

用蒙特卡罗方法模拟计算高压电离室对 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 源的空气吸收剂量率因子

王红艳, 肖雪夫

(中国原子能科学研究院 保健物理部, 北京 102413)

摘要:用蒙特卡罗方法模拟计算高压电离室对 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 源的空气吸收剂量率因子,并在标准参考辐射场中进行对应刻度。计算和刻度结果表明:对 ^{137}Cs 点源,高压电离室空气吸收剂量率因子的计算值与刻度值间的相对偏差为0.65%;对 ^{60}Co 点源,两者之间的相对偏差为-5.5%。计算值与刻度值在不确定度内一致。

关键词:高压电离室;空气吸收剂量率因子;蒙特卡罗方法

中图分类号:TL811.1

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)05-0632-03

Simulation of Air Absorbed Dose Rate Factor of High-Pressure Ionization Chamber for ^{60}Co and ^{137}Cs Source by Using Monte-Carlo Method

WANG Hong-yan, XIAO Xue-fu

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

Abstract: The air absorbed dose rate factor of high-pressure ionization chamber was calculated by Monte-Carlo method for ^{60}Co and ^{137}Cs source, and the calculated result was compared with the calibrated result in the standard reference gamma radiation field of ^{60}Co and ^{137}Cs . The relative deviation between calculated and calibrated value is 0.65% for ^{137}Cs reference gamma radiation, and is -5.5% for ^{60}Co reference gamma radiation. The results from two methods are accorded with each other in the range of uncertainty.

Key words: high-pressure ionization chamber; air absorbed dose rate factor; Monte-Carlo method

高压电离室用于 γ 辐射监测的测量对象是天然环境 γ 辐射和核设施 γ 辐射。高压电离室的刻度是将测得的电流值转换为对环境评价有意义的电离辐射剂量学量——空气吸收剂

量率,通常在 γ 标准参考辐射场中刻度。近年来,国内外采用蒙特卡罗方法模拟计算电离辐射剂量学量的研究工作逐渐增多。本工作采用蒙特卡罗方法模拟计算高压电离室对 ^{60}Co

和¹³⁷Cs源的空气吸收剂量率因子,并在国防科工委放射性计量一级站标准参考辐射场中对模拟计算结果进行实验验证。

1 原理

高压电离室的工作原理是X或γ射线在电离室内气体中产生次级电子,次级电子在其运动径迹上使氩气原子电离,产生一系列正负离子对,在灵敏体积内的电场作用下,电子、正离子分别向两极漂移,引起相应极板的感应电荷量发生变化,从而在外接电路中形成电流。用蒙特卡罗方法模拟计算高压电离室剂量率是基于在电子平衡条件下,X、γ辐射在电离室空腔的能量沉积全部用来产生气体电离,而电离室测量到的电离电量为灵敏体积内次级电子所产生的全部电荷电量,从而可用蒙特卡罗方法计算高压电离室灵敏体积内次级电子的能量沉积,以求取高压电离室的剂量率。

电离室空气吸收剂量率因子 η 可用下式计算:

$$\eta = \frac{I}{\dot{D}} = \frac{Q}{\dot{D}} \quad (1)$$

式中: I 为电离室电离电流; \dot{D} 为X、γ射线在与电离室有效中心重合点处的空气吸收剂量率; D 为X、γ射线在与电离室有效中心重合处的空气吸收剂量; Q 为电离电量。

在带电粒子平衡条件下,吸收剂量等于比释动能,空气中与电离室同样大小的空腔中的剂量 D 可由下式求得:

$$D = K \quad (2)$$

式中: K 为间接致电离粒子在该空腔的比释动能。

用文献[1]给出的单能γ辐射每单位注量的空气比释动能换算系数可计算平行束辐射场中X、γ辐射在空腔中心点处的空气吸收剂量 D ,有:

$$D = k/a \quad (3)$$

式中: k 为单能光子每单位注量的空气比释动能换算系数^[1]; a 为平行束辐射场中辐射粒子垂直穿过的空腔面积。

电离室饱和收集的电离电量 Q 为:

$$Q = 1.6 \times 10^{-19} \frac{E}{W} \quad (4)$$

式中: E 为归一光子在电离室灵敏体积内的能

量沉积,可用MCNP程序计算; W 为所充气体的平均电离能。

将式(2~4)代入式(1),得:

$$\eta = \frac{I}{\dot{D}} = \frac{Q}{\dot{D}} = 1.6 \times 10^{-19} \frac{Ea}{kW} \quad (5)$$

2 高压电离室空气吸收剂量率的蒙特卡罗模拟计算

环境γ辐射监测用高压电离室一般为球形不锈钢壁高压电离室,不锈钢(1Cr18Ni9Ti)密度为7.8 g/cm³,壁厚2 mm,外径250 mm;室中心不锈钢小球为中央收集极,直径50 mm,壁厚2 mm,用直径5 mm不锈钢管支撑。电离室内充2.53 × 10⁶ Pa高纯氩气^[2]。在MCNP程序的几何描述中,主要考虑电离室外壁和收集极壁,其他结构予以忽略。

