

CFD 方法研究 CFETR WCCB 全包层模块 不同湍流模型的流场分布与压降

高忠平, 赵平辉, 李远杰, 邓维平, 葛志浩, 聂星辰

(中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽合肥 230027)

摘要: 由于高压水具有优良的热工水力学性能与成熟的工业基础, 水冷陶瓷增殖(WCCB)包层成为中国聚变工程实验堆(CFETR)的一种主要的候选包层. 为了研究所设计的 WCCB 包层内的流场分布与压降, 采用三维计算流体动力学(CFD)数值模拟方法研究了 WCCB 包层全模块内的冷却剂流动. 结果表明, 在冷却板、分隔板和侧板中质量流量分布较均匀, 而第一壁中则较不均匀(不均匀度约为 30%). 由于冷却板中流道较长及流动方向的频繁改变, 最大压降出现在冷却板中. 考虑到所设计联箱结构上的复杂性, 综合考虑湍流模型对模拟结果的影响是必要的. 湍流模型的敏感性研究结果表明, 湍流模型对包层模块各部件质量流量分配的影响较小; 然而, 湍流模型对压降的影响是显著的. 另外, 由于第一壁流场分布得不均匀, 有必要对现有包层模块的设计进行优化.

关键词: 中国聚变工程实验堆; 水冷陶瓷增殖包层; 湍流模型; 数值分析

中图分类号: TL334

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2017.12.009

引用格式: 高忠平, 赵平辉, 李远杰, 等. CFD 方法研究 CFETR WCCB 全包层模块不同湍流模型的流场分布与压降[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(12):1029-1036.

GAO Zhongping, ZHAO Pinghui, LI Yuanjie, et al. CFD analysis of flow distributions and pressure drops in the whole CFETR WCCB blanket module with different turbulence models[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(12):1029-1036.

CFD analysis of flow distributions and pressure drops in the whole CFETR WCCB blanket module with different turbulence models

GAO Zhongping, ZHAO Pinghui, LI Yuanjie, DENG Weiping, GE Zhihao, NIE Xingchen

(School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: As a primary blanket candidate for CFETR(China Fusion Engineering Test Reactor), the water-cooled ceramic breeder (WCCB) blanket is now attracting enormous attention owing to the admirable thermal hydraulic performance and experienced industrial base of pressurized water. To analyze the flow distributions and pressure drops in the designed WCCB blanket, three dimensional numerical simulation of the coolant flow in the whole WCCB module was conducted based on the computational fluid dynamics (CFD) method. The results demonstrate that the flow distribution is uniform in cooling plates (CPs), stiffening plates (SPs) and side walls (SWs), but is non-uniform in the first wall (FW) with the unevenness of mass flow rate in FW being about 30%. The maximal pressure drop is in the CPs caused by

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-07-04

基金项目: 磁约束核聚变 973 专项(2013GB108004), 国家自然科学基金(51006095), 中央高校基础科研基金(WK2090130019)资助

作者简介: 高忠平, 男, 1991 年生, 硕士生. 研究方向: 反应堆热工水力学. E-mail: gzp@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 赵平辉, 博士/副教授. E-mail: phzhao@mail.ustc.edu.cn

the long coolant channel and the frequent change of flow direction. The effect of turbulence models needs to be comprehensively studied due to structural complexity of the designed manifold. Sensitivity analysis of turbulence models shows that different turbulence models have little effect on the mass flux distributions in all parts of the blanket module. However, the deviation of pressure drops is notable as a result of different turbulence models. In addition, the current design of the blanket module needs to be optimized further because of the non-uniform flow distribution in FW.

Key words: China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR); water-cooled ceramic breeder (WCCB) blanket; turbulence model; numerical analysis

0 引言

包层是聚变堆的关键部件.作为 CFETR(中国聚变工程实验堆)的候选包层之一,WCCB 包层的设计要求为:具备足够的冷却能力以保证最高温度皆低于对应材料的许用温度;各部件拥有相对均匀的速度场和均匀的质量流量分布.

