

微通道内流的微尺度粒子图像测速技术实验研究

王昊利^{1,2}, 王元¹, 邢丽燕¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国计量学院计量测试工程学院, 310018, 杭州)

摘要: 采用微流动粒子图像测速技术 Micro-PIV 对 0.4~0.8 mm 的方形截面微通道流场进行了研究. 实验选取 3 μm 的荧光染色微球作为示踪粒子, 使用 532 nm 激光、12 位灰阶电荷耦合器件 (CCD) 相机及 10 倍显微物镜得到粒子图像. 通过背景噪声处理技术提高了图像信噪比, 并采用系综相关及回归算法得到了微通道截面的速度分布, 测量的空间分辨率达到 23.68 $\mu\text{m} \times 23.68 \mu\text{m} \times 15.64 \mu\text{m}$. 为了消除壁面随机粗糙分布的影响, 采用沿流向进行空间平均方法得到了充分发展的方形截面微通道速度分布. 将测量结果与方形截面理论幂函数速度廓线进行比较发现: 微通道近壁区流场受到扰动的强弱和流道尺寸直接相关, 除近壁区外的大部分区域速度分布与矩形截面流道理论速度分布符合良好.

关键词: Micro-PIV 技术; 微通道; 速度分布

中图分类号: O357 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1355-05

Micro-PIV Measurements for Flow in Micro-Channels with Square Section

Wang Haoli^{1,2}, Wang Yuan¹, Xing Liyan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Metrological Technology & Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Micro-PIV measurements were implemented for laminar flows in 0.4 - 0.8 mm micro-channels under different conditions. In the measurements, 3 μm fluorescent microspheres were chosen as the track particles, whose images were gained by using 532 nm laser, 12 bit CCD and 10X objective. The process techniques of background noise were employed to improve SNR of images. The velocity vectors at the middle section of microchannels were achieved by the ensemble correlation and recursive arithmetics, and spatial resolving power of measurements reached 23.68 $\mu\text{m} \times 23.68 \mu\text{m} \times 15.64 \mu\text{m}$. The characteristics of velocity fields were analyzed by illustrating the space-averaged streamwise velocities in whole fields. The comparison of the averaged velocity with theoretical velocity profiles shows that velocity distributions are in accordance with their theoretical counterparts. In order to remove the stochastic distribution effects of wall surfaces, the fully-developed velocity distributions were determined by space-averaged method along the streamwise direction for the whole velocity field. Compared with the theoretical power function profile of velocity distributions in the square channels, the flow for the Micro-PIV measurements has the characteristics that the disturbances of velocity at the region near the walls have direct correlations with the scales of the microchannels. Except the areas near the walls, the space-averaged velocities are in agreement with the theoretical velocity profile.

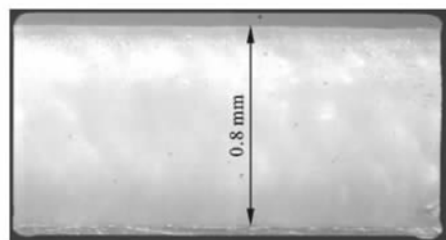
Keywords: micro-PIV technique; microchannel; velocity distribution

微流体定量可视化测量技术是近年发展迅速的微流动测量方法. 这一技术有别于传统的测量方式, 能够在对流场不产生干扰的前提下获得微流动的整场速度, 极大地拓展了人们对微流动现象机理的研究. 最具代表性的就是微流体粒子图像测速技术 Micro-PIV. 它是在传统的 PIV 基础上, 通过在 CCD 相机前加装显微光学系统对流动区域进行放大, 从而获得具有很高分辨率的流场结构. 从 Micro-PIV 技术产生初期的重要实验中, 可以看到这一技术在微流场的研究中的重要作用^[1-2]. 截至 2005 年, 国际上针对简单和复杂微流体速度场开展了大量的 Micro-PIV 实验研究, 取得了丰富的研究成果. 文献 [3] 对上述成果及 Micro-PIV 的关键技术作了较为全面的总结和分析. 国内开展这一研究的时间虽然不长, 但也取得了一些进展, 代表性的成果可见文献 [4-5]. 本文针对 0.4~0.8 mm 尺度的微通道层流流场开展了 Micro-PIV 实验测量, 成功地解决了示踪粒子成像困难等技术问题, 获得了理想的速度场分布, 并在此基础上对微通道流动规律进行了研究.

