

超级均匀化方法用于球床氟盐冷却高温堆扩散计算

戴明^{1,3} 朱贵凤^{1,2} 戴叶^{1,2} 邹杨^{1,2} 余笑寒^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

3 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 球床氟盐冷却高温堆的控制棒位于侧反射层内,存在无裂变中子源且受堆芯泄漏谱强烈影响的强吸收体区域扩散计算难题。超级均匀化方法(Super Homogenization, SPH)被用于对氟盐球床堆侧反射层中控制棒区域的强吸收体进行等效均匀化处理,同时堆芯除控制棒区域外采用谱修正方法(Spectra Modification, SM),将运输计算的结果作为基准进行验算。结果表明,SM-SPH模型能有效地计算球床氟盐冷却高温堆反射层控制棒价值及通量分布,并且较常规的SPH方法能更好地处理棒间干涉效应。

关键词 球床氟盐冷却高温堆,控制棒,超级均匀化方法,强吸收体

中图分类号 TL329

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.090604

Super homogenization method applied in diffusion calculation for pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactors

DAI Ming^{1,3} ZHU Guifeng^{1,2} DAI Ye^{1,2} ZOU Yang^{1,2} YU Xiaohan^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: The control rods of pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (PB-FHR) are located in the side reflector. Neutron diffusion calculation in those control rods has difficulties of no fission source in the control rod region and strong effect from the core leakage spectrum. **Purpose:** This study aims to apply super homogenization (SPH) method in diffusion calculation for PB-FHR. **Methods:** SPH method is applied in the diffusion calculation for the strong absorber in control rod region located in the reflector area of the PB-FHR, through which the local area of control region is homogenized. The spectra of different places of the reactor core except the control rod region are calculated to modify its cross sections. SPH factors calculation is accomplished by an iteration procedure between SPH and spectra modification (SM). **Results:** Reactivity worth of the control rod and neutron flux distribution are calculated accurately. **Conclusion:** Compared with the fine mesh transport reference solution, the verification results demonstrates that the method proposed can accurately model the control rod including the reactivity worth and flux distribution, and it is more suitable for the situation with interference effect between different control rods compared with regular SPH method.

Key words PB-FHR, Control rod, SPH, Strong absorber

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010200)、中国科学院前沿科学重点研究项目(No.QYZDY-SSW-JSC016)资助

第一作者:戴明,男,1988年出生,2011年毕业于中南大学,现为博士研究生,研究领域为反应堆中子物理

通信作者:余笑寒, E-mail: yuxiaohan@sinap.ac.cn

收稿日期:2017-03-14, 修回日期:2017-05-27

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010200), Frontier Science Key Program of Chinese Academy of Sciences (No.QYZDY-SSW-JSC016)

First author: DAI Ming, male, born in 1988, graduated from Central South University in 2011, doctoral student, focusing on nuclear reactor physics

Corresponding author: YU Xiaohan, E-mail: yuxiaohan@sinap.ac.cn

Received date: 2017-03-14, accepted date: 2017-05-27

球床氟盐冷却高温堆(Pebble-Bed Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactors, PB-FHR)^[1-4]的控制棒位于侧反射层中, 强吸收体吸收截面远大于周围石墨介质, 使得吸收体边界出现通量畸变, 扩散近似失效。同时受堆芯泄漏谱影响, 使得球床氟盐冷却高温堆的全堆扩散计算需要特别处理反射层中的强吸收体。高温气冷堆中同样存在反射层中控制棒计算问题, 为了解决这个问题, 大致有三种方法: 1) 使用离散纵坐标方法(又称为 S_N 方法)直接精细建模, 进行传统的体积通量权重(Volume-Flux weighted Method, VFM)^[5]; 2) 采用等效截面方法^[6]; 3) 应用不连续因子局部均匀化强吸收体区域^[7]。体积通量权重方法及等效截面方法并不能很好地保证强吸收体区域的反应率守恒及通量分布一致, 而不连续因子方法需要使用支持不连续因子的扩散程序, 并且需要扩散程序支持径向非零起点的扇形几何模型。本文利用同样在压水堆中成功使用的另一种等效均匀化方法, 即超级均匀化方法(Super Homogenization, SPH)^[8], 结合谱修正方法(Spectra Modification, SM)^[9-10]来处理 PB-FHR 中扩散计算

中的强吸收体。

1 超级均匀化的需求

如图 1 所示, 反应堆模型的侧反射层中均匀布置有 16 根控制棒, 控制棒插入形成强吸收体区域, 控制棒拔出后为有一定中子吸收能力的熔盐区域。各种控制棒组合状态都可以由强吸收体区域和熔盐区域排列组合构成。球床堆全堆计算为了考虑谱区间相互泄漏的影响, 通常采用谱修正方法, 即使用全堆扩散计算的泄漏率来修正截面, 显然谱修正方法不适用于强吸收体区。为此把强吸收体区域划分为超级均匀化区域, 并使用 SPH 因子修正相应均匀化截面。为了计算 SPH 区域的 SPH 因子, 选取包括强吸收体区域或熔盐区域的 1/32 扇形区域作为组件模型, 并对由图 1(b)所示的 SPH 区域进行等效均匀化处理, 计算时组件模型上下边界为反射边界条件。全堆扩散计算时对于 SPH 区域采用 SPH 因子修正的少群常数, 其他区域采用谱修正方法处理。

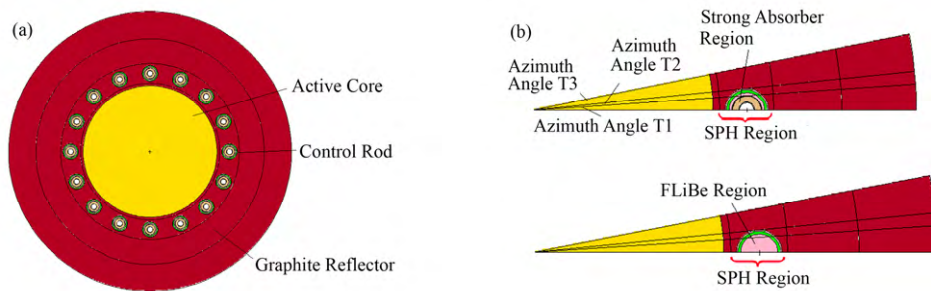


图 1 PB-FHR 带控制棒堆芯模型及组件模型

(a) 非均匀反应堆模型, (b) 两类 1/32 扇形堆芯组件模型

Fig.1 Reactor model of PB-FHR with control rods and its assemblies.

