

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.06.007

多电极测氡脉冲电离室对氡探测效率的模拟研究

严 恺,康 玺*,闫先瑞

(南华大学核科学技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:脉冲电离室的多个因素(几何形状、体积和电极数目)影响着其测氡探测效率,现采用蒙特卡罗程序 Geant4 模拟了这些因素与测氡探测效率之间的关系。模拟结果表明:脉冲电离室测氡探测效率与其表面积体积比成反比关系;同一表面积体积比下脉冲电离室测氡探测效率与其电极数目(或电极/电离室体积比)成负指数关系。该模拟结果的有效性为文献报道的多电极脉冲电离室测氡实验结果所检验,可用于提高多电极脉冲电离室测氡探测效率的快速优化设计。

关键词:脉冲电离室;氡;探测效率;蒙特卡罗

中图分类号:TL811 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)06-0040-05

Simulation Study on Radon Detection Efficiency of the Ion Pulse Ionization Chamber with Multi-electrode Structure

YAN Kai, KANG Xi*, YAN Xianriu

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Many factors (geometric shape, volume and number of electrodes) of the pulse ionization chamber affect its radon detection efficiency. The relationship between these factors and the radon detection efficiency is simulated by the Monte Carlo program Geant4. The results show that: the detection efficiency of ion pulse ionization chamber for measuring radon is inversely proportional to its surface area to volume ratio. Under the same surface area to volume ratio, the detection efficiency of pulse ionization chamber for radon measurement has a negative exponential relationship with the number of electrodes (the volume ratio of electrodes to chamber). The simulation results are verified by the experimental results in the literature, and can be used for the rapid optimization design to improve the radon detection efficiency of the ion pulse ionization chamber with multi-electrode structure.

收稿日期:2022-06-21

基金项目:湖南省教育厅一般项目(18C0475)

作者简介:严 恺(1998—),男,硕士研究生,主要从事辐射防护方面的研究。E-mail:1759064247@qq.com。*通信作者:康 玺(1979—),男,讲师,博士,主要从事辐射防护与核安全方面的研究。E-mail:kangcy2011@qq.com

trode structure.

key words: ion pulse ionization chamber; radon; detection efficiency; Monte Carlo

0 引言

氡及其子体是人们所受天然辐射照射的最大来源,其测量问题引起了人们的广泛关注。氡的实时测量方法主要包括闪烁室法、静电收集法、脉冲电离室法等^[1]。脉冲电离室通过直接测量氡衰变产生的 α 粒子来实现氡的测量,具有测量准确度高、灵敏度高、可实现氡的绝对测量等优点,近年来成为氡测量装置的一个重要研究方向^[2-5]。

脉冲电离室对氡的探测效率与其测氡灵敏度有着密切关系,提高脉冲电离室测氡探测效率对提高脉冲电离室测氡灵敏度有着十分重要意义。脉冲电离室的多个因素(几何形状、体积和电极数目)影响着其测氡探测效率,采用实验方法获得这些因素与测氡探测效率的关系较为繁琐,成本较高,本文拟通过蒙特卡罗程序 Geant4 模拟得到这些因素与测氡探测效率之间关系,为提高脉冲电离室灵敏度提供参考。

1 测氡脉冲电离室

圆柱形电离室和平行板电离室是脉冲电离室的两种基本结构,如图1所示。脉冲电离室的正负极间加有高压,可分别收集氡衰变所产生的 α 粒子在空气中电离产生的电子和正离子,其收集到的总电荷数可反映氡衰变 α 粒子能量,从而实现氡衰变 α 粒子测量,进而可实现氡浓度水平测量。

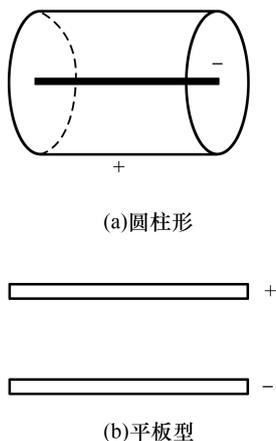


图1 脉冲电离室结构图

Fig.1 Structure of pulse ion chamber

空气中正离子漂移速度比电子小3个量级,其在大体积电离室内的收集时间可达几十毫秒,为缩短脉冲电离室对氡衰变 α 粒子电离产生正离子的收集时间,提高脉冲计数率,人们发展了多电极结构脉冲电离室。V. V. Kuzminov^[6]设计了一种多电极平板型脉冲电离室;S. Rottgera 等人^[7]设计了一种多电极圆柱形脉冲电离室(如图2所示),邱天力等人^[8]构建了该结构电离室并做了实际氡测量实验。

