

贫铀球壳中 D-T 中子诱发的铀反应率的测量与分析*

羊奕伟¹⁾²⁾ 严小松^{1)†} 刘荣¹⁾ 鹿心鑫¹⁾ 蒋励¹⁾ 王玫¹⁾ 林菊芳¹⁾

1) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

2) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2012 年 5 月 24 日收到; 2012 年 8 月 21 日收到修改稿)

为校验次临界能源堆的概念设计, 在 R19.4/30.0 cm 的贫铀球壳装置上采用活化法开展 14 MeV 中子学积分实验. 布放 6 片贫铀活化片于球壳中与入射 D 离子束 90° 方向上的不同位置处活化, 用 HPGe 探测器测量 ^{238}U (n, γ) 反应、 ^{238}U (n, f) 及 ^{235}U (n, f) 反应和 ^{238}U (n, 2n) 各反应产物发射的特征 γ 射线, 得到了相应的反应率. ^{238}U (n, γ) 反应率的不确定度为 3.6%—3.7%, ^{238}U (n, f) 和 ^{235}U (n, f) 反应率的不确定度为 5.1%—5.9%, ^{238}U (n, 2n) 反应率的不确定度为 4.3%—4.7%. 用 MCNP5 程序在 ENDF66c 数据库下进行模拟计算, ^{238}U (n, γ) 反应率的计算值/实验值 (C/E) 为 0.972—1.034, ^{238}U (n, f) 和 ^{235}U (n, f) 反应率的 C/E 为 0.983—1.058, ^{238}U (n, 2n) 反应率的 C/E 为 0.979—1.019.

关键词: D-T 中子, 铀反应率, 蒙特卡罗模拟, 次临界能源堆

PACS: 28.20.Np, 28.20.-v, 28.41.Ak, 25.85.Ec

DOI: 10.7498/aps.62.022801

1 引言

聚变-裂变混合堆, 主要由聚变中子源和次临界堆包层构成, 能够利用资源丰富的铀-238 或钍-232, 甚至是压水堆乏废料发电, 在减少核废料的同时增殖核燃料, 能够有效的缓解日益凸显的能源危机和核燃料短缺问题. 此外, 次临界系统没有临界安全问题, 聚变-裂变混合堆不涉及铀钚分离, 防核扩散性能优异, 可以缓解国际社会对反应堆安全和核扩散的担忧, 有利于大规模建设, 更引发了国际国内聚变-裂变混合堆的新一轮研究热潮^[1].

目前, 我国聚变-裂变混合堆的研究团队一般采用基于 MCNP 程序的耦合程序开展次临界能源堆的概念设计^[2-6]. 模拟程序的计算方法和核数据库的可靠性直接关系着最终设计的混合堆的性能, 甚至是混合堆的成败. 通常通过开展实验, 测量模拟装置中的各种重要反应率特性和中子能谱, 并与模拟程序在相应数据库下的计算结果进行比较, 验证中子学计算模拟程序和参数数据库的可靠性.

在次临界能源堆中, 铀-238 俘获中子生成铀-239, 经两级衰变后生成易裂变同位素钚-239, ^{238}U (n, γ) 反应率的准确计算决定了概念设计中核燃料增殖性能计算的可靠性; ^{238}U (n, f) 和 ^{235}U (n, f) 反应释放裂变能, 是反应堆中最重要的反应, 其反应率的准确计算关系着概念设计中能量放大倍数以及电厂功率的可靠性; ^{238}U (n, 2n) 反应阈能为 6 MeV 左右, 在 7.7—13.5 MeV 的快中子能区截面超过 1 b, 是混合堆中除了裂变反应外几乎唯一的产生中子的反应, 概念设计采用的计算程序和数据库能否准确计算 ^{238}U (n, 2n) 反应率也影响着概念设计的可靠性.

