

# 中子学积分实验前级准直系统的设计

蔡兴钢<sup>1,2</sup> 聂阳波<sup>2</sup> 鲍杰<sup>2</sup> 鲁彦霞<sup>1</sup> 刘剑韬<sup>1,2</sup> 阮锡超<sup>2</sup>

1 (南华大学 衡阳 421001)

2 (中国原子能科学研究院 核数据重点实验室 北京 102413)

**摘要** 积分实验是检验评价中子核数据可靠性和精度的重要手段,效应/本底比是衡量积分实验数据品质的重要参数。为了获得更高的效应/本底比,对中国原子能科学研究院积分实验使用的前级准直系统进行了设计,该系统主要由前级准直器和阴影锥组成。利用 MCNP-4C 程序对不同条件下的本底谱进行了模拟,结果显示,加上前级准直系统之后,效应/本底比有非常明显的改善。

**关键词** 积分实验,效应/本底比,前级准直系统,MCNP-4C 程序

**中图分类号** O571.5

## 1 研究目的

利用中国原子能科学研究院的高压倍加器(CNPG)开展了一系列聚变中子学积分实验研究<sup>[1-4]</sup>,取得了较为理想的实验结果。尤其近几年来,我们利用改进的实验大厅和积分实验装置,开展了<sup>238</sup>U的积分实验,检验了CENDL3.0库中<sup>238</sup>U数据存在的一些问题,为CENDL评价库数据的改进提供了重要的实验数据。

目前的实验装置布局如图1所示。中子源为高压倍加器T(d,n)<sup>4</sup>He反应产生14.8 MeV单能脉冲中子,采用伴随粒子法监视源中子强度。为了降低大厅散射中子本底的影响,提高效应/本底比,将主探测器(BC501A型液闪探测器)置于高压倍加器大厅2 m厚的墙体准直孔之外,同时在高压倍加器大厅安放了一个简单的前级准直系统,以便进一步减少探测器的本底中子计数。图2为目前条件下实验测得的典型时间飞行谱,其中无样品时的测量谱为本底谱。由图2,在高速区(150 ns)附近,效应/本底比明显偏低,经分析认为主要是前级准直器洞口散射造成的。因此有必要重新设计一套专门的前级准直系统。

## 2 设计方案

为了解决由于目前前准直器口散射造成的高速区效应/本底比明显偏低的问题,设计了新的前准直

器口系统。该前级准直系统主要由准直器和阴影锥组成。准直器置于中子探测器和样品之间,准直进入探测器的次级中子束,只允许从样品发射出的中子在探测器对样品所张的立体角内进入探测器,阻止源中子以及其他倍加器大厅结构的散射中子进入探测器。阴影锥置于中子源与准直器之间,目的是阻止源中子与准直器材料(尤其是准直器洞口材料)发生作用,产生次级中子进入探测器而造成严重的中子本底。

### 2.1 准直器设计

由于目前高压倍加器实验大厅是一个公用设备,前级准直器只作为积分实验的必要设备,而其他用户实验时,它又是一个干扰源,必须移开。因此我们必须将准直器设计为轻便简单,易于安装、定位、拆卸的装置。总体设计思路是:内径足够小,但不能影响样品出射中子到探测器的入射路径;外径足够小,但要起到充分的屏蔽效果;长度足够短,但要充分减少源中子穿透的可能性。

#### 2.1.1 准直器材料与尺寸

根据中子能量来选择不同的慢化材料,对于T(d,n)<sup>4</sup>He反应产生的14.8 MeV快中子,首先用中重元素通过非弹性散射能很快地慢化到1 MeV以下,然后用轻核材料通过弹性散射慢化成热中子,最后通过热中子吸收材料吸收产生的热中子<sup>[5]</sup>。考虑使用以下几种材料:铁、含吸收材料的氢物质、铅。

湖南省教育厅重点基金项目(10A106)

