

文章编号: 1007-4627(2010)02-0178-04

# $\gamma$ 探测器中子灵敏度标定技术\*

李如荣, 郭洪生, 胡清元, 李忠宝, 张建华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 叙述了  $\gamma$  探测器的 14.1 MeV 中子灵敏度标定原理和屏蔽方法, 利用 MCNP 程序建模, 优化设计了对  $\gamma$  和中子高屏蔽性能的屏蔽体。实验研究表明, 其信噪比最高达 10:1, 比测量点本身的信噪比 1.35:1 提高了 7 倍, 从而实现了  $\gamma$  探测器的中子灵敏度标定。

**关键词:**  $\gamma$  探测器; 中子灵敏度; 信噪比

**中图分类号:** TL81      **文献标识码:** A

## 1 引言

近年来, 随着探测技术的发展, 对中子、 $\gamma$  混合场中的  $\gamma$  射线测量精度要求愈来愈高<sup>[1]</sup>, 传统的有机晶体(如 ST401)构成的探测器很难满足当前的测量要求, 而新研制的  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{Yap}:\text{Ce}$  等无机晶体分别与光电倍增管组合构成的探测器, 由于具有对  $\gamma$  射线灵敏和对中子不灵敏的特性, 被广泛用于中子、 $\gamma$  混合辐射场中  $\gamma$  射线的甄别测量。目前对该类型探测器的  $\gamma$  特性(发光效率、灵敏度等)有一定程度的研究<sup>[2-8]</sup>, 而对中子特性的研究甚少, 主要原因是由于其中子灵敏度比相同能量的  $\gamma$  灵敏度低数倍, 且在标定过程中伴随有次级中子和  $\gamma$  的产生, 环境本底极其复杂, 因此要在空间有限的实验室中标定出其中子特性参数较为困难。为此本文将对其子灵敏度的标定技术进行了初步研究。

## 2 标定原理<sup>[9]</sup>

D 粒子经 K-400 加速器加速与 T 靶作用产生的  $90^\circ$  方向高能中子直接照射到探测器上产生的电流与注量率之比即为探测器在该能点的中子灵敏度, 数学表达式为

$$S(E) = \frac{I(E)}{J(E)}, \quad (1)$$

式中,  $S(E)$  为探测器对能量为  $E$  的中子的灵敏度 ( $\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2$ );  $I(E)$  为探测器接收到能量为  $E$  的中子后产生的电流 (A), 由美国 KEITHLEY 公司生

产的高精度小电流仪 6517A 测量;  $J(E)$  是能量为  $E$  的中子在探测器灵敏面上的注量率 ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $J(E)$  的计算公式为

$$J(E) = \frac{k_\alpha N_\alpha}{4\pi L^2}, \quad (2)$$

式中,  $L$  为探测器到中子源的距离(单位: cm);  $N_\alpha$  为 D 粒子与 T 靶相互作用产生的  $\alpha$  粒子监测计数(单位:  $\text{s}^{-1}$ ), 由距靶心 20 cm、与入射粒子成  $178.2^\circ$  方向上的 PIN 探测器进行监测;  $k_\alpha$  为  $\alpha$  粒子监测因子, 等于  $0.981 \times 1.54 \times 10^7$ 。

在实验室标定时, 探测器的输出通常要受本底的影响。其主要来源有: 中子与周围环境物质作用产生的各种能量的散射中子和次级  $\gamma$  构成的外本底; 在屏蔽此本底的同时, 信号中子与屏蔽材料作用又将产生新的散射中子和  $\gamma$  射线, 因此有效降低次级  $\gamma$  和散射中子的影响是解决问题的关键。

## 3 两种屏蔽方法的比较

### 3.1 影锥法

影锥法是标定中子探测器灵敏度的传统方法, 它的主要思路是首先测量含有信号和本底的混合电流(即不对探测器进行任何屏蔽), 然后在探测器前放置锥体测量出本底电流, 最后两者相减便可扣除本底的影响, 得到信号中子产生的电流。

屏蔽锥的设计除了能保证完全阻挡 14.1 MeV

\* 收稿日期: 2009-07-16; 修改日期: 2009-10-26

\* 基金项目: 中国工程物理研究院预先研究项目(4210303)

作者简介: 李如荣(1966—), 男(汉族), 四川大竹人, 副研究员, 从事粒子探测技术研究; E-mail: lrrzwy@sohu.com

能量的中子外, 还应着重考虑中子在屏蔽锥上产生的次级  $\gamma$  效应的影响, 因此锥材料选择含 B 聚乙烯, 利用  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反应吸收慢化中子, 含 B 聚乙烯长度为 40 cm, B 的含量约 10%。同时在锥体尾部用 2 cm 厚的 Pb 吸收  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反应产生的 0.48 MeV 的  $\gamma$  射线。

