

IN-PLACE LEACHING OF FRAGMENTED URANIUM ORE BY BLASTING

原地破碎浸铀理论与实践

杨仕教 等 编著
丁德馨 主审



中南大学出版社

原地破碎浸铀理论与实践

杨仕教 杨建明 李广悦 李长山
李 秦 张晓文 黄永忠 黄晓乃
编 著

丁德馨
主 审

中南大学出版社

原地破碎浸铀理论与实践

杨仕教 杨建明 李广悦 李长山 编著
李 荣 张晓文 黄永忠 黄晓乃
丁德骅 主审

☐责任编辑 秦瑞卿

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731 8876770 传真:0731 8710482

电子邮件:csuebs @ public. cs. hn. cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 湖南飞蝶新材料有限责任公司衡阳印务分公司

☐开 本 850×1168 1/32 ☐印张 10.5 ☐字数 257 千字

☐版 次 2003 年 3 月第 1 版 ☐2003 第 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-712-5/TL·002

☐定 价 20.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 原地破碎浸铀地质条件	(7)
1.1 矿床地质条件	(7)
1.1.1 花岗岩型铀矿床地质	(9)
1.1.2 火山岩型铀矿床地质	(24)
1.1.3 碳硅泥岩型铀矿床地质	(36)
1.1.4 原地破碎浸铀的矿床地质条件	(49)
1.2 水文地质条件及工程地质条件	(60)
1.2.1 水文地质条件	(60)
1.2.2 工程地质条件	(63)
1.3 工艺矿物学特点	(64)
第 2 章 原地破碎浸铀筑堆工艺	(71)
2.1 原地破碎浸铀筑堆方案分类	(71)
2.1.1 原地破碎浸铀筑堆方案分类的依据	(71)
2.1.2 原地破碎浸铀筑堆方案分类	(72)
2.2 原地破碎浸铀开拓、采准工艺	(73)
2.2.1 原地破碎浸铀开拓方式	(73)
2.2.2 原地破碎浸铀采准工作	(76)
2.3 原地破碎浸铀深孔爆破筑堆典型方案	(78)
2.3.1 深孔爆破筑堆	(78)

2.3.2	中深孔爆破筑堆	(89)
2.3.3	浅眼爆破筑堆	(95)
2.3.4	阶段自然崩落法筑堆	(98)
2.3.5	核爆破原地破碎浸出筑堆法	(100)
2.4	铀和铜矿床原地破碎浸出	
	开采筑堆实例及分析	(106)
2.4.1	广东某铀矿 1 号矿体原地破碎浸出 开采深孔筑堆技术研究与实践	(106)
2.4.2	陕西某铀矿 101 矿床 30 [#] 矿体中深孔 分段挤压爆破留矿法筑堆实例	(125)
2.4.3	美国亚利桑那州的桑弗尔杰矿床 原地核爆破浸出实例	(132)
2.4.4	某铜矿 5401 残矿原地破碎浸出深孔 筑堆方案设计	(133)
2.4.5	中条山地下原地破碎浸出试验研究	(139)
第 3 章	布液与浸出	(145)
3.1	浸出的理论基础	(145)
3.1.1	待浸矿堆的物理特征	(147)
3.1.2	浸出的化学过程	(153)
3.1.3	矿堆中液体的运动	(155)
3.1.4	浸出过程的扩散传质	(159)
3.1.5	浸出速率的影响因素	(164)
3.2	布液浸出工艺	(171)
3.2.1	布液系统	(171)
3.2.2	布液方法	(172)
3.2.3	配套工艺	(178)
3.2.4	浸出工艺	(182)

