

自然循环换热器壳侧传热及流动的数字模拟

薛若军, 邓程程, 李朝君, 王明远

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为分析换热器的求解模型和内部结构的不同对传热和流动特性的影响,用等效自然循环换热器的模型进行多种变换。用 Fluent 软件对等效模型进行非稳态数值模拟,研究其传热和流动特性。通过比较分析不同模型的温度场和流场的变化,对该换热器的传热过程和自然对流情况有较深刻的认识。结果表明:自然循环换热器的传热管内外温差较大,且流动较复杂,选用湍流模型计算更为合理;传热管位置的不对称性,引起左右两侧传热和流动的不对称性,使得流体相互影响,增强了自然对流作用;传热管的形状由直管变为 C 型弯管,结构的复杂性在一定程度上增强了流体温度分布和流动的不规则性,使得湍流强度增加,致使换热效果得到改善。

关键词:换热器;非稳态数值模拟;自然对流

中图分类号:TL33

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)02-0192-07

Numerical Simulation of Shell-Side Heat Transfer and Flow of Natural Circulation Heat Exchanger

XUE Ruo-jun, DENG Cheng-cheng, LI Chao-jun, WANG Ming-yuan

(National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to analyze the influence on the heat transfer and flow characteristics of the heat exchanger model of different solving models and structures, a variety of transformation to the model equivalent for the heat exchanger was studied. In this paper, Fluent software was used to simulate the temperature-field and flow-field of the equivalent model, and investigate its heat-transferring and flow characteristics. Through comparative analysis of the distribution of temperature-field and flow-field for different models, the heat-transferring process and natural convection situation of heat exchanger were deeply understood. The results show that the temperature difference between the inside and outside of the natural circulation heat exchanger tubes is larger and the flow is more complex, so the turbulence model is the more reasonable choice. Asymmetry of tubes position makes the flow and heat transfer of the fluid on both sides to be dissymmetrical and makes the fluid interaction, and increases the role of natural convection. The complex structure of heat exchanger makes the flow and heat transfer

of the fluid on both sides to be irregular to some extent when straight tubes into C-bent are transformed, and all these make the turbulence intensity increase and improve the effect of heat transfer.

Key words: heat exchanger; unsteady numerical simulation; natural convection

非能动余热排出系统(PRHRS)是非常重要的非能动安全系统,能利用其自然循环能力及时地排出堆芯余热,从而确保反应堆的安全性^[1-3]。热交换器是非能动余热排出系统中的关键设备,它对反应堆的安全运行起着举足轻重的作用。而随着计算机硬件技术的不断进步及计算流体力学(CFD)的迅速发展,流动与传热的数值模拟已成为换热器研究的一种有效手段。用 Fluent 软件对换热器的壳侧进行非稳态数值模拟,通过得出的温度场和流场的直观信息,研究其传热和流动特性^[4-8]。

根据需要,本文依据已知的主要参数推测计算其他所需参数^[1-3]。如由换料水箱容积结合径高比可取换料水箱的高为 16 m,半径为 7 m;由文献[1]给出的数据,再结合相关图形比例确定最外排管宽为 4 m;根据传热管根数、管外径、管间距可排列出管束内管子的具体分布位置。

为使模型简化后网格数减少,又要使等效模型的结构和换热效果与简化之前的大致等效,本文在保证换热量与换热面积、水箱中水的体积基本成比例的前提下,将换热器等效为高 300 mm、半径 100 mm 的水箱,内含有 1 根左偏 50 mm、半径 20 mm 的管的相似模型。本文用换热器的等效模型进行模拟,改变传热管的位置、形状,对同一类型传热管采用不同的计算模型,分析热交换器的求解模型和结构的不同对传热和流动特性的影响。

1 研究对象和数学模型

1.1 研究对象

初始模型的建立:水箱高 300 mm,半径 100 mm,内含高 300 mm、半径 20 mm 的管,管向左偏移 50 mm。在此模型的基础上设置了以下 4 种模型进行求解计算。模型 A:对初始模型用湍流模型计算;模型 B:对初始模型用层流模型计算;模型 C:对管移到中心位置的模型用湍流模型计算;模型 D:对类似余热排出热交换器的 C 型弯管模型用湍流模型计算。

