

国际原子能机构技术报告丛书 第196号



铀的冶金矿物学与铀矿加工

YOU DE YEJIN KUANG WUXUE
YU YOUKUANG JIAGONG

原子能出版社

内 容 简 介

本书是国际原子能机构根据一些国家在开发铀矿资源方面所取得的经验而编写成的。它是将世界上各种类型的铀矿石的矿物学特性与矿石加工工艺联系起来的第一本书。全书分三部分,第一部分内容包括:铀矿物学,铀矿加工的基本原理、工业实践及加工工艺的新发展;第二部分通过铀矿床和铀工厂的实例,说明各种类型的铀矿石的特性及其加工方法;第三部分列表介绍了76个铀矿加工厂的概况。

本书可供从事铀矿选冶方面工作的科研、生产及管理人员,以及大专院校有关专业师生参考。

国际原子能机构技术报告丛书 第196号

铀的冶金矿物学与铀矿加工

高席丰 傅秉一 译

孙方玖 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

市政水泥制品厂印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 1/32·印张9.75·字数270千字

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数1—800 ·统一书号: 15175·587

定价: 2.30元

前 言

本报告是根据1978年1月在维也纳举行的一次顾问会议上和会议后所形成的资料而编写的。那次会议的主要目的是拟制一个文件,以使用以指导铀矿加工流程的制订工作。

显然,矿石的矿物学特性(用对冶金工作者来说是非常有意义的方式加以分析、叙述和阐明)是最基本的资料,这种资料是制订流程所必需的重要依据。因此,矿石矿物学(在本报告中称作冶金矿物学)就是本报告的主题。

在编写本报告时,国际原子能机构考虑到了将比较发达的国家所取得的经验和知识介绍给那些还处于铀资源开发的早期阶段的国家是很有必要的。

也许有人会批评本书的内容在某些方面缺少必要的深度和矿石加工的细节,本机构及其顾问也意识到有必要以若干种方式来扩充这份资料。然而,本报告还是以本书的形式出版,以作为将世界范围内的矿石类型与其加工工艺联系起来的第一次尝试。我们相信,这本书对于进一步研究这些课题将是一个有用的基础。

目 录

第一部分 铀矿物学和铀矿加工冶金学的原理和实践

绪论

1. 铀的产状和地球化学.....	3
1.1. 地球化学循环的分布.....	3
1.2. 铀矿床.....	5
1.3. 铀的其它产状.....	7
2. 冶金矿物学.....	7
2.1. 引言.....	7
2.2. 铀矿物.....	9
2.3. 矿物学特性的原始资料.....	10
2.4. 冶金矿物学的研究方法.....	11
2.5. 推荐的方法.....	20
2.6. 结论.....	24
3. 铀矿加工冶金学.....	25
3.1. 引言.....	25
3.2. 加工化学.....	26
3.3. 冶金研究.....	3
3.4. 初步评价.....	53
3.5. 中间工厂.....	55
4. 矿石加工的工业实践.....	56
4.1. 铀矿加工工艺.....	56
4.2. 铀矿加工的环境污染问题.....	78
4.3. 能量的需要量和加工费用.....	81
5. 加工工艺的新发展.....	89
5.1. 引言.....	89
5.2. 预选和分选.....	89
5.3. 破碎和磨矿.....	89
5.4. 浸出.....	90

