

# 含氢介质内中子能谱测量

安力, 陈渊, 郭海萍, 牟云峰, 王新华, 朱传新

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**建立了直径 34 cm 的含氢慢化球和含氢慢化球与  $\phi 24$  cm  $\times$  30 cm 聚乙烯圆柱组合的 2 种基准装置, 加速器的  $d-T$  中子入射到含氢慢化介质, 用  $\phi 18$  mm  $\times$  20 mm 的蒽晶体闪烁探测器测量了 2 种实验装置内不同位置的 1 MeV 以上的中子能谱, 并处理成不同能量阈值的中子数。在 0.95 置信水平下, 本测量方法的不确定度为 4.8%。

**关键词:**  $d-T$  中子; 二维装置; 介质内能谱

中图分类号: O571.54

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)S0-0089-04

## Measurement of Neutron Spectrum in Medium Containing Hydrogen

AN Li, CHEN Yuan, GUO Hai-ping, MOU Yun-feng, WANG Xin-hua, ZHU Chuan-xin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,

P. O. Box 919-213, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Two benchmarks were established. One is moderation shell containing hydrogen which is 34 cm in diameter. The other is composed of the shell and polyethylene cylinder of  $\phi 24$  cm  $\times$  30 cm which are combinatorial. Measurement of neutron energy spectrum above 1 MeV changing with different positions of the experimental assemblies were carried out for incident neutrons from outside using  $d-T$  fusion source of accelerator. Meanwhile, the spectra were transformed integral spectrum. The scintillation detector of stilbene crystal of  $\phi 18$  mm  $\times$  20 mm was used to measure neutron spectrum. At 0.95 level of confidence, the uncertainty of the measurement is 4.8%.

**Key words:**  $d-T$  neutron; two dimensional assembly; neutron spectrum in medium

中子与介质相互作用会产生散射反应等各种过程, 当介质是大块物质时, 作用过程更加复杂。中子与含 C、H、O、N 等低原子序数元素材料的作用不同于与含高原子序数元素材料的作用, 它主要表现为弹性散射, 能谱软化也较快。在以往的基准实验中, 中子源均置于球中心测量泄露出来的中子能谱, 而对球、柱组合装置的

基准实验开展较少。鉴于此, 本工作拟测量含氢慢化球、含氢慢化球与  $\phi 24$  cm  $\times$  30 cm 聚乙烯圆柱组合 2 种实验装置内部的中子能谱。

### 1 实验装置

含氢慢化球外径 34 cm, 内径 4 cm, 厚度 15 cm, 由上、下两半组成, 界面间有一条通球心

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-05-15

作者简介: 安力(1973-), 男, 四川仪陇人, 助理研究员, 硕士研究生, 核物理专业

的 28 mm × 28 mm 方槽。聚乙烯圆柱直径 24 cm, 两段各长 15 cm, 可以组合。当在球和

圆柱组合装置内测量时, 含氢慢化球的孔道旋转 90°, 球柱组合实验装置示于图 1。

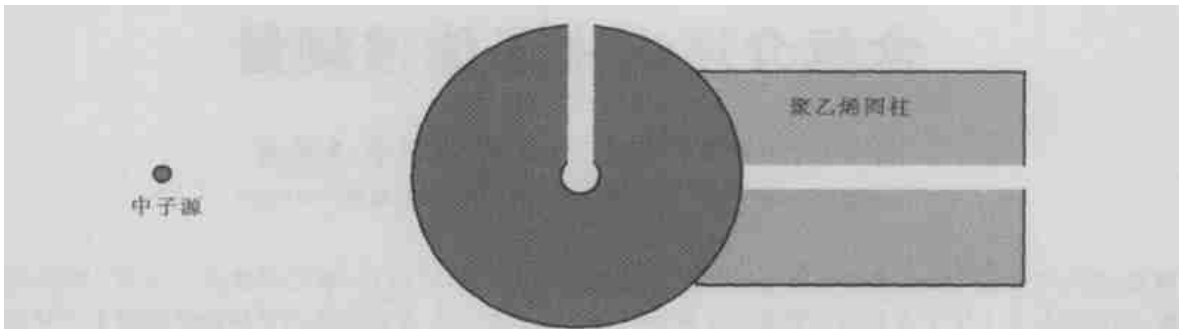


图 1 球柱组合实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combination of the shell and polyethylene cylinder

