

核辐射测量方法

成都理工大学核技术与自化工程学院

前 言

本讲义旨在缓解我院“核工程与核技术”专业人才培养计划调整后尚无专业教材的状况。主要内容有核辐射测量基础知识、射线与物质相互作用、核辐射测量的单位、核辐射防护知识、 γ 射线测量方法、 β 射线测量方法、 α 射线测量方法、X射线荧光测量方法、核辐射测量统计学与误差预测等。该讲义可作为“核工程与核技术”和“辐射防护与环境保护”专业的核辐射测量方法课程的教材，也可作为“测控技术与仪器”、“勘查技术工程”和“地球化学”（铀矿地质勘探方向）等本科专业的教学参考书，以及“核科学与技术”学科专业研究生教学的参考书。

本讲义相关内容主要从以下几本参考书的有关内容编辑：

- [1] 章晔，华荣洲、石柏慎 编著，放射性方法勘查，原子能出版社，1990
- [2] 葛良全，周四春，赖万昌 编著，原位 X 辐射取样技术，四川科学技术出版社，1997
- [3] 格伦敦 F 诺尔 著（李旭等译），辐射探测与测量，原子能出版社，1984。
- [4] 复旦大学、清华大学、北京大学，原子核物理实验方法，北京，原子能出版社，1985
- [5] 李星洪等编，辐射防护基础，北京，原子能出版社，1982
- [6] 吴慧山，核技术勘查，北京，原子能出版社，1998
- [7] 王韶舜，核与粒子物理实验方法，北京，原子能出版社，1989

第 1 章 放射性方法勘查的基本知识

1.1 原子和原子核

1.1.1 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 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 $6.6262 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ；

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

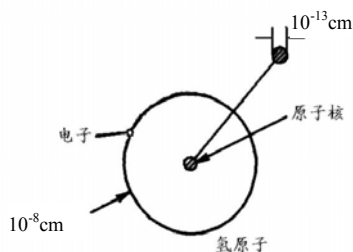


图 1-1 氢原子核结构示意图

光谱，也就是原子的能谱。

1.1.2 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。

$${}^A_Z X$$

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_1H 和 3_2H 例外)。当

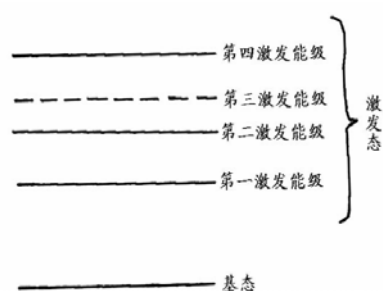


图 1-2 核能级示意图

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。

1.2 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。

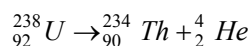
1.2.1 α 衰变

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4~9MeV。

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：

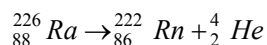
$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$$

例如， ${}_{92}^{238}\text{U}$ 经 α 衰变为 ${}_{90}^{234}\text{Th}(\text{UX}_1)$ ，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， ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 经 α 衰变后变成 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ ：



镭经 α 衰变放出4.785MeV和4.602MeV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0.183MeV的 γ 光子，示于图1-3。

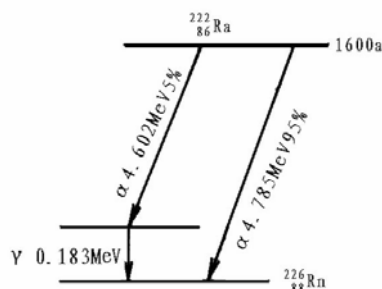


图 1-3 ${}^{222}\text{Ra}$ 的 α 衰变纲图

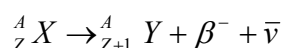
1.2.2 β 衰变

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^- 变， β^+ 衰变，轨道电子俘获等三种类型。

1. β^- 衰变

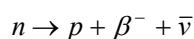
放射性核素的原子核自发地放出 β^- 粒子而变成另一个核素的原子核的过程称为 β^- 衰变。从原子核中放出的 β^- 粒子实际上就是高速运动着的电子，它的静止质量等于电子的质量，带有一个负电荷。因为 β^- 的质量比原子核的质量小得多，所以 β^- 衰变前后，母核与子核的质量数相同，但子核的原子序数提高一位。 β^- 衰变的表示式如

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。

${}^{137}_{55}\text{Cs}$ 是 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。

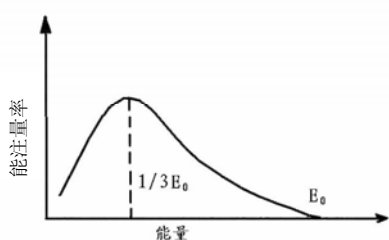


图 1-4 β^- 的粒子的能量分布曲线

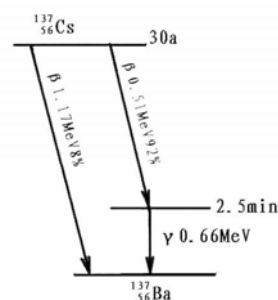


图 1-5 ${}^{137}\text{Cs}$ 的 β 衰变纲图

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

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$$

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：

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + \beta^+ + \nu$$

例如， ${}_{14}^{27}\text{Si}$ 就是作 β^+ 衰变的，其衰变过程可表示如下：

$${}_{14}^{27}\text{Si} \rightarrow {}_{13}^{27}\text{Al} + \beta^+ + \nu$$

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 0.51MeV 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

$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$

$${}_Z^A X + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + \nu$$

例如，： ${}_{19}^{40}\text{K}$ 经轨道电子俘获形成 ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ 即

$${}_{19}^{40}\text{K} + e^- \rightarrow {}_{18}^{40}\text{Ar} + \nu$$

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

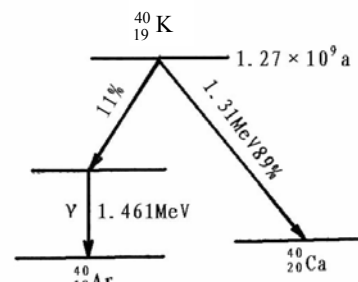


图 1-5 ${}^{40}\text{K}$ 的衰变纲图

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 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 。

