

启明星 2 号轻水堆燃料棒价值实验和模拟研究

姜 韦^{1,2}, 顾 龙^{1,2,*}, 朱庆福³, 周 琦³, 陈 亮², 刘星泉²,
张 璐², 李金阳², 于 锐², 王大伟²

(1. 中国科学技术大学 物理学院, 安徽 合肥 230000;

2. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 本文对启明星 2 号零功率装置中轻水堆的单根棒价值进行了实验和模拟研究。利用 MCNP6 程序和 5 种截面库计算出 5 组动态参数, 将实验所测的倍周期代入倒时方程得到了 5 种动态参数对应的单根棒价值。采用斜率法计算出 5 种数据库对应的单根棒价值, 并与实验结果进行了比较。结果表明: 5 组动态参数给出的周期法实验结果存在明显差异, 不同数据库下斜率法给出的模拟结果基本一致; 采用 JENDL-4.0 库时, 实验值与模拟值吻合最好, 相对偏差小于 1%。本文推荐选用 JENDL-4.0 库计算的动态参数处理实验数据, 周期法所得的单根棒价值为 (0.2376 ± 0.0156) mk。获得精确的单根棒价值, 将有助于提高后续 ADS 相关实验的准确性和可靠性。

关键词: 启明星 2 号; 燃料棒价值; 周期法; 斜率法; 截面库

中图分类号: TL375.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2018)09-1665-06

doi: 10.7538/yzk.2017.youxian.0793

Experiment and Simulation Study for Fuel Rod Worth of Venus-II Light Water Reactor

JIANG Wei^{1,2}, GU Long^{1,2,*}, ZHU Qingfu³, ZHOU Qi³, CHEN Liang²,
LIU Xingquan², ZHANG Lu², LI Jinyang², YU Rui², WANG Dawei²

(1. School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Experiment and simulation studies for single fuel rod worth were carried out at the light water reactor of Venus-II zero-power facility. Five groups of kinetic parameters were calculated by MCNP6 code with five libraries. By plugging the measured double periods into the in-hour equation, five corresponding single fuel rod worths were obtained respectively. Five single fuel rod worths were calculated by slope method using five libraries and the simulation results were compared with the experiment

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91326203, 11705242)

作者简介: 姜 韦(1988—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士研究生, 核科学与技术专业

* 通信作者: 顾 龙, E-mail: gulong@impcas.ac.cn

网络出版时间: 2018-06-14; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180614.1148.004.html>

results. The results show that the experiment results of period method exhibit obvious discrepancies due to the differences of kinetic parameters obtained by different libraries. But the simulation results given by the slope method with different libraries are almost consistent. By comparison, a good agreement between the experiment and simulation with JENDL-4.0 is achieved and the relative deviation is less than 1%. Therefore, it is recommended that the kinetic parameters calculated with the JENDL-4.0 should be adopted to process the experiment data and the corresponding single fuel rod worth of period method is $(0.237\ 6 \pm 0.015\ 6)$ mk. The accurate single fuel rod worth will improve the reliability and accuracy of the follow-up experiments on ADS.

Key words: Venus-II; fuel rod worth; period method; slope method; cross section library

在中国科学院“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项^[1]的支持下,中国原子能科学研究院和中国科学院近代物理研究所联合搭建了启明星2号零功率实验装置,该装置包括轻水堆芯和铅金属堆芯^[2],两个堆芯于2016年12月成功实现首次临界,可用于开展加速器驱动的次临界系统(ADS)相关的临界和次临界实验,实现对理论程序、关键核数据和反应性监测技术的基准验证^[3],将有助于改进堆芯物理模型和相关实验方法。

为满足ADS不同目的的实验要求,单根棒价值的准确测量是一项十分关键的实验内容,可为后续实验提供重要的基础数据,如周期法分步测量大反应性价值^[4],外推周期法测量装置的次临界度^[5]等实验。周期法适用于在缓发超临界状态下测量反应性,方法简单有效,可用于对其他反应性测量实验方法的校验^[6-9],故选定周期法为测量单根棒价值的实验方法。然而周期法获得单根棒价值需使用MCNP6^[10]程序计算的动态参数,而动态参数的计算值依赖于截面库的选择^[11]。

