

基于模拟现场中子场的电子式个人剂量仪 响应实验研究

刘立业^{1,2,3} 陈法国^{1,3} 李 会^{1,3} 陈红涛^{4,5} 唐智辉^{1,2,3} 李德源^{1,3} 黄政林^{1,2,3}
张 凯⁵

1(中国辐射防护研究院 太原 030006)

2(辐射安全与防护山西省重点实验室 太原 030006)

3(中核集团辐射防护技术重点实验室 太原 030006)

4(中国原子能科学研究院 北京 102413)

5(瑞昌核物理应用研究院 瑞昌 332200)

摘要 中子剂量测量因中子能量范围宽和能量响应的复杂性而面临准确性挑战;电子式中子个人剂量仪(Electronic neutron personal dosimeters, n-EPDs)在不同能谱下的响应差异显著,常用同位素中子源校准可能导致现场剂量测量偏差。为了研究中子能谱分布对n-EPDs响应的影响,利用²⁵²Cf同位素中子源、氘-氚(D-T)加速器中子源以及重水、钨、铁、石墨、聚乙烯等材料,建立了4种不同能谱分布的中子辐射场,并结合多球中子谱仪的实测能谱和蒙特卡罗计算的入射角度分布,测试了两种市售电子式中子个人剂量仪(n-EPDs)的响应差异。结果显示:在²⁵²Cf裸源参考辐射场中,多球实测能谱与标准谱主要能区的相对偏差在±10%以内;4个中子场的注量平均能量为0.12~2.00 MeV、剂量平均能量为0.75~3.65 MeV、谱平均注量-剂量转换系数为51.17~390.3 pSv·cm²;两种市售n-EPDs对4个中子场的最大响应差异分别为5.7和6.7倍。研究表明,当利用同位素中子源进行校准时,n-EPDs读数通常会高估现场实际的个人剂量当量,需要特别关注能量响应、现场能谱分布及入射方向对测量准确性的影响。

关键词 模拟现场中子场, 中子个人剂量仪, 能量响应, 中子剂量

中图分类号 TL84

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250006

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250006

Experimental study on neutron response of electronic personal dosimeters based on simulated workplace neutron field

LIU Liye^{1,2,3} CHEN Faguo^{1,3} LI Hui^{1,3} CHEN Hongtao^{4,5} TANG Zhihui^{1,2,3} LI Deyuan^{1,3}
HUANG Zhenglin^{1,2,3} ZHANG Kai⁵

1(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

2(Shanxi Key Laboratory of Radiation Safety and Protection, Taiyuan 030006, China)

3(China National Nuclear Corporation Key Laboratory of Radiation Protection Technology, Taiyuan 030006, China)

4(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

5(Ruichang Institute of Nuclear Physics Application, Ruichang 332200, China)

中子剂量监测技术研究项目(No.YY24010702)资助

第一作者: 刘立业, 男, 1978年出生, 2010年于清华大学获博士学位, 研究领域为辐射监测与防护

通信作者: 陈法国, E-mail: chenfaguo@cirp.org.cn

收稿日期: 2025-01-08, 修回日期: 2025-06-23

Supported by the Research on Neutron Dosimetry Monitoring Technology (No.YY24010702)

First author: LIU Liye, male, born in 1978, graduated from Tsinghua University with a doctoral degree in 2010, focusing on radiation measurement and protection

Corresponding author: CHEN Faguo, E-mail: chenfaguo@cirp.org.cn

Received date: 2025-01-08, revised date: 2025-06-23

Abstract [Background] Neutron dose measurement faces challenges due to the wide range of neutron energy and the complexity of energy response. The response of electronic neutron personal dosimeters (n-EPDs) varies significantly under different energy spectra, and calibration with isotope neutron sources may lead to on-site dose measurement deviations. [Purpose] This study aims to investigate the influences of neutron energy spectrum distribution and incident direction on the response of n-EPDs. [Methods] Firstly, ^{252}Cf isotope neutron source, D-T accelerator neutron source and materials such as heavy water, tungsten, iron, graphite and polyethylene, were used to establish four neutron radiation fields with different energy spectra. Then, the Bonner neutron spectrometer was employed to measure neutron energy spectra, while the incident angle distributions were calculated using Monte Carlo method. Finally, the response differences of two commercial electric personal neutron dosimeters (n-EPDs) were experimentally tested. [Results] The relative deviation between measured spectrum and standard spectrum of ^{252}Cf reference radiation field is within $\pm 10\%$ in the main energy regions. For four neutron fields, the fluence-averaged neutron energy ranges from 0.12 MeV to 2.00 MeV, the dose-averaged neutron energy ranges from 0.75 MeV to 3.65 MeV, and the spectra-averaged conversion coefficient ranges from 51.17 pSv $\cdot\text{cm}^2$ to 390.3 pSv $\cdot\text{cm}^2$. The maximum response differences of two commercial n-EPDs to four neutron fields are 5.7 and 6.7 times, respectively. [Conclusions] Results of this study indicate that when using isotope neutron sources for calibration, n-EPDs readings often overestimate the actual individual dose equivalent in workplace, hence special attentions need to be paid to the impacts of energy response, neutron energy spectrum, and incident direction on measurement accuracy.

