

表面润湿性对微通道界面减阻特性的影响

李小磊^{1,2}, 马晓雯¹, 常允乐¹, 张会臣¹

(1.大连海事大学, 辽宁 大连 116026; 2.清华大学, 北京 100084)

摘要: **目的** 降低微通道的流动阻力。**方法** 借助激光加工、自组装技术和化学涂覆技术, 在 Si 基底上制备了 3 种不同润湿性的表面, 通过组装获得具有不同润湿性壁面的微通道。采用微观粒子成像测速技术 (μ -PIV), 对构建的微通道单侧滑移流动和双侧滑移流动进行测试。**结果** Si 表面沉积自组装分子膜、微结构加工结合自组装分子膜沉积及构筑微结构后, 进行纳米二氧化硅涂覆的接触角分别为 114.6° 、 142.7° 和 155.4° 。亲水壁面 A 与疏水壁面 B、C 和超疏水壁面 D 组成的微通道, B、C 和 D 壁面的滑移速度分别为 0.018、0.022、0.029 m/s。B-D 通道的平均流速比 B-C 通道提高了 0.85%, C-D 通道的平均流速比 C-C 通道提高了 5.25%。**结论** 疏水壁面处均存在较明显的滑移速度, 且壁面疏水性越强, 滑移速度越大。当两侧壁面均为疏水壁面时, 一侧壁面疏水性的提高可以增加另一侧壁面疏水性对整体减阻效果的影响, 但会迫使另一侧疏水壁面的滑移速度减小。流场中最大速度位置会偏向疏水性较强的一侧壁面, 且两侧壁面润湿性的差距越大, 其偏离距离越大。

关键词: 微通道; 润湿性; 疏水壁面; 单侧速度滑移; 双侧速度滑移; 阻力

中图分类号: TG117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0042-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.007

Effects of Surface Wettability on Interfacial Drag Reduction in Micro-channel

LI Xiao-lei^{1,2}, MA Xiao-wen¹, CHANG Yun-le¹, ZHANG Hui-chen¹

(1.Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2.Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: To reduce the flow drag in micro channel, by the technology of laser manufacturing, self-assembled monolayer(SAM) technique and chemical coating, three kinds of surfaces with different wettabilities were obtained. Then the micro-channels whose wall surfaces were constituted by theses surfaces, were manufactured. The flow fields of these micro-channels were tested by the microscopic particle image velocimetry (μ -PIV), including the single wall's slip experiment and the double walls' slip experiment. The contact angles were 114.6° , 142.7° , 155.4° after SAM deposition, microstructure manufacturing(MM) and SAM deposition, MM and chemical coating on silicon wafer, respectively. The slip velocities were 0.018, 0.022, 0.029 m/s on hydrophobic specimen B、C and superhydrophobic specimen D wall surface when they were combined the micro-channel with A specimen. The average flow velocity in B-D micro-channel increase 0.85% than that of in B-C micro-channel. The average flow velocity in C-D micro-channel increase 5.25% than that of in C-C micro-channel. There are

收稿日期: 2017-05-30; 修订日期: 2017-06-12

Received: 2017-05-30; Revised: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51275064, 50975036)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51275064, 50975036)

作者简介: 李小磊 (1988—), 男, 博士后, 主要研究方向为纳米摩擦学。

Biography: LI Xiao-lei (1988—), Male, Postdoctor, Research focus: nanotriboogy.

通讯作者: 张会臣 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米摩擦学和微流控技术。

Corresponding author: ZHANG Hui-chen (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: nanotribology and microfluidics.

obvious slip velocities near the hydrophobic surfaces, and the slip velocity increases with the enhance of the wall's hydrophobicity. When the two walls of channel are both hydrophobic, the slip velocity of the other wall will decrease with the increase of one wall's hydrophobicity, but the effect of the other wall's hydrophobicity on drag reduction will improve. The position of the maximum velocity locates on the region which is closer to the wall with stronger hydrophobicity, instead of the center part of channel. Moreover, the bigger the difference between the two wall's wettability, the greater the deviation.