本文研究5种截面库(ENDF/B-VII.0, ENDF/B-VII.1, CENDL-3.1, JENDL-4.0和JEFF-3.2库)对周期法测量单根棒价值的影响,并通过周期法和斜率法结果对比,为倒时方程中动态参数的选择提供参考,给出更加精确的实验单根棒价值。

1 实验装置

为研究ADS反应堆特性,所建立的启明星2号轻水堆包括堆芯容器、结构材料、燃料棒、

散裂靶区、慢化剂和反射层等。反应堆堆芯实物如图1所示。堆芯容器为圆筒容器,结构材料为SS316L。燃料元件尺寸为长639 mm、直径7 mm,燃料Zr-4包壳和Al包壳的外直径分别为7 mm和6 mm,Al包壳内含松装²³⁵U富集度为20%的U₃O₈,燃料活性区长度为400 mm。图2示出燃料棒的剖面示意图。同时,燃料棒以均匀栅格形式的同心圆排布在散裂靶区外,同心圆共有13圈,第1~12圈装满燃料棒,最外第13圈通过装进不同燃料棒数量,可调节反应堆的反应性,使反应堆处于不同的次临界、临界和缓发超临界状态,以满足ADS不同目的的实验要求。圆筒状散裂靶区尺寸为高804 mm、直径170 mm,可用于堆靶耦合的相关研究。

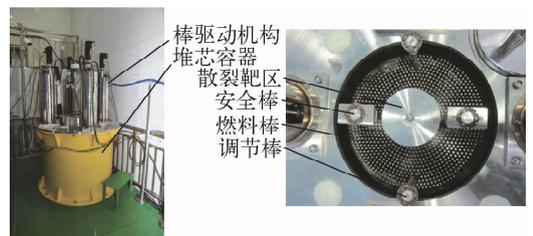


图1 启明星2号轻水堆堆芯

Fig. 1 Core of Venus-II light water reactor

反应堆堆芯的慢化剂和冷却剂均为轻水,活性区周围的轻水反射层均大于150 mm。用于监测中子水平的中子计数管和监测功率的 γ 补偿电离室布置在反射层大于150 mm厚度内的探测器孔道中。其中,中子计数管用于反应堆启动时外推临界质量的测量, γ 补偿电离室

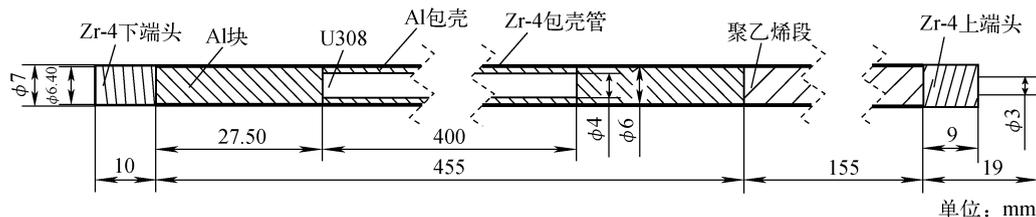


图 2 启明星 2 号轻水堆燃料棒轴向截面

Fig. 2 Axial cross section of fuel rod in Venus-II light water reactor

用于周期法实验测量反应堆功率上升的周期。选择²⁵²Cf为实验启动中子源,并采用中子源驱动系统(跑兔)实现²⁵²Cf在源储存容器和堆芯装置间的传输。

2 周期法实验

2.1 倍周期测量

从实验的安全性和准确性角度考虑,周期法测量反应性时,应当选择合适的缓发超临界状态,即反应堆倍周期一般为 20~100 s^[4]。根据启明星 2 号轻水堆实验装置临界外推实验,临界装载量约为 955 根^[2]。然后,向缓发超临界过渡后,堆芯共装载 961 根燃料棒,第 1~13 圈的燃料棒根数列于表 1,活性区内氢与铀的原子比约为 98 : 1,使用跑兔将²⁵²Cf从源储存容器传输到反应堆顶部,提供诱发链式裂变反应的初始中子,然后立即将²⁵²Cf传输回源储存容器,经一段等待时间后,通过反应堆控制台上的功率监测表和秒表测量出反应堆倍周期为 T_d ,然后落下控制棒停堆。经过一段时间,拔出堆芯第 13 圈内的 1 根燃料棒,即堆芯装载 960 根燃料棒,同理测量此时反应堆的倍周期。其中,每个超临界状态进行 4 次倍周期测量,给出各自的平均倍周期,所得结果列于表 2。

