

基于直接数值模拟的压力容器 入口射流湍流模型评价*

孙宇蒙¹, 李捷¹, 魏宗岚², 艾哲伦¹, 苗恒¹, 邓坚²

1. 中山大学中法核工程与核技术学院, 广东 珠海 519082
2. 中国核动力研究设计院 / 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610012

摘要: 采用基于谱元法的开源软件 Nek5000 对压力容器入口射流进行直接数值模拟 (DNS)。压力容器模拟在环向简化为 1/3 的尺度, 主管段雷诺数为 63 700, 下降段雷诺数为 14 014, 工质为碘化钠溶液。通过对常见物理量进行统计, 构建高精度湍流数据库。并采用 FLUENT 对常见的壁面函数和湍流模型进行适应性评价, 评价标准包括速度、湍动能和湍流黏度。结果表明: 在上升段 Stress- ω 模型适用性最好; 在下降段, Standard k - ω 模型适用性最优。

关键词: 压力容器; 射流; 直接数值模拟; 湍流模型; 壁面函数; 评价

中图分类号: TL353 **文章编号:** A **文章编号:** 2097-0137 (2024) 04-0088-09

Assessment of jet turbulence model of pressure vessels inset pipe based on direct numerical simulation

SUN Yumeng¹, LI Jie¹, WEI Zonglan², AI Zhelun¹, MIAO Heng¹, DENG Jian²

1. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2. Nuclear Power Institute of China / Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Chengdu 610012, China

Abstract: The open-source software Nek5000, based on the spectral element method, was used to conduct direct numerical simulation (DNS) of the pressure vessel inset pipe. A simplified 1/3 scale pressure vessel with a main pipe Re of 63 700, a downcomer section Re of 14 014, and a flowing medium of sodium iodide solution were used for the simulations. Turbulent statistics were conducted on common physical quantities, leading to the construction of a highly accurate turbulent flow database. Fluent was used to conduct an adaptive assessment of common wall functions and turbulent models, with assessment criteria based on velocity, turbulent kinetic energy, and turbulent viscosity. The findings indicate that the Stress- ω model is optimal for the rising section, whereas the Standard k - ω model is preferable for the downcomer section.

Key words: pressure vessel; jet; DNS; turbulence model; wall function; assessment

* 收稿日期: 2024-02-27

录用日期: 2024-03-26

网络首发日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(12075111)

作者简介: 孙宇蒙(1999年生), 男; 研究方向: 反应堆热工水力; E-mail: sunym28@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 李捷(1986年生), 男; 研究方向: 反应堆热工水力; E-mail: lijie287@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240058

反应堆压力容器一回路下降段入口是反应堆中的典型几何结构。该区域中的流动为曲面射流, 其涉及多种复杂的物理流动现象。其中包括形成大规模涡流结构的自由剪切区、强流线曲率的停滞区域以及壁面射流区域, 且下降段的流场分布是反应堆设计中堆芯流量分配的关键因素。因此, 精确计算入口射流(特别是下降段流场)分布非常重要。

对于压力容器的下降段, 学者们基于雷诺时均法(RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes)进行了一些研究(Lucas et al., 2009; Sharabi et al., 2016; 黄雷等, 2019; 蒋兴等, 2020, 2021), 主要方向为加压热冲击下的流动与传热。下降段复杂的几何形状和强湍流作用, 使得RANS模拟难以获得精确的结果。因此, 有学者对湍流模型在压力容器下降段的适用性进行了评价。Mulloy et al.(2018)基于 $k-\varepsilon$ 湍流模型使用Star-CCM+研究了压水堆压力容器冷端注入区的混合特性。尽管总体趋势与实验相符, 但是速度峰值最大偏差高达100%。康惠伦等(2021)通过实验数据评价了压力容器下降段和下腔室的湍流模型适用性, 包括Standard $k-\varepsilon$ 、Realizable $k-\varepsilon$ 和RSM模型等。结果发现: 两方程模型明显低估了下降段湍流交混的能力, 可能是各向同性的两方程模型不适用于高度各向异性的结构所导致的。Meng et al.(2019)采用Realizable $k-\varepsilon$ 模型对下降段、堆芯进行了三维模拟, 发现: 与实验对比, 加热管壁面温度差异较大。Zhang et al.(2022)对压力容器环形下降段硼混合现象进行了数值模拟, 并基于实验数据评价了Standard $k-\varepsilon$ 、Realizable $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、Standard $k-\omega$ 、SST和RSM模型。结果显示: 无论是在速度分布还是硼质量分数分布上, RNG $k-\varepsilon$ 模型均优于其他模型。Zeng et al.(2023)在进行环形下降段紧急冷却剂输运模拟时, 筛选出SST $k-\omega$ 模型更符合实验数据。

总体来看, 湍流模型在压力容器入口射流的适用性上未形成统一的认识。DNS理论上能够获得Navier-Stokes方程的精确解, 同时基于湍流统计的湍动能、输运项等高阶量可从底层一湍流模型建模形式上评价湍流模型。目前, 尚未发现针对压力容器下降段的DNS模拟。本文对反应堆压力容器入口射流进行DNS模拟, 构建高精度湍流数据库。基于高精度DNS数据库对FLUENT的常用湍流模型进行评价, 为实际应用时的湍流模型选择提供参考。

1 研究方法

1.1 直接数值模拟

湍流可以看成由不同尺度的涡叠合而成。无论湍流运动多么复杂, 非稳态的Navier-Stokes方程对于湍流的瞬时运动仍然适用。流体流动的基本守恒定律为

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial u_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i. \quad (2)$$

