

# 声空化核效应实验的中子探测系统

李欣年<sup>1</sup>, 范祥祥<sup>1</sup>, 黄敏<sup>1</sup>, 方晓明<sup>1</sup>, 钱梦霖<sup>2</sup>, 程茜<sup>2</sup>

(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:**设计建立了用于声空化核效应的中子测量系统,该系统由 ST-451 液闪探测器和 BF<sub>3</sub> 正比计数管组成,各中子谱仪的仪器精度 < 2.42%,并导出 BF<sub>3</sub> 正比计数管的中子探测灵敏度计算式。利用高压倍加器氦离子轰击 D-Ti 靶产生的 2.45 MeV 中子,对 BF<sub>3</sub> 计数管进行探测灵敏度标定。利用 BF<sub>3</sub> 正比计数管测量声空化核效应实验的声核中子,由此估算有效中子发生率为  $7.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。

**关键词:**声空化核效应;声核中子;BF<sub>3</sub>正比计数管;中子探测灵敏度

中图分类号:TL81

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2011)05-0606-05

## Neutron Detection System for Nuclear Effect of Acoustic Cavitation

LI Xin-nian<sup>1</sup>, FAN Xiang-xiang<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>1</sup>,

FANG Xiao-ming<sup>1</sup>, QIAN Meng-lu<sup>2</sup>, CHENG Qian<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The neutron detection system based on ST-451 liquid scintillator detector and BF<sub>3</sub> proportional counters was arranged, the instrument precision of the neutron spectrometers was less than 2.42%, and the system was applied on neutron determination in the nuclear effect of acoustic cavitation (NEAC). And the neutron detection sensitivity formula of BF<sub>3</sub> proportional counter was derived. The detection sensitivities of the BF<sub>3</sub> detectors were calibrated by 2.45 MeV neutrons which were emitted from deuterium-titanium target bombarded by deuterium ions of high-voltage accelerator. The sonofusion neutron signals were determined used the BF<sub>3</sub> proportional counters, and the effective neutron emissivity estimations were of about  $7.0 \times 10^4$  to  $8.0 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ .

**Key words:** nuclear effect of acoustic cavitation; sonofusion neutron; BF<sub>3</sub> proportional counter; sensitivity of neutron detection

声空化效应形成的高温高压和高密度极端物理条件可产生发光等一系列物理、化学效应,

也可产生核效应。在声空化核效应实验中,在外加中子场中测量反应腔中由声空化核效应引

收稿日期:2010-04-06;修回日期:2010-07-30

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(10434070);国家自然科学基金资助项目(10974145);上海市重点学科第三期资助项目(S30109)

作者简介:李欣年(1953—),女,天津人,副研究员,核技术应用专业

发的出射中子,因此,中子测量的准确性非常重要。近年来,声空化核聚变(ACF)的理论探讨和实验研究<sup>[1-9]</sup>受到国际科学界高度重视,国际上未对 ACF 达成一致认识,其争议的焦点之一是中子测量的准确性以及由此得到的 ACF 有效中子发生率<sup>[10-11]</sup>。

本文针对声空化核效应实验建立由多个 BF<sub>3</sub> 正比计数管构成的中子测量系统,实验测量系统的仪器精度,并对 BF<sub>3</sub> 正比计数管标定探测灵敏度,由此估算声空化核效应实验的有效中子发生率。

### 1 声空化核效应实验

声空化核效应实验装置如图 1 所示。中子探测系统由 1 个液闪(LS)探测器和 2 个 BF<sub>3</sub> 计数管组成。LS 探测器和 BF<sub>3</sub> 计数管 1 用于测量反应腔空化区的中子能谱,BF<sub>3</sub> 计数管 2 则用于监测高压倍加器出射的成核中子注量。BF<sub>3</sub> 计数管 1 前端面至反应腔空化区中心距离为 13 cm,LS 探测器前端面至反应腔空化区中心距离为 3 cm。BF<sub>3</sub> 计数管 2 前端面距 D-Ti 靶中心 100 cm。

种单能中子分别测得的中子能谱如图 2 所示。图 2 中给出两种能量中子的 Ch<sub>max</sub> 分别对应 80 和 350 道。

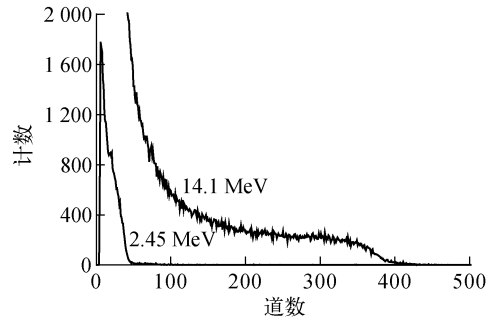


图 2 液闪探测器测得的 14.1 和 2.45 MeV 中子脉冲高度谱

Fig. 2 Typical 14.1 and 2.45 MeV neutrons pulse height spectra by liquid scintillator detector

