

^{220}Rn 累积测量的吸收体法及其应用

肖德涛 赵桂芝 肖拥军 马光霖

(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

摘要 利用 ^{220}Rn 子体 ThC' 衰变产生的 α 粒子能量较氡及其子体衰变产生的 α 粒子能量都高的特点, 发展了一种 ^{220}Rn 测量的吸收体方法。本文介绍了加吸收体甄别氡及实现 ^{220}Rn 直接测量的原理、剂量计及其刻度方法。该剂量计测量 ^{220}Rn 暴露量和介质表面 ^{220}Rn 析出率的刻度系数分别为 $R_0 = 0.0767 \text{ cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $R = 0.1300 \text{ cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ 。当测量周期 7 d, 所用 CR-39 本底径迹密度标准差 $S_T = 1.6 \text{ cm}^{-2}$ 时, 其测 ^{220}Rn 浓度与 ^{220}Rn 析出率的探测下限分别为 $\text{LLD}_C = 248.4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $\text{LLD}_E = 34.8 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 ^{220}Rn 累积测量的吸收体法在环境 ^{220}Rn 水平测量、室内 ^{220}Rn 及其子体水平分布测量和介质表面 ^{220}Rn 析出率测量中得到了应用。

关键词 ^{220}Rn , ^{220}Rn 浓度, ^{220}Rn 析出率, 吸收体

中图分类号 TL818+.2, O613.16

^{220}Rn 跟氡一样, 几乎无处不在, 有 ^{220}Rn 的地方就有氡。测氡时会受到 ^{220}Rn 的影响^[1], 测 ^{220}Rn 时也要甄别氡的干扰。所以, 发展测 ^{220}Rn 技术首先必须研究甄别氡的干扰的方法。利用 ^{220}Rn 子体 ThC' 产生的 α 粒子的能量 (8.78 MeV) 比氡及其子体产生的 α 粒子的能量都高这一特性, 通过加吸收体的方法将氡及其子体衰变产生的 α 粒子全部吸收可实现甄别氡的目的^[2]。本文介绍 ^{220}Rn 累积测量的吸收体法及其初步应用情况。

1 ^{220}Rn 测量的吸收体法

1.1 吸收体法测量 ^{220}Rn 的原理

^{220}Rn 的衰变子体 ^{212}Po 衰变释放的 α 粒子能量 (8.78 MeV) 较氡及其子体衰变释放的 α 粒子最大能量 (7.69 MeV) 还要大 1.09 MeV。利用这一特性, 可以在 CR-39 上加一定厚度某吸收体来阻止氡及其子体衰变产生的 α 粒子对径迹片的照射, 而只让大部分 ^{212}Po 衰变释放的 α 粒子照射径迹片 (如用 65.6 μm 厚聚碳酸酯膜就可以达到上述要求^[2]), 从而实现 ^{220}Rn 暴露量的直接测量。

若 $E_a(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})$ 表示用吸收体法测得的 ^{220}Rn 暴露量, $T_D(\text{cm}^{-2})$ 表示剂量计探测器 CR-39 受到 ^{212}Po 衰变产生的 α 粒子照射形成的径迹密度, $R_0[\text{cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}]$ 为吸收体法测 ^{220}Rn 暴露量时剂量计的刻度因子, 则

$$E_a = T_D / R_0 \quad (1)$$

为防止静电干扰, 采用铝膜作吸收体。由 4 片超能铝膜叠加在一起, 其质量厚度为 11.08 mg/cm^2 , 不仅能完全甄别掉氡的干扰, 而且具有很好的均匀性和一致性。

1.2 测量介质表面 ^{220}Rn 析出率的原理

由于吸收体法被动累积测 ^{220}Rn 剂量计能甄别掉氡及其子体衰变释放的 α 粒子, 直接测量 ^{220}Rn 暴露量, 因此可以利用此特性测量介质表面的 ^{220}Rn 析出率。

假设介质表面的 ^{220}Rn 析出率在测量过程中保持不变为 $E_{Tn}(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$, λ_e 为泄漏和反扩散速率常数(s^{-1}), V 为剂量计采样小室体积(m^3), S 为剂量计扩散窗的面积(m^2), λ 为 ^{220}Rn 的衰变常数(s^{-1}), t 时刻介质表面析出的 ^{220}Rn 在采样小室中积累的 ^{220}Rn 浓度为 $C(t)(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$, 则

