

# 西安脉冲堆 WIMS 和 MCNP 耦合燃耗计算方法

郭和伟, 江新标, 赵柱民, 陈立新, 张信一

西北核技术研究所, 西安 710024

**摘要** 基于 MCNP 的多群计算特性, 扩展了其多群功能, 并与栅元均匀化程序 WIMS 耦合, 实现了临界-燃耗耦合计算; 采用 WIMS 产生的 69 群共振、自屏宏观中子截面, 进行了栅元、组件计算以及实验对比, 计算结果与其他方法的计算结果和实验结果一致, 验证了此耦合程序的可靠性和正确性。最后, 应用此耦合程序对西安脉冲堆第一循环的燃耗进行了计算和分析。

**关键词** 西安脉冲堆; 耦合程序; 燃耗

中图分类号 TL329.2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.008

## Burnup Calculation Methods for Xi'an Pulsed Reactor Based on Coupled Code of WIMS and MCNP

GUO Hewei, JIANG Xinbiao, ZHAO Zhumin, CHEN Lixin, ZHANG Xinyi

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

**Abstract** Based on the multigroup calculation feature of the MCNP code, the multigroup function is extended. The coupled code is used to calculate the burnup with the lattice homogenous code WIMS. The 69-group resonance and self-shield macroscopic neutron cross-section, is generated by the WIMS code to simulate the fuel cell and the fuel assembly and the comparative experiment is carried out. The calculation results are in good agreement with the results of other methods and experiments. It indicates that the coupled code is correct and rational. Finally, the paper uses the coupled code to compute and analyze the burnup of the Xi'an pulsed reactor.

**Keywords** Xi'an pulsed reactor; coupled code; burnup

### 0 引言

要保证西安脉冲堆安全连续运行, 燃耗计算很重要。MCNP<sup>[1]</sup>程序可求解任意三维复杂几何系统内的粒子输运问题, 具有真实模拟粒子轨迹的特点, 具有强大的几何处理能力, 但其不能直接进行燃耗计算。为此, 本文利用 MCNP 的多群计算功能和 WIMS<sup>[2-5]</sup>栅元程序耦合, 实现了燃耗计算, 并利用此方法计算了脉冲堆的燃耗。该程序的主要思想是: 首先将能量分群, 把对连续能量的中子跟踪问题转变为对能群的中子跟踪问题; 然后, 参考积分输运理论, 用栅元程序 WIMS 对堆芯中的基本栅元进行均匀化处理, 并求出考虑非均匀效应后的均匀化群常数; 最后, 应用栅元程序 WIMS 进行栅元燃耗计算, 求出栅元群常数与燃耗的关系, 提供给 MCNP 进行计算, 完成堆芯的燃耗计算。

### 1 临界-燃耗耦合程序的研制

#### 1.1 多群临界计算

MCNP 程序多群功能求解多群中子输运方程<sup>[6]</sup>形式为

$$\Omega \nabla \phi_g(r, \Omega) + \Sigma_g^a(r) \phi_g(r, \Omega) = \frac{\chi_g(r)}{4\pi k_{\text{eff}}} \sum_{g'=1}^G \int_{4\pi} d\Omega' v_{g'}(r) \Sigma_{g'}^f(r) \cdot \phi_{g'}(r, \Omega') + \sum_{g'=1}^G \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_{g'}^{g \rightarrow g}(r, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi_{g'}(r, \Omega') \quad (1)$$

