

DRAGON&DONJON 程序在 MSR 中堆芯燃耗计算的适用性

赵文博 谢金森 谢 芹 陈珍平 曾文杰 刘紫静 何丽华 于 涛

(南华大学 核科学与技术学院 衡阳 421001)

摘要 DRAGON&DONJON 组件-堆芯“两步法”程序通过合理简化,理论可适用于任何堆芯与工况。使用蒙特卡罗方法 RMC (Reactor Monte Carlo code)、MCNP (Monte Carlo Neutron Particle transport code)程序验证 DRA&DON 程序是否能够承担快/热谱型熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)焚烧 TRU、ThU 燃料燃耗计算。选出熔盐增殖堆(Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)与熔盐钢系元素再循环和嬗变堆(Molten Salt Advanced Reactor Transmuter, MOSART)堆型进行比较,同时分别利用 RMC 程序验证 DRAGON 程序组件燃耗计算的准确性,利用 MCNP 程序验证 DRAGON 程序组件均匀化方法以及 DONJON 程序截面调用和程序全堆扩散的准确性。结果表明,组件燃耗计算中,TRU 和 ThU 燃料满足燃耗计算要求;堆芯临界计算中,快/热谱堆芯计算误差均小于 0.001。证明 DRA&DON 程序可以胜任快、热谱型 MSR 焚烧 TRU、ThU 燃料的物理计算任务。

关键词 熔盐堆, 组件均匀化, ThU 燃料, TRU 燃料

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.060602

Feasibility of DRAGON&DONJON code for MSR core burnup calculation

ZHAO Wenbo XIE Jinsen XIE Qin CHEN Zhenping ZENG Wenjie LIU Zijing HE Lihua YU Tao

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract Background: Simplify DRAGON&DONJON lattice - core “two step” process reasonably, this method can be applied to any reactor and any working condition. **Purpose:** This study aims at verifying the feasibility of using DRAGON&DONJON physical analysis for burning TRU and ThU fuel in molten salt reactor (MSR) by combination of reactor Monte Carlo code (RMC) and Monte Carlo neutron particle transport code (MCNP). **Methods:** Both the molten salt breeder reactor (MSBR) and molten salt advanced reactor transmuter (MOSART) reactor were taken as examples for comparison and analysis. RMC program was employed to verify accuracy of burnup calculated by DRAGON program whilst MCNP program was used to verify both the accuracy of lattice homogenization embedded in DRAGON program and the few group cross - section call and diffusion in whole reactor adopted in DONJON program. **Results:** The results show that DRAGON program can be used in MSR for burning TRU and ThU fuel. The calculation errors of fast spectrum and thermal spectrum diffusion are less than 0.001 in critical calculation. **Conclusion:** DRAGON&DONJON is suitable for physical analysis of TRU and ThU fuel burning in MSR.

Key words MSR, Lattice homogenization, ThU, TRU

国家自然科学基金(No.11305088)、湖南省自然科学基金(No.14JJ2088)资助

第一作者: 赵文博, 男, 1992 年出生, 2014 年毕业于东华理工大学, 现为硕士研究生, 从事反应堆物理计算研究

通信作者: 于涛, E-mail: yutao29@sina.com

收稿日期: 2016-11-28, 修回日期: 2016-12-26

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11305088), Natural Science Foundation of Hunan Province (No.14JJ2088)

First author: ZHAO Wenbo, male, born in 1992, graduated from East China University of Technology, master student, focusing on reactor physics research

Corresponding author: YU Tao, E-mail: yutao29@sina.com

Received date: 2016-11-28, accepted date: 2016-12-26

熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)堆芯物理计算的相关分析程序较少, 现今研究主要依靠多种物理计算程序相互校核完成 MSR 堆芯计算。其中可分为蒙特卡罗(Monte Carlo method, MC)与确定论两类程序, 而 MSR 在线处理过程周期短(熔盐堆实验(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)堆中每 487 s 去除惰性气体)^[1-2], 使用 MC 方法进行燃耗计算, 需对每次在线处理设立燃耗步, 计算耗时过长; 然而与 MC 方法相比, 确定论方法采用截面近似处理以及共振近似处理等原因, 尤其本次研究中需要涉及 TRU 燃料多共振核素的中子输运计算, 可能产生较大误差。因此本文主要通过使用蒙特卡罗程序 MCNP (Monte Carlo Neutron Particle transport code)和 RMC (Reactor Monte Carlo code)作对标校核程序, 验证确定论程序 DRAGON&DONJON 能否胜任快/热谱型 MSR 堆芯焚烧 TRU、ThU 燃耗计算任务。因燃耗计算主要与中子能谱和截面数据有关, 考虑几种程序的适用性, 本文计算均在堆芯无在线处理、熔盐不流动的静态环境假想条件下进行, 因而未考虑缓发中子先驱核流动性的相关计算^[3]。

