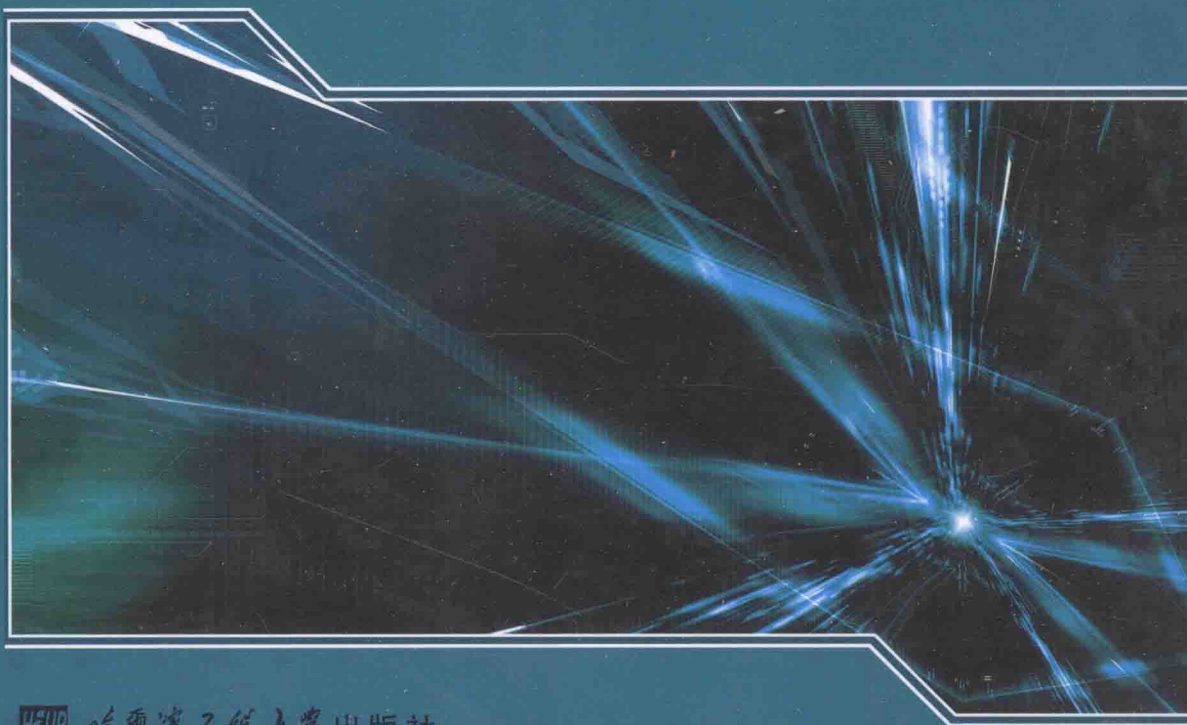




国防特色教材·核科学与技术

溶浸采铀

丁德馨 李广悦 主编



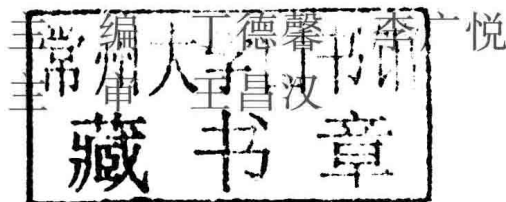
HEUP 哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

铀采浸溶



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书共分8章,内容包括溶浸采铀的物理化学原理、堆浸提铀、原地爆破浸出采铀、原地浸出采铀、微生物浸铀、浸出液中铀的回收工艺、室内实验等。

本书为矿物资源工程和矿物加工工程专业本科生的教材,也可作为这类专业硕士研究生和博士研究生的参考书,还可作为研究院所的研究人员、设计院所的设计人员和铀矿山的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

溶浸采铀/丁德馨,李广悦主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2015.1

ISBN 978-7-5661-0960-6

I. ①溶… II. ①丁… ②李… III. ①溶浸采矿-铀矿开采 IV. ①TD868 中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第016760号

溶浸采铀

丁德馨 李广悦 主编

责任编辑 张盈盈

*

哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨市南岗区东大直街124号(150001) 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨市石桥印务有限公司 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19.5 字数:412千字

