

MCNP 程序在 CARR 物理启动计算中的应用

吕征,孙志勇,肖诗刚,李建龙,花晓

中国原子能科学研究院反应堆工程研究设计所,北京 102413

摘要 中国先进研究堆(CARR)既没有参考堆,也不进行零功率物理模拟实验,其物理启动工作完全以理论分析结果为依据,这在国内大型研究堆的启动中尚属首次。CARR 堆芯结构复杂,启动过程中堆内标准燃料组件、跟随体燃料组件和贫铀组件混装,堆芯装载变化大,大部分基于扩散理论的物理计算程序较难完成 CARR 物理启动的理论分析工作。选用 MCNP 程序对 CARR 物理启动的各项实验进行模拟计算,该程序强大的几何描述功能很好地解决了上述难点。得到的计算结果为 CARR 物理启动工作提供了重要依据和参考,保证了 CARR 物理启动工作的安全顺利进行,实验结果表明,MCNP 的计算结果准确可信,该程序在 CARR 物理启动工作中的应用是成功的。

关键词 中国先进研究堆;零功率物理模拟实验;物理启动;MCNP 程序

中图分类号 TL411

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.006

Application of MCNP Code in the Calculation of CARR Nuclear Commissioning

LU Zheng, SUN Zhiyong, XIAO Shigang, LI Jianlong, HUA Xiao

Department of Nuclear Engineering Research and Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Abstract There is no reference reactor for CARR and no zero power experiment carried out, the nuclear commissioning of CARR will be run based totally on the theoretical analysis, as the first case in the China's domestic research reactor start-up. Because of the complicated structure and the large variations of the load of the core, the simulation calculation of the experiment can not be carried out with most neutronics codes based on the diffusion theory. In this paper, the MCNP code is used to run the calculation because of its real geometry function. The calculation results provide some important reference for the CARR start-up. The results of the experiment show that the calculation results are accurate and reliable and the application of the code is successful.

Keywords China advanced research reactor; zero power neutronics experiment; nuclear commissioning; MCNP code

0 引言

物理启动是反应堆建造的重要环节,期间进行的各项试验可以得到反应堆的核特性参数,在验证理论设计的同时可以为反应堆的安全运行提供必要的基础数据。对于新型研究堆,由于采用新设计思想和新技术,通常先建造零功率物理模拟装置,对设计进行初步验证,同时获取一些基本物理参数供工程调试参考^[1]。随着反应堆物理分析手段的成熟,模拟计算在反应堆物理启动中的作用日益显著,但是完全以数值

模拟计算为主导进行新型研究堆的物理启动目前未见报道。

中国先进研究堆(CARR)是一座高性能、多用途的大型核科研设施,是中国新世纪核科技发展的重要平台,建成后将在核科学技术领域的研究中发挥重要作用。CARR 于 2009 年开始带核调试,由于没有完全相同的参考堆,也不进行零功率物理模拟实验^[2],所以物理启动各项实验方案的制定和重要安全参数的确定完全以理论分析计算结果为依据,这在国内的大型研究堆启动中尚属首次,对理论模拟计算的精度

收稿日期:2012-05-22;修回时间:2012-07-02

作者简介:吕征,副研究员,研究方向为核能科学与工程,电子邮箱:carrlvzheng@yahoo.com.cn

和可靠性提出了很高的要求^[3]。

CARR 是一座轻水冷却重水慢化的反中子阱型反应堆。堆芯由 17 根标准燃料组件和 4 根控制棒跟随体组件构成,堆芯容器(即重水箱内壁)将堆芯内的轻水与重水箱中的重水隔开。重水箱内安装了供实验生产用的垂直和水平孔道。CARR 堆芯布置如图 1 所示,图中标准燃料组件编号为燃料装载顺序。

