

U, Ra, Th

矿石岩石中
铀 镭 钍
的物理测定

原子能出版社

矿石岩石中铀镭钍的物理测定

原子能出版社

内 容 简 介

本书内容基本上概括了国内现有的各种放射性分析方法，除系统地介绍了铀、镭、钍的物理分析方法外，还在有关章节介绍了有关放射性、各种探测器及其调试、分析误差等基础知识。本书可供从事放射性物理测量的工人、大专院校师生和技术人员参考。

矿石岩石中铀镭钍的物理测定

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京印刷一厂印刷

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 13 $\frac{1}{2}$ · 字数 367 千字

1981 年 2 月第一版 · 1981 年 2 月第一次印刷

印数 001—1500 · 统一书号: 15175·187

定价: 2.20 元

前 言

随着我国铀矿、钍矿地质事业的发展，天然放射性元素的分析方法和测量技术日益完善，广大放射性分析工作者在这方面积累了丰富的经验。本书的编写，主要是总结放射性物理测量方面的经验，提供分析方法，以适应铀矿地质工作的需要。

放射性物理分析技术通常包括分析方法、仪器装置和数据处理三部分。为了使理论密切联系实际，以便更好地掌握放射性物理分析方法，本书除系统地介绍铀、镭、钍的物理分析方法外，还在第一章介绍了一些与分析方法有关的放射性基础知识，在第二章介绍了常用的各种探测器，在第三章介绍了放射性分析装置的调试，在第九章介绍了分析误差的基本知识。对于几种常用分析仪器的原理及使用方法已有专门介绍，故不再编入。

本书内容基本上概括了国内现有的各种放射性分析方法和一些较新的方法。

本书是在有关领导部门及有关单位的大力支持下，并在广大地质分析工作者多年实践的基础上编写成的。在编写过程中，许多同志提供了宝贵的资料，为本书的及时出版创造了有利的条件。书稿由各有关单位的同志分头编写（执笔人的姓名分别署在各章），最后由李利权（第二章、第三章、第四章、第八章、第九章、附录）、董纯茵（第一章）、魏世林同志（第五章、第六章、第七章）整理并审定。在整理和审定过程中，对稿件作了适当的删改和补充。另外，张书达、贾文懿、李南赣同志对本书的定稿提供了宝贵的意见。

本书由于编写时间较短，编者水平有限，难免存在错误和缺点，希望读者批评指正。

编者

1978年8月

目 录

第一章 放射性基本知识	1
第一节 放射性核及其衰变	1
一、原子及原子核结构简述	1
二、放射性核的衰变方式	3
三、放射性衰变的基本规律	9
第二节 天然放射性系列	11
一、铀系	12
二、钍系	17
三、锕铀系	17
四、不成系列的天然放射性元素	17
第三节 天然放射性核素的射线谱及放射性分析中常用的单位	20
一、天然放射性核素的射线谱	20
二、放射性分析中常用的单位	29
第四节 多种放射性核连续衰变时的衰变、积累规律	31
一、两种放射性核素相继衰变的规律	31
二、三种或多种放射性核素的积累	39
第五节 α 射线与物质的相互作用	45
一、 α 粒子与物质的相互作用	45
二、 α 射线的电离密度	46
三、 α 粒子的射程	47
第六节 β 射线与物质的相互作用	49
一、 β 射线与物质的相互作用	49
二、 β 射线在物质中的吸收	51
第七节 γ 射线与物质的相互作用	54
一、 γ 射线与物质的相互作用	54
二、 γ 射线在物质中的衰减	61
三、 γ 射线在 NaI(Tl)闪烁谱仪中的仪器谱	63

第二章 射线探测器	71
第一节 电离室	71
一、气体的电离	71
二、电离室的结构	72
三、电离室的性能	74
第二节 正比计数管	76
一、正比计数管的工作原理	76
二、正比计数管的种类和结构	77
三、正比计数管的运用	78
第三节 G-M计数管	79
一、G-M计数管的工作原理	79
二、G-M计数管的种类	80
三、G-M计数管的特性	81
第四节 闪烁计数器	83
一、闪烁体	84
二、光电倍增管	93
第五节 半导体探测器	102
一、半导体探测器的工作原理	103
二、半导体探测器的种类	104
三、半导体探测器的性能	107
第六节 固体径迹探测器	115
一、工作原理和特性	115
二、用固体径迹探测器探测 α 射线和中子	118
第三章 放射性分析装置的工作原理与调试	121
第一节 积分测量装置的调试	121
一、探测器输出电路的安装与调试	121
二、消除假脉冲和提高信号噪声比	127
三、坪曲线的测定	128
四、测量装置的稳定性	131
第二节 单道 γ 能谱仪的工作原理与调试	133
一、单道 γ 能谱仪的工作原理	133

