

^{225}Ac 使用过程中的辐射防护

罗宇 李欢 荣茂凯 丁愿

(成都纽瑞特医疗科技股份有限公司 成都 610200)

摘要 测量和计算了 ^{225}Ac 及其子体平衡体系的剂量当量率, 计算了相同活度的 ^{131}I 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的剂量当量率。根据测量数据推导了 ^{225}Ac 及其子体平衡体系的铅十值层、半值层厚度。结果表明: 85.5 MBq的 ^{225}Ac 源在未屏蔽情况下, 距其0.5 m处剂量当量率是标准规定的人员操作位的剂量当量率限值2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 的4.56倍。距 ^{225}Ac 源0.5 m处的剂量当量率的实测值与理论值符合性比0.15 m处的更好, 特别是0 mm、5 mm、10 mm、15 mm和20 mm铅屏蔽情况下; 相同活度的 ^{131}I 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 实测的 ^{225}Ac 及其子体平衡体系的剂量率约为 ^{131}I 理论值的一半, 约为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的1.5倍; 核医学 ^{225}Ac 实践活动中, 应重视外照射防护, 辐射屏蔽计算时可将20 mm、5 mm分别作为放射性平衡条件下的 ^{225}Ac 及其子体的铅十值层和半值层厚度。

关键词 ^{225}Ac , 铅材料, 辐射防护, 铅十值层, 核医学

中图分类号 TL77

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0067

引用该文:

罗宇, 李欢, 荣茂凯, 等. ^{225}Ac 使用过程中的辐射防护[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0067.

LUO Yu, LI Huan, RONG Maokai, *et al.* Radiation protection during use of ^{225}Ac [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0067.



Radiation protection during use of ^{225}Ac

LUO Yu LI Huan RONG Maokai DING Yuan

(Chengdu New Radiomedicine Technology Co., Ltd., Chengdu 610200, China)

ABSTRACT The dose equivalent rate of ^{225}Ac and its daughter equilibrium system were measured and calculated. In addition, the dose equivalent rates of ^{131}I and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ with the same activity were also calculated. The tenth- and half-value thicknesses of lead for ^{225}Ac were derived based on measurement data. The results show that dose equivalent rate at 0.5 m, for unshielded 85.5 MBq ^{225}Ac , is 4.56 times higher than dose equivalent rate maximum limit 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ of personnel operation positions form standard. The measured and theoretical values of dose equivalent rate at 0.5 m are more consistent than those at 0.15 m for ^{225}Ac source, especially under lead shielding conditions of 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, and 20 mm. For the same activity, measured dose equivalent rate of ^{225}Ac is about half of ^{131}I and about 1.5 times of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ theoretical value. We should pay attention to external radiation protection during the use of ^{225}Ac . It is suggested that, 20 mm can be used as the lead tenth value thickness, and 5 mm as the lead half value thickness conservatively for ^{225}Ac and its descendants.

第一作者: 罗宇, 男, 1990年7月出生, 工程师, 2016年7月于东华理工大学获得硕士学位, 从事辐射防护与安全方向

通信作者: 丁愿, 工程师, E-mail: yuan.ding@nrtmedtech.com

收稿日期: 初稿 2023-08-08; 修回 2024-01-15

First author: LUO Yu (male) was born in July 1990, engineer, and obtained his master's degree from East China University of Technology in July 2016, mainly engaged in radiation protection and safety

Corresponding author: DING Yuan, engineer, E-mail: yuan.ding@nrtmedtech.com

Received 08 August 2023; accepted 15 January 2024

KEYWORDS ^{225}Ac , Lead, Radiation protection, Lead tenth value thickness, Nuclear medicine

CLC TL77

^{225}Ac 是一种释放高能 α 射线的锕系金属元素, 半衰期为 9.92 d, 非常适合靶向 α 治疗 (Targeted alpha therapy, TAT), 在治疗脑肿瘤、神经内分泌肿瘤、黑色素瘤和前列腺癌方面取得了非常积极的成果^[1-3]。 ^{225}Ac 依次衰变为 6 种寿命极短的子体: ^{221}Fr 、 ^{217}At 、 ^{213}Bi 、 ^{209}Tl 、 ^{213}Po 和 ^{209}Pb , 最终成为稳

定核素 ^{209}Bi ^[4-6]。 ^{225}Ac 及其子体发射 α 粒子的能量在 5.8~8.4 MeV, 在人体组织中的射程为 47~85 μm 。值得注意的是, ^{225}Ac 及其子体还发射 0.6~2.0 MeV 的 β 粒子, 并且 ^{221}Fr 、 ^{213}Bi 和 ^{209}Tl 发射一定分支比的 γ 射线^[7], 详细信息如图 1 所示。

