

10 MW级液态燃料熔盐堆堆芯流量分配 优化设计研究

胡思勤^{1,2} 田 健¹ 周 翀¹ 邹 杨¹ 余笑寒¹

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)

摘要 液态燃料熔盐堆的堆芯流量分配设计是其热工水力设计中的重要一环,目的是实现堆芯流量分布与功率分布的匹配,消除堆芯内的热点,而堆芯的水力结构设计对堆芯流量分配起着决定性作用。本研究建立了液态燃料熔盐堆的1/12堆芯模型,使用ANSYS FLUENT16.0软件进行了三维流场数值模拟,通过调节上腔室高度、下降环腔宽度、下腔室结构和流量分配装置进行优化,最终实现堆芯流量分布与功率分布的匹配。结果表明:增加上腔室高度可以平衡内外通道的流量分布差异,改善流量分布均匀性;增加下降环腔宽度可以减缓环腔出口处的下腔室涡流,同时展平流量分布,使流量与功率更好的匹配;增设导流围筒的圆柱型下腔室结构可以更好的抑制下腔室涡流,同时使流量分布更趋于平缓。基于上述分析,最终确定了最优的半椭球型上腔室高度、下降环腔宽度、下腔室几何结构与尺寸等参数,并设置倾斜非均匀孔径分布的导流围筒。以上结果对液态燃料熔盐堆的工程优化设计具有参考价值。

关键词 液态燃料熔盐堆, 流量分配, 结构优化, 下腔室结构, 计算流体力学

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110601

Optimal design of core flow distribution for 10 MW liquid fuel molten salt reactor

HU Siqin^{1,2} TIAN Jian¹ ZHOU Chong¹ ZOU Yang¹ YU Xiaohan¹

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

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

Abstract [Background] The flow distribution in core for the liquid fuel molten salt reactor (MSR) is an important part of the thermal hydraulic design, and the hydraulic structure of reactor core plays a decisive role on flow distribution. [Purpose] This study aims to find out a suitable hydraulic structure design to make the core flow distribution match with the power distribution, and flatten the core temperature distribution for a 10 MW MSR. [Methods] First of all, a one-twelfth core model of liquid fuel MSR was established. Then, ANSYS FLUENT16.0 software was employed to conduct three-dimensional numerical simulation of the flow field. The influence of hydraulic structure of reactor core was analysed by changing the structure of upper plenum, downcomer and lower plenum, and the corresponding flow distribution characteristics of the core are obtained. Finally, a suitable structure was proposed after step-by-step improvement. [Results] The simulation results show that increasing of the height of

中国科学院青年创新促进会(No.2018301)资助

第一作者: 胡思勤, 男, 1995年出生, 2018年毕业于南华大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 田健, E-mail: tianjian@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-07-14, 修回日期: 2022-09-16

Supported by the Youth Innovation Promotion Council of Chinese Academy of Sciences (No.2018301)

First author: HU Siqin, male, born in 1995, graduated from University of South China in 2018, doctoral student, focusing on thermal hydraulic analysis of nuclear reactor

Corresponding author: TIAN Jian, E-mail: tianjian@sinap.ac.cn

Received date: 2022-07-14, revised date: 2022-09-16

upper plenum can balance the flow distribution between central and peripheral channels, increasing of the width of the downcomer can reduce the vortex flow at the downcomer outlet and flattens the flow distribution at the same time. The cylindrical lower structure with shroud in lower plenum can restrain the vortex to a certain extent and make the flow distribution more gentle. Based on the analysis above, a reasonable hydraulic structure is proposed for the molten salt reactor. **[Conclusions]** The results of this study provide important reference for the further optimization design of liquid fuel molten salt reactor.

Key words Liquid fuel molten salt reactor, Flow distribution, Structure optimization, Lower plenum structure, Computational fluid dynamics (CFD)

熔盐堆作为国际核能论坛推荐的第四代核能系统6个候选堆型之一,相较于传统反应堆具有经济性好、安全性高和防核扩散的战略优势^[1-3]。堆芯流量分配设计是反应堆热工水力设计的重要内容,是堆芯核热安全高效地将热量从堆芯传出的重要保证,堆芯功率分布与流量分布的匹配程度决定了堆芯温度热点,对于确保反应堆安全运行具有重要意义^[4]。在中国科学院战略先导研究专项“未来先进裂变核能——钍基熔盐堆核能系统(Thorium Based Molten Salt Reactor, TMSR)”项目中,钍基熔盐堆采用液态熔盐兼作冷却剂和燃料,其流量分配设计尚未有成熟的工程设计可供参考^[5]。在液态熔盐堆中,其堆芯熔盐通道一般为闭式通道,彼此间没有流量的交换,堆芯流量分配主要依赖上下腔室结构的流量分配设计^[6-7]。此外,由于反应堆上、下腔室流体湍流强度较大,可能产生局部涡流^[8],既阻碍了熔盐顺畅流入堆芯,也容易由于熔盐自发热效应在上下腔室形成温度热点,因此需要对液态熔盐堆的流量分配规律进行研究,并对流量分配结构进行优化设计。