KEY WORDS: micro-channel; wettability; hydrophobic wall; single-side slip velocity; double-side slip velocity; drag

由于具有防污自清洁、防水防潮和表面防护等优异性能,超疏水表面已被广泛应用于人们的日常生活和工业生产中^[1-2]。近年来,随着科学技术的发展,超疏水表面的制备方法和技术已较成熟^[3-4]。人们对超疏水表面的关注也逐渐从表面的制备转向实际应用,其中超疏水表面减阻方面的应用尤为引人注目。Tian 等^[5-6]借助基于时间分辨的粒子图像测速技术 (TRPIV) 对超疏水和亲水壁面的减阻效果进行了对比,结果表明超疏水壁面的减阻率可达 10%~11%。Gavin 等^[7]通过计算流动时间的方法研究了铜管内超疏水壁面的减阻性能,结果表明随着壁面疏水性的增强,壁面的摩擦系数和能量损失均减小。郭瑞生等^[8]采用流变仪和水洞试验,分别在层流和湍流流动状态下,测试了具有不同润湿行为的亲、疏水材料的减阻性能,结果表明在层流和湍流两种流体流动中,均存在材料表面水接触角增加和减阻效率增大的行为。黄桥高等^[9-10]采用格子 Boltzmann 方法研究了疏水表面微通道内的流体流动,从而获得了润湿性对疏水表面滑移流动及减阻特性的影响规律,揭示了速度滑移的产生机理为疏水性作用在近壁区诱导了一个低密度层,而速度滑移则发生在此低密度层上。另外, Fuaad 等^[11]利用直接数值模拟 (DNS) 的方法研究了不同微结构对超疏水表面减阻效果的影响,研究发现当微结构的深宽比增大时,减阻效果增强。胡海豹等^[12]以低表面能纳米通道内液态 Poiseuille 流为对象,采用分子动力学模拟方法,研究了通道壁上布置的二级规则微结构对微流动特性的影响规律,结果发现随着微结构周期和深度的增大,通道内流体的流量逐渐增大,反映出流体的滑移速度和滑移长度也逐渐增加,即呈现出更好的减阻效果。Nowrouz 等^[13-14]研究了雷诺数分别为 180、300、500 时疏水壁面的速度滑移,研究发现当摩擦雷诺数为 500 时,壁面的减阻效果最好 (25%)。现有研究大多是对超疏水表面的减阻效应进行验证,或是研究表面微结构、粗糙度等对减阻特性的影响,对双侧发生不同速度滑移情形的研究还未见报道。

本文通过激光加工、自组装分子膜技术和化学涂覆的方法,在 Si 基底上制备了 3 种具有不同润湿性的微通道壁面,并借助微观粒子成像测速技术

(μ -PIV), 对双侧壁面均为亲水、均为疏水和一侧为亲水另一侧为疏水的微通道内的流场进行测试。分析了壁面滑移速度与壁面润湿性之间的关系以及壁面滑移的产生机理,着重研究了双侧壁面疏水性不同时壁面相互之间的影响。

1 试验

1.1 材料与表面制备

本文采用的壁面基底材料为单晶硅 (购于北京有研硅股公司), 试样分成 4 组。其中, A 组硅片不作任何处理, B 组硅片表面沉积自组装分子膜 (1H,1H,2H,2H-全氟十二烷基三氯硅烷, FDTs), C 组硅片在激光构筑微结构 (50 μ m 间距点阵) 后沉积自组装分子膜, D 组硅片在构筑微结构后进行纳米二氧化硅涂覆。

将 A、B、C、D 四种表面两两组合, 将这些表面按照组合分别粘接到通道 (如图 1 所示) 两侧。然后用盖玻片封装通道的上下表面, 通道的出口和入口粘接橡胶软管, 制备得到的微通道尺寸为 30 mm (length) \times 3 mm (height) \times 0.484 mm (width)。通道以两侧壁面类型命名, 如通道 A-B 表示通道由 A 组表面和 B 组表面组成。