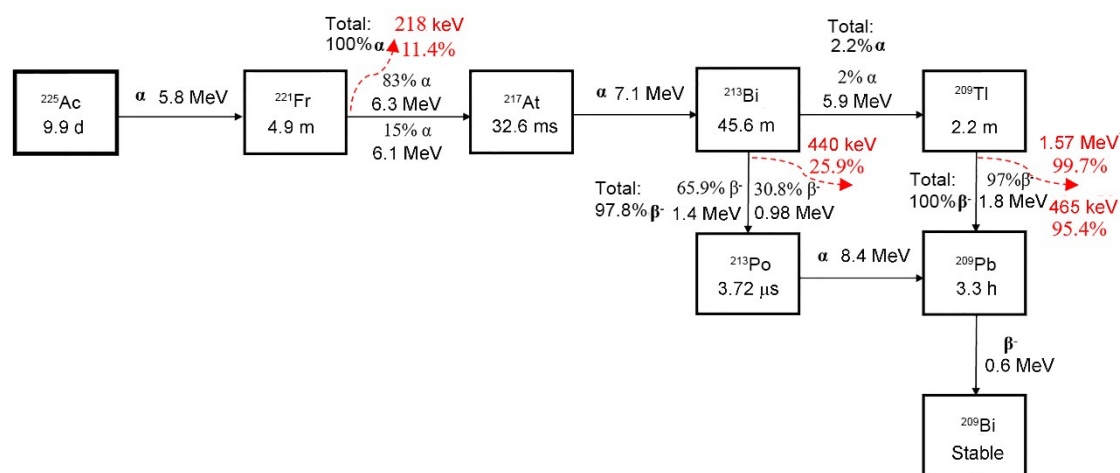


图 1 ^{225}Ac 的衰变链
Fig.1 Decay chain of ^{225}Ac

^{221}Fr 在约 30 min ($T_{1/2}=4.8$ min, 约 6 个半衰期) 后与 ^{225}Ac 形成放射性长期平衡; ^{213}Bi 在约 4.5 h 后 ($T_{1/2}=45.6$ min, 约 6 个半衰期) 后与 ^{225}Ac 形成放射性长期平衡^[2]。 ^{225}Ac 原料从生产到运输至用户手中通常大于 2 d, 使用 ^{225}Ac 原料时, ^{225}Ac 已和 ^{221}Fr 、 ^{213}Bi 形成放射性长期平衡。

^{225}Ac 核素及其子体的平衡体系发射的 α 粒子极容易被阻挡, 可不考虑; 而 β 粒子虽容易被屏蔽材料屏蔽, 但其产生的韧致辐射需要作相应的屏蔽防护。

通过理论计算和实际测量两种方式研究铅对 ^{225}Ac 及其子体的辐射屏蔽效果, 分析使用 ^{225}Ac 的外照射风险, 可为 ^{225}Ac 药物研发、生产、使用活动的辐射防护提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

测量仪器: 白俄罗斯 ATOMTEX 公司生产的

AT1123 型便携式 X- γ 剂量率仪, 能量响应范围为 15 keV~3 MeV, 测量范围为 50 nSv/h~10 Sv/h。仪器经中国计量科学研究院检定, 检定证书编号: DLj12021-17456。

实验源项: 俄罗斯生产的 85.5 MBq 硝酸锕 [^{225}Ac] (20 μg 固体), 装于 10 mL 西林瓶 (直径 22 mm), 放射性核纯度: $^{225}\text{Ra}<2\times 10^{-4}$, $^{224}\text{Ra}<2\times 10^{-5}$, 其他核素 $<7\times 10^{-6}$ (下文简称 ^{225}Ac 源)。

铅屏蔽体: 制作的一套铅罐, 铅厚度分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm、45 mm。铅罐的主要成分: 铅 $\geq 93.89\%$, 锑 $\leq 6.1\%$, 其余金属锡、铜、银、铋等的含量 $\leq 0.006\%$ 。

1.2 测量方法

首先将测量仪器开机预热 1 min, 选择连续辐射测量模式 (T), 并通过制作的工装固定在测量位置 (标尺 15 cm 或 50 cm 处), 将定位盘放至标尺零点处, 圆盘中心和标尺零点处预留准直卡位, 利用插销插入对齐 (定位盘用于标尺零点无铅灌时垫

高), 仪器探测器中心点位置与定位盘顶部处于同一水平面, 探测器朝向标尺零点, 两者间连线与标尺方向平行。点击仪器“开始测量”按钮, 待仪器显示的统计学误差 $\leq 5\%$ 后, 记录数据, 重复操作5次, 对该数据作算术平均处理后作为实验场所本底。

预先将实验铅罐摆放至标尺零点处(铅罐底部中心和标尺零点处预留卡位, 利用插销插入对齐), 再将 ^{225}Ac 源转移至实验铅罐内(铅罐内腔直径23 mm)。点击仪器“开始测量”按钮, 待仪器显示的统计学误差 $\leq 5\%$ 后, 记录数据。相同铅屏蔽厚度和距离下, 重复上述测量操作5次并记录数