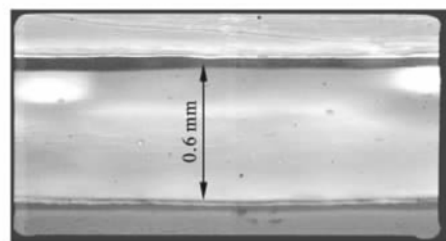
1 Micro-PIV 测量系统组成

实验采用的 Micro-PIV 测量系统由激光光源、CCD 相机、同步器、显微物镜及相应配套元件和荧光示踪粒子几部分组成. 激光光源选用美国 New Wave 公司生产的 Mini:YAG 双脉冲激光器, 激光波长为 532 nm. CCD 相机选用美国 TSI 公司生产的 PowerViewPlus2MP 相机, 能够输出 12 位灰阶图像, 适合于微流场荧光粒子图像获取. 同步器由 TSI 公司生产, 型号为 610034. 显微物镜选用日本 Mitutoyo 公司生产的 Apo $\times 10$ (10 倍)型高数值孔径显微物镜, 配套元件为 TSI 公司生产, 由可伸缩调焦镜筒、中继镜和滤色镜三部分组成, 通过粗调和微调机构调整焦平面位置. 荧光示踪粒子由美国 Duke Scientific 公司生产, 其吸收波长峰值在 532 nm 附近, 激发光波长为 610 nm(红光). 实验采用的是粒径为 3 μm 的荧光微球. 实验测量的微通道采用有机玻璃制作, 通过微机械雕刻工艺加工完成. 由图 1 可以看到:通过微雕刻工艺加工的微通道通常能够满足实验要求, 加工精度也比较理想. 但是, 经过显微镜放大后能观察到流道存在明显的粗糙度, 尺度减小时相对粗糙度有所增大. 这也正是微通道壁面粗糙度引起人们极大兴趣的原因. 实验台分别由 Micro-PIV 测量系统、实验段以及动力源组成. 微通道元件固定在一台微型坐标架上, 能够实现测

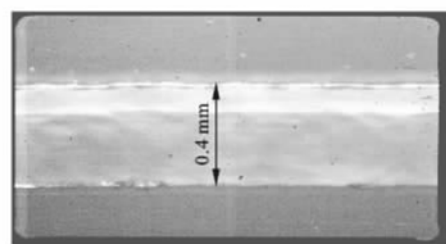
量平面上的二维调节. 测量平面的定位由显微系统上的粗调和微调节装置实现. 动力系统由压缩空气源、调压阀、压力表、储液容器以及空气管路和溶液管路组成. 通过调节压缩空气的进气压力来调节溶液流量. 显微照相系统、实验段以及调节装置固定于由特殊型材制作的实验台面上, 严格地保证光路系统的精度. 图 2 给出了 Micro-PIV 实验台的整体和局部照片.



