

427167

# 铀矿物探



## 内 容 简 介

本书较系统地介绍了铀矿地质领域所采用的物探方法。内容包括放射性物探的普查方法（航空 $\gamma$ 法，地面 $\gamma$ 法， $\alpha$ 法，化探及水化学方法找矿），勘探方法（ $\gamma$ 测井，辐射取样与参数测定），用于间接找铀矿的非放射性物探方法，物探数据处理及铀矿物探的新发展等。全书共十章并有附录。

本书总结了我国几年来的科研成果，并收集了国内、外有关新资料。书中附图、表格、实际材料等较多。这是一本铀矿物探工作手册性的参考书。

本书可供从事铀矿地质的物探员及科技工作者在实际工作中参考，对地质院校物探专业的师生也有参考价值。

### 铀 矿 物 探

卢贤栋 吴慧山 编著  
唐声喙 崔焕敏

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

北京印刷一厂印刷

（北京市西便门）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×11681/32·印张16 $\frac{1}{2}$ ·字数417千字

1981年 月第一版·1981年 8月第一次印刷

印数001—2300·统一书号：15175·311

定价：2.45元

## 前 言

铀矿物探是由铀矿地质、地球物理探矿、核物理、电子学……等多门学科相交错而发展起来的一门边缘科学。近年来它发展很快，但至今还没有一本系统反映当前国内、外最近水平的参考书。编著本书的目的是为从事铀矿地质的物探员及科技工作者提供一本手册性的参考书。它的特点是：

1. 内容尽量做到全而新，文字则简明扼要，公式一律不推导，基本概念均不作详述，有关详细内容可查阅相应的参考文献。测量单位与符号均采用国际制。

2. 本书不仅编写了放射性物探，而且还照顾到当前探寻铀矿床时所采用的非放射性物探方法（七、八章）。

3. 考虑到当前铀矿物探的新进展，本书还简要介绍了物探数据处理（九章）及铀矿物探的新发展（十章），以便对其动向有所了解。

4. 本书未涉及物理分析及安全防护技术。因这两项工作在地质队分别由实验室及安防部门承担，不属铀矿物探的范畴。

本书在地面 $\gamma$ 能谱测量、测井、取样、 $\beta$ - $\gamma$ 取样、 $\alpha$ 径迹测量及激发极化法和浅层地震法，物探数据处理等章节中着重总结了我们自己的一些经验。本书仅对公开发表的国内、外文献注明出处，而对于一些未公开发表的国内资料，文中没有注明出处及作者，对于他们所提供的资料，这里一并致谢。

本书由卢贤栋（一、二、十章），吴慧山（三、四章），唐声喤（五、六、九章），崔焕敏（七、八章）分别执笔编写，并由卢贤栋同志主编定稿。

本书手稿先后经秦积庚、刘腾跃、蒋永一、贾文懿、刘彝筠、华荣洲、于汇津、聂勋碧、王柏钧等同志详细审阅；最后由赵廷业、华荣洲两同志审定，在此一并致谢。

由于编著者水平有限，书中难免有不少错误和缺点，欢迎读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第一章 铀、钍矿石的放射性	1
§ 1 放射性基础知识	1
一、概述	1
二、天然放射性同位素	2
三、放射性衰变的基本规律	7
四、中子及人工放射性	11
§ 2 放射性元素的射线	13
一、 $\alpha$ 射线	13
二、 $\beta$ 射线	21
三、 $\gamma$ 射线	25
§ 3 放射性测量单位、标准源与模型	38
一、放射性测量单位	38
二、标准源与标定模型	42
§ 4 铀、钍矿石的放射性特性	45
一、矿石中放射性平衡状态	45
二、铀矿石的射气扩散作用	46
三、氡的析出量	47
第二章 $\gamma$ 方法找铀矿	49
§ 1 方法基础	49
一、 $\gamma$ 射线探测器基本参数	49
二、 $\gamma$ 射线仪器谱	56
三、 $\gamma$ 场的理论计算	63
§ 2 航空 $\gamma$ 能谱测量	71
一、地质前提与方法原理	71
二、仪器设备	75
三、工作方法	82
四、航测成果的表达与解释	96
§ 3 地面 $\gamma$ 测量	100
一、汽车 $\gamma$ 能谱测量	100

