

CNIC-01259

SINPC-0010

铁球壳系统 D-T 中子穿透几率谱测量

段绍节

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

实验用系列铁球样品测量了 D-T 中子穿透几率谱, 同时给出了穿透率曲线。由于实验条件的限制, 探测器距样品球很近, 所以用近似校正结果与文献结果进行了比较, 两者在误差范围内是相符的。

**Measurement of D-T Neutron Penetration
Probability Spectra for Iron
Ball Systems**
(In Chinese)

DUAN Shaojie

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The D-T neutron penetration probability spectra are measured for iron ball shell systems of the series of samples used in the experiments, and the penetration curves are presented. As the detector is near to samples, the measured results being approximately corrected are compared with those in the literature, and it is shown that the former is compatible with the latter in the range of the experimental error.

引言

铁不仅是现代工业离不开的结构材料,同时也是核能应用的重要结构材料。而核能应用的结构设计,通常是用计算完成的。由此,对计算所用铁核中子群参数的准确性就提出了明确的要求。

为了校验核参数的准确性,一般是设计一些或一系列基准或准基准宏观实验来校验。现代核数据库都是在一些宏观实验检验基础上建立起来的。本实验所设计的铁球壳系统,也是为此目的进行的。

为了同样的目的,美国早在 70 年代就进行了脉冲球系列实验及理论计算^[1,2]。

1 实验设计

为了能更好地达到校验核参数的目的,也使实验结果能进行自治性的检验,宏观样品系统设计成六层,每层厚度为一点几个 D-T 中子平均自由程。球样品系统参数详见表 1。

铁球材料为 45[#] 钢。主要成分为 Fe,其元素成分为:Fe>98.5%,C 0.44%,S 0.016%,Mn 0.66%,Si 0.30%,P 0.021%,及其它杂质微量。铁球密度为 7.73 g/cm³。

源中子选用 D(T,n) α 反应产生的中子。因为中子能量高,故校验的能区范围宽。实际用 ns-200 kV 高压倍加器加速 D⁺ 打氘靶,倍加器束流 100 μ A,则可满足实验要求。

测量选用茛闪烁中子探测器。茛闪烁体为 $\phi 3.9$ cm $\times$ 1.63 cm 的圆柱形,测量下能阈为 1.5 MeV, n γ 分辨选用脉冲前沿拾取方法^[3]。

由于探测器没有中子屏蔽系统,实验测量布置充分考虑了本底中子的影响。为实验设计了简洁、用料少的支架和靶室。探测器与样品球的放置几何关系要能得到尽可能大的效应本底比,又要便于安装样品,并保证探测器的位置不变。

为了检验测量布置环境对测量的影响,设计了不同大小的支架、不同的布置环境及不同大小的球进行了实验。

表 1 铁球壳样品数据

$\frac{R}{\text{cm}}$	$\frac{\text{壳厚}}{\text{cm}}$	$\frac{\text{壳质量厚}}{\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}}$	$\frac{\text{D-T 中子平均自由程}}{\text{组 合 单 层}}$		$\frac{\text{重量/kg}}{\text{组 合 单 层}}$	
			组 合	单 层	组 合	单 层
35.0~29.5	5.5	42.5	1.2	1.2	562	562
35.0~23.8	11.2	86.6	2.5	1.3	960	398
35.0~18.1	16.9	130.6	3.8	1.3	1206	246
35.0~13.1	21.9	169.3	4.9	1.1	1326	120
35.0~8.1	26.9	207.9	6.0	1.1	1382	66
35.0~3.1	31.9	246.6	7.1	1.1	1400	18

2 测量布置

实验测量布置如图 1 所示。样品球距空心地板 1.5 m,地板距地面 1.5 m,探测器距空心地板(铁板) 1.7 m,探测器置放在与倍加器 D⁺ 束成 45°角、与水平面成 23°角的方位。探测器距样品球心(靶心) 42.7 cm,距样品球面 7.7 cm。这样尽可能地提高了效应本底比,同时又便于吊装球样品,还利用样品球自身屏蔽掉部分本底中子的影响。

