

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.02.019

基于 FLUENT 的 UDS 和 UDF 功能的中子扩散耦合计算研究与快堆应用分析

张雪贝, 王 驰, 陈红丽
(中国科学技术大学物理学院, 合肥 230027)

摘 要: 随着计算机性能的不断提高, 用 CFD 与中子学相结合的方法分析复杂的流动与传热现象引起了人们的广泛关注. 本文基于 FLUENT 的 UDF (User Defined Function) 和 UDS (User Defined Scalar) 功能对中子扩散方程进行定义, 利用 FLUENT 内基于有限容积法的求解器对中子扩散方程进行迭代求解, 耦合质量、动量、能量方程的迭代求解, 在每次迭代计算时, 将中子扩散方程迭代计算得到的功率分布(中子通量分布)传递给热工水力计算作为热源项, 同时将热工水力计算得到的温度分布传递给中子扩散计算, 修正材料的宏观反应截面, 实现中子扩散和热工水力在同一求解器和同一套网格下的耦合计算. 通过对 5×5 压水堆组件模型进行建模和计算, 将计算结果与其他程序计算结果进行对比, 验证该耦合计算方法的可行性和数据传递的正确性. 然后将该耦合方法应用到模块化铅冷快堆(M²LFR-1000)热组件计算中, 证明热工水力学参数(燃料最高温度, 包壳外表面最高温度)在设计限值范围内.

关键词: 核热耦合; UDS; UDF; 5×5 压水堆组件; M²LFR-1000 热组件

中图分类号: TL333 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)02-0324-09

Research on neutron diffusion coupling calculation based on the UDS and UDF functions of FLUENT and its application analysis on fast reactor

ZHANG Xue-Bei, WANG Chi, CHEN Hong-Li
(School of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: With the great improvement of computer performance, analyzing the complex flow and heat transfer phenomenon by coupling CFD and neutronics has attracted lots of attentions nowadays. The study aims to investigate the neutron diffusion coupling calculation based on the UDF and UDS functions of FLUENT and its application analysis on fast reactor. The neutron diffusion equation is defined based on the UDF (User Defined function) and UDS (User Defined Scalar) functions of the FLUENT. The neutron diffusion equation is solved iteratively by using the solver of the FLUENT based on the finite volume method. At the same time, the mass, momentum and energy equations are solved iteratively. At each iteration, the power distribution (neutron flux distribution) obtained by the iteration of the neutron diffusion equation is transferred to the thermal-hydraulics calculation and is used as the heat source term. At the same time, the temperature distribution obtained from the thermal-hydraulics calculation is transferred to the neutron diffusion calculation and the macroscopic cross sections of the materials are

收稿日期: 2019-02-22
作者简介: 张雪贝(1993—), 男, 云南保山人, 硕士生, 研究领域为中子扩散求解程序开发及其与 FLUENT 的耦合计算研究.
E-mail: zxb1993@mail.ustc.edu.cn
通讯作者: 陈红丽. E-mail: hlchen1@ustc.edu.cn

corrected to realize the coupling calculation of the neutron diffusion and the thermal-hydraulics under the same solver of the FLUENT. Through the modeling and calculation of the 5×5 PWR assembly model and the hot assembly of a modular lead-cooled fast reactor (M²LFR-1000). It is proved that this method is feasible to realize the neutron diffusion and thermal-hydraulics coupling and the data transfer is correct. And the thermal hydraulics characteristics (the maximum fuel temperature and the maximum cladding outer surface temperature) of the M²LFR-1000 are all within the corresponding thermal-hydraulics design limits.

Keywords: Neutron diffusion and thermal-hydraulics coupling; UDF; UDS; 5×5 PWR assembly; M²LFR-1000 hot assembly

1 引言

传统上,反应堆设计和反应堆安全分析一般都使用最佳估算程序。随着计算机性能的提高和并行计算的发展^[1-2],反应堆的高置信度模拟在反应堆设计、方案优化和安全分析的研究中开始受到重视,只有考虑了反应堆模拟中的多物理反馈,才能实现高置信度模拟,而中子扩散和热工水力耦合计算是多物理耦合计算的重要组成部分^[3-8]。反应堆实际的运行就是中子学和热工水力相互反馈的一个过程。反应性的温度系数(燃料温度系数和慢化剂温度系数)是反应堆正常运行时实现反应性控制的重要因素^[9]。要实现反应堆运行和瞬态工况的准确的计算,必须要实时考虑燃料温度、慢化剂温度和密度对局部中子通量和系统反应性的影响。

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)程序 FLUENT 能够通过对质量连续方程,动量方程,能量守恒方程的耦合求解实现反应堆堆芯和燃料组件的精细模拟。因此将 CFD 模型与中子动力学模型耦合来进行反应堆安全分析的方法受到很大的关注^[10]。FLUENT 中的 UDS (User Defined Scalar)能够对一类扩散方程运用 Fluent 内的求解器进行求解,其在多物理场耦合计算已得到广泛应用。西安交通大学基于 FLUENT 的 UDF 和 UDS 功能开发 TASNAM 程序^[11],主要用于熔盐堆的中子扩散数值计算。海军工程大学基于商用软件 CFX 的用户接口编程功能,增加三维时空中子动力学模型,并与 CFD 热工水力学进行耦合,对压水堆稳态下局部三维流动行为和三维物理特性进行了数值模拟^[12]。

