

## 氟盐冷却球床堆球栅元少群截面计算

戴明<sup>1,2</sup>, 朱贵凤<sup>1,2</sup>, 戴叶<sup>1</sup>, 于世和<sup>1</sup>, 邹杨<sup>1,3</sup>, 余笑寒<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院核辐射与核能技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要:** 氟盐冷却球床堆经 10 余年的发展, 已逐步由预概念设计走向试验堆基准设计。本文采用确定论软件中的碰撞概率法模块对氟盐冷却球床堆球栅元建模, 计算了其无穷增殖因数, 少群均匀化总截面、俘获截面和裂变截面, 并使用连续能量蒙特卡罗软件验证与分析。其中使用基于碰撞概率法的共振处理程序直接求解共振能区超精细群慢化方程, 很好地处理了氟盐冷却球床堆的球栅燃料元件所构成的双重非均匀系统。结果表明, 确定论软件中碰撞概率法模块的计算结果与蒙特卡罗软件结果吻合, 适用于对氟盐冷却球床堆进行少群截面加工。

**关键词:** 双重非均匀性; 氟盐冷却球床堆; 少群截面加工; 蒙特卡罗方法

中图分类号: TL323

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)S0-0100-07

doi: 10.7538/yzk.2015.49.S0.0100

## Generation of Few-group Cross Sections for Pebble-bed Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactors

DAI Ming<sup>1,2</sup>, ZHU Gui-feng<sup>1,2</sup>, DAI Ye<sup>1</sup>, YU Shi-he<sup>1</sup>,  
ZOU Yang<sup>1,3</sup>, YU Xiao-han<sup>1,3</sup>

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*  
3. *Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

**Abstract:** Pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactors (PB-FHR) have made progress to the stage of baseline designing of test reactor after more than ten-year pre-conceptual designing. Collision probability method was applied to solve the neutronic system of one pebble of PB-FHR, and attained its infinite multiplication factor and cell-homogenized few-group cross sections including total, capture and fission cross sections. The evaluation of accuracy of the output was based on comparison to a continuous-energy, doubly heterogeneous Monte Carlo reference model. Resonance calculation routine solved slowing-down equations on the ultra-fine lethargy mesh by collision probability method, through which the doubly heterogeneous system could be treated accu-

收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-01-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA02010200)

作者简介: 戴明(1988—), 男, 湖南常德人, 博士研究生, 核科学与工程专业

rately. Results show that outputs from collision probability method are consistent with that of Monte Carlo reference model, and collision probability lattice code with ultra-fine resonance calculation is capable of generating few-group cross sections for PB-FHR.

**Key words:** doubly heterogeneous system; PB-FHR; few-group cross-section generation; Monte Carlo

氟盐冷却球床堆(PB-FHR)经 10 余年的发展,已逐步由预概念设计走向试验堆基准设计。2012 年美国能源部(DOE)启动合作研究项目(IRP)研究先进高温堆(AHTR)<sup>[1]</sup>的发展技术路线,包括进行实验堆、原型堆和商业堆的设计以及关键技术、策略需求分析,在该项目中 AHTR 被命名为氟盐冷却高温堆(FHR),并选用 PB-FHR(氟盐冷却球床堆)作为设计基准<sup>[2]</sup>。中国科学院自 2011 年开始启动实施“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项,进行钍基熔盐堆核能系统的研究(专项简称 TMSR),PB-FHR 选为该专项试验堆基准设计方案之一。

PB-FHR 中子学求解与传统压水堆方法相比存在一些差异,如栅元能谱计算要考虑双重非均匀性及堆芯不同位置泄漏反馈影响<sup>[3]</sup>,流动球床燃耗计算时谱区内不同批次燃料同时存在且认为具有一致的有效微观截面<sup>[4]</sup>等。PB-FHR 的少群截面计算是其堆芯扩散计算分析的重要研究前提,它将对扩散计算的准确性产生重大影响。球床堆复杂的几何模型构成所谓的双重非均匀性系统,第 1 重非均匀性为燃料核和包覆层及石墨基质,第 2 重非均匀性为燃料区、球石墨壳和氟盐冷却剂。双重非均匀性要求能准确求解可分辨共振区的共振吸收<sup>[5]</sup>。对于可分辨共振能区一般采用求解基于碰撞概率法的精细群慢化方程,在 ZUT 共振处理软件中,采用解析的数值积分精确求解相关碰撞概率<sup>[4]</sup>,燃料核逃脱概率与燃料核的总截面相关,而该截面在共振区又随能量改变很大,所以采用精细群求解。SRAC 的共振处理程序 PEACO 能调用共振区点连续截面 MCROSS 库直接求解基于碰撞概率法的精细群慢化方程。对于双重非均匀性的处理,可采用类似于 SCALE 处理双重非均匀栅元的 CSAS<sup>[6]</sup>的共振计算两步法,即先计算包覆颗粒共振能区空间均匀化有效微观共振截面,再利用该有效截面进行燃料球栅元计算。庄坤等<sup>[7]</sup>

