

SUAN FA DI JIN CAI YOU GONG YI SHOU CE

酸法地浸采铀工艺手册



原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

酸法地浸采铀工艺手册/国际原子能机构著;马飞等译.

—北京:原子能出版社,2003.1

书名原文:Manual of Acid in Situ Leach Uranium Mining Technology

ISBN 7-5022-2710-5

I. 酸… II. ①国…②马… III. 酸浸:原地浸出—铀矿开采—
技术手册 IV. TD868-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 004842 号

此中译本的出版已得到国际原子能机构的准许,但该机构对本书的翻译、出版不承担责任。

内 容 简 介

本书较系统地介绍了酸法地浸采铀工艺,同时也涉及几个相关学科的资料和信息。内容包括铀矿地质、水文地质、地浸采铀工艺理论和工程、化学、地浸设施及采矿井田系统、环境研究及保护措施,以及酸法地浸在乌兹别克斯坦的应用实例等。全书共 13 章,并附有术语、单位换算等 4 个附录。

本书可供从事铀矿地质和铀矿采冶的广大科技工作者、工程技术人员及中高等院校师生参考。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:谭 俊

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

保定市印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm 1/32 印张:10.25 字数:274 千字

2003 年 1 月北京第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—500

定价:38.00 元

译者的话

地浸(in situ leaching, 缩写为 ISL)采铀矿,即原地浸出采铀矿,它是通过化学溶液萃取岩石中的铀,并抽取地下产品液而回收铀的一种化学方法。地浸采铀矿技术通常使用两种化学浸出方法——酸法和碱法。目前,酸法浸出应用较为广泛,占世界地浸采铀矿的大多数,它已成为可地浸砂岩型铀矿的主要回收方法。地浸采铀矿技术始于 20 世纪 60 年代早期,美国和前苏联是最早研制和开发地浸采铀矿技术的国家,随后,在保加利亚、捷克斯洛伐克、德意志民主共和国、澳大利亚、中国等国家都得到了发展。由于地浸采铀矿具有回收费用低,对地面环境污染小,工艺简单,效率高等特点,因此,在矿量大、品位低、埋藏浅的可地浸砂岩型铀矿采矿中,越来越受到各国的青睐。

《酸法地浸采铀工艺手册》(Manual of acid in situ leach uranium mining technology)一书于 2001 年 8 月由国际原子能机构(IAEA)出版。“该书是第一部详细描述酸法地浸采铀工艺的英文版著作”,它是根据 1993,1994,1999 年在奥地利维也纳和 1998 年在捷克共和国召开的国际原子能机构技术委员会会议资料,由 Benes, V. (捷克)、Boitsov, A. V. (俄罗斯)、Fazluilin, M. (俄罗斯)、Hunter, J. (英国)、Mays, W. (美国)、Novak, J. (捷克)、Slezak, J. (捷克)、Stover, D. E. (美国)、Tweeton, D. (美国)、Underhill, D. H. (IAEA)10 名专家撰写而成。该书共分 13 章,书后还附有 4 个附录,书中插图近 100 张,表 50 多张,内容极其丰富。经国际原子能机构同意,授权核工业北京地质研究院将该书翻译成中文,正式出版中译本,在中国供广大铀矿地质工作者及其他地质行业同仁学习、参考。这是一本很难得的酸法地浸采铀工艺手册,它的出版无疑对我国铀矿地质及采矿事业的发展将起到积极的推动作用。

该书由国防科工委核能开发专项资助,核工业北京地质研究院组织翻译出版;马飞院长主持翻译出版全面工作;马飞、张书成、潘燕、腰善丛翻译,黄贤芳、谈成龙校对,刘平参加了前言和目录的翻译工作。最后由陈祖伊研究员复校、审阅定稿。英文版原书由陈祖伊提供。在中译本的出版中得到了中国核工业集团公司科技与国际合作部、国家原子能机构国际合作司,以及核工业北京地质研究院领导和院科技处的大力支持。值此,对上述部门和领导及为此书的出版付出辛勤劳动的译、校、审稿者表示由衷的谢意。全书的录入和计算机编排分别由李彤和李珍媛完成。

