

闪烁室测氡不同时刻的刻度因子研究

张书燕¹, 李志强¹, 徐 勇¹, 张 迷¹, 李委刚², 李彦秋¹, 张登玉¹

(1. 衡阳师范学院, 衡阳 421002; 2. 南华大学, 衡阳 421001)

摘 要: 为了快速标定闪烁室的氡浓度, 本文提出一种无需通过实验就能得到闪烁室测氡不同时刻的刻度因子来标定氡浓度的方法. 该方法首先利用 Geant4 模拟了 ST-203 闪烁室内氡及其子体不同能量 α 粒子的探测效率, 再基于取样 3 h 平衡后其刻度因子与闪烁室内氡及其子体平均探测效率的关系, 然后根据氡及其子体的衰变规律, 建立了闪烁室不同时刻的刻度因子计算方法. 基于上述方法, 本文利用 ST-203 闪烁室开展不同时刻测氡的刻度因子实验研究, 其理论值和实验值的偏差小于 5%. 由闪烁室结构直接确定不同时刻测氡刻度因子的方法, 能够快速标定闪烁室的氡浓度.

关键词: 闪烁室; 探测效率; 刻度因子; Geant4

中图分类号: TL84 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2023.024002

Study on calibration factor of radon measurement in scintillation chamber at different times

ZHANG Shu-Yan¹, LI Zhi-Qiang¹, XU Yong¹, ZHANG Mi¹,
LI Wei-Gang², LI Yan-Qiu¹, ZHANG Deng-Yu¹

(1. Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China; 2. University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to calibrate the concentration of radon in the scintillation chamber quickly, this paper proposes a method to calibrate the radon concentration by obtaining the calibration factor of measuring radon in scintillation chamber at different times without any experiments. Firstly, Geant4 was used to simulate the detection efficiency of α particles with different energies of radon and its daughters in ST-203 scintillation chamber, then based on the relationship between the calibration factor and the average detection efficiency of radon and its daughters in the scintillation chamber after 3 hours of sampling and equilibration, and according to the decay law of radon and its daughters, the calculation method of the calibration factor at different times in the scintillation chamber is established. Based on the method above, the calibration factor of radon measurement at different times were studied by using ST-203 scintillation chamber. The results show that the errors between the theoretical and experimental calibration factors of the scintillation chamber at different times are less than 5%. Therefore, the radon concentration in scintillation chamber can be quickly calibrated by directly determining the radon calibration factors at different times from the structure of scintillation chamber.

Keywords: Scintillation chamber; Detection efficiency; Calibration factor; Geant4

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 湖南省自然科学基金(2018JJ2007); 湖南省研究生科研创新项目(CX20211233)

作者简介: 张书燕(1995—), 女, 安徽东至人, 硕士研究生, 主要从事核电子学和探测技术的研究.

通讯作者: 李志强, E-mail: hysylzq@126.com

1 引言

氡及其子体是人类所受天然辐射的主要来源^[1]。2009 年世界卫生组织(WHO)公布,氡是 19 种环境致癌物质之一^[2, 3]。随着人们对氡危害的日益重视,氡测量方法也在不断完善,其中闪烁室法测氡因操作简便、探测灵敏度高以及受环境温湿度等因素的干扰较小而成为氡测量的主要方法^[4-6]。其探测原理是闪烁室内氡及其子体释放的 α 粒子打到涂有 ZnS(Ag) 的闪烁室内壁产生闪光,再由光电倍增管转化为电脉冲,经电子学线路将脉冲信号放大后,记录其脉冲数,3 h 后依据刻度因子来确定闪烁室的氡浓度^[7]。

