

Alpha GUARD 测氦仪的²²⁰Rn 响应研究

刘翠红¹,张 磊¹,卓维海²,郭秋菊¹

(1. 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室,北京 100086;2. 复旦大学放射医学研究所,上海 200032)

摘要:基于最优化电离室设计的 AlphaGUARD 测氦仪是目前国内外最稳定准确的商用氦探测器,其作为氦测量标准传递装置广泛应用于国内外各个氦室中。在通常氦浓度水平下,该仪器基于脉冲电离室工作原理,只记录 粒子计数,不能甄别能谱,故只能使用于纯²²²Rn 环境的测量。为研究该仪器对环境中有可能是存在的钍射气的响应,本文从 AlphaGUARD 测氦仪两种工作模式下²²⁰Rn 响应机理出发对 AlphaGUARD 测氦仪的²²⁰Rn 响应系数 S 进行了实验研究。研究表明:流气模式下,采样流速为 1.0 L · min⁻¹时,²²⁰Rn 的流速修正因子 R 为 0.80;扩散模式下²²⁰Rn 响应系数 S 不随²²⁰Rn 浓度和²²²Rn/²²⁰Rn 混合浓度比的变化而变化,为 6.09%。

关键词:²²²Rn/²²⁰Rn;AlphaGUARD 测氦仪;脉冲电离室;响应系数;流速修正因子

中图分类号:TL81

文献标识码:A

放射性气体氦(²²²Rn)由²²⁶Ra 衰变产生,广泛存在于室内外环境空气中,是人类所受天然辐射照射的重要来源^[1]。为了测量评价环境中氦浓度水平,人们开发了各种氦浓度测量仪器。常用的氦探测器有脉冲电离室(PIC)、电流电离室、ZnS(Ag)闪烁体探测器、半导体 谱仪和核径迹探测器等。选择何种探测器取决于具体测量环境和对测量的要求。

环境氦测量中存在的最大的问题是如何甄别²²²Rn 和²²⁰Rn 气体(钍射气)。尽管氦调查结果表明,大部分地区²²⁰Rn 相对于²²²Rn 而言可以忽略,但部分地区仍存在高浓度的²²⁰Rn,高浓度²²⁰Rn 的存在会影响²²²Rn 浓度测量的准确性^[2]。AlphaGUARD 测氦仪在通常环境氦浓度水平下工作时,能记录 粒子产生的计数,但不能甄别 粒子能谱,无法甄别出²²²Rn 和²²⁰Rn,

使得该仪器只能用于纯²²²Rn 环境的测量。T. Ishikawa^[3]最先发现了²²⁰Rn 对 AlphaGUARD 测氦结果的影响,并实验给出了 AlphaGUARD 扩散模式测氦中的²²⁰Rn 的响应系数。AlphaGUARD 测氦仪有两种工作模式^[4]:流气模式(测量周期 = 1 min、10 min)和扩散模式(测量周期 = 10 min、60 min)。流气模式下工作时,氦气体直接通过外置泵抽到电离腔中;扩散模式下工作时,氦气体扩散穿过滤膜,进入到电离腔中。

为研究该仪器对环境中有可能是存在的钍射气的响应,本文从 AlphaGUARD 测氦仪两种工作模式原理出发,分析了不同工作模式下²²⁰Rn 的响应机理,并实验测量了流气模式下²²⁰Rn 的流速修正因子 R 和扩散模式下²²⁰Rn 的响应系数 S 。基于理论分析和实验测量结果,本文提

收稿日期:2009 - 04 - 07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10775007)。

作者简介:刘翠红(1979—),女,2001年毕业于山东轻工业学院电气自动化专业,现役海军 92609 部队,工程师,现为北京大学物理学院在读研究生。

通讯作者:郭秋菊。E-mail:jqguo@pku.edu.cn

出了一种 AlphaGUARD 测氡仪测量²²²Rn/²²⁰Rn 混合气体的方法,扩展了 AlphaGUARD 的使用范围。

1 测量装置及原理

1.1 测量装置

本实验主要在北京大学实验用氡室中进行。北京大学氡室由主腔体、氡室气路控制系统、气溶胶发生系统、源控制系统及监测单元组成。氡室主腔体长 108.3 cm,内径 110.8 cm,有效体积 1 m³。通过控制源回路的温湿度和循环气路中泵流速的稳定,保证氡室中氡浓度的长期稳定。目前,采用两个活度不同的固体²²⁶Ra 源来进行氡浓度调节,²²²Rn 气体浓度可以在 100~7 000 Bq/m³ 范围内变化。

