

# 热中子参考辐射装置参数的实验测量

杨竣凯 王平全 张辉 张健

(中国计量科学研究院 北京 100029)

**摘要** 中国计量科学研究院新建的热中子参考辐射装置采用12枚 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源,分别由高纯石墨和重水慢化形成内、外两个参考辐射场。该装置主要用于基准值的量值传递并为热中子探测器、热中子成像等研究提供实验平台。利用未包镉和包镉金箔活化进行热中子注量率和镉比测量,采用金箔单面包镉计算反射腔参考点前后方中子注量率之比;使用SP9  $^3\text{He}$ 探测器扫描方法来表征腔内均匀性。测量和计算结果表明:外场反射腔参考点处中子注量率为 $(1\,999.4\pm 48.0)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,前后中子注量率之比为1.54:1,镉比为1 433:1,竖直面内 $70\text{ cm}\times 70\text{ cm}$ 区域均匀性为1%,水平面内 $70\text{ cm}\times 35\text{ cm}$ 区域均匀性为5.2%;内场反射腔体积较小,参考点处中子注量率为 $(21\,288.3\pm 404.4)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,前后中子注量率之比为1.05:1,镉比为15.4:1,参考点所在直线均匀性为0.4%。关键参数指标可满足具有不同体积和热中子响应的探测器的检定和研究工作。

**关键词** 热中子场, 注量率, 镉比, 均匀性

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110501

## Experimental measurement of parameters of thermal neutron reference field

YANG Junkai WANG Pingquan ZHANG Hui ZHANG Jian

(National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

**Abstract** [Background] Twelve  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron sources are used in thermal neutron reference field rebuilt by National Institute of Metrology, China. The inner and outer radiation fields are formed by high-purity graphite and heavy water moderated the neutron emitted by neutron sources, respectively. [Purpose] This study aims to measure parameters of this thermal neutron reference field to guarantee the accuracy of numerical transmission and provide a platform for the research of thermal neutron detectors, thermal neutron imaging, etc. [Methods] Firstly, the average neutron capture profiles of  $^{197}\text{Au}$  were calculated by using different neutron spectra. Gold foil with and without cadmium activation method were used to obtain the precise neutron fluence rate and cadmium ratio. Then, the ratio of front and rear neutron fluence rates of reference point was determined by one side of gold foil with cadmium. Finally, the uniformity of the two fields was obtained by scanning with SP9  $^3\text{He}$  detector. [Results] Measurement results show that the neutron fluence rate of the outer field is  $(1\,999.4\pm 48.0)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  at the reference point, the ratio of the front and rear neutron fluence rates to cadmium are 1.54:1 and 1 433:1, respectively. Uniformities in  $70\text{ cm}\times 70\text{ cm}$  vertical plane and in  $70\text{ cm}\times 35\text{ cm}$  horizontal plane are 1% and 5.2%, respectively. For the inner field, the neutron fluence rate at the reference point is  $(21\,288.3\pm 404.4)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , the ratio of the front and rear neutron fluence rates to

国家重点研发计划(No.2017YFF0206205)、中国计量科学研究院基本业务费(No.AKYZZ2113)资助

第一作者: 杨竣凯, 男, 1994年出生, 2020年于中国原子能科学研究院获硕士学位, 研究领域为粒子物理与原子核物理

通信作者: 张辉, E-mail: zhanghui@nim.ac.cn

收稿日期: 2021-08-02, 修回日期: 2021-09-26

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFF0206205), Fundamental Research Funds of National Institute of Metrology, China (No.AKYZZ2113)

First author: YANG Junkai, male, born in 1994, graduated from China Institute of Atomic Energy with a master's degree in 2020, focusing on particle physics and nuclear physics

Corresponding author: ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@nim.ac.cn

Received date: 2021-08-02, revised date: 2021-09-26

cadmium are 1.05: 1 and 15.4: 1, respectively. Uniformity of the straight line at the reference point is 0.4%.

**[Conclusions]** The key parameters of thermal neutron reference field meet the requirements of verification and research work of detectors with different volume and thermal neutron response.