本文基于 FLUENT 的 UDF 和 UDS 功能,对中子扩散方程进行定义,利用 Gambit 进行精细建模并利用 FLUENT 内的求解器在同一套网格下实现中子扩散与热工水力的耦合计算。迭代计算

流程如图 1 所示。为验证耦合计算方法的可行性和数据传递的正确性,对 5×5 压水堆组件模型^[13]进行建模和耦合计算,并将计算结果与其它耦合程序计算结果进行对比。然后通过对 M²LFR-1000^[14]热组件的建模和耦合计算,得到组件稳态条件下的中子通量分布和温度分布,将热工水力参数(燃料最高温度,包壳外表面最高温度)和中子通道程序(KMC-SUB)^[15]的计算结果进行比较。

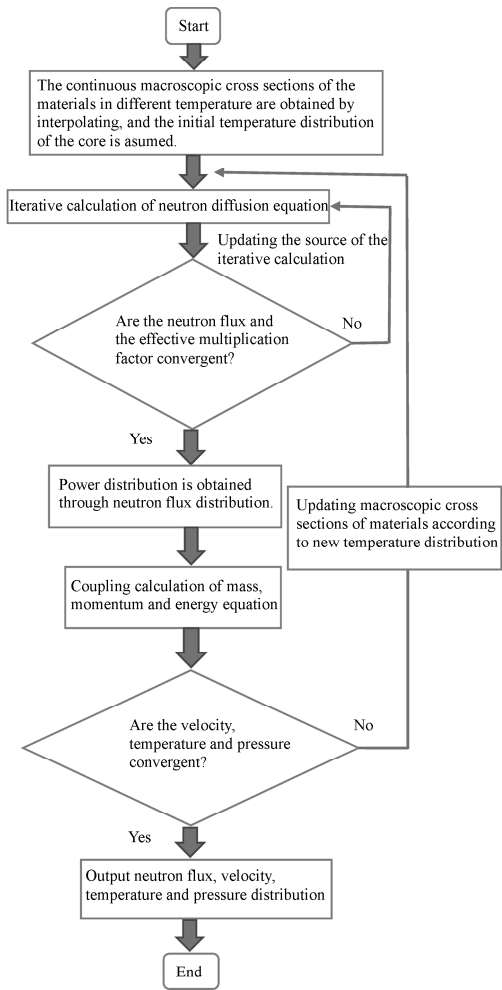


图 1 耦合计算流程图
Fig. 1 The flow chart of coupling calculation

2 计算方法和数学模型

2.1 FLUENT 的 UDS 模块

FLUENT 的 UDS 模块能够利用有限容积法对一类方程进行定义和运用其内在的求解器进行离散和求解,形式如式(1)所示:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\psi \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) = S_\phi \tag{1}$$

FLUENT 中方程各项定义如表 1 所示.

瞬态中子扩散方程与 UDS 定义中各项对应关系如式(2)所示,式(2)方程左端第一项为非稳态项,左端第二项为扩散项,方程右端为源项.

对于稳态计算,略去方程中的非稳态项.方程如式(3)所示.

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g(\vec{r}, t)}{\partial t} - \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g(\vec{r}, t) &= - \sum_{r, g} (\vec{r}, t) + \\ &\sum_{g' \neq g} \sum_{s, g' \rightarrow g} \phi_{g'}(\vec{r}, t) + \chi_g (1 - \beta) \sum_{g'=1}^G \nu \sum_{f, g'} \\ &\phi_{g'}(\vec{r}, t) + \sum_{i=1}^{ND} \chi_{g, i} \lambda_i C_i(\vec{r}, t), g = 1, \dots, G \tag{2} \\ - \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g(\vec{r}) &= - \sum_{r, g} (\vec{r}) + \\ &\sum_{g' \neq g} \sum_{s, g' \rightarrow g} \phi_{g'}(\vec{r}) + \chi_g \frac{\chi_{g, s}}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'=1}^G \nu \sum_{f, g'} \\ &\phi_{g'}(\vec{r}), g = 1, \dots, G \tag{3} \end{aligned}$$

式(3)中 $\phi_g(r)$ 代表中子通量,单位为 $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, D 代表中子扩散系数,单位为 cm , $\sum_f$ 为宏观裂变截面,单位为 cm^{-1} , $\sum_{g' \rightarrow g}$ 代表从 g' 群到 g 群的宏观转移截面,单位为 cm^{-1} , $\sum_r$ 为宏观消失截面,单位为 cm^{-1} , ν 为每次裂变释放的中子数, χ_g 为中子的裂变谱.

