种加压浸出釜（含钼不锈钢制）同样可用于加压酸浸^[16]。另外对地表堆浸、井下堆浸及细菌浸出的研究^[17]也都取得很好效果。

最近又完成了近万吨规模的堆浸试验，效果很好。在细菌堆浸的研究基础上又研究和开发了生物膜氧化试验，利用铁硫杆菌使 FeSO_4 氧化为 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ，用于浸出。

在国外，特别是加拿大，在处理高品位铀矿石时使用了加压酸浸（西方国家约10—15%的铀浓缩物是由加压浸出生产，其中大约4—5%用碱法生产，5—10%用酸法生产）。例如在处理凯湖的矿石（2.5% U_3O_8 ，2.5%Ni和1.5%As）采用两段浸出系统，首先在四台帕丘卡一次浸出槽进行酸浸，然后在十台立式高压釜二次浸出槽进行加压酸浸，总的铀浸出率

为99.0%。国外使用的加压釜有卧式、立式,最近还开发管式加压釜,例如丹麦的Risø国立实验室曾利用管式釜处理了西南格陵兰Ilmangssaq地块的火成岩铀矿石,反应温度接近300℃,压力高达120个大气压。

我国为了处理一个矿床的矿石,曾研究了浓酸熟化薄层浸出,以便达到废水零排放的水平,在连续的设备扩大试验中取得好的效果。法国曾为处理尼日尔铀矿石研究和开发了拌酸熟化浸出,取得在尼日尔工业化的效果。英国Warren Spring国立实验室曾研究和开发了强酸浸出(SAL)法^[18]。

关于铀矿浸出工序所用的氧化剂,加拿大、美国和法国一般用氯酸钠。而我国和澳大利亚、南非、印度则常使用软锰矿。经验证明,使用氯酸钠,由于氯离子在废水中的积累,限制了工厂中废水的循环利用,而使用软锰矿则可增加酸耗并造成废水中锰离子的污染。为了解决这些问题,各国研究了新的氧化剂,目前在工业上使用效果较好的是过一硫酸(卡洛氏酸 H_2SO_5),1984年已在澳大利亚的Nabarlek厂应用^[19]。

六、由溶液或浸出矿浆中回收铀

1.含铀溶液与浸出尾砂分离 此步骤所用设备与一般湿法冶金工业所用固液分离设备并无差异。在铀水冶中,此工序在投资中占15—35%,在操作费用中占10—20%,在生产成本中占较大比重,因此提高效率或省去此工序就成为研究和开发的目标。我国在铀水冶工艺中,先后研究和开发了斜板浓密机,改进了水力旋流器,最近试制成带式真空过滤机^[20]及高效浓密机,还研究和开发各种类型的絮凝剂^[21]。为了在萃取前得到含固量较低的清液,我国研究开发了双层滤床,用煤及砂作滤剂,还研制了轻质滤料上向流滤塔,都取得了好的效果。国外亦在同一方向上发展。

2.连续离子交换及矿浆吸附工艺及设备 离子交换技术的最新发展是在连续离子交换技术方面。此类系统可处理浑浊液至浓矿浆或低浓度铀的溶液。我国采用离子交换的水冶厂在采用悬浮吸附,清液吸附半连续逆流离子交换,施行淋萃流程的基础上研究和开发了连续逆流离子交换筛板塔,试验规模达800mm直径的塔,已得到应用。最近又研制成浓矿浆(50%)吸附设备,还研究了浅床吸附塔都取得了好效果。同时研制和生产了各种新型树脂,如大比重树脂^[22]、大孔树脂^[23]、叔胺树脂、萃淋树脂及离子交换纤维^[24]等,此外还研究了有机淋洗。

最近几年国外^[25]在生产厂中安装的塔式设备有:南非的Cloete-Streat塔的改进型NIMCIX塔和Davy Power Gas系统,加拿大的Himsley塔和HIMIX设备;美国的USBM塔和Himsley塔。除了塔式类型的连续离子交换系统外,有两种新研制成功的Porter离子交换系统和Chem-Sep(或Higgins Loop)系统用来回收铀。前者在纳米比亚的Rossing厂使用,后者在美国用来从铜矿石堆浸出液中回收铀。最近英国的Davy McKee公司研究成功浓矿浆(50%)吸附系统,加拿大的一个大学研究了浅床离子交换系统。关于树脂中毒问题,我国对硅、钼、有机质中毒及其解毒方法进行了系统研究^[26,27]。

