

基于BEAVRS2.0三维堆芯仿真建模验证分析

谢明亮 罗芳绘 杨森权 肖云龙 单福昌 谢政权

(中核武汉核电运行技术股份有限公司 武汉 430223)

摘要 针对最新发布的BEAVRS2.0基准题,采用多群二维输运理论进行燃耗计算,得到离散工况下少群常数并进行截面拟合处理,将先进节块法应用于求解中子扩散方程,建立三维堆芯节块程序SimOR仿真计算模型;选取不同运行工况进行组件均匀化计算、堆芯临界计算,并建立堆芯临界燃耗分析模型,并与BEAVRS2.0基准测量解、nTRACER等程序参考解比对,其计算结果吻合很好,验证了仿真模型建立的正确性与程序计算的精准性,可以广泛应用于核电仿真计算研究,同时为压水堆燃料管理燃料组件计算、堆芯扩散-燃耗计算提供数据依据及方案参考。

关键词 BEAVRS, NLSANM, 燃耗, 仿真计算

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060604

Verification analysis and modeling of 3D core simulation based on BEAVRS2.0

XIE Mingliang LUO Fanghui YANG Senquan XIAO Yunlong SHAN Fuchang XIE Zhengquan

(China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd, Wuhan 430223, China)

Abstract [Background] Based on the latest release of benchmark for evaluation and validation of reactor simulations (BEAVRS), verification of three-dimensional core simulation is one of important issues. [Purpose] This study aims to verify simulation modeling of three-dimensional core in coordinate with BEAVRS version 2.0 and establish corresponding burnup analysis model. [Methods] First of all, 2D transport theory with multi-group was used to calculate the fuel burnup, and few-group constant of discrete state points for calculation of nuclear cross sections fitting model. Then, the advanced nodal method was used to solve the neutron diffusion equation, and establish the 3D core nodal code SimOR simulation model. Finally, various operating conditions were selected to carry out component homogenization calculation and core critical calculation. [Results] The calculation results are in good agreement with the measured values of BEAVRS benchmark and the reference results of nTRACER code, which verifies the correctness of the simulation model and the accuracy of the program calculation. [Conclusion] This study provides data basis and scheme reference for the calculation of fuel management components and core diffusion-burnup calculation of PWR.

Key words BEAVRS, NLSANM, Burnup, Simulation calculation

BEAVRS2.0 (Benchmark for Evaluation And Validation of Reactor Simulations)基准题^[1]由美国麻省理工学院于2017年发布,它是一个新型全堆芯压水反应堆(Pressurized Water Reactor, PWR)具备多循环带燃耗的基准题,并基于商业核电站的两个运

行周期,提供了燃料组件、可燃吸收体、堆内裂变探测器、堆芯装载和许多堆内热构建等详细描述。该基准题极其详细地描述堆内模型,可以用于测试和验证耦合中子输运、热工水力学和燃料同位素核素衰变等。本文基于BEAVRS2.0基准题堆芯描述,建

第一作者: 谢明亮, 男, 1990年出生, 2015年于海军工程大学获硕士学位, 从事核反应堆安全分析及堆芯物理方向研究

收稿日期: 2018-05-17, 修回日期: 2018-11-05

First author: XIE Mingliang, male, born in 1990, graduated from Naval Engineering University with a master's degree in 2015, focusing on nuclear reactor safety analysis and core physics research

Received date: 2018-05-17, revised date: 2018-11-05

立三维堆芯燃耗计算模型;组件计算采用多群二维输运理论,得到各组件、各燃料类型下两群截面,对两群截面进行多变量多项式拟合处理,采用先进节块法(Nonlinear Iteration Semi-Analytic Nodal Method, NLSANM)求解中子扩散方程,建立三维堆芯节块程序SimOR仿真计算模型。

1 BEAVRS堆芯描述

核反应堆堆芯是由一定数量的燃料组件和相关组件构成,燃料组件主要由燃料棒、上下管座、格架、导向管和仪表管等组成,相关组件主要包括控制棒组件、可燃毒物组件、中子源与阻力塞组件等^[2]。BEAVRS2.0反应堆堆芯活性区高度为365.76 cm,堆芯热功率3 411 MW。堆芯第一循环燃料采用不同的燃料富集度,根据燃料的富集度不同划为3个燃料区,分别为第一区到第三区,其基本结构及组件富集度分布情况如图1所示。

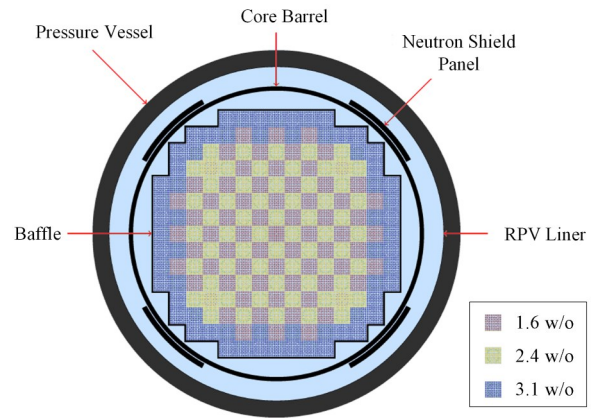


图1 堆芯横截面布置图
Fig.1 Radial cross section of BEAVRS core

堆芯包含193个燃料组件,组件内燃料元件呈现17×17分布排列,每个组件包含264根燃料棒,中心位置设置1根仪表管用于堆内测量,还有24个位置设置导向管,燃料组件参数如表1所示。

