



·研究堆应用技术专题·

Dragon 程序在金属燃料铅铋快堆堆芯 计算中的应用与偏差分析*

张 亮, 孙 胜, 孙寿华, 杨文华

(中国核动力研究设计院 反应堆运行与应用研究所, 成都 610213)

摘 要: 铅铋合金或铅冷却快堆(LFR)是具有良好应用前景的第四代先进核能系统之一。针对环形芯体金属燃料(UZr, UPuZr)LFR的燃料组件与堆芯,利用Dragon/Donjon程序开展中子学计算,获得了基于ENDF/B 8.0库的172群和295群多群中子数据库、输运方法(SP3)和扩散方法(MCFD)的结果及其与蒙卡程序RMC的偏差。采用SP3算法针对UZr燃料得到的 k_{eff} 偏差小于 550×10^{-5} ;对于UPuZr燃料采用MCFD算法得到的 k_{eff} 偏差小于 -700×10^{-5} 。控制棒组件价值的偏差小于7.6%;172群和295群库的结果基本无差异。应用SP3算法的燃料组件功率偏差小于 $\pm 6.0\%$;SP3算法的偏差小于MCFD的。结果证明,Dragon/Donjon程序在金属燃料铅铋快堆物理分析中具有可行性。

关键词: 铅铋快堆;金属燃料;反应堆物理;Dragon/Donjon程序

中图分类号: TL352

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220001

Preliminary application of neutronics calculation in LFR reactor with metallic fuel using dragon code

Zhang Liang, Sun Sheng, Sun Shouhua, Yang Wenhua

(Reactor Operation and Application Sub-Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: Lead-bismuth/lead cooled fast reactor (LFR) is one of the fourth-generation advanced nuclear energy systems with good application prospects. Aiming at the application of two metallic fuels (UZr, UPuZr) with annular slug in an LFR fuel assembly and a typical LFR core, the Dragon/Donjon code was used to perform neutronics calculations. The results of 172-group and 295-group neutron databases based on the ENDF/B 8.0 library and the transport method (SP3) and the diffusion method (MCFD) were obtained and compared with the results using RMC code. The k_{eff} deviations using SP3 algorithm for UZr fuel are less than 550×10^{-5} , and for UPuZr fuel, the k_{eff} deviations obtained by MCFD algorithm are less than -700×10^{-5} . The maximum deviation of control rod worth is 7.6%, and the results using 172-grouplib and 295-grouplib are basically the same. By using the SP3 algorithm, the fuel assembly power deviations are less than $\pm 6.0\%$, and the deviation with the SP3 algorithm is less than that with MCFD algorithm. The results preliminarily prove the feasibility of the Dragon/Donjon code for reactor physics analysis of LFR with metallic fuel.

Key words: lead bismuth cooled fast reactor, metallic fuel, reactor physics, Dragon/Donjon code

与氧化物燃料相比,金属燃料(如UZr,UPuZr,PuZr等)具有高热导率、低燃料温度、高裂变物质密度、更硬的中子能谱,在快堆中比氧化物燃料具有更大的增殖比^[1]。铅铋合金或铅冷却快堆(LFR)是第四代先进核能系统的六大堆型之一,在中小型核电与特种用途方面具有良好的应用前景^[2]。将金属燃料与LFR堆结合是一种较新的设计,仅少量文献提到了LFR中应用金属燃料以获得超长寿命堆芯的尝试^[3-4]。

相对于成熟的钠冷快堆(SFR),不同的程序、模型与算法以及核数据库得到的全堆中子学参数均存在较大差

* 收稿日期:2022-01-04; 修订日期:2022-03-14

基金项目:四川省青年科技创新研究团队项目(2022JDTD0006)

联系方式:张 亮, 552181112@qq.com。

通信作者:孙寿华, 1319049712@qq.com。

异^[5];考虑到堆型与燃料的显著差异,有必要针对金属燃料 LFR 开展堆芯中子学程序的对比与验证。确定论程序结合组件-堆芯“两步法”是应用最广的反应堆物理分析方法,可保证一定精度且具有较高计算效率;针对金属燃料 LFR 开展基于确定论程序-“两步法”的对比计算与适用性评价具有较强的现实意义。

加拿大蒙特利尔技术学院开发的确定论反应堆物理数值计算程序包 Dragon^[6],包含组件计算程序 Dragon 和堆芯计算程序 Donjon^[6]。文献 [7-12] 报道了 Dragon/Donjon 程序在轻水堆、熔盐堆、SFR 上的应用情况,结合蒙特卡罗程序或实验测量值验证了其在上述堆型中子学分析中的适用性^[9-12],但缺少对金属燃料或 LFR 的分析。本文针对两种环形芯体金属燃料(UZr, UPuZr)LFR 的燃料组件和堆芯,利用 Dragon/Donjon 程序进行建模与中子学计算分析,并与蒙卡程序 RMC^[13]进行对比。

