

AP1000 非能动换热器数值模拟

薛若军^{1,2}, 王明远¹, 李朝君¹, 祝 贺¹

(1. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 150001 哈尔滨; 2. 海军装备研究院, 100161 北京)

摘 要: 为准确认识 AP1000 非能动余热排出热交换器的具体换热和流动过程, 针对 AP1000 非能动换热器, 应用 FLUENT 软件对其非稳态传热特性和流动进行研究, 比较分析同一时刻不同位置温度场和流场的分布, 以及不同时刻同一位置温度场和流场的变化, 分析换热器传热和流动特性随时间的变化, 同时对比分析直管形管束和弯形管束对换热器自然对流的影响. 分析结果表明: 温差、漩涡和回流使温度场和流场相互影响, 弯形管束使流体自然对流更加复杂. 研究成果有助于分析换热器的自然循环能力, 为我国新建的 AP1000 先进压水堆核电机组的安全运行提供参考.

关键词: 非能动换热器; 自然循环; 弯管; 传热; 流动特性

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0133-06

Numerical simulation of AP1000 passive residual heat removal heat exchanger

XUE RUO-jun^{1,2}, WANG Ming-yuan¹, LI Chao-jun¹, ZHU He¹

(1. National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China; 2. Navy Equipment Research Institute, 100161 Beijing, China)

Abstract: To accurately know heat transfer and flow processes of AP1000 passive residual heat removal heat exchanger (PRHR HX), and provide a reference for the safe operation of our new AP1000 advanced pressurized water reactor nuclear power plant, FLUENT software is used. By comparative analysis of the distribution of temperature-field and flow-field in different locations at the same time, and the change of temperature-field and flow-field in the same location at different times, we can know the heat transfer and flow characteristics which are changed with time more intuitive, and analyze the effect of straight tubes and elbow tubes on the natural circulation. The results show that the temperature difference, vortex, flow around make the interaction of temperature field and flow field. Due to the influence of elbow tubes structure, the fluid natural convection in the IRWST is more complex.

Key words: passive residual heat removal heat exchanger; natural circulation; elbow tubes; heat-transfer-ring; flow characteristic

非能动余热排出换热器 (PRHR HX) 是 AP1000 非能动余热排出系统中的主要设备, 在事故或停堆时利用自然循环将反应堆内的余热排出^[1]. 本文针对 AP1000 弯管结构的换热器进行数值模拟, 分析温度场和流场变化, 并同文献[2]的模拟结果进行比较. 文献[2]主要是将弯形管简化为直管后进行模拟分析. 虽然这种简化在一

定程度上可以看出换热器的温度场和流场变化, 但是仍无法反应真实的变化过程.

用 FLUENT 软件对管壳式换热器的模拟已经有过许多研究, 如 O. Ender 等^[3]研究了折流板的宽度对管壳式换热器壳侧传热特性的影响, 并且从模拟结果的对比中得出了适合管壳式换热器数值模拟的最佳湍流模型; A. Karno 和 S. Ajib 等^[4]研究了不同传热管的排列方式对换热效果的影响; C. Uday 等^[5]开发了一种适用于研究管壳式换热器壳侧压降的理论模型, 并且研究了管壳式换热器壳侧压力的变化. 这些研究都充分说

收稿日期: 2012-03-23.

基金项目: 高等学校创新引智计划资助项目 (B08047).

作者简介: 薛若军 (1974—), 男, 副教授.

通信作者: 薛若军, xueruojun@hrbeu.edu.cn.

明了数值模拟研究管壳式换热器的可行性和有效性.

1 换热器模型

1.1 换热器物理模型

图1是AP1000非能动余热排出换热器(PRHR HX)的局部物理模型^[6-8],换热器安装在安全壳内换料水贮存箱(IRWST)里,IRWST的高度为16 m,半径为7 m,内侧传热管距IRWST壁面约为2.49 m,传热管束粗约为2.13 m.由于没有研究管内的流动情况,这样只需对传热管外部进行网格画分,便可以保证网格数量在计算机的承受能力范围内.在尽量不改变原模型具体结构的基础上,使模拟的结果更接近于原模型,并可同时研究弯管区的流动情况.换热器的物理模型和管束排列方式同文献[2]相同.换热器简化模型及坐标方向图如图2所示.

