

石墨慢化通道式熔盐堆的稳态热工水力计算模型

何龙^{1,2,3}, 余呈刚^{1,2}, 郭威^{1,2,3,*}, 戴叶^{1,2}, 王海玲^{1,2}, 蔡翔舟^{1,2,3,*}

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 中国科学院 先进核能创新研究院, 上海 201800; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对石墨慢化通道式熔盐堆的堆芯结构,基于COMSOL Multiphysics程序和MATLAB程序建立了堆芯稳态热工水力学计算模型。该模型对堆芯内固体区域的温度分布采用三维热传导方程进行模拟,对通道内熔盐温度采用一维单相流体模型进行计算。固体区域与熔盐通过熔盐通道壁面的对流换热边界建立热耦合。该模型基于平行通道压力损失相等的原则,分配堆芯内各熔盐通道的流量。通过对比RELAP5程序的计算结果,验证了模型对温度和流量分配计算的正确性。针对2 MW_t液态燃料熔盐堆的一种概念设计,分析了堆芯内三维温度分布和通道间流量分配。该模型可精确计算通道式熔盐堆堆芯内稳态温度分布和流量分配,对堆芯的热工水力学设计具有重要意义。

关键词:熔盐堆;热工水力学;热耦合

中图分类号:TL33 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2019)02-0319-07

doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0344

Steady Thermal-hydraulic Analysis Model for Graphite-moderated Channel Type Molten Salt Reactor

HE Long^{1,2,3}, YU Chenggang^{1,2}, GUO Wei^{1,2,3,*}, DAI Ye^{1,2},

WANG Hailing^{1,2}, CAI Xiangzhou^{1,2,3,*}

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. CAS Innovative Academies in TMSR Energy System, Shanghai 201800, China;

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

Abstract: Based on COMSOL Multiphysics and MATLAB software, a three-dimensional thermal-hydraulic model was developed for the graphite-moderated channel type molten salt reactor (MSR). The temperature distribution in the solid region was calculated with a three-dimensional heat conduction equation. The heat transfer in the molten salt was modelled by the one-dimensional single-phase flow model. The thermal coupling of fuel salt and solid region was set up through the convective heat transfer boundary condition at the surface of fuel channel. The mass flow rate in each fuel channel was calculated

收稿日期:2018-04-28;修回日期:2018-06-07

基金项目:中国科学院 TMSR 战略性先导科技专项资助项目(XDA02010000);中国科学院前沿科学重点研究项目资助(QYZDY-SSW-JSC016);国家自然科学基金重点资助项目(91326201)

作者简介:何龙(1987—),男,江西赣州人,工程师,博士研究生,核能科学与工程专业

*通信作者:蔡翔舟,E-mail: caixz@sinap.ac.cn;郭威,E-mail: guowei@sinap.ac.cn

网络出版时间:2018-09-04;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180903.1331.008.html

based on the assumption of equal pressure drop over all channels. In terms of temperature and mass flow rate distribution calculations, the result from this thermal-hydraulic model is consistent with that from the RELAP5 code. With the aid of this model, the temperature and mass flow rate distributions in the 2 MWt MSR were analyzed. This thermal-hydraulic model can be used to precisely analyze the temperature and mass flow rate distributions of the channel type molten salt reactor, which is quite useful in the thermal-hydraulic design.

Key words: molten salt reactor; thermal-hydraulics; thermal coupling

熔盐堆的一种典型设计是堆内含有石墨慢化材料^[1-2],堆芯由截面为六边形或四边形的石墨组件规则排布构成。燃料盐在各组件的熔盐通道内流动并发生裂变反应。石墨慢化通道式熔盐堆与传统反应堆在传热上有很大不同。首先,体现在堆芯裂变功率主要沉积在液态熔盐中,并由熔盐自身的流动带出堆芯。其次,由于中子和伽马射线的辐照,堆芯固体区域(石墨慢化材料和结构材料)仅沉积了少量能量。最后,燃料盐在组件的熔盐通道内沿轴向流动,不同组件内熔盐没有通过横向流动产生的质量、能量和动量的交换,组件间热量传递依赖于石墨慢化材料的热传导实现。

