

矿石放射性分析

资料汇编

原子能出版社

内 容 简 介

本汇编登载了矿石放射性分析方面的研究成果和经验总结共12篇。内容主要包括闪烁 β - γ 法测铀，放射化学法测镭、铀， γ 能谱法测铀、镭、钍和测量装置的改进四个部分。所介绍的分析方法，有些是在原有的基础上加以提高，有些是近年来发展的新技术、新方法。同时对分析方法的应用范围和影响因素进行了探讨。本汇编可供从事放射性分析人员、物探工作者以及大专院校有关专业师生参考。

矿 石 放 射 性 分 析

资 料 汇 编

湖南二三〇研究所

原子能出版社出版

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)



开本787×1092 $1/32$ ·印张 $8\frac{7}{16}$ ·字数 187千字

1978年9月北京第一版·1978年9月北京第一次印刷

： 统一书号：15175·118

定 价：0.80元

前 言

矿石放射性分析是放射性测量工作的一个重要方面，是天然放射性元素的主要分析手段之一。随着我国铀矿地质事业的不断发展，对这一工作提出了越来越高的要求。因此，不断提高它的测量精确度和准确度，提高测量速度，探求新的分析方法，已成为从事铀矿放射性分析人员的一项重要课题。为了适应形势的需要，我们选编了近年来我所在放射性分析工作中的部分研究成果和经验总结，在编写过程中还参考了一些国内外有关资料。

本汇编共收入12篇文章。内容主要包括四个方面：(1)闪烁 β - γ 法测铀；(2)放射化学法测镭、铀；(3)能谱法测铀、镭、钍；(4)测量装置的改进及工作条件的选择。可供从事矿石放射性分析人员、物探工作者以及大专院校有关专业师生参考。

由于我们水平有限，书中缺点和错误之处，望读者批评指正。

编 者

1977年8月

目 录

闪烁 β - γ 法测定矿石中铀	(1)
偏镭样品中铀的测定	(51)
能谱法测定矿石中铀、镭、钍	(62)
β 射线及其次级辐射对 NaI (Tl) 闪烁 γ 能 谱测量的影响	(110)
关于区分系数的探讨	(134)
射气闪烁法测定矿石中镭	(138)
α 计数法测定 ^{226}Ra 的探讨	(152)
β 计数法测定铀	(171)
放化纯 RaD (RaD + RaE) 源的制备与标定	(187)
电流型阻抗匹配放大器及其在闪烁计数装置中 的应用	(197)
光电倍增管的坪	(214)
光电倍增管的分压器	(236)
附录 1 射线测定装置及其测定方法一览表	(244)
附录 2 天然放射性核的 γ 量子的能谱成分	(249)
附录 3 γ 射线的质量衰减系数	(262)

闪烁 β - γ 法测定矿石中铀

张庆文 唐芳云 胡海云

一、引言

用 β - γ 法测定铀-镭矿石中的铀含量, 是一种行之有效的办法, 区分系数可达 $\text{tg}\theta \approx 1$ [1], 且所需的仪器比较简单。特别是使用 G-M 计数管探测装置, 对计数管工作电压的稳定度和定标器的性能要求不高, 成本低廉, 适合于野外地质矿山测定大批样品。因此曾被用来定量测定矿石中的铀含量。在国外也有关于这类工作的报道 [2-4]。

G-M 计数管 β - γ 法测铀装置的最大缺点, 是计数的不灵敏时间长, 约 10^{-4} 秒; 作为 β 探测器, 对 γ 射线的探测效率太高, 本底也高, 但作为 γ 探测器, 则对 γ 射线的探测效率又太低 (1-3%)。它不但不能用来作高速计数, 也就是不能用以测定铀-镭含量很高的样品, 也不利于进一步提高测量精确度。塑料-NaI (Tl) 闪烁 β - γ 装置的应用, 为克服 G-M 计数管装置存在的这些缺点提供了有利的条件 [5]。同时, 由于当前电子学的高度发展, 对闪烁探测装置所需高压的稳定度和对电子记录系统的某些要求所带来的困难已降到了次要的地位。自从 GP-I-T₁ 探头成批生产以来, 它已

逐渐被用来代替 G-M 计数管装置。该探头所用的两只光电倍增管的型号是 GDB-10，光阴极灵敏直径 44 毫米，分别配以 $\phi 60$ 毫米的薄片塑料闪烁体和 $\phi 50 \times 50$ 毫米的 NaI(Tl) 晶体，具有结构紧凑，被测样品需要量少的优点。但是， β 探测器的灵敏面积不够大以及所用的电压型前级放大器的不灵敏时间长(约 5 微秒)成为妨碍进一步提高测量速度和扩大测量含量范围的主要因素。针对这些问题，我们自己安装了闪烁 β - γ 法测铀装置，并经过了一年多的生产考验，取得了良好的效果。本工作的主要特点是：

1. 采用大面积 ($\phi 100$ 毫米) 的塑料闪烁体配接有效窗直径 100 毫米的光电倍增管，以提高 β 探测灵敏度。

2. 应用电流型阻抗匹配放大器，其分辨时间比 GP-I-T₁ 探头的放大器约提高一个数量级，并且简化了探头内的元件及其与定标器之间的引线。

3. 为了提高测量精确度和减少干扰，对塑料闪烁体的厚度、光电倍增管的工作电压以及吸收屏等进行了选择。

4. 除定量测定钾、钍的干扰外，还用放化纯 RaD 源定量地测定了 Ra (D+E) 的干扰。

5. 闪烁装置的使用，会带来一些新的问题。为了确保分析质量，对测量中可能存在的某些影响因素作了探讨。

二、原理^[8]

在铀系元素中，主要的 β 辐射体有 UX₂，RaC 和 RaE， γ 辐射体主要有 UX₂，RaB 和 RaC。UX₂ 通过 UX₁ 与铀处于平衡，RaB 和 RaC 与钍处于平衡。RaE 的 β 射线能量较低。因此 β - γ 法测量往往忽略 RaE 的影响，而只把该系

元素分为铀和钍两组。

当矿样这两组的平衡状态与所使用的标准源的相同时，只需单独地比较它们的 $(\beta + \gamma)$ 或 γ 射线强度即可求得样品的铀含量。但往往样品中铀-钍不一定平衡，而且其平衡破坏程度也不尽一致。因此，必须用 β - γ 法分别测量 β 和 γ 射线的强度以确定样品的铀含量，测得的射线强度与放射性元素含量之间的关系用下式表示：

$$\begin{cases} I_{\#}^{\beta} = a_1 U + b_1 Rn \\ I_{\#}^{\gamma} / P_{\#} = a_2 U + b_2 Rn \end{cases} \quad (1)$$

式中 $I_{\#}^{\beta}$, $I_{\#}^{\gamma}$ 分别为样品的 β 和 γ 射线强度； $P_{\#}$ 为样品的称量； U , Rn 分别为样品中铀和钍（用铀当量表示）的含量； a_1 , b_1 分别为单位含量的铀和钍产生的 β 射线强度； a_2 , b_2 分别为单位含量、单位重量的铀和钍产生的 γ 射线强度。

需要注意的是所称矿石中某元素的含量均指其相对含量。

实际工作中，通常用 β 和 γ 当量含量来求铀含量，当量含量与真含量的关系式为：

$$\begin{cases} Q_{\beta} = aU + bRn \\ Q_{\gamma} = mU + nRn \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中 } a = \frac{a_1}{a_1 + b_1}, \quad b = \frac{b_1}{a_1 + b_1}, \quad a + b = 1$$

$$m = \frac{a_2}{a_2 + b_2}, \quad n = \frac{b_2}{a_2 + b_2}, \quad m + n = 1$$

系数 a 的含义为铀-钍平衡时，铀组产生的 β 射线强度

对总 β 射线强度的比值。所以系数 a 通常又称为 β 测量时纯铀的平衡铀当量。同样，系数 b 又称为 β 测量时钍的平衡铀当量。系数 m 的含义为铀-钍平衡时，铀组产生的 γ 射线强度对总 γ 射线强度的比值，或称为 γ 测量时纯铀的平衡铀当量。同样， n 为 γ 测量时钍的平衡铀当量。

Q_β 称为 β 当量含量； Q_γ 称为 γ 当量含量。它们可以通过与铀-钍平衡标准源（简称平衡标准源）相对测量而得出

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_\beta = \frac{Q_{\beta\text{标}}}{I_{\beta\text{标}}^\beta} \cdot I_{\text{样}}^\beta = K_\beta \cdot I_{\text{样}}^\beta \\ Q_\gamma = \frac{Q_{\gamma\text{标}}}{I_{\gamma\text{标}}^\gamma} \cdot P_{\text{标}} \cdot \frac{I_{\text{样}}^\gamma}{P_{\text{样}}} = K_\gamma \cdot \frac{I_{\text{样}}^\gamma}{P_{\text{样}}} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_\beta = \frac{Q_{\beta\text{标}}}{I_{\beta\text{标}}^\beta} \\ K_\gamma = \frac{Q_{\gamma\text{标}}}{I_{\gamma\text{标}}^\gamma} \cdot P_{\text{标}} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中 $I_{\beta\text{标}}^\beta$, $I_{\text{样}}^\beta$ 分别为对平衡标准源和样品所测得的 β 射线强度； $I_{\gamma\text{标}}^\gamma$, $I_{\text{样}}^\gamma$ 分别为对平衡标准源和样品所测得的 γ 射线强度； $P_{\text{标}}$, $P_{\text{样}}$ 分别为平衡标准源和样品的称量； $Q_{\beta\text{标}}$ 为平衡标准源的铀含量； K_β , K_γ 分别为与单位 β 和 γ 计数率相当的平衡铀含量。对同一测量装置，当测量条件（仪器、探测元件及规格、屏、平衡标准源、测量几何条件等）不变时， K_β 和 K_γ 应当是常数。

解方程组 (2) 可得到

$$U = \frac{n}{n-b} Q_\beta - \frac{b}{n-b} Q_\gamma \quad (5)$$

令 $l = b/(n-b)$, 则 (5) 式可写成

$$U = (1+l) Q_{\beta} - l Q_{\gamma} = Q_{\beta} + l (Q_{\beta} - Q_{\gamma}) \quad (6)$$

这就是我们常用的计算铀含量的公式。

l 为平衡破坏校正系数, 也称装置系数, 它可用一个已知含量的纯铀 (或纯镭) 源和平衡标准源由 (6) 式逆推来测定, 即

$$l = \frac{U - Q_{\beta}}{Q_{\beta} - Q_{\gamma}} \quad (7)$$

式中 Q_{β} , Q_{γ} 由 (3) 式得出; U 为纯铀源的铀含量, 如果使用纯镭源, 则 U 等于零。

由于 β 探测器除记录 β 射线外, 或多或少也记录了部分 γ 射线, 因此必须扣除此部分 γ 计数率以获得真 β 计数率。为了简化测量步骤, 不必对各别的样品所对应的这部分 γ 计数率作测量, 而是通过用 γ 计数的换算系数 C_{γ} 乘以 γ 探测器的计数率来确定。因为

$$\begin{cases} I_{\pm} = I^{\beta} + I_{\pm}^{\gamma} + I_{\pm}^D \\ I_{\mp} = I^{\gamma} + I_{\mp}^D \end{cases} \quad (8)$$

则

$$C_{\gamma} = \frac{I_{\pm}^{\gamma}}{I^{\gamma}} = \frac{I_{\pm}^{\gamma}}{I_{\mp} - I_{\mp}^D} \quad (9)$$

同时可得

$$\begin{cases} I^{\beta} = I_{\pm} - I_{\pm}^D - C_{\gamma} (I_{\mp} - I_{\mp}^D) \\ I^{\gamma} = I_{\mp} - I_{\mp}^D \end{cases} \quad (10)$$

式中 I_{\pm} , I_{\mp} 分别为 β , γ 探测器的实测计数率; I_{\pm}^D , I_{\mp}^D 分别为 β , γ 探测器的本底计数率; I^{β} , I^{γ} 分别为被测样品的 β 和 γ 射线强度。被测样品如果是平衡标准源, 则为 I_{\pm}^{β} 和 I_{\mp}^{γ} 。

如果是一般的样品则为 I_{β}^A , I_{β}^Z 。

上述各量单位均用计数/分表示。

C_{γ} 用平衡标准源测得。其中 I_{β}^Z 的测定是在不改变几何位置条件下, 于标准源和 β 探头之间加入厚度5—6毫米(面密度约1.4—1.6克/厘米²)的铝屏以吸收掉 β 射线, 并用该铝屏对 γ 射线的衰减量对测量值进行校正。例如, 对铀含量为1.40%的 P651-2号平衡标准源的某次测量, 加6毫米厚铝屏(我们采用6毫米铝屏, 对平衡标准源的 γ 射线衰减8%, 此衰减量与装置有关, 对不同的装置应当实际测定)后 β 探测器的计数率为5602计数/分, $I_{\beta}^Z = 120$ 计数/分, 加铝屏前 γ 探测器的计数率为73255计数/分, $I_{\beta}^P = 670$ 计数/分, 于是

$$C_{\gamma} = \frac{5602 - 120}{73255 - 670} \times \frac{1}{92\%} = 8.22\%$$

三、测量装置和某些工作条件的选择

1. 装置

图1(a)是装置的示意图。两台定标器均为FH-408。 β 探测器所用光电倍增管为GDB-100, 配用 $\phi 100 \times 0.2$ 毫米的ST-402型塑料闪烁体, 该型号闪烁体的对联三苯浓度在40—70%, 吸收屏用0.52毫米铝板。 γ 探测器用GDB-10光电倍增管配以 $\phi 40 \times 40$ 毫米NaI(Tl)晶体, 其吸收屏采用4.0毫米Al + 0.5毫米Pb + 2.0毫米Al。两探头置于壁厚为40毫米的圆形铅室中, 铅室中间开活门以便放置待测样品。

图1(b)为装置的实物图片, 图1(c)为 β 探头各

部件图片。

样品盘用厚度 2 毫米铝板制作，内径 100 毫米，内高 10 毫米。硅酸盐样品的装填面密度约 1.4 克/厘米²。样品上表面距塑料闪烁体约 8 毫米，底部距 NaI (Tl) 晶体包壳约 8 毫米。

2. 吸收屏的选择

吸收屏的材料和厚度，直接影响到样品的分析质量。

β 探测器的吸收屏，目前多用铝板，但不同工作者采用的厚度不同。较薄的屏有利于提高探测灵敏度，但不利于排除 RaD 和 ⁴⁰K 的干扰；厚的吸收屏能有效地消除 RaD 和 ⁴⁰K 的干扰，但却使探测灵敏度降低，从而使统计误差加大。

图 2 是把 γ 探测器的吸收屏固定为 4.0 毫米 Al + 0.5 毫米 Pb + 2.0 毫米 Al 时，测得的 Rn 和 RaD 的 $I^{\beta} / (I^{\gamma} / P)$ 值随

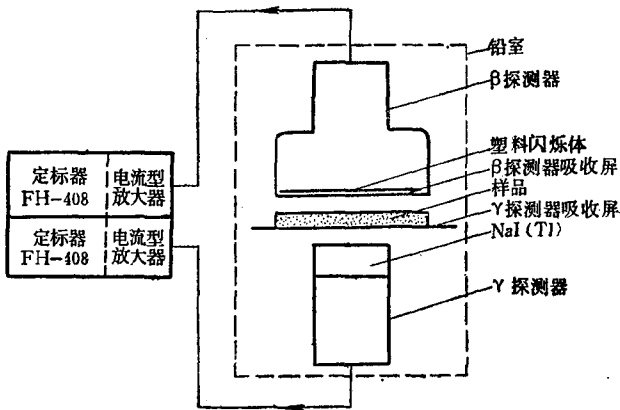


图 1 (a) 探测装置示意图

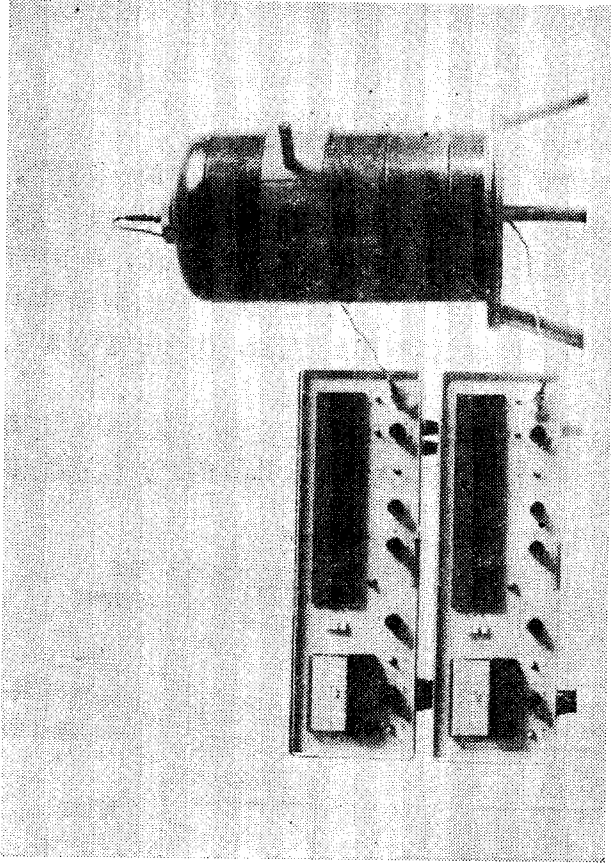
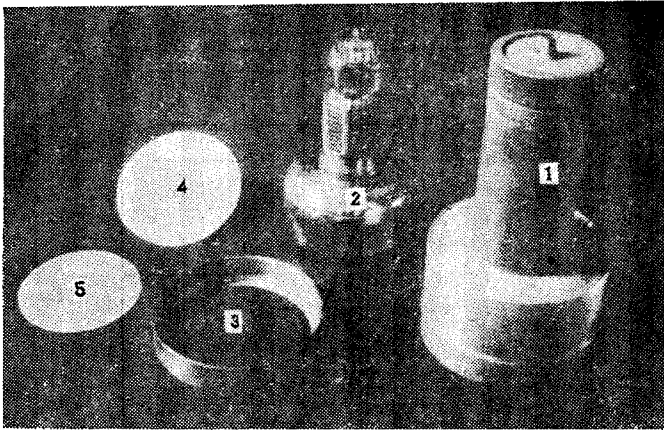


图 1 (b) 探测装置实物照片

图 1(c) β 探头各部件

1——探筒；2——光电倍增管(GDB-100)；3——探筒的螺口压环；4——铝吸收屏；5——塑料闪烁体(ST-402)。

β 探测器的铝屏厚度变化的情况，图内两直线也同时表示两种源的 β 探测灵敏度（计数率）随屏厚相对变化的情况。当屏厚达到1.13毫米时，则

$$\left(\frac{I^{\beta} P}{I^{\gamma}} \right)_{\text{Rn}} = \left(\frac{I^{\beta} P}{I^{\gamma}} \right)_{\text{RaD}} \quad (11)$$

式中 I^{β} ， I^{γ} 分别代表测得的 β ， γ 计数率； P 为被测样品的装填重量，即称量。这说明，RaD 的 β ， γ 强度和氧的一样，它将等价于氦而被测定，因此它们之间平衡与否不会影响铀的测量准确度，可是，与 0.52 毫米厚铝屏相比，平衡标准源的 β 探测灵敏度大幅度降低，仅为它的 1/4 左右。

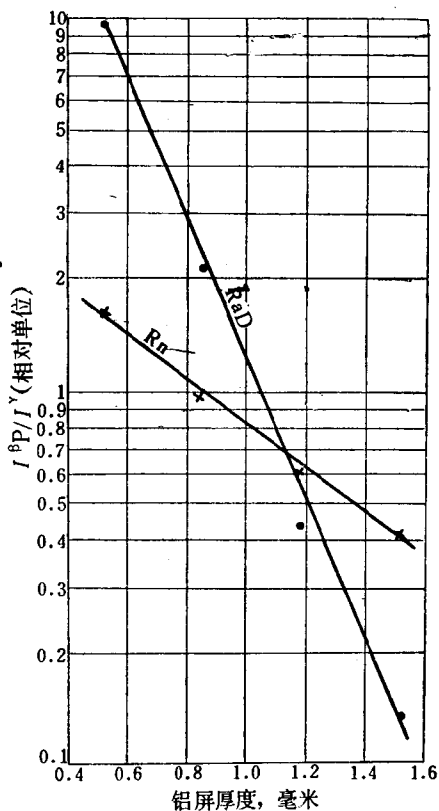


图2 Rn 和 RaD 的 β 探测灵敏度随屏厚变化的情况

实际工作中， β 探测器的铝屏厚度选择在0.4—0.7毫米为宜(参见图7)，铝屏太薄则 RaD 和 ^{40}K 的影响将显得严重。曾用屏厚为0.68和0.04毫米两套装置对比分析过一批铀-镭近于平衡的管理样品，屏厚为0.68毫米的装置测得的结果与原结果一致，而屏厚为0.04毫米的装置的测量结果系统偏高

5.0%。偏高的原因是 RaD 的 β 射线的干扰，详细情况，参见本文质量评价部分干扰元素的影响一节。

γ 探测器的吸收屏选择，本文在第七部分将详细论述。由于 RaD 的 γ 射线能量为 47 千电子伏^[6]，低于铀-镭系 γ 射线的平均能量，因此采用加有铅材料的吸收屏会使 RaD 对应的 Q_{γ} 变小，从而使 RaD 的干扰有所加大。尽管如此，但它却有利于减小因样品化学成分不同而可能带来的影响。因此， γ 探测器的吸收屏还是以加有适当厚度的铅材料为好。

3. 塑料闪烁体厚度的选择

塑料闪烁体厚度的选择原则，必须是（1）有较高的测量精度，（2）工作稳定性良好，（3）足够的灵敏度。

为使工作稳定，应使用有计数率-高压坪的闪烁体，并将工作点选于坪区，以减小高压、阈值、放大器增益等变化对计数率的影响。

为了获得最高的测量精度，要求对铀组的 β 射线计数具有最小的相对统计误差，因为

$$I_{\pm} = I^{\beta}_{\text{U}} + I^{\gamma}_{\text{U}} + I^{\beta}_{\text{Rn}} + I^{\gamma}_{\text{Rn}} + I^{\text{D}}_{\pm} \quad (12)$$

$$I^{\beta}_{\text{U}} = I_{\pm} - I^{\gamma}_{\text{U}} - I^{\beta}_{\text{Rn}} - I^{\gamma}_{\text{Rn}} - I^{\text{D}}_{\pm}$$

I^{β}_{U} 的统计标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{I_{\pm} + I^{\gamma}_{\text{U}} + I^{\beta}_{\text{Rn}} + I^{\gamma}_{\text{Rn}} + I^{\text{D}}_{\pm}} \quad (13)$$

相对标准误差 e 为

$$e = \frac{\sigma}{I^{\beta}_{\text{U}}} = \frac{\sqrt{I_{\pm} + I^{\gamma}_{\text{U}} + I^{\beta}_{\text{Rn}} + I^{\gamma}_{\text{Rn}} + I^{\text{D}}_{\pm}}}{I^{\beta}_{\text{U}}} \quad (14)$$

式中 I_{\pm} 为 β 探测器的总计数率； I^{β}_{U} 、 I^{γ}_{U} 和 I^{β}_{Rn} 、 I^{γ}_{Rn}

分别为被测样品中铀组和钍组在 β 探测器中对应的 β , γ 计数率; I_{\pm}^D 为 β 探测器的本底计数率。

(14) 式适用于各种平衡状态的样品。为了能够将有效平

衡系数 C ($C = \frac{Rn}{U}$) 在式中反映出来, 令 $I^{\beta}_{Rn\mp}$ 和 $I^{\gamma}_{Rn\mp}$

代表样品内与铀平衡的钍所对应的 β 和 γ 计数率, 则

$$\begin{cases} I^{\beta}_{Rn} = CI^{\beta}_{Rn\mp} \\ I^{\gamma}_{Rn} = CI^{\gamma}_{Rn\mp} \end{cases} \quad (15)$$

将 (15) 式代入 (14) 式得

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{I_{\pm} + I^{\gamma}_U + CI^{\beta}_{Rn\mp} + CI^{\gamma}_{Rn\mp} + I_{\pm}^D}}{I^{\beta}_U} \quad (16)$$

可见, ε 值小, 测量精度就高。使 ε 值小的条件是: 探测灵敏度要高, 本底要小, 对平衡样品测得的 I^{β}/I^{γ} 值以及铀组的 β 射线比重, 即 $I^{\beta}_U/I^{\beta}_{Rn\mp}$ 值要大。但是这些条件不可能同时满足。有的条件达到一定程度后不再是影响测量精确度的主要因素。因此, 闪烁体的最佳厚度, 只能通过实际测量并按 (16) 式的计算结果加以选择。

图 3 是对几种厚度的塑料闪烁体测得的坪曲线。表 1、2 是工作电压选于噪声即将被记录之处 (故本底较高) 对纯铀源 (Z 65-7) 和平衡标准源 (P 651-2) 测得的有关数据及算得的 ε 值 ($C = 1$)。从图 3 和表 1、2 可以看出, 选用厚度为 0.2 或 0.5 毫米的 ST-402 型塑料闪烁体, 不但有满意的坪, 同时还能获得较好的测量精度。

对于不同的装置, 闪烁体的最佳厚度也可能不同, 它主要由探测系统的噪声等效能当量所决定。

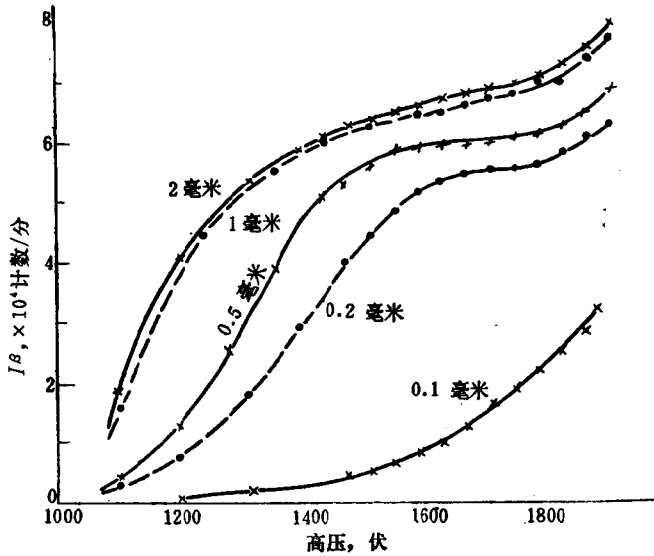


图3 不同厚度闪烁体测得的计数率-高压关系曲线

表1 β 探测器铝屏厚度为0.35毫米时标准源的测量数据
与闪烁体厚度的关系

闪烁体型号	厚度, 毫米	I_D^D	平衡标准源 I_U^D	I_U^β	$I_{Rn}^{\beta*}$	I_U^{γ}	I_{Rn}^{γ}	$e, \%$
ST-402	0.1	320	6345	3007	2453	28	537	3.27
ST-402	0.2	321	14843	6301	6516	55	1650	2.42
ST-402	0.5	373	15285	6320	6381	68	2143	2.47
ST-401	1	268	16889	6525	6410	110	3576	2.53
ST-401	2	349	18395	6713	6363	160	4810	2.58

* 该数据的测量精度较低, 因此造成后四个数有所波动, 但它不影响闪烁体厚度的选择。

表2 β 探测器铝屏厚度为0.68毫米时标准源的测量数据
与闪烁体厚度的关系

闪烁体型号	厚度, 毫米	I_{\pm}^D	平衡标准源 I_{\pm}^{β}	I_{U}^{β}	$I_{\text{Rn}}^{\beta*}$	I_{U}^{γ}	I_{Rn}^{γ}	$\epsilon, \%$
ST-402	0.1	320	3846	1743	1194	27	562	4.42
ST-402	0.2	321	8945	3500	3374	54	1695	3.43
ST-402	0.5	373	9467	3552	3030	67	2445	3.50
ST-401	1	268	11026	3745	3250	97	3666	3.61
ST-401	2	349	12413	3890	3077	157	4940	3.72

* 同表1的注。

4. 电流型阻抗匹配放大器

为了缩短探测装置的不灵敏时间, 在探头与定标器之间装了一个电流型阻抗匹配放大器^[7]。放大器的输入阻抗只有十几欧, 至几十欧, 由入射粒子引起的并经光电倍增管倍增后的电荷所形成的电流脉冲, 直接地注入放大器作电流放大而几乎不受传输电缆(几米长)的影响。这是与电压型放大器截然不同的地方。

实验证明, 传输电缆在2米以内, 对应于相同的入射粒子, 输出脉冲波形和幅度不变, 因此放大器允许远离探测元件安装, 既简化了探头内元件, 又减少了连接电缆。

图4为该放大器与探头联接的电路。由 R_1 和 R_2 组成的电流并联负反馈保证其放大倍数有高的稳定性。由于所需元件不多(即点划线内部分), 故将其安装于 $\phi 55$ 毫米, $h=20$ 毫米的圆铝盒中并直接置于FH-408型定标器内。

采用电流型阻抗匹配放大器后, β 探头输给定标器计数

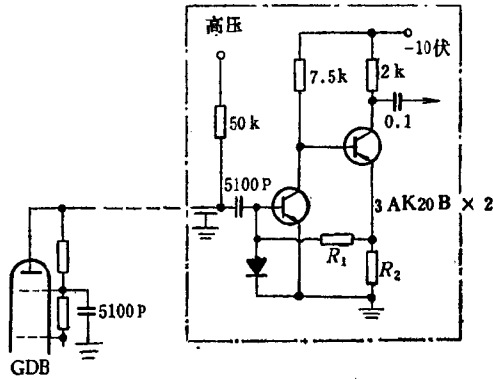


图 4 电流型阻抗匹配放大器

R_1 和 R_2 决定放大倍数,数值根据需要而选择。 β 探测器用 $R_1 = 12k$;
 $R_2 = 200\Omega$ 。 γ 探测器用 $R_1 = 2.5k$, $R_2 = 150\Omega$ 。

的脉冲宽度只有0.3—0.4微秒,如果连接 FH-408或DB-1 型定标器,整个探测系统的不灵敏时间也接近此数值。与 G-M 计数管装置相比,时间分辨本领提高两个数量级以上。 γ 探头的输出脉冲宽度为0.6—0.8微秒,这是晶体不同所致。

5. 光电倍增管工作电压的选择

光电倍增管的工作电压应选于坪区。图 5 和图 6 是本装置对应于某两只光电倍增管用平衡标准源和 RaD 源测得的 β 和 γ 计数率-高压坪曲线,工作电压分别选于 1200 伏和 1400 伏。换用不同的光电倍增管,电压也可能不同,应实际测量确定。

四、系数和样品的测量

我们所用的平衡标准源和纯铀标准源的基体成分是硅酸

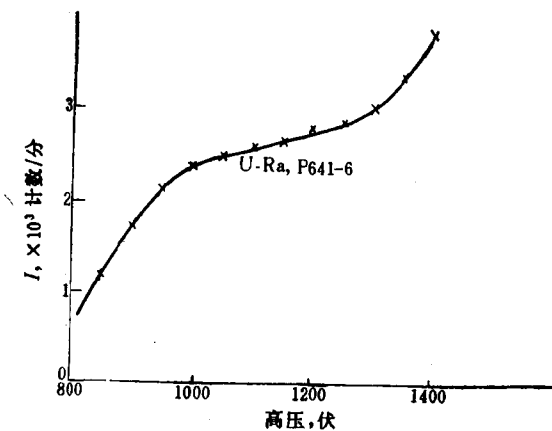


图5 β 坪曲线

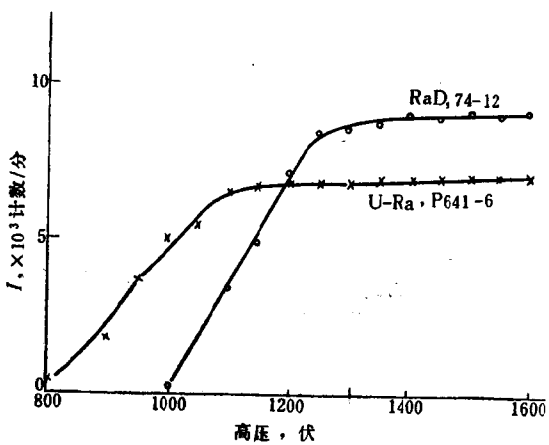


图6 γ 坪曲线

盐矿石, 粒度 120 目。表 3 是本装置对平衡标准源和纯铀标准源测得的数据和算得的系数。

表3 系数值

标准源			对应计数率, 计数/分				$K_B, \times 10^{-7}$ 克/克 (计数/分)	$K_T, \times 10^{-7}$ 克/克 (计数/分)	$C_T, \%$	l
型号	铀含量, %	称量, 克	I_{\pm}^D	I_{\mp}^D	I_{\pm}	I_{\mp}				
P651-2	1.40	110	120	620	43739	72573	3.71	2.14	8.15	—
ZY69-1	1.272	110	120	620	17827	3060	—	—	4.55	1.04
ZY75-2	0.414	110	120	620	6427	1527	—	—	4.55	0.92
Z65-7	0.402	110	120	620	6318	1515	—	—	4.54	0.84

两种标准源测得的 C_T 值不同是本装置的缺点之一。由于绝大多数矿石样品的平衡状态是接近平衡标准源的, 所以实际工作中使用由平衡标准源测得的 C_T 值。

K_B, K_T, l 和本底经准确测定后, 可以长期使用, 而平时只在测样品之前对本底和平衡标准源作数分钟的检查测量。当 K_B 和 K_T 检查值不超过原测定值的2%时, 仍用原测定值计算被测样品的铀结果; 当作10—15分钟的测量仍超过2%, 则用当天测得的 K_B, K_T 值(此种情况甚少见)。只在变动测量条件, 如更换闪烁体、光电倍增管, 改变工作电压和测量几何位置等时才须重新测定 K_B, K_T, l 和本底、 C_T 。

样品粒度为80—100目, 测量条件与标准源保持一致。每个样品计数时间为 2×1 分钟, 将测得的数据代入(3)和(6)式求出铀含量。

五、质量评价

1. 装置的稳定性

自1975年1月以来, 本装置运转正常, 系数稳定, 工作

表4 系数的稳定性*

测量时间	K_{β} , $\times 10^{-7}$ 克/克· (计数/分)	K_{γ} , $\times 10^{-6}$ 克/ (计数/分)	测量时间	K_{β} , $\times 10^{-7}$ 克/克· (计数/分)	K_{γ} , $\times 10^{-6}$ 克/ (计数/分)
1975			1975		
1.1 上午	3.91	7.55	1.17 上午	3.88	7.42
1.1 下午	3.77	7.43	1.17 下午	3.93	7.42
1.2 上午	3.85	7.45	1.18 上午	3.85	7.46
1.2 下午	3.84	7.45	1.18 下午	3.90	7.43
1.3 上午	3.77	7.45	1.19 上午	3.84	7.47
1.3 下午	3.85	7.45	1.19 下午	3.90	7.44
1.4 上午	3.85	7.44	1.20 上午	3.83	7.44
1.4 下午	3.81	7.46	1.20 下午	3.81	7.44
1.5 上午	3.82	7.44	1.21 上午	3.81	7.47
1.6 上午	3.83	7.43	1.21 下午	3.83	7.41
1.6 下午	3.89	7.45	1.22 下午	3.82	7.42
1.7 上午	3.91	7.44	1.23 上午	3.81	7.45
1.7 下午	3.87	7.45	1.24 下午	3.91	7.45
1.8 上午	3.90	7.46	1.25 上午	3.76	7.57
1.8 下午	3.96	7.43	1.27 上午	3.88	7.46
1.9 上午	3.91	7.45	1.28 下午	3.84	7.45
1.9 下午	3.85	7.44	1.29 上午	3.82	7.42
1.10 上午	3.82	7.42	1.29 下午	3.82	7.45
1.10 下午	3.83	7.42	1.30 上午	3.82	7.45
1.11 上午	3.92	7.42	1.31 上午	3.82	7.45
1.11 下午	3.89	7.42	1.31 下午	3.82	7.45
1.12 上午	3.86	7.45			
1.12 下午	3.91	7.45	平均值	3.86	7.45
1.13 上午	3.89	7.42			
1.13 下午	3.86	7.45			
1.14 上午	3.85	7.48			
1.14 下午	3.89	7.44			
1.16 上午	3.93	7.45			

* β 探测器吸收屏0.68毫米Al; γ 探测器吸收屏6.0毫米Al; 样品盘
 $\phi 80 \times 10$ 毫米。

情况良好。

表 4 给出了 1975 年 1 月每天测得的 K_{β} 和 K_{γ} 值, 49 次测量值的相对标准误差各为 1.16% 和 0.30%。

工作室温度从 10°C 变化至 37°C, 尚未觉察出对 K_{β} 和 K_{γ} 值的影响。

2. 中低铀含量样品的分析结果

表 5 和表 6 是本装置投产时对近 200 个样品的测量结果与 2×4 只 J106 γ 计数管装置和化学分析结果的比较。计数管装置每样计数时间为 2×4 分钟。这两表均充分显示出闪烁装置的分析质量的可靠性。表 7 是本装置对管理样 4 号的 25 次重复测量结果, 测量结果的相对标准误差 $e = 2.58\%$ 。此品位的样品最易超差, 但本装置达到了令人满意的高的测量精度。

本装置曾与另一套闪烁装置连续平行分析 354 个样品, 铀含量范围在 0.005—8% 之间, 除 1—8% 的最大允许误差值用 4% 外, 其余均按表 5 所给的最大允许误差值衡量, 共有 5 个样品超差, 合格率达 98.6%。

3. 高铀含量样品的分析结果

高铀含量样品的分析, 必须解决如下三个问题: (1) 铀自吸收的影响, (2) 由于样品密度加大造成 β 射线平均辐射中心的几何位置的改变, (3) 探测系统的漏计。

自吸收的影响以低能的 γ 射线最为严重, 特别是当样品内含有大量高原子序数的元素时。铀是高原子序数的元素, 当然也不例外。

高铀含量 ($> 5\%$) 样品的密度一般比普通硅酸盐样品

大，因此测量时样品盘内 β 射线饱和层中心位置相对地靠近 β 探测器而使 β 计数率偏高。

表 5 闪烁装置结果与计数管装置分析结果比较

铀含量范围, %	两种结果的最大允许相对误差, %	样品数 N	超差数 N_1	合格率 $P = \frac{N - N_1}{N}, \%$	系统误差情况		
					Σx_i (闪)	Σy_i (计)	$f = \frac{\Sigma x_i}{\Sigma y_i}$
<0.03	(绝对误差 0.005%)	36	1	97.2	824	819	1.006
0.03— 0.05	13	30	0	100	1024	1179	1.021
0.05— 0.1	13	43	0	100	3132	3098	1.011
0.1— 0.2	6	34	1	97	4642	4676	0.992
0.2— 0.4	6	41	2	95.1	10721	10898	0.982
0.4— 1.0	6	17	1	94.1	9828	10026	0.980

表 6 闪烁装置结果与化学分析结果比较

铀含量范围, %	两种结果的最大允许相对误差, %	样品数 N	超差数 N_1	合格率 $P = \frac{N - N_1}{N}, \%$	系统误差情况		
					Σx_i (闪)	Σy_i (化)	$f = \frac{\Sigma x_i}{\Sigma y_i}$
<0.03	(绝对误差 0.005%)	31	2	93.5	717	705	1.017
0.03— 0.05	15	24	0	100	965	940	1.026
0.05— 0.1	15	35	0	100	2522	2456	1.010
0.1— 0.2	7	35	3	91.4	4823	4794	1.006
0.2— 0.4	7	38	4	89.4	9973	10076	0.989
0.4— 1.0	7	15	0	100	8867	8883	0.998

表7 管理样第4号重复25次铀测量结果

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
测量结果, %	0.123	0.122	0.123	0.119	0.118	0.121	0.120	0.127	0.120
与平均值相 对偏差, %	2.5	1.7	2.5	-0.8	-1.7	0.8	0	5.8	0
测量序号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
测量结果, %	0.120	0.121	0.125	0.121	0.119	0.115	0.117	0.114	0.116
与平均值相 对偏差, %	0	0.8	4.2	0.8	-0.8	-4.2	-2.5	-5.0	-3.3
测量序号	19	20	21	22	23	24	25		
测量结果, %	0.116	0.117	0.122	0.121	0.118	0.119	0.122		
与平均值相 对偏差, %	-3.3	-2.5	1.7	0.8	-1.7	-0.8	1.7		

漏计的影响情况可以通过下面的分析得出。将(10)式代入(6)式后可得

$$U = (1+l)K_{\beta}(I_{\pm} - I_{\pm}^0) - \left[(1+l)C_{\gamma}K_{\beta} + \frac{lK_{\gamma}}{P} \right] (I_{\mp} - I_{\mp}^0)$$

令 $(1+l)K_{\beta} = A$, $(1+l)C_{\gamma}K_{\beta} + \frac{lK_{\gamma}}{P} = B$, 有

$$U = A(I_{\pm} - I_{\pm}^0) - B(I_{\mp} - I_{\mp}^0) \quad (17)$$

A 是常数, B 对应于一定的装填重量是个确定值, 它与样品的铀含量无关。系数 A, B 的测定不存在明显的漏计, 同时有 $I_{\pm} \gg I_{\pm}^p, I_{\mp} \gg I_{\mp}^p$, 故漏计对分析结果的影响为

$$\Delta U = A\Delta I_{\pm} - B\Delta I_{\mp} \quad (18)$$

ΔI_{\pm} 和 ΔI_{\mp} 为负值。在 $\tau I \ll 1$ 的情况下有

$$-\Delta U = A\tau_{\pm} I_{\pm}^2 - B\tau_{\mp} I_{\mp}^2 \quad (19)$$

式中 τ_{\pm} 和 τ_{\mp} 是 β 和 γ 探测装置的不灵敏时间。因存在 $B\tau_{\mp} I_{\mp}^2 > A\tau_{\pm} I_{\pm}^2$, 故漏计的效果和自吸收、密度增大的影响一样, 都是使测量结果偏高, 它们之间没有互相补偿的可能。因此探测装置的不灵敏时间应力求尽可能地短。

本装置的不灵敏时间只有 0.5 微秒左右, 将实际数据代入 (19) 式, 可以看出漏计对测量结果的影响已不再是主要因素了。

自吸收和密度增加的影响可用下面叙述的密度校正法对分析结果进行校正。表 8 是我们对某矿区的一批高铀含量样品采用此法的分析结果, 与化学分析结果相比, 仅有两个样品相对算术误差超出 5%。系统误差 $f = \sum x_i(\text{闪}) / \sum y_i(\text{化})$ 有

铀含量 5—10% 样品, $f = 1.02$

铀含量 10—30% 样品, $f = 1.002$

铀含量 30—50% 样品, $f = 1.026$

结果良好。可见本方法可以用来准确测定铀含量为 0.005—50% 的样品而无需更换标准源和样品盘。用于地质矿山的矿石分析, 这是一个非常突出的优点。

4. 干扰元素的影响

钍、钾、RaD 是本方法的主要干扰元素。用纯钍、纯

表 8 高含量样品的分析结果

样 品 编 号	样品称量, 克	本法分析结果, %	化学分析结果, %
75-1321	124.0	4.850	5.000
75-1335	106.5	5.245	5.120
75-1330	112.1	5.454	5.351
75-1322	103.4	5.759	5.517
75-1333	118.5	6.425	6.449
75-1327	111.1	7.749	7.840
75-1336	111.8	8.370	8.313
75-1332	111.6	9.000	8.399
75-1338	117.3	9.018	8.697
75-1339	123.5	9.630	9.230
75-1324	124.7	12.470	12.260
75-1334	130.5	12.349	12.766
75-1328	122.3	14.063	14.069
75-1347	106.5	15.990	15.933
75-1329	120.4	14.885	14.610
75-1323	122.0	15.380	16.330
75-1331	140.3	18.145	18.360
75-1344	130.4	18.075	17.354
75-1326	137.0	24.585	23.753
75-1346	137.2	25.750	25.790
75-1337	141.0	27.530	27.237
75-1325	138.6	27.315	27.629
75-1342	143.7	32.260	31.843
75-1343	141.3	31.120	30.632
75-1345	136.0	32.280	32.089
75-1320	150.1	43.56	41.730
75-1340	146.0	38.99	38.137
75-1341	167.7	48.62	46.773

RaD 和氯化钾试剂进行测定, 本装置钍的等效铀当量 t 为

$$t = \frac{\text{纯钍源测得的等效铀含量}}{\text{钍含量}} = 7.05 \times 10^{-3} \quad (20)$$

钾的等效铀当量 k 为

$$k = \frac{\text{纯钾源测得的等效铀含量}}{\text{钾含量}(52.4\%)} = 7.26 \times 10^{-4} \quad (21)$$

RaD 的等效铀当量 d 为

$$d = \frac{\text{纯 RaD 源测得的等效铀含量}}{\text{RaD 含量(用平衡铀当量表示)}} = 6.30 \times 10^{-2} \quad (22)$$

此处 t 值是用 GT69-1 号纯钍源 (钍含量为 1.274%) 测得。结果表明, 在此条件下, 样品中即使含有 0.5% 的钍, 铀分析结果的偏高值也不足 0.004%。

k, d 与 β 探测器的铝吸收屏厚度有关。图 7 给出了

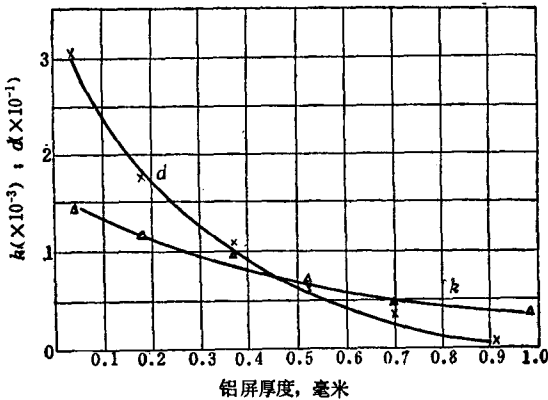


图 7 RaD 和钾的等效铀当量随铝屏厚度变化的情况

k, d 随屏厚变化的情况。如前面所述, 为减小 ^{40}K 和 RaD 的干扰, β 探测器的铝吸收屏应保证有足够的面积密度。

我们所用的铀-钍平衡标准源的钾含量为 3%, 但其铀

含量高，钾的放射性所占比重甚小，故分析低含量样品时还需考虑钾的干扰。

RaD 的影响比较复杂。只有当样品和平衡标准源的氡和 RaD 的平衡状态不一致时，偏离的 ΔRaD 部分才会影响分析结果。

因射气系数的改变造成 RaD 与氡的相对偏离量为

$$\frac{\delta RaD}{Rn} = \frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} 100\%$$

样品相对于平衡标准源的相对偏离量为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\delta RaD}{Rn} \right)_{\text{样}} - \left(\frac{\delta RaD}{Rn} \right)_{\text{标}} \\ &= \left(\frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} - \frac{\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}}}{1 - \eta_{\text{标}}} \right) 100\% \end{aligned}$$

故能对分析结果造成误差 (ΔU) 的那一部分 RaD 等于

$$\Delta RaD = Rn \left(\frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} - \frac{\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}}}{1 - \eta_{\text{标}}} \right) 100\%$$

$$\Delta U = d \cdot \Delta RaD = d Rn \left(\frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} - \frac{\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}}}{1 - \eta_{\text{标}}} \right) 100\% \quad (23)$$

相对误差 E

$$\begin{aligned} E &= \frac{\Delta U}{U} = d \frac{Rn}{U} \left(\frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} - \frac{\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}}}{1 - \eta_{\text{标}}} \right) 100\% \\ &= dC \left(\frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} - \frac{\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}}}{1 - \eta_{\text{标}}} \right) 100\% \quad (24) \end{aligned}$$

式中 δRaD 为 RaD 对氡的偏离量； C 为样品的有效平

衡系数,有 $C = Rn/U$ 或 $C = (Ra/U)(1 - \eta)$; η 和 $\eta_{\text{标}}$ 为样品和平衡标准源的射气系数; η' 和 $\eta'_{\text{标}}$ 为样品和平衡标准源开采前矿体的射气系数,实际上应理解为射气逸失。

矿石从开采到测量的时间一般远短于 RaD 的半衰期,故 (24) 式成立。

鉴于目前我们所用的平衡标准源是经过 900°C 焙烧的原始铀矿, $\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}} \leq 0$, 通常存在 $\eta - \eta' > 0$, 故 RaD 的影响使分析结果系统地偏高。设

$$\left(\frac{\eta - \eta'}{1 - \eta} - \frac{\eta_{\text{标}} - \eta'_{\text{标}}}{1 - \eta_{\text{标}}} \right) = 10\%$$

样品的分析结果的误差情况示于图 8, 对于 $C \leq 1.5$ 的样品,

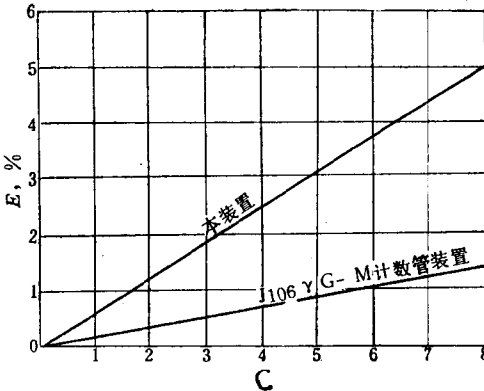


图 8 Rn 与 RaD 偏离 10% 时分析结果的误差情况

此时本装置的分析结果系统偏高不超过 1%。

此外,样品的化学成分不同也会对分析结果造成干扰。多数情况下,化学成分不同可以从样品的装填密度反映出

来，因此这种干扰可以通过“密度校正”的方法一并作近似校正。

图 9 是我们测得的密度校正曲线。为便于使用和对比起

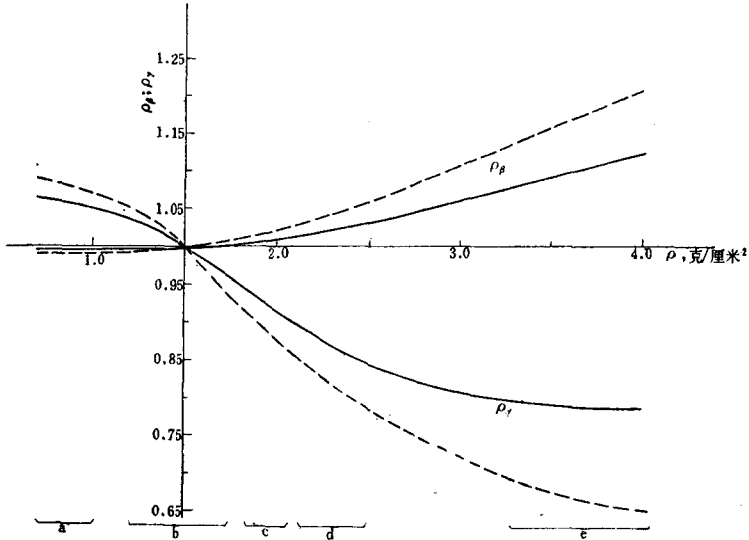


图 9 密度校正图

- γ 探测器附有 0.5 毫米 Pb 吸收屏；
- γ 探测器无 Pb 屏。
- a——滑石样； b——大理石与石英砂； c——黄铁矿； d——黄铁矿、方铅矿混合； e——方铅矿。

见，同时对两种可以用于生产的屏蔽状态作了测定，图内实线是本装置的工作状态，即 β 探测器吸收屏为 0.52 毫米 Al， γ 探测器吸收屏为 4.0 毫米 Al + 0.5 毫米 Pb + 2.0 毫米 Al，虚线为 β 探测器吸收屏改为 0.68 毫米 Al 和 γ 探测器吸收屏改为 5.5 毫米 Al（包括晶体包壳 1 毫米）时测得。对应的密度校正值分别给于表 9 和表 10，其中 ρ_{β} 代表 $(a_1 + b_1)$ 相对

表9 密度校正表

装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_T	装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_T
0.70	0.998	1.056	1.30	0.999	1.028
0.72	0.998	1.056	1.32	0.999	1.026
0.74	0.998	1.055	1.34	0.999	1.023
0.76	0.998	1.054	1.36	0.999	1.021
0.78	0.998	1.054	1.38	0.999	1.018
0.80	0.998	1.053	1.40	0.999	1.015
0.82	0.998	1.052	1.42	1.000	1.012
0.84	0.998	1.052	1.44	1.000	1.009
0.86	0.998	1.051	1.46	1.000	1.006
0.88	0.998	1.050	1.48	1.000	1.003
0.90	0.998	1.050	1.50	1.000	1.000
0.92	0.998	1.049	1.52	1.000	0.997
0.94	0.998	1.048	1.54	1.000	0.994
0.96	0.998	1.047	1.56	1.001	0.991
0.98	0.998	1.047	1.58	1.001	0.987
1.00	0.998	1.046	1.60	1.001	0.984
1.02	0.998	1.045	1.62	1.001	0.981
1.04	0.998	1.044	1.64	1.002	0.978
1.06	0.999	1.043	1.66	1.002	0.974
1.08	0.999	1.043	1.68	1.002	0.971
1.10	0.999	1.042	1.70	1.003	0.968
1.12	0.999	1.041	1.72	1.003	0.965
1.14	0.999	1.040	1.74	1.004	0.962
1.16	0.999	1.039	1.76	1.004	0.959
1.18	0.999	1.038	1.78	1.005	0.956
1.20	0.999	1.037	1.80	1.005	0.953
1.22	0.999	1.035	1.82	1.006	0.950
1.24	0.999	1.034	1.84	1.006	0.947
1.26	0.999	1.032	1.86	1.006	0.945
1.28	0.999	1.030	1.88	1.007	0.942

续表

装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_γ	装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_γ
1.90	1.007	0.939	2.46	1.030	0.869
1.92	1.007	0.936	2.48	1.031	0.867
1.94	1.008	0.933	2.50	1.032	0.865
1.96	1.008	0.930	2.52	1.033	0.863
1.98	1.009	0.927	2.54	1.034	0.861
2.00	1.009	0.924	2.56	1.035	0.860
2.02	1.010	0.921	2.58	1.036	0.858
2.04	1.011	0.918	2.60	1.037	0.856
2.06	1.012	0.915	2.62	1.038	0.854
2.08	1.013	0.913	2.64	1.039	0.852
2.10	1.014	0.910	2.66	1.040	0.851
2.12	1.014	0.907	2.68	1.041	0.849
2.14	1.015	0.904	2.70	1.042	0.847
2.16	1.016	0.902	2.72	1.043	0.846
2.18	1.017	0.899	2.74	1.044	0.844
2.20	1.018	0.897	2.76	1.045	0.843
2.22	1.019	0.894	2.78	1.046	0.841
2.24	1.019	0.891	2.80	1.047	0.840
2.26	1.020	0.889	2.82	1.048	0.839
2.28	1.021	0.886	2.84	1.049	0.837
2.30	1.022	0.884	2.86	1.050	0.836
2.32	1.023	0.882	2.88	1.051	0.834
2.34	1.024	0.880	2.90	1.052	0.833
2.36	1.025	0.878	2.92	1.053	0.832
2.38	1.026	0.876	2.94	1.054	0.831
2.40	1.027	0.875	2.96	1.055	0.829
2.42	1.028	0.873	2.98	1.056	0.828
2.44	1.029	0.871	3.00	1.057	0.827

表10 密度校正表 (无Pb屏)

装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_T	装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_T
0.70	0.985	1.077	1.32	0.995	1.032
0.72	0.985	1.076	1.34	0.996	1.029
0.74	0.985	1.075	1.36	0.996	1.026
0.76	0.985	1.074	1.38	0.997	1.023
0.78	0.986	1.073	1.40	0.997	1.019
0.80	0.986	1.073	1.42	0.998	1.016
0.82	0.986	1.072	1.44	0.998	1.012
0.84	0.987	1.071	1.46	0.999	1.008
0.86	0.987	1.070	1.48	0.999	1.004
0.88	0.988	1.070	1.50	1.000	1.000
0.90	0.988	1.069	1.52	1.000	0.995
0.92	0.988	1.068	1.54	1.001	0.990
0.94	0.989	1.067	1.56	1.001	0.985
0.96	0.989	1.066	1.58	1.002	0.980
0.98	0.989	1.065	1.60	1.002	0.976
1.00	0.990	1.063	1.62	1.003	0.971
1.02	0.990	1.062	1.64	1.003	0.967
1.04	0.990	1.061	1.66	1.004	0.963
1.06	0.991	1.058	1.68	1.004	0.958
1.08	0.991	1.057	1.70	1.005	0.953
1.10	0.991	1.056	1.72	1.005	0.949
1.12	0.992	1.054	1.74	1.006	0.944
1.14	0.992	1.052	1.76	1.007	0.940
1.16	0.992	1.050	1.78	1.008	0.935
1.18	0.993	1.048	1.80	1.009	0.930
1.20	0.993	1.046	1.82	1.010	0.925
1.22	0.993	1.044	1.84	1.011	0.920
1.24	0.994	1.042	1.86	1.012	0.915
1.26	0.994	1.040	1.88	1.013	0.910
1.28	0.995	1.037	1.90	1.014	0.905
1.30	0.995	1.035	1.92	1.015	0.901