纯²²⁰Rn 环境的实验测量是在北京大学实验用²²⁰Rn 室中进行的。该氡室由主腔体、源控制系统、温湿度控制系统及监测单元组成。主腔体为 250 L 的立方腔体,²²⁰Rn 气体源主要由汽灯纱罩提供,通过控制汽灯纱罩的温湿度来保证²²⁰Rn 气体的稳定析出。

对于纯²²²Rn 的测量,我们采用 AlphaGUARD 测氡仪扩散模式作为基准[灵敏度 0.05 cpm/(Bq·m⁻³),探测下限 2 Bq/m³];对于纯²²⁰Rn 的测量,我们选用 AB-5 测氡仪(Pylon 公司,加

拿大)抓取模式采样测量作为基准(纯²²⁰Rn 环境,灵敏度 0.0265 cpm/(Bq·m⁻³),探测下限 64 Bq/m³);对于²²²Rn/²²⁰Rn 混合气体的测量采用纯²²²Rn 和²²⁰Rn 环境下刻度过的 RAD-7 测氡仪(Durridge 公司,美国)作为基准(灵敏度:嗅吸模式 0.2 cpm/(pCi·L⁻¹),普通模式 0.4 cpm/(pCi·L⁻¹);探测下限 4 Bq/m³)。

1.1.1 AlphaGUARD 测氡仪

AlphaGUARD 测氡仪采样原理如图 1 所示。电离室有效探测体积 0.56 L,气体可以通过两个入口进入,左侧入口贴有玻璃纤维滤膜。扩散模式工作下,氡气体扩散穿过滤膜,进入脉冲电离室中,氡子体被滤膜阻挡;流光模式工作下,通过外置泵 AlphaPUMP 直接将滤过了子体的氡气体通过侧面进气孔直接抽入电离室中。进入电离室中的²²²Rn 和²²⁰Rn (及新生的²¹⁸Pb 和²¹⁶Pb)衰变放出的 α 粒子将气体电离,在高压场内形成脉冲被记录下来。流光模式下工作时,腔体内外氡浓度很快达到一致,而扩散模式下工作时,由于氡气体扩散需要一定的时间,导致测量氡浓度值有时间上的延迟,该延迟时间的长短取决于滤膜的性质。一般而言,AlphaGUARD 扩散模式测量时,氡浓度通常会有半小时左右的增长时间。

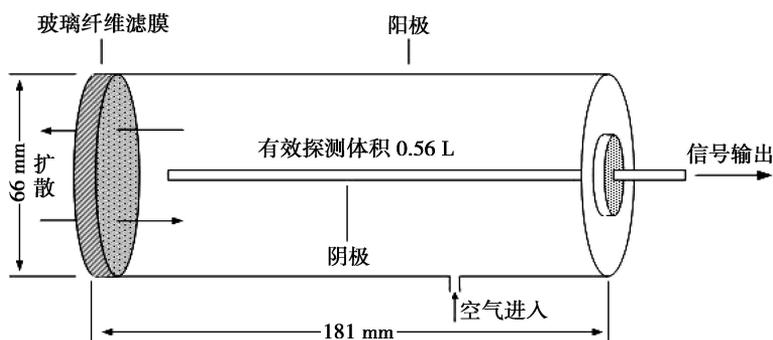


图 1 AlphaGUARD 测氡仪采样原理图

Fig. 1 Sketch map of AlphaGUARD sampling

1.1.2 RAD-7 测氡仪

RAD-7 测氡仪是一种便携式、可连续取样的仪器,其使用方便、性能稳定,克服了空气湿度对检测结果的影响。该仪器采用静电

采集原理,通过内置泵将干燥的、过滤掉子体的氡气抽入一个 0.7 L 的半球形腔体中,氡气衰变产生的子体在静电场中被收集在半导体探测器表面,氡子体衰变放出的 α 粒子被记录下来。

RAD - 7 采用的 PIPS 型半导体探测器能够甄别出不同能量 粒子,因此能够对²²²Rn 和²²⁰Rn 浓度进行甄别。通常情况下,RAD - 7 测量²²²Rn 和²²⁰Rn 测量精度分别在 $\pm 5\%$ 和 $\pm 25\%$ ^[5] 以内。

