

D-T中子诱发贫化铀球壳内裂变率分布实验

韩子杰 朱通华 鹿心鑫 秦建国 王玫 蒋励 杨波

Experimental study on fission reaction rate induced by D-T neutron in depleted uranium shell

Han Zi-Jie Zhu Tong-Hua Lu Xin-Xin Qin Jian-Guo Wang Mei Jiang Li Yang Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 152501 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181717

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181717>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于裂变 γ 标识技术的瞬发裂变中子谱测量新方法

A novel method to measure prompt fission neutron spectrum based on fission γ tagging technique

物理学报. 2018, 67(21): 212501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180563>

^{252}Cf 自发裂变中子发射率符合测量的回归分析

Regression analysis of coincidence measurements for determining the neutron emission rate of ^{252}Cf spontaneous fission

物理学报. 2018, 67(24): 242901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181073>

反应堆蒙特卡罗临界模拟中均匀裂变源算法的改进

Modified uniform-fission-site algorithm in Monte Carlo simulation of reactor criticality problem

物理学报. 2015, 64(5): 052801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.052801>

单线态分裂的超快光谱学研究

Ultrafast spectroscopic study for singlet fission

物理学报. 2015, 64(9): 094210 <https://doi.org/10.7498/aps.64.094210>

二氧化铀电子结构和弹性性质的第一性原理研究

Study on the electronic structure and elastic constants of uranium dioxide by first principles

物理学报. 2015, 64(9): 097101 <https://doi.org/10.7498/aps.64.097101>

沉积态铀薄膜表面氧化的X射线光电子能谱

Surface oxidation of as-deposit uranium film characterized by X-ray photoelectron spectroscopy

物理学报. 2018, 67(2): 027301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172055>

D-T 中子诱发贫化铀球壳内裂变率分布实验*

韩子杰¹⁾ 朱通华¹⁾ 鹿心鑫¹⁾ 秦建国^{1)†} 王玫¹⁾ 蒋励¹⁾ 杨波²⁾

1) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2018年9月16日收到; 2019年5月7日收到修改稿)

中子诱发裂变反应率是表征和检验中子在材料中的运输、裂变放能等过程的重要物理量. 贫化铀球壳裂变反应率径向分布数据可为铀核数据宏观检验及研究裂变放能与贫化铀球壳厚度的关系提供数据支持. 本文设计了内径为 13.1 cm, 外径分别为 18.10, 19.40, 23.35, 25.40, 28.45 cm 的五种不同厚度的贫化铀球壳组合装置; 利用位于球壳中心的氚氟中子源轰击贫化铀球壳装置, 中子产额约为 3×10^{10} — $4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$; 在“赤道”平面与入射光束成 45° 方向测量裂变反应率随径向分布的情况. 为了克服裂变室和俘获探测器等自身对模型和中子场的扰动, 本文选择与装置材料相同的贫化铀材料作为活化探测器, 以活化探测器中的裂变碎片 ^{143}Ce 发射的 γ 射线作为测量对象, 通过 HPGe 探测器测量的 γ 射线数, 基于 ^{143}Ce 裂变产额数据反推裂变反应率. 通过实验获得了贫化铀球壳内的裂变率及其径向分布规律, 裂变反应率和相对标准不确定度分别位于 5.28×10^{-29} — 7.58×10^{-28} 之间和 6%—11% 之间. 基于蒙特卡罗程序和 ENDF/BVL8 数据库完成了模拟计算, 并与实验结果进行了对比分析, 两者在不确定度范围内一致.

关键词: 贫化铀, 裂变率, ^{143}Ce , 裂变产额**PACS:** 25.85.Ec, 28.20.Gd, 28.41.Ak**DOI:** 10.7498/aps.68.20181717

1 引言

大量基础研究认为, 基于聚变中子源^[1]和次临界堆包层的聚变-裂变混合型次临界能源堆^[2]是解决能源问题比较值得研究的途径. 在这些概念研究中, 我国的研究团队开发了基于 MCNP^[3]程序的耦合程序, 如 MCORGS, MCBURN, MOCOUPLES 等^[4-7], 并配套开发了多群截面库^[8,9], 为校验程序和截面库的可靠性, 有必要在一系列模拟装置上开展基准实验.

