

一体化反应堆自然循环流动传热特性分析

吴建邦, 张星亮, 白宇飞

上海核工程研究设计院有限公司部件研究与设计部, 上海

收稿日期: 2022年11月14日; 录用日期: 2023年1月5日; 发布日期: 2023年1月12日

摘要

某型号一体化反应堆采用内置螺旋管式换热组件的部分一体化布置形式和取消主泵的全自然循环设计理念, 其堆内结构和驱动力与传统大型压水反应堆存在较大区别。本文采用商业计算流体力学软件Star ccm + 10.02, 针对该型号的一体化反应堆开展了堆内自然循环三维流场分析。计算结果表明, 冷却剂由于冷热段的高差和密度差形成的驱动力可以和堆内阻力匹配, 堆芯支承下板的压降约占反应堆一回路总压降的12%, 整个上腔室约占反应堆一回路总压降的30%, 反应堆内冷却剂的最高流速为2.2 m/s左右, 流速最高的位置出现在堆芯支承下板流水孔中。同时, 该堆型堆芯入口流量分配较为均匀, 最大流量分配因子为1.05, 最小流量分配因子为0.93。

关键词

一体化反应堆, 自然循环, 计算流体力学, 反应堆热工水力

Analysis of Natural Circulation Flow and Heat Transfer Characteristics in an Integrated Reactor

Jianbang Wu, Xingliang Zhang, Yufei Bai

Department of Component Research & Design, Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai

Received: Nov. 14th, 2022; accepted: Jan. 5th, 2023; published: Jan. 12th, 2023

Abstract

A certain type of integrated reactor adopts the partially integrated arrangement and the whole

natural circulation design which the spiral-tube heat exchangers are internally installed and cancel the primary pump. Based on above reasons, the reactor's structure and driving force are quite different from traditional commercial pressurized water reactor. In this paper, Star ccm + 10.02, a commercial computational fluid dynamics software, is used to analyze the natural circulation characteristics of this integrated reactor. The results show that driving force caused by the height and density difference of the coolant in the hot and cold sections can match the resistance inside the reactor. The pressure drop of the lower core support plate accounts for about 12% of the total pressure drop in the primary loop, and the upper plenum pressure drop accounts for about 30% of the total pressure drop in the primary loop. The maximum flow velocity of the coolant in the reactor is about 2.2 m/s. The highest flow velocity located in the drain hole of lower core support plate. The core inlet flow distribution is even, with the maximum flow distribution factor of 1.05 and the minimum flow distribution factor of 0.93.

Keywords

Integrated Reactor, Natural Circulation, CFD, Reactor Thermal Hydraulics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自然循环是在上世纪六、七十年代开始,逐渐应用在核能领域的一种非能动运行理念。在核反应堆系统中的自然循环是指:整个冷却剂回路依靠冷源和热源之间的相对高差和密度差产生驱动力,克服回路自身流动阻力,在没有外加动力源的情况下产生一定的循环流量,将热源产生的热量带走的一种运行方式。其作为一种非能动运行方式,可以在提高系统的固有安全性的同时简化系统复杂度。某型号反应堆采用全自然循环的设计理念和内置螺旋管式换热组件的部分一体化布置形式,其堆内结构和驱动力与传统反应堆有较大区别,而其堆内流动传热特性对反应堆系统的安全和相关设备的稳定运行都至关重要。通常,对于反应堆的自然循环数值模拟方法分为两种,分别为基于单相自然循环流动传热方程的一维系统分析和三维计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)自然循环流动传热分析[1] [2] [3] [4]。Vijayan [5]通过大量实验研究以及理论推导建立了一套完整的无量纲化的自然循环特性方程,并采用稳态雷诺数作为稳态情况下自然循环回路的流量解。谢衡[6]推导了闭式单相闭式循环回路的稳定性方程,指出单相流动不稳定的出现需要较大的加热功率和合适的阻力系数以及系统布置,一般的商用压水堆不会出现单相自然循环不稳定性。杨祖毛[7]指出采用速度的平方来度量流动阻力大小的方法在自然循环回路中的适用性有待商榷,并提出了一个新的参数 m 来衡量自然循环阻力特性。任成[8]提出了表征自然循环能力的综合特性参数 k 来衡量不同自然循环回路和不同工况下的自然循环能力。周媛[9]基于 CFD 方法针对中国先进研究堆(CARR)进行了自然循环瞬态分析并同试验结果进行对比,验证了 CFD 方法用于分析全堆自然循环的可靠性。卢川[10]也采用 CFD 方法分析了某自然循环反应堆,并发现其堆芯入口流量分配较为均匀,最小流量分配因子为 0.93。

