

固体核径迹氡探测器刻度系数 及其受大气压强影响的蒙特卡罗模拟计算

陈凌¹, 刘森林¹, 武奕华¹, 廖海涛¹, 潘自强²

(1. 中国原子能科学研究院 保健物理部, 北京 102413;

2. 中国核工业集团公司 科学技术委员会, 北京 100822)

摘要: 利用氡及其子体在测量容器中的位置分布和衰变时 粒子出射方向的随机性, 编制了固体核径迹氡探测器刻度系数的蒙特卡罗模拟计算程序。对不同尺寸的圆柱形容器和不同类型探测片 (CR-39、LR-115) 氡探测器的刻度系数进行了计算, 模拟计算结果与已有的实验数据符合较好。计算了大气压强 (假定温度不变) 对刻度系数的影响。当大气压强下降至标准压强的 0.65 时, LR-115 型探测器的刻度系数增大约 31%, CR-39 型探测器的刻度系数增大约 17%。

关键词: 固体核径迹探测器; 氡; 蒙特卡罗方法; 刻度系数; 大气压强

中图分类号: TL812.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)01-0074-05

Monte-Carlo Computation of the Calibration Factor of Solid State Nuclear Track Detector for Radon and the Effect by Atmospheric Pressure

CHEN Ling¹, LIU Sen-lin¹, WU Yi-hua¹, LIAO Hai-tao¹, PAN Zi-qiang²

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-24, Beijing 102413, China;

2. Committee of Science and Technology, CNNC, Beijing 100822, China)

Abstract: Based on the randomness of space and direction distribution of particles emitted by radon and its daughters in the volume of detector can, a Monte-Carlo code was developed to calculate the calibration factor of Solid State Nuclear Track Detector (SSNTD) for radon. For various sizes of cylindric can and various types of SSNTD (CR-39 and LR-115), the calculated calibration factors are in good agreement with those measured. The effects of atmospheric pressure on the calibration factor of SSNTD for radon were also calculated. The results show that for a decrease of air pressure to 0.65 atmosphere, the calibration factors increase by 31% and 17%, respectively for LR-115 and CR-39.

Key words: solid state nuclear track detector; radon; Monte-Carlo simulation; calibration factor; atmospheric pressure

收稿日期: 2002-09-12; 修回日期: 2003-03-25

作者简介: 陈凌 (1967—), 男, 四川筠连人, 研究员, 博士研究生, 辐射防护与环境保护专业

根据 UNSCEAR^[1]的最新估计,全球天然辐射源所致个人平均年有效剂量为 2.4 mSv,其中,吸入氡及其子体所致内照射剂量占 50%。

正确认识和评价氡的危害以及决定是否采取必要的缓解措施,对包括氡浓度在内的一些基本参数的准确测量是十分关键的。固体核径迹氡探测器具有造价低、操作方便、适宜大范围布放及长时间累积测量等优点,因而被广泛使用。利用固体核径迹探测器(SSNTD)测量氡浓度时,环境大气压强(或空气密度)对探测器刻度系数有影响^[2]。

本工作利用氡及其子体在测量容器中的位置分布和衰变时 粒子出射方向的随机性,建立相应物理模型并编制蒙特卡罗模拟计算程序,对大气压强(或空气密度)对核径迹氡探测器刻度系数的影响进行计算。

1 计算模型和方法

本工作就 CR-39、LR-115 两种探测片及圆柱形容器进行计算。计算过程主要包括粒子位置和出射方向的随机抽样(蒙特卡罗模拟)、记录、刻度系数等。

1.1 粒子位置及出射方向

测量时,SSNTD 只记录 粒子,因此,在氡及其子体衰变链中只涉及²²²Rn、RaA (²¹⁸Po)和 RaC (²¹⁴Po),它们的半衰期分别为 3.824 d、3.05 min 和 164 μs,衰变释放的 粒子能量分别为 5.49、6.00 和 7.68 MeV。对于²²²Rn,假定其均匀分布在测量容器的整个空间;对 RaA 和 RaC,则假定一部分均匀分布在容器空间,另一部分均匀沉积在容器内壁(包括上、下底面)上。上述 3 种核素的位置计算实际上是圆柱体和圆柱面均匀分布的蒙特卡罗抽样,具体细节参见文献[3]。粒子的出射方向为实验室系各向同性,其出射角余弦 μ 的分布密度函数 $f(\mu) = 1/2$,即 μ 在 $[-1, 1]$ 区间内均匀分布;其出射的方位角 ϕ 的分布密度函数 $f(\phi) = 1/2\pi$,即 ϕ 在 $[0, 2\pi]$ 区间内均匀分布。

