

空气氡浓度瞬时测量方法研究

丁卫撑 方方 阮菊红 王敏 黄秋

(成都理工大学核技术四川省重点实验室 成都 610059)

摘要 针对目前空气氡浓度测量中存在的测量灵敏度低、测量时间长的缺点,对比研究及理论探讨后提出一种空气氡浓度瞬时测量方法。常压空气脉冲电离室对氡及其子体均有较高的探测效率,符合高灵敏度测量要求。在电离室内部加入氡及其子体收集装置实现空气中氡及其子体的快速抓样收集,克服了氡子体对电离室污染问题,符合瞬时测氡要求。通过实验初步验证了本文方案的可行性。

关键词 电离室, 氡, α 粒子, 测量, 计数

中图分类号 O571.32*1

氡是天然放射性衰变系列中对人体非常有害的气态放射性核素。国家标准 GB50325-2001《民用建筑工程室内环境污染控制规范》和国家标准 GB/T18883-2002《室内空气质量标准》规定了室内氡气检测的要求。因此,环境辐射评价很需要快速有效的空气氡浓度检测方法。本文提出一种基于常压空气脉冲电离室空气中氡浓度的瞬时测量方法。

1 现有空气氡浓度测量技术分析

稳定空间中,氡及其子体处于平衡状态,测量其衰变放射出 α 粒子,可监测空气中氡浓度。但是,空气中的氡浓度极低,为增加测量灵敏度,一般采用累积测氡方法,测量时间很长。常用空气测氡法有径迹蚀刻法、热释光法、活性炭吸附法、双滤膜法、 ^{218}Po 法及离子喷涂式法等,这些方法对氡及其子体的探测效率较低,在空气氡浓度为 37 Bq/m^3 条件下,每小时只能探测到数个至数十个 α 粒子。有些探测器则易受氡子体污染,测量结果易受上次测量的影响,如金硅面垒型探测器、Si-PIN 结管探测器、钝化离子注入硅探测器等。一些光敏、不可触摸的探测器也给使用者带来诸多不便。

对空气瞬时测氡须满足三个条件:(1)能清除探测器中原有的氡子体;(2)有氡及其子体收集装置,能使内部氡及其子体浓度很快与测量环境达到一致;(3)灵敏度高,能在最短时间内实现最大的氡信息记录。

空气脉冲电离室对氡及其子体的探测效率较高,电离室测氡仪有较高的测量灵敏度,如德国 AlphaGUARD 型测氡仪,以及我们研发的泵吸式电离室测氡仪。根据放射性平衡理论及电离室测氡仪

的测量原理,只有在氡与其子体处于平衡状态下,测量到的 α 粒子数量才能正比于环境中的氡浓度。现有的电离室测氡仪虽满足了高灵敏度测量要求,但由于电离室腔体高压的存在,氡子体易吸附于电离室壁上。多点瞬时测氡时,这些吸附子体会影响短时间内(4 h)的测量结果。

分析现有测氡方法可知,目前尚无能有效满足室内空气中氡浓度连续瞬时测量的方法。

2 空气脉冲电离室测氡结构设计

2.1 空气电离室结构

空气脉冲电离室的测氡原理为: α 粒子的空气电离能力很强,在空气中形成大量电子-空穴对,在高压电场作用下,电子和空穴分别向两电极移动,在电极上形成信号。

该电离室(图1)主要由圆柱形腔体、保护环、绝缘环、信号收集电极、氡及其子体收集塑料杯等组成。电离室腔体为铝材,信号收集电极为镀银铜,以增加信号收集电极的导电率。铜制的保护环通过一个低噪声系数金属碳膜电阻(数十 $\text{M}\Omega$)接到信号收集电极,保护环接系统地,此时信号收集电极近似为地电平。保护环为消除高压漏电流对信号的影响而设。电离室腔体加上由大容量 CBB 高压保持电容提供的无杂散干扰的负高压,电压大小需满足消除电离室内部离子和电子“复合”与“扩散”的饱和特性要求^[1](本文用 -1000 V),在信号收集电极与电离室腔体间形成一个正电场,电离室内部的电场为:

$$E = V/[x \ln(b/a)] \quad (1)$$

式中, V 为外加电压, x 是距收集电极的距离, a 是收集电极半径, b 是外电极半径(即电离室内腔半径)。显然, 电场压降主要落在收集电极附近, 那里电场较强, 电子和离子的迁移率高。电子在电场中迁移率比离子高 2-3 个数量级, 电离室输出产生明显的上升信号后会慢速变化, 所以选择合适的积分成形时间参数(大于离子的收集时间, 约 10 ms), 输出信号才能达最大值^[2]。若只收集电子信号, 形成的电荷幅度要小些, 脉冲宽度也仅数十 μs ^[1]。由于信号收集电极的电荷信号微弱, 电荷输出须由低噪声电荷灵敏放大器放大并整形为脉冲信号, 以便后续电路记录。

