

能量拓展型长中子计数器响应特性研究

李雅男¹ 李桃生² 洪 兵³ 郭浩民¹

1(杭州电子科技大学 杭州 310018)

2(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

3(合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室) 合肥 230031)

摘要 高能中子的测量在空间中子所致剂量评估和高能粒子加速器辐射防护等方面越来越重要。介绍了一种能量拓展型长中子计数器的性能研究模拟及测试结果。这种能量拓展型长中子计数器是基于De Pangher的设计,通过在长中子计数器内层慢化体嵌入金属铅和铬材料,利用中子与金属材料的(n, xn)增殖反应,改善了其高能响应。采用蒙特卡罗模拟优化了长中子计数器的结构,获得在1 keV~20 MeV、1 keV~150 MeV能量范围内最大值相对平均值偏差为12.2%响应特性曲线。利用Am-Be中子源和D-T中子源标准辐射场测试了长中子计数器的有效中心和能量响应,验证了长中子计数器在20 MeV内的能量响应。将实验结果与蒙特卡罗模拟计算相比较,结果表明:理论计算与实验在误差范围内一致。

关键词 长中子计数器, 中子增殖, 能量拓展, 注量测量

中图分类号 TL816

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060402

Simulation and experimental characterization of an energy-extended neutron long counter

LI Yanan¹ LI Taosheng² HONG Bing³ GUO Haomin¹

1(Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

2(Hefei Physical Institute of China Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

3(Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

Abstract [Background] The measurement of high-energy neutrons is becoming more and more important in the evaluation of dose caused by space neutrons and the radiation protection of particle accelerators. [Purpose] The study aims to investigate the performance of an energy-extended neutron long counter. [Methods] The energy-extended neutron long counter was designed based on De Pangher type. The (n, xn) multiplication reaction between neutrons and metallic materials was utilized to improve the high-energy response of neutron long counter by adding metal chromium and lead materials into the moderator of the neutron long counter. Then, the structure of the neutron long counter was optimized by using Monte Carlo simulation to obtain the maximum value within the energy range of 1 keV~20 MeV and 1 keV~150 MeV, respectively. Finally, the effective center and energy response of the long neutron counter were measured by Am-Be neutron source and D-T neutron source in the standard radiation field. [Results] The calculated response curve shows that the deviation of the maximum value from the average value is 12.2% in above energy range. The comparison between experimental results and the Monte Carlo simulation results

安徽省重点研究与开发计划项目(No.202104g0102007)、国家"十三五"核能开发科研项目(No.[2019]1342)资助

第一作者: 李雅男, 女, 1984年出生, 2011年于中国科学院大学获博士学位, 研究领域为辐射探测与成像技术

通信作者: 郭浩民, E-mail: ghmx@126.com

收稿日期: 2022-03-19, 修回日期: 2022-04-21

Supported by Anhui Provincial Key R&D Program (No.202104g0102007), the National 13th Five Year Plan Nuclear Energy Development and Research Project (No.[2019]1342)

First author: LI Yanan, female, born in 1984, graduated from University of Chinese Academy and Sciences with a doctoral degree in 2011, focusing on radiation detection and imaging

Corresponding author: GUO Haomin, E-mail: ghmx@126.com

Received date: 2022-03-19, revised date: 2022-04-21

shows that the theoretical calculation is consistent with the experiment within the error range. **[Conclusion]** The upper energy limit of the long neutron counter can be extended by embedding metallic lead and chromium materials in the inner polyethylene layer of the long neutron counter.

Key words Neutron long counter, Neutron multiplication, Energy extended, Fluence measurements

随着空间辐射探测与高能加速器技术的发展, 高能中子的测量在空间中子所致剂量评估和高能粒子加速器辐射防护等方面越来越重要^[1-2]。为了测量高能中子的能谱和剂量, 国内外已开展了一些高能中子能谱和剂量监测仪器的研制工作, 例如, 高能中子谱仪^[3-7]、高能雷姆仪^[8-11]、塑料闪烁体^[12-15]等。但该类辐射场中子注量监测仪器仍然缺乏, 主要存在监测器高能中子响应随能量增加急剧下降的现象, 因此该类辐射场中子注量监测问题有待进一步研究^[16]。