1 燃料组件与堆芯模型

采用铅铋共晶合金(LBE)冷却、热功率 1000 MW 的 LFR,堆芯由 379 个组件组成:78 个内区燃料组件(FA-i)、102 个外区燃料组件(FA-o)、15 个控制棒组件(CR-P)、4 个安全停堆组件(CR-S)、180 个径向反射层组件(RR)。堆芯布置参考文献 [5] 中的金属堆芯,如图 1 所示。

燃料组件为六边形结构,由组件盒和由绕丝定位的 271 根燃料棒束组成,燃料组件结构如图 2 所示。燃料组件轴向分为 4 段,由上至下分别为上部反射层段(UAR)、气腔段(GC)、芯体段(FA)和下部反射层段(LAR);燃料组件的反射层段为实心棒,棒外径与燃料段和气腔段一致。

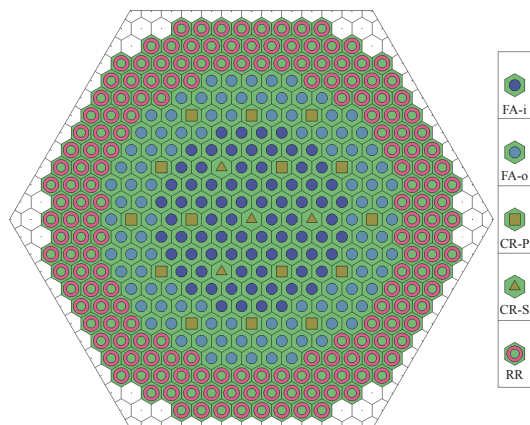


Fig. 1 Core arrangement of an LFR core

图 1 铅铋堆芯布置图

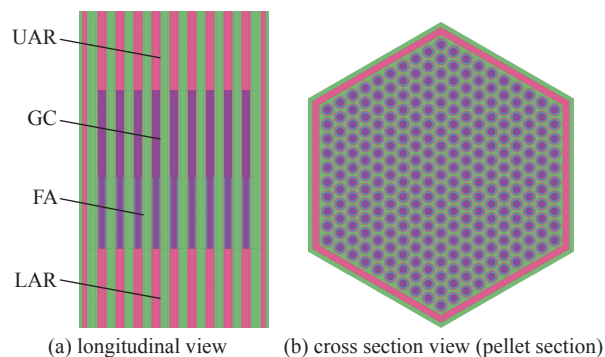


Fig. 2 Geometric structure of fuel assembly

图 2 燃料组件结构图

径向反射层组件由组件盒和实心棒束组成,轴向不分段。两种控制棒组件均为棒束结构,棒内为采用¹⁰B 富集度为 65% 的 B₄C 芯块;轴向分为 4 段,由上至下分别为冷却剂段(LBE)、毒物段(CR)、冷却剂段(LBE)和下部反射层段;其下部反射层段与 RR 组件结构一致,冷却剂段即为填充冷却剂与组件盒。293 K 时各组件结构设计参数和堆芯轴向各段长度如表 1 所示,组件尺寸参数来自于 SFR 基准题^[14]。

UZr 燃料棒和 UPuZr 燃料棒采用环形芯体,其有效体积分数为 55%;芯体中 Zr 的质量分数均为 10%。UZr 燃料的²³⁵U 富集度为 17%;UPuZr 燃料中 Pu 的质量分数为 13.5%,²³⁵U 的富集度为 0.4%,²³⁵U 和 Pu 的质量占全部 U 和 Pu 质量之和的 15.3%。Pu 元素中各同位素的比例与文献 [14] 相同。与 SFR 中采用钠结合层的圆柱芯体燃料棒不同,本研究的金属燃料棒采用了与包壳直接贴合的圆环形芯体设计。

燃料包壳、组件盒、反射层组件棒束等结构均采用 HT9 不锈钢。293 K 设计状态下,UZr 燃料、UPuZr 燃料、B₄C 芯块和 HT9 材料的密度分别取 16.02, 15.804, 2.40, 7.772 g/cm³,材料线膨胀系数和 LBE 的密度等参考文献 [14-16]。

2 计算模型与方法

2.1 组件群常数计算

基于 ENDF/B 8.0 库^[17]的 172 群和 295 群中子截面数据库(Dragon 程序自带),采用 Dragon 程序建立组件均匀化群常数库时,中子通量密度求解采用碰撞概率方法(NXT 模块),核素的自屏蔽计算采用子群方法(USS 模块),使用 FLU 模块中的基模修正 B1 模型与输运修正 PNL 模型求解扩散系数,并利用超级均匀化方法(SPH)进行群常

