

物探工人自学参考读物

放射性物探

广东省地质局七〇五地质队 编

地质出版社

物探工人自学参考读物

放射性物探

广东省地质局七〇五地质队 编

地质出版社

物探工人自学参考读物
放射性物探
广东省地质局七〇五地质队 编

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张: $10\frac{3}{8}$ · 插页: 3个 · 字数: 238,000

1980年8月北京第一版·1980年8月北京第一次印刷

印数1—2,750册·定价1.70元

统一书号: 15038·新543

前 言

《放射性物探》一书，主要是根据我队二十余年野外寻找铀矿的实际经验编写的。书中介绍了常用的各种寻找、评价和勘探铀矿的放射性物探方法。全书共分十二章，第一、二章介绍理论基础及探测仪器原理；第三章至第十章较系统地叙述了八种实用找矿方法，最后两章介绍了误差处理、数理统计的应用及综合找矿的重要性。内容力求通俗易懂，深入浅出，供从事铀矿地质工作的物探工人、找矿员阅读参考。

本书由贺龙德、黄建国、李诚、吴宏业同志编写，吴宏业同志最后修改定稿。书中照片由徐见平同志拍摄。插图、表格大部分由我队绘图组完成。初稿完成后，北京第三研究所周镭庭同志进行了认真的审阅，提出许多宝贵意见，在此表示谢意。

由于缺乏编写经验，错误难免，请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 放射性物探理论基础	1
一、放射性及放射性元素	1
(一) 放射性	1
(二) 天然放射性系列与放射性元素	2
(三) 天然放射性元素衰变积累规律、放射性平衡	9
二、射线与物质的相互作用	13
(一) α 射线与物质的相互作用	13
(二) γ 射线与物质的相互作用	14
(三) β 射线与物质的相互作用	21
三、放射性测量单位和标准源	23
(一) 放射性测量单位	23
(二) 标准源	26
第二章 放射性测量仪器	29
一、常用找矿仪器及其工作原理	29
二、闪烁探测器	34
(一) 闪烁探测器及其工作原理	34
(二) 闪烁体	36
(三) 光的收集和光导	41
(四) 光电倍增管	43
三、FD-71 型晶体管闪烁辐射仪	47
(一) 仪器的用途及结构	47
(二) 仪器工作原理	48
(三) 仪器的使用方法	59

四、FD-72 型铀钍轻便普查仪	64
(一) 仪器的用途及结构	64
(二) 仪器简要工作原理	65
五、FD-118G ₂ 型闪烁射气仪	67
(一) 仪器的用途及结构	67
(二) 仪器简要工作原理	67
第三章 地面伽玛测量	71
一、地面伽玛测量的基础知识	71
(一) 对测点的 γ 强度应有的认识	71
(二) 正常场	74
(三) 异常值	74
二、地面 γ 测量工作的部署	74
(一) 地面 γ 测量的测区选择	75
(二) 地面 γ 测量的顺序	75
(三) γ 编录及矿山检查中的 γ 测量	77
三、地面 γ 测量工作方法与技术	83
(一) 正确地使用仪器	83
(二) 路线上的工作方法	88
(三) 地面 γ 测量野外观测精度及工作质量检查	91
四、顺便 γ 测量	92
五、资料整理	93
(一) 整理编制野外测量及仪器工作状况的原始资料	94
(二) 编制岩石的 γ 射线强度变化曲线及岩石 γ 强度 剖面图	94
(三) γ 测量结果的图示	96
六、 γ 异常的解釋与评价方法	100
(一) 研究 γ 异常在地面上的分布	100
(二) 研究 γ 异常在深度方向上的变化	101
第四章 射气测量	103