(a) Heterogeneous reactor model, (b) Two kinds of 1/32 reactor core assemblies

2 SM-SPH 方法原理

SM-SPH 方法基本原理即将谱修正方法与 SPH 方法两者耦合。

谱修正方法即由堆芯扩散计算得到的谱区泄漏率计算谱区曲率, 将该曲率反馈到谱区能谱计算, 从而修正谱区截面。修正的谱区截面又用于堆芯扩散计算, 所以谱修正过程是能谱计算与堆芯扩散计算之间迭代计算过程。

多群扩散方程可写为:

$$-D_g \nabla^2 \phi_g(r) + \Sigma_{rg} \phi_g(r) = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \Sigma_{g \leftarrow h} \phi_h(r) + \frac{\chi_g}{k_{\text{eff}}} \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_{fh} \phi_h(r) \quad (1)$$

把扩散方程在指定区域体积内空间积分, 有:

$$L_g + \Sigma_{rg} \Phi_g = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \Sigma_{g \leftarrow h} \Phi_h + \frac{\chi_g}{k_{\text{eff}}} \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_{fh} \Phi_h \quad (2)$$

其中:

$$\Phi = \int_V \phi dr \quad (3)$$

$$L_g = \int_S J \cdot dS = \int_V \nabla \cdot J dr = \int_V -D_g \nabla^2 \phi_g dr \quad (4)$$

令 $L_g = D_g B_g^2 \Phi$ ，定义群相关曲率：

$$B_g^2 = \frac{L_g}{D_g \Phi} \quad (5)$$

把堆芯划分不同谱区，对谱区体积进行空间积分 (K 、 H 为少群， n 为第 n 次迭代)，可得到少群曲率 $B_{K,n}^2$ ：

$$D_{K,n} B_{K,n}^2 \Phi_{K,n} + \sum_{rK,n} \Phi_{K,n} = \sum_{\substack{H=1 \\ H \neq K}}^M \sum_{K \leftarrow H,n} \Phi_{H,n} + \frac{\chi_K}{k_{\text{eff},n}} \sum_{H=1}^M \nu \Sigma_{fH,n} \Phi_{H,n} \quad (6)$$

谱区多群能谱计算方程为：

$$(D_g B_g^2 + \Sigma_{rg}) \Phi_g = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \sum_{g \leftarrow h} \Phi_h + \frac{\chi_g}{k_{\text{eff}}} \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_{fh} \Phi_h \quad (7)$$

对式(7)进行并群：

$$\sum_{g \in K} D_g B_g^2 \Phi_g + \sum_{rK,n+1} \Phi_K = \sum_{\substack{H=1 \\ H \neq K}}^M \sum_{K \leftarrow H,n+1} \Phi_H + \frac{\chi_K}{k_{\text{eff}}} \sum_{H=1}^M \nu \Sigma_{fH,n+1} \Phi_H \quad (8)$$

要使能谱计算的式(8)与全堆扩散计算得到的谱区中子平衡方程式(6)等价，最直接的方式是令

$B_g^2 = B_{K,n}^2, g \in K$ ，这样式(8)可写为：

$$D_{K,n+1} B_{K,n}^2 \Phi_K + \sum_{rK,n+1} \Phi_K = \sum_{\substack{H=1 \\ H \neq K}}^M \sum_{K \leftarrow H,n+1} \Phi_H + \frac{\chi_K}{k_{\text{eff}}} \sum_{H=1}^M \nu \Sigma_{fH,n+1} \Phi_H \quad (9)$$

式(9)表示由 $B_{K,n}^2$ 求解下次全堆扩散计算的常

数 ($D_{K,n+1}, \sum_{rK,n+1}, \sum_{K \leftarrow H,n+1}, \nu \Sigma_{fH,n+1}$)。式(9)得到常数后又进行全堆扩散计算，即在全堆扩散计算与谱区能谱计算之间进行迭代。当收敛时，式(6)和(9)的所有反应率 (包括泄漏率) 相等，即多群能谱计算时完全考虑了全堆少群计算时各谱区间的泄漏影响。由于是采用反馈泄漏率来计算能谱，强吸收体的泄漏率在扩散计算中计算不准，因此谱修正方法不适用于计算强吸收体。

超级均匀化的思想是通过引入 SPH 因子实现均匀化/并群前后反应率守恒。对于传统的体积通量权重均匀化，有：

$$\bar{\Sigma}_{m,k} = \frac{\sum_{g \in M_k} \sum_{i \in C_m} V_i \Sigma_{i,g} \phi_{i,g}}{\sum_{g \in M_k} \sum_{i \in C_m} V_i \phi_{i,g}} \quad (10)$$

式中： $\bar{\Sigma}$ 为均匀化截面； Σ 为多群宏观截面。

通常这种体积通量权重均匀化得到截面并不能完全保证反应率守恒，为此，引入 SPH 修正因子 μ ，并定义等效截面：

$$\tilde{\Sigma}_{m,k} = \mu_{m,k} \bar{\Sigma}_{m,k} \quad (11)$$

为了保证反应率守恒，均匀化的积分通量与均匀化前存在如下关系：

$$\sum_{g \in M_k} \sum_{i \in C_m} V_i \tilde{\phi}_{i,g} = \frac{1}{\mu_{m,k}} \sum_{g \in M_k} \sum_{i \in C_m} V_i \phi_{i,g} \quad (12)$$