直接数值模拟就是直接求解上述N-S方程, 不引入任何的简化和近似, 在理论上得到准确的计算结果。但随着雷诺数的增加, 计算量增长极快, DNS对内存空间及计算速度的要求很高, 目前还无法用于工程数值计算, 只有采用高性能计算机才能进行这一类问题的研究。

1.2 雷诺时均法

为避免DNS方法计算量大的问题, 求解时均化的Navier-Stokes方程的方法应运而生。这类Reynolds平均法(RANS)为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial u_i} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial u_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial u_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + \rho g_i, \quad (4)$$

其中 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 定义为雷诺应力。为了求解雷诺应力, 将引入湍流模型。根据需求解的偏微分方程的数量, 湍流模型分为: 一方程Spalart Allmaras(SA)模型、两方程 $k-\varepsilon$ 模型(Standard $k-\varepsilon$ 、Realizable $k-\varepsilon$ 和RNG $k-\varepsilon$ 模型)、两方程 $k-\omega$ 模型(Standard $k-\omega$ 、Generalized $k-\omega$ 、BSL $k-\omega$ 和SST $k-\omega$ 模型)、雷诺应力模型(RSM)(线性应力应变模型, Stress- ω 模型和Stress-BSL模型)。

$k-\varepsilon$ 模型、线性应力应变模型仅针对充分发展的湍流才有效, 因此对于近壁面内发展不充分的流动, 需要考虑主流核心区与壁面的联系, 提供不同的壁面函数选择, 如: Standard壁面函数, Scalable壁面函数, Non-equilibrium壁面函数, Enhanced wall treatment和Menter-Lechner treatment。

SA模型计算速度更快, 鲁棒性好, 对没有分离的流动可以做出较好的预测。Standard $k-\varepsilon$ 模型一直是工程流动计算的主力, 但当流场中含有较大压力梯度时, 将使其精度降低。RNG $k-\varepsilon$ 模型在Standard $k-\varepsilon$ 模型的基础上进行了改进, 不仅有

效地改善了精度, 并提供了一个考虑低雷诺数流动粘性的解析公式、拓宽了适用范围。Realizable $k-\varepsilon$ 模型对旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流有更好的表现。 ω 方程相对于 ε 模型最突出的优点是可以通过粘性子层进行无附加项的方程积分, 使得该模型很容易获取稳健的 y^+ 非敏感格式。RSM 包含了涡粘模型不易处理的几种效应, 比如: 强旋转和流线曲率对湍流稳定性的影响, 但会显著地增加计算时间。

1.3 Nek5000

Nek5000 (Fischer et al., 2007) 是美国阿贡国家实验室研发的一款开源 CFD 软件, 采用基于高阶方法的谱元法, 精度高、并行性能好。本文将基于 Nek5000 程序, 采用 DNS 方法开展反应堆压力容器入口射流流动研究, 构建高精度数据库。

2 模拟细节

2.1 几何结构

以常见的三环路压力容器为研究对象, 来流入口直管长度 0.3 m, 来流入口管径为 0.055 m, 在主管道与压力容器之间有一部分为扩张过渡段, 扩张角度约为 6° , 扩张长度为 0.128 4 m。压力容器为内壁面半径 0.175 m, 外壁面半径 0.2 m, 压力容器间距 0.025 m, 整体高度 0.7 m, 上升段高度 0.117 8 m, 下降段高度 0.582 2 m, 环向角度共 120° 。入口直管段水力直径 0.055 m, 下降段水力直径 0.05 m。以入口管平面中心为坐标原点, 重力方向为 x 轴, 环向为 y 轴, 来流方向为 z 轴, 其几何结构如图 1 所示。

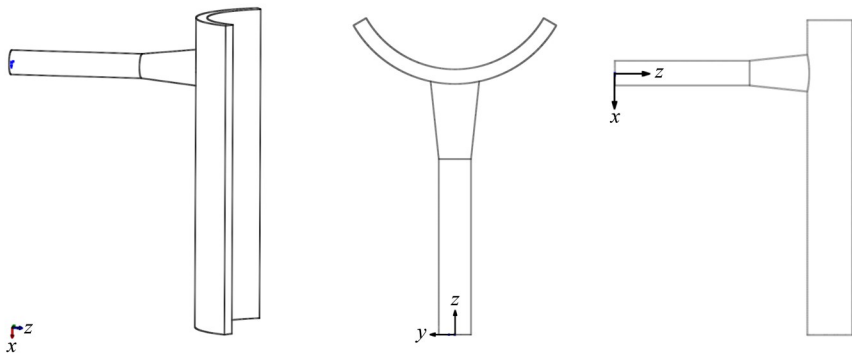


图 1 入口管几何结构

Fig. 1 Diagram of inset pipe geometry structure

2.2 模拟参数

实际上, 反应堆一回路具有很长的一段主管道。为简化计算, 入口段速度场分布单独计算, 同时保证来流为充分发展的湍流状态。通过验证, 环向采用周期性边界条件和对称边界条件的结果差异几乎为零。考虑到软件实施难度, 采用对称边界条件。出口为零压力出口。在环向简化为原来的 $1/3$ 尺度, 工质为碘化钠溶液, 来流管和下降段 Re 分别为 63 700 和 14 014, 单环路流量为 $8.55 \text{ m}^3/\text{h}$ 。入口速度为 1 m/s , 密度为 1816.7 kg/m^3 。动力黏度为 $8.634 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.3 网格