## 2 测量技术

### 2.1 粒子监测

中子绝对产额通过测量  $d-T$  反应产生的伴随  $\alpha$  粒子得到。金硅面垒半导体探测器中心与  $D^+$  束成 178.9° 夹角。为降低测量时伴随  $\alpha$  粒子谱的本底, 经过几次测量比较, 对建立的 2 套靶室经过几次测量比较得知, 将氚靶装在细管内、金硅面垒半导体探测器装在粗管内的靶室, 其伴随  $\alpha$  粒子谱的本底只有单一的相同尺寸的细管靶室的 1/3 ~ 1/2, 且本底仅占  $\alpha$  粒子总数的 2% ~ 3%。因此, 本实验采用粗细两节管子构成的靶室进行相应的  $\alpha$  粒子监测。

### 2.2 中子谱仪

为减小空腔对测量结果的影响, 建立了小型  $CaF_2$  晶体闪烁探测器, 探测器的外径为 19 mm。 $CaF_2$  晶体分为有外壳和没有外壳 2 种, 对于无外壳的裸晶体尺寸为  $\phi 18$  mm × 20 mm; 带有外壳及光反射层的其晶体尺寸为  $\phi 12$  mm × 16 mm, 加上外壳后其尺寸也为  $\phi 18$  mm × 20 mm。对它们的性能进行了测试比较, 有外壳及光反射层的  $CaF_2$  晶体的光输出比无外壳裸晶体的光输出大 1/3 左右; 它们的  $(n, \gamma)$  分辨性能均达到使用要求。无外壳的裸晶体的能量分辨明显好于有外壳及光反射层的, 对于 14 MeV 中子和  $^{137}Cs$  射线源, 无外壳的裸晶体的能量分辨分别为 4.8% 和 11%。而有外壳及光反射层的晶体对 14 MeV 中子能谱测量不能满足能量分辨要求。因此实验选用没有外壳的  $\phi 18$  mm × 20 mm 的  $CaF_2$  晶体。

## 3 实验方法

在 0.75 ~ 14 MeV 的中子能量范围内, 相应的质子能量的光产额相差近 80 倍。在如此宽的能量范围内一次测量中子能谱十分困难, 它受脉冲形状甄别效果和探测器的线性范围的限制, 也受多道分析器可用的线性道数范围的限制。因此, 在该能量范围内分 2 段测量, 低能段为 0.75 ~ 5 MeV, 高能段为 3 ~ 16 MeV, 3.25 ~ 4.5 MeV 是两段的衔接部分。

$(n, \gamma)$  分辨采用脉冲形状甄别实现, 分辨效果与线路参数调节有很大关系, 除了得到清晰的  $(n, \gamma)$  分辨图形之外, 更主要的是要保证在该过程中中子或  $\gamma$  数目不要丢失。为此, 将  $(n, \gamma)$  分辨线路的常份额甄别器输出 (相当于积分数) 分一路输到定标器测量计数, 同时也把分辨线路的时-幅变换输出分一路到另一个定标器监视计数, 在正确调节分辨线路参数情况下, 这 2 个定标器的计数非常接近, 而且  $(n, \gamma)$  分辨图形也清晰。

在测量低能段时, 高于 5 MeV 质子能量的脉冲幅度都已经饱和, 而线性门对含有饱和脉冲比没有饱和脉冲允许通过的能力要小得多。因此, 在测量低能段时, 线性门的计数率控制在约  $600\text{ s}^{-1}$ , 而对高能段, 可以允许其控制在约  $800\text{ s}^{-1}$  左右。为了定量测出线性门的门控损失, 把线性门的门控输入、输出和多道分析器的“SCA”输出同时输到三路计数器进行比较。在上述计数率控制情况下, 门控损失一般均小于

