

基于 RAD7 测氡仪的²²⁰Rn 气体准确测量研究

马若云, 张磊, 郭秋菊

(北京大学 物理学院 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要:针对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度准确测量的问题, 本文采用理论模型分析和实验测量比较的方法, 分析干燥管体积和采样泵流速对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响。研究表明, 随着干燥管体积增加和采样流速减小, RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量值同环境²²⁰Rn 活度浓度真实值之间的差别增大。RAD7 测氡仪采用小干燥管干燥时, 修正因子 R 为 1.224 ± 0.118 ; 采用大干燥管时, 修正因子 R 为 2.232 ± 0.598 。采用上述修正因子对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果进行修正, 能在一定程度上解决 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度准确测量问题。

关键词: RAD7 测氡仪; ²²⁰Rn 活度浓度; 准确测量; 修正因子

中图分类号: TL72

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)11-1397-05

Study on Accurate Measurement of ²²⁰Rn Activity Concentration by Using RAD7 Radon Monitor

MA Ruo-yun, ZHANG Lei, GUO Qiu-ju

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The study on accurate measurement of ²²⁰Rn activity concentration was carried out theoretically and experimentally. The effect of the volume of dryer vessel and the sampling flow rate on ²²⁰Rn measurement was studied in detail. It is found that the increase of dryer volume and the decrease of sampling flow rate can increase the differences between RAD7 results of ²²⁰Rn activity concentration and true value. For an accurate measurement of ²²⁰Rn activity concentration, the correction is necessary. And the results show that correction factors for both the RAD7 proper small dryer and the big dryer are 1.224 ± 0.118 and 2.232 ± 0.598 , respectively.

Key words: RAD7 radon monitor; ²²⁰Rn activity concentration; accurate measurement; correction factor

²²²Rn 及其子体暴露是人类所受天然辐射最主要的来源^[1]。²²⁰Rn 作为²²²Rn 最重要的同

位素之一, 很长一段时间得不到关注。一方面, ²²⁰Rn 半衰期非常短 (55.6 s), 环境中的

收稿日期: 2011-04-26; 修回日期: 2011-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075009); 核物理理科基地资助项目(J1103206)

作者简介: 马若云(1990—), 女, 甘肃兰州人, 辐射防护与环境保护专业

^{220}Rn 气体分布不均匀,难以测量;另一方面,有限的 ^{220}Rn 气体测量数据导致人们忽略 ^{220}Rn 及其子体暴露剂量贡献^[2]。近些年,在我国局部地区的室内环境调查中发现了较高活度浓度的 ^{220}Rn 的存在,部分区域 ^{220}Rn 及其子体暴露剂量甚至超过 ^{222}Rn 及其子体暴露剂量,居室环境中的 ^{220}Rn 及其子体暴露问题逐渐引起大家的广泛关注^[3-5]。

目前, ^{220}Rn 活度浓度测量方法主要分为主动法和被动法。主动法主要是用采样泵抽取 ^{220}Rn 气体到测量腔中,或通过计数时序分析,或通过 α 粒子能谱分析,测量给出 ^{220}Rn 活度浓度,代表性仪器有 AB-5 测氡仪(Pylon 公司,加拿大)和 RAD7 测氡仪(Durrige 公司,美国);被动法主要是 ^{220}Rn 气体通过扩散方式穿过滤膜进入测量腔,由于 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 半衰期不同,在测量腔内外形成的活度浓度差各异,采用对照测量,甄别出 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体,代表装置为 Raduet 和 RSFS 测氡杯^[6]。主动式仪器主要用于 ^{220}Rn 活度浓度的快速准确测量,被动式测量装置主要用于环境氡暴露剂量评价。

RAD7 测氡仪是国内最常用的一款主动式氡测量仪,其采用静电累积腔收集进入腔体后衰变产生的 ^{220}Rn 子体,通过半导体探测器测量 α 能谱,能同时测量 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体^[7]。RAD7 测氡仪最显著的特点是采用干燥的办法控制进入累积腔的空气湿度,避免湿度对测量结果的影响,提高了测量精度。然而,干燥管的存在使 ^{220}Rn 气体在进入静电收集腔前已部分衰变,导致累积腔中 ^{220}Rn 活度浓度较实际环境中 ^{220}Rn 活度浓度低。为准确测量 ^{220}Rn 活度浓度,需对 RAD7 测氡仪 ^{220}Rn 活度浓度测量结果进行一定修正^[8]。干燥管体积不同, ^{220}Rn 气体干燥过程中 ^{220}Rn 气体衰变份额不同,修正因子也不同。实际使用中发现,不同的 RAD7 采样泵的采样流速不完全相同,修正因子也应有所不同。

