

α 谱仪探测效率的理论计算与实验测定

肖德涛,许艳婷,康 玺,周青芝,刘 凯,黄雪芳

(南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:谱仪的探测效率表征了探测器接收和记录信息的能力.为了更精确的测量 α 放射性核素的活度,定准 α 能谱仪的探测效率是非常必要的.本文利用查圆面源对窗的几何因子表和基于蒙特卡罗思想的 MatLab 模拟这两种方法对 α 谱仪探测效率进行了理论计算,并用 Matlab 软件对这两者所得的数据进行了比较分析,结果表明在 5.5% 的相对误差范围内两者可以近似相等.通过 ^{241}Am 标准面源与氦子体标准源对 α 谱仪的探测效率进行了测量,发现用 ^{241}Am 标准面源测得的探测效率与理论计算的探测效率相差很大,用氦子体标准源测得的探测效率与理论值符合的很好.研究表明 ^{241}Am 标准面源的活度的均匀性与准确性以及尺寸定位的准确性是造成 ^{241}Am 标准面源探测效率实验值与理论计算值差异的主要原因.

关键词: α 能谱仪;探测效率;几何因子;MatLab 模拟

中图分类号:TL817⁺.2; O614.35⁺4 **文献标识码:**A

Theoretical Calculation and Experimental Calibration of the Detection Efficiency of Alpha Spectrometer

XIAO De-tao, XU Yan-ting, KANG Xi, ZHOU Qing-zhi, LIU Kai, HUANG Xue-fang

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: A detector's capability of receiving and recording information is characterized by a spectrometer's detection efficiency. It's very necessary to calibrate an alpha spectrometer's detection efficiency for more accurate measurement of activity of alpha radionuclides. This paper theoretically calculates the alpha spectrometer's detection efficiency by two methods, looking up the table of geometrical factor of round non-point source to window and Matlab simulation based on Monte Carlo idea. Then, a comparative analysis of data between the two methods is made by Matlab software. Both methods are approximately equal in the allowed error range with 5.5%. The detection efficiency of alpha spectrometer is measured

收稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(11005060;11105070)

作者简介:肖德涛(1964 年-),男,湖北钟祥人,南华大学核科学技术学院教授,博士.主要研究方向:辐射防护与环境保护.

by an ^{241}Am standard source and radon progeny standard source. Theory detection efficiency is in accord with the experimental results used the radon progeny standard source and is different from the experimental results used the ^{241}Am standard source. The results show that uniformity and accuracy of radioactivity for ^{241}Am standard surface source and the accuracy of location dimensions cause detection efficiency errors between the experimental results and theoretical value.

key words: alpha spectrometer; detection efficient; geometrical factor; Matlab simulation

南华大学氡实验室使用美国 ORTEC 公司生产的高分辨率 α 谱仪开展了 α 能谱测量的研究工作. 为了更精确的测量 α 放射性核素的活度, 需要定准 α 能谱仪的探测效率, 使用 ^{241}Am 标准面源与氡子体标准源对该谱仪进行了探测效率的测定并与理论计算的探测效率作对比.

1 谱仪简介

OCTETE[®] PLUS ALPHA SPECTROMETER 是美国 ORTEC 公司生产的 α 谱仪工作站. 它是一台具有 8 个独立测量通道, 可同时测量 8 个 α 放射性样品的高精密度谱仪. 该谱仪的每个通道分别配有离子注入型金硅面垒探测器, 探测器的可选择面积为 450 mm^2 或 900 mm^2 . 在真空度 $P \leq 1000\text{ mTorr}$ 时, 450 mm^2 探测器的最小半高宽 (FWHM) 为 20 keV , 900 mm^2 探测器的最小半高宽 (FWHM) 为 29 keV ; 探测器与被测样品之间有 10 档距离可选, 相邻两档之间的距离差为 4 mm , 最大距离可达 44 mm .

2 谱仪探测效率的理论计算

分别采用两种方法对探测效率进行理论计算, 一是几何因子法; 二是蒙特卡罗模拟法.

2.1 几何因子法

由点源发出的射线是各向同性发射的, 如果没有受到散射和吸收的作用, 射线进入计数器灵敏体积的概率 G 为:

$$G = \Omega/4\pi \quad (1)$$

式中, Ω 为灵敏体积对该点源所张的立体角. G 完全由几何条件决定, 称为几何因子. 几何因子计算示意图如图 1 所示. a 为探测器的半径, b 为源的有效半径, H 则为源与探测器的距离. 面积为 450 mm^2 的探测器半径为 12 mm ; 面积为 900 mm^2 的探测器半径为 16.92 mm . 所用的 ^{241}Am 标准面源的有效半径为 10 mm .

