



中华人民共和国国家标准

GB/T 11713—2015
代替 GB 11713—1989

高纯锗 γ 能谱分析通用方法

General analytical methods of high-purity germanium gamma spectrometer

2015-06-02 发布

2016-01-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 术语和定义	1
3 谱仪配置及主要部件基本要求	2
4 刻度源和系统刻度	3
5 样品测量	6
6 计算	6
7 报告	7
附录 A (资料性附录) 能量刻度用的单能和多能核素	9
附录 B (规范性附录) γ 能谱仪刻度源的制备	10
附录 C (规范性附录) γ 能谱测量的探测下限	12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB 11713—1989《用半导体 γ 谱仪分析低比活度 γ 放射性样品的标准方法》。本标准与 GB 11713—1989 相比,主要技术变化如下:

- 标准的名称改为《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》;
- 标准的性质由强制性改为推荐性;
- 修改了测量所用探测器为 HPGe 探测器,并修改了能量分辨力和探测效率等相关的参数要求;
- 增加了本征探测效率、相对探测效率和探测下限三个术语;
- 修改了 γ 能谱仪对高压、谱放大器、多道脉冲幅度分析器的相关要求;
- 增加了“刻度源的溯源性”;
- 增加了能量刻度曲线的计算方法;
- 增加了附录 C“ γ 能谱仪刻度源的制备”。

本标准由中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会提出并归口。

本标准起草单位:中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、海南省疾病预防控制中心、吉林大学公共卫生学院。

本标准主要起草人:徐翠华、赵力、周强、拓飞、王川健、吕焱、张庆、任天山、张京、李文红、张建峰。

本标准于 1989 年 9 月首次发布。

高纯锗 γ 能谱分析通用方法

1 范围

本标准规定了使用高纯锗(HPGe) γ 能谱仪分析样品中 γ 放射性核素的通用方法。

本标准适用于在实验室测量分析 γ 射线能量大于40 keV且特征谱线能够分辨开的 γ 放射性核素。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1

本征探测效率 intrinsic detection efficiency

用以表示探测器本身性能的参数。它等于记录的脉冲数与入射到探测器灵敏体积内的 γ 光子数的比值。

2.2

相对探测效率 relative detection efficiency

在源至探头前表面距离为25 cm时,HPGe探测器和标准的圆柱形NaI(Tl)闪烁晶体($\phi \times h$: 7.62 cm \times 7.62 cm)探测器测量 ^{60}Co 源1 332.5 keV γ 射线的全吸收峰面积之比。

2.3

核素全吸收峰探测效率 total absorption detection efficiency for nuclide

对于给定的测量条件以及该核素所发射的能量为 E_γ 的特征 γ 辐射,探测到的全吸收峰内的净计数与同一时间间隔内辐射源中该核素的衰变总数的比值。

2.4

γ 射线全吸收峰探测效率 total absorption detection efficiency for gamma-ray

对于给定的测量条件和 γ 射线能量,探测到的全吸收峰内的净计数与同一时间间隔内辐射源发射的该能量的 γ 射线总数的比值。

2.5

本底 background

无被测辐射源(样品)时,其他因素,如宇宙射线、放射性污染、电磁干扰等在所研究的谱的能量区间造成的计数。

2.6

全能峰半高全宽度 full width at half maximum; FWHM

仅由单峰构成的分布曲线上,峰值(最大值)一半处的全宽度(两点横坐标之间的距离),即半宽度。

2.7

能量分辨力 energy resolution

探测器分辨能量不同却又非常相近的入射 γ 射线的的能力。能量分辨力与入射 γ 射线能量有关,对于指定能量的单能 γ 射线,常用该能量的全吸收峰的半高全宽度来表示。