1.2.3 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 $^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}(\text{UX}_1)$ 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。

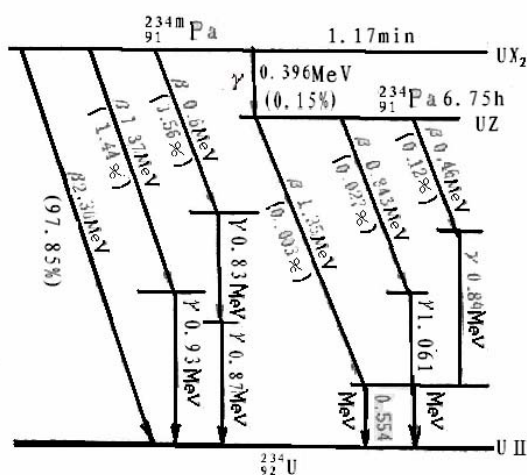


图 1-7 ^{234}Pa 衰变纲图

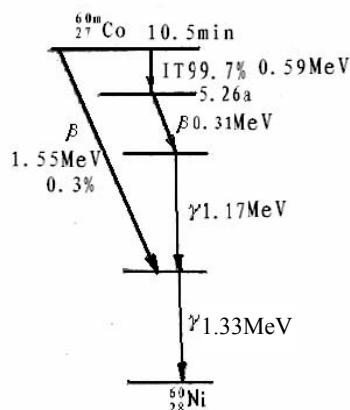


图 1-8 ^{60}Co 衰变纲图

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。

1.3 放射性系列

在铀矿石中，常常同时含有镤、镭、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。

1.3.1 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，所以称为氡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，所以称为氡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 4.468×10^9 年，在子体核素中 ^{234}U 的半衰期最长，为 2.45×10^5 年。

