

碳材料反射中子的 ^{238}U 裂变反应率测量和计算

刘荣, 蒋励, 王玫, 林菊芳, 刘成龙, 王大伦, 励义俊, 温中伟

(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:用小型贫化铀裂变室和俘获探测器测量了D-T聚变中子在碳材料反射体上反射中子引起的 ^{238}U 裂变反应率分布。比较了无碳材料反射体的测量结果。实验测得的 ^{238}U 裂变反应率合成不确定度为5.1%~6.4%。实验结果与用MCNP/4A程序和ENDF/B-库数据计算的结果在误差范围内符合。

关键词:碳材料;反射中子; ^{238}U 裂变反应率

中图分类号:O571.43

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2003)04-0310-03

Measurement and Calculation of ^{238}U Fission Reaction Rates Induced by Neutrons Reflected by Carbon Material

LIU Rong, JIANG Li, WANG Mei, LIN Jufang, LIU Cheng-long,
WANG Da-lun, LI Yr-jun, WEN Zhong-wei

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, China)

Abstract: To check the data of carbon material reflecting neutrons, the distribution of ^{238}U fission reaction rates induced by D-T fusion neutrons reflected by carbon material was measured by using the small depleted uranium fission chamber and the capturing detector. For comparison, ^{238}U fission rates without carbon material was measured too. The combined standard uncertainty of ^{238}U fission reaction rate is 5.1%~6.4%. The measured results are consistent with the calculated ones with MCNP/4A code and ENDF/B- library data in the range of the error.

Key words: carbon material; reflected neutrons; ^{238}U fission reaction rates

介质反射中子对核材料、反应堆中的临界或次临界系统等的临界安全、反应性有重要影响。在核材料的库存中,需要考虑混凝土反射中子引起的裂变系统临界安全问题。国外有关反射中子的文献报道不多,理论计算方面的多

于实验测量方面的文献,主要研究混凝土等材料的中子反射率。不同材料引起的反射中子在一定厚度下与材料的成分有关。为检验碳的反射中子参数,本工作实验研究碳材料反射中子特性及其影响。

收稿日期:2002-04-26;修回日期:2002-08-12

作者简介:刘荣(1963—),男,甘肃武威人,研究员,实验核物理专业

1 测量方法

反射中子的测量是在源中子和测点之间放入屏蔽中子的材料,屏蔽掉直穿中子,在测点处测量反射中子。实验研究中用的反射体由碳材料构成,厚 10 mm,中子源为 D-T 聚变中子源。

采用铀核裂变法测量反射中子(测量反射中子引起的绝对裂变反应率),中子探测器为小型贫化铀和浓缩铀裂变室,贫化铀中的²³⁸U 对裂变计数的贡献采用浓缩铀裂变室测量与迭代法相结合的方法来扣除。在更为狭小的空间内,采用俘获探测器测量裂变反应率。绝对裂变反应率 F 由下式表示:

$$F = \frac{1}{\phi m} (N_{f,s} - K N_{f,b}) \quad (1)$$

式中: N_f 为裂变计数,若用俘获探测器测量,则 $N_f = KN$, K 为转换系数, N 为俘获探测器聚酯膜上裂变碎片的射线计数;下角“s”指信号,“b”指本底; K 是相当于屏蔽锥厚度处的本底与测点处本底的转换系数,由计算得到; ϕ 为 D-T 聚变中子源产额,由大角度伴随粒子法得到^[1]; 为裂变室测量裂变碎片的效率; m 为铀镀层的质量。

式(1)得到的绝对裂变反应率归一到了 1 个源中子和 1 个裂变材料原子。

2 实验装置

实验布置与文献[2]中的基本一致。不同之处是,屏蔽材料厚度不同,反射体为碳材料而非水泥屏蔽体。中子源与小铁球壳之间是屏蔽材料,测点选在小铁球壳的水平赤道方向上。测点的具体位置由探测器在铁球表面的径向位置与源中子沿系统轴向入射方向的夹角确定。