这样，可以通过迭代计算求出 SPH 因子。值得注意的是，中子通量求解对象为特征值方程，在求解 SPH 因子时，积分通量需要进行归一化处理。常用的归一化方法为使得非均匀和均匀计算的平均通量相等，而本文 SM-SPH 模型只对控制棒的强吸收体附近区域进行 SPH 修正，归一化方法选择为功率归一化，即输运参考解与扩散解都归一到指定功率。

SPH 方法的应用需要知道确切的边界条件，为此谱修正方法能首先给它提供一个近似的边界条件。谱修正需要堆芯计算的净中子流信息修正截面，SPH 修正能确保强收体附近区域反应率守恒，特别是泄漏率，为谱修正区域提供相对正确的净中子流信息。SPH 区域与谱修正区域相互影响，可以通过迭代逼近参考输运解。

3 SM-SPH 方法物理实现过程

SM-SPH 方法的组件计算即只对部分区域划分为 SPH 区 (如控制棒区和附近反射层)，采用谱修正方法处理其他区域，通过迭代得到 SPH 区的 SPH 因子。SPH 因子计算流程如图 2 所示。

1) 燃料球栅元计算得到球床燃料区考虑了双重非均匀性的有效均匀化截面，该截面用于如图 1 所示的组件 S_N 输运计算，组件 S_N 输运计算作为输运参考解，提供 SPH 区域的通量及体积通量权重均匀化截面，用于 SPH 因子计算与截面修正。

2) 假设 SPH 因子, 并采用式(11)修正相应截面。

3) 对除 SPH 区域进行谱修正计算, 即在能谱计算与扩散计算进行迭代计算, 使得谱区能谱计算能考虑谱区间泄漏影响。

4) 由扩散解与输运参考解采用式(12)计算 SPH 因子, 并判断 SPH 因子是否收敛, 如果不收敛则返回到 2)过程。

上述计算过程的双迭代部分只进行组件扩散计算, 所以整个 SPH 因子计算所需的时间可接受。

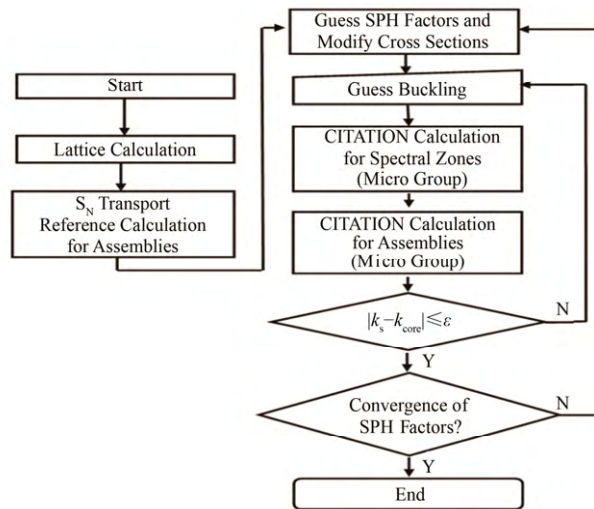


图 2 SM-SPH 方法的 SPH 因子计算流程
Fig.2 Flow chart for the SPH factors calculation.

4 组件 S_N 输运参考解验证

本文使用二维 S_N 程序 TWOTRAN 对 TMSR-SF1 (Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel 1)的控制棒进行精细建模计算, 并与 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)程序进行对比验证。TMSR-SF1 的控制棒模型为同心圆柱形, 最内部为空腔, 内外套管为哈氏合金, 中间为含 B 强吸收体, 控制棒通道套管为 C/C 复合材料。TMSR-SF1 相关参数如表 1 所示。

TWOTRAN 对于控制棒区域构建如图 3 所示精细网格模型, 进行 107 群 P1S8 的 S_N 方法求解。其燃料区截面来源于 SRAC 栅元计算。为了验证这种建模方式计算的准确性, 采用 MCNP 进行了验证, 包括控制棒价值及通量分布。MCNP 计算时采用以 ENDF/B-VII 库为基础加工到相应温度下的连续能量截面库, 有效中子代数为 200, 每代粒子数为 10 万。均匀化宏观截面的计算采用文献[11]公式。快热分界能设为 1.86 eV, 使用 F4 卡和 FM 卡统计相关反应率来计算四因子。使用 F1 卡统计界面进出中子流, 得到泄漏率, 然后按定义求得不泄漏概率。

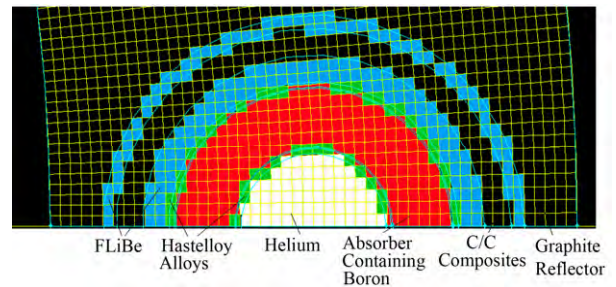


图 3 TWOTRAN 计算时控制区域精细网格建模
Fig.3 Fine meshes of control rod region in TWOTRAN.

表 2 给出了组件计算时燃料区截面及四因子对比。由表 2 可知, 所有结果两者都能符合。TWOTRAN 计算的组件控制棒价值为 0.178 17, 与 MCNP 结果(0.180 12)相比偏低 1.06%, 这部分偏差的引入与燃料区的不泄漏概率 P_{NL} 有关。控制棒插入时, 会增加堆芯泄漏率, 不泄漏概率由 0.82 变为 0.72。SRAC 计算的燃料吸收截面偏大, 在控制棒插入时 P_{NL} 增加的幅度会增大, 有棒下的 P_{NL} 偏大 0.48%, 明显高于无棒时 0.14%, 这是造成 TWOTRAN 计算价值偏大的主要原因。

表 1 TMSR-SF1 堆芯核设计参数
Table 1 Parameters of TMSR-SF1.

