



## 氧化镁中子过滤器研究

苏晓斌 侯龙 刘世龙 杨毅 王琦

### Research on MgO as a Neutron Filter

SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, YANG Yi, WANG Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021080>

### 引用格式:

苏晓斌, 侯龙, 刘世龙, 杨毅, 王琦. 氧化镁中子过滤器研究[J]. *原子核物理评论*, 2022, 39(2):195–200. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021080

SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, YANG Yi, WANG Qi. Research on MgO as a Neutron Filter[J]. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(2):195–200. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021080

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al材料中子吸收性能检测设备研制](#)

Research on B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al Material Neutron Absorption Testing Equipment

原子核物理评论. 2021, 38(3): 283–292 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020071>

#### [B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al材料中子吸收性能检测技术研究](#)

Study on Neutron Absorption Testing Technology of B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al Material

原子核物理评论. 2019, 36(4): 462–470 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.462>

#### [Gamma全吸收型BaF<sub>2</sub>探测装置中子屏蔽体与吸收体的研究](#)

Study of Neutron Shield and Absorber for Gamma Total Absorption Facility

原子核物理评论. 2020, 37(3): 771–776 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC30>

#### [中国先进研究堆中子科学平台发展现状及展望](#)

Current Status and Future Prospect of Neutron Facilities at China Advanced Research Reactor

原子核物理评论. 2020, 37(3): 364–376 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC36>

#### [低本底液闪中子探测器的材料测试研究](#)

Study of Material used in Liquid Scintillator Detector with Low Background

原子核物理评论. 2017, 34(3): 604–610 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.604>

#### [主动中子多重性铀质量测量模拟研究](#)

Simulation of Uranium Mass Measurement Based on Active Neutron Multiplicity

原子核物理评论. 2019, 36(2): 266–271 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.266>

文章编号: 1007-4627(2022)02-0195-06

# 氧化镁中子过滤器研究

苏晓斌, 侯龙, 刘世龙, 杨毅, 王琦

(中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413)

**摘要:** 核电厂反应堆乏燃料水池格架材料在生产使用过程中需要对其子吸收性能进行监测和检测, 针对这两方面需求, 研制了乏燃料水池格架  $B_4C\_Al$  材料的中子吸收性能检测设备。为了降低检测过程中超热中子本底的影响, 考虑采用氧化镁超热中子过滤器滤除超热中子。对 10 和 5 cm 氧化镁单晶的中子透射率与宏观总截面进行了理论计算, 对慢化体表面中子成分进行蒙特卡罗模拟计算并开展实验测量。实验结果表明, 10 cm 氧化镁对采用 8 cm 聚乙烯慢化后的  $^{252}Cf$  中子源的中子透射率为 60.16%, 相对辐比值比未加 10 cm 氧化镁时提高了 93.85%, 证明常温下采用氧化镁单晶做  $B_4C\_Al$  检测装置的超热中子过滤器是可行的。

**关键词:** 氧化镁; 中子过滤器; 中子吸收材料

**中图分类号:** TL816.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.39.2021080

## 1 引言

乏燃料贮存水池是从核岛卸载的乏燃料运输至后处理厂之前的中间储存场所, 是核电厂的重要组成部分。乏燃料贮存采用固定式中子吸收材料作为临界控制措施, 其有效性直接影响着乏燃料的安全, 通常需要在乏燃料水池中悬挂与贮存格架同种中子吸收材料的监督样片, 定期检查样片的中子吸收性能, 实现对乏燃料水池中子吸收材料的可靠性评估。另外, 在贮存格架的生产过程中, 也需要对其中子吸收性能进行检测。中国原子能科学研究院核数据重点实验室研制的国内首台  $B_4C\_Al$  材料中子吸收性能检测设备<sup>[1-2]</sup>, 在评估核电厂反应堆乏燃料水池的安全性方面发挥了重要作用。