3.溶剂萃取和矿浆萃取的工艺和设备 溶剂萃取在我国不但用于从矿石浸出液中提取铀,还用于从树脂洗提液中提取铀。我国水冶厂用的萃取剂都是自行研究和生产的胺类或磷类萃取剂。在反萃方面则采用碳酸胺和结晶反萃,研制了三相反萃结晶槽,还针对一个碱

法厂研究和开发了季铵萃取流程。同时对含铀煤灰浸出液开发了脉冲筛板塔叔胺矿浆萃取流程,在此基础上进一步研究降低有机相损耗的方法,在工厂中取得好效果。为了解决乳化问题,系统研究了硅酸状态及有机质对乳化的影响及其防治方法,并研制了三相报警器在工厂得到应用。

在萃取设备方面,我国研究了脉冲筛板塔在矿浆萃取中的应用,研究和开发了泵吸入式混合澄清器、斜底式混合澄清器、矮型混合澄清器、全逆流混合澄清器^[28]及复合型混合澄清器等,都取得好的效果。

国外铀水冶厂,除法国已开始应用脉冲塔外,一般应用混合澄清器,其改进的目标是降低混合器中的剪切力,以防止或减少三相物的生成,另一个目标是设计出一种只需要较小的面积就能完成相分离的系统,以减小设备的尺寸和减少溶剂的投料量,例如Krebs系统已在法国、尼日尔和加蓬等国使用。此外如英国Davy McKee研制成功的复合型混合澄清器^[29],已用于南非金-铀矿水冶厂铀的生产中。国外,特别是加拿大,详细地研究了矿浆萃取及降低有机相消耗的方法,但未见用于工业。

在液膜萃取方面我国研究了液膜萃取铀。国外,特别是美国、法国、英国和意大利对液膜萃取的各种方式(包括支撑液膜萃取)进行了深入的研究,尚未见在铀水冶工业中应用。

七、沉淀铀化合物的工艺和设备

为了得到铀的化合物,可由浸出液、合格淋洗液、有机相或反萃取液使铀沉淀。我国用离子交换流程的水冶厂采用氨沉淀浓缩物,用清液萃取或淋萃流程的水冶厂采用结晶反萃取或碳酸铵反萃取直接得到纯铀化合物。结晶母液送去蒸氨。最近我国进行了流化床沉淀铀的研究,取得成功。此外还研究了氧化镁沉淀法^[30]。

在国外,特别是加拿大,为了消除废水中铵离子的污染,研究和开发了新的沉淀方法。例如在加拿大埃利奥特湖矿区的Rio Algom水冶厂的Panel生产厂,已废弃硝酸盐淋洗-氨水沉淀的流程,而采用LAMIX法沉淀^[31]。其要点为采用 $1\text{mol/l H}_2\text{SO}_4$ 溶液由饱和树脂淋洗铀,得合格液,先用石灰石使合格液中和至pH为2,然后用MgO中和至pH为7,沉淀得重铀酸镁。在另一生产厂也考虑用过氧化氢从反萃液中使铀沉淀为过氧化铀,用氧化镁控制沉淀pH。此两种方法都可避免把氨水、氯离子、硝酸根离子或钠离子等污染物排放到周围环境中。

八、从磷酸盐矿提铀

含铀磷酸盐矿是铀的潜在资源,含铀可达0.01—0.02%。磷酸盐可综合利用,不但提供铀,且可使磷肥的放射性污染降低。我国曾在南京磷肥厂开始研究由湿法磷酸提铀,建立了一个车间,其后在浙江一个磷肥厂又建立了用此法的提铀车间^[32],进行了由普钙提铀的中间工厂试验,利用国产萃取剂首先进行了双循环,又改进为单循环的研究,使用了三相结晶设备,得到了纯的铀化合物。

