

铀水冶基础知识

《铀水冶基础知识》编写组

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍铀水冶工艺基础知识。主要内容包括：铀矿石的破碎与磨细；选矿与焙烧；铀矿石浸出；浸出矿浆的固液分离与粗砂洗涤；铀的离子交换提取和溶剂萃取；铀的沉淀；核纯三碳酸铀酰胺和二氧化铀的生产；从其他资源中回收铀，以及三废处理等。

本书主要读者对象是从事铀水冶工作的工人、战士，对于有关的工程技术人员、管理人员和大专院校师生也有一定的参考价值。

铀水冶基础知识

《铀水冶基础知识》编写组

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $9\frac{1}{8}$ · 字数 203 千字

1978 年 12 月北京第一版 · 1978 年 12 月北京第一次印刷

统一书号：15175 · 140 印数：0,001—6,000

定 价：1.05 元

绪 言

在毛主席革命路线指引下，我国原子能事业坚持“独立自主、自力更生”的方针，发扬艰苦奋斗、奋发图强的精神，从无到有地建立和发展起来，取得了巨大成就，为我国社会主义革命和建设事业作出了重大贡献。

铀水冶是原子能工业的一个重要组成部分。它的基本任务是，将开采出来的、具有工业品位的铀矿石加工成含铀量较高的三碳酸铀酰铵、铀氧化物或四氟化铀，为进一步制备各种类型核燃料提供核纯产品。

铀是原子能工业最基本的原料。自然界中铀的含量丰富，但很分散。铀矿石中铀的含量很低，一般为万分之几到千分之几。天然铀有三种同位素：铀-238、铀-235 和铀-234。其中铀-238 的含量占 99.28%，铀-235 占 0.714%，铀-234 仅为十万分之六。

铀-235 是一种可裂变物质。铀-235 原子核受到中子轰击后易发生裂变，裂变过程中放出大量能量；在适当的条件下能形成自行持续的链式反应。铀-238 是不易裂变的，它仅在高能中子作用下才能发生核裂变。但是，铀-238 容易俘获中子，俘获后经过两次 β 衰变，最终变成另一种可裂变物质——钚-239。

远在半世纪以前，铀矿石就开始以工业规模进行采掘和加工。但那时，铀仅作为冶金工业的副产品来生产，一般只用来着色玻璃、瓷器，用途很有限。直到本世纪三十年代

末，人们发现铀核裂变现象，并确定了自持链式反应的可能性之后，才打开核能利用的大门。铀主要用作核武器的装料、核电站的燃料、核船舶的动力，以及用来生产其他裂变物质、放射性同位素等等。随着科学技术的发展，核能利用范围愈加广泛，对铀的需求量也日益增长。

铀矿石加工是天然铀冶炼的第一步。由于加工过程中大多采用湿法作业，而且与下一步的火法冶炼（如用高温金属热还原法生产金属铀）相对应，所以习惯上把铀矿石加工称为铀水法冶金，简称铀水冶。主要工序有：破碎、磨矿、浸出、固液分离、离子交换或溶剂萃取、沉淀等。具体的加工方法和工艺流程，要根据铀矿石的成分与特性、对水冶产品的要求、成本及其他因素来选择，而且随着工艺技术的发展而不断改进。

当前，我国社会主义革命和建设进入了一个新的发展时期，一场向科学技术现代化进军的伟大革命群众运动正在迅猛兴起。为了适应铀水冶战线广大工人、战士学习业务知识的需要，我们编写了《铀水冶基础知识》一书，作为工人、战士自学读物和培训参考书。由于水平所限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