2.8

康普顿散射干扰 disturbance from Compton scattering

辐射源发射多个能量的 γ 射线,其中较高能量 γ 射线的康普顿散射计数对较低能量 γ 射线的全吸

收峰分析产生的干扰。这种干扰大多数表现为较低能量 γ 射线的(全)能峰下的连续谱的基底计数的增加。

2.9

本底干扰 background disturbance

本底对于待测物理量(如全吸收峰)的干扰。

2.10

密度差异干扰 disturbance from density difference

待测样品与刻度源间的密度差异(如超过 10%)对于待测物理量的干扰。

2.11

探测下限 lower limit of detection; LLD

在给定的置信度下,谱仪可探测的最低活度。

3 谱仪配置及主要部件基本要求

3.1 γ 能谱仪

3.1.1 典型高纯锗 γ 能谱仪构成图

本标准规定的高纯锗 γ 谱仪的典型构成如图 1 所示。

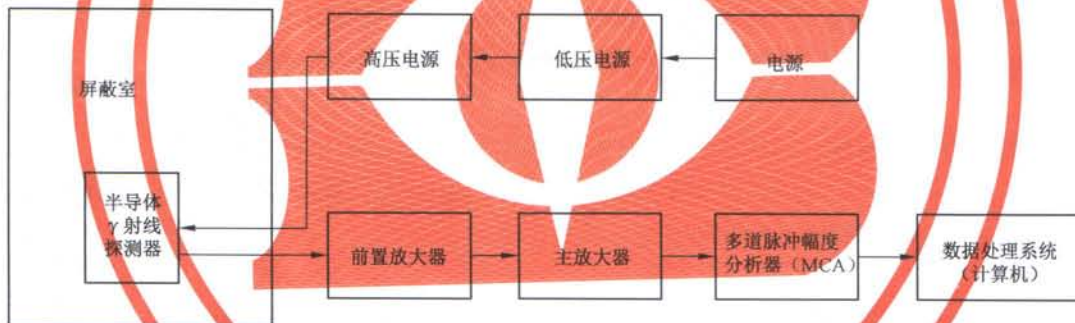


图 1 典型高纯锗 γ 能谱仪的构成图

3.1.2 半导体 γ 射线探测器

宜采用探测效率高(灵敏体积较大)、能量分辨力好的高纯锗半导体探测器,可以是 N 型或 P 型。探测器的相对探测效率一般应大于 20%,对⁶⁰Co 1 332.5 keV γ 射线的能量分辨力应优于 2.5 keV,探测器的能量响应上限应不低于 2 MeV。HPGe 探测器要在低温状态下工作(85 K~100 K),工作温度要稳定,可采用液氮制冷或电制冷。探测器与配套的低噪声电荷灵敏前置放大器一体化组装。

3.1.3 屏蔽室

3.1.3.1 探测器应置于厚度至少 10 cm 铅当量的铅或钢铁作屏蔽物质的外辐射屏蔽室中,屏蔽室内壁距探测器灵敏体积表面的距离至少 13 cm。当铅制屏蔽室内壁与探测器的距离小于 25 cm 时,在屏蔽室的内表面应有原子序数逐渐递减的多层内屏蔽。内壁从外向里依次衬有厚度不小于 1.6 mm 的镅或锡、不小于 0.4 mm 的铜以及厚度为 2 mm~3 mm 的有机玻璃。此外,屏蔽室应设置放、取样品的门或窗,以便放取样品。

3.1.3.2 探测器在屏蔽室内,在 40 keV~2 000 keV 能区内应没有天然放射性核素以外的污染。

3.1.4 高压电源

根据所用探测器的最佳工作状态选择探测器高压。电源输出电压应从 0 V~5 000 V 连续可调,波纹电压应不大于 0.01%,电流应不小于 100 μ A。对于同轴 P 型 HPGe 探测器,要加正高压,同轴 N 型要加负高压。

3.1.5 主放大器

又称谱学放大器,属于线性放大器,应具有波形调节并与前置放大器及多道脉冲幅度分析器匹配。

3.1.6 多道脉冲幅度分析器(MCA)

与 HPGe 探测器相配的 MCA 的道数应不少于 8 192 道。应根据能谱的复杂程度、 γ 射线能量分布范围及探测器的能量分辨力等选择多道分析器的道宽和道数。

3.1.7 谱仪稳定性

若多道分析器取 8 192 道,要求对 ^{60}Co 的 1 332.5 keV γ 射线的全吸收峰置于 5 000 道附近时,24 h 内峰位漂移应不超过 2 道。

