

文章编号:2095-6134(2018)02-0200-09

压水堆燃料棒束新型定位格架的数值分析*

梁好玉, 武俊梅[†]

(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

(2017 年 4 月 18 日收稿; 2017 年 8 月 15 日收修改稿)

Liang H Y, Wu J M. Numerical analysis of a novel spacer grid in rod bundles of PWR[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(2):200-208.

摘要 定位格架是反应堆燃料组件中较为重要的部分,带搅混叶片的 AFA-2G/3G 定位格架具有良好的支撑燃料棒束和强化棒束通道换热的性能,但结构复杂,加工难度大。设计一种制造工艺相对简单的带有矩形涡旋发生器(longitudinal vortex generators, LVGs)的新型定位格架,研究当此种定位格架用于 5×5 的燃料棒束时的热工水力特性。主要采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和增强型壁面函数处理方法,分析雷诺数和 LVGs 攻角对流体换热的影响。结果表明:由 LVGs 产生的二次流扩散到下游区域并对燃料棒的边界层产生扰动,增强换热; 60° 和 45° 攻角的矩形涡旋发生器(RLVGs)的换热效果几乎相同,但 60° 攻角 RLVGs 的阻力和压降较大。本研究对这种新型燃料组件的工程设计具有一定的参考价值。

关键词 燃料组件;定位格架;涡旋发生器;CFD

中图分类号:TL421+.1 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2018.02.008

Numerical analysis of a novel spacer grid in rod bundles of PWR

LIANG Haoyu, WU Junmei

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Spacer grid is an important part of fuel assembly in reactor. The AFA-2G/3G spacer with mixing vane supports rod bundles well and enhances the heat transfer, but it has a complex structure and difficult processing. A novel spacer grid with the rectangular longitudinal vortex generators (RLVGs) is designed to improve thermal-hydraulic characteristics of fuel assembly. Based on the standard $k-\varepsilon$ model with the enhanced wall treatment, a three-dimensional numerical simulation of the novel spacer grid in the channel of PWR fuel rods is presented. The effects of Reynolds number and attack angle are investigated. Numerical results show that the second flow generated by LVGs spreads to the downstream region of spacer grid and improves the heat transfer. The spacer grids with RLVGs with attack angles of 60° and 45° result in almost equal heat transfer performances. However, the spacer grid with RLVGs with attack angle of 60° brings about more pressure drop in comparison with that of the 45° case. The present research on new fuel assembly has certain potential value for the engineering design.

* 国家自然科学基金(51336006)资助

[†] 通信作者, E-mail: wjmxjtu@mail.xjtu.edu.cn

Keywords fuel assembly; spacer grid; longitudinal vortex generator; CFD

燃料组件的热工水力特性很大程度上影响着核电厂的安全和经济效益。定位格架是组件中较为重要的部分,对燃料棒起机械支撑的作用,可减少燃料棒由流体流动引起的棒束振动。另外,格架还能使流体在通道内产生回旋流,提高燃料组件的热工水力性能。根据压水堆中燃料棒束通道内定位格架的结构和换热特性,结合目前涡旋发生器的发展情况,本文根据现有定位格架的结构,提出一种带有矩形涡旋发生器的新型定位格架。此种新型定位格架与原格架相比,省去了复杂的加工工艺,降低了制造成本,并能改善燃料棒的冷却效果,保证燃料组件具有良好的热工水力特性。

定位格架叶片的设计方案很大程度上影响着通道内的湍流强度和流型,目前对燃料组件中定位格架的研究大部分都集中在原有的分离式叶片。Holloway 等^[1]通过实验研究带有分离式叶片的定位格架,发现在定位格架下游 10 倍水力直径范围内的换热特性都有所增强。Han 等^[2]设计一种新型串联分布叶片,并通过实验计算 6×6 管束在截面位置的流场,发现设计的叶片比原有的分离型叶片产生的涡流延伸得更远。随着 CFD (computational fluid dynamics) 的快速发展,也有很多人利用 CFD 方法研究定位格架的性能。Nematollahi 和 Nazifi^[3]利用 CFD 方法研究在燃料组件的单个通道内不同叶片配置对流型和格架下游换热效果的影响,结果表明:在工业生产中,随着泵功率的合理增加,分离式叶片明显提高核燃料组件的整体换热效果。Shin 和 Chang^[4]研究带混合叶片的燃料棒束中的临界热流现象,发现混合叶片降低壁面附近区域的空泡份额,并诱导液体流到壁面附近,最后提高了 CHF (critical heat flux density)。Tóth 和 Aszódi^[5]用数值方法研究曾用于 WER-440 (俄国人设计的压水堆) 的燃料组件的单通道内的流场,发现 BSL 雷诺应力模型的 RANS 模型可以很准确地预测到定位格架产生的湍流流动。Zhu 等^[6]研究在棒束中的定位格架对超临界水流动的流动传热影响,详细表述标准定位格架和带有分离叶片定位格架的热工水力特性,结果表明:在高雷诺数条件下,分离叶片定位格架下游的换热性能提高更明显。Tseng 等^[7]利用 CFD 方法研究流体在燃料棒束中的流动和换热特性,结果表明:流动分离使燃料棒壁面附近的