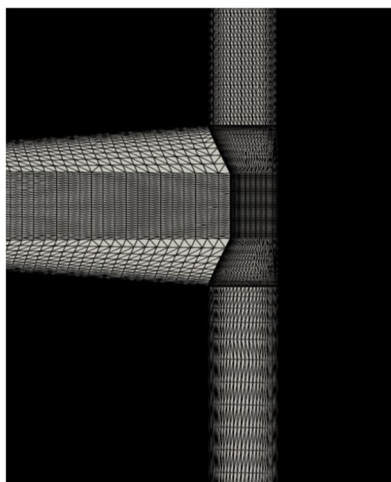
2.3.1 DNS 网格 初始网格为 43 812, 并且在壁面附近进行了加密处理。谱元法多项式阶数 N 代表在两个网格点之间插值加密点总数, 三维模拟则在每个维度均加密 $N-1$ 倍, 即最终网格量为 $43812(N-1)^3$ 。为了加速模拟, 首先使用低阶数

$N=6$ 进行模拟, 然后逐渐增加到 $N=8$, 最终达到稳定后增至 $N=14$ 。在 $N=14$ 时进行 DNS 计算并开展湍流统计, 共计 9 625 万个网格单元, 12 022 万个网格点, 其中射流区网格如图 2 所示。Kolmogorov 尺度是湍流中的最小尺度, 在 DNS 中网格尺度需与 Kolmogorov 尺度相当才能保证结果的精确性, 其计算方式为 $\eta \sim \nu^{3/4} \varepsilon^{-1/4}$ 。

撞击壁面为湍流最强区域, 距该壁面 1 mm 处平面 Kolmogorov 尺度平均为 $1.04 \times 10^{-4} \text{ m}$, 此处网格大小 $1.20 \times 10^{-4} \text{ m}$, 量级相当, 网格质量良好, DNS 结果可信度高。

2.3.2 RANS 网格 为了减小网格对仿真结果的影响, 采用 77 万和 220 万两组网格进行无关性验证。使用 SST $k-\varepsilon$ 模型, 比较位置一处的速度分布。从图 3 可以看出, 两个网格的速度分布接近, 即结果与网格的相关性较小。为降低计算成本, 本文的 RANS 模拟计算均使用 77 万网格进行。

(a) RANS网格



(b) DNS网格

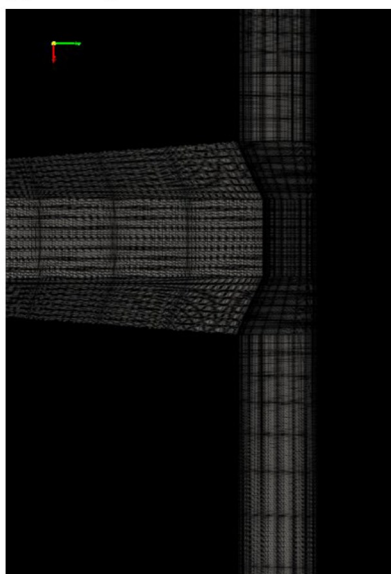


图2 网格示意图

Fig. 2 Diagram of the grid

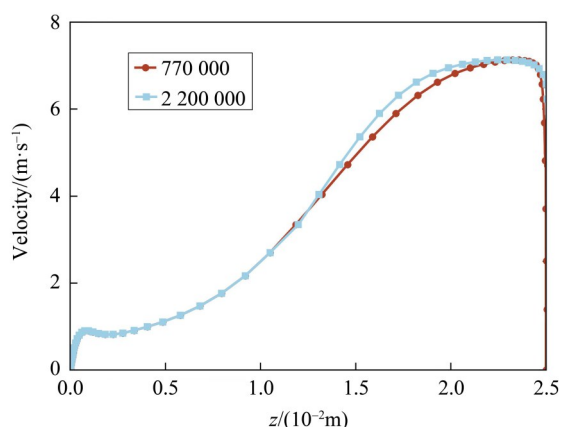


图3 RANS的网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence validation for RANS

3 结果与讨论

基于 ANSYS FLUENT, 针对关键物理量速度、湍动能、湍流黏度, 对常用的四类湍流模型进行评价。选取上升段 $x = -0.1$ m 处和下降段 $x = 0.05$ m 处两个位置, $x = -0.1$ m 处位于上升段旋涡中心区, $x = 0.05$ m 处位于下降段壁面射流扩张区, 两位置代表了上下区域湍流最强的位置, 更能反映湍流模型的适用性。

3.1 壁面函数

为了更深入地理解壁面函数与边界层粘性子层和对数区域之间的联系, 推导了5种壁面处理方法 (Standard, Scalable, Non-equilibrium, Enhanced wall treatment 和 Menter-Lechner treatment) 下的边界层无量纲速度分布, 如图4所示。在位置一的无量纲速度比较中, 所有壁面处理方法与 DNS 结果相比都显示出显著差异。其中, Standard、Scalable 和 Non-equilibrium 壁面函数在粘性子层中与 DNS 结果相对接近, 但仍然存在一定的低估。Enchanted wall treatment 和 Menter-Lechner treatment 壁面函数的相对较差。在位置二处, 在粘性子层区域, 五种壁面处理方法都显示出了与 DNS 结果的一致性。然而, 当远离粘性子层时, 只有 Menter-Lechner treatment 壁面函数的数值结果与 DNS 曲线较匹配。尽管结果有些高估, 但是整体趋势相似。综合两个位置结果, 5种壁面处理方法中 Menter-Lechner 处理方法对于模拟压力容器入口射流表现出较好的适用性。

