

高等学校试用教材

# 铀矿地质简明教程

张万林 编  
余达淦  
章邦桐 审  
黄世杰

原子能出版社

高等学校试用教材

# 铀矿地质简明教程

张万林 编

余达淦 章邦桐 黄世杰 审

原子能出版社

## 内 容 简 介

本书概括了铀矿地质学的基本理论和基本方法，共三篇。

第一篇包括铀地球化学的基本概念，工业铀矿物和常见铀矿物的特性及鉴定方法。第二篇包括内生铀矿床、外生铀矿床和变质铀矿床的成矿地质条件和各类铀矿床的地质特征。第三篇包括铀矿找矿、勘探的主要工作内容和基本工作方法；编录、取样、储量计算的一般原则和方法。

本书可作为放射性地球物理探矿专业的教材，亦可供有关地质工作者参考。

# 前 言

本书是根据1981年5月在北京召开的教材编写提纲审定会所审定的《铀矿地质学简明教程》编写大纲编写的，可作为高等学校放射性地球物理探矿专业的试用教材。

本书内容涉及面广，包括铀地球化学及铀矿物学、铀矿床学、铀矿找矿勘探地质学等。根据突出重点、照顾一般的原则，书中简明地论述了：铀元素在地壳中的运移规律；铀矿物特别是工业铀矿物和常见铀矿物的基本特征及鉴定方法；铀矿成矿地质条件、成矿规律及各类铀矿床的地质特征；铀矿找矿勘探方法等。本书能使放射性地球物理探矿专业的学生在较短的时间内较全面系统地掌握铀矿地质学的基本知识、基本理论和基本方法，懂得物探工作如何同铀矿地质工作结合。

本书由余达淦、章邦桐、黄世杰审校。

在本书编写过程中，金景福对本书编写提纲提出了宝贵意见。南京大学张祖还，成都地质学院王德荫、傅永全、肖庆廉、罗朝文、王有翔、黄茂新，北京铀矿地质研究所黄净白、王文广、刘正义、黄志章、李永利，对书稿提出了许多宝贵意见。薛禹选、何钟琦、崔焕敏、刘腾耀为本书的编写给予了热情帮助。全书插图由成都地质学院绘图室描绘。许多野外地质队和北京铀矿地质研究所，为编写本书提供了大量资料。