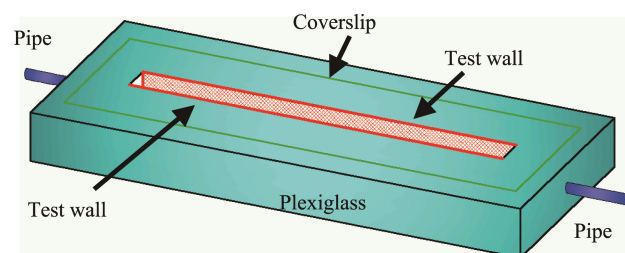


图 1 微通道结构

Fig.1 Structure of micro-channel

1.2 方法

采用 LEXT OLS4000 3D 激光三维共聚焦显微镜对试样表面形貌进行测量, 采用德国 Easy-Drop 型接触角测量仪测定 4 组试样表面的静态水接触角 (Static contact angle, SCA), 并借助卡尺对各表面滚动角 (Roll angle, RA) 进行测量。

采用微观粒子图像速度场系统（Particle Image Velocimetry 型号为 PIV/PLIF，美国 TSI 公司）对微通道内的速度场进行测试，其主要测试系统如图 2a 所示。流场测试前，先向水平放置的微通道内（图

2b）注满混有 $1\text{ }\mu\text{m}$ 示踪粒子（型号为 SM-F02，购置于北京立方天地科技有限公司）的去离子水，然后将入口处的橡胶软管与工业注射泵（SP1-C1）相连，通过注射泵控制微通道内流体的流动。

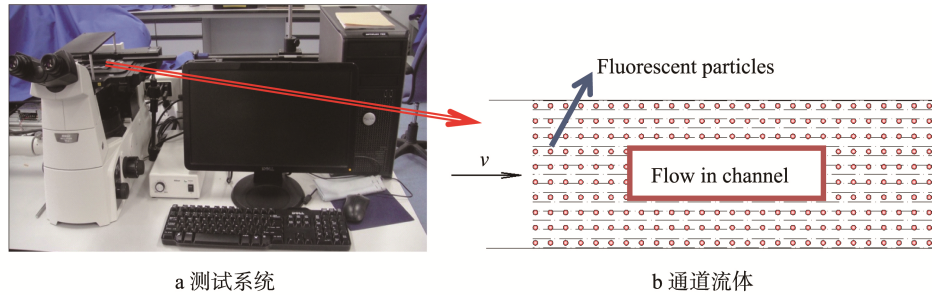


图 2 试验测试系统示意
Fig.2 Schematic diagram of the test system

2 结果及分析

2.1 壁面润湿性

图 3 为 3 组试样表面的三维形貌，可以看出，B

组试样表面平整光滑，有一层膜覆于表面，C 组表面微结构分布均匀，D 组表面在微结构表面还覆盖有一层二级微结构。对各表面进行测量后得到表面的静态接触角和滚动角，其结果如表 1 所示。由此可见，A 组为亲水表面，B 和 C 组为疏水表面，D 组为超疏水

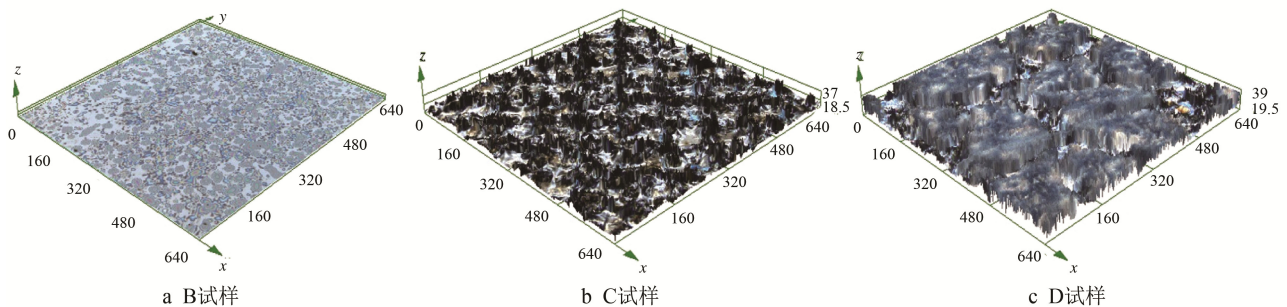


图 3 试样的三维形貌
Fig.3 Three-dimensional topography of specimens

表 1 各试样静态接触角和滚动角
Tab.1 SCAs and RAs of all specimens (°)