闪烁室法测氡不能分辨不同能量的 α 粒子,常需要较长的时间完成测量^[8]。如 Zhu 等^[9]和 Ye 等^[10]将闪烁室密封 3 h 后,在已知闪烁室刻度因子的情况下,利用实验测得的 α 粒子净计数率,计算得到氡浓度;Sensintaffar 等^[11]将空气混合物中的氡样品转移到疏散的闪烁槽中并密封 4 h 以上,利用 α 粒子净计数率与氡活度的关系来计算刻度因子;赵桂芝等^[12]依据平衡后 α 粒子的平均探测效率与闪烁室刻度因子之间的关系,建立了闪烁室标定氡浓度的方法;王政霞等^[13]通过测定一组长测量周期的刻度因子来标定其他不同短测量周期的刻度因子,实现了小闪烁室氡浓度的快速标定。针对上述情况,本文提出一种无需通过实验测定即可得到闪烁室不同时刻的刻度因子计算方法来实现氡浓度的快速测量。

2 不同时刻闪烁室刻度因子理论推导

氡(Rn-222)进入闪烁室后发生衰变直到产生稳定的核素 Pb-206,衰变过程中其原子核数变化满足递次衰变规律。但各子体的半衰期不一样,其中半衰期最长的核素是 Pb-210,因此在它后面的子体核素对于研究闪烁室的刻度因子没有实际意义^[5],故氡及其子体的衰变链可简化为图 1 所示。

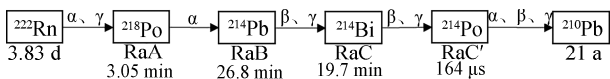


图 1 氡及其子体简化衰变链

Fig. 1 Simplified decay chains of radon and its daughters

从图 1 可看出,整个衰变链中能够产生 α 粒子的核素只有 Rn-222、Po-218 和 Po-214,但 Po-214

的半衰期非常短,仅为 164 μ s,故可将 Po-214 产生的 α 粒子看作是由 Bi-214 直接产生的^[12]。

若在取样过程中闪烁室内的氡浓度不变,且在 $t=0$ 时闪烁室内氡的分布是均匀的。设测量时间为 t ,依据闪烁室的刻度因子与该时刻定标器采集到的总 α 粒子净计数率的关系来确定氡浓度。闪烁室氡浓度测量公式为^[5]

$$C=KN(\Delta t) \quad (1)$$

式中, C 为闪烁室的氡浓度($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$); K 为不同时刻闪烁室的刻度因子($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{cpm}^{-1}$); $N(\Delta t)$ 为不同时刻 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 衰变产生的总 α 粒子净计数率(cpm)。

当采用闪烁室法测氡时,一般在取样结束 3 h 后开始对氡浓度进行测量,此时闪烁室内的氡及其子体达到了动态平衡,三种 α 粒子产生的权重相等。故闪烁室对 α 粒子的探测效率可用三者的平均探测效率来表示。平衡后闪烁室的刻度因子 K_0 与平均探测效率 $\bar{\eta}$ 满足下列关系^[12, 14, 15]

$$K_0 = \frac{1}{180 \bar{\eta} V} \quad (2)$$

式中, V 为闪烁室的体积,单位为 m^3 ; $\bar{\eta}$ 为闪烁室对 α 粒子的平均探测效率。

$$\bar{\eta} = (\eta_R + \eta_A + \eta_C) / 3 \quad (3)$$

η_R 、 η_A 和 η_C 分别表示闪烁室对 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 产生的 α 粒子的探测效率。将式(3)代入式(2)即可得到平衡后闪烁室的刻度因子。

$$K_0 = \frac{1}{60(\eta_R + \eta_A + \eta_C)V} \quad (4)$$

已知闪烁室内氡及其子体从取样结束到平衡的过程中不断发生衰变,假设整个过程 Rn-222 衰变产生的 α 粒子数不变,则此时闪烁室收集到的 α 粒子数与 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 的关系为

