

文章编号:1671-6833(2017)01-0041-05

# 一种强化换热流道的传热特性及流体扩散性分析

王永庆<sup>1</sup>, 朱冰<sup>2</sup>, 赵頔<sup>1</sup>, 靳遵龙<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450001; 2. 河南化工职业学院 化工系, 河南 郑州 450042)

**摘要:**以一种正交波纹流道为研究对象,应用 CFD 软件 Fluent 对其在低雷诺数下的特性进行了数值研究,并对数值结果进行了实验验证。研究表明,流体在较小的流速下,获得较好的传热效果。受流道的影响和流体黏性力的作用,随流体在流道中几何位置变化,流线间的相对位置与速度大小分布变化明显,在截面上形成了比较明显的二次流。流体受到了较大程度的拉伸与折叠作用,横截面内具有较大的横向速度分量且变化明显,流体在不同的几何位置处速度的大小与方向各不相同,不同位置处的流体质点受到不同的拉伸与折叠强度,形成复杂三维速度场,流道内形成较强的对流,增大了流体间的混合与传热。所得结论与研究方法可以为低雷诺数下流道内的传热、混合强化机理分析与结构优化提供参考。

**关键词:**层流;传热强化;扩散性;对流传热

**中图分类号:**TK172 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.002

## 0 引言

换热设备是工业中常用的一种装备,提高换热设备的传热效率有着重要的意义<sup>[1-2]</sup>。管道作为众多换热设备的换热流道,其结构形式、流体流动与传热特性一直受到人们的重视。管道内的传热强化技术,常见的有添加管内插入物<sup>[3]</sup>、粗糙表面<sup>[4]</sup>、结构形式的优化<sup>[5]</sup>、复合强化<sup>[6]</sup>等。

随着制造技术以及工艺的发展,流体在低雷诺数下管道内的强化传热也越来越受到重视。Patil 等<sup>[7]</sup>研究了层流情况下,具有螺旋结构的方管内的传热与流动特性;Yong 等<sup>[8]</sup>对含有缩放微槽道内层流情况下的混合与传热特性进行了研究。在对管道内的强化传热分析过程中,多为基于得到的流体流动速度场和温度场的分布,应用边界层理论进行定性分析。近年来的研究表明:流体流线或流动面被剧烈的拉伸与折叠、流体对初始位置条件敏感、在某些区域内流体间的拉伸程度成指数增长<sup>[9-10]</sup>,这种扩散特性是流体对流中可以强化混合与传热的主要原因<sup>[11]</sup>。对强化流道中的扩散特性进行分析与研究,对于强化传热机理与新技术的应用具有重要的理论研究意义与工程应

用价值。

笔者以一种具有正交波纹流道的强化换热管为研究对象,应用 CFD 软件 Fluent 对其在低雷诺数下的流动与传热特性进行数值研究,并对计算结果进行实验验证。结合数值计算得到的流体流线、流速以及温度场的分布,分析流道的强化传热机理;并采用拉格朗日跟踪技术计算流道中流体物质线的变形情况,分析流道内流体扩散性对强化传热的影响。

## 1 研究模型与数值计算

以具有正交波纹作为基本单元组成的一种传热流道作为研究对象。流道基本单元的前半部分中,上下面为相同的两个波纹面,左右两个面为平面;后半部分中,左右两个面为相同的两个波纹面,上下两个面为平面,前后两部分中的波纹为具有相同参数的余弦形式。结构如图 1 所示。流体在流道中周期性地重复流过正交波纹单元,在低雷诺数下可以形成较强的对流,从而获得更好的传热效果。

参照紧凑型换热器流道的几何参数,选用波高  $2a$  为 3 mm,波长  $l$  为 12 mm,流道截面  $w$ 、 $h$  均

收稿日期:2016-10-18;修订日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21676257);河南省高等学校重点科研项目(17A530006);中国博士后科学基金资助项目(2014M552011,2016T90678)。

通信作者:靳遵龙(1973—),男,河南淮阳人,郑州大学教授,博士,主要从事强化传热方面的研究工作,E-mail:zlj@zzu.edu.cn.

为 5 mm 的流道作为研究对象. 由于结构在流动方向上具有周期性, 在模拟过程中采用周期性模型进行计算. 划分网格时, 靠近壁面时网格适当加密, 确保数值计算能恰当反映靠近壁面的速度与温度梯度. 划分后的网格如图 2 所示.