近些年来,为了验证设计结构的合理性,国内外进行了较多的数值计算.Satake 等^[1]利用 AKN 模型(一种 $k-\epsilon$ 模型)模拟了高普朗特数流体在聚变堆第一壁内的流动.基于不同湍流模型,Ili'c 等^[2]研究了 ITER 氦冷球床测试包层模块第一壁内的传热问题.Zhao 等^[3]研究了包层模块第一壁内矩形截面流道下湍流模型(标准 $k-\epsilon$ 模型、SST 模型与 SSG 模型)与高宽比对传热系数的影响.基于 3 种湍流模型(标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型与 RSM 模型)计算结果与实验结果的比较,Jiang 等^[4]研究了 CFETR WCCB 包层第一壁(内嵌入螺旋叶片)中的传热与摩擦特性.此外,Zhao 等^[5]采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型分析了 CFETR 水冷包层概念设计内第一壁的传热特性.目前对第一壁内的流动与传热特性已经有一定的研究,但对全包层模块进行数值模拟以得到第一壁内的流场与压降特性仍是必要的.Lee 等^[6]利用标准 $k-\epsilon$ 模型对韩国氦冷陶瓷包层测试包层模块概念设计进行了热工水力学分析.基于双功能锂-铅测试包层模块(test blanket module, TBM),Wang 等^[7]选用 SST $k-\omega$ 模型对氦气与锂-铅的双流场进行了详细的三维数值计算.Ni 等^[8]采用 SST $k-\omega$ 模型研究了浮力对双功能锂-铅测试包层模块传热的影响.基于 CFD 程序 CFX-10,Yoon 等^[9]采用 $k-\epsilon$ 模型对多物理场耦合程序 COMSOL 的热工水力学分析能力进行了验证.Jiang 等^[10]利用 $k-\epsilon$ 模型,对 CFETR WCCB 全包层模块热工水力学进行了三维

数值模拟.Cui 等^[11]基于 CFX 采用标准 SST 模型对氦冷固态包层典型模块进行了热工水力学分析,并将程序计算结果与适用于氦气的一维 PKP 经验关系式计算结果进行了对比分析,从而判定得到最适用于 CFETR HCSB 包层热工水力分析的湍流模型.Cheng 等^[12]基于 CFX 选用 $k-\epsilon$ 湍流模型对 ITER 超临界水冷包层进行了热工水力计算.然而,由于包层模块结构上的复杂性,缺乏湍流模型对包层模块内冷却剂流动数值模拟影响的研究.本文重点研究了不同湍流模型对 CFETR WCCB 全包层模块流量分配与压降的影响.

1 包层结构与冷却剂流动方案

如图 1 所示,WCCB 包层模块是一个由多层结构(包括 U 型第一壁、冷却板、分隔板、侧板和背板)围成的盒式结构,主要部件之间由联箱连接.为获得可观的氦增殖比,该设计以 $\text{Li}_2\text{TiO}_3/\text{Be}_{12}\text{Ti}$ 的混合球床填充增殖区.此外,增殖区布置两层铍层以提高其中子学性能.低活化铁素体马氏体钢(reduced activation ferritic/martensitic steel, RAFM)作为主要的结构材料^[13].

图 2 给出了 WCCB 包层内的冷却剂流动方案示意图:①冷却剂水经包层模块入口流入第一联箱,再由第一联箱分配进入并冷却第一壁;②由第二联箱收集,冷却剂流入并冷却增殖区冷却板;③由第三联箱收集,冷却剂被分配进入五个下级联箱以冷却分隔板与侧板;④冷却剂由第四联箱收集并从包层出口流出.为了方便展示流动特性,图 2 中的主要部件按照图示黑色箭头编号.另外,图 3 详细给出了冷却剂流动方案流程图.总的来说,第一壁(FW)、冷却板(CPs)、分隔板(SPs)与侧板(SWs)依次被冷却.

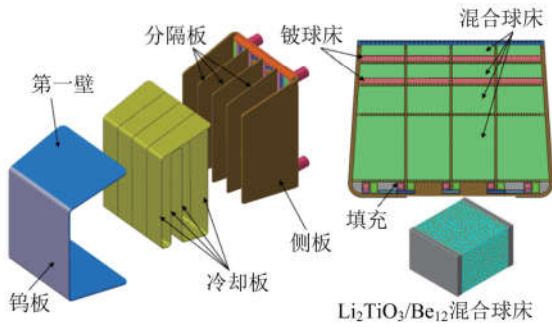


图 1 WCCB 包层三维结构示意图(左)及剖面图(右)

Fig.1 Schematic diagrams of 3D geometry configuration (left) and profile map (right) for WCCB blanket