DRAGON&DONJON 程序均为加拿大蒙特利尔技术学院研制的反应堆物理数值计算程序^[4]。其中 DRAGON 为组件计算程序, DONJON 为堆芯计算程序。组件-堆芯“两步法”是目前工业界广泛应用的反应堆核设计方法, 它在保证一定精度的前提下, 提供了可接受的计算代价。

在“两步法”中, 组件计算主要用于产生不同工况下的组件均匀化少群常数, 这些离散工况的均匀化少群常数通过特定的方法进行拟合(插值)可用于任意工况堆芯计算。因此 DRAGON&DONJON 程序可以实现 MSR 在线化学处理过程, 更真实的模拟 MSR 运行工况。RMC 与 MCNP 均为蒙特卡罗输运程序, RMC 为清华大学研发设计^[5]。

1 MSR 堆型材料选取与简化

本文选取熔盐增殖堆(Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)与熔盐铜系元素再循环和嬗变堆(Molten Salt Advanced Reactor Transmuter, MOSART)进行研究分析。TRU 燃料熔盐选取 MOSART 熔盐 $58\text{NaF}-15\text{LiF}-27\text{BeF}_2$ (1.5 mol% Pu + MA)^[6]进行分析, ThU 燃料熔盐选取 MSBR 熔盐 $71\text{LiF}-16\text{BeF}_2-12.7\text{ThF}_4-0.3^{235}\text{UF}_4$ ^[7]、MSFR 熔盐 $77.5\text{LiF}-20\text{ThF}_4-2.5^{233}\text{UF}_4$ ^[8]进行分析。它们的燃料熔盐进出口温度较低, 两种堆型平均温度相近, 同时堆芯快热能谱区分明显, 方便分析与比较。由于 MSBR 与 MOSART 实际堆型较为复杂, 为方便研

究, 需要对堆芯进行相应简化。

1.1 MSBR 熔盐堆简化

MSBR 堆芯概念设计模型如图 1 所示^[7], MSBR 堆芯活性区高度为 3.96 m, 堆芯总体半径为 3.38 m。MSBR 堆芯由中心控制棒系统、ZONE-1 区、ZONE-2 区两区组件组成, 组件尺寸为 $10.16\text{ cm} \times 10.16\text{ cm}$, 组件中石墨作为导流通道和慢化剂作用。ZONE-1 区为燃料体积占 13.2%的组件构成; ZONE-2 区在 ZONE-1 堆芯外围包裹了一圈燃料体积占 37%的组件, 能够有效搅混内外燃料熔盐流速, 展平堆芯功率; 37%的组件外围包裹了近 30 cm 石墨栅栏, 栅栏与外侧石墨反射层留有 6 cm 缝隙, 供燃料熔盐流过; 在外围为石墨反射层厚度为 76 cm。

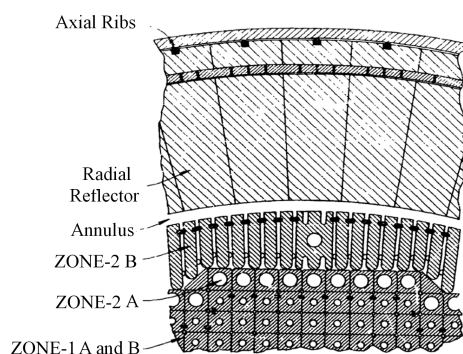


图 1 MSBR 堆芯结构

Fig.1 MSBR reactor core structure.