3.2 $k-\varepsilon$ 模型

Standard $k-\varepsilon$ 模型的数值结果, 如图5所示 (除特别说明外, 以下的数值结果均为位置一的结果)。5种壁面处理的速度非常接近, 并且整体分布与 DNS 结果都呈现“M”型, 在内壁面速度较低, 左壁面和中心区域则偏大。整体上并未完全复现因壁面撞击导致的高速度梯度分布。在湍动能模拟中, Standard 和 Scalable 壁面函数的曲线完全重合, 并且 Standard、Scalable 和 Non-equilibrium 壁面函数的右侧壁面存在明显偏差。一般情况下, 湍动能会在壁面附近急剧减小为0。Enhanced 和 Menter-Lechner 壁面处理方法可以很好地模拟这种趋势。对于湍流黏度, 五种壁面处理方法相较于 DNS 数值结果, 无论是在大小上还是在趋势上均有较大的偏差。

RNG $k-\varepsilon$ 模型的数值结果, 如图6所示。可以看出, 与 Standard $k-\varepsilon$ 模型类似, 速度曲线呈现一

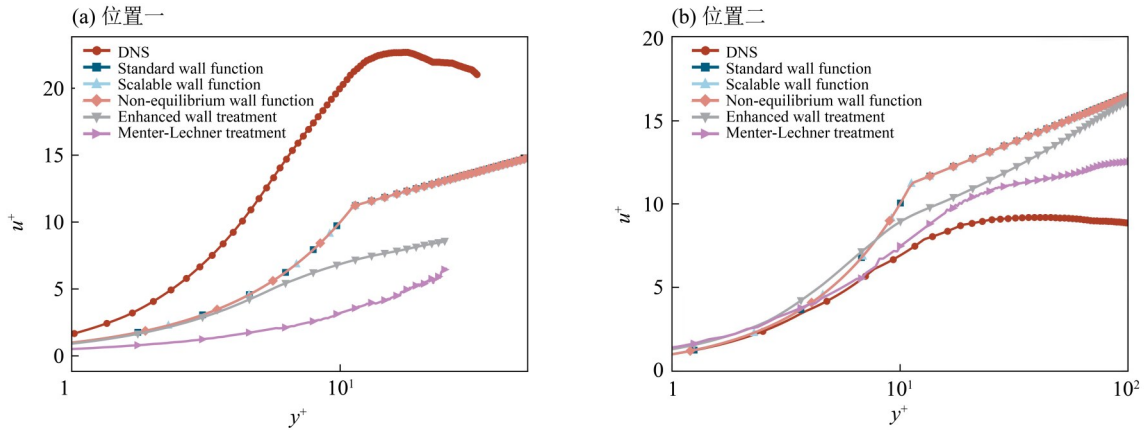


图4 不同壁面函数的模拟结果

Fig. 4 Simulation results by different wall functions

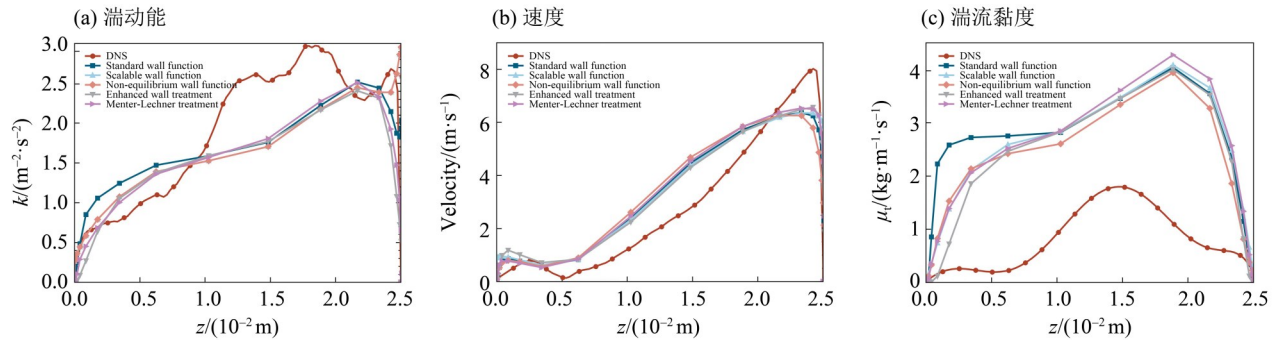


图5 Standard $k-\epsilon$ 模型数值结果

Fig. 5 Simulation results by Standard $k-\epsilon$ model

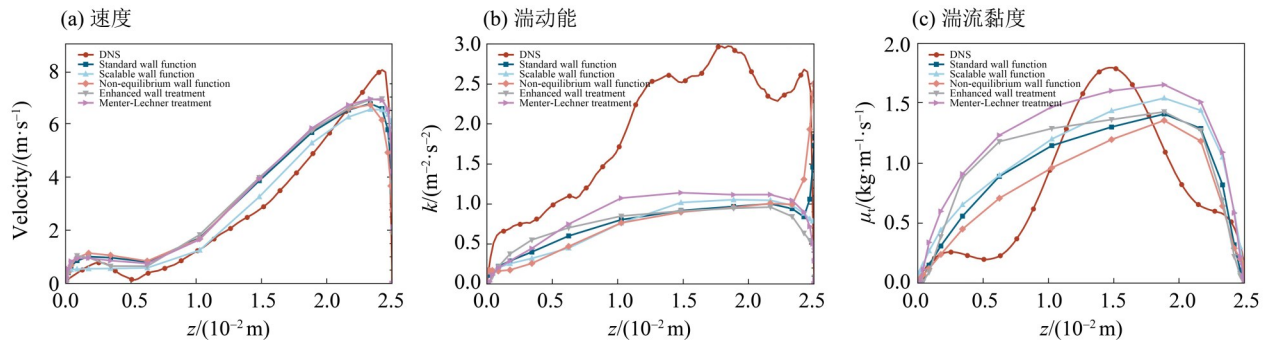


图6 RNG $k-\epsilon$ 模型数值结果

Fig. 6 Simulation results by RNG $k-\epsilon$ model

个类似“M”型的曲线，5种壁面处理方式得到的数值结果十分接近；相对Standard $k-\epsilon$ 模型，RNG $k-\epsilon$ 模型与DNS数值结果贴合地更好，且同样在右壁面区域速度最大值略小于DNS数值结果。在湍动能与湍流黏度的模拟中，RNG $k-\epsilon$ 模型与Standard $k-\epsilon$ 模型的情况不同。对于湍动能，Standard、Scalable和Non-equilibrium壁面函数同样都存在右壁面非常理分布，同时5种壁面处理方式在中心区域均严重低估了湍动能，差异较大。湍流黏度模