二、 γ 谱仪的能量分辨率	134
三、 γ 谱仪的刻度和能量线性的检查	138
四、放大器和分析器的频率响应	141
五、含量线性的检查	142
六、电源稳定性的检查	143
七、闪烁 γ 能谱仪的稳定性	144
第三节 多道脉冲幅度分析器的工作原理与调试	147
一、多道脉冲幅度分析器的工作原理	148
二、多道脉冲幅度分析器的调试	158
第四章 用 β - γ 法测定矿石中铀含量	164
第一节 放射性元素含量与射线强度的基本关系	164
第二节 β - γ 法测定铀含量的原理	167
一、不含钍样品中铀含量分析的原理	167
二、铀、钍混合样品中铀含量分析的原理	170
第三节 闪烁 β - γ 法测定矿石中铀含量	172
一、测量装置	172
二、测量条件的选择	173
三、系数和样品测量	177
四、影响铀分析质量的因素	182
五、铀分析精度的估计	190
第四节 G-M 计数管 β - γ 法测定矿石中铀含量	193
一、测量装置	193
二、测量条件的选择	194
三、影响铀分析的因素	194
第五章 γ 法测定矿石中镭含量	195
第一节 γ 法测镭原理	195
一、射气系数	195
二、 γ 法测钍和测镭	196
三、 γ 法测镭公式的推导	197
第二节 用闪烁装置的 γ 法测矿石中镭	200
一、测量装置及其调整	200

二、系数的测定和样品的测量	203
三、影响分析质量的干扰因素	205
四、装置的极限灵敏度和测量精度	207
第三节 用G-M计数管装置的 γ 法测镭	209
第六章 用放射化学分析法分析矿石岩石中铀、镭、 钍含量	211
第一节 放射化学 β 法测铀	211
一、方法原理	211
二、制备 β 测量源	212
三、测量工作	214
四、若干干扰因素与讨论	215
第二节 射气法测定镭含量	219
一、镭和氡的性质及矿样化学处理	219
二、样品溶液的放射性测定	228
第三节 射气法测定钍含量	244
一、方法的基本原理	245
二、测量装置	246
三、测量准备工作	247
四、测量工作	249
五、矿样的化学处理	251
六、干扰元素对测量的影响及排除方法	254
七、提高分析质量的措施	255
八、讨论	256
第七章 能谱法测定矿石岩石中铀、镭、钍含量	257
第一节 γ 能谱分析方法原理	257
一、概况	257
二、 γ 能谱法的物理基础	258
第二节 β - γ - γ 法测定铀、镭、钍含量	266
一、 β - γ - γ 能谱法的计算公式	267
二、 β - γ - γ 能谱法的装置	269
三、测量条件的选择	271
四、系数的测定	277

五、样品的分析	279
六、影响分析精度的因素	281
七、提高铀的测量精度的措施	283
八、分析灵敏度及样品测量误差计算	284
九、讨论	289
第三节 用 β - γ - γ 法测定复杂样品中低含量铀	290
一、方法原理和计算公式	291
二、测量装置	293
三、测量条件	297
四、测量方法	300
五、讨论	305
第八章 中子活化法分析矿石岩石中铀、钍含量	306
引言	306
第一节 γ 能谱中子活化法分析矿石岩石中铀、钍含量	308
一、方法原理	308
二、测量装置及仪器	322
三、样品测量前的准备工作	325
四、样品测量和数据处理	327
第二节 缓发中子法测定矿石岩石中铀、钍含量	332
一、方法原理	332
二、测量装置	335
三、样品的分析过程	337
四、影响因素的讨论	338
五、方法的灵敏度	339
第三节 裂变径迹法分析矿石岩石中铀、钍含量	339
一、方法原理	339
二、样品分析	341
第九章 放射性分析误差	344
第一节 误差理论知识	344
一、测量值误差的分类及起因	344
二、有效数字及运算法则	346
三、概率的意义及基本定理	348

