

非对称槽道中涡旋波的特性研究¹⁾

刘凤霞 刘志军²⁾ 李 丰 鄧红虹 史启财 周集体

(大连理工大学化工机械系, 大连 116012)

摘要 利用 PIV 流场显示技术, 对振荡流体在非对称槽道中涡旋波的产生、发展和消失的规律进行了实验研究和分析, 测得了涡旋波流场的速度矢量图, 阐明了涡旋波流场周期性变化的特点. 结合涡动力学方程, 深入分析并揭示了做周期性运动的流体能在槽道中产生波的特性这一规律, 从中发现: 流体周期变化的非定常性和不对称的槽道结构是形成涡旋波流动的主要因素. 本文对涡旋波流场中各个旋涡的速度分布和涡量进行了测量和计算, 分析了涡旋波强化传质的机理, 并研究了 Re 数对涡旋波流动的影响.

关键词 振荡流, 涡旋波, PIV, Re 数, 速度矢量图, 涡量

中图分类号: O357.1 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2005)06-0682-07

引 言

Bertram 和 Pedley 等人^[1]研究脉动流经过一个固定的扩张槽道时, 在槽道的壁面处观察到有大量的旋涡产生, 但当时他们没有意识到这种流动所体现出的波动特性, 而认为这些旋涡是在准定常条件下, 由于具有拐点的速度侧形的不稳定性所形成的“涡街”. 有几位研究者在相类似的研究中^[2,3], 推导得出了流体边界层方程的解具有波动的特点, 且当振荡频率超出某一临界值时, 波即刻衰减, 但他们也没有提出“涡旋波”这一概念. 1985 年, Sobey^[4]的实验表明: 振荡流时, 在静止的扩张槽道的下游, 会产生涡旋波流动状态. 他认为: 当振荡流体通过扩张槽道时, 槽道两侧交替地产生旋涡, 这些旋涡的生成具有波动的特点; 同时, 主流体穿插在旋涡间呈现波状流动的特点, 这种类型的流场称为“涡旋波”(vortex wave) 流场.

近年来, 涡旋波流动不仅作为一种有趣的特殊流动现象, 它也具有潜在的工业应用前景. 例如, 由于涡旋波能对壁面浓度边界层造成扰动, 从而可以强化混合和过滤的传质过程; 又如: 膜生物反应器中的涡旋波流动可以在较低流速下产生较强的对流混合, 从而使近壁处流体的剪应力维持在较低水平, 保证各种细胞 (尤其是没有细胞壁的动物细胞) 的存活率^[5].

虽然前人对涡旋波流动现象的实验观察和简单的模拟计算做了一些研究工作^[1~3], 但由于早期的实验流体力学和计算流体力学理论以及测试技术的局限性, 对其形成机理的精确分析和定量描述还很不完善, 迄今为止的应用研究也几乎是一片空白. 本文利用 PIV 流场显示技术, 以水作为流动介质, 用 FlowManager 软件对 PIV 系统测得的实验结果进行了处理, 实现了涡旋波流场的定量描述及其相关影响因素的定量分析^[6].

1 实验装置

实验流程示意图如图 1 所示, 主要由 4 部分组成: 槽道、往复泵、PIV 系统和外触发器. 往复泵用于产生周期性的振荡流. 当泵稳定运行后, 启动

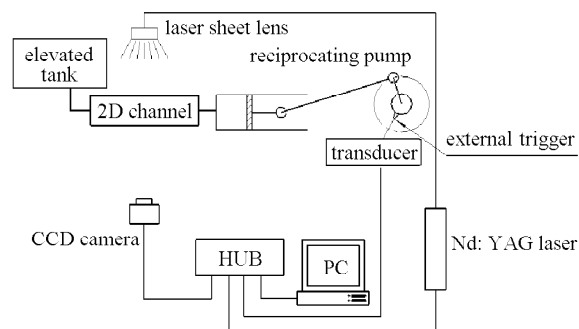


图 1 实验流程图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2004-10-09 收到第 1 稿, 2005-07-28 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10202005).

2) E-mail: hjlzj@chem.dlut.edu.cn

外触发器, 泵的活塞运行到外止点位置时, 即对应于流速为零的时刻, 外触发器触动 PIV 系统的同步发生器, 并使之开始工作: 激光器产生的片光源照射槽道的纵向剖面, 同时 CCD 照相机按预置参数对流场进行拍照, 对连续得到的 2 帧示踪粒子图像信息进行互相关计算, 便可得到槽道内速度场的分布情况.

