

反应堆下腔室湍流形态及流体脉动特性分析研究

莫少嘉, 段远刚

(核电安全技术与装备全国重点实验室, 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518172)

摘要: 反应堆下腔室流场的均匀性和稳定性是确保堆芯冷却效率与运行安全性的关键因素。本研究基于剪切应力输运(SST)湍流模型结合尺度自适应模拟(SAS)方法, 采用计算流体动力学(CFD)技术对3种典型结构的反应堆下腔室流场开展瞬态数值模拟, 系统研究了不同结构反应堆内的湍流形态与流体脉动特性, 并通过能量串级理论对脉动功率谱密度(PSD)进行了定量分析。数值结果表明: 由多组支承柱与能量吸收器构成“柱状组件”的结构1, 其下腔室内冷却剂形成空间分布均匀的小尺度涡系, 流体脉动PSD呈中等水平, 高能量频域截止频率达5~10 Hz; 采用全覆盖式半球形流量分配装置的结构, 通过狭窄间隙设计有效抑制了大尺度涡结构的形成, 显著降低了流体脉动强度, PSD较低, 高能量频域约为5 Hz; 未完全覆盖堆芯的局部流量分配结构, 其底部空腔区域存在特征频率约为1 Hz的大尺度高能涡结构。研究表明, 结构2(四环路反应堆结构)的低频水力激励可能引发燃料组件低频振荡, 易导致核功率波动幅值增大及定位格架异常磨损等潜在风险。基于此, 建议在运行期间实时监测, 并在必要时进行结构优化以调控下腔室湍流特性及脉动强度, 从而为反应堆安全运行提供可靠保障。

关键词: SST-SAS模型; 湍流形态; 流体脉动; 功率谱密度; 湍流能量串级

中图分类号: TL35

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)00-0001-12

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0934

Turbulent Conformation and Flow Fluctuation Analysis in Reactor Lower Chambers

MO Shaojia, DUAN Yuangang

(State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Technology and Equipment,
China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518172, China)

Abstract: The uniformity and stability of the flow field in the reactor lower plenum are crucial factors for ensuring the core cooling efficiency and operational safety. This study is based on the shear stress transport (SST) turbulence model combined with the scale-adaptive simulation (SAS) method. Computational fluid dynamics (CFD) technology was adopted to conduct transient numerical simulations of the flow fields in the lower plenums of three typical reactor structures. The turbulence characteristics and fluid pulsation properties in reactors with different structures were systematically investigated, and the pulsation power spectral density (PSD) was quantitatively analyzed through the energy cascade theory. The numerical results show that in the lower plenum of Structure 1 reactor, there are “columnar structures” such as support columns and energy absorbers, which cause the coolant to generate a large number of small-scale vortices inside the lower plenum. From the power spectral

density analysis results, its power spectral density is at a medium level, and the high-energy cutoff frequency is relatively high, about 5-10 Hz. For Structure 3 with a full-coverage hemispherical flow distribution device, the coolant entering the lower plenum is “squeezed” into the narrow gap close to the lower plenum wall, effectively suppressing the formation of large-scale vortices, and the turbulence energy is low. According to the power spectral density analysis results, its maximum PSD value is only 1/100 of that of Structure 2. The high-energy cutoff frequency is at a medium-high level, about 5 Hz. It can be seen that the “hemispherical” structure plays a key role in reducing the fluid pulsation energy and stabilizing the flow field. In the lower plenum of Structure 2 reactor, the flow distribution components only cover the central area of the core, and a “cavity” is formed at the edge position. The coolant generates a significant large-scale vortex below the radial support key, making the fluid pulsation in the edge area obvious. The power spectral density analysis shows that its fluid pulsation PSD value is the highest, about 10 times and 100 times that of Structure 1 and Structure 3 respectively, and the high-energy cutoff frequency is relatively low, about 1 Hz. Such high-energy, low-frequency large-scale vortices are extremely likely to generate large hydraulic excitations on the core fuel assemblies, which may trigger low-frequency oscillations of the fuel assemblies, and then lead to problems such as large fluctuations in nuclear power and grid wear. Therefore, during the power operation period, Structure 2 needs to be closely monitored, and structural modifications should be carried out when necessary to improve the turbulence pattern and pulsation conditions inside the lower plenum and ensure the safe operation of the reactor.

Key words: SST-SAS model; turbulent conformation; flow fluctuation; power spectral density; turbulent energy cascade

压水堆核电站反应堆结构主要由反应堆堆芯、反应堆压力容器(RPV)、堆内构件和控制棒驱动机构等组成,是核电站的重要组成部分。反应堆下腔室内均匀稳定的流场对保障堆芯的冷却效率和安全运行有重要作用。当前核电站反应堆下腔室结构设计过程中通常采用实验研究^[1-4],或与计算流体动力学(CFD)技术相结合,获得反应堆下腔室和堆芯入口区域的流场分布,验证并优化反应堆压力容器内部的结构设计。相关技术已应用于秦山核电站二期工程和华龙一号等反应堆结构的研发设计^[5-11]和优化^[12-15]。

传统反应堆整体水力学实验及 CFD 分析主要关注堆芯各燃料组件入口处的流量分配均匀性以及交混因子等空间分布均匀性。实际上,对于典型压水型核电站反应堆结构,冷却剂进入反应堆压力容器入口接管后,沿下降环腔向下流动,在下腔室改变流动方向为垂直向上,通过堆芯下板进入堆芯区域。由于流道结构的非均匀性、大量的钝体扰流以及较高的流速,导致反应堆内高速非均匀流动即湍流现象始终存在。自 20 世纪

80 年代后期起,西屋公司的四环路压水堆频繁出现堆芯出口温度升高、堆芯流量降低等异常工况。西屋公司分析指出,下腔室内湍流漩涡(即流体混沌现象)的形成与耗散是导致这些异常现象的主要原因^[16]。近年来,反应堆内流场的瞬态特性愈发受到业内学者的关注。卢川等^[17]借助 CFX 瞬态计算,深入探讨了反应堆下腔室所具有的卡门涡街发展特性。孟洋等^[18]针对 129 组模拟燃料组件的实验本体开展了 1:5 缩比实验,研究发现流量分配裙对下腔室涡流具有显著的抑制效果,而下腔室涡流会对堆芯入口流量分配均匀度产生不利影响,流体脉动偏大区域对应的流量分配因子明显偏小。

然而,受限于现有的分析与测量技术,过往研究存在诸多局限性。在 CFD 分析方面,主要采用稳态分析方法,无法捕捉流体的瞬时状态^[5-9,11,13]。由于计算能力和网格数量的限制,湍流模型多采用常规的 Reynolds 平均法(如 $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、SST 模型等)^[5-13,19],对瞬时脉动进行时间平均处理,难以精确刻画流动瞬态特性。在试验测量时,

常规涡轮流量计和文丘里流量计的采集频率较低,难以获取高精度的瞬时流动状态^[1-3,18]。此外,流量计仅能测量局部位置的流量,无法反映较大范围内整体流场的变化。随着核电站功率持续提升以及反应堆内流量增大,湍流的不稳定性影响日益显著。近年来,国内外部分大型核电站的反应堆在功率运行期间,出现了核功率波动偏大、燃料组件低频率振荡,甚至引发格架磨损、燃料组件破损等问题。按照以往的分析技术和试验方法,难以合理剖析这些现象产生的原因,也无法提出有效的解决措施。因此,采用更能准确描述反应堆下腔室流体脉动的湍流模型,开展高频瞬态流场模拟和流体脉动定量分析,构建反应堆内的湍流形态以及流体脉动特性,对于指导反应堆结构设计,以及分析处理相关异常运行现象,具有重要的工程意义。

