

HPGe γ 谱仪峰总比不变性的实验研究

樊元庆, 王 军, 王世联

(禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085)

摘要: 测定了点源、面源和盘状源在距 HPGe 探测器表面不同距离上的峰总比, 研究了探测器的峰总比随样品形状和测量几何条件的变化规律, 验证了同一探测器不同测量条件下峰总比基本不变的特性, 给出了所使用 HPGe γ 谱仪的峰总比曲线。

关键词: HPGe γ 谱仪; 峰总比; 峰效率; 总效率

中图分类号: TL816.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)S0-0122-04

Experiment Research on Invariability of Peak-to-Total Ratio in γ -ray Spectrometry

FAN Yuan-qing, WANG Jun, WANG Shi-lian

(CTBT Beijing National Data Centre and Radionuclide Laboratory, Beijing 100085, China)

Abstract: The source, such as point, plane and disc were measured in several source-detector distances for the research on invariability of the peak-to-total ratio, and the curve of peak-to-total ratio was presented.

Key words: HPGe detector; peak-to-total ratio; peak efficiency; total efficiency

在利用 HPGe γ 谱仪进行环境水平放射性样品分析时, 使用单能 γ 标准源标定探测器在特定测量条件下的峰效率和总效率的工作费时费力, 且通常能够同时获得足够数量的单能 γ 标准源非常困难, 这就使得实验标定工作往往不能取得满意的结果, 通常采用效率转移法标定探测器的峰效率和总效率。

峰总比定义为峰效率与总效率的比值, 峰总比不变性是效率转移法的重要理论基础。1981年, Moens 等人^[1]就提出峰总比不变性的假设, 认为全能峰效率与总效率的比值与源的位置、尺寸和材料组成无关而是探测器的本征

性质, 但直到近年才由 Vidmar 等人^[2]通过 Monte-Carlo 模拟计算对峰总比不变性进行了比较系统的研究。本文使用一系列单能 γ 射线源制成点源、面源 ($\phi 20$ mm) 和盘状源 ($\phi 35$ mm \times 4 mm, $\phi 70$ mm \times 4 mm 和 $\phi 73$ mm \times 12 mm) 在不同位置对探测器的峰总值进行测量, 实验研究峰总比的不变性。

1 原理

γ 谱仪系统的峰总比可以定义为:

$$R = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_t} \quad (1)$$

式中: ϵ_p 和 ϵ_t 分别是能量为 E 的 γ 射线峰效率和总效率,它们与样品几何形状 V ,距探测器距离 L 密切相关。对于某一测量条件下的单能 γ 射线谱,峰总比 R 也可以表示为:

$$R = \frac{n_p}{n_t - n_b - n_q + n_0} \quad (2)$$

式中: n_p 为全能峰计数率; n_t 为总谱积分计数率; n_b 为本底总谱积分计数率; n_q 为核素的其它 γ 射线峰计数率; n_0 为外推至零点的计数率。

2 实验

2.1 实验装置

探测系统由相对效率为 66.4% 的 P 型同轴高纯锗探测器和 γ 谱仪组成,高纯锗探测器的能量分辨率为 1.78 keV/1 332.5 keV,晶体尺寸为 $\phi 69.8 \text{ mm} \times 69.8 \text{ mm}$,高压为 +2 300 V。探测器置于内部尺寸为 100 cm \times 100 cm \times 180 cm 的铅室内进行屏蔽(铅室的壁厚为 10 cm,内衬各 1 mm 厚的镭、铜、铝板),环境本底计数率为 4.72 s⁻¹。

实验中设定 ADC 的道数为 8 192,为减小外推至零道计数的校正,调节下阈和零点,使脉冲信号尽可能不被卡掉而又不使噪声出现,调节后的下阈为 9 道,对应的能量为 5.9 keV。

2.2 源的制备

使用单能 γ 射线核素²⁴¹Am、¹⁰⁹Cd、⁵⁷Co、¹⁴¹Ce、¹³⁹Ce、⁵¹Cr、¹¹³Sn、⁸⁵Sr、¹³⁷Cs、⁵⁴Mn 和⁶⁵Zn 的放射性溶液,制备了点状源、面状源($\phi 20 \text{ mm}$ 滤纸源)和 3 种尺寸的盘状源($\phi 35 \text{ mm} \times$

4 mm、 $\phi 70 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 和 $\phi 73 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的聚丙烯滤材)样品。其中,在盘状源制备时,为保证样品中放射性的均匀性,要将正方形聚丙烯滤材用铅笔划分成 22 \times 22 个方格,将一定量的放射性溶液均匀滴在方格内,并尽量保持液滴大小均匀。将阴干后的滤材叠成直径与所制样品直径大小相当的厚源,装入相应内径尺寸的模具中压制滤材源。

