

一种液态燃料熔盐堆堆芯流量分配设计

周振华^{1,2} 潘登^{1,2} 陈玉爽¹ 黄建平¹ 余笑寒¹ 王纳秀¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 在液态燃料熔盐堆(Molten salt reactor, MSR)热工水力设计中,为实现堆芯径向功率展平需对堆芯流量分配进行设计,使得堆芯进口流量分布正比于释热量分布,而下腔室结构和流场分布对堆芯流量分配起决定性作用。利用 FLUENT 软件对堆芯三维流场进行模拟,通过调节下腔室结构和流量分配装置,对下腔室流场分布进行优化,最终实现堆芯流量合理分配。数值模拟结果表明,喇叭状下腔室比椭球形下腔室熔盐通道流量标准差降低 4.2%,设置流量分配板熔盐通道流量标准差降低 29.2%;改变下腔室结构和设置流量分配装置能够较好调节流量分配和功率分布匹配性,该结果可为液态熔盐堆堆芯优化设计提供依据。

关键词 熔盐堆, 流量分配, 下腔室结构, 流量分配装置, 计算流体力学

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050601

Core flow distribution design of molten salt reactor with liquid fuel

ZHOU Zhenhua^{1,2} PAN Deng^{1,2} CHEN Yushuang¹ HUANG Jianping¹
YU Xiaohan¹ WANG Naxiu¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: In the thermal-hydraulic design of molten salt reactor (MSR) with liquid fuel, the structure and the flow field distribution of lower plenum play a decisive role for the core flow distribution. **Purpose:** The mass flow distribution of core inlet is designed to match with the release heat distribution, so that the core power distribution will be flattened in radical. **Methods:** To realize the reasonable distribution of core flow, the flow field of lower plenum is optimized through adjusting the geometry of core lower plenum and flow distribution device using FLUENT software to simulate three-dimensional flow field of core. **Results:** The simulation results showed that the mass flow rate standard deviation of salt channels of trumpet-shape lower plenum is reduced by 4.2% compared with that of the ellipsoid-shape. The mass flow rate standard deviation of salt channel is reduced by 29.2% by setting the flow distribution plate. **Conclusion:** Changing the structure of lower plenum and setting the flow distribution plate are useful measures to adjust the mass flow distribution and power matching. The results can provide the basis for the optimization design of MSR with liquid fuel.

Key words MSR, Flow distribution, Lower plenum structure, Flow distribution device, Computational fluid dynamics (CFD)

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA0201002)资助

第一作者: 周振华, 男, 1988 年出生, 2013 年毕业于华东理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为液态熔盐堆热工水力学

通信作者: 王纳秀, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

Supported by Strategic Priority Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA0201002)

First author: ZHOU Zhenhua, male, born in 1988, graduated from East China University of Science and Technology in 2013, master student, focusing on thermal hydraulic of the MSR with liquid fuel

Corresponding author: WANG Naxiu, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

收稿日期: 2016-02-22, 修回日期: 2016-03-23

熔盐堆(Molten salt reactor, MSR)作为第四代核能系统先进高温堆的候选堆型之一,其特殊之处在于核燃料溶解在高温熔盐流体中,高温熔盐既作为燃料又作为冷却剂^[1-4]。液态燃料熔盐堆的冷却剂通道是闭式循环通道,相邻通道之间的流体没有搅混,在熔盐堆设计中为展平堆芯功率,要求堆芯熔盐通道内流量分配正比于释热量,而下腔室结构和流场分布对堆芯流量分配起决定性作用。

国内外有关研究表明^[5-6],反应堆运行时,下腔室内部会出现多个漩涡流动,且会产生小部分流动死区。对于液态熔盐堆^[7]来说,冷却剂同时作为燃料且带有热源,下腔室的涡流及流动死区会导致局部温度偏高,影响堆芯材料性能和反应堆的安全性能,因而有必要对堆芯流量合理分配进行研究。

美国西屋公司研发的 AP1000 反应堆采用在堆芯下腔室内部加装导流围板的办法,使流量分配均匀化。中国原子能科学研究院张曙明等^[8]以秦山二期反应堆整体水力模拟试验模型为研究对象,利用 ANSYS CFX12.0 软件,采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对下腔室几何结构、冷管段入口流量等影响因素进行了分析。中核核反应堆热工水力技术重点实验室杜代全等^[9]建立了反应堆从进口到出口模型,采用剪切应力运输(Shear-Stress Transport, SST)模型对 VVER-1000 反应堆堆芯流量分配进行了分析。韩国原子能研究院 Youngmin Bae 等^[10]建立了反应堆整体模型,采用 SST 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对 SMART (System-integrated modular advanced reactor) 反应堆堆芯进口流量分配进行了分析。西安交通大学周建军等^[11]建立了熔盐堆简化模型,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型研究了流量分配板和下腔室对熔盐堆堆芯流量分配的影响。

