氡钍射气连续测量装置的研制及其现场验证

刘啸晨，杨明理，王 攀，初旭阳

（核工业北京化工冶金研究院，北京 101149）

摘要：氡与钍射气的连续甄别测量是辐射防护领域的重要课题，能够为氡钍射气混合环境中内照射剂量的准确估算提供数据支撑。使用改进的 ZnS 闪烁室，基于延迟计数法，构造了氡与钍射气连续监测方法的试验装置，在实验室与现场进行了不同条件下的测试，并将测试结果与平行组 Alpha Guard DF2000 的测试结果进行了比较。结果表明，当氡与钍射气的浓度比大于 1∶30 时，试验装置对 2 种核素的测量结果与 DF2000 的测量结果相比，偏差均小于 10%，且长期监测结果不受前序周期遗留物的干扰。研制的氡钍射气连续测量装置可准确测量氡与钍射气的放射性浓度。

关键词：ZnS 闪烁室；连续监测；氡；钍射气；延迟计数法；甄别测量

中图分类号：TL81 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0069-06

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.03.08

连续监测氡与钍射气在辐射防护领域具有重要意义。氡与钍射气及其子体是人体所受天然放射源内照射剂量的主要贡献者，在高钍本底地区或稀土厂房，钍射气对内照射剂量的贡献甚至高于氡[1-3]。因此，为了辐射防护与剂量监测工作的开展，需要对现场环境中的氡与钍射气的放射性浓度进行连续监测。

氡与钍射气的半衰期不同，在不同材料中的扩散系数以及发射出的 α 粒子能量也不同，在氡与钍射气的混合环境中通常利用这三方面的不同进行甄别测量[4-8]。现有氡钍射气监测装置，按照原理主要分为固体径迹探测器、脉冲电离室探测器、半导体探测器、闪烁室探测器四类。固体径迹探测器体积小，携带方便；但所得到的是一段时间内氡与钍射气造成的累积效应，无法用于连续监测，无法得到一段时间内氡与钍射气所致剂量的变化情况。半导体探测器与脉冲电离室探测器可以通过能量分辨识别氡与钍射气并进行连续监测；但半导体探测器在高湿度环境中受到复合损失的影响较大，脉冲电离室探测器的最小探测限比半导体探测器更低，当环境中氡与钍射气的浓度之比超出(1∶5)～(5∶1)范围时，对其中相对较少的核素测量值准确性下降。在所有探测器中，闪烁室探测器具有计数稳定性好、受湿度影响较小，以及抗电磁干扰能力强等特点[9-12]；但使用闪烁室探测器进行长期监测时，可能受到前序周期生成的附壁钍子体影响(氡子体半衰期较短，在长期监测中影响远远小于钍子体)。因此，排除湿度变化、电磁干扰以及附壁钍子体的影响，准确地对氡与钍射气进行甄别测量，是氡钍射气联合监测的关键。

笔者使用闪烁室构造氡与钍射气连续监测装置并解决湿度变化影响，建立了氡与钍射气分辨测量、连续监测方法，研制了氡钍射气连续测量装置原型机(简称为原型机)，并对原型机进行了现场测试。

1 氡钍射气连续监测原理和装置研制

1.1 监测原理

利用氡与钍射气半衰期的差异，在 2 个探测单元间增加 1 个延迟器，如果采样气流中的钍射气在延迟单元中接近完全衰变，则可以认为前 1 个探测器所产生的计数是由氡与钍射气及其子体衰变发出的 α 粒子所致，后 1 个探测器所产生的

收稿日期：2023-03-24

第一作者简介：刘啸晨(1997—)，男，陕西西安人，在读硕士，主要从事辐射防护研究工作。

通信作者简介：杨明理(1962—)，男，湖南湘潭人，研究员级高级工程师，主要从事辐射防护研究工作。

计数完全由氡及其子体衰变发出的 α 粒子导致，前后探测单元的计数相减则可近似得到由钍射气及其子体产生的影响，即通过 2 个探测器产生的计数反推 2 种核素的放射性浓度。

1.2 装置研制

原型机主要由延迟器、闪烁室探测器、光电倍增管、单片机、电源构成（图 1），闪烁室记录放射性衰变产生的计数，并将结果依次上传至信号采集单元、单片机和上位机。上位机接收装置各元件上传的信号，并通过单片机对高低压电源、甄别阈值、测量周期、采样流率等进行控制。

