

# 凹槽通道中脉动流动强化传质的数值研究

杨卫卫, 何雅玲, 陶文铨, 赵春风

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 对脉动流动强化凹槽通道中的传质进行了数值研究,探讨了雷诺数  $Re$ 、斯德鲁哈尔数  $St$ 、脉动振幅  $A$  以及凹槽的几何结构等参数对通道中流动和传质特性的影响. 研究发现,受流体速度脉动的影响,凹槽中的漩涡发生周期性的形成和脱落,从而增强了流体间的相互掺混,这是强化传质的关键因素之一. 在脉动流动下,通道内的传质能力得到很好地强化,尤其是凹槽内部的局部传质性能更佳. 传质的强化效果随着  $Re$  和  $A$  的增大而增强,而且对于该模型存在最佳的  $St$ ,它与凹槽的几何结构有很大关系.

**关键词:** 脉动流动;强化传质;数值模拟

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)11 - 1119 - 04

## Numerical Study on Enhancing Mass Transfer in Grooved Channel by Pulsating Flow

Yang Weiwei, He Yaling, Tao Wenquan, Zhao Chunfeng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

**Abstract:** Enhancing mass transfer in periodic square grooved channels by a laminar pulsating flow was studied numerically. Comprehensive research was conducted to investigate the influence of several main parameters on flow characteristics and mass transfer enhancement in the grooved channel. These parameters are Reynolds number  $Re$ , Strouhal number  $St$ , pulsation amplitude  $A$ , and geometrical characteristics of the cavity. The results obtained indicate that, due to the flow pulsation, the vortex in cavity periodically bursts and then sheds. This periodic shedding of vortices contributes to the bulk chaotic mixing of fluid which is the main factor of mass transfer enhancement. By pulsating flow, the mass transfer rate of the channel is enhanced at a large extent, especially by the local mass transfer in the cavity. The enhancement of mass transfer rate increases with the  $Re$  and  $A$ . There exists an optimal Strouhal number for the greatest enhancement of mass transfer in this model, which appears to have a strong relation with the geometrical characteristics of the cavity.

**Keywords:** pulsating flow; enhancement of mass transfer; numerical simulation

凹槽或者波纹通道在紧凑式换热器、传质装置、电子器件冷却以及化工行业有着广泛的应用. 对凹槽通道中稳态传热、传质的研究表明,肋骨周围形成的复合边界层对通道中总的热、质传输起着主导作用. 然而,凹槽内部的传热、传质速率却非常小,削弱了通道整体的热、质传输能力. 因此,只要能有效地强化凹槽内的传热、传质,将有利于通道整体传热、

传质能力的增强.

近年来,利用脉动流动技术强化周期性凹槽或者波纹通道中的传热、传质引起了学者们的注意. 文献[1,2]发现在特定频率下,流体小振幅的脉动能显著地增强通道中的换热. 文献[3,4]研究了波纹和凹槽通道中脉动流动的流动和传质特性. 文献[5]研究了脉动流动对波纹通道中流体的掺混和传质的强化

收稿日期: 2004 - 04 - 21. 作者简介: 杨卫卫(1980~),男,硕士生;何雅玲(联系人),女,教授,博士生导师. 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000026303);国家自然科学基金资助项目(50276046).

作用.流体的掺混是强化传热、传质的主要因素之一,脉动流动能显著增强流体的扰动和相互掺混,从而达到强化传热、传质的目的.

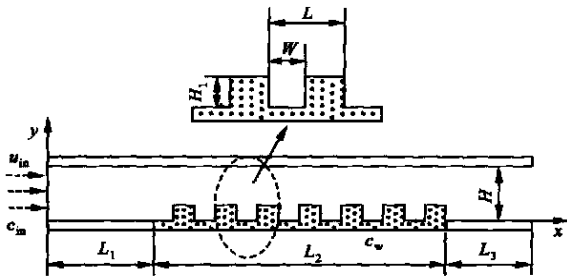
本文将研究脉动流动强化凹槽通道中流体的掺混作用和通道的传质性能.讨论了雷诺数 ( $50 < Re < 400$ )、斯德鲁哈尔数 ( $010 < St < 210$ )、脉动振幅 ( $010 < A < 016$ )以及凹槽的结构等参数对于流动和传质效果的影响.

