

环境样品放射性活度用 HPGe γ 谱仪测量的误差来源分析

刘兆华

中图分类号: R144 TL817.12 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2005)02-0147-02

【摘要】 目的 对环境样品放射性活度用 HPGe γ 谱仪测量的误差来源进行分析并为减小活度测量误差指明方向。方法 从测量原理出发分析误差来源。结果 指出分析误差的几项来源。结论 通过减小活度测量误差, 可提高用 HPGe γ 谱仪测量环境样品放射性活度的准确性。
[关键词] 放射性活度; 高纯锗 γ 谱仪; 测量误差

用 γ 谱仪测量环境样品放射性核素活度, 可以比其他方法更方便更真实地了解环境放射性的分布情况和变化规律^[1,2]。在 γ 谱仪中, 半导体探测器 γ 谱仪具有比闪烁探测器 γ 谱仪高得多的能量分辨率, 而在半导体探测器 γ 谱仪中, 高纯锗 (HPGe) γ 探测器由于不需要在液氮低温下保存, 因而具有比 Ge(Li) γ 谱仪维护更方便的优点, 因此目前对环境样品的放射性活度测量, 普遍采用 HPGe γ 谱仪^[3,4]。虽然 HPGe γ 谱仪具有较高的能量分辨率, 较之闪烁 γ 谱仪可以具有更高的测量准确性, 但这并不意味着用 HPGe γ 谱仪测量环境样品放射性活度的误差就一定很小, 如果不仔细分析环境样品放射性活度用 HPGe γ 谱仪测量的误差来源以及不采取减小这些误差的方法和技术, 仍然可能使测量结果具有较大的误差。下面从测量原理出发, 分析其误差来源, 以便针对具体的待测环境样品, 找出提高测量准确性的方法。

1 从测量原理出发分析误差来源

图 1 为用 HPGe γ 谱仪测得的一环境土壤样品的 γ 能谱。由图可见, 各 γ 射线的全能峰能被清楚分开, 这非常有利于测量那些放出能量相近的 γ 射线的放射性核素活度。γ 谱全能峰峰位由 γ 射线的能量决定, 一定的放射性核素放出的 γ 射线能量是一定的, 因而可以通过全能峰峰位确定放射性核素的种类。全能峰面积和相应能量 γ 射线的强度成正比, γ 射线强度又和放射性活度成正比, 因而全能峰面积和放射性活度之间满足正比关系, 通过这种关系可以求出放射性活度。通过这种关系的建立, 可以确定出用 HPGe γ 谱仪测量环境样品放射性活度的误差来源。

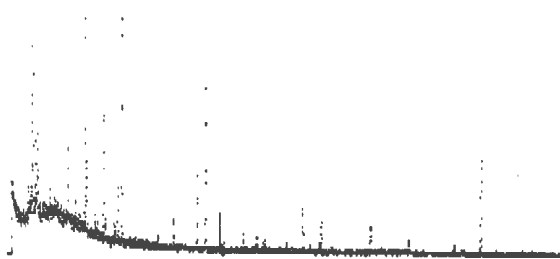


图 1 用 HPGe γ 谱仪测得的环境土壤样品的 γ 谱

待测环境样品, 包括土壤样品、水样品、生物样品等, 不论其种类如何, 都是通过一定制样过程处理后, 将其盛于一定形状和一定体积的样品盒内, 置于探测器近旁进行 γ 能谱获取测