氡与钍射气在闪烁室内产生的子体，一部分附在闪烁室壁上（附壁效应），另一部分会随采样气体流出闪烁室，附壁比例主要受湿度与闪烁室结构的影响。目前已有附壁比例不受湿度影响的改进型 ZnS 闪烁室[13]，为排除环境湿度对结果的干扰，本研究使用此改进型闪烁室来构建原型机。

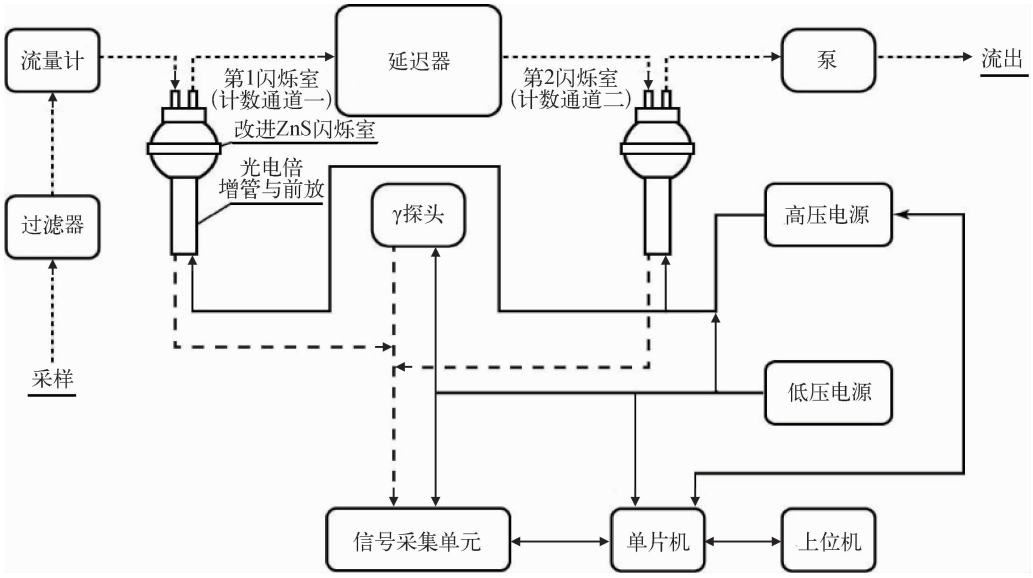


图 1 氡钍射气连续监测原型机框图

Fig. 1 The diagram of radon-thoron continuous monitoring prototype machine

采样气体先后流经过滤器、第 1 闪烁室、延迟器、第 2 闪烁室。气体中原有的放射性子体被过滤器全部过滤，在第 1 闪烁室中氡、钍射气及其生成的子体衰变产生的 α 粒子被计数（以下简称通道计数）；采样气体流入延迟器经过较长时间（钍射气半衰期的 8 倍以上）后再进入第 2 闪烁室，在其中仅有氡及其子体衰变产生的 α 粒子被计数。通过第 2 闪烁室的计数可以计算出采样气体中的氡浓度，而通过 2 个闪烁室在测量周期内通道计数之差则可计算出采样气体中的钍射气浓度。

2 氡钍射气连续监测装置性能测试

2.1 遗留系数标定

氡子体中半衰期最长的 RaB 的半衰期仅有 26.7 min，按 6 倍半衰期考虑，附壁氡子体对相隔 3 h 后的测量值的影响已经可以忽略。在长周期（测量周期 24 h）取样监测过程中，由于钍子体中存在半衰期较长的核素，因此前序采样周期中附壁的钍子体依然会对后续周期的通道计数产生贡献。将初始采样周期在一定周期后遗留的附壁钍子体所产生的通道计数与初始采样周期内由钍射气及其子体产生的通道计数之比定义为遗留系数。为了排除在长期监测中附壁钍子体的影响，建立了数学模型，并将数学模型计算出的遗留系数与试验测定出的遗留系数进行比较。

数学模型的建立过程如下。为使推导过程的指代清晰明了，钍射气（Tn）及其子体核素对应的下标见表 1。由于使用了附壁状态不受湿度影响的改进型闪烁室，可以假设生成的子体全部留在闪烁室内。