在国外,从湿法磷酸回收的铀约为西方国家铀产量的5%以上^[33-41]。美国为了利用其佛罗

里达州的含铀磷块岩首先由橡树岭国家实验室与美国联合碳化物公司合作提出了 D_2EHPA - $TOPO$ 、 $OPAP$ 双循环流程并在工业上应用。其后一些国家或地区,特别是以含铀磷块岩为唯一铀资源的以色列对由磷矿提铀进行了广泛的研究。1983年波兰发表了以壬基苯基磷酸煤油溶液从湿法磷酸中提取铀(IV),用含0.2% $NaClO_3$ 的 $8mol/l$ H_3PO_4 进行五段氧化反萃取的方法。这种载铀的酸不再返回,而是稀释到 $5-6mol/l$ H_3PO_4 后,用 D_2EHPA - $TOPO$ 混合煤油溶液直接萃取铀,最后由有机相中沉淀出三碳酸铀酰胺。以色列为了克服溶剂萃取由湿法磷酸提铀的困难,研究了两种由磷块岩提铀的方法:(1)基于铀与酸化磷块岩生产湿法磷酸过程中形成的磷石膏的共沉淀;(2)用固体萃取剂从过滤后的湿法磷酸中吸附铀。研究结果证明,对于以色列产磷块岩,固体萃取剂,特别是离子交换法有明显的优点。西德发表了新URAPOS流程和移动式中间工厂的研究结果。此流程的特点在于以胺类萃取($Exsol\ D\ 200/240+2\%TDDA$)由磷酸(加约 $1mol/l$ ($NaPO_3$)_n/MTDDA)提取铀(IV),然后以5% Na_2CO_3 溶液反萃取,得重铀酸钠。西班牙为从磷酸中回收铀的 D_2T 流程(即 D_2EHPA 和 $TOPO$ 流程)编制了计算机模型程序。英国研究了从磷酸提铀的液膜流程。例如用 D_2EHPA - $TOPO$ 与贫反萃液接触制成油包水乳化液;然后与含铀磷酸接触;最后破乳,膜相循环使用,富铀内相进一步回收铀。此流程的操作费用比常规的萃取流程低,能直接处理黑酸而不用事先冷却,能处理高浓度(达45% P_2O_5)的磷酸,因此可用于由半水磷酸中回收 U_3O_8 。

九、由褐煤及含碳页岩提铀

褐煤是水中六价铀的良好天然还原吸附剂。含铀的褐煤分布很广,其含铀量可由万分之几到千分之一。因此含铀褐煤是铀的巨大的潜在资源。由褐煤提铀不但有利于综合利用,也有利于保护环境。我国采用了煤粉中温燃烧发电,用硫酸浸出煤灰中的铀和钼,用胺进行矿浆萃取回收铀和钼的流程,建立了水冶厂^[42]。同时对煤灰中铀的存在状态进行了研究。另外还由堆烧的褐煤提取铀,由含铀、锆的褐煤用流态化低温燃烧所得的煤灰中提取铀、锆^[43]。还研究了由铀炭质页岩和石煤灰中提取铀的流程。为此还研究了工业煤粉燃烧锅炉及流化床煤粉燃烧炉。在国外^[4],美国研究了由达柯达州褐煤灰提铀的流程。南斯拉夫进行了由Istrian半岛矿山开采的高硫褐煤中回收铀的研究。结果证明,当地原来一座普通热电厂在高于1200℃温度下燃烧所得的煤灰,可用来回收铀。含有 SO_2 的烟气,可作为浸出试剂而代替硫酸和氧化剂。从灰中可浸出约90%的铀,从烟气中可除去40—95%的 SO_2 。采用矿浆离子交换技术,从浸出浆中回收铀。西班牙在Barcelona的Calaf盆地蕴藏有含放射性煤,其特点是含铀、高硫和高灰分。用重介质洗选煤,精煤用流化床燃烧。为了由灰中提铀,采用硫酸浸出及溶剂萃取。

十、由金属矿中提取共生的铀

为了综合利用金属矿,其中包括黑色、有色及稀有金属矿,提取共生的铀,我国曾研究了由铜矿、褐铁矿^[44]、铅锌矿、褐钨钼矿、钽铌矿、铌钛矿^[45]等提铀的流程,有的已在工业上应用。在美国由铜矿的浸出液或矿坑水提铀已工业化,由于采用了流化床离子交换,效率

很高,回收的铀已在生产总量中占一定比例。澳大利亚研究了由Olympic Dam铜-铀矿提铀的流程^[46]。

十一、由海水中提铀^[47—50]

海水含铀虽只有0.003ppm,但其含铀总量却达45亿吨。因此吸引了一些国家或地区的注意。特别是一些贫铀国家,如日本、英国、西德等对由海水提铀进行了大量的研究工作。我国曾研究了各种吸附剂并进行了一定规模的试验。经验证明,从海水中提铀需处理大量的水,处理的量取决于吸附和淋洗过程的效率,因此研究和开发活动主要围绕下列两个方面进行:(1)研究出最佳的提取体系,亦即最有效和最有选择性的提取体系,以及与此相关的化工技术;(2)研究出一种使此种提取体系接触大量水的经济方法。