(a) 0.8 mm 微通道显微照片



(b) 0.6 mm 微通道显微照片

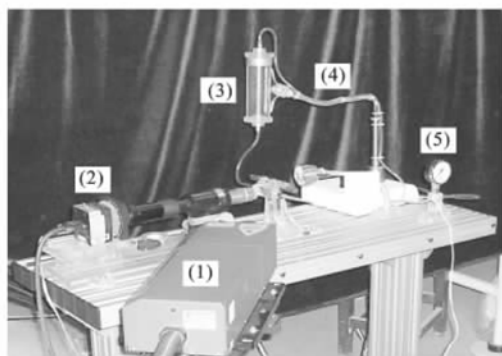


(c) 0.4 mm 微通道显微照片

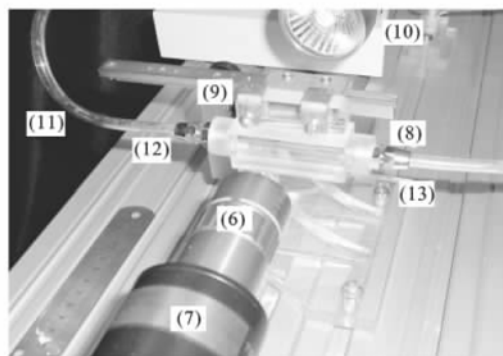
图1 显微系统下的微流道显微图像 $\times 10$

2 粒子图像及速度矢量算法

测量中采用体照明方式及跨帧技术获得粒子双帧图像. 首先需要对图像进行预处理以消除背景噪声, 图 3 给出了处理前后的局部粒子图像. 从图 3a 可以看到, 示踪粒子激发光的强度(在图像中为灰度值)完全能够分辨出单个粒子的运动, 但由于景深以外粒子激发的荧光和显微镜片表面的污物被放大后一并被 CCD 相机采集到, 因此原始图像有较强的背景噪声, 一定程度上影响了速度矢量的计算, 处理后

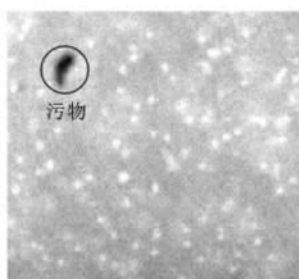


1:激光器;2:CCD相机;3:储液容器;
4:支架;5:压力表;
(a)Micro-PIV 系统及实验台全貌照

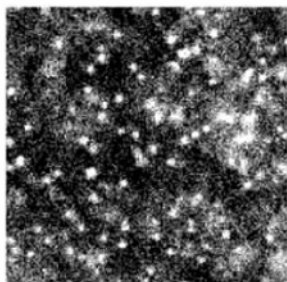


6:显微镜;7:调节筒;8:测试段;9:坐标架;10:白
炽灯;11:管路;12:进液口;13:出液口
(b)测试段局部照片

图 2 Micro-PIV 实验台照片



(a)荧光粒子原始图像



(b)采用背景噪声消除技术后的荧光粒子图像

图 3 原始图像和采用背景噪声消除技术后的图像对比

的图像(见图 3b)背景噪声和壁面的污物影响已经被成功消除.速度场求解算法采用系综相关算法,其主要思想和实施方法可参考文献[4].实验针对 100 对图像通过采用系综相关算法及回归算法计算速度矢量,获得精度较高的速度场.经过测算,测量的空间分辨率达到 $23.68 \mu\text{m} \times 23.68 \mu\text{m} \times 15.64 \mu\text{m}$.

3 微通道速度场测量结果及分析

由图 4 可以看出,速度场分布符合黏性流体通道内流的流动特性,近壁区速度趋于 0,中心区域流

速达到最大值,速度大小与雷诺数成正比,由此可知微通道速度场测量已经达到了预期的结果.由于实验采用的介质为去离子水,同时选用的微通道尺度偏离常规尺度(大于 1 mm)并不很远,微流体的其他物理效应(如分子构形力、电动效应)的影响可以忽略不计,因此可以直观地看到微通道内流速度廓线与方形截面的理论廓线较为一致.但是,微通道加工因素产生的壁面随机粗糙分布对微通道速度场产生了一定影响,这一影响可以从几个速度场分布中定性看到(见图 4).

从图 4 还可以发现,沿流向不同位置的速度场存在波动现象,并且这一现象在近壁区表现得较为明显,速度矢量的方向在这一区域呈现出较大的随机性.从 3 种通道的速度分布可以看到,雷诺数较小时壁面对流场的影响区域较高雷诺数条件下更大(见图 4a),但高雷诺数下近壁区速度场波动似乎更为显著(见 4b).这是因为雷诺数较低时主流动能较小,壁面对速度场的影响比较容易传输到通道中心位置,而高雷诺数条件下这种传输过程实现起来相对较难.另一方面,高雷诺数流动条件下示踪粒子与粗糙壁面的碰撞较低雷诺数流动更为强烈,因此粗糙壁面对近壁区的速度影响更为显著.此外,随着通道尺度的减小,速度场分布的不规律性有所增加,这一点可以通过对图 4 中几个图进行比较后看到,由此说明壁面相对粗糙度随着通道尺度的减小而增大,相对粗糙度对速度分布的影响也随之增大.