有效增殖系数由式(4)计算:

$$k_{\text{eff}}^{(n)} = \frac{\int_V \sum_{i=1}^G \nu \sum_{f, i} \phi_i^{(n)} dV}{[\int_V \sum_{i=1}^G \nu \sum_{f, i} \phi_i^{(n-1)} dV] / k_{\text{eff}}^{(n-1)}} \tag{4}$$

表 1 Fluent 中的 UDS 对方程的定义
Tab. 1 Definition of equation in the UDS of FLUENT

名称	表达式	各项需要在 UDS 中定义的量	在 UDS 中对应的宏
非稳态项	$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$	离散形式的非稳态项	DEFINE_UDS_UNSTEADY
对流项	$\frac{\partial}{\partial x_j} \psi \phi$	通量 ϕ	DEFINE_UDS_FLUX
扩散项	$-\Gamma \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2}$	扩散率 $\Gamma(T)$	DEFINE_DIFFUSIVITY
边界条件	ϕ 值		Specified Value
	ϕ 梯度值		Specified Flux

表 2 5×5 组件材料热物性
Tab. 2 Thermal properties of the assembly materials

材料	密度/ (g/cm³)	热导率/ (W/m·K)	比热/ (J/kg·K)	动力粘 度/(Pa·s)
燃料/ (UO2)	10.3	3.0	310	
包壳(Zircaloy-2)	6.5	11.0	330	
冷却剂(Water)		0.53		0.000 091 77
气隙(Helium)	0.000 162 5	0.152	5 193	

2.2 热工水力计算模型

冷却剂区域能量方程如式(5)所示:

$$(\rho_{\text{coolant}} c_{p, \text{coolant}} U \cdot \nabla T) = \beta_{\text{coolant}} U \cdot \nabla P + \nabla \cdot (k_{\text{coolant}} \nabla T) \tag{5}$$

燃料区域导热方程如式(6)所示:

$$-\nabla \cdot k_{\text{fuel}} \nabla T = q \tag{6}$$

$$q(r) = \gamma \sum_{g=1}^G \sum_{f, g} (r) \phi(r) \tag{7}$$

γ 为每次裂变释放的能量.

包壳和气隙导热方程如式(8),式(9)所示:

$$-\nabla \cdot k_{\text{cladding}} \nabla T = 0 \tag{8}$$

$$-\nabla \cdot k_{\text{gas}} \nabla T = 0 \tag{9}$$

2.3 材料温度截面库

通过 DRAGON 程序在已知材料核子密度条件下,同时考虑温度对材料密度的影响,通过能群归并,计算得到燃料,气隙,包壳,冷却剂在 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200, 1 300, 1 400, 1 500, 1 600 K 处的宏观截面,通过插值得到材料在 400~1 600 K 范围内的连续温度截面分布^[16],建立材料宏观截面和温度的函数关系,简写为式(10),然后将宏观截面温度分布函数通过 UDF 添加到 FLUENT 的求解器中,通过读取每次迭代后每个网格的新的温度分布更新每个网格的材料宏观截面.

$$\sum = f(T) \tag{10}$$

3 耦合计算方法验证

3.1 模型介绍

本文运用基于 FLUENT 的 UDF 和 UDS 功能得到中子扩散和热工水力耦合计算方法对 5×5 压水堆组件模型进行计算,材料热物性由表 2 给出,模型结构和参数由图 2 和表 3 给出,冷却剂密度和比热随温度变化由式(11),式(12)给出.

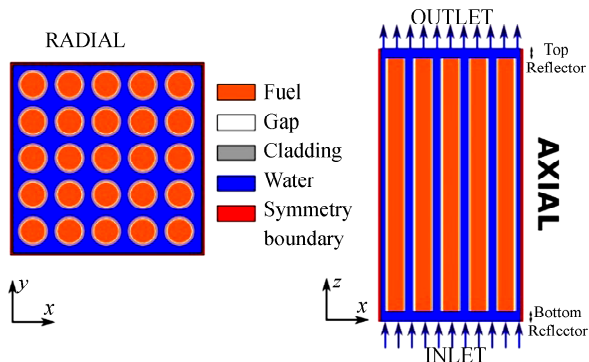


图 2 5×5 组件径向和轴向结构
Fig. 2 Radial and axial geometric structure of the assembly

表 3 组件尺寸和材料参数

参数	半径
燃料棒半径	4.1 mm
包壳内径	4.2 mm
包壳外径	4.8 mm
燃料棒间距	12.5 mm
燃料高度	3 m
底部反射层高度	0.2 m
顶部反射层高度	0.2 m
燃料	UOX(2%, 4% enrichment)
冷却剂	Water, 1 000 ppm boron
气隙	Helium, 0.1 MPa
包壳	Zircaloy-2
功率	12.5 MW
能群数	2
能群分界能	0.625 eV

3.2 建模与网格划分

使用 Gambit 对 5×5 压水堆燃料组件模型进行建模和网格划分,燃料棒径向网格划分如图 3 所示,组件径向网格划分如图 4 所示,中子扩散和热工水力计算采用同一套网格,其中轴向网格尺寸为 0.1 m,模型网格总量 3 100 000,利用 Gambit 的网格质量检验工具对所画网格进行检测,EquiSize Skew 在 0~0.4 的网格数占 99.32%,湍流计算采用 k-epsilon 模型.

$$\rho(T)=\begin{cases} 1\,006, T<277.6 \\ -4.12\times10^{-8}T^4+6.74\times10^{-5}T^3-4.31\times T^{-2}T^2+11.8T-154, 277.6<T<600 \\ 657.4, T>600 \end{cases}$$

(11)

$$c_P(T)=\begin{cases} 4\,570, T<500 \\ 5.0\times10^{-5}T^4-0.11T^3+85.2T^2-3.0\times 10^4T+4.03\times10^6, 500<T<600 \\ 6\,778, T>600 \end{cases}$$

3.3 计算边界条件

耦合计算边界条件如表 4 所示.