使用 SRAC 采用该两步法与 MVP-BURN 程序比较了燃料球有效增殖因数随燃耗的变化。SRAC 也提供直接一步处理双重非均匀性的功能,相关碰撞概率的求解没有 ZUT 精确,而是采用了一些假设。该方法与两步法无本质区别。

本工作通过与采用连续能量蒙特卡罗软件 MCNP 计算的参考模型对比,分析确定论软件 SRAC 对于准确加工 PB-FHR 少群截面的适用性。主要比较参量有无穷增殖因数( $K_{inf}$ ),少群均匀化总截面、俘获截面和裂变截面。计算包括两个温度点:冷态(300 K)和热态(1 000 K)。

## 1 计算程序及方法

### 1.1 确定论软件

确定论软件 SRAC<sup>[8]</sup>是针对各种热中子堆的中子学计算而设计的,能加工有效微观和宏观群截面,进行静态栅元和堆芯计算,能提供堆芯设计或实验分析所需的相关关键参数。公用数据库为基于 JENDL-3.3 库加工的超过 300 种核素的多群库。SRAC 的共振处理程序 PEACO 采用基于碰撞概率法直接求解共振能区超精细群慢化方程,能很好地处理 PB-FHR 的球型燃料元件所构成的双重非均匀系统。

本文主要采用 SRAC 的碰撞概率程序 PIJ 进行通量计算,采用固定源模式。选择 HOMOSP 程序求零几何曲率下全能群  $B_1$  方程解,并给出无穷增殖因数和均匀化能谱。可分辨共振区采用 PEACO 处理,处理能区为快热分界能到 961.12 eV,勒宽间隔为 0.000 5,两区微观栅元碰撞率比采用透射截面模型。

### 1.2 MCNP 程序

MCNP 程序<sup>[9]</sup>是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发的一个通用的蒙特卡罗程序。MCNP 程序采用连续点截面库,具有强大的几何处理能力,在核能新堆型的设计上发挥着很大作用。MCNP 通过使用各种记数卡统计大

量粒子在介质中发生的输运事件来给出宏观结果。本文中, PB-FHR 的燃料与熔盐等材料温度非常高, 运用 NJOY 程序为 MCNP 中涉及的材料做了相应的温度库以使计算结果更加精准。

MCNP 在本文中主要是对球栅元内各种反应率和通量分别采用 FMn 卡和 Fn 进行统计, 两者相除即为所需的少群截面<sup>[10]</sup>。为方便与 SRAC 比较, 给出的能谱为 107 群能谱。由于 MCNP 未提供统计出射中子能量及方向信息的计数卡<sup>[11]</sup>, 不能直接求得散射矩阵及平均散射余弦, 所以散射矩阵和扩散系数未给出相应结果。为统计所有包覆颗粒 (TRISO) 的燃料核的总体积, 采用 VOID 卡、SDEF 卡和 F4 卡统计燃料核总体积<sup>[9]</sup>。

### 1.3 计算模型

参考 VSOP 及 MICROX-2 软件对球床模块高温气冷堆 (PBMR) 球燃料元件建模<sup>[12]</sup>, PB-FHR 球栅元等效几何模型如图 1 所示, 包层冷却剂的厚度取决于包覆颗粒填充因子。MCNP 建模时弥散的 TRISO 采用筒立方栅格排布于燃料区, 燃料球结构也采用图 1 模型。少群常数能群划分参考文献<sup>[13]</sup>给出的石墨慢化堆推荐的 8 群划分方法, 取与其相邻的 SRAC 的多群库能群分界能 (表 1)。相关模型参数列于表 2。

