

放射性废物最小化丛书第 3 分册

铀矿冶放射性废物最小化

潘英杰 徐乐昌 刘晓超 等编著

中国原子能出版社

放射性废物最小化丛书第3分册

铀矿冶放射性废物最小化

潘英杰 徐乐昌 刘晓超 等编著
冷瑞平 马成辉 审

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

铀矿冶放射性废物最小化/潘英杰等编著. —北京:
中国原子能出版社, 2014. 4
ISBN 978-7-5022-6209-9

I. ①铀… II. ①潘… III. ①铀矿-放射性废物-废物管理 IV. ①TL94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 070822 号

内 容 简 介

本书就铀矿冶工业放射性废物最小化的相关内容,分析了世界和我国铀矿冶工业发展及放射性废物管理的现状,从废物最小化政策、废物最小化技术及废物最小化管理等方面介绍了我国控制铀矿冶废物最小化研究的状况,介绍了现阶段我国铀矿冶放射性废物最小化研究的进展和发展战略,同时提出了建议。

本书可为铀矿冶工业放射性废物管理人员,铀矿冶设计、运行和管理人员开展放射性废物最小化工作提供指导,对国家相关部门进行废物最小化监督管理具有一定价值,也可供大专院校有关专业师生阅读和参考。

铀矿冶放射性废物最小化

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 孙凤春
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 9.5 字 数 237 千字
版 次 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6209-9 定 价 45.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

“放射性废物最小化战略 和顶层设计研究” 总体组

组 长:潘自强

副组长:刘森林

成 员:(按姓氏笔画排列)

马成辉	边慧英	刘建桥	刘振河	刘振领
李 承	李忠镒	李俊杰	何文新	陈 凌
范 仲	费洪登	黄来喜	程 理	鲍家斌
潘英杰				

放射性废物最小化丛书 编辑委员会

主 任:潘自强

副主任:刘森林

委 员:(按姓氏笔画排列)

马成辉	毛亚虹	毋 涛	边慧英	刘振河
刘振领	刘新河	孙东辉	李 承	李 夏
李忠镒	李俊杰	杨华庭	何文新	冷瑞平
陈 凌	范 仲	罗上庚	费洪登	黄 慧
黄来喜	崔安熙	康玉峰	程 理	

分册编辑委员会

主 任：杜运斌

副主任：潘英杰 薛建新

委 员：(按姓氏笔画排列)

王志远 刘晓超 苏衍春 李西栋 李建华

宋立权 张学礼 陈仲秋 陈安全 陈雪莲

周友生 胡锦明 徐乐昌 黄 强 黄代富

撰稿人：潘英杰 徐乐昌 刘晓超 等

审稿人：冷瑞平 马成辉

前言

放射性废物最小化是放射性废物管理的基本原则之一。在《放射性污染防治法》中规定“第三十九条 核设施营运单位、核技术利用单位、铀(钍)矿和伴生放射性矿开发利用单位,应当合理选择和利用原材料,采用先进的生产工艺和设备,尽量减少放射性废物的产生量”。在《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)中规定“8.5 注册者和许可证持有者应确保在现实可行的条件下,使其所负责实践和源所产生的放射性废物的活度与体积达到并保持最小”。这些法律和标准对放射性废物最小化提出了原则和要求。为了贯彻执行这一原则和要求,有必要进行深入的研究和分析。

核工业主管部门、监管部门和经营部门都很重视放射性废物最小化。它既涉及辐射安全、环境安全,也与经济效益直接相关。2009 年年初国家国防科技工业局下达了“放射性废物最小化战略和顶层设计研究”项目,这一计划同时得到了环境保护部(国家核安全局)以及中国核工业集团公司、中国广核集团有限公司、中国电力投资集团公司、中核清原环境技术工程有限责任公司的支持。项目负责单位是中国原子能科学研究院,子课题负责单位是中国核电工程有限公司、中国辐射防护研究院、中国核燃料有限公司、中核金源铀业有限公司和中国原子能科学研究院。参加单位包括广东大亚湾核电环保有限公司、中核清原环境技术工程有限公司、中核新能核工业工程有限责任公司、中核建中核燃料元件有限公司、中核北方核燃料元件有限公司、中核兰州铀浓缩公司、中核四〇四有限公司、中国核电工程有限公司郑州分公司、核工业第四研究设计有限公司、中核北方铀业有限公司、湖南核工业宏华机械有限公司、中核韶关锦原铀业有限公司、中核抚州金安铀业有限公司、核工业北京化工冶金研究院、新疆中核天山铀业有限公司、中核二七二铀业有限责任公司、中国核动力研究设计院和清华大学核能与新能源技术研究院。