BF<sub>3</sub> 计数管是 1 种核反应型中子探测器,是基于 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 核反应探测中子,BF<sub>3</sub> 计数管对 γ 光子不灵敏,具有 n-γ 甄别能力,测得谱具有分辨率较高的中子峰。实验测得的中子能谱如图 3 所示。

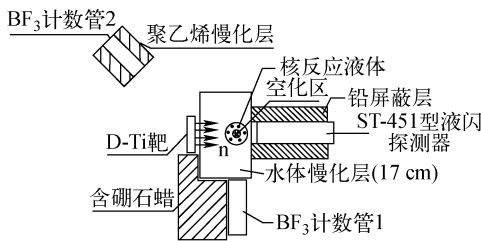


图 1 声空化核效应的实验装置

Fig. 1 Arrangement for nuclear effect of acoustic cavitation experiment

高压倍加器的氘-钛靶出射的 2.45 MeV 中子,经水体慢化射入反应腔中的核反应液体,同时,在液体中施加高声强的超声脉冲,形成超声空化区,探测器测量反应腔空化区处的中子能谱,根据施加超声和未施加超声测得的中子计数差异,判别液体中是否产生声核效应。

基于核反冲机理,探测中子的 LS 探测器测得中子能谱包含中子和 γ 光子康普顿散射电子的贡献,最大脉冲幅度(Ch<sub>max</sub>)对应被测中子能量,利用高压倍加器出射的 2.45 和 14.1 MeV 两

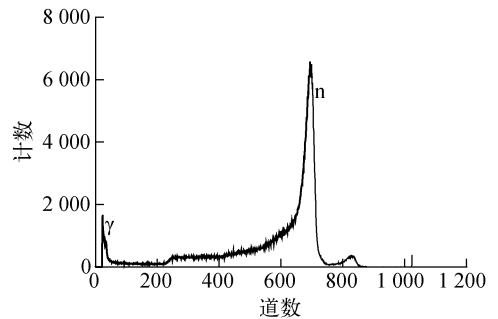


图 3 用 BF<sub>3</sub> 正比计数管测量的中子能谱  
Fig. 3 Typical neutron spectrum by BF<sub>3</sub> proportional counter

声空化核效应实验时探测器分别测得施加超声和未施加超声的中子能谱,对 LS 谱进行 80~1 024 道计数积分,对 BF<sub>3</sub> 谱进行 130~1 024 道计数积分。测量取得的中子计数增量 ΔC 由下式算得:

$$\Delta C = C_{cav, on} - C'_{cav, off} = C_{cav, on} - C_{cav, off} \frac{\Phi_{cav, on}}{\Phi_{cav, off}} \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{cav. on}}$  为施加脉冲超声时 LS 探测器或  $\text{BF}_3$  计数管 1 测得的中子计数;  $C_{\text{cav. off}}$  为无超声时 LS 探测器或  $\text{BF}_3$  计数管 1 测得的中子计数;  $C'_{\text{cav. off}}$  为无超声时测得的经中子注量归一的中子计数;  $\Phi_{\text{cav. on}}$  为施加脉冲超声时  $\text{BF}_3$  计数管 2 测得的中子注量;  $\Phi_{\text{cav. off}}$  为无超声时  $\text{BF}_3$  计数管 2 测得的中子注量。

在声空化核效应实验中, 利用数理统计的假设检验概念来判别中子计数增量的统计意义,  $\Delta C$  的统计显著性增量 (S. S. I) 为:

$$\text{S. S. I} = \frac{\Delta C}{\sqrt{C_{\text{cav. on}} + C'_{\text{cav. off}}}} = \frac{C_{\text{cav. on}} - C'_{\text{cav. off}}}{\sqrt{C_{\text{cav. on}} + C'_{\text{cav. off}}}} \quad (2)$$