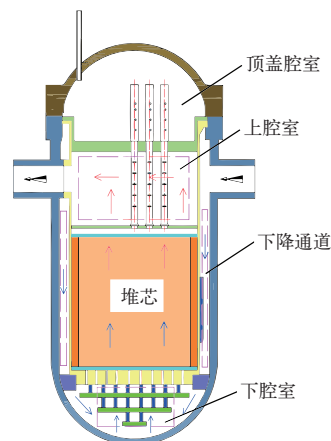
本文运用CFD分析软件ANSYS CFX对3种典型反应堆内部的流场进行数值分析,获取反应堆内的瞬态流场特性参数,研究不同反应堆结构下腔室内的湍流形态和流体脉动特征。此外,基于湍流的能量串级理论开展功率谱密度(PSD)分析,研究堆内流体脉动的功率谱密度和频率特征,分析其对堆芯燃料组件的影响,旨在为后续反应堆设计及相关异常运行现象的分析处理提供理论模型和分析依据。

1 模型构建

1.1 模型简化

本文聚焦于反应堆结构(图1)展开研究,涵盖3种典型结构。第1种为二代加三环路反应堆结构(结构1),其堆芯包含157组燃料组件。在下腔室内,设有支承柱(直径约80 mm)、能量吸收器(直径约220 mm)、仪表柱(直径约35 mm)以及大小格架板(厚度约50 mm)等部件。第2种是四环路反应堆结构(结构2),堆芯燃料组件数量为241组。此结构下腔室内设置了网状孔板式流量分配结构,该结构由环形围筒、网状孔板以及边缘的支承柱组件构成。其中,环形围筒外径尺寸约为2 600 mm,小于堆芯下板(约4 000 mm),致使其仅能覆盖堆芯中间区域位置的燃料组件,无法覆盖整个堆芯。第3种为中广核华龙一号三环路反应堆结构(结构3),堆芯含有177组燃料组

件。下腔室内设置了能覆盖整个堆芯的“半球形”流量分配结构,该结构上开有多层直径为60~80 mm的通孔,冷却剂经流量分配结构和下支承板水孔后进入堆芯。3种结构下腔室的流量分配结构示意图如图2所示。



箭头指示为冷却剂流动方向

图1 反应堆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reactor structure

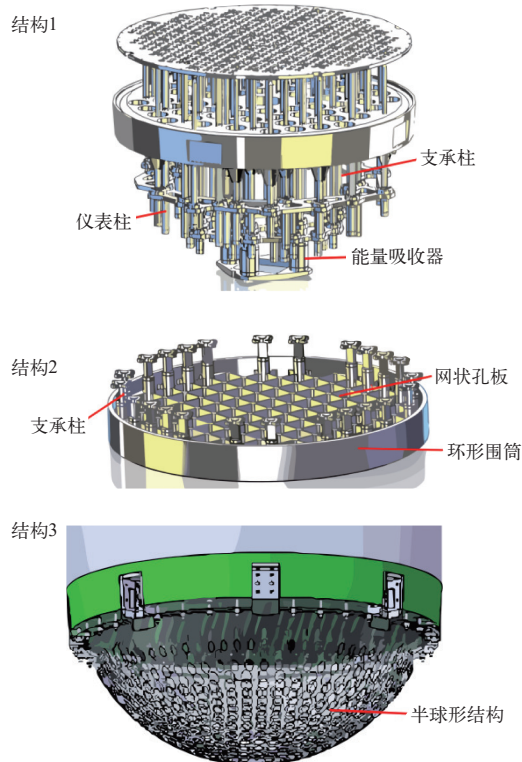


图2 3种典型反应堆流量分配结构示意图

Fig. 2 Three typical flow distribution structure of PWR

分析模型主要模拟反应堆进口接管(入口边界)、下降环腔、下腔室(含流量分配结构)、堆芯

下板和堆芯部分(出口边界)。模型中将对流场影响较小的部分零部件(如小尺寸的螺栓螺母、导向销、孔塞等)进行简化。以结构3为例,其分析模型如图3所示。

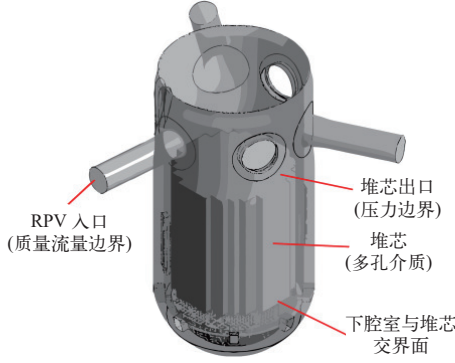


图3 分析模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of analytical model

1.2 流体模型

核心流体域采用了剪切应力输运(SST)湍流模型的尺度自适应模拟方法(SST-SAS)^[20-21],通过引入可根据当地流动拓扑自动调整的 Von Karman 尺度,依靠流动状态动态地自适应调整湍流黏性。该模型在标准 SST 湍流模型中 ω 方程的源项中添加了一项 Q_{SAS} ,即:

$$Q_{SAS} = \max \left[\rho \zeta_2 \kappa S^2 \left(\frac{L}{L_{vk}} \right)^2 - C \frac{2\rho k}{\sigma_\varphi} \max \left(\frac{|\nabla \omega|^2}{\omega^2}, \frac{|\nabla k|^2}{k^2} \right), 0 \right] \quad (1)$$

$$L_{vk} = \frac{\kappa \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}}{\sqrt{(\nabla^2 U)^2 + (\nabla^2 V)^2 + (\nabla^2 W)^2}} \quad (2)$$

$$L = \frac{\sqrt{k}}{c_\mu^{1/4} \omega} \quad (3)$$

式中: L_{vk} 为 Von Karman 尺度, m, 能够覆盖惯性子区所有的湍流脉动尺度,同时能够在非稳态区根据当前已知流场分辨漩涡动态,实时调整湍流模型中的长度尺度,在自适应全流场网格的基础上准确体现局部流动尺度; L 为模化湍流应力尺度, m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; k 为湍动能, m^2/s ; ω 为比耗散率, s^{-1} ; S 为应变速度的不变量, s^{-1} ; S_{ij} 为应变率张量, s^{-1} ; 模型常数 $C=2.0$, $\zeta_2=3.51$, $\kappa=0.41$, $\sigma_\varphi=2/3$, $c_\mu=0.09$ 。

