棒束通道单相流数值方法应用特性

李小畅，郜 冶

（哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院，150001 哈尔滨）

摘 要：为改善压水堆棒束通道单相流与传热的数值计算效率和精度，在不同工况下对无格架四通道及带交混翼格架的5×5棒束通道模型进行数值模拟. 采用高质量壁面函数网格和低雷诺数网格，从传热（Nusselt数）及流动（二次流，湍流强度）两方面对不同湍流模型、近壁面处理和近壁面网格的应用特性进行了综合评估. 分析表明，Nusselt数受湍流模型及近壁面处理的影响均较大，二次流和湍流强度则主要受湍流模型的影响. 雷诺应力模型（RSM）相比于两方程涡黏模型能更准确地预测无格架通道中的二次流，但在格架下游二者无明显差异. 所有模型中只有SST $k-\omega$ 模型结合不同近壁面网格均表现良好. 工程计算中使用SST模型加壁面函数网格的方法能同时保证计算效率和精度，数值研究则推荐采用SST模型加低雷诺数网格.

关键词：压水堆；棒束通道；湍流模型；近壁面处理；数值模拟

中图分类号：TL334；TK124 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2013)11－0056－08

Application characteristics of single-phase numerical treatments for rod bundle

LI Xiaochang, GAO Ye

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: To improve the efficiency and accuracy of numerical simulation of single-phase flow and heat transfer in Pressurized Water Reactor (PWR) rod bundle, simulations were performed in two computational models of four-subchannel without spacer and 5 × 5 rod bundle with a mixing vane spacer under different working conditions. The different turbulence models, near-wall treatments and near-wall mesh generation strategies were comprehensively evaluated from two aspects of heat transfer (Nusselt number) and fluid flow (Secondary flow, turbulence intensity) by using high quality wall-function mesh and low-Reynolds-number mesh. Analysis shows that the numerical results of Nusselt number were seriously affected by both of the turbulence model and near-wall treatment, while secondary flow and turbulence intensity were mainly influenced by turbulence model. The Reynolds Stress Model (RSM) could predict the secondary flow field in bare rod bundle better than eddy viscosity models, and there was no significant difference for calculating the secondary flow field downstream of the mixing vane spacer grid. Among all turbulence models, only the SST $k-\omega$ model behaved well even combined with different type of near-wall meshes. Using the SST model with wall-function mesh for engineering computation can provide both the efficiency and accuracy of simulation, and the SST model combined with low-Reynolds-number mesh is recommended for numerical research.

Key words: pressurized water reactor; rod bundles; turbulence model; near-wall treatments; numerical simulation

随着计算流体力学（CFD）和计算机硬件的高速发展，CFD技术由于其经济性好、周期短、精细度高而越来越多的应用于压水堆热工水力研究和设计中. Navarro等[1]采用CFD方法研究了5×5棒束通道及格架下游流场特性. Conner等[2]基于燃料棒束的单相流实验对CFD方法进行了验证. Chun等[3]对一个4通道模型进行了一系列CFD计算，分析了格架交混翼强化换热的效果. Karoutas等[4]将格架附近速度场的数值解与激光多普勒测速仪

收稿日期：2012－10－23.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（10972063）；中央高校基本科研业务费专项资金自由探索项目（HEUCF130204）.
作者简介：李小畅（1986—），男，博士研究生；
郜 冶（1953—），男，教授，博士生导师.
通信作者：李小畅，171703280. student@ sina. com.

(LDV)的实验结果进行对比分析,证明了 CFD 方法的有效性. 日本三菱重工和美国西屋电力公司均借助 CFD 商业软件设计了新型定位格架[5-6]. 然而,早期棒束通道的数值模拟大多没经过讨论而直接选用某一种湍流模型进行计算,直到近几年才有了少量针对不同湍流模型应用特性的研究. Baglietto 等[7]研究证明了 RSM 模型对稠密栅格有较好的数值预测精度. Hùzi[8]针对无格架棒束通道,证明了 RSM 模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型能更好地预测二次流大小. Ferng 等[9]从对流换热的角度评估了不同湍流模型及近壁面处理方式的计算效果.

本文主要目的则是从传热及流动两方面综合评估不同湍流模型、近壁面处理方式及近壁面网格划分策略在无格架棒束通道和带交混翼格架棒束通道中的应用特性,为今后堆芯的热工水力数值研究提供较全面的参考.

1　数值方法概述

1.1　湍流模型

基于 Boussinesq 假设的两方程涡黏模型用平均速度梯度来表示雷诺应力项,同时引进了未知量湍流黏性系数 μ_t, 模型的任务就是给出该系数的计算方法. 选择 6 个典型两方程涡黏模型作为研究对象:标准 $k-\varepsilon$ 模型、重整化群 $k-\varepsilon$ 模型、可实现 $k-\varepsilon$ 模型、Abid 低雷诺数模型[10]、标准 $k-\omega$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型. 各模型特点(见表 1).