当  $\text{S. S. I} \geq 3$  时, 即可认为施加超声测得的中子计数明显大于未施加超声的,  $\Delta C$  具有统计意义。LS 探测器测得值可判断声空化引发液体的 D-T 反应, 产生了 14.1 MeV 声核中子。 $\text{BF}_3$  计数管 1 测得值可判断声空化引发了液体中的核聚变。由此可知, 具有统计意义的中子计数增量即为声核中子。因此, 中子计数的准确性直接与判断是否发生 ACF 有关, 即仪器精度是中子测量系统的重要指标。

## 2 中子探测系统的精度测定

核测量的计数统计误差及谱仪的电子学稳定性是影响仪器精度的主要因素。通过长时间放射性测量, 了解中子测量系统的电子学稳定性和统计误差。分别用  $\text{BF}_3$  计数管 1、2 以及 ST-451 型液闪探测器组成 3 套中子能谱仪, 对实验厅进行放射性本底测量, 为保证探测器计数值相对标准偏差 ( $1/\sqrt{C}$ )  $\leq 1\%$ , 采用长时间计数, 计数时间为 22 000 s, 在相同的仪器参数和几何装置条件下测量  $\gamma$  标准源 ( $^{137}\text{Cs}$ ), ST-451 型液闪探测器的计数时间为 660 s,  $\text{BF}_3$  计数管 1 和 2 为 30 000 s, 两组测量均重复进行 5 次。根据测得计数率, 得出各测量系统的相对标准偏差。探测器组成的谱仪框图如图 4 所示。

各谱仪对于实验厅放射性本底和  $\gamma$  放射源测量计数率 ( $\text{CPS}_B$  和  $\text{CPS}_\gamma$ ) 以及相对标准偏差 (RSD) 列于表 1。

由表 1 可见,  $\text{BF}_3$  计数管 1、2 能谱仪对于两种测量源的 RSD 基本相同 (1.02% 和 2.42%,

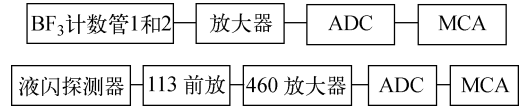


图 4 各种探测器组成的能谱仪框图

Fig. 4 Schematic diagram of spectrometries with different neutron detectors

表 1 各谱仪对实验厅放射性本底和  $\gamma$  放射源的测量计数率及相对标准偏差

Table 1 CPS and RSD of experimental room background and  $\gamma$  emitter by spectrometries

探测器	$\text{CPS}_B/\text{s}^{-1}$	$\text{CPS}_\gamma/\text{s}^{-1}$
ST-451	2.348	67.924
	2.364	68.261
	2.373	67.906
	2.657	68.202
	—	68.364
	(6.08%)	(0.30%)
$\text{BF}_3$ 计数管 1	0.486	2.502
	0.493	2.450
	0.499	2.440
	0.488	2.381
	0.492	2.354
	(1.02%)	(2.42%)
$\text{BF}_3$ 计数管 2	0.467	1.289
	0.462	1.298
	0.465	1.261
	0.454	1.259
	0.454	1.238
	(1.30%)	(1.92%)

注: 括号内为 RSD

1.30% 和 1.92%), 而 ST-451 型液闪能谱仪对放射性本底测量的 RSD 达到 6.08%, 说明了液闪在长时间测量时, 其电子学稳定性稍逊, 对  $^{137}\text{Cs}$  标准源测量的 RSD 减小为 0.30%, 这显示了在较短时间测量时, 其电子学稳定性仍很好。由于声空化核效应实验是在成核中子场中测量声核中子, 各中子谱仪测得的计数大于  $10^3$ , 较高的计数将减小其统计误差, 且单次声空化核效应实验测量时间约为 3 600 s, 因此, 较高的计数和较短的测量时间, 使得能谱仪的精度  $< 2.42\%$ , 适合于声空化核效应实验的中子测量要求。

### 3 BF<sub>3</sub> 计数管中子探测灵敏度的校刻

实验对两个 BF<sub>3</sub> 计数管进行了中子探测效率校刻,以估算声空化核效应的中子发生率。BF<sub>3</sub> 计数管中子探测效率  $\eta$  的定义为入射中子数与<sup>10</sup>B 反应中子数之比,沿 BF<sub>3</sub> 管轴线入射中子的探测器效率<sup>[12]</sup>可近似为:

$$\eta(E) = \frac{\varphi\pi r^2 nL\sigma(E)}{2rL\varphi} = \frac{\pi}{2}nr\sigma \quad (3)$$

式中: $r$  和  $L$  分别为计数管的半径和有效长度; $n$  为单位体积中<sup>10</sup>B 的原子个数; $\sigma(E)$  为<sup>10</sup>B 核反应截面; $\varphi$  为中子注量率。