**Key words** Thermal neutron reference field, Fluence rate, Cadmium ratio, Uniformity

热中子参考辐射装置是中子计量和中子物理研究的重要设备<sup>[1]</sup>。热中子参考辐射是ISO 8529推荐的中子参考辐射之一<sup>[2]</sup>，不仅用于校准热中子测量仪器和中子个人剂量计，同时也是热中子注量率/标准运行必要的基础条件。通常情况下，热中子可通过石墨、重水和聚乙烯等材料慢化能量较高的中子获得<sup>[3-4]</sup>。目前，国际上除美国NIST(National Institute of Standards and Technology)使用核反应堆，英国NPL(National Physical Laboratory)和法国

IRSN(Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety)利用加速器中子源形成热中子参考辐射场外<sup>[5]</sup>，其他国家计量院均使用放射性核素中子源(表1)。为恢复热中子注量率国家基准，满足对热中子注量量传的需要，中国计量科学研究院(以下简称计量院)新建了一套由<sup>241</sup>Am-Be中子源和石墨及重水慢化体组成的热中子参考辐射装置，该装置形成两个辐射场，内场具有较高的中子注量率，外场热中子占比和均匀区均高于世界其他同类装置。

表1 世界各个国家热中子参考辐射场基本参数  
Table 1 Basic parameters of thermal neutron reference radiation field in various countries in the world

| 国家 Nation  | 实验室 Laboratory | 方法 Method  | 注量率 Fluence rate / cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 热中子占比 Thermal neutron ratio / % | 均匀性 Uniformity    |
|------------|----------------|--|--|---------------------------------|-------------------|
| 捷克 Czech   | CMI            | Am-Be/Pu-Be+石墨<br>Am-Be/Pu-Be+graphite               | 30 000   | 97.3                            | 5%(φ 40 cm)       |
| 韩国 Korea   | KRISS          | Am-Be+石墨<br>Am-Be+graphite                           | 2 000  | 94                              | 1%(30 cm×30 cm)   |
| 德国 Germany | PTB            | 中子源+石墨<br>Neutron sources+graphite                   | 70   | 98.9                            | <10%(20 cm×20 cm) |
| 俄罗斯 Russia | VNIIM          | 中子源+聚乙烯<br>Neutron sources+ polyethylene             | 1 000~10 000   | 95                              | <5%(5 cm×5 cm)    |
| 日本 Japan   | NIMJ           | 中子源+石墨<br>Neutron sources+graphite                   | 1 000  | 98.2                            | <5%(5 cm×5 cm)    |
| 中国 China   | NIM            | Am-Be+重水(内场)<br>Am-Be+D <sub>2</sub> O (inner field) | 1 999.4  | 99.9                            | 1%(70 cm×70 cm)   |
| 中国 China   |                | Am-Be+石墨(外场)<br>Am-Be+graphite (outer field)         | 21 288.3   | 93.5                            | 0.4%(55 cm)       |
| 英国 UK      | NPL            | 加速器+石墨(柱)<br>Accelerator+graphite (column)           | 200~40 000   | 81                              | 0.2%              |
| 英国 UK      |                | 加速器+石墨(洞)<br>Accelerator+graphite (hole)             | 10 <sup>4</sup> ~3×10 <sup>7</sup>                   | 99.7                            | 0.2%              |
| 法国 France  | IRSN           | 加速器+石墨<br>Accelerator+graphite                       | 4 000  | 95                              | <5%(10 cm×10 cm)  |

## 1 装置结构

装置设置有两个方向相反的热中子参考辐射场，分别为内场和外场。整体结构如图1(a)所示，主要由中子源、慢化体、反射腔以及屏蔽体组成。整个装置长3.2 m、宽2.3 m、高2.2 m，12枚<sup>241</sup>Am-Be中子源镶嵌在一块10 cm厚的石墨板上，垂直放置在装置中间，根据每枚中子源的源强，中子源布局如图1(b)所示，每一枚中子源外面包有1 cm铅用以屏

蔽<sup>241</sup>Am衰变产生(59.5 keV)和与<sup>9</sup>Be(α, n)<sup>12</sup>C(4.438 MeV)产生的γ射线<sup>[4]</sup>，同时对<sup>241</sup>Am-Be中子源发射的快中子具有一定慢化作用<sup>[6-7]</sup>。<sup>241</sup>Am-Be中子源的源强由计量院的中子源强度基准装置测量，测量结果如表2所示。12枚中子源总源强为1.406×10<sup>8</sup> s<sup>-1</sup>，12枚源强的相对标准偏差为0.4%。