目 录

绪言	V
第一章 铀矿资源	1
第一节 铀在地壳中的含量和分布	1
第二节 有工业价值的铀矿物	3
第三节 矿石性质与水冶工艺的关系	6
第二章 铀矿石的破碎与磨矿	10
第一节 破碎	10
第二节 筛分	17
第三节 破碎筛分流程	19
第四节 磨矿	22
第五节 分级	31
第六节 自磨工艺与自磨机	33
第三章 铀矿石的选矿与焙烧	39
第一节 概述	39
第二节 铀矿石的浮选	42
第三节 放射性选矿	48
第四节 铀矿石的氧化焙烧	52
第四章 浸出	56
第一节 浸出的基本概念	56
第二节 酸法浸出	60
第三节 碱法浸出	68
第四节 低品位铀矿石的其他浸出方法	74

第五节 浸出设备	78
第五章 浸出矿浆的固液分离和粗砂洗涤	85
第一节 概述	85
第二节 清液的制备	86
第三节 粗砂的分离	95
第六章 用离子交换法从浸出液中提取铀	104
第一节 铀的提取方法概述	104
第二节 离子交换树脂	106
第三节 离子交换树脂吸附铀的化学机理	113
第四节 强碱性阴离子交换树脂吸附铀的影响因素	116
第五节 清液吸附	120
第六节 矿浆吸附	131
第七节 铀的淋洗	142
第八节 树脂中毒及其处理	146
第九节 离子交换法的发展趋势	149
第七章 铀的萃取	152
第一节 萃取的基本概念	152
第二节 铀水冶工艺中常用的萃取剂	159
第三节 有机胺萃取铀	164
第四节 二(2-乙基己基)磷酸萃取铀	175
第五节 磷酸三丁酯萃取铀	187
第六节 矿浆萃取	196
第七节 乳化现象和防乳化措施	198
第八节 有机相的制备和再生	201
第九节 萃取设备	204
第十节 降低萃取剂的消耗	210
第八章 铀的沉淀	212

第一节	概述.....	212
第二节	酸性溶液中沉淀铀.....	213
第三节	碱性溶液中沉淀铀.....	217
第四节	沉淀物的过滤和过滤设备.....	220
第九章	核纯三碳酸铀酰胺和二氧化铀的生产.....	228
第一节	概述.....	228
第二节	核纯三碳酸铀酰胺的生产.....	229
第三节	核纯二氧化铀的生产.....	241
第十章	铀水冶工艺流程.....	248
第一节	概述.....	248
第二节	酸法流程.....	250
第三节	碱法流程.....	255
第四节	酸-碱联合流程.....	257
第五节	直接生产四氟化铀的流程.....	258
第十一章	从其他资源中回收铀.....	260
第一节	从含铀铜矿中提取铀.....	260
第二节	从含铀磷矿中提取铀.....	261
第三节	从含铀煤矿中提取铀.....	263
第四节	从独居石中提取铀.....	266
第五节	从铀矿山坑道水中提取铀.....	269
第六节	从海水中提取铀.....	270
第十二章	三废处理和尾矿坝设施.....	272
第一节	概述.....	272
第二节	废水的处理.....	274
第三节	废气的处理.....	279
第四节	尾矿渣的处理及尾矿坝设施.....	282

第一章 铀矿资源

第一节 铀在地壳中的含量和分布

一、铀在地壳中的含量

铀在自然界的含量比金、银、汞、钼、锑等金属元素还多，它广泛存在于岩石、水、空气和动植物体中。地壳中铀的平均含量为 4 克铀/吨岩石，含铀总量达十万亿到百万亿吨。铀主要分布在地壳外岩石圈中，愈向地球的内部愈少，它易溶解和迁移，富集比较困难，只有极小部分富集成具有工业意义的铀矿床。在海水中，也有大量的铀，平均浓度为 3.3 微克/升，估计总量有 45 亿吨之多。目前许多国家都在探索从海水中提取铀的方法。

