

DOI:10.11918/202001008

# MRANS 方案的反应堆压力容器 CFD 仿真

康慧伦, 田兆斐, 胡培政, 陈广亮

(核安全与仿真技术国防重点学科实验室(哈尔滨工程大学) 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为提高反应堆压力容器(reactor pressure vessel, RPV) CFD(computational fluid dynamics)仿真的计算效率,将多湍流模型(multiple RANS model, MRANS)方案与 RPV CFD 仿真相结合,提出了一种新型的 RPV CFD 仿真方案,并通过优化传统棒束模拟 MRANS 方案的区域划分方法和数据传输方法使 RPV MRANS CFD 仿真方案的计算准确性得到保证。首先,对完整的压力容器模型进行 CFD 模拟,将整体计算结果与实验数据进行对比,验证所用 CFD 方法的有效性。其次,基于区域重叠的方案建立了下降段区域和下腔室区域的分段模型,并采用压力-流量双向数据传递方案,建立了多区 CFD 仿真计算方案。然后,分析不同的湍流模型在各区域的影响,选择合适的湍流模型。最后,以优化 CFD 仿真计算效率为目标,提出了两种 MRANS 方案。研究表明:基于区域重叠的双向数据传递方案相较于传统的单向数据传递方案,速度和压力计算结果与整体计算一致性更高;优化的 MRANS 方案相较于传统的单一湍流模型方案,计算效率提高了 28.75%,从而验证了优化的 MRANS 具有高效率的特性。本研究成果为提高 RPV CFD 仿真效率提供了一种新思路 and 途径。

**关键词:** 计算流体力学(CFD); 交混特性; 分段技术; 多湍流模型(MRANS)方案; 区域重叠

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)12-0127-08

## CFD simulation of RPV based on MRANS scheme

KANG Huilun, TIAN Zhaofei, HU Peizheng, CHEN Guangliang

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory  
(Harbin Engineering University), Harbin 150001, China)

**Abstract:** To improve the computing efficiency of the computational fluid dynamics (CFD) simulation of reactor pressure vessel (RPV), a novel CFD simulation scheme for RPV was proposed by combining the multiple RANS model (MRANS) with CFD simulation. The accuracy of the CFD simulation scheme using MRANS for RPV was guaranteed by optimizing the domain division technology and the data transmission method of traditional MRANS scheme which is used in rod bundle simulation. First, a CFD simulation of the integrated RPV model was carried out, and the validity of the CFD method was verified by comparing the calculated results with the experimental data. Then, based on the domain overlapping approach, the domain division model of downcomer (DC) and lowerplenum (LP) was built, and the modeling of multi-domain CFD simulation was carried out by using the two-way pressure-velocity data transfer method. Next, the performance of different turbulent models in each domain was compared and analyzed aiming to select the appropriate turbulent model. Finally, taking the computing efficiency of CFD simulation as the optimization objective, two MRANS schemes (RSM-SKE and RSM-RKE) were proposed. Results show that compared with the traditional domain division simulation scheme, the velocity and pressure calculated by the two-way domain division simulation scheme based on overlapping had better consistency with the integrated simulation results. The computing efficiency of the optimized MRANS scheme increased by 28.75% compared with the traditional single RANS model scheme, which proved that the optimized MRANS scheme has high efficiency in CFD simulation of RPV. The research results provide a new way of improving the efficiency of CFD simulation for RPV.

**Keywords:** computational fluid dynamics (CFD); mixing characteristic; domain division technology; MRANS scheme; domain overlapping

作为堆芯的入口边界,压力容器下腔室出口的

冷却剂流量、温度及硼的分布对反应堆的安全性和经济性有着重要影响。因此,对压力容器内冷却剂流动特性进行研究成为反应堆安全分析的重要组成部分。随着 CFD 技术的快速发展,利用 CFD 分析方法对压力容器进行数值模拟,逐渐成为与实验同样重要的研究手段。中国核动力研究院的睦曦

收稿日期: 2020-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(51909045); 中央高校基本科研业务费专项资金(GK2150260197); 中核集团青年英才项目(CNNC2019YTEP-HEU01)

作者简介: 康慧伦(1992—),男,博士研究生;

田兆斐(1973—),女,教授,博士生导师

通信作者: 田兆斐, tian\_zf@hrbeu.edu.cn

等<sup>[1]</sup>基于下腔室实验对 CFD 计算中不同交混模型进行对比,认为组分输运模型可以较好的描述由于浓度梯度导致的硼扩散现象。郭超等<sup>[2]</sup>基于 CFX 程序进行下腔室全尺寸计算,并对下腔室流场及压力场进行研究,验证下腔室流量分配设计合理性。Cho 等<sup>[3]</sup>基于 ROCOM 实验对 CFD 程序进行验证,验证结果表明 CFD 程序在适当的网格处理情况下可以合理的预测压力容器内的硼稀释现象。