表 1　湍流模型描述

模型	简称	描述
标准 $k-\varepsilon$ 模型	SKE	求解湍流动能 k 及湍流耗散率 ε 的输运方程;忽略分子黏性影响;假设流动为充分发展的湍流.
重整化群 $k-\varepsilon$ 模型	RNG	与 SKE 模型类似,但 ε 方程中增加了一个源项以求解快速应变流问题;考虑了漩涡对湍流的影响;增加了湍流普朗特数的解析式.
Realizable $k-\varepsilon$ 模型	RKE	与 SKE 模型类似,但 μ_t 计算式中 C_μ 不再为常数;ε 方程不再源于简单的物理构造,而是根据涡量脉动均方根的精确方程衍生而来.
Abid 低雷诺数模型	LRM	基于 SKE 模型,但在近壁面区域考虑了湍流脉动各向异性、湍流雷诺数及分子扩散系数的影响,无需借助壁面函数.
标准 $k-\omega$ 模型	SKW	求解湍流动能 k 及湍流涡频率 ω 的输运方程,同时适用于近壁面及湍流核心区.
SST $k-\omega$ 模型	SST	与 SKW 模型类似,但该模型通过混合函数整合了 SKE 和 SKW 模型,适用于近壁面及湍流核心区;μ_t 的计算考虑了湍流剪切应力输运的影响;模型系数与 SKW 有所不同.
雷诺应力模型	RSM	直接求解雷诺应力各分量的输运方程,不受各向同性限制,但计算量远大于两方程涡黏模型.

1.2　近壁面处理

近壁面处理考虑有代表性的标准壁面函数和加强型壁面处理. 标准壁面函数基于 Launder 和 Spalding 的壁面法则[11],用一组半经验公式将近壁面与湍流核心区联系起来,温度则根据雷诺相似求解. 加强型壁面处理依赖于近壁面网格精细程度,当网格足够密时采用双层模型,较粗糙则采用加强型壁面函数. 双层模型是一种低雷诺数求解方式,根据壁面法向高度及湍流雷诺数将近壁面区域划分成黏性影响区及完全湍流区,黏性影响区采用 Wolfstein 单方程模型,完全湍流区则使用高雷诺数模型[12]. 加强型壁面函数采用 Kader 提出的混合函数将近壁面层流区及湍流区整合成一个单一的壁面法则进行求解[13]. 表 2 给出了两种近壁面处理方法的特点. $k-\omega$ 系列模型是典型的低雷诺数模型,湍流涡频率 ω 在近壁面区域存在代数解析式,因而无需借助其他模型.

带交混翼格架的棒束通道结构复杂,交混翼下游出现较强漩涡运动及二次流,计算时需要巨大网格单元数,而不同湍流模型及近壁面处理方式特性各异,对网格质量及数量的要求有所不同,因此寻求既精确又高效的数值方法意义重大.

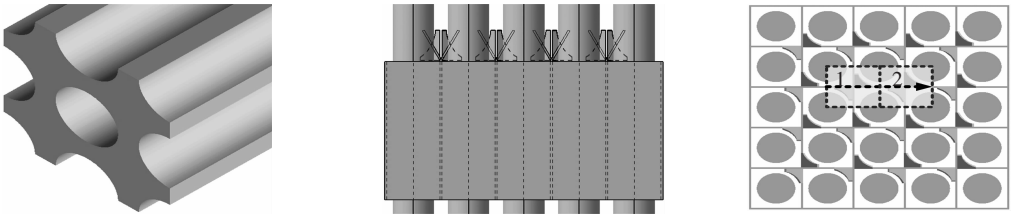
表 2　近壁面处理方法及特点

近壁面处理方法	简称	近壁面网格要求	特点
标准壁面函数	SWF	第一层网格质心包含对数律成立的区域即可,$30 < y^+ < 60$.	网格数量少,稳定性好,计算量小,高雷诺数下精度较好,但不适用于低雷诺数、高压力梯度及强体积力流动问题.
加强型壁面处理	EWT	近壁面需布置约 10 层边界层网格,$y^+ \approx 1$.	对低雷诺数和复杂流动求解较精确,但网格密,数量大,与 RSM 模型结合时对网格质量要求高,计算时间长,不易收敛.

2 数值模拟

2.1 几何及边界条件

图 1 为无格架四通道模型和带交混翼格架的 5 ×5 棒束通道模型的正视图及俯视图. 四通道模型包含两个节径比（P/D）分别为 1.38 和 1.33 的几何模型，水力直径分别为 14.1 mm 和 12.01 mm，加热段长 500 mm. 5 ×5 棒束通道模型燃料棒直径 D 为 9.53 mm，栅距 P 为 12.7 mm，轴向高度为 660 mm，其中格架上游 110 mm，下游 510 mm，格架高 40 mm，水力直径 10.94 mm.



