

7-31-2020

Numerical Simulation of Hot and Cold Fluids Mixing in a Tee-Junction

Wenli Wei

Institute of Hydraulic Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China;

Yunfei Hong

Institute of Hydraulic Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China;

Shipeng Shao

Institute of Hydraulic Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China;

Yuling Liu

Institute of Hydraulic Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Hot and Cold Fluids Mixing in a Tee-Junction

Abstract

Abstract: Flow and heat transfer model in tee junction was established and the 3D RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was completed to simulate the process of mixing and capture the information of velocity and temperature. The simulation results and measured data of the mean value of velocity and temperature were analyzed and compared, and are in a good agreement, which indicates that the RNG $k-\varepsilon$ model combined with the heat transfer model can well simulate the hydraulic characteristics and heat transfer mechanism of hot and cold fluids in a tee junction. *Furthermore, the upstream segment of a tee junction has two kinds: straight pipe and bend, for which the velocity and temperature distributions along different vertical lines were compared. Through the comparisons, is obtained that the hot and cold fluids are more conducive to mix when the upstream inlet section is elbow for the tee junction, which results in the temperature gradient being reduced, and the fluctuations being reduced for the beneficial security.*

Keywords

Tee junction, mixing, flow, heat transfer, numerical simulation

Recommended Citation

Wei Wenli, Hong Yunfei, Shao Shipeng, Liu Yuling. Numerical Simulation of Hot and Cold Fluids Mixing in a Tee-Junction[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1444-1450.

T 型管道冷热流体混合的数值模拟研究

魏文礼, 洪云飞, 邵世鹏, 刘玉玲

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 通过建立 T 型管道混合过程的流动与传热模型, 选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭雷诺时均方程组, 对冷热流体混合过程进行模拟, 捕捉混合过程中速度和温度信息, 将计算的流体速度和温度的时均值与试验值进行分析比较, 结果吻合良好, 得出 RNG $k-\varepsilon$ 模型结合传热模型是模拟 T 型管道中冷热流体水力特性和传热机理的有效方法。通过比较上游进口段分别为直管和弯管时 2 种 T 型管内不同特征垂线的速度和温度分布, 得出上游进口段为弯管时更有利于 T 型管道中冷热流体的混合, 减小温度梯度, 进而减小波动, 对安全有利。

关键词: T 型管道; 混合过程; 流动; 传热; 数值模拟

中图分类号: TK123

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015)07-1444-07

Numerical Simulation of Hot and Cold Fluids Mixing in a Tee-Junction

Wei Wenli, Hong Yunfei, Shao Shipeng, Liu Yuling

(Institute of Hydraulic Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Flow and heat transfer model in tee junction was established and the 3D RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was completed to simulate the process of mixing and capture the information of velocity and temperature. The simulation results and measured data of the mean value of velocity and temperature were analyzed and compared, and are in a good agreement, which indicates that the RNG $k-\varepsilon$ model combined with the heat transfer model can well simulate the hydraulic characteristics and heat transfer mechanism of hot and cold fluids in a tee junction. Furthermore, the upstream segment of a tee junction has two kinds: straight pipe and bend, for which the velocity and temperature distributions along different vertical lines were compared. Through the comparisons, is obtained that the hot and cold fluids are more conducive to mix when the upstream inlet section is elbow for the tee junction, which results in the temperature gradient being reduced, and the fluctuations being reduced for the beneficial security.