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E_{Tn}S}{V} - (\lambda_e + \lambda)C(t) \quad (2)$$

若初始时刻剂量计采样小室内的 ^{220}Rn 浓度 $C(0)=0$, 则

$$C(t) = \frac{E_{Tn}S}{V(\lambda_e + \lambda)} \cdot [1 - e^{-(\lambda_e + \lambda)t}] \quad (3)$$

由于 $\lambda = 1.246 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 一般被测介质表面满足 $\lambda_e \ll \lambda$, 故式 (3) 可简化为

国家自然科学基金资助项目(10075083)、湖南省科技计划重点资助项目 (04FJ4064)

第一作者: 肖德涛, 男, 1964 年出生, 2002 年于中国原子能科学研究院辐射防护和环境保护专业获得工学博士学位, 南华大学核科学技术学院教授, 博士生导师, 13307478601@ie165.com

收稿日期: 2005-05-11, 修回日期: 2005-06-13

$$C(t) = \frac{E_{\text{Tn}} S}{\lambda V} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

事实上, $C(t)$ 很快达到 C_{max} , $C_{\text{max}} = E_{\text{Tn}} S / (\lambda V)$, 对介质表面 ^{220}Rn 析出率测量而言, 采样时间可以任意长。

若 CR-39 测量 ^{220}Rn 暴露量 (剂量计采样小室内) 的刻度因子为 R , 采样时间为 t 时的径迹片上的径迹密度为 T_t , 则被测介质表面的 ^{220}Rn 析出率 E_{Tn} 为

$$E_{\text{Tn}} = \frac{T_t \lambda V}{StR} \quad (5)$$

1.3 吸收体法被动累积测 ^{220}Rn 剂量计及其刻度

1.3.1 吸收体法被动累积测 ^{220}Rn 剂量计 吸收体法被动累积测 ^{220}Rn 剂量计 (见图 1) 由乳白色 ABS 塑料注塑而成, 采样小室的体积为 37cm^3 , 底部扩散窗 ($\phi 5\text{cm}$) 上打了 127 个 $\phi 1\text{mm}$ 的圆孔和 6 个 $1\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的方孔, 滤材由剂量计采样小室内筒压紧, 剂量计顶盖上装有挂夹, 可以方便地布放剂量计。剂量计采用固体核径迹探测器 (SSNTD) CR-39, 探测器被吸收体和压盖固定在剂量计顶盖上。

当剂量计用于环境 ^{220}Rn 暴露量测量时, 扩散窗装有过滤膜; 用于介质表面的 ^{220}Rn 析出率测量时, 扩散窗不装过滤膜, 直接将剂量计扣在介质表面上进行测量。

1.3.2 剂量计的刻度 剂量计测量 ^{220}Rn 暴露量的刻度因子是在文献[3]中介绍的简易 ^{220}Rn 室上刻度的。

吸收体法测 ^{220}Rn 剂量计测 ^{220}Rn 析出率时, 其扩散窗是不装滤膜的, 从介质表面析出的 ^{220}Rn 射

气可以不受任何阻挡地进入剂量计采样小室。若剂量计过滤窗装有滤膜, 当被测环境中的 ^{220}Rn 浓度 C_0 与采样小室中的 ^{220}Rn 浓度 C 达到平衡时, C 与 C_0 满足下列关系:

$$C = \frac{\lambda_d}{\lambda_d + \lambda} C_0 \quad (6)$$

式 (6) 中, λ_d 为剂量计扩散窗的有效扩散速率常数 (s^{-1})。

装有滤膜的剂量计的刻度因子 R_0 是按 C_0 的暴露量刻度的, R_0 不能直接用作剂量计测 ^{220}Rn 析出率的刻度因子。为此, 必须得到与 C 的暴露量相关的刻度因子 R 。