影锥法的首要条件是锥体的引入不能改变辐射场的分布, 这就要求锥体截面略大于探测器灵敏层面积, 探测器离锥体须有一定距离。但在实验时, 由于中子源产额较低, 探测器不可能离中子源太远, 通常在 120 cm 左右, 因此不可避免要改变辐射场的分布。图 1 为影锥法标定示意图。从该图可以看出, 引入锥体以后, 探测器无法测到虚线以内的环境散射本底, 因此影锥法不能测量出真正本底, 测量结果通常比实际本底小。

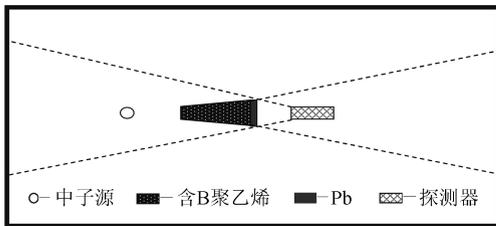


图 1 影锥法标定示意图

### 3.2 全屏蔽法

全屏蔽法是将探测器置于屏蔽体中, 以降低环境本底对探测器影响的一种方法, 因此屏蔽体的设计就显得尤为重要。我们通过对屏蔽体屏蔽材料的选取, 利用 MCNP 程序建模对屏蔽体的几何形状和物理尺寸进行优化设计, 以较少的屏蔽材料达到了较佳的屏蔽效果, 如图 2 所示。

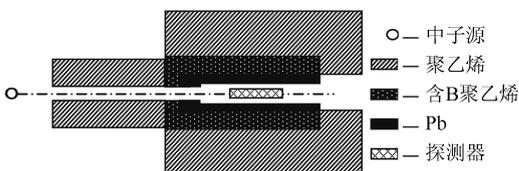


图 2 中子灵敏度标定实验装置图

屏蔽体的前部设计为长度 50 cm、内径 6 cm 和外径 30 cm 的由聚乙烯构成的准直器, 以屏蔽来自中子源及前面的墙壁、地面和屋顶等物质产生的散射中子和诱发  $\gamma$  射线的干扰, 同时它减小了对源的立体角, 降低了源中子直接与屏蔽材料作用产生的

内本底。屏蔽体的外层为聚乙烯, 内径为 38 cm, 外径为 78 cm, 总长度为 100 cm, 以慢化空间散射中子。第二层为含 B 聚乙烯, 内径为 18 cm、外径为 38 cm 和长度为 40 cm, 以吸收慢化后的热中子。最内层为 Pb, 内径为 12 cm, 外径为 18 cm, 长度为 40 cm, 以屏蔽各种能量的次级  $\gamma$  射线。屏蔽体的后端为带孔的聚乙烯, 以利于取放探测器, 同时还可泄漏测量通道内的信号中子, 避免反照到探测器上产生干扰。

### 3.3 屏蔽效果模拟计算

对于全屏蔽法的屏蔽效果, 可以通过模拟计算来判定, 虽然对 neutron 与环境物质作用产生的中子、 $\gamma$  本底的强度及能量分布情况难以从实验上进行测定, 但根据实验室和屏蔽体的结构, 利用 MCNP 程序建模可以分别计算出全屏蔽法测点处(离源 154 cm)屏蔽前后的中子、 $\gamma$  本底归一能谱(见图 3), 从而从理论上掌握屏蔽体的屏蔽效果。图 3(a)中的曲

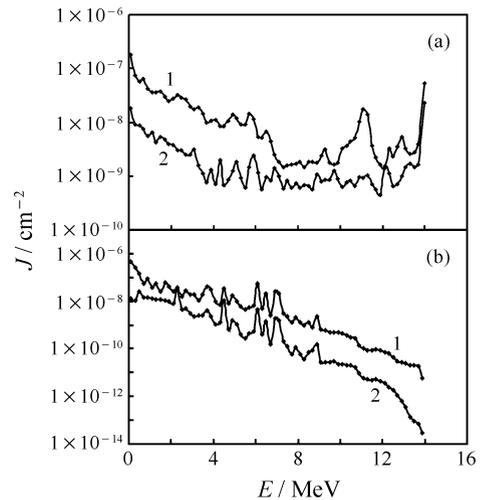


图 3 屏蔽前后本底中子、 $\gamma$  归一能谱

线 1 和曲线 2 分别为屏蔽前后的本底中子归一能谱, 图 3(b)中的曲线 1 和曲线 2 分别为屏蔽前后的本底  $\gamma$  归一能谱。从图 3 可以看出, 屏蔽后各种能量的中子比屏蔽前降低了一个量级左右, 而各种能量的  $\gamma$  射线降低了两个量级左右, 可见其屏蔽效果较为理想。

## 4 实验及结果分析

### 4.1 全屏蔽法实验

实验在长宽各为 8 m、高为 3.5 m 的实验室进

行, 中子能量为 14.1 MeV, 屏蔽体前端离源 60 cm, 先将探测器置于屏蔽体中离源 120 cm 处, 测量由中子信号和屏蔽后本底产生的电流, 然后将屏蔽体的准直孔堵住, 测量屏蔽后本底产生的电流。

