

[测量技术]

SGS测量技术中的计数率损失校正方法试验研究

文/中国原子能科学研究院核保障技术重点实验室 邵强 卢文广 邵婕文 何丽霞 隋洪志 甘霖

在HPGe γ 谱仪测量中，当谱仪系统通过的总计数率较高时，会出现计数率损失现象。在定量测量分析中需要对损失的计数率进行校正。通过试验，对参考峰法与谱仪内置活时间计数法的校正效果进行了比较分析。结果表明：在试验涉及的死时间范围中，参考峰校正方法存在不足，而活时间计数法得到的计数率结果能够满足定量测量的需要。根据这个结果，卸除了研制中的分段式 γ 扫描测量装置上的参考源，降低了装置成本，提高了装置的安全性能，简化了测量分析流程。试验表明，简化后装置的测量分析结果满足设计指标的要求。

由于放射性物质发射 γ 射线的时间间隔是服从泊松分布的随机变量。同时 γ 射线在探测器中的整个物理过程以及谱仪对输入信号的处理过程都需要一定时间来完成。对于这段时间中到达的其它射线，谱仪将不能正确地予以处理。这段系统失效的时间被称为死时间。由于死时间的存在，谱仪记录到的射线计数率将低于实际达到探测器的射线与晶体反应的计数率，形成谱仪的计数率损失。在定量测量中，计数率损失是分析偏差的一个重要来源，会使分析结果低于相应“真值”。为了消除这一偏差来源，精确地定出各个 γ 峰的计数率，必须对死时间造成的 γ 峰的计数率的损失进行校正。在分段 γ 扫描测量装置 (Segmented Gamma-ray Scanning, SGS) 定量测量中，通常用参考峰法对计数率的损失进行校正。此外，目前常用的 γ 谱仪系统往往具备计数率损失自动补偿功能，可以进行计数率损失校正，被称为活时间计数率损失校正法 (Live Time Correction, LTC)。

本文通过试验对参考峰法与LTC得到的计数率进行分析比较。并且对LTC法替代参考峰校正法应用于SGS的可行性进行研究。

死时间行为与计数率损失机制

从原理上，死时间的行为可以分为如下两类：

1) 扩展型。在处理第一个到达探测器射线的死时间 τ 内，不仅持续到达探测器的射线不能被记录，而且持续到达的射线同样在谱仪中造成死时间阻止时后续到达的射线的处理。简单地讲就是每一个到达探测器的射线都会在谱仪中形成死时间，只有在相邻到达探测器的射线的时间间隔一定要大于谱仪的死时间 τ 才能被记录。在这种情况下，谱仪对相邻到达射线记录下来的概率就是相邻到达时间间隔大于死时间 τ 的概率，此概率为 $e^{-n\tau}$ 。因此，谱仪全谱总的实测计数率 m_0 、谱仪全谱总的实际产生的计数率 n 与死时间 τ 的关系为：

$$m_0 = ne^{-n\tau} \quad (1)$$

2) 非扩展型。谱仪在处理第一个到达探测器射线的死时间 τ 内，第二个到达的射线不能被记录，但是第二个到达射线不会引起死时间的延续，只要第三个到达的射线与第一个到达的射线的时间间隔大于死时间 τ 就可被记录。在这种情况下 m_0 、 n 与 τ 的关系为

$$n = \frac{m_0}{1 - m_0\tau} \quad (2)$$

实际谱仪的死时间行为介于扩展型与非扩展型两者之间。

参考峰法

1. 参考峰法的基本原理

假设每一个 γ 峰的计数率损失都是成相同比例,参考峰法是为了进行计数率损失校正而引入具有适当特征峰(参考峰)的参考源,假设参考峰的计数率与其他 γ 峰的计数率的损失成正比,通过对参考峰计数率损失的校正来对其他 γ 峰的计数率进行校正。参考峰计数率损失校正方法采用总测量时间得到 γ 特征峰计数率,并将测量时间归一化到单独测量参考峰时的测量时间。参考峰法原理如下:

在实际测量中,谱仪的总计数率较低条件下($n\tau \ll 1$ 时),一般用式(2)对计数率损失进行校正。由式(2)可得

$$\sum_{i=P_0}^{P_n} (m_i + A_i) = \sum_{i=P_0}^{P_n} (m_i + B_i) / (1 - m_0 \tau) \quad (3)$$

式中, n_i 为多道分析器上第 i 道扣本底后实际的脉冲计数率, m_i 为第 i 道扣本底后实际的脉冲计数率, A_i 为第 i 道本底实际产生的计数率, B_i 为第 i 道本底实际产生的计数率。其中 P_0 为多道分析器上零能量的道址; P_n 为多道分析器上的最高能量的道址。

如分道写,则式(3)可写为

$$\begin{aligned} \sum_{i=P_0}^{P_{r-1}} n_i + \sum_{i=P_r}^{P_{r-1}} n_i + \sum_{i=P_{r+1}}^{P_n} n_i + \sum_{i=P_0}^{P_n} A_i \\ = (\sum_{i=P_0}^{P_{r-1}} m_i + \sum_{i=P_r}^{P_{r-1}} m_i + \sum_{i=P_{r+1}}^{P_n} m_i + \sum_{i=P_0}^{P_n} B_i) / (1 - m_0 \tau) \end{aligned} \quad (4)$$

令

$$n_p = \sum_{i=P_r}^{P_{r-1}} n_i \quad (5)$$

令

$$m_p = \sum_{i=P_r}^{P_{r-1}} m_i / (1 - m_0 \tau) \quad (6)$$

其中, n_p 为从 P_r 道到 P_{r-1} 道某条 γ 峰实际的脉冲计数率, m_p 为该 γ 峰实测累计计数率; $\sum_{i=P_0}^{P_{r-1}} m_i$ 为从 P_0 道到 P_{r-1} 道之间谱的实测计数率; $\sum_{i=P_{r+1}}^{P_n} m_i$ 为从 P_{r+1} 道到 P_n 道之间谱的实测计数率; $\sum_{i=P_0}^{P_n} B_i$ 为从 P_0 道到 P_n 道的全谱本底的实测计数率; $\sum_{i=P_0}^{P_{r-1}} n_i$ 为从 P_0 道到 P_{r-1} 道之间谱真实产生的计数率; $\sum_{i=P_{r+1}}^{P_n} n_i$ 为从 P_{r+1} 道到 P_n 道之间谱的真实产生的计数率; $\sum_{i=P_0}^{P_n} A_i$ 为从 P_0 道到 P_n 道的全谱本底真实产生的计数率。

由于等式两边是按道址来写的,各对应部分分别相等。所以可得

$$n_p = m_p / (1 - m_0 \tau) \quad (7)$$

$$n_p = f m_p / \quad (8)$$

令

$$f = n_p / m_p = 1 / (1 - m_0 \tau) \quad (9)$$

其中, f 为计数率损失校正因子。

由式(7)~式(9)可知,任何一段谱计数率或者某条 γ 峰的计数率损失都可以用计数率损失校正因子进行修正。并且计数率损失校正因子 f 可由某条 γ 峰(参考峰)的实际产生的计数率与该 γ 峰的实测计数率的比值求出。因为在实际测量中,谱仪死时间率低于1%的条件下,所测得参考峰的实测计数率的损失可以忽略。这时单独测量的参考峰计数率可以被看作是参考峰实际产生的真实计数率。(死时间率为累计死时间占总测量时间的份额,全谱总计数率越高,死时间率越高,下文试验部分用死时间率的不同表示总计数率的不同)。因此测量中,可以应用参考峰法按下式对计数率损失进行校正

$$n_p' = \frac{m_p^{(1)}}{m_p^{(2)}} \times m_p' \quad (10)$$

其中 n_p' 为经计数率损失校正后 γ 峰的计数率; m_p' 为该峰实测计数率。 $m_p^{(1)}$ 为单独测量参考源时,并且谱仪的死时间率不大于1%时,得到的参考峰实测的计数率; $m_p^{(2)}$ 为参考峰与被校正峰一同测量时,参考峰实测的计数率。

