

锯齿型微通道内流流场的微尺度粒子图像测量

王元^{1,2}, 金文^{2,3}, 何文博²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 710055, 西安; 3. 西安航空技术高等专科学校动力工程系, 710077, 西安)

摘要: 利用微通道粒子图像测速技术在 $Re=150$ 时, 对断面尺寸为 $800\ \mu\text{m}\times 800\ \mu\text{m}$ 的两种锯齿型微通道流动进行了研究. 采用 $3\ \mu\text{m}$ 荧光示踪粒子、10 倍显微物镜和 14 位灰阶 CCD 相机获得了清晰的粒子图像, 通过多幅图像平均的方法消除示踪粒子布朗运动的影响, 使用滤光装置提高图像信噪比. 对两种锯齿形微通道流动的整场测量发现: 微通道内流体在各齿之间流动结构基本一致, 尖角和圆角齿形微通道在转弯内侧都存在一个低速旋涡区, 圆角齿形微通道旋涡区占据范围相对尖角通道更大; 在尖角齿形流道的尖角处, 除存在一个完整的大涡外, 还发现在大涡上部存在一个与大涡方向相反的叠加涡, 叠加涡流动结构不稳定, 流速更低, 流体中所挟带杂质更容易在该区域沉积形成堵塞, 从而导致微流道结构的改变.

关键词: 微通道粒子图像测速技术; 锯齿型微通道; 叠加涡

中图分类号: O357 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0109-05

Research on Flow Velocity Field in Jagged Micro-Channel with Micro-PIV

WANG Yuan^{1,2}, JIN Wen^{2,3}, HE Wenbo²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Architectural and Technological University, Xi'an 710055, China; 3. Department of Power Engineering, Xi'an Aeronautical College, Xi'an 710077, China)

Abstract: With the micro-fluidic particle image velocimetry technique, the flow was measured in both of cusp and fillet jagged micro-channels with a cross section of $800\ \mu\text{m}\times 800\ \mu\text{m}$ at $Re=150$. Deionized water with $3\ \mu\text{m}$ -diameter fluorescent particles inside was adopted in the micro-channels. The distinct images were obtained with a 10-fold microscope and 14-bit CCD camera system. The influence of Brownian motion was eliminated by averaging obtained images of the particles. Filter lens were used to improve the signal-to-noise ratio of the images. The experimental results indicate that the flow patterns in both jagged micro-channels are similar to each other. There is a low velocity vortex cavity at the swerving inside for both the fillet jagged micro-channel and the cusp jagged micro-channel, and the former vortex cavity is greater than the latter one. Moreover, at the jag peak of the cusp jagged micro-channel, there exist a big intact vortex and a superposition vortex in the opposite direction with lower velocity and unsteady structure. The impure substance in the low-velocity region is easier to deposit and form block, leading to the structure change of the micro-channels.

Keywords: micro-PIV; jagged micro-channel; superposition vortex

伴随着人们对微尺度流动研究兴趣的不断增长, 微尺度流动测量技术得到了迅猛的发展^[1]. 目

前, 对微尺度流动最有效的检测手段是微通道粒子图像测速 (Micro-PIV) 技术, 它是上世纪末在常规

PIV 基础上发展起来的一种微流场定量可视化测量方法. Santiago 等人首先使用汞弧灯光源和直径为 300 nm 的荧光示踪粒子,用 CCD 相机测量了 $120\text{ }\mu\text{m}\times 120\text{ }\mu\text{m}$ 的 Hele-Shaw 盒的表面张力驱动流^[2]. Meinhart 等人使用 Nd:YAG 脉冲激光器测量了 $30\text{ }\mu\text{m}\times 300\text{ }\mu\text{m}$ 矩形微通道的流场^[3]. Pai 等人采用 Micro-PIV 和直径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的荧光示踪粒子,分析了 $220\text{ }\mu\text{m}\times 220\text{ }\mu\text{m}$ 区域磁流体的速度分布^[4]. 王健等人对水力直径为 $237\text{ }\mu\text{m}$ 的梯形截面微通道内流场转捩雷诺数进行了研究^[5]. 作者所在的研究组也曾通过数学建模和 Micro-PIV 实验测量相结合的方法,对粗糙壁直管微通道内流流场进行过详细研究^[6-9],图 1 所示就是一种广泛应用的微灌滴头锯齿型微通道.



