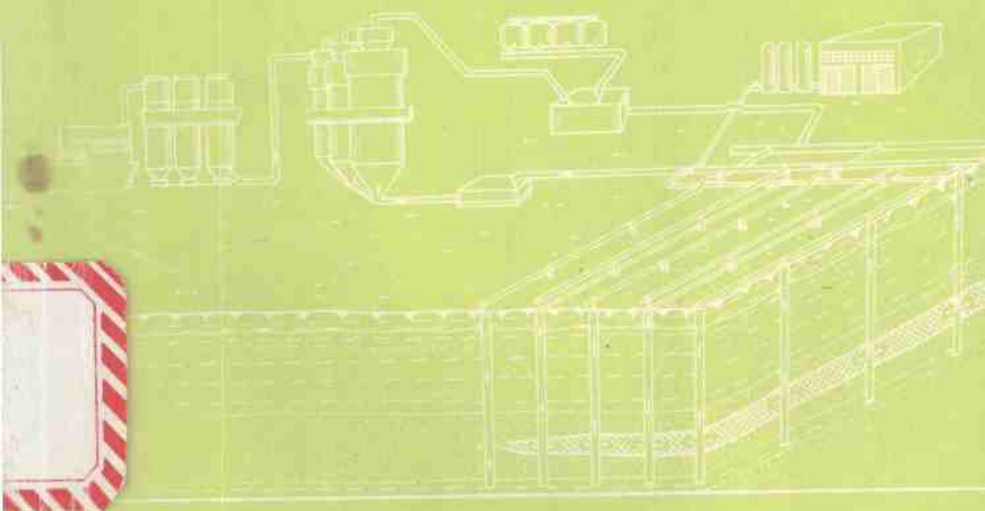


溶浸采矿法的 地质工艺研究

[苏] B . A . 格拉博夫尼科夫 著



原子能出版社

溶浸采矿法的地质工艺研究

[苏] B. A. 格拉博夫尼科夫 著
夏同庆 刘家俊 白凤周 译
施文静 夏同庆 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书叙述了为获得溶浸开采矿床条件的定量特征(地质工艺参数)而进行的地质工艺研究的理论基础和实际方法,描述了金属溶浸开采时的化学反应,给出了影响溶浸开采矿床进程和结果的主要天然因素的特征以及进行预测地质工艺计算的方法。

本书适用于地质、水文地质、地球物理和水冶工作者,对高等学校的师生也是有益的。

书中有 26 个表、35 张插图和 50 篇参考文献的目录。

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РАЗВЕДКЕ МЕТАЛЛОВ

В.А.Грабовников

Недра 1983

溶浸采矿法的地质工艺研究

[苏] В. А. 格拉博夫尼科夫 著

夏同庆 刘家俊 白凤周 译

责任编辑 刘其润 刘玉和

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

核工业西北地勘局二〇三研究所彩印厂印刷

☆

开本 787×1092 1/32·印张 4.6·字数 100 千字

1991 年 5 月北京第一版·1991 年 5 月咸阳第一次印刷

印数 1-2500

ISBN7-5022-0532-2

TD·8 定价: 3.50 元

中译本说明

盐类矿产用溶浸采矿法(俗称地下浸出)在我国已有两千多年的历史。用类似方法开采金属矿产,我们许多地质和矿山工作者还不很熟悉。世界上用溶浸采矿法进行工业规模开采某些金属是本世纪中期出现的。近20年来,对原产状矿层用钻孔注入溶浸剂而后抽取有用金属组分的溶浸采矿法,与传统的矿山(露采和坑采)方法相比,由于其独特的优越性和巨大的经济效益,在国外正得到日益广泛的应用。

近些年来溶浸采矿法在国内也引起了重视。在新疆和云南的铀矿山,溶浸采矿已试验成功。1991年将在内蒙两个盆地的铀矿床上进行新的试验。最近核工业有关部门相继举行了“地浸”工作会议,讨论和安排了“八五”期间的溶浸开采工作。

