

SND-S1 型液体闪烁体光输出的能量响应

李欣年¹, 郭俊鹏¹, 虞太六¹, 方晓明¹, 罗文芸^{1,*}, 石双惠², 钱梦霖², 程 茜²

(1. 上海大学 射线应用研究所, 上海 201800; 2. 同济大学 声学研究所, 上海 200092)

摘要:采用不同能量的 γ 射线标准源及 D-D、D-T 核反应的单能中子源分别测定了新型液体闪烁体 SND-S1 的光输出随粒子能量的变化, 采用 Monte-Carlo 程序 Penelope 模拟计算了 ^{137}Cs γ 射线的能量分布谱, 最大康普顿电子能量的计算值和实验值相差 2.7%。将实验结果与文献值作了比较, 能量低于 3 MeV 时, 符合较好; 能量高于 6 MeV 时, 略有差别。结果表明, 液体闪烁体的光输出与电子能量呈线性正比关系, 而与中子能量呈非线性关系。

关键词:液体闪烁体; 光输出; 能量响应

中图分类号: TL812.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)08-0755-05

Measurement of Light Output Function for SND-S1 Liquid Scintillator

LI Xin-nian¹, GUO Jun-peng¹, YU Tai-liu¹, FANG Xiao-ming¹,
LUO Wen-yun^{1,*}, SHI Shuang-hui², QIAN Meng-lu², CHENG Qian²

(1. *Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University, Shanghai 201800, China;*

2. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The light output as a function of electron and proton energy for SND-S1 liquid scintillator was measured using several γ -ray sources and mono-energy neutrons from D-D, D-T nuclear reactions. The electron energy spectra of ^{137}Cs (resolution-free) was calculated by Monte-Carlo code Penelope. It is found that the difference of the maximum Compton electron energy between calculated and measured values is 2.7%. The experiment results were compared with those of literatures. For energy below 3 MeV, results are in excellent agreement with all literatures'; Above 6 MeV, in excellent agreement with one literature's and in moderate agreement with others'. The results indicate that the increase of the light output of liquid scintillator linearly depends on the energy of electron, but nonlinearly on the energy of proton.

Key words: liquid scintillator; light output; particle energy response

收稿日期: 2007-04-18; 修回日期: 2007-07-10

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10434070); 上海市重点学科第二期资助项目(T0105)

作者简介: 李欣年(1953—), 女, 天津人, 副研究员, 核技术应用专业

* 通信作者: 罗文芸, wyluo@shu.edu.cn

有机液体闪烁体具有发光衰减时间短(ns级)、对 γ 射线和中子灵敏度高的特性,常作为中子探测元件和光电倍增管组成快中子探测器。闪烁体光输出能量响应对于谱仪刻度、计算中子探测效率、确定测得能谱的形状极其重要^[1-2]。国内外对类似的液体闪烁体(ST-451和NE-213)光产额的能量响应进行了大量研究。研究表明,对于各种液体闪烁体,即使类型尺寸相同,其光输出能量响应也有所差异,甚至液体闪烁体的使用年限也是影响因素^[3-4]。本工作使用北京高能科迪科技公司的新型含钆液体闪烁体(SND-S1)作为射线成核声空化中氙-氙反应研究^[5]的核测量元件,采用不同能量的 γ 射线标准源和氙-氙、氙-钆核反应的单能中子源分别实验测量SND-S1型液体闪烁体的光输出随粒子能量的变化,采用Monte-Carlo模拟计算¹³⁷Cs γ 射线无分辨率的能量分布谱。

1 实验

1.1 实验装置

SND-S1型液体闪烁体用硅油耦合到XP2020Q型光电倍增管上,能谱测量系统实验装置如图1所示。采用石蜡(厚度15 cm)内衬铅层(厚度60 mm)的结构进行屏蔽,探头放在屏蔽体内。在实验采用的仪器参数下,本底噪声 $\leq 2.5 \text{ s}^{-1}$,测量无道漂。

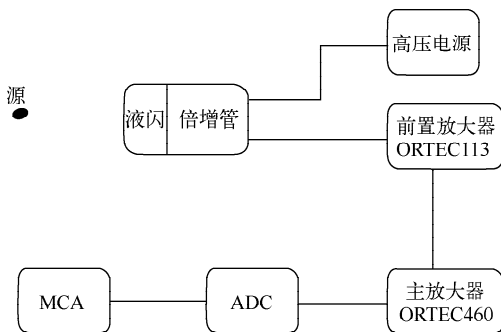


图1 实验装置图

Fig.1 Scheme of experiment assembly

1.2 实验原理

光产额的能量响应是指闪烁体产生的光输出随不同入射粒子(α 、 β 、 γ 、 p 等)的能量变化关系。对于 γ 射线,当 γ 射线能量 $E_\gamma < 3 \text{ MeV}$ 时, γ 光子在有机闪烁体中以康普顿散射为主,由式