2%。

$^{22}\text{Na}$  射线源作为探测器的能量刻度用源,其 2 个能量分别为 1.275 和 0.511 MeV,对应的康普顿电子能量为 1.062 和 0.341 MeV。利用质子和电子光产额关系的光表,即可得到脉冲幅度与质子能量的对应关系。对于测量的高能段,用  $\text{d-T}$  反应的 14 MeV 中子作为刻度标准,效果更好些。

### 4 实验测量

含氢慢化球的直径与  $\text{D}^+$  束重合,中子源距球面 30 cm,对于球柱组合该距离保持不变。

对于含氢慢化球,分别在球心、内表面、距球心 9 cm 处和外表面 4 个位置进行了 1 MeV 以上中子能谱测量。测量球表面处的中子能谱时,因为缺少样品方槽相应的塞块,样品球水平旋转 90°。

对于球柱组合装置(球柱紧密接合,柱轴线在  $\text{D}$  束零度方向上重合),测量了球、柱交界面和距离球心 31.8 cm 处的 1 MeV 以上的中子能谱。

### 5 实验结果

实验得到的大于 1 MeV 的中子能谱是一个微分的结果。2 个实验装置的测量能谱随位置的变化关系示于图 2 和 3。由图 2 和 3 可以看出,介质内不同位置的能谱变化,反映了中子在介质内输运的宏观效果,越是远离源中子,谱的软化越明显;球柱交界面处的中子谱比没有聚乙烯柱时要硬一些,同时通量也高些,这是由于聚乙烯柱对中子反射的缘故。为了进一步比较,将能谱处理成不同阈能时的积分中子数。积分中子数就是对于一个源中子入射时,高于 1 MeV 的不同能量阈值的总中子数。单一球体和球柱组合 2 种情况下的积分中子数随中子能量的变化关系示于图 4 和 5。从图 4 和 2 可看出,在球心和内球面,散射中子的份额明显大于距球心 9 cm 的结果;在外球面,不同能量阈值的积分中子数的分布曲线较平坦,这是因为探测器只能探测到泄漏的中子的缘故。对于球柱组合,从图 5 和 3 可看出,增加聚乙烯柱时,明显增加了中子的慢化效果,低能段尤为明显。

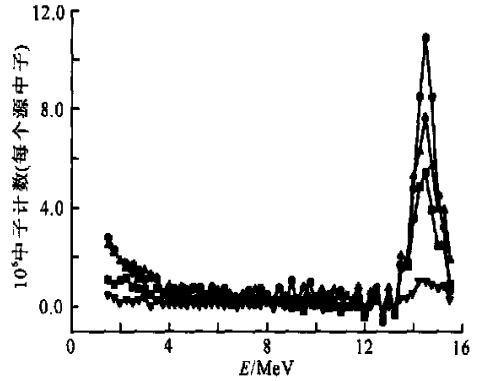


图 2 含氢慢化球壳中子能谱

Fig. 2 Neutron spectrum in the sphere shell containing hydrogen

●—球心;▲—内表面;  
■—距球心 9 cm 处;▽—球外表面

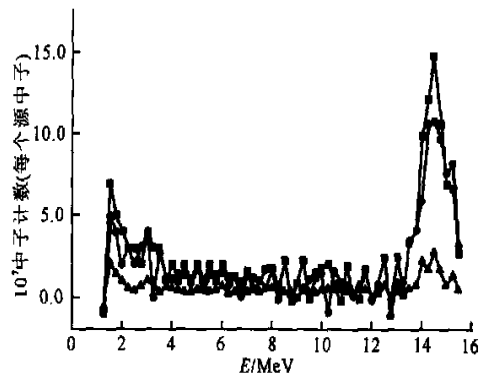


图 3 2 种装置的中子能谱比较

Fig. 3 Comparison of the energy spectrum in the two assemblies

■—球柱界面(慢化球+聚乙烯柱);  
●—球面(仅慢化球);  
▲—距球心 31.8 cm 处(慢化球+聚乙烯柱)