第一作者:蔡兴钢,男,1988年出生,硕士研究生,研究领域:核技术及应用

通讯作者:聂阳波, nieyb@ciae.ac.cn; 鲁彦霞, luyanxia\_67@126.com

收稿日期:2012-08-27,修回日期:2012-10-6

第一层选择用铁<sup>[6]</sup>, 因非弹性截面比较大, 且比较经济, 45 cm 左右的铁能使 1 MeV 以上的中子降低两个量级(图 3); 第二层采用含硼聚乙烯<sup>[7]</sup>, 中子被含氢物质继续慢化到热中子能区附近, 然后靠硼吸收热中子, 厚度为 45 cm 的铁加上 60 cm 的含

硼聚乙烯, 能使 0.4 MeV 以上的中子降低 5–6 个量级(图 4); 第三层采用 10 cm 的铅来屏蔽反应过程中产生的  $\gamma$  射线。其他物质如钨等材料屏蔽效果虽好但价格贵, 不适合大量使用。

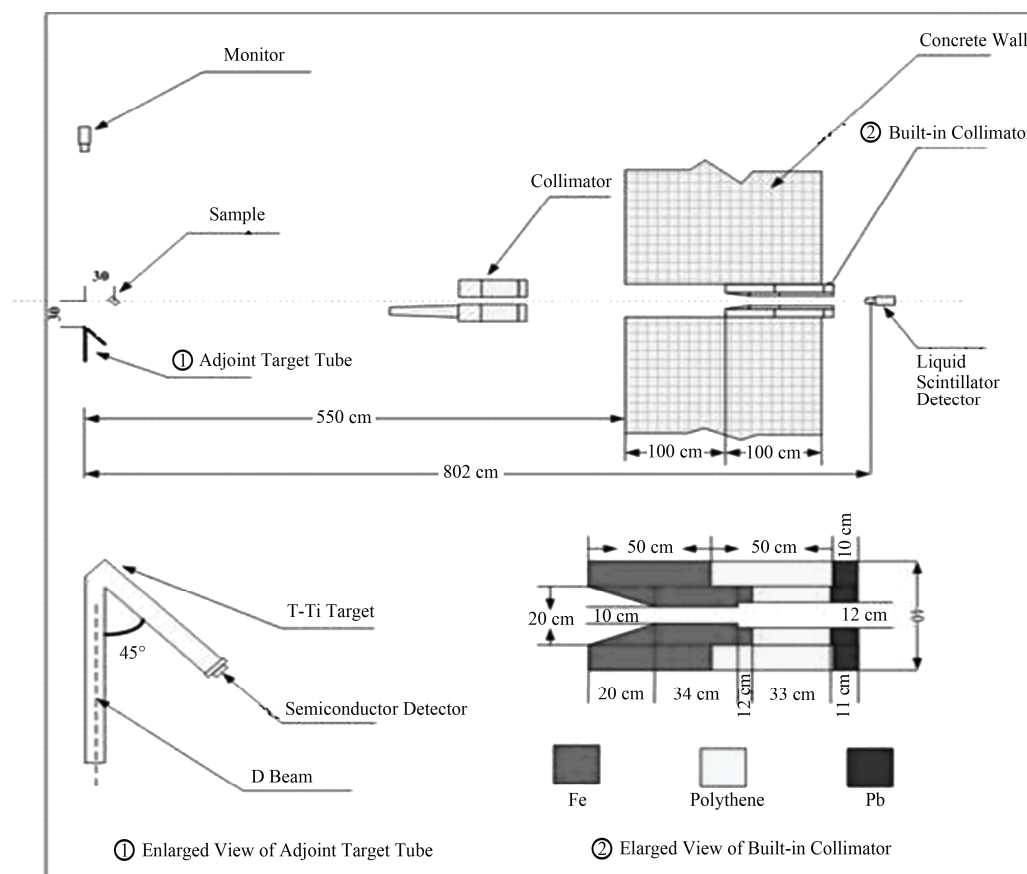


图 1 板状  $^{238}\text{U}$  样品中子泄漏谱测量布局图

Fig.1 Experimental arrangement for measuring the neutron leakage spectra from uranium slab.