表1 燃料组件参数
Table 1 Fuel assembly parameters

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
燃料组件数量 No. fuel assemblies	193	导向管数量 No. guide tube	24
燃料组件长度 Fuel assembly lattice pitch / cm	21.503 64	导向管内径(缓冲器以上) Guide tube ID (above dashpot) / cm	1.122 68
燃料组件内燃料棒束分布 Pin lattice configuration	17×17	导向管外径(缓冲器以上) Guide tube OD (above dashpot) / cm	1.203 96
燃料棒束长度 Pin lattice pitch / cm	1.259 84	导向管内径(缓冲器上) Guide tube ID (at dashpot) / cm	1.008 38
燃料棒外径 Outer diameter of fuel pin / cm	0.914 4	导向管外径(缓冲器上) Guide tube OD (at dashpot) / cm	1.092 20
燃料棒直径 Fuel rod diameter / cm	0.784 36	导向管材料 Guide tube material	Zircaloy
燃料装载量 Heavy metal loading (MT)	81.8	包壳厚度 Cladding thickness / cm	0.057 15
燃料棒材料 Fuel rod material	UO ₂	仪表管数量 No. instrument tube	1
包壳材料 Cladding material	Zircaloy	仪表管外径 Instrument tube OD / cm	1.203 96
顶/底部支架装置材料 Top/bottom grid spacer material	Inconel 718	仪表管内径 Instrument tube ID (air) / cm	0.873 76

燃料组件的导向管内可以放置控制棒组件、中子源组件、可燃毒物组件或阻力塞组件^[2]。BEAVRS2.0堆芯内分别布置57束上层区域控制棒和56束下层区域控制棒,其吸收材料分别为B₄C和Ag(80%)-In(15%)-Cd(5%),表2给出含控制棒组件的基本参数。

BEAVRS2.0基准题反应堆可燃毒物布置在燃料第二区和第三区内,堆芯第一循环包含毒物5种类型可燃毒物布置组件,分别为6BA、12BA、15BA、16BA、20BA。表3给出含可燃毒物组件的基本参数,图2给出可燃毒物在组件中的布置。

表2 控制棒参数
Table 2 Control rod parameters

参数 Parameters	上层区域 Upper geometry	下层区域 Lower geometry
控制棒材料 Control rod material	B ₄ C	Ag(80%)-In(15%)-Cd(5%)
直径 Diameter / cm	0.746 76	0.764 54
密度 Density / g·cm ⁻³	1.76	10.16
包壳材料 Cladding material	SS304	SS304
气隙材料 Air gap material	氦气 Helium	氦气 Helium
包壳外径 Cladding OD / cm	0.967 74	0.967 74
包壳厚度 Cladding thickness / mm	0.097 79	0.097 79
控制棒束组数量 No. control rod banks	57	56
控制棒束数量 No. control rods	24	24

表3 可燃毒物棒参数
Table 3 Parameters of burnable absorber rods

参数 Parameters	可燃吸收体 Burnable absorber
可燃毒物材料 Burnable poison material	12.5% 硼玻璃 Borosilicate glass
可燃毒物棒外径 Burnable absorber rod OD / cm	0.967 74
密度 Density / g·cm ⁻³	2.26
包壳材料 Cladding material	SS304
包壳外径 Cladding outer thickness / cm	0.046 99
包壳内径 Cladding inner thickness / mm	0.016 51
气隙材料 Air gap material	氦气 Helium
气隙外径 Air gap outer thickness / cm	0.010 16
气隙内径 Air gap inner thickness / mm	0.010 79

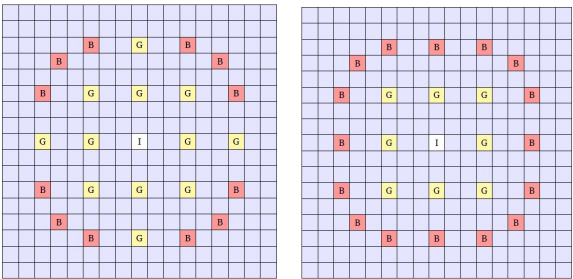


图2 可燃毒物组件布置图
(B: 可燃毒物棒, G: 导向管, I: 仪表管)
Fig.2 Burnable absorber assembly model
(B: burnable absorber rod, G: guide tube, I: instrument tube)

2 堆芯仿真计算模型建立

基于 BEAVRS2.0 基准题堆芯描述, 建立相应三维堆芯燃耗计算模型; 组件计算采用多群二维输运理论进行燃耗计算, 得到各个组件类型各个燃料类型下两群截面, 对两群截面进行数据预处理并导入到截面拟合程序, 从而得到少群常数并经过数据处理作为堆芯程序的输入卡, 堆芯采用三维稳态堆芯节块计算程序进行计算。其基本流程如图 3 所示。