对于 SST-SAS 整体,通过 L_{vk} 将流动分为 RANS 区($Q_{SAS}=0$)和 SAS 区($Q_{SAS}>0$),当流动进入分离

状态时, Q_{SAS} 增大,即增大了 ω 方程的生成项,加剧了湍流黏性的耗散从而促进了分离流动的发展。

堆芯区域虽位于反应堆下腔室的下游,但其所形成的阻力以及间隙流道,仍会对上游产生一定影响。在实际堆芯中,燃料组件数量众多,且结构复杂,按照实际结构进行建模难度极大。鉴于此,本研究采用 ANSYS CFX 中的多孔介质模型展开模拟。在模拟过程中,确保多孔介质模型的压降和孔隙率与原堆芯结构高度接近,以此最大程度减少因堆芯结构差异对上游下腔室内流场造成的影响,也是比较成熟的处理方式^[6-12,19]。在模型构建时,首先依据燃料组件的结构参数,换算出孔隙率(φ),随后根据前期试验所测得的燃料组件压降、结构参数以及流体热工参数等,进一步换算得到模型中的线性阻力系数(C^{R1})和平方阻力系数(C^{R2})。

$$\varphi = \frac{V_p}{V}, C^{R1} = \frac{\mu}{K}, C^{R2} = K_{\text{loss}} \frac{\rho}{2} \quad (4)$$

式中: V_p 为燃料组件多孔介质模拟体中孔隙体积, m^3 ; V 为燃料组件多孔介质模拟体体积, m^3 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; K 为渗透率, m^2 ; K_{loss} 为损失系数, m^{-1} 。

1.3 网格模型

采用四面体网格对各区域进行网格划分,在近壁面设置3层边界层网格。为确保数值模拟结果的准确性与可靠性,开展网格无关性分析至关重要。本研究以结构3为例,针对计算域采用多组不同疏密程度的网格进行模拟计算,网格数量为690万~4400万。在相同的边界条件与物理模型设定下,对归一化进出口压差进行监测与对比,结果如图4所示。

随着网格的逐步加密,模拟结果呈现出一定的变化规律。当网格细化到一定程度后(即网格数量从2000万开始),归一化进出口压差的计算结果逐渐减小并趋于稳定。综合考虑计算资源与结果精度,最终选择数量为约4000万的网格为本次分析的网格模型,另外两个结构的网格模型也按相同的尺度进行划分。

1.4 流场分析前提条件及边界条件

首先采用稳态模型计算初始流场,然后采用瞬态模型计算。为保证计算精度和收敛性,根据结构网格的尺寸和反应堆内的流动速度,选取瞬态计算时间步长为0.005 s,对应库朗数(CFL

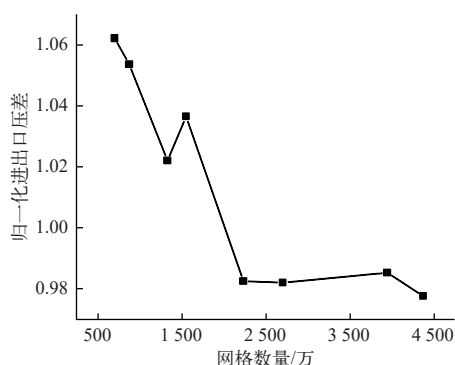


图4 归一化进出口压差随网格数量的变化

Fig. 4 Normalized import and export pressure difference changing with number of grids

数)在1.5~3之间,其中CFL数定义为:

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

式中: u 为流体速度, m/s; Δt 为时间步长, s; Δx 为网格尺寸, m。

计算工况为: 反应堆的最佳估算流量、100%功率、RPV入口冷却剂参数为工质参数、考虑重力加速度(9.8 m/s²)、不考虑换热。

计算边界条件为: 入口设置在RPV入口接管处, 根据原型反应堆实际运行参数, 3种典型堆型的单环路体积流量在23 500~28 500 m³/h之间。出口设置在堆芯(多孔介质)出口区域, 压力边界条件为静压15.5 MPa。其他壁面设置为无滑移壁面边界条件。

2 计算模型验证

在反应堆的结构设计中, 为使堆芯各燃料组件间的功率分布趋于相近, 进而保障堆芯运行的稳定性, 要求堆芯各燃料组件入口处的流量尽可能均匀。为精准描述堆芯入口流量的分配特性, 引入归一化堆芯入口流量分配系数 Q_i 作为评估指标, 其定义如下:

$$Q_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i/n} \quad (6)$$

式中: q_i 为计算结果中每个燃料组件入口处的质量流量, kg/s; n 为组件总数。

为验证计算的有效性, 选取结构3作为研究对象, 将其堆芯入口流量分配的CFD计算结果与按1:5缩比的反应堆整体水力模拟实验模型所得结果进行对比。

在该模拟实验中, 实验回路采用去离子水作为工作介质。流体温度控制在30~80℃之间, 实验压力设定为≤1.0 MPa, 单环路流量范围为580~1 000 m³/h。这些参数与原型反应堆及本文计算工况参数均满足相似原理。实验过程中, 流体从压力容器入口管嘴流入下降环腔, 随后进入底部腔室。经过流量分配结构与下部支承板后, 流入由177组模拟燃料组件构成的区域。之后, 流体再经上腔室与出口管嘴流出压力容器。在各燃料组件模拟件入口前端, 均安装有涡轮流量计, 用于精确测量堆芯入口处流经各燃料组件的流量。

为量化对比结果, 定义各燃料组件入口流量分配系数的CFD计算值与实验值的相对偏差为 x_i , 即 $x_i = (Q_i - Q_{si})/Q_{si} \times 100\%$, 其中 Q_{si} 为实验中每个燃料组件入口处的流量分配系数。经对比分析, 各燃料组件入口处的流量分配系数相对偏差大部分低于4%, 最大相对偏差仅为6.24%, 如图5所示。这表明计算值与实验值的相对偏差范围较小, 即计算结果与实验结果具有良好的一致性。

单位: %

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1						0.02	2.11	0.17	0.08	0.97					
2				2.55	0.34	1.78	2.64	0.71	0.86	1.47	1.43	4.68			
3			0.89	1.62	0.55	1.39	1.59	2.31	2.14	2.84	0.70	2.49	3.65		
4		2.32	0.36	2.35	3.46	0.78	1.06	1.67	1.61	0.10	2.20	1.07	1.14	3.75	
5		1.48	1.56	3.69	0.86	5.51	0.83	0.46	1.40	2.23	0.74	1.23	0.97	2.92	
6	0.17	1.70	2.15	2.02	0.65	3.40	2.04	1.96	0.83	0.01	3.99	1.38	1.69	0.93	1.61
7	1.87	2.25	1.77	2.28	2.52	3.04	1.43	1.12	1.30	2.06	1.38	3.08	0.82	0.72	0.17
8	1.01	0.61	4.25	1.26	0.86	2.18	0.83	1.43	0.36	0.90	0.96	1.11	1.09	0.68	2.83
9	0.16	2.98	6.24	5.49	2.06	1.38	1.35	0.38	1.17	0.38	0.78	1.61	4.08	2.09	0.36
10	1.30	2.66	0.41	3.88	4.74	0.26	2.74	1.30	1.30	2.63	0.86	3.61	2.99	0.70	2.40
11		0.52	3.44	1.33	3.38	0.46	1.32	3.81	0.30	1.12	2.16	0.39	2.12	0.21	
12		0.56	3.04	0.99	0.63	1.02	0.91	2.98	2.09	1.97	0.40	0.60	1.35	0.99	
13			0.71	1.78	2.20	4.14	1.82	2.62	2.39	0.32	1.81	0.83	2.69		
14				0.39	1.43	0.68	1.37	2.29	0.66	0.25	0.90	0.17			
15						0.67	0.23	5.36	2.44	1.29					

