

组合闪烁探测系统的中子能量响应研究^{*}

杨洪琼¹⁾ 彭太平 杨建伦 唐正元 杨高照 李林波 王立宗 朱学彬

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 组合闪烁探测系统由“Pb 过滤片加塑料闪烁探测器”组成.采用直流标定方法,实验研究了 ST401,ST1422,ST1423 组合探测系统对 0.565—14.16MeV 能量范围的 6 个能点的中子灵敏度,得到了探测系统的中子灵敏度随 Pb 过滤片厚度的变化、随闪烁体厚度的变化和随中子能量的变化关系.利用理论计算和实验测量结果相结合,获得了 3 种组合闪烁探测系统的中子灵敏度能量响应曲线.

关键词 闪烁探测器 Pb 过滤片 中子灵敏度 能量响应

1 引言

对于中子辐射测量,根据不同的测量目的与探测机制,探测系统可分为单粒子计数型或电流型.对于测量能谱连续分布的脉冲中子源,需要使用电流型脉冲中子探测器,而且探测器的能量响应(即中子灵敏度随中子能量的变化曲线)问题往往是无法回避的.在瞬态的 n、 γ 混合辐射场中,常采用飞行时间法原理^[1,2],实现对脉冲中子的探测.因受测量环境或中子源强度等限制,不能采用 n、 γ 飞行时间差将 n、 γ 辐射脉冲分开时,要提高探测系统的信噪比,需要研究抑制 γ 内本底的方法.因此,在 n、 γ 混合脉冲辐射场中,诊断具有连续能谱分布、中子强度低和脉冲宽度宽的脉冲中子源特性的测量技术研究,是具有实际意义和技术难度较大的课题.

在 n、 γ 混合脉冲辐射场的裂变中子的绝对测量中,探索和研究了一种对脉冲 γ 辐射不灵敏的 PIN 脉冲中子探测器^[3,4].这里,介绍抑制 γ 内本底的另一种方法——“Pb 过滤法”,即:利用中子和 γ 辐射在 Pb 介质中传播的自由程差,在中子源和闪烁探测器之间加 Pb 过滤片,建立了“Pb 过滤片加塑料闪烁体加光电倍增管”的组合闪烁探测系统.由于脉冲中子源的能谱连续分布,必须已知组合闪烁探测系统的中子能量响应,但可用于灵敏度标定的单能中子

源较少,因此,建立相应的理论模型,采用 Monte Carlo 方法模拟计算得到灵敏度曲线,再由标定实验检验几个能点.

在中国原子能科学研究院计量测试部的 5SDH-2 型串列加速器上^[5],利用 4 种核反应获得能量为 0.250MeV,0.565MeV,1.20MeV,2.50MeV,3.50MeV,5.00MeV,14.16MeV 的单能中子,实验标定了不同厚度的 Pb 过滤片加不同厚度的 ST401,ST1422 或 ST1423 塑料闪烁体加光电倍增管探测系统,对 6 个中子能点的中子灵敏度,获得了:“Pb 过滤片加闪烁探测器(ST401,ST1422 或 ST1423)”系统的中子灵敏度随 Pb 过滤片厚度的变化关系、随闪烁体厚度的变化关系、随中子能量的变化关系.利用理论计算和实验测量结果,获得了 3 种组合闪烁探测系统的中子灵敏度能量响应曲线.

2 实验原理和方法

根据中子灵敏度的定义,当中子辐射垂直入射到闪烁探测器上,探测器的灵敏度为

$$S_n(E_n) = \frac{\Delta Q}{\Delta \Phi_n} = \frac{\frac{\Delta Q}{\Delta t}}{\frac{\Delta \Phi_n}{\Delta t}} = \frac{I}{\phi_n(E)_n} = \frac{4\pi L^2 \cdot I}{Y_n}, \quad (1)$$

其中

2004-11-09 收稿

^{*} 中国工程物理研究院专项基金(J09-303)资助

¹⁾ E-mail: yang_hong_qiong@126.com

$$\phi_n = Y_n/4\pi L^2, Y_n = N \times K, \quad (2)$$

式中 I 为电流计测量的电流值(A); ϕ_n 为测点处中子注量率($s^{-1} \cdot cm^{-2}$); L 为中子源到探测器的距离(cm); Y_n 为中子源产额(s^{-1}); N 为监测计数; K 为修正因子. 实验标定的中子灵敏度由公式(1)给出, 其单位是 $C \cdot cm^2$.