2.1 组件均匀化计算

组件计算采用 SimFA 程序, 该程序采用多群二



图3 计算基本流程
Fig.3 The flow chart of calculation

维输运理论进行燃耗计算, 适用于棒状燃料元件组成的燃料组件, 以及棒状元件构成的独立栅元。程序可计算含钚的圆柱燃料棒、可燃毒物棒、控制棒、堆内测量管、水道、硼钢涂层以及十字型控制棒的正方形组件。由于 BEAVRS2.0 基准题燃料组件导向管轴向具有差异布置 (Guide Tube 与 Dashpot Guide Tube)、可燃毒物种类多样性及轴向差异布置、控制棒轴向材料类型差异性, 同时考虑轴向、径向反射层的布置, 因此对燃料计算过程应更加详细地描述该问题, 表 4 给出燃料轴向的分布情况。

2.2 截面拟合计算

由于组件均匀化计算所得到的少群截面数据, 只包含离散的有限数量状态下的截面数据, 而堆芯实际运行需要运行状态连续变化下的数据。因此需要对产生的少群截面进行拟合处理, 将燃料组件的宏观截面数据用一些影响截面的独立变量多项式表示^[3]; 将组件计算程序产生的少群截面经 Cr_XSPRE.py 预处理, 导入到群常数拟合程序 Cr_LINK

表4 燃料轴向布置情况
Table 4 Distribution of fuel axis

高度 Elevation / cm	燃料 Fuel	导管 Guide	仪表管 Instru- ment	可燃毒物 Burnable	控制棒 Rod
423.049	W	G	I	SSP	SSP
419.704	FP/ZR	G	I	BRP	CRP
402.508	F	G	I	BRP	CRUAP
401.238	F	G	I	BP	CRUAP
364.725	FG	GG	IG	BPG	CRUAP
359.01	F	G	I	BP	CRUAP
312.528	FG	GG	IG	BPG	CRUAP
306.813	F	G	I	BP	CRUAP
260.331	FG	GG	IG	BPG	CRUAP
254.616	F	G	I	BP	CRUAP
208.134	FG	GG	IG	BPG	CRUAP
202.419	F	G	I	BP	CRUAP
155.937	FG	GG	IG	BPG	CRUAP
150.222	F	G	I	BP	CRUAP
143.428	F	G	I	BP	CRLAP
103.740	FG	GG	IG	BPG	CRLAP
98.025	F	DG	I	BP	CRLAP
41.828	F	DG	I	BP	SSP
40.558	F	DG	I	SSPG	SSP
40.520	FG	G	IG	SSPDGG	SSP
39.958	FG	DGG	IG	SSPDGG	W
38.660	FG	DGG	IG	DGG	W
37.162	F	DG	I	DG	W
36.748	ZR	DG	I	DG	W
35.000	SSP	W	W	W	W
20.000	W	W	BI	W	W

注: F: 燃料棒; FG: 燃料棒(格架上); G: 导向管; DG: 导向管(缓冲器上); GG: 导向管(格架上); I: 仪表管; IG: 仪表管(格架上); SSP: 不锈钢; SSPG: 导向管上不锈钢; SSPGG: 导向管(格架上)上不锈钢; SSPDGG: (缓冲器上)导向管上不锈钢(格架上); BP: 可燃毒物棒; BPG: 可燃毒物棒(格架上); BRP: 可燃毒物棒; CRP: 控制棒; CRUAP: 控制棒(上层吸收区域); CRLAP: 控制棒(下层吸收区域); BI: 裸露仪表套管; ZR: 锆合金; FP: 燃料棒充气室; W: 水

Notes: F: Fuel rod pincell; FG: Fuel rod pincell w/ grid; G: Guide tube pincell; DG: Dashpot guide tube; GG: Guide tube pincell w/ grid; I: Instrument tube pincell; IG: Instrument tube pincell w/ grid; SSP: Stainless steel pin; SSPG: Stainless steel pin in GT; SSPGG: SS pin in GT w/ grid; SSPDGG: SS pin in dashpot GT w/ grid; BP: Burnable absorber pincell; BPG: Burnable absorber pincell w/ grid; BRP: BPRA rod plenum pincell; CRP: Control rod in plenum geometry; CRUAP: Control rod upper absorber pincell; CRLAP: Control rod lower absorber pincell; BI: Bare instrument thimble; ZR: Zircaloy pin; FP: Fuel rod plenum pincell; W: Water

拟合处理,其拟合方式可根据拟合需求来控制拟合参数,如组件种类数、截面关于反馈变量的展开形式、各自变量个数及相应变量拟合阶数等,下面给出

燃耗、硼浓度、相对功率、慢化剂相对密度、裂变产物(^{135}Xe)及控制棒等独立变量对截面影响的处理方式。

1) 燃耗BU、硼浓度CB对截面的影响,采用双变量多项式进行拟合,其中燃耗BU取四阶拟合,硼浓度CB取两阶拟合。其拟合多项式 $F_{II}(\text{BU}, \text{CB}) = \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^4 a_{ij} \text{BU}^i \text{CB}^j$;

2) 对于相对功率独立变量,采取二阶多项式拟合 $F_{2I}(P) = a_0 + a_1 P + a_2 P^2$,功率选取通常为满功率、50%功率与零功率;

3) 慢化剂相对密度(U)和硼浓度(CB)对截面的影响,均采用二阶多项式拟合,其拟合多项式 $F_{II}(\text{U}, \text{CB}) = \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^2 a_{ij} \text{U}^i \text{CB}^j$ 在实际计算中,通常取堆芯入口、平均及出口三种温度对应下的慢化剂密度作为拟合状态点;