Akiyama 等^[7] 在由贫铀金属块组成的球壳上开展 14 MeV 中子积分实验, 采用活化法测量了 ^{238}U (n, γ) 反应率, 相对不确定度为 5.4%—6.7%, 用 ^{238}U 裂变室测量了离中子源较近位置处的 ^{238}U (n, f) 反应率, 不确定度为 5.8%—6.0%, 用 ^{235}U 裂变室测量了 ^{235}U (n, f) 反应率, 不确定度为 5.5%—5.6%. 用 MCNP2B 程序在 JENDL-2 库下进行了模拟计算, ^{238}U (n, γ) 反应率计算结果一般比实验低

* ITER 计划专项国内配套研究 (批准号: 2010GB111002) 和中国工程物理研究院科技发展基金 (批准号: 2011B0103014) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yanxs05@gmail.com

10%左右, $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率的计算与实验偏差一般在 5%以内, 但最内侧实验点的偏差超过 30%, $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率的计算与实验偏差一般达到 10%—20%. Afanas'ev 等^[8] 在聚变堆包层模拟装置上开展 14 MeV 中子学积分实验, 采用活化法测量 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 和 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率分布, 用固体径迹探测器测量 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 及 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率, 各反应率的相对不确定度在 8%左右. 用 BLANK 程序在 ENDF/B-IV 库下进行了模拟计算, 各反应率的计算与实验结果一般在 10%以内符合, 但离中子源较远的部分位置的 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率, 计算与实验结果偏差超过 20%.

为校验次临界能源堆的概念设计, 我们在参考概念设计建立的贫铀/聚乙烯交替球壳装置上采用活化法开展了 14 MeV 中子学积分实验, 测量 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率、 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 、 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率和 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率^[9–11], 并用 MCNP5 程序^[12] 在 ENDF66c 库下进行了模拟计算. $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率的不确定度为 3.5%—3.7%, 计算与实验一般在 5%以内符合, 但在最外侧实验点偏差超过 10%; $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率的不确定度为 5.1%—6.9%, 计算值平均比实验值高 5%, 一般偏差 5%—10%; $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的不确定度为 5.3%—6.0%, 计算值都比实验值高 5%左右.

在贫铀或天然铀装置上开展的实验, 由于测量技术相对落后、计算方法多样、参数库陈旧等原因, 实验与计算符合情况不甚令人满意. 而在贫铀/聚乙烯交替球壳中开展的实验, 由于聚乙烯对 14 MeV 中子的强慢化作用, 中子能谱变化剧烈, 采用 MCNP5 程序得到的计算结果与实验结果间偏差较大. 此外, 由于我们首次将活化法测量裂变反应率的方法应用于 14 MeV 中子积分实验中, 此方法的可靠性需要开展更多的实验验证. 因此, 有必要在能谱更简单的贫铀球壳装置中开展 14 MeV 中子积分实验, 准确的测量包括裂变反应率在内的各种铀反应率.

本文在 R19.4/30.0 cm 的贫铀球壳装置上采用活化法开展 14 MeV 中子积分学实验, 用 HPGe 探测器测量贫铀片中发生 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应、 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 、 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 和 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应后发射的相应的特征 γ 射线计数, 得到相应的铀反应率. $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率的不确定度为 3.6%—3.7%, $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 及 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应的不确定度为 5.1%—5.8%, $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的不确定度为 4.6%—5.0%. 相

比于以前的实验, 测量精度总体上有了一定程度的提高. 用 MCNP5 程序在 ENDF66c 库下进行模拟计算, $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率的计算值/实验值 (C/E) 为 0.972—1.034, $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 及 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率的 C/E 为 0.983—1.058, $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的 C/E 为 0.979—1.019, 计算与实验结果符合情况良好, 优于在贫铀/聚乙烯交替球壳上计算和实验的符合情况, 更明显优于 Akiyama 等^[7] 和 Afanas'ev 等^[8] 计算和实验的符合情况, 表明对于 14 MeV 中子在单质的贫铀介质中的反应率计算, 目前采用的 MCNP5 程序在 ENDF66c 库下的计算结果是可靠的.