2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5661-0960-6 定价:48.00元

前 言

《溶浸采铀》是国防科技工业“十一五”规划国防特色专业教材,是矿物资源工程和矿物加工工程专业本科生的教学用书,也可作为这类专业硕士研究生和博士研究生的参考书,还可作为研究院所的研究人员、设计院所的设计人员和铀矿山的工程技术人员的参考书。

本教材是在王昌汉教授编著、李开文教授主审,原子能出版社1997年出版的《溶浸采铀(矿)》的基础上编写而成的。本教材既继承了《溶浸采铀(矿)》的精髓,又反映了该书出版以来溶浸采铀领域所取得的一些较为成熟的科技成果。

本教材由南华大学丁德馨、李广悦主编,王昌汉主审。参加编写的人员还有王清良、史文革、胡鄂明、刘玉龙、王永东、胡南、王正庆。

在本教材编写的过程中,编者参考了大量中、外文文献,在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,还请读者指正。

编 者

2013年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 溶浸采铀的研究内容和任务	1
1.2 溶浸采铀的发展历史	1
1.3 溶浸采铀的研究现状及应用概况	4
1.4 溶浸采铀的发展趋势	8
复习思考题	10
第2章 溶浸采铀的物理化学原理	11
2.1 物理原理	11
2.2 化学原理	24
复习思考题	34
第3章 堆浸提铀	35
3.1 概述	35
3.2 堆场的设计与建设	45
3.3 破碎工艺和设备	49
3.4 造粒工艺和设备	54
3.5 筑堆	59
3.6 浸出工艺	65
3.7 堆浸尾渣和废水处理	71
3.8 应用实例	74
复习思考题	81
第4章 原地爆破浸出采铀	82
4.1 概述	82
4.2 原地爆破浸出工艺的开拓和采切	85
4.3 爆破落矿筑堆	86
4.4 布液与浸出	99
4.5 实例	106
4.6 集液与防渗漏技术	111
4.7 采场浸后矿渣的处理	117

复习思考题	118
第5章 原地浸出采铀	119
5.1 概述	119
5.2 原地浸出采铀的水文地质研究	125
5.3 矿床开拓	135
5.4 钻孔工程	137
5.5 溶浸液的配方和使用方法	153
5.6 溶浸范围的控制	158
5.7 浸出液的提升设备	168
5.8 地下水复原	174
5.9 应用实例	176
复习思考题	189
第6章 微生物浸铀	190
6.1 概述	190
6.2 浸铀微生物	192
6.3 育种技术	202
6.4 微生物浸铀原理	211
6.5 微生物浸铀的影响因素和浸出动力学	215
6.6 微生物浸铀工艺	222
6.7 应用实例	231
复习思考题	234
第7章 浸出液中铀的回收工艺	235
7.1 离子交换	235
7.2 萃取法纯化分离	248
7.3 产品制备	267
复习思考题	277
第8章 室内实验	278
8.1 矿石取样、样品制备	278
8.2 工艺矿物学研究和化学分析	280
8.3 铀矿石室内浸出试验	284
复习思考题	298
参考文献	299

第1章 绪 论

1.1 溶浸采铀的研究内容和任务

溶浸采铀利用溶浸液与地面机械破碎铀矿石、原地爆破破碎铀矿石及原地铀矿石中铀矿物的化学反应提取金属铀,是集采、选、冶于一体的采铀方法。溶浸采铀包括堆浸提铀、原地爆破浸出采铀及原地浸出采铀,其主要工艺过程包括浸出、金属回收等。因此,溶浸采铀的主要研究内容和任务包括以下几个方面。