3.2.5 静压浸出	(185)
3.2.6 实例	(186)
3.3 强化浸出技术	(193)
3.3.1 物理方法	(194)
3.3.2 化学方法	(198)
3.3.3 机械方法	(198)
第4章 集液与防渗漏技术	(201)
4.1 集液技术	(202)
4.1.1 底部结构构筑	(203)
4.1.2 采场封堵	(207)
4.1.3 集液池构筑	(207)
4.1.4 集液中转系统	(209)
4.1.5 集液工作	(209)
4.2 防渗漏技术	(216)
4.2.1 采场防渗漏	(216)
4.2.2 底部结构防渗漏	(219)
4.2.3 集液池防渗漏	(220)
4.2.4 中转系统防渗漏	(220)
4.3 工程实践简介	(221)
4.3.1 实例1	(221)
4.3.2 实例2	(222)
4.3.2 实例3	(222)
第5章 细菌浸出	(225)
5.1 细菌浸出的理论基础	(225)
5.1.1 微生物的化学组成	(225)
5.1.2 微生物的营养物质	(226)

5.1.3	微生物的营养类型	(226)
5.1.4	微生物的生理和形态特征鉴定	(228)
5.1.5	浸铀微生物	(229)
5.1.6	影响微生物生长发育的理化因素	(231)
5.1.7	细菌的分离、筛选培养及保藏	(235)
5.1.8	细菌浸出与矿石矿物学	(238)
5.1.9	微生物浸铀理论	(240)
5.2	细菌浸铀工艺与实践	(244)
5.2.1	细菌浸铀现状	(244)
5.2.2	细菌浸出工艺	(245)
5.2.3	细菌浸铀工业实践	(258)
第6章 铀矿山环境保护与可持续发展		(273)
6.1	环境保护	(275)
6.1.1	我国铀矿资源状况及其环境特点	(277)
6.1.2	我国铀矿工业的发展水平	(278)
6.1.3	我国铀矿山环境保护的任务	(279)
6.1.4	“三废”对环境的影响	(280)
6.1.5	“三废”的处理	(293)
6.2	可持续发展	(303)
6.2.1	我国铀矿山面临的挑战	(306)
6.2.2	我国铀矿山可持续发展	(311)

绪 论

原地破碎浸出采铀是一种新的铀矿开采技术,其工艺过程是,先借助爆破方法或地压控制手段,将天然埋藏条件下的矿铀矿体,原地破碎到一定块度并形成适宜矿堆,再用溶浸液有选择性地浸出其中的铀矿物,最后将含有铀矿物的浸出液抽出采场,输送到处理车间提取铀矿物。

原地破碎浸出法的筑堆工艺是用爆破或地压管理手段,将矿石破碎到合适的块度和级配并形成适宜堆形的工艺。破碎后的矿石应粒度适宜、密实度均匀、渗透性好、矿块张性裂隙发育,形成有利于浸出的地下矿堆。按常规地下采矿方法的分类,原地破碎浸出法的筑堆方法均为留矿法或留矿法与其他方法相结合的组合留矿法。

在松散矿堆内溶浸液在重力和毛细管力共同作用下呈非饱和流形式流动。根据溶浸液和矿石反应的特点,为了提高浸出率和开采强度,爆破筑堆必须创造矿石和溶浸液大面积接触的条件,并保证均质矿石处于良好的渗滤状态。

溶浸采矿技术近年来在国内外金属矿山得到了广泛应用,其中铀和钼矿山使用最为成功。文献^[1-8]介绍了溶浸采矿法在铀、铜等矿山中应用情况:美国 70% ~ 75% 的铜金属通过溶浸采矿法获得,智利为 20% 左右,而铀矿的生产在美国几乎全部采用溶浸采矿法,苏联高达 50%,我国也达 30% ~ 40%。与传统采冶方法相比,溶浸采矿法不需要高温条件,能耗低、污染少、开采成本大大

降低。尤其是原地破碎浸出采矿法,基建投资节省 30% ~ 40%,建设周期缩短 30%,生产成本降低 30%,降低了矿石可采品位,相应地增加了矿石储量。因此,原地破碎浸出法在低品位、残留、分散难采矿体的开采方面有广阔的应用前景。

原地破碎浸出采铀的地表尾渣排放量只有常规采铀的 20% ~ 30%,尾矿库容也相应减少 70% ~ 80%。加之低品位矿石和部分表外矿石随爆破一起崩落采场就地浸出处理,与常规采铀相比既减少了废石量,又避免了被揭露的低品位矿石留在井下造成地下水污染和地表污染。原地破碎浸出采铀为了最大限度地回收铀金属浸出液,在施工集液工程时,对采场周围的裂隙通道进行了严密的封堵防漏处理,以防止造成污染,加上采场浸出结束后,对采场矿渣进行中和处理,并彻底封闭采场,使每个采区和浸出采场成为一个完整的封闭体,从而减少了环境污染。