### 6 不确定度分析

实验布置、实验测量和中子源条件等是实验结果不确定度的主要来源。

由于中子源在实验装置外部,周围环境及各种物质散射的中子有可能进入样品,与入射的中子一起被探测器记录,从而引起误差,其不确定度估计为 3%。

测量的 2 段反冲质子谱用伴随  $\gamma$  粒子归一,能谱和不同阈能的积分中子数均归一到一个源中子,因此中子绝对产额监测误差对实验

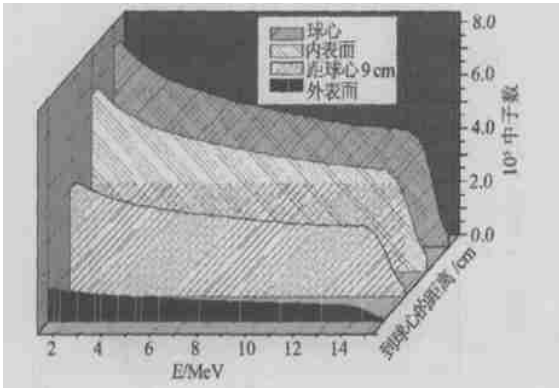


图4 含氢慢化球中子积分谱

Fig. 4 Neutron integral spectrum in the moderation shell containing hydrogen

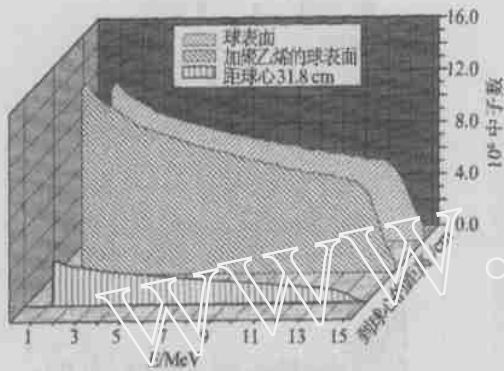


图5 2种装置的中子积分谱比较

Fig. 5 Comparison of the neutron integral spectrum in the two assemblies

结果的影响较大,从 2.1 节对不同结构靶室的粒子监测结果的比较可看出,中子绝对源强监测的不确定度小于 2.5 %。实验时使用的是新氚靶,加速器的 D<sup>+</sup> 束流最大不超过 10 μA,从监测的伴随 粒子谱看出,α-D 反应的中子

占源中子份额不足 1 %。

由于测量的中子能量范围较大,低能部分利用<sup>22</sup>Na 源刻度,高能部分利用源中子刻度。源中子的能量依赖于 D<sup>+</sup> 能量,而 D<sup>+</sup> 能量和加速器的高压及氚靶的厚度相关,因此源中子的能量存在误差。同时由于系统能量刻度存在大约 2 %的不确定度,所以能量刻度总的不确定度为 2.5 %。

综合以上考虑,本实验结果的不确定度为 4.8 %。

### 7 结论

在加速器的源条件下,得到了 α-T 中子入射到含氢慢化球、含氢慢化球与 φ24 cm × 30 cm 聚乙烯圆柱组合 2 种实验装置内部的能谱。在实验的不确定度范围内,本结果可供二维数值模拟计算方法检验参考使用。

### 参考文献:

- [1] Chen Y, An L, Mou YF, et al. Leakage Rate of Combined Hemispherical Shells With D-T Neutron [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 69:367 ~ 372.
- [2] 陈 渊, 郭海萍, 安 力, 等. 钚球 14 MeV 中子泄漏能谱测量[J]. 原子能科学技术, 2002, 36 (2): 157 ~ 159
- [3] 白希祥, 温琛林, 李安利, 等. 伴随粒子型快中子飞行时间谱仪[J]. 原子能科学技术, 1977, 1: 20 ~ 36.
- [4] Brooks FD. A Scintillator Counter With Neutron and Gamma-ray Discriminators[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1959, 4: 151 ~ 163.