

文章编号:1671-6833(2011)03-0006-04

## 混沌对流强化传热的场协同分析

王永庆,董其伍,刘敏珊,王 丹

(郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室,河南 郑州,450002)

**摘 要:**基于采用周期性计算模型得到的混沌对流流道内的流体流动与传热数值计算结果,应用场协同原理,对混沌对流内强化传热进行分析.分析了混沌流道截面上流场与温度场的协同关系,讨论了流道内不同雷诺数下 Nusselt 数与平均流速与温度梯度矢量和平均协同角的对应变化趋势,并与普通直流道内层流下的流动与传热场协同情况进行了对比.结果表明,混沌流道改变了流体在流道内速度场的分布,流场的变化影响了温度场的分布,使得两场的协同效果得到明显的改善,从而强化传热.在整个流道内,混沌对流的 Nusselt 数与速度和温度梯度两矢量的点积具有相同变化关系,混沌对流强化传热的根本机理是改善了两场的协同关系.

**关键词:**混沌对流;场协同原理;传热强化;层流

**中图分类号:** TQ051.5 **文献标志码:** A

### 0 引言

1983 年 Aref 发表关于混沌对流的文章<sup>[1]</sup>,此后,混沌对流被用来强化混合与传热,在 20 世纪 90 年代初开始,已经发展的研究混沌的工具开始被应用,混沌对流也被研究应用于优化混合、传热强化等节能工程,对设计紧凑、高性能的换热设备有着广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>.

1998 年我国学者过增元等<sup>[4]</sup>对边界层型的流动进行能量方程的分析,从流场和温度场相互配合的角度重新审视对流换热机制,在此基础上提出了换热强化的“场协同”原理(Field Synergy Principle),证明了减小速度矢量与温度梯度矢量之间的夹角是强化对流换热的有效措施,提出通过改善流场与温度场的协同关系来控制对流传热的强弱.

笔者选取已经证实的在层流范围内产生混沌对流的流道,在通过 CFD 软件 FLUENT 计算混沌对流流道内流体流动与传热数值计算的基础上,应用场协同原理,对流场与温度场的协同关系进行了分析,并与普通直流道层流下的流动与传热对比,揭示混沌对流内强化传热的机理.

### 1 研究结构及数值方法

近年来的研究表明在特殊几何流道下,流体可以在层流状况下,产生扩散特性接近于湍流的流动状态,称为混沌对流(Chaotic advection),也称拉格朗日湍流(Lagrangian turbulence)和拉格朗日混沌(Lagrangian chaos),这种流动状态中流体粒子轨迹显示为混沌态,可以提高流体间混合.在适宜的特殊流道内,混沌对流能够促进流道中间的冷流体与传热壁面附近的热流体交换能量,从而增强传热而又不显著地增大压降<sup>[3]</sup>.

混沌计算流道取为文献[2,5-6]已经证实的在层流范围内产生混沌对流的 C 型流道,如图 1 所示;与其对应的普通层流流道为平直柱形流道,如图 2 所示.两种流道流通面积相同,尺寸为 30 mm × 15 mm.

笔者利用 CFD 软件 FLUENT,对以上两种流道内的流体流动与传热特性进行数值分析.分析两种流道在充分发展段的流体流动与传热特性.由于两种流道在流体流动方向上均具有几何周期性,在计算过程中采用周期性计算模型.混沌流道的计算长度为混沌流道的一个几何周期,为 120 mm,如图 1 中阴影部分所示.平直流道计算长度取为与混沌流道模型展开相等长度,为 240 mm.

收稿日期:2010-12-13;修订日期:2011-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51006092)

作者简介:王永庆(1979-),男,河南林州人,郑州大学讲师,博士,主要从事过程传热强化及装备研究,E-mail:wanygq@zzu.edu.cn.