国外于1980年在华盛顿,1983年在东京一直到最近,连续举行了海水提铀的国际讨论会,主题都是上列两方面的研究结果。关于寻找合适的吸附剂的大量研究活动过去主要集中在无机吸附剂,特别是水合氧化钛(HTO),而最近则涉及到有机离子交换树脂(如PAO)。为了增大接触面积,日本和西德还把HTO或PAO树脂制成纤维并进行处理。关于第二方面的研究,各国根据天然海岸条件,采用了各种方法。例如日本由于黑潮流过东南海岸,研究了一种固定式岸基方法并进行了年产10kg铀的中间工厂试验。美国、西德、瑞典都试验了各自提出的设备。各国的研究结果指出,目前海水提铀所得产品成本在150美元/磅 U_3O_8 ,远高于目前铀产品的价格,但从长远看,随着吸附剂体系的改进,它的成本定会降低。

随着海水提铀技术的发展,法国还研究了用HTO及树脂提取矿山排放水及河水中的铀,研究结果认为此方法是有希望的^[4]。

十二、铀水冶厂含铀废水及铀尾矿处理^[51—57]

铀水冶厂排放的废水主要来自尾矿中和后排放到尾矿池的废水和由尾矿池渗漏出来的废水。前者在无干扰元素存在的情况下可返回利用或经处理后排放,后者则需要防止渗出,在渗出时要经处理再排。根据国家规定,铀水冶厂的排放废水必须符合卫生标准。我国针对各水冶厂的特点,研究了由废水中回收氨及硝酸、回收硝酸铵、活性软锰矿及活性木屑除镭、TPI型斜板隔油设备及活性炭回收萃余水相中的有机相、萃余水电渗析-石灰沉淀法处理碱性放射性工艺废水、过磷酸钙吸附法净化废水中的氟、用氯化钡-石灰沉淀法处理尾矿池废水、沉淀-曝气法处理尾矿池废水、用离子交换法吸附碱性工艺废水中的铀,都取得好的效果。国外对水冶厂废水处理也进行了大量工作,最近还开发了LAMIX流程,以消除废水中的铵离子和硝酸根离子。目前国内外都在致力于无外排废水或零排放流程的研究。最近加拿大还研究了生物膜除镭。

铀尾矿问题自70年代就已引起国内外的注意。我国已研究了尾矿堆增容及干式尾矿处置工艺,展开了铀尾矿处理研究,以降低其放射性核素含量,从而加以利用。美国对铀尾矿的处置进行了大量研究工作,并对废弃的尾矿堆开展了“铀尾矿补救行动”(UMTRA),加拿大已完成了铀尾矿环境评价计划,并进行了广泛的铀尾矿无害化处理研究,例如用氯化物法、络合物法等使存在于尾矿中的放射性核素,特别是 ^{226}Ra 溶解,从尾矿中除去^[61]。

十三、铀水冶无废物工艺流程的研究^[58-62]

在铀水冶工艺中不产生含过量放射性核素的尾矿,最后实现无废物流程,在国内外已引起关注。其关键在于选择非硫酸体系的浸出剂。我国曾试用了硝酸体系,在回收铀的同时回收了镭、钍、钷。国外,特别是加拿大研究了HCl, HNO₃等体系,1987年还发表了CaCl₂-HCl-O₂体系,在125℃及345kPa O₂,矿浆密度为0.33t/m³,加入4kg/t HCl和330kg/t CaCl₂可由一种低品位铀矿(0.11%U, 14Bq/gRa)得到95%U及90%Ra的浸出率(残渣中余留1.33Bq/g)。在70℃及517kPa O₂,矿浆密度为0.66t/m³,加入66kg/t HCl及600kg/t CaCl₂,由一种高品位铀矿(1.69%U, 21.8Bq/gRa)得到最好的回收率为99.6%U及99.1%Ra(残留于尾渣中有2.22Bq/g)。此外,还对凯湖矿石进行了HCl浸出系统的中间工厂试验。

十四、展望

根据最近十年来国内外铀水冶工业科学技术的发展,可清楚地观察到下列情况:

1. 铀作为唯一的一次核燃料,具有极为特殊的商品性质。其唯一需要者是核能工业,其来源为自然含铀资源。因此铀水冶工业成为核燃料循环系统的重要组成部份,铀水冶科学技术的发展对核工业具有很强的能动作用。

2. 十年来铀水冶工业面临极为特殊的局面,一方面核电需求在持续增长,生产由过剩转为不足,而价格却持续下跌,铀资源储量在大量减少,同时环境保护的要求日益强烈。为此铀水冶科学技术的研究和开发面临三个方面课题:(1)降低成本,特别要降低能耗;

(2) 开拓和充分合理利用含铀资源;(3) 减少污染,保护生态环境。这个趋势将持续下去。

3. 铀水冶科学技术作为一门应用科学是为铀水冶工业服务的,内容涉及矿石准备,一些化工单元过程及控制,直至尾矿处理,因此一些基础科学、应用基础科学及其它应用科学的发展都可影响铀水冶科学技术的发展。利用现代科学技术的新成就促进铀水冶科学技术的发展,就成为改进铀水冶厂所必需。

4. 铀水冶工业要受到技术经济的制约,因此铀水冶研究必须针对需要,针对资源特点。同时一项新的研究成果要在工业应用必须经过开发和示范阶段以取得最佳经济效益,社会效果及环保效果。

最后应指出,在上述各节中因篇幅所限,未涉及专用仪表、自动控制及计算机在铀水冶中的应用,但国内外在这方面的发展是显著的。仅从上述的简单介绍可以看出一些研究工作仍在进行,一些虽在工业上应用,但仍有大量工作要做。面临现代科学技术的发展及核能工业日益增长的需要,铀水冶科学技术的研究和开发工作必将在现有基础上,继续高速前进。

参 考 文 献

[1] 王金堂,中国铀水冶的进展,北京国际水冶会议,1988年。

[2] Dayle, F. M., *J. Met. Apr.*, **40** (4), 26 (1988)。

- [3] Wadsworth, M.E., Hydrometallurgy Res. & Dev. and Plant Practice, 112 AIME, Mar. 5-10, 1983, pp. 3-38
- [4] Advances in Uranium Ore Processing and Recovery from Non-Conventional Resources Proceeding, IAEA, 1985.
- [5] 宋文兰等, 铀矿冶, (3), 12 (1983) .
- [6] 高席丰、傅秉一译, 铀的冶金矿物学与铀矿加工, 国际原子能机构技术报告丛书, 第196号, 原子能出版社, 1986年.
- [7] 王西文等 铀矿冶, (2), 6 (1987) .
- [8] Tsai, T.F., Soc. Pet. Eng. J., 25 (5), 563 (1984) .
- [9] 胡长柏等, 铀矿冶, (1), 15 (1983) .
- [10] 李素媛, 铀矿冶, (4), 7 (1987) .
- [11] 戴玉洁等, 铀矿冶, (4), 17 (1982) .
- [12] 细粒级放射分选机专题组, 铀矿冶, (3), 45 (1986) .
- [13] Watzon, J. et al., Proc. Int. Symp. on Electrical & Magnetic Separation & Filtration Technology Antwerp, pp. 1-13, 1984.
- [14] Anon, Min. J., June 15, 463 (1979) .
- [15] 孙文久等, 铀矿冶, (3), 31 (1984) .
- [16] 田均海等, 铀矿选冶, (2), 70 (1981) .
- [17] 贺守中, 铀矿冶, (1), 68 (1987) .
- [18] Skelton, R.L. et al., 2nd Symp. on Uranium IMM/EEC, Jan. 1977, pp. 140-144.
- [19] Fulton, E.J., Caro's Acid-Its Introduction to Uranium Acid Leaching in Australia, Proceeding Darwin Conf. 1984.
- [20] 杨凯云等, 铀矿冶, (1) 68 (1987) .
- [21] 邱次建等, 铀矿冶, (3), 67 (1982) .
- [22] 房延柱等, 铀矿选冶, (3), 1 (1981) .
- [23] 吴柏华等, 铀矿选冶, (3), 49 (1981) .
- [24] 周绍箕等, 铀矿冶, (2), 71 (1983) .
- [25] Streat, M. & Naden, D., Ion Exchange in U Extraction, in Ion Exchange & Sorption Processes in Hydrometallurgy, John Wiley Sons, 1987.
- [26] 张国维等, 铀矿冶, (3), 28 (1983) .
- [27] 张国维等, 铀矿冶, (2), 11 (1984) .
- [28] 傅子忠等, 铀矿冶, (1), 51 (1984) .
- [29] Bonney, C.F. et al., Hydrometallurgy Res. Dev. & Plant Practice 112, AIME, Mar. 6-10, 1983, pp. 407-418.
- [30] 彭如清等, 铀矿冶, (3), 11 (1984) .
- [31] Hester, K. et al., Ion Exchange & Precipitation at Rio Algom's Operation at Elliot Lake, CIM Conf. Halifax, Aug. 26, 1980.
- [32] 铀矿选冶研究所磷组, 铀矿冶, (2), 69 (1981) .
- [33] Hurst, F.J., SME (AIME), Trans., 262 Sep., 240 (1977) .
- [34] Anon., World Mining, Aug. 100, 49 (1977) .
- [35] Schimmel, G. et al., USP, 4460549, 1980.
- [36] Lyaudet, G. et al., MINTEX-TR-1173 (Proc. Conf.) 1984.
- [37] Gorecki, H., Pol Tech. Rev., (2-3), 17 (1986) .
- [38] Figueiredo, C. de Araujo, DE 86700717/WMS, 1984.
- [39] Jdid, E.A. et al., USP 4656012, 1985.
- [40] Grabas, K., The Extraction of U (IV) from Wet-Process H_3PO_4 in a Centrifugal Extractor,

