

板型燃料组件内部温度场数值模拟

王金华, 薄涵亮, 姜胜耀, 郑文祥

(清华大学核能与新能源技术研究院 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:以板型燃料组件为研究对象,采用商用流体力学计算程序CFX5对板型燃料组件内部温度场进行数值模拟。数值计算结果表明:燃料组件不同流道的流速分布和温度分布均较均匀,单一流道的流速分布和温度分布也较均匀。燃料板所构成的各流道从外到内流速变化不太大,在中间流道内流速稍小一些,但差值很小;燃料组件单一流道内的流速在壁面附近快速减小,壁面上流速为0。燃料板和定位梳的温度最高,侧板温度与板间流体温度相近,侧板外侧的流体温度较低。

关键词:板型燃料组件;数值模拟;计算流体力学;温度场

中图分类号:TL334;TL351.5

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)02-0222-06

Numerical Simulation of Temperature Fields in Planar Fuel Assembly

WANG Jin-hua, BO Han-liang, JIANG Sheng-yao, ZHENG Wen-xiang

(*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The temperature fields in planar fuel assemblies are simulated numerically by Computational Fluid Dynamics(CFD) program CFX5. The results are useful in optimizing the design of a planar fuel assembly. The results indicate the velocity and temperature in different flow channels of a planar fuel assembly are relatively uniform, and the velocity and temperature in the same flow channel are also uniform. The variation of the flow velocity between different flow channels from outside to inside is small, and the flow velocity in the middle flow channel is relatively smaller than in other channels. The velocity becomes low when the flow is approaching the wall boundary, and the velocity at the wall boundary is zero. The temperature of the fuel plates and pectinate localizers is high, and the temperature of the side panels is close to the temperature of the flows between fuel plates, and the temperature of the flow outside of the side panels is low.

Key words: planar fuel assembly; numerical simulation; computational fluid dynamics; temperature field

数值模拟可深入了解流体的流动过程,又可减少实验以节省实验成本,且数值模拟的结果对于板型燃料组件的优化设计具有重要参考价值。本工作拟对板型燃料组件内部流场进行数值模拟,以获得板型燃料组件的板间流场和温度场,并通过实验验证计算结果的可靠性。

1 燃料组件

数值模拟采用的燃料组件是全尺寸组件,由20块燃料板组合而成。图1为燃料组件的实体外观^[1]。每块燃料板经滚压工艺固结在侧板上,侧板指定位燃料板的合金板,边板指燃料板中的最外边板,燃料板间有梳状定位架支承。燃料组件上有提梁,目的是固定侧板和吊装燃料组件。燃料组件下有管嘴,起固定侧板和燃料组件的作用。

在进行实验时,燃料组件安装在组件不锈钢壳体内。组件流道由矩形外壳和支撑孔座构成。外壳的设计完全模拟了组件和其周围的水隙,其水隙尺寸是相邻组件侧板与侧板、边燃料板与边燃料板之间的理论间隙。

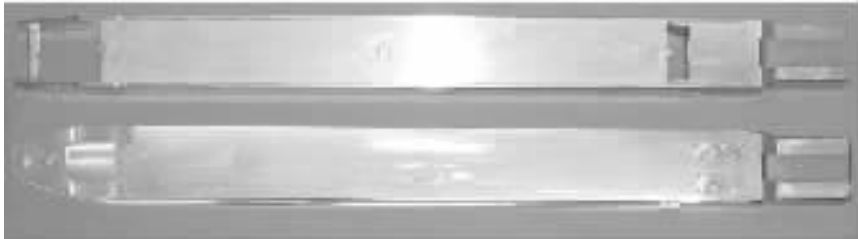


图1 燃料组件

Fig. 1 Fuel assembly

2 数值模拟

2.1 计算工具

板型燃料组件内部流场数值模拟采用由英国 AEA Technology 工程软件公司开发研制的 CFX5 程序,它由4个模块组成:CFX-5 Build(前处理);CFX-5 Solver(求解器);CFX-5 Solver Manager(求解管理器);CFX-5 Post(后处理)。CFX5 采用了加拿大 ASC 公司开发的多网格耦合求解技术,使 CFX5 的计算速度和稳定性比传统方法有了很大提高^[2]。