本文基于理论模型分析和实验测量,分析干燥管体积和采样泵流速对 RAD7 测氡仪 ^{220}Rn 活度浓度测量结果的影响,并拟给出典型测量条件下修正因子的典型值,为 RAD7 准确测量 ^{220}Rn 活度浓度提供参考。

1 材料与方法

1.1 基本理论

RAD7 测氡仪是一便携、可连续取样测量的仪器,在环境氡检测中得到广泛应用。RAD7 测氡仪基于静电采集原理采样,其累积腔是一 0.7 L 的半球形腔体,内表面涂有导电材料,累积腔的中心位置放置一 PIPS 型半导体 α 探测器。半球形腔体内表面加正电压,探测器上加负电压。经干燥和子体过滤的放射性 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体经泵抽气进入累积腔中,累积腔中的 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体衰变产生的子体通常带正电,在电场作用下累积收集在探测器的表面。 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 子体衰变放出的 α 粒子被探测器探测,通过 α 能谱分析甄别出 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 子体衰变放出的 α 粒子,记录单位时间不同能量 α 粒子的计数随时间的变化,结合采集效率和探测效率等刻度因子,计算给出 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体活度浓度。

RAD7 测氡仪流气式采样过程中, ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体经采样管、干燥管和子体过滤膜进入累积腔中,累积腔体内 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体活度浓度随时间的变化 $A(t)$ 为:

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda A(t) - A(t) \frac{q}{V} + A_0 \frac{q}{V} \quad (1)$$

式中: A_0 为累积腔外 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体活度浓度, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$; q 为泵采样流速, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; λ 为 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体衰变常量; V 为累积箱的体积。等号右边第 1 项和第 2 项分别为衰变和泵抽出的减小项,第 3 项为环境氡气体抽入的增加项。初始时刻累积腔内活度浓度为 0 (即 $A(0)=0$)时,累积腔内外活度浓度之比可表示为:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \frac{q}{q + \lambda V} (1 - e^{-(\lambda + q/V)t}) \quad (2)$$

由于 $V=0.7 \text{ L}$, q 标称值为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $V/q \approx 0.7 \text{ min}$ 。采样时间 $t > 5 \text{ min}$ 后,基本可认为累积腔内活度浓度达到稳定。累积腔内 ^{222}Rn 与 ^{220}Rn 气体活度浓度稳态解为:

$$A = A_0 \frac{q}{q + \lambda V} \quad (3)$$

由于 ^{222}Rn 的半衰期长(3.83 d), $\lambda_{\text{Rn-222}} \ll q/V$,因此,对于 ^{222}Rn , $A = A_0$ 。 ^{220}Rn 的半衰期为 55.6 s, $\lambda_{\text{Rn-220}} \approx 0.748 \text{ min}^{-1}$,与 q/V 在同一

量级,因此,累积腔内外²²⁰Rn 活度浓度之比呈一定固定比例关系。由于²²⁰Rn 气体在进入累积腔前先经过干燥管,假设干燥管的体积为 V_d ,干燥管中²²⁰Rn 活度浓度为 A_1 ,则累积腔中²²⁰Rn 活度浓度 A 为:

$$A = A_1 \frac{q}{q + \lambda_{Rn-220} V} = A_2 \frac{q}{q + \lambda_{Rn-220} V_d} \cdot \frac{q}{q + \lambda_{Rn-220} V} \quad (4)$$

环境空气中²²⁰Rn 活度浓度 A_2 ($Bq \cdot m^{-3}$)和累积腔内²²⁰Rn 活度浓度 A ($Bq \cdot m^{-3}$)之比即为理论修正因子 R_0 :

$$R_0 = A_2/A = \frac{q + \lambda_{Rn-220} V_d}{q} \cdot \frac{q + \lambda_{Rn-220} V}{q} \quad (5)$$

从上式可看出,RAD7 测氡仪流气模式测量²²⁰Rn 活度浓度时,腔体内²²⁰Rn 活度浓度和环境²²⁰Rn 活度浓度并不相同,两者之间存在一固定比例关系,该比值取决于干燥管的体积 V_d 和采样流速 q 。