图5 流量分配系数CFD计算值与实验值的相对偏差
Fig. 5 Relative deviation between CFD and experimental value of flow distribution coefficient

3 结果分析

3.1 堆芯入口流量分配效果

3种结构对应的不同区间堆芯入口流量分配系数分布示于图6。对比分析表明, 结构3各燃料组件的堆芯入口流量分配系数主要集中在0.95~1.0和1.0~1.05之间, 整个堆芯入口的流量分布

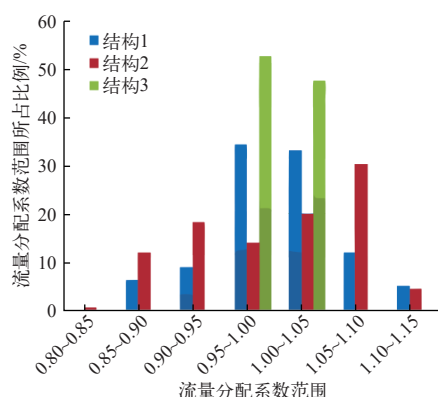


图6 不同区间堆芯入口流量分配系数比例分布

Fig. 6 Proportion distribution of flow distribution coefficient at inlet of different intervals of reactor core

非常均匀。而结构1和结构2则分布相对分散,流量分配系数的离散度较大。

3.2 下腔室湍流形态及堆芯入口流体脉动特性

分别提取3种结构下腔室湍流形态及堆芯入口流体脉动特性进行分析。

1) 结构1

图7、8为结构1下腔室纵截面流场及底部不同高度横截面在不同时刻的速度矢量分布。当冷

却剂从下降环腔流入下封头时,由于受到下腔室支承柱、能量吸收器等“柱状结构”的作用,冷却剂会形成分离流。在底板与下格架板之间的横截面(截面1)处,冷却剂围绕能量吸收器和支承柱产生明显绕流,漩涡尺度较大。随着时间推移,漩涡的位置与尺度呈现出显著变化,充分体现了其不稳定性。在上格架板与堆芯支承板之间的横截面(截面2),围绕支承柱形成了小尺度涡系,

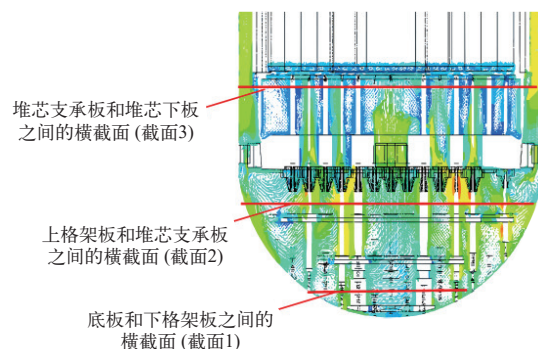


图7 结构1纵截面流场示意图

Fig. 7 Schematic diagram of flow field in longitudinal section for Structure 1

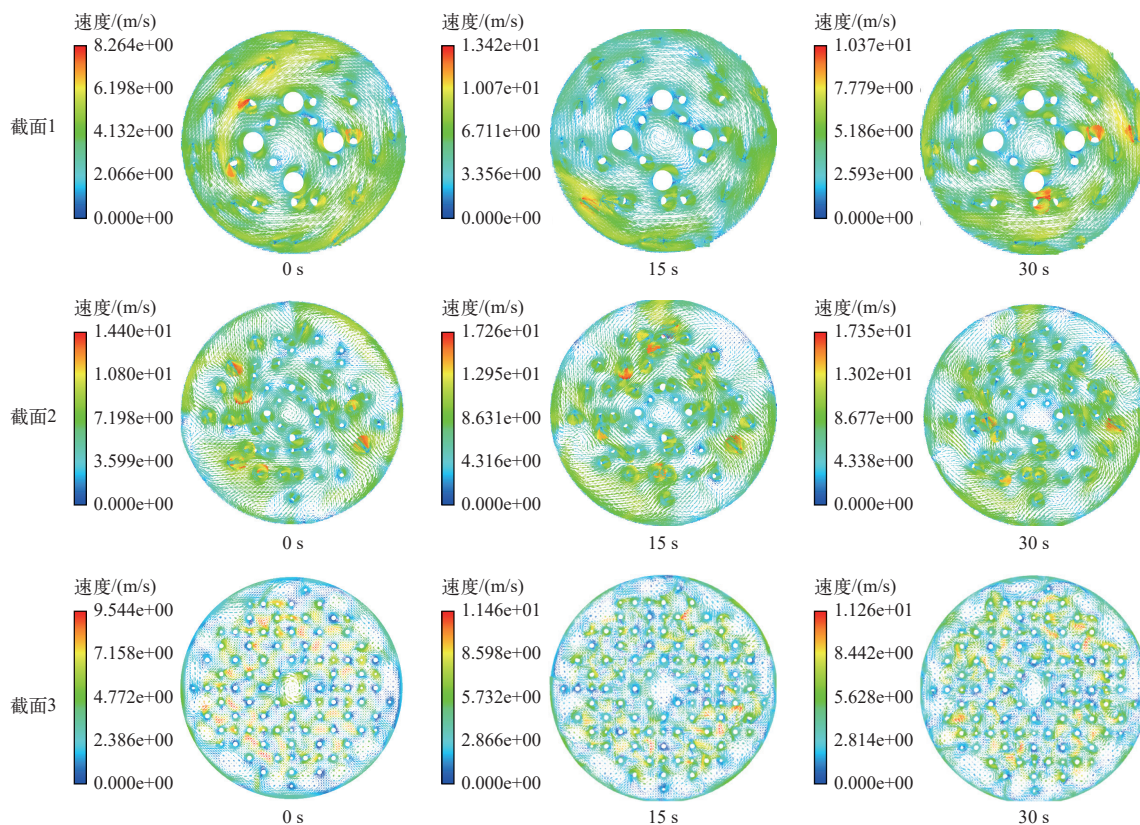


图8 结构1不同时刻各截面速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector diagrams of different cross-sections at different times for Structure 1

其位置和尺度随时间的变化相对较小。而在堆芯支承板与堆芯下板之间的横截面(截面3), 围绕支承柱依然存在明显漩涡, 尺度更小, 且位置和尺度随时间的变化也较微小。通过对比分析可知, 各位置漩涡的尺度与“柱状结构”尺寸相近。

提取结构1中心区域与边缘区域典型位置处燃料组件的入口流量随时间的变化数据(即流体

脉动)进行分析, 结果如图9所示。在选取位置时, 考虑了不同象限与不同列的燃料组件, 旨在保证分析结果更具有代表性(后续章节均遵循此原则)。分析结果表明, 结构1各位置组件的流体脉动均较为显著, 流体脉动最大值(振幅)约处于13%~32%的范围。