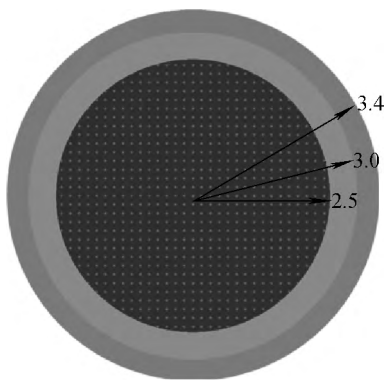


图 1 PB-FHR 球栅元模型

Fig. 1 Pebble model of PB-FHR

## 2 结果与讨论

### 2.1 无穷增殖因数与少群截面计算

PB-FHR 球栅元无穷增殖因数与少群截面

在冷态的计算结果列于表 3。除 2 群的俘获截面和 1 群的裂变截面外, 各截面的相对偏差在 1.45% 以下, 特别是包括可分辨共振能区的 3 群的俘获截面相对偏差仅为 0.04%。SRAC 计算得到的 2 群的俘获截面较 MCNP 计算得到的大 12.76%, SRAC 计算得到的 1 群的裂变截面较 MCNP 计算得到的小 7.08%。SRAC 计算的无穷增殖因数与 MCNP 计算的相比大 0.05%。

表 1 少群常数能群划分

Table 1 8-group structure

能群	能量上界/MeV	能量下界/MeV
1	$1.00 \times 10^1$	$8.21 \times 10^{-1}$
2	$8.21 \times 10^{-1}$	$7.10 \times 10^{-3}$
3	$7.10 \times 10^{-3}$	$2.38 \times 10^{-6}$
4	$2.38 \times 10^{-6}$	$9.93 \times 10^{-7}$
5	$9.93 \times 10^{-7}$	$5.32 \times 10^{-7}$
6	$5.32 \times 10^{-7}$	$4.14 \times 10^{-7}$
7	$4.14 \times 10^{-7}$	$1.23 \times 10^{-7}$
8	$1.23 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-11}$

表 2 PB-FHR 球栅元主要参数

Table 2 Parameters of lattice of PB-FHR

参数	数值
燃料球直径	6.0 cm
燃料区域直径	5.0 cm
石墨基体和石墨壳密度	$1.73 \text{ g/cm}^3$
<sup>235</sup> U 质量分数	12.0%
燃料球中包覆颗粒 (TRISO) 填充因子	10.0%
球床的理论燃料球填充因子	68%
燃料球石墨包壳密度	$1.73 \text{ g/cm}^3$
燃料颗粒半径	250 $\mu\text{m}$
UO <sub>2</sub> 密度	$10.4 \text{ g/cm}^3$
包覆层材料 (从内到外)	PrC/PyC/SiC/PyC
包覆层厚度	95/40/35/40 $\mu\text{m}$
包覆层密度	$1.10/1.90/3.18/1.90 \text{ g/cm}^3$
冷却剂组分	2LiF-BeF <sub>2</sub> (FLiBe, <sup>7</sup> Li 原子百分比为 99.99%)
冷却剂密度	$1.9577 \text{ g/cm}^3$

(校验计算时不随温度变化)

表3 冷态时 SRAC 计算的少群截面  
及无穷增殖因数与 MCNP 结果比较

Table 3 Few-group cross sections and  
infinite multiplication factors comparison at 300 K

