

中华人民共和国卫生行业标准

WS/T 675—2020

氡及其子体个人剂量监测方法

Method for monitoring individual dose induced by radon and its progeny

2020-04-03 发布

2020-10-01 实施

中华人民共和国国家卫生健康委员会 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 监测原则	2
5 测量系统	2
6 氡暴露量测量	3
7 剂量估算	3
8 不确定度分析	4
9 质量保证	4
附录 A (资料性附录) 氡个人剂量计结构示意图	5
附录 B (资料性附录) 固体核径迹测量方法的探测限	6
附录 C (资料性附录) 单位氡暴露量致氡有效剂量的转换系数	7
附录 D (资料性附录) 氡及其子体个人剂量监测不确定度的评定	8
参考文献	9

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准起草单位：中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、北京市化工职业病防治院、黑龙江省疾病预防控制中心、中国医学科学院放射医学研究所、湖北省疾病预防控制中心。

本标准主要起草人：邓君、曹磊、赵宇、张良安、周文珊、王拓、郝述霞、孙全富、苏旭。

氡及其子体个人剂量监测方法

1 范围

本标准规定了采用固体核径迹探测技术开展氡及其子体致个人内照射剂量的监测方法。

本标准适用于铀矿山、非铀矿山和地下涵洞等工作场所作业人员的氡及其子体致个人内照射剂量监测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

GBZ 129 职业性内照射个人监测规范

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 的化学元素，其主要同位素有 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 、 ^{219}Rn 。

注：本标准中的氡仅指 ^{222}Rn 。

3.2

氡暴露量 radon exposure

某一时间段内，氡通过空气暴露途径进入人体体内的总量。

注：国际单位制（SI）单位为贝可小时每立方米（ $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ）。

3.3

固体核径迹探测 solid state nuclear track detection

利用带电粒子穿过绝缘介质时，沿其轨迹会造成原子尺度辐射损伤这一现象而建立的带电粒子探测方法。如果损伤密度足够高，则经过化学蚀刻等方法处理，可用普通显微镜加以观察。

3.4

CR-39

CR-39 学名碳本酸丙烯乙酸，或称烯丙基二甘醇碳酸酯（Dially Glycol Carbonates）。

注：它由美国哥伦比亚公司化学家发现，为美国空军所研制的一系列聚合物中的第39号材料，因此俗称CR-39。

3.5

化学蚀刻 chemical etching

固体核径迹探测器的辐射损伤经过化学试剂蚀刻形成可观察径迹的过程。

3.6

氡个人剂量计 radon dosimeter

可佩戴在个人身上、用于监测个人受到氡及其子体致内照射剂量的器具。

注：本标准特指由CR-39元件和无源扩散式氡收集杯（盒）组成的剂量计。

3.7

平衡因子 equilibrium factor; F

氡的平衡当量浓度与氡的实际浓度之比。

注：平衡当量浓度是氡与其短寿命子体处于平衡状态、并具有与实际非平衡混合物相同的 α 潜能浓度时氡的活度浓度。

3.8

跟随剂量计 follow up dosimeter

用于测量同期非职业工作场所包括剂量计邮寄过程中的氡暴露，在氡及其子体个人剂量监测中需予以扣除。

4 监测原则

4.1 当因职业缘由带来的氡照射个人剂量有可能超过 2 mSv/a 时，应开展氡个人剂量的常规监测。通常情况下，可结合现场主动式的测量结果和工作条件来判断是否可能超过 2 mSv/a。

4.2 氡及其子体个人剂量监测周期参考 GBZ 129 的要求，应考虑监测方法灵敏度等因素。监测的记录、报告和档案应符合 GBZ 129 的要求。

5 测量系统**5.1 测量系统组成**

5.1.1 氡及其子体个人剂量测量系统主要由氡个人剂量计、化学蚀刻装置和径迹读出系统组成。

5.1.2 氡个人剂量计的氡收集杯（盒）材质应采用导电塑料，留出适宜尺寸的氡收集腔室，并在外侧设置佩带针（夹），便于佩戴使用。氡个人剂量计示意图参见附录 A。

5.1.3 化学蚀刻装置由恒温水浴箱、温控系统、蚀刻架和蚀刻架容器等组成。

5.1.4 径迹读出系统由光学显微镜及适配的图像分析系统组成。

5.2 测量系统性能要求

5.2.1 在连续三个月的使用条件下，氡个人剂量计的可探测范围应能覆盖平均氡浓度在 $50 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} \sim 10000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。