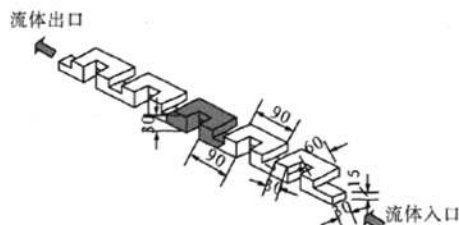


图1 混沌流道及尺寸

Fig.1 Chaotic advection channel with dimension

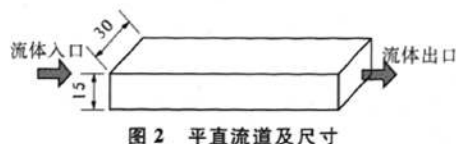


图2 平直流道及尺寸

Fig.2 Regular straight channel with dimension

在数值计算过程中使用如下边界条件,流体介质为液体,常物性( $Pr = 7.0$ ),传热壁面温度400 K,流体的入口温度300 K,操作条件为标准大气压,边界条件中的所用固体壁面均为标准无滑移壁面,流体进出口对应的两个端面取为周期性边界,压力速度的耦合采用SIMPLE算法,动量和能量离散均采用二阶迎风格式.在计算过程中,分别对两个模型网格进行考核,对流动变化剧烈处进行局部加密,确保所得计算结果是网格独立的解以及计算结果的可靠性.

根据流体物性以当量直径得出流体流动的特征参数:

$$Re = \rho u d_e / \mu \quad (1)$$

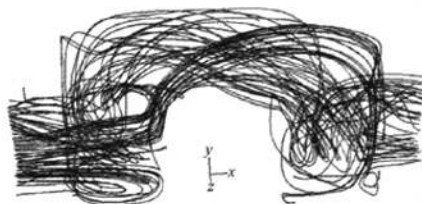
式中: $\mu$ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho$ 为流体密度, $\text{kg/m}^3$ ;  $u$ 为流体流速, $\text{m/s}$ ;  $d_e$ 为当量直径, $\text{mm}$ ;  $Re$ 为雷诺数.

## 2 计算结果及讨论

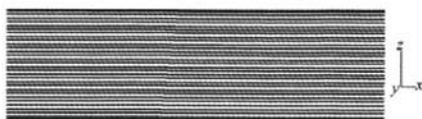
对于平直流道,当流体 $Re = 300$ 时,经过数值模拟计算, $Nu$ 数为3.442,摩擦因子 $\lambda$ 为0.205,其理论值分别为3.391和0.2073<sup>[7]</sup>,数值模拟结果与理论值的相对误差分别为1.50%和1.11%.对于混沌流道,当雷诺数为200时,笔者在流道壁为常壁温条件下,所得的 $Nu$ 数为18.2,而文献[5]中,在流道壁为常热流密度条件下, $Nu$ 数的数值结果为20.4,两者的数值关系符合层流条件下的传热规律.以上结果比较可作为数值计算结果的验证.

在两种流道内,当 $Re = 300$ 时流体流线分布如图3所示,速度大小分布如图4所示.可以看出,混沌流道内流体沿管道向前运动中,在主流速度方向上产生较大的径向分速度,且其径向分速度随流体所处位置的不同,其大小与方向也各不相同.而平直流道流道内,流体为分层流动,各流

体质点严格地按直线运动,在宏观上彼此互不混杂,几乎没有径向速度.



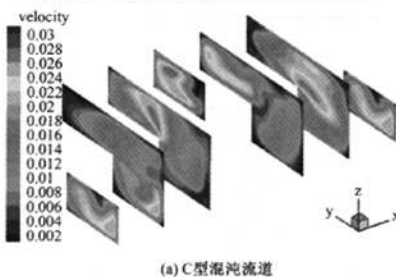
(a) C型混沌流道



(b) 平直流道

图3 流体流线图

Fig.3 Streamlines in two channels



(a) C型混沌流道



(b) 平直流道

图4 速度分布图

Fig.4 Velocity magnitude distribution in two channels

场协同理论指出,对流换热的热边界层内壁上传递的热量<sup>[4]</sup>:

$$q_w = \int_0^{\delta} \rho c_p (U \cdot \nabla T) dy \quad (2)$$

可见,被积函数 $(U \cdot \nabla T)$ 反映了速度场与热流场配合程度,反映了对流传热过程整体上的协同程度,提高其数值,就可以强化传热.此值不仅与边界层内的速度、热流的绝对值有关,还取决于速度与温度梯度之间的局部夹角,即协同角.协同角是表征局部协同程度的一个指标,反映了某个对流换热过程中局部区域的场协同程度,并可通过局部协同角的全场积分得出相应过程的全场平均协同角.

虽然此理论分析是对边界层流动进行的,然其结论有更普遍的意义,场协同理论不仅适合于抛物型流动,同样亦适合于椭圆型流动<sup>[8]</sup>.

