

斜三通的 CFD 数值模拟及传热影响因素研究

朱海荣, 卢红亮, 崔海亭, 邓小叶

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为研究斜三通管内流体的流动与传热过程,应用 CFD 软件 Fluent 分别对管间夹角 θ 为 $20^\circ \sim 90^\circ$ 、流速比 λ 为 $2 \sim 3.5$ 以及支管位置 l 为 $500 \sim 1\,000$ mm 的斜三通内流体的流动与传热过程进行了数值模拟,并通过正交试验设计对影响三通壁面平均换热系数的各参数进行了敏感性分析。结果表明,随着 θ 和 λ 的增大,三通出口处流体最大速度逐渐增大,其中 λ 的影响更为显著;壁面平均换热系数随 θ 和 λ 的增大而增大,随 l 的减小而增大;支管位置 l 主要影响壁面平均换热系数,对最大速度的影响可忽略不计。按照影响壁面平均换热系数作用的强弱,支管位置 $l >$ 流速比 $\lambda >$ 管间夹角 θ ,即支管越靠近主管进口、流速比越大、管间夹角越大,则壁面换热效果越好。因此,支管位置是影响斜三通壁面传热效果的首要因素。

关键词:节能技术;斜三通;流动与传热;管间夹角;流速比;支管位置

中图分类号:TQ018 文献标志码:A

Research on CFD numerical simulation of an oblique tee and the influencing factors of heat transfer

ZHU Hairong, LU Hongliang, CUI Haiting, DENG Xiaoye

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to study the flow and heat transfer process of the fluid in an oblique tee, the CFD simulation of flow and heat transfer processes of the fluid in oblique tee with the included angle of $20^\circ \sim 90^\circ$, the velocity ratio of $2 \sim 3.5$ and the branch position of $500 \sim 1\,000$ mm is carried out based on Fluent software, and the sensitivity analysis of various parameters influencing the average heat transfer coefficient of wall surface is conducted by orthogonal experimental design. The results show that as the included angle or velocity ratio increases, the maximum velocity of fluid at the outlet of oblique tee increases gradually, and the influence of velocity ratio is more significant. The average heat transfer coefficient of wall surface also increases with the increase of included angle and velocity ratio; the branch position mainly affects the average heat transfer coefficient of wall surface, and its influence on the velocity is negligible. The average heat transfer coefficient of wall surface is increasing with the decrease of the branch position. According to the different effects of various parameters on average heat transfer coefficient of wall surface, branch position $l >$ velocity ratio $\lambda >$ included angle θ , which means that the closer the branch pipe is to the inlet

收稿日期:2018-11-28;修回日期:2019-03-01;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51706085);河北省教育厅高等学校科学技术研究重点项目(ZD2018079);河北科技大学五大平台开放基金(PT2015022)

第一作者简介:朱海荣(1979—),女,河北廊坊人,副教授,博士,主要从事流体传热传质方面的研究。

E-mail: zhuh2005@126.com

朱海荣,卢红亮,崔海亭,等.斜三通的 CFD 数值模拟及传热影响因素研究[J].河北科技大学学报,2019,40(2):97-104.

ZHU Hairong, LU Hongliang, CUI Haiting, et al. Research on CFD numerical simulation of an oblique tee and the influencing factors of heat transfer[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(2): 97-104.

of main pipe, the greater the velocity ratio, and the greater the included angle, the better the heat transfer effect of wall surface will be. Therefore, the branch position is the primary factor to influence the heat transfer effect of oblique tee.

Keywords: energy conservation technology; oblique tee; flow and heat transfer; included angle; velocity ratio; branch position

三通可用于水、油及各种液体化工材料的输送管路,广泛应用于医学、水利(节水灌溉、给水排水)、能源动力(石油、天然气、核工业)、建筑等工程领域。三通作为主要的分流部件,当流体流经主管与支管的交汇处时,会在主管道截面上产生二次流动并在支管内产生涡旋结构,不但会导致流体总压和能量的损失,还会降低传热、传质的效率^[1-2]。因此,研究三通在不同结构形式下的流动和传热特性以及影响其流动传热性能的主要因素是非常有必要的。