表 1　钍射气及其子体核素编号

Table 2　The code list for thoron and its progenies

核素	Tn	ThB	ThC	ThA	ThC′
编号	0	1	2	X	Y

推导过程中，定义以下物理量：周期时长（T），s；闪烁室体积（V），m^3；闪烁室内任意核素的原子数量（N_i），个；放射性浓度（C_i），Bq/m^3；初始周期在闪烁室内所产生的对应核素在后续周期 t 时刻剩余的原子数量（$N^r_{i(t)}$），个；前一个闪烁室的钍射气浓度（$C_{前}$），Bq/m^3；前一个通道的有效计数（$G_{前}$），c；后一个通道的有效计数（$G_{后}$），c。

第 n 周期前后通道有效计数之差受到所有前序周期的影响，可以表述为

$$G_{前(n)} - G_{后(n)} = \sum_{i=1}^{n} R_{n-i+1} C_{前(i)}, \tag{1}$$

式(1)中，余量系数 R_{n-i+1} 表示第 i 周期的附壁钍子体遗留物对第 n 周期前后通道有效计数之差的影响，其计算公式为

$$R_{n-i+1} = \frac{G_{n(i)}}{C_{前(i)}}, \tag{2}$$

式(2)中，$G_{n(i)}$ 表示第 i 周期遗留物在第 n 周期产生的计数。接下来需确定 R 的变化规律，将逐周期分析。

2.1.1　起始周期余量系数计算

起始周期存在关系：

$$G_{前(1)} - G_{后(1)} = R_1 C_{前(1)}, \tag{3}$$

子体末态数量计算公式为

$$N_{1(T)} = \frac{1}{\lambda_1} V C_{前(1)} (1 - e^{-\lambda_1 T}), \tag{4}$$

$$N_{2(T)} = V C_{前(1)} \frac{1}{\lambda_2} + V C_{前(1)} \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)\lambda_2} e^{-\lambda_2 T} - V C_{前(1)} \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 T}, \tag{5}$$

周期内总 α 衰变数量计算公式为

$$G_{前(1)} - G_{后(1)} = 3V C_{前(1)} T - N_{1(T)} - N_{2(T)}。 \tag{6}$$

通过上述公式可算出 R_1，下面将计算其他余量系数。

2.1.2　任意周期余量系数计算

后续周期遗留物变化规律（$t > T$）：

$$N^r_{1(t)} = N_{1(T)} e^{-\lambda_1 (t-T)}, \tag{7}$$

$$N^r_{2(t)} = N_{2(T)} e^{-\lambda_2 (t-T)} - \frac{\lambda_1 N_{1(T)}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2 (t-T)} + \frac{\lambda_1 N_{1(T)}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 (t-T)}, \tag{8}$$

特别地

$$N^r_{1(kT)} = N_{1(T)} e^{-\lambda_1 (k-1) T},$$
$$N^r_{1(T)} = N_{1(T)},$$
$$N^r_{2(kT)} = N_{2(T)} e^{-\lambda_2 (k-1) T} - \frac{\lambda_1 N_{1(T)}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2 (k-1) T} + \frac{\lambda_1 N_{1(T)}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 (k-1) T},$$
$$N^r_{2(T)} = N_{2(T)}。 \tag{9}$$

初始周期遗留物在第 $k+1$ 周期探测到的 α 衰变量 $= N^r_{1(kT)} - N^r_{1((k+1)T)} + N^r_{2(kT)} - N^r_{2((k+1)T)}$，以之除以 $C_{前(1)}$ 可以得到 R_{k+1}。当 $k=1$ 时，α 衰变量 $= N^r_{1(T)} - N^r_{1(2T)} + N^r_{2(T)} - N^r_{2(2T)}$，以之除以 $C_{前(1)}$ 可以得到 R_2；当 $k=2$ 时，α 衰变量 $= N^r_{1(2T)} - N^r_{1(3T)} + N^r_{2(2T)} - N^r_{2(3T)}$，以之除以 $C_{前(1)}$ 可以得到 R_3，依此类推。至此，对任意一个周期，均可定量算出其子体遗留物对后续任意周期计数的影响（即余量系数 R）。

