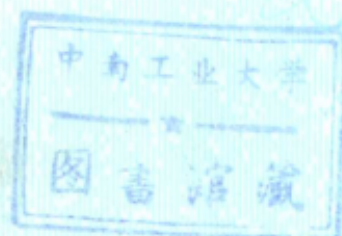


718607

高等学校试用教材

放射性方法勘查



章 晔 华 荣 洲 石 柏 慎 编著

原子能出版社

ISBN 7-5022-0238-2
P·11(课) 定价: 5.55 元



高等学校试用教材

放射性方法勘查

章 晔 华荣洲 石柏慎 编著

吴慧山 主审 刘腾耀 审

原子能出版社

内 容 简 介

本书为高等学校的应用地球物理专业、核电子学与核技术应用专业的教材,亦可作为铀矿地质勘查专业的教学参考书。

本书的主要内容有放射性测量基础、放射性普查方法、放射性勘探方法(包括天然放射性方法和人工放射性方法)以及放射性方法在地学其它领域中的应用。它对从事勘查铀矿、金矿、贵金属矿、稀土矿、金属与非金属矿、天然气与石油,以及从事水文地质与工程地质、环境地质、地震预报和古墓勘察等的工程技术人员是一本理想的参考书。

本书的特点是理论系统、全面,实例丰富,图文并茂,方法反映了80年代国际先进技术水平。

★ ★ ★

本书由吴慧山主审、刘腾耀审阅,经核工业部教育司教材编审委员会《地球物理勘查》课程组于1987年2月由吴慧山、卢存恒主持召开的审稿会审定,同意作为高等学校试用教材。

高等学校试用教材

放射性方法勘查

章晔 华荣洲 石柏慎 编著

吴慧山 主审 刘腾耀 审

责任编辑 操达志

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张28.375·字数708千字插一

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数1—1000

ISBN 7-5022-0238-2

P·11(课) 定价: 5.55元

前 言

《放射性方法勘查》一书是根据一九八二年十二月由核工业部教育司召开的教材会议上所审定的编写提纲编写的。

编写过程中,贯彻了“教育要面向现代化、面向世界、面向未来”的方针,从培养高级专门人才的需要出发,以改革精神向多样化发展,并研究和吸收各国教材的长处,形成有自己特色的教材。在编写过程中还注意到,努力提高教材的思想性、科学性、启发性,以及适合我国情况的先进性和教学适用性。

本书的编写是在一九七八年原子能出版社出版的《放射性勘探方法》一书以及总结近年来的教学经验,参考国内外本学科的最新成就的基础上进行的。本书内容除铀矿的普查、勘探、地质填图和矿山开采外,还包括非放射性矿产,即石油和天然气,金矿及其它贵金属矿、多金属矿和非金属矿的勘查;解决工程地质和水文地质问题,即普查和勘测地下水源和勘察地基等;预报中、近期地震和监测环境等范围广泛的领域。

全书分十三章。第一章放射性方法勘查的基础知识;第二章射线与物质相互作用;第三章放射性测量单位及核辐射防护;第四章放射性普查概论;第五章航空伽玛测量;第六章地面伽玛测量;第七章常规射气测量;第八章 α 径迹蚀刻测量及钋量测量;第九章伽玛测井;第十章辐射取样及编录;第十一章铀矿石有效平衡系数及其应用;第十二章放射性分析和第十三章放射性方法在地学其它领域中的应用。书后列出的附录有:一、常用物理常数;二、 α 衰变表;三、几种物质的 γ 射线质量衰减系数表;四、几种物质的密度;五、几种常用核素的伽玛常数和半衰期表;六、射线标准源(一);七、射线标准源(二);八、 e^{-x} , $\Phi(x)$ 和 $F(x)$ 函数表;九、 $G(x, y, u)$ 函数表;十、放射性方法勘查中常用法定单位和应废除单位的对照表。

本书可作为高等学校应用地球物理专业和核电子学与核技术应用专业的教科书,亦可作为铀矿地质勘查专业和水文地质与工程地质专业的教学参考书。

学习本课程前,应学习高等数学、近代物理、电子技术、基础地质、计算技术等课程。

本书的前言、第二章、第六章、第十二章、附录由章晔编写;第一章、第三章、第七章、第八章、第十一章由华荣洲编写;第四章、第五章、第九章、第十章、第十三章由石柏慎编写。杨鹤鸣、赵树新、李斌分别为第五章的第二节和第三节撰写了初稿。原核工业部地质局所属单位、北京铀矿地质研究所和地矿部所属有关单位等也提供了不少宝贵资料。

成都地质学院的梁锦华、梁兴中为本教材进行了认真内审。

本教材由原核工业部北京铀矿地质研究所吴慧山主审,刘腾耀审。原核工业部地质局朱文泉及华东地质学院卢存恒、华东地勘局269大队郑名寿和原子能出版社姜利民、成都地质学院梁兴中等同志参加了1987年2月的审稿会议,提出了十分宝贵意见,对提高本书的质量,起到了重要作用,值此向以上同志表示衷心感谢!