大部分关于压力容器的实验的装置按比例对真实压力容器进行缩放,但其复杂的下腔室结构和依然较大的模拟域导致 CFD 模拟所需的网格数量庞大,对计算使用的硬件提出了较高的要求。同时,冷却剂在压力容器下降段与下腔室结构差异很大(下降段为环段结构,下腔室为球形且内含孔板结构),使用同一湍流模型可能无法保证精度与效率的最佳平衡。为解决这些问题,本文将分段技术和 MRANS 方案应用在压力容器 CFD 计算中。Navarro 等<sup>[4]</sup>采用分段模拟技术对 Karoutas 等<sup>[5]</sup>的  $5 \times 5$  棒束实验进行模拟,以减少每次计算的计算负荷;Li 等<sup>[6]</sup>对分段模拟技术在棒束通道仿真中的应用特性进行了研究;Chen 等<sup>[7-8]</sup>针对带交混翼棒束通道不同区域流体流动状态不同的特点,基于分段模拟技术提出了多湍流模型(Multiple RANS models, MRANS)方案,在保证计算精度的同时提高计算效率,并提出了 DP-CFD 方案以解决堆芯大流域 CFD 仿真问题。值得注意的是,绝大部分的分段 CFD 分析技术和 MRANS 方案的讨论都是针对棒束几何模型,在其他

几何模型中的适用性仍然需要讨论。

ROCOM 实验<sup>[9-10]</sup>被广泛应用在 CFD 计算方法的验证<sup>[11]</sup>中,许多学者基于 ROCOM 实验装置进行了 CFD 分析,其中包括网格敏感性、湍流模型和边界条件效应等等<sup>[12-14]</sup>。本文以 ROCOM 实验为对象,针对分段技术与 MRANS 方案展开研究,提出合理的分段计算与 MRANS 方案,减小计算负荷,提高计算效率,并保证 CFD 计算的准确性。

## 1 仿真对象介绍

本文以欧洲 FLOMIX-R 基准实验中<sup>[9-10]</sup>的 ROCOM 实验装置为仿真对象,对稳态运行的压力容器的冷却剂交混现象进行研究。ROCOM 实验装置以 KONVOI 三代压水堆为原型,按 1:5 的比例建造,反应堆压力容器(RPV)为其主体设备,包括 4 个冷却剂入口、出口、下降段(downcomer)及下腔室(lowerplenum),下腔室布置有空心孔眼滚筒,堆芯入口布置支撑板。装置具有 4 个完整的回路,并配有泵、阀门及蒸发器等设备,通过对泵的流量控制可以实现不同工况的实验。在进行混合实验时,实验装置在室温和环境压力下运行,示踪剂氯化钠溶液在入口上游注入主冷却剂系统,并通过装置进行混合,确保示踪剂均匀分布在压力容器入口横截面处,压力容器上布置有 4 处测点(容器入口、下降段上部、下降段下部及堆芯入口)对示踪剂进行跟踪,具体参数如图 1 所示。

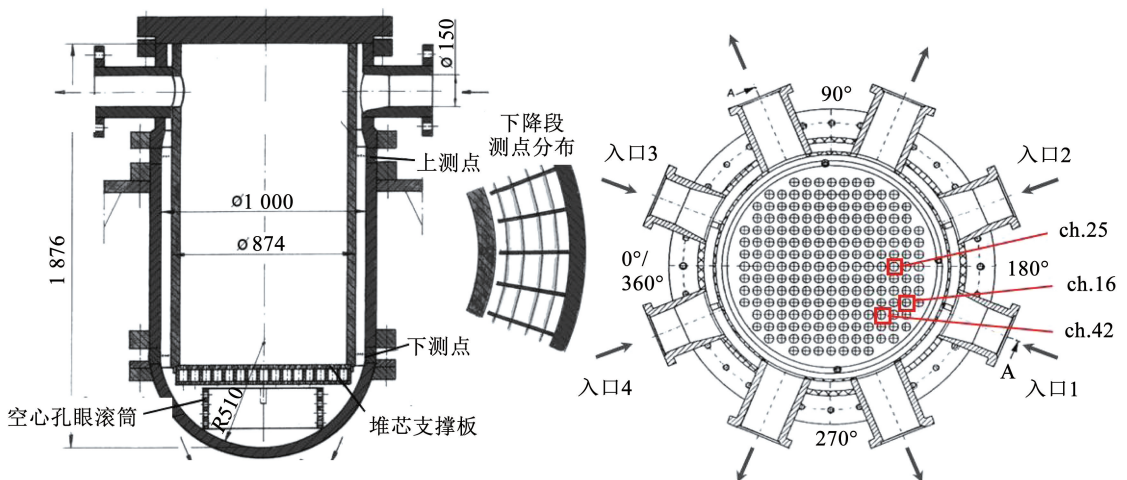


图 1 压力容器及测点分布图<sup>[5-6]</sup>

Fig. 1 Reactor pressure vessel and sensor distribution<sup>[5-6]</sup>

## 2 分段 CFD 技术研究

### 2.1 数值建模

#### 2.1.1 几何模型和网格划分

根据 Boumaza 等<sup>[14]</sup>的研究,环路对发生在 RPV

的交混现象的影响很小。因此,在不影响计算准确性的前提下减少计算所需网格,本文使用 300 mm 的圆管代替环路作为 RPV 入口。堆芯采用高度为 800 mm 的圆柱代替,圆柱以堆芯入口支撑板上直径 30 mm 的冷却剂流量分配孔为基准进行延长。

图 2 展示了本文所使用的网格模型。如图 2 所示,本文采用多面体网格对 RPV 模型入口环腔和下腔室进行网格划分,这是因为多面体网格与四面体网格相比,在达到相同精度的前提下具有更好的收敛性<sup>[6]</sup>。多面体网格的生成方式采用将四面体在 FLUENT 软件中转化的方式生成。下降段则采用六面体网格。表 1 展示了在网格敏感性分析中使用的不同划分方案的网格量。图 3 显示了不同网格方案中堆芯入口处标量最大和平均值随时间的变化趋势。由于网格划分占据了前处理中的绝大部分时间,同时无止境的增加网格量会增加大量的计算时间,因此,尽管未达到所谓的网格无关解,考虑精度与计算时间的平衡的情况下,本文选择了方案 2 作为本文的计算网格划分方案。