二、地面 $\gamma$ 普查	( 102 )
三、地面 $\gamma$ 能谱测量	( 110 )
第三章 $\alpha$ 方法找铀矿	( 124 )
§ 1 方法原理及基础	( 124 )
一、放射性气体氡的特性	( 124 )
二、射气场的理论计算	( 133 )
三、 $\alpha$ 法找铀矿的应用条件及其测网	( 141 )
§ 2 常规射气测量法	( 143 )
一、仪器的准备与标定	( 143 )
二、工作方法	( 147 )
三、成果的解释	( 151 )
§ 3 $\alpha$ 径迹找矿法	( 159 )
一、 $\alpha$ 径迹找矿法的基础	( 159 )
二、工作方法	( 166 )
三、成果的解释	( 171 )
四、应用实例	( 180 )
§ 4 其它的 $\alpha$ 粒子找矿方法	( 183 )
第四章 地球化学方法找铀矿	( 187 )
§ 1 方法原理及基础	( 188 )
一、铀、钍的主要地球化学特征	( 188 )
二、放射性元素在自然界的分布	( 189 )
§ 2 金属量测量	( 194 )
一、原生晕测量	( 194 )
二、土壤金属量测量	( 196 )
三、河(湖)底沉积物测量	( 203 )
§ 3 水化学方法找铀矿	( 205 )
一、方法基础	( 205 )
二、工作方法	( 208 )
三、成果的解释	( 211 )
§ 4 生物地球化学方法找铀矿	( 215 )
第五章 $\gamma$ 测井	( 219 )
§ 1 $\gamma$ 测井理论	( 219 )
一、无泥浆和铁套管时的 $\gamma$ 测井	( 219 )
二、有泥浆和铁套管时的 $\gamma$ 测井	( 222 )
三、 $\gamma$ 测井小模型饱和度的理论计算	( 225 )
§ 2 $\gamma$ 测井工作方法	( 229 )

一、 $\gamma$ 测井换算系数的测定	229
二、井场工作方法	232
三、 $\gamma$ 测井资料的定量解释	235
四、钻孔中氧对 $\gamma$ 测井结果的影响	251
五、 $\gamma$ 测井结果的验证	253
§ 3 $\beta$ - $\gamma$ 测井	254
一、基本原理	254
二、仪器及工作方法	255
§ 4 $\gamma$ 能谱测井	258
一、基本原理	258
二、仪器及工作方法	262
三、定量解释及质量评价	272
第六章 辐射取样及参数测定	282
§ 1 $\gamma$ 辐射取样	282
一、差值法 $\gamma$ 取样	282
二、定向 $\gamma$ 取样	284
三、 $\gamma$ 取样技术和方法	287
四、成果解释与质量评价	292
五、炮孔 $\gamma$ 取样	295
§ 2 $\beta$ - $\gamma$ 取样	296
一、方法原理	296
二、仪器及工作方法	297
三、应用实例	298
§ 3 $\gamma$ 能谱取样	299
一、理论基础	300
二、仪器和工作方法	300
三、应用实例	305
§ 4 放射性物探参数的测定方法	306
一、放射性平衡系数的测定	307
二、天然产状矿石射气系数的测定	309
三、矿石体重的测定	311
第七章 铀、钍矿石的非放射性物性参数	326
§ 1 电性参数	326
一、电阻率	326
二、激发极化参数	331
§ 2 磁性参数	339

一、磁化率	( 339 )
二、剩余磁化强度	( 342 )
◇ 3 地震波速	( 344 )
一、纵波在各类岩石中的波速	( 345 )
二、波速测定方法	( 348 )
◇ 4 铀矿的红外辐射特性	( 349 )
第八章 非放射性物探方法在铀矿普查勘探中的应用	( 352 )
◇ 1 激发极化法	( 352 )
一、方法原理及地质前提	( 352 )
二、仪器设备	( 355 )
三、地面激发极化法	( 356 )
四、井中激发极化法	( 362 )
◇ 2 浅层地震方法	( 373 )
一、方法基础及仪器	( 373 )
二、浅层折射波法	( 379 )
三、浅层反射波法	( 387 )
四、应用实例	( 396 )
◇ 3 其它物探方法	( 399 )
一、电阻率法	( 399 )
二、自然电场法	( 409 )
三、无线电波透视法	( 411 )
四、磁法	( 413 )
第九章 物探资料数据处理	( 418 )
◇ 1 底数及异常下限的确定方法及其应用	( 418 )
一、根据频率分布曲线确定岩石底数	( 418 )
二、根据累积频率展直图确定岩石底数	( 419 )
三、资料整理成图及应用实例	( 420 )
◇ 2 概率统计方法分离物探异常	( 423 )
一、趋势面分析	( 423 )
二、图解法趋势面分析	( 430 )
三、逆概率法	( 435 )
四、自调滤波法	( 441 )
五、能导滤波法	( 445 )
◇ 3 物探资料的综合解释	( 447 )
一、概率统计方法解反演问题概述	( 447 )
二、综合解释的基本原则	( 449 )