续表

装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_T	装填密度, 克/厘米 ²	ρ_B	ρ_T
1.94	1.016	0.896	2.48	1.052	0.795
1.96	1.017	0.891	2.50	1.053	0.792
1.98	1.018	0.887	2.52	1.055	0.789
2.00	1.019	0.882	2.54	1.057	0.786
2.02	1.020	0.878	2.56	1.059	0.783
2.04	1.021	0.874	2.58	1.061	0.780
2.06	1.023	0.870	2.60	1.063	0.777
2.08	1.024	0.866	2.62	1.065	0.774
2.10	1.025	0.862	2.64	1.067	0.771
2.12	1.026	0.858	2.66	1.069	0.768
2.14	1.028	0.854	2.68	1.071	0.765
2.16	1.029	0.850	2.70	1.073	0.762
2.18	1.030	0.846	2.72	1.075	0.759
2.20	1.031	0.842	2.74	1.078	0.756
2.22	1.032	0.838	2.78	1.080	0.753
2.24	1.033	0.834	2.80	1.082	0.749
2.26	1.035	0.830	2.82	1.084	0.746
2.28	1.036	0.826	2.84	1.086	0.743
2.30	1.038	0.823	2.86	1.088	0.740
2.32	1.039	0.819	2.88	1.090	0.737
2.34	1.041	0.816	2.90	1.092	0.734
2.36	1.042	0.812	2.92	1.094	0.732
2.38	1.044	0.809	2.94	1.096	0.730
2.40	1.045	0.805	2.96	1.098	0.728
2.42	1.047	0.802	2.98	1.100	0.725
2.44	1.049	0.799	3.00	1.102	0.723
2.46	1.050	0.797			

于装填面密度等于1.5克/厘米²时的变化, ρ_T 代表 $(a_2 + b_2)$ 相对于装填面密度等于1.5克/厘米²时的变化。

当样品的装填面密度与平衡标准源的装填面密度相差大

于10%时,对测得的当量含量值 Q_β 和 Q_γ 进行校正,校正的方法为

$$\begin{cases} Q_\beta' = Q_\beta \frac{\rho_{\beta\text{标}}}{\rho_\beta} \\ Q_\gamma' = Q_\gamma \frac{\rho_{\gamma\text{标}}}{\rho_\gamma} \end{cases} \quad (25)$$

式中 $\rho_{\beta\text{标}}$, $\rho_{\gamma\text{标}}$ 为平衡标准源对应的密度校正值。我们的平衡标准源的装填面密度是 1.40 克/厘米²,从表 9 可查得 $\rho_{\beta\text{标}} = 0.999$, $\rho_{\gamma\text{标}} = 1.015$; ρ_β , ρ_γ 为样品对应的密度校正值,同样由样品的装填面密度从表 9 查得; Q_β , Q_γ 为样品未经校正的 β 和 γ 当量含量; Q_β' , Q_γ' 为校正后的 β , γ 当量含量。此时样品的铀含量由 (26) 式给出

$$U = Q_\beta' + l(Q_\beta' - Q_\gamma') \quad (26)$$

5. 测量精确度与 G-M 计数管装置的比较

Q_β 和 Q_γ 的统计性相对标准误差分别由 (27) 式和 (28) 式确定

$$\varepsilon_\beta = \frac{\sqrt{I_\beta + I_\beta^p + I_\beta^\gamma}}{I_\beta} \quad (27)$$

$$\varepsilon_\gamma = \frac{\sqrt{I_\gamma + I_\gamma^p}}{I_\gamma} \quad (28)$$

铀含量的相对标准误差 ε_U 为

$$\varepsilon_U = \frac{\sqrt{(1+l)^2 Q_\beta^2 \varepsilon_\beta^2 + l^2 Q_\gamma^2 \varepsilon_\gamma^2}}{(1+l) Q_\beta - l Q_\gamma} \quad (29)$$

对于平衡状态与平衡标准源一致的样品, $Q_\beta = Q_\gamma$, 有

$$\varepsilon_U = \sqrt{(1+l)^2 \varepsilon_\beta^2 + l^2 \varepsilon_\gamma^2} \quad (30)$$

表11是本装置与计数管装置对铀-氧平衡样品的测量精

表11 两种测量装置测量精确度的比较

样品铀含量, %		1.00	0.500	0.100	0.050	0.010
G-M计数管装置	$\varepsilon_\beta, \%$	0.396	0.564	1.33	1.98	5.98
	$\varepsilon_\gamma, \%$	0.537	0.783	2.11	3.53	14.3
	$\varepsilon_U, \%$	0.957	1.37	3.40	5.31	18.6
闪烁 β - γ 装置	$\varepsilon_\beta, \%$	0.491	0.698	1.61	2.35	6.69
	$\varepsilon_\gamma, \%$	0.316	0.452	1.08	1.70	5.76
	$\varepsilon_U, \%$	1.00	1.42	3.28	4.82	13.5

确度比较。计数管装置的测量时间为 2×3 分钟, 本装置的测量时间仍然为 2×1 分钟。当样品的铀含量为 0.100% 时, 本方法的测量精确度为

$$\varepsilon_U = \sqrt{3.76\varepsilon_\beta^2 + 0.884\varepsilon_\gamma^2} = (9.75 + 1.03)^{\frac{1}{2}} \% = 3.28\%$$

G-M 计数管装置的测量精确度为

$$\varepsilon_U = \sqrt{4\varepsilon_\beta^2 + \varepsilon_\gamma^2} = (7.08 + 4.45)^{\frac{1}{2}} \% = 3.40\%$$

两种装置的测量精确度相近。铀含量低于 0.100% 时, 本装置的测量精确度比计数管装置高。因此, 在保持有同等的测量精确度的情况下, 本装置的测量速度是计数管装置的 3 倍。

六、对其它几个影响因素的探讨

1. γ 探测器的吸收屏对密度校正值和样品分析结果的影响

γ 探测器所用的吸收屏, 其材料和厚度直接关系到 ρ_γ 和 C_γ 值的大小。同时从 (10) 式可以看出, I^β 通过 C_γ 与

I^γ 有联系，它也会间接影响 I^β 值。因此该屏若选择不当， ρ_β 将不能确切地反映密度校正的实质，从而在某些情况下会给铀的分析结果带来系统误差。

下面我们将分别对几种情况，包括屏的选择方法加以探讨。

(1) 装置处于理想条件的情况

于理想情况下， β, γ 探测器所记录的 γ 射线应是：

(1) C_γ 值与能量无关，两探测器对各种能量的 γ 射线的探测效率比值相同；(2) 积分计数的能量下限 $E^\gamma_{\text{最小}}$ 一样。设这种理想情况的装置测得的密度校正曲线如图10实线

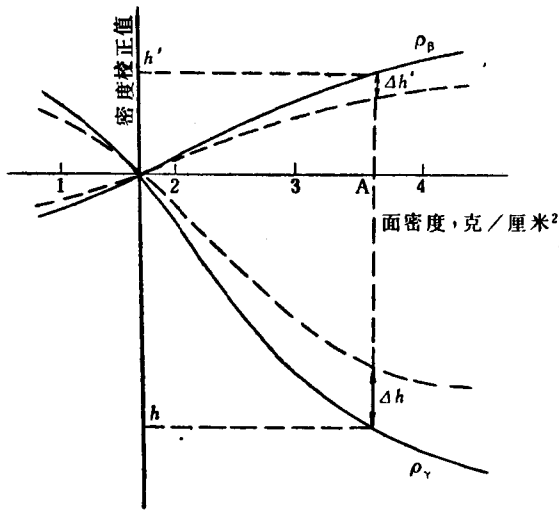


图10 密度校正曲线与屏材料的关系

所示，此时不但 ρ_γ 值能正确地代表 I^γ 随密度变化的实际情况， ρ_β 值也能确切地反映出装填面密度的变化对 I^β 的影

响。这种装置适用于测量各种密度的平衡破坏样品。过去采用的 J106 γ G-M 计数管装置 (γ 探测器用 6 毫米 Al 屏), 就很接近这种理想情况。

(2) 过厚的高原子序数材料吸收屏所造成的异常

γ 探测器的吸收屏采用过厚的高原子序数材料, 会导致降低低能 γ 射线的探测效率, 因此, 装置的 C_γ 值变大且密度校正曲线靠近横座标轴, 如图10虚线所示。

以图10中的 A 点为例, 此时 ρ_γ 向横座标靠近了 Δh 。
 Δh 为正值, 对应的 I_γ 增量 ΔI_γ 有

$$\Delta I_\gamma = I_\gamma \Delta h$$

再从 (10) 式可以得出对应的 ΔI^β 和 ρ_β 的偏离量 $\Delta h'$

$$\Delta I^\beta = -C_\gamma \Delta h I_\gamma = -I_{\beta}^{\gamma} \Delta h$$

$$\Delta h' = \frac{\Delta I^\beta}{I^\beta} = -\frac{I_{\beta}^{\gamma}}{I^\beta} \Delta h = -\frac{\Delta h}{\psi} \quad (31)$$

式中 $\psi = I^\beta / I_{\beta}^{\gamma}$ 。 ψ 通常称为 β 探测器的 β, γ 比。

由于采用了过厚的高原子序数材料作吸收屏造成铀分析结果的误差情况可由下面推导得出。根据 (1) — (3) 式可得到

$$\left\{ \begin{array}{l} K_\beta = \frac{1}{a_1 + b_1} \\ K_\gamma = \frac{1}{a_2 + b_2} \end{array} \right. \quad (32)$$

因为工作中密度校正值是用铀-氧平衡源测得, 对于各种平衡状态的样品, 与平衡源相比, 此时 β 计数 I_{β}^{β} 的误差 ΔI_{β}^{β} 为

$$\Delta I_{\#}^B \approx -(C-1)I_{\pm}^? \Delta h = (1-C)I_{\pm}^? \Delta h \quad (33)$$

由此造成铀的分析结果误差 ΔU 为

$$\begin{aligned} \Delta U &= (1+l) \Delta Q_{\beta} = (1+l) \frac{\Delta I^B}{a_1 + b_1} \\ &= \frac{(1+l)(1-C)I_{\pm}^? \Delta h}{a_1 + b_1} \end{aligned} \quad (34)$$

根据 (1) 式

$$I_{\#}^B = I^B = a_1 U + b_1 Rn = a_1 U + b_1 C U$$

并且注意到本法存在 $a_1 \approx b_1$, 故有

$$a_1 + b_1 \approx \frac{2I^B}{(1+C)U}$$

代入 (34) 式

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{(1+l)(1+C)(1-C)\Delta h}{2I^B/I_{\pm}^?} \cdot U \\ &= \frac{(1+l)(1-C^2)\Delta h}{2\psi} U \end{aligned} \quad (35)$$

铀分析结果的相对误差 E

$$E = \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{(1+l)(1-C^2)}{2\psi} \Delta h \quad (36)$$

因为 $l \approx 1$, (36) 式也可写成

$$E \approx \frac{(1-C^2)}{\psi} \Delta h \quad (37)$$

图11实线示出此种相对误差的情况。误差的大小除与 C

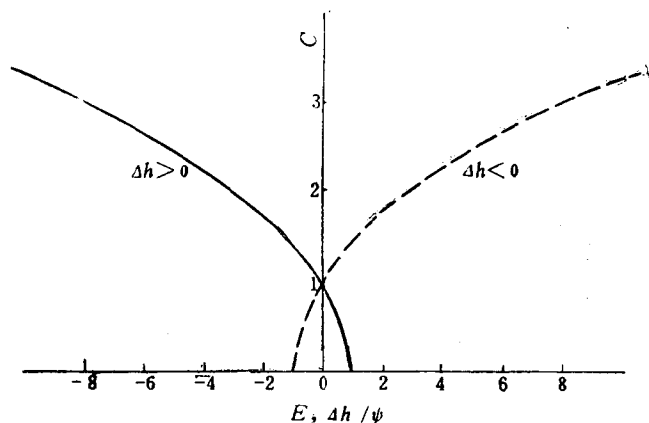


图11 C_7 与能量有关时铀的测量误差随 C 的变化情况

有关外，还与样品中高原子序数元素含量（~密度）多少有关，也与上探测器的 β , γ 比值 (ψ) 有关。G-M 计数管装置中如果下探测器采用铅材料的吸收屏就能出现这种情况。

(3) 低原子序数材料的吸收屏可能出现的异常

这是与上述相反的情况，它最易在塑料 - NaI(Tl) 装置上出现。由于 β , γ 探测器的探测元件的平均原子序数相差如此悬殊，NaI(Tl) 对低能 γ 射线的探测效率远比塑料闪烁体的高，因此会使 C_7 值变小且密度校正曲线偏离横座标轴。对于平衡破坏的样品，铀分析结果的相对误差情况如图11中虚线所示。表示式与 (36) 和 (37) 式一样，不过 Δh 和 E 的符号与采用过厚的高原子序数材料吸收屏的相反。

(4) 两探测器的 $E_{\text{最小}}$ 不一致的情况

对于理想情况的第二条件不能满足时，即两探测器对 γ 射线的积分计数能量下限不同时，装置也同样处于异常状态。若

$$E_{\text{上最小}}^{\gamma} > E_{\text{下最小}}^{\gamma}$$

则与塑料-NaI(Tl)装置使用低原子序数材料吸收屏的情况相似；若

$$E_{\text{上最小}}^{\gamma} < E_{\text{下最小}}^{\gamma}$$

此种情况与采用过厚的铅材料吸收屏相似。

(5) 吸收屏的选择

上述的影响，简称为“Z”影响。

对于G-M计数管装置或 β ， γ 探测器均用塑料闪烁体的装置，其 γ 探测器的吸收屏应当选用低原子序数材料如铝、有机板等制作。若采用铅屏，不但加大“Z”的影响，同时也加大RaD对分析结果的影响。

对于塑料-NaI(Tl)探测装置，建议采用(Al+Pb)屏，铝一般在6毫米以内，置于铅的两边。铅的作用是吸收软 γ 射线以抵偿NaI(Tl)对低能 γ 射线的高探测效率。

为仿效碘的原子序数，也可以采用(Al+Sn)屏。

铅屏有一个最佳厚度，在这厚度下， β ， γ 探测器对各种能量 γ 射线的探测效率的比值相近。

铅屏的最佳厚度用 γ 谱仪比较塑料闪烁体与NaI(Tl)晶体对平衡标准源的大道宽 γ 谱来确定。当两探测器的 γ 积分下限相等或相近时还有一种更简便的测定方法，即调节铅屏厚度，使两探测器对纯铀标准源和平衡标准源的 γ 计数比值相等，即 C_{γ} 相等。此时的铅屏厚度，即为该装置的最佳厚度。我们的装置，测得的铅屏最佳厚度为0.9—1.0毫米。为了不致于太大地降低 γ 探测灵敏度，我们只用0.5毫米的厚度。因此两种标准源测得的 C_{γ} 值不一样。

此外，不妨指出，塑料-NaI(Tl)装置的 γ 探测器吸收屏适当地采用铅材料，还可以减轻不能通过密度反映出来的

那种化学成分不同的影响。这种影响有时还是相当严重的。

2. 有关平衡破坏校正系数 l 的探讨

(1) 平衡标准源的有效平衡状态与 l 的关系

如果我们将铀-钍有效平衡系数不等于 1 的标准源作为平衡标准源加以使用时, 则射线的强度也相应地改变。设平衡时的 β 和 γ 射线强度为 $I_{\text{平}}^{\beta}$ 和 $I_{\text{平}}^{\gamma}$, 不平衡时的 β 和 γ 射线强度为 $I_{\text{不平}}^{\beta}$ 和 $I_{\text{不平}}^{\gamma}$, 则有〔8〕

$$\begin{cases} I_{\text{不平}}^{\beta} = I_{\text{平}}^{\beta} \left[a + bC_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}}) \right] \\ I_{\text{不平}}^{\gamma} = I_{\text{平}}^{\gamma} \left[m + nC_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}}) \right] \end{cases} \quad (38)$$

采用不平衡标准源后的当量含量的公式存在下面的关系

$$\begin{cases} Q_{\beta} = U_{\text{标}} \frac{I_{\text{样}}^{\beta}}{I_{\text{标}}^{\beta}} \left[a + bC_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}}) \right] \\ Q_{\gamma} = U_{\text{标}} \frac{I_{\text{样}}^{\gamma}}{I_{\text{标}}^{\gamma}} \frac{P_{\text{标}}}{P_{\text{样}}} \left[m + nC_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}}) \right] \end{cases} \quad (39)$$

式中 $C_{\text{标}}^{\text{真}}$ 和 $\eta_{\text{标}}$ 为标准源的铀-钍平衡系数和射气系数, $C_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}})$ 即标准源的有效平衡系数 $C_{\text{标}}$; Q_{β} , Q_{γ} 为用平衡标准源求得的当量含量。

将 (39) 式代入 (5) 式, 得

$$\begin{aligned} U = & \frac{n}{n-b} [a + bC_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}})] U_{\text{标}} \frac{I_{\text{样}}^{\beta}}{I_{\text{标}}^{\beta}} - \\ & - \frac{b}{n-b} [m + nC_{\text{标}}^{\text{真}}(1 - \eta_{\text{标}})] U_{\text{标}} \frac{I_{\text{样}}^{\gamma}}{I_{\text{标}}^{\gamma}} \frac{P_{\text{标}}}{P_{\text{样}}} \end{aligned}$$

令

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{b}{n-b} [m + nC_{\text{标}}^{\alpha} (1 - \eta_{\text{标}})] = l' \\ U_{\text{标}} \frac{I_{\text{标}}^{\beta}}{I_{\text{标}}^{\gamma}} = Q'_{\beta} \\ U_{\text{标}} \frac{I_{\text{标}}^{\gamma}}{I_{\text{标}}^{\beta}} \frac{P_{\text{标}}}{P_{\text{样}}} = Q'_{\gamma} \end{array} \right. \quad (40)$$

即得

$$U = (1 + l')Q'_{\beta} - l'Q'_{\gamma} \quad (41)$$

式中 Q'_{β} 和 Q'_{γ} 分别为样品的射线强度直接和不平衡标准源的射线强度对比求出的 β, γ 当量含量。

由于使用不平衡标准源, 系数 l 变成 l' , 且

$$l' = l[m + nC_{\text{标}}^{\alpha} (1 - \eta_{\text{标}})] = l(m + nC_{\text{标}}^{\alpha}) \quad (42)$$

因为 $m + n = 1$, 故有

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{标准源处于平衡状态时 } C_{\text{标}}^{\alpha} = 1, l' = l \\ \text{标准源偏铀时 } C_{\text{标}}^{\alpha} < 1, l' < l \\ \text{标准源偏钍时 } C_{\text{标}}^{\alpha} > 1, l' > l \end{array} \right.$$

(2) 标准源铀含量的误差对 l 和样品测量结果的影响

(1) 纯铀标准源存在误差的情况 倘若我们是采用纯铀标准源与平衡标准源测定 l , 纯铀标准源的铀含量确定值比真实含量偏差 $\Delta U_{\text{标}}$, 根据 (7) 式有

$$\left\{ \begin{array}{l} l' = \frac{(U_{\text{标}} + \Delta U_{\text{标}}) - Q_{\beta}}{Q_{\beta} - Q_{\gamma}} = l + \Delta l \\ \Delta l = \frac{\Delta U_{\text{标}}}{Q_{\beta} - Q_{\gamma}} \end{array} \right. \quad (43)$$

可见纯铀标准源的铀含量确定值偏高时, l 值增大; 反之 l 值减小。此时除测定那些有效平衡状态与平衡标准源相同的样品不存在误差外, 其余样品的测量结果均会引进误差 ΔU 。

且有

$$\Delta U = \Delta I (Q_B - Q_T) = \Delta I Q_B \left(1 - \frac{Q_T}{Q_B} \right) \quad (44)$$

相对误差 E 为

$$E = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta I (1 - Q_T/Q_B)}{1 + I (1 - Q_T/Q_B)}$$

进一步运算后可得

$$E = (1 - C) E_{\text{标}} \quad (45)$$

式中 $E_{\text{标}}$ 为纯铀标准源的铀含量的相对误差。图 12 给出了

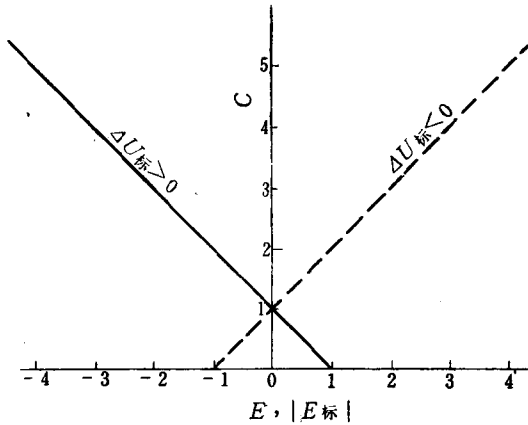


图12 纯铀源铀含量的误差造成样品分析结果的误差情况

样品测量的相对误差随有效平衡系数变化的情况。图中横座标的单位为 $|E_{\text{标}}|$ 。

(2) 平衡标准源存在误差的情况 倘若我们所用的平衡标准源的铀含量存在有 $E_{\text{标}}$ 的相对误差，那么当用纯铀源

来测定 l 时, l 值不变, 与 $E_{\text{标}} = 0$ 时一样。但测量样品的铀含量均存在有与 $E_{\text{标}}$ 相同的相对误差。当用含量准确的纯铀源来测定 l 时, 此时 l 变成 l' , 且有

$$l' = \frac{(b_1 - a_1 E_{\text{标}})(a_2 + b_2)}{(1 + E_{\text{标}})(a_1 b_2 - b_1 a_2)} = \frac{\left(1 - \frac{a_1}{b_1} E_{\text{标}}\right)}{1 + E_{\text{标}}} l \quad (46)$$

用以测量样品的铀含量为

$$U' = Q'_B + l'(Q'_T - Q_T)$$

式中 Q'_B 和 Q'_T 为用存在 $E_{\text{标}}$ 误差的平衡标准源求得的当量含量。

样品的铀结果的相对误差为

$$E = \frac{U' - U}{U} = C E_{\text{标}} \quad (47)$$

图13给出了此种误差的情况。图内虚线对应 $E_{\text{标}} < 0$ 的情形, 实线为 $E_{\text{标}} > 0$ 的情形。图中 1 和 2 分别表示用纯铀标准源和纯镭标准源测定 l 的情况。

(3) 纯铀标准源和平衡标准源均存在误差的情况 当所用的两种标准源均存在误差时, l 值的变化和对样品测量结果的影响为它们单独影响的叠加。图14给出了两种情况下样品测量结果的误差。图内(a)线(1, 2 两线累加)是对应于两种标准源的相对误差都等于 $E_{\text{标}}$ 的情形, $E_{\text{标}}$ 为正值, 此时样品的测量都将存在 $E_{\text{标}}$ 的相对误差且与样品的有效平衡系数 C 无关。偏氡样品的测量, 最糟的是两种标准源的误差符号相反, 图内(b)线(2, 3 两线的累加)即为纯铀标准源的相对误差 $E_{\text{标}}$ 为正值, 平衡标准源的相对误差 $E_{\text{标}}$ 为负值对样品的测量结果所造成的影响。

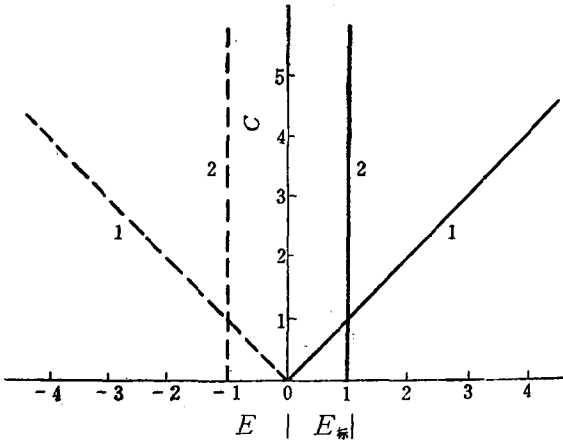


图13 平衡标准源铀含量的相对误差为 $E_{\text{标}}$ 时造成样品分析结果的误差情况

1——用纯铀标准源测定 I ； 2——用纯镭标准源测定 I 。

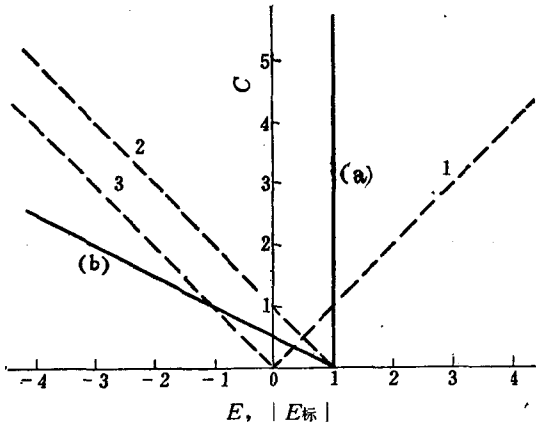


图14 平衡标准源和纯铀标准源均存在相对误差 $E_{\text{标}}$ 时造成样品分析结果的误差情况

属于其它情况，可以类推。

(3) C_7 与 l 的关系

当探测装置的 C_7 值测定不准确时， l 的数值也会改变。
 设 C_7 的绝对误差为 ΔC_7 ，即

$$C_7' = C_7 + \Delta C_7$$

此时装置的“ γ 差异系数” e 为

$$e = \frac{I_1' - C_7' I'}{I'} = \frac{I_1' - C_7 I'}{I'} - \frac{\Delta C_7 I'}{I'} = -\Delta C_7 \quad (48)$$

式中 C_7' 为存在绝对误差值为 ΔC_7 的 γ 换算系数。

设所用的标准源的称量都为 $P_{\text{标}}$ ，此时系数 l 变 l' ，且有

$$\begin{aligned} l' &= \frac{(b_1 + eP_{\text{标}}b_2)(a_2 + b_2)}{a_1b_2 - b_1a_2} = \frac{(1 + eP_{\text{标}}\frac{b_2}{b_1})b_1(a_2 + b_2)}{a_1b_2 - b_1a_2} = \\ &= \left(1 + eP_{\text{标}}\frac{b_2}{b_1} \right) l \end{aligned} \quad (49)$$

当 $e < 0$ 时，也即 β 探测器对所记录的 γ 射线部分扣除过量时， l 值变小；反之， $e > 0$ 时则 l 值增大。

3. C_7 的测量误差对铀分析结果的影响

当 C_7 存在误差 ΔC_7 时的平衡破坏改正系数 l' 已由 (49) 式给出，此时对应的当量含量 Q_8' 和 Q_7' 为

$$\begin{cases} Q_8' = \frac{a_1 + Cb_1 + ePa_2 + ePCb_2}{a_1 + b_1 + eP_{\text{标}}a_2 + eP_{\text{标}}b_2} U \\ Q_7' = \frac{a_2 + Cb_2}{a_2 + b_2} U \end{cases} \quad (50)$$

为便于演算，令

$$\begin{cases} a_1 + b_1 + eP_{*}a_2 + eP_{*}b_2 = L \\ a_1 + Cb_1 + ePa_2 + ePCb_2 = L' \\ a_1b_2 - b_1a_2 = M \\ a_2b_1 + b_1b_2 + eP_{*}a_2b_2 + eP_{*}b_2^2 = M' \\ a_2 + b_2 = N \\ a_2 + Cb_2 = N' \end{cases}$$

则 (49) 式和 (50) 式可以简化为

$$\begin{cases} Q'_s = \frac{L'}{L}U \\ Q'_i = \frac{N'}{N}U \\ I' = \frac{M'}{M} \end{cases}$$

轴分析结果为

$$U = Q'_s + I'Q'_i - I'Q'_s = \frac{L'MN + L'M'N - LM'N'}{LMN}U$$

或

$$\frac{U'}{U} = \frac{L'MN + L'M'N - LM'N'}{LMN}$$

进一步运算后可得到

$$\frac{U'}{U} = 1 + e \left(\frac{P - P_{*}}{P_{*}} \right) P_{*} \frac{b_2(a_2 + Cb_2)}{a_1b_2 - b_1a_2} =$$

$$= 1 + eaP_{\text{标}} \frac{b_2(a_2 + Cb_2)}{a_1b_2 - b_1a_2}$$

式中 e 为“ γ 差异系数”，见 (49) 式； α 为“密度差异系数”，即 $\alpha = (P - P_{\text{标}}) / P_{\text{标}}$ 。

因此可得铀结果的相对误差为

$$E = \frac{U' - U}{U} = eaP_{\text{标}} \frac{b_2(a_2 + Cb_2)}{a_1b_2 - b_1a_2} \quad (51)$$

(51) 式是 β - γ 法测铀当 $e \neq 0$ 时的铀结果误差普遍表达式。可见在 ΔC 存在的情况下，只有当 $P = P_{\text{标}}$ ，即 $\alpha = 0$ 时才不至于给分析结果造成误差。

由于存在 $a_1 \approx b_1$ ； $a_2 \ll b_2$ 。(51) 式可以简化成近似式

$$E = eaP_{\text{标}} \frac{a_2 + Cb_2}{a_1 + b_1 \frac{a_2}{b_2}} \approx eaC \frac{b_2 P_{\text{标}}}{a_1} \quad (52)$$

误差的大小正比于 e ， α 和 C 。

塑料-NaI (Tl) 闪烁装置， β 探测器对 γ 射线的探测效率较低，因此可以获得较大的 ψ 值。即使这样，我们也不能将 C ，当作零来计算样品的铀含量。否则，此时

$$\Delta C_{\gamma} = -C_{\gamma}$$

由 (48) 式可得

$$e = -\Delta C_{\gamma} = C_{\gamma} \quad (53)$$

将 (53) 式代入 (52) 式得

$$\begin{aligned} E &\approx C_{\gamma} \alpha C \frac{b_2 P_{\text{标}}}{a_1} = \frac{I_{\beta}'}{I'_{\gamma}} \alpha C \frac{2b_2 P_{\text{标}} U}{2a_1 U} = \\ &= \frac{I_{\beta}'}{I'_{\gamma}} \alpha C \frac{2I'_{\beta}}{I'_{\beta}} = 2 \frac{\alpha C}{\psi} \end{aligned} \quad (54)$$

我们的装置, β 探测器曾用0.35毫米 Al 和0.68毫米 Al 两种吸收屏作试验, ψ 值分别为7.10和3.84, 根据 (54) 式算得的 E 与 αC 的关系以及实际测量值给于表12和表13. 实

表12 $\psi=7.10$ 时的误差情况

$\alpha, \%$		-10.5	0	+10	备 注
管-5号样 $E_U, \%$	计 算	-2.94	0	+2.82	$U=0.254\%$ $C=1$
	实 测	-3.5	0	+1.95	
管-10号样 $E_U, \%$	计 算	-14.86	0	+14.05	$U=0.165\%$ $C=5$
	实 测	-14.2	0	+12.2	

表13 $\psi=3.84$ 时的误差情况

$\alpha, \%$		-10.5	0	+10	备 注
管-5号样 $E_U, \%$	计 算	-6	0	+5.2	$U=0.254\%$ $C=1$
	实 测	-3.7	0	+2.9	
管-10号样 $E_U, \%$	计 算	-27.4	0	+26.0	$U=0.165\%$ $C=5$
	实 测	-24.8	0	+15.0	

际测量结果与近似计算结果基本相符。两表均充分说明此种计算方法带来的误差是严重的。

七、讨 论

1. (30) 式及其运算例子表明, 提高测量精度或分析速度的关键仍然是提高 β 探测灵敏度。

2. 为减少装样可能不够均匀的影响, 我们曾试将 γ 探

测器改用 $\phi 100 \times 25$ 毫米的 NaI(Tl) 配以 GDB-100 光电倍增管和 $\phi 100 \times 30$ 毫米的 ST-401 塑料闪烁体配以 GDB-100 光电倍增管。前者结果良好；后者坪曲线较差。

GDB-100 光电倍增管的噪声较低，有利于获得良好的计数率-高压坪，经一年多的工作，证明其性能良好，工作稳定可靠。

3. 目前减少 RaD 干扰的办法常用的有调节铝屏厚度和调节阈电压两种，它们各有优缺点。图15给出了用单道谱

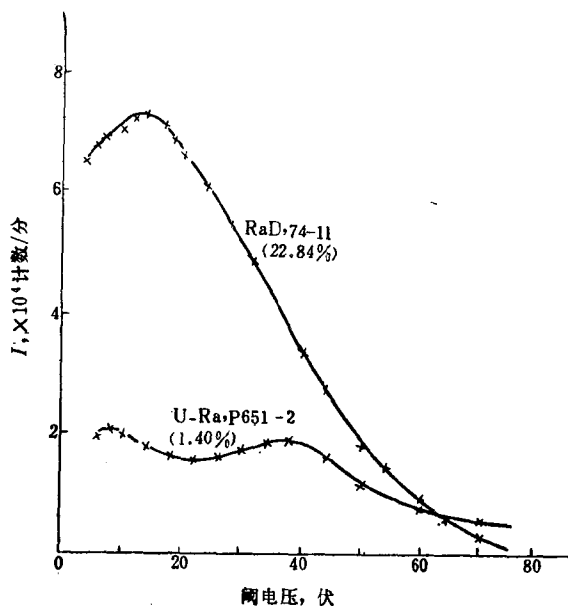


图15 两种源的 β 射线谱

Al 屏厚度0.02毫米，UX₁ 的 β 射线同时被记录。

仪测得的纯 RaD 源和平衡标准源的 β 射线谱，当采用调阈法时，阈值必须取相当于图内40—50伏的位置甚至更高，在

此情况下， β 探测器不可能工作于坪区而只能工作于坪前陡区，这是调阈法的最大缺点。一般情况下，还是采用调屏法好。

调阈法的一个优点是对 γ 射线的灵敏度较低。

4. 本方法的 t 值小，因之可望略加改进装置条件（如调节两探测器的吸收屏等）就能够用来测定铀钍混合样品中的铀含量。

我们曾将 GT-69-1号纯钍源从密封的塑料瓶中装入样品盘测量，测得的 t 值随着该盘样品放置时间的延长而逐渐增大（表14）。估计这是钍射气的影响所造成的。因此，用

表14 t 值随放置时间的变化（放置时加盖）

放置时间	即装即测	11天	31天	38天
钍的等效铀当量 t	7.05×10^{-3}	4.16×10^{-2}	5.02×10^{-2}	6.05×10^{-2}

本方法测定不加封闭的铀钍混合样品中的铀含量时，除要求 $t \approx 0$ 外，看来还应当寻找不因钍射气的不同而过大地影响 t 值的条件。

八、结 论

本方法和所用的装置具有不灵敏时间短，分析精度高和铀含量适应范围广的优点。经一年多的生产考验，证明装置的稳定性可靠，受干扰少，分析质量良好。分析速度从过去采用的 2×4 只 J106 γ 计数管装置每个样品测量 2×4 分钟减少为 2×1 分钟。每套装置每半天以工作四小时计算，除

预热仪器，检查本底和系数外，可分析样品80—90个。继续提高 β 探测灵敏度，分析速度还可以进一步提高。

由于 β 和 γ 探测元件的不同，因此必须对某些工作条件加以选择。本文所讨论的有关影响因素是可以控制的，只要工作中加以注意并选择合适的测量条件，就能够保证得到好的分析质量。

参 考 文 献

- [1] 见本汇编第134页。
- [2] X.Б.Межиборская, Анализ радиоактивных руд β - γ - Методом
中译本，于铭强，放射性矿石的 β - γ 分析方法，中国工业出版社，
1962年。
- [3] В.В.阿列克赛耶夫等编，程方道等译，铀矿普查勘探的放射性测量
法，第285—289页，地质出版社，1960年。
- [4] 波里特等，国外放射性地质，第2期，62 (1976)。
- [5] 王祝翔，核物理探测器及其应用，第154—198页，科学出版社，
1964年。
- [6] 原子力工业(日)，第18卷，第7号，103—105 (1972)。
- [7] 见本汇编第197页。
- [8] 白弟，铀矿床放射性勘探，第219—234页，中国工业出版社，1962
年。

偏镭样品中铀的测定

张书达

本文讨论了影响 β - γ 法测铀精确度的因素, 通过实测与理论计算对闪烁测铀装置与 J106 计数管测铀装置进行了比较。为了得到相同的测铀精度, 文中给出了不同平衡状态的样品所需要的相对测量时间。

一、影响测铀精确度的因素

下面讨论一律不考虑本底的影响。

设 $I^{\beta+\gamma}$ 、 I_{γ}^{β} 分别表示 β 探头 (上探头) 和 γ 探头 (下探头) 对单位铀含量平衡样品的总计数率。则

$$\begin{aligned} I^{\beta+\gamma} &= I_{\text{U}}^{\beta} + I_{\text{Ra}}^{\beta} + I_{\text{U}}^{\gamma} = \\ &= I_{\text{U}}^{\beta} + I_{\text{Ra}}^{\beta} + \eta I^{\beta+\gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 I_{U}^{β} 、 I_{Ra}^{β} 分别为铀组和镭组的 β 计数率, I_{U}^{γ} 为 β 探头的 γ 计数率, η 为测量平衡样品时, 在 β 探头总计数中 γ 计数所占的比例。

$$\begin{aligned} I^{\beta+\gamma} &= I^{\beta+\gamma} (1 - \eta) a + I^{\beta+\gamma} (1 - \eta) b + \\ &+ I^{\beta+\gamma} \eta \end{aligned} \quad (2)$$

式中 a 、 b 分别为上探头 β 计数中铀组和镭组 β 射线所占的比例, $a + b = 1$ 。

设对于有效平衡系数为 C 的单位铀含量样品 β 探头的总计数率为 $I'^{\beta+\gamma}$, 则

$$I'^{\beta+\gamma} = I^{\beta+\gamma} (1-\eta) a + I^{\beta+\gamma} (1-\eta) bC + I^{\beta+\gamma} \eta C \quad (3)$$

式中第三项中忽略了铀组 γ 射线的影响, 这在一般情况下是可行的 (平衡样品铀组 γ 射线计数率仅占 I'_{β} 的 3% 左右)。

令 Q_{β} , Q_{γ} , U 分别表示样品的 β 当量、 γ 当量和铀含量, 则

$$\begin{cases} Q_{\beta} = K_{\beta} (I'^{\beta+\gamma} - I'_{\beta}) \\ Q_{\gamma} = K_{\gamma} I'_{\gamma} / P \\ U = Q_{\beta} + l(Q_{\beta} - Q_{\gamma}) \end{cases}$$

式中 K_{β} , K_{γ} , l 为测量装置相应的系数; P 为样品的重量; I'_{β} , I'_{γ} 分别表示对于有效平衡系数为 C 的样品, 上探头、下探头所记录的 γ 计数率。

由于计算样品的 β 当量 Q_{β} 是用 $I'^{\beta+\gamma} - I'_{\beta}$ 进行的, 所以根据误差的叠加原理可知 Q_{β} 的相对均方误差 ε_{β} 为

$$\varepsilon_{\beta}^2 = \frac{(1-\eta)a + (1-\eta)bC + 2\eta C}{[(1-\eta)a + (1-\eta)bC + \eta C]^2 I^{\beta+\gamma}} \quad (4)$$

用下探头测得样品的 γ 当量 Q_{γ} 的相对均方误差 ε_{γ} 为

$$\varepsilon_{\gamma}^2 = \frac{1}{CI'_{\gamma}} = \frac{1}{CI^{\beta+\gamma}} \cdot \frac{I^{\beta+\gamma}}{I'_{\gamma}} \quad (5)$$

测定铀含量的相对均方误差 ε_U 用下式表示

$$\varepsilon_U^2 = \frac{(1+l)^2 \varepsilon_{\beta}^2 + l^2 \varepsilon_{\gamma}^2 \left(\frac{Q_{\gamma}}{Q_{\beta}}\right)^2}{\left[1+l\left(1-\frac{Q_{\gamma}}{Q_{\beta}}\right)\right]^2} \quad (6)$$

样品有效平衡系数 $C \left[C = \frac{Ra}{U} (1 - \text{射气系数}) \right]$ 与 Q_{β} , Q_{γ} 的关系可用下式表述

$$C = \frac{\left(1 + \frac{m}{b}l\right)\frac{Q_\gamma}{Q_\beta} - \frac{m}{b}l}{(1+l) - l\frac{Q_\gamma}{Q_\beta}} \quad (7)$$

式中 m 表示在 γ 探头的总计数中铀组 γ 所占的比例。

从 (4) — (7) 式的物理意义可知, 为了提高测铀精度, 除提高 β , γ 探头的总计数 $I^{\beta+\gamma}$, I_γ^2 外, 还应尽量减小 b , m , η 值。

二、几种测铀装置的比较

1. J106计数管装置

β , γ 探头各为 4 只 J106 计数管, γ 探头的铝屏厚度为 6.0 毫米, 样品盘为 $200 \times 100 \times 10$ 毫米。测定的参数如下: $I^{\beta+\gamma}/I_\gamma^2 = 4.12$, $\eta = 0.243$, $a = 0.534$, $b = 0.466$, $m = 0.06$, $l = 0.990$ 。于是 (4) — (7) 式可具体化为

$$\varepsilon_\beta^2 = \frac{0.404 + 0.839C}{(0.404 + 0.466C)^2} \cdot \frac{1}{I^{\beta+\gamma}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_\gamma^2 = \frac{4.12}{C} \cdot \frac{1}{I^{\beta+\gamma}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_0^2 = \frac{3.95\varepsilon_\beta^2 + 0.980\varepsilon_\gamma^2 \left(\frac{Q_\gamma}{Q_\beta}\right)^2}{\left(1.990 - 0.990\frac{Q_\gamma}{Q_\beta}\right)^2} \quad (10)$$

$$C = \frac{1.128\frac{Q_\gamma}{Q_\beta} - 0.128}{1.990 - 0.990\frac{Q_\gamma}{Q_\beta}} \quad (11)$$

2. 闪烁测铀装置

β 探头: $\phi 100 \times 0.3$ 毫米 ST-402 塑料闪烁体, 0.37 毫米铝屏; γ 探头: $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI (Tl), 0.27 毫米 Fe + 1.5 毫米 Al + 0.5 毫米 Pb + 1.0 毫米 Al (晶体外壳), 样品盘为 $\phi 80 \times 10$ 毫米。测得各参数如下: $\eta = 0.156$, $a = 0.518$, $b = 0.482$, $m = 0.035$, $l = 0.995$, $I^{\beta+\gamma}/I_{\gamma}^{\beta+\gamma} = 0.197$ 。

$$\varepsilon_{\beta}^2 = \frac{0.437 + 0.719C}{(0.437 + 0.563C)^2} \cdot \frac{1}{I^{\beta+\gamma}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\gamma}^2 = \frac{0.197}{C} \cdot \frac{1}{I^{\beta+\gamma}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_v^2 = \frac{3.98\varepsilon_{\beta}^2 + 0.990\varepsilon_{\gamma}^2 \left(\frac{Q_{\gamma}}{Q_{\beta}}\right)^2}{\left(1.995 - 0.995\frac{Q_{\gamma}}{Q_{\beta}}\right)^2} \quad (14)$$

$$C = \frac{1.073\frac{Q_{\gamma}}{Q_{\beta}} - 0.0726}{1.995 - 0.995\frac{Q_{\gamma}}{Q_{\beta}}} \quad (15)$$

为便于查阅, 现将计算结果列表并绘成双对数坐标图 (见表 1、2 和图 1)。表 1、2 和图 1 中的 $\varepsilon_v^2(C)/\varepsilon_v^2(C=1.0)$ 和 $\varepsilon_v^2(\text{闪})/\varepsilon_v^2(\text{计})$ 均指相同测量时间的比值。

上述计算中, 只考虑在相同测量时间内装置的固有测量精度, 而未包括系数的变化对测量精度的影响。图 1 中 Q_{γ}/Q_{β} 的标度是近似的, 因对于同一个 C 值计数管与闪烁装置的 Q_{γ}/Q_{β} 值略有出入。

表 1 J106计数管装置的测量精度与C值的关系

Q_{γ}/Q_{β}	0.50	1.00	1.30	1.60	1.80	1.90
C	0.278	1.00	1.902	4.13	9.15	18.3
$\varepsilon_{\beta}^2 \cdot I^{\beta+\gamma}$ (计)	2.24	1.645	1.20	0.715	0.372	0.198
$\varepsilon_{\gamma}^2 \cdot I^{\beta+\gamma}$ (计)	14.83	4.12	2.17	0.998	0.451	0.225
$\varepsilon_{\beta}^2 \cdot I^{\beta+\gamma}$ (计)	5.59	10.54	16.88	32.2	65.8	130.3
$\varepsilon_{\beta}^2 (C)/\varepsilon_{\beta}^2 (C=1.0)$	0.530	1.00	1.60	3.06	6.24	12.37

表 2 闪烁装置的测量精度与C值的关系

Q_{γ}/Q_{β}	0.50	1.00	1.30	1.60	1.80	1.90
C	0.311	1.00	1.89	4.07	9.07	18.55
$\varepsilon_{\beta}^2 \cdot I^{\beta+\gamma}$ (闪)	1.778	1.156	0.832	0.451	0.219	0.115
$\varepsilon_{\gamma}^2 \cdot I^{\beta+\gamma}$ (闪)	0.634	0.1970	0.1042	0.0484	0.0217	0.0105
$\varepsilon_{\beta}^2 \cdot I^{\beta+\gamma}$ (闪)	3.24	4.79	7.06	11.78	22.4	44.7
$\varepsilon_{\beta}^2 (C)/\varepsilon_{\beta}^2 (C=1.0)$	0.676	1.00	1.47	2.46	4.68	9.33
ε_{β}^2 (闪)/ ε_{β}^2 (计)	~0.47	~0.37	~0.34	~0.30	~0.27	~0.28

从表 1、2 和图 1 可清楚地看出：(1) 对于平衡样品，在同样的测量时间内，所述闪烁测铀装置的相对均方误差大约是计数管装置的 $1/\sqrt{3}$ 倍；若保持同样的测量精度，则闪烁装置的测量时间仅是计数管的 $1/3$ ；(2) 随着样品 C 值的增加， ε_{β}^2 (闪) / ε_{β}^2 (计) 之数值逐渐减小。这说明闪烁测铀装置的优点对于偏镭样品显得更突出。

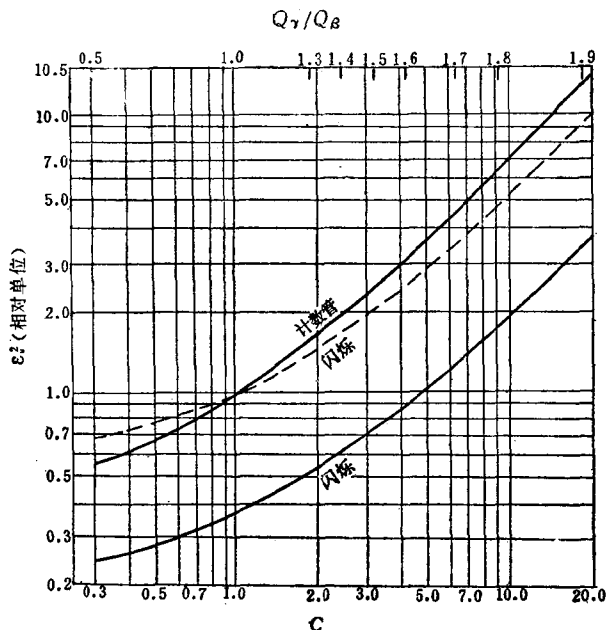


图1 ϵ_U^2 和 $C (Q_\gamma/Q_\beta)$ 的关系曲线

实线是以计数管测 $C=1$ 的样品的 ϵ_U^2 为1.0;

虚线是以闪烁探头测 $C=1$ 的样品的 ϵ_U^2 为1.0。

在上述计算中，只考虑了 C 值大小对测铀精度的影响。实际上，随着 C 值的增加，系数等的微小变化都会使测铀的准确度下降。

三、测量结果

曾用不同的测量装置多次测量同一个偏镭样品（其有效平衡系数 $C \approx 9$ ），并比较它们各自的测量精度，结果完全证

实了上述的分析。测量时，各用四个工作单元，每个单元连续测量12个结果为一组。每测完一次，样品水平转动半周，并使不同装置每次测得的 $\beta + \gamma$ 总计数 $t' \cdot I^{\beta+\gamma}$ 相近（注意这里指的是总计数而并非是计数率）。用计数管装置测量时，使用的是小样品盒（100×50×10毫米）因大样品盒会出现漏计。装置系数均采用平均值。闪烁装置的具体参数如前所述。测量结果见表3。

表3 不同装置对同一偏镭样品(有效平衡系数 $C \approx 9$)
测量精度的比较

测 量 装 置	J106计数管	ST-402塑料闪烁体 NaI(Tl)
$t' \cdot I^{\beta+\gamma}$	$\sim 1.9 \times 10^4$	$\sim 2.0 \times 10^4$
每个结果计数时间 t'	2 × 8分	2 × 1分
每组12个铀结果 的相对均方误差 $\varepsilon_U, \%$	9.1	5.20
	14.4	7.01
	10.6	6.97
	10.8	7.37
平均每组相对均方误差 $\varepsilon_U, \%$	11.2	6.64
总平均铀含量, %	0.137	0.126

由表1可见,用J106计数管装置测 $C \approx 9$ 的样品,测量时间为 t' 时, $\varepsilon_U^2 \approx 66/t' \cdot I^{\beta+\gamma}$;而由表2可查得,用我们上述的闪烁装置测量 $C \approx 9$ 的样品时, $\varepsilon_U^2 \approx 22/t' \cdot I^{\beta+\gamma}$ 因为实验时两装置的 $t' \cdot I^{\beta+\gamma}$ 近似相等,故 $\varepsilon_U(\text{计})/\varepsilon_U(\text{闪}) \approx \sqrt{3} \approx 1.7$ 。对于单位铀含量的样品是如此,对于任意含量的同类样品也是如此。实际测量结果是

$$\frac{\varepsilon_v(\text{计})}{\varepsilon_v(\text{闪})} = \frac{11.2\%}{6.64\%} = 1.69。$$

可见理论计算与实测数据符合得很好。

有时为了更好地排除 ^{40}K 和 RaE 的影响而将 β 探头的铝屏加厚,但这样做会使测量精度下降。这不仅是因为 $I^{\beta+\gamma}$ 的数值降低较多,而且因为 η 值增加很大。例如另一套闪烁测铀装置 β 探头为 $\phi 100 \times 0.2$ 毫米 ST-402 型塑料闪烁体加0.68毫米铝屏, γ 探头为 $\phi 40 \times 40$ 毫米 NaI(Tl) 晶体加0.27毫米 $\text{Fe} + 4.0$ 毫米 Al 屏(包括晶体外壳)。这套装置与前述 β 探头铝屏厚度为0.37毫米的闪烁装置相比, $I^{\beta+\gamma}$ 仅为后者的0.629倍,而 η 值却由0.156增大至0.258。对于 $C = 1$ 的样品,其测量精度与计数管相比 $\varepsilon_v^2/\varepsilon_v^2(\text{计}) = 0.80$ 。

用该装置测量与前面相同的有效平衡系数 $C \approx 9$ 的样品,得到12个结果,每个结果的测量时间为 3×100 秒,铀含量的相对均方误差为5.90%。根据统计规律换算成每个结果测量时间为 2×60 秒,则应为9.33%。此数值相当于薄铝屏的1.4倍。 $\varepsilon_v^2(\text{计})/\varepsilon_v^2 = 11.2/9.33 = 1.20$,而理论计算此值应为1.25,两者基本相符。

可见提高测铀精度与排除 ^{40}K 和 RaE 的影响有矛盾。 β 探头铝屏的厚度应根据样品及装置情况灵活掌握,一般可采用0.4—0.5毫米。

除闪烁探测器之外,曾分别用钟罩计数管及金硅面垒型半导体探测器作 β 探头、 NaI(Tl) 晶体作 γ 探头做过实验。在 $I' \cdot I^{\beta+\gamma}$ 与计数管的相近的情况下,测铀精度均有显著提高。

四、测定偏镭样品的铀含量时应注意的问题

1. 选用较理想的测量装置

除尽量提高 β 探头和 γ 探头的计数率外,还应选用对 γ 探测效率低(η 值小)、铀组 β 射线所占比例大(a 值大)的 β 探头。目前看来闪烁装置较为适宜。

2. 合理选取测量时间

e_{γ}^2 是与测量时间 t' 成反比的,所以,为了得到与 $C = 1$ 样品的同样测量精度,则对于 $C > 1$ 的样品应相应地延长测量时间。具体的数值可由图1中方便地查出。例如对于 $Q_{\gamma}/Q_{\beta} \approx 1.3$ 的样品,则测量时间应是原来的1.5倍。现将测量精度 e_{γ}^2 保持相同时,测量时间 t' 与样品对应的 Q_{γ}/Q_{β} 值列于表4。

表4 相对测量时间与 Q_{γ}/Q_{β} 的近似关系

Q_{γ}/Q_{β}		1.0	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
t'	计数管装置	1.0	1.5	2		3	4.5	6.5	13
t'	闪烁装置	1.0	1.5		2	2.5	3.5	4.5	9.5

3. 装样与装标准源的用力应大致相同

目前所流行的密度校正表,主要是校正由于样品化学成分不同所带来的附加误差。被测样品和所用标准源的化学成分接近时,装填面密度相差在 $\pm 30\%$ 以内,由此带来的误差

则实际上不影响分析结果。现将用J106计数管装置测定的两个不同样品的结果列于表5。

表5 不同装填面密度对铀含量测定的影响*

样品的平衡状态		$C \approx 1$			$C \approx 9$	
装填面密度, 克/厘米 ²		1.05	1.28	1.40	1.28	1.54
铀含量, %	未经密度校正	0.272	0.272	0.274	0.132	0.140
	经密度校正	0.288	0.272	0.266	0.132	0.094

* 标准源的装填面密度为1.28克/厘米²。

从表5可见, 对于同一样品(化学成分相同)不同的装填面密度对于铀含量的影响不大。若进行密度校正, 则反而会造成不能允许的误差, 特别是对于C值大的样品。用闪烁测铀装置进行同样的实验亦得出了相同的结论。所以在装样时应与装标准源时用力大致一样, 这样面密度的变化才能大略地反映出样品化学成分的变化。此时进行密度校正才是有意义的。若仅仅是为了不进行密度校正而采取所谓“重样轻装, 轻样重装”的错误作法, 则会带来不应有的误差, 特别是对于严重偏镭样品更应注意这一点。

4. 标准源含量误差对偏镭样品测定结果的影响

对 $l = 1$ 的装置, 若平衡源含量偏差为 + 1%, 则它所造成的样品铀结果的偏差, 对于 $C = 1$ 的样品为 + 1%, 而对于 $C = 9$ 的样品为 + 9%。若纯铀源含量偏差为 + 1%, 则它所造成的样品铀结果的偏差, 对于 $C = 1$ 的样品为 0,

而对于 $C = 9$ 的样品为 -8% 。特别应指出的是，用 $\beta\text{-}\gamma$ 法分析样品的铀含量时，对于一般平衡破坏不严重的样品，纯铀源含量的偏差对分析结果影响不大。故对纯铀源的准确度有时要求不高。但当测量偏镭样品时，纯铀源含量的偏差可能会对分析结果带来不能允许的系统误差。故在测偏镭样品时，欲保证其准确度高，则所用标准源含量的准确度必须很高。

5. 系数的偶然误差对样品分析结果的影响

除上述因标准源含量不准会造成系数的系统误差外，整个测量装置的不稳定性还会造成系数的偶然误差，因而影响样品的分析结果。随着样品 C 值的增大，装置系数允许的变化范围应减小。例如 $C = 1$ 的样品，对前述的闪烁装置而言，仅由于 K_B 增加 1% 会使样品铀含量增加 $\approx 2\%$ ，但同样的变化对于 $C = 9$ 的样品，铀含量却会增加 $\approx 8\%$ 。因此对于严重偏镭样品最好采取不同时间测量结果的平均值较为可靠。当 $C > 3$ ， $Q_1/Q_B > 1.5$ 时，最好在不同时间两次装样测量后取平均值，这样可使测量的准确度提高。