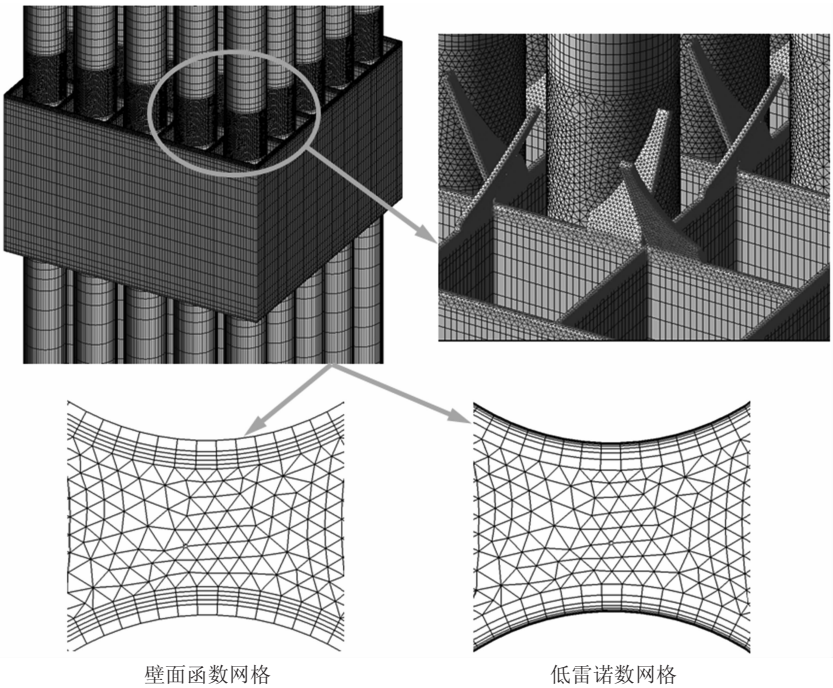
(a)无格架四通道模型　(b)带交混翼格架的 5×5 棒束通道模型正视图　(c)带交混翼格架的 5×5 棒束通道模型俯视图

图 1　几何模型

四通道模型系统压力 0.101 MPa，燃料棒壁面热流量 50.7 kW/m^2，入口温度 293.15 K，节径比为 1.38 和 1.33 的几何模型雷诺数分别为10 000和 76 400，模型中 4 个侧面设置为两组周期性边界，以便最大程度考虑周围流体的影响. 5 ×5棒束通道模型系统压力 0.483 MPa，燃料棒壁面热流量 707 kW/m^2，入口速度 6.79 m/s，入口温度 26.67 ℃. 所有模型中固体壁面均为无滑移边界条件. 冷却剂物性参数根据 IAPWS – IF97 关系式确定，且密度、定压比热容、导热系数、分子黏性系数均随温度而变化. 尽管压水堆实际运行工况下的典型系统压力维持在 15.8 MPa 左右，但流场及温度场特性主要受几何结构及雷诺数影响，因而低压工况既能降低研究成本又能达到研究目的.

2.2 网格及计算过程

根据标准壁面函数及加强型壁面处理对近壁面网格的要求，将上述各几何结构划分成两种类型的网格：壁面函数网格和低雷诺数网格. 壁面函数网格较粗糙，壁面第一层网格质心包含对数律成立的区域，用于标准壁面函数；低雷诺数网格较精细，包含若干层边界层网格，第一层网格质心位于黏性底层内，用于加强型壁面处理和 Abid 低雷诺数模型，如图 2 所示. 四通道模型采用全六面体结构化网格，5 ×5棒束通道模型交混翼部分采用四面体网格，其他区域采用三棱柱网格，这样可实现混合网格之间的无缝连接. 所有网格模型均通过网格敏感性分析，压降偏差控制在 3% 以内，确保数值结果与网格尺寸无关，最终各模型网格数据如表 3 所示.



壁面函数网格　低雷诺数网格

图 2　网格模型

表 3　计算网格数据

几何模型	网格模型	网格数/万	y^+（实算值）
四通道，P/D = 1.38	壁面函数网格	23.04	30.2 ~ 33.5
	低雷诺数网格	47.25	0.85 ~ 1.43
四通道，P/D = 1.33	壁面函数网格	28	29.6 ~ 38.6
	低雷诺数网格	49	0.92 ~ 1.39
5 ×5 棒束	壁面函数网格	1 287	31.4 ~ 42.5
	低雷诺数网格	1 562	0.89 ~ 1.81

数值计算基于稳态 RANS 方程组，对上述 6 套网格模型分别采用不同的湍流模型（SKE、RNG、RKE、SKW、SST、RSM）及对应的近壁面处理方式（SWF、EWT），共包含 39 个计算工况. 离散方程组的求解采用速度 - 压力耦合的 SIMPLE 算法. 初步计算时，动量、湍流动能和湍流耗散率的空间离散采用一阶迎风格式，计算平稳后改为二阶，压力项和能量项则始终采用二阶格式，以提高计算精度. 四通道模型由于网格数相对较少，采用单机四节点进行计算；带交混翼格架的 5 ×5 棒束通道模型的计算则基于曙光高性能大型并行计算集群，开启 128 个主频为 2.4 GHz 的并行节点，每个计算工况运行约 12 h 后质量残差收敛到 10^{-4} 量级，动量、湍流动能及湍流耗散率残差收敛到 10^{-7} 量级，能量残差收敛到 10^{-8} 量级，进出口质量差为 10^{-5} 量级.