三、图形识别分类法·····	( 451 )
四、基于自学原理的分类法·····	( 456 )
第十章 铀矿物探的新发展·····	( 462 )
§ 1 铀矿普查方法的新发展·····	( 462 )
一、区域普查方法·····	( 462 )
二、找深部铀矿方法·····	( 465 )
§ 2 直接测铀的测井方法·····	( 479 )
一、缓发裂变中子测井·····	481 )
二、用Ge(Li)探测器的 $\gamma$ 能谱测井·····	( 491 )
三、其它测井方法·····	( 494 )
附录 1 $F(x)$ 函数表·····	( 501 )
附录 2 $G(x, y, u)$ 、 $I_M/I_\infty$ 、 $s/S$ 函数表·····	( 503 )
附录 3 专用函数表·····	( 513 )
附录 4 正态分布表·····	( 518 )
附录 5 $F$ 分布表·····	( 519 )
参考文献·····	( 521 )



# 第一章 铀、钍矿石的放射性

## § 1 放射性基础知识

### 一、概 述

放射性衰变是不稳定的原子核所特有的一个自发转变过程。在这个过程中，原子核放出带有一定能量的粒子，或者以电磁辐射的形式释放能量。放射性衰变的类型一般表现为 $\alpha$ 、 $\beta^-$ 、正电子( $\beta^+$ )衰变或电子俘获( $\epsilon$ )。

核内具有一定质子数和中子数的一类原子叫做核素，例如 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 是一种核素。而核内质子数相同，中子数不同的核素，在元素周期表中属于同一位置，故称为同位素，例如 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 是同位素。放射性元素被称为放射性核素或放射性同位素，习惯上这两个术语可以通用。由于铀矿地质上已习惯用同位素，故本书以下均称同位素，意即指核素。

放射性同位素进行 $\alpha$ 衰变时放出 $\alpha$ 粒子， $\alpha$ 粒子实际上就是氦核( ${}_{2}^4\text{He}^{2+}$ )，带有两个正电荷，具有一定的能量。原子核经 $\alpha$ 衰变后产生的元素，其原子序数减少2，质量数减少4， $\alpha$ 衰变可表示为： ${}_{Z}^AX \longrightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_{2}^4\text{He}$

式中 ${}_{2}^4\text{He}$ 是 $\alpha$ 粒子。 ${}_{Z}^AX$ 为母体元素。 ${}_{Z-2}^{A-4}Y$ 为 $\alpha$ 衰变后产生的子体元素。

放射性同位素进行 $\beta$ 衰变时放出 $\beta$ 粒子， $\beta$ 粒子是带有一定能量的电子。原子核经 $\beta$ 衰变后产生的元素，其原子序数增加1，质量数不变。 $\beta$ 衰变可表示为： ${}_{Z}^AX \longrightarrow {}_{Z+1}^AY + e^{-} + \nu$

式中 $e^{-}$ 是 $\beta$ 粒子，即电子。 ${}_{Z+1}^AY$ 为 $\beta$ 衰变后产生的子体元素。 $\nu$ 代表中微子，它是质量十分微小(电子质量的1/2000)的中性粒子。

$\gamma$  辐射是当放射性同位素衰变到子核激发态后，退激时所放出的一种波长极短的电磁辐射，它具有粒子和波动双重性。 $\gamma$  光子不带电。

正电子( $\beta^+$ )衰变时原子核放出 $\beta^+$ 粒子， $\beta^+$ 粒子除了带正电外，与 $\beta$ 粒子相似，也具有动能。当正电子与电子相互作用时，两者消失并转变成具有正、负电子结合能量的两个光子。当粒子与反粒子相互作用并转变成其它粒子，这个过程通常称为湮灭。

电子俘获是放射性同位素俘获一个轨道电子。这时原子核中的一个质子变为中子，而电子壳层中空出的位置由较高能级的电子来填补，同时放出特征X射线。例如 $^{40}\text{K}$ 的原子核可俘获K层电子，简称K俘获。

某些放射性元素的重原子核能自发裂变成两部分，释放出大量能量并同时放出数个中子。例如 $^{235}\text{U}$ 每次裂变能放出二、三个中子。一公斤铀每秒能放出11.8个中子。

表 1.1 列出了几种粒子的物理常数<sup>30)</sup>。

粒 子	质 量		电荷, 库仑(C)	备 注
	克 (g)	原子质量单位(u)		
$\alpha$ 粒子	$6.6456 \times 10^{-24}$	4.0026135	$3.20420 \times 10^{-19}$	1 u = 1.6605655 × 10 <sup>-27</sup> 千克
$\beta$ 粒子	$9.1091 \times 10^{-28}$	$5.4855 \times 10^{-4}$	$-1.6021892 \times 10^{-19}$	
正电子	$9.1095 \times 10^{-28}$	$5.4858 \times 10^{-4}$	$1.6021892 \times 10^{-19}$	
质 子	$1.67264 \times 10^{-21}$	1.0072716	$1.6021892 \times 10^{-19}$	
中 子	$1.67495 \times 10^{-21}$	1.0086627	0	