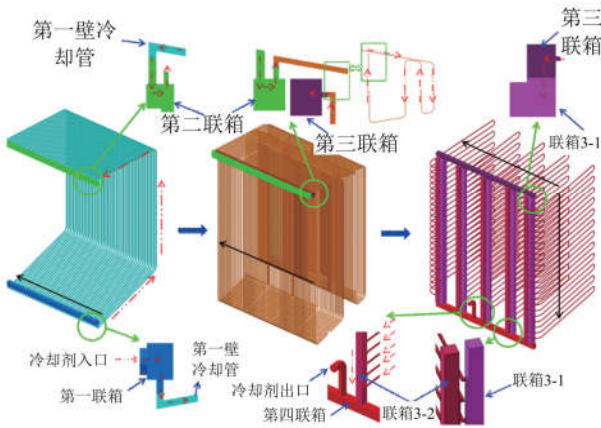


图 2 WCCB 包层内冷却剂流动方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of coolant flow scheme in WCCB blanket

2 方法

2.1 控制方程

本文采用 CFD 方法研究冷却剂流道内的湍流.对于不可压缩粘性流动,质量方程和动量方程如下表示:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (2)$$

式中, ρ, t, p 和 μ 分别是流体密度、时间、压力和动力粘度; x_i 和 x_j 是笛卡尔坐标分量, $i, j = 1, 2, 3$; $\nu = \mu/\rho$ 是运动粘度; u_i 是速度的 i 方向分量; f_i 是体积力, $i, j = 1, 2, 3$.

雷诺平均纳维-斯托克斯 (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 模拟广泛用于模拟湍流和控制方程的求解,该方法的中心思想是雷诺分解,由此瞬时量可以分解为时间平均项和脉动项.对于标量

φ , 其表示为

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \quad (3)$$

将(3)式型的流动变量表达式带入方程(1)和(2),控制方程可以表示为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \overline{U_i U_j})}{\partial x_j} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) - \overline{p} \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} \right] + \overline{f_i} \quad (5)$$

方程(4)和(5)被称为雷诺方程,其中 \bar{p} 是时间平均压力; u_i, u_j 是时间平均速度; $\overline{u_i u_j}$ 是雷诺应力项; δ_{ij} 是 Kronecker 符号, $i, j = 1, 2, 3$; $\overline{f_i}$ 是时间平均体积力, $i = 1, 2, 3$.

Lauder 等^[14] 提出标准 $k-\epsilon$ 模型,其优势在于预测高雷诺数流动下的速度分布,前提假设是充分发展的湍流及分子黏度影响可以忽略,因此,标准 $k-\epsilon$ 模型比较适合充分发展的高雷诺数湍流. Orszag^[15] 等开发了 RNG $k-\epsilon$ 模型,采用重整化群的统计方法推导而成,其在更广泛的流动中能够给出比标准 $k-\epsilon$ 模型更精确和可靠的计算结果. Wilcox^[16] 提出了标准 $k-\omega$ 模型,其对低雷诺数影响、压缩性和剪切流传播做了一些修正. Menter^[17] 发展了 SST $k-\omega$ 模型,结合了 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 模型的优点,使得 SST $k-\omega$ 模型有更高的精确性和可靠性.雷诺应力模型(RSM)是基于各向异性的湍流模型,对于复杂流场的计算有更高的精度.

本文采用了 7 种湍流模型,包括标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、Realizable $k-\epsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型、SST $k-\omega$ 模型、Linear Pressure-Strain RSM (LSP RSM) 和 Stress- ω RSM (Omega RSM).

2.2 边界条件

方程的离散采用有限体积法,为了达到更好的收敛性,求解则采用 SIMPLE-C 算法.此外,为了达到更高的计算精度,采用双精度计算器.为了节省计算量,近壁面采用标准壁面函数处理,其第一层网格位于对数率区,相应的壁面 y^+ 处于 30~60 的范围内.为了保证更高的网格质量和计算精度,包层模块各部件采用结构化网格.此外,参考压力设为 15.5 MPa,入口处质量流量为 5.457 5 kg/s^[10],湍流强度和水力直径分别为 5% 和 0.03 m.出口采用压力边界条件.计算域其他边界设为无滑移边界条件.

