

# C 型混沌结构中传热强化的数值分析

王永庆<sup>1</sup>, 董其伍<sup>1</sup>, 刘敏珊<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 2 郑州大学过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 随着对强化传热的广泛重视与研究, 利用混沌对流来强化传热的新技术得到了关注。利用 CFD 软件 Fluent 对 C 型混沌结构内的流体流动与传热进行数值模拟, 对比了 C 型混沌结构与普通平直结构在流体流动场、温度场分布和传热特性等细观信息, 分析了 C 型混沌结构的强化传热性能及特点。分析结果表明, C 型混沌结构使流体在较小速度下产生混沌对流, 这种流态增加了流体的扰动与湍动, 增大主流区或近壁处流动的混合, 强化了流道内的传热, 使流道横截面上的温度分布均匀化; 混沌对流内的传热  $Nu$  数和  $Po$  数 (即  $fRe$  值) 不再象普通层流为一定值, 而随  $Re$  数的增大而增大。

**关 键 词:** 混沌对流; 传热强化; 层流; CFD

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 引 言

能源是经济发展的基础, 将热能有效地转化为各种动力, 并提高热能的传递和利用率, 进行能量的综合利用和回收利用是全球性的长期研究热点之一。20 世纪 70 年代初出现的世界性能源危机, 使传热强化技术获得了快速发展, 受到科技界和工业界的广泛重视<sup>[1-2]</sup>。

近年来的研究表明, 在特殊几何流道下, 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), 这种流动状态中存在小数量的自由度, 产生二次流, 流体粒子轨迹显示为混沌态, 可以提高流体间混合, 促进流道中间的冷流体与传热壁面的热流体交换能量, 从而增强传热但又不显著地增大压降<sup>[3]</sup>。

在 20 世纪 80 年代末以前, 工程研究的重点在于研究能够产生混沌状况的系统和发展研究混沌动

力系统的工具<sup>[4]</sup>。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用于优化混合和传热强化的实际流动研究<sup>[3, 5-10]</sup>。根据研究的结果表明, 混沌对流能够显著地强化传热, 对设计紧凑、高性能的换热器或换热反应堆是一个很有前途的强化传热技术<sup>[11]</sup>。

混沌对流作为一种新的强化传热技术, 国外在这方面已经做了许多的工作。对于二维的发生混沌对流模型研究较多的主要有偏心环隙和椭圆环隙<sup>[12-13]</sup>。Lefevre 和 Mota 等人对二维周期流与三维空间流结构中发生的混沌对流传热进行分析<sup>[9]</sup>。Chagny 和 Peerhossaini 等人对具有同样传热面积与相同数量弯头的两种管壳式换热器进行了实验<sup>[8]</sup>, 一种为混沌对流结构换热管, 而另一种为常规螺旋结构换热管。Peerhossaini 和 Castelain 等人对扭曲方管 (twisted duct) 在层流情况下进行了实验研究<sup>[10, 14]</sup>。Acharya, Lemenand 等人对螺旋管中混沌强化传热现象进行了分析<sup>[11, 15]</sup>。

## 1 计算模型

为突出其特性, 这里选择一个混沌对流比较强烈的混沌对流结构来进行对比分析, 混沌对流模型根据文献 [16-17] 已经证实的能在层流范围内产生混沌对流的结构—C 型混沌结构, 文献中对其性能进行了初步的分析, 本文采用 CFD 技术和数值分析的方法, 与普通平直结构进行对比, 对其流场和温度场分布、流体流动对传热强化的影响进行细观分析。

文中所分析的 C 型混沌结构的形式及尺寸如图 1 所示; 相对应的普通平直模型为柱形结构, 其流动横截面采用与混沌结构流通面积相等的长方形, 如图 2 所示。两种结构的当量直径均为 20 mm。

收稿日期: 2007-10-11; 修订日期: 2007-11-01

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目 (0621001600)