根据几何因子公式^[1] $\alpha = b/a, \rho^2 = a^2/(a^2 +$

$H^2)$ 与已知的各参数, 计算 $\alpha \rho^2$, 查圆形源和探测器几何因子表, 根据内插值法, 得到随距离 H 变化的探测效率理论经验值 (下文简称为理论值), 列于表 1.

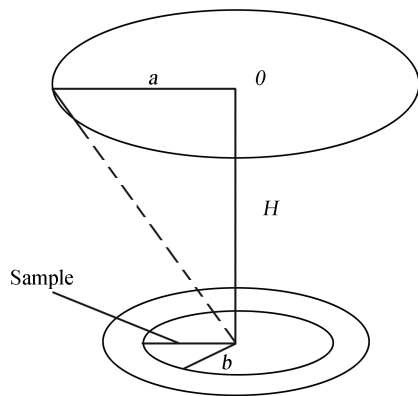


图 1 几何因子计算示意图

Fig. 1 The schematic diagram for calculation of geometric factor

2.2 蒙特卡罗模拟

基于蒙特卡罗思想的 MatLab 模拟^[2-3]是将面源视作各向同性的, 把面源视作由大量不同位置的点源组成, 而点源位置的选取是随机的, 假设面源所在的平面为 xy 平面, 则点源的位置选取为:

$$x = R_s \sqrt{\xi_1} \cos(2\pi\xi_2) \quad (2)$$

$$y = R_s \sqrt{\xi_1} \sin(2\pi\xi_2) \quad (3)$$

其中 ξ_1, ξ_2 为随机数.

运用乘同余法得到伪随机数, 对于任一初始值 x_1 , 伪随机数序列由下面递推公式确定:

$$x_{i+1} = a \cdot x_i, (\text{mod } M) \quad (4)$$

$$\xi_{i+1} = \frac{x_{i+1}}{M}, i = 1, 2, 3 \cdots \quad (5)$$

其中 a 为常数. 为了便于在计算机上使用, 通常取: $M = 2^s$, 其中 s 为计算机中二进制数的最大可能有效位数.

$$x_i = \text{奇数} \quad (6)$$

$$a = 5^{2k+1} \quad (7)$$

其中 k 为使 5^{2k+1} 在计算机上所能容纳的最大整数,即 a 为计算机上所能容纳的 5 的最大奇次幂.一般地, $s = 32$ 时, $a = 5^{13}$; $s = 48$, $a = 5^{15}$ 等.伪随机数序列的最大容量 $\lambda(M) = 2^{s-2}$. 从而得到探测效率模拟值列于表 1.

2.3 计算数据分析

2.3.1 几何因子值与蒙卡模拟值的比较

将探测效率的几何因子计算值与蒙卡模拟计算值进行对比来说明 α 谱仪探测效率理论计算值的可信度. 因为几何因子法的探测效率是根据线性内插得到的,所以误差会比蒙卡模拟法的探

测效率的误差大,蒙卡模拟得到的探测效率更准确一些,从而将蒙特卡罗模拟值作为参考值,以式 (8)为相对偏差的计算公式,计算探测效率的几何因子计算值对蒙卡模拟值的相对偏差如表 2 所见.

$$\sigma = \left| \frac{\eta_{\text{几何}} - \eta_{\text{MC}}}{\eta_{\text{MC}}} \right| \%$$

(8)

从表 2 可以看出在 5.5% 的误差范围内,可认为几何因子法计算值与蒙特卡罗模拟值是一致的.

表 1 几何因子法与 MC 模拟法探测效率
Table 1 Geometrical factor and MC simulation detection efficiency

源与探测器的间距 H/mm	探测器的面积 450 mm^2		探测器的面积 900 mm^2	
	几何因子法	蒙卡模拟法	几何因子法	蒙卡模拟法
7	0.207 2	0.206 0	0.289 2	0.285 7
11	0.136 7	0.136 4	0.209 2	0.209 3
15	0.094 9	0.092 0	0.154 9	0.153 4
19	0.068 7	0.091 0	0.117 4	0.113 2
35	0.025 6	0.026 0	0.047 9	0.045 6
39	0.021 1	0.021 0	0.039 9	0.037 9

表 2 几何因子法的 探测效率对蒙卡模拟法的探测效率的相对偏差
Table 2 Relative deviation of Geometrical factor to MC simulation detection efficiency