3.1.8 数据处理系统

3.1.8.1 它接收 MCA 的谱数据并对其进行处理。数据处理系统由计算机硬件设备和软件构成。

3.1.8.2 数据处理系统的硬件设备主要包括计算机及其配套的读出读入装置,如打印机、移动存储等。

3.1.8.3 数据处理系统的软件主要包括解析 γ 能谱的各种常规程序,诸如能量刻度、效率刻度、谱光滑、寻峰、核素识别、峰面积计算、峰面积校正、效率校正、母子体校正和重峰分析等基本程序。

3.2 样品容器

应该采用低放射性材料制成的容器,如聚乙烯、有机玻璃、不锈钢等。应根据测量对象的特点,采用不同的容器形状(如圆盘状、圆柱状及阱形状等)和尺寸。通常,样品容器的直径最好与探测器的直径相近。

3.3 样品托盘

当样品是非粉末状固体时,为防止样品污染探测器,测试样品时仍需置于样品托盘中或用干净的聚乙烯塑料布或袋对其进行包裹。

3.4 吸收体

对于低比活度测量,样品量一般都比较小,用以吸收韧致辐射的吸收体通常不是必需的。如果需要吸收体,可用厚度为 6.4 mm 的铝或厚度为 1.6 mm 的铅,吸收体的放置应对来自样品的直接韧致辐射有完整的阴影屏蔽作用。

4 刻度源和系统刻度

4.1 刻度源及其要求

4.1.1 刻度源

指由适当基体物质和适量标准放射性物质配制而成的、其核素活度已知的辐射源。刻度源是 γ 能谱系统能够正常进行谱仪能量刻度和效率刻度的必备条件。

4.1.2 刻度源的溯源性

刻度源应具备准确性和可溯源性,具有检验证书原件或副本,证书上除给定活度(或比活度)和不确定度外,还应标明定值日期、标准源纯度、质量或体积、化学成分、核素半衰期、 γ 射线分支比和标准源的定值方法。此外,放射性核素标准源的总不确定度应小于5%。

4.2 能量刻度

4.2.1 刻度源

能量刻度是指用刻度源刻度谱仪系统的 γ 射线能量和道址间的对应关系。适于能量刻度的单能和多能核素及其主要参数见附录A。能量刻度源的放射性核素的半衰期应长,所发射的 γ 射线的能量应均匀分布在所需刻度的能区(通常为40 keV~2 000 keV),且最少需要4个能量点。能量刻度至少包括四个不同的能量,并应均匀覆盖所研究的能区。刻度源应是发射多种能量 γ 射线的混合源,可以是多个单能核素、单个多能核素,或其混合而成的混合源。

4.2.2 刻度范围

刻度的能区范围(多道分析器满量程)可通过调节系统的增益来完成。如果所研究的能区为40 keV~2 000 keV,应调节系统增益,使 ^{137}Cs 的661.6 keV γ 射线的全吸收峰峰位大约在多道分析器满量程的三分之一处。若多道分析器取8 192道,则该峰位约在3 000道。

4.2.3 刻度曲线

用解谱软件做 γ 射线能量与全吸收峰峰位的直线拟合。处于良好工作状态的高分辨 γ 能谱系统的能量刻度曲线应是一条直线,其非线性应小于0.5%。如果偏离线性,就应该重新做能量刻度。

4.2.4 刻度曲线的计算方法

假定峰位(道址)和能量之间关系满足式(1):

$$E = a_0 + a_1 P^1 + a_2 P^2 + \dots + a_n P^n \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

E —— γ 射线能量,单位为千电子伏(keV);

P ——全能峰所在道址;

a_0, a_1, \dots, a_n ——拟合常数。

利用式(1)对已知的峰位和能量作最小二乘法拟合,确定系统 a_0, a_1, \dots, a_n 。通常取一次或二次多项式作拟合即可。 a_0 表示零道对应的能量(截距), a_1 表示拟合直线的增益(斜率), a_2 表示系统的非线性。

4.2.5 刻度曲线的核查

在样品测量期间,每天应至少用两个能量点的 γ 射线对谱仪进行检查。所用 γ 射线的能量应分别靠近刻度能区的低能端和高能端。如果峰位基本保持不变,则刻度数据保持适用。如果峰位变化超过1道,则能量刻度过程应重作。