为了置放样品方便及保证实验系统的不变,测量从最外层球壳做起,即最外层球壳为第一层,不同厚度实验通过改变内层球壳的层数实现。

由于铁球壳样品很重,改变样品厚度时都用吊车吊装。吊车为大散射体,会使测量中的本底中子增加。布置时已尽可能使吊车远离测量系统(距2.5 m),且与探测器取不同方位。

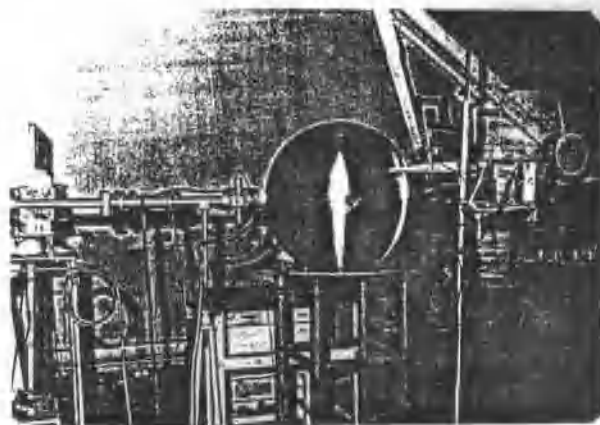


图1 实验测量装置系统

为了对测量环境影响进行实验测定,设计了图2的实验。由于铁球样品为小球,可以通过人工组装,可将吊车、大样品支架撤除,小样品支架为2 mm厚铝筒,从而可以比较环境本底影响。这显然对全系统测量的本底中子影响评价有一定价值。实验测量电子学系统如图3所示,是利用商品NIM插件按需要条件改造搭成的。

3 实验结果

图4为三层铁球壳第二段(0.5~3.5 MeV)测量的n-γ分辨图,同时还对茛闪烁谱仪线性等技术指标进行了定量测量。实验测得的D-T中子源谱如图5所示。此谱是在与有样品条件相同情况下测量的。

结果给出了每层铁球样品下的一个D-T源中子穿透几率谱。这时定义的穿透几率谱 $P(E_n)$ 为:

$$P(E_n) = \frac{\phi(E_n)}{N_0}$$

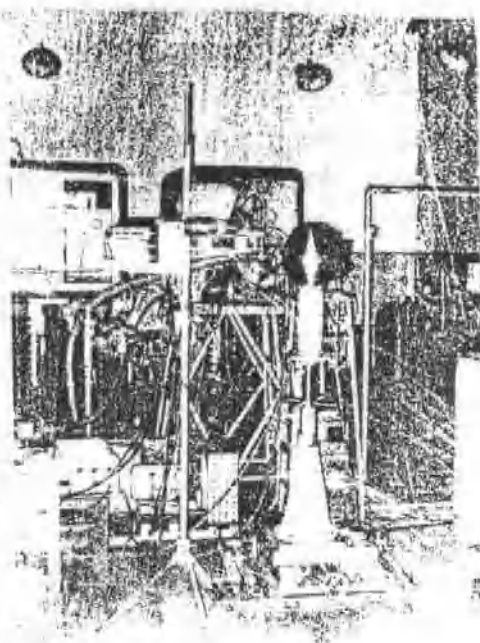


图2 对比实验测量系统图

其中 N_0 为无样品球情况下, 探测器在确定伴随粒子数 (10^4) 时, 测得的相对中子数。 $\phi(E_0)$ 为有样品情况下, 用同一探测器, 在同一位置同样确定伴随粒子下测得下阈能量为 E_0 的相对中子数。这里要明确指出, 实际所用的探测器是有一定几何限度的。在测量源中子谱时, 中子都是端面入射, 而在测量有样品球时, 由于探测器距样品很近, 中子不仅有端面入射, 且有侧面入射, 由此, 这与通常所指的穿透率是有差异的。

