

603204

高等学校教材

铀矿物学

王德荫 傅永全 编
赵凤民 马永焕 审

原子能出版社

高等学校教材

铀 矿 物 学

王德荫 傅永全 编
赵凤民 马永焕 审

原子能出版社

内 容 简 介

本书共分两篇六章。

第一章系统论述了铀矿物的化学成分、晶体化学特点、形态、物理性质和成因。第二章扼要介绍了铀矿物的主要鉴定方法和研究方法。第三章阐述了铀矿物的分类和命名原则。第四、五、六章系统论述了各类铀矿物的化学成分、晶体结构、形态和物理性质以及成因、产状等，并详细描述了10种四价铀矿物、44种六价铀矿物和11种含铀矿物。书末附有铀矿物及含铀矿物鉴定表，表中包括1985年以前发表的150种铀矿物和11种含铀矿物。

本书可用作高等院校铀矿地质勘查专业的教材，亦可供科研、生产单位的地质人员参考。

高 等 学 校 教 材

铀 矿 物 学

王德荫 傅永全 编

赵凤民 马永焕 审

责任编辑 姜利民

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京顺义小店印刷厂

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $10\frac{1}{4}$ · 字数272千字

1986年9月北京第二版 · 1986年9月北京第一次印刷

印数1—2000 · 统一书号: 15175·773

定价: 1.70元

修订再版前言

此书本版是根据核工业部教育司 1983 年召开的《铀矿物学》修订再版编写提纲审定会通过的纪要修订的。本着“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的精神,在本次修订中增删了第一版的内容并充实了重点内容;加强了对矿物产状、形成条件以及鉴定方法和研究方法的论述;对各论的内容作了较大的精简,详细描述矿物种由 141 种减为 65 种,删去了矿物粉晶数据表,增加了新编的矿物晶体化学分类和晶体结构数据表;在全书各部分更多地反映了国内研究成果。

此书本版仍分为二篇六章。第一、二、三、五章和附录由王德荫编写,第四、六章由傅永全编写。本版书稿由王德荫主编,由赵凤民、马永焕审校。在修订过程中,成都地质学院矿物教研室张如柏和南京大学地质系闵茂中对书稿提出了宝贵意见,姜利民提供了铀石的照片。对以上同志和参加修订版编写提纲审定会的同志,我们在此谨表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请读者提出宝贵意见。

编 者

1985.4

第一版前言

铀矿物学是放射性矿产地质与勘探专业的一门专业课。由于矿物的化学组成和晶体结构是决定矿物各项性质的基本因素，因此本教材对铀矿物的晶体化学特点作了详细的介绍，并根据四价铀矿物和六价铀矿物所具有的截然不同的晶体化学性质，将铀矿物各论分为四价铀矿物、六价铀矿物和含铀矿物三章。铀矿物学与铀的地球化学和铀矿床学有密切的关系，因此在本教材的铀矿物成因和产状部分中列举了较多的实际资料，并从理论上作了比较详细的论述。本教材还对各类铀矿物的鉴定特征和主要鉴定方法作了重点介绍，并结合一般岩矿鉴定实验室的条件，编制了铀矿物系统鉴定表。

全书共分二篇六章。第一、四、六章及附录三、四由傅永全编写，第二、三、五章及附录一、二、五由王德荫编写，全书由王德荫统稿，由赵凤民审校，马永焕参加了复审工作。描图工作由成都地质学院绘图室完成。

在为编写本书收集资料的过程中，曾得到北京铀矿地质研究所、湖南 230 研究所和中国人民解放军 00259 部队、00279 部队等单位的大力协助，对此我们谨表示衷心的感谢。

由于编者的水平和经验有限，书中错误和不妥之处在所难免，请读者给予批评指正。

编 者

1979. 10

目 录

修订再版前言	(1)
第一版前言	(2)

第一篇 通 论

第一章 铀矿物的基本特征	(1)
第一节 铀矿物的化学成分	(1)
一、铀矿物的组成元素	(1)
二、铀矿物化学成分的特点和变化	(2)
第二节 铀矿物的晶体化学特点	(6)
一、四价铀矿物的晶体化学特点	(6)
二、六价铀矿物的晶体化学特点	(9)
第三节 铀矿物的形态	(15)
一、单体形态	(15)
二、集合体形态	(16)
第四节 铀矿物的物理性质	(18)
一、放射性	(18)
二、光学性质	(20)
三、力学性质	(24)
第五节 铀矿物的成因	(26)
一、产于岩浆岩中的铀矿物	(26)
二、产于伟晶岩中的铀矿物	(27)
三、热液成因铀矿物	(28)
四、沉积-变质成因铀矿物	(28)
五、沉积成因和后生淋积成因铀矿物	(28)
六、产于氧化带中的铀矿物	(29)
第二章 铀矿物的鉴定方法和研究方法	(31)
第一节 铀矿物的鉴定程序	(31)