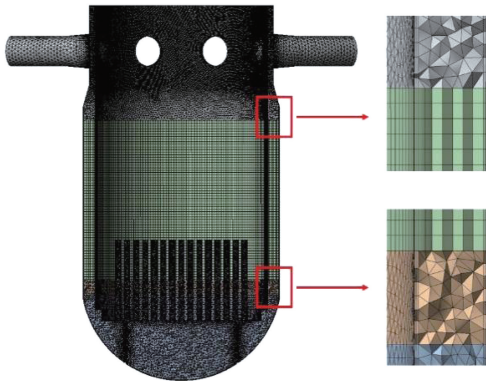


图 2 网格模型

Fig. 2 Mesh model

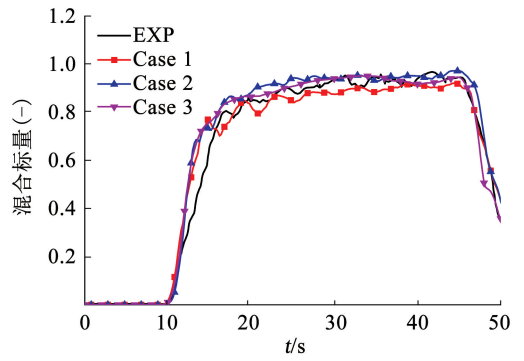
表 1 网格划分方案

Tab. 1 Mesh information

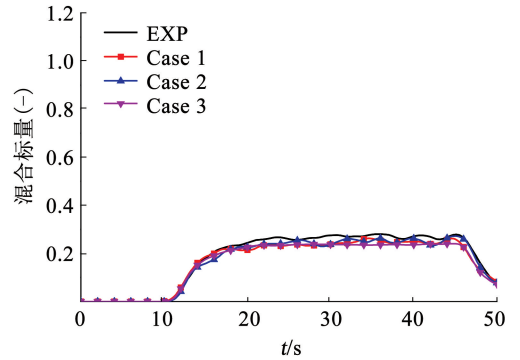
方案	网格类型	边界层厚度/mm	$Y^+$	网格数量
1	Hexa & Tetra	<2.0	<300	5 527 346
2	Hexa & Tetra	<2.0	<300	7 350 547
3	Tetra	<0.5	<100	11 722 163

### 2.1.2 边界条件和湍流模型

本文以 ROCOM\_STAT\_02 实验工况为仿真对象,其是针对低流速下的稳态混合进行的实验,实验过程中没有发生热传导且操作环境为室温和环境压力,因此选择 25 °C,  $1.01 \times 10^5$  Pa 的水作为计算工质,采用 0.73 m/s (25% 正常流速,即各环路的质量流率为 46.25 m<sup>3</sup>/h) 的均匀速度分布作为入口边界条件,出口采用压力出口边界条件。作为硼替代物的混合标量采用均匀分布的方式由入口 1 中注入,注入时间共 35 s。本文采用的时间步长与实验中测点的时间监测间隔相同,均为 0.05 s (频率 20 Hz)。本文的分段计算方案研究中,均使用 RSM 湍流模型。



(a) 标量最大值



(b) 标量平均值

图 3 堆芯入口处标量最大值和平均值计算结果

Fig. 3 Results of the maximum and average mixing scalar at core inlet for sensitivity analysis

### 2.2 分段方案研究

RPV 根据流域特点可以分为:下降段(DC)和下腔室(LP)。在建模和网格划分过程中,将 DC 和 LP 从整体 RPV 中拆分,得到代表各区域的独立模型。本文利用 FLUENT 软件自带的界面数据读写功能,通过编写的 Python 控制程序控制 DC 和 LP 之间的数据传输,完成分段计算的自动计算流程。图 4 展示了 DC 和 LP 的数据传递过程。

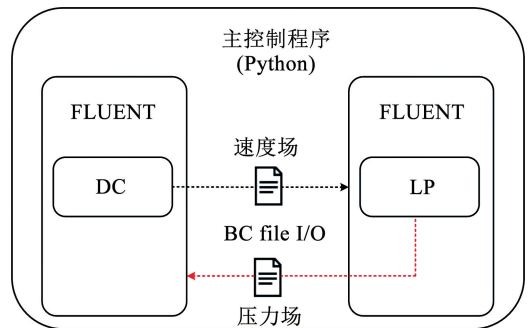


图 4 分段计算的数据传输方案

Fig. 4 Logical construction of the scheme of domain division technology

在文献[4, 6-7, 15]的分段计算中,将计算区域沿流动方向分为若干段,并将前一段的出口的速度场结果作为下一段的入口边界条件,如图 4 中黑线的传输方案。这种计算方式相当于把流场下游对

上游的影响切断,意味着假设了下游的几何与流动状态对上游没有影响。这种数据传输方式可以保证在没有回流模型中速度场的准确传播,但由于缺乏下游模型,上游的出口压力场将无法准确得到。综上所述,由于缺少数据通信,会导致上游出口面与下游入口面的压力分布不一致,无疑会引入一定的误差。

