

T/WSJD

中国卫生监督协会团体标准

T/WSJD 53—2024

氡测量 CR-39 径迹蚀刻法

CR-39 track etching method for radon measurement

2024 - 03 - 11 发布

2024 - 03 - 26 实施

中国卫生监督协会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测量原理与测量系统 2

 4.1 测量原理 2

 4.2 测量系统的构成与技术要求 2

5 测量步骤 2

 5.1 氦探测器准备 2

 5.2 氦探测器布放原则 2

 5.3 CR-39 的蚀刻 2

 5.4 径迹密度测读 2

 5.5 平均氦浓度计算 3

6 测量系统刻度 3

 6.1 刻度条件 3

 6.2 刻度系数及其不确定度计算 3

7 质量保证措施 4

 7.1 CR-39 元件 4

 7.2 氦采样盒 4

 7.3 刻度 4

 7.4 蚀刻 4

 7.5 径迹密度测读 4

 7.6 平行样和本底测量 4

 7.7 判定限 5

 7.8 探测下限 5

8 结果描述 5

 8.1 平均氦浓度 5

 8.2 标准不确定度 5

9 报告格式 6

附 录 A （资料性） 刻度系数不确定度评价示例 7

附 录 B （资料性） 氦探测器布放周期估算示例 9

附 录 C （资料性） 测量结果的计算与表示示例 10

参 考 文 献 11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国卫生监督协会提出并归口。

本文件起草单位：复旦大学放射医学研究所、中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、中国医学科学院放射医学研究所、上海仁机仪器仪表有限公司。

本文件主要起草人：卓维海、陈波、邓君、翟贺争、武云云、张志勇、张卫媛。

氡测量 CR-39 径迹蚀刻法

1 范围

本文件规定了采用CR-39径迹蚀刻法开展空气中氡的平均浓度测量的方法与质量保证措施。
本文件适用于CR-39径迹蚀刻法开展建筑物、矿山和地下空间等场所空气中平均氡浓度的测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 18883—2022 室内空气质量标准
HJ 1212—2021 环境空气中氡的测量方法
JJG 825—2013 氡测量仪检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氡 radon

原子序数为86的天然放射性元素。本文件中的氡仅指环境空气中最为常见的²²²Rn。

3.2

氡浓度 radon concentration

单位体积空气中氡的放射性活度，SI单位为 Bq·m⁻³。

3.3

平均氡浓度 average radon concentration

随时间累积暴露的氡浓度总量除以持续的暴露时间，SI单位为 Bq·m⁻³。

3.4

CR-39 元件 CR-39 element

烯丙基二甘醇碳酸酯（Diallyl 2,2"-oxydiethyl dicarbonate），分子式是C₁₂H₁₈O₇，分子量为274.27，商品名CR-39。按辐射监测需要切割成一定尺寸的CR-39称为CR-39元件。

3.5

氡采样盒 radon sampler

一种可用来采集空气中氡的闭合式小腔室。该腔室可仅让空气中的氡通过分子自由扩散进入，而腔室外的气溶胶无法进入。

3.6

CR-39 氡探测器 CR-39 radon detector

CR-39元件置于氡采样盒内后，该组合体称为CR-39氡探测器。

3.7

蚀刻 etching

CR-39元件的辐射损伤经过化学反应形成在显微镜等装置下可观察损伤痕迹的过程。

3.8

径迹密度 track density

CR-39元件上由蚀刻形成的可观察损伤痕迹称为径迹。CR-39元件表面单位面积上的径迹数量称为径迹密度，单位为每平方厘米径迹数（cm⁻²）。

3.9

标准氡室 standard radon chamber

一个特制的密封含氡腔室，能对其内部的氡浓度和有关环境条件加以稳定而均匀调控，其氡浓度可定值。可用于空气中氡浓度测量装置的计量检定、校准或刻度。

3.10

刻度 calibration

通过已知氡浓度的暴露实验，确定氡测量装置的刻度系数（灵敏度）或校正因子。

4 测量原理与测量系统

4.1 测量原理

空气中的氡伴随着空气自由扩散进入氡采样盒，氡及其衰变产物（子体）发射的 α 粒子入射到固定在氡采样盒内的CR-39元件上，形成原子尺度的潜径迹。将CR-39元件进行化学蚀刻，潜径迹会扩大成可用光学显微镜等装置观测的径迹。径迹密度与采样期间氡暴露量成线性关系，根据测读到的径迹密度、采样时间、本底径迹密度和刻度系数，可计算出采样期间采样点空气中的平均氡浓度。