换热恶化,当产生涡旋流动后,涡流会冲击壁面,使换热效果提高。Bieder 等^[8]采用基于 Trio U 程序的大涡模型 (LES) 模拟 5×5 燃料组件中 2 个混合格架间的流动特性,将计算结果与实验数据比较,发现在格架下游 10 倍水力直径长的区域内,通过 LES 和 $k-\varepsilon$ 模型计算得到的平均速度都与实验值吻合。Podila 等^[9]使用 $y+$ 值为 30 的自适应体混合网格,用 ANSYS FLUENT 14.0 的非稳态求解器模拟带有分离式叶片定位格架的 5×5 燃料棒束的换热情况,计算中使用雷诺平均应力模型中的标准 $k-\varepsilon$ 模型,其湍流强度与实验值吻合较好。

和燃料棒束通道中定位格架的搅混叶片一样,在固体表面的涡旋发生器 (vortex generators, VG) 也能对流动产生扰动并诱发涡旋。涡旋发生器的概念最初被提出是为了控制边界层,减少流动损失。Johnson 和 Joubert^[10]曾对 VG 附近的换热情况进行相关研究,纵向涡旋发生器 (longitudinal vortex generator, LVG) 能够产生绕主流方向平行的中心轴旋转的二次流,即纵向涡。纵向涡能够绕流动方向一直盘旋并持续到很远的地方。从 20 世纪 90 年代开始,很多学者都在研究翅片管增强换热的方法,但大部分都是在翅片表面冲压或者增添 LVG 以提高气体侧换热效果。另外,关于 LVGs 对不同管型 (圆管、直管和椭圆管) 换热的影响,主要讨论和研究的方向为平直翅片或其他强化翅片 (如波纹翅片、凹形翅片等) 上的 LVGs 的形状、大小、位置以及它的倾斜角度^[11]。在我们之前的研究工作中^[12],已经将 LVGs 强化传热的本质和机理用场协同原则进行了详细解释。

1 RLVGs 定位格架的结构

图 1 是带有矩形涡旋发生器 (rectangle longitudinal vortex generators, RLVGs) 的 5×5 新型定位格架的结构示意图,此种结构基于 AFA-2G 定位格架而设计。新型定位格架主要是将原格架的曲面型搅混叶片改变为开孔的矩形叶片,通过格架的隔板冲孔翻起而成型,在每个格架单元内都布置一对 RLVG,并且 2 个 RLVG 的倾斜方向相反,可起到固定和机械支撑燃料棒的作用。矩形叶片与定位格架隔板垂直,并与来流方向成一

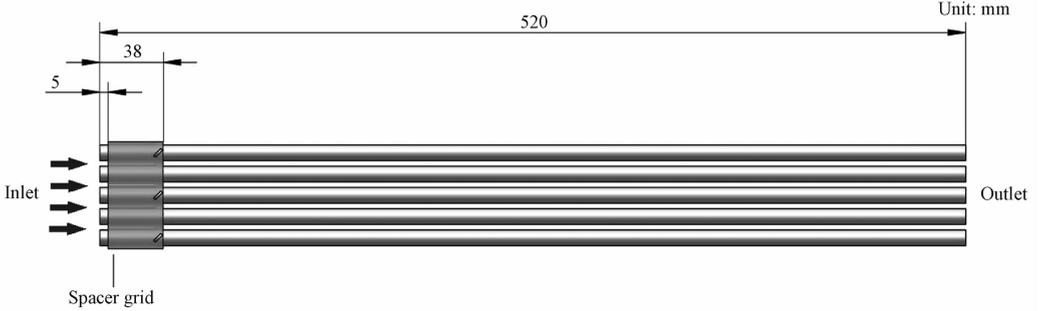
定夹角。当冷却介质流经 RLVG 时,会产生偏移主流方向的速度,发生旋转,从而产生二次流。定位格架的 LVG 中心距格架上边缘的距离为 3 mm,主要几何尺寸如表 1 所示。定位格架中每相邻的 2 个单元的 RLVG 的布置方式不同,是非对称结构。每隔一单元重复布置,形成交错的布置方式。由于燃料棒的存在,定位格架的矩形翼片尺寸受到限制。在本文中,矩形叶片高度和厚度作为固定值,分析比较不同攻角对流体的流动和