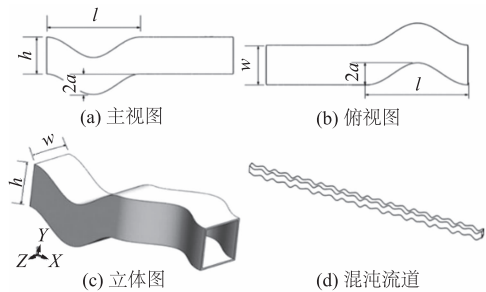


图 1 具有正交波纹的传热单元  
Fig. 1 Chaotic structure with orthogonal waves

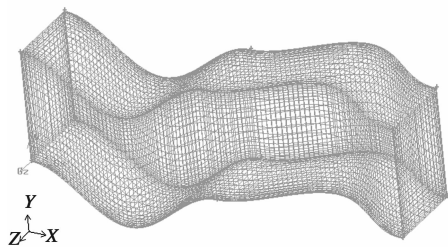


图 2 周期性模型网格  
Fig. 2 Mesh for periodic model

对所采用的网格进行加密和对波纹处进行局部加密后, 对计算的传热与压降结果影响小于 1.5%, 确保计算结果是网格独立的解<sup>[12]</sup>. 在对网格进行考核后, 选用离散求解器和层流流动模型, 包含能量方程. 流体介质为水, 在计算过程中为常物性 ( $Pr = 6.99$ ), 管壁温度为 360 K, 这种情况相当于另一侧流体为等温冷凝传热. 流体介质的入口温度为 300 K, 操作条件为标准大气压, 边界条件中壁面为标准无滑移壁面, 流体进出口两个端面为周期性边界条件, 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 动量和能量离散采用二阶迎风格式. 在求解过程中, 当连续性方程、动量方程中的变量残差小于  $10^{-4}$ , 能量方程中的变量残差小于  $10^{-7}$  时认为计算收敛.

为验证数值模拟的准确性, 建立传热实验装置, 本实验采用一套单管传热实验装置. 整套装置由供料系统、数据采集和实物模型 3 部分组成, 实验流程见图 3. 实验装置中饱和蒸汽流经管外, 在传热过程中冷凝放热; 水流经管内, 在传热过程中被加热. 实验测量结果及整理结果与数值计算值进行对比, 所得结果列于表 1. 由对比结果可以看

出, 在不同的流量下, 虽然数值模拟计算结果与实验结果存在一定的偏差, 但其值较小, 误差约在 6% 以内, 说明笔者采用的数值计算方法是正确、可靠的.

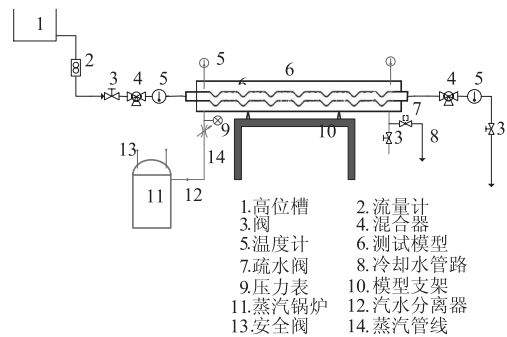


图 3 传热实验测量流程图  
Fig. 3 Experimental diagram of heat transfer

表 1 实验测量与数值计算结果  
Tab. 1 Heat transfer results of experimental and numerical calculation

当量雷诺数 $Re$	传热系数 $h / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	实验 $Nu$	模拟 计算 $Nu$	误差 / %
225.2	795	13.25	12.85	3.14
341.9	1 133	18.88	17.97	5.07
388.2	1 127	18.80	19.81	-5.15

2 流道内流动与传热特性分析

在流道内流体的  $Re$  为 300 时, 正交波纹流道中的  $Nu$  为 16.93, 而在没有波纹的直流道中, 对应的  $Nu$  为 3.61<sup>[13]</sup>, 表明研究的结构具有明显的强化传热作用. 流道中的流线形式如图 4 所示, 受流道的影响和流体黏性力的作用, 波纹的几何形状与流体的黏性力均对流体的流动产生影响, 流体流线随流体在流道中几何位置变化而变化的同时, 流线间的相对位置变化也比较显著.