$$N(\Delta t) = N_R \eta_R + N_A \eta_A + N_C \eta_C \quad (5)$$

式中, $N(\Delta t)$ 为 t 时刻闪烁室收集的总 α 粒子净计数率; N_R 、 N_A 和 N_C 分别表示 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 在 t 时刻产生的 α 衰变数。当静置 3 h 后,闪烁室内的氡及其子体达到了动态平衡,三种 α 粒子产生的权重相等。此时 $N_R = N_A$, $N_C = 0.9731 N_R$ ($N_R = N_A \approx N_C$), 0.9731 表示氡及其子体在瞬态平衡中 Bi-214 的衰变原子数与氡的比值。则闪烁室收集的 α 粒子数与 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 的关系为

$$N(\Delta t_0) = N_R (\eta_R + \eta_A + 0.9731 \eta_C) \quad (6)$$

式中, t_0 为第 3 h, 即 $t_0 = 10\,800 \text{ s}$, Δt_0 表示 10 740~10 800 s 的单位时间; $N(\Delta t_0)$ 为 t_0 时刻闪烁室收集

到的总 α 粒子净计数率. 已知 t_0 时刻与不同时刻 t 的氦浓度相等, 则 K_0 与 K_x 满足下列关系

$$C = K_0 N(\Delta t_0) = K_x N(\Delta t) \quad (7)$$

式中 K_x 为不同时刻闪烁室的刻度因子. 根据式 (5)~(7) 得到

$$K_x = \frac{N(\Delta t_0) K_0}{N(\Delta t)} = \frac{(\eta_R + \eta_A + 0.9731 \eta_C) K_0}{\eta_R + \frac{N_A}{N_R} \eta_A + \frac{N_C}{N_R} \eta_C} \quad (8)$$

依据氦及其子体的衰变关系, 可得到 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 的放射性活度 $A_R(t)$ 、 $A_A(t)$ 和 $A_C(t)$ 随时间的变化满足下列方程^[16].

$$A_R(t) = A_0 e^{-\lambda_R t} \quad (9)$$

$$A_A(t) = \frac{\lambda_A A_0}{\lambda_A - \lambda_R} [e^{-\lambda_R t} - e^{-\lambda_A t}] \quad (10)$$

$$A_C(t) = A_0 [C_1 e^{-\lambda_R t} + C_2 e^{-\lambda_A t} + C_3 e^{-\lambda_B t} + C_4 e^{-\lambda_C t}] \quad (11)$$

其中

$$C_1 = \frac{\lambda_A \lambda_B \lambda_C}{(\lambda_A - \lambda_R)(\lambda_B - \lambda_R)(\lambda_C - \lambda_R)}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_A \lambda_B \lambda_C}{(\lambda_R - \lambda_A)(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)}$$

$$C_3 = \frac{\lambda_A \lambda_B \lambda_C}{(\lambda_R - \lambda_B)(\lambda_A - \lambda_B)(\lambda_C - \lambda_B)}$$

$$C_4 = \frac{\lambda_A \lambda_B \lambda_C}{(\lambda_R - \lambda_C)(\lambda_A - \lambda_C)(\lambda_B - \lambda_C)}$$

式中, λ_R 、 λ_A 、 λ_B 和 λ_C 分别为 Rn-222、Po-218、Pb-

214 和 Bi-214 的衰变常数 (s^{-1}), 其中 $\lambda_R = 2.1 \times 10^{-6} s^{-1}$ 、 $\lambda_A = 3.8 \times 10^{-3} s^{-1}$ 、 $\lambda_B = 4.3 \times 10^{-4} s^{-1}$ 、 $\lambda_C = 5.9 \times 10^{-4} s^{-1}$; A_0 为 $t=0$ 时闪烁室内氦的放射性活度. 则 t 时刻 Rn-222、Po-218 和 Bi-214 单位时间内衰变产生的 α 粒子数分别为 N_R 、 N_A 和 N_C .