5.5. 用高效浓密机进行固液分离.....	97
5.6. 用连续离子交换法进行浓缩和纯化.....	98
5.7. 用溶剂萃取法进行浓缩和纯化.....	109
5.8. 沉淀.....	111
5.9. 流程改进.....	112
第一部分参考文献	114
第二部分 铀矿床和铀工厂的具体实例	
说明各种类型矿石的特性的实例分析	
1. 砂岩矿床.....	118
1.1. 美国.....	120
1.2. 尼日尔: 阿加德兹盆地.....	130
1.3. 阿根廷: 平塔达山脉.....	132
2. 石英卵石砾岩.....	134
2.1. 加拿大: 埃利奥特湖阿格纽湖地区.....	135
2.2. 南非: 威特沃特斯兰德、奥兰治自由邦金矿区.....	138
3. 脉状矿床.....	146
3.1. 加拿大: 北萨斯喀彻温.....	147
3.2. 澳大利亚: 阿利盖特河产铀区.....	152
4. 花岗岩矿床.....	157
4.1. 纳米比亚(西南非): 罗辛.....	158
4.2. 澳大利亚: 克罗克威尔.....	160
5. 伟晶岩、碳酸盐岩和正长岩.....	161
5.1. 加拿大: 班克罗夫特(伟晶岩).....	161
5.2. 南非: 法拉博尔瓦(碳酸盐岩).....	162
5.3. 格陵兰: 伊利莫萨克(正长岩).....	163
6. 含铀页岩.....	164
6.1. 埃及: 夸特腊尼.....	164
6.2. 瑞典: 兰斯塔德.....	165
6.3. 美国: 查塔努加.....	166
7. 含铀褐煤.....	167
7.1. 美国: 达科他州、蒙大拿州、怀俄明州.....	167

8. 钙质结砾岩.....	169
8.1. 澳大利亚：伊利利.....	169
9. 从其它资源中回收铀.....	171
9.1. 铜浸出液.....	171
9.2. 磷酸.....	172
9.3. 海水.....	172
第二部分参考文献	

第三部分 选定的铀矿床和铀矿加工厂的概况

1. 编号法的说明.....	176
2. 对表中每一栏的细节的说明.....	184
一览表	194
第二部分和第三部分的参考书目	

第 一 部 分

铀矿物学和铀矿加工冶金学的

原理和实践

绪 论

决定一个铀矿床是否可以经济地加以开发的两个主要因素是，能被开采并作为可销售的产品而加以回收的铀的数量以及矿石开采和加工的费用。

铀矿石的矿物学特性对矿石加工的工艺和经济性有着重要的影响，并且决定着用任何一种特定工艺方法最终所能得到的铀的总量。因此，在制订从任何一种矿石中提取铀的研究计划时，了解矿石的矿物学特性和矿石在特定工艺条件下的行为是很重要的。

虽然矿物研究者经常被请来解答提取冶金工作者在研究过程中所遇到的有关矿石加工方面的一些疑难，但是在最初制订加工方法的研究计划时，很少有人充分利用矿物学特性的资料。在铀矿加工工艺方面有经验的冶金工作者会不很自觉地应用他的矿物学知识来解释某个矿石加工问题。他的经验实质上是对某类加工流程的直观了解，而这种流程很可能只适合于个别矿石。也许是由于这个原因，矿物学特性在铀矿加工流程研究中的重要性往往未能得到充分如实的阐述。

岩石是复杂的矿物组合，而且在具体的组成和结构上有很大的差别，因此没有一种矿石同另一种矿石完全相同。从同一个矿体

取得的样品也是变化的,而且往往差别很大。这些差异意味着,任何时候某一种流程不可能对于所有相似的矿石都是最佳的,一种加工流程也不能从一种矿石一成不变地搬到另一种矿石上去。一个流程总是许多因素的折衷,而且在矿山的整个服务年限内是不断改进的。对矿石的矿物学特性及其变化的了解以及对矿物和矿物组合的行为的了解,是确定最佳折衷方案的重要根据。

本报告的目的是介绍一些能把矿物学特性与矿石行为联系起来的基本概念,并指出由正确布置的岩矿分析所得到的资料在形成总的加工流程的最初设想中的价值。这些设想以后可能成为试验研究和经济研究的基础,最后导致选定一种特定的流程和进行矿石加工工厂的设计。

因此,第1,2,3章论述了这个主题,主要是供经验较少的专业人员参考,可作为他们在制订工作计划时的指南。然而,有经验的人员也会发现,这些章节对于他们正确地理解某些基本概念也是有用的。

