

自研塑料闪烁体探测器中子/ γ 甄别能力测试

宋云 左晶鑫 梁勇飞 韩冰 白立新 杨朝文
(四川大学 物理学院 成都 610065)

摘要 塑料闪烁体在中子探测领域具有重要应用前景。对于自研两种尺寸($\phi 2.54\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$ 、 $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$)的塑料闪烁体进行了测试。采用光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)搭建了探测系统,利用高速示波器采集功能对自研塑料闪烁体进行能量刻度,通过测量 ^{137}Cs γ 放射源的脉冲幅度谱并与MCNP5模拟谱对比,以获取康普顿边缘位置信息,实现准确的 γ 射线能量标定。利用电荷积分法对从 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源上获取的数据进行分析,采用品质因子(Figure Of Merit, FOM)、中子峰谷比、中子漏计数率等参数量化不同能区的n- γ 甄别效果,对比自研塑料闪烁体相对于EJ-299-33A的探测效率。结果表明: $\phi 2.54\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$ 自研塑料闪烁体相比于 $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$ 自研塑料闪烁体具有较高的FOM值;两种自研塑料闪烁体相对于EJ-299-33A的探测效率分别约为0.49和1.0,可见自研的 $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$ 塑料闪烁体与同尺寸的商用塑料闪烁体EJ-299-33A性能相当。

关键词 塑料闪烁体, 能量标定, 中子/ γ 甄别, 甄别能力量化

中图分类号 TL812+.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030403

Neutron/gamma discrimination performance test for self-developed plastic scintillation detectors

SONG Yun ZUO Jingxin LIANG Yongfei HAN Bing BAI Lixin YANG Chaowen
(School of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract [Background] Plastic scintillators have potential for application in neutron detection. Two sizes ($\phi 2.54\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$, $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$) of plastic scintillators are self-developed by scientific research team in the school of physics, Sichuan University. [Purpose] This study aims to experimental test the neutron/gamma (n-) discrimination performance for two self-developed plastic scintillators. [Methods] A photomultiplier tube (PMT) was used to build detection systems, and high speed oscilloscope (LECROY HDO6104A) was employed to sample signal of detector for the energy calibration of the self-developed plastic scintillator. The pulse amplitude spectrum of ^{137}Cs γ radiation source was measured and compared with the MCNP5 simulation spectrum to obtain the position information of the Compton edge and accurately calibrate the energies of γ rays. The data obtained from a $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source were analyzed using the charge integration method, and parameters such as the figure of merit (FOM), peak-to-valley ratio for neutrons, and the proportion of leaked neutrons over all neutron events were used to quantify the n- γ discrimination in different energy zones. The detection efficiencies of two self-developed plastic scintillators relative to the Commercial off-the-Shelf (COTS) EJ-299-33A were determined. [Results] The results show that the

国家自然科学基金(No.U1967205)资助

第一作者: 宋云, 男, 1997年出生, 2020年毕业于成都理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射探测技术

通信作者: 梁勇飞, E-mail: liangyf@scu.edu.cn

收稿日期: 2022-11-30, 修回日期: 2022-12-22

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U1967205)

First author: SONG Yun, male, born in 1997, graduated from Chengdu University of Technology in 2020, master student, focusing on nuclear radiation detection technology

Corresponding author: LIANG Yongfei, E-mail: liangyf@scu.edu.cn

Received date: 2022-11-30, revised date: 2022-12-22

FOM of $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ self-developed plastic scintillator is higher than that of $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ self-developed plastic scintillator, and the detection efficiency of two self developed plastic scintillators relative to EJ-299-33A is about 0.49 and 1.0, respectively. **[Conclusions]** The performance of the $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ self-developed plastic scintillator is comparable to that of the COTS plastic scintillator EJ-299-33A with near the same discrimination ability.