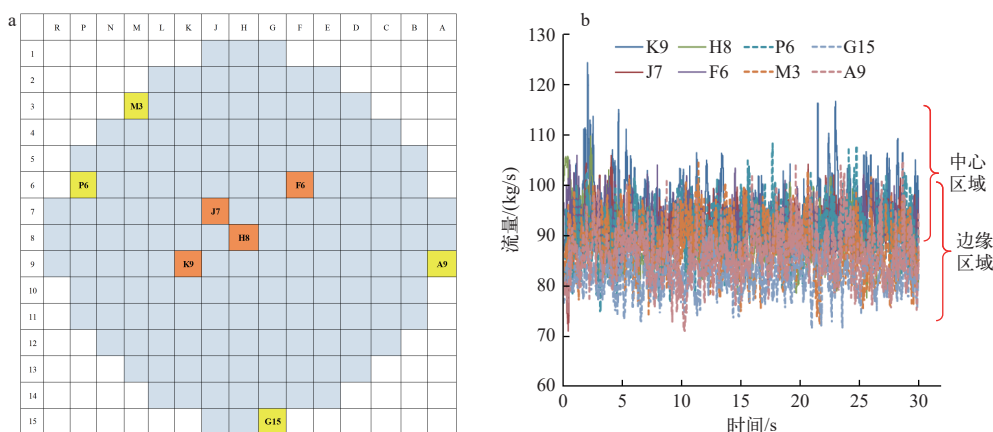


图9 结构1中心和边缘区域典型燃料组件位置(a)及流量随时间的变化(b)

Fig. 9 Typical fuel assembly positions (a) and flow rates (b) in center and edge regions of Structure 1 over time

2) 结构2

图10为结构2下腔室纵截面速度矢量分布。冷却剂从下降环腔流入下腔室后, 改变流动方向转为向上流动, 随后流入堆芯。鉴于流量分配结构仅覆盖堆芯的中心区域, 边缘区域形成“空腔”, 致使冷却剂在径向支承键下方与下腔室壁面之间, 生成一个显著的大尺度漩涡。图11为下腔室底部不同高度横截面在不同时刻的速度矢量分布。在流体尚未进入流量分配结构时(截面1), 速度场较为紊乱, 存在大尺度漩涡, 且随着时间推移, 漩涡位置变化明显。当到达流量分配

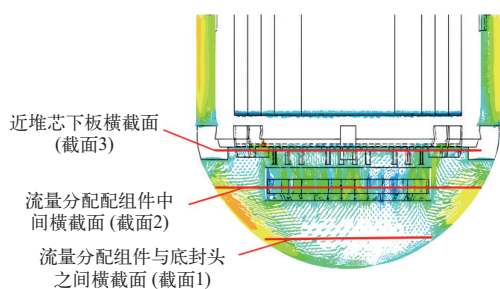


图10 结构2纵截面流场示意图

Fig. 10 Schematic diagram of flow field in longitudinal section for Structure 2

结构中间横截面处(截面2)时, 中间位置的漩涡被流量分配结构的格架“打散”, 形成小尺度漩涡, 但格架外部的流体依然呈现大尺度漩涡状态。在接近堆芯下板的横截面(截面3), 中心区域基本无明显漩涡(仅有小尺度漩涡), 而边缘区域仍存在中等尺度的漩涡, 其位置和尺度随时间的变化相对较小。

针对结构, 提取中心区域和边缘区域典型位置燃料组件入口的流体脉动数据, 结果如图12所示。分析结果表明, 边缘区域燃料组件的入口流体脉动幅度较大, 流体脉动最大值(振幅)约在14%~28%之间; 中心区域燃料组件的脉动量略小, 流体脉动最大值(振幅)约为13%~17%, 这与速度矢量分布图所呈现的变化趋势一致。

3) 结构3

图13为结构3下腔室纵截面速度矢量分布状况。在该结构中, 整个堆芯区域由“半球形”流量分配结构全覆盖。这一结构将流入下腔室的冷却剂“引导”至靠近下腔室壁面的狭窄间隙内, 有效抑制了较大漩涡的产生。图14为下腔室底部不同高度横截面在不同时刻的速度矢量分

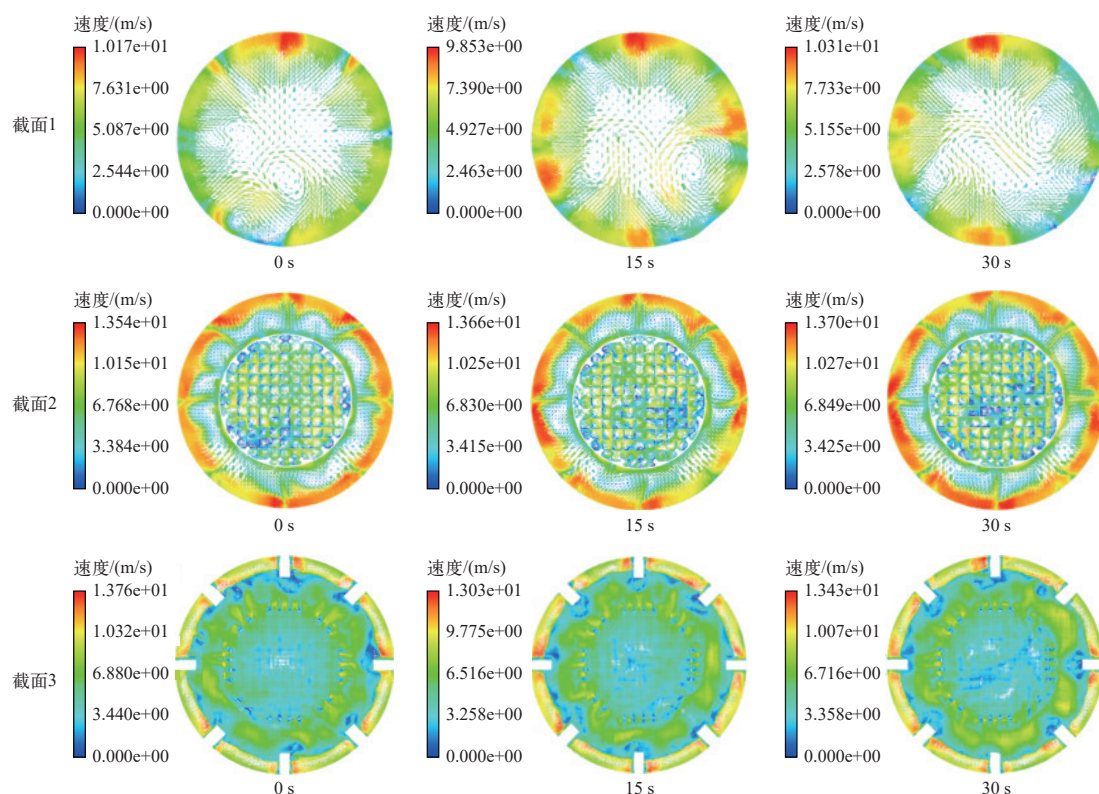


图 11 结构 2 不同时刻各截面速度矢量图

Fig. 11 Velocity vector diagrams of different cross-sections at different time for Structure 2