对于石墨慢化通道式熔盐堆,现有稳态分析模型^[3-4]及瞬态分析程序(如 DYN3D-MSR^[5]和 TANG-MSR^[6]程序)通常采用并联多通道模型。该模型将堆芯内不同区域的组件等效为独立的空心圆柱,采用一维流体模型和一维热传导方程描述熔盐和圆柱壁面的传热。模型仅考虑圆柱壁径向的热传导,未能考虑组件间的传热。由于并联多通道模型在物理模型上进行了大量简化,这导致该模型无法计算熔盐堆内反射层的温度分布,同时也无法考虑组件间的热耦合。

为克服并联多通道模型面临的限制,本文针对石墨慢化通道式熔盐堆将建立一种新型稳态热工水力学模型(STHM-MSR, steady-state thermal-hydraulic model for molten salt reactor)。STHM-MSR 耦合固体区域的三维热传导方程和一维流体模型,可考虑组件间由于热传导产生的热交换,并能计算反射层的温度分布。为验证 STHM-MSR 对温度和流量分配计算的正确性,本文将对 RELAP5 程序的计算结果。基于 2 MWt 液态燃料熔盐堆的一种

概念设计,本文将计算在额定功率下堆内的稳态温度分布和流量分配。

1 物理模型

STHM-MSR 采用三维热传导方程计算堆芯内石墨组件和反射层等固体区域的温度分布,计算方程如下:

$$\nabla \lambda_g \nabla T_g(x, y, z) + Q_g = 0 \quad (1)$$

式中: λ_g 、 T_g 和 Q_g 分别为固体材料的热导率、温度和沉积的热源。固体区域的外表面采用绝热边界条件,熔盐通道壁面采用对流换热边界条件。通道内熔盐采用一维单相流体模型,求解质量守恒方程、动量守恒方程和能量方程:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial p_f}{\partial z} - \rho g \quad (3)$$

$$A \frac{\partial(\rho v c_f T_f)}{\partial z} = A Q_f + Q_h \quad (4)$$

式中: ρ 、 v 、 T_f 和 c_f 分别为熔盐的密度、速度、温度和比热容; p_f 为通道内的摩擦压降; A 为通道的流体面积; Q_f 为熔盐的内热源; Q_h 为熔盐与通道壁面产生的换热量。一维单相流体模型采用指定入口温度和入口质量流量边界条件。

堆芯固体区域的三维温度场通过壁面的对流换热边界条件与熔盐温度建立了热耦合,通道壁面的热流密度计算公式为:

$$q(x, y, z) = \frac{Nu \lambda_f}{D_e} (T_g(x, y, z) - T_f(z)) \quad (5)$$

式中: λ_f 和 D_e 分别为熔盐的热导率和通道的水力学直径; Nu 为努塞尔数。 Nu 的计算关系式采用熔盐在光滑圆管内强迫对流换热的实验结果^[7](表 1)。表 1 中, Re 为雷诺数, Pr 为普朗特数, L 为通道的长度, μ_i 和 μ_s 分别为基于熔盐温度和壁面温度计算得到的熔盐黏度。对

$q(x, y, z)$ 沿通道换热湿周积分可得式(4)中的 Q_h :

$$Q_h(z) = \int q(x, y, z) dl \quad (6)$$

表 1 Nu 计算关系式

区间	关系式
层流	$Nu = 1.89(RePrD_e/L)^{0.33}(\mu_l/\mu_s)^{0.14}$
过渡区	$Nu = 0.107(Re^{2/3} - 135)Pr^{0.33}(\mu_l/\mu_s)^{0.14}$
湍流	$Nu = 0.0234Re^{0.8}Pr^{0.33}(\mu_l/\mu_s)^{0.14}$

图 1 为固体区域温度和一维流体温度建立热耦合的示意图,计算模型中每个壁面与通道内熔盐将建立映射关系,并通过式(5)和式(6)计算固体和流体在壁面的热交换。

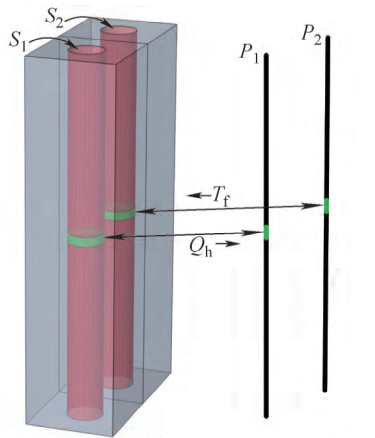


图 1 固体区域温度与一维熔盐温度耦合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coupling between solid temperature and molten salt temperature