2 实验装置和测量仪器

2.1 D-T 中子源

在中国工程物理研究院核物理与化学研究所的 PD-300 加速器 D-T 中子源上开展实验, 入射 D 离子束流约为 200 μA , D 离子束在氚靶片上的平均能量为 134 keV, 在与入射 D 离子束成 178.2° 方向上距离氚靶片 50.8 cm 处安装有 Au-Si 面垒半导体探测器, 通过测量 D-T 反应产生的伴随 α 粒子数监测实验时的中子产额^[13]. 实验时, 平均中子产额为 $2.15 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 照射时间为 24792 s.

2.2 贫铀球壳

球壳尺寸 R19.4/30.0 cm, 贫铀的密度为 18.8 g/cm^3 , 其中 ^{238}U 丰度为 99.58%, ^{235}U 丰度为 0.416%. 在球壳装置的竖直向上方向开有半径为 2.2 cm 的测量孔道, 插入布放有 R1.2 cm $\times$ (0.018—0.020) cm 的贫铀活化片 (密度和成分与贫铀球壳一致) 的贫铀套筒 (内/外半径为 1.6/2.1 cm), 在套筒中通过贫铀塞块固定贫铀片, 安装球壳时保证球壳与氚靶同心 (偏差 $< 0.5 \text{ cm}$). 贫铀球壳和贫铀片的布置如图 1 所示.

2.3 HPGe 探测器

测量 γ 射线的 HPGe 谱仪由 ORTEC 公司的 GEM60P 探测器与 GammaVision 分析软件组成, 探头的灵敏体积为 250 cm^3 . 此系统在 1.33 MeV 时, 能量分辨率为 1.87 keV, 相对探测效率为 60%. 在本实验中, 所有的 γ 源都被置于离探测器表面 5.50

cm 处进行测量.

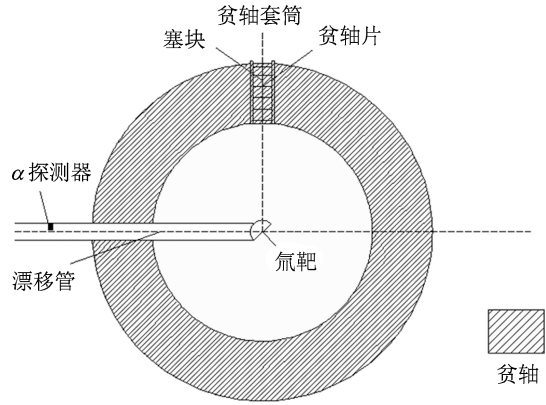


图1 贫铀球壳和贫铀片的布置示意图

3 实验测量

3.1 计算方法

用 HPGe 探测器测量活化贫铀片中发射的 277.6 keV γ 射线计数 $N_{277.6}$ 计算 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率 C_8 , 测量 293.3 keV γ 射线计数计算 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率 F_8 和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率 F_5 , 测量 208 keV γ 射线计数 N_{208} 计算 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率 $R_{\text{n}2\text{n}}$, 用于测量的各 γ 射线的半衰期和分支比等数据 [14,15] 如表 1 所示.

表1 用于测量反应率的 γ 射线数据

反应率	$^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$	$^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$	$^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$	$^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$
γ 射线来源	^{239}Np	^{143}Ce	^{143}Ce	^{237}U
半衰期/d	2.355	1.375	1.375	6.75
能量/keV	277.6	293.3	293.3	208.0
分支比/%	14.38 ± 0.21	42.8 ± 0.4	42.8 ± 0.4	21.2 ± 0.3
裂变产额/%	—	4.622	5.731	—

