

气球法测氡仪在室内氡浓度评价中的应用

朱国祯¹ 葛良全² 李值纯¹

1 (湖南省职业病防治院 长沙 410000)

2 (成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要 借助气球法测氡仪调查成都某高校实验楼内氡浓度大小,并估算楼内氡气所致不同人群的年有效剂量,按照标准《室内氡及其衰变产物测量规范》(GBZ/T 182-2006)中的要求进行布点和剂量估算。结果表明:实验楼的氡浓度的平均值为 $20.99 \pm 13.87 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,符合标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中关于室内氡浓度的要求,室内氡浓度的大小与房间建筑面积有一定关系;楼内氡致科研工作者的年有效剂量最高位 0.24 mSv ,低于世界平均值(1.2 mSv);楼内氡气致人群的年有效剂量处于正常本底水平,氡及其子体并未造成附加剂量。气球法测氡仪操作简单、便携性好,基于气球法测氡仪的直接刻度方法能在无标准氡室的情况下,计算出测氡仪的刻度系数在误差范围内,用此种方法计算出的刻度系数基本能满足实际测量的要求。

关键词 气球法测氡仪, 氡浓度, 年有效剂量

中图分类号 TL77

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.080201

氡气是一种特殊的气体。它集惰性和放射性于一身,存在于任何的自然环境中,是天然辐射本底的主要贡献者^[1-3]。由于氡具有级联衰变性,其测量一直是核探测领域困难的研究课题^[4]。常见的测氡方法有很多种,气球法测氡是环境中氡浓度的标准测量方法之一,由清华大学于1974年研发并成功应用到矿山中氡浓度的测量。这种方法除了能测量环境中的氡浓度外,还能测量氡子体的浓度,具有测量精度高、测量结果准确等优点^[5-6]。气球法测氡以马尔科夫测氡理论为基础,能在26 min内给出测量结果,属于主动快速测氡法。刻度系数是气球测氡的关键技术指标之一,在定量分析中,通常要根据所测量的环境的氡浓度、气压、相对湿度等条件,将测氡仪放在与标准氡室相近的环境中测量后得到。这是一项比较复杂而且周期较长的工作,往往测氡仪的生产部门并没有得到相关部门认可的标准氡室。本文基于气球法测氡仪测量过程,建立了气球法测氡仪直接测氡的理论方法,并把这种方法应用到室内氡浓度的评价。结果表明,在误差范围内,这种方法基本能满足实际工作的需求。这种方法操作简单、可以缩短仪器的制作周期、经济代价低^[7]。

1 测量原理

根据气球法测氡的测量原理,其测量程序应按照图1的过程严格进行。

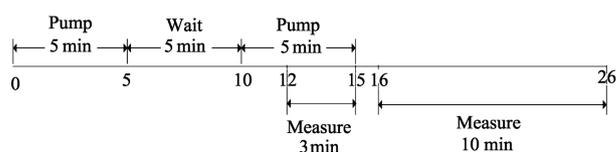


图1 气球法测氡工作程序

Fig.1 Time program of balloon radon measure instrument.

该装置的测氡的过程分为:抽气阶段、等待阶段、排气阶段、测量阶段。在抽气阶段(5 min),采样头1会把气体中含有氡的子体RaA全部过滤掉,而把“干净”的气体抽到气球内,让纯净的氡气在气球内衰变(5 min);然后排出所有的气体(5 min),前两个阶段新产生的子体RaA全部留在采样头2上;取下采样头2进行测量(10 min),得到的计数为X。然后根据式(1)算出氡在单位体积内的活度。

$$C_{\text{Rn}} = K_b (X - 10R) \quad (1)$$

式中, K_b 为气球测氡装置的刻度系数, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}$; R 为滤膜上的本底。