Specimen	A	B	C	D
SCA	40.0	114.6	142.7	155.4
RA	—	—	23.4	1.6

表面，且液滴在 A 组和 B 组表面未发生滚动。

2.2 壁面的速度滑移

通道两侧均为亲水壁面时，A-A 通道内的速度场分布如图 4 所示。可见两壁面处的速度近似为零，通道内流场的最大速度 $v_{A-Amax} \approx 0.043\text{ m/s}$ 。由此可知，当壁面为亲水时，壁面处的滑移速度为零。这是因为 A 组壁面为亲水壁面，表面能高，壁面切向阻力大，壁面处的粘性底层较厚，导致流场速度在此区域大幅度减小，壁面处的速度近似为零。

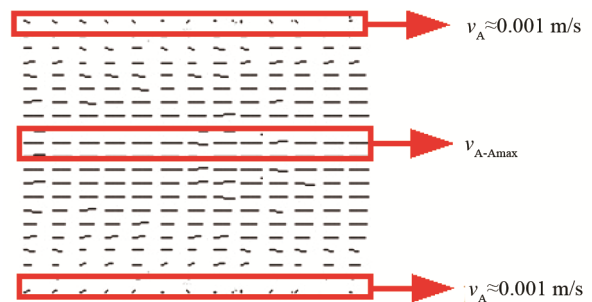


图 4 A-A 通道的速度场分布
Fig.4 Velocity distribution of channel A-A

微通道一侧为亲水壁面、另一侧为疏水壁面时，分别对通道 A-B、A-C 和 A-D 进行测试，得到各通道内的流场分布。其中，A-C 通道内的速度场如图 5 所示。由图 5 可知，亲水壁面 A 处的滑移速度为零，疏水壁面 C 处的滑移速度为 0.022 m/s ，通道内的最大速度 $v_{A-Amax} \approx 0.041\text{ m/s}$ 。整体而言，C 壁面一侧分

布的速度明显大于 A 壁面一侧。另外,在 A-B 通道和 A-D 通道内的最大速度分别为 0.042、0.040 m/s, B 壁面和 D 壁面处的滑移速度分别为 0.018、0.029 m/s。可见,疏水壁面处均发生了明显的速度滑移,且随着壁面疏水性的增强,滑移速度增大。分析其原因为: B 组壁面经 FDTS 修饰后,表面能大大降低,壁面处的粘性底层较薄,流场速度的下降幅度减小,在壁面处的流场速度并未减小到零,即壁面处存在滑移速度; C 组表面构筑了阵列式微结构,并进行了低表面能修饰,流体流过表面时,表面微结构中会残留一部分气体,形成无剪切的气液自由界面^[15],其壁面处的滑移速度更大; D 组表面在进行激光刻蚀后又涂覆了一层纳米 SiO_2 颗粒,具有微纳米双重结构,能够形成更好的气液无剪切自由界面,因此其壁面滑移速度最大。

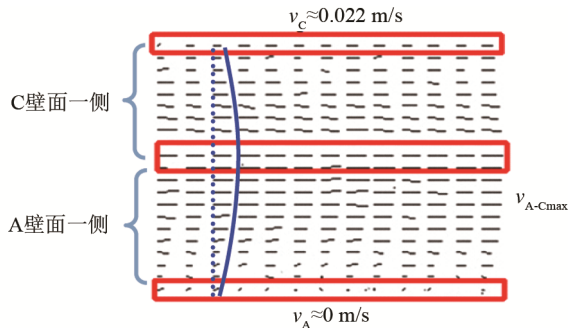


图 5 A-C 通道的速度场分布
Fig.5 Velocity distribution of channel A-C

微通道双侧均为疏水壁面时,对双侧均为疏水性壁面的通道 B-B、B-C、B-D、C-C、C-D 和 D-D 进行 μ -PIV 试验,得到各通道内流体的速度分布。以 B-C