Keywords: Tee junction; mixing; flow; heat transfer; numerical simulation

引言

T 型管道中冷热流体混合时会在管道周围产生温度波动, 由于温度梯度的产生会在管道周围产

生热应力, 当热应力的范围足够大时, 在冷热流体混合过程中就很容易诱发管道壁面热疲劳失效^[1-2]。在石油化工、能源动力等管道系统中, 管道安全尤其受到关注, 因此揭示 T 型管道中冷热流体混合过程的热波动机理对于 T 型管道的设计、优化、安全评估都具有重要的意义^[3]。国内外许多学者也对有冷热流体混合的管道进行了研究, 如 Wu 等^[4]运用粒子成像测速技术和 $k-\varepsilon$ 模型对有套管的横向射流的流动进行了实验研究和数值模拟, 射



收稿日期: 2014-07-11

修回日期: 2014-09-25;

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178391); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101);

作者简介: 魏文礼(1965-), 男, 陕西大荔县人, 博士, 教授, 研究方向为环境水力学、水污染控制理论与技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 1444 •

流与主流之比范围为0.5~8, 得出随着速度比的增加, 流动呈现附着射流、升空射流和冲击射流3种基本流型; 卢冬华等^[5]运用应力湍流代数模型((ASM), 对具有不同温度的主管和支管流体在等直径三通管中的热分层流动进行了三维数值模拟, 得出了三通管内的速度和温度的分布规律; 王海军等^[6]对不同射流与主流流速比下T型通道中横向射流的流动与传热进行了实验研究, 得到了流动的基本特性以及不同流速比下局部点的温度波动特性; Kamide等^[7]应用AQUA程序, 对T型管道内的热波动现象进行了模拟分析和实验研究, 并对温度波动进行了能谱分析, 研究模拟结果与实验结果符合较好。他们还根据主管与支管的动量比 M_R 由小到大, 将管道内的流动形态分为3种: 碰撞射流($M_R < 0.35$), 偏射流($0.35 < M_R < 1.35$)和壁面射流($M_R > 1.35$); 吴海玲等^[8]采用稳态 $k-\varepsilon$ 湍流模型对厚壁通道内的流动与传热特性进行了研究, 定性讨论了不同流速比下构件承受的热冲击状况; Frank T等^[9]应用ANSYS CFX中的URANS模型对T型交汇管道中的湍流和热混合进行了数值模拟研究, 结果与试验值吻合良好; Kamaya M等^[10]对混合三通管的由热应力导致的疲劳损伤进行了分析评估, 对热应力的空间和空间分布进行了研究; Simoneau等^[11]运用不同的亚格子模型, 在CFD软件Star-CD平台上, 对核电厂T型管道和绕过障碍物的交叉流流动与传热过程进行了模拟研究, 获得了温度和压力波动等特征参数, 模拟结果与实验结果具有很好的吻合度, 得出精细网格和合理的上游边界条件对获得准确结果至关重要。

本文在前人研究的基础上, 采用流体仿真软件Fluent6.3对上游主管进口段分别为直管和弯管2种体型下冷热流体混合时T型管道中的水力特性和传热机理进行了数值模拟研究, 结合专业的后处理软件Tecplot对模拟的结果进行分析, 得到其速度和温度的变化规律, 比较2种进口体型的优缺点, 以期在实际工程中T型管道的优化设计提供参考。

1 数学模型

描述水流的时均控制方程如下^[12]:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

雷诺时均方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho \beta (\overline{T} - T_0) g_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} -\rho \overline{u_i' u_j'} = & \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \\ & \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: t 是时间; x_i 是沿 i 方向的空间坐标($i=1, 2, 3$); u_i 是沿 i 方向的时均速度分量; μ_t 为湍动黏度; ρ 和 μ 分别为流体密度和分子黏性系数; p 为压强; β 为热膨胀系数; g_i 为 i 方向的重力加速度; k 为湍动动能; δ_{ij} 是 Kronecker 函数: $\delta_{ij} = 1, (i = j)$; $\delta_{ij} = 0, (i \neq j)$ 。

热量输运方程的表达式如下^[13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{T u_j}) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} - \rho \overline{T u_j''} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$-\rho \overline{T u_j''} = \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \quad (5)$$

其中: λ 为导热系数; c_p 为比热容; σ_T 为紊动普朗特数。

采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型结合热量输运方程模拟时, 其湍动动能 k 的方程如下^[13]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho g_i \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (6)$$