次临界能源堆能源供应主要依靠裂变包层中贫化铀裂变释放裂变能来实现, 裂变反应率的准确性在设计能量放大指标中异常重要. 英国的 Weale 等^[10]用直径 29.2 mm 的天然铀棒搭建了一个高

1066 mm, 直径 990 mm 的准圆柱装置, 用圆柱形裂变电离室测量了 $^{238}\text{U}(n, f)$ 及 $^{235}\text{U}(n, f)$ 裂变反应率分布. 日本东京大学的 Akiyama 等^[11]用块堆砌了等效半径为 457.2 mm 的准球形装置, 利用柱形裂变室测量了 14 MeV 中子源条件下装置内侧 $^{238}\text{U}(n, f)$ 及 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应率, 不确定度为 5.5%—6.0%. Afanas'ev 等^[12]在聚变堆包层模拟装置上开展 14 MeV 中子学积分实验, 用固体径迹探测器测量 $^{238}\text{U}(n, f)$ 及 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应率, 相对不确定度在 8%. 国内朱通华等^[13]在贫化铀聚乙烯交替球壳上用长杆平板型贫化铀裂变室测量了裂变反应率径向分布, 不确定度为 3.4%.

Weale 实验与 Akiyama 实验所用的装置均采用现有材料堆砌而成, 基准性不足. 另外, 上述实验测量无论采用裂变室^[14]还是固体径迹探测器^[15,16],

* 国家自然科学基金 (批准号: 11575165, 11775200) 和国家磁约束核聚变能发展研究专项 (批准号: 2015GB108006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: stingg@126.com

均在被测位置引入了其他材料,破坏了测量对象的原始状态,使得测量点的物理参数发生改变,要对测量值进行修正才能得到所需的物理量.为了解决以上探测手段对测量的影响,本文采用与宏观贫化铀球壳丰度完全相同的贫化铀片状样品作为活化探测器^[17,18],活化探测器可以看作被测模型的一部分,最大限度降低了对被测对象的影响.利用中国工程物理研究院现有系列贫化铀球壳,构建五种不同厚度的实验模型,选择与D⁺粒子(D⁺粒子指氘气电离后形成的带正电的原子核,经引出、加速、然后轰击氘靶产生中子)水平呈45°角的测量孔道,采用活化法基于14 MeV D-T中子开展实验研究.选择裂变碎片中的¹⁴³Ce^[19]作为测量对象,通过测量其发射的γ射线,实现¹⁴³Ce核子数的测量,再根据裂变产额数据和中子产额监测数据,获得裂变反应率沿45°方向分布规律,为裂变放能与球壳厚度关系研究提供数据支持.

2 方法与实验

2.1 测量原理

绝对裂变反应率是指一个源中子诱发一个核材料原子核产生裂变的概率^[20].通过测量装置内被测位置的核裂变计数,可得到该处的裂变反应率.裂变率计算公式为

$$f = \frac{N_f}{\phi \times t_1 \times m}. \quad (1)$$

式中, N_f 为裂变数, ϕ 为中子产额, t_1 为辐照时间, m 为活化探测器核子数.

本实验选取裂变产额比较准确的裂变碎片¹⁴³Ce作为测量对象,核裂变数 N_f 与¹⁴³Ce核子数

$N_{\text{Ce-143}}$ 有如下关系:

$$N_f = N_{\text{Ce-143}}/Y_{\text{Ce-143}}. \quad (2)$$

式中 $Y_{\text{Ce-143}}$ 为¹⁴³Ce总裂变产额.

贫化铀主要成分为²³⁸U和²³⁵U,将中子能量从0 keV到15 MeV分成8个能段(²³⁸U只计算后7个能段),¹⁴³Ce总裂变产额 $Y_{\text{Ce-143}}$ 可用(3)式表示:

$$Y_{\text{Ce-143}} = R_5 \sum_1^8 Y_{5i} R_{5i} + R_8 \sum_2^8 Y_{8i} R_{8i}, \quad (3)$$

式中, R_5 为²³⁵U裂变占总裂变的百分比; Y_{5i} 为第*i*个能量段²³⁵U裂变¹⁴³Ce的产额; R_{5i} 为第*i*个能量段裂变占总²³⁵U裂变的百分比; R_8 为²³⁸U裂变占总裂变的百分比; Y_{8i} 为第*i*个能量段²³⁸U裂变¹⁴³Ce的产额; R_{8i} 为第*i*个能量段裂变占总²³⁸U裂变的百分比.