长中子计数器具有探测效率随中子能量变化缓慢、简单可靠、方向性好、对 γ 甄别性能好的特点, 被广泛用作中子注量测量的次级标准。比较典型的设计是 Hanson 和 De Pangher 结构^[17], 主要由位于中心的热中子灵敏探测器和外层慢化体构成, 该类型长中子计数器在 5 MeV 以上响应急剧下降, 限制了其在高能辐射场中的应用。针对不同辐射场所中子注量率测量, 国内外研究人员在提高灵敏度、便携性、效率刻度、低能响应改善等方面进行了研究。文献[18]中介绍了用大直径、高气压、5 个阵列式的 ^3He 替代 BF_3 提高探测效率。文献[19]在长中子计数器前面增加聚乙烯柱, 改善低能响应。文献[20]中介绍了一种外屏蔽层, 可组装拆卸的长中子计数器以改善便携性。文献[21]给出了两个球形 ^3He 的便携式长中子计数器设计。文献[22-24]中介绍了长中子计数器的效率校准。文献[25]介绍了用于脉冲中子产额测量的长中子计数器, 在长中子计数器前端添加聚乙烯, 使得 2.4~14 MeV 能量响应较一致。为了进一步拓宽长计数器能量响应, 获得宽能区的平坦响应特性, 在长中子计数器内层慢化体嵌入金属材料, 利用中子与金属材料的 (n, xn) 增殖反应是一种可行方案。文献[26]中在内层聚乙烯中嵌入 1 cm 厚钨层拓宽能量响应, 获得在 1 keV~20 MeV 能区范围最大偏差 7.8% 的响应特性曲线。文献[27-28]中又进一步将平响应能量上限拓展到 150 MeV, 该方案在内层慢化体内嵌入铬材料和铅材料, 获得 1 keV~150 MeV 偏差小于 12% 的响应特性曲线。本文介绍能量拓展型长中子计数器的结构参数, 给出了能量响应特性曲线模拟计算结果, 并利用 Am-Be 中子源和 D-T 中子源辐射场, 测试了长中子计数器有效中心和能量响应, 给出了测量与计算

结果的比较。

1 能量拓展型长中子计数器

1.1 原理与结构

长中子计数器主要由位于中心的热中子探测器、内层慢化体、硼吸收层、增殖层和外层慢化体组成。它利用中子与增殖层金属材料 (n, xn) 增殖反应改善高能响应。常用的热中子灵敏探测器有 ^3He 正比计数器、 BF_3 正比计数器、 ^6LiI 晶体探测器等。其中, ^{10}B 与热中子反应截面高, 输出脉冲大, 因此选用 BF_3 正比计数器作为热中子灵敏探测器。中子沿平行于计数器的长轴方向射入, 如果入射束内含有热能至高能的各种能量中子, 仅被 ^{10}B 依 $1/v$ 规律吸收的热中子探测效率高。快中子在慢化体前端面入射, 与慢化材料中的碳、氢发生弹性碰撞损失能量, 在达到热能的扩散过程中落入计数器而被探测到。而高能中子与 ^{10}B 反应截面很低, 难以慢化成热中子而趋于逃逸。因此, 在慢化体内部添加金属材料, 较高能量的中子会与金属材料发生非弹性散射, 将一部分能量传递给金属材料, 从而使高能中子能量降低并被慢化, 进而被热中子探测器记录下来, 因而提高了高能中子的响应。

常用的金属增殖材料有钨、铅、铬、铁、铜、锆和镍等。铅和钨材料在高能 Bonner 球、高能雷姆仪中较为常用, 但是由于其有较大的 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 反应截面, 将其用于长中子计数器能量补偿, 会存在 10 MeV 以上过响应现象, 不利于长中子计数器获得平坦的能量响应特性曲线。铬和铜材料 $(n, 2n)$ 反应截面较小, 不能满足能量补偿要求。综合增殖特性、加工性能以及价格等因素, 本设计中选用铅和铬两种材料组合获得平坦的能量响应特性曲线。

设计研制的长中子计数器结构示意图如图 1 所示。长中子计数器总直径 50 cm, 长 50 cm。所用 BF_3 正比计数器为不锈钢外壳, 长度 25 cm, 外径 50.8 mm, 厚 0.5 mm, 充 ^{10}B 丰度为 96% 的 BF_3 气体, 压力为 100 kPa。 BF_3 正比计数器外包裹 5 mm 厚的铅筒以增加高能中子响应, BF_3 正比计数器和铅筒外包裹长度 36 cm、半径 7.5 cm 的聚乙烯慢化体, 慢化体内均匀嵌入 12 根长度 31 cm、直径 2.2 cm 的铬棒。慢化体前端面在铅筒外围处挖有宽 5 mm、深 22 mm