事实上,RAD7 测氡仪在出厂刻度时已对²²⁰Rn 活度浓度测量结果进行了标定,刻度时采用小干燥管,标称流速为 $1 L/min$,即 RAD7 测氡仪测量给出的²²⁰Rn 活度浓度结果已涵盖了刻度修正因子 R_{RAD7} :

$$R_{RAD7} = \frac{Q + \lambda_{Rn-220} V_{d,small}}{Q} \cdot \frac{Q + \lambda_{Rn-220} V}{Q} \quad (6)$$

其中: $V_{d,small}$ 为小干燥管的体积, $0.014 L$; Q 为刻度时的流速, $1 L \cdot min^{-1}$ 。测量发现,多数 RAD7 的采样流速并非 $1 L \cdot min^{-1}$ 。因此,实地测量时,环境中²²⁰Rn 活度浓度真实值同 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量值之间的比值——表征修正因子 R 应为:

$$R = \frac{R_0}{R_{RAD7}} = \frac{\frac{q + \lambda_{Rn-220} V_d}{Q} \cdot \frac{q + \lambda_{Rn-220} V}{Q}}{\frac{q + \lambda_{Rn-220} V_{d,small}}{Q} \cdot \frac{q + \lambda_{Rn-220} V}{Q}} \quad (7)$$

通过 R 修正,可有效减小 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量的系统误差,为此,称 R 为修正因子。

1.2 实验方法

实验验证工作在北京大学实验用²²⁰Rn 室中进行,实验装置结构如图 1 所示。

北京大学实验用²²⁰Rn 室主腔体采用防静电有机玻璃组成,有效体积 $300 L$,内置风扇保证内部活度浓度分布均匀。²³²Th 源(由汽灯纱罩提供)外置,通过调节源回路气体流速和汽灯纱罩的数目来控制²²⁰Rn 室内²²⁰Rn 活度浓度水平。外界温湿度控制系统和测量系统保证腔体内温湿度稳定。²²⁰Rn 气体的参考标准采用 AB5 测氡仪抓取模式测量结果。研究表明,AB5 抓取式测量方法原理简单,测量结果稳定,可作为²²⁰Rn 测量的实验室参考方法^[9-11]。

为研究干燥管体积对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响,在不改变采样流速的情况下(选择 RAD7 内置泵,采样流速 $0.62 L \cdot min^{-1}$),在 $1\ 000$ 和 $3\ 000 Bq/m^3$ 两种²²⁰Rn 活度浓度水平下,测量修正因子 R 随干燥管体积的变化。干燥管选型为 RAD7 配备大、小两种干燥管和一自制的体积在两者之间的干燥管,干燥管体积分别为 0.755 、 0.218 和 $0.014 L$ 。

为了解采样流速对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响,在不改变干燥管体积的情况下(选择 RAD7 配置的小干燥管,体积

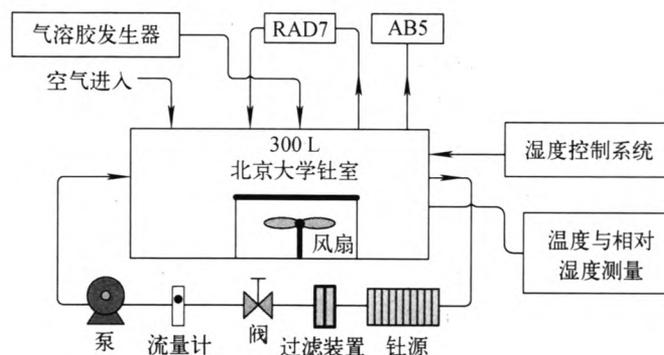


图 1 实验装置结构

Fig. 1 Structure of thoron chamber system

0.014 L),在 1 000 和 3 000 Bq/m³ 两种活度浓度水平下测量了修正因子随采样流速的变化。采样流速分别为 0.5、0.62 和 1 L·min⁻¹。其中,0.62 L·min⁻¹ 是本实验采用 RAD7 测氡仪采样流速的实测结果,另外两个采样流速分别由外置泵 AlphaPUMP 提供。