$$N_R = \frac{A_0}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t-60)} - e^{-\lambda_R t}) \quad (12)$$

$$N_A = \frac{\lambda_A A_0}{\lambda_A - \lambda_R} \left[\frac{1}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t-60)} - e^{-\lambda_R t}) - \frac{1}{\lambda_A} (e^{-\lambda_A(t-60)} - e^{-\lambda_A t}) \right] \quad (13)$$

$$N_C = A_0 \left[\frac{C_1}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t-60)} - e^{-\lambda_R t}) + \frac{C_2}{\lambda_A} (e^{-\lambda_A(t-60)} - e^{-\lambda_A t}) + \frac{C_3}{\lambda_B} (e^{-\lambda_B(t-60)} - e^{-\lambda_B t}) + \frac{C_4}{\lambda_C} (e^{-\lambda_C(t-60)} - e^{-\lambda_C t}) \right] \quad (14)$$

整个过程中 Rn-222 衰变产生的 α 粒子数不变, 故 t 与 t_0 时刻闪烁室中 Rn-222 单位时间内衰变产生的 α 粒子数相等. 因此式 (12) 可表示为

$$N_R = \frac{A_0}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t_0-60)} - e^{-\lambda_R t_0}) \quad (15)$$

将式 (13)~(15) 代入式 (8) 计算得到不同时刻闪烁室的刻度因子为

$$K_x = \frac{(\eta_R + \eta_A + 0.9731 \eta_C) K_0}{\eta_R + A \eta_A + B \eta_C} \quad (16)$$

式中 A 和 B 分别表示不同时刻氦及其子体在瞬态平衡中 Po-218 和 Bi-214 的衰变原子数与氦的比值.

$$A = \frac{\frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_R} \left[\frac{1}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t-60)} - e^{-\lambda_R t}) - \frac{1}{\lambda_A} (e^{-\lambda_A(t-60)} - e^{-\lambda_A t}) \right]}{\frac{1}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t_0-60)} - e^{-\lambda_R t_0})};$$

$$B = \frac{\left[\frac{C_1}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t-60)} - e^{-\lambda_R t}) + \frac{C_2}{\lambda_A} (e^{-\lambda_A(t-60)} - e^{-\lambda_A t}) + \frac{C_3}{\lambda_B} (e^{-\lambda_B(t-60)} - e^{-\lambda_B t}) + \frac{C_4}{\lambda_C} (e^{-\lambda_C(t-60)} - e^{-\lambda_C t}) \right]}{\frac{1}{\lambda_R} (e^{-\lambda_R(t_0-60)} - e^{-\lambda_R t_0})}.$$

将式 (16) 代入式 (7) 即可得到氦浓度计算公式.

$$C = \frac{(\eta_R + \eta_A + 0.9731 \eta_C) K_0}{\eta_R + A \eta_A + B \eta_C} \times N(\Delta t) \quad (17)$$

式 (17) 为不同测量时刻对应的闪烁室氦浓度计算公式. 根据闪烁室对氦及其子体产生的单个 α 发射体的探测效率和平衡后闪烁室的刻度因子, 以及实验测得氦及其子体在不同时刻衰变产生的总 α 粒子净计数率, 计算可得到闪烁室的氦浓度.

3 方案验证

3.1 闪烁室对 α 粒子的探测效率模拟

蒙特卡罗模拟跟踪 α 粒子在闪烁室中的输运是估计闪烁室对 α 粒子探测效率最有效的方法^[17]. 本文利用 Geant4 构建 ST-203 闪烁室模型. ST-203 闪烁室内部腔体近似于球体, 直径为 9.85 cm, 容积为 500 mL. 闪烁室被有机玻璃隔板分为 4 个相同体积的隔间, 其内壁和隔板都涂有

ZnS(Ag), 且每个隔间对 α 粒子的探测效率相等^[9]. 因此可将闪烁室的模型简化为 1/4 球体, 其外壳材料为 ZnS(Ag), 里层填充空气. 由于闪烁室底部是观察窗, 未涂有 ZnS(Ag), 因此在构建模型时可利用布尔运算对闪烁室的底部进行切割, 其可视化模型见图 2.