图 1 微灌滴头锯齿型微通道结构

1 实验装置与测量技术

1.1 Micro-PIV 技术

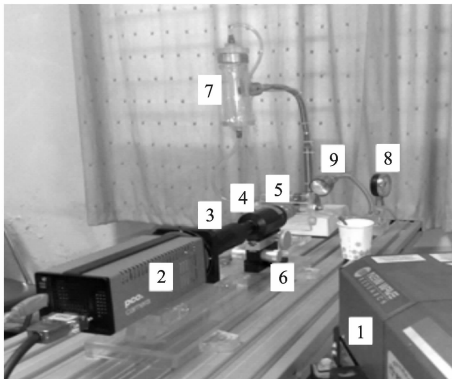
Micro-PIV 测量技术是在 PIV 技术基础上发展起来的,但 Micro-PIV 技术特点与传统 PIV 有明显不同:①由于所关注的流动区域通常只有几十到几百微米,为获取高品质 CCD 图像,必须采用显观测设备以提高图像的空间分辨率,但这同时大大限制了 CCD 相机的进光量;②由于激光片光厚度往往远大于微通道尺度,测量中流场是被通体照亮的,拍摄成像景深必须依靠显微镜头控制;③为了有效消除边壁反光所形成的干扰,测量中要使用荧光示踪粒子并在成像系统上配备荧光滤光装置;④由于荧光示踪粒子受激光诱导发出的荧光光强很弱,为提高成像的信噪比,需要使用有更高灰阶位数的 CCD 相机^[1].

1.2 实验装置

实验在西安交通大学流体机械及工程系进行. 实验装置由 Micro-PIV 测量系统、锯齿形微通道试件及微流动驱动系统共同组成.

Micro-PIV 测量系统包括激光光源、CCD 相机、同步器、显微镜头及相应光学元件. 其中:激光光源采用美国 NewWave 公司生产的 Mini:YAG 双脉冲激光器,工作频率为 15 Hz,最大脉冲能量为 150 mJ;CCD 相机选用德国 Cooke 公司生产的 PCO.

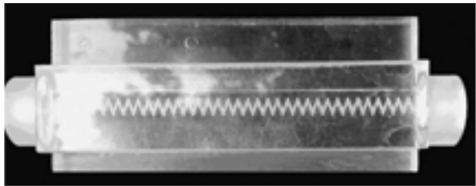
1600 型,具有 $1\text{ }600\times 1\text{ }280$ 像素和 14 位灰阶动态范围;同步器采用美国 TSI 公司生产的 610034 型,操作平台采用 Insight6.0 软件;示踪粒子选择美国 Duke 公司 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的荧光微球,其吸收波长峰值在 532 nm 附近,激发波长为 610 nm;镜头选用日本 Mitutoyo 公司的 Apo $\times 10$ 显微物镜和 Nikon 公司生产的 60 mm 微距镜头并加装只允许波长为 610 nm 红光透过的滤光装置. 专门设计的微流动驱动系统由压缩空气源、压力调节阀、压力表、贮液容器,以及压缩空气管路和溶液管路组成,通过调节压缩空气的进气压力来调节微通道的流量,图 2 展示了整个实验及测量装置.



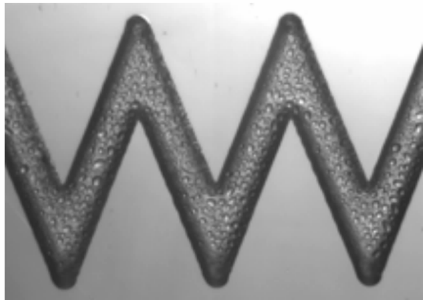
1:激光器;2:CCD 相机;3:伸缩筒;4:中继镜;5:显微物镜;
6:调焦旋钮;7:溶液容器;8:压力表;9:白炽灯

图 2 微灌滴头内通道微尺度 PIV 测量实验台

锯齿形微通道试件采用有机玻璃制作,通道全长 10 cm,共 36 个齿,齿尖夹角为 43.6° ,其过流断面为等边矩形,边长 $800\text{ }\mu\text{m}$,图 3 给出了尖角齿形



(a)试件照片



(b)微通道成像部分

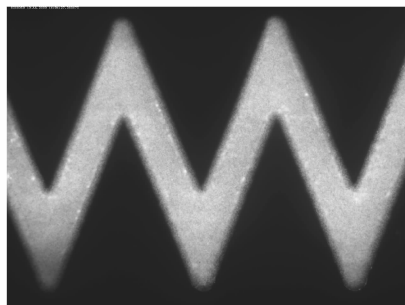
图 3 $800\text{ }\mu\text{m}$ 尖角齿形微通道试件照片
及微通道显微放大照片

微通道试件照片及微通道显微放大照片. 由于使用了 14 位灰阶的 CCD, 从图 3b 中可以清晰看到微通道内壁上微米级水滴的细部.