由于实际测量的是多能量中子,探测器灵敏体积内的死体积及计数管内 BF<sub>3</sub> 气体压力误差,使得探测器效率难以确定,实验采用探测灵敏度  $\epsilon$  表征中子探测效率<sup>[13]</sup>,中子计数管的灵敏度为单位中子注量率的计数率或单位面积中 1 个中子的计数。根据定义,得出 BF<sub>3</sub> 正比计数管的中子探测灵敏度  $\epsilon(\text{cm}^2)$  计算式:

$$\epsilon = \frac{\text{CPS}}{\varphi} = \frac{\text{CPS} \times 4\pi R^2}{M} \quad (4)$$

式中:CPS 为 BF<sub>3</sub> 计数管测得的中子计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\varphi$  为高压倍加器靶片中子源的中子注量率,  $\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  $M$  为靶片中子源强,  $\text{s}^{-1}$ ;  $R$  为源距,即 BF<sub>3</sub> 计数管前端面至中子靶片的距离,  $\text{cm}$ 。

根据声空化核效应实验装置,灵敏度校刻实验采用高压倍加器出射的 2.45 MeV 中子作为中子源来校刻 BF<sub>3</sub> 计数管的灵敏度,实验装置示于图 5。探测器灵敏体积半径为 2.5 cm,源距与 ACF 实验中反应腔空化区中心至探测器前端面的距离相同,为 13 cm,D-Ti 靶半径为 1.25 cm,ACF 实验的反应腔中空化区相对于探测器可视为半径为 1.2 cm 的平面源,D-Ti 靶中子源和空化区平面源对探测器所张的立体角基本相同,即 BF<sub>3</sub> 计数管的装置几何与声空化核效应实验接近。

BF<sub>3</sub> 计数管 1、2 测定 2.45 MeV 中子经过 13 cm 水体慢化后的中子能谱,分别对 130~1 024 道和 100~1 024 道的中子峰面积进行积分,得到计数率 CPS,重复实验 6 次,测量时间为 300 s。由式(4)计算的 BF<sub>3</sub> 计数管对中子的探测灵敏度列于表 2。

由表 2 得到 BF<sub>3</sub> 计数管 1、2 的灵敏度分别为  $(0.529 \pm 0.031)$ 、 $(0.148 \pm 0.011) \text{ cm}^2$ 。

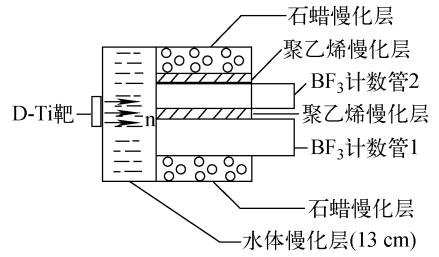


图 5 BF<sub>3</sub> 计数管灵敏度校刻实验装置

Fig. 5 Layout of experimental apparatus for BF<sub>3</sub> proportional counter sensitivity calibration

表 2 BF<sub>3</sub> 计数管 1 和 2 的计数率及中子探测灵敏度  
Table 2 Neutron count rate and detection sensitivity of BF<sub>3</sub> proportional counter 1, 2

中子源强/ $\text{s}^{-1}$	计数率/ $\text{s}^{-1}$		灵敏度/ $\text{cm}^2$	
	计数管 1	计数管 2	计数管 1	计数管 2
$7.74 \times 10^5$	262	—	0.719	—
$2.64 \times 10^6$	621	165	0.499	0.132
$2.49 \times 10^6$	620	174	0.529	0.149
$2.22 \times 10^6$	562	160	0.537	0.153
$2.05 \times 10^6$	555	159	0.575	0.162
$2.36 \times 10^6$	559	163	0.503	0.146

### 4 声空化核效应有效中子发生率的估算

声空化核效应增强了反应腔中空化区内的声核聚变,则空化区可视为各向同性的点源,其在  $4\pi$  空间发射中子的几率为有效中子发生率。

声空化核效应中子发生率计算公式为:

$$m = \frac{\Delta\text{CPS} \times 4\pi r^2}{\epsilon} \quad (5)$$

其中: $m$  为声空化核效应的有效中子发生率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\Delta\text{CPS}$  为 BF<sub>3</sub> 计数管在脉冲超声期间测得的声核中子计数率  $(\Delta C/t)$ ,  $\text{s}^{-1}$ ;  $r$  为 BF<sub>3</sub> 计数管前端面至测试腔空化区中心的距离,  $\text{cm}$ 。