表 1 启明星 2 号轻水堆燃料棒排布

Table 1 Arrangement of fuel rod in Venus-II light water reactor

圈序号	燃料棒根数	圈序号	燃料棒根数
1	44	8	84
2	48	9	90
3	54	10	94
4	60	11	100
5	66	12	110
6	72	13	61
7	78		

表 2 不同超临界状态的倍周期测量值

Table 2 Measured double period under different super-critical states

燃料棒 装载根数	T_d/s	T_d 平均值/s
961	26.03,26.03,25.72,26.13	25.98±0.15
960	33.44,34.84,33.56,33.53	33.84±0.58

2.2 数据处理

测量倍周期后,采用 MCNP6 程序将堆内所有材料的核截面分别更换为 5 个数据库,调用 KOPT 卡计算出 5 组反应堆的动态参数(Λ 、 $\beta_{i,eff}$ 和 λ_i)及其统计误差(表 3,其中 β_{eff} 为总的缓发中子有效份额),并作为倒时方程中动态参数的输入值,然后将测量的倍周期 T_d 代入倒时方程^[12]:

$$\rho_0 = \frac{\Lambda}{T_d / \ln 2} + \sum_{i=1} \frac{\beta_{i,eff}}{1 + \lambda_i T_d / \ln 2}$$

式中: ρ_0 为反应性; Λ 为中子代时间; $\beta_{i,eff}$ 为第 i 组缓发中子有效份额; λ_i 为第 i 组先驱核的衰变常量。

计算出两种情况下的反应性 ρ_{961} 和 ρ_{960} ,两个反应性之差即为周期法采用不同数据库计算的动态参数获得的单根燃料棒的价值 $\Delta\rho_{exp}$ ($\Delta\rho_{exp} = \rho_{961} - \rho_{960}$), $\Delta\rho_{exp}$ 考虑了 T_d 的测量误差以及动态参数的统计误差,通过误差传递公式计算出实验误差(表 4)。

3 蒙特卡罗程序模拟

采用 MCNP6 程序对启明星 2 号轻水堆进行建模,使用 KCODE 卡,设置每代取 5×10^5 个中子,共计算 600 代,跳过前 30 代,则模拟的 k_{eff} 相对标准偏差小于 4×10^{-5} 。堆内所有材料的截面分别采用 ENDF/B-VII.0、ENDF/B-VII.1、CENDL-3.1、JENDL-4.0 和 JEFF-3.2 库的常温点截面数据,由于轻水堆模拟中需考