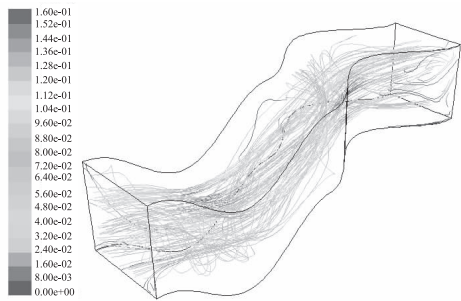


图 4 流道中的流线形式  
Fig. 4 Fluid streamlines in the duct

由图 4 中流体流线代表的速度可以看出, 在流道内, 流体在沿流动方向的横截面上的速度分

布随其几何位置的不同发生着明显的变化. 流体流线在随流道几何变化、流线间的相对位置变化也比较显著的同时,其最大速度的分布区域在横截面中的位置也会发生明显的变化.

周期性结构的出口截面上的温度场和流函数分布如图5所示. 流体在截面上形成了比较明显的二次流,且二次流流速相对较大,结构内的传热边界层得到了减薄. 因此,其传热得到了明显的强化. 由流体流动状态与流体温度分布的分析可以看出,流体的速度场与传热之间有着较强的联系.

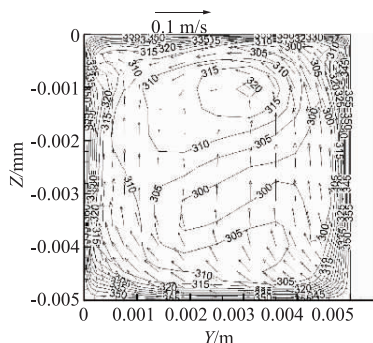


图5 出口截面上的速度矢量与等温线的分布

Fig. 5 Temperature contours and velocity vector

流道内产生的对流增加了近壁面的速度梯度,使流体可以从靠近壁面区域流向中间低温主流区域,增大了主流区低温流体与近壁处高温流体的混合,热量可以以对流的方式传递到中间温度较低的区域. 整个流道内流体湍动程度增加,从主流区内流向传热壁面的流体减薄或破坏边界层,这种流动方式大大地增强了传热. 而在普通方形流道内,层流时,流体为分层流动,各流体质点严格地按直线运动,各层之间几乎没有径向速度,且  $Nu$  为一定值. 相较普通流道,在本研究的结构中,流体可以在较小的流速时,获得较好的传热效果.

### 3 流道内流体的扩散性分析

采用拉格朗日跟踪技术<sup>[11]</sup>来描述对流特性,对流道中流体拉伸与折叠形成的扩散性进行分析.

笔者结合 Fluent 软件后处理功能和编程计算的方法,计算流体粒子在流道中的运动轨迹. 为验证计算机程序和所采用方法的正确性和计算精度,分别采用 CFD 后处理软件 TECPLOT 和所编写的计算机程序,对在流动中轨迹具有较大转折的进口面上同一初始点进行计算,所得到的轨迹如图6所示. 图中两种曲线的重合程度表明:编写

的轨迹计算程序可以用来计算流体粒子在流道内的运动轨迹,且具有较高的计算精度.



图6 两种方法所得轨迹比较

Fig. 6 Comparison of pathlines created by using two means

流体在混合过程中存在3种运动形式,其中流体的平动会因对流作用而产生大范围的传输现象,流体的纯变形运动则能使流体介质的界面形状发生变化,这两种运动都有利于流体混合的分割与重组. 而流体的旋转运动产生的流体质点自身的旋转运动,则对应着流体的折叠,折叠使得流体能够保持在一个给定的区域内运动,使得流体之间的对流和流体拉伸作用能够持续<sup>[14]</sup>. 在  $Re$  为 300 时,在 10 个周期研究结构内,流道入口面上相邻两点在流道中形成的流线如图7所示. 从图7可以看出,流体在进入流道内时,受到较大程度的拉伸与折叠作用.