我国北西部地区中新生代盆地大小有352个,总面积达243.7万平方公里,其中许多盆地具有良好的铀成矿远景和适于溶浸采矿的条件。因此,大力开展和推广溶浸采矿法定将使大批潜在资源转变为可利用资源,为建立新的铀资源基地作出重大贡献。核工业地质局和西北地勘局对此非常重视,1990年派考察团赴苏进行专访。访问期间苏联友人赠了这本《溶浸采矿法的地质工艺研究》。此书内容丰富、实用性强,从理论和实践的角度对溶浸开采金属的地质工艺问题进行了多方面的探讨和叙述。我们随即组织夏同庆、刘家俊、白凤周三位同志在短时间内翻译成中文。全书由施文

静、夏同庆统一审校，并在原子能出版社刘其润同志大力协助下得以迅速出版，在此一并向他们表示感谢。

可以相信，本书的出版发行将会对我国正在试验和研究的溶浸采矿工作产生积极的推动作用。

孙 圭

1991年4月19日

序 言

苏共 26 次代表大会上通过了《1981—1995 年和到 1990 年期间苏联社会和经济发展的基本方向》决议，在以发展科学和加速技术进步为基础的寻求解决的主要任务中，载有“保证建立和广泛采用各种技术手段和工艺，以利……低品位的和复杂矿床的开采”。

金属在天然产状条件下溶浸开采法是新的先进的、被称之为地质工艺采矿法中的一种方法^[1-4,15,21,22]。所有地质工艺方法的共同点在于，部分或全部的直接在地下天然产状条件下采矿的工艺加工都是通过热的、物质交换的、化学的和水动力学的作用将有益组分转变成活动状态^[1]。对金属的溶浸开采来说，从矿石中选择性提取金属到含有反应剂的渗滤流溶液中就是在地下进行工艺加工的这种转移阶段。

溶浸开采金属的基本原理和技术方法早就为人们所知，例如俄国早在 1896 年就已颁发了第一份溶浸开采金的专利证书^[22]。本世纪 30 年代末至 40 年代初，苏联和其他国家都曾积极进行过溶浸开采铜的初步试验和工业性试验^[40]，但广泛实际运用这种方法则是 50 年代末至 60 年代初的事。目前，溶浸开采在采铀工业中的应用极为普遍^[3,4,15]，而且在不断扩展它的应用范围。这种方法已用来开采铜矿^[40]，溶浸开采金^[17]、锰、铝、有色金属^[14]和磷矿石^[24]，也正在进行研究。

根据溶浸开采的方式和构造形态的特点，可将含矿岩石分为坚硬（块状）和沉积透水两大类^[3]。在第一种情况下，溶浸开采通常作为开采矿床的辅助性方法被采用（不符合矿山开采条件矿石的地段），需要进行一定的矿山工作和预先

专门准备好矿石物料^[3,14,15]；在溶浸开采条件有利的情况下，渗透沉积岩中的矿床，只要用钻孔系统就能完全开采出来^[3,15,17]，无须预先专门准备矿石物料。

所有的地质工艺方法，包括金属的溶浸开采在内，与传统的矿山方法相比具有极大的技术经济上的优越性^[1,15,21,22]。但在对一些具体矿床作溶浸开采条件和其可能性进行评价时，地下矿石工艺加工某些阶段的转换，就出现了一些附加的条件限制。因而在勘探这些矿床时就要考虑到将来开采的这些特点。而在对这些矿床作详细设计和地质工艺评价时，必要的定量预测的能力应当通过专门、综合的地质工艺研究来保证。但迄今已发表的文献中，这样的研究方法看来都十分简略，主要是作为基本资料的补充，从属于开采的地质工艺方法本身的论述之中^[1-4,5]。用地质工艺方法（包括溶浸）开采和评价矿床的实践证明：在勘探这类矿床时，有必要专门对地质工艺研究的方法和地质工艺条件的评价进行研究。