表 4 耦合计算边界条件

物理量	边界	边界条件类型	边界值
温度(T)	组件入口	定值	540 K
	组件出口	梯度为 0	
中子通量(φ)	组件入口	外推边界条件	边界处梯度
	组件出口	外推边界条件	边界处梯度
压力(P)	组件入口	梯度为 0	
	组件出口	定值	
速度(U)	组件入口	定值	(0,0,3) m/s
	组件出口	梯度为 0	

3.4 计算结果及分析

为验证网格无关性,本文分别计算了 930 万网格和 310 万网格两套模型,得到 310 万网格条件下能满足计算精度要求,组件有效增殖系数参考值为 1.171 09^[13],计算得到的组件有效增殖系数为 1.171. 图 5 给出中子扩散和热工水力计算都达到收敛时 2%和 4%富集度燃料棒中心的轴向功率密度分布,蓝色点和黑色点为其它耦合程序结果,红色线和绿色线为本文的计算结果,4%富集度燃料棒中心最大功率密度计算值为 4.25×10⁸ W/m³, 2%富集度燃料棒中心最大功率密度计算值 2.50×10⁸ W/m³,4%富集度燃料棒中心最大功率密度参考值为 4.178×10⁸ W/m³,2%富集度燃料棒中心最大功率密度参考值为 2.45×10⁸ W/m³.

由图 5 可以看出,计算偏差主要在组件模型的进口与出口处,功率密度参考值在组件进出口处有微小的上升,这主要是由于上下反射层的影响,使得部分中子被反射进入燃料区,进而引起功率密度的微小上升,本文计算时由于考虑方便运用 Gambit 建模和网格划分,忽略了上下反射层的影响,所以燃料棒轴向功率密度在进出口处未出现微小的上升. 图 6 为燃料棒外径处的温度分布图,图 7 为燃料包壳内径处的温度分布图,图 8 为燃料棒包壳外径处的温度分布图,图 9 为燃料组件进出口处的冷却剂和燃料棒的温度分布图. 图 10 为相邻燃料棒中心和对角燃料棒中心沿轴向的冷却剂温度分布. 图 11 给出 z=0.0 m, y=0.0 m 处沿 x 方向的温度分布(z=0 为对称轴),计算得到的 4%富集度燃料中心最高温度为 1 506.97 K,2%富集度燃料中心最高温度为 1 066.42 K,4%富集度燃料中心

最高温度参考值为 1 502. 22 K, 2%富集度燃料中心最高温度参考值为 1 047. 60 K. 通过对压水堆 5×5组件模型的耦合计算验证了利用 Fluent 的 UDS 和 UDF 功能实现中子扩散和热工水力耦合计算的可行性和数据传递的正确性.

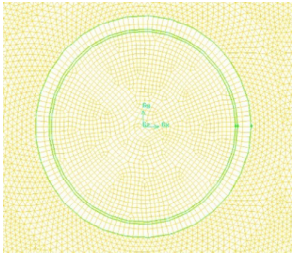


图 3 燃料棒径向网格划分图
Fig. 3 Radial mesh of the fuel rod

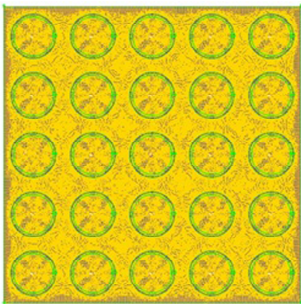


图 4 组件径向网格划分图
Fig. 4 Radial mesh of the assembly

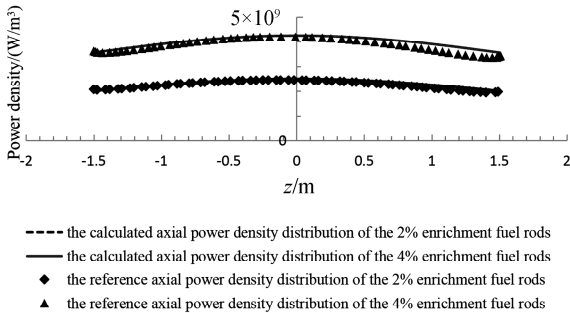


图 5 燃料棒中心的轴向功率密度分布
Fig. 5 Axial power density distribution of the fuel rod center

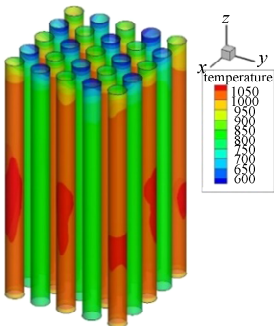


图 6 燃料棒外径处温度分布
Fig. 6 Temperature distribution of the fuel rod outer diameter

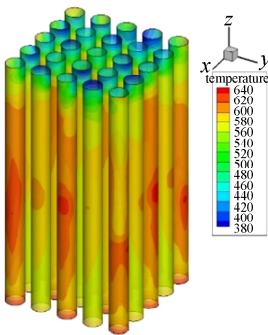


图 7 燃料包壳内径处温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of the fuel rod internal diameter

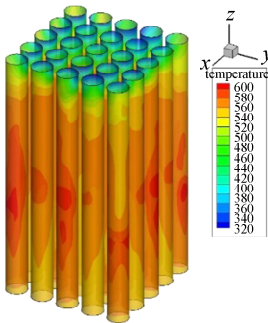


图 8 燃料包壳外径处温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of the fuel cladding external diameter