式中系数及表达式如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$\sigma_k = 0.7179$, $\beta = 0.015$, 湍流动能耗散率 ε 的方程参考文献[13]。

以上方程组构成了求解流场分布规律的封闭方程组, 根据实际工况施加相应的边界条件后, 构成该方程组的定解问题。

2 模型验证及结果分析

2.1 计算区域

本文将对如图1(a), (b)所示的上游进口段主管分别为直管和弯管的2种T型管道中的冷热流体的混合过程进行数值模拟, 其垂直中心断面的具体尺寸图如图2(a), (b)所示, 其中支管垂直连接于水平的主管下方。主管管径为0.15 m, 支管管径为0.05 m。

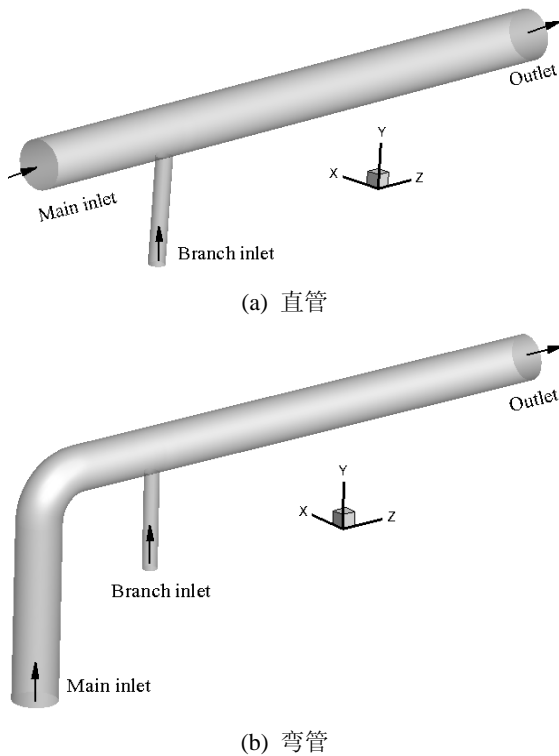


图 1 计算区域图

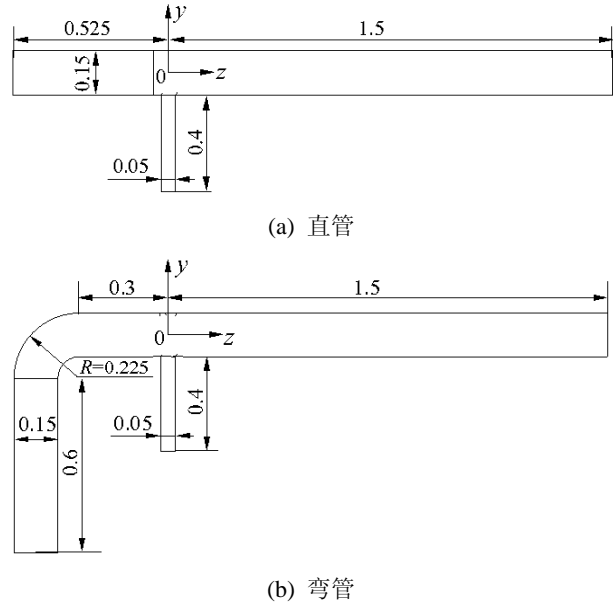


图 2 垂直中心断面尺寸示意图(单位/m)

2.2 网格划分

初始计算网格由GAMBIT软件生成, 计算时采用结构化网格和非结构化网格结合的方式进行划分, 在主管和支管交汇的局部区域用非结构化四面体网格进行划分, 其他区域用结构化网格进行划分。上游进口段主管为直管时网格总数为52 416个, 上游进口段主管为弯管时网格总数为64 557个, 为清楚显示网格图, 在采用相同网格划分方式的前提下, 将下图中网格尺寸较实际计算尺寸放大一倍, 如图3所示。