外场主要慢化材料为重水，慢化体厚度为90 cm，高和宽均为72 cm。重水容器壁材料为Zr-4，厚度为3 mm，纯度为99.9%。为提高<sup>241</sup>Am-Be中子

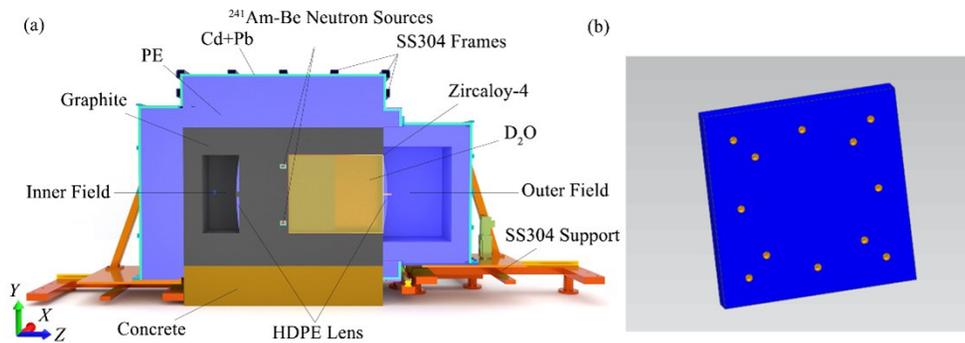


图1 热中子参考场设计剖面图(a)和中子源布局示意图(b)

Fig.1 Thermal neutron reference field profile (a) and the diagram of neutron source layout (b)

表2 12枚<sup>241</sup>Am-Be中子源测量结果  
Table 2 The measurement results of 12 <sup>241</sup>Am-Be

| 源编号<br>Source number | 测量结果<br>Measurement result | 不确定度<br>Uncertainty / % |
|----------------------|----------------------------|-------------------------|
| S020/19              | 1.168×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S013/19              | 1.168×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S017/19              | 1.166×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S021/19              | 1.172×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S019/19              | 1.166×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S016/19              | 1.169×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S015/19              | 1.165×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S014/19              | 1.172×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S018/19              | 1.174×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S023/19              | 1.178×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S024/19              | 1.180×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |
| S022/19              | 1.177×10 <sup>7</sup>      | 0.80                    |

源利用率,重水容器侧面增加了高纯石墨。受限于房间尺寸,12枚<sup>241</sup>Am-Be中子源分布区域有限,造成中间区域中子注量率较高,为此在慢化体的热中子出射面安装了一块球冠形状(球半径为220 cm,中心厚度为2.5 cm)的高密度聚乙烯(High Density Polyethylene, HDPE),有效提高了热中子分布均匀性,称为均整透镜。在热中子出射方向设置了一个长90 cm、宽90 cm、深65 cm高纯聚乙烯可移动反射腔,聚乙烯密度为0.95 g·cm<sup>-3</sup>,用来提高热中子注量率以及进一步改善热中子分布的均匀性(图2(a))。设计指标为中子注量率大于500 cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,均匀性小于1.0%(40 cm×40 cm),热快比大于1 000:1。MCNP(Monte Carlo Neutron Particle Transport Code)模拟计算结果表明:热快比大于1 400:1,分布均匀性优于1.0%(40 cm×40 cm)。

内场主要慢化材料为高纯石墨,慢化体厚度为50 cm,高和宽均为78 cm。与外场一样,石墨慢化体外围也额外增加厚度为23 cm的高纯石墨,同样在出射面安装球冠形状均整透镜,球半径为141 cm,

中心厚度为4 cm。在热中子出射方向设置了一个深27 cm、宽72 cm、高72 cm石墨反射腔(图2(b))。设计指标为中子注量率大于20 000 cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,均匀性小于0.5%(30 cm×30 cm),热快比大于15:1。MCNP计算结果表明:热快比大于15,分布均匀性优于0.1%(30 cm×30 cm)。



图2 热中子参考辐射场的外场(a)和内场(b)

Fig.2 Outer field (a) and inner field (b) of thermal neutron reference radiation field