### 1 模型描述

本文的模型如图1所示,其中  $L_2$  部分用来模拟凹槽通道(总共7个结构单元),取  $L_1$  和  $L_3$  以满足数值计算的需要.通道入口处流体速度为

$$u_{in} = u_s + u_{max} \sin(\omega t)$$

式中:  $u_s$  为周期平均流速;  $u_{max}$  为脉动振幅.通道的其他壁面(阴影面)均假设为绝缘.通道详细的几何尺寸如图中所示.描述该通道中瞬态的流动和传质的无量纲控制方程如下.



$$H = 8 \text{ mm}, H_1 = H/3, L = 2.0 H, L_2 = 14 H$$

$W/L = 2/3$  宽凹槽;  $W/L = 1/2$  中凹槽;  $W/L = 1/3$  窄凹槽

图1 模型的几何尺寸

连续方程

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{5U}{5} + U \cdot \nabla U = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 U \tag{2}$$

传质方程

$$\frac{5C}{5} + U \cdot \nabla C = \frac{1}{ReSc} \nabla^2 C \tag{3}$$

上述方程中无量纲参数定义如下

$$(X, Y) = \frac{(x, y)}{H}, U = \frac{u}{u_s}, C = \frac{c - c_{in}}{c_w - c_{in}}, P = \frac{p}{u_s^2}$$

$$= \frac{t}{H/u_s}, Re = \frac{u_s H}{\nu}, Sc = \frac{H}{D}, A = \frac{u_{max}}{u_s}$$

式中:  $c_{in}$  为某组分的质量分数;  $c_w$  为  $L_2$  段壁面上组分的质量分数.

对于该问题的边界条件设置如下.

入口  $U = 1 + A \sin(2 St), V = 0, C = 0$

式中:  $St = fH/u, f$  为量纲频率,  $St$  表征无量纲频率.

上壁面  $U = 0, V = 0, 5C/5 Y = 0$

下壁面  $U = 0, V = 0, L_2$  段  $C = 1$ , 其他段  $5C/5 Y = 0$

出口 充分发展, 即  $5(U, C)/5 X = 0$

采用均匀网格, 节点数为  $400(x) \times 40(y)$ , 利用 SIMPLE 算法进行求解, 为保证计算具有较高精度, 对流项采用文献[6]中开发的 SGSD 格式.

### 2 计算结果及分析

计算中, 取  $L_1 = 15 H, L_3 = 15 H$ , 以保证出口区域充分发展的边界条件, 取  $Sc$  恒为 110. 为方便研究, 定义:  $Sh$  为传质的速率;  $Sh_m$  为周期平均的传质速率;  $Sh_s$  为稳态的传质速率;  $E$  为强化倍数. 其中  $Sh$  通过下式计算

$$Sh = \frac{1}{S} \int_S \left[ -\frac{5C}{5n} \right] dS \tag{4}$$

式中:  $S$  为无量纲传质面积;  $n$  为法向矢量.

流体流动的不稳定性能增强流体的扰动, 促使流体之间的相互掺混. 图2给出了  $Re = 200, St = 016, A = 016, W/L = 1/2$  不同瞬时及相应稳态时凹槽内部的流场分布情况, 所选区域如图1中虚线所示. 从图2可以看出, 在脉动流动下, 凹槽内的漩涡与稳态时截然不同. 当  $t = 1/3$  时, 凹槽内的右壁面处‘旧的’漩涡即将脱落, 而  $t = 2/3$  时, 凹槽内左壁面处‘新的’漩涡又形成了. 在流体流动的减速阶段, 漩涡逐渐地形成、发展和成熟, 而流动的加速阶段, 漩涡慢慢地迁移和最终脱落. 一个脉动周期内漩涡的形成 - 发展 - 迁移 - 脱落的过程在图3中直观地反映出来. 由此可见, 通过强迫流体脉动流动, 能够促使凹槽内的漩涡发生周期性的脱落, 从而增强了流体的径向混合, 这对凹槽内的质量传输是有利的. 另外, 图3还给出了相应的浓度场分布情况. 从图3可以看出, 在脉动流动下, 由于流体的掺混, 主流区域低浓度的流体被卷入凹槽中, 在很大程度上扰乱了浓度场的分布, 改善了凹槽内的传质环境. 凹槽内流体等浓度线间距变小, 壁面处浓度梯度增大, 即传质的‘驱动力’增加了. 这正好说明脉动流动对凹槽内的传质环境具有改善作用.

图4给出  $Re = 200, A = 014, W/L = 1/2$  时  $St$  对第3单元局部传质效果的影响. 从图4可以看出, 在脉动流动下, 每个面的传质都有一定程度的增强,