课题的前期工作始于 2007 年,2009 年正式立项,2011 年年底完成。研究工作分 6 个专题:放射性废物最小化战略与政策总体研究、核燃料循环前段放射性废物最小化、核电厂放射性废物最小化、核燃料循环后段放射性废物最小化、核与辐射技术利用和研究堆放放射性废物最小化以及放射性废物最小化实用专项技术研究。完成技术研究报告 13 份,废物最小化技术导则建议稿 11 份。为了让更多人了解放射性废物最小化,将其中的主要内容以放射性废物最小化丛书形式编辑出版。放射性废物最小化丛书包括:废物最小化研究总论,核电厂放射性废物最小化(第 1 分册),铀转化、浓缩、元件制造过程中放射性废物最小化(第 2 分

册),铀矿冶放射性废物最小化(第 3 分册),核燃料后处理放射性废物最小化(第 4 分册),研究堆放放射性废物最小化(第 5 分册),核与辐射技术利用放射性废物最小化(第 6 分册),核设施退役放射性废物最小化(第 7 分册),污染材料再循环再利用(第 8 分册)和放射性废物分拣(第 9 分册)。

书中可能存在一些不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

潘自强 刘森林
2013 年

分册前言

放射性废物最小化是放射性废物管理的基本原则之一,随着我国核能和核技术应用的快速发展,铀矿冶工业也必将得到较大发展,因而铀矿冶放射性废物产生量也会随着增加。我国的放射性废物最小化及安全处置受到了政府部门、科研设计单位及运营单位的高度重视。在环境保护部、国防科技工业局以及中国核工业集团公司、中国广核集团有限公司、中国电力投资集团公司的大力支持下,我们编写了本书。在本书编写过程中得到了中国原子能科学研究院、中核第四研究设计工程有限公司、核工业北京化工冶金研究院、中核抚州金安铀业有限公司、西安中核蓝天铀业有限公司、中核浙江衢州铀业有限责任公司、中核北方铀业有限公司、中核韶关锦原铀业有限公司、新疆中核天山铀业有限公司及湖南核工业宏华机械有限公司等单位的大力协助和支持。

本书共分7章,分别介绍铀矿冶放射性废物最小化的背景和范围;国外铀矿冶工艺及废物最小化实践;我国铀矿冶工业、废物产生及对环境影响;我国铀矿冶废物处理和最小化实践;铀矿冶废物最小化形势分析、战略目标及对策;铀矿冶废物最小化顶层设计;在书的最后一章给出了铀矿冶废物最小化研究结论和建议。本书第1章由潘英杰撰稿;第2章由徐乐昌撰稿;第3章、第4章由潘英杰、李建华撰稿;第5章由徐乐昌、潘英杰撰稿;第6章由刘晓超、宋立权撰稿;第7章由潘英杰、刘晓超撰稿;附录1由潘英杰撰稿;附录2由黄强、王志远、陈安全、陈雪莲等撰稿;全书由潘英杰、薛建新统稿。

中核集团安全环保部冷瑞平研究员和国家环境保护部马成辉研究员对本书进行审稿。在本书编写过程中,多次得到中国工程院潘自强院士的指导。中国原子能科学研究院刘福东研究员也对本书提出了许多宝贵意见。在此对他们的支持和帮助表示衷心感谢。