4.3 探测效率刻度

4.3.1 效率刻度

测定样品中 γ 放射性核素含量时,应对谱仪系统探测效率进行刻度。刻度方法一般采用核素总探

测效率、核素全吸收峰探测效率、 γ 射线总探测效率和 γ 射线全吸收峰探测效率等刻度方式。

4.3.2 效率刻度源

效率刻度源的放射性核素的活度要小于 1 000 kBq, 能量分布应该适当, 用于效率曲线刻度时的能量应该分布在 40 keV~2 000 keV 能区内, 至少选择 7 个能量的 γ 射线。效率刻度源原则上要选择与待测样品的几何形状和大小完全相同、基质一样或类似、质量密度相等核素含量和 γ 射线能量已知, 以及源容器材料和样品容器材料相同的刻度源。效率刻度源的制备详见附录 B。

4.3.3 核素全吸收峰探测效率刻度

核素全吸收峰探测效率刻度包括以下几方面内容:

- 在与样品测量条件相同的条件下, 分别获取核素及其活度已知的刻度源(或标准源)谱和基体本底源谱;
- 以刻度源谱获取时间归一, 求得归一后的基体本底源谱(简称基体本底归一谱);
- 从刻度源谱中扣除基体本底归一谱, 求得刻度核素的净谱;
- 从净谱中选择该核素的一个或几个特征 γ 射线的全吸收峰, 并求得其净峰面积(即去除康普顿散射干扰后的峰面积);
- 计算所选特征 γ 射线的全吸收峰净峰面积与在获取刻度源谱的同一时间间隔内刻度源中该核素的衰变总数的比值 $\epsilon_{p,n}(E_\gamma)$ 。

4.3.4 γ 射线全吸收峰探测效率刻度

4.3.4.1 刻度的一般程序

刻度的一般程序如下:

- 依次执行 4.3.3 中的 a)~c) 操作程序;
- 从净谱中选择该核素的非级联的特征 γ 射线的全吸收峰, 并求得其净峰面积;
- 计算所选特征 γ 射线的全吸收峰净峰面积与在获取刻度源谱的同一时间间隔内刻度源中发射的该能量的 γ 射线总数的比值 $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$;
- 如果所选特征 γ 射线是级联辐射, 在计算净峰面积时, 应对级联辐射的相加效应做出修正。

4.3.4.2 γ 射线全吸收峰效率曲线法

对于标准源与待测样品的几何形状、性状等相同, 只是核素或 γ 射线能量不同的情况, γ 射线全吸收峰探测效率刻度可用全能峰效率曲线法:

- 用在 40 keV~2 000 keV(或 3 000 keV) 能区内, 至少选择 7 个能量的孤立 γ 射线能峰, 并刻度它们的全吸收峰探测效率 $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$;
- 用谱分析软件或在双对数坐标纸上完成 γ 射线全吸收峰探测效率 $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$ 与 γ 射线能量 E_γ 的关系曲线拟合, 即 γ 射线全吸收峰效率刻度曲线。一般的拟合函数为:

$$\ln \epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma) = \sum_{i=0}^k a_i (\ln E_\gamma)^i \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- E_γ —— γ 射线对应的能量, 单位为千电子伏(keV);
 $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$ ——探测器对能量为 E 的 γ 射线的全吸收峰探测效率;
 a_i ——拟合常数;
 k ——多项式的最高阶次, $k \leq m-1$;

m ——相应能区内参加曲线拟合的效率刻度点的数目。

4.3.5 探测效率刻度的修正

当刻度源与样品的装样量或密度间差异较大时,应对效率刻度做出修正,特别是在能量低于200 keV的特征 γ 射线核素含量分析时,密度差异干扰不能忽略。

5 样品测量

5.1 样品制备

5.1.1 根据测量对象,合理制备放射性均匀的样品。对装样密度均匀性较差的样品,应充分混匀样品,并在测量过程中间倒置一次再继续测量。

5.1.2 对含有易挥发核素或伴有放射性气体生成的样品,以及需要使母子体核素达到平衡后再测量的样品,应将测量容器密封,并待其达到放射性平衡时再开始测量。否则,在数据处理时应对非平衡核素做出合理的校正。