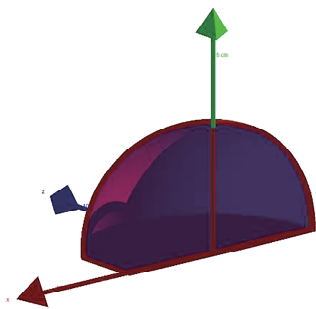


图 2 闪烁室的 1/4 结构可视化模型图
Fig. 2 Visualization model of 1/4 scintillation chamber

Geant4 的模拟过程需要自定义粒子的属性并添加相关的物理过程. 选用 G4GeneralParticle Source 方式来自定义 α 粒子源, 其发射方向为各向同性, 且 α 粒子在闪烁室内随机分布. 由于 α 粒子与空气中的粒子主要发生非弹性碰撞进而产生电离反应, 其物理过程可选用 Geant4 自带的电磁相互作用 QBBC 来模拟^[18-20]. 在自然环境状态下, 基于构建的闪烁室模型分别发射 10^4 个不同能量 (5.49、6.00 和 7.69 MeV) 的 α 粒子模拟其在闪烁室内的探测效率, 将模拟得到的探测效率代入式 (4) 计算得到平衡后闪烁室的刻度因子 K_0 .

3.2 实验装置与步骤

闪烁室刻度因子实验装置主要由北京核仪器厂生产的 ST-203 闪烁室、FD125 氡钍分析仪和

BHC336 定标器组成, 如图 3 所示.

采用闪烁室氡浓度标定方法进行实验验证. 实验环境气温范围在 10~35 ℃, 相对湿度在 50% 左右, 气压为标准大气压. 为减少计数误差, 保证氦及其子体衰变产生的 α 粒子打到闪烁室内壁及有机隔板上所产生的光电信号均能被记录, 将 BHC336 定标器的工作高压设置为 -528 V, 下阈值设置为 0.7 V. 本实验首先采用真空泵清洗闪烁室, 再利用 FD125 氡钍分析仪测得闪烁室内的本底计数; 然后将闪烁室抽真空 (约定真空度小于 0.1 MPa 时为真空) 并用弹簧夹夹紧; 选用容积为 1 mL 的注射器抽取 1 mL 氦源经子体过滤器注入真空闪烁室内, 松开弹簧夹使闪烁室内外气压平衡后再夹住并静置. 整个取样过程在 5 min 内完成.

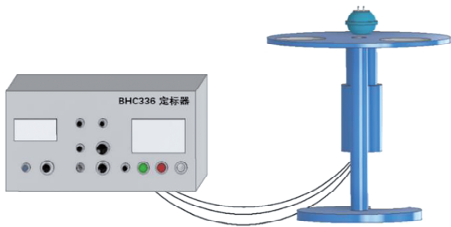


图 3 闪烁室刻度因子实验验证装置图
Fig. 3 Calibration factor experimental verification device of scintillation chamber

取样结束后将闪烁室放在 FD125 氡钍分析仪上, 设置定标器的采集时间和次数, 以测量不同时刻闪烁室内氦及其子体衰变产生的总 α 粒子计数率 N . 将模拟得到平衡后闪烁室的刻度因子 K_0 和实验测得 t_0 时刻的总 α 粒子计数率代入式 (1) 计算, 可得到闪烁室的氦浓度 C , 再根据 C 和式 (1) 计算不同时刻闪烁室的实验刻度因子 K_{ex} .

