

6-14-2018

Effect of Interfacial Curvature on Drag Reduction of Superhydrophobic Microchannels

Chunxi Li

Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

Zhang Shuo

Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

Xuemin Ye

Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Effect of Interfacial Curvature on Drag Reduction of Superhydrophobic Microchannels

Abstract

Abstract: The two-dimensional fluid flow in superhydrophobic microchannels with transverse grooves was numerically simulated with Fluent to *investigate the impact of the liquid-gas interface curvature on the effective slip behavior in the laminar regime*. The effects of shear-free fraction, normalized periodic cell length and Reynolds number on the normalized slip length and pressure drop reduction are also examined. The results show that *as protrusion angle increases, the normalized slip length and pressure drop reduction exhibit with single-hump variations*. When $\theta = \theta_{opt}$, increments in the normalized slip length and pressure drop reduction tend to be greater as shear-free fraction and normalized periodic cell length decrease, leading to the better drag reduction effect. *When $\theta > \theta_n$, especially $\theta > 90^\circ$, the transverse grooves deteriorate flow resistance, and the normalized slip length and pressure drop reduction decrease significantly with increasing shear-free fraction and normalized periodic cell length*. The effect of Reynolds number on drag reduction is approximately negligible.

Keywords

superhydrophobic surfaces, microchannels, numerical simulation, gas-liquid interface curvature

Recommended Citation

Li Chunxi, Zhang Shuo, Ye Xuemin. Effect of Interfacial Curvature on Drag Reduction of Superhydrophobic Microchannels[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2405-2413.

界面曲率对超疏水微通道减阻的影响

李春曦, 张硕, 叶学民

(电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 针对具有横向微槽的超疏水微通道中的流动减阻特性, 采用 Fluent 模拟了微通道中的二维层流流动, 分析了气-液界面曲率、流动和结构参数对减阻效果的影响。结果表明: 压降比和滑移长度随凸出角增大均呈单驼峰曲线变化; 当 $\theta = \theta_{opt}$ 时, 随自由剪切面积比和周期单元长度增加, 压降比和滑移长度均提高, 减阻效果显著; 当 $\theta > \theta_n$, 尤其是 $\theta \approx 90^\circ$ 时, 横向微槽起增阻作用, 且提高自由剪切面积比和周期单元长度将显著降低压降比和滑移长度, 增阻作用愈加显著; 雷诺数对减阻效果影响很小。

关键词: 超疏水表面; 微通道; 数值模拟; 气-液界面曲率

中图分类号: O 35 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 06-2405-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806051

Effect of Interfacial Curvature on Drag Reduction of Superhydrophobic Microchannels

Li Chunxi, Zhang Shuo, Ye Xuemin

(Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: The two-dimensional fluid flow in superhydrophobic microchannels with transverse grooves was numerically simulated with Fluent to investigate the impact of the liquid-gas interface curvature on the effective slip behavior in the laminar regime. The effects of shear-free fraction, normalized periodic cell length and Reynolds number on the normalized slip length and pressure drop reduction are also examined. The results show that as protrusion angle increases, the normalized slip length and pressure drop reduction exhibit with single-hump variations. When $\theta = \theta_{opt}$, increments in the normalized slip length and pressure drop reduction tend to be greater as shear-free fraction and normalized periodic cell length decrease, leading to the better drag reduction effect. When $\theta > \theta_n$, especially $\theta \approx 90^\circ$, the transverse grooves deteriorate flow resistance, and the normalized slip length and pressure drop reduction decrease significantly with increasing shear-free fraction and normalized periodic cell length. The effect of Reynolds number on drag reduction is approximately negligible.