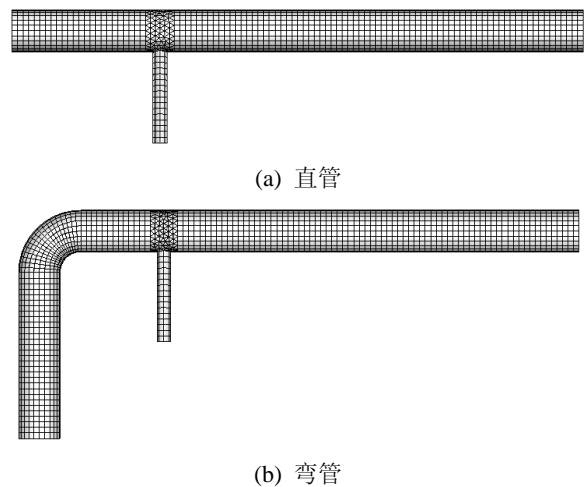


图 3 计算区域网格图

2.3 边界条件

计算中流体为水, 主管进口为速度进口, 水流流速为 1.46 m/s, 水流温度为 321.15 K; 支管进口也为速度进口, 水流流速为 1 m/s, 水流温度为 306.15 K; 出口为压力出口, 相对压强为 0, 初始时刻管道中注入的水的温度与试验环境温度相同, 即初始时刻水流温度为 300 K。管道壁面上的边界条件符合流速在壁面上的不分离和无滑移条件, 其管道固体边界条件为绝热, 厚度为单位 1, 模型的离散采用有限体积法, 速度与压力耦合方程组求解时使用半隐 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)算法。

2.4 结果分析和讨论

在以下分析中所提的速度 V_z^* 和温度 T^* 均为无量纲化的, 其定义如下^[7]:

$$V_z^* = \frac{V_z}{V_m} \quad (7)$$

式中: V_z 为 T 型管中心断面($x=0$)不同垂线上的纵向流速; V_m 为主管进口流速。

$$T^* = \frac{T - T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (8)$$

式中: T 为 T 型管中心断面($x=0$)不同垂线上的温度值; T_{hot} 为主管进口温度; T_{cold} 为支管进口温度。

2.4.1 速度验证

将 T 型管上游进口段为直管时其垂向中心断面($x=0$)不同垂线上的纵向速度的模拟值与试验值^[7]比较, 结果如图 4 所示。

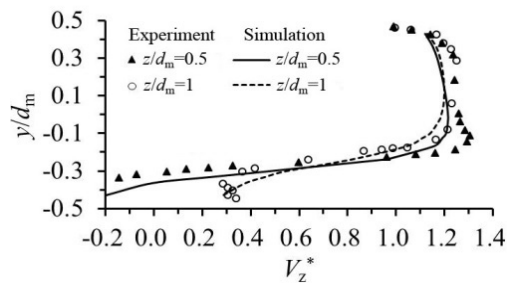


图 4 不同垂线纵向流速比较图

由图 4 可以看出, 试验值与模拟值变化规律吻合良好, 数值上也有一定的吻合度, 即水流纵向流速在 $-0.2 < y/d_m < 0.5$ 范围内流速变化很小, 试验值与模拟值吻合也很好, 最大误差 $< 5\%$, 在 $-0.5 < y/d_m < -0.2$ 范围内水流纵向流速急剧增大, 且变化梯度大, 试验值与模拟值在局部位置误差大, 这是因为在这一区域冷热水流混掺剧烈, 加之湍流模型本身的复杂性导致的。但整体试验值与模拟值变化趋势吻合良好, 即在 $z/d_m=0.5$ 断面, 在靠近主管底面一侧速度有负值, 在上部区域流速为正, 说明靠近主管下壁面一侧产生了回流, 即在支管入流的背流面有一漩涡存在, 主流在此涡上部的狭窄通道内被加速到较主流速度更高的速度; 在 $z/d_m=1$ 断面, 流速都为正值, 回流区消失, 这是因为支管水流从主管下壁面垂直流入时形成水柱, 能够深入到主管的主流内部, 会阻挡主管水流, 迫使主管内上游来流在靠近主管上壁面的区域流动, 随着越接近主管上壁面, 支管水流的动能也逐渐被消耗, 支管水流对主管水流的阻碍作用也逐渐变小, 所以水流纵向流速在靠近主管上壁面一侧大于靠近主管下壁面一侧。从图中可以看出虽然试验值与模拟值在定量上有一定的误差, 但在定性上吻合良好, 所以模拟值整体上达到了反映试验规律的要求。

