

# 气球法测氡装置探测效率的探究

朱国祯 葛良全 杨强 谷懿 罗耀耀 曾国强 王婧 徐立鹏

(成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

**摘要** 探测效率是气球法测氡装置的重要技术指标之一,它的大小直接影响测氡装置测量结果的准确性。本文探究气球测氡装置的探测效率的方法,基于成都理工大学研制的一款新型气球法测氡仪—IED-3000F 气球测氡仪,结合其测氡的原理,推导了气球法测氡装置探测效率  $\eta$  的表达式。通过南华大学氡实验室刻度常数的实验结果,计算了该装置探测效率  $\eta$  的理论值,并与  $\eta$  的实测值进行了对比。结果表明,在误差范围内,由这种方法计算气球法测氡装置的探测效率具有可行性。

**关键词** 氡子体, 气球法测氡, 探测效率

**中图分类号** TL11

氡气是一种集放射性惰性于一身的特殊气体,它衰变出来的产物会通过确定性效应和非确定性效应对人体造成危害<sup>[1-2]</sup>。研究表明,人类长期处在含氡过高的环境中会增加得肺癌的几率<sup>[3-6]</sup>。在我国环境空气中氡的标准测量方法推荐的四种方法中<sup>[7]</sup>(径迹蚀刻法,活性炭盒法,双滤膜法和气球法),气球法测氡是唯一能够测出氡子体的浓度的方法,并且它在测量效率和精度上有很大的优势。气球法测氡以托马斯(Thomas)绝对测氡公式为原理,无需达到放射性平衡就能测出氡的浓度,是属于主动式快速测氡法<sup>[8]</sup>。首台气球法测氡装置是由清华大学和 711 矿研制成功的,此种方法不仅操作简单,而且非常有效地提高了测量结果的灵敏度<sup>[9]</sup>。以往的气球测氡装置的测量部分和抽气泵是分开的,新研制的气球测氡仪将两者集成在一起,基本上克服了早期气球测氡装置漏气的缺点,提高了测氡装置的整体稳定性和测量结果的精度。探测效率和灵敏度是气球法测氡装置的两个重要技术指标,其中探测效率直接影响着测量结果的准确性。然而,近些年来关于它的研究却未能受到广泛的关注。本文基于这台新研制的气球测氡仪的测量原理,推导这台装置探测效率的理论表达式,把这台装置工作时的一些参数值和刻度常数引入理论表达式中,计算理论值的大小,并与实测值进行了比较。结果表明,在误差范围内,由这种方法计算气球法测氡装置的探测效率具有可行性。

## 1 理论基础

### 1.1 气球测氡仪测量原理<sup>[10]</sup>

根据气球法测氡的测量原理,其测量程序应严格按照图 1 的过程严格进行。

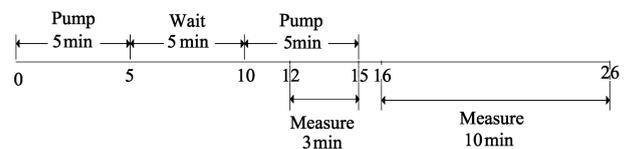


图 1 气球法测氡工作程序

Fig.1 Time program of balloon radon measure instrument.

该装置的测氡过程分为下面几个阶段: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,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  $\alpha$  计数为  $X$ 。然后根据下面的公式算出氡在单位体积内的活度<sup>[7]</sup>:

$$C_{Rn} = K_b(X - 10R)$$

式中  $K_b$  为气球测氡装置的刻度常数;  $C_{Rn}$  为空气中氡的活度,  $Bq/m^3$ ;  $X$  为  $\alpha$  计数;  $R$  为本底。

国家自然科学基金(410740093、40904054)资助

第一作者:朱国祯,男,1987 年出生,现为成都理工大学核能与核技术工程专业硕士研究生

通讯作者:葛良全, E-mail: glq@cdu.edu.cn

收稿日期:2012-09-10, 修回日期:2012-12-19

## 1.2 气球测氡装置探测效率的理论表达式的推导

现将仪器的参数做如下设定, 抽气阶段的起始时间为  $0 \sim t_1$  min, 等待阶段的起始时间为  $0 \sim t_2$  min, 排气阶段的起始时间为  $0 \sim t_3$  min, 测量阶段的起始时间为  $0 \sim t_4$  min; 气泵抽/排气的速度为  $v$  (L/min), 气泵停止抽气后气球的体积为  $V$  (L), 氡子体的衰变常数为  $\lambda_2$  ( $s^{-1}$ ), 滤膜的过滤效率为  $\theta$ , 滤膜的自吸收效率为  $\beta$ ; 以氡子体 RaA 在采样头 2 上的积累衰变过程为模型, 可以有如下推导:

