

几套就地 HPGe γ 谱仪系统的死时间修正

陈伟,冯天成,晏林,苏川英,吴睿,龙斌,冯元举

(西北核技术研究所,陕西西安 710024)

摘要:用强源干扰法实验研究了几套就地 HPGe γ 谱仪系统的死时间修正问题,得到了在不同百分死时间下的修正因子,拟合获得了修正函数,并与谱仪系统的自动修正结果进行了比较分析。结果显示:在实验所控制的死时间范围内,死时间与修正因子间呈线性关系;谱仪系统自动修正结果与实验修正值间的最大相对偏差小于 4.4%。这说明,在 1.13%~52.95%死时间范围内,这几套谱仪系统的死时间自动修正结果是准确的,也表明现代 γ 谱仪系统死时间修正技术是有效的,可应用于数据分析中。

关键词:就地 HPGe γ 谱仪系统;死时间修正;强源干扰法;自动修正

中图分类号:TL81

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)05-0589-06

Deadtime Correction of Several in-situ HPGe γ Spectrometers

CHEN Wei, FENG Tian-cheng, YAN Lin, SU Chuan-ying,

WU Rui, LONG Bin, FENG Yuan-ju

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Deadtime corrections of three in-situ HPGe γ spectrometers were studied by experimental method of interference-method with strong γ source. The linear relationships between the percent deadtime and the correction coefficients were fitted by the least-square-method. The comparisons between the experimental results and the automatic correction values of full-energy-peak count rates were performed. The results show that the maximum deviation of the automatic correction values relatively to the experimental results is less than 4.4%. It indicates that in the deadtime range of 1.13%-52.95%, the automatic correction results of deadtime by these spectrometers themselves are exact and the deadtime correction techniques of modern γ spectrometers are efficacious, which can be used in the data analysis of γ spectra.

Key words: in-situ HPGe γ spectrometer; deadtime correction; interference-method with strong γ source; automatic correction

样品特征 γ 射线全能峰净计数的准确确定是 γ 能谱定量分析的基础。放射性粒子在探测器中产生电荷的收集及信号处理均需要时间,

该时间即为死时间^[1],在死时间内,系统不再对进入探测器的粒子有响应,造成计数丢失,因此给分析结果带来误差^[2]。一般,用死时间相对

实际测量时间的百分数(百分死时间)来反映计数丢失程度^[3],百分死时间越大,计数丢失越严重。

现代 γ 谱仪系统死时间的构成复杂,由死时间引起的计数丢失均采用活时间计数法进行自动补偿。若这种活时间计数法自动补偿结果准确,则可将自动补偿后的 γ 射线全能峰净计数直接应用于定量分析,否则,需对该净计数进行再修正。死时间的实验修正方法主要有脉冲产生器法、强源干扰法和核跟踪测量法^[4]等。

测量工作中发现,由于部分监测区域的放射性活度浓度较高,致使就地HPGe γ 谱仪系统死时间高达50%以上。在这种情况下,活时间计数法的死时间补偿结果是否可靠,须得到

确认或进一步修正。因此,本工作结合现有实验室条件,采用强源干扰法,对3套就地HPGe γ 谱仪系统进行死时间修正的实验研究,得到不同百分死时间对应的修正因子,拟合获得修正函数,并与系统自动修正结果进行比较分析。

1 仪器设备

1.1 γ 谱仪系统

就地HPGe γ 谱仪系统主要由探测器、多道脉冲幅度分析器(MCA)、谱获取软件和计算机组成。本工作使用的3套 γ 谱仪系统的MCA均由CANBERRA公司生产,型号为Inspector2000,能谱获取软件均为Genie2000。各系统探测器型号及性能参数列于表1。

表1 HPGe探测器性能参数
Table 1 Parameters of HPGe detectors

探测器序号	性能参数	厂家
1	FWHM, 2.2 keV@1 332 keV; 相对效率, 45%	CANBERRA
2	FWHM, 1.8 keV@1 332 keV; 相对效率, 26.5%	ORTEC
3	FWHM, 1.8 keV@1 332 keV; 相对效率, 25.7%	ORTEC