(1) 铀矿石工艺矿物学。主要研究铀矿石的化学成分、矿物组成、粒度组成、结构与构造、矿物的赋存状态、有用与有害元素的分布情况等,以确定溶浸液与氧化剂的种类。

(2) 溶浸采铀热力学。主要研究化学反应过程是否可以发生、朝什么方向进行、可以达到什么样的极限状态,以解决溶浸液浓度、反应温度、物理化学条件等。

(3) 溶浸采铀动力学。主要研究化学反应过程的机理即化学反应速率的主要影响因素,以加快铀的浸出速率,缩短浸出周期,提高生产效率。

(4) 溶浸采铀渗流规律。主要研究溶浸液在铀矿石中的渗流及其影响因素,以确定它们对浸出反应和浸出率的影响。

(5) 溶浸采铀工艺。主要研究堆浸、原地爆破浸出、原地浸出的工艺参数对浸出率的影响,以实现其工艺参数的优化。

(6) 铀矿微生物浸出。主要研究溶浸液的 pH、Eh、温度及微生物的接种量、接种时机对浸出率的影响,以确定微生物浸矿的最佳条件。

(7) 溶浸采铀矿山环境保护。主要研究溶浸采铀产生的废水、废渣等的处理技术,以实现溶浸采铀矿山的可持续发展。

1.2 溶浸采铀的发展历史

自溶浸采铀技术诞生以来,国内外科技工作者对堆浸提铀、原地爆破浸出采铀及原地浸出采铀进行了大量的研究,取得了一系列的成果,许多成果在生产中得到了广泛应用。目前已经形成了以堆浸提铀、原地破碎浸出采铀及原地浸出采铀等工艺为主的较完整的学科体系。

1.2.1 堆浸提铀的发展历史

早在 1956 年,国外就已开始采用堆浸技术处理铀矿石。如葡萄牙采用堆浸技术处理品位为 0.076%~0.15% 的低品位氧化铀矿石,获得了较高的回收率;美国采用堆浸技术处理粒度在 28 目以下、品位为 0.05%~0.1% 的砂岩铀矿,浸出率高达 90%,每年回收的铀超过了 100 t,占其总产铀量的 15%~20%;加拿大采用堆浸技术处理品位为 0.05% 的阿格纽湖铀矿石时,将其中 1/3 的铀矿石破碎至 20 目,筑成 6 m 高的堆,采用经细菌氧化后的硫酸铁溶液进行喷淋,在 2~3 年内回收了 80% 的铀;法国旺代矿区仅在 1982 年至 1984 年就采用堆浸技术处理了 88.2 万吨矿石,入堆矿石的品位为 0.028%~0.17%,浸出率为 77% 左右,用堆浸法回收的铀约占其总产铀量的 30%;前苏联采用堆浸技术生产的铀,占其总产铀量的 40%。

我国堆浸提铀技术的研究始于 1965 年。20 世纪 80 年代初,由于国家政策调整,铀矿企业为了生存,对堆浸技术做了大量改进。1984 年,我国铀矿山开始进行堆浸提铀工业试验。江西某铀矿先后进行了千吨级规模和万吨级规模的堆浸提铀工业试验,浸出率达到了 90.7%,总回收率达到了 87.6%。“万吨级铀矿石地表堆浸”于 1987 年通过了鉴定,1990 年获得了“国家科技进步一等奖”。这标志着我国堆浸提铀技术的发展进入了一个新的阶段。

1.2.2 原地爆破浸出采铀的发展历史

在堆浸法的基础上,国外从 20 世纪 60 年代开始了原地爆破浸出采铀的研究与工艺试验,20 世纪 70 年代初陆续在部分铀矿山得到应用。法国克鲁齐剥山区勃鲁若矿采用原地爆破浸出采铀工艺,对其品位为 0.02%~0.07% 的花岗岩型铀矿进行了开采,先采用爆破技术对矿体进行了爆破,爆破后采场内破碎铀矿石的块度为 0 mm~360 mm,其中块度小于 50 mm 的破碎铀矿石占 20%,再采用硫酸溶液进行周期性淋浸,硫酸溶液的浓度为 10 g/L,淋浸强度为 $1.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,浸出液浓度达 1.14 g/L。浸出持续 86 d,每吨矿石耗酸 20 kg,回收率达 60%。20 世纪 60 年代末,法国在埃卡尔皮尔铀矿进行了原地爆破浸出试验,试验矿块的阶段高度为 40 m,矿体倾角为 70° ,矿石的平均品位为 0.102%,采用小中段分两次崩落,先崩落一半进行淋浸,再崩落另一半,再进行淋浸。该矿在该试验采场回收了 2.1 t 金属铀,回收率达 82.5%。