Keywords: superhydrophobic surfaces; microchannels; numerical simulation; gas-liquid interface curvature

引言

微加工技术的发展促使具有表面微结构的



收稿日期: 2016-07-29 修回日期: 2016-12-21;
作者简介: 李春曦(1973-), 女, 唐山, 博士, 教授, 研究方向为流体力学及流体工程等; 张硕(1991-), 女, 邢台, 硕士生, 研究方向为流动减阻; 叶学民(1973-), 男, 邢台, 博士, 教授, 研究方向为流体力学及流体工程。

超疏水表面在流动减阻方面得到广泛应用, 如石油储层注水减阻技术^[1], 水下航行器表面减阻等^[2]。有关超疏水表面的研究大多基于 Cassie 模型^[3]。其表面含有规整粗糙微结构, 从而形成很薄的疏水层。在表面张力作用下^[4], 因流体不能完全浸湿微槽, 致使微槽内驻留部分气体、形成剪切力很小的气-液接触面, 极大减少了表面上固-液接触

面积, 从而降低流动的粘性阻力^[5]。因此, 超疏水表面在微流体流动减阻方面具有良好的应用前景。

在研究其宏观流动时, 通常以平整光滑的固体表面替代原本具有粗糙微结构的真实表面, 而在壁面处采用滑移边界条件表征超疏水表面的减阻效果^[6], 且壁面结构和速度都会影响壁面滑移^[7]。目前, 针对超疏水微通道的流动减阻特性, 已开展了一系列的理论和数值研究。Philip^[8]、Lauga 和 Stone^[9]分别针对两平行平板间和圆管中的 Stokes 流进行了理论研究, 得到了滑移长度的理论解。在气-液界面为平面这一假设基础上, Teo 和 Khoo^[10]假定气-液界面为自由剪切面, 系统地分析了超疏水微通道中的 Stokes 流动, 及横向和纵向微槽、单侧和双侧滑移等因素的影响, 获得了有效滑移长度与极大或极小的自由剪切面积比、周期单元长度间的渐近关系式; Nizkaya 等^[11]提出了将气相内流动影响转化为气-液界面处局部滑移长度的方法; Davies 等^[12]通过在气-液界面上设定局部速度和剪切力的方法, 数值研究了超疏水微通道中的减阻特性, 指出降低微通道高度有助于提高减阻效果; 常允乐^[13]采用固-气复合壁面模型对比了四种不同形状微槽对超疏水表面减阻的影响, 发现燕尾形微槽的减阻效果最佳。刘占一等^[14]基于壁面剪应力公式模拟了疏水通道的滑移边界, 减阻效果可达 16.62%。

实验研究方面也取得了积极进展。Ou 等^[15]重点观测了疏水表面微柱间的气-液界面特征, 通过共聚焦表面轮廓测试仪发现了高度为 30 mm 的微柱间气-液界面曲率的存在, 且气液两相压差越大, 该气-液界面轮廓的曲率越突出。Choi 等^[16]研究了具有纳米柱微结构的超疏水微管道, 指出其压降较普通微管道可显著降低 20~30%。霍素斌等^[17]测试了由化学刻蚀法得到的铝基超疏水微通道的流动特性, 对比了超疏水和超亲水微通道中的流动压降, 结果表明, 水在超疏水微通道中的流动阻力降明显降低, 压降减少最大可达 25%。卢思等^[18]针对具有微纳双重结构的超疏水表面槽道阻力实验表明, 流体在壁面处存在明显滑移, 表面减阻效果显著。

虽然平面型气-液界面假设可近似表征超疏水表面的减阻效果^[10-13], 但最近研究开始关注气-液界面曲率的影响, 以客观反映实验现象^[15]。Tsai 等^[19]认为气-液界面曲率导致了理论和实验结果的偏差, 并通过共聚焦显微镜也观察到了气-液界面存在曲率这一事实。Teo 和 Khoo^[20]模拟了具有纵向微槽的超疏水微通道内的流动, 分析了不同气体面积比和无量纲周期单元长度情形下气-液界面曲率对有效滑移长度的影响, 发现滑移长度随凸出角增大而单调增加。Davis 和 Lauga^[21]在极限小自由剪切面积比前提下, 针对低雷诺数下具有横向微槽的超疏水表面上的层流流动, 建立了有效滑移长度和气-液界面凸出角间的简化模型, 指出存在中性凸出角使超疏水表面不再具有减阻作用; 但其分析基于自由剪切面积比极小和低雷诺数条件, 所得关系式适用受限。