量。要测量的放射性核素, 如天然放射性核素²³⁸U、²³²Th、²³⁵Ra 和⁴⁰K 等, 它们在环境样品中的含量极微, 一般均匀分布在样品盒内的介质内。当这些放射性核素发生衰变时, 以一定几率发射某种能量的 γ 射线, 设样品中某种放射性核素的活度为 A, 在一次衰变中, 发射能量为 E₀ 的 γ 射线的几率为 P, 则单位时间内发射这种能量的 γ 射线数目 n₀ 为:

$$n_0 = P \cdot A \tag{1}$$

由于 n₀ 条 γ 射线以 4π 立体角各向同性发射, 因此只有射向探测器方向的 γ 射线才有可能进入探测器损失其全部能量并在全能峰内计数, 虽然那些向其他方向发射的 γ 射线在样品介质内通过一次或多次康普顿散射也可能进入探测器内并损失能量, 但由于这些 γ 射线在进入探测器前已损失部分能量, 因此不能对全能峰计数有贡献。显然, 探测器对样品所张的立体角越大, 射向探测器的 γ 射线就越多, 设探测器对样品所张的平均立体角因子为 f_Ω, 那么射向探测器的 γ 射线数 n₁ 为:

$$n_1 = f_{\Omega} \cdot P \cdot A \tag{2}$$

(2) 式中 f_Ω 被称为平均立体角因子, 是因为 γ 射线是从样品内各处发射出来的, 而不同位置发射出的 γ 射线, 探测器对其所张的立体角不相同, 但对于确定体积的样品, 探测器对其所张的平均立体角却是确定的。在射向探测器的 n₁ 条 γ 射线中, 由于样品介质等材料对它的吸收和散射, 只能有部分 γ 射线才能以初始能量 E₀ 进入探测器, 设这部分 γ 射线所占比例为 f_a, 则以初始能量 E₀ 进入探测器的 γ 射线数 n₂ 为:

$$n_2 = f_a \cdot f_{\Omega} \cdot P \cdot A \tag{3}$$

显然, f_a 的大小与 γ 射线的能量即与 γ 射线的穿透能力有关, 也与 γ 射线穿过样品的质量厚度和介质组成成分有关。那些以初始能量 E₀ 进入探测器的 γ 射线, 只有一部分 γ 射线通过与探测器介质的相互作用在探测器内全部损失能量, 其余的 γ 射线或者直接穿出探测器, 或者只在探测器内损失部分能量后穿出。对于高纯锗探测器, 其全部损失能量的 γ 射线所占的比例取决于 γ 射线的能量和探测器的形状和尺寸, 对那些能量更低、尺寸较大的 HPGe 探测器, γ 射线更容易在内全部损失能量。设在探测器全部损失能量的 γ 射线所占比例为 f_e, 则全部损失能量的 γ 射线数 n₃ 为:

$$n_3 = f_e \cdot f_a \cdot f_{\Omega} \cdot P \cdot A \tag{4}$$

一条将能量全部损失在探测器内的 γ 射线是否会在相应的全能峰内增加一个计数取决于在探测器的分辨时间内没有别的 γ 射线进入探测器并损失能量, 否则, 探测器输出的脉冲幅度比由单独一条 γ 射线产生的要大, γ 谱仪将把这一信号记录在多道分析器的更高的道址。这种符合相加的结果将使得全能峰内的计数丢失, 这种丢失的多少取决于与被测 γ 射线一起发射的级联 γ 射线的数目和进入探测器内的各种能量的 γ

作者单位: 四川省辐射环境管理监测中心站, 四川 成都 610031
作者简介: 刘兆华(1964~), 男, 四川德阳人, 高级工程师。从事辐射环境管理及监测工作。

射线强度, 级联发射的 γ 射线数目越多, 总的 γ 射线的强度越大, 这种丢失就越严重。设由于这种原因记录在全能峰内的 γ 射线所占比例为 f_c , 则落在全能峰内的 γ 射线数 n_4 为:

$$n_4 = f_c \cdot f_e \cdot f_a \cdot f_{\Omega} \cdot P \cdot A \quad (5)$$

(5) 式中的 n_4 只是表示了能量为 E_0 的 γ 射线在单位时间内产生的与全能峰对应的脉冲幅度数。这些脉冲是否一定记录在全能峰内, 还取决于进入探测器的 γ 射线强度和 γ 谱仪的分辨时间即死时间大小。如果 γ 射线的强度较大, 死时间较小, 就会造成部分计数丢失。这是因为当 γ 谱仪正忙于处理前一个 γ 射线产生的信号时, 不能处理在它的分辨时间内到来的 γ 射线产生的信号。设能够记录在全能峰内的 γ 射线所占比例为 f_b , 则记录在全能峰内的计数 n_5 为:

$$n_5 = f_d \cdot f_c \cdot f_e \cdot f_a \cdot f_{\Omega} \cdot P \cdot A \quad (6)$$

