文章编号:1673-0062(2012)01-0019-05

²²² Rn/²²⁰ Rn 绝对测量小闪烁室的 ZnS(Ag)涂层厚度确定

贺三军,赵修良*,刘丽艳,曹光辉,练德幸

(南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要: ZnS(Ag)涂层厚度会影响²²² Rn/²²⁰ Rn 绝对测量小闪烁室的探测效率.用
²⁴¹Amα电镀参考源对厚度为 10 mg/cm² 的 ZnS(Ag)涂层 α 探测效率进行了实验验证.分别采用解析方法与 MCNP 模拟方法计算了相对立体角修正因子,讨论了空气层对α粒子的吸收修正,分析了不确定度来源.实验结果表明,10 mg/cm² ZnS(Ag)涂层对α粒子的探测效率在 102.4% ~103.1% 之间,不确定度小于 5.44%.在实验不确定度范围内,可认为其对α粒子的探测效率为 100%.实验证明了²²² Rn/²²⁰ Rn 绝对测量小闪烁室内采用 10 mg/cm² 厚的 ZnS(Ag)涂层是可行的.
关键词:ZnS(Ag);涂层厚度;小闪烁室;²²² Rn/²²⁰ Rn;绝对测量
中图分类号:TL812 文献标识码:B

ZnS(Ag) Coating Layer Thickness Verification of One Small Scintillation Cell for ²²²Rn/²²⁰Rn Absolute Measurement

HE San-jun, ZHAO Xiu-liang^{*}, LIU Li-yan, CAO Guang-hui, LIAN De-xing

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

Abstract: The detection efficiency of one small scintillation cell for 222 Rn/ 220 Rn absolute measurement can be affected by ZnS (Ag) coating layer thickness on the inner wall of the small scintillation cell. The α detection efficiency of 10 mg/cm² thickness ZnS (Ag) coating layer has been tested and verified using a plating reference source (241 Am). The solid angle correction factor is calculated by analysis and MCNP simulation methods. The absorption correction of air layer on α particle has been discussed. The source of uncertainty has been analysed. The results indicate the α detection efficiency of 10 mg/cm² thickness ZnS (Ag) coating layer is between 102. 4% ~ 103. 1% while the uncertainty is less than 5. 44%. In the uncertain range α detection efficiency of it is considered as 100%. 10 mg/cm² thickness ZnS (Ag) coating layer can be used to apply on the inner wall of the small scintillation cell for

基金项目:2009 年湖南省教育厅研究生科研创新基金资助项目(2009CXJJ4)

收稿日期:2012-02-08

作者简介:贺三军(1985-),男,湖南衡南人,南华大学核科学技术学院硕士研究生.主要研究方向:核技术及应用. * 通讯作者.

 $^{222}\mathrm{Rn/}^{220}\mathrm{Rn}$ absolute measurement.

key words:ZnS(Ag); coating layer thickness; small scintillation cell;²²² Rn/²²⁰ Rn; abso-

lute measurement

氡(主要包括²²²Rn、²²⁰Rn)是地球上无处不在 的放射性气体,氡子体是放射性气溶胶,吸入人体 产生的内辐照可诱发肺癌.对氡的准确测量是研 究氡问题的前提.由于²²²Rn的研究起步早,它的 准确测量比较成熟.对于²²⁰Rn,由于缺乏标准 ²²⁰Rn源,难以建立标准测量装置^[1].因此非常有 必要研究²²²Rn/²²⁰Rn的绝对测量方法及装置,建 立²²²Rn/²²⁰Rn的计量标准装置和量值传递系统.

闪烁室被广泛用于²²²Rn/²²⁰Rn 等α放射性气 体的测量^[2]. 周剑良等人对传统的闪烁室形状和 体积进行了改进,提出了一种用于²²² Rn/²²⁰ Rn 绝 对测量的小闪烁室模型[3],并从理论上预言这种 小闪烁室对²²²Rn/²²⁰Rn 及其子体的探测效率可达 100%.这个模型的提出基于一个已知结论:ZnS (Ag) 对 α 粒子探测效率为 100%^[4-5]. 但是 ZnS (Ag)由于自身透光性差,探测效率受涂层厚度的 影响.涂层太薄,α粒子不能把剩余能量全部沉积 在 ZnS(Ag)中,使 α 粒子利用率降低;涂层太厚, α粒子打出的光子会被 ZnS(Ag)吸收,不能进入 光电倍增管,这两种情况都会降低 α 探测效率. 根据相关文献,ZnS(Ag)涂层厚度一般不能超过 25 mg/cm²,5~20 mg/cm²的ZnS(Ag)闪烁体对α 粒子探测效率可达 100% [6]. 我们在制作小闪烁 室的过程中,拟采用 10 mg/cm² 的 ZnS(Ag)涂层 厚度,为保证 ZnS(Ag) 对²²² Rn、²²⁰ Rn 及其子体探 测效率为100%,采用了与222 Rnα粒子能量相近 的²⁴¹Ama 参考源对 10 mg/cm² 的 ZnS(Ag)涂层 探测效率进行了实验验证.