二、铀的分布

铀虽属分散元素，但它在岩浆岩、沉积岩、变质岩中的分布是不均匀的。在岩浆岩中，铀的含量随二氧化硅含量的增加而升高(表 1-1)。

在沉积岩中，铀的含量比岩浆岩要少一半，虽然其含量少，但分布极广。沉积岩中铀的富集都与碳质、沥青质、有机质、磷质硫化物、粘土矿物等有关，并常形成有价值的铀矿床。各种沉积岩的平均铀含量见表 1-2。

变质岩中的铀含量，据资料介绍，是介于岩浆岩和沉积

表 1-1 岩浆岩中二氧化硅与铀含量的关系

岩石名称	花岗岩	花岗闪长岩	闪长岩	玄武岩	辉绿岩	橄榄岩	纯橄榄岩
SiO ₂ (%)	70	66	60	50	50	43	40
U(克/吨岩石)	9	7.7	4	3	2.4	1.5	1.4

表 1-2 各种沉积岩的平均铀含量

岩石名称	石灰石	白云石	砂岩	页岩	粘土
铀含量(克铀/吨岩石)	1.5	0.30	4.00	3.00	4.30

岩之间。

三、铀在地壳中的存在形式

铀在地壳中的存在形式主要有三种：形成铀矿物，以类质同象存在于非铀矿物结晶格架中和呈吸附状态。

(1) 形成铀矿物 指的是铀以 U^{4+} 或 UO_2^{2+} 的形式与其他元素形成独立的铀矿物和含铀矿物。如晶质铀矿、沥青铀矿、铜铀云母、钙铀云母等。

(2) 以类质同象存在于非铀矿物的结晶格架中 U^{4+} 能取代离子半径大致相等的元素而进入其他矿物的结晶格架里，呈类质同象的形态存在，如铀存在于方钍矿 $(Th,U)O_2$ ，存在于独居石 $(Ce,Pr,La,Pd)PO_4$ ，磷灰石 $[Ca_5(PO_4)F]$ 以及钛酸盐、铌钽酸盐等矿物中。

(3) 呈吸附状态存在 有机质、玻璃蛋白石、磷块岩、粘土矿物、氢氧化铁和氢氧化锰等能以物理或化学方式吸附铀酰离子(UO_2^{2+})。

第二节 有工业价值的铀矿物

目前已发现的铀矿物和含铀矿物约 200 多种，但只有 20—30 种具有工业价值。铀矿物按成因分为原生铀矿物和次生铀矿物。在铀矿物中，大量的是次生铀矿物，而在工业利用上主要是原生铀矿物。现将原生铀矿物、次生铀矿物和含铀矿物三类中一些工业价值较大的分别介绍如下。

一、原生铀矿物

(1) 沥青铀矿 沥青铀矿分布十分广泛，它是工业价值最大的原生铀矿物。化学式为 $k\text{UO}_2 \cdot l\text{UO}_3 \cdot m\text{PbO}$ ，铀的含量约为 40—76%，主要成分的含量为： UO_2 27.55—59.3%， UO_3 22.33—52.8%， PbO 1.61—17.07%，几乎不含 ThO_2 ，稀土含量不超过 1%，此外，还含有 $\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 等。比重 6.6—7.7，硬度 5.42—6.29(莫氏)，颜色有沥青黑色、淡褐色或绿黑色，贝壳状断口。常产于热液矿床，与硫化物伴生，也产于沉积岩中，如磷块岩、有机质砂岩。

(2) 晶质铀矿 晶质铀矿是原生的铀矿物，与沥青铀矿有相同的结晶构造，但矿物成分和形态显然不同，最主要的是晶质铀矿含有钍和稀土。化学式为 $k(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2 \cdot l\text{UO}_3 \cdot m\text{PbO}$ ，铀在该矿物的含量占 65—74.5%，某一晶质铀矿样的矿物成分如表 1-3 所示。

晶质铀矿比重 9.0—9.7，硬度 5—6(莫氏)，黑色不透明，呈树脂光泽。常产于伟晶岩中，与硫化物、萤石、钍、稀土(RE)、铌、钽共生。晶质铀矿分布虽广，但工业价值较小，至今尚未发现由该矿物富集而成的工业铀矿床。在与稀有元素、

