



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 417—2006

γ 谱仪

γ Ray Spectrometers

2006—12—08 日发布

2007—06—08 日实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

γ 谱仪检定规程

Verification Regulation of

γ Ray Spectrometers

JJG 417—2006
代替 JJG 417—1986

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2006 年 12 月 8 日批准，并自 2007 年 6 月 8 日起施行。

归口单位：全国电离辐射计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：国防科工委放射性计量一级站

本规程委托全国电离辐射计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

李彦禄（中国计量科学研究院）

参加起草人：

刁立军（国防科工委放射性计量一级站）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(2)
5 计量性能要求	(2)
5.1 碘化钠 γ 谱仪	(2)
5.2 半导体 γ 谱仪	(2)
6 通用技术要求	(2)
6.1 设备标牌清晰	(2)
6.2 操作的适应性	(3)
6.3 碘化钠 [NaI (Tl)] 探测器	(3)
6.4 屏蔽室	(3)
6.5 多道脉冲幅度分析器	(3)
6.6 样品盒	(3)
6.7 放射源支架	(3)
6.8 监督源	(3)
7 计量器具控制	(3)
7.1 碘化钠 γ 谱仪	(3)
7.2 半导体 γ 谱仪	(5)
7.3 检定结果的处理	(6)
7.4 检定周期	(7)
附录 A 半导体 γ 谱仪不确定度分析实例	(8)
附录 B 检定证书和检定结果通知书 (内页) 格式	(10)

γ 谱仪检定规程

1 范围

本规程适用于 γ 谱仪的首次检定、后续检定和使用中检验。γ 谱仪包括碘化钠 γ 谱仪和半导体 γ 谱仪。

2 引用文献

GB 11743—1989 《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》

EJ/T 1091—1999 《放射性核素活度测量 锗 γ 谱仪法》

IEC 1452: 1995 《核仪表 放射性核素 γ 射线发射率的测量 锗谱仪的校准和使用》

3 术语

3.1 [放射性] 活度 activity

在给定时刻，处于特定能态的一定量放射性核素在 dt 时间内发生自发核跃迁数的期望值 dN 除以 dt 。活度符号为 A ， $A = dN/dt$ 。活度单位名称为贝可 [勒尔]，符号 Bq， $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$ 。

3.2 γ 射线发射几率 gamma-ray emission probability

放射性核素衰变所伴随发射特定能量 γ 射线的几率，通常以百分数表示。

3.3 γ 射线发射率 gamma-ray emission rate

一个给定的放射性样品（源），在单位时间内发射特定能量的 γ 射线数。γ 射线发射率等于活度乘以 γ 射线发射几率。

3.4 本底 background

非起因于待测物理量的信号。在 γ 能谱测量中，是指除待测样品（放射源）外的其他因素，包括探测器及周围环境的放射性和宇宙射线引起的含峰的谱数据。

3.5 γ 射线全能峰效率 full-energy-peak efficiency for gamma-ray

对给定的样品（放射源）- 探测器距离，测得的能量为 E 的 γ 射线全能峰净面积计数与同一时间间隔内样品（放射源）发射该能量 γ 射线数的比值。

3.6 符合相加 coincidence summing

来自同一次核衰变的两个或两个以上的光子被同时探测，但只产生一个观察脉冲。

3.7 脉冲堆积 pulse pile-up

时间上紧密相联但来自独立衰变的两个相继脉冲发生的重叠现象。测量系统通常把这两个输入的事件当成一个组合脉冲处理，并存储在一个与两个分量脉冲道址不同的能谱道址中。脉冲堆积是计数率的平方及放大器脉冲宽度的函数。

3.8 半高宽 full width at half maximum

在脉冲高度谱中，单峰峰值一半处两点的横坐标之间的距离。半高宽又记作 FWHM。

4 概述

γ 谱仪由探测器、连续可调的高压电源、线性放大器、多道脉冲幅度分析器和谱数据分析处理系统组成。此外，还配有铅屏蔽室以减小本底。 γ 射线与探测器相互作用，产生的电脉冲信号由电子学系统分析和记录，形成 γ 射线幅度谱。 γ 谱仪刻度后，用 γ 能谱分析软件分析样品谱，便可以得到该样品中核素的活度。