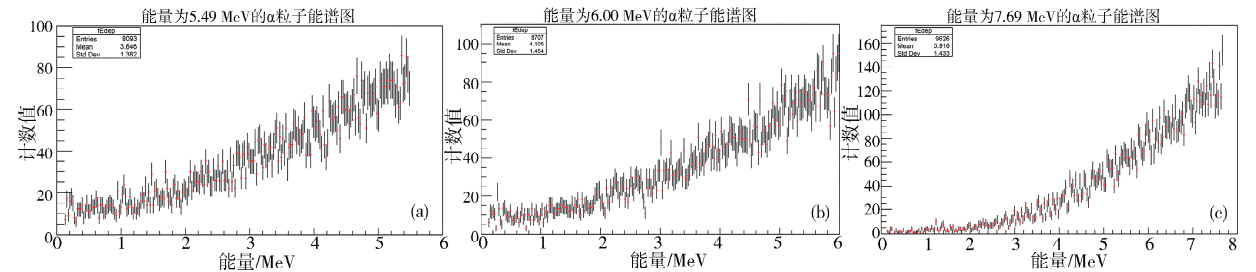


图 4 能量为 5.49、6.00 和 7.69MeV 的 α 粒子能谱图
Fig. 4 Energy spectra of α particles with energies of 5.49, 6.00 and 7.69 MeV

4 结果与讨论

4.1 模拟结果

在自然环境状态下, 基于所构建的闪烁室模型分别发射 10^4 个不同能量 (5.49、6.00 和 7.69

MeV) 的 α 粒子, 模拟其在闪烁室内的探测效率, 三种能量的 α 粒子能谱图如图 4 所示. 其中 Entries 表示闪烁室收集到能量为 5.49、6.00 和 7.69 MeV 的 α 粒子数分别为 8093、8707 和 9626. 依据收集到的 α 粒子数与发射的 α 粒子数之比, 可得到

闪烁室对 5.49、6.00 和 7.69 MeV α 粒子的探测效率分别为 $\eta_R = 80.93\%$ 、 $\eta_A = 87.07\%$ 和 $\eta_C = 96.26\%$. 将探测效率代入式(4), 计算可得到平衡后闪烁室的刻度因子 $K_0 = 12.6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{cpm}^{-1}$.

4.2 实验验证与误差分析

用 FD125 氡钍分析仪测得不同时刻闪烁室内氡及其子体单位时间衰变产生的总 α 粒子数, 重复测量 3 次求平均值. 已知 t_0 时刻闪烁室的刻度因子 $K_0 = 12.6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{cpm}^{-1}$, 实验测得 t_0 时刻闪烁室内的 α 粒子净计数值 $N(\Delta t_0)$, 将其代入式(1) 计算得到闪烁室的氡浓度 C , 结果如表 1 所示.

表 1 闪烁室的氡浓度

Tab. 1 Radon concentration in scintillation chamber

序号	α 粒子净计数值/cpm	$C/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$
1	6553	82 567
2	6742	84 949
3	6116	77 061
平均值	6470.3	81 526

从表 1 可看出 3 次实验测量的数据之间存在差异, 这是由测量时闪烁室内的本底波动、人工取样的不准确、 α 粒子产生的随机性以及统计涨落等因素导致的. 但总的来看, 实验测得的数据符合放射性核素的衰变规律. 为减少上述因素带来的 α 粒子计数误差, 取 3 次实验测量结果的平均值. 由于上次实验残留的氡子体对本次实验会产生影响, 故需要扣除闪烁室内的本底计数, 通过实验测得闪

烁室的本底计数为 8 cpm. 由式(1)计算得到进入闪烁室的氡浓度 $C = 81\,526 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. 根据实验测得不同时刻闪烁室内氡及其子体单位时间衰变产生的总 α 粒子数和式(1)即可得到不同时刻闪烁室的实验刻度因子 K_{ex} , 将其与不同时刻闪烁室的理论刻度因子 K_x 进行比较, 两者之间的偏差 $K_{error} = (K_{ex} - K_x)/K_{ex} \times 100\%$. 分别计算闪烁室在第 30、60、90 和 120 min 的理论刻度因子与实验刻度因子并计算两者之间的偏差, 结果如表 2 所示.

