

中子辐射权重因子 及其对中子剂量测量的影响

尚爱国, 赵锋涛, 何文昌

(第二炮兵工程学院 核工程系, 陕西 西安 710025)

摘要: 文章介绍辐射权重因子的概念和发展变化, 分析中子辐射权重因子与剂量监测之间的关系。根据中子能量给出了相应的辐射权重因子的数值。根据所得的中子辐射权重因子对中子剂量测量的影响规律得出, 在设计中子剂量当量测量仪器时, 需充分考虑到品质因数和辐射权重因子数据的变化, 并按按照新的辐射权重因子数据进行刻度。

关键词: 辐射权重因子; 品质因数; 剂量当量; 当量剂量

中图分类号: TL72 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)S0-0097-04

Influence of Neutron Radiation Weighting Factor to Neutron Dose Monitoring

SHANG Ai-guo, ZHAO Feng-tao, HE Wen-chang

(Department of Nuclear Engineering, Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The paper introduces the concept and development of radiation weighting factor, and analyzes the relationship between neutron radiation weighting factor and dose monitoring. Based on the neutron energy, the value of weighting factor was given. For designing the neutron dose equivalent instrument, the variations of quality factor and radiation weighting factor must be considered, and the calibration of instrument according to new radiation weighting factor is necessary.

Key words: radiation weighting factor; quality factor; dose equivalent; equivalent dose

在核材料 ^{239}Pu 、 ^{235}U 、 ^{238}U 贮存管理中, 由于核材料自发裂变而在周围产生一定的中子辐射场。为评估 ^{239}Pu 、 ^{235}U 、 ^{238}U 贮存管理中的个人剂量, 中子剂量的测量是一重要内容。中子剂量的研究相对于 γ 剂量的研究要复杂得多, 这是由于辐射所致生物效应与射线的种类、能量、吸收剂量、吸收剂量率、照射条件、机体的生

理状态等多种因素有关。在实际工作中, 为评估吸收剂量的微观分布所造成的危害, 国际放射防护委员会(ICRP)引入辐射权重因子的概念, 对于不同能量的射线给出一定的权重因子。本文主要分析中子辐射权重因子对中子剂量计算和测量方法的影响。

1 辐射权重因子的概念与数值的发展变化

1962年,国际辐射单位与测量委员会(ICRU)在其第10号报告中正式提出了剂量当量这一概念。剂量当量 H 定义为人体组织中所关心的一点上的吸收剂量 D 、品质因数 Q 及其他修正系数 N 的乘积,即:

$$H = DQN \quad (1)$$

在剂量当量的诠释中,首次提出用品质因数对吸收剂量进行适当的修正,其目的是在统一的尺度上评价不同辐射类型或不同辐射条件所产生的生物效应。品质因数 Q 是用来度量吸收剂量的微观分布对环境的影响。它是所关心的那一点在水中的传能线密度 L_∞ 的函数。品质因数 Q 与传能线密度 L_∞ 的关系列于表1^[1]。

表1 品质因数 Q 与传能线密度 L_∞ 的关系

Table 1 Relationship between quality factor and linear energy transfer

$L_\infty / (\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	Q
≤ 3.5	1
7	2
23	5
53	10
≥ 175	20

由于 L_∞ 的大小和致电离粒子的初始动能、种类及介质的特性有关,在一定的范围内其值愈大,则表明该种辐射的生物效应也大。在实际工作中,可按照类型和射线性质进行品质因数的选取。品质因数与照射类型、照射种类的关系列于表2。如果在所关心的体积内辐射按 L_∞ 的分布不是所有各点上均已知,ICRP建议可按初级辐射类型使用对内照射和外照射都适用的 Q 的近似值(表3)。

1990年,ICRP在其第60号报告中正式提出了当量剂量的概念。当量剂量定义为:

$$H_R = W_R D_R \quad (2)$$

式中: H_R 为辐射 R 在组织或器官中产生的当量剂量; W_R 为辐射 R 的辐射权重因子; D_R 为辐射 R 在组织或器官中产生的吸收剂量。

当量剂量实际上是由组织或器官中的平均吸收剂量导出的辐射防护专用量。提出当量剂

表2 品质因数 Q 与照射类型、射线种类的关系

Table 2 Relationship between quality factor and radial

照射类型	射线种类	Q
外照射	X射线、 γ 射线、电子	1
	热中子及能量小于0.005 MeV中子	3
	0.02 MeV中子	5
	0.1 MeV中子	8
	0.5~10 MeV中子	10
内照射	重反冲核	20
	β^- 、 β^+ 、 γ 、 e^- 、X射线	1
	α	10
	裂变过程中的碎片、 α 发射过程中的反冲核	20

表3 按初级辐射类型选用的品质因数近似值 \bar{Q}

Table 3 Approximation of quality factor for different primary radiation

射线种类	\bar{Q}
X射线、 γ 射线、电子	1
中子、质子和静止质量大于1个原子质量单位的单电荷粒子	10
α 粒子和多电荷粒子(以及电荷未知的粒子)	20

量和辐射权重因子的主要原因是:ICRP认为,利用1种简单形式的 $Q-L$ 关系式对吸收剂量进行修正以反映受高传能线密度成分的辐射照射时引起的危害的概率较高,因为放射生物学资料含有多种不确定因素,这种做法的细节和精密度被认为是没有理论依据的。因此,ICRP根据对生物学资料、各种各样的照射条件以及对周围剂量当量传统计算结果的检验,建议在计算当量剂量时选用辐射权重因子,并对品质因数 Q 与碰撞阻止本领 L_∞ 的关系进行了新的修正。辐射权重因子和 $Q-L_\infty$ 关系分别列于表4^[2]和表5。