4) 裂变产物 ^{135}Xe 、 ^{149}Sm 对截面的影响,裂变毒物氙、钐对截面的影响采用两阶多项式拟合,拟合多项式 $\sigma_i(\text{BU}) = a_0 + a_1 \text{BU} + a_2 (\text{BU})^2$, N_{Xe} 、 N_{sm} 可以通过求解燃耗方程得到,氙、钐的影响是单独处理的,因此在做其它反馈影响时,都是扣除了氙、钐的影响;

5) 对于含有控制棒组件,一般将不含控制棒组件截面数据附加一个分量,作为含控制棒截面数据,对于部分插入控制棒的类型,则采用体积权重的方法处理,其附加分量表示为:

$$\Delta \sum_{ii}(\text{BU}, \text{CB}) = \sum_{ii}(\text{BU}, \text{CB})_{\text{rod}} - \sum_{ii}(\text{BU}, \text{CB})_{\text{no-rod}} \quad (1)$$

对于BEAVRS2.0基准题控制棒结构布置,上层控制棒吸收材料为 B_4C ,下层控制棒材料吸收体为 $\text{Ag}(80\%)$ - $\text{In}(15\%)$ - $\text{Cd}(5\%)$,加上轴向导向管布置的差异性,因此在含控制棒处理上分类进行计算;同时考虑控制棒拟合截面采用附加分量的方式叠加在总截面上,因此对于含控制棒组件需要按式(1)做截面预处理,再导入Cr LINK拟合程序进行计算。

将不同状态燃料组件少群截面进行拟合处理,从而得到组件截面随堆芯主要参数连续变化函数,最终导入堆芯燃耗程序进行燃耗临界计算。在处理独立变量对截面的影响过程中,是通过每一个变量进行拟合处理,最后将得到的分截面值累加到一块便得到宏观截面的输入值,即: $\Delta \sum_{ii} = F_{II}(x, y) F_{2I}(z)$ 。

2.3 堆芯临界燃耗计算

采用轻水堆三维稳态堆芯节块计算程序

SimOR, 建立三维堆芯燃耗计算模型; SimOR 是一个堆芯燃料管理计算程序, SimOR 程序考虑轻水堆的所有重要的局部反馈效应, 包括控制棒插入、慢化剂空泡、慢化剂密度变化、燃料温度、燃料燃耗、氙瞬态和钐瞬态; 应用现代均匀化理论和不连续因子求解中子扩散方程, 围板/反射层显式表示, 因而具有很高的精度, 并且可以进行堆芯内任意节块的三维精细功率的重构。

程序采用非线性迭代的先进节块方法求解中子扩散方程, 全堆计算将中子扩散方程离散成粗网有限差分方程形式; 但在其系数中包含一项耦合修正因子, 然后在局部利用半解析节块法求解界面相邻的两节块问题, 得到两节块交界面上的净中子流, 并用之求出耦合修正因子, 并通过非线性迭代过程不断更新耦合修正因子, 从而使得粗网有限差分方程的解收敛于高阶节块方法的解^[4], 计算流程如图 4 所示。

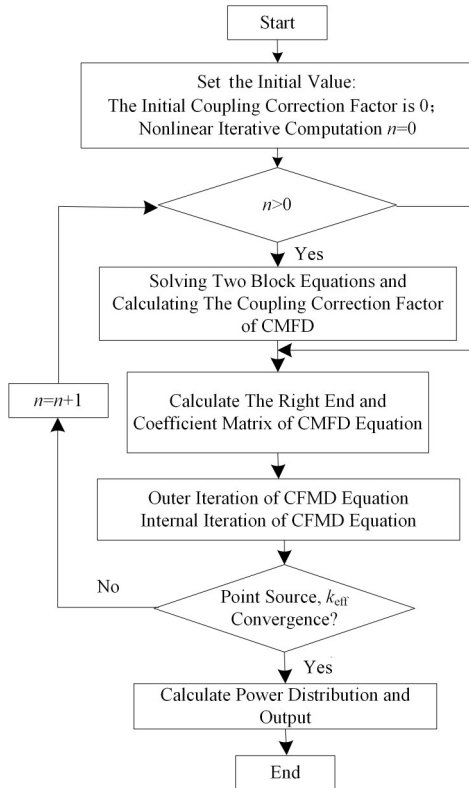


图 4 计算流程
Fig.4 The flow chart of calculation

稳态多维多群中子扩散方程可以表示为:

$$-\nabla \cdot D_g(r) \nabla \Phi_g(r) + \sum_{ig} (r) \Phi_g(r) = \sum_{g'=1}^G \left[\sum_{g'g} (r) + \frac{\chi_g}{k_{\text{eff}}} \nu \sum_{fg'} (r) \right] \Phi_{g'}(r) \quad (2)$$

式中: $g = 1, 2, \dots, G$; $D_g(r)$ 为 g 能群扩散系数,

cm^{-1} ; $\Phi_g(r)$ 为 g 能群中子通量, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}$; $\sum_{ig} (r)$ 为 g 能群宏观总截面, cm^{-1} ; $\sum_{g'g} (r)$ 为从 g' 能群散射到 g 能群宏观散射转移截面, cm^{-1} ; χ_g 为 g 能群中子裂变份额; $\nu \sum_{fg'} (r)$ 为 g 能群宏观 ν -裂变截面, cm^{-1} 。