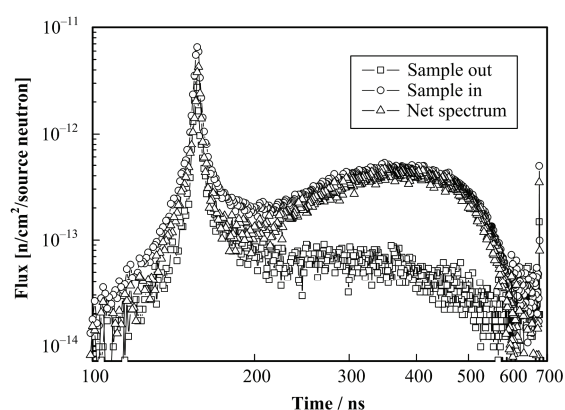


图 2 实验测量得到的有样谱、本底谱以及效应谱

Fig.2 The measured sample in, sample out and net spectrum.

### 2.1.2 准直器位置

使用准直器主要是为了尽量阻止样品之外的其他中子进入探测器，尤其是阻止源中子直接进入探测器。准直器上的大部分材料都在探测器的立体角

范围内，准直器距离中子源和样品太近会加大中子与准直器材料散射进入探测器的本底计数，因此，准直器应尽量远离中子源。

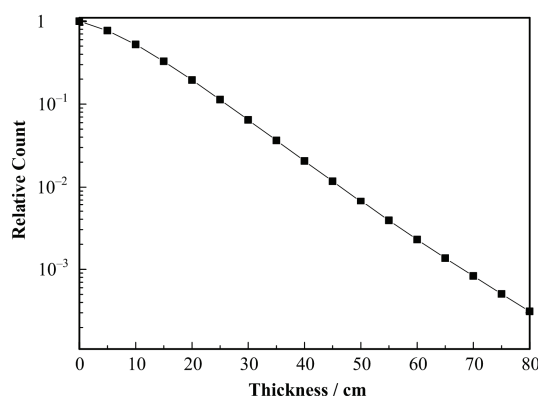


图3 1 MeV 以上中子相对计数随 Fe 厚度的变化情况

Fig.3 Attenuation of the neutrons above 1 MeV with the thickness of iron.

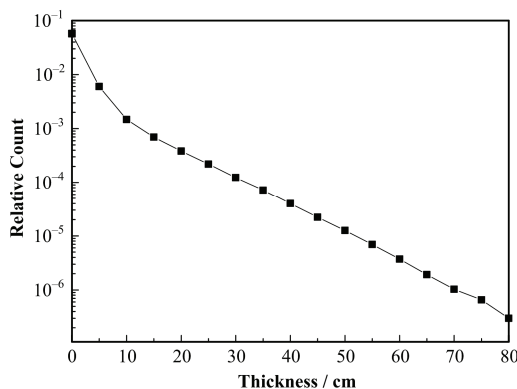


图4 0.4 MeV 以上中子相对计数随聚乙烯厚度的变化情况(穿透 45 cm 铁后)

Fig.4 Attenuation of the neutrons above 0.4 MeV with the thickness of boron loaded polyethylene (after 45 cm iron shielding).

### 2.1.3 准直孔形状

准直孔越小越能降低大厅内的散射中子本底，但太小会影响样品出射中子到探测器的路径。根据实验计划，待测样品的最大尺寸是 10 cm×10 cm×10 cm，通过 MCNP 程序进行模拟计算，假设样品为一个体中子源，改变 4 m 处准直孔径的大小(孔径外重要性设为 0)，计算 8 m 处面探测器通量(面探测器半径为 2.54 cm)，然后与不放准直器情况下面探测器通量比较(孔径外设为真空，重要性不为 0)，结果如图 5 所示。直径为 9 cm 的准直孔几乎不会影响样品到探测器的出射路径，考虑到摆放样品时可能会有误差，将准直孔的大小设定为  $\Phi 10$  cm。在 4 m 位置，墙体准直器已将探测器立体角限制在一个较小的范围内，准直器外径设置为  $\Phi 40$  cm 时完全能满足散射中子屏蔽。