限于作者水平,本书不足之处在所难免,请读者批评指正。

编著者

1988年5月

目 录

前言

第一编 放射性测量基础

第一章 放射性方法勘查的基本知识.....	1
第一节 原子和原子核	1
第二节 核衰变	2
第三节 放射性系列	6
第四节 天然放射性核素的射线谱	16
第五节 放射性核素衰变的基本规律	25
第六节 两种和多种放射性核素的衰变规律	26
第七节 衰变规律的应用	31
第八节 中子及人工放射性核素	37
第二章 射线与物质相互作用	39
第一节 带电粒子与物质相互作用	39
第二节 γ 射线与物质相互作用	51
第三节 γ 射线在物质中的衰减	61
第四节 γ 射线通过物质时谱成分的变化	66
第五节 γ 射线在物质中迁移	78
第六节 中子与物质相互作用	80
第三章 放射性测量单位及核辐射防护	83
第一节 放射性测量常用单位	83
第二节 标准源与标准模型	87
第三节 核辐射防护简述	92

第二编 放射性普查方法

第四章 放射性普查概论	96
第一节 放射性核素在自然界的分布	96
第二节 铀矿床及其主要地球化学特征	104
第三节 铀矿的分散晕及分散流	109
第四节 铀、钍同位素地质学简介	112
第五节 放射性普查概述	116
第五章 航空伽玛测量	123
第一节 航空伽玛测量基本原理	123
第二节 航空伽玛能谱测量工作方法	137
第三节 航空伽玛测量资料解释和应用实例	144
第六章 地面伽玛测量	153
第一节 地面伽玛测量基本原理	153
第二节 地面伽玛测量工作方法	159

第三节	地面伽玛能谱测量	169
第四节	仪器性能的检查	179
第五节	放射性普查测量的数据处理	186
第六节	地面伽玛能谱测量在地质工作中应用	215
第七章	常规射气测量	224
第一节	射气的性质和射气晕的形成	224
第二节	射气分布的理论计算	229
第三节	射气测量工作方法	242
第四节	常规射气测量资料的整理	247
第五节	影响射气异常的一些因素	250
第六节	射气异常的处理与评价	251
第八章	α径迹蚀刻测量及钋量测量	259
第一节	径迹的形成及固体核径迹探测器的性质	259
第二节	射气浓度与 α 径迹密度的关系	262
第三节	α 径迹蚀刻测量工作方法	264
第四节	α 径迹蚀刻测量资料的整理与解释	267
第五节	钋量测量基本原理	271
第六节	钋量测量工作方法	273
第七节	钋量测量资料的整理与解释	275
第八节	其他射气测量方法简介	279

第三编 放射性勘探方法

第九章	伽玛测井	283
第一节	沿钻孔轴线的 γ 照射量率	283
第二节	伽玛测井的野外工作方法	289
第三节	伽玛测井异常曲线解释方法	292
第四节	伽玛测井换算系数及其测定方法	302
第五节	几项修正系数	304
第六节	伽玛测井影响因素及质量评价	306
第七节	伽玛能谱测井	309
第十章	辐射取样及编录	315
第一节	辐射编录	315
第二节	伽玛辐射取样的基本原理	317
第三节	伽玛辐射取样的工作方法	319
第四节	伽玛辐射取样异常曲线解释方法	322
第五节	伽玛辐射取样换算系数	323
第六节	伽玛辐射取样的影响因素	324
第七节	炮孔伽玛辐射取样	325
第八节	β - γ 辐射取样	325
第九节	伽玛能谱辐射取样	327
第十一章	铀矿石有效平衡系数及其应用	329
第一节	铀矿石放射性平衡的研究	329

第二节	射气系数的野外测定方法	335
第三节	有效平衡系数的应用	340
第十二章	放射性分析	341
第一节	放射性分析的基本原则	341
第二节	根据 β - γ 射线计数率确定样品中的铀、镭含量	343
第三节	测定镭含量和射气系数	355
第四节	铀钍矿样品中铀、镭、钍含量的分析	358
第五节	放射性分析中的统计误差及分析精度估计	369
第六节	放射性分析的质量检查	376
第七节	其它分析方法简介	379
第十三章	放射性方法在地学其它领域中的应用	391
第一节	应用放射性方法找金矿	391
第二节	放射性方法在水文地质及工程地质中的应用	399
第三节	辐射法测定密度及其若干应用	411
第四节	应用放射性方法寻找石油及天然气	421
第五节	应用放射性方法寻找非放射性的固体矿产	426
第六节	应用放射性方法解决某些地质学问题	432
附录一	常用物理常数	437
附录二	氡衰变表($I=I_0e^{-\lambda t}$)	437
附录三	几种物质的 γ 射线质量衰减系数(μ/ρ)表	439
附录四	几种物质的密度	440
附录五	几种常用核素的 γ 常数(K_γ)和半衰期(T)表	441
附录六	射线标准源(一)	441
附录七	射线标准源(国产)(二)	442
附录八	e^{-x} , $\Phi(x)$ 和 $F(x)$ 函数表	442
附录九	$G(x, y, u)$ 函数表	444
附录十	放射性方法勘查中常用法定单位和应废除单位的对照表	445