### 4.2 影锥法实验

将屏蔽体拆去, 测量信号中子和本底产生的混合电流, 然后在源与探测器间放置一锥体, 不让信号中子直接到达探测器, 只测量本底产生的电流。

### 4.3 实验结果及分析

实验结果见表 1。从表 1 中可以看出, 影锥法

测得的探测器灵敏度都比全屏蔽法测得的灵敏度高 20% 以上, 主要原因是锥体的引入, 不仅挡住了信号, 还挡住了本底, 使测得的本底比实际的本底低, 扣除本底时相对增加了信号中子产生的电流; 全屏蔽法的信噪比分别为 6.6:1 和 10.1:1, 说明全屏蔽法基本消除了本底(尤其是次级  $\gamma$ ) 的干扰, 且与模拟计算的结果相吻合, 因此置信度高。而影锥法的本底分别为 1.2:1 和 1.4:1, 与测点本身的信噪比相差不大, 说明还存在严重的本底干扰, 因此置信度较低。

表 1 14.1 MeV 中子灵敏度标定结果(光电倍增管管号 T31463)

标定方法	晶体类型	晶体尺寸/mm	计数	本底/ $\mu\text{A}$	电流/ $\mu\text{A}$	中子灵敏度 / $(\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2)$	屏蔽后 信噪比
全屏蔽法	CeF <sub>3</sub>	$\phi 40 \times 10$	16127	0.32	2.43	$1.55 \times 10^{-10}$	6.6:1
	YaP:Ce	$\phi 50 \times 20$	6277	0.79	8.73	$1.50 \times 10^{-9}$	10.1:1
影锥法	CeF <sub>3</sub>	$\phi 40 \times 10$	12028	1.66	3.61	$1.92 \times 10^{-10}$	1.2:1
	YaP:Ce	$\phi 50 \times 20$	11596	12.44	29.62	$1.87 \times 10^{-9}$	1.4:1

## 5 结论

实验结果表明: 全屏蔽法对 CeF<sub>3</sub>, YaP:Ce 晶体屏蔽后的信噪比分别比屏蔽前测点本身的信噪比提高了近 7 倍, 灵敏度标定精度比影锥法提高了 20% 左右, 从而实现了  $\gamma$  探测器的中子灵敏度标定; 而影锥法的信噪比提高不大。因此, 全屏蔽法优于影锥法。

### 参考文献 (References):

[1] Hu Mengchun, Ye Wenying, Tang Zhangkui, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**(1): 64(in Chinese).  
(胡孟春, 叶文英, 唐章奎等. 原子核物理评论, 2005, **22**(1): 64.)

[2] Moszynski M, Kapusta M, Wolski D. Nucl Instr and Meth, 1998, **A404**: 157.

[3] Belogurov S, Bressi G, Carugno G. Nucl Instr and Meth,

2004, **A516**: 58.

[4] Gorin A, Kuroda K, Manuilov I. Nucl Instr and Meth, 2003, **A510**: 76.

[5] Baccaro Cecilia A, Montecchi M. Nucl Instr and Meth, 1998, **A406**: 479.

[6] Zhang Lianwen, Zhu Shifu, Wang Yongguo, *et al.* Journal of Synthetic Crystals, 2002, **31**(1): 54(in Chinese).  
(章连文, 朱世富, 王永国. 人工晶体学报, 2002, **31**(1): 54.)

[7] Zhang Jianhua, Zhang Chuanfei, Pen Taipn, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2006, **40**(4): 447(in Chinese).  
(张建华, 张传飞, 彭太平等. 原子能科学技术, 2006, **40**(4): 447.)

[8] Zhang Jianhua, Pen Taipn, Hu Mengchun, *et al.* Journal of Synthetic Crystals, 2006, **35**(5): 1057(in Chinese).  
(张建华, 彭太平, 胡孟春等. 人工晶体学报, 2006, **35**(5): 1057.)

[9] Liu Qinzhaoh. The Diagnosis Technology of Pulse Radiation Field. Beijing: Science Press, 1994, 158.

# Calibration Technique of Neutron Sensitivity for $\gamma$ -ray Detector<sup>\*</sup>

LI Ru-rong<sup>1)</sup>, GUO Hong-sheng, HU Qing-yuan, LI Zhong-bao, ZHANG Jian-hua  
(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,*  
*Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** It is introduced that a method and principle for calibrating 14.1 MeV neutron sensitivity of  $\gamma$ -ray detector. A shield system for scattering neutrons and  $\gamma$ -rays has been optimized by MCNP code. The experimental results show that the signal-to-noise ratio of the system is about 10:1, 7 times higher than the value of 1.35:1 without shield system. Calibration of neutron sensitivity of  $\gamma$ -ray detector is then accomplished.

**Key words:**  $\gamma$ -ray detector; neutron sensitivity; signal-to-noise ratio

---

\* Received date: 16 Jul. 2009; Revised date: 26 Oct. 2009

\* Foundation item: Advanced Research Program of China Academy of Engineering Physics(4210303)

1) E-mail: lrrzwy@sohu.com