

摇摆条件对湍流流动特性的影响

鄢炳火¹, 顾汉洋², 杨燕华², 于雷¹

(1. 海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033;

2. 上海交通大学 核科学与工程学院, 上海 200240)

摘要:利用 Fluent 软件对摇摆条件下矩形管内的湍流流体进行理论分析, 分析了多种湍流模型和多个参数对流动特性的影响。在摇摆条件下, 矩形管中心区域速度分布趋于均匀化, 但壁面附近的的速度梯度增大, 从而使摩擦阻力系数增加。壁面对摇摆条件对湍流流体的影响产生抑制作用。在纵摇条件下, 小长宽比矩形管内速度等高线成哑铃状分布。对于本文的计算流体, 摇摆条件下的湍流摩擦阻力系数与 Re 的 0.47 次方成反比。

关键词:摇摆; 湍流; 矩形管

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)12-1451-06

Theoretical Research on Effect of Rolling Motion on Turbulent Flow

YAN Bing-huo¹, GU Han-yang², YANG Yan-hua², YU Lei¹

(1. Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The turbulent flow in rectangular tube at rolling motion was investigated theoretically with Fluent code. The effects of several turbulent models and parameters on the flow were analyzed. At rolling motion, the velocity profile in tube center is more averaged. But the velocity gradient and frictional resistance coefficient on the wall increase. The effect of rolling motion on the turbulent flow can be depressed by the tube wall. At pitching motion, the velocity contour in small length-width ratio tube is in a dumbbell shape. As to the turbulent flow in the paper, the frictional resistance coefficient at rolling motion is in inverse ratio with the power of 0.47 of Reynolds number.

Key words: rolling; turbulent flow; rectangular tube

近年来,随着核动力系统在海洋上的广泛使用,人们逐渐开始系统地研究海洋条件(尤其是摇摆条件)对核动力系统热工水力特性和冷却剂流动特性的影响^[1-2]。对于层流流体,其流

动特性较有规律,可通过构建数学模型对其进行分析。但由于自然界大多流体均是湍流流体,其运动规律和运动特性难以用数学模型来描述,使人们难以对海洋条件下的核反应堆热

工水力特性进行系统性研究。目前,国内外尚无这方面公开发表的文献。

矩形通道具有结构紧凑、燃料芯体温度低、换热面积大等突出特性,它适合于具有高传热性能的紧密传热组件,在核动力领域具有很大的应用潜力。相对于传统的棒状燃料组件的压水堆,采用板状燃料组件的压水堆堆芯活性段的流道形状有很大的改变,堆芯流动及传热特性差异很大。为了板型燃料组件的优化设计和深入的安全分析,有必要对这种特定复杂堆芯结构进行研究。

随着计算机技术的迅猛发展,CFD作为流体力学领域第3种重要研究方式逐渐被认可。CFD模拟既可深入了解流体的流动及传热过程,又可减少实验以节省成本。近年来的大量研究成果充分证实了它的可靠性^[3]。本工作采用Fluent软件对摇摆条件下矩形通道内的湍流流体进行理论研究,分析摇摆条件和矩形通道尺寸对湍流流体流动特性的影响。

1 理论模型

1.1 数学模型

首先建立摇摆坐标系,如图1所示。横摇摆轴为 x 轴,纵摇摆轴为 y 轴。坐标原点位于底面中心,流体从下部流入。矩形管长为 L_1 ,宽为 L_2 ,高为 H 。忽略入口段的影响,假定流体处于充分发展状态。

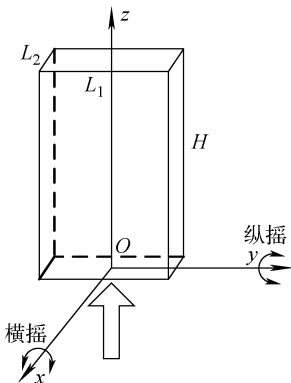


图1 坐标系示意图

Fig. 1 Scheme of coordinate

在摇摆条件下,湍流流体的Reynolds时均方程中的动量方程需进行修改,可写为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) + F \quad (1)$$

其中:上标“—”和“'”分别表示时均值和脉动值; u 为速度; t 为时间; ρ 为密度; p 为压力; $x_{i,j,k}$ 表示坐标,分别对应 x,y,z 坐标方向; F 为单位体积上的摇摆附加力,可表示为:

$$F = \rho \cdot a =$$

$$\rho \cdot [\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}] \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\omega}$ 为摇摆角速度; $\boldsymbol{\beta}$ 为摇摆角加速度; \mathbf{r} 为流体微元的矢径。