14 MeV 中子由 $T(d,n)^4_2\text{He}$ 反应产生。Ti-T 靶面与 D^+ 束方向成 45° ,靶面活性区 $\phi 12$ mm,靶用水冷却。靶室头部为半球状,壁厚 2 mm。测量粒子的金硅面垒半导体探测器安放在与 D^+ 束线成 178.2° 方向上。

贫化铀和浓缩铀平板裂变室外径 $\phi 30$ mm、高 20 mm。Ni 底衬上的铀镀层 $\phi 24$ mm,两个裂变室的铀层质量厚度分别为 361 和 $290 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。俘获探测器^[3]由铀片和聚酯膜相互交叠构成,铀片 $\phi 24$ mm,厚 0.5 mm;聚酯膜 $\phi 30$ mm,厚 50 μm 。

3 测量结果和讨论

3.1 D-T 聚变中子源注量角分布

实验中,源中子将穿过靶室头部(靶头)的结构材料,因此,需考虑源中子经过靶头的衰减。源中子穿过靶头的注量角分布用 A1 活化箔测量。A1 的活化反应 $\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ 中的 ^{28}Al 的射线用 NaI(Tl) 闪烁探测器测量。测得的靶头注量角分布示于图 1。根据靶头的结构和材料,用 MCNP/4A 程序和 ENDF/B- 库数据计算的注量角分布同示于图 1。

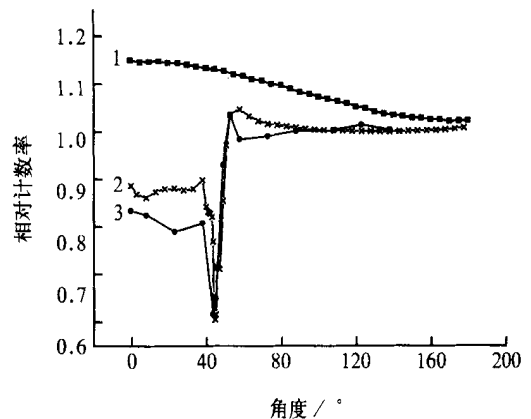


图 1 测量和计算的靶头注量角分布

Fig. 1 Measured and calculated angular distributions of the fluxence from the head of target chamber

1——无结构材料时的注量分布;2——MCNP/4A 程序和 ENDF/B- 库数据计算的注量分布;3——测量结果

3.2 反射中子分布

实验测点布在铁球壳水平赤道方向上 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内,每隔 30° 布一测点,其中,在 0° 和 30° 测点放置俘获探测器,其他测点为裂变室。测量的裂变计数经绝对中子产额、同位素、记录裂变碎片效率、铀材料质量、计数死时间等修正后,由式(1)算得反射中子引起的²³⁸U 绝对裂变反应率在铁球外表面上的分布。实验大厅的散射中子本底采用实验屏蔽法和数值模拟计算相结合的方法扣除^[4]。

在 1~14 MeV 中子能区,用 MCNP/4A 程序和 ENDF/B- 库数据对反射中子进行计算分析。计算中用的 D-T 中子源中子能谱考虑了图 1 中源中子经靶头结构材料衰减的影响。MCNP 程序基于蒙特卡罗方法,可计算中子、光子等输运问题。该程序的 4A 版本是美国

LANL 在 1993 年发表的。

在碳材料反射体上的反射中子测量和计算结果示于图 2a, 图中曲线是在铁球壳外表面不同位置(角度)处的纯 ^{238}U 裂变反应率分布。为了与有碳材料反射体的结果比较, 在同样条件下测量了无碳材料反射体的 ^{238}U 裂变反应率分布, 并进行了计算分析, 结果示于图 2b。