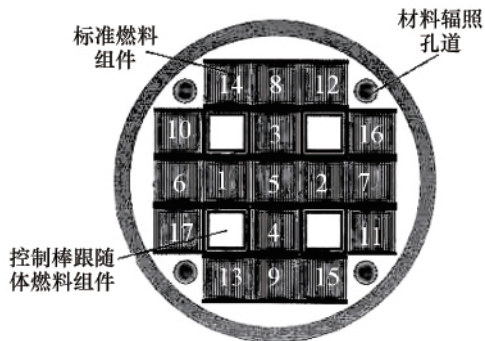
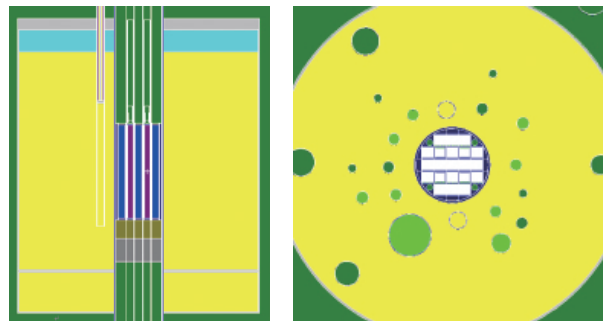


图 1 CARR 堆芯布置
Fig. 1 Layout of CARR core

在物理启动的装料过程中,为保证堆芯内的慢化性能基本不变,在 17 个标准燃料组件栅位上先安装贫铀组件,装料时取出一盒贫铀组件在相应位置装入标准燃料组件。因此整个装料过程中,堆芯处于标准燃料组件、跟随体燃料组件和贫铀组件的混装状态。跟随体燃料组件处于活性区的长度随着控制棒位的变化而变化,对于跟随体燃料组件和控制棒吸收体处于活性区以外的部分必须加以考虑^[4]。另外,为满足不同生产实验要求,重水箱内的孔道采取非对称布置方式。上述结构特点使得少群扩散程序的少群参数获得和几何描述都极为困难,而具有真实几何描述功能的 MCNP 程序则可以解决上述难点,因此本文采用 MCNP 程序对 CARR 物理启动进行模拟计算^[4],以得到实验所需的参考数据。MCNP 程序的计算精度和可信度在 CARR 核设计和医院中子照射器物理建造中已经得到很好的验证^[1]。

1 计算模型

根据 CARR 的结构尺寸和各部件材料成分,建立 MCNP 程序计算模型。在堆芯活性区内,标准燃料组件和跟随体燃料组件的几何尺寸和材料成分采用出厂实测值,贫铀组件因厂家无法提供成分实测值按 ²³⁵U 富集度 0.3%wt 计算。将控制棒吸收体和跟随体燃料组件作为一个整体进行描述,模拟了控制棒全行程 922mm 内吸收体和跟随体在活性区内、外的实际状态。按照物理启动过程中重水箱内孔道的实际状态,分别对干孔道、充轻水孔道和充氮气孔道进行描述,真实反映了孔道状态对堆芯物理性能的影响^[5]。图 2 为整个计算模型的纵剖图与横剖图,图 3 为堆芯横剖图,图 4 为控制棒和跟随体燃料组件的几何描述。



(a) 纵剖图 (b) 横剖图
(a) Axial section (b) Cross section

图 2 MCNP 计算模型图
Fig. 2 MCNP calculation model

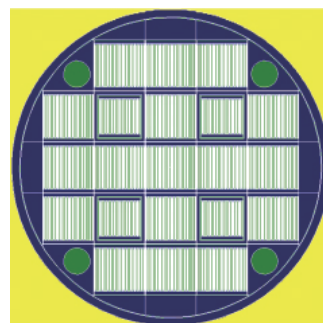


图 3 堆芯横剖图
Fig. 3 Cross section view of the core model

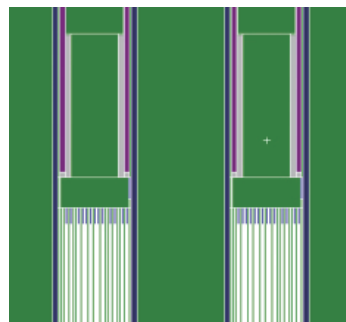


图 4 控制棒和跟随体燃料组件计算模型
Fig. 4 Model of control rod and following fuel assembly

2 计算结果

CARR 物理启动主要包括:首次临界实验、剩余反应性测量、中子注量率测量和反应性系数测量。本文主要对首次临界实验和反应性测量等操作复杂、存在临界安全问题的项目进行模拟计算^[6]。