燃料组件结构较为复杂, 为方便分析和简化计算, 采用面积等效法, 对组件模型进行简化, 简化模型见图 2。其中, 中心为燃料孔道, 外部为石墨慢化剂。此外因石墨栅栏无法用程序建模, 因此在模拟中直接采取搅混计算, 全堆简化后模型如图 3 所示。

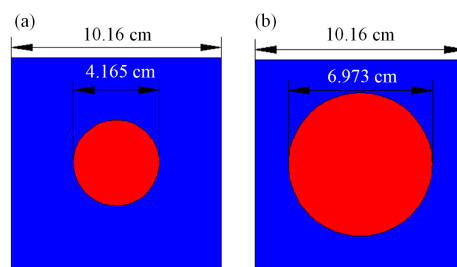


图 2 MSBR 组件简化模型 (a) ZONE-1, (b) ZONE-2

Fig.2 MSBR simplified assembly model.

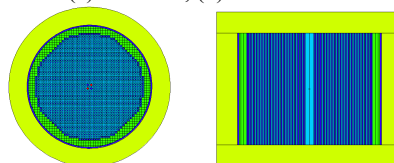


图 3 MSBR 简化堆芯模型

Fig.3 MSBR simplified model.

1.2 MOSART 熔盐堆简化

MOSART 堆芯概念设计模型如图 4(a)所示^[6], MOSART 堆芯呈罐式结构, 堆芯高度为 3.6 m, 堆芯直径为 3.4 m。整体结构总体可以分为三层: 第一层为罐内充满燃料熔盐圆柱; 第二层为包裹燃料熔盐的 30 cm 石墨反射层, 防止中子泄漏; 第三层为最外围 20 cm 不锈钢堆芯壳体, 因此堆芯堆型可以简化为如图 4(b)所示。为更有效对堆芯进行分析, 简化计算任务, 因此通过调整堆芯高度, 去除堆芯上下两端较为复杂的锥形结构, 经 MCNP 程序对两模型校算, 最后得到 MOSART 简化模型如图 4(c)所示。因不锈钢对快中子影响较小, 因此在简化模型中忽略不计, 堆芯活性区高度为 360 cm, 堆芯活性区半径 170 cm, 石墨厚度为 30 cm。由于 MOSART 堆芯无组件结构, MOSART 组件可假设为纯燃料无限高圆柱, 组件边界采用白边界处理, 因此组件半径可任意设置, 考虑计算任务与时间, 组件半径选取为 3 cm。

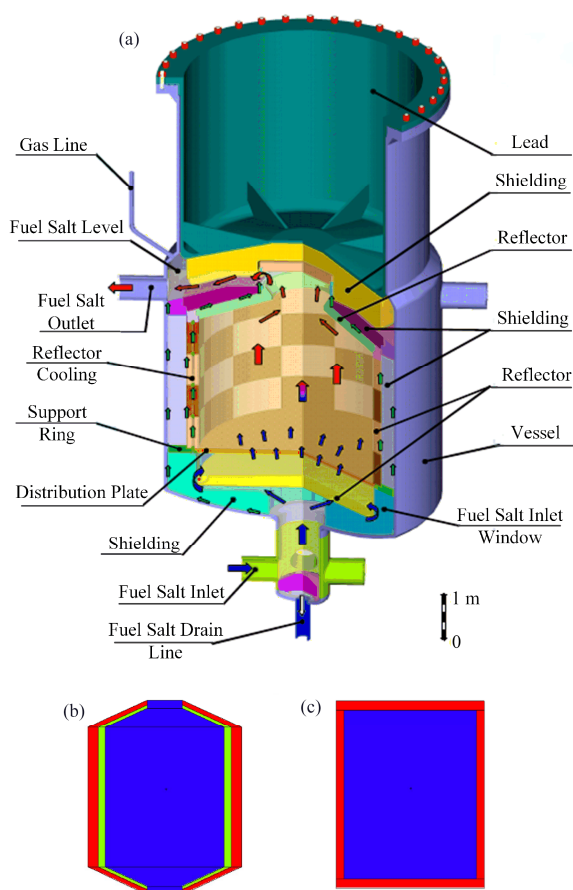


图 4 MOSART 简化过程

(a) 堆芯实际模型, (b) 计算模型, (c) 简化模型

Fig.4 MOSART simplified model.