Key words Simulated workplace neutron field, Personal neutron dosimeter, Energy response, Neutron dosimetry

由于中子剂量-注量转换系数的能量相关性高、现场中子能量范围宽(通常在 0.025 eV~20 MeV)的特点,在中子剂量测量中需要特别关注能量响应差异对测量准确性的影响。由于单能中子参考辐射场较为缺乏,实际主要利用能谱较硬的 $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf (注量平均能量分别为 4.16 MeV、2.13 MeV)等同位素辐射场来校准中子剂量仪表,导致剂量仪表的现场测量结果与实际差异较大,甚至有倍数或数量级的差异^[1-2]。例如,欧洲开展了中子/ γ 混合场中的个人剂量学评价 EVIDOS 项目,针对沸水堆、压水堆、研究堆、核燃料循环、乏燃料贮存等 14 个现场中子调查发现,常见中子场所剂量仪表的测量值与参考值之比在 0.5~1.5,而中子个人剂量仪的总体分布在 0.1~10、个别甚至更大^[3]。

为了提高中子剂量测量的准确性,目前主要有两种技术思路:一种是通过组合探测器分能区设计或能谱测量方法^[4-5],优化中子剂量仪表的本征能量响应;另一种是在实验室建立与现场中子能谱接近的模拟现场中子场、结合中子方向信息直接给出中子剂量仪表的校准因子,或者实际测量现场中子能谱、计算修正因子来校正仪表响应。

模拟现场中子场的概念最早在 20 世纪 90 年代由 Lacoste 等^[6]提出,并被纳入到了中子参考辐射场相关国际标准 ISO 12789 中^[7-8],主要在同位素或加速器中子源周围组合设置中子慢化、吸收和增殖材料来实现。例如,英国国家物理实验室(National

Physical Laboratory, NPL)利用 p-Li 源和重水来模拟气冷堆中子场^[6],中国原子能科学研究院利用 D-T 源与贫铀、铁、水和聚乙烯材料来模拟压水堆中子场^[2]。由于通用性有限,相关实验室仍在针对特定目标谱建立模拟现场中子场,并探索其模块化构建方式和可拓展性。

对于场所中子剂量测量,研发单慢化体、多探测器组合的能谱型剂量仪是当前技术发展趋势,有望在宽能量范围内实现较为一致的本征能量响应,从而适用于大部分现场测量^[9]。而对于使用逐渐增多的电子式(主动式)个人剂量仪,在宽中子能量范围内的响应一致性仍然是一个挑战;例如,典型市售 n-EPDs 对 0.025 eV~15 MeV 不同能区的响应差异最高可达 20~60 倍^[5]。本文将重水、钨、铁、石墨、聚乙烯、镅材料与 ^{252}Cf 同位素、D-T 加速器中子源相组合,获得了 4 个不同能谱的中子场,并结合多球中子谱仪的实测能谱和模拟计算的中子入射方向信息,实验测试了两种市售 n-EPDs 对不同中子谱的响应差异,以期在现场测量提供参考。

1 实验条件与对象

1.1 中子实验条件

实验用中子源分别为中国辐射防护研究院计量站的 $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf 源和瑞昌核物理应用研究院的 D-T 中子源。 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子发射率为 $2.43 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$,

^{252}Cf 为 $1.65 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ (发射率参考日期为2018年12月27日); D-T源发射率在 $10^8 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级, 根据伴随 α 粒子金硅面垒探测器的测量结果与空间立体角关系推算实际中子发射率。

利用 ^{252}Cf 裸源、直径30 cm重水球(外部包裹1 mm厚镉片)慢化 ^{252}Cf 源, 获得了两个不同能谱的同位素中子场。以国际原子能机构IAEA 403报告