为了提高该设备的检测精度, 有效地降低能量高于 1 eV 的中子本底, 提高热中子比例, 考虑在检测设备锂玻璃探测器前端采用超热中子过滤器。超热中子过滤器利用的是单晶材料对热中子能区总截面较小而对能量高于 1 eV 的中子总截面较高的原理实现对热中子的过滤性能。通常用作超热中子过滤器的材料有铍<sup>[3]</sup>、蓝宝石<sup>[4-5]</sup>、硅、铜、石英、铅<sup>[6]</sup>、氧化镁、氟化镁<sup>[7]</sup>等单晶材料, 在能量大于 1 eV 以上的中子能区, 上述材料的中子总截面大约在几个靶左右, 而在能量小于 0.1 eV 的热中子能区截面下降很多, 因为伴随中子能量的下降, 布拉格散射作用消失, 同时热漫散射截面也减少。国际上很多人致力于中子过滤器的研究<sup>[8]</sup>, 本文

将以氧化镁材料为例对超热中子过滤器进行研究。

氧化镁单晶作为超热中子过滤器最佳工作温度为 77 K, 因为其在液氮温度下工作可降低单声子散射, 其对超热中子的过滤性能优于常温状态。温度为 300 K 的时候 10 cm 氧化镁对快中子透射率非常低, 对于大于 1 eV 的中子, 透射率小于 5%, 但是对于小于 0.025 eV 的中子(典型热中子, 波长 0.18 nm)透射率约为 75%。

使用表面为特定晶面的单晶作为超热中子过滤器材料, 入射束在穿过晶体过程中布拉格散射的贡献是有限的, 并且在计算中可以全面考虑。如果是多晶材料, 布拉格散射的贡献很大, 会导致热中子损失过多。而且, 很多单晶材料比如氧化镁、硅、铍等参数明确, 生长技术成熟。厚度对信噪比影响非常大, 所以需要选择最佳厚度。厚度与透射率的关系也可以简单看成线性关系。

中子与过滤器作用时其衰减有多方面的因素。对于波长大于 0.4 nm 的中子, 主要的损失来自核吸收、单声子散射和布拉格散射的作用。布拉格散射造成的损失, 只对一些特定波长起作用。波长小于 0.4 nm 中子的损失, 主要因为核吸收和多声子散射的作用, 单声子散射和布拉格散射的贡献在此能区可以忽略。

## 2 氧化镁中子透射率理论计算

根据国际上发表的对氧化镁单晶中子过滤器研究工作<sup>[9-11]</sup>, 氧化镁单晶的中子总截面可以表示为

收稿日期: 2021-10-26; 修改日期: 2022-01-30

作者简介: 苏晓斌(1980-), 女(满族), 辽宁辽阳人, 副研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: su\_bin\_2001@163.com

$$\sigma = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{tds}} + \sigma_{\text{Bragg}}, \quad (1)$$

式中： $\sigma$ 为中子总截面； $\sigma_{\text{abs}}$ 为吸收截面； $\sigma_{\text{tds}}$ 为热漫散射截面； $\sigma_{\text{Bragg}}$ 为布拉格散射截面。

在  $10^{-4} \text{ eV} < E < 10 \text{ eV}$  能区  $\sigma_{\text{abs}}$  正比于  $E^{-1/2}$ ，可用下列方程描述：

$$\sigma_{\text{abs}} = C_1 E^{-1/2}, \quad (2)$$

式中： $C_1$ 为常数； $E$ 为中子能量。

式(2)中  $C_1$  可根据 Sear 提供的数据进行计算<sup>[12]</sup>。式(1)中第二项  $\sigma_{\text{tds}}$  由单声子散射截面  $\sigma_{\text{sph}}$  和多声子散射截面  $\sigma_{\text{mph}}$  两部分组成，与中子能量相关。单声子散射主要发生在  $E \ll k_B \theta_D$  能区，截面如式(3)所示。 $k_B$  为波尔兹曼常数， $\theta_D$  为德拜温度， $T$  为晶体温度， $X = \theta_D/T$ ；当晶体温度比较低的时候，如果满足公式中的  $X > 6$ ，则按照式(3)中第二部分计算截面：

$$\sigma_{\text{sph}} = E^{-1/2} \left[ \frac{\theta_D^{1/2} \sigma_{\text{bat}}}{36A} \begin{cases} R & X \leq 6 \\ 3.3X^{-7/2} & X > 6 \end{cases} \right]. \quad (3)$$