4.2 测量系统的构成与技术要求

4.2.1 测量系统由CR-39元件、氡采样盒、蚀刻装置、径迹密度测读装置组成。

4.2.2 CR-39元件的形状和大小应与氡采样盒、径迹密度测读装置相匹配，其可用于测读径迹的有效面积不小于 0.5 cm^2 。

4.2.3 氡采样盒通常是由防静电材料（防静电塑料或金属）制成的空腔箱体、内部可固定放置CR-39元件，其尺寸大小和形状可根据实际测量需要而设计。

4.2.4 蚀刻装置由带温控系统的水浴箱、蚀刻容器、蚀刻架组成。恒温水浴箱的使用温度在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内，可控精度应优于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；蚀刻架应具备防强碱腐蚀功能，并可避免在蚀刻过程发生CR-39元件脱落。蚀刻溶液多用分析纯的NaOH或KOH配制。

4.2.5 径迹密度测读装置包括光学显微镜及其配套的测读设备，可通过人工或借助于图像分析系统测读得到CR-39元件上形成的微米尺度径迹数量，并能给出单个视野的面积、视野准确位置等信息。

5 测量步骤

5.1 氡探测器准备

按下列要求准备氡探测器：

- 在通风良好的低氡室内环境（通常 $<20\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ）中按产品要求组装同一批CR-39元件和氡采样盒；
- 组装过程应避免接触CR-39元件表面以保持其表面清洁且不受损伤；
- CR-39元件在装入氡采样盒时需保证用于探测的一面完全暴露在采样盒内的空气中，并为CR-39元件和采样盒做好编号等标识；
- 如近日不使用组装后的氡探测器，应尽快用铝箔等密封袋包装，以避免增加本底。

5.2 氡探测器布放原则

氡探测器的布放原则可参照HJ 1212—2021的第5.1.4.2条执行。

5.3 CR-39的蚀刻

回收后的氡探测器应尽快取出其中的CR-39元件并进行蚀刻，该过程中需注意的事项包括但不限于下列要求：

- 蚀刻前打开密封袋（有密封情况）取出氡探测器，再次检查氡采样盒外观，进一步重点检查其内CR-39元件是否有破损或污染（若有污染，蚀刻前应先进行清洗），登记CR-39元件和采样盒的编号；
- 蚀刻过程需严密控制条件，可在设备供货商提供的条件基础上采用正交试验等方法来确定选择最佳的蚀刻温度、蚀刻液浓度、蚀刻时间，建立实验室标准化操作程序。按标准操作程序开展蚀刻，控制好蚀刻液浓度、蚀刻温度和蚀刻时间；蚀刻条件须与刻度实验时的蚀刻条件一致；
- 蚀刻后取出CR-39元件，用去离子水、无水酒精等冲洗干净后晾干。

5.4 径迹密度测读

径迹密度测读前需确认径迹密度测读装置状态的稳定性，必要时可利用刻度用的CR-39元件作为参考标准来检查该装置的稳定性。

径迹密度测读时应根据实验室操作规程规定的径迹人工甄别规则或者自动测读仪器设定的径迹识别参数，对视野内的径迹进行甄别并记录径迹数。对多视野测读时，保证各个视野互不重叠。由多个视野的径迹总数和总测读面积，得到径迹密度。