本文采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法^[12],通过优化下腔室结构和增加流量分配装置来调节堆芯冷却剂流量分配,调节熔盐通道流量分配和功率分配的匹配性;并选用不同湍流模型进行了敏感性分析,研究结果将为液态熔盐堆堆芯结构的优化设计提供依据。

1 模型简介

1.1 堆芯结构简介

该液态燃料熔盐实验堆设计的几何模型如图 1 所示,反应堆容器主要包含石墨慢化堆芯(含熔盐通道)及其支撑结构栅板、石墨反射层(径向石墨反射层和轴向石墨反射层)、上下熔盐腔室、旁流和进出口管道等部件^[13]。使用三维建模软件

SolidWorks2014 建立几何模型。

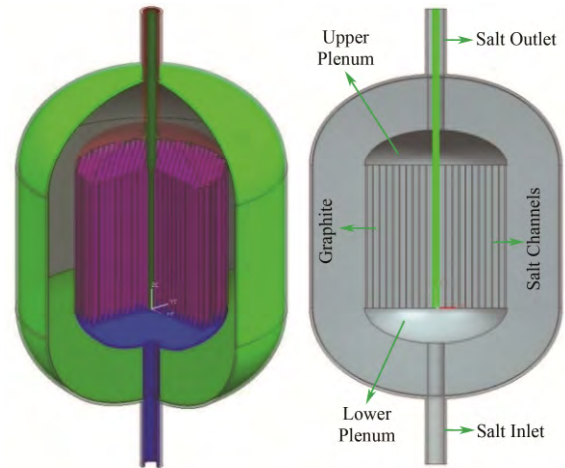


图 1 实验模型几何模型

Fig.1 Geometric modeling for the test model.

由于实验堆几何结构较复杂,且考虑到堆芯流量分配与下腔室结构有重要关系,在数值模拟计算分析时,对实验堆几何模型进行了简化处理,并选取了 1/4 实验堆模型进行计算。计算模型包含:

- 1) 高温熔盐进出口管道。
- 2) 堆芯上下熔盐腔室:优化前模型下腔室为标准椭圆形结构,不添加流量分配装置;优化后模型下腔室为喇叭状结构,添加有流量分配装置。
- 3) 堆芯石墨反射层组件:1/4 液态燃料熔盐堆实验堆模型由堆芯石墨反射层组件围成熔盐通道,石墨组件结构如图 2(a)所示。

- 4) 堆芯熔盐通道:1/4 实验模型由图 2(a)所示的堆芯石墨组件构成 192 个熔盐通道,熔盐通道的分布如图 2(b)所示。

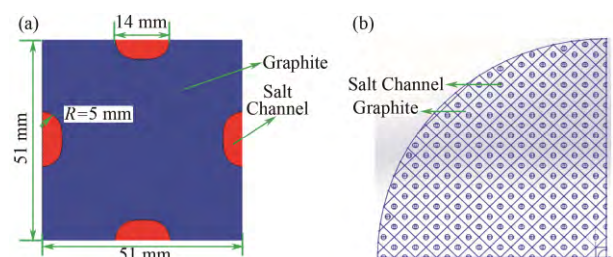


图 2 石墨组件(a)和熔盐通道分布(b)示意图

Fig.2 Schematic view of graphite assembly (a) and salt channels distribution (b).

1.2 流量分配装置

反应堆压力容器下腔室的结构对堆芯熔盐通道流量分配具有重要的影响。燃料熔盐经下降环腔由熔盐入口管进入堆芯下腔室,经流量分配装置流入堆芯活性区域。流量分配结构固定在堆芯下部支撑板上,主要功能是确保熔盐通道流量分配和功率分

布的匹配性满足设计要求。本文设计了两种流量分配装置(图 3)来研究流量分配装置对下腔室压降、熔盐通道流量分配及下腔室流场分布等的影响。流量分配装置固定在堆芯下部支撑板上，位置处于下腔室正中心，为了便于数值模拟分析，在建模计算时省略了下支撑板和流量分配装置之间的连接结构。

2 网格简介

2.1 计算模型网格划分

根据该液态燃料熔盐实验堆几何模型结构的特点，使用 ANSYS ICEM 14.5 软件对计算模型采用分块网格划分策略进行网格划分。对几何结构较为规则的计算区域，采用六面体结构化网格进行划分，此类区域包括堆芯活性区（堆芯石墨组件结构和

192 个如图 2(a)所示的堆芯熔盐通道）和熔盐进出口管道；对于堆芯上下熔盐腔室为椭球形结构，采用非结构化四面体网格进行划分，网格质量如表 1 所示，其中网格质量最差为 0.45，绝大部分网格质量控制在 0.8 以上，满足 CFD 精确计算要求。

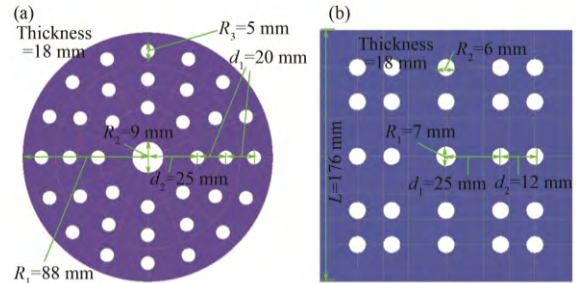


图 3 流量分配装置结构
Fig.3 Structures of the flow distribution device.