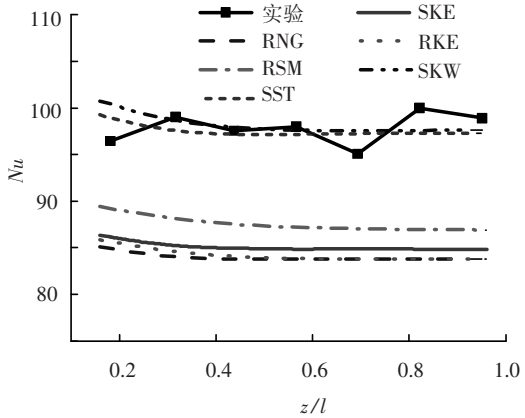
3　结果分析

3.1　传热分析

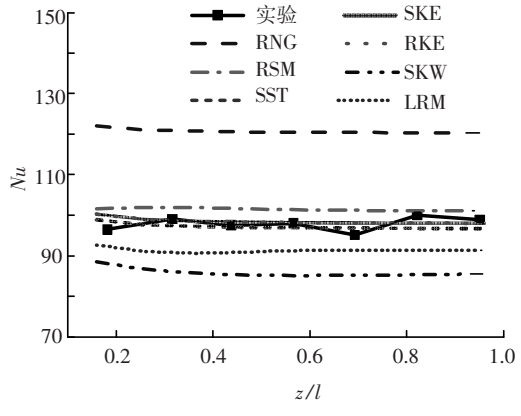
传热分析基于无格架四通道模型 Nusselt 数沿轴向的分布，Nusselt 数定义如下：

$$Nu = h_z D_h / \lambda.$$

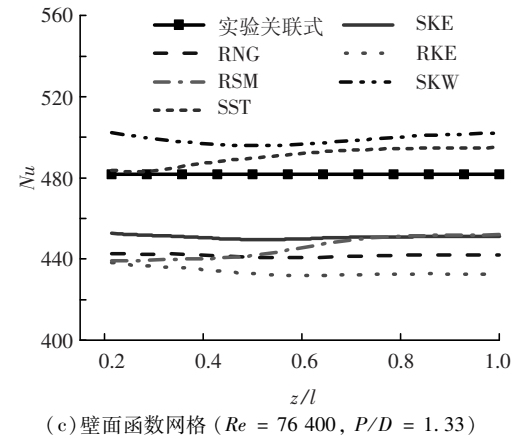
式中：h_z 为当地对流换热系数，D_h 为水力直径，λ 为冷却剂导热系数. 将充分发展的 Nusselt 数计算结果与实验数据及实验关联式进行对比分析（见图 3）. 图中 z/l 为加热段轴向坐标与加热段总长之比，实验数据及实验关联式均来自文献[14]. 对于 P/D = 1.33，Re = 76 400 的工况，文献[14]中提供的关联式计算结果为 481.8，而 Wesiman 关联式[15]计算结果为 491.3，相差2%.



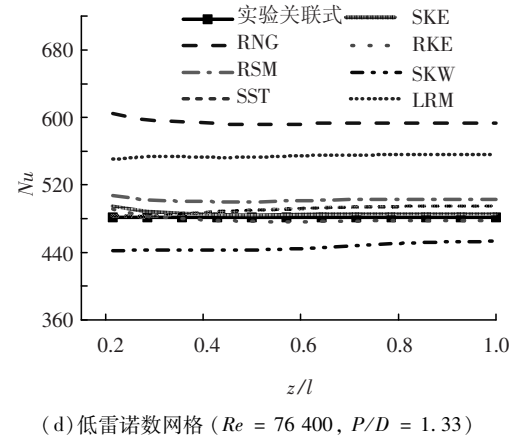
（a）壁面函数网格（Re = 10 000，P/D = 1.38）



（b）低雷诺数网格（Re = 10 000，P/D = 1.38）



（c）壁面函数网格（Re = 76 400，P/D = 1.33）



（d）低雷诺数网格（Re = 76 400，P/D = 1.33）

图 3　四通道模型 Nusselt 数轴向分布

从图 3 可以看出，对于 P/D = 1.38、Re = 10 000 的工况，$k-\varepsilon$ 系列和 RSM 模型结合标准壁面函数的预测值均偏低，而 SKW 和 SST 模型的计算结果更接近实验值. 对于较粗糙的壁面函数网格，由于 SKW 和 SST 模型采用了相同的近壁面处理方法，而 $k-\varepsilon$ 系列和 RSM 模型采用的标准壁面函数法，因此可以推断上述差异主要由近壁面处理方式所造成. 对于低雷诺数网格，SKE、RKE、