Key words Plastic scintillator, Energy calibration, n- γ , Discrimination ability quantification

中子探测技术目前被广泛应用在核能发电、核医学、安全检查、石油测井、高能物理等领域。闪烁体探测器作为最常用的中子探测器,其探测效率高,时间响应快,常见的有 ZnS(Ag)中子屏、Li玻璃闪烁体、无机晶体、有机晶体、液体闪烁体和塑料闪烁体等。其中,液体闪烁体具有良好的 n- γ 甄别能力,得到了广泛的应用,但其溶剂含有苯、甲苯、二甲苯、三甲苯等易燃有毒物质,因此在使用过程中需格外注意,避免发生闪爆、破裂、泄漏,使用条件较为苛刻^[1];塑料闪烁体主要由基质材料和闪烁物质构成,机械性能好,可加工成任意形状,无毒,不易潮解、氧化,耐辐照,适用于各种恶劣环境,经过特殊工艺制作的塑料闪烁体探测器可以甄别中子和 γ 射线^[2-3]。

目前,国际上研制出具有 n- γ 甄别效果塑料闪烁体最为成功的当数美国立弗莫尔国家实验室,该实验室的 Zaitseva 等^[4]制作的塑料闪烁体的 n- γ 甄别能力已经超过商用液体闪烁体 EJ-309。基于立弗莫尔国家实验室的相关技术,美国 Eljen Technology 公司生产和销售具有较高 n- γ 甄别能力的 EJ-299^[5]和改进后的 EJ-276^[6]型塑料闪烁体,而国内还未见成功研制出具有理想 n- γ 甄别效果的塑料闪烁体的报道。四川大学物理学院科研团队经过长期不懈努力,已经探索出制备具有 n- γ 甄别能力的塑料闪烁体的工艺。为了及时对自研塑料闪烁体的制备工艺提供反馈,提高其性能,本文对自研塑料闪烁体进行了 γ 射线能量标定,测定了不同能区的中子峰谷比、中子漏计数率以及 n- γ 甄别品质因子,并与 EJ-299-33A 做了对比测试。

1 实验方案

实验所用塑料闪烁体为自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 和 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 圆柱形塑料闪烁体以及 Eljen Technology 公司 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 的 EJ-299-33A。自研塑料闪烁体主要由单体基底(苯乙烯),第一发光物质(2, 5-Diphenyloxazole, PPO)和移波剂(7-Diethylamino-4-methylcoumarin, MDAC)组成。如图 1 所示,用聚四氟乙烯生料带封装自研塑料闪烁体,只露一个底面,聚四氟乙烯生料带具有较低的水蒸气透过率,可以保证塑料闪烁体长时间不雾化^[7-8]。

实验所用光电倍增管为滨松 R6231-100 型^[9],由阳极输出信号。探测器输出信号经由高速示波器 LECROY HDO6104A^[10]采集(12 bit@1.25 GSps)后导入 MATLAB 软件处理。能量刻度源为 ^{137}Cs 、 ^{22}Na ,中子源为 $^{241}\text{Am-Be}$ 源。在 n- γ 甄别实验中,探测器和源孔道之间加装一块 5 cm 的铅砖以屏蔽 γ 射线,尽量降低 γ 射线计数率。图 2 为 n- γ 甄别实验框图。



图 1 自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 和 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 塑料闪烁体拍照

Fig.1 Snapshot of $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ and $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ self-developed plastic scintillators

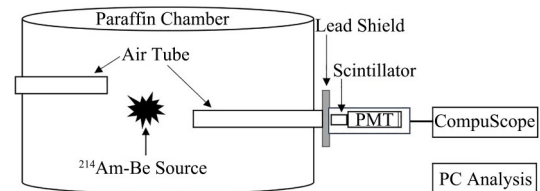


图 2 n- γ 甄别实验框图

Fig.2 Schematic of n- γ discrimination experiment

2 n- γ 甄别实验及数据分析

2.1 γ 射线能量刻度

塑料闪烁体主要由 C、H、O 等低原子序数材料组成, γ 射线与塑料闪烁体主要发生康普顿散射,形成康普顿坪区^[11-13]。通常以康普顿坪区边缘作为塑料闪烁体能量刻度点^[14],康普顿坪区边缘能量可用式(1)表示^[15]:

$$E_{\text{CE}} = \frac{2m_e c^2 g^2}{1 + 2g}, g = \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \quad (1)$$

式中：电子静止能量 $m_e c^2=511$ keV； E_γ 为 γ 射线能量。

由于统计涨落及噪声等原因，实验测得的康普顿坪区边缘具有一定展宽，若要通过坪区边缘进行能量刻度，就需要确定坪区边缘的确切位置。本实验采用蒙特卡罗程序 MCNP5 模拟与实验测量谱相结合的方法来确定能量刻度的确切位置^[16-18]，如图 3 所示。从图 3 中可以看出，可以以康普顿坪区右侧峰值计数一半处的道址进行能量刻度。