综上所述, 针对超疏水微通道内的流动研究表明, 气-液界面曲率对有效滑移长度和减阻效果具有显著影响。而目前多数研究或假定气-液界面为平面, 而忽略已获实验验证的气-液界面为曲面这一重要特征的影响, 或采用基于理论分析的简化模型, 因而其所得结果既不能全面反映微通道内的流动细节, 也并不能真实反映实际减阻效果。而采用数值模拟方法可以在不简化控制方程组的基础上, 获得超疏水微通道内的流动细节, 全面分析气-液界面曲率影响减阻的内在机理, 而目前这方面的研究尚待进一步深入。为此, 本文依据实验结果^[15], 在考虑气-液界面曲率这一重要特征的基础上, 针对具有横向微槽的超疏水微通道内的层流流动, 采用 Fluent 开展二维数值模拟, 探讨气-液界面曲率、流动和结构参数对减阻效果的影响。

1 数学物理模型

针对两无限大平行平板间的流动, 因流动在微通道宽度方向上保持不变, 因此可采用二维模拟展开分析。如图 1 所示, 流体在二维微通道内做层流流动, 上下壁面均为具有交替分布的微槽和微脊的

超疏水表面, 微槽内驻存有部分气体。流体介质为常物性的水, 忽略重力影响^[13]。假定气-液界面为自由剪切曲面且曲率恒定, 以凸出角 θ 表示, θ 为气-液界面切线与微脊表面所在水平线间的夹角。当气-液界面向液侧变形时, θ 为正值, 否则, θ 为负值^[15]。为全面分析气-液界面曲率的影响, 模拟中 θ 取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$; 当 $\theta = \pm 90^\circ$ 时, 气-液界面为半圆形。

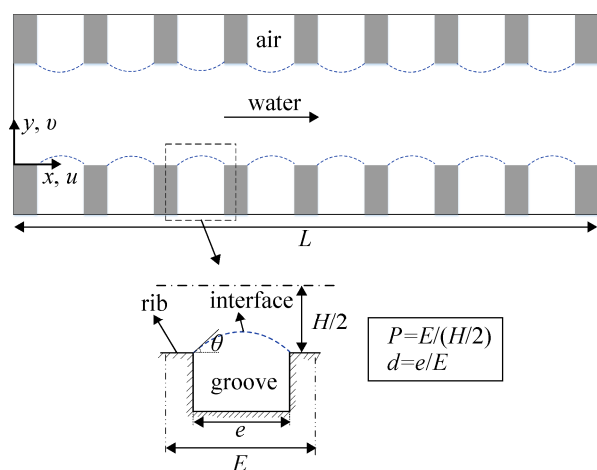


图 1 二维超疏水微通道模型示意图

Fig. 1 Diagram of 2D superhydrophobic microchannels model

控制方程组包括连续性方程和动量方程^[22]:

$$\partial v_i / \partial x_i = 0 \tag{1}$$

$$\nu_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\rho \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

在计算中, 微通道左端和右端分别给定入口速度 u_{in} 和出口压力作为边界条件, 且出口压力保持标准大气压不变; 微通道中的流动关于中心线对称, 在中心线上给定对称边界条件; 因流体在弯曲的气-液界面上做自由剪切流动, 因此在气-液界面上设置剪切力为零。速度与压力采用 SIMPLE 耦合, 动量方程采用二阶迎风格式离散。文中多数采用结构网格, 但当气-液界面曲率很大时则采用非结构网格。在模拟中进行了网格无关性检验, 当 $Re=20$, $P=0.8$, $\delta=0.6$, $\theta=30^\circ$ 时, 网格数分别为 5 万、7 万、10 万、12 万、16 万时, 与网格数为 20 万时所得微通道进出口压降的最大偏差分别为 2.7%、1.9%、1.5%、1.2%、0.7%; 综合考虑计算