5.1.3 当对样品作化学分离后制备样品源并测量时,其回收率等参数应按相应规程测定、记录和报告。

5.2 测量条件

5.2.1 能量刻度、探测效率刻度和样品的测量应在仪器处于相同且稳定的状态下进行,且保持相同的几何条件和工作状态。

5.2.2 测量时效率刻度标准源和待测样品源与探测器的相对位置应严格一致。

5.2.3 根据样品中放射性强弱、对特征峰面积统计误差的要求或样品分析误差的要求确定谱获取时间,特征峰峰面积计数的统计误差应小于10%或24 h是合理的最长计数时间。

5.2.4 在测量开始和结束时,应测量仪器的本底谱,计算时用测量前、后本底的平均值。

5.3 核素鉴别

5.3.1 根据全吸收峰的能量(或道址)和样品的历史鉴别样品中存在的核素。如果证据不足以判断样品中所含的核素,则应进行衰变研究或组分的化学分离。

5.3.2 在测量结束时,还应校验开始时的能量刻度,两者基本无差异时,核素鉴别才保证可靠。

6 计算

6.1 采用核素全吸收峰探测效率法的计算

样品中待测核素的活度按式(3)计算:

$$A(E_\gamma) = \frac{C(E_\gamma)}{\epsilon_{p,n}(E_\gamma)} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$A(E_\gamma)$ ——样品中该核素的活度,单位为贝可(Bq);

$C(E_\gamma)$ ——测量到的该核素选定特征峰的净计数率;

$\epsilon_{p,n}(E_\gamma)$ ——该核素全吸收峰探测效率。

6.2 采用 γ 射线全吸收峰探测效率法的计算

样品中待测核素的活度按式(4)计算:

$$A(E_\gamma) = \frac{C(E_\gamma)}{a \cdot \epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$A(E_\gamma)$ ——样品中该核素的活度,单位为贝可(Bq);

$C(E_\gamma)$ ——测量到的该核素选定特征峰计数率;

$\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$ ——该能量 γ 射线全吸收峰探测效率;

a ——该核素每次衰变发射选定特征 γ 射线的概率。

6.3 计算方法的比较和修正

当采用上述核素全吸收峰探测效率法的计算时,通常引入较小的不确定度;采用 γ 射线全吸收峰探测效率法的计算时引入的不确定度通常大于前种计算方法。如果选定的特征 γ 射线是核素的级联 γ 射线中的一条特征射线,并且谱中有不能忽略的符合相加效应,在计算中应对符合相加效应进行修正。

7 报告

7.1 报告格式

样品分析报告应包括核素活度数据及适当的不确定度项。对于不确定度项,本标准推荐2倍标准差或扩展因子为2,即置信度95%情况下的不确定度。但是,无论以多大的置信度报告不确定度项,都应用脚注标出或在行文中叙及,以免混淆。

7.2 不确定度

7.2.1 计数不确定度

在放射性测量中,往往计数不确定度是分析结果的总不确定度的主要来源。样品的计数不确定度(即计数标准差)可用式(5)计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_s}{t_s^2} + \frac{N_b}{t_s^2}} = \frac{1}{t_s} \sqrt{N_s + N_b} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

N_s ——选定能区内(通常是全吸收峰)包括本底在内的样品积分计数;

N_b ——选定能区内的本底积分计数;

t_s ——样品计数时间,单位为秒(s)。

7.2.2 扩展不确定度

测量结果的扩展不确定度可用式(6)求解:

$$\mu_c = k \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

μ_c ——合成扩展不确定度;

k ——扩展因子,一般取2,相应置信度约为95%;

μ_A ——A类标准不确定度;

μ_B ——B类标准不确定度。

A类标准不确定度是用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度,如由统计计数引入的不确定度等。B类标准不确定度是用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度,如因探测效率、自吸收校正因子、体积校正因子、发射概率校正因子、核素衰变校正因子和符合相加校正因子