能群	总截面/cm <sup>-1</sup>		相对 偏差/%
	SRAC	MCNP	
1	1.937 72×10 <sup>-1</sup>	1.954 81×10 <sup>-1</sup>	-0.87
2	3.624 43×10 <sup>-1</sup>	3.640 82×10 <sup>-1</sup>	-0.45
3	3.682 59×10 <sup>-1</sup>	3.694 99×10 <sup>-1</sup>	-0.34
4	3.667 98×10 <sup>-1</sup>	3.668 11×10 <sup>-1</sup>	0.00
5	3.674 79×10 <sup>-1</sup>	3.676 15×10 <sup>-1</sup>	-0.04
6	3.682 80×10 <sup>-1</sup>	3.686 03×10 <sup>-1</sup>	-0.09
7	3.711 50×10 <sup>-1</sup>	3.719 11×10 <sup>-1</sup>	-0.20
8	3.826 90×10 <sup>-1</sup>	3.853 26×10 <sup>-1</sup>	-0.68
能群	俘获截面/cm <sup>-1</sup>		相对 偏差/%
	SRAC	MCNP	
1	3.352 52×10 <sup>-4</sup>	3.304 50×10 <sup>-4</sup>	1.45
2	8.080 34×10 <sup>-5</sup>	7.166 25×10 <sup>-5</sup>	12.76
3	1.489 29×10 <sup>-3</sup>	1.489 85×10 <sup>-3</sup>	-0.04
4	4.199 03×10 <sup>-4</sup>	4.163 29×10 <sup>-4</sup>	0.86
5	4.249 53×10 <sup>-4</sup>	4.216 47×10 <sup>-4</sup>	0.78
6	5.828 39×10 <sup>-4</sup>	5.781 85×10 <sup>-4</sup>	0.80
7	1.196 07×10 <sup>-3</sup>	1.181 40×10 <sup>-3</sup>	1.24
8	2.379 65×10 <sup>-3</sup>	2.372 47×10 <sup>-3</sup>	0.30
能群	裂变截面/cm <sup>-1</sup>		相对 偏差/%
	SRAC	MCNP	
1	6.684 52×10 <sup>-5</sup>	7.193 80×10 <sup>-5</sup>	-7.08
2	3.328 19×10 <sup>-5</sup>	3.322 52×10 <sup>-5</sup>	0.17
3	4.032 11×10 <sup>-4</sup>	4.037 14×10 <sup>-4</sup>	-0.12
4	5.989 56×10 <sup>-4</sup>	6.031 38×10 <sup>-4</sup>	-0.69
5	1.099 33×10 <sup>-3</sup>	1.094 38×10 <sup>-3</sup>	0.45
6	1.632 27×10 <sup>-3</sup>	1.622 75×10 <sup>-3</sup>	0.59
7	3.269 44×10 <sup>-3</sup>	3.226 82×10 <sup>-3</sup>	1.32
8	7.398 29×10 <sup>-3</sup>	7.300 62×10 <sup>-3</sup>	1.34
$K_{inf}$	1.497 24	1.496 49	0.05

表4 所列为 PB-FHR 球栅元无穷增殖因数与少群截面在热态的计算结果。除2群的俘获截面和1群的裂变截面外,各截面的相对偏差在2.25%以下,3群的俘获截面相对偏差仅为0.08%。SRAC 计算得到的2群的俘获截面较 MCNP 计算得到的大12.74%,SRAC 计

算得到的1群的裂变截面较 MCNP 计算得到的小7.07%。SRAC 计算的无穷增殖因数与 MCNP 计算的相比大0.04%。可看出,温度的改变对两个计算的影响是一致的,计算结果的差异未扩大。SRAC 计算的球栅元的无穷增殖因数和少群截面与 MCNP 结果基本符合,说明 SRAC 处理 PB-FHR 球栅元双重非均匀性的方法基本可取。

表4 热态时 SRAC 计算的少群截面  
及无穷增殖因数与 MCNP 结果比较

Table 4 Few-group cross sections and  
infinite multiplication factors comparison at 1 000 K