责任编辑姜利民为本书文字和内容的修改付出了大量劳动。

对以上为本书的编写给予帮助的单位和个人，一并在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

1985年12月

# 目 录

前言 .....	( 3 )
----------	-------

## 第一篇 铀地球化学和铀矿物学

第一章 铀的性质和铀的分布 .....	( 1 )
---------------------	-------

第一节 铀的性质 .....	( 1 )
----------------	-------

一、铀的物理性质 .....	( 3 )
----------------	-------

二、铀的化学性质 .....	( 5 )
----------------	-------

第二节 铀在自然界的分布 .....	( 6 )
--------------------	-------

一、铀在地球各圈层中的分布 .....	( 6 )
---------------------	-------

二、铀在地壳岩石中的分布 .....	( 6 )
--------------------	-------

三、铀在水圈中的分布 .....	( 9 )
------------------	-------

第三节 铀在自然界的存在形式 .....	( 9 )
----------------------	-------

第二章 铀地球化学 .....	( 11 )
-----------------	--------

第一节 岩浆作用中的铀地球化学 .....	( 11 )
-----------------------	--------

第二节 伟晶作用中的铀地球化学 .....	( 14 )
-----------------------	--------

第三节 热液作用中的铀地球化学 .....	( 15 )
-----------------------	--------

一、含铀热液的成分 .....	( 16 )
-----------------	--------

二、热液中铀的迁移形式 .....	( 16 )
-------------------	--------

三、热液中铀的沉淀条件 .....	( 20 )
-------------------	--------

四、热液铀矿物的特征 .....	( 22 )
------------------	--------

第四节 风化作用中的铀地球化学 .....	( 22 )
-----------------------	--------

一、风化作用中铀的迁移和沉淀 .....	( 23 )
----------------------	--------

二、铀矿床氧化带 .....	( 24 )
----------------	--------

三、层间氧化带 .....	( 27 )
---------------	--------

四、构造氧化带 .....	( 28 )
---------------	--------

五、氧化带的U-Ra平衡 .....	( 31 )
--------------------	--------

第五节 沉积作用中的铀地球化学 .....	( 32 )
-----------------------	--------

第三章 铀矿物通论 .....	( 34 )
-----------------	--------

第一节 铀矿物的化学成分 .....	( 34 )
--------------------	--------

第二节	铀矿物的形态特征 .....	( 35 )
第三节	铀矿物的物理性质 .....	( 35 )
一、	放射性 .....	( 35 )
二、	荧光性 .....	( 36 )
三、	其他物理性质 .....	( 37 )
第四节	铀矿物的成因 .....	( 37 )
第五节	铀矿物的分类 .....	( 38 )
第四章	铀矿物各论 .....	( 40 )
第一节	四价铀矿物 .....	( 40 )
一、	铀的氧化物 .....	( 40 )
二、	铀的硅酸盐 .....	( 45 )
三、	铀的磷酸盐 .....	( 46 )
第二节	六价铀矿物 .....	( 46 )
一、	铀酰氢氧化物 .....	( 46 )
二、	铀酰硅酸盐 .....	( 49 )
三、	铀酰磷酸盐和铀酰砷酸盐 .....	( 51 )
四、	铀酰钒酸盐 .....	( 55 )
五、	铀酰硫酸盐、铀酰硫酸-碳 酸盐、铀酰碳酸盐 .....	( 57 )
第三节	含铀矿物 .....	( 59 )
一、	铀呈类质同象混入物的含铀矿物 .....	( 59 )
二、	铀呈吸附质状态的含铀矿物 .....	( 64 )
三、	铀呈铀矿物超显微包裹体的含铀矿物 .....	( 65 )
第五章	铀矿物鉴定方法 .....	( 66 )
第一节	铀矿物的鉴定程序 .....	( 66 )
第二节	放射性照相 .....	( 67 )
一、	普通放射性照相 .....	( 67 )
二、	显微放射性照相 .....	( 68 )
第三节	荧光分析 .....	( 69 )
第四节	微化分析 .....	( 70 )
一、	铀矿物的溶解度 .....	( 70 )
二、	定性微化反应 .....	( 70 )
第五节	裂变径迹分析 .....	( 72 )

一、裂变径迹的种类 .....	(72)
二、诱发裂变径迹分析 .....	(73)