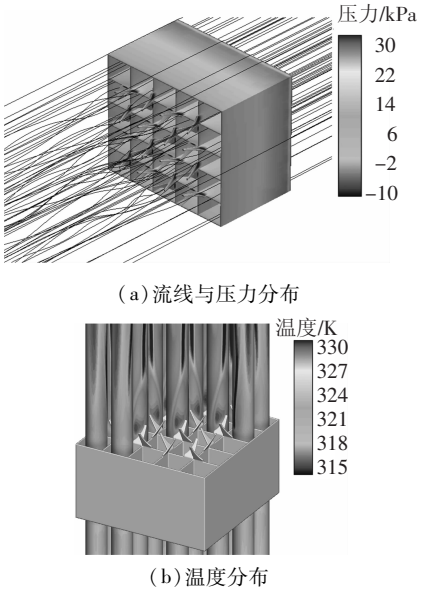
RSM 及 SST 模型的计算结果均与实验数据吻合较好,而 Abid 低雷诺数模型和 SKW 模型的预测值偏低,RNG 模型则偏高. 对于 $P/D = 1.33$、$Re = 76\,400$ 的高雷诺数工况,通过与实验关联式的对比可以得出类似的结论,区别在于 Abid 低雷诺数模型的计算值偏高. 由于 Abid 低雷诺数模型对近壁面网格要求较为苛刻,其近壁面需要设置比双层模型更多层数的边界层网格来求解过渡区域,且对壁面第一层网格高度非常敏感,使得网格质量和数量均难以控制,尤其对于带交混翼格架的棒束通道来说,其结构复杂且网格数量巨大,因而不推荐使用.

从对流换热的角度来说,湍流模型和近壁面处理方式对数值结果均有较大影响. 所有湍流模型中,只有 SST 模型在两种类型的近壁面网格下均能取得较好计算结果. 从 $k-\varepsilon$ 系列(不包括 RNG)和 RSM 模型的计算结果来看,加强型壁面处理法要优于标准壁面函数法.

3.2 流动分析

流动分析基于横向速度分布、二次流场及湍流强度,通过与相关实验数据进行对比分析来评估各数值方法的应用特性.

图 4 为格架及其下游附近流线、压力及温度分布,取自 SST 模型结合低雷诺数网格的计算结果. 从图中可以看出,由于交混翼的存在,格架下游流线变得紊乱,冷却剂横向交混加剧,压降明显提升,燃料棒壁面温度分布相比于格架上游出现明显的周向差异性. 格架下游的这些特征为研究不同湍流模型及近壁面处理方法的应用特性提供了基础.