表 1 网格质量
Table 1 Mesh quality.

组成部分 Component	网格数量 Mesh number	网格质量百分比 Percentage of mesh quality / %		
		0.45-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0
熔盐进口管 Inlet pipe of salt	273 849	0	5.95	94.05
下腔室 Lower plenum	2 890 933	1.34	4.67	93.99
熔盐通道 Salt channels	1 536 963	26.24	25.49	48.27
石墨反射层 Graphite reflective layer	28 192 165	4.31	11.41	84.28
熔盐出口管 Outlet pipe of salt	273 849	0	5.95	94.05
上腔室 Upper plenum	2 889 045	1.65	4.76	93.59

2.2 计算模型网格敏感性分析

根据计算模型的几何特点和计算经验，上下腔室对堆芯流量分配产生主要影响，因此对上下腔室及堆芯石墨组件结构网格加密进行敏感性分析，网格划分方案为 6 种，详情见表 2。

部分熔盐通道质量流量和网格数量关系如图 4

所示，可以看出当计算模型网格数量达到 3×10^7 及以上时，选取的 5 个不同位置堆芯熔盐通道的质量流量基本保持不变，相对误差在 0.1% 内，模拟结果更趋近于真实值，最终选取计算模型网格数量为 3×10^7 进行数值模拟计算分析。

表 2 网格划分方案
Table 2 Schemes of mesh division.

方案 Schemes	网格数量 Mesh number / 10^4				最小尺寸 Minimum size / mm
	下腔室 Lower plenum	上腔室 Upper plenum	石墨反射层 Graphite reflective layer	模型整体 Whole model	
1	19.5	16.3	120.4	316.6	15
2	29.6	29.3	204.3	584.5	13
3	37.9	37.4	244.7	983.7	12
4	64.8	64.8	384.6	1 982.7	10
5	123.3	123.1	720.7	3 288.6	8
6	289.1	288.9	3 828.5	4 566.6	4

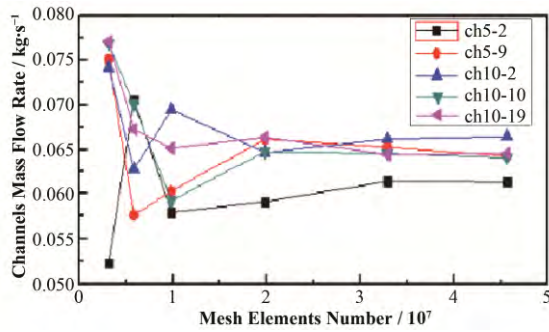


图 4 部分熔盐通道质量流量和网格数量关系

Fig.4 Relationship between some channels mass flow rate and mesh elements number.

3 边界条件和物性

该液态熔盐实验堆^[13]设计热功率为 2 MW，采用石墨作为慢化剂，热工水力设计堆本体熔盐进口温度为 600 °C，出口温度为 620 °C。一回路采用含有高富集度 ⁷Li 的 LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄ 熔盐作为燃料盐，二回路采用 FLiNaK^[14]作为载热剂。一回路堆芯熔盐体积 0.538 m³，熔盐质量(600 °C)为 1.38 t，主管道流速 1.75 m·s⁻¹，一回路质量流量 55.4 kg·s⁻¹。

通过 MCNP (Monte Carlo N-Particle)程序计算获得每个熔盐通道径向功率分布，图 5 是使用 MATLAB 软件编写脚本处理程序得到的二维彩图，它是每个熔盐通道功率占堆芯总功率百分比图。

ANSYS FLUENT 14.5 数值模拟计算相关边界条件和熔盐、石墨及哈氏合金物性参数如表 3、4 所示。

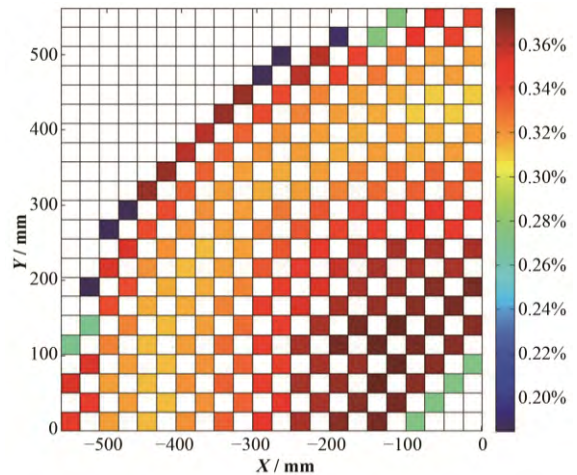


图 5 熔盐通道功率百分比

Fig.5 Schematic diagram of salt channels power percentage.