据。改变铅罐厚度或距离变量, 重复测量过程, 记录不同距离、铅屏蔽厚度情况下的数据。实验装置示意图如图2所示。

测量裸源(^{225}Ac 西林瓶不存在铅罐的屏蔽)的数据时, 移除所有铅罐, 将定位盘放至标尺零点处, 再将 ^{225}Ac 源转移至定位盘上, 西林瓶中心对齐标尺零点处, 重复上述测量操作5次并记录数据, 获得铅屏蔽厚度为0 mm时, 0.15 m和0.5 m处的剂量当量率数据。

最终, 数据扣除实验场所本底, 计算出每组数据的算术平均值, 再经仪器校准因子修正后, 即得测量点位的剂量当量率。

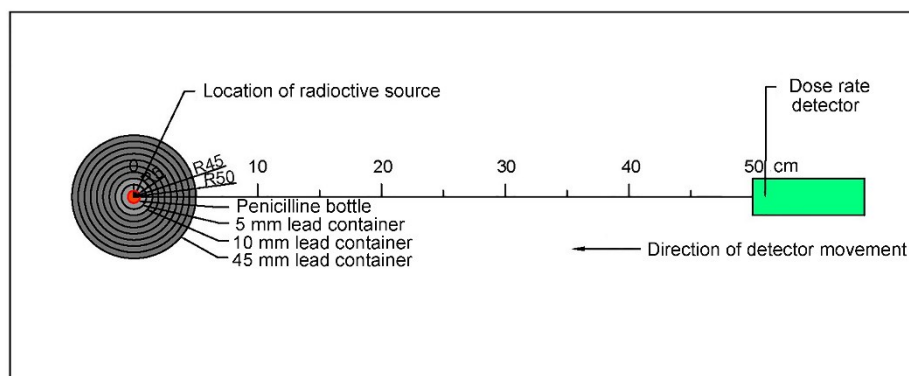


图2 实验装置示意图(俯视)
Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus (overhead view)

2 理论计算

2.1 γ 射线

20 μg 的 ^{225}Ac 装于直径22 mm西林瓶内, 可将其及其子体视为点源, γ 点源的剂量当量率和屏蔽计算公式^[8]如式(1)。

$$\dot{K}_a = \frac{A \cdot \Gamma_\delta}{r^2} \cdot \frac{1}{K} \quad (1)$$

式中: $\dot{K}_a$ 是距离活度 $A(\text{Bq})$ 的放射性核素点源 $r(\text{m})$ 处, 由能量大于 $\delta(10 \text{ keV})$ 的光子(包括 γ 光子、内轫致辐射和特征X辐射的光子)所造成的空气比释动能率, Gy/h ; Γ_δ 是空气比释动能率常数, $\text{Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{Bq} \cdot \text{s})$; K 是屏蔽材料的减弱倍数。

对于低能 γ 射线, 符合带电粒子平衡条件^[8], 则有式(2)。

$$\dot{K}_a = \dot{D}_a \quad (2)$$

式中: $\dot{D}_a$ 是距离活度 $A(\text{Bq})$ 的放射性核素点源 $r(\text{m})$ 处空气中吸收剂量率^[8], Gy/h 。

点源的剂量当量率公式为式(3)。

$$\dot{H} = \dot{D}_a Q N \quad (3)$$

式中: $\dot{H}$ 是距离活度 $A(\text{Bq})$ 的放射性核素点源 $r(\text{m})$ 处剂量当量率, Sv/h ; Q 是与该位置上的辐射品质因数, X 、 γ 、 β 射线的 Q 值取1; N 是考虑到由于照射条件的改变而引进的所有其他修正因数的乘积, 国际辐射防护委员会(ICRP)推荐 N 取1。

由(1)、(2)式代入(3)式, 得到式(4)。

$$\dot{H} = \frac{A \cdot \Gamma_\delta}{r^2} \cdot \frac{1}{K} \cdot Q \cdot N \quad (4)$$

式中符号的意义同前。

由图1可知, ^{225}Ac 及其子体衰变过程中伴随发射4条 γ 射线, 其主要参数见表1^[9]。

表1 ²²⁵Ac及其子体衰变过程中发射的 γ 射线
Table 1 Gamma rays emitted during the decay of ²²⁵Ac and its progeny

子体核素 Daughter nuclide	γ 射线能量(分支比) / keV γ -Ray energy (branching ration)	平衡态, ²²⁵ Ac与子体核素的活度比(子体核 素活度) / MBq Equilibrium state, activity ratio of ²²⁵ Ac to daughter nuclide (daughter nuclide activity)	空气比释动能率常数 $\Gamma_\delta^{①}$ / (Gy·m ² ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹) Air kerma rate constant
²²¹ Fr	218 (11.4%)	1 : 1 (85.5)	1.74×10^{-18}
²¹³ Bi	440 (25.9%)	1 : 1 (85.5)	5.44×10^{-18}
²⁰⁹ Tl	1567 (99.7%) 465 (95.4%)	1 : 2.2% (18.8)	7.52×10^{-17}

注：①《辐射安全手册》(潘自强主编)表6.1^[9]。

Note: ① *Radiation safety manual* (PAN Ziqiang) Table 6.1^[9].