有学者已经对 T 型三通管内流体流动、传热特性、结构设计等方面进行了一些研究。曹海兵等^[3]和侯聪等^[4]运用数值模拟的方法分析了等直径的 T 型、Y 型和圆弧型三通管内流体的流动状况和阻力性能。巩启涛等^[5-6]通过对三通管内流体速度场和压力场的分析,研究了流速比 λ 、雷诺数 Re 、管径比 d 及管间夹角 θ 对大管径三通局部阻力的影响。杨康等^[7]利用 Fluent 软件分析了不同的流体参数和管路结构下三通管内流体的速度场、压力场、温度场和湍动能等。韩方军等^[8]通过对不同管径直角三通管的分析得出局部水头损失和静压力的变化。王海军等^[9]研究了不同流速比下 T 型三通管内的内壁面传热系数以及内部温度波动。魏显达等^[10]通过对三通的速度、温度、压力进行数值模拟对管道进行结构优化和选材优化。陈江林等^[11]和卢冬华等^[12]通过数值模拟与实验研究分析了三通水头损失的机理及管内流动状态。谷雨等^[13]用标准 $k-\epsilon$ 模型对三通进行三维模拟,分析了管内流体压力和温度的变化。石喜等^[14]对 PVC 三通管进行了实验与数值模拟研究,分析影响其局部阻力的主要因素。卜琳等^[15]、龚旭等^[16]数值模拟了斜三通管内流体的流动结构、压力分布与温度分布情况,分析了斜三通几何结构、流动条件和流体温度变化对管内流体流动结构、温度分布及热应力的影响。孙鑫^[17]通过对 T 型三通和圆弧型三通内流体的湍流流动进行数值模拟和实验研究,分析其内部的流场分布,初步研究了三通对大气出流情况下的水头损失率。康朝阳^[18]分析了在三通管内流体发生瞬态流动时,流体的速度场、压力场的变化。SELVAM 等^[19]和 GAO 等^[20]通过数值模拟分析验证了流速比与射流深入主流的程度成正比,在不同区域流体与壁面的换热程度也不同,在射流管与主流管的交汇处温度波动最大。ANDREOPOULOS 等^[21-22]对当射流垂直入射至主流体中且不同流速比时射流与主流的平均速度、紊动能及平均温度分布情况进行了研究;SHERIF 等^[23]对当水洞中热水垂直向上注入冷流中且速比为 1,4 和 7 时的平均温度及波动温度进行了研究。

现有文献从不同方面研究了三通管内流体流动时温度、压力的分布情况以及阻力和湍流强度的变化规律,但是还缺乏对影响三通管内流体流动传热性能因素的显著性分析,而显著性分析的结果恰恰可以有效指导三通的结构优化和工程应用。本文应用 Fluent 软件数值模拟了斜三通在不同结构参数(如支管位置 l 、管间夹角 θ)和运行工况(如流速比)下的流体流动状况、速度场与平均换热系数的分布情况,并得到了各参数对三通壁面平均换热系数的影响规律。

1 模型的建立

1.1 物理模型

平均换热系数是指流体与管壁面的平均对流换热系数,不考虑三通管的管径内外径和壁厚以及其内部的热传导。本文主要研究两股流速、温度不同的流体,分别从主管、支管进入斜三通,在三通管内混合流动并进行传热,最终从主管出口流出的过程。斜三通物理模型如图 1 所示,主管和支管的管径均为 150 mm,主管总管长为 1 500 mm,支管管长为 500 mm。

1.2 网格模型

采用分块划分网格方法,以六面体网格为基本单元,在三通主

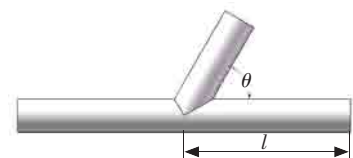


图 1 斜三通物理模型

Fig.1 Physical model of oblique tee

管和支管交汇处进行网格加密。近壁面第 1 个网格单元中心至壁面的距离满足壁面函数法的要求。如图 2 所示,当管间夹角 $\theta = 60^\circ$, $l = 750 \text{ mm}$ 时,三通共划分了 157 666 个网格。进一步进行网格无关性验证,计算结果无明显改变,表明此时网格满足计算要求且较为合理。

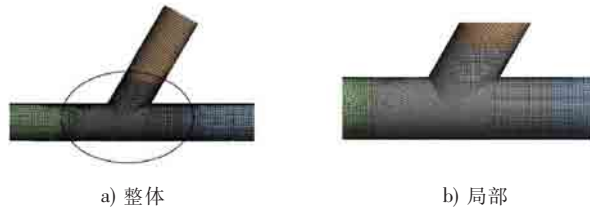


图 2 斜三通的网格划分图

Fig.2 Meshing of oblique tee

2 控制方程及边界条件

2.1 控制方程

三通管内的流体流动满足质量守恒、动量守恒、能量守恒、状态方程等。常用的湍流模型有标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型等。考虑到三通主管与支管交汇处流体流动复杂,存在旋流与二次流,故选用 RNG $k-\epsilon$ 模型,其在模拟强逆压力梯度、射流扩散率以及模拟分离、回流和旋转时具有较高的精度。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}). \quad (2)$$