铀系

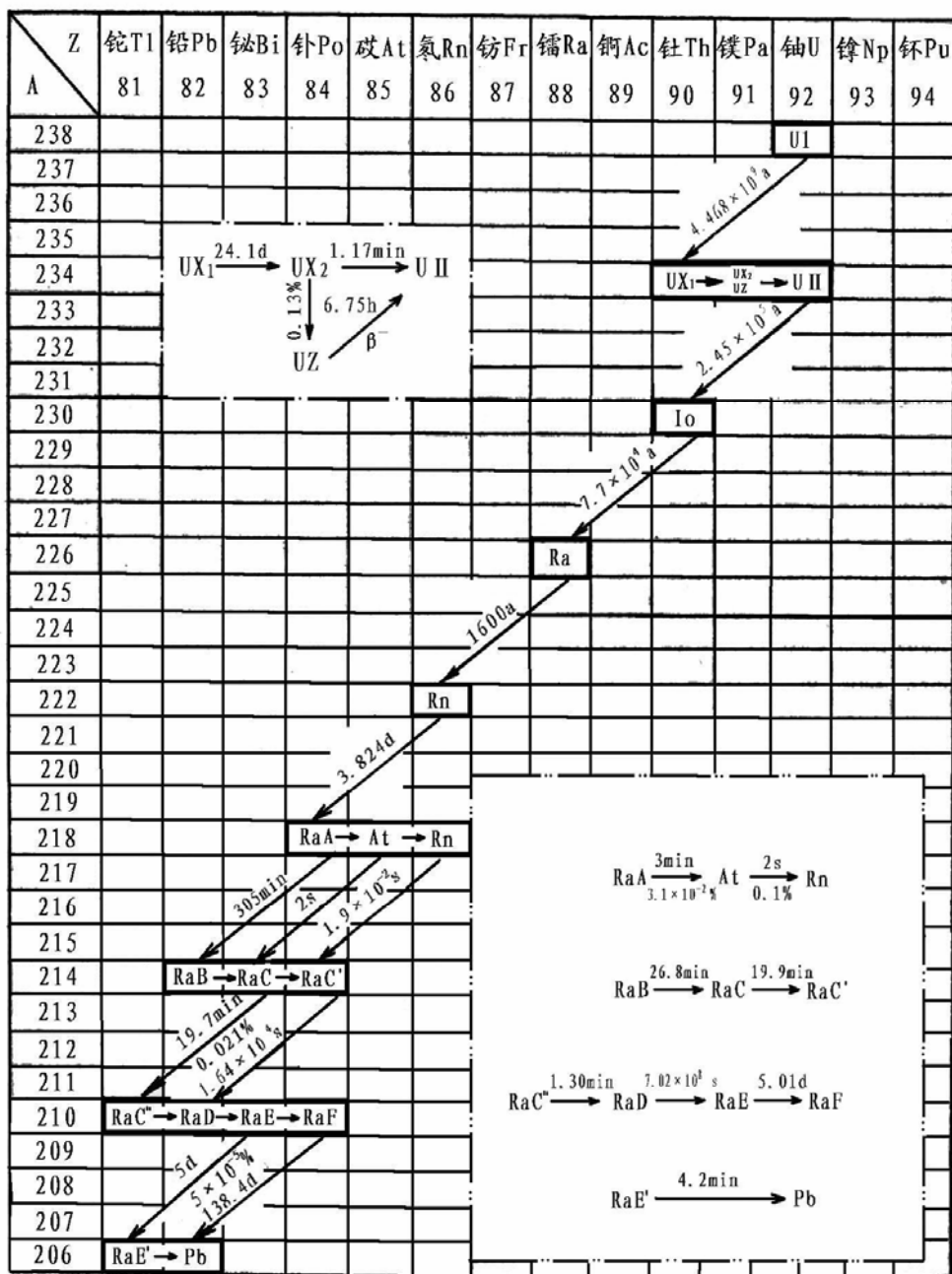


图 1-9 铀系衰变纲图

表 1-1 铀系衰变常数及半衰期

核 素	俗称之符号	半衰期 $T_{1/2}$	衰变常数 λ (s^{-1})	与铀处于平衡时的重量数
$^{234}_{90}\text{U}$	铀 I (UI)	$4.468\times 10^9\text{a}$	4.91×10^{-18}	0.9327
$^{234}_{90}\text{Th}$	铀 X_1 (UX_1)	24.1d	3.33×10^{-2}	1.44×10^{-11}
$^{234}_{91}\text{Pa}$	铀 X_2 (UX_2)	1.17min	9.37×10^{-3}	4.85×10^{-16}
$^{234}_{91}\text{Pa}$	铀 Z (UZ)	6.75h	2.85×10^{-3}	2.52×10^{-16}
$^{234}_{92}\text{U}$	铀 II (UII)	$2.45\times 10^5\text{a}$	9.01×10^{-14}	5.32×10^{-5}
$^{230}_{90}\text{Th}$	钍 (Io)	$7.7\times 10^4\text{a}$	2.85×10^{-13}	1.65×10^5
$^{226}_{85}\text{Ra}$	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 (RaA)	3.05min	3.85×10^{-3}	1.16×10^{-12}
$^{214}_{82}\text{Pb}$	镭 B (RaB)	26.8min	4.81×10^{-4}	1.02×10^{-14}
$^{218}_{85}\text{At}$	砒 (^{218}At) ($3.1\times 10^{-2}\%$)	2s	0.347	3.99×10^{-2}
$^{214}_{83}\text{Bi}$	镭 C (RaC)	19.7min	5.86×10^{-4}	7.49×10^{-13}
$^{214}_{80}\text{Po}$	镭 C' (RaC')	$1.64\times 10^{-4}\text{s}$	4.23×10^3	1.03×10^{-2}
$^{210}_{81}\text{Tl}$	镭 C'' (RaC'') (0.021%)	1.30min	8.75×10^{-3}	1.96×10^{-19}
$^{220}_{82}\text{Pb}$	镭 D (RaD)	22.3a	9.87×10^{-8}	4.36×10^{-8}
$^{210}_{83}\text{Bi}$	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 (^{205}Tl) ($5\times 10^{-5}\%$)	4.9min	2.75×10^{-3}	7.65×10^{-22}
$^{206}_{82}\text{Pb}$	镭 G (RaG)	稳定		

1.3.2 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 1.41×10^{10} 年，钍系子体核素的寿命一般比较短，寿命最长的子体核素 $^{238}\text{Ra}(\text{MsTh}_1)$ 的半衰期为 5.76 年。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。