本研究采用厚为 3 mm 的有机玻璃制作了槽道, 其结构见图 2, 槽道小截面段高度 $h = 5$ mm, 宽度 $w = 30$ mm, 长度 L, L_1, L_2 和 L_3 分别为 180, 50, 35 和 30 mm. 实验中, 为了得到二维流场的速度矢量图, 将激光片光源的厚度控制在 2 mm, 从槽道中间部位射入槽道 (图中 laser sheet plane).

往复泵产生振荡流, 泵的各项参数见表 1.

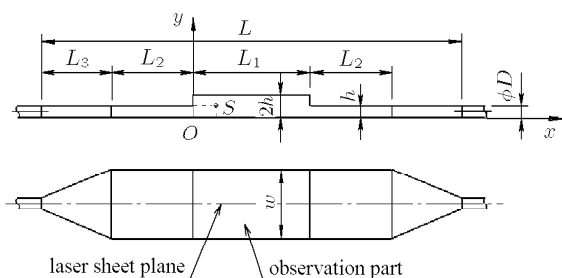


图 2 二维槽道结构尺寸图

Fig.2 Two-dimensional channel geometries

表 1 往复泵的各项参数

Table 1 Parameters of the reciprocating pump

Model	Area of the piston A_p/mm^2	Radius of the crank r/mm	Length of the connecting rod l/mm
3J-X120/3.2	706.5	7.5	33.5

泵的曲柄旋转频率为 Ω , 二维槽道的宽度为 w , 高为 h 的小截面段 (见图 2) 内流体的平均流速

$$u = \frac{2\pi\Omega A_p r}{wh} \left(\sin 2\pi\Omega t + \frac{r}{2l} \frac{\sin 4\pi\Omega t}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \sin^2(2\pi\Omega t)}} \right) \quad (1)$$

引入无因次时间参数 $t^* = \Omega t$, 以及表征流动非定常性强弱的无因次数 —— 斯特劳哈尔数 St (Strouhal number) 以及表征惯性力和黏性力相对大小的无因次数 —— 雷诺数 Re (Reynolds number), St 数和 Re 数分别定义如下

$$\left. \begin{aligned} Re &= \frac{Uh}{\nu} \\ St &= \frac{\Omega h}{U} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当 $t^* = 0.217$ 时, 小截面段的速度达到最大值

$$U = 1.025 \times \frac{2\pi\Omega A_p r}{wh} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 可得

$$\left. \begin{aligned} Re &= 1.025 \times \frac{2\pi\Omega A_p r}{wh\nu} \\ St &= \frac{1}{1.025} \times \frac{wh^2}{2\pi A_p r} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

本文以水作为流动介质, 在水中加入适量的示踪粒子, 示踪粒子的密度与水接近, 在水中搅拌均匀后粒子呈悬浮状态; 再调节往复泵的频率到预设值, 当往复泵运转稳定后, 其活塞运行到外止点位置时, 外触发器瞬间触发 PIV 系统; PIV 粒子图像速度仪采集数据前, 需要预置 PIV 系统 2 帧图片的时间间隔及其它采集参数, 激光片光源和 CCD 相机协同工作, 便可得到流体中示踪粒子连续 2 帧图片信息, 然后, 用 FlowManager 软件对拍摄的图像进行处理, 便得到整个槽道中流场的速度矢量图. 由此, 实现了涡旋波流场的定量描述.

2 实验结果及讨论

2.1 涡旋波速度矢量图的变化

通过 FlowManager 处理软件, 可以从 2 帧示踪粒子的图像信息得到流场的速度矢量图, 并能对流场中各点的速度定量分析. 图 3 为振荡频率 Ω 等于 0.5 Hz 时, 涡旋波流场对应于不同时刻的速度矢量图. 20°C 水的运动黏度 $\nu = 1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 由式 (3) 和式 (4) 可得: $U = 0.114 \text{ m/s}$, $Re = 567$, $St = 0.022$.