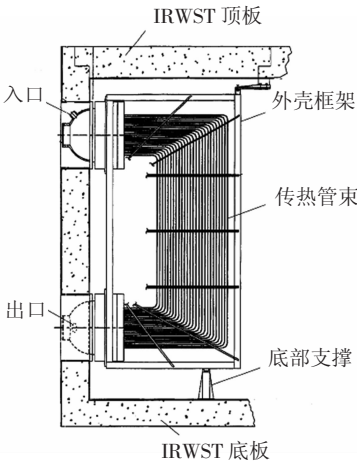


图1 PRHR HX 物理模型图

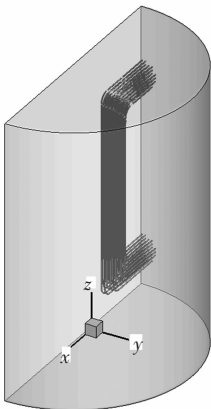


图2 简化模型及坐标方向

1.2 控制方程

控制方程如下^[2,9-10].

守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial\varphi}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial\varphi}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}(\rho w\varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial\varphi}{\partial z}) = S_\varphi.$$

湍流模型采用 $k - \epsilon$ 湍流模型,对连续方程, $\varphi = 1$; 动量方程, $\varphi = u, v, w$; 湍流脉动方程, $\varphi = k$; 湍流耗散率方程, $\varphi = \epsilon$. 每个控制体共有6个方程.

能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + p \nabla u = (\nabla \lambda \cdot \nabla) T + \rho q - \nabla q_t + \varphi.$$

迪贝斯-贝尔特公式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n. \tag{1}$$

对于自然对流问题,密度的处理较为关键.由于水箱内流体密度变换不太大,为得到更好的收敛速度,选用 Boussinesq 近似,除动量方程的浮力项外,其他方程中的密度均看成常数.动量方程中的浮力项可表示为

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g.$$

其中: ρ_0 为流体的(常)密度; T_0 为操作温度; β 为热膨胀系数,取 $\beta \approx 0.00052$,以上各个方程中各项物理意义及经验系数详情参见文献[7].

2 边界条件设置

因为没有画管内网格,所以不能设置管入口和出口边界条件,只能设置管壁边界条件.本文采用定壁温的边界条件,并将管壁温度线性化处理来反映沿管长方向温度的变化.图3是将直管型换热器壁温分不同段数处理时温度云图.从云图分析可知,分段越少,温度分层越明显,这是因为分层少高温段较长使传热更加明显;但是分段越多更能反映实际的传热过程.本文结合弯管结构,将管壁温线性化分为5段.这里要注意管内流体的温度并不是管外壁的温度,必须根据相关的传热知识计算出管外壁温.首先由方程(1)计算出管内侧对流换热系数,再由对流换热公式计算出壁温.分别计算出管进出口外壁温后,再将壁温线性化分成5份处理.水箱外壁设为绝热壁面.水箱初始水温 $48.9\text{ }^\circ\text{C}$,传热管的入口温度为 $297.2\text{ }^\circ\text{C}$,出口温度为 $92.8\text{ }^\circ\text{C}$.对于非稳态问题的求解,要选取合适的时间步长,还要根据残差监视曲线的变化趋势调整时间步长和最大迭代步数.计算时先取较小的时间步长(如 0.1 s),计算到一定的时间后再逐渐调大时间步长^[11-12].