## 2 实验测量

### 2.1 中子注量率的绝对测量

<sup>197</sup>Au(n,γ)<sup>198</sup>Au活化反应截面是国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)推荐的标准反应截面<sup>[8]</sup>,<sup>198</sup>Au半衰期为2.694 1 d,金箔活化法方法测量结果准确度较高且相对简便,从而成为确定热中子注量率的绝对测量方法之一<sup>[9-10]</sup>。

金箔活化法饱和活度和中子注量率计算见式(1)和(2):

$$A_{\text{sat}} = N_{\text{Au}} \cdot \sigma_a \cdot \varphi_n \quad (1)$$

$$A = A_{\text{sat}} \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}\right) \quad (2)$$

式中: $A_{\text{sat}}$ 为照射后金箔的饱和活度; $N_{\text{Au}}$ 为被照射金箔的<sup>197</sup>Au原子数; $\sigma_a$ 为中子活化截面; $\varphi_n$ 为中子注量率; $A$ 为照射后金箔的活度; $T_{1/2}$ 为<sup>198</sup>Au半衰期; $t$ 为辐照时间。

通过式(1)、(2)可得中子注量率为:

$$\varphi_n = A / \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}}\right) \cdot \left(\frac{m_{Au}}{M_{Au}} \cdot N_A \cdot \sigma_a\right) \cdot f_{abs} \quad (3)$$

式中： $m_{Au}$ 为金箔质量； $M_{Au}$ 金相对原子质量； $N_A$ 为阿伏伽德罗常数； $f_{abs}$ 为金箔自吸收修正系数。

金箔活化截面计算中，热中子服从  $kT=25.3$  meV 时的 Maxwellian 中子能量分布，温度为  $(293.6 \pm 10)$  K<sup>[11]</sup>，根据 MCNP 计算的内场和外场参考点处中子能谱(图 3)，从 IAEA 核评价数据库 ENDF/B-VII<sup>[12]</sup>，选取适当能量区间的截面数据代入式(4)中，可得到内场和外场 <sup>197</sup>Au 的平均中子俘获截面为  $\sigma_{a,out}=(87.15 \pm 1.48)$  b,  $\sigma_{a,in}=(87.00 \pm 1.48)$  b。

$$\sigma_a = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) \sigma(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) dE} = \frac{\sum_{E_1}^{E_2} \varphi(E) \sigma(E)}{\sum_{E_1}^{E_2} \varphi(E)} \quad (4)$$

将金箔固定在参考点处，外场参考点距离源板直线距离 130 cm，反射腔后壁 32.5 cm，其余四侧壁

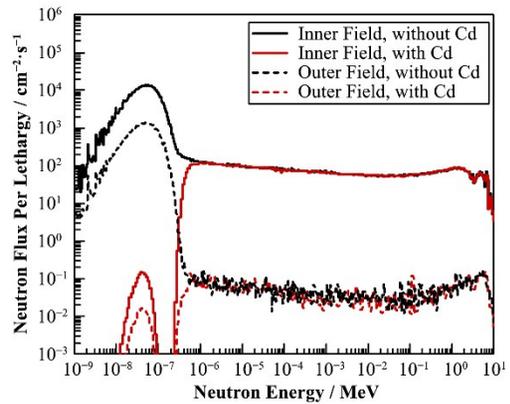


图3 MCNP 计算内场和外场参考点的中子能谱  
Fig.3 Neutron energy spectra of inner and outer field in reference points simulated by MCNP

均为 45 cm，内场参考点位于反射腔正中心，距离源板 72 cm，金箔质量、厚度等参数、修正后的辐照结果见表 3，不确定度评定见表 4。

表3 金箔辐照参数和结果  
Table 3 Irradiation parameters and results of gold foil

|   | 内场 Inner field    | 外场 Outer field               |
|---|-------------------|------------------------------|
| 质量 Mass / g                             | 0.057 70          | 0.060 86                     |
| 厚度 Thickness / μm                       | 16.92             | 18.22                        |
| 测量方法 Method                             | 4πβ-γ coincidence | 高纯锗 γ 谱仪 HPGe γ spectrometer |
| 辐照时间 Irradiation time / d               | 21.85             | 11.69                        |
| 活度 Activity / Bq                        | 315.7             | 29.9                         |
| 活度不确定度 (k=1) Activity uncertainty (k=1) | 1%                | 1.7%                         |

