

文章编号: 1007-4627(2002)03-0357-04

塑料闪烁体中子探测效率及相对发光产额的标定*

彭太平¹, 罗小兵², 张传飞¹, 李如荣¹,

张建华¹, 夏宜君², 杨志华²

(1 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900;

2 四川大学原子核科学技术研究所, 四川 成都 610064)

摘要: 利用加速器中子源研究了用于标定塑料闪烁体中子探测效率及相对发光产额的实验技术, 在四川大学原子核科学技术研究所 2.5 MeV 静电加速器上, 利用 T(p, n) 和 D(d, n) 核反应作为中子源, 在 0.6—5 MeV 中子能区对直径为 40 mm, 厚度为 5 mm 的 1421 塑料闪烁体的中子探测效率及相对发光产额进行了测定.

关键词: 塑料闪烁体; 中子探测效率; 相对发光产额

中图分类号: TL815 **文献标识码:** A

1 引言

塑料闪烁体具有对中子灵敏, 尤其是闪烁发光衰减时间短的特点, 在核爆炸、次临界实验等瞬发高强度中子辐射场的测量中有着重要的应用, 而对其性能参数——中子探测效率及相对发光产额进行准确标定是其实际应用的基础. 为此我们在四川大学原子核科学技术研究所 2.5 MeV 静电加速器上, 利用 T(p, n) 和 D(d, n) 核反应作为中子源, 研究了用于标定塑料闪烁体中子探测效率及相对发光产额的实验技术, 针对塑料闪烁体既对中子灵敏, 又对 γ 灵敏的特点, 特别考虑了对实验大厅散射中子、实验大厅 γ 本底及靶头 γ 贡献的扣除方法, 并在 0.6—5 MeV 中子能区对直径为 40 mm, 厚度为 5 mm 的 1421 塑料闪烁体的中子探测效率及相对发光产额加以测定, 对中子注量采用金活化法并用长计数器计数归一的方法确定.

2 实验原理及方法

对能量为 E 的单能中子, 塑料闪烁体探测器的探测效率 $\epsilon_E = N/\Phi$, 其中 Φ 为入射到闪烁体的中子总注量, N 为探测器系统记录的全谱中子总数^[1].

若将能量为 E 的单能中子在塑料闪烁体中的

平均发光产额用 \bar{Y} 表示, 则

$$\bar{Y} \propto \epsilon_E \int_0^E Y_{E_p} \frac{dE_p}{E} \propto \frac{K \sum N_i H_i}{\Phi},$$

其中 Y_{E_p} 表示能量为 E 的中子产生的能量为 E_p 的反冲质子的发光产额, $0 \leq E_p \leq E$, N_i 表示在 multidetector 记录的能谱中对应于道数 (H_i) 的记数, K 与闪烁体中的光传输系数、光导的光传输系数、光阴极的光电转换效率、光电倍增管的放大倍数、电荷-电压转换系数以及电子学系统的放大倍数等相关, 但对固定的闪烁体探测器系统可视为常数^[2]. 则中子相对发光产额 Y 可用下式表示:

$$Y = \frac{\sum H_i N_i}{\Phi}.$$

当用加速器中子源对塑料闪烁体的中子探测效率及相对发光产额进行标定时, 进入探测器并被记录的包括以下贡献: 加速器产生的氘(质子)粒子在氘(氘)靶上核反应产生的直接中子的贡献、氘(质子)粒子在靶底衬材料 (Ti, Mo) 及靶管材料 Cu 上产生的 γ 的贡献、中子在靶底衬及靶管材料上的散射中子及由中子引起的 γ 的贡献、大厅散射中子及大厅 γ 本底的贡献.

收稿日期: 2001-11-02; 修改日期: 2002-02-07

* 基金项目: 中国工程物理研究科学基金资助项目(20000212)

作者简介: 彭太平(1968—), 男(汉族), 重庆垫江人, 硕士, 副研究员, 从事脉冲辐射测量研究.

对于中子在靶底衬及靶管材料上的散射及由其引起的 γ 贡献, 由于属于次生效应, 通过加工特制的管壁厚度仅 0.5 mm 的长靶管, 尽量减少靶头物质, 其影响可不作特别考虑.