图 1、2 分别示意了 4 种小模型的建模和网格划分的情况。

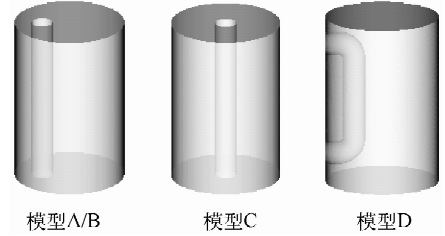


图 1 4 种模型
Fig. 1 Four models

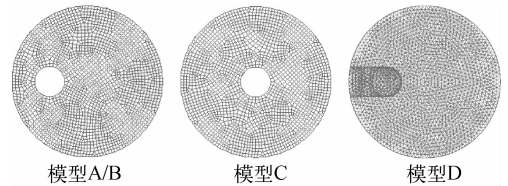


图 2 4 种模型的横截面网格
Fig. 2 Cross-section grid of four models

1.2 数学模型

由于换热器管束温度与水箱内流体的温度相差较大,由温差产生的浮升力对流动有较大的影响,使得换热器内部呈现湍流流场。对于复杂的湍流流动,常以雷诺平均 N-S 方程为基础进行模拟。欲使 N-S 方程封闭,须构建一湍流模型,使雷诺应力项模型化。为此,采用 Boussinesq 假设,设定雷诺应力与平均速度梯度成比例,引入湍流粘性系数 μ_t ,构建湍流模型,相应的控制方程^[4-6]如下。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = S_m \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \rho f + \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + p \nabla u =$$

$$(\nabla\lambda \cdot \nabla)T + \rho q - \nabla q_r + \phi \quad (3)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

式中: Y_M 为压缩湍流中脉动扩张的贡献; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 为与湍流动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍流动能 k 的产生项; S_k, S_ϵ 为源项; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 为经验常数。

非稳态动量离散方程^[7]为:

$$\begin{cases} a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + A_e (p_p - p_E) \\ b = S_C \Delta V + a_e^0 u_e^0 \\ a_e = \sum a_{nb} + \Delta F - S_e \Delta V + a_e^0 \\ a_e^0 = \rho_e^0 \Delta V / \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

非稳态连续性方程的离散格式为:

$$\frac{\rho_p - \rho_p^0}{\Delta t} \Delta V + [(\rho u A)_e - (\rho u A)_w] + [(\rho v A)_n - (\rho v A)_s] + [(\rho w A)_t - (\rho w A)_b] = 0 \quad (7)$$

从连续性方程的离散方程中导出的压力修正方程,要包含表示瞬态特性的项。瞬态问题的压力修正方程为:

$$\begin{cases} a_p p'_p = a_w p'_w + a_E p'_E + a_S p'_S + \\ \quad a_N p'_N + a_B p'_B + a_T p'_T + b \\ a_w = \rho_w d_w \Delta y \Delta z, a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z \\ a_S = \rho_s d_s \Delta x \Delta z, a_N = \rho_n d_n \Delta x \Delta z \\ a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta y, a_T = \rho_t d_t \Delta x \Delta y \\ a_p = a_w + a_E + a_S + a_N + a_B + a_T \\ b = [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z + \\ \quad [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \Delta z + \\ \quad [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] \Delta x \Delta y + \\ \quad \frac{(\rho_p - \rho_p^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \end{cases} \quad (8)$$