由于时间仓促,水平有限,中译本中难免有欠妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

译 者

2002 年 10 月

前 言

国际原子能机构关于反应堆燃料计划的一个重要部分包括创新性铀生产技术信息的获得和传播。与常规开采比较,地浸工艺既是一项革新性技术,又是一项相对年轻的技术。知识丰富的专家用该方法从适合于地浸开采的砂岩型矿床中提取铀,无论从经济角度还是环境保护方面均具有优势。

近年来,用地浸法开采的铀矿产量一直占世界铀矿产量的 13%~15% 左右。因为它具有回收成本低和不污染地面环境这两种潜在优势,这项技术将被广泛使用。适于地浸开采的砂岩型铀矿床在世界上的分布相当广泛,因此,广泛采用地浸法将成为事实。

地浸回收铀工艺可选用两种化学浸出系统——酸法和碱法。酸法浸出应用更为广泛,占世界已地浸生产铀的大部分。这项工艺始于 20 世纪 60 年代,由前苏联和独联体及中、东欧国家开发和利用。本书描述了在各种经济条件下,以及国家政策和计划条件下该时期流行的铀矿开采实践。美国是持续推广铀地浸生产的国家,并在考虑环境因素而采纳碱法浸出技术之前,对酸法和碱法都进行过试验。像对待所有的采矿工艺一样,对任何一个项目的制订、设计、运作及至关闭,都必须适当考虑对环境的影响。

本书以地浸技术为主体,涉及了几个不同学科的资料和信息。它们包括铀矿地质、水文地质、化学及热贮工程、工艺工程,并未打算把此书作为如何进行操作的手册。然而,它确实确实提供了许多见

解,涉及地浸采铀项目的计划、运行和关闭的技术可行性问题。

本书并不是酸法或碱法地浸采铀的综合性书籍。而且,目前关于碱法浸出系统方面的文献已有很多,但几乎没有一部有关酸法浸出工艺的英文文献。因此,本手册是第一部详细描述酸法地浸开采铀矿工艺的英文版著作。应当指出的是,本书提供的很多实际材料,对碱法地浸采铀矿的计划制订和运作也是有价值的。

目 录

第1章 导言和地浸采铀工艺理论	1
1.1 导言	1
1.2 地浸场区的地球化学特征	4
1.3 试剂-浸出化学	7
1.3.1 有关试剂的一般情况	7
1.3.2 硫酸浸出中的化学反应	9
1.3.3 碱法浸出中的化学反应	11
1.3.4 选择浸出化学的准则	13
1.4 铀地浸过程的理论基础	14
1.4.1 地浸的主要过程	14
1.4.2 未固结沉积矿床地浸的一般机理	15
1.4.2.1 地浸是一种不均匀作用	15
1.4.2.2 浸出液中铀浓度的开发	17
1.4.2.3 多孔隙介质中铀浸出的一般机理	19
1.5 地浸中溶液流的基本特性	25
1.5.1 含水层中影响迁移溶液的物理性质,含水层中 密度分层	25
1.5.2 孔隙阻塞的溶液流	31
1.5.3 溶液流与气体生成	47
1.5.4 浸出期间溶液的稀释	52
1.5.5 溶液流后产品液的滞后	56
第2章 地浸开采的地质和水文地质条件	58
2.1 适于地浸开采矿床的分类	58