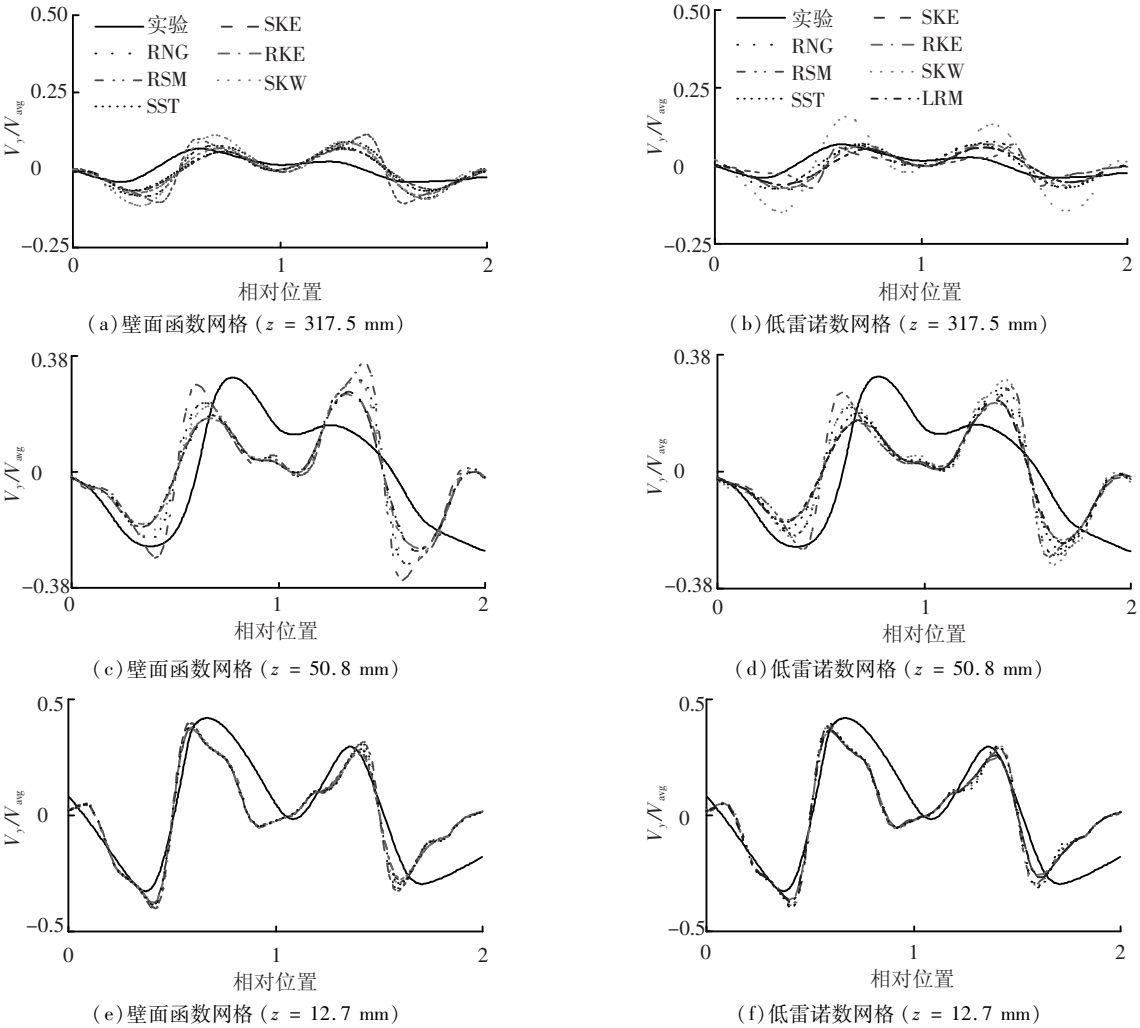
(a)流线与压力分布

(b)温度分布

图 4 交混翼格架附近流线、压力及温度分布

图 5 为格架下游横向速度与实验数据的对比. 相对位置表示图 1(c)所示路径上坐标与栅距 P 的比值,V_y 为垂直于路径方向的横向速度,V_{avg} 为平均轴向速度,z 为格架下游位置. 从图中可以看出,各湍流模型的计算结果在定性和定量上均能一定程度地吻合实验数据. 在离格架较近的下游区域,各湍流模型的计算结果几乎完全一致,而远离格架的区域则表现出一定的差异性,对于壁面函数网格,RSM 模型的预测值明显偏大;对于低雷诺数网格,SKW 模型的预测值则明显偏大. 总体而言,难以从横向速度的角度评估不同湍流模型和近壁面处理方式的优劣.

图 6 为 SST 模型结合低雷诺数网格计算的格架下游不同截面二次流场及轴向涡量分布与粒子成像测速技术(PIV)测量结果[16]的对比,结果取自图 1(c)所示子通道 2. 由于文献[16]中的实验入口速度与本文有所不同,因此图中没有给出涡量的具体大小,但从二次流结构及涡量分布情况来看,CFD 能较好地预测格架下游的复杂旋流运动. 图 7 对比了不同湍流模型基于低雷诺数网格计算的格架下游二次流场及湍流强度分布. 选取图 1(c)所示子通道 1 中距格架下游分别为 $4D_h$ 和 $9D_h$ 的两个截面作为分析对象. 从图中可以看出,各湍流模型计算的不同截面二次流场基本一致,湍流强度分布则有所不同. 对于离格架较近的截面($4D_h$),SST 模型预测到通道中心湍流强度最大,而 RNG、RKE 和 RSM 模型计算的湍流强度在通道中心出现一个局部较低值. 根据相关文献[17-18]的实验结果,由于交混翼的存在,离格架较近的下游区域湍流强度最大值出现在通道中心,随着流体远离格架,通道中心湍流强度逐渐降低,最大值出现在壁面附近. 其中文献[17]测得格架下游 $4D_h$ 处通道中心湍流强度最大,文献[18]中测得格架下游 $9D_h$ 处近壁面区域湍流强度最大. 因此,从计算结果来看,SST 模型要优于 $k-\varepsilon$ 系列和 RSM 模型. 文献[9]认为 SST 模型较好的计算效果源于其在近壁面区域引入了湍流阻尼系数,而文献[19]认为原因在于 SST 模型对近壁面区域湍流黏性系数的计算不依赖于单方程模型(双层模型). 实际上,从本文的计算结果来看,SKW 模型预测到 $4D_h$ 截面中心同样存在一个湍流强度的较低值,而 SKW 和 SST 模型均引入了湍流阻尼系数,且均不依赖于单方程模型. 因此初步推断,SST 模型较好的计算效果得益于其通过混合函数整合了 SKW 模型和 ω 形式的 SKE 模型.