(1)得出最大康普顿散射电子能量 $E_{e,\max}$,有:

$$E_{e,\max} = E_\gamma / (1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}) \quad (1)$$

式中: E_γ 为入射 γ 射线能量; m_e 为电子质量; c 为光速。

$E_{e,\max}$ 与测定的 γ 射线脉冲幅度谱中康普顿边缘半高位置 $L_{1/2}$ 相关。同一实验条件下,测量不同 E_γ 的 γ 标准源的脉冲幅度谱,可得到 $L_{1/2}$,即得出有机液体闪烁体光输出对电子能量的响应。不同 γ 标准源的 E_γ 和 $E_{e,\max}$ 列于表1。

表1 不同 γ 源的 γ 射线能量和最大康普顿散射电子能量
Table 1 E_γ and $E_{e,\max}$ of different γ -ray sources

标准源	E_γ/MeV	$E_{e,\max}/\text{MeV}$
¹³⁷ Cs	0.662	0.477
²² Na	0.511	0.341
²² Na	1.275	1.061
⁶⁰ Co	1.173	0.963
⁶⁰ Co	1.332	1.118

对于中子,入射中子与有机闪烁体中的主要元素氢原子发生弹性碰撞,产生反冲质子。反冲质子能量与中子能量的关系为:

$$E_p = \cos^2 \theta E_n \quad (2)$$

式中: E_n 为中子能量; E_p 为反冲质子能量; θ 为中子入射方向与反冲核运动方向之间的夹角。最大反冲质子能量 $E_{p,\max}$ 等于入射中子能量。

在K-400型高压倍加器上,用能量为180 keV的氙束分别轰击氙-钆和氙-钆薄靶,产生D-D、D-T核反应,根据中子能量与出射角的关系,取得一定出射角下的单能中子。

对D-D反应,有:

$$\sqrt{E_n} = 0.3535 \cos \varphi \sqrt{E_d} \pm \sqrt{(0.125 \cos^2 \varphi + 0.250) E_d + 2.475} \quad (3)$$

对D-T反应,有:

$$\sqrt{E_n} = \frac{\sqrt{2}}{5} E_d \cos \varphi \pm \frac{2}{5} \sqrt{\frac{1}{2} E_d (\cos^2 \varphi + 5) + 88} \quad (4)$$

式中: E_d 为氙离子能量; φ 为出射角,即出射中子能量与入射氙束间的夹角。

不同出射角下的中子能量列于表2。在2.1~14.6 MeV范围内测量不同单能中子的脉冲高度谱,经本底谱(无中子发射)和死时间

修正,得到单能中子能谱,能谱的边缘半高度的道数 L_p 与 $E_{p,max}$ 相对应,从而得到液体闪烁体的光输出随中子能量的变化关系,即光输出对反冲质子能量的响应。

表 2 中子能量与出射角的关系

Table 2 Neutron energy with variable injection angles

出射角/(°)	不同反应下的中子能量/MeV	
	T(d,n)	D(d,n)
0	14.645±0.112	3.106±0.036
90	14.166±0.015	2.529±0.017
140	13.828±0.009	2.160±0.010