## 第二篇 铀矿床学

第六章 绪论 .....	(76)
--------------	------

第一节 铀矿床学及其任务 .....	(76)
--------------------	------

第二节 铀矿床的特点及铀矿主要工业指标 .....	(77)
---------------------------	------

第三节 铀矿床分类 .....	(79)
-----------------	------

一、铀矿床的分类原则 .....	(79)
------------------	------

二、本书采用的铀矿床分类 .....	(80)
--------------------	------

第七章 内生铀矿床 .....	(81)
-----------------	------

第一节 岩浆铀矿床 .....	(81)
-----------------	------

第二节 含铀伟晶岩矿床 .....	(85)
-------------------	------

第三节 含铀砂卡岩矿床 .....	(89)
-------------------	------

第四节 热液铀矿床 .....	(92)
-----------------	------

一、花岗岩型铀矿床 .....	(93)
-----------------	------

二、火山岩型铀矿床 .....	(114)
-----------------	-------

三、碳、硅、泥岩型铀矿床 .....	(134)
--------------------	-------

第八章 外生铀矿床 .....	(150)
-----------------	-------

第一节 砂积铀矿床 .....	(151)
-----------------	-------

第二节 成岩铀矿床 .....	(152)
-----------------	-------

一、泥质岩中的铀矿床 .....	(153)
------------------	-------

二、含铀磷块岩矿床 .....	(158)
-----------------	-------

第三节 后生铀矿床 .....	(160)
-----------------	-------

一、砂岩型铀矿床 .....	(161)
----------------	-------

二、含铀煤矿床 .....	(181)
---------------	-------

三、碳、硅、泥岩淋积型铀矿床 .....	(186)
----------------------	-------

四、钙(膏)结岩型铀矿床 .....	(194)
--------------------	-------

第九章 变质铀矿床 .....	(199)
-----------------	-------

第一节 区域变质铀矿床 .....	(199)
-------------------	-------

第二节 混合岩化铀矿床 .....	(205)
-------------------	-------

### 第三篇 铀矿找矿勘探

第十章 找矿 .....	(210)
第一节 找矿地质判据及找矿标志 .....	(210)
一、找矿地质判据 .....	(211)
二、找矿标志 .....	(218)
第二节 铀矿找矿方法 .....	(221)
一、地质学方法 .....	(221)
二、地球化学方法 .....	(224)
三、地球物理学方法 .....	(230)
四、找矿方法的综合应用 .....	(232)
第三节 铀矿区域地质调查 .....	(232)
一、区域地质调查的任务 .....	(233)
二、区域地质调查的工作程序及工作内容 .....	(233)
第四节 铀矿普查 .....	(238)
一、铀矿普查原则 .....	(238)
二、铀矿普查的任务 .....	(239)
三、铀矿普查的工作程序和工作内容 .....	(239)
第五节 铀矿揭露 .....	(244)
一、铀矿揭露的任务 .....	(245)
二、大比例尺地质填图 .....	(246)
三、铀矿揭露工程的布置 .....	(247)
四、铀矿远景评价 .....	(251)
第十一章 勘探 .....	(253)
第一节 铀矿床勘探原则 .....	(253)
第二节 铀矿床勘探的工作内容 .....	(254)
第三节 铀矿床勘探阶段的划分 .....	(256)
第四节 铀矿产储量分级 .....	(257)
一、储量分级的依据 .....	(258)
二、铀矿产储量分级 .....	(258)
第五节 铀矿床勘探程度 .....	(260)
一、铀矿床勘探程度的标志 .....	(260)

二、铀矿床勘探程度的要求 .....	(261)
第六节 铀矿床勘探类型 .....	(263)
第七节 勘探技术手段的选择与勘探工程的布置 .....	(266)
一、影响勘探工程选择的因素 .....	(266)
二、勘探工程布置方法 .....	(269)
三、矿体控制程度的判定 .....	(277)
第十二章 编录 .....	(280)
第一节 编录工作的种类及基本要求 .....	(280)
一、编录工作的种类 .....	(280)
二、编录工作的基本要求 .....	(280)
第二节 原始地质编录 .....	(282)
一、探槽编录 .....	(282)
二、坑道编录 .....	(283)
三、钻孔编录 .....	(286)
第三节 地质编录的综合整理 .....	(291)
一、勘探线地质剖面图 .....	(291)
二、勘探中段地质平面图 .....	(292)
三、矿体投影图 .....	(294)
第十三章 取样 .....	(295)
第一节 铀矿取样的任务和种类 .....	(295)
第二节 铀矿岩矿鉴定取样 .....	(296)
一、岩矿鉴定取样的目的 .....	(296)
二、岩矿鉴定取样的原则和方法 .....	(296)
第三节 铀矿化学分析取样 .....	(297)
一、坑探取样 .....	(298)
二、钻探取样 .....	(303)
三、取样间距的确定 .....	(304)
第四节 铀矿物理参数取样 .....	(304)
一、矿石体重的测定和矿石体重取样 .....	(305)
二、矿石湿度的测定和矿石湿度取样 .....	(306)
三、矿石块度的测定和矿石块度取样 .....	(307)
四、矿石松散系数的测定和矿石松散系数取样 .....	(307)
第五节 铀矿石技术加工取样 .....	(308)

