

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.02.002

基于蒙特卡罗模拟方法的圆筒形固体核径迹氡探测器 探测效率的研究

李梦艺,叶勇军*,周 乐,张英朋

(南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:以 ^{222}Rn 累积浓度的测量为研究对象,采用蒙特卡罗模拟方法,研究了圆筒形固体核径迹探测器的探测效率与圆筒体高度、固体核径迹片尺寸和形状之间的关系。研究表明:1)当圆筒形探测器半径和固体核径迹片尺寸一定时,圆筒形探测器的固有效率、击中效率以及总探测效率均随着探测器高度的增加而减小;2)当圆筒形探测器尺寸一定时,击中效率随着圆形固体核径迹片的半径增大而减小,固有效率和总探测效率会随着固体核径迹片半径的增大而增加;3)当圆筒形探测器尺寸和固体核径迹片面积相同时,采用圆形固体核径迹片的探测器和采用方形固体核径迹片探测器的固有效率基本相同,但前者的击中效率以及总探测效率明显都高于后者。

关键词:氡;固体核径迹探测器;蒙特卡罗;探测效率

中图分类号:TL815 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)02-0007-05

Study on Detection Efficiency of Cylindrical Solid Nuclear Track Radon Detector Based on Monte Carlo Simulation Method

LI Mengyi, YE Yongjun*, ZHOU Le, ZHANG Yingpeng

(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China,
Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Taking the measurement of ^{222}Rn cumulative concentration as the research object, the relationship between the detection efficiency of cylindrical solid nuclear track detector and the height of cylinder, the size and shape of the solid nuclear track sheet was studied by Monte Carlo simulation. The results show that: (1) when the radius of the cylindrical detector and the size of the solid nuclear track sheet are fixed, the intrinsic effi-

收稿日期:2021-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(11575080)

作者简介:李梦艺(1996—),女,硕士研究生,主要从事铀矿冶安全与退役治理技术方面的研究。E-mail:2903229009@qq.com。*通信作者:叶勇军(1979—),男,教授,博士,主要从事铀矿冶安全理论与技术方面的研究。E-mail:yongjunye@163.com

ciency, hit efficiency and total detection efficiency of the cylindrical detector decrease with the increase of the detector height; (2) When the size of cylindrical radon detector is fixed, the hit efficiency decreases with the increase of the radius of circular solid nuclear track sheet, and the intrinsic efficiency and total detection efficiency increase with the increase of the radius of nuclear solid track sheet; (3) When the size of cylindrical detector and the area of solid nuclear track sheet are the same, the intrinsic efficiency of detector with circular solid nuclear track sheet and detector with square solid nuclear track sheet are basically the same, but the hit efficiency and total detection efficiency of the former are significantly higher than those of the latter.

key words: radon; solid state nuclear track detector; Monte Carlo simulation; detection efficiency

0 引言

氡是自然界中无色、无味的天然的放射性气体^[1]。研究表明,氡是仅次于吸烟的第二大致癌物质^[2-3],对居室、地下空间的氡浓度水平进行高效测量是评价和指导氡防护设计的重要手段和依据。目前测量氡浓度的技术可以大致分为两大类:1)主动方法;2)被动方法^[4]。其中使用固体核径迹片测量氡浓度是最常见和通用的被动方法之一^[5-7]。固体核径迹探测器因其低成本和较小的体积而易于操作以及能提供与人体受到的实际照射剂量最一致的结果,已成为环境氡测量的主要手段^[8]。对于这些采用固体核径迹片的无源氡探测器,氡衰变的 α 粒子的探测效率是衡量其性能的重要参数。现有研究指出探测器的形状和尺寸对 α 粒子的探测效率有重要影响^[9-11],但目前对探测器的筒体及径迹片形状和尺寸与探测效率之间的关系还缺少系统研究。为此,以 ^{222}Rn 累积浓度的测量为研究对象,通过研究圆筒形探测器的固有效率、击中效率以及总探测效率与固体核径迹片的尺寸、形状(圆形和方形)以及圆筒体高度之间的关系,为圆筒形固体核径迹氡探测器的优化设计提供理论参考依据。