1.2 放射源

用强源干扰法进行实验,要求干扰源与作为测量对象的放射源全能峰无重叠,干扰源仅起到增加全谱总计数率以增加百分死时间的作用。为得到较大的百分死时间,要求干扰源的强度应足够大;为得到一定能量范围的死时间修正因子,要求作为测量对象的放射源能发射不同能量的多支 γ 射线。综合考虑这些因素,选用实验室现有的¹⁵²Eu、¹³⁷Cs源分别作为测量对象源和干扰源。

2 死时间修正因子实验测量方法

对同一测量对象,令某全能峰在百分死时间可忽略时(百分死时间不大于1%^[5])的净计数率为 n_1 ,某一大于1%百分死时间下的净计数率为 n_2 ,则该百分死时间对应的死时间修正因子 F 为:

$$F = n_2/n_1 \quad (1)$$

获得某一百分死时间下全能峰的净计数率 n 后,可得该全能峰净计数率经修正后的值 n_0 ,

有:

$$n_0 = n/F \quad (2)$$

选择¹⁵²Eu强度较大的5支 γ 射线进行研究,能量分别为121.8、344.3、778.9、1 112.0和1 408.0 keV。¹⁵²Eu放射源中可能存在¹⁵⁴Eu,其123.1、346.7、1 110.0和1 408.4 keV γ 射线与¹⁵²Eu的部分 γ 射线能量很接近,但不会影响死时间修正因子的计算结果^[5]。

实验测量布局如图1所示。将¹⁵²Eu点源置于探测器前端,调整放射源与探测器前端面间的距离,使上述 γ 射线全能峰的统计涨落和探测器百分死时间(通过Genie2000谱获取软件读取)均不大于1%。以该条件下 γ 射线各全能峰净计数率作为真实净计数率。保持¹⁵²Eu点源与探测器的相对位置不变,将¹³⁷Cs源置于探测器前方,调整¹³⁷Cs源与探测器间的距离,使百分死时间逐渐增大,获取不同百分死时间下的 γ 能谱。各百分死时间下121.8、344.3、778.9、1 112.0和1 408.0 keV全能峰净计数率除以该全能峰真实净计数率(百分死时间小于1%时的计数率),即为该百分死时间对应的死时间修正因子。

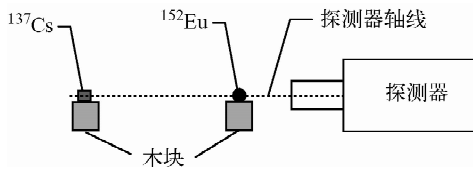


图 1 实验测量布局示意图

Fig. 1 Layout of experimental measurement

3 实验结果与分析

3.1 实验结果及其不确定度

1) 实验结果

获取了 1、2、3 号谱仪系统百分死时间分别在 0.99% ~ 52.95%、0.98% ~ 63.08% 和 0.94% ~ 60.46% 范围内的多个能谱。能谱获取时间以实际测量时间计,将全能峰净计数率

代入式(1)计算得到这 3 套 γ 谱仪系统不同百分死时间(D/R)对应的各全能峰的死时间修正因子 F_i ,结果列于表 2。

测量条件相同时,同一 γ 谱仪系统各全能峰的死时间修正因子应相同,因此,对表 2 中各全能峰的死时间修正因子按照式(3)进行加权平均,以得到不同死时间对应的修正因子,结果列于表 3。

$$F = \frac{\sum F_i \omega_i}{\sum \omega_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

式中: F 为某一百分死时间对应的死时间修正因子; F_i 为该百分死时间对应的能谱中某一全能峰的死时间修正因子; ω_i 为 F_i 的权, $\omega_i = 1/\sigma_i^2$, σ_i 为该全能峰计数的统计涨落。

表 2 1~3 号谱仪系统各全能峰的死时间修正因子

Table 2 Deadtime correction coefficients of full-energy peaks of No. 1 to No. 3 spectrometers