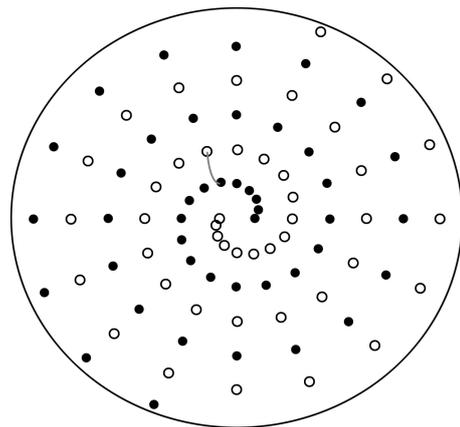


图2 双阿基米德螺旋多电极脉冲电离室截面图

Fig.2 Cross section of double Archimedes spiral multi-electrode pulse ionization chamber

(黑色代表正极,白色代表负极)

此外,氡衰变产生的氡子体带正电荷,在电场作用下会漂移并吸附在脉冲电离室负极,其衰变释放的 α 粒子会对脉冲电离室测量氡 α 粒子产生干扰。

2 仿真模拟

采用蒙特卡罗程序 Geant4 构建了基本结构和多电极结构的脉冲电离室模拟模型。Geant4 程序是欧洲核子中心开发的蒙特卡罗程序,可模拟 α 、 β 、 γ 等多种粒子,具有灵活的几何构建和结果统计能力^[9]。模拟中氡气衰变释放 α 粒子的位置在脉冲电离室空气内均匀抽样;带正电的氡子体附着于脉冲电离室负极,其衰变释放 α 粒子位置在负极表面均匀抽样。氡及其子体 α 粒子发射方向按各向同性分布抽样,它们的能量和在空气中射程^[10]如表1所示。

表1 氡及其子体α粒子在空气中射程
Table 1 Air range of alpha particles of radon and its daughters

核素	能量/MeV	空气射程/cm
²²² Rn	5.49	4.0
²¹⁸ Po	6.0	4.6
²¹⁴ Po	7.69	6.8

模拟结果统计了氡及其子体衰变产生的α粒子在脉冲电离室空气内沉积能量分布谱,脉冲电离室对氡及其子体衰变产生的α粒子的探测效率按式(1)计算:

$$\varepsilon = \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

式(1)中 n_i 为α粒子在感兴趣能量区的粒子计数,对α粒子一般为全能峰单峰计数; N 为脉冲电离室内氡发射α粒子数目。模拟中未考虑脉冲电离室对电离离子收集不全及电子学噪声的影响,故模拟结果为理论值。

在模拟中,通过不断调整脉冲电离室体积以获得不同体积下脉冲电离室测量氡α粒子探测效率;在相同体积下模拟了多电极结构下的脉冲电离室测量氡α粒子探测效率和脉冲电离室对氡子体衰变产生α粒子的探测效率。在这些模拟的基础上,分析了这些因素对脉冲电离室测量氡α粒子探测效率的影响。

3 模拟结果与讨论

3.1 单电极脉冲电离室模拟结果与讨论

脉冲电离室对²²²Rn α粒子探测效率主要受电离室结构和体积的影响。此外,氡子体衰变释放的α粒子可能会对脉冲电离室测量²²²Rn α粒子产生干扰。

首先对不同几何尺寸的平板型和圆柱形单电极电离室对²²²Rn α粒子探测效率进行了模拟。结果如图3所示,数据1和数据2是固定圆柱形(或平板型)电离室底面直径(或边长)为8 cm时,改变其高度时的模拟结果;数据3和数据4是固定圆柱形(或平板型)电离室高度为8 cm时,改变其底面直径(或边长)时的模拟结果。从图3中可知,几何尺寸相近的圆柱形和平板型电离室对²²²Rn α粒子探测效率相差不大;相比于高度,增加底面直径(或边长)对脉冲电离室的²²²Rn α粒子探测效率提高更多。此外,电离室高度(半