### 1.2.1 抽气阶段

设气球测氡装置在  $t$  ( $t < t_1$ ) min 内所抽的气体总量为  $Q$  (L), 根据上面的设定则有  $Q = vt$ , 在  $t_1$  分钟内(抽气结束后), 这部分氡气在气球内产生的总的 RaA 的个数为  $n = QC_{Rn}t_1$ , 那么在  $dt$  时间内产生的子体个数  $dn = vC_{Rn}t_1 dt$ , 由于 RaA 要衰变, 设这一阶段产生 RaA 总个数为  $N_1$ , 那么有如下方程:

$$\frac{dN_1}{dt} = C_{Rn}vt_1 - \lambda_2 N_1 \quad (1)$$

$t=0$  时,  $N_1=0$ , 解上面方程有:

$$N_1 = \frac{C_{Rn}vt_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) \quad (2)$$

### 1.2.2 等待阶段

气泵停止抽气后气球内氡子体 RaA 的个数为  $N_2$ , 则有如下方程:

$$\frac{dN_2}{dt} = C_{Rn}V - \lambda_2 N_2$$

$t=0$  时,  $N_2 = N_1$ , 解上面的方程:

$$N_2 = N_1 e^{-\lambda_2 t_2} + (1 - e^{-\lambda_2 t_2}) \frac{C_{Rn}V}{\lambda_2} \quad (3)$$

把(2)式代入到(3)式中:

$$N_2 = \frac{C_{Rn}vt_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) e^{-\lambda_2 t_2} + (1 - e^{-\lambda_2 t_2}) \frac{C_{Rn}V}{\lambda_2} \quad (4)$$

### 1.2.3 排气阶段:

这个阶段开始之前有两个假设: (1)在排气之前子体  $^{218}\text{Po}$  在气球内的含量为  $\phi$  (个/L); (2)在排气之前采样头 2 的滤膜上的子体  $^{218}\text{Po}$  的个数为 0, 设开始排气后的某个时刻滤膜上的子体数为  $N_3$ 。

根据贝特曼方程<sup>[11]</sup>有如下的表达式:

$$\frac{dN_3}{dt} = \theta\phi v - \lambda_2 N_3$$

由假设可知  $t=0$  时,  $N_3=0$ , 解上面的方程:

$$N_3 = \frac{\theta\phi v}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_3}) \quad (5)$$

且排气之前气球内的子体  $^{218}\text{Po}$  的含量均匀, 所以有:

$$\phi = \frac{N_2}{V} \quad (6)$$

把式 (4)代入式(6)中得:

$$\phi = \frac{e^{-\lambda_2 t_2}}{V} \frac{C_{Rn}vt_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) + (1 - e^{-\lambda_2 t_2}) \frac{C_{Rn}}{\lambda_2} \quad (7)$$

再把式(7)代入到(5)中, 就可以算出滤膜上沉积的子体  $^{218}\text{Po}$  的个数  $N_3$ :

$$N_3 = \frac{\theta v}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_3}) \cdot$$

$$\left[ \frac{e^{-\lambda_2 t_2}}{V} \frac{C_{Rn}vt_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) + (1 - e^{-\lambda_2 t_2}) \frac{C_{Rn}}{\lambda_2} \right] \quad (8)$$

### 1.2.4 测量阶段

把采样头 2 放入探测器后, 仪器开始测量。假设测量的时间间隔为  $0 \sim t_4$ , 在这一段时间内, 假设仪器的探测效率为  $\eta$ , 过滤膜的自吸收系数为  $\beta$ 。如果某次测试的计数为  $X$ , 那么就有下面的关系:

$$N_3 \eta (1 - \beta) (1 - e^{-\lambda_2 t_4}) = X \quad (9)$$

把式(8)代入(9)中, 得

$$\frac{\theta v}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_3}) \left[ \frac{e^{-\lambda_2 t_2}}{V} \frac{C_{Rn}vt_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) + (1 - e^{-\lambda_2 t_2}) \frac{C_{Rn}}{\lambda_2} \right] \eta (1 - \beta) (1 - e^{-\lambda_2 t_4}) = X \quad (10)$$

$$\text{令: } K = \left[ \frac{e^{-\lambda_2 t_2}}{V} \frac{vt_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_1}) + \frac{(1 - e^{-\lambda_2 t_2})}{\lambda_2} \right] \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda_2 t_3}) (1 - e^{-\lambda_2 t_4}) v}{\lambda_2} \quad (11)$$