燃料球 Fuel pebble	直径 Diameter / cm	6.0
	燃料区域直径 Diameter of fuel region / cm	5.0
	石墨基体和石墨球壳密度 Density of graphite matrix and pebble shell / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.73
	^{235}U 富含度 ^{235}U enrichment / %	17.0
	燃料颗粒半径 Fuel kernel radius / mm	0.25
	UO_2 密度 Density of UO_2 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	10.4
	包覆层材料 (从内到外) Material of layers (inside-out)	PrC/PyC/SiC/PyC
	包覆层厚度 Thickness of layers / μm	90/40/35/40
	包覆层密度 Density of layers / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.1/1.90/3.18/1.90
冷却剂 Coolant	类型 Material	2LiF-BeF ₂
	密度 Density	ρ ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)=2.28-4.884 $\times 10^{-4} T$ ($^{\circ}\text{C}$)
活性区 Active core	活性区圆柱直径 Diameter of active core / cm	135.0
	燃料球在堆芯中的堆积因子 Packing factor of pebbles / %	60
反射层 Reflector	反射层石墨密度 Density of reflector graphite / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.87
	侧反射层厚度 Thickness of reflector / cm	75.0
控制棒通道 Control rod channel	通道结构 Channel size	Inside diameter 13 cm Outside diameter 15 cm
	套管厚度 Sleeve thickness / cm	1
	套管材料 Sleeve material	C/C composite
	材料密度 Material density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.9
	吸收体段从中心向外厚度 Absorber thickness (inside-out) / cm	2.75/0.2/0.05/2.25/0.05/0.2
	B_4C 密度, ^{10}B 丰度 B_4C density, ^{10}B abundance	>1.7 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 19.9%

表 2 组件计算时燃料区截面及四因子对比
Table 2 Comparison of cross sections and four factors of the active core region.

参数 Parameters	控制棒拔出 Control rod withdrawn			控制棒插入 Control rod inserted		
	MCNP	TWOTRAN	偏差 Deviation	MCNP	TWOTRAN	偏差 Deviation
k_{eff}	1.164 74 \pm 0.000 17	1.169 33	0.39%	0.984 62 \pm 0.000 20	0.991 19	0.67%
单群吸收截面 One-group absorption cross section / cm^{-1}	2.53×10^{-3}	2.55×10^{-3}	0.77%	2.29×10^{-3}	2.31×10^{-3}	1.13%
单群裂变截面 One-group fission cross section / cm^{-1}	1.46×10^{-3}	1.48×10^{-3}	0.92%	1.28×10^{-3}	1.29×10^{-3}	1.28%
单群产生截面 One-group production cross section / cm^{-1}	3.57×10^{-3}	3.60×10^{-3}	0.93%	3.11×10^{-3}	3.15×10^{-3}	1.24%
热通量比例 Thermal flux ratio	0.399	0.402	0.84%	0.352	0.356	1.23%
η	2.012 90	—	—	2.012 08	—	—
f	0.830 47	—	—	0.829 73	—	—
p	0.777 69	0.777 84	0.02%	0.734 28	0.735 12	0.11%
ε	1.095 36	1.094 21	-0.11%	1.120 88	1.119 13	-0.16%
P_{NL}	0.818 14	0.819 28	0.14%	0.716 61	0.720 02	0.48%
ηf	1.671 66	1.677 91	0.37%	1.669 49	1.674 14	0.28%
四因子公式 k_{eff} Four-factor formula k_{eff}	1.165 03	1.170 02	0.43%	0.984 66	0.991 68	0.71%

控制棒的插入会压低反射层中的热群通量, 同等功率下, 增加堆芯中心通量, 如图 4 所示, 图 4 中 T1-T3 为图 1 所示不同方位角方向。由图 4 可知, TWOTRAN 计算的通量分布在控制棒拔出和插入时不同方位角方向都符合良好, 进一步说明本文所采用的 SRAC-TWOTRAN 对控制棒区域精细建模的准确性。控制棒的插入使得热中子泄漏由净入变为净出, 即增加了燃料区泄漏, 形象地反映了表 2 的不泄漏概率计算结果。控制棒拔出时, 控制棒区为熔盐填充, 由于熔盐对 neutron 吸收, 使得 T1 方位角方向在棒孔位置通量变低。

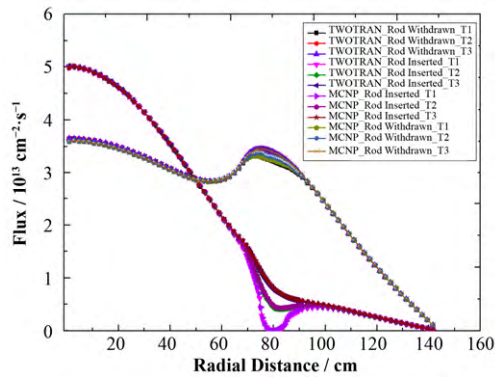


图 4 组件计算在不同方向上的径向热群通量分布
Fig.4 Radial thermal flux distributions in different azimuths.

5 SM-SPH 方法在全堆模型计算中的应用

组件计算模型相当于控制棒全插, 除了组件计算, 本节还使用 SM-SPH 方法用于部分控制棒插入的全堆模型计算, 并与 S_N 输运参考解对比。首先进行三类组件计算, 再进行二维堆芯 (1/2 堆芯) 下单根控制棒计算及不同间距下的三根控制棒模型计算, 主要是为了更好地验证棒间干涉效应。为了节省 S_N 输运参考解的计算时间, 1/2 堆芯建模时省略掉不插棒的棒孔结构。同时, 也采用常规的 SPH 方法与之对比。

5.1 部分控制棒插入全堆模型介绍

部分控制棒插入全堆模型如图 5 所示的 1/2 堆芯, 无棒的棒孔全部省略, 下边界为反射边界条件。单根控制棒模型在 1/2 堆芯中即在边界上构建半根控制棒。三根控制棒模型又根据 1/2 堆芯中两棒的不同棒距分为 7 个模型, 即 1/2 堆芯中, 半根控制棒 (棒 1) 固定不动, 所构建的完整控制棒 (棒 2) 依次移动到如图 5 所示的 7 个完整棒位 (Rod Position, RP) 中, 并编号为 “三棒堆芯 1-7”。