式中: V_x, V_y, V_z 是速度矢量 \mathbf{v} 在 x, y 和 z 方向的分量; t 为时间; ρ 为密度; μ 为流体黏度。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C_p} - \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C_p} - \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_T. \quad (3)$$

式中: C_p 为比热容; T 为温度; k 为流体的传热系数; S_T 为黏性耗散项。

在 RNG $k-\epsilon$ 模型中,经过必要的化简。其 k 方程和 ϵ 方程如下。

k 方程:

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

ϵ 方程:

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

式中: k 为湍动能; ϵ 为湍动耗散率; $\alpha_k, \alpha_\epsilon$ 分别为与湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数,数值均为 1.39; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; $C_{1\epsilon}^*$ 为修正系数, $C_{1\epsilon}$ 的经验常数值为 1.42, $C_{2\epsilon}$ 的经验常数值为 1.68。其中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; $C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} -$

$$\frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\rho\eta^3}; \quad \eta = 2(2E_{ij} \cdot E_{ij})^2 \frac{k}{\epsilon}; \quad E_{ij} =$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right), E_{ij} \text{ 为时均应变率}; C_\mu \text{ 为模型系数,}$$

通常取 0.09。RNG $k-\epsilon$ 模型常数见表 1^[8]。

2.2 边界条件

1) 入口: 主管入口速度为 1 m/s, 流速方向垂直于入口边界, 入口流体温度为 323 K; 支管入口速度为 2 m/s, 流速方向垂直于入口边界, 入口流体温度为 293 K。

2) 出口: 出口为压力出口边界条件。

3) 壁面: 忽略管壁厚, 三通的壁面均为恒温边界条件, 所有的管壁面均为固体与流体的对流边界条件。

边界条件的设置见表 2, 其他计算条件的设定见表 3。

表 1 RNG $k-\epsilon$ 模型常数

Tab.1 Parameters of RNG $k-\epsilon$ model

C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	α_k	α_ϵ	β	η_0
0.084 5	1.42	1.68	1.39	1.39	0.012	4.377

表2 边界条件的设置

Tab.2 Setting of boundary conditions				
类型	温度/K	速度/(m·s ⁻¹)	介质	边界条件
主管进口(inlet1)	323	1	水	速度入口
支管进口(inlet2)	293	2	水	速度入口
出口(out)			水	压力出口
主管壁面(wall1)	353			
支管壁面(wall)	353			

表3 计算条件的设定

Tab.3 Setting of calculation conditions	
类型	设定
求解器(Solver)	Pressure Based(压力求解)
算法(Formulation)	隐式算法(Implicit)
空间(Space)	三维空间(3D)
速度类型(Velocity Formulation)	绝对速度(Absolute)
离散格式	一阶迎风格式
压力与速度的耦合	SIMPLE
入口边界条件	速度入口
出口边界条件设置	压力出口
湍流模型	RNG <i>k-ε</i> 湍流模型

3 结果与讨论

在 Fluent 中对不同数值模型进行求解器设置, 采用三维、稳态隐式求解方法在计算到 1 000 步左右时管内流体流动达到稳定状态。

3.1 出口处流体最大速度的影响因素分析

图 3 为 $\lambda=2, l=750 \text{ mm}, \theta=20^\circ \sim 90^\circ$ 时管内流体的速度变化规律。两股流体分别从主管与支管进入, 在交汇处混合后向主管出口流动。