对于瞬态问题流场的计算,采用隐式积分方程,在每个时间步内进行迭代,直到取得本时间步的收敛解,然后转入下一个时间步继续重复上述过程。

2 数值模拟结果与分析

2.1 温度场

模型 A、B、C、D 4 个不同时刻的温度云图示于图 3~6。

1) 对比模型 A、B

层流流动宏观上是规则的粘性流体运动,

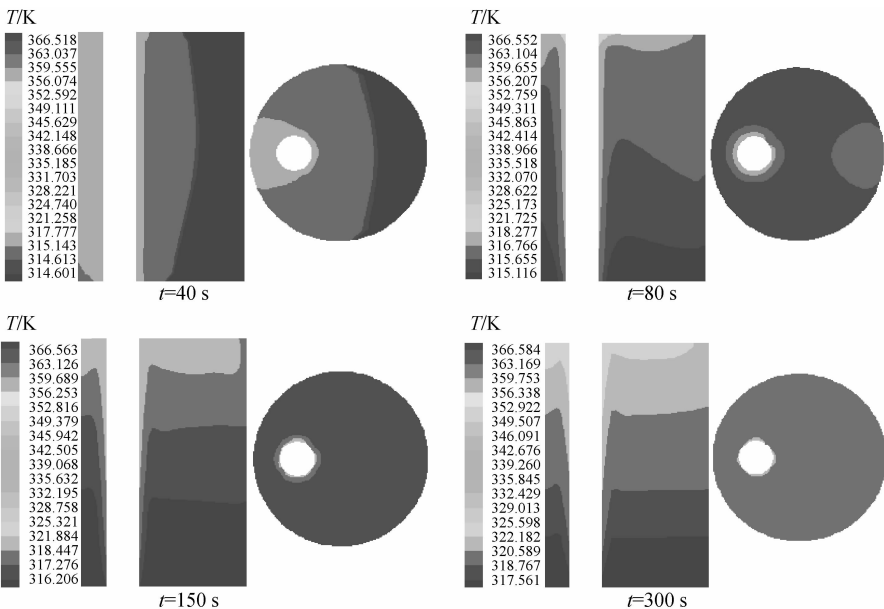


图 3 模型 A 4 个不同时刻的温度云图

Fig. 3 Temperature clouds at four different time of model A

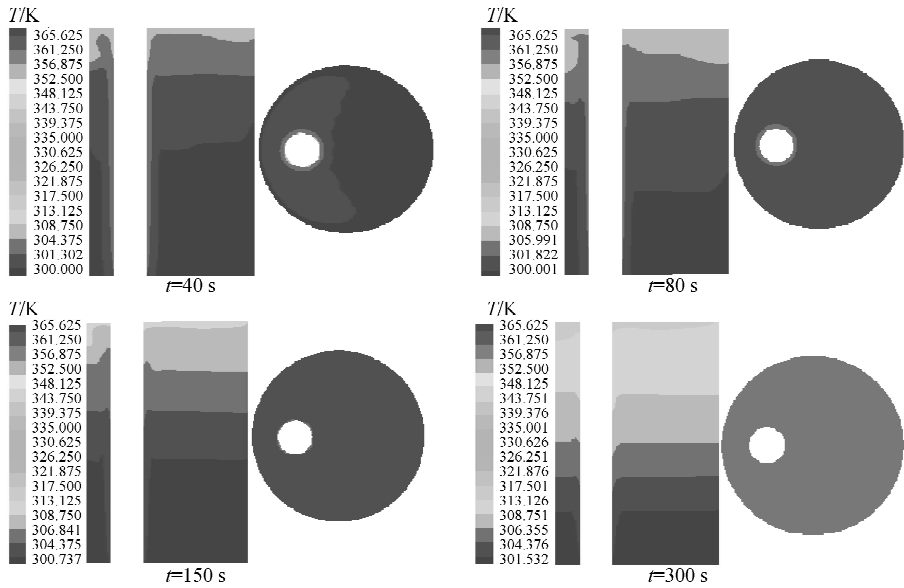


图4 模型 B 4 个不同时刻的温度云图

Fig. 4 Temperature clouds at four different time of model B

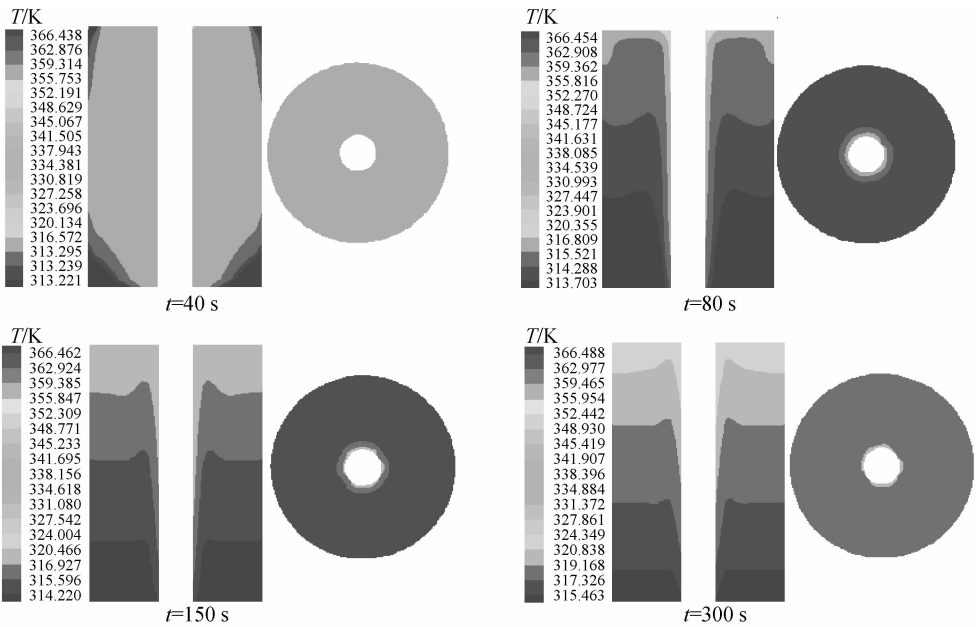


图5 模型 C 4 个不同时刻的温度云图

Fig. 5 Temperature clouds at four different time of model C

是流场呈一簇互相平行的流线的流动状态。湍流流动极不规则,极不稳定,每一点的速度随机变化。对于这种运动,一般把任一点的瞬时物理量用平均值和脉动值来描述。自然界的大部分流动是湍流流动。自然对流也有层流和湍流之分,一般用 Gr 作为自然对流流态转变的判据。

模型 A、B 的温度云图有很大的差异。从