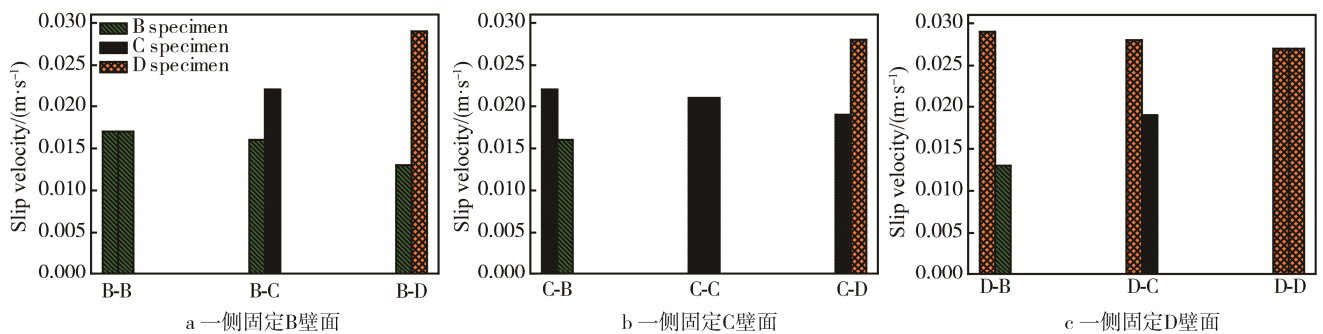


图 7 各通道壁面的滑移速度
Fig.7 Slip velocities of channel walls

2.3 通道内的平均流速

在速度场中建立如图 8 所示的坐标系,在 x 方向选定一个固定位置,相当于三维通道的一个横截面。从 μ -PIV 试验数据中,可得到这条线上(固定位置)所有点的速度值。利用 Origin 软件对这些点的 y 位置-速度值进行作图,如图 9 所示。

通道为例,其流场分布如图 6 所示。与通道 A-C 不同,通道 B-C 两壁面处的速度均不为零。C 壁面处的滑移速度 $v_C \approx 0.021$ m/s, B 壁面处的滑移速度 $v_B \approx 0.016$ m/s,且 C 壁面一侧分布的速度明显大于 B 壁面一侧,最大速度位置偏向 C 壁面一侧。

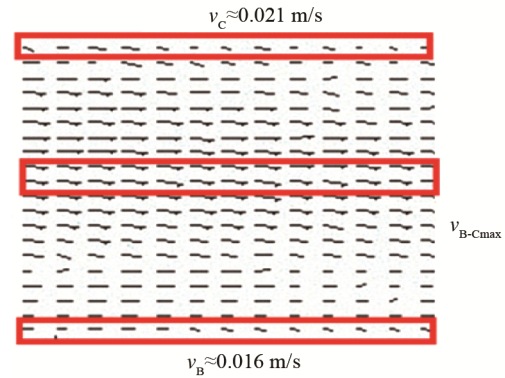


图 6 B-C 通道的速度场分布
Fig.6 Velocity distribution of channel B-C

同样,可测得其余通道内的滑移速度值,如图 7 所示。可见当通道双侧均为疏水表面时,通道两侧均发生速度滑移,且疏水性越强,滑移速度越大。另外,同一通道内,两侧壁面之间会相互影响,一侧壁面的滑移速度会随着另一侧壁面疏水性的增强而减小。以图 7a 为例,一侧固定为 B 壁面,另一侧壁面依次由 B 壁面变到 C 壁面再变到 D 壁面, B 壁面的滑移速度依次减小。结合通道内的速度场分布(图 6)可知,随着另一侧疏水性的增强,最大速度所处的位置偏离 B 壁面的距离增大, B 壁面一侧发生速度递减的距离增加,所以 B 侧壁面处的滑移速度减小。

