

D-T 中子照射下贫化铀球、钒球介质内 中子能谱和伴生 γ 能谱测量

郭海萍, 安力, 王新华, 牟云峰, 朱传新, 陈渊

(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: 为获得介质内中子能谱及伴生 γ 能谱的实验数据, 在中心 D-T 中子照射下, 用 $\phi 18 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的苣闪烁体探测器, 测量了与 D^+ 束成 45° 角的水平方向距球心 7、10、13、16、19、22 cm 位置处贫化铀球介质内的中子能谱和伴生 γ 能谱, 以及钒球内与 D^+ 束成 0° 角、距离球心 1.8、4.8 和 8.3 cm 处的中子能谱和伴生 γ 能谱。用 MCNP/4B 程序和 ENDF/B-VI 库数据对实验模型进行模拟计算, 并与实验结果进行了比较。

关键词: 贫化铀球; 钒球; 中子能谱; γ 能谱

中图分类号: O571.43⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)03-0283-05

Measurement of Neutron Spectrum and Induced γ -Spectrum in Vanadium Sphere and Depleted Uranium Sphere

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

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-213, Mianyang 621900, China)

Abstract: In-vivo neutron and gamma spectra of depleted uranium sphere and vanadium sphere under central D-T neutron source were measured, with a $\phi 18 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ stilbene crystal detector, at 7, 10, 13, 16, 19, 22 cm away to the center in 45° direction in depleted uranium sphere, and 1.8, 4.8, 8.3 cm away to the center in the 0° direction in V sphere. Simulation was carried out using MCNP code with ENDF/B-VI database, and the calculated result was compared with the measured result.

Key words: depleted uranium sphere; vanadium sphere; neutron spectrum; γ -spectrum

中子能谱是反映中子与物质反应过程的重要物理量, 反应中的伴生 γ 能谱也是核反应过程的特征量。国际上一些发达国家早在 20 世纪 80、90 年代已将实验研究的重点转移到介质内中子和 γ 射线的行为上。在我国, 介质内中

子能谱及伴生 γ 能谱的实验数据几乎是空白, 相应的探测器技术也需深入研究。贫化铀是重要的核材料, 钒是 1 种重要的核工程材料, 而国内外有关贫化铀、钒介质内的能谱数据很少。本工作将为贫化铀及钒的核数据评价提供基准

检验。

1 实验内容及方法

研究贫化铀球、钚球在 D-T 中子照射下介质内中子能谱和伴生 γ 能谱特征。中子能谱的范围为 1.0~14 MeV, 伴生 γ 能谱范围为 0.4~4 MeV。

实验测量反冲质子谱和康普顿电子谱。通过解逆矩阵方法得到中子能谱和 γ 谱^[1]。设实验测量的反冲质子/康普顿电子谱为 $J(E_c)$, 把反冲质子/康普顿电子谱和连续的中子、 γ 能谱 $\varphi(E)$ 分成 m 个能量间隔, 则第 i 个间隔内的反冲质子(电子)数为:

$$J_i = \sum_{j=i}^m f_{i,j} \varphi_j \quad (1)$$

用矩阵可表示为:

$$\mathbf{J} = \mathbf{F}\boldsymbol{\varphi} \quad (2)$$

逆矩阵解谱则为:

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{J} \quad (3)$$

式中: \mathbf{F}^{-1} 为矩阵 \mathbf{F} 的逆矩阵; $f_{i,j}$ 为闪烁体对单能中子或 γ 射线的响应函数。

茂闪烁体单能中子响应函数用 O5S 蒙特卡罗程序计算。单能 γ 射线的响应函数用 EGSnrc 蒙特卡罗程序计算。

2 实验装置

贫化铀球实验装置如图 1a 所示, 加速器中子源位于贫化铀球的中心。贫化铀球由 4 层球壳组成, 4 层球壳的半径分别为 80、262、362 和 388 mm。0° 方向的孔道用贫化铀塞块填充。测量在相对于 D⁺ 束方向 45° 的测量孔道内进行。测量时, 孔道内依次在不同测量点由内到外填充贫化铀塞块。钚球实验装置示意图如图 1b 所示。钚球直径 $\phi 23$ cm、厚 10.5 cm, 为整球结构。一条直径 $\phi 2$ cm 的通孔一半与单管中子靶室相配, 另一半用于放置探测器^[2]。金属钚的密度为 6.02 g/cm³, 纯度为 99.9%, 含有氧、铁、铝、硅和铬等少量杂质元素, 其质量百分比分别为 0.016%、0.0081%、0.005%、0.004% 和 0.019%。

2.1 靶室

靶室用铝制作, 它由伴随 α 粒子探测室、漂移管和靶室 3 部分组成(图 2)。

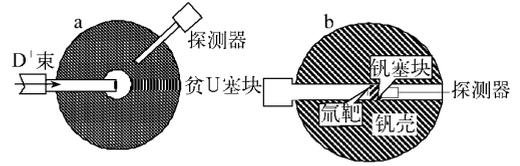


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental assembly

a——贫化铀球; b——钚球

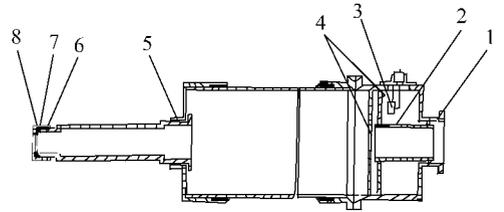


图 2 中子靶室结构示意图

Fig. 2 Scheme of neutron target cell

1——漂移管; 2——屏蔽准直管; 3——半导体探测器;
4——光闸; 5——聚四氟乙烯环; 6——拧盖;
7——靶片; 8——橡皮密封圈

2.2 α 粒子监测系统

中子绝对产额通过测量伴随 D-T 反应产生的 α 粒子而得到。金硅面垒探测器放置在与 D⁺ 束成 178.9° 的方向上。源中子中的 D-T 反应所占的份额小于 1%。绝对中子产额不确定度小于 2.5%。

2.3 探测器

探测器为 $\phi 1.8$ cm \times 2.0 cm 的茂晶体, 体积小, 能较好分辨中子和 γ 射线, 其单能中子响应函数用经过改进的 O5S 蒙特卡罗程序计算, 单能 γ 射线的响应函数用 EGSnrc 蒙特卡罗程序计算。在测量中子或 γ 射线能谱时, 用脉冲形状甄别技术进行 n、 γ 分辨。

3 实验测量

实验在 ns-200 高压倍加器上进行。由于受到探测器的线性范围和 n、 γ 分辨效果的制约, 所以, 测量反冲质子谱时, 分高、低 2 段进行。低能段能量为 1.0~4.0 MeV, 高能段能量为 3.5~15.0 MeV, 二段测量用伴随 α 粒子归一。由于贫化铀球本身的 γ 射线太强, 产生的信号会堵塞放大器, 因此, 在探测器的探头外用厚度为 2.6 mm 的铅皮来屏蔽一些 γ 射线, 这样, 不会对中子的测量产生明显影响。实验

前,用 MCNP 蒙特卡罗程序和 ENDFI B-VI 库数据进行了模拟计算,发现介质内的 γ 射线大部分集中在低能区,因此,在测量反冲电子谱时,只进行 1 个能段的测量。在计算探测器的响应函数时,假设探测器的外层包有 2.6 mm 厚的铅屏蔽层。测量介质内中子和 γ 谱时,探测器放在介质内与 D^+ 束成 45° 角的水平方向距靶 7、10、13、16、19 及 22 cm 的位置处,也就是在贫化铀球壳从内到外的厚度依次为 3、6、9、12、15 及 18 cm 处的 6 个测量点上,并分别测量高、低 2 段的反冲质子谱和低能区的康普顿反冲电子谱。