表4 金箔活化法不确定度分量(k=1)  
Table 4 Uncertainty components of gold foil activation method (k=1)

| 不确定度分量<br>Uncertainty component           | 来源<br>Source                     | 评定方法<br>Assessment method | 未包镉不确定度<br>Uncertainty without Cd |                       | 包镉不确定度<br>Uncertainty with Cd |                      |
|---|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|
|   |                                  |                           | 内场<br>Inner                       | 外场<br>Outer           | 内场<br>Inner                   | 外场<br>Outer          |
|   |                                  |                           | $U_m$                             | 质量<br>Mass            | A、B 合成<br>A and B             | $1.7 \times 10^{-4}$ |
| $U_{\sigma_a}$                            | 截面数据库<br>Profile database        | B类<br>Type B              | $1.7 \times 10^{-2}$              | $1.7 \times 10^{-2}$  | $1.7 \times 10^{-2}$          | $1.7 \times 10^{-2}$ |
| $U_A$                                     | 活度<br>Activity                   | B类<br>Type B              | $9 \times 10^{-3}$                | $1.75 \times 10^{-2}$ | $1.4 \times 10^{-2}$          | —                    |
| $U_N$                                     | Avogadro 常数<br>Avogadro constant | B类<br>Type B              | $4 \times 10^{-8}$                | $4 \times 10^{-8}$    | $4 \times 10^{-8}$            | $4 \times 10^{-8}$   |
| 合成标准不确定度<br>Combined standard uncertainty |                                  |                           | 1.9%                              | 2.4%                  | 2.2%                          | —                    |

由式(3)，外场、内场中子注量率分别为  $(1\ 999.4 \pm 48.0)$  cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>和  $(21\ 288.3 \pm 404.4)$  cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

## 2.2 镉比

<sup>113</sup>Cd 的热中子(镉下中子)吸收截面高达  $2 \times 10^4$  b，而大于 0.5 eV 的镉上中子吸收较少，其比值

(式(5))镉比( $R_{Cd}$ )是计算热中子纯度的重要指标。将金箔用 1 mm 厚镉完全包裹，分别测量内场和外场参考位置处镉上中子，其各自的不确定度分量见表 3。内场测量中，根据图 3 和式(4)计算可得金箔包镉之后平均中子俘获截面  $\sigma_{a,in(Cd)}=(68.99 \pm 1.17)$  b，

镉上中子注量率为 $(1\ 302.2\pm 28.6)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 镉比为15.4:1。

外场测量中, 金箔包镉后活度低于高纯锗谱仪的探测下限(0.031 Bq), 因此使用充气压力为200 kPa的 $^3\text{He}$  正比计数器(SP9, Centronic, 英国)测量外场的镉比。该计数器于2019年9月在德国PTB进行了热中子响应的刻度, 响应值为 $(3.21\pm 0.3)\text{ cm}^2$ 。探测器不包镉时, 测得参考位置处中子注量率为 $(1\ 879\pm 193.5)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 在不确定度范围内与金箔活化法吻合; 探测器全包镉时, 中子注量率为 $(1.31\pm 0.1)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 镉比为1 433:1。虽然外场的中子注量率低于内场, 但镉比较高, 表明热中子纯度更高。内场和外场镉比测量结果均与MCNP模拟计算相符。

$$R_{\text{Cd}} = \frac{\varphi_{<0.5\text{eV}}}{\varphi_{>0.5\text{eV}}} = \frac{(\varphi_{\text{n}} - \varphi_{>0.5\text{eV}})}{\varphi_{>0.5\text{eV}}} \quad (5)$$

式中: $R_{\text{Cd}}$ 为镉比; $\varphi_{<0.5\text{eV}}$ 和 $\varphi_{>0.5\text{eV}}$ 分别为镉下和镉上中子注量率, $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 2.3 中子注量率前后分布