表3 MCNP6 程序采用不同截面库模拟的动态参数

Table 3 Kinetic parameter calculated by MCNP6 code with different libraries

动态参数	不同截面库下的参数值				
	ENDF/B-VII.0	ENDF/B-VII.1	CENDL-3.1	JENDL-4.0	JEFF-3.2
$\Lambda, \mu\text{s}$	60.396 00±0.022 53	60.451 00±0.018 03	60.263 00±0.024 93	60.399 00±0.022 71	60.419 00±0.018 00
$\beta_{1,\text{eff}}$	0.000 24±0.000 01	0.000 26±0.000 00	0.000 28±0.000 01	0.000 26±0.000 01	0.000 26±0.000 00
$\beta_{2,\text{eff}}$	0.001 25±0.000 01	0.001 35±0.000 01	0.001 44±0.000 01	0.001 65±0.000 01	0.001 16±0.000 01
$\beta_{3,\text{eff}}$	0.001 22±0.000 01	0.001 30±0.000 01	0.001 38±0.000 01	0.001 50±0.000 01	0.000 72±0.000 01
$\beta_{4,\text{eff}}$	0.003 43±0.000 02	0.002 89±0.000 01	0.003 05±0.000 02	0.002 99±0.000 02	0.001 53±0.000 01
$\beta_{5,\text{eff}}$	0.001 01±0.000 01	0.001 20±0.000 01	0.001 25±0.000 01	0.000 88±0.000 01	0.002 53±0.000 01
$\beta_{6,\text{eff}}$	0.000 36±0.000 01	0.000 50±0.000 01	0.000 54±0.000 01	0.000 31±0.000 01	0.000 72±0.000 01
$\beta_{7,\text{eff}}$					0.000 63±0.000 01
$\beta_{8,\text{eff}}$					0.000 18±0.000 00
β_{eff}	0.007 51±0.000 03	0.007 5±0.000 02	0.007 94±0.000 03	0.007 59±0.000 03	0.007 73±0.000 02
λ_1, s^{-1}	0.012 49±0.000 00	0.013 34±0.000 00	0.013 34±0.000 00	0.012 44±0.000 00	0.012 47±0.000 00
λ_2, s^{-1}	0.031 81±0.000 00	0.032 73±0.000 00	0.032 73±0.000 00	0.030 55±0.000 00	0.028 29±0.000 00
λ_3, s^{-1}	0.109 43±0.000 00	0.120 80±0.000 00	0.120 93±0.000 00	0.111 66±0.000 00	0.042 52±0.000 00
λ_4, s^{-1}	0.317 24±0.000 00	0.303 00±0.000 00	0.303 36±0.000 00	0.302 01±0.000 00	0.133 04±0.000 00
λ_5, s^{-1}	1.353 33±0.000 01	0.850 44±0.000 01	0.859 02±0.000 08	1.142 11±0.000 05	0.292 47±0.000 00
λ_6, s^{-1}	8.654 90±0.000 29	2.856 17±0.000 03	2.872 04±0.000 25	3.033 65±0.000 27	0.666 49±0.000 00
λ_7, s^{-1}					1.634 78±0.000 00
λ_8, s^{-1}					3.554 60±0.000 00

考虑低能区域中子的向上散射作用,因此应当使用热中子散射数据库^[13],故统一选定 ENDF/B-VII.0 截面库中的 endf70sab 作为模拟的热中子散射库,模拟最外圈不同装载燃料棒下的反应性。由于燃料棒以准均匀栅格形式的同心圆方式排布,最外第 13 圈不同位置的燃料棒对反应性的贡献可看作是相同的,所以通过不同装载燃料棒下的反应性,可拟合出单根棒价值。

表4 周期法采用不同截面库给出的动态参数计算的单根棒价值

Table 4 Single fuel rod worth calculated with different groups of kinetic parameter by period method

截面库	$\Delta\rho_{\text{exp}}/\text{mk}$
ENDF/B-VII.0	0.204 9±0.017 6
ENDF/B-VII.1	0.209 8±0.017 7
CENDL-3.1	0.222 8±0.018 4
JENDL-4.0	0.237 6±0.019 4
JEFF-3.2	0.241 6±0.018 0

MCNP6 模拟中堆芯模型装载的燃料棒数,以 961 根为中心,按 4 根递增和递减分别选取 4 个装载棒数,即选取了 945~977 根之间的 9 个燃料棒装载数,调整的燃料棒全部属于最外圈,通过 MCNP6 程序使用不同数据库计算

出不同堆芯装载下的中子有效增殖因数 k_{eff} ,通过公式 $\rho=(k_{\text{eff}}-1)/k_{\text{eff}}$,将计算所得的 k_{eff} 转换成 ρ ,结果如图 3 所示。可看出临界附近堆芯的反应性随燃料棒数的增加呈近似线性增加,将 9 个点进行线性拟合,所得直线的斜率就是模拟的单根棒价值 $\Delta\rho_{\text{cal}}$,称此方法为斜率法。该方法比单纯用 2 个装载燃料棒数计算单根棒价值更精确,且可降低蒙特卡罗统计误差的影响。采用不同截面库计算时,通过斜率法拟合 9 点的直线公式以及单根棒价值,其中单根棒价值误差是 9 点线性拟合斜率的标准偏差,结果列于表 5。

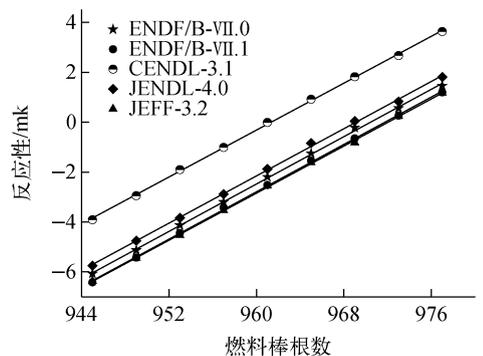


图3 反应性随燃料棒装载数的变化

Fig. 3 Change of reactivity with number of fuel rod

表 5 斜率法计算的线性拟合公式和单根棒价值

Table 5 Linear fitting formula and single fuel rod worth calculated by slope method