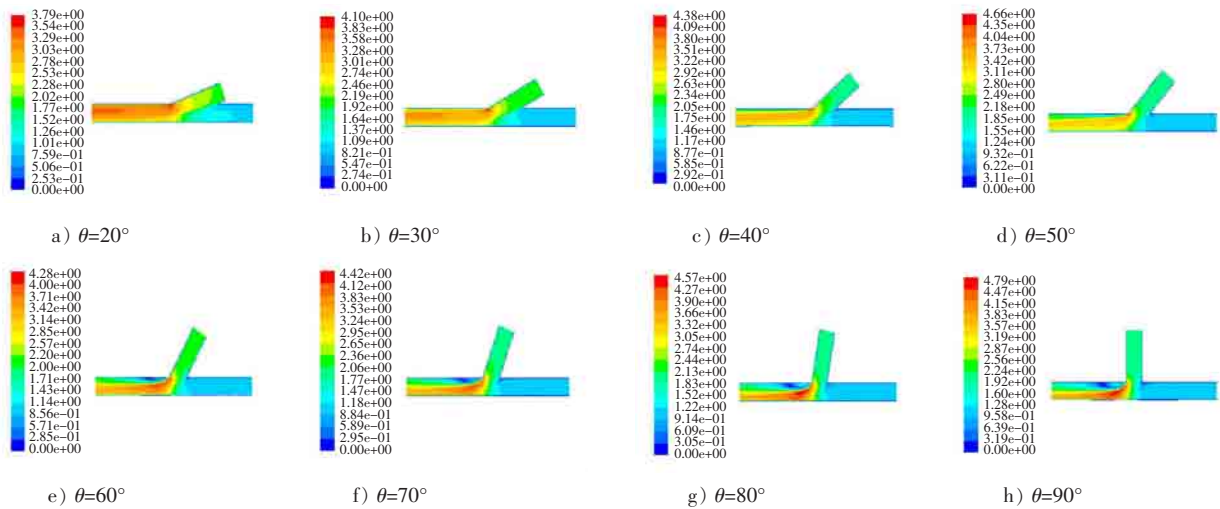


图3 出口处流体最大速度随 θ 的变化规律

Fig.3 Variation of maximum velocity of fluid with θ

当 $\theta=20^\circ$ 时, 两股流体混合时波动不大, 流体流动平缓, 有明显的分层现象。随着 θ 的增大, 两股流体在交汇处的混合程度加剧, 支管流体进入主管后逐渐脱离主管上壁面, 向下移动至靠近主管下壁面, 随着 θ 的进一步增大, 管内开始形成涡流。当 $\theta=90^\circ$ 时, 支管流体垂直射流进入主管, 涡团尺寸与流体速度明显增大, 由于支管流体流速较大, 主管内流体被迫改变流动方向, 向主管下部逼近, 在交汇处下游达到速度最大。

图 4 为 $\theta=45^\circ, \lambda=2$ 时, 出口处流体最大速度随 l 的变化规律。如图 4 所示, 不同支管位置的三通管在两股流体交汇时的流动状态几乎一样, 说明 l 对流速的影响较小, 所以汇合处的最大速度几乎相同。

图 5 为出口处流体最大速度的变化规律。当 λ 不变时, 出口处流体最大速度随着 θ 的增大而增大。 θ 较小时, 流体汇合后基本没有剧烈混合, 有明显的分层; θ 较大时, 流体混和剧烈, 并且在交汇处下游出现涡流, 进一步加剧混合, 汇合后流体开始向主管底部靠近, 出口流体的最大速度也随之增大。在相同 θ 时, 出口流体最大速度受 λ 的影响较大, 随着 λ 的增大, 出口流体的最大速度大幅度提高。当 $\lambda=2$ 提高到 $\lambda=3.5$ 时, 流体的最大速度上升了约 50%。可见, 出口流体的最大速度主要取决于支管流体的速度, 对出口流体最