针对上、下游交界面压力不一致的问题,本文提出了一种基于区域重叠的双向数据传输分段计算方案。区域重叠方案如图 5 所示,DC 域向下拉伸了 150 mm 的圆环柱与 LP 域重叠。在计算过程中,DC 将 LP 的入口所在面的速度和其他标量数据作为入口边界条件传递至 LP,而 LP 将 DC 的出口所在面的压力分布数据作为出口边界条件传递至 DC,其与文献[4,6-7]的单向数据传输的不同之处在于数据传输包括了图 4 中红线的传输内容(压力场)。图 6 展示了不同的分段方案交界面处的压力对比图。

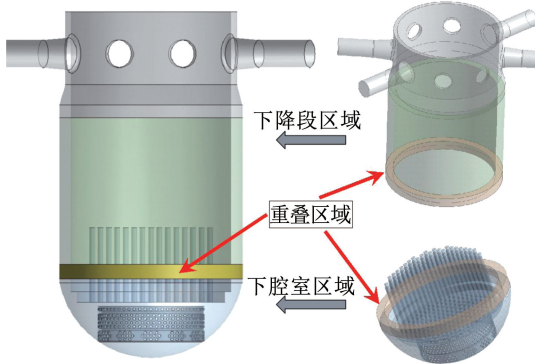


图 5 区域划分方案

Fig. 5 DC and LP sub-domain

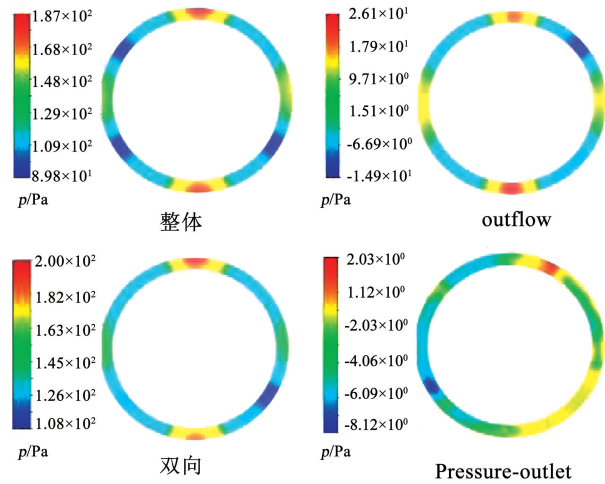


图 6 压力分布对比

Fig. 6 Comparison of pressure distribution

如图 6 所示,相较于 pressure-outlet 出口边界的均匀压力场,outflow 出口边界的压力分布在趋势上与整体计算相似,这与 Li 等<sup>[6]</sup>所得到结果相同。然而,由于单向数据传输的自身缺陷,使用 outflow 边

界在交界面处的压差与整体计算依然有一定差距(整体计算中界面压力最高点与压力最低点的压差为 100 Pa,而 outflow 计算为 40 Pa)。而双向数据传输的分段方案考虑了上下游的相互反馈,从图 6 可以看出,双向数据传输的分段方案与整体计算最接近。

图 7、8 分别为不同的分段方案与整体计算的结果对比。图 7 为 DC 下降段下部的 3 个测点的速度。考虑到计算几何具有对称性,3 个测点选取在同一个象限内。图 8 为 LP 中 16 号通道与 42 号通道堆芯入口平面的速度。选取这两个通道是因为两个通道分别在下腔室空心孔眼滚筒的内外两侧,具有一定的代表性。从图中可以看出,采用双向数据传输的分段方案与整体计算结果对比具有较好的一致性。