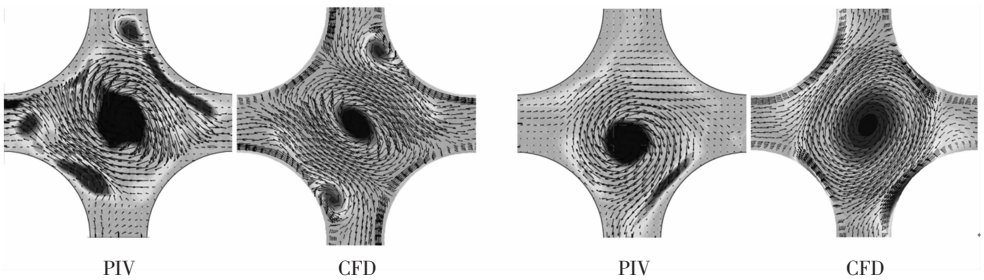


(a)壁面函数网格（z = 317.5 mm）　(b)低雷诺数网格（z = 317.5 mm）

(c)壁面函数网格（z = 50.8 mm）　(d)低雷诺数网格（z = 50.8 mm）

(e)壁面函数网格（z = 12.7 mm）　(f)低雷诺数网格（z = 12.7 mm）

图 5　格架下游横向速度分布



(a)格架下游 1.5D_h　(b)格架下游 9D_h

图 6　不同截面二次流场及轴向涡量分布与实验结果的对比

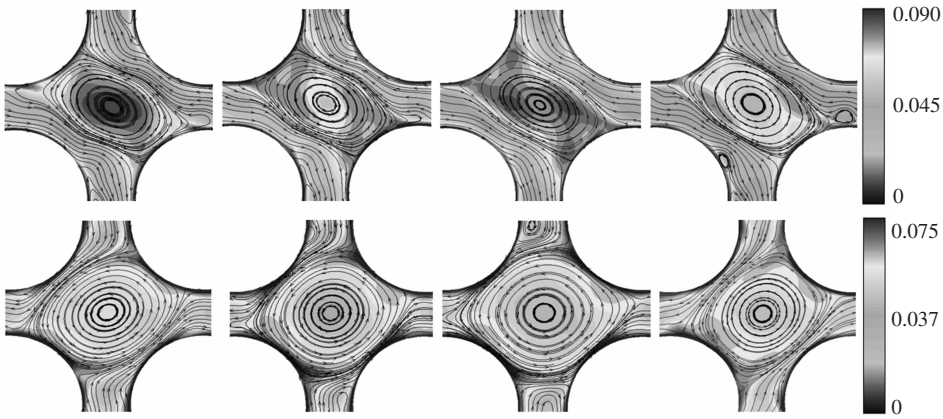


图 7　格架下游二次流场及湍流强度分布

过去,不少学者从无格架棒束通道中二次流场的角度出发,研究认为 RSM 模型比两方程涡黏模型更适合棒束通道数值计算[8, 20]. 图 8 给出了无格架四通道模型子通道中二次流场及径向速度分布. 从图中可以看出,RSM 模型计算的径向速度大小与两方程涡黏模型相差两个数量级. 同时,RSM 模型的计算结果能明显观察到 8 个二次流涡,而所有两方程模型完全预测不到任何涡的存在. 事实上,这是由于无格架棒束通道中的二次流是由不同方向的雷诺正应力引起的,而带交混翼棒束通道中的二次流主要由几何结构所造成. 众所周知,基于 Boussinesq 假设的涡黏模型具有各向同性的特点,无法正确表达雷诺正应力,因此预测不到无格架通道中的二次流现象,可作如下简单分析:

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} = 2\mu_t \bar{S}_{ij} - 2/3\rho k\delta_{ij}. \quad (1)$$

式(1)为基于 Boussinesq 假设的线性本构关系式. 式中:μ_t 为湍流黏性系数;u' 为湍流脉动速度;$\bar{u}$ 为雷诺时均速度;k 为湍流动能;δ 为 Kronecker 符号;$\bar{S}_{ij}$ 为变形速率张量. 在不可压流动中,速度场散度为零($\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0$),将式(2)中所有雷诺正应力相加可得 $\sum -\rho\overline{u'_i u'_i} = 2\mu_t \nabla \cdot U + 2\rho k\delta_{ii} = 0 + 2\rho k\delta_{ii}$,而 δ_{ij} 具有各向同性的特点,因此基于 Boussinesq 假设的涡黏模型不能预测由雷诺正应力造成的二次流. 然而,从上述带交混翼格架的棒束通道计算结果来看,RSM 模型计算的二次流场与两方程涡黏模型并无明显差异,可以推断,这是由于由雷诺正应力引起的二次流远小于由几何结构引起的二次流,因此 RSM 模型各向异性的优势没有表现出来. 此外,从 3.1 节中传热分析的结果来看,RSM 模型也没有表现出特别的优势. 这也解释了图 5 所示各湍流模型在离格架较远的下游区域表现出一定差异性的原因. 上述结论说明,从无格架棒束通道二次流场的角度并不能很好地评估不同数值处理方法在棒束通道中的应用特性.

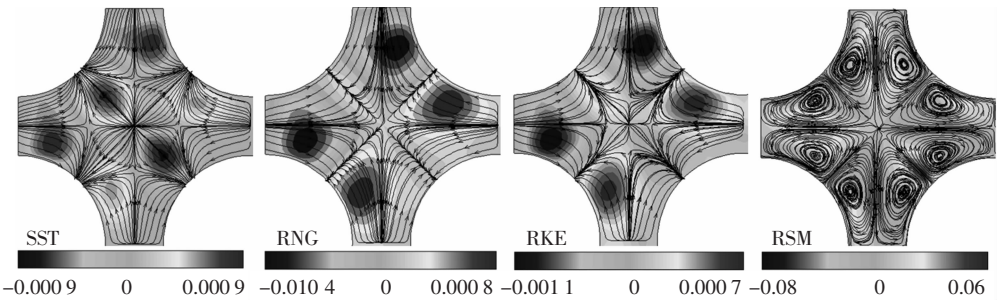


图 8 无格架子通道中二次流场及径向速度分布

4 结 论

1) 湍流模型、近壁面处理方式和近壁面网格对棒束通道中传热及流动的数值计算结果和计算效率影响较大,选取合适的数值处理方法对提高数值计算的可靠性至关重要.