由图 9 可知,当两侧壁面疏水性不同时,最大速度位置并不位于流场的中心位置,而是偏离中心位置靠近疏水性较强的壁面一侧,并且两壁面疏水性相差越大,最大速度偏离中心位置的距离越大。定义图 9 中速度 v 与 y 位置的函数关系为: $v=f(y)$,则通道内流体的体积流量 Q 应为:

$$Q = h \int_0^w f(y) dy \quad (1)$$

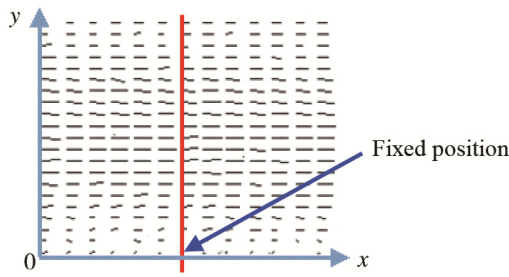


图 8 坐标系和固定位置 (横截面) 示意
Fig.8 Schematic diagram of the coordinate system and the fixed position(cross section)

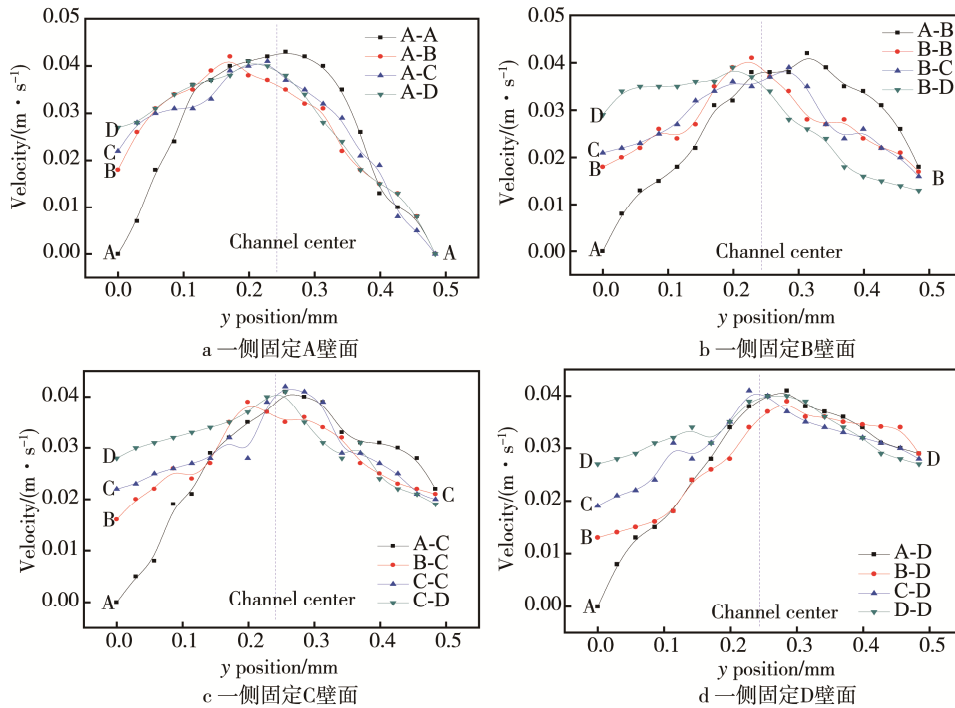


图 9 固定位置上的速度分布曲线
Fig.9 Velocity distribution at the fixed position

将等式(3)代入等式(1)和(2), 计算得到 A-D 通道内的平均流速为 $2.793 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 。

同理, 计算得到其余各通道内的平均流速大小, 其结果如表 2 所示。试验中各通道的入口压力相等, 平均流速越大, 则说明通道的减阻效果越好。从表 2 中可以看出, 减阻效果最好的是 D-D 通道, 其次按顺序依次为 C-D、C-C、B-D、B-C、A-D、B-B、A-C、A-B、A-A。可见, 当一侧固定时, 随着另一侧壁面疏水性的增强, 整体减阻效果提高。值得一提的是, A-D 通道的减阻效果强于 B-B 通道, 说明发生单侧壁面滑移微通道的减阻效果不一定比双侧发生壁面滑移微通道的减阻效果差。此外, 以 B-C 和 B-D、C-C 和 C-D 通道为例可以看出, B-D 通道的平均流速比 B-C 组合提高了 0.85%, C-D 通道的平均流速比 C-C 组合提高了 5.25%, 这说明一侧疏水性的提高可以增