用蒙特卡罗方法模拟计算的球形不锈钢壁高压充氩电离室吸收剂量率因子列于表1。

表1 空气吸收剂量率因子的模拟计算结果

Table1 Calculated results of air absorbed dose rate factor

放射源	能量/MeV	空气吸收剂量率因子/ (μA · Gy ⁻¹ · h ⁻¹)
¹³⁷ Cs	0.662	3.09
⁶⁰ Co	1.173, 1.333	3.06

模拟计算的主要误差源项如下:1)计算中对电离室室壁取材料为Fe,密度为7.8 g/cm³,实际上,室壁材料为不锈钢,其密度为7.7~7.85 g/cm³,由此引入的不确定度小于0.05%;2)取压力计读数为模拟计算中电离室的压强值,这种取值方法将引入误差,压力计给定读数误差为0.5%,按均匀分布估计的取值不确定度为0.3%;3)单能γ辐射每单位注量的空气比释动能换算系数本身具有2%的不确定度^[1];4)电离室内复合作用误差,计算假定,高压电离室能量响应是次级电子所产生的全部电荷电量,实际上,在外加电场作用下,电子与正离子在迁移过程中存在着带电粒子的复合作用,由此引入的估计误差为1%;5)蒙特卡罗方法模拟计算的估计误差小于1%。假定上述5项误差分量各自独立,则合成不确定度为3.9%。

3 高压电离室空气吸收剂量率因子的实验刻度

高压电离室空气吸收剂量率因子的实验刻度在国防科工委放射性计量一级站的 γ 标准参考辐射场进行。在实验刻度中,采用源距为2~5 m的近似平行束辐射场。实验刻度结果列于表2。

表2 空气吸收剂量率因子的实验刻度
Table 2 Experimental calibration of air absorbed dose rate factor

放射源	辐射场剂量率/ ($\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	距离/m	刻度的空气吸收剂量率 因子/($\mu\text{A} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
^{137}Cs	0.928	5	3.111
	36.0	5	3.055
	611.9	3	3.105
	2 232.0	3	3.077
	5 085.0	2	2.989
^{60}Co	1 043.0	2.62	3.237
	805.0	3.12	3.229
	592.0	3.62	3.209
	455.0	4.12	3.297

表3 计算和刻度的空气吸收剂量率因子的比较

Table 3 Comparison of results of air absorbed dose rate factor

放射源	空气吸收剂量率因子/($\mu\text{A} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)		不确定度/%		相对偏差 ¹⁾ /%
	计算值	刻度值	计算值	刻度值	
^{137}Cs	3.09	3.07	3.9	8.9	0.65
^{60}Co	3.06	3.24	3.9	8.4	-5.5

注:1) 相对偏差=(计算值-刻度值)/刻度值

5 结论

在标准参考辐射场中的验证结果表明,利用蒙特卡罗方法计算获得的球形不锈钢壁高压电离室的空气吸收剂量率因子与实验刻度值相符。在高压电离室的有关研究应用中,可利用蒙特卡罗方法模拟计算其空气吸收剂量率因子。

董柳灿、岳清宇研究员指导了本研究,实验工作得到侯金兵、魏可新的大力协助,在此表示感谢。

实验刻度的误差源项如下:1) 标准辐射场定值不确定度为5%;2) 辐射场散射引入的误差小于5%;3) 由时间测量引入的误差小于3%;4) 在源距为2~5 m条件下, ^{137}Cs 点源的剂量率刻度因子均值标准差为4.4%, ^{60}Co 的剂量率刻度因子均值标准差为3.3%;5) 电离室自身本底电流会引入误差,实验测量表明,电离室测量系统的本底电流小于 1.0×10^{-15} A,由此带来的误差可忽略不计。假定上述5项分量各自独立,则对 ^{137}Cs 源合成不确定度为8.9%,对 ^{60}Co 源合成不确定度为8.4%。

4 模拟计算值与实验刻度值的比较

将用 ^{137}Cs 点源和 ^{60}Co 点源实验刻度的空气吸收剂量率因子分别取平均值并与蒙特卡罗方法模拟计算结果比较,比较结果列于表3。

由表3可知:对 ^{137}Cs 点源,高压电离室空气吸收剂量率因子模拟计算值和实验刻度值之间的相对偏差为0.65%;对 ^{60}Co 点源,两者的相对偏差为-5.5%;计算值与刻度值在不确定度内一致。

参考文献:

- [1] 陈丽姝,柴征文. 国际放射防护委员会74号出版物[M]. 北京:原子能出版社,1998:217.
- [2] 金花,岳清宇,王文海. 核设施环境 γ 辐射连续监测系统[J]. 原子能科学技术,1997,31(3):204-209.
JIN Hua, YUE Qingyu, WANG Wenhai. Continuous monitoring system of environmental γ -radiation near nuclear facility[J]. Atomic Energy Science and Technology,1997,31(3): 204-209(in Chinese).