式中： $\sigma_{\text{bat}}$  为束缚态原子核的相干散射截面和非相干散射截面之和； $A$  为化合物的平均原子质量数； $R = \sum_{n=0}^{22} B_n X^{n-1} / [n!(n+5/2)]$ ； $B_n$  为伯努利数。

在  $E \geq k_B T$  能区，多声子散射截面  $\sigma_{\text{mph}}$  起主导作用：

$$\sigma_{\text{mph}} = [A/(A+1)]^2 \sigma_{\text{bat}} \left[ 1 - e^{-(B_0+B_T)C_2 E} \right], \quad (4)$$

式中： $B_0 = 3h^2/2k_B \theta_D A$ ； $h$  为普朗克常量； $B_0$  对应零点运动，与温度无关<sup>[13]</sup>； $B_T = 4B_0 \phi(X)/X$ <sup>[14]</sup>， $B_T$  与温度相关， $\phi(X) = X^{-1} \int_0^X \zeta d\zeta / (e^\zeta - 1)$ ； $C_2$  为常数，与散射材料有关， $C_2 = 4.27 \exp[A/61]$ 。

当中子能量大于等于 1 eV 时候，固体原子核的束缚效应可以忽略不计，这时总散射截面可视为自由态散射截面  $\sigma_{\text{free}} = [A/(A+1)]^2 \sigma_{\text{bat}}$ 。

布拉格散射对中子衰减的贡献主要为不同晶面对中子反射形成的相干弹性散射。就单晶材料来说，布拉格散射截面可用下列方程计算<sup>[15]</sup>：

$$\sigma_{\text{Bragg}} = \frac{1}{N t_0} \ln \left( \frac{1}{\prod_{hkl} (1 - P_{hkl}^\theta)} \right), \quad (5)$$

式中： $P_{hkl}^\theta$  为晶面  $(hkl)$  对掠射角为  $\theta$  的入射中子的反射能力； $N$  为晶体单位体积原子数； $t_0$  为晶体厚度。

当中子束入射以后为反射模式时反射能力可用下列方程计算<sup>[16]</sup>：

$$P_{hkl}^\theta = \frac{a}{1 + a + (1 + 2a)^{1/2} \coth \left[ A(1 + 2a)^{1/2} \right]}, \quad (6)$$

式中： $A = \mu t_0 / \gamma_0$ ， $\mu$  为线性吸收系数， $\gamma_0$  为入射中子

与  $[h_c k_c l_c]$  夹角余弦值； $a = Q_{hkl} W(\Delta) / \mu$ ， $Q_{hkl} = \frac{\lambda^3 N_c^2}{\sin(2\theta)} \times F_{hkl}^2 e^{-2w}$ ， $\lambda$  为中子波长， $N_c$  为单位体积晶胞数量， $F_{hkl}$  为  $(hkl)$  面的结构因子， $W = B_0 + B_T$ ， $e^{-2w}$  为德拜修正因子， $W(\Delta) = \eta^{-1} (2\pi)^{-1/2} \exp(-\Delta^2/2\eta^2)$ ， $W(\Delta)$  为描述晶体嵌镶结构的角分布函数， $\Delta$  为嵌镶晶块的法线与晶体平均法线之间的夹角， $\eta$  为嵌镶部分的标准偏差。

当中子束入射以后为透射模式时反射可用下列方程计算：

$$P_{hkl}^\theta = \sinh(Aa) e^{-A(1+a)}. \quad (7)$$

假设一平行中子束垂直入射到厚度为  $d$  的靶子上，一定时间段内探测器在没有样品时计数为  $N_0$ ，有样品时计数为  $N$ ，则有如下关系：

$$N = N_0 e^{-\sigma_a N_i d}, \quad (8)$$

式中  $\sigma_a$  为样品的中子全截面， $N_i$  为样品单位体积内所有原子数之和。

中子对样品的透射率  $T$  为

$$T = \frac{N}{N_0}, \quad (9)$$

根据理论计算公式进行计算，吸收截面分为两部分，镁的吸收截面和氧的吸收截面。 $C_{1\text{Mg}}$  取值 0.01， $C_{1\text{O}}$  取值 0.000 030 2<sup>[12]</sup>。

$$\sigma_{\text{abs}} = C_{1\text{Mg}} E^{-1/2} + C_{1\text{O}} E^{-1/2}, \quad (10)$$