2 仪器介绍

IED-3000F 气球法测氡仪是成都理工大学地学核技术实验室新研发的一款环境级氡测量仪。主要由采样系统、测量系统、气球等配件构成。这款测

国家863计划资助项目(No.2012AA061803)资助

第一作者:朱国祯,男,1987年出生,2013年于成都理工大学核技术与自动化工程学院获硕士学位,现从事放射性检测与评价工作

收稿日期:2014-03-17,修回日期:2014-04-19

氡仪在测量程序上与双滤膜法相似, 只是将双滤膜法中的衰变筒换成了气球, 不仅降低了制作成本, 而且延长了氡气的衰变时间, 提高了测量结果的精度。与早期的气球法测氡仪相比, 新研发的气球法测氡仪将采样系统和测量系统集成在一起, 并设计了抽气和排气的半自动化回路, 完善了采样系统, 基本上克服了早期气球法测氡仪漏气的缺点, 提高了测氡装置的整体稳定性和测量结果的准确度。实验结果证明, 这款测氡仪性能优良, 适用于环境中氡浓度的测量与评价^[8-9]。

2.1 仪器的采样系统

采样系统如图 2 所示, 在进气口和排气口处各安装三通阀门。进气时, 阀门 K1、K2 都置于①位置, 空气经过 A-B-P-E-F 通道进入气球; 排气时, 阀门 K1、K2 都置于②位置, 空气经过 F-D-P-C-A

通道被排出。无论是进气还是排气, 空气都经过了气泵和流量计, 通过对阀门 K1、K2 的控制, 实现了切换气路的功能。在抽气或排气的过程中, 气流都在封闭的环境里进行, 提高了采样效率。

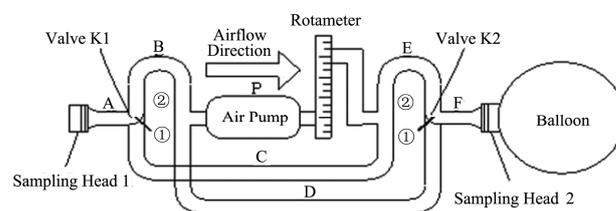


图 2 气球法测氡仪的采样系统

Fig.2 Sampling system of emanometer in balloon method.

2.2 仪器的电路工作原理

仪器的电路结构示意图如图 3 所示^[8]。

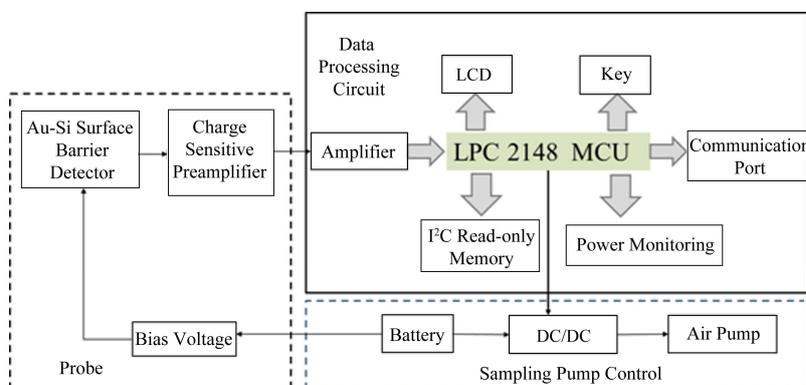


图 3 仪器电路结构框架图

Fig.3 Frame diagram of circuit about the instrument.

2.3 仪器的性能参数

实验结果表明, 仪器正常工作时, 各项性能参数如表 1^[9]。

表 1 测氡仪正常工作时的各项参数

Table 1 Parameters of radon measurement instrument.

参数名称	符号	值
Parameter name	Symbol	Value
抽/排气速度 Exhaust/pumping speed	v	$20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$
气球的体积 Volume of the balloon	V	50 L
抽气时间 Pump-down time	t_1	5 min
等待时间 Waiting time	t_2	5 min
排气时间 Pump-out time	t_3	5 min
测量时间 Measuring time	t_4	10 min
膜的过滤效率 Filtration efficiency	θ	97.47%
膜的自吸收效率 Absorption efficiency	β	90.47%
刻度系数 Calibration coefficient	K_b	1.70