由于放射性废物最小化是一门新兴课题,本书覆盖面大、涉及范围广,加之放射性废物最小化管理技术发展较快,我们的研究深度不够,特别由于作者知识水平有限,书中难免存在不当、疏漏和谬误之处,敬请读者批评指正,我们将不胜感谢。

分册编辑委员会

2013年8月30日

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 背景	(1)
1.2 范围及主要内容	(2)
第 2 章 国外铀矿冶工艺及废物现状	(3)
2.1 天然铀生产方法和工艺	(3)
2.1.1 铀矿采冶	(3)
2.1.2 铀纯化	(6)
2.2 国外铀废石、尾矿及废液和废气的产生率	(7)
2.2.1 铀废石、尾矿产生率	(7)
2.2.2 废液、废气产生率	(10)
2.3 国外铀矿冶工业的环境问题	(10)
2.3.1 废石与尾矿造成的环境问题	(10)
2.3.2 废水造成的环境问题	(12)
2.4 国外铀矿冶和纯化废物最小化实践	(12)
2.4.1 废物最小化策略	(12)
2.4.2 采矿废物的最小化实践	(13)
2.4.3 铀水冶废物最小化实践	(16)
2.4.4 铀矿采冶废水处理	(18)
2.4.5 铀矿采冶地下水修复	(21)
2.4.6 国外铀矿冶退役治理废物最小化简介	(22)
2.5 铀纯化废物最小化实践	(26)
2.5.1 铀回收和去除	(26)
2.5.2 硝酸和硫酸回收	(26)
2.5.3 硝酸铵处理和再利用	(27)
2.5.4 萃余液处理和循环利用	(27)
2.5.5 有机相处理	(28)
2.5.6 焚烧	(28)

2.5.7 放射性废气处理·····	(28)
2.5.8 铀纯化废物最小化·····	(28)

第3章 我国铀矿冶工业、废物产生及对环境的影响 ····· (30)

3.1 我国铀矿冶工业及废物特点·····	(30)
3.1.1 我国铀资源及矿冶工业特点·····	(30)
3.1.2 铀矿冶工业废物及环境特点·····	(31)
3.2 我国铀矿采冶工艺简介·····	(32)
3.2.1 采矿工艺·····	(32)
3.2.2 选矿工艺·····	(33)
3.2.3 水冶工艺·····	(33)
3.2.4 铀纯化(精制)工艺·····	(37)
3.3 铀矿冶建材用量及废物产生率·····	(38)
3.3.1 铀矿冶生产建设建材用量·····	(38)
3.3.2 铀矿冶生产过程废物产生率·····	(39)
3.3.3 铀矿冶系统废物归一化废物产生率·····	(40)
3.4 铀矿冶废物对环境的影响·····	(40)
3.4.1 废物中放射性有害物含量·····	(40)
3.4.2 铀矿冶生产对环境的影响·····	(41)
3.4.3 废物的处理和处置·····	(43)

第4章 我国铀矿冶废物处理和最小化实践 ····· (46)

4.1 我国铀矿冶废物最小化政策及法规标准·····	(46)
4.2 气态废物·····	(47)
4.2.1 气载污染源·····	(47)
4.2.2 废气最小化实践·····	(49)
4.3 液态废物·····	(55)
4.3.1 铀矿冶废水·····	(55)
4.3.2 废水最小化实践·····	(57)
4.4 固体废物·····	(66)
4.4.1 固体废物的产生·····	(66)
4.4.2 固体废物最小化措施和方法·····	(68)
4.5 废旧污染金属·····	(73)
4.5.1 废旧金属处理现状·····	(74)
4.5.2 熔炼去污工艺流程·····	(75)

4.5.3	熔炼产生的废物	(76)
4.5.4	熔炼去污达标的金属再利用	(76)
4.6	铀矿冶退役环境治理	(77)
4.6.1	铀矿冶设施退役概况	(77)
4.6.2	铀矿冶退役治理技术政策及基本原则	(78)
4.6.3	铀矿冶退役治理的主要技术措施	(78)
4.6.4	主要退役治理废物最小化技术成果	(79)
4.6.5	铀矿冶设施退役治理效果	(82)