根据式(3)  $\sigma_{\text{sph}}$  的计算方法如下： $\theta_D$  取值 700 K， $T$  取值 300 K。 $\sigma_{\text{bat}}$  分为  $\sigma_{\text{Mg}}$  和  $\sigma_{\text{O}}$  两部分，这两部分之和为 7.942 b。 $A$  为氧化镁的平均原子质量数，为 20.155， $C_2$  取值为  $600 \text{ nm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。

图 1 为计算的 300 K 温度下氧化镁的中子总截面曲线，根据理论模型，当中子能量大于 1 eV 以后，单声子散射贡献逐渐消失，总散射截面贡献主要来源于自由核散射截面，大小为 7.2 b 左右。

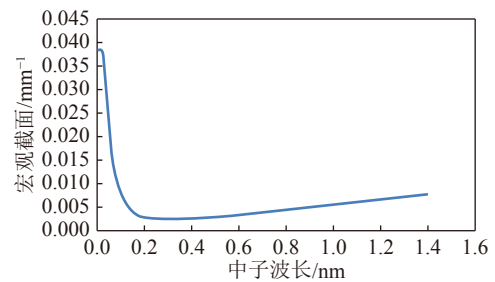


图 1 (在线彩图) 300 K 温度下氧化镁的中子总宏观截面

图 2 为 300 K 温度下 5 和 10 cm 氧化镁的中子透射率曲线，对于 0.025 3 eV 的热中子来说，10 cm 的氧化镁中子透射率为 72%，对 1 eV 以上能量中子透射率小

于 3%；5 cm 的氧化镁对 0.025 3 eV 能量的中子透射率为 85%，对 1 eV 以上能量的中子透射率小于 17%。

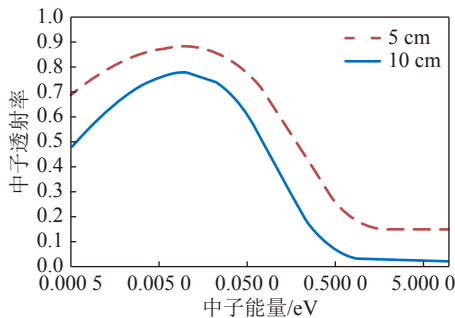


图 2 (在线彩图) 300 K 温度下 5 和 10 cm 氧化镁的中子透射率

如果入射中子方向垂直于晶体表面，那么根据布拉格散射公式：

$$2d \sin\theta = n\lambda (n = 1, 2, 3 \dots)$$

若要在 (100) 晶面上发生一级中子衍射，中子波长需要达到 0.842 nm，而布拉格散射在大于 0.4 nm 的能区不起作用。而次级衍射强度很低，做近似计算时可以忽略。10 cm 氧化镁晶体沿 (100) 晶面切割，在 300 K 温度下，镶嵌宽度为 0.5° 时布拉格衍射对总截面的贡献很小 [11]，因此本论文计算时暂不考虑布拉格散射作用。

理论计算参数是根据理论结合实验经验拟合而成，而且德拜温度本身就是随中子能量和温度变化的量，理论计算时将其视为一个常数近似计算 [9, 11]。

从图 2 计算结果可以看出，10 cm 氧化镁晶体对 0.1 eV 以下能量的中子透射率基本为 50% 以上，5 cm 氧化镁晶体对 0.1 eV 以下能量的中子透射率基本为 70% 以上，而且可以有效吸收能量大于 0.5 eV 的中子。

### 3 实验测量

#### 3.1 蒙特卡罗模拟

采用蒙特卡罗 (MCNP X) 程序，采用 <sup>252</sup>Cf 点源，聚乙烯慢化体厚度 3~9 cm，长 100 cm，宽 100 cm；探测器采用锂玻璃探测器，锂玻璃闪烁体直径 2.54 cm，厚 0.13 cm，后端是光电倍增管，见图 3 所示。分别模拟计算了当 <sup>252</sup>Cf 中子源前的聚乙烯慢化体厚度从 3 cm 到 9 cm 之间改变时，在慢化体表面产生的中子能谱，计算出各个能量区间的中子百分比，结果见表 1。

