

## 双探测器中子剂量当量仪的探头设计

夏文明<sup>1</sup>, 贾铭椿<sup>1</sup>, 郭智荣<sup>2</sup>, 龚军军<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033; 2. 中船重工第七一九研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 针对单探测器中子剂量当量仪的能量响应性能普遍不好的问题, 设计了一种新型中子剂量当量仪, 该中子剂量当量仪的探头包含有两个不同厚度慢化体球壳和两个球形  $^3\text{He}$  正比计数管。用 MCNP 程序对分别嵌入到两个慢化体球壳中心的两个  $^3\text{He}$  正比计数管的能量响应进行了计算。在周围剂量当量的结果计算时, 用两个探测器的计数率之比确定 1 个修正因子以对探测器的计数率转换成中子周围剂量当量率进行修正。经过理论分析和实验验证, 该中子剂量当量仪的能量响应性能有一定改善, 可使热中子~14 MeV 范围内的能量响应缩小到 0.7~1.3 范围内。

**关键词:** 中子周围剂量当量; 多探测器; 能量响应

中图分类号: TL818.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0458-04

## Design of Neutron Dose-Equivalent Meter With Two Detectors

XIA Wen-ming<sup>1</sup>, JIA Ming-chun<sup>1</sup>, GUO Zhi-rong<sup>2</sup>, GONG Jun-jun<sup>1</sup>

(1. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. 719 Research Institute, China Shipbuilding Industry Company, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** Because the energy response performance of neutron dose-equivalent meters with single detector is not very good, a new type of neutron dose-equivalent meter was designed. Its detector composed of two spheric moderators with different thicknesses and two spheric  $^3\text{He}$  proportional counters. The energy response of two spheric  $^3\text{He}$  proportional counters embeded into the centers of the moderators were calculated by the use of MCNP codes. In order to get the ambient dose-equivalent results, the ratios of the counts were used to get a factor to correct the conversion of the counts to ambient dose-equivalent. With theory analysis and experiment validation, it shows that the energy response performance of the neutron dose-equivalent meter is improved obviously. The response of neutron energy from thermal to 14 MeV can be narrowed to a range of 0.7-1.3.

**Key words:** neutron ambient dose-equivalent; multi detector; energy response

中子剂量当量仪通常又称为雷姆仪, 典型的中子剂量当量仪通常由探头和电子学系统组成, 探头一般由 1 个慢化体和 1 个热中子探测器组成, 有些慢化体内还会嵌入 1 个吸收层 (如含硼橡胶等), 为了增加对高能中子的响

应, 也有些加入一重金属层 (如铅、钨等), 但是这些探头由单慢化体和单探测器组成的中子剂量当量仪的能量响应性能都不是很理想, 于是采用多探测的中子剂量当量仪便逐渐成为中子剂量当量仪研究的趋势。如加拿大的 BTI 公

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-08-20

作者简介: 夏文明 (1982—), 男, 湖北浠水人, 博士研究生, 辐射防护与环境保护专业

司生产的 ROSPEC 便携式谱仪就是采用多个不同类型的生物等效正比计数管和  $^3\text{He}$  正比计数计数的组合来进行中子注量能谱的测量从而可以分析出周围剂量当量的信息, 测量范围为热中子  $\sim 4.5$  MeV, 能量响应有较大改善。文献[1-2]分别采用等分法和不等分法设计了一种探头由 1 个慢化体和 3 个位置灵敏  $^3\text{He}$  正比计数管组成的周围剂量当量测量装置。上述方法存在一共同点是要通过较复杂的数据分析得到中子注量能谱才能得到周围剂量当量数据, 数据处理较为复杂, 不适合设计了一种新型中子剂量当量仪作为可携式的中子周围剂量当量的巡测仪。因此, 本工作设计一新型中子剂量当量仪, 以实现中子周围剂量当量率的实时监测。

## 1 探头设计

本工作设计的探头由两个慢化体球壳和两个球形  $^3\text{He}$  正比计数管组成, 探头的剖视图如图 1 所示, 为获得较好的角响应性能, 探头设计成轴对称的结构, 两个球形  $^3\text{He}$  正比计数管分别嵌入到两个慢化体球壳的正中心, 固定在铝制的圆柱形的外壳内, 两个球形  $^3\text{He}$  正比计数管的中心在外壳的中轴上, 外壳上下分别留出了安装对两个探测器的信号进行处理的电子学系统的空间。