源与探测器距离 H/mm	7	11	15	19	35	39
450 mm^2 探测器的 σ	0.58%	0.22%	4.29%	0.73%	1.54%	0.48%
900 mm^2 探测器的 σ	1.22%	0.05%	0.98%	3.71%	5.04%	5.28%

2.3.2 理论探测效率的数据拟合

为了方便探测效率的计算,分别对 450 mm^2 、 900 mm^2 的探测器,Φ20 mm 的源的理论计算值进行函数拟合,拟合方法采用非线性最小二乘法,使用 Matlab 软件 cftool 工具箱. η_1 、 η_2 分别为 450 mm^2 探测器几何因子法和 MC 模拟法的理论探测效率与距离 H 的关系, η_3 、 η_4 分别为 900 mm^2 探测器几何因子法和 MC 模拟法的理论探测效率与距离 H 的关系,拟合结果如下:

$$\eta_1 = -1.777\text{e}-008 * H^5 + 2.522\text{e}-006 * H^4 - 0.0001417 * H^3 + 0.004054 * H^2 - 0.06318 * H + 0.494$$

(9)

$$\eta_2 = -1.682\text{e}-008 * H^5 + 2.378\text{e}-006 * H^4 - 0.0001338 * H^3 + 0.003871 * H^2 - 0.06146 * H + 0.4877$$

(10)

$$\eta_3 = 4.523 * e-010 * H^5 + 1.306\text{e}-007 * H^4 - 2.385\text{e}-005 * H^3 + 0.001417 * H^2 - 0.03973 * H + 0.5057$$

(11)

$$\eta_4 = -8.501\text{e}-010 * H^5 + 2.807\text{e}-007 * H^4 - 2.97\text{e}-005 * H^3 + 0.0015 * H^2 - 0.03987 * H + 0.5005$$

(12)

以上四个拟合函数的相关系数皆大于 0.999,接近于 1,可见曲线拟合的很好. 如此,源与探测器的距离在 (0,44) 区间内的探测效率可以直接代入函数使用 matlab 计算(距离的单位是 mm).

3 谱仪探测效率的实验测量

分别使用 $2\pi^{241}\text{Am}$ 标准面源与氦子体标准源测量谱仪探测效率. $2\pi^{241}\text{Am}$ 标准面源活度为

221 /s,有效直径是 20 mm. 氦子体源的制作方法是
将一取样滤膜放入密封的、内有高射气系数²²⁶Ra
源的容器内,容器内的²²⁶Ra 会衰变产生氦,氦衰变
又会产生氦子体. 氦及其子体会不断按衰变规律增
长,氦子体均匀地沉积在容器壁及滤膜上. 氦子体
标准源产生的氦子体滤膜源的活度是可以通过理
论计算的,只需测量滤膜源取出后一段时间内的计
数就可以获得该谱仪的实测探测效率. 根据此氦子
体标准源说明书,探测效率计算公式为式(13).

$$E = \frac{C_{(t_2,t_3)} \times 100\%}{Q_0 \times R_{(t_1)} \times M_{(t_2,t_3)} \times A} \quad (13)$$

式中, E 为探测效率. $C(t_2, t_3)$ 为在 t_2, t_3 时间内测
量的计数. Q_0 为 RN - 190 给出的滤膜源平均活
度,单位 dpm/cm². A 为滤膜源的面积,此处为
3. 14 cm². $R(t_1)$ 为平衡因子, $R_{(t_1)} = 1 - e^{0.000283(t_0-t_1)}$,
 t_0, t_1 分别为滤膜放入 RN - 190 氦子体标准源的开
始和结束时间. M 为 t_2, t_3 时间段内的累积因子,
数值如表 3. 由于氦子体滤膜源存在很严重的反
冲,所以在铜片源上覆盖一层 1. 5 μm 的薄膜.

将²⁴¹Am 标准面源与氦子体源放于托盘上,
然后分别放进 α 谱仪工作站真空度小于1 000 mT
的真空室进行测量. 托盘放在第二、三、四、五、九、
十格处. ²⁴¹Am 标准面源每次的测量时间为 600 s;
氦子体源的测量时间为表 3 中的三个时间段,探
测效率为这三个时间段测得的探测效率的平均
值. 所得数据见表 4. $\eta_{\text{exp1}}, \sigma_{\text{exp1}}$ 为²⁴¹Am 标准面源

实测探测效率及相对标准偏差, $\eta_{\text{exp2}}, \sigma_{\text{exp2}}$ 为氦
子体标准源实测探测效率及相对标准偏差.