2.1 首次临界模拟计算

CARR 首次临界实验采用组件法外推和棒位法外推相结合的方式^[2]。堆芯初始装载 17 盒贫铀组件和 4 盒跟随体

燃料组件,装料时每次取出 1 盒贫铀组件在相应的位置装入标准燃料组件,根据计数率的变化进行组件数外推,当外推临界装载与堆芯当前装载量之差小于 1 时,将全部控制棒插入堆芯,再向堆芯内添加 1 盒标准燃料组件,逐步提升控制棒栅进行棒位法外推,直至反应堆向超临界过渡成功^[3]。

反应堆的最小临界装载量和在该装载下的临界棒栅高度是首次临界实验中最重要参数^[4],为保证实验的安全必须对这两个参数进行计算分析。根据图 1 中的燃料装载顺序,对各个装载进行净堆临界计算,得到有效增值因子 k_{eff} ^[1],计算结果见表 1。由表中数据外推可得临界装载量为 8.25 盒,即反应堆装载 9 盒标准燃料组件时可达到临界状态^[4]。

表 1 各装载临界计算结果
Table 1 Calculation results for different fuel assembly load

装载	k_{eff}	装载	k_{eff}
0	0.50625	9	1.01839
1	0.61987	10	1.04870
2	0.69374	11	1.07530
3	0.77422	12	1.10290
4	0.83524	13	1.12492
5	0.89319	14	1.15427
6	0.92707	15	1.17715
7	0.95974	16	1.20601
8	0.99200	17	1.22639

在 9 盒标准组件装载下对控制棒栅价值进行计算,得到的控制棒栅价值曲线如图 5 所示。根据棒栅价值计算结果进行外推和内插,得到该装载下临界棒栅高度为 667.8mm。

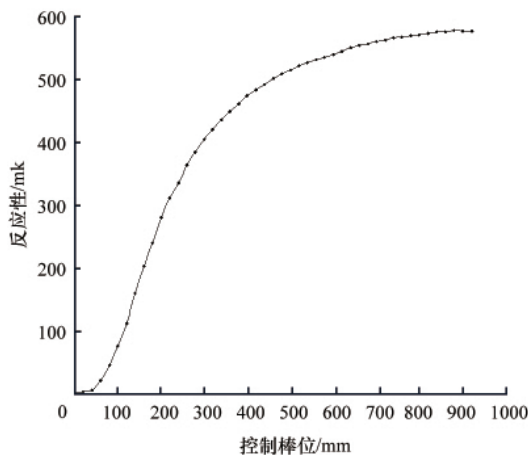


图 5 装载 9 盒标准组件时棒栅价值曲线
Fig. 5 Control rod worth curve for 9 fuel assembly load

2.2 剩余反应性测量模拟计算

CARR 的冷态剩余反应性设计值为 200mk, 由于 CARR

自身结构的限制,如此大的反应性无法在满装载下用水位法或毒物补偿法测量。因此,CARR 剩余反应性的测量方案为:从最小临界装载开始,每添加一盒标准燃料组件就用落棒法测量该组件的反应性价值,直至堆芯满装载,将各盒组件的价值进行修正后累加即可得到总的剩余反应性。因此需要对各装载进行临界计算,得到临界棒栅高度供实验参考。表 2 为各装载下的临界棒栅高度。

表 2 各装载下的临界棒栅高度
Table 2 Critical rods height for different load

装载	临界棒栅高度/mm	装载	临界棒栅高度/mm	装载	临界棒栅高度/mm
9	667.8	12	408.8	15	291.9
10	549.4	13	371.1	16	257.7
11	472.2	14	325.2	17	234.8

3 分析与讨论

CARR 已于 2010 年 5 月成功实现首次临界,目前已完成剩余反应性测量等 B 阶段实验。在整个实验过程中,理论计算结果为实验的进行提供了重要参考,为实验的安全提供了有力的保障。

在首次临界实验的组件法外推中,实际的外推最小临界装载量为 8.4 盒,9 盒装载下的外推临界棒栅高度为 656mm,内插临界棒栅高度为 646mm^[3]。实验进程完全符合理论计算预期,理论计算结果与实验结果符合较好。

在剩余反应性测量过程中,在 9—17 盒标准组件装载下分别进行了临界实验,实际临界棒栅高度与计算值的比较如表 3 所示。

从表 3 可知,临界棒栅高度计算值与实际值最大偏差不超过 5%。分析认为,临界棒栅高度计算值与实验值的差异,是由于贫铀组件的物质参数的不确定性引起的,理论计算中,燃料组件取工厂提供的实测值,而贫铀组件取理论值。从