四、高斯误差方程	349
五、最小二乘法原理	351
六、误差的表示	351
七、误差的置信度	354
八、误差的误差	354
九、误差在函数中的传递	355
十、不等精度观测值的误差	360
第二节 放射性测量统计学	364
一、放射性统计涨落误差的分布	364
二、放射性测量误差的估算	368
三、放射性分析样品误差的估算	373
四、样品测量时间的确定	377
第三节 测量数据的整理和检验	379
一、U 检验	379
二、 t 检验	383
三、 χ^2 检验	385
四、符号检验	387
五、测量数据的回归分析	388
六、可疑测量值的取舍	392
七、利用统计检验确定装置的极限灵敏度	395
八、测量结果的表示	396
附录	398
一、常用物理和数学常数表	398
二、物理单位换算表	399
三、氡衰变 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 表	400
四、氡积累表	404
五、几种常用电容电阻型号名称	407
六、 t 分布的双侧分位数(t_α)表	408
七、几种物质的密度	410
八、 β 粒子的最大射程	411
九、 β 粒子在铝中的半衰减厚度	412

十、 γ 射线的质量衰减系数	413
十一、几种材料对窄束 γ 射线的线性衰减系数(厘米 ⁻¹)	416
十二、不同能量的宽束 γ 射线在不同的衰减倍数 K 时铅 的厚度(厘米).....	417
十三、正态分布的双侧分位数(u_α)表.....	419
十四、数字半导体集成电路型号命名方法	420
十五、线性半导体集成电路命名方法.....	421
十六、7字打头的数字半导体集成电路型号命名方法.....	422
十七、8字打头的模拟半导体集成电路命名方法	423
十八、电子管器件型号命名方法	424
十九、半导体器件型号命名方法	426
二十、 χ^2 分布的上侧分位数(χ^2_α)表	427
二十一、符号检验表.....	429

第一章 放射性基本知识

执笔人 魏世林 張庆文

第一节 放射性核及其衰变

一、原子及原子核结构简述

按照玻尔模型原子的中心有一个原子核，外面有电子围绕着原子核运动。电子带负电，原子核带正电，整个原子的正负电荷量正好相等，所以原子是电中性的。原子的体积很小，它的直径大约是 10^{-8} 厘米数量级，原子核则更小，它的直径大约是 10^{-13} 厘米数量级。

原子核外围绕核运动的电子分 K, L, M 等壳层，其中每一壳层又有一定数目的电子轨道。例如靠近核的为 K 层，有二个轨道，每个轨道上有一个绕行电子； L 层有两个支壳层，第一支壳层有二个轨道，第二支壳层有六个轨道， L 层共有八个绕行电子。一般可以用 $2n^2$ 来表示每层绕行电子数，其中 n 称主量子数（ K 层 $n=1$ ， L 层 $n=2$ ， M 层 $n=3$ ，……）。每层轨道电子都有一定能量， K 层电子能量最小，离核愈远的轨道电子能量愈大。

原子核由中子和质子组成，它们统称核子。质子用符号 P 表示，带一正电荷。原子核的电荷常用 Z 表示， Z 就是原子核的质子数，又等于核外电子数，也就是原子序数。中子是不带电的中性粒子，用 n 表示。原子核内质子和中子数之和叫核子数，用 A

表示，称为质量数。常用符号 A_ZX 表示原子核，其中 X 代表元素名称，例如 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 为质量数为 238 的铀原子核的符号。

自然界中，原子核可分为两大类：一类原子核能够稳定地存在，不会自发地发生衰变，称为稳定的原子核；另一类原子核则不能稳定地存在，它自发地转变为别的原子核，称为放射性原子核。

核子在核内不是静止不动的，而是处于一定的运动状态。运动状态不同，相应的能量状态也不同。原子核的能量状态不是连续的，而是分成一系列的等级，叫做核能级。可以用图 1.1 形象地表示。

一个原子核的最低能量状态叫基态，比基态高的能量状态称激发态，激发态还可分为第一激发能级，第二激发能级等等。如果原子核的运动状态处于激发态的某个能级上，这种核状态是不稳定的，会自发跃迁到基态，并放出射线。