谱仪系统	百分死时间/%	各全能峰死时间修正因子 F_i				
		121.8 keV	344.3 keV	778.9 keV	1 112.0 keV	1 408.0 keV
1 号	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.13	1.00	0.99	1.00	0.96	1.00
	2.67	0.98	0.98	0.98	0.96	1.00
	5.73	0.95	0.96	0.95	0.92	0.96
	15.88	0.85	0.81	0.83	0.90	0.86
	33.13	0.68	0.61	0.58	0.78	0.67
	43.41	0.56	0.45	0.40	0.69	0.55
	52.95	0.47	0.35	0.49	0.57	0.48
2 号	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2.02	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99
	5.24	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96
	10.07	0.89	0.89	0.92	0.92	0.91
	20.68	0.79	0.77	0.83	0.79	0.80
	30.96	0.70	0.68	0.72	0.68	0.70
	40.06	0.61	0.57	0.61	0.59	0.60
	51.46	0.49	0.45	0.52	0.49	0.49
3 号	63.08	0.37	0.33	0.40	0.38	0.38
	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2.01	0.99	0.98	0.97	1.00	1.00
	4.43	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99
	10.90	0.92	0.94	0.92	0.94	0.93
	19.73	0.81	0.84	0.81	0.84	0.85
	24.88	0.76	0.76	0.75	0.79	0.79
	29.55	0.71	0.72	0.69	0.72	0.75
	39.75	0.62	0.60	0.60	0.63	0.64
	49.71	0.52	0.50	0.50	0.51	0.53
60.46	0.40	0.38	0.38	0.41	0.42	

表 3 1~3 号谱仪系统死时间修正因子 F

Table 3 Deadtime correction coefficients of No. 1 to No. 3 spectrometers

百分死时间/%			修正因子 F		
1 号谱仪	2 号谱仪	3 号谱仪	1 号谱仪	2 号谱仪	3 号谱仪
0.99	0.98	0.94	1.00	1.00	1.00
1.13	2.02	2.01	0.99	0.99	0.99
2.67	5.24	4.43	0.98	0.96	0.98
5.73	10.07	10.90	0.95	0.91	0.93
15.88	20.68	19.73	0.86	0.80	0.83
33.13	30.96	24.88	0.67	0.70	0.77
43.41	40.06	29.55	0.56	0.60	0.71
52.95	51.46	39.75	0.47	0.49	0.61
—	63.08	49.71	—	0.38	0.51
—	—	60.46	—	—	0.39

用最小二乘法拟合得到 3 套系统的百分死时间 D/R 和修正因子 F 的关系曲线,如图 2 所示,拟合公式如下:

$$F = -0.0102 \times (D/R) + 1.0089 \quad (R^2 = 0.999) \quad (4)$$

$$F = -0.0101 \times (D/R) + 1.0102 \quad (R^2 = 0.999) \quad (5)$$

$$F = -0.0104 \times (D/R) + 1.0233 \quad (R^2 = 0.997) \quad (6)$$

式(4)、(5)和(6)分别为 1、2 和 3 号谱仪系统的百分死时间与死时间修正因子的拟合关系式。式中: D/R 为百分死时间; R^2 为拟合相关系数。

2) 实验结果不确定度

死时间修正因子的不确定度主要来自全能峰计数的统计涨落。根据修正因子的计算式(1)、(3)对死时间修正因子不确定度进行合成,有:

$$\mu_{F_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial F_i}{\partial n_1}\right)^2 \mu_{n_1}^2 + \left(\frac{\partial F_i}{\partial n_2}\right)^2 \mu_{n_2}^2} \quad (7)$$

$$\mu_F = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial F_i}\right)^2 \mu_{F_i}^2} \quad (8)$$

式中: μ_{F_i} 为各全能峰修正因子不确定度; μ_{n_1} 为百分死时间小于 1% 时的全能峰计数统计涨落; μ_{n_2} 为百分死时间大于 1% 时的全能峰计数统计涨落; μ_F 为某一百分死时间对应的死时间修正因子不确定度。