此外，正如文章开头所述，为简化理论推导的表达式，以上讨论没有考虑本底的作用。不过，文内各分析结论，并不因是否考虑了本底而改变。

能谱法测定矿石中铀、镭、钍

张书达 陈英强 彭光慧

一般说来，当对存在多种放射性母体元素的样品进行分析时，需用能谱分析法；而对于同时含有铀、镭、钍的矿石样品进行分析时，通常采用 γ 能谱法。由于 γ 能谱法具有排除干扰能力强，分析中不破坏样品，并可同时、快速、定量地分析多种放射性元素等优点，加之近年来半导体探测器、多道谱仪和电子计算机的迅速发展，使得 γ 能谱分析的应用日益广泛。国内外情况表明， γ 能谱分析应用于实验室，而且普遍地应用于野外的普查找矿等项工作中。本文拟在使用单道 γ 能谱仪的基础上，阐明测定矿石中铀、镭、钍的工作原理，扼要叙述测量方法，并对一些影响因素进行讨论。最后对国内外稳定谱仪的几种方法作一简单介绍。

一、原理

对于天然放射性矿石说来，当样品密封3天以上则可认为整个钍系已达到放射性长期平衡；而当样品密封一个月以上则可认为镭和它的短寿命子体已达到放射性长期平衡；当 ^{40}K 和 RaD 及其子体的影响可以忽略时（这在一定的条件下是成立的，见下文），则可认为矿石样品中只有铀、镭、钍三个独立的待测元素。从数学处理的角度看，欲使三元方程中的三个未知数有确定解，则必须有三个互相独立的方程。对于 γ 能谱分析的情况而言，这是一个三元线性方程

组。铀组、镭组和钍系的 γ 能谱成分是各不相同的 (见图1, 2, 3)。在 γ 能谱分析中就是通过测量它们的彼此能够互

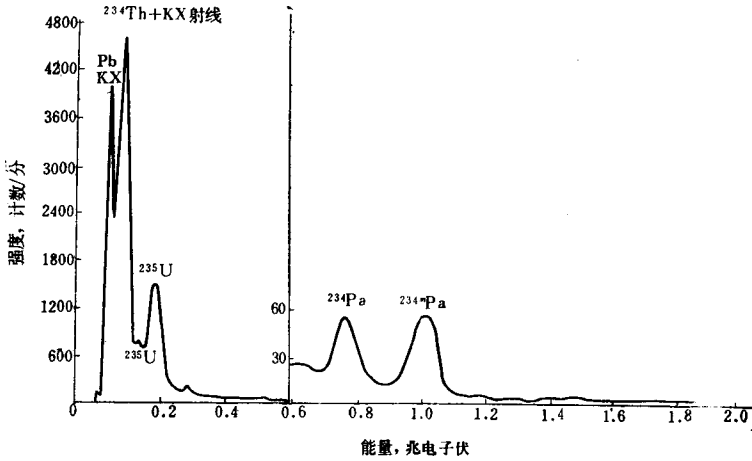


图1 UO_2 新制剂 (^{226}Ra 及其子体的放射性增长得不明显)的 γ 谱

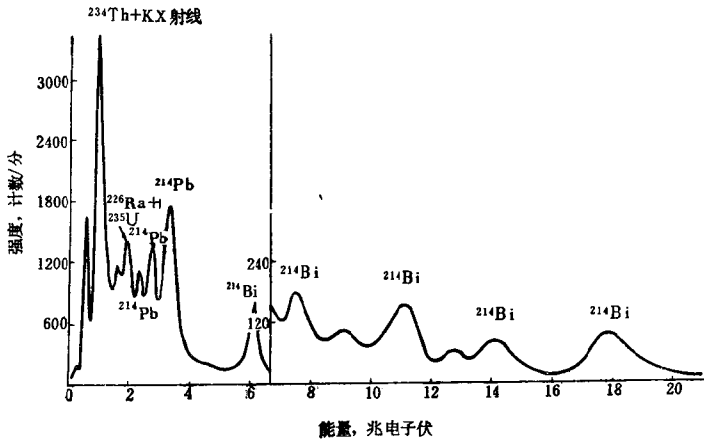


图2 ^{238}U 系处于长期平衡的沥青铀矿的 γ 谱

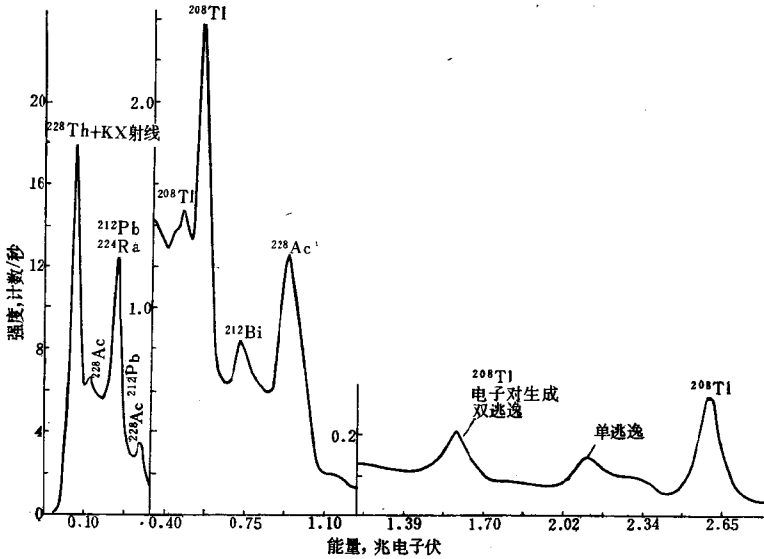


图3 ^{232}Th 系处于长期平衡的钍石的 γ 谱

相分开的光峰计数率来确定它们的含量的。其关系式如下

$$I_i/P = a_i U + b_i Ra + c_i Th \quad (1)$$

式中： I_i 为第*i*道 γ 射线的计数率； P 为样品重量； a_i ， b_i ， c_i 分别为第*i*道所记录的单位重量和单位含量的铀、镭、钍的 γ 射线计数率； $i=1, 2, 3$ 分别代表钍道、镭道、铀道； U ， Ra ， Th 分别为矿样中铀-238、镭-226和钍-232的含量。

求方程组(1)的解可通过计算逆矩阵而方便地获得^[1]。

一般的三元线性方程组写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{令 } A = (a_{ij}), X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad \text{则方程组}$$

(2) 改写成

$$AX = B \quad (3)$$

$$X = A^{-1}B \quad (4)$$

式中 A^{-1} 为矩阵 A 的逆矩阵, 即

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A_{11}}{|A|} & \frac{A_{21}}{|A|} & \frac{A_{31}}{|A|} \\ \frac{A_{12}}{|A|} & \frac{A_{22}}{|A|} & \frac{A_{32}}{|A|} \\ \frac{A_{13}}{|A|} & \frac{A_{23}}{|A|} & \frac{A_{33}}{|A|} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 $|A|$ 为矩阵 A 的行列式,

A_{ij} 为矩阵元素 a_{ij} 的代数余子式。

从式 (5) 可见, 只有当行列式 $|A| \neq 0$ 时, 方程 (2) 才有确定解。

将方程 (1) 改写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U \\ Ra \\ Th \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1/P \\ I_2/P \\ I_3/P \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 I_1, I_2, I_3 分别为钍道、镭道、铀道的计数率。

$$\begin{pmatrix} U \\ Ra \\ Th \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{b_2c_3 - b_3c_2}{\Delta} & \frac{b_3c_1 - b_1c_3}{\Delta} & \frac{b_1c_2 - b_2c_1}{\Delta} \\ \frac{c_2a_3 - c_3a_2}{\Delta} & \frac{c_3a_1 - c_1a_3}{\Delta} & \frac{c_1a_2 - c_2a_1}{\Delta} \\ \frac{a_2b_3 - a_3b_2}{\Delta} & \frac{a_3b_1 - a_1b_3}{\Delta} & \frac{a_1b_2 - a_2b_1}{\Delta} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_1/P \\ I_2/P \\ I_3/P \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 Δ 为方程组 (6) 的系数行列式, 即

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = a_1b_2c_3 + a_2b_3c_1 + \\ &+ a_3b_1c_2 - a_1c_2b_3 - a_2c_3b_1 - a_3c_1b_2 \end{aligned} \quad (8)$$

令

$$\begin{cases} I_1 = \frac{b_2c_3 - b_3c_2}{\Delta} \\ I_2 = \frac{b_3c_1 - b_1c_3}{\Delta} \\ I_3 = \frac{b_1c_2 - b_2c_1}{\Delta} \end{cases} \begin{cases} m_1 = \frac{c_2a_3 - c_3a_2}{\Delta} \\ m_2 = \frac{c_3a_1 - c_1a_3}{\Delta} \\ m_3 = \frac{c_1a_2 - c_2a_1}{\Delta} \end{cases} \begin{cases} n_1 = \frac{a_2b_3 - a_3b_2}{\Delta} \\ n_2 = \frac{a_3b_1 - a_1b_3}{\Delta} \\ n_3 = \frac{a_1b_2 - a_2b_1}{\Delta} \end{cases} \quad (9)$$

则方程组 (6) 的解可用下式表达

$$\begin{cases} U = I_1 I_1 / P + I_2 I_2 / P + I_3 I_3 / P \\ Ra = m_1 I_1 / P + m_2 I_2 / P + m_3 I_3 / P \\ Th = n_1 I_1 / P + n_2 I_2 / P + n_3 I_3 / P \end{cases} \quad (10)$$

方程 (1) 也可用克腊姆 (Cramer) 法则求解^[1]

$$U = \frac{\begin{vmatrix} I_1/P & b_1 & c_1 \\ I_2/P & b_2 & c_2 \\ I_3/P & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad Ra = \frac{\begin{vmatrix} a_1 I_1/P & c_1 \\ a_2 I_2/P & c_2 \\ a_3 I_3/P & c_3 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad Th = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & I_1/P \\ a_2 & b_2 & I_2/P \\ a_3 & b_3 & I_3/P \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (10')$$

测量时光峰的选择可根据具体情况灵活掌握, 一般的原理是: 在一定的条件下, 它的强度与待测元素的含量有确定的关系, 排除干扰能力强 (即区分系数大), 以及在保证准确度符合要求的前提下有适当的计数率。目前使用较多的有以下几个光峰:

钍道: 0.2386兆电子伏 (ThB), 2.614兆电子伏 (ThC');
镭道: 0.352兆电子伏 (RaB), 1.764兆电子伏 (RaC);
铀道: 0.0914兆电子伏 (UX₁), 0.185兆电子伏 (²³⁵U)。

由于铀组 γ 射线能量较低, 且在铀道中镭和钍对计数率的贡献较大, 所以测量它时干扰因素多, 故通常又用 β 射线总量来代替, 这就是所谓 β - γ 能谱法。当样品的面密度达到 β 射线饱和层后, 则样品面密度对 β 射线强度的影响不大, 此时方程 (1) 变成如下形式:

$$\begin{cases} I_1/P = a_1 U + b_1 Ra + c_1 Th \\ I_2/P = a_2 U + b_2 Ra + c_2 Th \\ I^\beta = a_3^\beta U + b_3^\beta Ra + c_3^\beta Th \end{cases} \quad (11)$$

式中 I^β 为 β 射线的总计数率，即铀道的计数率； a_3^β , b_3^β , c_3^β 分别代表 β 探测器所记录的单位铀、镭、钍含量的 β 射线计数率。

(11) 式的解仍可利用 (10) 式求得，只是将 I^β , a_3^β , b_3^β , c_3^β 分别代替 (10) 式中的 I_3/P , a_3 , b_3 和 c_3 罢了。

由于一般的 β 探测器在记录 β 射线的同时也记录了部分 γ 射线，所以 I^β 必须通过间接的方法获得。

必须指出，上述方法只有在 ^{226}Ra 和 ^{224}Ra 分别与其子体产物达到长期平衡后才是正确的。但在一般测量中，为了缩短生产周期，可利用不同时间测量的积累曲线上的两个点来计算镭、钍的含量。

例如，当测定 ^{226}Ra 的含量时，样品密封后即行测量。此时方程 (1) 中的 Ra 应用 Rn 代替，测定的结果为 Rn_1 。在密封 1—2 倍 Rn 的半衰期 ($T^{1/2} = 3.8229$ 天) 的时间后再进行第二次测量。其测定结果为 Rn_2 。则该样品的 Ra 含量由下式确定

$$Ra = Rn_1 + \frac{Rn_2 - Rn_1}{1 - e^{-\lambda \Delta t}} \quad (12)$$

式中 λ 为 ^{222}Rn 的衰变常数， Δt 为测量 Rn_1 和 Rn_2 之间的时间间隔。

由于在利用 (1) 式分析矿石中的钍含量时是将整个钍系作为一个放射性母体元素来看待的，所以只有当整个钍系处于放射性长期平衡时上述假设才成立，即只有满足这一条件时 (1) 式才是正确的。这里姑且不谈 ^{232}Th 和 ^{224}Ra 之间是否可能由于自然环境的作用而使它们的平衡遭到破坏，仅就 ^{224}Ra 与其子体的平衡状态来确定测量时间。 ^{224}Ra 的子体中

以ThB (^{212}Pb) 的半衰期为最长 ($T^{1/2} = 10.64$ 小时), 一般认为积累10倍半衰期的时间以上才能达到平衡, 这就需密封4天半后才能用(1)式测定其Th含量。若不作精确测量, 且考虑到钍的射气系数并非100%, 则上述所需的密封时间可减少到2.5—3天。这样仅由于积累时间不足而造成的误差小于1%。这一测量时间的限制也同样适于用密封样品法测定铀、钍矿样中的铀含量。

由于 ^{224}Ra 与其子体达到平衡所需的密封时间较短, 所以不必用类似(12)式的方法确定钍含量, 且一般用能谱分析的样品均要求Ra、Th结果, 所以在测 R_{n2} 时即可同时测出样品的钍含量。

为了计算方便, 在上述所有公式中Ra和 R_n 的含量均用它们的铀当量表示。

二、测量装置

1. 装置的组成部分

用 γ 能谱法分析矿石时需要一台能谱仪和一个 γ 探测器; 用 β - γ 能谱法分析矿石时还需增加一个 β 探测器和一个定标器。选择 β 探测器的原则是: 对 γ 射线探测效率低, 对 β 射线有较高的计数率以及工作稳定可靠。目前常采用ST-401型薄片塑料闪烁体(约0.5—1.0毫米厚)或ST-402型塑料闪烁体(0.2—0.5毫米厚)与光电倍增管配合使用。 γ 探测器常用NaI(Tl)晶体与光电倍增管配合使用。其装置示意图见图4。若采用电流型阻抗匹配前级放大器, 则该放大器可置于探头外〔2〕。 γ 探测器的输出讯号传递给单

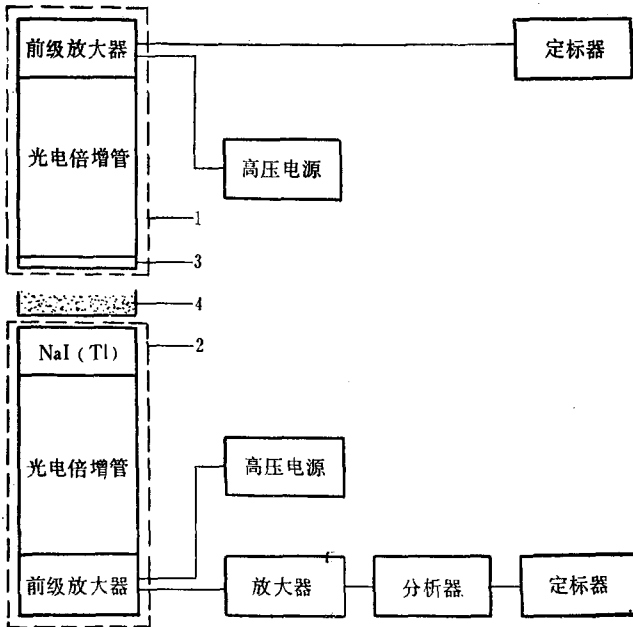


图 4 β - γ 能谱法测量装置方块图

1 —— β 探头； 2 —— γ 探头； 3 —— 塑料晶体； 4 —— 样品盒。

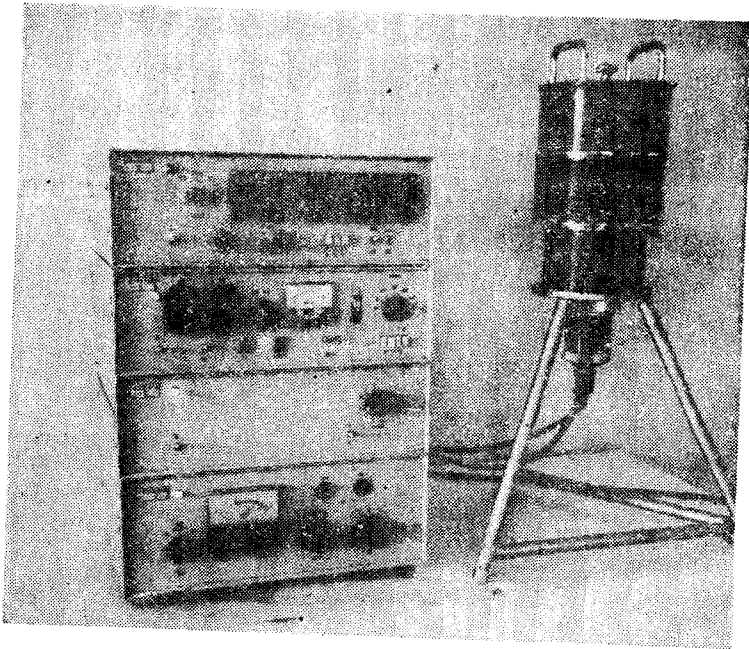
道 γ 能谱仪。目前常用的单道 γ 能谱仪有 FH-421, GP-III, GP-I 等型号的谱仪 (图 6)

γ 射线与物质的相互作用一般分为三类：光电效应，康普顿散射，电子对生成。而在进行能谱分析时则是利用第一种效应。此时入射到 NaI (Tl) 晶体的 γ 射线的全部能量都交给次级电子。次级电子使晶体产生荧光，其光强与次级电子能量成正比。该荧光照到光电倍增管的光阴极后即产生出光电子，经打拿极逐级倍增后在光电倍增管的阳极即可得到

一个电流脉冲，其总电荷量与入射 γ 量子的能量成正比。此电流脉冲可经电流放大器放大后再转换成电压脉冲输至脉冲幅度分析器；或者在光电倍增管的阳极输出电路上将其转换成电压脉冲，经电压放大器放大后再输至脉冲幅度分析器。由于康普顿散射和电子对生成的影响，使得 γ 能谱曲线中的光峰叠加在一个连续谱上。

β 射线的探测和记录系统与闪烁 β - γ 法测铀的装置相同，此处不赘述。 γ 射线的探测和记录系统则是 γ 能谱仪，现将它的主要技术指标简介如下。





b

图5 单道 γ 能谱仪实物图
a—GP-I型, b—FH-421型。

2. γ 能谱仪的主要技术指标

(1) 能量线性

可以通过 ^{137}Cs 与 ^{60}Co 两种 γ 射线光峰的对应峰位来确定。设能量非线性系数为 Δ , 则

$$\Delta = \frac{x_2 - x'_2}{x_2} \quad (13)$$

式中 x'_2 为能量1.3325兆电子伏的 ^{60}Co γ 射线光峰位实测

值, x_2 为能量1.3325兆电子伏的 ^{60}Co γ 射线光峰位计算值。它可以通过实测能量为0.6616兆电子伏的 ^{137}Cs γ 射线之光峰位 x_1 后按下式计算:

$$x_2 = \frac{1.3325}{0.6616} x_1 \quad (14)$$

仪器的能量线性好坏还可用阈值的积分非线性来标志, 其定义为: 输入的脉冲幅度(可精确测量)对应于阈值刻度曲线上任意一点的线性偏离与满刻度值之比称为积分非线性, 它可以用标准信号发生器来测量。一般 γ 能谱仪的积分非线性可作到0.3—1.0%。

在用能谱仪进行测量工作前, 必须检查仪器的能量线性。对于一般的分析仪器可要求其能量非线性小于1—3%。若达不到此要求须逐级进行检查并设法予以矫正。造成能量非线性的部件可能是探头, 也可能是放大器或分析器。

(2) 能量分辨率

设仪器的能量分辨率为 W , 则

$$W = \frac{\Delta h^{1/2}}{h_{\text{最大}}}$$

式中 $\Delta h^{1/2}$ 为光峰分布曲线的半宽度, $h_{\text{最大}}$ 为分布曲线最大计数率处的脉冲幅度。

对于同一台谱仪, 用不同能量的光峰(不同种类的 γ 源)测得的 W 值不同。目前一般常用 ^{137}Cs 的0.6616兆电子伏的光峰来测量。也有用 ^{60}Co 的峰谷比来表示能量分辨率的。若以 ξ 来表示峰谷比的数值, 则有

$$\xi = I_{1.3325} / I_{\text{谷}}$$

式中： $I_{1.3325}$ 为 ^{60}Co 的1.3325兆电子伏光峰处的计数率， $I_{\text{谷}}$ 为 ^{60}Co 的两个光峰（1.3325和1.1732兆电子伏）之间计数率最低处的计数率。

用 ^{60}Co 的峰谷比来表示能量分辨率的优点是计算简单，反映灵敏。 ξ 与 W 之间无确切的数学公式来联系，但有一定的经验关系，如图6〔3〕。一般的NaI(Tl) γ 能谱仪的 W

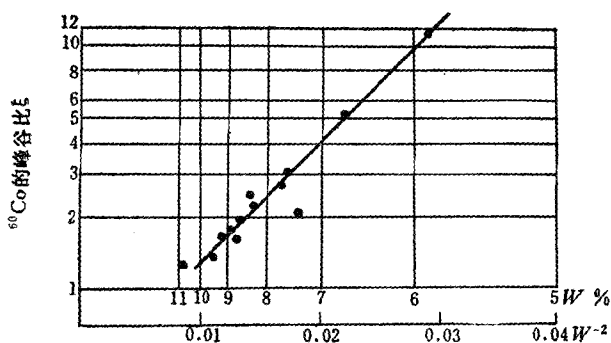


图6 对 ^{137}Cs 的分辨率 W 与对 ^{60}Co 的峰谷比 ξ 的实验关系曲线

值可达7—10%，其理论计算的极限值为5—6%〔4〕。

影响能量分辨率的因素很多。首先分析晶体尺寸的影响。设NaI(Tl)晶体的直径为 D ，厚度为 H ，对闪烁体辐射光的吸收系数为 K ，那么随着 KD 和 H/D 的增加，分辨率变坏。在某个范围以外，闪烁体具有反常大的固有分辨率或过小的光收集系数。文献〔5〕给出了可供谱仪使用的晶体线度的范围。除了线度以外，晶体本身质量的好坏亦对晶体固有分辨率有较大影响。

光电倍增管的质量好坏对分辨率也有很大影响。一般说

来光阴极均匀性好，在相同增益下暗电流小，分辨率会好些。对于一只确定的光电倍增管，打拿极分压电阻的选取对分辨率亦有影响〔6〕。聚焦型光电倍增管分压电阻的形式对分辨率有较大影响，特别是靠近光阴极的前两个分压电阻。

在使用时还必须合理选取光电倍增管的工作电压，过高或过低的电压不仅会造成放大系数的非线性，而且会使能量分辨率变坏。对于使用者来说，选取最佳分压比及适当的工作电压是有实际意义的。

此外，环境温度对闪烁探测器的能量分辨率也有影响〔7,8〕。

（3）不灵敏时间

不灵敏时间就是能谱仪能够无畸变地分开相继两个脉冲的最小时间间隔。对于整个能谱仪来说，它不仅与放大器、分析器和定标器的不灵敏时间有关，而且还与探头输出的波形有关。在谱仪中往往是分析器的不灵敏时间较其它单元的长些。目前单道 γ 能谱仪的不灵敏时间可作到小于0.7—1.0微秒。

由于每台谱仪都有其固有的不灵敏时间，因此当测量放射性强的样品时要防止出现漏计现象。

若采用电流型阻抗匹配前级放大器，可使探头和前级放大器的不灵敏时间大为减小〔2〕。

（4）稳定性

外界电源电压的变化、温度的变化及长期工作(八小时)等都会使峰位发生漂移。

电源变化 $\pm 10\%$ ，可作到峰位漂移小于 $\pm 0.5\%$ 。

长期工作稳定性主要决定于光电倍增管。光电倍增管一般要工作1小时后才能稳定下来。若不采取特殊稳定措施在

预热一小时后可作到连续工作八小时峰位漂移小于2—3%。

对温度稳定性来说,主要取决于光电倍增管和晶体,分析器的阈值也会随温度的变化而有所改变。此种漂移一般可作到每度变化0.1—0.6%。

上述几项主要技术指标都应进行定量的检测。若某些指标过低,则应查明原因,予以消除后,方可进行样品的测量。

三、测量方法

为了叙述方便,先讲镭、钍的测定,而后再谈及铀的测定。

1. 普通样品中镭、钍含量的测定

对于一般化学成分与标准源相近的样品,采用钍道在0.2386兆电子伏、镭道在0.352兆电子伏的谱段进行测量。它具有计数率较高,有一定的区分本领等优点,目前使用较为广泛,其测量步骤如下。

(1) 工作点的确定

用¹³⁷Cs源的光峰初步确定钍道和镭道的阈值。选择合适的道宽,原则是既有较大的区分系数又有较高的计数率。相对道宽的数值一般为15—30%。可根据具体情况经实测后确定。用既定的道宽和钍源、铀-镭平衡源分别确定0.2386兆电子伏和0.352兆电子伏的阈值。

(2) 系数的测定

由于在方程式(1)中 $a_1 \ll b_1, c_1; a_2 \ll b_2, c_2$ 所以在一般情况下可将求氧、钍的方程简化为:

$$\begin{cases} I_1/P = b_1 Rn + c_1 Th \\ I_2/P = b_2 Rn + c_2 Th \end{cases} \quad (15)$$

分别测量纯钍源和铀-镭平衡源在钍道和镭道的计数率, 根据 (15) 式即可方便地计算出 b_1 , b_2 , c_1 , c_2 。(15) 式忽略了铀组的 γ 射线在铀-镭平衡源中的贡献。这一近似在铀镭平衡破坏不很严重时是允许的。测系数时所用的纯钍源应密封 4 天以上, 铀-镭平衡源应密封一个月以上。此时标准源内部已达到长期平衡状态, 其钍含量即是源的镭含量 (均用铀当量表示)。否则应进行积累校正。

(3) 样品的测定

若不用当天的系数, 则测样品前应先检查系数的变动情况。最简便的办法是将所有的标准源当作样品测量, 然后用预定的系数计算其含量, 再与标准源的真实含量比较。一般可允许其相对偏差为 $\pm 2\%$ 。若钍源的钍含量和铀-镭源的镭含量同时比真实含量高 (或低), 则此偏差还应控制小一些。否则应检查其峰位变动情况并重测系数。

样品密封 3 小时后即进行第一次测量, 此时可只计算 Rn_1 。待样品密封 3—7 天后再进行第二次测量, 此时计算出 Th 和 Rn_2 。 Ra 的结果应按 (12) 式算出。以使用 GP-I 型单道能谱仪为例, 其 NaI (Tl) 晶体尺寸为 $\phi 50 \times 50$ 毫米, 样品盒容积为 $\phi 58 \times 13$ 毫米, 一般样品重量为 50 克左右, 每个样品的测量时间可用 2×4 分。解方程 (15) 即可求得钍、钍含量。其计算公式如下

$$\begin{cases} Rn = m_1' I_1/P + m_2' I_2/P \\ Th = n_1' I_1/P + n_2' I_2/P \end{cases} \quad (16)$$

式中

$$\begin{cases} m_1' = \frac{c_2}{b_1c_2 - b_2c_1} \\ m_2' = \frac{-c_1}{b_1c_2 - b_2c_1} \end{cases} \quad \begin{cases} n_1' = \frac{-b_2}{b_1c_2 - b_2c_1} \\ n_2' = \frac{b_1}{b_1c_2 - b_2c_1} \end{cases} \quad (17)$$

2. 含有大量高 Z 元素样品中镭、钍含量的测定

(1) 样品对 γ 射线的自吸收与原子序数 Z 的关系

γ 射线穿过物质时的衰减固然与物质的密度有关, 但更与组成该物质的元素性质有关。通常用线性衰减系数 μ 来表征某种物质对 γ 射线的衰减本领

$$J = J_0 e^{-\mu d} \quad (18)$$

式中 J_0 为 γ 射线穿过物质前的强度, J 为 γ 射线穿过物质后的强度, d 为物质的厚度。

由于 γ 射线与物质的相互作用主要有三种形式: 光电效应、康普顿散射和电子对生成, 所以 μ 值由三部分组成:

$$\mu = \tau + \sigma + \chi \quad (19)$$

式中 τ 、 σ 、 χ 分别为上述三种效应导致 γ 射线强度减弱的线性衰减系数。其中

$$\tau = 0.0089 \frac{\rho Z^{4.1}}{A} \lambda^n \quad (20)$$

式中 ρ 、 Z 、 A 分别为吸收体物质的密度、原子序数和原子量, λ 为光子波长, n 仅是 Z 的函数, 但变化不大, 约为 3。

可见对同一能量的 γ 射线, τ 值随吸收体原子序数 Z 的增加而急剧加大。

对于不同的元素, σ 值差别不大, 而仅与 γ 射线能量和

吸收体密度 ρ 有关。

三种效应的主要作用区随 γ 射线能量而异。电子对生成的主要作用区在大于 5 兆电子伏的高能区段。对于天然放射性元素放出的 γ 射线来说，在粗略分析的情况下，通常可以只考虑前两种作用。一般来说，能量越低，光电效应所占比重越大。所以，对于低能 γ 射线的吸收，随元素不同而差异较大；随着 γ 射线能量的增加，这种差异逐渐变小。有时也用质量衰减系数 μ/ρ 表示物质对 γ 射线的吸收情况。表 1 列出了几种元素的质量衰减系数。

表 1 某些元素对 γ 射线的质量衰减系数(厘米²/克)[9]

原子序数	元素	γ 能量, 兆电子伏				
		0.08*	0.30*	0.5	1.0	2.0
13	Al	0.203	0.104	0.0844	0.0614	0.0431
14	Si	0.224	0.108	0.0873	0.0635	0.0448
56	Ba			0.0978	0.0572	0.0402
57	La			0.100	0.0581	0.0406
71	Lu			0.125	0.0641	0.0427
82	Pb	2.33	0.404	0.152	0.0703	0.0456
90	Th			0.175	0.0762	0.0477
92	U	3.35	0.509	0.185	0.0779	0.0483

* 此 2 列数据由文献[10]取得。

从表 1 可明显地看出，在 γ 射线能量相同的情况下， μ/ρ 随吸收体的原子序数 Z 的增加而增大。因此，当样品含有大量的（例如大于 2%）高原子序数元素时，必须考虑样品本身对 γ 射线的自吸收，否则可能会使分析结果系统偏低。如某独居石样品中稀土元素 ($Z = 57-71$) 的总含量为

38%，在以花岗岩样品作标准源，以 $E_1 = 0.2386$ 兆电子伏， $E_2 = 0.352$ 兆电子伏进行能谱分析时，其钍含量为 1.988%，而化学分析为 2.32%。能谱分析结果比化学分析结果低 14.3%。上述现象是由于所用标准源中高原子序数元素少而样品中高原子序数元素多所致。

(2) 减小自吸收影响的方法——用高能谱段测量

从表 1 可以看出，对于不同的介质，随着 γ 射线能量的增加， μ/ρ 值之间的差异逐渐减小。例如 Pb 与 Al 的 μ/ρ 值之比在 0.08 兆电子伏时为 11.5，在 0.30 兆电子伏时为 3.88，而在 2.0 兆电子伏时降至 1.06。对于天然放射性元素的 γ 射线来说，当能量大于 1.5 兆电子伏时，不同元素的 μ/ρ 值就相差不大了。在分析样品过程中，不同元素的 μ/ρ 值差别越小，则样品由于化学成分不同而引起的自吸收影响亦越小。所以在待分析的样品中含有可观的高 Z 元素时，必须采用 γ 射线的高能谱段进行测量以减少自吸收的影响。当然如果标准源与待测样品的化学成分完全相同，就不存在这个问题了。但这一条件事实上是很难办到的。

高能谱段的工作条件是这样选择的：钍道 $E_1 = 2.614$ 兆电子伏 (ThC'')，镭道 $E_2 = 1.764$ 兆电子伏 (RaC)；相对道宽约为百分之二十。有的单道 γ 能谱仪中的放大器本身有鉴别器输出，这时钍道亦可采用积分测量（如 $E_1 > 2.4$ 兆电子伏）。这样单道谱仪即可变成双道使用。这是因为 2.614 兆电子伏的光峰是天然放射性元素中能量最大的一个较明显的峰。用上述条件工作，区分系数可达 1.2—1.5 左右。其计算公式如下〔11〕

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{b_1 c_2 - b_2 c_1}{b_1 b_2 + c_1 c_2} \quad (21)$$

仪器的调试及测量步骤与前述相同。在这样的条件下测量前述的独居石样品钍含量为2.310%，比低能谱段的结果高14%而与化学分析结果2.32%相符。

为了提高计数率亦曾试过用 $E > 0.5$ 兆电子伏的其它谱段，例如钍道曾选过0.9—0.96兆电子伏，镭道分别用过0.6093和1.120兆电子伏。这些谱段与用0.2386和0.352兆电子伏相比仍有区分系数大和自吸收影响较小的优点，但对于象独居石这样的特殊样品（高 Z 元素含量很高），其分析结果仍有偏低的趋势。

（3）用高能谱段测量时提高计数率的措施

采用高能谱段测量存在探测灵敏度低的缺点。为提高灵敏度可采用大晶体、加大样品量及加大探测立体角等措施。

1. 我们曾将 NaI (Tl) 晶体由 $\phi 1.5 \times 1.0$ 英寸加大至 $\phi 75 \times 75$ 毫米，样品盒的容积由 $\phi 58 \times 13$ 毫米加大至 $\phi 80 \times 24$ 毫米，样品重量相应增大2倍以上，在后者保持比前者区分系数大的情况下，计数率可提高一个数量级以上。

2. 利用 GP-I 单道谱仪原配倒凹形样品杯，这既可加大样品量又可加大探测立体角，从而大大提高计数率。我们用一块 $\phi 50 \times 50$ 毫米的 NaI (Tl) 晶体，当采用0.2386和0.352兆电子伏光峰时使用 $\phi 58 \times 13$ 毫米的圆盒；当采用2.614和1.764兆电子伏光峰时使用 $\phi 83 / \phi 63 \times 60$ 毫米的倒凹形样品杯。两种情况下计数率和区分系数的比较示于表2。

由表2可见对于一块固定的晶体，当用倒凹形杯测量高能谱段时，在区分系数比测量低能谱段大很多的情况下，计数率也可接近或超过测量低能谱段时的计数率（用圆形盒）。这就不仅保证了测量的准确度，同时也保证了测量精度。曾对20多个含量为0.01—0.1%的镭钍混合样品进行实验。结

表2 两种情况下计数率和区分系数之比较

镭道相对 道宽, %	纯钍源(Th $=0.306\%$)		铀-镭源(Ra $=0.289\%$)		区分 系数	光峰能量, 兆电子伏		装样条件
	I_1'	I_2'	I_1	I_2				
17	4404	1019	5224	4878	0.52	0.2386	0.352	圆盒
25	6046	1603	7379	7799	0.39	0.2386	0.352	圆盒
20	5485	1352	2533	6415	1.31	2.614	1.764	倒凹杯

注: 表中 I 为4分钟计数。

果表明镭、钍含量的分析能满足目前生产中的要求。实验中每个样品的测量时间为 2×4 分。

(4) 结论

1. 对于含有大量高 Z 元素或化学成分复杂的样品须用高能谱段测量以保证其结果的准确度, 否则会造成系统误差。

2. 采用 $E_1=2.614$ 兆电子伏, $E_2=1.764$ 兆电子伏光峰分析镭、钍含量具有如下优点: (1) 化学成分影响小, 提高了测定结果的准确度。(2) 区分系数大, 可达1.2—1.5或更大。而用0.2386和0.352兆电子伏时区分系数只能达到0.5左右。对于测量 Ra/Th 大的样品中的 Th 和 Th/Ra 大的样品中的 Ra , 采用高能谱段分析可减小干扰从而提高其测量精度。(3) β 射线的次级辐射及氧在样品盒上方的聚集等现象对分析镭钍的影响都大为降低。

3. 由于高能谱段的区分系数大, 所以可采用大道宽, 此时仪器峰位的漂移对测量结果的影响较小。

3. 高含量镭、钍的测定

(1) 减小自吸收的影响

对于一般的铀-镭平衡破坏不十分严重的样品，镭含量高，其相应的铀含量也高。而铀和钍的原子序数分别为92和90，所以高含量镭、钍样品本身就是含有大量高 Z 元素的样品。如前所述，这样的样品须用高能谱段测量。

曾用不同能谱段分别测量了18个高含量样品，结果列于表3，其钍含量为1.9—2.6%，铀含量为3—5%。

所用铀-镭平衡标准源为P651-3 ($U=1.40\%$, $Ra=1.359\%$)，纯钍标准源为GT69-1 ($Th=1.274\%$)。

设用低能谱段(0.2386和0.352兆电子伏)与用高能谱段(2.614和1.764兆电子伏)的分析结果分别为 x_i 、 y_i 。令 $f = \sum x_i / \sum y_i$ ，则对于钍 $f=0.940$ ，而对于镭 $f=0.966$ 。可见低能谱段的钍、镭结果均系统偏低。实验证实，在测量上述高含量样品时，低能谱段与高能谱段均无峰位漂移现象。这就排除了上述结果是由于所谓计数率效应所造成的系统误差的可能性。

(2) 消除漏计

高含量的镭、钍样品，由于测量时仪器的计数率高而容易产生漏计。如果在测量中出现的漏计现象未引起我们注意并设法消除它，那么得出的镭、钍结果往往令人费解。例如，在有严重漏计的情况下，用0.2386和0.352兆电子伏的光峰分析时，由于钍道漏计甚过镭道漏计，故随着样品积累时间的增加 Th 结果越来越低而 Ra 结果却可能高很多。

能谱分析实际上是分析脉冲高度的分布，这是不能用简单的数学公式进行漏计校正的。因为在脉冲重迭很厉害的情

表3 用不同的 γ 能谱段测量的高含量钍、镭结果

分析项目	$Th, \%$		$Ra, \%$	
	低能谱段	高能谱段	低能谱段	高能谱段
A-1	2.295	2.324	4.113	4.384
A-2	2.283	2.330	4.060	4.384
A-3	2.248	2.389	4.111	4.370
A-4	2.368	2.506	4.079	4.341
A-5	2.330	2.364	4.034	4.395
A-6	1.915	1.970	3.418	3.453
A-7	1.923	2.016	3.314	3.408
A-8	1.958	2.045	3.425	3.498
A-9	1.908	2.030	3.392	3.427
A-10	1.865	2.019	3.340	3.406
A-11	2.030	2.123	3.778	3.715
A-12	2.053	2.106	3.685	3.713
A-13	2.048	2.164	3.663	3.723
A-14	1.993	2.135	3.737	3.753
A-15	2.020	2.265	3.725	3.622
A-16	2.243	2.479	3.710	3.980
A-17	2.200	2.551	3.694	3.903
A-18	2.188	2.453	3.781	4.010
结果总和	37.868	40.269	67.059	69.485

注：低能谱段 γ 能谱的结果是在没有漏计的情况下测得的。

况下，不仅脉冲数目减少，而且脉冲高度也在变化。当漏计严重时所测出的谱线可能完全失真。所以，在分析高含量样品时，首先应检查仪器工作时是否有明显漏计。

前级放大器（或跟随器）、主放大器、脉冲高度分析器及定标器等整个电子学记录系统的任何一部分、辐射探测器及其接入线路都不允许有明显的漏计（一般说来，脉冲高度分析器较其它部分容易漏计）。其检查方法简述如下。

检查脉冲高度分析器是否漏计。将脉冲高度分析器置于积分工作状态，将阈值置于作能谱分析时所选用的低能处，然后测得分析样品的积分计数率。按仪器说明书中所载的分辨时间计算漏计程度，一般可要求漏计不超过1%。

比较样品不同密封时间的测量结果。如前所述，当漏计严重时，样品不同密封时间的测量结果相差很大。样品的射气系数越大，此现象越明显。

降低计数率，检查原来是否漏计。可将样品与晶体的距离加大几个厘米或更换小样品盒以降低计数率。从而使漏计程度大为降低。然后再进行分析。若与原来的结果相近，则说明原来无明显漏计现象。

测样品时，若装置漏计超过1%，则应采取减小探测装置和电子记录系统的不灵敏时间或降低探测效率减少样品量等方法予以消除。

(3) 结论

当样品中的 $U + Th > 2\%$ 时最好采用高能谱段测量，这一方面可减少 U 、 Th 本身对 γ 射线的自吸收从而保证测量的准确度；另一方面又可避免用低能谱段测定时极易出现的漏计现象。而且用高能谱段测定高含量样品时，计数率低的缺点此时已不复存在。

4. 用 γ 能谱法测定矿石中的铀、镭、钍

当需要同时测定铀、镭、钍的含量时，或者测定严重偏铀样品的镭、钍含量时，(15) 式就不适用了，这时需用 (1) 式的完整三元方程，按 (10) 式或 (10') 式计算结果。镭道和钍道的选择与测量已如前述，本节和下节将重点讨论铀道的选择与测量。

各系数可通过测量纯铀源、纯钍源和铀-镭源确定,也可通过测量多个不同性质的标准源,用最小二乘法确定系数最佳值^[12]。

由于铀组的 γ 射线强度弱,且能量较低,所以干扰因素多。

铀道光峰的能量可以选在0.0914兆电子伏(UX_1)。为了提高测铀的精度,必须尽量增大 a_3/b_3 之值。曾用1.0英寸厚的NaI(Tl)晶体,样品面密度约1.8克/厘米²,相对道宽 $< 5\%$,此时测得的 a_3/b_3 可达0.32, a_3/c_3 可达0.89。

铀道也可用0.185兆电子伏(^{286}U)的光峰。它受化学成分的影响较0.0914兆电子伏光峰为轻。但镭、钍在此处的计数率仍较高。我们采用厚1.0英寸的NaI(Tl)晶体,样品面密度约1.8克/厘米²,相对道宽约35%,此时 $a_3/b_3 \approx 0.2$, $a_3/c_3 \approx 0.8$;若相对道宽减小至10%左右,则 a_3/b_3 可提高到0.3以上。

用厚的NaI(Tl)晶体对高能 γ 射线探测效率高,但由于散射的影响对测量低能 γ 射线干扰大。为解决这一矛盾测量时可分别采用厚度不同的两块晶体。如有的工作者用 $\phi 1.75 \times 0.25$ 英寸的晶体测量铀道,其能量为52—108千电子伏(其中包括 UX_1 的0.063和0.0914兆电子伏两个明显的光峰);用 $\phi 3 \times 3$ 英寸晶体测镭道(能量为0.560—0.660兆电子伏)和钍道(能量为2.46—2.76兆电子伏)^[12]。样品的面密度约0.8克/厘米²,此时 a_3/b_3 约0.28, a_3/c_3 约0.54。

近年来Ge(Li)半导体探测器的迅速发展,使 γ 能谱测铀的工作又有了新的发展。由于Ge(Li)探测器的能量分辨率可达几个千电子伏。所以排除干扰能力强,在某些情况下可直接计算光峰面积即可求出样品的含量。如有的工作

者用总是与 ^{238}U 处于平衡的 ^{234}Th (UX_1) 的 0.063 兆电子伏光峰来测定铀含量^[13]。但该方法计数率太低，每个样品的测量时间较长。

5. 用 β - γ 能谱法测定矿石中的铀、镭、钍

(1) 用 β - γ 能谱法的优点

用 γ 能谱法分析铀、镭、钍时很难获得大的 a_3/b_3 值，这是因为铀组本身的 γ 辐射较弱所致。若将铀道的 γ 射线改为测 β 总量，则 a_3/b_3 将会有较大的提高。作为 β 探测器的塑料闪烁体下面附有一块 0.5 毫米左右的 Al 屏，以减小 ^{40}K 和 RaE 的 β 射线对测量铀的影响^[14]。

为了使测量装置工作稳定可靠，必须使 β 探测器的工作点选在计数率-高压坪曲线中坪斜较小的地方。根据我们的经验，在 300 伏的坪长内，坪斜小于 10%/100 伏，而其中有的地方坪斜可小至 3—5%/100 伏。这样，铀道的系数可保持一年多不变。

与单纯的 γ 能谱法不同，由于 β 探测器也记录了一部分 γ 射线，而铀组的 γ 射线所占比例甚小，故此时镭组和钍系的射线对（测量铀道时）铀组射线的干扰不能只用 a_3^0/b_3^0 和 a_3^0/c_3^0 来衡量，而应该用 $a_3^0/(b_3^0 + b_3^0 P)$ 和 $a_3^0/(c_3^0 + c_3^0 P)$ 来衡量（各系数的物理意义见下文）。

我们曾用 $\phi 100 \times 0.3$ 毫米的 ST-402 塑料闪烁体与 GDB-100 光电倍增管配合，用 275* 硅油作光耦合，下面附加 0.473 毫米厚的 Al 屏，样品面密度为 1.4 克/厘米²。此时测得 $a_3^0/(b_3^0 + b_3^0 P) = 0.768$ ， $a_3^0/(c_3^0 + c_3^0 P) = 2.17$ 。可见镭组和钍系对测铀的干扰比用 γ 能谱法大为降低。

用 β - γ 能谱法测定样品的铀、镭、钍，其结果可用与 (10)

相似的公式和(11)式计算。但由于 β 探测器或多或少地记录了一部分 γ 射线，故只能间接地获得 β 射线的总计数率 I^β

$$I^\beta = I^{\beta+\gamma} - I_{\pm}^\gamma$$

式中 I_{\pm}^γ 为上探测器(β 探测器)所记录的 γ 射线计数率， $I^{\beta+\gamma}$ 为上探测器所记录的总计数率($\beta + \gamma$)。

I_{\pm}^γ 的确定有直接测定和间接计算两种方法，而测定铀含量时又有样品密封与样品不密封之分，下面分别加以介绍。

(2) 直接测定 I_{\pm}^γ

将装好的样品置于 β 探头下面测量 $I^{\beta+\gamma}$ ，然后再在样品与 β 探头间加5—6毫米的Al屏吸收 β 射线以测量 γ ($I_{\pm 1}^\gamma$)。设该Al屏对 γ 射线的吸收率为 K ，则有

$$I^\beta = I^{\beta+\gamma} - I_{\pm 1}^\gamma = I^{\beta+\gamma} - \frac{I_{\pm 1}^\gamma}{1-K} \quad (22)$$

K 值通过实际测量来确定：先将该Al屏(β 吸收屏)加在样品上测 γ 计数率 $I_{\pm 1}^\gamma$ ，然后再用一块厚度与它一样的Al屏盖在第一块Al屏上测量 $I_{\pm 2}^\gamma$ ，则

$$K = \frac{I_{\pm 1}^\gamma - I_{\pm 2}^\gamma}{I_{\pm 1}^\gamma} \quad (23)$$

K 值对于纯钍、铀-镭平衡及偏镭样品相差不大，而对于纯铀的样品则比前者大一倍左右。由于严重偏铀样品在实际工作中遇到的并不多，且在具体测量样品时只能用一个 K 值，所以 K 值取纯钍与铀-镭平衡样品所测之数的平均值为宜。 K 值不仅与Al屏厚度有关，而且与 β 探头的组成(主要是闪烁体的性质)和样品的密度有关。前述的 β 探头，用

5.75毫米的Al屏吸收 β 射线,对于面密度约1.4克/厘米²的样品其 γ 校正系数 $1/(1-K) \approx 1.07$ 。对于面密度约3.5克/厘米²的样品 $1/(1-K) \approx 1.08$ 。GP-I型单道能谱仪原配的铅室 β 探头与样品距离较近,无法放置Al质吸收屏。为此可采用0.7毫米左右的Pb屏作 β 吸收屏,其 γ 校正系数约1.17。

样品的测量步骤是:首先用 β 探头记录样品的 $I^{\beta+\gamma}$,然后加 β 吸收屏测 $I_{\pm 1}^{\gamma}$;与此同时用 γ 能谱仪分别测量镭道和钍道的 γ 计数率 I_2 和 I_1 。将所测数据代入下列方程组

$$\begin{cases} I_1/P = a_1U + b_1Rn + c_1Th \\ I_2/P = a_2U + b_2Rn + c_2Th \\ I^{\beta+\gamma} - I_{\pm 1}^{\gamma}/(1-K) = a_3^{\beta}U + b_3^{\beta}Rn + c_3^{\beta}Th \end{cases} \quad (24)$$

其解的表达式与(10)式相似,只是将 $[I^{\beta+\gamma} - I_{\pm 1}^{\gamma}/(1-K)]$ 代替 I_3/P 一项即可。

系数的测量步骤和条件与样品的测量步骤和条件相同。例如,能谱仪测钍道计数率 I_1 时 β 探测器测 $I^{\beta+\gamma}$,能谱仪测镭道计数率 I_2 时 β 探测器测 $I_{\pm 1}^{\gamma}$ 。测系数和测样品时一定要按此程序。否则由于 β 吸收屏的散射作用会得出错误的分析结果。分别用纯铀源、铀-镭源和纯钍源测量后即可确定方程式(24)中的9个系数。

(3) 间接计算 $I_{\pm 1}^{\gamma}$

为了提高工效,不一定每个样品都直接测得 $I_{\pm 1}^{\gamma}$,而是通过计算确定 $I_{\pm 1}^{\gamma}$

$$I_{\pm 1}^{\gamma} = (a_1^{\gamma}U + b_1^{\gamma}Rn + c_1^{\gamma}Th)P \quad (25)$$

式中 a_1^{γ} , b_1^{γ} , c_1^{γ} 分别为 β 探头所记录的单位重量、单位含量的 U , Rn , Th 的 γ 计数率。它们的数值可通过测量纯铀源、铀-镭源和纯钍源确定。测量时仍需加 β 吸收屏并经

$(1-K)^{-1}$ 的校正。此时，对于不同性质的标准源应用它们各自的 K 值。于是，关于 β 探头所记录的计数率（铀道）有如下关系

$$I^{\beta+\gamma} = a_3^{\beta}U + b_3^{\beta}Rn + c_3^{\beta}Th + (a_3^{\gamma}U + b_3^{\gamma}Rn + c_3^{\gamma}Th) P \quad (26)$$

方程式 (1) 相应变成如下形式

$$\begin{cases} I_1/P = a_1U + b_1Rn + c_1Th \\ I_2/P = a_2U + b_2Rn + c_2Th \\ I^{\beta+\gamma} = (a_3^{\beta} + a_3^{\gamma}P)U + (b_3^{\beta} + b_3^{\gamma}P)Rn + (c_3^{\beta} + c_3^{\gamma}P)Th \end{cases} \quad (27)$$

令 $a_3^{\beta\gamma} = a_3^{\beta} + a_3^{\gamma}P$, $b_3^{\beta\gamma} = b_3^{\beta} + b_3^{\gamma}P$, $c_3^{\beta\gamma} = c_3^{\beta} + c_3^{\gamma}P$, 则方程式 (27) 的解与 (10) 式相似，只不过用 $I^{\beta+\gamma}$ 代替了 (10) 式中的 I_3/P 。注意， $a_3^{\beta\gamma}$, $b_3^{\beta\gamma}$, $c_3^{\beta\gamma}$ 是与样品重量 P 有关的量，这点与方程 (1) 中的 a_3 , b_3 , c_3 不同。

该方法与前述方法相比，测量样品时不需再加一块 β 吸收屏来测 I_1^{γ} 。若 I_1 和 I_2 可同时测量（如用双道能谱仪）则工效可提高一倍。不仅如此，它还可避免由于纯铀样品、纯钍样品、铀-钍样品之间的 K 值不同所造成的误差。缺点是计算较复杂。

(4) 样品不密封

为了减少射气对测 β 的影响可在测量时加纸罩，或将 β 探头所配的 0.5 毫米左右的 Al 屏用同样厚度的 Al 盒盖代替，在测量样品时再盖上。这种方法的测量步骤是：在样品未密封时进行第一次测量，测出 U 和 Rn_1 ，而后经密封 3-7 天再进行第二次测量，测出 Rn_2 和 Th ，再按 (12) 式算出 Ra 。

用此法测定的铀含量受样品的钍射气系数的干扰。钍系

中主要的 β 辐射体是 ^{228}Ac (MsTh_2) , ^{212}Pb (ThB) , ^{212}Bi (ThC) 和 ^{208}Tl (ThC'') 。当钍系处于长期平衡时, 其中 ^{228}Ac 的 β 射线强度约占整个钍系的1/3以上, 当 β 探测器加0.5毫米Al屏后(为了减小 ^{40}K 和RaE对测铀的干扰), 所记录到的 β 总计数中 ^{228}Ac 的 β 辐射约占1/5。若待测样品的钍射气系数大于纯钍标准源的射气系数, 则会使测定的铀含量偏高, 其偏高的程度不仅与样品的钍射气系数大小有关, 而且还与 Th/U 之值有关。

当 Th 道选取 Tn 子体的光峰时, 若纯钍标准源的射气系数接近零, 样品不密封时测定的含量为 U_1, Rn_1, Tn_1 , 而经过3—7天密封后测定的含量为 Rn_2, Th (此时不再测量铀道)。即通过两次不同时间的测量不仅可以确定样品的镭、钍含量, 而且还可以确定在该条件下(第一次不密封测量时的温度、湿度、样品密度等条件)样品的钍射气系数。只要能定量地确定 ^{228}Ac 的 β 计数率, 即可对第一次测定的铀含量 U_1 进行校正, 以得出准确的 U 。

(5) 样品密封

将样品密封3小时后即进行第一次测量, 以测定 Rn_1 , 然后密封3—7天至钍系各元素已达平衡时再进行第二次测量, 求出 U, Rn_2, Th , 再按(12)式算出 Ra 结果。从放射性衰变理论上讲, 这一方法比不密封测铀要合理, 但由于样品盒下方的样品密度大于样品盒上方的样品密度, 于是射气向样品盒上方聚集, 这会使 I^{B+7} 测量偏高, 从而使铀含量系统偏高。曾用17个铀含量为0.03—0.06%的铀钍混合样品作实验, 密封3天后测量的 U 结果比化学分析结果系统偏高4.7%。为克服这一缺点曾将样品倒置积累, 待测量时再正置过来, U 结果又会比化学分析结果系统偏低。为了减少射

气聚集的影响，可采取折中的办法：密封时倒置积累，测量铀时提前一定的时间正置样品，目的是使样品盒内部的射气尽量分布均匀些。

密封测铀中应该引起我们足够重视的另一个问题是样品盒盖对 β 射线的吸收。不同盒盖之间的差异将使测量结果的准确性下降。为此必须经过严格的挑选。我们用自制的醋酸铀酰源经放射性测量选择盒盖，每分计数在 8×10^4 以上，不同盒盖之间的计数控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。

(6) 近似计算法

欲解一个完整的三元方程组 (27)，其计算步骤较繁。在大量分析样品、装置系数经常变动而又无电子计算机的情况下，这是一个较重的负担。如前所述，由于铀组 γ 射线在钍道和镭道的贡献很少，故在一般情况下可以忽略。这时 (27) 式中的 $a_1 = 0$, $a_2 = 0$ ，一个完整的三元方程组即简化成一个二元方程组和一个三元方程，其镭（钍）、钍的含量即可按 (16) 式算出，而铀的含量可按铀道的三元方程算出。用纯钍源和铀-镭平衡源测定 b_1, b_2, c_1, c_2 。应当指出，此时测得的 b_1, b_2 实际上包括了镭组和铀组（所占比例很小）的 γ 射线在钍道和镭道的贡献。这样可使计算工作大为简化。由此所造成的钍（镭）、钍含量的偏差可由下式近似估计

$$\begin{cases} \delta Th = Th' - Th = p(U - Rn) \\ \delta Rn = Rn' - Rn = q(U - Rn) \end{cases} \quad (28)$$