通常可认为摇摆波动规律服从三角函数规律^[1],二者可分别表示为:

$$\omega = -\frac{2\pi\theta_m}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (3)$$

$$\beta = -\frac{4\pi^2\theta_m}{T^2} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (4)$$

由于Fluent等CFD软件中均不包含附加力项,因而,本文将摇摆附加力加入方程的源项中,并与非稳态项等其他3项一起进行迭代计算。考虑湍流是由各种大小和涡量不同的涡旋叠加而成^[4],假设摇摆运动不会改变湍流中各种涡结构的运动特性,而只是使其运动参数大小产生一些波动。因而,本文依然采用Fluent软件中的湍流模型对湍流流体的运动特性进行分析。

1.2 网格划分

湍流边界层内速度分布示于图2。在图2中, u_τ 为剪切速度; ν 为运动粘度。

从图2可看出,湍流边界层内速度变化较剧烈。为了准确得到边界层内的湍流速度分布

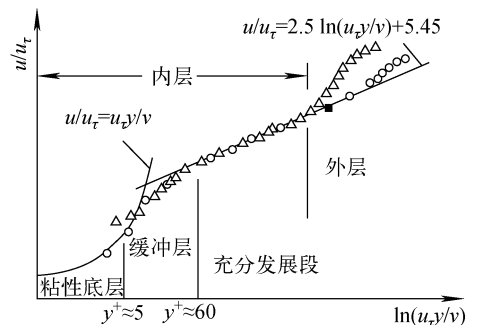


图2 湍流边界层内速度分布

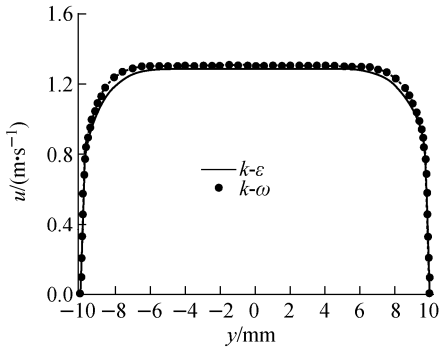
Fig. 2 Velocity profile of turbulent boundary layer

和壁面上的摩擦阻力系数,须对壁面附近的网格进行加密。离壁面最近的网格对应的 y^+ 始终小于 1,然后以 1.2 倍的比率在近壁面区域依次递增。对主流区域的网格进行敏感性分析后,最终确定主流区域的网格间隔为 0.5 mm。

2 计算结果

2.1 湍流模型比较

Fluent 等 CFD 软件均有多种湍流模型可对湍流流体的流动特性进行计算,不同的模型计算得到的结果可能会不一样,本文首先分析不同模型的计算结果差异。由于一方程模型较简单,而



雷诺应力模型(RSM)在中低雷诺数流体上的应用并不十分有效,因而,本文主要分析比较 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 这两种二方程模型计算结果的差异。

对于摇摆条件下的核反应堆热工水力特性,人们往往更关心摇摆条件对系统某些极限参数的影响。因而,本文主要分析摇摆条件对矩形管内参数波动峰值的影响。取常温常压下的单相水质为研究对象, $L_1 = 20$ mm, $L_2 = 2$ mm,流体进口速度为 1 m/s,横摇振幅为 15° ,横摇周期为 10 s。分析 1 个周期内出口截面中心线上的速度波动峰值分布和出口壁面上的摩擦阻力系数 C_f 峰值分布,结果如图 3 所示。

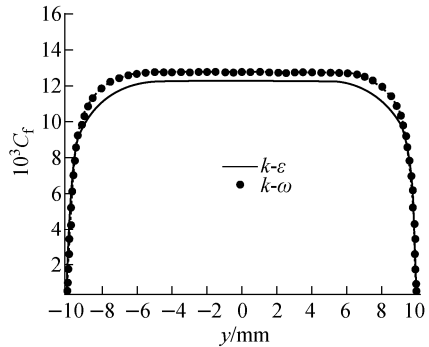


图 3 不同湍流模型比较

Fig. 3 Comparison of different turbulent models

由图 3 可见,用 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 两种湍流模型计算得到的流体速度和摩擦阻力系数基本一致,其中,摩擦阻力系数的差异略明显些,但也在可接受范围内。因而可认为, $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 这两种湍流模型均可用于对摇摆条件下的湍流流体进行分析。