通常使用的 γ 谱仪有两类：

第 I 类：探测器为碘化钠 [NaI (Tl)] 探测器的 γ 谱仪；

第 II 类：探测器为半导体探测器的 γ 谱仪。

5 计量性能要求

5.1 碘化钠 γ 谱仪

5.1.1 分辨力

^{137}Cs 的 661.66keV 全能峰的半高宽除以峰位（按道数计算），分辨力不应大于 9%。

5.1.2 本底

对 $\phi 76\text{mm} \times 76\text{mm}$ 碘化钠探测器，在能区（59~3 000）keV 内本底计数率不应大于 8s^{-1} (cps)。

5.1.3 短期稳定性

8h 内峰位相对漂移不应大于 1%。

5.1.4 刻度源

刻度源用于刻度碘化钠 γ 谱仪，刻度源应具有较好的均匀性和稳定性。刻度源活度值的扩展不确定度 $\leq 9\%$ ($k=3$)。

5.1.5 活度

在活度范围为 $(10 \sim 1 \times 10^4)$ Bq 时，谱仪测量活度的扩展不确定度 $\leq 20\%$ ($k=3$)。

5.2 半导体 γ 谱仪

5.2.1 分辨力

探测器的能量分辨力不应大于 2.5keV（对 ^{60}Co 的 1 332keV γ 射线）。

5.2.2 短期稳定性

8h 内谱仪峰位相对漂移不应大于 0.05%。

5.2.3 效率

效率值的相对偏差不超出 $\pm(1.5 \sim 6)\%$ 。

5.2.4 活度

在能量范围为（59~1 500）keV、活度范围为 $(3.7 \times 10^3 \sim 3.7 \times 10^5)$ Bq 时，谱仪测量活度的扩展不确定度为 1.6%~7.5% ($k=3$)。

6 通用技术要求

6.1 设备标牌清晰

标牌应清晰地注明 γ 谱仪设备的名称、型号、产品系列号、生产厂家的国别与名称以及出厂日期。

6.2 操作的适应性

γ 谱仪设备说明书完整，软件易于操作。

6.3 碘化钠 [NaI(Tl)] 探测器

碘化钠探测器由碘化钠晶体、光电倍增管和前置放大器组成，是碘化钠 γ 谱仪的重要部件。测量镭-226、钍-232、钾-40 等天然放射性核素活度时碘化钠晶体尺寸应不小于 $\phi 75\text{mm} \times 75\text{mm}$ ，光电倍增管噪声应较低，碘化钠探测器应用低钾材料制成。

6.4 屏蔽室

屏蔽室是 γ 谱仪的重要配件。测量镭-226、钍-232、钾-40 等天然放射性核素活度时屏蔽室壁厚应不小于 100mm 铅当量，内腔直径应不小于 200mm，屏蔽室应有复合内衬。

6.5 多道脉冲幅度分析器

应有实时间和活时间功能，道数不少于 512 道。

6.6 样品盒

使用规格化的、有固定形状和容量的、密封性好的圆柱形或凹形杯样品盒。样品盒应选用天然放射性核素含量低的材料制成，如 ABS 塑料等。推荐使用标准化的 $\phi 76\text{mm} \times 70\text{mm}$ ABS 塑料样品盒。

6.7 放射源支架

半导体 γ 谱仪应配有放射源支架，使放射源轴向和在轴线的垂直方向的位置不一致性对探测效率的不确定度贡献分别小于 0.03%。

6.8 监督源

为了监督谱仪的长期稳定性，半导体 γ 谱仪应配备有长寿命的、高中低能区至少各有一条 γ 射线的监督源。

7 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检验。

7.1 碘化钠 γ 谱仪

7.1.1 检定条件

7.1.1.1 环境条件

γ 谱仪实验室应有空调设备，测量时室温变化范围不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度小于 75%。实验室附近不得有影响测量的电磁场。