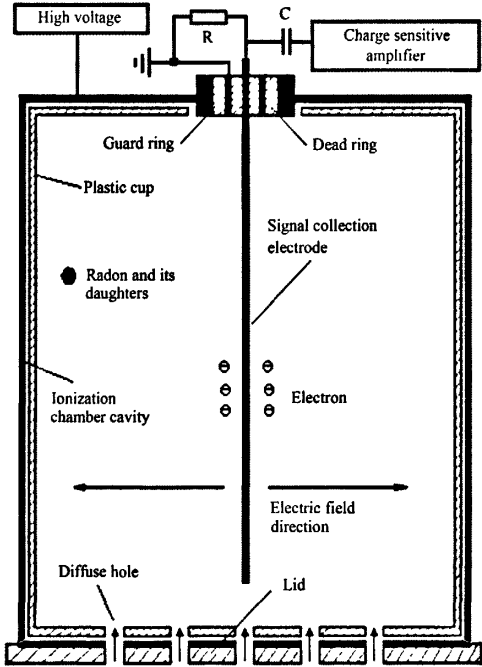


图 1 电离室结构
Fig.1 Schematics of the ionization chamber.

2.2 空气脉冲电离室空间要求

α 粒子在空气中的射程 R_{air} 为(cm):

$$R_{\text{air}} = 0.309 E^{3/2} \quad (2)$$

式中, E 为 α 粒子能量(MeV)。 ^{222}Rn 及其第一代子体 ^{218}Po 与第二代子体 ^{214}Po 发射的 α 粒子能量分别为 5.482、6.002 与 7.687 MeV, 这些 α 粒子在空气中的射程为 4-9 cm。电离室尺寸应满足 α 粒子的射程要求。

研究表明, 氡子体的存在形态主要为未结合的离子态或离子团, 或放射性气溶胶, 两者大部分带正电荷, 少部分会被空气中的负离子中和掉而不带

电, 存在形态比例会因空气的气溶胶颗粒数量和粒度情况而异^[3]。它们在收集电极和电离室壁间的强电场作用下吸附到电离室壁上。由式(2), 要满足 α 粒子完全电离的要求, 电离室壁与信号收集电极间距须大于 9 cm。但是, α 粒子的部分能量会损耗在克服电场力上, 空中 α 粒子的实际射程与式(2)计算结果略有差别。实际应用中, 考虑体积要求, 选用半径 7 cm 的圆柱电离室腔体。

2.3 低本底氦气及其子体收集装置

该电离室带有氦及其子体收集装置(塑料杯体、能通电), 以达高灵敏度瞬时空气测氦的要求, 这是其与传统空气脉冲电离室的不同之处, 也是实现快速空气测氦的关键所在。

传统的空气电离室测氦仪工作时, 氦子体会吸附到电离室壁上, 下次测量须考虑如何消除残留氦子体的影响。由不同时刻的测量值可根据衰变规律扣除残留子体的影响, 但计算复杂, 也不太现实, 一般须等待残留子体衰变到可忽略其影响再行下次测量。

在电离室腔体壁上加一个氦及其子体收集装置(塑料杯), 平时密封保存, 可认为其内部为无氦。测量时打开封闭口, 装入电离室, 并用金属网将其封闭。金属网贴在绝缘材料上(其上均匀分布有 16 个 $\varnothing 8 \text{ mm}$ 的扩散孔), 组成一个有屏蔽电磁干扰功能的封口。在氦团簇^[4,5]、氦浓度梯度差等作用下, 空气中氦可通过扩散孔和金属网孔扩散到电离室内部, 而空气中氦子体大部分被吸附到电离室的外表面, 因此电离室腔体内部仍能满足放射性动态平衡条件。电离室壁上吸附的氦子体发射的 α 粒子, 很难穿氦及其子体收集装置腔体壁进入空气电离区。这样测得的 α 粒子计数即氦及其子体是收集装置腔体空间内部产生的 α 粒子。下次测量时, 更换一个收集装置, 从而获得当前时段空气中的氦浓度值。

2.4 理论氦浓度

空气氦浓度也称氦的活度浓度, 指单位体积内氦放射性活度值的多少, 即单位体积内每秒氦发生 α 衰变的次数。室内氦污染检测领域, 一般用平衡当量氦浓度(Equivalence Equilibrium Concentration)和平衡因子表示。平衡当量氦浓度指氦与其短寿命衰变产物处于平衡状态, 并与实际非平衡混合物相同的 α 潜能浓度时氦的活度浓度^[6], 单位 Bq/m^3 。氦浓度值与平衡因子的乘积等于平衡当量氦浓度值。