基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法的数值仿真研究已经广泛应用于反应堆堆芯流量分配分析。在国内,唐茂等^[9]采用ANSYS CFX软件研究了导流围板几何设计参数对堆芯入口流量分布的影响。张明乾等^[10]研究了球形和格架两种结构的流量分配件对堆芯水力特性的影响。周建军等^[11]以先进熔盐嬗变堆(Molten Salt Advanced Reactor Transmuter, MOSART)原型堆为对象研究了不同腔室结构和流量分配板搭配方式对堆芯流量分配的影响。文俊等^[12]采用CFD软件对铅铋冷却堆的组件上下管座段的阻力特性进行了研究和优化。王天石等^[13]研究了一回路腔室高度、中心测量柱半径等几何参数对自然循环铅冷快堆堆芯流量分配的影响。

国际上,ANSYS FLUENT软件被美国核管理委员会推荐将其应用于液态燃料熔盐堆的许可和验证性分析上^[14],Roucha等^[15]采用FLUENT对熔盐快堆

(Molten Salt Fast Reactor, MSFR)堆芯结构进行了优化设计,展平了堆芯的温度热点分布。Krishna Podila等^[16]建立了熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)堆芯模型,使用STAR-CCM+研究了不同湍流模型对最热通道温度分布的影响,以及MSRE堆芯温度场和流场的特点,其计算结果与美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)数据取得了很好的一致性,表明CFD中的湍流模型可以用于堆芯温度分布预测及局部三维流场模拟。

本研究利用ANSYS FLUENT16.0软件进行了10 MW级熔盐反应堆堆芯流量分配数值仿真模拟,通过优化堆芯上腔室和下降环腔几何结构,使堆芯入口流量分配与核热功率分布相匹配,并增加下腔室流量分配装置抑制下腔室涡流,最终实现堆芯温度分布展平的目标,该研究将为液态燃料钍基熔盐堆堆芯水力结构设计和流量分配优化设计提供理论依据和参考。

1 仿真模型

1.1 结构模型

10 MW级液态燃料熔盐堆的研究是TMSR项目中的重要环节,其堆芯原型结构及熔盐流动方向如图1所示,反应堆本体主要包括下降环腔、堆芯活性区、上下腔室以及双层进出口套管、石墨反射层、上下金属支撑板和外层合金等部件,一回路燃料盐从顶端双层套管外侧环形通道均匀流入,通过下降环腔向下流入下腔室,熔盐在下腔室经流量再分配过程,经下支撑板向上流入堆芯活性区,在活性区产生并带出堆芯热量,最后经上腔室从双层套管内管流出堆芯。堆芯结构参数见表1。

由于堆芯实际结构复杂,在数值模拟计算分析时,对计算几何模型进行了简化处理,且考虑到堆芯结构的对称性,选取1/12扇形结构进行计算,熔盐通道及其径向距离分布如图2所示,计算模型具体如下:

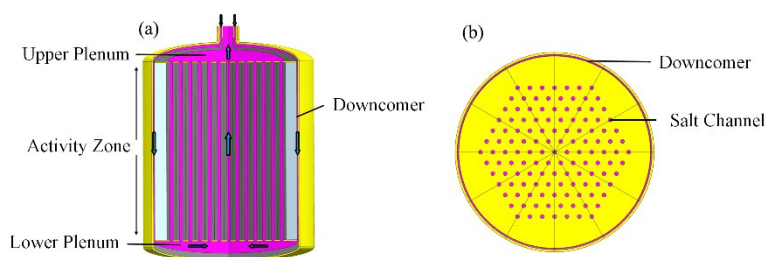


图1 10 MW级液态燃料堆堆芯结构剖面图(a)和切面图(b)
Fig.1 Vertical section (a) and cross section (b) of 10 MW molten salt reactor-liquid fuel

表1 堆芯设计参数
Table 1 Design parameters

设计参数 Design parameter	值 Value
活性区直径(含反射层) Diameter of active zone (including reflector) / m	2.8
熔盐孔道直径 Diameter of salt channel / m	0.06
熔盐通道个数 Number of channels	127
活性区高度 Height of activity zone / m	3
燃料盐 Fuel salt	LiF-BeF ₂ -ZrF ₄ -UF ₄ -ThF

1)下降环腔熔盐通道:初始环腔宽度为10 mm。考虑降低一回路阻力,环腔宽度不小于10 mm;考虑减少熔盐用量,环腔宽度不大于40 mm。

2)堆芯下腔室与堆芯活性区支撑板:下腔室初始结构为半椭球形,高度200 mm。考虑减少熔盐用量,下腔室高度不高于200 mm;堆芯活性区支撑板用于支撑稳定活性区石墨组件,支撑板开孔布局与孔径与活性区石墨熔盐通道一致。