γ 射线在不同铅屏蔽厚度下的减弱倍数 K 根据《辐射防护导论》(方杰主编)附表11^[8]内插法获得，将表1和表2及其他已知参数代入(4)式，算得 γ 射线的剂量当量率，结果详见表3。其计算结果见表2。

表2 γ 射线在不同铅屏蔽厚度下的减弱倍数 $K^{①}$
Table 2 Attenuation factor K of gamma rays under different lead shielding thicknesses^①

母体核素 Parent nuclide	铅屏蔽厚度 / mm Lead shielding thicknesses								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
²²¹ Fr ^②	36.7	1.61×10^3	6.83×10^4	3.15×10^6	1.15×10^8	5.06×10^9	2.15×10^{11}	9.91×10^{12}	3.64×10^{14}
²¹³ Bi	2.57	6.25	16.8	43.0	1.22×10^2	3.53×10^2	9.14×10^2	2.69×10^3	7.26×10^3
²⁰⁹ Tl ^③	1.21	1.42	1.72	2.79	4.17	6.12	9.35	15.6	23.8

注：①按照修约规则，减弱倍数 K 保留3位有效数；②对于²²¹Fr衰变发射的218 keV的 γ 射线，25 mm、30 mm、35 mm、40 mm和45 mm铅已超过《辐射防护导论》(方杰主编)附表11中最大的减弱倍数 5×10^7 对应的铅厚度23.8 mm，表中25 mm、30 mm、35 mm、40 mm和45 mm铅对应的减弱倍数分别通过 $K_{25\text{ mm}} = K_{5\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$ 、 $K_{30\text{ mm}} = K_{10\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$ 、 $K_{35\text{ mm}} = K_{15\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$ 、 $K_{40\text{ mm}} = K_{10\text{ mm}} \times K_{30\text{ mm}}$ 、 $K_{45\text{ mm}} = K_{25\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$ 计算得出；③²⁰⁹Tl衰变同时发射1.57 MeV和465 keV的 γ 射线。在计算减弱倍数 K 时，保守地将所有 γ 射线看作1.57 MeV。

Note: ① According to the rounding rule, attenuation factor K retain 3 significant digits; ② for γ -ray of 218 keV emitted from ²²¹Fr decay, the lead thickness of 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, and 45 mm has exceeded the maximum attenuation factor of 5×10^7 corresponding to the lead thickness of 23.8 mm in Appendix 11 of the *Introduction to Radiation Protection* (edited by FANG Jie); the attenuation factors corresponding to the lead thickness of 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, and 45 mm in the table are calculated using $K_{25\text{ mm}} = K_{5\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$, $K_{30\text{ mm}} = K_{10\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$, $K_{35\text{ mm}} = K_{15\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$, $K_{40\text{ mm}} = K_{10\text{ mm}} \times K_{30\text{ mm}}$, $K_{45\text{ mm}} = K_{25\text{ mm}} \times K_{20\text{ mm}}$, respectively; ③ ²⁰⁹Tl emits γ -ray of 1.57 MeV and 465 keV. Conservatively considered all γ -ray as 1.57 MeV, when calculating the attenuation factor K .

表3 距²²⁵Ac源0.15 m、0.5 m处 γ 射线的剂量当量率 $\dot{H}$
Table 3 Dose equivalent rates of gamma rays at 0.15 m and 0.5 m from the ²²⁵Ac source^①

母体核素 Parent nuclide	0.15 m处的剂量当量率 $\dot{H}$ / ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) Dose equivalent rates at 0.15 m									
	铅屏蔽厚度 / mm Lead shielding thicknesses									
	0 ^②	5	10	15	20	25	30	35	40	45
²²¹ Fr	23.8	0.65	0.01	0	0	0	0	0	0	0
²¹³ Bi	74.40	28.94	11.91	4.42	1.73	0.61	0.21	0.08	0.03	0.01
²⁰⁹ Tl	22.62	18.66	15.88	13.18	8.10	5.43	3.70	2.42	1.45	0.95
合计 Total	120.82	48.25	27.80	17.60	9.83	6.04	3.91	2.50	1.48	0.96

续表

母体核素 Parent nuclide	0.5 m处的剂量当量率 $\dot{H}$ / ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) Dose equivalent rates at 0.5 m 铅屏蔽厚度 / mm Lead shielding thicknesses									
	0 ^①	5	10	15	20	25	30	35	40	45
²²¹ Fr	2.14	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0
²¹³ Bi	6.70	2.60	1.07	0.40	0.16	0.05	0.02	0.01	0	0
²⁰⁹ Tl	2.04	1.68	1.43	1.19	0.73	0.49	0.33	0.22	0.13	0.09
合计 Total	10.88	4.34	2.50	1.59	0.89	0.54	0.35	0.23	0.13	0.09

注：①按照修约规则，剂量当量率保留小数点后2位有效数字；②铅屏蔽厚度为0的剂量当量率是减弱倍数 $K=1$ 计算得出。

Note: ① According to the rounding rule, dose equivalent rates retain 2 significant digits; ② the dose equivalent rate with a lead shielding thickness of 0 is calculated based on the attenuation factor $K=1$.