对动量方程沿通道轴向进行积分,可得到通道内的压降方程:

$$\Delta p_{a,i} = \Delta p_i - \Delta p_{t,i} - \Delta p_{g,i} - \Delta p_{k,i} \quad (7)$$

式中: $\Delta p_{a,i}$ 、 Δp_i 、 $\Delta p_{t,i}$ 、 $\Delta p_{g,i}$ 和 $\Delta p_{k,i}$ 分别为通道 i 的加速压降、总压降、摩擦压降、提升压降和局部压降(上下腔室的形阻),计算公式如下:

$$\Delta p_{a,i} = \frac{1}{A_i} \int \frac{\partial(\rho A_i v^2)}{\partial z} dz = \frac{1}{A_i} \int \frac{\partial(m_i v)}{\partial z} dz = \frac{m_i}{A_i} (v_{out} - v_{in}) \quad (8)$$

$$\Delta p_{t,i} = \int f \frac{\rho v^2}{2D_e} dz = \frac{1}{A_i} \int f \frac{m_i v}{2D_e} dz =$$

$$\frac{m_i}{A_i} \int f \frac{v}{2D_e} dz \quad (9)$$

$$\Delta p_{g,i} = \int \rho g dz \quad (10)$$

$$\Delta p_{k,i} = k \frac{\rho v^2}{2} = k \frac{m_i}{A_i} \frac{v}{2} \quad (11)$$

式中: m_i 为通道 i 中的质量流量; f 和 k 分别为摩擦系数和形阻系数,计算中每个通道需输入各自的 k 。式(8)~(11)中质量流量、密度及速度均为给定入口温度和流量边界下计算得到的已知量。在计算出各种压降后,根据式(7)可得通道 i 的总压降 Δp_i 。由于各通道的进口和出口分别与相同的腔室相连接,根据平行通道压力损失相等的原则,合理的质量流量分配将使各通道的总压降 Δp_i 相同。以通道流通面积为权重的堆芯平均压降 Δp_{av} 可表示为:

$$\Delta p_{av} = \frac{\sum_i \Delta p_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (12)$$

流量分配计算步骤^[8]如下:1) 假定各通道的初始质量流量 m_i ; 2) 在给定 m_i 情况下计算固体区域的温度分布和各通道内熔盐轴向上的温度、速度和密度分布,并以此计算各通道的 Δp_i 和 Δp_{av} ; 3) 根据各通道的 Δp_i 和 Δp_{av} 的偏差重新调节各通道的 m_i (调节过程需保证堆芯的总质量流量守恒); 4) 重复步骤 2, 直到满足 $|\Delta p_i - \Delta p_{av}| / \Delta p_{av} < \epsilon$ 条件。图 2 示

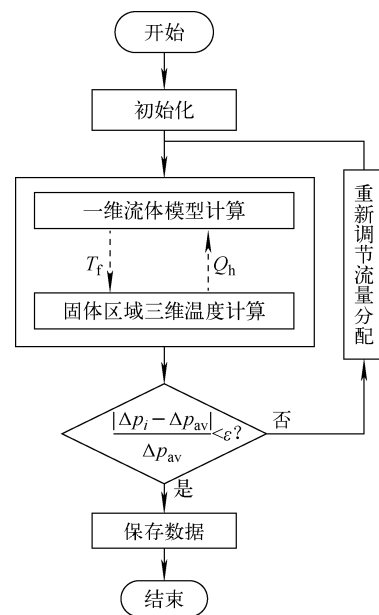


图 2 STHM-MSR 计算流程

Fig. 2 Calculation flow of STHM-MSR

出了 STHM-MSR 计算流程。

STHM-MSR 包含了固体区域三维热传导计算、一维流体换热计算及各燃料通道间流量分配计算。其中三维热传导和一维流体模型由 COMSOL Multiphysics 程序^[9]进行求解,而固体区域温度和流体温度的耦合以及通道间流量分配计算则基于编写的 MATLAB 脚本实现。STHM-MSR 实现了固体区域三维温度场与一维流体的耦合,解决了并联多通道模型不能考虑组件间传热等方面的不足。该模型适用于在流体处于液相情况下,通道式结构堆芯的稳态热工水力学分析。