作者简介: 王永庆 (1979-) 男, 河南林州人, 华东理工大学博士研究生

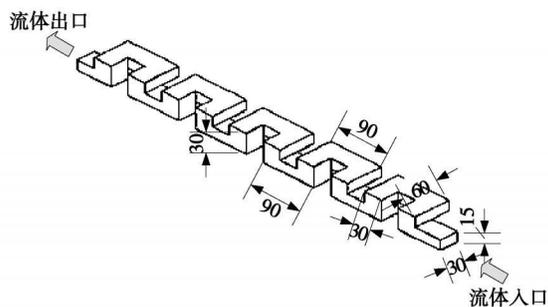


图 1 混沌 对流结构及尺寸(mm)

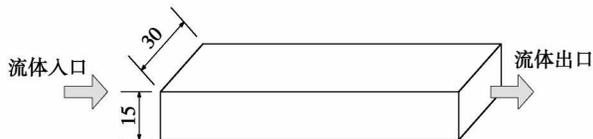


图 2 平直结构及尺寸

## 2 数值计算

利用 CFD 软件 Fluent, 对以上两种结构, 不考虑入口与出口效应及重力影响, 分析在充分发展段的流体流动与传热特性, 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计算。

在 Fluent 中选用离散求解器和层流模型, 打开能量方程。对网格进行考核, 对所采用的网格进行加密、改变划分方法和对流动变化剧烈处进行局部加密后对计算的关键结果影响很小, 确保计算结果是网格独立的解和计算结果的可靠性。在边界条件中作如下设置: 设置介质为水, 在计算过程中为常物性, 将管壁温度设置为 400 K, 将介质的入口温度设置为 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, 压力速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 动量和能量离散采用二阶迎风格式。

当不计体积力时, 一个周期内的流动控制方程为<sup>[18]</sup>:

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$

$$\rho \left[ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \phi}{\partial y} +$$

$$\mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$\rho \left[ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \phi}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$

能量方程:

$$\rho c_p \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

周期性边界条件:

$$u(x, y, z) = u(x, y, z + s) \quad (4)$$

$$v(x, y, z) = v(x, y, z + s) \quad (5)$$

$$w(x, y, z) = w(x, y, z + s) \quad (6)$$

$$p(x, y, z) - p(x, y, z + s) = p(x, y, z + s) - p(x, y, z + 2s) \quad (7)$$

在模型中, 压力可由压力梯度来表征, 压力梯度可理解为单位长度的压力降, 其定义式为:

$$\Delta p = [p(x, y, z) - p(x, y, z + s)] / s \quad (8)$$

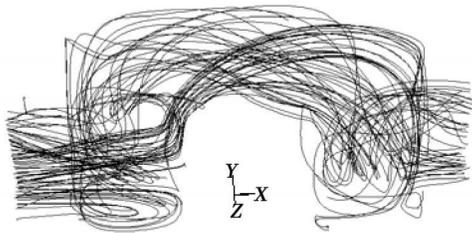
## 3 结果分析

对平直结构, 当流体  $Re = 300$  时, 经过数值模拟计算,  $Nu$  数为 3.442, 摩擦因子  $f$  为 0.205 0, 其理论值分别为 3.391 和 0.207 3<sup>[19]</sup>, 数值模拟结果与理论值的相对误差分别为 1.50% 和 1.11%。可以看出数值模拟的流动与传热结果具有较高的准确性与可靠性。

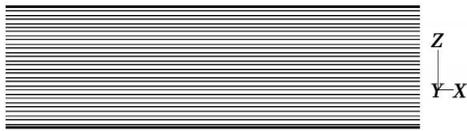
### 3.1 混沌结构的流体流动与传热

在两种结构的流道内, 流体流线分布如图 3 所示, 速度大小的分布如图 4 所示。可以看出, 在混沌结构内由于流通结构在流体主流方向的几何摆动, 使流体在总体上沿管道向前运动, 同时在流动的主流速度方向上产生较大的径向分速度, 而且由于流体所处的几何位置不同, 受到的几何约束和向心力不同, 其径向分速度的大小与方向也各不相同。在整个周期流道内, 速度较大区域随着流道的几何变化, 从流道内的右下方逐渐过渡到左上方, 然后又回至右下方, 随着流体在流道内的流动, 流体的横截面上的速度大小分布随几何位置的不同而各不相同, 从而使流体流动显示出了湍流的一些特性。混沌结构虽然表现出了湍流的特性, 但造成其形成这种流动形态的原因是由于流道几何结构的摆动、流体在各几何位置受到的向心力不同, 并不是由于其速度值较大而在各个方向产生随机的脉动, 用欧拉法来