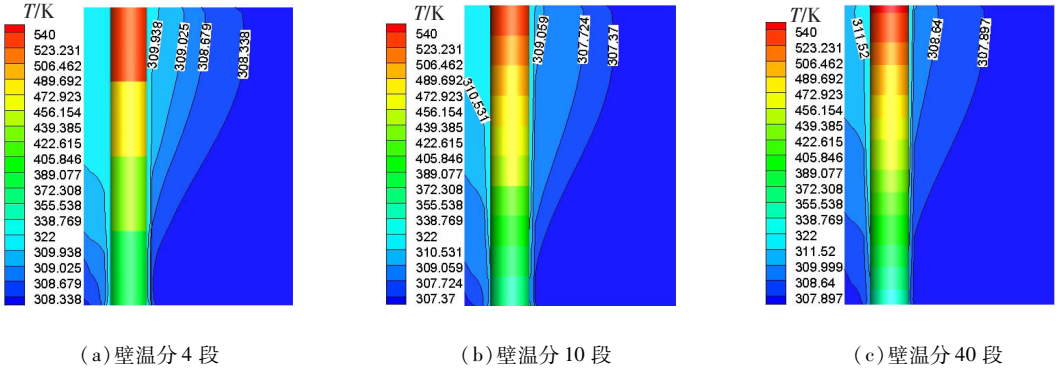


图 3 壁温分不同段线性化处理温度分布云图

3 计算结果分析

3.1 温度场分析

3.1.1 300 s 时刻的温度场分析

在 300 s 时刻, 换热器内的温度场和速度场开始出现明显的变化, 所以本文取 300 s 为研究时间进行分析. 云图中温度的单位为 K, 速度单位 m/s.

从图 4 (a) 可以看出, 越靠近管壁的直线 ($x = -2.5$) 上各点的温度越高, 但在水箱上部 ($z > 12.8$) 却出现 $x = 2.5$ m 曲线高于 $x = 0$ m 曲线, $x = 0$ m 曲线高于 $x = -2.5$ m 曲线的情况, 这说明水箱中上部区域出现了局部的回流现象. 从每条曲线的总体趋势来看, 都是沿 z 方向温度逐渐升高, 这主要是受管壁线性化温度高低不同的影响, 其次也由于热流体在浮力驱动下向上

流动导致的. 对比 3 条曲线, 可以发现在同一高度 z 不同水平位置 x 的温度变化不同. 在较低位置, 水箱不同水平位置的温度差异较小; 在较高位置, 水箱不同水平位置的温度差异较大, 这是由于在较高位置换热和流动更强烈导致的. 这一模拟结果和参考文献[2]中相似. 在图 4 (b) 中从 3 条曲线的整体分布状态来看, 直管段高度越高的水平面上温度越高, 而远离弯管区域的 $z = 15$ m 曲线的温度则低于靠近弯管区的 $z = 12.8$ m 曲线, 这是因为水的导热系数较小, 传递到 $z = 15$ m 处的热量相对较小. 在图 5 (a) 中可以看出水箱中心明显的回流现象, 而远离中心管束的区域这一现象还不明显, 这说明越靠近中心管束集中区域的流体的传热和对流效果越强, 而在图 5 (c) 中几乎看不出管束的影响, 等温线变化也不明显.