2.3 实验和结果

实验中使用放射源²⁴¹Am、¹⁵²Eu 和⁵⁶Co 对 γ 能谱进行了能量和峰形刻度,能量范围为 60~3 000 keV。拟合的能量刻度和峰形刻度方程见式(3)和(4):

$$E_\gamma = 2.6897 + 0.358868 \text{ch} - 4.2443 \times 10^{-9} \text{ch}^2 \quad (3)$$

$$\text{FWHM} = 0.8073 + 8.5201 \times 10^{-4} E_\gamma - 1.0283 \times 10^{-7} E_\gamma^2 \quad (4)$$

式中:ch 为多道道数。

将所制备的样品源依次置于探测器外壳表面以及距探测器表面 8、32、72 和 140 mm 位置处进行测量,获取 γ 能谱,用式(2)计算得到不同测量条件下的峰总比。

点源、 $\phi 20 \text{ mm}$ 面源、 $\phi 35 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 盘状源、 $\phi 70 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 盘状源、 $\phi 73 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 盘状源在探测器表面时测量的峰总比列于表 1;点源在探测器表面及距探测器表面 8 mm 和 32 mm 位置测量的峰总比的测量结果列于表 2;面源样品在探测器表面及距探测器表面 8、32、72 和 140 mm 位置测量的峰总比,以及在

表 1 各种形状样品源在探测器表面测量的峰总比

Table 1 Peak-to-total ratios of different shape sources on surface of detector

核素	能量/ keV	样品形状				
		点源	$\phi 20 \text{ mm}$	$\phi 35 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$	$\phi 70 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$	$\phi 73 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$
²⁴¹ Am	59.54	0.364 2	0.338 8	0.367 5	0.361 5	0.362 8
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.588 1	0.543 3	0.537 0	0.554 7	0.569 3
⁵⁷ Co	122.47	0.650 1	0.610 9	0.615 6	0.608 2	0.581 5
¹⁴¹ Ce	145.45	0.649 5	0.611 8	0.602 9		0.571 9
¹³⁹ Ce	165.86	0.604 1	0.577 1	0.553 1	0.538 2	0.549 7
⁵¹ Cr	320.01	0.491 7	0.466 5	0.465 5		0.443 7
¹¹³ Sn	391.70	0.420 5	0.398 5	0.356 5	0.389 6	0.372 1
⁸⁵ Sr	514.01	0.369 9	0.358 8	0.348 6		0.341 8
¹³⁷ Cs	661.66	0.317 8	0.304 7	0.300 3	0.299 2	0.298 2
⁵⁴ Mn	834.85	0.283 5	0.275 1	0.264 3	0.268 2	0.268 9
⁶⁵ Zn	1 115.55	0.237 8	0.226 0	0.224 1	0.228 3	0.221 1

表 2 点源样品在距探测器表面不同距离测量的峰总比

Table 2 Peak-to-total ratios of point sources in different distance from detector

核素	能量/keV	距探测器表面距离		
		表面	8 mm	32 mm
²⁴¹ Am	59.54	0.364 2	0.389 2	0.452 0
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.588 1	0.609 6	0.626 3
⁵⁷ Co	122.47	0.650 1	0.663 0	0.679 2
¹⁴¹ Ce	145.45	0.649 5	0.652 5	0.643 2
¹³⁹ Ce	165.86	0.604 1	0.612 7	0.585 1
⁵¹ Cr	320.01	0.491 7	0.499 8	0.502 4
¹¹³ Sn	391.70	0.420 5	0.421 0	0.423 5
⁸⁵ Sr	514.01	0.369 9	0.372 5	0.373 5
¹³⁷ Cs	661.66	0.317 8	0.317 3	0.316 2
⁵⁴ Mn	834.85	0.283 5	0.284 0	0.282 6
⁶⁵ Zn	1 115.55	0.237 8	0.236 9	0.241 4

表 3 $\phi 20$ mm 面源在距探测器表面不同距离测量的峰总比

Table 3 Peak-to-total ratios of plane sources in different distance from detector

核素	能量/keV	距探测器表面距离					吸收层
		表面	8 mm	32 mm	72 mm	140 mm	
²⁴¹ Am	59.54	0.338 8	0.352 4	0.406 1	0.418 4	0.397 0	0.5 mmCu
			0.388 1	0.436 2	0.448 2	0.426 5	
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.543 3	0.547 2	0.558 0	0.555 9	0.534 2	0.5 mmCu
			0.562 4	0.593 5	0.597 4	0.577 6	
⁵⁷ Co	122.47	0.610 9	0.613 1	0.630 1	0.612 9	0.599 2	0.5 mmCu
			0.592 5	0.613 5	0.607 5	0.590 0	
¹⁴¹ Ce	145.45	0.611 8	0.605 2	0.606 0	0.586 7	0.561 4	0.5 mmCu
			0.567 1	0.557 9	0.553 6	0.532 0	
¹³⁹ Ce	165.86	0.577 1	0.597 2	0.610 5	0.599 1	0.570 8	0.5 mmCu
			0.597 2	0.610 5	0.599 1	0.570 8	
⁵¹ Cr	320.01	0.466 5	0.462 3	0.473 0	0.458 9	0.444 0	
¹¹³ Sn	391.70	0.398 5	0.390 5	0.393 6	0.380 4	0.380 6	
⁸⁵ Sr	514.01	0.358 8	0.353 4	0.354 7	0.354 1	0.344 8	
¹³⁷ Cs	661.66	0.304 7	0.300 7	0.307 1	0.300 5	0.293 2	
⁵⁴ Mn	834.85	0.275 1	0.272 0	0.274 0	0.272 5	0.266 1	
⁶⁵ Zn	1 115.55	0.226 0	0.218 5	0.227 3	0.228 6	0.226 8	