1.2 记录

在抽样确定某核素释放的 粒子的出射角余弦 μ 和方位角 ϕ 后,其在三维空间的运动方向同时也确定下来^[3]。如果 粒子沿其运动方向可达到径迹探测片(假定圆形探测片位于圆

柱形容器下底面中心,面积 2 cm^2),且存在剩余能量,则该 粒子有可能被记录。具体的记录条件对于 CR-39 和 LR-115 是不同的。表 1 中列出了不同能量 粒子在 CR-39 和 LR-115 中的射程^[4~6]。

粒子在探测片内能否形成径迹与 粒子的能量和入射角度有关。本次计算时,为与已有的实验数据进行比较,CR-39 对 粒子记录条件选为 粒子在 CR-39 中射程的垂直深度大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

LR-115 的情况与 CR-39 不同。考虑到与文献[2]中实验数据的比较,在文献[6,7]基础上,LR-115 对 粒子的记录条件为:1) 粒子能量小于 1.8 MeV 时,不记录;2) 粒子能量处在 1.8~4.1 MeV 之间,且其射程 R 加上剥蚀厚度 $5.7\text{ }\mu\text{m}$ 的 $1/\cos\theta$ 后大于 $12/\cos\theta$ ($12\text{ }\mu\text{m}$ 为 LR-115 厚度, θ 为入射角)记录,否则不予记录;3) 粒子能量大于 4.1 MeV 时,只有当 粒子穿越 $X_c/\cos\theta$ (X_c 为临界距离,计算时认为在其 $0\sim 5.7\text{ }\mu\text{m}$ 之间均匀分布)距离后能量下降至小于 4.1 MeV,且其射程 R 加上剥蚀厚度 $5.7\text{ }\mu\text{m}$ 大于 $12/\cos\theta$ 记录,否则不予记录。

1.3 气压的影响

气压对探测器的影响主要是气压变化使得空气密度发生改变,从而导致 粒子在空气中的射程及探测器灵敏体积等随之改变,探测器刻度系数也相应变化。本次计算中,假定温度不变,空气密度与气压成反比, 粒子在空气中的射程则与空气密度成反比,即 $R = R_0 / \rho$,式中, R_0 为 粒子在密度为 ρ_0 的空气中的射程($\rho_0 = 0.001\ 293\text{ g/cm}^3$ 时的 R_0 列于表 1), R 为 粒子在密度为 ρ 的空气中的射程。

1.4 刻度系数的计算

计算时假定²²²Rn 与其子体已达放射性平衡。²²²Rn 一般均匀分布在测量容器整个空间, RaA 及 RaC 除一部分均匀分布在测量容器的空间内,其余绝大部分均匀沉积在容器的内壁上。这里假定其沉积份额分别为 P_a 和 P_c 。

如果对²²²Rn、空间分布的 RaA、壁上分布的 RaA、空间分布的 RaC 及壁上分布的 RaC 分别模拟了 N 个粒子,得到探测器的计数分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和 C_5 ,则氡探测器的刻度系数 K 为:

表1 不同能量 粒子在空气、CR-39 和 LR-115 中的射程
Table 1 Ranges of particles with various energy in air, CR-39 and LR-115

不同能量的 粒子在空气与 CR-39 中的射程			不同能量的 粒子在 LR-115 中的射程	
E / MeV	空气中射程 ¹⁾ /cm	CR-39 中射程 ²⁾ /μm	E / MeV	LR-115 中射程 ³⁾ /μm
0.1	0.11	0.98	0.8	2.86
0.5	0.31	2.79	1.0	3.59
1.0	0.53	4.73	1.2	4.36
1.5	0.74	6.61	1.6	6.00
2.0	0.99	8.84	2.0	7.80
2.5	1.28	11.4	2.4	9.77
3.0	1.59	14.2	2.8	11.9
3.5	1.94	17.3	3.2	14.2
4.0	2.33	20.8	3.6	16.6
4.5	2.75	24.6	4.0	19.2
5.0	3.30	29.5	4.1	19.8
5.49	3.95	35.5	4.6	23.4
6.0	4.50	40.7	6.0	35.2
6.28	4.90	43.6	8.0	56.1
6.77	5.60	48.9	10.0	82.8
7.68	6.65	59.8	12.0	112

注:1) 粒子能量低于 5.49 MeV,根据文献[4]中 粒子在 O、N 中的射程推算得到; 粒子能量等于和高于 5.49 MeV,取自文献[5]

2) 按空气中射程的 8.93×10^{-3} 计算

3) 取自文献[6]

$$K = (C_1 + (1 - P_a) C_2 + P_a C_3 + (1 - P_c) C_4 + P_c C_5) CV T / NS$$

式中: C 为氡浓度, kBq/m^3 ; V 为测量容器体积, m^3 ; S 为探测片面积, cm^2 ; T 为照射时间, h ; K 的单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{kBq}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

