

# **第一部分** **铀矿资源和浸矿技术**

## 第二章 铀资源和铀矿物

### 2.1 铀资源

铀资源是在目前和将来提供铀矿加工工艺研究和生产的基础。铀矿成因的研究可以为寻找铀矿指明方向。研究和了解铀矿石的组成和性质将为确定铀矿加工工艺提供依据。

#### 2.1.1 铀矿的成因

铀在地壳中的分布特性和存在形式是由它的化学性质决定的。从地球化学的角度，铀具有如下性质<sup>[2.1]</sup>：

(1) 铀是亲氧（或亲石）元素，即铀与氧可以形成牢固的化合物。这是由铀的核外电子层结构决定的，见表 2-1。

表 2-1 铀原子的核外电子层结构

电 子 层	K	L	M	N	O	P	Q
电 子 数	2	8	18	32	18+③	8+①	②

注：加圆圈的电子数是价电子数

由表 2-1 可见，当铀失去价电子以后，铀离子（六价）的最外电子层（P 层）为 8 个电子，呈惰性气体型，与氧、氟、氯的亲合力较强，极易形成氧化物或含氧盐。大多数铀都分布在地表以下 20 km 以内的地壳中，就是因为该段地壳主要是由氧化物构成的硅酸盐岩石层，这也是自然界中不存在铀的硫化物、氮化物、碳化物、氢化物以及铀不可能以金属形式存在的原因。

(2) 自然界中铀有两种稳定价态：四价和六价。因此，铀可以参与地球化学作用的氧化-还原过程，形成种类繁多的铀矿物。

在高温高压的条件下，在含氧和含金属氧化物的介质中，铀最稳定的价态是四价。因此，在熔融硅酸盐岩浆中铀以  $\text{UO}_2$ （晶质铀矿）形式存在。在氧化条件下，铀容易从四价氧化为六价形成铀酰离子（ $\text{UO}_2^{2+}$ ）。

在自然界，铀酰离子能和其他阳离子（主要是二价阳离子，例如： $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ ）一起与磷酸盐、砷酸盐、钒酸盐、含水硅酸盐、钼酸盐、碳酸盐、硫酸盐等结合，形成各种盐类。在各种凝胶质细分散物（例如：褐铁矿、蛋白质、磷酸钙、粘土矿物、有机物和沥青等）上，铀酰离子很容易被吸附。铀酰离子的化合物容易溶解在含  $\text{SO}_4^{2-}$  或  $\text{CO}_3^{2-}$  等阴离子的水中，因此溶解的铀可以随地下水迁移，生成各种次生铀矿物。

(3) 在化学性质上，铀是两性元素。铀的氧化物既可以与其他碱性氧化物作用生成铀酸盐，也可以与酸作用生成铀酰化合物。

(4) 在结晶化学方面, 铀能形成多电荷的大离子团, 这就使铀只能与为数不多的元素(例如: 钍、稀土、钇、铈、钽、钼、钨、钨等) 有较密切的类质同象关系。

铀矿床是铀矿物的堆积体, 铀矿床是分散在地壳中的铀元素在各种地质作用下不断集中而成的, 也是地壳不断演变的结果, 这种地质作用称为“成矿作用”。按照地质作用的能量来源, “成矿作用”又可分为内成矿作用和外成矿作用。

#### 2.1.1.1 内成矿作用

内成矿作用是由地球内部热能所产生的作用力引起的, 可分为岩浆作用和变质作用。

##### 2.1.1.1.1 岩浆作用

岩浆作用是由岩浆活动产生的。

岩浆是地球内部自然作用形成的粘稠而含有挥发性组分的硅酸盐熔浆。岩浆的化学成分以硅、铝、镁、铁、钾、钙、氧等为主, 这些元素在岩浆中的含量可达 99 % 以上, 称为“主要造岩元素”。这些造岩元素在岩浆中的存在形式通常用氧化物的形式来表示, 例如:  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等。 $\text{SiO}_2$  是岩浆中含量最多的组分, 岩浆中挥发性组分主要是  $\text{H}_2\text{O}$ , 此外还有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等。

岩浆有两个主要类型, 一个是含硅和铝为主的酸性岩浆(或称为: 花岗岩浆), 另一个是含镁和铁较多的玄武岩浆。铀和其他金属元素是以微量元素的形式存在于岩浆中, 其中酸性岩浆是形成铀矿床的重要来源。在地壳运动的不同时期和不同条件下, 随着岩浆逐步冷却, 岩浆的凝固结晶和从岩浆中汽化的热液物质沉积富集的结果形成各种金属元素(包括铀)的矿床。一般来说, 与岩浆活动有关的成矿作用可以分为以下三个阶段<sup>[2,1]</sup>:

##### (1) 岩浆阶段。

岩浆阶段是岩浆从地球深处侵入地壳或喷出地表, 到大部分岩浆冷凝为岩石的过程。

据推测, 在地球内部, 岩浆的温度可以达到  $800^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ , 压力可以达到几千个大气压。当地壳运动过程中出现断裂带时, 由于局部压力下降, 岩浆就会向压力降低的方向移动, 沿各种不同类型的断裂带上升到地壳的上部或直接喷出地表。在这个过程中, 岩浆不断与周围的岩石相互作用, 不断改变自己的成分和状态, 其中的大部分开始冷却并凝固成岩石。在这个岩浆阶段所发生的地质作用称为“岩浆分异作用”, 由岩浆分异作用凝固形成的岩石称为“岩浆岩”或“火成岩”。

岩浆分异作用符合质量作用定律。在岩浆阶段可能凝固结晶析出的是在岩浆中含量较多、熔点较高的元素。因此, 在岩浆岩中主要矿物为硅酸盐矿物, 例如: 橄榄石类、辉石类、角闪石类、云母类、长石类和石英( $\text{SiO}_2$ )。

在岩浆阶段, 铀不能形成独立的矿物, 因为: ①铀在岩浆中的含量低, 在粘滞性很高的岩浆中铀及其化合物不易扩散。所以当岩浆中主要元素开始结晶时, 铀还不能富集到形成铀矿物的浓度。②铀的离子半径较大, 不能与在岩浆阶段结晶析出的造岩元素形成类质同象的矿物。③岩浆阶段的结晶作用是在缺氧的情况下进行的, 岩浆中含量高的元素( $\text{Fe}$  和  $\text{Si}$  等)都处于低价态, 它们与氧的亲合力比铀强。因此, 在岩浆阶段铀难以与氧结合形成结晶而析出, 只能仍然留在熔融体(残余岩浆)中。

岩浆岩凝固以后, 铀和锂、铍、钍、稀土等没有结晶析出的元素在“残余岩浆”中得到相对富集。

## （2）伟晶阶段。

伟晶阶段是指残余岩浆冷却结晶到完全固化的过程，在这个阶段，晶体与岩浆发生分离，形成伟晶岩。

由于岩浆中含有大量挥发性组分，周围又存在巨大的压力，因此这些挥发性组分在岩浆中呈液体状态存在。随着在岩浆阶段形成的岩浆岩凝固，挥发性组分在残余岩浆中的浓度增加，从而降低了残余岩浆的粘度。由于残余岩浆的粘度降低，活动性增大，就为残余岩浆中金属元素形成矿物的结晶作用提供了良好的条件。因此，岩浆中这些挥发性组分被人们称为“矿化剂”或“矿化素”。随着环境温度缓慢下降，残余岩浆逐步冷却，矿物便从残余岩浆中以巨大的晶体析出，从而形成伟晶岩。

伟晶岩可以由酸性或碱性岩浆形成，成矿温度为  $400^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ ，在伟晶阶段形成的伟晶岩矿物有绿柱石、独居石、晶质铀矿、铌铁矿和钨、钼的矿物等。伟晶阶段形成的矿物多为稀有金属，例如：钍、稀土、铌、钨等。这个阶段铀有可能形成独立的铀矿物（晶质铀矿），但更多的是以类质同象的规律进入到其它稀有金属矿物中形成共生的复合矿物（例如：复杂的铌钽钛酸盐矿物）。

在伟晶阶段，铀在岩浆中的浓度并不高。因此，铀在伟晶岩中的含量也不高，很少达到  $0.01\%$ ，通常都小于  $0.001\%$ ，基本不具备工业开采价值。

## （3）热液阶段。

热液阶段是岩浆活动的最后阶段。在伟晶阶段的后期，由于环境温度的降低，残余岩浆中含有的液态挥发性组分成为过热水溶液。当过热水溶液浸入已固化的岩层时，可能选择性的溶解一些组分，例如：铀或其它金属。这些富集了铀或其它金属的过热水溶液，在迁移的过程中，由于温度、压力、酸度、氧化-还原条件等因素的变化，水中溶解的铀或其它金属结晶析出，成为矿物并与周围岩石形成矿床，称为“热液矿床”。

热液阶段铀结晶析出的温度范围为  $250^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，按析出的温度不同，热液矿床又分为高温、中温和低温三类。高温热液铀矿床，例如：钛铈铁矿型，这类矿床的形成温度可达  $500^{\circ}\text{C}$  左右，甚至更高。中温热液铀矿床，例如：砷化物型，可以在  $175^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  形成。低温热液铀矿床，例如：碳酸盐型，形成时的温度为  $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。三类热液铀矿床中，高温热液铀矿床分布较少，工业开采价值不大。中温和低温热液铀矿床的铀品位较高，分布比较广，具有工业开采价值。热液铀矿床容易浸出，但储量规模不大，一般一个矿床只有几百至几千吨铀。

热液铀矿床多呈脉状或柱状，它们的特点为：①铀的品位较高，能形成富矿。②矿物组成简单，很少出现类质同象现象，基本不含钍或稀土。③铀矿物主要是沥青铀矿（也称为铀沥青或非晶质铀矿），其组成与  $\text{U}_3\text{O}_8$  相近，但是作为铀氧化物的  $\text{U}_3\text{O}_8$  是组成一定的晶体，而沥青铀矿是铀与氧的比例不定的无定形产物。

应当指出，在热液铀矿床中存在的铜、铁、锌、铅等硫化物，并不是铀与它们共同构成矿物或类质同象，只是这些硫化物与铀矿物具有相同的矿化条件而已。

### 2.1.1.1.2 变质作用

变质作用是指在地壳形成和发展的过程中，在地球的内力（包括：地壳运动、岩浆活动、热液过程等）作用下，造成地壳的地质和物理化学条件发生变化（主要是温度和压力

的增高),引起原有岩石中的矿物成分和结构发生变化,形成了一种在固态岩石条件下发生的岩石转化再造过程。

一般来说,在变质作用过程中,岩石的化学成分可能在不同程度上与外界物质的化学成分发生交换,岩石中原来分散的元素也可能发生富集。通过变质作用,虽然除水和二氧化碳以外,岩石的总化学成分基本不变,但是通过上述交换和富集作用,也可以形成有用元素的矿床。目前已发现的变质铀矿床都属于沉积变质类型,主要矿物有:晶质铀矿、沥青铀矿、钛铀矿和碳铀矿等。沉积变质铀矿床的特点是矿石的铀品位低,但是矿床的铀储量特别大,多为几十万吨,目前只在世界上少数地区有发现。

### 2.1.1.2 外成矿作用

外成矿作用是指地壳外层和地表以外的自然力对岩石的作用,作用的能量来自太阳能、地能(包括:放射性物质的衰变能和地球内部的热能)、生物能、化学能等。这种作用通过物理和化学变化把内成矿作用形成的岩石和矿床加以破坏和改造,同时形成在地表条件下稳定的新物质。外成矿作用我们又称为风化作用,所形成的矿床称为风化矿床。

风化作用的产物可以以真溶液、胶状液或碎屑的形式被地表水带走,当水流到适当的地方,由于温度、酸度、氧化-还原条件、地形等因素的变化,水中的金属元素又会形成难溶性化合物而沉积,或被各种物质(有机的或无机的)吸附,形成新的矿物。这种矿物称为“沉积矿物”,形成的矿床称为“沉积矿床”。铀的沉积矿床可以划分为:海相沉积铀矿床、陆相沉积铀矿床、淋积铀矿床、风化壳铀矿床等。