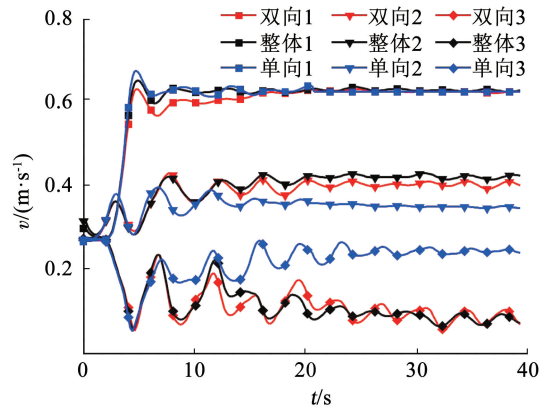


图 7 DC 域中 3 个测点的速度

Fig. 7 Velocities at three sensors in DC domain

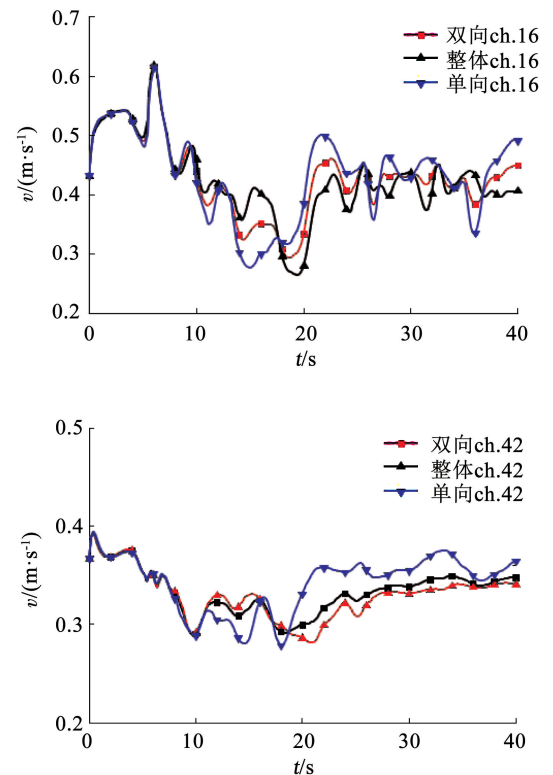


图 8 堆芯入口通道的速度

Fig. 8 Velocities at core inlet

### 3 多湍流模型方案研究

#### 3.1 MRANS 方案设计

受到计算资源的限制, DNS 和 LES 模型在工业 CFD 仿真领域使用较少, 通常采用基于雷诺时均方法的 RANS 模型进行计算。雷诺时均的 N-S (Navier-Stokes) 方程可以表示如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $u_i$  为在  $i$  方向上的平均速度分量,  $p$  为压力,  $\tau_{ij}$  为黏性应力张量。雷诺应力  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  的求解是 RANS 模型的关键。

标准  $k-\varepsilon$  模型 (SKE)、realizable  $k-\varepsilon$  模型 (RKE)、renormalization group  $k-\varepsilon$  模型 (RNG) 及 shear stress transport  $k-\varepsilon$  模型 (SST) 等 2 方程模型基于 Boussinesq 假设和湍流黏度的概念, 通过下式求解雷诺应力。

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中:  $k$  为湍流动能,  $\mu_t$  为湍流黏度。湍流黏度是湍流动能和湍流耗散率或比耗散率的函数, 因此求解两方程模型的雷诺应力需要建立湍流动能输运方程和湍流耗散率或比耗散率输运方程。

雷诺应力模型 (RSM) 摒弃了各向同性的湍流黏度概念, 直接构造了关于雷诺应力的输运模型, 一般如下式所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \overline{u'_i u'_j}) = D_{ij} + \varphi_{ij} + G_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

式中: 等号左侧第 1 项为应力时间项, 第 2 项为应力对流项, 右侧  $D_{ij}$  为湍流扩散项,  $\varphi_{ij}$  为压力应变项,  $G_{ij}$  为应力产生项,  $\varepsilon_{ij}$  为耗散项。

经过模化后的雷诺应力模型中的雷诺应力为二阶张量, 需要求解 6 个雷诺应力分量方程和 1 个湍流耗散输运方程。RSM 模型在求解雷诺应力时需要建立更多的方程, 导致其计算效率低于 2 方程模型, 但由于 RSM 模型直接求解雷诺应力张量, 可以更加准确的反应雷诺应力的各向异性, 一般来说在复杂湍流应用中 RSM 模型的适用性和精确性优于两方程模型<sup>[15]</sup>。

由于在 RPV 整个流域中, 平均雷诺数达到了  $10^4$  量级, 所以本文的多湍流模型方案选取 SKE、RKE 以及 RSM 这 3 个高雷诺数模型进行研究。上

述 3 种模型有相同的壁面处理方式, 可使用同样类型与密度的网格对多湍流模型混合计算精度与效率进行对比分析。MRANS 计算时需要在区域边界面上对求解动量方程与湍流方程的重要参数数据进行传递, 表 2 显示了分段界面上各模型计算所需的参数。

表 2 湍流模型参数

Tab. 2 Parameters of turbulent models	
RANS 模型	界面传递参数
SKE/RNG/RKE(2 方程)	速度矢量
	湍流动能
	湍流耗散率
	湍流强度
RSM(7 方程)	混合标量
	速度矢量
	湍流动能
	湍流耗散率
	雷诺应力分量(6 个独立分量)
	混合标量

图 9、10 为应用不同的湍流模型的计算结果与实验值<sup>[11]</sup>的对比, 分别对应着 DC 不同高度 (upper 和 lower) 测点的混合标量值。

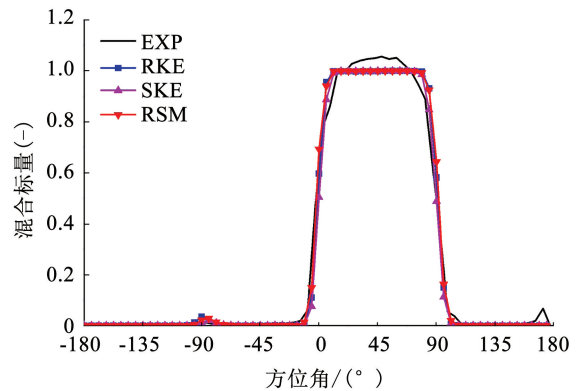


图 9 下降段上部测点标量方位角数据

Fig. 9 Azimuthal profile of mixing scalar at upper DC sensor

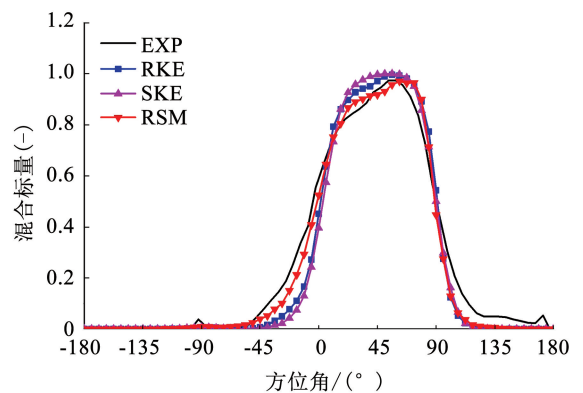


图 10 下降段下部测点标量方位角数据

Fig. 10 Azimuthal profile of mixing scalar at lower DC sensor

如图 9、10 所示,在下降段上部 2 方程模型与 RSM 模型的计算结果差异很小且均与实验值符合较好。在下降段下部,2 方程模型预测的标量场空间分布的坡度比实验值更加陡峭,而 RSM 明显与实验值的分布更加接近。可以看出,2 方程模型明显的低估了下降段湍流交混的能力,这可能是将各向同性的 2 方程湍流模型应用在具有高的各向异性的结构上所导致的。同时,这种交混能力的低估在很多的有关 FLOMIX 的结果中被发现<sup>[10]</sup>。