通过实验谱，可以获得自研塑料闪烁体的能量分辨率 (ΔE) 与 γ 射线能量 (E_γ) 的关系，如式 (2) 所示：

$$\Delta E = 0.27 \sqrt{E_\gamma} \quad (2)$$

通过该关系，可以对模拟谱进行展宽，如图 3 所示，可见，模拟的展宽谱与实验谱基本一致。

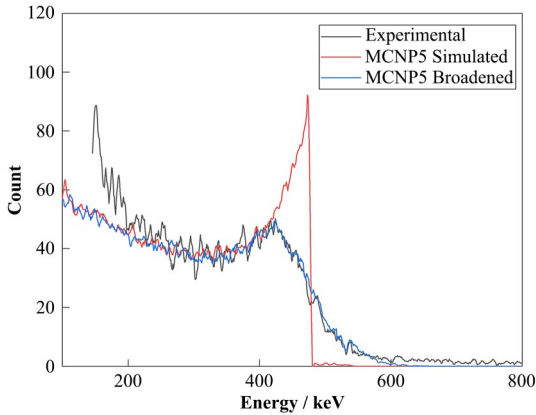


图 3 实验测量和 MCNP5 模拟的自研塑料闪烁体对 ^{137}Cs 源的脉冲幅度谱
 Fig.3 Pulse amplitude spectra of ^{137}Cs source with self-developed plastic scintillator among the experimental measurement, MCNP5 simulation, and the broadened spectrum of MCNP5 simulation

自研塑料闪烁体的能量刻度采用放射源 ^{137}Cs 、 ^{22}Na ，由式 (1) 可计算出 ^{137}Cs 源 662 keV 能量的康普顿边缘数值为 447 keV， ^{22}Na 源 511 keV、1 275 keV 能量对应的康普顿边缘数值分为 341 keV、1 062 keV。利用上述三个能量点对自研 $\phi 2.54$ cm \times 2.54 cm 塑料闪烁体探测器进行了线性拟合，如图 4 所示，确定了能量刻度曲线：

$$y_1 = 1.26x + 26.30 \quad (3)$$

式中： y_1 为能量，keV； x 为道址。

如图 4，对于自研 $\phi 5.08$ cm \times 5.08 cm 塑料闪烁体和 EJ-299-33A 的能量刻度也采用这种方法，实验结果表明，自研塑料闪烁体具有较好的能量线性。

2.2 相对光产额测试

使用 ^{137}Cs 放射源测量自研塑料闪烁体与 EJ-

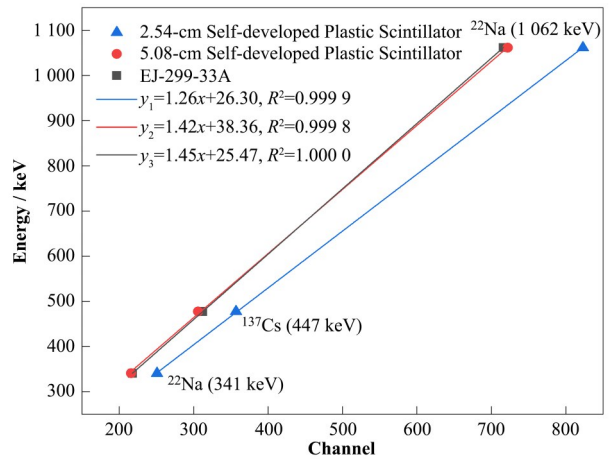


图 4 两种自研塑料闪烁体、EJ-299-33A 对 ^{137}Cs 、 ^{22}Na 源的能量标定曲线
 Fig.4 Energy calibration curves of two self-developed plastic scintillators and EJ-299-33A for ^{137}Cs and ^{22}Na sources

299-33A 的脉冲幅度谱以对比相对光产额。如图 5 所示，不同塑料闪烁体 ^{137}Cs 能谱的康普顿边缘对应道址与光产额的大小成正比，若以康普顿坪区右侧峰值计数一半处的道址换算光产额的大小，则自研 $\phi 2.54$ cm \times 2.54 cm 和 $\phi 5.08$ cm \times 5.08 cm 塑料闪烁体相对于 EJ-299-33A，光产额分别为 114.42%、98.08%。