1 计算模型

为计算圆筒形固体核径迹氡探测器的探测效

率,进行了如下假设:1) $t=0$ 时,氡及其子体均匀分布在圆筒形探测器中(且不考虑沉积效应),并已经达到放射性衰变平衡;2)假设所有落在核径迹探测片上的 α 粒子都会产生有效的径迹。

图1为圆筒形固体核径迹探测器的示意图,固体核径迹片位于 xy 平面。如图1所示,在圆筒形固体核径迹探测器内部随机生成两个点,由这两个点可以确定一条直线。假设氡衰变产生的 α 粒子沿着直线移动,图1中实线与固体核径迹片表面产生交点,因此,沿着实线向下移动的 α 粒子可能到达固体核径迹片表面;虚线不会与固体核径迹片表面产生交点,因此,沿着图中虚线向下移动的 α 粒子不能到达固体核径迹片表面。由于沿着直线移动的 α 粒子存在两个运动方向,因此给定一个 α 粒子运动方向因子 w_α ,令 $w_\alpha=0.5$,在计算过程中只考虑沿着能与固体核径迹片产生交点的直线向下移动的 α 粒子。探测器内最终将会生成“ n ”条直线(α 粒子),其中 n 为氡浓度 C 、衰变系数和暴露时间 t 的乘积。将沿着能与固体核径迹片产生交点的直线向下移动的 α 粒子数的 α 粒子数与沿着能与固体核径迹片产生交点的直线向下移动的 α 粒子数的比值称为固有效率:

$$\eta_{\text{int}} = w_\alpha \frac{\text{沿着能与固体核径迹片产生交点的直线移动的}\alpha\text{粒子数}}{\text{探测器内发射的总}\alpha\text{粒子数}} \quad (1)$$

^{222}Rn 衰变产生的 α 粒子在空气中的自由程 R_α 为 3.95 cm ^[12],受 α 粒子在空气中的射程 R_α 的限制,并非所有沿着能与固体核径迹片产生交点的

直线向下移动的 α 粒子都可以到达固体核径迹片表面。当发射的随机点到固体核径迹片表面随机点的距离 d 大于 R_α 时,沿着能与固体核径迹片产

生交点的直线向下移动的 α 粒子将不能到达固体核径迹片表面,不会在固体核径迹片上产生径迹。

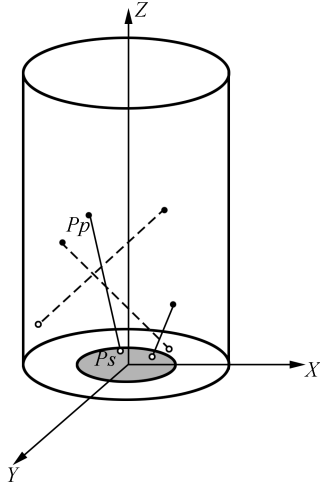


图1 圆筒形固体核径迹探测器示意图

Fig.1 Schematic diagram of cylindrical solid nuclear track detector

为了确定 α 粒子能否到达固体核径迹片表面,假设固体核径迹片的圆心坐标为 $(x_0, y_0, 0)$,采用蒙特卡罗模拟方法在 $0 \sim 1$ 之间生成一个数字“ ξ_i ”^[13],在圆筒形探测器内生成随机点 $P_p(x_p, y_p, z_p)$,半径为 r ,角度为 θ ,如图2所示。