2.2	地浸的水文地质条件·····	59
2.3	矿石和岩石成分对地浸开采过程的影响·····	66
2.3.1	概述·····	66
2.3.2	矿石的矿物成分对地浸开采过程的影响·····	67
2.3.3	主岩成分对地浸开采过程的影响·····	67
2.4	铀矿石和成矿矿物·····	71
2.5	地浸期间形成的矿物及其对地浸的影响·····	74
第3章	砂岩型铀矿床地质 ·····	77
3.1	矿床的岩性和岩相(矿石和主岩按岩性和渗透率的分类)·····	77
3.2	矿床和后生蚀变的地球化学特征研究·····	80
3.3	矿体形态和铀矿化参数的研究·····	82
3.3.1	矿体形态·····	82
3.3.2	铀矿化填图·····	86
3.4	矿石和主岩成分的研究·····	90
3.5	地浸铀矿床勘查·····	96
3.5.1	地浸开采的铀矿床勘查和圈定·····	96
3.5.2	地浸开采资源评价的参数·····	99
3.6	地浸采铀中使用的地球物理方法·····	102
3.6.1	概述·····	102
3.6.2	用测井方法研究矿石和主岩·····	104
3.6.3	测量井斜、孔径和地热特征·····	105
第4章	铀矿床的水文地质评价 ·····	106
4.1	概述·····	106
4.2	各个评价阶段的水文研究·····	106
4.2.1	初步评价·····	106
4.2.2	进一步调查·····	107
4.2.3	详勘·····	108
4.3	抽水试验·····	109

4.4	静态监测井	110
4.5	评价流体性质的地球物理方法	111
4.6	地浸矿床的水文地质分带	112
第5章	模拟与实验室研究	115
5.1	模拟地浸过程	115
5.1.1	基本概念	115
5.1.2	矿石采样	119
5.1.3	柱浸试验前准备	120
5.1.4	柱浸	122
5.1.5	地面槽中的浸出模型	126
5.1.6	粘土质矿石的浸出模型	128
5.2	确定未固结岩石和矿石的渗透性能	131
5.2.1	概述	131
5.2.2	确定岩、矿石渗透系数的初始值	131
5.2.3	浸出过程中岩、矿石渗透系数的变化	134
第6章	地浸矿床上井田浸出试验	136
6.1	浸出试验的基本概念和顺序	136
6.2	地浸试验场的钻井排列样式	138
6.3	浸出试验场的信息要求	149
6.4	浸出特性的计算及其可靠性评价	154
第7章	砂岩矿床地浸采矿的井田系统	164
7.1	地浸井田系统	164
7.2	主要井田样式的水流网络	166
7.3	地浸钻井样式最优设计的选择	170
7.4	砂岩矿床地浸作业系统的分类和描述	173
7.4.1	线状钻井样式	173
7.4.2	垂直阶梯式系统	176
7.4.3	长方形系统	177
7.4.4	蜂窝状式系统	179

7.4.5	屏障系统	179
7.4.6	综合系统	181
7.5	设计地浸阶段	181
第8章	溶液的处理	183
8.1	产品液的组成	183
8.2	过滤产品液	184
8.3	浸出液中离子形式的铀	185
8.4	铀的吸附	188
8.5	使用离子交换法时溶液处理中的动力学问题	192
8.6	从阴离子树脂上解吸铀	194
8.7	从淋洗液中分离铀的方法	195
8.8	铀产品的运输	196
8.9	处理回收液的工艺流程	196
8.10	处理回收液的吸附/解吸设备	201
8.11	未来浸出液的综合处理	205
第9章	地浸作业的井田开发	206
9.1	概述	206
9.2	注液井和回收井的施工和运作	208
9.3	地浸钻井设计	209
9.3.1	回收井的设计	212
9.3.2	注液井的设计	217
9.3.3	观测井的设计	218
9.3.4	勘探和控制钻孔	220
9.3.5	锚状钻孔的设计	220
9.3.6	控制浸出液侧向渗流的钻井设计	221
第10章	地浸钻井的运作	223
10.1	地浸产品液抽至地表的方法	223
10.2	浸出现场钻井运转的性能	227
10.3	注液井效率降低的原因	229

10.4	回收井生产效率降低的因素	234
10.5	浸出现场钻井故障的原因	235
10.6	钻井加工	238
10.7	地浸过程中地浸现场参数的控制	242
第 11 章	环境保护研究及措施	243
11.1	总则(基本概念)	243
11.2	地表的污染和土地的复垦	243
11.3	地浸作业中地下水污染的一般情况	246
11.4	地下水污染的评价	251
11.4.1	总则(基本概念)	251
11.4.2	地浸终止后污染地下水晕的计算	253
11.4.3	水源污染的可能性	254
11.5	地下水环境保护研究	258
11.5.1	概述	258
11.5.2	野外条件下相互反应参数评价的方法学	259
11.6	地下水复原过程	261
11.6.1	用试剂沉淀的净化法	261
11.6.2	电吸附技术净化法	262
11.6.3	用压缩空气净化溶液	262
11.6.4	用地层水冲洗	263
11.6.5	天然衰减稀释法	263
11.6.6	加速地下水自然衰减的方法	264
第 12 章	地浸设施设计	267
12.1	简要的可行性报告	267
12.2	主要技术决策	269
12.2.1	采矿地质工艺	269
12.3	溶液的处理	271
12.4	钻井和抽液设备	273
12.5	注入液和回收液的运送	276