测量钷球介质内能谱时,探测器轴线与 D^+ 束成 0° 角。在第 1 测点测量时,在探测器和靶头间加入厚 1.5 cm 的钷塞块;在第 2 测点,再加 3 cm 厚的钷塞块;在第 3 测点,又加 3.5 cm 厚钷塞块。靶头铝制拧盖厚约 3 mm,也即第 1 测点距离靶心 1.8 cm,第 2 测点距离靶心 4.8 cm,第 3 测点距离靶心 8.3 cm。分别测量高、低二段的反冲质子谱和康普顿反冲电子谱。测量系统用 ^{22}Na 标准 γ 源进行能量刻度。

4 结果和讨论

测量的贫化铀球介质内的 1.25 MeV 以上的中子能谱和用 MCNP/4B 程序和 ENDF/B-VI 库核数据进行计算的结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,中子谱的峰位在 14.75 MeV 处,此峰是直穿中子的作用。低能段的中子则是中

子在贫化铀球介质内经过碰撞及反应后的结果,相对强度随厚度的增加而降低。图 4 是 0.3 MeV 以上的贫化铀球介质内 γ 能谱的实验结果。可以看出,每条谱的趋势是一致的,说明实验是自洽的。从图 4 还可看出, γ 能谱随厚度的增加而减弱,这是因为 γ 射线主要是由中子与 ^{238}U 的非弹性散射作用后产生,在中子的强度减少的情况下, γ 射线的强度随之减少。对贫化铀球介质内 γ 能谱也进行了模拟计算,但计算结果与实验结果相差很大。这说明, ^{238}U 的 γ 产生截面数据可能有待于进一步评价。图中纵坐标为归一到 1 个源中子的计数率。

图 5 是解出的 1~16 MeV 的钷球介质内中子能谱。中子谱的峰位在 14.75 MeV 处,是直穿中子的贡献;随着介质厚度的增加,相对强度逐渐变小。低能段的中子则是中子在钷球介质内经过非弹性散射后慢化的结果,相对强度随厚度的增加而降低。这是因为,随着厚度的增加,慢化作用越发明显。图 6 是对测量的钷介质内 γ 射线能谱积分的结果。可以看出, γ 能谱总的变化趋势是随厚度的增加而减少,这是因为 γ 射线主要是由中子与钷的非弹性散射作用后产生,因此,在中子强度减少的情况下, γ 射线的强度也随之减少。

图 7 是用 MCNP 程序和 ENDF/B-VI 库数据计算的 γ 射线能谱结果。可以看出, γ 能谱总的变化趋势随厚度的增加而减少,这说明实验是自洽的。

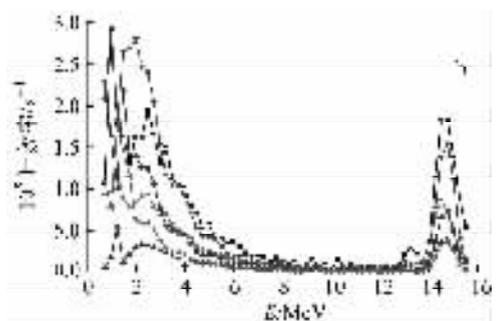
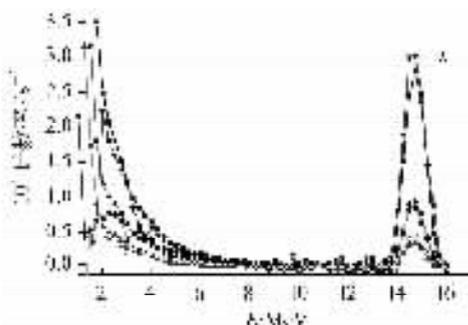