ISEC'86.

- [41] Davister, A. et al., Improvements & Result Acquired through Six Years of Industrial U Eet. from H_2PO_4 , ISEC'86, Vol.1, Prayon Press.
- [42] 禄福延等, 铀矿冶, (1), 20 (1983).
- [43] 张乐华等, 铀矿冶, (3), 18 (1982).
- [44] 李铭生等, 铀矿冶, (1), 25 (1988).
- [45] 孟广寿等, 铀矿冶, (3), 11 (1982).
- [46] Ragozzini, R.J. et al., Hydrometallurgy, 18 (3), 367 (1987).
- [47] Anon., *J. At. Energy Soc. Japan*, 28 (6), 501 (1982).
- [48] Egawa, H. et al., *J. At. Energy Soc. Japan*, 29 (12), 1073 (1987).
- [49] Vernon, F., *Tool Alloys Steels*, 21 (9), 943 (1987).
- [50] Hori, T. et al., *Sea Water Technol.*, (Jpn), 24 (5), 377 (1987).
- [51] 滕元勋, 铀矿选冶, (2), 41 (1981).
- [52] 郭德凡, 铀矿选冶, (1), 53 (1981).
- [53] 伍庆昌等, 铀矿冶, (2), 32 (1984).
- [54] 陈肇栋等, 铀矿冶, (2), 41 (1985).
- [55] 王生德, 铀矿冶, (1), 65 (1986).
- [56] 李韧杰, 铀矿冶, (4), 35 (1988).
- [57] 李韧杰, 铀矿冶, (1), 63 (1988).
- [58] Nirdosh, I. et al., USP4454097, (1982).
- [59] Nirdosh, I., USP 4649029 (1984).
- [60] Haque, K.E. et al., *Hydrometallurgy*, 17 (2), 229 (1987).
- [61] Nirdosh, I., *Uranium*, 4 (2), 88 (1987).
- [62] Haque, K.E., *Can Min Metall. Bull.*, 80 (908), 76 (1987).

PROGRESS ON THE HYDROMETALLURGY OF URANIUM IN RECENT YEARS

WANG JINTANG

(The Beijing Research Institute of Nuclear Chemical Engineering and Metallurgy)

ABSTRACT

An short introduction of the progress on the hydrometallurgy of uranium is given. In the first part the background of the progress is described. Then, the progress on uranium technical mineralogy, solution mining, mineral sorting, leaching, extraction of uranium from solution and slurry and precipitation of uranium compound is stated in simple terms. The progress on the extraction of uranium from phosphate rock, lignite, carbonaceous shale, uraniferous metallic complex ores and seawater is also described briefly. The progress on the disposal and treatment of effluent and tailings from uranium mill and technical flowsheet without producing wastes is also introduced concisely. At the end, prospect of the development of the hydrometallurgy of uranium is discussed briefly.

Key words Uranium, Hydrometallurgy, Progress.