截面库	线性拟合公式	$\Delta\rho_{\text{cal}}/\text{mk}$
ENDF/B-VII.0	$y = -0.23015 + 0.237157x/1000$	0.2372 ± 0.0022
ENDF/B-VII.1	$y = -0.23065 + 0.237349x/1000$	0.2373 ± 0.0017
CENDL-3.1	$y = -0.22577 + 0.234847x/1000$	0.2348 ± 0.0020
JENDL-4.0	$y = -0.22932 + 0.236629x/1000$	0.2366 ± 0.0024
JEFF-3.2	$y = -0.22922 + 0.235808x/1000$	0.2358 ± 0.0016

注: x 为燃料棒根数; y 为反应性, mk

4 结果与讨论

综合以上实验和模拟结果,分别将周期法和斜率法计算所得的单根棒价值列于表 6,由表 6 可知,周期法获得的单根棒价值的实验结果受截面库的影响较大,方差约为 0.0219 mk。分析原因,由表 3 可知,JEFF-3.2 库计算的动态参数为 8 组,而其他库则为 6 组,ENDF/B-VII.0、ENDF/B-VII.1、CENDL-3.1 和 JENDL-4.0 计算的动态参数分组数相同,但对应组的动态参数值也有差异,其中不同库的第 6 组缓发中子有效份额和第 6 组衰变常量差异最大,导致了倒时方程中动态参数的输入值不同,进而造成周期法得到的单根棒价值波动较大。

由斜率法采用不同截面库计算的 5 个单根棒价值结果十分接近,方差约为 0.0009 mk,一方面是由于不同截面库的²³⁵U 的裂变截面和

燃料棒内的中子能谱非常一致,另一方面由于斜率法数据处理过程不需使用倒时方程,即不需代入 MCNP6 程序计算的动态参数值,误差仅受到蒙特卡罗统计和多点线性拟合的影响,所以斜率法计算的 5 根单根棒价值结果十分接近是合理的。因此,截面库选取对斜率法所得的单根棒价值结果几乎没有影响。

由表 6 可看出,在选用相同截面库的情况下,采用 JENDL-4.0 的周期法和斜率法获得的单根棒价值吻合最好,相对偏差约为 -0.42%,从这个角度可判断,确定启明星 2 号轻水堆的单根棒价值时,倒时方程中的动态参数最好选用 JENDL-4.0 库的计算结果。由表 6 还可看出,5 个库对应的周期法和斜率法的单根棒价值的绝对偏差最大为 0.0323 mk,总地来说斜率法模拟的单根棒价值与周期法的实验值基本吻合。

表 6 周期法和斜率法计算的单根棒价值对比

Table 6 Comparison of single fuel rod reactivity worth between period method and slope method

截面库	单根棒价值/mk		相对偏差/%	绝对偏差/mk
	周期法	斜率法		
ENDF/B-VII.0	0.2049 ± 0.0134	0.2372 ± 0.0022	13.62	0.0323
ENDF/B-VII.1	0.2098 ± 0.0137	0.2373 ± 0.0017	11.59	0.0275
CENDL-3.1	0.2228 ± 0.0145	0.2348 ± 0.0020	5.11	0.0120
JENDL-4.0	0.2376 ± 0.0156	0.2366 ± 0.0024	-0.42	-0.0010
JEFF-3.2	0.2416 ± 0.0158	0.2358 ± 0.0016	-2.46	-0.0058

5 结论

采用周期法测量了启明星 2 号轻水堆的单根棒价值,将 MCNP6 程序和 5 个截面库计算的 5 组动态参数(Δ 、 β_{eff} 和 λ_i)分别代入倒时方程,获得了 5 个实验单根棒价值。然后,通过斜率法得到了 5 个截面库对应的模拟单根棒价值。分析结果可知,截面库的选取对周期法获得的单根棒价值结果影响较大,而对斜率法的

