

高压组织等效电离室用于 混合辐射场测量的实验研究

曲延涛, 陈凌, 王薇, 陈勤

(中国原子能科学研究院 辐射安全研究所, 北京 102413)

摘要:介绍了基于复合理论的组织等效电离室的设计原理,利用该原理设计的区域中子、 γ 剂量当量仪可使用1个探头间接测量周围剂量当量、吸收剂量和品质因子。利用加速器和标准辐射场对该装置进行测试,测试结果表明,该装置对于中子和 γ 辐射场,尤其是对于高能 γ 、热能至几十MeV的中子具有较好的能量响应和较高的灵敏度,在剂量率高于几十 $\mu\text{Sv/h}$ 时,测量不确定度可控制在 $\pm 50\%$ 以内。该系统可为存在中子、 γ 辐射场的场所提供必要的测量手段和监控技术。

关键词:混合辐射场;周围剂量当量;品质因子;离子收集效率

中图分类号:TL72

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)04-0502-05

Experimental Research of High-Pressure Tissue Equivalent Ionization Chamber Used for Detecting in Mixed Radiation Field

QU Yan-tao, CHEN Ling, WANG Wei, CHEN Qin

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

Abstract: The design principle of tissue equivalent ionization chamber based on the theory of recombination was described, and the area neutron and gamma dose equivalent instrument was designed. This detection system can indirectly acquire the information of the ambient dose equivalent, the absorbed dose and the quality factor of the mixed radiation field using only one probe. Moreover, the detection system was tested by the accelerator and the standard radiation field. The results indicate that the system has good energy response and sensitivity to the neutron and gamma radiation, especially to the high energy gamma radiation and the neutrons with energy ranging from thermal to dozens of MeV. The uncertainty can be controlled within $\pm 50\%$, while the dose rate of the radiation is above dozens of $\mu\text{Sv/h}$, so this detection system can serve as the necessary measurement instruments and monitoring technology for the places having the mixed radiation field of neutron and gamma ray.

Key words: mixed radiation field; ambient dose equivalent; quality factor; ion collection efficiency

在反应堆、高能加速器现场及使用中子源的场合,均存在中子辐射场或中子、 γ 混合辐射场,对其区域中子、 γ 剂量进行准确监测,对设施和人员安全均具有重要意义。

目前,中子剂量监测问题在世界范围内还未得到很好的解决。中子剂量监测设备主要存在两个问题:1) 测量误差大,尤其在中能区过响应明显;2) 能量覆盖范围有限,一般只从热能至 14 MeV,对于高能中子剂量的探测需专门设计。而对中子、 γ 混合辐射场区域剂量的监测,通常使用两套独立的设备,设备体积大,操作繁琐。为此,本工作设计以组织等效高压复合电离室为探头的周围剂量当量率仪。复合电离室可测量剂量当量以及其他与辐射品质因子有关的量^[1],可用于加速器及反应堆周围的辐射防护。

1 原理

1.1 电离室收集效率

当电离室设计成体复合可忽略时,将电离室中电极上收集的电荷与电极间产生的电荷的比值定义为离子收集效率 f ,它可定量描述电离室中离子的线复合状况。按照线复合理论,单个粒子径迹的离子收集效率^[2]可表示为:

$$f = (1 + m\mu)^{-1} \quad (1)$$

式中: m 为与电离室中电场强度 x 和气体压力 p 有关的量; μ 为无量纲参数,它由粒子径迹结构(径迹内正负离子的接近度)决定, μ 可看作正比于 y_d/ω (y_d 为线能,下标 d 表示 $0.1 \mu\text{m}$ 量级, ω 为气体空腔中产生 1 个电离离子对所需的能量)。

线复合在受辐照的液体和高压气体中,较其他类型的复合明显得多。与体复合不同的是,线复合并不依赖于剂量率的大小,而只是与沿粒子径迹产生的电离离子的密度有关。大多受照物质最初的变化是由同一电离径迹中正负离子相互作用引起的,因此,线复合反映了辐射品质,因而可利用复合电离室测量辐射品质因子和其他一些与辐射品质有关的量。