表 1-3 某晶质铀矿样的矿物成分(%)

成分 样品号	UO ₂	UO ₃	PbO	ThO ₂	RE ₂ O ₃
1*	39.10	32.40	10.95	10.60	4.02
2*	48.87	28.58	16.42	2.15	2.08
成分 样品号	ZrO ₂	CaO + MgO	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ + MnO	SiO ₂	H ₂ O
1*	—	1.09	0.55	0.19	0.70
2*	0.22	0.47	0.30	0.06	0.44

稀土元素共生的矿床中，它具有综合利用的价值。

(3) 铀的复杂氧化物 属于这类氧化物的有：

钛铀矿 (U,Ge,Fe,Y,Th)₃Ti₅O₁₆

黑稀金矿 (Y,U)(Nb,Ti)₂O₆

复稀金矿 (Y,U,Th)(Nb,Ti)₂O₆等。

这些矿物成分相当复杂，变化不定，主要元素有铌、钽、钛、铁、锰、钙、铀、钍，次要元素有钾、镁、铝、钡、硅、铅、锶、锑、铋、锌、磷、氟等。它们之间形成广泛的类质同象。这些矿物性质类似，一般都具有较高的化学稳定性，比重与硬度都较大，难于水冶加工处理。铀的复杂氧化物分布十分广泛，目前只发现钛铀矿、绿层硅铈钛矿具有工业意义，其他矿物尚未发现有工业意义的铀富集，但有综合利用的价值，如褐钨铀矿等。

二、次生铀矿物

次生铀矿物比原生铀矿物多，大部分产生于铀矿床的氧化带。主要由原生铀矿物及含铀岩石经氧化分解形成的。

(1) 残余铀黑 残余铀黑是沥青铀矿或晶质铀矿原地氧化生成的，一般存在于沥青铀矿或晶质铀矿的表面。化学组成(按百分数计): UO_3 大于 9.8—40.4%， UO_2 微量—11.7%， ThO_2 小于 3%。如为晶质铀矿氧化的，则矿物中 ThO_2 大于 3—8%，比重 3.1—4.8，硬度变化较大，可以从 1 至 4，黑色或深灰绿色，光泽暗淡不透明，土状或粉末状。常产于矿床氧化带的下部，保持了原生铀矿床的产状和形态，与铀的磷酸盐、硫酸盐、砷酸盐共生。残余铀黑也是提炼铀的重要原料，与原生矿物一起开采。

(2) 铀云母类矿物 铀云母类是六价铀的磷酸盐、钒酸盐、砷酸盐，在氧化带是比较重要的次生铀矿物。它们可用通式 $\text{R}(\text{UO}_2)_2(\text{MO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表示。其中 R——Ca, Cu, Fe, Ba, K; M——P, V, As。此类矿物的特点，具有鲜艳的黄、绿或黄绿色，呈鳞片状云母型结构， UO_2^{2+} 与 MO_4^{3-} 构成平面 $[(\text{UO}_2^{2+})(\text{MO}_4^{3-})]$ ，两平面间由阳离子 Ca, Cu, Fe, Ba 等联结，形成层状结构，硬度低，易溶解。铀的含量通常较高，一般为 55—60%。

常见铀云母类矿物有：

铁铀云母 $\text{Fe}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

铜铀云母 $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

翠砷铜铀矿 $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

钙铀云母 $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8—10\text{H}_2\text{O}$

钾钒铀矿 $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

钒钙铀矿 $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

(3) 铀的含水氧化物 本类矿物是由沥青铀矿或晶质铀矿经氧化作用和水化作用形成的。主要为六价铀的矿物，个别矿物中也含有四价铀。它们当中工业意义较大的有：

水沥青铀矿 $\text{UO}_2 \cdot k\text{UO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