图 3 不同厚度下贫化铀球内中子能谱

Fig. 3 Neutron spectra in depleted uranium

- a: ■——3 cm(实验值); ◆——6 cm(实验值); ☆——9 cm(实验值);
 ▼——3 cm(计算值); ●——6 cm(计算值); △——9 cm(计算值)
- b: ■——12 cm(实验值); ●——15 cm(实验值); ▲——18 cm(实验值);
 ▼——12 cm(计算值); ◆——15 cm(计算值); ◀——18 cm(计算值)

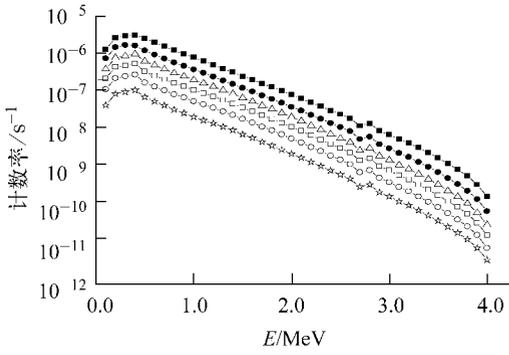


图4 贫化铀球内不同厚度处 γ 能谱

Fig. 4 γ -spectra in depleted uranium sphere

■——3 cm; ●——6 cm; △——9 cm;
 □——12 cm; ○——15 cm; ☆——18 cm

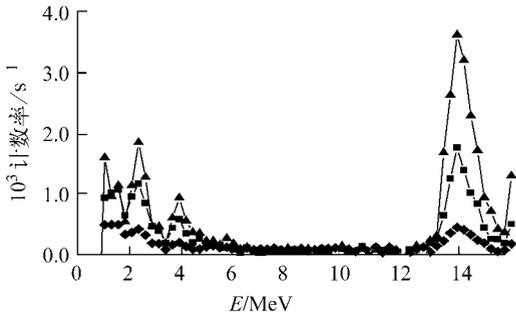


图5 钒介质内距靶心不同位置处中子能谱实验结果

Fig. 5 Experimental neutron spectra in V sphere

▲——1.8 cm; ■——4.8 cm; ◆——8.3 cm

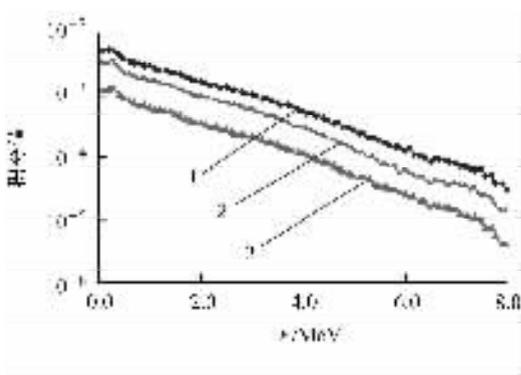


图6 钒介质内不同厚度处 γ 射线能谱实验结果

Fig. 6 Experimental γ -spectra in vanadium sphere

1——1.8 cm; 2——4.8 cm; 3——8.3 cm

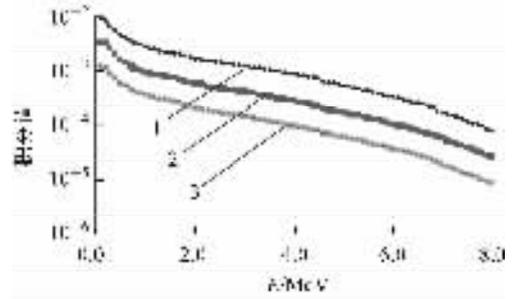


图7 钒介质内不同厚度处 γ 射线能谱计算结果

Fig. 7 Calculated γ -spectra in V sphere

1——1.8 cm; 2——4.8 cm; 3——8.3 cm

1 MeV的不同能量阈值的总中子数。实验与计算的介质内中子积分谱比较如图8所示。由图8可看出,实验和计算的中子积分能谱总的变化趋势是一致的,说明实验自洽。可以看出,在大于3 MeV的能区范围内二者符合较好;在1~3 MeV能区,实验与计算结果间有差异。最近的实验结果表明,低能区的差异主要来源于 n, γ 分辨引起的探测器的计数损失。圆柱形探测器探测效率和响应函数的各向异性也是造成实验与计算结果有所差异的原因之一。因此,测量介质内中子、 γ 能谱最好使用球形探测器^[5],这样,可避免因探测效率和响应函数各向异性带来的影响,从而提高解谱精度。