第4章是对一些典型的铀矿加工流程中所采用的单元操作的简要述评。它还概述了各单元操作所需的能量与费用之间的相对关系。这一章对于圆满结束前面三章的主题是必不可少的,而且起着联系第二部分的桥梁作用。

本报告的第二个目的是以概括的形式给出关于目前正被用来生产黄饼的各类主要矿石的加工方法的资料。这是与国际原子能机构1967年在维也纳举行的低品位矿石处理会议上提出的下述建议相一致的〔1〕:

“收集和传播有关叙述不同类型矿石的相对重要性的资料,而这些矿石的适宜的加工方法已经证明是成功的。”

1970年在圣保罗召开的铀的回收会议〔2〕以后,人们的注意力再次被吸引到这个主题上来了,而且在1975年关于铀矿加工的华盛顿会议以后,通过出版一套表格而有了一个开端。

这个主题将在第二、三部分展开加以论述。第二部分通过对世

界各地的各种矿床(砂岩、砾岩、脉状矿床、花岗岩、伟晶岩、碳酸盐岩、正长岩、页岩、褐煤和钙质结砾岩)所作的实例分析,介绍了主要类型的铀矿石的特性,为读者提供指南。

第三部分是由一组表格所组成,它们总括了所选定的 76 个工厂的数据。然而,这两部分也是构成本报告的整个主题的重要组成部分,因为它们组成了参考资料的核心,而这些资料把矿石类型与加工特性关联了起来。

1. 铀的产状和地球化学

1.1. 地球化学循环的分布

铀的地球化学主要是由该元素的特性决定的。首先,铀的四种可能存在的价态中四价和六价这两种价态具有某些热力学特性,因而,自然环境(有时邻近地区)的 pH 和 Eh 条件呈有规律地出现,在这种条件下一价态或另一种价态是稳定的。其次,所产生的两种离子(正四价和正二价)性质大不相同。高度电离的四价铀离子(U^{4+})呈弱碱性,所以它生成一种不溶于稀酸的氧化物,而且它的盐很容易水解。它的离子半径同镧系元素及钍的离子半径相近,它的化学性质与钛和锆也相似,所以四价铀 U^{4+} 往往同这些元素伴生。

六价铀以铀酰离子 UO_2^{2+} 的形式存在,六价铀的氧化物是易溶的。铀酰离子同一些阴离子结合生成易溶于酸性和碱性溶液的络合物。它同其它金属阳离子生成复合物,因此形成了一组范围很广的矿物。可是,由于铀酰离子的半径大,它不易同形置换别的离子,也不易被别的离子同形置换,所以它的晶体状矿物一般都是独特的铀化合物。

铀分布很广。例如,它的丰度比锑、镉、铋、碘和贵金属都高。本报告不叙述铀的分布的复杂经历。若要进一步详细了解,读者

可参阅专门的地球化学文献,如Roers和Adams的文章(1969[4])。

下表给出了铀在一些岩石中的丰度的数量级(单位ppm):

镁铁质火成岩(玄武岩、辉长岩等)	1
中间火成岩(闪长岩)	2
酸性火成岩——花岗闪长岩	2.6
花岗岩	4.7
沉积岩	
正常页岩	4
石灰岩	2
黑页岩	8

(最高可达250)

海水 0.0033

这些数据都是平均值,有的波动范围可能很宽,尤其是在黑页岩中(可能含有高达250ppm的铀)和在酸性火成岩中(铀含量可能高达500ppm)。

铀是亲岩元素,对于硅酸盐有亲和力(由定义可知)。在酸性和碱性的氧化条件下,铀的活动性很大,生成了铀酰离子(UO_2^{2+}),而铀酰离子又会同各种阴离子和其它阳离子生成大量的通常是复杂的矿物(硫酸盐、磷酸盐、碳酸盐、硅酸盐、钒酸盐、砷酸盐等)。四价形式的铀即 UO_2 (理想的晶质铀矿) 是几乎不溶的,在它变成可活动的形式之前需要氧化到六价。可是,正如上面所指出的,在自然环境中经常会遇到六价铀(铀酰)化合物被还原而沉淀出 UO_2 的条件。这就是在沉积矿床中发现大量铀及某些黑页岩铀含量高的原因。它们含有有机物,而有机物能使溶解的铀酰化合物还原,沉淀出 UO_2 ,并生成晶质铀矿或沥青铀矿及含铀的有机物。