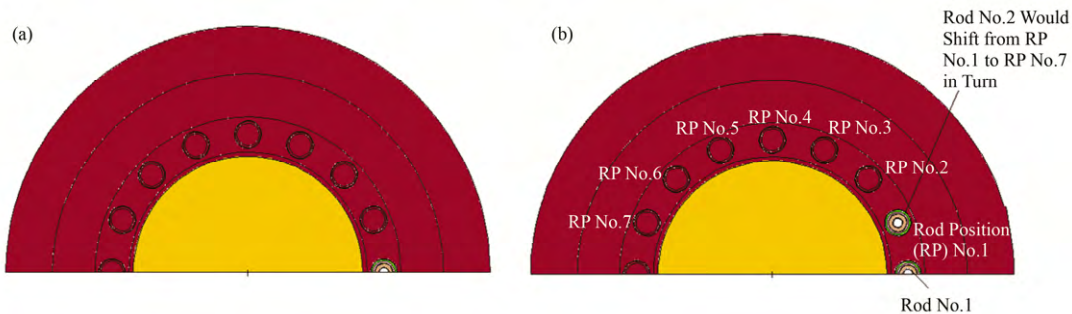


图 5 部分控制棒插入全堆模型介绍 (a) 单根控制棒模型, (b) 三根控制棒模型
Fig.5 Full core models with partial control rods inserted. (a) Core with one rod, (b) Core with three rods

5.2 三类组件计算

为了准确计算部分控制棒插入的 1/2 堆芯模型, 划分三类组件 (图 1 所示的 1/32 堆芯): 无棒孔组件; 控制棒拔出组件; 控制棒插入组件。其 CITATION 模型如图 6 所示的 Theta-R 模型, 水平方向为 Theta, 垂直方向为 R, 并给出粗网间距, 带灰色的每个区域对应于 CITATION 中的 Zone。组件价值计算结果如表 3 所示。 k_{eff} 计算最大偏差为 0.06%。SPH 方法的价值偏差为 0.236%, SM-SPH 计算的价值偏差为 0.348%, 说明 SM-SPH 方法与 SPH 方法

都能较好地反应出控制棒价值。三类组件使用不同方法得到的径向热群通量分布如图 7 所示。SM-SPH 模型与 SPH 模型所计算的热群中子径向通量分布都与输运参考符合良好, 包括控制棒强吸收体附近的方位角方向的通量分布。表 4 给出了体积通量权重方法用于控制棒插入组件得到的 k_{eff} 、强吸收体附近区域吸收反应率及泄漏率结果, 并与参考解进行了对比。VFM 方法得到的 k_{eff} 约偏大 1%, 吸收反应率偏低 4.50%, 泄漏率偏低达 12.42%, 说明使用 VFM 处理强吸收体时并不能保证反应率守恒。

SPH 模型和 SM-SPH 模型由于 SPH 因子的引入，只要 SPH 因子收敛，其相关反应率必然守恒。说明在组件层面上，SPH 模型和 SM-SPH 模型通过引入

SPH 因子确保反应率守恒下都能得到接近参考输运解的结果。

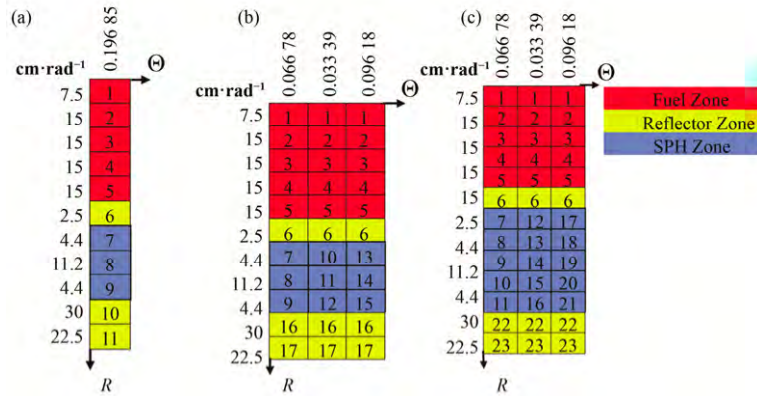


图 6 三类组件 CITATION 模型 (a) 无棒孔组件, (b) 控制棒拔出组件, (c) 控制棒插入组件

Fig.6 CITATION models of three kinds of assemblies.

(a) Assembly without rod hole, (b) Assembly with rod withdrawn, (c) Assembly with rod inserted

表 3 三类组件 k_{eff} 计算结果

Table 3 k_{eff} results of three kinds of assemblies.

	TWOTRAN	SPH	偏差 Deviation / %	SM-SPH	偏差 Deviation / %
无棒孔组件 Assembly without rod hole	1.208 29	1.208 02	-0.022	1.208 29	0.000
控制棒拔出组件 Assembly with rod withdrawn	1.169 33	1.168 95	-0.032	1.169 29	-0.003
控制棒插入组件 Assembly with rod inserted	0.991 19	0.991 23	0.004	0.991 81	0.063
价值 Reactivity worth	17 814	17 772	-0.236	17 748	-0.370

表 4 控制棒插入组件使用体积通量权重方法的结果

Table 4 Results from volume-flux weighted method for assembly with rod inserted.

	k_{eff}	吸收反应率 Absorption reaction rate	泄漏率 Leakage rate
TWOTRAN	0.991 19	3.74×10^{15}	-2.05×10^{15}
VFM	1.000 74	3.57×10^{15}	-1.79×10^{15}
偏差 Deviation / %	0.96	-4.50	-12.42