第一编 放射性测量基础

第一章 放射性方法勘查的基本知识

第一节 原子和原子核

一、原 子

原子是构成自然界各种元素的最基本单位,由原子核及核外轨道电子(又称束缚电子或绕行电子)组成。原子的体积很小,直径只有 10^{-8}cm 左右,原子的质量也很小,例如氢原子质量为 $1.67356 \times 10^{-24}\text{g}$,铀原子的质量为 $3.951 \times 10^{-22}\text{g}$ 。原子的中心为原子核,它的直径比原子的直径小得多,为 $n \cdot 10^{-13} \sim n \cdot 10^{-12}(\text{cm})$,但它集中了原子的绝大部分质量。例如氢原子由原子核和一个束缚电子组成,其结构示于图1-1,氢核的质量为 $1.67 \times 10^{-24}\text{g}$,而束缚电子的质量仅为 $9.1 \times 10^{-28}\text{g}$,两者的比值近似为1/1840。对于原子序数较大的原子,这个比值更小些。例如,铀原子92个绕行电子的总质量和原子核质量之比为1/4717。

原子核带正电荷,束缚电子带负电荷,两者所带的电荷量相等,符号相反,因此原子本身呈中性。当原子吸收外来的能量,使轨道上的电子脱离原子核的吸引而自由运动时,原子便失去电子而呈现电性,成为正离子。

原子中束缚电子按一定的轨道绕原子核运动,相应的原子处于一定的能量状态。对一种原子来说,它的绕行电子的数目和运动轨道都是一定的,因此每一个原子只能处于一定的,不连续的一系列稳定状态中。这一系列稳定状态,可用相应的一组能量 W_i 表征, W_i 称为原子的能级。处于稳定状态的原子,不放出能量。当原子由较高能级 W_1 跃迁到较低的能级 W_2 时,相应的能量变化 ΔW 即 $W_1 - W_2$,以发射光子的形式释放出来,此时光子的能量为:

$$h\nu = W_1 - W_2$$

式中, h ——普朗克常数, 等于 $6.6262 \times 10^{-27} \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$,

ν ——光子的频率。

将某种原子发射的各种频率的光子按波长排列起来,便构成了该种原子的发射光谱,也就是原子的能谱。

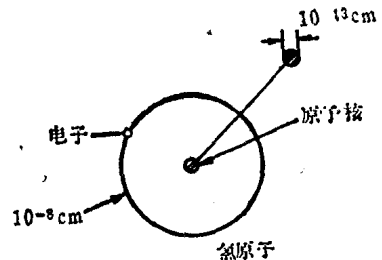


图1-1 氢原子结构示意图

二、原子核

原子核是由很小的粒子——中子和质子组成，这两种粒子统称核子。原子核内中子和质子数之和称为核子数（又称质量数），以 A 表示。由于原子核内质子数与核外电子数相同，且等于原子序数 Z ，所以核内中子数 N 等于核子数与原子序数之差，即 $N = A - Z$ 。

具有特定质量数、原子序数和核能态，而且其平均寿命长得足以被观察的一类原子称为核素。可以用下面简单的符号表示核素的原子核。



其中 X 为原子所属的化学元素符号。

在原子核内，质子和中子数的比值是有一定规律的。一般情况下，在原子序数小的稳定核素中，中子数与质子数相差不多或中子数略多一些（ ${}^1_1\text{H}$ 和 ${}^2_1\text{H}$ 例外）。当原子序数很大时，

中子数比质子数多 50% 左右。任何含有过多中子或质子的原子核，都是不稳定的。例如，自然界中 $Z > 82$ 的核素都是不稳定的，属于放射性核素。

中子和质子在原子核内不停地运动着。运动状态不同，相应的能量状态也不同，原子核的不同能量状态组成原子核的能级。

原子核的最低能量状态叫“基态”，在自然界中，所有稳定核素均处于基态。比基态高的能量状态称为

“激发态”，激发态按能量的不同可分为第一激发态，

第二激发态等等，示于图 1-2。处于激发态的原子核是不稳定的，它往往通过放出光子的形式从激发态回到基态。因核能级变化而放出的光子称为 γ 光子。某种原子核发射的各种能量的 γ 光子的集合，即是该种原子核的 γ 能谱。

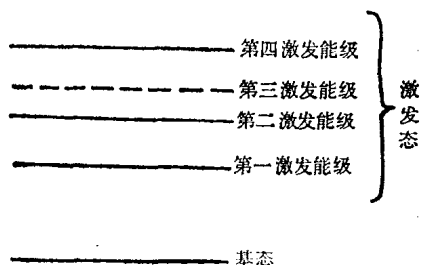


图 1-2 核能级示意图

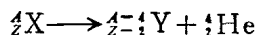
第二节 核衰变

自然界中，有些核素的原子核能自发地发生变化，从一个核素的原子核，变成另一个核素的原子核，并伴随放出射线，这种现象称为“核衰变”，这些核素称为放射性核素。现将常见的几种核衰变类型简介如下：

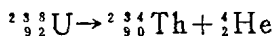
一、 α 衰变

放射性核素的原子核自发地放出 α 粒子而变成另一种核素的原子核的过程称为 α 衰变。从原子核中放出的 α 粒子实际上就是高速运动着的氦原子核（ ${}^4_2\text{He}$ ），它由两个中子和两个质子组成，带两个正电荷。天然放射性核素放出的 α 粒子的能量一般为 4~9 MeV。

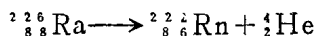
放射性核素经 α 衰变后，它的质量数 A 降低 4 个单位，原子序数 Z 降低 2 个单位。若以 X 表示母体核素， Y 表示衰变形成的子核素，则 α 衰变可用下式表示：