南华大学资源开发工程系和溶浸采矿研究所在原地破碎浸出采铀方面进行了长达 20 年的研究,积累了丰富的实践经验。本书作者正是根据这些经验才写成了本书。全书共分六章。

第一章叙述原地破碎浸铀的地质条件和工艺矿物学条件。

一个矿床是否适合于原地破碎浸出法开采,不但与矿床的地质条件有关,而且还与矿岩孔隙度、矿石渗透性、围岩的渗透性、矿床地下水水位与涌水量等有关。硬岩铀矿床原地破碎浸出采矿的工艺特点是溶浸液直接接触采场矿堆的矿石,铀的浸出是毛细管和化学的共同作用,而矿石渗透性既影响溶浸液在重力和静压力作用下的传递,又影响已溶解的铀从孔隙到溶浸液流的传递效率及溶浸剂渗入矿石的速度。

矿石的渗透性是影响原地破碎浸铀的主要因素,若矿石的渗透系数小于 0.1 m/d ,则必须用工程手段,将矿石预先破碎,以增大矿石的渗透系数。当矿石的渗透系数大于围岩的渗透系数时有利于浸矿。

决定铀矿床能否正确采用原地破碎浸铀法不但取决于铀矿石的品位,还取决于铀矿石的工艺矿物学特点。铀矿石的工艺矿物学特点对原地破碎浸铀工艺的实行和经济性有着重要的影响,因此在评价铀矿床地质条件时,了解铀矿石的工艺矿物学特点和矿石在特定工艺条件下的行为是很重要的。

第二章介绍原地破碎浸铀的筑堆方案。

本章重点介绍了深孔筑堆方案、中深孔筑堆方案、浅眼筑堆方案及其适用条件,还介绍了原地破碎浸出的核爆破筑堆方案及自然崩落筑堆方案。最后,介绍了部分铀矿山及铜矿山原地破碎浸出开采的筑堆方案。

第三章介绍浸出基本理论、布液浸出工艺和强化浸出技术。

原地破碎浸出采铀的浸出过程是在多孔介质中进行的多相反应,属于非催化的“液体—多粒微固体”体系的异相反应。本章根据原地破碎浸出待浸矿堆的物理特征,重点论述了淋滤浸出条件下溶液在矿堆中的非饱和流运动规律以及浸出的扩散和质量传递规律,并根据浸出的物理—化学原理,讨论了浸出速率及其影响因素,提出了筑堆的质量要求。

布液浸出工艺涉及两方面的内容,即布液方法选择和浸出过程控制。本章结合国内原地破碎浸出实践和多年的研究成果较详细地归纳和总结了原地破碎浸出的布液方法的特点和使用条件,尤其介绍了实用性较强的配套工艺—多孔出流和松散矿堆钻孔工艺。论述了浸出过程的控制,并提供了国内原地破碎浸出实践中布液浸出的几个实例。

采用强化浸出技术是原地破碎浸出待浸矿堆的浸出动力特征和浸出特点的必然要求,在浸出过程中采用强化浸出是势在必行的。本章对强化浸出技术进行了系统分类,并对其研究和应用情况做了简要介绍。

第四章介绍集液与防渗漏技术。

集液工作包括两方面的内容：一是指集液设施的构筑及安装；二是指集液工作程序、集液工作内容、集液方法及工作制度等的建立、完善及实施的过程。集液技术是指集液工作过程中所采取的技术手段和方法。

集液工作程序及工作内容始于矿堆底部结构的构筑，具体工序如下：底部结构构筑—采场矿堆周围采准切割工程封堵（防渗漏）—集液池构筑—集液中转系统构筑与安装—注水试验—采场矿堆周围渗漏检测—矿堆饱和吸水率测试—矿堆渗透速度测试—集液与取样分析—峰值浓度监测与研究—集液中转—集液结果分析—集液信息反馈。