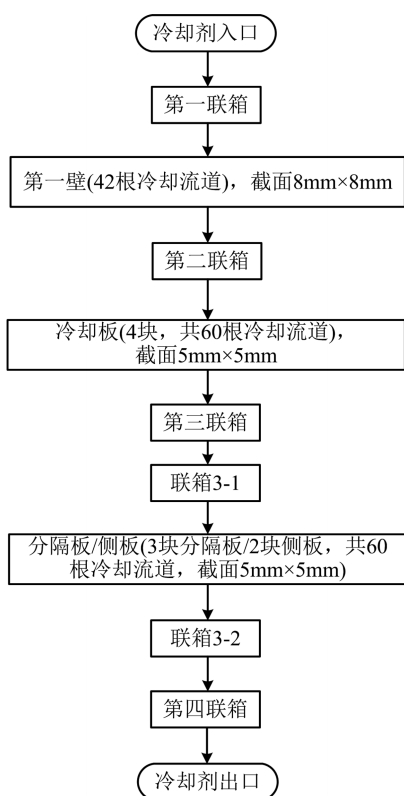


图 3 冷却剂流动示意图

Fig.3 Schematic of coolant flow loops

3 网格独立性分析

本文进行了全包层模块的网格独立性分析,选取了 3 套网格,网格数量分别为 278.9 万、329.5 万和 499.6 万.此节分析并比较了质量流量分布和压降.表格 1、图 4 和图 5 中质量流量与压降计算结果表明,第 2 套网格与第 3 套网格的计算结果差别较小,所得结果可以认为是网格独立的,因此,采用第 2 套网格作为计算网格.

表 1 网格 1 与网格 2 对网格 3 的平均相对偏差

Table 1 Average relative deviation of grid1 and grid2 from grid3

部件	质量流量偏差		压降偏差	
	网格 1	网格 2	网格 1	网格 2
第一壁	0.899 5%	0.831 2%	2.332%	1.498%
冷却板	0.298 8%	0.244 7%	0.547 9%	0.284 9%
分隔板/侧板	0.590 1%	0.495 2%	3.625%	0.797 2%

4 结果与分析

此节进行了湍流模型的敏感性分析,选取了 7 种湍流模型,给出了各部件的质量流量分布和压降,

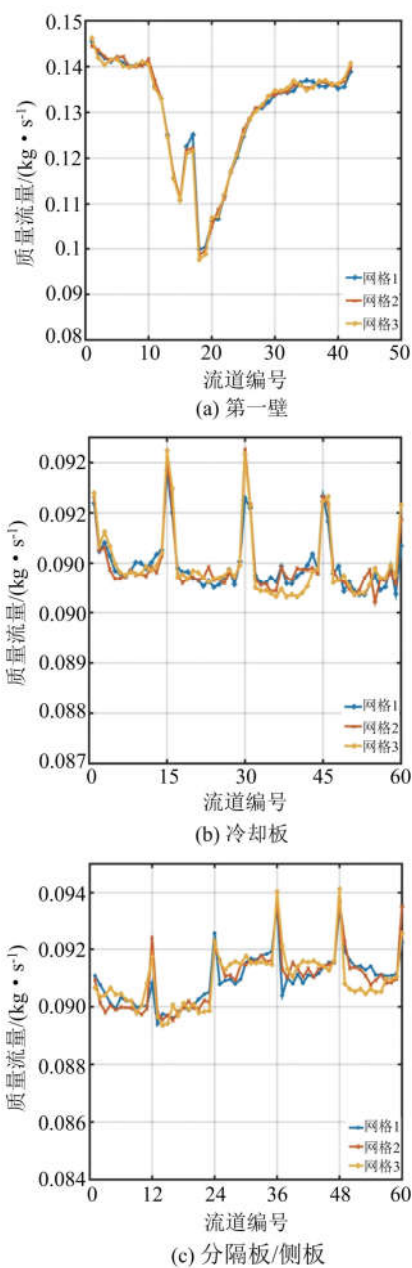


图 4 不同网格密度的质量流量分布

Fig.4 Mass flow rate distribution for different grid densities

图 6 至图 8 分别给出了第一壁、冷却板和分隔板/侧板内的质量流量分布与压降.从质量流量计算结果来看,在各部件中,7 种湍流模型的质量流量有较小的偏差,表明湍流模型对质量流量计算的影响是可以忽略的.