测量各铀反应率的计算方法分别如 (1), (2), (3), (4) 式所示, 反应率归一到每个源中子每个原子 (单位为 $\text{source neutron}^{-1} \text{ atom}^{-1}$):

$$C_8 = N_{277.6} \cdot K_1 / (N_8 \cdot \bar{\phi} \cdot F_1 \cdot A_1(d) \cdot b_1 \cdot \eta_1), \quad (1)$$

$$F_8 = N_{293.3} \cdot R_8 \cdot K_2 / [N_8 \cdot \bar{\phi} \cdot F_2 \cdot A_2(d) \cdot b_2 \cdot \eta_2 \cdot Y_8], \quad (2)$$

$$F_5 = N_{293.3} \cdot R_5 \cdot K_2 / [N_5 \cdot \bar{\phi} \cdot F_2 \cdot A_2(d) \cdot b_2 \cdot \eta_2 \cdot Y_5], \quad (3)$$

$$R_{\text{n}2\text{n}} = N_{208.0} \cdot K_3 / (N_8 \cdot \bar{\phi} \cdot F_3 \cdot A_3(d) \cdot b_3 \cdot \eta_3), \quad (4)$$

式中, N_8 为贫铀片样品中的 ^{238}U 原子数, N_5 为样品中的 ^{235}U 原子数; $\bar{\phi}$ 为平均中子产额 (s^{-1}). K_i 为活化期间中子产额变化的瞬态修正因子, 与照射期间的中子产额波动以及测量产物的衰变常数有关; F_i 为时间因子 (s), 与照射时间、冷却时间、测量时间以及测量产物的衰变常数有关; $A_i(d)$ 为厚度 d (cm) 的贫铀片对特征 γ 射线的自吸收修正因子; b_i 为特征 γ 射线所占测量产物衰变的分支比; η_i 为 HPGe 探测器对特征 γ 射线的探测效率. 其中 $i=1$ 表示 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率计算中的参数, $i=2$ 表示 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率计算中的参数, $i=3$ 表示 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率计算中的参数. 各参数的测量和计算在我们以前的工作 [9–11] 中有详细的介绍.

Y_8 和 Y_5 分别为 ^{143}Ce 在 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应中的裂变产额; R_8 和 R_5 分别为 293.3 keV γ 射线计数中来自于 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 及 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应的比例, $R_8 + R_5 = 1$. 由于 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 及 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应都能产生裂变碎片 ^{143}Ce , 293.3 keV γ 射线来自于 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 或 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应, 在实验上无法区分. 通过模拟计算其数值, 能够得到可靠的数值 [16,18], 是用活化法测量裂变反应率常用的方法, 其计算方法在文献 [10] 中有详细的介绍.

3.2 测量结果及不确定度分析

得到球壳装置中不同径向位置的各反应率及其相对不确定度如表 2 所示, 详细的不确定度分析如表 3 所示.

由于各衰变核素的半衰期精度很高, 中子监测和 γ 射线测量时都有准确的计时, 因此认为计算公式中的衰变常数和时不引入实验误差. 由于 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率都是通过测量 293.3 keV γ 射线计数, 并结合模拟计算结果得到, 因此, 其相对不确定度相同, 并且在表 3 中统一为裂变反应率. 此外, 由于探测效率是用 ^{243}Am 衰变生成 ^{239}Np 发射的各特征 γ 射线进行刻度的, HPGe 探测器对 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 的 277.6 keV γ 射线的 $\eta_1 \times b_1$ 可以联合得到, 其相对不确定度为 2.4%, 因此在表 3 中未单独列出 η_1 的不确定度.

相对于在贫铀/聚乙烯球壳交替装置中开展的实验 [9–11], 本实验增大了照射时的平均中子产额, 延长了照射时间, 并优化了 HPGe 探测器记录各活化片 γ 谱的测量时间, 降低各特征 γ 射线峰计数的统计涨落, 因此本实验精度总体上有一定的提高.