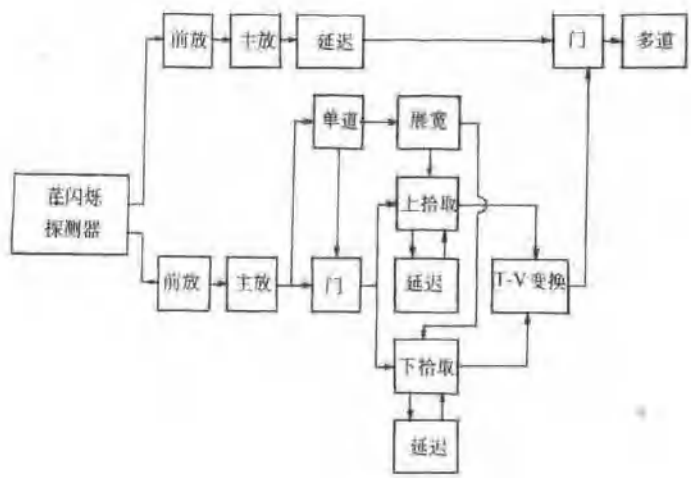


图3 测量电子学方框图

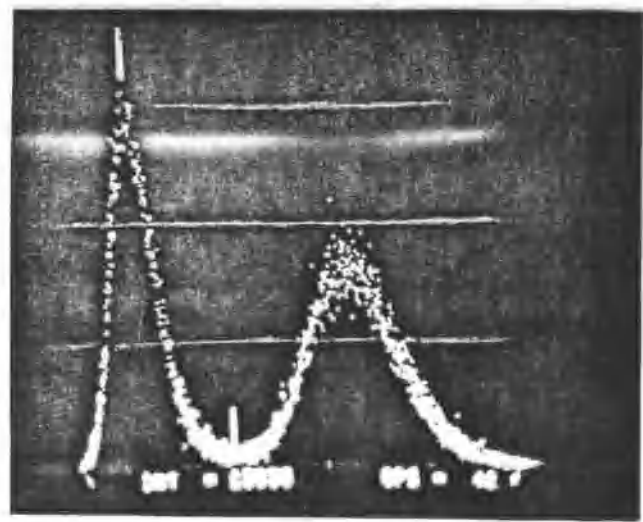


图4 三层铁球低能段 $n-\gamma$ 分辨图

通过数据处理,最后得到了各层铁球的穿透几率谱。谱形如图 6 所示。

由穿透几率谱积分很易得到中子的穿透率 T (其中 E_n 为下能阈值):

$$T = \int_{E_n}^{E_{\text{max}}} P(E_n) dE_n = \int_{E_n}^{E_{\text{max}}} \frac{\phi(E_n)}{\phi_0(E_n)} dE_n$$

穿透率结果见图 7。穿透率按指数衰减规律:

$$T = Ae^{-\Sigma r}$$

这样就可进行最小二乘法拟合,结果列于表 3 中。定义 Σ 为宏观有效作用截面,它反映了中子穿透铁物质的衰减变化规律。表中 γ 为拟合相关系数。

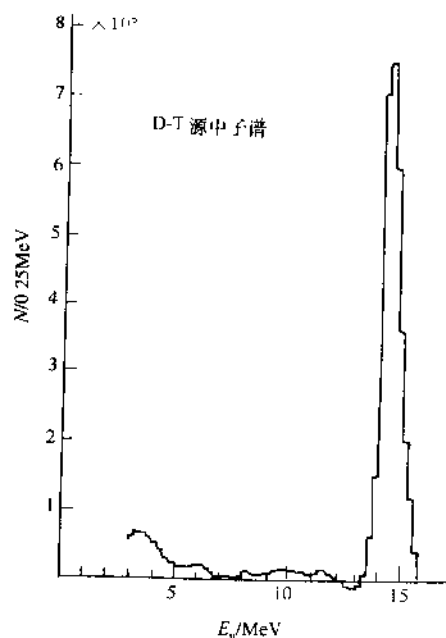
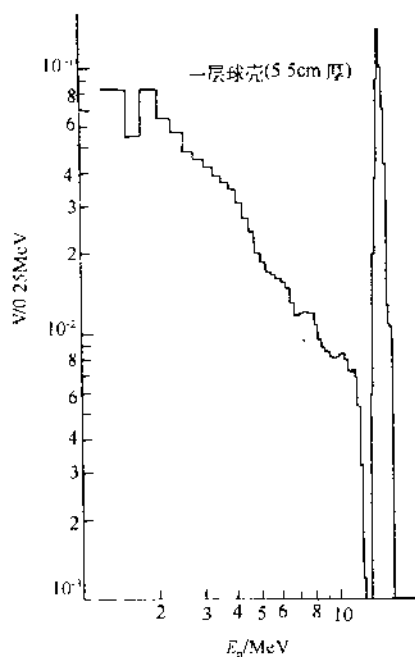
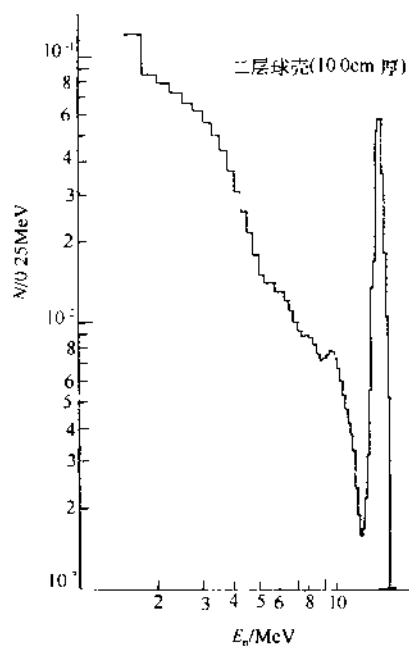