由式 (1) 和式 (6) 可知:

$$R = \frac{\lambda_d + \lambda}{\lambda_d} R_0 \quad (7)$$

假设 CR-39 对氡 ^{220}Rn 及其子体衰变释放的 α 粒子的探测效率是一样的, 则 λ_d 可根据装有滤膜的剂量计测氡 ^{220}Rn 暴露量的刻度因子 $R_{\text{Rn},0} = (4.325 \pm 0.131) \text{cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $R_{\text{Tn},0} = (2.551 \pm 0.070) \text{cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ 来确定^[4], 即 $\lambda_d = 64.52 \text{h}^{-1}$ 。 R_0 的刻度值 $R_0 = (0.0767 \pm 0.0046) \text{cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$, 故 $R = 0.1300 \text{cm}^{-2}(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

1.4 探测下限 LLD

吸收体法测 ^{220}Rn 剂量计测 ^{220}Rn 析出率时, 其直接测量对象仍然是 ^{220}Rn 暴露量。采用 CR-39 SSNTD 测氡 ^{220}Rn 的方法, 其测量暴露量的探测下限一般定义为未受照射的径迹片的本底径迹密度标准差 S_T 的 2 倍所对应的暴露量。日本产 CR-39 的 $S_T = 1.6 \text{cm}^{-2}$ 。若测量周期为 7 d, 由 (5) 式可得:

$$\text{LLD}_C = \frac{2S_T}{R_0 \cdot T} = 248.4 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \quad (8)$$

$$\text{LLD}_{E_{\text{Tn}}} = \frac{2S_T \lambda V}{STR} = 34.8 \text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9)$$

1.5 误差分析

采用局部静态法测量介质表面的氡 ^{220}Rn 析出率时, 由于采样器扣在被测介质表面后, 会改变氡 ^{220}Rn 的析出条件, 且改变的大小跟气候、气象条件、介质特性等密切相关。

测量 ^{220}Rn 析出率的吸收体法除受上述因素影响外, 其测量结果的精确度主要还受刻度因子确定

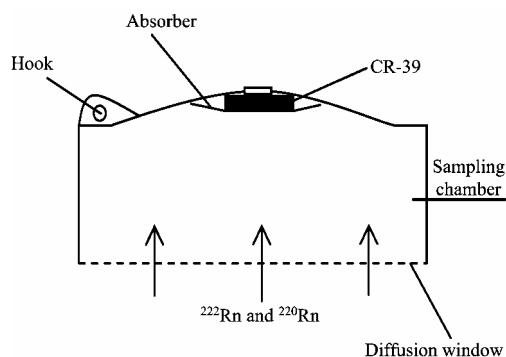


图 1 吸收体法被动累积测 ^{220}Rn 剂量计示意图

Fig. 1 The schematic diagram of a passive and integrated thoron dosimeter with absorber

方法的不确定度 v_1 和径迹测读方法的不确定度 v_2 的影响。径迹测读误差可控制在 5% 以内, 即 $v_2=5\%$ 。由式 (7) 可知:

$$v_1 = \sqrt{\left[\frac{\lambda\sigma_d}{\lambda_d(\lambda_d + \lambda)}\right]^2 + \left(\frac{\sigma_{R_0}}{R_0}\right)^2} \quad (10)$$

式 (10) 中, σ_d 和 σ_{R_0} 分别为 λ_d 和 R_0 的不确定度。

由于氡 ^{220}Rn 室参考氡 ^{220}Rn 水平的定值误差分别为 5%^[5] 和 3.5%^[3], 由式 (1) 可知, $R_{\text{Rn},0}$ 、 $R_{\text{Tn},0}$ 的不确定度分别为 7.1% 和 6.1%。由式 (7) 可得到 λ_d 的不确定度为 19.5%, 故 $v_1=10.1\%$, 由式 (5)

可知 $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 11.2\%$ 。

上述讨论中还没有计及假设 CR-39 SSNTD 对氡 ^{220}Rn 及其子体衰变释放的 α 粒子的探测效率是一样的而引入的误差, 事实上 CR-39 SSNTD 对氡 ^{220}Rn 及其子体衰变释放的 α 粒子的探测效率是有差别的^[6], 故 λ_d 的不确定度较上述分析的还要大。