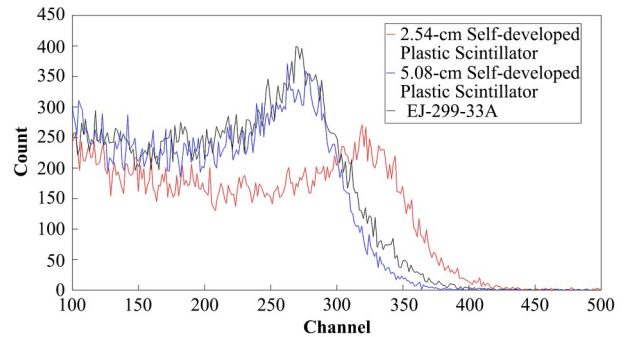


图 5 两种自研塑料闪烁体、EJ-299-33A 的脉冲幅度谱图
 Fig.5 Pulse amplitude spectra of two self-developed plastic scintillators and EJ-299-33A

2.3 n-γ 甄别参数设定

目前用于 n- γ 脉冲形状甄别 (Pulse Shape Discrimination, PSD) 的方法较多，本实验采用电荷积分法^[19]。通常，电荷积分法采用信号尾部的积分 Q_{tail} 与整个信号的积分 Q_{tot} 比值作为甄别参数 PSD，如式 (4) 所示：

$$\text{PSD} = \frac{Q_{\text{tail}}}{Q_{\text{tot}}} \quad (4)$$

本实验采用信号的峰位作为脉冲信号积分起点，PSD 数值由式 (4) 给出。脉冲信号尾部积分的起点选取对 n- γ 甄别十分重要，对于自研塑料闪烁体选

取约峰后 28 ns, 积分终点取峰后 120 ns 处, 如图 6 所示。

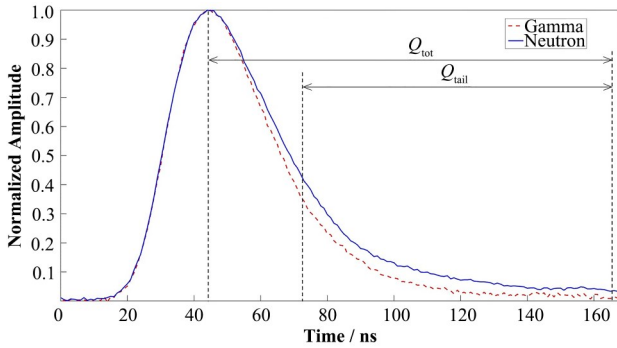


图6 电荷积分法参数设置示意图
Fig.6 Diagram of parameter settings for the charge integration method

2.4 n- γ 甄别性能

为了定量评估 n- γ 甄别性能, 引入 FOM 因子 (Figure Of Merit)^[14, 20]。如图 7 所示, 左峰为 γ 事件, 右峰为中子事件, 基本符合高斯分布。FOM 因子为中子、 γ 峰的峰位之差除以两个峰的半高宽之和:

$$FOM = \frac{\text{peak}_n - \text{peak}_\gamma}{FWHM_n + FWHM_\gamma} \quad (5)$$

式中: peak_n 、 peak_γ 分别为中子峰和 γ 峰的中心峰位; $FWHM_n$ 、 $FWHM_\gamma$ 分别中子峰和 γ 峰半高宽。FOM 值越大, 则表示 n- γ 的甄别能力越好。通常认为中子

峰和 γ 峰的间距达到 3σ , FOM 值达到 1.27, 则具有较好的 n- γ 甄别效果^[14]。

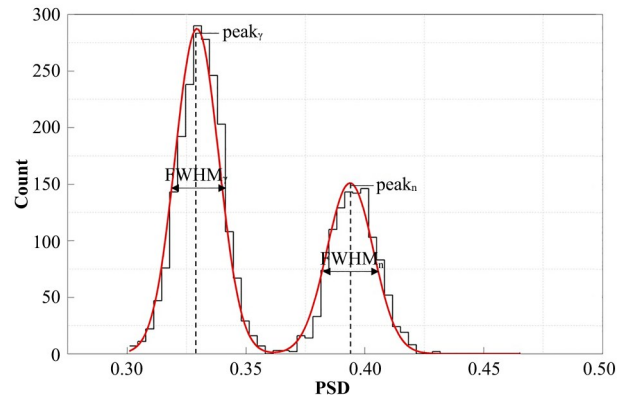


图7 中子/ γ 甄别能力分辨图
Fig.7 Differentiate diagram of n- γ discrimination ability

除 FOM 因子外, 还可以采用中子峰谷比、中子漏计数率^[21]等参数来比较不同探测器的 n- γ 甄别效果, 以确定探测器的甄别等效电子能量下限。

中子峰谷比是指中子峰的计数值与中子峰和 γ 峰之间峰谷的计数值之比。中子漏计数率则是指分离中子、 γ 事件时, 把本属于中子事件而统计成 γ 事件的个数占总中子事件数的比例, 从图 8 可以看出, 以中子、 γ 峰谷为界限, 除去 γ 事件的同时会扣除峰谷左边的一部分中子事件。中子峰谷比越大, 中子漏计数率越小, 表示中子、 γ 分离的程度越高。