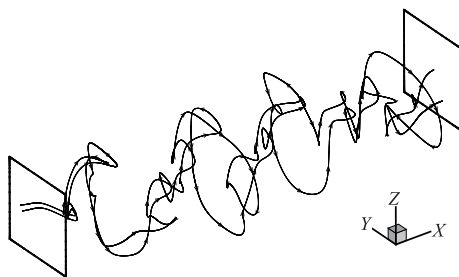


图7 10个周期结构内的两条流体流线

Fig. 7 Two streamlines in the channel with 10 periodic units

在周期性单元入口面上,由多个空间固定点组成物质线,通过这些空间点的脉线经过一些几何周期单元后的分布(或映射)来定性分析对流中物质线与物质面的变形情况. 物质线取为流道进口面上的截面中心线. 在计算过程中,物质线采用沿中心线均布的 5 000 个离散点来研究流体物质线的变形情况,所有经过该截面中心线的流体粒子脉线变形情况,均用从这些离散点出发的迹线来模拟. 这种分布的物质线用于分析结构内流体物质线的变形情况. 经过数个周期后的映射如图8所示.

由于流道内边界的几何布置的影响,流体在沿主流方向运动的过程中,在横截面内产生的横

向速度分量较大. 从第一个几何单元入口面中心线上出发的所有脉线被迅速分离, 在经过多个对流单元的作用后, 在横截面上的映射被迅速拉伸, 各相邻点间长度增加, 然后被折叠在一起. 从不同几何周期出口面上的粒子分布可以看出, 原中心线上各流体物质点之间的相对速度较大, 且在不同的几何位置处速度的大小与方向各不相同, 使得相邻位置的流体质点可以被迅速地分离开, 从而使得它们之间原本有序、相关的排放位置变得杂乱无章. 经过 5 个周期后, 这些空间点的映射几乎均匀地遍布流道的整个横截面.

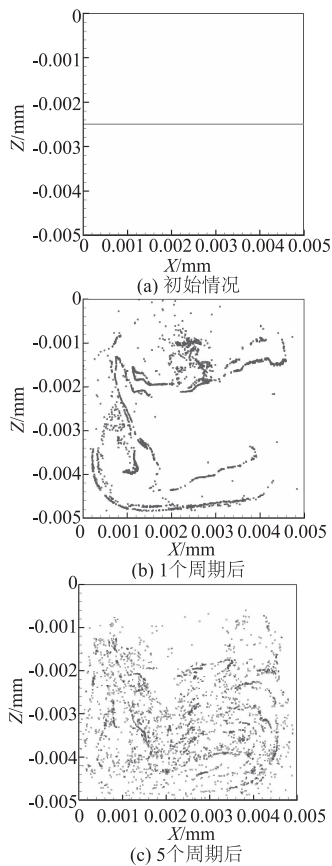


图 8 入口面中心线上均布粒子的映射

Fig. 8 Mappings of uniformly distributed particles on the centerline of inlet

由图 8 可以得出, 对流中粒子运动的轨迹和其最终的位置对其初始位置是非常敏感的. 这是由于在对流结构内, 不同位置处的流体质点受到的拉伸与折叠强度是不同的, 对流所形成的复杂三维速度场对流体粒子产生的对流作用亦是非常复杂的. 这表明在此流道内, 在较低雷诺数下, 流体的流动具有较强的对流运动特征.

#### 4 结论

笔者以一种正交波纹流道为研究对象, 应用

CFD 软件 Fluent 对其在低雷诺数下流体流动与传热性能进行数值研究, 并对数值结果进行了实验验证.

分析表明, 受流道的影响和流体黏性力的作用, 波纹的几何形状与流体的黏性力均对流体的流动产生影响, 流体流线随流体在流道中几何位置变化而变化的同时, 流线间的相对位置与速度大小分布变化明显. 流体在截面上形成了比较明显的二次流, 增大了流体在流道横截面中的速度分量, 增大了主流区流体与近壁处流体的混合, 整个流道内流体湍动程度增加, 这种流动方式大大地增强了传热. 流体可以在较小的流速时, 获得较好的传热效果.

采用拉格朗日跟踪技术研究粒子迹线, 结果表明, 流体在进入流道内时, 受到了较大程度的拉伸与折叠作用. 横截面内具有较大的横向速度分量, 各流体物质点间的相对速度较大, 且在不同的几何位置处速度的大小与方向各不相同, 使得相邻位置的流体质点可以被迅速地分离开, 不同位置处的流体质点受到的拉伸与折叠强度是不同的, 从而使得它们之间原本有序、相关的排放位置变得杂乱无章, 所形成的复杂三维速度场对流体粒子产生较强的对流作用. 对流中粒子运动的轨迹和其最终的位置对其初始位置是非常敏感的, 在较低雷诺数下, 流道内流体流动具有较强的对流运动特征.