第5章 我国铀矿冶废物最小化形势分析、战略目标与对策 (84)

5.1	废物最小化形势分析	(84)
5.1.1	现状与成绩	(84)
5.1.2	问题与差距	(88)
5.1.3	机遇与挑战	(90)
5.2	废物最小化战略目标	(90)
5.3	废物最小化战略对策	(91)
5.3.1	实现废物最小化工作的标准化和规范化	(91)
5.3.2	建立和完善铀矿冶废物最小化管理机构,制定和完善废物 最小化规章制度	(91)
5.3.3	开展铀矿冶废物最小化调查与统筹管理	(91)
5.3.4	建立与完善废物最小化评价指标体系	(91)
5.3.5	开展废物最小化新技术、新方法、新工艺、新设备和新材料的研发	(91)
5.3.6	推广与普及废物最小化技术,促进废物最小化成果转化	(92)

第6章 我国铀矿冶废物最小化顶层设计 (96)

6.1	废物最小化指导原则	(96)
6.2	废物最小化管理体系模式	(96)
6.3	废物最小化调控政策	(97)
6.4	废物最小化管理机制	(99)
6.5	废物最小化评价指标体系的构建	(100)
6.5.1	废物最小化评价指标选择的原则	(100)
6.5.2	废物最小化评价指标层次结构及评价方法步骤	(100)
6.5.3	废物最小化评价指标的选择	(102)

6.5.4 铀矿冶废物最小化评价指标参数的确定	(103)
6.6 废物最小化评价方法	(104)
6.6.1 评价标准	(104)
6.6.2 基本原则	(104)
6.6.3 评价方法选择	(104)
第7章 铀矿冶废物最小化小结与建议	(105)
7.1 小结	(105)
7.2 建议	(106)
参考文献	(109)
附录1 铀矿冶术语定义	(111)
附录2 铀矿冶放射性废物最小化的良好实践	(115)

第 1 章 概 述

1.1 背景

从发现铀至今的 200 多年中,铀使人类步入了高度文明的核能开发利用新时代。因为铀资源是现今国际社会最重要的战略物资和核能源燃料。铀矿的勘探和开发备受国际社会所关注,铀资源的储备已经提高到极其重要的国家安全高度。

铀矿冶生产是核燃料生产的前端、核工业的基础,在原子能工业中占有重要地位。在铀矿开发建设初期,由于人们对铀矿的危害性认识不足,只注重开发,忽视防护问题和废物处理、处置,在铀矿冶生产过程中产生数量庞大的放射性和非放射性废物:废气、废水、铀废石、尾矿(渣)。这些废物中含有铀、钍、镭等长寿命放射性核素,以及衰变产生放射性气体氡、氡子体和 α 放射性气溶胶,同时还存在重金属毒物及化学有害物质,所以在各产铀国造成许多辐射防护和环境污染问题。我国的铀矿采冶工业同样存在放射性废物问题,在《中国核工业三十年辐射环境质量评价》^[1]中指出:铀矿冶生产过程产生的废物所致公众集体受照剂量最高,约占核燃料循环系统总集体剂量的 89%。在《中国核工业辐射水平与效应》^[2]中得出:铀矿冶生产过程中的职业受照集体剂量最高,约占核燃料循环系统总集体剂量的 86%。特别是在铀矿冶废物处理、处置不当或管理不善时,将会对环境造成较大影响和潜在危害。

因此,在铀矿冶工业开展放射性废物最小化研究,实现最大限度地控制和减少铀矿冶废物产生量,对改善环境质量状况,保护工作人员和公众安全健康是非常重要和必要的。铀矿冶工业放射性废物最小化的实施对我国铀原料工业的开发和铀矿山环境生态文明建设具有重大现实意义和深远战略意义。