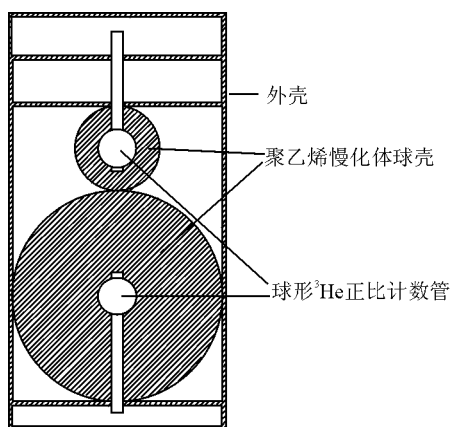


图 1 探头的剖视图

Fig. 1 Section of detector

## 2 探测器能量响应的计算

能量响应的定义为:

$$R(E) = M/\Phi(E) \quad (1)$$

式中:  $E$  为中子能量, MeV;  $\Phi(E)$  为能量为  $E$  的中子的注量,  $\text{cm}^{-2}$ ;  $M$  为探测器的计数。

能量响应可通过测量或计算得到, 本工作采用 MCNP 程序对探头的能量响应进行了模拟计算, 计算中严格按照探头的结构建立几何模型, 计算时采用平面单能中子源。MCNP 计算的 inp 文件中的计数卡采用 F4 和 FM4 组合, F4 为记录卡, FM4 卡为倍增记录卡, 格式为 FM4 ( $Cm103$ ), 其中,  $C$  为倍增系数,  $m$  为材料号码, 103 是 MCNP 规定的反应号, 指 (n, p) 反应。F4 和上述格式的 FM4 卡配合输出的结果是单位注量照射时在探测器灵敏体积内产生的 (n, p) 反应的次数, 即单位注量能量响应。若在写 FM4 卡时将  $C$  设为 1, 则:

$$R(E) = F_4 a_s n_{\text{He}} V \quad (2)$$

式中:  $a_s$  为中子源的面积,  $\text{cm}^2$ ;  $n_{\text{He}}$  为氦气的原子密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $V$  为探测器灵敏体积。

两个探测器 (1#为大慢化体球壳内的探测器, 2#为小慢化体球壳内的探测器) 的能量响应计算结果如图 2 所示, 由图 2 可知, 1#探测器能量响应的峰值在 1 MeV 左右, 2#探测器能量响应的峰值在 1 eV 左右。在热中子  $\sim 5$  keV 的能量范围, 2#探测器的能量响应高于 1#探测器的, 而在中子能量大于 5 keV 的范围, 1#探测器的能量响应高于 2#探测器的。

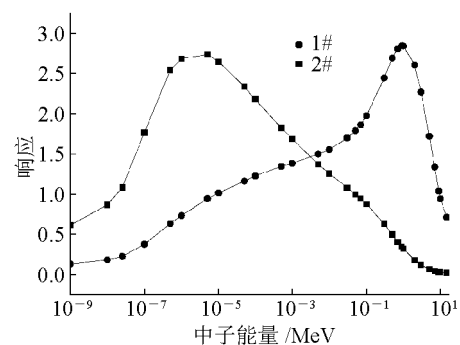


图 2 两个探测器的能量响应曲线

Fig. 2 Energy response curves of two counters

## 3 中子周围剂量当量的计算原理

仪器得到的原始数据是与各探测器的响应成正比的计数, 最终要输出的结果却是中子周围剂量当量, 要得出结果是建立起探测器的计

数与中子周围剂量当量的关系。对于一次测量, 参数  $k$  为:

$$k = M_1/M_2 \quad (3)$$

式中:  $M_1$  和  $M_2$  分别为 1# 和 2# 探测器的计数。

而由式 (1) 有:

$$M = \int R(E) \Phi_E(E) dE \quad (4)$$

对于能量为  $\bar{E}$  的单能中子, 有:

$$M = R(\bar{E}) \Phi \quad (5)$$

式中:  $\Phi$  为总注量。

而对于能量有一定分布的中子辐射场, 假设也存在  $\bar{E}$  使下式成立, 则有:

$$k = \frac{M_1}{M_2} = \frac{R_1(\bar{E}) \Phi}{R_2(\bar{E}) \Phi} = \frac{R_1(\bar{E})}{R_2(\bar{E})} \quad (6)$$

而根据能量响应的计算结果可建立  $k$  与能量的关系, 其曲线如图 3 所示。由图 3 可看出,  $k$  随能量单调递增, 由  $M_1$  和  $M_2$  的比值可反推出  $\bar{E}$ 。 $h_\phi(E)$  为 ICRP 推荐的中子注量-周围剂量当量转换系数<sup>[3]</sup>, 可由  $\bar{E}$  得到  $h_\phi(\bar{E})$ , 则中子周围剂量当量的测量值  $H_m^*(10)$  可用探测器的计数计算为:

$$H_m^*(10) = \begin{cases} k_c \frac{h_\phi(\bar{E})}{R_1(\bar{E})} M_1 & (\bar{E} \geq 5 \text{ keV}) \\ k_c \frac{h_\phi(\bar{E})}{R_2(\bar{E})} M_2 & (\bar{E} < 5 \text{ keV}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k_c$  为经刻度实验确定的刻度因子。对于大于等于 1 MeV 和小于 1 MeV 的中子辐射场中的  $H_m^*(10)$  分别用 1# 和 2# 探测器的计数来计算, 因为 1# 探测器对能量大于等于 5 keV 中子的响应较大, 而 2# 探测器对能量小于 5 keV 中子的响应较大, 这样可提高中子剂量当量仪的灵敏度。当中子辐射场中的中子为单能中子, 则  $H_m^*(10)$  等于中子周围剂量当量的约值  $H_m^*(10)$ , 对于能量分布在较小范围内的中子辐射场,  $H_m^*(10)$  与  $H^*(10)$  的差别不大, 而对于中子能量分布较均匀的中子辐射场用  $H_m^*(10)$