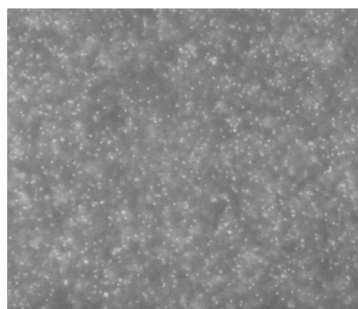
2 测量结果及分析

2.1 流动图像获取与处理

图 4 是 Micro-PIV 测量系统拍摄的断面为 $800\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$ 的尖角齿形微通道流动的粒子图像.



(a) 整体图像



(b) 局部放大粒子图像

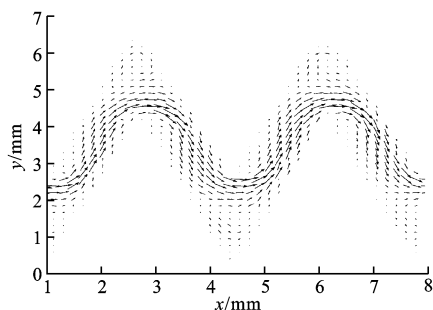
图 4 Micro-PIV 测量系统拍摄的粒子图像

对微尺度测量而言, 获得高品质图像是最重要的, 相机的灰阶动态范围在保证高品质图像质量方面比其分辨率更为重要, 具备冷却降噪处理的相机是较为理想的选择. 在微尺度测量中, 由于示踪粒子的布朗运动是扩散引起的, 属正态分布的随机运动, 产生的误差分布是无偏的^[10], 因此当流场定常时, 可采用多幅图像叠加平均的方法加以消除. 为克服采集的图像信噪比低的问题, 实验中针对低雷诺数的定常微尺度流动采用系综相关技术对图像进行了处理.

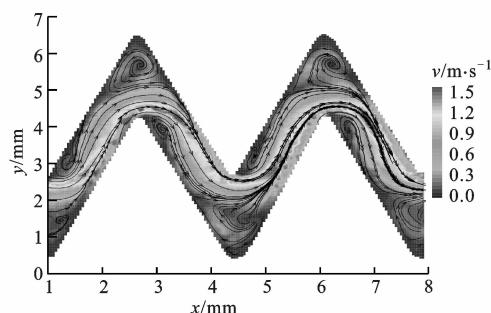
2.2 锯齿型微通道的流场结构

在 $Re=150$ 的实验条件下拍摄到的流场粒子图像如图 4 所示, 流场内测点分布均匀, 布朗运动效应基本消除. 经过互相关处理后, 得到尖角齿形微通道流场速度矢量图、速度云图及流线图(见图 5). 由于试件内通道结构复杂, 流动状况变化大, 因此在图

像处理中未使用矢量平滑处理技术, 以保证流场速度分布的准确性.



(a) 速度矢量图



(b) 速度云图及流线图

图 5 $800\ \mu\text{m}$ 尖角齿形滴头内通道流场的速度矢量场、速度云图及流线图

对图 5 所展示的 $Re=150$ 时尖角齿形微通道整体流动图像进行分析, 发现通道在两个齿之间的流体流动结构基本一致, 说明流体在充分发展后每齿通道内的流动具有可重复性. 因此, 对尖角齿形微通道流动结构的分析可仅针对一个齿内的情况进行. 整体看来, 由于流道结构为齿形, 因此流体运动方向变化大, 各点流速值差异显著. 在流道中, 受流体冲击侧流速较大, 而在流道转弯内侧流体速度相对较低, 存在一个负压回流区, 并伴随着涡的生成. 齿形通道的尖角区域存在一个较大旋涡, 且速度低, 流体及所挟带的介质一旦进入其中, 就很难再回流到主流中, 此处就成为微流道的一个死区, 容易沉积固体颗粒.

2.3 细部流动信息

为了更清楚地展现低速旋涡区的流动细节, 提高流场的分辨率, 采用 10 倍显微镜对尖角齿形微通道内两个典型回流区(尖角区和流道转向内侧区域)速度分布再次进行测量. 由图 6 可以发现: 流道尖角处完全处于低速回流区, 在速度矢量图中可以看到此处存在一个完整的大涡, 但随着流动图像分

分辨率的提高,还可以在大涡上部发现一个与大涡方向相反的叠加涡.多次测量结果显示,大涡结构具有规律性,随流动时间和雷诺数变化不大,而叠加涡随机性强,结构变化大.从图6可知,此处的流速最低,一旦流体中有杂质进入这一区域,由于流速和压差作用,杂质将滞留于此,很难再回到主流中,当这些杂质逐步沉积,就逐渐将尖角填充,使内流道结构由尖角变为圆角.