有 0.5 mm Cu 吸收层的情况下²⁴¹Am、¹⁰⁹Cd、⁵⁷Co和¹³⁹Ce的峰总比测量结果列于表 3。表 4 中列出了各种测量条件下峰总比的平均值及相对标准偏差。

取各种测量条件下的峰总比平均值标定探测器峰总比曲线,结果示于图 1 中,并拟合成式

(5)的方程,此即为所测量 HPGe 探测器的峰总值。

$$\ln R = 58.837 05 + 38.509 05 \ln E - 9.389 34 \ln^2 E + 1.007 07 \ln^3 E - 0.040 63 \ln^4 E \quad (5)$$

表 4 各种测量条件下峰总比的
相对标准偏差

Table 4 Relative standard deviation
of peak-to-total ratios in all measuring geometries

核素	能量/keV	峰总比平均值	相对标准偏差/%
^{241}Am	59.54	0.394 1	3.05
^{109}Cd	88.03	0.567 2	1.57
^{57}Co	122.47	0.624 0	1.40
^{141}Ce	145.45	0.609 1	1.56
^{139}Ce	165.86	0.566 4	1.38
^{51}Cr	320.01	0.470 8	1.35
^{113}Sn	391.70	0.393 3	1.64
^{85}Sr	514.01	0.357 2	0.96
^{137}Cs	661.66	0.305 0	0.84
^{54}Mn	834.85	0.273 7	0.77
^{65}Zn	1 115.55	0.228 8	0.94

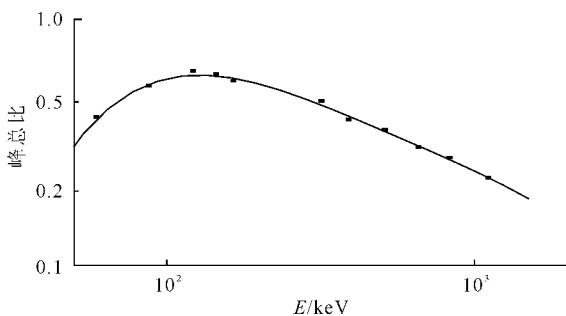


图 1 实验测定的 HPGe 探测器的峰总比

Fig.1 Peak-to-total ratio curve of gamma-ray
spectrometry measured by experiment

3 结论

对 γ 射线能量大于 100 keV 的能区,不同测量条件下峰总比的平均值相对标准偏差小于 2%,不同测量条件下的峰总比一致性较好,峰总比随能量的变化与测量几何条件无关,完全可以作为效率转移法的基础。

对 γ 射线能量小于 100 keV 的能区,不同

测量条件下的峰总比的平均值的相对标准偏差稍大,说明测量几何条件对峰总比随能量的变化有一定影响。文献[3,4]认为这是由低能部分 γ 光子与探测器作用的边缘效应,使得 γ 光子的吸收不完全造成的。从结果中发现,距探测器表面越近峰总比越小,这也可能是所使用的核素中低能 X 和 γ 光子(如 ^{241}Am 的 17 和 26 keV X 射线, ^{57}Co 的 14 keV γ 射线)对总谱积分计数的贡献以及加和效应的综合作用。为此,用面源测定了 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 、 ^{57}Co 和 ^{139}Ce 几个低能核素在有 0.5 mm Cu 吸收情况下的峰总比(表 3),与无吸收情况相比,测量条件对峰总比的影响有所减小。对 γ 射线能量小于 100 keV 的能区,峰总比经相关因素校正后在一定相对偏差范围内可认为是与测量条件无关的,能够作为效率传递的理论基础。

参考文献:

- [1] MOENS L, DE DONDER J, LIN X, et al. Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries [J]. Nucl Instrum Methods, 1981, 187: 451-472.
- [2] TIM V, ANDREJ L. On the invariability of the total-to-peak ratio in gamma-ray spectrometry [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, 60: 191-195.
- [3] GOSTELY D M. Coincidence-summing corrections for extended sources in gamma-ray spectrometry using Monte-Carlo simulation[J]. Nucl Instrum Methods, 1992, A312:152-155.
- [4] SIMA O, ARNOLD D. Self-attenuation and coincidence-summing corrections calculated by Monte-Carlo simulations for gamma-spectrometric measurements with well-type germanium detectors[J]. Appl Radiat Isot, 1996, 47: 889-893.