一、射气测量的基本原理	103
(一) 射气场的形成	103
(二) 影响射气场分布的因素	105
(三) 射气底数和射气异常	108
二、射气测量的野外工作方法	109
(一) 射气测量工作部署	109
(二) FD-118 型射气仪工作性能检查	111
(三) FD-118 型射气仪的校正方法	111
(四) 测线上的工作方法	114
(五) 射气异常的处理	116
三、射气测量工作的资料整理	120
(一) 射气浓度的计算	120
(二) 异常点的编号和登记	121
(三) 射气测量成果的图示	121
四、射气异常的解釋	124
(一) 矿异常	124
(二) 镭次生富集形成的异常	125
(三) 物理参数变化或破碎带所引起的异常	125
(四) 屏蔽引起的异常	126
第五章 径迹测量	129
一、 α 径迹找矿的基本原理	129
二、野外工作方法	131
(一) 探测器和探测容器	131
(二) 野外工作	133
三、薄膜的蚀刻与径迹的判读	134
(一) 薄膜的蚀刻	135
(二) 径迹的镜下判读	136
四、资料整理与成果解释	139
(一) 底数与异常	139

(二) 作图的种类	140
(三) 异常的解释	140
(四) 异常的验证	143
五、找矿效果实例	144
第六章 铀矿地球化学找矿方法	147
一、化探的基本知识	148
(一) 原生晕的形成	148
(二) 次生分散晕的形成	150
二、化探找矿方法的部署	154
(一) 踏勘工作	154
(二) 普查工作	155
(三) 详测工作	156
三、化探找矿野外工作方法	156
(一) 铀量测量和金属量测量	156
(二) 放射性水化学找矿	159
(三) 铀植物找矿法	160
四、资料整理	160
(一) 原始资料的整理	161
(二) 样品分析结果的整理及误差计算	161
(三) 正常底数的确定及其方法	162
(四) 图件的编制	163
(五) 异常及晕圈的圈定	165
五、异常的解释与评价	166
(一) 描述各种晕圈	166
(二) 异常的分类与解释	166
(三) 异常的检查与评价	167
(四) 化探异常的工程验证	167
第七章 伽玛测井	171
一、伽玛测井的基本知识	171

(一) 什么是伽玛测井?	171
(二) γ 测井理论曲线的形状	171
(三) γ 测井曲线面积与矿层厚度、铀含量的关系	174
二、 γ 测井工作方法	175
(一) γ 测井的常用仪器设备	175
(二) FD-61型测井仪的校正和测井电缆长度的标记	176
(三) γ 测井技术	178
(四) 重复测井和检查测井	181
三、 γ 测井资料的整理及定量解释	182
(一) γ 测井资料的整理	182
(二) 根据 γ 测井结果确定矿层边界	183
(三) 铀含量计算公式	191
(四) 定量解释中各项影响因素的修正	193
四、 γ 测井换算系数	198
(一) γ 测井换算系数的意义	198
(二) 测定 γ 测井换算系数的主要方法	199
五、 γ 测井结果的外部验证	204
第八章 伽玛取样	205
一、伽玛取样的基本知识	205
(一) 什么叫伽玛取样	205
(二) 均匀分布、无限大矿体上 ΔI 值与铀含量 的关系	206
(三) 有限厚度矿体取样时铀含量的确定	208
二、 γ 取样仪器设备及铅屏系数测定	208
(一) γ 取样仪器设备	208
(二) 铅屏系数的测定	213
三、 γ 取样的方法及技术	216
(一) 剖面 γ 取样	216
(二) 面积 γ 取样	218

(三) 炮孔 γ 取样	221
四、矿区有效平衡系数的确定	222
(一) 平衡系数的确定	222
(二) 射气系数的确定	226
五、 γ 取样资料的整理及定量解释	227
(一) 剖面 γ 取样资料整理及定量解释	227
(二) 面积 γ 取样的资料整理	230
(三) 炮孔 γ 取样资料的整理	232
六、 γ 取样质量检查及评定	233
(一) 重复测量	233
(二) 检查测量	233
(三) 外部检查	233
第九章 伽玛能谱测量	236
一、 γ 能谱测量的基本知识	237
(一) 天然放射性元素的 γ 能谱	237
(二) γ 射线的能谱曲线	237
二、 γ 能谱测量的技术	242
(一) γ 能谱测量的仪器原理	242
(二) 铀和钍含量的测定	244
(三) γ 能谱仪的标定	247
(四) γ 能谱仪的技术要求	252
三、 γ 能谱测量种类	253
(一) 地面 γ 能谱测量	254
(二) 航空 γ 能谱测量	257
(三) 天然 γ 能谱取样	258
(四) 天然 γ 能谱测井	259
(五) γ 能谱分析	260
第十章 放射性分析	261
一、样品放射性分析的基本方法及原理	261