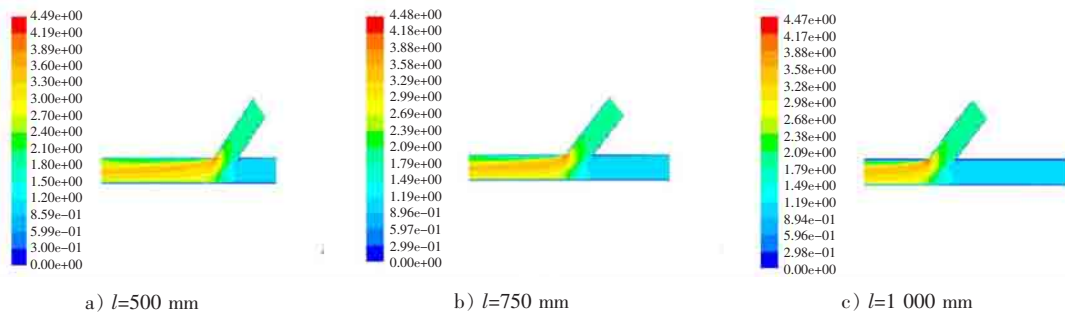


图 4 出口处流体最大速度随 l 的变化规律

Fig.4 Variation of maximum velocity of fluid with l

大速度的影响要高于 θ 。

3.2 壁面平均换热系数的影响因素分析

图 6 为 $\lambda=2, l=750 \text{ mm}$ 时, 壁面平均换热系数随 θ 的变化规律。如图 6 所示, 支管流体的温度较低, θ 较小时支管流体与主管流体的混合不明显, 两股流体各自平稳地向出口流动, 支管壁面的换热系数较大, 换热系数最大值出现在支管与主管的交汇处; 随着 θ 的增大, 支管流体进入主管后被迫改变方向并与主管流体混合碰撞, 产生涡流, 两股流体在主管内混合换热, 但是主要集中在主管轴线附近, 因此壁面平均换热系数略有下降; 随着 θ 的进一步增大, 两股流体产生了强烈的回旋涡流, 在管道交汇处的湍流混合加剧, 从而导致换热系数的大幅度提高; $\theta=90^\circ$ 时, 两股流体垂直相遇, 碰撞最为剧烈, 引起强烈的能量和动量的交换, 此时壁面换热系数达到最大值。同时, 由于流动方向的改变而产生的涡流也引起了水头损失, 在 $\theta=90^\circ$ 时支管产生的水头损失最大。

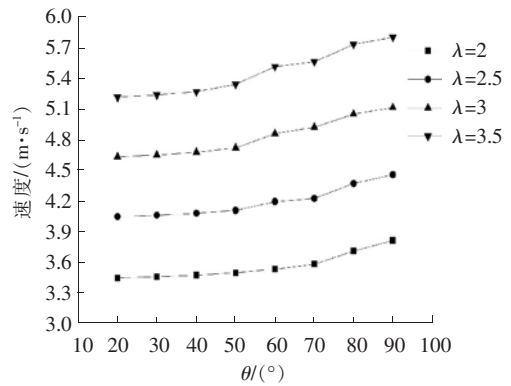


图 5 斜三通出口处流体最大速度的变化规律

Fig.5 Variation of maximum velocity of the fluid at the outlet of oblique tee

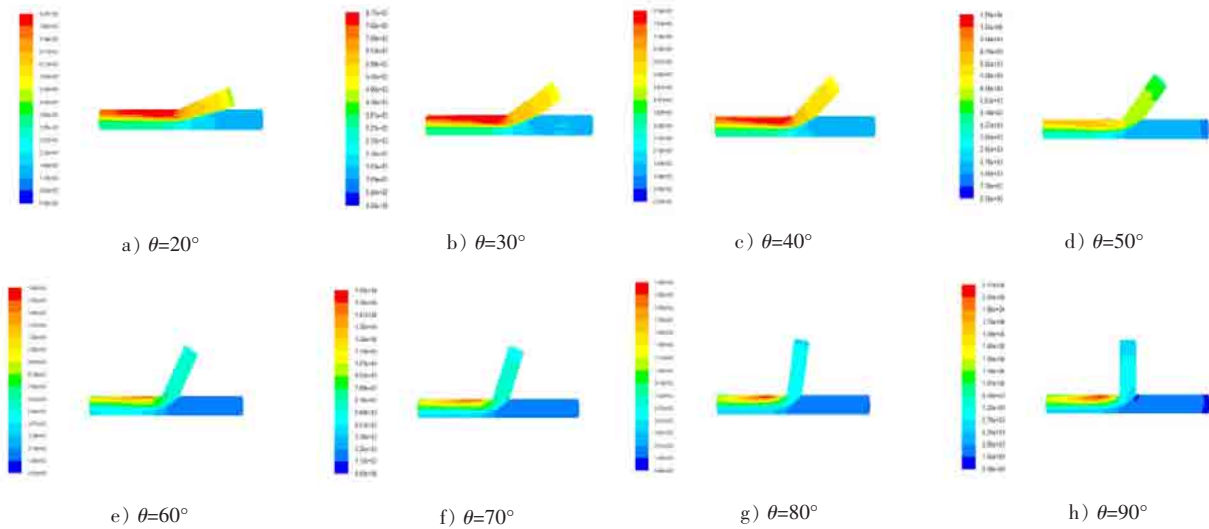


图 6 壁面平均换热系数随 θ 的变化规律

Fig.6 Variation of average heat transfer coefficient of the wall surface with θ

图 7 所示为 $\theta=45^\circ, \lambda=2$ 时, 壁面平均换热系数随 l 的变化规律。无论支管位置距离主管进口远近, 两股流体交会时的流动状态几乎一样, 不同支管位置的壁面平均换热系数最大值基本相同。然而, 支管离主管进口越近, 支管流体越早与主管流体混合。因此, 相同时间内, 混合后流体与壁面的对流换热量会随着 l 的减小而增大。