20 世纪 70 年代中期,加拿大阿格纽湖铀矿采用深孔挤压爆破筑堆,随后采用淹没法浸出,虽然铀矿石的品位只有 0.045%,但仍然取得了较好的经济效益。

前苏联、前东德及东欧国家采用原地爆破浸出采铀法开采坚硬和半坚硬的砂岩类铀矿床,爆破方法有浅眼、中深孔、深孔。这些国家对铀矿石的结构构造、浸出机理、浸出方式、

水动力学、集液方法、浸出方案等进行了系统的研究。

20世纪60年代末,我国在铀矿山开展了3 000 t级的浅眼落矿筑堆的原地破碎浸出采铀试验,金属的浸出率达82%。20世纪80年代末,在突破了爆破落矿筑堆、采场布液浸出及集液防渗漏三大关键技术后,在陕西某铀矿山进行了万吨级规模的中深孔爆破筑堆的原地爆破浸出采铀工业试验,铀的浸出率达到了84.47%。鉴于上述成功经验,20世纪90年代初,在江西某铀矿也开展了万吨级规模的原地爆破浸出采铀工业试验,试验指标均达到了设计要求。1993年至1994年,南华大学在广东某铀矿山开展了万吨级规模的原地爆破浸出采铀工业试验,采用深孔分段爆破筑堆技术顺利完成了筑堆。

1.2.3 原地浸出采铀的发展历史

1957年,利文斯顿受石油流动原理的启发,开始研究原地浸出采铀技术。自此以后,美国、法国、前苏联、澳大利亚、加拿大等国相继开展了大量的试验研究,先后成功实现了铀矿床的原地浸出开采,其发展经历了以下三个阶段。

第一阶段,从20世纪50年代中期到1978年。这一阶段主要研究原地浸出采铀的可行性。

第二阶段,从1978到1984年。这一阶段主要研究原地浸出采铀的基本原理和机理,同时配合取样,进行小型和扩大试验。

第三阶段,从1984年至今。完善原地浸出采铀工艺,开展工业试验和工业生产。

美国于1957年提出了淋积型砂岩铀矿床原地浸出开采的设想,并于1961年至1963年进行了第一次工业试验,其规模为月产3.8 t金属铀,1980年,年生产规模已达到1 000 t以上。近年来,美国50%的铀由原地浸出法生产。与此同时,前苏联也开始了原地浸出采铀的研究,并于1963年开始进行可行性试验。1971年至1976年,至少已建成了7座地浸矿山。前苏联还专为地浸采铀设计了小型耐腐蚀的潜水泵和全自动控制仪器仪表,建立了科研、设计、施工、设备供应和人才培养的整套机构。澳大利亚于1982年进行了工业试验,铀的年产量达100 t。加拿大、英国、尼日尔和捷克也相继开展了溶浸采铀的试验研究。

我国于20世纪70年代初开始研究原地浸出采铀技术,30多年来,原地浸出采铀技术获得了快速发展,日臻成熟。其发展也经历了以下三个阶段。

第一阶段,探索阶段。核工业铀矿开采科技工作者从国外收集了大量有关地浸采铀的资料,并进行了深入研究,在此基础上,针对我国铀矿床的地质特征提出了原地浸出采铀的构想。20世纪70年代,在广东省和黑龙江省的两个铀矿山进行了原地浸出采铀的探索试验,积累了丰富的经验,为原地浸出采铀技术在我国推广应用奠定了基础。