2.2 计算模型

根据板型燃料组件设计参数,建立板型燃料组件内部流场数值模型。板型燃料组件为对称结构,为减小计算量,只建立燃料组件 1/4 的结构进行计算。板型燃料组件 1/4 数值计算模型示于图2。

板型燃料组件内部流域的参考压力为 103.25 kPa,湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型,参考温度为 293 K。将 Navier-Stokes 方程组采用有限单元法进行偏微分方程离散化处理,将偏微分方程转换成线性代数方程组并联立连续方程、状态

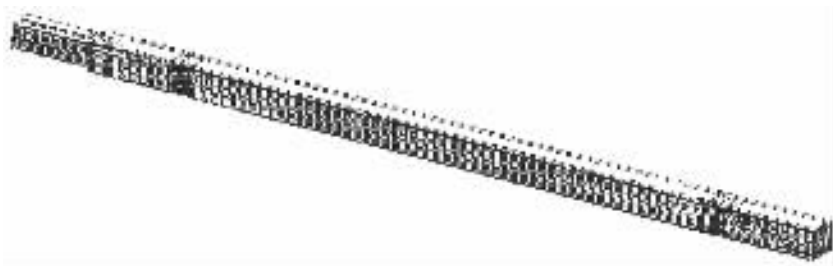


图2 板型燃料组件 1/4 数值计算模型

Fig. 2 1/4 sector of numerical model of planar fuel assembly

方程、能量方程和粘度物性关系式联立求解。采用全隐式多方程耦合算法求解线性代数方程组,相对于半隐式压力修正算法,即SIMPLEC算法而言,采用时间推进的方法,改善了半隐式压力修正算法中的收敛性,并提高了求解收敛速度,尤其对于网格数量庞大的实际工程问题,其求解速度明显优于半隐式压力修正算法^[2]。

对于板型燃料组件内部三维流场,其基本控制方程为:

质量守恒方程,即连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) =$$

$$\nabla \cdot (-p\delta + \mu(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) + S_M$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho h_{\text{tot}}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{\text{tot}}) =$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; \mathbf{U} 为流体速度; δ 为 δ 函数; μ 为流体动力学粘度; S_M 为动量源项; λ 为导热率; S_E 为能量源项; h_{tot} 为总比焓, $h_{\text{tot}} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2$,其中, h 为静比焓,它是压力和温度的函数,即 $h = h(p, T)$ 。

入口边界的湍流模型为默认强度和自动计算尺度模型。计算入口流速为2.7~7.3 m/s情况下的板型燃料组件内部流场。出口边界的相对压力差为0,其它未定义的面被默认定义为非滑移绝热面,壁面粗糙度定义为0.01 mm。

在模型网格划分中,体网格划分采用六面体结构化网格,这样,既能有效控制网格数量,又能保证迭代收敛和较高的求解精度。差分采用高精度差分格式,算法采用全隐式多方程耦合算法。

3 计算结果

3.1 速度场和温度场

图3是板间流速为6 m/s条件下板型燃料组件内部的速度场和温度场分布图。燃料板的表面发热率为 $H_s = 1.4 \times 10^6$ W/m²,燃料板长度为0.78 m、宽度为0.071 m、高度为0.001 52 m。将表面发热率折算成体发热率得

$$H_v = 1.885 \times 10^9 \text{ W/m}^3。$$

由图3可以看出,燃料组件不同流道的流速分布和温度分布均较均匀,单一流道的流速分布和温度分布也较均匀。燃料板所构成的各流道从外到内流速变化不太大,在中间流道内流速稍低一些,但差值很小;燃料组件单一流道内的流速在壁面附近快速降低,壁面上流速为0。燃料板和定位梳的温度最高,侧板的温度与板间流体温度相近,侧板外侧的流体温度较低。

3.2 燃料组件内部温度分布

图4是板间流速为6 m/s条件下板型燃料组件内部中心单一通道温度分布图和纵向多通道温度分布图。

由图4可看出,板间流速为6 m/s时,在入口水温为27℃工况下,燃料板中央位置处的水温约为45℃,出口位置处的水温约为65℃。在燃料板表面发热率为 $H_s = 1.4 \times 10^6$ W/m²、板间流速为6 m/s时,流过燃料板区域后水温上升了近40℃。