例如, ${}^{238}_{92}\text{U}$ 经 α 衰变为 ${}^{234}_{90}\text{Th}(\text{UX}_1)^*$, 其表示式可写为:



同一种放射性核素进行 α 衰变时放出的 α 粒子能量是一定的。但是, 有的核素衰变时放出单一能量的 α 粒子, 有的核素衰变时放出几种能量不同的 α 粒子。当 α 衰变放出几种能量的 α 粒子时, 可伴随放出 γ 射线。例如, ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 经 α 衰变后变成 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$:



镭经 α 衰变放出 4.785 MeV 和 4.602 MeV 两种能量的 α 粒子, 并分别形成处于基态和激发态的氡核。处于激

发态的氡核很快跃迁到基态, 并放出能量为 0.183 MeV 的 γ 光子, 示于图 1-3。

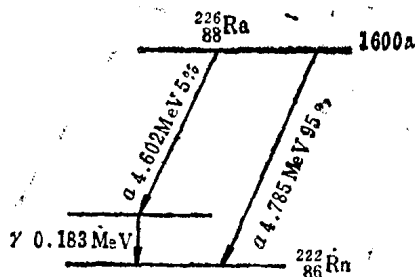


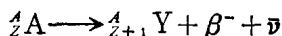
图1-3 镭的 α 衰变纲图

二、 β 衰 变

放射性核素的原子核自发地放出 β 粒子或俘获一个轨道电子而变成另一个核素的原子核的过程称为 β 衰变。 β 衰变分为 β^- 衰变, β^+ 衰变, 轨道电子俘获等三种类型。

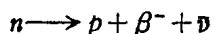
1. β^- 衰变

放射性核素的原子核自发地放出 β^- 粒子而变成另一个核素的原子核的过程称为 β^- 衰变。从原子核中放出的 β^- 粒子实际上就是高速运动着的电子, 它的静止质量等于电子的质量, 带有一个负电荷。因为 β^- 的质量比原子核的质量小得多, 所以 β^- 衰变前后, 母核与子核的质量数相同, 但子核的原子序数提高一位。 β^- 衰变的表示式如下:



式中, $\bar{\nu}$ ——反中微子, 是质量十分微小的 (为电子质量的 1/2000) 中性粒子。

β^- 衰变时, 母核中的一个中子 (n) 转变成一个质子 (p), 即



母核经 β^- 衰变所释放出的能量被子核、 β^- 粒子及反中微子带走。由于三个粒子发射方向所成的角度是任意的, 所以它们带走的能量也是不固定的。子核的质量远大于 β^- 粒子及反中微子的质量, 所以子核带走的反冲动能可忽略不计。这样, β^- 衰变放出的能量就在 β^- 粒子与反中微子之间进行分配。实际测到的 β^- 粒子的能谱曲线示于图 1-4。从图可看出: ① β^- 粒子的能量是连续分布的, 形成一连续谱, ② 有一个确定的最大能量值 E_0 , 一般图表上所给的某一放射性核素的 β^- 粒子能量, 均指 β^- 粒子的最大能量值 E_0 , ③ 在能量约为 $\frac{1}{3}E_0$ 处, 曲线有一极大值, 即在该处 β^- 粒子的能注量率**最大。

${}^{137}_{55}\text{Cs}$ 的 β^- 衰变纲图示于图 1-5。

β^- 衰变后形成的子核常处于激发态, 原子核由激发态回到基态时放出 γ 射线, 所以 β^- 衰变时往往伴随放出 γ 射线。有的核素衰变时放出几组不同能量的 β^- 粒子, 因而伴随放出几种

* UX_1 是 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ 核素的早期表示方法, 下同。

** 能注量率为单位时间内射入单位体积球体的粒子能量的总和, 详见第三章。

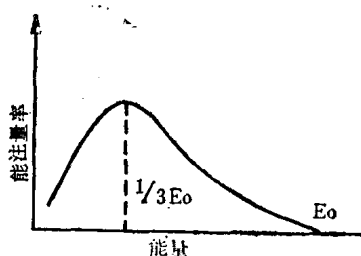


图1-4 β^- 粒子的能量分布曲线

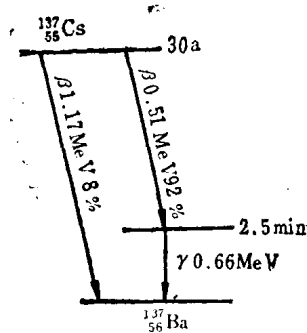
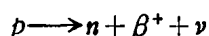


图1-5 ^{137}Cs 的 β 衰变纲图

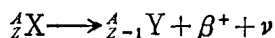
能量的 γ 射线。与 α 衰变相比， β^- 衰变放出的 γ 射线的能注量率大得多。天然放射性核素放出的几组主要的 γ 射线，几乎都是伴随 β^- 衰变产生的。

2. β^+ 粒子

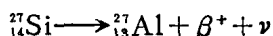
放射性核素的原子核自发地放出 β^+ 粒子而变成另一种核素的过程称为 β^+ 衰变。 β^+ 粒子就是高速运动着的正电子(或阳电子)，它是一种质量与电子相等，但带一个正电荷的粒子。 β^+ 衰变只在人工放射性核素衰变时才发生，这种衰变实际上是核内一个质子 p 转变成一个中子 n ，并放出 β^+ 粒子和中微子 ν 的结果，即



