



计量论坛
WWW.BFJL.ORG

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1744—2019

闪烁体探测器 γ 谱仪校准规范

Calibration Specification of γ Ray Spectrometers of
Scintillation Detectors

市场监管总局

2019-09-27 发布

2019-12-27 实施

国家市场监督管理总局 发布

批准稿，稍后上传出版稿

闪烁体探测器 γ 谱仪 校准规范

JJF1744—2019

Calibration Specification of γ Ray
Spectrometers of Scintillation Detectors

归口单位: 全国电离辐射计量技术委员会

起草单位: 上海市计量测试技术研究院

中国计量科学研究院

本规范委托全国电离辐射计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

何林锋（上海市计量测试技术研究院）

唐方东（上海市计量测试技术研究院）

梁琚成（中国计量科学研究院）

参加起草人：

陆小军（上海市计量测试技术研究院）

刘皓然（中国计量科学研究院）

市场监管总局

目录

引言.....	2
1 范围.....	3
2 引用文件.....	3
3 术语和计量单位.....	3
3.1 术语.....	3
3.2 计量单位.....	3
4 概述.....	3
5 计量特性.....	4
5.1 能量分辨率.....	4
5.2 本底.....	4
5.3 活度响应/示值误差.....	4
6 校准条件.....	4
6.1 环境条件.....	4
6.2 测量标准.....	4
7 校准项目和校准方法.....	5
7.1 本底.....	5
7.2 能量分辨率.....	5
7.3 活度响应/示值误差.....	6
8 校准结果表达.....	6
9 复校时间间隔.....	6
附录 A 校准记录推荐格式.....	7
附录 B 校准证书内页内容.....	8
附录 C 活度响应校准不确定度评定示例.....	9

引言

本规范依照JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编制。

本规范的编制主要参考JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、GB/T 4960.6-2008《核科学技术术语第6部分：核仪器仪表》、IEC 61453-2007《核仪器.放射性核素分析用闪烁体 γ 探测器系统.校准和常规测试》等技术资料。

本规范为首次制定的国家计量校准规范。

市场监管总局

闪烁体探测器 γ 谱仪校准规范

1 范围

本规范适用于能量测量范围（59~3000）keV 的闪烁体探测器 γ 谱仪的校准，闪烁体探测器包括碘化钠、锗酸铋、溴化铷等。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》

GB/T 4960.6-2008《核科学技术术语第 6 部分：核仪器仪表》

IEC 61453-2007《核仪器.放射性核素分析用闪烁体 γ 探测器系统.校准和常规测试》

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

JJF 1001-2011、GB/T 4960.6-2008 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1.1 本底 background

无被测样品时仪器的读数。

3.1.2 计数率 count rate

单位时间内仪器的计数。

3.1.3 半高宽 full width at half maximum

在脉冲高度谱中，单峰峰值一半处两点横坐标之间的距离。

3.2 计量单位

3.2.1 [放射性]活度：贝可[勒尔]；符号：Bq。

3.2.2 [放射性]比活度：贝可每千克；符号：Bq·kg⁻¹。

4 概述

闪烁体探测器 γ 谱仪由探测器、铅屏蔽室、高压电源、线性放大器、多道分析器、能谱分析处理软件、操作控制与显示系统等组成，探测器材料通常采用 NaI(Tl)、BGO、LaBr₃ 等。 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 能谱，经能量与效率校准后，可以由 γ 能谱鉴别样品中的放射性核素并确定其活度。

闪烁体探测器 γ 谱仪主要应用于建筑装饰材料、环境与生物样品中 γ 放射性核素分析与活度测量。

5 计量特性

5.1 能量分辨率

标准试验条件下，闪烁体探测器 γ 谱仪对 ^{137}Cs 核素661.7 keV的能量分辨率不超过9%（对NaI探测器）。

5.2 本底

标准试验条件下，闪烁体探测器 γ 谱仪在（59–3000）keV能区内，本底计数率典型值不大于 10 s^{-1} 。

5.3 活度响应/示值误差

标准试验条件下，闪烁体探测器 γ 谱仪示值误差不超过 $\pm 20\%$ 。

注：以上指标不用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 实验室温度： $(20\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ ，测量过程中环境温度变化不超过 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度：不大于75%。

6.1.3 校准时，仪器不应受到震动和电磁场干扰。

6.2 测量标准

6.2.1 γ 放射性点参考源

推荐核素： ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am

活度范围： $(10^3\sim 10^4)\text{ Bq}$

相对扩展不确定度： $U_{\text{rel}}=5\%$ （ $k=2$ ）。

点参考源为点状薄膜源，源斑位于源托中心，直径不大于3.0mm，偏离中心小于1.5mm。可用于探测器分辨率测试、能量刻度。

6.2.2 γ 放射性体参考源

推荐核素： ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am

活度范围：($5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$) Bq

相对扩展不确定度： $U_{rel} = 6\%$ ($k=2$)