等引入的不确定度。对于测量结果,当有几项不确定度来源时,需对各类不确定度进行合成,并在报告中予以说明。

7.3 低于仪器探测下限的报告

在报告低活度样品分析结果中,出现不确定度项大于样品值时,按常规方式报告样品值及不确定度项,如 $(0.5 \pm 1.0)\text{Bq/kg}$;出现样品计数率减去本底(或基底)结果为负值时,常见方法是用前置“ \leq ”报告该样品的实际测量条件下的 LLD 值。探测下限的计算方法见附录 C。

附录 A

(资料性附录)

能量刻度用的单能和多能核素

能量刻度用的单能和多能核素列于表 A.1。

表 A.1 能量刻度用的单能和多能核素

核素	半衰期	γ 射线能量 keV	γ 射线发射概率 %
^{210}Pb	22.3 a	46.5	4.25
^{241}Am	432.6 a	59.54	35.78
^{109}Cd	461.4 d	88.03	3.626
^{57}Co	271.80 d	122.1	85.51
^{141}Ce	32.508 d	145.4	48.29
^{51}Cr	27.703 d	320.1	9.87
^{137}Cs	30.018 a	661.7	84.99
^{54}Mn	312.13 d	834.84	99.974 6
^{22}Na	2.602 7 a	1 274.54	99.940
^{88}Y	106.626 d	898.0	93.90
		1 836.1	99.32
^{60}Co	5.271 a	1 173.2	99.85
		1 332.5	99.982 6
^{152}Eu	13.522 a	121.8	28.41
		344.3	26.59
		964.1	14.50
		1 112.1	13.41
		1 408.0	20.85

附录 B
(规范性附录)
γ能谱仪刻度源的制备

B.1 刻度源的制备

B.1.1 基体物质

基体物质的选择应满足以下要求：

- a) 与样品主要化学成分相同或相近；
- b) 与样品的物理形态，如固态、液态、颗粒度、密度或比重等相同或相近；
- c) 与样品相比，其放射性活度可以忽略；
- d) 与加入的标准放射性物质易于均匀混合；
- e) 物理、化学性质稳定。

B.1.2 标准放射性物质

标准放射性物质应满足：

- a) 应由国家法定计量部门认定或可溯源到国家法定计量部门的计量基准。国外进口的标准放射性物质应经国家法定计量部门核定；
- b) 标准放射性物质应具备有检验证书原件或副本等相关资料，以保证传递过程的可溯源性；
- c) 使用标准放射性物质应在规定的有效期内使用。

B.2 刻度源的一般要求

刻度源的一般要求应满足：

- a) 均匀性：无论是基体物质还是标准放射性物质，其在刻度容器内的分布是均匀的，不产生显著的容器壁特异性吸附而改变其分布；
- b) 模拟性：除放射性活度已知外，其他性质，如密度、形状、成分等，都和样品相同或相近；
- c) 稳定性：在贮存及使用期内，不产生沉淀、潮解或结晶，不生成异物或霉变；
- d) 高纯度：除去加入的放射性标准物质以外，应不含或尽量少含其他放射性杂质；
- e) 准确度：在置信度为 99.7%的前提下，放射性活度的不确定度应小于 5%；
- f) 密闭性：应密封于与样品容器的材料和形状相同的容器中。

B.3 基体本底源的制备

按制备刻度源要求制备仅含基体物质的、均匀的并与刻度源形态、体积、尺寸大小相同的基体本底源(又称为基体空白样品或空白样品)，作为模拟源专门用于扣除刻度源基体的本底。

B.4 刻度源的可靠性检验

按照制备刻度源的同样方法,制备几个活度已知的刻度源检验样,包括单一放射性核素的和多核素混合物的检验样。在谱仪上测量检验样,将测量结果和检验样的已知活度比较分析,从而判断刻度源的可靠性和谱分析程序的可行性。

附录 C

(规范性附录)

γ能谱测量的探测下限

C.1 判断限与探测下限

C.1.1 判断限(L_C)

当测得的样品净计数 $N > L_C$ 时,可做出结论:“探测到”,即样品中存在超过 L_C 的放射性。当 $N < L_C$ 时,则可做出结论:“未探测到”,即样品中无超过 L_C 的放射性。