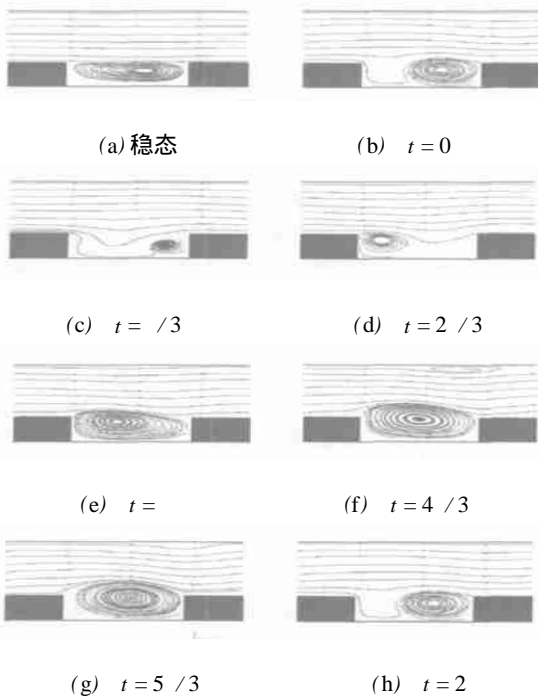


图 2 稳态的流场和脉动流动时一个周期内流场的变化规律

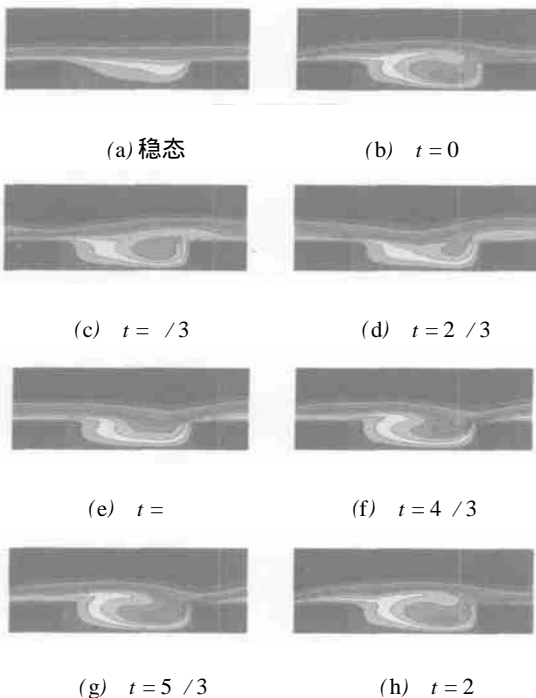


图 3 稳态的浓度场和脉动流动时一个周期内浓度场的变化规律(  $C=0.11$  )

尤其是  $F_1$  面, 而  $F_3$  面的强化程度很小. 这是因为  $F_1$  面处于凹槽中, 稳态时的传质效果很差, 而脉动流动时流体的纵向掺混改善了凹槽中的传质, 其传质能力有很大的提升潜力. 另外, 脉动流动强化传质的关键在于促使凹槽中漩涡周期性地脱落, 即流体间的相互掺混. 当  $St$  很小时, 每个瞬时都类似于稳

态时的流动和传质, 凹槽中的漩涡不会发生脱落, 因而不能改善凹槽中的传质环境. 当  $St$  很大时, 流体流动的加速阶段很短, 凹槽中漩涡也不能完成脱落. 所以, 对于该模型存在最佳的  $St$ , 使得强化效果最好.

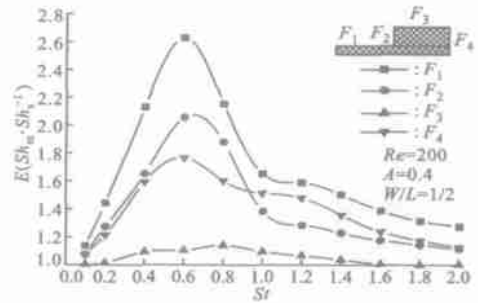


图 4  $St$  对第 3 单元局部传质效果的影响

图 5 给出不同的  $Re$  下  $St$  对于通道整体传质效果的影响. 计算中取  $A=0.16$ ,  $W/L=1/2$ . 从图 5 可以看出, 随着  $Re$  的增大, 脉动流动对于通道整体传质效果的强化程度也增大. 这是因为随着  $Re$  的增大, 流体的动力学特性决定了传质效果的增强, 而且在  $A$  一定的情况下, 流体流动速度中的脉动分量增大, 增强了流体流动的不稳定性和扰动, 也有助于通道中传质效果的增强. 另外, 很明显可以看出, 对于该通道存在最佳的  $St$ , 使得通道的整体传质效果最好.

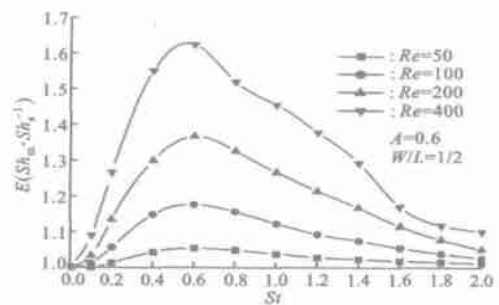


图 5 不同  $Re$  时  $St$  对整体传质效果的影响

图 6 中给出了不同的  $A$  时  $St$  对通道整体传质效果的影响. 随着  $A$  的增大, 脉动流动对于整体传质性能的强化倍数也增大. 这是因为随着  $A$  的增大, 流动的不稳定性增加, 流体的扰动和掺混程度加强, 因而通道整体传质效果的强化幅度增加.