将反应堆划分为 N 个节块, 局部坐标系原点设置在节块的几何中心点, 并假定在每个节块 k 内具有均匀化参数, 则可以得到节块 k 内的中子扩散方程:

$$-D_g^k \nabla^2 \Phi_g^k(r) + \sum_{ig}^k \Phi_g^k(r) = \sum_{g'=1}^G \left[\sum_{g'g}^k + \frac{\chi_g}{k_{\text{eff}}} \nu \sum_{fg'}^k \right] \Phi_{g'}^k(r) \quad (3)$$

$(x, y, z) \in \Omega^k, g = 1, 2, 3, \dots, G$

其中:

$$\Omega^k = \left[-\Delta x_k/2, \Delta x_k/2 \right] \times \left[-\Delta y_k/2, \Delta y_k/2 \right] \times \left[-\Delta z_k/2, \Delta z_k/2 \right]$$

式中: $\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$ 为均匀化宏观截面; $D_g^k, \sum_{ig}^k, \sum_{g'g}^k, \nu \sum_{fg'}^k$ 为均匀化节块宏观截面。

在节块 k 上对节块 k 内的中子扩散方程进行体积积分, 即可得到均匀化节块 k 的节块中子平衡方程:

$$\sum_{u=x,y,z} \frac{1}{\Delta u_k} (J_{gu+}^k - J_{gu-}^k) + \sum_{ig}^k \bar{\Phi}_g^k = \sum_{g'=1}^G \left[\sum_{g'g}^k + \frac{\chi_g}{k_{\text{eff}}} \nu \sum_{fg'}^k \right] \bar{\Phi}_{g'}^k \quad (4)$$

其中:

$$\bar{\Phi}_g^k = \frac{1}{V_k} \int_{-\frac{\Delta x_k}{2}}^{\frac{\Delta x_k}{2}} \int_{-\frac{\Delta y_k}{2}}^{\frac{\Delta y_k}{2}} \int_{-\frac{\Delta z_k}{2}}^{\frac{\Delta z_k}{2}} \Phi_g^k(r) dx dy dz$$

$$\frac{1}{\Delta u_k} (J_{gu+}^k - J_{gu-}^k) = \frac{1}{V_k} \int_{-\frac{\Delta x_k}{2}}^{\frac{\Delta x_k}{2}} \int_{-\frac{\Delta y_k}{2}}^{\frac{\Delta y_k}{2}} \int_{-\frac{\Delta z_k}{2}}^{\frac{\Delta z_k}{2}} -D_g^k \frac{\partial^2 \Phi_g^k(r)}{\partial u^2} du dv dw$$

$$J_{gu}^k(r) = -D_g^k \frac{\partial \Phi_g^k(r)}{\partial u}$$

$u \in \{x, y, z\}, v \in \{x, y, z\}, w \in \{x, y, z\}, u \neq v \neq w$

式中: $\bar{\Phi}_g^k$ 即为节块 k 的体积平均中子通量; $J_{gu\pm}^k = J_{gu}^k(\pm \frac{\Delta u_k}{2})$ 为节块 k 在 u 坐标方向 $\pm \Delta u_k/2$ 处的面平均净中子流; V_k 为节块 k 的体积。

将拟合程序 Cr_LINK 拟合处理的截面数据, 经 Cr_XSMAC.py 程序格式转换处理, 产生 SimOR 计算所需信息截面卡片, 截面卡片包含每类组件的各类截面信息, 并将组件的燃耗分为三段, 每一段分别进行截面多项式拟和; 根据堆芯描述, 建立堆芯三维

计算卡片组,堆芯计算卡片组主要包括维数卡、文件卡、状态卡、数码卡、执行卡和 ILAST 卡信息,其中维数卡、文件卡和 ILAST 卡定义运行信息,状态卡、数码卡和执行卡定义状态信息。

在输入数据卡中由当前燃耗、 N_{xc} & N_{sm} 、功率、硼浓度、慢化剂密度及控制棒棒位得到当前状态的宏观截面参数,将宏观截面参数传递给堆芯中子扩散

计算程序 NLSANM,得到三维的堆芯通量分布;由单通道程序完成热工水力计算,得到燃料温度、冷却剂密度等热工参数;并进行硼浓度临界搜索、临界棒位搜索更新硼浓度与棒位,迭代计算使 k_{eff} 收敛 $|k_{eff} - k^*|$,循环燃耗计算、 N_{xc} & N_{sm} 毒物计算使得迭代结束、输出计算结果。其基本流程如框图 5 所示。