PIV 系统设置采集 2 帧图片的时间间隔为 $1500 \mu\text{s}$. 槽道小截面段的平均速度 u 达到最大值 U 时, $t^* = 0.217$, 亦即在 $t^* = 0 \sim 0.217$ 时段内, 流速从零加速到最大值; 而在 $t^* = 0.217 \sim 0.5$ 时, 流速从最大值减速到零. 在随后的半个周期, 流体流动方向与前半个周期相反, 其变化规律与前半个周期近似.

观察流体加速阶段的速度矢量图 (图 3(a)~图 3(c)). 图 3(a) 中 N 处的旋涡是流动的上半个周期形成的, 此时正处于消失阶段, 并在 M 处开始产生一个小旋涡. 当 $t^* = 0.15$ 时 (见图 3(b)), N 处的旋涡已经消失, M 处的旋涡逐渐长大, 而下游流体依然呈层流状态, 无旋涡生成. 图 3(c) 是 $t^* = 0.217$ 时

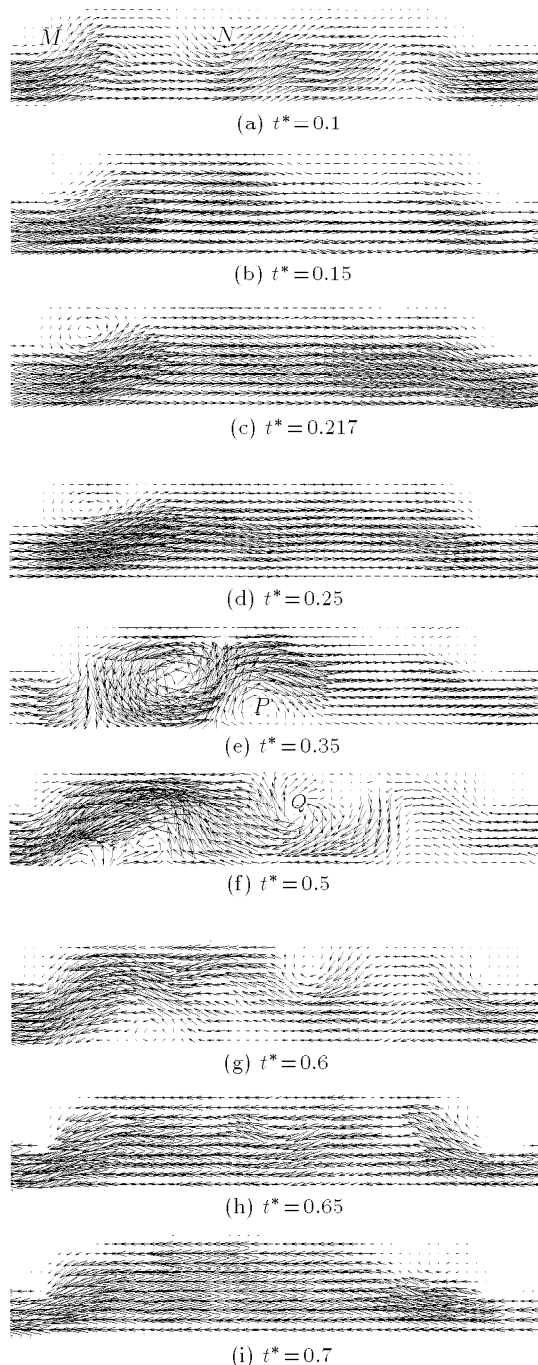


图 3 PIV 测得的涡旋波速度矢量图
Fig.3 Velocity vector of vortex wave by PIV

的速度矢量图,此时小截面段的流速达到最大值 U , M 处的旋涡尺寸比图 3(b) 有所增加,但并没达到最大,该旋涡在减速阶段还会继续增大。

在流体减速阶段(图 3(d)~图 3(f)),随着流速的减小,在初始旋涡下游相对的壁面生成第 2 个旋涡(见图 3(e) 中 P 位置),此时,主流体在这两个旋涡间呈现波状流动状态。当流速继续减小至零时(图 3(f)),这两个旋涡尺寸达到最大,同时,在第 2 个旋涡

