

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0155-04; doi: 10.13832/j. jnpe. 2014. S2. 0155

新型燃料组件计算软件 SimFA 燃耗计算策略研究与验证

刘婷婷, 林旭升, 杨森权, 谢政权, 罗芳绘

中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉, 430223

摘要:如何在合理的时间步长下准确地模拟含钆(Gd)燃料的燃耗行为一直是组件计算程序开发工作中密切关注的问题。为了提高用于核电厂控制室全范围模拟机的少群截面参数的精确度,中核武汉核电运行技术股份有限公司(CNPO)开发了新型燃料组件计算软件 SimFA。本文对 SimFA 的燃耗计算方法,特别是含 Gd 燃料的燃耗计算策略进行了介绍。与传统燃耗计算方法以及国际同类权威软件的计算结果比较显示, SimFA 采用的扩展的预估-校正方法(EPC)与带燃耗子步的线性反应率方法(LR)相结合的燃耗计算策略,在计算精度和计算速度方面表现出良好的综合性能,允许在不丢失计算精度的情况下用较大的时间步长进行燃耗计算,可以认为是一种适用于含 Gd 组件的燃耗计算策略。

关键词: 燃耗; 含钆燃料; 扩展的预估-校正方法; 预估步外推方法; SimFA

中图分类号: TL48 文献标志码: A

Study and Verification of Burnup Calculation Strategy in Lattice Physics Code SimFA

Liu Tingting, Lin Xusheng, Yang Senquan, Xie Zhengquan, Luo Fanghui

China Nuclear Power Operation Technology Corporation, LTD., Wuhan, 430223, China

Abstract: Advanced analysis code on fuel assembly homogenization, SimFA, has been developed by CNPO to improve the accuracy of few group cross section generation for the further use in the core code embedded in full-scope NPP control room simulators. In this paper, the burnup calculation strategy adopted in SimFA, i.e. the Extended Predictor-Corrector Method incorporating the Linear Rate Method is presented, with the emphasis on Gadolinium-bearing assembly case. In comparison with the conventional burnup calculation methods, SimFA demonstrates a better performance considering both the calculation efficiency and accuracy. The burnup calculation strategy implemented in SimFA enables a fairly accurate burnup calculation with sufficiently large step size, and is therefore considered as a suitable way for the gadolinium-bearing assembly burnup calculation.

Key words: Burnup, Gadolinium-bearing assembly, Extended predictor-corrector method, Post correction method, SimFA

0 引言

燃耗计算是燃料组件计算程序的核心部分,为保证其准确性,数值计算中常采用小的燃耗步长来提高计算的精度。特别是当燃料中含有可燃

毒物钆(Gd)时,由于 Gd 对热中子有很大的吸收截面,这一特性将引起燃耗过程中中子注量率分布在短时间内的显著变化。此时,尽量小的燃耗步长的使用更为必要,可是如此一来,计算时

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-01-07

作者简介: 刘婷婷(1982—),女,工程师,现从事反应堆物理与辐射屏蔽相关工作

间将随着燃耗步长的缩短而变长。

SimFA 是中核武汉核电运行技术股份有限公司(CNPO)自主研发的新型燃料组件计算软件。出于对计算精度和计算速度的综合考虑,在广泛调研国内外相关的研究工作的基础上,SimFA 采用扩展的预估-校正方法(EPC)和带燃耗子步的线性反应率方法(LR)相结合的燃耗计算策略。本文将介绍 SimFA 燃耗计算策略的理论方法,并给出 SimFA 和国际同类权威软件针对同一基准题的计算结果比较。

1 SimFA 燃耗计算方法

1.1 扩展的预估-校正方法(EPC)

对于典型的压水堆组件,采用预估-校正方法(PC)时,在 $1.0 \text{ MW}\cdot\text{d}/\text{kg}$ 的步长下就能得到满意的燃耗计算精度;而当燃料中含有热中子吸收截面非常大的材料(如 Gd)的时候,必须减小步长至 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{d}/\text{kg}$ 左右才能保证燃耗计算具有较好精度^[1]。