换热的影响。

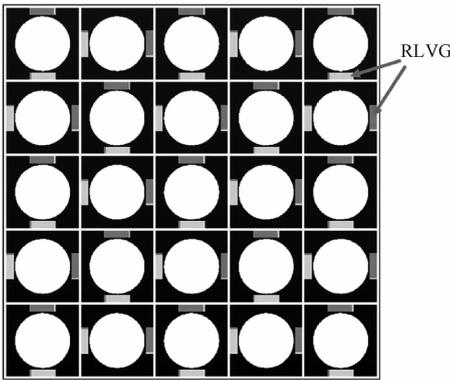
表 1 RLVGs 定位格架的主要尺寸

Table 1 Geometric sizes of the spacer grid with RLVGs

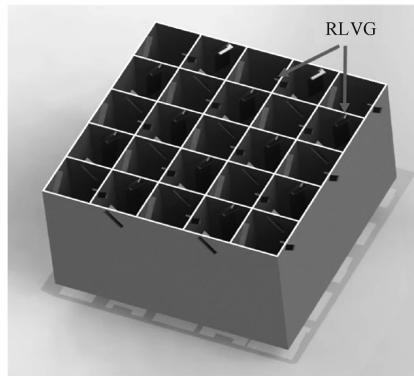
结构	尺寸	结构	尺寸
格架布局	5 × 5	网格间距/mm	12.8
燃料棒直径/mm	9.5	定位格架高/mm	33
间距/mm	64 × 64	格架壁厚/mm	0.43
发生器宽度/mm	1.3	发生器长/mm	6
发生器倾角/(°)	30 45 60	发生器数量/个	50



(a) 带定位格架的5×5燃料棒束侧视图



(b) 带有燃料管束的RLVGs定位格架俯视图



(c) RLVGs定位格架

图 1 燃料棒束定位格架的结构图

Fig.1 Structure diagram of spacer grid

2 数学物理模型

2.1 网格划分

冷却介质从入口流入,被恒定热流密度的燃料棒加热,经定位格架的 RLVGs 作用而产生二次流,最终达到强化换热的目的。由于定位格架尺寸大,矩形翼分布复杂,如果采用整个几何模型作为计算域,生成的网格量将非常庞大,因此可将几何模型进行合理简化。本文选取的计算区域为带有格架和 RLVG,由 4 根 1/4 棒束、4 根 1/2 棒束和 1 根完整棒束围成的冷却介质通道,如图 2 所示。