表 3 边界条件
Table 3 Boundary condition.

边界条件 Boundary condition	值 Value
质量流量进口 Mass flow inlet / kg·s ⁻¹	55.4
进口管径 Inlet diameter / m	0.125
进口温度 Inlet temperature / °C	600
雷诺数 Reynolds	62 658
湍流模型 Turbulence model	标准 <i>k-ε</i> Standard <i>k-ε</i>
水力直径 Hydraulic diameter / m	0.125
压力出口 Pressure outlet / Pa	101 325
进口流速 Inlet velocity / m·s ⁻¹	1.75
出口温度 Outlet temperature / °C	620
重力加速度 Gravity / m·s ⁻²	9.8
湍流强度 Turbulence intensity / %	2.845
参考压力 Reference pressure / Pa	101 325
固体壁面条件 Solid wall conditions	光滑壁面，无滑移边界 Smooth wall, no-slip boundary condition
收敛条件 Convergence condition	均方根残差为 1×10 ⁻⁶ ，出口质量流量恒定 RMS residuals is 1×10 ⁻⁶ , mass flow rate of outlet is a constant
热源加载方式 Heat loading method	UDF 加载如图 5 所示功率 Load power as shown in Fig.5 with user-defined function of FLUENT

表 4 物性参数
Table 4 Physical parameters.

材料 Material	密度 Density / kg·m ⁻³	比热 Specific heat capacity / J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	导热系数 Thermal conductivity / W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹	粘度 Viscosity / kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄	3 079.24-0.573 094T	1 490.55+0.362 641T	0.462 01+0.000 5T	0.009
石墨 Graphite (T=873 °C)	1 860	1 750	30	—
哈氏合金 Hastelloy (T=873 °C)	8 860	586	20.3	—

4 计算结果和讨论

4.1 湍流敏感性分析

本文研究过程中分别采用标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 、SST 剪切应力运输模型和 SST $k-\omega$ 模型对计算敏感性进行分析,研究不同湍流模型对堆芯熔盐通道进出口压降 ΔP_1 、熔盐进口和流量分配板 A 之间的压降 ΔP_2 以及流量分配等结果的影响。图 6 为不同湍流模型获得的不同区域压降 (熔盐通道进出口、熔盐进口与流量分配板 A)。

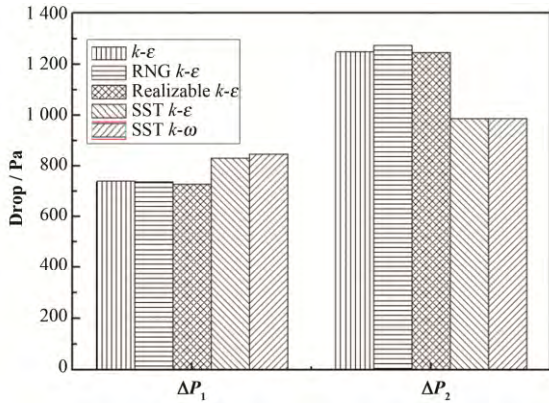


图 6 不同湍流模型各区域压降情况

Fig.6 Comparison of pressure drops in different zones in the turbulent model.

湍流模型敏感性分析结果表明,采用上述几种不同湍流模型得到的堆芯熔盐通道进出口压降最大相对偏差为 10%,熔盐进口和流量分配板 A 之间的压降最大偏差为 15%,湍流模型的选取对计算结果

影响较大。综合考虑计算过程的稳定性、数值计算收敛速度的快慢、上述湍流模型对计算网格的要求以及计算机硬件资源配置的限制,最终采用较稳健的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值计算。

4.2 堆芯流量分配设计方案

下腔室的结构对熔盐通道流量分配和下腔室流场分布具有重要影响,根据上述设计的流量分配装置和两种不同的下腔室结构(标准椭球形和喇叭状),设计 4 种不同的流量分配方案如表 5 所示,并与原标准椭球形下腔室结构方案进行比较。4 种流量分配设计方案如图 7 所示。

表 5 流量分配方案
Table 5 Schemes of flow distribution.