传统的 PC 方法中^[2],每一燃耗步长内需进行 2 次输运计算和 2 次燃耗计算,为了避免冗繁的输运计算,部分国际权威软件,如 CASMO5 和 HELIOS,在燃耗计算时采用了半预估-校正的方法(SPC)。与 PC 方法相比 SPC 略去了校正步燃耗计算之后的输运计算步骤,在每一燃耗步长内进行 1 次输运计算和 2 次燃耗计算。相对于 SPC 方法,PC 方法又被称为全预估-校正方法(FPC)。FPC 方法注重计算精度,能进行精确地燃耗计算;而 SPC 方法则在一定程度上牺牲了计算精度,提高了计算速度。

由于燃耗计算的时间相对于输运计算可忽略不计,对比 SPC 和 FPC 方法可以看出,对于同一问题,SPC 方法仅需 FPC 一半的时间来完成计算。并且,对于普通的燃料组件 SPC 方法在 $1.0 \text{ MW}\cdot\text{d}/\text{kg}$ 的步长下也能得到与 FPC 方法相当的燃耗计算精度。但是对于含 Gd 燃料来说,SPC 方法显现出问题:校正步燃耗计算后的输运步骤不能省略。因为尽管校正步得到的核密度是精确的,但是由于后续预估步燃耗计算的微观反应率是不准确的,于是后续预估步燃耗计算所得的核密度也是不准确的。Gd 的存在引起的中子注量率随时间的显著变化使这一不准确性更为明显。为了补偿 SPC 方法的这一缺陷,CASMO5 团队提出

了一种预估步外推方法^[3]。除 CASMO5,该方法也被全堆芯计算程序 nTRACER 成功地采用,测试验证结果良好。对预估步燃耗计算得到的核密度进行外推后,接下来的输运计算将在此外推后的核密度基础上进行。

有别于传统的 SPC 和 FPC 方法,SimFA 采用扩展的预估-校正方法(EPC)进行燃耗计算:对于重核和裂变产物采用 SPC 方法;对于钷毒物使用 SPC 与预估步外推方法相结合的方法。

1.2 带燃耗子步的线性反应率方法(LR)

LR 的核心思想是假设同位素的微观反应率随时间呈线性变化,并将同位素微观反应率的变化带入到每一步的燃耗方程求解中。

为了实现此方法,需要引入燃耗子步的概念。通过输运计算得到同位素微观反应率是组件燃耗计算过程中最耗时的部分,在尽量大的时间步长下进行微观反应率计算(即输运计算)是比较理想的。在组件燃耗计算时,经常采用双步长方法(即燃耗步长和燃耗子步长共同应用的方法)^[4]。此方法是将燃耗步长进一步细分为若干个燃耗子步长,输运计算在燃耗步长下进行,燃耗方程的求解在燃耗子步长下逐个依次进行^[1]。

LR 方法用于 SimFA 程序考虑三类核素(即重核、裂变产物和可燃毒物),并且仅作用于校正步燃耗计算。研究证明,线性反应率方法的使用和燃耗子步的引入可以一方面减小燃耗方程求解时数值离散带来的误差,另一方面改善短寿命核素的燃耗计算结果。

因此,SimFA 拟采用 EPC 和 LR 相结合的燃耗计算策略。

2 数值验证

采用文献[5]公布的含 Gd 燃料组件基准题对 SimFA 的燃耗计算方法进行测试和验证。一方面,从计算的精度和速度两方面综合比较 SimFA 燃耗计算方法和传统方法的性能;另一方面,通过与其他同类权威软件计算结果对比来验证 SimFA 计算结果的准确性。

基准题考虑了含有 32 根含 Gd 燃料棒的压水堆组件,具体布置和参数见文献[5]。无限增殖因数(k_{inf})随燃耗的变化曲线见图 1。在 $2.5 \text{ MW}\cdot\text{d}/\text{kg}$ 的步长下,SimFA 分别采用了 SPC、SPC+LR、FPC+LR 和 EPC+LR 的方法进行燃耗计算,并与