其中  $\chi_g$  为  $g$  群中子裂变向量谱。通过求解此方程, 即可求得系统的有效增值系数  $k_{\text{eff}}$ 。

#### 1.2 燃耗计算

计算燃耗时, 首先用 WIMS 程序计算出每根燃料棒、不同燃耗值对应的宏观中子截面 (截面考虑了共振自屏、互屏及

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-06-17

作者简介: 郭和伟, 研究实习员, 研究方向为核技术及其应用, 电子信箱: guohw2005@yahoo.com.cn

温度效应), 然后由接口程序完成截面的转化, 生成 MCNP 用的多群截面。计算流程如图 1 所示。

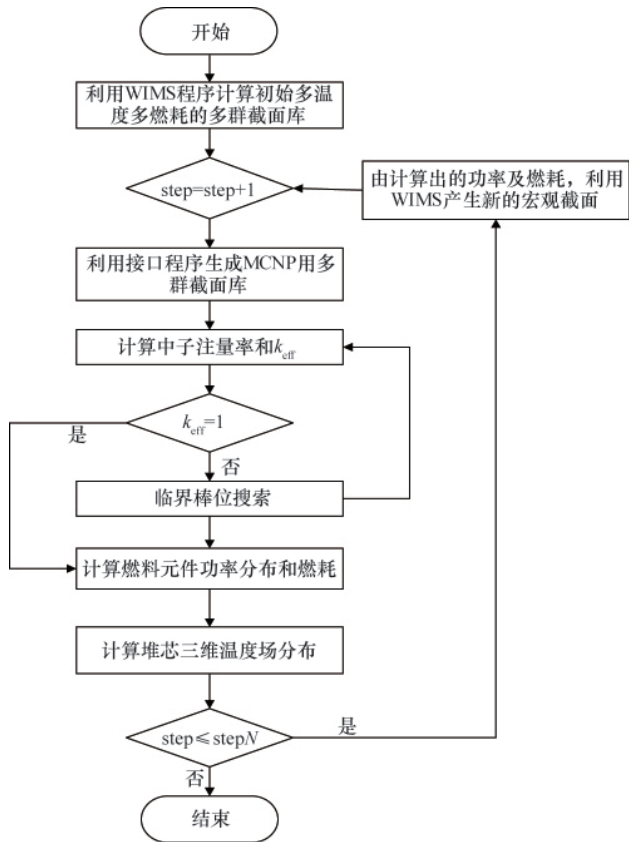


图 1 WIMS 与 MCNP 耦合计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart with the combination of WIMS and MCNP

耦合程序计算燃耗的基本过程如下。

(1) 在  $k_{eff}$  及中子通量密度收敛后, 利用该中子通量密度计算每根燃料元件的功率, 进而计算其燃耗。

(2) 由计算出的燃料元件功率及燃耗, 利用 WIMS 计算出新的多群截面, 经过接口程序转化后, 用此截面替代上一步耦合程序中的多群截面, 再次计算  $k_{eff}$  及中子通量密度, 如此循环, 直到满足结束条件 (一般为  $k_{eff}=1$ )。

第  $i$  根燃料元件的功率  $P_i$  和当前燃耗增量  $\Delta(BU(i))$  的值由下式计算<sup>[7]</sup>:

$$P_i = \kappa \sum_{g=1}^G \Sigma_{f,g}(i) \phi_g(i) \quad (2)$$

$$\tilde{P}_i = P_i \cdot \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_j} \quad (3)$$

$$\Delta(BU(i)) = \tilde{P}_i \cdot \frac{\Delta t}{m_i} \quad (4)$$

式中,  $\Sigma_{f,g}(i)$  为第  $i$  根燃料元件、第  $g$  群裂变截面;  $\phi_g(i)$  为第  $i$  根燃料元件的中子通量密度;  $P_i$  为堆芯总功率;  $N$  为堆芯中总的燃料元件个数;  $\Delta t$  为燃耗步长, d;  $m_i$  为第  $i$  根燃料元件的初始铀装量, t;  $\kappa$  为每次裂变所放出的能量, MeV。

## 2 临界-燃耗耦合程序的验证

### 2.1 燃料栅元及组件问题

主要验证不同方法在不同燃耗下单棒和组件的无限增值系数  $k_{\infty}$  随燃耗的变化情况。其中 U-ZrH<sub>1.6</sub> 燃料芯体铀含量为 12% (质量), <sup>235</sup>U 富集度为 19.75%, 密度为 6.1792 g·cm<sup>-3</sup>。每块燃料芯体外径 36.1mm, 内径 4.6mm, 长度 130mm。包壳管采用 0Cr18Ni11Ti 不锈钢, 内径 36.2mm, 壁厚 0.5mm, 长 614mm。采用连续点 MCNP、WIMS 和 MCNP 耦合计算及 ORIGEN2<sup>[8]</sup> 和 MCNP 耦合<sup>[9]</sup> 计算 3 种不同方法, 计算了无限增值系数的变化。单棒和组件模型如图 2、图 3 所示。