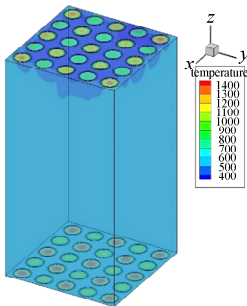


图 9 组件进出口温度分布
Fig. 9 Temperature distribution of the inlet and outlet

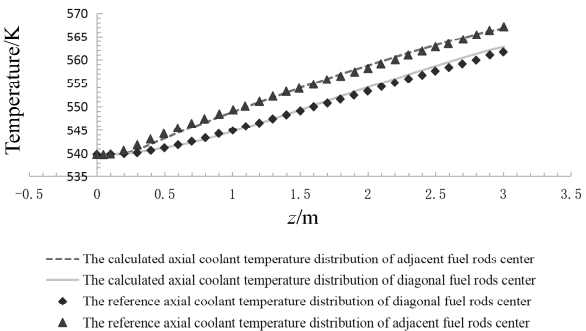


图 10 相邻燃料棒中心处和对角燃料棒中心处冷却剂温度轴向分布
Fig. 10 Axial coolant temperature distribution of the contiguous fuel rod center and diagonal fuel rod center

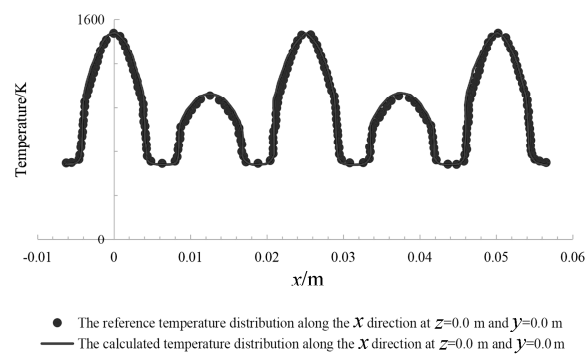


图 11 $z=0.0\text{ m}$, $y=0.0\text{ m}$ 处沿 x 方向的温度分布
Fig. 11 Temperature distribution in the x axis direction ($z=0.0\text{ m}$, $y=0.0\text{ m}$)

4 耦合方法应用

通过对 5×5 压水堆组件模型进行耦合计算, 验证了利用 FLUENT 的 UDF 和 UDS 功能实现中子扩散与热工水力耦合计算是可行的, 现利用该耦合方法计算 $M^2\text{LFR-1000}$ 反应堆热组件模型.

4.1 模型描述

$M^2\text{LFR-1000}$ 是作者所在课题组设计的模块化铅冷快堆, 组件和燃料棒结构由图 12 和图 13 给出. 堆芯燃料组件中的燃料棒采用正三角矩阵排布, 构成的棒束为正六边形, 被厚度为 4 mm 的组件盒包裹在其中, 燃料棒的间距为 14 mm , 每个燃料组件包含有 169 根燃料棒. 燃料组件盒的内对边距为 185 mm , 外对边距为 193 mm , 组件中心距为 198 mm . 燃料芯块中心有直径为 1.9 mm 的中心孔, 可以在燃料棒相同线功率密度条件下降低芯块中心温度, 提高堆芯安全裕度. 燃料芯块外径为 8.6 mm , 采用添加少量 MA 或不添加 MA 的 MOX 燃料.

燃料芯块和包壳之间有 0.15 mm 的间隙, 其内填充有 $\sim 0.5\text{ MPa}$ 的 He, 填充气体压力高于一回路的运行压力, 这样做一方面可以改善燃料芯块和包壳之间的间隙导热并提供惰性环境; 另一方面可防止包壳因外压与自身蠕变坍塌造成与燃料芯块的接触; 此外, 还可以检验包壳是否破损. 燃料包壳为厚度 0.55 mm 的 FMS T91, 整个燃料棒的径向直径为 10 mm , 燃料棒活性区长度为 $1\,000\text{ mm}$.

选择综合性能比较好的 FMS T91 作为其堆芯结构和包壳的材料, FMS T91 的核素组成如表 5 所示^[17], 冷却剂为 Pb.

堆芯入口冷却剂温度设为 673.15 K , 堆芯出口冷却剂温度设为 753.15 K , 在包括设计基准事

故 (DBA) 在内的各种工况下, 燃料芯块最高温度应低于 $2\,946.15\text{ K}$ ^[18]. 正常情况下, 包壳最高温度应低于 823.15 K ^[19], 并有足够的安全裕度.

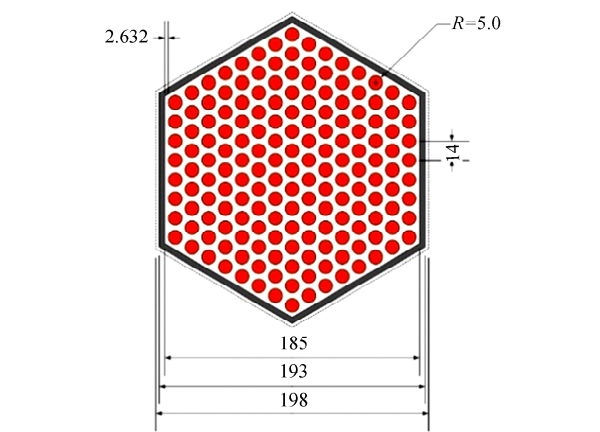


图 12 组件截面图 (单位: mm)
Fig. 12 Fuel assembly cross section (unit: mm)