2 结果与讨论

2.1 SND-S1 型液体闪烁体光输出对 γ 射线康普顿散射电子能量响应

测得的 3 种 γ 标准源脉冲幅度谱示于图 2。对用于快中子测量的液体闪烁体(NE213 和 ST451)的研究结果^[2,6-7]表明,由于测量的康普顿幅度谱形状与液闪类型、尺寸、封装外壳材料、 γ 源相对于闪烁体的几何位置、 γ 射线能量和探测器系统的能量分辨等因素密切相关,因此,从脉冲幅度谱的康普顿边来确定 $E_{e,max}$ 对应的位置(道数)较为关键。本实验中的 SND-S1 型液体闪烁体的主要成分是 1,3,5-三甲基苯和 Bis-MSB(对-双(邻-甲基苯乙烯基)苯)和含钆络合物,其脉冲幅度谱形状以及 $L_{1/2}$ 不同于文献[2]中的报道值。采用 Monte-Carlo 模拟计算电子能量分布谱,并与测量的脉冲幅度谱进行比较,以确定实验误差。采用 Penelope 程序^[8]进行了模拟计算。该程序用 Monte-Carlo 方法模拟从 ^{137}Cs γ 源发射的 662 keV 能量的光子入射到闪烁体(包括闪烁体的铝容器、石英玻璃)内的能量损失过程,截止能量设为 1 keV。由于 $E_\gamma \leq 3$ MeV,电子对产生效应忽略不计,但考虑了容器壁的作用,即闪烁体内产生的光电子可穿过铝壁;铝容器上亦可能产生电子而被阻止在闪烁体内。程序计算得到 ^{137}Cs 的能量分布谱。根据谱仪的能量定标关系,将计算谱的能量值转化为道数,从而与实验测量的脉冲幅度谱进行比较。计算采用的数据为:SND-S1 型液体闪烁体直径 46 mm,高度 50 mm;容器铝外壳外径 56 mm,入射铝层厚度

3 mm;石英玻璃厚度 2 mm;闪烁体密度 0.886 g/cm³;氢碳原子比 1.331; γ 射线源放置在闪烁体中心轴线上,与闪烁体中心的距离为 4.5~8.3 cm;随机跟踪光子数 2×10^6 个。

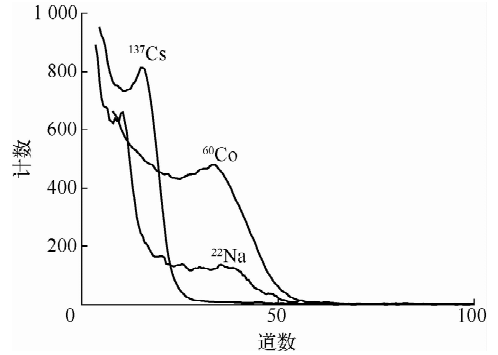


图 2 ^{137}Cs 、 ^{22}Na 和 ^{60}Co γ 射线的脉冲幅度谱
Fig. 2 Gamma ray pulse height spectra of ^{137}Cs , ^{22}Na and ^{60}Co for SND-S1

测量的 ^{137}Cs 脉冲幅度谱和模拟计算无分辨率的 ^{137}Cs 电子能量分布谱示于图 3。 L_c 为能量分布谱中康普顿边对应的 $E_{e,max}$, $L_{1/2}$ 为实测脉冲幅度谱中康普顿边半高度对应的能量值。由图 3 可见,两者相差 2.7%。模拟计算采用多次散射模型,使得模拟结果更接近于实际情况,因此,计算值与实测值的差异较小,与文献[2,9]的计算误差为 2%~4% 一致。SND-S1 型液体闪烁体脉冲幅度(道数)与电子能量的线性关系如图 4 所示。由图 4 可知,闪烁体的光输出与电子能量呈线性关系。

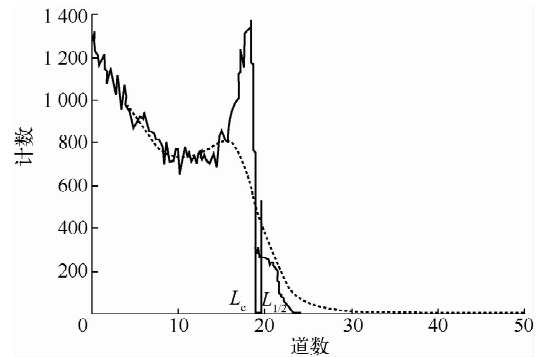


图 3 ^{137}Cs 的实测脉冲高度谱和模拟计算能量分布谱
Fig. 3 Calculated and measured pulse height spectra for ^{137}Cs
实线——实测脉冲高度谱;虚线——模拟计算能量分布谱