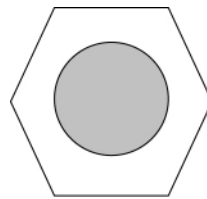


图 2 单棒栅元模型

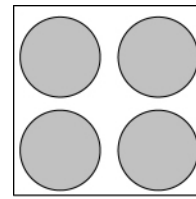


图 3 组件模型

Fig. 2 Model of fuel cell Fig. 3 Model of fuel assembly

单棒和组件无限增值系数对比结果如图 4、图 5 所示。

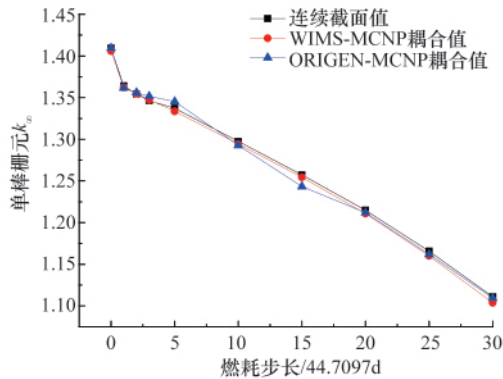


图 4 单棒无限增值系数的对比

Fig. 4 Comparison of infinite multiplication factor for fuel cell

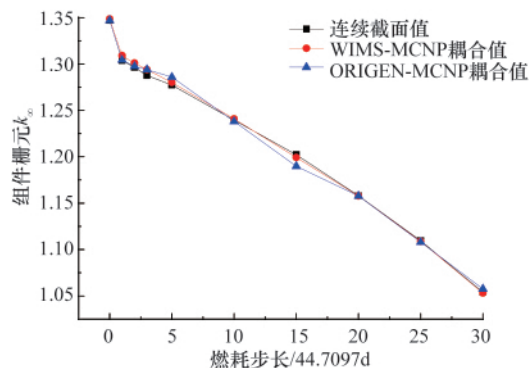


图 5 组件无限增值系数的对比

Fig. 5 Comparison of infinite multiplication factor for fuel assembly

由图4、图5可知,在不同燃耗下采用3种不同方法计算的单棒和组件的无限增殖系数基本一致,计算偏差在0.5%左右,这说明WIMS和MCNP耦合计算方法是正确可靠的。

### 2.2 实验验证

利用西安脉冲堆的燃耗实验测量结果<sup>[10]</sup>对此耦合程序进行验证。西安脉冲堆堆芯呈正三角形排列,栅距为43mm,9圈共211个孔位,中心7个孔为中央垂直孔道占据,控制棒占据6个孔位,燃料元件占据105个孔位,中子源占1个孔位,跑兔辐照管占2个孔位,其余为石墨元件。利用此耦合程序,进行了堆芯燃料棒的燃耗计算,本文计算了满功率运行15d后(简称15EFPD)D5和G14燃料棒的燃耗,由于燃料棒轴向功率分布的不均匀性,会导致燃料棒不同高度处燃料成份的不同,因此对D5和G14两根燃料棒进行了轴向分层,对不同高度处<sup>235</sup>U的含量进行计算,并与实验值、ORIGEN2和MCNP的耦合程序计算值进行对比,计算结果如图6和图7所示。

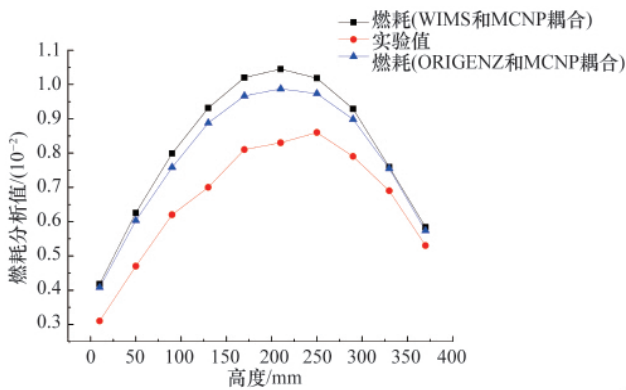


图6 D5棒燃耗分析

Fig. 6 Burnup analysis for D5 fuel cell

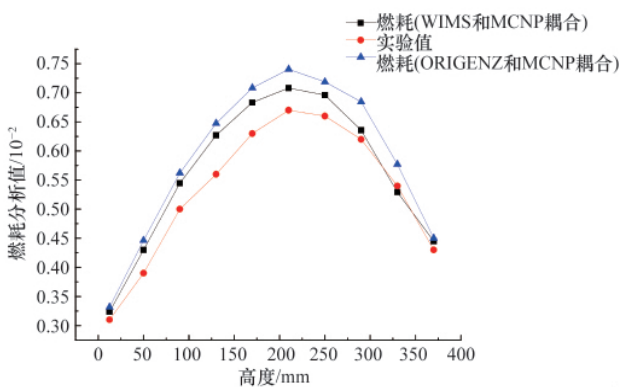


图7 G14棒燃耗分析

Fig. 7 Burnup analysis for G14 fuel cell

由图6和图7比对结果可以看出,本文开发的WIMS和MCNP耦合方法计算值与MCNP和ORIGEN2耦合方法计算值符合较好。对于D5棒,WIMS和MCNP耦合燃耗计算值和实验值的偏差不超过20%;对于G14棒来说,其偏差在5%左右,而实验测量值有20%的不确定度,计算分析值和实验值