P_a 和 P_c 的取值与换气率、气溶胶浓度、粒径、容器体积、面积(体积面积比)等参数有关^[8]。本工作采用文献[9]根据 Jacobin-Porstendortler 模式计算的结果(容器为圆柱形, $\phi 30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 无气溶胶, 无换气, 非结合态沉积率 330 h^{-1}), 即 $P_a = 0.96$, $P_c = 0.99$ 。

2 计算结果及初步分析

2.1 计算值与实验数据的比较

为了验证计算模式的可靠性, 将计算结果与已有的实验值进行了比较。对于 CR-39 探测器, 容器为圆柱形 ($\phi 62 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$), 蚀刻条件为 80%、25% NaOH 溶液、蚀刻时间 5 h;

对于 LR-115 探测器, 容器为圆柱形 ($\phi 53 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$), 蚀刻条件为 60%、10% NaOH 溶液、蚀刻时间 145 min。数据比较列于表 2 (计算时采用标准状况下的空气, 模拟粒子数 $N = 10^7$, 探测器面积 $S = 2 \text{ cm}^2$)。

表 2 氡探测器标准状况下刻度系数计算值与实验值的比较

Table 2 Comparison between calculated and measured values of calibration factor under STD for radon detector

探测片	刻度系数 $K / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{kBq}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	
	计算值	实验值 ¹⁾
CR-39	5.69	5.90, 5.46
LR-115	1.09	1.03 ± 0.07

注:1) CR-39 的数据由中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全研究所尚兵同志提供; LR-115 的数据取自文献[2]

从表 2 可看出,计算结果与实验值符合得较好,说明计算模式是可靠的。另外,根据计算结果分析得出:对 CR-39, ²²²Rn、RaA 和 RaC 径迹的贡献相当;LR-115 的径迹主要由 ²²²Rn 贡献。

将 LR-115 氡探测器刻度系数随气压变化的计算值与文献[2]的实验值进行了比较,两者基本上相符(图 1)。

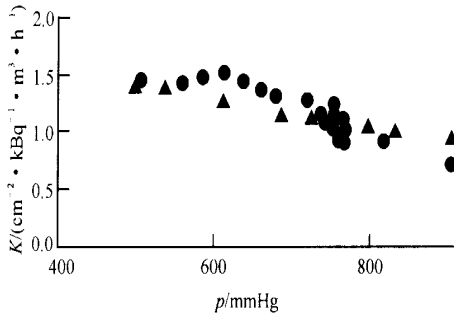


图 1 LR-115 氡探测器刻度系数实验值和计算值随气压变化的比较

Fig. 1 Comparison of calculated and measured values of calibration factor varying with atmospheric pressure for LR-115 radon detector
—计算值; —实验值

2.2 氡探测器刻度系数随气压的变化

本次共计算了 5 种不同容器和两种径迹探测片(CR-39, LR-115)的氡探测器刻度系数随大气压强变化(图 2)。大气压强的取值分别为 91.2、83.6、79.8、76.0、72.2、68.4、60.8、53.2 及 49.4 cm 汞柱。从图 2 可看出:对于 CR-39 径迹探测器,容器较大时,刻度系数会受到大气压强(假定温度不变)一定的影响,压强较标准压强增大约 35% 时,刻度系数相应增大 13% ~ 17%,压强较标准压强增大约 20% 时,刻度系数减小 5% ~ 8%;容器体积变小,刻度系数随压强的变化相应变小,当容器的线度明显小于粒子在空气中射程时,刻度系数几乎不随压强变化。由此可见:在较小尺度下,对 CR-39 这类能量探测阈较宽的探测器,一定范围内的压强变化对灵敏空气体积的影响微乎其微。

LR-115 探测器的情况与 CR-39 的稍有不同(图 3)。压强对刻度系数的影响较为明显。在容器较大情况下,压强减小 35%,刻度系数增大约 30%;压强增大 20%,刻度系数减小

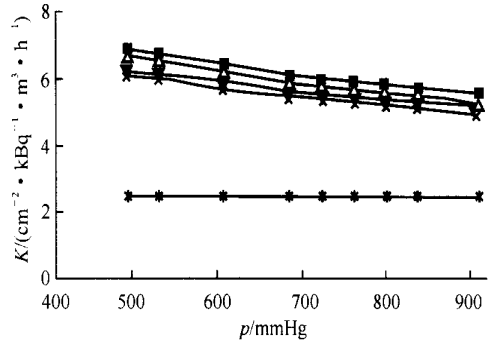


图 2 CR-39 氡探测器刻度系数随气压的变化
Fig. 2 Variation of the calibration factor of CR-39 radon detector with atmospheric pressure
容器尺寸: — $\phi 53$ mm \times 70 mm;
— $\phi 62$ mm \times 70 mm; — $\phi 62$ mm \times 48 mm;
 \times — $\phi 53$ mm \times 48 mm; * — $\phi 20$ mm \times 20 mm