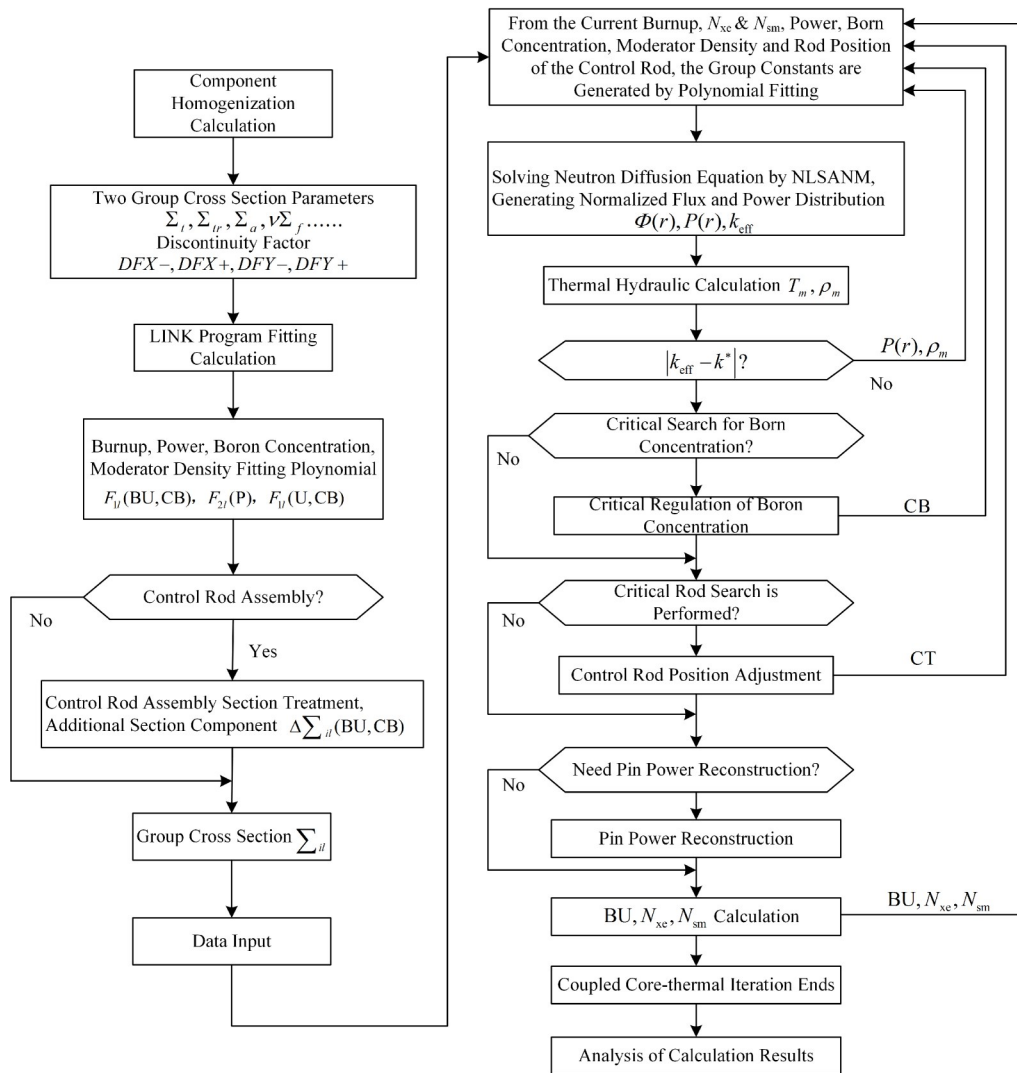


图5 堆芯临界燃耗计算基本流程
Fig.5 The flow chart of criticality calculations with core burnup

3 计算验证及结果分析

3.1 燃料组件计算

采用 SimFA 程序建立热态零功率状态下 (566 K) 计算模型卡,将硼浓度设定为 975×10^{-5} ,计算富集度分别为 1.6%、2.4% 与 3.1%,含不同数量可

3.2 堆芯临界计算

采用堆芯程序 SimOR 建立三维稳态堆芯模型,

燃毒物棒下,组件 k_{inf} 的变化情况,结果如表 5 所示;并与国际上 nTRACER、McCARD 程序参考值进行比对^[5],结果表明:与两组参考值计较,其计算误差 $\Delta\rho$ 均在 0.005 内,满足计算精度要求,同时验证了组件模型计算的正确性。

选择热态零功率状态下,控制棒全部提出,计算热态零功率临界硼浓度,其结果如表 6 所示;同时计算控

表5 组件计算k-inf
Table 5 calculation of k-inf for assembly problems.

富集度 Enrichment / %	毒物棒数量 No.BA rods	nTRACER	McCARD	计算值 Calculated	$\Delta\rho_1 / 10^{-5}$	$\Delta\rho_2 / 10^{-5}$
1.6	0	0.993 40	0.994 83	0.991 47	-193	-336
2.4	0	1.136 96	1.137 51	1.135 19	-177	-232
	12	1.013 18	1.014 32	1.016 10	292	178
	16	0.974 54	0.975 97	0.978 74	420	277
3.1	0	1.219 71	1.219 71	1.216 26	-345	-345
	6	1.162 73	1.163 13	1.162 02	-71	-111
	15	1.078 35	1.078 95	1.080 52	217	157
	16	1.063 40	1.064 16	1.066 16	276	200
	20	1.027 69	1.028 86	1.031 60	391	274