拟中，RNG $k-\epsilon$ 模型相对于Standard $k-\epsilon$ 模型，其数值与DNS数值结果更加接近，但是其分布不完全贴合。Realizable $k-\epsilon$ 模型的速度、湍动能、湍流黏度情况同Standard $k-\epsilon$ 模型的类似，如图7所示。

综上所述，在压力容器入口射流的模拟中，3种模型的速度结果差异不大；对于湍动能模拟结果，Standard、Scalable和Non-equilibrium壁面函数同样都存在右壁面非常理解，Enhanced与Menter-Lechner treatment壁面函数表现较好。3种

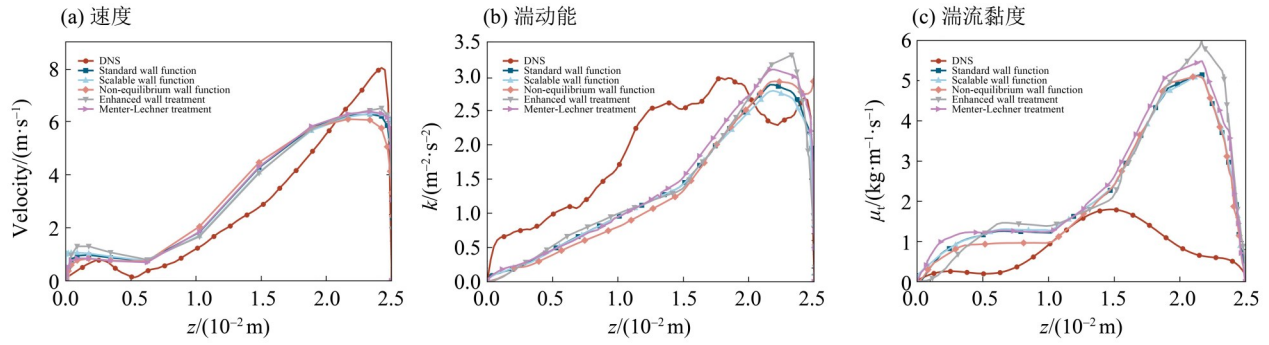


图 7 Realizable $k-\varepsilon$ 模型数值结果

Fig. 7 Simulation results by Realizable $k-\varepsilon$ model

模型中, Standard $k-\varepsilon$ 模型与 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对湍动能的模拟较好, 对湍流黏度的模拟较差; RNG $k-\varepsilon$ 模型则相反, 对湍动能的模拟较差, 对湍流黏度的模拟较优。因此, Standard $k-\varepsilon$ 模型与 Menter-Lechner treatment 搭配在压力容器下降段具有较高的适用性。

3.3 $k-\omega$ 模型

$k-\omega$ 模型中, 选择常用的 Standard $k-\omega$ 模型、Generalized $k-\omega$ 模型、BSL $k-\omega$ 模型和 SST $k-\omega$ 模

型进行比较。图 8 中, 4 个 $k-\omega$ 模型的速度模拟, 总体上差异较小; SST $k-\omega$ 模型峰值大小预测较准, 最大速度值略低于 DNS 数值结果; $k-\omega$ 模型的预测效果整体优于 $k-\varepsilon$ 模型。4 个 $k-\omega$ 模型的模拟结果中, 湍流最剧烈的区域相对偏右, 表现为湍流动能和湍流黏度的峰值位置右移。总体而言, Standard $k-\omega$ 、BSL $k-\omega$ 模型与 DNS 数值结果匹配较好, 适用性更强。

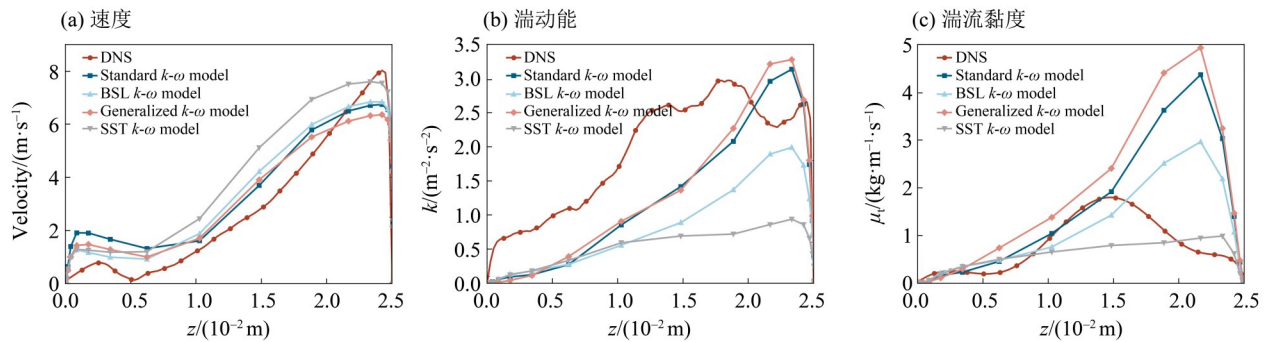


图 8 $k-\varepsilon$ 模型数值结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results by $k-\varepsilon$ model