3 刻度系数

根据气球法测氡仪的工作原理, 推导出了计算气球法测氡仪刻度系数(K_b)的理论计算公式^[8-9]:

$$K_b = \frac{1}{K\theta\eta(1-\beta)} \quad (2)$$

K 是一个与仪器自身有关的参数, 其计算方法如下:

$$K = \left[\frac{e^{-\lambda_2 t_2} v t_1 (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) + (1 - e^{-\lambda_2 t_2})}{\lambda_2} \right] \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda_2 t_3})(1 - e^{-\lambda_2 t_4}) v}{\lambda_2} \quad (3)$$

式中各符号的意义与表 1 一致。

将表 1 中的数据代入式(2)中, 可以算出 K_b 为 1.70; 与该测氡仪在核工业六所标准氡室温度 25°C 和相对湿度 70% 的条件下测量所得到的刻度系数

1.75 相比, 相差 2.9%。在误差范围内, 用此种方法得到的刻度系数能满足实际的需求。

4 材料与方法

4.1 监测点

成都某高校实验楼, 该实验楼为三层老式建筑, 建筑材料为混凝土、红砖、水泥、砂石等。选取 4 个实验室为实际测量地点, 其中一层 2 个, 二层 1 个, 三层 1 个。所选实验室的建筑面积均未超过 200 m^2 , 但是却有大小之分, 一层楼的 110 室和二层楼的 210 室面积相同是大建筑面积实验室, 一层楼的 115 室和 3 层楼 313 室的面积相同为小建筑面积实验室。

4.2 布点

按照标准《室内氡及其衰变产物测量规范》(GBZ/T 182-2006)^[6], 每个实验室布一个测点, 测点距地面的高度为 1.5 m, 与墙的距离不小于 30 cm, 而且测点应远离门窗、通风口、空调等。

4.3 测量

选晴朗、无风、室内温湿度稳定的天气测量, 测量前关闭门窗 8 h 以上。根据 IED-3000F 型气球测氡仪使用说明书及注意事项规范操作。

5 结果与分析

5.1 监测点氡浓度整体分析

此次检测共收集有效测量结果 125 个, 表 2 为此次调查的整体结果。监测点氡浓度的最小值为 $3.40\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值为 $86.70\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 $20.99\pm 13.81\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 符合标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)^[10]中对室内氡浓度的限值。与用径迹法所测得成都地区累积氡浓度^[13]的结果相比, 降低了约 $19\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与 20 世纪 90 年代用闪烁法所测的成都地区瞬时氡浓度的结果相比^[11], 降低了约 $10\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。313 室与 115 室的平均氡浓度分别为 $24.65\pm 9.72\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $29.28\pm 16.30\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 210 室与 110 室的平均氡浓度分别为 $11.69\pm 4.92\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $11.05\pm 4.23\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 在建筑材料和室内装饰条件相同时, 氡气在建筑面积相同的环境中的浓度相近。

表 2 楼内氡气测量结果
Table 2 Measuring results of radon in the laboratory building.

测量地点 Measuring site	有效测量次数 Effective measuring	氡浓度 Radon concentration / $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	
		范围 Range	平均值±均方差 Mean value±mean square error
313 室 313 room	30	10.2–47.6	24.65 ± 9.72
210 室 210 room	24	3.4–22.1	11.69 ± 4.92
110 室 110 room	26	5.1–20.4	11.05 ± 4.23
115 室 115 room	45	8.5–86.7	29.28 ± 16.30
整个楼内 All building	125	3.04–86.70	20.99 ± 13.87

5.2 不同面积房间氡浓度的比较

表 2 的结果表明, 小房间的氡浓度的平均值为 $27.43\pm 14.28\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 大房间的氡浓度的平均值为 $11.36\pm 4.54\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 小房间的平均氡浓度比大房间的氡浓度要高。这两类房间的建筑材料和室内装饰材料都一样, 在相同的时间内, 大房间所释放的氡的总量要比小房间高, 但由于大房间的空间要比小房间大, 氡气的迁移速度在大房间相对较快, 从而使得整体的浓度值降低。在建筑材料和室内装饰材料相同时, 氡气在建筑面积较小环境中的浓度可能高于建筑面积较大房间的浓度。