研究整个流场, 其内任一点的速度(包括大小与方向)并不是一个随机值, 所以本质上还属于层流。而在平直结构流道内, 流体为分层流动, 各流体质点严格按直线运动, 层次分明, 为分层流动, 流体速度在各横截面上的分布情况相同, 在宏观上彼此互不混杂, 各层之间的几乎没有径向速度, 为典型的层流。



(a) C型混沌结构



(b) 平直结构

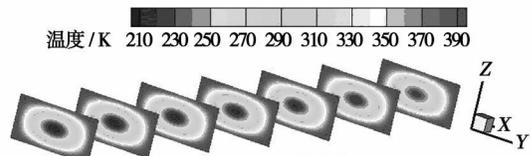
图 3 流体流线图

的平均温度明显高于平直结构。

而在平直结构中温度的分布明显呈现为层流传热特征, 传热主要的方式为各层之间的热传导, 温度从中心到传热面呈层状的分布, 各个截面温度都是从壁面到中心依次降低, 温度呈环状分布。

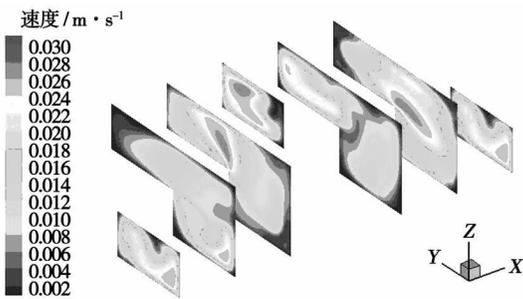


(a) C型混沌结构

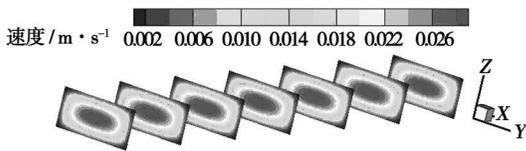


(b) 平直结构

图 5 温度分布图

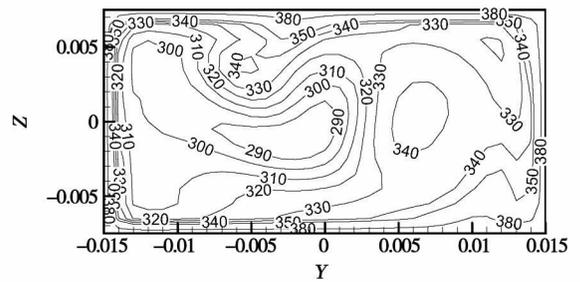


(a) C型混沌结构

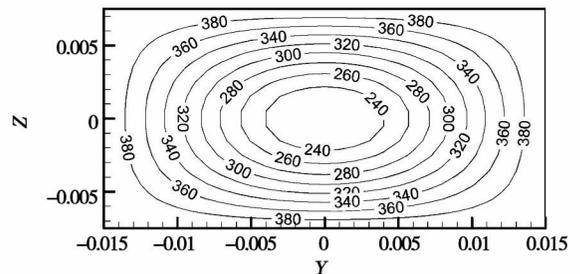


(b) 平直结构

图 4 速度分布图



(a) C型混沌结构



(b) 平直结构

图 6 出口截面温度分布图

两种结构在流道的温度分布如图 5 所示, 在流道出口截面的温度分布如图 6 所示。两种结构内均是靠近壁面的温度较高, 中心区域温度较低。C 型混沌结构内的流体温度整体分布较为均匀, 温度的分布也呈现有湍流传热的特点, 而且在不同几何位置的横截面上其温度分布各不相同, 各截面温度的分布比平直结构均匀, 规律性不明显。在流过相同的长度时, 具有同样入口的平均温度, 混沌结构出口