沉积铀矿床是重要的铀资源之一,其特点是分布面积广,储量规模大,多为几千至几万吨铀,但是矿石的铀品位较低。沉积铀矿床主要包括:含铀磷酸盐、含铀褐煤、含铀页岩、含铀沥青砾岩、沉积砾岩等。

铀矿床的形成过程是漫长的,往往经历几千万年甚至几亿年。在这漫长的历史时间里形成的铀矿床,只有一部分是在单一地质作用下形成的,而更多的铀矿床是经历多种地质作用叠加和改造而形成的。例如:有的先由沉积地质作用提供铀的来源,后在热液地质作用下形成铀矿床;有的先在热液地质作用下形成铀矿床,再经过表生地质作用的改造使铀矿富集或贫化。因此,把铀矿床简单划分为内生、外生和变质三大类,并不能概括经历多种地质作用而形成的铀矿床<sup>[2,2]</sup>。在实际工作中,根据铀矿床的围岩成分进行分类,把铀矿床分为:花岗岩型铀矿床、火山岩型铀矿床、砂岩型铀矿床、含铀煤型铀矿床等。

铀矿床的分布还受到时间和空间控制。时间是指成矿的地质年代,空间是指成矿的地区。地质学根据地层产出的顺序和生物残体的化石确定地层的地质年代,把地质年代划分为:震旦纪、寒武纪、奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪、二迭纪、三迭纪、侏罗纪、白垩纪、第三纪和第四纪。应当指出,用这种方法确定的地质年代是相对的。

由于铀和钍的放射性衰变具有一定的半衰期,放射性衰变的半衰期不受温度和压力的影响,也不受地壳内化学作用的影响。因此,含铀矿物可以作为特殊的地质时钟,通过测定同位素的比例就可以正确计算地质年代。

事实证明,不同类型铀矿床的成矿地质年代是不同的,例如:沉积变质铀矿床多形成于20亿年~25亿年前,沉积铀矿床几乎在所有的地质年代都可能形成,热液铀矿床只能在某几个地质年代形成。同一类型铀矿床形成的地质年代也很不一致,例如:花岗岩型铀

矿床在西欧以海西期（2.4 亿年 ~ 4.0 亿年）花岗岩为主，在我国以燕山期（0.7 亿年 ~ 1.8 亿年）花岗岩为主。这说明，在一定地区内是以某一个或几个成矿年代为特征的。在地壳发展的漫长时间中，地壳分出了活动地段和稳定地段，在不同地段上的地层发育程度和种类、构造活动强度和类型各不相同，铀矿床的形成方式也各不相同<sup>[2,2]</sup>。

多旋回的岩浆和火山活动，变质和混合岩化作用是中国东部陆壳演化的显著特点。除奥陶纪外，各个地质年代我国都有铀矿床产出，但主要集中产出于中生代侏罗纪，其铀储量占我国铀矿床总储量的 60%，部分铀矿床产出于第三纪，寒武纪以前的老地层中铀矿床的铀储量只占我国铀矿床总储量的 3%，这是我国明显不同于加拿大和澳大利亚等产铀大国的特点<sup>[2,3]</sup>。

### 2.1.2 铀资源的分类

国际原子能机构（IAEA）对铀资源的分类有两种方法：（1）按铀资源所处的地质环境分类。（2）按铀资源存在的可靠程度和资源回收的经济情况分类。

#### 2.1.2.1 按铀资源所处的地质环境分类

根据地质环境，IAEA 把世界上大多数铀资源划分为以下矿床类型<sup>[2,4]</sup>：

（1）不整合型矿床。不整合型矿床存在于大型侵蚀不整合面附近，这种矿床多数形成于 16 亿年 ~ 18 亿年以前的全球造山运动时期，也有的形成于较年轻的地质年代。这些矿床的某些矿石中除铀以外还含有砷、镍、钼和痕量金等其它元素。

（2）砂岩矿床。大多数砂岩矿床都赋存于河流或浅海的沉积岩中，其围岩大多数比较松散，矿体为含黄铁矿和由植物形成的有机物的粗粒砂岩，沉积物一般与凝灰岩或其它火山物质有关。这类矿床的非原生矿石中含有的铀矿物是沥青铀矿和铀石，经风化后的氧化矿石含次生铀矿物，例如：钍铀矿、钍钙铀矿和硅钙铀矿。此外，砂岩矿床的矿石中还可能伴生有可以综合回收的钼、硒、铜和钒。

由于砂岩的多孔性和渗透性，在矿体的周围同时存在着下伏或上覆的封闭泥岩和粉砂岩。因此，砂岩铀矿床适合采用原地浸出技术回收铀。

（3）石英卵石砾岩矿床。已知的石英卵石砾岩矿床仅存在于在缺氧条件下形成的下元古代沉积岩中，在南非的这类矿床，铀是作为黄金生产的副产品被回收的。

（4）脉状矿床。铀的脉状矿床是指那些在铀矿物中伴生银、镍、钴、铋、铁和钼等元素，并填充于裂缝、裂隙或角砾岩中的矿床。这些脉状矿床的厚度在世界的不同地区变化很大，尤其是厚度很小的狭窄裂隙、断层和裂缝状的脉状矿床，在开采过程中会使矿石品位大大贫化。

（5）角砾杂岩矿床。角砾杂岩矿床形成于非造山运动时期的元古代大陆带中，其围岩为富含火山碎屑的石英岩和沉积岩。铀矿化存在于靠近花岗基底杂岩之上的岩层中，矿石一般呈层状结合体和不整合形式产出，与铀伴生的有铜、银、金等。

（6）侵入岩矿床。侵入岩矿床是指那些与不同化学成分的侵入岩或深源岩有关的铀矿床，包括白岗侵入岩和碳酸岩侵入岩。

（7）磷灰岩矿床。磷灰岩矿床的细粒磷灰石中含有低品位的铀。从铀资源角度，此类铀矿床是作为一种非常规资源，其中的铀一般作为磷酸生产的副产品加以回收。

（8）筒状塌陷火成角砾岩矿床。筒状塌陷火成角砾岩矿床赋存于填充了下落岩石碎屑

的环状直立火山筒中，铀和钼、银等其它元素一起富集在火山筒的渗透性角砾岩填充物中和火山筒周围的弧形断裂带中。

(9) 火山岩矿床。火山岩矿床存在于酸性火山岩的层状结合或结构结合体中，铀通常与钼、氟等伴生。

(10) 地面矿床。含铀地面矿床可以认为是含铀的沉积物，形成的年代比较年青，埋藏不深。铀矿床与称为钙质结砾岩的钙化沉积物有关，可能已经钙化到一定程度或尚未钙化。此类矿床铀沉积的环境是泥碳、沼泽和岩溶洞穴，或成土填充物和构造填充物。

(11) 交代矿床。交代矿床中的铀富集在受微斜长石花岗岩侵入的交代岩中。

(12) 变质矿床。变质铀矿床形成在沉积变质岩或准火山岩中，一般没有后变质矿化的直接证据。

(13) 褐煤。褐煤中的铀属于非常规铀资源，铀赋存在褐煤和直接临近褐煤的粘土或砂岩中。

(14) 黑色页岩矿床。在黑色页岩矿床中，铀和其它元素含量很低，此类矿床中的铀只作为铀的非常规资源。

(15) 其他类型矿床。其他类型矿床指不属于以上类型的铀矿床，例如：美国新墨西哥州格兰茨区的托迪尔托石灰岩矿床。

各种类型铀矿床的主要产地和代表性的矿石加工厂，见表 2-2<sup>[2,4]</sup>。八十年代，资本主义国家的铀产量中，30 % 来自不整合型矿床，30 % 来自石英卵石砾岩矿床，17 % 来自砂岩型矿床。近年来，随原地浸出技术的开发，从砂岩型矿床生产铀的比例增加。

表 2-2 铀矿床类型和代表性的矿石加工厂

铀 矿 床 类 型	主 要 产 地	代 表 性 的 矿 石 加 工 厂
不整合型矿床	加拿大萨斯喀彻温 澳大利亚北部	克拉夫湖、基湖、拉比特湖 兰格尔、纳巴利克*
砂岩矿床	美国西科迪勒拉 美国得克萨斯 美国内布拉斯加 尼日尔 法国（粉砂岩） 加蓬 匈牙利 巴基斯坦 阿根廷	怀特梅萨 罗西塔（地浸） 克劳比尤特（地浸） 库米纳克 洛代夫 穆纳纳
石英卵石砾岩矿床	加拿大埃利奥特湖 南非威特沃特斯兰特 巴西 印度	丹尼森、夸克、斯坦累* 布费尔斯枫丁、西里夫斯、哈特比斯枫丁
脉状矿床	加拿大西北部 加拿大萨斯喀彻温 法国 捷克斯洛伐克	镭锭港* 比弗洛基* 贝辛、埃卡尔皮埃尔*
角砾杂岩矿床	澳大利亚南部	奥林匹克丹

续表 2-2

铀矿床类型	主要产地	代表性的矿石加工厂
侵入岩矿床	纳米比亚 美国（斑岩铜矿） 南非 加拿大安大略	罗辛 宾厄姆坎尼恩、特温比尤特* 帕拉博拉 班克洛夫特*
磷灰岩矿床	美国佛罗里达 爱沙尼亚 北非和中东	弗里波特 锡利迈
筒状塌陷火成角砾岩矿床	美国亚里桑那	怀特梅萨
火山岩矿床	俄罗斯 巴西 加拿大米什兰 墨西哥奇瓦诺帕尔 秘鲁马库萨尼 中国	勒尔蒙托夫 波科斯德卡尔达斯
地面矿床（钙质结砾岩型）	澳大利亚西部 纳米比亚 索马利	伊利利
交代矿床	乌克兰克里沃罗格 澳大利亚昆士兰 巴西埃斯皮哈拉斯 美国阿拉斯加	热尔提沃斯 玛丽凯思林
变质矿床	奥地利福尔斯陶 加拿大萨斯喀彻温	
褐煤	俄罗斯 美国北达科他 瑞典（埃勒姆页岩） 希腊塞雷斯 哈萨克斯坦梅洛沃伊	明库奇、臣特纳亚、阿耳马累克 萨斯奎哈纳-韦斯顿
黑色页岩矿床	美国（查塔努加页岩） 中国 瑞典科隆 德国格拉-隆内堡	
其他类型矿床	美国新墨西哥 （托迪尔托石灰岩）	

\* 为已停产的铀矿加工厂

#### 2.1.2.2 按铀资源存在的可靠程度和资源回收的经济情况分类

勘探阶段是对铀矿床进行全面工业评价的决定性阶段，它是在普查和揭露评价阶段证实地下有铀矿体存在的前提下进行的。通过勘探工作查明铀矿床产出的地质条件，圈定矿体的形态和规模，探明矿石的铀品位和共生的其它成分，计算矿床的铀储量，勘查水文地质和矿山开采条件，了解铀矿石的加工性能，从而对铀矿床进行全面工业评价。

铀矿床储量是用金属铀或  $U_3O_8$  的数量表示的，其规模可以分为若干等级，各国的规



定很不一致。一般将金属铀储量大于 5000 t 的称为大型铀矿床, 1000 t ~ 5000 t 的称为中型铀矿床, 100 t ~ 1000 t 的称为小型铀矿床, 小于 100 t 的称为铀矿点。

矿床的铀储量和矿石的铀品位是评价铀矿床的主要指标。国际原子能机构 (IAEA) 和经济合作与发展组织 (OECD) 的核能机构 (NEA), 按铀资源存在的可靠程度和资源回收的经济情况, 对铀资源进行分类。

#### 2.1.2.2.1 按铀资源存在的可靠程度分类

按铀资源存在的可靠程度可以把铀资源分成已探明资源和未探明资源。

已探明资源分为: 已详细探明的可靠资源 (RAR) 和 I 级估增资源 (EAR-I)。未探明资源分为: II 级估增资源 (EAR-II) 和推测资源 (SR) <sup>[2.5]</sup>。