2.2 韧致辐射

韧致辐射在空气中的吸收剂量率计算公式^[8]见式(5)。

$$\dot{D}_a = \frac{4.58 \times 10^{-14} \cdot A \cdot Z \cdot E_b^2 \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)}{K \cdot r^2} \quad (5)$$

式中： $\dot{D}_a$ 是屏蔽层中由 β 粒子产生的韧致辐射在 r (m)处空气中剂量当量率，Sv/h； Z 是屏蔽材料的有效原子序数，实验中西林瓶为首层材料，故取玻璃的有效原子序数10； μ_{en}/ρ 是平均能量为 E_b ($E_b =$

$E_{\text{max}}/3$)的韧致辐射在空气中质量能量吸收系数， m^2/kg ^[8]；其他符号的意义同前。

由(5)式代入(3)式，得式(6)。

$$\dot{H} = \frac{4.58 \times 10^{-14} \cdot A \cdot Z \cdot E_b^2 \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)}{K \cdot r^2} \cdot Q \cdot N \quad (6)$$

式中符号的意义同前。

通过图1可知，²²⁵Ac及其子体衰变过程中有3个子体核素发生了 β 衰变，伴随发射的 β 射线主要参数见表4。

表4 ²²⁵Ac及其子体衰变过程中发射的 β 射线
Table 4 Beta rays emitted during the decay of ²²⁵Ac and its progeny

子体核素 Daughter nuclide	β 射线最大能量 E_{max} (分支比) / MeV β -ray maximum energy (branching ration)	平衡态， ²²⁵ Ac与子体核素的活 度比(子体核素活度) / MBq Equilibrium state, activity ratio of ²²⁵ Ac to daughter nuclide (daughter nuclide activity)	韧致辐射平均能量 E_b / keV Bremsstrahlung average energy	空气中质量能量吸收系 数 μ_{en}/ρ ^① / ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$) Mass energy absorption coefficient in air
²¹³ Bi	1.4 (65.9%)	1:1 (85.5)	467	2.960×10^{-3}
²¹³ Bi	0.98 (30.8%)	1:1 (85.5)	327	2.893×10^{-3}
²⁰⁹ Tl	1.8 (97%)	1:2.2% (18.8)	600	2.953×10^{-3}
²⁰⁹ Pb	0.6 (100%)	1:1 (85.5)	200	2.672×10^{-3}

注：①经《辐射防护导论》(方杰主编)附表1中数据内插法获得。

Note: ① Obtained from data interpolation method in Appendix 1 of *Introduction to Radiation Protection* (edited by FANG Jie).

韧致辐射在不同铅屏蔽厚度下的减弱倍数 K 根据《辐射防护导论》(方杰主编)附表11内插法可得，韧致辐射的平均能量 E_b 作为插值能量，其计算结

果见表5。

将表4和表5及其他已知参数代入(6)式，算得韧致辐射的剂量当量率，结果详见表6。

表5 轫致辐射在不同铅屏蔽厚度下的减弱倍数 $K^{\text{①}}$
Table 5 Attenuation factor K of bremsstrahlung under different lead shield thicknesses

轫致辐射平均能 量 E_b / keV	铅屏蔽厚度 / mm								
Bremsstrahlung average energy	Lead shielding thicknesses								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
467	2.29	5.12	13.0	30.1	74.9	1.89×10^2	4.76×10^2	1.24×10^3	3.33×10^3
327	4.81	25.2	1.42×10^2	7.85×10^2	4.41×10^3	2.56×10^4	1.43×10^5	8.17×10^5	4.62×10^6
600	1.68	3.25	5.32	9.63	18.3	33.6	62.6	1.24×10^2	2.38×10^2
200 ^②	23.3	6.00×10^2	1.60×10^4	4.36×10^5	1.09×10^7	2.55×10^8	6.55×10^9	1.75×10^{11}	4.75×10^{12}

注：①按照修约规则，减弱倍数 K 保留3位有效数；②对于平均能量200 keV的轫致辐射直接选用《辐射防护导论》（方杰主编）附表11中0.25 MeV的数据进行插值计算得出，30 mm、35 mm、40 mm和45 mm铅已超过《辐射防护导论》（方杰主编）附表11中最大的减弱倍数 5×10^7 对应的铅厚度27.3 mm。表中30 mm、35 mm、40 mm和45 mm铅对应的减弱倍数分别通过 $K_{30\text{ mm}} = K_{5\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$ 、 $K_{35\text{ mm}} = K_{10\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$ 、 $K_{40\text{ mm}} = K_{15\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$ 、 $K_{45\text{ mm}} = K_{20\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$ 计算得出。

Note: ①According to the rounding rule, attenuation factor K retain 3 significant digits; ②for the Bremsstrahlung radiation with an average energy of 200 keV, the data of 0.25 MeV in Appendix 11 of the *Introduction to Radiation Protection* (edited by FANG Jie) was directly selected for interpolation calculation; the lead thickness of 30 mm, 35 mm, 40 mm, and 45 mm has exceeded the maximum attenuation factor of 5×10^7 corresponding to the lead thickness of 27.3 mm in Appendix 11 of the *Introduction to Radiation Protection* (edited by FANG Jie). The attenuation factors corresponding to the lead thickness of 30 mm, 35 mm, 40 mm, and 45 mm in the table are calculated using $K_{30\text{ mm}} = K_{5\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$, $K_{35\text{ mm}} = K_{10\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$, $K_{40\text{ mm}} = K_{15\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$, $K_{45\text{ mm}} = K_{20\text{ mm}} \times K_{25\text{ mm}}$, respectively.