7.1.1.2 点源

活度范围为 $(5 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4)$ Bq 的 ^{137}Cs 点源一个。

7.1.1.3 混合体标准源

含 $^{232}\text{Th} + ^{226}\text{Ra} + ^{40}\text{K}$ 体标准源一个， ^{232}Th 活度约为 25Bq， ^{226}Ra 活度约为 25Bq， ^{40}K 活度约为 100Bq，活度值的扩展不确定度 $\leq 15\%$ ($k=3$)。

含 $^{232}\text{Th} + ^{226}\text{Ra} + ^{40}\text{K}$ 体标准源一个， ^{232}Th 活度约为 100Bq， ^{226}Ra 活度约为 100Bq，

^{40}K 活度约为 300Bq, 活度值的扩展不确定度 $\leq 12\%$ ($k=3$)。

含 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 等核素体标准源一个, 各核素的活度约为 50Bq, 活度值的扩展不确定度 $\leq 12\%$ ($k=3$)。

7.1.1.4 γ 谱仪活度测量装置

γ 谱仪在能区 (59~1 500) keV、活度范围 10Bq~ 1×10^4 Bq, 测量活度的扩展不确定度 $\leq 15\%$ ($k=3$), γ 谱仪活度测量装置必须经计量检定机构检定合格。

7.1.2 检定项目和检定方法

7.1.2.1 检定项目一览表

碘化钠 γ 谱仪的检定项目见表 1。

表 1 碘化钠 γ 谱仪检定项目

检定项目	首次检定	后续检定	使用中检验
分辨力	+	+	-
本底	+	+	-
短期稳定性	+	+	+
刻度源	+	+	-
活度	+	+	+

注：“+”为应检项目，“-”为不检项目。

7.1.2.2 分辨力

选合适的位置测量 ^{137}Cs 点源, 使全谱计数率小于 $1\,500\text{s}^{-1}$ 、峰位计数大于 10 000, 计算 661.66keV 全能峰的半高宽和峰位 (用道数表示), 分辨力 = 半高宽/峰位。

7.1.2.3 本底

探测器置于铅屏蔽室, 关闭铅屏蔽室, 测量时间 30min, 计算 (59~3 000) keV 全谱计数, 本底计数率 = 全谱计数/活时间。

7.1.2.4 短期稳定性

选合适的位置测量 ^{137}Cs 点源, 使全谱计数率小于 $1\,500\text{s}^{-1}$ 、峰位计数大于 10 000, 计算 661.66keV 全能峰的峰位 X_1 。在 8h 内, 在不同时刻重复测量 ^{137}Cs 点源 4 次, 每次测量位置和测量时间相同, 每次时间间隔不应少于 1h, 计算每次测得的 661.66keV 全能峰的峰位 X_i ($i=2, 3, 4, 5$), 计算峰位漂移绝对值 $|X_i - X_1|$, 找出最大值 $|X_i - X_1|_{\max}$, 计算峰位相对漂移:

$$s = \frac{|X_i - X_1|_{\max}}{X_1} \times 100\% \quad (1)$$

7.1.2.5 刻度源

用 7.1.1.4 中的 γ 谱仪活度测量装置测量 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 刻度源, 以活度测量值为标准, 分别计算活度标称值的相对误差 (估计值):

$$D = \frac{A_o - A_m}{A_m} \times 100\% \quad (2)$$

式中： A_o ——活度标称值；

A_m ——活度测量值。

7.1.2.6 活度

用被检碘化钠 γ 谱仪测量 7.1.1.3 中规定的 2 个或 3 个混合体标准源，测量时间在 2.5h 以上，分析²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 等核素活度，分别计算活度测量值的相对误差（估计值）：

$$D = \frac{A_m - A_s}{A_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中： A_m ——测量的活度值；

A_s ——源活度的标准值。

7.2 半导体 γ 谱仪

7.2.1 检定条件

7.2.1.1 环境条件

γ 谱仪实验室应有空调设备，测量时室温变化范围不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度小于 75%。实验室附近不得有影响测量的电磁场。