1.1.3 AB - 5 测氡仪

该仪器主要由 AB5 和卢卡斯闪烁室 LSC (Lucas scintillation cell) 组成,前者是一台便携式监测器和数据采集设备,后者是内部涂有 ZnS (Ag) 闪烁体的圆筒状探头。放射性气体通过滤膜过滤子体后进入闪烁室,在腔内发生衰变,放出 粒子。 粒子打到闪烁体上放出光子,通过光电倍增管放大将光子数转换为电脉冲数来确定 粒子数,从而达到测量浓度的目的。

LSC 最早只用于²²²Rn 气体测量,其测量原理简单,仪器稳定性好。基于此仪器,研究人员逐渐开发了²²⁰Rn 气体和²²²Rn/²²⁰Rn 混合气体的测量^[6,7]。AB - 5 测量²²⁰Rn 气体时,其本身探测下限较高,在环境测量使用中受限,但是在实验刻度中非常方便。外加其原理简单,能直接给出 粒子计数,可以作为²²⁰Rn 气体测量基准。AB - 5 测量²²⁰Rn 时采用抓取式采样,采样后的 10 s 开始计数,记录每 10 s 周期内 粒子总计数,总共测量 20 个周期,根据计数率的变化曲线计算得到²²⁰Rn 浓度。

1.2 测量原理

1.2.1 AlphaGUARD 测氡仪扩散模式机理

扩散模式下,气体扩散穿过滤膜进入电离腔中,考虑气体在滤膜中的稳态扩散,从 Fick 第一定律出发,浓度梯度造成的单位面积流过的量为:

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x} = -\frac{D}{l} (n_{in} - n_{out}) \quad (1)$$

式中, J 为流量通量, D 为气体在滤膜中的扩散系数, l 是滤膜的厚度(第二个等号成立,考虑了滤膜很薄的假设),而 n_{in} 和 n_{out} 分别为薄膜内外侧气体浓度。

仅由扩散运动造成的腔体内部浓度随时间的变化为:

$$\frac{dn_{in}}{dt} = -\lambda n_{in} + \frac{A \times J}{V} \quad (2)$$

式中, λ 为衰变常数, A 为滤膜有效表面积, V

为空心腔内有效体积。

将式(1)带入式(2),考虑内部氡浓度为 0 的初始条件,计算得到 n_{in} 随时间的变化关系如下所示:

$$n_{in} = \frac{r}{r + \lambda} [1 - e^{-(r + \lambda)t}] n_{out} \quad (3)$$

式中, $r = \frac{A \times D}{V \times l}$,即薄膜的交换率。 t 时,

$\frac{n_{in}}{n_{out}} = \frac{r}{r + \lambda}$,即内外两侧浓度比成为常数,定义为平衡浓度比。表达式结果表明,平衡浓度比 只与薄膜的交换率 r 和气体本身的衰变常数 有关。

而 AlphaGUARD 选用的滤膜, $\lambda_{Rn} \ll r$, $\lambda_{Rn} = 1$, $\lambda_{Th} \gg r$, λ_{Th} 是不为 1 的常数。即长时间后,滤膜两侧²²²Rn 浓度能保持一致,而²²⁰Rn 浓度在滤膜两侧成一比例。²²²Rn/²²⁰Rn 混合情况测量时,给出的氡浓度数值实际包括了全部的²²²Rn 浓度和一定量的²²⁰Rn 浓度值。

为了表征 AlphaGUARD 扩散模式测量过程中对²²⁰Rn 的响应,定义一个可以测量的量²²⁰Rn 响应系数 S ,其定义式如下:

$$S = \frac{R_{\text{AlphaGUARD}} - R_{\text{RAD-7}}}{T_{\text{RAD-7}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, S 为 AlphaGUARD 扩散模式下²²⁰Rn 的响应系数; $R_{\text{AlphaGUARD}}$ 为 AlphaGUARD 扩散模式下测量²²²Rn/²²⁰Rn 混合气体得到的氡浓度; $R_{\text{RAD-7}}$ 为 RAD - 7 测量到的²²²Rn 浓度; $T_{\text{RAD-7}}$ 是 RAD - 7 测量到的²²⁰Rn 浓度。对于固定的滤膜而言,该值与²²²Rn/²²⁰Rn 浓度无关,是一常数($S = \lambda_{Th}$)。