制棒D插入堆芯、控制棒C&D插入堆芯等4种状态下,临界硼浓度的变化情况;并与nTRACER、OpenMC基准参考解比对^[6-8],结果表明:与基准

参考值计较,其计算误差均在 30×10^{-6} 内,满足临界硼浓度计算精度要求,同时初步验证了三维稳态堆芯模型的建立以及控制棒计算模型的正确性。

表6 热态零功率临界计算
Table 6 critical calculation of thermal zero power

算例 Case	硼浓度(测量值) Measured CBC / 10^{-6}	k_{eff}		硼浓度(计算值) Calculated CBC / 10^{-6}	误差Error / 10^{-6}
		nTRACER	OpenMC		
All Rods Out (ARO)	975	0.999 89 (-11)	0.999 20 (-80)	980	5
D in	902	1.001 47 (147)	1.008 00 (80)	921	19
C, D in	810	1.000 96 (96)	1.000 23 (23)	830	20
A, B, C, D in	686	0.999 48 (-52)	0.998 84 (-116)	698	12
A, B, C, D, SE, SD, SC in	508	0.998 20 (-180)	0.997 25 (-275)	532	24

3.3 堆芯燃耗计算

堆芯的临界燃耗分析主要是研究临界硼浓度随燃耗的变化情况,在堆芯运行初期,可燃毒物组件同燃料组件已装载堆芯,除了调节控制棒对堆芯控制外,就是调节堆芯硼浓度变化,随着反应堆燃耗的加深,需要调节主回路的硼浓度来控制反应性,但通常采用棒控与化控联合来控制堆芯反应性。图6给出BEAVRS2.0基准题堆芯临界硼浓度随燃耗的变化情况,其中包含100%功率运行水平下及实际运行功率历史两条曲线^[9],主要差异在于燃耗初期、热态零功率到热态满功率的过程变化。可以看出在燃耗初期,硼浓度有一个小幅度的上升趋势,随后达到又平稳状态,主要是初期可燃毒物的消耗与裂变产物的积累所致,随燃耗的加深,临界硼浓度也逐渐减少。图7出BEAVRS2.0基准题测量相对功率随燃耗地变化情况。

BEAVRS2.0基准题提供了用于热态零功率(Hot Zero Power, HZP)物理测试的反应堆数据、硼

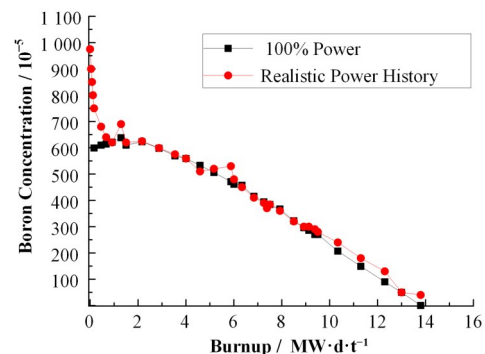


图6 BEAVRS2.0 基准题硼降曲线
Fig.6 Critical boron concentration of BEAVRS2.0 benchmark

参数曲线以及组件的通量分布^[10]。采用轻水堆三维稳态堆芯节块计算程序SimOR,建立三维堆芯燃耗计算模型,选取热态满功率、75%功率运行工况下,对堆芯进行临界燃耗分析。

堆芯计算数据如表7所示,图8给出给出了堆芯临界硼浓度随燃耗地变化情况,同时将计算结果与

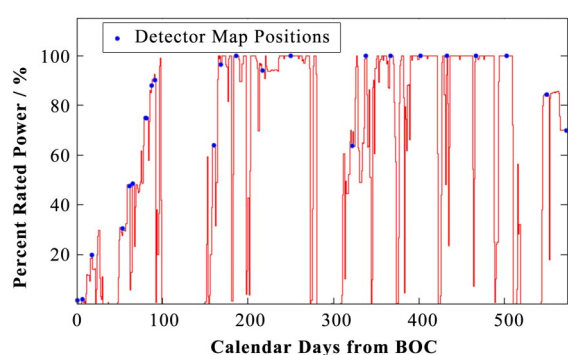


图7 BEAVRS2.0 基准题运行功率曲线
Fig.7 Operating power curve of BEAVRS2.0 benchmark

nTRACER 参考值进行比对,结果表明:100%、70% 功率水平运行,随着燃耗加深,硼浓度计算误差均在 50×10^{-6} 范围内变化,其计算值与基准参考解吻合很好,满足临界燃耗硼浓度计算精度要求,验证了模型建立的正确性与程序计算的精准性,可以应用于核燃料管理及堆芯物理建模仿真研究。

表7 不同功率水平下堆芯临界硼浓度随燃耗变化情况
Table 7 Comparisons of critical boron concentration with core burnup calculation at different power levels

燃耗 Burnup / $\text{MWd} \cdot \text{t}^{-1}$	硼浓度(测量值) Measured CBC / 10^{-5}	nTRACER		Calculated		Error1	Error2
		100%	75%	100%	75%	100%	75%
170	599	606	646	601	624	-5	-22
453	610	592	637	604	628	12	-9
659	614	596	642	605	629	9	-13
921	621	603	648	604	630	1	-18
1 296	638	609	653	602	628	-7	-25
1 499	610	610	654	599	626	-11	-28
2 157	623	604	646	586	613	-18	-33
2 898	598	582	624	567	594	-15	-30
3 564	569	558	600	546	569	-12	-31
3 999	559	542	583	527	551	-15	-32
4 580	533	517	558	498	527	-19	-31
5 159	506	490	531	466	503	-24	-28
5 874	471	455	496	429	464	-26	-32
5 998	461	448	490	423	457	-25	-33
6 337	457	431	472	406	439	-25	-33
6 862	415	402	444	380	411	-22	-33
7 274	394	379	421	358	389	-21	-32
7 390	384	372	415	351	383	-21	-32
7 510	384	365	408	344	376	-21	-32
7 930	367	341	383	322	354	-19	-29
8 490	322	307	350	291	322	-16	-28
8 941	296	279	322	268	299	-11	-23
9 148	286	266	309	256	288	-10	-21
9 370	270	252	295	242	274	-10	-21
9 501	270	243	287	235	267	-8	-20
10 338	207	188	232	187	219	-1	-13
11 293	149	123	167	130	162	7	-5
12 305	72	52	96	68	101	16	5