可靠资源 (RAR) 是指赋存于一定规模、品位和构造形态的已知矿床中的铀, 而且这些铀用现行通用的开采和加工技术, 在给定的生产成本范围内是可以回收的。矿床的铀储量和矿石的铀品位是根据专门的取样资料、矿体的测量数据和矿体特征进行计算的。可靠资源 (RAR) 有很高的可靠性, RAR 确定的计算储量和品位的误差不应超过 20 %。RAR 相当于加拿大和美国的测定资源+指示资源; 相当于法国的 I 级储量+II 级储量; 也相当于前苏联、东欧国家和中国的  $A_1 + A_2 + B + C_1$  级储量。

I 级估增资源 (EAR-I) 是指可靠资源以外的矿体延伸部分, 或根据直接的地质证据可以预期的赋存铀的矿体, 但是依据专门的取样资料、矿体的测量数据和对矿体特征的了解还不足以划为可靠资源的那些矿体。这类矿体可以圈定, 其中的铀可以在给定的生产成本范围内回收, 矿床的铀储量和矿石的铀品位是根据可能得到的取样数据, 并按该矿床中最可靠的矿体或类似矿床中已知矿体的矿体特征进行计算的。I 级估增资源 (EAR-I) 的可信度低于 RAR。EAR-I 级相当于加拿大和美国的推断资源; 相当于法国的 I 级和 II 级远景储量; 也相当于前苏联、东欧国家和中国的  $C_2$  级储量。

II 级估增资源 (EAR-II) 是指 I 级估增资源 (EAR-I) 以外, 已初步确定地质走向或矿化带的范围, 并确信有铀赋存的那些矿体。这类矿体可以被发现和圈定, 其中的铀可以在给定的生产成本范围内回收, 矿床的铀储量和矿石的铀品位主要是根据矿床的地质走向或矿化带内已知矿床的矿体特征, 以及尽可能得到的取样数据和地质的、地球物理的或地球化学的证据进行估算的。EAR-II 的可信度低于 EAR-I。EAR-II 级与加拿大、德国和美国的预测资源或假设资源相当; 也相当于前苏联、东欧国家的  $P_1$  级储量, 或中国的 D 级储量。EAR-II 未被澳大利亚采用。

推测资源 (SR) 是指 II 级估增资源 (EAR-II) 以外, 主要根据间接的证据和地质外推法认为可能用现有的勘探技术发现的那些铀矿体。设想中的这类矿体的位置通常限定在某一给定地区内或地质走向上。推测资源 (SR) 的存在和规模是高度推测性的。

只有已探明资源, 即: 可靠资源 (RAR) 和 I 级估增资源 (EAR-I) 才属于铀的可回收资源。

#### 2.1.2.2.2 按资源回收的经济情况分类

按照资源回收的经济情况对铀资源进行分类, 需要对指定的铀资源进行产品的成本估算。按成本分类只适用于可靠资源 (RAR) 和 I 级估增资源 (EAR-I)。而 II 级估增资源 (EAR-II) 和推测资源 (SR) 属于未探明资源, 无法按成本分类。

在对指定的铀资源进行产品的成本估算时，需要考虑以下各项费用<sup>[2.5]</sup>：

- (1) 开采、运输和加工铀矿石的直接费用。
  - (2) 与环境和废物管理有关的费用。
  - (3) 一切必要部位需要但不运行的生产设备的保养费用。
  - (4) 正在建设中的工程项目，尚未偿还的投资费用。
  - (5) 为一切必要部位提供新的生产设备的投资，包括筹备期间的费用。
  - (6) 上级管理单位的开支，税收和必要的矿山使用费等间接费用。
  - (7) 开采准备阶段需要进一步圈定矿体时的补充勘探费用和建设费用
- 通常不考虑沉没资本（指已经投入的费用，例如：勘探费用）。

自六十年代以来，OECD（NEA）和 IAEA 在连续出版的《红皮书》中把铀资源按成本分成低、中、高三类。不同类别的费用标准，几十年来不断被修订以反映流通领域中经济的变化情况。一般来说，按 1 kg U 计的费用（成本）可以把铀资源分为三类：小于 40 美元（低成本）；40 美元 ~ 80 美元（中等成本）；80 美元 ~ 130 美元（高成本）。

目前，全世界已探明的铀资源中，每 kg U 生产成本小于 130 美元的铀资源总量为 4.299 Mt，其中 RAR 为 3.22 Mt，EAR-I 为 1.079 Mt。每 kg U 生产成本小于 80 美元的铀资源总量为 3.085 Mt，其中 RAR 为 2.34 Mt，EAR-I 为 0.745 Mt。每 kg U 生产成本小于 40 美元的铀资源总量为 0.923 Mt，其中 RAR 为 0.666 Mt，EAR-I 为 0.257 Mt<sup>[2.6]</sup>。

从矿石中提取铀的成本与矿石的铀品位密切相关，用常规方法从矿石中提取每 kg U 的成本要小于 80 美元，则矿石的铀品位应当大于 0.1 %。一般把铀品位大于 0.3 % 的矿石称为富矿石，铀品位为 0.1 % ~ 0.3 % 的矿石称为中等矿石，铀品位为 0.05 % ~ 0.1 % 的矿石称为贫矿石。

### 2.1.3 世界铀资源状况

世界铀资源主要集中在澳大利亚、加拿大、中西非、纳米比亚、南非、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌克兰、乌兹别克斯坦和美国。

#### (1) 美国

美国的主要铀矿床分布在三个地区：① 怀俄明盆地，即：希尔利、鲍德河（Powder River）地区和加斯山；② 科罗拉多高原，即：尤拉文矿带、大印地安、拉古纳和安布罗西亚湖；③ 得克萨斯的墨西哥湾沿岸。科罗拉多高原包括：犹他州东南部、科罗拉多州西南部、亚利桑那州东北部和新墨西哥州西北部，面积超过 259000 km<sup>2</sup>。该地区的地形由侵蚀谷分开的台地组成。绝大部分铀矿体位于沉积地层中，存在于较浅的近乎水平层状的砂岩、泥岩和石灰岩中。铀矿物在围岩中以浸染状和孔隙充填状产出。在 250 m 的深度内的矿床铀储量占已知储量的 85 %，在 105 m 以内的占 55 %<sup>[2.7]</sup>。

砂岩、泥岩和石灰岩中的铀矿体形状是不规则的，有的近似板状体，从小矿囊到宽千米、厚 6 m ~ 7 m 的大矿体都有。矿床受构造特征的限制，常与碳质物的存在有关，并与硫化矿和碳酸盐矿伴生。大多数露头 and 近地表的矿床已被不同程度氧化，它们受到强烈的淋滤，只有在干旱和缺乏地下水的地区才得以存留。较稳定和不溶性的钒酸铀酰类矿物（钒钾铀矿和钙钒铀矿）是科罗拉多高原常见的铀矿物。砂岩中最重要的矿体是位于深部的黑色含碳未被氧化的铀矿物，包括：铜铀矿物、含钒矿物和少含或不含其它金属的单一黑色

铀矿物。新墨西哥州的格兰茨-拉古纳地区、怀俄明州的温德河（Wind River）盆地（加斯山）和希尔利盆地地区的主要矿床是少含或不含其它金属的单一黑色铀矿物。科罗拉多高原的许多未被氧化的铀矿物是含钒的，但是在还原状态下未形成铀钒配合物，黑山和鲍德河地区也有类似的矿物。铜铀矿物主要在犹他州东南部的怀特峡谷地区被发现。美国的铀矿床类型和主要铀矿物见表 2-3<sup>[2.7]</sup>。

表 2-3 美国的铀矿床类型和主要铀矿物

铀 矿 床 类 型	主 要 铀 矿 物	代 表 性 的 矿 床
脉状矿床	晶质铀矿、铜铀云母、钙铀云母、硅钙铀矿	科罗拉多州前岭、犹他州马里斯维尔区、华盛顿州斯波坎地区
含钒砂岩矿床	晶质铀矿、水硅铀矿	科罗拉多高原（科罗拉多、犹他、亚利桑那、新墨西哥各州）、南达科他州黑山地区、怀俄明州温德河盆地、犹他州大印地安冲积层
含铜砂岩矿床	晶质铀矿、铀的磷酸盐、钒酸盐、硫酸盐、碳酸盐和硅酸盐	犹他州怀特峡谷
沥青砂岩矿床	晶质铀矿、铀的碳氢化合物和钒钾铀矿	犹他州圣拉费尔斯威尔地区
其它砂岩矿床	晶质铀矿、水硅铀矿、铀的磷酸盐、砷酸盐、碳酸盐和硅酸盐	怀俄明州温德河盆地、新墨西哥州格兰茨-拉古纳地区
石灰岩矿床	晶质铀矿、钒钾铀矿、硅钙铀矿和钙钒铀矿	新墨西哥州格兰茨-拉古纳地区
磷盐岩矿床	碳酸盐-氟磷灰石	佛罗里达州中部、爱达荷州贝尔莱克地区、犹他州、怀俄明州和蒙大拿州西部
褐煤	铀的碳氢化合物和少数次生铀矿物	北达科他州和南达科他州西部、蒙大拿州东部
沥青页岩矿床	铀-碳氢化合物的配合物	田纳西州

脉状铀矿床的铀储量只占美国铀储量的 5 % 左右，分布于科罗拉多州、犹他州、亚利桑那州、蒙大拿州、内华达州、加利福尼亚州、华盛顿州、南达科他州、怀俄明州和俄勒冈州。大多数脉状铀矿床埋藏在火成岩和变质岩的裂缝和断层中，但是在亚利桑那州的沉积岩中也发现了角砾岩的管状矿体，在矿体中含有高品位的沥青铀矿和各种硫化矿，硫化矿中的铜可以回收。

科罗拉多州前岭地区的施瓦茨瓦尔德矿是一个典型的热液脉状矿床，沥青铀矿是该矿

的主要铀矿物，其厚度在矿脉中可能达到 2 m ~ 3 m， $U_3O_8$  的含量大于 60 %，共生矿物包括碳酸盐和大量硫化矿（主要是黄铁矿）。

犹他州马里斯维尔脉状矿床的矿石以共生大量萤石和石英为特征，并且含有铁的氧化物、铁和铜的硫化物、方铅矿、闪锌矿和辉钼矿，该矿床的上部蚀变成为铀的磷酸盐、硅酸盐和硫代硫酸盐。

$U_3O_8$  平均含量 0.3 % 的含铀褐煤产于北达科他州西南部和南达科他州的毗邻地区，其它含铀的碳氢化合物矿床也有发现，铀是以有机化合物形式存在的，钼、砷和铁在褐煤中经常与铀伴生。

某些海相磷盐岩和伴生物质中的铀主要分布在佛罗里达、爱达荷、蒙大拿、怀俄明和犹大等州。佛罗里达矿床的  $U_3O_8$  含量在 0.005 % ~ 0.03 % 的范围内，矿石中铀的含量随磷酸盐含量的增高而增高，但当  $CO_2$  的含量超过百分之几后铀含量反而降低。西部矿石的铀含量变化范围较大，铀与钙以类质同象形式存在于磷酸岩矿物中，并且铀以四价的价态存在，在磷钙土矿石中的铀只能作为提取磷酸盐的副产品回收。

## （2）加拿大

加拿大的主要铀矿分布在安大略省布兰德河-埃利奥特湖地区、萨斯喀彻温省比弗洛奇湖、安大略省班克罗夫特和西北地区的大熊湖。

埃利奥特湖地区曾是加拿大非常重要的铀矿区，有 12 个矿山和 11 个铀水冶厂在 1958 年开始生产，其中有三个厂一直到 1968 年仍在继续操作。该地区有三个重要的铀矿已经开采，一个位于布兰德河以东约 20 km 的地方，其他两个靠近埃利奥特湖和在夸克（Quirke）湖稍偏北的地方。所有这些矿床都很大，是均匀和连续的，铀存在于石英卵石砾岩和石英岩中。矿床中  $U_3O_8$  的平均品位为 0.10 % ~ 0.15 %，主要铀矿物有钛铀矿、晶质铀矿和独居石，呈显微颗粒存在于砾石的基质中，大多数矿石富含黄铁矿，也含有其它硫化矿。