2 结果和讨论

2.1 干燥管体积对测量结果的影响

实验测量的干燥管体积对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响如图 2 所示。

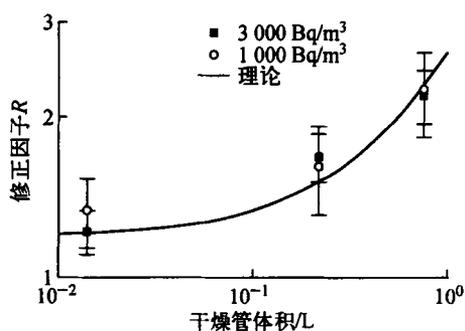


图 2 干燥管体积对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响

Fig. 2 Influence of volume of desiccation tube on result of RAD7

实验测量结果表明,修正因子随干燥管体积增大而增大,与²²⁰Rn 活度浓度水平无关。实验测量结果同理论计算结果基本吻合。低活度浓度水平下的²²⁰Rn 活度浓度测量误差较大,导致修正因子理论值和实验值的偏差较大。

RAD7 测氡仪在使用说明中推荐采用小干燥管来测量²²⁰Rn 活度浓度,小干燥管修正因子的典型值为 1.224 ± 0.118 。由于小干燥管测量时,干燥剂失效太快,在现场需较长时间连续测量²²⁰Rn 活度浓度时,通常采用大干燥管进行干燥,此时修正因子的典型值应取 2.232 ± 0.598 。

2.2 采样流速对测量结果的影响

实验测量的采样流速对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响如图 3 所示。

实验测量结果表明,修正因子随采样流速的增大而减小,与²²⁰Rn 活度浓度无关。高活度浓度水平下,实验测量结果同理论计算结果吻合较好。低活度浓度水平下的²²⁰Rn 活度浓度

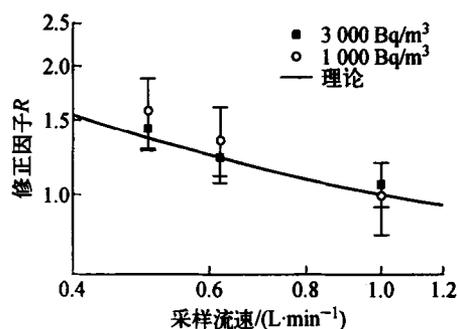


图 3 采样流速对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响

Fig. 3 Influence of flowing velocity on result of RAD7

测量误差较大,导致修正因子理论值和实验值的偏差较大。

从实验结果可发现,增加采样泵流速,缩小干燥管的体积,能有效缩小累积腔内²²⁰Rn 活度浓度同环境²²⁰Rn 活度浓度的差别。但采样泵流速的增大会带来功率增加、电池使用时间缩短等不利因素,缩小干燥管的体积会带来需频繁更换干燥剂的问题。虽采用修正因子修正能部分解决 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度准确测量的问题,但不能提高²²⁰Rn 测量灵敏度和降低探测下限。干燥方法上的更新和硬件性能的提高才是 RAD7 测氡仪解决²²⁰Rn 活度浓度测量问题的最根本之道。

3 结论与展望

本研究分析了干燥管体积和采样泵流速对 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量结果的影响。研究表明,随着干燥管体积的增加和采样流速的减小,环境中²²⁰Rn 活度浓度真实值同 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度测量值之间的比值增大。RAD7 测氡仪采用小干燥管干燥时, R 为 1.224 ± 0.118 ;采用大干燥管时, R 为 2.232 ± 0.598 。采用上述 R 能从一定层面上解决 RAD7 测氡仪²²⁰Rn 活度浓度准确测量的问题,但并不能提高²²⁰Rn 测量灵敏度和降低探测下限。

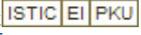
静电收集腔采集、半导体能谱测量,是目前大多数测氡仪测量²²²Rn 与²²⁰Rn 的方法。湿度能显著影响静电收集效率,进而影响测氡仪的灵敏度。常用的消除湿度影响的方法有两种:1) 如同 RAD7 加干燥管;2) 如同 EQF2100 对湿度影响进行刻度修正。前者虽免去了湿度修正

带来的误差,但带来了²²⁰Rn测量上的问题。为获得更准确的测量结果,需优化选择采样泵流速和干燥管大小,使修正因子最小。后者测量结果的准确性,直接取决于湿度测量结果和湿度响应修正因子的准确性。将两者的优点有机结合,将是以后测氡仪发展的方向。