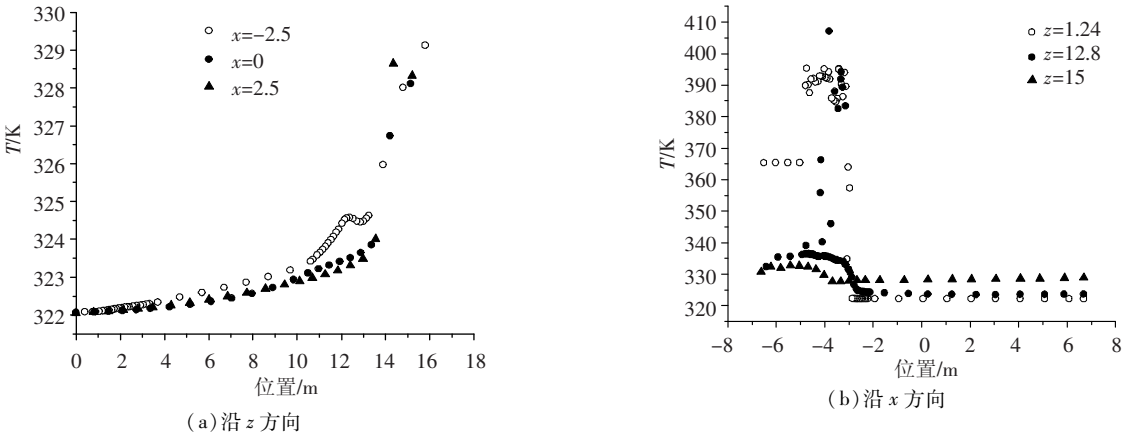


图 4 沿 x 方向和 z 方向的温度分布

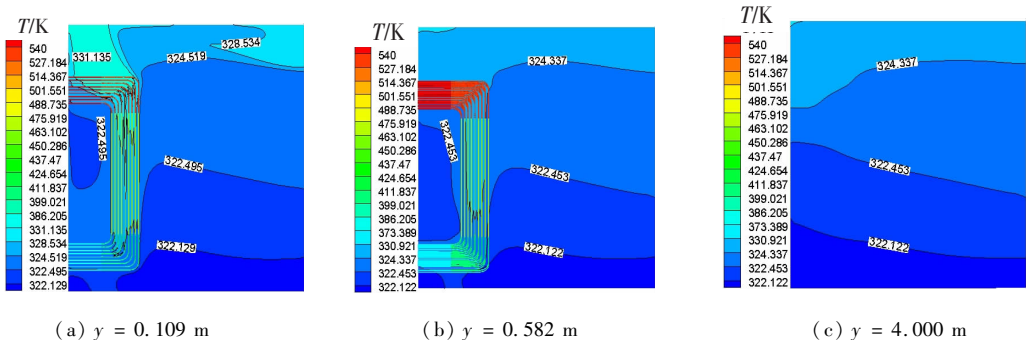


图 5 3 个不同纵截面的温度分布云图

3.1.2 不同时刻的温度场分析

图6是不同时刻截面 $y = 0.109 \text{ m}$ (第一排管) 的温度云图. 从云图的变化来看, 开始时导热占主导作用, 管束通过热传导作用把热量传递给周围流体, 使周围流体的温度迅速升高; 但由于管壁温度沿 z 正方向线性升高, 所以换热效果也沿 z 正方向逐渐升高; 管束附近的热流体在浮力驱动下向上流动, 水箱内水温从下至上呈逐渐升高的趋势, 且等值线向右侧发生倾斜. 由于水的导热系数较小, 因而开始时温度明显升高的区域只是管束周围的小范围区域; 但随着时间的增长, 流体之间温差的增大使得流体产生自然对流现象, 流动作用增强,

温度等值线发生弯曲, 使管束附近集中的热量不断扩散出去. 从 $t = 150 \text{ s}$ 的图中可以看出, 在水箱上部温度等值线弯曲最大, 出现两边低中间高的趋势, 这说明在水箱上部发生了强烈的回流现象, 促进了流体之间以及流体和壁面之间的换热. 在 $t = 300 \text{ s}$ 时, 随着自然对流的作用, 水箱上部等温线弯曲减弱, 而水箱中下部等温线也发生了不同程度的弯曲. 同文献[2]中的直管模拟结果比较发现, 相同时刻弯管结构换热器水箱中云图变化更为明显, 说明换热效果更好, 而且相同时刻弯管换热器的绕流现象也更加明显, 这对于及时排出余热是有利的.

图7是不同时刻 $z = 12.8 \text{ m}$ 截面的温度云图.