表 1 燃料组件、径向反射层组件和控制棒组件的设计参数 (293 K)

Table 1 Designed dimensions of fuel, radial reflector and control rod assemblies (293 K)

item	number of rods in assembly	Hexcan outer flat-to-flat size/mm	Hexcan wall thickness/mm	pin pitch/mm	pin cladding inner diameter/mm	pin cladding outer diameter/mm	pin cladding thickness/mm
fuel assembly	271	173	4.5	9.80	7.37	8.500	0.565
radial reflector assembly	91	173	4.5	16.90	—	15.838	—
CR assembly	31	173	4.5	22.77	18.00	19.000	0.500
item	pin cladding outer diameter, including wrap wires/mm	fuel pellet outer diameter/mm	fuel pellet inner hole diameter/mm	absorber pellet diameter/mm	rod body outer diameter of CR assembly/mm	rod body wall thickness of CR assembly/mm	assembly (section) axial length/m
fuel assembly	8.584	7.37	4.944	—	—	—	upper reflector section: 0.5 gas chamber section: 1.1 fuel pellet section: 0.9 lower reflector section: 0.5
radial reflector assembly	—	—	—	—	—	—	3.0
CR assembly	—	—	—	17	149	2	absorber pellet section: 1.0 lower reflector section: 0.5 LBE section: 1.5

数修正。并群后的组件群常数为 24 群结构, 该能群结构和最大能群上限值与文献 [18-19] 相似, 具体能群划分如表 2 所示。

燃料组件采用全反射边界的二维组件模型, 如图 3(a) 所示, 芯体、包壳和棒束均详细建模, 组件盒与盒间冷却剂均匀打混处理。其他非燃料组件或组件轴向段采用“超栅元”模型, 由 6 个均匀打混的燃料组件环绕着待解组件^[18], 整个模型外侧采用全反射边界条件。对于控制棒组件, 其棒束套筒并入组件盒处理, 毒物棒束则准确建模, 其计算模型如图 3(b) 所示。对于堆芯燃料区域边缘(即与 1~3 个 RR 组件相邻)的 FA-o 组件, 同样采用超栅元计算模型, 居中的待解组件建模方法与燃料组件相同, 周围环绕着 4 个打混的燃料组件和 2 个打混的 RR 组件, 其计算模型如图 3(c) 所示。这种方法可以近似考虑外围燃料组件处的中子泄露效应, 有利于降低此位置的组件功率计算偏差。

因温度变化引起的结构变化, 包壳和组件盒的尺寸、燃料棒栅距等依据材料线膨胀系数计算得到; 各结构的材料密度随尺寸变化而调整, 以保证质量守恒。金属燃料芯体、B₄C 芯体均只考虑轴向一维膨胀, 密度随轴向热膨胀而相应调整。包壳、组件盒、其他打混组件考虑为均匀的三维膨胀, 密度随温度相应改变。

2.2 三维堆芯计算模型与求解方法

按照图 1 所示的堆芯布置, 利用 Donjon 程序建立三维堆芯计算模型; 以组件为基本节块, 每个组件的轴向各段再进行网格细分, 堆芯模型的轴向结构如图 4 所示; 堆芯模型最外侧采用真空边界条件。在中子通量密度的空间求解上, 采用两种方法进行计算: 基于扩散理论的网格中心有限差分法 (MCFD)、3 阶简化球谐函数方法 (SP3)^[20]。在组件网格划分方面, 前者将六边形的组件节块等分为 6 个正三角形网格

表 2 并群后的 24 群能群结构

Table 2 24 group energy structure for condensation

group number	upper energy limit of 172-group lib/eV	upper energy limit of 295-group lib/eV
1	19.6400×10 ⁶	19.6400×10 ⁶
2	10.0000×10 ⁶	10.0000×10 ⁶
3	6.0653×10 ⁶	6.0653×10 ⁶
4	3.0119×10 ⁶	3.3287×10 ⁶
5	2.0190×10 ⁶	1.9014×10 ⁶
6	1.2246×10 ⁶	1.2870×10 ⁶
7	8.2085×10 ⁵	8.6001×10 ⁵
8	4.9787×10 ⁵	4.9400×10 ⁵
9	3.0197×10 ⁵	3.2065×10 ⁵
10	1.2277×10 ⁵	1.6506×10 ⁵
11	1.1109×10 ⁵	1.1562×10 ⁵
12	6.7379×10 ⁴	6.7379×10 ⁴
13	3.6979×10 ⁴	3.6979×10 ⁴
14	1.6616×10 ⁴	2.2699×10 ⁴
15	1.5034×10 ⁴	1.4900×10 ⁴
16	9.1188×10 ³	9.1188×10 ³
17	5.0045×10 ³	5.0045×10 ³
18	3.3546×10 ³	3.4811×10 ³
19	1.5073×10 ³	1.8118×10 ³
20	1.2341×10 ³	1.1347×10 ³
21	6.7729×10 ²	6.7729×10 ²
22	3.7170×10 ²	4.1909×10 ²
23	3.0432×10 ²	2.9592×10 ²
24	1.3674×10 ²	1.4666×10 ²
lower energy		1.0000×10 ⁻⁵