1.2.2 AlphaGUARD 测氡仪流气模式机理

流气模式下,氡气体通过外置泵抽入。AlphaGUARD 配套的采样泵 AlphaPM 有 3 个档位共 6 种流速可以选择。AlphaGUARD 测氡仪本身没有记录泵流速的信息,不同流量档位皆可用于²²²Rn 测量。而对于²²⁰Rn 的测量而言,流速则是一个关键影响因素。

流气式采样过程中,假设只考虑抽气,不考虑扩散,则电离腔中²²²Rn/²²⁰Rn 气体的活度浓度随时间变化可以用下式表达:

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda A(t) - A(t) \frac{Q}{V} + A_0 \frac{Q}{V} \quad (5)$$

式中, $A(t)$ 为气体活度浓度, λ 为衰变常数, q 为采样流量, V 为腔体体积, A_0 为腔体外气体的活度浓度。

初始条件 $A(0) = 0$, 则解上式得到:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \frac{q}{q + V\lambda} (1 - e^{-(q+V\lambda)t}) \quad (6)$$

得到 $\frac{A(t)}{A_0} = \frac{q}{q + V\lambda}$, 比值为常数, 该

比值定义为流速修正因子 R 。

对于 ^{222}Rn 而言, 由于衰变常数很小, AlphaPM 几个档位流速取样时流速修正因子为 1, 即 AlphaPM 取样流速对电离腔内外活度浓度无影响。而对于 ^{220}Rn 气体而言, 稳定状态时电离腔内的活度浓度取决于泵的流速, 且随着流速的增大, 该比值趋近于 1。AlphaGUARD 电离腔有效探测体积为 0.56 L, 而通常采样流速取为 1 L/min。带入 $^{220}\text{Rn} = 0.7478 \text{ min}^{-1}$ 得到 R

$= 0.70$ 。

2 实验结果

2.1 流气模式流速修正因子测量结果

为了研究 AlphaGUARD 流气模式工作时对 ^{220}Rn 的响应, 我们对不同采样流量下的流速修正因子进行了实际测量。在北京大学 ^{220}Rn 室中控制稳定的 ^{220}Rn 浓度, 同时保持恒定的温湿度。先用 AB-5 抓取模式对 RAD-7 测量 ^{220}Rn 的结果进行刻度, 在 RAD-7 采用新鲜小干燥管情况时, 其刻度因子为 1.30。然后用 RAD-7 进行 ^{220}Rn 室浓度的时时监控。采用 AlphaPM 进行不同流速采样, 看 AlphaGUARD 显示氢浓度随采样流速的变化关系 (流气模式下, 测量时间选取 10 min)。测量结果列于表 1。

表 1 流速修正因子 R 测量结果

Tab. 1 Result of flow rate correction factor

采样流速 ¹⁾ (L/min)	AlphaGUARD 流气模式		RAD-7 ²⁾		流速修正因子 R	
	^{220}Rn 浓度 (Bq/m ³)	标准差 (Bq/m ³)	^{220}Rn 浓度 (Bq/m ³)	标准差 (Bq/m ³)	理论结果	实测结果
0.1	429	96	924	260	0.19	0.46 ± 0.10
0.5	636	115	957	271	0.54	0.66 ± 0.12
1.0	760	130	945	265	0.70	0.80 ± 0.14
3.3	818	133	908	250	0.89	0.90 ± 0.15
4.9	848	139	914	255	0.92	0.93 ± 0.15

1) 前三个流速采用 AlphaPM 实现, 后两个采用外置的微型真空泵来实现; 2) 考虑了 1.30 刻度因子的结果。

从实验结果中可以发现, 随着流速的增大, 流速修正因子的实测结果和理论计算结果越吻合。即采样流速对 AlphaGUARD 测量 ^{220}Rn 的结果有较大影响, 且随着采样流速增大, 该影响越小, 同时电离室内浓度和外界环境浓度趋于一致。在有限采样流速情况下, 实测结果都比理论结果偏大, 且随着流速减小, 该差别越明显。分析其原因在于, 流气模式下工作时, ^{220}Rn 气体除了由泵直接抽入外, 也能从另外一侧的扩散口进入, 而该扩散进入量的大小取决于滤膜两侧浓度差。采样流速越低, 滤膜两侧浓度差越大, 扩散进入量越多, 导致实测刻度因子比理论结果高得越多。另外, 进气口管路的长度和对测量结果也可能会有些许影响。