钍系

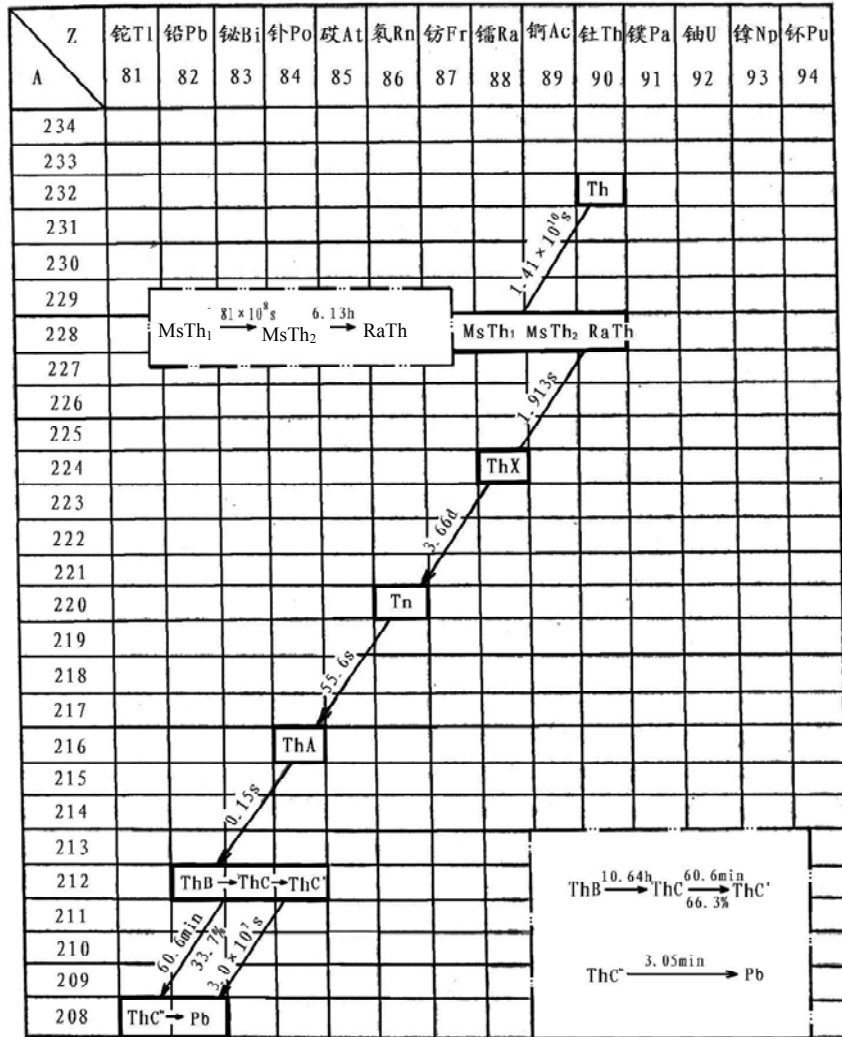


图 1-10 钍系衰变纲图

表 1-2 钍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 λ (s^{-1})	与钍处于平衡时的重量数
$^{232}_{90}\text{Th}$	钍 (Th)	$1.41\times 10^{10}\text{a}$	1.57×10^{-18}	1
$^{288}_{86}\text{Ra}$	新钍 1 (MsTh ₁)	5.76a	3.83×10^{-9}	4.03×10^{-14}
$^{228}_{89}\text{Ac}$	新钍 2 (MsTh ₂)	6.13h	3.14×10^{-5}	4.92×10^{-14}
$^{228}_{90}\text{Th}$	射钍 (RdTh)	1.913a	1.15×10^{-6}	1.34×10^{-10}
$^{224}_{88}\text{Ra}$	钍 X (ThX)	3.64d	2.21×10^{-6}	6.86×10^{-12}
$^{220}_{86}\text{Rn}$	钍射气 (Tn)	55.3s	1.27×10^{-2}	1.17×10^{-16}
$^{216}_{84}\text{Po}$	钍 A (ThA)	0.15s	4.62	3.16×10^{-19}
$^{222}_{82}\text{Pb}$	钍 B (ThB)	10.64h	1.81×10^{-5}	7.93×10^{-14}
$^{216}_{85}\text{At}$	破 ^{216}At ($1.3\times 10^{-2}\%$)	$35\times 10^{-4}\text{s}$	1.98×10^3	9.61×10^{-20}
$^{212}_{83}\text{Bi}$	钍 C (ThC)	60.6min	1.91×10^{-4}	7.52×10^{-15}
$^{212}_{84}\text{Po}$	钍 C'(ThC') (66.3%)	$30.4\times 10^{-7}\text{s}$	2.27×10^5	4.19×10^{-25}
$^{208}_{81}\text{Tl}$	钍 C''(ThC'') (33.7%)	3.05min	3.73×10^{-3}	1.27×10^{-16}
$^{208}_{82}\text{Pb}$	钍 D (ThD)	稳定		

1.3.3 铀系

自然界存在的铀系的母体核素为 $^{235}_{92}\text{U}$ (AcU)，它经 11 次衰变，最后形成稳定的铅同位素 ^{207}Pb (AcD)。铀系核素的质量数服从 $A=4n+3$ 的规律 ($n=51\sim 58$)，所以铀系又叫 $4n+3$ 系列。铀系的衰变规律如图 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 $7.038\times 10^8\text{a}\sim 1.41\times 10^{10}\text{a}$ 之间，正因为这个原因三个系列才能在自然界中存在。
2. 在三个系列中部各有一个气态核素，它们的原子序数为 86，是氧的放射性同位素，通常称为射气。铀系的射气是： $^{222}\text{Rn}(\text{Rn})$ ，半衰期为 3.825d ，钍系的射气为 $^{220}\text{Rn}(\text{Tn})$ 半衰期为 54.5s ，锕系的射气为 $^{219}\text{Rn}(\text{AD})$ 半衰期为 3.96s 。
3. 三个系列中的射气都能逸散，因而它们的衰变子体可能附着于物体表面，这些衰变子体称为放射性沉淀物。对于铀系，根据沉淀物半衰期的差别，可分为氡的

短寿沉淀物(^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Po 、 ^{210}Tl)和长寿沉淀物(^{210}Pb 、 ^{210}Bi 、 ^{210}Po)。钍系和铀系的射气衰变子体都是短寿沉淀物。

4. 三个系列的射气衰变子体为钋的同位素(^{218}Po 、 ^{216}Po 等),它们几乎全都放出 α 射线而成为铅的同位素(^{214}Pb 、 ^{212}Pb 等),再经 β 衰变成为铋的同位素(^{214}Bi 、 ^{212}Bi 等),这些铋同位素衰变时释放出能注量率大的射线,所以铋同位素是天然放射性系列中主要的 γ 辐射体。

5. 三个系列的射气衰变产物钋同位素中, ^{214}Po 、 ^{212}Po 及 ^{211}Po 放出的 α 射线的能量在整个系列中为最大。

6. 各系列衰变的最后产物是铅的稳定同位素,对应于铀系为 ^{206}Pb ,钍系为 ^{207}Pb ,铀系为 ^{208}Pb 。

表 1-3 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 λ (s^{-1})	与铀处于平衡时的重量数
$^{235}_{92}\text{U}$	铀 (AcU)	$7.038 \times 10^5 \text{a}$	3.12×10^{-17}	7.3×10^{-3}
$^{231}_{90}\text{Th}$	钍 Y (UY)	25.5h	7.54×10^{-5}	2.97×10^{-14}
$^{231}_{91}\text{Pa}$	镤 (Pa)	$3.28 \times 10^4 \text{a}$	6.97×10^{-13}	2.30×10^{-7}
$^{227}_{89}\text{Ac}$	镭 (Ac)	21.77a	1.01×10^{-9}	2.18×10^{-10}
$^{227}_{90}\text{Th}$	射镭 (RdAC) (99.8%)	18.22d	4.41×10^{-7}	4.93×10^{-13}
$^{223}_{87}\text{Fr}$	镭 K (AcK) (1.2%)	22min	5.25×10^{-4}	4.90×10^{-16}
$^{223}_{88}\text{Ra}$	镭 X (AcX)	11.43d	7.01×10^{-7}	3.09×10^{-13}
$^{219}_{86}\text{Rn}$	镭射气 (An)	3.96s	1.75×10^{-1}	1.21×10^{-18}
$^{215}_{84}\text{Po}$	镭 A (AcA)	$1.78 \times 10^{-3} \text{s}$	3.85×10^2	5.42×10^{-22}
$^{211}_{82}\text{Pb}$	镭 B (AcB)	36.1min	3.19×10^{-4}	6.42×10^{-16}
$^{215}_{85}\text{At}$	砹 (^{215}At) ($5 \times 10^{-4}\%$)	10^{-4}s	6.93×10^3	1.51×10^{-23}
$^{211}_{83}\text{Bi}$	镭 C (AcC)	2.15min	5.41×10^{-3}	3.79×10^{-17}
$^{211}_{84}\text{Po}$	镭 C' (AcC') (0.32%)	0.52s	1.2400	5.28×10^{-22}
$^{207}_{81}\text{Tl}$	镭 C'' (AcC'')	4.79min	2.41×10^{-3}	8.33×10^{-17}
$^{207}_{82}\text{Pb}$	镭 D (AcD)	稳定		