集液方法根据底部结构构筑方式可划分为巷道集液和钻孔集液两种形式；根据矿体产状和矿堆高度可划分为阶段集中集液和分段集液两种形式。阶段集中集液适用于各种急倾斜矿体；分段集液适用于缓倾斜矿体和采用浅孔留矿法筑堆的各种矿体。

防渗漏技术按集液系统可分为采场（矿堆）防渗漏、底部结构防渗漏、集液池防渗漏及中转系统防渗漏等四部分。

第五章介绍细菌浸出的基本理论。

本章主要内容包括：微生物的化学组成、微生物的营养物质、微生物的营养类型、微生物的生理和形态特征鉴定、浸铀微生物、影响微生物生长发育的理化因素、细菌的分离、筛选培养及保藏、细菌浸出与矿石矿物学、微生物浸铀的理论。本文还介绍了细菌浸铀现状、细菌浸出工艺及细菌浸出工业实践。

第六章叙述铀矿山环境保护与可持续发展。

“防治污染，保护环境”是我国的一项长期基本国策，也是铀矿工业必须严格遵循的重要原则和实现可持续发展的基础。在铀矿资源的开采、选矿及冶炼过程中，放射性废物会通过各种途径污染水、土壤、大气等动植物赖以生存的生态环境，尤其值得引起重视的是放射性“三废”引起的环境污染对人类自身将造成各种危

害。因此,加强铀矿山的环境保护,对于实现铀矿山的可持续发展具有重要意义。

铀矿资源是重要的战略物质,又是非再生资源,我们必须十分珍惜。我国是发展中国家,实施铀矿业可持续发展战略,必须根据我国的科学技术水平和综合国力等现实情况来开发铀矿资源。

参 考 文 献

- [1] K Rohatgi, J P Trivedi, P K Rohatgi. Research Imperatives in Microbial Leaching and Other Silicabearing Minerals Using Heterotrophic Bacteria[J]. Journal of Scientific and Industrial, 1984, 43(6), 302 ~ 305
- [2] J A Munoz, F González, M I. Blázquez and A Ballester. A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part I: A review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores[J], Hydrometallurgy, 1995, 38(1), 39 ~ 57
- [3] 吕昌汉. 溶浸采铀[M]. 北京:原子能出版社, 1998
- [4] 李珍媛. 美国过去、现在和将来的铀地浸采铀业[J]. 国外铀金地质, 2000, 17(4), 299 ~ 308
- [5] 童雄. 微生物浸矿的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 1997, 128 ~ 133
- [6] 樊庆恩、周展民、陈玉梅等译. 溶浸采铀教程[M]. 北京:《溶浸采铀教程》编译委员会, 1995, 44 ~ 49
- [7] 莫西涅茨 B H、洛巴诺夫 A A、吉捷耶夫 M H 等. 地浸矿山的建设与开采[M]. 朱志祥、李素媛、刘士侧, 等译. 北京:《铀与金》编辑部, 1992, 139
- [8] 杨仕教. 我国原地破碎浸出采铀技术的现状与发展[J]. 中国矿业, 1999, 8(5), 50 ~ 53
- [9] Narayan K, et al. Environmental Considerations in Uranium Solution Mining [J]. Trans. Soc. Min. Eng. AIME, June 1977, 262
- [10] Rouse J V. Environmental aspects of in-situ Mining and Dump Leaching. Proc. J]. Solution Min. Symp. AIMA Ann. Meeting, Dallas, Texas, Feb.