由于流气模式测量 ^{222}Rn 气体时, 通常取用采样流速为 1.0 L · min⁻¹, 在该流速下测量 $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ 混合气体时, 对 ^{220}Rn 的流速修正因子 R 取 0.80。

2.2 扩散模式 ^{220}Rn 响应系数测量结果

为了研究 AlphaGUARD 扩散模式下 ^{220}Rn 响应系数 S , 分别在纯 ^{220}Rn 环境和 $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ 混合环境进行了测量。 ^{222}Rn 浓度以 AlphaGUARD 扩散模式测量结果作为基准 (扩散模式下测量时间选取 1 小时, 下同), ^{220}Rn 浓度以 AB-5 抓取模式测量结果作为基准, ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 测量基准传递由 RAD-7 来实现。

纯 ^{220}Rn 环境测量采用 AlphaGUARD 扩散模式和 RAD-7 在北京大学 ^{220}Rn 室中共同完成。

RAD - 7 实测²²⁰Rn 浓度值乘以刻度因子 1.30 即为氡室腔体中真实²²⁰Rn 浓度,AlphaGUARD 扩散模式测量出的氡浓度即为扩散进入的²²⁰Rn 气体的浓度,后者与前者的比值即为²²⁰Rn 响应系数 S 。为了反映不同²²⁰Rn 浓度对响应系数 S 的影响,改变²²⁰Rn 浓度进行测量,测量结果列于表 2。

表 2 表明:AlphaGUARD 扩散模式²²⁰Rn 响应系数 S 近似为一常数,为 $(6.09 \pm 1.25) \%$,与²²⁰Rn 浓度无显著关系,同理论分析结果吻

合,并且该值同 T. Ishikawa 给出的平均响应系数 7% 近似符合。

对于²²²Rn/²²⁰Rn 混合环境,刻度过的 RAD - 7 分别给出²²²Rn 浓度和²²⁰Rn 浓度值,而 AlphaGUARD 给出的氡浓度示数实际上是²²²Rn 与²²⁰Rn \times 响应系数 S 之和。改变不同²²²Rn/²²⁰Rn 混合浓度,待浓度稳定后,在不同混合浓度情况下进行实验测量,测量时间 24 小时。根据式(4)计算,得到的 AlphaGUARD 扩散模式对²²⁰Rn 的响应系数 S ,结果列于表 3。

表 2 纯²²⁰Rn 环境下²²⁰Rn 响应系数 S 测量结果

Tab. 2 Measuring results of relative sensitivity coefficient for ²²⁰Rn under different ²²⁰Rn concentrations

RAD - 7 测量结果 $\times 1.3^1$		AlphaGUARD 扩散模式测量结果		响应系数 S (%)
²²⁰ Rn 浓度(Bq/m ³)	标准差(Bq/m ³)	²²⁰ Rn 浓度(Bq/m ³)	标准差(Bq/m ³)	
33 097	6 971	1 936	251	5.85 \pm 0.76
12 343	3 474	816	154	6.61 \pm 1.25
8 823	1 684	584	113	6.62 \pm 1.28
6 217	1 273	386	85	6.21 \pm 1.37
5 463	1 083	228	74	4.17 \pm 1.36
5 006	916	354	74	7.07 \pm 1.48

1) RAD - 7 新鲜小干燥管测量²²⁰Rn 刻度系数 1.30。

表 3 AlphaGUARD 对不同²²²Rn/²²⁰Rn 浓度下的响应系数 S 测量结果

Tab. 3 Relative sensitivity coefficient for ²²⁰Rn under different ²²²Rn/²²⁰Rn concentrations

RAD - 7 测量结果 ¹⁾		AlphaGUARD 测量结果		响应系数 S (%)
²²² Rn 浓度(Bq/m ³)	²²⁰ Rn 浓度(Bq/m ³)	氡浓度(Bq/m ³)		
1 063 \pm 262	3 140 \pm 857	1 250 \pm 277		5.96 \pm 1.66 %
6 439 \pm 512	2 599 \pm 827	6 625 \pm 552		7.16 \pm 4.86 %