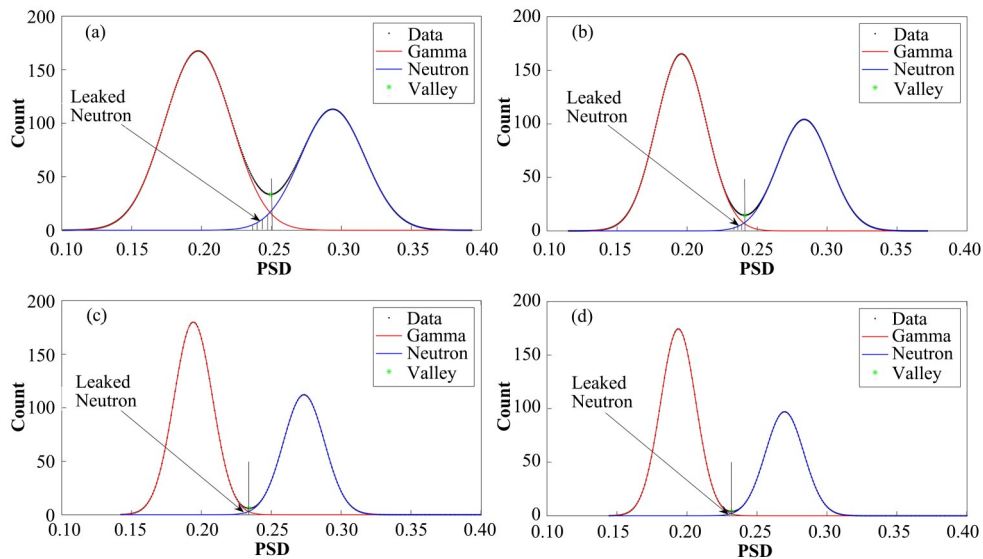


图8 4个等效电子能区的 n- γ 甄别能力分辨图
(a) E 100~200 keVee, (b) E 200~300 keVee, (c) E 300~400 keVee, (d) E 400~500 keVee
Fig.8 n- γ discrimination ability differentiation chart of the four electron equivalent zones
(a) E 100~200 keVee, (b) E 200~300 keVee, (c) E 300~400 keVee, (d) E 400~500 keVee

3 实验结果

分别在 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源上对自研 $\phi 2.54\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$ 和 $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$ 塑料闪烁体和EJ-299-

33A进行n- γ 甄别实验,实验结果如图9所示,可见,自研塑料闪烁体具有n- γ 甄别能力。塑料闪烁体甄别中子、 γ 射线的的能力随着能量的增大而增大,其中PSD值较高的是中子,PSD值较低的是 γ 射线。