表 3 各装载下的实际临界棒栅高度与计算值比较
Table 3 Actual critical rods height vs calculation results

装载	临界棒栅高度/mm		绝对误差/mm	相对误差/%
	计算值	实际值		
9	667.8	646.2	21.6	3.34
10	549.4	526.6	22.8	4.33
11	472.2	457.4	14.8	3.24
12	408.8	397.6	11.2	2.82
13	371.1	361.0	10.1	2.80
14	325.2	315.3	9.9	3.14
15	291.9	286.3	5.6	1.96
16	257.7	253.7	4.0	1.58
17	234.8	234.1	0.7	0.30

表中还可见,随着贫铀组件的减少,理论值与实验值越来越接近,当全部为标准燃料组件时(堆芯满装载),计算值与实验值完全符合。

4 结论

通过对 CARR 物理启动实验进程的总结和对实验数据的分析可知,物理实验的进程完全符合理论计算的预期,计算结果为实验的安全顺利开展提供了有力保障和重要参考,计算结果与实验结果符合较好,充分说明了 MCNP 程序在 CARR 物理启动模拟计算中的应用是成功的。本文研究的开展也可为其他研究堆启动中的理论计算分析提供一定的借鉴和参考。

参考文献 (References)

- [1] 李义国, 夏普, 邹淑芸, 等. 医院中子照射器反应堆实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S2): 10-12.
Li Yiguo, Xia Pu, Zhou Shuyun, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(S2): 10-12.
- [2] 朱庆福, 史永谦, 沈雷生, 等. 铀溶液核临界安全实验装置首次物理启动[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(4): 293-295.
Zhu Qingfu, Shi Yongqian, Shen Leisheng, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2005, 39(4): 293-295.
- [3] 肖诗刚, 吕征. 中国先进研究堆首次临界实验报告[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2011.
Xiao Shigang, Lu Zheng. The report of initial critical experiment of CARR[R]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2011.
- [4] 吕征, 孙志勇, 沈峰, 等. 中国先进研究堆(CARR)首次临界实验模拟计算[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(S1): 337-339.
Lu Zheng, Sun Zhiyong, Shen Feng, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(S1): 337-339.
- [5] 孙志勇, 沈峰, 吕征, 等. CARR 控制棒物理设计计算[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 41-43.
Sun Zhiyong, Shen Feng, Lu Zheng, et al. *Nuclear Power Engineering*, 2006, 27(5): 41-43.
- [6] 解家春, 赵守智, 孙征, 等. MCNP 程序计数分段卡存在的问题及解决办法[J]. 核动力工程, 2010, 31(4): 16-20.
Xie Jiachun, Zhao Shouzhi, Sun Zheng, et al. *Nuclear Power Engineering*, 2010, 31(4): 16-20.
- [7] 解家春, 赵守智, 贾宝山. SNRE 堆芯物理计算分析[J]. 核动力工程, 2010, 31(5): 137-141.
Xie Jiachun, Zhao Shouzhi, Jia Baoshan. *Nuclear Power Engineering*, 2010, 31(5): 137-141.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·

“第十三届全国固体薄膜学术会议”征文



“第十三届全国固体薄膜学术会议”将于 2012 年 8 月 6—12 日在山东省烟台市召开。本次大会由中国电子学会电子材料学分会、半导体与集成技术分会、应用磁学分会主办。

征稿范围:(1) 薄膜科学与技术展望;(2) 薄膜生长制备、特性表征及应用研究;(3) 薄膜生长机理、动力学研究及模拟计算;(4) 薄膜表面、界面及微结构研究;(5) 新型固体薄膜相关技术研究;(6) 纳米薄膜材料及低维结构;(7) 磁性薄膜、多层膜、颗粒膜、超薄膜的制备及特性研究;(8) 薄膜传感器件的制备及特性研究;(9) 薄膜太阳能电池的制备、测试及产业化研究;(10) 薄膜生长设备及测试设备。

论文截稿日期:2012 年 8 月 1 日

联系电话:13863861635

通信地址:山东烟台大学光电信息科学技术学院(264005)

电子信箱:ypsun@ytu.edu.cn

会议网站:<http://oei.ytu.edu.cn:8083/>