

压水堆工作场所模拟中子参考辐射场的建立

刘毅娜, 王志强, 李春娟, 刘蕴韬, 陈军, 李玮, 骆海龙

(中国原子能科学研究院 计量测试部, 计量与校准技术国防科技重点实验室, 北京 102413)

摘要: 利用串列加速器 $T(d,n)^4\text{He}$ 反应产生的 14.8 MeV 中子, 以及适当的中子慢化散射装置建立了目前国内唯一的压水堆典型工作场所模拟中子参考辐射场。对不同中子慢化散射材料组合下的中子能谱及中子周围剂量当量进行了测量, 并校准了 2 台典型结构的中子周围剂量当量率仪。将模拟中子参考辐射场下的校准因子和放射性核素中子源参考辐射场下的校准因子进行比较, 发现放射性核素中子源参考辐射场下的校准因子明显偏高, 且仪表类型不同, 偏高的程度也有所区别, 这主要是由于不同类型仪表的能量响应不同。相比之下, 模拟中子参考辐射场更适合用于反应堆工作场所的中子剂量仪表的校准。

关键词: 中子慢化散射装置; 模拟中子参考辐射场; 中子周围剂量当量率仪; 校准因子

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2020)12-2476-05

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0465

Establishment of Simulated Neutron Reference Radiation Field for Workplaces of Pressurized Water Reactor

LIU Yina, WANG Zhiqiang, LI Chunjuan, LIU Yuntao, CHEN Jun, LI Wei, LUO Hailong

(Radiation Metrology and Measurement Division, National Key Laboratory for Metrology and Calibration Techniques, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: A simulated neutron reference field for typical workplaces of the pressurized water reactor was established with 14.8 MeV neutrons from $T(d,n)^4\text{He}$ reaction and a neutron moderating and scattering assembly. The neutron energy spectrum and ambient dose equivalent were measured with the assembly in different material combinations. Two typical neutron ambient dose rate meters were calibrated in this field. Calibration factors were compared with the results from the radionuclide neutron reference field. The results show that the calibration factors from the radionuclide neutron reference field are larger than the simulated neutron reference field, and different for two types of meters due to their energy responses. By contrast, the simulated neutron reference field is more appropriate to calibrate neutron dose meters which are used in reactor workplaces.

Key words: neutron moderating and scattering assembly; simulated neutron reference radiation field; neutron ambient dose rate meter; calibration factor

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-07

作者简介: 刘毅娜(1981—), 女, 陕西西安人, 副研究员, 硕士, 电离辐射计量专业

网络出版时间: 2020-12-01; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20201201.0836.002.html>

中子剂量是核电站必要的常规监测项目。常用的中子剂量监测仪表主要有两类:一类是针对个人剂量监测的中子个人剂量计;另一类是针对场所监测的中子周围剂量当量率仪。目前国内中子剂量仪表的常规检定主要在 $^{241}\text{Am-Be}$ 和 ^{252}Cf 中子源参考辐射场中进行^[1-2]。压水堆工作场所的中子谱是由燃料棒内的 ^{235}U 裂变中子(裂变中子谱)经过重生物屏蔽材料的慢化和散射形成,包括没有发生碰撞的高能中子、近似 $1/E_n$ 依赖的散射中子和热中子^[3],能量范围一般在热能 ~ 10 MeV之间,其能量分布与常用的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源和 ^{252}Cf 中子源的中子能谱差别较大。相比之下,现有校准辐射场的能谱较硬,造成采用放射性核素中子源校准的中子剂量仪表测量的中子剂量与实际场所的中子剂量差异较大,有时达到几倍或数量级的差别。在实验室内建立与反应堆工作场所一致或相近的中子场(能谱相同或相近)^[4-7],可给出适合工作场所使用的剂量仪的校准因子,提高中子监测的准确性和可靠性。

本文拟利用 2×1.7 MV 串列加速器 $\text{T}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 反应产生的 14.8 MeV 单能中子,以及适当的中子慢化散射装置建立压水堆工作场所模拟中子参考辐射场。采用 2 台中子谱仪测量不同中子慢化散射材料组合下校准区的中子能谱及中子周围剂量当量,在一种慢化散射材料组合下,对 2 台典型的中子周围剂量当量(率)仪进行校准,并与放射性核素中子源参考辐射场的校准因子进行比较。

1 方法

1.1 实验装置

1) 中子慢化散射装置

中子慢化散射装置由贫铀中子转换体、包裹贫铀的铁壳、水箱和分层拼接的聚乙烯散射室组成。各部分材料的尺寸及几何参数经过模拟计算优化^[8],装置剖面如图 1 所示。校准区位于距离加速器靶头 150 cm 处。