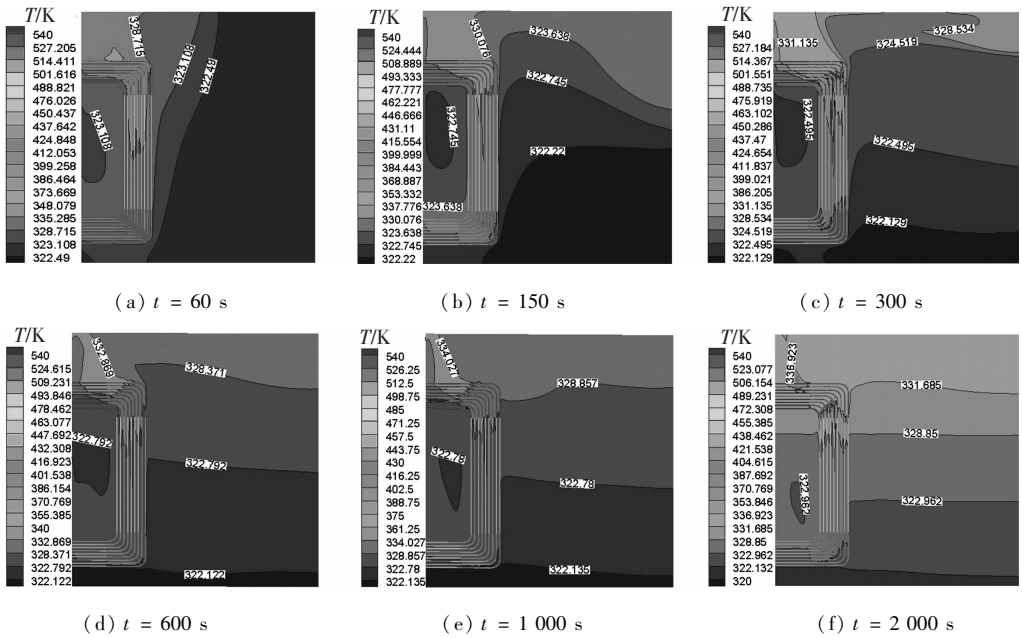


图6 不同时刻 $y=0.109 \text{ m}$ (第1排管) 截面的温度云图

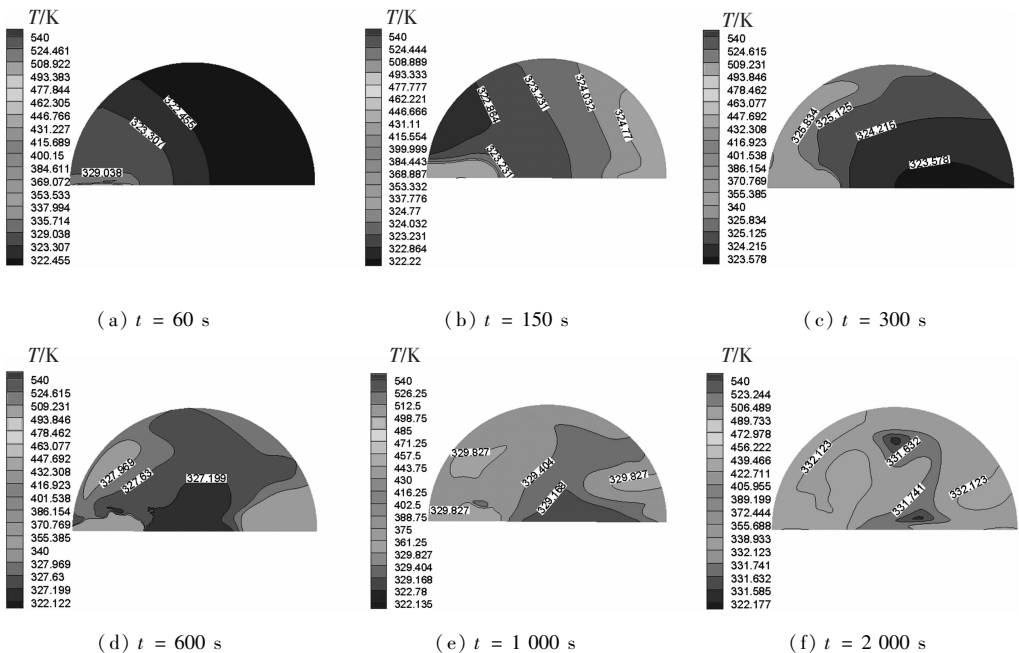


图7 不同时刻 $z=12.8 \text{ m}$ 截面的温度云图

从温度云图的变化来看,开始时导热作用产生的管束附近的温度梯度很明显.随着时间的增长,流体在热浮力驱动下产生自然对流,热流体有贴水箱侧壁流动的趋势,使得水箱壁面附近温度较高,中间部分区域温度反而较低,出现绕流现象,且随时间的变化绕流区的位置也不断变化.从图中可以看出,刚开始只在弯管区有小范围的绕流,在 $t = 300\text{ s}$,弯管区的左上方和右上方分别存在绕流,在 $t = 600\text{ s}$ 时,左上方绕流消失,而右上方绕流开始像左移动,有逐渐减小的趋势,在 $t = 1\ 000\text{ s}$ 时,绕流继续减小,并转化为几个局部小的回流,在 $t = 2\ 000\text{ s}$ 时,水箱中绕流现象基本消失,水温分布趋于均匀.