对大厅散射中子及大厅 γ 本底的贡献, 采用挡锥法加以扣除. 其屏蔽锥的设计除了能保证完全阻挡 5 MeV 能量的中子外, 还应着重考虑中子在屏蔽锥上可能产生的次级 γ 效应, 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 20 mm 厚的铅和 20 mm 厚的铜吸收 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反应产生的 0.48 MeV 的 γ 射线. 尤其要注意对慢化中子的吸收不能采用惯用的镉片吸收法, 因为镉对慢化中子的吸收主要是通过 $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)$ 反应完成, 其结果是产生大量的较高能量的 γ 射线, 会对测量工作带来不利影响. 同时在实验中, 锥的位置应根据下述标准权衡确定: (1) 离闪烁探测器尽可能远, 使锥对闪烁体所张的立体角尽可能小, 尽量减少锥上产生的次级效应对测量结果的影响, 同时也尽量减少锥对反向散射的大厅中子本底及 γ 本底的屏蔽影响. (2) 屏蔽锥不能离产生中子的靶太近, 以避免引起中子场的太多变化.

对于氘(质子)粒子在靶衬及靶管材料上产生的 γ 的贡献, 采用空靶实验数据以靶头束流积分计数归一的方法扣除. 因为, 在我们的实验能区, $T(p, n)$ 反应和 $D(d, n)$ 反应虽不产生 γ , 但质子、氘与靶底衬材料(Ti, Mo)及靶管材料 Cu 作用, 会产生 γ , 其强度、能谱结构及角分布情况均不清楚, 用挡锥法不能扣除该部分 γ 的贡献. 为此我们用与产生中

子时相同能量的质子束(氘束)轰击空靶(即未吸附氘、氘的同条件靶片), 用同一塑料闪烁体在需要测量的各个角度分别测定其 γ 贡献谱, 并用靶头束流积分计数对靶头 γ 贡献归一扣除, 对氘打空靶实验用长计数器监测由氘在钛上吸附而产生的中子.

对中子总注量 Φ 是采用金活化法与长计数器计数相归一的方法确定.

3 实验测量

实验装置如图 1 所示.

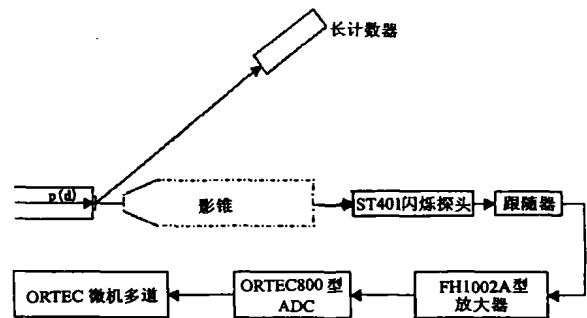


图 1 实验装置

3.1 中子源

在 2.5 MeV 静电加速器上, 用能量为 1.976 MeV 的质子束轰击能量厚度约为 152 keV 的氘-钛靶以产生 0.2—1.1 MeV 能区的中子, 用能量为 1.9 MeV 的氘束轰击能量厚度约为 200 keV 的氘-钛靶以产生 2—5 MeV 能区的中子, 中子能量与角度关系如表 1, 其中中子能散度是考虑了靶厚引起的能散度与闪烁体对中子源的有限张角引起的能散度, 二者的平方和开方给出. 角度是指出射中子与

表 1 中子能量与角度关系

角度	MeV		
	0°	60°	120°
T(p, n)	1.100±0.079	0.655±0.060	0.215±0.026
D(d, n)	5.029±0.107	3.827±0.084	2.194±0.035

入射质子束(或氘束)间的夹角.

3.2 谱仪系统

配置了三套由低噪声 GDB44F 型光电倍增管组成的探头, 能谱记录系统是采用 ORTEC 公司的计算机多道谱仪系统, 其配置软件是 Maestro, 该系统具有死时间显示及谱相减功能.