3)堆芯活性区熔盐通道:堆芯由石墨组件构成,石墨组件中间开孔作为熔盐通道,熔盐通道半径为30 mm。活性区共计127个熔盐通道,计算取其1/12模型,部分熔盐通道被对称面分割,共包含16个熔盐通道,除去作为测量通道的中心通道,选取其余15个通道作为分析对象讨论堆芯流量分布的变化趋势。

4)堆芯上腔室及出口通道:上腔室为半椭球形,初始高度100 mm,考虑减少熔盐用量,上腔室高度不高于200 mm。

1.2 边界条件及物性参数

作为研究对象的兆瓦级液态熔盐堆采用石墨做慢化剂, LiF-BeF₂-ZrF₄-UF₄-ThF 熔融盐兼作燃料和冷却剂,堆芯设计进出口温度为660~700 °C,燃料盐取平均温度680 °C时的物性参数:密度2 373 kg·m⁻³,粘度系数0.005 9 kg·(m·s)⁻¹。兆瓦级液态熔盐堆堆芯进口流量为315 kg·s⁻¹,计算模型取其1/12对称模型,Ansys fluent 16.0求解器边界条件设置如表2所示。

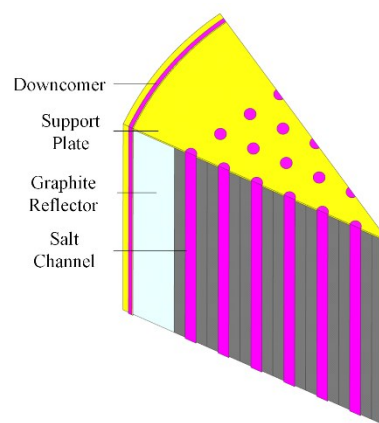


图2 整体结构1/12模型选取示意图
Fig.2 Diagram of 1/12 molten salt channels model of reactor core

1.3 网格划分及无关性验证

利用UG12.0建模工具,根据液态熔盐堆几何特征建立堆本体简化模型,使用Workbench Mesh 16.0划分网格,将计算域划分为下降环腔、下腔室、活性区、上腔室、出口管道共5个部分。对下降环腔、活性区等较规则区域采用结构化六面体网格划分,其余部分则采用四面体网格划分。

为保证计算准确性,进行网格无关性分析,选取6套网格进行敏感性分析,得到各通道质量流量变化趋势如图3所示。

结果显示,当网格数量达到1.38×10⁶后,各通道的质量流量变化趋于稳定,为提高计算准确性,采用网格量为2.92×10⁶的网格划分方案进行后续分析。

本文研究过程中,分别采用了标准k-ε模型、RNG k-ε模型及Realizable k-ε模型进行分析,如图4

表2 计算条件
Table 2 Calculation conditions

边界条件 Boundary condition	参数 Value
湍流模型 Turbulent model	标准 $k-\varepsilon$ Standard $k-\varepsilon$
进口质量流量 Inlet Mass flow rate / $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	26.25
进出口水力直径 Inlet/outlet hydraulic diameter / m	0.2
进出口流速 Inlet/outlet velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.1
进口管道雷诺数 Reynolds	88 000
出口压力 Pressure outlet / Pa	0
壁面条件 Wall condition	光滑壁面, 无滑移条件 Smooth wall, no-slip boundary condition

所示为不同湍流模型计算所得流量分布情况。

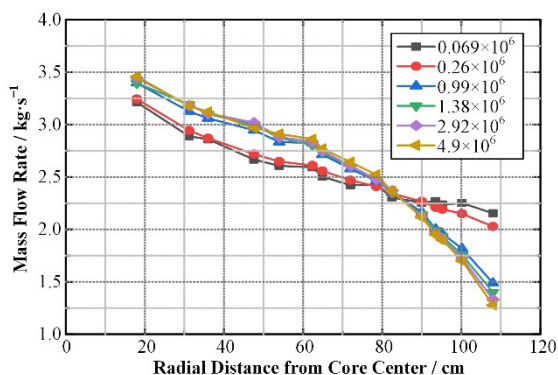


图3 各通道质量流量与网格数量关系
Fig.3 Relationship between channels mass flow rate and mesh elements number

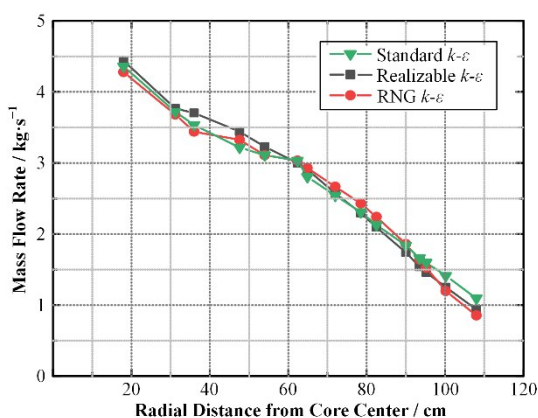


图4 不同湍流模型对应的通道的质量流量
Fig.4 Channel mass flow rate corresponding to different turbulent model