¹⁴³Ce的半衰期为33 h,能量为293 keV的γ射线的分支比是42%.通过测量这条γ射线可以得到¹⁴³Ce核子数.¹⁴³Ce核子数 $N_{\text{Ce-143}}$ 与293 keV γ射线计数有如下关系:

$$N_{\text{Ce-143}} = \frac{C_{293.3}}{A(d)_{293.3} b_{293.3} \eta_{293.3} k e^{-\lambda_{\text{Ce-143}} \tau} (1 - e^{-\lambda_{\text{Ce-143}} t})}. \quad (4)$$

式中, $C_{293.3}$ 为293.3 keV γ射线计数, $A(d)_{293.3}$ 为293.3 keV γ射线自吸收修正因子, $b_{293.3}$ 为293.3 keV γ射线分支比, $\eta_{293.3}$ 为293.3 keV γ射线探测效率, k 为辐照过程修正因子, $\lambda_{\text{Ce-143}}$ 为 $C_{\text{Ce-143}}$ 衰变常数, τ 为冷却时间, t_2 为测量时间.

由(1),(2)和(4)式可得裂变反应率 f ,如(5)式所示:

$$f = \frac{C_{293.3}}{A(d)_{293.3} \cdot b_{293.3} \cdot \eta_{293.3} \cdot k \cdot e^{-\lambda_{\text{Ce-143}} \tau} \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Ce-143}} t_2}) \cdot Y_{\text{Ce-143}} \cdot \phi \cdot t_1 \cdot m}. \quad (5)$$

(5)式中各参数的意义同上.

2.2 贫化铀装置

贫化铀装置^[21]共分五种模型,内半径 R_{in} 均为13.1 cm,外径及组合厚度见表1.贫化铀的密度为 $(18.8 \pm 0.1) \text{ g/cm}^3$,其中²³⁸U和²³⁵U同位素丰度分别为99.58%和0.416%^[22].在装置的水平径向留有放置D⁺离子束流漂移管的靶室孔道,水平方向与D⁺粒子漂移方向呈45°和90°方向留有两条

表1 五种贫化铀球壳的外径及厚度

Table 1. Radius and thickness of depleted uranium shells.

模型编号	外半径 R_{out} /cm	厚度 L /cm
1	18.10	5.00
2	19.40	6.30
3	23.35	10.25
4	25.40	12.30
5	28.45	15.35

测量孔道, 竖直方向有一条测量(吊装)孔道, 靶室孔道及测量孔道直径均为 44 mm. 本次实验在 45°孔道开展实验.

实验测量时需在测量孔道内放置一个贫化铀套筒, 与套筒匹配有不同厚度 (5, 10, 20 和 30 mm) 的圆柱形贫化铀塞块, 用于填充活化探测器之外的空间, 以尽可能保证贫化铀球壳的完整性, 最大限度避免空腔效应及其他材料对贫化铀球壳中子场

的扰动. 贫化铀装置及其蒙特卡罗模型分别见图 1(a) 和图 1(b), 贫化铀装置置于一铁支架上, 其中心与中子源中心重合 (偏差 < 3 mm). 活化探测器与塞块交替放置在套筒内, 它们的材料成分均与贫化铀装置一样的, 5 片活化探测器在装置中的分布情况见图 1(b) 中“1, 2, 3, 4, 5”. 为降低实验大厅散射中子本底影响, 实验装置距离实验大厅周围墙壁、地面及屋顶的距离均在 3.5 m 以上.

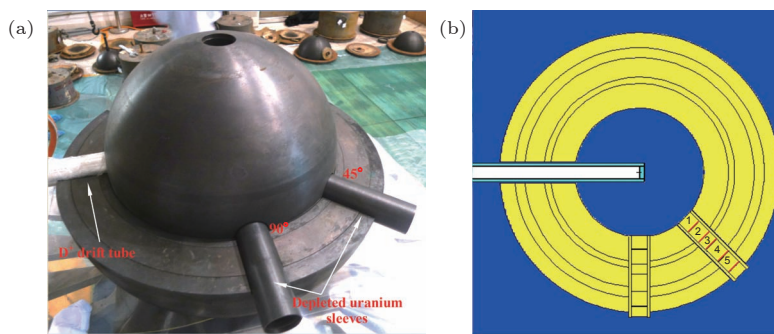


图 1 (a) 贫化铀装置实物图; (b) 蒙特卡罗模型 5 片活化探测器分布情况 (45°方向中的 1, 2, 3, 4, 5)

Fig. 1. (a) Physical map of depleted uranium device; (b) distribution of five activation detectors in Monte Carlo Model 5 (1, 2, 3, 4, 5 in the direction of 45°).