式中 Th, Rn 分别为按 (10) 式计算钍、钍的结果， Th', Rn' 分别为按 (16) 式计算钍、钍的结果。

当钍道和镭道分别取 0.2386 和 0.352 兆电子伏的光峰时， $p \approx 0.04$, $q \approx -0.008$ 。可见偏铀样品的钍含量会系统偏

高，而镭含量的偏差较小。当钍道和镭道分别取 2.614 和 1.764 兆电子伏的光峰时， $p = 0$ ， $q \leq 0.003$ 。由此可见用高能谱段测定钍、镭含量时，因忽略铀组 γ 射线所造成的偏差甚微。

由于镭、钍含量的偏差也会对铀含量的测定有影响，所以当用 γ 能谱法测定时有

$$U = \frac{1}{a_3} (I_3/P - b_3 R_n - c_3 Th)$$

$$\delta U = -\frac{b_3}{a_3} \delta R_n - \frac{c_3}{a_3} \delta Th \quad (29)$$

因为 $b_3/a_3 \approx 3 - 5$ ， $c_3/a_3 > 1$ ，所以用 γ 能谱法测定铀、镭、钍含量而作上述的近似计算时，由此所造成的铀含量的偏差一般是较大的。

若用 β - γ 能谱法测定铀、镭、钍，则有

$$\delta U = -\frac{b_3^\beta + b_3^\gamma P}{a_3^\beta + a_3^\gamma P} \delta R_n - \frac{c_3^\beta + c_3^\gamma P}{a_3^\beta + a_3^\gamma P} \delta Th \quad (30)$$

我们用前述的装置测量， $(b_3^\beta + b_3^\gamma P)/(a_3^\beta + a_3^\gamma P) \approx 1.3$ ， $(c_3^\beta + c_3^\gamma P)/(a_3^\beta + a_3^\gamma P) \approx 0.46$ 。可见铀的偏差比用 γ 能谱法时大为降低。若钍道和镭道分别取 0.2386 和 0.352 兆电子伏的光峰，考虑到 δR_n 和 δTh 一正一负以及 p 和 q 的具体数值，可以认为，用本节所述的近似算法对铀含量所带来的偏差一般是很小的。

(7) 结论

1. 为了利用闪烁探头测定铀含量，使用 β - γ 能谱法比 γ 能谱法的精度高。

2. 用间接计算 I_{U}^{e} 的方法比直接测定 I_{U}^{e} 的方法好，因为前者测定程序简单、工效高。

3. 测铀时样品不密封比样品密封好，因为前者可对铀含量进行定量校正以消除钍射气系数的影响；而后者由于射气向样品盒上方聚集以及不同盒盖之间的厚度差异会使测定的铀含量的可靠性降低。

4. 用一个二元方程组确定样品的镭、钍含量可使整个计算过程大为简化，但对于严重偏铀样品须进行含量校正；若钍道和镭道分别用 2.614 和 1.764 兆电子伏的高能谱段测量，则不必进行含量校正。

总之，为了同时测定矿石中的铀、镭、钍，用 β - γ 能谱法，间接计算 I_{U}^{e} ，测铀时样品不密封，钍道和镭道用高能谱段测量，这一程序是较好的方法，它既可保证结果的准确度较高，又有较好的精度。

四、若干影响因素

有些影响因素在前面的测量方法中已经提及，本节将对其它一些影响因素作简单介绍。

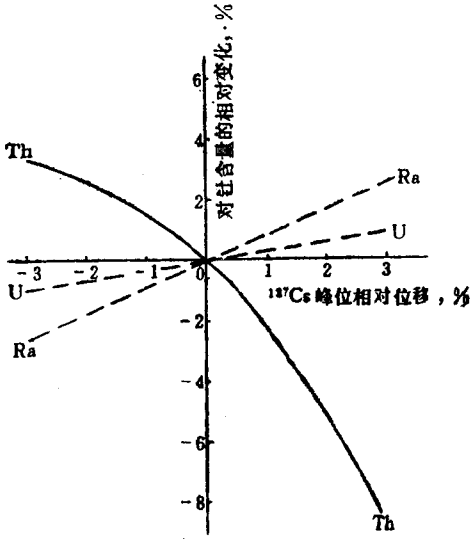
1. γ 谱仪的峰位漂移对测定结果的影响

光电倍增管的高压、放大器的放大倍数、脉冲高度分析器的甄别阈等等的变化，均可使待测的光峰位置发生漂移。这里着重讨论峰位漂移对测定结果的影响。 γ 能谱仪通常用 ^{137}Cs 源 ($E_{\gamma} = 0.6616$ 兆电子伏) 的光峰位置来调整和检查。所以此处“峰位漂移”系指测样品时 ^{137}Cs 峰位对于测系数时的相对变化。

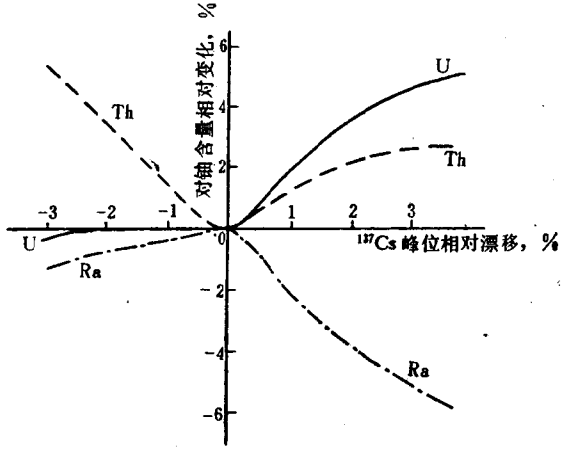
峰位漂移会使分析结果出现系统误差。以 GP-I 型单道 γ 能谱仪为例,用 $\phi 50 \times 50$ 毫米的 NaI(Tl) 晶体测 γ , 20 支 J305 计数管组成环状置于倒凹形样品杯外围以探测 β 。铀道、镭道和钍道分别为 β 总计数、0.352 和 0.2386 兆电子伏的 γ 。后两者相对道宽分别为 11%, 16%。此时峰位漂移对分析 U, Ra, Th 含量的影响示于图 7。由图 7 可见,若 ^{137}Cs 峰位往高能方向漂移 3%, 则纯钍标准样品的钍含量偏低 9%, 且会测出相当于钍含量的 1%, 2% 的假 U、Ra 含量; 铀-镭平衡标准样品的铀含量偏高 4% 以上, 镭含量偏低 5%。当峰位往低能方向漂移时变化要小一些, 此时钍含量偏高, 镭含量仍偏低, 铀含量变化很小。值得注意的是, 由于峰位的漂移, 在纯钍样品的测量中得到了假的铀、镭含量, 在铀-镭平衡样品中测得了假的钍含量。这样, 在铀、钍混合比例不同的样品中就出现了更复杂的情况: 可能因变化相抵消而使某一元素的测定结果受峰位漂移的影响比图 7 中给出的要小, 但不可能三个元素同时都如此; 更可能的是因变化相叠加而使结果的变化比图 7 中给的要大。因此, 峰位的漂移将使测量结果产生系统误差。若一般分析中要求系统误差小于 $\pm 5\%$, 则必须把 γ 谱仪的 ^{137}Cs 峰位的相对漂移控制在 $\pm 1\%$ 左右, 最大不得超过 $\pm 2\%$ 。

2. 干扰讯号的影响

频率不高的干扰脉冲讯号, 只要其脉冲幅度不在谱仪测量的甄别阈范围内, 一般对测量不会造成影响。但是高频干扰讯号, 即使讯号幅度不在谱仪的甄别阈范围内, 也将使 γ 能谱曲线严重的畸变, 影响谱仪的正常工作。例如, 当 GP-I 型单道 γ 能谱仪的铅室底无屏蔽时, 由探头感应接收了无线



(a)



(b)

图7 峰位漂移对测定结果的影响
(a)纯钍标准样品; (b)钍-镭平衡的无钍标准样品。

电高频载波讯号，尽管幅度在测量的甄别阈以下，可是由于干扰讯号的叠加使脉冲幅度的分布发生畸变，谱中的峰变钝，峰位计数率下降。如图8所示，ThB峰位（0.2386兆电子伏）的计数率约降低7%。因此，在 γ 能谱分析中，必须使谱仪各部分有良好的屏蔽和接地。

3. ^{40}K 的影响

^{40}K 既是 β 辐射体，又是 γ 辐射体。它的 β 射线最大能量为1.33兆电子伏， γ 射线能量为1.46兆电子伏。一般的岩石中钾含量约为1—6%，而 ^{40}K 在钾总量中所占的比例是个固定值。在 γ 能谱分析中若测量的 γ 能量低于1.46兆电子伏，则 ^{40}K 的 γ 射线会在计数中有贡献。在测量 β 总量时欲完全屏蔽掉 ^{40}K 的 β 射线也是困难的，因为这样做会大大地降低 β 计数率。

在测量低含量的铀、镭、钍时（ $<0.05\%$ ）应考虑 ^{40}K 的影响。例如用 β - γ 能谱法测量样品时，当用0.475毫米Al作 β 探头的屏蔽以降低 ^{40}K 对测铀的影响，用 $\phi 100 \times 0.3$ 毫米的ST-402型塑料闪烁体探测 β 射线，镭道和钍道分别选

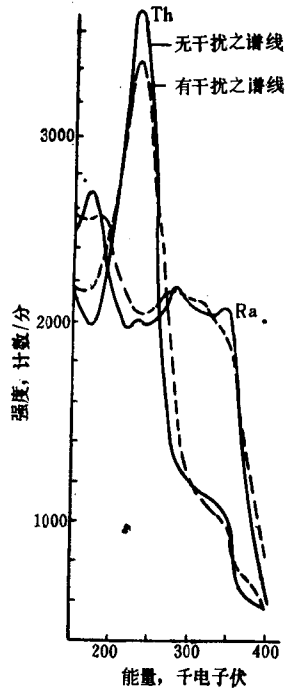


图8 高频电磁波对 γ 谱线测量的影响

在0.352和0.2386兆电子伏，相对道宽分别为20%和30%，样品盒深10毫米，用纯 K_2SO_4 测定钾的影响，用(11)式和(22)式计算它的铀、镭、钍“含量”，则1%的钾相当于样品中含有 $7.2 \times 10^{-4}\%$ 铀， $2.5 \times 10^{-6}\%$ 镭， $7.5 \times 10^{-6}\%$ 钍。所以在分析低含量的样品时需经钾含量的校正以保证测量的准确度。若已知样品的钾含量时可直接进行校正。若样品中的钾含量未知，且对分析结果不作过高的要求时，对于一般的矿石样品可以统一用3%的钾含量进行校正。

测量低含量的样品，要取得满意的准确度，可将 ^{40}K 作为另外一个待测元素来分析，这时方程式(11)将变为一个四元方程组， ^{40}K 道的 γ 射线能量选在1.46兆电子伏^[15]。

4. 钍射气系数的影响

只有整个钍系处于长期平衡时才能用一个三元方程组来确定矿石样品中的铀、镭、钍。但这一条件在许多情况下都只是一个近似，有时甚至相差很远。由于样品的钍射气系数不等于零，而钍射气 T_n 以前的 $^{228}Ac(MsTh_2)$ 是一个强的 β 、 γ 辐射体，在用能谱分析矿石时钍道的光峰选的都是 T_n 的子体产物的 γ 辐射，在某些情况下，这将会给测定结果带来一定的误差。下面讨论它对测定钍和镭的影响。

(1) 对测钍的影响

钍射气 T_n 的子体中以 ThB 的半衰期(10.64小时)最长，样品密封3.1天才能保证 ThB 积累达99%以上。若样品的钍射气系数小于50%，则样品密封2.7天即可保证 ThB 积累达99%以上。钍标准源是处于长期平衡状态的，当样品密封3天以上再行测定钍含量时，由于钍射气系数的影响所造成的偏差(系统偏低)小于1%。

(2) 对测镭的影响

利用(12)式确定镭含量时，由于测定 Rn_1 时一般是在钍系达到长期平衡以前，这样 ^{228}Ac 的 γ 辐射对测定 Rn_1 的结果可能有影响。为了讨论这一影响，特测定了刚制成三天的纯 ^{228}Ac ($^{228}\text{Ra} + ^{228}\text{Ac}$) 源的 γ 谱，结果绘于图 9 ($E_\gamma > 200$ 千

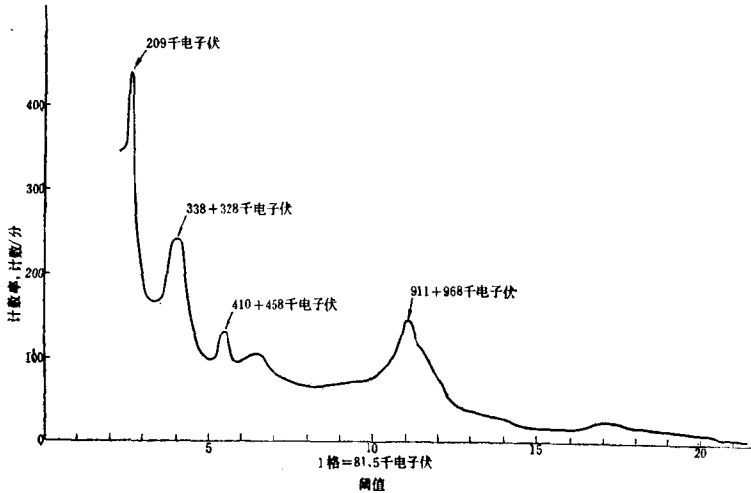


图 9 ^{228}Ac 新制剂 (放化提纯后三天半内测量) 的能量高于 200 千电子伏的 γ 能谱图

电子伏)。测量时所用晶体为 $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI(Tl)。从图 9 可清楚地看出，在能量大于 200 千电子伏的范围内， ^{228}Ac 有 209 千电子伏，328 + 338 千电子伏，410 + 458 千电子伏，911 + 968 千电子伏等 4 个明显的光峰。若镭道的光峰选在 0.352 兆电子伏，钍道光峰选在 0.2386 兆电子伏，则 ^{228}Ac 的 328 + 338 千电子伏的光峰对于测定 Rn_1 是个干扰。设达到长期平衡后纯钍源在钍道和镭道的计数率分别为 $I_1(\text{Th})$ 和

$I_2(\text{Th})$ ，而 ^{228}Ac 源的计数率分别为 $I_1(^{228}\text{Ac})$ 和 $I_2(^{228}\text{Ac})$ ，则 $I_1(\text{Th})/I_2(\text{Th}) = 3.62$ ，而 $I_1(^{228}\text{Ac})/I_2(^{228}\text{Ac}) = 0.82$ 。这两个比值即相差3倍以上，说明在装样后立即测定 Rn_1 时将整个钍系作为一个未知数来处理是不科学的。由上述数据分析可知，这会使 Rn_1 偏高，从而使 Ra 结果偏低，特别是对于钍射气系数大且 Th/Ra 大的样品更加明显。

为了减小这一偏差，可在样品密封三天后与测钍同时测 Rn_1 ，但这会降低测 Ra 精度并延长了生产周期。从图9中可见，在能量大于1兆电子伏的范围内， ^{228}Ac 无明显的光峰。所以当用高能谱段(2.614兆电子伏，1.764兆电子伏)测 Ra ， Th 时，钍射气系数对于测定镭含量影响较小。这也是采用高能谱段的优点之一。

5. “频率效应”的影响

在分析高含量样品时，要特别注意“频率效应”它是在高计数率情况下谱仪的峰位发生漂移的现象。造成这一现象的原因可能是多方面的，下面仅介绍其中常见的几种情况。

在一般的能谱仪中，脉冲高度分析器的输入端或其前面放大器、整形器等单元的输入端可能接有单向钳位电路（直流恢复器），以保证在高计数率的情况下输入脉冲的正或负的顶点始终位于某一定的直流电位。当没有钳位电路或其性能不佳时，在高计数率的情况下可能会造成峰位漂移，即此时有“频率效应”存在。如图10所示的整形器，当没有钳位二极管时，用发生器输入幅度为+30伏宽为2微秒的矩形脉冲，当频率小于500赫兹时输出为+20伏，当输入频率增加到10000赫兹时输出降至+14伏。从频率和脉冲宽度的数值可知，此时不会发生脉冲重叠现象。幅度之所以降低，是因

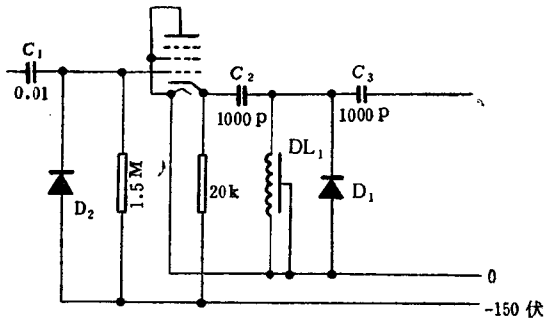


图10 带有单向钳位电路的整形器

为在高频情况下电容 C_1 上的负电荷来不及放掉，从而使栅极电位降低。当加入钳位二极管 D_2 后，栅极电位始终接近 -150 伏。此时输入脉冲频率由 50 赫兹增加到 10000 赫兹，输出幅度无变化。

当上述的“频率效应”存在时，显然，高含量样品是分析不准的。由于峰位的计数率较高且变化较陡，所以当峰位漂移时计数率会相应地降低。但这与前面所说的漏计现象是不同的，尽管有时在一起出现。

闪烁计数器（包括其输出电路）也有一定的不灵敏时间。在不灵敏时间内所到来的讯号有可能未被记录，也有可能记录该讯号并输出一个幅度与其不相应的脉冲。前者则造成漏计，后者则造成峰位的漂移，亦即出现“频率效应”。

有的光电倍增管本身也会造成“频率效应”。文献〔16〕指出，当计数率由 3000 计数/分增加到 12000 计数/分时，峰位的漂移可达 6% ，并且肯定不是由电子学设备造成而是由光电倍增管本身的特性所致。

6. 光电倍增管内空间电荷效应的影响

由于光电倍增管的总增益很大，所以在电流密度最高的阳极附近，有可能出现电子不能被阳极及时收集的状态，即所谓空间电荷效应。在能谱分析中，空间电荷效应的最大影响是破坏了能量线性，从而使测得的 γ 谱线变形。在能量线性遭到破坏时，为了鉴定是否是由于空间电荷效应所致，可根据空间电荷效应的其它特点来分析。

(1) 有空间电荷效应时的特点

1. 输出波形（包括脉冲宽度、上升时间等）随脉冲幅度而变化 对于大幅度的输出脉冲，其顶部变平缓，脉冲宽度加大，上升时间增加（图11）。当无空间电荷效应时，其输

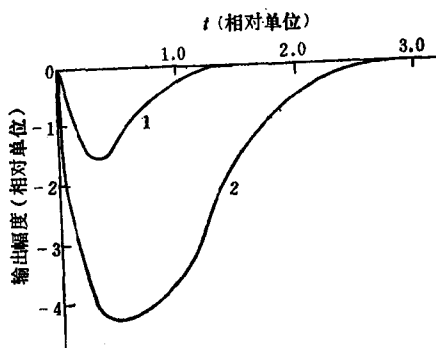


图11 光电倍增管内空间电荷效应对输出波形的影响

1——无空间电荷效应；2——有空间电荷效应。

出波形与幅度无关。

2. 输出脉冲幅度不再随高压的增加而指数地上升 由于大幅度脉冲的宽度加大，而总电荷量不变，故其幅度相

应地降低。当输入光脉冲强度一定时，光电倍增管输出脉冲的幅度与其所加高压的关系示于图12。

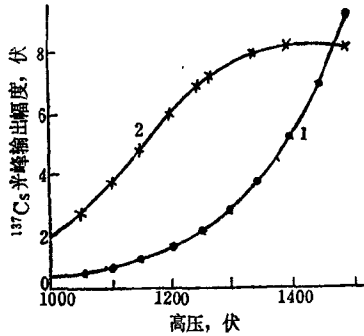


图12 输出幅度与高压的关系

1——无空间电荷效应；2——有空间电荷效应。

在其它条件相同时，空间电荷效应与人射粒子的能量（输入光脉冲强度）有关。对能量小于某一数值的人射粒子不会出现空间电荷效应，而且谱线的低能部分可能完全正常。若这个临界能量正好是661.6千电子伏，那么用 ^{137}Cs 测量分辨率时还可能得出小于5%的异常好的数值。这是由于大幅度脉冲刚刚被压低所造成的假相。

（2）消除空间电荷效应的措施

1. 降低光电倍增管的工作电压可使阳极附近的电流密度大为降低，从而消除空间电荷饱和状态。

2. 选择合适的分压线路可使光电倍增管在较高的电压下工作而不出现空间电荷效应。一般可要求靠近阳极的1—2个分压电阻成倍地加大。

五、几种常用自动稳定谱仪的方法

闪烁计数器（即晶体和光电倍增管）的温度稳定性约 0.5%/度，谱仪的其它部分（前置放大器和线性放大器的放大系数、甄别器的阈值、高压电源和低压电源）的稳定性，借助于现代电子技术可保持在 0.005%/度的水平上。可以认为，闪烁能谱仪中最不稳定的部分是闪烁计数器，它也是自动稳定装置的主要稳定对象。

常用的稳定装置可分为有附加参考源和无附加参考源两种。

1. 具有附加参考源的自动稳定装置

在这种稳定装置中采用附加参考源和比较电路。从参考源获得的标准讯号被分离并与给定值比较，这些量的差被转变为直流讯号，作用于系统的被调节部件。为了补偿系统的增益变化，通常将比较电路的输出讯号引进高压电源部分（调整光电倍增管的放大系数，见下文）、带有可调放大系数的放大器^[17]、分析装置的甄别器^[18]及光电倍增管的控制栅^[19]等。根据附加参考源的性质不同又可分为以下几种：

(1) α 源

以 GP-I 型单道 γ 能谱仪为例，其中设有 GP-I-M₂ 自动稳定单元。它是一种将比较电路的输出讯号引进高压电源部分的自稳装置。所用参考源是 ²³⁹Pu α 源。电路方块图示于图 13。

该装置将一个强度约为 0.05 微居里的 ²³⁹Pu α 源 ($E_{\alpha} \approx 5.1$ 兆电子伏) 直接置于所用 NaI (Tl) 晶体上（在包壳内

部)。由 α 粒子打到晶体上，所激发的光子经光电倍增管转换成电脉冲，再由前置放大器放大后输给自动稳定单元。自动稳

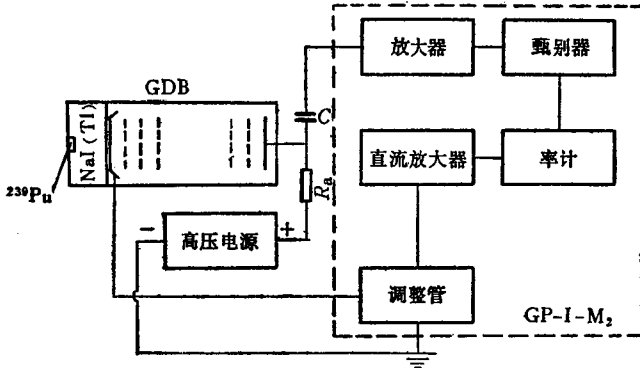


图13 GP-I 单道 γ 能谱仪自动稳定原理方块图

定单元由线性放大器、甄别器、率计、控制器(直流放大器)等部分组成。经线性放大器放大的讯号通过甄别器选择之后送入率计。在率计电路中形成积分电压，再经直流放大后输送到电压调整管。调整管的输出电压 $V_{调}$ 又与光电倍增管的工作电压 $V_{光}$ 串联到高压电源上。设高压电源的供电电压为 $V_{高}$ ，则

$$V_{光} = V_{高} - V_{调}$$

$V_{调}$ 的大小由率计的积分电压来确定。它的变化恰好与率计输入的脉冲频率成正比。工作时，GP-I-M₂ 中甄别器的阈值置于 ^{239}Pu 参考源积分谱线中斜率最大的位置，此时的自稳效果最好。

若由于某种原因使光电倍增管输出脉冲的幅度变小，则进入率计的脉冲数即减少，率计的积分电压降低， $V_{调}$ 随之减小， $V_{光}$ 即增大到使光电倍增管输出脉冲幅度恢复到原来的数值，从而达到了自动稳定的目的。注意， $V_{高}$ 的微小变

化也可引起 V_m 的相应变化。所以，此自稳装置亦能控制由于高压电源变化所带来的幅度变化。

这样的装置对于光电倍增管、高压及前置放大器的温度系数、老化等原因所引起的漂移能起到较好的稳定作用。但 ^{239}Pu α 射线所引起的脉冲幅度约相当于 2.5 兆电子伏的 γ 量子，因此不能测量接近或大于这一能量的 γ 射线。若采用加滤光片等其它的办法，可将 ^{239}Pu α 参考源的 γ 当量提高到 4 兆电子伏以上。此外 NaI (Tl) 晶体对 α 粒子和 γ 量子发光的温度系数不同，所以在温度变化较大时补偿效果不好。

(2) γ 源

为了减小由于温度变化所引起的峰位漂移，有的工作者采用了 γ 辐射源作为参考源。

其装置由两个 γ 探测器组成，分别作测量和补偿用，它们置于同一个铅室中以保持有相同的环境温度。补偿探测器用一个 ^{137}Cs γ 源作参考源，它与测量探测器之间隔以铅屏以防止互相干扰。其电路特点是测量讯号和补偿讯号分别进入各自的处理电路，互不干扰，并分别装有调整、指示装置。由补偿探测器所形成的调整电压 V_m 引进高压部分，这点与 GP-I 的控制方法相同。

两个探测器和它们的电子线路，要经过事先仔细选调配对，特别是应作温度实验，使两者的温度效应基本相同。

采用上述措施后，仪器稳定性显著提高。当 ^{137}Cs 光峰在 8—9 伏，道宽 200 毫伏时，其稳定性为：小于 100 毫伏/10 度，小于 100 毫伏/8 小时。

此法的优点是温度补偿效果好，且对测量探测器的本底和分辨率无不良影响。缺点是设备比较复杂庞大，对于光电倍增管的疲劳效应、电子元件性能的变化等因素引起的漂移

不能起到补偿作用。

(3) 光源

用小灯管或气体放电装置作光源，以产生等强度光脉冲照射光电倍增管的光阴极作为补偿讯号。这种方法结构较复杂并需对光束仔细稳定。目前已有用结构较简单的 GaF 注入二极管 (инжекционный диод) 作脉冲光源的自稳装置，它可用于野外测量装置。

注入二极管装在位于光电倍增管和闪烁体中间的有机玻璃光导的侧面深部。用一个脉动电压发生器来注入载流子以使二极管发光。参考光脉冲幅度高于被测谱 γ 量子最大能量相应的脉冲幅度。发生器是一个间歇振荡器，产生持续时间约 2 微秒的矩形脉冲，上升到 0.7 的脉冲前沿为 0.06 微秒，这与 NaI (Tl) 晶体的闪烁时间接近。用比较电路的输出讯号来控制谱仪甄别器的阈值。这样的自稳装置可用于测量能量范围宽的 γ 辐射，仪器的能量标度漂移为 $\pm 0.25\%$ [20]。

一般说来带有附加参考源的自稳装置本底增高，分辨率变坏。除用两个 γ 探头的自稳装置外，对于晶体的温度系数补偿效果较差。

2. 无附加参考源的自动稳定装置

(1) 利用被测射线能谱本身进行稳定

以 FH-436G1 型流线单道谱仪为例。这是一种用被测射线能谱本身进行自稳的装置。为了稳定能谱峰位，在单道脉冲幅度分析器的上、下甄别器之间插入一个与下甄别器完全相同的中甄别器。用这三个甄别器将谱峰分为两个区域，总计数就是上、下甄别阈所夹的面积。在开始测量时，调节中甄别阈，使上半道和下半道的计数相等。当峰位向上漂移

时,上半道计数就大于下半道的计数。上半道和下半道的输出脉冲分别被送到相减率表的两个输入端。在相减率表的输出端就将给出已经变成直流的上半道和下半道的差讯号。这个差讯号再经直流放大器的放大,去控制一个与光电倍增管的光阴极相串联的调整管的内阻,从而改变光电倍增管的工作高压,使峰位产生一个相反的变化,达到稳峰的目的。

这种稳定方法避免了由附加参考源所带来的一些缺点,但它只适用于单个样品的长时间测量或待测样品的谱线形状基本不变的情况。

经改进后的类似方法也可用来对不呈光电峰的辐射谱加以稳定。它的工作原理是基于对两个甄别阈以上的计数率进行比较,其中之一选择在靠近辐射谱的上端(这里积分谱线的相对斜率较高),另一个则选在相对斜率较低的地方。这样的装置可对塑料闪烁探头进行自动稳定^[21]。

(2) 引进辅助电源进行稳定

对于聚焦型光电倍增管在较后面的一个打拿极中引进一个辅助电源作参考电压(可用干电池),这会造成极间倍增作用的相互补偿,当高压在某一范围内变化时(可达400伏)总倍增效应基本不变。此时光电倍增管仍工作于线性区,故能用于能谱分析^[22]。这种稳定方法简单易行,但它只能补偿高压电源的变化所带来的峰位漂移。

参 考 文 献

- [1] 复旦大学数学系,高等代数,第36—46页,上海科学技术出版社,1960年。
- [2] 见本汇编197页。
- [3] Ю. А. Цирлин, и др, ПТЭ, 1,56 (1962).
- [4] W. W. Managan, IRE Trans. Nucl. Sci., NS-9, № 3, 1,

- (1962)中译本: 浚, 柳正仁, 物理译丛, 第2期, 1 (1966).
- [5] M. E. Глобус, и др, *Изв. Тех.*, 12, 63 (1968).
- [6] 洪跃, 原子能, 第6期, 368 (1966).
- [7] 洪跃, 原子能, 第6期, 395 (1966).
- [8] M. H. Назарова, *ПТЭ*, 6, 49 (1962).
- [9] Б. М. Злобинский, *Безопасность работ с радиоактивными веществами*, СТР. 286, Москва (1961).
- [10] Bureau of Radiological Health and the Training Institute Environmental Control Administration, *Radiological Health Handbook*, p. 137, Rockville, Maryland, (1970).
- [11] 见本汇编134页。
- [12] J. M. Dominicos, *Nucl. Instru. Meth.*, 48, 1, 28 (1967).
- [13] О. В. Гобатюк, и др, *Атом. Энер.*, 35, 5, 352 (1973).
- [14] 见本汇编第1页。
- [15] А. Л. Якубович, и др, *Атом. Энер.*, 15, 3, 224 (1963).
- [16] R. D. Connor, et al, *Nucl. Instru. Meth.*, 6, 4, 337 (1960).
中译本: 福嘉, 原子能译丛, 第12期, 1056 (1961).
- [17] Ю. Ф. Бирюлин, и др, *ПТЭ*, 4, 100 (1970).
- [18] F. R. Lenkszus, et al., *IEEE Trans.*, NS-17, 1, 285 (1970).
- [19] И. Сабол, И. Шела, *ПТЭ*, 1, 42 (1974).
- [20] В. В. Бахтерев, и др, *ПТЭ*, 4, 41 (1973).
- [21] В. Machaj, *Nucl. Instru. Meth.*, 118, 1, 231 (1974).
- [22] Л. И. Злобин, и др, *ПТЭ*, 2, 134 (1961).

β 射线及其次级辐射对 NaI(Tl) 闪烁 γ 能谱测量的影响

陈 英 强

在 NaI (Tl) 闪烁 γ 能谱测量中, 通常对 β 射线已作了一定的屏蔽, 但 β 辐射总伴随着产生一些次级辐射, 其中有些辐射的穿透能力甚至比 β 射线强, 并能为 NaI(Tl) 闪烁探测器所探测, 从而影响 γ 能谱的测量。本文具体探讨了 β 射线及其次级辐射对 NaI(Tl) 闪烁 γ 能谱测量的影响, 以及为消除或减弱这种影响所应采取的措施。应当指出: 天然铀系中 β 射线的最大能量 (3.26兆电子伏) 比 ^{90}Sr 源的 β 射线能量大, 其 β 射线谱也比 ^{90}Sr 源的 β 射线谱复杂; 天然钍系中的 β 射线最大能量 (2.25兆电子伏) 虽然与 ^{90}Sr 源的 β 射线的最大能量相近, 可是其 β 射线谱比 ^{90}Sr 源的 β 射线谱复杂; 因此在本文的分析中, 根据对 ^{90}Sr 源进行实验的结果而推算得的数据是近似的。

一、测量装置和辐射源

1. 测量装置

测量装置为 GP-I 型单道 γ 能谱仪及其铅室。因只用 γ 闪烁探头, 故取去铅室中的计数管探头。并去掉铅室盖,

使源与探头保持一定的距离，以减弱探头所接受的辐射强度（因源很强）。

2. 辐 射 源

为避免 γ 射线的干扰，同时考虑到 β 射线的能量选在天然放射性元素的 β 射线能量范围内，且所要研究的辐射能被明显地观测到，故实验中采用了辐射强度大的 ^{90}Sr -66型 β 辐射源。其参数如下：

(1) 半衰期和 β 射线的最大能量〔1〕。

$T_{1/2}(^{90}\text{Sr}) = 27.7$ 年， $E_{\beta\text{最大}} = 0.545$ 兆电子伏（没有 γ 射线）。

$T_{1/2}(^{90}\text{Y}) = 64.2$ 小时， $E_{\beta\text{最大}} = 2.26$ 兆电子伏（ γ 射线甚微，辐射几率 $\approx 0.02\%$ ， $E_{\gamma} = 1.734$ 兆电子伏）。

(2) 源强： ~ 380 微居里。

(3) 包装：放射源装于胶木托盘内，上用 0.03 毫米厚的铝箔密封。

(4) 活性面积： $\phi 7$ 毫米。

(5) 其他放射性杂质 $< 1\%$ 。

3. ^{90}Sr 源的主要辐射形式

这里指用 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁 γ 谱仪测量时所观测到的主要辐射形式。为了弄清 β 射线及其次级辐射对闪烁 γ 能谱测量的影响，首先应了解闪烁 γ 谱仪测量到一些什么辐射。

(1) β 射线

放射性同位素 ^{90}Sr 源的核辐射有 β 射线，而 γ 射线甚微。其核反应式为

源中 β 射线最大射程(3.78毫米厚的铝)的2.6倍。它已使

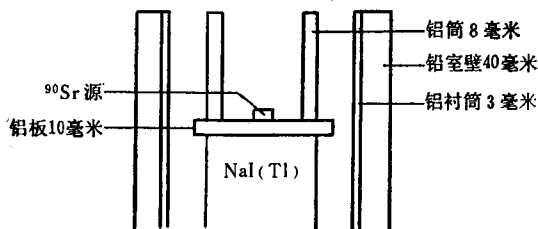


图1(a) 测量装置示意图

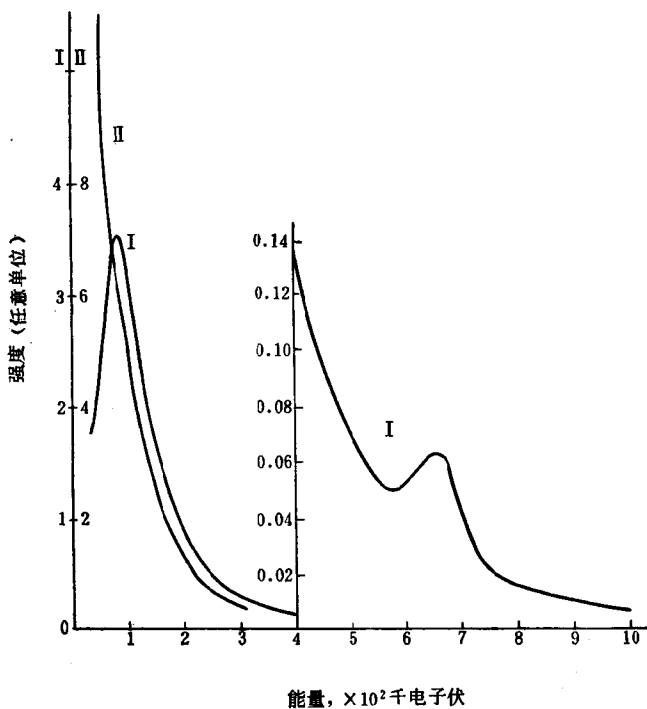


图1(b) 能谱曲线(道宽1.00, 相当于20千电子伏)

源的 β 射线强度减弱到原强度的 $\frac{1}{2^{26}}$ (或 1.49×10^{-8}) , 即 5.66×10^{-6} 微居里 (平均每秒只有 0.21 个 β 粒子)。再考虑到源和晶体原包装对 β 射线的衰减、装置的几何条件和探测效率等, 就更可认为对 β 射线已完全屏蔽了。

在此条件下, 测量到的能谱曲线 [图1(b)中曲线 I] 便是内轫致辐射经过了10毫米铝板衰减后的能谱曲线。曲线在 80千电子伏处出现了峰。这是由于10毫米厚的铝板对低能内轫致辐射显著地衰减所造成的。对这种衰减进行校正后得曲线 II (若对源和晶体包装的衰减也加以校正, 则曲线 II 还应陡些)。曲线 I 在662千电子伏处也出现峰, 这可能是因源中存在放射性杂质 ^{137}Cs 所致。

上述 β 射线和内轫致辐射是源本身放出的, 它们不受源以外因素的影响。

(3) 轫致 X 射线和特征 X 射线

这两种辐射是源的 β 射线作用于周围物质而产生的次级辐射。它与周围物质的性质, 所处的几何条件等有关。

β 射线在核库仑场中受到阻止时, 失去动能而转化为另一种能量形式, 这就是轫致 X 射线。轫致辐射的物理实质与运动的电子打到固体上迅速被阻止时产生 X 射线的实质一样, 原子序数愈高, 这种辐射的几率愈大。轫致辐射的能量是连续的。最大辐射能量等于入射 β 射线的能量。重叠在轫致辐射连续谱上的有特征 X 射线。它是在入射的 β 射线与物质原子游离碰撞时, 驱逐了一个内层电子, 内层电子的空位由较外层电子补充, 同时放出特征 X 射线, 其特征能量等于两个能级间的能量差 [2, 4-6]。

为了了解是否测到这两种辐射, 曾在图1(a)所示装置条件下, 在铝筒上盖以不同物质, 测量其低能谱段 (如图2)。

三种情况下的强度对比如表 1。

由表 1 可见，覆盖铅时，强度显著地增加，而在铅板下加 1 毫米厚的铝板屏蔽时，增加的强度 ΔI 便减弱了一半以上。1 毫米厚的铝有如此大的衰减作用，显然是对 β 射线的衰减，这说明使强度增加的原因是 β 射线作用于铅的结果。是否由于铅板对内轭致辐射的反散射而造成强度增加呢？众

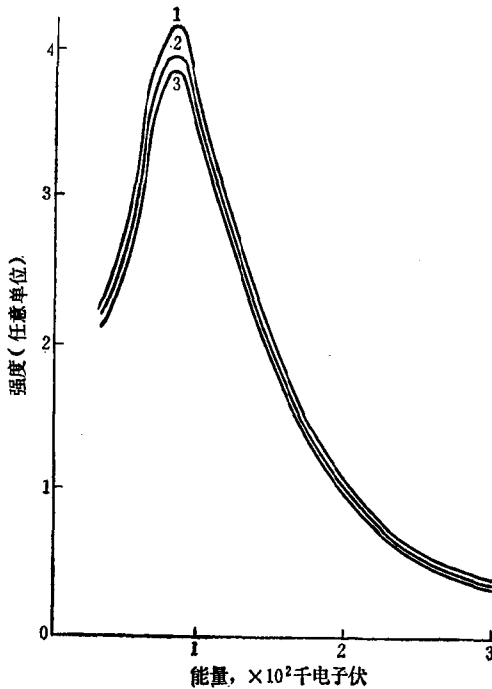


图2 测量谱线

1 —— 铝筒上盖1.4毫米厚的铅；2 —— 铝筒上盖1.0毫米厚的铅，再盖1.4毫米厚的铅；3 —— 铝筒上无覆盖物。

表1 几种覆盖物对低能辐射的衰减

铝筒上覆盖物	厚度, 毫米	能量, 千电子伏	$\Delta I/I_0^*$, %
铅	1.4	30	6.9
		80	8.3
		150	2.9
上 铅	1.4	30	4.1
下 铝	1.0	80	3.1
		150	1.4
铝	1.0	50	0.6
		80	0.6
		130	0.5

* I_0 为无覆盖物时辐射源的强度, ΔI 为有覆盖物和无覆盖物时辐射源强度之差。

所周知, 铝对光子的反散射作用比铅强得多〔7〕, 如果是反散射作用使强度增加, 那么在反散射作用弱的铅下面增加反散射作用强的铝, 则应使强度增加。实测结果则相反。另外从覆盖物为1毫米厚的铝时, 强度增加甚微 ($< 1\%$), 也可以说明反散射的影响在此是微不足道的。可见, 覆盖物为铅时, 强度显著的增加是 β 射线作用于高原子序数的铅而产生了韧致X射线和特征X射线的缘故。铅的 $K_{\alpha 1}$ X射线的能量为74.957千电子伏〔8〕。因具有特征能量的特征X射线重叠在能量连续的韧致X射线谱上, 故在能量80千电子伏附近的强度增加最大。在前面为证实测到内韧致辐射的实验中, 由于采用了低原子序数的厚铝屏将源与探头及铅室隔开, 所产生的X射线是非常微弱的。

二、几种不同屏蔽对 ^{90}Sr 源辐射的衰减

1. 在源和晶体原包装情况下用闪烁 γ 谱仪测量 ^{90}Sr 源的辐射谱

测量装置如图 3 所示。前面已指出，在无外加屏蔽的情

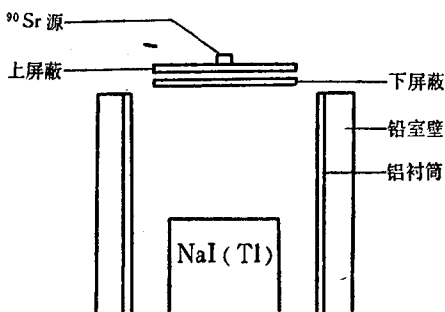


图3 测量装置示意图 (源置于硬纸架上)

况下，源的辐射实际上已经过了源和晶体原包装的衰减。为了确定甄别阈的能量，同时还测量了 ^{60}Co 的 γ 谱，并同绘于图 4。

从 ^{90}Sr 源主要辐射形式的分析可知，图 4 之 ^{90}Sr 源辐射谱主要是由源的 β 射线和内韧致辐射叠加而成，因铅室内壁衬以 3 毫米厚的铝筒，故其他次级辐射已很弱。谱线一直到甄别阈为 8.45 伏 (2.26 兆电子伏) 附近才趋于本底。

谱线在 70 千电子伏以下的一段没有 在 70—100 千电子伏的一段陡 (图 5 中“原包装”之曲线更明显)，这是源和晶体原包装对低能辐射衰减所造成的。

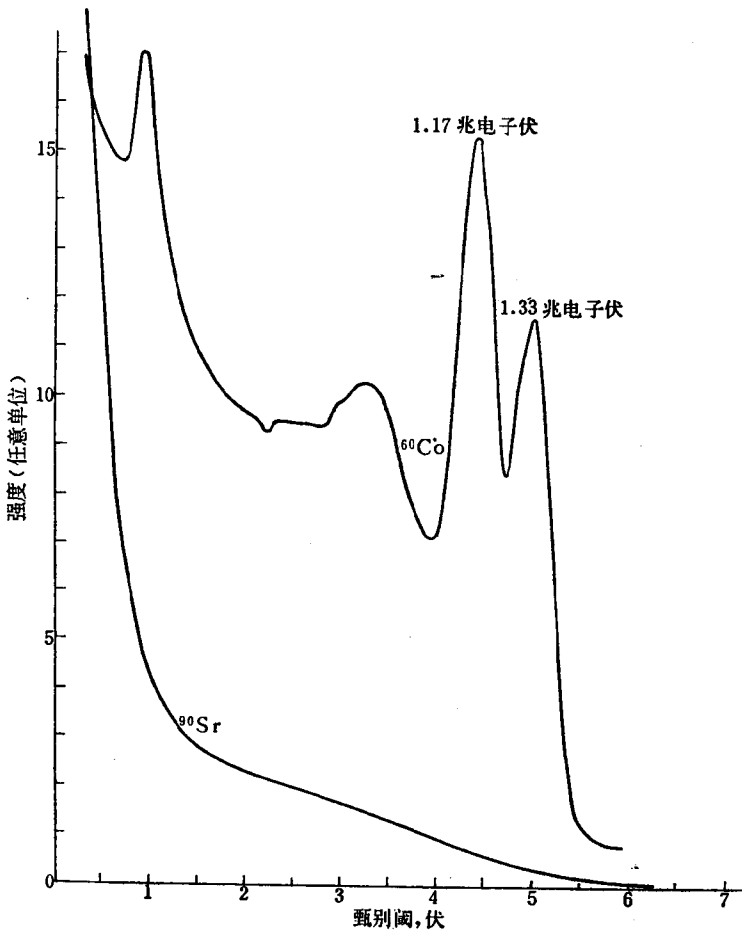


图4 实测谱线 (道宽为0.1伏)

1.17兆电子伏的甄别阈为4.37伏 (实测值); 1.33兆电子伏的甄别阈为4.98伏 (实测值); 2.26兆电子伏的甄别阈为8.45伏 (计算值)。

2. 铝、铁、铅屏对⁹⁰Sr源辐射的衰减

试验中分别以不同厚度的铝、铁、铅屏对⁹⁰Sr源的辐射进行衰减，并测量衰减后的低能谱段（见图5）。

其规律归纳如下：

(1) 经铝、铁、铅衰减后的谱线，随着屏厚的增加而逐渐出现了峰，峰（铅为第2个峰）的两侧是不对称的，峰的低能侧随屏厚的增加而越来越陡（铅因出现两个峰，情况复杂些）。这是由于随着屏厚的增加，屏对低能辐射的衰减作用迅速增大所致。

(2) 随着铝、铁、铅屏厚的增加，虽然峰的强度越来越

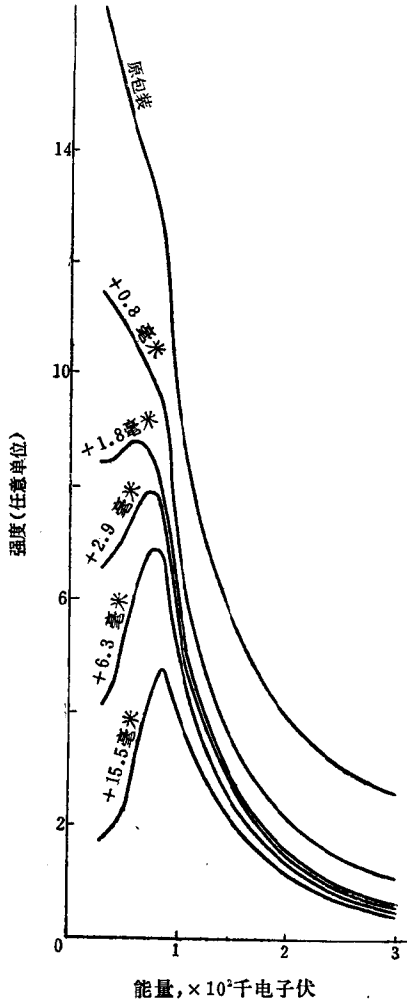


图5(a) ⁹⁰Sr源的辐射经不同厚度的Al衰减后的谱段(道宽20千电子伏)

低，可是峰（铅为第2个峰）的位置向高能方向移动。这是由于随着屏厚的增加，能明显被衰减的辐射能量也随之增大，因此出现的峰位就向高能方向移动。

(3) 当屏厚相同时，随着屏蔽物质原子序数和密度的增大，屏蔽后出现的峰位（铅为第2个峰位）也往高能方向移动。例如屏厚 2.4 毫米时，屏蔽后出现的峰位，铝为 69 千电子伏，铁为 86 千电子伏，铅为 245 千电子伏。其原因是能显著被衰减的辐射能量随着屏原子序数和密度的增大而增高。

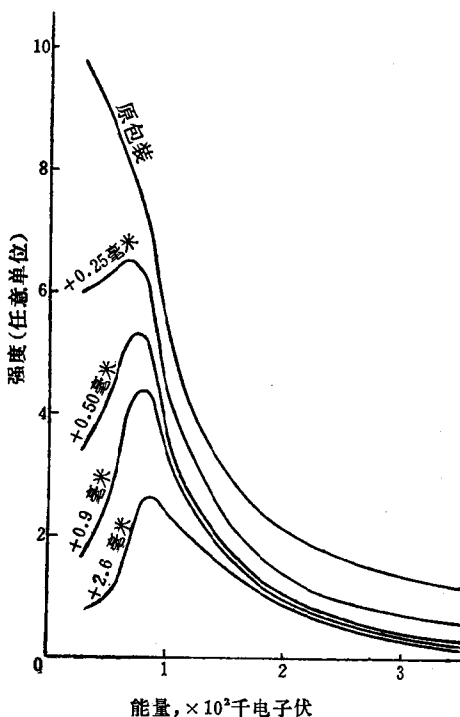


图5(b) ^{90}Sr 源的辐射经不同厚度的 Fe 衰减后的谱段 (道宽 20 千电子伏)

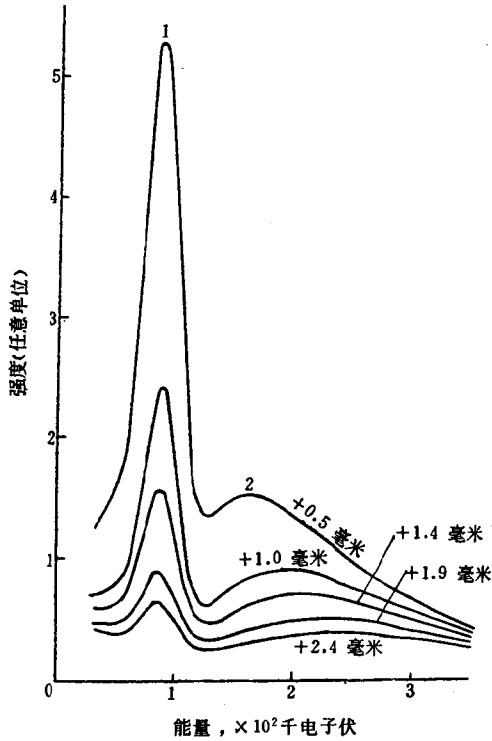


图5(c) ^{90}Sr 源的辐射经不同厚度的 Pb 衰减后的谱段
(道宽20千电子伏)

(4) 铅屏蔽后之辐射谱, 在低能处出现了强度较高的峰, 峰的两侧总是对称的, 峰的强度随屏厚的增大而减小, 但峰位不受屏厚的影响。这就是 β 射线经过铅时, 一方面被衰减, 另一方面在衰减过程中产生了 X 射线。其中铅的特征 X 射线($K\alpha_1$)是单能的 (74,957千电子伏)。所以峰的两侧是

对称的,且峰位不变,又因随屏厚的增加,铅对X射线的自吸收也明显增大,故强度随屏厚的增加而减弱。铝和铁的特征X射线($K\alpha_1$)分别为1.487千电子伏和6.403千电子伏〔8〕,均在谱仪最低甄别阈以下,能谱图中未显出。

铝、铁、铅对 ^{90}Sr 源辐射衰减后的相对强度 I/I_0 与屏厚度 d 及辐射能量 E 的关系,见图6。此处 I_0 为源和晶体原包装情况下所测辐射强度, I 为外加屏蔽后所测辐射强度。根据测得的结果,可归纳如下:

(1) 铝、铁、铅对各种能量的辐射,其 I/I_0 均随 d 的增加而减弱。

(2) 在 I/I_0-d-E 关系曲线中, I/I_0 随 d 增加而衰减

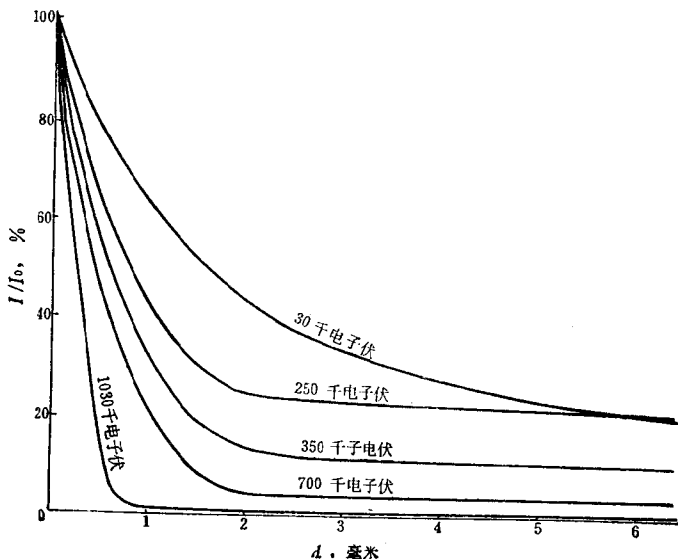


图6 (a) Al 的 I/I_0-d-E 关系曲线

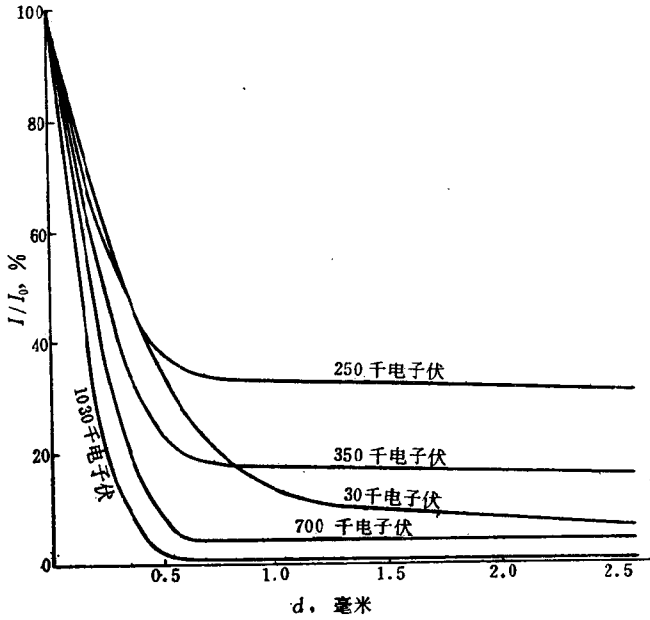


图6 (b) Fe 的 I/I_0-d-E 关系曲线

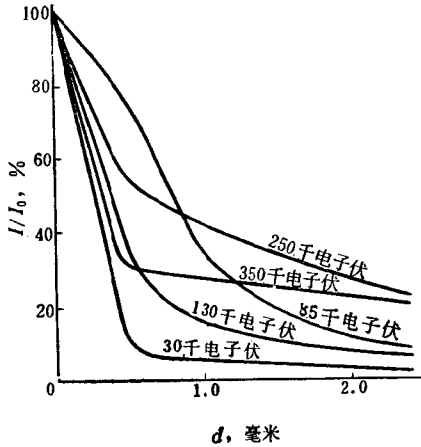


图6 (c) Pb 的 I/I_0-d-E 关系曲线

的速度，高能比低能衰减得快，即同一物质、相同厚度的屏，对高能辐射的衰减比低能的大。这是由于辐射经屏蔽物衰减后，尽管低能较高能易于衰减，可是高能经衰减后有部分减弱了能量或转化为另一种形式的低能辐射，这都使低能辐射得到补充，而高能辐射缺乏此类补充，因此显得对高能辐射衰减得快些。

(3) 对某些能量(如30千电子伏)的辐射，无论屏厚如何，衰减效果由好到差，依次是铅、铁、铝。

(4) 相同厚度的屏对不同能量的辐射，铅、铁、铝的衰减效果不同。如2毫米厚的屏，对30千电子伏的辐射， I/I_0 分别为(铝)43%，(铁)8%，(铅)3%；对350千电子伏的辐射， I/I_0 分别为(铝)14%，(铁)16%，(铅)22%。这是因为随着屏蔽物原子序数的增大产生韧致辐射等的几率也增大，而同一厚度的屏对能量较高的韧致辐射衰减较小。

5. 不同屏厚对同一能量的辐射，铝、铁、铅三种物质衰减效果也不同。如对250千电子伏的辐射，屏厚1毫米时， I/I_0 分别为(铝)42%，(铁)33%，(铅)42%；屏厚2毫米时， I/I_0 分别为(铝)25%，(铁)31%，(铅)27%。铝对 β 射线衰减时产生次级辐射的几率很小，因此屏厚增加时其衰减效果较显著。铅对 β 射线衰减时，产生次级辐射的几率较大，但屏厚增加时，自吸收作用也很明显，故总的衰减也显著，但仍不如铝。铁则介于铝、铅之间。