2 热工水力学模型验证

考虑到目前没有商用程序采用与 STHM-MSR 完全相同的物理模型,本文采用 RELAP5 程序^[10]对 STHM-MSR 进行验证。

固体区域温度和流体温度计算结果采用单个空心圆管进行验证。空心圆管长为 50 cm,内径为 2 cm,管壁厚度为 1 cm,管壁导热率为 25 W/(m·K)。圆管总共沉积了 59 650.0 W 热量,其中 4% 均匀分布在管壁,剩余部分沉积在冷却剂内。圆管由 FLiBe 熔盐冷却,质量流量

为 0.5 kg/s,入口温度为 873.15 K。由于圆管管壁较薄且由冷却剂强迫对流冷却,管壁轴向的热传导并不显著,因此圆管管壁的三维热传导问题可近似为一维径向热传导问题。RELAP5 程序对于固体区域采用一维热传导模型,对于该验证模型,RELAP5 程序对管壁温度的计算结果可很好地验证三维热传导模型。验证计算过程中,STHM-MSR 采用 RELAP5 程序内置的 FLiBe 物性及相同的换热关系式。

图 3a 对比了圆管底部($z=2.5$ cm)、中间($z=25.0$ cm)及顶部($z=47.5$ cm)位置处管壁径向温度分布。由于管壁轴向热传导效应不明显,STHM-MSR 计算结果与 RELAP5 程序计算结果基本一致。FLiBe 熔盐沿轴向的温度分布如图 3b 所示,STHM-MSR 和 RELAP5 程序的计算结果一致。图 3c 示出了 STHM-MSR 计算得到的管壁的三维温度分布和熔盐的轴向温度分布。

为验证流量分配及流量分配对温度的影响,采用 3 个相同尺寸的竖直圆管(圆管的尺寸与温度验证的圆管相同)作为计算模型。各圆管沉积的不同热源值列于表 2,总的入口质量

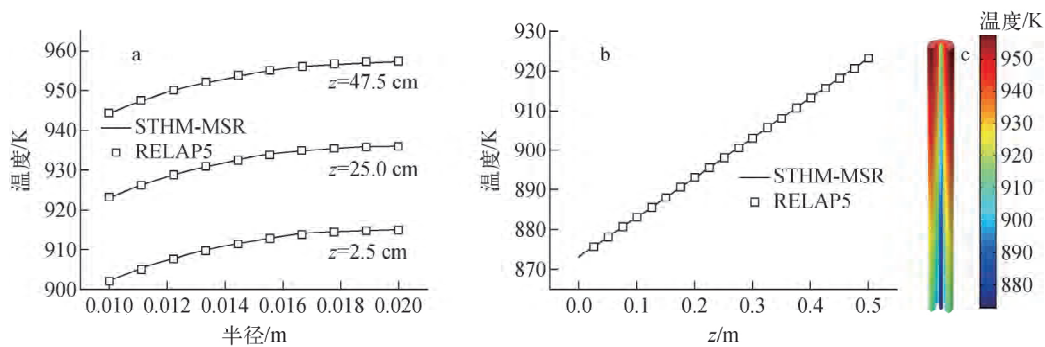


图 3 圆管内温度分布

Fig. 3 Temperature distribution in circular tube

表 2 流量分配

Table 2 Distribution of mass flow rate

圆管编号	功率/W	10^2 质量流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)		出口熔盐温度/K	
		RELAP5	STHM-MSR	RELAP5	STHM-MSR
1	2 982.5	2.509 83	2.510 16	922.953 8	922.947 1
2	3 579.0	2.891 46	2.892 17	925.026 6	925.013 7
3	2 386.0	2.098 70	2.097 67	920.798 2	920.821 3