3.4 RSM 模型

本节验证 RSM 模型和不同壁面处理方式在压力容器入口射流模拟中的适用性。在线性压力应变模型中, 共有 4 种壁面处理方式可供选择, 如图 9 所示。在速度的模拟中, 4 种壁面处理方式差异较小, 在右壁面区域与 DNS 曲线十分吻合, 4 种壁面处理方式仅有 Scalable 壁面函数呈现出与 DNS 数值结果类似的“M”型曲线。湍动能的模拟中, 均不能复现湍动能的分布, 但增强型处理方法表现相对较好。在湍流黏度的模拟中, 4 种壁面处理方式均高估了真实数值, 远大于 DNS 数值结果。综合来看, Enhanced 处理方法总体表现优于其他方式。

Stress- ω 模型与 Stress-BSL 模型是低雷诺数模型, 无需结合壁面函数。此模型与加入 Enhanced 壁面处理的线性压力应变模型进行对比, 结果如图 10 所示。在速度的模拟中, 3 种模型的结果接近, Stress- ω 模型与 Stress-BSL 模型均能模拟出呈现类“M”型的速度曲线分布, 与 DNS 数值结果一致。其中, Stress- ω 模型结果与 DNS 曲线吻合更好。

在湍动能的模拟中, Stress- ω 模型与 Stress-BSL 模型相近, 但整体上偏离 DNS 数值结果较多, 低估了湍动能强度。Stress- ω 模型与线性压力应变模型结果较为吻合, 但在接近右侧壁面存在过高预测。在湍流黏度的模拟中, Stress- ω 模型与

Stress-BSL 模型量级上吻合, 并且 Stress- ω 模型在左壁面附近趋势与 DNS 结果一致。整体而言, 三个模型均效果不佳。综合考虑, RSM 湍流模型中,

Stress- ω 模型表现相对较好, 为 RSM 类模型中在压力容器下降段适用性最优的模型。

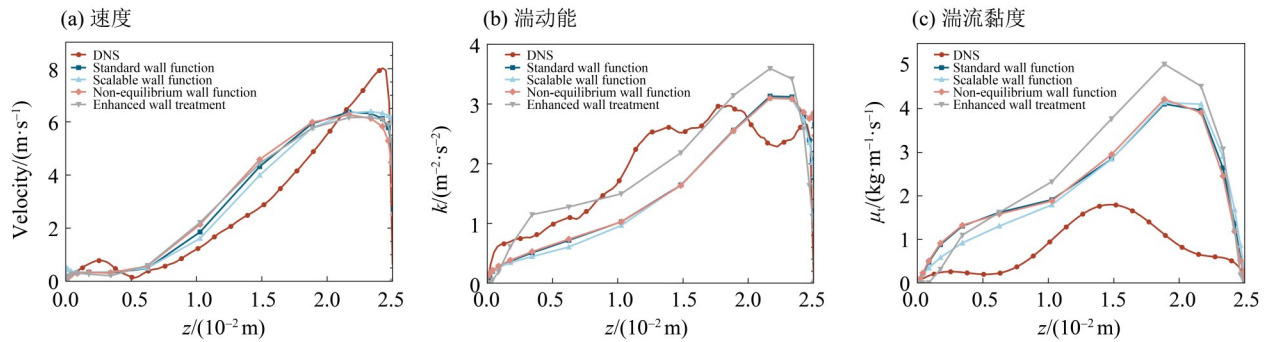


图9 RSM模型数值结果

Fig. 9 Simulation results by RSM model

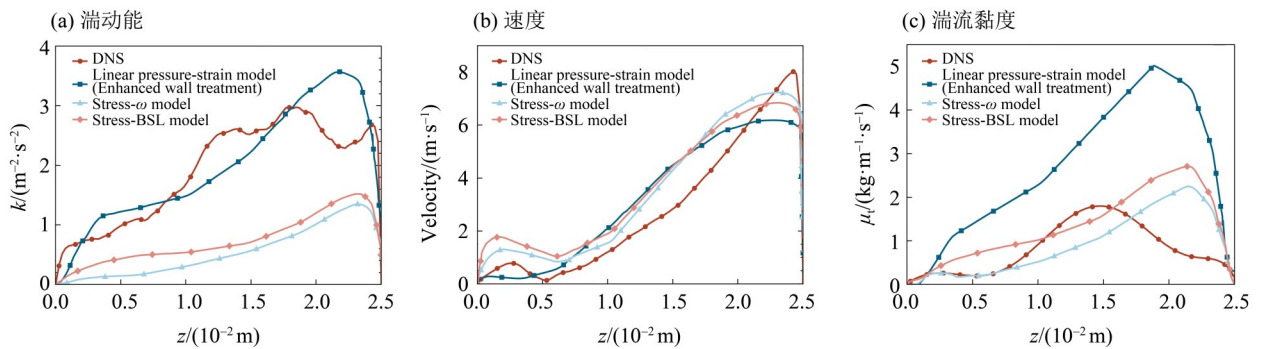


图10 线性应力应变模型数值结果

Fig. 10 Simulation results by linear stress-strain model

3.5 最优模型

前面几节中, 已经评价了部分湍流模型在压力容器入口射流模拟中的适用性。k- ϵ 类模型中, 基于Menter-Lechner处理方法的Standard k- ϵ 模型与基于Enhanced处理方法的RNG k- ϵ 模型适用性较强, k- ω 类和RSM类模型中Standard k- ω 模型、Stress- ω 模型适应性相对较好。在本节中, 加入一方程模型SA模型, 与上述4种模型进行对比并评