中心单一通道两侧由于紧贴金属铝侧板,加大了换热面积,因此其温度较高。燃料板区域入口和出口分别有一定位梳。定位梳为金属铝,与燃料板镶嵌在一起,其温度较高。因此,燃料板区域入口和出口中央紧贴定位梳的位置处温度很高。

纵向多通道温度分布曲线的两侧温度较低,主要是因板型燃料组件两侧的燃料板外的流道只有一面燃料板加热,而其它流道都是两面加热,因此,最边上的流道内的水温较低。

分别计算板间流速为5、4、3、2、1 m/s时板型燃料组件内部的温度场。计算得到组件出口水温为100℃时的临界板间流速值,然后可用其它程序计算板间流速低于该值后,水发生汽化沸腾工况下燃料组件内部的速度场、压力场和温度场,为板型燃料组件的设计提供参考。

3.3 不同板间流速燃料组件温度场比较

图5是板间流速分别为5、4、3 m/s条件下板型燃料组件内部中心单一通道温度分布图和纵向多通道温度分布图。由图5a、b可看出,板间流速为5 m/s时,在入口水温为27℃、燃料板表面发热率 $H_s = 1.4 \times 10^6$ W/m²下,燃料板中央位置处的水温约为49℃,出口位置处的水温约为72℃,流过燃料板区域后水温上升了近

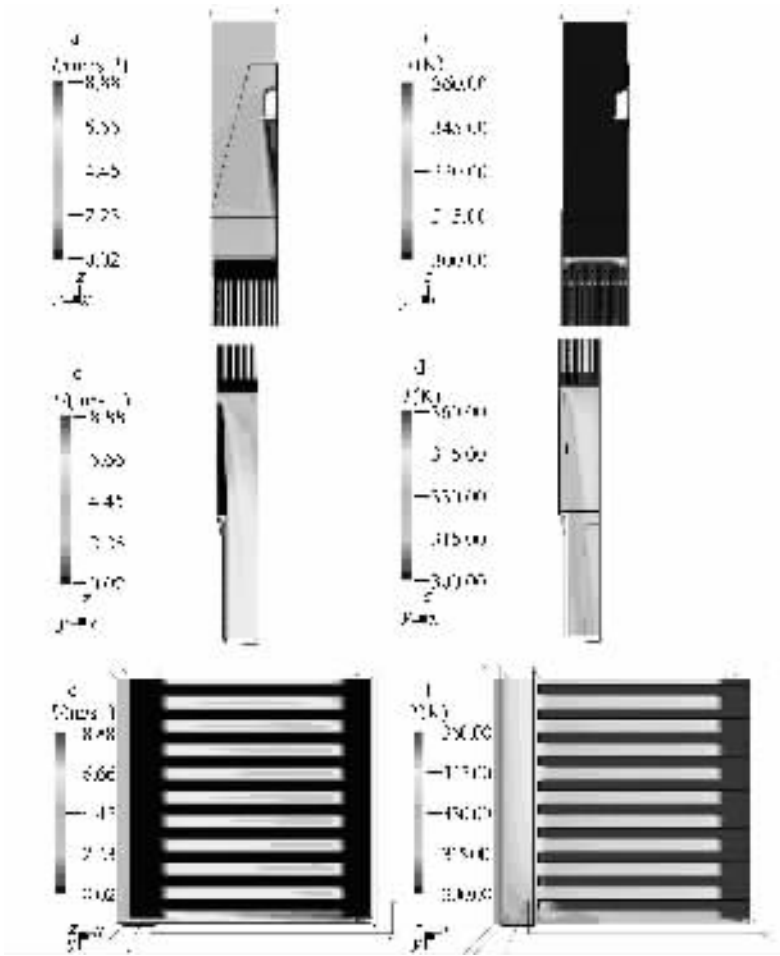


图3 板型燃料组件内部速度场和温度场

Fig. 3 Velocity and temperature fields in planar fuel assembly

a——燃料组件入口速度场;b——燃料组件入口温度场;c——燃料组件出口速度场;
d——燃料组件出口温度场;e——燃料组件出口横截面速度场;f——燃料组件出口横截面温度场