2.2 与非摇摆条件的比较

以上述横摇条件和矩形管为例,分析摇摆运动对矩形管出口横截面上流体速度分布的影响,结果如图 4 所示。

从图 4 可看出,在非摇摆条件下,矩形管横截面上的速度梯度较大,中心区域的流体速度也较大。在摇摆条件下,矩形管横截面上的速度梯度较小,横截面上的速度峰值也较小,速度分布较均匀。这是因为,摇摆条件加强了湍流流体内部的交混,使湍流流体微团之间的动量交换得到增强,从而使横截面上的速度分布较均匀。

2.3 摇摆幅度的影响

摇摆幅度通常由摇摆角速度和摇摆角加速

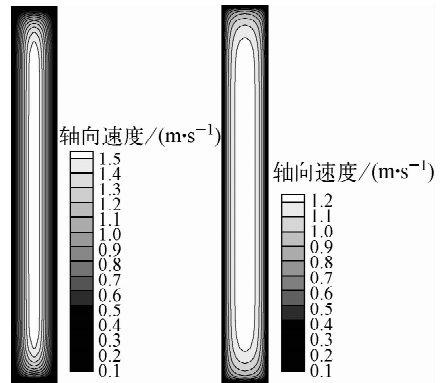


图 4 速度等高线

Fig. 4 Velocity contours

度来体现,而二者均由摇摆振幅和摇摆周期决定。改变摇摆幅度可通过改变摇摆振幅或摇摆周期来实现。取摇摆振幅为 15° ,通过改变摇摆周期分析摇摆幅度对矩形管内湍流流体流动特性的影响,结果如图 5 所示。

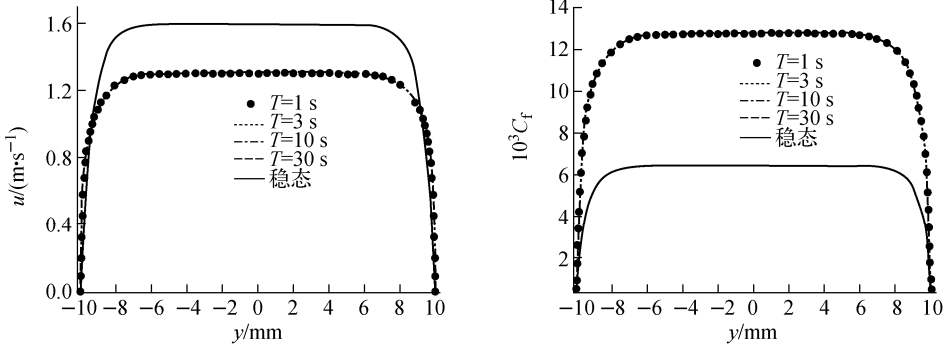


图5 摇摆周期的影响

Fig. 5 Effect of rolling periods

图5表明:在摇摆条件下,横截面上流体速度峰值小于非摇摆条件下的速度峰值,而壁面上的摩擦阻力系数则大于非摇摆条件下的摩擦阻力系数。这说明,摇摆可使速度分布趋于均匀化,但会使壁面附近的速度梯度增大,从而增大摩擦阻力系数。随着摇摆幅度的变化,横截面上流体速度分布和壁面上的摩擦阻力系数几乎无变化,不同摇摆周期对应的速度分布曲线和摩擦阻力系数分布曲线几乎重合。这说明,在摇摆这种低频波动条件下,波动周期对矩形

管内参数波动影响非常小。

2.4 长宽比的影响

在摇摆条件下,流体同时受到 x 、 y 和 z 方向上的附加力的作用,壁面可能对摇摆条件对流体的作用产生影响。取横摆振幅为 15° ,横摆周期为10 s,流体进口速度为1 m/s, $L_1 = 20$ mm, L_2 分别为2和6 mm,即矩形管长宽比分别为10:1和10:3,分析摇摆条件下长宽比矩形管内湍流流体的流动特性,结果如图6所示。