2.3 活化探测器

实验时, 每种模型均布放 5 片活化探测器, 活化探测器位置 p_i 见 (距中子源距离) 表 2. 测量孔道与 D+ 粒子入射方向呈 45°, 测量孔道内放置贫化铀套筒, 活化探测器置于贫化铀套筒内, 活化探测器之间用贫化铀塞块填充. 套筒内径 $\Phi 3.2$ cm, 外径 $\Phi 4.2$ cm, 活化探测器直径 $\Phi 2.4$ cm, 标称厚度 0.2 mm, 塞块直径 $\Phi 3.15$ cm.

表 2 五种模型中活化探测器的布放位置

Table 2. Position of activation detector in various models.

模型编号	L/cm				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
1	13.60	14.62	15.64	16.16	17.18
2	14.60	15.62	16.64	17.66	18.68
3	14.60	16.62	18.64	20.66	21.68
4	15.60	18.62	20.64	22.66	24.68
5	15.60	18.62	20.64	24.16	27.18

2.4 中子源及产额监测

中子源由中国工程物理研究院核物理与化学研究所的中子发生器提供, 中子源靶室置于装置中

心. 直管式铝制靶室外径 26 mm, 靶管外为铝制水套, 内外直径分别为 37 mm 和 39 mm, 靶管与水套之间为循环冷却水. TiT 靶活性区直径为 12 mm, TiT 靶为厚靶 (D+ 粒子全部阻止在 T-Ti 层内), 平均入射 D+ 粒子能量为 135 keV, 对应最大中子能量为 14.9 MeV.

绝对中子产额通过伴随 α 粒子法监测, 探测器置于漂移管中与 D+ 束流方向夹角 178.2°, 束流强度为 300 μA 时, 中子产额约为 3×10^{10} — $4 \times 10^{10} s^{-1}$. 中子产额监测采用分时记录系统, 该记录系统时间步长为 10 s, 能够精确反映实验期间中子产额波动, 实验期间中子产额波动修正由 (4) 式中的“辐照过程修正因子” k 完成.

2.5 γ 射线探测系统

测量 γ 射线的探测系统为 ORTEC 公司的 TRANS-SPEC-DX100 电制冷 HPGc 探测器和 GammaVision 谱分析软件. Ge 晶体直径 67.0 mm, 长度 51.7 mm, 死层厚度 0.7 mm. HPGc 探测器置于屏蔽体内, 工作高压为 -4500 V, 对 ^{60}Co 的 1.33 MeV γ 射线能量分辨率为 1.87 keV, 相对探测效率 40%.

利用到 ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu 等 γ 点源对 HPGe 探测器效率刻度, 得到探测器表面中心位置点源的探测效率曲线. 面源的探测效率采用积分的方法获得. 在探测器表面径向每隔 3 mm 测量一个点源探测效率, 拟合出径向的探测效率变化曲线, 在半径为 12 mm 的圆面内积分得到面源探测效率. 经标定, 位于探测器端面直径为 24 mm 的面源发射的 293 keV γ 射线的探测效率为 7.44%. 293 keV 的 γ 射线在贫化铀片中的自吸收因子由理论模拟得到(已由实验验证), 每片贫化铀片的自吸收因子根据实际厚度进行计算, 实验所用 25 片贫化铀片自吸收因子介于 85%—92% 之间.

3 结果与分析

3.1 实验结果及分析

辐照实验完成后, 为降低短半衰期的 γ 本底, 将活化探测器冷却 2 h, 然后在 HPGe 探测器表面对活化探测器进行了实验测量, 得到裂变碎片 ^{143}Ce 发射的 293.3 keV γ 射线能谱, 如图 2 所示. 与 γ 射线测量相关的自吸收修正因子、探测效率、辐照过程修正因子等实验前都进行了测量及标定.

