

铀提取工艺新进展

内 容 简 介

本书是国际原子能机构(IAEA)于1985年出版的《ADVANCES IN URANIUM ORE PROCESSING AND RECOVERY FROM NON-CONVENTIONAL RESOURCES》一书的译文集,主要内容涉及:过一硫酸浸出、管式高压釜浸出、加压酸浸、溶剂萃取、离子交换和液膜分离铀;脉冲塔和带式过滤机的应用;对各种不同工艺流程的技术-经济评价以及从湿法磷酸、煤灰和海水中提铀的新进展。本书可供从事原子能、有色金属湿法冶金、化工、水处理、环境保护等科研、设计、生产人员以及大专院校有关专业师生阅读。

铀提取工艺新进展

《湿法冶金》编辑部出版

(北京234信箱)

北京通县印刷厂印刷

• • •

开本850×1198 1/32 印张 11.875 字数300千字

1987年9月 北京第一次印刷 印数1—1500册 定价4.00元

编 者 的 话

国际原子能机构(IAEA)于1983年6月26日—29日在维也纳召开了一次技术委员会会议,来自29个国家的64名代表参加了会议,并于1985年出版了会议论文集《ADVANCES IN URANIUM ORE PROCESSING AND RECOVERY FROM NON-CONVENTIONAL RESOURCES》(简译为《铀提取工艺新进展》)。该书收集论文18篇(英文14篇、法文4篇),全书共325页,附插图90张(含照片1张)、表格76个。该论文集内容丰富,对于我国铀工业的技术改造和发展以及对于其它有关学科作为技术借鉴颇有参考价值。《铀提取工艺新进展》一书涉及的主要内容有:过一硫酸浸出、管式高压釜浸出、加压酸浸、溶剂萃取、离子交换和液膜分离铀的新进展;脉冲塔和带式过滤机的应用;对各种不同工艺流程的技术-经济评价。此外,还报道了从湿法磷酸、煤灰和海水中提铀的新进展。

为了及时交流科技信息,核工业部北京第五研究所《湿法冶金》编辑部组织有关专业科技人员翻译出版了《铀提取工艺新进展》一书,并在书后附录有“离子交换术语”和“树脂数据汇编”,此外,还列出了有关的专业英汉对照词汇,供读者参阅。

《铀提取工艺新进展》一书可供从事原子能、有色金属湿法冶金、化工、水处理、环境保护等科研、设计、生产人员以及大专院校有关专业师生阅读。

囿于水平加之时间仓促,书中欠妥和错误之处在所难免,望广大读者批评指正。

在本书排印过程中,得到北京通县印刷厂的大力支持和协助,谨表谢意。

《湿法冶金》编辑部

43445^{1987年2月}

本书译校编辑人员

译 校 张仁里 祝振鑫 乔繁盛 黄昌海

高 立 曹淑清 彭如清 张 颖

赵 捷

总审校 张仁里 赵 捷

编 辑 赵 捷 乔繁盛 张淑兰 曹淑清

前 言

随着核能的开发，铀已成为一种重要能源，它不仅扩大了世界上的能源资源，而且还使其更加多样化了。核能占世界总电能的12%左右，并已发展到成熟和可靠的阶段。虽然，目前由于市场过剩和价格下跌使铀工业不景气，然而，这种局面不会无限期地持续下去。随着核电装机容量不断增加，无疑将显示出铀矿加工工艺持久的重要地位。

当前，铀的提取工艺与40年代和50年代铀工业初期相比，已发展到一个崭新的阶段，但仍需继续改进和提高。主要任务是：提高铀浸出率、降低成本、生产高质量的铀浓缩物和改善废物特性以利长期贮存等。同时，还应致力于提高从磷酸中回收铀的经济效益，因为目前从磷酸中提取铀，在经济上的竞争力还是很薄弱的。此外，还要进一步发展从非常规资源（煤和海水等天然水）中提取铀的工艺技术。从煤和天然水中提取铀的工艺，尽管技术上可行，然而，在若干年内，经济上仍无吸引力。但由于它们能提供巨大的铀资源，故具有潜在的重要性。