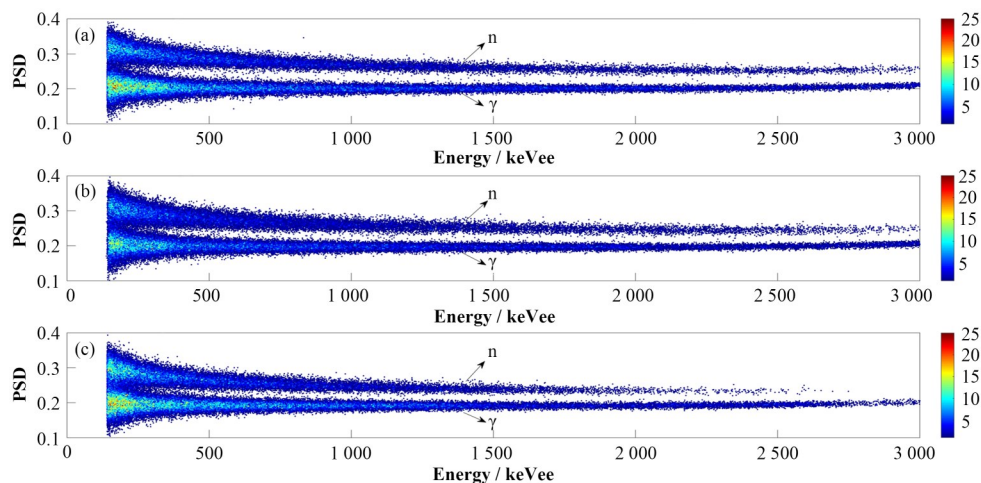


图9 PSD与等效电子能量图 (a) 自研2.54 cm塑料闪烁体,(b) 自研5.08 cm塑料闪烁体,(c) EJ-299-33A

Fig.9 PSD vs. electron equivalent energy histograms

(a) 2.54-cm self-developed plastic scintillator, (b) 5.08-cm self-developed plastic scintillator, (c) EJ-299-33A

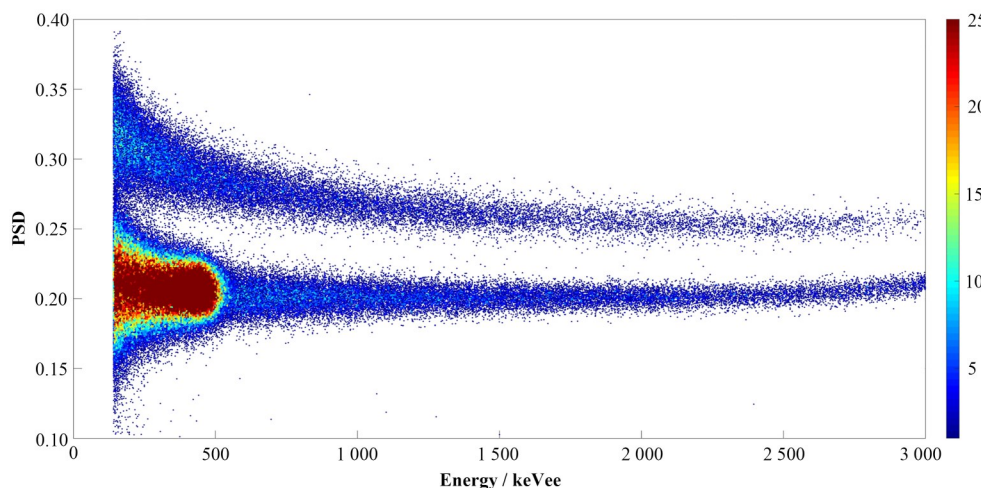


图10 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源和 ^{137}Cs γ 源的PSD与等效电子能量图

Fig.10 PSD vs. electron equivalent energy histogram of $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source and ^{137}Cs gamma source

为了验证自研塑料闪烁体的n- γ 甄别准确性,在 $^{241}\text{Am-Be}$ 源的中子孔道旁放置一枚 ^{137}Cs γ 源,从图10可以看出,在PSD值较小、500 keVee以下的低能区域,辐射事件计数明显增多,这部分事件由放置的 ^{137}Cs 放射源提供。

为了定量评估三种塑料闪烁体的n- γ 甄别能力,本实验分析了不同能区的FOM值^[14]、中子峰谷比、中子漏计数率。图11显示了三种塑料闪烁体的FOM值随等效电子能量的变化趋势。可以看出,同样条件下,自研 $\phi 2.54\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$ 塑料闪烁体的甄

别效果比自研 $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$ 的效果好,平均高0.27,这主要是闪烁体对光的自吸收引起的,体积越大自吸收越强^[22];自研 $\phi 5.08\text{ cm}\times 5.08\text{ cm}$ 塑料闪烁体的甄别效果与EJ-299-33A相当。

表1给出了自研 $\phi 2.54\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$ 塑料闪烁体在7个等效电子能区的FOM值、中子峰谷比、中子漏计数率。由表1可以看出,在300 keVee时,n- γ 甄别效果较好,FOM值为1.40,中子峰谷比为84.57,中子漏计数率约为0.3%。随着能量增高,FOM值不断增大,中子峰谷比均大于84.57,中子漏计数率均小