本文采用 CFD 方法,建立了某一体化反应堆的堆本体的流动传热分析模型,获得了该一体化反应堆的流速分布、各部分的压降和堆芯入口流量分配,分析了该一体化反应堆的自然循环特性和堆芯入口流量分配特性,为该一体化反应堆的后续优化提供借鉴。

2. 计算模型

2.1. 几何模型

某型号一体化反应堆压力容器高 14.8 m，最大外径 5.1 m，反应堆本体结构示意图如图 1 所示，其中内置了 8 台螺旋管式换热组件。本文所采用的计算模型如图 2 所示，该模型由下降环腔、下腔室、堆芯、上腔室和换热组件构成，由于堆芯和换热组件的结构过于复杂，不便直接模拟这两部分的流动和传热情况，采用多孔介质的分布阻力来近似替代这两部分结构的阻力特性，这也是在进行反应堆本体流场分析中通常使用的方法。同时为了方便计算，考虑到几何模型的对称性，几何模型取实际模型的 1/8。此外，几何模型对实际结构中对流场影响很小的局部倒角及螺栓等结构进行了简化。但是对于关键部位的倒角，如堆芯支承下板开孔倒角等部位予以保留。



Figure 1. Schematic diagram of reactor structure

图 1. 反应堆本体结构示意图

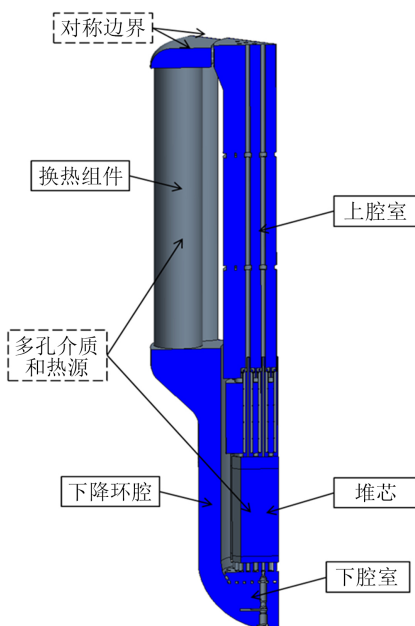


Figure 2. Diagram of the reactor calculation model

图 2. 反应堆计算模型图

2.2. 边界条件

计算模型的流体域是封闭的，没有进口和出口，为了模拟重力驱动冷却剂在其中进行自然循环，需要在堆芯和换热组件位置分别设置热源和冷源以及密度随温度变化的冷却剂物性。本文在堆芯和换热组件区域采用均布的体积热源来实现冷却剂的吸热和放热。堆芯导出至冷却剂的总热量和冷却剂导出给换热组件的总热量一致，以保证冷却剂能形成稳定的温度场和流场。堆芯和换热组件处的多孔介质分布阻力采用修正的 Darcy 定律来描述[9]，并只考虑惯性损失项，不考虑黏性损失项。本文所采用的计算输入参数见表 1。

Table 1. Calculate input parameters

表 1. 计算输入参数

参数	数值
参考压力(MPa)	9
自然循环热功率(MW)	200
体积冷源(MW/m ³)	10.6
体积热源(MW/m ³)	36.5
堆芯多孔介质阻力系数(1/m)	15.5
换热组件多孔介质阻力系数(1/m)	76.2

2.3. 网格划分

对 2.1 节介绍的计算模型采用 Star ccm + 10.02 软件划分多面体非结构网格，针对堆芯支承下板、导向筒延伸段等局部结构进行网格加密，并对整体模型设置统一的间隙网格数量。根据网格生成的情况，进行质量检查，并根据质量检查结果再次调整局部网格的尺寸，进行反复多次迭代，并考虑计算的经济性，将总网格规模控制在 1000 万以下，最终选取的网格数量 997 万。整体网格模型和导向筒区域的局部网格分别如图 3 和图 4 所示。