原子质量单位(u)的数值是 $1.6605655 \times 10^{-27}$  千克。

电子电荷具有 $1.6021892 \times 10^{-19}$  库仑(C)。

核辐射能量的实用单位为兆电子伏(MeV)，其数值等于 $1.6021892 \times 10^{-13}$  焦耳(J)。因为： $1\text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

## 二、天然放射性同位素

### (一) 天然放射性系列

自然界存在着三个放射性系列，即铀(U)系，钍(Th)系，和

铀 (AcU) 系。放射性系列以起始元素的名称命名。放射性元素经过衰变, 变成一个新的元素称为衰变子体。这个元素仍不稳定, 具有放射性, 它继续进行衰变, 直到形成非放射性的 (稳定) 同位素为止。图 1.1 列出了三个放射性系列的衰变图<sup>[1, 30]</sup>。图中自上而下按原子序数及元素符号 (如  ${}_{92}\text{U}$ 、 ${}_{91}\text{Pa}$ 、 ${}_{90}\text{Th}$ ……) 顺序排列。方框中上排为同位素旧的习惯名称 (如 RaB、RaC……等) 及其质量数, 下排为半衰期。三个放射性系列排列在一张图上, 便于对比同一元素在三个放射性系列中的相应同位素。例如, 氡 ( ${}_{86}\text{Rn}$ ) 在铀、钍、锕铀系中的相应同位素分别为:  ${}^{222}_{86}\text{Rn}(\text{Rn})$ 、 ${}^{220}_{86}\text{Rn}(\text{Tn})$  及  ${}^{219}_{86}\text{Rn}(\text{An})$ 。

表 1.2, 1.3, 1.4 列出了三个放射性系列同位素的基本参数<sup>[1, 30]</sup>。

从表 1.2, 1.3, 1.4 三个放射性系列中可以看到:

(1) 三个系列的起始元素的半衰期都很长, 在  $10^8 \sim 10^{10}$  年之间。如  ${}^{238}_{92}\text{U}$  为  $4.51 \times 10^9$  年,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  为  $7.1 \times 10^8$  年,  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  为  $1.4 \times 10^{10}$  年。

(2) 每个系列中各有一气态同位素, 原子序数为 86, 它是氡的同位素, 通常称为射气。铀系的射气是  ${}^{222}_{86}\text{Rn}(\text{Rn})$ , 半衰期为 3.825 天; 钍系的射气是  ${}^{220}_{86}\text{Rn}(\text{Tn})$ , 半衰期为 55.6 秒; 锕铀系的射气是  ${}^{219}_{86}\text{Rn}(\text{An})$ , 半衰期为 3.96 秒。

(3) 三个系列中的射气都能逸散, 其衰变子体除铀系的  ${}^{210}\text{Pb}$  (RaD)、 ${}^{210}\text{Bi}$  (RaE)、 ${}^{210}\text{Po}$  (RaF) 为长寿命沉淀物外, 其余均为短寿命的。

表 1.2 铀系同位素表

同位素	半衰期(T)	衰变常数( $\lambda$ ), 秒 <sup>-1</sup>	射线形式	与 ${}^{238}\text{U}$ 处于平衡的同位素数量
${}^{238}_{92}\text{U}(\text{U})$	$4.51 \times 10^9$ 年	$4.867 \times 10^{-16}$	$\alpha, \gamma$	1
${}^{234}_{90}\text{Th}(\text{UX}_1)$	24.1 天	$3.328 \times 10^{-7}$	$\beta, \gamma$	$1.462 \times 10^{-11}$
${}^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}(\text{UX}_2)$	1.17 分	$0.988 \times 10^{-2}$	$\beta, \gamma$	$4.926 \times 10^{-16}$
${}^{234}_{91}\text{Pa}(\text{UZ})$	6.75 时	$2.852 \times 10^{-6}$	$\beta, \gamma$	$1.707 \times 10^{-13}$
${}^{234}_{92}\text{U}(\text{UII})$	$2.44 \times 10^5$ 年	$9.002 \times 10^{-11}$	$\alpha, \gamma$	$5.40 \times 10^{-9}$
${}^{230}_{90}\text{Th}(\text{Th})$	$7.7 \times 10^4$ 年	$2.852 \times 10^{-13}$	$\alpha, \gamma$	$1.707 \times 10^{-7}$
${}^{226}_{88}\text{Ra}(\text{Ra})$	1602 年	$1.356 \times 10^{-11}$	$\alpha, \gamma$	$3.589 \times 10^{-7}$
${}^{222}_{86}\text{Rn}(\text{Rn})$	3.825 天	$2.160 \times 10^{-6}$	$\alpha, \gamma$	$2.318 \times 10^{-12}$