5.5 平均氡浓度计算

根据式（1）计算测量周期内的平均氡浓度：

$$\bar{C} = \frac{\bar{N}_g - \bar{N}_0}{F_C \cdot t} \quad (1)$$

式中：

$\bar{C}$ ——测量周期内的平均氡浓度，单位为贝可每立方米（Bq·m⁻³）；

$\bar{N}_g$ ——测量用氡探测器中CR-39元件上的径迹密度的平均值，单位为径迹数每平方厘米（cm⁻²）；

$\bar{N}_0$ ——实验室或测量现场密封留存用作本底测量氡探测器中CR-39上的径迹密度的平均值，单位为径迹数每平方厘米（cm⁻²）；

F_C ——刻度系数，单位为径迹数每平方厘米每贝可每小时立方米[cm⁻²/(Bq·h·m⁻³)]；

t ——氡探测器在采样点的连续暴露时间，单位为小时（h）。

6 测量系统刻度

6.1 刻度条件

测量系统刻度时的暴露条件应满足但不限于下列要求：

a) 刻度应在获得国家计量部门授权的标准氡室内进行，每批产品的刻度实验可参照JJG 825—2013的第7.3.4条规定，至少在三个不同氡暴露水平下进行；

b) 在每个氡浓度水平的标准氡室内放置至少10个氡探测器；

c) 每次刻度时至少取同一批CR-39元件10片，并测读其本底径迹密度；

d) 氡探测器的暴露时间需保证其内外的氡达到足够长时间的平衡，且单片CR-39元件上的径迹密度不少于400 cm⁻²，以免统计涨落过大，但不能过量暴露以避免在CR-39元件上形成的径迹发生明显重叠而无法准确测读其径迹数量；

e) 暴露后的氡探测器需在低氡室内环境（通常<20 Bq·m⁻³）放置一段时间（通常数小时），进行必要的时间补偿后方可取出CR-39元件，不可从氡室取出后直接密封。

6.2 刻度系数及其不确定度计算

6.2.1 刻度系数计算

根据式（2）计算刻度系数：

$$F_C = \frac{\bar{D}_{Rn} - \bar{D}_b}{IC_{Rn}} \quad (2)$$

式中：

F_C ——刻度系数，单位为径迹数每平方厘米每贝可每小时立方米[cm⁻²/(Bq·m⁻³·h)⁻¹]；

$\bar{D}_{Rn}$ ——经氡暴露氡探测器中CR-39元件上径迹密度的平均值，单位为径迹数每平方厘米（cm⁻²）；

$\bar{D}_b$ ——未经氡暴露CR-39元件的本底径迹密度的平均值，单位为径迹数每平方厘米（cm⁻²）；

IC_{Rn} ——刻度期间标准氡室的氡浓度和连续暴露时间的乘积，单位为贝可小时每立方米（Bq·m⁻³·h）。

6.2.2 刻度系数的标准不确定度评定

刻度系数的标准不确定度主要来源于径迹密度测读的不确定度和标准氡室的氡浓度定值不确定度，暴露时间的不确定度通常可忽略不计。具体计算示例可参照附录A。

7 质量保证措施

7.1 CR-39 元件

为保证CR-39元件的质量，在使用CR-39元件过程中应实施但不限于下列措施：

- a) 新购买的CR-39元件需先进行其外包装和元件表面外观检查，外观检查通过后再做本底径迹密度的抽样检测，以确保其可满足使用要求，通常情况下，若本底径迹密度的相对标准偏差大于30%，不建议使用；
- b) 确认可使用的CR-39元件在使用前需密封保存在低氦、低中子辐射水平和低温环境中，建议在冰箱的冷藏室内储存；长期储存的CR-39元件，至少每半年需要再次抽样检测其本底径迹密度，以掌握其变化情况，并判断是否可以继续使用；
- c) CR-39元件使用前需确保其外观完好、表面整洁、无划痕；如出厂时CR-39元件表面附有保护膜，在装入氦探测器前需先去除保护膜；在组装过程中应避免接触其探测面；
- d) 回收后的CR-39元件应尽快进行蚀刻，经蚀刻后的CR-39元件需经过洗净后晾干，并在测读前保持其表面干净；
- e) CR-39元件不能重复使用。