由上可见， I/I_0-d-E 之间的关系是很复杂的，无法笼统地得出铝、铁、铅三者对 β 射线及其次级辐射衰减效果的简单结论，而应根据具体情况作具体地分析。但是，若不考虑某一能量的辐射(微分测量)，而只考虑总的辐射(最低甄别阈的积分测量)时，则由图6的 I/I_0-d 关系可知，对 β 射

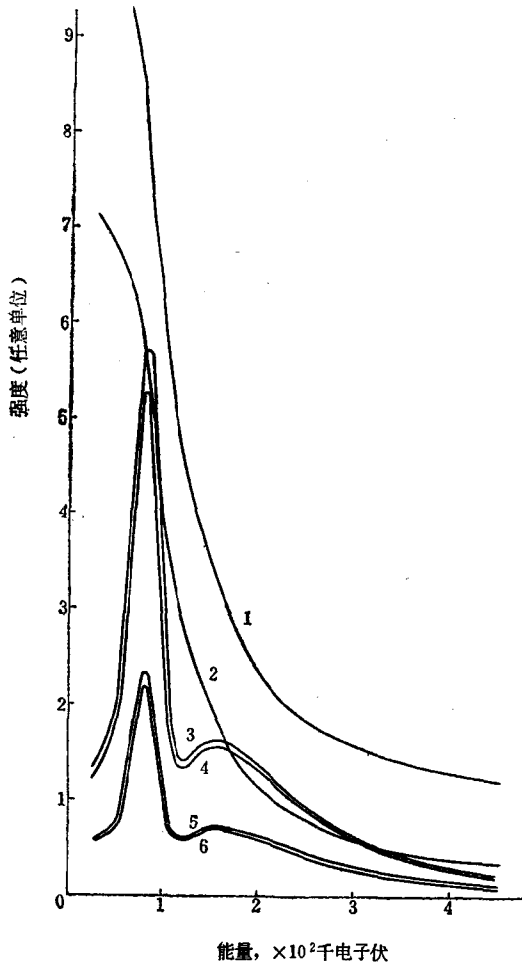


图7 铅铝不同组合对⁹⁰Sr源辐射衰减效果的对比(道宽20千电子伏)
1——源和晶体原包装, 2——1.0毫米Al, 3——0.5毫米Pb,
4——上0.5毫米Pb+下1.0毫米Al, 5——上1.0毫米Al+下
0.5毫米Pb, 6——上1.0毫米Al+中0.5毫米Pb+下1.0毫米Al。

线及其次级辐射，相同屏厚的衰减效果，三种物质中以铅最佳，铁次之，铝较差。

3. 铝铅组合屏中的几何位置对衰减效果的影响

同样一块铅屏和一块铝屏，由于它们组合的几何位置不同，对 ^{90}Sr 源辐射的衰减效果差别也甚大，如图7所示（测量装置同图3）。现以75千电子伏处的强度变化说明衰减效果的差别，为此列数据于表2。

（1）在0.5毫米铅下面增加1毫米铝屏蔽，衰减效果（即衰减后相对强度减弱的程度）比不加铝时只提高7%。

表2 不同屏蔽的衰减效果对比

屏蔽情况	效果对比	
	I , 脉冲/分	I/I_{Pb}^* , %
0.5毫米Pb	56345	100
上0.5毫米Pb 下1.0毫米Al	52347	93.0
上1.0毫米Al 下0.5毫米Pb	22998	40.8
上1.0毫米Al 中0.5毫米Pb 下1.0毫米Al	21628	38.4
上0.8毫米Al 下0.5毫米Pb	24849	44.1
1.4毫米Pb	16161	28.7
上1.0毫米Al 下1.4毫米Pb	7768	13.8

* I_{Pb} 为0.5毫米Pb对应的 I 值。

(2) 将上述两屏上下位置对换一下, 衰减效果比对换位置前提高56%, 比不加铝时提高59%。

(3) 用上1毫米铝、下1.4毫米铅屏蔽时, 其衰减效果比不加铝时提高52%。如下为薄铅(0.5毫米)时, 提高59%。可见屏愈薄, 屏位置对换引起衰减效果的差别也愈大。

(4) 上、下各1毫米铝, 中间0.5毫米铅, 其衰减效果比下面不加铝时只提高6%。

1毫米厚的铝放在铅之上和铅之下, 其总的衰减效果有如此大的差别, 原因在于铝在铅之上时, β 射线先为铝所衰减, 这样再经铅时所产生的次级辐射就相应地减弱了。当铝在铅之下时, β 射线先经铅衰减, 并产生了大量的韧致X射线和特征X射线, 这时铝在其下主要是对X射线和源的内韧致辐射起衰减作用, 而对辐射光子的衰减作用不大。

由此可见, 采用薄层铝-铅组合屏屏蔽 β 射线时, 其组合几何位置应为辐射源-铝-铅-探头。铝、铅屏(尤其铅屏)越薄, 组合几何位置对衰减效果的影响就越显著。当铝屏或铅屏的厚度足够大, 以致于不仅全部屏蔽了 β 射线, 而且几乎全部自吸收 β 射线的次级辐射, 在此情况下, 铝屏和铅屏组合的几何位置如何, 对总的衰减效果来说, 当然就毫无意义了。

三、结果分析

1. β 射线及其次级辐射对 γ 能谱测量的影响

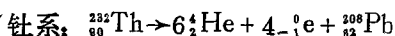
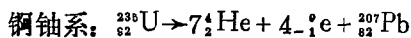
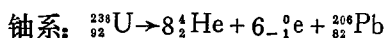
在NaI(Tl)闪烁 γ 能谱测量中, 若不采取适当的屏蔽, 则 β 射线及其次级辐射将影响 γ 能谱测量, 对低能尤为显著。

延长图4中 ^{90}Sr 曲线, 使其与纵坐标相交, 计算曲线下包

络的面积，可近似地得出，能量小于 1.13 兆电子伏（即 $1/2 E_{\beta\text{最大}}$ ）的辐射强度占总辐射强度的 97%，能量小于 0.565 兆电子伏（即 $1/4 E_{\beta\text{最大}}$ ）的辐射强度占总辐射强度的 81%，能量小于 0.283 兆电子伏（即 $1/8 E_{\beta\text{最大}}$ ）的辐射强度占总辐射强度的 66%。 β 射线和内轫致辐射经过屏蔽后（图 5）或与周围物质作用后（图 2），即使在产生 X 射线的情况下，其辐射也是集中在低能范围内。由此可见， β 射线及其次级辐射主要是对低能闪烁 γ 能谱测量有影响。

2. 天然放射性系列的 β 射线及内轫致辐射对 γ 能谱测量的影响

三个天然放射性系列的核反应式分别为：



由反应式可知，从起始母元素衰变到稳定同位素铅，铀系有六次 β 辐射，锕铀系和钍系各有四次 β 辐射。

众所周知，当整个系列处于放射性平衡时，各元素的衰变率相等，即 $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \cdots = \lambda_n N_n$ 。所以，整个铀系处于平衡时，其 β 辐射强度为

$$I_{\beta}^0 = 6\lambda_1 N_1 / L = 6\lambda_1 G_1 N_A / M_1 L \text{ (微居里)} \quad (1)$$

式中 λ_1 为 ${}^{238}\text{U}$ 的衰变常数 ($4.883 \times 10^{-18} \text{秒}^{-1}$)； N_1 为 ${}^{238}\text{U}$ 原子的数量； G_1 为平衡 ${}^{238}\text{U}$ 的质量(克)； M_1 为一克分子 ${}^{238}\text{U}$ 的质量 (238克)； N_A 为阿伏伽德罗常数 ($6.0238 \times 10^{23} \text{克分子}^{-1}$)； L 为一微居里的辐射强度。由 (1) 式可计算出，一克平衡 ${}^{238}\text{U}$ 的 β 辐射强度为 2.0 微居里。

同理，可分别计算出一克平衡 ${}^{235}\text{U}$ 的 β 辐射强度为 8.5

微居里，一克平衡 ^{232}Th 的 β 辐射强度为0.44微居里。

铀同位素的天然混合物中含有： ^{238}U (99.285%)， ^{235}U (0.710%)， ^{234}U (0.005%)^[9]。设一克天然平衡铀的 β 辐射强度为 $I_{\beta 1}^0$ ，则

$$I_{\beta 1}^0 = (2.0 \times 99.285\% + 8.5 \times 0.710\%) \text{微居里} \approx 2.05 \text{微居里。}$$

内韧致辐射是伴随着原子核放射 β 射线而产生的，每进行一次 β 辐射，便放出一个内韧致辐射光子，共有二个辐射。因此，一克天然平衡铀的 β 射线及内韧致辐射的总辐射强度为4.1微居里，其能量范围从0到3.26兆电子伏（RaC放出 β 射线的最大能量^[8]）。一克平衡钍的 β 射线及内韧致辐射的总辐射强度为0.88微居里，其能量范围从0到2.25兆电子伏（ThC放出 β 射线的最大能量）。

根据结果分析1可求出，在NaI (Tl) 闪烁 γ 能谱测量中，一克天然平衡铀的 β 射线及内韧致辐射的总辐射强度中约有大于 $1.0 \times 10^5 \text{秒}^{-1}$ 的辐射分布在小于400千电子伏的能量范围内；一克平衡钍，则约有大于 $2.2 \times 10^4 \text{秒}^{-1}$ 的辐射分布在小于280千电子伏的能量范围内。对于加密封盖时装矿石粉末样品约200克的倒凹形样品杯来说，这分别相当于平衡铀含量为1.5%和平衡钍含量为0.8%的样品的总 γ 辐射强度。实际测量中的影响远比此要弱，其减弱程度视探头的探测效率，晶体与样品之间屏蔽物的性质、厚度，样品的化学成分，测量中选择的能量和道宽等等的不同而有差别。

3. β - γ_1 (238千电子伏)- γ_2 (350千电子伏)法能谱测量中对 β 射线及其次级辐射的屏蔽

由屏蔽实验获得 I/I_0 - d - E 关系曲线(图6)可列出能

量分别为250和350千电子伏的 I/I_0-d 关系 (表 3、4)。

表 3 E 为250千电子伏时相对辐射强度与屏蔽状态的关系

屏厚度 d , 毫米		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
I/I_0 , %	Al	63	42	30	25	24
	Fe	38	33	32	31	30
	Pb	54	42	34	27	21

表 4 E 为350千电子伏时辐射强度与屏蔽状态的关系

屏厚度 d , 毫米		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
I/I_0 , %	Al	55	32	19	14	12
	Fe	23	17	16.6	16.2	15.8
	Pb	31	27	24	22	20

从图 6 和表 3 可知, 对于250千电子伏 (近于238千电子伏) 辐射的屏蔽效果, 当 $d < 1.4$ 毫米时, Fe 的屏蔽效果最好; 当 d 为1.4毫米—2.2毫米时, Al 的屏蔽效果最好; 当 $d > 2.2$ 毫米时, Pb 的屏蔽效果最好。

从图 6 和表 4 可知, 对于350千电子伏辐射的屏蔽效果, 当 $d < 1.7$ 毫米时, Fe 的屏蔽效果最好; d 为 1.7—2.5 毫米 (实验中铁、铝屏只做到2.5毫米) 时 Al 的屏蔽效果最好。

若同时考虑对250和350千电子伏的 β 射线及其次级辐射的屏蔽, 则在三种屏蔽物中以 2.2 毫米厚的铝屏作屏蔽效果最佳, 它使250千电子伏的辐射强度已衰减到原来的1/4, 350千电子伏的辐射强度已衰减到原来的1/8。再增加铝屏的厚度, 其衰减效果的提高就不显著了。

若需进一步有效地（尤其是对 250 千电子伏的辐射）衰减时，似乎用铅更好。根据铅的 I/I_0-d-E 关系曲线的延伸计算，当铅屏厚达 4 毫米以上时，250 和 350 千电子伏的 β 射线及其次级辐射强度均衰减到约原来的 1/10 以下。在三种屏蔽物质中铅的屏蔽效果最好。但是 2 和 4 毫米厚的铅屏对 350 千电子伏的 γ 射线将分别衰减掉约 1/2 和 2/3，对 250 千电子伏的 γ 射线的衰减则更大。而 2 和 4 毫米厚的铝屏对 350 千电子伏的 γ 射线只分别衰减掉约 1/20 和 1/10。在 γ 能谱测量中，显然不应该以牺牲较大的 γ 射线探测灵敏度为代价，去追求对 β 射线及其次级辐射有过高的屏蔽效果。因此，在低能 γ 能谱测量中，应尽可能避免采用高原子序数的物质（如铅）作 β 屏蔽屏。

4. γ 射线总量测量中的屏蔽

在 γ 射线总量测量（即最低甄别阈的积分测量）的实际工作中，有时不仅要屏蔽 β 射线，而且要屏蔽部分软 γ 射线（如 γ 脉冲法测镭）。测量装置通常期望屏蔽屏符合如下三个要求：

- （1）屏对所要屏蔽的辐射衰减效果好；
- （2）屏尽可能薄些，以少占装置的几何空间和节约材料；

（3）屏的机械强度高，以保证装置的几何条件不变。

可望的屏就是通常采用的铝-铅组合屏或铝-铅-铝组合屏。它们既利用了铝对 β 射线的衰减效果和铝的机械强度，又利用了铅对 β 、 γ 射线和内韧致辐射的衰减效果，使屏可做得薄一些。铝-铅-铝组合屏则不仅以铝从两面保护了铅，而且屏蔽了 γ 射线经铅衰减时产生的次级辐射。由实验可

知，组合屏中铅、铝的几何位置应该是辐射源-铝-铅-探头，或辐射源-铝（较厚）-铅-铝（较薄）-探头。

5. 化学成分对 β 射线及其次级辐射的影响

从铝、铁、铅对⁹⁰Sr源的辐射衰减后谱线出现的复杂性，可以看到不同化学成分的矿石样品对 β 射线及其次级辐射自吸收的复杂性。不仅不同化学成分其影响不同，而且相同化学成分其影响亦因含量高低而异。对低能(100千电子伏以下)辐射的影响尤为显著。例如当高能 β 射线通过高原子序数物质时，产生韧致辐射的几率就很大。单位路程上 β 射线因产生韧致辐射而损失的能量称为辐射亏损；因产生电离而损失的能量称为电离亏损。二者之比近似地等于^[2]

$$\frac{-\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{辐射}}}{-\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{电离}}} \approx \frac{ZE}{800} \quad (2)$$

式中 E 为 β 射线的能量 (以兆电子伏表示)； Z 为物质的原子序数。

天然放射性系列中 β 射线最大的能量为 3.26 兆电子伏 (RaC)。它通过铅和铝时，辐射亏损与电离亏损之比分别为 33.4 和 5.3%。可见，天然放射性元素所放出的 β 射线通过轻元素时辐射亏损所占的比重很小，可以忽略，而通过重元素时则应予以适当考虑，其辐射强度还与重元素的含量有关。

为使能谱成分一致，应尽可能使标准源与样品的化学成分一致，或者避免测量低能辐射。

参 考 文 献

- 〔1〕 机器分析ハンドブック編集委员会编, 机器分析ハンドブック, p.901—902, 技报堂, 东京 (1965)。
- 〔2〕 白弟, 铀矿床放射性勘探 (上册), 第40—42页, 中国工业出版社, 1962年。
- 〔3〕 梅镇岳, β 和 γ 放射性, 第64—66页, 科学出版社, 1964年。
- 〔4〕 B.T.普莱斯等著, 益群译, 原子核辐射屏蔽, 第56—59页, 中国工业出版社, 1961年。
- 〔5〕 中国科学院原子能研究所编, 放射性同位素应用知识, 第71—72页, 科学出版社, 1959年。
- 〔6〕 L.S.勃克斯著, 高新华译, X射线光谱分析, 第6—9页, 冶金工业出版社, 1973年。
- 〔7〕 B.B.阿列克赛耶夫等主编, 程方道等译, 铀矿普查勘探的放射性测量法, 第93—95页, 地质出版社, 1960年。
- 〔8〕 原子力工业 (日), 第18卷, 第7号, 26—28, 103—105 (1972)。
- 〔9〕 B.N.巴兰诺夫等编, 于铭强译, 放射性测量参考手册, 第27页, 地质出版社, 1959年。

关于区分系数的探讨

张书达

对于一个二元方程组

$$\begin{cases} a_1X + b_1Y = C_1 \\ a_2X + b_2Y = C_2 \end{cases} \quad (1)$$

只要 $a_1/a_2 \neq b_1/b_2$, 就有一个确定的解。但其解的稳定性却与系数 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 有直接关系。过去在镭、钍的能谱分析中, 常用 $(a_1/a_2)/(b_1/b_2)$ 来表征解的稳定性, 称之为“区分系数”。使用它有一定的优点: (1) 在一定的变化范围内, 区分系数越大解越稳定; (2) 计算简便。如镭道和钍道的能量分别取0.350和0.238兆电子伏, 则上述区分系数约为4左右; 若改用高能谱段的1.76和2.62兆电子伏时, 则上述区分系数可达8以上。

但它的适用范围较小, 在方程(1)的四个系数中, 若有一个值很小, 就会使区分系数的值并不能表示解的稳定性。例如对于J106计数管测铀装置, 若 X 和 Y 分别代表铀和镭的含量, C_1 代表 β 计数率, C_2 代表单位重量样品的 γ 计数率, 由于 $a_2/b_2 \approx 0.07$, 尽管 $a_1/b_1 \approx 1.2$, 但区分系数 $(a_1/a_2)/(b_1/b_2) \approx 18$ 。若采用闪烁测铀装置, 可使 $a_2/b_2 \approx 0.04$, 从而使上述区分系数提高到30左右。但实际上 a_2/b_2 值的进一步减小并未能使镭对铀的干扰降低多少, 铀的解的稳定性也不会随着 a_2 的减小而迅速地上升。从铀的计算公式中可看

出，其解的稳定性不会比高能谱段测镭、测钍好多少。这说明用 $(a_1/a_2)/(b_1/b_2)$ 作为区分系数并非普遍适用。

当方程 (1) 中 $a_1/a_2 = b_1/b_2$ 时，则方程无确定解，即解的稳定性坏到极点。由解析几何可知，上述条件即是一个平面上两条直线互相平行的充分必要条件。方程组 (1) 的几何表示即是同一平面上的两条直线，其交点的坐标即是方程 (1) 的解。显然，两条直线的交角越大（最大为 90° ），方程 (1) 解的稳定性越好。

方程 (1) 所代表的两条直线的交角 θ 用下式表示：

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \quad (2)$$

(2) 式的数值作为方程 (1) 的区分系数是适宜的，它没有前述的缺点。

例1. 用 0.350 和 0.238 兆电子伏 γ 射线分析镭、钍时，方程 (1) 中的 X 、 Y 分别代表钍、镭的含量； C_1 、 C_2 分别代表单位重量样品在钍道和镭道的计数率， $a_1 = 4.19 \times 10^4$ ， $b_1 = 4.87 \times 10^4$ ， $a_2 = 0.987 \times 10^4$ ， $b_2 = 5.06 \times 10^4$ ，

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 a_2 + b_1 b_2} = +0.572$$

$\theta = 29.8^\circ$ ，数值的正负号只是表示两条直线的相对位置。

方程 (1) 的图解法示于图 1。直线 1 和 2 分别是钍道和镭道的方程式，它们与坐标轴的交点由单位重量样品的计数率确定，两条直线的交点 O 的坐标即是样品的分析结果。

例2. 用高能谱段的 1.76 和 2.62 兆电子伏分析镭、钍时， $a_1 = 5.88 \times 10^8$ ， $b_1 = 2.59 \times 10^8$ ， $a_2 = 1.196 \times 10^8$ ， $b_2 = 4.75 \times 10^8$ ， $\operatorname{tg}\theta = 1.282$ ， $\theta = 52.1^\circ$ 。

例3. 在 J_{106} 计数管测铀装置中, 方程 (1) 中的 X 、 Y 分别代表铀、镭 ($B+C$) 的含量, C_1 代表 β 计数率, C_2 代

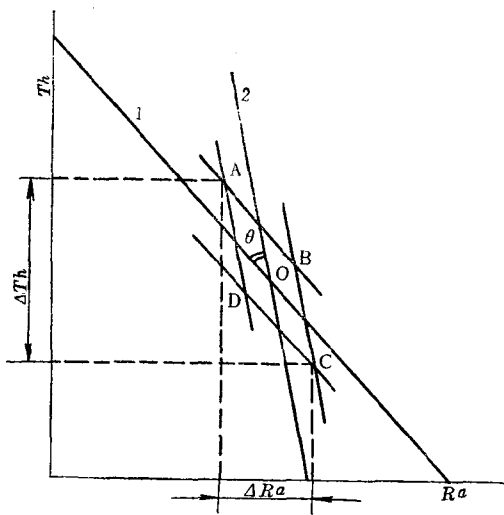


图1 区分系数示意图

表单位重量样品的 γ 计数率。 $\alpha_1 = 4.43 \times 10^6$, $b_1 = 3.97 \times 10^6$, $\alpha_2 = 0.638 \times 10^3$, $b_2 = 9.39 \times 10^3$, $\text{tg}\theta = 0.976$, $\theta = 44.3^\circ$ 。

例4. 在塑料闪烁体测铀装置中, $\alpha_1 = 1.721 \times 10^6$, $b_1 = 1.483 \times 10^6$, $\alpha_2 = 0.106 \times 10^4$, $b_2 = 3.00 \times 10^4$, $\text{tg}\theta = 1.08$, $\theta = 47.2^\circ$ 。

从例3与例4可看出, 尽管例4中的 $\alpha_2/b_2 = 0.0353$, 比例3中的 α_2/b_2 (为0.068) 小很多, 但区分系数却无很大变化。

(2) 式可改写为

$$\text{tg}\theta = \frac{(a_1/a_2)/(b_1/b_2) - 1}{\frac{a_1}{b_1} + \frac{b_2}{a_2}} \quad (3)$$

可见 $(a_1/a_2)/(b_1/b_2)$ 只是 (3) 式分子中的一项, 它的大小并不能完全确定 $\text{tg}\theta$ 的大小, 故用它作为区分系数衡量某个方程组解的稳定程度是不妥当的。

图 1 中两条直线的斜率是通过测量标准源确定装置系数后所决定的。在测量样品时即是确定该直线与坐标轴的交点。由于计数率的统计涨落, 实际通过测量而确定的两条直线是在一定的范围内平行移动的, 两条直线并无一个确定的交点 O , 而是一个平行四边形 $ABCD$ (图 1)。样品的分析结果及其误差范围就由这个四边形在两个坐标轴上的投影来确定。

一般说来, 同一个方程组中两个元素的分析精度是不相同的。例如图 1 中 $\angle Th$ 大于 $\angle Ra$ 。究竟方程组中那个元素测量精度高, 是不能单纯通过区分系数的大小来反映的, 这要分别看两条直线与坐标轴的交角大小。如图 1 中直线 1 (钍道测定) 与 Th 轴的交角小于直线 2 (镭道测定) 与 Ra 轴的交角。所以一般情况下 Ra 的测量精度比 Th 高; 只是当样品的 Th/Ra 很大时, O 点在 Ra 轴上的投影就会相对地靠近坐标原点, 此时 Ra 的相对误差也可能大于 Th 的相对误差。

当 θ 角相同而两条直线的方位不同时, 两个元素的分析精度就会一个降低一个升高。例如图 1 中两条直线同时逆时针方向旋转某一角度, 则 $\angle Th$ 会减小而 $\angle Ra$ 会加大。

总之, 在一般需要同时分析两个元素时, 用 (2) 式表示的区分系数越大, 两条直线的交角也越大, 则总的说来互相干扰越小, 因而解的稳定性越高。

射气闪烁法测定矿石中镭

徐发中 张玉兰

张书达 陈英强

一、引言

较为准确和灵敏的测镭方法是射气法。氡气的放射性强度通常利用灵敏度为20—30格/伏的静电计以电离电流进行测量。采用这种方法测镭的检出限约为 1×10^{-11} 居里。

如果采用正比计数管^[1]、脉冲电离室^[2]或 α 闪烁室^[3-5]记录氡及其子体的 α 粒子的辐射强度以代替电离电流测量时,可使射气测量的灵敏度提高10—20倍。在这些方法中, α 闪烁法操作比较简便易行。所以,目前得到了广泛的应用。

本文仅对用FH-408自动定标器和FD-125型室内氡钍分析器以放射化学法测定镭的情况作一简单介绍。

二、原理

射气闪烁法测定矿石中的镭是通过测定氡并和已知含量的液体标准源进行比较实现的。首先,用放射化学的方法将矿石中的镭定量地溶解到一定体积的溶液内。然后,将此溶液进行排气、封闭,积累起来的氡全部输送到闪烁室内。氡及其子体的 α 粒子对闪烁室壁上的 $ZnS(Ag)$ 激发闪光,在

光电倍增管阳极负载上形成电压脉冲，用定标器记录。最后，根据镭的衰变规律和实测数据计算镭含量。其计算公式简单推导如下。

制得的镭溶液经排出残余氦气后，封闭至某一时刻，氦的积累量与母体镭的量存在如下关系^[6]。

$$Q_{Rn\text{标}} = Q_{Ra\text{标}}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

式中 $Q_{Ra\text{标}}$ 为标准液体源的镭量（克镭）； $Q_{Rn\text{标}}$ 为容器中封闭 t 时间后的氦量（用克镭当量表示）； λ 为氦的衰变常数（天⁻¹）； t 为氦的积累时间（天）； $(1 - e^{-\lambda t})$ 为氦的积累系数。

如果测得某一时刻积累的氦量，根据（1）式可求得溶液中的镭量。

将积累的氦气全部输送到闪烁室内。经测定证明，输入的氦气量与其 α 计数率成正比（图 1）

$$Q_{Rn\text{标}} = K \cdot I_{\text{标}} \quad (2)$$

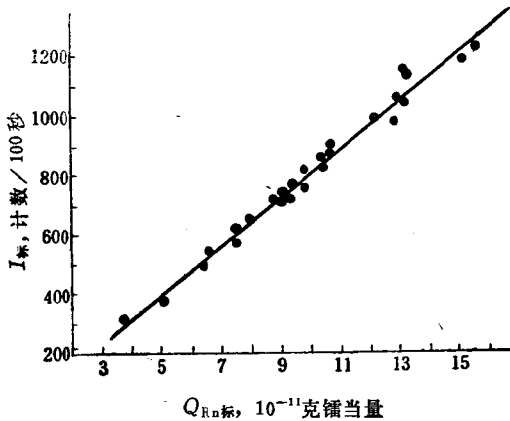


图1 $I_{\text{标}}$ 随 $Q_{Rn\text{标}}$ 变化的情况

式中 K 为比例系数, 即装置系数〔克镭/(计数/100秒)〕;
 $I_{\text{标}}$ 为测得的标准源的 α 计数率 (计数/100秒)。

合并 (1) 和 (2) 式, 则

$$Q_{\text{Ra标}} (1 - e^{-\lambda t}) = K \cdot I_{\text{标}}$$

$$Q_{\text{Ra标}} = \frac{K \cdot I_{\text{标}}}{(1 - e^{-\lambda t})} \quad (3)$$

$$K = \frac{Q_{\text{Ra标}}(1 - e^{-\lambda t})}{I_{\text{标}}} \quad (4)$$

对于矿石样品, 其计算公式为

$$Q_{\text{Ra样}} = \frac{K \cdot I_{\text{样}}}{(1 - e^{-\lambda t}) \cdot P} \quad (5)$$

式中 $Q_{\text{Ra样}}$ 为矿石样品中镭含量 (克镭/克矿样);
 $I_{\text{样}}$ 为被测矿石样品的 α 计数率 (计数/100秒)。

三、溶 矿

1. 主要试剂及配制方法

Na_2O_2 , 无水 Na_2CO_3 , NaOH , 浓 HCl , 甘露醇等, 所用试剂均为分析纯。

10% BaCl_2 溶液: 称10克 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶于100毫升水中。

1 : 1 H_2SO_4 : 将浓 H_2SO_4 逐滴加入等份的水中。

EDTA- NaOH 溶液: 称150克乙二胺四乙酸 (EDTA), 100克 NaOH , 溶于蒸馏水中, 并稀释至1000毫升。

麝香草酚酞酒精溶液: 称0.1克麝香草酚酞溶解于100毫

升酒精中。

1 : 3 HCl; 将 1 份浓 HCl 与 3 份水混合。

2. 溶矿方法

第一种方法

(1) 熔融 按表 1 准确称取矿样于铁坩埚中。先加入约为应加量三分之二的 Na_2O_2 , 用玻璃棒搅拌均匀。然后加入所需的 NaOH。最后均匀地覆盖一层约三分之一的 Na_2O_2 。将坩埚放于 550—600°C 的马弗炉内熔融约 10 分钟。当熔融物呈流体状时取出, 稍冷。

表 1 不同含量矿样的称量与试剂用量

镭含量, 克镭/克矿样	矿样称量, 克	试 剂 用 量		
		Na_2O_2 , 克	NaOH, 克	浓HCl, 毫升
3×10^{-8} — 1×10^{-9}	0.5	5	2	25
1×10^{-8} — 3×10^{-9}	1	8	3	40
3×10^{-9} — 3×10^{-10}	2	12	4	50
3×10^{-10} — 1×10^{-10}	3	15	5	75
1×10^{-10} 以下	5	20	8	100

(2) 提取 将坩埚外壁用冷水浸洗一下, 然后放到 600 毫升烧杯中, 用 200 毫升温水提取。待剧烈反应停止后, 再用水洗净表面皿和铁坩埚。

(3) 酸化 在不断搅拌下, 向热的提取液中迅速加入所需的浓 HCl, 使其呈黄色透明溶液。澄清后, 倾出上面清液于 600 毫升烧杯中。向留下的带铁渣底液加入约 5 毫升

浓 HCl, 加热溶解铁渣, 所得溶液并入主液。

(4) 富集 用水将溶液体积调至500毫升左右, 加入 10% BaCl₂ 溶液 1.5 毫升, 加热到 60°C 左右, 取下烧杯, 在不断搅拌下, 逐滴加入 1 : 1 H₂SO₄ 3 毫升。然后加热到近沸, 再加入 0.5 毫升 10% BaCl₂ 溶液, 并再搅拌片刻, 洗净、取出玻璃棒, 盖上表面皿, 放置过夜。

(5) 分离 用虹吸管吸出清液 (切勿吸出沉淀), 再加入 400 毫升水, 静置 4—6 小时, 当沉淀已经完全沉降后, 再虹吸出清液。重复此操作三次。

(6) 溶解 向已经分离好的 Ba(Ra)SO₄ 沉淀中加入 0.3 克甘露醇, 加入 3—5 滴 0.1% 麝香草酚酞指示剂, 加入 10 毫升 EDTA-NaOH 溶液, 用水稀释溶液至体积为 100—150 毫升。盖上表面皿, 加热溶解。当 Ba(Ra)SO₄ 沉淀完全溶解后, 将表面皿洗净、取下, 再继续加热浓缩。当蓝色透明溶液体积为 15 毫升左右时, 移入扩散器。洗净烧杯, 洗液并入扩散器。装入的溶液量控制在占扩散器容积的三分之一左右。

第二种方法

(1) 熔融 准确称取 0.5—1 克矿样于 30 毫升铁坩埚内, 加入 4—5 克 Na₂O₂, 1—2 克无水 Na₂CO₃, 0.2 克 BaCl₂·2H₂O, 用玻璃棒搅拌均匀, 再加入 1—2 克 NaOH, 最后在上面覆盖一层 1—2 克 Na₂O₂。将铁坩埚置于 550—600°C 的马弗炉中熔融 10 分钟左右, 使其呈透明流体状或即将呈流体状熔融物, 取出, 稍冷。

(2) 提取 用冷水浸洗一下铁坩埚外壁, 然后放到 250 毫升烧杯中, 用约 80 毫升 30°C 左右的温水提取。当剧烈反应停止后, 用水洗净表面皿和铁坩埚。

(3) 老化 在玻璃棒搅拌下，将提取溶液置于电炉上加热至沸，取下，冷却，澄清。

(4) 分离 先倾出烧杯内清液于定性滤纸上过滤，然后倾出沉淀物和冲洗烧杯的洗液一起在滤纸上过滤。再用 $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaOH}$ 混合溶液 (约1%) 洗涤烧杯和沉淀物 2—4 次 (对含硅量高的矿样，其沉淀物应多洗涤几次，把 Na_2SiO_3 全部洗掉，以防止盐酸溶解时出现胶体)。最后用水洗涤二次，弃去滤液。

(5) 溶解 用10毫升左右 1:3 的热 HCl (约 60°C) 溶解滤纸上的沉淀物，再用水洗涤滤纸至无黄绿色 (应控制黄色透明溶液体积为25毫升以内)，将溶液装入干净的扩散器内。体积同第一种方法。

用过的铁坩锅放入稀 HCl 中浸泡一小时左右，取出，用水冲洗，用布擦干净，在电炉上烘干。然后置于干燥器内备下次溶矿时用。

四、测量工作

1. 测量装置

FH-408自动定标器。FD-125室内氡钍分析器。球状闪烁室 (500毫升)。扩散器 (70毫升)。真空泵 (0.5—1.0升/秒)。液体镭标准源，不同级别的数个。

2. 准备工作

检查定标器的各参数是否符合仪器说明书的要求。若不

符合，需进行检修，使仪器处于正常状态。

检查探头与闪烁室系统是否漏光。若漏光，需彻底消除。

检查闪烁室及其送气系统是否漏气。若漏气，需设法消除。

此外，还需选定探测装置的工作点：用 α 源（如电镀铀源）和取适当阈电压，测量高压-计数率“坪”曲线，使探测装置工作于“坪”区。用初选的工作电压，改变阈电压，和固定阈电压，改变高压的方法，分别测量标准源或样品的 α 计数率，和闪烁室本底。兼顾对氡有高的探测灵敏度和低的本底。最后选定合适的阈电压和光电倍增管的工作电压。

3. 测量步骤

(1) 封样

将待测镭溶液用真空泵以每分钟约二百多个气泡的速度排气10—20分钟（注意不要太快，以免溶液溢出），然后关闭扩散器两端的玻璃开关，并记下封闭时间。

扩散器内氡气的积累时间，视矿样强弱而定，如矿样内含镭量为 $n \times 10^{-10}$ 克，则可封闭1—2天。

(2) 送气

将已测好本底、抽真空的闪烁室与待测的扩散器经干燥管连接起来，连接方法见图2。

送气时，先打开扩散器水平端的玻璃开关，使扩散器中的气体先进入闪烁室。到气泡停止时，再小心打开扩散器上端的玻璃开关，并以此开关来控制气流速度。送气开始时，每分钟约一百多个气泡。十五分钟后，可加快到每分钟约二百多个气泡。最后一分钟可再加快，使送气在二十分钟时结

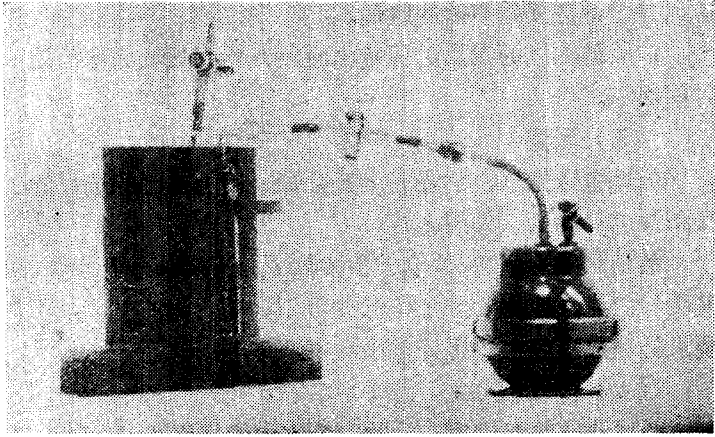


图 2 送气情况

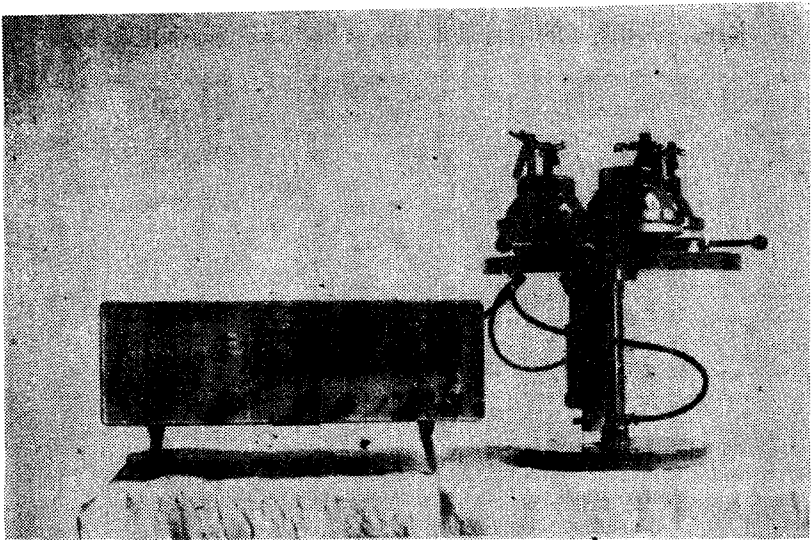


图 3 测量情况

束，并记下送气结束时的时间。

扩散器内氩的积累时间是由封闭开始到送气完毕的这一时间间隔。

(3) 测量

闪烁室送完气，放置五十五分钟。用上述已经选好的工作条件进行测量（见图3）。

测量时间为每100秒取一个读数 I_i ，连续取三个读数，用其平均值 \bar{I} 。读数误差允许范围为 $|I_i - \bar{I}| < 2\sqrt{\bar{I}}$ ，不合要求的读数应弃去，再计算平均值。

(4) 排气

为尽快排除测量完毕后的闪烁室内的氩气及其子体，需将测量完毕的闪烁室马上连接真空泵排气。排气过程中，间断地用新鲜空气冲刷闪烁室内壁，使闪烁室尽快恢复到正常本底。采用图4的半自动排气机（用TCC型同步电动机带

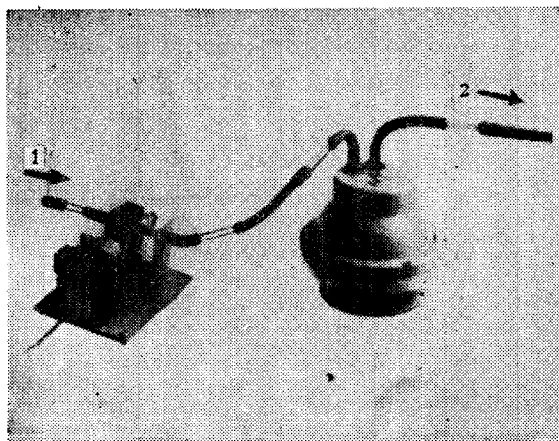


图4 排气情况

箭头表示：（1）空气进口；（2）接真空泵抽气。

动玻璃开关)可减少操作手续且能提高排气效果。

4. 结果整理

(1) K系数计算

K系数按(4)式计算。例如液体标准源的含镭量 $Q_{\text{Ra标}} = 4.00 \times 10^{-10}$ 克。氡的积累时间为两天三十分鐘, 积累系数 $(1 - e^{-\lambda t}) = 0.307$ 。本底为13计数/100秒。实测的 α 计数率为1002计数/100秒, 故 $I_{\text{标}} = (1002 - 13)$ 计数/100秒。将上述各数据代入(4)式可得

$$K = \frac{4.00 \times 10^{-10} \times 0.307}{1002 - 13}$$

$$= 1.24 \times 10^{-13} \text{ [克镭/(计数/100秒)]}$$

同一仪器和同一种规格的闪烁室, 用不同含镭量的标准源标定, 标定数不应少于15个, 取其平均值, 与平均值相对误差超过5%的数值弃去。再取平均值, 用此平均值参与计算样品的镭含量。

(2) 矿石样品中镭含量计算

样品的镭含量按(5)式计算。例如矿石样品称重 $P = 1$ 克。经溶矿制成溶液, 在扩散器内积累了一天十五小时, 积累系数 $(1 - e^{-\lambda t}) = 0.255$; 本底为9计数/100秒; α 计数率为1330计数/100秒, 故 $I_{\text{样}} = (1330 - 9)$ 计数/100秒。装置系数 $K = 1.24 \times 10^{-13}$ 克镭/(计数/100秒)。代入(5)式算得该矿石样品的镭含量为

$$Q_{\text{Ra样}} = \frac{1.24 \times 10^{-13} \times (1330 - 9)}{0.255 \times 1}$$

$$= 6.42 \times 10^{-10} \text{ (克镭/克矿样)}$$

五、注意事项与讨论

1. 适用范围

因装置系数为 1.24×10^{-18} 克镭/(计数/100秒), 所以本法可准确测量 5×10^{-12} — $n \times 10^{-8}$ 克镭/克矿样。

2. 溶矿用水

因本法不受其它放射性杂质的干扰, 所以溶矿所用的水可为蒸馏水、离子交换水或清冽不含镭的自来水。若用第二种方法溶矿时, 水中还不能含有硫酸根。

3. 灼烧有机物

当分析含有大量有机物的矿石样品(如煤样)时, 需先称好矿样于铁坩埚内, 置于 $500-600^{\circ}\text{C}$ 马弗炉内灼烧 15 分钟, 冷却后再进行溶矿操作。

4. 测量条件的控制

本法为相对测量, 所以, 必须严格控制矿样与标准源的测量条件相同。例如, 所用的闪烁室和扩散器的规格、溶液的体积、封闭方法、送气时间和速度、光电倍增管的工作电压、定标器的阈电压、测量几何位置及送气后到测量的时间等条件都应相同。

5. K 系数的检查

在一定条件下, K 系数是一个常数, 可长期使用。但

是，当温度、湿度、大气压力等条件发生变化时，可能会对 K 系数造成影响。因此，平时生产中需每天带测两个标准源和每月（最长不超过一个季度）专测两批标准源以检查 K 系数。两批标准源所测系数与原测量值相差超过 $\pm 3\%$ ，则应使用新系数。

6. 空白校正

测低含量矿样时，要注意对所用试剂如氯化钡的含镭量进行检查，选用合格的试剂。必要时，应对测量结果予以空白校正。

7. 用玻璃开关封矿样

橡皮管对氡气有强烈的吸收、吸附和渗透作用，因此需用玻璃开关封样。对此曾作过如下实验：

(1) 吸收实验

将长为 3 厘米的乳胶管（青岛出品， 6×9 型）剪成五条，置于扩散器水平端管内，扩散器两端均用火封。测量结果与火封结果比较，封闭五天， $f = 0.951$ ，封闭十五天， $f = 0.929$ ，封闭时间越长，结果偏低越严重。

(2) 渗透实验

将镭含量为 131.3×10^{-10} 克镭/克矿样，射气系数为 27.2% 的粉末样品，先排除自由氡，称取 6 克粉末平均分装入各为 9 厘米长的三条新的橡皮管内，橡皮管两端用玻璃棒塞紧，并用石蜡封闭，然后置于射气管内封闭，积累 5 天 21 小时后，测量射气管内的氡气。结果为 3.52×10^{-10} 克镭当量，而橡皮管内样品此时积累的自由氡应为 25.4×10^{-10} 克镭当量，即测得此条件下橡皮管对氡的渗透率达到 13.8%。

(3) 吸附实验

将送完气后的橡皮管从射气管内取出，立即将管内粉末倒干净。然后放在干净的射气管内，再往电离室内送气，测得的电离电流强度相当于上次测量的13.3%。可见橡皮管对氦气有吸附作用。

(4) 用玻璃开关封样

对19个 2×10^{-10} — 5×10^{-9} 含量范围的样品进行测量。用玻璃开关封样的结果与火封的结果比较，封闭10天， $f = 0.996$ 。一般生产时，样品的封闭时间大都在10天以内，因此，用玻璃开关封样，不但操作方便、不损坏扩散器，且能保证分析结果准确可靠。

8. 减少“余气”的影响

氦气从扩散器送入闪烁室时，要求输送完全。若送气不完全（即扩散器内仍剩余一定量的氦气，通常称为“余气”），则分析结果偏低。“余气”越多，偏低越甚。试验证明，用第一种溶矿方法制备的镭溶液，控制不好，“余气”可达7%。因此，必须严格控制输送氦气的操作步骤。积极创造氦在扩散器内积累和送气时的较高室温条件。或者在气温较低时采用第二种溶矿方法制备镭溶液。还可在送气前适当摇动扩散器等以便减少“余气”的影响，从而获得可靠的分析结果。

参 考 文 献

- [1] F. Vegeman. *Helv. phys. acta*, 27, № 5, 451 (1954).
- [2] А. М. Бабешкин, и др, *Заводск. Лаборатория*, № 8, 996 (1958).

- [3] P. Damon, H. Hyde, *Rev. Scient. Instrum.*, 23, № 12, 766 (1952).
- [4] H. Lucas, *Rev. Scient. Instrum.*, 28, № 9, 680 (1957).
- [5] M. Van Dilla, D. Taysum, *Nucleonics*, 13, № 10, 56 (1955).
- [6] 群力编, 放射化学实验指导, 第272页, 人民教育出版社, 1961年。

α 计数法测定 ^{226}Ra 的探讨

陈明秀 张庆文

本文是我们试验工作的总结。着重叙述了 α 计数法测镭的适用范围和存在的问题。

一、原 理

α 计数法测镭是通过化学处理，将镭从样品中分离出来，以有载体或无载体的形式收集于测量盘中，直接对镭放出的 α 射线作计数，从而确定镭含量。它无需对氡进行积累，是测镭的一种快速方法。

有关这方面的工作，国外已有过报道^[1-3]。为了扩增测镭的方法，我们对该法进行了验证，并根据自己的情况，设计了用 Na_2O_2 熔矿，用 BaSO_4 共沉淀镭，EDTA 纯化，最后在不锈钢盘内制作 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ 饱和层源提供 α 计数。主要研究对象为天然矿石样品。

α 计数采用相对测量的方法，直接比较标准源和样品的 α 辐射强度，由下式计算样品的镭含量：

$$\begin{cases} Ra = \frac{Ra_{\text{标}}P_{\text{标}}}{I_{\text{标}}} \cdot \frac{I}{P} = K \frac{I}{P} \\ K = \frac{Ra_{\text{标}}P_{\text{标}}}{I_{\text{标}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $Ra_{\text{标}}$, Ra 为标准源和样品的镭含量 (克镭/克矿样); $I_{\text{标}}$, I 为标准源和样品的 α 计数率 (计数/分); $P_{\text{标}}$ 为标准源的称量(克), P 为样品的称量, 单位为克。如果被测对象是含镭溶液, 则改用毫升表示, 此时分析结果的量纲为克/毫升。

二、制作 α 测量源

1. 称取矿样0.5—2克(视镭含量而定)于50毫升的铁坩埚内, 加入5—12克 Na_2O_2 和2—4克 NaOH 混匀, 于 600°C 马弗炉内熔融, 至样品呈胶状液时取出, 稍冷, 置于250毫升烧杯内用100—150毫升热水提取。

2. 用水洗出坩埚, 在搅拌下迅速加入25—50毫升浓盐酸。

3. 将黄色清液转入另一250毫升烧杯内, 向留有铁渣的少量底液中补加入2—3毫升浓盐酸, 加热溶解铁渣, 并入主液。

4. 准确加入1毫升8% BaCl_2 溶液, 加热至近沸, 在搅拌下滴加3毫升的1:1 H_2SO_4 。

5. 静置6小时, 虹吸弃去上层清液。转入15毫升试管内离心收集硫酸钡沉淀。用水洗涤, 离心, 弃去清液。重复水洗一次。

6. 将沉淀转入原烧杯内, 加8毫升0.5M EDTA-NaOH 溶液, 加热溶解沉淀。

7. 将溶液滤入100毫升烧杯内, 体积调至40毫升, 加热至沸腾, 在搅拌下迅速加入3毫升冰醋酸使 BaSO_4 再沉淀。

8. 放置半小时, 离心收集沉淀, 弃去清液。用约12毫

升水洗涤沉淀，离心，弃去清液。重复水洗一次。

9. 加入 1 毫升水，用玻璃棒搅匀沉淀，洗出玻璃棒，体积约 1.8 毫升。然后用吸管将此乳状液转移入不锈钢盘内，于红外灯下烘干制源备 α 测量。

如系直接处理镭溶液，则省去熔解矿样的步骤。

除用称重法测量含钡样品的镭含量外，整个操作中，在步骤 5 以前，要求镭不得损失，此后， $Ba(Ra)SO_4$ 允许有少量的损失。

本法所用的水，从步骤 7 以后改用蒸馏水，所用试剂除熔矿使用工业等级外，均为 AR 级或 CP 级。 $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ 试剂必须另作检查，要求不得含有 1×10^{-12} 克镭/克试剂以上的镭。

三、测 量

镭的 α 射线用半导体探测器和 $ZnS(Ag)$ 闪烁探测器来测定，两种探头均由电子管单道谱仪记录。

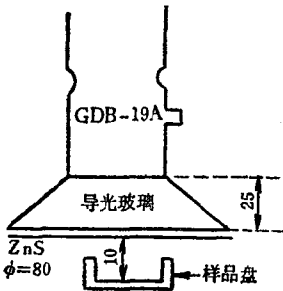


图 1 $ZnS(Ag)$ α 探头几何条件示意图 (长度单位毫米)

$ZnS(Ag)$ 探头是谱仪原配探头，光电倍增管光阴极有效窗直径 $\phi 34$ 毫米，闪烁体 $\phi 80$ 毫米，它与光电倍增管的光阴极之间有一导光玻璃联接，样品面与闪烁体相距约 10 毫米，几何条件如图 1 所示。光电倍增管的工作电压取 900 伏。

半导体探测器分别用过金硅面垒型和硅锂漂移型两种，面积曾用过 $\phi 15$ 毫米，20毫米，22毫米三种。除灵敏度不同外，测量结果对本实验没有什么差别。为了提高讯号噪声比，前级放大采用电荷灵敏放大器电路（图2）。工作中，计数率和峰位均有满意的稳定度。图3是本装置测得的电镀铀源的 α 谱，道宽为100千电子伏，电镀铀源和Ba(Ra)SO₄源至半导体探测器的探测面的距离约为7.5毫米。测量样品时阈电压取30—80伏，相当于记录探测器接收到的3—5兆电子伏能量范围的 α 粒子。

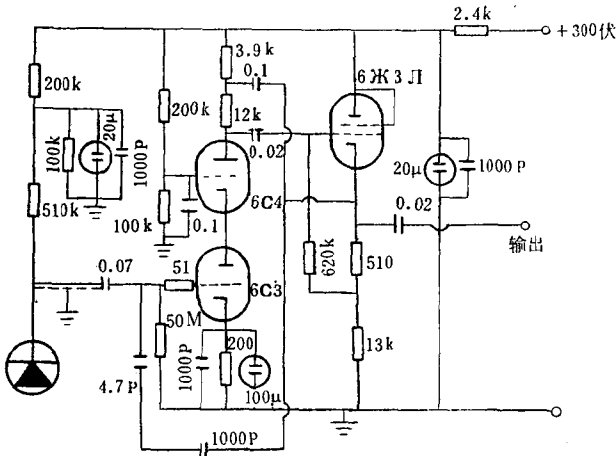


图2 电荷灵敏前级放大器电路

根据图3可以算出 α 粒子在空气和金层中大约损失1.5兆电子伏的能量。

样品盘为内径25毫米，内高6毫米，壁和底厚1.5毫米的不锈钢盘。制源时，从Ba(Ra)SO₄再沉淀到测量 α 射线

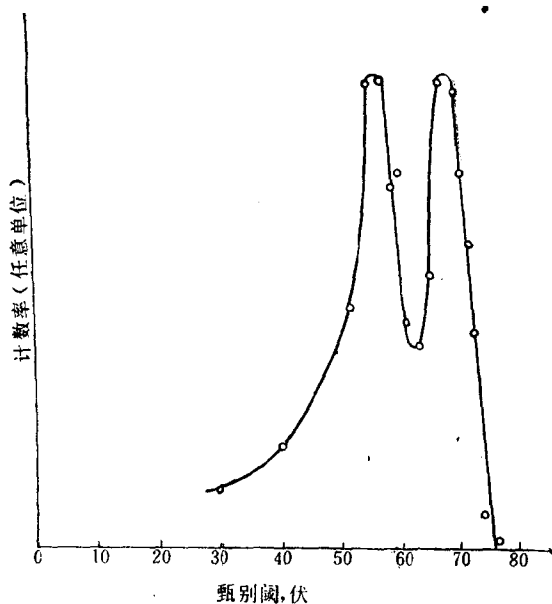


图3 自然钍源的 α 谱(未加准直器)

强度的时间间隔，标准源和样品均控制在4小时。

装置本底 $ZnS(Ag)$ 探头为4计数/分，半导体探测器本底很低，每小时小于一个计数。

样品与标准源的制源和测量条件相同，测得 I 与 $I_{标}$ 后，分别代入(1)式求得 K 系数和样品的镭含量。 K 系数每标定一次，通常能保持2—3月不变。

为了保证分析质量，每天工作开始时先用电镀钍源检查峰位和对应的计数率。此外，为了使测量条件尽量一致，我们还用 $BaSO_4$ 沉淀载带镭的方法，制作了一盘纯镭源供日常工作检查 K 系数用。因此，无需每天处理并测量标准源。

纯镭源用纯镭溶液直接加入 1 毫升 8% BaCl₂ 溶液，将体积调至 50 毫升再作 BaSO₄ 沉淀，用水洗净沉淀并收集于测量盘内烘干即得。其强度控制在能产生 1000—2000 计数/分即可。我们用的纯镭溶液是由不含钍的沥青铀矿通过化学处理的方法提取得到。

样品或标准源的计数时间视 α 强度而定，一般每盘不超过 15 分钟。

四、结 果

表 1 是两种探测器对镭含量为 3.30×10^{-9} 克/毫升的标准溶液测得的 K 系数。该标准溶液用沥青铀矿全溶配制而成。表 2 是两种探测器对一批不含钍、钷，铀-镭接近平衡的管理样的镭含量的分析结果。 K 系数的 24 次测量值，其相对标准误差，半导体探测器和 ZnS(Ag) 探测器分别为 2% 和 3%。管理样的分析结果，与已知结果相比，系统误差表示式用

$$f = \frac{1}{n} \sum \frac{x_i}{y_i}$$

平均相对算术误差表示式用

$$E = \frac{\sum \left| \frac{x_i - y_i}{y_i} \right|}{n}$$

半导体探测器分别为 0.992 和 3.3%，ZnS(Ag) 探测器分别为 1.009 和 2.5%。其中 x_i 代表 i 样的分析结果， y_i 代表 i 样的原含量， n 代表样品数。

表1 K系数测量结果

测量序号	$K, 10^{-11}$ 克/(计数/分)	
	半导体探测器	ZnS(Ag)探测器
1	2.45	1.66
2	2.38	1.67
3	2.39	1.74
4	2.35	1.67
5	2.43	1.64
6	2.35	1.69
7	2.32	1.63
8	2.35	1.60
9	2.32	1.63
10	2.40	1.57
11	2.33	1.67
12	2.33	1.66
13	2.43	1.71
14	2.34	1.61
15	2.39	1.71
16	2.37	1.73
17	2.37	1.59
18	2.34	1.63
19	2.39	1.61
20	2.39	1.56
21	2.45	1.69
22	2.47	1.59
23	2.43	1.65
24	2.46	1.67
平均	2.38	1.65

表2 管理样分析结果

管理样号	已知镭含量, $\times 10^{-10}$ 克镭/克矿样	半导体探测器分析		ZnS(Ag)探测器分析	
		结果, $\times 10^{-10}$ 克镭/克矿样	相对误差, %	结果, $\times 10^{-10}$ 克镭/克矿样	相对误差, %
7	13.16	12.53	-4.8	12.80	-2.8
8	9.70	9.38	-3.3	9.66	-0.4
9	10.62	10.76	1.3	11.18	5.3
10	26.59	26.98	1.5	27.25	2.5
12	11.45	11.36	-0.8	12.23	6.8
14	16.87	16.18	-4.6	16.65	-1.3
16	20.20	20.00	-1.0	20.68	2.4
17	11.93	10.90	-8.6	11.25	-5.7
19	110.90	112.80	1.7	112.50	1.4
20	83.00	81.90	-1.3	84.80	2.2
24	20.45	19.78	-3.3	20.10	-1.7
26	14.90	15.55	4.4	14.70	-1.3
29	22.30	21.15	-5.2	22.05	-1.1
33	11.93	11.40	-4.4	11.43	-4.1
35	29.60	31.28	5.7	32.00	8.1
38	22.45	22.53	0.4	22.65	0.9
40	18.40	17.61	-4.3	18.67	1.5
41	9.61	9.89	2.9	9.64	0.3
44	8.43	8.88	5.3	9.03	7.1
52	227.20	236.00	3.9	235.50	3.6
53	59.90	58.55	-2.3	58.03	-3.1
54	47.10	48.50	3.0	49.00	4.0
55	234.50	228.30	-2.6	229.50	-2.1
56	48.10	47.00	-2.3	47.85	-0.5