续表

同位素	半衰期(T)	衰变常数( $\lambda$ ),秒 <sup>-1</sup>	射线形式	与 <sup>238</sup> U处于平衡的同位素数量
<sup>218</sup> <sub>84</sub> Po(RaA)	3.0分	$3.851 \times 10^{-3}$	$\alpha$ (99.96%) $\beta$ (0.0185%)	$1.264 \times 10^{-15}$
<sup>218</sup> <sub>85</sub> At(At)	2秒	0.347	$\alpha$	$14.02 \times 10^{-18}$
<sup>214</sup> <sub>82</sub> Pb(RaB)	26.8分	$4.310 \times 10^{-4}$	$\beta, \gamma$	$1.129 \times 10^{-14}$
<sup>214</sup> <sub>83</sub> Bi(RaC)	19.7分	$5.865 \times 10^{-4}$	$\alpha$ (0.021%) $\beta$ (99.98%) $\gamma$	$0.830 \times 10^{-14}$
<sup>214</sup> <sub>84</sub> Po(RaC')	$1.64 \times 10^{-4}$ 秒	$4.227 \times 10^3$	$\alpha, \gamma$	$1.151 \times 10^{-20}$
<sup>214</sup> <sub>86</sub> Te(RaC'')	1.32分	$8.75 \times 10^{-3}$	$\beta, \gamma$	$5.562 \times 10^{-16}$
<sup>214</sup> <sub>87</sub> Pb(RaD)	22.3年	$9.850 \times 10^{-10}$	$\beta, \gamma$	$4.941 \times 10^{-9}$
<sup>214</sup> <sub>83</sub> Bi(RaE)	5天	$1.605 \times 10^{-6}$	$\beta$	$3.032 \times 10^{-12}$
<sup>214</sup> <sub>84</sub> Po(RaF)	138.4天	$5.795 \times 10^{-8}$	$\alpha, \beta, \gamma$	$0.840 \times 10^{-10}$
<sup>208</sup> <sub>82</sub> Pb(RaG)	稳定	—	—	—

表 1.3 铀钍系同位素表

同位素	半衰期(T)	衰变常数( $\lambda$ ),秒 <sup>-1</sup>	射线形式	与 <sup>238</sup> U处于平衡的同位素数量
<sup>235</sup> <sub>92</sub> U(AcU)	$7.1 \times 10^8$ 年	$3.094 \times 10^{-17}$	$\alpha, \gamma$	$7.2 \times 10^{-3}$
<sup>231</sup> <sub>90</sub> Th(UY)	25.52时	$7.543 \times 10^{-6}$	$\beta, \gamma$	$2.954 \times 10^{-11}$
<sup>231</sup> <sub>91</sub> Pa(Pa)	$3.25 \times 10^4$ 年	$6.758 \times 10^{-13}$	$\alpha, \gamma$	$3.297 \times 10^{-7}$
<sup>227</sup> <sub>89</sub> Ac(Ac)	21.77年	$1.009 \times 10^{-9}$	$\alpha$ (1.4%) $\beta$ (~99%) $\gamma$	$2.208 \times 10^{-10}$
<sup>227</sup> <sub>90</sub> Th(RdAc)	18.2天	$4.108 \times 10^{-7}$	$\alpha, \gamma$	$5.054 \times 10^{-14}$
<sup>223</sup> <sub>88</sub> Ra(AcX)	11.43天	$7.014 \times 10^{-7}$	$\alpha, \gamma$	$3.176 \times 10^{-13}$
<sup>219</sup> <sub>87</sub> Rn(An)	3.96秒	0.175	$\alpha, \gamma$	$1.273 \times 10^{-18}$
<sup>215</sup> <sub>87</sub> Po(AcA)	0.0018秒	$3.851 \times 10^2$	$\alpha$	$5.786 \times 10^{-22}$
<sup>215</sup> <sub>88</sub> At(At)	$1 \times 10^{-1}$ 秒	$6.93 \times 10^4$	$\alpha$	$3.215 \times 10^{-24}$
<sup>215</sup> <sub>84</sub> Pb(AcB)	36.1分	$3.199 \times 10^{-1}$	$\beta, \gamma$	$6.965 \times 10^{-16}$
<sup>215</sup> <sub>83</sub> Bi(AcC)	2.14分	$5.399 \times 10^{-3}$	$\alpha$ (99.7%) $\beta$ (0.28%) $\gamma$	$4.127 \times 10^{-17}$
<sup>211</sup> <sub>84</sub> Po(AcC')	0.56秒	1.238	$\alpha$	$1.800 \times 10^{-19}$
<sup>207</sup> <sub>81</sub> Tl(AcC'')	4.79分	$2.411 \times 10^{-4}$	$\beta, \gamma$	$9.241 \times 10^{-17}$
<sup>207</sup> <sub>82</sub> Pb(AcD)	稳定	—	—	—