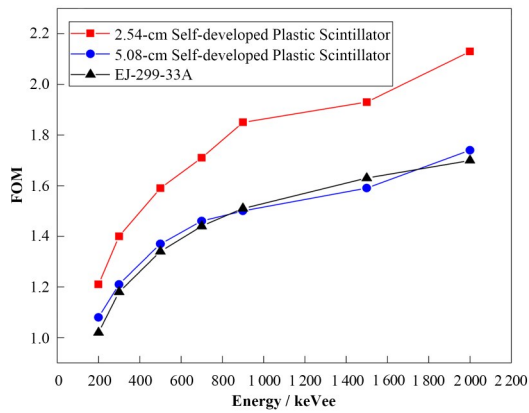


图11 三种塑料闪烁体不同能区FOM值对比
Fig.11 Comparison of FOM values in different energy zones of three plastic scintillator detectors

表1 7个等效电子能区的n- γ 甄别参数
Table 1 n- γ discrimination parameters for the 7 electron equivalent energy zones

等效电子能区 Electron equivalent energy zones / keVee	FOM	峰谷比 The peak-to-valley ratio for neutron	中子漏计数率 The proportion of leaked neutrons over all neutron events
200~300	1.21	21.73	2.98×10^{-3}
300~400	1.40	84.57	6.87×10^{-4}
500~600	1.59	394.85	1.31×10^{-4}
700~800	1.71	1 185.64	4.08×10^{-5}
900~1 000	1.85	4 750.88	9.30×10^{-6}
1 500~1 600	1.93	9 912.26	4.46×10^{-6}
2 000~2 100	2.13	84 012.70	4.83×10^{-7}

表2 三种探测器相对探测效率对比
Table 2 Comparison of the relative detection efficiency of three detectors

探测器 Detector	相对中子探测效率 Relative neutron detection efficiency	相对 γ 射线探测效率 Relative gamma detection efficiency
EJ-299-33A ($\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$)	1	1
自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 塑料闪烁体 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ self-developed plastic scintillator	0.49	0.53
自研 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 塑料闪烁体 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ self-developed plastic scintillator	1.02	0.98

4 结语

本文以自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 和 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 塑料闪烁体、商用EJ-299-33A搭建了测量系统,以蒙特卡罗方法模拟和实验测量结合的方式,确定了能量刻度点,进行了 γ 射线能量标定,结果表明,自研塑料闪烁体具有较好的能量线性。在 $^{241}\text{Am-Be}$ 源进行了n- γ 甄别实验,以FOM因子,中子峰谷比、中子漏计数率等参数来衡量n- γ 甄别效果,结果表明,自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 和 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 塑料闪烁体具有良好的n- γ 甄别效果,且

于0.3%,因而自研塑料闪烁体n- γ 甄别下限为300 keVee。采用类似的方法对其他两种探测器测得的数据拟合分析,得到了 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 自研塑料闪烁体的n- γ 甄别下限为400 keVee, $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ EJ-299-33A的n- γ 甄别下限为500 keVee。

分别统计在相同条件下测得中子事件数和 γ 事件数,若以EJ-299-33A作为标准,则自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 和 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 塑料闪烁体相对EJ-299-33A的探测效率如表2所示,自研 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 塑料闪烁体的中子、 γ 探测效率约为EJ-299-33A的一半,而自研 $\phi 5.08 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 塑料闪烁体和EJ-299-33A相近。

作者贡献声明 宋云:负责探测系统整体设计,进行

试验及数据分析,构思并撰写论文;左晶鑫:负责塑料闪烁体探测器的研制;梁勇飞:负责论文的修改及审定;韩冰:负责资料的收集与整理;白立新:负责研究的提出及论文的修改;杨朝文:负责研究的提出及论文的修改。