1 验证实验方案

1.1 实验原理

根据定义探测效率可分为源效率和本征效率^[4],本文讨论的是本征效率,探测器的本征效率 $\varepsilon_{4\pi}$ 的定义为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{\tiny \text{\tiny \text{\tiny \text{\tiny }}}} = \frac{N_i}{I_i}} \tag{1}$$

式(1)中,N_i为单位时间内探测器记录的脉冲记数,I_i为单位时间内源发射的并入射到探测器灵敏空间内的粒子数.由于源发射的粒子只有在探测器对源所张的立体角内才能到达探测器的灵敏空间,源本身存在自吸收和源与探测器之间

介质存在对粒子的吸收,因此式(1)可展开为^[7]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ক}\boldsymbol{\mathrm{d}}\boldsymbol{\mathrm{t}}} = \frac{N_{\text{i}}}{A \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{L}\boldsymbol{\mathrm{f}}\boldsymbol{\mathrm{f}}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{B}\boldsymbol{\mathrm{g}}\boldsymbol{\mathrm{b}}\boldsymbol{\mathrm{t}}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{B}\boldsymbol{\mathrm{g}}\boldsymbol{\mathrm{b}}\boldsymbol{\mathrm{t}}}} \qquad (2)$$

式(2)中,A 为源活度(或发射率), $\varepsilon_{\Pi \eta}$ 为相 对立体角修正因子, $\varepsilon_{\parallel g \psi}$ 为源的自吸收修正因子 (如式(2)中A为发射率, $\varepsilon_{\parallel g \psi}$ =1.), $\varepsilon_{g \psi}$ 为吸收 修正因子.一般情况, $\varepsilon_{\Pi \eta}$, $\varepsilon_{\parallel g \psi}$, $\varepsilon_{g \psi}$ 计算都比较 复杂,不确定因素比较多.

实验中使用的源为²⁴¹ Am α 电镀参考源,其表面发源率 A 已知,因此不用考虑源对 α 粒子的自吸收,即 $\varepsilon_{\text{lgwb}}$ = 1.

²⁴¹Amα 粒子能量约为5.44 MeV,在空气中的 射程约为4 cm^[4].α粒子在源与探测器之间空气 层穿行的最远路程可由下式计算:

$$l = \sqrt{h_i^2 + (R + R_1)^2}$$
(3)

式(3)中,l为 α 粒子在源与探测器之间穿行的最远路程, h_i 为源与探测器的距离,R为源半径, R_1 为探测器半径.

保证 α 粒子在源与探测器之间穿行的最远路 程 l 小于它在空气中的射程(约为4 cm),可避免 空气对 α 粒子的吸收,即 ε_{ggg} 为1.考虑 ε_{igggg} 也 为1,式(2)简化为式(4):

$$\varepsilon_{\pm \tilde{l} \tilde{l}} = \frac{N_i}{A \cdot \varepsilon_{\mathcal{I}} \eta} \tag{4}$$

式(4)中A为源的发射率. ε_{wk} 是否为1可以通 过测量源距探测器不同距离的探测效率来检验. 因为 只要存在空气对 α 粒子的吸收,那么在源距探测器不 同的距离处,空气对 α 粒子的吸收就不相同,由式(4) 计算得出的 $\varepsilon_{*\pi}$ 自然也不一致,源距探测器距离越远, 空气对 α 粒子的吸收越严重, $\varepsilon_{*\pi}$ 也就越小. 如果由式 (4)得出的 $\varepsilon_{*\pi}$ 一致,就可以证明 ε_{wk} 为1.

1.2 实验装置

图 1 为验证实验装置方框图. 该装置由自制 探头、FD-125 氡钍分析仪(NO.013)、FH463B 智 能定标器(NO.113)组成.