方案编号 Number	下腔室结构 Lower plenum structure	流量分配板 Flow distribution plate
0	标准椭球形 Standard ellipsoid	无分配板 Without distribution plate
1	标准椭球形 Standard ellipsoid	分配板 A Distribution plate A
2	喇叭状 Flared	无分配板 Without distribution plate
3	标准椭球形 Standard ellipsoid	分配板 B Distribution plate B
4	喇叭状 Flared	分配板 A Distribution plate A

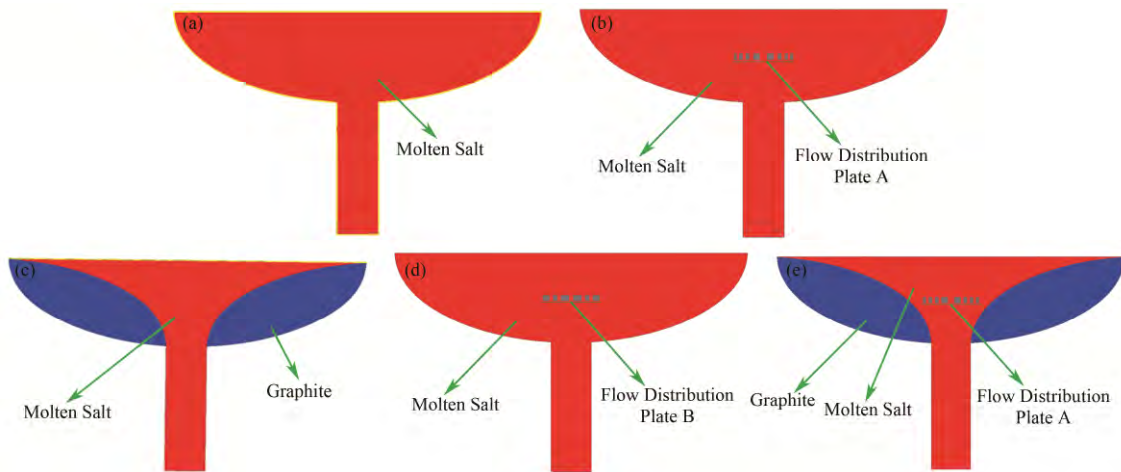


图 7 流量分配方案 (a) 方案 0, (b) 方案 1, (c) 方案 2, (d) 方案 3, (e) 方案 4

Fig.7 Schemes of flow distribution. (a) Scheme 0 (before optimization), (b) Scheme 1, (c) Scheme 2, (d) Scheme 3, (e) Scheme 4

4.3 不同流量分配方案计算结果

通过 ANSYS FLUENT 14.5 软件数值模拟计算

得到每个熔盐通道的质量流量。为了描述堆芯熔盐通道流量分配特性,定义为熔盐通道流量分配系数,流量分配系数由式(1)计算:

$$\lambda_i = q_i / \sum_{i=1}^{192} \frac{q_i}{192} \quad (1)$$

式中： i 为熔盐通道序号； λ_i 为熔盐通道流量分配系数； q_i 为熔盐通道的质量流量。

4种不同流量分配方案通过 FLUENT 软件进行

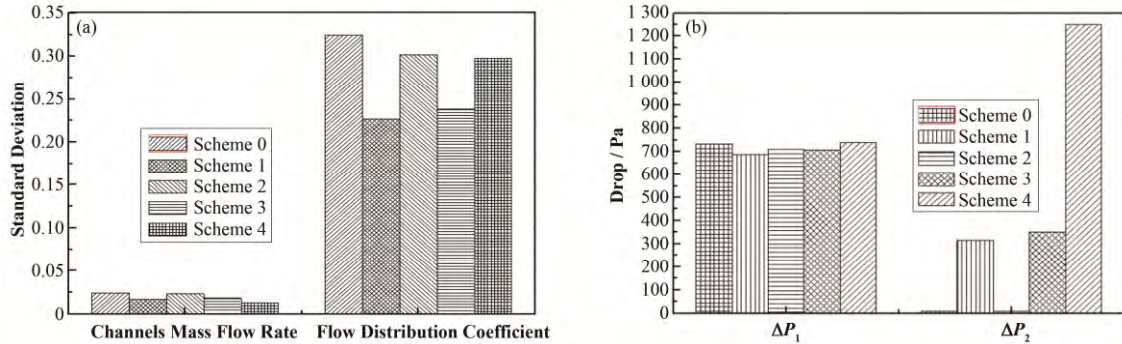


图 8 不同流量分配方案流量标准差(a)和各区域压降(b)情况

Fig.8 Comparison of flow standard deviation (a) and pressure drops in different zones (b) in the program of mass flow distribution.