5SDH-2 型串列加速器, 分别加速 p, d 离子束, 分别打到 Li, D, T 靶上, 产生 ${}^7Li(p, n){}^7Be$, $T(p, n){}^3He$, $D(d, n){}^3He$, $T(d, n){}^4He$ 各种反应, 出射中子能量可以在 0.1—18MeV 范围调节. 根据离子束的入射粒子能量, 选择了 0° 或 90° 方位, 获得能量为 0.565MeV, 1.20MeV, 2.50MeV, 3.50MeV, 5.00MeV, 14.16MeV 的中子. 加速器产生的稳态中子源, 在中

子能量相应的出射方位上, 探测系统接受单能中子照射, 闪烁探测器将入射的稳态中子流转化为稳定的电流信号, 信号电缆将其传输到电流记录仪表 (6517 electrometer/high resistance system) 进行测量.

当闪烁探测系统与中子源的距离足够大时, 将中子源视为点源, 通过监测获得测点处探测系统所接收的 0.565MeV, 1.20MeV, 2.50MeV, 3.50MeV, 5.00MeV, 14.16MeV 中子能点的中子注量, 获得直流标定探测系统的中子能量响应函数.

3 实验标定

组合闪烁探测系统由“Pb 过滤片加塑料闪烁探测器”组成. 实验标定示意图如图 1.

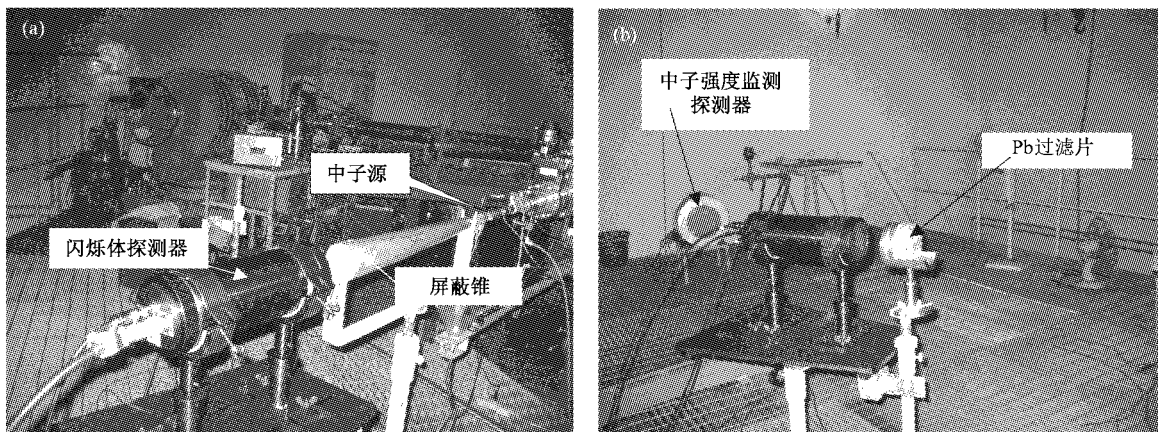


图 1 组合闪烁探测系统的标定示意图
(a) 环境本底测量; (b) 信号测量.

在实验中, 加速器稳态中子源产生恒定的中子流, 中子产额为 (10^7 — 10^9) s^{-1} , 探测系统放置在距离中子源 (50—90) cm 处, 在中子的照射下, 采用图 1 所示的方法, 直接用 6517 型电流测量仪测量探测系统的输出信号.

串列加速器实验大厅, 长度大于 10m, 宽度大于 10m, 高度大于 6m, 靶管横向, 靶头高度 1.07m, 地板镂空, 地板下方距地面 2m, 采取在 90° (14.16MeV) 和 0° (其余能量) 方向获得出射单能中子.

根据源中子产额, 选择组合闪烁探测系统的测点距离; 在各次测量前, 先测量闪烁探测器的暗流 (无中子源照射); 采用屏蔽锥体, 测量组合闪烁探测系统的环境本底; 测量“Pb 过滤片加 ST401 或 ST1422 或 ST1423 闪烁探测器”系统对各中子能点的

输出电流, 计算出系统的中子灵敏度.

在实验标定时, 当中子入射到闪烁探测系统上, 中子源输出稳定后, 开始测量探测系统的输出电流信号, 并同时监测中子源产额.

4 实验研究结果

实验获得了厚度为 0cm, 3cm, 6cm 的 Pb 过滤片加不同厚度的 ST401, ST1422, ST1423 闪烁探测器的 6 个能量点的中子灵敏度. Pb 过滤片厚度为 3cm 加 ST401 闪烁探测器的中子灵敏度与闪烁体厚度的关系见图 2, 图中闪烁体为 0 是指光电倍增管的光阴极灵敏度; ST401 组合闪烁探测系统对 1.2MeV 的中子灵敏度与 Pb 厚度的关系见图 3.