12.6	一般性目的服务、电力供应、作业机构·····	283
12.6.1	中心研究实验室·····	283
12.6.2	维护、汽车修理车间和保管服务·····	283
12.6.3	企业管理学及其经营·····	286
12.7	总的施工决策、施工技术·····	286
12.7.1	总的施工决策·····	286
12.7.2	施工技术·····	286
12.8	环境保护·····	287
12.8.1	大气保护·····	287
12.8.2	水资源的保护和利用·····	287
12.8.3	土地的保护和利用·····	287
12.9	总平面图和运输·····	287
12.9.1	总的企划·····	287
12.9.2	运输·····	288
12.10	计算施工成本·····	288
第13章	乌兹别克斯坦砂岩铀矿地浸中副产品的回收·····	289
13.1	鉴别副产品的组分·····	291
13.2	每种产品的评价:当前和未来的需求·····	291
13.3	矿石和围岩中稀有元素的分布及浓度的分析研究·····	292
13.4	开展经济的副产品回收·····	294
附录 I	术语汇编·····	296
附录 II	规划地浸采铀矿工程环境影响评价的重要性·····	306
附录 III	参考文献·····	311
附录 IV	渗透系数、导水率、补给速率和流速单位·····	313

第 1 章 导言和地浸采铀工艺理论

1.1 导言

地浸(ISL)采矿被定义为:通过化学溶液从含矿主砂岩中提取铀,并在地表回收铀的过程。地浸浸出是通过将一种适合的浸出液注入潜水面以下的矿带内,经氧化作用、络合作用、铀的活化作用,然后从生产井中回收母液,最后,将含铀溶液抽至地表作进一步处理。酸浸技术是使用酸法的一种浸出系统,通常使用稀硫酸。

地浸采矿的术语汇编列于附录 I 中。

铀矿地浸开采工艺在 20 世纪 60 年代早期分别由苏联和美国研制和开发。该方法的提出是由于产在水饱和并透水的卷锋砂岩型铀矿床不适合使用传统采矿方法开采的情况下而设想出来的。它的发展在上述两个国家使用了相似的工程和工艺方法。然而,苏联采用了酸法浸出系统,而美国专家使用了碱法浸出技术,主要是基于碳酸盐的系统。随后,酸法地浸工艺也应用于保加利亚、捷克斯洛伐克、德意志民主共和国和中国。到 1998 年和 1999 年间新的酸法浸出方案在澳大利亚得到了开发。

这本手册介绍了前苏联和俄罗斯联邦开发的酸法浸出工艺。也概要地介绍了很多有关地浸设施、设计和操作的内容,及在英语文献中没有的大量资料。

就像所有工艺一样,地浸法也在不断地更新和发展,以满足新的经济、场地、作业和管理条件的要求。乌兹别克斯坦使用低酸工艺的现代进展和南澳大利亚酸法浸出的完成就是例证。澳大利亚开发的有关资料可查阅本书的附录 II。

20 世纪 90 年代,地浸工艺的重要性已提高到用这种工艺生产的铀占世界铀产量的 13%~15% 的水平。20 世纪 90 年代后期,65% 或更多的地浸铀产量是用酸法工艺回收的。由于设计良好和已运作地浸项目的潜在的经济和环境优势,可以预计地浸工艺的使用今后将会大大提高。

酸法地浸工艺提取铀的第 1 次野外试验是 1962 年在乌克兰的 Devladovo 矿床和乌兹别克斯坦的乌奇库杜克(Uchkuduk)矿床进行的。这些矿床的地质和地质水文特征是完全不同的。