由式 (1) 可知, ^{220}Rn 暴露量测量的不确定度为 7.9%。

2 应用

2.1 用吸收体法和平行法进行环境 ^{220}Rn 水平的测量

吸收体法测 ^{220}Rn 时, 虽然可以甄别掉氡的干

扰, 但其测量灵敏度较低, 测量下限会受到限制。研究的平行氡 ^{220}Rn 测量方法测 ^{220}Rn 水平时, 若测量环境中氡水平高于 ^{220}Rn 水平或氡水平与 ^{220}Rn 水平相近时, 测量结果会受到氡的干扰。为了检验这两种方法的适用性, 于 2000 年 3 月下旬至 5 月底在五个不同地点的相同位置用普通型平行法和吸收体法进行了室内 ^{220}Rn 水平测量, 测量地点为南华大学核科学技术学院实验室源库、资料室、南华大学住户自挖地下室、衡阳市郊农民旧土砖房 (原核工业六所) 土坯房等。测量结果列于表 1。

从表 1 的测量结果可见, 两种方法的测量结果基本上是一致的。

2.2 室内外无空气交换时 ^{220}Rn 及其子体分布的测量

在香港大学氡分析实验室里的暴露室进行了 ^{220}Rn 及其子体分布的测量, ^{220}Rn 的浓度分布是采用普通吸收体法测 ^{220}Rn 剂量计测量的, ^{220}Rn 子体的分布是采用普通吸收体法测 ^{220}Rn 剂量计的顶盖直接暴露于室内空气中测量的。测量时, 暴露室内的所有通风管道及双重密封门全关闭, 测量时间为 2000 年 11 月 13 日上午 10:00 至 2001 年 3 月 12 日下午 17:30。测量结果示于图 2。

从图 2 可以看出, 当室内外无空气交换且室内空气处于静止时, 室内 ^{220}Rn 子体的分布不明显, 这与采用五段法测量相同状况下的 ^{220}Rn 子体分布的结论是一致的^[7]。从 ^{220}Rn 的分布, 可以算出 ^{220}Rn

表 1 室内 ^{220}Rn 水平的测量结果

Table 1 The measurement results of indoor thoron concentrations

测量地点 Location	剂量计布放位置 Position of the dosimeter		通风状况 Ventilation	墙面情况 Wall surface	²²⁰ Rn 浓度 Thoron concentration / Bq·m ⁻³	
	离地面高度/cm Height from the ground	离墙面距离/cm Distance from the wall			平行法 Simultaneous	吸收体法 Absorber
源库 Source room	86	13	密不通风 Airless	水泥面外露 Cement naked	379.2	366.7
资料室 Information room	136	35	一般通风 Draft	防氡漆面 Anti-radon paint	10.4	<LLD
地下室 Basement	122	20	不通风 Airless	防氡漆面 Anti-radon paint	87.6	67.6
土砖房 House with soil brick wall	148	20	一般通风 Draft	裸露 Nude	367.3	299.8
土坯房 House with soil wall	195	30	一般通风 Draft	裸露 Nude	198.0	256.2

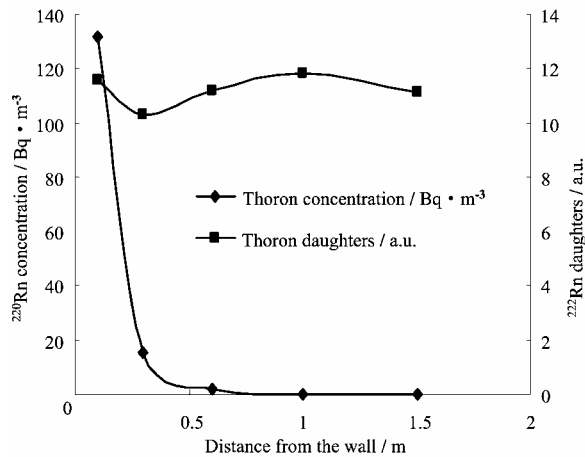


图2 室内空气静止时 ^{220}Rn 及其子体的分布

Fig. 2 The distribution of thoron and its daughters when the indoor air is in the static-state

向离开墙面方向扩散的有效扩散系数约为 $0.385 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ，这与氡 ^{220}Rn 在空气中的气体分子扩散系数相近^[8]。