流量为 0.075 kg/s,入口温度为 873.15 K。为保证各圆管的总压降相同,合理的流量分配将使各管道内的重力压降加上其他形式压降的总和相同。从表 2 可看出,RELAP5 和 STHM-MSR 计算得到的各圆管内的流量分配和出口熔盐温度符合很好。

3 2 MWt 液态燃料熔盐堆堆芯稳态热工水力分析

3.1 计算模型

2 MWt 液态燃料熔盐堆^[1]是由中国科学院上海应用物理研究所提出的小型熔盐实验堆(简称实验堆)。图 4a 和 b 为实验堆的纵向和横向剖面图,堆芯由 85 个横截面为六边形的石墨组件组成,组件的尺寸如图 4c 所示。实验堆热功率为 2 MW,进出口温度分别为 600 °C 和 620 °C。堆芯额定流量为 59.25 kg/s,其中大部分熔盐流经堆芯活性区,少量熔盐流经外围熔盐层。

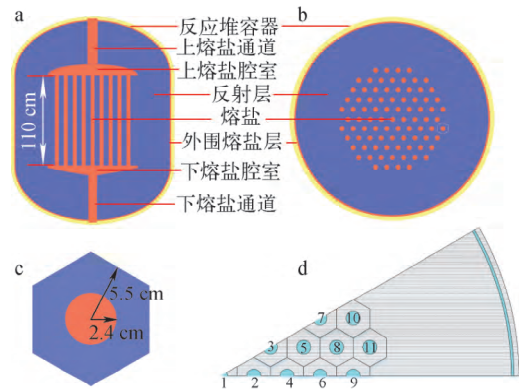


图 4 实验堆和计算模型的示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of experimental reactor and calculation model

堆芯内功率分布由 SCALE 程序计算^[12]得到,表 3 为实验堆不同区域内沉积的总功率份额。熔盐堆中缓发中子先驱核及衰变热会随燃料流动发生迁移,这对堆芯内功率分布会有轻微影响,目前 SCALE 计算结果未能考虑燃料盐流动对功率的影响。

表 3 功率分布

Table 3 Power distribution

部件名称	功率份额/%	部件名称	功率份额/%
活性区组件内熔盐	65.68	外围熔盐层 ¹⁾	4.41
活性区组件内石墨	3.39	反应堆容器	0.34
上熔盐腔及上熔盐通道	12.50	侧反射层	1.14
下熔盐腔及下熔盐通道	11.25	上下反射层	1.29

注:1) 外围熔盐层顶部、径向和底部区域功率份额分别为 0.99%、2.39%和 1.03%

由于实验堆堆芯具有 1/12 对称性,计算模型采用 1/12 堆芯。计算模型的横截面如图 4d 所示,图中根据各组件的径向位置对其进行了编号。计算模型包含活性区、径向反射层、径向部分的外围熔盐层和反应堆容器。各通道及外围熔盐层均等效为一维流体,并给定入口温度和质量流量边界条件。外围熔盐层中质量流量的设计值为 5% 的堆芯额定流量,计算过程中外围熔盐层入口流量采用该值,流量分配计算只针对带有编号的组件。各通道的入口温度计算公式为:

$$T = Q/Mc_f + T_{in} \quad (13)$$

式中:Q 为下腔室及熔盐通道和下反射层内沉积的总功率;M 为熔盐的质量;T_{in} 为堆芯的入

口温度。实验堆的上下腔室对优化流量分配起重要作用。由于缺乏流量分配的水力学实验,目前无法获得各通道的形阻系数 k,计算中忽略了由于上下腔室造成的局部压降。

3.2 计算结果与讨论

图 5 为堆芯内固体区域及各通道内熔盐的温度分布。由于石墨内沉积的功率由通道内熔盐带走,石墨的温度会高于通道内熔盐的温度。反射层内沉积的热量依赖外围熔盐层和堆芯边缘处的熔盐通道冷却,这导致反射层两侧的温度更低。实验堆内温度峰值出现在反射层,高达 642.3 °C。由于固体区域内沉积的功率份额较少,熔盐和石墨的温差并不显著。