式中: h 为微通道高度, $h=3 \text{ mm}$; w 为微通道宽度, $w=0.484 \text{ mm}$ 。通道的平均流速为:

$$\bar{v} = \frac{Q}{h \cdot w} \quad (2)$$

对图 9 中的曲线进行数据拟合, 可得到 $v=f(y)$ 的表达式, 然后将表达式代入等式(1)—(2), 即可得到通道内流体流速的平均值。

以 A-D 通道为例, 对其速度变化曲线 (图 9a) 进行二次多项式拟合, 得到其表达式为:

$$v = -0.409y^2 + 0.14y + 0.026 \quad (3)$$

加另一侧疏水性对整体减阻效果的影响。

表 2 通道的平均流速
Tab.2 Average flow rate of all channels

Groups	A-A	A-B	A-C	A-D	B-B
$\bar{v}/(\times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.736	2.742	2.787	2.793	2.790
Groups	B-C	B-D	C-C	C-D	D-D
$\bar{v}/(\times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.820	2.844	2.970	3.126	3.336

2.4 各通道内的最大速度

图 10 为试验测得的各通道内的最大速度值, 可见当微通道一侧固定为 A 壁面或 B 壁面时, 随着另一侧壁面疏水性的增强, 最大速度值减小, 但这种规律性并不适用于 C 壁面和 D 壁面。分析其原因为: 当一侧壁面固定时, 随着另一侧壁面疏水性的增强,

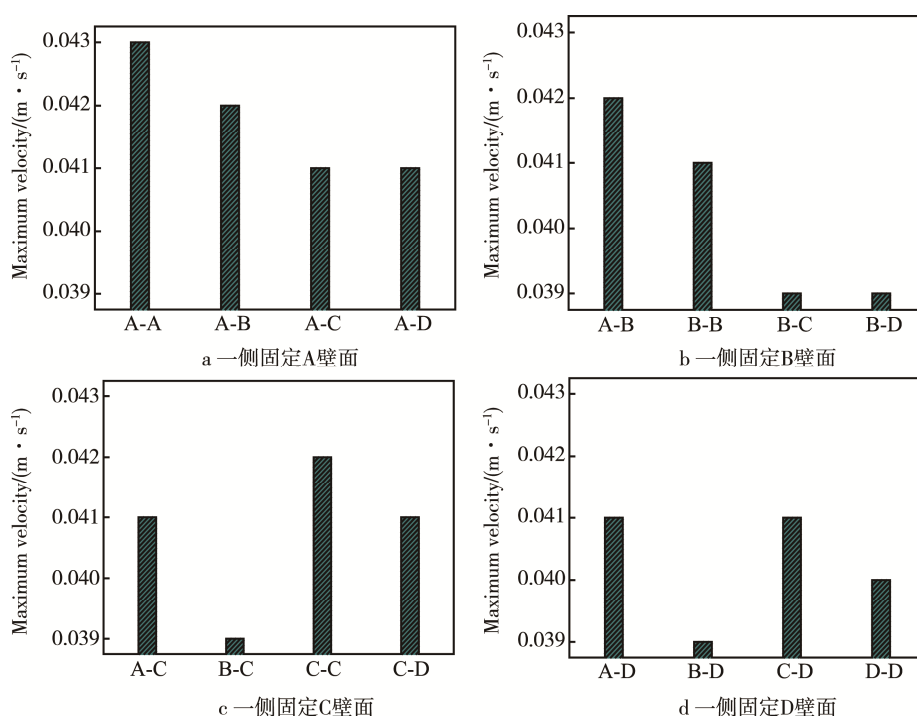


图 10 各通道内的最大速度
Fig.10 Maximum velocities of all channels

通道内流体平均流速和另一侧壁面的滑移速度均增大,当通道内平均流速的增大幅度较小时,最大速度值减小;当通道内平均流速的增大幅度较大时,最大速度值的变化呈不规则性。若是在保证入口流量一定的情况下,当一侧壁面固定时,流场中的最大速度会随着另一侧壁面疏水性的增强而减小。

3 结论

1) 疏水壁面会产生速度滑移,且随着壁面疏水性的增强,滑移速度和滑移长度均增大。当两侧壁面均为疏水壁面时,本侧滑移速度随另一侧壁面疏水性的增强而减小,但滑移长度的变化呈无规律性。