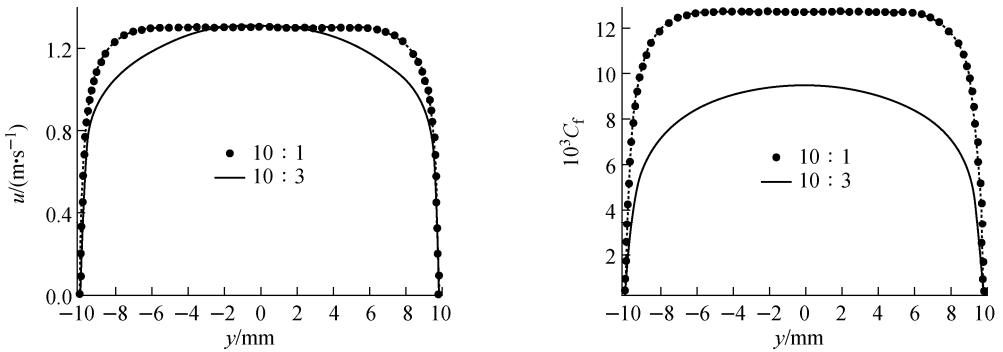


图6 长宽比的影响

Fig. 6 Effect of length-width ratios

从图6可看出,在摇摆条件下,小长宽比矩形管内的速度分布比大长宽比矩形管内的速度分布更为均匀。两种矩形管内流体入口速度相同,流体的特性参数也相同,小长宽比矩形管的当量直径是大长宽比矩形管当量直径的3倍,因此,小长宽比矩形管内流体的 Re 是大长宽比矩形管内流体 Re 的3倍。根据 $C_f \propto Re^{-0.2}$ 的关系以长宽比为10:1的矩形管内的摩擦阻力系数为基准可知, $C_{f_{10:3}} < 3^{-0.2} C_{f_{10:1}}$ 。这说

明,在摇摆条件下,小长宽比矩形管内湍流流体的交混流动更为明显,从而导致摩擦阻力系数更小。所以,壁面对摇摆条件对湍流流体的影响产生抑制作用。

2.5 横摇与纵摇的比较

摇摆条件可分为横摇和纵摇。取横摆振幅为 15° ,横摆周期为10 s,流体进口速度为1 m/s, $L_1 = 20$ mm, L_2 分别为2和6 mm,分析横摇与纵摇对矩形管内湍流流体的影响,结果如图7~9所示。

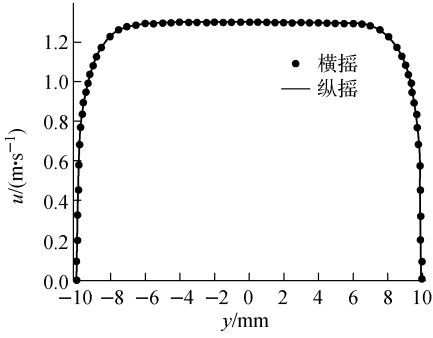


图7 横、纵摇条件下大长宽比矩形管内的流动特性

Fig. 7 Flow characteristics at rolling and pitching motions for big length-width ratio tube

从图7可看出,当矩形管长宽比较大时,横摇与纵摇对矩形管内湍流流体的影响几乎相同,两种摇摆条件下矩形管出口中心线上的速度分布曲线几乎重合。而图8表明,当矩形管长宽比较小时,横摇和纵摇条件下流体的速度和摩擦阻力系数幅值相差不大,但湍流流体的速度分布曲线和摩擦阻力系数分布曲线却呈现出明显的差异。在横摇条件下,矩形管横截面上的速度和壁面上的摩擦阻力系数均只有1个峰值,而纵摇条件下矩形管横截面上的速度和壁面上的摩擦阻力系数均有2个峰值。图9清

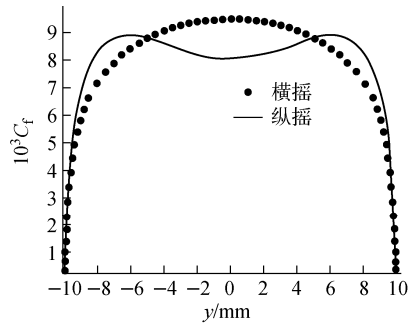
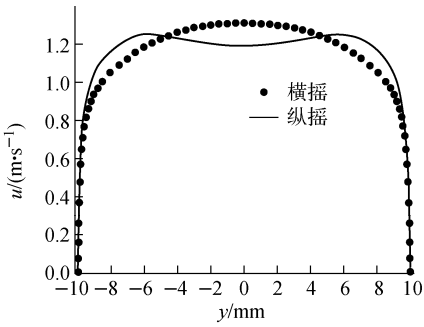


图8 横、纵摇条件下小长宽比矩形管内的流动特性

Fig. 8 Flow characteristics at rolling and pitching motions for small length-width ratio tube

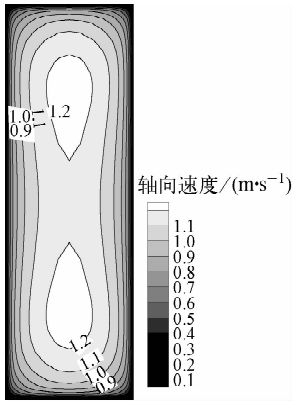


图9 纵摇条件下小长宽比矩形管出口速度等高线
Fig. 9 Outlet velocity contour of small length-width ratio tube at pitching motion