2. 参考峰法在SGS中的应用

试验表明参考峰法不受 γ 射线的能量与探测器探测效率的影响。并且参考峰法具有操作简单和能提高数据的获取速度(被校正感兴趣峰较早满足统计要求)等特点,在实际的放射性测量中,可以对活度较大的样品进行近距离测量而不用担心死时间率过高,有着广泛的实际应用价值。如SGS在测量放射性对象时,通常采用参考峰法进行计数率损失校正。但是参考峰法依赖参考源对计数率损失进行校正,并且在实际应用中为避免对测量峰产生康普顿影响,一般参考峰计数率损失校正方法所选择的参考峰对应的 γ 射线能量低于感兴趣测量峰对应的 γ 射线能量。但所选择的 γ 射线容易受到较强的康普顿本底及低能X射线的干扰。因而需选择适当能量的 γ 能峰。

试验设计与数据分析

1. 试验仪器与实验目的

试验采用CANBERRA公司生产的同轴HPGe γ 谱仪探测系统,多道分析器为DSA-1000,该

系统使用Genie2000获谱分析软件。

本文通过试验对参考峰法与谱仪自带的活时间计数法得到的计数率进行分析比较。

2. 试验设计与数据分析

(1) 试验设计

本试验为了在较高计数率条件下,检验谱仪自带的活时间计数法与参考峰法对计数率损失的校正能力。引入一个活度较大的干扰源 ^{75}Se ,通过改变对干扰源的屏蔽来实现不同强度的干扰,从而调整谱仪的死时间率。采用两个标准点源,利用式(10)得到不同死时间率条件下,两个标准点源各自特定 γ 峰经参考峰法校正后的计数率,同时直接采用 γ 谱仪系统自带的活时间计数法得到标准点源特定 γ 峰的计数率。我们通过下面两组试验对 γ 谱仪系统自带的活时间计数法与参考峰法得到不同死时间率时的 γ 峰计数率结果进行比较:

第一组试验:首先将标准点源 ^{54}Mn 、 ^{22}Na ,分别放在距离探测器适当位置,测得 ^{54}Mn 的834 keV与 ^{22}Na 的1 274 keV γ 全能峰的实测计数率,并且确保此时谱仪的死时间率在1%范围内;第二步,在干扰源 ^{75}Se 存在时,同时对标准点源 ^{54}Mn 和标准点源 ^{22}Na 进行测量,通过改变对干扰源的屏蔽来调整谱仪的死时间率。测得不同死时间率时标准点源 ^{54}Mn 的834 keV与 ^{22}Na 的1 274 keV γ 全能峰的实测计数率。最后,将干扰源 ^{75}Se 和标准点源 ^{54}Mn 移走,保持标准点源 ^{22}Na 的位置不变,单独对其1 274 keV特征峰进行测量,测得1 274 keV γ 全能峰的实测计数率(试验前选好标准点源 ^{22}Na 到探测器的距离,确保单独对其1 274 keV全能峰测量时,谱仪的死时间率在1%范围内)。根据式(10),既可利用834 keV特征峰作为参考峰对1 274 keV γ 全能峰的计数率损失进行校正,也可用1274keV特征峰作为参考峰对834 keV γ 全能峰的计数率损失进行校正。

第一组试验中,当标准点源 ^{54}Mn 和干扰源 ^{75}Se 不存在时,标准点源 ^{22}Na 的1 274 keV γ 能峰的平均实测计数率为11.30 cps,相应的谱仪平均死时间率0.77%。当标准点源 ^{22}Na 和干扰源 ^{75}Se 不存在时,标准点源 ^{54}Mn 的834 keV γ 全能峰的平均实测计数率为15 cps,相应的谱仪平均死时间率为0.51%。