第二阶段,试验阶段。在总结了成功经验与失败教训的基础上,核工业第六研究所于1982年至1984年在云南某铀矿开展了原地浸出采铀的条件试验;1986年至1990年开展了

扩大试验;并于1991年建成我国第一座原地浸出采铀矿山。这标志着我国已经掌握了原地浸出采铀技术。1985年在新疆某铀矿开展了原地浸出采铀室内试验研究;1986年至1990年完成了该铀矿床原地浸出采铀的条件试验;1991年至1993年开展了该铀矿床原地浸出采铀的半工业试验。

第三阶段,工业生产阶段。1995年新疆某铀矿原地浸出采铀工程启动,1996年建成并投入生产,1998年通过了国家验收,主要工艺技术指标达到了国际先进水平。这标志着我国实现了原地浸出采铀从试验向工业生产的跨越。接着,在新疆和内蒙古等地相继开展了原地浸出采铀的试验及工业化生产。至此,原地浸出采铀技术已成为我国铀矿开采的关键技术之一。

1.3 溶浸采铀的研究现状及应用概况

1.3.1 堆浸提铀技术的研究现状与应用概况

堆浸提铀技术是国内外铀矿采冶的主流技术之一。经过多年的研究与实践,已经在很多方面取得了突破。针对不同铀矿床的赋存条件,堆浸提铀技术已发展成种类较多、效益显著的生产工艺。

(1) 浓酸熟化-高铁淋滤堆浸技术

浓酸熟化-高铁淋滤是核工业北京化工冶金研究院研发的一种强化堆浸技术。该技术的特点是:先将破碎矿石进行浓酸熟化预处理,使矿石中的二价铁氧化为三价铁,铀大部分转化为可溶性盐;再采用清水进行淋浸。这既缩短了矿石的浸出周期,也提高了浸出合格液的铀浓度。该研究成果已在工业生产中应用了多年,应用情况表明,采用浓酸熟化-高铁淋滤技术进行强化堆浸,浸出周期仅为60 d~100 d,浸出合格液的铀浓度可达7 g/L~9 g/L。

(2) 酸法造粒堆浸技术

核工业第六研究所经过十多年的研究,提出了采用化学黏合剂进行酸法制粒的新概念,并研制出了用于铀矿石酸法制粒的系列新型黏合剂。该黏合剂通过参与化学反应,可在颗粒内部形成以水化物晶核为基础的结晶结构网,从而大幅度提高矿堆的渗透性。酸法制粒堆浸技术目前已经成功应用于低渗透性铀矿石的堆浸。工业应用的结果表明,铀矿石经过制粒预处理后进行堆浸,铀的浸出率可达到95%以上,与直接堆浸相比,浸出周期可缩短70%,浸出合格液的铀浓度可提高50%。

(3) 细粒级铀矿石堆浸技术

核工业第六研究所通过对堆浸传质机理及浸出过程进行深入研究,提出了细粒级铀矿石

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,并在充分试验的基础上,推导出堆浸铀矿石经济粒度计算模型。目前,该研究成果已经在多座堆浸铀矿山得到了应用。

(4) 串联堆浸技术

为了尽可能提高铀矿堆浸合格液的铀浓度、降低堆浸提铀的材料消耗,核工业第六研究所针对多种铀矿石进行了系统的串联堆浸技术试验研究,建立了计算铀矿石串联堆浸各阶段工艺参数的数学模型。多座堆浸提铀矿山的应用结果表明,使用该技术后,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%,显著地提高了堆浸提铀的经济效益。

(5) 细菌氧化堆浸技术

我国细菌氧化堆浸提铀技术的研究始于20世纪60年代,主要利用氧化亚铁硫杆菌对铀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+} ,从而实现对铀矿石中低价铀的氧化浸出。核工业北京化工冶金研究院经过长期的研究,在菌种的筛选、驯化、生物膜连续氧化装置等方面都取得了重要进展,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%。