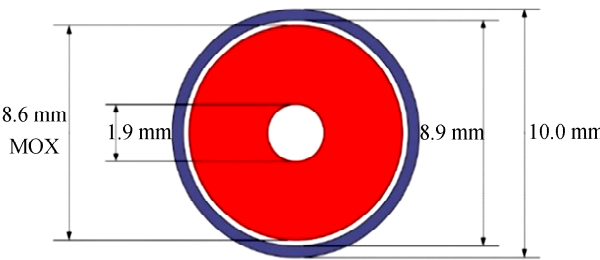


图 13 燃料棒截面图
Fig. 13 Fuel rod cross section

4.2 建模和网格划分

选取组件的 $1/6$ 进行建模计算, 热组件功率为 3.6 MW , 使用 Gambit 对 $M^2\text{LFR-1000}$ 组件模型进行建模和网格划分, 其中轴向网格尺寸为 0.05 m , 模型网格总量为 $3\,400\,000$, 燃料棒径向网格如图 14 所示, 组件径向网格由图 15 所示, 利用 Gambit 的网格质量检验工具对所画网格进行检测, Equi Size Skew 在 $0\sim 0.4$ 的网格数占 96.55% , 说明网格划分质量很好, 湍流计算采用 $k\text{-epsilon}$ 模型.

表 5 FMS T91 核子密度

Tab. 5 The nuclide composition of the FMS T91			
核素	核子密度 ($\text{b}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	核素	核子密度 ($\text{b}^{-1}\text{cm}^{-1}$)
C	$3.890\,0\times 10^{-4}$	N	$1.660\,0\times 10^{-4}$
Cr	$7.869\,0\times 10^{-3}$	P	$3.020\,0\times 10^{-5}$
Ni	$1.594\,8\times 10^{-4}$	S	$7.284\,5\times 10^{-6}$
Mn	$3.830\,0\times 10^{-4}$	Cu	$7.360\,0\times 10^{-5}$
Mo	$4.627\,0\times 10^{-4}$	V	$1.970\,0\times 10^{-4}$
Si	$5.823\,0\times 10^{-4}$	Al	$6.930\,0\times 10^{-5}$
Nb	$4.020\,0\times 10^{-5}$	Fe	$7.423\,2\times 10^{-2}$

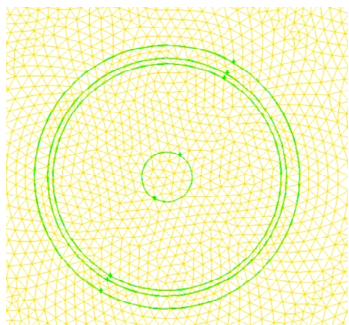


图 14 M²LFR-1000 燃料棒径向网格划分图
Fig. 14 Radial mesh of the M²LFR-1000 fuel rod

4.3 计算边界条件和物性参数^[18]

计算边界条件由表 6 给出.

MOX 热导率:

$$k_{\text{MOX}} = (1.0/2.85 \times 0.03 + 0.035 + T \times (0.286 - 0.715 \times 0.03)) + (6400/T^{2.5}) e^{(-16.35/T)} \tag{13}$$

MOX 密度:

$$\text{density}_{\text{MOX}} = \begin{cases} (10970 + 490 \times 0.05) \times (9.9734 \times 10^{-1} + T \times (9.802 \times 10^{-6} + T(-2.705 \times 10^{-10} + T \times 4.391 \times 10^{-13})))^{-3}, T < 923 \\ (10\,970 + 490 \times 0.05) \times (9.9672 \times 10^{-1} + T \times (1.179 \times 10^{-5} + T(-2.429 \times 10^{-9} + T \times 1.219 \times 10^{-12})))^{-3}, T > 923 \end{cases} \tag{14}$$

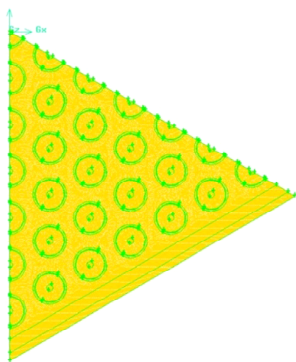


图 15 M²LFR-1000 组件径向网格划分图
Fig. 15 Radial mesh of the M²LFR-1000 assembly

Pb 密度

$$\text{density}_{\text{Pb}} = 11441 - 1.2795\,T \tag{18}$$

Pb 比热

$$C_{\text{Pb}} = 176.2 - 4.923 \times 10^{-2} T + 1.544 \times 10^{-5} \times T \times T - 1.524 \times 10^{-6} / (T \times T) \tag{19}$$