价其适用性。具体结果如图11所示。

在速度的模拟中, 两方程模型与RSM模型呈现类似“M”型的曲线, 结果接近; 而一方程模型明显低估了速度, 差异较大。

在湍动能的模拟中, 因SA模型在Fluent中无法直接提取, 在此不作讨论。基于Menter-Lechner treatment的RNG k- ϵ 模型、Stress- ω 模型的结果数值上明显低于DNS的数值结果, 基于Menter-Lechner

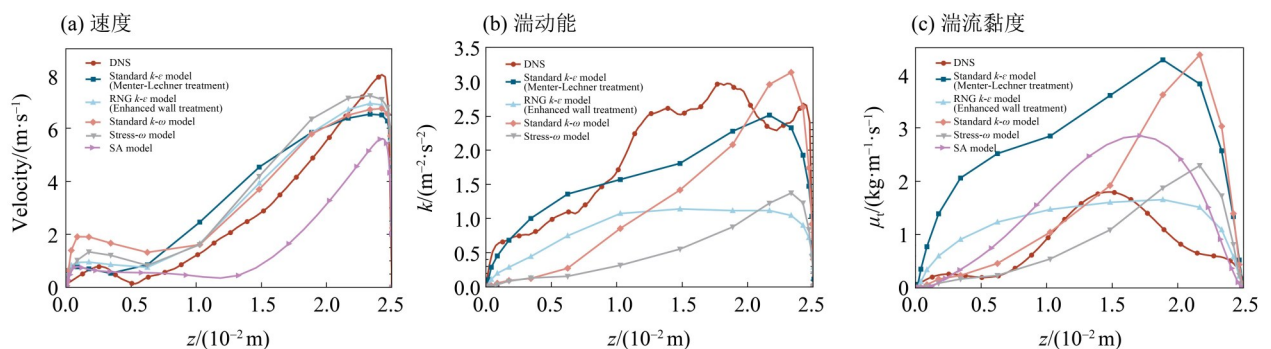


图11 四类最优模型结果对比 (位置一)

Fig. 11 Comparison of simulation results by four optimal model(position 1)

treatment 的 Standard $k-\varepsilon$ 模型、Standard $k-\omega$ 模型表现较好。

在湍流黏度的模拟中, SA 模型能完美的复现湍流黏度分布, 尽管在大小上存在一定的高估。在左壁面附近, Standard $k-\omega$ 模型能很好复现湍流黏度分布, 而在右壁面所有模型均难以预测, 均高估了湍流黏度的大小。整体上, 基于 Menter-Lechner treatment 的 RNG $k-\varepsilon$ 模型、Stress- ω 模型表现较好, 与 DNS 曲线的结果较为接近。

综合 3 个物理量, Standard $k-\omega$ 模型在位置一的模拟中, 综合适用性较好。

3.6 位置二

选取上升段 $x = -0.1 \text{ m}$ 处进行湍流模型的适应性评价, 整体流程与位置一相同。筛选出来的最优模型分别为 RNG $k-\varepsilon$ (Enhanced 壁面处理)、SST $k-\omega$ 、Stress- ω 模型和 SA 模型, 结果如图 12 所示。

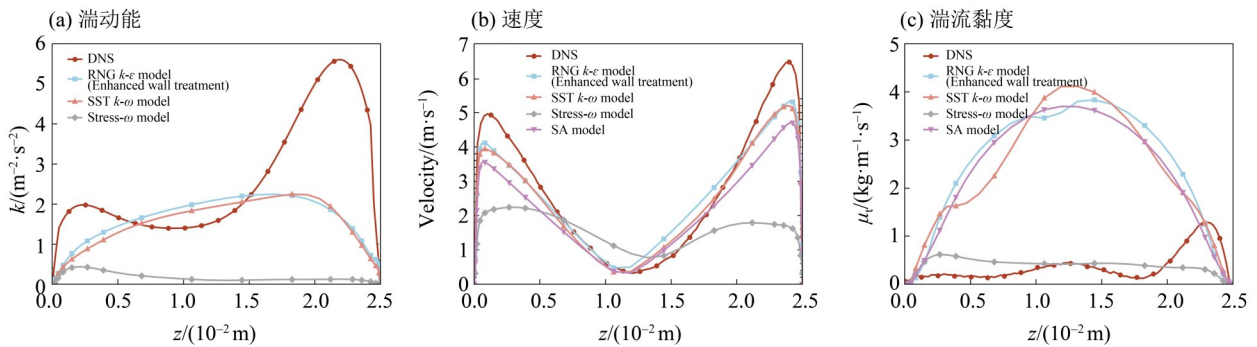


图 12 4类最优模型结果对比 (位置二)

Fig. 12 Comparison of simulation results by four optimal model(position 2)