2.1.3　遗留系数计算

定义遗留系数（γ_i）$= R_i / R_1$，以定量分析第 i 周期的余量对测量结果的影响。遗留系数（γ）与测量结果（C）的关系为

$$\frac{G_{前(n)} - G_{后(n)}}{R_1} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_{n-i+1} C_{前(i)}。 \tag{10}$$

显然，遗留系数仅受测量周期（T）与核素衰变常数（λ）的影响，每一周期的测量结果都可由本周期的计数与前序周期的测量结果计算得到。附壁钍子体的影响经过 60 h（6 倍半衰期）后可以忽略不计，因此用于长期监测时，若将测量周期设置为 24 h，则仅需考虑前 3 个遗留系数即可。

测量方法：将原型机与钍射气浓度恒定的钍室（平衡浓度约为 127 500 Bq/m^3，远大于实验室环境中的钍射气浓度）闭环连接，采样 24 h（周期时长设置为 24 h），得到此周期内前 1 个闪烁室产生的总通道计数。然后将原型机与环境空气连接，与钍室断开，从而确保此后通道一的计数完全由采样周期产生的附壁钍子体产生，测量并计算与空气连接后第 0～24、24～48、48～72 h 的遗留系数，结果见表 2。可以看出，二者偏差较小，当测量周期设置为 24 h 时，在原型机的算法中，可采用遗留系数试验结果的算术平均值（0.189、0.039 6、0.008 58）来扣除前序周期对当前周期的影响。

表 2 附壁子体遗留系数的理论计算与测量结果

Table 2 The calculation and measurement results of remnant coefficients

试验序号	第 1 周期			第 2 周期			第 3 周期		
	理论值	测量值	偏差/%	理论值	测量值	偏差/%	理论值	测量值	偏差/%
1	0.186	0.190	2.3	0.039 5	0.041 4	4.5	0.008 27	0.008 61	3.9
2		0.188	1.2		0.037 8	4.5		0.008 56	3.3
均值		0.189	1.8		0.039 6	0.2		0.008 58	3.6

表 2 中理论计算与试验测量结果的偏差定义为

$$\sigma = \left| \frac{C_T - C_E}{C_E} \right| \times 100\% , \qquad (11)$$

式中：σ—理论与实验结果的偏差，无量纲；C_T—理论计算结果；C_E—试验测量结果。

2.2 线性响应

为了检验原型机能否在较宽浓度区间内测量氡与钍射气的浓度，检验了原型机的线性响应，标定了刻度系数。

试验方法：将活度浓度为 44 841、37 479、25 393、8 474、1 376 Bq/m^3 的氡室与活度浓度为 106 244、72 579、35 825、14 597、7 411 Bq/m^3 的钍室（浓度均由 Alpha Guard DF2000 标定）分别与原型机闭环连接，测得不同浓度下原型机的通道计数率。测量结束后，将通道计数率与 Alpha Guard DF2000（以下简称 DF2000）测得的对应浓度进行线性拟合，通过线性相关系数判断原型机的线性响应。若原型机线性响应较好，则进一步得到通道对核素的刻度系数。由刻度系数与遗留系数即可得到通过通道计数计算活度浓度的公式为

$$C_{Rn(i)} = \frac{G_{2(i)}}{\varepsilon_{R2}}, \qquad (12)$$

$$C_{Tn(i)} = \frac{G_{1(i)} - \frac{\varepsilon_{R1}}{\varepsilon_{R2}} G_{2(i)}}{\varepsilon_{T1}} - \gamma_1 C_{Tn(i-1)} - \gamma_2 C_{Tn(i-2)} - \gamma_3 C_{Tn(i-3)}, \qquad (13)$$

式中：$C_{Rn(i)}$—第 i 周期测得氡浓度，Bq/m^3；$C_{Tn(i)}$—第 i 周期测得钍射气浓度，Bq/m^3；$G_{1(i)}$—第 i 周期通道一的计数，c；$G_{2(i)}$—第 i 周期通道二的计数，c；ε_{R1}—通道一对氡的刻度系数，c/(Bq/m^3)；ε_{R2}—通道二对氡的刻度系数，c/(Bq/m^3)；ε_{T1}—通道一对钍射气的刻度系数，c/(Bq/m^3)；γ_1—附壁钍子体对下一周期的遗留系数，无量纲；γ_2—附壁钍子体对两周期后的遗留系数，无量纲；γ_3—附壁钍子体对三周期后的遗留系数，无量纲。