(a) MOSART core actual model, (b) Actual calculation model, (c) Final simplified model

2 DRAGON&DONJON 程序准确性验证

2.1 DRAGON 程序组件燃耗计算校算

首先验证 DRAGON 程序组件燃耗计算的准确性, 分别选取 MSBR 和 MOSART 堆芯组件进行验证, 材料截面库以 ENDF/B-VII.0 为母库, 热谱堆芯使用 172 群 WIMSD 格式截面库, 快谱堆芯使用适用于 ERANOS 快堆的 315 群 DRAGLIB 格式截面库, 共振处理使用 Stamm'ler^[9]方法。

图 5 为 TRU 燃料在快热谱型堆型组件的燃耗结果, 以下数据均为在 MSR 中焚烧 400 d 数据结果。从图 5 可以看到, 在快、热谱堆芯 MSBR 组件中, TRU 燃料在热谱堆芯中焚烧结果误差会随着时间的逐渐增大, 主要因为各核素种类增多, 核素间共振干涉增强, 同时随着燃耗深度增加, 数据库燃耗链的误差逐渐累积, 这两个原因共同造成燃耗误差逐渐增大。截取其中部分数据, 燃烧至 225 d 时, k_{inf} 结果误差为 0.00613, 此时燃耗深度为 $204.621 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 各燃料核素平均相对误差为 1.29%, 单一燃料核素最大相对误差为 3.56% (^{242}Pu)。烧至 365 d 时, k_{inf} 结果误差为 0.01497, 燃耗深度为 $331.941 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 各燃料核素平均相对误差为 2.06%, 单一燃料核素最大相对误差为 4.43% (^{242}Pu)。可以看出, 虽然组件无限增殖系数 k_{inf} 在 300 d 后误差较大, 但各 TRU 核素之间误差较小, 此时已经远超过传统燃耗计算中的燃耗深度, 在模拟燃烧 $60 \text{ GW} \cdot \text{d}$ 后 (此处燃烧为 60 d, 该燃耗深度为压水堆最大燃耗深度), DRAGON 程序与 RMC 程序给出的有效增殖因数 k_{inf} 的最大误差为 0.00336, 在 $60 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$ 燃耗深度下, 两者给出的各 TRU 核素积存量的平均相对误差为 0.46%, 最大相对误差为 1.27% (^{243}Am), 且两程序计算趋势一致, 因此可以说明 DRAGON 程序可以胜任热谱堆芯多共振核素燃料计算任务, 并能够为在深燃耗情况下, 提供较好的各 TRU 核素积存量变化数据; TRU 燃料在快谱堆芯组件焚烧 400 d 中可以看到, 组件 k_{inf} 误差维持在 0.007–0.008, 误差主要来源于各燃料核素快谱处吸收截面变化复杂, 同时存在多核素共振干涉效应, 这两个原因共同造成两程序的计算误差, 然而从结果可以看到, 在组件焚烧 400 d 结束时 (燃耗深度为 $163.692 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$), 各 TRU 核素积存量平均相对误差为 0.462%, 单一燃料核素最大相对误差为 1.34% (^{244}Cm), 说明两程序结果变化趋势一致, 同时证明虽然临界计算误差较大, 但各核素燃耗链计算准确, 说明 DRAGON 程序可以模拟 TRU 核素在快谱堆芯中焚烧的燃耗计算。

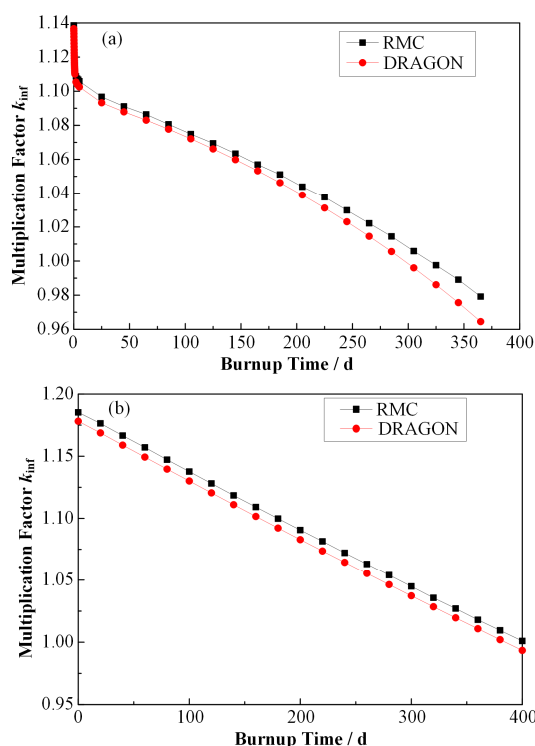


图5 TRU 燃料 DRAGON&DONJON 与 RMC 程序计算结果比较 (a) 热谱, (b) 快谱

Fig.5 TRU fuel comparison of calculation results between DRAGON&DONJON and RMC.
(a) Thermal spectrum, (b) Fast spectrum