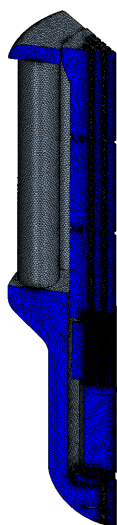


Figure 3. Grid diagram of overall calculation model

图 3. 整体计算模型网格图

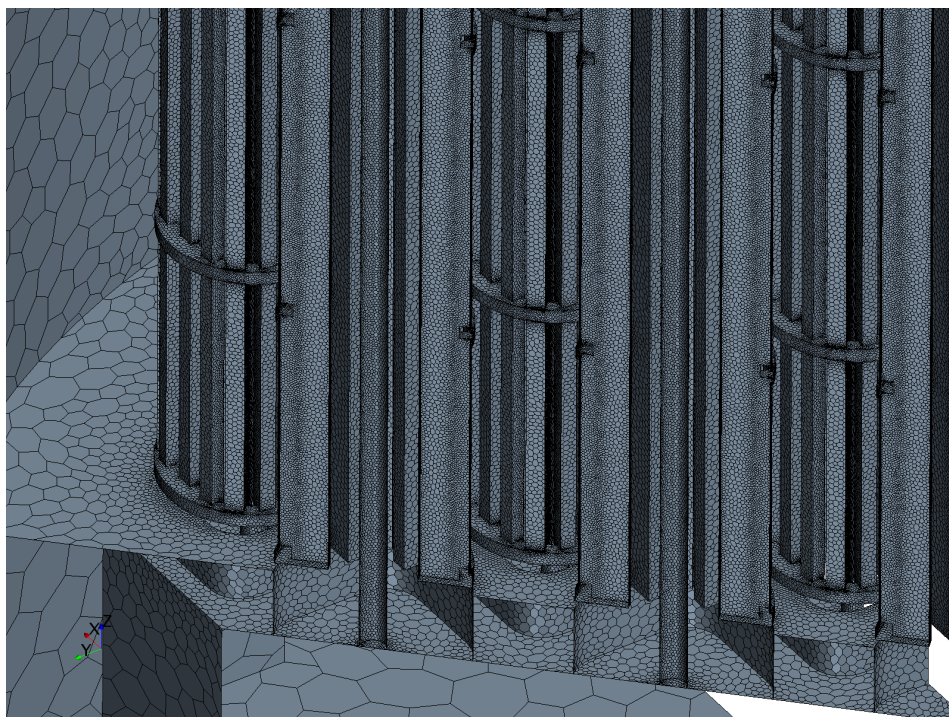


Figure 4. Grid diagram of guide tube zone
图 4. 导向筒区域网格图

2.4. 求解模型设置

本文采用稳态计算，并考虑重力的影响，因此在轴向设置重力加速度，湍流模型采用 *Realizable k-Epsilon* 模型，壁面函数为 *Two-Layer All y + Wall Treatment*。为保证计算的收敛性，将压力项松弛因子设置为 0.2，动量方程松弛因子设置为 0.8，能量方程松弛因子设置为 0.8，离散格式均采用一阶精度。计算采用 96 核并行求解，当质量、动量、能量、湍动能和湍流耗散率的残差均小于 10^{-6} 且压力和温度监测点的监测量均稳定时，认为计算收敛。

3. 计算结果分析

3.1. 压降和流速分析

图 5 为对称截面的冷却剂密度分布，由于堆芯热源的加热和换热组件冷源的冷却，冷却剂在两者之间形成了一定的密度差从而形成了自然循环驱动力。图 6 为反应堆整体的流线图，冷却剂由于冷热段的高差和密度差形成的驱动力可以和堆内阻力匹配，并形成了完整的闭合流线，堆芯支承下板、堆芯支承上板、导向筒区域和上腔室出口区域的流速较大，其中最大流速为 2.22 m/s，最大流速出现在堆芯支承下板流水孔内。