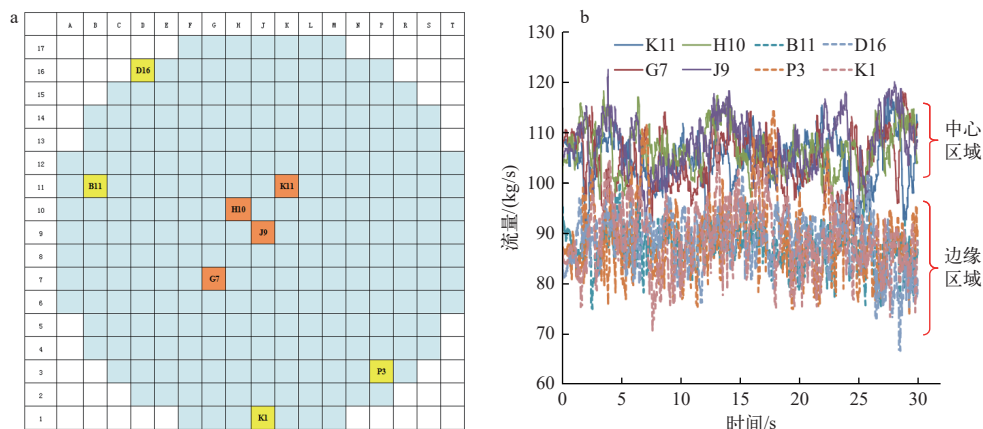


图 12 结构 2 中心和边缘区域典型燃料组件位置(a)及流量随时间的变化(b)

Fig. 12 Typical fuel assembly positions (a) and flow rates (b) in center and edge regions of Structure 2 over time

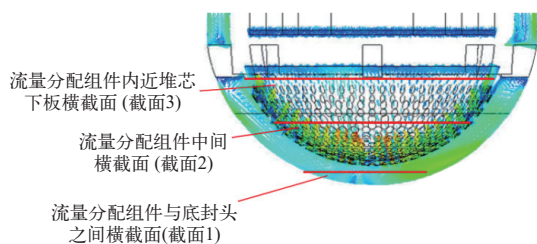


图 13 结构 3 不同截面流场示意图

Fig. 13 Schematic diagram of flow field in longitudinal section for Structure 3

布。当流体位于下腔室底部且尚未进入流量分配结构时(截面 1), 速度场较为紊乱, 形成中等尺度的漩涡, 其位置和尺度随时间呈现出明显的变化。而当流体进入流量分配组件后(截面 2)以及到达堆芯下板处(截面 3), 速度方向基本呈垂直向上, 流场分布均匀, 无明显漩涡出现, 并且不同时刻的流场分布几乎无差异。

提取结构 3 中心区域和边缘区域典型位置燃

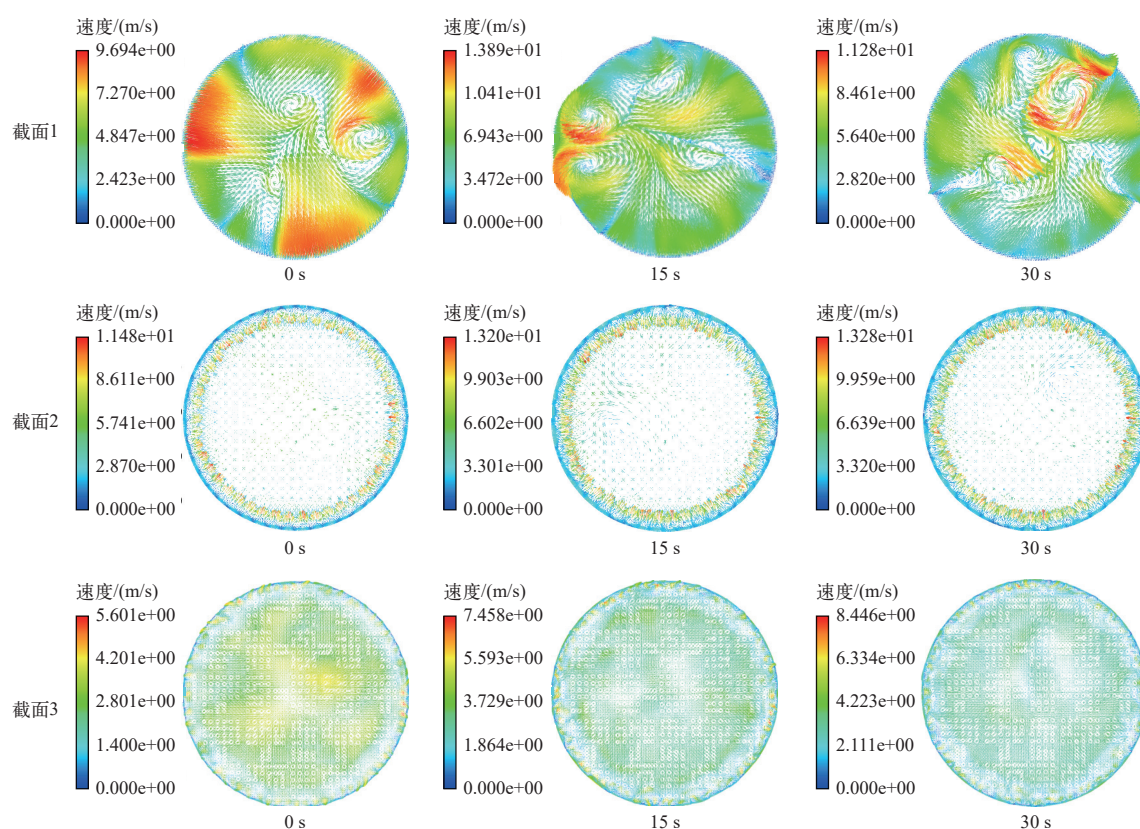


图 14 结构 3 不同时刻各截面速度矢量图

Fig. 14 Velocity vector diagrams of different cross-sections at different time for Structure 3

料组件入口流体脉动数据,结果如图 15 所示。分析显示,结构 3 边缘区域位置的燃料组件入口流体脉动幅度较小,流体脉动最大值(振幅)约在 3%~5%之间;中心区域的流体脉动幅度略大,流体脉动最大值(振幅)约为 6%~10%。整体而言,该结构的流体脉动数值相较于结构 1 和结构 2 均更小。

3.3 堆芯入口流体脉动功率谱密度分析

根据柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)和理查森

(Richardson)提出的湍流尺度演变的渐变理论,即湍流的能量串级理论^[22-23]:大尺度涡通过湍动剪切作用,从时均流动中获取能量。在黏性耗散过程中,这些大尺度涡不断分裂为不同尺度的小涡,并且在涡体分裂破碎的进程中,将能量逐级传递给更小尺度的涡,直至能量完全被黏性耗散。这表明,湍流的能量与漩涡尺度紧密相关,尺度越大,能量越高且频率越低。为深入探究前述不同

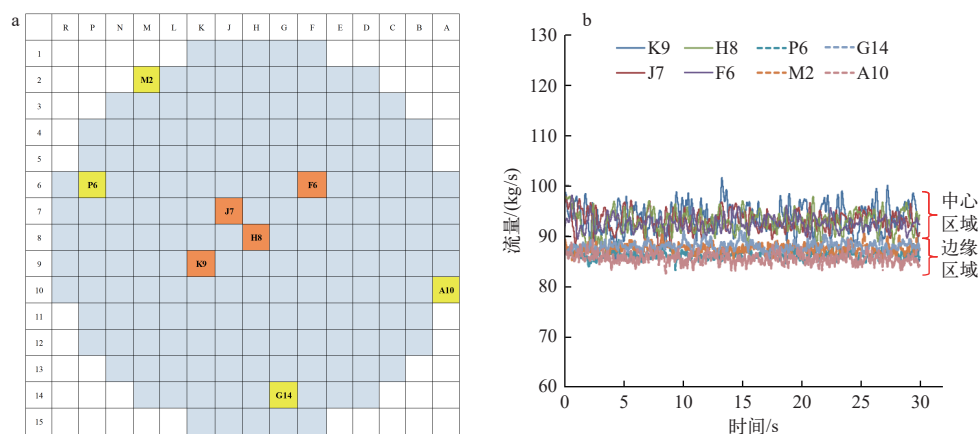


图 15 结构 3 中心和边缘区域典型燃料组件位置(a)及流量随时间的变化(b)