二、样品的铀分析	263
(一) β - γ 综合分析法	263
(二) β - γ 综合分析方法的装置及其要求	265
(三) β - γ 综合分析及样品含量的计算	268
三、脉冲法测量样品的镭含量	270
(一) 脉冲法测镭的原理	270
(二) 测量镭的装置及其要求	272
(三) 测镭的方法	273
(四) 脉冲法测定样品镭含量的主要影响因素	274
四、射气系数的测定	275
(一) γ 法测定射气系数的基本原理	275
(二) 测定块状样品射气系数的技术	276
五、水中镭、钍含量的测定	277
(一) 水中钍的测量	277
(二) 水中镭的测量	279
六、分析质量的检查	280
第十一章 误差处理与数理统计的应用	283
一、误差处理	283
(一) 误差的分类	283
(二) 误差的表示方法	285
(三) 误差表示的意义	287
二、数理统计的应用	289
(一) 相对 γ 强度图的应用	290
(二) 趋势分析	291
第十二章 综合物化探方法找矿	295
一、铀矿综合找矿概述	295
二、综合找矿方法的实际应用	297
(一) 综合找矿方法在找矿各阶段解决的问题	298

(二) 综合找矿方法的相互配合	298
三、综合找矿方法的成果解释	300
(一) 综合找矿成果的整理	300
(二) 综合方法异常的分类与成果分析	302
四、综合方法找矿实例	303
(一) 某矿床20号蚀变带综合找矿效果	303
(二) 某矿床外围综合找矿实例	304
(三) 261地区4号矿化蚀变带综合找矿实例	307

附录

一、普通常数表	309
二、常用计量单位及折算	309
三、放射性辐射单位	311
四、常见物质的密度	312
五、蚀刻溶液常用配方	312
六、电学单位	312
七、射气积累系数表	314

第一章 放射性物探理论基础

放射性究竟是怎么回事，哪些物质具有放射性，它们之间的关系如何，人们通过哪些方法能探测它们的存在和数量，这些都是放射性物探需要研究的问题。

一、放射性及放射性元素

(一) 放射性

放射性是某些元素的特殊物理性质。这些元素的原子核不稳定，能够自发地转变成另一种元素的原子核。在转变过程中伴随着放出射线来。这种现象称为放射性，具有放射性的元素称为放射性元素。

放射性元素很多，可分为两类：一类是天然放射性元素，另一类是人工放射性元素。天然放射性元素天然地具有放射性，如铀、镭、钍、钷等。由天然放射性元素形成的矿产称为放射性矿产。人工放射性元素必须经过人工核反应之后才显示出放射性现象。

天然放射性元素转变时放出的射线，主要由三种不同种类的射线组成： α 射线、 β 射线和 γ 射线，也可以分别叫做 α 粒子、 β 粒子和 γ 光子。

原子转变时放出 α 粒子，叫 α 衰变；放出 β 粒子，叫 β 衰变； γ 射线通常是在 α 衰变和 β 衰变的同时放出来的。

放射性射线能够穿透可见光不能穿透的物体，能够使物

质电离，能够激起许多物质发荧光，能够引起物质的化学反应和其它变化等等。利用射线与物质作用的这些独特本领来探测天然放射性元素所放出的射线强度，寻找矿体，是放射性物探的特点。

(二) 天然放射性系列与放射性元素

目前铀矿和钍矿是我们寻找的主要的放射性矿产。在自然界，同一块矿石中除铀、钍元素外，还有许多天然放射性元素，如镭、氡等。这些元素看起来好像很复杂，然而经过研究，发现许多放射性元素之间有“家族”关系。人们把盛有镭盐(RaCl_2)溶液的容器密封起来时，密封的容器里就会出现一种新的、以前容器里所没有的气体——氡。如果把氡气引进干净的容器，在容器壁上又会附着新的固态放射性物质。从镭→氡→新的放射性物质是一个“家族”。追根溯源，铀-238(${}^{238}_{92}\text{U}$)①元素就是这个“家族”的头。