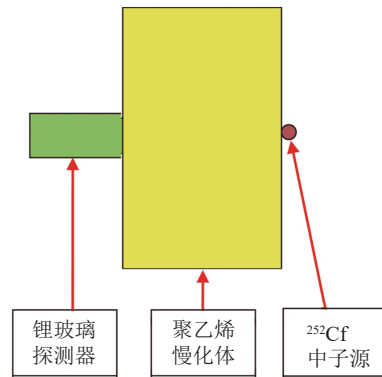


图 3 (在线彩图) 不同厚度聚乙烯慢化体对 <sup>252</sup>Cf 中子源慢化作用的蒙特卡罗模拟图

表 1 中子经不同厚度聚乙烯慢化以后的成分

慢化体厚度/cm	1 eV 以下中子计数占总计数百分比/%	1 eV 到 1 keV 中子计数占总计数百分比/%	1 keV 到 1 MeV 中子计数占总计数百分比/%	1 MeV 到 10 MeV 中子计数占总计数百分比/%
3	45.34	8.97	23.74	21.96
4	53.10	10.47	19.61	16.82
5	59.48	9.89	17.52	13.11
6	65.94	8.08	14.60	11.38
7	68.01	8.24	13.38	10.37
8	72.75	7.09	11.41	8.74
9	72.92	7.73	10.94	8.41

从表 1 中数据可以看出，随着慢化体厚度增加，1 eV 以下中子比例增大，说明慢化效果逐渐增强。我们在实验中分别在放射源前放置 3, 5, 8 cm 厚的聚乙烯慢化体进行实验测量。

#### 3.2 实验测量

为研究常温下氧化镁的中子过滤性能，设计了实验装置，如图 4 所示，采用的放置放射源的慢化体为大小

20 cm×20 cm×12 cm 的方形聚乙烯，在慢化体中间打一直径为 3 cm 的圆孔，内部放置放射源；准备边长 20 cm，厚度分别为 3, 5, 8 cm 的聚乙烯慢化体放置在放射源前端用来慢化中子。在慢化体前端放置一中间开有直径为 3.4 cm 圆孔的 B<sub>4</sub>C-Al 方板，方板边长 20 cm，厚 2.5 mm，碳化硼的质量分数为 26%，主要作用是屏蔽从准直孔以外方向射向氧化镁晶体的中子。限束孔外放置

20 cm×20 cm×15 cm 的含硼聚乙烯板，碳化硼的质量分数为 10%，其中心开一直径 3.4 cm 的圆孔，孔内放置 10 cm 厚的氧化镁晶体，晶体与慢化聚乙烯板距离 5 cm，作为中子准直孔，进一步限制从准直孔以外方向的中子入射到氧化镁单晶上。氧化镁的外侧放置另一中间开直径孔的 B<sub>4</sub>C\_AI 方板，其尺寸与厚度、碳化硼含量均与准直孔前放置的 B<sub>4</sub>C\_AI 方板相同，主要作用是屏蔽从氧化镁晶体以外方向射向锂玻璃闪烁体的中子。锂玻璃闪烁体放置在同样为 10% 碳化硼含量的 20 cm×20 cm×5 cm 的含硼聚乙烯内。

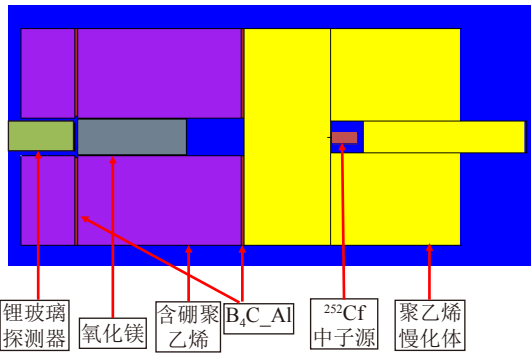


图 4 (在线彩图) 氧化镁中子过滤性能实验装置示意图

实验时放射源前分别放置 3, 5, 8 cm 的聚乙烯慢化体，测量了放置氧化镁、未放置氧化镁和在锂玻璃闪烁体前加 2 mm 镅片三种情况下的中子计数率。氧化镁晶体为直径 3.3 cm，长 5 cm 的圆柱体。测试时分两种情况，分别为采用 10 cm 氧化镁和 5 cm 氧化镁做超热中子过滤器。采用 10 cm 氧化镁时候装置结构图如图 5 所示，中间放置氧化镁的含硼聚乙烯长度为 15 cm；采用 5 cm 氧化镁的时候将中间放置氧化镁的含硼聚乙烯长度从 15 cm 减小到 10 cm，准直孔依然长 5 cm。