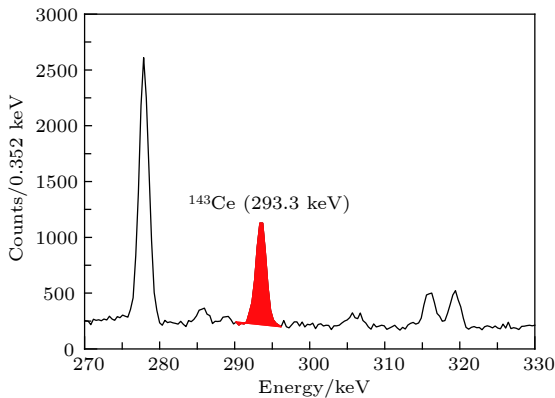


图 2 HPGe 探测器测量的贫化铀活化探测器发射的 γ 谱
Fig. 2. γ spectrum of depleted uranium activation detector, detected by using HPGe detector.

为了获得 ^{143}Ce 的总裂变产额, 分能区理论模拟了不同位置 ^{238}U 和 ^{235}U 的裂变反应率, 得到了 R_5 , R_{5i} , R_8 和 R_{8i} , Y_{5i} 和 Y_{8i} 取文献值^[23]. 根据 (3) 式得到了五种模型不同测量位置的 ^{143}Ce 总裂变产额 $Y_{\text{Ce-143}}$, 结果见表 3.

将 293.3 keV γ 射线总计数、自吸收修正因子、射线分支比、探测效率、辐照过程修正因子、

$C_{\text{Ce-143}}$ 衰变常数、冷却时间、测量时间、裂变产额、活化探测器核子数及源中子数代入 (5) 式, 可得到各模型相应位置处的裂变反应率, 归一到一个源中子一个铀原子核, 结果见图 3.

表 3 $Y_{\text{Ce-143}}$ 值
Table 3. Values of $Y_{\text{Ce-143}}$.

Model No.	$p_1/\%$	$p_2/\%$	$p_3/\%$	$p_4/\%$	$p_5/\%$
1	4.29	4.32	4.33	4.34	4.34
2	4.33	4.35	4.37	4.38	4.37
3	4.36	4.41	4.45	4.45	4.46
4	4.40	4.47	4.49	4.50	4.49
5	4.41	4.48	4.51	4.55	4.55

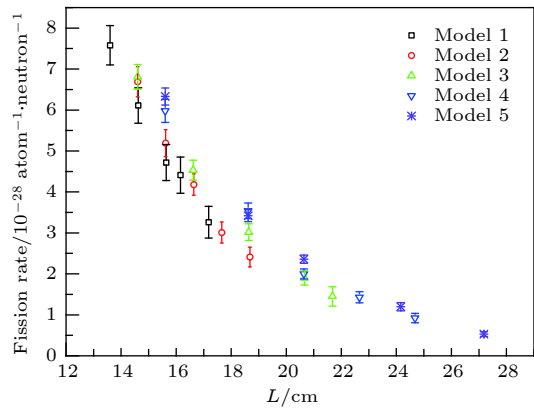


图 3 五种模型中的裂变反应率分布情况
Fig. 3. Fission reaction rate distribution for five models.

从图 3 可以看出: 1) 每种模型, 随着距中子源距离 L 的增加裂变反应率逐渐变小, 厚模型变化幅度比薄模型变化幅度更大, 主要原因是距中子源越远中子通量密度越小, 裂变反应率自然降低; 2) 相同测量位置, 模型越厚, 裂变反应率越大, 原因是外层贫化铀球壳的屏蔽与反射作用使得测点处中子通量密度增大, 为此用蒙特卡罗模拟计算了各模型测量位置处的中子通量密度, 结果见图 4.

实验结果的不确定度主要来自中子产额、裂变产额和 γ 射线测量三个方面. 实验前对 α 探测器和靶片在靶管中的几何位置进行了准确测量, 对准直光栏孔径采用显微镜进行了测量, 各向异性修正因子通过查表得到, 保证了中子产额的不确定度小于 2.5%^[24]. 裂变产额不确定度小于 5%. γ 射线测量的不确定度主要来自 HPGe 探测器探测效率、 γ 射线自吸收因子^[25] 及 γ 谱解谱. 探测效率用系列标准源进行了标定, 不确定度小于 2%^[26], 自吸

收因子进行了理论模拟及实验验证, 不确定度小于 0.5%, 解谱不确定度为 2%—10% (不同位置处活化探测器不确定度不同). 五种模型各位置裂变反应率的总不确定度见表 4.