铜系

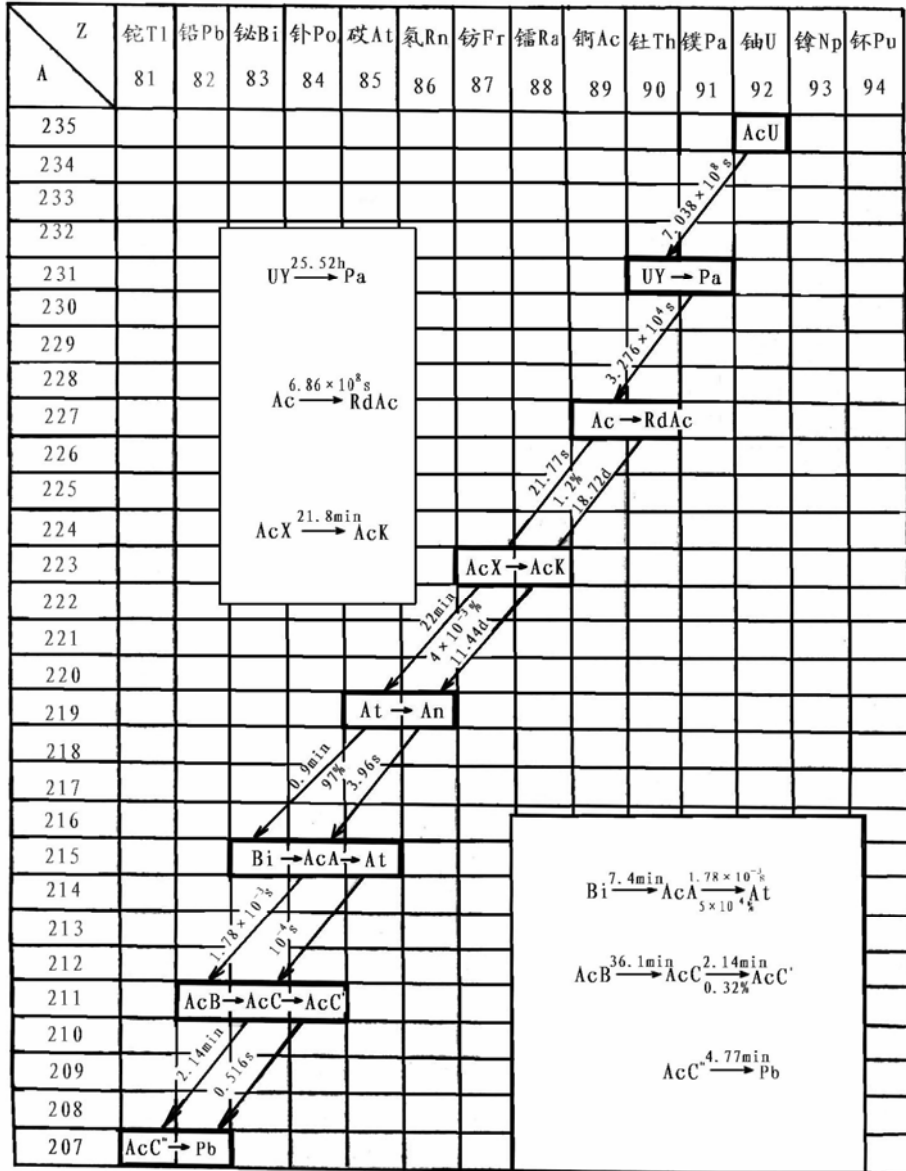


图1-11 铜系衰变图

1.3.4 镎系

三个系列的核素的质量数变化规律分别为钍系 $A=4n$ ，铀系 $A=4n+2$ ，锕系 $A=4n+3$ 那么是否还存在一个服从 $A=4n+1$ 的系列?后来在人工放射性核素中发现了这种质量数变化规律的系列。这个系列的母体核素为镎(${}^{237}_{93}\text{Np}$)，故称镎系。由于镎系的原子序数大于铀的原子序数，故把它列入超铀元素。镎系的衰变图如图 1-12 所示。由于镎系中寿命最长的核素——镎的半衰期为 $2.14\times 10^6\text{a}$ ，是地球年龄的四分之一，所以在自然界已不存在。镎系列可用不同方法得到：例如 ${}^{236}\text{U}$ 经中子轰击后原子核放出两个中子变成 ${}^{237}\text{U}$ ， ${}^{237}\text{U}$ 经 β^- 衰变成 ${}^{237}\text{Np}$ 。也可以用 ${}^{232}\text{Th}$ 经中子轰击后变成 ${}^{233}\text{Th}$ ，再经 β^- 衰变而成 ${}^{233}\text{Pa}$ 。

1.3.5 不成系列的天然放射性核素

在自然界除了三个放射性系列外，还存在一些放射性核素，它们经一次衰变后即成为稳定核素，现在已知的这类核素有 180 多种。它们的半衰期在数秒到若干亿年之间变化。在自然界中，这些放射性核素的量极少，较有意义的有钾，铷，铯等核素的放射性同位素，如表 1-4 所列，这些核素的衰变方式几乎都是 β^- 衰变，只有少数核素(如 ${}^{40}\text{K}$)具有 β^- 衰变和 K 俘获两种衰变方式。对放射性方法勘察来说， ${}^{40}\text{K}$ 的影响予以重视，因为 ${}^{40}\text{K}$ 在地壳中分布极广。

天然钾有三个同位素， ${}^{39}_{19}\text{K}$ (93.31%)， ${}^{40}_{19}\text{K}$ (0.012%)和 ${}^{41}_{19}\text{K}$ (6.7%)，其中只有 ${}^{40}_{19}\text{K}$ 具有放射性，它的半衰期为 1.27×10^9 年。一克天然钾一秒钟内约放出 28 个能量为 1.31 MeV 的 β^- 粒子，另外还放出 3 个能量为 1.46MeV 的 γ 光子。钾衰变后形成 ${}^{40}\text{Ar}$ 和 ${}^{40}\text{Ca}$ ，它们都是稳定核素因此在含钾的岩石中均存在 ${}^{40}\text{Ar}$ 和 ${}^{40}\text{Ca}$ 。

1.3.6 常用天然放射性核素的特征

三个天然放射性系列中，铀、钍是重要的核燃料，是找矿的主要对象，而铀的衰变子体在找矿工作中的应用也日益广泛。因此有必要将铀、钍及其某些衰变子体的特征作一简单介绍。

1. 铀 (Z=92)