这种由最初的天然放射性元素(起始母元素)自发地通过 α 衰变或 β 衰变，一代接一代(女元素)地衰变，直到最后成为稳定元素的衰变“家族”，称为天然放射性系列。

天然放射性元素中构成系列的有三个，即铀系、钍系和锕系。还有一些天然放射性元素如钾-40、铯-137等不参加系列，独立存在。

1. 铀系(又称铀-镭系)

铀系因它的起始母元素是 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 而得名。它的半衰期为 4.49×10^9 年(半衰期是指物质中原子核衰减到原来一半所需要的时间)。全系列共由18种放射性元素组成。镭(Ra)是

① ${}^{238}_{92}\text{U}$ 为元素名称，U为元素符号，左上角238为原子量，左下角92为原子序数。

第五代产物，氡 (Rn) 是第六代产物，最后是稳定的铅同位素 ($^{206}_{82}\text{Pb}$)。

铀系衰变的顺序、各放射性元素的半衰期长短和发生 α 衰变或是 β 衰变的可能性，列于铀系衰变图中(图1—1)。

由图 1—1 看到，放射性元素在衰变时具有确定的辐射性质。例如，镭原子核放射 α 粒子，转变成氡原子核；镭 C 原子核主要放射 β 粒子 (99.96% 可能性)，转变成镭 C' 原子核。只有很小部分 (0.04% 可能性) 放射 α 粒子转变成镭 C' 原子核。伴随着 β 衰变 (或 α 衰变) 有强烈的 γ 辐射。原子核在衰变过程中遵守总电荷数和总质量数不变的规律，因此衰变前后的原子核在核电荷和质量数上有一定的关系可循。一个放射性原子核在 α 衰变后，原子序数 (Z) 减少 2，它在周期表内的位置就向左移 2 格，同时质量数 (M) 减少 4。而 β 衰变后原子序数 (Z) 将增加 1，它在周期表内的位置向右移 1 格，但质量数 (M) 保持不变。这样的规律叫位移律。

对照图 1—1，从铀系中各元素的质量数以及它们之间有规律衰变情况，可以清楚地看出位移律的特征。铀系中每一个元素的质量数 (M) 是 $4n + 2$ 的倍数 (n 为正整数，铀系中 $n = 51 \sim 59$)，所以铀系又称 $4n + 2$ 系。

钍系也具有铀系的这个特点，系列中每一个元素的质量数 (M) 是 4 的倍数，即 $M = 4n$ (对钍系而言 $n = 52 \sim 58$)，所以钍系就叫 $4n$ 系。

铀系列中铀和镭的地球化学性质不同，另外 $\text{U}^{238} \rightarrow \text{Io}$ 和 $\text{Ra} \rightarrow \text{RaE}'$ 、 RaF 两组中放出的 γ 射线的能量和相对强度差别较大，习惯上将铀系分成铀组和镭组两部分，故铀系又有铀-镭系之称。