根据下降段的计算结果对比,本文基于 SKE, RKE, RSM 3 个模型进行互相匹配,设计多湍流模型耦合计算方案。因为多湍流模型计算方案的意义在于解决模拟大尺度部件时计算时间与计算精度难以平衡的问题,本文将遵循保证计算精度同时减小计算所需的资源的原则进行 MRANS 方案的设计。图 11 为本文设计的 MRANS 计算方案,其中垂线连接的模型属于单一模型计算方案,斜线连接属于 MRANS 计算方案。通过各计算方案对整个流域的求解计算,可以从计算精度与效率两个方面综合评价 MRANS 方案与传统方案的区别。从表 2 中可以看出,7 方程模型包含有 2 方程模型所需要的全部参数,因此,在将 7 方程模型应用在 2 方程模型的上游时,无需补充参数。

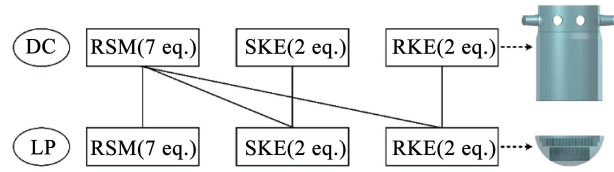


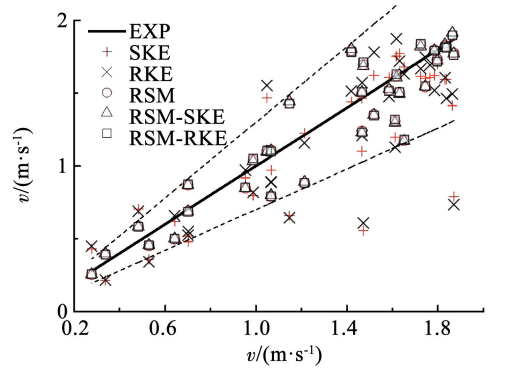
图 11 MRANS 计算方案

Fig. 11 MRANS schemes

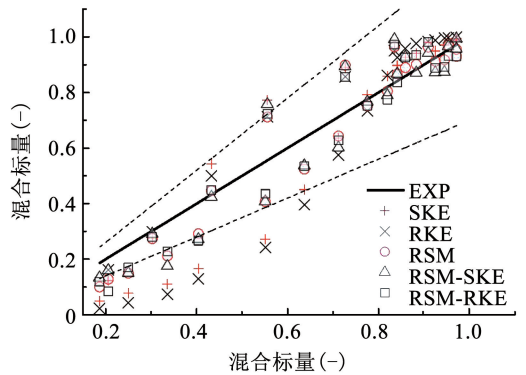
### 3.2 MRANS 方案验证

根据图 11 的 MRANS 计算方案,分别对 5 种 SKE, RKE, RSM 的单一/混合模型进行计算。作为下腔室的入口,下降段出口处的流场及标量场结果的准确性会对下腔室流场的计算造成极大的影响。图 12 分别展示了 MRANS 方案和单一湍流模型方案在下降段下部测点预测的速度和标量。图中黑色实线为实验值,虚线为实验值  $\pm 30\%$  范围。图 12(a) 中速度为 z 轴方向速度。如图 12 所示,由于 MRANS 模型在下降段使用 RSM 模型进行计算,因此在下降段下部测点的速度分布与 RSM 模型计算结果高度一致。SKE 模型和 RKE 模型的计算结果也表现出一致性。在速度分布的计算中, RSM 模型和 MRANS 模型在大部分区域与 2 方程模型精度相差不大,但在峰/谷值处与实验值更一致。

考虑到下降段标量场的影响范围,图 12(b) 将标量未扩散的区域的数据予以剔除。相较于 7 方程模型,单一的两方程模型低估了低浓度区域的混合标量浓度,并且高估了高浓度区域的混和标量浓度。这与图 10 的计算结果相符合。RSM 的混合标量预测结果与实验值符合最好,而 MRANS 模型也仅在极少的位置与 RSM 模型有差异。无论是速度场还是标量场, MRANS 模型都展现出了比 SKE 或 RKE 更优秀的精度。



(a) 下部测点的速度



(b) 混合标量

图 12 下降段下部测点的速度与混合标量

Fig. 12 Velocities and mixing scalars at lower DC sensor

图 13、14 展示了不同 RANS 方案的 RPV 堆芯入口第 16 号和第 25 号通道的标量浓度的计算结果。在靠近下降段的第 16 号通道,单一的 SKE 和 RKE 模型预测的混合标量浓度上升非常迅速,在 10 s 内达到了充分混合的平稳阶段(在实验中上升过程约为 15 s),且过高的预测了平稳阶段的混合标量浓度。相较于 2 方程模型, RSM 模型在上升阶段和平稳阶段的预测结果均与实验符合较好,两种 MRANS 方案中 RSM-SKE 模型在 16 通道均与 RSM 模型符合较好,且能较准确的描述标量随时间的变化过程。单一的 SKE 和 RKE 模型计算结果相类似,在上升阶段和平稳阶段预测结果与实验值的平