(4) 各系列衰变的最后产物均是铅的稳定同位素, 对应于铀系的为<sup>206</sup><sub>82</sub>Pb, 钍钍系为<sup>207</sup><sub>82</sub>Pb, 钷系为<sup>208</sup><sub>82</sub>Pb。

(5) 三个系列的同位素质量数都有一定的规律。钷系每一同

Z  
 82 U  
 81 Pa  
 90 Th  
 89 Ac  
 88 Ra  
 87 Fr  
 86 Rn  
 85 At  
 84 Po  
 83 Bi  
 82 Pb  
 81 Tl

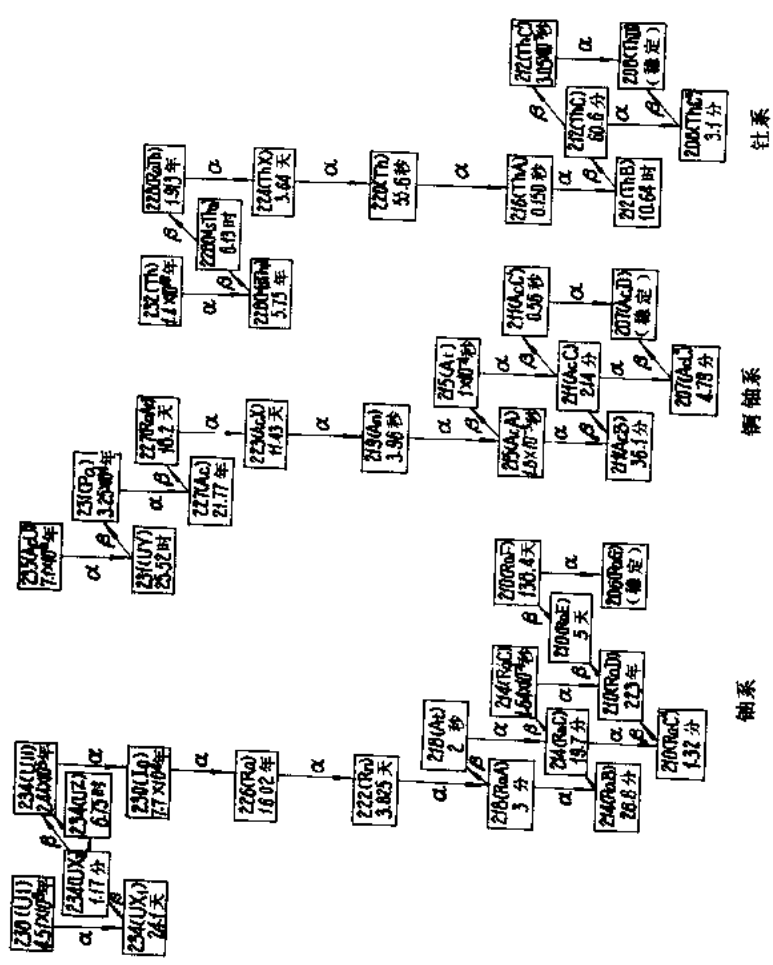


图 1.1 三个放射性系列的衰变图

铀系

锕系

钍系

表 1.4 钍系同位素表

同位素	半衰期(T)	衰变常数( $\lambda$ ),秒 <sup>-1</sup>	射线形式	与 <sup>232</sup> Th处于平衡的同位素数量
<sup>232</sup> <sub>90</sub> Th(Th)	1.4 × 10 <sup>10</sup> 年	1.57 × 10 <sup>-18</sup>	$\alpha, \gamma$	1
<sup>228</sup> <sub>88</sub> Ra(MsThI)	5.75年	3.820 × 10 <sup>-9</sup>	$\beta, \gamma$	4.110 × 10 <sup>-10</sup>
<sup>228</sup> <sub>89</sub> Ac(MsTh2)	6.13时	3.140 × 10 <sup>-7</sup>	$\beta, \gamma$	5.00 × 10 <sup>-11</sup>
<sup>228</sup> <sub>90</sub> Th(RaTh)	1.913年	1.148 × 10 <sup>-8</sup>	$\alpha, \gamma$	1.368 × 10 <sup>-10</sup>
<sup>224</sup> <sub>88</sub> Ra(ThX)	3.64天	2.204 × 10 <sup>-6</sup>	$\alpha, \gamma$	7.123 × 10 <sup>-12</sup>
<sup>220</sup> <sub>86</sub> Rn(Tn)	55.6秒	1.247 × 10 <sup>-2</sup>	$\alpha, \gamma$	1.239 × 10 <sup>-10</sup>
<sup>218</sup> <sub>84</sub> Po(ThA)	0.150秒	4.621	$\alpha$	3.40 × 10 <sup>-10</sup>
<sup>214</sup> <sub>82</sub> Pb(ThB)	10.64时	1.809 × 10 <sup>-5</sup>	$\beta, \gamma$	8.679 × 10 <sup>-11</sup>
<sup>214</sup> <sub>83</sub> Bi(ThC)	60.6分	1.906 × 10 <sup>-4</sup>	$\alpha(36.0\%)$ $\beta(64.0\%)$ $\gamma$	8.237 × 10 <sup>-11</sup>
<sup>212</sup> <sub>84</sub> Po(ThC')	3.05 × 10 <sup>-7</sup> 秒	2.272 × 10 <sup>6</sup>	$\alpha$	6.910 × 10 <sup>-20</sup>
<sup>208</sup> <sub>81</sub> Tl(ThC'')	3.1分	3.726 × 10 <sup>-5</sup>	$\beta, \gamma$	4.214 × 10 <sup>-16</sup>
<sup>208</sup> <sub>82</sub> Pb(ThD)	稳定	—	—	—

位素质量数是  $A = 4n$ , 铀系是  $A = 4n + 2$ , 锕铀系是  $A = 4n + 3$ ,  $n$  为正整数。