一、矿石技术加工样品的取样要求 .....	(308)
二、矿石技术加工样品的取样方法 .....	(309)
第六节 同位素地质年龄测定取样 .....	(309)
第十四章 铀矿产储量计算 .....	(311)
第一节 储量计算的一般过程 .....	(311)
第二节 矿体的圈定和块段的划分 .....	(312)
一、储量计算边界线的种类 .....	(313)
二、圈定矿体的方法 .....	(314)
三、块段的划分 .....	(319)
第三节 储量计算参数的确定 .....	(320)
一、矿体面积的确定 .....	(320)
二、断面间距的确定 .....	(322)
三、矿体厚度的确定 .....	(323)
四、矿体平均品位的确定 .....	(324)
第四节 常用储量计算方法 .....	(325)
一、算术平均法 .....	(325)
二、地质块段法 .....	(326)
三、断面法 .....	(328)
四、克立格 (Krige) 法 .....	(333)
主要参考文献 .....	(335)

# 第一篇 铀地球化学和 铀矿物学

## 第一章 铀的性质和铀的分布

### 第一节 铀的性质

铀位于周期表上第Ⅲ族，属于锕系元素，其原子序数为92，原子量为238.027。

铀在自然界有三种同位素，其分布量及半衰期列于表1-1。

表 1-1 铀天然同位素分布量及半衰期

原子序数	原子量	铀同位素	分布量, %	半衰期, 年
92	238	$^{238}\text{U}(\text{U I})$	99.275	$4.51 \times 10^9$
		$^{235}\text{U}(\text{AcU})$	0.7196	$7.1 \times 10^8$
		$^{234}\text{U}(\text{U II})$	0.0054	$2.44 \times 10^5$

$^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ 是重要的核原料。

铀原子呈似椭圆形，其短半径为1.4Å，长半径为1.65Å，泛用1.534Å。其离子半径大小随价态和配位数不同而有变化。配位数为6的 $\text{U}^{4+}$ 离子半径为0.97Å。

铀具有3个不饱和的电子层——最外层、次外层和外数第三层，列于表1-2。铀的价电子层结构为 $5f^3 6d^1 7s^2$ 。由于不仅最外层电子参与成键，而且次外层和外数第三层的电子也参与成键，

表1-2 铜系元素核外电子排布

元 素	符 号	原 子 序 数	电 子 层						
			K	L	M	N	O	P	Q
			1	2	3	4	5	6	7
			1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f	5s 5p 5d 5f	6s 6p 6d	7s
铜	Ac	89	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6 1	2
钍	Th	90	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6 2	2
镤	Pa	91	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 2	2 6 1	2
铀	U	92	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 3	2 6 1	2
镎	Np	93	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 5	2 6	2
钚	Pu	94	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 6	2 6	2
镅	Am	95	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 7	2 6	2
锔	Cm	96	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 7	2 6 1	2
锇	Bk	97	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 9	2 6	2
铱	Cf	98	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 10	2 6	2
镱	Es	99	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 11	2 6	2
镳	Fm	100	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 12	2 6	2
铳	Md	101	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 13	2 6	2
钷	No	102	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 14	2 6	2
铈	Lr	103	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 14	2 6 1	2

铜 系 元 素

所以铀具有变价的特性。铀失去全部价电子后的最外层电子结构为  $6s^2 6p^6$ ，即次外层电子为 8 个，趋于惰性气体型，故属亲氧元素。

就铀的三种同位素的原子核来说， $^{238}\text{U}$  由 92 个质子和 146 个中子组成， $^{235}\text{U}$  由 92 个质子和 143 个中子组成， $^{234}\text{U}$  由 92 个质子和 142 个中子组成。当原子核中中子数大大超过质子数时，原子核将产生自发的衰变，这就是铀的天然放射性。

## 一、铀的物理性质

金属铀具金属光泽，呈银白色，微带淡蓝色调。比重 19.04，熔点  $1132.3^\circ\text{C}$ ，沸点  $3818^\circ\text{C}$ 。硬度比铜稍软，为 240—260 公斤/毫米<sup>2</sup>（布氏硬度）。