氡不带电，主要在灵敏体积内衰变，而氡子体大部分带正电，大部分会在电场力作用下被吸附到氡及其子体收集腔体内壁表面上发生 α 衰变。不同位置发生 α 衰变，空气电离室对 α 粒子探测角度是不一致的，因此探测效率也略有不同。

结合放射性平衡理论和空气氡浓度定义，氡浓度可由式(3)算得。

$$R_n = N/(3vt\eta)$$

(3)

式中， R_n 为氡浓度， N 为被探测到的 α 粒子数， v 为腔体容积， t 为测量时间， η 为探测效率。 η 与电离室腔体的容积、温度、湿度及电场分布有关，实

际测量很难获得 η 的确定值，难以通过直接测量 α 粒子数去计算氡浓度，只有通过标准氡室刻度获得。

3 测量系统

测量系统主要由电离室探测器、探测器输出回路、信号整形放大电路、 α 粒子数据记录电路及数据处理显示功能单元分组成(图 2)。 α 粒子入射于电离室的灵敏体积时，探测器输出的信号，经低噪声电荷灵敏放大器电路放大，被计数电路记录，OLED 显示屏给出相应时间内的计数。测量系统中集成了环境温湿度测量模块，测量后再根据仪器的刻度方程及温湿度等修正系数得到空气中相应的氡浓度。

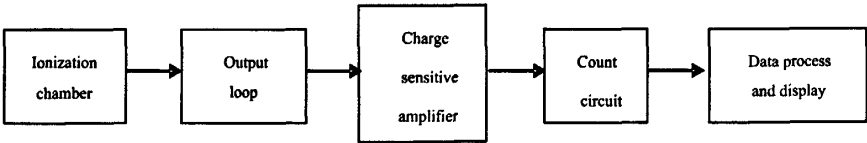


图 2 测氡仪系统框图
Fig.2 Schematics of the radon detection system.

4 实验

4.1 稳定性和精确度测量

将 ^{239}Pu 标准 α 固体面源置于电离室内壁处，每次测量 2 min，连续测量 10 次，计数值分别为 4106、4074、4023、4110、4081、3985、4121、4086、3963 和 4060。相对 α 面源的计数，本底计数可忽略，测量精度(标准偏差/平均值)为 1.32%，测量稳定性(与平均值的最大差值/平均值)为 2.41%。

4.2 仪器刻度

探测效率由标准氡室刻度。刻度时，标准源、标准氡室体积以及仪器本身都存在不确定度。中国测试技术研究院对本仪器系统刻度时给出总不确定度 <20%，平衡因子取 0.5，理论浓度为平衡当量氡浓度。氡室湿度为 33.3%RH-23.3%RH(仪器测量值)，氡室温度为 26.3℃-26.7℃(仪器测量值)。

刻度时无法换取氡及其子体收集杯体，将仪器系统置于氡室内部 5 h，以等待电离室内部氡及其子体达到平衡，再开始测量，每隔 1 h 测量 1 次，每次测量 6 min。

参与刻度的仪器还有我们研发的 KZ-D02(E)型泵吸式 α 能谱测氡仪($\phi 26$ mm 金硅面探测器，氡气收集腔 0.7 L)，每小时测量 1 次，每次测量 1 h。

表 1 为相应的刻度数据，其中 KZ-D02(E)的计数值为 ^{218}Po 衰变产生的被仪器测量到的 α 粒子计数值。由表 1，电离室测氡仪(KZ-D02)测量灵敏度明显高于 KZ-D02(E)泵吸式 α 能谱测氡仪，KZ-D02 测量值更接近理论值。

将理论值的平均值和计数值的平均值相除，得到电离室测氡仪的刻度系数为 $12.56\text{ Bq/m}^3(1\text{ cpm 计数率对应 }12.56\text{ Bq/m}^3\text{ 氡浓度})$ 。

4.3 实测

长期测量某一环境的氡浓度，可不必更换氡及其子体收集装置，让仪器处于连续累积测量状态，当前测量结果可反映 4 h 内环境氡浓度值。如要瞬时测氡，必须更换氡及其子体收集装置，测量结果才能反应当前时段测量环境的氡浓度。

实验环境为封闭 24 h 后的作者办公室。为了解封闭期间环境氡浓度的变化，将 KZ-D02(E) α 能谱测氡仪及本文论述的 KZ-D02 电离室测氡仪每小时测量 1 次。最后 12 次(20 点至次日 8 点，环境温度变化不大)测量数据如表 2 所示。