空气环,以提高低能中子响应。 BF_3 正比计数器前端面安装有一个25 mm长的聚乙烯柱以降低热中子-100 keV能区中子响应,长中子计数器前端面安装有0.5 mm厚的镅片以吸收热中子,内层慢化体侧面包裹5 cm厚柔性含硼塑料,和外层慢化体组合用于屏蔽从侧面散射过来的中子。

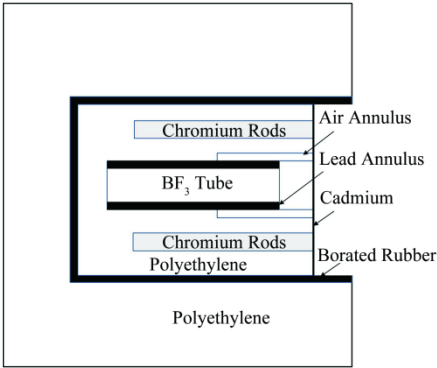


图1 能量拓展型长中子计数器原理结构示意图
Fig.1 Schematic drawing of the energy extended long counter

对长中子计数器的能量响应进行蒙特卡罗模拟。采用SuperMC软件对热中子探测器处的中子能量分布进行统计。模拟计算时,中子源定义为单能平行平面源,能量范围从热中子至150 MeV,每个量级分为10个能量点,模拟中子数为 1×10^7 ,计数统计误差小于1%。选择T4卡记录灵敏区域内的粒子径迹长度,输出结果即为 $\phi(\tilde{E}_j)$ 。再选择计数乘子卡将粒子径迹长度与热中子反应截面相乘,再进行叠加,进而得到中子探测器能量响应。对平行束或均匀单能入射中子,探测器的中子注量能量响应 $R_d(E_n)$ 表示为:

$$R_d(E_n) = \frac{M_d}{\phi(E_n)} = \phi(\tilde{E}_j) \cdot V \cdot A \cdot n \cdot \sigma_{n,\alpha}(\tilde{E}_j) \quad (1)$$

式中: M_d 为探测器的计数; $\phi(E_n)$ 为入射到探测器端面上的能量为 E_n 的中子注量; V 是 BF_3 正比计数器的有效体积; A 是源的面积; n 是原子密度; $\sigma_{n,\alpha}(\tilde{E}_j)$ 是

(n, α) 反应截面; $\tilde{E}_j \in (E_{j-1}, E_j)$ 是探测器体积内中子慢化后的能量。

计算所用材料、几何结构、尺寸、密度及原子比信息如表1所示。

图2给出了嵌入金属和未嵌入金属时长中子计数器的能量响应特性曲线。未嵌入金属情况下,将金属部分用聚乙烯填充。从图2可以看出,未嵌入金属之前,长中子计数器响应在5 MeV以上开始显著下降。嵌入金属材料后,5 MeV以上能量的中子响应有显著提升。在1 keV~20 MeV能量范围内响应均值为 1.06 cm^2 ,最大值相对平均值偏差为12.2%,标准差为0.074。在1 keV~150 MeV能量范围内响应均值为 1.05 cm^2 ,最大值相对平均值偏差为12.2%,标准差为0.072。因此,采用金属补偿的方法能够很好地改善长中子计数器的平响应特性。

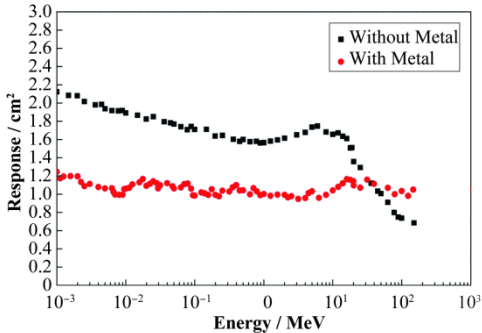


图2 未嵌入金属与嵌入金属时长中子计数器能量响应比较
Fig.2 Comparison of energy response of neutron long counter with and without embedded metal