2.4.2 温度验证

将 T 型管上游进口段为直管时其垂向中心断面($x=0$)不同垂线上的温度的模拟值与试验值^[7]比较, 结果如图 5 所示。

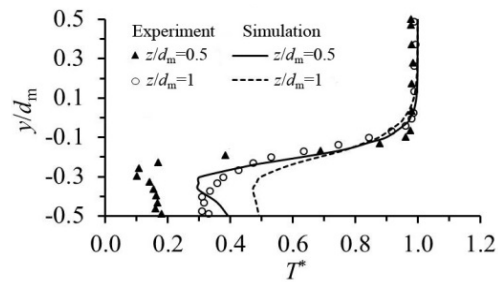


图 5 不同垂线纵向温度比较图

由图5可以看出, 在 $-0.1 < y/d_m < 0.5$ 的范围内, 模拟值与计算值在数值上和变化趋势上都吻合的很好, 最大误差为6%, 在 $-0.5 < y/d_m < -0.1$ 的范围内, 模拟值和试验值在数值上误差大, 这是因为在这一区域冷热流体混合剧烈, 且在模拟中管道假定绝热, 但在实际试验中管道虽为绝热材料, 但其还是有一定的导热性, 流体会损失一些热量, 导致模拟值与试验值有误差。同时也可以看出试验值与模拟值之间的误差随着 y/d_m 和 z/d_m 的增大而减小, 且试验值与模拟值变化趋势一致, 所以模拟值整体上达到了反映试验规律的要求, 说明 RNG $k-\epsilon$ 模型结

合传热模型是模拟T型管道冷热流体混合的有效方法。

2.4.3 速度分析

将上游进口段主管分别为直管和弯管的两种T型管道中的冷热流体的混合过程进行数值模拟, 并分别将两种T型管垂直中心断面($x=0$)速度分布云图及中心断面($x=0$)不同垂线上纵向速度进行比较, 结果如图6, 7所示, 其中 V^* 为无量纲化的合速度。