Pb 粘度

$$\text{viscosity}_{\text{Pb}} = 4.55 \times 10^{-4} e^{1069/T} \tag{20}$$

4.4 计算结果分析

图 16 和图 17 为组件出口处的快中子和热中子通量分布(未归一化),由于燃料区的裂变,快中子集中在燃料区域,热中子集中在冷却剂区域;并且由于燃料区域温度变化较大,造成此区域材料宏观截面参数发生明显变化,使得快中子和热中子在燃料区有明显变化;但是在冷却剂区域的快中子和热中子通量无明显变化,主要是由于堆芯冷却剂温度 673~753 K 左右,冷却剂 Pb 在此温度范围内材料宏观截面变化不大,所以对冷却剂区域中子通量分布无明显影响. 图 18 为组件外边界处的温度分布;图 19 为燃料芯块中心温度的轴向分布,由图 19 可以看出燃料芯块中心最高温度出现在 $z=0.6\text{ m}$ 处;图 20 为 $z=0.6\text{ m}$ 处,沿 y 轴方向上的组件温度分布,由图 20 可以看出由于中心孔的存在,使得燃料棒中心温度分布变得平坦,减低燃料芯块的最高温度,提高堆芯的安全裕度. 图 21 为轴向包壳外表面温度分布. 耦合计算得到的包壳外表面最高温度为 774.6 K,燃料芯块最高温度为 1 645.92 K,子通道程序 KMC-SUB 计算得到的包壳外表面最高温

表 6 M²LFR-1000 组件耦合计算边界条件

Tab. 6 Boundary conditions of the coupling calculation of the M²LFR-1000 assembly

物理量	边界	边界条件类型	边界值
温度(T)	组件入口	定值	673 K
中子通量(ϕ)	组件入口	外推边界	边界处梯度
	组件出口	外推边界	边界处梯度
压力(P)	组件出口	定值	101 KPa
速度(U)	组件入口	定值	(0,0,1.66) m/s

T91 热导率

$$k_{\text{T91}} = 32.196 - 6.534e^{(-T/546.792)} \tag{15}$$

T91 比热

$$C_{\text{PT91}} = 404.336 + T(0.881 + T(-2.04 \times 10^{-3} + T \times 2.6755 \times 10^{-6})) \tag{16}$$

Pb 热导率

$$k_{\text{Pb}} = 9.2 + 0.011\,T \tag{17}$$

度为 777.28 K,燃料芯块最高温度为 1 647.17 K.

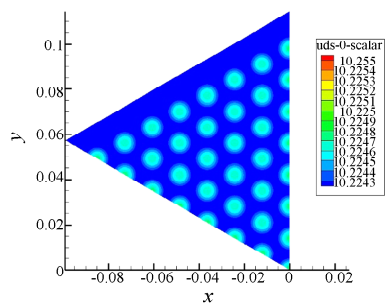


图 16 出口快中子通量分布
Fig. 16 Fast neutron flux distribution on the outlet

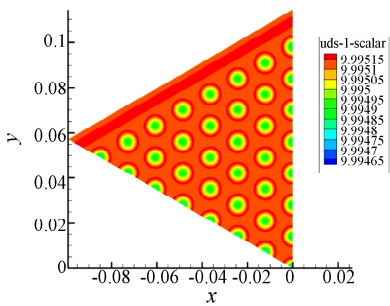


图 17 出口热中子通量分布
Fig. 17 Thermal neutron flux distribution on the outlet

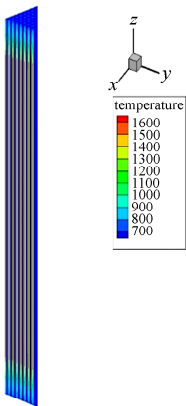


图 18 外边界处温度分布
Fig. 18 Temperature distribution on the outer boundary

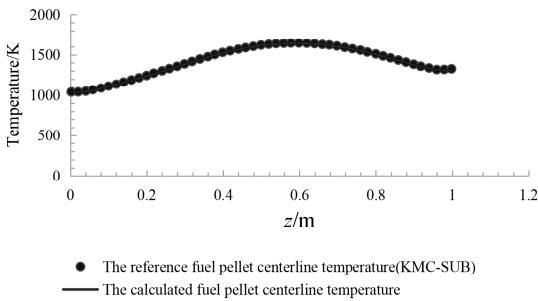


图 19 轴向燃料中心温度分布
Fig. 19 The fuel pellet centerline temperature distribution along Z axis direction

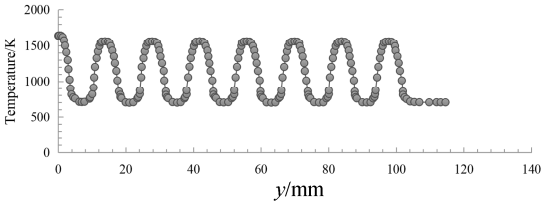


图 20 组件 y 方向温度分布($z=0.6\text{ m}$, $x=0.0\text{ m}$)
Fig. 20 Temperature distribution along the y axis direction ($z=0.6\text{ m}$, $x=0.0\text{ m}$)

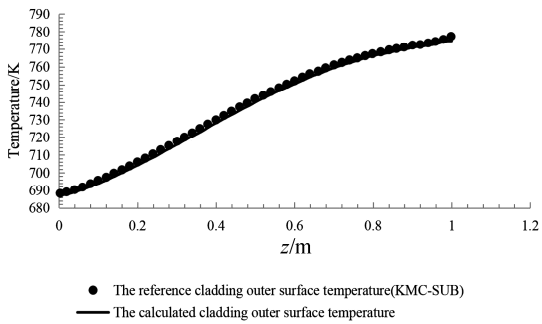


图 21 轴向包壳外表面温度分布
Fig. 21 The cladding outer surface temperature distribution along z axis direction

5 结 论

本文基于 FLUENT 的 UDF 和 UDS 功能,对 中子扩散方程进行定义,对反应堆组件模型进行精细建模,利用 FLUENT 内基于有限容积法的求解器对 中子扩散方程进行迭代求解,同时进行热工水力的计算,实现了在同一个求解器和同一套网格下的 中子扩散和热工水力的耦合计算.