25 ~ 27, 1974

- [11] 王昌汉. 溶浸采铀(矿)[M]. 北京:原子能出版社, 1998
- [12] 施勋借、余斌. 原地溶浸采矿技术国内外研究概况与发展趋势[J]. 1999, 15(5), 1 ~ 5

第1章 原地破碎浸铀地质条件

原地破碎浸出采铀技术是融合了地质学、采矿、化学、湿法冶金、环境工程等学科技术于一体的综合性采矿技术,是各学科交叉和渗透发展的结晶。它适应面广,一些不能用原地浸出(地浸)开采的矿床都可以用原地破碎浸出采矿法加以开采,特别适用于花岗岩型、火山岩型及碳硅泥岩型等硬岩铀矿床的开采,但以前铀矿床的勘探和地质条件的评价是基于传统的开采方法来评定,为了采用原地破碎浸出采矿法来开采矿床,有必要对以前勘探的矿床进行开采前的重新评价工作,同时在新勘探这类矿床时我们也可以按原地破碎浸出采矿法所需的地质条件来评价,因此正确评价适合原地破碎浸出采矿法的矿床,这在当前尤其重要。原地破碎浸铀是在矿体自然埋藏条件下进行原地爆破落矿筑堆;对矿堆进行布液浸出,有选择性从矿石中浸出有价金属,通过集液措施将浸出的含金属液收集起来,输送到金属回收厂进行处理,从而达到开采铀矿床的目的^[1]。因此原地破碎浸出地质条件主要分为:① 铀矿床地质条件;② 水文地质条件与工程地质条件;③ 矿石的工艺矿物学特点。

1.1 矿床地质条件

我国具有工业开采价值的铀矿床主要有四种类型,即花岗岩型(占38.10%)、火山岩型(占21.34%)、砂岩型(占19.51%)、碳

碳硅泥岩型(占 16.40%),其中部分砂岩型铀矿床适合于原地浸出开采(地浸)。所谓“地浸”是通过从地表钻进至含矿层的钻孔将按一定比例配制好的溶浸液注入到矿层,注入的溶浸液与矿石中的有用成分接触,发生化学反应,生成的可溶性化合物在扩散和对流作用下离开化学反应区,进入沿矿层渗透迁移的溶液流中。溶液经过矿层从另外的钻孔提升至地表,抽出的浸出液输送至回收车间进行离子交换等处理工艺,最后得到合格的产品^[2]。原地浸出(地浸)的开采成本相比原地破碎浸出采铀的成本低,而且能在地表工作,工作条件好,但适应地浸的矿种却很少。而花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型铀矿床由于矿体形态和产状复杂、岩石坚硬、矿石渗透性差、矿石成分相对复杂、且矿石和围岩的水文地质条件复杂,通常采用原地破碎浸铀的方法。我国先后在国内一些铀矿进行了工业试验与生产,如核工业六所在浙江某铀矿进行了 3000t 级的采场堆浸现场试验,浸出率达 82.2%。20 世纪 80 年代湖南某矿根据本矿的具体条件,开展了原地破碎浸铀工业试验,利用井下含有细菌的废水淋浸,取得较好的经济效益^[3]。20 世纪 90 年代核工业六所先后在陕西某矿进行原地破碎浸铀的工业试验,浸出率达 89%^[4]。原中南工学院在广东某矿进行了深孔原地破碎浸铀工业试验,浸出率达 82% 左右。黄峰岭矿原地爆破浸铀试验^[5,6],也获得成功。与此同时,开展了对江西某铀矿床溶浸地质条件评价和工艺试验研究^[7-10],该铀矿床规模大,品位低,采用传统水冶工艺开采,生产成本高,被认为是“呆矿”,铀源资源长期得不到开发利用,实验表明可以采用原地破碎浸铀。实践证明原地破碎浸铀在我国是可行的。下面分别讨论我国主要工业铀矿床的地质特点、原地破碎浸铀的地质条件以及评价方法和措施。

1.1.1 花岗岩型铀矿床地质

花岗岩型铀矿床属典型的中、低温热液铀矿床,是指与花岗岩类岩石在空间上与成因上有密切联系的铀矿床。在世界上分布比较广,近年来由于其他类型铀矿床相继发现,特别是可地浸的砂岩型铀矿床的勘探,花岗岩型铀矿床的地位相对下降。但在我国花岗岩型铀矿床仍占有重要地位,是我国目前开采的四大工业铀矿床类型之一,主要分布在广东、湖南、江西、江苏、陕西等省。花岗岩型铀矿床的主要特征之一在于它们的产出和各种花岗岩体有密切的空间联系,同时还有较密切的成因联系。但是每一具体铀矿床的产出位置及其与花岗岩体之间的关系又表现出各种不同的情况。下面简介我国花岗岩型铀矿床的特征如下。