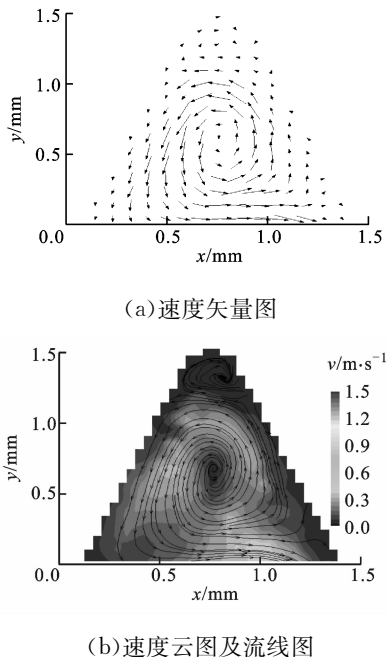


图6 尖角齿形微通道顶角区域流场的速度矢量图、速度云图及流线图

图7是 $Re=150$ 时齿形流道在转向后内侧区域的速度矢量图、速度云图及流线图.图7更加清晰地展示了流体在流过齿尖转入直流道后在内侧形成的涡结构.尽管该区域也为一狭长低速回流区,并伴有涡生成,但涡占据通道的空间相对较小,加之其右侧为主流区,流速较高,因此当通道内有杂质卷入其中时,不易造成永久性通道堵塞.

由于尖角齿形微通道的尖角部分容易被流体中固体颗粒堆积堵塞,长时间使用后使其尖角结构特征丧失,流道变成平滑的圆角齿形微通道,这时流场的分布会随着流道结构的改变而改变,因此对 $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$ 的圆角齿形微通道也进行了测量, $Re=150$ 时的流场速度分布结构如图8所示.通过与尖角齿形微通道流场的对比可知,圆角齿形微通道仅在通道转弯内侧存在一低速旋涡区,且涡占据范围相对尖角齿形通道要大.这是由于流体在圆角齿形通道内转向阻力小、惯性大导致的,但由于圆角流

道结构平滑,流体易于绕行,流动阻力有所降低.当这种形式的流道用作滴头流道时,为提高滴头流动阻力占整个系统总阻力的百分比以保证所有滴头的出水量均匀,就必需加大微通道的长度.

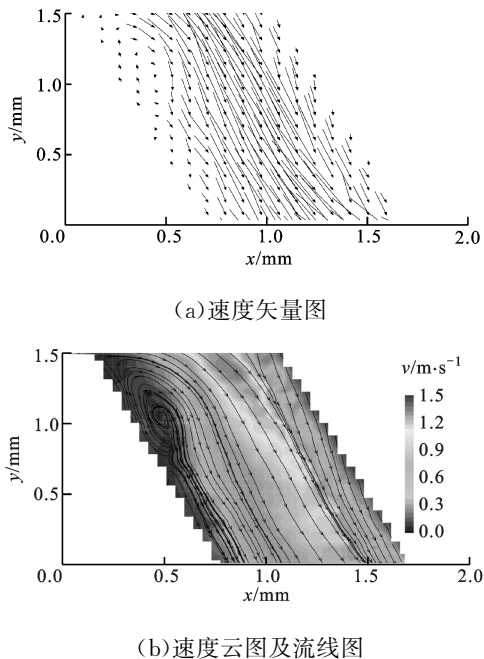


图7 尖角齿形微通道转向内侧区域流场的速度矢量图、速度云图及流线图

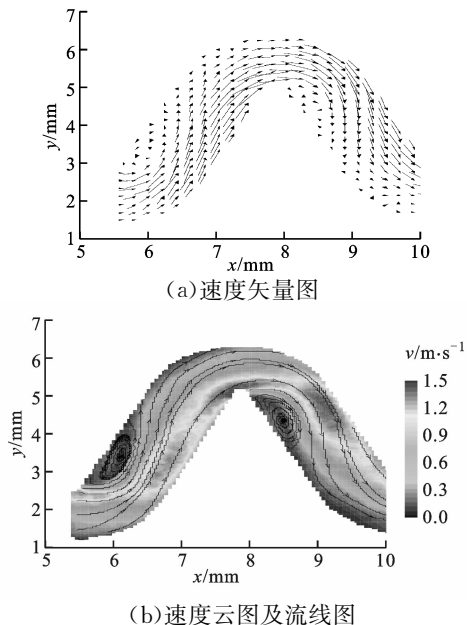


图8 圆角齿形微通道流场的速度矢量图、速度云图及流线图

3 结 论

采用Micro-PIV技术在低雷诺数情况下,对断面尺寸为 $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$ 的两种锯齿型复杂微通

道流动进行了实验研究,主要结论如下.