#### 参考文献:

- [1] SINHA A, CHATTOPADHYAY H, IYENGAR A K, et al. Enhancement of heat transfer in a fin-tube heat exchanger using rectangular winglet type vortex generators[J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 101:667 - 681.
- [2] 刘敏珊, 许伟峰, 王永庆, 等. 变角度连续螺旋折流板换热器优化结构的数值研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(5):39 - 43.
- [3] LIU C P, LIN Z M, WANG L B. Thermal boundary conditions on the cross sections normal to the main flow of a fully developed convection in a tube with tape insert[J]. Numerical heat transfer part A-applications, 2014, 65(12):1230 - 1253.
- [4] AHARWAL K R, PAWAR C B, CHAUBE A. Heat transfer and fluid flow analysis of artificially roughened ducts having rib and groove roughness[J]. Heat and mass transfer, 2014, 50(6):835 - 847.
- [5] MILLS Z G, WAREY A, ALEXEEV A. Heat transfer enhancement and thermal-hydraulic performance in

- laminar flows through asymmetric wavy walled channels [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2016, 97: 450 – 460.
- [6] 杨侠, 刘丰良, 熊卉, 等. EHD/脉动流混合强化传热换热器的传热与阻力特性实验研究[J]. *热能动力工程*, 2014, 29(3): 256 – 261.
- [7] PATIL S V, BABU P V V. Heat transfer and pressure drop studies through a square duct fitted with increasing and decreasing order of twisted tape [J]. *Heat-transfer engineering*, 2014, 35(14/15): 1380 – 1387.
- [8] YONG J Q, TEO C J. Mixing and heat transfer enhancement in microchannels containing converging-diverging passages[J]. *Journal of heat transfer-transactions of the ASME*, 2014, 136(4): 11.
- [9] CASTELAIN C, MOKRANI A, LEGUER Y, et al. Experimental study of chaotic advection regime in a twisted duct flow[J]. *European journal of mechanics-B/fluids*, 2001, 20: 205 – 232.
- [10] LASBET Y, AUVITY B, CASTELAIN C, et al. A chaotic heat-exchanger for pemfc cooling applications [J]. *Journal of power sources*, 2006, 156: 114 – 118.
- [11] LEFÈVRE A, MOTA J P B, RODRIGO A J S, et al. Chaotic advection and heat transfer enhancement in stokes flows[J]. *International journal of heat and fluid flow*, 2003, 24: 310 – 321.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 王林翔. 扭转弯管的混沌混合机理及其可视化研究[D]: 浙江大学机械工程学院, 1999.
- [14] OTTINO J M. Mixing, chaotic advection and turbulence[J]. *Annual review of fluid mechanics*, 1990, 22: 207 – 253.

## Characteristics of Heat Transfer and Fluid Diffusion in a Heat Transfer Enhanced Duct

WANG Yongqing<sup>1</sup>, ZHU Bing<sup>2</sup>, ZHAO Di<sup>1</sup>, JIN Zunlong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Chemical Engineering, Henan Vocational College of Chemical Technology, Zhengzhou 450042, China)

**Abstract:** The characteristics of a flow duct with orthogonal waves were numerical studied by using CFD code Fluent with a lower Reynolds number. The numerical simulations were verified by experimental results. The result indicated that heat transfer was enhanced in the duct with a lower fluid velocity. With the impact of duct geometry and fluid vicious force, the relative positions between streamlines and distribution of fluid velocity varied greatly with the fluid locations. Second flow came into being on cross sections along the duct. Fluid continually received strong function of stretching and folding, bearing varied bigger transverse velocity component. The magnitude and direction of fluid changed with the locations, and the intensity of stretching and folding changed as well. A complex 3D flow field was formed in the duct, which enhanced fluid mixing and heat transfer. The results and method could provide references for mechanism analysis and structure development.

**Key words:** laminar; heat transfer enhancement; diffusion character; convective heat transfer