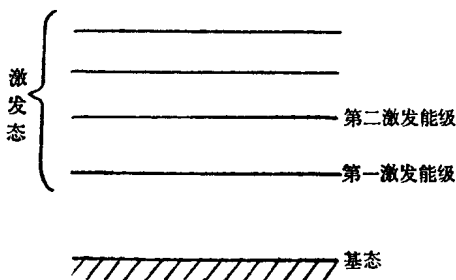


图 1.1 原子核能级示意图

凡是原子序数相同，质量数不同的原子核称为同位素。同位素在化学性质上有共同点，但是，由于核中质量数的不同，核的物理性质是不同的。有的是稳定的核，有的是放射性核，即使同样是放射性核，它们也有各自的衰变方式及不同的衰变常数。可见每一种核都有它独自的特性，所以现在对每一种原子核称作核素，例如 ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ ，表示质量数为 137，原子序数为 55 的核素铯-

二、放射性核的衰变方式

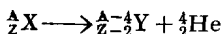
一个不稳定的原子核自发衰变为另一个原子核，同时放出射线，这种现象称为放射性衰变。放射性核衰变类型有多种，天然放射性元素核衰变的主要类型为 α 衰变， β^- 衰变及同核异能跃迁。

(一) α 衰 变

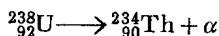
不稳定核自发地放出 α 粒子，而变成另一种核，称为 α 衰变。

α 粒子是氦核(${}^4_2\text{He}$)，由两个中子、两个质子组成，带两个正电荷，质量是4.0026原子质量单位。

放射性核在 α 衰变后，它的质量数减少4，原子序数减少2。若以X代表衰变前母核，衰变后子核用Y表示，则 α 衰变可写成以下形式

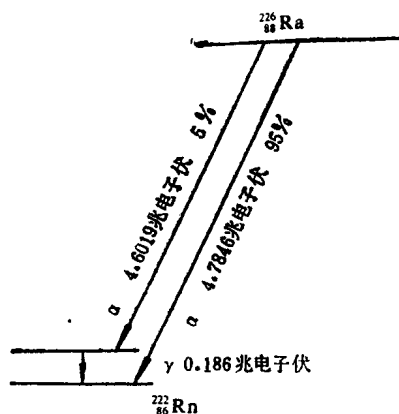


${}_{92}^{238}\text{U}$ 经过 α 衰变，生成 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 表示式可写为



同一种核放出的 α 粒子能量是一定的。有的核素放出单一能量的 α 射线，有的核素放出几种不同能量的 α 射线。当它不只放出一种能量的 α 射线时，往往伴随有 γ 射线放出。例如： ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 衰变后变成 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 。镭的 α 衰变及氡的能级见图1.2。

镭放出两种能量的 α 射线，一种是4.784兆电子伏的 α 粒子(占95%)，形成 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 的基态。放出的另一种 α 粒子能量为4.601兆电子伏(占5%)，衰变后子核处于激发态。处于激发状态的原子核是不稳定的，自发地回到核的基态，放出0.186兆电子伏的 γ 光子，这种现象称为 γ 跃迁。 γ 跃迁是核衰变后的一种次级过

图 1.2 镭的 α 衰变及钍的能级图

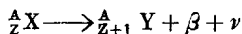
程。

一般 α 衰变时，伴随放出的 γ 射线的能量不大，概率也较小。

(二) β^- 衰 变

不稳定的核自发地放出 β 粒子及中微子 (ν)，变成另一原子核，称为 β^- 衰变。 β^- 衰变相当于母核中的一个中子转化为质子，使中子、质子数目之比发生了新变化，达到了新的平衡。

β 粒子实际上就是电子，它的静止质量等于电子质量，带有一个负电荷。 β^- 衰变的母核和子核的质量数相同，子核的原子序数提高一，可用下式表示：



β^- 衰变时放出的能量被衰变后的子核、 β 粒子和中微子共同带走。由于这三种粒子发射方向所成的角度是任意的，所以带走的能量也是不固定的。子核的质量远远大于 β 粒子及中微子，相比之下，它带走的动能可以忽略不计，因而 β^- 衰变放出能量在 β 粒子和中微子之间分配。实际测到的 β 射线谱如图 1.3 所

示。从图中可以看到：(1) β 粒子的能量可以由零到最大值，形成一个连续能谱。(2) 能谱曲线有个最大的能量 E_0 ，一般图表上所给的 β 粒子能量都是指 β 粒子最大能量 E_0 。(3) 能量为 $1/3 E_0$ 的 β 粒子强度有一极大值。