Devladovo 矿床的开发局限在中生代沉积中,矿床产于直接覆盖在古生代结晶基底之上的中生代沉积中,为底部河道(河谷型)砂岩矿床。上部土仑阶沉积的含矿层由一冲积砾石、砂岩和泥岩层序组成,含少量的粘土胶结物。这些岩石与粘土和粉砂互层。平缓的层状地层厚 15~20 m,整个层序有 6 层,大体上为独立的含水层。从底部往上第三层是含矿层,距地表 20~50 m。此层的平均渗透率为 0.5 m/d,矿石中平均铀含量约为 0.06%。根据有利的中试结果,开始商业运营,直到 1975 年。到地浸结束时,铀的总回收率为 77.6%。地浸开采期间,浸出液中的金属浓度和流量系数与下面介绍的许多硫酸地浸开采所观测到的相比并无明显不同。浸出溶液通常含铀 30~100 mg/L,回收每公斤铀,耗酸 70~120 kg。几年来(特别是强开采浸出期间)回收铀的成本比前苏联所有其他产铀矿山要低得多。

在乌奇库杜克,浸出现场选在直接位于 2~3 m 厚矿层的卷锋地带,也包括一些无矿围岩。矿体埋深 20~25 m。3 年浸出开采取得了非常成功的结果。将酸溶液注入矿体后几个月回收液中的铀浓度为 6~7 g/L,浸出的第 2 年,平均铀浓度为 0.380 g/L,20~40 kg/kgU 的回收酸耗系数相当低。

早期的这些结果大大地促进了最初曾设计为传统开采的一些铀矿床而又重新设计为地浸开采。经革新的地浸提取工艺也用于新发现的矿床。选用地浸法开采的矿床通常不适合于用传统方法,因为

岩石强度低、水饱和、矿体分布在几个不同高度的岩层内。

在前苏联,硫酸地浸工艺在乌兹别克斯坦中央克兹尔库姆成矿省和哈萨克斯坦锡尔达林和楚-萨雷苏成矿省一组大型卷铈铀矿床上试验并得到了改进。硫酸地浸试验最初是在这些矿床中的大多数矿床上进行的,它们中的几个随后是作为商业产品开发的。

在那几年内,酸法地浸经历了研究开发和工业生产的所有阶段。这期间是学习阶段,因为每个铀矿床都具有其独特的和变化的特征,在解决新出现的问题和地浸工艺的操作和实施上给予了许多注意。

根据传统方法和地浸方法(酸法和碱法)实验的对比,发现地浸采矿具有下列优点。

- (1) 项目的基建和运作成本低;
- (2) 一年内现金流动快;
- (3) 投资的偿还快;
- (4) 缩短了项目开发和启动的时间;
- (5) 能耗低和需求设备少;
- (6) 降低了每单位产品的劳动;
- (7) 减少了放射性照射和降低了环境影响(污染等);
- (8) 大大减少了固体废物(无尾矿);
- (9) 经济地回收低品位矿石,因此提高了资源利用率;
- (10) 可回收那些用其他方法无法回收的铀矿床。

除了酸法地浸的广泛应用外,碳酸盐(碱)法浸出曾由苏联专家在乌兹别克斯坦的 Sugraly 和 Kanimekh 矿床上进行。在这些工作结果对比的基础上,有可能列举出酸法和碳酸盐地浸工艺的优缺点,酸法地浸的优点如下。

- (1) 矿石中铀的回收率较高(70%~90%);

(2) 有效的浸出动力学(回收率达 80% 时的浸出循环溶液孔隙体积数为 3~4,而碳酸盐溶液时为 10~12);

(3) 酸法浸出周期相对短,为 2~5 年(取决于井场规模、矿石渗透率、井网等);

- (4) 可能回收副产品;
- (5) 超出浸出现场范围的渗漏有限,因为低渗透化学沉淀物使流动阻塞;
- (6) 不需要添加氧化剂,因为再循环溶液中广泛存在着氧化铁;
- (7) 由于受污染溶液经过相邻无矿围岩的“自净”或“再循环”,剩余浸出溶液有自复原(或自稀释)的可能性。