整体的温度变化来看,用湍流模型计算的结果(模型 A)要比用层流模型计算的结果(模型 B)温度升高得更快,换热效果更强烈。从不同时刻的温度分布变化来看,模型 A 的变化较明显,等温线的变化反映了从导热现象到出现对流作用再到对流的强化甚至出现绕流;而模型 B 的温度分布变化很小,几乎反映不出流动状

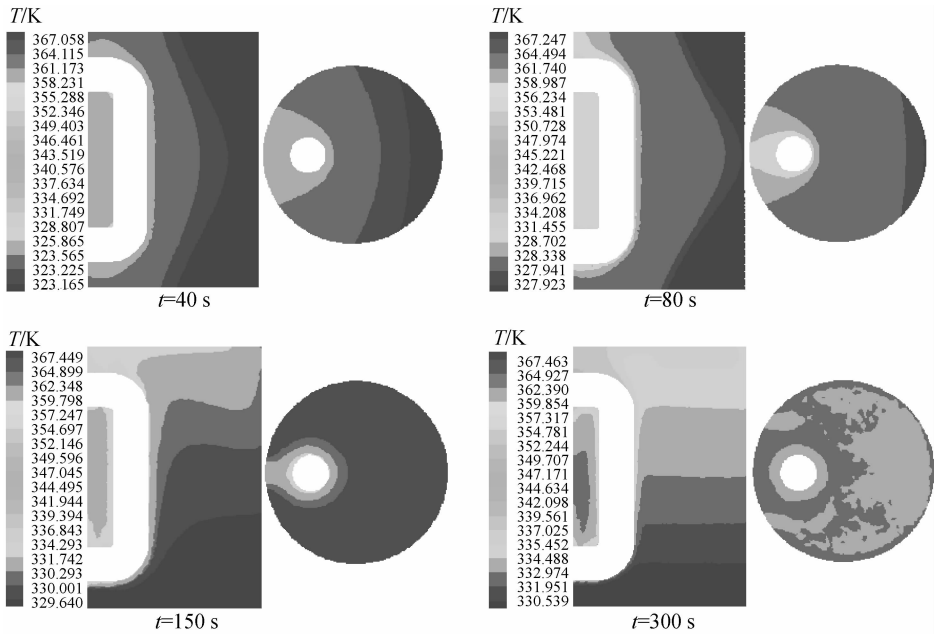


图6 模型D 4个不同时刻的温度云图

Fig. 6 Temperature clouds at four different time of model D

态的变化。考虑到非能动余热排出热交换器的传热管内外温差较大,且流动较复杂,选用湍流模型计算更为合理。

2) 对比模型 A、C

传热管相对水箱的位置不同,得出的温度场模拟结果也有所差异,这说明传热管的位置不同会影响传热效果。模型 A、C 的温度云图的最大差异就是模型 C 的温度分布呈现严格的对称性,而模型 A 的左右两侧温度分布有明显差异。从整体的温度变化来看,在相同时间内模型 A 的流体温度比模型 C 的升得略高一些,说明模型 A 的换热效果较模型 C 的好。传热管位置的不对称性,使得管左右两侧流体的温度产生差异,这种温度差无疑增加了热浮力的驱动作用,使得自然对流作用加强,对流混合作用反过来又促进了传热效果。

3) 对比模型 A、D

传热管由直管变成弯管后,换热器的结构变得更复杂,温度分布也产生了差异。从整体的温度变化来看,在相同时间内模型 D 的流体温度比模型 A 的升得高一些,说明模型 D 的换热效果较模型 A 的好。观察模型 D 的温度云图可看出,被弯管包围的小区域内的流体温度较其他流体温度高许多且变化较快。这种较大