1.2 复合电离室的饱和和收集曲线

电离室的输出信号(电离电流或被收集电荷)与收集电压的关系如图 1 所示。所有复合方法需至少测量两个收集电压下的电流(或电

荷)。最高收集电压应接近饱和值(电离室腔室产生的离子全部被收集)。实际应用中,最高收集电压的设定应以避免产生明显暗电流和其他副效应为原则。

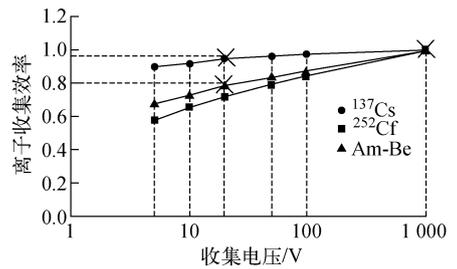


图 1 使用组织等效复合电离室测得的饱和曲线
Fig. 1 Saturation curves measured with recombination chamber

根据国外经验^[3],随着饱和曲线(图 1)测量点的不同,组织等效复合电离室可应用在不同的方面:1) 在最大电压处的电离电流正比于吸收剂量 D (由于不完全饱和,必要时须校正),因此,可用以测量吸收剂量 D ;2) 测量两个不同收集电压处的电流可确定辐射品质的复合指数 Q_1 ,它近似等于 ICRP21 号报告^[4]定义的品质因子,因而可用于测量周围剂量当量 $H^*(10)$, $H^*(10) = DQ_1$ 。

1.3 辐射品质的复合指数(RIQ)

辐射品质的复合指数 $Q_{R/S}$ ^[5]定义为:

$$Q_{R/S} = \frac{f_S - f_R}{R\% - S\%} \quad (2)$$

式中, f_S 、 f_R 分别为特殊选定的收集电压 U_S 、 U_R 下的离子收集效率, U_S 、 U_R 由参考 γ 辐射场刻度确定,分别对应于电离离子存在 $S\%$ 和 $R\%$ 的复合。

原则上 R 和 S 可随意选取。实际运用中最有价值的 RIQ 值是假定 $S=0$ (完全饱和)和 $R=4$,即:

$$Q_1 = (1 - f_R)/0.04 \quad (3)$$

因 Q_1 是可叠加的量,式(3)对任意形式的混合辐射场均有效。

实际运用中通常测量电离电流,因此,式(3)变为:

$$Q_1 = 25 \left(1 - \frac{i_R}{i_S} \right) \quad (4)$$

式中, $i_R = i(U_R)$ 和 $i_S = i(U_S)$ 分别为收集电

压 U_R 和 U_S 下的电离电流。

根据文献[6]中的定义,辐射场中 1 点的周围剂量当量是指相应齐向场在 ICRU 球内,对着齐向场的半径上,深度 10 mm 处产生的剂量当量。因此,组织等效电离室(适当的质量和壁厚)相当于 ICRU 球,而 Q_1 与 ICRP21 号报告^[4] 定义的品质因子(对任意辐射组成和能谱)非常近似(不准确度不大于百分之几)。当电离室充甲烷和氮气时,其对中子和 γ 的灵敏度相当(20%以内)^[1],因而可用 γ 源或 Am-Be 源刻度电

离室的吸收剂量响应因子 $R_D = \frac{D^*(10)}{i_S}$, 得:

$$H^*(10) = R_D i_S Q_1 \quad (5)$$

其中, $D^*(10)$ 为吸收剂量。

根据上述公式可完成周围剂量当量 $H^*(10)$ 的测量。

2 复合电离室设计及周围剂量当量仪组成

2.1 复合电离室设计

复合电离室要求电场强度为常数,参照国外经验,采用平行板电离室的设计。电离室包括 25 个平行板电极(图 2),电极直径 12 cm,厚 3 mm,电极间距 7 mm。电离室充组织等效气体甲烷和氮气(氮气分压 5%),压力为 1 MPa。