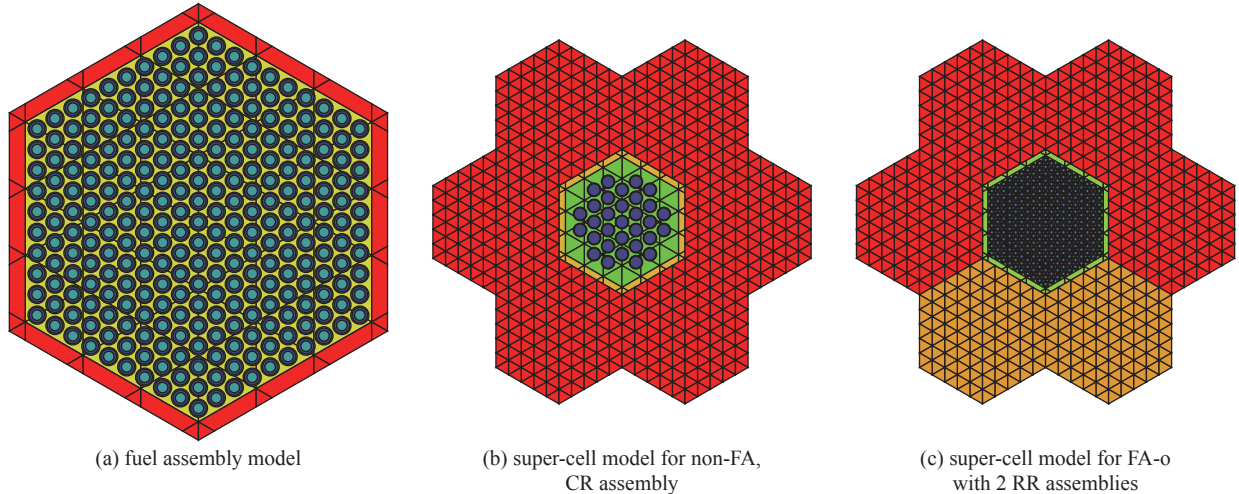


Fig. 3 Calculation models for assembly group constant computation

图 3 用于群常数制作的组件计算模型

(节块中心为正三角形网格的共同顶点), 后者则等分为 3 个相同的菱形网格(节块中心为菱形网格的共同顶点)。堆芯模型中不同轴向段结构的轴向均分网格数量如图 4 所示。针对不同燃料组件轴向网格数量的堆芯模型进行计算, 发现当轴向节块数量为 30 时, 进一步增加节块数量对 k_{eff} 的影响可以忽略, 因此, 燃料组件轴向均分为 30 段时的堆芯计算模型满足网格独立性要求。

采用反应堆物理分析用蒙特卡罗程序 RMC^[13] 建立精细的燃料组件(二维)和 LFR 三维堆芯模型, 采用 ENDF/B 8.0 连续能量中子截面库进行计算, 其结果用于与 Dragon/Donjon 程序的对比分析。按照图 1 所示的堆芯组件分布以及图 2、表 1 所示的组件结构与尺寸, 利用 RMC 显式地建立精细的三维堆芯模型, 其最外侧边界为真空边界。温度引起的各结构尺寸变化与密度变化, 其处理方式与 Dragon 一致; 控制棒全抽出时, 始终保持毒物段下端与燃料组件芯体段上端面平齐; 相同堆芯状态下, RMC 模型与 Donjon 模型中各控制棒的位置均保持一致。针对燃料组件和堆芯两类算例, RMC 计算时每代均投入 40 000 个中子, 分别计算 750 代和 1050 代(结果统计时均略去前 50 代), 使得组件 k_{inf} 或堆芯 k_{eff} 计算结果的统计偏差均小于 0.000 08, 堆芯算例中燃料组件功率的统计偏差小于 0.33%。