进口速度为 1 m/s, $L_1 = 20$ mm, $L_2 = 2$ mm, 分析入口流速对摇摆条件下湍流流动特性的影响,结果如图10、11所示。考虑到 $u = 0.3$ m/s 时的 Re 约为 1 200, 流体可能处于层流状态。层流模型的计算结果与低 Re $k-\omega$ 模型的计算结果几乎相同。因此,可用低 Re 模型对这种低流速下的流体进行分析。

从图10可看出,在摇摆条件下,流体入口速度越大,其横截面上的归一化速度 U 峰值越小,其速度分布也越均匀。从图10b可看出,流体入口速度越大,其湍动能也越大,流体内的动量交混越明显,速度分布越均匀。

从图11可看出,在摇摆条件下,摩擦阻力系数随着速度的减小而减小。当流速较大时,摩擦阻力系数随流速的变化较小,摩擦阻力系数在高流速下逐渐趋近于极限值。用 $C_f = au^b$ 对计算结果进行拟合可知, $b \approx -0.47$ 。这表明,摩擦阻力系数与 Re 的 0.47 次方成反比。

晰显示,在纵摇条件下,小长宽比矩形管横截面上的速度分布呈哑铃状。正是由于横截面上的这种对称分布才使得速度分布和摩擦阻力系数分布曲线上出现2个峰值。

2.6 流速的影响

取横摇振幅为 15°, 横摇周期为 10 s, 流体

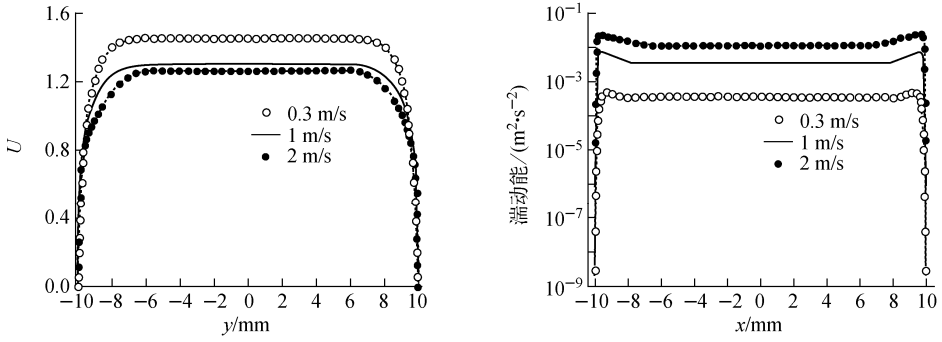


图 10 流速的影响

Fig. 10 Effects of flow velocity

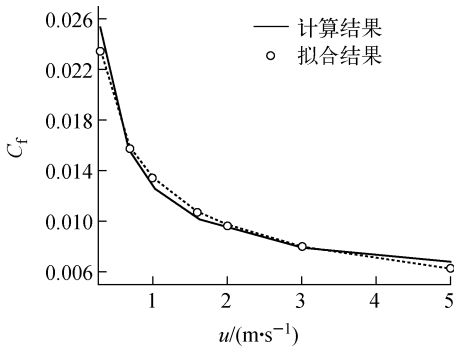


图 11 摩擦阻力系数与速度的关系

Fig. 11 Relation of frictional resistance coefficient with velocity

3 结论

利用 Fluent 软件分析了摇摆条件下矩形管内湍流流体流动特性,结论如下:

1) 摇摆条件可使速度分布趋于均匀化,但会使壁面附近的速度梯度增大,从而增加摩擦阻力系数,但摩擦阻力系数随摇摆幅度的变化非常小;

2) 壁面会对摇摆条件对湍流流体的影响产生抑制作用;

3) 对于大长宽比的矩形管,横摇和纵摇对湍流的影响几乎相同,但对于小长宽比的矩形管,横摇和纵摇对湍流的影响有所差异,纵摇条件下矩形管内速度等高线成哑铃状分布;

4) 流速越高,湍动能越大,矩形管内流体速度分布越均匀;

5) 摩擦阻力系数与 Re 的 0.47 次方成反比。

参考文献:

- [1] YAN B H, YU L, LI Y Q. Research on operational characteristics of passive residual heat removal system under rolling motion[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239: 2 302-2 310.
- [2] YAN B H, YU L. Theoretical research for natural circulation operational characteristic of ship nuclear machinery under ocean conditions [J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36: 733-741.
- [3] DAVIDSON L. Large eddy simulations: How to evaluate resolution[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30: 1 016-1 025.
- [4] FIEDLER H E. Coherent structures in turbulence flows[J]. Progress in Aerospace Science, 1988, 25: 231-269.