由式(7)计算得到的各全能峰修正因子不确定度列于表 4,由式(8)计算得到的不同百分死时间对应的修正因子不确定度列于表 5。

3.2 γ 谱仪系统的自动修正效果检验

以能谱活时间为测量时间,计算得到 3 套谱仪系统不同百分死时间时的全能峰净计数率,并与实验修正结果进行比较,以评价谱仪系统活时间计数法自动补偿结果的可靠性。经谱仪系统自动修正后的全能峰净计数率相对于实验修正结果的偏差按式(9)计算,计算结果列于表 6。

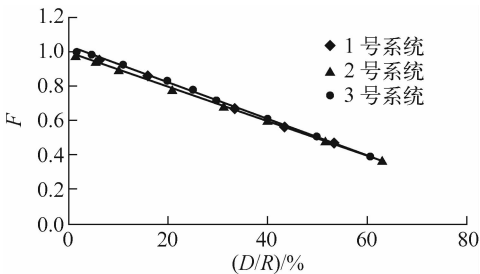


图 2 3 套 γ 谱仪系统百分死时间与死时间修正因子的关系

Fig. 2 Relationship between F and D/R of three γ spectrometers

表 4 1~3 号谱仪系统各全能峰死时间修正因子不确定度 μ_{F_i}

Table 4 Uncertainties of deadtime correction coefficients of full-energy peaks of No. 1 to No. 3 spectrometers

谱仪系统	百分死时间/%	$\mu_{F_i}/\%$				
		121.8 keV	344.3 keV	778.9 keV	1 112.0 keV	1 408.0 keV
1 号	0.99	0.26	0.51	0.94	1.12	0.75
	1.13	0.04	0.14	1.93	1.87	1.52
	2.67	0.05	0.18	1.97	1.89	1.68
	5.73	0.06	0.25	1.95	1.94	1.65
	15.88	0.10	0.70	2.10	1.92	1.53
	33.13	0.20	1.91	3.01	2.19	1.47
	43.41	0.39	5.29	4.28	2.47	1.65
	52.95	0.65	11.88	3.53	3.00	1.88
2 号	0.98	0.27	0.31	0.73	0.79	0.59
	2.02	0.02	0.05	0.45	0.62	0.39
	5.24	0.02	0.06	0.44	0.61	0.35
	10.07	0.03	0.10	0.47	0.67	0.39
	20.68	0.03	0.12	0.45	0.63	0.33
	30.96	0.05	0.20	0.66	0.93	0.39
	40.06	0.04	0.18	0.61	0.87	0.31
	51.46	0.04	0.21	0.80	1.06	0.29
3 号	63.08	0.06	0.24	1.13	1.44	0.32
	0.94	0.31	0.35	0.81	0.87	0.64
	2.01	0.04	0.10	0.85	1.34	1.14
	4.43	0.03	0.10	0.69	1.05	0.81
	10.90	0.04	0.15	0.74	1.22	0.97
	19.73	0.04	0.19	0.72	1.13	0.80
	24.88	0.05	0.26	0.78	1.25	0.82
	29.55	0.06	0.30	0.90	1.46	0.85
39.75	0.06	0.33	0.96	1.37	0.76	
49.71	0.08	0.44	1.33	2.41	0.86	
60.46	0.08	0.42	1.51	2.38	0.74	

表 5 1~3 号谱仪系统死时间修正因子不确定度 μ_F

Table 5 Uncertainties of deadtime correction coefficients of No. 1 to No. 3 spectrometers

百分死时间/%			$\mu_F/\%$		
1 号谱仪	2 号谱仪	3 号谱仪	1 号谱仪	2 号谱仪	3 号谱仪
0.99	0.98	0.94	0.46	0.33	0.37
1.13	2.02	2.01	0.76	0.22	0.49
2.67	5.24	4.43	0.76	0.19	0.35
5.73	10.07	10.90	0.76	0.19	0.37
15.88	20.68	19.73	1.36	0.17	0.31
33.13	30.96	24.88	3.71	0.26	0.33
43.41	40.06	29.55	4.82	0.26	0.39
52.95	51.46	39.75	6.65	0.34	0.45
—	63.08	49.71	—	0.50	0.70
—	—	60.46	—	—	0.73