7.2 氦采样盒

采样盒的质量保证应实施但不限于下列措施：

- a) 采样盒应具备良好的环境耐受性，以避免其在一个采样周期内发生破损和形变；
- b) 采样盒在使用前需经过防静电处理，并保持采样盒内外表面洁净；防静电处理可采取湿布擦拭、防静电液浸泡、或使用抗静电喷雾等方式；
- c) 若使用滤膜方式阻止气溶胶进入的采样盒，应保证滤膜在采样周期内不会受环境条件变化而破损等影响采样盒的氦采集效率；
- d) 采样盒的连续使用周期应与其待测的平均氦浓度水平相适应，如果待测浓度很高，则应减少采样时间，以避免CR-39元件上形成的径迹密度过高；相反，如果待测浓度水平较低，则应延长取样时间；采样周期的设定可参考附录B。
- e) 采样盒宜带有相应的编号等标识，以避免发生氦探测器与采样场所无法正确对应的情形。

7.3 刻度

7.3.1 测量系统的刻度系数仅对应特定品牌和型号以及批次的CR-39元件、氦采样盒、蚀刻条件和径迹测读系统，当上述任一条件发生变化时，测量系统应进行重新刻度。

7.3.2 如制造商提供了同一批次产品的刻度系数，需要了解其刻度和径迹测读条件以及刻度系数的不确定度，可在使用时严格按照制造商提供的条件开展蚀刻和径迹测读；如制造商未提供产品的刻度系数，或所使用的CR-39元件的型号或批次不同，或所使用的径迹密度测读装置性能不同，应自行按第5章的规定进行刻度和不确定度评定。

7.3.3 在刻度实验过程中，对经暴露过的或作为本底扣除用CR-39元件的径迹密度测读应尽可能覆盖到元件的全部表面（不小于 0.5 cm^2 ），并保证测读面积相同。

7.4 蚀刻

蚀刻装置的温度计需经计量部门检定，并通过自行开展的短期和长期稳定性核查以保证其示值准确可靠；蚀刻溶液应严格按各自实验室规定的比例配制，并尽量不重复使用。

7.5 径迹密度测读

径迹密度测读装置应安放在可防震动的平台上，其单个视野的面积和视野的准确位置需定期开展核查。通过人工观察径迹的，其径迹识别的原则和技术要求须与刻度时保持一致；采用自动图像分析系统测读径迹的，其径迹甄别阈值等识别参数须与刻度时保持一致。

7.6 平行样和本底测量

平行样和本底测量的质量控制措施可分别参照GB/T 18883—2022附录H的H.1.7.2和H.1.7.3条执行。

7.7 判定限

平均氡浓度的判定限按照式（3）和式（4）进行计算：

$$\bar{C}^* = k_{1-\alpha} \cdot \omega \cdot \sqrt{\bar{n}_b \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega = \frac{1}{t \cdot S \cdot F_C} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\bar{C}^*$ ——平均氡浓度的判定限；

$k_{1-\alpha}$ ——是正态分布的1- α 分位数（概率 α 为预设放射性不存在的错误判断几率，通常取为5%，在这种情况下 $k_{1-\beta}=1.645$ ）；

ω ——是影响量 t 、 S 和 F_C 符合公式（4）的综合性中间变量；

t ——氡探测器在采样点的连续暴露时间，单位为小时（h）；

F_C ——刻度系数，单位为径迹数每平方厘米每贝可每小时立方米[$\text{cm}^{-2}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$]；

S ——单片CR-39元件的测读面积，单位为平方厘米（ cm^2 ）；

$\bar{n}_b$ ——留作本底的单片CR-39元件上的总径迹数的平均值；

n ——实验室或测量现场密封留存用作本底测量氡探测器个数。

7.8 探测下限

在默认情况下（ $\alpha=\beta=0.05$ 时， $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k=1.65$ ），平均氡浓度的检测下限按照式（5）进行计算：

$$\bar{C}^{\#} = \frac{2 \cdot \bar{C}^* + k^2 \cdot \omega}{1 - k^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\omega)} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\bar{C}^{\#}$ ——平均氡浓度的检测下限；