几何模型长宽比很大,整体结构简单,在定位

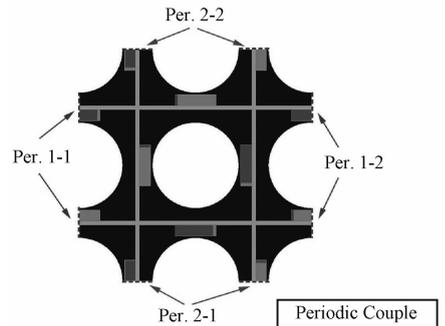


图 2 简化计算域的断面图

Fig.2 Schematic of the computation domain

格架和 RLVGs 局部位置几何较为复杂,采用混合网格对其进行网格划分。在定位格架附近采用非

结构自动体网格, 在其他区域采用结构六面体网格, 如图 3 所示。在两套网格交界处采用 interface 进行数据交换, 冷却剂通道的 8 个侧面

边界设置为周期性边界条件 (如图 2 所示), 允许流体在对应的边界上流入流出。

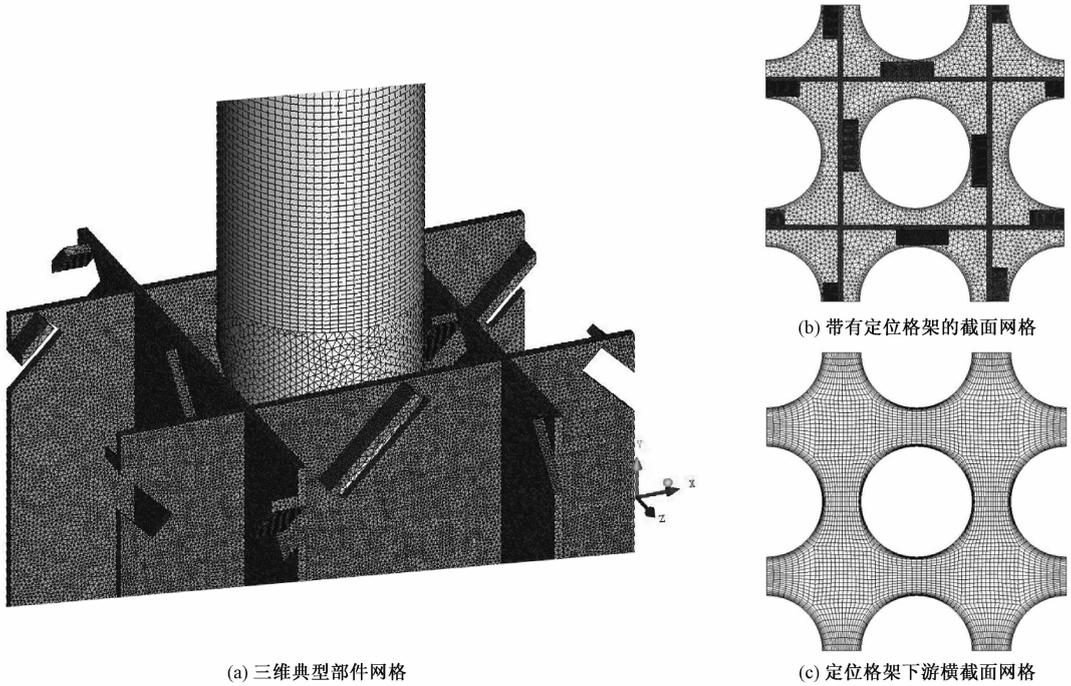


图3 网格划分

Fig.3 Meshing

压水堆中流经燃料棒束外侧进行冷却的介质一般是水, 由于计算过程中水的温升并不高, 因此可认为水的物性为常物性, 密度为 998.2 kg/m^3 , 定压比热为 $4182 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 热导率为 $0.6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 动力黏度为 $0.001003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。进口边界设置为速度入口边界, 出口边界设置为压力出口边界, 燃料棒表面设置为给定热流密度边界条件。为了更好地模拟定位格架两侧流体的热传递, 考虑了定位格架的厚度和材料的导热率, 格架材料为锆-4 合金。定位格架固体部分和流体部分的壁面采用热耦合壁面。具体边界条件见表 2。

$k-\omega$ 模型主要利用 Boussinesq 假设把雷诺压力和平均速度梯度联系起来, 将速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流黏性系数的乘积, 其不足之处是将湍流黏性系数假设为一个各向同性的标量。雷诺应力模型 (RSM) 则是直接建立以雷诺应力为因变量的微分方程, 没有使用 Boussinesq 假设就使方程实现了封闭。realizable $k-\varepsilon$ 、SST $k-\omega$ 和 RSM 这 3 种湍流模型都较适合计算带旋流的复杂流动。Gandhir 和 Hassan^[13] 在计算混合搅混叶片定位格架的 5×5 燃料棒束通道内流体流动特性时, 将 SST $k-\omega$ 模型与 realizable $k-\varepsilon$ 模型结果进行对比, 认为 SST $k-\omega$ 更准确。Liu 等^[14] 利用 CFD 方法计算燃料棒束通道中分离叶片定位格架下游的流场, 结果表明 SST $k-\omega$ 湍流模型要优于 realizable $k-\varepsilon$ 和 RSM 模型, 但是 realizable $k-\varepsilon$ 模型能够给实验者提供更好的壁面处理结果, 尤其是对表面传热的情况。Agbodemegbe 等^[15] 在对燃料棒束通道中定位格架搅混翼计算后认为可实现 $k-\varepsilon$ 双方程模型不能够准确预测由于脉动而产生的轴向速度波动。与 realizable $k-\varepsilon$ 、SST $k-\omega$ 和 RSM 3 种湍流模

表 2 边界条件设置

Table 2 Boundary conditions

边界位置	边界类型	数值
入口	速度/(m/s)	3,5,6,7,8
	温度/K	313.15
出口	压力/atm	1
燃料棒表面	壁面热流密度/(MW/m ²)	0.5

2.2 湍流模型

不同湍流模型有各自的适应性, $k-\varepsilon$ 模型和

型相比,标准 $k-\varepsilon$ 模型更适合高雷诺数的各向同性流动的计算。为了较好预测子通道下游中超临界水的湍流强度变化,文献[6, 9]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行计算,其结果显示良好。为比较不同湍流模型对计算结果的影响,本文选择不同的湍流模型对新型定位格架进行模拟计算,其中标准 $k-\varepsilon$ 模型使用增强型壁面函数来处理壁面,增强型壁面函数属于两层壁面函数法,要求 y^+ 值处于中间值,即大于 1 小于 30,其适应性较强,而 SST $k-\omega$ 模型则要求壁面无量纲长度 $y^+ \sim 1$ 。通过计算,得到入口速度 6 m/s 时使用增强型壁面函数的 $k-\varepsilon$ 模型计算得到的壁面 y^+ 分布,图 4 表示定位格架和附近燃料管壁面的 y^+ 值分布情况,从图中可以看出定位格架和燃料壁面的 y^+ 分布在 10 ~ 28, 满足计算要求。通过 ANSYS fluent 17.0 求解质量守恒、动量守恒、能量守恒等方程^[16], 压力和速度的耦合求解方法采用 SIMPLE 算法,动量方程和能量方程的离散格式为二阶迎风格式。以残差判断各方程的收敛性,当连续方程的残差小于 10^{-3} , 能量方程残差达到 10^{-8} , 其他方程残差小于 10^{-4} 时视为计算收敛。