结果几乎没有影响。通过对比相同截面库中周期法和斜率法的单根棒价值结果可知,JENDL-4.0 库的实验和模拟结果吻合最好,相对偏差小于 1%,故推荐选择 JENDL-4.0 库计算的动态参数处理周期法实验数据,所得的实验单根棒价值为 (0.2376 ± 0.0156) mk。获得精确的单根棒价值,将有助于提高后续 ADS 相关实验的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 詹文龙,徐瑚珊. 未来先进核裂变能——ADS嬗变系统[J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):375-381.
ZHAN Wenlong, XU Hushan. Advanced fission energy program: ADS transmutation system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 375-381(in Chinese).
- [2] 权艳慧,周琦,尹生贵,等. ADS铅冷却剂临界装置堆芯物理设计[J]. 原子能科学技术,2014,48(增刊):155-159.
QUAN Yanhui, ZHOU Qi, YIN Shenggui, et al. Neutronic design of ADS lead coolant critical assembly reactor core[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(Suppl.): 155-159(in Chinese).
- [3] ZHU Qingfu, ZHOU Qi, LIANG Shuhong, et al. Venus-II ADS zero power reactor in CIAE [C]// Proceedings of the Reactor Physics Asia 2017 (RPHA17) Conference. Chengdu, China: [s. n.], 2017.
- [4] 史永谦. 核反应堆中子学实验技术[M]. 北京: 中国原子能出版社,2011.
- [5] 夏普,史永谦,李义国,等. 外推-周期法测量ADS模拟装置的次临界度[J]. 原子能科学技术,2003,37(4):294-296.
XIA Pu, SHI Yongqian, LI Yiguo, et al. Sub-criticality measurement with extrapolation-period method on ads model facility[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(4): 294-296 (in Chinese).
- [6] 史永谦,李义国,鲁谨,等. 改进的源倍增方法测量控制棒价值[J]. 核科学与工程,2015,35(1):50-55.
SHI Yongqian, LI Yiguo, LU Jin, et al. The control rod worth measurement with improved neutron source multiplication method[J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(1): 50-55 (in Chinese).
- [7] 陈仪煜,杨勇,刚直,等. 中国实验快堆安全棒和补偿棒价值理论分析和试验研究[J]. 原子能科学技术,2013,47(增刊):92-94.
CHEN Yiyu, YANG Yong, GAGN Zhi, et al. Measurement and analysis of CEFR safety and shim rod worth[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(Suppl.): 92-94 (in Chinese).
- [8] 霍兴凯,陈晓亮,喻宏,等. 固定棒位法测量控制棒总价值[J]. 原子能科学技术,2017,51(8):1447-1450.
HUO Xing kai, CHEN Xiaoliang, YU Hong, et al. Measurement of total worth of control rod by static-rod-position method [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(8): 1447-1450(in Chinese).
- [9] 朱庆福,史永谦,李义国,等. 跳源法在ADS中子学研究中的应用[J]. 原子能科学技术,2003,37(3):246-249.
ZHU Qingfu, SHI Yongqian, LI Yiguo, et al. Source-jerk method for application on ADS neutronics study [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(3): 246-249(in Chinese).
- [10] PELOWITZ D, FALLGREN A, MCMATH G, et al. MCNP6 user's manual[M]. US: Los Alamos National Laboratory, 2014.
- [11] ZOIA A, NAUCHI Y, BRUN E, et al. Monte Carlo analysis of the CROCUS benchmark on kinetics parameters calculation [J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 96(3): 377-388.
- [12] 胡守印,王瑞偏,梁锡华,等. HTR-10物理实验方法及数据处理[J]. 核动力工程,2002,23(1):8-11.
HU Shouyin, WANG Ruipian, LIANG Xihua, et al. Method and data processing for HTR-10 physics experiment[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(1): 8-11(in Chinese).
- [13] 梅龙伟,蔡翔舟,蒋大真,等. MCNP温度相关热中子散射数据库研制[J]. 核科学与工程,2013,33(4):362-367.
MEI Longwei, CAI Xiangzhou, JIANG Dazhen, et al. Development of temperature related thermal neutron scattering database for MCNP[J]. Nuclear Science and Engineering, 2013, 33(4): 362-367(in Chinese).