能群	总截面/cm <sup>-1</sup>		相对 偏差/%
	SRAC	MCNP	
1	1.937 73×10 <sup>-1</sup>	1.954 87×10 <sup>-1</sup>	-0.88
2	3.624 61×10 <sup>-1</sup>	3.640 62×10 <sup>-1</sup>	-0.44
3	3.688 04×10 <sup>-1</sup>	3.700 59×10 <sup>-1</sup>	-0.34
4	3.672 47×10 <sup>-1</sup>	3.674 22×10 <sup>-1</sup>	-0.05
5	3.683 34×10 <sup>-1</sup>	3.688 82×10 <sup>-1</sup>	-0.15
6	3.694 86×10 <sup>-1</sup>	3.704 00×10 <sup>-1</sup>	-0.25
7	3.736 09×10 <sup>-1</sup>	3.759 51×10 <sup>-1</sup>	-0.62
8	3.931 73×10 <sup>-1</sup>	3.986 72×10 <sup>-1</sup>	-1.38
能群	俘获截面/cm <sup>-1</sup>		相对 偏差/%
	SRAC	MCNP	
1	3.352 49×10 <sup>-4</sup>	3.323 89×10 <sup>-4</sup>	0.86
2	8.090 10×10 <sup>-5</sup>	7.176 16×10 <sup>-5</sup>	12.74
3	1.778 86×10 <sup>-3</sup>	1.780 26×10 <sup>-3</sup>	-0.08
4	4.223 06×10 <sup>-4</sup>	4.178 22×10 <sup>-4</sup>	1.07
5	4.312 19×10 <sup>-4</sup>	4.270 46×10 <sup>-4</sup>	0.98
6	5.890 22×10 <sup>-4</sup>	5.829 26×10 <sup>-4</sup>	1.05
7	1.187 15×10 <sup>-3</sup>	1.173 69×10 <sup>-3</sup>	1.15
8	2.032 73×10 <sup>-3</sup>	2.001 97×10 <sup>-3</sup>	1.54
能群	裂变截面/cm <sup>-1</sup>		相对 偏差/%
	SRAC	MCNP	
1	6.683 25×10 <sup>-5</sup>	7.191 61×10 <sup>-5</sup>	-7.07
2	3.328 23×10 <sup>-5</sup>	3.323 10×10 <sup>-5</sup>	0.15
3	4.014 89×10 <sup>-4</sup>	4.022 91×10 <sup>-4</sup>	-0.20
4	6.052 47×10 <sup>-4</sup>	6.124 58×10 <sup>-4</sup>	-1.18
5	1.114 76×10 <sup>-3</sup>	1.108 4×10 <sup>-3</sup>	0.57
6	1.648 86×10 <sup>-3</sup>	1.634 30×10 <sup>-3</sup>	0.89
7	3.224 86×10 <sup>-3</sup>	3.186 25×10 <sup>-3</sup>	1.21
8	6.272 71×10 <sup>-3</sup>	6.134 71×10 <sup>-3</sup>	2.25
$K_{inf}$	1.417 91	1.417 34	0.04

### 2.2 FLiBe 熔盐

表 5 列出热态下 FLiBe 熔盐对 1、2 群俘获截面的影响。当计算模型中无 FLiBe 熔盐时,可看到 2 群的俘获截面相对偏差由 12.74% 降低到 1.54%,当把熔盐中的 F 元素由 C 元素替代后,2 群的俘获截面相对偏差也降为 1.08%。说明 SRAC 对于 FLiBe 熔盐中的 F 元素处理不当是造成 2 群俘获截面相对偏差较大的原因。熔盐 FLiBe 中的 F 元素为中等质量核素,相关共振能区位于平滑能量区 (67.4 keV~0.82 MeV),对应于少群能群结构中的 2 群,相关截面在该能区也较其他轻核的高出 1 个量级,且共振峰更宽。SRAC 带屏蔽因子的 Bondarenko 类型截面库构建时采用窄共振近

似,该近似得到的用于并群的能谱能有效适用于重质量核素,但对于在共振区有共振结构的轻中等质量核素不太精确。SRAC 对 F 元素采用该近似就造成 F 元素共振区的多群截面上有偏差。同样,SRAC 对轻核(如 C、O、Li 和 Be)的俘获处理也不理想,这造成了表 5 中无 FLiBe 熔盐时 1 群俘获截面相对偏差达到 23.98%,同样造成了熔盐中的 F 由 C 代替时 1 群俘获截面相对偏差达到 3.67%。

### 2.3 TRISO 尺寸

SRAC 处理双重非均匀性时,对于非 PEACO 处理能区(热区及快区  $E > 961.12$  eV),燃料区核素浓度由带石墨基质的 TRISO 栅元体积权重均匀化得到。图 2 所示为 TRISO 几何按表 2

表 5 热态下 FLiBe 对俘获截面的影响

Table 5 Effect of FLiBe salt on cell-homogenized capture cross section at 1 000 K

参数	有 FLiBe 熔盐			无 FLiBe 熔盐			F 由 C 代替		
	SRAC	MCNP	相对偏差/%	SRAC	MCNP	相对偏差/%	SRAC	MCNP	相对偏差/%
$K_{inf}$	1.417 91	1.417 34	0.04	1.437 27	1.438 90	-0.11	1.463 37	1.465 38	-0.14
1 群俘获截面, $cm^{-1}$	$3.352 49 \times 10^{-4}$	$3.323 89 \times 10^{-4}$	0.86	$5.310 21 \times 10^{-5}$	$4.283 25 \times 10^{-5}$	23.98	$1.840 49 \times 10^{-4}$	$1.775 36 \times 10^{-4}$	3.67
2 群俘获截面, $cm^{-1}$	$8.090 10 \times 10^{-5}$	$7.176 16 \times 10^{-5}$	12.74	$4.916 03 \times 10^{-5}$	$4.841 71 \times 10^{-5}$	1.54	$5.080 96 \times 10^{-5}$	$5.026 63 \times 10^{-5}$	1.08