班克罗夫特地区的矿石产于伟晶岩中，其矿石量和埋藏深度都很大， $U_3O_8$  的平均品位为 0.11 %，这对伟晶岩矿床来说是比较高的。典型的铀矿物为晶质铀矿和铀钍矿，它们常与少量赤铁矿和大量铁镁矿物伴生，在铀的高品位地段含有磁铁矿。某些钛矿物和锆矿物是与萤石、方解石和硫化矿伴生的。

在比弗洛奇湖和许多其它地区发现了沥青铀矿脉状矿床，矿化是很复杂的，有些矿脉中金属矿物多达 40 种，铀含量变化很大。有一些铀品位很高的矿脉， $U_3O_8$  平均品位 0.2 % ~ 0.5 %，方解石是常见的脉石矿物。

## （3）澳大利亚

在北部达尔文附近的鲁母江格尔和南阿利盖特地区的矿石，由碳质板岩中的细粒沥青铀矿和一些次生矿物组成。有的矿床以次生的磷酸铀酰镁-镁磷铀云母为主，也有的矿床含铜，可以综合回收。

在芒特艾萨附近的马里凯思林矿床的昆士兰矿石由富含石榴石的岩石组成，所含微细粒度的沥青铀矿存在于褐帘石中，附近的其它矿石是以花岗岩中的铀钛磁铁矿和钛铀矿的复杂氧化物形式存在的。安德逊矿脉的矿石含有一种在蚀变钙质砂岩中未被确定的极细小的铀矿物，该矿石是很难处理的。同样，含有铀钛磁铁矿和钛铀矿的复杂而耐高温的铁钛矿脉曾在南澳大利亚省镭山开采和处理过，加工困难而且费用昂贵。

#### (4) 非洲

非洲大陆的铀矿床，主要分布在南非、扎伊尔、尼日尔、纳米比亚、加蓬、马达加斯加和中非共和国。

南非的铀多数是从约翰内斯堡西部和西南部（距离在 240 km 以内）的含金矿石中提取的。铀是作为从砾岩矿石中生产金的副产品而回收的，该砾岩矿石在地质上与加拿大埃利奥特湖地区的砾岩有些相似。铀矿物有晶质铀矿、沥青铀矿和碳铀铀矿，与相当大量的黄铁矿伴生。虽然 1967 年估计南非铀的可靠储量达 205 kt，但是矿石的  $U_3O_8$  平均品位只有 0.03 %，因此只能作为生产金的副产品回收，否则经济上是不合算的。

扎伊尔曾有约 6000 t 的铀储量，但自六十年代以来，已不是非洲的重要产铀国。扎伊尔加丹加省的欣科洛布韦矿，为原子能工业的最初规划提供了大量的富沥青铀矿，高品位矿石可以手选富集，得到含铀 50 % ~ 70 % 的产品。欣科洛布韦矿属于典型的镍-钴-自然银类型，与加拿大的大熊湖矿类似，该矿床有许多共生元素，曾从该矿床鉴定了 67 种铀矿物，其中有 30 种是首先在这里被鉴定出来的。

尼日尔的铀资源位于 Agadez 地区，建成了 Arlit 和 Akouta 两个铀矿，铀的可靠资源（RAR）超过 182.2 kt<sup>[2.8]</sup>。

#### (5) 欧洲

欧洲发现的第一个铀矿位于捷克埃尔茨山地区的约阿希姆斯塔尔，该矿曾作为铅、银和其它金属的资源被开采，开采后的矿石残渣中含有沥青铀矿，1898 年居里夫妇从矿石残渣中第一次分离出镭，从 1906 年起该矿就进行了镭的生产。

俄罗斯的已探明铀储量为 376.7 kt<sup>[2.9]</sup>，占前苏联已探明铀总储量的 27 %，主要分布在奥涅加湖的斯特列措夫地区，有 15 个铀矿床，其中斯列得纳亚帕得马矿是铀-钒矿床，矿石中含有金、铂、钼、铜和钨，主要铀矿物是沥青铀矿，矿石铀品位为 0.005 % ~ 0.21 %（平均 0.064 %），矿化产生在元古代粉砂岩和片岩上的钠长石-云母-碳酸盐交代岩中，碳酸盐含量 6 % ~ 44 %（平均 21 %）。

乌克兰的第聂伯尔-顿涅茨洼地有大量含铀粘土、含铀煤质粉砂岩和含铀褐煤，已探明的铀储量为 356.2 kt<sup>[2.9]</sup>。俄罗斯和乌克兰的铀资源，见表 2-4<sup>[2.9]</sup>。

表 2-4 俄罗斯和乌克兰的铀（ $U_3O_8$ ）资源

国 家	储量级别	每 kg U 生产成本 / 美元			合计 / kt
		<80	80 ~ 120	>120	
俄罗斯	$A_1 + A_2 + B + C_1$	146.1	88.5	8.5	243.1
	$C_2 + P_1$	100.3	26.2	7.1	133.6
	$P_2 + P_3$	59.1	118.2	354.5	531.8
	合计 / kt	305.5	232.9	370.1	908.5
乌克兰	$A_1 + A_2 + B + C_1$	85.3	48.5	0	133.8
	$C_2 + P_1$	87.1	135.3	0	222.4
	$P_2 + P_3$	118.2	82.7	0	200.9
	合计 / kt	290.6	266.5	0	557.1

法国的铀资源在法国中部的拉克鲁齐伊、福雷和南特东北靠近大西洋沿岸的旺代。法国大多数铀矿床属于热液型脉状矿床，矿石中  $U_3O_8$  平均品位约 0.15 %，在矿石中沥青铀矿与萤石和石英脉石中的硫化矿共生，次生铀矿物包括钙铀云母和铜铀云母。在奥弗涅的拉肖地区曾发现含磷酸铀酰铅-斜磷铅铀矿的矿床，在孚日地区还发现了含铀碳质片岩。

1993 年，法国核材料总公司（Cogema）收购了矿业总公司（Total Compagnie Minière）的 Bernardan 矿，该矿是目前法国境内唯一仍在生产的铀矿山和水冶厂，共有五个主要铀矿床，截止 1992 年底探明的铀储量为 8407 t，铀的平均品位为 0.5 %，从 1986 年以来已经生产铀 3430 t。

西班牙和葡萄牙有一些较大的含沥青铀矿的脉状矿床，它们属于低温热液类型，含有石英和一些硫化矿。西班牙有低品位的含铀褐煤和其它沉积矿床，也有伟晶岩类型的铀矿床。葡萄牙也发现一些含铀页岩。

在瑞典的西约特兰和纳克地区有一个很大的含  $U_3O_8$  为 0.02 % ~ 0.03 % 的明矾页岩矿床，明矾页岩是细粒状的，其中含有沥青质（油母岩）、石英、长石、高岭石、黄铁矿和方解石。称为“柯姆煤”（kolm）的煤状物质（ $U_3O_8$  含量可达 0.2 % ~ 0.4 %）呈扁豆状矿体分布在页岩层中，这种页岩中  $U_3O_8$  的储量达到 350 kt。

#### （6）亚洲

亚洲铀资源主要分布在哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、中国、印度、日本和南朝鲜。

乌兹别克斯坦的塔什干是前苏联最早发现铀矿床的地区。乌兹别克斯坦已探明的铀储量为 330.5 kt，见表 2-5<sup>[2,9]</sup>。

哈萨克斯坦已探明的铀储量为 325.1 kt，见表 2-5<sup>[2,9]</sup>。砂岩型铀矿床主要在楚-萨雷苏和锡尔河两个洼地。楚-萨雷苏地区以单铀矿床和铀-钼矿床为主，锡尔河地区以铀-钼矿床为主。哈萨克斯坦的砂岩矿床所含铀的品位为 0.035 % ~ 0.07 %，矿体的厚度为 3.5 m ~ 7.5 m，面积含矿性好（平均 3 kg/m<sup>2</sup> ~ 7.5 kg/m<sup>2</sup>），铀矿化以细分散沥青铀矿和铀石集中于含矿砂体的孔隙状粉砂粘土质充填物中，含矿砂体的透水性较好（渗透系数为 5 m/d ~ 10 m/d），隔水层稳定。因此，哈萨克斯坦的砂岩型铀矿床适合原地浸出。

表 2-5 哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦的铀（ $U_3O_8$ ）资源

国 家	储量级别	每 kg U 生产成本 / 美元			合计 / kt
		<80	80 ~ 120	>120	
哈萨克斯坦	$A_1 + A_2 + B + C_1$	106.7	112.5	0	219.2
	$C_2 + P_1$	70.0	35.9	0	105.9
	$P_2 + P_3$	59.1	82.7	0	141.8
	合计 / kt	235.8	231.1	0	466.9
乌兹别克斯坦	$A_1 + A_2 + B + C_1$	183.9	11.5	0	195.4
	$C_2 + P_1$	125.3	9.8	0	135.1
	$P_2 + P_3$	0	70.9	0	70.9
	合计 / kt	309.2	92.2	0	401.4

在印度，铀主要存在于独居石中，作为生产钚的副产品被回收，也有一些低品位的铜铀矿，已探明的铀储量约为 62700 t<sup>[2.8]</sup>。

日本只有一个铀矿床（Ningyo-Toge），建立了一个从矿石直接生产 UF<sub>4</sub> 的铀水冶厂。

中国的铀资源占世界铀资源的 4 % ~ 7 %<sup>[2.6]</sup>，勘探程度不够高，只有 1/3 属于可靠资源（RAR）。分布在七个主要成矿区域（见图 2-1）<sup>[2.10]</sup>：东南部成矿区（包括：浙江、江西、湖南、广东等省和广西壮族自治区）；东北部阴山-辽河成矿区（内蒙古自治区、辽宁省和河北省北部）；中部的祁连-秦岭成矿区（包括：甘肃、陕西、河南和河北等省）；西北部的准噶尔-天山成矿区（新疆维吾尔自治区）；广西壮族自治区南部的靖南成矿区；西南部的滇西成矿区（云南省）和黔西南成矿区（贵州省）。虽然在全国有 23 个省（自治区）都发现了铀矿床，但是东南部成矿区是中国最重要铀资源地区，其中江西、湖南、广东和广西四省（自治区）的铀储量占全国已探明铀储量的 74 %<sup>[2.3]</sup>。位于中国北部的阴山-辽河成矿区、祁连-秦岭成矿区和准噶尔-天山成矿区将是中国未来的铀生产中心。



SC 东南部成矿区，YS-L 阴山-辽河成矿区，Q-Q 祁连-秦岭成矿区  
Z-TS 准噶尔-天山成矿区，J 靖南成矿区，WY 滇西成矿区，SG 黔西南成矿区

图 2.1 中国铀资源分布图

中国的铀矿床主要有四种类型：花岗岩型铀矿床、火山岩型铀矿床、砂岩型铀矿床和

碳硅泥岩型铀矿床（IAEA 称为“层状结构型铀矿床”），这四种类型铀矿床的铀储量占全国铀总储量的 92 %<sup>[2.3]</sup>。其它类型的铀矿床包括：交代岩、侵入岩（碱性正长岩、伟晶花岗岩）、硅角砾岩、褐煤、磷灰岩和碳酸盐基的矿化物。

花岗岩型铀矿床（以脉状存在于花岗岩内或花岗岩周边）主要存在于东南部成矿区南岭（诸广山、九连山）的成矿带中，在陕西省西安地区、北秦岭褶皱带和江苏省的长江下游花岗岩带中都有发现。花岗岩型铀矿床的铀储量占全国铀总储量的 35.93 %<sup>[2.3]</sup>。

火山岩型铀矿床（脉状或层状）主要存在于东南部成矿区东部（浙江和福建省），尤其是赣-杭火山岩带，其次是江西省相山地区和广东省北部的火山岩-花岗岩带，也存在于准噶尔-天山成矿区和河北省北部青龙地区的大兴安岭-燕山火山岩带。火山岩型铀矿床的铀储量占全国铀总储量的 19.9 %<sup>[2.3]</sup>。