精度和计算时间, 确定网格数为 16 万。

微通道长度为 $L=1\ 600\ \mu\text{m}$, 高度为 H ; 周期单元长度为 $E=40\ \mu\text{m}$, 微槽宽度为 e , 则微脊宽度为 $(E-e)$ 。模拟中, 微通道长度和周期单元长度保持不变, 微通道上下壁面均包含 40 个周期单元。为便于分析, 采用如下无量纲参数: 自由剪切面积比 $\delta=e/E$, 无量纲周期单元长度 $P=E/(H/2)$, 雷诺数 $Re=\rho u_{in} D_h / \mu$; 其中, ρ 和 μ 为流体密度和动力粘度, $D_h=2H$ 为微通道水力直径。

由数值模拟所得微通道稳定段的压降可求得反映减阻效果的泊肃叶数 fRe , 其中 f 为微通道平均摩擦因子。对于光滑壁面微通道中的定常层流^[23], fRe 为

$$fRe = 2 \frac{\Delta p D_h^2}{u_{in} \mu L_p} \tag{3}$$

式中: $\Delta p=p_1-p_2$, 为微通道中稳定段的压降, p_1 和 p_2 为 $1\ 100\ \mu\text{m}$ 和 $1\ 500\ \mu\text{m}$ 处的截面平均压强, 经验证, 此压降段不受进出口段的影响; L_p 为稳定压降段所对应的微通道长度。

由式(1)可得无量纲滑移长度 β ^[24]

$$\beta = \frac{\lambda}{(H/2)} = \frac{32}{fRe} - \frac{1}{3} \tag{4}$$

式中: λ 为有量纲滑移长度。

为有效衡量超疏水微通道的减阻效果, 引入无量纲压降比 Π

$$\Pi = (\Delta p_S - \Delta p) / \Delta p_S \times 100\% \tag{5}$$

式中: Δp_S 和 Δp 分别为光滑微通道和壁面含微槽的超疏水微通道中的稳定段压降。

此外, 定义超疏水表面的减阻率为:

$$\Phi = (F_S - F) / F_S \times 100\% \tag{6}$$

式中: F_S 和 F 分别为光滑表面和超疏水表面阻力。

2 模拟结果与分析

2.1 微通道中泊肃叶数的变化

图 2 为微通道中泊肃叶数 fRe 随雷诺数 Re 的变化, 其中 $P=0.8$, 对于超疏水微通道 $\delta=0.8$, $\theta=30^\circ$ 。已有研究表明, 对于两光滑无限大平行平板间的流

动, 泊肃叶数为常数, $fRe=96$ ^[25]。图2表明, 光滑微通道的模拟结果与理论解吻合极好, 最大偏差仅为0.025%, 由此表明文中所做数值模拟的准确性。对于超疏水微通道, 其 fRe 明显小于光滑微通道情形, 平均降低约36%, 表明超疏水表面具有显著减阻功能。另外, 对于超疏水微通道, 随 Re 增大, fRe 略有提高; 但从整体上, 超疏水微通道的减阻效果受雷诺数影响并不明显, 当 Re 由20增至70时, fRe 仅增大0.28%。

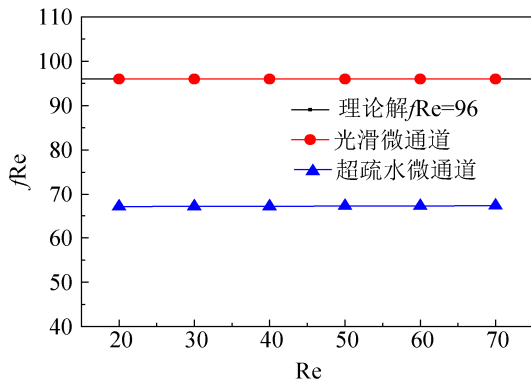
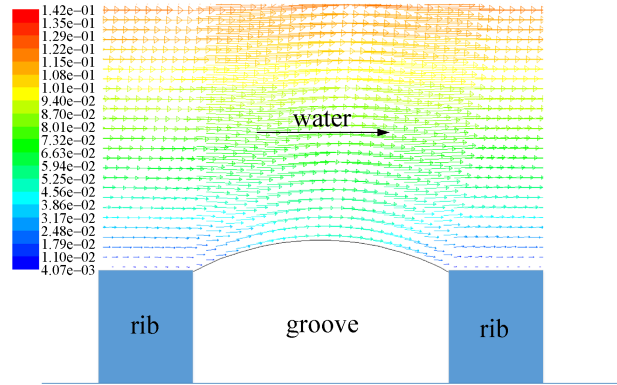