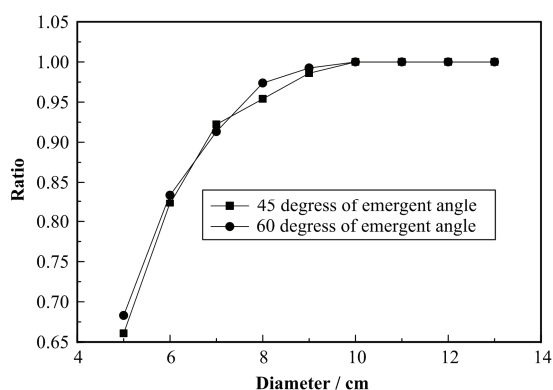


图5 有无准直器面探测器中子通量比随准直孔大小的变化  
Fig.5 Whether the collimator Plane detector neutron flux ratio changes with the size of the collimator hole.

探测器对样品所张的立体角之外的中子, 包括源中子以及样品散射中子打到准直器的前端材料上产生散射后进入探测器而造成测量中子谱发生畸变, 这些干扰效应称为孔口散射效应。将准直孔设计成双锥型, 可有效降低样品散射中子造成的畸变(图 6)。计算表明, 长度为 110 cm 的准直器在 4 m 位置, 前端内径为 10 cm, 后端内径为 17 cm 时, 能使内壁散射中子降低到最小。为进一步降低其他位置出射中子与准直孔内壁发生作用, 在准直器的前端再加上一层 15 cm 厚的圆柱铁, 其圆锥形孔径由内向外从  $\Phi 10$  cm 变化到  $\Phi 10.8$  cm。

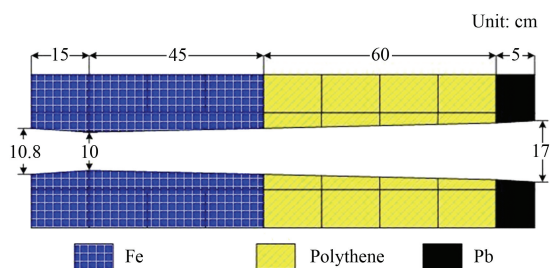


图 6 前级准直器尺寸  
Fig.6 Size of the Pre-collimator.

## 2.2 阴影锥设计

虽然准直器与中子源的距离已经很长, 但仍会有部分源中子与准直器(尤其是准直孔洞口)发生作用后进入探测器, 它是孔口散射效应的主要贡献。因此, 在准直孔洞口与中子源之间使用阴影锥是非常有必要的。

### 2.2.1 阴影锥材料与尺寸

因阴影锥的体积较小, 所以选择了比铁具有更好屏蔽效果的 Cu, 经计算, 对于 14.8 MeV 的源中子, 50 cm 厚的 Cu 能够使 1 MeV 以上的中子降低两个数量级, 而 90 cm 厚的 Cu 能够使 1 MeV 以上的中子降低五个数量级, 结果如图 7 所示。

### 2.2.2 阴影锥形状与位置

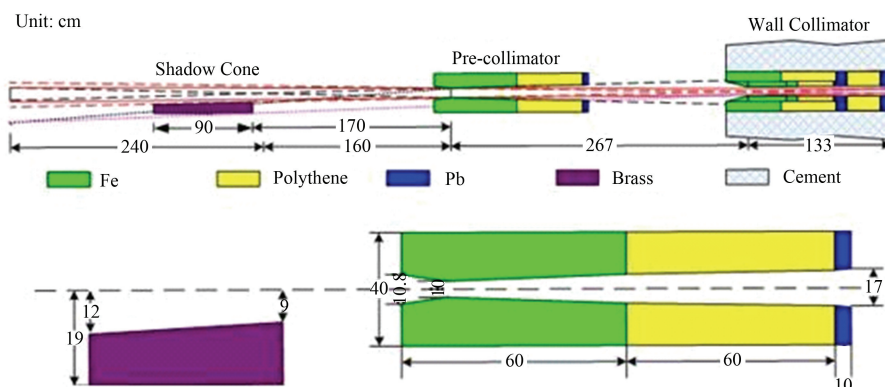


图 8 前级准直器与阴影锥  
Fig.8 The pre-collimator and the shadow cone.