如图 6 至图 8 所示,不同湍流模型下的压降有着较明显的偏差,在第一壁、冷却板和分隔板/侧板中压降计算结果的最大偏差分别为 23%, 25% 和 19%,表明湍流模型对压降计算有着较大的影响.标准 $k-\epsilon$ 模型与 LSP RSM 的压降计算结果偏大,而

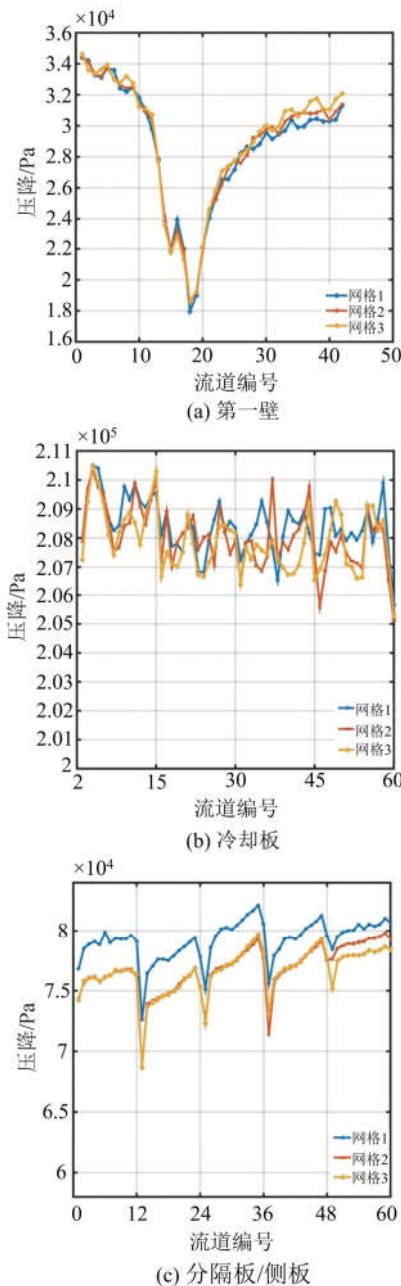


图 5 不同网格密度的质量流量分布

Fig.5 Pressure drop distribution for different grid densities

Stress- ω RSM 则偏小.

图 9 显示了第一壁单根流道内压力沿流动方向的变化. 容易看出, 由于与第一联箱相连的入口段流场较复杂, 对于标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 压力沿着流动方向呈下降趋势, 而对于余下的 4 种模型则呈现上升趋势, 表明不同湍流模型对入口段复杂流动下压降的计算表现出较明显的差异; 而在充分发展段, 各湍流模型的压降计算结果接近, 湍流模型对压降计算的影响是可以

忽略的, 其中, Stress- ω RSM 下压降计算结果明显偏小, 在该流动下计算压降时需谨慎选择此湍流模型, 其计算结果还需进一步验证. 正是联箱结构上的复杂性使得流道入口段流动变得复杂, 湍流模型对入口段复杂流动下压降的计算影响较大, 引起图 6 至图 8 中不同模型间压降的明显差异.

考虑到联箱中流动的复杂性, 此部分选取 3 种湍流模型 (Realizable $k-\epsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型和 LSP RSM), 分析了第一联箱内冷却剂的流动特性. 图 10 给出了第一联箱极向横截面上的流线图, 结果表明联箱内流场复杂, 最大速度出现在入口处, 入口和两端的流动更为复杂, 入口处的速度梯度相对较大, 而两端的的速度分布则较均匀.

表 2 给出了 Realizable $k-\epsilon$ 模型下各部件的压降. 可以看出, 由于长流动管道及流动方向的频繁改变, 冷却板具有最大的压降, 占全模块总压降的 46.7%. 从各部件中质量流量的分配来看, 图 6 中第一壁中质量流量大体呈现 V 形分布, 即越接近两端, 质量流量越大. 这主要是由于联箱两端流动阻力较大, 使得两端具有较大的质量流量. 此外, 由于入口处冷却剂流入后很快受到联箱壁面的阻挡, 所以靠近入口处, 质量流量较之附近流道具有更大的流量, 体现在 16、17 号流道具有较大的流量. 图 7 与图 8 表明, 在冷却板、分隔板和侧板中质量流量呈现 U 形状分布, 即两端质量流量较大, 中间流道流量较小, 主要是由于冷却剂受联箱两端挡板阻挡, 两端附近具有较大的流动阻力. 如图 6 至图 8 所示, 第一壁、冷却板和分隔板/侧板内质量流量不均匀度分别为 30%, 5% 和 4%. 可见, 冷却板、分隔板和侧板中流量分配较均匀, 而第一壁中流量分配则明显不均匀, 不符合流量均匀分配的要求, 其设计需进一步的优化.