研究表明,采用上述三种湍流模型计算所得流量分布形状基本一致,总体偏差在6%左右,湍流模型对计算结果的影响较小。在综合考虑模型计算收敛稳定性和计算资源的限制后,选择较为稳健的标准 $k-\varepsilon$ 进行后续的数值计算研究。

1.4 流量分配性能评价指标

根据液态燃料熔盐堆的设计目的,确定了两个流量分配方案的评价指标:

1) 流量分布匹配功率分布,定义各个熔盐通道的流量均匀因子 λ_i , $\lambda_i = Q_i / \bar{Q}$, 其中 Q_i 为第 i 个通道的质量流量, $\bar{Q}$ 为 15 个熔盐通道的平均质量流量,根据蒙特卡罗程序 (Monter Carlo N-Particle Transport Code, version 5, MCNP5) 计算所得堆芯径向功率分布,堆芯径向功率因子在 15 个冷却剂通道分布范围内随径向距离增加近似单调递减,且径向功率因子分布在 0.85~1.28 区间。定义各熔盐通道流量与功率分布匹配因子 λ_{Di} , $\lambda_{Di} = \lambda_i - q_i$, q_i 为第 i 个通道所处位置的归一化径向功率因子,定义匹配因子标准差 σ ,统计 15 个通道的流量与功率匹配因子的标准差, σ 值越小说明流量分布匹配功率分布程度越好。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i \lambda_{Di}^2}{n-1}}$$

2) 上、下腔室流动死区消除和涡流抑制,通过对比分析下腔室的流线分布和速度矢量分布,观察流动死区是否得到消除,以及有无大尺度涡流的产生,定性的比较流场优化的效果。

2 优化设计方案与计算结果

2.1 上腔室高度敏感性研究

为研究上腔室高度对流量分配的影响,选取高度 $H=100\text{ mm}$ 、 150 mm 、 200 mm 和 300 mm ,计算得到代表通道的流量均匀因子如图 5 所示。随着上腔室高度的增加至 200 mm ,中心区域通道的流量均匀因子最大值由 1.84 逐渐下降为 1.54,边缘区域通道流量则相应略有上升,整体通道匹配因子标准差由 30.58% 下降至 24.21%。在 $100\sim 200\text{ mm}$ 范围内,增加上腔室高度,流量分配曲线变平缓,调节效果明显,超过 200 mm 后增加上腔室高度作用有限。结合应尽量减少腔室体积,降低熔盐用量,认为上腔室高度设计取 200 mm 较为合适。仅靠增加上腔室高度无法满足流量分布匹配功率分布要求,需对其他结

构进一步优化。

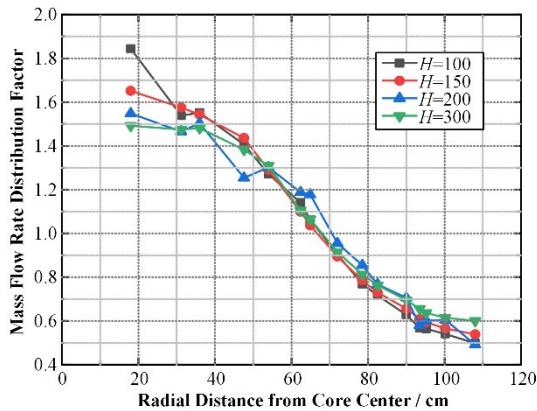


图5 不同 H 值对应的代表通道的流量均匀因子

Fig.5 Channel mass flow rate distribution factor corresponding to different heights of the upper plenum

2.2 下降环腔宽度敏感性研究

选取下降环腔宽度 $D=10\text{ mm}$ 、 20 mm 、 30 mm 和 40 mm ,计算结果如图6所示,可见随着通道距离中轴线径向距离的增加,各种环腔结构下通道内的流量逐渐下降;增加下降环腔宽度可显著降低中心区域通道的流量份额,随着环腔宽度由 10 mm 增加至 30 mm ,中心区域通道内流量均匀因子最大值由 1.59 下降为 1.34 ,边缘通道的均匀因子最小值由 0.62 上升至 0.77 ,整体通道匹配因子标准差由 24.09% 下降至 10.56% 。不同环腔宽度下的下腔室流线如图9所示,环腔宽度越小,熔盐流速越大,流量冲击更多集中在活性区中心区域,在远离中心区域的周边通道入口附近高速熔盐上卷形成涡流,受涡流扰动的影响,在边缘通道入口附近产生较大阻力,导致该排通道流量过小。增加环腔宽度,边缘区域流量份额上升。由图6观察到,当环腔宽度达到 30 mm 后,流量均匀因子分布随环腔宽度增加流量分布曲线变化不大,考虑节约熔盐用量,认为取环腔宽度 $D=30\text{ mm}$ 较为合适。