一、矿物外表特征鉴定	(31)
二、矿物分离	(32)
三、矿物鉴定	(32)
第二节 铀矿物的鉴定方法和研究方法	(33)
一、放射性照相	(33)
二、裂变径迹分析	(35)
三、简易化学定性分析(微化分析)	(38)
四、发光分析	(40)
五、光性鉴定	(41)
六、X 射线分析	(43)
七、热分析	(44)
八、电子探针 X 射线微区分析	(45)
九、红外光谱分析	(47)
第三章 铀矿物的分类和命名	(49)

第二篇 各 论

第四章 四价铀矿物	(53)
第一节 铀的简单氧化物	(53)
一、化学成分	(53)
二、晶体结构	(57)
三、形态	(61)
四、物理性质	(65)
五、显微镜下特征	(66)
六、热分析	(67)
七、鉴定特征	(68)
八、成因和产状	(69)
九、关于铀黑	(72)
第二节 铀和钍的复杂氧化物	(73)
一、概述	(73)
二、分述：钍铀矿、斜方钍铀矿、铈铀钍铁矿	(76)
第三节 铀和钍的复杂氧化物	(84)
一、概述	(84)
二、分述：褐钨铀矿、紫钨铀矿	(86)

第四节 铀的硅酸盐	(88)
铀石	(89)
第五节 铀的磷酸盐	(94)
一、概述	(94)
二、分述：人形石、莱磷铀矿、维磷铀矿	(95)
第五章 六价铀矿物	(99)
第一节 铀酰氢氧化物和重铀酸盐	(99)
一、概述	(99)
二、分述：柱铀矿、黄钙铀矿、板铅铀矿、红铀矿、水钠铀矿、 水斑铀矿、水丝铀矿、水沥青铀矿、脂铅铀矿	(102)
第二节 铀酰硅酸盐	(113)
一、概述	(113)
二、分述：硅钙铀矿、 β 硅钙铀矿、硅铅铀矿、硅铜铀矿、硅铀 矿、高硅钾铀矿	(127)
第三节 铀酰磷酸盐	(137)
一、概述	(137)
二、分述：钙铀云母、准钙铀云母、铜铀云母、准铜铀云母、钡 铀云母、准钡铀云母、铁铀云母、铅铀云母、磷钙铀矿、磷 铅铀矿、芙蓉铀矿	(150)
第四节 铀酰砷酸盐	(165)
一、概述	(165)
二、分述：翠砷铜铀矿、准翠砷铜铀矿、钙砷铀云母、准钙砷铀 云母、镁砷铀云母、准镁砷铀云母、砷铀矿、砷铋铀矿 ...	(172)
第五节 铀酰钨酸盐	(181)
一、概述	(181)
二、分述：钨钙铀矿、准钨钙铀矿、钨钾铀矿、钨钡铀矿、钨铜 铀矿	(189)
第六节 铀酰碳酸盐	(196)
一、概述	(196)
二、分述：纤铀碳酸钙石、菱镁铀矿、纤碳铀矿、黑碳钙铀矿 ...	(203)
第七节 铀酰硫酸盐	(208)
一、概述	(208)
二、分述：水铀矾族、水硫铀矿、铜铀矾	(212)

第八节 铀酰钼酸盐	(218)
一、概述	(218)
二、分述：钼铀矿、水钼铀矿	(222)
第九节 铀酰亚硒酸盐	(225)
一、概述	(225)
二、分述：硒铜铀矿	(226)
第十节 铀酰亚碲酸盐	(227)
一、概述	(227)
二、分述：碲铀矿	(228)
第十一节 铀酰的复盐	(229)
板菱铀矿、湘江铀矿	(229)
第六章 含铀矿物	(233)
第一节 铀呈类质同象混入物的含铀矿物	(234)
一、含铀的简单氧化物：方钍石	(234)
二、含铀的铀-钽-铌复杂氧化物	(236)
(一) 概述	(236)
(二) 分述：铀烧绿石、铀细晶石、贝塔石、褐钨铌矿、黑稀金 矿、复稀金矿、铀易解石、铌钽矿	(240)
三、含铀的硅酸盐	(254)
(一) 概述	(254)
(二) 分述：钍石、羟硅钍矿、绿帘硅钍铀矿	(256)
四、含铀的磷酸盐	(261)
第二节 铀呈吸附质状态的含铀矿物	(263)
第三节 铀呈铀矿物超显微包裹体的含铀矿物	(265)
附录 铀矿物及含铀矿物鉴定表	(266)
主要参考文献	(316)