1.2 电子学

测量系统的方框图见图3。中子与 BF_3 正比计数器中的 ^{10}B 发生核反应,反应产物在正比计数器内引起电离,经气体放大后,输出脉冲,进一步通过前置放大器输出幅度较大的脉冲,再经主放大器完成脉冲信号的成形和放大。并利用脉冲幅度分析的方法设置阈值,把不需要的 γ 信号甄别掉。电子学采用ORTEC公司的NIM插件,其中前置放大器为

表1 模拟计算中用的材料几何、尺寸、密度及原子比等信息
Table 1 Geometry, dimension, density and atomic composition of the materials used by the transport calculation

材料名称 Material	几何结构 Geometry	尺寸 Dimension	原子比 Atom ratio	密度 Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
聚乙烯 Polyethylene	柱形 Cylinder	Inner $\phi 50 \times 50 \text{ cm}$ Outer $\phi 15 \times 36 \text{ cm}$	$^{12}\text{C}:^1\text{H}=1:2$	0.951
BF_3	柱形 Cylinder	$\phi 5.08 \times 25 \text{ cm}$	$\text{B}:\text{F}=1:3$	5.58×10^{-4}
铬棒 Chromium	柱形 Cylinder	$\phi 2.2 \times 31 \text{ cm}$	$\text{Cr} (\text{nut})$	7.22
镅片 Cadmium	圆形片状 Circular piece	$\phi 14 \times 0.1 \text{ cm}$	$\text{Cd} (\text{nut})$	8.65
铅桶 Lead	环形 Annulus	0.5 cm thick	$\text{Pb} (\text{nut})$	11.35
含硼塑料 Borated rubber	环形 Annulus	0.5 cm thick	$^{12}\text{C}:^1\text{H}:^{10}\text{B}=6:4:4$	1.83

142PC,主放大器为572A,单道分析器为551A,高压电源为556,定标器为974。 BF_3 正比计数器的工作高压为920 V,单道阈值定在1 V处。图4是长中子计数器的坪特性曲线,当工作电压920 V时,用Pu-Be中子源测量的坪宽250 V,每100 V坪斜<3%。

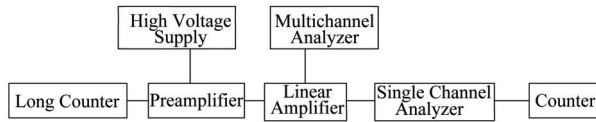


图3 电子学方框图

Fig.3 Block diagram of electronics

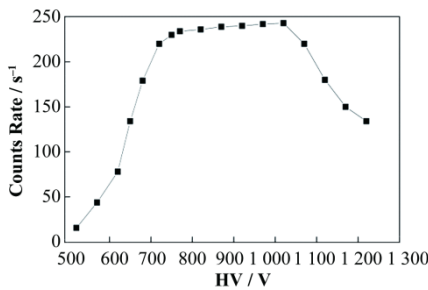


图4 BF_3 正比计数器的坪特性

Fig.4 The plateau characteristics of the BF_3 proportional counter

2 长中子计数器性能

长中子计数器实物图如图5所示。长中子计数器的有效中心、能量响应等性能测试在国防科技工业电离辐射一级计量站开展,测量长中子计数器性能标定现场如图6所示。标定测试所用的中子源为Am-Be中子源和 $^3\text{H}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 反应产生的14 MeV中子源。图5中的阴影锥置于源和长中子计数器之间,用于长中子计数器的本底测量。

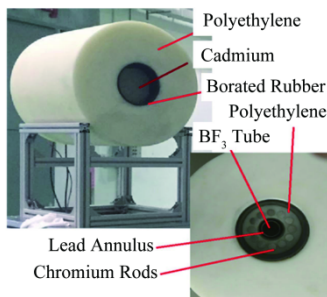


图5 研制的长中子计数器

Fig.5 The developed neutron long counter

2.1 死时间修正及空气衰减修正

死时间修正。实验过程中当计数率很高时,会导致电子学线路漏计数,需要对测量计数率进行死时间修正。修正公式为:



图6 性能参数标定现场

Fig.6 Calibration experimental setup

$$N_c = \frac{N}{1 - N\tau} \quad (2)$$

式中: N 为测量计数率, s^{-1} ; τ 为长中子计数器输出脉冲宽度, s ; N_c 为真计数率, s^{-1} 。

死时间测量类似于“双源法”,具体参考文献[29]。测量过程中固定长中子计数器和束流能量。改变束流强度,使得长中子计数器的计数率从几百 s^{-1} 增加到 $10\,000\text{ s}^{-1}$ 。共测量5个不同束流条件时的长中子计数器,用伴随粒子法作为一路束流强度监视器,监视中子强度变化。使用线性拟合函数拟合长中子器计数与束流强度值,采用线性回归方法,确定死时间为 $11.2\text{ }\mu\text{s}$ 。同时采用强流中子源照射 BF_3 长中子计数器,利用数字示波器观察长中子计数器脉冲,观察到 BF_3 长中子计数器的死时间,测量结果与以上测量结果相吻合,约为 $10\text{ }\mu\text{s}$ 。这表明,当长中子计数器计数率达到 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 时,它的计数误差达到了1%。

空气散射修正。从中子源到达探测器前端面的圆锥体内存在空气散射,这部分散射无法通过影锥测量法扣除,因此需要修正。校正方法参考ISO 8529-2^[30],用空气的反应截面计算该部分散射来实现校正。

$$N = [N_T(l) - N_s(l)] F_a(l) \quad (3)$$

式中: $N_T(l)$ 为总计数率; $N_s(l)$ 为放置阴影锥后计数率; $F_a(l)$ 为空气衰减系数。空气衰减系数主要考虑氧和氮的贡献。空气衰减因子由下式给出:

$$F_a(l, E) = \exp[\Lambda(E)] = \exp\left\{\left[3.88\sigma_N(E) + 1.04\sigma_O(E)\right]10^{-5}l\right\} \quad (4)$$

式中: l 是从源的中心到长中子计数器中心距离; σ_N 和 σ_O 是氮和氧随能量变化的总中子截面。

2.2 有效中心

长中子计数器的长度为50 cm,有效中心位置的确定对能量响应的确定非常重要。有效中心指的是长中子计数器上的 r_0 位置,对于一个点源,长中子

计数器的计数遵守距离反比关系 $1/(r+r_0)^2$ 。有效中心位置可以根据式(5)计算：

$$M(r) = \frac{k}{(r+r_0)^2} \quad (5)$$

式中： r 是点源距离长中子计数器端面距离； M 是距离为 r 时长中子计数器的计数。

长中子计数器的有效中心测量使用 Am-Be 中子源与加速器 D-T 中子源。设置源至探测器距离为 1~2 m 之间，每个位置间隔 20 cm，在每个位置处记录一段时间累计计数，将计数统计误差控制在 1% 以内，采用影锥法扣除空气、墙壁、地板和楼顶的散射。实验中，Am-Be 源的发射率是已知的，平均能量为 4.16 MeV。D-T 中子源的源强用伴随 α 粒子装置作为一路束流监视器，监视束流随时间变化。实验时，长中子计数器与中子源置于同一高度，测量数据经过死时间及空气吸收修正。做完所有校正后，对测量计数的平方根数据采用最小均方根法进行拟合，可获得长中子计数器在 Am-Be 中子源与 D-T 中子源的有效中心分别是 (7.34 ± 0.37) cm 和 (12.13 ± 0.85) cm。

同时计算了长中子计数器在不同能量点的有效中心。计算能量点选择 ISO 8529 中推荐的 10 个能

量点：2 keV、144 keV、250 keV、565 keV、1.2 MeV、2.5 MeV、2.8 MeV、5.0 MeV、14.8 MeV、19 MeV 以及 Am-Be 中子源能量点。对每个能量点，计算了 50~500 cm 之间 10 个不同的距离的响应，再根据式(5)计算出有效中心。

前期在有效中心的计算过程中，发现拟合出来的有效中心分散性很大，如图 7(a)所示，即使对于相近的能量点，有效中心却相差很大。文献[31]认为这个现象是由于蒙特卡罗软件抽样相关性造成的。在计算有效中心时，对每个能量点，蒙特卡罗模拟一个距离运行的第 i 个历史与另一个距离运行的第 i 个历史初始伪随机数相同，导致每次运行时中子从源上以相同的角度发射，入射到长中子计数器计数器前端面几乎相同的位置。为了消除每次运行使用相同的起始伪随机数导致的相关性，在计算过程中为每个距离选择不同的初始伪随机数。

图 7(b)给出了长中子计数器有效中心的模拟计算与实验结果。可以看出，有效中心计算结果分散性较小。计算结果表明，在 Am-Be 中子源和 D-T 中子源辐射场中有效中心分别为 (6.89 ± 0.11) cm 和 (11.12 ± 0.13) cm，理论计算与实验的不一致性小于 10%。还可以从计算结果看出，随着能量的增加，长中子计数器的有效中心呈上升趋势。