由流道结构内的流场与流道内的温度分布可以看出, 混沌结构内产生的混沌对流增加了近壁面的速度梯度, 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。在混沌对流结构中可以在较小的流速时得到较好的传热效果。

而在平直结构内, 靠近传热壁面的流体沿直线运动, 各层之间除因极少量的扩散方式传热外, 主要以热传导方式传热, 从而使其传热效果明显不如混沌结构。

### 3.2 雷诺数对传热和摩擦因子的影响

本文对雷诺数在 50、100、200、300 和 500 时的两种结构进行了分析, 两种结构的努塞尔数  $Nu$  和 Poiseuille 数  $Po$  (即  $fRe$  值) 随雷诺数  $Re$  的变化如图 7 所示。在混沌结构内, 流体产生的混沌对流在强化传热的同时, 也造成其努塞尔数  $Nu$  不再象普通层流是一常数, 而随雷诺数的增大而增大, 在传热方面表现出了湍流传热状态下的某些特性; 混沌结构与平直结构中摩擦系数均随  $Re$  数的增大而减小, 但  $Po$  数在普通层流中为一常数, 在混沌对流中随  $Re$  数的增大而增大。

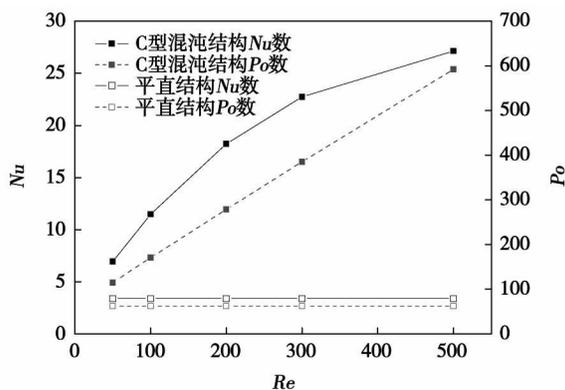


图 7 两种结构的  $Nu$  与  $f$  与  $Re$  的关系

对于混沌结构, 在一个较短长度的周期内出现了 6 个  $90^\circ$  直角, 而且结构也未做优化, 混沌结构内伴随着强化传热, 也使摩擦因子显著地增大, 从而产生了较大的压力降。但由于传热性能的增强, 在相同换热量的情况下, 所需流体工质流量减小, 导致泵功降低。对于本文所考虑的几何结构参数和流体  $Re$  数下, 在相同换热面积和泵功条件下, 混沌结构较平直结构换热量平均增大 8.2%, 且  $Re$  数越小, 换热量增加值越大, 也说明了混沌结构在  $Re$  数较小时性能更加突出。

压力降与摩擦因子的关系为:

$$\Delta p = f \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (9)$$

式中,  $L$ —流道长度;  $\rho$ —流体密度;  $v$ —流体平均流

速<sup>[20]</sup>。

泵功的定义为:

$$P = \Delta p \cdot Q \quad (10)$$

式中:  $Q$ —单位时间内流体体积流量。

## 4 结 论

利用 CFD 软件 Fluent, 采用周期性模型对 C 型混沌结构进行了流体流动与传热的三维数值分析, 并与普通平直结构相对比, 分析了混沌结构的传热强化原因, 结果表明, 在混沌结构内产生的混沌对流, 流体在流道内的湍动增大, 在流道内的温度分布也较普通流道均匀, 传热得到了明显的强化。讨论了雷诺数对混沌对流传热及压降的影响, 结果表明混沌对流内的传热努塞尔数不再象普通层流为一定值, 而随  $Re$  数的增大而增大。