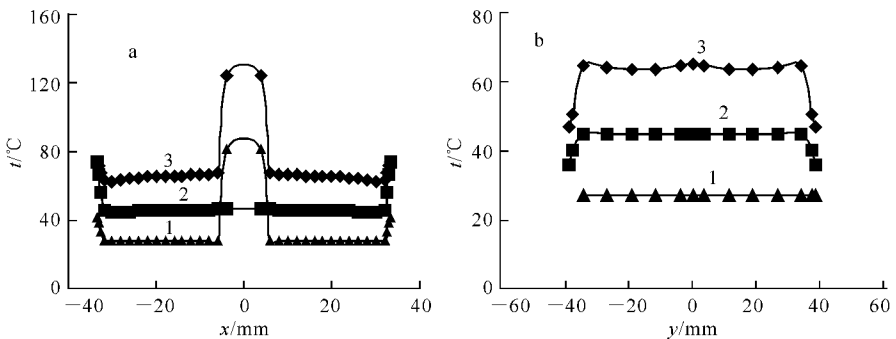


图4 流速为6 m/s时板型燃料组件内部温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in planar fuel assembly at 6 m/s flow velocity

a——中心单一通道;b——纵向多通道

1——燃料板区域入口;2——燃料板区域中间;3——燃料板区域出口

45 °C;由图 5c、d 可看出,板间流速为 4 m/s 时,燃料板中央位置处的水温约为 54 °C,出口位置处的水温约为 83 °C,流过燃料板区域后水温上升了近 56 °C;由图 5e、f 可看出,板间流速为 3 m/s 时,燃料板中央位置处的水温约为 63 °C,出口位置处的水温约为 100 °C,流过燃料板区域后水温上升了近 73 °C,出口处的水流接近达到沸腾状态。

由于 CFX5 中无水的沸腾换热模型,在板间流速继续减小的情况下,燃料组件出口处的

水温将继续上升,超过其沸腾温度 100 °C,从而使计算结果超出其合理范围(图 6)。

由图 4~6 可看出:在燃料板表面发热率为 $H_s = 1.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、板间流速为 6、5、4 和 3 m/s 时,在入口水温为 27 °C 工况下,出口位置处的水温分别为 65、72、83 和 100 °C。当板间流速低于 3 m/s 时,需考虑水的沸腾换热,以获得板型燃料组件内部水发生过热沸腾情况下组件内部的速度场、压力场、温度场以及各处水中的含汽量。