砂岩型铀矿床主要分布于西北部的新疆维吾尔自治区的伊犁盆地、喀什洼地和北祁连褶皱带；东北部的建昌、青龙和内蒙古自治区的狼山地区；华中的武当-淮阳中型地台和北秦岭褶皱带；云南省西部的保山中型地台；华南的靖南成矿区等。砂岩型铀矿床的铀储量占全国铀总储量的 21.3 %<sup>[2.3]</sup>。

在广西壮族自治区的铲子坪和川甘边境的若尔盖地区发现的碳硅泥岩型铀矿床，是中国特有的铀矿床类型<sup>[2.11]</sup>。铀矿床是由浸染取代特征为主的层状界面结构控制的铀矿化形成的，这种矿化被限制在特殊的沉积岩或轻微变质沉积岩蚀变的裂缝带中，这种沉积岩主要由富集在含碳物质中的含硅碳酸盐和泥质岩支配相组成的。这种类型的铀矿床主要分布于东南部成矿区的西部成矿带（包括：广西壮族自治区和湖南、江西等省）；西南部的贵州成矿区；西北部的准噶尔-天山成矿区；华中的北仑江复背斜层和南秦岭褶皱带。碳硅泥岩型铀矿床的铀储量占全国铀总储量的 14.81 %<sup>[2.3]</sup>。

在东北部的连山关-辽东地块和河北省北部发现了交代岩铀矿床。在辽东地块也发现了侵入岩铀矿床（位于赛马的霞石-正长岩复合物）。在龙首山东部和北祁连褶皱带还存在其它类型的铀矿床。

中国已发现的铀矿床数量超过 200 个，但是 70 % 矿床铀储量小于 1000 t，最大矿床的铀储量为 5000 t~6000 t。80 % 铀矿床中铀的品位小于 0.2 %，大于 0.3 % 的高品位矿石仅占 7 %，50 % 铀矿床埋藏深度在 300 m 以下<sup>[2.6]</sup>。

## 2.2 铀矿物

铀矿床中的铀是以铀矿物、含铀矿物（类质同象）和被围岩吸附的形式存在的。目前已知的铀矿物和含铀矿物约有 500 种，其中矿物组成稳定、铀含量确定和物化性质确定的铀矿物超过 150 种，见表 2-6<sup>[2.12]</sup>。

### 2.2.1 铀矿物的分类

#### 2.2.1.1 铀矿物的存在形式

##### 2.2.1.1.1 单一铀矿物

单一铀矿物是指具有一定化学组成的铀化合物，因此它们的含铀率比较高。例如：晶质铀矿、沥青铀矿、氢钙铀云母、铜铀云母、铁铀云母、水铀矿、柱铀矿、菱铀矿、硅铀矿、红铀矿、磷铀矿、水碳酸钙铀矿、土水铀矿、黄钾铀矿、板铅铀矿、深黄铀矿、水碲铀矿、钡磷铀石、黄硅钾铀矿、钒钾铀矿、硅铜铀矿等。



表 2-6 主要的铀矿物和含铀矿物

矿 物 名 称	矿 物 组 成	含铀率/ % <sup>(a)</sup>	比重 /(g/cm <sup>3</sup> )
水铀钾铀矿 <sup>-</sup> Abernathyite	$K_2(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 6H_2O$	45.8	3.7
易解石 Aeschynite	$(Ce, Ca, Fe^{2+}, Th)(Ti, Nb)_2(O, OH)_6$	~ 2.5	5.2
水钠钙铀矿 <sup>-</sup> Andersonite	$Na_2Ca(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 6H_2O$	39.2	2.8
磷灰石 Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(F, OH, Cl)$	0.01 ~ 0.08	3.1 ~ 3.2
水铀铈矿 <sup>-</sup> Arsenuranylite	$Ca(UO_2)_4(AsO_4)_2(OH)_4 \cdot 6H_2O$	58.3	
钙铀云母 Autunite	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10 \sim 12H_2O$	48.3 ~ 50.1	3.05 ~ 3.2
钡硅钙铀矿 <sup>-</sup> Barium Uranophane	Ba, U, Si 及少量 Mo, Al, Ca		
铁铀云母 Bassetite	$Fe(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	51.0	3.1 ~ 3.4
菱镁铀矿 Bayleyite	$Mg_2(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 18H_2O$	28.9	2.05
深黄铀矿 Becquerelite	$7UO_3 \cdot 11H_2O$	75.7	5.1 ~ 5.6
钡磷铀石 Bergenite	$Ba(UO_2)_4(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 8H_2O$	58.8	
铈钛铀矿 <sup>-</sup> Betafite	$A_{2-x}B_2O_6(O, OH_x)^{(b)}$	15 ~ 24.5	3.7 ~ 4.9
$\beta$ -硅钙铀矿 <sup>-</sup> Beta-Uranophane	$Ca(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$	55.6	3.9
黑硅钙铀矿 Bilibinitite	$3(Ca, Pb)O(U, Th)O_2 \cdot 7UO_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 19H_2O$	42.7	
黄钡铀矿 <sup>-</sup> Billietite	$BaO \cdot 6UO_3 \cdot 11H_2O$ 或 $BaU_6O_{16}(OH)_{16} \cdot 8H_2O$	68.8	5.3 ~ 5.4
硅钾铀矿 <sup>-</sup> Boltwoodite	$K_2(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$	58.2	3.1
钛铀矿 <sup>-</sup> Brannerite	$AB_2O_6^{(c)}$	26.5 ~ 43.6	4.2 ~ 5.4
钙铈钇矿 <sup>-</sup> Calciosamaraskite	$(Ca, Y, Ce, U, Th)_3(Nb, Ta, Fe, Ti, Sn)_5O_{15}$	9.4 ~ 11.3	4.5 ~ 4.7
水钙铀钼矿 <sup>-</sup> Calcurmolite	$Ca(UO_2)_3(MoO_4)_3(OH)_2 \cdot 11H_2O$	39.4	
钒钾铀矿 <sup>-</sup> Carnotite	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	52.8 ~ 55.0	4.7
铈磷硅钍石 Cerphosphorhuttonite	$(Th, Ce)(Si, P)O_4 \cdot 1.5H_2O$	1.4	
富钍独居石 Cheralite	$AXO_4^{(d)}$	3.5 ~ 5.5	5.3
硅钛铈矿 <sup>-</sup> Chevkinite	$(Ce, Y, Ca, U, Th)_2(Ti, Fe, Mg)_2(Si, Al)_2O_{11}$	~ 2.3	4.5
水钠铀矿 <sup>-</sup> Clarkeite	$(Na, Ca, Pb, Th, H_2O)_2U_2(O, H_2O)_7$	64.2 ~ 68.0	6.3 ~ 6.4
多水铁硫磷铀矿 <sup>-</sup> (铀石) Coconinoite	$Fe_2^{3+}Al_2(UO_2)_2(PO_4)_4(SO_4)(OH)_2 \cdot 20H_2O$	28.5 ~ 29.0	
水硅铀矿 <sup>-</sup> Coffinite	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	40.9 ~ 60.9	2.2 ~ 5.1
黄钾铀矿 <sup>-</sup> Compreignacite	$K_2O \cdot 6UO_3 \cdot 11H_2O$	71.0	
镁钼铀矿 <sup>-</sup> Cousinitite	$MgO \cdot 2MoO_3 \cdot 2UO_2 \cdot 6H_2O$	48.8	
纤磷钙铝石 Crandallite	$CaAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$	~ 0.06	

续表 2-6

矿 物 名 称	矿 物 组 成	含铀率/ % <sup>(a)</sup>	比重 /(g/cm <sup>3</sup> )
硅铜铀矿 Cuprosklodowskite	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	54.1	3.5
板铅铀矿 Curite	$3\text{PbO} \cdot 8\text{UO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	61.8 ~ 62.6	7.2 ~ 7.4
铀钛磁铁矿 Davidite	$\text{A}_6\text{B}_{15}(\text{O}, \text{OH})_{36}$ <sup>(e)</sup>	~ 4.4	4.5
铅铜硒铀矿 Demesmaeckerite	$\text{Pb}_2\text{Cu}_5(\text{UO}_2)_2(\text{SeO}_3)_6(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	22.5	
磷铅铀矿 Dewindtite	$\text{Pb}_3(\text{UO}_2)_5(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} (?)$	49.5	4.1 ~ 5
水磷铀铅矿 Dumontite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	46.5	
硅钙铁铀钍矿 Ekanite	$(\text{Th}, \text{U})(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Pb})_2\text{Si}_8\text{O}_{20}$	1.8	
黑稀金矿 Euxenite	$(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$	0.6 ~ 12.45	4.8 ~ 5.9
水钒铀矿 Ferghanite	可能为 $(\text{UO}_2)_3(\text{VO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	62.2 ~ 67.9	3.3
褐钒铀矿 Fergusonite	$(\text{Y}, \text{Er}, \text{Ce}, \text{Fe})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})\text{O}_4$	0.8 ~ 7.2	5.6 ~ 5.8
萤石 Fluorite	$\text{CaF}_2$ (U 取代 Ca)		3 ~ 3.6
黄钒钼矿 Formanite	$(\text{Y}, \text{U}, \text{Th}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})\text{O}_4$	1.1	5.7
红铀矿 Fourmarierite	$\text{PbO} \cdot 4\text{UO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	64.6 ~ 65.3	5.7 ~ 6.0
黄钒铀钒铅矿 Francevillite	$(\text{Ba}, \text{Pb})(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	45.8	
磷锰铀矿 Fritzscheite	$\text{Mn}(\text{UO}_2)_2[(\text{P}, \text{V})\text{O}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O} (?)$		3.5 (?)
硒钒铀矿 Guilleminite	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_4(\text{SeO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	53.8	
脂铅铀矿 Gummite	属于晶质铀矿变化产物类		
水硅钙铀矿 Haiweeite	$\text{CaO} \cdot 2\text{UO}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	52.8	
斜铀钒矿 Hallimondite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)(\text{AsO}_4)_2$	28.1	
铀钒矿 Heinrichite	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10 \sim 12\text{H}_2\text{O}$	40.7 ~ 41.9	4.1
钙铀钒矿 Hielmite	$\text{AB}_2\text{O}_6$ 或 $\text{A}_2\text{B}_3\text{O}_{10}$ <sup>(f)</sup>	4.0 ~ 4.3	5.2 ~ 5.8
铀钒铅矿 Hugelite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$		5
氢钙铀云母 Hydrogen Autunite	$\text{H}_2(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \sim 10\text{H}_2\text{O}$	51.7 ~ 54.3	
水铀矿 Ianthinite	$\text{UO}_2 \cdot 5\text{UO}_3 \cdot 10 \sim 11\text{H}_2\text{O}$	75.6	
黄钼铀矿 Iriginite	$\text{UO}_3 \cdot 2\text{MoO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{U}(\text{MoO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	38.7	3.8
铀钒铁铀矿 (石川石) Ishikawaite	$(\text{U}, \text{Fe}, \text{Y}, \text{Ce})(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_4$	19.3	6.2 ~ 6.4
铀铜钒 Johannite	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50.8	3.3
黄铀钒铁矿 Kahlerite	$\text{Fe}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	46.8	
硅铅铀矿 Kasolite	$\text{Pb}(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$	40.5	6 ~ 6.5