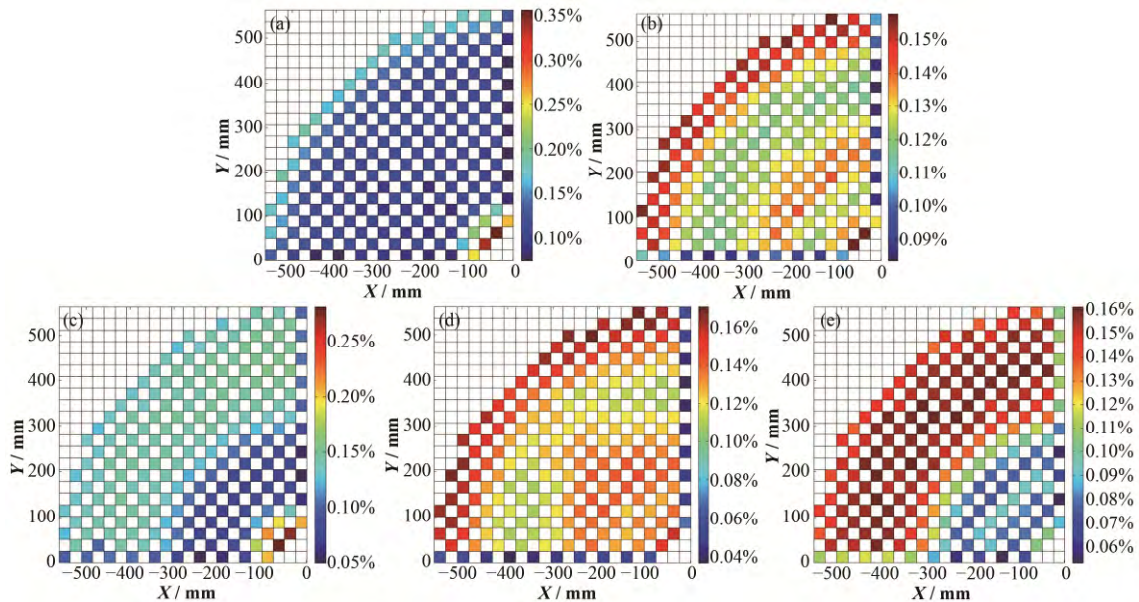


图 9 不同流量分配方案熔盐通道流量分配 (a) 方案 0, (b) 方案 1, (c) 方案 2, (d) 方案 3, (e) 方案 4

Fig.9 Comparison of salt channels mass flow distribution in the program.

(a) Scheme 0 (before optimization), (b) Scheme 1, (c) Scheme 2, (d) Scheme 3, (e) Scheme 4

如图 8(a)所示,不同流量分配方案熔盐通道流量分布标准差和流量分配系数标准差,从图 8(a)中可以看出,下腔室结构由椭球形改为喇叭状熔盐通道流量标准差降低 4.2%,流量分配系数标准差降低 7.1%;在下腔室设置流量分配装置,熔盐通道流量标准差降低 29.2%,流量分配系数标准差降低 30.2%;下腔室结构改为喇叭状同时设置流量分配板,熔盐通道流量标准差降低 4.2%,流量分配系数标准差降低 8.3%。

喇叭状下腔室结构跟与熔盐流通界面由窄变宽流动时流线相一致,避免了流体在下腔室的涡流现象,使流量分配均匀化。下腔室设置流量分配板,

数值模拟计算,得到堆芯每个熔盐通道质量流量、熔盐通道进出口压降、流量分配装置和堆芯熔盐进口之间压降、熔盐通道出口截面温度分布以及下腔室流线分布等结果,结果如图 8-11 所示。

使得熔盐流体不是直接由进口冲击中心位置熔盐通道,而是熔盐流体经过分配板和其孔道向四周扩散流动,因而下腔室内由涡流产生的流动死区得到消除,涡流强度降低,在堆芯径向流量分配更加均匀。

如图 8(b)所示,方案 1 和 3 与优化前(方案 0)相比,通过设置流量分配板使堆芯熔盐通道进出口压降减小 3.6%;这是因为熔盐由进口直接冲击分配板后,沿分配板孔道和周围扩散流动,熔盐通道进口流速减小,在熔盐通道材料物性、摩擦系数等不变的情况下,由沿程阻力产生的摩擦压降减小,从而熔盐通道进出口压降降低。方案 2 与优化前(方案 0)相比,下腔室结构由标准椭球形改为喇叭状,

熔盐通道进出口压降减小 3.2% ;方案 2 与方案 4 相比,喇叭状结构下腔室基础上设置流量分配板 A,堆芯熔盐通道进出口压降及流量分配板与熔盐进口压降均增加,设置了流量分配板,熔盐流动受到分配板的阻碍,使得下腔室压降增加。