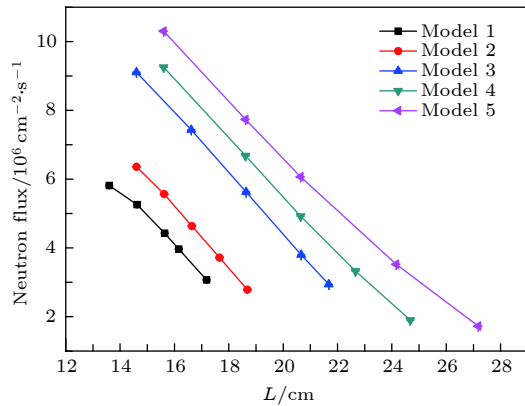


图 4 五种模型不同测量点处的中子通量密度 (蒙特卡罗模拟计算)

Fig. 4. Neutron flux density at various measuring positions of five models (Monte Carlo simulation).

表 4 裂变反应率总不确定度

Table 4. Synthesize uncertainty of fission reaction rate.

Position	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
$p_1/\%$	6.5	6.5	6.5	7.4	6.1
$p_2/\%$	6.2	6.3	5.7	7.2	7.0
$p_3/\%$	6.5	5.8	6.7	8.6	10.0
$p_4/\%$	6.5	6.3	6.5	9.5	9.5
$p_5/\%$	6.5	6.1	7.0	10.9	10.9

3.2 蒙特卡罗模拟与实验比较

利用 MCNP5 程序和 ENDF/VI.8 数据库对五种模型进行理论模拟, 用 F4 栅元卡配合计数乘子卡 F4 得到了不同测量位置的裂变反应率, 不确定度小于 3.4%. 为更清晰地分析计算值与实验值的差异, 用计算值与实验值的比值 (C/E) 来进行表征, 结果见图 5. 可以看到, 五种实验模型 C/E 值介于 0.9 至 1.1 之间, 表明计算与实验在 10% 以内符合, 且对于大部分测量位置其比值都落在测量标准不确定度范围之内.

4 结论

采用与宏观贫化铀球壳丰度完全相同的贫化铀活化片作为探测器, 采用活化法测量方法得到了不同模型裂变反应率随径向距离的变化. 同种模型

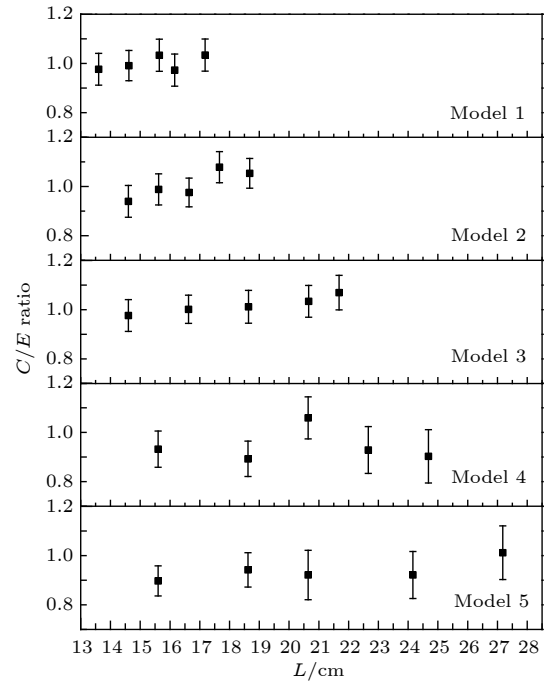


图 5 贫化铀装置中不同位置裂变率 C/E 值

Fig. 5. C/E ratio of fission reaction rate for various measuring position in depleted uranium assembly.

随径向距离增大裂变率逐渐降低, 主要是通量密度逐渐变小及能谱逐渐变软造成. 不同模型相同测量位置裂变反应率随模型厚度的增大逐渐变大, 主要原因是外层贫化铀球壳的屏蔽与反射作用使得测点处中子通量密度增大. 利用 MCNP5 程序和 ENDF/VI.8 数据库对上述实验模型进行了模拟, 理论与实验结果在不确定度范围内一致, 验证了蒙特卡罗输运程序及 ENDF/VI.8 数据库的可靠性.