DF2000 具有湿度修正与能量分辨功能，可以在高湿度环境下分别测量 Tn 与 Rn 的放射性浓度，能够直接将母体核素与放射性子体区分开来并排除湿度变化的干扰，该仪器经中国计量科学研究院检定合格，具有较高的精度与准确度。试验结果见表 3。

表 3 线性响应的试验结果

Table 3 The experimental results of linear response

计数率/cp10 m		氡活度浓度/(Bq/m^3)	计数率/cp10 m	钍射气活度浓度/(Bq/m^3)
通道一	通道二		通道一	
44 083	41 187	44 841	14 830	106 244
36 482	33 455	37 479	10 131	72 579
25 279	23 545	25 393	5 001	35 825
8 805	7 605	8 474	2 037	14 597
1 472	1 244	1 376	1 034	7 411

注：cp10 m 代表 10 min 的计数率。

由于钍射气在延迟器中已接近全部衰变，因此对钍射气的线性刻度仅考虑钍射气浓度与通道一计数率的关系。由多组结果所确定的通道线性相关系数为 0.999，表明原型机在较宽浓度范围内的测量结果与 DF2000 保持一致，线性响应良好。在此浓度范围内、周期 24 h 情况下，通道一、二对氡的刻度系数分别为 122.4 c/(Bq/m^3) 和 99.4 c/(Bq/m^3)，通道一对钍射气的刻度系数为 20.1 c/(Bq/m^3)。

3 氡钍射气监测装置现场测试

3.1 测试方案

南方某新材料有限公司稀土厂房板框过滤车间的环境空气，具有高 Tn 浓度、低 Rn 浓度、高湿度、强酸性、强 γ 放射性的特点（随工作状况变化

幅度较大），适于探测器性能的检验。

为了验证原型机对氡与钍射气长期甄别测量的准确性，将原型机与 DF2000 布置于板框过滤车间的同一位置，从 2023 年 2 月 18 日上午开始进行 96 h 的连续测试，每经过 24 h，将 2 台仪器在此周期内各自测量结果的算术平均值比较一次，评价原型机的现场测量准确性。

3.2　试验结果与分析

定义原型机与 DF2000 测量偏差的计算公式为

$$\sigma = \frac{C_P}{C_D}, \tag{14}$$

$$\varepsilon = |1-\sigma| \times 100\%, \tag{15}$$

式中：σ—原型机与 DF2000 测量结果的比值，无量纲；ε—原型机与 DF2000 测量结果的偏差，无量纲；C_P—原型机的测量结果，Bq/m^3；C_D—DF2000 的测量结果，Bq/m^3。

现场 96 h 比对测试结果见表 4。

表 4　现场试验结果

Table 4　The results of on-site experiment

日期	原型机测量结果		DF2000 测量结果		C(Tn)比值	C(Rn)比值
	C(Tn)/(Bq/m³)	C(Rn)/(Bq/m³)	C(Tn)/(Bq/m³)	C(Rn)/(Bq/m³)		
02-18	9 624	192	10 000	200	0.96	0.96
02-19	6 813	173	7 320	182	0.93	0.95
02-20	5 824	382	5 338	392	1.09	0.97
02-21	6 533	336	7 134	312	0.92	1.08

注：现场氡与钍射气的浓度之比接近 1∶50，在进行测量结果处理时将 DF2000 第 1 天测得的氡与钍射气浓度分别归一到 200 Bq/m^3 和10 000 Bq/m^3。

从表 4 可看出，即使在氡与钍射气浓度之比极为悬殊的情况下，原型机与 DF2000 对 Tn 与 Rn 的测量结果偏差均小于 10%。现场试验中，原型机与 DF2000 对钍射气测量结果比值的平均值为 0.975，对氡测量结果比值的平均值为 0.990，可以认为原型机在高湿度、强酸性、高 Tn 浓度、低 Rn 浓度环境中，24 h 周期下对 Tn 与 Rn 的测量准确性符合要求，在长期监测过程中，能够排除前序周期遗留物的影响。