在误差分析范围内一致,这也证明本文开发的临界-燃耗耦合方法是可行的。

### 3 西安脉冲堆燃耗分布计算

利用建立的燃耗计算方法,计算了西安脉冲堆第一循环燃耗的分布情况,主要针对<sup>235</sup>U的含量进行计算,分别计算了50EFPD和120EFPD下的燃耗,部分计算结果如图8—图11所示。

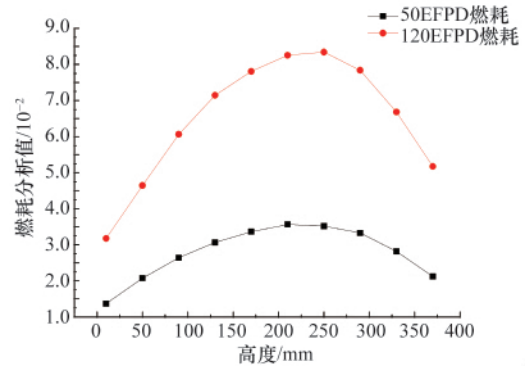


图8 D5棒不同时刻燃耗对比

Fig. 8 Burnup comparison for different time for D5 fuel cell

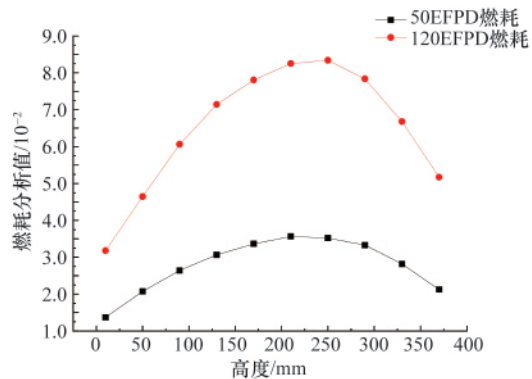


图9 G14棒不同时刻燃耗对比

Fig. 9 Burnup comparison for different time for G14 fuel cell

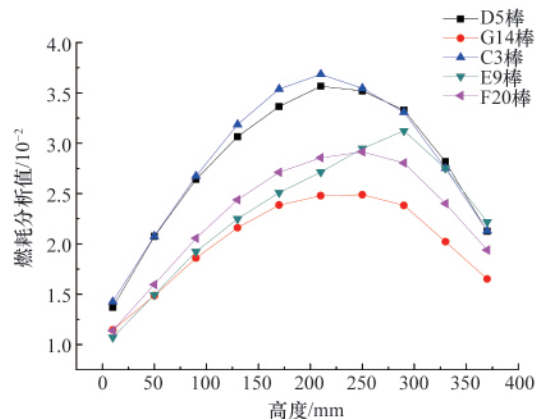


图10 50EFPD不同燃料棒燃耗分析

Fig. 10 Burnup analysis for different fuel cells at 50EFPD

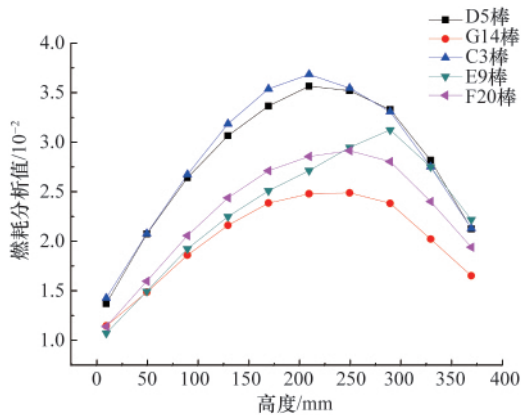


图 11 120EFPD 不同燃料棒燃耗分析  
Fig. 11 Burnup analysis for different fuel cells at 120EFPD

由图 8、图 9 可知,随着脉冲堆运行时间的增加,各燃料棒 <sup>235</sup>U 的含量消耗逐渐增加,燃耗逐渐加深;由图 10、图 11 可知,在脉冲堆不同运行时间下,内圈 <sup>235</sup>U 的燃耗比外圈更深。

#### 4 结论

本文建立了基于 WIMS 和 MCNP 的燃耗耦合计算方法,并利用栅元、组件问题计算和实验对比,验证了此耦合方法的可行性。最后应用此耦合程序计算了西安脉冲堆第一循环堆芯燃料的燃耗情况,随着脉冲堆运行时间的增加,各燃料棒 <sup>235</sup>U 的含量消耗逐渐增加,燃耗逐渐加深;在脉冲堆不同运行时间下,内圈比外圈的燃耗更深,符合燃耗运行的规律,得到了可靠的数据结果。

#### 参考文献 (References)

[1] Briesmeister J F. MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport

code: LA2126252M, version 4B [R]. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1997.