图 6 中 ThU 燃料组件两程序 k_{inf} 曲线符合结果较好。在热谱堆芯组件中, 焚烧至 400 d 结束时, MSBR 燃料燃料燃耗深度为 $52.283 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 误差为 0.018 23, 但燃料核素积存量平均误差为 1.05%, 最大误差为 2.98% (^{233}Pa), 同时此时组件 k_{inf} 已经远小于 1, 无法达到临界, $k_{inf}=1$ 时为燃烧至 105 d, 燃耗深度为 $13.296 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 此时误差仅为 0.003 26, 核素积存量平均误差为 0.89%, 最大误差为 1.54% (^{233}Pa); MSFR 燃料燃料燃耗深度为 $27.868 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 误差为 0.007 61, 燃料核素积存量平均误差为 1.385%, 最大误差为 3.04% (^{234}U), 此时组件 k_{inf} 同样远小于 1, 临界时燃耗深度为 $15.482 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 误差仅为 0.003 72, 燃料核素积存量平均误差为 1.063%, 最大误差为 2.27% (^{234}U), k_{inf} 曲线变化一致, 因此可以说明 DRAGON 程序可以在热谱 MSR 中进行 ThU 燃料燃耗计算。在快谱中 MSBR 型燃料无法满足临界要求, 因此仅使用 MSFR 燃料进行验证, 从图 6 中可以看出, 曲线变化趋势一致, 焚烧至 400 d 结束时, 燃耗深度为 $16.099 \text{ GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$, 组件 k_{inf} 误差仅为 0.003 71, 燃料核素积存量平均误差为 1.17%, 最大误差为 3.59% (^{234}U), 证明 DRAGON 程序可以在快谱 MSR 中进行 ThU 燃料燃

耗计算。综合以上结果, 虽然总体 ThU 燃料燃耗深度较小, 但已经满足快热谱 MSR 计算范围的要求, 同时在 MSR 需要计算的范围内, 组件燃耗计算结果较好, 燃料核素积存量计算准确, 因此可以证明 DRAGON 程序较好地模拟 ThU 燃料在快、热谱 MSR 中的燃耗计算。

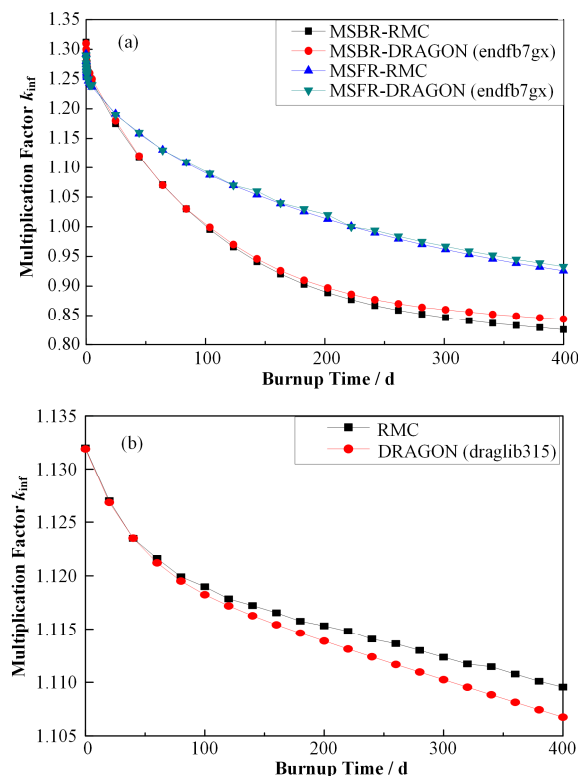


图6 ThU 燃料 DRAGON&DONJON 与 RMC 程序计算结果比较 (a) 热谱, (b) 快谱

Fig.6 ThU fuel comparison of calculation results between DRAGON&DONJON and RMC.
(a) Thermal spectrum, (b) Fast spectrum