表6 距²²⁵Ac源0.15 m、0.5 m处轫致辐射的剂量当量率 $\dot{H}$
Table 6 The dose equivalent rate of bremsstrahlung at 0.15 m and 0.5 m from ²²⁵Ac source

轫致辐射平均能量 E_b / keV	0.15 m处的剂量当量率 $\dot{H}$ / ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) ^②									
Bremsstrahlung average energy	Dose equivalent rates at 0.15 m									
	铅屏蔽厚度 / mm Lead shielding thicknesses									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
467	0.74	0.32	0.14	0.06	0.02	0.01	0	0	0	0
327	0.17	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0
600	0.04	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
200	0.19	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
合计 Total	1.14	0.38	0.16	0.07	0.02	0.01	0	0	0	0
轫致辐射平均能量 E_b / keV	0.5 m处的剂量当量率 $\dot{H}$ / ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) ^②									
Bremsstrahlung average energy	Dose equivalent rates at 0.5 m									
	铅屏蔽厚度 / mm Lead shielding thicknesses									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
467	0.07	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
327	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计 Total	0.10	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0

注：①按照修约规则，剂量当量率保留小数点后2位有效数字；②理论计算值 <0.005 时，数据写为0。

Note: ①According to the rounding rule, dose equivalent rates retain 2 significant digits; ②Theoretical calculation value <0.005 , data is written as 0.

2.3 平衡体系的剂量当量率

将表3、6中距²²⁵Ac源0.15 m、0.5 m处的 γ 射

线和轫致辐射的剂量当量率求和，得到²²⁵Ac核素及其子体平衡体系的剂量当量率，计算结果见表7。

表7 ^{225}Ac (85.5 MBq)核素及其子体平衡体系剂量当量率
Table 7 Dose equivalent rates of ^{225}Ac (85.5 MBq) nuclides and their progenitor equilibrium systems

铅屏蔽厚度 / mm Lead shielding thicknesses	实测剂量当量率 $M / (\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$ Actual dose equivalent rate M		理论剂量当量率 $T^{\text{①}} / (\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$ Theoretical dose equivalent rate T		$\frac{T-M}{M} / \%$	
	距源 0.15 m Distance 0.15 m	距源 0.5 m Distance 0.5 m	距源 0.15 m Distance 0.15 m	距源 0.5 m Distance 0.5 m	距源 0.15 m Distance 0.15 m	距源 0.5 m Distance 0.5 m
	Distance 0.15 m	Distance 0.5 m	Distance 0.15 m	Distance 0.5 m	Distance 0.15 m	Distance 0.5 m
0 ^②	89	11.4	122	11.0	37.1	-3.7
5	33	4.4	49	4.4	48.5	0.0
10	17.7	2.39	28.0	2.51	58.2	5.0
15	11.0	1.50	17.7	1.60	60.9	6.7
20	7.3	0.94	9.8	0.89	34.2	-5.3
25	5.4	0.72	6.0	0.54	11.1	-25.0
30	4.1	0.51	3.9	0.35	-4.9	-31.4
35	3.2	0.40	2.5	0.23	-21.9	-42.5
40	2.5	0.33	1.5	0.13	-40.0	-60.6
45	2.0	0.28	1.0	0.09	-50.0	-67.9

注：①理论剂量当量率保留有效位数与使用仪器测量的实测数据的有效位数相同；②为无铅屏蔽状态，西林瓶直接暴露在空气中。

Note: ① The dose equivalent rate calculated by theory retains the same effective number of digits as the data measured by instruments. ② In a lead-free shielding state, the penicillin bottle is directly exposed to the air.