径)增加至5倍²²²Rn α粒子射程长度后其探测效率增加较为缓慢,单从提高电离室探测效率看,进一步增加电离室尺寸对提高氡测量灵敏度效果有限。

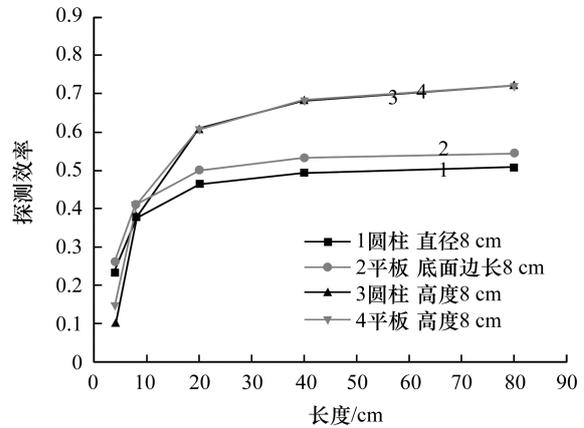


图3 不同尺寸下电离室对²²²Rn α粒子探测效率
Fig. 3 Detection efficiency of the decay alphasparticle of ²²²Rn in ion pulse chamber with different size

进一步计算表明,电离室比表面积(表面积/体积比,表面积指电离室外壳电极表面积)是影响电离室对²²²Rn α粒子探测效率的直接因素,两者基本呈线型递减关系,如图4和式(2)所示。式(2)中 ε 为圆柱形电离室探测效率, t 为比表面, R 为拟合优度。由于比表面积不可能为0,因而增大电离室体积不可能使²²²Rn α粒子探测效率达到1。

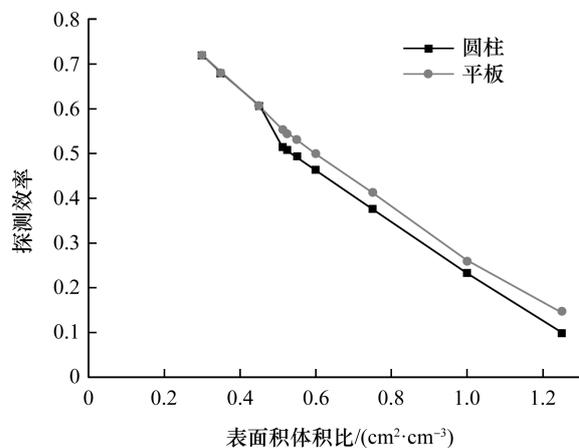


图4 不同比表面积下电离室对²²²Rn α粒子探测效率
Fig. 4 Detection efficiency of the decay alphasparticle of ²²²Rn in ion pulse chamber with different surface-volume ratio

$$\varepsilon = \begin{cases} -0.7556t + 0.9448, t \leq 0.5, R^2 = 0.9997 \\ -0.6414t + 0.8718, 1.2 > t > 0.5, R^2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

为分析氡子体 α 粒子对脉冲电离室测量 ^{222}Rn α 粒子产生的影响,对以 ^{222}Rn 5.49 MeV α 粒子在空气中的射程(4.0 cm)为半径的单电极圆柱形电离室($\phi 8.0\text{ cm} \times 8.0\text{ cm}$,中心负极 $\phi 0.1\text{ cm}$)对 ^{222}Rn 、 ^{218}Po 和 ^{214}Po (^{222}Rn 、 ^{218}Po 和 ^{214}Po 处于放射性平衡)的 α 粒子能量沉积进行了模拟,结果如图5所示。从图5可知,受限于电离室体积,部分氡及其子体 α 粒子未将全部能量沉积在电离室内。由式(1)计算得到的 ^{222}Rn 、 ^{218}Po 和 ^{214}Po α 粒子的全能峰探测效率分别为 0.381、0.172 和 0.028; ^{218}Po 和 ^{214}Po α 粒子形成了 5 MeV 和 3.5 MeV 低能峰,这些低能峰对应于附着在中心电极上 ^{218}Po 和 ^{214}Po α 粒子穿过电离室半径距离(4.0 cm)时的沉积能量(模拟表明 ^{218}Po 6.0 MeV α 粒子、 ^{214}Po 7.69 MeV α 粒子沿圆柱体径向穿过 4.0 cm 空气的平均能量沉积分别为 4.92 MeV、3.38 MeV,这些 α 粒子的剩余能量在电离室阳极外壳损失)。氡子体的低能峰会增加 ^{222}Rn α 粒子全能峰的计数,造成测量不准确,应加以扣除。