2.2 DRAGON&DONJON 程序组件-堆芯“两步法”简化方法验证

组件-堆芯“两步法”, 可以对堆芯进行了简化计算, 减少计算任务, 同时可能因简化的步骤产生误差, 因此通过对 MSBR 与 MOSART 零燃耗临界计算验证, 确定 DRAGON&DONJON 程序“两步法”计算方法准确性, 同时确定堆芯简化模型合理性。具体步骤如下。

2.2.1 MSBR 全堆校算

根据 MSBR 堆芯设计, 在使用 DRAGON 程序进行少群截面生成时, 主要把 MSBR 分为三区, 分别为: ZONE-1、ZONE-2 区、石墨栅栏与石墨反射层中石墨栅栏与之间缝隙的燃料均匀化截面, 以及石墨反射层少群截面的计算。具体简化过程见图 7。生成均匀化截面后, 利用 DONJON 程序建模并调用均匀化少群截面计算, DONJON 全堆模型见图 8。

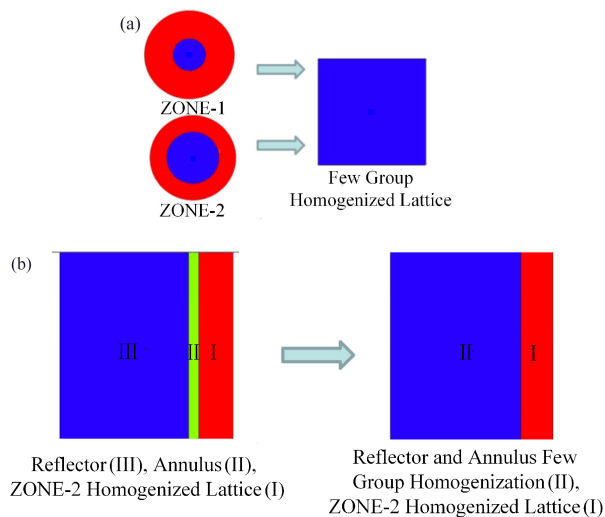


图 7 MSBR 组件均匀化模型 (a) 燃料组件, (b) 堆芯边界
Fig.7 MSBR assembly homogenization. (a) Assembly homogenization, (b) Core boundary reflector homogenization

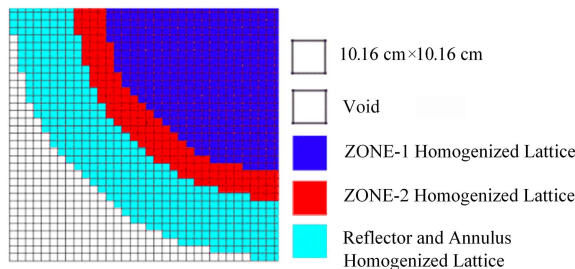


图 8 DONJON 程序 1/4 MSBR 堆芯计算模型
Fig.8 1/4 MSBR core calculation model.

以 ThU 燃料作为参考依据，经过上述计算过程，各阶段结果见表 1。从结果可以看出，与 MCNP 计算结果相比，DRAGON 程序组件临界计算中误差小于 0.002。全堆计算中，DONJON 调用经 DRAGON 均匀化、并群的组件，同时合理地考虑了超栅尺寸的选取，并以真实模型为基础，可以保证 DONJON 程序步骤中引入误差很小，因此由于 ZONE-1 区（正误差）与其他区误差（负误差）相

表 1 热谱堆芯 DRAGON&DONJON “两步法”
计算结果误差

Table 1 Thermal spectrum core DRAGON&DONJON
“two steps” calculation error.

