

开环式氡析出率连续测量中抽气流率的影响

刘 畅¹ 单 健¹ 袁久林² 钟士力¹ 肖德涛¹ 刘晓翔¹ 刘 彦¹

1 (南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

2 (山东省核与辐射安全监测中心 济南 250117)

摘要 应用MATLAB对开环式氡析出率测量过程中不同抽气流率下集氡罩内氡浓度随时间的变化规律进行模拟计算,并用实验对计算结果进行了验证。结果表明,在氡析出率测量时保持集氡罩参数不变的情况下,随着抽气流率的增大,集氡罩内平衡氡浓度值减小,达到平衡氡浓度的时间也缩短。实验表明,集氡罩内的平衡氡浓度的减小可最大限度地减小泄露与反扩散的影响;抽气流率的变大使集氡罩内达到平衡氡浓度时间缩短以及集氡罩内的充气均匀性愈好。通过本次实验,获得的抽气流率为 $1.94\text{--}3.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,集氡罩底面积为 299 cm^2 ,体积为 $1.79\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 。

关键词 氡析出率,开环测量,抽气流率,平衡时间,平衡氡浓度

中图分类号 O571.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010401

Influence of air pumping flow rate on the continuous measurement of open-loop radon exhalation rate

LIU Chang¹ SHAN Jian¹ YUAN Jiulin² ZHONG Shili¹ XIAO Detao¹
LIU Xiaoxiang¹ LIU Yan¹

1(Institute of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Nuclear and Radiation Safety Monitoring Center of Shandong Province, Jinan 250117, China)

Abstract Background: The research on radon exhalation rate mainly focuses on the influence factors of radon exhalation rate on the media surface, while research is still lacking with respect to equilibrium radon concentrations in radon cover sets, gas flow rate and other factors affecting the measurement accuracy of radon exhalation rate. **Purpose:** This study aimed to explore the relationship of the open-loop air-bleed rate, equilibrium radon concentrations and radon exhalation rate through theoretical calculations and actual measurements. **Methods:** MATLAB was used to simulate the variations of radon concentrations with time at different air-bleed rates during the open-loop measurement of radon exhalation rate in radon cover sets. The results were further proven by experiments. **Results:** In the case of constant parameters in radon cover sets in the measurement of radon exhalation rate, the equilibrium concentrations of radon decreased with the increase of air-bleed rates, and the time to reach the equilibrium concentrations was also shortened. The decrease of equilibrium concentrations of radon minimized the effect of the leakage and counter diffusion. The increase of air-bleed rates shortened the time for radon concentrations to reach equilibrium with better inlet gas uniformity in the radon cover sets. **Conclusion:** Reasonable parameters were obtained in this experiment with $1.94\text{--}3.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ for air-bleed rates, 299 cm^2 for basal area and $1.79\times 10^{-3}\text{ m}^3$ for the volume of radon cover sets.

国家自然科学基金(No.11375083)资助

第一作者:刘畅,男,1989年出生,2013年毕业于成都理工大学工程技术学院,现为硕士研究生,主要从事辐射防护与环境保护的研究

通信作者:单健, E-mail: shanjian0666@163.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11375083)

First author: LIU Chang, male, born in 1989, graduated from the Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology in 2013, master student, mainly engaged in radiation protection and environmental protection

Corresponding author: SHAN Jian, E-mail: shanjian0666@163.com

收稿日期: 2015-09-18, 修回日期: 2015-12-12

Key words Radon exhalation rate, Open-loop measurement, Air pumping flow rate, Equilibration time, Equilibrium radon concentration

随着公众环保意识的不断加强,人们对居室和环境的氡浓度也更加关注。氡析出率的大小直接反映了物体释放氡的能力。它也是评价各种建材及居室环境辐射危害程度的重要指标。所以,积极发展和优化氡析出率测量方法,对准确测量土壤、岩石和建材等表面的氡析出率具有重要意义。

目前,介质表面氡析出率的测量普遍采用在待测介质表面倒扣集氡罩的方式,通过对集氡罩内氡浓度的测量,进而推导出介质表面的氡析出率。而调研发现对氡析出率研究主要是集中在对介质表面的氡析出率影响因素方面的研究,如:陈凌等^[1]的氡面析出率的测量及相关因素的考虑;李初杰^[2]关于氡析出率的测定及其影响因素的探讨;曹众为^[3]的压力梯度和温度对多孔射气介质氡析出率影响的试验研究;苏日娜^[4]关于大气压力变化对于土壤氡析出率的影响等相关研究。而关于测量中集氡罩内氡的平衡浓度、气体流率等因素对氡析出率的测量准确性影响研究还很欠缺。