续表 2-6

矿 物 名 称	矿 物 组 成	含铀率/ % <sup>(a)</sup>	比重 /(g/cm <sup>3</sup> )
铀铌铁铀矿 <sup>+</sup> Khlopinite	(Y, U <sup>4+</sup> , Th) <sub>3</sub> (Nb, Ta, Ti, Fe) <sub>7</sub> O <sub>20</sub> (?)	7.2	5.2
水磷钍铀矿 <sup>+</sup> Kivuite	(Th, Ca, Pb)H <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>8</sub> • 7H <sub>2</sub> O	52.3	
铀稀金矿 <sup>+</sup> Kobeite	可能为 AB <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub> <sup>(g)</sup>	8.4 ~ 10.7	
铀煤 Kolm	类似于油页岩的物质	0.43	
水铀铀磷钙石 Lermontovite	(U, Ca, RE) <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> • 6H <sub>2</sub> O <sup>(h)</sup>	44.3	4.5
铀钙石 Liebigite Mackelveyite	Ca <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> )(CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> • 10H <sub>2</sub> O 近似 Na <sub>2</sub> Ba <sub>4</sub> Ca(Y, U) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>9</sub> • 5H <sub>2</sub> O	33.5 3.9	2.4
水铀铅矿 <sup>+</sup> Masuyite	UO <sub>3</sub> • 2H <sub>2</sub> O	73.9	5.1
准钾铀云母 Meta-Ankoleite	K <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 6H <sub>2</sub> O	49.6 ~ 50.6	
准钙铀云母 I Meta-Autunite I	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 2 ~ 6H <sub>2</sub> O	53 ~ 59	3.4 ~ 3.6
准水硅钙铀矿 <sup>+</sup> Metahaiweeite	CaO • 2UO <sub>3</sub> • 6SiO <sub>2</sub> • nH <sub>2</sub> O (n < 5)		
准砷铀钡矿 <sup>+</sup> Metaheinrichite	Ba(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 8H <sub>2</sub> O	43.3	
准砷铀绿矿 <sup>+</sup> Metakahlerite	Fe(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 8H <sub>2</sub> O (?)	45.7	
准砷钴铀矿 <sup>+</sup> Metakirchheimerite	Co(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 8H <sub>2</sub> O	46.6	
准砷镁铀云母 Metanovacekite	Mg(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 4H <sub>2</sub> O	52.1	
准镁铀云母 Metasaleeite	Mg(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 4H <sub>2</sub> O (?)	65.1	3.3
准铜铀云母 Metatorbernite	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • nH <sub>2</sub> O	50.8 ~ 55.0	3.5 ~ 3.8
准钙钒铀矿 <sup>+</sup> Metatyuyamunite	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 3 ~ 5H <sub>2</sub> O	52.9 ~ 55.1	3.8 ~ 3.9
准钡铀云母 Meta-Uranocircite	Ba(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 8H <sub>2</sub> O	47.1	
准砷钙铀矿 <sup>+</sup> Meta-Uranospinite	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 8H <sub>2</sub> O	46.4	
准菱钙铀矿 <sup>+</sup> Metazellerite	Ca(UO <sub>2</sub> )(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> • 3H <sub>2</sub> O	49.2	
准翠砷铜铀矿 <sup>+</sup> Metazeunerite	Cu(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> • 8H <sub>2</sub> O	46.4	3.3 ~ 3.6
细晶石 Microlite	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (O, OH, F) <sup>(i)</sup>	~ 10.4	4.2 ~ 6.4
铅铀碲矿 <sup>+</sup> Moctezumite	PbO • UO <sub>3</sub> • 2TeO <sub>2</sub>	24.2	
黑钼铀矿 <sup>+</sup> Moluranite	PbO • 3UO <sub>3</sub> • 7MoO <sub>3</sub> • 20H <sub>2</sub> O	36	

续表 2-6

矿 物 名 称	矿 物 组 成	含铀率/ % <sup>(a)</sup>	比重 (g/cm <sup>3</sup> )
紫铝铀矿 Mourite	四、六价铀的含水铝酸盐	18.5	
钠铀云母 Natroautunite	$\text{Na}_2(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	46.7	4
硅铀钙镁矿 Nenadkevite	$(\text{U}^{4+}, \text{Y}, \text{Ce})\text{U}^{6+}(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Pb})(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	19.2 ~ 55.0	3.6 ~ 4.8
人形石 Ningyoite	$(\text{U}^{4+}, \text{Ca}, \text{RE})_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 1 \sim 2\text{H}_2\text{O}^{(\text{h})}$	20.4	
水铈镁矿 Novacekite	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8 \sim 10\text{H}_2\text{O}$	51.6 ~ 53.7	3.2 ~ 3.7
钇铀烧绿石 Obruchevite	$(\text{Y}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{U})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti}, \text{Fe})_2(\text{O}, \text{OH})_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	8.1 ~ 10.9	4.6 ~ 4.8
蛋白石 Opal	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	0.05 ~ 0.9	1.9 ~ 2.3
水硅铀铅矿 Orlite	$3\text{PbO} \cdot 3\text{UO}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	38.1	5.3
准沥青铀矿 Parapitchblende	铀氧化物。六价铀为主, 少量四价铀		
斜磷铅铀矿 Parsonite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2$	24.7 ~ 28.8	5.4 ~ 5.7
砷铝铀云母 Paulite	$\text{Hal}(\text{UO}_2)_4(\text{AsO}_4)_4 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$		
磷铀矿 Phosphuranylite	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_4(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	63.3	2.7 ~ 4.1
沥青铀矿 Pitchblende	晶质铀矿的胶状、细粒变种		
复稀金矿 Polycrase	$(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	5.5 ~ 12.4	5 ~ 5.9
钇易解石 Priorite	$(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Er}, \text{Fe}^{2+}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6$	0.4 ~ 3.4	4.8 ~ 5.0
水磷铀铅矿 Przhevalskite	$\text{Pb}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	48.9	
假钙铀云母 Pseudo-Autunite	$(\text{H}_3\text{O})_2\text{Ca}(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$	44.2	
烧绿石 Pyrochlore	$\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})^{(\text{j})}$	1.4 ~ 17.1	4.2 ~ 6.4
针钙铀矿 Rabbittite	$\text{Ca}_3\text{Mg}_3(\text{UO}_2)_2(\text{CO}_3)_6(\text{OH})_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	31.1	2.6
水钙钒铀矿 Rauvite	$\text{CaO} \cdot 2\text{UO}_3 \cdot 5\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 16\text{H}_2\text{O} (?)$	26.1	2.9
黄磷铅铀矿 Renardite	$\text{Pb}(\text{UO}_2)_4(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	57.3	4 ~ 4.4
水板铅铀矿 Richetite	含铅和铀		
菱铀矿 Rutherfordine	$(\text{UO}_2)\text{CO}_3$	72.1	4.8 ~ 5.7
铝钙铀云母 Sabugalite	$\text{Hal}(\text{UO}_2)_4(\text{PO}_4)_4 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	53.6	3.2
镁磷铀云母 Saleeite	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \sim 10\text{H}_2\text{O}$	50.9 ~ 53.0	3.3
铈钇矿 Samarskite	$(\text{Y}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Pb}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Te}, \text{Ti}, \text{Sn})_2\text{O}_6$	8.4 ~ 16.6	5.6 ~ 5.8
柱铀矿 Schoepite	$\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	71.9	4.8
板菱铀矿 Schroëckingerite	$\text{NaCa}_3(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3(\text{SO}_4)\text{F} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	26.8	2.5
褐钼铀矿 Sedovite	$\text{U}(\text{MoO}_4)_2 (?)$	36	
水钒铜铀矿 Sengierite	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 8 \sim 10\text{H}_2\text{O}$	47.0 ~ 48.7	4.4
水菱铀矿 Sharpite	$(\text{UO}_2)(\text{CO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或 $6\text{UO}_3 \cdot 5\text{CO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	68.4 ~ 68.6	3.3
震旦矿 Sinicite	可能为 $\text{AB}_2(\text{O}, \text{OH})_7^{(\text{k})}$	5.0 ~ 5.7	
硅铀矿 Sklodowskite	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	56.6	3.5 ~ 3.8

续表 2-6

矿 物 名 称	矿 物 组 成	含铀率/ % <sup>(a)</sup>	比重 /(g/cm <sup>3</sup> )
硅铀矿 Soddyite	$(\text{UO}_2)_5(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	71.8	4.6 ~ 4.7
钠铀钙铀矿 Sodium Uranospinite	$(\text{Na}_2, \text{Ca})(\text{UO}_2)_2[(\text{As}, \text{P})\text{O}_4]_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48.5	
菱黑稀土矿 Steenstrupine	$(\text{Ca}, \text{La}, \text{Th}, \text{Ce}, \text{Na})_2(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	~ 0.18	3.4
水丝铀矿 Studtite	U 和 Pb 的水合碳酸盐		7
水钙镁铀矿 Swartzite	$\text{CaMg}(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	32.6	2.3
方钍石 Thorianite	$(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$	~ 44.6	9.3 ~ 9.8
钍石 Thorite	$\text{ThSiO}_4$	~ 10.1	4.3 ~ 5.4
钍脂铅铀矿 Thorogummite	$\text{Th}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$	2.5 ~ 31.4	3.2 ~ 5.4
钍钍矿 Thorutite	$(\text{Th}, \text{Ca}, \text{U})\text{Ti}_2(\text{O}, \text{OH})_6$	2.2	
碳铀钍矿 Thucholite	晶质铀矿和碳氢化合物的络合物	~ 53(在灰中)	1.8
铜铀云母 Torbernite	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	47.1	3.2
砷铀矿 Troegerite	$\text{H}_2(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	55.1	3.3
钙钒铀矿 Tyuyamunite	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 5 \sim 8\text{H}_2\text{O}$	49.4 ~ 54.1	3.3 ~ 4.3
菱钼铀矿(钼铀矿) Umohoite	$(\text{UO}_2)(\text{MoO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O} (?)$	47.4	4.6 ~ 4.7
铀铵磷石 Uramphite	$(\text{NH}_4)(\text{UO}_2)(\text{PO}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	54.5	3.7
晶质铀矿 Uraninite	$(\text{U}_{1-x}^{4+}, \text{U}_x^{6+})\text{O}_{2+x}$ (理想的为 $\text{UO}_2$ )	46.5 ~ 88.2	7.5 ~ 10.9
铀华 Uranocher	属于铀的硫酸盐类		
硅钙铀矿 Uranophane	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	55.6	3.7 ~ 4
铀钙钒 Uranopilite	$(\text{UO}_2)_6(\text{SO}_4)(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	67.9	2.5
水磷铀矿 Uranospathite	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O} (?)$	46.0 (?)	2.5
纤铀铋矿 Uranosphaerite	$\text{BiUO}_4(\text{OH})$	45.1	6.4
砷钙铀矿 Uranospinite	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	45.9	3.5 ~ 3.8
铀钍矿 Uranothorite	$(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2 \cdot \text{SiO}_2$		
土水铀矿 Urgite	$\text{UO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	58.9 ~ 59.2	
水钙镁铀石 Ursilite	$2(\text{Ca}, \text{Mg})0.2\text{UO}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 9 \sim 10\text{H}_2\text{O}$	41.4 ~ 42.1	3 ~ 3.3
钒铀矿 Uvanite	$\text{U}_2\text{V}_6\text{O}_{21} \cdot 15\text{H}_2\text{O} (?)$	34.3 (?)	
绿铀矿 Vandenbrandeite	$\text{CuUO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	59.3	4.9 ~ 5
橙水铀铅矿 Vandendriesscheite	$\text{PbO} \cdot 7\text{UO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O} (?)$	68.3	4.6 ~ 5.6
钒铀铝矿 Vanuralite	$(\text{UO}_2)_2\text{Al}(\text{VO}_4)_2(\text{OH}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	50.0	
低钒铀矿 Vanuranylite	$[(\text{H}_3\text{O})_{1.2}(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{K}, \text{Pb})_{0.4}](\text{UO}_2)(\text{VO}_4)_2 \cdot 4.2\text{H}_2\text{O}$	48.5	
铜菱铀矿 Voglite	$\text{Ca}_2\text{Cu}(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	31.3	
砷铀铋矿 Walpurgite	$\text{Bi}_4(\text{UO}_2)(\text{AsO}_4)_2 \text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	15.9	5.8 ~ 6