在火成岩和有关的伟晶岩中,铀以四价的形式存在于一些原生矿物里。可是,在次要的副矿物中铀的含量比在主要的成岩矿物中要高得多。这样的矿物包括独立的铀矿物(例如晶质铀矿、钛铀矿)及铀在其中以次要成分存在的铀矿物(例如锆石、榍石、磷灰石)。这些原生矿物的火成岩很少是有经济价值的(但伟晶岩例

外),要形成可以开发的矿床,必须通过其它的一些成矿过程。

这些成矿过程包括热液过程、变质作用、交代作用、沉积物中的氧化—溶解—还原—沉积作用、沉淀作用以及第 1.2. 节的分类中所略述的其它一些过程。

1.2. 铀 矿 床

一般说来矿床的分类,尤其是铀矿床的分类,是相当错综复杂的,主要是由于成因问题。许多矿床的成因已很好地为人们所了解,因而它们的分类是明确的。可是有些矿床,包括一些较大的矿床,有待进一步地加以研究,并且是广泛讨论的课题。在某些情况下,关于它们的成因也许永远也不能取得一致意见。因此这样的一些矿床的分类是很难确定的。

由于需要在第二部分中编制铀的主要产状的目录,因此在本报告中使用的分类表就显得特别重要(见第三部分:选定的铀矿床和铀矿加工厂的概况)。

本报告采用了卢齐卡(Ruzicka)分类法(1975[5])(见图1)。

有必要简要地说明一下卢齐卡分类法中所用的术语,若要进一步详细了解,读者可查阅原文。名词“源”是指存在于地壳中的“原始的”铀。“同生”关系是指同时的或者同时期的成岩、成矿过程;“后成”关系则是指成矿过程发生在成岩过程之后。

成矿过程分成第一和第二两个阶段。由于这些成矿过程的不同组合而形成了十四种矿床,如图1表中最后一栏所示。

在某些情况下(例如砂岩矿床),进一步细分某些类型的矿床也许是有必要的,而且肯定是可能的。有的矿床也许可以被分到不止一类里去,即它们是迭生矿床(例如某些澳大利亚矿床)。这样的进一步细分虽然对于地质学研究来说是有用的,但对本文来说并无必要。在第二部分里列出了与矿石加工有关的比较详细的矿床方面的资料。