本文通过理论计算和实际测量,探讨开环氡析出率测量时抽气流率、集氡罩内平衡氡浓度与氡析出率准确测量的关系。

1 开环式测量氡析出率的方法

氡析出率的测量采用开循环时,集氡罩为非密封状态,即:将集氡罩内的气体以一定的流率泵出,并不断地将干净空气(空气中不含有氡或氡浓度相对较低)泵入罩内,开环式测量氡析出率原理^[5-6]如图1所示。

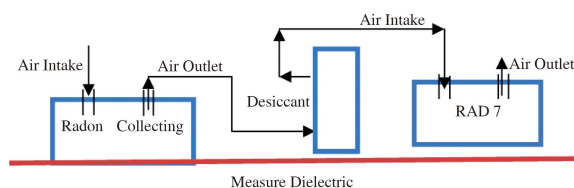


图1 双室开循环测量氡析出率原理图
Fig.1 Diagram of the measurement of radon exhalation rate by double room open loop method.

此时,罩内的氡浓度变化规律如式(1)所示^[7]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{PS - LC}{V} - \lambda C - RC \quad (1)$$

式中: L 为氡析出率测量时的抽气流率, $L \cdot \text{min}^{-1}$; S 为集氡罩底面积; V 为集氡罩体积; P 为氡析出率; C 为集氡罩内积累 t 时刻的氡浓度; λ 为氡的衰变常数($2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$); R 为氡的泄露和反扩散率。

式(1)可简化为:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{PS}{V} - \left(\frac{L}{V} + \lambda + R\right)C \quad (2)$$

当 $\lambda + R \ll L/V$ 时, 式(2)简化为:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{PS}{V} - \frac{L}{V}C \quad (3)$$

解微分方程可得:

$$C(t) = \frac{PS}{L} - \frac{PS}{L}e^{-\frac{L}{V}t} \quad (4)$$

在测量时, L 、 S 、 V 均为常数, 对于同一介质可以将 P 也近似看为常数。令 $K = PS/L$, 则:

$$Y(t) = Ke^{-\frac{L}{V}t} \quad (5)$$

必然存在某一时刻 $t \rightarrow m$ 时 $Y(t) \approx 0$, 也就是说, 此时集氡罩内的氡浓度达到了动态平衡, 式(4)可以简化为:

$$C = \frac{PS}{L} \quad (6)$$

所以, 氡析出率为:

$$P = \frac{LC}{S} \quad (7)$$

由式(6)可知, 在集氡罩参数不变的情况下, 在氡析出率的测量中抽气流率与集氡罩内平衡氡浓度在一定范围内成反比。

2 MATLAB 模拟计算

据式(6)成立的条件可知, 存在 $t \rightarrow m$ 时, 使得 $Y(t) = Ke^{-\frac{L}{V}t} \approx 0$, 下面我们借助 MATLAB 软件对 $Y(t) = Ke^{-\frac{L}{V}t}$ 进行模拟计算, 当集氡罩的体积为 2500 mL、常数 K 设为 1 时, 在不同的抽气流率下, $Y(t)$ 随时间 t 变化的曲线如图 2 所示。

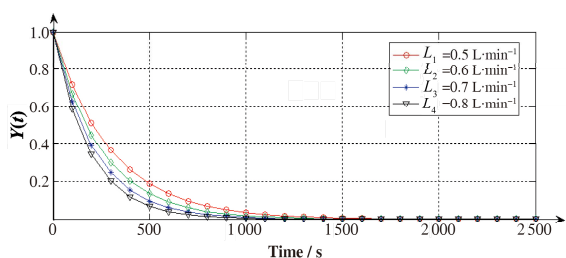


图2 不同抽气流率下 $Y(t)$ 随时间的变化曲线
Fig.2 $Y(t)$ under different pumping flow rates varies with time.

从图2可以看出,在不同的抽气流率下, $Y(t)$ 随 t 有着相同的变化趋势。在相同的集氡罩体积下,随着抽气流率的变大,集氡罩内的氡浓度达到平衡(即满足 $Y(t) \approx 0$) 时所需要的时间变短。

同时,当介质表面氡析出率值和集氡罩底面积不变时,抽气流率的大小也与集氡罩内的平衡氡浓度有着直接的关系。

此处,选择底面直径为 19 cm,即底面面积 $S=283.53 \text{ cm}^2$ 的集氡罩作为计算对象。用 MATLAB 软件模拟的结果如图3所示。

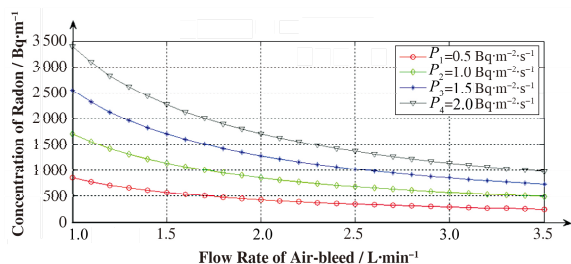


图3 抽气流率与集氡罩内氡浓度的关系变化曲线
Fig.3 Relationship between gas flow rate and the concentration of radon in the set of radon.