基于混沌对流流道的层流充分发展流动与传热进行数值计算,在流体介质为常物性的速度与

温度场计算结果上,将两矢量的点积( $U \cdot \nabla T$ )在全场内作积分<sup>[8-9]</sup>,并与普通平直流道相对比,利用场协同原理分析混沌对流内强化传热。

在不同雷诺数下的两种流道的  $Nu$  数随雷诺数  $Re$  的变化如图 5 所示,混沌流道的  $Nu$  随  $Re$  数的增大而增大,普通层流的  $Nu$  不随  $Re$  数的变化而改变,为一常数,对于笔者所用流道在常壁温条件下为 3.39。

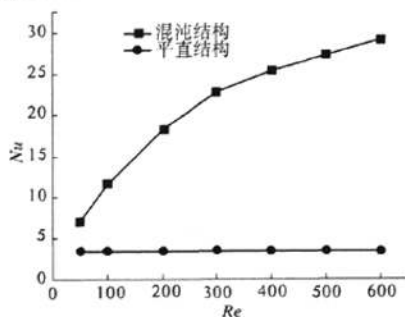


图 5 两种流道的  $Nu$  与  $Re$  的关系

Fig. 5  $Nu$  number versus Reynolds number in two channels

在雷诺数为 300 时,取两种周期性流道的出口面进行协同性分析,所得截面上的温度场和流函数分布如图 6 所示,混沌周期流道出口面即整个流道中平直段中间位置。由于平直流道内流体在垂直于主流速的平面内分速度很小,图 6(b)中单位长度流函数线代表的速度为图 6(a)的百万分之一。

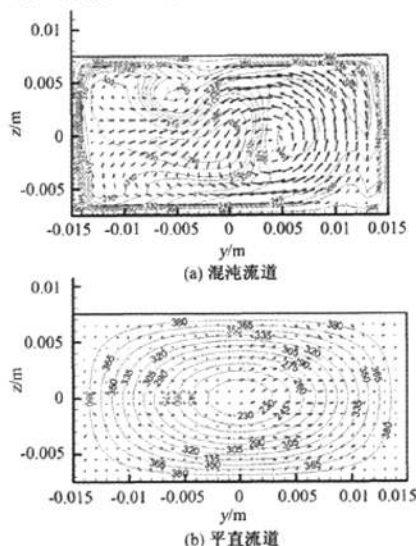


图 6  $Re = 300$  时两种流道出口截面协同性分析

Fig. 6 Analysis of field synergy on outlet cross sections in two channels for  $Re = 300$

由图(6)可见,平直流道截面内温度与速度接近于垂直,速度与温度梯度的协同性较差。而混沌流道截面内温度与速度的分布不再同普通层流万方数据

截面内那样规律明显,流体表面出了接近于湍流的扩散性,在温度梯度较大的区域出现了较大速度,速度与温度梯度的协同在部分区域得到了较大的提高,同时也在部分区域恶化严重,致使流道内流体的压力损失也较平直流道要高许多。整体上速度与温度梯度的协同性较平直流道有所增强,这种协同性导致了在相同的  $Re$  数下,混沌流道的  $Nu$  数大大高于平直流道,并随  $Re$  数的增加而增大。混沌流道改变了时均速度场的分布,流场的变化影响了温度场的分布,使得两场的协同效果得到明显的改善。

除简单的算术平均对于非均分网格是不合理的之外,体积加权平均角、矢量模加权平均角、分量加权平均角和积分平均中值角 5 种计算方式的协同角整体变化趋势基本一致<sup>[10]</sup>。根据这一结论,在两种流道数值模拟基础上,取全场内速度与温度梯度两矢量点积( $U \cdot \nabla T$ )的体积加权平均值(记为  $Int$ )和两矢量夹角的体积加权平均协同角,所得两类数值随  $Re$  数的变化如图 7 所示。