5.2.2 氡个人剂量计应具有防水功能，并能阻止空气中粉尘和氡子体进入剂量计内。

5.2.3 化学蚀刻过程中应保持蚀刻液温度和浓度的相对恒定，温度范围为 60 °C~80 °C，相对偏差为 ±1 °C。蚀刻条件需经优化，通常可采用正交实验法确定蚀刻剂的浓度、蚀刻时间和蚀刻温度等关键参数。对于 CR-39 元件，典型常用化学蚀刻条件为 6.25 mol·L⁻¹ 氢氧化钠 (NaOH) 水溶液，10 h 蚀刻，蚀刻温度为 70 °C，或 6.5 mol·L⁻¹ 氢氧化钾 (KOH) 水溶液，7 h 蚀刻，蚀刻温度为 70 °C。

5.2.4 因径迹密度标准偏差与测读面积及总径迹计数相关，实际测读的有效面积应不少于 0.2 cm²，并要求读出系统可对 10 trs·cm⁻²~10⁴ trs·cm⁻² 的总径迹数进行准确的定量分析。

5.2.5 测量系统应经有相应授权的计量部门检定或校准。

5.2.6 实验室人员的技术差异将引入测量差异。如采用人工测读方式，对于同一组样品，应由不同人员进行重复检测，提高测读准确率，重复检查量应不小于 5%，控制测读引入的相对偏差小于 20%。

5.2.7 应给出采用本标准固体核径迹测量方法探测限的估计，方法参见附录 B。

6 氡暴露量测量

6.1 测量方法

6.1.1 氡个人剂量计制备：在低氡浓度环境中装配氡个人剂量计，同时注意预防静电影响，制备后及时采用密封包装。

6.1.2 氡个人剂量计发送：发送过程中应保持密封状态，并提供跟随剂量计。

6.1.3 氡个人剂量计使用：在使用前开封包装袋，佩戴在人员的胸部位置，同时注意防尘和防水。记录使用人员及场所、剂量计发放时间等信息。

6.1.4 氡个人剂量计回收：密封包装氡个人剂量计，记录回收时间等信息，并将跟随剂量计一同送回测量实验室。

6.1.5 CR-39 蚀刻：将 CR-39 元件从氡收集杯（盒）中取出，使用适量清洗液（蒸馏水或去离子水等）清洗表面后，放置入蚀刻系统进行蚀刻。蚀刻后的固体核径迹探测器经清洗晾干后，置于阴凉、干燥处保存待测。

6.1.6 径迹计数：采用视域读法。人工计数时，应调节光学显微镜焦距微调手轮至径迹轮廓清晰后，缓慢移动载物台，逐条读取径迹数并记录。移动时应注意不要交叉或重复测读同一视域面积。