表 2 Realizable $k-\epsilon$ 模型下各部件的压降

Tab.2 Summary of the pressure drop with the Realizable $k-\epsilon$ model for each component

部件	压降/Mpa	百分比/%
第一壁	0.0290	6.82
冷却板	0.199	46.7
分隔板/侧板	0.0686	16.1
联箱(1~4)	0.129	30.4
全模块	0.426	100

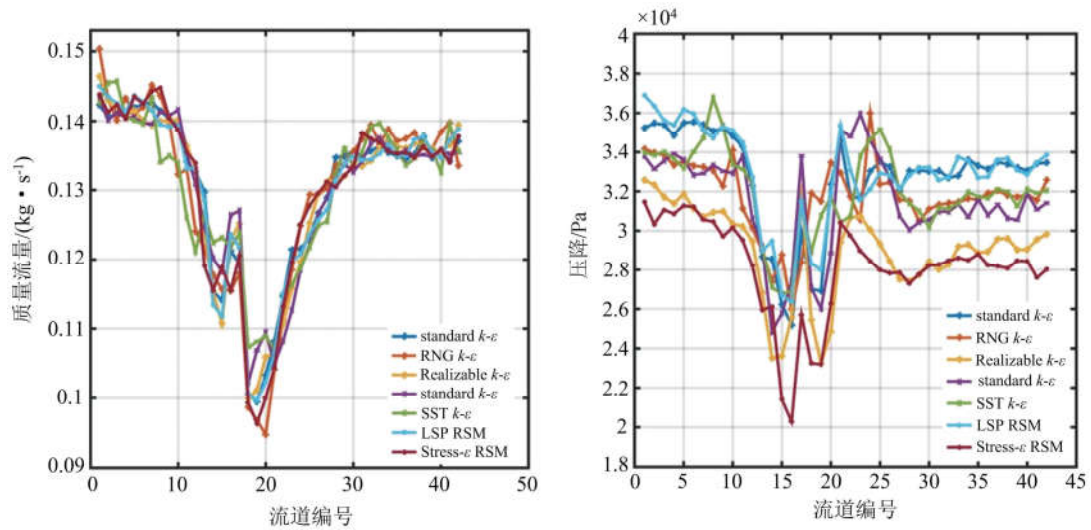


图 6 各模型下第一壁的质量流量(左)及压降(右)分布

Fig.6 Mass flow rate (left) and pressure drop (right) distributions in FW for different turbulence models

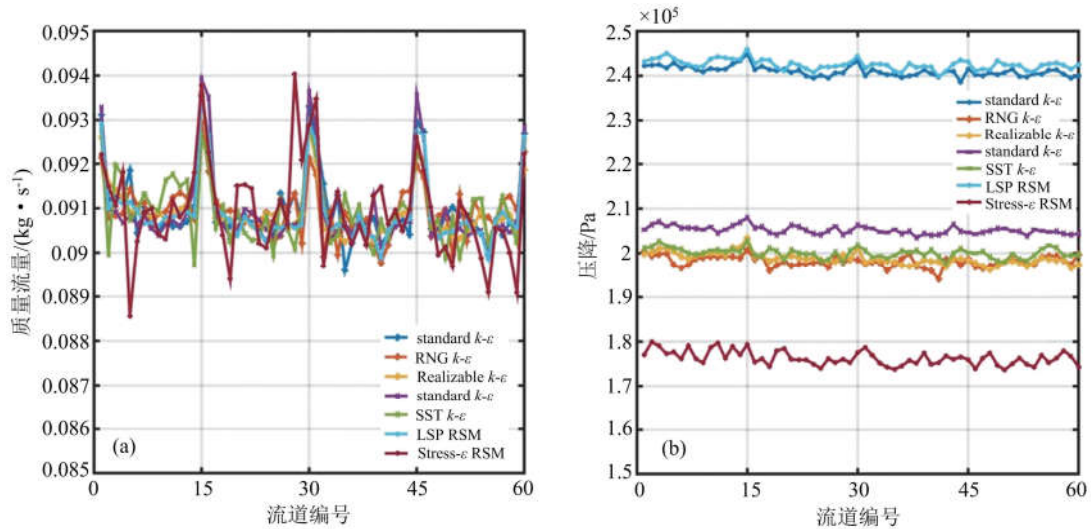


图 7 各模型下冷却板的质量流量(左)及压降(右)分布

Fig.7 Mass flow rate (left) and pressure drop (right) distributions in CPs for different turbulence models