(6) 自然界中铀的同位素有三个。<sup>238</sup>U ( $T = 4.51 \times 10^9$ 年)、<sup>234</sup>U ( $T = 2.44 \times 10^5$ 年)、<sup>235</sup>U ( $T = 7.1 \times 10^8$ 年)。在自然界, 它们的丰度比为:

$$^{238}\text{U}; ^{234}\text{U}; ^{235}\text{U} = 1:5.4 \times 10^{-5}:7.2 \times 10^{-3}.$$

## (二) 不成系列的天然放射性同位素

除了三个放射性系列外, 自然界还存在一些放射性同位素, 它们经一次衰变后即成稳定同位素。较有意义的不成系列的天然放射性同位素见表 1.5<sup>[1,30]</sup>。值得注意的是<sup>40</sup>K(钾), 因为它在地壳中分布较广。

放射性同位素<sup>40</sup>K在自然界的丰度为0.0118%。约11%的<sup>40</sup>K由于K俘获而成为<sup>40</sup>Ar, 同时放出能量为1.46MeV的 $\gamma$ 射线。其余89.33%的核经 $\beta$ 衰变而转变为<sup>40</sup>Ca, 放出 $\beta$ 粒子的最大能量为1.3116MeV。<sup>40</sup>K的半衰期为 $1.26 \times 10^9$ 年。1克自然钾每秒钟平均放出27.2个 $\beta$ 粒子及3.4个 $\gamma$ 光子。一次衰变的 $\gamma$ 光子数

表 1.5 不成系列的天然放射性同位素

同位素	丰度, %	半衰期( $T$ ), 年	射线形式	射线能量 MeV	衰变产物
$^{40}_{19}\text{K}$	0.0118	$1.26 \times 10^9$	$\beta^-$ (89.33%) $\gamma$ (~11%)	1.3116 1.460	$^{40}_{20}\text{Ca}$ $^{40}_{18}\text{Ar}$
$^{87}_{37}\text{Rb}$	0.19	$\geq 2 \times 10^{10}$	$\beta^-$	—	$^{87}_{38}\text{Sr}$
$^{90}_{40}\text{Zr}$	2.8	$> 3.6 \times 10^{17}$	$\beta^-$	—	$^{90}_{40}\text{Nb}$
$^{115}_{51}\text{In}$	95.72	$5.1 \times 10^{11}$	$\beta^-$	0.486	$^{115}_{50}\text{Sn}$
$^{137}_{52}\text{Te}$	34.48	$2.51 \times 10^{21}$	$\beta^-$	—	$^{137}_{51}\text{I}$
$^{138}_{57}\text{La}$	0.089	$1.2 \times 10^{11}$	$\beta^-$	0.21	$^{138}_{56}\text{Ba}$
$^{147}_{62}\text{Sm}$	15.0	$1.07 \times 10^{11}$	$\alpha$	2.23	$^{143}_{80}\text{Nd}$
$^{176}_{71}\text{Lu}$	2.6	$3.0 \times 10^{10}$	$\beta^-$	0.42	$^{176}_{72}\text{Hf}$
$^{187}_{74}\text{W}$	0.13	$6 \times 10^{14}$	$\alpha$	—	$^{183}_{72}\text{Hf}$
$^{187}_{75}\text{Re}$	62.5	$5 \times 10^{10}$	$\beta^-$	0.0025	$^{187}_{76}\text{Os}$
$^{209}_{83}\text{Bi}$	100	$> 2 \times 10^{18}$	$\alpha$	—	$^{205}_{81}\text{Tl}$