体参考源形状为圆柱体，外径 75mm，高 70mm（内径 70mm，内高 57mm）；放射性核素均匀分布在介质中，密封于塑料容器内；体参考源介质及密度宜与测量样品一致或相似。

7 校准项目和校准方法

7.1 本底

探测器置于铅屏蔽室内，关闭铅屏蔽室，开启闪烁体探测器 γ 谱仪预热 1 小时。设定测量时间 30 分钟，测量完毕读取（59~3000）keV 能区内全谱计数，按式（1）计算仪器本底。

$$N_b = \frac{H}{T_{live}} \quad (1)$$

式中： N_b — 仪器本底， s^{-1} (cps)；

H — (59~3000) keV 能区内全谱计数，无量纲；

T_{live} — 测量活时间（由仪器给出）， s 。

对于直接以（比）活度值显示测量结果的闪烁体探测器 γ 谱仪，校准时可以从仪器数据库内调出全谱计数的测量数据并读取。

7.2 能量分辨率

将 ^{137}Cs 点参考源于探测器上方合适的位置，测量时间应使得全能峰峰面积计数不少于 10000，记录 661.7 keV 全能峰的半高宽和峰位（以能量或道数表示），仪器能量分辨率按式（2）计算。

$$R_E = \frac{FWHM}{D} \times 100\% \quad (2)$$

式中： R_E — 仪器能量分辨率，%；

$FWHM$ — 全能峰的半高宽，以能量或道数表示；

D — 峰位，以能量或道数表示。

对于直接以（比）活度值显示测量结果的闪烁体探测器 γ 谱仪，校准时可以从仪器数据库内调出能谱测量数据，准确选定 ^{137}Cs 核素 661.7 keV 全能峰并读取半高宽和峰位。

7.3 活度响应/示值误差

根据被校仪器主要测量对象选用相应的参考源。将体参考源紧贴闪烁体探测器放置,设置测量时间使得参考源核素的全能峰峰面积计数不少于 10000,重复测量 3 次,按式(3)分别计算闪烁体探测器 γ 谱仪对参考源核素的响应。

$$\eta_i = \frac{N_i - N_{bi}}{A_{si}} \quad (3)$$

式中:

η_i —仪器对 i 核素的活度响应, $s^{-1} \cdot Bq^{-1}$;

N_i — i 核素相应的全能峰计数平均值, s^{-1} ;

N_{bi} —仪器本底谱中 i 核素相应的全能峰区域的计数, s^{-1} ;

A_{si} —体参考源 i 核素(比)活度值, Bq 或 Bq/kg。

当参考源的核素为 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 时,分别选择能量为 1764.5keV(^{226}Ra 子体 ^{214}Bi) 和 2614.5keV(^{232}Th 子体 ^{208}Tl) 的全能峰,计算闪烁体探测器 γ 谱仪对相应核素的响应。

对于直接以(比)活度值显示测量结果的闪烁体探测器 γ 谱仪,校准时可以从仪器数据库中调出能谱测量数据,准确选定被测核素的全能峰,读取全能峰峰面积计数,按式(3)计算活度响应。如果不能获得能谱测量数据,或不能准确选取被测核素的全能峰,则按式(4)计算闪烁体探测器 γ 谱仪测量 γ 核素(比)活度的示值误差。

$$E_i = \frac{A_i - A_{si}}{A_{si}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

E_i —仪器测量 i 核素(比)活度的示值误差, %;

A_i —仪器对 i 核素(比)活度的示值, Bq 或 Bq/kg。

8 校准结果表达

按本规范进行校准,出具校准证书,校准证书内页格式见附录 B;校准结果应给出响应或响应测量结果的不确定度(评定示例见附录 C)。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户仪器的使用情况自行确定,建议为 24 个月。

附录 A

校准记录推荐格式

A.1 能量分辨率

半高宽 <i>FWHM</i>	峰位 <i>D</i>	能量分辨率/%

A.2 本底

(59~3000) keV 总计数	测量活时间 /s	本底计数率 /s ⁻¹

A.3 活度响应/示值误差

体参考源	核素全能峰区域 本底计数 (s ⁻¹)	仪器对体参考源读数		活度响应/ 示值误差
		<input type="checkbox"/> 峰面积计数 (s ⁻¹)	<input type="checkbox"/> (比) 活度 (Bq 或 Bq/kg)	
⁴⁰ K (1460.8keV)		第 1 次		
		第 2 次		
		第 3 次		
²²⁶ Ra (子体 ²¹⁴ Bi; 1764.5keV)		第 1 次		
		第 2 次		
		第 3 次		
²³² Th (子体 ²⁰⁸ Tl; 2614.5keV)		第 1 次		
		第 2 次		
		第 3 次		