在本书中依次论述了地质工艺研究的任务和方法，具渗透性、能用溶浸开采系统开采的金属矿床的地质工艺条件评价及其结果的解释。

在多年的研究过程中，И.Ю.Рослякова、З.И.Семсова、Л.Л.Белова、М.А.Рогожина 曾给作者以巨大帮助；矿床勘探的实验工作是在 К.Г.Бровин、Е.А.Эммануилов、Ю.К.Закиа、А.А.Заикин、С.И.Крючков、Г.П.Федотов 和 Е.В.Сёма 参与下进行的；在组织这项工作中，Б.Г.Самсонов 给作者以经常性的帮助；插图由 В.А.Демочкина 和 Л.И.Кривошесва 完成。作者对上述同志表示衷心感谢。

目 录

序 言

绪 论 (1)

第一章 溶浸开采金属时的化学反应 (5)

铀的溶浸开采 (5)

砂金的溶浸开采 (11)

铜的溶浸开采 (12)

第二章 溶浸开采的数学模型 (14)

溶浸开采过程数学描述的理论基础 (14)

水溶盐类的渗滤浸出(Н.Н.Веригин) (16)

用化学溶浸剂溶浸开采金属的数学模型 (19)

第三章 溶浸开采的实际模拟 (25)

实验室模拟 (27)

现场模拟 (40)

第四章 在勘探和评价溶浸开采金属矿床时预测的

地质工艺计算 (44)

地质工艺计算的任务 (46)

进行计算所必需的原始数据 (47)

进行计算的顺序和技术 (49)

第五章 决定矿床溶浸开采进程和结果的主要天然

因素 (61)

决定产品液中金属浓度和开采金属生产率的

主要天然因素 (63)

溶浸开采矿床时决定溶浸剂消耗量的主要天然

因素 (64)

勘探溶浸开采的矿床时确定合理限度的特点	(67)
---------------------------	------

第六章 勘探溶浸开采金属矿床时的地质工艺条件	
研究和评价的方法	(70)

实验室地质工艺试验	(71)
-----------------	------

实验室试验的方法	(71)
----------------	------

试验结果的处理	(83)
---------------	------

试验结果的检查	(88)
---------------	------

野外地质工艺研究	(92)
----------------	------

试验性地质工艺试验	(92)
-----------------	------

工业性试验地质工艺研究	(108)
-------------------	-------

野外地质工艺研究时地质工艺参数评估的 误差	(110)
--------------------------------	-------

第七章 矿床地质工艺条件的评价	(120)
-----------------------	-------

结 论	(136)
-----------	-------

参考文献	(138)
------------	-------

绪 论

И.П.Кириченко^[22]和 В.Ж.Аренс^[1]都给出了溶浸开采的定义,这是“一种在原地产状条件下,通过化学反应选择性地溶解有益组分,并随后在反应带中提取形成的化合物,而不形成比较大的空洞和不使围岩产生大的位移的开采一些稀有、分散或其他元素的方法”。矿石矿物赋存于砂质(有时是具强裂隙的)透水(通常所说的充水)岩石中的那些矿床是可以应用溶浸开采法的。这些矿石矿物溶解于弱酸、弱碱或盐类溶液,而脉石矿物和围岩对于这些溶浸剂来说是基本稳定的组分。许多产于砂和疏松砂岩中的外生铀矿床^[13,15]、砂金矿床^[16]、透水砂岩中铜的氧化矿床^[1,14]、含磷的砂矿床满足这样的条件。无疑,满足上述溶浸开采要求条件的矿床,远不限于我们所列举的那几类矿床。