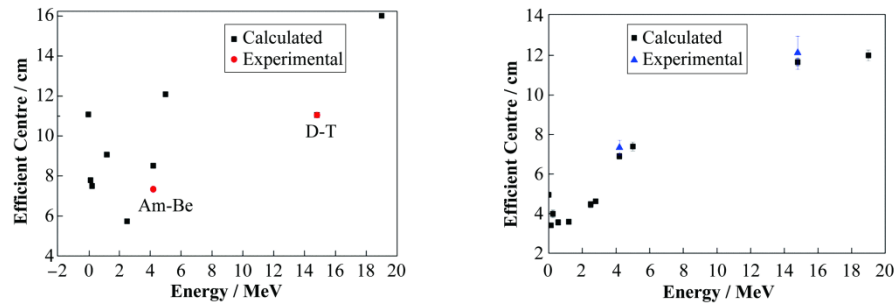


图7 长中子计数器有效中心实验结果与计算结果 (a) 初始计算,(b) 计算时消除相关性
Fig.7 The calculated and experimental efficient center for the neutron long counter
(a) Initial calculated results, (b) Calculated results after removing correlations

2.3 能量响应

长中子计数器的能量响应根据以下公式计算：

$$R = M/\varphi \quad (6)$$

式中： φ 是长中子计数器入射中子注量率； M 是测定能量点的净计数率。经过散射校正、死时间校正等因素后，根据以上公式计算出长中子计数器的能量响应。

长中子计数器能量响应的标定在 Am-Be 中子源与 D-T 中子源辐射场中进行。Am-Be 源的强度为 $2.79 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ ，源至长中子计数器前端面距离为 1.87 m，测量 10 次取平均值，每次计数时间选定为

500 s，获得了 42 518 个计数，然后，采用影锥法测量空气、墙壁、地板和楼顶的散射本底，500 s 内，共获得 11 237 个计数。D-T 源的强度为 $6.82 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ ，源至长中子计数器前端面距离为 1.82 m，测量 10 次取平均值，每次计数时间选定为 500 s，获得了 91 097 个计数，散射本底计数为 10 193 个。

实验中，长中子计数器的响应不确定度可表示为：

$$\frac{u(R)}{R} = \sqrt{\left[\frac{u(N_c)}{N_c} \right]^2 + \left[\frac{u(N_s)}{N_s} \right]^2 + \sum \left[\frac{u(s)}{s} \right]^2} \quad (7)$$

式中:计数 N_c 和 N_s 分别代表总计数和散射本底计数; $\sum \left[\frac{u(s)}{s} \right]^2$ 指其他系统不确定度,由源强、定标器、探测距离、电压稳定性等引起。 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源测量过程中由计数和散射本底计数引起的不确定度分别为0.5%和1%,系统不确定度为5%。 D-T 中子源测量过程中由计数和散射本底计数引起的不确定度分别为0.3%和1%,系统不确定度为7%。其中系统不确定度由中国原子能研究院标定给出。测量得到长中子计数器在 Am-Be 中子源辐射场中的能量响应是 1.06 cm^2 ,测量不确定度为5.1%,在 D-T 中子源辐射场中的能量响应为 1.11 cm^2 ,测量不确定度为7.1%。

图8给出了长中子计数器的能量响应曲线的计算和实验结果。计算过程中,将统计误差控制在1%以内,计算得到长中子计数器在 Am-Be 中子源辐射场的响应是 1.01 cm^2 ,在 D-T 中子源辐射场的响应是 1.12 cm^2 。图8显示,实验结果与理论计算在不确定度范围内一致。