经 β^+ 衰变形成的子核与母核具有相同的质量数但原子序数减少一位。 β^+ 衰变可用下式表示：



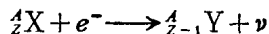
例如， ^{27}Si 就是作 β^+ 衰变的，其衰变过程可表示如下：



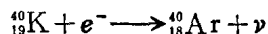
β^+ 粒子的能谱是连续的。 β^+ 粒子被介质阻止而丧失动能时，将与介质中的电子相结合，同时辐射出两个方向相反，能量各为0.51 MeV的光子，这种辐射称为阳电子湮没辐射(又称光化辐射)。在 β^+ 衰变时，也伴随放出 γ 射线。

3. 轨道电子俘获

轨道电子俘获系指原子核俘获了一个轨道电子，使原子核内的质子转变成中子并放出中微子的过程，经轨道电子俘获形成的子核与母核的质量数相同，但原子序数减少一位，其衰变过程可用下式表示：



例如， ^{40}K 经轨道电子俘获形成 ^{40}Ar 即



因为 K 层电子靠近原子核， K 层电子被俘获的几率比其他壳层电子被俘获的几率都大(即自 K 层吸收电子的可能性比自 L 层吸收电子的可能性大100倍左右)，所以这种衰变也叫 K 电子俘获，简称 K 俘获。轨道电子俘获时只放出一个中微子，其能量是单一的。

轨道电子俘获后，新形成的核素的 K 电子层产生了空位，这个空位由外层电子(例如 L 层电子)来充填。当能级较高的轨道电子(例如 L 层电子)充填 K 层电子空位时，多余的能量(等于 K 层电子与 L 层电子结合能之差)以特征X射线(或称标识X射线)的形式放出。

这个多余的能量也可以传给L层电子，使之成为自由电子，即俄歇电子。俄歇电子的能量也是单一的。

有很多放射性核素能同时发生 β^+ 衰变和轨道电子俘获，少数核素能同时发生 β^- 衰变和轨道电子俘获。例如自然界分布较广的 $^{40}_{19}\text{K}$ 就能同时发生 β^- 衰变及轨道电子俘获。如图1-6所示，89%的 $^{40}_{19}\text{K}$ 经 β^- 衰变形成 $^{40}_{20}\text{Ca}$ ，11%的 $^{40}_{19}\text{K}$ 经轨道电子俘获方式衰变放出 γ 射线而形成 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 。

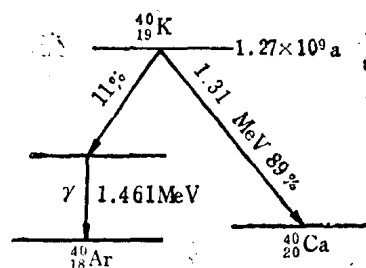


图1-6 $^{40}_{19}\text{K}$ 衰变纲图

三、 γ 跃 迁

α 衰变或 β 衰变形成的子核往往处于激发态，而激发态是不稳定的，它要直接退激或级联退激到基态，原子核由激发态跃迁到较低能态（能量较低的激发态或基态）时，常常放出 γ 光子。这种原子核由激发态跃迁到较低能态，而核的原子序数Z和质量数A均保持不变的过程，称为 γ 跃迁（或称 γ 衰变）。一般情况下，原子核处于激发态的时间极短（约为 10^{-13}s ），很快就跃迁到较低能态（或基态）并放出 γ 光子，因此不能作为独立的核素。有些原子核的激发态存在时间较长，其寿命可用仪器测出，这些核素就可作为独立的核素。这类具有相同质量数和相同原子序数而半衰期有明显差别的核素，称为同质异能素。这种衰变方式称为同质异能跃迁。例如，在天然放射性核素中 $^{234}_{91}\text{Pa}$ 就有一对同质异能素 $^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}(\text{UX}_2)$ 和 $^{234}_{91}\text{Pa}(\text{UZ})$ 。99.85%的 $^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$ 进行 β^- 衰变，形成 $^{234}_{92}\text{U}$ ， $^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$ 的半衰期为1.17min，0.15%的 $^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$ 先放出 γ 射线变成 $^{234}_{91}\text{Pa}$ ，再作 β^- 衰变而成 $^{234}_{92}\text{U}$ ， $^{234}_{91}\text{Pa}$ 的半衰期为6.75h。 $^{234}_{91}\text{Pa}$ 的衰变图见图1-7。