3 计算结果与讨论

3.1 燃料组件的计算结果

针对采用全反射边界的单盒 LFR 燃料组件, 采用 Dragon 程序进行多群输运计算, 并与 RMC 程序的结果进行比较。燃料组件冷却剂密度效应定义为燃料组件内以及组件间隙的 LBE 为 293 K 和 1200 K 时的反应性变化值 ($\Delta\rho_{\text{LBE}}$)。燃料组件的燃料多普勒系数(k_D)采用式(1)计算。其中 T_1, T_2 分别为 293, 900 K, $k_{\text{inf},1}$ 和 $k_{\text{inf},2}$ 分别为相应温度下燃料组件的无限增殖因子。

$$k_D = \frac{1/k_{\text{inf},1} - 1/k_{\text{inf},2}}{\ln(T_2/T_1)} \quad (1)$$

length (at 293 K)/cm	node number	inner FA	outer FA	RR	S-CR	P-CR
50	5	UAR-i	UAR-o		LBE	LBE
10	2					
50	4	GC-i	GC-o			
50	5				RR	CR
90	30	FA-i	FA-o		LBE	LBE
50	5	LAR-i	LAR-o		RR	RR

FA: fuel pellet of fuel assembly; GC: gas chamber of fuel assembly; AR: axial reflector of fuel assembly; CR: B₄C pellet section of control rod assembly; LBE: assembly section with empty HEXCAN and coolant. I/O: inner/outer fuel zone; U/L: upper/lower part of core.

Fig. 4 Calculation model of an LFR core with Dragon/Donjon code

图 4 Dragon/Donjon 程序中的 LFR 堆芯计算模型示意图

293 K 时燃料组件 k_{inf} 及其与 RMC 结果的反应性偏差如表 3 所示, 冷却剂密度效应和燃料多普勒效应的计算结果与偏差分别如表 4、表 5 所示, 表中均列出了基于两种库的 Dragon 结果。为便于比较, 组件计算中也列入 UO_2 燃料的结果, 其 ^{235}U 富集度为 16%。

表 3 铅铋堆燃料组件中子无限增殖因子的计算结果
Table 3 Calculation results of k_{inf} in an LFR fuel assembly

solution	k_{inf}			difference with RMC/ 10^{-5}		
	UZr fuel assembly	UPuZr fuel assembly	UO_2 fuel assembly	UZr fuel assembly	UPuZr fuel assembly	UO_2 fuel assembly
RMC code	1.33254	1.35197	1.23743	—	—	—
Dragon code (172-group lib)	1.31722	1.33137	1.22903	-873	-1144	-552
Dragon code (295-group lib)	1.31272	1.32382	1.22524	-1133	-1573	-804

表 4 铅铋堆燃料组件冷却剂密度效应的计算结果
Table 4 Calculation results of coolant density effect in an LFR fuel assembly

solution	reactivity change of coolant density effect, $\Delta\rho_{LBE}/10^{-5}$			relative difference/%		
	UZr fuel assembly	UPuZr fuel assembly	UO_2 fuel assembly	UZr fuel assembly	UPuZr fuel assembly	UO_2 fuel assembly
RMC code	265	383	214	—	—	—
Dragon code (172-group lib)	247	374	224	-6.8	-2.3	4.7
Dragon code (295-group lib)	248	375	223	-6.4	-2.1	4.2

表 5 铅铋堆燃料组件燃料多普勒系数的计算结果
Table 5 Calculation results of fuel Doppler coefficient in an LFR fuel assembly

solution	fuel Doppler coefficient, $k_D/10^{-5}$			relative difference/%		
	UZr fuel assembly	UPuZr fuel assembly	UO_2 fuel assembly	UZr fuel assembly	UPuZr fuel assembly	UO_2 fuel assembly
RMC code	-297	-380	-743	—	—	—
Dragon code (172-group lib)	-280	-359	-715	-5.7	-5.5	-3.8
Dragon code (295-group lib)	-300	-378	-725	1.0	-0.5	-2.4

由表 3 可知, Dragon 程序得到的 k_{inf} 均小于 RMC 的, 且基于 295 群库的 k_{inf} 均比 172 群库偏小 $(250\sim 430)\times 10^{-5}$; 对于 UO_2 燃料组件 k_{inf} , Dragon 与 RMC 的偏差与文献值相当, 金属燃料的偏差大于 UO_2 燃料的。

由表 4 和表 5 可知, Dragon 程序得到的冷却剂密度效应与 RMC 的吻合良好, UZr 燃料与 UPuZr 燃料的偏差分别约 -6.6% 和 -2.2%, 不同库的结果基本无差异。对于燃料组件 k_D , 3 种燃料的计算偏差均较小, 且基于 295 群库的偏差显著小于 172 群库的; 基于 295 群库的 UZr 燃料与 UPuZr 燃料的偏差分别为 1.0% 和 -0.5%。