利用混沌结构, 可以在较小的流速下使流体在层流状态下出现混沌对流, 提高流体间混合, 促进流道中间冷、热流体热量交换, 实现强化传热。流体在合适结构形式内可以形成混沌对流, 可能在较小的流动阻力功耗下实现强化传热, 对设计紧凑、高性能的换热器或换热反应堆有着广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] BERGLES A E. Heat transfer enhancement-encouragement and accommodation of high heat fluxes[J]. Journal of Heat Transfer, 1995, 119: 8—19
- [2] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [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] AREF H. Stirring by chaotic advection[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 143: 1—21.
- [5] OTTINO J M. Mixing chaotic advection and turbulence [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1990, 22: 207—253
- [6] CASTELAIN C, MOKRANI A, LEGENTILHOMME P, et al. Residence time distribution in twisted pipe flows helically coiled system and chaotic system[J]. Exp Fluids, 1997, 22: 359—368
- [7] JONES S W. The enhancement of mixing by chaotic advection[J]. Phys Fluids A, 1991, 3(5): 1081—1086
- [8] CHAGNY C, CASTELAIN C, PEERHOSSAINI H. Chaotic heat transfer for heat exchanger design and comparison with a regular regime for a large range of Reynolds numbers[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20: 1615—1648
- [9] 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.

- [10] PEERHOSSAINI H, CASTELAIN C, LE GUER Y. Heat exchanger design based on chaotic advection[J]. *Expt Therm Fluid Sci*, 1993, 7: 333-344.
- [11] LEMENAND T, PEERHOSSAINI H. A thermal model for prediction of the Nusselt number in a pipe with chaotic flow[J]. *Applied Thermal Engineering* 2002, 22: 1717-1730
- [12] OTTINO J.M. The kinematics of mixing: stretching, chaos and transport [M]. Cambridge: Cambridge Univ Press 1989.
- [13] GANESAN V, BRYDEN M D, BRENNER H. Chaotic heat transfer enhancement in rotating eccentric annular-flow systems[J]. *Phys Fluids*, 1997, 9(5): 1296-1306.
- [14] CASTELAIN C, MOKRANI A, LEGUER Y, et al Experimental study of chaotic advection regime in a twisted duct flow[J]. *Eur J Mech B-Fluids*, 2001, 20: 205-232.
- [15] ACHARYA N, SEN M, CHANG H C. Analysis of heat transfer enhancement in coiled-tube heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001, 44: 3189-3199.
- [16] IASBET Y, AUVITY B, CASTELAIN C, et al A chaotic heat-exchanger for PEMFC cooling applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 156: 114-118.
- [17] 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.
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [19] HOLMAN J.P. Heat transfer[M]. 9th ed New York: McGraw-Hill, 2002.
- [20] WHITE F.M. Fluid Mechanics[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

(编辑 单丽华)

余热锅炉设计

## 蒸燃联合装置余热锅炉补燃初参数和补燃率的优化

据《Энергетика》2007 年 11~12 月号报道, 在具有单压和多压余热锅炉的燃蒸联合装置内, 对燃气轮机的排气介质进行燃料的补燃, 可提高余热锅炉内产生的蒸汽初始的温度  $T_0$ 、压力  $P_0$  及其流量  $D_0$ , 增加了蒸燃联合装置组成内汽轮机装置的功率。

在一般的情况下, 可以在不改变蒸汽初参数或转变到新的、更高参数的条件下实现具有余热锅炉的蒸燃联合装置系统内燃料的补燃。

在不改变蒸汽初参数的条件下, 应用燃料的补偿增加了所生产蒸汽的流量, 增加了燃蒸联合装置的功率。

在转变到新的初参数情况下, 在汽轮机部分内, 蒸汽流量和汽轮机内的工作热降均产生变化, 蒸燃联合装置的电功率和经济性也随之而变化。

应该与所选择的蒸燃联合装置热力系统蒸汽参数详细的优化计算相结合, 确定在燃气轮机装置后排气内应用补燃的合理性。

应用补燃允许提高汽轮机装置的经济性和功率, 并降低单回路余热锅炉后排气的温度, 这在一定的条件下可以使整个蒸燃联合装置的效率有一些提高。

从蒸燃联合装置简单的单回路系统转变成更完善的双回路系统, 以及在蒸燃联合装置组成中使用更经济的燃气轮机装置, 都将减小在余热锅炉内应用燃料补燃的效果。

(吉桂明 供稿)

long, DIAO Cheng-dong, WU Mao-song, et al (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 630 ~ 634