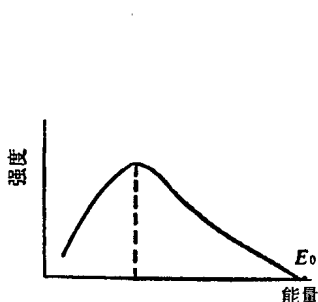


图 1.3 β 粒子的能量分布曲线

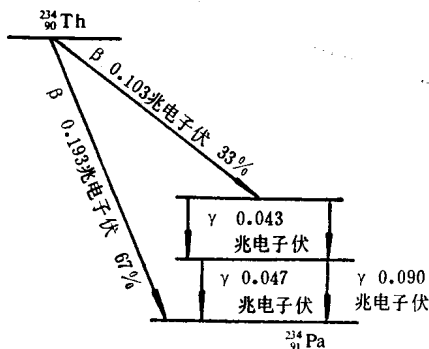


图 1.4 UX_1 的衰变图

图 1.4 列出了 UX_1 的 β^- 衰变图。

在 β^- 衰变时，往往放出 γ 射线，其原因是 β^- 衰变后形成的子核处于激发状态，激发态核发生 γ 跃迁回到基态时放出 γ 射线。有的核素放出几组不同能量 β 射线，子核处在不同能量的激发状态，因而伴随 β^- 衰变产生几种能量的 γ 射线。与 α 衰变时伴随放出的 γ 射线相比较， β^- 衰变放出的 γ 射线强度大得多。天然放射性元素放出的几组主要的 γ 射线几乎都是伴随 β^- 衰变产生的。

(三) 同核异能跃迁

有许多放射性核，在发生 α 衰变、 β^- 衰变以后，生成的子核不是处于基态而是处于激发态，由激发态过渡到基态的半衰期大于 0.1 秒，我们把这种衰变类型称为同核异能跃迁；或称作 γ 衰变。

同核异能跃迁前后，母核与子核的原子序数、质量数都没有

变化，只是能量不同。同时，母核与子核具有明显不同的半衰期。将这类母核与子核称为同核异能素。例如：天然放射性系列中的 Pa 的同位素 UX_2 和 UZ 就是一对同核异能素。 UX_2 以 99.85% 进行 β 衰变，半衰期为 1.17 分，生成核素 $U II$ 。 UX_2 还有 0.15% 的核以同核异能跃迁方式衰变，放出 0.396 兆电子伏的 γ 光子，生成新的核素为 UZ ， UZ 又作 β 衰变而生成 $U II$ ， UZ 的半衰期是 6.75 小时。Pa 的衰变见图 1.5。

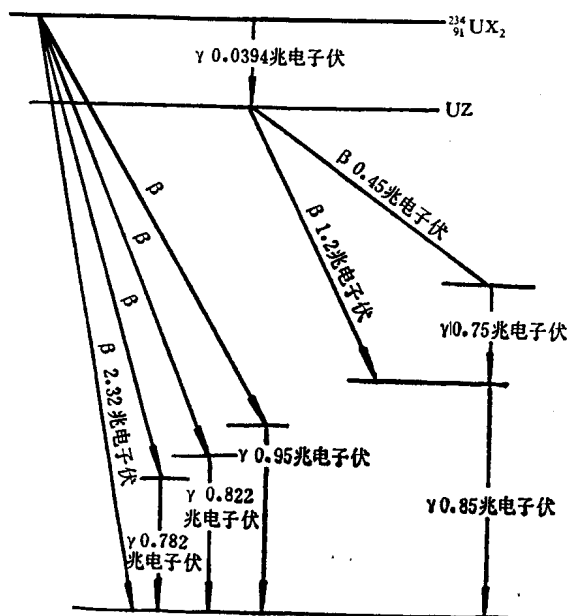


图 1.5 $^{234}_{91}\text{Pa}$ 的衰变图

在人工放射性核素中，同核异能跃迁较多，例如 ^{137}Cs 和 ^{60}Co ，它们的衰变图见图 1.6。

先看图 1.6 a， ^{137}Cs 经 β^- 衰变后生成钡-137 的激发态 $^{137m}_{56}\text{Ba}$ (其中 m 是同核异能素的符号)， $^{137m}_{56}\text{Ba}$ 进行同核异能跃迁衰变，半衰期为 255 分，生成钡-137 的基态 $^{137}_{56}\text{Ba}$ 。