由图3可以看出,集氡罩内平衡氡浓度随着抽气流率的增大而不断减小,在相同抽气流率下,集氡罩内平衡氡浓度随着介质表面氡析出率而不断增大,反之则不断减小。所以,在测量介质表面氡析出率较小的物质时,应适当地选用抽气流率小的泵体测量,从而保证集氡罩内的氡浓度足够大以得到较准确的测量数据,减小由此带来的测量误差。

3 氡析出率的实验测量

本实验采用开循环法测氡析出率。所用仪器主要有测氡仪 RAD 7 (内置泵为 $0.54 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)、集氡罩(底面积为 299 cm^2 , 4个进气口、一个出气口)、Gilian5000 型空气采样泵。本实验的实验装置如图4所示。在集氡罩的进气口连接一个空气采样泵。首先,将干燥管的一端连接到 RAD7 测氡仪的进气口,

另一端连接到集氡罩的出气口,然后将集氡罩的 4 个进气口(为使集氡罩内的氡能够分布均匀)用 3 个三通连接至外接空气采样泵,完整实物连接如图4所示。通过改变空气采样泵的抽气流率来研究抽气流率对氡析出率测量的影响。



图4 实验数据测量实物装置图
Fig.4 Physical device of measuring experimental data.

实验选择南华大学氡室的氡析出率参考标准装置^[8]作为测量对象,装置如图5所示,该装置为模拟土壤尾矿氡析出率表面标准氡析出率参考值为 $P=(1.58 \pm 0.05) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



图5 氡析出率测量仪检定装置图
Fig.5 Radon exhalation rate meter verification device image.

实验采用的集氡罩底面积为 $2.99 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 集氡罩体积为 $V=1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。测量时 RAD7 的泵一直为 on 的状态,测量周期为 60 min,外置泵的流量设置为 $1-3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。实验得到了不同抽气流率下氡析出率的测量结果(图6(a))和不同抽气流率下集氡罩内平衡氡浓度的变化趋势(图6(b))。

由图6可看出,在抽气流率为 $1.64 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $1.94 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的4组中,实验结果与理论计算的平衡氡浓度、平均氡析出率值符合得较好,氡析出率装置加外置泵时测量的氡析出率平均值与标准装置的氡析出率值的相对误差都在 10% 以内,其中4组的平均氡析出率分别为 $1.69 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.57 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.63 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、

$1.59 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。并且随流率的变大符合得较好, 3组数据在集氦罩内到达平衡氦浓度后都会出现数据波动。这可能由于测氦仪内部的抽气泵流率并不稳定及外界环境的温湿度变化等因素造成数据波动。由图 6(a)可以看出, 流率在 $1.64 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 氦析出率值波动比较大, 而随着抽气流率的增大, 氦析出率的测量值变化趋势越来越平稳和精确, 这是由于流率的变大使集氦罩内的氦混合得更加均匀, 测量的值

更加稳定和准确; 图 6(b)得出集氦罩内平衡氦浓度值随抽气流率的变大而减小, 而集氦罩内平衡氦浓度值的变小有利于减少泄露和反扩散的影响, 为提高氦析出率测量值的准确性提供帮助。另外, 实验发现抽气流率的变大可以使集氦罩内达到平衡氦浓度的时间大大缩短, 为快速可靠的氦析出率测量提供保障。