3 结果与分析

3.1 剂量当量率结果

85.5 MBq 的 ^{225}Ac 核素及其子体的平衡体系，在铅屏蔽厚度 0 mm、5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm 和 45 mm 条件下，距离源 0.15 m、0.5 m 处的剂量当量率见表 3。

由表 7 的数据可以看出，在无屏蔽情况下， ^{225}Ac 及其子体平衡体系的剂量当量率的实测值与理论值符合性较好，但随着屏蔽厚度增加，符合性变差，经分析，由于铅屏蔽厚度增加，对 γ 射线、韧致辐射的减弱倍数呈自然指数倍增加，计算的剂量当量率数值也呈自然指数倍的减小；实测中，铅屏蔽厚度增加，对辐射能谱产生硬化影响且此时辐射水平较低，仪器灵敏度、探测效率、能量响应和测量数据的统计涨落对测量值的影响变大，导致理论值与测量值符合性越来越差；距 ^{225}Ac 源 0.5 m 处的符合性比 0.15 m 处的更好，特别是 0 mm、5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm 铅屏蔽情况下。

无屏蔽的情况下，85.5 MBq 的 ^{225}Ac 及其子体平衡体系 0.5 m 处实测剂量当量率为 11.4 $\mu\text{Sv/h}$ ，已超过《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-

2021)^[10]要求的核医学操作人员操作位的剂量当量率 $\leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的限值。

3.2 不同放射性核素剂量当量率比较

目前医院核医学科广泛使用核药核素 ^{131}I 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ^[11-13]，在同样活度 85.5 MBq 和不采取屏蔽的情况下，采用 §2.1 γ 点源剂量当量率计算方法进行计算，将 ^{131}I 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 计算结果与 ^{225}Ac 及其子体平衡体系的实测剂量当量率进行对比，详细数据见表 8。

表8 ^{225}Ac 及其子体平衡体系剂量当量率与 ^{131}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 对比结果

Table 8 Comparison of dose equivalent rate for ^{225}Ac decay chain with ^{131}I and $^{99\text{m}}\text{Tc}$

距离 / m Distance	剂量当量率 / ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) Dose equivalent rates				
	^{225}Ac	^{131}I	^{131}I	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
0.5	11.4	17.8 ^①	22.4 ^②	6.3 ^①	8.0 ^②

注：①理论计算数据，计算参数来源于《辐射安全手册》(潘自强主编)，2011^[9]；②理论计算数据，计算参数来源于《Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook 2002》^[14]。

Note: ① Theoretical calculation data, parameters from the *Radiation Safety Manual* (edited by PAN Ziqiang), 2011^[9]; ② theoretical calculation data, parameters from the *Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook 2002*^[14].

在不采取屏蔽且同等活度的情况下，实验测得的²²⁵Ac及其子体平衡体系的剂量率约为¹³¹I理论计算的剂量当量率的一半，约为^{99m}Tc的1.5倍。

3.3 铅的半值层和十值层

根据§3.1分析结果，随着铅屏蔽厚度增加，理

论计算的²²⁵Ac及其子体平衡体系的剂量当量率与实测的剂量当量率符合性变差，为了给²²⁵Ac的使用者提供准确和安全的辐射防护建议，利用实测的剂量当量率推导出²²⁵Ac及其子体的铅十值层和半值层。将表7中实测的剂量当量率进行比值，得到不同厚度铅屏蔽材料的衰减倍数*K*见表9。

表9 ²²⁵Ac及其子体平衡体系的铅屏蔽衰减系数*K*
Table 9 Lead shielding attenuation coefficient *K* of ²²⁵Ac decay chain

不同铅厚度剂量当量率相比 Comparison of dose equivalent rates for different lead thicknesses	铅屏蔽衰减倍数 <i>K</i> Attenuation factor		
	距源0.15 m Distance 0.15m	距源0.5 m Distance 0.5m	平均值 Average value
0/5	2.7	2.6	2.6
0/10	5.0	4.7	4.9
0/15	8.1	7.6	7.8
0/20	12.1	12.1	12.1
0/25	16.4	15.8	16.1
0/30	21.6	22.2	22.0
0/35	27.7	28.3	28.0
0/40	35.8	34.8	35.3
0/45	44.4	41.1	42.7

由表9可以看出，²²⁵Ac及其子体平衡体系的铅屏蔽衰减倍数*K*为10时，铅屏蔽厚度介于15 mm与20 mm之间；铅屏蔽衰减倍数*K*为2时，铅屏蔽厚度小于5 mm。辐射屏蔽计算选择参数时，通常采用保守原则，将20 mm作为放射性平衡条件下的²²⁵Ac及其子体的铅十值层厚度，5mm作为放射性平衡条件下的²²⁵Ac及其子体的铅半值层厚度。

4 结论

本实验进行了85.5 MBq的²²⁵Ac及其子体放射性长期平衡体系的剂量当量率测量，在无屏蔽情况下距源0.5 m处剂量当量率为11.4 μSv/h，为《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021)中辐射工作人员在放射性药物合成、分装等设备外表面30 cm处的操作位剂量当量率最大值2.5 μSv/h要求的4.56倍。在有屏蔽的情况下，随着铅屏蔽厚度增加，²²⁵Ac及其子体平衡体系的剂量率的实测值与理论值符合性变差。

通过理论计算¹³¹I和^{99m}Tc点源的剂量当量率，在不采取屏蔽且同等活度的情况下，实测的²²⁵Ac及其子体平衡体系的剂量当量率约为¹³¹I计算值的一半，约为^{99m}Tc计算值的1.5倍。操作非密封放射