下游相对的壁面 Q 位置处生成了第 3 个旋涡。

在随后的流体反向加速流动过程中(图 3(g)~图 3(i)),槽道中生成的旋涡也很快消失,并在槽道右端的截面突扩处产生新的旋涡,重复与前半个周期相似的运动规律。

2.2 旋涡的速度分布及涡量分析

槽道内点 $S(10,5)$ 位置处(见图 2)速度的大小随时间的变化曲线如图 4 所示。图 4 中表示了两个周期内速度随时间的波动性,每个周期内流体正向加速和反向加速的阶段分别出现两个较大的速度峰值。在每个周期内,这些峰值的大小以及出现的时刻基本相近(见图 4 中的标记点),说明槽道内的流体力学参数具有周期的波动性。

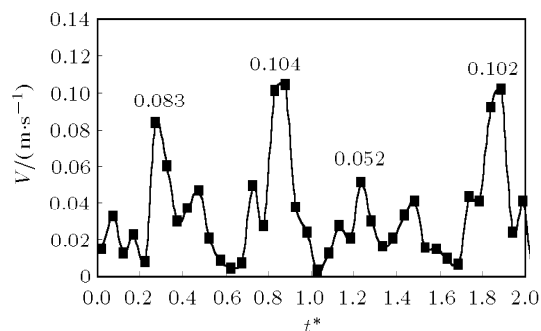


图 4 S 点位置处速度随时间的波动性
Fig.4 Variation of velocities of S point with time t^*

通过对旋涡处速度矢量的数据进行分析可知:在主流速度最大时,虽然旋涡中心的速度为零,但旋涡在壁面附近的速度与主流体的速度相差很大,以图 3(c) 中左上角的旋涡为例:旋涡中心处的速度为零;靠近上壁面的旋涡边缘处的速度为 0.026 m/s ;旋涡下部接近主流中心位置处的速度为 0.125 m/s 。在主流体减速阶段(图 3(d)~图 3(f)),旋涡的尺寸是继续增大的,当主流速度减为零时,旋涡尺寸达到最大,因此,旋涡在整个振荡流循环过程中,都会有力地扰动壁面处的流体边界层,起到强化传质的作用。

图 3(a) 中 M 点位置处的旋涡在 $t^* = 0.1$ 生成后,其尺寸不断增加,在 $t^* = 0.5$ 时刻,流体速度为零时,旋涡的尺寸达到最大值,但在这一阶段,旋涡的涡量并不随时间呈现线性递增趋势。

利用有限差分法,在得到速度场的情况下,即可求解流场中各点的涡量。速度场的旋度称为涡量,槽道中速度场的涡量为流体微团准刚体转动角速度

的两倍，二维流场中的涡量表示如下

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

本文实验研究得到涡旋波的涡量随时间的变化曲线见图 5。涡量的增加说明流体微团的旋转角速度也相应增加，流场扰动强烈，有利于强化传质。

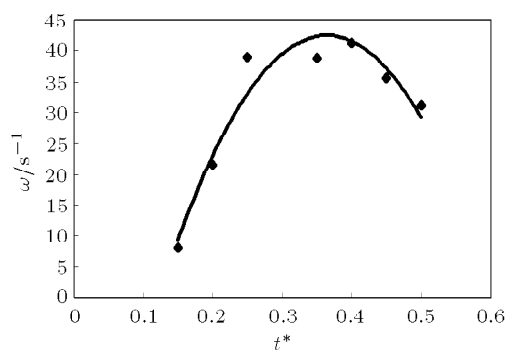


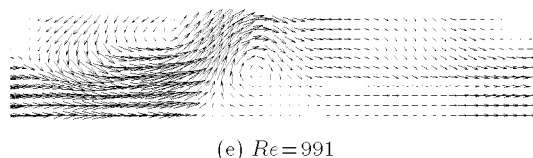
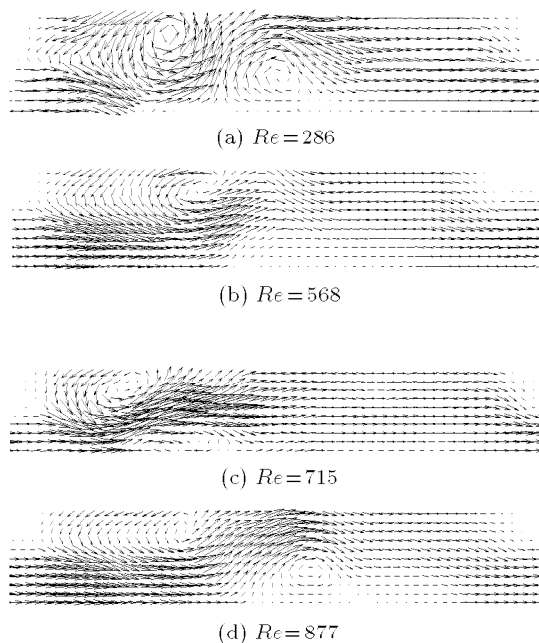
图 5 涡量大小随时间变化的趋势线