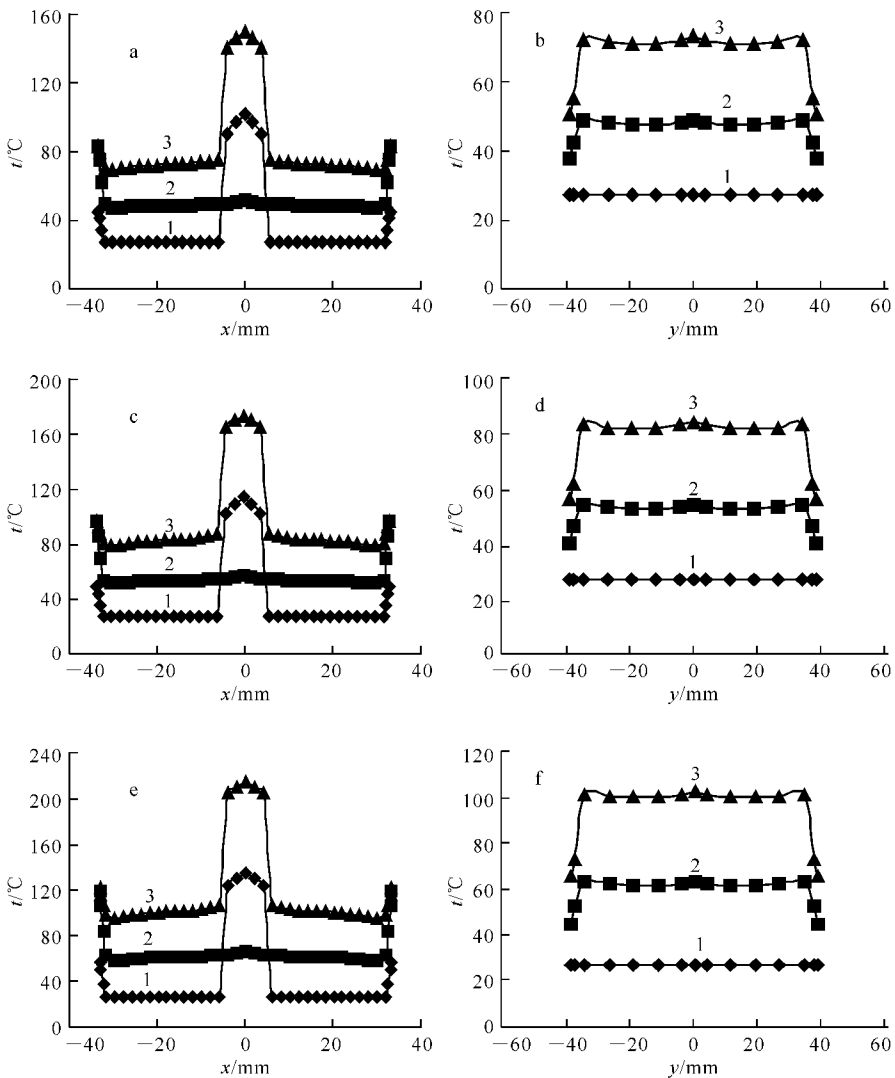


图 5 流速为 5、4、3 m/s 时板型燃料组件内部温度分布

Fig. 5 Temperature distribution in planar fuel assembly at 5, 4, 3 m/s flow velocity

a, c, e——中心单一通道; b, d, f——纵向多通道

流速 $v, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a, b——5; c, d——4; e, f——3

1——燃料板区域入口; 2——燃料板区域中间; 3——燃料板区域出口

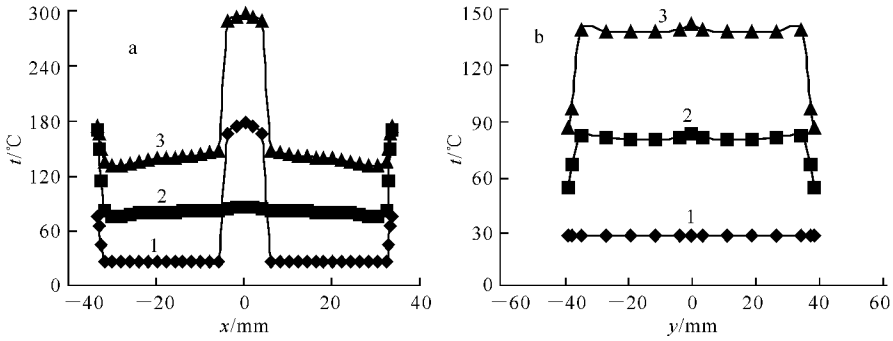


图 6 流速小于 3 m/s 时板型燃料组件内部温度分布

Fig. 6 Temperature distribution in planar fuel assembly at less than 3 m/s flow velocity

a——中心单一通道;b——纵向多通道

1——燃料板区域入口;2——燃料板区域中间;3——燃料板区域出口

4 结论

1) 燃料组件不同流道的流速分布和温度分布均较均匀,单一流道的流速分布和温度分布也较均匀。燃料板所构成的各流道从外到内流速变化不太大,中间流道内的流速稍低些,但差值很小;燃料组件单一流道内的流速在壁面附近快速降低,壁面上流速为 0。燃料板和定位梳的温度最高,侧板的温度与板间流体温度相近,侧板外侧的流体温度较低。

2) 由于板型燃料组件两侧燃料板外的流道只有一面燃料板加热,而其它流道都是两面加热,因此最边上流道内的水温较低。中心单一通道两侧由于紧贴金属铝侧板,加大了换热面积,因此其温度较高,燃料板区域入口和出口的定位梳与燃料板镶嵌在一起,其温度较高,故燃料板区域入口和出口中央紧贴定位梳的位置温度很高。

3) 在燃料板的表面发热率 $H_s = 1.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、板间流速为 6、5、4 和 3 m/s 时,入口水温为 27 °C 工况下的出口位置处的水温分别为 65、72、83 和 100 °C。当板间流速低于 3 m/s 时,需考虑水的沸腾换热。

参考文献:

[1] 薄涵亮,张佑杰,贾海军,等. 板型燃料组件水力学特性实验研究报告[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,2002.
BO Hanliang, ZHANG Youjie, JIA Haijun, et al. Experimental study report for the hydraulic characteristics of the planar fuel assembly[R]. Beijing: Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, 2002(in Chinese).

[2] AEA Technology. Introduction to CFX-5 [R]. England: AEA Technology, 2001.