铀有 15 种同位素，但自然界只存在三种天然同位素（表 1-1）。

$^{238}_{92}\text{U}$ ， $^{235}_{92}\text{U}$ ， $^{232}_{90}\text{Th}$  分别是自然界 3 个天然放射系列，即铀（U I）系、锕（AcU）系和钍（Th）系的起始元素，它们经一系列  $\alpha$  衰变和  $\beta$  衰变，最终分别转变为  $^{206}_{82}\text{Pb}$ ， $^{207}_{82}\text{Pb}$  和  $^{208}_{82}\text{Pb}$  三种稳定同位素，示于图 1-1。

铀通常和它的衰变产物 Ra，Rn，Pb 等共存。在铀矿找矿工作中主要测量铀的衰变子体 RaB ( $^{214}_{82}\text{Pb}$ )，RaC ( $^{214}_{83}\text{Bi}$ ) 等所产生的  $\gamma$  射线强度。气态元素 Rn，半衰期较长，可向远处扩散而形成射气异常，因而在浮土覆盖地区可通过测量其射气浓度，来寻找较浅的隐伏矿体。铀衰变的最终产物 Pb 的含量与矿物形成的

时间成正比，地质上通常根据  $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ ， $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ ， $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ ， $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$  的

值，确定矿物的形成年龄。近年来，国内还应用衰变中间产物  $^{210}\text{Po}$  寻找隐伏矿体取得良好效果。应用铀的自发裂变和诱发裂变现象可解决若干地质问题。



## 二、铀的化学性质

铀在周期表中的位置及其电子壳层结构的特点决定了它的地球化学行为。它具有下列化学性质：

(1) 亲氧性 铀的化学性质活泼。铀在自然界形成氧化物及含氧酸盐，不形成自然铀及硫化物。

(2) 变价及价态转换性 铀在实验室中可以出现二价、三价、四价、五价和六价。但在自然界铀只有四、六两种价态，在一定条件下它们可以互相转化，即在铀所处的环境由还原条件变为氧化条件时，四价铀变为六价铀。相反，在由氧化条件转化为还原条件时，六价铀变为四价铀。因此，铀的变价特点是决定铀元素地球化学行为的最重要因素。

(3) 呈络合物出现的特性 六价铀在自然界中特别是在水溶液中，多呈  $\text{UO}_2^{2+}$ ，这种络离子叫做铀酰离子。 $\text{UO}_2^{2+}$  的离子半径很大，其长轴半径长  $3.02\text{--}3.42\text{\AA}$ ，示于图 1-2，约为最大

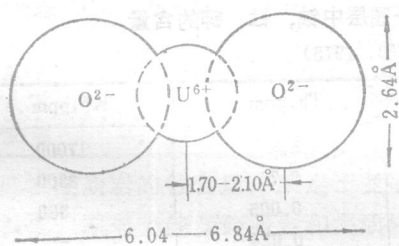


图1-2 铀酰离子

阳离子  $\text{Cs}^+$  半径  $1.78\text{\AA}$  的 2 倍。因此， $\text{UO}_2^{2+}$  与其他阳离子不能产生类质同象置换，但同部分阳离子和络阴离子  $\text{SiO}_4^{4-}$ ， $\text{PO}_4^{3-}$ ， $\text{AsO}_4^{3-}$ ， $\text{VO}_4^{3-}$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{CO}_3^{2-}$ ， $\text{MoO}_4^{2-}$ ， $\text{SeO}_4^{2-}$ ， $\text{TeO}_4^{2-}$  结合，形成铀酰含氧酸盐。

(4) 与某些元素电子层结构特征和化学性质的相似性 铀是锕系元素的成员之一，它的电子层结构特征和化学性质，在低价态时与钍和第 IV 族元素  $\text{Zr}$ ， $\text{Hf}$  以及镧系元素相似。所以在自然界中，铀与  $\text{Th}$ ， $\text{Zr}$ ， $\text{RE}^*$  等有广泛的类质同象置换。