中的压水堆反应堆厂房、主泵间两个现场实测中子能谱作为目标谱, 利用D-T源构建了由快中子主慢化体、中能中子调节层和热中子反射组件构成的模拟现场中子场装置^[10], 如图1所示; 主泵间模拟场采用8 cm钨/30 cm铁主慢化体、30 cm聚乙烯反射组件的组合, 反应堆厂房模拟场采用8 cm钨/10 cm铁主慢化体、5 cm石墨调节层的组合。

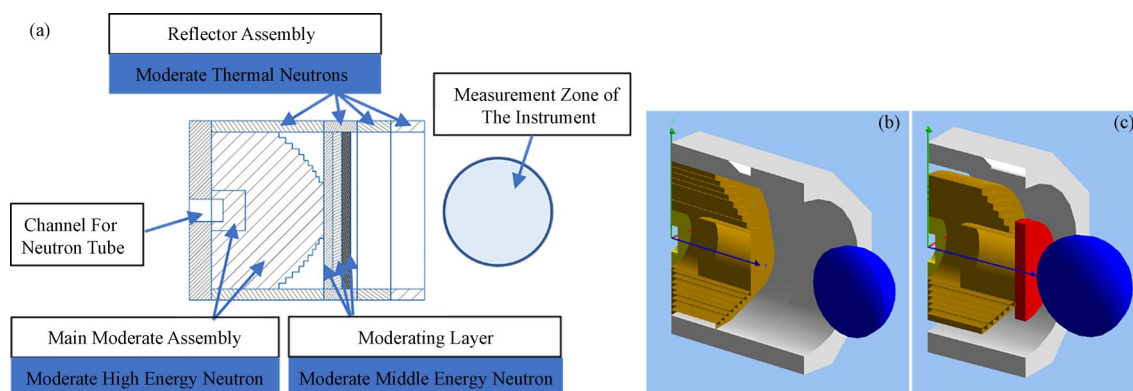


图1 基于D-T中子源的模拟现场中子场装置示意图 (a) 结构示意图, (b) 主泵间, (c) 反应堆厂房

Fig.1 Schematic diagram of simulated neutron field device based on D-T neutron source

(a) Schematic diagram, (b) Main pump room, (c) Reactor hall

1.2 测量设备与实验对象

中子能谱测量采用多球中子谱仪: SP9球形 ^3He 管直径33 mm、不锈钢壁厚0.5 mm, 内充0.405 MPa的 ^3He 和0.122 MPa的Kr; ^3He 管输出信号经放大整形后, 接入Ortec 923MCB多道采集脉冲幅度谱; 慢化球为直径7.62~30.48 cm的10个聚乙烯球。

实验对象为两种可测量中子/ γ 混合场的市售电子式个人剂量仪, 分别编号为EPD1、EPD2。EPD1利用聚乙烯和 ^6LiF 快/热中子组合转化层覆盖一个二极管来测量中子响应, 灵敏度约 $0.5 \text{ counts} \cdot \mu\text{Sv}^{-1}$ 。EPD2利用两个二极管测量中子响应, 一个覆盖塑料转化层对快中子的灵敏度约 $0.1 \text{ counts} \cdot \mu\text{Sv}^{-1}$, 另一个覆盖 ^6LiF 转化层对热/超热/中能中子的灵敏度约 $1 \text{ counts} \cdot \mu\text{Sv}^{-1}$ ^[11]。

2 中子辐射场的能谱测量

2.1 多球谱仪测量验证

利用蒙特卡罗方法模拟计算了多球谱仪对0.025 eV~20 MeV不同能区中子的响应矩阵。在实测不同慢化球下的 ^3He 管计数率后, 利用德国技术物理实验室(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)的少道解谱程序UGM 3.1和GRAVEL算法反卷积解谱得到实测谱。

基于 $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf 裸源对多球谱仪进行了实

测验验证。在距源1.5 m处, 依次测量 ^3He 裸管及10个不同直径慢化球条件下的计数率, 安装影锥后再测量相应条件下的散射中子计数, 用扣除散射后的计数率解谱并与ISO 8529-1推荐标准谱进行对比^[12]。如图2所示, 实测谱与标准谱的一致性较好, 主要能区的中子注量相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内; 考虑到多球谱仪虽无法获取中子入射方向信息但具有各向同性响应的特点, 利用注量谱与周围剂量当量转换系数的加权和 $h^*(10)$ 来表征对应能谱剂量特性的一致性, $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf 裸源实测谱与标准谱 $h^*(10)$ 的相对偏差分别为-1.35%和-1.55%。