人工放射性核素中同质异能素较多，例如 $^{60}_{27}\text{Co}$ ，其衰变纲图示于图1-8。

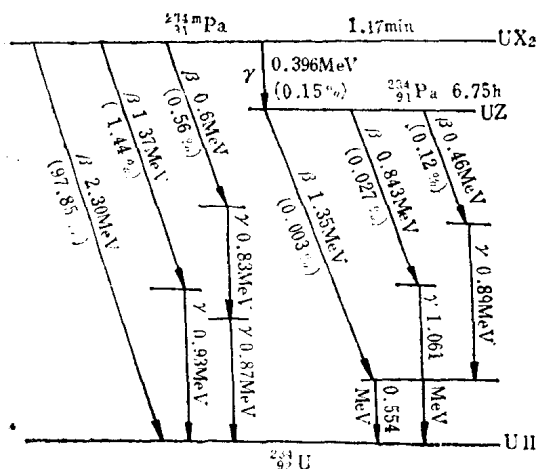


图1-7 $^{234}_{91}\text{Pa}$ 衰变纲图

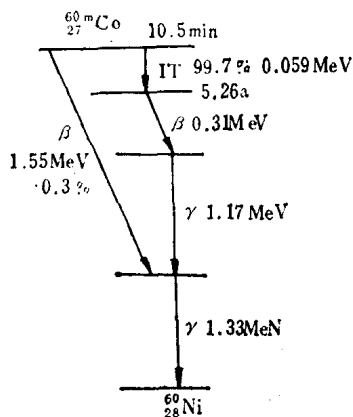


图1-8 $^{60}_{27}\text{Co}$ 衰变纲图

原子核从激发态跃迁到较低的能态或基态时，除发射 γ 光子外，还可以通过发射电子的

方式来完成,即原子核将多余的能量传给壳层(K层或L层)电子,使电子脱离原来轨道,形成单能的内转换电子,这种现象简称为内转换。内转换过程使核素的一个电子壳层中留下了一个空位,该空位被外壳层电子充填时,会产生特征X射线,甚至可导致发射俄歇电子。

第三节 放射性系列

在铀矿石中,常常同时含有镭、钍、钋、铋等核素的同位素,研究这些核素的共生原因时,发现这些放射性核素相继衰变而形成系列。每一系列中有一个起始核素,它经放射性衰变变成一个新的核素(称衰变子体),这个核素仍是不稳定的,继续进行衰变,直到生成稳定的核素为止。

自然界中有三个放射性系列,即铀(U)系列、钍(Th)系列和锕铀(AcU)系列。用人工方法还能得到镎(Np)系列。

在自然界中,除上述三个系列外,还存在许多经一次衰变即形成稳定核素的天然放射性核素,如钾(^{40}K),铷(^{87}Rb)等,这些核素将在后面略作介绍。

一、铀系(或称铀镭系)

自然界存在的铀系的母体核素为 ^{238}U ,它经 α 衰变后形成 $^{234}\text{Th}(\text{UX}_1)$,如图1-9所示, ^{234}Th 为Th的同位素,它经 β 衰变成为镤的同位素 $^{234\text{m}}\text{Pa}(\text{UX}_2)$, $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 有两种衰变方式,其大部分原子核经 β 衰变而成 ^{234}U , ^{234}U 以后是一连串的 α 衰变,经 $^{230}\text{Th}(\text{Io})$ 、 ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 至 $^{218}\text{Po}(\text{RaA})$, ^{218}Po 有两种衰变方式,其大部分经 α 衰变成 $^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$,极少部分(0.03%)经 β 衰变而成 ^{218}At ,99.9%的At经 α 衰变而成 $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$ 。 $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$ 的极大部分是由 $^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$ 经 β 衰变而成的。99.98%的 $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$ 经 β 衰变而成 $^{214}\text{Po}(\text{RaC}')$, ^{214}Po 经 α 衰变而成 $^{210}\text{Pb}(\text{RaD})$, ^{210}Pb 的极少部分是由 $^{210}\text{Tl}(\text{RaC}'')$ 经 β 衰变而成的。 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Po 、 ^{210}Tl 等的寿命都很短,所以称为氢的短寿放射性衰变子体。 ^{210}Pb 经两次 β 衰变,一次 α 衰变后形成铅的稳定同位素 ^{206}Pb 。由于 ^{210}Pb 、 $^{210}\text{Bi}(\text{RaE})$ 、 $^{210}\text{Po}(\text{RaF})$ 的寿命较长,所以称为氢的长寿放射性衰变子体。整个系列的衰变规律示于图1-9,衰变常数和半衰期列于表1-1。

从铀系的衰变规律可看出,铀系核素的质量数都是4的整数倍再加2,即服从 $A=4n+2$ 的规律(其中 $n=51\sim 59$),所以铀系也叫 $4n+2$ 系列。在整个系列中,母体核素 ^{238}U 的半衰期最长,为 $4.468\times 10^9\text{a}$,在子体核素中 ^{234}U 的半衰期最长,为 $2.45\times 10^5\text{a}$ 。

二、钍系

自然界存在的钍系的母体核素为 ^{232}Th ,它经10次衰变后成稳定核素——铅的同位素 ^{208}Pb 。钍系中各核素的质量数都服从 $A=4n$ 的规律($n=52\sim 58$),所以钍系又叫 $4n$ 系列。系列中母体核素 ^{232}Th 的半衰期最长,为 $1.41\times 10^{10}\text{a}$,钍系子体核素的寿命一般比较短,寿命最长的子体核素 $^{228}\text{Ra}(\text{MsTh}_1)$ 的半衰期为5.76a,钍系的衰变规律示于图1-10,各核素的衰变常数及半衰期列于表1-2。