通过金箔单面包镉来确定反射腔参考点处前后中子注量率贡献比。将两片金箔分别贴在镉片两侧, 金箔面中子与入射方向垂直, 金箔参数和测量结果见表5, 不确定度评定见表6。表中“前”“后”分别表示金箔面正对和背对入射中子方向。计算可得, 内场和外场反射腔参考点前后中子注量率比值分别为1.05和1.54。相比于内场, 外场参考点处, 前方入射的中子注量率占比更高, 这可能是由于外场中子热化比更高, 其反射腔聚乙烯壁中所含的H对热中子吸收截面是C(石墨组成元素)的86倍<sup>[4,11]</sup>, 且外场反射腔体积更大, 因此从反射腔后面散射中子数较少。内、外场参考点处前后中子注量率之和分别为 $(21\ 842.5\pm 415.0)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $(2\ 075.5\pm 60.2)\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 略高于绝对测量值2.6%和3.8%。可能的原因主要有两个: 1) 金箔与镉片之间有间隙, 会有少量中子进入并活化金箔, 使中子注量率值增加; 2) 半包镉时, 由于金箔厚度变为绝对测量的两倍, 侧面接收中子数增多, 使注量率之和增大。

表5 金箔单面包镉辐照参数和结果

Table 5 Irradiation parameters and results of the gold foil half wrapped by cadmium

| 辐照参数 Irradiation parameters                    | 内前 Inner front        | 内后 Inner rear         | 外前 Outer front        | 外后 Outer rear         |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 质量 Mass / g                                    | 0.058 53              | 0.063 24              | 0.057 7               | 0.060 7               |
| 厚度 Thickness / $\mu\text{m}$                   | 17.08                 | 18.26                 | 17.02                 | 18.36                 |
| 测量方法 Method                                    | $\gamma$ spectrometer | $\gamma$ spectrometer | $\gamma$ spectrometer | $\gamma$ spectrometer |
| 辐照时间 Irradiation time / d                      | 6.83                  | 6.83                  | 12                    | 11.13                 |
| 活度 Activity / Bq                               | 112                   | 119                   | 17.7                  | 11.4                  |
| 活度不确定度( $k=1$ ) Activity uncertainty ( $k=1$ ) | 1%                    | 1%                    | 1.2%                  | 1.2%                  |

表6 金箔半包镉不确定度分量( $k=1$ )

Table 6 Uncertainty component of gold foil half wrapped by cadmium ( $k=1$ )

| 不确定度分量<br>Uncertainty components          | 来源<br>Source                     | 评定方法<br>Assessment<br>method | 半包镉不确定度 One side of gold foil with cadmium |                     |                     |                     |
|---|----------------------------------|------------------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|
|   |                                  |                              | 外前<br>Outer front                          | 外后<br>Outer rear    | 内前<br>Inner front   | 内后<br>Inner rear    |
| $U_{\text{m}}$                            | 质量<br>Mass                       | A、B合成<br>A and B             | $1.7\times 10^{-4}$                        | $1.6\times 10^{-4}$ | $1.7\times 10^{-4}$ | $1.6\times 10^{-4}$ |
| $U_{\text{oa}}$                           | 截面<br>Profile                    | B类<br>Type B                 | $1.7\times 10^{-2}$                        | $1.7\times 10^{-2}$ | $1.7\times 10^{-2}$ | $1.7\times 10^{-2}$ |
| $U_{\text{A}}$                            | 活度<br>Activity                   | B类<br>Type B                 | $1.2\times 10^{-2}$                        | $1.1\times 10^{-2}$ | $9.5\times 10^{-3}$ | $9.5\times 10^{-3}$ |
| $U_{\text{N}}$                            | Avogadro 常数<br>Avogadro constant | B类<br>Type B                 | $4\times 10^{-8}$                          | $4\times 10^{-8}$   | $4\times 10^{-8}$   | $4\times 10^{-8}$   |
| 合成标准不确定度<br>Combined standard uncertainty |                                  |                              | 2.1%                                       | 2.0%                | 1.9%                | 1.9%                |

### 2.4 中子场均匀性

均匀性用来表征场的某一物理量在一定范围内的均匀程度, 热中子分布均匀性是热中子参考辐射

场重要参数之一, 均匀区的尺寸决定适用的探测器尺寸大小, 均匀区和均匀度越大, 中子场可覆盖的探测器尺寸越大, 在检测大灵敏区探测器时(如用于反应堆周围的裂变电离室), 结果准确度也更高。利用