如图3所示, 利用相同的方法测量了重水慢化 ^{252}Cf 源1.5 m处的中子能谱, 实测谱与标准谱 $h^*(10)$ 的相对偏差为-8.18%。

2.2 模拟现场中子场的能谱测量

以IAEA 403报告提供的实测谱为目标谱, 设计模拟现场中子场装置后, 基于D-T加速器中子源信息和装置结构信息计算了相应的设计谱, 并利用多球谱仪在实际构建的两个模拟现场中子场中实测了中子能谱。测量时, 同时采集D-T源伴随 α 粒子计数和 ^3He 管计数, 通过 α 计数来修正加速器束流波动对中子辐射场强度的影响。

由于模拟现场谱有效测量区域与装置之间的距离有限, 无法安装影锥来扣除实验大厅散射中子的

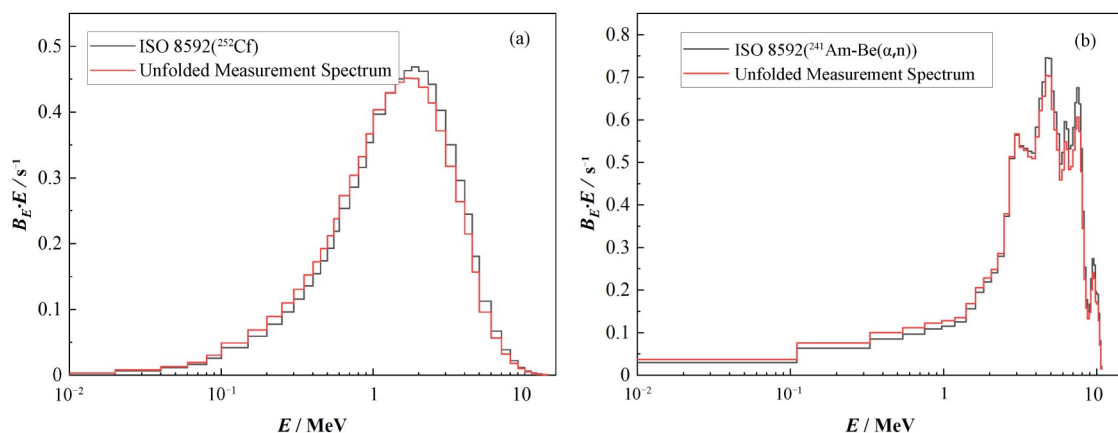


图2 ^{252}Cf 源(a)和 $^{241}\text{Am-Be}$ (b)实测谱与ISO标准能谱对比(彩图见网络版)
Fig.2 Comparison of measured neutron spectra of ^{252}Cf (a) and $^{241}\text{Am-Be}$ (b) with ISO standard spectra (color online)

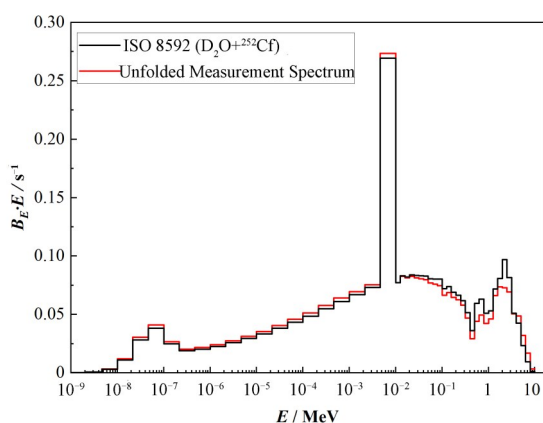


图3 重水慢化 ^{252}Cf 源的实测中子谱(彩图见网络版)
Fig.3 Measured neutron spectrum of ^{252}Cf moderated by D_2O (color online)

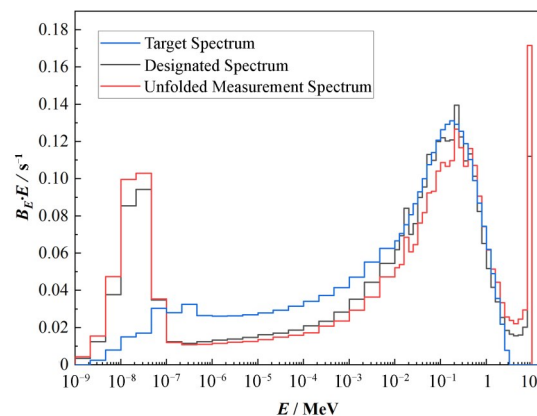


图4 反应堆厂房模拟现场中子场的测量谱(彩图见网络版)
Fig.4 Measured spectrum of neutron field for simulated reactor hall workplace (color online)

影响;为此,建立了实验大厅、模拟中子场装置、多球谱仪及辅助支架的计算模型,采用蒙特卡罗方法修正了散射中子的影响。以模拟中子场装置的设计谱作为解谱程序的预置谱,利用修正后的多球计数解谱得到了模拟现场中子谱分布。