放射源采用 <sup>252</sup>Cf 源，测量开始时活度为 7.066 24×10<sup>5</sup> Bq。由于中子计数率低，为了达到计数统计进行了长时间的测量，因为放射源半衰期为 2.645 y，测量时间共 20 d 左右，需要对放射源活度衰减进行修正。

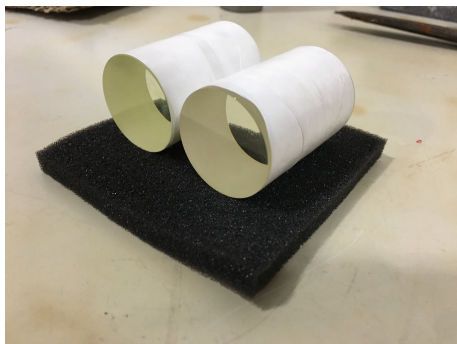


图 5 (在线彩图) 氧化镁单晶

图 5 为实验采用的两枚 5 cm 厚、直径 3.3 cm 的氧化镁晶体，实验时侧面包裹生料带放入含硼聚乙烯中部的准直孔中。

因为探测器计数率低，以免受到天然本底的影响在整套探测装置四周都挡了 10 cm 厚的含硼聚乙烯，并进行了本底水平测量。测量结果表明，探测器本底计数率为 0，在数据处理中不需要扣除天然本底的影响。

### 3.3 测量结果

表 2 为采用 10 和 5 cm 氧化镁晶体，聚乙烯慢化体分别采用 8, 5, 3 cm 时，测量的有氧化镁和无氧化镁以及在各种情况下在锂玻璃探测器前加 2 mm 厚的镅片以后的实验数据，并对中子净计数率进行了放射源活度衰减修正和死时间修正后得出最终结果，放射源活度衰减和死时间修正基本都在 1.5% 以内。

分别计算出 10 和 5 cm 氧化镁的中子透射率与相对镅比，结果见表 3。

表 3 中相对镅比为实验测量的镅片吸收的中子与镅片未吸收的中子之比。从表中结果可见，在氧化镁晶体厚度不变的情况下，随着聚乙烯厚度的减少，氧化镁的中子透射率逐渐降低，这是因为慢化效果变差，热中子比例下降，验证了氧化镁对热中子的过滤性能。另外，从表中镅比数据可以看出，加氧化镁过滤器以后可以有效提高镅比，特别是在使用 8 cm 聚乙烯做慢化体时，镅比提高 93.85%，证明了 8 cm 聚乙烯的慢化效果最好；10 cm 氧化镁中子透射率低于 5 cm 氧化镁，但是镅比提升率却高于 5 cm 氧化镁，说明经过 10 cm 氧化镁过滤器对镅截至能量之上的中子透射率低于 5 cm 氧化镁，这与理论计算结果一致。

实验测量 B<sub>4</sub>C\_AI 材料中子吸收性能检测设备中未采用 MgO 超热中子过滤器时锂玻璃探测器的计数率约为 1 500 s<sup>-1</sup>，经过 B<sub>4</sub>C\_AI 样品吸收以后中子计数率为 350 s<sup>-1</sup>，一般情况下一个数据点测量 60 s。根据实验结果，10 cm MgO 超热中子过滤器对经过 8 cm 聚乙烯慢化后的中子透射率为 60.61%，估计在检测设备中采用了 MgO 超热中子过滤器以后单个锂玻璃计数率约能达到 900 s<sup>-1</sup>，近似认为经过 MgO 过滤器的都是 1 eV 以下能量的中子，蒙特卡罗模拟计算出 B<sub>4</sub>C\_AI 对 1 eV 能量以下的中子吸收率为 10%<sup>[2]</sup>，经过 B<sub>4</sub>C\_AI 样品吸收以后中子计数率至少能达到 90 s<sup>-1</sup>，每个点测量 111 s 即可统计误差 1%，对整体测量时间影响不大。