1.1.1.1 产铀花岗岩形成的地质背景

我国花岗岩型铀矿床主要分布在华南地区、秦岭地区和河西走廊以北地区,且华南地区花岗岩型铀矿床集中分布,工业意义很大,成因复杂。因此我们主要讨论华南花岗岩型铀矿床的成矿特征,偶而讨论其他地区的花岗岩型铀矿床。

华南地区泛指长江中下游以南的江苏、安徽、浙江、江西、福建、广东、广西等省的大部分地区。该地区内花岗岩分布十分广泛,大小岩体数以千计,是西太平洋成矿带的重要组成部分。该地区内最古老的地层为中元古代(1400~1700 Ma),即分布在江南地背斜轴部,如广西、湖南的四堡群、江西的双桥山群和浙江的双溪坞群,构成华南陆壳基底的最重要部分,这些地层以复理石建造为主,含有多层海相火山岩。通常含铀 $(2\sim3)\times10^{-6}$,广西融水四堡群白岩顶组平均含铀 6.6×10^{-6} [11]。中晚元古代(1400~1000 Ma)沿江南古岛弧沉积海相复理石建造并有海相火山活动,如湘黔的板溪群和浙赣的双桥山群、双溪坞群。雪峰运动后伴随着区域变质作用和花岗岩化作用,形成 MT、元宝山、九岭山、许村

等岩体,出现最老的产铀花岗岩体,如 MT 岩体平均铀含量达 9.23×10^{-6} ^[1]。自震旦纪至奥陶志留纪沉积较厚的海相类复理石建造,以泥质、硅质和碳酸盐沉积为主。形成华南重要的富铀层位(铀源层),铀含量可高达 30×10^{-6} 以上。加里东运动时,前泥盆纪地层褶皱隆起,伴随区域变质和局部花岗岩化、混合岩化以及重熔岩浆侵入,产生了较大富铀花岗岩体。加里东运动后华南相对拗陷地区沉积了大量碳酸盐建造。海西-印支运动在一些加里东期大型复式岩体内部,经过后期演化形成的海西印支期重熔再生岩浆型产铀岩体。印支运动后华南陆壳基本形成。燕山运动是华南目前最后强烈地壳运动,太平洋板块向欧亚板块强烈而频繁的俯冲运动使已经逐渐硬化的华南陆壳中原有深断裂复活并引起广泛的块断运动,继而局部向裂谷性质发展,地幔上隆,深部岩浆上涌,火山活动频繁,上部地壳局部反复重熔,形成了多阶段的改造型重熔花岗岩和少数规模较小的同熔型花岗岩以及众多的断陷盆地。铀矿床的形成绝大部分与燕山晚期的断裂活动和红色断陷盆地的发育时间相一致,并为特殊的古地貌、古气候和地下渗流热水的活动所控制。众所周知,华南产铀花岗岩体主要为燕山期花岗岩体(如 ZG 岩体、ME 岩体、DG 岩体等,同位素年龄约 140~185 Ma),此外尚有雪峰期产铀花岗岩体(MT 岩体)、加里东期产铀花岗岩体(如 ME 岩体,同位素年龄为 (368 ± 10) Ma)、海西-印支期产铀花岗岩体(如 IC 岩体,同位素年龄为 283 Ma)。华南产铀花岗岩体一般中、小型岩基,有的可达到大型岩基的规模。而较小的岩株和岩墙则没有工业意义的铀矿化,有重要工业意义的铀矿田大多与中型岩基以上的复式花岗岩体有关。

秦岭地区处于中国大地构造单元接壤的过渡地带,其铀源来自太古代及元古代的火山熔岩,铀随陆源碎屑带入海盆,在沉积过程中被炭质吸附,与硅质及泥质同时沉积,形成赵案庄组、大贵坪组及中川组铀源层^[12]。秦岭地区花岗岩型铀矿床由加里东期的