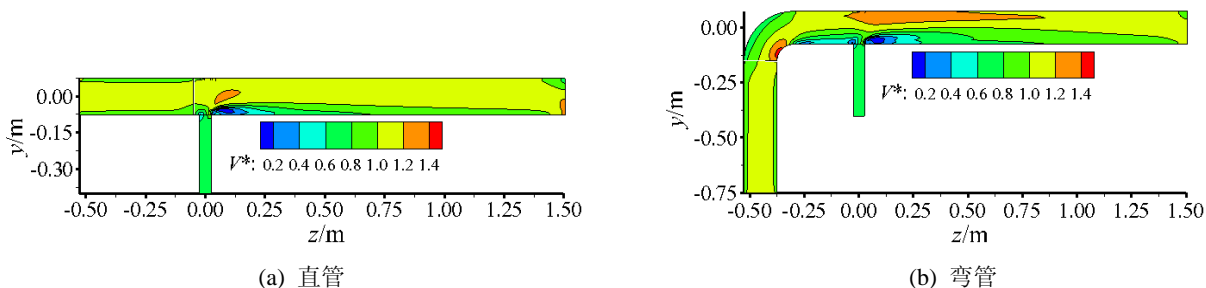


图 6 垂直中心断面速度分布云图比较

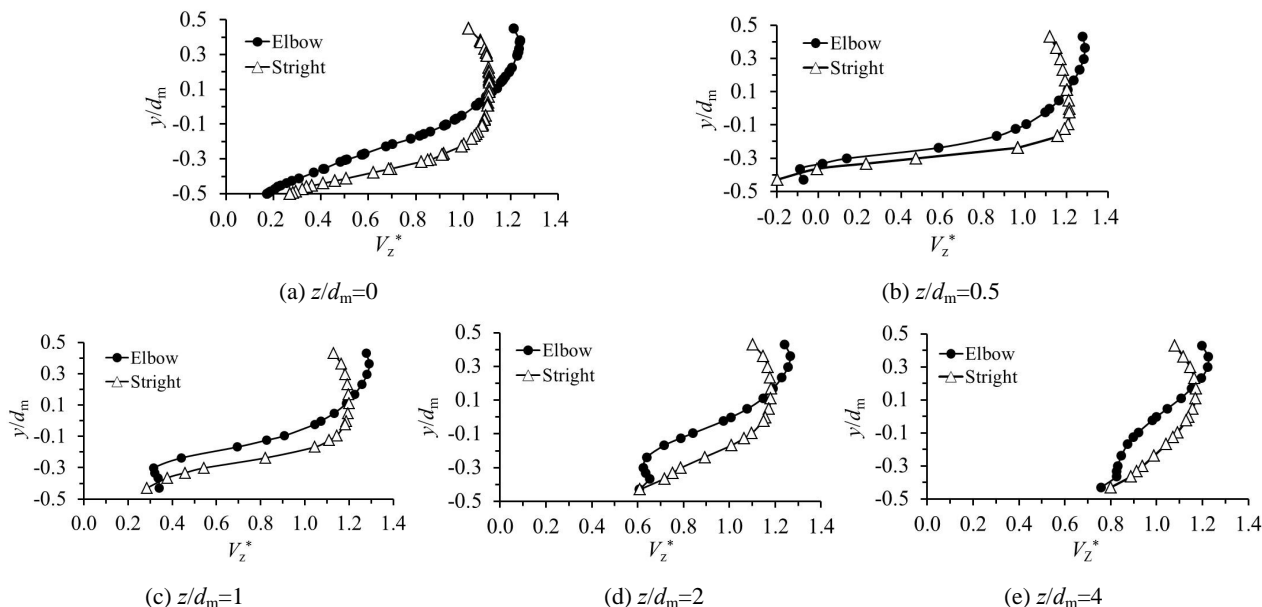


图 7 不同垂线纵向流速比较图

从图6可以看出在上游进口段为弯管时在主管交汇区域其速度变化梯度范围比直管时的大, 这是因为上游进口段为弯管时水流发生了扰动, 而且由于主流经过弯道时消耗了一部分能量, 其水平动

量相对于直管时较小, 因此支管水流更容易挤压主流而流入主流内部, 即上游进口段为弯管时更有利于主管水流的混合。从两种T型管垂直中心断面($x=0$)不同垂线上的纵向速度比较图(图7)可以看

出, 在 $y/d_m < 0.1$ 的范围内在上游进口段为直管时其在下壁面附近处的速度比弯管时的大, 这是因为上游进口段为直管时其水平动量较弯管时大, 随着 z/d_m 的增大其差异也逐渐变小。

2.4.4 温度分析

将上游进口段主管分别为直管和弯管时两种 T 型管道中冷热流体的混合过程进行数值模拟, 并将 T 型管垂向中心断面 ($x=0$) 温度分布云图进行比较, 结果如图 8 所示, 从图中可以看出, 上游进口段为直管时, 温度的渐变区范围较上游进口段为弯管时的小, 说明上游进口段为弯管时更有利于冷热流体的混合, 这是因为水流程经上游弯管发生了扰动, 加强了冷热流体的混合, 使温度梯度变化范围增大, 减小了温度梯度。