$n$  为 0.11 个, 其总能量为  $nE_\gamma = 0.16 \text{ MeV}$ 。

### 三、放射性衰变的基本规律

在较小的时间间隔  $dt$  内, 衰变的原子数  $dN$  与当时的原子总数  $N$  成正比, 即

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

积分后, 得指数规律,

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

(1.2) 式中,  $N_0$ ——起始时间 ( $t = 0$ ) 放射性同位素的原子数。  $t$ ——衰变时间。  $N$ ——经时间  $t$  后的放射性同位素原子数。  $\lambda$ ——该放射性同位素的衰变常数, 它表示单位时间内该同位素衰变的相对数量 (量纲为  $\text{秒}^{-1}$ ), 即衰变速度。还可以用半衰期 ( $T$ ) 及平均寿命 ( $\tau$ ) 来表示放射性同位素的衰变速度。

半衰期指放射性同位素衰变到起始原子数目的一半时所需要的时间。衰变常数 ( $\lambda$ ) 与半衰期 ( $T$ ) 及平均寿命 ( $\tau$ ) 的关系如下:

$$T = \frac{0.693}{\lambda}; \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44 T \quad (1.3)$$

### (一) 两个放射性同位素相继衰变

这时，子体同位素的数量可按下式计算：

$$N_2 = N_{02} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (1.4)$$

或可简写为 
$$N_2 = N_{22} + N_{21} \quad (1.5)$$

式中， $N_{01}$ 、 $N_{02}$ ——分别为起始时间（ $t = 0$ ）时母体、子体同位素的原子数。 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ——分别为母体及子体同位素的衰变常数。

$N_2$ —— $t$  时间后子体同位素的数量。 $N_{22}$ —— $t$  时间后由原有的子体同位素（2）衰变而剩下的子体同位素数量。 $N_{21}$ —— $t$  时间后由母体同位素（1）衰变而积累的子体同位素数量。

由（1.4）（1.5）式所描述的子体同位素原子数随时间变化的规律见图1.2。

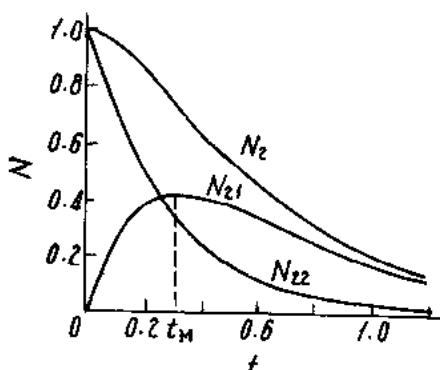


图 1.2 两种放射性元素的相继衰变

[ 根据(1.5)式 ]

如果在  $t = 0$  时，只有母体，没有子体，即  $N_{02} = 0$ ，则子体的积累公式可表示为：



$$N_2 = N_{21} = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.6)$$

下面讨论几种特殊情况：

(1)  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  长寿母体同位素的子体的积累 经过10倍于子体同位素的半衰期后 (即  $t = 10 T_2$ )，子体同位素与长寿母体同位素达到放射性平衡。这时，两者的衰变率相等，即

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (1.7)$$

在放射性系列中，整个系列达到放射性平衡的时间为系列中寿命最长子体同位素半衰期的十倍。这时，

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n \quad (1.8)$$

铀系列达到放射性平衡需时  $8 \times 10^5$  年，钍系则需要60年。

(2)  $\lambda_1 < \lambda_2$  母体同位素衰变较慢，但慢得不很显著。经

过  $t_M = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$  后，子体同位素达到极大， $N_{2M} = \frac{\lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2}$ 。经  $t > 10 T_2$ ，则达到放射性动平衡。这时母体同位素与子体同位素原子数的比值保持不变，即：

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.9)$$

母体、子体同位素衰变率随时间的关系曲线如图1.3所示。

(3)  $\lambda_1 > \lambda_2$ ，即母体同位素的半衰期比子体的短。经过  $t = 10 T_1$  后，

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.10)$$

这相当于单个放射性同位素衰变的情况。因为这时，母体同位素已衰变完了，如图1.4所示。