(6) 伴生铀矿综合堆浸回收技术

我国已探明的铀矿资源中,铀钼共生矿占有一定的比例。采用常规浸出法浸出这类矿石时往往浸出时间长、钼的浸出率低,且浸出液中的铀钼难以分离。核工业北京化工冶金研究院通过采用拌酸熟化及活化浸出技术对矿石进行浸出,使浸出周期缩短了一半以上,铀、钼的浸出率分别达到了90%和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和钼,再采用分步淋洗使两者的分离系数达到了2 000以上。

(7) 渗滤浸出提铀

对于铁、镁、钙、铝等杂质含量高的复杂铀矿(如火山岩型铀矿),采用常规浸出法浸出时,堆内溶浸液的酸度随着它的流动和反应会不断升高,导致铁、镁、钙、铝在堆内不断地迁移、积累、沉淀,使矿堆板结,降低矿堆的渗透性。渗滤浸出工艺由于改变了溶浸液与矿石的接触方式,可使溶浸液的酸度保持相对稳定,有效地避免矿堆板结。工业试验结果表明,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%左右提高到了90%以上。

1.3.2 原地爆破浸出采铀技术的研究现状与应用概况

原地爆破浸出采铀技术也是国内外铀矿采冶的主流技术之一。研究的重点是爆破落矿筑堆技术、采场的布液浸出技术及采场的集液与防渗漏技术。国内外的科技工作者围绕这三大关键技术问题,开展了大量的研究,取得了一些重要成果。

(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,首先要根据铀矿石的结构构造特征和浸出性能解决爆破落矿筑堆问题。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,而且还要求矿石颗粒内微裂隙发育,因而常规的凿岩爆破参数无法满足要求。多年来,核工业铀矿开采研究所对原地爆破落矿筑堆凿岩爆破参数的优化方法、补偿空间的布置形式及补偿空间系数、装药结构及起爆网络等进行了系统的研究,开发了“原地爆破粒度控制计算机模拟系统——BLAST系统”,从而使中深孔和深孔爆破落矿形成的矿堆中 -150 mm 块度的破碎矿石的产率达到75%~86%,其他指标也能达到布液浸出的要求。

(2) 采场布液浸出技术

受地质构造影响,铀矿体产状、形态多种多样,其倾角、厚度对布液浸出的影响较大;加之受岩性和布液空间的限制,采场布液的难度也较大。如果采场布液不合理,不仅布液会不均匀,且容易出现浸出死角,直接影响浸出效果和金属回收。为此,研发了堰塘布液技术、钻孔注液技术、微喷淋布液技术和预埋管网布液技术,以适应不同条件采场的布液浸出。

(3) 采场集液与防渗漏技术

由于原地爆破浸出采场位于地下,因此,构筑堆场底垫往往很难,即便能构筑,成本也较高,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都不构筑底垫,但必须解决溶液的渗漏流失问题。对于这一问题,只要掌握了矿床的地质构造特征和矿堆内溶浸液的流动规律,并采取相应措施,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。考虑到地质构造和开拓采准的影响,采场围岩中往往发育一些构造裂隙和次生裂隙。为了避免溶浸液沿构造或裂隙渗漏造成金属损失、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,下中段的开拓采准工程要推迟施工,以免浸出采场下部出现降落(水)漏斗。如上述条件无法满足,则须提前做好构造裂隙的防渗堵漏处理。至于钻孔集液,做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,合理确定集液钻孔及孔口的位置、采场通道封堵措施和抽注液压力,否则很难达到集液的要求。

1.3.3 原地浸出采铀技术的研究现状与应用概况

原地浸出采铀技术,是我国铀矿采冶的主流技术之一。目前,已形成了包括原地浸出采铀铀资源评价、溶浸液配方和使用、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在内的地浸采铀技术体系。

