

## 钒球 14 MeV 中子的泄漏能谱测量

陈渊, 郭海萍, 安力, 牟云峰, 赵秋雯

(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:**建立了厚度为 10.5 cm 的金属钒球基准实验装置。钒的纯度为 99.9%。用 NE-213 谱仪测量了 d-T 中子的 0.75 ~ 15 MeV 泄漏中子能谱, 能量大于 0.75 MeV 的中子的穿透率为  $0.84 \pm 0.03$ , 中子能谱实验误差为 5% ~ 7%。用 MCNP/4A Monte-Carlo 程序和 FENDL-2 库核数据进行了模拟计算, 并与实验结果进行了比较。

**关键词:**钒球; d-T 中子; 中子泄漏能谱

中图分类号: O571.54

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2002)02-0157-03

### Neutronics Experiment of Vanadium Shell Benchmark With 14 MeV Neutron Source

CHEN Yuan, GUO Hai-ping, AN Li, MOU Yun-feng, ZHAO Qiu-wen

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

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

**Abstract:** A benchmark of vanadium shell with thickness of 10.5 cm is established. The purity of the material is 99.9%. The leakage neutron spectrum is measured using NE-213 spectrometer. The energy range of measured neutron spectrum is 0.75 ~ 15 MeV. The overall experimental error is 5% ~ 7%. The transmissivity of neutron with energy 0.75 MeV is  $0.84 \pm 0.03$ . The measured result is compared with the calculated by using MCNP/4A code and FENDL-2 data bank.

**Key words:** vanadium shell; d-T neutron; leakage neutron spectrum

聚变堆是实现热核反应获得洁净能源的最好方法之一。聚变反应产生的大量高能 d-T 中子活化聚变堆的第一壁及结构材料, 活化核对环境造成放射性污染, 因此, 在建造聚变堆时使用低活性材料是极其重要的。目前, 钒被认为是最具竞争性的低活性材料之一。钒的另一重要特点是其 (n, 2n) 中子增殖大于 (n, x) 反应引

起的吸收<sup>[1]</sup>, 这对欧共体建造的 DEMO 类聚变堆的包层材料是很有意义的。国内外有关钒球基准装置的聚变中子积分实验进行得很少, 本工作是钒的核数据评价的重要实验依据。

### 1 实验装置

钒球实验装置示于图 1。

收稿日期: 2001-04-02; 修回日期: 2001-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19985003); 中国工程物理研究院基金资助项目 (20000214)

作者简介: 陈渊 (1940—), 男, 福建莆田人, 研究员, 实验核物理专业

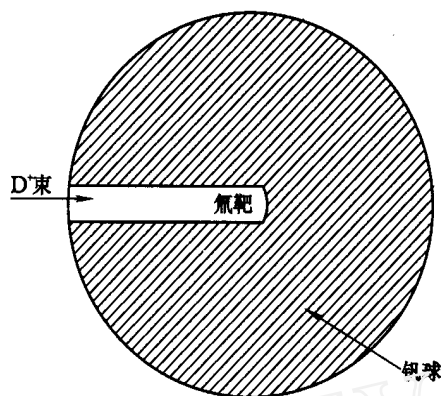


图1 钒球剖面图

Fig. 1 Section of vanadium benchmark

钒球外径 23 cm, 厚度 10.5 cm, 为整球结构。一条直径 2 cm 的孔道与单管中子靶室相匹配。金属钒密度  $6\ 020\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。钒球的纯度为 99.9%, 主要杂质元素为氧、铁、铝、硅和铬等, 质量百分比 (%) 分别为 0.016、0.008 1、0.005、0.004 和 0.019 (金属钒主要杂质元素含量及纯度分析由北京有色金属研究总院稀贵金属研究所提供)。

## 2 测量系统

### 2.1 粒子监测系统

中子绝对产额通过测量  $d\text{T}$  反应产生的伴随  $\gamma$  粒子得到。金硅面垒半导体探测器中心与  $D^+$  束成  $178.9^\circ$  夹角, 探测器面上装有铝箔以阻挡散射的  $D$  离子, 光阑直径为  $2.63 \pm 0.03\ \text{mm}$ 。  $D^+$  束流约为  $3\ \mu\text{A}$  时, 中子产额为  $(1 \sim 2) \times 10^8\ \text{s}^{-1}$ ,  $d\text{D}$  反应中子占源中子份额小于 1%。中子绝对产额的误差小于 2.5%。