那么式(10)可以简化为如下形式:

$$\theta \eta (1 - \beta) K C_{Rn} = X$$

$$C_{Rn} = \frac{X}{K \theta \eta (1 - \beta)} \quad (12)$$

如果刻度常数  $K_b$ , 那么就有:

$$K_b = \frac{1}{K \theta \eta (1 - \beta)} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{理}} = \frac{1}{K \theta K_b (1 - \beta)} \times 100\% \quad (14)$$

式(14)就是新研发的气球测氡装置的探测效率的理论表达式。把表 1 中的  $v$ 、 $V$ 、 $\lambda_2$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  带入到(11)式中, 可以算出  $K$  值的大小为 15.49。

把仪器正常工作时的各项参数和由实验得到的

刻度常数  $K_0$  代入于(14)式，可以算出测氡装置探测效率的理论值。而气球法测氡装置探测效率的实测值可以借助于已知活度的标准  $\alpha$  放射源得到。方法是将仪器在标准源下测得的计数除以  $\alpha$  放射源的标准活度：

$$\eta_{测} = N_1 / N_0 \times 100\% \quad (15)$$

式中， $N_1$  为测氡装置在标准源下的计数， $N_0$  为标准源的活度。式(15)就是计算这台装置的探测效率的实测值的表达式。

## 2 实验

### 2.1 实验装置的介绍

新研发的气球测氡仪—IED-3000F 气球测氡仪

是成都理工大学研制的一款新型的气球法测氡装置，它设计了双控抽/排气系统，采用高性能金硅面垒探测器为探头，操作简单，测量精准，易携带。图 2 是装置内部示意图，正常工作时的各项参数的参考值见表 1。

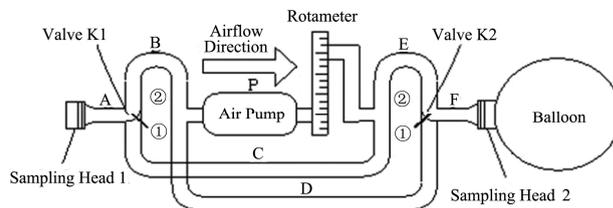


图 2 IED-3000F 气球测氡仪内部结构图

Fig.2 Internal structure of Balloon method for the measurement of radon.

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 Parameter name	符号 Symbol	值 Value
抽/排气速度 Exhaust/pumping speed	$v$	20 L/min
气球的体积 The volume of the balloon	$V$	50 L
氡子体的衰变常数 Radon of plasma decay constant	$\lambda_2$	$0.00385 \text{ s}^{-1}$
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	$\theta$	97.47%
膜的自吸收效率 Absorption efficiency	$\beta$	90.47%

### 2.2 气球测氡仪的标定

标准氡室是为模拟地下和地表环境条件，以及对多种类和大数量的测量仪器进行标定和测试建立的。它主要由主体箱(刻度区)，参数调节自动控制系統，监测系统和空气净化系统 4 部分组成<sup>[12]</sup>。参照 JJG 825-1993 测氡仪检定规程的氡测量仪检定方法，让待刻度的测氡仪抽取主体箱内的含有的标准氡浓度的气体，并进行测量，可以算出待刻度测氡仪的刻度常数<sup>[13]</sup>。

本次标定实验是在南华大学氡实验室完成的。南华大学氡实验室是国际氡计量组织的亚洲区域协调实验室，氡的剂量标准是亚洲区域氡量传递的最高标准。在实验时选取主体箱的条件是：温度为 25 度，相对湿度为 70%，氡室浓度为  $2000 \text{ Bq/m}^3$  和  $5000 \text{ Bq/m}^3$  左右。

### 2.3 气球测氡仪探测效率的测量

实验中使用活度为  $626/\text{min}$  的标准  $\alpha$  放射源，把标准源放在探测器处，让测氡仪测量 1 min，一共测量 10 次。

## 3 结果与分析

### 3.1 实验测量结果

实验结果见表 2、表 3。经过测试，新研制气球法测氡仪的各项指标都达到同类仪器的水平，符合国家标准，能够适用于矿山环境下氡浓度的快速测量与评价。

表 2 氡浓度测量结果表

Table 2 Measure result of radon.

氡浓度 Radon/Bq·m <sup>-3</sup>	氡计数 Radon counts	$K_b$
1837	1125	1.75
4810	2582	

表 3 探测效率测量结果表

Table 3 Measure result of detection efficiency.