$$r = R\xi_1, 0 < \xi_1 < 1 \quad (2)$$

$$\theta = 2\pi\xi_2, 0 < \xi_2 < 1 \quad (3)$$

$$x_p = x_0 + r \times \cos \theta \quad (4)$$

$$y_p = y_0 + r \times \sin \theta \quad (5)$$

$$z_p = H\xi_3, 0 < \xi_3 < 1 \quad (6)$$

式中 R 为圆筒形固体核径迹探测器的半径,cm; H 为探测器的高度,cm; r 为随机生成半径,cm; θ 为随机生成点的角度; ξ_i 为生成的随机数。

在 α 粒子可能撞击的固体核径迹片的表面生成随机点 $P_s(x_s, y_s, z_s)$,半径为 r_1 ,角度为 θ_1 ,如

图2所示。

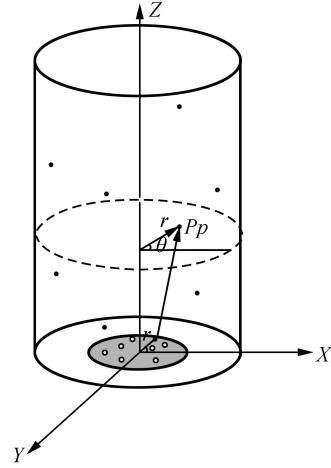


图2 随机点生成图

Fig.2 Random point generation diagram

$$r_1 = R\xi_4, 0 < \xi_4 < 1 \quad (7)$$

$$\theta_1 = 2\pi\xi_5, 0 < \xi_5 < 1 \quad (8)$$

$$x_s = x_0 + r_1 \times \cos \theta_1 \quad (9)$$

$$y_s = y_0 + r_1 \times \sin \theta_1 \quad (10)$$

$$z_s = 0 \quad (11)$$

式中 R 为圆筒形探测器的半径,cm; r_1 为随机半径,cm; θ_1 为随机生成点的角度; ξ_i 为生成的随机数。

从点 P_p 到点 P_s 的距离 d 计算为:

$$d = \sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2} \quad (12)$$

通过比较 d 与 R_α ,如果 $d < R_\alpha$,沿着能与固体核径迹片产生交点的直线向下移动的 α 粒子才会到达固体核径迹片表面并产生径迹。将实际到达固体核径迹片表面的 α 粒子数与沿着能与固体核径迹片产生交点的直线向下移动的 α 粒子数的比值称为击中效率。

$$\eta_{\text{hit}} = \frac{\text{到达固体核径迹片表面的}\alpha\text{粒子数}(n_{\text{hit}})}{\text{沿着能与固体核径迹片产生交点的直线向下移动的}\alpha\text{粒子数}(N_{\alpha_{\text{MTD}}})} \quad (13)$$

圆筒形固体核径迹探测器的总探测效率为到达固体核径迹片表面的 α 粒子数与总的 α 粒子数的比值,即:

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{hit}} \quad (14)$$

2 结果与讨论

2.1 圆筒形固体核径迹探测器的高度对探测效率的影响

当圆筒形探测器和圆形固体核径迹片的半径

尺寸为3 cm, R_α 为3.95 cm时,探测效率与探测器的高度的关系如图3所示。

由图3可知高度增加,圆筒形固体核径迹探测器的固有效率、击中效率以及总探测效率都会减小。以上表明,随着探测器高度的增加,探测器内最终能到达固体核径迹片表面并产生径迹的 α 粒子数会减少,探测器的探测效率将受到影响,因此要合理确定探测器的高度。