由表 2，测量数据有波动，KZ-D02(E) α 能谱测氡仪和 KZ-D02 电离室测氡仪的测量数据稳定性分别为 22.2%和 11.4%。

表 1 刻度数据
Table 1 The calibration data

测量时段 Measurement hours	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
理论浓度 Concentration /Bq·m ⁻³	1520	1562	1603	1644	1685	1726	1766	1806	1846	1885
KZ-D02 计数值 Counts	776	793	812	807	817	828	868	866	872	901
K-D02(E)计数值 Counts	323	311	347	319	319	342	357	327	363	377
测量时段 Measurement hours	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
理论浓度 Concentration /Bq·m ⁻³	1924	1963	2001	2040	2077	2115	2152	2190	2226	2263
KZ-D02 计数值 Counts	898	931	932	958	964	980	1005	1023	1055	1057
KZ-D02(E)计数值 Counts	349	402	352	359	359	359	428	383	400	425

表 2 连续测量数据
Table 2 The continuous measuring data

测量时段 Measurement hours	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
KZ-D02 计数值 Counts	192	218	212	210	226	215	231	213	222	216	218	227
K-D02(E)计数值 Counts	13	16	14	12	15	13	17	12	15	12	13	15

为瞬时测氡的测量数据准确性,将氡及其子体收集装置腔体封闭 10 d 以上,使其处于低本底水平。为使实验环境一致性,选取 6 min 测量周期,测量数据 10 次,在 1 h 内(相对较短)认为实验环境是相对稳定的,10 次浓度分别为 48.3、50.4、46.2、42.0、42.0、52.5、44.1、48.1、46.2 和 54.6 Bq/m³,计数值分别为 23、24、22、20、20、25、21、23、22 和 26。实测计数值在 20–26 变化,这是由于仪器本身的稳定性、测量的统计涨落及测量环境氡浓度波动(实际很难获得恒定的氡浓度实验环境)共同引起的。

5 结论

用电离室测量空气氡浓度时存在一些影响因素,如钍射气、环境温湿度及气压等,这部分工作必须依靠标准氡室进一步研究。选用常压空气脉冲电离室探测器,其对氡和子体均有较高的探测效率,因此有灵敏度高、稳定性好特点。设计专用的氡及其子体收集装置配合高灵敏度的电离室测氡方法,实现环境空气中氡浓度的快速测量。通过实验初步验证了设计的合理性。因此,成果非常适合空气中氡浓度瞬时测量的应用领域。

参考文献

1 安继刚. 电离辐射探测器. 北京: 原子能出版社. 1995
AN Jigang. Ionizing radiation detectors. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1995

2 贾文懿, 方方, 唐红, 等. 核地球物理仪器. 北京: 原子能科学出版社, 1998
JIA Wenyi, FANG Fang, TANG Hong, *et al.* Nuclear geophysical apparatus. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1998

3 卢正永. 气溶胶科学引论. 北京: 原子能科学出版社, 2000
LU Zhengyong. Aerosol science introduction. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 2000

4 乐仁昌, 贾文懿, 吴允平. 辐射防护, 2002, 22(3): 175–181
LE Renchang, JIA Wenyi, WU Yunping. Radiat Prot, 2002, 22(3): 175–181

5 方方, 贾文懿, 周蓉生. 核技术, 1999, 22(4): 218–222
FANG Fang, JIA Wenyi, ZHOU Rongsheng. Nucl Technol, 1999, 22(4): 218–222

6 GBZ/T 182-2006 室内氡及其衰变产物测量规范, 2007 年 4 月
GBZ/T 182-2006 The Norm of Indoor Radon and Its Decay Products Measurement, April, 2007

A new method for consecutive measurement of air radon

DING Weicheng FANG Fang RUAN Juhong WANG Min HUANG Qiu

(Key Laboratory of Applied Nuclear Technology in Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610069, China)

Abstract The current methods for air radon measurement are often of low sensitivity, and the measurement takes longer time. In this paper, based on comparative study and theoretic discussion, we propose an ionization chamber for consecutive air radon measurement. The ionization chamber under ordinary pressure has high detective efficiency in measuring radon and its daughters. A collector unit is equipped for collecting residual radon and its daughters in a measurement. This prevents radon and its daughters from polluting the ionization chamber for a subsequent measurement, a common problem with conventional methods of air radon detection. Feasibility of the design for instantaneous measurement of air radon has been proved in experiments.

Key words Ionization chamber, Radon, α particle, Measuring, Count

CLC O571.32⁺1