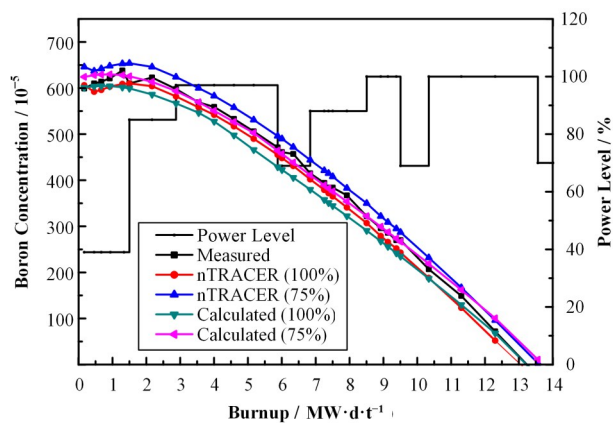


图8 堆芯临界硼浓度随燃耗变化情况
Fig.8 Boron let-down curves with core burnup

4 结语

针对当前发布的 BEAVRS2.0 基准题,对堆芯进行组件均匀化计算,截面拟合处理,采用先进节块法(NLSANM)应用于求解中子扩散方程,建立三维堆芯节块程序 SimOR 仿真计算模型,选取冷、热态、不同功率台阶运行工况下,进行燃料组件均匀化计算、堆芯临界计算,并建立堆芯临界燃耗分析模型,得到堆芯临界燃耗曲线,并与 BEAVRS2.0 基准测量解、nTRACER 等程序参考解比对,其计算结果吻合很好,验证了模型建立的正确性与程序计算的精准性,可以应用于核燃料管理及堆芯物理建模仿真研究,为压水堆燃料管理燃料组件计算、堆芯扩散-燃耗计算提供数据依据及方案参考。

参考文献

- Horelik N, Herman B, Ellis M, *et al.* Benchmark for evaluation and validation of reactor simulation (BEAVRS) [R]. Version 2.0.1. Massachusetts Institute of Technology: MIT Computational Reactor Physics Group, 2017.
- 谢明亮, 于雷, 陈玉清. AP1000 核反应堆控制棒价值特性的 MC 模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2016, **37**(3): 121–125. DOI: 10.11809/scbgxb2016.03.029.
XIE Mingliang, YU Lei, CHEN Yuqing. Analysis of control rod worth features of MC simulation in AP1000 reactor[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, **37**(3): 121 – 125. DOI: 10.11809/scbgxb2016.03.029.
- 谢明亮, 陈玉清, 于雷, 等. 基于 WIMS 格式多群核数据制作过程的优化分析[J]. 核技术, 2015, **38**(11): 110502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110502.
XIE Mingliang, CHEN Yuqing, YU Lei, *et al.* Optimization analysis of the production process based on WIMS format multigroup nuclear data[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(11): 110502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110502.
- 廖承奎, 谢仲生. 非线性迭代半解析节块方法在压水堆燃料管理计算中的应用[J]. 核科学与工程, 2003, **23**(1): 14–19. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2003.01.003.
LIAO Chengkui, XIE Zhongsheng. Application of nonlinear iteration semi-analytical nodal method in the PER fuel management calculation[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2003, **23**(1): 14 – 19. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2003.01.003.
- Min Ryu, Yeon Sang Jung, Hyun Ho Cho, *et al.* Solution of the BEAVRS benchmark using the nTRACER direct whole core calculation code[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2015, **52**: 7–8, 961–969. DOI: 10.1080/00223131.2015.1038664.
- Wang Z Y, Wu B, Hao L J, *et al.* Validation of SuperMC with BEAVRS benchmark at hot zero power condition[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **111**: 709 – 714. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.09.045.
- Wang K, Liu S C, Li Z G, *et al.* Analysis of BEAVRS two-cycle benchmark using RMC based on full core detailed model[J]. Progress in Nuclear Energy, 2017, **98**: 301–312. DOI: 10.1016/j.pnucene.2017.04.009.
- Liu S C, Liang J G, Wu Q, *et al.* BEAVRS full core burnup calculation in hot full power condition by RMC code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **101**: 434–446.
- Li Z, Cao L Z, Wu H C, *et al.* Sensitivity analysis for the weighting factor in the least-square method for the PWR on-line power-distribution monitoring[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **109**: 675 – 683. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.06.008.
- Jaakko Leppänen, Riku Mattila. Validation of the Serpent-ARES code sequence using the MIT BEAVRS benchmark – HFP conditions and fuel cycle 1 simulations[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, **96**: 324–331. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.02.014.