第一篇 通 论

第一章 铀矿物的基本特征

矿物是具有相对固定的化学成分和确定的内部结构的天然产物。铀矿物是以铀为基本组分的矿物。现已发现 150 种铀矿物，下面分别叙述其基本特征。

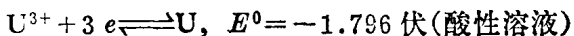
第一节 铀矿物的化学成分

一、铀矿物的组成元素

在自然界，铀能与许多种化学元素结合。与铀结合的阴离子主要是 O^{2-} ，而 $(OH)^-$ 只见于少数铀矿物中， F^- 只见于个别铀矿物中。许多元素以络阴离子形式与铀结合。铀矿物中常见的络阴离子有 $[SiO_4]^{4-}$ ， $[PO_4]^{3-}$ ， $[AsO_4]^{3-}$ ， $[V_2O_8]^{6-}$ ， $[CO_3]^{2-}$ ， $[SO_4]^{2-}$ ， $[MoO_4]^{2-}$ ， $[SeO_3]^{2-}$ 和 $[TeO_3]^{2-}$ 等。

参与铀矿物组成的阳离子主要是亲石元素（惰性气体型离子和靠近惰性气体型离子一侧的过渡型离子）中的 K，Na，Ca，Mg，Ba，Al，Ti，Th，Y，RE，Nb，Ta 和 Mn 等，其次是亲硫元素（铜型离子）中的 Cu，Pb，Zn，Bi，Tl 以及亲铁元素（过渡型离子）中的 Fe，Co，Ni 和 Mo 等（图 1.1）。在个别情况下，亲气元素 H 和 N 以 H^+ 和 NH_4^+ 的形式参与铀矿物的组成。

氧化态为零的铀在水溶液中是极强的还原剂。



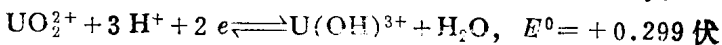
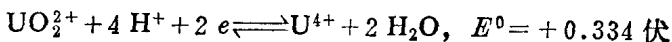
因此,在自然界不能形成铀的单质。

由此可见, + 4 以下价态的铀离子和 U^0 在水溶液中都是强还原剂。

五价铀在自然界也不能稳定存在,因为 U^{5+} (在溶液中呈 UO_2^+ 形式)在酸性溶液中会发生歧化反应,即一部分 U^{5+} 被还原成 U^{4+} , 另一部分 U^{5+} 被氧化而变成 U^{6+} 。



在自然界 + 4 和 + 6 价的铀以 U^{4+} 和 UO_2^{2+} (铀酰)离子形式存在。其电对的电极电位为:



以上两个电对的电极电位都位于水的稳定区以内,因此 U^{4+} 和 UO_2^{2+} 能稳定地存在于水溶液中。

铀以 + 4 和 + 6 两种价态存在这一现象有十分重要的意义,因为四价铀和六价铀,不但在晶体化学性质上,而且在地球化学性质上都有重大的差别。

在化学成分上既含四价铀,又含六价铀,在结构上以 U^{4+} 为基本构造单元的矿物称为四价铀矿物。在成分上以六价铀为主(或全部是六价铀),在结构上以铀酰-阴离子组合(主要是铀酰-阴离子层)为基本构造单元的矿物称为六价铀矿物。

四价铀矿物多数为内生作用的产物,能稳定地存在于还原环境下;六价铀矿物多数为表生作用的产物,能稳定地存在于氧化环境下。当外界环境改变时,矿物中的 U^{4+} 和 U^{6+} 能相互转化。

(二) 元素组合

铀属于亲石元素,与氧有很强的亲合力,因此在自然界只形成氧化物、氢氧化物和含氧盐类矿物,而不形成硫化物、砷化物和氟化物类矿物,也不存在自然元素型的单质铀。

铀矿物中的元素组合因铀的价态而异。这是铀矿物化学成分的又一特点。

由图 1.1 可见，与四价铀结合的元素几乎全部都属于亲石元素*。它们组成的矿物有简单氧化物、复杂氧化物、硅酸盐和磷酸盐等。

与六价铀结合的元素种类很多。除亲石元素外，还有亲硫元素、亲铁元素和亲气元素。它们组成的矿物有氢氧化物和含氧盐类。六价铀矿物的形成条件表明，亲硫元素、亲铁元素和亲气元素只是在氧化环境下才参与铀矿物的组成的。这反映了物理-化学条件的强烈影响。在表生作用带的氧化条件下，许多元素的活性增强，铀也以化学性质十分活泼的铀酰形式参与地壳表层的地球化学反应，所以才形成了上述元素组合。