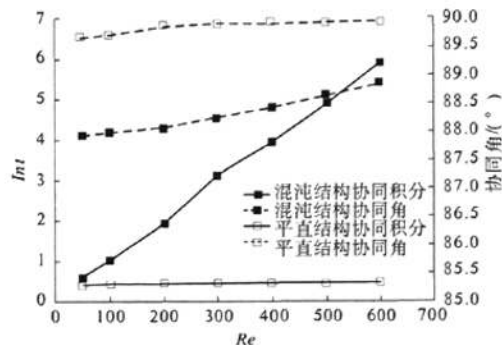


图 7 两种流道  $Int$  及协同角随  $Re$  数的变化

Fig. 7  $Int$  and synergy angle versus Reynolds number in two channels

由图 7 可以看出,混沌流道的  $Int$  值随着  $Re$  数的增大而增大,平直流道的  $Int$  几乎不随  $Re$  数的改变而变化。两种流道内  $Int$  随  $Re$  数的变化趋势基本与  $Nu$  数随  $Re$  数的变化趋势一致。 $Int$  值代表了整个区域速度与温度梯度的点积的体积加权平均量,在混沌流道内温度梯度较大区域出现了较大的速度分量,因此二者的协同程度较好,而在平直流道内二者的协同程度要较混沌流道差许多,并且其点积并不随流体流速的增大而提高。同时,混沌流道内的协同角随着  $Re$  数的提高,协同角不断增大,导致了混沌流道内  $Nu$  数随  $Re$  数的增大而增长速度逐渐减慢,不能随  $Re$  数呈线性增长。

由以上的场协同分析可以得出,混沌对流内的强化传热特性及其变化趋势完全符合场协同原

理.

### 3 结 论

混沌流道改变了普通层流内的时均速度场的分布,流场的变化影响了温度场的分布,在温度梯度较大的区域出现了较大的速度分量,使得两场的协同效果得到明显的改善.

混沌对流的强化传热程度与速度和温度梯度两矢量的点积( $U \cdot \nabla T$ )大小具有单调变化的密切关系,传热  $Nu$  数与( $U \cdot \nabla T$ )随  $Re$  数的变化趋势一致,传热  $Nu$  数随两矢量的点积增大而增加.而在平直流道内层流情况下,传热  $Nu$  数与两矢量的点积均为常量,不随  $Re$  数的变化而变化.通过场协同原理的分析发现,混沌对流强化传热的根本机理有效改善了速度场与温度场的协同作用.

### 参考文献:

- [1] AREF H. Stirring by chaotic advection[J]. *Journal of Fluid Mechanics*. 1984,143:1-21.
- [2] AREF H. The development of chaotic advection[J]. *Physics of Fluid*. 2002,14(4):1315-1325.
- [3] MOKRANI A, CASTELAIN C, PEERHOSSAINI H. The effects of chaotic advection on heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997, 40(13):3089-3104.
- [4] GUO Z Y, LI D Y, WANG B X. A novel concept of convective heat transfer enhancement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998, 41(14): 2221-2225.
- [5] 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.
- [6] LIU R H, STREMLER M A, SHARP K V, et al. Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2000,9(2):190-197.
- [7] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006
- [8] TAO Wen-quan, GUO Zeng-yuan, WANG Bu-xuan. Field synergy principle for enhancing convective heat transfer—its extension and numerical verifications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002,45(18): 3849-3856.
- [9] 王炯,宋富强,屈治国,等. 场协同理论在椭圆型流动中的数值验证[J]. *工程热物理学报*. 2002,23(1):59-62.
- [10] 陶文铨,何雅玲. 对流换热及其强化的理论与实验研究最新进展[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

## Analysis of Field Synergy on Heat Transfer Enhancement in Chaotic Advection

WANG Yong-qing, DONG Qi-wu, LIU Min-shan, WANG Dan

(Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Based on the numerical results of fluid flow and heat transfer in a chaotic advection channel by adopting periodic model, heat transfer enhancement in chaotic advection is analysed by using the field synergy principle. The synergy between velocity and temperature fields on the cross section in the duct was analyzed, and the relationship in the chaotic duct between the Nusselt number and the average vector product of velocity and temperature gradient, and average synergy angle in different Reynolds numbers were studied, which were compared with that in the regular straight channel. It is found that the chaotic channel resulted in the different distribution of velocity field, which changed temperature fields. The synergy of velocity and temperature fields is improved, which enhances heat transfer in chaotic channel. The Nusselt number changes monotonously with the vector product of velocity and temperature gradient, and the fundamental mechanism of heat transfer enhancement in chaotic advection is the improvement of synergy between velocity and temperature fields.

**Key words:** chaotic advection; field synergy principle; heat transfer enhancement; laminar flow.