	MCNP5	DRAGON& DONJON	ERROR
ZONE-1	1.312 15± 0.000 28	1.311 04	-0.001 11
ZONE-2	1.162 69± 0.000 36	1.163 21	0.000 52
燃料-石墨反射层	0.987 98± 0.000 40	0.990 50	0.002 52
全堆	1.278 25±	1.278 78	0.000 53
Whole core	0.000 35		

互抵消，导致 DONJON 程序误差仅为 0.000 53±0.000 35，可见 DRAGON&DONJON “两步法”程序可以较好适用于热谱堆芯 MSR 中计算。

2.2.2 MOSART 全堆校算

MOSART 为快谱堆芯，堆芯却由石墨包裹，堆芯外围中子能谱变化较大，因截面并群需根据能谱计算，因此使用 DRAGON&DONJON 程序在对 MOSART 堆芯进行建模时，需要先计算堆芯能谱分布后对堆芯进行分区。图 9 为 MOSART 堆芯分别装载 TRU、ThU 燃料时，堆芯径向位置能谱分布。从图 9 可以看到，当半径为 0–140 cm 时，中子能谱分布几乎不发生变化趋于一致；当半径为 140–200 cm 时，燃料被石墨慢化，堆芯中热中子通量逐渐增加。

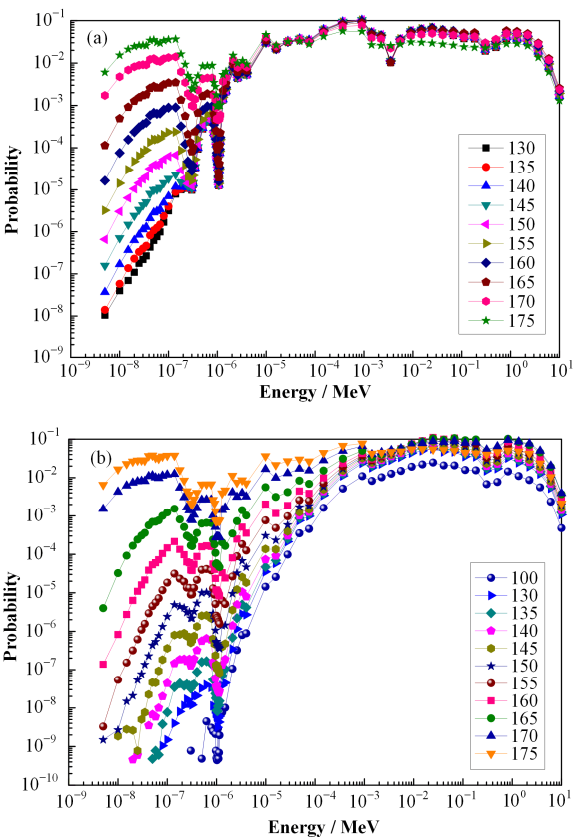


图 9 TRU (a)和 ThU (b)燃料径向位置能谱分布
Fig.9 MOSART energy spectrum distribution of TRU (a) and ThU (b) fuel.

因此堆芯可分为两区进行计算，0–140 cm 为 ZONE-1 区纯燃料区和 140–200 cm 燃料-石墨反射层区。均匀化方法与 MSBR 堆芯组件相同，简化为方形无限高少群均匀化组件。两区模型如图 10 所示，全堆模型如图 11 所示。

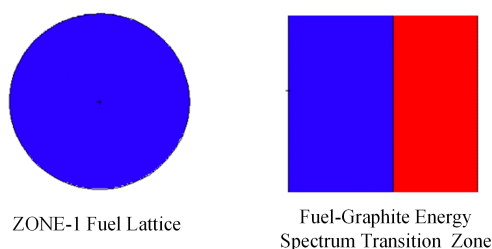


图 10 MOSART 组件均匀化模型
Fig.10 MOSART assembly homogenization.

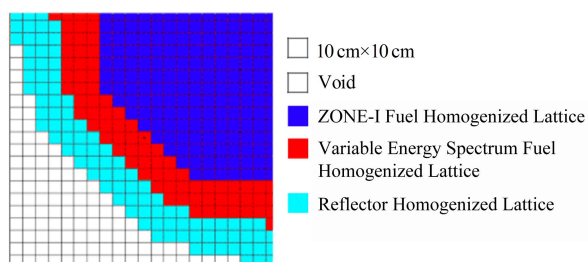


图 11 DONJON 程序 1/4 全堆 MOSART 堆芯计算模型
Fig.11 1/4 MOSART core calculation model.

