

根据 γ 辐射谱测定铀-钍混合矿石中钍的含量

刘 鹏 张 庆 文

一、引 言

许多作者^[1,2]指出,当未将矿石中某些铀和钍的子体产物先行过滤掉时,用辐射方法测定混合矿石中铀和钍的含量很简便。但在衰变系列内,由于同位素具有特殊的物理和化学特性,所以不平衡经常存在于系列内两个主要的铀组和钍组之间。在铀组内,同位素相互之间常是保持平衡的;而在钍组内除受强烈的地质、地球物理等因素破坏外,一般也常保持平衡。但是在铀组和钍组之间的不平衡则是经常存在的。如果平衡已被破坏,则根据不同的子体元素所放射出来的辐射相对量的测定,其分析精度就会相应受到不同程度的影响。

众所周知,在铀系铀组、钍组和钍系中的 γ 辐射谱十分复杂,且各有其独自的特点。这样一来,用简单的 β - γ 综合法就不能精确地分析其中放射性元素的含量。近代闪烁计数器在物理探矿中的应用,为解决这一问题提供了可能性,因为它不仅能记录岩石中天然 γ 辐射的总合,而且可以得到 γ 辐射的一些能谱特性,保证了更为单值地解释观察结果。

根据铀系钍组中能量为 350 千电子伏和钍系中能量为 238 千电子伏两个能谱段的不同性,作为提出方法的物理基础,在忽略铀组的 γ 射线影响的情况下,引用下列方程组求解钍的含量:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= (b_1 Ra + c_1 Th)P \\ N_2 &= (b_2 Ra + c_2 Th)P \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$Th = \frac{b_2 N_1 - b_1 N_2}{(b_2 c_1 - c_2 b_1)P} \quad (2)$$

式中 N_1, N_2 ——被测样品在两种不同能量鉴别阈下测得的 γ 辐射强度(脉冲/分); b_1, b_2, c_1, c_2 ——分别为平衡铀源和钍源在两种不同能量鉴别阈下单位含量、单位重量的 γ 辐射强度; Ra, Th ——分别为样品中镭(以平衡铀当量表示 % U)和钍的含量(%); P ——被测样品的重量(克)。

本实验的目的是,了解用“rac”仪器微分鉴别器,在铀和钍的子体产物 RaB 和 ThB 软 γ 射线范围内,测定铀-钍混合矿石中钍含量所能达到的精度、灵敏度,以及了解影响分析精度的因素。

二、实 验 方 法

1. 实验仪器 所用仪器为单道能谱仪“rac”, γ 射线接受器是由 $\Phi 3V-19M$ 型光电倍增管和高 50 毫米、直径 44 毫米的 NaI(Tl) 晶体组成的闪烁计数器。标准源:平衡铀($U = 0.100\%$, $Ra = 0.110\% U$); 纯铀 ($U_3O_8, U = 0.300\%$); 钍源 ($Th = 0.200\%$, $U = 0.009\%$)。标准源的粒度均为 80 筛孔。盛样品用的是一铝制圆形杯(图 1)。

2. 样品 被测样品围于晶体四周,厚 15 毫米。

3. 仪器选用的工作条件 为了按振幅选择信号,用仪器的微分鉴别器进行工作。取道宽 $\Delta = 2$; 放大系数 $y = 300$; 光电倍增管的工作电压 $V_H = 1100$ 伏(对不同光电倍增管, V_H 值可能不同)。电源功率为 1000 瓦的稳压器稳定后供仪器使用。

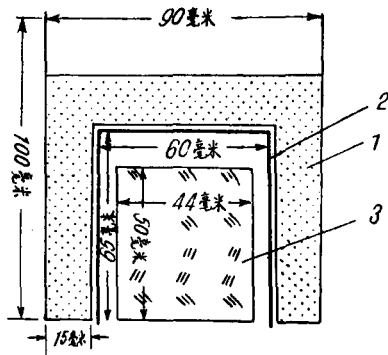


图 1 样品杯剖面图

1—样品,其厚层为 15 毫米; 2—防光套; 3—晶体。

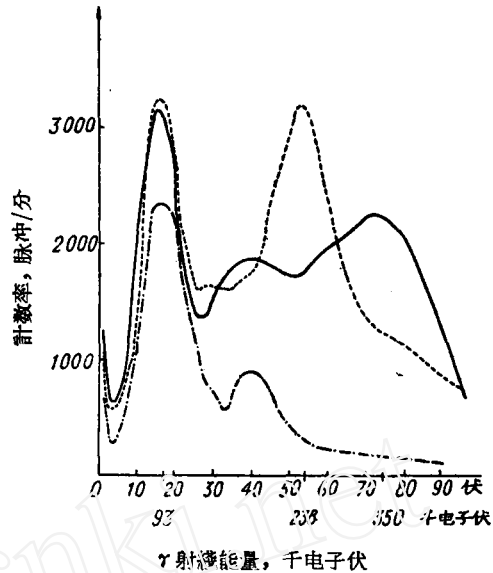


图 2 铀钍和钍的 γ 射线能谱图

1— $U_3O_8 = 0.300\%$; 2— $Ra = 0.110\% U$;
3— $Th = 0.200\%$. $V_H = 1100$ 伏; $\Delta = 2$;
 $y = 300$.