这个系列中 α 辐射体主要有 8 个，它们是铀 I (UI)、

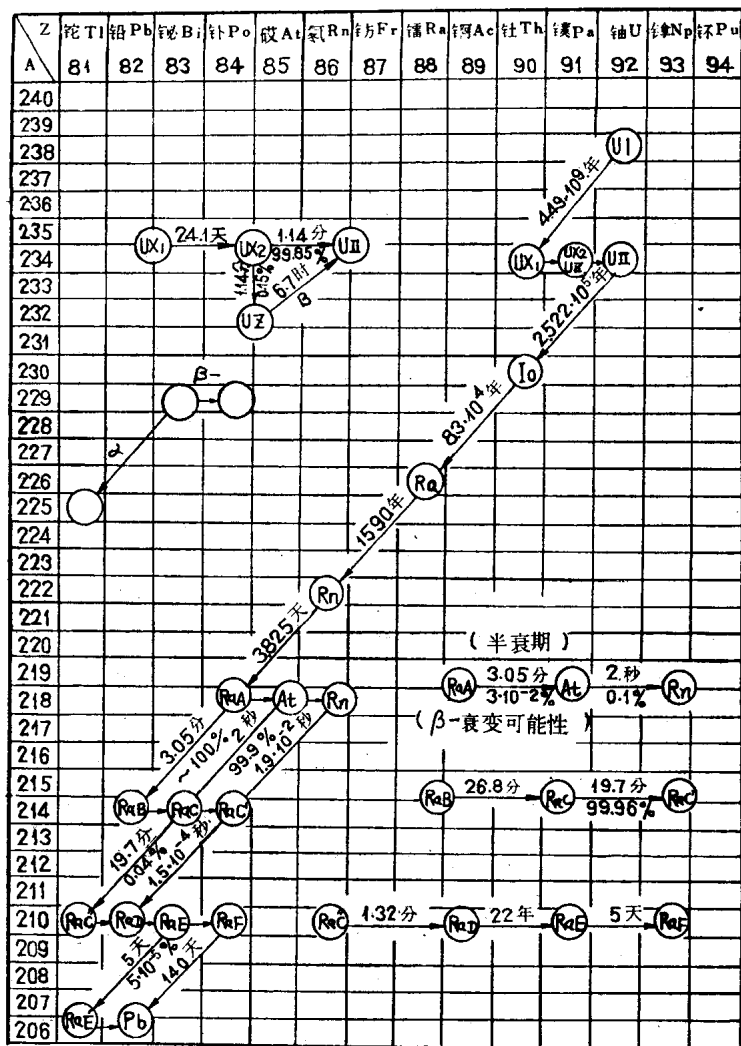


图 1-1 铀系衰变图

铀II(UII)、镓(Io)、镭(Ra)、氡(Rn)、镭A(RaA)、镭C'(RaC')和镭F(RaF)。每种 α 辐射体大多放出一种固定能量的 α 粒子,其能量比 β 射线和 γ 射线能量都大,约在4.15~7.68兆电子伏^①范围内。系列中铀组元素放出的 α 射线占铀系总强度的31.7%,而镭组占68.3%。

β 辐射体主要有4个,它们是铀X₂(UX₂)、镭B(RaB)、镭C(RaC)和镭E(RaE)。系列中铀组元素放出的 β 射线强度占铀系总强度的39%,镭组占61%。如果只记录高能量的 β 粒子,例如记录大于1兆电子伏的 β 粒子,可以发现铀组的 β 射线强度与镭组的 β 射线强度几乎相等。

整个铀系近98%的 γ 射线强度是由镭组中的RaB、RaC产生的,而铀组仅占总 γ 射线强度的2%左右。特别是能量大于1兆电子伏的 γ 射线,几乎全是由镭组放出来的(表1—1)。

了解铀系列的衰变顺序和射线能谱,对于找矿有很大意义。例如,采用测量 γ 射线的方法找铀矿时,由于 γ 射线强度主要取决于镭组,因此找矿时发现的 γ 射线强度的增高(或称 γ 异常)直接取决于镭量的多少,而不取决于铀量。虽然我们知道镭是铀衰变生成的,镭量的多少与铀量有关,可是由于铀和镭的地球化学性质不同,它们的迁移性能也往往不一样。在氧化作用强烈的环境下,铀容易被酸溶解带走,而镭被溶解的量极少,这时就发生了 γ 强度很高,但铀并不富的现象;在还原的环境下镭被带走,而铀溶解得很少或搬运的铀在此还原而沉淀,这时就出现了相反的现象:铀虽富,但 γ 强度不高。因此,在野外发现的 γ 异常不能仅仅

① 1兆电子伏 = 10^6 电子伏特。电子伏特是物理学中功和能的单位,代表1个电子经过1伏特的电位差时电场所作的功,以符号eV表示。兆电子伏用MeV表示。