性物质²²⁵Ac时，除了采用密闭负压手套箱防止内照射危害外，建议选择适宜厚度的屏蔽体，使操作位剂量率合理降低至2.5 μSv/h以内。

采用实测数据推导出：将20 mm保守地作为放射性平衡条件下的²²⁵Ac及其子体的铅十值层厚度，5 mm保守地作为放射性平衡条件下的²²⁵Ac及其子体的铅半值层厚度，为²²⁵Ac核素使用者提供更准确和安全的辐射防护参考。

作者贡献声明 罗宇负责数据测量、数据分析、论文撰写；李欢参与数据测量、论文修订；荣茂凯负责实验用器具的设计制作；丁愿负责构思设计、论文审核。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 Morgenstern A, Apostolidis C, Kratochwil C, *et al.* An overview of targeted alpha therapy with ²²⁵Actinium and ²¹³Bismuth[J]. Current Radiopharmaceuticals, 2018, **11** (3): 200-208. DOI: 10.2174/1874471011666180502104524.

2 Hooijman E L, Chalashkan Y, Ling S W, *et al.* Development of [²²⁵Ac] Ac-PSMA-I&T for targeted alpha

- therapy according to GMP guidelines for treatment of mCRPC[J]. *Pharmaceutics*, 2021, **13**(5): 715. DOI: 10.3390/pharmaceutics13050715.
- 3 Peng D S, Liu H X, Huang L, *et al.* ^{225}Ac -DOTATATE therapy in a case of metastatic pheochromocytoma[J]. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 2022, **49**(10): 3596-3597. DOI: 10.1007/s00259-022-05826-5.
- 4 Kahraman M C, Chege B W, Tkhorik O, *et al.* A Study of the current and potential suppliers of Actinium-225 for targeted alpha therapy[J/O] [2023-08-08]. *Networks for Innovation in Nuclear Applications*, https://www.researchgate.net/publication/338886356_A_Study_of_the_Current_and_Potential_Suppliers_of_Actinium-225_for_Targeted_Alpha_Therapy.
- 5 王雷, 吕银龙, 王峰, 等. 100 MeV 回旋加速器生产医用 ^{225}Ac 核素的实验研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, **55**(z1): 171-176. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0798.
WANG Lei, LYU Yinlong, WANG Feng, *et al.* Experimental study on production of medical nuclide ^{225}Ac with 100 MeV cyclotron[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, **55**(z1): 171-176. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0798.
- 6 赵紫宇, 温凯, 马承伟, 等. α 核素 ^{225}Ac 的制备及医学应用现状[J]. *同位素*, 2022, **35**(3): 179-188. DOI: 10.7538/tws.2022.35.03.0179.
ZHAO Ziyu, WEN Kai, MA Chengwei, *et al.* Research status of alpha-emitting radionuclide ^{225}Ac : preparation and medical application[J]. *Journal of Isotopes*, 2022, **35**(3): 179-188. DOI: 10.7538/tws.2022.35.03.0179.
- 7 National Nuclear Data Center. Evaluated nuclear structure data file (ENSDF)[EB/OL]. [2023-08-17]. <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- 8 方杰. 辐射防护导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1988: 17-328
FANG Jie. Introduction to radiation protection[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988: 17-328.
- 9 潘自强. 辐射安全手册[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 135-140.
PAN Ziqiang. Radiation safety manual[M]. Beijing: Science Press, 2011: 135-140.
- 10 中华人民共和国国家生态环境部. 核医学辐射防护与安全要求: HJ 1188—2021[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Nuclear medicine radiation protection and safety requirements: HJ 1188—2021[S]. Beijing: China Environmental Press, 2021.
- 11 陈春晖, 贾茹, 陈飏. ^{131}I 甲状腺癌治疗住院管理及放射防护状况调查[J]. *中国辐射卫生*, 2022, **31**(1): 64-69. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.012.
CHEN Chunhui, JIA Ru, CHEN Biao. An investigation of hospitalization management and radiation protection in ^{131}I treatment for thyroid cancer[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2022, **31**(1): 64-69. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.012.
- 12 甘景文. 碘 131 和抗甲状腺药物治疗甲状腺功能亢进症的进展[J]. *中外医学研究*, 2020, **18**(18): 178-180. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2020.18.074.
GAN Jingwen. Progress of iodine 131 and antithyroid drugs in the treatment of hyperthyroidism[J]. *Chinese and Foreign Medical Research*, 2020, **18**(18): 178-180. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2020.18.074.
- 13 田佳乐, 贾红梅. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -放射性药物的现状和展望[J]. *同位素*, 2018, **31**(3): 143-156. DOI: 10.7538/tws.2018.31.03.0143.
TIAN Jiale, JIA Hongmei. Current status and prospects of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -radiopharmaceuticals[J]. *Journal of Isotopes*, 2018, **31**(3): 143-156. DOI: 10.7538/tws.2018.31.03.0143.
- 14 Delacroix D, Guerre J P, Leblanc P, *et al.* Radionuclide and radiation protection data handbook 2002[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2002, **98**(1): 1-168. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006705.