为用溶浸开采法开采出金属,矿床的开采通常由不同种类且按一定规律网格构成的工艺钻孔系统来实现。每一个钻孔都装备有对所使用的溶浸剂具有稳定性的物质组成的圆柱状导管,它作为矿石范围内的一种渗滤器。一类钻孔(称为压入或注入钻孔)供给溶浸剂,而另一类钻孔(称为排液孔或抽液孔)最初是将层间水,而后将完全转变为产品液抽到地表。此种产品液是在溶浸剂由注入孔沿着含矿围岩层向抽出孔渗滤过程中形成的。在地表,产品液经工艺加工后(提取有益组分、补充溶浸剂和其他一些必要的加工)再经过注入孔重新进入矿层而作新的溶浸循环。

溶浸开采法开采赋存于渗透性含水岩石中的金属矿床的应用,对扩大矿物原料基地和提高矿山开采工业的技术经济

指标具有非常重要的意义。对许多这样的矿床来说，钻孔溶浸开采是唯一技术上可行或经济上有利的开采方法。美国专家指出，在已知的铀矿床中有 50% 用钻孔溶浸开采是利可图的^[43]。它可有效地开采矿石埋深达 700 米、矿石品位为 0.04%~0.05% (用矿山方法开采所需的品位为 0.07%~0.08%^[50]) 的这类矿床。其产品液中铀的最低工业浓度为 20mg/L，不及矿山开采水冶时母液平均浓度的 1/20^[39,40]。而且砂质含矿围岩的高渗透性和含水性使得这种矿床用传统的矿山开采方法变得非常困难，有时甚至完全成为不可能^[13]。

整个地质工艺学，其中也包括它的方法之一——金属溶浸开采是采矿事业新的方向，正处于开创和大力发展的阶段。因此，这方面的许多复杂和综合的问题，目前在文献中还没有得到应有的阐述，许多问题缺乏通用的术语和定义，矿床研究、评价和认识不同阶段研究的目的与任务没有明显的区别，也无用于评价矿床和保证它的开采所必需的足够的有关信息的特点内容相统一的概念，于是，在叙述这项工作基本内容时合理地制定其主要术语和定义便显得必要了。

“矿床地质工艺条件”这一术语应理解为在开采所研究的矿床时，对某一种地质工艺方法的采用、进程和结果可能产生实质性影响的各种天然因素的综合。

矿床的地质工艺条件可以表征为定性和定量的两类。定性特征提供有关决定矿床地质工艺条件的天然因素的综合信息。虽然这些因素本身也可具定量性质（例如矿石的渗透性、矿石中的有益组分含量等），但它们所提供的地质工艺条件特征仍然是定性的，因为它不能对该地质工艺方法开采矿床的进程的结果提供定量预测。通常根据这些不同种类的

信息，对地质工艺方法采用的条件进行分类（分组、分型），以提供所研究的矿床可能属于某一类型，而且能定性地表示出它们彼此之间的区别（例如分为非常有利的、有利的和不利的条件）。研究金属溶浸开采条件分类的有 А.И.Калабин^[21]、В.И.Новик—Качан^[14]和其他许多研究者^[4,27]。地质工艺条件的定量特征（和天然因素相结合）提供可定量预测用该种地质工艺方法开采所研究矿床的进程和结果的特有的指标，这些指标称之为矿床（或它的某些部分）的地质工艺参数。

从所述定义来看，通常把可给出矿床地质工艺条件定性评价勘探工作的总和称为广义的地质工艺研究，但是在本书中对术语“地质工艺研究”的理解比较狭窄，它是只为获得特有地质工艺参数而专门研究的综合。这些参数对采用钻孔溶浸开采金属矿床的地质工艺条件提供定量的评价。照这种理解，地质工艺的研究相当于按矿山方式开采勘探矿床时矿石工艺性质的研究。

本书阐述了金属溶浸开采试验在理论和实践上所得到的效果，以及建立在预测地质工艺计算方法和进行预测计算所必需的原始数据（地质工艺参数）基础上的金属溶浸开采过程的主要定量规律、决定溶浸开采金属的进程与结果和对矿床地质工艺条件特点进行评价的主要天然因素、矿床勘探时获得地质工艺参数的方法即地质工艺研究的方法。