4. 能谱曲线的选择 在各种条件(改变 V_H 、 Δ 和 y)下,对平衡铀源和钍源进行能谱曲线的测量,共测了 150 条谱线和谱段,最后选定上述工作条件用于生产。在这种工作条件下,对平衡铀源、钍源和纯铀源的多次测量,均获得如图 2 所示之能谱曲线。其标准源的重均均为 250 克。

对获得的谱线(图 2)进行分析,可以得出下面结论:

- (1) 在鉴别阈为 18 伏时出现的谱峰,是由 UX_1 的能量为 93—100 千电子伏的 γ 射线所引起。
- (2) 在鉴别阈为 54 伏时出现的尖峰,是由能量为 238 千电子伏 ThB 的 γ 射线引起的。
- (3) 在鉴别阈为 74 伏时出现的宽峰是由能量为 320—350 千电子伏 RaB 的 γ 射线所引起。上述所获得的结论与文献[3]获得的结论相吻合。

5. 系数测量 在已选定的工作条件下,对平衡铀和钍源的测定获得以下系数值:

$$b_1 = \frac{N_{1U-Ra}}{Q_{U-Ra}P} = \frac{1850}{0.110\% \times 250} = 6727;$$

$$b_2 = \frac{N_{2U-Ra}}{Q_{U-Ra}P} = \frac{2250}{0.110\% \times 250} = 8200;$$

$$c_1 = \frac{N_{1Th}}{Q_{Th}P} = \frac{3250}{0.200\% \times 250} = 6500;$$

$$c_2 = \frac{N_{2Th}}{Q_{Th}P} = \frac{1200}{0.200\% \times 250} = 2400.$$

区分系数:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{6500}{2400} \approx 3.3$$

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{6727}{8200}$$

三、精度、灵敏度的实验

1. 本方法对所配制的铀-钍比例不同的矿石样品的分析结果与化学分析结果列入表 1.

表 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ法(%Th)	0.009	0.005	0.015	0.017	0.018	0.047	0.050	0.096	0.075	0.078
化学法(%Th)	0.007	0.005	0.014	0.017	0.014	0.050	0.047	0.086	0.074	0.073
已知结果($\frac{\text{Th}}{\text{U}}$)	0.009/ 0.000	0.005/ 0.015	0.015/ 0.017	0.015/ 0.022	0.015/ 0.078	0.050/ 0.101	0.050/ 0.254	0.100/ 0.011	0.079/ 0.019	0.079/ 0.041
比值	—	0.33	0.88	0.68	0.19	0.50	0.20	9.11	4.15	1.92

根据所获得的分析结果,在上述铀-钍比例的情况下,γ法的分析结果与化学分析结果或与已知结果之间的比较,其分析精度是令人满意的.

2. 对 0.050/0.254 ($\frac{\text{Th}}{\text{U}}$) 样品进行了 20 次统计测量,结果(%Th)列入表 2.

表 2

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ法结果	0.051	0.044	0.051	0.058	0.052	0.043	0.046	0.063	0.065	0.056
$(\bar{x} - x_i) \times 10^3\%$	-1	+6	-1	-8	-2	+7	+4	-13	-15	-6
$(\bar{x} - x_i)^2 \times 10^6\%$	1	36	1	64	4	49	16	169	225	36
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
γ法结果	0.048	0.049	0.045	0.039	0.049	0.049	0.044	0.048	0.059	0.042
$(\bar{x} - x_i) \times 10^3\%$	+2	+1	+5	+11	+1	+1	+6	+2	-9	+8
$(\bar{x} - x_i)^2 \times 10^6\%$	4	1	25	121	1	1	36	4	81	64

$$\sum_{i=1}^{20} x_i = 1.001\%;$$

$$\sum_{i=1}^{20} (\bar{x} - x_i)^2 = 939 \times 10^{-6};$$

$$\bar{x} = 0.050\% \text{ Th.}$$

$$\text{均方误差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{939 \times 10^{-6}}{19}} = 7 \times 10^{-3}\% \text{ Th.}$$

$$\text{相对均方误差 } m = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{0.007}{0.050} 100\% = 14\%.$$

3. 当 $U \leq 3\text{Th}$ 时,仪器所能达到的灵敏度为 0.005% Th. 该灵敏度可以认为已满足地质分析的要求. 因为:(1) 铀-钍矿石中,品位在 0.05% Th 以下者无开采价值^[4];(2) 铀-钍矿石中,钍含量低于 0.005% Th 时,对采用 β - γ 法测定矿石中的铀,或对 γ 测井资料的定量解释,钍 γ 射线的干扰可以不予考虑^[5].