7.2.1.2 点标准源

活度约为 $(1\sim 2) \times 10^5 \text{Bq}$ 的¹³³Ba 点标准源一个，扩展不确定度 2.5% ($k=3$)；
 活度约为 $(1\sim 2) \times 10^5 \text{Bq}$ 的²⁴¹Am 点标准源一个，扩展不确定度 2.0% ($k=3$)；
 活度约为 $(1\sim 2) \times 10^5 \text{Bq}$ 的¹⁵²Eu 点标准源一个，扩展不确定度 2.0% ($k=3$)；
 活度约为 $(2\sim 4) \times 10^4 \text{Bq}$ 的⁵⁷Co 点标准源一个，扩展不确定度 2.0% ($k=3$)；
 活度约为 $(0.5\sim 1) \times 10^5 \text{Bq}$ 的¹³⁷Cs 点标准源一个，扩展不确定度 2.0% ($k=3$)；
 活度约为 $(3\sim 7) \times 10^4 \text{Bq}$ 的⁶⁰Co 点标准源一个，扩展不确定度 2.0% ($k=3$)。

7.2.2 检定项目和检定方法

7.2.2.1 检定项目一览表

半导体 γ 谱仪的检定项目见表 2。

表 2 半导体 γ 谱仪检定项目

检定项目	首次检定	后续检定	使用中检验
分辨力	+	+	-
短期稳定性	+	+	+
效率	+	+	-
活度	+	+	+

注：“+”为应检项目，“-”为不检项目。

7.2.2.2 分辨力

选合适的位置测量⁶⁰Co点源,使全谱计数率小于 $2\,000\text{s}^{-1}$ 、峰位计数大于10 000,计算1 332keV全能峰的能量分辨力(半高宽FWHM)。

7.2.2.3 短期稳定性

选合适的位置测量¹³⁷Cs点源,使全谱计数率小于 $2\,000\text{s}^{-1}$ 、峰位计数大于10 000,计算661.66keV全能峰的峰位 X_1 。在8h内,在不同时刻重复测量¹³⁷Cs点源4次,每次测量位置和测量时间相同,每次时间间隔不应少于1h,计算每次测得的661.66keV全能峰的峰位 X_i ($i=2, 3, 4, 5$),计算峰位漂移绝对值 $|X_i - X_1|$,找出最大值 $|X_i - X_1|_{\max}$,用公式(1)计算峰位相对漂移 s 。

7.2.2.4 效率

检定时,分别把¹³³Ba、²⁴¹Am和¹⁵²Eu标准源放在拟校准的几何位置上,收集谱数据,使被测 γ 射线的峰净面积计数统计误差小于0.2%。计算出¹³³Ba的80.998keV和356.017keV,²⁴¹Am的59.537keV,¹⁵²Eu的121.782keV、244.699keV、344.281keV、411.126keV、443.965keV、778.903keV、964.055keV、1 112.087keV和1 408.022keV γ 射线的峰净面积。用下式计算效率:

$$\epsilon(E) = \frac{n(E) \cdot c}{A \cdot P(E)} \quad (4)$$

式中: $\epsilon(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰效率;

$n(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰净面积计数率, s^{-1} ;

A ——标准源的活度,Bq;

$P(E)$ ——能量为 E 的 γ 射线的发射几率;

c ——符合相加修正因子。

用软件中的效率函数(一般为对数多项式,也可以是其他函数)对¹³³Ba、²⁴¹Am和¹⁵²Eu各被测 γ 射线的效率值进行拟合,得到效率-能量曲线。

对首次检定,在证书中给出被测各能量的拟合效率值。

对后续检定,对给定能量 E_i ,计算谱仪原有效率值 $\epsilon_0(E_i)$ 与本次检定值 $\epsilon(E_i)$ 的相对偏差:

$$D = \frac{\epsilon_0(E_i) - \epsilon(E_i)}{\epsilon(E_i)} \times 100\% \quad (5)$$