附录 B

校准证书内页内容

B.1 校准证书内页内容

至少应包括下列信息：

- a) 被校对象的名称、型号、编号；
- b) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- c) 本次校准时的环境条件；
- d) 校准结果及其测量不确定度的说明。

B.2 校准结果

- 1、本底（59keV~3MeV）
- 2、能量分辨率（对¹³⁷Cs的661.7keV）
- 3、活度响应 / 示值误差

市场监管总局

附录 C

活度响应校准不确定度评定示例

C.1 测量条件与测量方法

C.1.1 环境条件

实验室温度：(15~25) °C，相对湿度：(45~75) %。

周围环境无影响测量的电磁场。

C.1.2 测量标准

^{40}K 体参考源，外尺寸：Φ75mm×70mm（内填充尺寸：Φ70mm×57mm），活度：3997.7Bq，净重 220.0g， $U_{\text{rel}}=5.0\%$ ($k=2$)。

C.1.3 测量对象

闪烁体探测器 γ 谱仪的活度响应。

C.1.4 测量方法

将 ^{40}K 体参考源紧贴闪烁体探测器，然后关闭测量室（铅室）盖后测量， ^{40}K （1460.8 keV）峰位面积计数大于 10000 后择时停止测量，连续测量 3 次，用全能峰内的计数率（ s^{-1} 或 cps）扣除 ^{40}K 全能峰本底计数率后的净计数率（ s^{-1} 或 cps）除以 ^{40}K 体参考源的活度(Bq)，即可得到该仪器对 ^{40}K 体参考源的活度响应（ $\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ）。

C.2 测量模型

$$\eta = \frac{N - N_b}{A}$$

式中：

η —仪器对 ^{40}K 体参考源的活度响应， $\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ；

N —仪器对 ^{40}K 全能峰面积计数率， s^{-1} ；

N_b — ^{40}K 全能峰本底计数率， s^{-1} ；

A — ^{40}K 体参考源的活度值，Bq。

C.3 输入量的标准不确定度评定

C.3.1 输入量 N 的标准不确定度 $u(N)$ 的评定

输入量 N 的标准不确定度来源主要是闪烁体探测器 γ 谱仪的测量重复性以及体参考源在探测器表面位置的变化。前者可以通过连续测量得到,采用 A 类方法评定;后者可以用实验得到测量值,采用 B 类方法评定。

C.3.1.1 由测量重复性引入的相对标准不确定度 $u(N_1)$ 的评定

任意选择 1 台闪烁体探测器 γ 谱仪,在重复性测量条件下对 ^{40}K 体参考源连续测量 3 次,每次 4000s,测量结果见表 C.3-1。

表 C.3-1 某型号闪烁体探测器 γ 谱仪试验结果

参考源	活度 /Bq	测量次数	全能峰本底计数率 /s ⁻¹	全能峰面积	全能峰计数率 N /s ⁻¹	响应 $\times 10^{-3}$ /s ⁻¹ ·Bq ⁻¹
^{40}K	3997	1	0.1	32711	8.2	2.0
		2		31231	7.8	
		3		31600	7.9	

重复性测量时, $n=3$,用极差法求得全能峰计数率 N 的实验标准差,查表得 $d_v=1.69$,则得到:

$$s(N) = (8.2-7.8)/1.69 = 0.24 \text{ s}^{-1}$$

3 次测量全能峰计数率 N 的平均值的标准差:

$$s(\bar{N}) = \frac{s(N)}{\sqrt{3}} = 0.14 \text{ s}^{-1}$$

即由测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_1) = s(\bar{N}) = 0.14 \text{ s}^{-1}$

C.3.1.2 由参考源与探测器表面位置的变动引入的标准不确定度 $u(N_2)$ 的评定

校准时, ^{40}K 体参考源置于半导体探测器 γ 谱仪探头的中心位置,探头上顶面为 $\Phi 80\text{mm}$ 的圆面, ^{40}K 体参考源尺寸为 $\Phi 75\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。以探头中心处为原点作 X、Y 轴,体参考源置于中心时,底面为半径 $r=37.5\text{mm}$ 的圆,相对原点在 X、Y 轴方向, $10\%r$ 范围内移动体参考源进行测量,得到全能峰计数率的变化,见表 C.3-2 所示。