### 2.2 中子谱仪

中子谱仪是  $\phi 5.08\ \text{cm} \times 5.08\ \text{cm}$  NE-213 液体闪烁体谱仪。液体闪烁体单能中子响应函数用 05S Monte-Carlo 程序计算。用脉冲形状甄别技术去除本底, 当甄别能阈对应于质子能量 0.75 MeV 时, 对于  $^{60}\text{Co}$  源的射线通过率小于 1%。谱仪的能谱测量误差通过与测量已知谱形的 Po-Be 中子源相比较得到。

## 3 实验测量

实验在 NS-200 高压倍加器上进行, 实验

布置示于图 2。钒球用绳吊在距地面 1.3 m 的空中, 以减少支架散射对测量带来的影响。受 NE-213 探测器的线性范围和  $(n, \gamma)$  分辨效果的制约, 反冲质子谱的测量分两段进行, 低能段为 0.75 ~ 4 MeV, 高能段为 3 ~ 15 MeV。两段测量用伴随  $\gamma$  粒子计数归一。

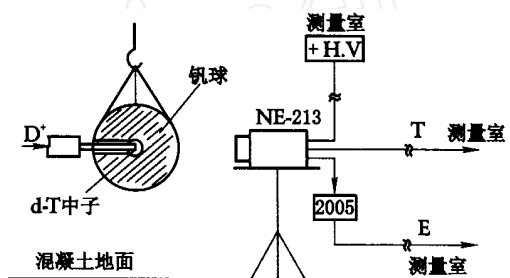


图2 实验布置

Fig. 2 Experimental arrangement

### 3.1 源中子谱

测量源中子谱时, NE-213 探测器放在  $D^+$  束方向距靶心约 1.8 m 的位置处, 分别测量高、低两段反冲质子谱。测量低能段时, 放大器工作在饱和状态, 线性门对高、低能段信号通过能力不同, 即对高能段无饱和和信号可以允许比低能段饱和和信号有更高的计数率。为使线性门对低能段计数损失控制在 2% 左右, 对高、低两段的计数率分别控制在  $800$  和  $600\ \text{s}^{-1}$ 。为测量散射本底, 在源和探测器间放置一根  $\phi 6\ \text{cm} \times 80\ \text{cm}$  的铁棒, 源强保持与测源中子时的一致。

### 3.2 样品泄漏谱

测量样品泄漏谱时, NE-213 探测器位置保持不变, 分别测量高、低两段的能谱。线性门计数率的控制与测量源中子时的相同。测量散射本底时, 在样品和探测器之间放置了一影锥, 影锥大头一端有  $\phi 20\ \text{cm} \times 11\ \text{cm}$  的铁饼, 接着是一个相配的 70 cm 长的聚乙烯锥体; 影锥大头朝向样品球, 其放置位置保证探测器完全不可能直接接收样品球发出的中子。

### 3.3 测量系统的能量刻度

反冲质子在 NE-213 闪烁体中的光产额是非线性的, 通常采用  $^{24}\text{Na}$  或  $^{60}\text{Co}$  源对测量系统进行刻度。实验中观测到, 对同一个源, 探测器在有、无加速器中子照射时测量的康普顿峰的半高宽对应的道数不一致, 差异可达 6% ~

7%。因此,每测完一段反冲质子谱后,一等加速器降完高压,立即测量源,这样得到的能量刻度值好于2%。

#### 4 结果和讨论

测量的钒球 0.75 MeV 以上泄漏中子能谱示于图 3。从图 3 可以看出:源中子的峰位在 14.75 MeV 位置处,这与  $D^+$  能量约为 100 keV 时的  $d-T$  反应零度方向的中子能量相一致。在对数坐标上同样明显看出:在约为 11.25 MeV 处是一个凹谷,说明能量大于 11.25 MeV 的能谱是由直穿和小角度散射中子贡献的,而低于此能量的能谱是由散射中子贡献的,且能量越低,多次散射的中子数也越多,因此,能谱呈单调下降的趋势。