7.2.2.5 活度

在正常工作条件下测量⁵⁷Co和¹³⁷Cs点标准源(要求峰净面积计数 $\geq 5 \times 10^5$),分别计算活度测量值的相对误差(估计值):

$$D = \frac{A_m - A_s}{A_s} \times 100\% \quad (6)$$

式中: A_m ——测量的活度值;

A_s ——源活度的标准值。

7.3 检定结果的处理

按本规程检定合格的 γ 谱仪发给检定证书,检定不合格的发给检定结果通知书,并

指明不合格项。

检定证书内页格式见附录 B。

7.4 检定周期

γ 谱仪的检定周期为 2 年。

γ 谱仪的探测器修理后，在使用之前，按首次检定处理。后续检定包括周期检定和一般修理后用户提出要求检定。

附录 A

半导体 γ 谱仪不确定度分析实例

A.1 数学模型

γ 谱仪测量活度的计算公式:

$$A = \frac{n(E) \cdot c}{\epsilon(E) \cdot P(E)} \quad (\text{A.1})$$

式中: $\epsilon(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰效率;

$n(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰净面积计数率, s^{-1} ;

A ——被测源的活度, Bq;

$P(E)$ ——能量为 E 的 γ 射线的发射几率;

c ——符合相加修正因子。

A.2 不确定度分量的评估

A.2.1 $n(E)$ 的不确定度分量:

$$n(E) = \frac{N(E)}{T}$$

式中: $N(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰净面积;

T ——源测量的活时间。

$N(E)$ 用 γ 谱分析软件求得, $N(E)$ 的不确定度来源有: 峰净面积统计误差, 样品吸收, 源-探测器距离, 脉冲堆积修正。不确定度分量样品吸收由实验估测; 不确定度分量源-探测器距离是指刻度时测量标准源与测样品时测量被测源的几何位置的不一致性引起的不确定度, 此不确定度分量由实验估测; 当被测源的活度太大时, 谱放大器有脉冲堆积, 测得的峰净面积偏小, 脉冲堆积修正的不确定度由实验估测。活时间 T 的不确定度由时间检定标准给出, 一般小于 0.01%, 可忽略。

A.2.2 符合相加修正因子 c 的不确定度由实验估测。

A.2.3 γ 射线的发射几率 $P(E)$ 的不确定度由核素数据表查得。

A.2.4 γ 射线全能峰效率 $\epsilon(E)$ 的不确定度在用标准源刻度 γ 谱仪时评估得到。

全能峰效率计算公式:

$$\epsilon(E) = \frac{n(E) \cdot c}{A \cdot P(E)} \quad (\text{A.2})$$

式中: $\epsilon(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰效率;

$n(E)$ ——能量为 E 的被测 γ 射线全能峰净面积计数率, s^{-1} ;

A ——标准源的活度, Bq;

$P(E)$ ——能量为 E 的 γ 射线的发射几率;

c ——符合相加修正因子。

其中, $n(E)$ 、 $P(E)$ 和 c 的不确定度同前文所述, A 的不确定度由标准源证书查得。

A.3 半导体 γ 谱仪不确定度分析

半导体 γ 谱仪不确定度分量见表 A.1。

表 A.1 半导体 γ 谱仪不确定度分量

不确定度来源	标准不确定度典型值/%
峰净面积统计误差	0.1~0.5
样品吸收	0.0~0.5
源-探测器距离	0.1~0.2
脉冲堆积修正	0.0~0.1
活时间	0.0~0.05
符合相加修正	0.0~0.7
γ 射线发射几率	0.1~1.1
全能峰效率	0.5~2.0

用方和根法得到活度 A 的合成标准不确定度为 0.53%~2.5%，活度 A 的扩展不确定度为 1.6%~7.5% ($k=3$)。

中华人民共和国
国家计量检定规程

γ 谱仪

JJG 417—2006

国家质量监督检验检疫总局发布

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

880 mm×1230 mm 16 开本 印张 1 字数 14 千字

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—1 000

统一书号 155026 - 2224