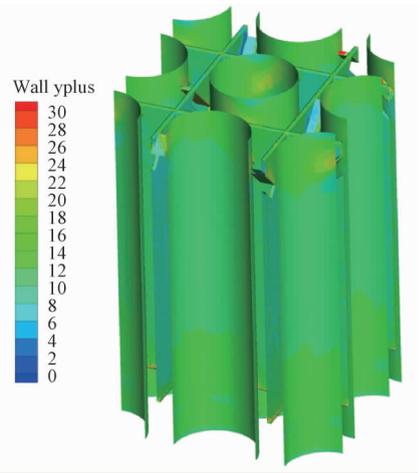


图 4 局部壁面 y^+ 分布 ($Re = 93\ 601$)

Fig. 4 y^+ distribution about local wall

图 5 为采用 4 种不同湍流模型计算得到的壁面温度分布和沿程 Nu 分布,从图中可以看出 SST $k-\omega$ 和 RSM 2 种湍流模型的计算结果最为接近,标准 $k-\varepsilon$ 模型计算得到的 Nu 要大于其他湍流模型,4 种模型普遍都能反映出不同结构定位格架对流换热的规律。本文选择使用 $k-\varepsilon$ 模型进行计算和比较分析。

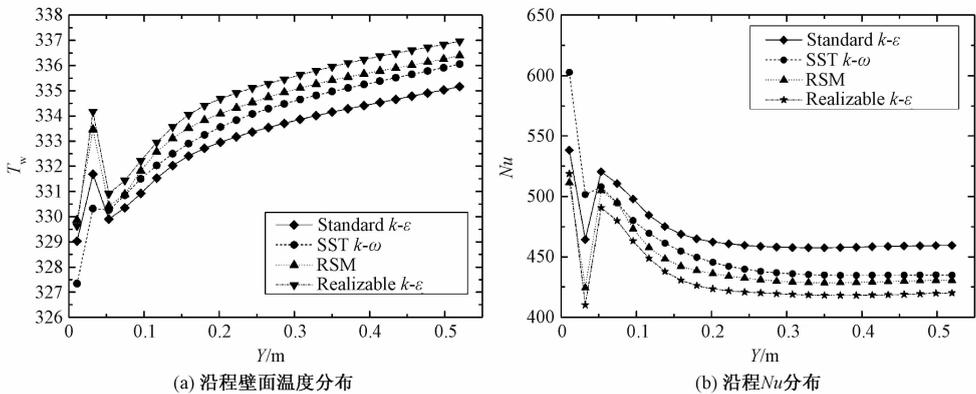


图 5 不同湍流模型比较

Fig. 5 Comparison among different turbulent models

2.3 网格无关性分析

分析网格数量对计算结果的影响,在定位格架的 RLVGs 附近,使用的是自适应体网格,除燃料棒壁面的边界层外,均使用四面体网格。通过控制 RLVGs、定位格架附近的单元大小和全局网格大小对网格进行加密处理,共得到 5 套网格。分别对 5 套不同数量的网格在同一工况下进行计算。网格数列于表 3,分别计算得到各网格对应的平均 Nu ,以平均 Nu 为考核依据对不同网格的计算结果进行分析。图 6 为采用不同网格进行计

表 3 网格无关性分析

Table 3 Grid independence analysis

网格编号	总网格数量/万	定位格架附近流体域网格数量/万	定位格架下游流体域网格数量/万
1	334	194	64.1
2	465	225	164
3	796	361	172
4	903	409	231
5	1 009	463	283