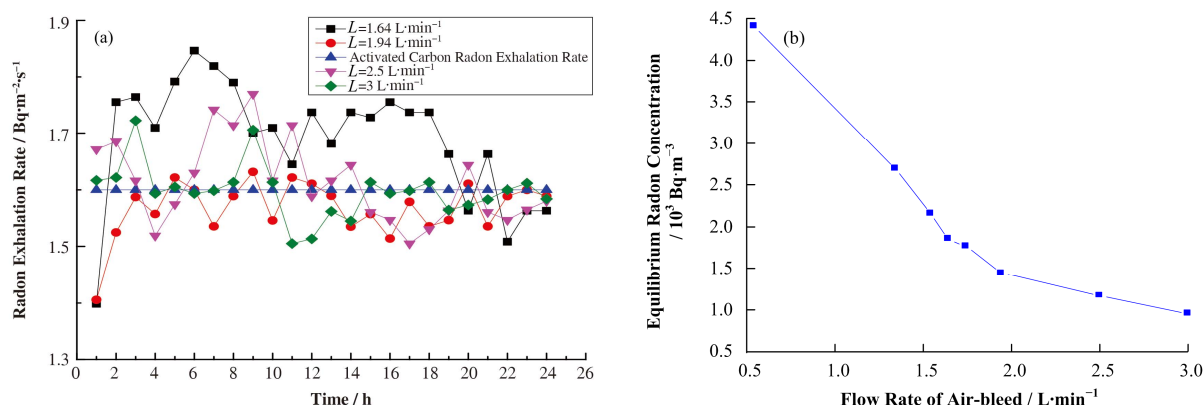


图 6 不同抽气流率下所测氦析出率数据(a)和集氦罩内平衡氦浓度(b)的变化
Fig.6 Variation curves of radon release rate (a) and equilibrium radon concentration (b) with different pumping flow rates.

4 结语

由模拟计算和实验结果分析得知:

1) 采用开环式进行氦析出率测量时, 通过增加外置泵控制持续开环循环气流的流率大小, 可以控制测量时集氦罩内平衡氦浓度值。模拟和计算结果也表明, 在氦析出率的测量中抽气流率与集氦罩内平衡氦浓度值在一定范围内成反相关的关系。

2) 测量时集氦罩内平衡氦浓度值随抽气流率变大而减小, 在尽可能降低集氦罩内平衡氦浓度值的情况下, 可最大限度地减小泄露和反扩散的影响, 有利于提高氦析出率测量值的准确性。

3) 泵的引入可以缩短集氦罩内达到平衡氦浓度的时间, 为实现快速氦析出率的测量提供了保障。

4) 以模拟土壤与尾矿氦析出率标准装置为测量的参考标准装置, 其氦析出率 $P=(1.58\pm0.05) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 在实际测量中得到测量时抽气流率为 $1.94\sim3.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 较为合适。

5) 实验中还发现, 泵的引入对集氦罩内氦的均匀性和介质表面压力有影响, 这可能影响氦析出率的准确测量, 今后应该对此问题进行深入的研究。

参考文献

- 陈凌, 谢建伦, 黄隆. 氦面析出率的测量及相关因素的考虑[J]. 辐射防护通讯, 1998, 18(6): 28-36
CHEN Ling, XIE Jianlun, HUANG Long. Measurement of radon surface exhalation rate and consideration of correlation factor[J]. Radiation Protection Bulletin, 1998, 18(6): 28-36
- 李韧杰. 氦析出率的测定及其影响因素的探讨[J]. 铀矿冶, 2000, 19(1): 56-61
LI Renjie. Measurement of radon exhalation rate and its discussion of influence factor[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(1): 56-61
- 曹众为. 压力梯度和温度对多孔射气介质氦析出率影响的试验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013
CAO Zhongwei. Experimental study on influence of pressure gradient and temperature on radon exhalation from porous emanium medium[D]. Hengyang: University of South China, 2013
- 苏日娜. 大气压力变化对于土壤氦析出率的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2008
SU Rina. Atmospheric pressure fluctuation effects on soil radon exhalation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008

-
- 5 Tan Y, Xiao D, Yuan H, *et al.* A method to simultaneously and continuously measure the ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates of soil in an open loop[J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2014, **50**(4): 531–537
- 6 Tan Y L, Xiao D T, Yuan H Z, *et al.* Revision for measuring radon exhalation rate in open loop[J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, **8**(2): 1–7
- 7 肖德涛, 谭延亮, 赵桂芝, 等. 开环式测量氡析出率的方法研究[A]. 第三次全国天然辐射照射与控制研讨会论文汇编[C]. 2010
- XIAO Detao, TAN Yanliang, ZHAO Guizhi, *et al.* Study on measurement method of radon exhalation rate in open loop[A]. The 3rd national seminar on natural radiation irradiation and control compilation of papers[C]. 2010
- 8 李先杰, 丘寿康, 刘纯魁. 氡析出率测量仪的检定装置[J]. *辐射防护*, 2008, **28**(4): 197–201
- LI Xianjie, QIU Shoukang, LIU Chunkui. A calibration facility for radon fluxmeter[J]. *Radiation Protection*, 2008, **28**(4): 197–201