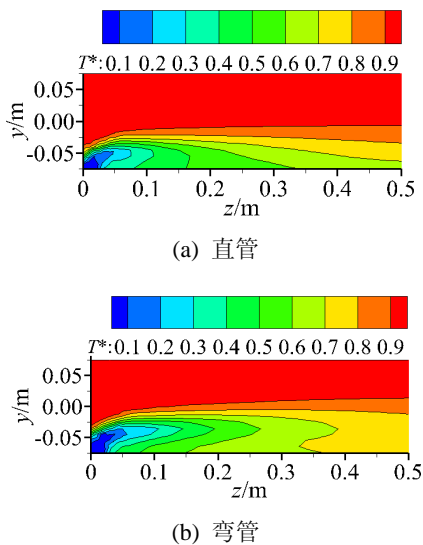


图 8 垂向中心断面温度分布云图比较

将 2 种 T 型管中心断面 ($x=0$) 不同垂线上的温度进行比较, 结果如图 9 所示, 从图中可以看出, 在 $z/d_m=0$ 时, 其无量纲化的温度在 $y/d_m > -0.1$ 的范围内都为 1, 随着 z/d_m 的增大, 其无量纲化的温度为 1 的范围也在缩小, 即这一范围逐渐靠近上壁面, 说明温度的混合主要是发生在主支管交汇的下游区域; 还可以看出, 在靠近下壁面区域的温度, 在上游进口段为弯管时比直管时的大, 再次说明上游进口段为弯管时, 加强了冷热流体的混合, 减小了温