铀系

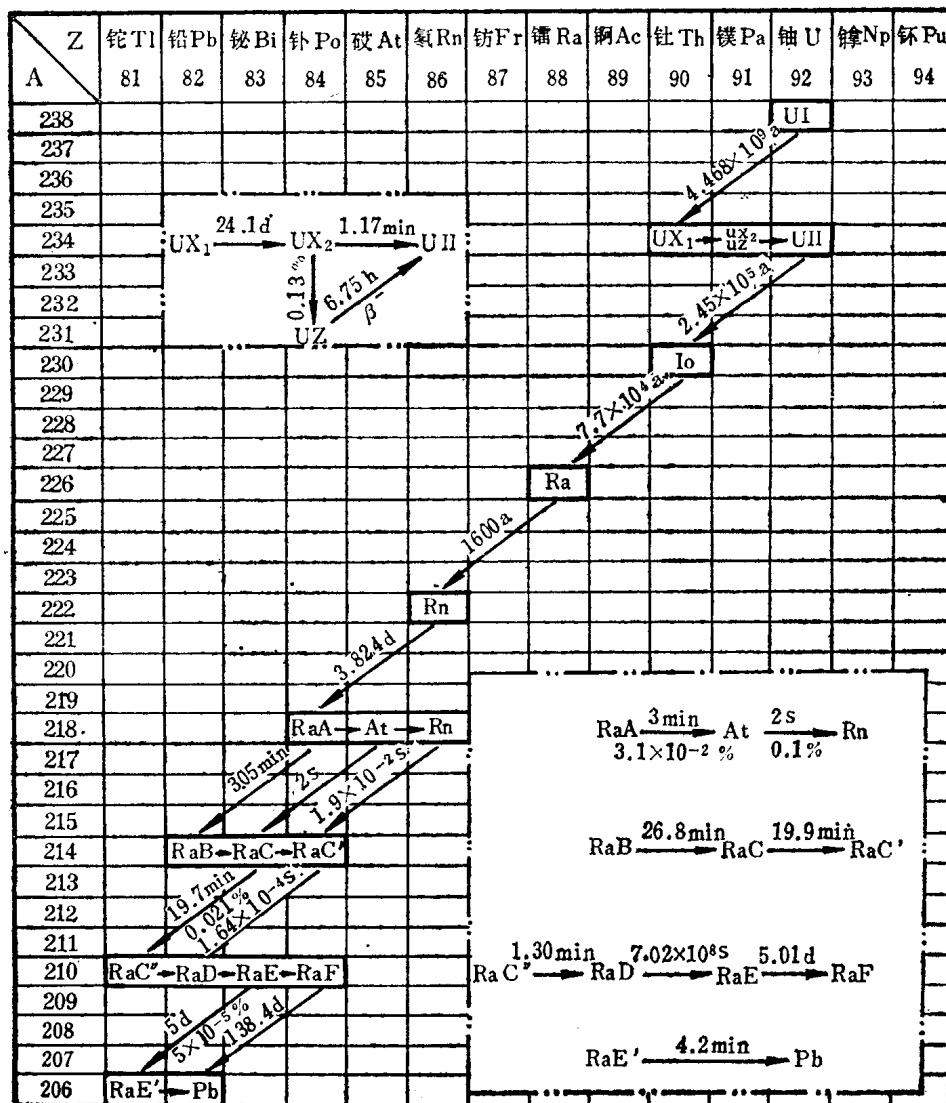


图1-9 铀系衰变图

表1-1 铀系衰变常数及半衰期

核 素	俗称及符号	半 衰 期 $T_{1/2}$	衰变常数 $\lambda(s^{-1})$	与铀处于平衡时的重量数
$^{238}_{92}\text{U}$	铀 I (U I)	$4.468 \times 10^9 \text{a}$	4.91×10^{-18}	0.9927
$^{234}_{90}\text{Th}$	铀 X_1 (UX $_1$)	24.1d	3.33×10^{-7}	1.44×10^{-11}
$^{234}_{91}\text{Pa}$	铀 X_2 (UX $_2$)	1.17 min	9.87×10^{-3}	4.85×10^{-16}
$^{234}_{91}\text{Pa}$	铀Z(UZ)	6.75h	2.85×10^{-5}	2.52×10^{-16}
$^{234}_{92}\text{U}$	铀 II (U II)	$2.45 \times 10^{-5} \text{a}$	9.01×10^{-14}	5.32×10^{-5}
$^{230}_{90}\text{Th}$	钍(lo)	$7.7 \times 10^4 \text{a}$	2.85×10^{-13}	1.65×10^{-5}
$^{226}_{88}\text{Ra}$	镭Ra	1600a	1.37×10^{-11}	3.40×10^{-7}
$^{222}_{86}\text{Rn}$	氡Rn	3.824d	2.10×10^{-6}	2.16×10^{-12}
$^{218}_{84}\text{Po}$	镭A (Ra A)	3.05 min	3.85×10^{-3}	1.16×10^{-15}
$^{214}_{82}\text{Pb}$	镭B (RaB)	26.8 min	4.31×10^{-4}	1.02×10^{-14}
$^{218}_{85}\text{At}$	砷(^{218}At) ($3.1 \times 10^{-2}\%$)	2s	0.347	3.99×10^{-2}
$^{214}_{83}\text{Bi}$	镭C (RaC)	19.7 min	5.86×10^{-4}	7.49×10^{-15}
$^{214}_{80}\text{Po}$	镭C' (RaC')	$1.64 \times 10^{-4} \text{s}$	4.23×10^3	1.03×10^{-21}
$^{210}_{81}\text{Tl}$	镭C'' (RaC'') (0.021%)	1.30 min	8.75×10^{-3}	1.96×10^{-19}
$^{210}_{82}\text{Pb}$	镭D (RaD)	22.3a	9.87×10^{-5}	4.36×10^{-9}
$^{210}_{83}\text{Bi}$	镭E (RaE)	5.01d	1.60×10^{-6}	2.69×10^{-12}
$^{210}_{84}\text{Po}$	镭F (RaF)	138.4d	5.79×10^{-8}	7.42×10^{-14}
$^{206}_{81}\text{Tl}$	铊(^{206}Tl) ($5 \times 10^{-5}\%$)	4.9 min	2.75×10^{-3}	7.65×10^{-22}
$^{206}_{82}\text{Pb}$	镭G (RaG)	稳 定		