第二组试验与第一组试验方案相同,更换两个标准点源。采用标准点源 ^{137}Cs 、标准点源 ^{109}Cd 和干扰源 ^{75}Se 进行试验。用 ^{109}Cd 的88 keV γ 全能峰作为参考峰对 ^{137}Cs 的661 keV γ 全能峰的计数率损失进行校正。当标准点源 ^{137}Cs 和干扰源 ^{75}Se 不存在

时,标准点源 ^{109}Cd 的88 keV γ 全能峰的真计数率为23.3 cps。当标准点源 ^{109}Cd 和干扰源 ^{75}Se 不存在时, ^{137}Cs 的661 keV γ 全能峰的计数率为47.89 cps。用 ^{109}Cd 的661 keV γ 全能峰作为参考峰对 ^{137}Cs 的88keV γ 全能峰的计数率损失进行校正。

(2) 数据分析

图1和图2为第一组实验中,谱仪的死时间率在30%范围内变化时,谱仪自带的活时间计数法与参考峰法得到的校正后计数率结果与真实计数率(谱仪死时间率低于1%时的计数率,可以认为计数率损失可以忽略不计)的相对偏差。

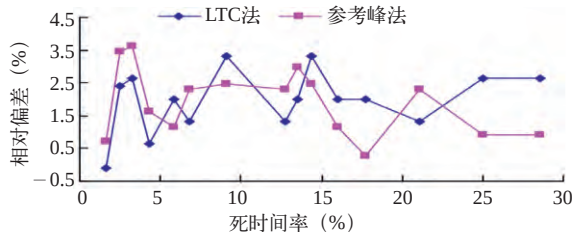


图1 LTC法与参考峰法得到的834keV的计数率与真实计数率的相对偏差

由图1可知,在本文试验所涉及的死时间率30%范围内,活时间计数法和参考峰法得到的834 keV计数率基本一致,与真实计数率的相对偏差均小于4.4%,峰面积测量统计误差是其主要来源。

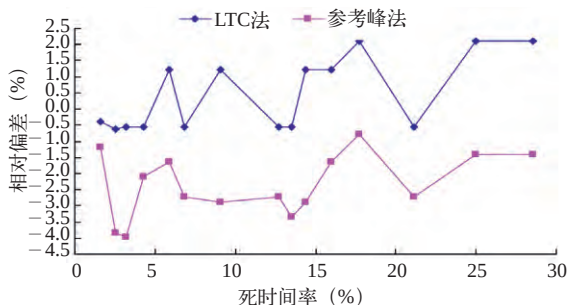


图2 LTC法与参考峰法得到的1274keV的计数率与真实计数率的相对偏差

由图2可知,本文试验所涉及的死时间率30%范围内,谱仪活时间计数法得到的1 274 keV γ 全能峰的计数率与该峰真实计数率的相对偏差不超过2.2%,活时间计数法对计数率损失校正的比较圆满;用834keV γ 全能峰作为参考峰求得的1 274 keV γ 全能峰的计数率与该峰真实计数率的相对偏差在-4%~-1%之间变化。误差主要来源峰面积统计误差、峰面积求解引入的误差、能量刻度引入的误差等。

图3和图4为第二组试验中,谱仪系统的死时间率在15%范围内变化时,谱仪自带的活时间计数法与参考峰法得到的88 keV γ 全能峰的计数率与真实计数率的相对偏差。

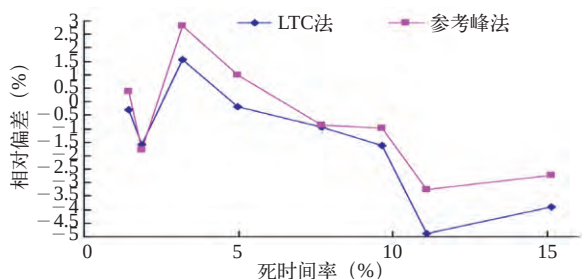


图3 LTC法与参考峰法得到的88keV的计数率与真实计数率的相对偏差

由图3、图可知，在本文试验所涉及的死时间率15%范围内，活时间计数法和参考峰法得到的88、661keV γ 全能峰的计数率基本一致。峰面积测量统计误差是其主要来源。