阴影锥的功能是靠锥的阴影面积覆盖需要屏蔽的物体来实现。因此, 锥的设计一般是靠近源中子的前截面要求稍大于中子靶面积即覆盖中子源; 后截面决定阴影面积的大小, 它与锥的长度, 放置位置, 前级准直器大小有关。中子源与影锥距离很近, 影锥材料会有大量散射中子泄漏。阴影锥位置摆放的总体思路是: 阴影面积尽量覆盖前级准直器, 尤其是准直器洞口; 为了减少阴影锥与样品之间中子散射的影响, 两者距离应该尽量拉远; 此外必需尽量避免阴影锥上泄漏的中子直接进入探测器, 探测器所张立体角内尽量不要有阴影锥材料。

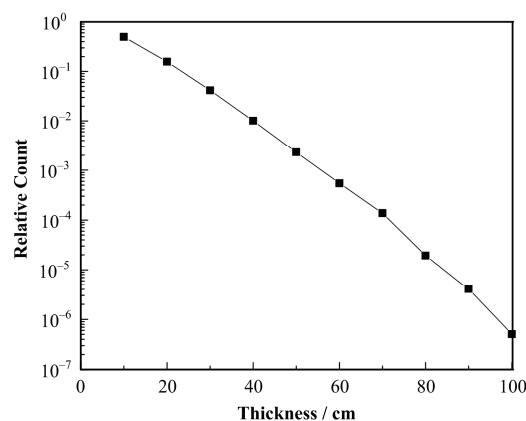


图 7 1 MeV 以上中子相对计数随 Cu 厚度的变化情况  
Fig.7 Relative count of above 1 MeV neutron changes with the Cu thickness.

## 3 准直器系统模拟结果

加上前级准直系统后, 整个实验的布局如图 8 所示。模拟程序采用的是 MCNP 4C 程序, 将源中子能谱和角分布, 探测器效率, 脉冲中子源宽度直接写入 MCNP 输入卡, 并且尽可能的对实验布局进行精确模拟, 以求得到准确的模拟结果。通过模拟有无前级准直器及影锥的情况, 得到不同条件下的泄露中子谱。

由图 9, 单独使用墙体准直器情况下, 本底谱特别高, 甚至高于  $^{238}\text{U}$  样品的泄漏中子效应谱; 使用前级准直器配合墙体准直器, 本底谱降低两个数量级以上, 但由于前级准直器洞口散射的影响, 弹性峰位置本底谱和  $^{238}\text{U}$  样品的泄漏中子效应谱相当接近; 使用前级准直器和影锥配合墙体准直器, 本底谱再降低一个数量级。此时, 弹性峰位置的中子主要是空气散射的中子。

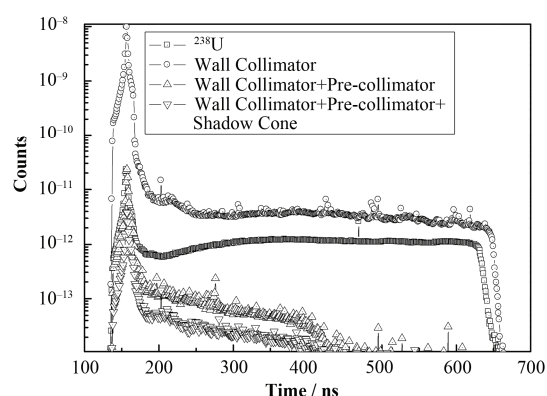


图 9 模拟得到不同条件下泄漏中子谱

Fig.9 The neutron leakage spectra under various conditions (simulated by MCNP-4C code).