本书通过对国内、外铀矿采冶和纯化生产工艺,废物的产生、处理和处置技术,以及废物的最小化实践进行广泛深入的调查和研究,并紧密结合我国铀矿冶生产实际,开展了针对我国铀矿冶生产工艺特点、生产设施设备、生产管理的具体情况和存在问题,如废物最小化理念;政策、法规、标准;生产工艺改进;废物的产生规律、处理和处置技术;以及辐射环境监测和废物最小化监管等问题,从科研、设计、生产运行和关闭退役的全过程开展了全面废物最小化实践活动。采用科学、有效的技术手段,推进铀矿冶工艺优化设计,严格控制废物产生源,强化生产环节管理和废物处理管理,实现废物减量化,积极推进废物再循环与再利用,加强各层次的废物最小化监管。在深入开展铀矿冶废物最小化工作基础上,强调废物最小化顶层设计,建立铀矿冶废物最小化管理办法及控制指标体系,努力提高资源综合利用率,千方百计降低单位能耗与物耗,最大限度减少废物产生率与排放量,推广铀矿冶废物最小化最佳实践与先进技术措施及管理制度,使铀矿冶废物最小化工作逐步达到科学化和规范化,进一步改善铀矿冶工业环境质量状况,达到环境效益最大化,以加快铀矿冶废物最小化和生态

文明建设进程,促进我国铀矿冶工业可持续发展。

1.2 范围及主要内容

为了总结和推广铀矿冶生产过程中产生大量废气、废水和废石、尾矿(渣)的最小化工作和实践经验,我们从废物最小化控制和管理的高度,在以往废物最小化工作基础上,进行梳理、提升和总结,由于废物最小化是一项复杂的系统工程,本书重点阐述的内容主要包括:

(1) 国外铀矿冶工艺及废物现状

调研国外铀矿采冶、纯化生产工艺;废物产生率和排放率;三废处理技术措施;退役治理技术措施;废物最小化技术措施等。

(2) 我国铀矿冶工业、废物产生及对环境的影响

调研我国常规采冶、地浸、堆浸、原地爆破浸出、铀纯化生产工艺及特点;三废产生率、废物处理和处置措施及排放情况。

(3) 我国铀矿冶废物处理和最小化实践

对常规采冶、堆浸、原地爆破浸出、地浸、铀纯化、退役治理、污染废旧金属去污、熔炼,以及熔炼后金属的再利用等过程的废物最小化技术研究和实践。

(4) 我国铀矿冶废物最小化当前形势分析、战略目标与对策研究

铀矿冶设施退役治理废物最小化政策、法规、标准、技术和管理,覆盖治理、铀尾矿库与废石堆、渗出水治理、土壤与农田治理、建构筑物去污、地下水修复,以及退役治理工程的长期稳定性。

(5) 我国铀矿冶废物最小化顶层设计

根据放射性废物最小化理念,铀矿冶制定了一系列考核指标,并建立了评价方法,对铀矿采冶、铀纯化工艺及退役治理全过程实施废物最小化控制与管理。

(6) 对我国铀矿冶废物最小化工作的建议

本书最后部分列出了铀矿冶工业常用的术语定义;同时给出了铀矿冶废物最小化良好实践的实例。

第 2 章 国外铀矿冶 工艺及废物现状

2.1 天然铀生产方法和工艺

2.1.1 铀矿采冶

天然铀生产方法包括地下开采、露天开采、地浸、共伴生回收产品、堆浸、原地爆破浸出、矿井水处理及环境修复的回收。由表 2-1 可知^[3-4],天然铀主要生产方法为地下开采、露天开采和地浸。值得注意的是,地浸自 1960 年开始试验生产以来,其所占比重逐渐增加,目前已成为主要的天然铀生产方法,并从 2006 年起,超过露天开采成为第二种主要采矿方法。现在采用地浸采铀的国家有澳大利亚、中国、哈萨克斯坦、俄罗斯、美国、乌兹别克斯坦,其中美国和乌兹别克斯坦全部采用地浸采铀,哈萨克斯坦主要采用地浸采铀。原地爆破浸出占全球天然铀产量不到 0.1%。我国主要采用的堆浸采铀方法约占全球天然铀产量的 2.3%。共伴产品回收的天然铀比例,约为全球天然铀产量的 10%。其他如矿井水处理和环境治理过程中也回收了一定量的天然铀。因此对资源综合利用、矿井水回收及环境治理所生产的天然铀不容忽视,应加以充分挖掘。