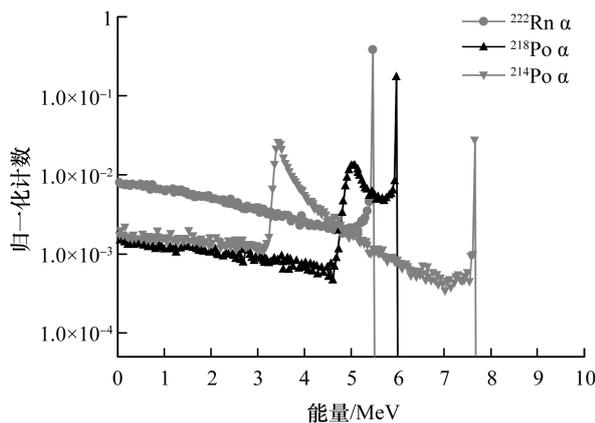


图5 单电极电离室对氡及其子体 α 粒子模拟能谱
Fig.5 Simulated energy spectra from the decay alpha particles of radon and its daughters in ion pulse chamber with single electrode

3.2 多电极脉冲电离室模拟结果与讨论

多电极电离室主要可有效解决大体积电离室难以有效收集 α 粒子电离电荷和正电荷收集时间过长问题,但多电极的引入会造成电离室有效探测体积的减小,进而影响电离室对 ^{222}Rn α 粒子的测量效率。图6给出了不同电极数目(1、15、

29、57 和 113 根)的双阿基米德螺旋多电极电离室($\phi 8.0\text{ cm} \times 8.0\text{ cm}$,各电极直径 1 mm)对 ^{222}Rn α 粒子探测效率模拟结果。从图6和式(3)可知,随着电极数目(或电极/电离室体积比)的增加,电离室对 ^{222}Rn α 粒子探测效率呈指数下降,因而减少电极数目有助于提高电离室对 ^{222}Rn α 粒子探测效率。式(3)中 ε 为归一化探测效率(多电极电离室对单电极电离室探测效率的归一), t 为电极/电离室体积比, R 为拟合优度。

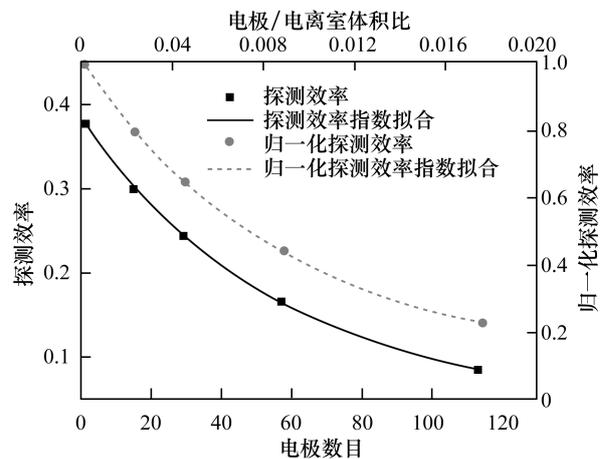


图6 不同数目电极下电离室对 ^{222}Rn α 粒子探测效率
Fig.6 Detection efficiency of the decay alpha particle of ^{222}Rn in ion pulse chamber with different number of electrodes

$$\varepsilon = 0.9723e^{-84.151t}, t < 0.02, R^2 = 0.9965 \quad (3)$$

双阿基米德螺旋多电极电离室($\phi 8.0\text{ cm} \times 8.0\text{ cm}$,各电极直径 1 mm)对 ^{222}Rn 、 ^{218}Po 和 ^{214}Po α 粒子的能量沉积模拟谱如图7所示。从图7中可知,相比于单电极电离室,多电极电离室降低了 ^{218}Po 和 ^{214}Po α 粒子对 ^{222}Rn α 粒子全能峰计数的干扰,电极数目越多,对干扰的降低越明显。这可能是 ^{218}Po 和 ^{214}Po 附着于多根电极(部分电极分布于电离室外侧,如图2所示),它们的 α 粒子穿过电离室内空气的距离变短,能量沉积变小,低能区尾部计数增加,对较高能量 ^{222}Rn α 粒子的全能峰影响变小。

实际实验验证了以上探测效率模拟的有效性。邱天力等人^[8]构造了一个双阿基米德螺旋电极电离室($\phi 28.0\text{ cm} \times 22.0\text{ cm}$),含有 433 个电极($\phi 0.1\text{ cm}$),电极间相距为 1 cm。对氡水平为 22 Bq/m^3 的空气,该电离室在 10 min 内 ^{222}Rn α