2 辐射权重因子对 neutron 剂量测量的影响

在中子剂量计算中,品质因数及辐射权重因子对 neutron 剂量计算的影响体现在公式 $H = DQN$ 和 $H_R = W_R D_R$ 中。从表2、4可定性分析得出,中子品质因数及辐射权重因子的不同体现在两个方面:一是中子按能量进行的分

表 4 辐射权重因子

Table 4 Radiation weighting factors

辐射类型	能量范围	辐射权重因子 W_R
光子	所有能量	1
电子和 μ 子	所有能量	1
中子	<10 keV	5
	10~100 keV	10
	100 keV~2 MeV	20
	2~20 MeV	10
	>2 MeV	5
质子(反冲质子除外)	>2 MeV	5
α 粒子, 裂变碎片, 重核	所有能量	20

表 5 品质因数 Q 与水中传能线密度 L_∞ 的关系

Table 5 Relationship between quality factor and linear energy transfer in water

$L_\infty / (\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	Q
<10	1
>100	$0.32L_\infty \sim 2.2$
10~100	$300 / \sqrt{L_\infty}$

段;二是不同能量的中子对应的中子品质因数及辐射权重因子有了较大的变化。这表明,在中子吸收剂量相同时,中子剂量当量和中子当量剂量也有较大的不同。

对不同能量的中子(以及对中子和 γ 的混合辐射),由于它们的品质因数及辐射权重因子相差较大,因此,从辐射防护角度分析,需要测量以 mSv 为单位的剂量当量。中子剂量当量测量原则上可采用下述方法:1)采用不同的探测器,分别测量辐射场各种成份的吸收剂量,然后各自乘以适当的辐射权重因子,并求出这些乘积的总和;2)设计 1 种探测器,使得它对各种成份的响应与它们所贡献的剂量当量成正比;3)测出在各传能线密度(LET)区间内的吸收剂量,各乘以相应区间的辐射权重因子,然后将这些乘积相加;4)测量各种成份辐射的注量和能谱,然后计算吸收剂量,乘以适当的辐射权重因子后再加和求出剂量当量^[3]。在实际中,第 2 种方法应用较多。设计这类探测器的基本要求应基于下式:

$$N = \int_{E_1}^{E_2} \epsilon(E)\phi(E)dE = k \int_{E_1}^{E_2} d(E)\phi(E)dE = kH \quad (3)$$

式中: N 为探测器的计数; H 为中子的当量剂量; $\epsilon(E)$ 为探测器对不同能量中子的探测效率, $\phi(E)dE$ 表示能量从 E 到 $E+dE$ 之间的中子注量, $d(E)$ 为不同能量中子每单位中子注量所相应的剂量当量(又称剂量当量换算因子)。

从式(3)中可以看出,只要设计合适的探测器,使之对不同能量中子的探测效率随能量的变化与剂量当量换算因子随能量的变化一致,就可实现对剂量当量的测量。但是,剂量当量换算因子与不同能量的中子与机体组织发生作用所产生的次级辐射被吸收的情况以及相应的辐射权重因子有关。剂量当量换算因子的计算为式(4)。不同能量中子的剂量换算因子列于表 6。

$$d(E) = E \frac{\mu_{tr}}{\rho} Q \quad (4)$$

表 6 不同能量中子的剂量换算因子

Table 6 Dose conversion factor for neutron with different energy

中子能量 E/MeV	剂量换算因子 $d(E) / (\text{fSv} \cdot \text{m}^2)$
2.5×10^{-8}	1.068
1×10^{-7}	1.157
1×10^{-6}	1.263
1×10^{-5}	1.208
1×10^{-4}	1.157
1×10^{-3}	1.029
1×10^{-2}	0.992
1×10^{-1}	5.787
5×10^{-1}	19.84
1	32.68
2	39.68
5	40.65
10	40.85
20	42.74
50	45.54

3 结论

根据以上分析,中子品质因数和辐射权重因子均用来描述射线所致吸收剂量的微观分布对环境的影响的量。随着人们对各类辐射所致生物效应本质的认识,中子品质因数和辐射权重因子概念和数据会有较大的变化。由于具体数值的变化会直接导致中子剂量计算结果的变化的差异,这种变化在描述某一特定辐射生物效应时应特别予以说明。

中子品质因数和辐射权重因子概念和数据的较大变化对中子剂量当量或当量剂量的直接测量有较大影响。在上述讨论的中子剂量当量测量中,应用的剂量当量换算因子包含了中子品质因数和辐射权重因子。因此,中子品质因数和辐射权重因子数据的变化也直接对中子剂量当量测量仪器的设计和刻度产生影响。在中

子剂量实际测量应用中,首先要分析中子剂量当量测量仪器的结构设计是否充分考虑了品质因数和辐射权重因子数据的变化,其次要注意所选择的仪器是否按照新的辐射权重因子数据进行了刻度。

参考文献:

- [1] 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京:原子能出版社,1982:51-52.
- [2] 国际放射防护委员会. 国际放射防护委员会第60号出版物-国际放射防护委员会1990年建议书[M]. 李德平,孙世荃,陈明焜,等译. 北京:原子能出版社,1993:11-12.
- [3] 田德祥. 电离辐射量及其单位[M]. 北京:原子能出版社,1993:25-27.