(三) 类质同象

类质同象是引起矿物化学成分变化的主要因素之一。

由于 U^{4+} 的离子半径与 Th^{4+} 及 RE^{3+} 的相近，所以一些四价铀矿物中常含有钍和稀土元素的类质同象混入物。例如，晶质铀矿中常含千分之几至百分之几的 ThO_2 和 RE_2O_3 ，存在着晶质铀矿-方钍石类质同象系列。又如，在铀-钛复杂氧化物中也常含有 Th 和 RE。

六价铀矿物中类质同象主要表现为阴离子之间的置换，如 O^{2-} 和 $(OH)^-$ 之间、 $[PO_4]^{3-}$ 和 $[AsO_4]^{3-}$ 之间的置换。阳离子类质同象不太明显，仅见于少数矿物中。

类质同象杂质含量的变化常引起矿物晶胞参数和某些物理性质的有规律的变化。有些四价铀矿物中类质同象杂质的种类和含量的变化有重要的地质意义。

* 四价铀矿物中的铅一般是铀的衰变产物。铅与四价铀结合只发生在表生条件下。

(四) 放射性衰变

铀原子核属于不稳定核，铀矿物的化学成分是不恒定的。自从铀矿物在地壳中形成之后，其成分就按照一定的规律发生着变化，结果矿物中的铀含量逐渐减少，而铀的衰变产物—— ^{206}Pb 却越积越多。在形成时代较晚的矿物中，此变化甚微，可忽略不计。在形成时代较早的矿物中，放射性衰变成因的铅可积累得相当多，甚至要反映在矿物的化学式中。据统计，晶质铀矿中 PbO 含量最高达 20.45%。铅含量与其年龄成正比，例如，某前寒武纪地盾中的古老晶质铀矿含 PbO 达 19.50%，而中、新生代形成的沥青铀矿含 PbO 一般只有千分之几到百分之一、二。

(五) 铀矿物中的水

大多数六价铀矿物都含水，其中以层间水和结构水为主。

1. 层间水

层间水以水分子形式存在，参与矿物晶格的组成，其性质介于结晶水与吸附水之间。随着介质温度和湿度的升降，层间水含量可在一定范围内变化。例如，在潮湿介质中钙铀云母含 10 至 12 个水分子，当湿度降低时，则该矿物转变为含 6 至 8 个水分子的准钙铀云母。

2. 结构水

六价铀矿物中结构水主要以羟基 $(\text{OH})^-$ 形式存在，仅在少数矿物中以水合离子 H_3O^+ 形式存在。它们与结构联系紧密，因此只有在较高温度下才能从矿物中逸出，同时矿物的结构也随之而遭到破坏。

四价铀矿物一般不含水。一些矿物化学分析数据中的水多数不是矿物固有组分，而是在矿物(尤其是隐晶质矿物)形成过程中带入的，或者是由于变生作用而产生的。

第二节 铀矿物的晶体化学特点

前已述及，按铀的价态和矿物中基本构造单元的组成，铀矿物可分为四价铀矿物和六价铀矿物两大类。它们在晶体化学上各有特色，在结构上有很大差别，这对它们的晶形、物理性质等方面都有很大的影响。

一、四价铀矿物的晶体化学特点

(一) 键性和晶格类型

四价铀矿物的晶体结构分析表明，铀在其中以 U^{4+} 离子形式存在，四价铀矿物主要是离子键化合物，多数属于离子晶格。由于 U^{4+} 的离子半径较大，所以其配位数较高。

在离子晶格中，阳离子的配位数主要取决于阳离子和阴离子半径的比值。现已知 U^{4+} 的离子半径* 为 $0.97\text{\AA}$ (配位数 6) 和 $1.01\text{\AA}$ (配位数 8)， O^{2-} 的离子半径为 $1.32\text{\AA}$ ，其比值为 0.734 或 0.765。理论上与此比值相当的配位数是 6 和 8。结构分析表明，实际情况也确实如此，四价铀简单氧化物和硅酸盐中铀的配位数为 8，铀-钛复杂氧化物中铀的配位数为 6。

(二) 晶体结构类型

四价铀矿物的晶体结构有配位型、岛状型和层状型三种类型。

1. 配位型结构

四价铀简单氧化物的结构属于配位型，与萤石的结构相似。在其晶格中，离子键在三度空间均匀分布，各配位多面体有共用棱和共用角顶，同一角顶联结着 4 个配位多面体。

* 本书中元素离子半径值均取自 H. J. Rosler, H. Lange, 1972, *Geochemical Tables*.