由于被测量中子能谱和 γ 能谱是间接测量,故其标准不确定度由测量过程中各个输入量的不确定度决定,并符合不确定度的传递规律。实验的标准不确定度由各标准不确定度分

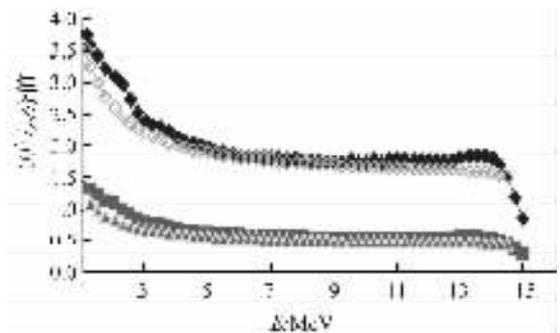


图8 距靶心不同位置处中子积分能谱实验与计算的比较

Fig. 8 Comparison of experimental and calculated integral neutron spectra

◆——4.8 cm(实验值); ◇——4.8 cm(计算值)
 ■——8.3 cm(实验值); ▲——8.3 cm(计算值)

用MCNP程序和ENDF/B-VI库数据对介质内中子能谱进行了模拟计算。为便于比较,将能谱处理成不同阈能时的积分中子数(中子积分谱),即对于1个源中子入射时,高于

量平方和的平方根值确定。各标准不确定度分量采用B类评定。标准不确定度分量主要包括:中子源强监测不确定度小于2.5%; β 闪烁体探测器响应函数的计算不确定度为3.0%~4.0%^[4];测量系统的能量刻度不确定度为1.0%;测量中子能谱时n、 γ 分辨不确定度,低能段为3%,高能段为1.0%;测量 γ 能谱时的n、 γ 分辨不确定度为1%;受自发裂变 γ 影响的不确定度为1.0%;解谱过程中的不确定度为5.0%。总的实验标准不确定度为:中子能谱低能段,7.0%~8.0%;高能段,6.5%~7.0%; γ 能谱,6.5%~8.0%。

参考文献:

- [1] 复旦大学,清华大学,四川大学.核物理实验方法(下)[M].北京:原子能出版社,1982:23-24.
- [2] 陈渊,郭海萍,安力,等.钒球14 MeV中子的泄漏能谱测量[J].原子能科学技术,2002,36(2):157-159.
CHEN Yuan, GUO Haiping, AN Li, et al. Neutronics experiment of vanadium shell benchmark with 14 MeV neutron source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(2): 157-159(in Chinese).
- [3] 牟云峰,陈渊,安力.D-T中子照射铁球 γ 射线角通量谱测量[J].原子能科学技术,2000,34(增刊):113-116.
MOU Yunfeng, CHEN Yuan, AN Li. Measurement and calculation of γ -ray angular flux spectra of iron sphere bombarded by D-T neutrons[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2000, 34(Suppl):113-116(in Chinese).
- [4] 王新华,陈渊,郭海萍,等.EGSnrc系统在计算闪烁探测器响应函数矩阵中的应用[J].原子能科学技术,2005,39(3):202-204.
WANG Xinhua, CHEN Yuan, GUO Haiping, et al. Application of EGSnrc system to calculate matrix of response functions for scintillator detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(3): 202-204(in Chinese).
- [5] 王新华,陈渊,牟云峰,等. β 探测器响应函数各向异性计算[C]//全国第十二届核电子学与探测技术学术年会论文集.昆明:[s. n.],2004:454.