[2] Askew J R, Fayers F J, Kemshell F B. A general description of the lattice code WIMS[J]. *Nucl Energy Soc*, 1966, 5(4): 564.

[3] Halsall M J. A summary of WIMSD4 input options [R]. AEEW-137, Oxfordshire: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1980.

[4] 陈伟, 江新标, 陈达, 等. WIMS-D/4 程序 69 群数据库的扩充 [J]. 实验与研究, 1997, 20(2): 63-67.  
Chen Wei, Jiang Xinbiao, Chen Da, et al. *Test and Research*, 1997, 20 (2): 63-67.

[5] 景春元, 朱继洲, 陈达. 栅元程序 WIMS-D4 及其数据库应用的评价 [J]. 核动力工程, 1999, 20(5): 395-398.  
Jing Chunyuan, Zhu Jizhou, Chen Da. *Nuclear Power Engineering*, 1999, 20(5): 395-398.

[6] 谢仲生, 邓力. 中子输运理论数值计算方法 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 48-54.  
Xie Zhongsheng, Deng Li. *The numerical calculation method of neutron transport theory* [M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2005: 48-54.

[7] 李树. 堆芯燃耗分析系统及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.  
Li Shu. *Reactor core fuel consumption analysis system and its application*[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.

[8] Croff A G. A user's manual for ORIGEN2 computer code: ORNLPTM27175[R]. US: Oak Ridge National Laboratory, 1980.

[9] 张信一, 赵柱民, 江新标, 等. 基于 MCNP 和 ORIGEN2 的脉冲反应堆裂变产物中毒和燃耗计算分析[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2011.  
Zhang Xinyi, Zhao Zhumin, Jiang Xinbiao, et al. *The fission product poisoning and burnup calculation analysis for pulse reactor based on the MCNP and ORIGEN2* [R]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2011.

[10] 袁建新, 阿景焯, 张文首, 等. 西安脉冲堆燃料元件燃耗测量实验及结果分析[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2006.  
Yuan Jianxin, A Jingye, Zhang Wenshou, et al. *Fuel burn-up measurement experiment and result analysis for Xi'an Pulsed Reactor* [R]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2006.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

#### · 科学共同体介绍 ·

### 中国农业工程学会

中国农业工程学会 (Chinese Society of Agricultural Engineering) 于 1948 年 1 月 15 日由中国赴美国学习农业工程专业的 19 名留学生在美国加利福尼亚州 STOCKTON 城发起, 并召开了“中国农业工程师学会”首次筹备会; 1979 年在浙江杭州召开第一次全国代表大会并正式成立。朱荣、刘江、洪绶曾、刘成果、徐文海、汪懋华等历任学会理事长。

中国农业工程学会是中国科学技术协会所属的全国一级学会, 是国际农业工程学会的国家会员。作为学术性、综合性和社会公益性科技社团, 中国农业工程学会通过组

织各项活动广泛团结、组织农业工程科技工作者, 促进农业工程科技创新与繁荣发展, 加强农业工程的普及与推广, 加快科技人才的成长和提高, 成为党和政府联系农业工程科技工作者的桥梁和纽带, 是国家发展农业和农业工程科学技术事业的参谋和助手, 是促进农业和农村经济发展的重要社会力量。

中国农业工程学会现有 24 个分支机构, 设有学术交流、国际交流、科学普及、咨询及青年科技 5 个工作委员会及 19 个专业委员会、分会, 拥有近万名会员。全国有 23 个省、自治区、直辖市设立了农业工程

学会。

中国农业工程学会自成立以来, 先后设立了青年科技奖、专、兼职干部先进工作者奖、优秀论文等奖项, 并颁发中国农业工程学会科技发展贡献奖。同时, 还承担中国青年科技奖、国家科学技术进步奖的推荐工作。学会组织出版《农业工程学报》、《农业工程技术》、《中国农业工程学会会讯》等刊物及相关文集。

中国农业工程学会 2008 年 12 月在北京召开第八届全国会员代表大会, 选举朱明任理事长, 兼京光任秘书长。

(责任编辑 秦政)