均偏差分别为 32% 和 17%, MRANS 模型为 11% 和 9%, RSM 模型为 5% 和 7%。而在相对更靠近中心的 25 号通道, 单一的两方程模型预测的上升过程与实验符合较好, 但仍低估了平稳阶段的标量浓度。所有的模型在上升阶段的预测与实验的平均偏差都在 10% 左右。在平稳阶段, 单一的 SKE 和 RKE 模型的平均偏差为 19%, MRANS 模型为 11%, RSM 模型为 5%。两种 MRANS 方案在上升阶段和平稳阶段的前半段预测符合较好, 但在平稳阶段的后半段的混合标量浓度预测较 RSM 仍有较大偏差。之所以产生这种情况是因为, 16 通道为边缘通道, 靠近下降段, 流体从下降段进入下腔室后迅速进入通道, 因此 MRANS 方案对该区域的准确性的提升较大。而 25 通道为中心通道, 流体进入下腔室后需要流经分配孔板等几何结构后才能进入通道, 因此 MRANS 方案对该区域的提升较小。

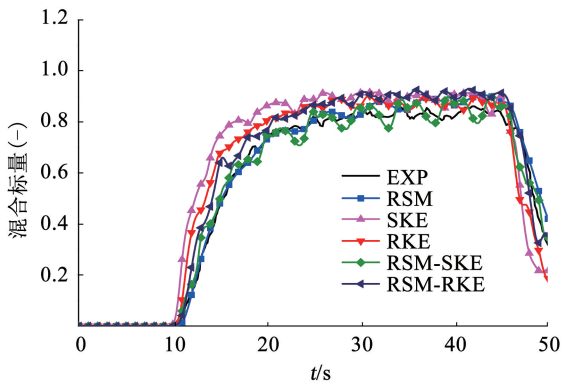


图 13 堆芯入口第 16 号通道的标量随时间变化

Fig. 13 Mixing scalar at core inlet with time (ch. 16)

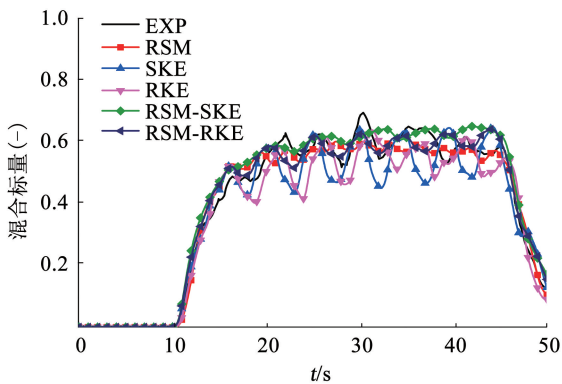


图 14 堆芯入口第 25 通道标量随时间变化

Fig. 14 Mixing scalar at core inlet with time (ch. 25)

通过上述分析可以看出, 基于 RSM 模型的 MRANS 方案可以得到与单一 RSM 模型符合较好的计算结果。由于不是全域使用更耗时的 RSM 模型, 采用 MRANS 方案减少了大量的计算时间。表 3 为

本文所设计的 MRANS 方案与单一的 RSM 模型在 Inter(R) Xeon(R) CPU E3-1280 v5, 3.7 GHz, 64 G 的单机 8 核处理器条件下的计算效率。如表 3 所示, MRANS 方案相较于单一的 RSM 模型更加高效, 在本文的网格规模下可以缩短约 30% 的 CPU 时间, 且随着网格数量增加或 LP 网格数量在整体 RPV 模型的比重增加, 可以增大这种 MRANS 方案的优势。

表 3 MRANS 计算方案与 RSM 方案计算效率

Tab. 3 Computing efficiency of MRANS schemes and RSM model

模型	RSM-SKE	RSM-RKE	RSM
计算耗时/s	48 456	47 264	67 910

## 4 结 论

1) 本文将棒束 CFD 分析中提出的分段方案运用到压力容器 CFD 分析中, 设计了基于区域重叠方法的双向数据传递分段计算方案。

2) 分析了不同的湍流模型在各区域的计算结果, 为分区计算选择合适的湍流模型。

3) 通过运用 MRANS 方案和所设计的双向数据传递分段计算方案构建了 SKE-RSM 与 RKE-RSM 两种 MRANS 方案, 相比于传统的单一 RSM 湍流模型计算方案, 本文提出的 MRANS 方案具有更高的效率。研究成果对提高 RPV CFD 仿真效率提供了一种新思路 and 途径。

## 参 考 文 献

- [1] 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  
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. DOI:10.7538/yzk.2017.51.02.0286
- [2] 郭超, 魏超, 田欣鹭, 等. 压水反应堆下腔室流动特性数值模拟分析[J]. 核科学与工程, 2018, 38(3): 353  
GUO Chao, WEI Chao, TIAN Xinlu, et al. Numerical simulation analysis of flow characteristics in lower plenum of pressure water reactor[J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(3): 353. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2018.03.003
- [3] CHO Y J, YOON H Y. Numerical analysis of the ROCOM boron dilution benchmark experiment using the CUPID code[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 341: 167. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.11.005
- [4] NAVARRO M A, SANTOS A A C. Evaluation of a numeric procedure for flow simulation of a 5 × 5 PWR rod bundle with a mixing vane spacer[J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(8): 1190. DOI: 10.1016/j.pnucene.2011.08.002