图 6a 示出了 z=0.2, 0.55 和 0.9 m 处平

面上的温度分布,图 6b 示出了这 3 个平面上的等温线分布。对于堆芯中心区域的组件,等温线呈现以熔盐通道为中心的同心圆分布,这说明组件之间的传热并不显著。边缘处的组件(编号 9~11,图 4d)对反射层起冷却作用,这导致这些组件内的等温线明显偏离同心圆分布。

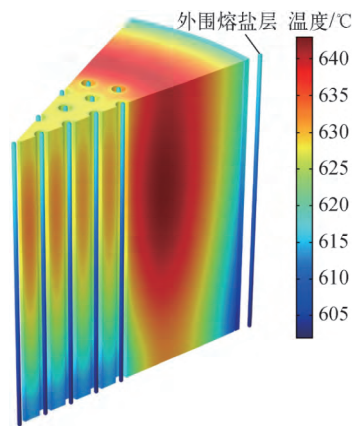


图 5 堆芯温度分布

Fig. 5 Temperature field of reactor core

表 4 列出了功率、流量和出口温度统计。由表 4 可知,各组件的出口温度偏差较小,组件间流量分配较为平均。 ΔE 为通道内熔盐带走的功率(基于熔盐进出口的温差)与对应组件内沉积功率的差值,体现了某组件通过热传导带走邻近组件热量的能力。对于中心区域的组件,由于沉积的功率较大,会通过邻近组件带走部分功率,这体现在 ΔE 为负值。对于组件 1~8, ΔE 的绝对值仅为几十 W,这说明这些组件间的热传递不显著。对于边缘组件 9~11, ΔE 显著大于 0,这是由于这些组件会带走少部分反射层内沉积的功率。由表 4 还可知,外围熔盐层的 ΔE 高达 1 847.4 W,这表明外围熔盐层带走了反射层和反应堆容器内沉积的大部分功率。对各通道内熔盐带走的功率乘以权重因子并求和,可得到在 1/12 堆芯模型中熔盐带走的总功率。熔盐带走的总功率(121 550.8 W)与 1/12 堆芯计算域内沉积功率(121 550.9 W)仅偏差 0.1 W,这表明 STHM-MSR 的计算结果满足能量守恒。

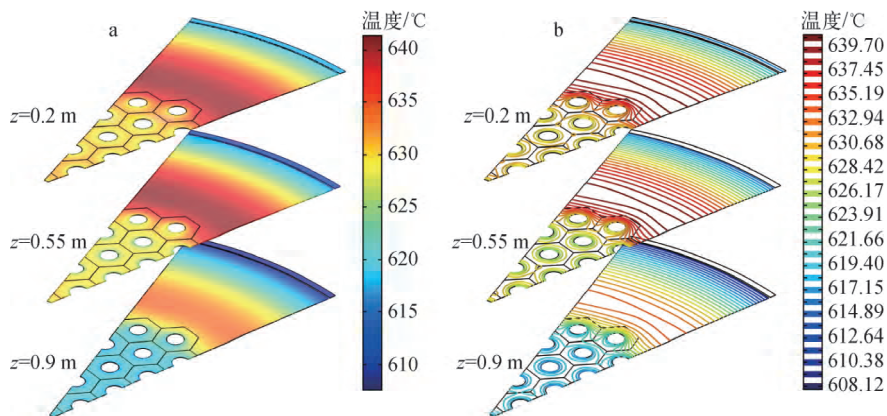


图 6 $z=0.2, 0.55$ 和 0.9 m 处平面上的温度及等温线分布

Fig. 6 Cross-sectional view of temperature field and isotherms at cut planes of $z=0.2, 0.55$ and 0.9 m

表 4 功率、流量和出口温度统计

Table 4 Statistics of power, mass flow rate and outlet temperature

组件编号	权重因子	沉积功率 ¹⁾ /W	流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta E/\text{W}$
1	1/12	18 031.6	0.712 2	617.572	-16.5
2	1/2	17 777.8	0.703 4	617.545	-17.6
3	1/2	16 984.7	0.680 8	617.362	-5.3
4	1/2	16 984.7	0.680 6	617.360	-12.1
5	1	15 878.9	0.649 1	617.095	17.9
6	1/2	15 878.9	0.649 2	617.095	20.3
7	1/2	15 318.5	0.633 8	616.966	63.3