2) 中子谱仪

采用 2 台基于反冲质子法的中子谱仪,即中子旋转谱仪(ROSPEC 谱仪)和中子闪烁谱仪(S. S. S 谱仪),测量辐射场的中子能谱。ROSPEC 谱仪测量的中子能量范围为热能 \sim

4.5 MeV,探测单元由 3 个 $\phi 5.08$ cm 内充不同气压氢气的球形正比计数器、1 个 $\phi 15.24$ cm 内充氩甲烷混合气的球形正比计数器、1 个 $\phi 5.08$ cm 的裸 ^3He 球形正比计数器和 1 个 $\phi 5.08$ cm 带 ^{10}B 涂层的 ^3He 球形正比计数器组成。6 个探测单元单独记录和处理信号。谱仪的电机可使探测器的支撑平面匀速转动,实现在谱仪覆盖面尺度对辐射场的均匀测量。S. S. S 谱仪测量的中子能量范围为 4 \sim 17 MeV,探测单元为塑料闪烁体阵列,闪烁体尺寸的选择既考虑了系统的中子探测效率,同时又将探测单元对 γ 射线的灵敏度降到最低。对 2 台谱仪测量的脉冲幅度谱进行多道解谱,可得到各探测器测得的中子注量和剂量当量,并得到热能 \sim 17 MeV 范围内的中子束流监视器。

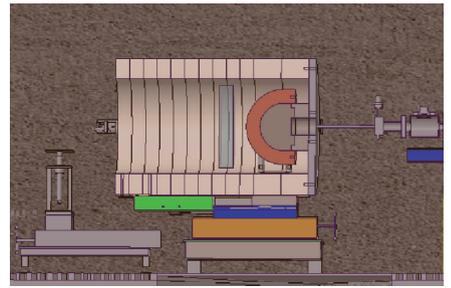


图 1 中子慢化散射装置剖面

Fig. 1 Profile of neutron moderating and scattering assembly

3) 束流监视器

由于依托加速器中子源建立模拟中子参考辐射场,为保证校准仪表时的量值传递属性,必须考虑与中子产额相关的归一化仪器可靠性,即必须有 1 台或多台能反映因加速器束流及靶材料变化而引起的中子产额变化,并可实时同步监测的仪器。

经过中子慢化散射装置产生的中子束类似于准直束,因此无法在中子束出射端放置中子束流监视器。如果采用在靶端安置中子束流监视器的方式,由于距离靶较近,靶点位置的变化会造成监视数据不可靠。因此采用 $\text{T}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 伴随 α 粒子测量装置作为中子产额的归一化仪器,测量结果不受散射本底的影响,保证监视数据的可靠性。

4) 待检中子周围剂量当量(率)仪

选定目前国内常用的 2 台典型结构的中子

剂量仪作为校准对象,分别为中国原子能科学研究院生产的 NH-1A 型和美国热电公司生产的 FHT 762 型中子周围剂量当量(率)仪。2 台中子周围剂量当量(率)仪使用的热中子探测器均为 ^3He 正比计数管,NH-1A 的慢化体为 $\phi 20\text{ cm}$ 的球体,FHT 762 的则为 $\phi 22.86\text{ cm} \times 21\text{ cm}$ 的近似等高圆柱体。

1.2 辐射场参数测量

1) 中子能谱

中子能谱是模拟中子参考辐射场的基本参数,通过中子能谱分布可计算出中子周围剂量当量和个人剂量当量。本文分别测量 4 种不同中子慢化散射装置组合下的中子能谱:组合 1,聚乙烯散射室长度 50 cm、无水层、校准距离 150 cm;组合 2,聚乙烯散射室长度 60 cm、水层厚度 4 cm、校准距离 150 cm;组合 3,聚乙烯散射室长度 80 cm、水层厚度 4 cm、校准距离 150 cm;组合 4,聚乙烯散射室长度 100 cm、水层厚度 4 cm、校准距离 179.6 cm。通过伴随 α 粒子装置进行束流归一化,得到在热能 $\sim 17\text{ MeV}$ 能量范围内的中子能谱。