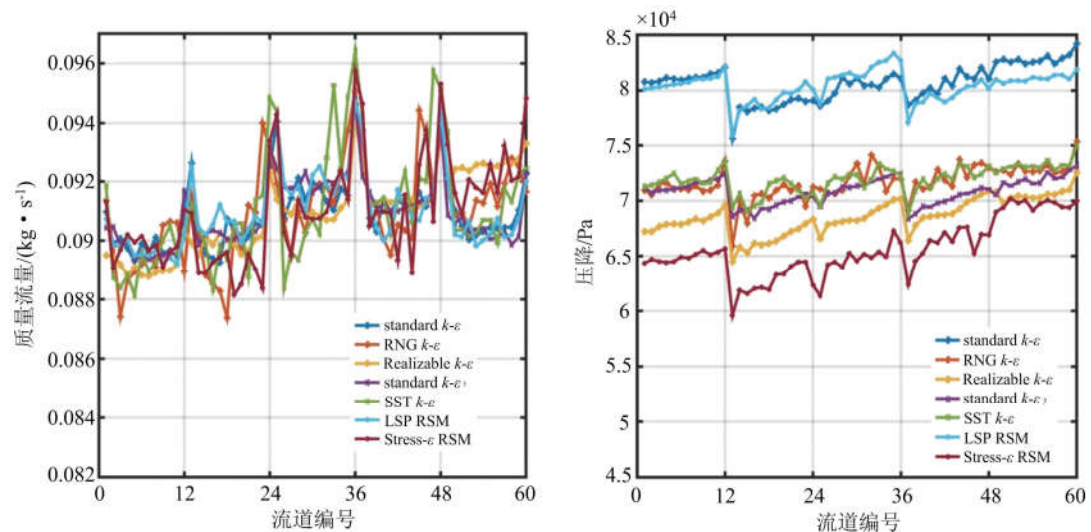


图 8 各模型分隔板/侧板的质量流量(左)及压降(右)分布

Fig.8 Mass flow rate (left) and pressure drop (right) distributions in SPs & SWs for different turbulence models