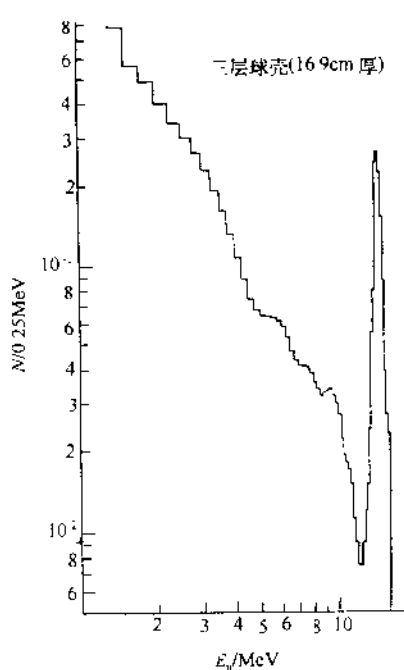
图 5 源中子谱



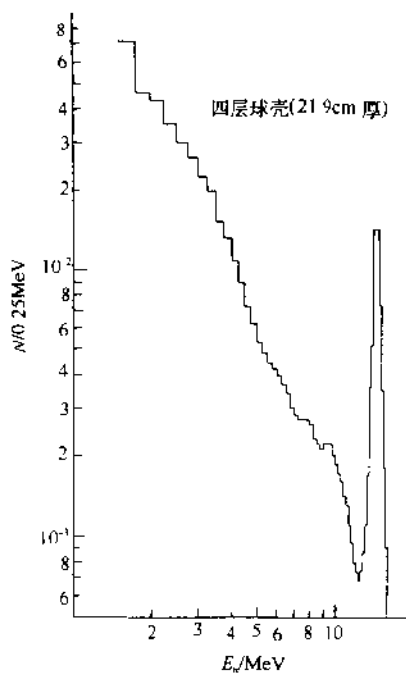
a 一层球壳泄露谱



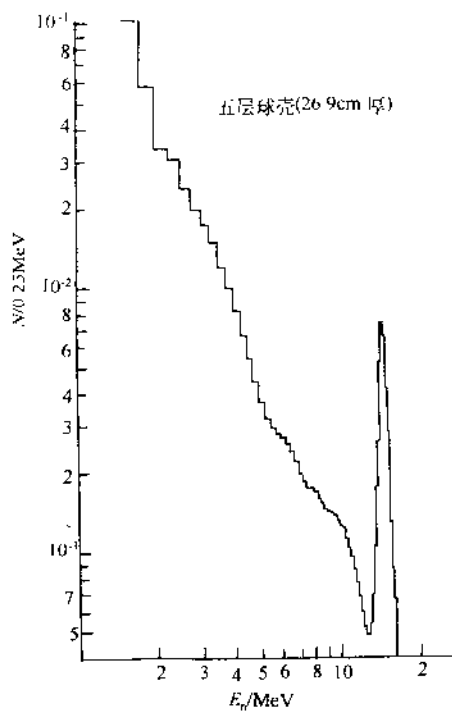
b 两层球壳泄露谱



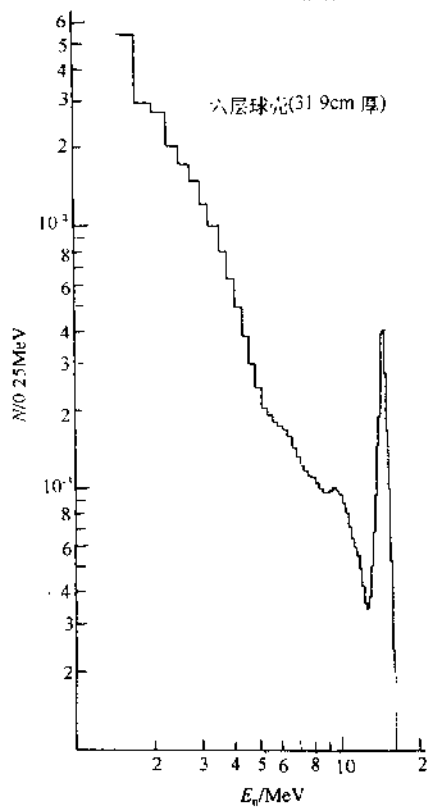
c 三层球壳泄露谱



d 四层球壳泄露谱



e 五层球壳泄露谱



f 六层球壳泄露谱

图6 穿透几率谱图形

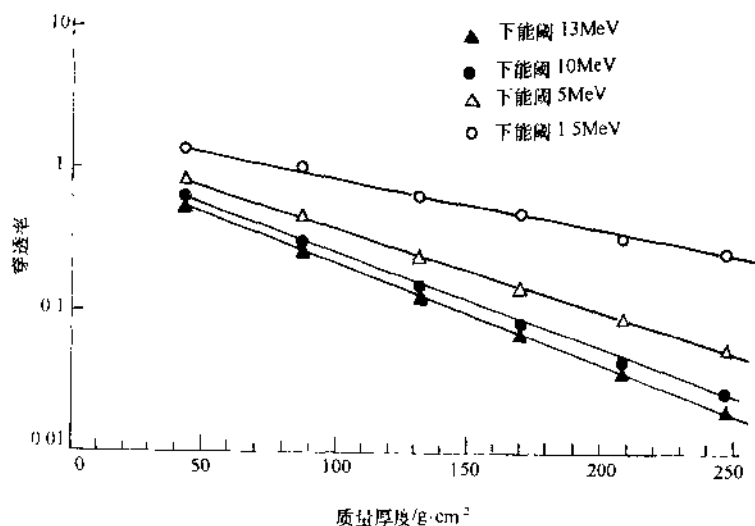


图 7 实验穿透率曲线

实验不确定度列于表 4 中。能量在 1.5 MeV 至 7 MeV 范围, 总的穿透几率谱实验不确定度为 $\pm 8.5\%$, 7 MeV 至 16 MeV 范围为 $\pm 5.5\%$ 。

表 3 最小二乘拟合结果

能阈/MeV	13	10	5	1.5
A	1.016	1.130	1.534	2.218
Σ	-0.0162	-0.0155	-0.0137	-0.00882
γ	-0.9997	-0.9995	-0.9996	-0.9917