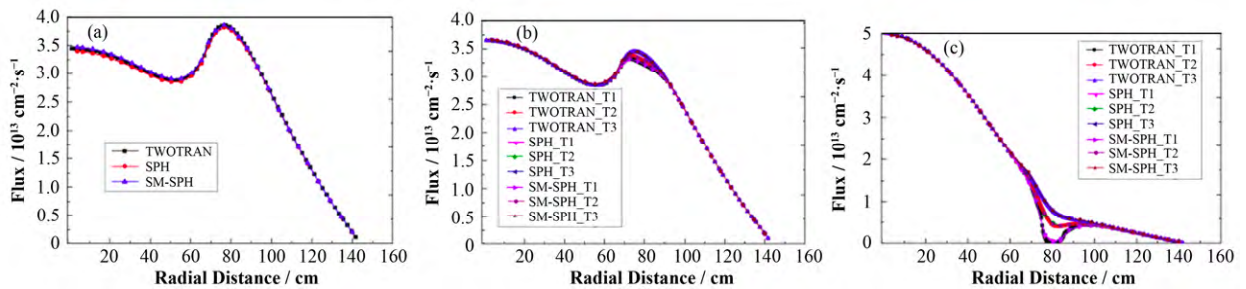


图 7 三类组件径向热群通量分布 (a) 无棒孔组件, (b) 控制棒拔出组件, (c) 控制棒插入组件

Fig.7 Radial thermal flux distributions of three kinds of assemblies.

(a) Assembly without rod hole, (b) Assembly with rod withdrawn, (c) Assembly with rod inserted

5.3 部分控制棒插入全堆模型

对于单棒堆芯模型，其 CITATION 建模如图 8 所示。SPH 模型由上述控制棒拔出或插入组件与无

棒孔组件构成，构成整个 1/2 堆芯。SM-SPH 模型的 SPH 区域的截面来源于组件计算的 SPH 因子修正的截面，而其他区域（包括燃料）采用谱修正计算。单棒下的控制棒价值计算结果如表 5 所示。参

考解的单棒控制棒价值为 1.704×10^{-2} , SM-SPH 及 SPH 模型计算的价值与参考解相差在 4×10^{-4} 以内, 偏差约 2%。其插棒情况下燃料区最大功率密度分布偏差在 1.2% 以内。单棒堆芯模型下径向热群通量分布对比如图 9 所示, 三者符合较好, 与 SPH 模型相比, SM-SPH 模型的通量分布与参考解符合更好。表 6 给出了单棒下强吸收体附近区域 (图 8(a)中的

7-15) 反应率对比。与参考解相比, SM-SPH 及 SPH 模型计算的吸收反应率及泄漏率不再守恒, 原因是单棒堆芯模型与进行 SPH 因子计算时的控制棒插入组件模型明显不同, 但它们的偏差并不大 (最大为 2.60%), 由于 SM-SPH 的泄漏率偏差较 SPH 的更小, 且采用谱修正方法处理燃料区域, 使得 SM-SPH 模型的通量分布与参考解符合更好。

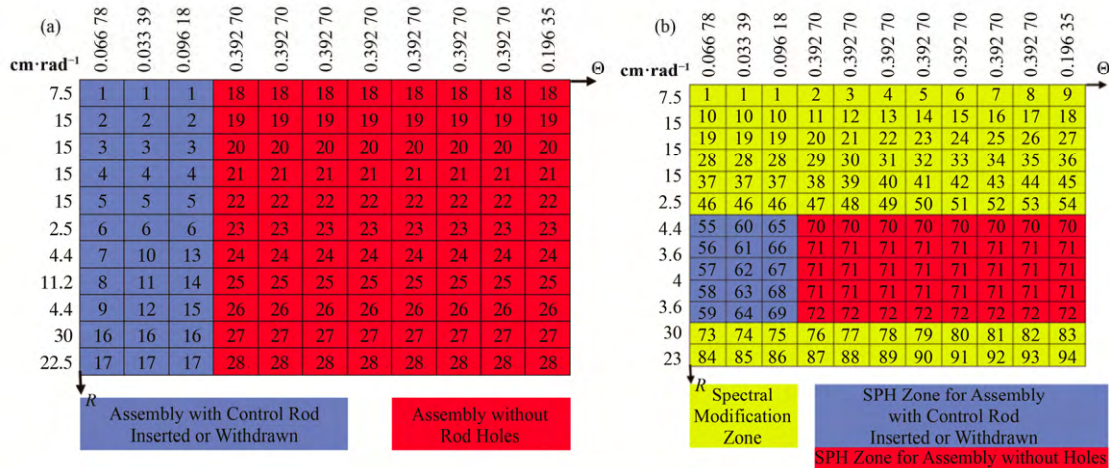


图 8 单棒堆芯 CITATION 建模 (a) SPH 模型, (b) SM-SPH 模型
Fig.8 CITATION models of core with single rod. (a) SPH model, (b) SM-SPH model

表 5 单棒下的控制棒价值计算结果
Table 5 Control rod worth results of core with single rod.

	TWOTRAN	SPH	偏差 Deviation / %	SM-SPH	偏差 Deviation / %
控制棒拔出 Control rod withdrawn	1.188 76	1.188 18	-0.049	1.189 35	0.050
控制棒插入 Control rod inserted	1.205 80	1.205 59	-0.017	1.206 07	0.022
价值 Reactivity worth	1 704	1 741	2.171	1 672	-1.878

表 6 单棒下强吸收体附近区域反应率对比
Table 6 Comparison of reaction rates of strong absorber surrounding regions in core with single rod.

	TWOTRAN	SPH	偏差 Deviation / %	SM-SPH	偏差 Deviation / %
吸收反应率 Absorption reaction rate	5.33×10^{15}	5.30×10^{15}	-0.39	5.19×10^{15}	-2.60
泄漏率 Leakage rate	-3.86×10^{15}	-3.77×10^{15}	-2.30	-3.80×10^{15}	-1.53

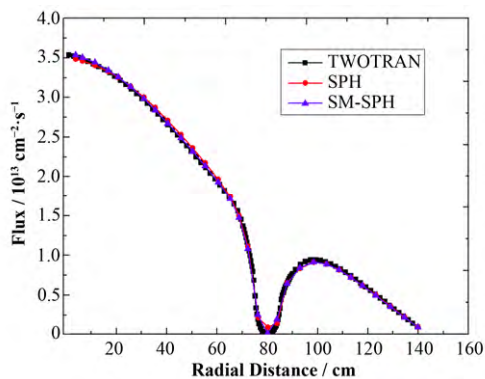


图 9 单棒模型下径向热群通量分布对比
Fig.9 Radial thermal flux distributions of core with single rod.