续表 2-6

矿 物 名 称	矿 物 组 成	含铀率/ % <sup>(a)</sup>	比重 /(g/cm <sup>3</sup> )
高硅铀矿 Weeksite	$K_2(UO_2)_2(Si_2O_5)_3 \cdot 4H_2O$	43.4	
碳酸铀铅矿 Widenmannite	U 和 Pb 的碳酸盐		
亮红铀铅矿 Wolsendorfite	$(Pb, Ca)U_2O_7 \cdot 2H_2O$	58.1	
水碳钙铀矿 Wyartite	$UO_2 \cdot 6UO_3 \cdot 2CO_2 \cdot 3CaO \cdot 12 \sim 14H_2O$	66.8 ~ 67.7	
硅铈铀矿 Yttrialite	$(Y, Th)_2Si_2O_7$	0.7 ~ 4.0	4.6
铈铀矿 Yttrocrasite	$(Y, Th, U, Ca)_2Ti_4O_{11} (?)$	3.3	4.8
菱钙铀矿 Zellerite	$Ca(UO_2)(CO_3)_2 \cdot 5H_2O$	44.8	
翠砷铜铀矿 Zeunerite	$Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 10 \sim 12H_2O$	47.7 ~ 49.5	3.2 ~ 3.5
水铀矾 Zippeite	$K_4(UO_2)_6(SO_4)_3(OH)_{10} \cdot H_2O$	63.4	3.2
锆石 Zircon	$ZrSiO_4$	~ 2.7	4.2 ~ 4.9
钛锆铀矿 Zirkelite	$(Ca, Fe, Th, U)_2(Ti, Nb, Zr)_2O_7 (?)$	1.4	4.7

注: a. 基于典型样品的分析

b. A = Ca, Na, U, Ce, Y

c. A = U(主要), Ca, Fe, Th, Y

d. A = Th, Ca, Ce, La, U, Pb

e. A =  $Fe^{2+}$ , 稀土元素, U, Ca, Zr, Thf. A = Y,  $Fe^{2+}$ ,  $U^{4+}$ , Mn, Ca

g. A = Y, U

h. RE = 稀土元素

i. A = Na, Ca,  $Fe^{2+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $Sb^{3+}$ , Pb, Th, Zr, Ce, Yj. A = Na, Ca 为主,  $Fe^{2+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $Sb^{3+}$ , Pb, Th, Ce, Y

k. A = Ce, Y, U, Th

B = Nb, Ta, Ti,  $Fe^{3+}$ 

B = Ti(主要), Fe

X = P, Si

B = Ti,  $Fe^{3+}$ , V, Cr

B = Nb, Ta, Sn, W

B = Ti(主要),  $Fe^{3+}$ , Nb, TaB = Nb, Ta, Ti, Sn,  $Fe^{3+}$ B = Nb, Ta, Ti 为主, Sn,  $Fe^{3+}$ , W

B = Ti, Nb 为主

## 2.2.1.1.2 类质同象

类质同象是指性质上相近的元素在晶格中以可变量互相代替的现象,即:矿物晶体结构中一种元素(质点)的位置被性质上相近的另一种元素(质点)所取代,但是晶体结构形式、化学键类型和正负离子的电荷平衡保持不变或基本不变,仅仅晶胞参数和物理性质(例如:折射率和比重等)随置换质点数量的改变而发生变化。

必须指出,质点的相互置换是有条件的。这些条件包括<sup>[2.1]</sup>:

(1) 置换质点的大小(离子半径)相近,这是形成类质同象的容积条件。

(2) 置换质点的电荷(符号与电量)总和相等。但是,有时离子半径和电荷这两个条件会同时起作用,例如:“对角线规律”,即:元素周期表中左上方元素与相邻右下方元素之间(尽管离子半径和价态都不同)发生类质同象置换的规律,就是因为离子半径和电荷这两个条件同时起作用的结果。

(3) 相互置换质点的键性相似。确定元素之间能否进行类质同象置换时,键性往往具有决定性意义,这是由原子的核外电子层结构决定的。如果键的类型不同,尽管具有其它条件,也不会发生类质同象置换。

(4) 物理化学条件的影响。例如:提高温度会提高类质同象的可混性,促进类质同象

置换，这是变质作用和外生成矿作用形成含铀矿物的主要原因。

类质同象现象在岩浆岩的副矿物中较常见，例如：在独居石、磷灰石、钛酸盐、铌钽酸盐等矿物中，铀以  $U^{4+}$  形式置换其中离子半径大致相等的元素，形成类质同象形态的含铀矿物。大多数以类质同象现象形成的含铀矿物，其中铀的含量都较低。

### 2.2.1.1.3 围岩吸附

当矿物中铀以铀酰离子 ( $UO_2^{2+}$ ) 的形式存在时，铀很容易被围岩中具有吸附性能的物质，例如：有机质（碳氢化合物）、蛋白石、磷灰石、粘土、氢氧化铁等以物理或化学的形式吸附，形成含铀矿物。这类铀矿物的含铀量都很低，例如：褐煤。

### 2.2.1.2 铀矿物的化学组成

在目前已知的铀矿物中，其化学组分的主要特点是一定含氧，但不含硫化物、卤化物和硝酸盐等，也不存在天然的金属铀矿。

铀在铀矿物中存在的价态是四价 ( $U^{4+}$ ) 和六价 ( $UO_2^{2+}$ )。由于铀在放射性衰变时附带产生自氧化作用，因此在自然界仅含四价铀而不含六价铀的矿物是极少的，一般情况都是两种价态同时存在，只是由于矿石受空气中的氧气或地下水中的氧化剂的氧化作用程度不同，六价铀的含量有较大程度的不同而已。

#### 2.2.1.2.1 简单氧化物

以晶质铀矿和沥青铀矿为代表的简单氧化物类铀矿物是提取铀的主要原料，它又可以分为两类：

(1) 铀的氧化物，通式为  $(U_{1-x}^{4+} U_x^{6+})O_{2+x}$ ，例如：沥青铀矿和铀黑。

(2) 铀钍氧化物，通式为  $[(U^{4+}, Th)_{1-x} U_x^{6+}]O_{2+x}$ ，例如：晶质铀矿和方钍石。

晶质铀矿、沥青铀矿和铀黑是不同成因的同一矿物的三种存在形式，它们虽然具有相同的结晶结构，但是具有不同的组成和形态：

(1) 化学组成。晶质铀矿在不同程度上含有钍或稀土；沥青铀矿几乎不含钍。

(2) 矿物形态。晶质铀矿大多数呈立方体，有时为八面体或菱形十二面体，一般呈单体，少数呈脉状；沥青铀矿以各种形态（肾状、结核状、鱼子状、微球状、葡萄状、串珠状等）的胶状、具有胶状结构的细微脉状或网脉状出现；铀黑一般以土状、粉末状、烟灰状出现。

(3) 成矿条件。晶质铀矿主要产于高温热液、伟晶岩脉和变质矿床中，形成温度超过  $300^{\circ}C$ ，常与高温热液矿物、稀土钛铌钽复杂氧化物、钍硅酸盐等共生；沥青铀矿主要产于中低温热液矿床中，形成温度较低，一般在  $150^{\circ}C \sim 250^{\circ}C$  以下，与硫化物或其它中低温热液矿物共生。

晶质铀矿、沥青铀矿和铀黑一般都呈黑色，氧化后可呈褐色。矿物的比重和硬度都随含氧系数的增加而降低。

#### 2.2.1.2.2 复杂氧化物

这类铀矿物主要指铀的钛、铌、钽矿物，它们的成分复杂多变，种类繁多。主要元素有铌、钽、钛、铁、锰、钙、钠、铀和钍，次要元素有钾、镁、铝、钡、硅、铅、锶、锑、铋、锌、磷、 $OH^-$  和  $F^-$ 。这些元素相互可以进行类质同象置换，形成不同的矿物。

复杂氧化物类铀矿物主要产于高温热液蚀变的花岗岩、高温热液接触变质岩和花岗伟

晶岩中。一般为黑色或褐色，含钽高的矿物比重较大，含铁高的矿物具有弱磁性。这类矿物有综合开发利用的价值，但是因为成分复杂和化学稳定性高而难以处理。代表性的矿物有：钛铀矿、铈钛铀铁矿、铈钼矿、黑稀金矿、铀烧绿石、铈铀烧绿石和铈钛铀矿等。

### 2.2.1.2.3 氢氧化物

铀的氢氧化物是由晶质铀矿和沥青铀矿经氧化作用或水化作用而形成的次生矿物。在氧化作用的过程中，铀的氢氧化物又可转化成各种铀的硅酸盐类矿物。这类矿物的颜色鲜艳，有橙红色、红褐色、黄色等，代表性的矿物有：水铀矿、橙水铅铀矿、红铀矿等。

### 2.2.1.2.4 铀云母

铀云母类矿物是六价铀的磷酸盐、砷酸盐和钒酸盐。这类矿物外表特征与云母比较相似，故以“云母”命名。

水在铀云母类矿物中的含量变化很大，在磷酸盐和砷酸盐中水分子数为 4 ~ 16，在钒酸盐中水分子数为 4 ~ 8。水在铀云母类矿物中以构造水和沸石水的形式存在，其中以沸石水的含量变化最大。

含有钙、镁、钡、铜的磷酸盐和砷酸盐具有典型的层状云母构造，它们的晶体结构是由四面体的磷酸盐（或砷酸盐）和八面体的  $\text{UO}_2^{2+}$  组成层，在层与层之间布满了阳离子（ $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等）和水分子。由于是层状结构，这类矿物性脆和硬度低，其比重随矿物中阳离子和阴离子原子量的增加和含水量的减少而增加。大部分铀云母类矿物呈黄色和黄绿色，含铜的铀云母类矿物为翠绿色和碧绿色。

含钒的铀云母类矿物一般存在于含铀沉积矿床的氧化带中，例如：钾钒铀矿和钒钙铀矿。含磷或砷的铀云母类矿物存在于内生矿床的氧化带中，其中磷酸盐类的代表性矿物包括：钙铀云母、铜铀云母、铁铀云母、钡铀云母、氢铀云母和铝铀云母；砷酸盐类的代表性矿物包括：翠砷铜铀矿和钙砷铀云母。

### 2.2.1.2.5 硅酸盐

硅酸盐类铀矿物分布很广，分为铀硅酸盐和铀钼硅酸盐两类，大多数铀矿床产于氧化带，常与铀酰的氢氧化物类矿物紧密共生，具有表生矿物的特征和共生组合的特点。

硅酸盐类铀矿物性脆，呈黄色或土黄色，含铜时为绿色。铀硅酸盐类的代表性矿物包括：铀石、硅钙铀矿、 $\beta$ -硅钙铀矿、硅镁铀矿和硅铜铀矿。铀钼硅酸盐类的代表性矿物包括：铀钼石和硅铀钙镁矿。

### 2.2.1.2.6 其它

在各类铀矿床中，还存在着铀的钼酸盐类矿物，例如：水钼铀矿和褐钼铀矿；铀的碳酸盐类矿物，例如：纤铀碳酸钙和水菱铀矿；铀的硫酸盐类矿物，例如：水铀矾和水硫铀矿；铀的硫酸-碳酸盐类矿物，例如：板菱铀矿。

## 2.2.2 铀矿石的加工性质

铀矿石是在现代技术经济条件下有开发利用价值的含铀岩石，它是由铀矿物和其赋存的围岩组成。

铀矿床中的铀矿物或含铀矿物一般情况下与围岩之间的界线是清晰的，但是如果铀以被围岩吸附的形式存在，则围岩也含铀。铀矿床中的铀矿物经常以细分散状态存在，开采得到的铀矿石不是单一的铀矿物，有大量脉石矿物组成的围岩同时被开采。因此，铀矿石



的加工性质不仅与矿石中的铀矿物有关，而且与围岩（脉石矿物）的组成和性质有关。

### 2.2.2.1 铀矿物的加工性质

铀矿物按其成因可以分为原生铀矿物和次生铀矿物。

#### 2.2.2.1.1 原生铀矿的溶解性能

原生铀矿中的铀以四价为主，最重要的原生铀矿是晶质铀矿、沥青铀矿（铀的氧化物）和水硅铀矿（硅酸盐）。原生铀矿中的铀，必须在氧化剂存在的条件下才能被酸或碱（碳酸盐）溶解。在  $\text{pH} = 1.8 \sim 2.0$ ，温度  $40^\circ\text{C}$  的条件下，在 12 h 以内矿物中的铀能迅速溶解在硫酸中。如果脉石矿物的孔隙率低，则浸出时间还需要长一些。