图 5 与图 9 相比较,方案 4 设置流量分配板 A 和改变下腔室几何结构为喇叭状所获得的流量分配与功率分配匹配性较好。

图 10 与图 5 相比较,方案 1 和 3 设计可以使流

量分配均匀化但没有较好的匹配性;方案 2 和 4 的设计能使流量分配与功率分布相匹配,且方案 4 的效果较佳,但未能做到精确的匹配。

由图 11 可知,下腔室结构由标准椭球形改为喇叭状结构后,下腔室涡流情况减弱和熔盐流体流动死区减少;在下腔室仅添加流量分配板,下腔室涡流状况并没得到明显改善;将下腔室结构改为喇叭状结构同时添加流量分配板,下腔室涡流现象明显减弱。

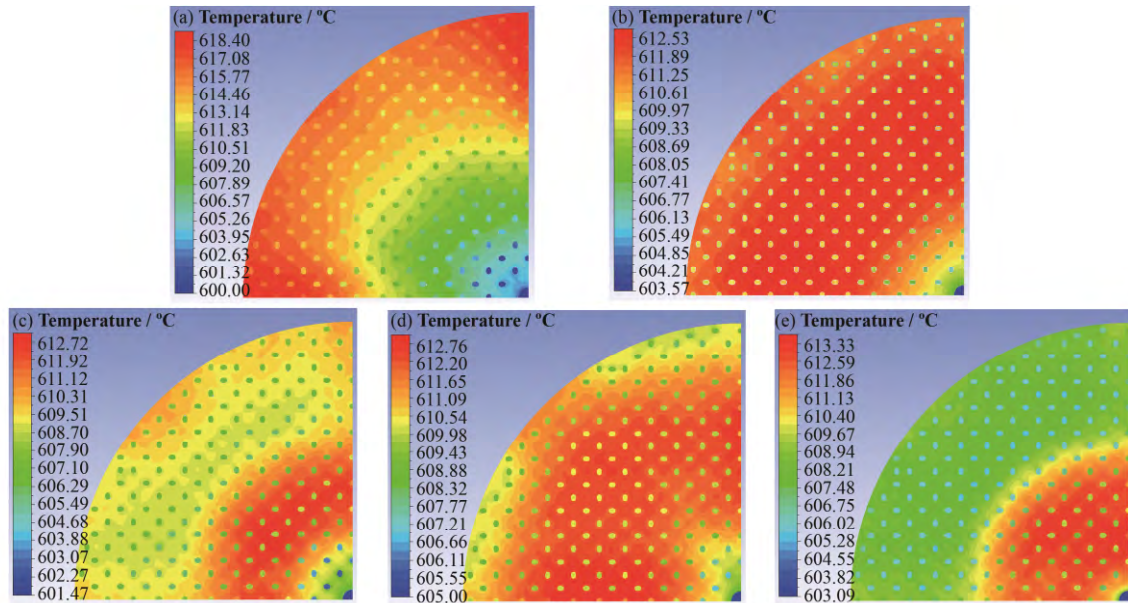


图 10 不同方案下熔盐通道出口截面温度分布图 (a) 方案 0, (b) 方案 1, (c) 方案 2, (d) 方案 3, (e) 方案 4
Fig.10 Comparison of salt channels outlet section temperature distribution in different programs.
 (a) Scheme 0 (before optimization), (b) Scheme 1, (c) Scheme 2, (d) Scheme 3, (e) Scheme 4

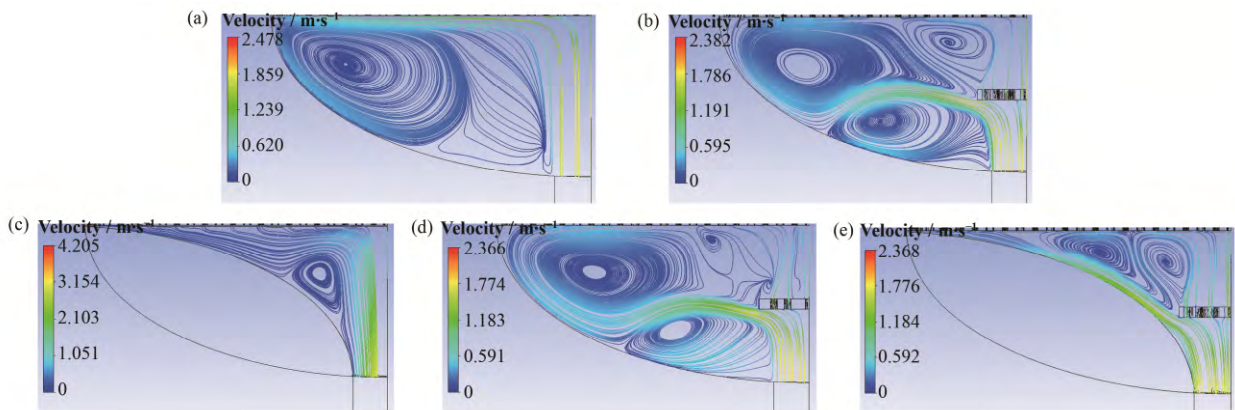


图 11 不同方案下腔室流线分布图 (a) 方案 0, (b) 方案 1, (c) 方案 2, (d) 方案 3, (e) 方案 4
Fig.11 Comparison of lower plenum streamline in different programs.
 (a) Scheme 0 (before optimization), (b) Scheme 1, (c) Scheme 2, (d) Scheme 3, (e) Scheme 4