本方法克服了裂变室及固体径迹探测器的不足, 最大限度降低了探测器对测量对象的影响, 使得测量结果更加真实反映宏观模型内部裂变放能特性; 细分了测量位置的中子能谱, 采用最新的 ^{143}Ce 裂变产额数据, 提高了总裂变产额 $Y_{\text{Ce-143}}$ 的精度. 该研究成果对校验贫化铀材料核参数及中子输运特性具有重要意义, 为贫化铀裂变放能包层设计提供实验支撑.

参考文献

- [1] Yu J N, Yu G 2009 *J. Nucl. Mater* **386**–388 949
- [2] Robert G Mills 1981 *IEEE Trans. Power Apparatus Systems PAS-100* 1173
- [3] Zhang J, Zhang D L, Wang C L, Tian W X, Qiu S Z, Su G H 2017 *At. Energ. Sci. Technol.* **51** 2230 (in Chinese) [张俊, 张大林, 王成龙, 田文喜, 秋穗正, 苏光辉 2017 *原子能科学技术* **51** 2230]

- [4] Liu G M, Cheng H P, Shao Z 2012 *At. Energ. Sci. Technol.* **46** 272 (in Chinese) [刘国明, 程和平, 邵增 2012 原子能科学技术 **46** 272]
- [5] Ma J M, Liu Y K 2012 *At. Energ. Sci. Technol.* **46** 437 (in Chinese) [马纪敏, 刘永康 2012 原子能科学技术 **46** 437]
- [6] Xu H, Yang Y W, Zhou Z W 2009 *At. Energ. Sci. Technol.* **43** 97 (in Chinese) [徐红, 杨永伟, 周志伟 2009 原子能科学技术 **43** 97]
- [7] Li M S, Liu R, Shi X M, Yi W W, Peng X J 2012 *Fusion Eng. Des.* **87** 1420
- [8] Ma J M, Liu Y K, Li M S 2012 *Nucl. Power Eng.* **33** 16 (in Chinese) [马纪敏, 刘永康, 李茂生 2012 核动力工程 **33** 16]
- [9] Yi W W, Hu Z H, Li M S 2010 *Nucl. Power Eng.* **31** 125 (in Chinese) [伊伟伟, 胡泽华, 李茂生 2010 核动力工程 **31** 125]
- [10] Weale J W, Goodfellow H, McTaggart M H, Mullender M L 1961 *J. Nucl. Energy.* **14** 91
- [11] Akiyama M, Oka Y, Kanasugi K, Hashikura H, Kondo S 1987 *Ann. Nucl. Energy* **14** 543
- [12] Afanas'ev V V, Belevitin A G, Verzilov Y M, Romodanov V L, Khro-mov V V, Markovskii D V, Shatalov G E 1991 *At. Energy.* **71** 901
- [13] Zhu T H, Yang C W, Lu X X, Liu R, Han Z J, Jiang L, Wang M 2014 *Ann. Nucl. Energy* **63** 486
- [14] Kimio Y, Shigeru I, Hisao O, Tetsuo M 1983 *Jpn. J. Appl. Phys.* **22** 324
- [15] Li Y G, Shi Y Q, Zhang Y B, Xia P 2001 *Radiat. Meas.* **34** 589
- [16] Szabó J, Pálfalvi J K, Strádi A, Bilski P, Swakoń J, Stolarczyk L 2018 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **888** 196
- [17] Wojciechowski A, Lim Y C, Stepanenko V, Tiutiunnikov S, Khilmanovich A, Martsynkevich B 2016 *Measurement* **90** 118
- [18] Lin H X, Chen W L, Liu Y H, Sheu R J 2016 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **811** 94
- [19] Yang Y W, Yan X S, Liu R, Lu X X, Jiang L, Lin J F 2012 *Fusion Eng. Des.* **87** 1679
- [20] Feng S, Liu R, Lu X X, Yang Y W, Wang M, Jiang L, Qin J G 2014 *Acta Phys.Sin.* **63** 162501 (in Chinese) [冯松, 刘荣, 鹿心鑫, 羊奕伟, 王玫, 蒋励, 秦建国 2014 物理学报 **63** 162501]
- [21] Lu X X, Zhu T H, Liu R, Jiang L, Wang M, Lin J F, Wen Z W 2011 *At. Energ. Sci. Technol.* **45** 645 (in Chinese) [鹿心鑫, 朱通华, 刘荣, 蒋励, 王玫, 林菊芳, 温中伟 2011 原子能科学技术 **45** 645]
- [22] Zhu T H, Han Z J, Jiang L, Wang M, Lu X X, Yang C W, Liu R 2015 *J. Nucl. Sci. Technol.* **52** 1383
- [23] Gooden M E, Arnold C W, Becker J A, Bhatia C, Bhike M, Bond E M, Bredeweg T A, Fallin B, Fowler M M, Howell C R, Kelley J H, Krishichayan, Macri R, Rusev G, Ryan C, Sheets S A, Stoyer M A, Tonchev A P, Tornow W, Vieira D J, Wilhelmy J B 2016 *Nuclear Data Sheets* **131** 319
- [24] Liu R, Lin L B, Wang D L, Li Y J, Jiang L, Chen S H, Wang M, Yang K 1999 *Nuclear Electron. Detect. Technol.* **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]
- [25] Lu X D, Tian D F, Xie D 2004 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **519** 647
- [26] Zhu C X, Chen Y, Mou Y F, Zheng P, He T, Wang X H, An L, Guo H P 2011 *Nucl. Sci. Eng.* **169** 188