为了消除测量中随机因素的影响,同时量化测量结果,采用了沿流向进行空间平均的方法,按式(1)得到了充分发展的方形截面微通道速度分布,其对应的速度廓线称为整场平均廓线,空间平均速度

按下式计算

$$\langle U \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U(x_j, y_k) \quad (1)$$

式中: N 为流动方向截面的个数; (x_j, y_k) 为流场坐标. 矩形通道层流解析近似表达式为

$$U_{\infty=0} = 1.21\bar{U}[1 - |(y/a)^{2.2}|] \quad (2)$$

式中: a 为微通道宽度的一半, $a = H/2$, H 为微通道的宽度. 图 5 给出了整场平均速度廓线与式(2)曲线

之间的比较. 从图 5 中可以看到, 经过空间平均计算后的速度场较好地消除了测量中随机因素的影响, 除壁面附近外, 大部分区域流向的速度廓线与理论廓线相当吻合, 由此说明实验所选择的微通道条件下内流分布与方形截面通道流动的理论分布符合较好. 另一方面, 由于壁面粗糙度的存在, 近壁区的速度分布与理论值偏离较大, 进一步说明壁面粗糙度是影响微通道内流的不可忽视的重要因素.

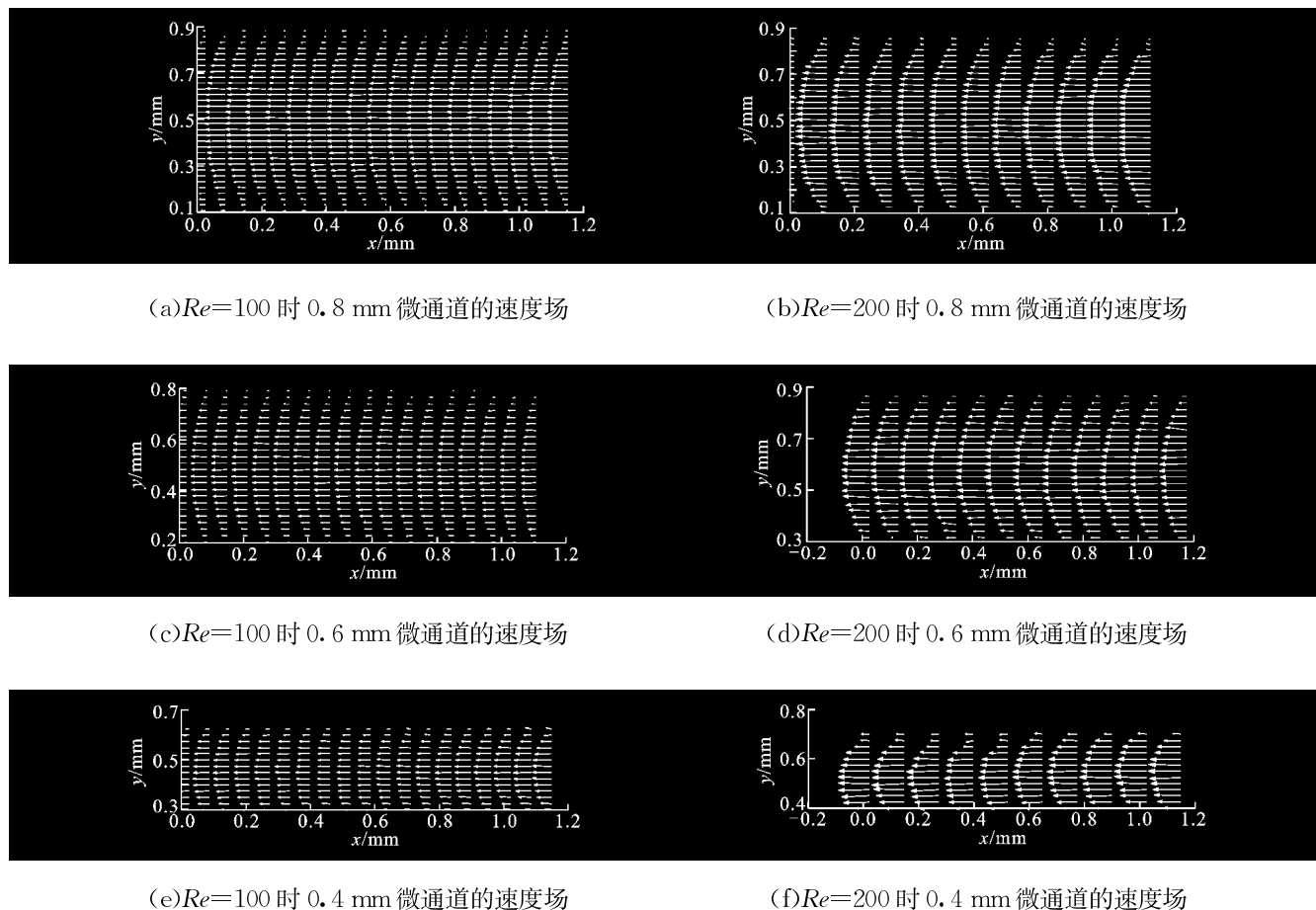
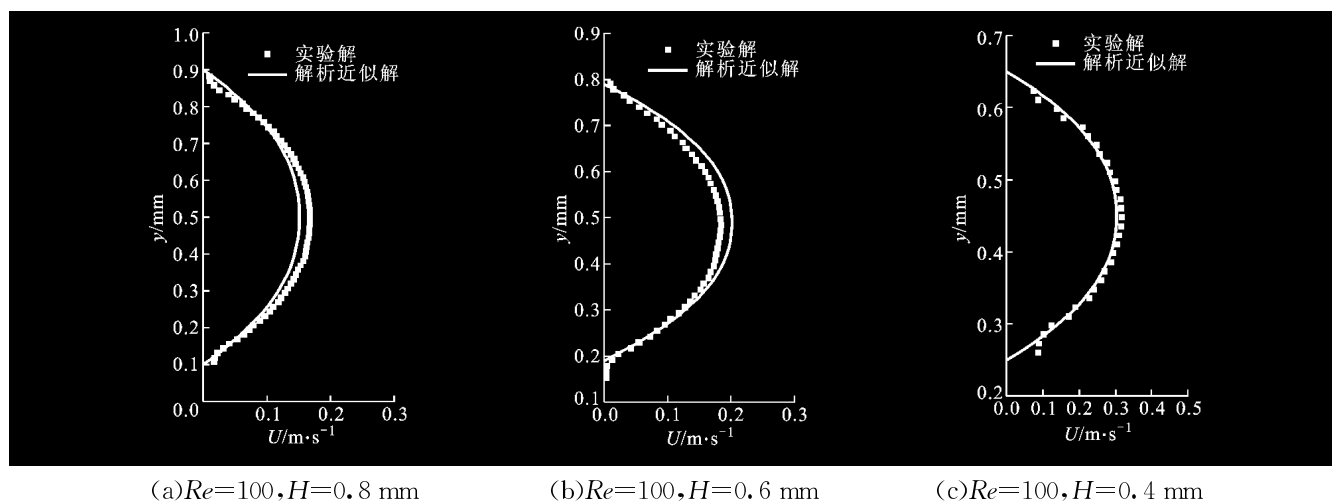