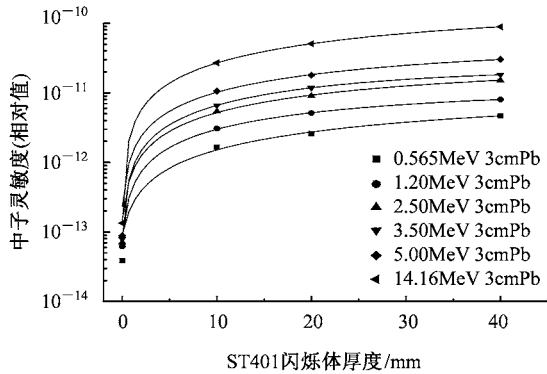


图 2 ST401 组合系统中中子灵敏度与闪烁体厚度的关系

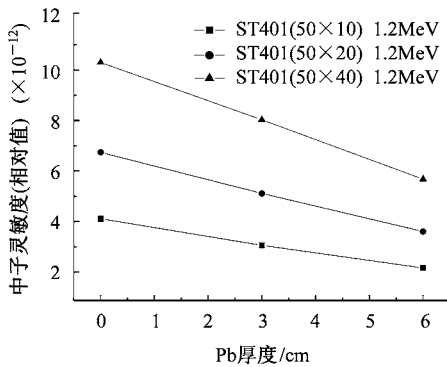


图 3 组合探测系统中子灵敏度与 Pb 厚度的关系

为了获得“Pb 厚度加闪烁体类型、厚度多种组合”的数据,利用 CYLY2 和 MCNP 程序分别作了计算^[6],计算结果与实验标定数据符合很好.在 M. C. 计算程序 CYLY2 中,考虑了闪烁体的边界效应、荧光产额与质子能量之间的非线性效应等,研究了大块圆柱体塑料闪烁体及组合系统的中子能响特性;在 MCNP 程序中,考虑了中子与闪烁体中的 H, C 作用的贡献,计算了几种厚度的 Pb 过滤片加塑料闪烁体探测系统的相对灵敏度与中子能量的关系,获得了 Pb 厚度为 0, 3, 6cm 的相对灵敏度比值,并与实验结果一致.用实验测量结果和理论计算的相对比值,获得了 ST401, ST1423, ST1422 组合闪烁探测器的中子灵敏度随中子能量的变化关系的外推数据,见图 4.厚度为 3cm 的 Pb 的中子衰减曲线计算值和实验值,见图 5.

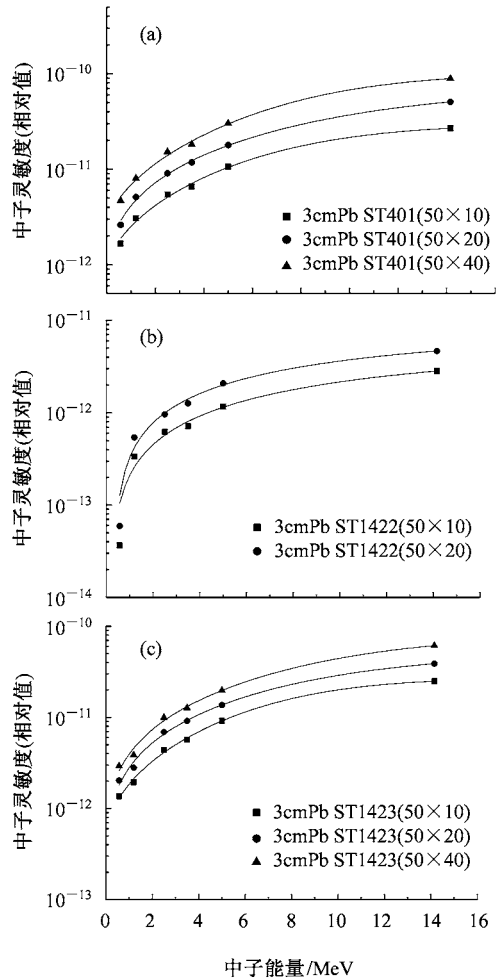


图 4 3 种组合闪烁探测系统的中子能量响应 (a)ST401 组合闪烁探测系统的中子能量响应; (b)ST1422 组合闪烁探测系统的中子能量响应; (c)ST1423 组合闪烁探测系统的中子能量响应.