(6) 式表示的是待测样品内活度为 A 的某种放射性核素发射能量为 E_0 的 γ 射线在全能峰内的计数率, 实际测量都是在相当长一段时间 t 内完成的, 因此全能峰内的总计数 N 为:

$$N = t \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_e \cdot f_a \cdot f_{\Omega} \cdot P \cdot A \quad (7)$$

通过(7)式, 我们可以得到待测样品内某种放射性核素的活度 A 为:

$$A = \frac{N}{t \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_e \cdot f_a \cdot f_{\Omega} \cdot P} \quad (8)$$

根据(8)式, 由 γ 谱仪测得全能峰计数 N , 在已知其它各参数时, 可得到样品内一种放射性核的活度。但在实际测量中, 要准确知道各参数的值是比较困难的, 为了避免这一困难, 往往采用相对法测量环境样品的放射性活度。

2 放射性活度测量的误差来源

相对法测量是将待测样品与标准样品的测量结果进行比较。对(8)式, 分别用角标 x 表示待测样和用角标 s 表示标准样, 再将两式相比, 就得到(9)式,

$$A_x = \frac{t_s \cdot f_{ds} \cdot f_{cs} \cdot f_{as} \cdot f_{\Omega_s} \cdot N_x}{t_x \cdot f_{dx} \cdot f_{cx} \cdot f_{ax} \cdot f_{\Omega_x} \cdot N_s} \quad (9)$$

(9) 式中没有出现参数 p 和 f_b , 是因为每次核衰变放出能量为 E_0 的 γ 射线几率 P 只与放射性核本身的性质有关, 而与样品的大小和组成等因素无关, 因此对待测样和标准样, P 是相同的; 进入探测器全部损失能量的 γ 射线所占比例 f_c 的大小也只与 γ 射线的能量和 HPGe 探测器的几何大小有关, 与样品无关, 由于是使用的同一个探测器和测的是相同能量的 γ 射线, 因此 f_c 对待测样和标准样也是相同的。通过分析, 还可以去掉(9)式中那些对误差影响很小的项。首先, 由谱仪给出的测量事件 t 可看作是无误差的, 当待测样品与标准样测量时间相同时, 可以去掉(9)式中的时间项。其次, 待测环境样品与标准样品的天然放射性 γ 强度都较低, 且现在的 γ 谱仪都有死时间校正功能, (9)式中与死时间有关的修正因子 f_d 对于待测样和标准样可以看作相同, 因此 f_d 可从(9)式中消去。最后, 与符合相加有关的修正因子 f_e 也可以从(9)式中消去, 因为 f_e 只与级联相关的 γ 发射数和 γ 射线的强度有关, 而通常环境样品的 γ 强度都是较低的, 而且待测样和标准样由于测的是同一种核素, 因此与级联相关的 f_{es} 和 f_{ex} 即使不为 1 也是相同的, 因此也可以从(9)式中消去, (9)式最后变为:

$$A_x = \frac{f_{as} \cdot f_{\Omega_s} \cdot N_x}{f_{ax} \cdot f_{\Omega_x} \cdot N_s} A_s \quad (10)$$

(10) 式中, 存在与 γ 射线穿出样品时不被吸收散射的因子 f_a 以及探测器对样品所张的立体角因子 f_{Ω} , 这两个因子一般不能从(9)式中消去, 因为通常待测样和标准样在样品体积、组成