图 4 微通道中的截面流速分布



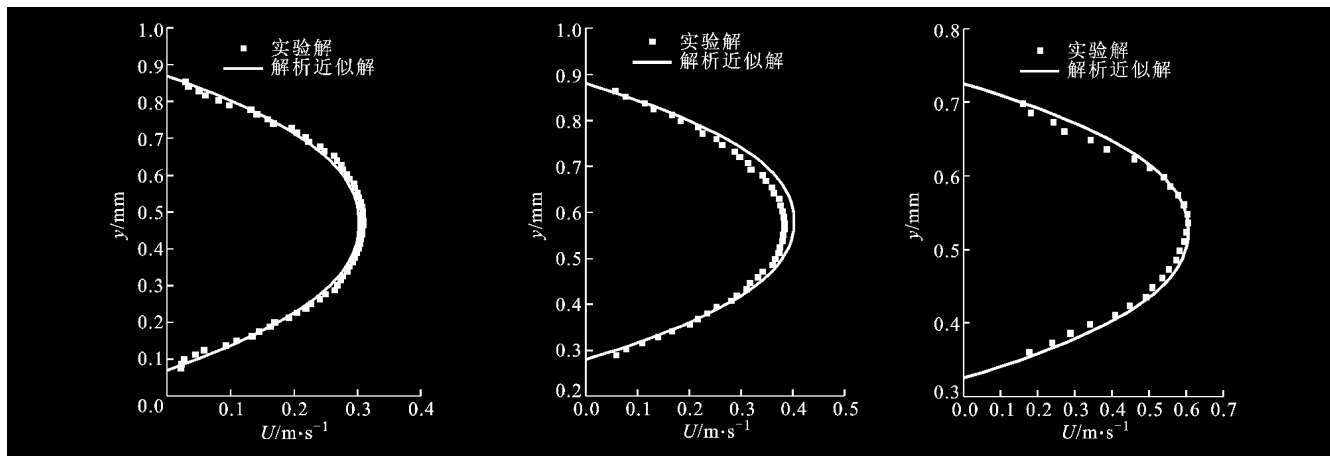
(d) $Re=200, H=0.8 \text{ mm}$ (e) $Re=200, H=0.6 \text{ mm}$ (f) $Re=200, H=0.4 \text{ mm}$

图 5 3 种尺度通道中截面上空间平均速度廓线与理论廓线的比较

4 结 论

采用微尺度粒子图像测速技术 Micro-PIV 对 $0.4 \sim 0.8 \text{ mm}$ 的矩形微通道速度场进行了测量. 实验表明, Micro-PIV 技术能够在对流场不产生干扰的情况下实现微流场的定量可视化测量, 具有很高的空间分辨率. 对方形截面微通道的测量表明, 测量的截面速度场与方形通道的层流理论流场分布规律较为一致, 但因壁面存在较大的相对粗糙度造成近壁区流场受到较强的壁面扰动作用, 扰动作用的强弱与流动的雷诺数和流道尺度直接相关.

参考文献:

- [1] Santiago J G, Werely S T, Meinhart C D. A particle image velocimetry system for microfluidics [J]. Exp Fluids, 1998, 25: 316-319.
- [2] Meinhart C D, Werely S T, Santiago J G. PIV measurements of a microchannel flow [J]. Exp Fluids, 1999, 27: 414-419.

- [3] 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.

- [4] 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.

- [5] 谢海波, 傅新, 杨华勇, 等. 典型微管道流场数值模拟与 Micro-PIV 检测研究 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 32-38.

Xie Haibo, Fu Xin, Yang Huayong, et al. Simulation and Micro-PIV research on classical microchannel flow [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 32-38.

(编辑 王焕雪)

[文摘预登]

散热对无油涡旋空气压缩机性能影响的实验研究

赵远扬, 李连生, 马丽强, 卜高选, 束鹏程

(西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

针对小型家用制氧机用无油涡旋空气压缩机, 分析了散热对压缩机各方面性能的影响机理, 对研制样机进行了 3 种不同冷却方式下的实验研究. 研究表明: 散热是影响无油涡旋空气压缩机性能的一个重要因素; 随着排气压力的升高, 排气温度升高、容积效率下降、电功率升高. 其中自然冷却方式下压缩机的性能最差, 额定排气压力下压缩机容积效率仅为 20%, 而动盘强制冷却的效果最好, 静盘强制冷却的效果介于两者之间. 因此, 动盘背面的强制冷却是无油涡旋空气压缩机设计的首要考虑因素.