表 2 测得的反应率及其相对不确定度

离中子源距离/cm	$^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$	$^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$	$^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$	$^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$
19.8	3.191×10^{-28} 3.6%	3.669×10^{-28} 5.0%	3.512×10^{-27} 5.0%	1.748×10^{-28} 4.6%
21.8	2.817×10^{-28} 3.7%	2.541×10^{-28} 5.1%	2.945×10^{-27} 5.1%	1.143×10^{-28} 4.6%
23.9	2.348×10^{-28} 3.7%	1.843×10^{-28} 5.4%	2.451×10^{-27} 5.4%	7.536×10^{-29} 4.7%
25.9	1.774×10^{-28} 3.7%	1.199×10^{-28} 5.8%	1.738×10^{-27} 5.8%	4.836×10^{-29} 4.8%
27.9	1.151×10^{-28} 3.7%	8.341×10^{-29} 5.2%	1.218×10^{-27} 5.2%	3.277×10^{-29} 4.9%
29.5	6.622×10^{-29} 3.7%	5.544×10^{-29} 5.2%	7.884×10^{-28} 5.2%	2.332×10^{-29} 5.0%

表 3 铀反应率的不确定度分析 (%)

反应率	中子产额	探测效率	分支比	自吸收	γ 峰计数涨落	裂变产额
$^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$	2.5	—	1.5	1.0	0.5—0.7	—
裂变反应率	2.5	2.7	0.9	1.0	2.5—3.8	2.0
$^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$	2.5	3.4	1.4	1.0	0.6—2.0	—

为反映在各测量点 4π 立体角内的总反应率情况, 在图 2 中给出了各反应率的 $r^2R(r)-r$ 分布图 (r 为离中子源的径向距离, $R(r)$ 为位于 r 处的反应率).

从图 2 中可以看出, 4π 立体角内的 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率与离中子源的距离近似指数减小, 4π 立体角内的 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率变化规律和 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的变化规律相近; 而 4π 立体角内 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率变化规律相似, 前三个测量点的反应率几乎不变, 甚至还略有上升, 从第四个测点开始逐渐下降.

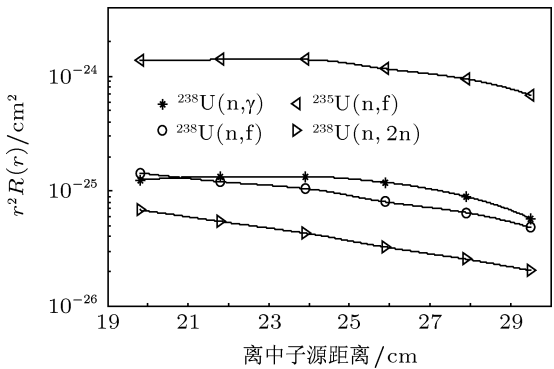


图 2 反应率的 $r^2R(r)-r$ 分布图

4 模拟计算与分析

用 MCNP5 程序在自带数据库 ENDF66c (来源

于 ENDF/B-VI.5 库数据) 下开展实验的模拟计算. 模拟计算时写入了大厅、靶室、D 离子束漂移管道、90° 测量管道、套筒、贫铀片及塞块等模型. 未写入放置贫铀球壳装置的支架, 由于活化贫铀片置于贫铀球壳中, 外侧有厚度至少为 0.4 cm 的贫铀塞块使之与大厅散射本底隔离, 实验模型的此近似对反应率计算结果的影响可以忽略.

4.1 反应率的计算与实验结果比较

计算反应率时, 中子源写入了其能量、角度的关联分布, 其分布通过 “DROSG-2000” 程序 [19] 计算得到, 用 F4 卡和计数乘子卡计算贫铀片中的反应率. 计算时, 统计粒子数超过 1 亿个, 保证各反应率的统计偏差 < 1%. 对计算结果和实验结果进行比较, 各测量点的计算值/实验值 (C/E) 情况如表 4 所示.