反应堆厂房、主泵间模拟中子场的目标谱、设计谱、测量谱分别如图4、5所示;由于设计谱很难在所有能区都与目标谱相匹配,在实际应用中应该以测量谱为参考。反应堆模拟场测量谱与设计谱 $h^*(10)$ 的相对偏差为-7.78%,主泵间模拟场的为3.09%。反应堆厂房模拟谱装置的测量谱和设计谱在14 MeV能区的中子注量差异较大,主要原因是慢化结构简单、厚度小且内部存在装配间隙,快中子在未充分慢化的情况下通过装配间隙泄漏到周围,影响了测量位置的中子谱分布。

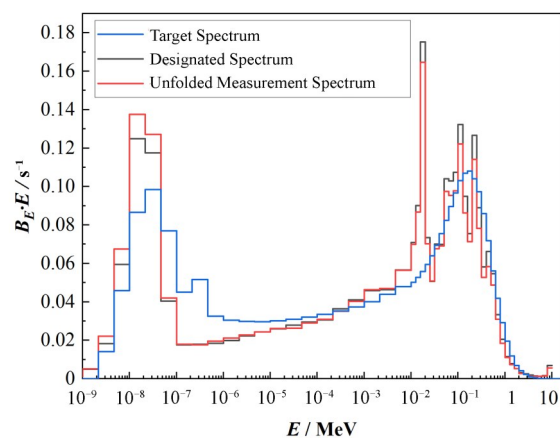


图5 主泵间模拟现场中子场的测量谱(彩图见网络版)
Fig.5 Measured spectrum of neutron field for simulated main pump room workplace (color online)

3 个人剂量仪对不同能谱中子的响应实验

3.1 实验方法与结果

将个人剂量仪放置在 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的标准水模正前方,测量了其在4种不同能谱中子的响应,如图6所示。与中子能谱测量类似,在同位素中子场下,利用影锥扣除了实验大厅散射中子对剂量仪响应的影响;在模拟现场中子场下,受空间限制未利用影锥扣除散射影响(剂量仪响应包含散射中子的贡献)。

对于可用影锥法扣除散射的两个同位素中子场,大部分中子从剂量仪的正前方入射,将实测中子谱与 0° 方向入射中子的注量-个人剂量当量转换系数的加权和 $h_p(10,0^\circ)$ 作为剂量参考值。

对于未能用影锥法扣除散射的两个D-T源模拟现场中子场,参照ISO 12789的建议模拟计算了测量位置处的中子入射方向分布;结合实测中子谱、不同入射角 α 的注量-个人剂量当量转换系数 $h_p(10,\alpha)$ 加权求和得到剂量参考值 $h_p(10)$ 。如图7所示,模拟场的入射方向主要集中在 $15^\circ \sim 60^\circ$ 锥角内,对 $h_p(10)$ 贡献占比约80%;对于主慢化体较厚且设置

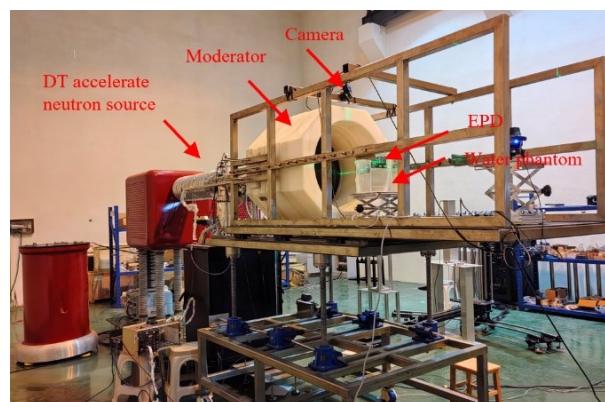


图6 中子个人剂量仪响应实验现场图(彩图见网络版)
Fig.6 Picture of neutron response measuring experiment site for personal dosimeter (color online)

了反射组件的主泵间模拟场, $30^\circ \sim 45^\circ$ 锥角内贡献最高30.6%;对于主慢化体较薄且未设置反射组件的反应堆厂房模拟场, $15^\circ \sim 30^\circ$ 锥角内贡献最高32.8%。

将个人剂量仪的个人剂量当量率测量值与参考值之比定义为响应因子;表1给出了4个中子场的平均能量、谱平均注量-个人剂量当量转换系数以及两种EPD的归一化响应因子(以 ^{252}Cf 裸源实验结果为参考)。