红铀矿 $\text{PbO} \cdot 4\text{UO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

柱铀矿 $4\text{UO}_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

板铅铀矿 $2\text{PbO} \cdot 5\text{UO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

此类矿物常产于铀矿床的氧化带，与铀的硅酸盐类矿物紧密共生。往往和原生矿物一起开采。

三、含铀矿物

含铀矿物种类很多，分布也十分广泛。铀在矿物中的存在形式是多种多样的，除少部分以类质同象形式外，大部分铀是不参加矿物晶格构造的。目前已发现的一些主要含铀矿物形成的工业铀矿床有：含铀胶磷矿、绿帘角闪岩、含铀三水铝矿、含铀辉铜矿、含铀褐煤和页岩类的有机物等。

含铀胶磷矿是凝细的胶状沉积，主要是氟磷灰石和碳磷灰石与石英、海绿石、方解石、粘土等组成磷块岩。它是制造磷酸和磷肥的工业原料。铀的平均含量为 0.02—0.03%，储量大，是很有远景意义的铀矿资源。

第三节 矿石性质与水冶工艺的关系

在铀水冶生产过程中，其工艺特点很大程度上取决于矿石特性。现就矿石类型和脉石性质及其与水冶工艺的关系简单介绍如下。

矿石类型 根据矿石中铀矿物的成因，把铀矿石分为三种工艺类型，即原生矿石、次生矿石和混合型矿石。原生矿石中的铀矿物有完整的晶格构造，颗粒较粗，比重、硬度也较大，一般可用选矿富集，但铀难以浸出，需加氧化剂，使

四价铀氧化成六价铀。次生矿石则相反,不适于用选矿富集,由于次生矿物中的铀大多数呈六价,因而易于浸出。有的泥质次生矿石,因含泥量多,对水冶生产过程有一定影响,使操作难以正常进行。

各种类型矿石与浸出工艺关系综合于表 1-4。

表 1-4 矿石类型与浸出工艺的关系

矿 石 类 型		主 要 矿 物	浸 出 工 艺	备注
原生矿石	沥青铀矿型	沥青铀矿	稀酸浸出* 或碱浸 [△]	有的矿石在出矿前,可用选矿富集
	晶质铀矿型	晶质铀矿	稀酸浸出* 或浓酸浸出* [△]	
	钛铀矿型	钛铀矿, 钛钽铌酸盐	浓酸浸出*	
次生矿石	铀黑型	铀 黑	稀酸浸出或碱浸	焙烧
	铀的含水氧化物型	水沥青铀矿, 红铀矿, 柱铀矿等	稀酸浸出或碱浸 [△]	
	铀云母型	铜铀云母, 铁铀云母, 翠砷铜铀矿等	稀酸浸出或碱浸	
	不定型铀矿物型	磷酸钙, 有机物, 粘土类等	稀酸浸出或稀酸浸出*	
混合型矿石	沥青铀矿-铀黑型	原生与次生铀矿物共生	稀酸浸出*	焙烧
	沥青铀矿-铀云母型	原生与次生铀矿物共生	稀酸浸出*	
	沥青铀矿-铀的含水氧化物型	原生与次生铀矿物共生	稀酸浸出*	
	沥青铀矿-硅钙铀矿型	原生与次生铀矿物共生	稀酸浸出*或碱浸 [△]	
	沥青铀矿-钾钒铀矿-钒钙铀矿物型	原生与次生铀矿物共生	稀酸浸出*或碱浸 [△]	