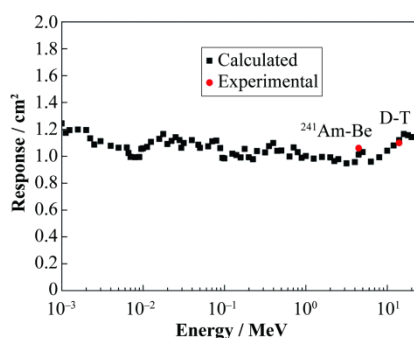


图8 长中子计数器响应与能量关系
Fig.8 The energy response of neutron long counter

3 结语

理论计算和实验结果均表明,在长中子计数器内层聚乙烯嵌入金属铅和铬材料,可以拓展长中子计数器的能量上限。本文介绍了长中子计数器的优化设计方案,获得了在 $1 \text{ keV} \sim 20 \text{ MeV}$ 、 $1 \text{ keV} \sim 150 \text{ MeV}$ 能区响应最大值相对平均值偏差为12.2%的响应特性曲线。同时验证了长中子计数器在 20 MeV 内的能量响应,长中子计数器在 Am-Be 中子源和 D-T 中子源辐射场的响应分别为 1.06 cm^2 和 1.11 cm^2 ,测量不确定度分别为5.1%和7.1%,在不确定度范围内与理论计算结果一致。

作者贡献声明 李雅男:完成了模拟设计、数据分析并撰写了论文;李桃生:提供长中子计数器标定实验方法支持;洪兵:提供实验支持;郭浩民:进行了实验

数据分析并提供基金资助。

参考文献

- Gressier V. Review of neutron calibration facilities and monitoring techniques: new needs for emerging fields[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2014, **161**(1 - 4): 27 - 36. DOI: 10.1093/rpd/nct328.
- Bilski P, Blomgren J, d'Errico F, et al. The problems associated with the monitoring of complex workplace radiation fields at European high-energy accelerators and thermonuclear fusion facilities[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, **126**(1 - 4): 491 - 496. DOI: 10.1093/rpd/ncm099.
- Wiegel B, Alevra A V, Matzke M, et al. Spectrometry using the PTB neutron multisphere spectrometer (NEMUS) at flight altitudes and at ground level[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, **476**(1 - 2): 52 - 57. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01387-0.
- 付鑫. 宽能谱多球中子谱仪的研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
FU Xin. Research and development of an extended range multi-sphere neutron spectrometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 李冠稼, 王庆斌, 郭思明, 等. 基于扩展型多球中子谱仪的中子能谱测量[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(5): 549 - 552, 556. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2016. 05.022.
LI Guanjia, WANG Qingbin, GUO Siming, et al. Measurement of neutron spectrum by extended range neutron multi-sphere spectrometers[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(5): 549 - 552, 556. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.05.022.
- 袁娇. 宽能谱多球中子谱仪的设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
YUAN Jiao. Design of an extended range multi-sphere neutron spectrometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 王攀峰. 多球中子谱仪的研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 54.
WANG Panfeng. Research and development of a neutron multi-sphere spectrometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 54.
- 陈炼, 梁福田, 王宝琛, 等. 基于球谱仪的中子剂量率仪设计[J]. 核技术, 2015, **38**(1): 010402. DOI: 10.11889/j.