由国际原子能机构召集的铀矿加工工艺新进展和从非常规资源中回收铀的技术委员会会议，乃是该机构在核原料方面的一次例行活动。这次会议于1983年9月26—29日在维也纳召开，有来自29个国家的64名代表参加，会上提出了27篇论文，本文集收选了其中18篇。

会议主要议题包括：就地浸出和堆浸；铀矿石常规酸浸和碱浸的改进；从湿法磷酸中提取铀；从煤和天然水中提取铀。会议还组织了三次专题小组讨论会，专门研究了预富集和选矿、就地浸出和堆浸以及从湿法磷酸中回收铀，会议简报也收入本文集中。

国际原子能机构向参加会议的所有科学家和工程师致谢，感谢他们为会议提交了论文以及在会议讨论中所做出的贡献；特别要向会议主席W. A. Gow (加拿大) 和各小组讨论会主席Z. M. Dogan (土耳其)，W. Flöter (联邦德国) 和D. Naden (英国) 致以衷心的感谢。

目 录

编者的话

前言

综述

铀矿石加工方法的新进展..... (3)

从矿石中回收铀

NABARLEK水冶厂用过一硫酸作氧化剂的实践..... (21)

用管式高压釜连续碱浸法提取铀..... (42)

回收铀的溶剂萃取、离子交换、树脂矿浆法和液膜

流程的研究与应用..... (54)

脉冲塔在铀矿石工业处理中的应用..... (72)

水冶厂中铀的在线监测自动分析仪..... (82)

处理小型矿床的模式工厂..... (97)

加拿大凯湖厂的加压酸浸工艺..... (114)

劳代夫工厂采用综合碱法流程处理复杂铀矿石..... (130)

从威特沃特斯兰浸出矿浆中回收铀的八个工艺

流程的技术-经济评价..... (163)

从磷酸中回收铀

用壬基苯基磷酸煤油溶液从湿法磷酸中

提取铀 (IV)..... (193)

从以色列湿法磷酸中回收铀的研究

——进展及展望..... (210)

新URAPHOS流程和移动式中间工厂..... (225)

从湿法磷酸中回收铀的D 2 T流程

——流程的模型..... (240)

从煤和天然水中回收铀

从煤灰中回收铀 (257)

从含放射性煤中回收副产品铀 (269)

一种从天然水中回收铀的钛基无机交换

剂的研制和评价 (284)

海水提铀 (293)

会议简报

专题讨论会简报 I

——物理选矿 (311)

专题讨论会简报 II

——就地浸出和堆浸 (313)

专题讨论会简报 III

——从湿法磷酸中回收铀 (315)

附录 (一) 参加会议代表名单 (317)

附录 (二) 离子交换术语汇编 (325)

附录 (三) 树脂数据汇编 (330)

附录 (四) 英汉对照词汇 (347)

综 述

铀矿石加工方法的新进展

W. A. Gow

(Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Ottawa,
Ontario, Canada)

本文评述了最近几年来铀矿石加工方法的主要进展。半自磨法在可采用的厂矿已证明是一项重大的革新，可使投资和操作费用降低。另一方面，其成功应用取决于初步设计试验是否仔细和充分，以及磨机给料是否能保持变化最小。选矿只有在少数几个例子中才是成功的。放射分选法已用来处理南非的低品位矿石和美国的脉状矿床的矿石。赖克特圆锥重力选矿已在南非得到采用。在高品位和低品位矿石浸出技术方面均有许多革新。加压浸出已用来处理含铀在0.5—2.5%范围内的矿石以及含有难浸铀矿物的矿石。在原地进行就地浸出和堆浸已发现可用来处理低品位的多孔性矿石或有裂隙的矿石。铀工厂正把注意力转向高容量浓密机和水平带式过滤机，以改进固-液分离效率和降低投资与操作费用。然而，高容量浓密机需要非常严格地控制底流矿浆密度，并在底流矿浆密度较低条件下操作，这样就会使可溶性铀的损失增大。关于使用带式过滤机的利弊问题，人们仍然有争议。人们对离子交换法和溶剂萃取法研究较多，或许比铀矿石加工中的任何其它单元操作研究得都要多。各种形式的连续离子交换(CIX)法是离子交换技术方面的最新革新。最近几年中业已安装使用的塔式系统有：Himsley塔，USBM-MCIX塔和Cloete-Streat塔及