来估计  $H^*(10)$  则可能会存在较大不确定度。本工作分别计算了用此种方法得到的单位注量 Am-Be 源和 Cf 源的  $H_m^*(10)$  分别为 419.7 pSv 和 334.1 pSv, 而按 ICRP 推荐的中子注量-周围剂量当量转换系数计算得到单位注量 Am-Be 源和 Cf 源的  $H^*(10)$  值分别为 385 pSv、391 pSv, 两者的偏差分别为 9% 和 14.5%。

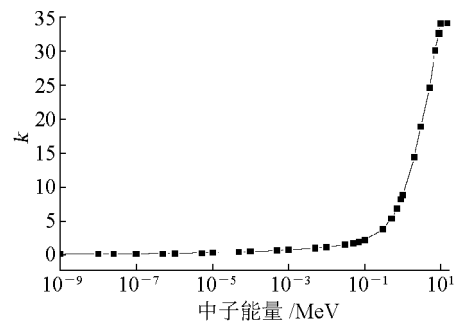


图3 参数  $k$  与中子能量的关系曲线

Fig. 3 Relation graph of  $k$  and neutron energy

#### 4 不确定度分析

总不确定度主要来自 3 方面:

- 1) 能量响应计算的不确定度;
- 2) 仪器计数的不确定度;
- 3) 中子周围剂量当量计算的不确定度。

##### 4.1 能量响应计算的不确定度

本工作采用 MCNP 程序对探头进行模拟计算得到探测器的能量响应, 计算的不确定度主要来自以下几个方面:

1) MCNP 程序采用的是随机抽样的统计方法, 该方法本身存在一定的不确定度, MCNP 在给出结果的同时会给出相应的计算不确定度, 这只是 MCNP 程序本身的不确定度, 可通过增加模拟的粒子数来减小这一不确定度, 本工作将此不确定度控制在 5% 以内;

2) 计算所使用的核反应截面数据不是最新数据, 可能存在一定的误差, 其带来的不确定度在 3% 以内;

3) 在建立计算模型时描述的慢化体的密度及探测器的气压与实际值可能有一定偏差, 慢化体的密度变化 3% 造成的不确定度约 6%, 而探测器的的气压变化 10% 造成的不确定度在 10% 以内。按照不确定度的合成方法对上述不确

定度进行合成得到能量响应计算的总不确定度为 13%。

#### 4.2 计数统计的不确定度

将该探头置于 Am-Be 中子源辐射场中对两个探测器进行计数，经分析，两个探测器的计数统计不确定度均约为 3%。

#### 4.3 中子周围剂量当量计算的不确定度

由文献[2]中中子周围剂量当量的计算方法的原理可知，对于单能中子来说，不确定度是非常小的，而对于能量分布较均匀的中子辐射场，该方法可能会带来较大的不确定度。本工作分别按照 Am-Be 中子源和 Cf 中子源的能量分布推算了该计算的不确定度，Am-Be 中子源的中子辐射场中该计算方法的不确定度为 9%，而 Cf 源辐射场中该计算方法的不确定度为 14.5%。对于其它典型辐射场的不确定度的最大值为 18%。

除了上述 3 项主要不确定度来源外，还有一些次要的不确定度源，如方向响应引起的不确定度、中子注量-剂量当量转换系数的不确定度、刻度因子和散射引起的不确定度等，此因素引起的不确定度约为 6%左右，综上所述进行合成，总测量结果不确定度为 23%，上述不确

定度均是在中子能量从热中子~14 MeV 范围内的不确定度，因此，本中子剂量当量仪在热中子~14 MeV 范围内的能量响应可缩小到约 0.7~1.3 的范围内。

## 5 结束语

本工作设计的中子剂量当量仪的探头采用双探测器的结构，具有结构简单、数据处理和结果输出快速的特点，可实现中子周围剂量当量率的实时监测，经过较准确的刻度和标定后可使其能量响应性能较单慢化体单探测器的探头结构的中子剂量当量率有一定的改善。

### 参考文献：

- [1] TOYOKAWA H, URITANI A, MORI C, et al. Neutron spectrometer with position-sensitive proportional counters[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 381: 481-487.
- [2] 李桃生. 中子周围剂量当量(率)监测方法的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2004.
- [3] ICRP. ICRP publication 74[R]. Oxford: Pergamon Press, 1996.