Experimental study on fission reaction rate induced by D-T neutron in depleted uranium shell*

Han Zi-Jie¹⁾ Zhu Tong-Hua¹⁾ Lu Xin-Xin¹⁾ Qin Jian-Guo^{1)†}
Wang Mei¹⁾ Jiang Li¹⁾ Yang Bo²⁾

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

2) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100094, China*)

(Received 16 September 2018; revised manuscript received 7 May 2019)

Abstract

Fission reaction rate is an important index for validating and checking the neutron transportation and fission power in nuclear engineering. The experimental data can be used in benchmark validation of cross sections, and in studying the correlation of fission power with the thickness of uranium sphere shell. There are five assemblies of depleted uranium shells used in this work, the inner radii of which are all fixed at 13.1 cm, while their outer radii are 18.1, 19.4, 23.35, 25.4 and 28.5 cm, respectively. The D-T neutron source is generated in the center of the assemblies, the yield of which is about $3 \times 10^{10} - 4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. In horizontal plane across the center of the assemblies, the fission rates at positions along the radial direction are measured in the direction with 45° inclining with respect to the incident D^+ beam. Due to the disturbance to assemblies and neutron field, the activation foil of uranium is a suitable choice rather than fission chamber or capture detector. The material of activation foil is the same as that in the experimental assemblies. Considering the accurate fission yield of ^{143}Ce , the objective nuclides are selected. The total fission yield of ^{143}Ce is contributed by ^{238}U and a little ^{235}U . For calculating the total fission yield of ^{143}Ce , the neutron energy range of 0–15 MeV is divided into eight subranges. By measuring the 293 keV gamma rays from the fission product ^{143}Ce in activation foils with a TRANS-SPEC-DX100 HPGe detector, with a relative efficiency 40%, the fission rates and the trends at positions along the radial direction in the five assemblies are obtained based on the ^{143}Ce fission product yield. The fission rate ranges from 5.28×10^{-29} to $7.58 \times 10^{-28} \text{ sn}^{-1}\cdot\text{nuclide}^{-1}$, with the relative uncertainty in a range from 6% to 11%. The Monte Carlo transport code MCNP5 and continuous energy cross section library ENDF/BV.8 are used for analyzing the fission rate distribution in the assemblies, and the experimental configuration, including the wall of the experimental hall is described in detail in the model. The calculated results are compared with the experimental ones and their agreement is found to be in an uncertainty range.

Keywords: depleted uranium, fission reaction rate, ^{143}Ce , fission product yield

PACS: 25.85.Ec, 28.20.Gd, 28.41.Ak

DOI: 10.7498/aps.68.20181717

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11575165, 11775200) and the National Magnetic Confinement Fusion Science Program of China (Grant No. 2015GB108006).

† Corresponding author. E-mail: stingg@126.com