其改进型的NIMCIX塔与Davy Power Gas系统。已经投入使用的另外两个系统是Porter IX(吸附操作在一组槽中进行的)以及CHEM-SEPS, 在后一系统中, 吸附、淋洗、洗涤和反洗均是在一组由依次动作的阀门相连接的独立隔室中进行的。溶剂萃取所用混合澄清器设计上业已取得的新进展是降低了混合澄清器中的剪切力和减小了相分离所需的面积, 而后者旨在缩小设备尺寸和减少溶剂的投料量。至于沉淀过程, 人们已不再使用氨水和硝酸盐, 而改用浓硫酸淋洗和反萃, 以减少对环境的污染。从湿法磷酸和铜堆浸液中回收铀的工艺仍在进一步完善。虽然在未来几十年中可能还得不到从海水和从煤中提取铀的适用的工艺, 但这些方面的研究工作也正在进行着。

前 言

从矿石中提取铀的现代实践活动已经在许多文献资料中, 特别是在经济合作和发展组织的出版物——《铀提取工艺》^{〔1〕}中作了很好的介绍。对于我们这些专门从事矿石加工行业的人来说, 从这一文献中必然会知道, 含铀矿石加工方法的选择和改进都是基于铀含量、矿物组成^{〔2〕}和原矿的产状以及该工艺的现状。对于加工方法的每一步骤来说, 上述诸点均是头等重要的, 而且对加工中所涉及到的化学问题、所采用的专门工艺、设备的选择以及经济估价的标准都会有影响。选用自磨法还是常规磨矿方法, 酸浸还是碱浸, 溶剂萃取还是离子交换, 全都由矿物状态和岩石产状所确定。加工低品位矿石所容许的回收率要比加工高品位矿石的低, 因此, 人们把注意力放在诸如堆浸等效率较低的操作。当矿石中除铀以外还存在其它有用组分时, 矿物组成和产状是决定有用组分回收顺序的一个因素。

本文仅仅是后面那些较详细的论文的一篇引言, 这些论文的

总题目是铀矿石加工方法的新进展和从非常规原料中回收铀。鉴于上述论点，很显然，在确定“非常规原料”的定义时就会遇到问题。由于铀在自然界中是以各种各样的方式存在的，那么，根据什么标准来区分“常规原料”和“非常规原料”呢？最近在加拿大 Saskatchewan 发现了一些含铀达 2—3 % 的高品位铀矿床，在这些矿床中铀与硫化镍和砷化物矿物共生。对于加拿大的铀矿加工者来说，当把它们与加拿大人业已熟悉了 25 年之久的埃利奥特湖的低品位砾岩型矿床相比较时，则前者是非常规原料。这仅仅是可以引证的许多例子之一。

因此，面对这一困境，我们决定只扼要地介绍已知的铀资源，把这些资源与所采用的加工方法联系起来，而把区分熟悉的资源与不熟悉的资源的任务留给读者。

铀的产状

1980 年经济合作和发展组织与国际原子能机构联合发表了一批资料，报告了世界铀资源的可靠储量(可以以每公斤铀 130 美元回收的铀储量)为 2293000 吨铀，另外还有估计储量为四分之二至四分之三百万吨铀。这些铀资源在已经确定的几种主要类型的矿床中所占的比例列于表 1。

在以前发表的文章中业已对这些矿床的类型作了详细的介绍。本文只想提及那些对目前的加工工艺状况有重要意义的矿床

表 1 铀资源在几种主要类型的矿床中所占的比例

矿床类型	铀资源的比例, %
砂岩型矿床	39
石英砾岩型矿床	17
元古代不整合相关型矿床	15
浸染状矿床	14
脉状矿床	7
其它类型的矿床	8

的特性。

砂岩型矿床的铀含量为0.05—0.3% U_3O_8 ，在原生矿床中，铀以晶质铀矿、沥青铀矿和水硅铀矿的形式存在，而在氧化矿石中，铀则以钒钾铀矿、钒钙铀矿和硅钙铀矿的形式存在。铀赋存在矿物颗粒的胶结物中。这些矿床可以含有高达5%的方解石和少量的硫化物。