Fig. 15 Typical fuel assembly positions (a) and flow rates (b) in center and edge regions of Structure 3 over time

反应堆结构在下腔室内形成的不同尺度漩涡的能量与频率特征,运用 Matlab 软件,对堆芯入口各燃料组件的流体脉动数值进行 PSD 影响分析,以获取流体脉动信号在频率域上的分布情况。具体而言,通过傅里叶变换将流量的自相关函数信号转换为频域信息,其计算公式为:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_X(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (7)$$

其中: $G(f)$ 表示流体脉动信号在频率 f (Hz) 下的傅

里叶变换平方的期望值, $(\text{kg/s})^2/\text{Hz}$, 可以衡量不同频率流量信号所携带的功率(能量)大小; $R_X(t)$ 为流体脉动数值的自相关函数; t 为时间, s ; i 为虚数单位。

3 种典型结构燃料组件位置的 PSD 随频率的变化如图 16 所示,其中流体脉动 PSD 最大值与高能量截止频率(即能量显著降低时对应的频率)的提取结果如表 1 所列。

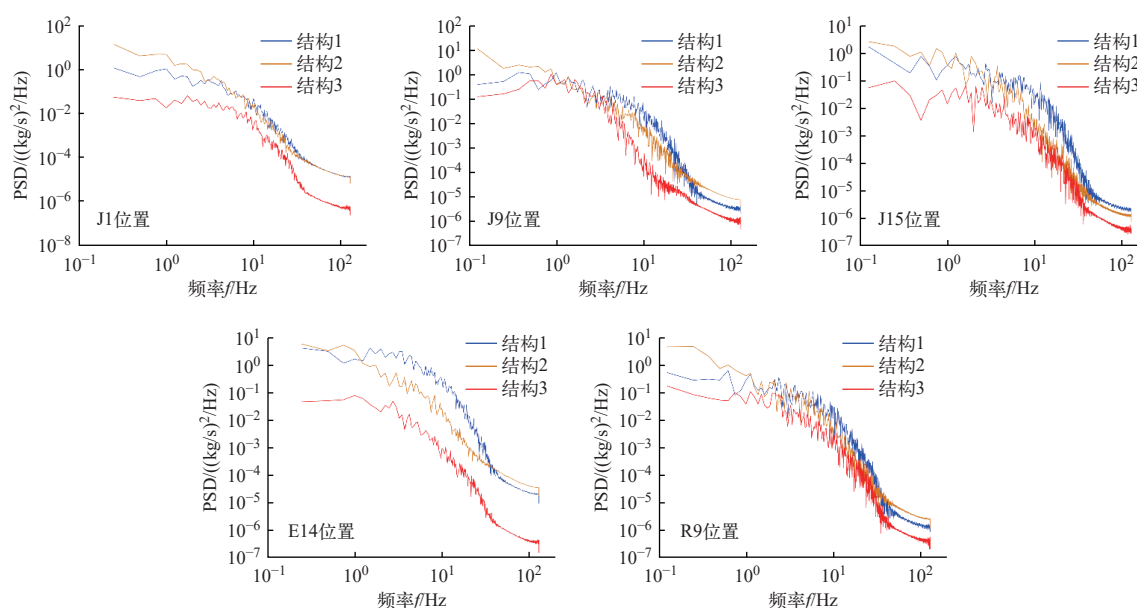


图 16 3 种结构典型位置燃料组件入口流体脉动 PSD

Fig. 16 Fuel assembly inlet fluid pulsation PSD of typical positions of three structures

表 1 不同结构 PSD 分析结果

Table 1 Analysis results of PSD for different structures

结构	PSD 最大值/ ((kg/s) ² /Hz)	高能量 截止频率/Hz	对应湍流形态特征
结构 1	0.7~3	5~10	中等能量、 高频率的小漩涡
结构 2	5~10	约 1	高能量、 低频率的大漩涡
结构 3	0.07~0.2	约 5	低能量、 高频率的小漩涡

由图 16 可知,结构 1 的流体脉动 PSD 最大值处于中等水平,约为 $0.7 \sim 3 (\text{kg/s})^2/\text{Hz}$,但其高能量截止频率较高,大部分位置(如 J1、J9、J15、R9)接近 10 Hz,这意味着在“柱状结构”下产生了高频率的小尺度涡系(E14 处于边缘位置,受小尺度涡系的影响较小,因此流体脉动能量较高,高能量截

止频率偏低)。结构 2 的流体脉动 PSD 最高,约为 $5 \sim 10 (\text{kg/s})^2/\text{Hz}$,分别约为结构 1 和结构 3 的 10 倍与 100 倍,且高能量截止频率较低,各位置均约为 1 Hz。依据前文分析,结构 2 的下腔室由于边缘区域缺乏流量分配结构,易产生大尺度漩涡,进而形成能量较高、频率较低的水力激励,导致燃料组件承受较大的低频能量波动。这极有可能引发堆芯内部燃料组件的振动,以及堆芯流量、压力、温度等的异常波动变化,最终致使边缘区域燃料组件低频振荡明显,核功率波动偏大,甚至可能引发格架磨损等问题。结构 3 的流体脉动 PSD 最低,约为 $0.07 \sim 0.2 (\text{kg/s})^2/\text{Hz}$,PSD 最大值仅为结构 2 的 1/100,高能量截止频率处于较高水平,大部分位置(如 J9、J15、E14、R9 等)约为 5 Hz。这证实了覆盖整个堆芯区域的“半球形”流量分配结构,能够有效抑制大漩涡的形成,使堆芯入口

流体脉动能量较低、频率较高,对燃料组件的水力激励较小(J1处于边缘中心位置,且位于RPV进出口接管中间,因此无明显漩涡形成,流体脉动能量较低,频率较高)。

4 结论

本文基于 SST-SAS 湍流模型,采用 CFD 技术针对 3 种典型压水堆核电站反应堆内流场开展瞬态流场计算,获得了不同结构反应堆内的湍流形态与流体脉动特性参数,并基于湍流的能量串级理论开展了 PSD 分析,所得结论如下。

1) 结构 1 反应堆下腔室存在支承柱和能量吸收器等“柱状结构”,使冷却剂于下腔室内部生成大量小尺度漩涡。中心区域与边缘区域各位置燃料组件的脉动幅度均较大。从 PSD 分析结果可知,其 PSD 处于中等水平,高能量截止频率较高,约为 5~10 Hz。这表明“柱状结构”促使下腔室内形成高频率的小尺度涡系,在一定程度上影响了流体的能量分布与频率特性。

2) 结构 2 反应堆下腔室的流量分配组件仅覆盖堆芯中心区域,边缘位置形成“空腔”。冷却剂在径向支承键下方产生一个显著的大尺度漩涡,使得边缘区域流体脉动明显,中心区域燃料组件脉动量略小。PSD 分析显示,其流体脉动 PSD 最高,分别约为结构 1 和结构 3 的 10 倍与 100 倍,且高能量截止频率较低,约为 1 Hz。这种高能低频的水力激励易引发堆芯燃料组件的低频振荡,进而导致核功率波动偏大以及格架磨损等问题。