2.3 介质表面 ^{220}Rn 析出率的测量

尽管 ^{220}Rn 的半衰期很短，难于从介质中向大气释放，也不会在室内空间长期累积（若室内完全密闭，室内 ^{220}Rn 活度在 10 min 就可达到最大），但一般而言，介质表面的 ^{220}Rn 析出率较氡要大得多。因此，测定不同介质表面的 ^{220}Rn 析出率，对经济有效地实施室内 ^{220}Rn 的防护，修正介质表面氡析出率的测量结果是很有意义的。为此，用吸收体法测 ^{220}Rn 剂量计测量了一些典型介质表面的 ^{220}Rn 析出率、内墙表面 ^{220}Rn 析出率随墙体中压力和抽气位置的变化规律^[9]。测量结果表明：介质表面的 ^{220}Rn 析出率不仅与介质中 ^{232}Th 的含量、介质颗粒的大小、孔隙度大小、含水率的多少等有关，而且受气候气象参数的影响。

3 结论

测量介质表面 ^{220}Rn 析出率的吸收体法克服了氡的干扰，测量周期可任意选择，适合大规模同时布样测量。研制的测 ^{220}Rn 剂量计质量轻、操作简单、测量成本低，能在环境污染调查和 ^{220}Rn 的特性等研究中得到广泛应用。

致谢 室内外无空气交换时 ^{220}Rn 及其子体分布的测量工作得到了香港大学梁干庄博士的帮助，深表谢意。

参考文献

- 肖德涛, 赵桂芝, 梁干庄, 等. 原子能科学技术, 2002, 36(6): 543—547
XIAO Detao, ZHAO Guizhi, LEUNG J K C, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(6): 543—547
- 肖德涛, 赵桂芝, 凌球. 核技术, 1999, 22(7): 431—434
XIAO Detao, ZHAO Guizhi, LING Qiu. Nuclear Techniques, 1999, 22(7): 431—434
- 肖德涛, 潘自强, 凌球, 等. 原子能科学技术, 2002, 36(1): 89—92
XIAO Detao, PAN Ziqiang, LING Qiu, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(1): 89—92
- 肖德涛, 潘自强, 凌球, 等. 原子能科学技术, 2001, 35(4): 325—330
XIAO Detao, PAN Ziqiang, LING Qiu, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(4): 325—330
- 赵桂芝, 肖德涛, 凌球, 等. 中国预防医学, 2001, 2(2): 111—113
ZHAO Guizhi, XIAO Detao, LING Qiu, *et al.* China Preventive Medicine, 2001, 2(2): 111—113
- 田志恒. 辐射剂量学. 原子能出版社, 1992. 182
TIAN Zhiheng. Radiation dosimetry. Atomic Energy Press, 1992. 182
- 肖德涛. ^{220}Rn 的被动积分测量和剂量估算. 原子能出版社, 2002. 12
XIAO Detao. Passive and integrated thoron measurement and it's dose evaluation. Atomic Energy Press, 2002. 12
- 吴慧山, 林玉飞, 白云生, 等. 氡测量方法与应用. 原子能出版社, 1995. 8
WU Huishan, LIN Yufei, BAI Yunsheng, *et al.* Radon measurement methods and applications. Atomic Energy Press, 1995. 8
- 肖德涛, 赵桂芝, 梁干庄. 原子能科学技术, 2003, 37(5): 476—480
XIAO Detao, ZHAO Guizhi, LEUNG J K C. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(5): 476—480

An integrated thoron monitoring method with absorber and its applications

XIAO Detao ZHAO Guizhi XIAO Yongjun MA Guangnai

(School of Nuclear Science and Technology, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

Abstract An integrated thoron measurement method with absorber was developed based on the characteristic of thorium C' which emits an α particle with higher energy than that of α particles released from radon and radon progenies. The principle of discriminating radon and realizing thoron measurement with absorber, a passive and integrated thoron monitor developed and its calibration method are introduced. The calibration coefficients of the monitor are $R_0=0.0767\text{cm}^{-2}(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ for thoron exposure measurement and $R=0.1300\text{cm}^{-2}(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ for thoron exhalation rate measurement. The lower limits of detection are $\text{LLD}_C=248.4\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ and $\text{LLD}_E=34.8\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ when the sampling period is 7 days and the deviation of background track densities of the adopted CR-39 is $S_T=1.6\text{cm}^{-2}$. The method was used for the measurement of environmental thoron concentrations, the distribution of indoor thoron and its progenies concentrations, and thoron exhalation rates on material surfaces.

Key words Thoron, Thoron concentration, Exhalation rate, Absorber

CLC TL818⁺.2, O613.16