3.3　分析与讨论

为了解原型机对 Rn 与 Tn 放射性浓度探测的准确性，将原型机的现场测量结果与其他氡钍射气联合探测方法进行比较，由于原型机的现场测试中仅有一个比较对象（DF2000），而 DF2000 相对真值存在一定的偏差，因此对原型机与真值的偏差进行计算。计算方法为

$$\varepsilon_{P(Rn)} = [1-(1-\varepsilon_{D(Rn)}) \times \sigma_{Av(Rn)}] \times 100\%, \tag{16}$$

$$\varepsilon_{P(Tn)} = [1-(1-\varepsilon_{D(Tn)}) \times \sigma_{Av(Tn)}] \times 100\%, \tag{17}$$

式中：$\varepsilon_{P(Rn)}$—原型机对氡测量结果与真值的偏差，无量纲；$\varepsilon_{P(Tn)}$—原型机对钍射气测量结果与真值的偏差，无量纲；$\varepsilon_{D(Rn)}$—DF2000 对氡测量结果与真值的偏差，无量纲；$\varepsilon_{D(Tn)}$—DF2000 对钍射气测量结果与真值的偏差，无量纲；$\sigma_{Av(Rn)}$—原型机与 DF2000 对氡测量结果比值的平均值，无量纲；$\sigma_{Av(Tn)}$—原型机与 DF2000 对钍射气测量结果比值的平均值，无量纲。计算结果见表 5。

表 5　氡钍射气联合监测方法比较

Table 5　Comparison of radon-thoron simultaneous monitoring methods

仪器名称	测量原理	测量值与真值的偏差/%	
		Tn	Rn
GSF[14]126	固体径迹探测器	12	9
LD-P[14]126	固体径迹探测器	9	13
RAD 7[14]127	半导体探测器	30	3
RTM-2100[14]127	半导体探测器	45	33
使用两段计数法的实验装置[15]	闪烁室探测器	4	26
Alpha Guard DF2000[16]	脉冲电离室	7	8
实验验证装置原型机	闪烁室探测器	9	9

注：表中偏差是由文献中的数据按本文的偏差计算方法计算得到的。

2 种固体径迹探测器(GSF、LD-P)对氡与钍射气的测量值与真值的偏差均略大于原型机。2 种半导体探测器(RAD 7、RTM-2100)测量结果受湿度的影响很大,除 RAD 7 对氡的探测结果(与真值的偏差为 3%)比原型机更准确外,其他测量结果与真值的偏差均大于原型机。基于两段计数法的实验装置,主要用于在氡与钍射气混合环境中对 2 种核素的放射性浓度进行快速测量,其对钍射气的测量结果比原型机更准确但对氡的测量结果偏差更大,不具备对附壁子体的修正能力。Alpha Guard DF2000 在纯氡、纯钍或氡钍浓度之比适中的环境下,均能给出较准确的测量结果,且不受湿度变化的影响。

本研究所构造的原型机,具备在氡与钍射气混合环境中分别测量 2 种核素活度浓度的功能,测量结果与真实值的偏差均小于 10%;且能够在长期连续监测中,排除湿度与前序周期钍子体遗留物的干扰。

4 结论

使用改进型 ZnS 闪烁室,基于延迟计数法构建了氡钍射气连续监测方法,在 2 个闪烁室之间增加延迟器使钍射气充分衰变,分别得到由氡与钍射气导致的计数,实现了在氡与钍射气混合环境中甄别测量 2 种核素放射性浓度的目标。

在氡与钍射气浓度之比较为悬殊的环境中,原型机依然能够进行甄别测量。原型机测量准确度受湿度影响小,能够排除前序周期子体遗留物的影响,且长期计数的稳定性高。

参考文献:

[1] PORSTENDÖRFER J. Properties and behavior of radon and thoron and their decay products in the air [J]. Journal of Aerosol Science, 1994, 25(2): 219-263.

[2] PORSTENDÖRFER J, WICKE A, SCHRAUB A. The influence of exhalation, ventilation and deposition processes upon the concentration of radon and thoron and their decay products in room air[J]. Health Phys, 1978, 34(5): 465-473.