石英砾岩型矿床的铀含量为0.01—0.15% U_3O_8 ，铀以沥青铀矿、晶质铀矿、钛铀矿和铀钍矿的形式存在。在精矿中黄铁矿的含量通常可高达5%，而在南非的矿床中则还存在金。虽然矿化主要发生在胶结物中，但在砾石中也存在某些有用矿物。以绢云母和绿泥石形式存在的耗酸矿物并不是一个严重问题。

元古代不整合相关型矿床都是些大型的富矿床，其铀含量高达2.5% U_3O_8 ，主要以沥青铀矿和晶质铀矿的形式存在。在这类矿床中，铀储量达200000吨铀。铀矿物以浸染状和块状形式存在。这些矿床也可能含有镍和其它金属(例如金)的砷化物和硫化物。虽然已知这些矿床含有较高的碳酸盐，但这并不是一种规律。

浸染状矿床与正长岩、伟晶岩、花岗岩以及类似岩石有关。其铀含量为0.05—0.15% U_3O_8 ，且矿物特性变化很大。有些矿床(例如加拿大和纳米比亚的伟晶岩矿床)含有晶质铀矿和铀钍矿，容易用常规的酸浸方法处理，但有些矿床则难以用各种经济加工方法加以处理。

在脉状矿床中，铀矿物充填在各种围岩的空穴中。沥青铀矿和晶质铀矿是最常见的矿物，它们以块状和浸染状形式存在于相邻的围岩中。这些矿床的铀含量可从0.1%变化到2.5%，而在某些矿床中则存在各种硫化物和砷化物。

除了这五种主要类型的矿床外，还存在若干不适于这种一般分类法的低品位铀矿床。其中包括含铀页岩和褐煤、磷酸盐类、钙质结砾岩和多孔石灰岩，铀以钒钾铀矿薄涂层的形式存在于这些岩石的孔隙中和石灰石中。其铀含量变化范围很宽，低的可以低至0.01% U_3O_8 以下，高的则可达0.1% U_3O_8 。

铀矿石加工

破矿和磨矿

自从铀首次被开采至今的长时期中，粉碎铀矿石所用的方法已经发生了一系列变化。经典的方法是用颚式破碎机、回旋破碎机和圆锥破碎机进行初级、次级破碎，甚至三级破碎，然后再在棒磨机和球磨机中进行闭路磨矿。后来的一系列改进旨在降低费用。最近几年中出现的最有意义的革新是在若干铀矿加工厂中采用半自磨方法^[1]。开始所用的设备都是全自磨的，在这些设备中，原矿直接加到一台直径与长度之比为3:1左右的湿磨机中，大矿块把小矿块磨碎至所希望的粒度，而大矿块本身则通过磨损和撞碎也被磨碎了。不久人们就发现，加入直径为15厘米的钢球使之占总装料量的5%左右，能改善磨矿效率，从而该操作就被人们称之为半自磨(或SAG)。

在砂岩型矿床中，由于铀只存在于矿物颗粒的胶结物中，所以，为使铀矿物解离，只需把矿石磨碎至单体矿物颗粒的粒度。因此，这类矿床的矿石特别适合于半自磨。虽然加拿大的砾岩型矿床的矿石也曾成功地用半自磨法磨碎，但由于在这些矿石中，铀是存在于卵石中的，所以破碎时裂隙必须横切基岩和卵石，从而要求整个矿石必须磨碎至矿物颗粒的粒度以下。为此，半自磨机排出的物料还必须在常规的球磨机或砾磨机回路中作进一步磨碎。类似的半自磨加球磨机回路已用来处理澳大利亚的不整合相关型矿床的矿石，在加拿大也计划用它来处理这类矿石。

使用半自磨机可以大大节省操作费用和投资费用^[3]。投资费用的节省是由于省去了一个或一个以上的破矿段，而操作费用的节省则是由于它的维护费用较低，以及几乎不用钢的磨矿介质，从而降低了氧化剂和酸的费用。另一方面，半自磨法的成功应用取决于初步设计试验是否仔细和充分。