3) 结构 3 反应堆下腔室的“半球形”流量分配结构覆盖整个堆芯区域,将进入下腔室的冷却剂“挤压”至靠近下腔室壁面的狭窄间隙中,有效抑制了较大尺度漩涡的形成,湍流能量较低。根据 PSD 分析结果,其流体脉动 PSD 最低,约为 $0.1 \text{ (kg/s)}^2/\text{Hz}$, PSD 最大值仅为结构 2 的 $1/100$,高能量截止频率处于中高水平,约为 5 Hz。可见,“半球形”结构对降低流体脉动能量、稳定流场起到了关键作用。

综上所述,结构 1 和结构 3 反应堆下腔室(即堆芯入口)的湍流形态特征主要体现为中小尺寸、低能量高频率的漩涡,堆芯入口流量较为平稳,水力激励较小。而结构 2 由于下腔室流量分

配装置未覆盖全堆芯,形成空腔位置,导致下腔室内产生高能、低频率的大尺度漩涡,极易对堆芯燃料组件产生较大的水力激励,可能引发燃料组件低频振荡,进而导致核功率波动偏大以及格架磨损等问题。因此,在功率运行期间,需对结构 2 进行密切监测,必要时实施结构改造,以改善下腔室内部的湍流形态和脉动情况,确保反应堆的安全运行。

参考文献:

- [1] 田吉安,张龙根,洪忠元,等. 秦山核电厂反应堆整体模型水力试验[J]. 核科学与工程, 1989, 9(4): 319-327, 310. TIAN Ji'an, ZHANG Longgen, HONG Zhongyuan, et al. The whole model hydraulic test of Qin Shan Nuclear Power Plant reactor[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1989, 9(4): 319-327, 310(in Chinese).
- [2] LEE K B, IM I Y, LEE B J, et al. YGN 3&4 reactor flow model test[J]. Journal of the Korean Nuclear Society, 1991, 23(3): 340-351.
- [3] 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(增刊 1): 208-211. 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(in Chinese).
- [4] 丁宗华,张明,林绍萱. CAP1400 反应堆堆芯入口流量分配试验研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(9): 1635-1640. DING Zonghua, ZHANG Ming, LIN Shaoxuan. Experiment study on CAP1400 core inlet flow distribution[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(9): 1635-1640(in Chinese).
- [5] 蒋晓华. 反应堆压力容器下封头三维流场计算[J]. 核动力工程, 2002, 23(增刊 2): 49-5. JIANG Xiaohua. Three dimensional numerical simulation in lower header of reactor pressure vessel[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(S2): 49-53(in Chinese).
- [6] 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 reator core inlet of Qinshan phase-II reactor[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2010, 30(4): 299-

- 307(in Chinese).
- [7] 杨洪建, 陈德峰, 李铮, 等. 压水堆下腔室水力特性数值研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(4): 446-450.
- YANG Hongjian, CHEN Defeng, LI Zheng, et al. Numerical simulation on hydraulic characteristics of lower chamber of PWR[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2014, 30(4): 446-450(in Chinese).
- [8] 张明乾, 冉小兵, 刘言午, 等. CPR1000 反应堆三维数值模拟分析及验证[J]. 核技术, 2013, 36(10): 100601.
- ZHANG Mingqian, RAN Xiaobing, LIU Yanwu, et al. CFD simulation analysis and validation for CPR1000 pressurized water reactor[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(10): 100601(in Chinese).
- [9] TONG L L, HOU L Q, CAO X W. Analysis of the flow distribution and mixing characteristics in the reactor pressure vessel[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53(1): 93-102.
- [10] 张明乾, 段远刚, 于晓雷, 等. ACPR1000+反应堆整体水力特性数值分析与比较[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 52-54.
- ZHANG Mingqian, DUAN Yuangang, YU Xiaolei, et al. Numerical research on hydraulic performance of ACPR1000+ reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(6): 52-54(in Chinese).
- [11] WEI Z, LI S, DU S, et al. Assessment of the three-dimensional flow field in the reactor pressure vessel in Hualong One nuclear power plants[J]. Frontiers in Nuclear Engineering, 2024, 3: 1359616.
- [12] 睦曦, 朱勇辉, 方颖, 等. 反应堆压力容器下腔室交混特性的数值模拟方法研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(2): 286-291.
- SUI Xi, ZHU Yonghui, FANG Ying, et al. Investigation of numerical simulation method on mixing characteristic in lower plenum of reactor pressure vessel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(2): 286-291(in Chinese).
- [13] 王玮. 堆芯下腔室 CFD 流量分配优化研究[J]. 科技视界, 2017(7): 21-22.
- WANG Wei. The CFD flow distribution optimization study in the lower chamber of the core[J]. Science & Technology Vision, 2017(7): 21-22(in Chinese).
- [14] 赵伟, 李燕, 杜思佳, 等. 华龙一号反应堆下腔室结构优化设计[J]. 核动力工程, 2019, 40(2): 112-116.
- ZHAO Wei, LI Yan, DU Sijia, et al. Optimization design of HPR1000 reactor lower plenum structure[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(2): 112-116(in Chinese).
- [15] 王鹏, 于晓雷. 反应堆下腔室流量分配装置结构流场分析[J]. 设备管理与维修, 2022(15): 112-116.
- WANG Peng, YU Xiaolei. Flow field analysis of the flow distribution device structure in the lower chamber of the reactor[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(15): 112-116(in Chinese).
- [16] RADCLIFF T D, JOHNSON W S, PARSONS J R, et al. Visualization of the lower plenum anomaly in the Westinghouse AP600 reactor[J]. Nuclear Technology, 1994, 106(1): 100-109.
- [17] 卢川, 杜思佳. CFD 方法在反应堆下腔室流量分配中的应用研究[C]//第八届中国 CAE 工程分析技术年会论文集. 北京: [出版者不详], 2012: 359-365.
- [18] 孟洋, 廖恒基, 姜林, 等. 反应堆下腔室涡流引起堆芯流动不稳定性试验研究[J]. 核动力工程, 2024, 45(2): 96-102.
- MENG Yang, LIAO Hengji, JIANG Lin, et al. Experimental study on core flow instability caused by vortex flow in reactor lower plenum[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(2): 96-102(in Chinese).
- [19] BÖTTCHER M, BERNARD O, MAS A, et al. CFD analysis of coolant mixing in VVER-1000/V320 reactor pressure vessel[J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 197: 110274.
- [20] EGOROV Y, MENTER F. Development and application of SST-SAS turbulence model in the DESIDER project [C]// Advances in Hybrid RANS-LES Modelling. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 261-270.
- [21] 王翔宇, 李栋. SST-SAS 在小分离流动数值模拟中的表现测试[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(3): 337-340.
- WANG Xiangyu, LI Dong. Behavior of SST-SAS for mild airfoil trailing-edge separation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(3): 337-340 (in Chinese).
- [22] (美) 田内科斯 H, (美) 兰姆利 J L. 湍流初级教程[M]. 施红辉, 林培锋, 金浩哲, 译. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] 杨牧之. 中国大百科全书-情报学[M]. 3 版. 北京: 中国大百科全书出版社, 2021.