(1)在微尺度测量中为获得高品质图像,相机的灰阶动态范围是比分辨率更为重要的参数.测量中示踪粒子布朗运动的影响可采用多幅图像叠加平均的方法加以消除.图像处理采用系综互相关方法,可以获得更高的信噪比.

(2)对两种锯齿形微通道流动的整场测量发现,微通道内流体在各齿之间流动结构基本一致,即微通道内流充分发展后是一种周期性流动.尖角和圆角齿形微通道在转弯内侧都存在一个低速旋涡区,由于流体在圆角齿形通道内转向阻力较小,惯性较大,使得其旋涡区范围相对尖角通道更大.

(3)尖角齿形微通道本身存在两个低速涡旋区,特别是在流道的尖角处,除存在一个完整的大涡外,采用显微观测技术提高流动图像分辨率后,还发现在大涡上部存在一个与大涡方向相反的叠加涡,叠加涡流动结构不稳定,流速更低,流体中所挟带杂质更容易在该区域沉积形成堵塞,从而导致微流道结构改变.

参考文献:

- [1] 王昊利,王元. Micro-PIV 技术:粒子图像测速技术的新进展[J]. 力学进展, 2005, 35 (1):77-99.
WANG Haoli, WANG Yuan. Micro-PIV: a new development of particle image velocimetry [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35 (1):77-99.
- [2] SANTIAGO J G, WERELY S T, MEINHART C D. A particle image velocimetry system for microfluidics [J]. Exp in Fluids, 1998, 25(4): 316-319.
- [3] MMEINHART C D, WERELY S T, SANTIAGO J G. PIV measurements of a microchannel flow [J]. Exp in Fluids, 1999, 27(5): 414-419.
- [4] PAI V M, CHEN C J, HAIK Y. Microscopic flow vi-

sualization system for fluids in magnetic field [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 194(1/3): 262-266.

- [5] 王健,郝鹏飞,何枫. 梯形截面微管道内流场的 PIV 测量[J]. 实验流体力学, 2005, 19(3): 94-98.
WANG Jian, HAO Pengfei, HE Feng. PIV measurement of flow field in a trapezium-cross section micro-channel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(3): 94-98.
- [6] WANG H L, WANG Y. Influence of ribbon structure rough wall on the microscale Poiseuille flow [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 2005, 127(6): 1140-1145.
- [7] WANG Haoli, WANG Yuan. Flow in the microchannel with rough wall: flow pattern and pressure drop [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17 (3): 586-596.
- [8] WANG Haoli, WANG Yuan. Influence of three-dimensional wall roughness on the laminar flow in microtube [J]. Heat and Fluid Flow, 2007, 28(2): 220-228.
- [9] 王昊利,王元,邢丽燕. 微通道内流的微尺度粒子图像测速技术实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (11): 1355-1359.
WANG Haoli, WANG Yuan, XING Liyan. Micro-PIV measurements for flow in micro-channels with square section [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(11): 1355-1359.
- [10] MERKLE C L, KUBOTA T, KO D R S. An analytical study of the effects of surface roughness on boundary-layer transition, AD/A004786 [R]. Washington, USA: AF Office of Scin. Res. Space and Missile Sys. Org., 1974.

(编辑 王焕雪)

[本刊相关文献链接]

微通道内流的微尺度粒子图像测速技术实验研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1355-1359.
风沙流中沙粒相输移的测量. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 846-850.
滑移流条件下纳米粒子布朗运动的 Stokes-Einstein 扩散关系. 西安交通大学学报, 2008, 42(9).
微通道中极性流体流动特性的研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 274-278.
一种新的测定流体质扩散系数的全息干涉图像处理办法. 西安交通大学学报, 2008, 42(11).
一种基于小波的 Contourlet 变换的图像压缩算法. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 479-483.
基于双密度双树复数小波变换的图像去噪. 西安交通大学学报, 2006, 40(2): 246-248.