2. 岛状型结构

四价铀硅酸盐的结构属于岛状型，与锆石的结构相似。在其结构中，彼此孤立的 $[\text{SiO}_4]$ 四面体通过 U^{4+} 离子相连。

3. 层状型结构

铀-钛复杂氧化物和铀-钼复杂氧化物具有复杂层状结构。其结构单元层由 $[\text{TiO}_6]$ 八面体或 $[\text{MoO}_6]$ 八面体组成。

(三) 类质同象

在四价铀矿物中， U^{4+} 与 Th^{4+} ， RE^{3+} 之间的类质同象置换关系十分普遍。因为 U^{4+} 的离子半径(1.01 Å)与 Th^{4+} (1.06 Å) 及 RE^{3+} (0.86—1.18 Å) 的离子半径相近，离子类型和键性也相似，所以它们之间能够发生置换。四价铀矿物中常含 Th^{4+} 和 RE^{3+} ，而钍和稀土元素矿物中也常含 U^{4+} 。值得注意的是， U^{4+} 对 RE^{3+} 的置换有一定的选择性。由于钪族稀土的离子半径 (0.86—1.08 Å) 与 U^{4+} 的离子半径比较接近，而铈族稀土的离子半径 (1.00—1.18 Å) 与 Th^{4+} 的离子半径比较接近，所以 U^{4+} 倾向于置换钪族稀土三价阳离子，而 Th^{4+} 则倾向于置换铈族稀土三价阳离子。

Zr^{4+} (离子半径 0.82 Å) 和 Ca^{2+} (离子半径 1.03 Å) 也能与 U^{4+} 发生类质同象，但它们之间的置换通常是单向的，属于极性类质同象。在锆石和磷灰石中， Zr^{4+} 和 Ca^{2+} 常被 U^{4+} 所置换，然而在四价铀矿物中尚未发现 Zr^{4+} 和 Ca^{2+} 的类质同象混入物。虽然某些晶质铀矿含 Ca，但是否有 $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{U}^{4+}$ 的置换关系，尚有待于证实。

除上述晶体化学因素外，矿物的形成条件对类质同象的发育程度也有很大的影响。例如，矿物形成温度的增高有利于类质同象。同一种四价铀矿物的高温变种比其中、低温变种可含较多的类质同象混入物。因此，矿物中类质同象混入物的种类和含量可作为研究矿物形成温度的重要标型特征。

四价铀矿物中常含有 U^{6+} ，但 U^{4+} 与 U^{6+} 之间绝不是类质同象关系。 U^{6+} 在四价铀矿物晶体结构中的位置和作用尚有待于查

明。

(四) 变生作用

在铀、钍衰变过程中放出的射线的作用下和核裂变碎片的作用下，某些含铀、钍矿物的晶体结构遭到破坏从而呈非晶态的现象称为变生作用。变生矿物是指其内部结构遭到了破坏，但仍保持着晶体外形的矿物。与结晶质的同种矿物相比，变生矿物的性质已发生了相当大的变化。这主要表现在下列五方面：

1. 光性上为均质体，或局部残留有非均质性，折光率和反射率都偏低。○

2. 无解理。断口呈贝壳状或次贝壳状。具沥青光泽或油脂光泽。硬度和比重都偏低。

3. 在X射线照射下不发生衍射，但在一定温度下焙烧后能恢复结晶构造。

4. 在热处理过程中，当变生矿物恢复为结晶质时，其差热曲线上能显示出放热效应。有时还会出现发光现象(再辉现象)，此现象与矿物中积累的辐射能的释放有关。

5. 非结构水含量偏高。

按非晶化程度变生矿物可分为完全变生矿物和半变生矿物两类。划分的主要根据是X射线粉晶分析结果。矿物完全不产生衍射线时，称为完全变生矿物；矿物只产生少量弱线时，称为半变生矿物。近年来在研究变生锆石时常利用其红外光谱中 615 cm^{-1} 谱带的高度与半高宽度的比值或该谱带所占面积的大小来衡量锆石的变生程度。实际上每一变生矿物单体的各个部分的变生程度经常是不均匀的，局部还可能留有未变生的残留体。

变生作用在铀-钍复杂氧化物、四价铀的硅酸盐、含铀的铀-钍-钍复杂氧化物和含铀硅酸盐中普遍存在。这些矿物在自然界多以变生态出现。个别矿物甚至只以变生态出现，如铀矿。

变生矿物在化学组成上有下列特点：

1. 含铀、钍等放射性元素，有些变生矿物本身就是铀矿物，