Fig.5 Variation of average vorticity with time t^*

2.3 Re 数对涡旋波的影响

实验中调节往复泵频率，从而改变 Re 数的大小，保持 $St = 0.022$ 不变。图 6 是 $t^* = 0.35$ 时刻，不同 Re 数情况下所对应的涡旋波流场的速度矢量图。

由图 6 可知，涡旋波流动形成后， Re 数对旋涡的尺寸几乎没有影响。从涡旋波流场的速度矢量图



(e) $Re = 991$

图 6 $t^* = 0.35$, $St = 0.022$ 时涡旋波的速度矢量图
随 Re 数的变化

Fig.6 Velocity vector with Re at $t^* = 0.35$, $St = 0.022$

很难分析出涡旋波流动在不同 Re 数条件下的细微差别，但研究发现 Re 数对涡旋波涡量的影响是显著的。

图 7 是在上述 t^* 和 St 数的条件下，槽道中上、下壁面旋涡的涡量随 Re 数的变化曲线。由图 7 可知，涡旋波流场的涡量随 Re 数的增加而明显增加，这说明流体微团的旋转角速度也相应增加，即随着 Re 数的增加，旋涡对流场的扰动较强烈。

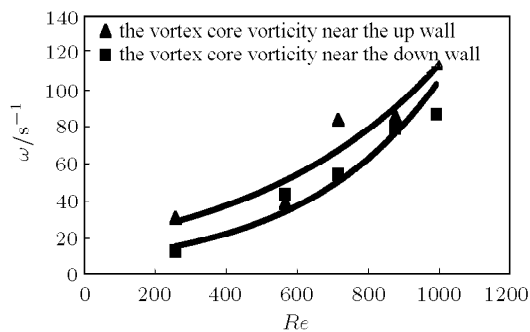


图 7 涡量随雷诺数变化的趋势线

Fig.7 Variation of vorticity with Re number

3 涡旋波产生机理的分析

周期性振荡流体流经非对称槽道时，在扩张截面之后的来流下游产生了一系列交错的旋涡，这些旋涡相对集中在槽道的有限区域，具有周期性和波动性的特点。往复泵使得进入槽道的外界来流本身维持一定的振荡频率，进入槽道扩张截面的新的来流与槽道内原有的流体之间、流体与槽道壁面之间就会互相作用，其作用力的大小和频率完全由外来的振荡流及槽道的几何结构决定，与流体和槽道本身的固有频率及振型关系不大。

开始时刻，槽道左上角附近产生第 1 个旋涡，这是因为槽道截面突然扩大后，由流体黏性作用产生的边界层分离而形成的有旋流动，尤其是槽道壁面无滑移条件是黏性流体中生成涡量的要因，这可以用描述理想流体在势力场中运动的开尔文定理加以解释。在壁面边界层内流体微团受到黏性阻力的

作用, 动能损耗, 速度降低; 尤其是靠近壁面的流体微团, 受到的黏性阻滞力更大, 加之逆压梯度的作用, 使得其动能损耗更快, 到达某一位置处, 靠近壁面的流体微团速度降为零, 下游流体在逆压梯度的作用下会发生倒流, 形成有旋涡的分离区。

随后时刻, 槽道中产生的第 2 和第 3 个旋涡是由于流动的非定常性引起的. 任何振荡流本质上都是非定常流, 非定常流动参数 (如速度 v , 涡量 ω 等) 是空间坐标和时间坐标的函数, 对于本文中狭窄槽道微幅振荡条件而言, 任何非定常流动参数均可以看成是其定常量和其振荡量的线性叠加。

定义下列无量纲数

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{x}{h}, \quad \bar{y} = \frac{y}{h} \\ \bar{t} &= \Omega t, \quad \bar{p} = \frac{p}{\rho U^2} \\ \bar{u} &= \frac{u}{U}, \quad \bar{v} = \frac{v}{U} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