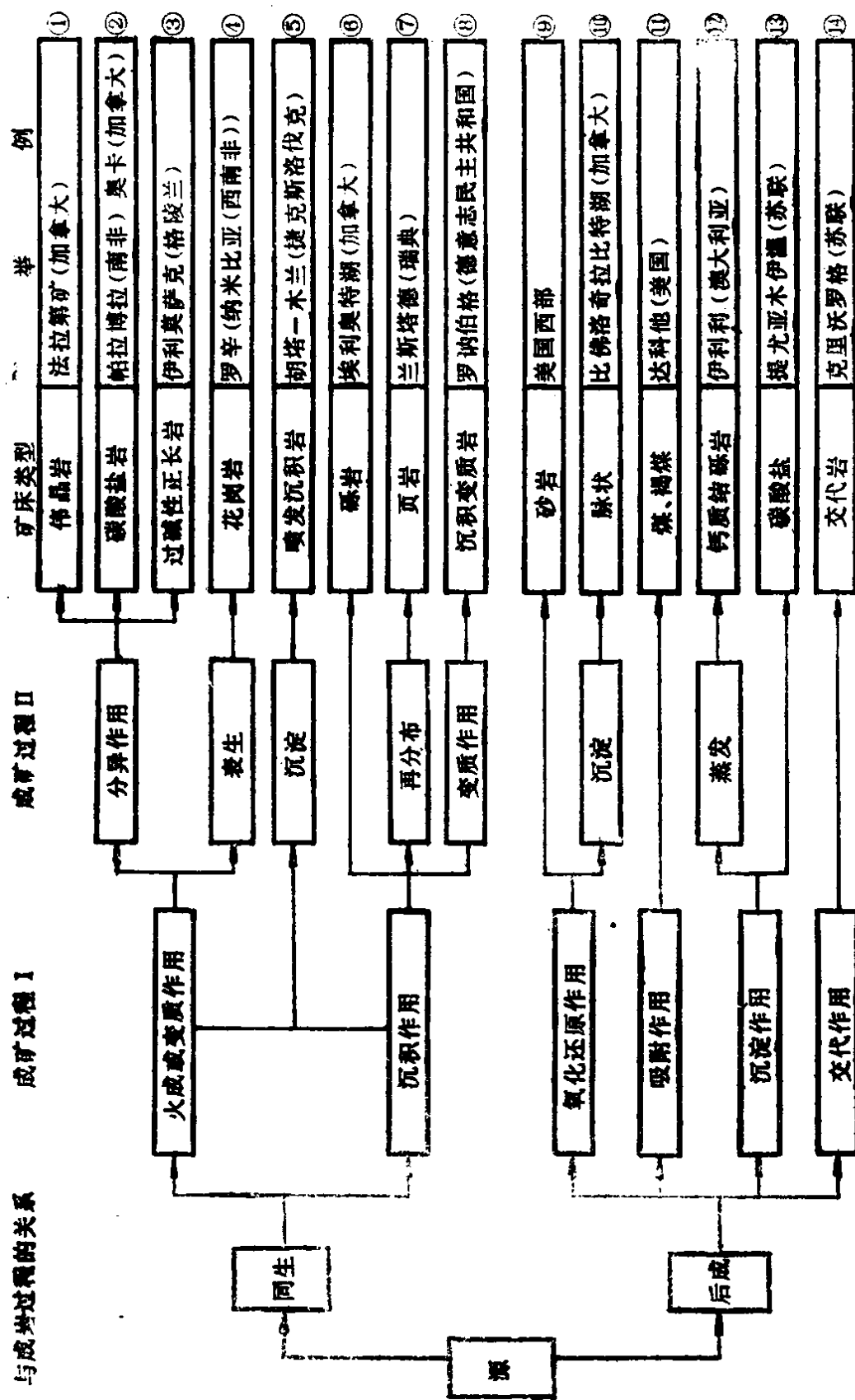


图1 铀矿床成因类型 (据Ruzicka[5])

1.3. 铀的其它产状

还有其它的一些铀的资源,铀在其中是非常次要的成分,而且一般不以独立的或特殊的铀矿物存在。

众所周知,海水、磷酸盐矿床、含碳沉积物以及斑岩铜矿中都含有铀。在某些地方,相当数量的铀以可溶形式存在于地下水中。原生岩石(如花岗岩)有时也可能会变为可开发的,特别是当铀矿物随同别的矿物或者工业矿物(云母、长石或诸如硫化物、磷灰石、氧化物等这样一些副矿物)一道加工处理时。为从这种资源中回收铀,已经进行了一些研究工作。

2. 冶金矿物学

2.1. 引言

从矿石中提取铀的流程的技术特点和经济可行性主要受岩石类型的影响,而岩石类型是由矿石的矿物组成和结构决定的。

在受矿石的矿物学特性影响的那些因素中(不同于铀品位),下列因素是最重要的:

- (a) 解离出铀矿物所需的破磨程度;
- (b) 用物理方法从脉石矿物中分出铀矿物的可能性;
- (c) 所要求的浸出剂的种类(例如酸、碱、氧化剂)和试剂消耗的可能水平;
- (d) 矿物在水悬浮液中的可能的流变学性质(因而对搅拌、浓密、过滤等的影响);
- (e) 浸出液的可能的离子组成和浓度(它决定了离子交换或溶剂萃取设备的尺寸和最终产品的纯度)。