图 2 复合电离室结构

Fig. 2 Structure of recombination chamber

通过 MCNP4B 程序计算不同能量光子入射时电离室的响应因子,通过 GEANT4 程序计算不同内衬材料对不同能量的中子能量沉积的影响、不同厚度的内衬材料对中子能量沉积的影响及电离室对中子剂量响应的情况。结果表明:电离室对不同能量的 γ 光子响应较为一致,对高能光子的响应也较好;对中子响应有些

涨落,但平均仍在 50% 以内。

2.2 中子、 γ 周围剂量当量仪组成

周围剂量当量仪(图 3)由两部分组成:电离室和弱电流测量系统;自动控制与测量系统。自动控制与测量系统包括电离室的高压自动变换、弱电流测量系统的自动换挡、测量数据的自动处理与显示。

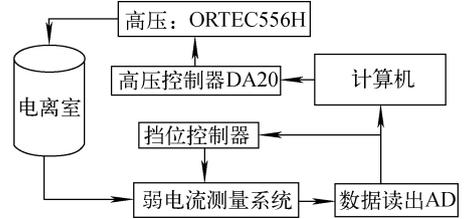


图 3 周围剂量当量仪的系统组成

Fig. 3 System composition of ambient dose equivalent instrument

使用时,需开机预热几分钟,启动测量过程后,控制单元自动对收集电压进行切换,电压升降的步进时间为 1 min,测量数据 2 min,通过 AD 进行采样,电离电流取测量周期内的平均值。测量过程(分别测量 50 和 1 000 V 收集电压下的离子收集效率)结束后,给出剂量率。

3 测试结果和分析

3.1 测试条件

利用国防科工委放射性计量一级站的 γ 剂量标准刻度室提供的不同剂量率条件辐射场对仪器进行测试。同时,利用国防科工委放射性计量一级站加速器提供的 14 MeV 中子及中子剂量标准刻度室提供的不同剂量率条件的辐射场对仪器进行测试。

3.2 测试方法

利用弱电流测量系统分别测量组织等效电离室在两个不同收集电压(根据多次测量的结果,最终选定为 50 和 1 000 V)下的电离电流,根据式(2)~(5)可得到 $H^*(10)$ 。

3.3 测试结果及分析

该测量系统对几种典型 γ 辐射响应因子的测试结果列于表 1。利用平均响应因子,分别计算了测量系统对 γ 辐射和中子辐射的剂量响应(表 2、3)。

表 1 系统对几种典型 γ 辐射响应因子的测试结果

Table 1 Response factor test of system for some typical gamma radiation

源类型	标准剂量率/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	响应值/mV	响应因子/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mV}^{-1})$
^{137}Cs	7.07	0.53	13.3
^{137}Cs	64.1	3.74	17.1
^{137}Cs	388	24.15	16.1
^{137}Cs	5 767	368.6	15.6
^{137}Cs	23 280	1 734	13.4
^{60}Co	46.5	2.45	19.0

表 2 系统对 γ 辐射的剂量响应

Table 2 Dose response of system to gamma radiation

源类型	标准剂量率/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	实际测量值/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	数据相对标准偏差/%	剂量率相对误差/%
^{137}Cs	7.07	8.4	58.3	+18.8
^{137}Cs	64.1	59.2	5.2	-7.6
^{137}Cs	388	381.5	2.9	-1.4
^{137}Cs	5 767	5 824	6.7	+1.0
^{137}Cs	23 280	27 391	0.1	+17.7
^{60}Co	46.5	38.8	4.0	-17.0

表 3 系统对 neutron 辐射的剂量响应

Table 3 Dose response of system to neutron radiation

源类型	标准剂量率/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	实际测量值/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	数据相对标准偏差/%	剂量率相对误差/%
Am-Be 源	117	109	7.3	-6.8
Am-Be 源	156	134	7.2	-14.1
加速器 14 MeV 中子	1 128	811.5		-28.1
加速器 14 MeV 中子	1 207	792.9		-26.4