- 0253-3219.2015.hjs.38.010402.
CHEN Lian, LIANG Futian, WANG Baochen, *et al.* Design of the neutron dosimeter based on neutron sphere spectrometer[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(1): 010402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010402.
- 9 Birattari C, Ferrari A, Nuccetelli C, *et al.* An extended range neutron rem counter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1990, **297**(1 - 2): 250 - 257. DOI: 10.1016/0168-9002(90)91373-J.
- 10 Olsher R H, Hsu H H, Beverding A, *et al.* WENDI: an improved neutron rem meter[J]. Health Physics, 2000, **79**(2): 170 - 181. DOI: 10.1097/00004032-200008000-00010.
- 11 文轩, 安恒, 杨生胜, 等. 空间中子探测器能量响应仿真分析及验证[J]. 核技术, 2020, **43**(12): 120401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120401.
WEN Xuan, AN Heng, YANG Shengsheng, *et al.* Simulation analysis and verification of energy response of space neutron detector[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(12): 120401. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2020. hjs. 43. 120401.
- 12 席印印. 液体闪烁体高能中子探测器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
XI Yinyin. Study of liquid scintillation detector for high energy neutrons[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- 13 王乙. 基于塑料闪烁体的空间中子探测器探头研制及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
WANG Yi. Probe development and performance studying of space neutron detector based on plastic scintillator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- 14 侯东辉, 张坤毅, 杨祎罡, 等. 基于 CLYC 闪烁体的中子能谱测量及反演方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, **47**(1): 106 - 114. DOI: 10.13700/j.bh. 1001-5965.2019.0643.
HOU Donghui, ZHANG Shenyi, YANG Yigang, *et al.* Neutron measurement and inversion based on CLYC scintillator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, **47**(1): 106 - 114. DOI: 10.13700/j.bh. 1001-5965.2019.0643.
- 15 陈军, 李玮, 李春娟, 等. 空间中子辐射及其测量技术[J]. 宇航计测技术, 2010, **30**(5): 43 - 45. DOI: 10.3969/j.issn. 1000-7202.2010.05.011.
CHEN Jun, LI Wei, LI Chunjuan, *et al.* Space neutron radiation and its measuring techniques[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurment, 2010, **30**(5): 43 - 45. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7202.2010.05.011.
- 16 Thomas D J, Nolte R, Gressier V. What is neutron metrology and why is it needed?[J]. Metrologia, 2011, **48**(6): S225 - S238. DOI: 10.1088/0026-1394/48/6/S01.
- 17 de Pangher J, Nichols L L. Precision long counter for measuring fast neutron flux density[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1966. DOI: 10.2172/4513481.
- 18 East L V, Walton R B. Polyethylene moderated ³He neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1969, **72**(2): 161 - 166. DOI: 10.1016/0029-554X(69)90152-9.
- 19 Lacoste V. Design of a new long counter for the determination of the neutron fluence reference values at the IRSN AMANDE facility[J]. Radiation Measurements, 2010, **45**(10): 1250 - 1253. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.06.026.
- 20 Park H, Kim J, Choi K O. Long counter and its application for the calibration of the neutron irradiators [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2014, **161**(1 - 4): 161 - 165. DOI: 10.1093/rpd/nct351.
- 21 Harano H, Matsumoto T, Nishiyama J, *et al.* Development of a compact flat response neutron detector[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, **58**(5): 2421 - 2425. DOI: 10.1109/TNS.2011.2163191.
- 22 陈军, 王志强, 骆海龙, 等. 0.144~14.8 MeV 能区长计数器效率校准[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2006: 160.
CHEN Jun, WANG Zhiqiang, LUO Hailong, *et al.* Efficiency calibration of long counter in 0.144~14.8 MeV region[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2006: 160.
- 23 郭洪生, 张建华, 杨高照, 等. 一种中子等探测效率探测器死时间效应研究[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(10): 1159 - 1162. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.10.012.
GUO Hongsheng, ZHANG Jianhua, YANG Gaozhao, *et al.* The study of measurements of the dead time on a detector with equal-detecting efficiency[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(10): 1159 - 1162. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.10.012.
- 24 程亮, 戴晶怡, 梅林. 长计数器探测效率的相对标定[J]. 原子能科学技术, 2008, **42**(2): 177 - 179.
CHENG Liang, DAI Jingyi, MEI Lin. Calibration of

- relative detection efficiency for neutron long counter[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(2): 177 - 179.
- 25 艾杰, 代红跃, 文延伟, 等. 用于D-D、D-T混合能量中子测量的长计数器研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(11): 1466 - 1468. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2010.11.014.
- AI Jie, DAI Hongyue, WEN Yanwei, *et al.* Study on long counters for measurement of D-D and D-T mixed neutrons [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(11): 1466 - 1468. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2010.11.014.
- 26 Li Y N, Team F, Li T S, *et al.* Response improved for neutron long counter[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2014, **164**(1 - 2): 93 - 96. DOI: 10.1093/rpd/ncu348.
- 27 Hong B, Liu C, Li T S, *et al.* Calibrations of the FDS long counter for neutron fluence measurement[J]. Nuclear Technology, 2018, **201**(2): 174 - 179. DOI: 10.1080/00295450.2017.1406270.
- 28 Mazunga M, Li T S, Li Y N, *et al.* Design of an extended range long counter using super Monte Carlo simulation [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2016, **175**(3): 413 - 417. DOI: 10.1093/rpd/ncw368.
- 29 Gressier V, Lacoste V, Martin A, *et al.* Characterization of a measurement reference standard and neutron fluence determination method in IRSN monoenergetic neutron fields[J]. Metrologia, 2014, **51**(5): 431 - 440. DOI: 10.1088/0026-1394/51/5/431.
- 30 ISO 8529-2: Reference neutron radiations-Part 2: calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field[S]. Switzerland: International Organization for Standardization Provided by IHS. 2002.
- 31 Roberts N J, Tagziria H, Thomas D J. Determination of the effective centres of the NPL long counters[R]. NPL Report DQL RN004, Teddington. 2004.