判断限 L_C 的数学表达式见式(C.1):

$$L_C = K_\alpha \sqrt{N_{b,s} + N_b} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$N_{b,s}$ ——本底加样品的总计数的观测值;

N_b ——本底计数的观测值;

K_α ——与当样品中实际上不存在超过 L_C 的放射性时而做出存在超过 L_C 的放射性的错误判断概率 α 相应的值。表 C.1 中给出了 K_α 与 α 的对应关系。

C.1.2 探测下限(LLD)

当 $N > LLD$ 时,可做出结论:样品中的放射性可被探测到。当 $N < LLD$ 时,则可做出结论:样品中的放射性不一定能被探测到。

探测下限 LLD 的数学表达式见式(C.2):

$$LLD = (K_\alpha + K_\beta) \sqrt{N_{b,s} + N_b} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

K_β ——当样品中实际存在超过 LLD 的放射性时而做出不存在超过 LLD 的放射性的错误判断概率 β 相应的值。表 C.1 中给出了 K_β 与 β 的对应关系,见表 C.1。

表 C.1 常用的 α 、 β 值对应的 K 值

α	$1-\beta$	$K_\alpha = K_\beta = K$	$2\sqrt{2} K$
0.01	0.99	2.327	6.59
0.02	0.98	2.054	5.81
0.025	0.975	1.96	5.55
0.05	0.95	1.645	4.66
0.10	0.90	1.282	3.63
0.20	0.80	0.842	2.38
0.50	0.50	0	0

C.1.3 简化的数学形式

对于低活度测量,考虑本底加样品的总计数 $N_{b,s}$ 可以和本底 N_b 相比拟时,则有 $N_{b,s} \cong N_b$; 并考虑概率 α 与 β 处于相同水平,则有 $K_\alpha = K_\beta = K$ 。此时,得出 L_c 及 LLD 的简化表达式见式(C.3)、式(C.4):

$$L_c = K \sqrt{2N_b} \dots\dots\dots (C.3)$$

$$LLD = 2K \sqrt{2N_b} = 2L_c \dots\dots\dots (C.4)$$

C.2 应用说明

C.2.1 虽然式(C.1)~式(C.4)中均未含探测效率因子,但是,计数项 $N_{b,s}$ 和 N_b 中已隐含了探测效率因子。

C.2.2 对于 γ 谱仪来说,探测效率和辐射源的形状、 γ 射线能量及测量条件等有关。因此,当给出一个谱仪系统的探测下限等参数时,应明确说明核素、源的形状特点(点源、体源质量或体积等)和计数时间等。

C.2.3 考虑到核素的 γ 辐射特性、谱仪探测效率和测量时间后,可以把探测下限变换成以样品中的核素活度表示的核素活度探测下限 LLD,见式(C.5)、式(C.6):

$$LLD = \frac{2.83K}{\epsilon_{p,n}(E_\gamma)} \sqrt{\frac{n_b}{T_b}} \dots\dots\dots (C.5)$$

或

$$LLD = \frac{2.83K}{a \cdot \epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)} \sqrt{\frac{n_b}{T_b}} \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

- n_b —— 对欲估算的核素所选特征 γ 射线的全吸收峰能区内的本底计数率;
- T_b —— 本底测量时间,单位为秒(s);
- $\epsilon_{p,n}(E_\gamma)$ —— 核素全吸收峰探测效率;
- $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$ —— γ 射线全吸收峰探测效率;
- a —— 该核素所选特征 γ 射线的发射概率。

C.2.4 为便于不同谱仪系统之间的性能比较,建议在使用全吸收峰 1/10 峰高全宽度(FWTM)为全吸收峰计算能区的前提下,分别估算计数时间为 1 000 min 和置信概率为 95%时的谱仪系统对²⁴¹Am、¹³⁷Cs和⁴⁰K点源的探测下限。

C.2.5 在多核素 γ 谱测量中存在康普顿散射干扰时,估算谱仪系统的探测下限各表达式中的 N_b 或 n_b 项应理解为该能区内的本底。