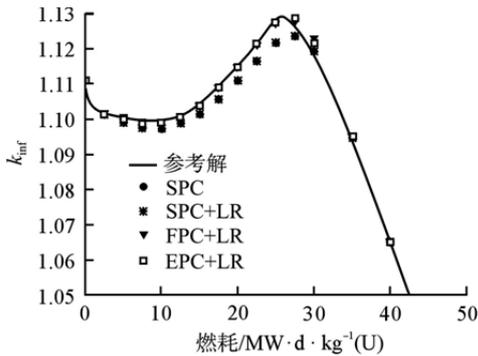


图1 k_{inf} 随燃耗深度变化曲线

Fig. 1 Comparison of k_{inf} for Different Burnup Calculation Methods

参考解比较。可以看出SPC方法计算结果在Gd燃尽前[燃耗<30 MW·d/kg前]与参考值误差较大。另外,在整个燃耗区间SPC和SPC+LR的结果基本是重合的,放大纵坐标轴后可以观察到,LR的引入对计算结果有一定的优化。FPC+LR和EPC+LR这两种方法计算结果几乎重合,都与参考值较好吻合。

图2给出分别用SPC、SPC+LR、FPC+LR和EPC+LR方法计算的 k_{inf} 随燃耗步长的变化。在0和25 MW·d/kg, Gd 未燃尽, SPC 方法计算的

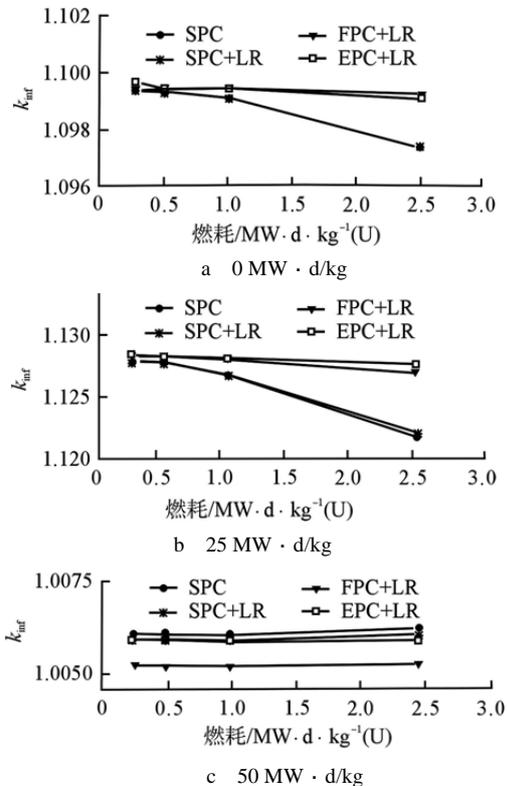


图2 不同燃耗深度下 k_{inf} 随燃耗步长的变化

Fig. 2 k_{inf} at Different Burnup with Various Step Size

k_{inf} 随燃耗步长的增大明显变小。这是因为 SPC 方法使用的预估步微观反应率不准确所致。燃耗步长越大,这一不准确性造成的误差越大。同时 Gd 的存在也使得这一误差更明显。引入 LR 方法后,计算结果随步长的收敛性略有提高。而 FPC+LR 和 EPC+LR 方法直至燃耗步长为 2.5 MW·d/kg 时仍能得到收敛的结果。至 50 MW·d/kg, Gd 已燃尽,包括 SPC 在内的所有方法都能给出不受燃耗步长大小影响的结果。

以上的分析和对比展示了当 Gd 存在于燃料中时, SPC、FPC 和 EPC 的燃耗计算性能表现。结果显示 SPC 方法表现出对燃耗步长的敏感性,为了保证精度用 SPC 方法进行燃耗计算时需设定较小的步长。而 FPC 和 EPC 方法在 2.5 MW·d/kg 的较大步长下依然能得到较为精确的燃耗计算结果。需要指出的是,如 1.1 中所述,采取相同的燃耗步长对同一复杂程度的问题进行计算时, EPC 方法的计算时间约为 FPC 方法的 50%。综合考虑计算精度和计算时间, EPC 方法的综合性能是最佳的。