对比第四代堆中最成熟的 SFR, 文献 [18-19] 报道的确定论组件程序得到的 MOX 燃料组件 k_{inf} 与蒙卡程序的偏差为 $(450\sim 800)\times 10^{-5}$; 并指出是燃料中主要成分 ^{238}U 共振吸收反应率的计算偏差, 深层次原因包括多群库的中子权重能谱的差异、组件程序共振处理方法差异等^[19]。Dragon 的组件 k_{inf} 偏小的原因, 包含上述因素的影响, 同时也可以从 Dragon 与 RMC 的中子能谱差异中得到佐证。

图 5 为 Dragon 与 RMC 得到的 UZr 燃料中子能谱。由图 5 可知, 能量区间 [10 keV, 1 MeV] 内的中子通量密度 (ϕ) 占主要部分, 超出此区间的 ϕ 快速减小; 在 [100 eV, 10 keV] 区间, Dragon 得到的 ϕ 明显大于 RMC 的, 其能谱相对偏软。对于归并后的 24 群中子能谱, [23 keV, 20 MeV] (1~13 群) 的中子能量区间内, Dragon 程序的中子能谱与 RMC 的吻合良好, 大部分能群的计算偏差均小于 $\pm 3.5\%$ (其中第 8 群与第 10 群的偏差 -7.5%~ -10%)。[1 keV, 23 keV] (14~19 群) 的

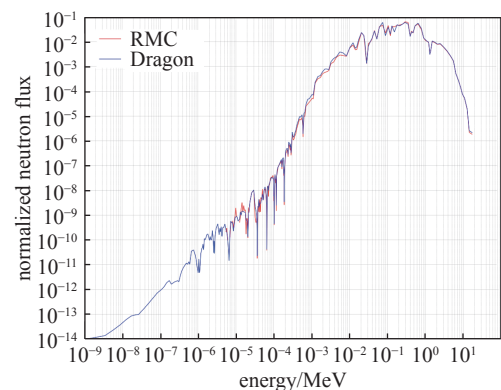


Fig. 5 Neutron spectrum of UZr fuel in a fuel assembly using Dragon or RMC code

图 5 Dragon/RMC 程序得到的 UZr 燃料组件中子能谱

中子能量区间内, Dragon 得到的 ϕ 比 RMC 的偏大 10%~22%(金属燃料)、偏大 2%~8%(UO_2 燃料); 该能区为 ϕ 较大的 ^{238}U 可分辨共振吸收区, ϕ 偏大使得 ^{238}U 的共振吸收增加, 进而使得 Dragon 组件 k_{inf} 偏小。

3.2 堆芯计算结果与偏差

针对金属燃料的 LFR 堆芯, 采用 Dragon 程序制作的组件群常数库, 用 Donjon 程序进行堆芯计算, 并与 RMC 程序的结果进行比较。堆芯温度为 293 K, CR-P, CR-S 组件均为全抽出状态时, 金属燃料 LFR 堆芯 k_{eff} 的计算结果如表 6 所示。

表 6 Dragon/Donjon 程序得到的铅铋堆 k_{eff} 及其计算偏差 (293 K)
Table 6 k_{eff} and its discrepancy of a LFR core using Dragon/Donjon code (293 K)

solution		k_{eff}		difference with RMC/ 10^{-5}	
		LFR core with UZr fuel	LFR core with UPuZr fuel	LFR core with UZr fuel	LFR core with UPuZr fuel
RMC code		1.02934	1.03132	—	—
172-group lib	MCFD	1.04436	1.03005	1398	-120
	SP3	1.03517	1.01923	548	-1151
295-group lib	MCFD	1.04139	1.02432	1124	-663
	SP3	1.03102	1.01247	159	-1805

由表 6 可知, 与组件 k_{inf} 计算结果类似, 295 群库的 k_{eff} 均小于 172 群库; 相同条件下同一堆芯计算模型中, 采用 SP3 算法得到的 k_{eff} 大幅度小于 MCFD 的, 前者的 k_{eff} 比后者偏小 $(900\sim 1200)\times 10^{-5}$, 这一点与采用 MOX 燃料的 SFR 基准题结果基本相同^[12]。另外, 对于 UZr 燃料的算例, Dragon/Donjon 得到 k_{eff} 均偏大, 对于 UPuZr 燃料则均偏小。对于 UZr 燃料, 采用 SP3 算法得到的 k_{eff} 与 RMC 的偏差较小, 分别为 548×10^{-5} (172 群库)、 159×10^{-5} (295 群库); 对于 UPuZr 燃料, 则采用 MCFD 算法的 k_{eff} 与 RMC 的偏差较小, 分别为 -120×10^{-5} (172 群库)、 -663×10^{-5} (295 群库)。考虑到基准题文献 [5] 中不同软件与计算方法关于金属燃料 SFR 堆芯 k_{eff} 的标准偏差为 $\pm 780\times 10^{-5}$, UZr 燃料 LFR 堆芯采用 SP3 算法、UPuZr 燃料 LFR 堆芯采用 MCFD 算法得到的 k_{eff} 偏差符合工程计算需求。