酸法工艺的缺点:

- (1) 含碳酸盐矿石(即 CO_2 含量超过 1.5%~2.0%)的酸耗大,增加化学试剂费用,而可能造成工艺不经济;
- (2) 孔塞危险(即化学和气泡);
- (3) 再循环浸出液中溶解固体的浓度增高(达 15~25 g/L);
- (4) 不得不使用抗腐蚀材料和设备,试剂费用相对高。

1.2 地浸场区的地球化学特征

地浸方法已被证明是回收层状砂岩铀矿最有效的技术,这些砂岩铀矿受控于具有因氧化作用而导致的、明显的还原环境蚀变的地球化学障。最大的这种矿床成因上类同自流盆地中含水层砂岩矿床,对产在干旱带中的这种矿床进行的研究最多。

除铀外,这些含水层可能含在氧化地下水中迁移并且沉淀于地球化学障上的 Se、Mo 和其他金属,这些金属形成一系列的后生带。

主岩的地球化学性质由它们的主要成分和颗粒大小分布,以及渗透率和其他水文特征所决定。主岩的还原化学状态可能发生在沉积后的成岩期间,或者可能是地质史较晚期的一些事件的结果。这个过程包括还原剂,如硫化氢、烃气和石油进入地层。

伴随还原作用,形成了灰、深灰和绿灰色主岩。在还原作用期间发生了后生蚀变作用,包括地沥青化作用、碳化作用、硫化物化作用、泥化作用和三价铁矿物的分解作用(岩石漂白)。

在矿床呈现出层控卷锋氧化作用时,就可观测到下列分带

(图 1.1)。

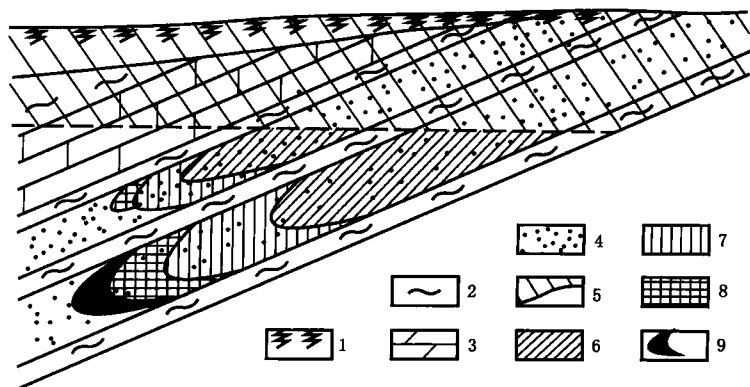


图 1.1 部分氧化含矿沉积层序的后生分带

- 1——土壤-植被层;2——粘土;3——泥灰岩;4——砂岩;5——氧化带与边界;
6——矿岩层的完全氧化亚带;7——赤铁矿蚀变亚带;
8——部分氧化砂岩亚带;9——卷型矿床

褐铁矿化带 被分成两个亚带——完全氧化和部分氧化亚带。完全氧化带中缺失菱铁矿、黄铁矿、黑云母、绿泥石和海绿石。矿石矿物被氢氧化铁替代,粒状部分包括一些高岭石化长石。岩石的主要颜色呈黄色、赭黄色和橙色。在不完全氧化的亚带内,氢氧化铁局部产出使岩石呈现斑点状外貌。可能存在少量的植物碎屑、菱铁矿、海绿石。主要颜色呈黄-绿色、淡黄色。完全和部分氧化带之间有时见到再沉积红赤铁矿的赭色亚带(图 1.1)。完全氧化亚带可从盆地边缘的露头向盆内延伸数十和数百千米。不完全氧化亚带延伸从几千米到几十千米和数百千米。

铈矿化带 沿不完全氧化岩石和主要灰色岩接触带的地球化学障产出。该带内几乎没有氧化铁,含未被氧化的碳化植物碎屑,也见一些伴生的黄铁矿,有时有碳酸盐。铈矿物包括煤烟状沥青铈矿、沥