2) 中子周围剂量当量

根据测量的中子能谱,以及 ICRP 74 号出版物中列出的单能中子-周围剂量当量转换系数^[9],计算各组合下的中子周围剂量当量。

1.3 中子周围剂量当量率仪的校准

在组合 4 下,利用模拟中子参考辐射场分别校准 NH-1A 型和 FHT 762 型中子周围剂量当量(率)仪。校准时均采用摄像头进行远距离读数。根据式(1)计算校准因子 N 。在 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源参考辐射场下,也对 2 台仪器进行校准,房间散射中子本底利用影锥法扣除。

$$N = H_t/M = H_0 C/M \quad (1)$$

式中: H_t 为周围剂量当量约定真值; H_0 为单位束流监视器计数对应的中子周围剂量当量; M 为待校仪表读数; C 为仪表测量时对应的束流监视器计数。

2 结果与讨论

4 种不同中子慢化散射装置组合下的中子能谱测量结果及采用 MCNP 程序模拟计算的结果示于图 2(E_n 为中子能量, $\phi(E_n)$ 为中子能

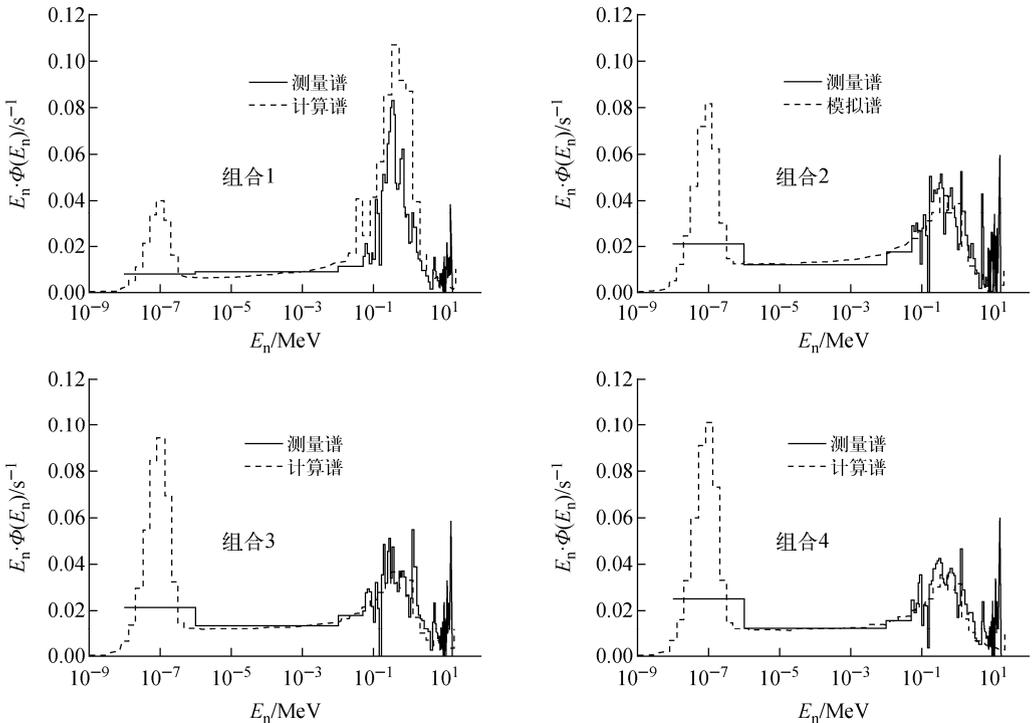


图 2 4 种中子慢化散射装置组合下的中子能谱测量结果及 MCNP 程序模拟计算结果

Fig. 2 Measurement result of neutron spectrum and simulation result of MCNP code under four neutron moderating and scattering devices

量 E_n 的注量)。从有无水层的中子能谱测量结果可看出,由于水对快中子的吸收和慢化作用,不仅增加了热中子成分,而且使高能中子得到软化。随着聚乙烯散射室长度的增加,能谱中的低能中子和热中子成分增加,即聚乙烯散射室的长度越长,热中子和中能中子的成分越多。比较各组合下的测量结果和模拟计算结果可看出,在快中子能区计算谱和测量谱的形状较为吻合,但在热能区的差异很大,有可能是该中子谱仪在热能区的“欠响应”引起的。ROSPEC 谱仪采用涂 ^{10}B 和无涂层的2个球形 ^3He 正比计数器解谱得到热能 $\sim 50\text{ keV}$ 范围内的中子能谱,该能区的能量分辨率较差。与能量在 50 keV 以上的中子相比,该能区的中子注量-周围剂量当量转换系数一般只有其几分之一或低一两个量级,因此对于模拟中子参考辐射场总的周围剂量当量影响不大。对于参考辐射场,有必要加强进一步研究,采用多种测量手段以进行比较,如基于少道解谱的中子多球谱仪。