铀为银色金属，具有金属光泽，质较软，易机械加工，化学活动性与铁相似，在空气中易氧化，也易溶于酸， 19.05g/cm^3 。

自然界中有三个铀同位素：

$${}^{238}\text{U}, \text{ 半衰期 } T_{\frac{1}{2}} = 4.468 \times 10^9 \text{ a}$$

镭系

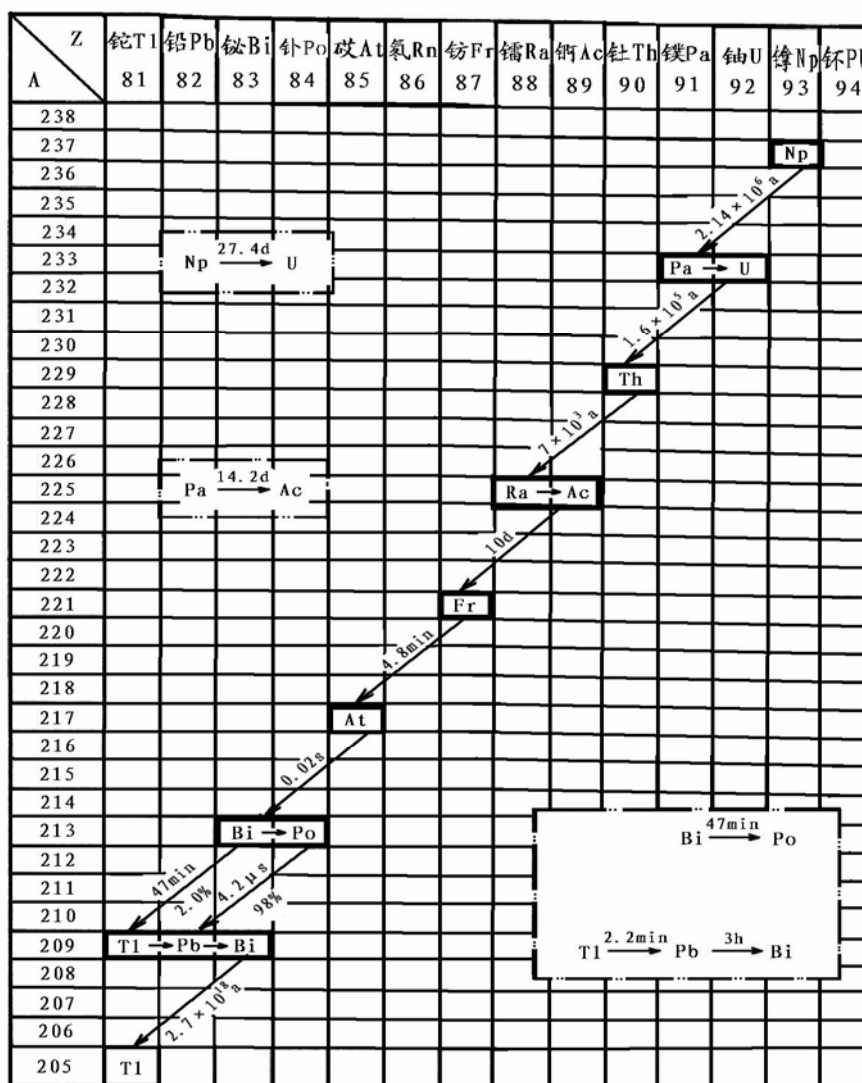


图1-12 镭系衰变图

表 1-4 不成系列的天然放射性元素

核 素	丰度 (%)	半衰期 (a)	衰变类型	能量 (MeV)		衰变产物
				粒子	γ 射线	
钾 $^{40}_{19}\text{K}$	0.012	1.27×10^9	β (89%) K (11%)	1.31	1.46	$^{40}_{20}\text{Ca}$ $^{40}_{18}\text{Ar}$
铷 $^{87}_{37}\text{Rb}$	27.85	4.6×10^{10}	β^-	0.28		$^{87}_{36}\text{Sr}$
镧 $^{138}_{57}\text{La}$	0.089	1.2×10^{11}	β^- K	0.21	1.436 0.788	$^{138}_{56}\text{Ce}$ $^{138}_{56}\text{Ba}$
钐 $^{147}_{62}\text{Sm}$	14.97	1.07×10^{11}	α	2.23	—	$^{143}_{60}\text{Nd}$
镨 $^{176}_{71}\text{Lu}$	2.60	3×10^{10}	β^-	0.42	0.306 0.202 0.088	$^{176}_{72}\text{Hf}$ $^{176}_{70}\text{Yb}$
铼 $^{187}_{75}\text{R}$	62.5	5×10^{10}	β^-	0.0025	—	$^{187}_{76}\text{Os}$

^{234}U , 半衰期 $T_{\frac{1}{2}} = 2.45 \times 10^5 \text{ a}$

^{235}U , 半衰期 $T_{\frac{1}{2}} = 7.04 \times 10^8 \text{ a}$

它们在自然界中的分布存在下列比例关系:

$$^{238}\text{U} : ^{234}\text{U} : ^{235}\text{U} = 1 : \frac{1}{1700} : \frac{1}{140}$$

其中, ^{235}U 不属于铀系列, 它在自然界不单独存在, 总是与 ^{238}U 共生在一起。

在慢中子作用下, ^{235}U 的原子核可分裂成两个中等原子量的原子核, 同时放出 1~3 个中子。当 ^{235}U 的浓度和体积达到一定值时, 可以发生链式反应, 释放出巨大的能量, ^{235}U 是主要的核燃料。但 ^{235}U 的丰度约只占铀的 0.7%, 并且与 ^{238}U 分离提纯的工艺也比较复杂。

^{235}U 可经中子轰击成 ^{239}U , 再经两次 β 衰变成钚 ^{239}Pu , ^{239}Pu 与 ^{235}U 有类似的性质, 可以作为核燃料。 ^{239}Pu 是将精治的天然铀放在铀-钚循环反应堆中轰击而得到的。

2. 钍(Z=90)

钍为银白色金属, 密度为 11.0g/cm^3 。它难与氧化合, 在一定的氟离子参与下可溶解于盐酸及硝酸。在自然界中, 钍有 6 个同位素, 即 ^{232}Th , $^{230}\text{Th}(\text{Io})$ 、 $^{228}\text{Th}(\text{RdTh})$, $^{234}\text{Th}(\text{UX}_1)$, $^{227}\text{Th}(\text{RdAc})$ 、 $^{231}\text{Th}(\text{Uy})$ 。但丰度较高的只有 ^{232}Th , 其他几个同位素的丰度很低。