的温度差异促进了自然对流作用。模型 D 的温度云图分布较不均匀且变化较大,说明弯管布置的结构复杂性在一定程度上增强了流体温度分布和流动的不规则性,使得湍流强度增加,致使换热效果得到改善。

2.2 流场

4 种模型分别在 4 个时刻中心纵截面的速度矢量图和速度云图及 4 种模型在同一参考平面上分别采用不同计算模型时的流场分布示于图 7~11。

1) 对比模型 A、B

从图 7、8 可看出,模型 A 的流体速度明显

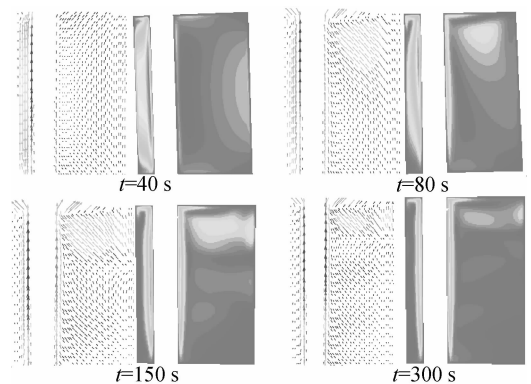


图7 模型A 4个不同时刻的速度图

Fig. 7 Velocities at four different time of model A

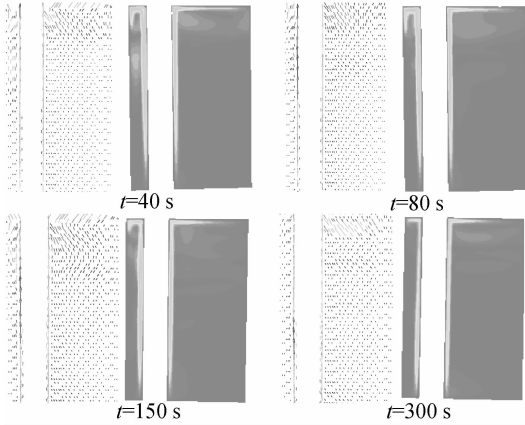


图 8 模型 B 4 个不同时刻的速度图

Fig. 8 Velocities at four different time of model B

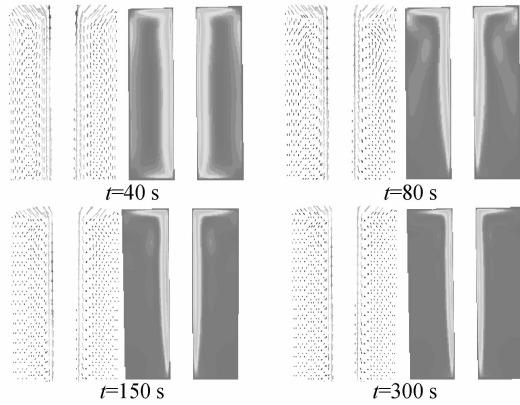


图 9 模型 C 4 个不同时刻的速度图

Fig. 9 Velocities at four different time of model C

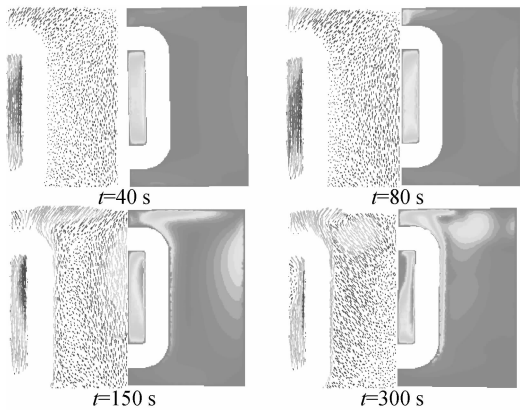


图 10 模型 D 4 个不同时刻的速度图

Fig. 10 Velocities at four different time of model D

较模型 B 的大,对流作用更强烈。模型 A 产生了绕流,出现了漩涡,且波及水箱的大部分流体区域,漩涡的位置和大小随时间不断变化,体现

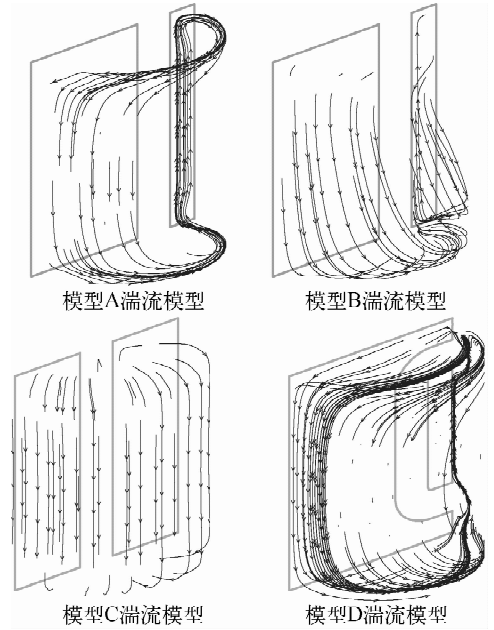


图 11 同一参考面上 4 个不同模型的流场图
Fig. 11 Flow field distributions of four models in same reference plane

了流动的复杂性。而模型 B 流体流动较为平缓,随时间的变化也不明显,仅在水箱上部的局部小区域出现了强度较小的绕流。

2) 对比模型 A、C

模型 C 由于结构的对称性导致流动也呈现对称性,相当于传热管左右两侧的流体将传热管传递的热量平分,产生对称的流动,彼此几乎互不影响和搅浑,成了几乎隔离的两个流动区域。而模型 A 的左右两侧流体的流动大有差异,这种差异是由传热的不对称引起的,同时这种差异使得两侧的流动相互影响产生搅浑,从而使对流作用增强。

3) 对比模型 A、D

传热管的形状不同,使得模型 A、D 的流场分布也不大相同。从图 7、10 可看出,模型 D 的流动要比模型 A 的稍强烈一些。弯管包围的左侧小区域流体的流动十分强烈,右侧区域结构的不规则性使得流动更为复杂,出现了明显的漩涡,且湍流强度要更大。

4) 对比同一参考面上 4 个不同模型的流场图

图 11 所示的流场图,是分别对 4 个模型截取同一位置的参考面所获得的。模型 A、B 的流场反映了湍流和层流两种流态的不同流动特

征,而模型 A 更加符合实际的流动现象。模型 A、C 中可更清楚的看出,模型 A 的流场较模型 C 的流场更加复杂,流线之间互相影响。模型 A、D 中,模型 D 的结构更加不规则,使得流动更加复杂,换热效果更好。因而模型 D 换热效果强于其它 3 种模型。

3 结论

1) 对上述 4 种不同结构模型进行比较得出,C 型管换热器是最优的结构方案。