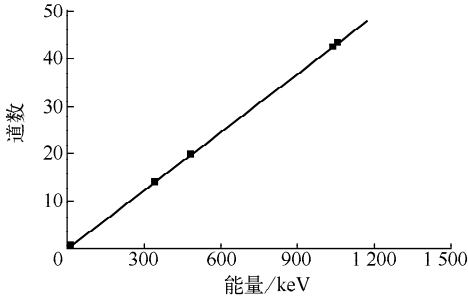


图4 SND-S1型液体闪烁体光输出的电子能量响应

Fig. 4 Electron energy response vs light output for SND-S1

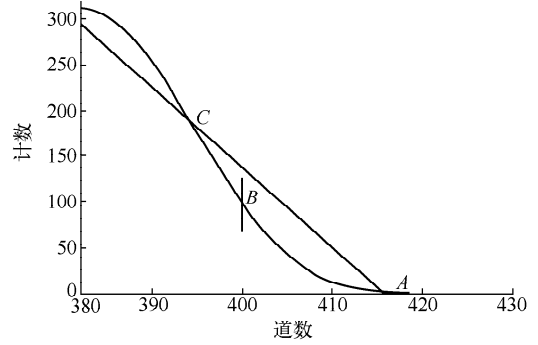


图6 14.65 MeV能量中子脉冲高度谱 L_p 的确定

Fig. 6 Determination of L_p for 14.65 MeV neutron PHS

2.2 SND-S1型液体闪烁体光输出对于中子弹性散射反冲质子的能量响应

在2.1~14.6 MeV范围内测得单能中子的脉冲幅度谱如图5所示。本工作采取文献[10]的方法确定中子脉冲高度谱的 L_p (道数), 对各中子脉冲幅度谱的边缘取多个数值, 进行线性拟合, 直线分别交于谱线A、C点, 取中值B(半高度), 对应的道数即为 L_p , 图6为确定14.65 MeV中子脉冲高度谱 L_p 的示意图。 L_p (道数)与 $E_{p,max}$ 对应。

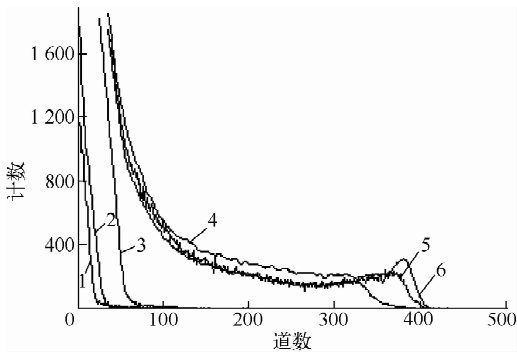


图5 不同中子能量的脉冲幅度谱

Fig. 5 Pulse height spectra with variable neutron energies by SND-S1
中子能量(MeV): 1—2.1; 2—2.5;
3—3.1; 4—13.8; 5—14.1; 6—14.6

液体闪烁体脉冲幅度与反冲质子能量的关系示于图7, 图中标出了其他文献的实验数据。将实测的 $E_{p,max}$ (道数) 经能量定标转换成能量值(MeV), 以与其他文献数据比较。粒子能量低于3 MeV时, 本实验数据与文献[3, 6-7]符合很好; 高于6 MeV时, 与文献[6]一致, 但比

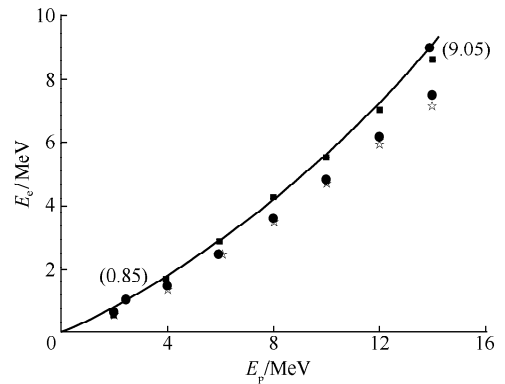


图7 SND-S1液体闪烁体光输出的质子能量响应

Fig. 7 Proton energy response vs light output for SND-S1

■——文献[6]实验数据; ☆——文献[7]实验数据;
●——文献[3]实验数据; 实线——本工作SND-S1拟合

文献[3, 7]高出10%~20%。14与2.5 MeV光输出的比值为10.6, 略小于Taleyarkhan^[5]测得值(11.7)。这些差异可能由于液体闪烁体成分不同所致, 也可能与最大反冲质子能量值的确定方法不同有关。对实验值进行二项式拟合, 得到闪烁体的光输出相对于反冲质子的能量关系为:

$$L = (0.24 \pm 0.04)E_p + (0.03 \pm 0.01)E_p^2 \quad (5)$$

2.3 SND-S1型液体闪烁体光输出能量响应

液体闪烁体对不同带电粒子的光响应可用Berks的半经验公式表示:

$$dS/dx = (AdE/dx)/(1 + kBdE/dx) \quad (6)$$

式中: S 为闪烁体的光产额; x 为带电粒子在闪烁体中的径迹长度; E 为带电粒子的能量; A 和 k 、 B 为实验特定常数。

液体闪烁体的光输出能量响应曲线如图8

所示。由图 8 可知, SND-S1 液体闪烁体的光输出与康普顿散射电子的能量 E_e 。在闪烁体中的能量损失呈线性正比, 而与质子的能量 E_p 损失呈非线性关系。