由于实验中所用的²⁴¹Am 源会发生衰变和表
面存在一定的磨损,使得测得的实验数据有波动;
除此之外,谱仪的能量分辨率、真空度^[4]、测量的
计数统计涨落、本底的波动、死时间、自吸收等也
都会对实验计数产生影响.

4 计算值与实验值的比较分析

4. 1 理论值与实验值的比较

探测效率的实测值与几何因子的计算值的比
较见表 5. η_{MC} 为蒙卡模拟理论计算值.

使用两种源测得的探测效率应该与理论值基
本一致^[5],但由表 5 可以看出²⁴¹Am 标准面源实
测探测效率与理论计算值相差很大,超出相对标
准偏差 σ_{exp} 差很多,氦子体标准源测得的探测效
率与理论值有比较好的一致性.

表 3 积因子 M
Table 3 Integral factor M

间隔($t_2 - t_3$)	计数时间/min	总 α
2 - 7	5	6. 882
8 - 23	15	14. 889
25 - 39	15	12. 040

表 4 是 φ20 mm α 标准源实验测量探测器效率 η_{exp}
Table 4 Theoretical detection efficiency η_{exp}

源与探测器的间距 H/mm	探测器的面积 450 mm ²				探测器的面积 900 mm ²			
	η_{exp1}	σ_{exp1}	η_{exp2}	σ_{exp2}	η_{exp1}	σ_{exp1}	η_{exp2}	σ_{exp2}
7	0. 213 9	1. 04%	0. 196 3	2. 87%	0. 321 2	1. 04%	0. 280 5	2. 42%
11	0. 141 8	1. 27%	0. 130 5	2. 79%	0. 234 6	1. 14%	0. 206 5	2. 51%
15	0. 100 6	1. 14%	0. 087 0	2. 70%	0. 174 0	1. 08%	0. 150 8	2. 45%
19	0. 073 1	1. 27%	0. 065 4	2. 75%	0. 132 4	1. 20%	0. 110 9	2. 60%
35	0. 028 0	1. 66%	0. 024 9	2. 86%	0. 055 2	1. 14%	0. 044 9	2. 47%
39	0. 023 4	1. 66%	0. 020 2	2. 89%	0. 045 8	1. 42%	0. 037 2	2. 65%

4. 2 分析²⁴¹Am 标准面源实测探测效率与理论 计算结果差异的原因

产生此现象的原因可能是²⁴¹Am 标准面源的
活度的不均匀性与不准确以、源与探测器的距离
不准确.

4. 2. 1 ²⁴¹Am 标准面源的活度均匀性的检验

几何因子计算探测效率与蒙卡模拟探测效率
都要求探测器与源的中心是同轴的,而且要求源
上各点的活度是均匀的,但是实际上源的活度的
均匀性是很不容易做到的,源的活度的均匀性的

检验结果如表 6,将一定直径的内环覆盖在源上,使用面积为 450 mm² 的探测器第三格 ($H = 10.9\text{ mm}$)测量圆环内的源,根据理论值与实测值的对比可知源的活度分布不均匀,中间少,越向两边越密集.但是这个现象只会导致理论值更小,使得实验值与理论值的比值更大,所以肯定还有其它因素对结果有影响.

4.2.2 ²⁴¹Am 标准面源的活度准确性的验证

使用氦子体标准源测得的探测效率与用 ²⁴¹Am标准面源测得的探测效率相差很大,而与理论探测效率符合的很好,得出此²⁴¹Am 标准面源的活度应该不太准确.

4.2.3 源与探测器的间距的准确性

腔室内的滑槽由于长时间的使用,可能导致磨损以及源与托盘之间可能存在间隙,以及探测器探头中的凹槽的尺寸无法测量,只能估算,这些都会造成几何尺寸的误差.以式(14)计算源与探测器之间的距离移动 0.5 mm 所造成的的探测效率实验值与理论计算值的比值的偏差,计算结果列于表 7. $\sigma_{0.5}$ 为所求的偏差, $(\eta_{\text{exp}}/\eta_{\text{th}})_1$ 为移动前的比值, $(\eta_{\text{exp}}/\eta_{\text{th}})_2$ 为移动后的比值.

$$\sigma_{0.4} = \left| \left(\frac{\eta_{\text{exp}}}{\eta_{\text{th}}} \right)_1 - \left(\frac{\eta_{\text{exp}}}{\eta_{\text{th}}} \right)_2 \right| \tag{14}$$