表 2 闪烁室在第 30、60、90 和 120 min 的刻度因子
Tab. 2 Calibration factors of scintillation chamber at 30, 60, 90 and 120 min

时刻/min	α 粒子平均计数值/cpm	实验刻度因子 $K_{ex}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{cpm}^{-1})$	理论刻度因子 $K_x/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{cpm}^{-1})$	$K_{error}/\%$
30	4626	17.62	17.63	-0.06
60	5400	15.10	15.15	-0.33
90	6003	13.58	13.76	-1.33
120	6289	12.96	13.07	-0.85

由表 2 可知, 在第 30、60、90 和 120 min 测量时刻, 理论计算的刻度因子和实验数值分析得到的刻度因子结果基本一致, 偏差小于 5%, 证明在这四个时刻闪烁室的理论刻度因子计算公式是可行的. 同理计算得到不同时刻闪烁室的理论刻度因子 K_x 和实验刻度因子 K_{ex} 随时间 t 的变化关系, 如图 5a 所示. 对不同时刻闪烁室的 K_x 和 K_{ex} 两者进行误差分析, 结果如图 5b 所示.

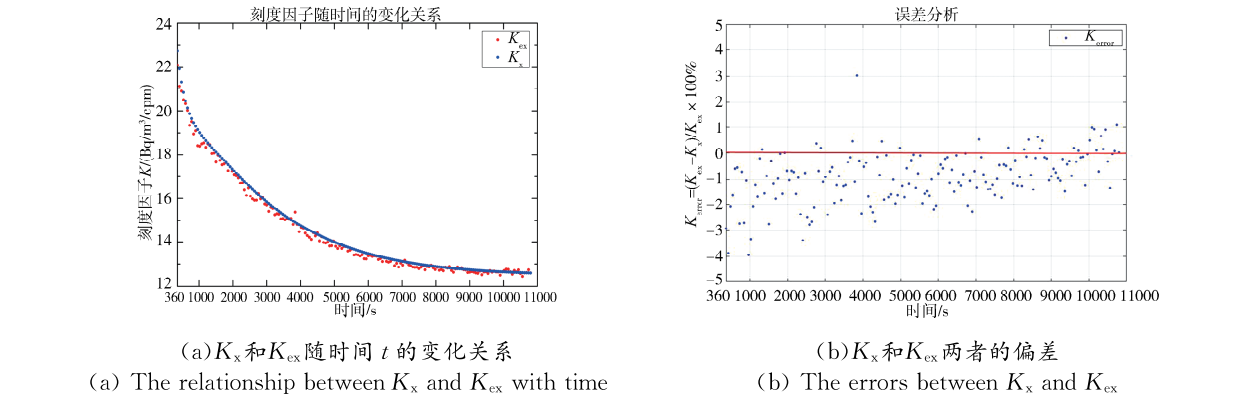


图 5 不同时刻闪烁室的理论刻度因子 K_x 与实验刻度因子 K_{ex} 的关系
Fig. 5 The relationship between the theoretical calibration factors K_x and the experimental calibration factors K_{ex} of the scintillation chamber at different times

由图 5a 可知, 不同时刻的理论刻度因子 K_x 与实验刻度因子 K_{ex} 的曲线基本一致. 由图 5b 可知, 不同时刻的理论刻度因子 K_x 与实验数值分析得到的实验刻度因子 K_{ex} 的偏差小于 5%, 证明不同时刻闪烁室的理论刻度因子计算公式是可行的.

5 结 论

本文依据平衡后 ST-203 闪烁室的刻度因子与氡及其子体平均探测效率的关系, 基于 ST-203 闪烁室的结构, 利用 Geant4 模拟其对氡及其子体

不同能量 α 粒子的探测效率,得到平衡后闪烁室的刻度因子,然后根据氡及其子体的衰变规律,建立了闪烁室不同时刻的刻度因子计算方法. 本文还利用 ST-203 闪烁室开展了不同时刻的刻度因子实验研究. 实验测得闪烁室内氡及其子体衰变产生的总 α 粒子净计数率,计算了不同时刻闪烁室的实验刻度因子. 结果表明,闪烁室在不同时刻的刻度因子理论值和实验值偏差小于 5%. 基于闪烁室结构直接确定不同时刻测氡刻度因子的方法,能够快速标定闪烁室的氡浓度.