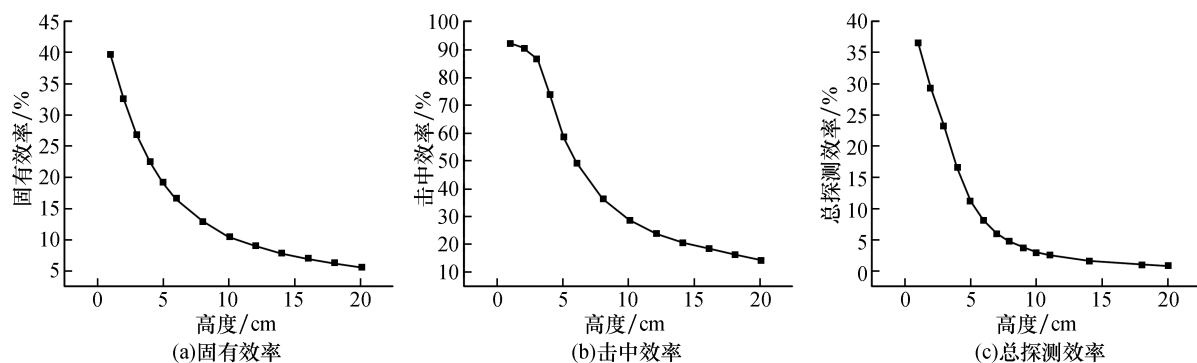


图3 探测效率随探测器高度的变化规律

Fig. 3 Variation rule of detection efficiency with detector height

2.2 固体核径迹片的尺寸对探测效率的影响

当圆筒形固体核径迹探测器的尺寸半径为3 cm,高度为5 cm, R_α 为3.95 cm时,固有效率、击中效率以及总探测效率与圆形固体核径迹片尺寸的关系如图4所示。

由图4可以看出圆筒形探测器的固有效率和总探测效率都会随着固体核径迹片半径的增大而增大,而击中效率会随着径迹片的半径的增大而减小。以上表明,随着固体核径迹片半径的增大,探测器内沿着能与固体核径迹片产生交点的直线移动的 α 粒子数以及最终能到达固体核径迹片表面并产生径迹的 α 粒子数均会增加,但最终能到达固体核径迹片表面并产生径迹的 α 粒子数与沿着能与固体核径迹片产生交点的直线移动的 α 粒子数的比值会减少,探测器的探测效率将受到影响,因此要合理确定固体核径迹片的尺寸。

2.3 固体核径迹片的形状对探测效率的影响

固定圆筒形固体核径迹探测器的尺寸半径为

3 cm,高度为5 cm,固有效率、击中效率以及总探测效率与固体核径迹片形状的关系如图5所示。

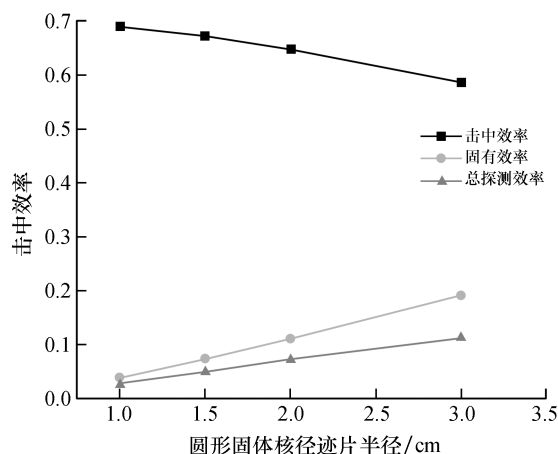


图4 固体核径迹片尺寸对探测效率的影响

Fig. 4 Effect of solid nuclear track sheet size on detection efficiency

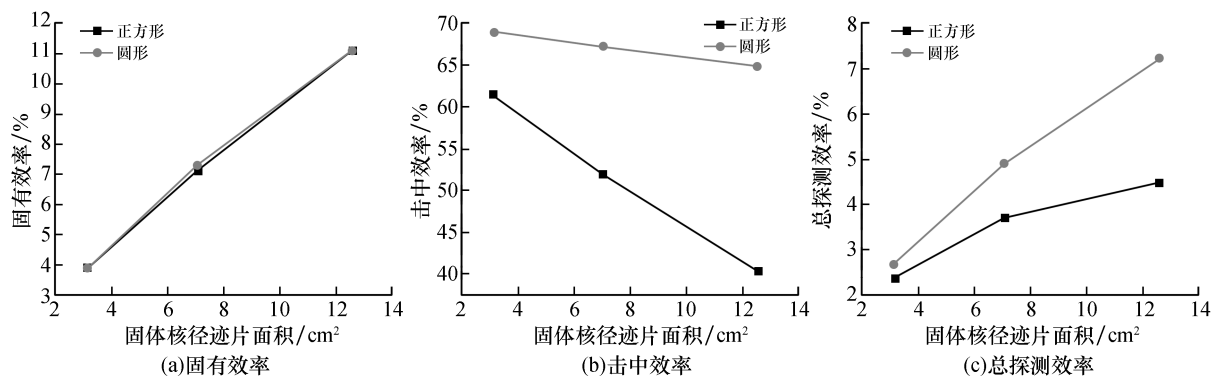


图5 核固体径迹片形状对探测效率的影响

Fig. 5 Effect of nuclear solid track sheet shape on detection efficiency

1) 当探测器的尺寸半径为3 cm,高度为5 cm 时,由图5(a)可以看出相同面积条件下圆形核固

体径迹片和正方形核固体径迹片的固有效率基本相同,这表明核固体径迹片形状的变化对固有效率几乎没有影响;