$\bar{C}^*$ ——平均氡浓度的判定限；

k ——是正态分布的1- α 和1- β 分位数（概率 α 为预设放射性不存在的错误判断几率，概率 β 为预设放射性存在的错误判断几率，通常都取为5%，在这种情况下 $k=1.645$ ）；

ω ——是影响量 t 、 S 和 F_C 符合公式（4）的综合性中间变量；

$u_{\text{rel}}(\omega)$ ——综合性中间变量 ω 的相对标准不确定度。

8 结果描述

8.1 平均氡浓度

测量周期内的平均氡浓度根据式（1）进行计算。

8.2 标准不确定度

计算得到平均氡浓度的标准不确定度主要来源于径迹密度的测读、刻度系数和测读面积的标准不确定度，可按照式（6）和式（7）进行计算：

$$u(\bar{C}) = \sqrt{\left[n_g + \frac{\bar{n}_b}{n}\right] \omega^2 + \bar{C}^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\omega)} \dots\dots\dots (6)$$

$$u_{\text{rel}}^2(\omega) = u_{\text{rel}}^2(F_C) + u_{\text{rel}}^2(S) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$u(\bar{C})$ ——平均氡浓度的标准不确定度；

n_g ——测量用氡探测器中CR-39元件上的总径迹数；

$\bar{n}_b$ ——留作本底的单片CR-39元件上的总径迹数的平均值；

n ——实验室或测量现场密封留存用作本底测量氡探测器个数；

- ω ——是影响量 t 、 S 和 F_C 符合公式（4）的综合性中间变量；
 $u_{\text{rel}}(\omega)$ ——综合性中间变量 ω 的相对标准不确定度；
 $u_{\text{rel}}(F_C)$ ——刻度系数 F_C 的相对标准不确定度；
 $u_{\text{rel}}(S)$ ——测读面积 S 的相对标准不确定度。

9 报告格式

9.1 测量结果报告至少应包含以下信息：

- 1) 采样盒和CR-39探测器类型的标识；
- 2) 空气样品的类别（如室内、室外空气等）；
- 3) 采样时间：开始时间（日期和小时）和结束时间（日期与小时）；
- 4) 采样具体地点（如室内外采样点地址、楼层、房间号等）；
- 5) 表示结果的单位；
- 6) 测量结果： $\bar{C} \pm u(\bar{C})$ ，示例见附录C。

9.2 测量结果报告还可以包含以下补充信息：

- 1) 测量目的；
- 2) 检测依据；
- 3) 出现A类和B类不确定度的概率；
- 4) 判断限和检测下限（根据客户的要求，可用不同方式显示结果）：
 - a) 当平均氡浓度 $\leq$ 其判定限时，一般表述为“未检测到氡浓度”；
 - b) 当平均氡浓度 $\leq$ 其检测下限时，测量结果应表示为结果低于检测下限；
- 5) 注明可能影响结果的任何相关信息，例如，室内测量的通风条件（机械通风系统、门窗打开或关闭等）。

附 录 A
(资料性)
刻度系数不确定度评价示例

A.1 实测径迹密度

在某次刻度实验中，从氡室取出10个氡探测器内CR-39元件和10片未经暴露的CR-39元件上的径迹数测读结果见表A.1和表A.2。

表A.1 氡室中取出氡探测器内 CR-39 元件上的径迹密度测读值及其平均值 $\overline{D_{Rn}}$ 与标准差 $s(D_{Rn})$

i	$D_{\text{Rn},i} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$\overline{D_{\text{Rn}}} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$s(D_{\text{Rn}}) \text{ (cm}^{-2}\text{)}$
1	573	642	40
2	650		
3	687		
4	600		
5	660		
6	614		
7	673		
8	1270 ^a		
9	685		
10	634		
^a 根据格拉布斯准则，第 8 号测量结果为异常值，需剔除。			