在本报告中我们把“冶金矿物学”定义为这样的矿物学研究,其目的在于预测矿物学特性对上述诸因素的可能影响。冶金学这

个名词也包括选矿、矿石加工和提取冶金。铀矿石的冶金矿物学同其它矿石的冶金矿物学基本上没有什么不同。然而，除了很少的一些特殊例子以外，有经济价值的铀矿石的品位都十分低，而且人们甚至对品位更低的矿石也开始感到兴趣。这一特点与金相同，但是金没有铀那样多的存在形式。

冶金矿物学研究的最终取决于经济上的考虑，因为提取富集过程同样是受到限制的。就其技术目的和理论解释而言，冶金矿物学研究诸如矿石的可能成因等地质学研究是完全不同的。

作为一支研究队伍中的一员的矿物研究者(其任务在于研究技术经济而不是矿物科学本身)，显然正在学科之间的领域里工作着，他必须从如何能经济地开采矿石和回收金属两个方面来交流他的成果。也很清楚，为了加强这种交流，他必须学习铀冶金学的基本知识。在这个稍微有点冒险的无人从事过的领域里工作的矿物研究者必须用科学来启发而不是蒙蔽别人，否则他们就无需存在了。

然而，矿物研究者在经济地质工作者和冶金工作者之间还起着十分重要的搭桥作用，因此他的知识面必须扩大到地下矿体以及目前的加工方法或者新提出的加工方法等方面。为此，他必须熟悉区域地质学特性，矿床本身的地质学特性，详细的岩石学特性以及紧邻的主岩和周围的岩石或远处相关的岩石的矿物学特性。他有责任对现有的书刊和报告作出评价。

矿物研究者有他自己可供使用的一整套设备和技术。虽然他必须十分熟悉所有的方法，并且当需要时他便能应用这些方法去解决问题，但是他首先必须提高技能和积累经验，以便能解释他所观察到的问题。不管设备有多么复杂，却不能代替这种技能，任何设备都必须被认为是用来解决一定范围内的问题的一种工具。

矿物研究者必须牢记工程项目的经济目标，而应当拒绝去详细探讨矿物学特性上的那些令人感到好奇的现象，只要能达到这

些经济目标，就不必去做更多的工作。

2.2. 铀 矿 物

美国地质调查所已经出版和修订了一部铀钍矿物专业词汇，最后的一次修订版是1967年的1250号通报 (Fron del, Fleischer和-Jones 1967〔6〕)。该通报将铀钍矿物分成三类：

- A. 铀、钍矿物(列出了185种，其中只有25种是钍矿物)。
- B. 含有少量铀和钍的矿物(列出了55种)。
- C. 已经报道过的矿物，其中所含的铀、钍矿物是以杂质形式或者共生形式存在的(列出了20种)。

再也没有什么能比从通报中引用的下面这段话更能说明铀矿物数量之惊人及其命名之困难：

“矿物名称的索引534条。它们代表了 260 种已经命名了的矿物：A类185种，B类55种，C类20种。经常有人提出这样的问题：‘铀和钍的矿物有多少？’若A类可接受为分类标准，则约有185种矿物，可是已经用了300个名称。”

下面选出了一组重要的有经济价值的铀矿物，这种选择是任意的，因为在局部地方一种比较不为人所知的矿物实际上可能成为主要的铀源。此外，比较不为人所知的矿物往往就是浸出尾矿中铀含量高的原因。