本书中对所研究问题阐述的详细程度不一，这一方面取决于研究的对象和能得到的用于分析和综合的资料的多少；另一方面也取决于作者力图重点集中于那些目前研究很少的、其中包括还在争论中的问题上。按照这一原则，我们专门研究了某些研究者在进行专项研究以及在用钻孔溶浸开采

和研究这些矿床时所获得的资料中那些根据不足的论点、方案和采矿方法。

第一章 溶浸开采金属时的化学反应

在溶浸开采时通常力求溶浸剂对有用组分有最大的选择性。但要完全保证这一点实际上任何时候都达不到，除了溶浸剂与所提取的有用组分反应之外，同时还与脉石矿物发生一些附带的反应。溶浸开采时的化学反应特点在许多文献中已有描述，其中 Р.П.Рафальский 对用硫酸浸出金属的研究最为深入^[33]

在本章中提供了在溶浸开采时溶浸剂同所提取金属的主要反应，同时也指出了溶浸剂同脉石矿物反应的特点，后者对矿床开采的进程和结果产生一种不良的影响。

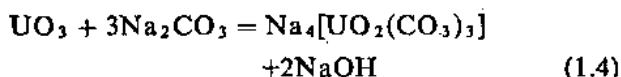
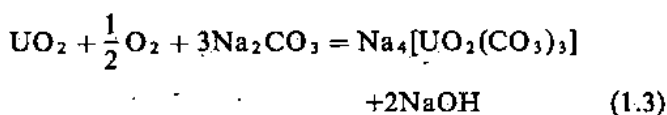
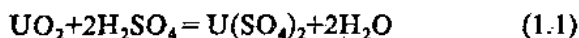
铀的溶浸开采

在采用溶浸开采外生铀矿床时，通常 4 价(UO_2)和 6 价(UO_3)铀共存的氧化物沥青铀矿和铀黑^①(此两矿物常写作 U_3O_8 或更正确地写为 UO_n ，其中 n 的变化范围是 2~3，它相当于 4 价和 6 价铀含量的比值) 是主要的矿石矿物^[15]，有时还见有一种少量的 4 价铀的硅酸盐矿物——铀石(USiO_4)。

硫酸(溶液浓度为 0.5%~3.0%)、钠和铵的碳酸盐和重碳酸盐(0.5%~5%)是开采这类矿床的溶浸剂，但后者需补加过氧化氢、氧、钾或钠的次氯酸盐作为氧化剂^[3,15,48,49]。

① 沥青铀矿和铀黑只是晶质铀矿的块状和粉末状变种，而不是单独的矿物。
译者注。

矿石中的石英、长石是主要造岩矿物，对于上述溶浸剂来说，它们是非常稳定的。这些溶浸剂与矿石矿物（铀的天然低温氧化物）之间的反应具有复杂的多阶段的特征，为了便于化学计算，我们概括为仅记录系统的初始状态和便于化学计算的下列简单的形式，4价和6价铀氧化物的反应分别为：



由于反应形成了易溶的4价铀的化合物和铀酰离子，室温时它们在水中的溶解度分别为：铀酰硫酸盐（1.2式）——18.9g/100g，钠的复铀酸盐（1.3和1.4式）——165g/100g^[36]。含不同水合分子的4价铀的硫酸盐溶解度（1.1式）列于表1^[34]。

表 1		
化 合 物	温 度, °C	溶 解 度, g/100g (水)
$\text{U}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	24	10.9
$\text{U}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	63	6.7
$\text{U}(\text{SO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	18	11.3
$\text{U}(\text{SO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	62	58.2