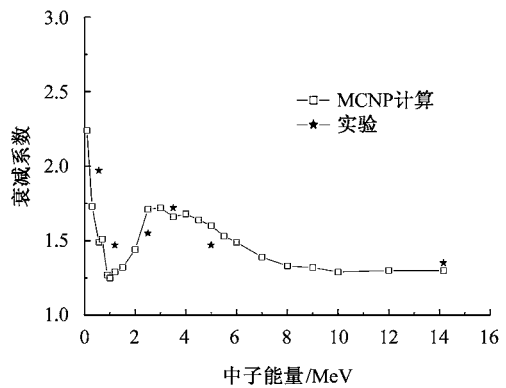


图 5 3cm 厚的 Pb 对中子的衰减计算和实验比较

5 结束语

采用直流标定方法,实验研究了“Pb 过滤片加 ST401 或 ST1422 或 ST1423 塑料闪烁体加光电倍增管”组成的探测系统对能量为 0.565MeV, 1.20MeV, 2.50MeV, 3.50MeV, 5.00MeV, 14.16MeV 的中子灵敏度. 获得了:组合闪烁探测系统的中子灵敏度随闪烁体厚度的变化关系、随 Pb 过滤片厚度的变化关系、随中子能量的变化关系. 中子灵敏度能量响应测量结果的相对合成标准不确定度为 13%.

利用 MCNP 程序计算获得了几种厚度的 Pb 与无 Pb 情况下的灵敏度比值,利用实验比值进行了验

证;采用实验和计算外推相结合的方法,解决了因实验不可能对“不同的 Pb 厚度加闪烁体类型和厚度组合”进行全部标定的困难,获得了一系列方便使用的完整的“Pb 过滤片加闪烁探测器”组合探测系统的中子能量响应数据.

组合闪烁探测系统的中子灵敏度能量响应函数的研究结果,已用于 n, γ 混合脉冲辐射场的裂变中子的绝对测量,并起到了重要的作用.

中国原子能科学研究院计量测试部的加速器运行组和中子产额监测组的大力支持和协作,为我们的实验顺利进行提供了条件,在此表示十分感谢.

参考文献 (References)

- LIU Qing-Zhao. The Diagnosis Technology of Pulse Radiation Filed. Beijing: Science Press, 1994. 524—536 (in Chinese)
(刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术. 北京: 科学出版社, 1994. 524—536)
- SHEN Guan-Ren, TANG Hong-Qing, YU Chun-Ying et al. Atomic Energy Science and Technology, 1992, **26**(1): 26—30 (in Chinese)
(沈冠仁, 唐洪庆, 于春英等. 原子能科学技术, 1992, **26**(1): 26—30)
- YANG Hong-Qiong, ZHU Xue-Bin, PENG Tai-Ping et al. HEP&NP, 2004, **28**(7): 744—748 (in Chinese)
(杨洪琼, 朱学彬, 彭太平等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(7): 744—748)
- ZHU Xue-Bin, YANG Hong-Qiong, YANG Jian-Lun et al. HEP&NP, 2004, **28**(9): 991—993 (in Chinese)
(朱学彬, 杨洪琼, 杨建伦等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 991—993)
- DING Sheng-Yue, HAN Kui-Chu. Trends in Nuclear Physics. 1994, **11**(2): 65—67 (in Chinese)
(丁声跃, 韩奎初. 核物理动态. 1994, **11**(2): 65—67)
- YANG Jian-Lun, PENG Xian-Jue, YANG Hong-Qiong et al. Nuclear Electronica & Detection Technology, 2004, **24**(4): 346—349 (in Chinese)
(杨建伦, 彭先觉, 杨洪琼等. 核电子学与探测技术, 2004, **24**(4): 346—349)

Neutron Energy Response of the Combined Scintillator Detection System*

YANG Hong-Qiong¹⁾ PENG Tai-Ping YANG Jian-Lun TANG Zheng-Yuan

YANG Gao-Zhao LI Lin-Bo WANG Li-Zong ZHU Xue-Bin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract The Combined Scintillator Detection System is composed of Pb filter leaf and plastic scintillator detector. Using direct current scale, the neutron sensitivity of detection systems composed of Pb filter leaf and ST401, ST1422 and ST1423 detector, respectively, has been studied at the neutron energy 0.565 MeV, 1.20 MeV, 2.50 MeV, 3.50 MeV, 5.00 MeV and 14.16 MeV. From the experiment results we get the relation of the detector's sensitivity and the thickness of Pb filter leaf, the thickness of scintillator, and the neutrons energy. By the experiment and calculation the neutron energy response of three kinds of combined scintillator detection system is obtained.

Key words scintillator detector, Pb filter, neutron sensitivity, energy response

Received 9 November 2004

* Supported by China Academy of Engineering Physics Project (J09-303)

1) E-mail: yang_hong_qiong @126.com