算得到的 Nu 分布,当网格单元总数达到 465 万后,计算结果基本趋于一定,满足网格无关性要

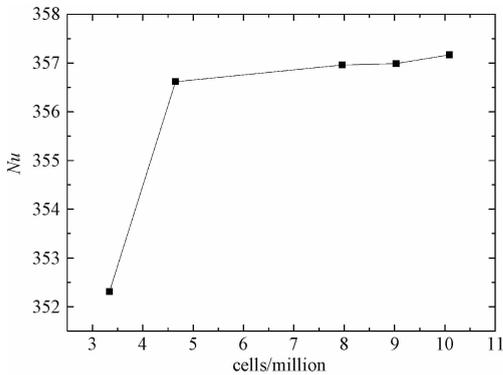


图6 网格无关性分析

Fig. 6 Grid independence analysis

求。因此计算时采用第2套网格。由于计算工况较多且定位格架结构有所变化,部分网格需要重新生成,因此再生成的网格质量和数量保证在第2套网格和第3套网格之间。

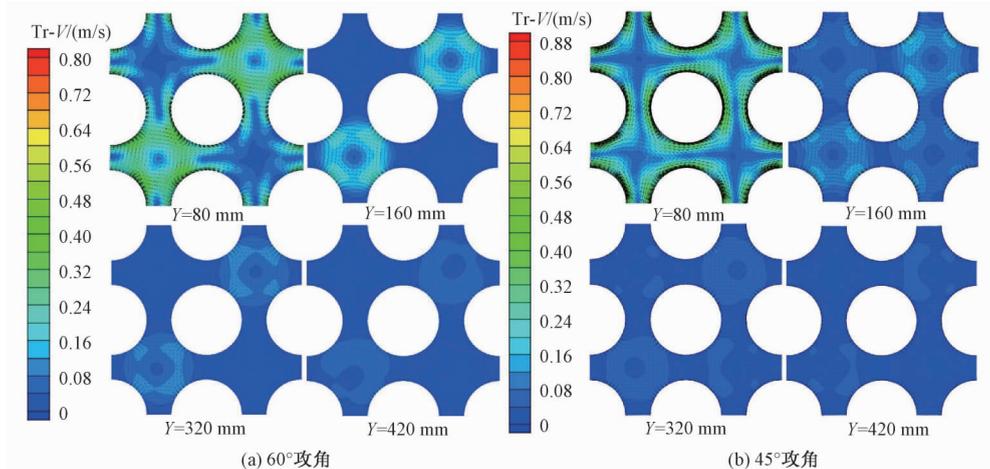


图7 不同攻角时横向速度矢量

Fig. 7 Transverse velocity vector fields at different attack angles

图8是45°攻角定位格架在入口速度为6 m/s时的数值计算结果,图中分别表示出燃料棒束通道中冷却剂的沿程最大横向速度、沿程压力,以及沿程壁面平均温度和沿程冷却剂平均温度的分布。由图8(a)可知,冷却介质由RLVGs扰动而产生了二次流,其刚形成时的最大速度高达2 m/s,之后横向速度逐渐衰减。结合图7(b)分析,由于横向速度的存在而产生的涡旋现象会一直持续到下游0.32 m处,此时横向最大速度为0.083 m/s。越靠下游,横向速度越小,涡旋越弱。当接近0.42 m时,最大横向速度减小到约0.04 m/s,涡旋已基本消失。

图8(b)给出冷却剂的沿程平均压力分布。

3 结果分析

以入口所在的平面为基准面,那么RLVGs所在的位置就是32 mm,取80、160、320和420 mm处的横截面为研究对象,图7给出60°和45°攻角情况下冷却通道内不同横截面上的横向速度矢量图。流体经过RLVGs后,产生横向速度,在接近燃料棒壁面处速度较大,有利于将壁面附近的高温流体导流到壁面远处,使壁面附近温度不至过高。另外,60°攻角的结果中,在左下和右上角的流道内横向速度较大,涡旋明显,这是由于RLVGs的倾斜方向所导致,倾斜仰角朝向的流道横向速度会较大。但是这种现象在45°攻角RLVGs中不明显,45°攻角的RLVGs对流场的扰动效果更显著,并且流体能围绕燃料棒形成均匀绕流。

在0~0.05 m处,即定位格架前沿附近,压力曲线有一个斜率变化,这是因为定位格架的隔板具有一定厚度,占有部分流体流道空间,使得流体在流进定位格架流道时流动截面积减小,增加了流动阻力,从而使压力突然下降。在RLVGs之间,压力又一次阶跃性地下降,这是因为RLVGs增加了流动阻力,从而导致压降下降明显。之后流体经过定位格架,流通截面积变大,压力先有所回升,之后开始均匀下降。本计算采用的出口边界为压力出口,表压为0,因此在曲线末端的压力值逐渐接近于0。

图8(c)给出燃料棒壁面的截面平均温度随轴向的变化规律。在流体流经RLVGs前,壁面温

度斜率很大,说明温度上升很快;之后经过 RLVGs,壁面温度迅速下降;在 RLVGs 之后,壁面温度上升速率变缓,0.17 m 之后,流体温度上升速率又再次下降,说明 RLVGs 改善了燃料棒壁面与流体的换热。图 8(d) 给出截面流体的平均温