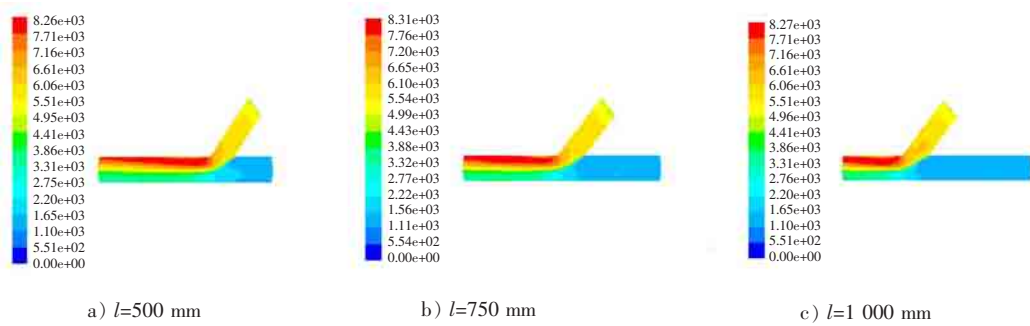


图7 壁面平均换热系数随 l 的变化规律

Fig.7 Variation of average heat transfer coefficient of the wall surface with l

图8为斜三通壁面平均换热系数变化曲线图。在相同 λ 下,随着 θ 的增大,三通壁面平均换热系数先减小后增大,但整体呈上升趋势。在相同 θ 下, λ 越大,壁面换热系数越大。当 λ 较小时,支管流体汇入主管比较缓慢,两股流体无法形成强烈的混合,近似保持层流状态向出口流动,因此壁面换热系数较小;随着 λ 的增大,支管流体高速汇入主管,两股流体强烈混合,在交汇处产生了强烈的回旋涡流,两流体的湍流混合加剧,加速了流体间以及流体与壁面间的接触换热,从而使壁面平均换热系数提高。

3.3 正交试验分析

对不同参数(支管位置 l 、管间夹角 θ 、流速比 λ)下三通管内流体的传热过程进行正交试验分析,正交试验方案如表4所示。

表4所列的9组实验结果中,以第3组实验得出的壁面平均换热系数最大,其水平组合为A3B3C3,分别是各影响因素中数值最大的组合。由此可以看出,本实验各因素组合中的最优组合为A3B3C3。

表5为各参数的敏感性分析结果,表中 k_1, k_2, k_3 为 K_1, K_2, K_3 的平均值; R 为极差,即每个因素下 k 的最大值与最小值的差值。通过 R 值的大小可以看出本实验中各参数的影响作用存在显著性顺序,其主次关系为 $A > C > B$,因此影响三通管壁面传热效果的因素依次为支管位置 l 、支管与主管的流速比 λ 、管间夹角 θ 。支管越靠近主管进口、流速比越大、管间夹角越大,则三通壁面的换热效果越好。

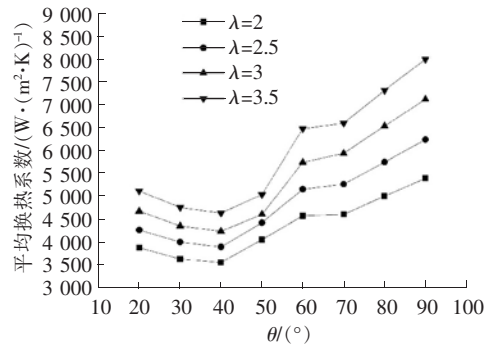


图8 斜三通壁面平均换热系数的变化规律

Fig.8 Variation of average heat transfer coefficient of the wall surface in oblique tee

表4 实验设计和结果

Tab.4 Design and results of experiment

	A	B	C	D
	支管位置 l/mm	管间夹角 $\theta/(\text{°})$	流速比 λ	平均换热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$
1	500	30	2	4 326
2	500	45	2.5	3 919
3	500	60	3	5 234
4	750	30	2.5	3 967
5	750	45	3	4 347
6	750	60	2	4 084
7	1 000	30	3	3 470
8	1 000	45	2	2 891
9	1 000	60	2.5	3 704