(1) 原地浸出采铀资源评价技术

原地浸出采铀资源评价是多方面的,采用单一的或某几个条件是很难正确评价的,只有通过对矿床地质、水文地质、浸出工艺和外部开发条件等进行综合评价,才能对铀矿床地浸开采的技术经济可行性作出客观的评价。我国在总结多年原地浸出采铀的经验的基础上,研发了“铀矿床地浸开采评价专家系统”(ESILU)、“地浸铀矿资源经济评价数学模型和计算机系统软件”(EEISLU)和“地浸工艺信息系统”(GTSILU),对我国已探明的地浸铀矿资源进行了经济评价和分类。

(2) 原地浸出采铀钻孔结构和施工工艺

原地浸出采铀时,钻孔不仅起着揭露矿层的作用,还起着注入溶浸液和抽出浸出液的作用。经过多年的努力,我国已研发出了低密度流体钻井技术、负压钻进技术、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,研制出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。

(3) 原地浸出采铀钻井井网布置技术

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,钻井的井网布置,就其作用来说相当于原地浸出采铀的矿床开拓。因此,合理确定适合铀矿床地质特点的井网布置,是开发可地浸铀矿床的重要内容。通过对影响井型与井距的各种因素进行研究,建立了原地浸出采铀流体动力学模型和井型与井距技术经济评价模型,提出了单井地质储量、单井可采储量、井距、单井平均日产量、浸出液浓度和平米铀量等的计算方法及井网密度的确定方法。

(4) 原地浸出采铀地下浸出工艺技术

溶浸液配方和使用方法是原地浸出采铀的关键技术之一。针对我国砂岩铀矿资源的特点,已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用淋洗残余硝酸根作为氧化剂的工艺。碱法地浸的关键技术已经突破。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研究。

(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为溶浸范围控制。经过多年研究,我国已掌握原地浸出采铀溶浸范围控制技术,开发了确定原地浸出采铀溶浸范围和污染范围的计算机模拟软件系统,并在我国西北原地浸出采铀中获得应用。应用中通过优化浸出地球化学环境和水动力学环境,实现了溶浸液的合理分配,消除了溶浸死角,溶浸液覆盖率大于90%。

(6) 原地浸出采铀矿层伤害评价技术

原地浸出采铀时,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阻力尽

可能的小。地浸开采过程中,当各种外来流体(入井液)侵入矿层后,容易与其中的流体作用,从而降低钻孔的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、增强注液井的注液能力,是低渗透砂岩铀矿地浸开采必须解决的关键技术问题;在对地浸采铀矿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) 原地浸出采铀地下水污染防治技术。

虽然原地浸出采铀不需建造尾矿库和废石场,但同样存在着环境保护与污染治理的问题。地浸矿山的环境保护与污染治理主要针对地下水进行。原地浸出采铀矿山地下水治理的方法通常有抽除法、反渗透法、自然净化法、化学处理法和细菌还原法。

1.4 溶浸采铀的发展趋势

当前铀矿冶所面临的最大问题是铀矿品位不断降低,开采深度日益加大,铀矿石的性质日益复杂,采冶难度加大,生产成本日益增加。大量品位低及难处理的边际经济、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。这些低品位铀矿资源采用常规开采技术难以经济利用,只有通过研发新工艺、新技术、新设备、新材料,并不断降低我国天然铀提取的投资和成本,才能实现其高效开发,从而扩大可开发铀矿资源的量。根据我国铀矿资源的现状,溶浸采铀领域研究的重点和发展的方向将主要集中在以下几个方面。

(1) 开展硬岩铀矿溶浸开采新技术研究,提高硬岩铀矿资源的开发利用水平

目前开发利用的硬岩铀矿资源,尚不足以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还很大。硬岩铀矿床主要有花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型以及交代岩型、侵入岩型、硅角砾岩型、褐煤型、磷灰岩型和碳酸盐型的矿化物等类型,铀矿石种类多,矿性复杂,大部分矿床中铀与其他元素伴生,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困难,而且用常规法开采成本较高。