从表 4 中知, 本实验中 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率的计算值与实验值偏差在 3.4% 以内, C/E 平均值为 1.004; 裂变反应率的偏差在 5.8% 以内, C/E 平均值为 1.017; $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的偏差在 2.1% 以内, C/E 平均值为 0.996, 计算与实验结果符合情况良好, 优于相关实验的计算与实验结果的符合情况, 表明对于 D-T 中子在单质的贫铀介质中的反应率计算, MCNP5 程序在 ENDF66c 库下的计算结果是可靠的.

此外, 裂变反应率计算与实验符合情况良好, 甚至优于相关实验用裂变室测得的结果, 也从侧面论证了活化法测量 14 MeV 中子诱发裂变反应率的可靠性.

表4 各测点反应率的 C/E 情况

离中子源距离/cm	$^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$	裂变反应率	$^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$
19.8	0.972	0.983	0.992
21.8	1.000	1.021	0.994
23.9	0.999	0.999	0.995
25.9	1.002	1.058	1.019
27.9	1.017	1.014	0.990
29.5	1.034	1.028	0.979
平均值	1.004	1.017	0.996

4.2 中子能谱和反应率分析

用 MCNP5 程序计算实验装置中的中子能谱, 有助于详细的分析各活化片内测得的铀反应率. “DROSG-2000” 程序的计算结果表明, D 离子平均能量为 134 keV 时, 产生的中子在 90° 测量管道内的平均能量为 14.1 MeV. 计算中子能谱时, 采用 14.1 MeV 单能中子源, 用 F1 卡计算穿过与各活化片离中子源距离相同的球面的中子数, 并用能量计数 (En) 卡将计数划分为六个能段, 计算结果以距离中子源 19.8 cm 处球面上的总中子数结果进行归一, 得到各能段中子数占总中子数的比例, 如表 5 所示.

表5 活化片内各能段的中子数比例

中子能量/MeV	19.8 cm	21.8 cm	23.9 cm	25.9 cm	27.9 cm	29.4 cm
$< 10^{-6}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10^{-6} —0.01	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
0.01—1	0.70	0.80	0.80	0.72	0.56	0.36
1—6	0.14	0.15	0.15	0.13	0.10	0.08
6—14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
14—14.1	0.14	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03
总中子数	1.00	1.07	1.04	0.92	0.71	0.48

4.2.1 中子能谱分析

对表 5 中的计算结果有以下分析:

由于在贫铀球壳中有多种消耗中子的反应, 穿过各球面的总中子数随离中子源的距离总体呈减小趋势.

由于贫铀对中子的慢化作用, 穿过各球面的 14.1 MeV 中子数随离中子源距离的增大而指数减小, 中子主要被慢化为能量为 0.01—1 MeV 的低能

快中子, 低能快中子数占总中子数的比例超过 70%, 且随离中子源距离的增加呈增大趋势. 另有少部分中子处于 1—6 MeV 的快中子能段, 很少有中子处于能量 < 1 eV 的热中子能段、1 eV—0.01 MeV 的共振中子段和 6—14 MeV 的快中子能段.

由于贫铀对中子的反射作用, 随着位置远离贫铀球壳内边界, 反射加强, 0.01—1 MeV 的低能快中子数呈上升趋势, 超过一定距离后, 由于位置靠近球壳外边界, 反射作用下降, 低能中子数明显降低.

4.2.2 反应率分析

对于 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应, 由于其阈能为 6 MeV 左右, 结合对表 5 中数据的分析, 由于 14.1 MeV 中子通量 $\phi_{14.1} \propto \frac{1}{4\pi r^2} e^{-\Sigma \Delta r}$ (其中 Σ 为贫铀与 14.1 MeV 中子作用的宏观截面, Δr 为穿过贫铀材料的厚度), 因此图 2 中 4π 立体角内的 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率随离中子源的距离指数减小. 对于 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应, 其阈能为 1 MeV 能量左右, 从表 5 中可以看出, 1—14.1 MeV 范围内的中子数随离中子源的距离增大而减小, 因此, $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率的变化规律与 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的变化规律相近, 随着离中子源距离的增大而减小.