根据中子能谱测量结果计算的中子周围剂量当量率列于表1,2台中子周围剂量当量(率)

仪在模拟中子参考辐射场下的校准因子列于表2,在 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源参考辐射场下的校准因子列于表3。综合表2和表3的校准结果可知,对于NH-1A型和FHT762型中子周围剂量当量(率)仪,在 $^{241}\text{Am-Be}$ 放射性核素中子源参考辐射场下的校准因子与模拟中子参考辐射场下的校准因子有较大差异,前者约为后者的4~5倍。由此可知,这两类中子周围剂量当量(率)仪用于反应堆工作场所中子剂量监测时,如果使用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源下测量的校准因子,可能会高估场所的中子周围剂量当量。

表1 各组合下的中子周围剂量当量率计算结果
Table 1 Calculation result of neutron ambient dose equivalent rate for each simulated combination after normalized

模拟组合	校准距离/cm	周围剂量当量率 $H * (10) / (\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1})$	周围剂量当量/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$
组合1	150	2.68	4.78
组合2	150	1.35	3.25
组合3	150	1.28	2.34
组合4	179.6	1.09	2.02

表2 两台中子周围剂量当量(率)仪在模拟中子参考辐射场下的校准因子

Table 2 Calibration factors of two instruments in simulated neutron reference field

校准距离/cm	周围剂量当量率约定真值/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$		周围剂量当量率测量值/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$		校准因子	
	NH-1A	FHT 762	NH-1A	FHT 762	NH-1A	FHT 762
150	89.87	88.47	531.5	410.5	0.17	0.22
179.6	87.49	88.95	407.6	335.3	0.21	0.27

表3 两台中子周围剂量当量(率)仪在 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源参考辐射场下的校准因子

Table 3 Calibration factors of two instruments in $^{241}\text{Am-Be}$ neutron reference field

校准距离/cm	周围剂量当量率约定真值/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$		周围剂量当量率测量值/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$		校准因子	
	NH-1A	FHT 762	NH-1A	FHT 762	NH-1A	FHT 762
100	305	312	313.6	295.2	0.97	1.06
120	212	185	188.8	165.5	1.12	1.12
140	156	122	141.8	111.2	1.10	1.10

3 结论

采用加速器中子源与以贫铀转换体和聚乙烯散射室为主体的中子慢化散射装置,在

国内首次实现了在实验室内模拟压水堆工作场所的中子参考辐射场,建立了中子剂量仪表响应校准平台,为在常规中子参考辐射场

中校准此类仪表与在实际工作场所测量偏差较大问题提供了参考。另外,反应堆工作场所个人剂量监测的准确性是人员辐射安全的重要保证,而中子注量-个人剂量当量转换系数不仅强烈依赖于入射中子能量,也随着中子入射角度有所变化,因此在后续研究中,需要进一步建立模拟中子参考辐射场对中子个人剂量计的校准方法。

参考文献:

- [1] JJG 852—2019 中子周围剂量当量(率)仪检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2019.
- [2] GB/T 14055.1—2008 中子参考辐射,第1部分:特性及产生方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [3] GRIFFITH R V, PALFALVI J, MADH-VANATH U. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes, IAEA Technical Report 318[R]. Vienna: IAEA, 1990.
- [4] ISO. ISO 12789-1:2008(E) Reference radiation fields-Simulated workplace neutron fields[S]. Geneva: ISO, 2008.
- [5] GRESSIERL V, LACOSTE V, LEBRETON L, et al. Characterisation of the IRSN canal/T400 facility producing realistic neutron fields for calibration and test purposes[J]. Radiat Prot Dosim, 2004, 110(1-4): 523-527.
- [6] TAYLOR G C, THOMAS D J, BENNETT A. A realistic field facility to simulate reactor spectra[J]. Radiat Prot Dosim, 2004, 110(1-4): 111-115.
- [7] SAEGUSA J, TANIMURA Y, YOSHIZAWA M. Conceptual design of spectrum changeable neutron calibration fields in JAERI/FRS[J]. Radiat Prot Dosim, 2004, 110(1-4): 91-95.
- [8] 刘毅娜,王志强,李春娟,等. 模拟计算压水堆工作场所模拟中子参考辐射场[J]. 辐射防护, 2013,33(2):104-108
- LIU Yina, WANG Zhiqiang, LI Chunjuan, et al. Calculation of simulated neutron reference radiation field for workplace in pressurized water reactor[J]. Radiation Protection, 2013, 33(2): 104-108(in Chinese).
- [9] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation[M] // Annals of ICRP. Geneva: ICRP, 1996.