通过实验数据可知,本系统对 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 及不同能量中子剂量率的测量不确定度在 $\pm 50\%$ 以内,能满足防护情况下中子、 γ 混合辐射场剂量率测量的要求。但是,通过实验也发现测量系统存在如下问题。

1) 低剂量率时测量结果波动较大

根据国内外相关数据及本工作的实际测量结果发现,目前的测量系统探测下限水平只有几 $\mu\text{Gy/h}$,且相对误差较大,这主要是由于探测器自身的暗电流造成的,在常规应用中,这些暗电流被视为限制低剂量率测量准确度的噪声干扰。所以,若可将天然本底之外的干扰全部排除,则会大幅提高系统在低剂量率测量方面的能力。

2) 对加速器 14 MeV 中子的响应明显偏低

该仪器对中子具有很好的能量响应,但在实际测量过程中发现,仪器对于加速器 14 MeV中子的响应明显偏低,国外的相关文献也证实了同样的问题。原因可能是由于在设计电离室的过程中所采用的组成成分、电离室的尺度与 ICRU 球规定的特征参数有偏离造成的,与电离室对 LET 的响应无关。根据测量结果,14 MeV的中子品质因子约为 7,而由 ICRU 球计算得到的值约为 7.5,约低了 25%。

3.4 有待解决的问题

1) 通过对电离室结构及组分的调整,或增加必要的测量手段,尽可能降低电离室本底的

暗电流,以提高系统在低剂量率测量方面的能力。

2) 对测量线路进行改进,利用灵敏度更高的静电计、稳定度更高的高压电源对测量电路进行升级。

3) 目前,系统测量 1 组数据的时间约为 3.5 min,下一步将对电离室内电场情况进行模拟,并根据模拟结果对电离室的设计进行修正,这样有可能通过测量过程变化或电离室结构变化来缩短系统的反应时间。

4) 测量系统对不稳定辐射场的测量能力还有待改善。主要原因是系统需在得到两个收集电压下的电离电流后,通过数据处理显示最终测量结果,这个过程最快需 3.5 min,即至少在这个测量过程中,辐射场必须是稳定的,否则拟合后的结果是不准确的。这就限制了系统只能对稳定的辐射场进行测量。

4 结论

基于复合理论,设计并制作了基于组织等效电离室的区域中子、 γ 剂量当量仪,同时利用国防科工委放射性计量一级站的 γ 剂量标准刻度室、加速器提供的 14 MeV 中子以及中子剂量标准刻度室对该剂量当量仪的中子、 γ 剂量响应进行了测试,结果表明该装置对于中子和 γ 辐射场,尤其对于高能 γ 、热能至几十 MeV 的中子具有较好的能量响应和较高的灵敏度,在剂量率高于几十 $\mu\text{Sv/h}$ 时,测量不确定度可

控制在 $\pm 50\%$ 以内。该系统可为存在中、 γ 辐射场的场所提供必要的测量手段和监控技术。

本工作得到岳清宇研究员的帮助和指导,在此表示由衷的感谢。

参考文献:

- [1] ZIELCZYNSKI M, GOLNIK N. Recombination index of radiation quality-measuring and applications[J]. Radiat Protect Dosim, 1994, 52(1-4): 419-422.
- [2] GOLNIK N. Recombination methods in the dosimetry of mixed radiation, IAE-20/A [R]. Swierk, Poland: [s. n.], 1996.
- [3] GOLNIK N, BREDE H J, GULDBARK S. H^* (10) response of the REM-2 recombination chamber in monoenergetic neutron fields[J]. Radiat Protect Dosim, 1997, 74(3): 139-144.
- [4] ICRP International Commission on Radiological Protection. ICRP data for protection against ionising radiation from external sources[M]. Oxford: Pergamon Press, 1973.
- [5] GOLNIK N, ZIELCZYNSKI M. Determination of quality factor in mixed radiation fields using a recombination chamber[J]. Radiat Protect Dosim, 1992, 44(1): 57-60.
- [6] ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU determination of dose equivalents from external radiation source [M]. Bethesda: ICRU Publications, 1988.