谱仪工作状态的选择关键是对特定塑料闪烁体, 选定光电倍增管的工作电压及相应的放大器参数(放大倍数, 成形时间). 在正式实验前的预备工作中, 采用 ^{137}Cs γ 放射源, 测定在不同高压下, 塑料闪烁体对其 661 keV γ 射线的康普顿反冲电子谱的高端边沿道数. 根据电子和质子在塑料闪烁体中

发光产额的对应关系^[3]，选定对应于 ST401 闪烁体的谱仪工作状态。选择标准是首先保证探头工作在线性区，其次是使测得能谱有合适的宽度。

3.3 加速器上机实验

(1) 空靶谱、效应谱、挡锥谱的测定 首先用 1.976 MeV 质子束(1.9 MeV 氘束)轰击空靶，分别在 0°、60°和 120°测定其靶头 γ 的贡献；然后换上氘(氘)靶，用同样束流轰击，在相应角度先测中子效应谱，然后挡锥测对应的大厅散射中子及大厅 γ 贡献谱——挡锥谱。在上述测量中，塑料闪烁体表面距中子靶 60 cm，屏蔽锥前端距靶 6 cm，后端距闪烁体表面 10 cm。在测量时，同时记录置于固定角度(30°)和固定距离(1.6 m)的长计数器中子积分计数，并记录靶上束流积分记数，以做数据的归一。

实验测得的典型谱如图 2 所示。

(2) 中子注量测定 对于 T(p, n)中子源和 D(d, n)中子源，分别在其 0°方向距靶 10 cm 处活化金片，并记录下在活化过程中长计数器总积分计数。活化时，直径为 20 mm 的金片封装在 0.5 mm 厚的锡盒中以消除热中子本底的影响。活化后生成核¹⁹⁸Au 衰变放出的 412 keVγ 射线用高纯锗谱仪测量。照射到金片上的中子注量率 Φ 可由下式得到：

$$\Phi = \frac{\lambda A}{N_s \delta_{(E)} I_{Au} \epsilon f_s (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}$$

其中：N_s 表示金片内的原子核总数，δ_(E) 表示在中子能量为 E 时¹⁹⁷Au 的活化截面值，λ 表示¹⁹⁸Au 的衰变常数，A 表示高纯锗探测器测出的¹⁹⁸Au 放出 412 keVγ 射线的全能峰面积，I_{Au} 表示¹⁹⁸Au 放出 412 keVγ 射线的强度，ε 表示高纯锗探测器对 412 keVγ 射线的全能峰探测效率，f_s 表示金片本身对

其放出的 412 keVγ 射线的自吸收修正因子，t₁ 和 t₂ 分别为中子照射时间和照射结束到开始 γ 放射性测量之间的冷却时间，t₃ 为 γ 放射性测量时间。

再利用中子注量率与源距的平方反比关系可以推得在闪烁体所处位置(距源 60 cm)的中子注量，其结果见表 2，其中长计数器积分计数表示在活化过程中长计数器记录的总中子计数，中子总注量表示在 0°方向距靶 10 cm 处单位面积上在活化时间内的总中子数，转换系数表示长计数器记录的一个中子对应着在 0°方向距靶 60 cm、直径为 4 cm 的塑料闪烁体上接收到的中子数。对于 60°和 120°时的转换系数可根据 T(p, n)反应和 D(d, n)反应微分截面值推得^[4]。

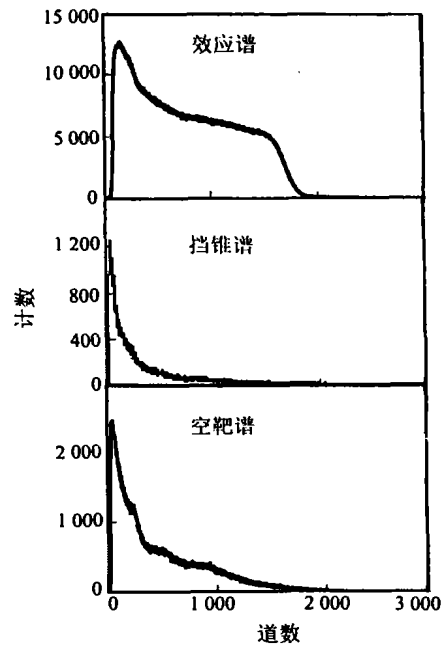


图 2 塑料闪烁体 1421φ40 mm×5 mm 在 E_n = 5 MeV 时的效应谱及相应的挡锥谱、空靶谱

表 2 长计数器中子计数——塑料闪烁体接收中子数转换系数

中子源	长计数器积分计数	中子注量/cm ²	转换系数
T(p, n)	1.901 739 2×10 ⁷	1.978 436×10 ¹⁰	363.143
D(d, n)	3.600 521 1×10 ⁷	7.053 599×10 ¹⁰	683.837