图3给出了 SimFA 计算文献[5]公布的基准题得出的 k_{inf} 随燃耗变化曲线,并将 SimFA 计算结果与同类软件,包括 CASMO、HELIOS、McCARD 和 MVPBURN 进行了比较,计算出上述软件与 SimFA 计算结果的相对偏差。可以看出 SimFA 的计算结果与 HELIOS 及 McCARD 的吻合度较好,在整个燃耗区间,最大相对偏差的绝对值在 750×10^{-5} 之内;与 CASMO 相比较,有个别点的偏差在 1200×10^{-5} 附近;与 MVPBURN 相比较偏差

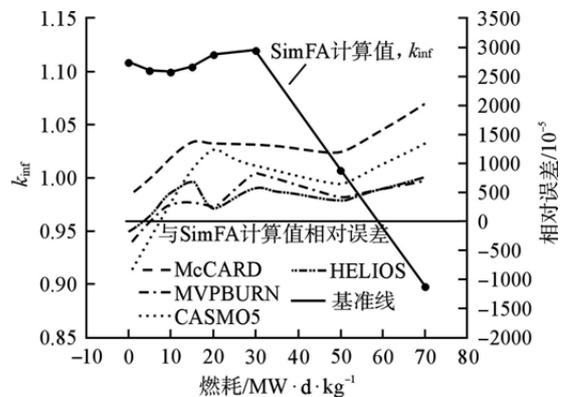


图3 k_{inf} 随燃耗变化曲线: SimFA计算结果与其他同类软件比较

Fig. 3 Comparison of k_{inf} Calculated by SimFA and other Lattice or Whole Core Codes

略大。依据文献[6]发表的针对与本文选取的同一基准题的其他软件计算结果比较标准, SimFA 与同类软件的一致度是良好的。尽管如此, 从整体对比来看, SimFA 在整个燃耗区间上的计算结果相较于其他软件呈现系统性偏低趋势。经初步分析, 认为引起这一系统误差的原因与 SimFA 目前采用的核数据库相关。文献[7]研究发现, 基于 ENDF/B-IV 评价库计算栅元和组件问题时 (SimFA 目前的情况), k_{inf} 将产生小于正确值 $600 \times 10^{-5} \sim 900 \times 10^{-5}$ 的误差。对于 ENDF/B-VI 以后新版本的评价库, 这一偏差将得到明显改善。根据上述结论定性分析, SimFA 采用的数据库升级后, 其计算结果将会与图 3 所示其他软件有更高的吻合度。可见后续对数据库的更新和核素燃料链的扩充对进一步提高 SimFA 的计算准确度是非常必要的。

3 结论与展望

本文介绍了 CNPO 自主研发的新型燃料组件计算软件 SimFA 的燃耗计算方法, 即 EPC 与 LR 相结合的燃耗计算策略。与公认精确度较高的 FPC 方法相比, SimFA 仅用一半的计算时间即可获得与 FPC 方法相当的计算精度, 在计算精度和计算速度方面表现出优良的综合性能。采用国际

公布的含钷基准题对 SimFA 进行了测试, 结果显示 SimFA 与同类权威软件的吻合度较好。

作为组件计算软件的输入数据, 核数据是程序计算的基础, 对最终计算结果起着决定性的影响。为了进一步提高 SimFA 软件的计算精度, 核数据库的升级和核素燃料链的扩充将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] Dan Gabriel Cacuci. Handbook of nuclear engineering [M]. Germany: Springer, 2010.
- [2] 谢仲生. 压水堆核电厂堆芯燃料管理计算及优化 [M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
- [3] Lee D J, Rhodes J, Smith K. quadratic depletion model for gadolinium isotopes in CASMO-5 [C]. Advances in nuclear fuel management IV (ANFM 2009), USA, 2009.
- [4] Isotalo A E, Aarnio P A. Substep methods for burnup calculations with bateman solutions [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38: 2509-2514.
- [5] Yamamoto A, Ikehara T, Ito T. benchmark problem suite for reactor physics study of LWR Next generation fuels [J]. Journal of nuclear science and technology, 2002, 39: 900-912.
- [6] Shim H J, Han B S, Jung J S. McCARD: Monte Carlo Code for Advanced reactor design and analysis [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2012, 44: 161-176.
- [7] Huria H C, Tahara Y. New multigroup library for PHOENIX-P [C]. PHYSOR96, Japan, 1996.

(责任编辑: 刘 君)