成分和密度方面存在差别, 在有差别时 f_{ax} 与 f_{as} 不相同, 因而不能从(9)式中消去; f_{Ω} 是与探测器对样品所张的立体角有关的因子, 由于待测样与标准样往往在样品体积上存在差别, 因此与立体角有关的因子 f_{Ω_s} 与 f_{Ω_x} 不相同, 因而也不能从(9)式中消去。而在实际测量中, 我们往往用下式计算待测样品的放射性活度。

$$A_x = \frac{N_x}{N_s} A_s \quad (11)$$

(11) 式把待测样与标准样与吸收有关的因子和立体角因子都看作相同, 因此, 用 HPGe γ 谱仪测量环境样品放射性活度的误差来源主要有如下几个方面:

(1) 当待测样与标准样在介质密度和组成成分上存在差别, 而又采用(11)式进行计算。由于一般实验室内的标准样多为土样, 如果以此为标准测量水样或生物样, 必然在密度和组成成分上存在差别, 即使待测样也是土样, 和标准样相比, 在密度上也可以存在很大差别。另外, 待测样如果颗粒较大, 即使平均密度与标准样相同, 也会由于局部的密度差别引起误差。

(2) 当待测样与标准样相比, 在样品体积上存在差别, 而计算时又忽略这一差别时会带来误差。一般是将待测样和标准样装在一定体积的圆柱形塑料盒内, 因此体积不同也就是样品在盒内的高度不同, 高度不同造成平均立体角因子不同, 也会造成平均吸收因子的不一样。在环境样品的测量中, 由于受采样量的限制, 常常待测样不足以装满样品盒。

(3) 待测样和标准样的全能峰计数 N_x 和 N_s 的计数误差导致样品活度的测量误差, 其来源有: ①本底的干扰。在记录待测 γ 射线的全能峰内, 总会有其他 γ 射线的贡献, 包括来源于样品内和样品外的更高能量 γ 射线的康普顿散射的贡献; 在待测样品外产生的和待测 γ 射线能量相同的 γ 射线的全能峰的贡献; 以及两条或多条 γ 射线在探测器内由于符合相加产生与待测 γ 射线的全能峰对应脉冲幅度相同的信号的贡献; ②和待测 γ 射线的能量相差很小, 即使是高分辨率的 HPGe γ 谱仪也不能完全把这两个峰完全分开; ③待测 γ 射线在全能峰内的计数较小, 使得统计误差较大。

(4) 标准样品的放射性活度 A_s 的误差引起待测样活度测量的误差, A_s 的误差大小由标准样品制备者给出。

(5) 由(11)式得到的是待测样的总活度, 为了便于比较, 需除以样品质量换算成比活度, 虽然用称重法得出样品质量的误差可以小于 1%, 但是, 如果待测样不象标准样那样足够干燥, 而是含有一定水份, 则会给活度测量带来误差。

上述 5 个方面的误差来源, 除了第 4 项我们不能减小外, 其余各项我们总可以找出办法使其误差尽量减小。例如, 可以通过实验或蒙特卡罗模拟计算减小来源于第一、二两方面的误差; 可以通过认真扣除本底, 采用解谱方法以及增大测量时间来减小第三种误差来源; 使样品充分干燥减小第五种来源引起的测量误差。

参考文献:

- [1] 姜让荣, 何元益. 全国环境样品中放射性核素 γ 谱分析比对[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 5.
- [2] 苏琼, 程建平, 范佳锦. 天然放射性核素活度 γ 谱测量中若干问题的思考[J]. 辐射防护通讯, 2001, 2.
- [3] 吕炎, 苏旭. 环境放射性核素的 HPGe γ 谱分析方法[J]. 白求恩医科大学学报, 2000, 5.
- [4] 张佳媚, 王中录, 夏兵. HPGe γ 谱分析环境水平放射性比样品[J]. 核电子学与探测技术, 2002, 1

(收稿日期: 2004-09-15)