四、影响因素的讨论

1. 密度实验 对铀-钍不同比例,装填密度为 1, 1.25, 1.5 (克/厘米³) 的样品,分别进行多

次测定,平均结果列入表 3。

表 3

序 号	测定结果 (%Th)			已知结果(Th/U)
	1 克/厘米 ³	1.25 克/厘米 ³	1.5 克/厘米 ³	
1	0.010	0.010	0.010	0.009/0.000
2	0.098	0.096	0.095	0.100/0.011
3	0.080	0.078	0.079	0.079/0.041

从表 3 的数据可以看出:在含量低的时候,看不出随着样品密度的增大自吸收对测量结果的影响;随着含量的增加,密度增大,其测量结果有降低的趋势。实验表明,密度在 1—1.5 克/厘米³ 范围内变化时,自吸收对测量结果引起的误差微不足道。

2. 分析精度 其分析精度决定于,由第一鉴别阈到第二鉴别阈时,铀源和钍源单位含量、单位重量的 γ 辐射强度的相对变化。此变化愈大,即 $\frac{c_1}{c_2} \gg \frac{b_1}{b_2}$, 则分析精度就愈高。

3. 高压稳定度 在工作状态中,光电倍增管的总放大系数 M 与高压 V_H 的关系是 $M \propto V_H^{1.6}$, 因此,对高压稳定性的要求十分苛刻。实验证明,当高压升高时,谱峰沿横坐标向右拉开;当高压降低时,谱峰沿横坐标向左推移(比较图 2 和图 3)。由于谱峰的位移,能导致完全错误的分析结果。为此应保证仪器在工作时,高压的波动不可大于 $\pm 0.1\%$ 伏。

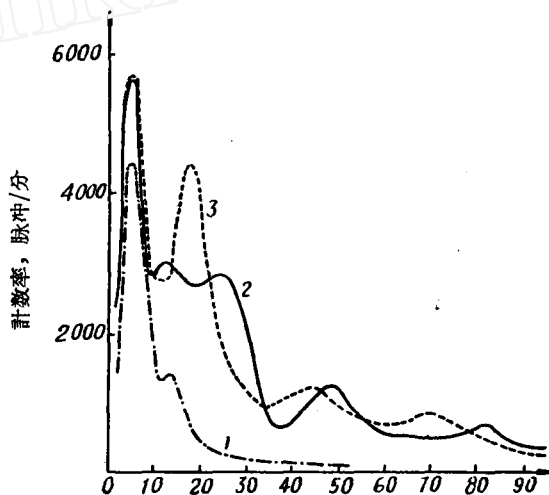
4. UX_1 的 γ 射线对测量结果的影响 通过对鉴别阈在 54 伏 ($E_r \approx 238$ 千电子伏) 时,铀系铀 UX_1 和铀系钍组 RaB 单位含量、单位重量 γ 辐射强度(除本底外)实际测量数据的计算表明,铀组 γ 辐射强度约占钍组 γ 辐射强度的 3%。因此,在这种情况下,可以认为铀组 UX_1 的 γ 射线近于全部被切除。

本文初稿完成后,承蒙朱志祥、芦贤栋、马占中等同志的校阅,并提出许多宝贵意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 代明兹,天然铀-钍矿样的分析(纯 γ 谱法的应用),原子能译丛,第 11 期,922—930 (1961)。
- [2] 朱志祥,用脉冲法分析复杂矿石样品中的铀、钍、钍含量,原子能科学技术,第 6 期,444—451 (1962)。
- [3] А. Л. Якубович, Е. И. Заизев, Радиометрическое определение кларковых содержаний урана, радия, тория и калия в образцах горных пород, *Разведка и охрана недр*, вып. 2, 33—37 (1961)。
- [4] А. А. Якжин, Поиски и разведка урановых месторождений, стр. 18, 1961。
- [5] 苏联地质部 γ 测井规程,莫斯科,1957 年。
- [6] 中国科学院原子能研究所编,同位素应用实验方法讲义,科学出版社,1960。

(编辑部收稿日期 1963 年 4 月 17 日)

图 3 铀钍和钍的 γ 射线能谱图

1— $U_3O_8 = 0.300\%$; 2— $Ra = 0.110\%U$; 3— $Th = 0.200\%$. $V_H = 1000$ 伏; $\Delta = 2$; $y = 300$ 。