4 数据处理

首先对测得的各空靶谱、效应谱、挡锥谱作死时间修正；然后以长计数器积分计数作为归一标准，效应谱—(挡锥谱×归一系数)，从而扣除大厅

散射中子及大厅 γ 的贡献；再以靶头束流积分计数作归一标准，效应谱—(空靶谱×归一系数)，扣除靶头 γ 的贡献。对上述处理得到谱中的下阈非零作数据外推^[5]，便得到所需要的单能中子谱，对其积

分得到全谱中子总计数 N 及 $\sum H_i N_i$; 利用金活化法确定出的长计数器计数与塑料闪烁体上接受到的中子数间的转换系数, 由测效应谱时记录的长计数器积分计数, 推得照射到闪烁体上的中子总注量 Φ ; 由 $\epsilon = N/\Phi$ 和 $Y = (\sum H_i N_i)/\Phi$ 求得不同中子能量时的探测效率及相对发光产额。

5 结果及讨论

塑料闪烁体 $1421\phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 对不同能量中子的探测效率及相对发光产额测量结果见图 3。图 3(b)中相对发光产额是以 5 MeV 中子能量点归一给出。对于 $D(d, n)$ 反应, 空靶实验表明在全谱总计数中靶头 γ 贡献为 2.67%—9.58%, 挡锥实验表明实验大厅散射中子及大厅产生的 γ 贡献为 1.63%—7.62%; 而对于 $T(p, n)$ 反应, 其靶头 γ 贡献小于 1%, 实验大厅散射中子及大厅产生的 γ 贡献为 2.36%—4.92%。实验数据的误差范围为 6.64%—10.10%, 主要来自于数据非零外推、扣本底谱、扣空靶谱误差(共 3.1%—6.6%), 及中子总

注量确定误差(5.87%—7.65%)。

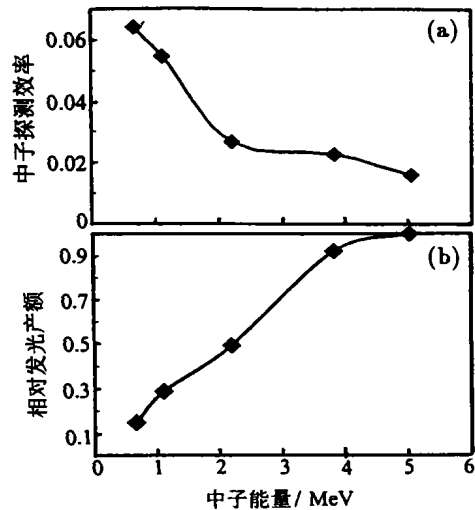


图 3 $1421\phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 塑料闪烁体中子探测效率和相对发光产额

致谢 感谢四川大学原子核科学技术研究所 2.5 MeV 静电加速器组工作人员的大力支持。

参 考 文 献:

[1] 郭士伦. 固体气泡损伤探测器中子探测效率的刻度[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(3), 212.
 [2] 唐孝威. 粒子物理实验方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983, 107—147.
 [3] Taylor C J, Remley M E, Jentschke W K, et al. Response of Some Scintillation Crystals to Heavy Particles [J]. Phys Rev, 1951, 83, 169.
 [4] 马鸿昌. 加速器单能中子源常用数据手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1976, 163.
 [5] 刘圣康. 中子物理[M]. 北京: 原子能出版社, 1986, 63—69.

Study on Calibration of Neutron Efficiency and Relative Photo-yield of Plastic Scintillator*

PENG Tai-ping¹, LUO Xiao-bing², ZHANG Chuan-fei¹, LI Ru-rong¹, ZHANG Jian-hua¹, XIA Yi-jun², YANG Zhi-hua²
 (1 Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;
 2 Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A method used for the calibration of neutron efficiency and the relative photo yield of plastic scintillator is studied. $T(p, n)$ and $D(d, n)$ reactions are used as neutron resources. The neutron efficiencies and the relative photo yields of plastic scintillators 1421 (40 mm in diameter and 5 mm in thickness) are determined in the neutron energy range of 0.655—5 MeV.

Key words: plastic scintillator; neutron efficiency; relative photo-yield; calibration

* Foundation item, Science Foundation of Chinese Academy of Engineering Physics (20000212)