### 3.4 误差来源及解决办法

实验结果误差来源主要有三个方面：天然本底及电子学噪声的影响，这部分影响已经通过增强屏蔽效果得

表 2 实验数据

氧化镁长度/cm	聚乙烯厚度	测量时间/s	Net area	Net rate	修正后Net rate	
10	8 cm	21 367.64	24 909	1.165 735	1.165 87	
	8 cm+镅	178 070.26	27 653	0.155 293	0.155 50	
	8 cm+MgO	62 757.26	44 204	0.704 365	0.706 65	
	8 cm+MgO+镅	262 998.12	13 502	0.051 339	0.051 95	
	5 cm	9 033.78	24 037	2.660 791	2.672 50	
	5 cm+镅	245 760.52	109 673	0.446 260	0.448 69	
	5 cm+MgO	14 949.48	22 985	1.537 512	1.544 07	
	5 cm+MgO+镅	168 499.2	28 593	0.169 692	0.170 91	
	3 cm	9 264.62	39 144	4.225 106	4.259 14	
	3 cm+镅	152 816.28	134 136	0.877 760	0.885 40	
	3 cm+MgO	9 641.22	22 132	2.295 560	2.313 78	
	3 cm+MgO+镅	166 045.06	49 848	0.300 208	0.303 22	
	5	8 cm	6 724.46	12 520	1.861 860	1.887 51
		8 cm+镅	25 977.48	10 226	0.393 649	0.398 79
		8 cm+MgO	10 706.44	15 111	1.411 394	1.430 70
8 cm+MgO+镅		53 663	11 271	0.210 033	0.212 85	
5 cm		2 650.72	10 795	4.072 478	4.128 84	
5 cm+镅		37 531.92	39 311	1.047 402	1.062 30	
5 cm+MgO		8 664.6	26 190	3.022 644	3.064 56	
5 cm+MgO+镅		17 209.22	11 463	0.666 096	0.675 35	
3 cm		2 856.02	17 837	6.245 404	6.336 85	
3 cm+镅		4 564.46	9 679	2.120 514	2.151 10	
3 cm+MgO		4 394.38	19 749	4.494 149	4.559 57	
3 cm+MgO+镅		12 619.12	16 436	1.302 468	1.321 31	

表 3 氧化镁晶体中子透射率实验结果

氧化镁厚度/cm	聚乙烯厚度/cm	氧化镁中子透射率/%	无氧化镁相对镅比	加氧化镁相对镅比	加氧化镁后的相对镅比提高率%
10	8	60.61	6.50	12.60	93.85
	5	57.78	4.96	8.03	61.90
	3	54.33	3.81	6.63	74.02
5	8	75.80	3.73	5.72	53.35
	5	74.22	2.89	3.54	22.49
	3	71.95	1.95	2.45	25.64

到了有效的去除，经探测器测量本底水平计数率为 0；实验测量周期长，计算中子透射率时需要考虑放射源的衰减，这部分影响在数据处理中已经修正；实验统计误差在 1% 以内。

图 6 为 B<sub>4</sub>C-Al 检测设备的中子透射率与 <sup>10</sup>B 面密度关系，<sup>10</sup>B 面密度不确定度在 2% 以内 [2]。加了 MgO 超热中子过滤器以后，总不确定度可以控制在 2.2% 以内。

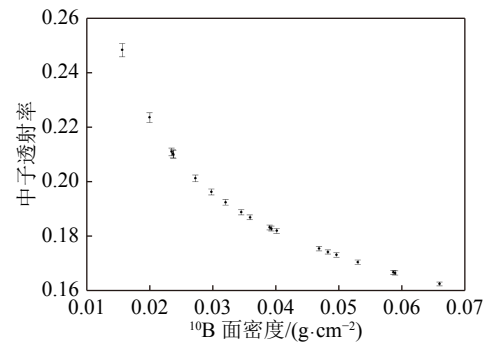


图 6 <sup>10</sup>B 面密度与中子透射率关系曲线

#### 4 结论

为了进一步完善 B<sub>4</sub>C-Al 中子吸收性能检测设备，拟采用氧化镁超热中子过滤器降低能量高于 1 eV 的中子本底。采用理论模型对氧化镁热中子透射率和总截面与中子波长或能量的关系进行了研究，给出了关系曲线，并通过实验对理论计算结果进行了验证。实验结果表明，<sup>252</sup>Cf 源经过 8 cm 聚乙烯慢化以后，常温下 10 cm 氧化