五、干扰因素的探讨

1. 源的纯度验证

$BaSO_4$ 沉淀能吸附多种元素，为检验制源是否达到 α 放射性纯的标准，我们曾用 ^{238}U 、 ^{234}U 和 ^{234}Th 作示踪。

在铀系中，除镭外有意义的长寿命 α 辐射体有 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th 和 ^{210}Po 四个。由于我们没有放化纯的钋样，故未作钋的去污实验。

示踪结果列于表 3。表内 α 、 β 计数率均由半导体探测器测得。 $BaSO_4$ 第一次沉淀时对铀的吸附很少，沉淀时溶液中有否柠檬酸存在也作过对比，没看出什么差别。与铀相反，钍则被强烈地吸附。沉淀经 EDTA 纯化（称再沉淀）后，铀全部被排除， ^{234}Th 也被排除了 99%。钍的去污效果与再沉淀时溶液的 pH 值有关，表 4 示出残留的 β 计数与再沉淀时加入的冰醋酸量的关系，因此必须控制冰醋酸的加入量。

表 3 铀、钍去污实验

示踪剂加入量	第一次沉淀 $BaSO_4$ 的计数率， 计数/分		再沉淀 $BaSO_4$ 的计数率*， 计数/分	
	α	β	α	β
90毫克 $UO_2(NO_3)_2$	6	9350	0	87

* 再沉淀时溶液 pH = 5。

表 4 钍的去污效果与冰醋酸加入量的关系*

冰醋酸加入量, 毫升	2	3	4	5	6	7	10
再沉淀BaSO ₄ 的β计数率, 计数/分	850	1100	1300	1449	1921	1992	2310

* 实验时每分钟含等量的UO₂(NO₃)₂溶液。

2. 氧的积累对测量结果的影响

Ba(Ra)SO₄再沉淀后, 氧开始在晶体内积累, 因此, 源的计数率也随之逐渐升高。图 4 是两种探头对 Ba(Ra)SO₄源测得的计数率随放置时间的变化曲线。

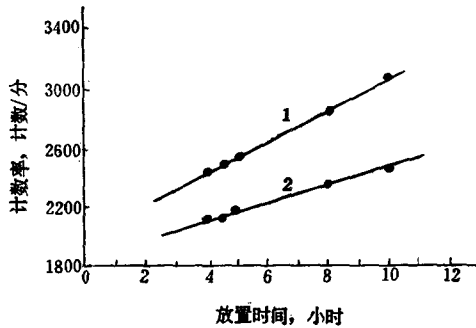


图 4 源的 α 计数率随放置时间的变化曲线

1 — ZnS 闪烁装置, $\sim 4\%$ /小时;

2 — 半导体探测器装置, 2.5% /小时。

为了消除氧积累的影响, 样品从 Ba(Ra)SO₄再沉淀至测量的时间应与测 K 系数时保持相同。本试验均控制在 4 小时。如果相差超过 0.5 小时, 则测量结果需按下式进行校正

$$Ra = \frac{Ra'}{1 + tf} \quad (2)$$

式中 Ra , Ra' 为校正后和校正前的镭结果; f 为氧的有效

积累速度 (%/小时)。ZnS(Ag) 闪烁装置的氩有效积累速度等于4%/小时，半导体探测器装置的氩有效积累速度等于2.5%/小时； t 为时间差数 (小时)。

3. 钡的干扰

钡是干扰元素之一。对于我们的情况，采用 α 饱和层测量，实际上镭结果的计算公式应为

$$Ra = K \frac{I}{P} \cdot \frac{BaSO_4}{BaSO_{4\text{标}}} \quad (3)$$

式中 $BaSO_4$ 和 $BaSO_{4\text{标}}$ 分别代表样品和标准源盘内的 $BaSO_4$ 量。

虽然加入的钡载体量相同，但当样品含有钡时， $BaSO_4/BaSO_{4\text{标}}$ 不等于 1。对于含钡样品镭的测定，可以根据 (3) 式用称重法或双载体法来测量。用称重法时制源过程中 $BaSO_4$ 不能有损失，但操作简单，直接用分析天平称出源内 $BaSO_4$ 的重量，与测得的 α 计数率一并代入 (3) 式即可算出样品的镭含量。双载体法每个样品必须同时制两份源，加入不同量的载体，通常将第二份源的钡载体量增加一倍，并用下式计算镭含量

$$Ra = \frac{Ra_1 \cdot Ra_2}{Ra_1 - Ra_2} \quad (4)$$

式中 Ra_1 和 Ra_2 分别为两份源用 (1) 式求得的镭结果。

钡载体量增加一倍会使源的厚度增加约40微米。实验证明，此一增量对实际计数率没有明显影响。

表 5 是用称重法对一批含钡样品校正前后的结果对比。制源时样品的称量为 1 克。

表5 含钡样品的影响及称重法校正的结果*

样品号	已知镭含量	已知钡含量	源内BaSO ₄ , 毫克	镭分析结果 ($\times 10^{-10}$)	
	($\times 10^{-10}$)	($\times 10^{-2}$)		校正前	校正后
01	3.30	5	122.0	2.20	3.12
02	4.30	2	97.0	3.58	4.19
03	4.95	7	146.1	3.07	5.09
04	6.60	10	169.3	3.54	6.70
05	7.58	6	133.2	5.34	8.15
06	8.52	3	107.6	6.42	8.20
07	8.92	8	159.6	5.51	9.89
08	9.90	10	173.0	5.54	10.70

* 表内已知钡含量是BaSO₄含量。

4. ²²⁴Ra 的干扰

²²⁴Ra 是 ²³²Th 的子体。经计算，与单位含量的 ²³²Th 处于平衡的 ²²⁴Ra 及其 Tn、ThA 两个短寿命子体的 α 辐射强度与单位含量的平衡铀中的 ²²⁶Ra 的 α 辐射强度相等，且能量高。可以预料，矿样中含有钷，其干扰是很严重的。

表 6 列出本法对一批镭、钷混合样品的分析结果。从纯钷源 C-12 可知，钷的镭当量（用平衡铀当量表示）对 ZnS (Ag) 探测器来说为 172%，半导体探测器为 76%。钷的干扰比 γ 计数法测镭严重。

5. ²²³Ra 的干扰

²²³Ra 是 ²³⁵U 的子体。²³⁵U 与 ²³⁸U 共生，丰度比为 0.71%:1。对于铀-镭、铀-钷平衡的原生铀矿，制源后 ²²³Ra 的 α 辐射率占 ²²⁶Ra 的 18%。可见当所用的标准源与矿石样品的 ²²⁶Ra 对 ²²³Ra 的比值不同时，分析结果会出现系统误差。

表6 钍的干扰情况

样品号	已知镭含量 ($\times 10^{-10}$)	已知钍含量 ($\times 10^{-2}$)	镭分析结果($\times 10^{-10}$)	
			半导体探测器	ZnS(Ag)探测器
C-12	0	0.296	7.70	17.33
∅P-06	9.18	0.055	9.65	12.60
70-122	0.54	0.122	3.84	8.42
70-129	5.10	0.106	8.00	13.43
71-250	11.30	0.305	19.23	29.00
71-251	9.16	0.653	27.75	45.45
71-253	9.45	0.081	11.25	14.30
71-254	1.02	0.128	4.40	10.33
71-259	12.70	0.039	13.72	13.85

用纯 ^{226}Ra 标准溶液和铀-镭平衡矿样制源测定 K 系数, 取得的数值相差很大(表7)。结果表明, 如果用纯 ^{226}Ra 标准源测定天然矿石样品, 则系统偏高, 偏高多少, 视样品的铀-镭, 铀-镭平衡破坏程度而定; 相反, 如果用铀-镭平衡的原生铀矿作标准来分析偏 ^{226}Ra 的样品, 则系统偏低。

表7内 ZnS(Ag) 对应于两种材料测得的 K 值相差如此之大, 是因为它对 ^{228}Ra 及其子体的 α 射线探测效率高于

表7 纯 ^{226}Ra 与原生铀矿对应的 K 系数比较

制源材料		1毫升纯 ^{226}Ra 溶液	1克原生铀矿
源内镭量, 克		3.26×10^{-9}	3.30×10^{-9}
半导体探测器测量值	I , 计数/分	110	140
	K , 克/(计数/分)	2.97	2.36
ZnS(Ag)探测器测量值	I , 计数/分	103	200
	K , 克/(计数/分)	3.18	1.65

^{226}Ra 的 α 射线探测效率。这说明, 应当改进 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 探测装置的探测条件。如尽量减小样品至闪烁体的距离, 适当提高光电倍增管的工作电压和降低定标器甄别阈等, 以相对提高 ^{226}Ra 的 α 射线探测效率。但是, 由于能谱性能不好, ^{223}Ra 的干扰 [和 ^{224}Ra 的干扰一样], 对 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 探测装置无论如何会比半导体探测器装置大。

六、讨 论

1. 适用范围

本法适用于分析不含其它镭同位素的 ^{226}Ra 样品。如某些水样和成分较简单的加工溶液等, 或铀-镭平衡状态与标准源相似的不含钍矿石, 它具有能快速提交分析结果的优点。

2. 饱和层检证

图 5 是在不改变 Ba/Ra 比率的情况下测得的计数率随 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ 装填量变化的情况。结果表明, 当装填量增至 50 毫克时, 实际上已经达到饱和层的厚度。我们的载体量为 80 毫克。

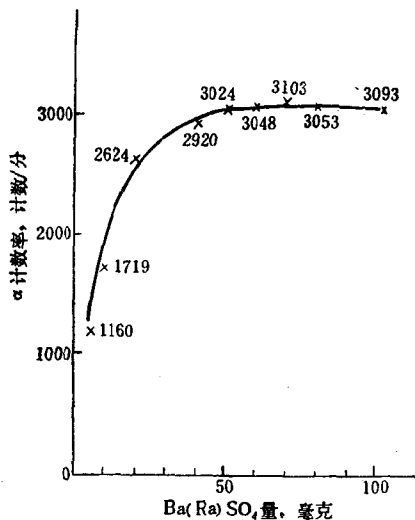


图 5 α 计数率随测量盘内 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ 量变化情况

因此，操作中容许丢失不超过 20—30 毫克的 $Ba(Ra)SO_4$ 。

3. 对制作少量载体源——“薄层”源的考虑〔1〕

许多 α 计数法测镭的资料，都是介绍制作少量载体源提供 α 测量。我们曾按图 6 的流程试制此种源，载体用量仅有 7.8 毫克 $BaSO_4$ 。由于载体量少，化学处理时操作难度大，不但制源不易均匀，实践中还发现镭的损失严重，因此没有取得理想的结果。

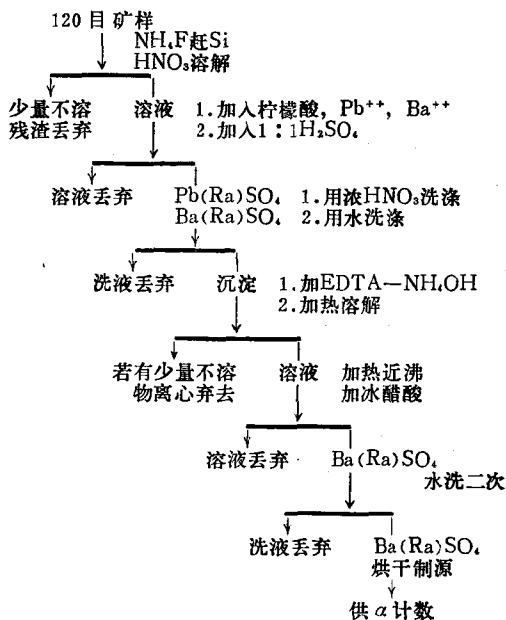


图 6 少量载体源制源流程示意图

为检验该法的溶矿和其它处理步骤中镭的回收情况，我

们曾同时用 P641-4 铀-镭平衡粉末标准源和标准镭溶液，按其化学处理步骤处理，并由射气法测镭逐一检查。

粉末源共取 5 份，每份称重 1 克，置于 150 毫升的烧杯内，用少量水湿润，加入 4 克 NH_4F ，滴加数滴 HF ，加热至不冒白烟。稍冷，加王水 20 毫升，加热至样品溶解，滤去少量不溶物。溶液蒸发至干以除去大量的氟、氯离子。加少量 HNO_3 及蒸馏水，加热溶解，然后将此溶液直接提交射气法测镭，检验溶矿的回收率。结果列于表 8。

表 8 少量载体源的溶矿回收率

序 号	1	2	3	4	5
溶液含镭量, $\times 10^{-10}$ 克	33.9	32.4	32.9	34.9	34.6
回 收 率, %	83.5	79.8	81.2	86.2	85.4

表 9 是用标准镭溶液检验除溶矿外其它化学处理步骤的回收情况。

表 9 少量载体源法对标准镭溶液制源的回收率的影响

检查对象	标准溶液	第一次 BaSO_4 沉淀清液*	浓 HNO_3 洗液	BaSO_4 再沉淀清液*	最后供制源的沉淀**
含镭量, $\times 10^{-10}$ 克	16.70	0.146	2.45	0.26	14.75
回收率, %	—	0.9	14.6	1.5	88

* 沉淀后的清液与洗沉淀的废水一起，滴入 1 毫升 10% BaCl_2 和 2 毫升 1:1 H_2SO_4 制沉淀，将沉淀用 EDTA 溶解提交测镭。

** 将沉淀用 EDTA 溶解提交测镭。

结果均表明，镭的损失非常严重，这是导致分析结果不好的根本原因。

改用制作饱和层源，虽然化学处理的难度小，但它却牺牲了良好的能谱特性和降低了探测灵敏度（表10）。饱和层源的 α 探测灵敏度只有少量载体源的20%左右。

表10 饱和层源和少量载体源优缺点比较

源的类型	化学处理	Ba(Ra)SO ₄ 损失	探测灵敏度	能谱性能
少量载体源	较难	不允许	较高	良好
饱和层源	易	允许损失25%以内	低	差

图7是半导体探测器装置测得的饱和层源和少量载体源的 α 谱线，由于饱和层源的自吸收和能量软化的影响，不能充分利用半导体探测器的能谱分辨本领来排除 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的

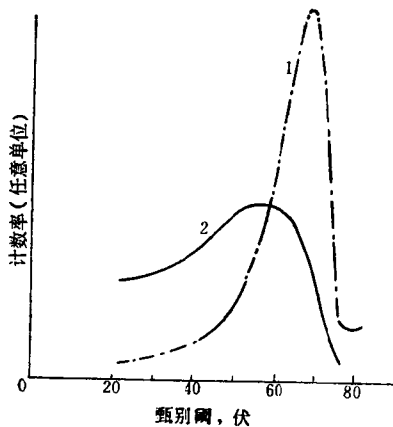


图7 少量载体源（1）与饱和层源（2）的 α 谱

干扰。

关于饱和层源的 α 谱线和应用例子，可参阅参考文献〔5〕。我们测得的 α 谱线形状和参考文献〔5〕的很类似。

图 8 是半导体探测器装置附加准直器后对电镀天然铀源

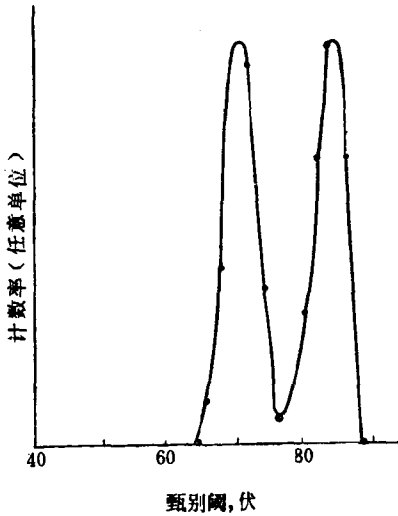


图 8 天然铀源的 α 谱 (测量时附加准直器)

测得的 α 谱线，能量分辨率达 5%。 ^{228}Ra 、 ^{224}Ra 和 ^{222}Rn 及其短寿命子体放出的 α 射线能量，均大于 ^{226}Ra 的 α 射线能量，且相差在 15% 以上。因此，如果能够解决制作少量载体源存在的困难并采用半导体探测器 α 能谱仪，便可以有效地将这些干扰元素的 α 射线甄别开来，这或许是一种能够快速获得准确测镭结果的方法。

参 考 文 献

- 〔1〕 中国科学院原子核科学委员会编辑委员会文献编辑室编辑，铯和钷的测定方法，第75—90页。
- 〔2〕 B.И.沙什金，铀矿地质，第6期，61 (1964)。
- 〔3〕 H.Duquesne et al., *Health Physics*, 9, 927—930 (1963)。
- 〔4〕 白弟，铀矿床放射性勘探，第38页，中国工业出版社，1961年。
- 〔5〕 让·唐居伊著，于立德译，用半导体探测器探测 α 粒子，原子能出版社，1976年。

β 计数法测定铀

张庆文

本文介绍一种测定矿石样品中铀含量的放射化学方法。样品用 Na_2O_2 熔融，由磷酸二丁酯(HDBP)萃取分离出 UX_1 并移入测量盘内制源作 β 测量，从而确定铀含量。与常用的 β - γ 法、 γ 能谱法和亚锡法、亚铁法等测铀方法相比，它不受镭、钍、 RaE 、 ^{40}K 、钷、铜等元素的干扰，也不受铅、钡等高原子序数元素和样品密度的影响，因此可以用来测定这类样品以及普通样品的铀含量。

一、原 理

在天然放射性元素中，钍的各种同位素只有 ^{234}Th (UX_1 及其短寿命子体 UX_2 一起) 是有意义的 β 辐射体。如果预先对矿样进行化学处理，将钍的同位素单独提出并作 β 计数，便可以准确地测定 UX_1 。由于矿样中 UX_1 与铀平衡，因此能够计算出样品的铀含量而不受其它放射性元素或非放射性元素的干扰。

UX_1 的分离可以采用沉淀分离、离子交换或萃取等方法。就萃取而言，钍的萃取剂有 TOPO、TTA、N-苄基苯胺、HDBP 等。由于在一定条件下 HDBP 对少数元素的萃取有较高的选择性和对钍有很高的萃取率^[1]，因此我们采

用 HDBP-苯萃取分离钍。萃取条件选定：HDBP 浓度为 0.25M (体积比为 5%)，水相为 4 NHNO₃，相比 1:8 (有机相 5 毫升，水相 40 毫升)，萃取时间 4 分钟。在此条件下已分别用放射性示踪证明，钍的萃取率为 100%，镭 (²²⁶Ra, MsTh₁, ThX, AcX)、铅 (RaD, RaB, ThB)、铋 (RaE, ThC)、铀 (MsTh₂, ²²⁷Ac) 的萃取率实际上都等于零。⁴⁰K 的萃取率也等于零。

铀的萃取率实际上是 100%，但样品经碱熔后，铀大部分在溶液中被滤去。只是当样品中含有锆及稀土元素时，锆被完全萃取，铈、铈(IV)、铈、钷被部分萃取。因此本法能有效地分离掉其它元素并获得放化纯的 UX₁β 源。

分析铀钍混合样品中的铀含量，应当注意到，制源后，源内由 ²²⁸Th 的衰变开始积累起 ²²⁴Ra (半衰期 3.64 天)。因此，在 ²²⁴Ra 之后的短寿命子体也开始积累而使 β 射线强度按一定速度增长。理论计算与实际测量均指出，制源后三小时内作测量，由于 ²²⁴Ra 的积累造成的铀当量不足 0.3%，也就是说，含量为 1% 的钍最多也只相当于 0.003% 的铀被记录。可见每份样品中即使钍含量高达 10 毫克时也不致于影响铀的测定。但用这种方法分析低含量铀矿样品时，则应考虑钍的影响。

二、化学处理

1. 按表 1 称取粒度为 100 目以上的矿石样品和规定加入量的 2/3 左右的 Na₂O₂ 于 30 毫升的瓷坩埚或镍坩埚中，用玻璃棒搅匀，再将余下的 Na₂O₂ 均匀地盖于样品上。
2. 在预热至 550—600°C 的马弗炉中熔融 10 分钟左右。

表 1 矿样和 Na_2O_2 用量表

铀含量范围, %	矿样称量, 克	Na_2O_2 加入量, 克
<0.5	1	5—7
0.5—5	0.5	3—5
5—50	0.1	2—3

3. 取出冷却, 置入 250 毫升的烧杯中。加入 60 毫升 5% (体积) 三乙醇胺溶液提取。当称量为 0.1 克时可能会遇到沉淀很少的情况, 此时应加入数毫克 MgCl_2 作载体。

三乙醇胺的作用主要是络合铁(III)从而使其转入溶液。因为萃取时铁(III)的存在会严重影响两相的分层。

4. 用水洗出坩埚。将提取物加热近沸, 过滤。用热水洗涤烧杯三次, 洗液倒入漏斗内过滤。用热的 0.5% (重量) NaOH 溶液洗涤漏斗内的沉淀 4—5 次。弃去滤液。

5. 用热的 4 NHNO_3 将滤纸上的沉淀溶入 60 毫升分液漏斗中。另用约 5 毫升热 4 NHNO_3 洗涤烧杯和坩埚, 洗液滤入分液漏斗中。继续用 4 NHNO_3 洗涤滤纸, 使溶液体积达 40 毫升。

6. 加入 5 毫升 0.25 M HDBP -苯, 振荡萃取 4 分钟。

7. 静置约 10 分钟, 弃去水相 (若有水珠状第三相形成, 可加入 5—10 毫升浓 HNO_3 萃洗, 分层即可完全)。

8. 各用 5 毫升 1:1 HNO_3 萃洗有机相 2 次, 萃洗时间每次约半分钟, 弃去水相。

由于 HDBP 对 UX_1 的萃取率特别高, 以致对有机相连续萃洗 12 次的情况下, 计数率降低也不会超过 0.5%。因此当有机相附有杂质时, 可以适当增加萃洗次数。

9. 将有机相放入测量盘中，于红外灯下烘去苯即可供 β 测量。测量盘预先放置一张大小与盘面（表面皿面）略小的丝擦镜纸。擦镜纸的使用给制源带来很大的方便。当苯烘干后，HDBP即能均匀地被吸润在纸上而保证制源的质量。

本方法所用的水为离子交换水，所用试剂为二级或三级试剂。其中HDBP为上海试剂总厂第三分厂出品（北京化工厂也生产）。

三、测 量

我们用电子管单道谱仪作为探测装置，作积分测量，将仪器原 α 探头中的ZnS(Ag)闪烁片取出换用 $\phi 75 \times 1$ 毫米ST-401型塑料闪烁体。在塑料闪烁体近样品的一面附上一张厚度为0.02毫米的屏蔽铝箔。铝箔不但能吸收源放出的 α 射线，同时还能将闪光反射至光电倍增管，从而提高光收集效率。

测量仪器也可以用高压较稳定、输出功率较大的各种定标器。 β 探头也可以用GDB-75型或GDB-100型光电倍增管自行安装。

测量盘用 $\phi 70$ 毫米的玻璃表面皿。表面皿应加以选择，要求几何条件尽量相近。将擦镜纸剪成 $\phi 65$ 毫米大小，制源时每盘放置一张。

钾玻璃会增加本底，因此应选用钠玻璃表面皿作测量盘。测本底时需放置一空盘进行测量。

测量盘最好专门制作，用 $\phi 75$ 毫米高5毫米的平底玻璃盘。使用此种测量盘估计还可以提高探测效率。

用 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ （硝酸铀酰）标准溶液经萃取后

制源测定系数。我们配制的标准溶液铀浓度为7.88毫克/毫升，准确取样1毫升，加入40毫升4 NHNO_3 ，按化学处理手续用HDBP萃取制源。测得计数率为 $I_{\text{标}}$ ，代入(1)式

表2 对7.88毫克/毫升
铀溶液的重复测量结果

序号	测量结果, 毫克	与平均值相 对偏差, %
1	7.79	-1.2
2	7.57	-3.8
8	7.60	-3.4
4	7.94	0.9
5	7.84	-0.4
6	7.85	-0.3
7	7.83	-0.5
8	7.86	-0.2
9	7.99	1.5
10	7.90	0.4
11	7.82	-0.6
12	7.74	-1.7
13	7.91	0.8
14	8.15	3.6
15	7.94	0.9
16	8.01	1.8
17	7.82	-0.6
18	8.05	2.3
19	7.94	0.9
20	8.15	3.6
21	7.93	0.8
22	7.64	-2.9
23	7.98	1.4
24	7.71	-2.0

表3 对1.21毫克/毫升
铀溶液的重复测量结果

序号	测量结果, 毫克	与平均值相 对偏差, %
1	1.20	-0.8
2	1.22	0.8
3	1.22	0.8
4	1.18	-2.5
5	1.21	0
6	1.16	-4.1
7	1.21	0
8	1.22	0.8
9	1.19	-1.7
10	1.25	3.3
11	1.19	-1.7
12	1.27	5.0
13	1.28	5.8
14	1.23	1.7
15	1.21	0
16	1.21	0
17	1.18	-2.5
18	1.16	-4.1
19	1.19	-1.7
20	1.22	0.8
21	1.21	0
22	1.20	-0.8
23	1.23	1.7
24	1.16	-4.1
25	1.19	-1.7
26	1.18	-2.5

计算系数 K ：

$$K = \frac{U_{\text{标}}}{I_{\text{标}}} = \frac{0.00788}{I_{\text{标}}} \text{ [克/(计数/分)]} \quad (1)$$

用不少于10份源测定系数，取其平均值。因铀的萃取率为100%，故可以选留与平均值最接近的一盘源作为日常工作的仪器检查源。

样品的铀含量由下式计算：

$$U = KI/P \quad (\text{克镭/克矿样}) \quad (2)$$

式中 K 为系数，由 (1) 式求得； I 为矿石样品制源测得

表 4 含量 < 0.1% 管理样测量结果

样 号	原 含 量, %	测 量 结 果, %	相 对 偏 差, %
P69-4	0.050	0.051	2.0
47	0.090	0.097	7.8
48	0.024	0.025	4.2
49	0.041	0.041	0
57	0.031	0.034	9.7
58	0.034	0.031	-8.8
59	0.032	0.035	9.3
60	0.036	0.036	0
61	0.047	0.045	-4.3
62	0.050	0.047	-6
63	0.057	0.066	-1.5
64	0.075	0.076	1.3
67	0.098	0.100	2
65	0.066	0.063	-4.5
69	0.073	0.075	2.7
70	0.080	0.077	-3.7
1	0.083	0.085	2.4
3	0.037	0.040	8.2

的计数率 (计数/分); P 为矿石样品称量(克)。

四、试验结果

用选定的条件重复萃取并测定铀含量为7.88和1.21毫克/毫升的铀溶液, 每次取样1毫升, 结果列于表2和3。分析结果的相对标准误差 e 分别为1.9%和2.5%。

对铀含量为0.1—0.03%和0.3—0.1%的两批管理样品的单次分析结果分别列于表4和5。它们的系统误差 f 用

表5 含量>0.1%管理样测量结果

样号	原含量, %	测量结果, %	相对偏差, %
P654-5	0.310	0.316	2
P69-5	0.330	0.327	-1
66	0.105	0.102	-3
4	0.125	0.132	5.6
5	0.254	0.257	1.2
6	0.240	0.228	-5
11	0.266	0.274	3
13	0.231	0.233	0.9
15	0.108	0.110	1.9
28	0.240	0.235	-2.1
34	0.197	0.194	-1.5
37	0.168	0.167	-0.6
43	0.147	0.140	-4.8
44	0.270	0.275	1.9
45	0.179	0.182	1.7
8	0.206	0.208	1
25	0.219	0.220	0.5
27	0.185	0.185	0
30	0.247	0.248	0.4
31	0.234	0.235	0.4

$$f = \frac{\sum x_1}{\sum y_1} \quad (3)$$

计算。算得的结果分别为1.009和1.004。两组样品分析结果的最大允许相对偏差分别用6%和13%来衡量，均不超出此范围，合格率都是100%。

表6 给出一批铀钍混合样品铀的分析结果，对铀含量大

表6 铀、钍混合样品的测量结果

样品编号	测量结果, %	已知铀含量, %	已知钍含量, %
C-12	0.000	0.000	0.273
GT-69-2	0.001	0.002	0.306
GT-69-1	0.007	0.006	1.274
70-122	0.013	0.010	0.122
70-129	0.159	0.156	0.106
71-250	0.212	0.219	0.305
71-251	0.210	0.207	0.653
71-253	0.264	0.271	0.081
71-254	0.022	0.025	0.128
71-230	0.066	0.069	0.015
71-233	0.054	0.057	0.019
71-247	0.030	0.031	0.045

表7 偏镭样品测量结果

样品编号	测量结果, %	原β-γ法结 果, %	原化学分析 结果, %	$C = \frac{Ra}{U}$
镭溶液	0.000	—	—	$Ra = 1.63 \times 10^{-3}$ 克
72-61	0.017	0.020	0.023	2.5
72-177	0.038	0.031	0.039	8.9
72-14	0.056	0.054	0.059	1.5
72-150	0.079	0.075	0.085	5.6
72-144	0.080	0.079	—	3.7
72-2081	0.108	0.119	0.110	10.0

于0.03%的样品, f 值为98.5%, 合格率同样是100%。

表7是对一批偏镭样品的分析结果。其中72-2081号样品的铀-镭平衡系数接近于10, G-M计数管 β - γ 法和本方法对该样品重复测量14次, 分析结果的对比如表8中。与平均值比较, 本方法的合格率 P 为100%, 相对标准误差 ϵ 为3.5%。但是, 测定这样的样品, G-M计数管 β - γ 法已显得无能为力, 其结果根本无法进行质量评价。

表9是本方法对一批含钒磷灰石样品的分析结果与计数管 β - γ 法和亚铁法结果的比较。该批样品钒的含量为1%左

表8 两种方法对72-2081样重复测量结果比较

序号	β 计数法结果		G-M计数管 β - γ 法结果	
	测量结果, %	与平均值相对偏差, %	测量结果, %	与平均值相对偏差, %
1	0.104	-3.7	0.165	38.6
2	0.107	-0.9	0.120	0.9
3	0.106	-1.8	0.157	31.9
4	0.102	-5.6	0.087	-26.8
5	0.106	-1.8	0.130	9.3
6	0.106	-1.8	0.071	-40.3
7	0.104	-3.7	0.037	-68.8
8	0.112	3.7	0.144	21.0
9	0.112	3.7	0.126	5.9
10	0.114	5.6	0.143	20.4
11	0.111	2.7	0.121	1.7
12	0.108	0	0.147	23.5
13	0.111	2.7	0.051	-57.1
14	0.112	2.7	0.166	39.4
质量评价	$\bar{X} = 0.108$ $P = 100\%$ $\epsilon = 3.5\%$		$\bar{X} = 0.119$ $P = 21\%$ $\epsilon = 35\%$	

表9 含钒磷灰石矿中铀的分析结果比较

样号	β 计数法, %	β - γ 法, %	亚铁法, %
222	0.018	0.013	0.018
223	0.083	0.076	0.070
224	0.038	0.037	0.035
225	0.112	0.113	0.110
226	0.084	0.086	0.083
227	0.044	0.039	0.041
232	0.071	0.074	0.076
233	0.109	0.108	0.103
234	0.047	0.047	0.044
237	0.079	0.079	0.078
238	0.047	0.041	0.041
239	0.070	0.066	0.061
240	0.083	0.077	0.074
241	0.100	0.092	0.087
246	0.075	0.077	0.075
247	0.049	0.050	0.048

表10 铁矿中铀的分析结果比较

样号	β 计数法, %	β - γ 法, %	亚铁法, %	样品铁含量, %
27	0.039	0.041	0.039	≥ 10
28	0.047	0.053	0.047	≥ 10
29	0.025	0.030	0.029	> 10
80	0.034	0.037	0.029	> 10
89	0.070	0.066	0.065	> 10
90	0.043	0.040	0.038	> 10
91	0.066	0.069	0.062	> 10
95	0.036	0.034	0.032	≥ 10
96	0.048	0.050	0.049	≥ 10
97	0.060	0.062	0.058	≥ 10

右，五氧化二磷的含量在20%左右。表10为上述三种方法对一批含铁样品分析结果的比较， β - γ 法结果已用密度校正法对测量值作了校正。铁的结果用光谱半定量测得。

所列各表中本方法给出的结果，每份样品的计数时间除7.88毫克/毫升铀溶液为(2—3)×2分钟外，其余均为(2—3)×4分钟，并且都是单次分析数值而不是两次“平行分析”的平均值。矿石样品的分析，称量均为1克。本法的分析结果良好。

五、讨 论

1. 测量灵敏度

与1毫克铀平衡的 UX_2 的 β 辐射率为750计数/分， $2\pi\beta$ 测量条件最高可获得375计数/分。我们的测量装置，其计数率为250计数/分，系数 K 为 4.00×10^{-6} 克/(计数/分)。进一步改善测量几何条件， K 值不难取得 3.5×10^{-6} 克/(计数/分)。

谱仪的 α 探头经改装后，本底计数率 $I_{\text{底}}$ 为140计数/分。

若按 $3\sqrt{\frac{I_{\text{底}}}{t}}$ 作为“最低灵敏度”计算，测量时间（即计数时

间） t 取10分钟，则最低灵敏度为0.004%克铀量。如果将探头置于铅室内，本底计数率 $I_{\text{底}}$ 可以降至每分钟70次以下。

2. 铀含量适应范围

用铀量为39.4毫克，7.88毫克，1.21毫克，0.61毫克和

0.17毫克的标准溶液按所选定的条件萃取制源测量，测得的计数率与铀含量很好地成线性关系（图1）。因此，若按表1称取样品，本方法可以测定铀含量为0.005—50%的矿样。

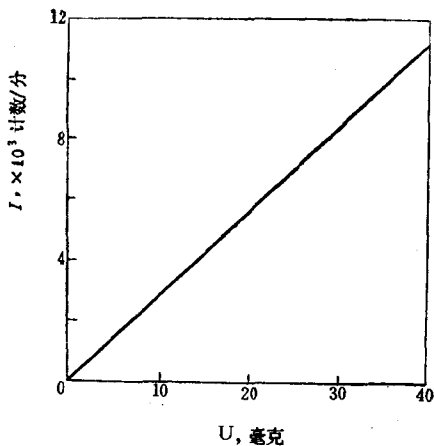


图1 β 计数率随铀量变化曲线

3. UX_1 的萃取率与HDBP浓度的关系

萃取温度为 10°C 时，固定所采用的其它条件，改变HDBP的浓度分别对7.88毫克铀量的硝酸铀酰溶液萃取，计算萃取率。实验结果示于图2。当HDBP的浓度达到5%以上时， UX_1 的萃取率实际上为100%。

4. UX_1 的萃取率与萃取温度的关系

在选用的萃取条件下，改变溶液温度，分别对7.88毫克铀量的硝酸铀酰溶液萃取，获得的结果表明，在 $10-40^{\circ}\text{C}$ 的实验范围内，萃取率不受溶液温度的影响，实际上都是100%

(图3)。这说明本方法不受季节的限制, 因而无需采取控制

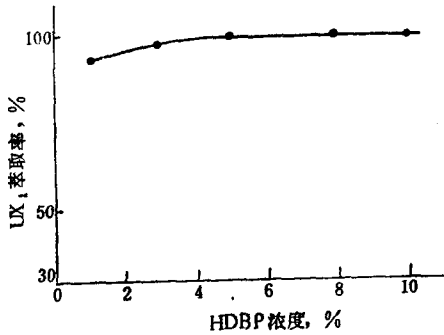


图2 UX₁萃取率与HDBP浓度的关系

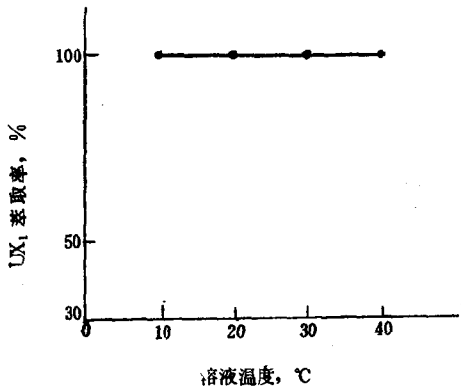


图3 UX₁萃取率与溶液温度的关系

温度的特别措施。

5. 萃取率的计算方法

本试验萃取率的计算, 是用同样的萃取条件对同一份溶液分别作两次萃取制源, 作 β 计数, 测得计数率为 I_1 和 I_2 ,

然后按下式计算萃取率 A ：

$$A = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = 1 - \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

在选定的条件下，镭的萃取率等于零是通过萃取 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{Cl}_2$ 溶液测得；铅、铋的萃取率等于零是由萃取纯 RaD ($\text{RaD} + \text{RaE}$) 溶液得以证明；铊的萃取率等于零是由萃取硝酸铊标准溶液测得。实际上，铊溶液萃取后放置30天(有必要时每隔5天再萃取一次)， ^{224}Ra 即可衰变完毕而只剩下 ^{228}Ra 和 ^{228}Ac 。

6. 干扰元素

锆和稀土元素中的镨、铈、铕、钇是可能造成干扰的元素。图4给出了HDBP- CCl_4 (20%，体积) 在 HNO_3 介质中对钍和稀土元素萃取时，其萃取率随酸度变化的关系〔2〕。当矿样中含有锆和稀土元素时，本方法的熔矿处理未能将它们分离。由于锆被完全萃取以及稀土元素被部分地萃取而消耗HDBP，从而有可能造成钍的萃取不完全。同时还会增加 β 源内的金属量，从而增加 β 射线的自吸收。

实验表明，将源内的HDBP量增加一倍，即增加大约250毫克，由于自吸收使 β 计数率降低10%。可见引入源内杂质的量不超过50毫克时，实际上自吸收的影响可以忽略。实验还表明，萃取前溶液内加入50毫克的 ZrCl_4 ，看不出会影响钍的分析结果。因此当取样为1克时，本方法可以适用于锆和稀土元素中的镨、铈、铕、钇、铽等元素的总含量不高于5%以及钍含量不超过1%的样品。是否能适应更高的范围，我们没有进一步作实验。

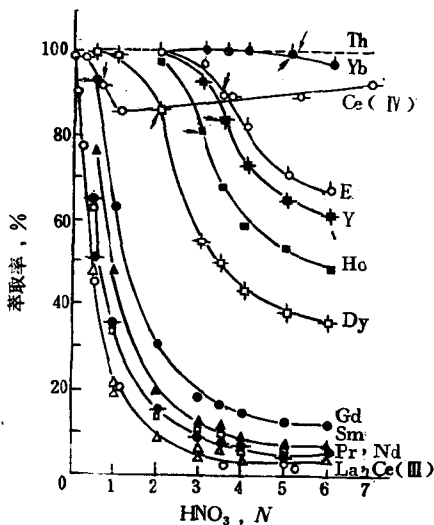


图 4 在不同硝酸酸度下稀土元素和钍的萃取率

稀土元素和钍的浓度: $0.05MRE(NO_3)_3$, $0.05MTh(NO_3)_3$;
 HDBP- CCl_4 浓度: $1.009M$; 箭头表示: 大于箭头所示的酸度时
 两相透明, 等于和小于此酸度时有机相有粘状层。

在我们的例行分析中, 所遇铈和稀土元素总含量高达 5% 的样品机会不多。若进一步选择其它化学分离的方法 (如 BPHA 萃取除铈或用 N-苄基苯胺从铈、稀土元素中萃取钍等), 则解决含铈和稀土元素高的样品也是可能的。此外, 当样品中铈含量高时, 也可以采用减少称量的办法进行测量。

7. 生产情况

本方法结合了化学分离和放射性测量的优点, 因此解决

了 G-M 计数管 β - γ 法存在的不能测定严重偏镭、含钍和高含量样品这三个问题。经几年的生产实践已证明本方法是可行的，特别是用以分析严重偏镭样品以及含钍样品。但是样品需经化学处理，故成本较高，测量效率较低，一个工作者手工操作每天只能分析十几份样品。

曾发现少数样品萃取时，有机相出现一些蜡屑状白色物，若量不多，可以将其一并移入测量盘烘干制 β 源，对分析结果没有影响。量多，则需重新称样熔矿，样品重熔后，此种蜡屑状物不一定会出现，看来其出现与化学处理条件有关系。努力提高装置的探测效率和降低本底，以求减少样品称量，会有助于消除这种影响。

参 考 文 献

- [1] A. K. De, Solvent Extraction of Metals, p.162—164, London (1970).
- [2] 苏镛等, 原子能科学技术, 第 6 期, 734 (1964).

放化纯RaD(RaD + RaE)源的制备与标定

张庆文

放化纯 RaD(RaD + RaE)源(简称纯 RaD 源),是矿石放射性测量需备的一种较常用的标准源。本文介绍其制取和标定的几种方法。

一、制备程序

选取不含钍的高含量沥青铀矿(铀含量在10%以上),将其硫酸浸取铀后的尾渣用热水洗净残留的可溶物质。加入15%(重量比,下同)Na₂CO₃,用水稀释。加热至60°C,搅拌2—3小时,过滤,用水洗滤渣数次。用1.6NHNO₃溶解滤渣内碳酸盐,过滤。溶液加入适量硫酸以制取硫酸盐沉淀。

沉淀主要成分为CaSO₄, PbSO₄和BaSO₄等难溶硫酸盐及少量穿滤泥砂。

我们已从数吨高含量提铀尾渣中提取了大量的此类“粗产品”。经鉴定, RaD和Ra的含量用平衡铀当量表示分别约为300%和30%(克铀/克矿样)。

为制取放化纯 RaD 源,还必须把镭和可能残留的少量铀分离掉。下面介绍我们采用的两种分离方法。

1. 硫酸盐-碳酸盐转化分离镭

利用铅、钡(镭)的硫酸盐和碳酸盐溶度积的悬殊差异, 可以用相互转化的方法将镭分离掉。

(1) 取“粗产品”10—20克, 加入5毫升10% BaCl_2 溶液和10克 Na_2CO_3 , 20克 Na_2SO_4 , 用热水稀释至200毫升。

(2) 加热至近沸, 搅拌3—4小时, 滤去水溶液。

(3) 用300毫升1N HNO_3 溶解沉淀, 滤去不溶物。

(4) 滤液加入2毫升10% BaCl_2 溶液, 加热至近沸, 滴加浓 Na_2SO_4 溶液, 制取硫酸盐沉淀, Na_2SO_4 溶液过量数毫升。

(5) 放置6小时以上, 虹吸弃去清液, 再加入5毫升10% BaCl_2 和10克 Na_2CO_3 , 20克 Na_2SO_4 , 用300毫升水稀释, 在加热至60°C的条件下搅拌2—3小时, 滤去清液。

(6) 滤渣用约300毫升1N HNO_3 溶解, 滤弃不溶残渣(可对清液取样供标定RaD含量)。

(7) 清液加热至近沸, 滴加浓 Na_2SO_4 溶液制取硫酸盐沉淀。该沉淀为 $\text{Pb}(\text{RaD})\text{SO}_4$ 。

(8) 收集并洗净沉淀, 再与预先准备好的粒度为100目的一定数量(本工作取~250克)的无放射性石英砂粉一起均匀搅拌, 烘干, 再搅匀。

2. 用分级沉淀法分离镭

(1) 取“粗产品”约20克, 同样用 Na_2CO_3 将其中的铅转化为碳酸盐并溶解入150毫升1N HNO_3 中。

(2) 用 HNO_3 将溶液调至4N, 用10毫升5% HDBP-苯溶液振荡萃取4—5分钟, 萃取可能残存的铀、钍^[1], 弃

去有机相。

为了将镭完全分离，采用 EDTA 络合，分级沉淀的方法。图 1 给出了在有 EDTA 存在下，铅、钡硫酸盐沉淀率

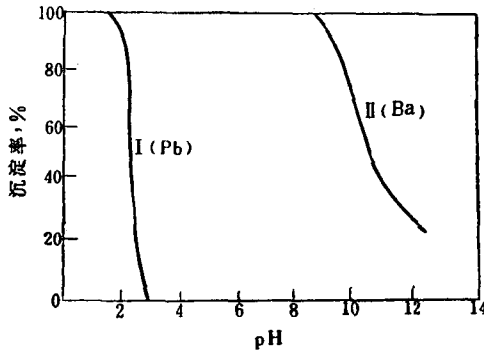


图 1 铅、钡硫酸盐沉淀率与溶液 pH 的关系

与溶液 pH 之间的关系〔2〕。可见当 EDTA 存在时，溶液酸度调至 pH 4—6，可以用硫酸钾或硫酸钠将钡和镭沉淀出来而铅仍然保留于溶液中。

(3) 将萃取后的溶液稀释至 300 毫升，加入 10 克 EDTA 二钠盐，煮沸，用 NaOH 调 pH 5—6。

(4) 滤去氢氧化物沉淀，溶液继续加热至 80—90°C，加入 1 毫升 10% Ba(NO₃)₂，搅拌下滴加 20 毫升 10% Na₂SO₄ 溶液。

(5) 静置 4 小时，过滤，丢弃沉淀。

(6) 清液加热至近沸并用 HNO₃ 将 pH 调至 0—1，PbSO₄ 即完全析出。

(7) 收集并洗净 PbSO₄ 沉淀，与一定数量的粒度为 100 目的石英砂粉末混和，烘干，搅匀。

以上两种方法制备的 RaD 源，经过用比色法和射气闪烁法测定，铀和钍的含量均小于 0.001%，镭含量小于 3×10^{-12} 。

只要保证所用的石英砂粉内不含有钾，源内钾的含量实际上等于零。

在铀、钍和镭这三个天然放射系中，除铀、钍、镭的同位素外，有意义的干扰元素还有 ^{231}Pa 和 ^{227}Ac 。 ^{231}Pa 是 α 辐射体，即使存在，短时间内（数年内）也不致造成干扰。同时文献〔3，4〕指出，矿石提镭后， ^{231}Pa 浓集于残渣中。我们的程序类似提镭程序，经多次从 HNO_3 溶液中制取 BaSO_4 沉淀后，可见能溶于稀的 H_2SO_4 和 HNO_3 的硫酸镭已被保留在矿渣或 HNO_3 溶液中，因而被分离掉。

^{227}Ac 是弱的 β 辐射体，本身不会造成干扰，它的干扰是通过积累起由 ^{227}Th 至 ^{207}Pb 的子体而实现的。对于处于放射性平衡的沥青铀矿，即使 ^{227}Ac 被全部带入 RaD 产品，其大于 0.5 兆电子伏能量的 β 辐射率，也只约占 RaE 的 1.5%。 γ 的干扰较强，约占 10% 且能量也较高。

文献〔3〕认为 BaSO_4 沉淀能够将镭吸附，但是没有说明沉淀的条件和吸附率。文献〔4〕则明确地指出，从酸溶液中分离 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ 后，镭则留在溶液中。

为验证杂质 ^{227}Ac 的载带量，我们用 ^{228}Ac 作示踪。将只含有 ^{228}Ra 和 ^{228}Ac 的 1 N HNO_3 溶液 300 毫升，模仿制备 RaD 源的条件作 BaSO_4 (200 毫克)、 PbSO_4 (40 毫克) 沉淀，迅速收集沉淀制 β 源作 β 测量，停放 6 和 24 小时后用同样的测量条件进行第二次和第三次测量，测量值按 ^{228}Ac 的半衰期为 6.13 小时进行校正，结果列在表 1 中。

镭在本沉淀条件下约被载带 30%。这说明无论用上述那

一种分离手段制取的纯 RaD 源, ^{227}Ac 的载带量是微不足道的, 最大也不超过矿石中原含量的 3%。其 γ 辐射强度, 只及 RaD 的 0.1—0.3%。

图 2 给出了制得的 75-3 号纯 RaD 源与铀-镭平衡标准源

表 1 BaSO_4 沉淀对钢的载带率

沉淀后停留时间	1 小时	5 小时 55 分	22 小时 35 分
测得的 β 计数率, 计数/分	1734	3025	4472
算得的载带率, %	—	32.3	29.4

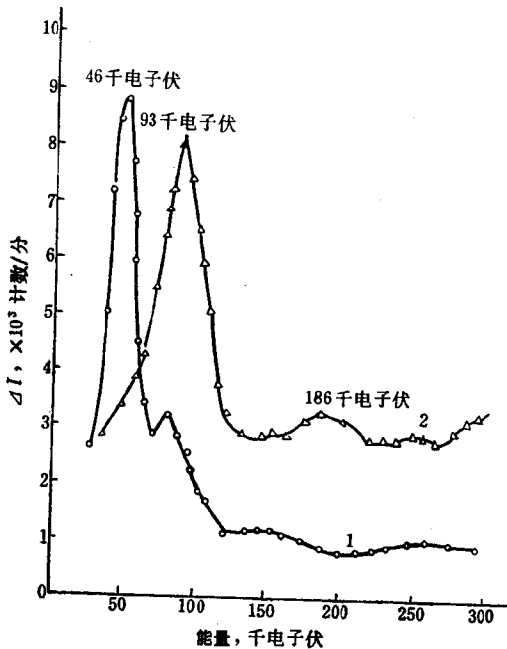


图 2 两种源的 γ 谱

1 —— 纯 RaD (RaD + RaE) 源, 75-3 ($RaD = 16.73\%$ 平衡铀, 61 克); 2 —— 铀-镭平衡源, P651-3 ($U = 1.40\%$, 48.1 克),

的 γ 射线谱。两谱线由单道谱仪测得，测量条件为 $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI(Tl) 晶体，道宽12千电子伏，采用2.5毫米铝吸收屏〔不包括 NaI(Tl) 晶体包壳〕，没有考虑 β 射线穿透的问题。

RaD 含量的标定，必须停放 50 天后进行，注明标定日期，以供该源长期使用时对 RaD 衰变作校正用。

二、RaD 含量的标定

由于 β 辐射谱是连续的，加之源的自吸收和某些测量条件受到限制，对 RaD 进行绝对测定是困难的。在没有已知含量的纯 RaD 源的情况下，我们采用铀含量已知的纯铀源对纯 RaD 源作相对测量的方法，在几套塑料闪烁计数装置上进行标定，通过用 UX_2 的 β 辐射强度来计算 RaE 的 β 衰变率，从而求出 RaD 的含量。此种方法，也可以理解为用纯铀源测定装置的探测效率，然后对纯 RaD 源作绝对测量。

纯铀源和纯 RaD 源发射的 β 粒子的最大能量不同，因此，要获得准确的结果，标定时必须严格遵循下列原则：

1. 采用放射化学的手续制作标定源，其厚度应尽可能地薄以减小自吸收的差异造成的误差。

本方法采用 $\phi 70$ 毫米的玻璃盘制备标定源。源的面密度为 1.5 毫克/厘米²。为保证辐射体均匀地分布于盘内，制源时用了辅助薄膜，否则面密度还可以降至 1 毫克/厘米² 以下。

1.5毫克/厘米²的面密度对 UX_2 和 RaE 的 β 射线自吸收的差别是微小的。即便如此，我们还是进行了“自吸收差异”的校正。校正方法是，用 0.02 毫米铝箔作 β 吸收实验。然

后按源的近似辐射中心厚度为0.7毫克/厘米²进行校正。

2. β 探测装置必须有足够长的“坪”，工作点选于坪区后段。

根据 β 积分测量“坪”的形成原理知道^[5]，在坪区后段进行测量时，射入闪烁计数器的 β 粒子已能大部分或绝大部分被记录，坪区越长，能够记录下来的 β 粒子数越接近100%，因此，由于两种源 β 辐射能量的不同所造成的差别就越小。

我们的测量装置均有 100 伏以上的坪区。图 3 示出我们

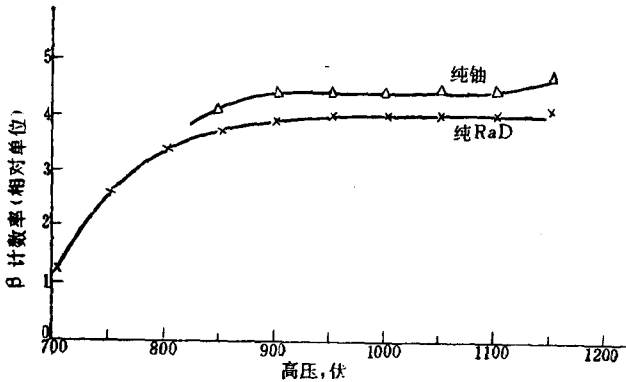


图 3 铝屏厚度为 0.04 毫米的装置测得的纯铀和纯 RaD (RaD+RaE) 薄源 β 坪曲线

屏厚为 0.04 毫米铝 (11 毫克/厘米²) 的一套装置对两种实际标定源测得的计数率-高压坪曲线，纯铀源于 1150 伏以后坪斜加大是由于 UX_1 最大能量为 0.161 兆电子伏的 β 粒子造成的。因此，工作电压取 1000 伏。

3. 要求有一定厚度的吸收屏以吸收 α 射线和充分吸收 UX_1 的 β 射线。

我们用作标定的三套测量装置，其吸收屏厚度分别为0.04毫米，0.06毫米和0.35毫米的铝屏。塑料闪烁体的厚度对应为0.3毫米ST-402型，2毫米ST-401型和0.2毫米ST-402型。三套装置的标定结果符合得较好。

4. 对吸收屏进行准确地吸收校正。

逐一增加同一型号的屏作高精度测量，按指数衰减规律计算，进行吸收校正。也可借助单对数坐标纸校正。

5. 因测量对象是 β 射线，故必须考虑到RaE与RaD平衡。

此外，与其它放射性元素相对测量的要求一样，测量几何条件和装置条件应严加控制，使其一致。

经过采取上述措施，对制备的74-12号和75-3号两纯RaD粉末源进行多次标定，结果重现性较好。RaD含量分别为 9.86×10^{-10} 和 7.22×10^{-10} ，用平衡铀当量表示则为22.84%和16.73%。

以铝屏厚度为0.04毫米的装置对用第一种分离程序制备的74-12号源的某次标定为例：

取纯铀标准溶液制 β 测量源，使每源内含有15.76毫克铀。将最后制取 PbSO_4 沉淀之前的纯RaD溶液放置50天以上，取样制标定源。每源取溶液1毫升。在所选定的测量条件下，它们对应于几种厚度的屏蔽测得的平均计数率列于表2。

根据表2的数据，能算得本装置的铝吸收屏每0.01毫米对 β 计数率的衰减，纯铀源是0.827%，纯RaD源是3.05%。对应于无吸收屏时两种源的计数率用计数/分表示应为7808和75827，经源自吸收校正后的计数率分别为

$$7808 \times 1.0023 = 7826$$

表2 纯铀源和纯 RaD 源在不同吸收屏厚度条件下的平均计数率

铝吸收屏厚度, 毫米		0.04	0.08	0.12	0.16
平均计数率, 计数/分	纯 铀 源	7558	7188	6953	6733
	纯 RaD 源	66427	61283	54393	48409

$$75827 \times 1.0085 = 76490$$

算得纯 RaD 溶液中的 RaD 含量用平衡铀当量表示为

$$15.76 \text{毫克/毫升} \times \frac{76490}{7826} = 154.0 \text{毫克/毫升}$$

74-12号源是用350毫升纯 RaD 溶液制取 PbSO_4 沉淀, 将沉淀与石英砂粉搅拌成240克干粉末得到的。因此可算得, 该源在本装置上的标定结果为

$$\text{RaD} = \frac{350 \text{毫升}}{240 \text{克}} \times 154.0 \text{毫克/毫升} = 22.43\% \text{ (平衡铀}$$

当量)

采用这种对沉淀 PbSO_4 之前的纯 RaD 溶液标定的方法, 可以省去取粉末样和对粉末样作化学处理的手续, 不过这种方法必须保证 PbSO_4 沉淀完全。

为检验 PbSO_4 沉淀是否完全, 我们将沉淀后废液取出一部分在 β 测量盘中烘干, 于不同的时间测其 β 放射性强度。结果表明, 盘内所有 β 放射性, 均为 RaE (半衰期5.013天) 放出。这说明 PbSO_4 沉淀是完全的, RaD 已被全部收集于沉淀之中。