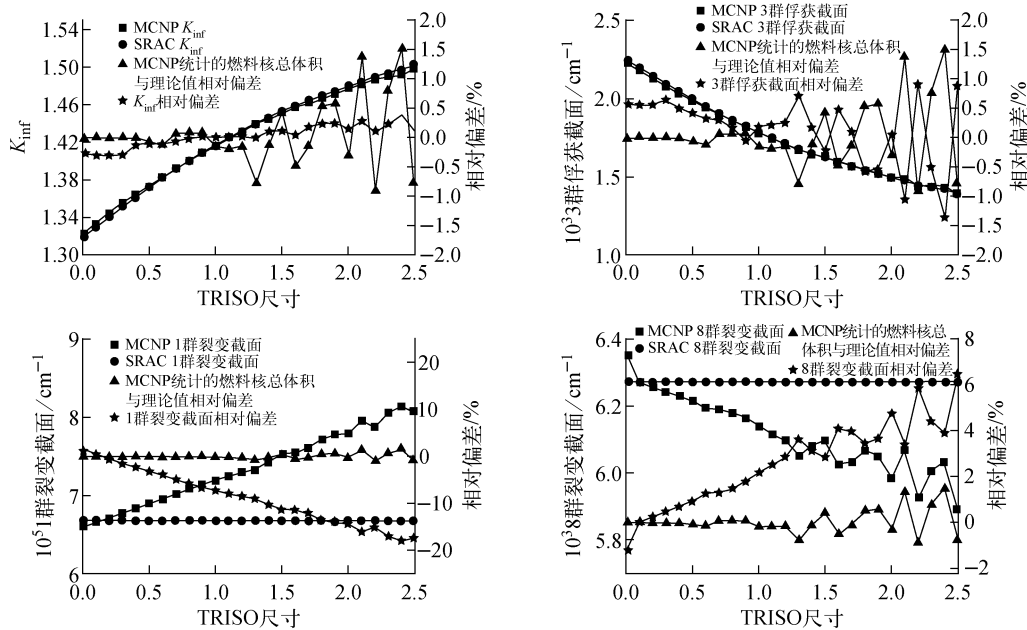


图 2 热态下填充比 10% 时不同 TRISO 大小对结果的影响

Fig. 2 Effects of TRISO size on results at 10% TRISO packing factor at 1 000 K

中原始尺寸等比例变化后热态下的无穷增殖因数、3群俘获截面、1群裂变截面及8群裂变截面的计算结果。等比例变化保证燃料区材料体积权重均匀化后核素原子浓度不变,但相应的TRISO尺寸改变为表2计算模型的0.1~2.5倍。零倍时即完全均匀分布,无双重非均匀性效应。为考虑MCNP建模中的切球影响,采用MCNP软件以2.5 cm半径的60 000 000粒子平面中子源及F4卡统计了所有TRISO的燃料核的总体积。

TRISO尺寸由零倍(无双重非均匀性)增加至2.5倍的过程能很好体现双重非均匀性对于PB-FHR栅元计算的影响。由图2可知,TRISO尺寸越大,含可分辨共振区的3群的俘获截面越小,无穷增殖因数越大,2.5倍尺寸时无穷增殖因数较无双重非均匀性时偏大约15%,其3群俘获截面较无双重非均匀性时偏小约40%,说明双重非均匀性效应对PB-FHR球栅元计算影响很大。同时,SRAC计算的无穷增殖因数与MCNP结果相比吻合很好,说明SRAC对双重非均匀性的处理方法在TRISO尺寸改变时也能很好适用。图2中,无穷增殖因数和3群俘获截面的偏差随TRISO尺寸的波动与MCNP模型中燃料核总体积与理论值的偏差随TRISO尺寸的波动规律一致或相反,说明MCNP模型在TRISO尺寸较大时切球会对结果产生一定影响。