表 7 为金属燃料 LFR 堆芯的控制棒价值计算结果, 堆芯温度为 293 K, 停堆组件 CR-S 为全抽出状态。

表 7 Dragon/Donjon 程序得到的铅铋堆控制棒组件价值及其计算偏差
Table 7 Discrepancy of control rod worth of an LFR core using Dragon/Donjon code

solution		CR worth/ 10^{-5}		relative difference/%	
		LFR core with UZr fuel	LFR core with UPuZr fuel	LFR core with UZr fuel	LFR core with UPuZr fuel
RMC code		-10570	-10022	—	—
172-group lib	MCFD	-10459	-10250	-1.1	2.3
	SP3	-11056	-10787	4.6	7.6
295-group lib	MCFD	-10405	-10235	-1.6	2.1
	SP3	-10985	-10743	3.9	7.2

由表 7 可知, 两种金属燃料 LFR 控制棒组件价值的计算偏差均较小; 两种多群库的结果基本无差异; MCFD 的偏差为 $-1.6\%\sim 2.3\%$, SP3 的偏差为 $3.9\%\sim 7.6\%$, 均显著小于基准题文献 [5] 中金属燃料 SFR 控制棒价值的计算偏差 ($\pm 11\%$)。

表 8 为金属燃料 LFR 堆芯燃料组件功率的相对计算偏差, 堆芯温度为 293 K, CR-S 组件为全抽出状态, CR-P 组件为抽出或临界棒位状态。表 8 还给出了全堆燃料组件功率计算偏差的最大值 (Max)、最小值 (Min) 和均方根值 (RMS)。

由表 8 可知, 应用 295 群库与 MCFD 算例的组件功率最大偏差绝对值小于 10%, 组件功率偏差的均方根为 $3.4\%\sim 4.3\%$; 其余 3 种算例的偏差小于 $\pm 6.0\%$, 组件功率偏差的均方根仅 $1.3\%\sim 2.4\%$ 。总体而言, Dragon/Donjon 程序得到的燃料组件功率与 RMC 的结果吻合良好, SP3 算法得到的组件功率偏差小于 MCFD 的。

4 结 论

针对两种环形芯体金属燃料 (UZr, UPuZr) LFR 的燃料组件和堆芯, 利用 Dragon/Donjon 程序和 RMC 程序进行

表8 Dragon/Donjon程序得到的铅铋堆燃料组件功率的计算偏差(D/R-1)
Table 8 Discrepancy of fuel assembly power of an LFR core using Dragon/Donjon code (D/R-1)

XS library	method	relative difference of LFR core with UZr fuel/%			relative difference of LFR core with UPUZr fuel/%			
		Max	Min	RMS	Max	Min	RMS	
CR-P and CR-S withdrawn	172-group lib	MCFD	1.6	-4.4	1.7	1.7	-4.8	1.9
		SP3	5.5	-1.5	1.8	3.9	-1.3	1.4
	295-group lib	MCFD	3.0	-8.9	3.7	2.7	-8.3	3.4
		SP3	1.4	-3.9	1.4	1.3	-3.7	1.3
CR-P at critical location; CR-S withdrawn	172-group lib	MCFD	3.2	-5.4	2.3	3.1	-5.9	2.4
		SP3	5.1	-1.7	1.7	3.9	-1.9	1.3
	295-group lib	MCFD	4.7	-9.9	4.3	4.3	-9.2	4.0
		SP3	2.2	-4.7	1.9	2.1	-4.9	1.8

建模与中子学计算,对比分析该程序以及相应计算方法在金属燃料LFR中子学计算中的可行性。

(1) 针对两种金属燃料(UZr, UPUZr)的LFR燃料组件,Dragon程序得到的 k_{inf} 比RMC的偏低,冷却剂密度效应和燃料多普勒效应的计算偏差较小。

(2) 针对两种金属燃料的冷态LFR堆芯,Dragon/Donjon程序采用SP3算法针对UZr燃料得到的 k_{eff} 计算偏差小于 550×10^{-5} ;对于UPUZr燃料采用MCFD算法得到的 k_{eff} 计算偏差小于 -700×10^{-5} 。

(3) 对于金属燃料LFR的控制棒组件价值,Dragon/Donjon程序与RMC程序吻合良好;MCFD的偏差为 $-1.6\% \sim 2.3\%$,SP3的偏差为 $3.9 \sim 7.6\%$;172群和295群中子截面库的结果基本无差异。