表 C.3-2 ^{40}K 体参考源在探测器表面位置变化对全能峰计数率的影响

参考源	活度 Bq	全能峰计数率 /s ⁻¹				
		-3.8mm	-1.9mm	0mm	1.9mm	3.8mm
⁴⁰ K	3997	7.84	7.92	8.01	7.95	7.79

体参考源底面中心相对原点位置改变 10% 所引起的全能峰计数率变化范围, 即为不确定区间的宽度, 故不确定度区间半宽度:

$$a = \frac{(8.01-7.84)+(8.01-7.79)}{2} = 0.19 \text{ s}^{-1}$$

区间内计数率均匀分布, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u(N_2) = a/k = 0.19/\sqrt{3} = 0.11 \text{ s}^{-1}$$

C.3.1.3 输入量 N 的标准不确定度 $u(N)$ 的计算:

$$u(N) = \sqrt{u(N_1)^2 + u(N_2)^2} = 0.17 \text{ s}^{-1}$$

C.3.2 输入量 N_b 的标准不确定度 $u(N_b)$ 的评定

⁴⁰K 作为一种天然放射性核素, 广泛存在周围环境介质中, 在进行效率计算时, 需要将全能峰内的本底计数扣除, 这些计数可能来源于宇宙射线、仪器噪声、铅屏蔽体以及周围环境中的微弱放射性, 因此, 本底引起的不确定度主要来源于仪器的统计涨落。采用 24h 的本底测量谱进行 ⁴⁰K 全能峰内的本底不确定度评估如下:

全能峰内 24h 本底读数 $n = 8640$

$$u(N_b) = s(N_b) = \frac{s(n)}{t} = \frac{\sqrt{8640}}{24 \times 3600} = 0.0011 \text{ s}^{-1}$$

C.3.3 输入量 A 的标准不确定度 $u(A)$ 的评定

输入量 A 的标准不确定度来源主要是 ⁴⁰K 体参考源活度值的不确定度, 可根据溯源证书给出的不确定度值评定, 采用 B 类方法评定。

⁴⁰K 体参考源活度的不确定度为 5.0%, 包含因子 $k = 2$, 换算为绝对量时乘上相应的源活度 3997 Bq 即得:

$$u(A) = \frac{5.0\% \times 3997}{2} = 99.9 \text{ Bq}$$

C.4 合成标准不确定度

C.4.1 灵敏系数

$$n_b \text{ 对 } \eta \text{ 的灵敏系数: } c_1 = \frac{\partial \eta}{\partial N} = \frac{1}{A} = 0.00025 \text{ Bq}^{-1}$$

$$n_b \text{ 对 } \eta \text{ 的灵敏系数: } c_2 = \frac{\partial \eta}{\partial N_b} = \frac{-1}{A} = -0.00025 \text{ Bq}^{-1}$$

$$A \text{ 对 } \eta \text{ 的灵敏系数: } c_3 = \frac{\partial \eta}{\partial A} = \frac{(N_b - N)}{A^2} = -4.9 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^2$$

C.4.2 标准不确定度汇总表

表 C.4-1 标准不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定 度值	*灵敏系数 c_i	活度响应标 准不确定 分量 $ c_i u(x_i) $ $\times 10^{-4} / \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$
$u(N)$ $u(N_1)$ $u(N_2)$	全能峰计数率 测量不重复性 源位置	0.17 s^{-1} 0.14 s^{-1} 0.11 s^{-1}	0.00025 Bq^{-1} - -	0.43 - -
$u(N_b)$	本底计数率的不 确定度	0.0011 s^{-1}	-0.00025 Bq^{-1}	0.0028
$u(A)$	标准源量值的 不确定度	99.9 Bq	$4.9 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^2$	0.49

C.4.3 合成标准不确定度 $u_c(\eta)$ 的计算

输入量 $u(N)$ 、 $u(N_b)$ 和 $u(A)$ 互相独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c^2(\eta) = [c_1 \cdot u(N)]^2 + [c_2 \cdot u(N_b)]^2 + [c_3 \cdot u(A)]^2$$

代入后得到 $u_c(\eta) = 6.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$

相对合成标准不确定度为：

$$u_{\text{Crel}}(\eta) = \frac{u_c(\eta)}{\eta} \times 100\% = \frac{6.5 \times 10^{-5}}{2.0 \times 10^{-3}} \times 100\% = 3.3\%$$

C.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，得到相对扩展不确定度：

$$U_{\text{rel}} = k \cdot u_{\text{Crel}}(\eta) = 6.6\%$$

闪烁体探测器 γ 谱仪对 ^{40}K 体参考源活度响应测量结果的扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 6.6\%, k=2$$