参考文献:

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation[R]. Sweden: UNSCEAR, 2000.
- [2] STEINHAUSLER F. Environmental ²²⁰Rn: A review[J]. Environmental International, 1996, 22(S1): 1 111-1 123.
- [3] GUO Q J, SUN J Y, ZHUO W H. Potential of high thoron exposure in China[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2000, 37(8): 716-719.
- [4] SHANG B. Radon survey in dwellings of Gansu, China: The influence of thoron and an attempt for correction [J]. Radiat Environ Biophys, 2008, 47: 367-373.
- [5] ZHANG L, LIU C H, ZHUO W H. Measurements of thoron and radon progeny concentrations in Beijing, China[J]. Journal of Radiological Protection, 2008, 28(4): 603-607.
- [6] ZHUO W H, TOKONAMI S, YONEHARA H, et al. A simple passive monitor for integrating measurements of indoor thoron concentrations[J]. Review of Science Instrument, 2002, 73: 2 877-2 881.
- [7] RAD7 radon detector user manual [M]. US: DURRIDGE Company Inc., 2000.
- [8] QIU S, XIAO D, LIU L. First intercomparison of Tn/Rn discriminative measurements in China [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2008, 128(1): 124-127.
- [9] 吴建,张磊,郭秋菊,等. 卢卡斯闪烁室法测量²²⁰Rn浓度研究[J]. 辐射防护, 2010, 30(1): 24-29.
WU Jian, ZHANG Lei, GUO Qiuju, et al. The measurement of thoron concentration using Lucas scintillation cell[J]. Radiation Protection, 2010, 30(1): 24-29(in Chinese).
- [10] 刘翠红,张磊,卓维海,等. Alpha GUARD测氡仪的²²⁰Rn响应研究[J]. 辐射防护, 2010, 30(3): 135-140.
LIU Cuihong, ZHANG Lei, ZHUO Weihai, et al. Response of alpha GUARD radon detector to ²²⁰Rn[J]. Radiation Protection, 2010, 30(3): 135-140(in Chinese).
- [11] 张磊,梁璐成,吴建,等. 放射性气体²²⁰Rn的准确测量研究[J]. 核技术, 2010, 33(4): 294-296.
ZHANG Lei, LIANG Juncheng, WU Jian, et al. Study on accurate measurement of radioactive gas ²²⁰Rn[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(4): 294-296(in Chinese).

基于RAD7测氡仪的 ^{220}Rn 气体准确测量研究

作者: [马若云](#), [张磊](#), [郭秋菊](#), [MA Ruo-yun](#), [ZHANG Lei](#), [GUO Qiu-ju](#)
作者单位: [北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室](#), 北京, 100871
刊名: [原子能科学技术](#) 
英文刊名: [Atomic Energy Science and Technology](#)
年, 卷(期): 2012, 46(11)

参考文献(11条)

1. UNSCEAR [Sources and effects of ionizing radiation 2000](#)
2. STEINHAUSLER F [Environmental \$^{220}\text{Rn}\$: A review 1996\(z1\)](#)
3. GUO Q J;SUN J Y;ZHUO W H [Potential of high thoron exposure in China 2000\(08\)](#)
4. SHANG B [Radon survey in dwellings of Gansu,China:The influence of thoron and an attempt for correction 2008](#)
5. ZHANG L;LIU C H;ZHUO W H [Measurements of thoron and radon progeny concentrations in Beijing,China 2008\(04\)](#)
6. ZHUO W H;TOKONAMI S;YONEHARA H [A simple passive monitor for integrating measurements of indoor thoron concentrations 2002](#)
7. RAD7 radon detector user manual 2000
8. QIU S;XIAO D;LIU L [First intercomparison of Tn/Rn discriminative measurements in China 2008\(01\)](#)
9. 吴建;张磊;郭秋菊 [卢卡斯闪烁室法测量 \$^{220}\text{Rn}\$ 浓度研究 2010\(01\)](#)
10. 刘翠红;张磊;卓维海 [Alpha GUARD测氡仪的 \$^{220}\text{Rn}\$ 响应研究 2010\(03\)](#)
11. 张磊;梁琚成;吴建 [放射性气体 \$^{220}\text{Rn}\$ 的准确测量研究 2010\(04\)](#)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_yznkxjs201211023.aspx