6.2 个人氡暴露量计算

根据式（1）计算监测周期内的累积氡暴露量：

$$C_{Rn} = (N_S - N_b) / F_R \dots\dots\dots (1)$$

式中：

C_{Rn} ——监测周期内的累积氡暴露量，单位为贝可小时每立方米 (Bq·h·m⁻³)；

N_S ——监测用氡个人剂量计中的 CR-39 经蚀刻后测读得到的径迹密度，单位为径迹数每平方厘米 (trs·cm⁻²)；

N_b ——跟随剂量计中的 CR-39 经蚀刻后测读得到的径迹密度，单位为径迹数每平方厘米 (trs·cm⁻²)；

F_R ——刻度系数，单位为径迹数每平方厘米每贝可小时每立方米 [trs·cm⁻² / (Bq·h·m⁻³)]。

7 剂量估算

根据式（2）估算氡及其子体致个人待积有效剂量：

$$E_{Rn} = C_{Rn} \times f \dots\dots\dots (2)$$

式中：

E_{Rn} ——氡及其子体致个人待积有效剂量，单位为毫希沃特（mSv）；

C_{Rn} ——监测周期内的累积氡暴露量，单位为贝可小时每立方米（Bq·h·m⁻³）；

f ——个人氡暴露量到待积有效剂量的转换系数，单位为毫希沃特每贝可小时每立方米 [mSv/(Bq·h·m⁻³)]，其值参见附录 C。

8 不确定度分析

8.1 考虑不同氡及其子体个人剂量水平的不确定度评价

可根据待积有效剂量的水平开展不确定度的评定：

- a) 对待积有效剂量≤0.1 mSv 的估算时，可不考虑不确定度评定；
- b) 对待积有效剂量>0.1 mSv 的估算时，应考虑 A 类和 B 类的不确定度、合成标准不确定度评定。本标准监测方法的不确定度评定参见附录 D。

8.2 氡及其子体个人剂量监测中应考虑的不确定度来源

氡及其子体个人剂量监测中应考虑的不确定度来源主要包括：

- a) 监测用和跟随剂量计的径迹测读与计数中的统计涨落及其正态分布的合理性；
- b) 探测器物理性能差异带来的测量系统误差，主要是能量响应和角度响应等；
- c) 校准或刻度引入的误差，主要是刻度系数的不确定度和非线性；
- d) 蚀刻引入的不确定度分量。

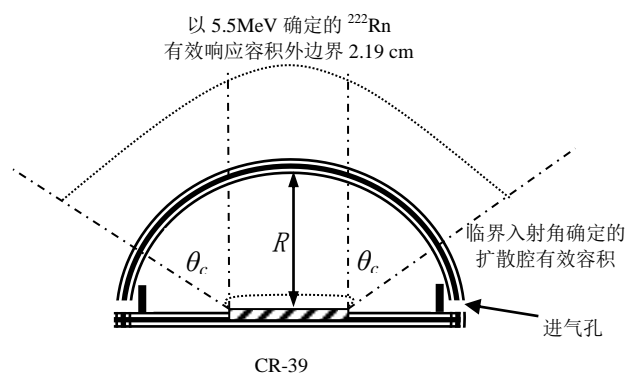
9 质量保证

应将质量保证始终贯穿于从监测计划制定到结果评价的全过程。质量保证包括但不限于下列要求：

- a) 选用符合要求、工作正常的剂量计、设备和仪器；
- b) 系统的定期校准和维护；
- c) 积极参与实验室间的相互比对，包括测量方法、技术规范等；
- d) 选择人工测读时，应进行人员技术培训并授权，妥善保留技术培训和授权文件；
- e) 应使用能够提供本底信息的跟随剂量计；
- f) 应制定和严格遵守剂量计发放、佩戴、运输、回收和保存等环节的操作规程；
- g) 按 GBZ 129 的要求进行剂量评价，记录并妥善保存监测数据；
- h) 对异常数据的剔除，应在现场用复查的方法，或使用适宜的统计学方法剔除异常数据。在剔除异常数据的同时，还应检查和分析其产生原因，并记录在案。

附 录 A
(资料性附录)
氦个人剂量计结构示意图

本标准中的氦个人剂量计特指由CR-39元件和无源扩散式氦收集杯(盒)组成的剂量计。氦收集杯(盒)内外空气可以自由交换,其形状通常为半球形或圆柱形;CR-39元件通常设置在氦收集杯(盒)的底部中央位置(如图A.1所示)。考虑到氦及其子体所发射出 α 粒子的能量以及CR-39可探测到入射 α 粒子的临界角度以及佩戴方便等原因,推荐使用直径约为4.0 cm、高度约为2.0 cm的近似半球形作为氦个人剂量计的扩散腔。