By adopting a method of high-speed video camera shooting, a study has been conducted of the vortex shedding characteristics of a staggered tube bundle, which is swept across by a vertically rising gas-liquid two-phase flow in a rectangular duct. The tube bundle has been arranged in three kinds of rotating square with a pitch ratio of 1.0, 1.5 and 2.0 respectively. Shown are the whole process of entrainment of surrounding bubbles and the formation of a gas nucleus after a gas column during a vortex formation and development course. It has been concluded through a statistics survey of the vortex shedding cycles that with an increase of the void fraction within the range of the present experiment, the shedding frequency will gradually increase, leading to a shedding of the vortex, and the Strouha number assumes a gradual decrease. When the void fraction  $\alpha=0.147$ , the phenomenon of a periodical vortex shedding will eventually disappear. **Key words:** gas-liquid two phase flow, vortex shedding, staggered tube bundle

C 型混沌结构中传热强化的数值分析 = **Numerical Analysis of the Heat Transfer Intensification in a C Type Chaotic Structure** [刊, 汉] / WANG Yong-qing, DONG Qi-wu (College of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237), LIU Min-shan (Henan Provincial Key Laboratory on Process Heat Transfer and Energy Savings, Zhengzhou University, Zhengzhou, Post Code: 450002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 635 ~ 639

With more and more academics giving priority to and engaging in the research on intensified heat transfer, the new technology of utilizing a chaotic convection to intensify heat transfer has attracted ever increasing attention. The authors have conducted a numerical simulation of the fluid flow and heat transfer in a C-type chaotic structure by using CFD (Computational Fluid Dynamics) software Fluent, and compared the detailed information depicting the difference between the structure in question and ordinary straight structures in respect of fluid flow field distribution, temperature profile and heat transfer characteristics. Also analyzed were the intensified heat transfer performance and specific features of the C-type chaotic structure. The analytic results show that the latter enables the fluid to produce a chaotic convection at a relatively low speed. This fluid state will intensify the turbulence and perturbation of the fluid, enhance the mixing of flows in the main flow zone or at places near walls, intensify the heat transfer in flow passages, and impart a uniform temperature distribution on flow channel cross section. Moreover, the Nusselt and Poiseuille number (i. e.  $fRe$  value) for the heat transfer in a chaotic convection is no longer a constant like that of an ordinary laminar flow, but will increase with an increase of Reynolds number. **Key words:** chaotic convection, heat transfer intensification, laminar flow, computational fluid dynamics (CFD)

非圆形微通道热沉的流动换热特性数值模拟 = **Numerical Simulation of the Heat Exchange Characteristics of the Flow in a Noncircular Microchannel Heat Sink** [刊, 汉] / XIAO Chun-mei, CHEN Yong-ping, SHI Ming-heng, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 640 ~ 644

Established was a three-dimensional model for a single-phase flow and heat exchange process in a noncircular silicon microchannel, and numerically simulated was the heat exchange of flows in a triangular, rectangular and trapezoidal microchannel respectively. It has been found that cross-sectional averaged Nusselt number attains a maximum value at the inlet of the channel, and then will drastically decrease along a fluid flow direction. It tends to be constant when the flow has been fully developed. Both solid and fluid temperatures grow in an approximately linear way along the flow direction. The wall temperatures on the heat exchange surfaces increase only along the flow direction and those along the direction perpendicular to the flow, however, basically maintain an equilibrium state. Reynolds number exercises a relatively big influence on the flow and heat exchange characteristics of the microchannel. The higher the Reynolds number, the greater the corresponding Nusselt number. It has been found through the analysis and comparison of the thermodynamic cost-effective-