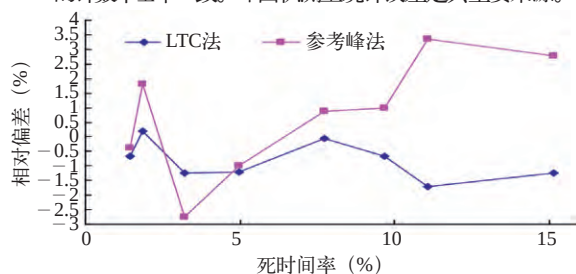


图4 LTC法与参考峰法得到的661keV的计数率与真实计数率的相对偏差

图5为第二组试验中，谱仪系统的死时间率在30%范围内变化时，谱仪自带的活时间计数法与参考峰法得到的661keV γ 全能峰的计数率与真实计数率的相对偏差。

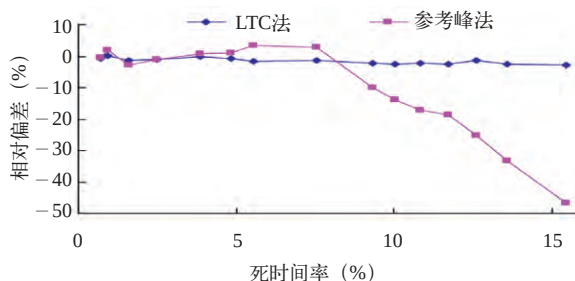


图5 LTC法与参考峰法得到的661keV的计数率与真实计数率的相对偏差

由图5可知，本文试验所涉及的死时间率30%范围内，谱仪活时间计数法得到的661keV特征峰的计数率与该峰真实计数率的相对偏差不超过3%；用88keV特征峰作为参考峰求得的661keV特征峰的计数率与该峰真实计数率的相对偏差已达46.7%，参考峰法失效。

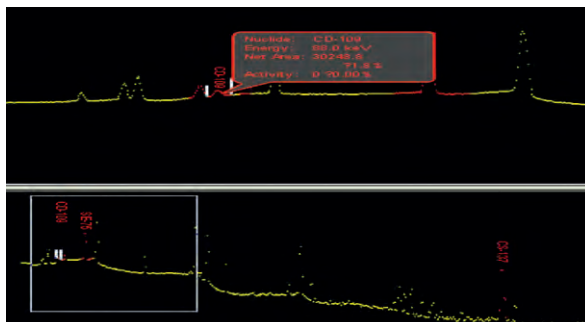


图6 为谱仪死时间率为30%时的 γ 谱图

图6给出了相应的谱图，可以看出当谱仪的死时间率变大时，干扰源75Se发射的 γ 射线与屏蔽体铅发生作用生成85keV 特征X射线与88keV γ 全能峰之间重峰的重峰现象逐渐明显，导致对88keV γ 全能峰面积求解引入误差；另一方面，干扰源75Se发射的 γ 射线产生的康普顿平台也随着通过率的增加而逐渐抬高，给88keV γ 全能峰的分析带来难度。因此造成图5中参考峰法失效。

SGS在应用参考峰法对计数率损失进行校正时，为避免对测量峰产生康普顿影响，所选择的参考峰对应的 γ 射线能量通常低于测量峰对应的 γ 射线。虽然可以用铜、镅等金属吸收片来排除低能噪声或特征X射线对低能量的 γ 射线造成的影响，但这些金属片会给其他 γ 峰峰面积的分析带

来误差。

由试验可知，参考峰法在实际应用中，所选择的参考峰峰面积容易受到干扰，因此使参考峰法受到限制。

结束语

由实验可知，谱仪在本试验所涉及的死时间率30%范围内，谱仪自带的活时间计数法对计数率损失的修正比较圆满，并且参考峰法存在不足。在应用 γ 谱仪定量测量中，可以直接用谱仪自带的活时间计数法。因此卸除了研制中的SGS上的参考源，降低了装置成本，提高了装置的安全性，简化了测量分析流程。EA

(收稿日期：2015.02.27)

(编辑：白文亭)