为使结果更加准确, 最好采用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合法或 $4\pi\beta$ 法标定。这项工作, 目前我们尚未进行。不过, 作为矿石放射

性分析中的影响因素的研究用, RaD 含量即使存在百分之几的相对偏差, 也不会降低其使用价值。

参 考 文 献

- 〔1〕 见本汇编第171页。
- 〔2〕 太秦等, 分析化学(日), 14, 551 (1965)。
- 〔3〕 群力编, 放射化学(下册), 第181—183页, 第189—191页, 人民教育出版社, 1961年。
- 〔4〕 A.H. 涅斯米扬诺夫等编, 苏峙鑫等译, 放射化学实验教程, 第281—283页, 化学工业出版社, 1959年。
- 〔5〕 见本汇编第214页。

电流型阻抗匹配放大器及其 在闪烁计数装置中的应用

张书达 胡海云

本文扼要叙述了阻抗匹配的原理及电流型阻抗匹配放大器的优点。给出了电流型阻抗匹配放大器的两种实际电路及其输出波形，描述了传输电缆对讯号的影响，介绍了电流型阻抗匹配放大器在总量测量和 γ 能谱测量中的应用情况。

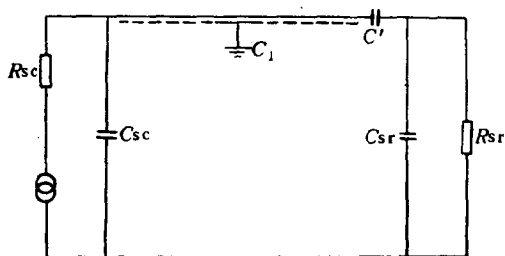
一、阻抗匹配的原理

任何讯号源与接收系统相连接时都存在阻抗匹配问题。为了使得到的讯号幅度尽可能大且不失真，必须使它们之间阻抗适当匹配。除功率匹配外，小讯号的阻抗匹配一般可分为电压型和电流型两种基本形式。

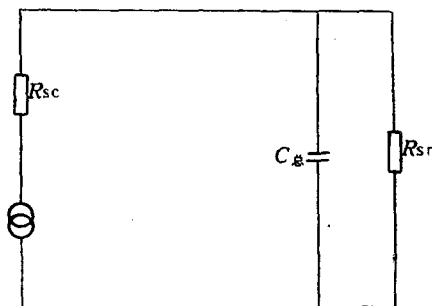
1. 电压型阻抗匹配放大器

设讯号源的输出电阻为 R_{sc} ，接收器的输入电阻为 R_{sr} ， C' 为两者之间的耦合电容， C_{sc} 为讯号源的输出电容， C_{sr} 为接收器的输入电容， C_1 为讯号引线的分布电容（图1）。当接收器的输入阻抗 Z_{sr} （包括 R_{sr} 和 C_{sr} ）远大于讯号源的输出阻抗 Z_{sc} （包括 R_{sc} 和 C_{sc} ）且 C_1 不大时，则连接了接收器后，讯号的电压脉冲幅度损失较小。这就是所谓电压型阻抗匹配。

一般说来，象 G-M 计数管、正比计数管、闪烁计数器、半导体探测器等都可以看作具有很高输出阻抗的电荷(电流)发生器。



a



b

图 1 阻抗匹配示意图

a——示意图，b——高频等效电路图。

以闪烁计数器为例，当一个电流脉冲 $i(t)$ 从光电倍增管阳极输出后，即对总电容 $C_{总}$ (C_{sr} 、 C_1 、 C_{sc} 之和) 充电，并形成电压脉冲，如图 2 所示。在某些情况下，电压脉冲的上升时间恰好就是光电倍增管内电荷的收集时间，也即是光电倍

增管输出电流脉冲的底部宽度。它由闪烁探测器本身的物理性质所决定。

实际上，在给 C_a 充电的过程中同时还存在一个放电过程，其放电的时间常数为 $C_a(R_{sc}/R_{sr})$ 。

为了使电荷 Q 所形成的电压幅度尽可能高些，要求放电时间常数不小于光电倍增管内电荷的收集时间；但为了使探测器的不灵敏时间尽量小，所以放电时间常数又不能太大。一般可使它略大于收集时间。此时可近似认为 C_a 的电压幅度是 $V = Q/C_a$ ， $Q = \int idt$ 。一般可认为 $R_{sc} \approx R_a$ (R_a 是光电倍增管阳极负载)。在电压型阻抗匹配中要求 $R_{sr} \gg R_{sc}$ 。于是放电时间常数约为 $R_a C_a$ 。对于 NaI(Tl) 晶体，放电时间常数约 1 微秒为宜。而 R_a 约几十至几百 $k\Omega$ ，所以 C_a 的数值不能超过几十 pf。闪烁探测器的 C_{sc} 即在 10 pf 以上。这就要求讯号引线尽量短以减小 C_1 的数值。否则，不仅电压脉冲的宽度很大，而且会使脉冲幅度衰减严重。因此，在闪烁计数器中的前级放大器或射极跟随器必须与探测器紧密相连而往往把它置于探头内。目前广泛采用的就是这种电压型阻抗匹配放大器。由于它所放大的是电压脉冲，所以也称之为电压型放大器。

可以看出， $R_{sc}C_{sc}$ 不能无限减小，它的数值约几百毫微秒—1 微秒。一般将电压型阻抗匹配前级放大器用于闪烁计数器中，它输出的电压脉冲宽度很难小于 1—3 微秒。所以

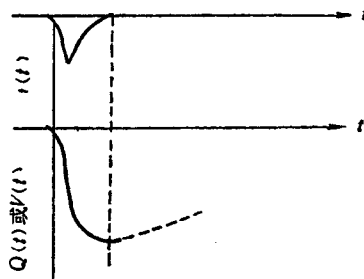


图2 电流脉冲和它的积分电压脉冲

用缩短讯号引线来减小脉冲下降时间的办法是非常有限的，并且会带来一些其它方面的不便。

2. 电流型阻抗匹配放大器

当 $Z_{sr} \approx Z_{sc}$ 时，讯号的电压脉冲幅度大约会损失一半，所以接收器的输入阻抗减小是不利的。但事物的发展总是由量变到质变的。当 $Z_{sr} \ll Z_{sc}$ 时，讯号的电流脉冲几乎全部通过接收器，这就是所谓电流型阻抗匹配放大器。 R_{sr} 可小至 $1-50\Omega$ ，使输入时间常数 $R_{sr}C_a$ 小于探测器输出的电流脉冲宽度。这时将出现奇妙的现象：前级放大器的输入电阻 R_{sr} 远小于 C_a 的容抗，所以电流脉冲将全部流过 R_{sr} 而几乎不对 C_a 充电。由于这种放大器放大的是电流脉冲，所以也可称之为电流型放大器。

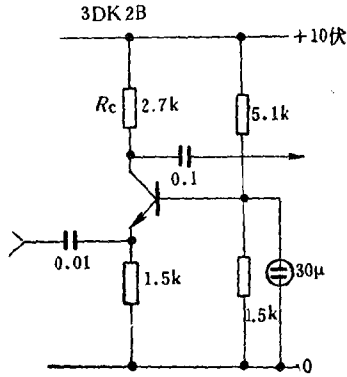
闪烁计数器的输出波形主要由闪烁体的发光衰减时间，光电倍增管电子飞越时间的歧离，光电倍增管的输出电路和下一级的输入电路等诸因素的综合作用所决定〔1〕。使用电流型阻抗匹配放大器和电压型阻抗匹配放大器所得到的分别是电流脉冲和电压脉冲。而电流脉冲的整个宽度大约仅相当于电压脉冲的上升时间。所以使用电流型放大器可得到很窄的脉冲。对于有机闪烁体，光电倍增管输出的电流脉冲宽度约 $0.2-0.3$ 微秒。当电流型放大器的输入电阻 $R_{sr} \approx 10\Omega$ 时，只要 C_a 小于几百 pf 即可使放大器接收到的脉冲形状与探测器输出的电流脉冲一致。可见在探测器与电流型放大器之间有几米长的讯号引线时仍可保证脉冲波形无畸变。

晶体三极管是一种天然的电流控制器件，有多种办法使它做出的放大器有极小的输入阻抗。应用电流型阻抗匹配，要求放大器有高于 20 兆赫的频率上限，这只要用频率响应好

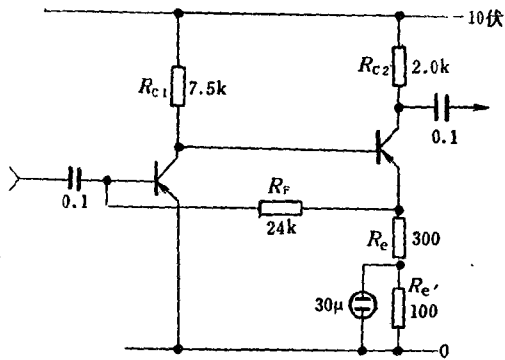
的晶体管也是很容易实现的。

二、电流型阻抗匹配放大器的电路与实验

为了使放大器的增益稳定，一般均采用负反馈电路。电



(a)



(b)

图3 电流型阻抗匹配放大器电路图
(a) — I型, (b) — II型。

流型阻抗匹配又要求有小的输入阻抗，电流并联负反馈电路则具备这些特点。图 3 绘出了两种实际电路，电路设计时考虑到在基本不影响功能的情况下尽量少用元件。

1. 图 3 (a) 的电路分析

电流放大倍数

$$K_{Fi} \lesssim 1 \quad (1)$$

电压放大倍数

$$K_{Fv} = \frac{\beta R_c}{r_{be}} \quad (2)$$

式中 β 为晶体管交流放大系数。作这种用途的晶体管要求有较大的 β 值，一般应大于 80。 r_{be} 为共射极电路中晶体管的输入电阻，即 h_{11} 。

输入电阻

$$r_{eb} = \frac{r_b}{\beta + 1} + r_e \quad (3)$$

式中 r_b 为基极等效电阻。 r_e 为发射极等效电阻。

2. 图 3 (b) 的电路分析

电流放大倍数

$$K_{Fi} = 1 + \frac{R_F}{R_e} \quad (4)$$

按图 3 (b) 的具体数值 $K_{Fi} = 81$ 。

电压放大倍数

$$K_{Fv} = K_{Fi} \frac{R_{c2}}{R_x} \quad (5)$$

式中 R_x 为讯号源内阻。

输入电阻

$$r_{s'x} = \frac{r_{sr}}{1 + K_i \frac{R_e}{R_F}} \quad (6)$$

式中 r_{sr} 为无反馈时的输入电阻。 K_i 为无反馈时的电流放

大倍数。可见输入电阻比无反馈时减小了 $K_i \frac{R_e}{R_F}$ 倍。

R_e 可起到调节直流工作点的作用。根据所需的放大倍数来确定 R_e 和 R_F 的具体数值。

关于电路的详细分析及公式的推导可参阅文献[2, 3]。图3中所示的数值仅供参考,工作时需视具体情况而定。所用晶体管必须是对高频响应好的开关管或高频管。

图3中两种电路均可使探头与前级放大器间加一长电缆而对讯号幅度和波形的影响甚小。所不同的是图3(a)的输出脉冲电压幅度较小。由于线路(a)的电流放大倍数近于1,所以它输出的电压脉冲可近似地看作是讯号源的电流脉冲在电阻 R_e 上的电压降。如光电倍增管的输出电流脉冲为50微安, R_e 为10k,则放大器输出脉冲接近0.5伏。而当电源为10伏时 R_e 不能比10k大多少。这就限制了放大器的输出幅度。即使用两级串联,也只能降低输入阻抗却不能使输出幅度提高。在用塑料闪烁体测 β 射线时如使用图3(a)的电路作放大器,这就需较高的电压供给光电倍增管工作。所以在闪烁体形成光脉冲较小的场合下最好使用图3(b)的电路。但图3(a)的输入阻抗比图3(b)的低,在输入端串接一个小电阻即可方便地使传输电缆与放大器输入端阻抗匹

配。并且，它的响应频率更高，脉冲上升时间短。对有机闪烁体，它所输出的脉冲更窄。

图3 (a) 是 I 型放大器，虽然其电流放大倍数 $K_i \leq 1$ ，但其输入讯号是电流脉冲，所以它仍然是属于电流型放大器

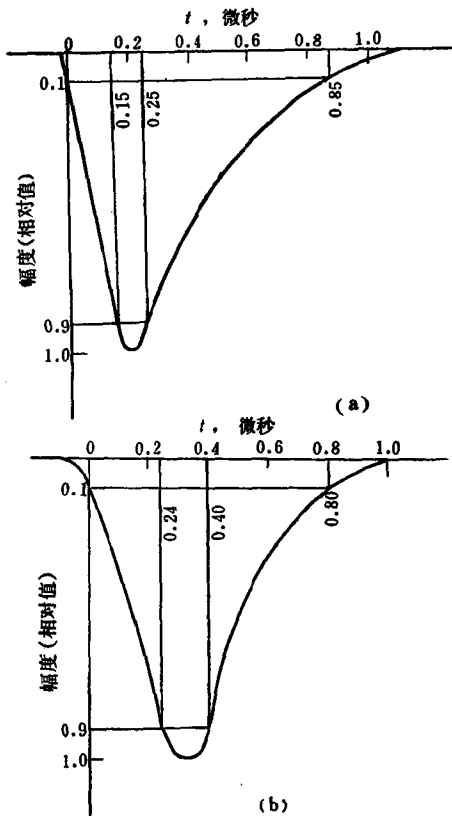


图4 电流型放大器输出波形
 $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI(Tl) 晶体, $^{137}\text{Cs}\gamma$ 源。
(a) —— I 型放大器; (b) —— II 型放大器。

中的一种，这正如射极跟随器是属于电压型放大器中的一种一样。

3. 输出脉冲波形

光电倍增管 GDB-100 的输出端经 2 米长的 PK-19 同轴电缆与电流型放大器输入端相连。用 SBM-10 示波器观测放大器输出端的脉冲波形，其测量结果示于图 4 和图 5。测量时除图 5 (b) 接有定标器外，其它只接示波器。

由晶体管的特性可知，共基极电路的截止频率是共发射极电路截止频率的 $(1 + \beta_0)$ 倍 (β_0 为低频时的电流放大系数)。我们测试时所用的 3AK20B 管子的电流放大系数较小 ($\beta_0 \approx 60$)，而 II 型电路的反馈深度较小，所以按 II 型电路制成负反馈放大器后其频率上限增加得还不够大，尚低于 I 型电路的频率上限及讯号中高频成分的频率。因此对于同样的晶体和光电倍增管，II 型放大器的输出脉冲的上升时间较大。

4. 传输电缆对讯号的影响

射极输出器的输出阻抗很低，它的输出端可通过一个长电缆而与主放大器相连；而电流并联负反馈放大器输入阻抗很低，它的输入端可接一长电缆 (图 6)。两者相比，后者的讯号衰减更小。实验表明，利用图 3 的两种电路制作的放大器，当用 PK-19 同轴电缆传输讯号时，其长度在 3 米以内则对讯号的幅度和波形没有可观测到的影响。

当传输电缆的长度增加到 15—20 米时，讯号幅度约衰减三分之一左右，脉冲宽度相应增加。测量数据见表 1。测量时所用光电倍增管均为 GDB-100 型，所标晶体相同时即为

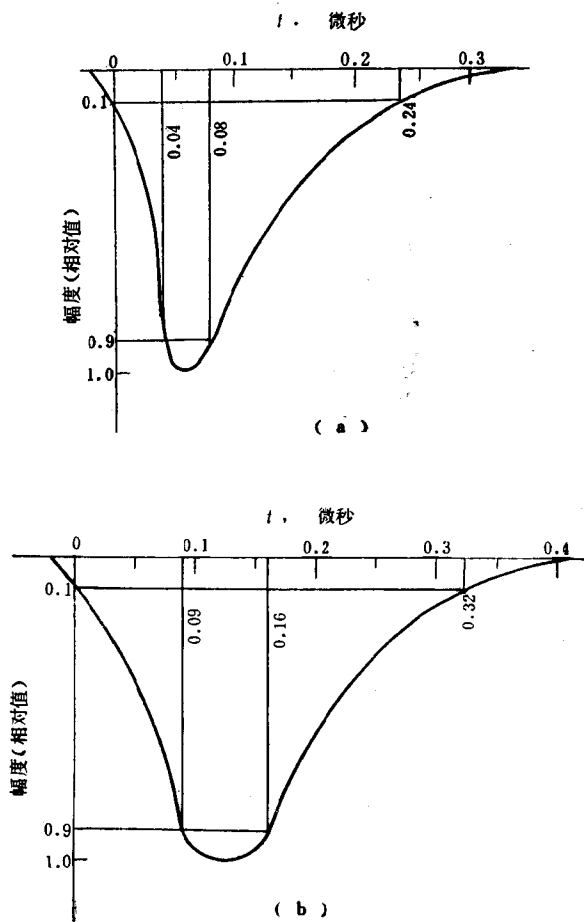


图5 电流型放大器输出波形
 $\phi 100 \times 0.3$ 毫米 ST-402塑料晶体, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}\beta$ 源。
 (a) — I型放大器; (b) — II型放大器。

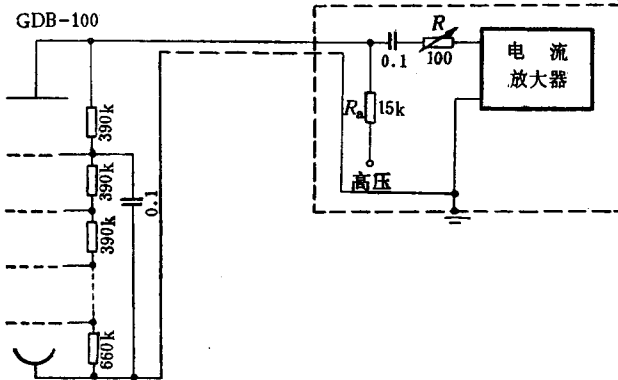


图 6 使用电流型阻抗匹配放大器的接入电路 (虚线方框里的那一部分置于定标器机壳内)

表 1 传输电缆对讯号的影响

工作方式	电缆长度, 米	匹配电阻 R , Ω	脉冲幅度, 伏	脉冲幅度 (相对值)	脉冲底部宽度, 微秒	光电倍增管电压, 伏
I型放大器 $\phi 100 \times 0.3$ 毫米 ST-402塑料晶体 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y} \beta$ 源	2.0	0	3.0	1.00	0.24	1500
	16.0	0	2.0	0.67	0.36	
I型放大器 $\phi 100 \times 0.3$ 毫米 ST-402塑料晶体 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y} \beta$ 源	2.0	0	5.0	1.00	0.60	970
	16.0	0	3.6	0.72	0.80	
I型放大器 $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI(Tl)晶体 $^{137}\text{Cs} \gamma$ 源	2.0	0	3.6	1.00	0.80	1000
	16.0	0	2.4	0.67	1.20	
I型放大器 $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI(Tl)晶体 $^{137}\text{Cs} \gamma$ 源	2.0	30	0.76	1.00	0.85	1500
	16.0	30	0.76	1.00	0.85	

同一个探头，除示波器外均无其它负载。

当所加讯号电缆的长度使得讯号在其间的传播时间可与讯号脉冲的宽度相比时，则需考虑讯号在电缆两端的反射问题，并采取始端或终端匹配等相应措施来消除反射的影响。如用 I 型放大器与 NaI(Tl) 晶体配合使用，当电缆长 16 米时，由于反射的影响，其输出波形会出现折点等异常。但在其输入端串接一小电阻 ($R = 30\Omega$) 后即可作到终端阻抗匹配。此时电缆长度的增加对幅度和波形影响甚微，当电缆长度分别为 16 米与 2 米时，它们的幅度和波形完全一样 (表 1)。由于 II 型放大器的输入阻抗与传输电缆的特性阻抗相近，所以在未采取终端匹配措施时，在电缆长 16 米的情况下仍看不出明显的反射的影响，但其讯号幅度衰减且宽度加大。

5. 使用情况

(1) 总量测量

用 GDB-100 型光电倍增管配以 $\phi 100 \times 0.3$ 毫米的 ST-402 塑料闪烁体测量 β 射线总量，采用 II 型的电路制成 $K_i = 81$ 的前级放大器置于 $\phi 55 \times 20$ 毫米圆铝盒内，整个铝盒放在 FH-408 定标器内，定标器与探头间用 2 米同轴电缆相连。当测量面密度约 1.4 克/厘米² 的 U-Ra 矿石粉末时， β 探测器的高压为 850—1150 伏左右，即在“坪区”，工作电压一般选在 950—1050 伏即可。有一套闪烁测铀装置，其 β 探测器采用了电流型前级放大器。经一个月内的 29 次测量，系数 K_B 的相对均方误差为 1.16%。另一套相同装置，在一个月测量 12 次，其 K_B 的相对均方误差为 0.39%。这里面还包括了底数和 β 探测器计数的统计涨落。从我们一年多的使用情况来看，装置工作稳定可靠。

从电路的参数分析可知，电流并联负反馈放大器的稳定情况是很好的。以图3(b)的电路为例，由于电流放大倍数仅与反馈网络的电阻值有关而与晶体管的参数几乎无关，所以 K_{Fi} 很稳定。由负反馈放大器的特性可知，此时放大器的稳定性比无负反馈时提高了 $K_i \frac{R_e}{R_F}$ 倍。

(2) γ 能谱测量

γ 射线能量分析是建立在闪烁体吸收的能量与光电倍增管阳极上收集的总电荷精确地成正比的基础之上的。应该将光电倍增管阳极电流脉冲用一个适当的电容积分，以便通过电容产生的电压代表总电荷——闪烁体吸收的能量。但当其电流脉冲的波形不随其幅度而变时，则电流脉冲的高度即能代表阳极上产生的总电荷量。在这样的条件下，进行能谱分析是可行的。我们用 $\phi 75 \times 75$ 毫米 NaI (Tl) 晶体与 GDB-100 光电倍增管配合，通过 16 米长的同轴电缆传输到 II 型放大器上，而后讯号再输至单道谱仪上。以 ^{137}Cs 的 0.662 兆电子伏光峰为准，测量 ^{60}Co 的两个光峰，其能量非线性系数 $< 1\%$ (其中包括了 γ 能谱仪本身的能量非线性)。具体数据见表 2。可见，将电流型放大器用于能谱仪中进行一般的能谱分析是

表 2 使用 II 型放大器的单道 γ 能谱仪之能量非线性系数

γ 源	光峰能量, 兆电子伏	光峰测量值	光峰计算值	能量非线性 系数, %
^{60}Co	1.3325	1014	1023	0.88
^{60}Co	1.1732	896	901	0.55
^{137}Cs	0.6616	508	508	—

可行的。当然，这时必须使电流型放大器工作于线性区，并且适当加深反馈深度以提高其稳定性。

6. 注意事项

电流并联负反馈放大器的输出阻抗较高，所以紧接着它的主放大器或定标器的输入阻抗应高些。为此可采用“仿真”技术来提高输入阻抗。如我们用的 FH-408 定标器，在其输入电路中仅加一个仿真电容，即可使电流型放大器接了定标器后讯号幅度的损失大为减小，从而降低光电倍增管的工作电压。

光电倍增管的阳极负载一般为 50—200k。但使用电流型阻抗匹配放大器可使它的数值大为减小。由于电流并联负反馈放大器的输入电阻只有 1—50 Ω ，所以只要阳极负载比它大几百倍即可保证阳极的脉冲电流的绝大部分进入放大器。按图 6 的连接方式，当阳极负载电阻减小时，可使供电电源的高压降低而实际上加到光电倍增管上的高压不变。我们用的光电倍增管极间分压电阻为 390k，此时将阳极负载由 150k 减小至 15k 可使高压降低几十伏而照样工作。

按图 6 的连接方式工作时，高压应缓慢地升至工作电压。否则将有一个几百伏的正脉冲通过耦合电容加到三极管上，易将管子损坏。有的高压电源（如 FH-408 定标器上的高压）一接通即有几百伏以上的电压输出。此时可在三极管的输入端加一个保护二极管或加其它保险装置。

三、电流型阻抗匹配的优点

1. 脉冲宽度很窄，特别适于高速计数。使用 NaI(Tl)

晶体时，电流型阻抗匹配放大器所得到的脉冲宽度大约是电压型阻抗匹配放大器的 $1/5$ 。对于使用有机晶体的闪烁探头此数值更小，它可获得 0.3 微秒左右的脉冲宽度。在其它工作条件相同时，光电倍增管阳极收集到的总电荷量相同，而脉冲宽度越小则其幅度越大。故使用电流型阻抗匹配时可要求放大器的增益减小到电压型的 $1/5$ 。由于共基极电路〔图3(a)〕的频率上限很高，所以已广泛地运用这种电路来制作高达 100 兆赫的计数装置〔4〕和高速运算放大器〔5〕。

2. 在探测器与放大器之间可加一根长电缆。由于 Z_{sr} 很小，所以加长电缆后讯号损失很小。如用图 6 所示的电路。在探测器与电流型放大器间加 $1-3$ 米长的 PK-19 型同轴电缆后，对于脉冲的幅度和波形无任何影响。由于前级放大器可与探头分开，所以探头体积可减小并便于维修；且探头与定标器间仅用一根同轴电缆相连，非常适合于要求小探头场合和远距离操作。这些是用电压型阻抗匹配所办不到的。

3. 光电倍增管阳极上工作电压稳定。在闪烁计数器中，当电荷到达阳极时会在其上形成一个电压降。在电压型阻抗匹配中这个变化有时可高达几伏甚至更大；而在电流型阻抗匹配中，由于电流脉冲通过 $R_{sc} // R_{sr}$ (R_{sr} 只有 $1-50\Omega$)，所以阳极上的电压变化甚微。这在高速计数时显得更稳定。

4. 晶体三极管本质上是个电流控制元件，所以在用它制作前级放大器时使用电流型阻抗匹配更为适宜。

5. 当光电倍增管输出小讯号时，后面接的放大器既要考虑到阻抗匹配问题，又要起到一定的放大作用。若采用电压型阻抗匹配，一般需经“阻抗变换—放大—阻抗变换”三步后再输出到主放大器或定标器，这至少需 $4-6$ 个晶体三极管；而采用电流型阻抗匹配后只用 $1-2$ 个三极管即可具

有同样的功能。这样就减少了元件，缩小了体积，且大大降低了功耗。

四、结 论

由于电流型阻抗匹配放大器具有计数速度快，结构简单，工作稳定，功耗小，适宜于用晶体管制作等许多优点，所以在闪烁计数器中使用它作为前级放大是非常理想的。

电流型阻抗匹配放大器可方便地置于仪器内，而它与闪烁探头之间仅用一根同轴电缆相连。当电缆长度小于3米时（这在室内分析的一般情况下足够用了），不论是对有机晶体还是对无机晶体，讯号的幅度和波形没有可观测到的影响。当放大器的输入阻抗与同轴电缆的特征阻抗匹配时，随着电缆长度的增加，讯号的幅度和波形的变化甚微。

电流型阻抗匹配放大器不仅适用于积分测量，而且也适用于一般的能谱分析。

五、讨 论

1. 如果在 C_{sc} 与 C_{sr} 间加一大电阻 R ，且使 $C_{sc}R \gg$ 电流脉冲宽度 $> C_{sr}R_{sr}$ ，探测器输出的电流脉冲经 $C_{sc}R$ 被一次积分。这就构成了电压-电流型阻抗匹配。此时电流放大器所得到的讯号电流具有与一般电压型放大器相同的上升时间。采用电压-电流型阻抗匹配可将传输电缆延伸到500米以上而波形不失真。这样，它可将探测器置于远处，且能用于能谱分析〔6〕。

2. 由于电流型阻抗匹配放大器具有上升时间短和输入

阻抗小的特点，因而在使用半导体探测器的场合下颇为有效。用与图 3 (a) 类似的线路不仅可进行快速计数（脉冲宽度仅 10 毫微秒），而且还可以在强 β 场 (10^8 个/秒) 下探测 α ，并能分开 ^{241}Am 和 ^{239}Pu 的 α 峰〔7〕。

3. 图 3 (b) 电路稍加变动即可制成放大倍数可调的电流型放大器。此时反馈电阻 R_F 用一个电位器代替，在电位器的滑动点和一个固定端之间并接一个电容即可。

4. 我们制作电流放大器用的晶体管的特征频率为 150—200 兆赫。若用特征频率较高的高频管（如 1000—5000 兆赫），其输出脉冲的上升时间可能还会小些，特别是对于有机晶体会更加明显。

参 考 文 献

- 〔1〕 I. A. D. Lewis, F. H. Wells, Millimicrosecond Pulse Techniques, Pergamon Press (1959). 中译本, 席德明等, 毫微秒脉冲技术, 第253页, 科学出版社, 1965年。
- 〔2〕 清华大学, 晶体管电路 (第一册), 第200—203页, 第366—369页, 科学出版社, 1973年。
- 〔3〕 华东师范大学, 无线电电子学 (第二册), 第296—310页, 高等教育出版社, 1961年。
- 〔4〕 R. Sugarman, et al., Nuclear Electronics, I, p. 3, IAEA, Vienna (1962).
- 〔5〕 P. F. Manfredi, et al., Nucl. Instru., Meth., 129, 1, 283 (1975).
- 〔6〕 H. Miwa, T. Tohyama, Nuclear Electronics, I, p. 421, IAEA, Vienna (1962).
- 〔7〕 Jean Tanguy, Détection des particules α par Semiconducteurs application au controle de l'extraction du Plutonium, CEA-R-3442, (1968) 中译本, 于立德, 用半导体探测器探测 α 粒子, 第118页, 第135页, 原子能出版社, 1976年。

光电倍增管的坪

张继扬 唐芳云

光电倍增管的坪，是指光电倍增管在实际应用中某一测量值随另一参量变化的平缓区。本文主要叙述在 α , β , γ 总量测量中形成计数率-高压坪的原因及其实际应用。

一、单色光源的计数率-高压坪曲线

生产厂家用单色光脉冲源来测量光电倍增管的坪。坪越长，坪斜越小，则说明管子的性能越好。如有的管子坪长可达1000伏〔1〕(图1)。

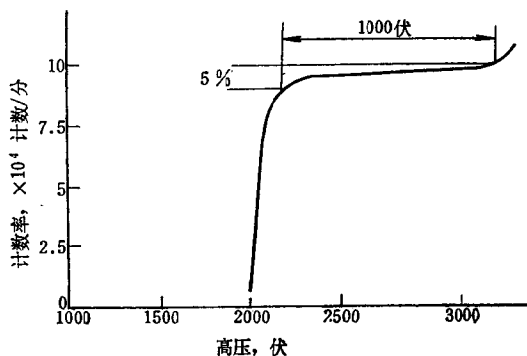


图1 用单色光脉冲源测得的光电倍增管计数率-高压坪曲线

二、单能 α 源的计数率-高压坪曲线

当用单色光脉冲源不便时，亦可以用单能 α 源来代替，同样可以测出光电倍增管的坪。当然后者还需要闪烁体配合使用。

我们用 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 晶体和 GDB-44 型光电倍增管测量了电镀铀 ($^{238}\text{U} + ^{234}\text{U}$) α 源的坪曲线(图 2)。测量时用 FD-125 型氡钍分析器配接 FH-408 定标器，将该仪器配备的闪烁室改用 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 片。图 2 还给出了该光电倍增管与暗电流相关

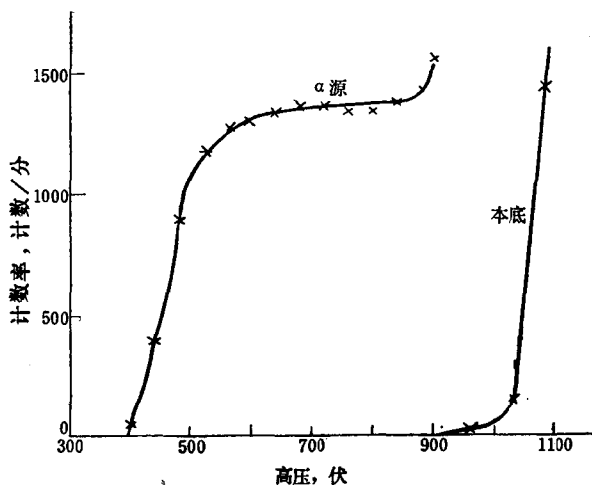


图 2 用 α 源测得的 GDB-44 型光电倍增管的坪曲线

的本底随高压变化的曲线。由于 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 能谱特性不好， α 源又非单能，与单色光源的相比，曲线从开始计数到进入坪就比较慢。

三、 γ 积分测量的计数率-高压坪曲线

1. 实验装置

采用闪烁 γ 计数法测镭装置，用带有前置放大器（放大倍数为5）的NaI(Tl)探头配接FH-408定标器。NaI(Tl)晶体尺寸 $\phi 50 \times 50$ 毫米，光电倍增管为GDB-10M。

2. γ 坪及其在实际测量中的应用

光电倍增管是高放大器件，其放大倍数 M 可达 10^6-10^8 。同时 M 对加于光电倍增管两端的高压响应灵敏，它们之间服从下面的关系式〔2-4〕

$$M \propto V^n \quad (1)$$

式中 n 在7—10之间。当要求放大倍数稳定度在0.1%时，相应的高压稳定度应为0.01%。尽管如此，在作积分测量时，我们能不能在光电倍增管装置上，找到一段象G-M计数管装置那样的计数率-高压坪区，或者人为地创造条件，造出一段坪区，以减小高压变化对计数的影响呢？在实际测量中已经证明，这是可以办到的。

采用P651-3号铀-镭平衡标准源（ $Ra = 4.62 \times 10^{-9}$ 克镭/克矿样），在上述装置上测得的计数率-高压坪曲线，如图3所示，出现了计数率-高压坪区。由于和计数管的坪曲线形式相似，因此可以用同样的方法描述，即坪长250伏，坪斜3.3%/100伏。实践证明，在坪的中点作积分测量，计数稳定，连续工作四小时内标准源对应的计数率变化不超过1%。FH-408定标器的甄别阈改变1—2格或高压改变 ± 50 伏，

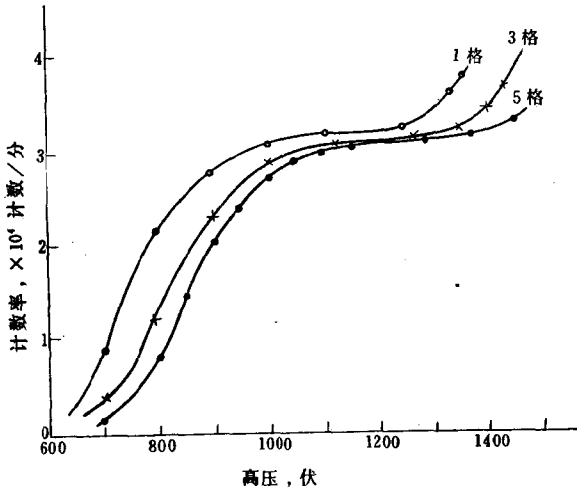


图3 不同甄别阈测得的坪曲线

标准源对应的计数率只变化1%。经几个月的实验， γ 计数法测镭的 K 系数变化不超过2%。温度对计数率的影响也不大。相反，如果工作点取于坪前陡区，高压只要偏离 ± 10 伏或甄别阈稍一变动都会使计数率变化超过5%。而且随着温度的变化，计数率也会产生非常大的波动。

可见，闪烁 γ 积分测量只要能在光电倍增管的坪区工作，对高压和甄别阈电压的稳定度就不再有过高的要求，而且克服了对环境温度变化比较敏感的缺点。

3. 影响坪的某些因素

光电倍增管的性能是决定能否形成坪以及形成的坪是否理想的最重要因素。这一点在下面坪的解释一节中将有详细的叙述。此外，影响坪的其它因素还有：

(1) 甄别阈电压对坪曲线的影响

取甄别阈 1, 3, 5 格, 测得的坪曲线示于图 3。三种状态都有坪。不过随着甄别阈的升高, 坪曲线向后移动, 即坪区向高压偏高的方向移动。

(2) β 吸收屏的材料对坪曲线的影响

作为 γ 探测器, 需用吸收屏以吸收源的 β 射线。吸收屏的材料不同, 对坪曲线的形状会有影响。我们分别取 3 毫米 Al, 3 毫米 Al + 0.5 毫米 Pb + 1 毫米 Al 和 3 毫米 Al + 2 毫米 Pb + 1 毫米 Al 三种吸收屏测得的坪曲线给于图 4。三种

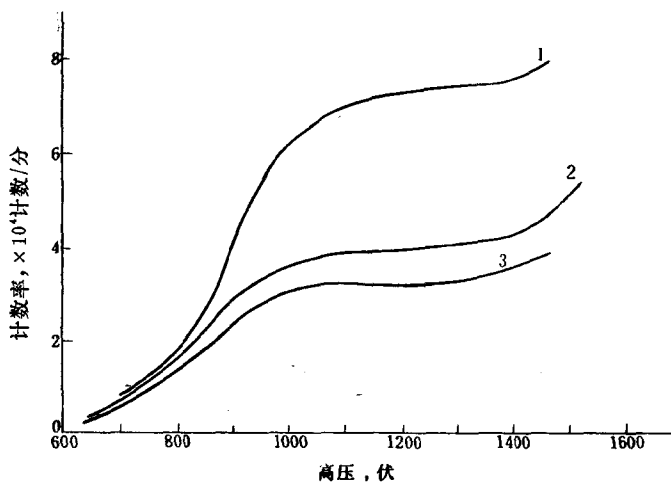


图4 对应于三种 β 吸收屏测得的坪曲线

1——3 毫米 Al, 2——3 毫米 Al + 0.5 毫米 Pb + 1 毫米 Al, 3——3 毫米 Al + 2 毫米 Pb + 1 毫米 Al。

情况都出现坪, 但坪区计数率和坪斜不同。不过, 坪长和坪区所对应的高压区域则变化不大。

(3) 光电倍增管的分压器电路是影响坪的一个重要因素

我们共测了 6 条坪曲线，结果示于图 5。对应于图 5 曲

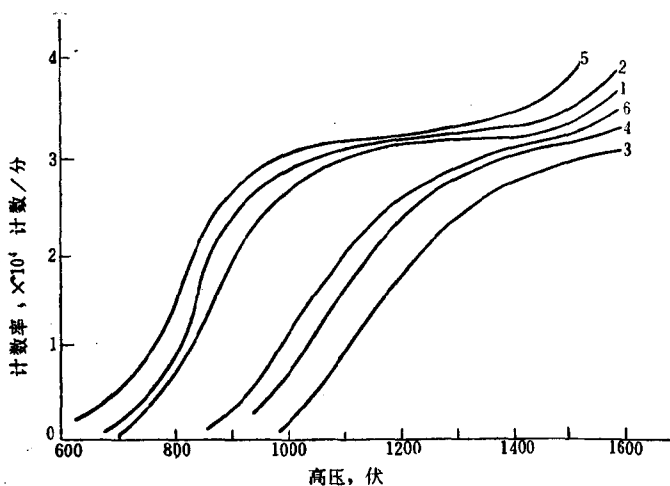


图 5 不同分压电路测得的坪曲线

线的编号其分压电路（电阻编号由光阴极数起）如下：

$$(1) R_1 = 200k, R_2 - R_{10} = 150k, R_{11} = 22k,$$

$$R_{12} = 150k;$$

$$(2) R_1 = 200k, R_2 - R_{11} = 150k, R_{12} = 22k;$$

$$(3) R_1 = 200k, R_2 - R_{11} = 150k, R_{12} = 1M;$$

$$(4) R_1 = 200k, R_2 - R_{10} = 150k, R_{11} = 1M,$$

$$R_{12} = 150k;$$

$$(5) R_1 = 200k, R_2 - R_{11} = 150k, R_{12} = 75k;$$

（高增益典型分压电路）

$$(6) R_1 = 300k, R_2 - R_{10} = 150k, R_{11} = 300k,$$

$$R_{12} = 150k. \text{（高输出电流典型分压电路）}$$

其中（1），（2），（5）三种情况坪区都在1000—1300

伏，坪长和坪斜相差也不大。高增益典型分压电路（5）进入坪区最早，从1050伏起就进入了坪区。

（3），（4），（6）三种情况曲线后移，未测到明显的坪区。

本装置正常工作时采用（5）的分压电路。

4. 光电倍增管 γ 积分测量坪的解释

为了更好地解释 γ 积分测量坪，首先必须确定定标器甄别阈对应的甄别能量。我们用 ^{137}Cs 源的 γ 光峰（662千电子伏）和它的Ba KX射线（32千电子伏）作标准，用 γ 谱仪、脉冲发生器、示波器作测试工具，分别确定光电倍增管在不同的高压下，定标器阈值相应的 γ 能量。结果列于表1。

表1 不同高压下阈值对应的能量

高压, 伏	800	1050	1200	1350	1500
阈值对应的能量, 千电子伏	300	42	15	5	2

用表1的数据，可以对 γ 坪曲线的各区段作解释。

第一、坪前区。在高压比较低的情况下，如800伏。此时甄别阈能量相当于300千电子伏。随着高压升高，放大倍数也增大，相当于甄别阈向低能方向移动，能量较低的 γ 射线所对应的讯号逐渐被记录，高压越高，对应被记录的 γ 量子数越来越多，所以出现了闪烁计数器随电压升高计数率迅速增加的区域——坪前区。

第二、坪区。当高压升到一定数值（本测量条件为1050

伏), 阈值相应的能量减小到42千电子伏, 铀-镭源 γ 射线有实际意义的最小能量组分RaD——46千电子伏也已经被记录了, 出现了连最小的能量组分也能被记录的区间。此时继续升高电压, 计数率也不再明显增加——坪区。当高压在1200伏时, 阈值相应的能量是15千电子伏, 此时仍在坪区。

第三、坪后区。我们测量了无晶体(只记录光电倍增管暗电流)时计数率随高压变化的关系和有晶体(记录本底或本底+源)时计数率随高压变化的关系, 结果见表2。

表2 无晶体和有晶体时计数率随高压变化的关系

高 压, 伏	无晶体时计数 率, 计数/分	有晶体时计数率, 计数/分	
		本 底	铀-镭 源
650			2528
750			11490
800	0	248	19269
900		398	26512
950			29660
1000		490	30769
1050			31475
1100	0	489	32032
1150			32358
1200	6	513	32285
1250	131		32569
1300	1243	2303	34402
1350		4409	37404
1400	17125	21376	46565
1500	77726		84657

对比同样条件下测得的坪曲线可以清楚地看到, 高压增至某一数值后, 暗电流(主要的)和一些低能散射, 即光电倍增管的噪声被放大到超过甄别阈水平时, 这时出现了计数

率急剧上升的坪后区。暗电流愈大，坪愈短，坪斜愈大。

图 6 给出了 800 伏和 1050 伏的高压时甄别阈对应的能量在铀-镭源的 γ 谱线^[5]上所对应的位置。

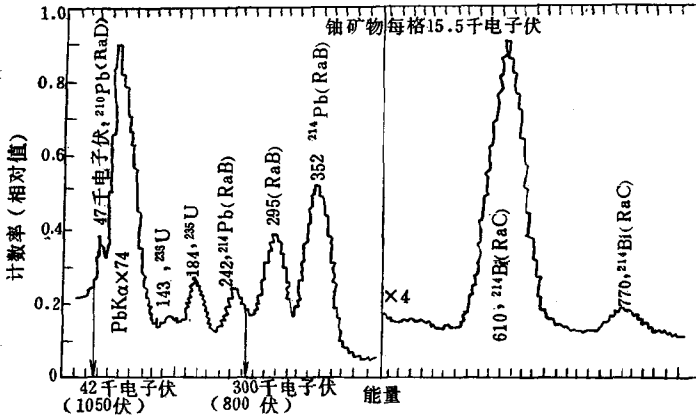


图6 高压为 800 伏和 1050 伏时甄别阈对应的能量在谱线上的位置

由此可见，造成坪的原因是放射源所发出的各种能量 γ 射线绝大多数已被记录，而光电倍增管的噪声还没有超过甄别阈的水平，并且基本上没有被记录。

对于单色光源以及单能 α 射线的计数率-高压坪曲线也同样可以解释。显然只要当高压升高到使单色光源或 α 源所对应的输出脉冲讯号通过甄别阈而被定标器记录，就进入了坪区，直到噪声讯号超过甄别阈水平为止。因此这两种坪的坪区比较长，坪斜也小。

在 γ 积分测量中，只要创造条件，使有用讯号尽早被近乎全部地记录，同时尽迟地记录噪声讯号，就能获得良好的坪。为此：

第一、定标器甄别阈在排除干扰情况下适当地低一些。

第二、光电倍增管分压电路尽可能采用高增益线路。

第三、对于 FH-408 定标器，探头后端的前置放大器的存在是必要的。因为 FH-408 定标器内部的主放大器的放大倍数不够，前置放大器的存在，使光电倍增管的工作电压不至于超出所规定的正常范围，同时还有改善输出，减少干扰的好处。图 7 是有无前置放大器的情况下测得的两条坪曲线，无前置放大器时的坪曲线，其坪区后移。

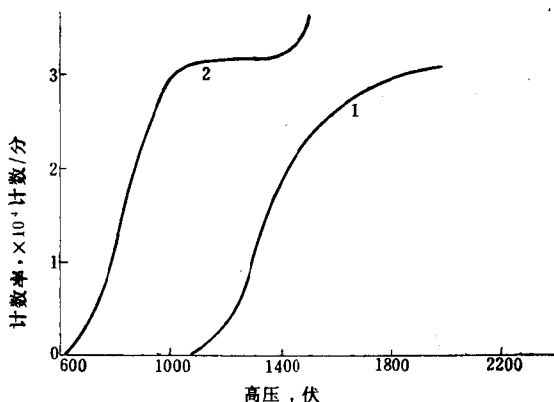


图7 GDB-10M在有前置放大器时测得的坪曲线
1——无前置放大器；2——有前置放大器（放大倍数为2.4）。

第四、不同类型的光电倍增管，特性不同，使用时必须根据具体情况加以选择。即使是同一类型的管子，管子之间也有分散性。图 8 给出了几支 GDB-10M 的坪曲线和本底曲线，它们之间性能的差别是明显的。

形成坪的根本原因在于光电倍增管。要得到坪区长且坪斜小，就应当选用暗电流小而阳极灵敏度大的光电倍增管。暗电流小，也就是光电倍增管的等效噪声能量小，光电倍增

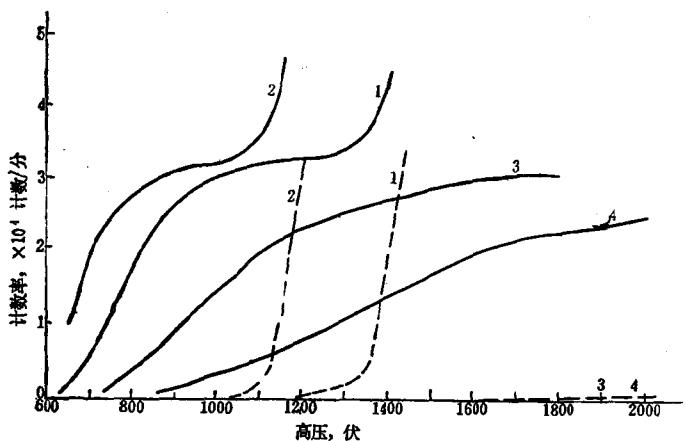


图8 不同光电倍增管测得的坪曲线

— 铀-镭源; --- 本底。

管的坪区向高压偏高的方向延伸。阳极灵敏度大，有利于早进入坪区。用光电倍增管的讯噪比（在其它电子单元的噪声较小的情况下）也可以描述它的坪曲线。因为噪声相当于暗电流，讯号是被测对象所对应的光电脉冲。讯噪比越大，光电倍增管的坪特性越好。

表3 列出了对应于图8的几支GDB-10M光电倍增管的

表3 对应图8内4支GDB-10M的几个参数

编号	管号	阳极积分灵敏度为 $1 A/L$ 时的高压, 伏	暗电流, 安
1	127	720	0.5×10^{-8}
2	95	610	1.2×10^{-8}
3	353	820	0.6×10^{-8}
4	210	890	1.3×10^{-8}

几个参数。管子的编号和图 8 中曲线号一致。

四、 β 总数测量的计数率-高压坪曲线

用塑料闪烁探测装置对 β 射线作积分测量时，同样可以得到不同程度的计数率-高压坪区。

1. β 坪的成因

β 坪与 γ 坪的成因，在本质上没有什么区别。

与 α 、 γ 辐射不同， β 辐射谱是连续谱，且在偏低能部分具有一个粒子发射几率的极大值。图 9 实线示出了一个最

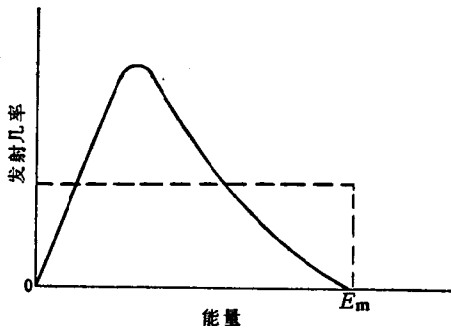


图9 β 射线谱

大能量为 E_m 的 β 辐射谱线。在能量约为 $\frac{1}{3}E_m$ 处，发射几率有一个极大值。为简明起见，我们先讨论假设辐射是由等于零至 E_m 的均匀分布谱（图 9 虚线所示）。

如果将探测装置的甄别阈固定在某一数值，当总增益为 A 时，具有最大能量 E_m 的粒子刚刚被记录，显然当增益由 A 增至 $2A$ ， $3A$ ， $4A$ …… xA 时，被记录的 β 强度也由零增

至总强度的 $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$..., $\frac{x-1}{x}$ 。用公式表示, 增益为

xA 时单位时间内能被记录的粒子数为 N 可用下式表示

$$N = \frac{x-1}{x} N_0$$

$$\frac{N}{N_0} = \frac{x-1}{x} \quad (2)$$

式中 N_0 代表单位时间内总辐射粒子数, 通常把它作为单位“1”。对应于 (2) 式的曲线绘于图10曲线 1。可见探测

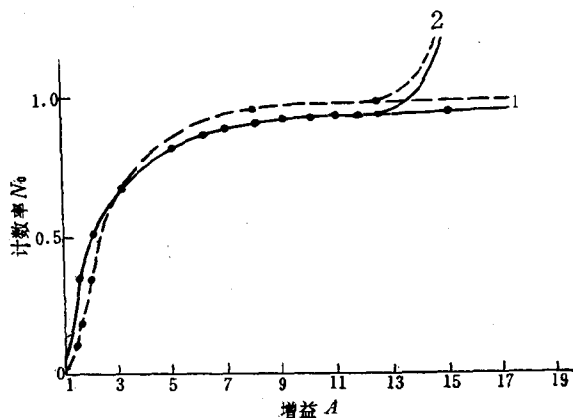


图10 计数率-增益坪曲线

装置在计数开始后, 随着增益变大, 计数率迅速增加。稍后, 计数率逐渐趋于平缓而出现一个坪区, 越往后, 坪越理想。当增益为 $20A$ 时, 计数率达到总数的 95%。只有当增益为无限大时, 辐射粒子才被全部记录。可见, 在增益大于 $20A$ 的很大区间内, 无论增益变化多大, 所造成计数率的变

化最大也不超过5%。

实际上探测装置有一定的噪声。正如前面所述，通常噪声主要来源于光电倍增管的暗电流。所以当增益增至某一数值后，噪声讯号开始被记录，出现迅速增加的假讯号即噪声脉冲。因此我们只能获得有限长的坪。图10中的实线2为讯噪比（ E_m 对噪声的比值）等于12的一条坪曲线。曲线2的前端与曲线1重叠，后端翘起部分是对应被记录的噪声。在噪声即将出现处坪的斜率可用下式求出

$$\frac{dN}{dx} = \frac{1}{x^2} N_0 \quad (3)$$

当 $x = 10$ 时

$$\frac{dN}{dx} = \frac{1}{100} N_0$$

换言之，在 $10A$ 处，增益变化 $1A$ ，计数强度的变化仅为总辐射强度的1%。

与图9对应的实际 β 谱的坪曲线，用虚线示于图10。与均匀谱相比，曲线开始部分上升较慢，在略大于 $2/3N_0$ 处，两曲线相交，于1.5和 $8A$ 附近斜率相等。 $8A$ 以上，真实谱的坪斜比均匀谱还小。

光电倍增管高压的变化，直接导致增益的变化。(1)式给出了此种变化的关系。因为其它测量条件不变，故式中 M 即代表 A 。另一方面探测器的讯噪比通常远不止于12。可以预计，将横坐标改用高压（均匀刻度）表示后，得到的坪曲线也会与图10相似。图11给出了讯噪比等于100的均匀分布谱的计数率-高压坪曲线。对于真实谱，坪还会要好些。

实际测得的 β 坪曲线请参阅图15, 其形状与分析结果可认为完全一致。

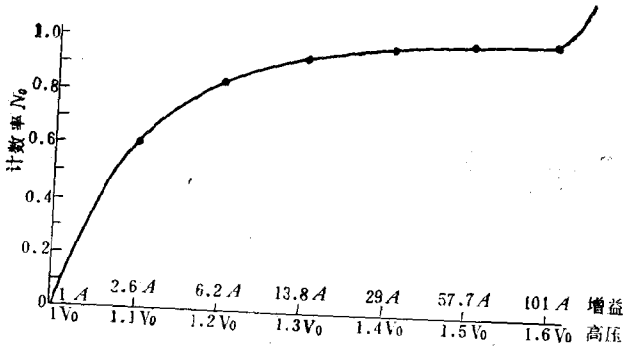


图11 计数率-高压坪曲线

2. 影响 β 坪的主要因素

与 α 坪、 γ 坪一样, β 坪的优劣是由探测系统的讯噪比所决定的。因此, 能够影响装置讯噪比的一切因素, 也是影响坪性能的因素。其中光电倍增管性能的好坏, 闪烁体的能谱特性和发光效率是否理想, 以及 β 粒子在到达闪烁体之前能量的损耗情况、探头的光收集效率和闪烁体厚度、电子记录系统的噪声等是最主要的因素。

往往 β 测量需要选择适宜的塑料闪烁体的厚度, 同时对于不同的装置, 阈电压需经实际测量来确定。下面我们将分别讨论这两种因素对 β 坪的影响情况。

(1) 坪与闪烁体厚度的关系

我们用单道谱仪配接塑料闪烁探头作实验。 β 辐射源曾准备薄源和厚源(粉末源)两种, 均为不含镭的纯铀源。薄源用化学萃取法分离制得, 厚约0.1毫米。粉末源用Z65-1号

纯铀标准源，用直径60毫米，高6毫米的铝盘盛装，装填重量24克。图12是闪烁体厚度为1毫米，GDB-19A光电倍增管工作电压取800伏时对薄源和厚源测得的两条 β 谱线。两条谱线形状相近，这说明辐射源厚度的差别对测量结果影响不大，所以我们只采用粉末源作实验。

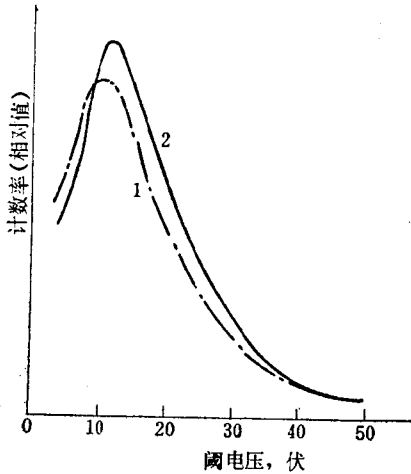


图12 实测纯铀源的 β 谱

1——薄源；2——厚源。

图13是用ST-401型闪烁体，厚度分别为0.5毫米，1毫米和4毫米时对粉末源测得三条 β 谱线。图14是将甄别阈电压固定在10伏时测得的三条对应的坪曲线和本底曲线（测量时闪烁体与玻璃光导之间未填硅油，故光耗较大）。