表5 敏感性分析

Tab.5 Sensibility analysis of parameters

	A	B	C
	支管位置 l/mm	管间夹角 $\theta/(\text{°})$	流速比 λ
K_1	13 476	11 763	11 256
K_2	12 362	11 154	10 587
K_3	10 065	12 986	13 051
k_1	4 492	3 921	3 752
k_2	4 121	3 718	3 529
k_3	3 355	4 329	4 350
R	1 137	611	821

4 结 论

利用 Fluent 软件数值模拟了三通管内流体的流动传热过程,获得了不同管间夹角、支管位置以及流速比对三通管内流体流动与传热的影响,并运用正交试验设计分析了各参数对壁面换热效果的影响规律,得出以下结论。

1)随着 λ 和 θ 的增大,三通出口处流体的最大速度都呈现增大的趋势,且 λ 对流体最大速度的影响要高于 θ ;而支管位置 l 对两股流体交汇时的流动状态影响较小。可见出口流体最大速度主要取决于支管流体的流速。

2)三通壁面的平均换热系数随 θ 的增大先略有减小后增大,随 λ 的增大持续增大,随 l 的减小而逐渐增大,说明 θ 和 λ 的增大均能使两股流体的混合更为充分,加剧了能量的交换和热量的传递,使壁面平均换热系数提高;而 l 的减小意味着支管流体提前汇入主管,相同时间内增大了流体与壁面间的换热量,从而使整个壁面的平均换热系数增大。

3)通过正交试验分析影响三通壁面平均换热系数的因素,按照影响壁面传热效果的程度依次为支管位置 $l >$ 流速比 $\lambda >$ 管间夹角 θ 。即支管越靠近主管进口、流速比越大、管间夹角越大,壁面的换热效果越好。因此,支管位置是影响斜三通壁面传热效果的首要因素。

4)笔者对全面认识三通管内流体的流动和传热过程提供了参考,然而三通管内流体在交汇时伴随着能量损失和阻力性能的变化,因此在最小能量损失和阻力下研究流体输送和流体与管壁之间的对流换热是未来的一个研究方向。

参考文献/References:

- [1] 魏志,王玉璋. 阀后 90°圆形弯管内部流场的数值模拟[J]. 动力工程学报,2013,33(8):595-599.
WEI Zhi,WANG Yuzhang. Numerical simulation on inner flow in a 90° circular-sectioned bend with fore-endvalve[J].Journal of Chinese Society of Power Engineering,2013,33(8):595-599.
- [2] 李雄,刘伟军,唐飘.排气三通管道分散流流动特性的数值模拟及分析[J]. 河北科技大学学报,2014,35(3):272-278.
LI Xiong,LIU Weijun,TANG Piao.Numerical simulation and analysis on the dispersed flow characteristics in tee branch pipe of exhaust system[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2014,35(3):272-278.
- [3] 曹海兵,高莉丽. 不同结构三通管内流体流动特性数值模拟[J]. 广东化工,2016,43(13):72-73.
CAO Haibing,GAO Lili. Numerical simulation on flow characteristics of different three-way pipe[J].Guangdong Chemical Industry,2016,43(13):72-73.
- [4] 侯聪,王合旭,张方驹.不同结构三通内冷热水混流特性的数值仿真[J]. 计算机辅助工程,2017,26(1):7-12.
HOU Cong,WANG Hexu,ZHANG Fangju. Numerical simulation on characteristics of hot and cold fluids mixed in tee junctions of different structures[J].Computer Aided Engineering,2017,26(1):7-12.
- [5] 巩启涛,杨俊红,韩奎,等. 大管径 T 型三通数值模拟及局部阻力特性分析[J]. 动力工程学报,2016,36(9):753-758.
GONG Qitao,YANG Junhong,HAN Kui,et al. Characteristic analysis on the flow and local resistance in large pipe tees [J].Journal of Chinese Society of Power Engineering,2016,36(9):753-758.
- [6] 巩启涛. 大管径三通局部阻力特性数值模拟及多热源集中供热运行分析[D]. 天津:天津大学,2015.
GONG Qitao. Numerical Simulation of Large Pipe Tees Local Resistance Characteristics and Analysis of Central Heating System with Multi-heat Sources Operation[D]. Tianjin:Tianjin University,2015.
- [7] 杨康,刘吉普,马雯波. 基于 FLUENT 软件的 T 型三通管湍流数值模拟[J]. 化工装备技术,2008,29(4):33-36.
- [8] 韩方军,孙鑫,张原. T 型三通管内部流场数值模拟与结构优化[J].新疆水利,2010,4:1-3.
HAN Fangjun,SUN Xin,ZHANG Yuan.Numerical simulation and structural optimization of internal flow field in T-type tee[J].Xinjiang Water Resources,2010,4:1-3.
- [9] 王海军,卢冬华,罗毓珊,等. 压水堆主系统 T 型三通管传热实验研究[J]. 核动力工程,2002,23(3):17-21.
WANG Haijun,LU Donghua,LUO Yushan,et al. Experimental study on heat transfer characteristic of T-type tee pipe of PWR main system[J].Nuclear Power Engineering,2002,23(3):17-21.
- [10] 魏显达,王为民,徐建普. 基于 Fluent 的三通管数值模拟及分析[J]. 当代化工,2011,40(2):165-167.
WEI Xianda,WANG Weimin,XU Jianpu. Numerical simulation and analysis of fluid in three-way connection pipe based on fluent software [J]. Contemporary Chemical Industry,2011,40(2):165-167.
- [11] 陈江林,吕宏兴,石喜,等. T 型三通管水力特性的数值模拟与试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(5):73-77.
CHEN Jianglin,LYU Hongxing,SHI Xi,et al. Numerical simulation and experimental study on hydrodynamic characteristics of T-types [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(5):73-77.