表 2-1 根据生产方法统计的世界铀产量分布百分比^[3-4]

生产方法	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
地下开采	44.1	43.1	41.6	39.3	39.4	39.8	36.5	32.0
露天开采	26.1	26.8	29.8	27.6	28.1	24.2	24.4	27.3
地浸	15.5	18.3	18.4	19.8	20.0	25.0	27.2	29.5
共伴生产品	12.3	9.0	9.7	11.1	10.3	8.6	9.5	8.9
堆浸	1.4	1.9	1.9	2.0	1.9	2.2	2.3	2.3
原地爆破	0.5	0.9	0.5	0.2	0.3	0.2	0.1	<0.1
其他	0.0	0.0	0.0	0.0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

铀水冶工艺按矿石特性可分为酸法浸出和碱法浸出,按浸出工艺过程可分为常规搅拌浸出、地浸、堆浸或槽浸、原地爆破浸出等。按溶液中铀回收工艺可分为离子交换和溶剂萃取两种工艺。

铀水冶工艺一般可表示为浸出一铀回收(吸附或萃取—淋洗或反萃取)—沉淀,工艺流

程可用图 2-1 表示。

(1) 常规搅拌浸出

将铀矿石破磨到需要的粒度，一般在 -200 目左右，在搅拌槽中进行浸出，其矿石来源于井下开采和露天开采的常规开采。常规搅拌浸出率高，可高达 90%~99%，因此一直得到铀矿冶企业青睐，特别适合于品位较高的铀矿水冶。

(2) 地浸

地浸采铀相对于常规采冶具有投资省，建设周期短，成本低，劳动强度小，生产效率高，安全性能好，废水排放量少，不产生尾矿与废石，不破坏自然景观，易实现大规模自动化生产等独特优势。因此，在国际上迅速得到推广利用，其规模和产量越来越大。截至 2011 年，已由占世界天然铀产量的 29.5% 提高到 45%，高于地下开采、露天开采、堆浸、原地爆破浸出等采矿方法的产量，位居首位。埋深大、

品位低、涌水量大等铀矿床采用常规采冶无法进行或不经济的情况下，地浸是唯一可采用的采冶工艺，地浸采铀回收率一般可达 70%~90%。哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、捷克、美国、保加利亚等曾经或正在实施大规模化的地浸生产。目前哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等全部采用地浸回收天然铀。表 2-2 给出了常规水冶提铀与地浸采铀成本等的对比。

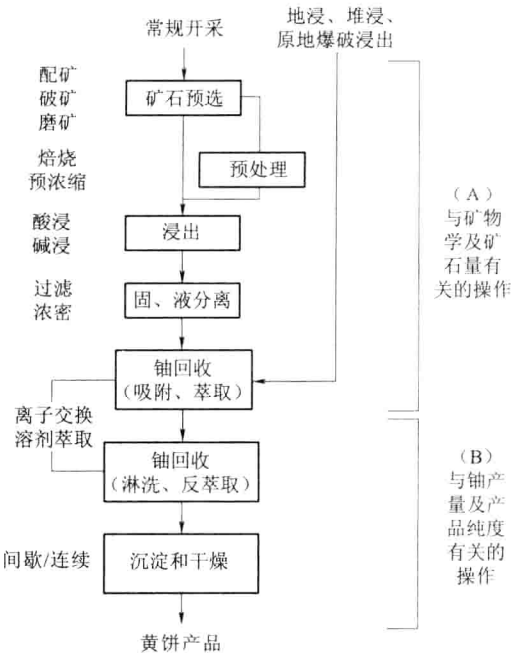


图 2-1 铀矿采冶工艺流程

表 2-2 常规水冶提铀与地浸采铀成本等的对比

对比参数	常规水冶法	地浸法
最低开采品位	0.03%	0.01%
铀回收率(硫酸法)	74%~99%	70%~90%
铀回收率(重碳酸盐法)	—	50%~60%
地段开采周期	10~15 年	3~5 年
试剂消耗量(相对)	100%	30%~35%
产品生产成本(相对)	100%	40%~45%
资金投入(相对)	100%	25%~50%
能源消耗(相对)	100%	30%~40%
劳动力效率(相对)	100%	250%~300%