10% ~ 25%。在小尺度容器状况下,刻度系数随压强增大而增大。这主要是因为 LR-115 存在一能量探测阈,在容器尺度较小时,压强增加反而增大了灵敏体积。

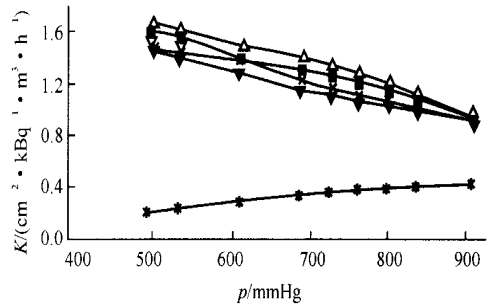


图 3 LR-115 氡探测器刻度系数随气压的变化
Fig. 3 Variation of the calibration factor of LR-115 radon detector in different containers with atmospheric pressure
容器尺寸: — $\phi 53$ mm \times 70 mm;
— $\phi 62$ mm \times 70 mm; — $\phi 62$ mm \times 48 mm;
 \times — $\phi 53$ mm \times 48 mm; * — $\phi 20$ mm \times 20 mm

3 初步结论与建议

模拟计算结果与实验结果基本相符,说明在尚不完全具备某些实验条件时,只要模型建立适当,运用模拟计算来研究某些环境因素对固体核径迹氡探测器的影响是完全可能的。

通过对计算结果的分析,可得出以下初步结论。

- 1) 对目前常用的探测器,大气压强(或空

气密度)对固体核径迹氡探测器刻度系数有影响,尤其是对 LR-115 一类有明显且较窄能量探测阈的探测器,影响尤为明显。

2) 从计算结果看,CR-39 探测器虽较 LR-115 探测器受气压影响为小,但氡子体对 LR-115 探测器的径迹贡献份额较少,即 LR-115 受氡子体的影响较小。本次计算时假定氡子体均匀分布,但实际情况不一定如此,因此,CR-39 探测器与 LR-115 探测器究竟孰优孰劣应视具体的测量对象和环境而定。

3) 减小测量杯的尺寸,灵敏度相应降低,但可减少气压的影响。因此,通过对探测器形状的适当设计,可降低某些环境因素对氡探测器性能的影响。

计算时发现,影响氡探测器测量的因素较多,从保证氡探测器的刻度和测量结果的质量角度,提出如下建议。

1) 氡子体对探测器的径迹贡献与表面沉积份额密切相关,而沉积份额又与容器内空气中的气溶胶浓度直接相关。目前,探测器的刻度时间一般较短,因此,刻度前在洁净室中对探测器进行装配并保证滤膜周边密封可能是有益的。

2) 在我国,测量环境较为复杂,为保证监测数据质量,对氡探测器的性能及其影响因素进行深入系统研究是必要的。对一些具体的测量对象,应当规范(甚至统一)测量方法。

参考文献:

- [1] UNSCEAR. 电离辐射源与效应[R]. 北京:原子能出版社,2002.
- [2] Vasudevan L, McAlen ME. Atmospheric Pressure Effects on the Calibration Constant of Alpha-track Radon Detectors[J]. Health Phys, 1994, 66(3): 318~326.
- [3] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社,1996. 56~59.
- [4] Ziegler JF. Helium Stopping Powers and Ranges in all Elemental Matter[M]. New York: Pergamon Press Inc, 1977. 18~20.
- [5] Khan HA, Qureshi, Tufail M. Passive Dosimetry of Radon and Its Daughters Using Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTDS) [J]. Radia Prot Dosim, 1993, 46(3):149~151.
- [6] Nikezic D, Markovic P, Uzarov DB. Calculating the Calibration Coefficient for Radon Measurements With the Bare LR-115 Track Detector [J]. Health Phys, 1992, 62(3):239~245.
- [7] Jonsson G. The Angular Sensitivity of KODAK LR-film to Alpha Particles [J]. Nucl Instrum Methods, 1981, 190:407~411.
- [8] George AC, Knutson EO, Tu KW. Radon Daughter Plateout I[J]. Health Phys, 1983, 45(2):439~445.
- [9] McLaughlin JP, Fitzgerald B. Models for Determining the Response of Passive Alpha Particle Detectors to Radon and Its Progeny in Cylindrical Detecting Volumes[J]. Radia Prot Dosim, 1994, 56(1-4):241~248.