(4) 对于金属燃料LFR的燃料组件功率,Dragon/Donjon程序与RMC程序的偏差较小;应用SP3算时的计算偏差小于 $\pm 6.0\%$,计算偏差的均方根为 $0.7\% \sim 2.8\%$;SP3算法得到的组件功率偏差总体小于MCFD的。

(5) 在金属燃料LFR堆芯物理分析中,Dragon/Donjon程序以及相应计算方法具备初步的可行性;仍需要就组件 k_{inf} 偏差问题、快堆专用多群库制作、燃耗计算、反应性系数对比、基准题测试等内容开展进一步工作。

参考文献:

- [1] Carmack J. Fuel development for advanced reactors[R]. Washington DC: Department of Energy, 2016.
- [2] Waltar A E, Todd D R, Tsvetkov P V. Fast spectrum reactors[M]. New York, USA: Springer, 2012.
- [3] Mum J W, Kin H J, Sweidan F B, et al. Metallic fuel performance evaluation for micro lead cooled fast reactor[C]//Proceedings of Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting. 2020.
- [4] 邹小亮, 柏云清, 王明煌, 等. 铅冷行波堆堆芯物理设计及中子学特性分析[J]. 核科学与工程, 2018, 38(4): 590-597. (Zou Xiaoliang, Bai Yunqing, Wang Minghuang, et al. Core neutronics design and analysis for the Pb-cooled traveling wave reactor[J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(4): 590-597)
- [5] Nuclear Energy Agency. Benchmark for neutronic analysis of sodium-cooled fast reactor cores with various fuel types and core sizes[R]. NEA/NSC/R(2015)9, 2016.
- [6] Hébert A. DRAGON5 and DONJON5, the contribution of École Polytechnique de Montréal to the SALOME platform[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Physics and Technology of Reactors and Applications. Tetouan, Morocco, 2014.
- [7] Sukarno D H. Neutronics analysis of PWR core using DRAGON, TRIVAC, and DONJON computer codes[C]//The 2nd International Conference on Energy Sciences (ICES). Bandung, Indonesia, 2018.
- [8] Al Zain J, El Hajjaji O, El Bardouni T, et al. Deterministic evaluation of safety parameters and neutron flux spectra in the MNSR research reactor using DRAGON-4 code[J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2018, 11(3): 255-261.
- [9] 赵文博, 谢金森, 谢芹, 等. DRAGON&DONJON程序在MSR中堆芯燃耗计算的适用性[J]. 核技术, 2017, 40: 060602-862. (Zhao Wenbo, Xie Jinsen, Xie Qin, et al. Feasibility of DRAGON&DONJON code for MSR core burnup calculation[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40: 060602-862)
- [10] 贾国斌, 伍建辉, 陈金根, 等. 基于Dragon与Donjon程序的液态熔盐实验堆临界计算与分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(5): 853-862. (Jia Guobin, Wu Jianhui, Chen Jingen, et al. Critical calculation and analysis of liquid molten salt experimental reactor based on Dragon and Donjon codes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(5): 853-862)
- [11] Choi H, Choi M, Hon R. Benchmarking DRAGON/PARCS against KRITZ and FFTF measurements[J]. Nuclear Technology, 2019, 205(3): 486-505.
- [12] Ponomarev A, Mikityuk K, Zhang Liang, et al. Superphénix benchmark Part I: results of static neutronics[J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2022, 8: 011320.
- [13] Wang Kan, Li Zeguang, She Ding, et al. RMC - a Monte Carlo code for reactor core analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 85: 121-129.
- [14] Ponomarev A, Bednarova A, Mikityuk K. New sodium fast reactor neutronics benchmark[C]//Proceeding of PHYSOR 2018: Reactor Physics Paving the Way

Towards More. Cancun, Mexico, 2018.

- [15] Hofman G L, Leibowitz L, Kramer J M, et al. Metallic fuels handbook[R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 1985.
- [16] Nuclear Energy Agency. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies[M]. Nuclear Energy Agency, 2015.
- [17] Brown D A, Chadwick M B, Capote R, et al. ENDF/B-VIII. 0: the 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data[J]. [Nuclear Data Sheets](#), 2018, 148: 1-142.
- [18] Faure B, Marleau G. Simulation of a sodium fast reactor: effect of B_1 leakage models on group constant generation[J]. [Annals of Nuclear Energy](#), 2017, 99: 484-494.
- [19] Rachamin R, Wemple C, Fridman E. Neutronic analysis of SFR core with HELIOS-2, serpent, and DYN3D codes[J]. [Annals of Nuclear Energy](#), 2013, 55: 194-204.
- [20] Hebert A, Sekki D, Chambon R. A user guide for DRAGON version5[M]. Canada: École Polytechnique de Montréal, 2019.