(3) 堆浸和槽浸

堆浸由于具有建设周期较短、投资较省、运行成本较低等优势，在 20 世纪 80 年代得到一定发展，如 20 世纪 80 年代初，美国、法国等国均采用地表堆浸法处理铀品位为 0.05%~0.1% 的砂岩，矿石破碎到 -28 目，浸出率达 90%，每年回收铀超过 100 t。但由于堆浸浸出周期长，浸出率通常较低(少数铀矿石固有浸出性较好的除外)，因此其在全球天然铀生产中

所占比例一直有限。表 2-3 给出了国外部分铀矿堆浸厂的主要技术参数。

表 2-3 国外部分铀矿堆浸厂的主要技术参数

矿山名称	品位/%	岩性	粒度/mm	回收率/%
美国 Split Rock	0.05	胶结砂岩	原矿	
美国 Petrotonics	0.05	可渗砂岩	原矿	75
加拿大 Agnew Lake	0.05	砾岩	-76	
法国 Bertholene	0.167	钒酸盐、水硅铀矿	-8	92.5
日本 Ningyo Toge	0.1	易碎氧化矿	原矿	83.8
墨西哥 El Nopal	0.29	流纹岩	原矿	83
阿根廷 Don Otto	0.1	砂岩	-65	50~60
尼日尔 Arlit	表外 0.04~0.08 边界 0.08~0.12	泥岩、砂岩	原矿	60~65

槽浸是在槽中进行的渗滤浸出,破碎的矿石装在有假底的槽内,假底上覆盖一层过滤介质,浸出剂从顶部加入,淹没全部矿石,在槽底收集浸出液,通过控制浸出液的流速达到控制浸出时间的目的,保证铀的浸出率。槽浸是特殊形式的堆浸,采用加盐焙烧法从钾钒铀矿中回收铀的早期铀矿加工厂多数采用槽浸技术,美国怀俄明州的 Spook 砂岩矿, U_3O_8 的品位为 0.13%,铀矿石破碎到 -19.05 mm,采用浓酸拌和后槽浸的方法,通过 72 h 的浸出,酸耗 35 kg/t,铀的回收率达到 85%~90%。

(4) 原地爆破浸出

原地爆破浸出的矿石粒度一般为 50~200 mm,然后进行喷淋、集液,再用泵送到水冶厂进行回收。原地爆破浸出一般适合于陡倾斜、品位较低、浸出性较好的矿体。原地爆破浸出会产生大量二氧化碳、硫化氢、二氧化硫,以及大量的氢,因此必须搞好矿井的通风防护。原地爆破浸出在 20 世纪 70~90 年代得到一定发展。如 1977 年,加拿大在 Agnew Lake 湖铀矿采用深孔(平均孔深 30 m)挤压爆破,使矿体松动并达到工艺需要的块度,用浸出液将矿石中的铀浸出,从铀品位为 0.045% 的贫铀矿床中回收铀,取得较好的经济效益。1987 年加拿大用堆浸法回收的铀超过 380 t。

依据铀矿物特性,各矿山可以采用不同的铀水冶工艺。以下给出了几座铀水冶厂工艺。

(1) 美国 Split Rock 厂工艺(如图 2-2 所示)

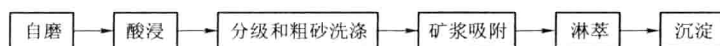


图 2-2 自磨离子交换流程

产品为重铀酸铵(煅烧后可得 95% U_3O_8)。

(2) 美国 Grants 厂工艺(如图 2-3 所示)

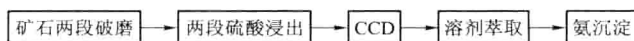


图 2-3 溶剂萃取流程