[3] 夏益华. 高等电离辐射防护教程[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010:117-139.

[4] 丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009:19-58.

[5] 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1994:69-159.

[6] 张智慧. 空气中氡及其子体的测量方法[M]. 北京:原子能出版社,1993:25-79.

[7] 孙汉城. 实验核物理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013:15-35.

[8] 王经瑾. 核电子学[M]. 北京:原子能出版社,1983:104-138.

[9] 唐培家. 放射性测量方法[M]. 北京:原子能出版社,2012:47-74.

[10] 邱国华. 钍射气(^{220}Rn)及其子体的研究现状与展望[J]. 世界核地质科学,2010,27(2):111-119.

[11] 刘艳丽,肖德涛,刘良军,等. 钍射气^{220}Rn 测量方法综述[J]. 辐射防护通讯,2007,27(2):34-38.

[12] WU Y, CUI H, ZHANG Q, et al. Intercomparisons for integrating the radon-thoron detector of NIRP, China with NIRS, Japan[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2014(164): 398-401.

[13] 王子琳,杨明理,王攀. 改进的 ZnS 闪烁室氡连续测量方法湿度效应测试[J]. 核电子学与探测技术,2021,41(2):269-273.

[14] QIU S, XIAO D, LIU L. First Intercomparison of Tn-Rn discriminative measurements in China[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2008, 128(1): 124-127.

[15] EAPPEN K P, NAIR R N, MAYYA Y S. Simultaneous measurement of radon and thoron using Lucas scintillation cell[J]. Radiation Measurements, 2008, 43(1): 91-97.

[16] DANIEL R, ISMAEL F, SANTIAGO C, et al. Intercomparison of indoor radon measurements under field conditions in the framework of metroradon european project[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(5): 1780.

(下转第 106 页)

Engineering Structural Detection and Evaluation of Uranium Mine Decommissioning and Treatment Project

LIANG Jiawei[1], WU Dong[2], CHENG Wenjuan[2], ZHAN Yueyin[2], ZHANG Shenzhou[3], LI Xuming[3]

(1. China National Uranium Co. Ltd., CNNC, Beijing 100013, China;
2. The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China;
3. Hunan Province Geological Disaster Survey and Monitoring Institute, Changsha 410004, China)

Abstract: Regular scientific testing and evaluation of the quality and safety of uranium decommissioning and treatment engineering facilities is an important activity to make up for engineering defects and continuously improve treatment measures, which will ensure the long-term effective isolation of uranium mine radioactive waste residue from the ecological environment. The study used on-site observation, in-situ strength detection, concealed engineering detection and other methods to complete the inspection of the structure of the decommissioning and treatment engineering facilities of some uranium mines in China that had been completed for 20～30 years, and established the quality assessment method of decommissioning treatment facilities through the investigation and analysis of the causes of damage. The results of structural inspection and evaluation show that the quality of decommissioning treatment facilities is good, the resistance to the influence of natural stress is guaranteed, and it is necessary to carry out continuous and active monitoring work. It also puts forward suggestions for future decommissioning design, construction and management.

Key words: uranium mine; decommissioning and treatment; engineering structure; detection; evaluation

(Continued from page 74)

Development and On-site Test of Radon-thoron Continuous Monitoring Device

LIU Xiaochen, YANG Mingli, WANG Pan, CHU Xuyang

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: The continuously discriminative monitoring of radon and thoron is a significant project in the realm of radiation protection, which can provide statistical supports for the accurate estimation of internal exposure dose in radon-thoron hybrid environment. Using the improved ZnS scintillation cells and based on the delay count method (DCM), an experimental device for radon-thoron continuous monitoring has been devised. This device has been tested under both laboratorial and on-site conditions, the measurement results from this device were compared with that from Alpha Guard DF2000. As a result, the deviations of the measurement values of this device and Alpha Guard DF2000 are less than 10% for both radon and thoron even when the radioactive concentrations of radon and thoron differ drastically(the ratio is over 1∶30), besides, the disturbance from the previous sampling durations upon the long-term monitoring values has been eliminated. To conclusion, this device is capable to discriminate radon and thoron accurately under distinctively different concentrations of radon and thoron.

Key words: ZnS scintillation cell; continuous monitoring; radon; thoron; delay count method; discriminative measurement