5 结语

本文以一种液态熔盐实验堆模型作为研究对

象,通过采用改变堆芯下腔室结构和设置流量分配板等方法对堆芯流量分配进行研究。该数值模拟结果分析表明,改变下腔室几何结构和设置流量分配

板,能够消除下腔室涡流和流动死区,优化堆芯入口流量分配,使功率分配和流量分配相匹配,其中方案4将下腔室改为喇叭状结构同时设置流量分配板得到的熔盐通道流量分配标准差和流量分配系数标准差较小,流量分配效果最佳,但本文所设计的流量分配板并未做到功率分布和流量分配的精确匹配,分配板的厚度、孔径大小、孔的排列方式以及分配板在下腔室所处的位置等有影响,后续工作将做深入研究。该结论将为液态燃料熔盐堆堆芯优化设计提供参考。

参考文献

- 1 LeBlanc D. Molten salt reactors: a new beginning for an old idea[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**: 1644–1656. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.12.033
- 2 Xu H J, Dai Z M, Cai X Z. Some physical issues of the thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Nuclear Physics News, 2014, **24**(2): 37–41
- 3 Yu C G, Li X X, Cai X Z, *et al.* Analysis of minor actinides transmutation for a molten salt fast reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **85**: 597–604. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.06.014
- 4 Bhatnagar V, Deffrennes M, Hugon M, *et al.* FISA-2009 conference on Euratom research and training activities: nuclear fission-past, present and future (Generation-II, -III and -IV + partitioning and transmutation)[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, **214**: 3376–3388. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.04.018
- 5 杨来生, 宋桂芳, 胡俊. 秦山核电二期工程反应堆水力模拟实验研究[J]. 核动力工程, 2003, **24**(S1): 208–211
YANG Laisheng, SONG Guifang, HU Jun. Reactor hydraulic simulation test study of Qinshan phase-II NNP project[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, **24**(S1): 208–211
- 6 Botcher M, Krubmann R. Primary loop study of a VVER-1000 reactor with special focus on coolant mixing[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**: 2244–2253. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.02.044
- 7 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016
- 8 张曙明, 李华奇, 赵民富, 等. 秦山核电站二期反应堆堆芯流量分配数值分析[J]. 核科学与工程, 2010, **30**(4): 299–307
ZHANG Shuming, LI Huaqi, ZHAO Minfu, *et al.* Numerical analysis of flow distribution at the reactor core inlet of Qinshan Phase-II reactor[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2010, **30**(4): 299–307
- 9 杜代全, 曾小康, 杨晓强, 等. VVER 型反应堆堆芯流量分配与组件冷却剂温升 CFD 分析[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(3): 429–432. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.03.0429
DU Daiquan, ZENG Xiaokang, YANG Xiaoqiang, *et al.* CFD analysis of flow distribution of reactor core and temperature rise of coolant in fuel assembly for VVER reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(3): 429–432. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.03.0429
- 10 Youngmin Bae, Young In Kim, Cheon Tae Park. CFD analysis of flow distribution at the core inlet of SMART[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **258**: 19–25. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2013.02.003
- 11 Zhou J J, Guo Z P, Qiu S Z, *et al.* The influence of lower plenum and distribution plates to thermal hydraulics characteristics of MSR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **256**: 235–248. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.11.004
- 12 王小军. CFD 的发展及其在核工业的应用 I—单相 CFD 方法的现状和发展趋势[J]. 国外核动力, 2005, **26**(1): 2–6
WANG Xiaojun. Development and application of CFD in the nuclear industry I - situation and development trend of single-phase CFD method[J]. Foreign Nuclear Power, 2005, **26**(1): 2–6
- 13 反应堆物理部. 2 MW 液态燃料钍基熔盐堆实验堆热工水力设计报告[R]. TMSR 卓越中心, 2014: 5–6
Reactor Physics Department. 2 MW liquid fuel thorium-based molten salt reactor experimental reactor thermal hydraulic design report[R]. TMSR Center of Excellence, 2014: 5–6
- 14 贾昀澎, 王子豪, 耿俊霞, 等. FLiNaK 熔盐中 CsF 的蒸发与分离[J]. 核技术, 2016, **39**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.020602
JIA Yunpeng, WANG Zihao, GENG Junxia, *et al.* Evaporation and separation of CsF in FLiNaK molten salt[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.020602