SP9  $^3\text{He}$  探测器进行热中子场均匀性扫描测量,外场以参考点为原点,测量所在水平面和竖直面的均匀性,各方向测量间隔为 5 cm,通过式(6)计算两个面的中子注量率均匀性。由于垂直平面和中子入射平面均为上下和左右对称结构,因此仅测量垂直平面 1/4 象限即可判断整个平面的注量率分布。测量结果如图 4(a)所示,竖直面上,均匀性在 35 cm×35 cm (全平面即为 70 cm×70 cm) 面积内为 1%,注量率变化仅为-0.12%~3.8%,表明透镜对中子注量率均整效果显著,竖直面均匀性较好。但中心和顶角处相比于其他位置注量率仍略有降低,中心位置变化是由于聚乙烯透镜中心较厚,对中子吸收较多导致;而

顶角处则是由于源的布局使该位置初始注量率较少。水平面(图 4(b))的均匀性在 30 cm×30 cm 面积内为 1.2%,在 70 cm×35 cm 范围内为 5.2%,注量率变化范围为-4%~26.7%。从图 4 可以明显看出,靠近反射腔后壁角落处中子注量率明显升高,这是由于入射中子到达后壁聚乙烯时会发生散射,而内角落处中子更容易在两块聚乙烯壁上发生多次散射,造成该范围内注量率增大。

$$M = \frac{S}{\bar{X}} \quad (6)$$

式中: $M$ 为热中子场均匀性; $S$ 为测量面积内中子注量率标准差; $\bar{X}$ 为中子注量率均值。

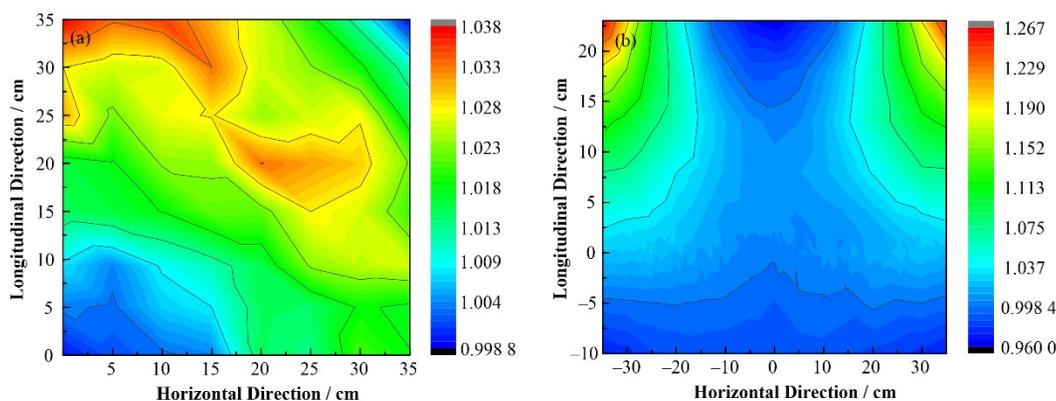


图4 外场参考点所在竖直平面(a)和水平平面(b)归一化注量率

Fig.4 Normalized fluence rate of reference point on vertical plane (a) and horizontal plane (b) in outer field

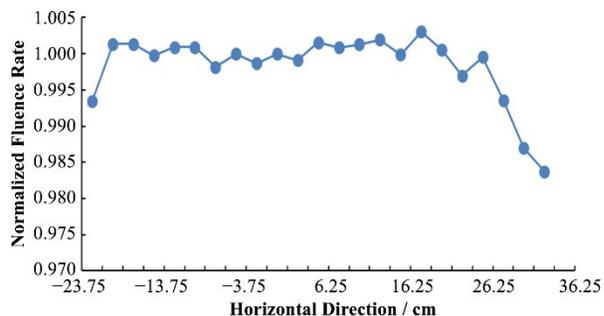


图5 内场参考点所在水平线归一化注量率

Fig.5 Normalized fluence rate of reference field on the horizontal line in inner field

内场由于反射腔探测器入口尺寸的限制(图 2 (b)内场圆形入口处),仅测量参考点所在的水平直线的中子注量率均匀性(图 5),且该水平线位于反射腔中心。该直线范围内中子注量率均匀性为 0.4%,变化范围为-1.6%~0.3%,内场由于反射腔体积较小,因此经过反射使腔内中子注量率相比外场更加均匀和稳定。但两边中子注量率略有下降,这仍然是由于源的布局导致边缘处中子注量率较低;而右侧(-32.5 cm)注量率下降较多则可能是由于反