对于 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应, 其反应截面随能量的降低而增大, 结合对表 5 的分析, 各测点处超过 70% 的中子能量为 0.01—1 MeV, 而处于热中子和共振中子能段的中子数很少, 因此 4π 立体角内的 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率的变化规律与能量在 0.01—1 MeV 的低能快中子数变化规律一致, 前三个测量点的反应率几乎不变, 甚至还略有上升, 从第四个测点开始逐渐下降.

5 结 论

为校验次临界能源堆的概念设计, 在 R19.4/30.0 cm 贫铀球壳装置上开展实验, 采用活化法测量了贫铀球壳中 D-T 中子诱发的 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率、 $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率、 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率和 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率分布. 相对于以前开展的类似的实验, 测量精度总体上有一定的提高. 计算 4π 立体角内的总反应率, $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率随测量点离中子源距离的增大而指数减小, $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率变化规律与 $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率变化规律相近, 而 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率和 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应率随测点离中子源距离的增大呈现先略有增大, 再逐渐减小的变化趋势. 用 MCNP5 程序在 ENDF66c 库下进行了中子

能谱和反应率的模拟计算. 计算结果表明: 各测点处超过 70% 的中子位于 0.01—1 MeV 的低能快中子区间, $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 反应率的计算值与实验值偏差在 3.4% 以内, 裂变反应率的偏差在 5.8% 以内, $^{238}\text{U}(\text{n}, 2\text{n})$ 反应率的偏差在 2.1% 以内, 计算与实验结果符合情况良好, 优于类似实验计算与实验结果的比

较情况, 表明对于 14 MeV 中子在单质的贫铀介质中的反应率计算, MCNP5 程序在 ENDF66c 库下能够给出可靠的计算结果.

在实验过程中, 中国工程物理研究院核物理与化学研究所 204 室物理一组及加速器组的同事们的辛勤工作保证了实验的正常进行, 在此表示感谢.