提高浸出过程的氧化-还原电位（达到 500 mV）可以改善水硅铀矿的浸出动力学，水硅铀矿的溶解速度还受矿物中 U/Si 比的影响，溶解度随溶液中  $\text{OH}^-$  取代矿物中  $\text{SiO}_4^{2-}$  的增加而增加。铀钍矿比晶质铀矿更容易溶解，而且富含铀的铀钍矿比富含钍的铀钍矿溶解更快<sup>[2,13]</sup>。

铀与铌、钽、钛、锆等以复杂氧化物形式存在的原生铀矿，例如：钛铀矿中铀的溶解极为困难，往往需要高温（ $60^\circ\text{C}$  以上）和高酸。

#### 2.2.2.1.2 次生铀矿的溶解性能

在一定的地质作用或氧化作用的条件下，原生铀矿中的铀通过渐进而复杂的过程，有时还通过地下水的溶解、迁涉和沉积过程形成次生铀矿。次生铀矿则以六价铀（ $\text{UO}_2^{2+}$ ）为主，形成铀酰离子（ $\text{UO}_2^{2+}$ ）的各种盐类（磷酸盐、钒酸盐、硫酸盐、碳酸盐等）或以铀酰键为特征的铀酸盐矿物。

次生铀矿一般不需要氧化剂就可以溶解，因此次生铀矿属于极易溶解的矿物。但是铀的磷酸盐或钒酸盐要求浸出液有较高的酸度，而且溶液中  $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  的配合作用，会妨碍  $\text{Fe}^{3+}$  对  $\text{U}^{4+}$  的氧化作用。

### 2.2.2.2 围岩（脉石矿物）的加工性质

由于大多数铀矿物是容易浸出的，因此铀矿石加工的经济性在很大程度上取决于脉石矿物的性质，而且浸出液的组成在很大程度上取决于脉石矿物的溶解程度，脉石矿物对铀矿石加工工艺流程的复杂性有很大的影响。

#### 2.2.2.2.1 石英

石英是铀矿床中广泛存在的脉石矿物，但是在铀矿石加工过程中它不与浸出剂发生化学作用，因此是属于不反应的矿物。

#### 2.2.2.2.2 碳酸盐

在溶解铀矿物所需要的 pH 值条件下，多数碳酸盐矿物都需要消耗等当量化学计算量的酸，因此矿石中碳酸盐的含量超过 8%，或 1 t 铀矿酸浸所消耗的硫酸高于 75 kg ~ 95 kg 时，就应当考虑碱浸。

菱镁矿、白云石和菱铁矿在  $\text{pH} = 1.2 \sim 1.8$  时的反应速度比较慢；而方解石在酸浸条件下激烈反应，放出  $\text{CO}_2$  所产生的气泡，给矿石加工带来问题。

#### 2.2.2.2.3 磷酸盐

磷灰石在酸性介质中的溶解不如碳酸盐，当  $\text{pH} = 1.5$  时磷灰石的溶解速度比较高。

溶液中的  $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  的配合作用，会妨碍  $\text{Fe}^{3+}$  对  $\text{U}^{4+}$  的氧化作用，从而影响铀的浸

出，增加氧化剂的耗量。当溶液的 pH 值超过 2.0 时，溶液中的  $\text{PO}_4^{3-}$  会使铀沉淀，造成铀的损失。如果在离子交换树脂中发生沉淀，解吸铀时需要先溶解沉淀才能解吸，从而增加了解吸铀的时间，也增加了解吸剂的消耗。

#### 2.2.2.2.4 硅酸盐

二氧化硅在酸性介质中一般不会发生化学反应，原生硅酸盐矿物在高酸条件下也不会溶解。只有次生硅酸盐矿物，在一定温度下能溶于稀酸。

铀矿床中存在的次生硅酸盐，例如：绿泥石、绢云母和各种粘土矿物，都能部分溶解于稀酸中，造成大量的铝、镁、铁和硅进入浸出液。由于浸出过程基本上是在 pH 值小于 2.0 的条件下进行的，因此次生硅酸盐是浸出过程中发生反应的主要脉石矿物，当温度高于 40℃ 时，反应速度明显提高。

次生硅酸盐矿物在浸出过程中不仅耗酸，而且有形成矿泥的趋势。这种矿泥由浸出尾渣、胶体二氧化硅和二氧化硅的聚合沉淀物组成，颗粒直径为 0.1  $\mu\text{m}$ ~0.3  $\mu\text{m}$  (以 0.1  $\mu\text{m}$  为主)。矿泥能从浸出液中吸附铀，增加铀在浸出过程的损失。矿泥还会影响固-液分离的实际效果，需要增加絮凝沉降或控制过滤（例如：超滤）等工序制备清液，避免后续的溶剂萃取过程发生乳化。

#### 2.2.2.2.5 铁氧化物

溶液 pH 值超过 1.0 时，赤铁矿和磁铁矿都不容易反应。但是，铁的水合氧化物-氢氧化物（例如：针铁矿）的溶解还是明显的。

#### 2.2.2.2.6 硫化物

硫化物在浸出过程的行为很复杂，它与硫化物存在形式（结晶状、细粒状、胶状）和介质有关。一般来说，黄铁矿和黄铜矿在弱酸性浸出条件下（pH = 1.5，温度 40℃，浸出时间 18 h）不溶解，但是辉铜矿容易溶解。斑铜矿在弱酸性浸出条件下溶解较慢，但是当溶液 pH 值较低、温度较高并有铁离子存在的情况下，溶解速度会提高。

在温度 40℃，溶液  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 10\text{g/L}$  的条件下，硫化物的溶解度按下列次序递减：辉砷镍矿、磁黄铁矿、辉钴矿、砷黄铁矿、白铁矿和黄铜矿，闪锌矿在此条件下不反应。

黄铁矿是铀矿石中较常见的矿物，黄铁矿几乎不溶于水，25℃在水中的溶解度只有 0.0005  $\text{g}^{[2.14]}$ ，在还原介质中也不溶于酸或碱的稀溶液。

在矿石浸出过程中，如果溶液中有氧化剂（包括细菌）存在，黄铁矿可能发生氧化反应而溶解。在碱性溶液条件下，黄铁矿中  $\text{S}^{2-}$  可以直接氧化为  $\text{S}^{4+}$  或  $\text{S}^{6+}$ ；在酸性溶液条件下，黄铁矿中  $\text{S}^{2-}$  必须先氧化为  $\text{S}^0$ ，再由  $\text{S}^0$  氧化为  $\text{S}^{4+}$  或  $\text{S}^{6+}[2.14]$ 。

黄铁矿的氧化与溶液 pH 值有密切关系，溶液的 pH 值越高，黄铁矿越容易被氧化。因此，黄铁矿在碱性溶液的氧化比在酸性溶液中容易，用碳酸盐作为铀矿石的浸出剂时，硫化物（包括黄铁矿）是浸出剂的主要消耗者。为了减少浸出剂消耗，可以在浸出前预先用浮选法从矿石中去除硫化物。

#### 2.2.2.2.7 萤石

萤石在酸性浸出条件下容易溶解，溶解速度随酸度和温度的增加而提高。在溶液 pH = 1.5，温度 40℃，浸出时间 18 h 条件下，50 % 以上萤石可以被溶解。如果溶液中存在稀土等能形成氟化物沉淀的元素，会使萤石的溶解复杂化。

溶液中的  $F^-$  会促使溶液中可溶性的二氧化硅聚合, 形成胶体或沉淀, 这个过程在溶液的 pH 值低于 1.8, 温度超过  $40^{\circ}C$  时, 速度明显加快。

溶液中的  $F^-$  能加速一些脉石矿物的溶解, 也能提高铀矿物的溶解度。

当溶液中存在  $Al^{3+}$  时, 由于  $Al^{3+}$  与  $F^-$  的强配合作用, 可以减弱或消除  $F^-$  的作用。

#### 2.2.2.2.8 硫酸钙

硫酸钙矿物和其它硫酸盐矿物在碱浸过程中消耗浸出剂(碳酸钠), 生成碳酸钙和硫酸钠, 使碱浸过程发生困难。

#### 2.2.2.2.9 碳质组分

存在于碳质页岩中的石墨及其相关物质, 一般在浸出过程不起反应。但是矿石中的碳质组分在铀矿浸出过程中, 可以吸附已溶解的铀, 同时消耗更多的氧化剂, 也可能造成固液分离的困难。

由生物残骸在地质过程经过化学或生物化学变化形成的有机物(碳氢化合物), 在铀矿浸出过程中, 可以进入浸出液。在含铀泥煤碱浸过程中进入浸出液的有机物, 当浸出液被酸化时, 一部分会形成黑褐色胶状沉淀, 称为腐植酸(humic acid); 另一部分以溶解状态存在的黄褐色酸性物质, 称为富里酸(fulvic acid)<sup>[2.15]</sup>。因此, 碱浸比酸浸会导致更多的有机物进入浸出液。

在酸浸时, 采用强氧化条件, 例如: 拌酸浸出, 可以使有机物被氧化分解<sup>[2.16]</sup>。

碱浸过程进入浸出液的腐植酸等有机物, 对后续的纯化过程有严重影响, 不仅会造成离子交换树脂中毒, 也会造成萃取剂中毒。

因此, 对于富含有机物的铀矿石, 例如: 褐煤, 应当通过焙烧预处理的方法去除碳质组分和有机物, 然后再进行浸出。

#### 2.2.2.2.10 稀土矿物

稀土矿物, 例如: 独居石、磷钇矿、氟碳铈矿和磷钼铈矿, 在溶液 pH 值超过 1.5 和温度  $55^{\circ}C$  条件下是完全不溶的。但是, 菱铈矿和水磷铈矿可在  $pH = 1.5$  条件下溶解; 钇和重稀土常赋存于水硅铈矿中, 也少量存在于晶质铈矿和钛铈矿中, 这些铈矿物的溶解也导致稀土的溶解。

### 参考文献

- [2.1]王德义, 谌竞清, 赵淑良, 姜志新. 铀的提取与精制工艺学. 北京: 原子能出版社, 1982. 50~66.
- [2.2]孟先雍. 原子能工业. 北京: 原子能出版社, 1978. 168~171.
- [2.3]沈锋. 依靠科技进步寻找超大型铀矿床. 铀矿地质, 1995, 11(1): 6~10.
- [2.4]IAEA. 铀提取工艺. 北京: 出版者不详, 1995. 11~19.
- [2.5]OECD(NEA) and IAEA. 铀的资源生产和供需分析. 北京: 出版者不详, 1987. 163~164.
- [2.6]邓佐卿. 新世纪展望——中国铀资源生产和需求. 铀矿冶, 2000, 19(1): 4~7.
- [2.7]梅里特 R C. 铀的提取冶金学. 北京: 科学出版社, 1978. 10~22.
- [2.8]OECD(NEA) and IAEA. 铀的资源生产和供需分析. 北京: 出版者不详, 1987. 18~24.
- [2.9]NUEXCO. Principles of Classification of NIS Reserves and Resources. NUEXCO Review, 1993, (302): 14~18.

- [2.10]NUEXCO. Uranium Industry of the People's Republic of China. NUEXCO, 1991, (274): 17~23.
- [2.11]李觉, 雷荣天, 等. 当代中国的核工业. 北京: 中国社会科学出版社, 1987. 112~113.
- [2.12]梅里特 R C. 铀的提取冶金学. 北京: 科学出版社, 1978. 515~522.
- [2.13]IAEA. 铀提取工艺. 北京: 出版者不详, 1995. 85~94.
- [2.14]韩勇, 黎海雁. 浅谈黄铁矿对矿石浸出的影响. 铀矿冶, 1991, 10(3): 18~24.
- [2.15]夏德长. 腐植酸对铀矿石加工过程的影响. 铀矿冶, 2000, 19(4): 266~272.
- [2.16]郑群英. 矿石中有机质对提取铀工艺过程的影响. 铀矿冶, 1985, 4(2): 33~36.