- [12] 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.
LU Donghua,Toshiharu Muramatsu. 3-D numerical simulation of stripping and stratification in mixing T-junction[J]. Nuclear Power Engineering,2005,26(4): 332-334.
- [13] 谷雨,李明达.基于 CFD 的三维三通管道湍流数值模拟研究[J].科协论坛,2013,12(5):234-235.
- [14] 石喜,吕宏兴,朱德兰,等.PVC 三通管水流阻力与流动特征分析[J].农业工程学报,2013,44(1):73-89.
SHI Xi, LV Hongxing, ZHU Delan, et al. Flow resistance and characteristics of PVC tee pipes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 44(1): 73-89.
- [15] 卜琳,李会雄,王海军,等.斜向三通管内射流混合特性的三维数值模拟[J].核动力工程,2008,29(5):124-128.
PU Lin, LI Huixiong, WANG Haijun, et al. Numerical simulation of 3D inclined jet to cross flow[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(5): 124-128.
- [16] 龚旭,刘德明,吴昆.建筑排水三通入流角度对流态影响的数值模拟[J].福建建设科技,2015,5:83-85.
GONG Xu, LIU Deming, WU Kun. Numerical simulation of the flow state affected by inflow angle in the tee coupling tube[J]. Fujian Construction Science and Technology, 2015, 5: 83-85.
- [17] 孙鑫. T型三通和圆弧型三通流场的试验研究及数值模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2009.
SUN Xin. Physical Experiment and Numerical Simulation of "T and arc" Shaped Three-way Pipe's Flow Field[D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2009.
- [18] 康朝阳.主蒸汽三通对流传热、热应力及寿命的计算分析[D].上海:上海发电设备成套设计研究院,2015.
KANG Chaoyang. Calculation and Analysis of the Heat Transfer Thermal Stress and Life of the Main Stream Tee[D]. Shanghai: Shanghai Power Equipment Research Institute, 2015.
- [19] SELVAM P K, KULENOVIC R, LAURIEN E. Experimental and numerical analyses on the effect of increasing inflow temperatures on the flow mixing behavior in a T-junction[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 61: 323-342.
- [20] GAO K, WANG P, LU T, et al. Experimental investigation and numerical simulation for weakening the thermal fluctuations in a T-junction [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 78: 180-187.
- [21] ANDREOPOULOS J, RODI W. Experimental investigation of jets in cross flow[J]. J Fluid Mech, 1984, 138(1): 93-137.
- [22] ANDREOPOULOS J. Heat transfer measurements in a heated jet-pipe flow issuing into a cold cross stream[J]. Phys Fluids, 1983, 26(11): 3201-3210.
- [23] SHERIF S A, PLETCHER R H. Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in cross flow[J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111(11): 897-903.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 13 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此,本编辑部特向这些专家表示敬意,对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

艾鹏飞 陈俊风 丁宇婷 冯俊小 胡敏强 贾相如 柯熙政
黎茵 李华昱 李敏权 李文斌 李元凯 廖翠萃 林进
皮大伟 石磊 宋水山 孙晓东 肖刚 徐夫义 叶姜瑜
袁显举 张昱 张新光

(本刊编辑部)