表 4 实验不确定度内容

实验不确定度内容	不确定度%
探测器响应函数 (绝对效率、有效能量分辨)	3~4
谱仪能量刻度不确定度	<1
谱仪非线性	2
测量系统稳定性	<1
统计不确定度	1~5
距离不确定性	1.5
本底中子	0.5~3
γ 本底	1~3
源中子相对监视	1.5
源中子角分布	2
靶室结构	<1
样品非均匀性及缺陷	1
总 计	5.5~8.5

4 讨 论

从实验的结果总观, 其是相互自洽的, 也是合理的。图 7 穿透率曲线完全表明了这点。最小二乘法拟合的相关系数也证明了这点。

从改变测量环境的测量中可以看出, 本实验的设计是成功的。小球两层实验结果与大球实验结果是相符的。但可看出在下能阈低时, 其测量值大于大球测量值, 这是本底中子的影响。由此可判断出本底中子在实验中的影响, 及实验设计的合理性。

表 5 实验结果与文献结果比较表

样品厚度 g/cm^2	能 阈 MeV	实 验 结 果		文 献 结 果	
		直接结果	校正结果	文 献 [1]	文 献 [2]
34.8 (0.98 mfp)	13	0.5952	0.5691	0.590	
	10	0.6635	0.5872	0.607	0.600
	5	0.9523	0.6208	0.643	0.645
	1.5	1.632	0.7357	0.775	0.780
104.6 (2.9 mfp)	13	0.1921	0.1837	0.202	
	10	0.2281	0.2013	0.218	0.215
	5	0.3660	0.2386	0.248	0.245
	1.5	0.8816	0.3975	0.423	0.420
173.9 (4.9 mfp)	13	0.0625	0.0598	0.064	
	10	0.0790	0.0699	0.071	0.066
	5	0.1416	0.0923	0.084	0.080
	1.5	0.478	0.2157	0.189	0.180
237.9 (6.7 mfp)	13	0.0222	0.0212		
	10	0.0296	0.0263		0.066
	5	0.0589	0.0384		0.080
	1.5	0.2721	0.1227		0.180

本实验结果与文献结果比较如表 5 所示, 拟合比较结果如表 6 所示。其中本实验结果用拟合时 $A=1$ 作为近似的几何因子校正, 文献结果为由曲线查出 (其测量时探测器距离样品大于 7.6 m, 且探测器有屏蔽)。可以看出, 校正结果在高中能部分与文献结果在误差范围内是完全符合的, 在厚样品低能部分有些差异, 而出现一些差异也是正常的, 因为测量安排不同。文献结果按曲线查的也可能造成一定差异。如果要进行实验与理论计算的比较, 最好用二维的计算方法, 直接计算实验条件下的情况, 这最能说明问题。

表 6 拟合比较结果比较表

下能阈		本实验结果	文献 [1] 结果	文献 [2] 结果
13 MeV	A	1.046	1.043	
	Σ	-0.0162	-0.0159	
	γ	-0.9997	0.9998	
10 MeV	A	1.130	1.057	1.150
	Σ	-0.0153	-0.01543	-0.01543
	γ	-0.9995	0.9996	0.9986
1.5 MeV	A	2.218	1.141	1.337
	Σ	-0.00882	-0.01014	-0.0122
	γ	-0.9947	0.9965	0.9920

参加实验的人员有段绍节、陈素和、刘荣、陈家斌、郝杰。同时，对沈寄安提出的质疑表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Wong C, et al. UCRL-51144, UCTL-51232, L. F. Hansen, J. D. Anderson, P. S. Brown, et al. Nucl. Sci. Eng., 1973, 51, 278
- 2 Marion L. STELTS, Sam DONALDSON and Jeanetta POVELITES. Nucl. Instr. and Meth., 1981, 187, 483
- 3 Kinbara S Kumahara T. Nucl. Instr., 1969, 70, 173
Y. Furuta, S. Kinbara and K. Kaieda Nucl. Instr. Meth., 1970, 84, 269.