氧化物： 沥青铀矿/晶质铀矿，铀钛磁铁矿，钛铀矿，铌钛铀矿，方钍石，碳铀钍矿(部分有机物)，烧绿石，细晶石，黑稀金矿，脂铅铀矿，褐钇铀矿；

硅酸盐： 水硅铀矿，硅钙铀矿，硅镁铀矿，硅铅铀矿，钍石，锆石/曲晶石，褐帘石；

磷酸盐： 磷钇矿，独居石，钙铀云母，铜铀云母，镁磷铀云母，钒钾铀矿，铝钙铀云母；

硫酸盐： 铀铜矾，铀钙矾；

碳酸盐： 铀钙石，氟碳酸铈镧矿，含铀方解石；

钼酸盐： 黑钼铀矿，菱钼铀矿。

2.3. 矿物学特性的原始资料

含铀矿物的参考书或手册应该有按不同参数进行的多种分类和编目，并有对照参考资料。其中的一些参数如下：

- (a) 对(短波和长波)紫外线的反应——一种非常方便、快速、简易的方法；
- (b) 颜色——一种差不多是不自觉地被利用的性质；具有有限的用途，但可能是有效的；
- (c) 密度——在冶金工作中及矿物性质测定中是有用的；
- (d) 化学组成——铀含量的一种表示法，可示出铀是不是一个重要成分；
- (c) 光学性质——系统表示基于折射率和光学符号的资料；用表格分开列出矿物的独特性质或与其它矿物不同的性质(如准铜铀云母)；
- (f) 结晶学和晶体结构——许多铀矿物倾向于呈很细的颗粒状或蚀变矿物(混胶状)，利用结晶学作为一种鉴定手段是有限制的；
- (g) X射线衍射资料——有局限性，因为某些矿物，特别是那些最难鉴定的矿物(复杂氧化物)，是混胶状的和非晶状的，而而，X射线装置也不总是容易得到的；
- (h) 在各种试剂中的溶解度；
- (i) 矿物的伴生，无论是含铀的还是不含铀的——如果伴生的矿物确实在成因上是有关系的话，这些资料可能是有用的，否则推论就没有根据。

铀矿物还有一些物理性质对于冶金实验结果的分析是十分有用的。虽然有关这些物理性质的许多数据尚待测量，但是一些文献已提供了许多这方面的资料。

美国地质调查所的1064号通报(Fron del 1958[7])上的《铀 钍

系统矿物学》包括了截至到那时为止的大多数有关的测定数据或参考资料。同时期出版的其它参考资料有Heinrich (1958〔8〕), Getseva和Savel'eva(1956〔9〕), 以及Volborth(1958〔10〕)的文章。

1064号通报列出了X射线资料, 这些资料同“粉末衍射标准联合委员会”(the Joint Committee for Powder Diffraction Standard)的索引卡片上的最新数据一道被记载下来。然而, 1958年以来的大多数资料分散地发表在有关矿物学的文献上。已经出现了一个能快速查阅铀矿物及其性质的总表(科罗拉多矿业学院研究所, 1976〔11〕)。新近的一期刊物已经总结了铀矿物和铀矿石, 并给出了它们的许多性质和判断特征〔12〕。还有一些关于一般矿物学和矿相学的文章, 如Deer, Howie 和 Zussman(1962〔13〕), Zussman (1967〔14〕)以及Edwards(1947〔15〕)等人的文章。

2.4. 冶金矿物学的研究方法

2.4.1. 要调查的资料

假若矿物研究者从发现一个矿床开始就介入某项工程, 他自然会对该矿床从一般了解逐渐地达到深入了解。他将协助搞清地球物理异常的可能原因, 调查研究露头样、冲击样以及划定地质边界的钻孔岩心普查样。最后他将确定可得到的岩石在矿物性质上是否适合各种工程目的(具体地说, 如矿山现场的基础、道路等)。因此, 在研究过程中要鉴定下述样品中的一部分或者全部:

- (i) 局部的普查样(包括河流沉积物);
- (ii) 从目标地区取来的露头样;
- (iii) 冲击钻样或刻槽样;
- (iv) 金刚钻岩心;
- (v) 集合样;
- (vi) 与具体问题(地球物理、工程、环境、采矿、安全等方面)有关的副样。

首先被开采的许多矿石会来自氧化区(如果存在的话)。因此,