2) 从传热的角度来说,若采用较粗糙的壁面函数网格,$k-\omega$ 系列模型的计算结果明显优于 $k-\varepsilon$ 系列和 RSM 模型;若采用较精细的低雷诺数网格,除了 SKW、RNG 及 Abid 低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型外,其他模型的计算结果均与实验符合良好.

3) 从流动的角度来说,RSM 模型对无格架棒束通道中二次流的预测更为准确,而对于带交混翼格架的棒束通道,两方程涡黏模型与 RSM 模型计算的二次流场并无明显差异. 此外,从格架下游湍流强度的分布情况来看,SST 模型要优于 $k-\varepsilon$ 系列和 RSM 模型. 初步推断,SST 模型较好的计算结果得益于该模型通过混合函数整合了 SKW 模型和 ω 形式的 SKE 模型,其具体影响方式有待进一步研究.

4) 综合传热及流动的分析结果,只有 SST 模型基于两种类型的近壁面网格均能取得较好的计算结果. 因此,对于工程问题,推荐使用 SST 模型结合较粗糙的壁面函数网格,这样既可以较准确地预测所关心的参数又能提高计算效率,而对于棒束通道中流动与传热的数值研究,则应考虑 SST 模型结合低雷诺数网格的方法,以便获取更为精细的流动及传热细节.

参考文献

[1] 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, 50(3): 1 – 7.

[2] CONNER M E, BAGLIETTO E, ELMAHDI A M. CFD methodology and validation for single-phase flow in PWR fuel assemblies [J]. Nuclear Engineering and

Design, 2009, 240(9): 2088 – 2095.

[3] IN W K, CHUN T H, SHIN C H, *et al.* Numerical computation of heat transfer enhancement of a PWR rod bundle with mixing vane spacers [J]. Nuclear Technology, 2008, 161(1): 69 – 79.

[4] KAROUTAS C Y, GU C Y, SCHOLIN B. 3 – D flow analyses for design of nuclear fuel spacer [C]// Proceedings of the Seventh International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics. New York: American Nuclear Society, 1995: 3153 – 3174.

[5] IKEDA K, HOSHI M. Development of Mitsubishi high thermal performance grid-CFD applicability for thermal hydraulic design [J]. JSME, 2002, 45 (3): 586 – 591.

[6] LIU B, DZODZO M B, PARAMONOV D V, *et al.* Application of CFD in the design process for PWR spacer grid mixing vanes[C]//Proceedings of the 2004 International Meeting on LWR Fuel Performance. Orland: American Nuclear Society, 2004: 19 – 22.

[7] BAGLIETTO E, NINOKATA H. A turbulence model study for simulating flow inside tight lattice rod bundles [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(7): 773 – 784.

[8] HAZI G. On turbulence models for rod bundle flow computations [J]. Annals of Nuclear Energy, 2005, 32(7): 755 – 761.

[9] LIU C C, FERNG Y M, SHIH C K. CFD evaluation of turbulence models for flow simulation of the fuel rod bundle with a spacer assembly [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 40(1): 389 – 396.

[10] ABID R. Evaluation of two-equation turbulence models for predicting transitional flows [J]. International Journal of Engineering Science, 1993, 31 (6): 831 – 840.

[11] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulence flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(1): 269 – 289.

[12] WOLFSHTEIN M. The velocity and temperature distribution of one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient [J]. International Journal of Heat Mass and Transfer, 1969, 12 (3): 301 – 318.

[13] KADER B. Temperature and concentration profiles in fully turbulence boundary layers [J]. International Journal of Heat Mass and Transfer, 1981, 24 (9): 1541 – 1544.

[14] ELGENK M S, SU B, GUO Z X. Experimental studies of forced, combined and natural convection of water in vertical nine-rod bundles with a square lattice [J]. International Journal of Heat Mass and Transfer, 1993, 36(9): 2359 – 2374.

[15] WEISMAN J. Heat transfer to water flowing parallel to tube bundles [J]. Nuclear Engineering and Design, 1959, 6(1): 78 – 79.

[16] MCCLUSKY H L, HOLLOWAY M V, CONOVER T A, *et al.* Mapping of the lateral flow field in typical subchannels of support grid with vanes [J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(6): 987 – 996.

[17] CHANG S K, MOON S K, BAEK W P. Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(3): 600 – 609.

[18] ABDELGHANY M, EICHHORN R. Measurements of wall shear stress in axial flow in a square lattice rectangular rod bundle [J]. Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(2): 166 – 172.

[19] HOLLOWAY M V, BEASLEY D E. Investigation of swirling flow in rod bundle subchannels using computational fluid dynamics [C]//Proceedings of ICONE14. Miami: ASME, 2006: 1 – 11.

[20] 曾和仪，郭赟. 湍流模型在堆芯热工水力性能分析中的应用[J]. 原子能科学技术，2011，45(1)：20 – 24.

（编辑　杨　波）