图2 泊肃叶数 fRe 随雷诺数 Re 的变化
Fig. 2 Relation of fRe with Re

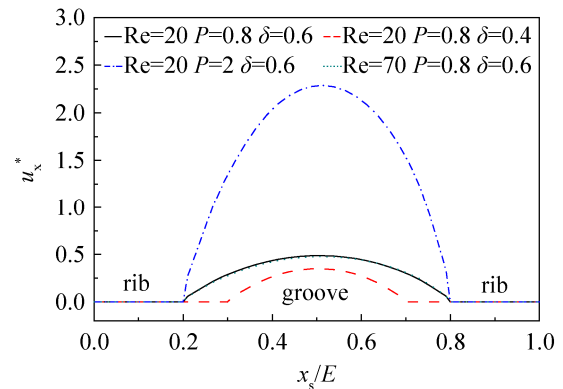
2.2 运动学特征

图3(a)为超疏水微通道下壁面附近的速度场, 其中 $Re=20$ 、 $P=0.8$ 、 $\delta=0.6$ 、 $\theta=30^\circ$ 。该图表明, 微通道壁面由交替的无滑移壁面和滑移界面组成, 在微脊壁上, 流体满足无滑移边界条件, 速度为零; 而在自由剪切气-液界面上, 流体存在局部滑移速度, 速度为一有限值。另外, 滑移界面仅对壁面附近流动有影响, 而远离壁面处的流动则不再受影响。图3(b)为微通道中第20个周期单元壁面处的速度分布, 其中 $\theta=30^\circ$, 无量纲壁面速度 $u_x^*=u_x/u_{in}$, x_s 为以第20个周期单元段左侧端点为起点, 向右沿流向的距离。比较图3(b)中 $Re=20$ 、 $P=0.8$ 时 $\delta=0.6$ 和0.4情形下的速度分布可知, 增大自由剪切面积比 δ 可提高壁面速度 u_x^* , 这是因为增大 δ 减小了无滑移的固-液接触面积, 从而降低粘性阻力。对比 $Re=20$ 、 $\delta=0.6$ 时 $P=0.8$ 和2的结果发现, 当增加周期单元长度 P 后, u_x^* 提高, 这是因

减小微通道高度增大了超疏水表面面积与流体体积的比值, 超疏水表面的作用更显著。比较 $P=0.8$ 、 $\delta=0.6$ 时 $Re=20$ 和70的结果可知, u_x^* 受雷诺数影响不明显, 但当 Re 增大后, 速度分布向下游偏移得更明显些, 这是因流动惯性所致。



(a) 壁面附近的速度矢量图



(b) 第20个周期单元壁面处的速度分布

图3 壁面处的速度矢量图及其分布
Fig. 3 Velocity vector and distribution at the wall

2.3 流动和结构参数对减阻效果的影响

2.3.1 自由剪切面积比的影响

图4为不同自由剪切面积比情形下压降比和滑移长度随凸出角的变化, 其中 $Re=20$, $P=0.8$ 。由图可知, 随凸出角 θ 增大, 二者均呈相似的单驼峰曲线, 对应最大压降比和零压降比存在最优凸出角 θ_{opt} 和中性凸出角 θ_n 。当 $\theta=\theta_{opt}$ 时, Π 和 β 取得最大值, 横向微槽结构减阻效果最好; 当 $\theta=\theta_n$ 时, Π 和 β 均为零, 则不再具有减阻作用。当气-液界面向气侧变形, 即 θ 为负值时, 此时 θ 越大, 界面变形程