以 ThU 燃料做为参考依据, 经过上述计算过程, 各阶段结果见表 2, 从结果可以看出, 与 MCNP 程序计算结果相比组件临界计算中 DRAGON 程序计算结果误差小于 0.002, 全堆计算中与 MSBR 堆芯相同, ZONE-1 区为负误差, 外区为正误差, 经过相互抵消, DONJON 程序误差仅为 0.00029 ± 0.00013 , 可见 DRAGON&DONJON “两步法”程序可以较好地适用于快谱堆芯 MOSART 中的计算。

表 2 快谱堆芯 DRAGON&DONJON “两步法”
计算结果误差比较

Table 2 Thermal spectrum core DRAGON&DONJON
“two steps” calculation error.

	MCNP5	DRAGON&DONJON	ERROR
ZONE-1	1.03722 ± 0.00028	1.03581	-0.00141
燃料-石墨	1.29200 ± 0.00032	1.29078	0.00122
反射层			
Fuel-graphite reflector			
全堆	1.03028 ± 0.00013	1.02999	-0.00029
Whole core			

3 程序适用性评价总结

从以上结果可以看到:

1) 在准静态情况下, 组件燃耗计算中 DRAGON 程序 ThU 燃料在快/热谱型 MSR 中焚烧可以得到较好的计算结果, 最大误差小于 0.005; TRU 燃料虽然在快/热谱型中误差相对较大, 但曲

线变化趋势一致, 误差变化稳定, 同时在深燃耗的条件下, 依然有较好的核素积存量信息。

2) 从均匀化方法选用与堆芯临界计算结果可以得出, 在能够保证 DRAGON 程序准确结果的前提下, DRAGON&DONJON 组件-堆芯 “两步法”方法可以用于 MSR 堆芯计算。

综上所述, 本文在准静态近似条件下, 针对 MSR 堆芯, 从数据库、组件及堆芯计算进行分析, 验证了 DRAGON&DONJON 程序可以胜任快、热谱型 MSR 焚烧 TRU、ThU 燃料的全堆燃耗计算任务。其中验证了包括: 截面数据库的适用性、DRAGON 燃耗计算正确性、MSR 超栅计算方法可行性、DRAGON&DONJON 耦合计算适用性、DONJON 全堆计算正确性。

参考文献

- Bell M J. Calculated radioactivity of MSRE fuel salt[R]. ORNL-TM-2970, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1970.
- 张志宏, 夏晓彬, 朱兴望, 等. 含在线处理的熔盐堆源项计算[J]. 核技术, 2014, 37(2): 020603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.020603.
ZHANG Zhihong, XIA Xiaobin, ZHU Xinwang, *et al.* Source terms calculation for the MSRE with on-line removing radioactive gases[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37(2): 020603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.020603.
- 蔡军, 夏晓彬, 陈堃, 等. 熔盐堆中燃料流动对缓发中子的影响分析[J]. 核技术, 2014, 37(3): 030603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.030603.
CAI Jun, XIA Xiaobin, CHEN Kun, *et al.* Study of fluid fuel influence on delayed neutron in Molten Salt Reactor[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37(3): 030603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.030603.
- Marleau G, Hebert A, Roy R. A user guide for DRAGON[M]. Canada: école Polytechnique de Montréal, 2007.
- 丘意书, 余顶, 范潇, 等. 堆用蒙特卡罗程序 RMC 的全堆计算研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(S1): 1-4.
QIU Yishu, SHE Ding, FAN Xiao, *et al.* Analysis of full-core calculation of RMC[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(S1): 1-4.
- Ignatiev V, Feynberg O, Gnidoi I, *et al.* Progress in development of Li, Be, Na/F molten salt actinide recycler and transmuter concept[C]. Proceedings of International Conference of Asian Political Parties, Nice, France, 2007:

75. Annals of Nuclear Energy, 2014, **64**: 421–429. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.08.002.
- 7 Robertson R C. Conceptual design study of a single-fluid molten-salt breeder reactor[R]. ORNL-4541, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1971.
- 8 Heuer D, Merle-lucotte E, Allibert M, *et al.* Towards the thorium fuel cycle with molten salt fast reactors[J].
- 9 Hebert A, Marleau G. Generalization of the Stamm’ler method for the self-shielding of resonant isotopes in arbitrary geometries[J]. Nuclear Science and Engineering, 1991, **108**: 230–239.