对于三棒堆芯模型, 其建模与单棒堆芯模型类似。其价值计算结果如表 7 所示。从堆芯 1 到堆芯 7, 三棒的总价值先升后降, 反映出了棒间干涉效应, 堆芯 1 中三根棒紧挨, 这时有最低价值 3.243×10^{-2} , 而对于堆芯 5, 三根控制棒间距很大, 相互之间的干涉影响很小, 达到最大价值 5.741×10^{-2} 。SPH 模型计算结果堆芯 1 价值偏差最大, 达到 6.29%, 而 SM-SPH 模型计算的价值最大偏差为 1.524% (堆芯 4), 明显优于 SPH 模型计算。堆芯 1 下 SPH 模型功率分布最大偏差为 6.09%, 而 SM-SPH 模型功率分布最大偏差为 1.08%。图 10 给出堆芯 1 与堆芯 4 的两根控制棒对应方位角方向上的径向热群通量分

布。对于堆芯 1，SM-SPH 模型较 SPH 模型能更好地符合输运参考解。对于堆芯 4，三棒的棒间距大于热中子扩散长度，相当于上述计算的单棒模型，

SPH 模型与输运参考解会存在一些偏差，而 SM-SPH 模型则与参考解符合良好。

表 7 三棒堆芯模型不同棒间距下控制棒价值计算
Table 7 Control rod worth of cores with their rods.

	TWOTRAN	SPH	偏差 Deviation / %	SM-SPH	偏差 Deviation / %
三棒堆芯 1 Core No.1 with three rods	3 243	3 447	6.29	3 222	-0.65
三棒堆芯 2 Core No.2 with three rods	4 278	4 458	4.21	4 241	-0.86
三棒堆芯 3 Core No.3 with three rods	5 012	5 190	3.55	4 951	-1.22
三棒堆芯 4 Core No.4 with three rods	5 513	5 695	3.30	5 429	-1.52
三棒堆芯 5 Core No.5 with three rods	5 741	5 943	3.52	5 662	-1.38
三棒堆芯 6 Core No.6 with three rods	5 691	5 886	3.43	5 608	-1.46
三棒堆芯 7 Core No.7 with three rods	5 227	5 430	3.88	5 150	-1.47

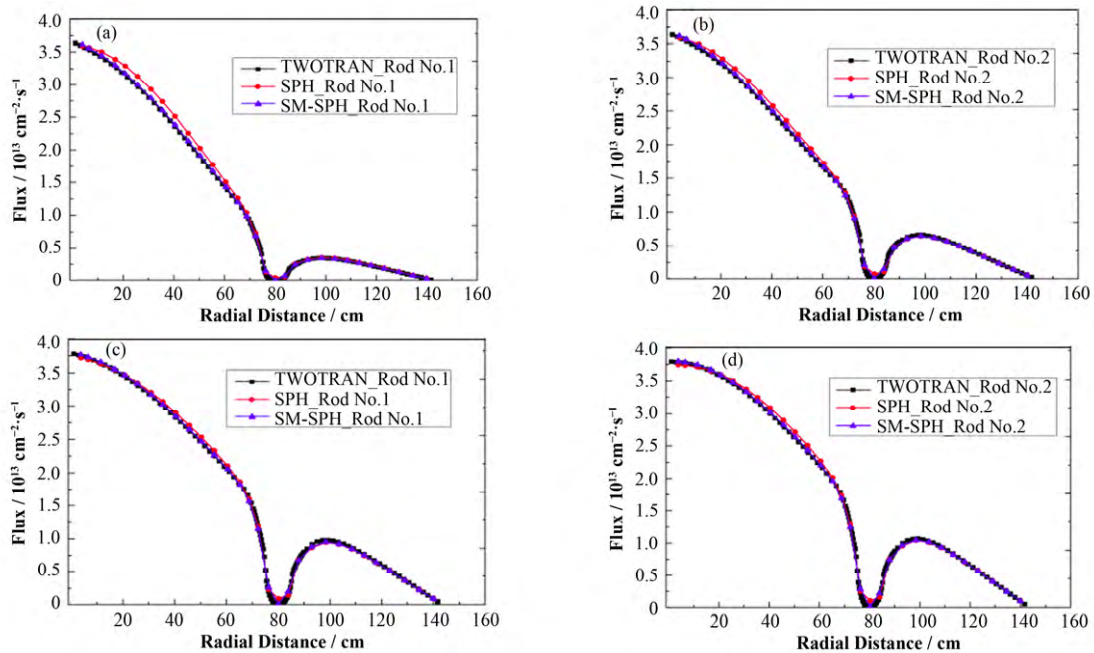


图 10 三棒堆芯 1 (a、b)与三棒堆芯 4 (c、d)的两根控制棒对应方位角方向上的径向热群通量分布
Fig.10 Radial thermal flux distributions of two rods in core 1 (a, b) and core 4 (c, d) with three control rods.

针对三棒堆芯 1，本文给出了强吸收体附近区域的反应率及控制棒所在方位角对应的燃料区相对功率密度分布对比，分别如表 8 和图 11 所示。表 8 中反应率不再守恒，且吸收率相差很大(-27.62%)，但泄漏率偏差不大(3.00%)，这说明由组件计算得到的 SPH 因子并不能保证三棒堆芯 1 下吸收率守恒，但可以一定程度上确保泄漏率偏差不大，这可能是由于泄漏率是区域净中子流，取决于区域边界中子通量密度梯度，把强吸收体区域细分为多个区域且包括附近非强吸收体材料，一定程度上可以保证区域边界中子通量密度分布。对堆芯反应性及通量密

度分布有影响的是强吸收体附近区域的泄漏率，对其吸收率并不需要太关心，甚至可以把反射层中强吸收体区域当黑体材料处理，只要能提供合适的黑体材料的拓展边界系数^[12]。SPH 和 SM-SPH 模型的反应率与参考解的偏差基本相似，图 11 中的 SPH 模型计算的燃料区相对功率密度最大偏差达到了 6.09%，而 SM-SPH 模型的最大偏差为 0.94%，说明在燃料区使用谱修正方法能极大改善控制棒对燃料区的影响。这是因为 SPH 模型中包括燃料的所有区域的截面都来自于组件计算(控制棒全插)结果，而 SM-SPH 模型中只有强吸收体附近区域的截面来

源于组件计算,从而不会明显受制于组件计算时所采用的边界条件,可以通过谱修正方法反馈强吸收

体附近区域的泄漏率来修正谱区截面,从而使得 SM-SPH 模型能更好地处理棒间干涉效应。

表 8 三棒堆芯 1 强吸收体附近区域反应率
Table 8 Comparison of reaction rates of strong absorber surrounding regions in core 1 with three control rods.