镁超热中子过滤器的中子透射率可达到 60.61%，与理论计算结果基本相符，相对镅比可提高 93.85%。将来可应用在  $B_4C\_Al$  检测设备上提高热中子比例，提高标准曲线精度。

#### 参考文献:

- [1] SU Xiaobin, HOU Long, WANG Qi, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(4): 462. (in Chinese)  
(苏晓斌, 侯龙, 王琦, 等. *原子核物理评论*, 2019, 36(4): 462.)
- [2] SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, et al. *Nuclear Physics Review*, 2021, 38(3): 283. (in Chinese)  
(苏晓斌, 侯龙, 刘世龙, 等. *原子核物理评论*, 2021, 38(3): 283.)
- [3] SUN Hongchao, NI Bangfa, XIAO Caijin, et al. *Journal of Isotopes*, 2012, 25(3): 182. (in Chinese)  
(孙洪超, 倪邦发, 肖才锦, 等. *同位素*, 2012, 25(3): 182.)
- [4] STAMATELATOS I E, MESSOLORAS S. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(1): 70.
- [5] MILDNER D F R, ARIF M, STONE C A. *J Appl Cryst*, 1993, 26: 438.
- [6] ADIB M, NAGUIB K, ASHRY A, et al. *Annals of Nuclear Energy*, 2002, 29: 1119.
- [7] BARKER J G, MILDNER D F R, RODRIGUEZ J A, et al. *Applied Crystallography*, 2008, 41: 1003.
- [8] D'MELLOW B, THOMAS D J, JOYCE M J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 577: 690.
- [9] FREUND A K. *Nucl Instr and Meth*, 1983, 213: 495.
- [10] THIYAGARAJAN P, CRAWFORD R K, MILDNER D F R. *J Appl Cryst*, 1998, 31: 841.
- [11] ADIB M, HABIB N, BASHTER I, et al. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, 38: 2673.
- [12] SEARS V F. *Neutron News*, 1992, 3: 26.
- [13] ADIB M, KILANY M. *Rad Phys Chem*, 2003, 66: 81.
- [14] BACON G E. *Neutron Diffraction[M]*. 3rd ed. Oxford: Clarendon, 1975.
- [15] NAGUIB K, ADIB M. *Annals of Nuclear Energy*, 1998, 25(18): 1553.
- [16] NAGUIB K, ADIB M. *J Appl Phys*, 1996, 29: 1441.

## Research on MgO as a Neutron Filter

SU Xiaobin<sup>1)</sup>, HOU Long, LIU Shilong, YANG Yi, WANG Qi

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

**Abstract:** In response to the need for monitoring and testing of the neutron absorption performance of the spent fuel pool grid material in the nuclear power plant reactor during the production and use process, we have developed the spent fuel pool grid frame  $B_4C\_Al$  material neutron absorption material detection equipment. In order to reduce the influence of the superthermal neutron background in the detection process, we consider using a magnesium oxide thermal neutron filter to filter out the superthermal neutrons. The neutron transmittance and macroscopic total cross-section of 10 and 5 cm magnesium oxide single crystals were calculated theoretically, and the neutron composition on the surface of the moderator was calculated by Monte Carlo simulation and experimental measurements were carried out. The experimental results show that the neutron transmittance of 10 cm magnesium oxide to the  $^{252}Cf$  neutron source moderated by 8 cm polyethylene is 60.16%, and the relative cadmium ratio is increased by 93.85% compared with that without adding 10 cm of magnesium oxide. At room temperature, magnesium oxide single crystal used as the superthermal neutrons filter of the  $B_4C\_Al$  detection device is feasible.

**Key words:** MgO; neutron filter; neutron absorption material