2) 当一侧壁面固定时,随着另一侧壁面疏水性的增强,壁面的整体减阻效果提高,其中减阻效果最好的是 D-D 通道。另外,一侧壁面疏水性的提高可增强另一侧壁面疏水性对整体减阻效果的影响。

3) 当两侧壁面疏水性不同时,流场内的最大速度位置并不位于通道中心,其位置会偏向疏水性较强的一侧壁面。两侧壁面的疏水性相差越大,其最大速度位置偏离通道中心的距离越大。

参考文献:

- [1] SCHUTZIUS T M, JUNG S, MAITRA T, et al. Spontaneous Droplet Trapping on Rigid Superhydrophobic Surfaces[J]. Nature, 2015, 527: 82—85.
- [2] LI X L, ZHANG L, MA X W, et al. Dynamic Characteristics of Droplet Impacting on Prepared Hydrophobic/Superhydrophobic Silicon Surfaces[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 243—253.
- [3] DONGWHI C, JAEWON Y, SANG M P, et al. Facile and Cost-effective Fabrication of Patternable Superhydrophobic Surfaces via Salt Dissolution Assisted Etching[J]. Applied Surface Science, 2017, 393: 449—456.
- [4] SIMONE G, GIOVANNI P, RUBEN B, et al. Fast and Large Area Fabrication of Hierarchical Bioinspired Superhydrophobic Silicon Surfaces[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(9): 2363—2369.
- [5] TIAN H P, ZHANG J X, WANG E D, et al. Experimental Investigation on Drag Reduction in Turbulent Boundary Layer over Superhydrophobic Surface by TRPIV[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2015, 5(1): 45—49.
- [6] TIAN H P, ZHANG J X, JIANG N, et al. Effect of Hierarchical Structured Superhydrophobic Surfaces on Coherent Structures in Turbulent Channel Flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 69: 27—37.
- [7] GAVIN M W, AHMAD B A, ADAM M, et al. Analysis of Friction Factor Reduction in Turbulent Water Flow Using a Superhydrophobic Coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 90: 472—476.
- [8] 郭瑞生, 魏强兵, 吴杨, 等. 材料表面润湿性调控及减阻性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(1): 23—30.

GUO R S, WEI Q B, WU Y, et al. Fabrication and Drag

- Reduction of Controllable Wetting Surfaces[J]. Tribology, 2015, 35(1): 23—30.
- [9] 黄桥高, 潘光, 宋保维. 疏水表面滑移流动及减阻特性的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 226—232.
- HUANG Q G, PAN G, SONG B W. Lattice Boltzmann Simulation of Slip Flow and Drag Reduction Characteristics of Hydrophobic Surfaces[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 226—232.
- [10] 黄桥高, 潘光. 疏水表面流体流动特性的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 船舶力学, 2016, 20(10): 1211—1218.
- HUANG Q G, PAN G. Lattice Boltzmann Simulation of Liquid Flow Characteristics of Hydrophobic Surfaces[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(10): 1211—1218.
- [11] FUAAD P A, BAIG M F, AHMAD H. Drag-reduction in Buoyant and Neutrally-Buoyant Turbulent Flows over Super-hydrophobic Surfaces in Transverse Orientation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93: 1020—1033.
- [12] 胡海豹, 何强, 鲍路瑶, 等. 二级规则微结构对低表面能纳米通道内微流动的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 165—170.
- HU H B, HE Q, BAO L Y, et al. Effect of Secondary Regular Microstructure on the Micro-flows in Nano-channel with Low Surface Energy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 165—170.
- [13] NOWROUZ M N, MOHAMMAD S B, SETAREH S. Analysis of Shear Rate Effects on Drag Reduction in Turbulent Channel Flow with Superhydrophobic Wall[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(6): 944—953.
- [14] NOWROUZ M N, SETAREH S, ALIREZA M. Drag Reduction in a Turbulent Channel Flow with Hydrophobic Wall[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(3): 458—466.
- [15] DU P, WEN J, ZHANG Z, et al. Maintenance of Air Layer and Drag Reduction on Superhydrophobic Surface[J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 328—335.