图 7 给出了  $Re=200$ ,  $A=0.16$  时不同凹槽结构下  $Sh_m$  随  $St$  的变化规律. 图中 3 种不同结构的通道总的传质面积是相等的. 从图 7 可以看出: 在脉动流动下, 3 种不同结构的通道中整体传质能力

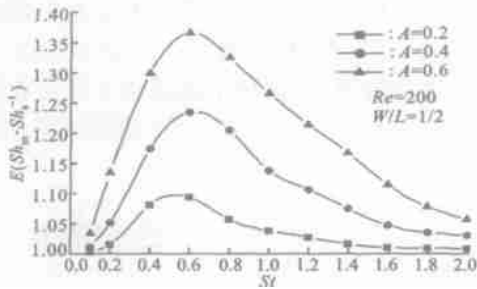


图6 不同  $A$  时  $St$  对整体传质效果的影响

$Sh_m$  相对于相应稳态时有很程度的提高; 在稳态时, 对于  $W/L = 2/3$  的这种通道, 其传质效果低于其他 2 种通道, 在脉动流动下, 其传质效果的增强幅度远超过其他 2 种通道, 并且其最佳的传质效果高于其他通道; 最佳的  $St$  与凹槽的几何结构有很大的关系, 随着凹槽宽度的增加, 最佳  $St$  减小. 因为其他参数不变时, 凹槽的宽度决定了漩涡迁移和脱落所需的时间, 即流体流动加速过程的时间. 随着凹槽宽度的增大, 漩涡迁移和脱落所需的时间增加, 即流体流动的脉动周期要增加,  $St$  要减小.

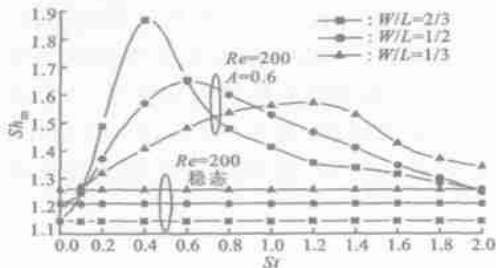


图7 不同几何特性时  $St$  对  $Sh_m$  的影响

### 3 结论

本文数值研究了凹槽通道中脉动流动对于传质过程的强化作用, 探讨了雷诺数 ( $50 < Re < 400$ )、斯德鲁哈尔数 ( $010 < St < 210$ )、脉动振幅 ( $010 < A < 016$ ) 以及凹槽的几何结构等参数对通道中流动和传质特性的影响. 研究发现以下几点.

(1) 在脉动流动下, 通道中的流场和浓度场与稳态时截然不同, 受流体速度脉动的影响, 凹槽内的漩

涡发生周期性的脱落, 增强了凹槽内流体与主流体的混合, 改善了凹槽内的传质环境, 从而强化了通道的传质性能.

(2) 在脉动流动下,  $Re$ 、 $A$  以及  $St$  等对于局部传质和整体传质效果都有很大的影响, 传质效果的强化幅度随  $Re$  和  $A$  的增大而增加.

(3) 凹槽的几何结构对于通道的传质效果有极大的影响. 在稳态时,  $W/L = 2/3$  (宽凹槽) 的这种通道, 其传质效果低于其他 2 种通道, 而脉动流动下, 其最佳的传质效果却超过了其他 2 种通道. 另外, 凹槽的几何结构对最佳的  $St$  有很大的影响, 随着凹槽宽度的增大, 最佳  $St$  减小.

### 参考文献:

- [1] Patera A T, Mikic B B. Instabilities - resonant heat transfer enhancement [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1986, 29 (6): 1 127 - 1 138.
- [2] Greiner M, An experimental investigation of resonant heat transfer enhancement in grooved channels [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1991, 34(8): 1 384 - 1 391.
- [3] Nishimura T, Kojima N. Mass transfer enhancement in a symmetric sinusoidal wavy - walled channel for pulsatile flow [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1995, 38(10): 1 719 - 1 731.
- [4] Nishimura T, Oka N, Yoshinaka Y, et al. Influence of imposed oscillatory frequency on mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2000, 43(13): 2 365 - 2 374.
- [5] Lee B S, Kang I S, Lim H C. Chaotic mixing and mass transfer enhancement by pulsatile laminar flow in an asymmetric wavy channel [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1999, 42(14): 2 571 - 2 581.
- [6] Li Zengyao, Tao Wenquan. A new stability guaranteed second order difference scheme [J]. Num Heat Transfer: Part B, 2002, 42(4): 349 - 365.

(编辑 王焕雪 荆树蓉)