相应的动量方程变为

$$\left. \begin{aligned} St \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right) \\ St \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \\ &\frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) + g \frac{h}{U^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由此看出: 涡旋波流场中的速度的时空分布与 St 数和 Re 数密切相关, 式 (5) 中定义的涡量是方程 (7) 所表征的速度场的旋度, 而涡量的大小表征槽道中旋涡旋转的强弱程度. 分析式 (7) 中影响速度场时空分布的因素, 就可得出影响槽道中旋涡的生成以及涡量随时间的变化规律. 这些因素主要有: 切变场的变化、流体微团的体积变化、非正压的密度变化、非有势质量力场的变化、分子黏性效应等。

对于不可压缩流体二维平面流场而言, 切变场中涡量的生成为零. 如果没有外界输入“涡能”, 旋涡就会慢慢消失, 本文中往复泵产生的振荡流周期性地对流体提供了能量, 因此导致槽道中流体的旋涡周期性地产生、发展和消失. St 数是表征振荡流的特征参数, 因而对槽道中旋涡的演变规律起着重要的作用, 我们正在对此问题进行深入地研究. 在本文的研究条件下, 非正压的密度变化和非有势质量力场的变化对槽道中旋涡的生成影响不大. 分子黏性效应会影响旋涡在槽道空间内的扩散, 并可导致涡量和速度随时间变化, 但对于 $Re \gg 1$ 的情

况, 黏性扩散层很薄, 其对涡量的影响可以忽略. 流体微团的体积变化率对涡量的影响较大. 流体微团的体积变化率为

$$\text{div} \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

图 8 表明了整个槽道扩张截面段内流场平均的速度散度随无因次时间的变化关系. 可以看出: 在 1 个周期内, 流场平均速度散度分别出现两个最大值 (见图中的标记点), 这意味着每个周期内旋涡的发展也会对应有两个峰值. 例如, 第 1 个周期内 $t^* = 0.42$ 时, 场内平均速度散度达到最大值, 槽道扩张截面左侧部分的旋涡长至最大, 此时刻的槽道中平均涡量也达到最大 (见图 5). 由此可见, 流体微团的体积变化率对涡旋波流场的产生起着重要的作用. 涡旋波流场中的第 2 和第 3 个旋涡在振荡流的减速阶段生成, 在下一个流体加速阶段的前期消失, 流场中旋涡的生成和消失具有周期性特征, 主流体在旋涡之间呈现波状流动的特点。

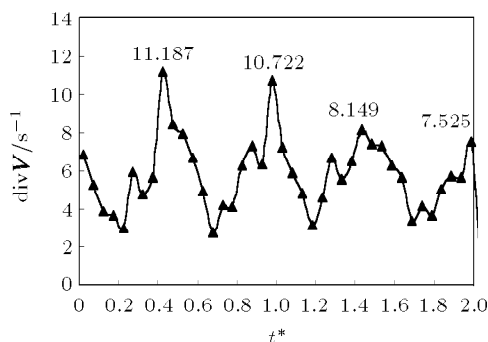


图 8 槽道内平均速度散度随时间的波动曲线

Fig.8 Variation of average $\text{div} \mathbf{V}$ with time t^*

4 结 论

本文采用 PIV 测试技术对非对称槽道内涡旋波的形成机理进行了实验研究和定量分析, 主要结论如下:

(1) 在 $Re = 567$, $St = 0.022$ 条件下, 振荡流在非对称槽道内会产生涡旋波. 涡旋波的产生、发展和消失与流体的运动状态有关. 在流体加速运动阶段, 槽道变截面处的上壁面会产生一个旋涡, 此旋涡的尺寸随流速的增加而变大, 且在减速阶段还会继续增大, 而旋涡下游的流体依然呈层流状态, 无旋涡生成。

(2) 在流体减速阶段, 在初始旋涡下游相对的壁面会生成第 2 个旋涡, 此时, 主流体在这两个旋涡

间呈现波状流动状态. 当流速继续减小至零时, 这两个旋涡尺寸达到最大, 同时在第 2 个旋涡下游相对的壁面位置处生成了第 3 个旋涡. 在随后的流体反向加速流动过程中, 槽道中生成的旋涡也很快消失, 并在槽道右端的截面突扩处产生新的旋涡, 重复与前半个周期相同的运动规律.