\*  $\text{RE}$  为稀土元素符号。稀土元素包括钪和镧系元素，其中原子序数  $57\text{--}62$  的元素为镧族元素，亦称轻稀土元素 (LREE)，钇和原子序数  $63\text{--}71$  的元素为铈族元素，亦称重稀土元素 (HREE)。

## 第二节 铀在自然界的分布

研究铀在自然界的分布，是铀地球化学研究中的一个基本内容。铀是非常活泼的化学元素之一，它赋存在各种地质体中，其含量随各种地质体演化而变化。铀在不同地质体中分布具有一定的规律性，了解这些规律性对阐明铀矿形成及找矿条件有重要意义。

### 一、铀在地球各圈层中的分布

地球由地壳、地幔、地核三部分组成。铀、钍、钾在地球中的含量从地壳向地核逐渐降低，地壳中的铀含量最高，列于表1-3。在地壳各圈层中的平均铀含量也不同。在下部硅镁层（玄武岩层）中较低，约为1ppm，在硅铝层（花岗岩层）中最高，约为4ppm。

表1-3 地球各圈层中铀、钍、钾的含量  
(据黎彤, 1976)

地球圈层	U, ppm	Th, ppm	K*, ppm
地壳	1.7	5.8	17000
上地幔	0.33	0.75	2300
下地幔	0.003	0.005	300
地核	0.003	0.024	—

\*  $^{40}\text{K}$  占 K 总量的 0.0118%。

### 二、铀在地壳岩石中的分布

铀在各类岩石中的分布不均匀，平均铀含量各有不同。在各类岩浆岩中，以酸性岩中的铀含量最高，超基性岩中的铀含量最低，列于表1-4。应当指出，不同地区的同种岩石以及同类不同种

表 1-4 各类岩浆岩中的放射性元素含量

(据 A. П. 维诺格拉多夫, 1958, 1962)

岩 类	U, ppm	Th, ppm	Ra, ppt	<sup>40</sup> K, ppm
酸性岩	3.5	18	1.2	3.94
中性岩	1.8	7	0.6	2.71
基性岩	0.5	3	0.27	0.98
超基性岩	0.003	0.005	0.01	0.04

岩石的铀含量也有变化。这种变化，与区域地球化学背景、岩浆岩的演化特点及形成条件等诸因素有关。

各种沉积岩中的铀含量也不相同，其中以富含有机质、磷酸盐质及粘土质的岩石中铀含量较高，列于表1-5。

表 1-5 沉积岩中的铀、钍含量

(据 J. J. W. 罗杰斯和 J. A. S. 亚当斯, 1969)

岩 石	U, ppm	Th, ppm	Th/U
砂 岩	0.45—3.21	1.7—9.05	3.8—2.82
页 岩	3.7—4.1	10.2—11.0	2.75—2.68
黑色页岩	9—168	—	低
泥质岩	4	6.8	1.7
石灰岩	2.1	2.4	1.1
磷块岩	50—300	1—5	<0.1
蒸发岩	<0.1	—	—

区域变质岩的铀含量，决定于变质前原岩的含铀性和岩石的变质程度。原岩为陆源碎屑岩和泥质岩的变质岩铀含量高，而原岩为基性火山岩和化学沉积岩的变质岩铀含量最低。此外，变质岩的铀含量随岩石的变质程度的加深而降低，但在超变质作用的某些混合岩和混合花岗岩中铀含量较高。K. S 海尔和 J. A. S. 亚当斯对挪威兰居岛变质岩的研究表明，从浅变质的角闪岩相到深变质的麻粒岩相，其铀含量逐渐降低，列于表1-6。

值得指出的是，岩石中的铀含量和钍含量，决定放射性衰变子体的量。换句话说，放射性衰变子体镭 ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ) 及其同位素  $\text{MsTh}_1$  ( $^{228}_{88}\text{Ra}$ )， $\text{ThX}$  ( $^{224}_{88}\text{Ra}$ )， $\text{AcX}$  ( $^{223}_{88}\text{Ra}$ ) 和氡 ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ) 及其同位