反应堆各区域的压降占比如表 2 所示。堆芯和换热组件的阻力以多孔介质阻力系数给出，属于计算的输入条件，其真实结构的阻力特性不在本计算中体现。下降环腔不存在复杂结构，且流道横截面较大，因此压降占比最小。堆芯支承下板由于要起到流量分配作用，因此需要有一定的阻力，其压降占比为 12% 左右，其阻力来源为堆芯支承下板流水孔和孔内的部分倒角和突缩结构。上腔室中有导向筒、导向筒延伸段、导向筒延伸段支承板等，其结构较为复杂，且部分横截面的流通面积较小，因此该区域压降占比最大，约占反应堆整体压降的 30% 左右。

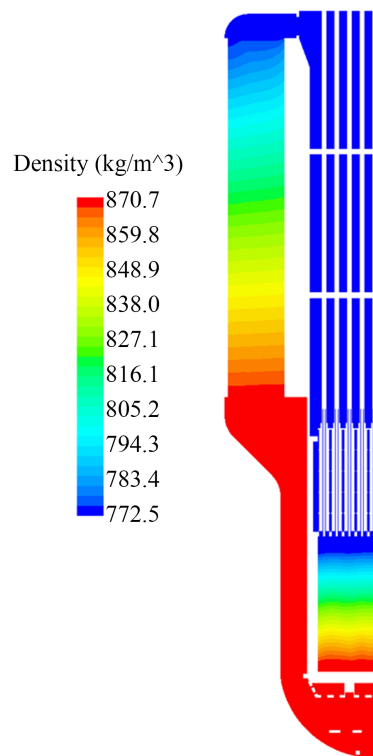


Figure 5. Diagram of coolant density distribution in symmetrical section
图 5. 对称截面冷却剂密度分布图

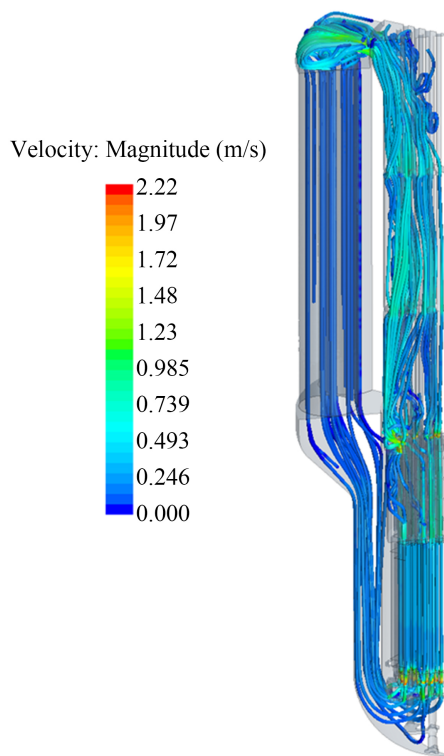


Figure 6. Diagram of reactor streamline
图 6. 反应堆整体流线图

Table 2. Proportion of pressure drop for each part in reactor
表 2. 反应堆内各部分压降占比

压降分段	各段占比
下降环腔	0.09%
下腔室	5.88%
堆芯支承下板	12.07%
堆芯支承上板	4.20%
上腔室	29.76%
堆芯	23.04%
换热组件	24.96%
总计	100%

3.2. 堆芯入口流量分配分析

堆芯入口流量分配情况的优劣将直接影响堆芯安全分析是否可行。本文通过整体模型的自然循环计算获得了其堆芯入口流量分配情况。该堆型由 57 组燃料组件构成，因此存在 57 个流量分配因子，流量分配因子的具体计算方法如下式所示，将每个组件的流量除以 57 个组件的平均流量获得该组件的归一化流量分配因子 η_i 。