如图2所示,SRAC计算的1群和8群的裂变截面不会随TRISO尺寸变化,与零倍尺寸的结果相同,这是由于SRAC对于非PEACO处理能区(热区及快区 $E > 961.12$  eV)的计算模型为未考虑双重非均匀性的体积权重均匀化的模型,即图2中的零倍尺寸。由MCNP的计算结果可看到,当TRISO尺寸增大时,1群的裂变截面偏差最大时约偏小17%,8群的裂变截面最大相对偏差约6.5%,MCNP计算结果随TRISO尺寸的波动与其模型中燃料核总体积与理论值的偏差波动规律一致。1群裂变截面会随TRISO尺寸增大而增大,这是由于TRISO燃料核尺寸增大时,产生于燃料核内的裂变中子逃脱燃料核的概率变小,重核与慢化轻核比例没有改变,导致裂变中子与慢化轻核碰撞而慢化到其他群的概率降低,裂变中子与重核

的碰撞概率增大,1群的裂变截面将增大。8群裂变截面会随TRISO尺寸增大而降低是因为由轻核慢化的热中子进入到TRISO燃料核会有空间自屏,尺寸越大空间自屏效应越明显。所以,1群和8群裂变截面会有较大偏差的原因是因为SRAC在非PEACO处理能区未考虑双重非均匀性效应。

### 3 结语

本文采用确定论软件SRAC计算了PB-FHR球栅元的无穷增殖因数,少群均匀化总截面、俘获截面和裂变截面,并使用连续能量蒙特卡罗软件MCNP验证与分析。SRAC计算的球栅元的无穷增殖因数和少群截面与MCNP结果基本符合,说明SRAC处理PB-FHR球栅元双重非均匀性的方法基本可取。SRAC快群数据库对FLiBe熔盐中的F元素共振处理不理想,造成2群俘获截面偏差较大。TRISO尺寸变化的计算结果说明双重非均匀性对于PB-FHR球栅元有很大影响,且1群和8群裂变截面会有较大偏差的原因是因为SRAC在非PEACO处理能区未考虑双重非均匀性效应。结果表明:SRAC程序计算结果与MCNP吻合,其适用于对PB-FHR进行少群截面加工。

### 参考文献:

- [1] FORSBERG C W, PETERSON P F, PICKARD P S. Molten-salt-cooled advanced high-temperature reactor for production of hydrogen and electricity[J]. Nuclear Technology, 2003, 144(1): 289-302.
- [2] FORSBERG C, PETERSON P F, SRIDHARAN K. Fluoride-salt-cooled high-temperature reactors (FHRs) for base-load and peak electricity, grid stabilization, and process heat[R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [3] HUDSON N H, OUGOUAG A M, RAHNE-MA F, et al. A pebble bed reactor cross section methodology [J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36(1): 1138-1150.
- [4] RÜTTEN H J, HAAS K A. V S O P (99/05) computer code system for reactor physics and fuel cycle simulation[R]. Jülich: Forschungszentrum

- Jülich, 2005.
- [5] BENDE E E, HOGENBIRK A H. Analytical calculation of the average dancoff factor for a fuel kernel in a pebble bed high-temperature reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 1999, 133(1): 147-162.
- [6] GOLUOGLU S, LANDERS N F, PETRIE L M, et al. CSAS: Control module for enhanced criticality safety analysis sequences [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- [7] 庄坤,曹良志,吴宏春,等. 球床型固体燃料熔盐堆计算软件开发[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(增刊): 463-466.  
ZHUANG Kun, CAO Liangzhi, WU Hongchun, et al. Software development for pebble bed MSR calculation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(Suppl.): 463-466(in Chinese).
- [8] OKUMURA K, KUGO T, KANEKO K, et al. SRAC2006: A comprehensive neutronics calculation code system[R]. Ibarakiken: Japan Atomic Energy Agency, 2007.
- [9] X-5 Monte Carlo Team. A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 5 [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [10] 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]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2012, 32(4): 306-314(in Chinese).
- [11] ILAS G, RAHNEMA F. A Monte Carlo based nodal diffusion model for criticality analysis of spent fuel storage lattices[J]. Annals of Nuclear Energy, 2003, 30(1): 1 089-1 108.
- [12] REITSMA F, STRYDOM G, DE HAAS J B M, et al. The PBMR steady-state and coupled kinetics core thermal-hydraulics benchmark test problems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(1): 657-668.
- [13] MPHABLELEA R, OUGOUAGB 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.