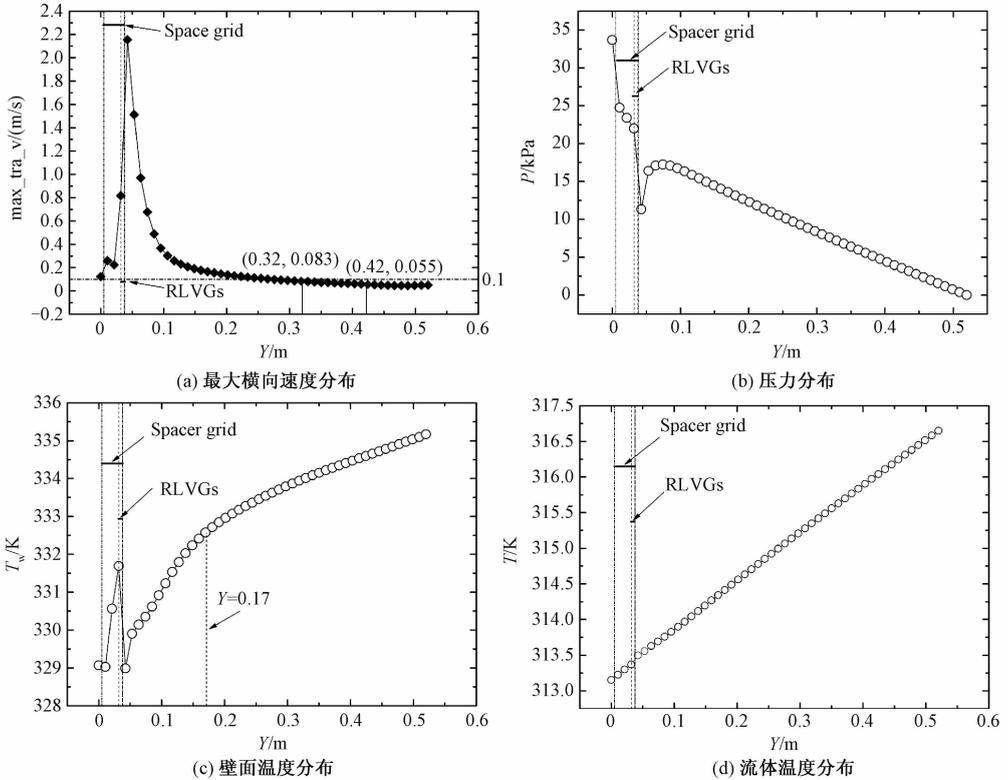


图 8 沿程分布(45°)

Fig. 8 Local distribution along mainstream direction(45°)

图 9(a) 给出 RLVGs 定位格架在不同攻角下的平均 Nu 数随 Re 数的变化规律。从图中可以看出,随 Re 的变化,3 种角度的 RLVGs 格架的平均 Nu 都随 Re 数的增加而增大;60° 攻角与 45° 攻角的平均 Nu 基本相等,此两种类型的格架换热效果相当;但是三者的平均 Nu 都十分接近,这很有可能是由于定位格架下游段的燃料棒通道过长而造成的。为了进一步分析它们对换热的影响,可取 Re 数为 93 600(速度为 6 m/s) 时各角度下的沿程 Nu 数分布来分析,如图 9(b) 所示。分析可知,在经过定位格架后,60° 和 45° 攻角的 RLVGs 的换热效果基本都要强于 30° 的;60° RLVGs 在前期强于但后期低于 45° 攻角 RLVGs 的换热效果。图 9(c) 表示不同攻角 RLVGs 对压降的影响情况。60° 攻角的阻力系数要高于 45° 和 30° 攻角下的阻力系数。从压降方面看,60° 攻角 RLVGs 的格架阻力最大。

度沿轴向的变化规律。从图中可以看出,流体从入口流入,温度从 313.15 °C 逐渐升高到 316.7 °C,定位格架的 RLVGs 对流体的平均温度有轻微的影响。

4 结论

本文主要利用数值计算方法研究 RLVGs 新型定位格架的热工水力特性。分析雷诺数、攻角对定位格架的热工水力特性的影响。主要结论如下:

SST $k-\omega$ 模型和 RSM 模型对新型定位格架模拟计算结果较接近,标准 $k-\varepsilon$ 模型和可实现 $k-\varepsilon$ 模型也可反映出燃料棒束通道的换热特性和 Nu 变化规律,4 种模型均适用于带旋流的压水堆燃料棒束通道内流动的数值模拟。此外,通过计算可以发现 RLVGs 能使冷却介质在格架通道内产生涡旋,并能持续至下游,产生的涡旋强度与 RLVGs 的倾角有关,倾角越大,产生的涡旋强度越大。燃料棒束子通道中产生二次流对边界层有较强的扰动作用,可使燃料棒壁面温度不至于过高,从而提高了压水堆堆芯反应处的热工水力特