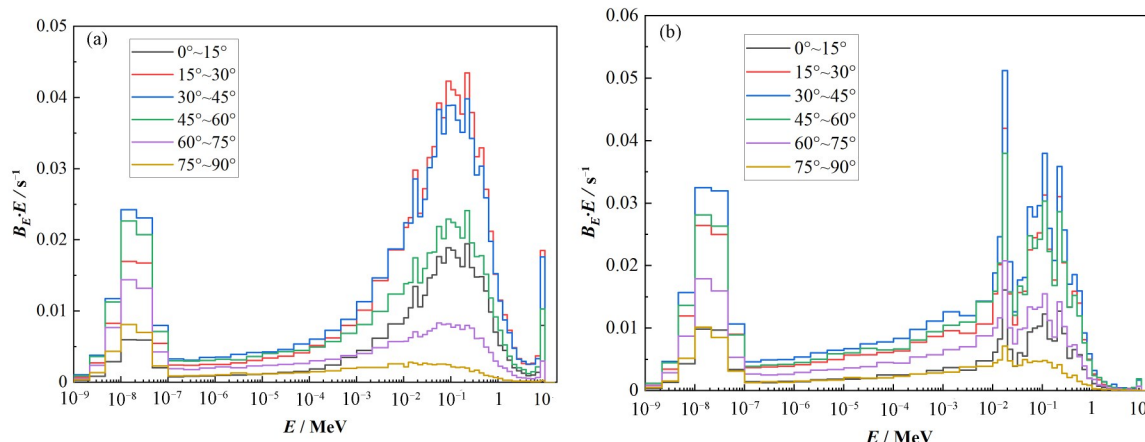


图7 反应堆厂房(a)、主泵间(b)的中子方向谱计算结果(彩图见网络版)

Fig.7 Calculated directional spectrum of simulated workplace neutron field for reactor hall (a) and pump room (b) (color online)

3.2 分析与讨论

如表1所示,4个中子场的注量平均能量 $\overline{E_\phi}$ 在0.12~2.00 MeV、剂量平均能量 $\overline{E_H}$ 在0.75~3.65 MeV、谱平均注量-剂量转换系数在51.17~390.3 pSv·cm²;对于 ^{252}Cf 裸源和D₂O慢化 ^{252}Cf 源的平均能量与转换系数,略低于中子参考辐射场相关标准中的推荐值。如图8所示,由于中子注量-剂量转换系数在0.01~1 MeV急剧增大大约40倍、在其他

能区变化较缓的特点,中子能谱分布越集中、 $\overline{E_\phi}$ 与 $\overline{E_H}$ 越接近,谱平均转换系数随 $\overline{E_\phi}$ 总体单调递增、随 $\overline{E_H}$ 并非呈现单调变化趋势。例如,由于反应堆厂房模拟场14.8 MeV高能中子成分较多,虽然 $\overline{E_H}$ 高于 ^{252}Cf 裸源中子场,但具有更小的 $\overline{E_\phi}$ 和转换系数。

以 ^{252}Cf 裸源实验结果为参考,EPD1和EPD2在其他3个中子场的归一化响应因子分别为3.0~5.7和3.4~6.7;若利用 ^{252}Cf 裸源来校准个人中子剂量仪,在

表1 个人剂量仪对不同中子能谱的归一化响应因子
Table 1 Normalized response factors of personal dosimeters to different neutron energy spectra

中子辐射场 Neutron radiation field	铜-252 ^{252}Cf	铜-252+重水慢化 $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O moderate}$	反应堆厂房模拟场 Simulated field of reactor hall	主泵间模拟场 Simulated field of pump room
注量平均能量 $\bar{E}_\phi$ / MeV Fluence-average neutron energy	2.00 (2.13 ^a)	0.47 (0.57 ^a)	1.01	0.12
剂量平均能量 $\bar{E}_H$ / MeV Dose-equivalent average neutron energy	2.17 (2.3 ^a)	2.06 (2.1 ^a)	3.65	0.75
谱平均注量-剂量转换系数 Average fluence to dose conversion factors / $\text{pSv}\cdot\text{cm}^2$	390.3 ^b (400 ^a)	95.54 ^b (105 ^a)	95.18 ^c (133.4 ^d)	51.17 ^c (59.52 ^d)
EPD1 归一化响应 EPD1 normalized response	1.00	3.3	5.7	3.0
EPD2 归一化响应 EPD2 normalized response	1.00	3.4	6.7	3.4