- [5] KAROUTAS Z, GU C Y, SCHOLIN B. 3-D flow analyses for design of nuclear fuel spacer [C]//Proceedings of the 7th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (Nureth-7). Saratoga Springs: [s. n.], 1995
- [6] LI Xiaochang, GAO Ye. Methods of simulating large-scale rod bundle and application to a  $17 \times 17$  fuel assembly with mixing vane spacer grid[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 267: 10. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2013.11.064
- [7] CHEN Guangliang, ZHANG Zhijian, TIAN Zhaofei, et al. Design of a CFD scheme using multiple RANS models for PWR[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 102: 349. DOI: http://10.1016/j.anucene.2016.12.030
- [8] CHEN Guangliang, WANG Jijun, ZHANG Zhijian, et al. Distributed-parallel CFD computation for all fuel assemblies in PWR core[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 141: 107340. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107340
- [9] ROHDE U, KLIEM S, HEMSTRÖM B, et al. The European project FLOMIX-R: Description of the slug mixing and buoyancy related experiments at the different test facilities (Final report on WP 2); FZR-430[R]. Dresden: Forschungszentrum Rossendorf, 2005
- [10] ROHDE U, HÖHNE T, KLIEM S, et al. The European project FLOMIX-R: Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit-Final summary report: FLOMIX-R-D13 [R]. Dresden: Forschungszentrum Rossendorf, 2005
- [11] ROHDE U, HÖHNE T, KLIEM S, et al. Fluid mixing and flow distribution in a primary circuit of a nuclear pressurized water reactor—Validation of CFD codes [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237 (15/16/17): 1639. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.015
- [12] MORETTI F, MELIDEO D, DAURIA F, et al. CFX simulations of ROCOM slug mixing experiments[J]. Journal of Power and Energy Systems, 2008, 2(2): 720. DOI: 10.1299/jpes.2.720
- [13] KLIEM S, HÖHNE T, ROHDE U, et al. Experiments on slug mixing under natural circulation conditions at the ROCOM test facility using high-resolution measurement techniques and numerical modeling[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(9): 2271. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.11.015
- [14] BOUMAZA M, MORETTI F, DIZENE R. Numerical simulation of flow and mixing in ROCOM facility using uniform and non-uniform inlet flow velocity profiles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280: 362. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.10.018
- [15] 陈广亮, 张志俭, 田兆斐, 等. PWR 堆芯热工水力 CFD 仿真优化方案研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(5): 15  
CHEN Guangliang, ZHANG Zhijian, TIAN Zhaofei, et al. Research on high efficient CFD schemes for PWRs[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(5): 15. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0015

(编辑 张红)

(上接第 120 页)

- [11] 孙枫, 曹通. 基于 Kalman 滤波的加速度计十位置标定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10): 2272  
SUN Feng, CAO Tong. Ten-position calibration for accelerometer based on Kalman filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(10): 2272. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.26
- [12] LÖTTERS J C, SCHIPPER J, VELTINK P H, et al. Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers in medical applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 68 (1/2/3): 221. DOI: 10.1016/S0924-4247(98)00049-1
- [13] 徐琛梅. 关于非线性方程的牛顿迭代格式初始值选取的注记[J]. 大学数学, 2019, 35(2): 110  
XU Chenmei. Notes of the initial value selection for newton iterative schemes of nonlinear equations[J]. College Mathematics, 2019, 35(2): 110. DOI: CNKI:SUN:GKSX.0.2019-02-024
- [14] TEDALDI D, PRETTO A, MENEGATTI E. A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments [C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907297
- [15] CHEUK C M, LAU T K, LIN K W, et al. Automatic calibration for inertial measurement unit [C]//Proceedings of the 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV). Guangzhou: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/ICARCV.2012.6485340
- [16] 刘宇, 余跃, 路永乐, 等. MEMS 加速度计混合误差标定补偿方案[J]. 压电与声光, 2018, 40(4): 589  
LIU Yu, YU Yue, LU Yongle, et al. A mixing error calibration and compensation scheme for MEMS accelerometer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(4): 589. DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.026
- [17] 张海鹏, 李杰, 张波, 等. 基于椭球拟合的 MEMS 倾角仪现场快速标定系统[J]. 中国测试, 2019, 45(2): 94  
ZHANG Haipeng, LI Jie, ZHANG Bo, et al. On-site quick calibration system of MEMS inclinometer based on ellipsoid fitting [J]. China Measurement & Test, 45(2): 94. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018030048
- [18] OSBORNE M R. Nonlinear least squares—the Levenberg algorithm revisited [J]. Journal of the Australian Mathematical Society, 1976, 19(3): 343. DOI: 10.1017/S03342700000120X
- [19] 何郁波, 董晓亮. 关于非线性不等式组 Levenberg-Marquardt 算法的收敛性[J]. 数学杂志, 2012, 32(1): 25  
HE Yubo, DONG Xiaoliang. On the convergence of levenberg-marquardt method for nonlinear inequalities [J]. Journal of Mathematics, 2012, 32(1): 25. DOI: 10.3969/j.issn.0255-7797.2012.01.004
- [20] 冀祥麟, 韦增欣. 一种广义 BFGS Levenberg-Marquardt 算法[J]. 广西科学, 2016, 23(5): 428  
JI Xianglin, WEI Zengxin. A generalized BFGS Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Guangxi Sciences, 2016, 23(5): 428. DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20161121.003

(编辑 张红)