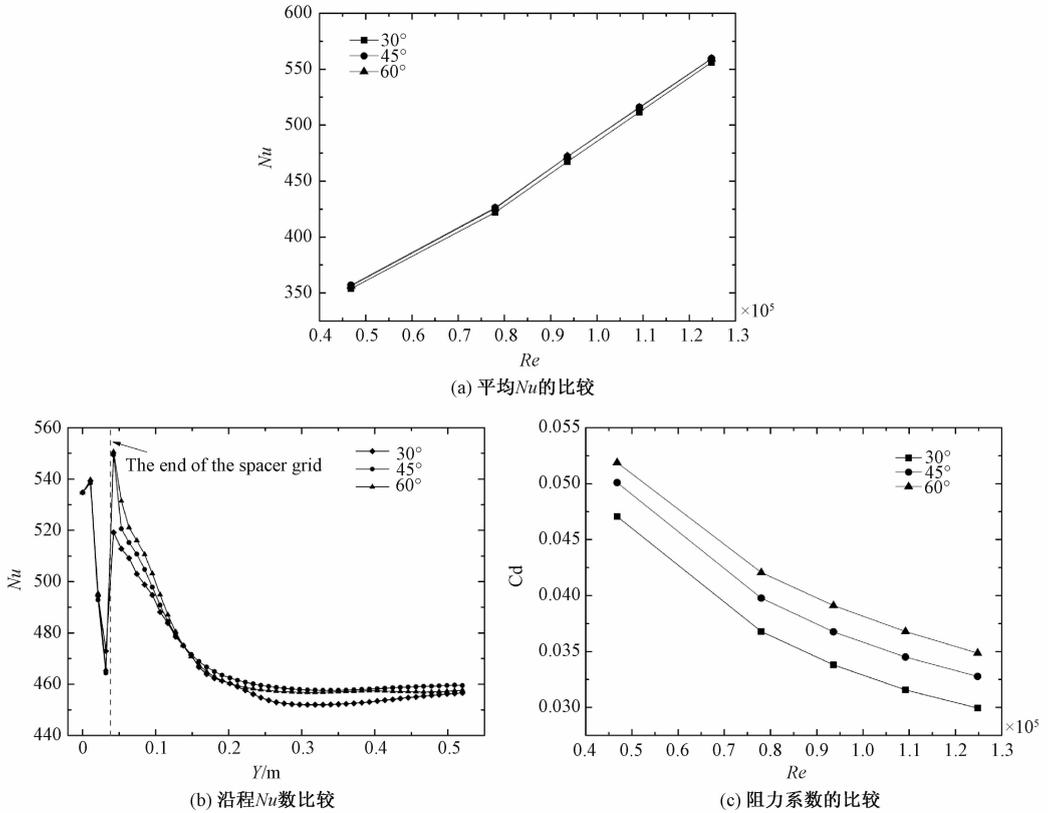


图9 RLVGs 不同攻角定位格架的比较

Fig.9 Comparison of spacer grids among different attack angles' RLVGs

性。在不同结构的定位格架对强化换热影响效果方面,60°攻角和45°攻角的 RLVGs 定位格架换热效果相当,其次是30°攻角的 RLVGs 定位格架。60°,45°和30°攻角 RLVGs 定位格架的阻力系数依次降低。此种新型定位格架在原有定位格架的基础上进行改进,主要是对叶片的改进,不仅降低了工艺制造难度降低成本,还改善燃料棒的冷却效果,保证了燃料组件的良好热工水力特性。本文对带有涡旋发生器的新型定位格架的研究对实际工业设计有一定的参考价值。

在将来的工作中,为了使 RLVGs 在绕流、搅浑和换热中更好地发挥作用,将会对以下几点做进一步研究。1)调整 RLVGs 的分布位置和数量,以便在每个子通道中都能产生更加均匀的涡旋;2)寻找定位格架的合理轴向间隔距离,即定位格架下游通道长度,当使用多个定位格架共同作用时,产生涡旋强度的变化。

参考文献

[1] Holloway M V, Beasley D E, Conner M E. Single-phase convective heat transfer in rod bundles [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(4):848-858.

[2] Han S Y, Seo J S, Park M S, et al. Measurements of the flow characteristics of the lateral flow in the 6×6 rod bundles with Tandem Arrangement Vanes [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(12):2728-2736.

[3] Nematollahi M R, Nazifi M. Enhancement of heat transfer in a typical pressurized water reactor by different mixing vanes on spacer grids [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(7):1981-1988.

[4] Shin B S, Chang S H. CHF experiment and CFD analysis in a 2×3 rod bundle with mixing vane [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(5):899-912.

[5] Tóth S, Aszódi A. CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(2):352-363.

[6] Zhu X, Morooka S, Oka Y. Numerical investigation of grid spacer effect on heat transfer of supercritical water flows in a tight rod bundle [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 76(2):245-257.

[7] Tseng Y S, Ferng Y M, Lin C H. Investigating flow and heat transfer characteristics in a fuel bundle with split-vane pair grids by CFD methodology [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 64(64):93-99.

[8] Bieder U, Falk F, Fauchet G. LES analysis of the flow in a simplified PWR assembly with mixing grid [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 75(1):15-24.

- [9] Podila K, Rao Y F, Krause M, et al. A CFD simulation of 5×5 rod bundles with split-type spacers [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 70(1):167-175.
- [10] Johnson T R, Joubert P N. The influence of vortex generators on the drag and heat transfer from a circular cylinder normal to an airstream[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1969,91(1):91-99.
- [11] Ahmed H E, Mohammed H A, Yusoff M Z. An overview on heat transfer augmentation using vortex generators and nanofluids: approaches and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012,16(8):5 951-5 993.
- [12] Wu J M, Tao W Q. Investigation on laminar convection heat transfer in fin-and-tube heat exchanger in aligned arrangement with longitudinal vortex generator from the viewpoint of field synergy principle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14/15):2 609-2 617.
- [13] Gandhir A, Hassan Y. RANS modeling for flow in nuclear fuel bundle in pressurized water reactors (PWR) [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(11):4 404-4 408.
- [14] 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(7):389-396.
- [15] Agbodomegbe V Y, Cheng X, Akaho E H K, et al. An investigation of the effect of split-type mixing vane on extent of crossflow between subchannels through the fuel rod gaps[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016,88:174-185.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M].2 版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.