尽管提高下降环腔的宽度能有效降低中心区域通道的流量份额,增加边缘区域通道的流量占比,有助于展平活性区入口的流量分布,但由图7(c)、(d)可见,当 D 大于 20 mm 以后在下腔室中心区域产生了涡流扰动,为抑制下腔室涡流的产生,需进一步对下腔室结构进行优化。

2.3 下腔室几何结构敏感性研究

针对下腔室中心区域的涡流,设计了具有更小体积的带倒角圆柱型下腔室结构,并对比了在下腔室高度为分别 100 mm 、 150 mm 、 200 mm 下的椭球型和圆柱形下腔室流量分配情况,如图8所示,虚线

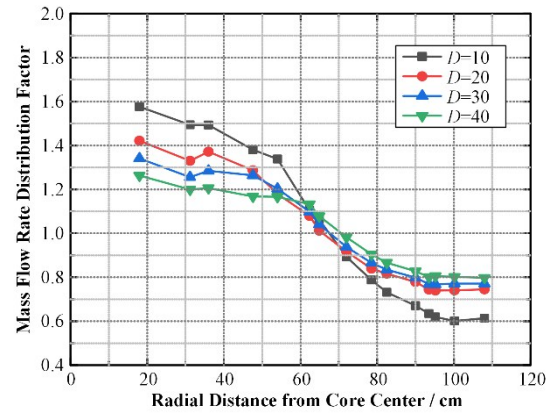


图6 不同 D 值对应的代表通道的流量均匀因子

Fig.6 Channel mass flow rate distribution factor corresponding to different widths of the downcomer

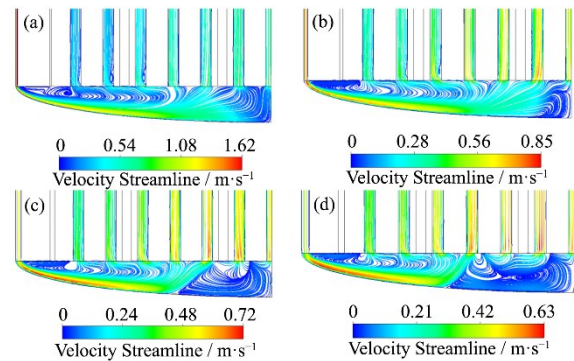


图7 不同环腔厚度的下腔室流线图

(a) 10 mm , (b) 20 mm , (c) 30 mm , (d) 40 mm

Fig.7 Streamline distribution diagram of lower plenum with different thickness D

(a) $D=10\text{ mm}$, (b) $D=20\text{ mm}$, (c) $D=30\text{ mm}$, (d) $D=40\text{ mm}$

为椭球型下腔室结构的流量分布,实线为圆柱型结构的流量分布。

从图8发现,相同高度下的圆柱结构下腔室比椭球型结构下腔室流量展平效果更好, $H=100\text{ mm}$ 时,圆柱型下腔室和椭球型下腔室对应匹配因子标准差分别为 5.16% 和 8.4% ,圆柱型结构匹配程度优于椭球型结构;圆柱型下腔室高度由 100 mm 增加至 200 mm ,整体通道匹配因子标准差由 5.16% 升高至 24.25% ,说明增大下腔室高度 H 不利于流量分布与功率分布的匹配;对比图13中(c)方案2与(d)方案3流线,椭球型下腔室结构中心区域的涡流在圆柱型下腔室中消失,说明圆柱型下腔室结构能够有效抑制中心区域涡流的产生,这是由于其紧凑的几何结构使得熔盐在下腔室底部不易上卷形成涡流。考虑到减少熔盐体积的目的,设计选取 $H=100\text{ mm}$ 的圆柱形下腔室结构。

从图13(d)方案3流线分布发现,在环腔与下腔室相接区域的通道附近仍存在部分涡流,因此进一步添加流量分配件优化下腔室流场。

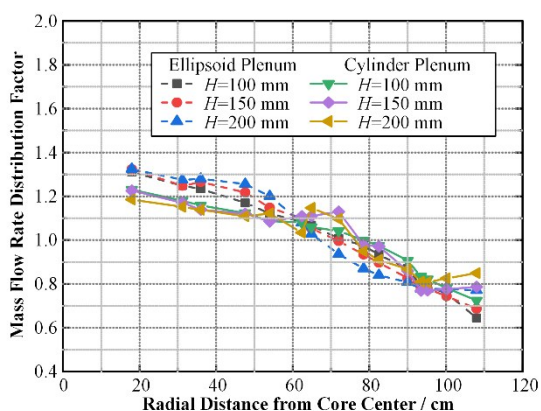


图8 不同下腔室结构对应的代表通道的流量均匀因子
Fig.8 Channel mass flow rate distribution factor corresponding to different geometry structure of the down plenum