自制探头装置结构图如图 2 所示. 自制探头 由²⁴¹Ama 参考源、准直器、涂层厚度为 10 mg/cm² 的有机玻璃 ZnS(Ag)屏、圆孔有机玻璃圆板、铝转 接法兰、避光胶带组成. 其中,²⁴¹Ama 参考源为二 级参考源 A402001,其表面发射率为 $\frac{2.21 \times 10^2}{2\pi * S}$, 不确定度小于 5%,活性区半径 $R = 10.0 \pm 0.1 \text{ mm}$;准直器半径 $R_1 = 13.0 \pm 0.1 \text{ mm}$;改变圆 孔有机玻璃圆板的厚度,源距 ZnS(Ag)屏距离可 分别为 $h_1 = 2.5 \pm 0.1 \text{ mm}, h_2 = 7.0 \pm 0.1 \text{ mm}, h_3 = 9.0 \pm 0.1 \text{ mm}, h_4 = 11.0 \pm 0.1 \text{ mm}.$



a—铝转接法兰; b—涂层厚度为10 mg/cm 的ZnS (Ag)屏; c—准直器 d— ²⁴¹Amα源; e—圆孔有机玻璃圆板; f—避光胶带

图 2 自制探头装置结构图

Fig. 2 The home-made probe

2 相对立体角修正因子($\varepsilon_{\Pi \eta}$)的计算

相对立体角修正因子 $\varepsilon_{\Pi n}$ 表示进入探测器对 源所张的立体角内的 α 粒子占源发射的 α 粒子 份额.实验中使用的²⁴¹ Ama 参考源给出了源向 2π 空间的发射率, $\varepsilon_{\Pi n}$ 定义为:

$$\varepsilon_{\text{LF}} = \frac{\Omega}{2\pi}$$
 (5)

式(5)中, Ω为探测器对源所张的立体角.

本文分别采用解析方法与 MCNP 模拟方法计 算了 *ε*_{л何}.

2.1 解析方法

²⁴¹Ama 参考源是均匀面源,它与准直器平行 同轴放置. 探测器对源所张的立体角 Ω 就是圆盘面 对同轴面源所张的平均立体角 $\overline{\Omega}$.这个平均立体角 $\overline{\Omega}$ 可以用解析方法计算出来,其计算公式如下:

$$\overline{\Omega} = \frac{\int_{0}^{R_{1}} \int_{0}^{R} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{h_{i}rr_{1} dr dr_{1} d\theta d\theta_{1}}{(r^{2} + 2rr_{1}\cos\theta + r_{1}^{2} + h_{i}^{2})^{\frac{3}{2}}}}{\int_{0}^{R} 2\pi r dr}$$

(6)

式(6)中, $\overline{\Omega}$ 为探测器对源所张的平均立体 角,R为源的半径, R_1 为探测器的半径, h_i 为源距 探测器的距离. 采用解析方法计算的 *ε*_{几何}相对误差可由式 (7)估算^[8].

$$\sigma_{\varepsilon_{\mathcal{I}}[i]} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon_{\mathcal{I}}[i]}{\partial R}\right)^2 \cdot d_R^2} + \left(\frac{\partial \varepsilon_{\mathcal{I}}[i]}{\partial R_1}\right)^2 \cdot d_{R_1}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_{\mathcal{I}}[i]}{\partial h}\right)^2 \cdot d_{h_i}^2$$
(7)

2.2 MCNP 模拟

由于源活性区相对于源表面有 0.5 mm 距 离.对于活性区半径比探测器准直器半径小的源, 源活性区边缘发射的 α 粒子会被源的这层 0.5 mm厚包壳阻挡而不能到达探测器,这种影响 会导致相对立体角修正因子变小.在源距探测器 较近时,此影响会更明显(如图 3 所示).



图 3 源与探测器几何结构图

Fig. 3 Geometry structure of the source and detector

考虑到源包壳对 α 粒子的阻挡作用,用解析 方法计算这个立体角就很困难.本文用蒙特卡罗 程序 MCNP4c 对 ε_{π何}进行了模拟. MCNP4c 虽不 能模拟 α 粒子,但立体角只跟源与探测器的形状 和相对位置有关,与粒子种类无关,所以可用中子 或者光子作为源粒子模拟立体角修正因子.

2.3 两种方法计算的 ε_{nm} 值

采用两种方法计算的 ε_{Π_0} 值如图 4 所示.





由图 4 可以看出,这两种方法计算的相对立体角修正因子基本上一致. MCNP 模拟所得相对立体角修正因子在短距离时比积分方法计算的偏

小,这是因为 MCNP 模拟方法考虑了源包壳对活 性区边缘发射 α 粒子的阻挡影响,所以更为准确.

3 实验结果与讨论

3.1 探测效率

按图 1、图 2、组出实验装置.调节仪器至合适的工作状态:FD-125 氡 钍分析仪工作电压-520 V,阀值 0.6圈.在此工作状态下,测量源距探测器不同距离时的计数率,由(4)式计算得10 mg/cm²的 ZnS(Ag)涂层探测效率如表 1 如示.