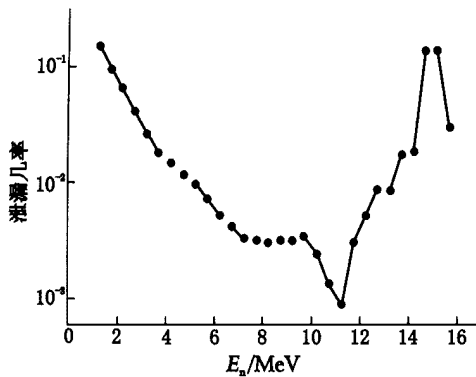


图 3 测量的泄漏中子谱

Fig. 3 Measured leakage neutron spectrum

测量的中子泄漏几率谱与计算结果的比较列于表 1。中子能量小于 6 MeV 时,实验与计算结果符合相当好;在 6 ~ 10 MeV 能量范围内,除个别能区外,计算结果均比实验值高,两者的最大差别达到 70% 左右;能量高于 10 MeV 的能谱主要来自直穿中子的贡献,在此能量范围内,计算和测量的谱形间有较大的差别,这与 NE-213 探测器对 14 MeV 中子有大约 8% 的能量分辨有关。为能将测量与计算结果进行正确比较,把能量高于 10.25 MeV 的谱合并成一个能区。经此处理后,计算与测量的泄漏几率之比为 1.18。中子能量大于 0.75 MeV 的实验和计算的穿透率分别为  $0.84 \pm 0.03$  和  $0.968 \pm 0.005$ 。由此可看出:无论是泄漏几率谱还是穿透率,计算值均大于实验结果。这说

明,对钒的核数据进行进一步评价是必要的。

表 1 泄漏几率谱的测量值与计算值的比较

Table 1 The comparison between the measured and the calculated leakage spectra

$E_n/\text{MeV}$	测量的 泄漏几率	计算的 泄漏几率	计算与测量的 泄漏几率之比
0.75 ~ 1.25	0.152 ± 0.011	0.190	1.25 ± 0.09
1.25 ~ 1.75	0.094 ± 0.006	0.114 7	1.22 ± 0.08
1.75 ~ 2.25	0.066 ± 0.005	0.062 7	0.95 ± 0.07
2.25 ~ 2.75	0.042 ± 0.003	0.041 2	0.98 ± 0.07
2.75 ~ 3.25	0.027 ± 0.002	0.026 7	0.99 ± 0.07
3.25 ~ 3.75	0.018 ± 0.001	0.018 1	1.00 ± 0.07
3.75 ~ 4.25	0.015 ± 0.001	0.015 90	1.06 ± 0.07
4.25 ~ 4.75	0.012 ± 0.001	0.013 20	1.10 ± 0.08
4.75 ~ 5.25	0.009 9 ± 0.000 7	0.010 49	1.06 ± 0.07
5.25 ~ 5.75	0.007 3 ± 0.000 4	0.008 61	1.18 ± 0.07
5.75 ~ 6.25	0.005 2 ± 0.000 3	0.007 38	1.42 ± 0.08
6.25 ~ 6.75	0.004 3 ± 0.000 3	0.006 41	1.49 ± 0.09
6.75 ~ 7.25	0.003 3 ± 0.000 2	0.005 54	1.68 ± 0.09
7.25 ~ 7.75	0.003 2 ± 0.000 2	0.004 83	1.51 ± 0.09
7.75 ~ 8.25	0.003 0 ± 0.000 2	0.004 47	1.49 ± 0.09
8.25 ~ 8.75	0.003 2 ± 0.000 2	0.004 14	1.29 ± 0.08
8.75 ~ 9.25	0.003 1 ± 0.000 2	0.003 75	1.21 ± 0.07
9.25 ~ 9.75	0.003 5 ± 0.000 2	0.003 39	0.97 ± 0.07
9.75 ~ 10.25	0.002 4 ± 0.000 1	0.003 36	1.39 ± 0.08
10.25 ~ 15.25	0.37 ± 0.02	0.423	1.18 ± 0.06

#### 5 测量误差

泄漏能谱测量误差包括反冲质子谱测量、闪烁体单能中子响应函数计算、散射本底扣除及  $(n, \gamma)$  甄别等引起的误差。反冲质子谱测量的统计误差约为 2%,抑制本底的误差估计为 1%,散射本底扣除带来的误差约为 3%,单能中子响应函数计算误差约为 3%。这样,对于 NE-213 中子谱仪,泄漏能谱测量总的实验误差为 5% ~ 7%。泄漏几率谱的计算误差不大于 0.5%。

#### 参考文献:

- [1] Simakov SP, Devain BV, Fursov BI, et al. Benchmarking of Evaluated Neutron Data for Vanadium by 14 MeV Spherical Shell Transmission Experiment: INDC(CCP)-417[R]. Obninsk: Institute of Physics and Power Engineering, 1998.