5.3 实验楼内氡气致不同人群年有效剂量的估算

氡气致人体的辐射剂量, 是由氡及其子体衰变的 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线引起, 这些粒子或射线与人体组织的作用机理十分复杂, 一直是辐射剂量学领域一项困难的课题。UNSEAR 和 ICRP 分别用辐射剂量学方法和流行病学方法做了相关研究, 最新的研究结果表明, 这两种方法推导出的剂量转换系数有一定的差别^[12]。因此, 文章按照标准《室内氡及其衰变产物测量规范》(GBZ/T 182-2006)中推荐的方法来估算进入实验室不同人群的有效剂量, 式 (4)为剂量估算公式。

$$E_{Rn} = (C_{Rn}TD_g + C_{Rn}F_{Rn}TD_p) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, E_{Rn} 为暴露氡所致人体年有效剂量, mSv; C_{Rn} 为所测环境的平均氡浓度, $Bq \cdot m^{-3}$; T 为所考察人群暴露氡环境的时间, h; D_g 为氡气的剂量转换系数($0.17 nSv \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1} \cdot m^3$, 参照 UNSCEAR 2000^[13] 年报告); D_p 为氡子体的剂量转换系数($9.0 nSv \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1} \cdot m^3$, 参照 UNSCEAR 2000^[13] 年报告); 10^{-6} 为 nSv \rightarrow mSv 的转换系数; F 为平衡因子, 这里取 0.5。

进入实验楼的人群, 主要是办公人员、科研工作者。办公人员按 8 小时工作制度, 科研工作者按 10 小时工作制度, 不考虑国家法定的假日, 大致可以估算不同人群在实验楼的停留时间, 计算出氡所致不同人群剂量的大小, 表 3 为估算结果。

表 3 实验楼内氡所致不同人群年有效剂量估算结果
Table 3 Results of annual effective dose of different people in laboratory building.

人群	年居留时间	年有效剂量
Crowd	Annual residence time / h	Annual effective dose / mSv
办公人员	1920	0.19
Office staff		
科研工作者	2400	0.24
Science researchers		

计算结果表明, 氡气所致科研工作者的年有效剂量最大, 为 0.24 mSv, 低于世界的均值 ($1.2 mSv$)^[14]; 进入实验楼内的人群受到的天然照射处于正常本底范围, 氡及其子体并未造成附加剂量。

6 结语

(1) 气球法测氡仪操作简单, 便携性好。基于此仪器的直接刻度方法能在无标准氡室的情况下, 计算出测氡仪的刻度系数, 这种方法缩短了制作周期, 降低了经济代价。在误差范围内, 用此种方法计算出的刻度系数基本能满足实际测量的要求。

(2) 所监测实验楼内氡浓度的平均值为 $20.99 \pm 13.87 Bq \cdot m^{-3}$, 符合标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中关于室内氡浓度的限值。

(3) 室内氡浓度的大小与建筑面积有一定的关系。氡气致实验楼内科研人员的年有效剂量最大为 0.24 mSv, 远低于世界平均水平 ($1.2 mSv$)。氡气致进入实验楼内人群的辐射剂量处在本底水平, 氡及其子体未造成附加剂量。

(4) 该台仪器的精度和稳定性上还有待提高。在实际应用中, 直接刻度方法的不足之处在于对机器整体性能的把握, 尤其是滤膜的过滤效率和自吸收效率。而且该刻度系数的推导是在理想的条件进行的, 很多可能影响机器性能的因素都没有考虑在内, 比如气球壁对子体的吸附, 环境压力、温度、湿度等因素。因而, 该方法还有很多地方需要改进和完善。