## 4 结语

根据中国原子能科学研究院积分实验组目前的实验条件设计了一套前级准直系统, 考虑实际待测样品大小及位置, 设计的前级准直系统不仅能够有效地提高积分实验测量数据的效应/本底比, 而且不会影响样品出射中子直接入射到探测器的路径。通过 MC 模拟计算发现, 使用该前级准直系统配合之前的墙体准直器, 模拟结果除了弹性峰区间稍小于 10, 其他各个时间段的效应/本底比均大于 10。弹性峰位置本底主要来自空气的散射, 这对大角度中子泄漏谱测量会有一定影响(大角度弹性散射截面较低), 因此在进行大角度泄漏谱测量时, 建议使用钨进行屏蔽, 可进一步提高效应/本底比。

## 参考文献

- 1 沈冠仁. 关于聚变中子学积分实验研究[J]. 核物理动态, 1995, 12(1): 29-33  
SHEN Guanren. Integral experimental study on fusion neutronics[J]. Trends in Nuclear Physics. 1995, 12(1): 29-33
- 2 NIE Yangbo, BAO Jie. Benchmarking of evaluated nuclear data for uranium by a 14.8 MeV neutron leakage spectra experiment with slab sample[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37: 1456-1460
- 3 聂阳波, 鲍杰. 准直 D-T 中子源穿过大块板状聚乙烯样品积分实验[J]. 原子能科学技术, 待出版  
NIE Yangbo, BAO Jie. Integral experiment of large slab polyethylene samples with 14.8 MeV collimated neutron beams[J]. Atomic Energy Science and Technology, In press
- 4 聂阳波, 鲍杰. 氘氚中子源穿过聚乙烯样品泄漏中子谱的测量与模拟[J]. 原子核物理评论, 待出版  
NIE Yangbo, BAO Jie. Measurement and simulation of leakage spectra on polyethylene slab irradiated with D-T neutrons[J]. Nuclear Physics Review, In press
- 5 罗鹏, 姚泽恩. T(d,n) $^4\text{He}$  反应快中子屏蔽体优化设计的蒙特卡罗模拟[J]. 核技术, 2008, 31(10): 756-759  
LUO Peng, YAO Ze'en. M-C simulation to optimize the shielding design for a T(d,n) $^4\text{He}$  neutron source[J]. Nucl Tech, 2008, 31(10): 756-759
- 6 杨化中, 姚泽恩. 天然铁屏蔽快中子的 Monte Carlo 模拟研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 60-65  
YANG Huazhong, YAO Ze'en. Monte Carlo simulation of fast neutrons shielded by natural iron[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1997, 33(4): 60-65
- 7 朱连芳, 宋文杰. 简易中子防护准直器的研制和性能[J]. 辐射防护, 1981, 1(4): 22-28  
ZHU Lianfang, SONG Wenjie. Development of simple neutron protection collimator and its performance[J]. Radiation Protection, 1981, 1(4): 22-28

## Design of a pre-collimator system for neutronics benchmark experiment

CAI Xinggang<sup>1,2</sup> NIE Yangbo<sup>2</sup> BAO Jie<sup>2</sup> LU Yanxia<sup>1</sup> LIU Jiantao<sup>1,2</sup> RUAN Xichao<sup>2</sup>

*1 ( University of South China, Hengyang 421001, China )*

*2 ( Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China )*

**Abstract** Benchmark experiment is an important means to inspect the reliability and accuracy of the evaluated nuclear data, the effect/background ratios are the important parameters to weight the quality of experimental data. In order to obtain higher effect/background ratios, a pre-collimator system was designed for benchmark experiment. This system mainly consists of a pre-collimator and a shadow cone. The MCNP-4C code was used to simulate the background spectra under various conditions, from the results we found that with the pre-collimator system have a very marked improvement in the effect / background ratios.

**Key words** Benchmark experiment, Effect/background ratios, Pre-collimator system, MCNP-4C code

**CLC** O571.5