表6 1~3号谱仪系统自动修正结果与实验修正结果的相对偏差
 Table 6 Relative deviations of full-energy-peak count rates corrected automatically
 to experimental values of No. 1 to No. 3 spectrometers

百分死时间/%			ϵ /%		
1号谱仪	2号谱仪	3号谱仪	1号谱仪	2号谱仪	3号谱仪
0.99	0.98	0.94	1.00	0.99	0.95
1.13	2.02	2.01	0.13	1.04	1.03
2.67	5.24	4.43	0.69	1.31	2.54
5.73	10.07	10.90	0.77	1.19	4.38
15.88	20.68	19.73	2.23	0.86	3.40
33.13	30.96	24.88	0.19	1.39	2.50
43.41	40.06	29.55	-1.04	0.10	0.78
52.95	51.46	39.75	-0.11	0.95	1.24
—	63.08	49.71	—	2.93	1.41
—	—	60.46	—	—	-1.37

$$\epsilon = \frac{\frac{N}{t_1} - \frac{N}{t_R \times F}}{\frac{N}{t_R \times F}} \times 100\% = \left(\frac{t_R \times F}{t_1} - 1 \right) \times 100\%$$

$$100\% = \left(\frac{1}{1 - D/R} \times F - 1 \right) \times 100\% \quad (9)$$

式中： ϵ 为经谱仪系统自动修正后的全能峰净计数率相对于实验修正结果的偏差； N 为全能峰净计数； t_1 为测量活时间； t_R 为实际测量时间； F 为死时间修正因子； D/R 为百分死时间。

由表6可知，总体上，全能峰净计数率的实验修正值与自动修正结果的相对偏差绝对值分别为：1号系统不大于2.3%；2号系统不大于3%；3号系统不大于4.4%。两种结果吻合较好，说明这3套 γ 谱仪系统自动修正结果是准确、可靠的。

4 结束语

用强源干扰法实验研究了3套就地HPGe γ 谱仪系统的死时间修正问题，结果表明，这3套谱仪系统的百分死时间与死时间修正因子之间呈线性函数关系。比较全能峰计数的实验修正值与系统的自动修正结果发现，二者吻合很好。因此，以活时间作为测量时间时，可直接将由系统读取的全能峰净计数率用于放射性核素定量分析，无须对该计数率再进行修正。

本实验所用 ^{152}Eu 放射源活度较小，当百分死时间较大时，强度较低的 γ 射线在能谱中的

能峰较弱，带来解谱误差，对实验结果有一定影响；所用源半衰期较长，若测量对象为短半衰期的强放射源，百分死时间变化将较快，这种情况下的谱仪自动修正结果的可靠性尚需研究。

参考文献：

- [1] 贾文懿. 核地球物理仪器[M]. 北京:原子能出版社,1998:124-127.
- [2] 王芝英. 核电子技术原理[M]. 北京:原子能出版社,1989:115-117.
- [3] 祖秀兰,吴允平,周蓉生. 多道脉冲幅度分析器死时间修正方法探讨[J]. 核电子学与探测技术, 2001,21(4):290-293.
ZU Xiulan, WU Yunping, ZHOU Rongsheng. Research on correcting method of dead time in multi-channel pulse amplitude analyzer[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, 21(4): 290-293(in Chinese).
- [4] 古当长. 放射性核素活度测量的方法和技术[M]. 北京:科学出版社,1994:257-258.
- [5] 周丰群,杨景康,拓飞,等. HPGe γ 谱仪系统死时间校正方法的实验研究[J]. 高能物理与核物理,2005,29(12):1 175-1 178.
ZHOU Fengqun, YANG Jingkang, TUO Fei, et al. Experimental study on the method of dead-time correction for HPGe γ spectrometer system [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29(12): 1 175-1 178(in Chinese).