2)由图5(b)和(c)可以看出相同面积条件下圆形核固体径迹片的击中效率以及总探测效率明显都高于正方形探测片,且当探测片面积越大时,两者的探测效率差值越大。

3 结 论

本文通过对圆筒形探测器的探测效率进行蒙特卡罗模拟研究,得到了以下结论:

1)当固体核径迹片尺寸一定时,圆筒形探测器的固有效率、击中效率以及总探测效率都会探测器高度的增加而减小。

2)圆筒形探测器的固有效率和总探测效率都会随着圆形固体核径迹片半径增大的而增大,而击中效率会随之减小。

3)固体核径迹片的形状会影响探测器的探测效率,在相同的固体核径迹片尺寸条件下,圆形核固体径迹片的击中效率以及总探测效率都明显高于正方形固体核径迹片,且当探测片面积越大时,两者效率差异越明显。

参考文献:

- [1] 秦宗会,谢兵. 氢的特性、来源及国家控制标准[J]. 中国西部科技,2011,10(20):4-5.
- [2] 徐创霞,卢晓煌,廖志华,等. 室内环境污染物的来源、危害及防治措施[J]. 四川建筑科学研究,2008,34(1):213-215.
- [3] 吴世达,仲伟鉴. 建设项目卫生学评价[M]. 北京:化学工业出版社,2009:11-19.
- [4] 李哲民,王中卫. 空气中氢浓度的测量及不确定度分析[J]. 北方环境,2013,29(2):125-128.
- [5] 吕丽丹,龚蕾. 浅谈国际 ISO1165-4 标准中固体核径

迹(SSNTD)测氢方法[J]. 科技经济导刊,2016(23):1.

- [6] NIKOLAEV V A,ILI R. Etched track radiometers in radon measurements:A review[J]. Radiation measurements,1999,30(1):1-13.
- [7] 卓维海,易艳玲,何治. 固体核径迹法测量室内氢浓度的质量保证[C]//中国核学会辐射防护分会2012年学术年会暨换届理事会. 辐射防护分会2012年学术年会论文集:2012年卷. 杭州:中国核学会辐射防护分会,2012:114.
- [8] 王晨,丁艳秋,邓君,等. 被动累积式氢个人剂量计技术进展[J]. 中国医学装备,2020,17(6):188-192.
- [9] JAMIL K,KAMRAN M,LLAHI A,et al. Monte Carlo simulation experiments on box-type radon dosimeter[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment,2014,764:18-23.
- [10] REHMAN F,JAMIL K,ZAKAULLAH M,et al. Experimental and Monte Carlo simulation studies of open cylindrical radon monitoring device using CR-39 detector[J]. Journal of environmental radioactivity,2003,65(2):243-254.
- [11] 过惠平,孙涛,姚红伟. CR-39 固体径迹探测器尺寸优化的蒙特卡罗模拟研究[C]//中国电子学会核电子学与核探测技术分会、中国核学会核电子学与核探测技术分会. 第13届全国计算机、网络在现代科学技术领域的应用学术会议论文集:2007年卷. 武汉:中国核学会,2007:75-78.
- [12] MIRZA S M,MIRZA N M,TUFAIL M,et al. Monte Carlo method to calculate volumetric activity to track density rate conversion coefficients for radon dosimetry[J]. Radiation protection dosimetry,1993,46(1):15-21.
- [13] GONZALEZ J A,REYES L I,SUAREZ J J,et al. A mechanism for randomness[J]. Physics letters A,2002,295(1):25-34.