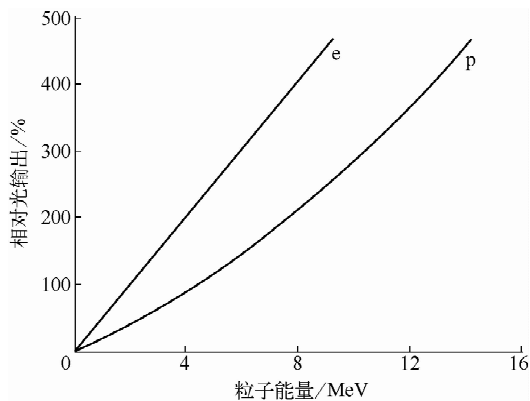


图 8 SND-S1 液体闪烁体光输出能量响应

Fig. 8 Curves of particle energy response for SND-S1

3 结论

用 SND-S1 型液体闪烁体探测器组成的中子能谱仪测量了不同能量的 γ 源和多种单能中子的脉冲幅度谱, 取得了光输出的粒子能量响应。结果显示, SND-S1 型液体闪烁体光输出随 γ 能量线性增加, 而随中子能量非线性增加。实验结果表明, SND-S1 型液体闪烁体的光输出能量响应与 NE213、ST451、EJ301 等闪烁体的相似, 也可用作射线成核声空中氘-氚反应研究的核测量元件。

感谢中国科学院上海应用物理研究所对于核测量器件的大力支持, 感谢上海大学王朝壮和唐欣欣在计算模拟方面的帮助。

参考文献:

[1] 李安利, 黄糖仔, 白希祥, 等. 用双闪烁体飞行时间谱仪测量 ^{252}Cf 和 Am-Be 源的中子能谱[J]. 原子核物理, 1982, 4(2): 145-152.
LI Anli, HUANG Tangzi, BAI Xixiang, et al. Measuring neutron energy spectra of ^{252}Cf and Am-Be sources with neutron time-of-flight spectrometer with double scintillators[J]. Chin J Nucl Phys, 1982, 4(2): 145-152(in Chinese).

[2] 陈金象, 施兆民, 唐国有, 等. 精确测定 ST451 型快中子探测器的有效中子阈和电子的相对闪烁响应[J]. 核电子学与探测技术, 1994, 14(3): 140-147.

CHEN Jinxiang, SHI Zhaomin, TANG Guoyou. Accurate determination of the effective neutron detection threshold and relative electron response for ST451 neutron scintillation detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1994, 14(3): 140-147(in Chinese).

- [3] NAQVI A A, KHIARI F Z, COBAN A, et al. Measurement of light output of NE213 and NE102A detectors for 2.7-14.5 MeV neutrons [R]. [S. l.]: [s. n.], 1992.
- [4] HAWKES N P, ADAMS J M, BOND D S, et al. Measurements of the proton light output function of the organic liquid scintillator NE213 in several detectors[J]. Nucl Instrum Methods, 2002, 476: 190-194.
- [5] TALEYARKHAN R P, CHO J S, WEST C D, et al. Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation[J]. Phys Rev, 2004, 69: 036109(1-11).
- [6] VERBINSKI V V, BURRUS W R, LOVE T A, et al. Calibration of an organic scintillator for neutron spectrometers[J]. Nucl Instrum Methods, 1968, 65: 8-25.
- [7] BATCHELOR R, GILBOY W B, PARKER J B, et al. The response of organic scintillators to fast neutrons[J]. Nucl Instrum Methods, 1961, 13: 70-82.
- [8] 罗文芸, 王传珊, 黄伟. Penelope 软件包的移植与应用实例[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 1999, 5(3): 213-216.
LUO Wenyun, WANG Chuanshan, HUANG Wei. The portable of Penelope and applied examples[J]. Journal of Shanghai University: Natural Science, 1999, 5(3): 213-216(in Chinese).
- [9] FLYNN K F, GLENDENIN L E, STEINBERG E P, et al. Pulse height energy relations for electrons and alpha particles in a liquid scintillator [J]. Nucl Instrum Methods, 1964, 27: 13.
- [10] 罗小兵, 张传飞, 彭太平, 等. ST1422 塑料闪烁体光输出能量响应函数的测定[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(2): 186-188.
LUO Xiaobing, ZHANG Chuanfei, PENG Taiping, et al. The measurement of the fluorescence response of plastic scintillator ST1422 to neutron [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(2): 186-188(in Chinese).