3.2 不确定度分析

实验中不确定度主要来源是²⁴¹ Amα 参考源 的不确定度,其次是相对立体角修正因子和统计 误差.相对立体角修正因子有较大的不确定度是 因为实验装置中源、准直器、圆孔有机玻璃圆板等 尺寸的测量存在较大的不确定度.表 2 中列出了 装置的主要不确定度及来源.

3.3 实验结果讨论

表1中,10 mg/cm²的ZnS(Ag)涂层²⁴¹Ama 粒子探测效率在102.4%~103.1%之间,均略大 于100%.这主要是因为实验中源、相对立体角修 正因子、统计误差有较大的不确定度.其次是实验 中源的铝包壳与准直器壁对 α 粒子存在壁散射, 使进入探测器的 α 粒子数增多,从而使探测效率 增大,其影响所图5所示.由于实验条件有限,没 有考虑壁散射对探测效率的影响.此外,表1中, 源距探测器四个不同距离处的探测效率在误差范 围内是一致的,这证明了本实验中不考虑空气对 α 粒子的吸收修正(即 $\varepsilon_{\text{吸收}}$ 为1)是可行的.

表1 1	10	mg/ cn	n ² 的] ZnS	(Ag))涂层	探测效率	$\overline{\varepsilon} \varepsilon_{\mathrm{A}\mathrm{ff}}$
------	----	--------	------------------	-------	-------	-----	------	---

	$h_1 = 2.5 \text{ mm}$	$h_2 = 7.0 \text{ mm}$	$h_3 = 9.0 \text{ mm}$	$h_4 = 11.0 \text{ mm}$
$oldsymbol{arepsilon}_{tation}$	102.4	103.1%	102.5%	103.1%
合成不确定度	< 5.35%	<5.44%	< 5.32%	< 5.38%

表 2 装置的主要不确定度	及来源
---------------	-----

Table 2 The main uncertainty and the source of uncertainty

	距离					
来源	$h_1 = 2.5 \text{ mm}$	$h_2 = 7.0 \text{ mm}$	$h_3 = 9.0 \text{ mm}$	$h_4 = 11.0 \text{ mm}$		
	大小					
统计误差	1.29%	1.46%	1.31%	1.25%		
立体角修正	1.41%	1.56%	1.27%	1.54%		
源不确定度	<5%	<5%	<5%	< 5%		
合成不确定度	< 5.35%	< 5.44	< 5.32	< 5.38		



- 图 5 源的铝包壳与准直器壁对 α 粒子散射示意图
- Fig. 5 Schematic diagram of α particles scattering on the source cladding and collimator wall
- 4 结 论

实验结果表明,本实验条件下,可认为 10 mg/cm²的ZnS(Ag)涂层对²⁴¹Ama粒子探测效 率为100%.由于²⁴¹Ama粒子与²²²Rna粒子能量 相近(²⁴¹Ama粒子能量5.44 MeV,²²²Rna粒子能 量5.49 MeV^[4],²²²Rna粒子能量是所有²²²Rn、 ²²⁰Rn及其子体 a 粒子中最小的.),且ZnS(Ag)对 a 粒子能量响应不敏感,所以可确定ZnS(Ag)涂 层厚度为10 mg/cm²时,其对²²²Rn、²²⁰Rn及其子体 探测效率可达100%.实验证明了²²²Rn/²²⁰Rn绝 对测量小闪烁室内采用10 mg/cm² ZnS(Ag)涂层 是可行的.

参考文献:

- [1] 李海亮,周剑良,邱小平,等.绝对测量²²⁰Rn的小闪烁 室的研制[J].核电子学与探测技术,2005,25(3): 305-308.
- [2] 张智慧. 空气氡及其子体的测量方法[M]. 北京:原子 能出版社,1993.
- [3] 周剑良,邱小平,于涛等.小闪烁室法绝对测钍研究
 [G]//环境 Rn/Tn 的测量与评价国际学术研讨会论 文汇编. 衡阳,2002,5:143-148.
- [4] 凌球,郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京:原子能出版 社,2002.
- [5] 复旦大学,清华大学,北京大学.原子核物理实验方法 [M].北京:原子能出版社,1985.
- [6] 汲长松. 辐射探测器及其应用技术手册[J]. 北京:原 子能出版社,1990.
- [7] Nuclear Regulatory Commission. r-ray detectors, passive Nondestructive Assay of nuclear materials: technical report of Los Alamos National Lab[R]. Washington D C: NRC, 1991.
- [8] 吴学超,冯正永.核物理实验数据处理[M].北京:原 子能出版社.1988.