注：1) 中子参考辐射场相关标准中的推荐值；2) 利用影锥扣除了散射，正前方 0° 入射方向的转换系数 $h_p(10,0^\circ)$ ；3) 未利用影锥扣除散射，采用模拟计算的入射方向 α 分布与 $h_p(10,\alpha)$ 加权求和所得的转换系数 $h_p(10)$ ；4) 假设中子全部从正前方 0° 方向入射的转换系数 $h_p(10,0^\circ)$
Note: 1) Recommended value from standards related to reference neutron radiation fields; 2) Conversion factors $h_p(10,0^\circ)$ corresponding to 0° frontal incidence, with scattered neutrons excluded using a shadow cone; 3) Conversion factors $h_p(10)$ obtained by a weighted sum of the simulated incident angle distribution α and the corresponding $h_p(10,\alpha)$, without using a shadow cone to exclude scattered neutrons; 4) Conversion factors $h_p(10,0^\circ)$ assuming all neutrons are incident from the 0° frontal direction

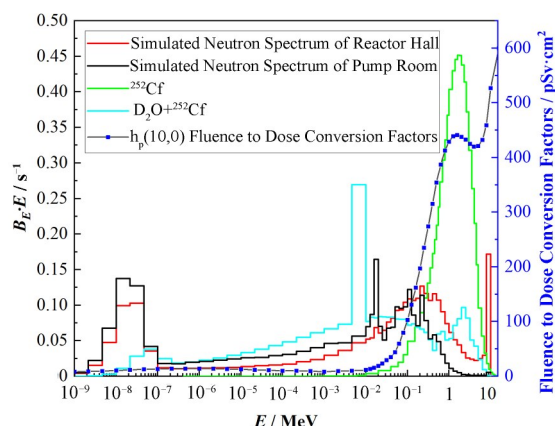


图8 中子注量-个人剂量当量转换系数的能量相关性
(彩图见网络版)

Fig.8 Energy dependence of neutron fluence to personal dose equivalent conversion coefficients (color online)

现场应用中有可能高估个人剂量当量测量结果，这与欧洲EVIDOS项目在反应堆现场电子式中子个人剂量仪会高估3倍以上的调查研究结果是相符的^[13]。中子剂量仪能量响应与现场能谱分布是造成响应差异的主要原因：一方面，硅二极管与转化层的组合探测器通常对1 keV以下能区响应较高、对0.1~8 MeV能区内欠响应（欠响应峰值在1 MeV附近）^[14-17]；另一方面， ^{252}Cf 裸源的中子能量主要分布在该类个人剂量仪的欠响应能区。与此同时，相对于场所中子剂量测量，个人剂量测量还需要考虑中子入射方向；以两个模拟现场中子场为例，在中子全部从正前方 0° 方向入射假设条件下的谱平均注量-剂量转换系数，会比考虑了入射方向分布时的分别高出40.2%和16.3%，这与 $h_p(10,\alpha)$ 随入射角增大而减小的趋势是一致的。

4 结语

本研究工作利用 ^{252}Cf 和D-T中子源在实验室构建了4种不同能谱分布的中子辐射场，并结合多球中子谱仪的实测能谱分布和模拟计算的入射角度分布，得到了测量位置处的谱平均注量-剂量转换系数以及个人剂量当量率参考值。在4个辐射场中测试了两种市售n-EPDs的响应，最大响应差异分别为5.7倍和6.7倍；以 ^{252}Cf 裸源下的响应进行校准时，会高估其他3个谱分布下的个人剂量当量。在使用n-EPDs时，要准确测量中子剂量，必须要以获取剂量仪能量响应、现场能谱分布以及入射方向分布信息为前提；若缺少上述信息，采用多种类型的剂量仪对比测量是非常必要的。

本研究工作是国内公开文献中首次利用模拟现场中子场开展的主动式中子个人剂量仪响应实验研究。在中子个人剂量仪的本征能量响应优化仍存在挑战的现状下，建立模拟现场中子场仍然是提高现场剂量测量准确性的一种必要且可行的方式。如需将模拟现场中子场提升为个人剂量仪校准用参考辐射场，有待进一步开展一系列研究工作，例如：利用含氢正比计数器或闪烁探测器测量中能中子（50 keV以上）能谱分布，弥补多球谱仪能量分辨率不足的问题；利用方向谱仪实测中子入射方向，并结合模拟计算确定中子角分布；分析次级光子对剂量当量的贡献等。

作者贡献声明 刘立业负责研究方案设计、章节撰写及修改；陈法国负责实验方案设计、章节撰写及修改；李会负责实验数据分析、结果整理；陈红涛、张凯提供加速器中子源实验条件；唐智辉提供同位素中