三、钍 系

自然界存在的钍系的母体核素为 $^{232}_{90}\text{U}$ (AcU)，它经 11 次衰变，最后形成稳定的铅同位素 $^{208}_{82}\text{Pb}$ (AcD)。钍系核素的质量数服从 $A=4n+3$ 的规律 ($n=51\sim 58$)，所以钍系又叫 $4n+3$ 系列。钍系的衰变规律如图1-11所示，各核素的衰变常数及半衰期列于表1-3。

从上面介绍的三个天然放射性系列中可以看出：

1. 三个系列的母体核素的半衰期都很长，在 $7.038 \times 10^9 \text{a} \sim 1.41 \times 10^{10} \text{a}$ 之间，正因为这个原因三个系列才能在自然界中存在。

钍系

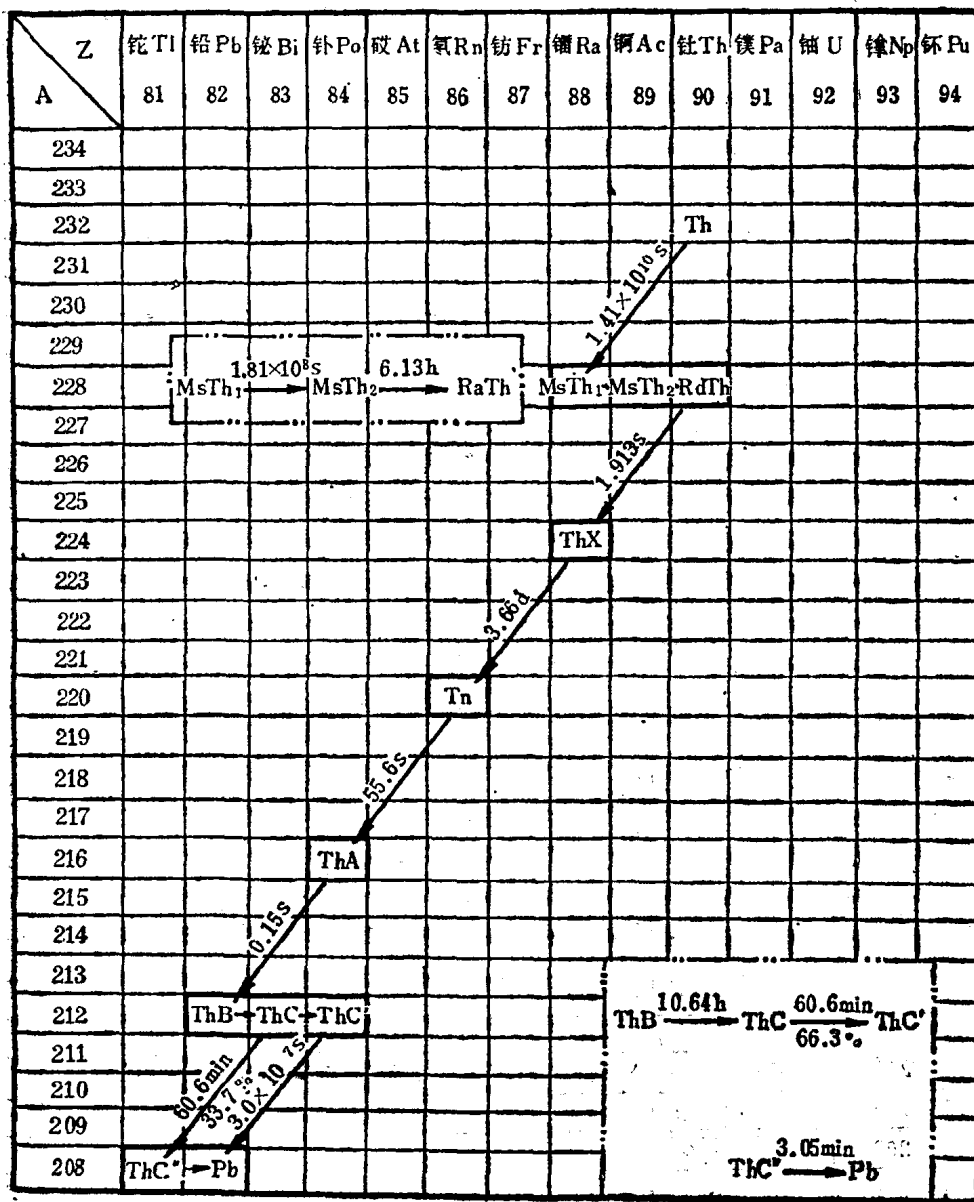


图1-10 钍系衰变图