根据我国硬岩铀矿开采及提取技术的研究和应用现状,并结合我国铀矿冶拟在下阶段进行开发的硬岩铀矿资源情况,开展硬岩铀矿开采新技术、强化堆浸新技术、水冶加工新技术、自动控制新技术的研究,努力在角砾岩型铀矿原地爆破浸出、低品位高酸耗矿石堆浸、包裹型含硫铀矿破膜浸出、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、适用于不同类型硬岩铀矿的综合回收工艺流程,进一步提高我国硬岩铀矿资源的开发利用水平。

(2) 开展低渗透性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

砂岩型铀资源是我国非常重要的一类铀矿资源。在我国初步探明的数万吨砂岩型铀资源中,低渗透性砂岩铀矿资源占一半以上,而且随着勘探工作的不断深入,这一比例还有

增大的趋势。虽然在高渗透性砂岩铀矿资源的开发利用方面已形成了成熟的地浸采铀工艺,但要扩大天然铀的产量,低渗透性砂岩铀资源的开发就显得非常重要。低渗透性砂岩铀矿含矿含水层的孔隙结构和表面物理性质极为复杂,在渗透机理、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的不同,采用现有地浸采铀工艺进行开发,效率低,资源的利用率也低。因此,亟须开展低渗透性砂岩铀矿地浸开采工艺的研究。

根据我国地浸采铀的研究及生产现状,低渗透砂岩铀资源地浸开采工艺技术的研究,应在深入认识低渗透矿层地质特点和渗流机理的基础上,研发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。

(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、通风困难导致氨浓度上升等问题。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、深井通风降氨技术等方面开展研究,突破深部铀矿开采关键技术。

(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。

(5) 加强铀矿山信息技术研究,推进数字矿山建设

进入21世纪,随着计算机技术、信息技术、通信技术、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。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、通信技术、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。

(6) 加强环境保护, 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, 逐渐将洁净生产、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。

复习思考题

- 1-1 简述溶浸采铀的研究对象和任务。
- 1-2 简述溶浸采铀的发展历史。
- 1-3 简述堆浸提铀技术的研究现状。
- 1-4 简述原地破碎浸出采铀技术的研究现状。
- 1-5 简述原地浸出采铀技术的研究现状。
- 1-6 试论溶浸采铀的发展趋势。

第2章 溶浸采铀的物理化学原理

2.1 物理原理

2.1.1 多孔介质中的渗流

1. 多孔介质的定义

多孔介质是由多相物质所占据的共同空间,也是多相物质共存的一种组合体。没有固体骨架的那部分空间叫作孔隙,它们由液体或气体或气液两相共同占有,相对于其中一相来说,另一相都弥散在其中,并以固相为固体骨架。构成空隙空间的某些空洞是相互连通的。由于我们是从渗流的角度来定义多孔介质的,所以还需要规定从介质的一侧到另一侧有若干连续的通道,并且孔隙和通道在整个介质中有着广泛的分布。概括起来可以用以下几点来描述多孔介质:

(1) 多孔介质是占据了一定空间的多相介质,其中固相部分为固体骨架,未被固相占据的部分称为孔隙,孔隙内可以是气体或液体,也可以是多相流体;

(2) 固相遍布整个介质,孔隙亦遍布整个介质,也就是说在介质中取一适当大小的体元,该体元内必须有一定比例的固体颗粒和孔隙;

(3) 孔隙空间有一部分或大部分是相互连通的,且流体可在其中流动,这部分孔隙空间称为有效孔隙空间,而不连通的孔隙空间或虽然连通但属死端孔隙的这部分空间是无效孔隙空间,就流体通过孔隙的流动而言,无效孔隙空间实际上可视为固体骨架。

2. 多孔介质性质的描述

从实用性方面考虑,需对多孔骨架的几何性质进行描述。由于介质骨架的复杂性,要用曲面方程来描述构成骨架的固体颗粒几何形状是不可能的。目前主要有两种描述方法:一种是宏观的也就是平均的描述,用孔隙度、比面等特性参数来反映多孔介质骨架的性质;另一种方法是以骨架的某些统计性质为基础的描述。

(1) 多孔介质的宏观描述

多孔介质的宏观特性主要有孔隙度、比面、渗透性和可压缩性。