表A.2 未经暴露 CR-39 元件上的径迹密度测读值及其平均值 $\overline{D_b}$ 与标准差 $s(D_b)$

i	$D_{Rn,i} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$\overline{D_{Rn}} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$s(D_{Rn}) \text{ (cm}^{-2}\text{)}$
1	55	78	31
2	49		
3	131		
4	96		
5	73		
6	101		

i	$D_{Rn,i} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$\overline{D_{Rn}} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$s(D_{Rn}) \text{ (cm}^{-2}\text{)}$
7	110		
8	39		
9	49		
10	77		

A.2 径迹密度的标准不确定度

径迹密度的标准不确定度采用 A 类方法评定，则可计算得到氡探测器内 CR-39 元件上的径迹密度算术平均值的标准不确定度 $u(\overline{D_{Rn}})$ 和未经暴露 CR-39 元件上的径迹密度算术平均值的标准不确定度 $u(\overline{D_b})$ 分别为：

$$u(\overline{D_{Rn}}) = s(\overline{D_{Rn}}) = s(D_{Rn})/\sqrt{9} \approx 14 \text{ cm}^{-2} \dots\dots\dots (\text{A. 1})$$

$$u(\overline{D_b}) = s(\overline{D_b}) = s(D_b)/\sqrt{10} \approx 10 \text{ cm}^{-2} \dots\dots\dots (\text{A. 2})$$

A.3 积分氡暴露量的标准不确定度

积分氡暴露量 IC_{Rn} 的标准不确定度来源主要包括氡浓度测量仪与计时器引入的不确定度。其中计时器引入的不确定度一般可忽略，氡浓度测量仪引入的不确定度采用 B 类方法评定。本示例中，本次刻度实验的 $IC_{Rn} = 113.0 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}$ ，氡浓度测量仪引入的标准不确定度 $u(C_{Rn})$ 根据检定证书给出的扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(C_{Rn}) = 3.0\%$ ($k = 2$)，则可计算得到本次刻度实验 IC_{Rn} 的标准不确定度 $u(IC_{Rn})$ 为：

$$u(IC_{Rn}) = \frac{U_{\text{rel}}(C_{Rn})}{k} \cdot IC_{Rn} \approx 1.7 \times 10^3 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h} \dots\dots\dots (\text{A. 3})$$

A.4 刻度系数及其合成标准不确定度的计算

根据公式 (2) 计算得到刻度系数为：

$$F_C = \frac{\overline{D_{Rn}} - \overline{D_b}}{IC_{Rn}} \approx 5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})^{-1} \dots\dots\dots (\text{A. 4})$$

假设在刻度实验时测读面积的不确定度对径迹密度的测读影响可忽略不计，那么本次刻度实验中径迹密度 ($\overline{D_{Rn}}$) 和本底径迹密度 ($\overline{D_b}$) 对刻度系数的灵敏系数 $c(x)$ 可通过求偏导给出如下：

$$c(\overline{D_{Rn}}) = c(\overline{D_b}) = 1/IC_{Rn} \approx 0.9 \times 10^{-2} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1} \dots\dots\dots (\text{A. 5})$$

本次刻度实验积分氡暴露量 IC_{Rn} 对刻度系数的灵敏系数 $c(IC_{Rn})$ 也可通过求偏导给出如下：

$$c(IC_{Rn}) = \frac{\overline{D_{Rn}} - \overline{D_b}}{IC_{Rn}^2} \approx 4.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-2} \dots\dots\dots (\text{A. 6})$$

假设各种来源的不确定度相互独立，按方和根合成，则刻度系数 F_C 的合成标准不确定度为：

$$\begin{aligned} (F_C) &= \sqrt{[c(\overline{D_{Rn}}) \cdot u(\overline{D_{Rn}})]^2 + [c(\overline{D_b}) \cdot u(\overline{D_b})]^2 + [c(IC_{Rn}) \cdot u(IC_{Rn})]^2} \\ &\approx 0.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1} \dots\dots\dots (\text{A. 7}) \end{aligned}$$