-
- [1] Peng X J 2010 *Journal of Southwest University of Science and Technology* **25** 1 (in Chinese) [彭先觉 2010 西南科技大学学报 **25** 1]
 - [2] Liu G P, Cheng H P, Shao Z 2012 *Atomic Energy Science and Technology* **46** 272 (in Chinese) [刘国明, 程和平, 邵增 2012 原子能科学技术 **46** 272]
 - [3] Ma J M, Liu Y K 2012 *Atomic Energy Science and Technology* **46** 437 (in Chinese) [马纪敏, 刘永康 2012 原子能科学技术 **46** 437]
 - [4] Shao Z, Cheng H P, Liu G M 2012 *Atomic Energy Science and Technology* **46** 277 (in Chinese) [邵增, 程和平, 刘国明 2012 原子能科学技术 **46** 277]
 - [5] Shi X M, Peng X J 2010 *Nuclear Power Engineering* **31** 5 (in Chinese) [师学明, 彭先觉 2010 核动力工程 **31** 5]
 - [6] Xu H, Yang Y W, Zhou Z W 2009 *Atomic Energy Science and Technology* **43** 97 (in Chinese) [徐红, 杨永伟, 周志伟 2009 原子能科学技术 **43** 97]
 - [7] Akiyama M, Oka Y, Kanasugi K, Hashikura H, Kondo S 1987 *Ann. Nucl. Energy* **14** 543
 - [8] Afanas'ev V V, Belevitin A G, Verzilov Y M, Romodanov V L, Khromov V V, Markovskii D V, Shatalov G E 1991 *At. Energ.* **71** 901
 - [9] Yan X S, Liu R, Lu X X, Jiang L, Wang M, Lin J F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** (in Chinese) [严小松, 刘荣, 鹿心鑫, 蒋励, 王玫, 林菊芳 2012 物理学报 **61** 102801]
 - [10] Yan X S, Yang Y W, Zhu T H, Liu R, Lu X X, Jiang L 2012 *Atomic Energy Science and Technology* (in Chinese) [严小松, 羊奕伟, 朱通华, 刘荣, 鹿心鑫, 蒋励 2012 原子能科学技术] (in press)
 - [11] Yan X S, Liu R, Lu X X, Jiang L, Wen Z W, Han Z J 2012 *Chin. Phys. C* **36** 670
 - [12] X-5 Monte Carlo Team 2003 MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version, 5 LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory
 - [13] Liu R, Lin L B, Wang D L, Li Y J, Jiang L, Chen S H, Wang M, Yang K 1999 *Nuclear Electronics and Detection Technology* **19** 428 (in Chinese) [刘荣, 林理彬, 王大伦, 励义俊, 蒋励, 陈素和, 王玫, 杨可 1999 核电子学与探测技术 **19** 428]
 - [14] ENDF/B-VI Decay Data, Joseph A C <http://t2.lanl.gov/data/decayd.html> [2012-05-20]
 - [15] England T R, Rider B F 1994 *Evaluation and compilation of fission product yields* 1993 (Los Alamos National Laboratory) p19
 - [16] Nakajima K, Akai M, Suzaki T 1994 *Nucl. Sci. Eng.* **116** 138
 - [17] Nakajima K, Akai M 1996 *Nucl. Technol.* **113** 375
 - [18] Bergmann U C, Chawla R, Jatuff F, Murphy M F 2006 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **556** 331
 - [19] DROSG-2000: Neutron Source Reactions, Drosge M <http://www-nds.iaea.org/at/drosg2000.html> [2011-05-20]

Measurements and analyses of uranium reaction rates on a depleted uranium shell with D-T neutrons*

Yang Yi-Wei¹⁾²⁾ Yan Xiao-Song^{1)†} Liu Rong¹⁾ Lu Xin-Xin¹⁾ Jiang Li¹⁾
Wang Mei¹⁾ Lin Ju-Fang¹⁾

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

2) (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 24 May 2012; revised manuscript received 21 August 2012)

Abstract

Aiming at checking the conceptual design of the subcritical reactor, an experiment using activation technique was carried out on a depleted uranium shell of R19.4/30.0 cm with D-T neutrons. The 6 depleted uranium foils were activated at 90° with respect to the incident D beam in the shell, and distributions of ^{238}U (n, γ) reaction rates, ^{238}U (n, f) reaction rates, ^{238}U (n, f) reaction rates and ^{238}U (n, 2n) reaction rates were obtained, by measuring characteristic γ rays generated by corresponding uranium reactions. The relative uncertainties are 3.6%—3.7% for ^{238}U (n, γ) reaction rates, 5.1%—5.9% for ^{238}U (n, f) reaction rates and ^{238}U (n, f) reaction rates, and 4.3%—4.7% for ^{238}U (n, 2n) reaction rates. The experiment was simulated using MCNP5 code with ENDF66c library, and the calculation-to-experiment ratios are 0.972—1.034 for ^{238}U (n, γ) reaction rates, 0.983—1.058 for ^{238}U (n, f) reaction rates and ^{238}U (n, f) reaction rates, and 0.979—1.019 for ^{238}U (n, 2n) reaction rates.

Keywords: D-T neutron, uranium reaction rates, Monte Carlo simulation, subcritical reactor

PACS: 28.20.Np, 28.20.-v, 28.41.Ak, 25.85.Ec

DOI: 10.7498/aps.62.022801

* Project supported by the Chinese Special Project for ITER (Grant No. 2010GB111002), and the Science and Technology Development Fund of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2011B0103014).

† Corresponding author. E-mail: yanxs05@gmail.com