$$\eta_i = \frac{q_i}{\frac{1}{57} \sum_{i=1}^{57} q_i} \quad (1)$$

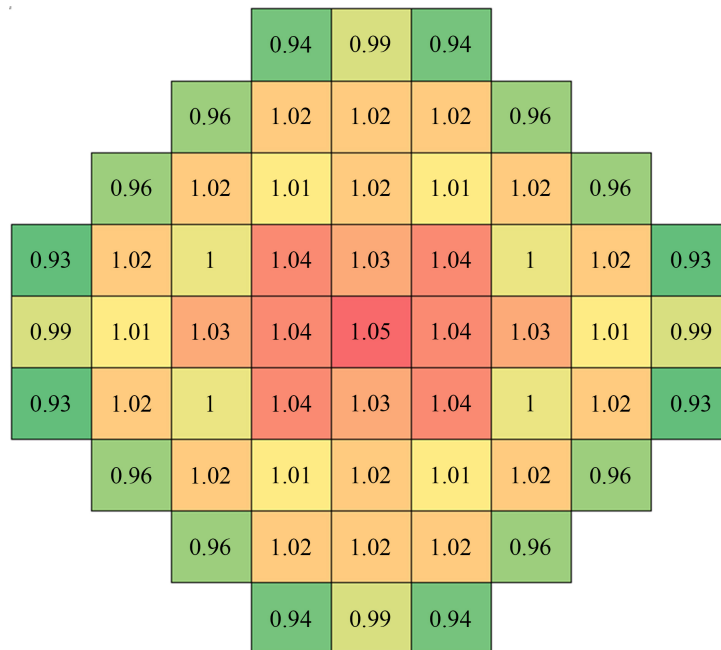


Figure 7. Diagram of core inlet flow distribution factor
图 7. 堆芯入口流量分配因子图

由于采用轴对称模型计算, 其余区域的流量分配情况由镜像对称获得, 堆芯入口的流量分配因子如图 7 所示。靠近中心位置处的流量分配因子较大, 部分外围组件的堆芯入口流量分配因子明显较小, 这是由于堆芯支承下板不同位置的流水孔对应下腔室的流动空间不同, 从而导致不同位置的流水孔所对应的总阻力不同, 进而造成了堆芯入口存在一定程度的流量分配, 但总体而言, 该堆芯虽然是自然循环驱动冷却剂流动, 但堆芯入口流量分配较为均匀, 最大流量分配因子为 1.05, 最小流量分配因子为 0.93。

4. 结论

本文采用 CFD 软件 Star ccm + 10.02 针对某一体化自然循环反应堆开展了三维稳态流动传热分析, 获得了该反应堆堆内的流速分布、各部分压降和堆芯入口流量分配情况。分析结果表明, 反应堆内的最大流速为 2.2 m/s, 该最大流速出现在堆芯支承下板区域。堆芯支承下板的压降约占反应堆一回路总压降的 12%, 整个上腔室约占反应堆一回路总压降的 22%。同时, 该堆的堆芯入口流量分配较为均匀, 最大流量分配因子为 1.05, 最小流量分配因子为 0.93。

参考文献

- [1] He, L.H., Wang, B. and Xia, G.L. (2017) Study on Natural Circulation Characteristics of an IPWR under Inclined and Rolling Condition. *Nuclear Engineering & Design*, **11**, 324-345.
- [2] 孔松, 于雷, 郝建立, 等. 一体化反应堆扰动条件下自然循环特性研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(4): 57-61.
- [3] Moon, S.K., Baek, W.P. and Chang, S.H. (1996) Parametric Trends Analysis of the Critical Heat Flux Based on Artificial Neural Networks. *Nuclear Engineering and Design*, **163**, 29-49. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(95\)01178-1](https://doi.org/10.1016/0029-5493(95)01178-1)
- [4] 杨若楠, 彭天骥, 秦长平, 等. 铅基反应堆自然循环与应急余热排出研究[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(1): 10-15.
- [5] Vijayan, P.K., Sharma, M. and Saha, D. (2007) Steady State and Stability Characteristics of Single-Phase Natural Circulation in a Rectangular Loop with Different Heater and Cooler Orientations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **31**, 925-945. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.10.003>
- [6] 解衡, 张金玲, 贾斗南. 自然循环单相流动不稳定性理论分析[J]. 核动力工程, 1997(5): 426-432.
- [7] 杨祖毛, 陈炳德. 一维单相自然循环流量稳态解的型式及实验验证[J]. 核科学与工程, 1999(3): 248-253.
- [8] 任成, 杨星团, 刘志勇, 等. 一体化小型堆主回路自然循环稳态特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(S1): 173-178.
- [9] 周媛, 吴献斌, 王玉林. 基于 CFD 方法的 CARR 自然循环特性分析[J]. 原子能科学技术, 2015(z1): 234-242.
- [10] 卢川, 张勇, 鲁剑超, 等. 基于 CFD 方法的自然循环反应堆冷却剂流动特性分析[J]. 核动力工程, 2012(S1): 5-14.