闪烁体厚度过薄，会使相当部分的 β 射线穿透而导致计数集中于低能区，因之使坪变坏。对应于不同的装置，能够出现坪的闪烁体最小厚度也不一样，这也主要由装置的噪声

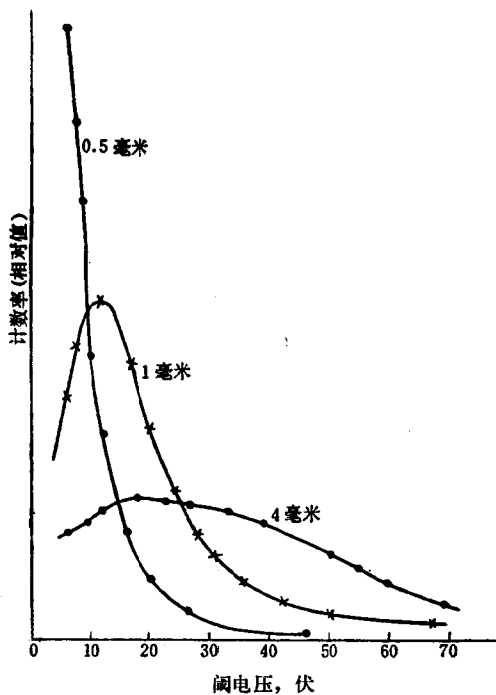


图13 β 谱与闪烁体厚度的关系

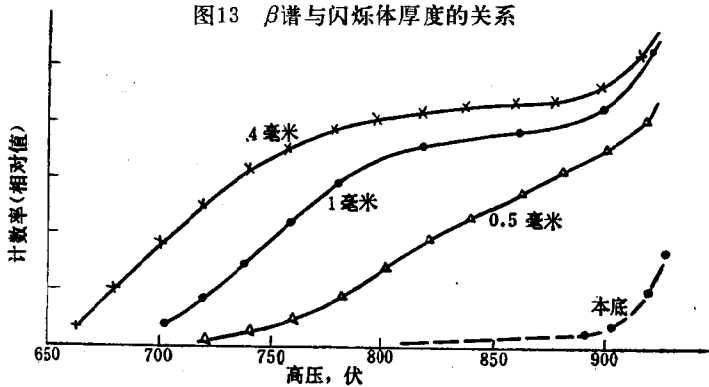


图14 坪曲线与闪烁体厚度的关系

能量决定。我们用以测量铀含量的 β - γ 装置,由于 GDB-100 光电倍增管性能好,电子记录系统的噪声低,采用厚度为 0.2 毫米的 ST-402 型塑料闪烁体也能得到满意的坪〔6〕。

应当指出,过薄的闪烁体不但不出现坪,而且探测灵敏度也大为降低。对 β - γ 法测铀装置的 β 探测器,为了片面地追求大的 ψ 值 (ψ 值代表一定条件下闪烁体的 β 射线和 γ 射线探测效率的比值)而采用过薄的闪烁体并不适宜。另一方面,实用中采用过厚的闪烁体也有缺点,因为它会增加本底计数率和 γ 探测灵敏度。

(2) 坪与甄别阈的关系

阈电压选用是否恰当,也影响到坪的好坏。选用过高或过低的阈电压均不适宜。过低的阈电压会使噪声提早被记录,过高的阈电压则会迫使光电倍增管工作在过高电压区。

图15是厚度为 2 毫米的 ST-401 型闪烁体,谱仪的放大

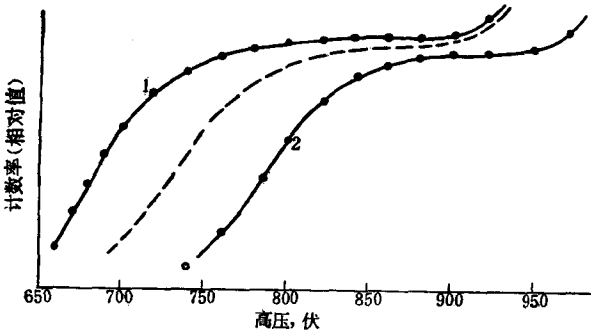


图15 坪与甄别阈的关系

1 —— 阈电压10伏; 2 —— 阈电压30伏。

器放大倍数为300, 阈电压分别取10伏和 30 伏时测得的两条坪曲线。为便于比较,用虚线将曲线 2 前移。看来,本装置

在这种测量条件下，甄别阈取10伏比取30伏更为恰当。

五、讨 论

1. 闪烁探测装置用以测量 α , β 或 γ 总辐射强度时，选择在计数率-高压坪区工作，可以获得良好的工作稳定性。

2. 实际测量中发现，只要选择恰当的工作条件和良好的光电倍增管等，对 α , β , γ 作积分测量都可以得到计数率-高压坪。其中光电倍增管本身是决定有否坪的最重要因素。光电倍增管的暗电流越小，阳极灵敏度越大（即输出讯噪比越大），坪特性就越好。换句话说，只有探测装置能记录到95%以上的待测讯号，而噪声还未被记录时才存在坪。坪区的长度，等于从记录95%的讯号时起至噪声讯号显著出现为止。如果噪声在记录95%的待测讯号之前出现，那就根本没有坪。对于一些质量低劣的光电倍增管，是测不到坪的。但是如果工作条件选择不合适，即使是用性能良好的光电倍增管，也同样测不出坪。因此还必须对其它工作条件，如光电倍增管的分压器电路、甄别阈电压、放大器的放大倍数、高压和定标器的噪声水平、闪烁体的厚度和透明度等加以选择。

3. 塑料闪烁体对于能量为100—1000千电子伏的电子，光输出与能量成正比〔7〕。因此可以用来测量 β 射线谱。但作为 β 谱仪，还需进一步确定能量分辨率。

对于像铀-镭平衡源那样存在多组的 β 辐射的谱线形状，是它们各自谱线的叠加。它同样可以测到计数率-高压坪。其成因和影响因素与只对应一个最大能量的单组辐射相同。

4. 除上述几种常用的坪外，还可以采用引进参考电

压、辅助电源的方法造成输出幅度-高压坪曲线。

文献〔8—10〕介绍了对于聚焦型和非聚焦型（百叶窗式）光电倍增管造成此种坪曲线的方法。现分别叙述如下。

1. 聚焦型光电倍增管成坪方法

对于聚焦型光电倍增管，在第8个打拿极（11个打拿极的管子）或在第6与第7打拿极之间（10个打拿极的管子）引进参考电压，可以造成输出幅度-高压坪。图16（a）是实验电路示意图，图16（b）是表示对应于几种不同的参考电

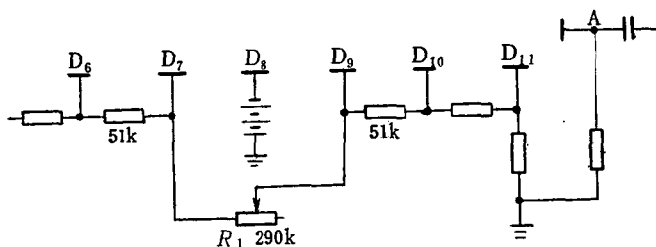


图16（a） 引进参考电压电路示意图

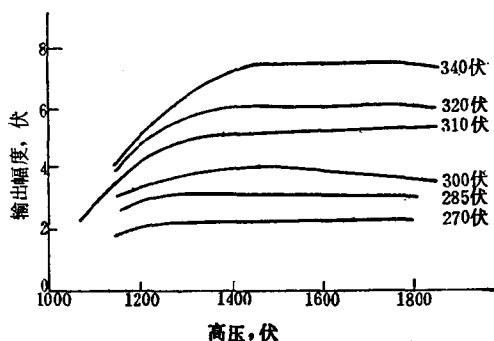


图16(b) 不同参考电压的输出幅度-高压坪曲线

压时输出幅度和高压之间的关系。可以看出，输入相同时，在改变高压的情况下输出幅度变化很小——坪。然而此种使用方法其灵敏度也将降低 2—3 倍。

特别需要指出的是光电倍增管仍然工作于线性区域，即输出脉冲幅度和能量依旧保持线性关系，故能用于能谱分析，起到类似于用补偿源进行自稳的作用。

造成这种坪的原因是参考电压对高压变化使极间倍增作用相互补偿，总的倍增效应在高压某一范围内基本不变。

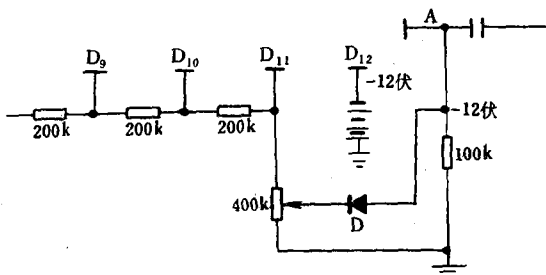


图17 (a) 百叶窗式光电倍增管造坪电路示意图

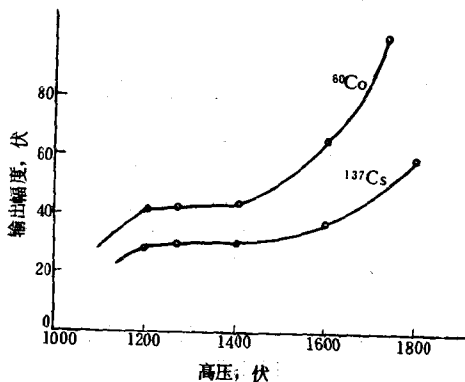


图17 (b) 百叶窗式光电倍增管的输出幅度-高压坪曲线

2. 百叶窗式光电倍增管成坪的方法

对于百叶窗式的非聚焦型光电倍增管，在中间打拿极引进参考电压的方法是不行的，改用了在 $D_{11}-A$ 之间电量重新分配的方法来达到相互补偿的作用。此时光电倍增管不再工作于线性区域，不再是一个线性系统。图17(a)给出了一支此类管子的实验电路，图17(b)给出了用它测得的 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 光电峰输出与高压之间的关系，两者均有坪，但能量与幅度不再成线性。还必须指出，产生坪的条件是输出幅度必须大于某个值，并且与电压平均分配（即分压器阻值均分电路）的场合相比，输出幅度约低5倍。

参 考 文 献

- [1] C. E. F. Misso, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-11, № 3, 72 (1964).
- [2] 王祝翔, 核物理探测器及其应用, 第183页, 科学出版社, 1964年。
- [3] 哈特曼等著, 华和等译, 光电倍增管, 第96页, 国防工业出版社, 1963年。
- [4] 赖祖武等, 核物理电子学方法, 第46页, 上海科学技术出版社, 1961年。
- [5] F. Adams et al., *Applied Gamma-Ray Spectrometry*, p. 457, Oxford, Pergamon, 1970.
- [6] 见本书第1页。
- [7] Ю. А. Кулинич, и др, *ПТЭ*, 1, 87 (1973).
- [8] Л. И. Злобин, *ПТЭ*, 2, 134 (1962).
- [9] H. Duquesne et al., *Health Physics*, 9, 927—930.
- [10] R. Sherr et al., *Rev. Sci. Instr.*, 23, 770 (1952),

光电倍增管的分压器

唐芳云

一、几种常用的光电倍增管分压器

光电倍增管是闪烁探测器中不可缺少的元件之一，在把光脉冲转变成电脉冲的元件中，它是最灵敏的一种。它能成比例地把极弱的光转变成较大的电讯号，而且响应快。管子说明书上已给出放大倍数、灵敏度和暗电流等参量。同时不同型号的管子都有它推荐的分压器。图 1 (a) 和图 1 (b) 是北京综合仪器厂生产的 GDB-44 型和 GDB-100 型光电倍增管的分压器，图 1 (c) 和图 1 (d) 是华东电子管厂生产的 GDB-19A 型和 GDB-10 型光电倍增管的分压器。

二、光电倍增管总分压电阻值的确定

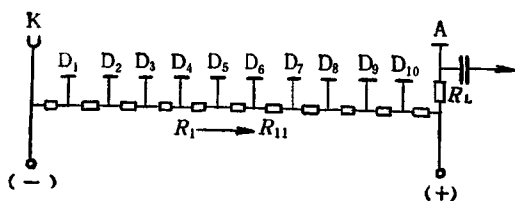
尽管某种型号的光电倍增管在出厂时，已推荐了分压器，但在实际工作中推荐的分压电阻仅供参考。到底分压器总阻值多大为宜，仍需看工作条件而定。从图 1 可看到，光电倍增管分压器均为串联连接，分压器总阻值等于各分压电阻之和。以图 1 (b) 的电路为例，此时

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{12} \quad (1)$$

若分压电阻按均分法连接，有

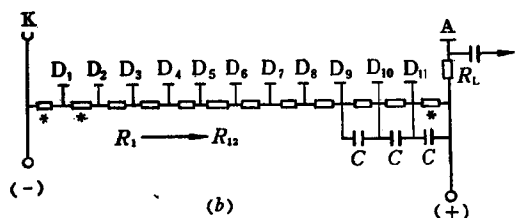
$$R_{\Sigma} = 12R_1 = 12R$$

级间电压是用串联电阻分压办法供给，则加到光电倍增



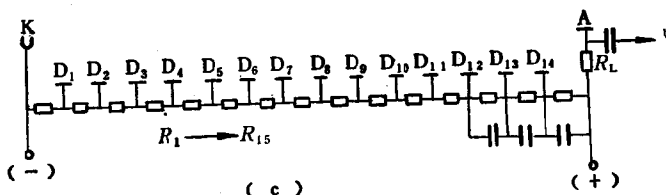
(a)

$R_1 100k, R_2 - R_{11} 200k, GDB-44。$



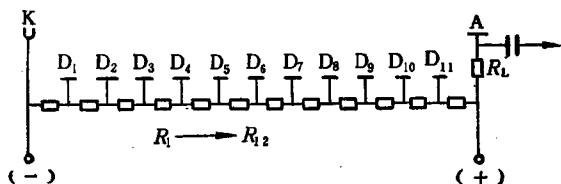
(b)

R_1, R_2, R_{12} 阻值需调节, $R_3 100k, R_4 - R_{11} 200k, C 0.01\mu, GDB-100$



(c)

$R_1 30k, R_2 220k, R_3 22k, R_4 130k, R_5 - R_{12} 75k, R_{13}, R_{14} 150k, C 0.05\mu, GDB-19A$



(d)

$R_1 250k, R_2 - R_{11} 200k, R_{12}, R_{13} 100k, GDB-10。$

图1 生产厂家推荐的几种光电倍增管分压器电路

管上的电压 V_{HV} 为

$$V_{HV} = I_{\lambda} R_{\Sigma} \quad (2)$$

式中 I_{λ} 为电源供给分压器的电流。

从公式 (2) 可看出, 若 V_{HV} 恒定不变, 则电阻 R_{Σ} 愈大, 电流 I_{λ} 愈小, 即是说供电电源输出的功率也愈小。当光电倍增管用于闪烁计数器时, 要求放大系数稳定, 也就是工作时级间电压保持不变。尤其是能谱仪, 要求更严。管子级间电压均从分压电阻上取得, 如果分压器阻值配得大, 高压电源供应的电流相应地减小, 级间的电压变动就显著。为了减小这种变动, 要求分压阻值小。但电阻太小, 则会使电源过载。因此总阻值的选择, 必须由高压电源的最大允许输出电流来定。在不超过电源的最大允许输出电流的情况下, 尽量取小值。例如, 工作电压取在 1.5 千伏时, 电源的输出电流, 最大允许 300 微安。将此电压和电流数值代入 (2) 式便可得出分压器总阻值 R_{Σ} 约为 5M, 而单个电阻可用 1/8W 的金属膜电阻。

三、分压器的调配

分压器的总阻值确定之后, 每一级的阻值怎样定呢? 先用均分法确定, 也就是用打拿级数加 1 除以分压器总阻值 R_{Σ} 的方法, 确定每一级的电阻值 R , 即

$$R = \frac{R_{\Sigma}}{1 + n} \quad (3)$$

式中 n 为光电倍增管光阴极和阳极之间打拿极 (也包括栅极) 个数。

在实际工作中，有时需要这种均分法分压器。但往往这种均分法并非最佳工作状态。因此，还需依据工作要求对分压电阻的阻值作适当的调整，从而取得最佳的工作状态。此点已有不少资料介绍。例如图 2〔1〕就是通过调级间阻值以获得比原来推荐的分压器还要好得多的

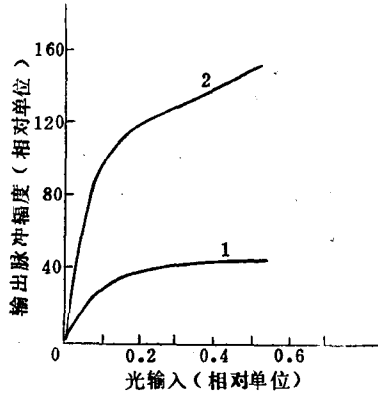


图 2 输出脉冲幅度与分压器的关系

输出性能。图中曲线 1 是厂家推荐的分布，调后得到曲线 2。曲线 2 比曲线 1 的输出幅度提高两倍多。通过调分压器能够得到最佳的工作点。

有人认为，需要对每一级电阻进行调节，但这是难以办到的。不过在一般的情况下，用比较简单的方法亦可获得满意的结果。例如图 1 (d) 线路各电阻先取均分，令其阻值为 R ，而对其中几个根据使用者的要求加以调节：

(1) 高增益 逐个调节 R_1, R_2, \dots, R_{12} 使有最大的输出幅度，如图 2 中的曲线 2 所对应的分压器。

(2) 高分辨率 为获得最高的分辨率，可适当调节前后两三个打拿极分压电阻。

(3) 最大线性输出分压器阻值朝阳极方向递增，特别是最后三个要大，以防止出现空间饱和和效应。

(4) 空间电荷饱和和波形甄别 最后一个电阻可以很小，从而出现空间电荷饱和状态。此种情况的一个用途是可进行脉冲波形甄别〔2〕。

(5) 低灵敏度 若要降低输出幅度，可将最后一两个电阻短路。

(6) 高稳定性 需要特别注意保证 $K-D_1$ 间电压的稳定。有时可用稳压二极管来代替此电阻。为了减小级间电压波动，最后几级并联 0.01μ 至 0.1μ 电容，如图1(b)和图1(c)所示。

四、光电倍增管的电源供给和输出电路

1. 基本电路

光电倍增管作为计数器时，电源输入和脉冲输出电路原则上如图3所示的四种。

从图3可以看出，这四种电路各有各的特点。第一、(a)和(b)用负高压，而(c)和(d)用正高压。第二、从A点输出是负脉冲，B点输出是正脉冲（但幅度较小）。第三、(a)，(b)，(c)连接较复杂（需地、高压、讯号三根导线），(a)和(c)的高压利用率高。而(d)连接较简单，若采用电流型放大器与其作阻抗匹配，则负载电阻和耦合电容可置于定标器内从而减少一根导线。第四、(a)和(b)的高压电源波纹及其它干扰不会直接经耦合电容进入放大器，且耦合电容不必用耐高压的电容。

2. 旁路电容的连接

一般作为弱计数时，最后几级不接旁路电容。当高强度计数时，为了稳定级间电压，并联1—3个 $0.01-0.1\mu$ 的旁路电容。当使用不同电路时，其连接方法也不一样。

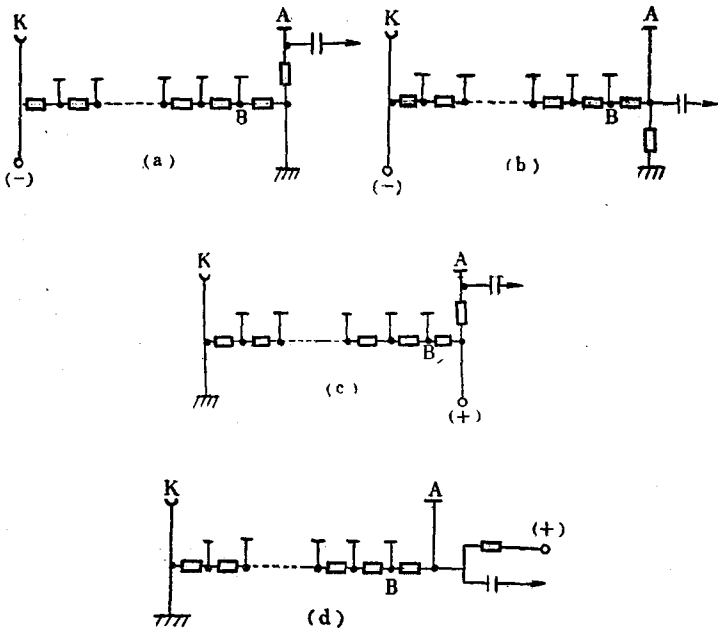


图3 四种常用工作电路

若采用图3 (a)和(c)电路, 旁路电容便可直接并联在分压电阻上, 如图1 (b)和图1 (c)所示。如果采用图3 (b)和(d)电路, 则最后一个旁路电容应接地。否则等于最后倍增极短路, 输出幅度变小。同时 (d) 电路的旁路电容应用耐高压 (大于2千伏) 电容。

五、焊接分压器时应注意的事项

(1) 先分清各级在管脚上的排列顺序, 方能进行焊接。有些管子, 尽管管脚的数目、大小一样, 但其内部结构、

排列顺序不一定相同，如 GDB-10和 GDB-44（图 4）。

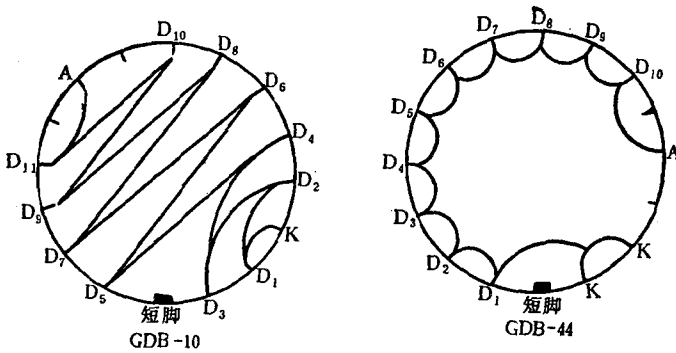


图 4 GDB-10和 GDB-44管脚连接图

从图 4 得知，虽然管脚数目都是 15 个，但是阳极、打拿极和阴极之间的排列不尽相同。管子 GDB-10 的阳极和阴极分别为 6 和 13 脚，而管子 GDB-44 的阳极和阴极分别为 12 和 15、14 脚。所以代用时，不能光看管子脚数而一定要查清它的内部构造。

(2) 在焊接时，空脚不要连接，最好也不要当作接线柱使用。

(3) 元件、导线不要直接焊在管脚上，也不能把管子插在管座上进行焊接。

(4) K—D₁之间电阻一定要焊牢。若焊接不牢（即断开），会在 K—D₁之间造成很高的电场，则阴极 K 上发射出大量的光电子，就会在强电场作用下急速飞向 D₁，易把管子击毁。

参 考 文 献

- [1] Г. Г. Дорошенко, и др, Приборы и методы анализа излучений, вып I
стр.125 (1962). 中译本: 樊成译, 物理译丛, 第2期, 35 (1966)。
- [2] G. Bellettini, et al., *Nucl. Instr. Meth.*, 24, 2152 (1963). 中译本:
物理译丛, 第5期, 63 (1965)。
- [3] 中国科学院原子核科学委员会编, 原子核物理学及仪器设备(9), 第58—81
页, 科学出版社, 1962年。
- [4] 王祝翔, 核物理探测器及其应用, 第170—193页, 科学出版社, 1964年。
- [5] 赖祖武等, 核物理电子学方法, 第35—49页, 上海科学技术出版社, 1961
年。

附录 1 射线测定装置及其测定方法一览表

测定项目	探测器	计数装置	测定条件	测定灵敏度	修正内容	所需标准源及其种类	本底, 计数/分
放射性强度相对测定	端面式 G-M 计数管	定标器或计数率计	使用统一类型测定管和样品皿测定	$1-10^{-4}$ 微居里	几何效率、样品量修正, 计数管窗或壁的吸收修正(基本修正)	适用于相同场合的核素需校正测定器的射线源	20—30
	薄壁式 G-M 计数管	同上	接近样品测定	$10-10^{-4}$ 微居里	除基本修正外, 还需修正坪曲线的变化	除点源外, 还需需面源	30—50
	气流式计数管	定标器	样品装在计数管中测定	$10^{-2}-10^{-5}$ 微居里	固体场合下进行基本修正, 气体场合下进行混合修正, 气体成分、坪曲线变化修正, 求得最佳条件	需校正用射线源, 要特别注意标准源的自吸收	~50
	电离室	劳里实验电振荡器, 场效应晶体管静电计	用测定台测定外照射测定	本底—毫伦/小时 毫居里— 10^{-3} 微居里	气压、气温修正, 射线散射修正	需 γ 射线源	视电离室尺寸而异
	NaI(Tl) 闪烁体	定标器或计数率计	在单一的 γ 射线源下用测定台测定	$1-10^{-4}$ 微居里	几何效率、样品量修正, 散射修正, 一般吸收很小, 选择电压修正	需校正能量的标准源	视 NaI(Tl) 尺寸及测定方法而异
	同上	计数率计	取下探头测定	毫居里— 10^{-2} 微居里	同上	同上	同上
	液体闪烁体	单道幅度分析器	冷却, 用符合计数法	$1-10^{-5}$ 微居里	闪烁体效率修正, 电源电压修正	需各种比较源	1—100 (视道的选择而异)

续表

测定项目	探测器	计数装置	测定条件	测定灵敏度	修正内容	所需标准源及其种类	本底, 计数/分
放射性强度绝对测定(在上述相对测定法中与标准源比较测定)	立体角窗式 G-M 计数管	定标器	测定台上用测定皿测定	$10^{-1} - 10^{-4}$ 微居里	计数管窗、样品自吸收、样品皿散射修正	无特殊要求	20
	4π 或 2π 计数管	同上	样品尽量制薄	$10^{-2} - 10^{-6}$ 微居里	样品自吸收修正(γ 、 X 射线效率修正)	同上	50—100
	电离室	振荡静电计	在一定距离测定 X 、 γ (β) 射线辐射量, 减少散射, 测定全计数, 或以测定特定的能量范围	毫居里—微居里	散射射线、电离室厚度、温度、气压修正	最好用标准源校正	
	NaI(Tl) 闪烁体	单道幅度分析器	同上	毫居里— 10^{-3} 微居里	几何效率和荧光体效率修正, 闪烁体效率修正(γ 、 X 射线效率与探测效率关系)	无特殊要求, 但对 γ 射线的探测效率须获得准确值	视 NaI(Tl) 尺寸而异
	Ge(Li) 半导体探测器	多道(4千)幅度分析器	光电量范围内测定(γ 射线)	毫居里— 10^{-3} 微居里	样品自吸收、能量分辨条件修正	用与样品条件相同的标准源, 元素无须相同	一般可忽视
	Si(Li) 半导体探测器	多道(1千)幅度分析器	特征 X 射线范围内测定(特征 X 射线)	毫居里— 10^{-3} 微居里	除上述要求外, 须考虑标准源与探测器间的吸收	同上	注意特征 X 射线
	液体闪烁体	单道幅度分析器	与闪烁体混合	$10^{-1} - 10^{-4}$ 微居里	射线能量效率修正, 化学淬灭、染色淬灭修正	标准射线源, 以 β 射线源为主的溶液, 外辐射源	(1—100) 视道的选择而异

续表

测定项目	探测器	计数装置	测定条件	测定灵敏度	修正内容	所需标准源及其种类	本底, 计数/分
放射性强度绝对测定(在上述相对测定法中与标准源比较测定)	端窗式G-M计数管及NaI(Tl)闪烁体	符合计数装置及定标器	与β射线一起同时还放射出γ射线者	10^{-2} — 10^{-4} 微居里	修正内容取决于衰变形式	无特殊要求	几乎可忽略, 但要考虑偶然的符合计数
	NaI(Tl)闪烁体(2个)	同上	同时放射出二个γ射线者	10^{-1} — 10^{-4} 微居里	同上	同上	同上
	测定X射线用的探测器及NaI(Tl)闪烁体	同上	与X射线一起同时还放射出γ射线者	同上	同上	同上	同上
剂量测定	G-M计数管	使用定标器或测量器的计数率计	测γ射线时需隔一定距离	10^{-1} — 10^{-2} 毫伦/小时	能量依存性修正	特别需校正能量用的射线源	30
	电离室	振簧静电计 微电流测定装置	距一定距离测定 使用高压电离室	10^{-2} 毫伦/小时以上 10^{-3} 毫伦/小时以上	能量依存性修正, 温度、气压修正	同上	$\approx 10^{-2}$ 毫伦/小时 $\approx 10^{-3}$ 毫伦/小时
	NaI(Tl)闪烁体	定标器、测量器	计数方式, 使用NaI(Tl)	10^{-1} — 10^{-3} 毫伦/小时	能量依存性修正(大), 电路或屏蔽材料修正	同上	同上
	有机闪烁体	微电流测定装置 多道幅度分折器	电流方式, 使用有机荧光体按计算进行	10^{-1} 毫伦/小时以上 10^{-1} — 10^{-3} 毫伦/小时	能量依存性修正(小) 根据能量范围的校正进行修正	特别需校正能量, 以幅度值校正为主时, 使用辅助射线源	$\approx 10^{-1}$ 毫伦/小时 $\approx 10^{-3}$ 毫伦/小时

续表

测定项目	探测器	计数装置	测定条件	测定灵敏度	修正内容	所需标准源及其种类	本底, 计数/分
α射线测定	ZnS(Ag)闪烁体	定标器	样品置于闪烁体中 使用测定台	$10^{-1} \sim 10^{-5}$ 微居里	样品粒度修正 几何效率修正, 样品自吸收修正	无特殊要求 须用标准源以确定计数效率	10计数/小时
	电离室	振荡静电计或微电流测定装置	测定电离电流 用记录仪测定总数	微居里 10^{-3} 毫微居里 10^{-5} (脉冲)	与气压、温度、γ射线能量有关的电离流值的读取很重要	需形状相同的标准源	≈10计数/小时
α射线能量测定	正比计数管	定标器	样品装于计数管内	$10^{-1} \sim 10^{-5}$ 微居里	计数管有效体积修正, 确定坪曲线	除验证探测α射线外, 无特殊要求	50—100
	栅屏电离室 半导体探测器(Si表面势垒型)	多道幅度分折器 同上	样品装在电离室内 样品尽量制薄 探测器、样品置于真空容器内, 样品尽量制薄	$10^{-2} \sim 10^{-6}$ 微居里 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 微居里	样品厚度修正 修正	需校正能量	10计数/小时以下
β射线能量测定(最常用者)	端窗式G-M计数管	定标器	通过吸收板测定吸收曲线求最大能量	$1 \sim 10^{-6}$ 微居里	同上	校正能量	同上
	气流计数管	同上	同上	$10^{-1} \sim 10^{-3}$ 微居里	进行基本修正, 与能量已知的β射线吸收曲线相比较来确定能量	需数种能量已知的β射线源(RaD、P-32、Ci-36等)	20—30
	有机闪烁体	多道幅度分折器, 对数增幅器亦可	薄膜与闪烁体贴紧测定	$10^{-1} \sim 10^{-6}$ 微居里	同上	同上	同上
					用幅度分析线路测定能量, 进行能量校正。扣除γ射线计数。进行自吸收修正。	需数种标准源	视荧光体尺寸而异

续表

测定项目	探测器	计数装置	测定条件	测定灵敏度	修正内容	所需标准源及其种类	本底, 计数, 分
β射线能 量测定用 (最常用者)	液体闪烁体 Si(Li) 半导体 探测器	2—3道幅度分 析器或多道幅 度分析器	溶于闪烁体内 或 减少散射, 或 考虑散射射线影 响	10 ⁻¹ —10 ⁻⁵ 微居里	用幅度分析线路测定 能量, 进行能量校正。 自吸收修正	需数种标准源	视荧光体 尺寸而异
	NaI(Tl) 闪 烁体	多道幅度分 析器	用测定台或于 一定距离测定 γ射线能谱	1—10 ⁻⁴ 微居 里	能量校正, 散射修正 或散射分布	能量校正	视大小而 定
γ射线、 X射线能 量测定用 (最常用 方法)	Ge(Li) 半 导体探测器 (测γ射线)	同上	同上	同上	用幅度分析线路测定 能谱, 进行能量校正 或散射分布	需数种标准源	视荧光体 尺寸而异
	Si(Li)、Ge (Li) 半导体 探测器 (测 X射线)	同上	测定γ射线、 X射线能谱, 与 探测器间的吸 收	同上	预先准确确定能量分 辨率, 进行样品自吸收 修正。考虑样品自吸收	需辐射率、能 量已知射线源(相对值亦 可)	视大小而 定
	X射线正比 计数管	同上	测定X射线能 谱, 预先了解测 量器和探测器间 效率与射线源间 的吸收	毫居里—10 ⁻³ 微居里	预先求出能量的 相对探测效率, 用已 知数据内外插法和能 量绝对探测效率和能量	用能量、辐射 率已知射线源和用 特征X射线	视屏蔽方 法而异

[郑作寰译自: 原子力工业, 1975, 11, 40—41.]

附录2 天然放射性核的 γ 量子的能谱成分

1. 铀-238族

对该族的 γ 辐射能谱成分已做过详细研究,对各单色谱线的能量已有详细了解,但关于一次衰变的量子数尚有误差。

平衡铀系的 γ 辐射谱列于表1。表中以兆电子伏为单位列出了各谱线的能量 E_γ 、以一次衰变的量子数 n 和每秒量子数表示的谱线强度,并列出了一次衰变的 γ 辐射能量 $n \cdot E_\gamma$ 和 10^{-4} 克铀的 γ 辐射能量。

镭-226及其所有衰变产物 γ 射线的总能量按表1所列接近1.81兆电子伏(一次衰变)。这个数字与热量测量资料很相符(1.79兆电子伏)。

铀系的 γ 射线分布在数十千电子伏至2.446兆电子伏的能区内。主要单色谱线(相对强度大于5%)有:0.352、0.609、1.12、1.76和2.204兆电子伏。这些谱线的总能量强度占54%。整个铀系的近98%的 γ 辐射能量和80%以上的量子数是由以下两个同位素放出的:铅-214(RaB)和铀-214(RaC)

表1 平衡铀系 γ 量子的能谱成分

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克铀的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{238}_{92}\text{U}(\text{U I})$	0.112	0.00023	0.00003		
	0.048	0.187	0.0089		
	总计	0.1872	0.0090	0.23	0.011
$^{234}_{90}\text{Th}(\text{UX}_1)$	0.093	0.148	0.0137		
	0.064	0.065	0.0041		
	0.029	0.065	0.0018		
	总计	0.278	0.0197	0.34	0.024

续表

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克 铀 的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{234}_{90}\text{Pa}(\text{UX}_2 + \text{UZ})$	0.250	0.0019	0.00047		
	0.750	0.0012	0.00090		
	0.760	0.0069	0.0045		
	0.910	0.0007	0.00064		
	1.000	0.0037	0.0037		
	1.680	0.0002	0.00034		
	1.810	0.0004	0.00072		
	总计		0.0141	0.011	0.017
$^{234}_{92}\text{U}(\text{UI})$	0.121	0.0003	0.00004		
	总计	0.0003	0.00004	0.00037	0.00005
$^{230}_{90}\text{Th}(\text{I}_0)$	0.253	0.00017	0.00004		
	0.184	0.00014	0.00003		
	0.142	0.0007	0.00010		
	0.068	0.0059	0.00040		
	总计		0.00691	0.00057	0.00857
$^{226}_{88}\text{Ra}(\text{Ra})$	0.184	0.012	0.0022		
	总计	0.012	0.0022	0.014	0.0027
$^{222}_{86}\text{Rn}(\text{Rn})$	0.51	0.00064	0.00032		
	总计	0.00064	0.00032	0.00079	0.00040
$^{214}_{82}\text{Pb}(\text{RaB})$	0.352	0.377	0.132		
	0.295	0.189	0.0557		
	0.285	0.052	0.014		
	0.242	0.105	0.0254		
	总计		0.723	0.228	0.896

续表

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克铀的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 $\frac{n}{\tau}$	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{214}_{83}\text{Bi}(\text{RaC})$	2.446	0.016	0.039		
	2.410	0.002	0.00482		
	2.297	0.004	0.00919		
	2.204	0.052	0.11		
	2.117	0.014	0.029		
	2.090	0.001	0.002		
	2.017	0.001	0.002		
	1.900	0.004	0.007		
	1.862	0.008	0.014		
	1.848	0.020	0.036		
	1.764	0.163	0.287		
	1.728	0.024	0.041		
	1.668	0.010	0.016		
	1.605	0.004	0.006		
	1.583	0.011	0.017		
	1.541	0.008	0.012		
	1.509	0.022	0.033		
	1.403	0.040	0.056		
	1.378	0.048	0.066		
	1.281	0.017	0.021		
	1.238	0.060	0.074		
1.207	0.006	0.007			
1.155	0.018	0.020			
1.120	0.166	0.185			
1.050	0.005	0.0052			
0.960	0.005	0.0048			
0.935	0.033	0.0308			
0.885	0.004	0.0035			
0.837	0.009	0.0075			

续表

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克铀的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{214}_{83}\text{Bi}(\text{RaC})$	0.806	0.015	0.012		
	0.787	0.012	0.0094		
	0.769	0.053	0.040		
	0.740	0.004	0.00296		
	0.721	0.007	0.005		
	0.703	0.008	0.005		
	0.666	0.023	0.0153		
	0.609	0.471	0.286		
	0.535	0.009	0.0048		
	0.509	0.013	0.0066		
	0.485	0.015	0.0072		
	0.465	0.010	0.0046		
	0.450	0.010	0.0045		
	0.417	0.008	0.0033		
	0.395	0.013	0.0051		
总计		1.446	1.574	1.79	1.95
$^{210}_{82}\text{Pb}(\text{RaD})$	0.047	0.0025	0.00012		
	总计	0.0025	0.00012	0.00310	0.00015
铀系总计		2.658	1.84	3.29	2.29
镭系总计		2.184	1.80	2.70	2.23

注：1. 强度小于 1×10^{-5} 兆电子伏/衰变的谱线表中未列出。

2. 能量为 0.395、0.417、0.450、0.465、0.485、0.509、0.535 兆电子伏的量子假定属于 RaC 的 γ 辐射。

续表

同 位 素	γ 量子能 量 E_γ , 兆电子伏	一 次 衰 变 的		10 ⁻⁴ 克 钍 的	
		量 子 数 n	能 量 nE_γ , 兆电子伏	1 秒 钟 的 量 子 数 \bar{n}	能 量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
²³¹ Th(UY) ₉₀	0.310	0.015	0.0046		
	0.218	0.015	0.0032		
	0.1693	0.0508	0.00860		
	0.164	0.220	0.0360		
	0.096	0.015	0.0014		
	0.0851	0.0509	0.00433		
	0.0842	0.290	0.0244		
	0.0812	0.0282	0.00229		
	0.0732	0.1611	0.0117		
	0.073	0.015	0.0011		
	0.0665	0.0282	0.00187		
	0.0621	0.1611	0.0100		
	0.0585	0.3190	0.0186		
	0.0579	0.0509	0.00295		
总 计	1.4202	0.1314	11.2	1.03	
²³¹ Pa ₉₁	0.356	0.0140	0.00498		
	0.329	0.0275	0.00905		
	0.302	0.0275	0.00831		
	0.299	0.0275	0.00822		
	0.283	0.0275	0.00778		
	0.260	0.0210	0.00546		
	0.101	0.0140	0.00141		
	0.097	0.0490	0.0047		
	0.064	0.2340	0.0149		
	0.046	0.5020	0.023		
	0.030	0.1670	0.0050		
	总 计	1.1110	0.0930	8.76	0.735

续表

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克铀的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{227}_{90}\text{Th}(\text{RdAc})$	0.350	0.015	0.0052		
	0.343	0.020	0.0068		
	0.334	0.029	0.0096		
	0.330	0.017	0.0056		
	0.304	0.029	0.0088		
	0.300	0.017	0.0051		
	0.296	0.019	0.0056		
	0.286	0.080	0.0228		
	0.282	0.020	0.0084		
	0.256	0.080	0.0204		
	0.250	0.020	0.0050		
	0.248	0.003	0.00074		
	0.236	0.080	0.018		
	0.236	0.0033	0.00078		
	0.205	0.0033	0.00068		
	0.174	0.0033	0.00057		
	0.113	0.0300	0.0033		
	0.080	0.0540	0.0043		
	0.061	0.0120	0.00073		
	0.048	0.0290	0.0013		
0.031	0.1200	0.00037			
0.030	0.2000	0.00600			
总计		0.7759	0.141	6.13	1.11
$^{223}_{87}\text{Fr}(\text{AcK})$	0.310	0.008	0.0024		
	0.215	0.030	0.0064		
	0.080	0.240	0.019		
	0.050	0.400	0.020		
	总计		0.6780	0.0481	5.35

续表

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10 ⁻⁴ 克铀的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
²²³ Ra(AcX) ₈₈	0.371	0.0028	0.0010		
	0.338	0.0195	0.00659		
	0.324	0.0230	0.00745		
	0.270	0.0465	0.01256		
	0.180	0.0050	0.00090		
	0.154	0.0550	0.00847		
	0.144	0.0410	0.00590		
	0.122	0.0034	0.00042		
	总计	0.1962	0.04333	1.550	0.342
²¹⁹ Rn(Ac) ₈₆	0.401	0.050	0.020		
	0.272	0.130	0.0353		
	总计	0.180	0.0554	1.42	0.437
²¹¹ Pb(AcB) ₈₂	0.829	0.130	0.107		
	0.764	0.010	0.0076		
	0.487	0.003	0.0014		
	0.425	0.060	0.025		
	0.404	0.060	0.024		
	0.065	0.010	0.00065		
	总计	0.273	0.167	2.15	1.32
²¹¹ Bi(AcC) ₈₃	0.351	0.137	0.0480		
	总计	0.137	0.0480	1.08	0.379
²⁰⁷ Tl(AcC'') ₈₁	0.890	0.005	0.0044		
	总计	0.005	0.0044	0.035	0.035
铀系总计		5.666	0.8803	44.76	6.955

注：强度小于 1×10^{-3} 兆电子伏/衰变的谱线表内未列出。

* 原文是“为”，疑有误。——编者

3. 钍-232族

对钍族的 γ 辐射谱研究不够。主要差别见于铀-228($MsTh_2$)和钍-212(ThC)。表4中列出了钍的平衡谱,表中所列数值应看作近似值。

表4 平衡钍系的 γ 量子能谱成分

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克钍的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{232}_{90}Th$	0.060	0.197	0.011		
	总计	0.197	0.011	0.080	0.0048
$^{228}_{89}Ac(MsTh_2)$	0.960	0.100	0.0960		
	0.908	0.250	0.227		
	0.831	0.016	0.013		
	0.790	0.045	0.035		
	0.779	0.008	0.0062		
	0.338	0.095	0.032		
	0.328	0.033	0.0108		
	0.270	0.031	0.0083		
	0.209	0.040	0.0083		
	0.129	0.106	0.0136		
	0.058	0.700	0.0406		
总计	1.424	0.492	0.583	0.201	
$^{228}_{90}Th(RdTh)$	0.217	0.0027	0.00059		
	0.205	0.0003	0.00006		
	0.169	0.0012	0.00021		
	0.133	0.0023	0.00031		
	0.084	0.0160	0.00134		
	总计	0.0225	0.00251	0.00922	0.00103

续表

同 位 素	γ 量子能 量 E_γ , 兆电子伏	一 次 衰 变 的		10 ⁻⁴ 克 钍 的	
		量 子 数 n	能 量 nE_γ , 兆电子伏	1 秒 钟 的 量 子 数 \bar{n}	能 量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
²²⁴ Ra(ThX) ₈₈	0.241	0.0303	0.00748		
	总 计	0.0303	0.00748	0.0124	0.00307
²²⁰ Rn(Tn) ₈₆	0.542	0.0003	0.00016		
	总 计	0.0003	0.00016	0.00012	0.00006
²¹² Pb(ThB) ₈₂	0.415	0.0016	0.00066		
	0.300	0.0320	0.00960		
	0.239	0.4700	0.11233		
	0.177	0.0024	0.00042		
	0.115	0.0066	0.00076		
	总 计	0.5126	0.1151	0.2101	0.04720
²¹² Bi(ThC) ₈₃	1.620	0.01680	0.02722		
	1.073	0.00648	0.00695		
	0.953	0.00389	0.00371		
	0.893	0.00389	0.00347		
	0.786	0.01040	0.00817		
	0.727	0.06600	0.04798		
	0.513	0.00454	0.00233		
	0.493	0.00127	0.00063		
	0.453	0.00370	0.00168		
	0.328	0.00151	0.00050		
	0.288	0.00366	0.00105		
	0.040	0.0105	0.00042		
	总 计	0.13264	0.10411	0.05438	0.04268

续表

同位素	γ 量子能量 E_γ , 兆电子伏	一次衰变的		10^{-4} 克钍的	
		量子数 n	能量 nE_γ , 兆电子伏	1秒钟的量子数 \bar{n}	能量 $\bar{n}E_\gamma$, 兆电子伏/秒
1	2	3	4	5	6
$^{208}_{81}\text{Tl}(\text{ThC}'')$	2.620	0.337	0.881		
	0.860	0.0404	0.0347		
	0.763	0.0067	0.0051		
	0.583	0.2932	0.1709		
	0.511	0.0842	0.0430		
	0.486	0.0017	0.00082		
	0.277	0.0377	0.00933		
	0.252	0.0034	0.00086		
	0.233	0.0010	0.00023		
	总计		0.8013	1.1464	0.3292
钍系总计		3.121	1.8796	1.279	0.7706

注：强度小于 1×10^{-5} 兆电子伏/衰变的谱线表中未列出。

钍系 γ 量子能量分布在数十千电子伏至2.62兆电子伏能区内。主要 γ 谱线（相对强度超过5%的谱线）是能量为0.239、0.583、0.960和2.62兆电子伏的谱线。这些谱线的总能量强度占整个钍系能量约70%。钍系中近85%的 γ 辐射能量是由两个同位素放出的：铊-208 (ThC'') 约60%和镭-228 (MsTh_2) 约25%。

表5中列出了钍系 γ 辐射的能谱区段。

表5 钍系 γ 辐射的能谱成分

能区和某些单色谱线, 兆电子伏	γ 量子总数, %	总能量, %
1.0以下	85	50
1.0—2.0	7	4
2.62	8	46

4. 其它天然放射性元素

某些天然放射核不能构成连续系列或族。其中分布较广的有：钾-40、镭-138、镭-176、铍-7。这些核的 γ 量子谱列于表6。

表6 未包括在放射族中的放射核 γ 辐射能谱成分

同位素	1克同位素 1秒钟的 衰变数	γ 量子 能量, 兆电子伏	一次衰变的		1克的	
			量子数 n	能量, 兆电子伏	1秒钟的 量子数	能量, 兆电子伏/秒
40K	23.8·10 ⁴	1.46	0.11	0.1606	—	—
		总计	0.11	0.1606	2.6·10 ⁴	3.8·10 ⁴
138La	9.6·10 ²	1.43	0.70	1.0010		
		0.81	0.30	0.2430		
		总计	1.0	1.2440	9.6·10 ²	11.9·10 ²
176Lu	31.4·10 ²	0.306	1.0	0.3060		
		0.202	0.892	0.1802		
		0.088	0.065	0.0057		
		总计	1.957	0.4919	61.45·10 ²	15.3·10 ²
7Be	1.29·10 ¹⁶	0.478	0.123	0.058		
		总计	0.123	0.058	1.58·10 ¹⁵	7.58·10 ¹⁴

1克岩石（放射性元素含量为克拉克值的岩石圈）放出的 γ 射线能量列于表7。

在放射性元素含量接近克拉克值的岩石中，钾-40所造成的能量占全部 γ 辐射能量的42%，平衡钍系占32%，平衡铀系和钍铀及其衰变产物共占25%。分布不广的镭-138、镭-176等元素仅占1%。

表 7 1 克岩石(岩石圈)放出的 γ 射线能量

同 位 素	平 均 含 量, %	能 量, 10^{-2} 兆电子伏/秒
^{238}U (与衰变产物平衡)	$2.98 \cdot 10^{-4}$	6.82
^{235}U (与衰变产物平衡)	$0.02 \cdot 10^{-4}$	0.153
^{232}Th (与衰变产物平衡)	$11.4 \cdot 10^{-4}$	8.78
^{40}K	3.0	11.4
其它元素	—	0.27

〔引自《国外放射性地质》，第 2 期，p. 1—7 (1972).〕

附录3 γ 射线的质量衰减系数

原子 序 数	元 素 符 号	原 子 量	质量衰减系数 μ/ρ , 厘米 ² /克				
			0.5 兆电子伏	1 兆电子伏	2 兆电子伏	8 兆电子伏	6 兆电子伏
1	H	1.008	0.173	0.126	0.0878	0.0693	0.0449
2	He	4.003	0.0874	0.0625	0.0425	0.0337	0.0247
3	Li	6.940	0.0756	0.0540	0.0360	0.0288	0.0216
4	Be	9.02	0.0772	0.0564	0.0394	0.0313	0.0212
5	B	10.82	0.0809	0.0587	0.0437	0.0323	0.0277
6	C	12.01	0.0870	0.0635	0.0443	0.0356	0.0246
7	N	14.008	0.0870	0.0636	0.0443	0.0357	0.0251
8	O	16.0000	0.0871	0.0636	0.0444	0.0359	0.0255
9	F	19.0000	0.0826	0.0600	0.0421	0.0342	0.0245
10	Ne	20.183	0.0867	0.0627	0.0443	0.0357	0.0260
11	Na	22.997	0.0835	0.0608	0.0427	0.0348	0.0255
12	Mg	24.32	0.0863	0.0625	0.0440	0.0362	0.0267
13	Al	26.97	0.0844	0.0614	0.0431	0.0353	0.0266
14	Si	28.06	0.0873	0.0635	0.0448	0.0367	0.0279
15	P	30.98	0.0854	0.0617	0.0434	0.0358	0.0274
16	S	32.066	0.0879	0.0636	0.0448	0.0368	0.0287
17	Cl	35.457	0.0846	0.0611	0.0430	0.0357	0.0278
18	Ar	39.944	0.0795	0.0574	0.0406	0.0336	0.0267
19	K	39.096	0.0859	0.0620	0.0437	0.0366	0.0289
20	Ca	40.08	0.0885	0.0637	0.0451	0.0378	0.0302
21	Sc	45.10	0.0826	0.0593	0.0418	0.0350	0.0284
22	Ti	47.90	0.0818	0.0588	0.0413	0.0347	0.0285
23	V	50.95	0.0805	0.0577	0.0406	0.0342	0.0283
24	Cr	52.01	0.0827	0.0589	0.0417	0.0351	0.0293
25	Mn	54.93	0.0817	0.0583	0.0411	0.0348	0.0294
26	Fe	55.85	0.0840	0.0598	0.0422	0.0359	0.0305
27	Co	58.94	0.0828	0.0598	0.0416	0.0353	0.0472

续表

原子 序 数	元 素 符 号	原 子 量	质量衰减系数 μ/ρ , 厘米 ² /克				
			0.5 兆电子伏	1 兆电子伏	2 兆电子伏	3 兆电子伏	6 兆电子伏
28	Ni	58.69	0.0866	0.0613	0.0434	0.0369	0.0319
29	Cu	63.54	0.0834	0.0588	0.0416	0.0356	0.0309
30	Zn	65.38	0.0841	0.0585	0.0418	0.0357	0.0314
31	Ga	69.72	0.0820	0.0575	0.0406	0.0349	0.0307
32	Ge	72.60	0.0820	0.0572	0.0403	0.0347	0.0308
33	As	74.91	0.0824	0.0573	0.0403	0.0350	0.0311
34	Se	78.96	0.0811	0.0561	0.0395	0.0343	0.0308
35	Br	79.916	0.0830	0.0572	0.0402	0.0350	0.0318
36	Kr	83.70	0.0817	0.0563	0.0397	0.0346	0.0315
37	Rb	85.48	0.0835	0.0567	0.0400	0.0349	0.0322
38	Sr	87.63	0.0842	0.0569	0.0402	0.0351	0.0327
39	Y	88.92	0.0859	0.0577	0.0408	0.0358	0.0335
40	Zr	91.22	0.0864	0.0573	0.0409	0.0360	0.0338
41	Nb	92.91	0.0864	0.0584	0.0414	0.0363	0.0343
42	Mo	95.95	0.0879	0.0581	0.0412	0.0362	0.0343
43	Tc
44	Ru	101.7	0.0883	0.0577	0.0410	0.0361	0.0334
45	Rh	102.91	0.0902	0.0584	0.0415	0.0367	0.0353
46	Pd	106.7	0.0901	0.0577	0.0410	0.0363	0.0351
47	Ag	107.88	0.0920	0.0586	0.0416	0.0369	0.0358
48	Cd	112.41	0.0912	0.0576	0.0409	0.0363	0.0354
49	In	114.76	0.0922	0.0578	0.0411	0.0364	0.0357
50	Sn	118.70	0.0923	0.0573	0.0407	0.0361	0.0356
51	Sb	121.76	0.0928	0.0573	0.0406	0.0361	0.0357
52	Te	127.61	0.0915	0.0560	0.0396	0.0354	0.0351
53	I	126.92	0.0954	0.0579	0.0408	0.0364	0.0364
54	Xe	131.3	0.0954	0.0571	0.0402	0.0361	0.0363
55	Cs	132.91	0.0978	0.0578	0.0406	0.0367	0.0369
56	Ba	137.36	0.0978	0.0572	0.0402	0.0363	0.0367
57	La	138.92	0.100	0.0581	0.0406	0.0368	0.0373

续表

原子 序 数	元 素 符 号	原 子 量	质量衰减系数 μ/ρ , 厘米 ² /克				
			0.5 兆电子伏	1 兆电子伏	2 兆电子伏	3 兆电子伏	6 兆电子伏
58	Ce	140.13	0.103	0.0591	0.0411	0.0373	0.0380
59	Pr	140.92	0.106	0.0601	0.0417	0.0380	0.0388
60	Nd	144.27	0.107	0.0601	0.0416	0.0379	0.0389
61	Pm	~146	0.109	0.0607	0.0419	0.0385	0.0395
62	Sm	150.43	0.110	0.0606	0.0415	0.0382	0.0394
63	Eu	152	0.112	0.0613	0.0420	0.0387	0.0400
64	Gd	156.9	0.113	0.0608	0.0416	0.0383	0.0397
65	Tb	159.2	0.115	0.0613	0.0417	0.0386	0.0401
66	Dy	162.46	0.116	0.0616	0.0417	0.0386	0.0403
67	Ho	164.94	0.118	0.0620	0.0419	0.0388	0.0406
68	Er	167.2	0.120	0.0626	0.0422	0.0391	0.0411
69	Tm	169.4	0.122	0.0632	0.0424	0.0394	0.0415
70	Yb	173.04	0.123	0.0633	0.0423	0.0393	0.0415
71	Lu	174.99	0.125	0.0641	0.0427	0.0396	0.0420
72	Hf	178.6	0.126	0.0643	0.0427	0.0396	0.0420
73	Ta	180.88	0.128	0.0650	0.0430	0.0399	0.0424
74	W	183.92	0.131	0.0655	0.0432	0.0400	0.0426
75	Re	186.31	0.134	0.0662	0.0436	0.0402	0.0429
76	Os	190.2	0.136	0.0663	0.0436	0.0402	0.0429
77	Ir	193.1	0.138	0.0670	0.0437	0.0403	0.0431
78	Pt	195.23	0.142	0.0676	0.0444	0.0407	0.0435
79	Au	197.2	0.145	0.0687	0.0449	0.0409	0.0440
80	Hg	200.61	0.147	0.0692	0.0451	0.0411	0.0441
81	Tl	204.39	0.149	0.0695	0.0452	0.0410	0.0442
82	Pb	207.21	0.152	0.0703	0.0456	0.0413	0.0445
83	Bi	209	0.156	0.0715	0.0461	0.0417	0.0449
84	Po	~210	0.160	0.0728	0.0468	0.0420	0.0456
85	At	~221	0.157	0.0709	0.0454	0.0409	0.0442
86	Rn	222	0.161	0.0723	0.0462	0.0415	0.0449
87	Fr	~224	0.164	0.0735	0.0467	0.0419	0.0453

续表

原子 序 数	元 素 符 号	原 子 量	质量衰减系数 μ/ρ , 厘米 ² /克				
			0.5 兆电子伏	1 兆电子伏	2 兆电子伏	3 兆电子伏	6 兆电子伏
88	Ra	226.05	0.168	0.0746	0.0472	0.0423	0.0458
89	Ac	~227	0.173	0.0760	0.0479	0.0429	0.0465
90	Th	232.12	0.175	0.0762	0.0477	0.0428	0.0463
91	Pa	231	0.183	0.0784	0.0489	0.0443	0.0475
92	U	238.07	0.185	0.0779	0.0483	0.0435	0.0471

[张书达译自 Б. М. Злобинский, Безопасность работ с радиоактивными веществами, 286, Москва (1961).]