通过对 5×5 压水堆燃料组件模型的建模与耦合计算,得到燃料棒不同边界处(燃料外径,气隙外径,包壳外径)处的温度分布,以及组件的进出口温度. 稳态条件下的组件有效增殖系数(1.171)与参考值(1.171 09)符合较好;将燃料棒中心轴向功率密度分布,相邻燃料棒和对角燃料棒中心的轴向冷却剂温度分布, x 方向($z=0.0\text{ m}$, $y=0.0\text{ m}$)温度分布与其他耦合程序计算结果进行对比,验证了耦合计算方法的可行性和数据传递的正确性.

将该耦合方法应用到 $M^2\text{ LFR-1000}$ 中,对 $M^2\text{ LFR-1000}$ 的热组件进行精细建模和耦合计算,得到组件内的 中子通量分布和温度分布,并与子通道程序 KMC-SUB 计算结果进行对比,燃料芯块最高温度偏差为 1.25 K,包壳外表面最高温度偏

差为 2.68 K, 得到其热工水力学参数都在设计限值范围内。

下一步将考虑添加反射层的建模, 然后进行瞬态的中子扩散与热工水力耦合计算。

参考文献:

- [1] 周紫瞻, 王俊峰. 基于 GPU 加速的恶意代码字节码特征提取方法研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 227.
- [2] 丁莎, 赵士元, 林涛. 基于 GPU 的大规模基因片段并行匹配的方法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54: 280.
- [3] Kulesza J A, Franceschini F, Evans T M, *et al.* Overview of the consortium for the advanced simulation of light water reactor (CASL) [R]. CASL-U-2014-0099-000, 2014.
- [4] Cacuci D. European platform for nuclear reactor simulation (NURESIM) [R]. Integrated Project NUCTECH-2004-3. 4. 3. 1-1. EURATOM Research and Training Program on Nuclear Energy, 2004.
- [5] Fiorina C, Clifford I, Aufiero M, *et al.* Ge N-Foam: a novel Open FOAM ©; based multi-physics solver for 2D/3D transient analysis of nuclear reactors [J]. Nucl Eng Des, 2015, 294: 24.
- [6] Lapenta G, Mattioda F, Ravetto P. Point kinetic model for fluid fuel systems [J]. Ann Nucl Energy, 2018, 28: 1759.
- [7] Ge J, Zhang D, Tian W, *et al.* Steady and transient solutions of neutronics problems based on finite volume method (FVM) with a CFD code [J]. Prog Nucl Energy, 2015, 85: 366.
- [8] Yanzhi E. Research of GPU-accelerated core transient analysis method for pebble-bed fluoride salt cooled high temperature reactor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [9] 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [10] Mylonakis A G, Varvayanni M, Catsaros N, *et al.* Multi-physics and multi-scale methods used in nuclear reactor analysis [J]. Ann Nucl Energy, 2014, 72: 104.
- [11] 张大林, 秋穗正, 刘长亮, 等. 新概念熔盐堆物理计算方法研究及程序设计[J]. 原子能科学技术, 2008, 42: 1103.
- [12] 桂学文, 蔡琦, 陈玉清. 基于 CFD 的反应堆局部三维流动模型与时空中子动力学模型耦合研究[J]. 核科学与工程, 2010, 30: 216.
- [13] Klas J, Paolo V, Christophe D. Fine-mesh deterministic modeling of PWR fuel assemblies: Proof-of-principle of coupled neutronic/thermal - hydraulic calculations [J]. Ann Nucl Energy, 2014, 68: 247.
- [14] Chen H, Zhang X, Zhao Y, *et al.* Preliminary design of a medium-power modular lead-cooled fast reactor with the application of optimization methods [J]. Int J Energy Res, 2018, 42: 3643.
- [15] Li S, Cao L, Khan M S, *et al.* Development of a sub-channel thermal hydraulic analysis code and its application to lead cooled fast reactor [J]. Appl Therm Eng, 2017, 117: 443.
- [16] 张翔, 余纲林, 毕光文, 等. 温度相关连续点截面库插值方法的研究[C]//中国核学会. 第十三届反应堆数值计算与粒子输运学术会议暨 2010 年反应堆物理会议论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2010.
- [17] Jaluvka D. Development of a core management tool for the myrrha irradiation research facility [D]. Heverlee, Belgium: KU Leuven, 2015.
- [18] Carbajo J J, Yoder G L, Popov S G, *et al.* A review of the thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels [J]. J Nucl Mater, 2001, 299: 181.
- [19] Chen Z. Thermal-hydraulics design and safety analysis of a 100MWth small natural circulation lead cooled fast reactor SNCLFR-100 [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.

引用本文格式:

中 文: 张雪贝, 王驰, 陈红丽. 基于 FLUENT 的 UDS 和 UDF 功能的中子扩散耦合计算研究与快堆应用分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 324.

英 文: Zhang X B, Wang C, Chen H L. Research on neutron diffusion coupling calculation based on the UDS and UDF functions of FLUENT and its application analysis on fast reactor [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 324.