^{232}Th 经中子轰击形成 ^{233}Th , 再经两次 β 衰变生成 ^{233}U , ^{233}U 和 ^{239}Pu 一样可以作为核燃。目前由于工艺和工程方面的困难, ^{232}Th 尚未被广泛利用。

3. 镅(Z=88)

镭为银白色金属，具有金属光泽，密度为 5g/cm^3 ，在空气中不稳定，易与水作用形成 $\text{Ra}(\text{OH})_2$ ，自然界中镭有四个同位素，即 ^{226}Ra 、 $^{223}\text{Ra}(\text{MsThI})$ 、 $^{224}\text{Ra}(\text{ThX})$ 、 $^{223}\text{Ra}(\text{AcX})$ 。它们的量不多，但分布广，在各种岩石中都含有不同量的镭(浓度都很低)，镭在自然界中的广泛分布以及镭的短寿衰变产物具有高放射性的特点，使人们能利用镭的放射性来找矿。

4. 氡($Z=86$)

氡是放射性气体，属惰性气体，密度为 $9.27\text{g/l}(0^\circ\text{C}, 101325\text{Pa})$ ，比空气重 7.5 倍多，在 0°C 及 101325Pa 压力下可形成水合物。在自然界中，氡有四个同位素，较重要的只有三个，分别属于三个放射性系列：

$$^{222}\text{Rn}(\text{Rn}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 3.825\text{d}$$

$$^{220}\text{Rn}(\text{Tn}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 54.5\text{s}$$

$$^{219}\text{Rn}(\text{An}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 3.96\text{s}$$

镭衰变形成的氡，在岩石与土壤中广泛分布。由于氡衰变时放出 α 射线，氡的短寿子体衰变时放出能注量率大的 β 、 γ 射线，所以现有的找矿手段中，很多是基于测量氡及其短寿子体的放射性。

氡的三个同位素的半衰期相差悬殊，测定它们的放射性随时间的变化，可以将它们定性区分，从而确定它们的母体核素。

5. 钋($Z=84$)

钋为银色金属，具金属光泽，密度为 9.4g/cm^3 。在空气中或氧中渐渐氧化成黄色氧化物，钋及其氧化物能溶于盐酸，生成黄色 PoCl_4 溶液。钋盐容易水解而形成胶体，钋是所有射性核素中最容易形成胶体的核素，在自然界中钋有七个同位素。

$$^{210}\text{Po}(\text{RaF}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 138.4\text{d}$$

$$^{218}\text{Po}(\text{RaA}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 3\text{min}$$

$$^{216}\text{Po}(\text{ThA}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 0.15\text{s}$$

$$^{215}\text{Po}(\text{AcA}) \quad T_{\frac{1}{2}} = 1.8 \times 10^{-3}\text{s}$$

$$^{214}\text{Po}(\text{RaC}') \quad T_{\frac{1}{2}} = 1.64 \times 10^{-4}\text{s}$$

$$^{212}\text{Po}(\text{ThC}') \quad T_{\frac{1}{2}} = 3.05 \times 10^{-7}\text{s}$$

$$^{211}\text{Po}(\text{AcC}') \quad T_{\frac{1}{2}} = 0.56\text{s}$$

其中 ^{210}Po 的半衰期较长，且又是 α 辐射体，因此常通过测定 ^{210}Po 的 α 辐射的方法测定 ^{210}Po 的量，以寻找铀矿床。

8. 铅($Z=82$)

铅是金属，呈深灰色，密度为 11.35g/cm^3 。在空气中加热熔化生成 PbO 。铅可溶于稀 HNO_3 ，难溶于稀 H_2SO_4 及 HCl 。在天然放射性系列中，铅有七个同位素：

$^{210}\text{Pb}(\text{RaD})$	$T=7.02\times 10^3\text{s}$
$^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$	$T=26.8\text{min}$
$^{212}\text{Pb}(\text{ThB})$	$T=10.64\text{h}$
$^{211}\text{Pb}(\text{AcB})$	$T=36.1\text{min}$
$^{206}\text{Pb}(\text{RaG})$	稳定
$^{207}\text{Pb}(\text{AcD})$	稳定
$^{208}\text{Pb}(\text{ThD})$	稳定

其中四个为放射性同位素。三个为稳定同位素，即三个天然放射性系列衰变的最终产物。

在自然界存在的铅中总是含有放射性铅—— ^{210}Pb ，但数量极微。

在放射性矿石中总会含有少量的 ^{206}Pb ， ^{207}Pb 及 ^{208}Pb ，因此根据矿物中所含铅的量与原始放射性物质生成的铅量的比值，可以确定矿物的年龄。

铅为良好的核辐射防护材料，因此它被广泛用于原子能工业。

1.4 天然放射性核素的射线谱

1.4.1 α 射线谱

一种处于基态的放射性核素的原子核，通过 α 衰变放出某一能量的 α 粒子，所形成的原子核同样处于基态。大多数 α 衰变属于这种情况。同时有少数原子核在 α 衰变时只放出较小能量的 α 粒子，所形成的子体原子核处于激发状态，当子核由激发态跃迁到基态时，伴随放出 γ 射线。因此一种核素经 α 衰变有可能放出几种能量不同的 α 粒子，例如铀系的镭衰变时放出的 α 粒子，能量为 4.785MeV 的约占 95%， 4.602MeV 的占 5% 左右， 4.33MeV 的占 0.01%。

还有一些核素的部分原子核，在 α 衰变前就处于激发态，因而放出较大量的 α 粒子，例如 $^{212}\text{Po}(\text{ThC}')$ ，绝大部分 ^{212}Po 的原子核由基态进行 α 衰变，放出能量为 8.784MeV 的 α 粒子；少量的 ^{212}Po 原子核由不同能级的激发态进行 α 衰变，放出能量为 9.488MeV ， 10.417MeV 和 10.536MeV 的 α 粒子。