附 录 B
(资料性)
氦探测器布放周期估算示例

氦探测器的布放周期应与其待测空气中的平均氦浓度水平相适应,如果待测浓度很高,则应减少采样时间,以避免CR-39元件上形成的径迹密度过高而无法准确测读;相反,如果待测浓度水平较低,则应延长取样时间,以克服本底径迹的波动对测量结果的准确性影响。

假设待测场所的平均氦浓度 $\bar{C}$ 为 $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,氦探测器的刻度系数 F_C 为 $5.0\times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}/(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$,CR-39元件上形成径迹的净密度低于 5000 cm^{-2} 时可以准确测读;根据式(1)可估算出氦探测器的布放周期 t 最长为:

$$t = \frac{5000}{0.005 \times 1 \times 2000} = 500 \text{ (h)} \approx 21 \text{ (d)} \dots\dots\dots (\text{B. 1})$$

假设待测场所的平均氦浓度 $\bar{C}$ 为 $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,氦探测器的刻度系数 F_C 为 $5.0\times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}/(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$,CR-39元件上形成径迹的净密度低于 80 cm^{-2} 时无法克服本底径迹的波动影响;根据式(1)可估算出氦探测器的布放周期 t 最短为:

$$t = \frac{80}{0.005 \times 1 \times 10} = 1600 \text{ (h)} \approx 67 \text{ (d)} \dots\dots\dots (\text{B. 2})$$

附 录 C
(资料性)
测量结果的计算与表示示例

一个氡探测器在某室内布放 90 天 (2160 小时) 后, 经蚀刻和测读得到其内 CR-39 元件上的径迹密度为 600 cm^{-2} , 同一批次 10 个未受暴露氡探测器在保管 90 天后其内 CR-39 元件的本底径迹密度为 40 cm^{-2} ; 已知该批氡探测器的刻度系数为 $(5.0 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})$, 该实验室所使用测读装置的测读面积为 $(1 \pm 0.1) \text{ cm}^2$ 。

按式 (1) 计算得到平均氡浓度 $\bar{C}$ 为:

$$\bar{C} = \frac{600 - 40}{0.005 \times 1 \times 2160} = 52 \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (\text{C. 1})$$

按式 (4) 和式 (7) 计算得到综合性中间变量 ω 及其相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\omega)$ 分别为:

$$\omega = \frac{1}{2160 \times 1 \times 0.005} = 0.09 \dots\dots\dots (\text{C. 2})$$

$$u_{\text{rel}}^2(\omega) = 0.04^2 + 0.1^2 = 0.012 \dots\dots\dots (\text{C. 3})$$

按式 (6) 计算得到平均氡浓度的标准不确定度 $u(\bar{C})$ 为:

$$u(\bar{C}) = \sqrt{[600 + 40] \times 0.09^2 + 52^2 \times 0.012} = 6 \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (\text{C. 4})$$

因此, 本次平均氡浓度的测量结果应表示为:

$$\bar{C} = (52 \pm 6) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \dots\dots\dots (\text{C. 5})$$

按式 (3) 计算得到平均氡浓度的判断限 $\bar{C}^*$ 为:

$$\bar{C}^* = 1.645 \times 0.09 \sqrt{40 \times \left(1 + \frac{1}{10}\right)} = 1 \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (\text{C. 6})$$

按式 (5) 计算得到平均氡浓度的探测下限 $\bar{C}^\#$ 为:

$$\bar{C}^\# = \frac{2 \times 1 + 1.645^2 \times 0.09}{1 - 1.645^2 \times 0.012} = 2.3 \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (\text{C. 7})$$

参 考 文 献

- [1] ISO 11665-4:2021 Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon-222 — Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis.
- [2] WS/T 675—2020 氡及其子体个人剂量监测方法.