* 需加氧化剂;
[△] 使用不普遍的工艺。

脉石性质 脉石即矿石中无用矿物的总称。它们的成分不同,对拟定水冶工艺流程有一定的影响。主要的有硅酸盐

型，硫化物型，磷酸盐型，铁氧化物型，可燃有机物型等。脉石成分与浸出工艺的关系如表 1-5 所示。

表 1-5 脉石成分与浸出工艺的关系

矿石类型	决定矿石类型的主要矿物	矿物组分含量	浸出工艺	备 注
硅酸盐型 (包括硅-铝酸盐)	石英、长石、云母等	主要矿物总量 ≥95%	稀酸浸出或碱浸 [△]	
碳酸盐型	方解石、白云石	碳酸盐总量 ≤6—12% 12—25% ≥25%	稀酸浸出或碱浸 碱浸或稀酸浸出 [△] 碱浸	采用酸浸时，可用浮选法除去碳酸盐
硫化物型	黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉铋矿等	硫化物总量 ≤3—10% 10—25% ≥25%	稀酸浸出或碱浸 [△] 稀酸浸出 稀酸浸出	采用碱浸时，可用浮选法除去硫化物
铁氧化物型	赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿	有大量两价铁存在	稀酸浸出	焙 烧
磷酸盐型	磷块岩（磷灰石）	P_2O_5 ≤3—10% 10—20% ≥20%	稀酸浸出 浓酸浸出 浓酸浸出	
可燃有机物型	含铀褐煤、沥青碳质、页岩、砂岩等	—	稀酸浸出或碱浸	焙 烧

[△] 不普遍使用的工艺。

硅酸盐型，包括硅-铝酸盐，硫化物型矿物一般用酸浸出，其中碳酸盐含量较高的宜用碱法浸出。磷酸盐型可在酸法生产磷肥时提取铀。铁氧化物型与可燃有机物型浸出前需先进

行焙烧处理。实践证明，对含有大量两价铁的矿石在浸出前进行氧化焙烧处理，能够改善浸出效果，提高铀的浸出率。

此外，矿石中铀的含量，共生矿物组分（有用及有害组分），铀矿物集合体的颗粒大小和分布特性，矿石的物理性质（如硬度、泥质）等，都对铀水冶工艺有直接的影响。因此，搞清楚矿石的性质，对铀水冶工艺有着十分重要的意义。

第二章 铀矿石的破碎与磨矿

第一节 破 碎

一、破碎的基本概念

破碎的主要任务是把大块矿石破碎成小块矿石，为磨矿创造条件。

破碎一般分为粗碎、中碎、细碎三个阶段。各阶段处理的矿石的大致粒度范围是：粗碎——给矿粒度为 400—300 毫米，破碎到 150—100 毫米；中碎——给矿粒度为 150—100 毫米，破碎到 60—25 毫米；细碎——给矿粒度为 60—25 毫米，破碎到 5—10 毫米左右。破碎阶段的划分是相对的，根据水冶厂生产规模和其他条件（如矿石性质）而变化，有的矿石要经三段破碎，有的只需两段或一段破碎。

矿石的破碎（包括磨碎），主要有四种方式（图 2-1）：

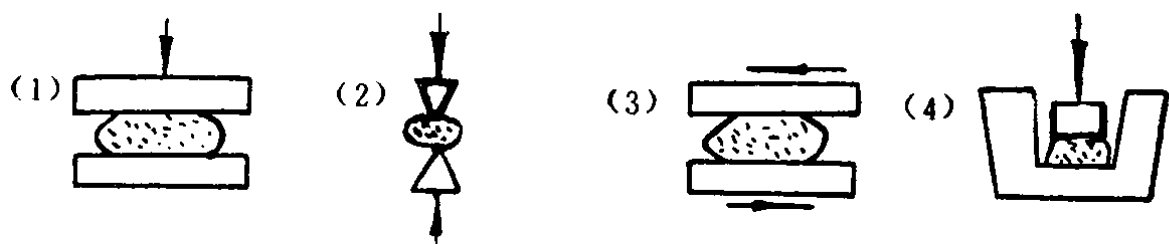


图 2-1 基本破碎方式示意图

1—压碎；2—劈碎；3—研磨；4—击碎

破碎机进行破碎往往不是采取单一的破碎方式，而是有