2.4 设置导流围筒及调整下支撑板孔径

郑健涛等^[17]的研究结果表明,在堆芯下腔室设置导流围筒能起到整流作用,可明显消除下腔室漩

涡以及减低入口流量分配标准差。为消除环腔相接区域的下腔室涡流死区,防止下腔室中温度热点的产生,设计了如图9所示的导流围筒,并进一步针对性调整下支撑板孔径使流量分布更加符合功率分布,设计方案如表3所示。

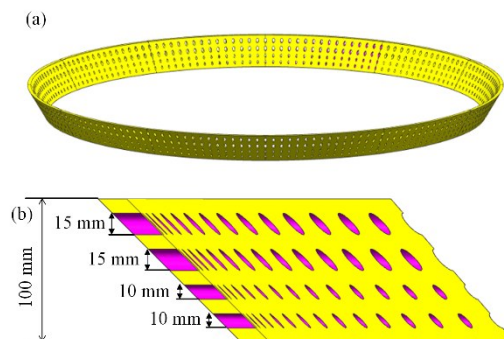


图9 导流围筒整体示意图(a)和剖面图(b)
Fig.9 Diagram of shroud in the lower plenum (a) and vertical section (b)

表3 导流围筒及下支撑板布置方案
Table 3 Optimization schemes

方案编号 Number	结构变化 Change of structure	匹配因子标准差 Standard deviation of matching factor / %
0	—	5.16
1	设置导流围筒,下支撑板孔径尺寸与活性区通道尺寸一致 With a shroud, the size of holes on support plate is consistent with the channel in the active zone	4.33
2	设置导流围筒,缩减第2、3、4圈孔直径为55 mm,第5、6、7圈为50 mm With a shroud, changeable diameter of holes on support plate (55 mm for the 2 nd , 3 rd and 4 th loop, 50 mm for the 5 th , 6 th and 7 th loop)	4.14

两种不同方案通过数值模拟计算,得到的流量分布曲线如图10所示,其中方案0与方案1的下腔室场分布对比如图11所示。

对比方案0与1可知,加入导流围筒后,流量分配曲线比未设置导流围筒时相比更加平稳,说明导

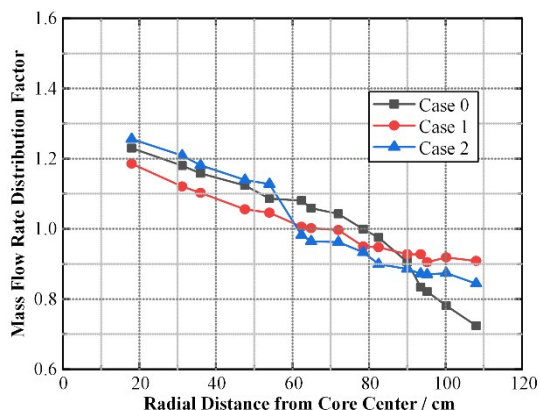


图10 不同导流围筒布置方案对应的流量均匀因子
Fig.10 Mass flow rate distribution factor corresponding to different the geometry structure of the shroud

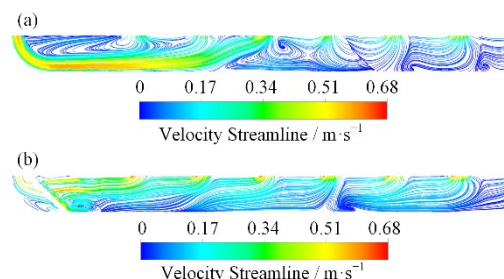


图11 加入导流围筒后下腔室场分布对比
(a) 方案0, (b) 方案1
Fig.11 Comparison of velocity field distribution in the lower plenum after adding shroud with solution case 0 (a) and case 1 (b)

流围筒具有展平流量分布的效果,同时整体通道匹配因子标准差由5.16%下降至4.33%。从图11可看出,布置导流围筒后,既能够消除下降环腔与下腔室相接段区域的涡流,同时在导流围筒内部流场不产生大尺度涡流,具有较好的涡流抑制效果。方案2,调整了下支撑板孔径分布获得了更加合理的流量分布结果,整体通道匹配因子标准差仅为4.14%,各通

道流量均匀因子分布在0.84~1.25,与径向功率因子分布符合良好,因此采取方案2作为最终优化方案。

2.5 流量分配结构设计

通过上述熔盐堆上腔室高度、下降环腔宽度、下腔室形状及其高度、下腔室导流结构及下支撑板孔径等6个因素对堆芯流量分配造成的影响,分析过程采用递进优化的方法,相应的设计方案及对应匹