声空化核效应实验中 BF<sub>3</sub> 计数管 2 作为中子注量监测器,测定在 BF<sub>3</sub> 计数管 1 测量期间高压倍加器出射中子的注量,BF<sub>3</sub> 计数管 1 前端面至测试腔空化区中心的距离为 13 cm,超声脉冲周期为 6 s,占空比为 1:1,测定了空化区的中子谱,测量时间为 300 s,重复实验 6 次,测得  $\Delta\text{CPS}$ ,根据式(5)求得  $m$ 。表 3 列出了不同核反应液体的  $\Delta C$ 、S. S. I 及  $m$ 。

表3 不同组分反应液的声核反应有效中子发生率

Table 3 Effective sonofusion neutrons emissivities of different reaction solutions

液体组分	$C_{cav.on}$	$C'_{cav.off}$	$\Delta C$	S. S. I	$m/s^{-1}$
D+T(A Bq)	2 457 782	2 140 995	316 787±30 274	148	$(7.0 \pm 0.7) \times 10^5$
D+T(B Bq)+Li	2 885 819	2 526 490	359 329±35 724	154	$(8.0 \pm 0.8) \times 10^5$
D+T(B Bq)	2 228 013	2 131 653	96 360±30 141	46	$(2.2 \pm 0.6) \times 10^5$
D+T(0 Bq)	2 489 612	2 460 600	29 012±34 793	13	$(7.0 \pm 7.8) \times 10^4$

注:1)  $BF_3$ 计数管1的灵敏度  $\epsilon_1 = (0.529 \pm 0.031) \text{ cm}^2$

2) 氚活度  $A > B$ , 相对标准误差  $\sigma \approx \frac{\sqrt{C_{cav.on} + (\sqrt{2}Q \times C'_{cav.off})^2}}{C_{cav.on} - C'_{cav.off}}$ ,  $Q$  为中子注量监测器计数相对误差, 一般设为1%

## 5 结论

本工作建立了由 ST-451 液闪探测器和  $BF_3$  正比计数管组成的中子测量系统, 各中子谱仪的仪器精度  $< 2.42\%$ , 该系统已用于测量声空化核效应的效应中子。  $BF_3$  正比计数管是对中子灵敏且具有  $n-\gamma$  甄别性能的中子探测器, 实验利用高压倍加器提供的 2.45 MeV 单能中子, 作为灵敏度校刻的中子源, 取得统计误差较小的  $\epsilon$  值, 并很好地用于 ACF 实验的中子测量, 由此估算得到在不同组分反应液中声空化核效应产生的有效中子发生率为  $7.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。

## 参考文献:

- [1] TALEYARKHAN R P, WEST C D, CHO J S, et al. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation [J]. Science, 2002, 295(5956): 1 868-1 873.
- [2] TALEYARKHAN R P, CHO J S, WEST C D, et al. Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation[J]. Physical Review E, 2004, 69: 036109.
- [3] TALEYARKHAN R P, WEST C D, CHO J S, et al. Nuclear emissions during self-nucleated acoustic cavitation[J]. Physical Review Letters, 2006, 96: 034301.
- [4] ROBERT N. Nanoscale thermonuclear fusion in imploding vapor bubbles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235: 1 079-1 091.
- [5] TOKIO O. Criteria for nuclear emission by bubble implosion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28: 1 011-1 014.
- [6] TOKIO O. On the molecular kinetics of acoustic cavitation and the nuclear emission[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28: 437-443.
- [7] TOKIO O. Processes and key properties of pool materials for "bubble fusion" [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28: 1 273-1 278.
- [8] TOKIO O. On the maximum  $D^+-D^+$  fusion rate by the implosion of cavitation bubble[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29: 1 553-1 554.
- [9] 应崇福, 安宇. 声空化气泡内部的高温和高压分布[J]. 中国科学:A 辑, 2002, 32(4): 306-312.
- [10] SHAPIRA D, SALTMARSH M. Nuclear fusion in collapsing bubbles—Is it there? An attempt to repeat the observation[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(10): 104302.
- [11] CAMARA C G, HOPKINS S D, SUSLICK K S, et al. Upper bound for neutron emission from sonoluminescing bubbles in deuterated acetone [J]. Physical Review Letters, 2007, 98: 06430.
- [12] 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 303.
- [13] 汲长松. 中子探测实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1998: 83.