3.2 流场分析

3.2.1 300 s 时刻的速度场分析

图 8(a)是中心面上的 3 条平行的竖直线沿 z 方向的速度分布曲线.从整体来看,流速随高度增大不断升高,越靠近管壁的区域这种上升趋势越明显(如 $x = -2.5\text{ m}$ 曲线),而较远位置处这种上升趋势较平缓.这是因为靠近管壁区的流体受管壁的影响越大传热效果越好,产生的热浮力驱动作用最大;而远离管壁处温度较低,产生的浮升力较小.在中上部位置,3 条曲线由于在弯管上部区域,温差较大,自然对流比较剧烈,流速相对弯管下部区域大很多,而随后在此区域由于温差和自然对流的作用出现了绕流现象,导致流速出现先增大后减小又增大的过程.从 $x = -2.5\text{ m}$ 曲线可以看出,由于弯管区结构发生突变使流动的复杂性增强,导致在上部弯管区出现了速度先降低后升高,随后结构变得开阔,速度又逐渐平稳升高.图 8(b)为中心面上 3 条平行的水平线沿 x 方向的速度分布曲线. $z = 12.8\text{ m}$ 曲线的形状反映了管束附近区域的速度梯度分布.而 $z = 1.24\text{ m}$ 和 $z = 12.8\text{ m}$ 两条曲线的弯管区域温度的波动较同一位置直管区更剧烈.在 $z = 15\text{ m}$ 曲线中,在弯管区左侧流速出现了先降低又升高的趋势,这是因为在弯管的左上方出现了局部的回流.而从 $z = 15\text{ m}$ 和 $z = 12.8\text{ m}$ 两条曲线中可以看出,在弯管区右侧,由于出现了绕流,流速先增大后减小,且绕流已经开始向左移动,越靠近弯管壁面,换热越明显,向左移动得越快.

图 9 是 IRWST 内部分区域的流线图.从图中可以看到:有热流体沿管壁上升而后向下纵向绕流的较规则的运动趋势;产生了漩涡,漩涡的搅动有利于对流换热;局部的绕流和回流现象不仅仅是纵向和横向作用的,而是相互影响,形成了斜向的漩

涡.这说明水箱内各流体的运动规律是相互影响的复杂运动.从图中还可以清晰地看到弯管左上方、右上方、弯管内侧以及弯管外侧局部的回流,同时还可以看到流体沿着水箱筒体壁面的绕流.

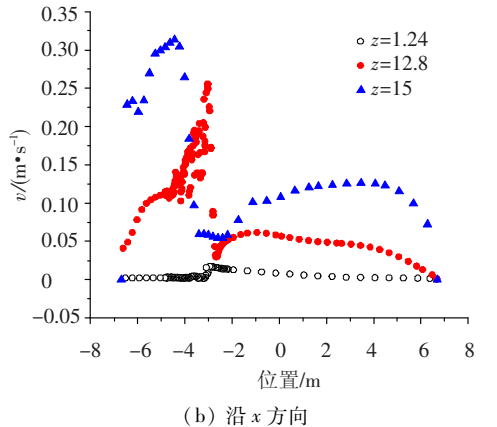
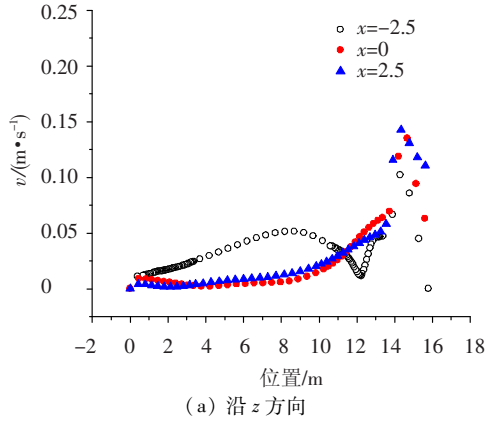


图 8 沿 z 和 x 方向的速度分布

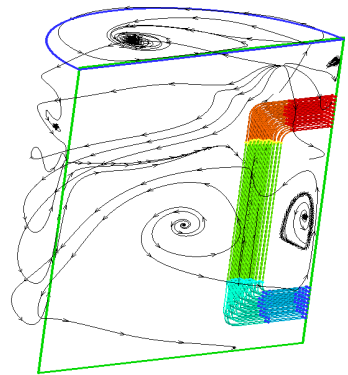


图 9 IRWST 内部分区域流线图

3.2.2 不同时刻的速度场分布

由图 10 可知,在换热器上部弯管区换热很强烈,150 s 时该部分流体流动的速度已经很快,而且出现了漩涡的趋势,随着换热的继续进行,出现了明显的绕流现象,产生了更加明显的漩涡.这种流动形式破坏了管束的边界层使换热效果更强.同直管式换热器相比,弯管换热器的换热效果更好,绕流现象更加明显,在水箱的上部出现了大量的漩涡,加剧了换热,而且在两弯管之间的区域换热也明显增强.