参考文献:

- [1] Nazir S, Simnani S, Mishra R, *et al.* Simultaneous measurements of radon, thoron and their progeny for inhalation dose assessment in indoors of Srinagar, J&K, India [J]. J Radioanal Nucl Ch, 2020, 325: 315.
- [2] Jalili-Majraeshin A, Behtash A, Rezaei-Ochbelagh D. Radon concentration in hot springs of the touristic city of Sarein and methods to reduce radon in water [J]. Radiat Phys Chem, 2012, 81: 749.
- [3] 秦敏. 新形势下环境中氡及其子体的危害与控制[J]. 资源节约与环保, 2017(4): 89.
- [4] 张曦. 氡活度的绝对测量方法[J]. 宇航计测技术, 2017, 37: 66.
- [5] 张雄杰, 张叶, 瞿金辉, 等. 闪烁室测氡仪采样方式对刻度系数的影响研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2014, 37: 429.
- [6] 李先杰. 环境空气中氡的监测方法[J]. 辐射防护通讯, 2021, 41: 1.
- [7] 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.
- [8] 傅燕. ^{220}Rn 室 $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ 参考水平定值的标准化研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2014.
- [9] Zhu S P, Tang Q, Qiu S K, *et al.* Study on background interference in the process of determination of the ultra-low concentration of ^{226}Ra in water by manganese fiber enrichment-scintillation cell radon measurement method [J]. J Radioanal Nucl Ch, 2021, 329: 1149.
- [10] Ye Y, Xia X, Dai X, *et al.* Effects of temperature, salinity, and pH on ^{222}Rn solubility in water [J]. J Radioanal Nucl Ch, 2019, 320: 369.
- [11] Sensintaffar E L, Windham S T. Calibration of scintillation cells for radon-222 measurements at the US environmental protection agency [J]. J Res Natl Inst Stan, 1990, 95: 143.
- [12] 赵桂芝, 肖德涛, 凌球, 等. 测定闪烁室对氡及其子体释放的 α 粒子探测效率的三段法研究[J]. 中国预防医学杂志, 2001(2): 33.
- [13] 王政霞, 李志强, 李彦秋, 等. 基于小闪烁室测氡仪快速定值方法研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 024004.
- [14] 徐明, 马怀成, 盛伟, 等. 闪烁室刻度因子模拟实验[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36: 634.
- [15] Tokonami S, Yang M, Yonehara H, *et al.* Simple, discriminative measurement technique for radon and thoron concentrations with a single scintillation cell [J]. Rev Sci Instrum, 2002, 73: 69.
- [16] 卢希廷. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [17] Sakoda A, Meisenberg O, Tschiersch J. Behavior of radon progeny produced in a scintillation cell in the flow-through condition [J]. Radiat Meas, 2015, 77: 41.
- [18] 张星明. 氡测量仪中脉冲电离室的性能研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021.
- [19] Geant4 Collaboration. Geant4 book for application developers [EB/OL]. [2022-09-25]. <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/BackupVersions/V10.7/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>.
- [20] Geant4 Collaboration. Guide for physics lists [EB/OL]. [2022-09-25]. <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/index.html>.

引用本文格式:

中 文: 张书燕, 李志强, 徐勇, 等. 闪烁室测氡不同时刻的刻度因子研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2023, 60: 024002.

英 文: Zhang S Y, Li Z Q, Xu Y, *et al.* Study on calibration factor of radon measurement in scintillation chamber at different times [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2023, 60: 024002.