参考文献

- 1 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 3版(修订本). 北京: 原子能出版社, 1997.
WU Zhihua. Experimental methods in nuclear[M]. 3rd Ed. Beijing: Atomic Press, 1997.
- 2 Bisaro F, Inial A, Gatignol J, *et al.* Plastic scintillators with 1-phenyl-3- (mesityl) -2-pyrazoline as unique fluorophore for efficient neutron/gamma pulse shape discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1030**: 166469. DOI: [10.1016/j.nima.2022.166469](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166469).
- 3 Zaitseva N, Rupert B L, PaweŁczak I, *et al.* Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **668**: 88 - 93. DOI: [10.1016/j.nima.2011.11.071](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.11.071).
- 4 Zaitseva N P, Glenn A M, Mabe A N, *et al.* Recent developments in plastic scintillators with pulse shape discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **889**: 97 - 104. DOI: [10.1016/j.nima.2018.01.093](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.093).
- 5 Pulse shape discrimination EJ-299-33A, EJ-299-34[ED/OL]. 2022-09-03. <https://eljentechnology.com/18-products/plastic-scintillator/20-ej-299-33a-ej-299-34>.
- 6 Pulse shape discrimination EJ-276 & EJ-276G[ED/OL]. 2022-09-03. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-276>.
- 7 Kouzes R T, Cho H M, Cowles C C, *et al.* Investigations of degradation and encapsulation of plastic scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **954**: 161791. DOI: [10.1016/j.nima.2019.01.018](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.018).
- 8 Myllenbeck N R, Payne S, Feng P L. Environmental conditions leading to fogging in commercial poly (vinyltoluene) plastic scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **954**: 161782. DOI: [10.1016/j.nima.2019.01.009](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.009).
- 9 R6231-100 data sheet, Hamamatsu product information [ED/OL]. 2022-09-03. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/16599.html>.
- 10 LeCroy HDO6104A High Definition Oscilloscope[ED/OL]. 2022-09-03. <https://www.tecorp.com/products/lecroy/hdo6104a>.
- 11 Stevanato L, Fabris D, Hao X, *et al.* Light output of EJ228 scintillation neutron detectors[J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, 2011, **69**(2): 369 - 372. DOI: [10.1016/j.apradiso.2010.10.022](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.10.022).
- 12 Siciliano E R, Ely J H, Kouzes R T, *et al.* Energy calibration of gamma spectra in plastic scintillators using Compton kinematics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008, **594**(2): 232 - 243. DOI: [10.1016/j.nima.2008.06.031](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.031).
- 13 Shen F Z, Pan Y Y, Fu Q B, *et al.* PSD performance of EJ-276 and EJ-301 scintillator readout with SiPM array[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1039**: 167148. DOI: [10.1016/j.nima.2022.167148](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167148).
- 14 Taggart M P, Sellin P J. Comparison of the pulse shape discrimination performance of plastic scintillators coupled to a SiPM[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **908**: 148 - 154. DOI: [10.1016/j.nima.2018.08.054](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.054).
- 15 Ryabeva E V, Urupa I V, Lupar E E, *et al.* Calibration of EJ-276 plastic scintillator for neutron-gamma pulse shape discrimination experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1010**: 165495. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165495](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165495).
- 16 Kim C, Kim Y, Moon M, *et al.* Iterative Monte Carlo simulation with the Compton kinematics-based GEB in a plastic scintillation detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **795**: 298 - 304. DOI: [10.1016/j.nima.2015.06.007](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.007).

- 17 Stankovic J, Marinkovic P, Ciraj-Bjelac O, *et al.* Toward utilization of MCNP5 particle track output file for simulation problems in photon spectrometry[J]. *Computer Physics Communications*, 2015, **195**: 77 - 83. DOI: [10.1016/j.cpc.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.05.003).
- 18 王德鑫, 张苏雅拉吐, 胡新荣, 等. EJ299-33A 闪烁体光输出及其应用研究[J]. *核技术*, 2022, **45**(2): 020403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020403).
WANG Dexin, ZHANG Suyalatu, HU Xinrong, *et al.* Light output of EJ299-33A scintillator and its application [J]. *Nuclear Techniques*, 2022, **45**(2): 020403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020403).
- 19 Sénoville M, Delaunay F, Pârlog M, *et al.* Neutron- γ discrimination with organic scintillators: intrinsic pulse shape and light yield contributions[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, **971**: 164080. DOI: [10.1016/j.nima.2020.164080](https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164080).
- 20 Pagano E V, Chatterjee M B, De Filippo E, *et al.* Pulse shape discrimination of plastic scintillator EJ 299-33 with radioactive sources[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, **889**: 83 - 88. DOI: [10.1016/j.nima.2018.02.010](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.010).
- 21 Chen Y H, Lei J R, Zhang X D, *et al.* Study of n- γ discrimination for 0.4 - 1 MeV neutrons using the zero-crossing method with a BC501A liquid scintillation detector[J]. *Chinese Physics C*, 2013, **37**(4): 046202. DOI: [10.1088/1674-1137/37/4/046202](https://doi.org/10.1088/1674-1137/37/4/046202).
- 22 Grodzicka-Kobylka M, Szczesniak T, Moszyński M, *et al.* Fast neutron and gamma ray pulse shape discrimination in EJ-276 and EJ-276G plastic scintillators[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, **15**(3): P03030. DOI: [10.1088/1748-0221/15/03/p03030](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/03/p03030).