总之，由于 α 衰变前或衰变后放射性核素的原子核可以处于基态或不同能级的激

发态，所以一种核素作 α 衰变时可以放出几种不同能量的 α 粒子。

一种核素的原子核衰变时放出的 α 粒子，若能量是单一的。则称此射线谱为单色谱，若有几组不同的能量，则称此射线谱为复杂谱，天然放射性系列中，大多数核素放出的 α 射线是复杂谱。

表 1-5, 1-6 及 1-7 中列出了铀系，钍系和锕系各核素的主要 α 射线能量，这个能量是根据衰变的百分数计算的平均加权能量。例如 ^{238}U 的 α 粒子平均加权能量为：

$$E_a = 0.77 \times 4.196 + 0.23 \times 4.149 = 4.185 \text{ (MeV)}$$

若以镭为界（包括镭在内），把铀系分成铀组和镭组，则铀组有三个主要 α 辐射体，即 ^{238}U , ^{234}U 和 ^{230}Th , ^{238}U 只作 α 衰变，所以每一百次衰变产生的 α 粒子数 $n=100$ ，平均能量 $E=4.185\text{MeV}$ ，则每百次衰变的 α 辐射能量总和是 $nE=100 \times 4.185$ ，按此方法可计算出铀系各核素的 α 辐射能量总值，将其相加后得了整个铀系核素的 α 辐射能量总值。则 ^{238}U 的 α 辐射能量总和占整个铀系核素 α 辐射能量总和百分数（即相对能量总和数）是：

$$\frac{nE}{\Sigma nE} \% = 9.8\%$$

^{234}U 的相对能量总和为 11.1%， ^{230}Th 的相对能量总和为 10.9%，所以铀组核素 α 辐射的相对能量总和为 31.8%。

镭组有五个辐射 α 射线多且能量大的核素（称为主要 α 辐射体）： ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Po 和 ^{210}Po ，镭组的相对能量总和为 68.2%。

锕系总是与铀系共生，但 ^{235}U 的量很少，一般情况下，它对辐射测量的影响可不予考虑。

钍系共有七个 α 辐射体： ^{232}Th 、 ^{228}Th 、 ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{210}Po , ^{212}Bi 及 ^{212}Po 。 ^{232}Th 辐射的 α 粒子能量最小(3.99MeV)， ^{212}Po 辐射的 α 粒子能量最大(8.785MeV)。

1. 4. 2 β 射线谱

天然放射性核素的 β 射线谱是连续谱，能量变化可自零变化到某一最大值 E_0 。图 1-13 是几个天然放射性核素的 β 射线谱。有时 β 衰变形成的子核处于激发态，子核用激发态向基态跃迁时可能产生内转换电子。内转换电子能量是单一的，所以有时在 β 射线的连续谱上会出现单能电子峰。

铀系 β 射线谱列于表 1-5，表中 β 粒子能量是指最大能量 E_0 。 β 衰变时往往放出几组不同能量的 β 粒子，如 ^{214}Pb 每百次衰变中平均有 91.5 个 β 粒子的能量是 0.68MeV，2.2 个 β 粒子的能量为 0.35MeV，6.3 个 β 粒子的能量为 0.98 MeV。 ^{214}Pb 的 β 射线能量总和($\Sigma n \cdot E$)与铀系核素 β 射线能量总和(ΣnE)之比为 11.5%。

表 1-5 铀系核素的 α 、 β 、 γ 射线谱

核素	α 射线			β 射线			γ 射线		
	每日次衰变的 粒子数 n	能量 $E_\alpha(\text{MeV})$	$\frac{nE}{\Sigma nE} \%$	每日次衰变的 粒子数 n	能量 $E_\beta(\text{MeV})$	$\frac{nE}{\Sigma nE} \%$	每日次衰变的 粒子数 n	能量 $E_\gamma(\text{MeV})$	$\frac{nE}{\Sigma nE} \%$
$\text{U } ^L_T(^{238}_{92}\text{U})$	100	4.185	9.8				0.00023 0.187	0.112 0.048	0.5
$\text{UX}_1(^{234}_{90}\text{Th})$				35	0.103		0.148	0.093	
				65	0.193	2.7	0.065 0.065	0.064 0.029	1
$\text{UX}_2 + \text{UZ}$ ($^{234}_{90}\text{Pa}$)				0.56	0.600		0.0019	0.250	
				1.44	1.370		0.0012	0.750	
$\text{UX}_2 + \text{UZ}$ ($^{234}_{91}\text{Pa}$)				97.85	2.30		0.0060	0.760	
				0.12	0.465		0.007	0.910	
				0.027	0.843	38.3	0.0037	1.000	0.6
				0.003	1.350		0.0002	1.680	
							0.0004	1.810	
$\text{UII } (^{234}_{90}\text{Th})$	100	4.756	11.1				0.0003	0.121	~ 0
$\text{I}_0(^{230}_{90}\text{Th})$	100	4.660	10.9				0.00017	0.253	
							0.00014	0.184	
							0.0007	0.142	~ 0
							0.0059	0.068	
铀组总和			31.8			41			2.1
$\text{Ra } (^{226}_{88}\text{Ra})$	100	4.761	11.1				0.012	0.184	~ 0
$\text{Rn } (^{222}_{86}\text{Rn})$	100	5.482	12.8				0.00064	0.51	~ 0
$\text{RaA } (^{218}_{82}\text{Pb})$	100	6.002	14.0						
$\text{RaB } (^{214}_{82}\text{Pb})$				2.2	0.350		0.377	0.352	
				91.5	0.680	11.5	0.189	0.295	12.4
				6.3	0.980		0.052	0.285	
$\text{RaB } (^{214}_{82}\text{Pb})$							0.105	0.242	
$\text{RaC } (^{214}_{83}\text{Bi})$	0.021	5.448	~ 0	10	0.380	27.6	0.016	2.446	
	0.011	5.512		58.98	1.290		0.002	2.410	
				11.99	2.100		0.004	2.297	
				18.99	3.200		0.052	2.204	
							0.014	2.117	
							0.001	2.090	
							0.001	2.017	
							0.004	1.900	
							0.008	1.862	

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/328030025015006060>