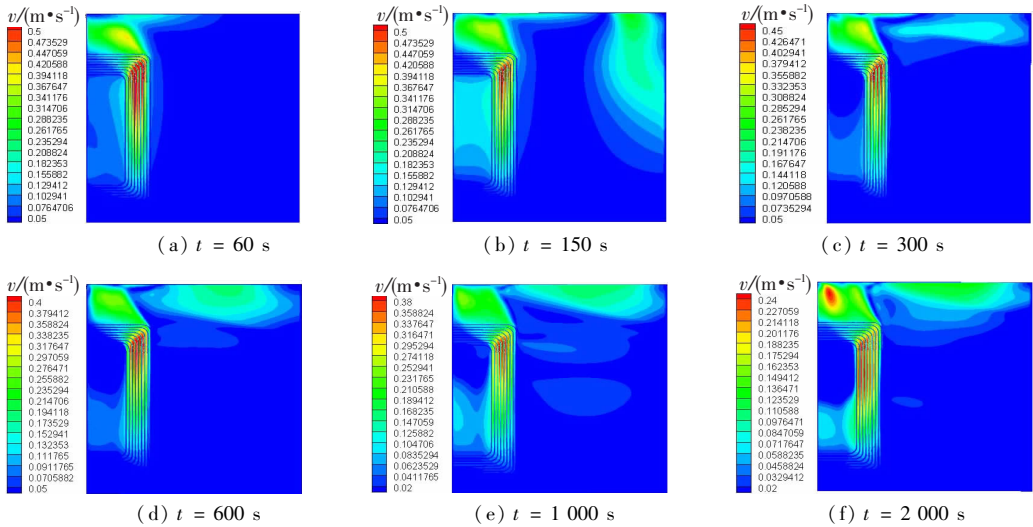


图 10 不同时刻 $y = 0.109 \text{ m}$ (第 1 排管) 截面的速度云图

4 结 论

1) 由于温差、漩涡和绕流的存在, 换料水箱中温度场和速度场产生相互影响, 在弯管处温度场和速度场的变化较剧烈, 有利于换热。

2) 随着时间的增长, 热流体沿着水箱壁面和弯管束内侧进行绕流, 并且强度、位置和方向不断的变化。由于受到了弯管束结构的影响, 使得流体在换料水箱中的自然对流作用更加复杂, 而流体的流速和方向的多变会更有利于热量的传递, 增加了该换料水箱的非能动性。

3) 管束附近产生了较强的湍流, 在弯管区绕流和回流现象更加明显。由于弯管结构增加了流体的扰动性, 所以同直管换热器相比弯管换热器的换热效果更好, 更能及时的排出反应堆内的余热, 保证反应堆的安全。

参 考 文 献:

[1] 西屋电气公司. 西屋公司的 AP1000 先进非能动型核电站[J]. 现代电力, 2006, 25(3): 60 - 61.
 [2] 薛若军, 邓程程, 彭敏俊, 等. 非能动余热排出换热器数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(4): 429 - 435.
 [3] ENDER O, LLKER T. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tubes heat exchanger[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 1004 - 1014.

[4] KARNO A, AJIB S. Effect of tubes pitch on heat transfer in shell and tubes heat exchangers-new simulation software[J]. Heat Mass Transfer, 2006, 29: 263 - 70.
 [5] UDAY C. Modeling for shell-side pressure drop for liquid flow in shell-and-tubes heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 601 - 610.
 [6] 林诚格, 郁祖盛. 非能动安全先进核电站 AP1000 [M]. 北京: 原子能出版社, 2008: 138 - 142, 157 - 161.
 [7] RRYES J, WOODS B. Testing of passive safety system performance for higher power advanced reactors [R]. [S. l.]: Oregon State University, 2004.
 [8] SCHULZ T L. Westinghouse AP1000 advanced passive plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(5): 1547 - 1557.
 [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 333 - 370.
 [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 237 - 243.
 [11] ANSYS Fluent Version 6.3. Fluent 6.3 user's guide [M]. Lebanon: ANSYS Inc, 2006.
 [12] DONG Q W, WANG Y Q, LIU M S. Numerical and experimental investigation of shell side characteristics for ROD baffle heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 651 - 660.

(编辑 杨 波)