续表 4

组件编号	权重因子	沉积功率 ¹⁾ /W	流量/(kg·s ⁻¹)	出口温度/℃	ΔE/W
8	1	15 318.5	0.634 1	616.968	74.0
9	1/2	15 318.5	0.636 4	616.983	146.1
10	1	16 631.6	0.676 8	617.310	187.8
11	1	16 631.6	0.678 7	617.322	248.5
外围熔盐层	1	3 984.3	0.246 9	616.583	1 847.4

注:1) 组件沉积功率包含石墨和熔盐内功率的总和,外围熔盐层沉积功率仅表示熔盐内的功率

4 结论

针对并联多通道模型的不足,本文针对通道式熔盐堆建立了一种新型堆芯稳态热工水力学模型 STHM-MSR。STHM-MSR 耦合了固体区域的三维热传导模型及一维单相流体模型,可计算组件间的传热和反射层内的温度分布。通过对比 STHM-MSR 和 RELAP5 程序计算得到的温度和流量分配结果,验证了 STHM-MSR 的正确性。

应用 STHM-MSR,分析了 2 MWt 液态燃料熔盐堆堆芯内的温度分布和流量分配。计算结果表明:1) 实验堆内各组件的出口熔盐温度和流量分配较为均匀;2) 堆芯中心区域组件间的热耦合并不显著,这些组件间基于热传导传递的热量小于 100 W;3) 外围熔盐层带走了反射层内大部分的热量,对反射层的冷却起至关重要的作用。

参考文献:

- [1] ROBERTSON R C. MSRE design and operations report, Part I: Description of reactor design [R]. USA: ORNL, 1965.
- [2] SCOTT D, GRINDELL A G. Components and systems development for molten salt breeder reactors[R]. USA: ORNL, 1967.
- [3] ZHANG D L, QIU S Z, LIU G L, et al. Steady thermal hydraulic analysis for a molten salt reactor [J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, 19 (3): 187-192.
- [4] 郭张鹏,张大林,肖瑶,等. 物理-热工耦合计算方法在熔盐堆稳态分析中的应用[J]. 原子能科学技术,2013,47(11):2 071-2 076.
GUO Zhangpeng, ZHANG Dalin, XIAO Yao, et al. Application of coupled neutronics/thermal-hydraulics computational method for steady-state analysis of molten salt reactor[J]. Atomic Ener-

gy Science and Technology, 2013, 47(11): 2 071-2 076(in Chinese).

- [5] KREPEL J, ROHDE U, GRUNDMANN U, et al. DYN3D-MSR spatial dynamics code for molten salt reactors[J]. Annals of Nuclear Energy, 2007, 34(6): 449-462.
- [6] 司胜义,陈其昌,卑华,等. 新型钍基熔盐堆多物理计算模型及分析[J]. 强激光与粒子束,2017, 29(1):71-78.
SI Shengyi, CHEN Qichang, BEI Hua, et al. Modeling and simulation of redesigned thorium molten salt reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29 (1): 71-78 (in Chinese).
- [7] COOKE J W, COX B. Forced-convection heat-transfer measurements with a molten fluoride mixture flowing in a smooth tube [R]. USA: ORNL, 1973.
- [8] 李磊,张志俭. 并联通道瞬态流量分配方法研究 [J]. 核动力工程,2010,31(5):97-101.
LI Lei, ZHANG Zhijian. Research on transient flux distribution in parallel channels[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31 (5): 97-101 (in Chinese).
- [9] Introduction to COMSOL multiphysics[M]. [S. l.]: [s. n.], 2016.
- [10] FERRAGUT M P, WAGNER R J, ALLISON C M. The development of RELAP5/SCDAPSIM/MOD4.0 for advanced fluid systems design and analysis[C]//International Conference on Nuclear Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2015.
- [11] TMSR. 2 MW 液态燃料熔盐实验堆深化概念设计[R]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所, 2016.
- [12] ORNL. SCALE: A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluations[R]. USA: ORNL, 2005.