射腔入口处少量中子泄漏导致。

### 3 结语

中国计量科学研究院利用 12 枚  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源,并用重水和高纯石墨做慢化体,形成两个具有不同中子注量率和辐比的参考辐射场,各项参数均满足设计指标的要求。此外,由于反射腔和均整透镜的设计,使中子场具有较高均匀性和热中子占比,参数指标均高于世界同类装置。外场反射腔参考点处中子注量率为  $(1\,999.4 \pm 48.0) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,具有较高的辐比(1 433:1)和较大的均匀区(70 cm×70 cm, 1%),因此适用于大体积,高灵敏度探测器的测量和研究;内场反射腔参考点处中子注量率为  $(21\,288.3 \pm 404.4) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,辐比(15.4:1)和均匀区较小(55 cm, 0.4%),更适用于较低灵敏度和小体积探测器的测量和研究。由于反射腔内形成的是封闭中子场,当有探测器或其他物体放入时,会产生一定的扰动,因此未来需要对该问题做更深入的研究。

### 参考文献

1 陈常茂, 谢建伦, 宋书绶, 等. 多球中子探测器能量响应

- 特性的研究[J]. 辐射防护, 1983, **3**(1): 14 - 25.
- CHEN Changmao, XIE Jianlun, SONG Shushou, *et al.* A study of energy response for multisphere neutron detectors [J]. Radialization Protection, 1983, **3**(1): 14 - 25.
- 2 ISO 8529. 1-2000 reference neutron radiations-part 1: characteristics and method of production[S]. 2001.
- 3 Irazola L, Praena J, Fernández B, *et al.* Using a Tandem Pelletron accelerator to produce a thermal neutron beam for detector testing purposes[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, **107**: 330 - 334. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.11.020.
- 4 丁大剑, 叶春堂, 赵志祥. 中子物理学——原理、方法与应用上下册[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
- DING Dajian, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang, *et al.* Neutron physics—principles, methods and applications volume I and II [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001.
- 5 National Physical Laboratory. Thermal neutron fluence and dose standards[OL]. 2021.8. <https://www.npl.co.uk/products-services/neutron/thermal-production>.
- 6 韩毅, 陈法国, 沈华亚. 中子屏蔽材料研究现状[C]//中国力学大会摘要集. 上海交通大学: 中国力学学会, 2015: 1.
- HAN Yi, CHEN Faguo, SHEN Huaya. Investigation of the research status of neutron shielding materials[C]// Chinese Mechanics Conference, Shanghai Jiao Tong University. Shanghai Jiao Tong University: Chinese Mechanics Conference, 2015: 1.
- 7 Le T N, Hoang S M T, Nguyen Q N, *et al.* Evaluation of the calibration factors of neutron dose rate meters in a  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron field[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(9): 133. DOI: 10.1007/s41365-019-0654-7.
- 8 包宗渝, 岳骞, 陈军, 等. 热中子参考辐射场[J]. 原子能科学技术, 1999, **33**(6): 510 - 514.
- BAO Zongyu, YUE Qian, CHEN Jun, *et al.* The neutron reference radiation field at the thermal energy region[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1999, **33**(6): 510 - 514.
- 9 于青玉, 刘书焕, 仲云红, 等.  $^{235}\text{U}$ 裂变电离室法及金箔活化法测量热中子注量率的不确定度分析[J]. 原子能科学技术, 2008, **42**(3): 233 - 238.
- YU Qingyu, LIU Shuhuan, ZHONG Yunhong, *et al.* Uncertainty analysis of measuring thermal neutron fluence rate by using  $^{235}\text{U}$  fission ionization chamber and gold foil-activation methods[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(3): 233 - 238.
- 10 陈朝阳, 巴维真, 何承发. 热中子注量率测量方法研究[J]. 核技术, 2004, **27**(2): 104 - 107.
- CHEN Zhaoyang, BA Weizhen, HE Chengfa. Study on measuring method of thermal neutron fluence rate[J]. Nuclear Techniques, 2004, **27**(2): 104 - 107.
- 11 Luszik-Bhadra M, Reginatto M, Wershofen H, *et al.* New PTB thermal neutron calibration facility: first results[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2014, **161**(1 - 4): 352 - 356. DOI: 10.1093/rpd/nct354.
- 12 <https://www.nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=9017305&req=162&PenSectID=13655316>, 2021, 8.