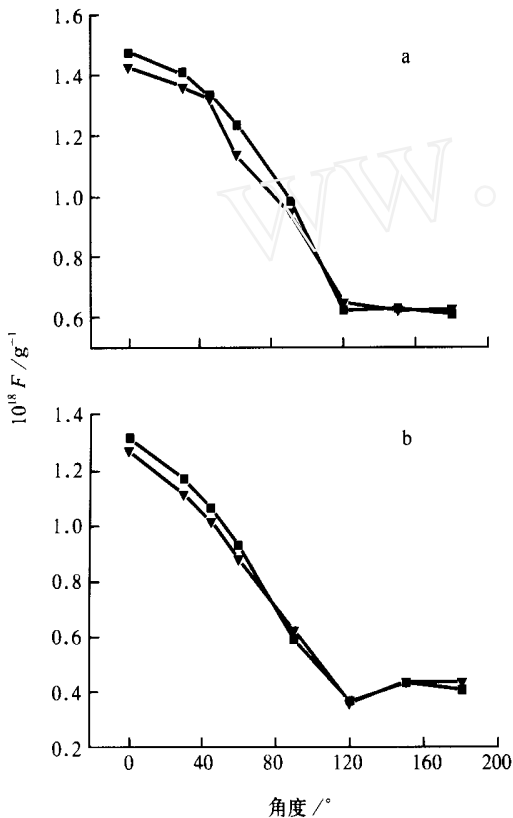


图 2 有无碳材料反射体时
裂变反应率的测量和计算结果

Fig. 2 Measured and calculated fission reaction rates with and without the carbon material
a——有反射体; b——无反射体
——计算值; ▼——测量值

通过分析式(1)和误差递推公式得到 ^{238}U 裂变反应率的合成不确定度为 5.1% ~ 6.4%。其中:绝对中子产额不确定分量为 2.5%;记录裂变碎片的效率, 1.5%;铀镀层质量, 1.2%;计数统计误差, 1.5% ~ 3.0%;同位素修正, 2.0%;本底扣除, 2.0%;转换系数, 3.8%。

3.3 讨论

1) 选用小型贫化铀裂变室和体积更小的俘获探测器测量小铁球壳外表面反射中子引起

的 ^{238}U 裂变反应率分布。用小铁球壳可观测小空间内反射中子的分布。俘获探测器可在更为狭小的空间内使用, 但需与裂变室配合方可得到裂变计数。因它是间接测量裂变碎片, 易受中子注量稳定性、聚酯膜与铀片的贴紧程度等因素的影响, 其测量误差较裂变室大。

2) 测量和计算的注量角分布符合较好。由于靶面与 D^+ 束线成 45° , 因此, 源中子注量角分布在 45° 处有一谷点, 这是由于中子穿过靶面衰减的结果。 D^+ 束线与竖直方向成 13° , 实验设计时考虑了实验系统水平放置, 所以, 实验系统轴向在与 D^+ 束线成 103° 方向上。

3) 有无反射体的中子分布在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内呈下降趋势, 120° 后变得平缓, 说明 90° 前有直穿中子影响, 120° 后铁球壳吸收中子起作用。有无反射体的 ^{238}U 裂变反应率之比在 1.1 ~ 2.0 之间, 说明测量到了实验研究中的反射体反射的中子。

4) 反射中子分布的实验值和计算值在实验误差范围内符合, 说明实验设计和实施是可行的。

4 结论

实验测量了碳材料反射体反射中子的 ^{238}U 裂变反应率分布, 测量结果的合成不确定度为 5.1% ~ 6.4%, 测量结果与用 MCNP/4A 程序和 ENDF/B- 库数据的计算结果在实验误差范围内符合。测量方法可用于进一步的实验研究中。

参考文献:

- [1] 刘 荣, 林理彬, 王大伦, 等. 用大角度伴随 粒子法测量绝对中子产额及其校对实验[J]. 核电子学与探测技术, 1999, 19(6): 428 ~ 432.
- [2] 刘 荣, 林理彬, 王大伦, 等. 用铀裂变室研究反射中子测量技术[J]. 核技术, 2000, 23(12): 851 ~ 855.
- [3] 刘 荣, 林理彬, 王大伦, 等. 通过测量裂变碎片的 射线研究中子测量技术[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(3): 164 ~ 167.
- [4] 刘 荣, 蒋 励, 王 玫, 等. 在特定实验条件下的散射中子本底研究[J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(4): 241 ~ 243.