参考文献

- 1 吴慧山. 氡测量方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1995
WU Huishan. The method and application of radon measurement[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1995
- 2 章晔, 华荣洲, 石柏慎. 放射性方法勘察[M]. 北京: 原子能出版社, 1978
ZHANG Ye, HUA Rongzhou, SHI Baishen. Radioactive survey method[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1978
- 3 UNSCEAR 2010. Summary of low-dose radiation effects on health[R]. New York: United Nation, 2010
- 4 汲长松. 改进的托马斯测氡公式[J]. 中国核科技报告, 1991(S3): 72-73
JI Changsong. Improved Thomas formula for radon measurement[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1991(S3): 72-73
- 5 GB/T 14582-93, 环境空气中氡的标准测量方法[S]. 北京: 中国辐射防护研究院, 1993
GB/T 14582-93, Standard methods for radon measurement in environmental air[S]. Beijing: China Institute for Radiation Protection, 1993
- 6 GBZ/T 182-2006, 室内氡及其衰变产物测量规范[S]. 北京: 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 2006
GBZ/T 182-2006, Specifications for monitoring of indoor radon and its decay products[S]. Beijing: The Chinese Center for Disease Control And Prevention of Radiation Protection and Nuclear Safety of Medicine, 2006
- 7 陈志恒, 傅耀宗. 气球法测氡钍浓度的一般公式[J]. 复旦学报(自然科学版), 1982, 21(3): 284-292
CHEN Zhiheng, FU Yaozong. A general formula of ballon method for the measurement of radon and thoron[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 1982, 21(3): 284-292
- 8 杨强, 葛良全, 花永涛, 等. 马尔科夫法气球测氡仪的研制[J]. 核技术, 2012, 35(11): 859-862
YANG Qiang, GE Liangquan, HUA Yongtao, et al. The

- development of balloon radon measure instrument by Markov method[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(11): 859-862
- 9 朱国祯, 葛良全, 杨强, 等. 气球法测氡装置探测效率的探究[J]. 核技术, 2013, **36**(3): 030402
ZHU Guozhen, GE Liangquan, YANG Qiang, *et al.* Exploration about detection efficient of the device measuring radon in balloon method[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(3): 030402
- 10 GB18871-2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 国家卫生部, 2002
GB18871-2002, Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S]. Ministry of Health, 2002
- 11 朱俊, 张文勇, 潘亚玲, 等. 成都市居民住宅内氡浓度水平调查[J]. 职业卫生与病伤, 2002, **17**(3): 207
ZHU Jun, ZHANG Wenyong, PAN Yaling, *et al.* Investigation of indoor radon concentration levels in Chengdu[J]. Journal of Occupational Health and Damage, 2002, **17**(3): 207
- 12 张磊, 艾宪芸, 郭秋菊, 等. 氡暴露的剂量转换系数研究动态[J]. 辐射防护, 2013, **33**(2): 115-119
ZHANG Lei, AI Xianyun, GUO Qiuju, *et al.* Developments on radon dose conversion factor research[J]. Radiation Protection, 2013, **33**(2): 115-119
- 13 UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation[M]. Sweden: UNSCEAR, 2000
- 14 徐立鹏, 葛良全, 谷懿, 等. 成都地区室内环境氡浓度和 γ 辐射水平调查[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 351-356
XU Lipeng, GE Liangquan, GU Yi, *et al.* Investigation of indoor radon concentration and γ radiation levels in Chengdu area[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(2): 351-356

Application of the instrument measuring radon in balloon method to evaluating indoor radon concentration

ZHU Guozhen¹ GE Liangquan² LI Zhichun¹

¹(Hunan Prevention and Treatment Institute for Occupational Disease, Changsha 410000, China)

²(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract Background: The value of indoor radon concentrations is related to the health of public, the measurement and evaluating had been attracting much attention from the scientific researcher. **Purpose:** The aim is to measure the indoor radon concentrations in a laboratory of university located in Chengdu, and estimate the annual effective dose of radon for researcher and staff. **Methods:** The measuring site and estimating dose were chosen according to the requirement of *Specifications for monitoring of indoor radon and its decay products* (GBZ/T 182-2006). **Results:** The average radon concentration in the laboratory building is 20.99 ± 13.87 Bq·m⁻³, which is conforming to the demands of *Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*; the value of indoor radon concentrations is related to the area of the room. The annual effective dose of the science researchers in the laboratory building is 0.24 mSv, which is lower than the world average dose. **Conclusion:** The annual effective dose of radon people in the laboratory received is in the normal background level; radon and its daughter don't bring additional dose. The instrument measuring radon in balloon method is simple in operation and portable; as direct scale based on the instrument can calculate the calibration factor without standard radon chamber, in the range of error, the calibration factor can satisfy the need of actual work.

Key words Instrument measuring radon in balloon method, Radon concentration, Annual effective dose

CLC TL77