配因子标准差如表4所示,方案0~4的各通道流量均匀因子绘制如图12所示,方案0~4的下腔室流线分布如图13所示。最终得到十兆瓦级液态燃料熔盐堆堆芯水力结构设计方案:上腔室采用半椭球腔室结构,高度200 mm;下降环腔宽度30 mm;下腔室采用圆柱腔室结构,高度为100 mm;下腔室增设导流围筒,调整下支撑板孔径。

表4 流量分配设计优化方案
Table 4 Schemes of flow distribution

方案编号 Number	结构改变 Structure changes	匹配因子标准差 Standard deviation of matching factor / %
0	初始结构 Primary structure	30.7
1	增高上腔室高度至200 mm Increase height of upper plenum to 200 mm	24.21
2	增加下降环腔宽度至30 mm Increase width of downcomer to 30 mm	10.55
3	下腔室改为圆柱形,高度调整为100 mm Change the lower plenum to cylindrical, change the height to 100 mm	5.16
4	下腔室增设导流围筒,调整下支撑板孔径 Set the shroud in lower plenum, change the size of holes on support plate	4.14

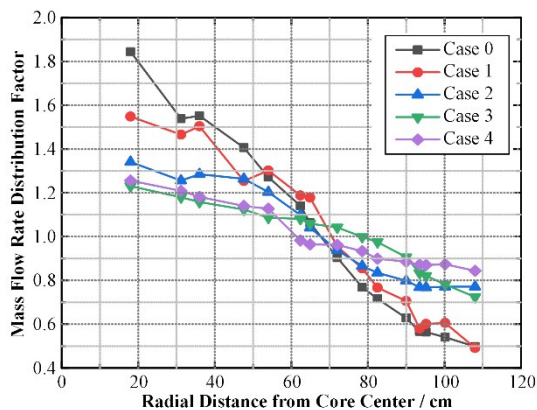


图12 不同方案对应的代表通道的流量均匀因子
Fig.12 Comparison of mass flow rate distribution factor with different solutions (case 0~4)

3 结语

本文基于CFD数值分析软件FLUENT16.0,以兆瓦级液态燃料熔盐堆本体为原型结构(上腔室高度100 mm,下降环腔宽度10 mm,椭球型下腔室高度200 mm不含导流围筒),研究了其流量分配特性,提出了递进式改进的优化方案,并对比了各方案的流量分配优化效果,结果表明:

1)增大上腔室高度可以平衡活性区内外通道流量分布差异,调整上腔室高度 H 至200 mm,将中心区域通道最大流量均匀因子由1.84减小至1.54,整体通道匹配因子标准差由30.58%下降至24.21%。

2)原始方案中下降环腔宽度过窄,环腔内熔盐流速较高,导致下腔室靠近环腔处熔盐通道入口形

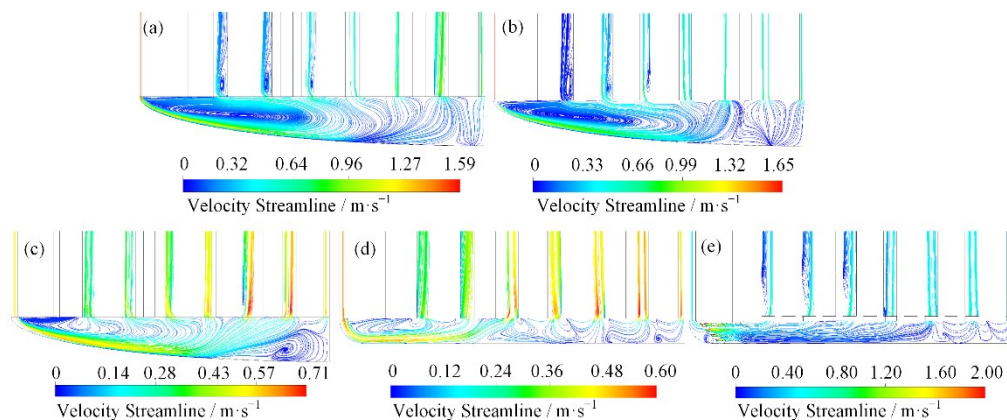


图13 不同方案对应下腔室流线分布 (a) 方案0, (b) 方案1, (c) 方案2, (d) 方案3, (e) 方案4
Fig.13 Comparison of streamline distribution in lower plenum with different solutions
(a) Case 0, (b) Case 1, (c) Case 2, (d) Case 3, (e) Case 4

成激烈涡流,下腔室流量径向分布极不均匀,增大下降环腔宽度能明显展平径向流量分布,增大下降环腔宽度 D 至 30 mm,整体通道匹配因子标准差由 24.21% 下降至 10.55%。

3)圆柱型下腔室结构比原始方案中的椭球型结构具有更好的抑制局部涡流的效果,增加下腔室高度并不能使流量分布更好的匹配功率分布,最佳方案(高度 100 mm 的圆柱型下腔室结构)可将整体通道匹配因子标准差由 10.55% 下降至 5.16%。