$\alpha$ 源活度 A (626/min)					
$\alpha$ source activity					
计数 / min <sup>-1</sup>	231	271	235	262	256
Counts	247	248	262	280	271

### 3.2 结果计算

把  $K_b=1.75$ ,  $K=15.94$  以及表 1 中的  $\theta=0.9747$ ,  $\beta=0.9047$  代入式(14)中得:

$$\eta_{理} = \frac{1}{1.75 \times 0.9747 \times 15.49 \times (1 - 0.9047)} \times 100\%$$

算出 IED-3000F 气球测氡仪探测效率的理论值为 39.71%。

由表 3 中的实验数据可知: 10 次计数的平均值为  $N_1=256.30$ , 把  $N_1$ ,  $N_0=626$  带入式(15)中:

$$\eta_{测} = \frac{256.3}{626} \times 100\%$$

算出 IED-3000F 气球测氡仪探测效率的实测值为 40.9%, 与理论值 39.71%吻合得很好。理论值要比实测值要小, 这是由于理论值的表达式是在相对理想的条件推导出来的, 很多影响气球测氡装置的因素都没有考虑在内。比如, 气球壁对  $RaA$  的吸收等, 但是这些因素在测氡装置正常工作时总是存在的。用这种方法测量气球法测氡装置探测效率的不足之处是工作量大, 比较容易出错。

### 4 结论

(1) IED-3000F 气球测氡仪探测效率的理论值和实测值在误差允许范围内基本吻合, 由此种方法计算气球法测氡装置的探测效率是可行。

(2) 其他条件一定时, IED-3000F 气球法测氡仪刻度常数  $K_b$  的稳定性与探测效率有密切的关系。

### 参考文献

- 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
- UNSCEAR 2010. Summary of low-dose radiation effects on health(R). New York: United Nation, 2010
- Jing Chen, Naureen, Rahman M. Radon exhalation from building materials for decorative use[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, **101**: 317-322
- National Research Council. Health Effects of Exposure to Radon(BEIR-VI). Washington, DC: National Academy Press, 1999
- 张辉, 卓维海. 室内氡对人体健康影响的研究现状[J]. 环境与职业医学, 2011, **28**(7): 449-452  
ZHANG Hui, ZHUO Weihai. Current Status of Epidemiological Studies on Health Effects of Indoor Radon[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2011, **28**(7): 449-452.
- 赵斌, 陈灿, 何海军. 氡的危害与防护[J]. 广州化工, 2011, **39**(9):61-62  
ZHAO bin, CHEN Can, HE Haijun. The Harm and Prerention of Radon[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, **39**(9): 61-62
- 国家质检总局.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]. [S.l.]:China Institute for Radiation Protection, 1993
- 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
- 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
- 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. The development of balloon radon measure instrument by Markov method[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(11): 859-862
- 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, P68  
ZHANG Zhihui. Measurement methods of radon and its daughters in atmosphere[M]. Beijing: Beijing: Atomic

- Energy Press, 1994, P68
- 12 刘鹏, 王怀杰. 标准氡室自动控制系统[J]. 辐射防护通讯, 2007, 27(4): 12-16
- LIU Peng, WANG Huaijie. Automatic control system for standard radon chamber[J]. Radiation Protection Bulletin, 2007, 27(4):12-16
- 13 国家技术监督局, JJG825-93 中华人民共和国国家计量检定规程测氡仪[M]. 北京:中国计量出版社, 1993: 4-5. JJG825-93 the People's Republic of China The national metrological verification regulations about emanometer [M]. Beijing: China Metrology Press, 1993: 4-5

## Exploration about detection efficient of the device measuring radon in balloon method

ZHU Guozhen GE Liangquan YANG Qiang GU Yi LUO Yaoyao  
ZENG Guoqiang WANG Jing XU Lipeng

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract Background:** Detection efficient is one of the important technical parameters in the device of measuring radon in balloon method. Its value would influence the veracity of the result. **Purpose:** This paper had explored a new method about calculating detection efficient of the device measuring radon in balloon method. **Methods:** The expression of detection efficient  $\eta$  has been deduced based on the principle of measuring radon and the new device which is IED-3000F developed by Chengdu University of Technology. **Results:** The detection efficient' experimental value has been measured. **Conclusions:** The result show that this theory used in calculating detection of balloon method for measurement of radon is quite feasible in the range of error.

**Key words** Radon daughter, Balloon method for measuring radon, Detection efficiency

**CLC** TL11