在速度的模拟中, 所有模型均能模拟出类“M”型的速度分布曲线。而 Stress- ω 模型明显低估了速度, 差异较大。其他模型预测的双峰位置和峰值均较优。

在湍动能的模拟中, 因 SA 模型在 FLUENT 无法直接计算, 在此不作讨论。其余所有模型都无法反应出湍动能的分布, 并且 Stress- ω 模型的数值结果明显低于 DNS 的。RNG $k-\varepsilon$ (Menter-Lechner treatment) 模型, SST $k-\varepsilon$ 模型仅在中心区域大小相当, 两侧壁面差异较大。

在湍流黏度的模拟中, SA 模型能完美的复现湍流黏度分布, 尽管在大小上存在一定的高估。在左壁面附近, Standard $k-\omega$ 模型能很好复现湍流黏度分布, 而在右壁面所有模型均难以预测, 均高估了湍流黏度大小。整体上, 基于 Menter-Lechner treatment 的 RNG $k-\varepsilon$ 模型与 Stress- ω 模型表现较好, 与 DNS 的数值结果较为接近。综合考虑 3 个物理量, Stress $k-\omega$ 模型在位置二的模拟中综合适用性较好。

对比下降段, 上升段多数湍流模型与 DNS 结果存在明显差异。DNS 和 Standard $k-\varepsilon$ (Menter-Lechner treatment) 的速度矢量图, 如图 13 所示。可以发现, DNS 与 RANS 模拟在上升段中都会产生一个大涡流, 但是涡流的中心位置明显不同,

同时涡流的形状也存在差别, 故在上升段中, RANS 模型的表现与 DNS 的数值结果存在较大差异。

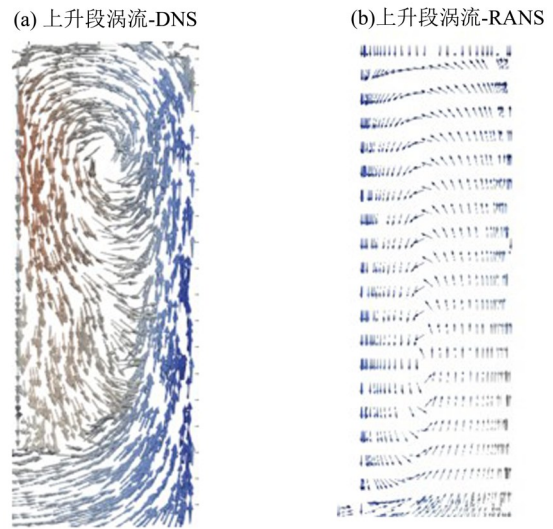


图 13 DNS 和 RANS 模拟上升段涡流
Fig. 13 Eddy currents in the ascending section by DNS and RANS

4 结 语

基于直接数值模拟, 构建了压力容器入口射流上升段和下降段的高精度流动数据库, 评价了

常见的湍流模型的适用性,得到以下结论:

(1) 下降段中预测速度、湍动能、湍流黏度的最优湍流模型分别为 RNG $k-\varepsilon$ (Enhanced wall treatment)、Standard $k-\varepsilon$ (Menter-Lechner treatment)、SA 模型。综合考虑三个物理量, Standard $k-\omega$ 模型适用性最强;

(2) 上升段中预测速度、湍动能、湍流黏度的最优湍流模型分别为 SST $k-\omega$ 、RNG $k-\varepsilon$ (Enhanced wall treatment)、Stress- ω 。综合考虑三个物理量, Stress- ω 模型预测效果最优;

(3) 上升段差异较大的原因在于旋涡的位置预测出现了偏差。

参考文献:

- 黄雷, 佟立丽, 2019. 压力容器下腔室冷却剂流动特性数值模拟研究[J]. 核科学与工程, 39(1): 42-50.
- 蒋兴, 贺寅彪, 张明, 2020. 承压热冲击瞬态下反应堆压力容器下降环腔内三维热工水力分析[J]. 压力容器, 37(4): 46-49.
- 蒋兴, 翁羽, 王海军, 2021. 反应堆压力容器直接安注热分布特性研究[J]. 核动力工程, 42(5): 119-122.
- 康慧伦, 田兆斐, 胡培政, 等, 2021. MRANS 方案的反应堆压力容器 CFD 仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 53(12): 127-134.
- FISCHER P, LOTTES J, TUFO H, 2007. Nek5000 [R]. Argonne, IL (United States): Argonne National Lab (ANL).
- LUCAS D, BESTION D, BODÈLE E, et al, 2009. An overview of the pressurized thermal shock issue in the context of the NURESIM project[J]. Sci Technol Nuclear Install, 2009: 583259.
- MENG T, ZHAO F, CHENG K, et al, 2019. Numerical study of flow and heat transfer characteristic of space gas-cooled nuclear reactor core[J]. Atomic Energy Sci Tech, 53(7): 1264.
- MULLOY J R, JOHN P, 2018. A RANS analysis of pressurized thermal shock phenomena in nuclear reactor geometries using star CCM+ [D]. Texas: Texas A&M University.
- SHARABI M, GONZÁLEZ-ALBUIXECH V F, LAFFERTY N, et al, 2016. Computational fluid dynamics study of pressurized thermal shock phenomena in the reactor pressure vessel[J]. Nucl Eng Des, 299: 136-145.
- ZHANG Q, LIU L, ZENG Y, et al, 2022. Numerical simulation of inherent boric mixing phenomenon inside reactor annular down-comer[J]. Prog Nucl Energy, 148: 104230.
- ZENG Y, ZHANG Q, CHEN H, et al, 2023. Numerical investigation of the external emergency coolant transportation inside reactor annular down-comer [J]. Ann Nucl Energy, 187: 109780.

(责任编辑 王海蓉)