度梯度, 进而减小由于温度梯度引起的热应力, 降低管道疲劳破坏的可能性, 对 T 型管安全有利。

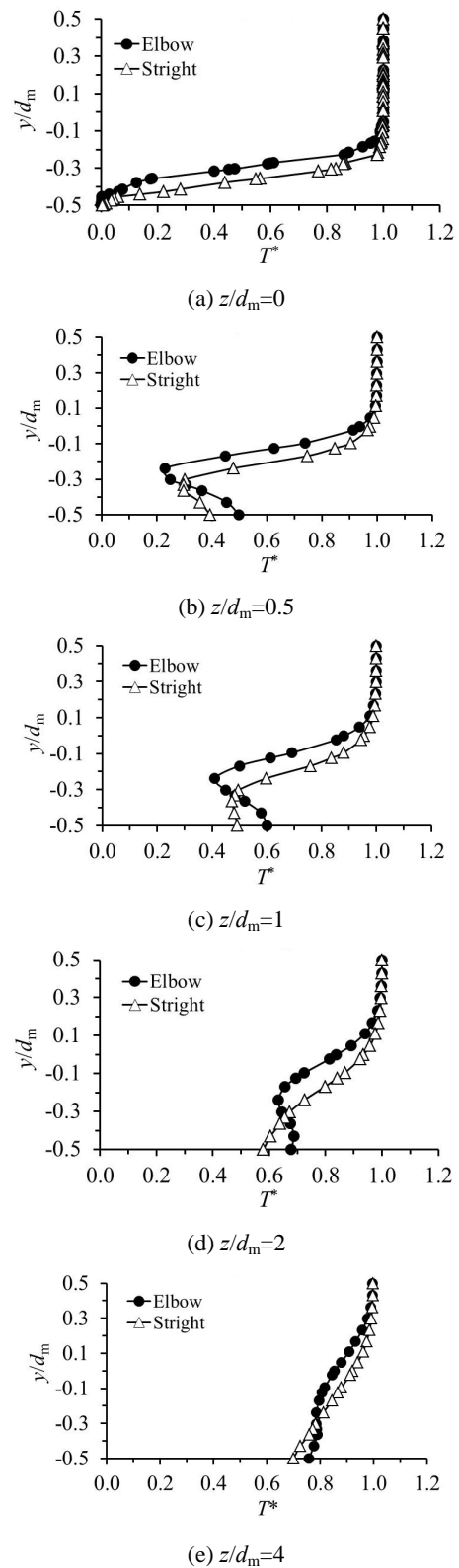


图 9 不同垂线纵向温度比较图

3 结论

本文通过建立混合过程的流动与传热模型,选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭时均方程,对 T 型管道冷热流体混合进行三维数值模拟,得到以下结论:

(1) 数值结果与试验结果具有一定的吻合度,在一定程度上反映了 T 型管道冷热流体混合的水力特性的变化规律,说明 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合传热模型能够有效地预测 T 型管道内的冷热流体混合的流动与传热过程。

(2) 通过比较上游进口段主管分别为直管和弯管的 2 种 T 型管道中垂向中心断面速度和温度分布云图得出,上游进口段主管为弯管时有利于使主管热流与支管冷流更好的混合,进而减小温度梯度。

(3) 通过比较上游进口段主管分别为直管和弯管时 2 种 T 型管垂向中心断面不同垂线上的速度和温度线图得出,温度的混合主要是发生在主管交汇的下游区域,且上游进口段主管为弯管时更有利于主管冷热流的混合,对安全有利。

本文用数值模拟的方法研究了上游进口段分别为直管和弯管时 T 型管内冷热流体混合的水力特性和传热机理,但在实际工程中,由于湍流和传热的复杂性及数值模拟本身的局限性,如何更精细地模拟 T 型管道冷热流体混合的运动情况,还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] Jones I S. Impulse response model of thermal striping for hollow cylindrical geometries[J]. Theoretical and applied fracture mechanics(S0167-8442), 2005, 43(1): 77-88.
- [2] Lejeail Y, Kasahara N. Thermal fatigue evaluation of cylinders and plates subjected to fluid temperature

- fluctuations[J]. International journal of fatigue (S0142-1123), 2005, 27(7): 768-772.
- [3] 朱维宇. 填充有/无多孔介质的 T 型管道中流体混合过程的流动与传热研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [4] Wu H L, Peng X F, Chen T K. Influence of sleeve tube on the flow and heat transfer behavior at a T-junction[J]. International journal of heat and mass transfer (S0017-9310), 2003, 46(14): 2637-2644.
- [5] 卢冬华, 村松寿晴. T 型三通管内热分层流动 3D 数值模拟[J]. 核动力工程, 2005, 26(4): 332-334.
- [6] 王海军, 陈听宽, 罗毓珊, 等. T 型三通管横向射流流动与传热实验研究[J]. 热能动力工程, 2002, 17(97): 14-16.
- [7] Kamide H, Igarashi M, Kawashima S, *et al.* Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping[J]. Nuclear Engineering and Design(S0029-5493), 2009, 239(1): 58-67.
- [8] 吴海玲, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 厚壁三通管件非等温横向射流的数值模拟研究[J]. 核动力工程, 2001, 22(2): 127-132.
- [9] Frank T, Lifante C, Prasser H M, *et al.* Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX[J]. Nuclear Engineering and Design (S0029-5493), 2010, 240(9): 2313-2328.
- [10] Kamaya M, Nakamura A. Thermal stress analysis for fatigue damage evaluation at a mixing tee[J]. Nuclear Engineering and Design(S0029-5493), 2011, 241(8): 2674-2687.
- [11] Simoneau J, Champigny J, Gelineau O. Applications of large eddy simulations in nuclear field[J]. Nuclear Engineering and Design(S0029-5493), 2010, 240(2): 429-439.
- [12] 张土乔, 尹则高, 毛根海. 弯曲圆形管道紊流的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 61-65.
- [13] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.