粒子测量计数为87,由此计算得到其对 ^{222}Rn α 粒子探测效率为0.497。依据该电离室比表面积($0.234\text{ cm}^2/\text{cm}^3$)和式(2)可计算得到单电极电离室探测效率,再依据电极/电离室体积比(0.00552)和式(3)计算得到该多电极电离室探测效率为0.469。该理论值与实验值的相对误差为5.6%,考虑到实验误差,两者具有较好的一致性,佐证了本论文仿真过程的准确性,该工作目前在国内尚未见到报道。多电极的引入会降低脉冲电离室的探测效率,但为缩短脉冲电离室对正离子的收集时间,提高脉冲计数率,测氡脉冲电离室多采用多电极结构。

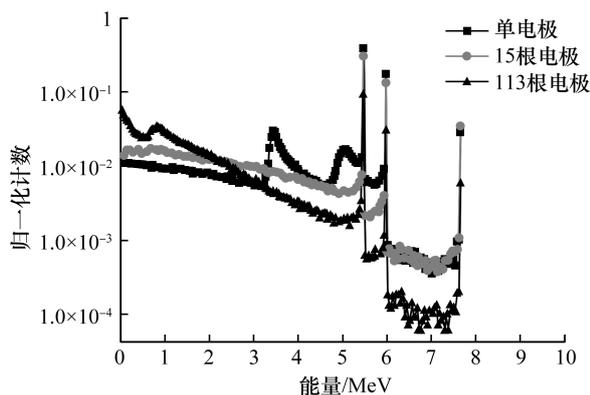


图7 双阿基米德螺旋电极电离室对氡及其子体 α 粒子的模拟能谱

Fig.7 The simulated energy spectra from the decay alpha particles of radon and its daughters in ion pulse chamber with double Archimedes spiral multi electrode

4 结论

为提高脉冲电离室对氡的探测效率,开展了脉冲电离室测氡探测效率影响因素的模拟研究。对不同几何形状、大小和电极数目的脉冲电离室测氡探测效率进行了模拟和分析。结果表明,脉冲电离室对氡探测效率与其比表面积(表面积/体积比)成反比关系,电离室高度、底面半径增加至5倍 ^{222}Rn α 粒子射程长度后其探测效率增加较为缓慢;多电极脉冲电离室对氡探测效率随电极数目(或电极/电离室体积比)成负指数关系,

减少电极数目可以提高脉冲电离室探测效率,但会增加氡子体 α 粒子对氡 α 粒子测量的干扰。该模拟结果的有效性为文献报道的多电极脉冲电离室测氡实验结果所检验,可用于提高多电极脉冲电离室测氡探测效率的快速优化设计。

参考文献:

- [1] 李先杰. 环境空气中氡的监测方法[J]. 辐射防护通讯,2021,41(6):1-17.
- [2] GAVRILYUK Y M, GANGAPSHEV A M, GEZHAEV A M, et al. High-resolution ion pulse ionization chamber with air filling for the ^{222}Rn decays detection[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment,2015,801:27-33.
- [3] HARTMANN A, HUTSCH J, KRÜGERA F, et al. Design and performance of an ionisation chamber for the measurement of low alpha-activities[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment,2016,814:12-18.
- [4] 邓友. 基于空气脉冲电离室测氡仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学,2016:1-5.
- [5] 黄叶. 高灵敏度测氡离子脉冲电离室的设计[D]. 南昌: 东华理工大学,2018:14-16.
- [6] KUZMINOV V V. Ion-pulse ionization chamber for direct measurement of radon concentration in the air[J]. Physics of atomic nuclei,2003,66(3):462-465.
- [7] ROTTGERA S, PAULA A, HONIGA A, et al. On-line low- and medium-level measurements of the radon activity concentration[J]. Nuclear instruments and methods in physics research A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment,2001,466(3):475-481.
- [8] 邱天力,李蒙,魏向伦,等. 在线环境氡浓度测量的离子脉冲电离室研制[J]. 核技术,2021,44(4):31-36.
- [9] ALLISON J, AMAKOCA K, APOSTOLAKIS J, et al. Recent developments in geant4[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment,2016,835(1):186-225.
- [10] 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,2010:8-9.