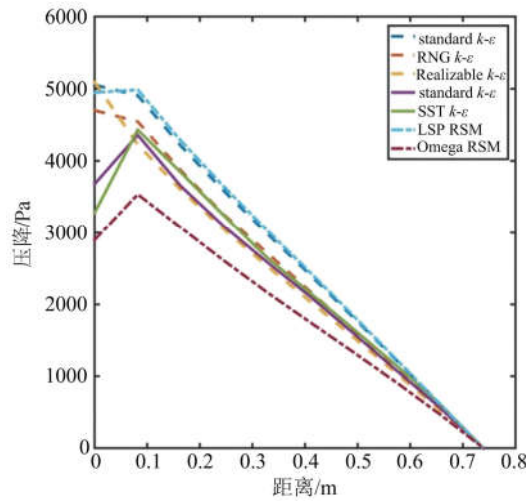


图 9 第一壁单根流道压强沿流向的变化

Fig.9 Pressure varies along flow direction in a single channel of FW

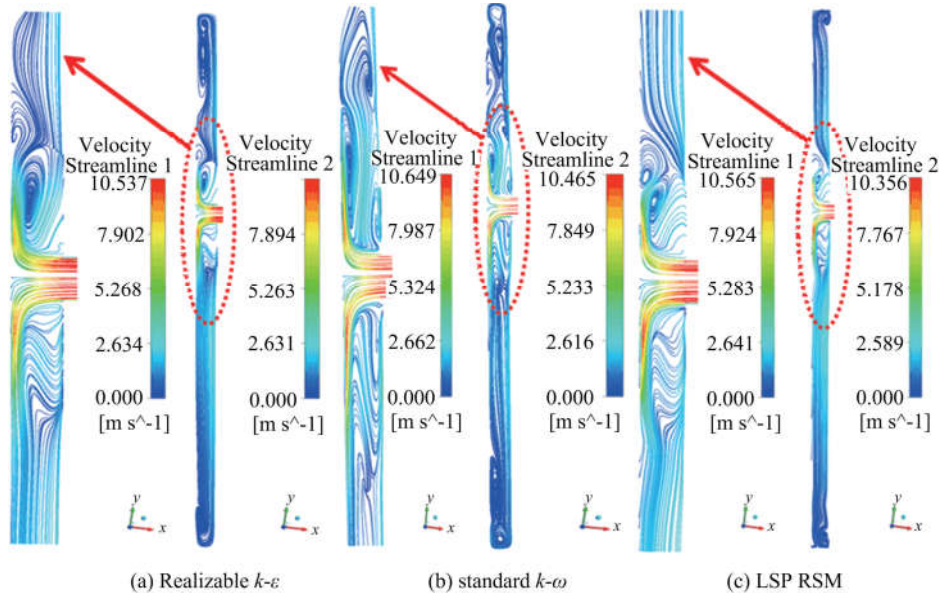


图 10 各湍流模型下第一联箱极向截面上的流线图

Fig.10 Flow streamlines on the poloidal cross-section of manifold1 under various turbulence models

5 结论

本文详细介绍了 CFETR WCCB 包层的概念设计和冷却剂流动方案,进行了详尽的网格独立性分析,重点研究了湍流模型对流量分配与压降计算的影响.结果表明,湍流模型对质量流量计算的影响是可以忽略的,而对压降的计算则表现出较大的影响.进一步的分析表明,联箱结构的复杂性引起流道入口段流动的复杂化,由此不同湍流模型对入口段压降计算有着较大影响,造成各部件压降在不同湍流模型下表现出较明显偏差,同时也说明了在工程应用中对全包层模块进行数值计算的必要性.对全包

层模块设计的水力学验证表明,第一壁中的质量流分布较不均匀,包层设计还需进一步的验证与优化.

参考文献(References)

[1] SATAKE M, YUKI K, HASHIZUME H. Thermohydraulic analysis of high-Prandtl-number fluid in complex duct simulating first wall in fusion reactor [J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85 (2): 234-242.

[2] ILIĆ M, MESSEMER G, ZINN K, et al. Experimental and numerical investigations of heat transfer in the first wall of Helium-Cooled-Pebble-Bed Test Blanket Module—Part 2: Presentation of results

- [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 90: 37-46.
- [3] ZHAO P, PENG Y, LV Y, et al. Analysis of turbulent heat transfer in rectangular flow channels inside the first wall of blanket modules[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(3): 485-492.
- [4] JIANG K, MA X, CHENG X, et al. Numerical studies on the heat transfer and friction characteristics of the first wall inserted with the screw blade for water cooled ceramic breeder blanket of CFETR[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 104: 46-55.
- [5] ZHAO P, DENG W, GE Z, et al. Numerical analysis of heat transfer in the first wall of CFETR WCSB blanket[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 105: 1-7.
- [6] LEE D W, PARK S D, JIN H G, et al. Thermal-hydraulic analysis for conceptual design of Korean HCCR TBM set[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(9): 1571-1575.
- [7] WANG W, LI J, LIU S, et al. Three-dimensional dual-flow fields analysis of the DFLL TBM for ITER[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2012, 87(7): 989-994.
- [8] NI W, QIU S, SU G, et al. Numerical investigation of buoyant effect on flow and heat transfer of Lithium-Lead Eutectic in DFLL-TBM[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2012, 58: 108-115.
- [9] YOON S J, SONG M S, PARK I W, et al. Assessment of COMSOL capability to analyze thermal-hydraulic characteristics of Korean helium cooled test blanket[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(9): 2240-2243.
- [10] JIANG K, MA X, CHENG X, et al. Thermal-hydraulic analysis on the whole module of water cooled ceramic breeder blanket for CFETR [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 112: 81-88.
- [11] CUI S, ZHANG D, CHENG J, et al. Numerical research on the neutronic/thermal-hydraulic/mechanical coupling characteristics of the optimized helium cooled solid breeder blanket for CFETR [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 114: 141-156.
- [12] CHENG J, WU Y, TIAN W, et al. Neutronics and thermo-hydraulic design of supercritical-water cooled solid breeder TBM[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 92: 52-58.
- [13] LIU S, MA X, JIANG K, et al. Conceptual design of the water cooled ceramic breeder blanket for CFETR based on pressurized water cooled reactor technology [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 124: 865-870.
- [14] LAUNDER B E, SPALDING D B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence* [M]. London, UK: Academic Press, 1972.
- [15] ORSZAG S A, YAKHOT V, FLANNERY W S, et al. Renormalization group modeling and turbulence simulations[J]. *Near-Wall Turbulent Flows*, 1993: 1031-1046.
- [16] WILCOX D C. *Turbulence modeling for CFD*[M]. La Cañada, CA: DCW Industries, 1998.
- [17] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.