4价铀的硫酸盐有如此之高的溶解度，显然可用形成了

相当稳定的络合物 $U(SO_4^2-)$ 和 $U(SO_4)_2^0$ 来说明, 这两个化合物在离子强度 $\mu = 3.5^{[34]}$ 时, 其不稳定常数分别为 $10^{-3.24}$ 和 $10^{-5.42}^{[34]}$, 因此, 游离的 U^{4+} 离子在这种溶液中是非常少的, 不超过 $U(OH)_4$ 的溶度和所控制的溶度积 ($10^{-45} \sim 10^{-52}$) 范围。由后者的数据可以得出, 在 $pH < 1.5 \sim 2.0$ 的酸性溶液中, 甚至不考虑几十毫克每升浓度的简单 4 价铀离子能同硫酸根离子形成络合物。

上列 (1.1)~(1.2) 式还可说明以下两个问题: 一是碳酸盐溶浸剂从四价铀氧化物中溶浸金属时必须加氧化剂 (1.3 式); 二是由上述化学计算可看出, 对铀的溶浸反应来说, 直接所需的溶浸剂的量是非常少的。按照 (1.1) 和 (1.2) 式, 从 4 价氧化物中提取 1kg 铀, 硫酸的消耗量应当是 0.8kg, 从 6 价氧化物中提取 1kg 铀, 消耗硫酸是 0.4kg, 但实际上溶浸开采铀时, 提取 1 kg 铀需数十 kg 硫酸^[15]。这是因为硫酸在溶浸液循环区内既与矿石本身中也与围岩中的造岩矿物发生反应的结果。岩石中的碳酸盐、某些粘土矿物和有机质都是主要的耗酸矿物, 硫酸同不含矿的造岩矿物反应的不利影响, 不仅仅限于硫酸无益的消耗, 而且由于这些反应, 产品液中富含的各种常量组分, 在一定条件下, 可以导致气体和固体产物从产品液中暂时或永久的析出, 造成矿层的渗透性减低 (称为堵塞) 和溶浸剂与矿石矿物的接触条件变差。

目前, 人们对野外条件下堵塞现象的实验研究还很不夠, 主要是因为人们对固相反应的了解是有限的。在实验室用硫酸浸出时的堵塞现象研究得比较深入, 特别是 В.И.Белецкий 等人^[5]。

不同类型堵塞的区分

气相堵塞 通常由酸同碳酸盐反应时析出 CO_2 所致,当溶解的气体压力高于含矿层中静水压力值时,就会产生气相堵塞。按照 Р.П.Рафальский 的计算^[33],成气体析出的 CO_2 和其所产生的堵塞现象很可能取决于含矿层的静水压力值(在含矿顶板所测得的地下水压力以 m 表示)不超过下列值时的溶液 pH 值。

溶液的 pH 值	最小压力值(m)
2.0	14
1.5	22
1.0	47

在 CO_2 压力值比较高的时候, CO_2 应当处于溶解状态,也即气体堵塞现象是不可能发生的。令人遗憾的是,在上述分析中没有考虑到岩石中碳酸盐的含量对堵塞效应的影响。

暂时堵塞 主要是由于在酸化阶段产品液中富含铁和铝的离子而产生的。被称为酸法溶浸开采矿床的第一阶段的酸化作用阶段,是指从注入溶浸液于钻孔中到抽出液中酸度明显增高这一段时间。(也即溶液的 pH 值减低到 2.5~2.0 之时)。此时,因同岩石反应而富含铁和铝的酸性溶液,沿着含矿层向抽出孔运动,由于同新的岩石作用而中和,同时因为溶液中 OH^- 浓度的增加,铁和铝的氢氧化物成沉积物析出。根据 Ю.Ю.Лыбе 的资料 (1979),上述金属氢氧化物开始沉积的 pH 值范围, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 是 1.5~2.3, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是 3.3~4.0。也是根据这位作者的资料,发生完全沉淀的 pH 值, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 是 4.1, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是 5.2。按照 Р.П.Рафальский 计算的结果^[33],适合于 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀的溶浸开采实际溶液的 pH 值相应范围是 2.0~3.5, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是 4.4~5.7。