2) 考虑到非能动余热排出热交换器的传热管内外温差较大,且流动较复杂,选用湍流模型计算更为合理。传热管位置的不对称性,引起左右两侧传热和流动的不对称性,使得流体相互影响,增强了自然对流作用。

3) 传热管的形状由直管变为 C 型弯管,结构的复杂性一定程度上增强了流体温度分布和流动的不规则性,使得湍流强度增加,致使换热效果得到改善。通过传热管位置和形状不同产生的影响效果的分析,在某种意义上说明了非能动余热排出热交换器的结构布置有利于提高自然循环能力,比较合理。

参考文献:

[1] 林诚格,郁祖盛. 非能动安全先进核电厂 AP1000[M]. 北京:原子能出版社,2008:138-142,157-161.

[2] RRYES J, WOODS B. Testing of passive safety system performance for higher power advanced reactors[R]. US: Oregon State University, 2004.

[3] SCHULZ T L. Westinghouse AP1000 advanced

passive plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(5): 1 547-1 557.

- [4] 薛若军,邓程程,彭敏俊. 非能动余热排出热交换器数值模拟[J]. 原子能科学技术,2010,44(4):429-435.
- XUE Ruojun, DENG Chengcheng, PENG Minjun. Numerical simulation of passive residual heat removal heat exchanger[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(4): 429-435 (in Chinese).
- [5] 李明岩,彭敏俊,张志俭. 非能动核电站主给水丧失事故仿真研究[J]. 原子能科学技术,2010,44(4):436-440.
- LI Mingyan, PENG Minjun, ZHANG Zhijian. Simulation research on loss of normal feedwater for passive nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(4): 436-440(in Chinese).
- [6] 董其伍,刘敏珊. 纵流壳程换热器[M]. 北京:化学工业出版社,2006:204-211.
- [7] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007:46-49.
- [8] 明廷臻,刘伟,王伟. 余热排出热交换器管束间自然对流的 CFD 模拟[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2003,31(9):9-12.
- MING Tingzhen, LIU Wei, WANG Wei. CFD simulation of natural convection circuits among tube bundle in residual heat removal exchanger [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2003, 31(9): 9-12(in Chinese).
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005.