表 5 实测探测效率与理论探测效率的比较
Table 5 Theoretical and experimental detection efficiency

源与探测器 的间距 H/mm	实测值与理论计算值的比值 $\eta_{\text{exp}}/\eta_{\text{MC}}$			
	探测器面积 450 mm ²		探测器面积 900 mm ²	
	²⁴¹ Am 源	氦子体源	²⁴¹ Am 源	氦子体源
7	1.038 3	0.952 9	1.124 3	0.981 8
11	1.039 6	0.956 7	1.120 9	0.986 6
15	1.105 5	0.956 0	1.134 3	0.983 1
19	1.071 8	0.958 9	1.169 6	0.979 7
35	1.076 9	0.957 8	1.210 5	0.984 6
39	1.114 3	0.961 9	1.208 4	0.981 5

表 6 源的活度均匀性的检验
Table 6 Test of activity uniformity of source

圆环的内直径/mm	计数	理论探测效率	实测探测效率	$\eta_{\text{exp}}/\eta_{\text{th}}$
12	6 640	0.154 2	0.069 6	0.451 4
14	11 126	0.150 5	0.085 6	0.568 8
16	19 662	0.145 9	0.115 9	0.794 4
18	25 408	0.141 4	0.118 3	0.836 6
20	37 615	0.137 2	0.142 5	1.038 6

表 7 距离移动 0.5 mm 造成的的实验值与理论值的比值的偏差
Table 7 Deviation of the ratio of experimental and theoretical values caused by the distance change about 0.5mm

源与探测器的间距 H/mm	探测器的面积 450 mm ²		探测器的面积 900 mm ²	
	$\eta_{\text{exp}}/\eta_{\text{th}}$	$\sigma_{0.5}$	$\eta_{\text{exp}}/\eta_{\text{th}}$	$\sigma_{0.5}$
6.5	0.978 5	4.52%	1.069 1	3.33%
10.5	0.990 8	3.95%	1.081 8	3.18%
14.5	1.018 6	3.51%	1.086 7	2.94%
18.5	1.028 3	3.08%	1.094 4	2.70%
34.5	1.071 7	1.98%	1.130 4	1.88%
38.5	1.088 8	1.85%	1.127 9	1.76%

由表 7 可得出距离移动 0.5 mm 所造成的偏差挺大,托板向上移动 0.5 mm 后结果会变好些,得出尺寸定位的不准确是导致 ^{241}Am 标准面源实测值与理论值的差异很大的原因之一.

此外因为探测器的窗对 α 粒子的吸收、以及阈值的影响,也使得探测效率的测量值与理论计算值存在一定的偏差.

5 结 论

本文采用几何因子查表法与蒙特卡罗模拟法对 α 谱仪的探测效率进行了理论计算,计算结果证明两种方法所得的探测效率在 5.5% 误差范围内是一致的,得出理论计算值是合理的,通过 Matlab 软件拟合得出探测效率同源与探测器距离之间的函数关系. 分别采用 ^{241}Am 标准面源与氦子体标准源测量探测器的探测效率,并与理论值进行了对比,得出 ^{241}Am 标准面源测得的探测效率与理论值相差很大,氦子体标准源测得的探测效率与理论值基本一致. 对 ^{241}Am 标准面源进行了活度均匀性及准确性、源与探测器间距准确性检验和理论分析后,得出造成此现象主要原因是

^{241}Am 标准面源的活度不均匀、活度的大小不准确以及尺寸的定位不准确. 以上研究结果表明使用 ^{241}Am 标准面源测量探测器的探测效率时须考虑源的活度均匀性及活度大小的准确性,标准面源的活度不均匀及活度大小不准确会给实验带来很大的偏差;测量 α 放射性核素的活度时,该谱仪的探测效率可以使用理论计算的探测效率值.

参考文献:

- [1] 张智慧. 空气中氡及其子体的测量方法[M]. 北京:原子能出版社,1994
- [2] Sood A, Gardner R P. A new Monte Carlo assisted approach to detector response function[J]. Nuclear Instrument Methods B, 2004, 213: 100-104
- [3] Siiskonen T, Pöllänen R. Simulation of alpha particle spectra from aerosol samples[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, 60: 947-953.
- [4] 黄连美, 庾先国, 成毅, 等. 便携式 α 谱仪中真空度影响特征试验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(11): 1512-1524.
- [5] 康玺, 肖德涛. 子体 α 能谱法测量仪器探测效率的测定. 核技术, 2005, 28(9): 700-703