	TWOTRAN	SPH	偏差 Deviation / %	SM-SPH	偏差 Deviation / %
吸收反应率 Absorption reaction rate	1.39×10^{16}	1.05×10^{16}	-24.61	1.01×10^{16}	-27.62
泄漏率 Leakage rate	-6.45×10^{15}	-6.72×10^{15}	4.23	-6.64×10^{15}	3.00

1	10	19	28	37
1.138	1.049	0.889	0.683	0.464
1.08%	3.48%	5.22%	5.93%	6.09%
0.56%	0.73%	0.79%	0.94%	0.82%
2	11	20	29	38
1.140	1.057	0.909	0.723	0.536
0.86%	2.58%	3.64%	3.75%	2.52%
0.55%	0.71%	0.75%	0.83%	0.33%

Zone No.
TWOTRAN
(SPH - TWOTRAN) / TWOTRAN
(SM-SPH - TWOTRAN) / TWOTRAN

图 11 三棒堆芯 1 控制棒所在方位角对应的燃料区相对功率密度分布对比
Fig.11 Comparison of relative power densities of fuel zones to which control rods corresponds in azimuth direction in core 1 with three control.

6 结语

本文针对 PB-FHR 中控制棒价值计算难点,研究了 SPH 方法应用于反射层中控制棒价值计算模型,提出 SM-SPH 模型,即把谱修正方法与 SPH 方法相结合,通过迭代方法求解强吸收体区域附近的 SPH 因子。计算表明,该模型能有效地计算控制棒价值及通量分布,并且较常规的 SPH 方法能更好地处理棒间干涉效应。SM-SPH 方法首先通过组件计算得到强吸收体附近区域的经过 SPH 因子修正的截面,然后采用谱修正方法处理其他区域截面,从而可以实现带控制棒的三维堆芯扩散计算。

参考文献

- 1 Forsberg C W, Peterson P F, Kochendarfer R A. Design options for the advanced high-temperature reactor[C]. Proceedings of ICAPP'08, Anaheim, CA, USA, June 8-12, 2008.
- 2 孙建友, 邹杨, 严睿, 等. 球床氟盐冷却高温堆中 ^6Li 摩尔浓度对冷却剂温度反应性系数影响的研究[J]. 核技术, 2014, 37(9): 090605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.090605.
- 3 孙建友, 邹杨, 严睿, 等. PB-FHR 堆芯活性区体积对冷却剂温度反应性系数影响的研究[J]. 核技术, 2014, 37(12): 120603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.

120603.

- SUN Jianyou, ZOU Yang, YAN Rui, *et al.* Study on the influence of core volume of PB-FHR on coolant temperature reactivity coefficient[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37(12): 120603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.120603.
- 4 Zhu G, Zou Y, Xu H, *et al.* Uranium utilization with thorium blanket in pebble bed fluoride salt-cooled high temperature reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 83: 374-386.
- 5 许云林, 经荣清, 王德安. 10 MW 高温气冷堆反应性当量计算[J]. 核动力工程, 1997, 18(6): 500-504.
- XU Yunlin, JING Xingqing, WANG Dean. Reactivity worth calculation for control rods of high temperature gas-cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 18(6): 500-504.
- 6 郭炯, 李富, 王登营. 高温气冷堆控制棒区等效截面方法的改进[J]. 核动力工程, 2010, 32(S2): 128-131.
- GUO Jiong, LI Fu, WANG Dengying. Treatment and improvement of equivalent cross sections in control rod region for high temperature gas-cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 32(S2): 128-131.
- 7 周旭华, 李富, 王登营, 等. 高温气冷堆控制棒区不连续因子的计算与应用[J]. 核动力工程, 2008, 29(6): 1-5.
- ZHOU Xuhua, LI Fu, WANG Dengying, *et al.* Calculation and application of discontinuity factors in control rod region for high temperature gas-cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(6): 1-5.

- 8 Alain Hébert. Applied reactor physics[M]. Ottawa: Presses Internationals Polytechnique, 2009: 247–253.
- 9 Mphahlele R, Ougouag A M, Ivanov K N, *et al.* Spectral zone selection methodology for pebble bed reactors[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, **38**(1): 80–87.
- 10 戴明, 朱贵凤, 戴叶, 等. 基于 CITATION-ORIGEN2 球床堆平衡态计算程序的实现[J]. 原子能科学技术, 2017, **51**(1): 113–119.
DAI Ming, ZHU Guifeng, DAI Ye, *et al.* Burnup calculation for equilibrium cycle of pebble-bed reactor with CITATION-ORIGEN2 codes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, **51**(1): 113–119.
- 11 李满仓, 王侃, 姚栋. 基于连续能量蒙特卡罗方法的均匀化群常数计算[J]. 核科学与工程, 2012, **32**(4): 306–314.
LI Mancang, WANG Kan, YAO Dong. Continuous energy Monte Carlo method based homogenization multi-group constants calculation[J]. Nuclear Science and Engineering, 2012, **32**(4): 306–314.
- 12 Okumura K. COREBN: a core burn-up calculation module for SRAC2006[R]. Ibaraki-ken: Japan Atomic Energy Agency, 2007: 6–7.