必须这样来设计操作：使磨机给料的变化保持至最低水平。

为此，如果矿床中矿石的变化较大(例如，在脉状矿床和不整合相关型矿床的矿石中就会遇到这种情况)，这就可能需要采取一种配矿对策。如果矿石的变化非常大，则就会难以控制磨机的负载量，这本身又会使钢球对磨机内衬的撞击过烈，从而致使内衬损坏。初步设计试验还必须确定矿石结构的稳定性及其构成适合磨矿介质的能力。

半自磨回路中所用的筛子及其它筛分设备必须设计成能处理木质矿浆及类似物质，以避免堵塞和循环负载过量。

一般来说，在可采用半自磨方法的厂矿，已证明这是铀矿石加工回路中的一项重大革新。

选 矿

自五十年代以来，在含铀矿石粉碎之前废弃部分粗粒尾矿或在浸出之前废弃部分细粒尾矿的可能性一直使铀冶金学家不断进行开创性的研究，但迄今这一问题并未得到很好解决。其优点是十分明显的：可提高给料的品位，在浸出之前可除去耗试剂物质，以及可产生“干净的”尾矿等。为此，已研究了电选、重选、强磁选和浮选等选矿方法。但只有少数几个例子中，这些方法才是成功的。由于铀的损失量太大，以及所废弃的尾矿量又不大，因而在实际中并没有得到广泛应用。

毫不奇怪，最成功的选矿技术是放射分选法，当然，这是以铀矿石的专属特性为基础的一种方法。现代分选机可处理的粒级范围为20至160毫米，通过测量其辐射强度及颗粒的表面积以估计矿石的 U_3O_8 品位，以确定把该矿石颗粒选入精矿流中或抛入尾矿流中。

在南非，放射分选法现在已用来处理铀作为副产品的低品位给料；在美国则用来处理脉状矿床的矿石，在这类矿石中，铀以独立的富矿物存在，且由于矿山离浸出车间有150公里远，因此，进行选矿是有吸引力的。根据南非的经验，分选机废弃的尾矿含 U_3O_8 为10—70ppm，而给料的 U_3O_8 含量可能是120—650ppm。美

国的分选操作所废弃的尾矿含U为0.015%，给料含U为0.27%。

现在已得到采用的另一种重要的物理选矿方法是在南非的Palabora生产厂中所使用的方法。它采用赖克特圆锥、摇床和磁选法以提高来自浮选车间的尾矿的品位，生产出来的精矿含 U_3O_8 为3.0%，而给料含 U_3O_8 为35ppm，回收率约为65%。这种操作之所以可行，仅仅是由于铀是作为铜生产中的一种副产品加以回收的。

浸 出

矿石的矿物学特性对浸出工段的影响或许比对铀矿石加工中任何其它单元操作的影响都要大。矿石中铀矿物的类型和含量及脉石的特性决定了浸出所采用的条件。因此，无论是采用酸浸还是碱浸，所采用的浸出条件是因所处理的矿石特性而变化的。然而，直到最近，从一种浸出方法至另一种浸出方法的可变性还是局部的，而不是根本上的。

最近，人们的看法有了一个基本的改变，即要么去加工铀含量在0.5至2.5%范围内的很高品位的矿石，要么去加工铀虽是主要价值矿物但其含量只有万分之几的很低品位的矿石。对于高品位矿石来说，有必要指出，铀的提取率应该达到99%以上，而不是在90—95%之间，而后一数字是含 U_3O_8 为0.1至0.2%的矿石通常所能达到的提取率。即使是处理上述高品位范围中0.5% U_3O_8 的低品位端矿石，5%以上的损失在经济上也是很严重的。为了在短时间内得到高浸出率，设计人员已转向加压浸出，加拿大凯湖铀厂的操作就是一例〔4〕。除了用来处理高品位矿石外，加压浸出也用来处理含有难浸铀矿物的矿石，并用来减小浸出车间的规模和降低浸出车间的耗电量。

对于很低品位的多孔性或有裂隙的矿石，发现在现场进行就地浸出及堆浸是有利可图的。在1981年初美国有11个以上单位就地采用溶液采矿作业，从多孔性低品位砂岩型矿床中年产铀达2500吨以上〔1〕。然而，由于若干原因，主要是由于经济上原因，