图A.1 半球形扩散型氦剂量计结构示意图

附 录 B
(资料性附录)
固体核径迹测量方法的探测限

本附录给出固体核径迹测量方法的探测限 L_D 的估计方法。在实际测量中，为做出更符合实际的判断，需要对第一类错误（ α 错误）发生概率（ K_α ）和第二类错误（ β 错误）发生概率（ K_β ）同时进行控制。当 $\alpha=\beta=5\%$ 时（即置信概率为 95%）， $K_\alpha=K_\beta=1.645$ ，那么，氦及其短寿命子体发射出 α 粒子在探测器上形成核径迹的探测限 L_D 可表示为式（B.1）：

$$L_D = K_\beta^2 + 2K_\alpha \times \sqrt{2N_b} \approx 2.71 + 4.65\sqrt{N_b} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

L_D ——固体核径迹测量方法的探测限；

K_α ——第一类错误（ α 错误）发生概率；

K_β ——第二类错误（ β 错误）发生概率；

N_b ——固体核径迹元件的本底径迹密度，单位为径迹数每平方厘米（ $\text{trs}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）。

附 录 C
(资料性附录)

单位氡暴露量致氡有效剂量的转换系数

工作场所内氡的个人氡暴露量到待积有效剂量的转换系数见表C.1。

表C.1 工作场所内个人氡暴露量到待积有效剂量的转换系数

暴露/场所	F	单位氡暴露量致待积有效剂量转换系数 $\text{mSv/Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$
室内工作场所	0.4	1.3×10^{-5}
矿井	0.2	3.5×10^{-6}
观光洞穴	0.4	1.5×10^{-5}
注1： F 为平衡因子。		
注2：本表引自 ICRP 137 号报告的附表 A.11。		

附 录 D
(资料性附录)

氡及其子体个人剂量监测的不确定度评定举例

D.1 氡及其子体个人剂量监测不确定度评定

D.1.1 A类不确定度分量主要来源如下:

- a) 本底计数的相对偏差, u_b ;
- b) 测量计数的相对偏差, u_s 。

D.1.2 B类不确定度分量主要来源包括:

- a) 能量响应, u_E : 由于氡及其短寿命子体发射 α 粒子能量不同, 而导致探测元件不同响应引入的不确定度分量。从 ^{222}Rn 衰变链的 α 粒子入射能量角度分析, 主要共有 3 种能量的 α 粒子, 分别是: 5.5MeV (^{222}Rn)、6.0MeV (^{218}Po) 和 7.7MeV (^{214}Po);
- b) 角度响应, u_A : 粒子入射角度变化主要是对径迹有效直径的影响, 一般认为, 在氡个人剂量监测关注的临界角 60° 范围内, 角度引入的标准不确定度可忽略;
- c) 化学蚀刻条件引入的偏差, u_T ;
- d) 刻度系数的非线性, u_{Cf} 。

D.2 相对扩展不确定度计算

相对扩展不确定度可用式 (D.1) 计算, 包含因子取 $k=2$:

$$U = 2\sqrt{u_b^2 + u_s^2 + u_E^2 + u_T^2 + u_A^2 + u_{Cf}^2} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- U ——为相对扩展不确定度;
- u_b ——本底计数的相对偏差引入的不确定度分量;
- u_s ——测量计数的相对偏差引入的不确定度分量;
- u_E ——能量响应引入的不确定度分量;
- u_A ——角度响应引入的不确定度分量;
- u_{Cf} ——刻度系数非线性引入的不确定度分量;
- u_T ——某一经优化过的蚀刻条件引入的不确定度分量。

D.3 计算示例

计算示例中选取的不确定度分量典型值和根据式 (D.1) 估计的相对扩展不确定度 ($k=2$) 的评定结果见表D.1。

表D.1 计算示例中选取的不确定度分量典型值和相对扩展不确定度 ($k=2$) 的评定结果

u_b	u_s	u_E	u_A	u_{Cf}	u_T	$U (k=2)$
2%	10%	7%	~0%	8%	2%	30%

参 考 文 献

- [1] ICRP Report 137, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3, ICRP137-2017
 - [2] 潘自强. 电离辐射环境监测与评价[M]. 北京: 原子能出版社, 2008
 - [3] 朱润生. 固体核径迹探测器的原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987
-