子源实验条件;李德源负责加速中子源实验数据获取;黄政林负责同位素中子源实验数据获取。

参考文献

- 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**(3): 164 - 168.
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**(3): 164 - 168.
- 刘毅娜, 王志强, 李春娟, 等. 压水堆工作场所模拟中子参考辐射场的建立[J]. 原子能科学技术, 2020, **54**(12): 2476 - 2480.
LIU Yina, WANG Zhiqiang, LI Chunjuan, *et al.* Establishment of simulated neutron reference radiation field for workplaces of pressurized water reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, **54**(12): 2476 - 2480.
- D'Errico F, Bartlett D, Bolognese-Milsztajn T, *et al.* Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part I: Scope and methods of the project[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, **125**(1 - 4): 275 - 280. DOI: 10.1093/rpd/ncm169.
- Bedogni R, Bortot D, Buonomo B, *et al.* First test of SP2: a novel active neutron spectrometer condensing the functionality of Bonner spheres in a single moderator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, **767**: 159 - 162. DOI: 10.1016/j.nima.2014.08.004.
- Gómez-Ros J M, Bedogni R, Domingo C. Personal neutron dosimetry: State-of-the-art and new technologies [J]. Radiation Measurements, 2023, **161**: 106908. DOI: 10.1016/j.radmeas.2023.106908.
- Lacoste V, Taylor G, Röttger S. Simulated workplace neutron fields[J]. Metrologia, 2011, **48**(6): S304 - S312. DOI: 10.1088/0026-1394/48/6/S07.
- ISO. Reference radiation fields - simulated workplace neutron fields - Part 1: Characteristics and methods of production: ISO 12789 - 1[S]. 2008.
- ISO. Reference radiation fields - simulated workplace neutron fields - Part 2: Calibration fundamentals related to the basic quantities: ISO 12789 - 2[S]. 2008.
- 谢树青, 安宁, 吴磊, 等. 中子周围剂量当量率测量技术的发展与现状[J]. 核安全, 2020, **19**(4): 83 - 87. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.04.014.
- XIE Shuqing, AN Ning, WU Lei, *et al.* Development and status of the measurement technology of neutron peripheral dose equivalent rate[J]. Nuclear Safety, 2020, **19**(4): 83 - 87. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.04.014.
- 李会, 李德源, 闫学文, 等. 基于DT中子源的模拟现场中子谱装置结构设计方法研究[J]. 辐射防护, 2023, **43**(3): 209 - 217.
LI Hui, LI Deyuan, YAN Xuewen, *et al.* Research on the module structure design of simulation workplace neutron spectrum device based on DT neutron source[J]. Radiation Protection, 2023, **43**(3): 209 - 217.
- Caresana M, Denker A, Esposito A, *et al.* Intercomparison of radiation protection instrumentation in a pulsed neutron field[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, **737**: 203 - 213. DOI: 10.1016/j.nima.2013.11.073.
- ISO. Reference neutron radiation fields- Part 1 Characteristics and methods of production: ISO 8529 - 1 [S]. 2021.
- Luszk-Bhadra M, Bolognese-Milsztajn T, Boschung M, *et al.* Summary of personal neutron dosimeter results obtained within the EVIDOS project[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, **125**(1 - 4): 293 - 299. DOI: 10.1093/rpd/ncm190.
- Jiao T Y, Li X B, Li W, *et al.* Development of personal neutron dosimeter with energy resolution ability[J]. Radiation Measurements, 2022, **156**: 106746. DOI: 10.1016/j.radmeas.2022.106746.
- 常靖峰, 张光华, 吴国忠, 等. 聚四氟乙烯固体自由基剂量计性能的研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(6): 060209. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0106.
CHANG Jingfeng, ZHANG Guanghua, WU Guozhong, *et al.* Investigating the performance of polytetrafluoroethylene solid free radical dosimeter[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(6): 060209. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0106.
- 田时海, 王和义, 陈旭, 等. $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$ 中子源实验室中子散射的模拟及验证[J]. 核技术, 2014, **37**(6): 060204. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.060204.
TIAN Shihai, WANG Heyi, CHEN Xu, *et al.* Simulation and verification of neutron scattering at $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$

- neutron laboratory[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(6): 060204. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.060204.
- 17 吕宁, 过惠平, 尚爱国, 等. 多球中子谱仪的周围剂量当量转换研究[J]. 核技术, 2018, **41**(12): 120403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120403.
- LYU Ning, GUO Huiping, SHANG Aiguo, *et al.* Research on the test, measurement and ambient dose equivalent conversion for a multisphere neutron spectrometer[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(12): 120403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120403.