(3) 通过对旋涡的速度分布和涡量进行了定量分析, 可以看出: 旋涡在整个振荡循环过程中都能有力地扰动壁面处的边界层. 在旋涡的尺寸达到最大值时, 涡量并非最大, 即旋涡中心处的涡量并不是随时间单调增加.

(4) Re 数对涡旋波流场中旋涡的尺寸影响不大, 但旋涡中心的涡量随 Re 数的增加而增加, 基本呈指数变化关系. 在相同条件下, 变截面槽道上壁面处旋涡的涡量略大于下壁面处旋涡的涡量.

参 考 文 献

- 1 Bertram CD, Pedley TJ. Steady and unsteady separation in an approximately two-dimensional indented channel. *J Fluid Mech*, 1983, 130: 315~345
- 2 Bogdanova EV, Ryzhov OS. Free and induced oscillations in Poiseuille flow. *Q J Mech Appl Maths*, 1983, 36: 271~287
- 3 Stephanoff KD, Pedley TJ, Lawrence CJ, et al. Fluid flow along a channel with an asymmetric oscillating constriction. *Nature*, 1983, 305: 692~695
- 4 Sobey Ian J. Observation of waves during oscillatory channel flow. *J Fluid Mech*, 1985, 151: 395~426
- 5 Millward HR, Bellhouse BJ, Sobey Ian J. The vortex wave membrane bioreactor: hydrodynamics and mass transfer. *Chem Eng J*, 1996, 62: 175~181
- 6 李丰. 涡旋波流场的测试分析及数值模拟. [硕士论文]. 大连: 大连理工大学, 2004 (Li Feng. The experimental and numerical investigation of vortex wave flow. [Master Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004(in Chinese))

THE STUDY OF THE CHARACTERISTIC OF VORTEX WAVE IN AN ASYMMETRIC CHANNEL¹⁾

Liu Fengxia Liu Zhijun²⁾ Li Feng Zhi Honghong Shi Qicai Zhou Jiti
(Department of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract It has been received much attention that the dispersion phenomena can be produced by unsteady flows in a channel during the past few decades because of their usages in chemical, biochemical and medical engineering. As the study of fluid mechanics has evolved from steady state investigations towards the reality of unsteady phenomena, it has become increasingly clear that instantaneous whole field non-intrusive flow measurement techniques are required. In the past few years particle image velocimetry (PIV) has developed rapidly as a means for obtaining whole fields of fluid velocities. It has capitalized on recent computer hardware and software developments, to the extent that it now is practicable for determining and mapping fields of unsteady movement, especially at the narrow flow channels.

This study makes the use of PIV to capture the vortex wave motion and their structures during oscillatory flows through a two-dimensional asymmetric channel. The vortex wave is a relatively recently discovered fluid structure where a standing wave of vortices can be generated either by an unsteady motion of a channel wall or by unsteady flow through an asymmetric channel expansion. The vortex wave, which evolved at low speed, can enhance the mass transfer of boundary layer in channels and consequently maintain very low wall shear rates for some shear sensitive microorganism or mammalian cells.

In this paper, a set of experimental equipment was established for vortex wave flow. Unsteady incompressible flow, flowing at low-Reynolds-number in periodic oscillatory pattern, in a two-dimensional channel

Received 9 October 2004, revised 28 July 2005.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10202005).

2) E-mail: hjlzj@chem.dlut.edu.cn

with backward sidestep structure was investigated by using PIV. The generation, development and disappear of the vortex wave about oscillatory flow in an asymmetric channel has been analyzed quantificationally. A series of velocity vector figures at different phases have been obtained. The velocity profile and the vorticity of vortex wave have been tested and calculated in this paper in order to analyze the mechanisms of strengthening mass transfer. The results show that the vortex wave flow-field is periodical and the waves will be brought as the fluid periodically flows. It indicates that the main feature of vortex wave is that it is a two-dimensional standing wave formed during the deceleration period and the core flow follows a curving path with a sequence of vortices forming alternately on each wall between the core flow and the walls of the channel. In addition, the relationship between Reynolds number and vortex wave has been investigated. The experimental results corresponded satisfactorily with the analysing results of the vorticity equation. It has showed that the vortex strength enhances but the size of the vortices and the wave is almost changeless as Reynolds number increases.

Key words oscillatory flow, vortex wave, piv, reynolds number, velocity vector, vorticity