4)设置下腔室导流围筒结构可以在环腔出口处起到整流效果,有效抑制下腔室靠近下降环腔区域的局部涡流,通过设置倾斜导流围筒,下腔室大尺度涡流得到消除,同时将整体通道匹配因子标准差减小至 4.33%,最终为使堆芯流量分布更好匹配功率分布,通过调节下支撑板孔径分布,整体通道匹配因子标准差下降为 4.14%。

最终确定的优化方案为下腔室调整为 100 mm 高度的圆柱型结构,增设倾斜非均匀孔径分布的导流围筒,下降环腔宽度调整至 30 mm,上腔室高度调整为 200 mm。上述结论可为兆瓦级液态燃料熔盐堆的流量分配优化设计提供参考。

作者贡献声明 胡思勤:负责文章的起草及最终版本修订;田健:负责论文的修改;周翀:负责资料的收集及整理;邹杨、余笑寒:负责研究课题的提出。

参考文献

- 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 Sciences, 2012, 27(3): 366-374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- 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): 24-30. DOI: 10.1080/10619127.2014.910434.
- 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.
- 于平安,朱瑞安,喻真烷,等.核反应堆热工分析[M].第三版.上海:上海交通大学出版社,2002:146-148.
- YU Pingan, ZHU Ruian, YU Zhenwan, *et al.* Nuclear reactor thermal analysis[M]. 3rd Ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2002: 146-148.
- 周振华,潘登,陈玉爽,等.一种液态燃料熔盐堆堆芯流量分配设计[J].核技术,2016,39(5):050601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050601.
- ZHOU Zhenhua, PAN Deng, CHEN Yushuang, *et al.* Core flow distribution design of molten salt reactor with liquid fuel[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(5): 050601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050601.
- 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, 241(9): 3376-3388. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.04.018.
- LeBlanc D. Molten salt reactors: a new beginning for an old idea[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(6): 1644-1656. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.12.033.
- 杨来生,宗桂芳,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):208-211,226. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2003.z1.056.
- YANG Laisheng, ZONG Guifang, HU Jun. Reactor hydraulic simulation test study of Qinshan phase II NPP project[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(S1): 208-211, 226. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2003.z1.056.
- 唐茂,张明乾,陈亮,等.导流围板对堆芯入口流量分配影响的数值分析[J].核动力工程,2013,34(S2):83-86.
- TANG Mao, ZHANG Mingqian, CHEN Liang, *et al.* Numerical analysis of flow skirt influence on core inlet flow distribution[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(S2): 83-86.
- 张明乾,段远刚,朱明莉,等.基于CFD方法的反应堆流量分配结构的优化设计[J].核科学与工程,2015,35(2):193-199. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2015.02.001.
- ZHANG Mingqian, DUAN Yuangang, ZHU Mingli, *et al.* Optimized design for the flow distribution device of nuclear reactor internals based on CFD simulation[J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(2): 193-199. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2015.02.001.
- 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.
- 文俊,彭天骥,范旭凯,等.中国加速器驱动嬗变研究装置堆芯流量分配设计与优化[J].核技术,2020,43(7):070601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.070601.
- WEN Jun, PENG Tianji, FAN Xukai, *et al.* Analysis and

- optimization of flow distribution for the reactor core of China initiative accelerator driven system Full text replacement[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(7): 070601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.070601.
- 13 王天石, 赵鹏程, 刘紫静, 等. 一回路腔室结构对自然循环铅基快堆堆芯流量分配特性影响研究[J]. 核技术, 2020, **43**(3): 030602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030602.
- WANG Tianshi, ZHAO Pengcheng, LIU Zijing, *et al.* Study on the influence of the geometry of the primary circuit plenum on the core flow distribution characteristics of the natural circulation lead-based fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(3): 030602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030602.
- 14 Bajorek S M. NRC confirmatory analysis and advanced non-LWR code selection[C]. GAIN-EPRI Modeling & Simulation (M&S) Workshop, Charlotte, NC, USA, January 24–25, 2017.
- 15 Rouch H, Geoffroy O, Rubiolo P, *et al.* Preliminary thermal-hydraulic core design of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR)[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, **64**: 449 – 456. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.09.012.
- 16 Podila K, Chen Q, Rao Y F. CFD simulations of molten salt reactor experiment core[J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, **193**(12): 1379 – 1393. DOI: 10.1080/00295639.2019.1627177.
- 17 郑健涛, 李华奇. 堆芯下腔室导流围筒对流场影响的数值研究[J]. 核动力工程, 2015, **36**(1): 148 – 151. DOI: 10.13832/j.jnpe.2015.01.0148.
- ZHENG Jiantao, LI Huaqi. Numerical study on effects of shroud in core lower plenum on flow field[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, **36**(1): 148 – 151. DOI: 10.13832/j.jnpe.2015.01.0148.