1) 考虑了 1.30 刻度因子的结果。

从测量结果中我们可以发现,不同²²²Rn/²²⁰Rn 混合浓度测量出来的响应系数 S 结果同纯²²⁰Rn 环境中测量的结果平均值上无明显差别。低²²²Rn 高²²⁰Rn 环境测量值比高²²²Rn 低²²⁰Rn 测量值更为精确,误差更小。其原因在于低²²²Rn 高²²⁰Rn 环境下无论 RAD - 7 测量结果还是 AlphaGUARD 扩散测量结果波动和测量误差都会比高²²²Rn 低²²⁰Rn 环境下测量结果波动和测量误差要小,最终导致响应系数 S 测量结果误差要小很多。

综合纯²²⁰Rn 环境和²²²Rn/²²⁰Rn 混合环境测量结果发现,AlphaGUARD 扩散模式下²²⁰Rn 响应系数 S 不随²²⁰Rn 浓度和²²²Rn/²²⁰Rn 混合比的

变化而变化,通常情况下可以取 6.09%。

3 结论

在²²²Rn/²²⁰Rn 混合环境下采用 AlphaGUARD 进行测量时,根据模式不同显示的氡浓度和实际²²²Rn、²²⁰Rn 会有如下的关系式:

流气模式:显示氡浓度 Rn-flow = 实际²²²Rn 浓度 + 实际²²⁰Rn \times 流速修正因子 R

扩散模式:显示氡浓度 Rn-diffusion = 实际²²²Rn 浓度 + 实际²²⁰Rn \times 响应系数 S

根据本文研究结果, $R = 0.80$, $S = 6.09 \%$ 。若在²²²Rn/²²⁰Rn 混合环境下用 AlphaGUARD 同时进行流气模式和扩散模式测量,采用上面关

系式,能够得到相对准确的 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 浓度。

由于AlphaGUARD扩散模式下 ^{220}Rn 响应系数 S 数值较小,该方法只适用于 ^{220}Rn 浓度比较高的环境,特别是 ^{220}Rn 浓度比 ^{222}Rn 高一个量级的环境。否则,扩散模式下显示氡浓度可以近似认为是实际的 ^{222}Rn 浓度(通常情况下,不确定度小于10%)。

参考文献:

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation [R]. Sweden:UNSCEAR,2000.
- [2] Shang B, Iida T, Ikebe Y. Influence of ^{220}Rn on ^{222}Rn measurement in Chinese cave dwellings. Radon and Thoron in the Human Environment [C]. Singapore: World Scientific. 1998: 379—384.
- [3] Ishikawa T. Effects of thoron on a radon detector of pulse-ionization chamber type[J]. Radiation Protection Dosimeter, 2004, 108(4): 327—330.
- [4] Genitron Instruments GmbH. User Manual of A Portable Radon Monitor "AlphaGUARD"R. 1998.
- [5] DURRIDGE COMPANY Inc. RAD7 Radon detector user Manual R.
- [6] Eappen KP, Sapra BK, Mayya YS. A novel methodology for online measurement of thoron using Lucas scintillation cell [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 572: 922—925.
- [7] Eappen KP, Nair RN, Mayya YS. Simultaneous measurement of radon and thoron using Lucas scintillation cell [J]. Radiation Measurements, 2008, 43: 91—97.

Response of Alpha GUARD Radon Detector to ^{220}Rn

Liu Cuihong¹, Zhang Lei¹, Zhuo Weihai², Guo Qiuju¹

- (1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;
2. Institute of radiological medicine, Fudan University, Shanghai 200032)

Abstract: Based on optimized design ionization chamber, AlphaGUARD is the most stable commercial radon detector, which is widely used in various radon chambers worldwide as a standard device. Under ordinary radon concentration, it works according to the principle of pulse ionization chamber which only records the α -particle counting without the spectroscopy, so it is limited to pure ^{222}Rn measurements. In this paper, the two working modes of response mechanisms of AlphaGUARD to ^{220}Rn were studied. This study found that, under flow mode with sampling flow rate of $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, the flow correction factor for ^{220}Rn is 0.80; under diffusion modes, the relative sensitivity coefficient of ^{220}Rn is independent on the ^{220}Rn concentration and mixed $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ ratio is 6.09%.

Key words: Radon/Thoron; Pulse-ionization Chamber; Relative Sensitivity Coefficient; Flow Correction Factor