度愈明显, 导致流动经历更显著的交替收缩与膨胀过程而增加能耗, 由此减阻效果变差。反之, 当气-液界面向液侧变形, 即 θ 为正值时, 此时随 θ 增大, 因界面向液侧变形更加明显, 从而减小了流通面积、阻碍流体流动, 导致减阻效果变差。当界面向液侧过分变形, 即 $\theta > \theta_n$ 时, 超疏水表面不再具有减阻作用, 反而起阻碍作用。

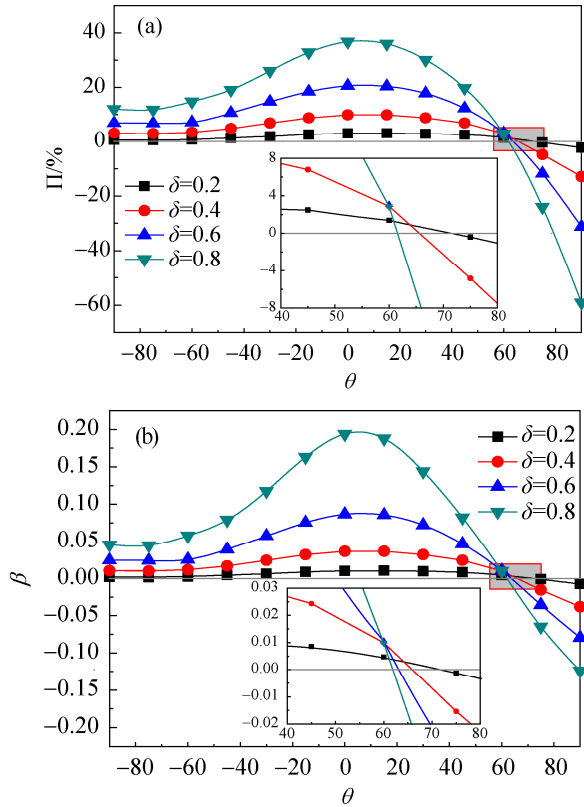
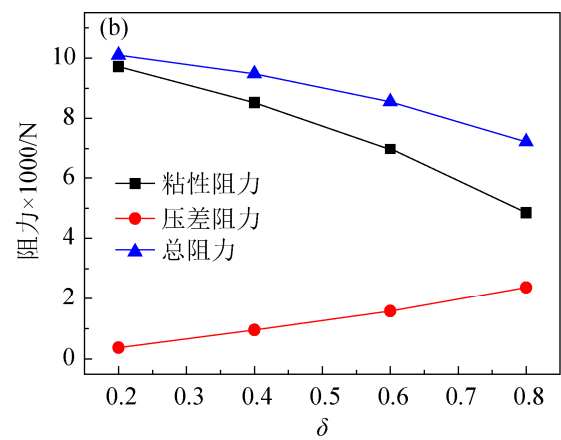
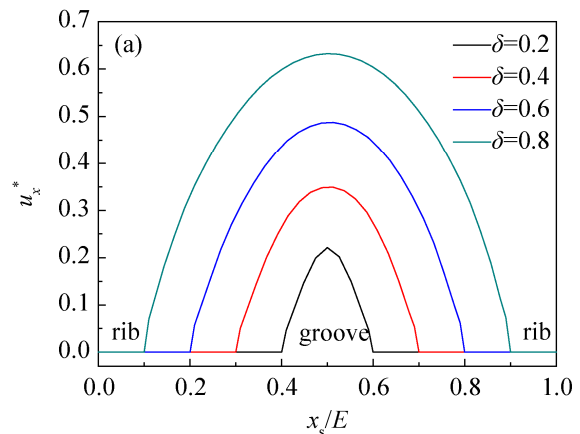


图 4 自由剪切面积比对压降比和滑移长度的影响
Fig. 4 Effect of shear-free fraction on pressure drop ratio and slip length

观察图中结果可知, $\theta_{opt} \approx 0 \sim 10^\circ$, 且受自由剪切面积比 δ 影响较小; $\theta_n \approx 62 \sim 71^\circ$, 与 Davies 和 Lauga^[21] 所得理论解 $\theta_n \approx 65^\circ$ 一致, 且 θ_n 随 δ 增大而减小, 这是因当 θ 较大时, 提高 δ , 气-液界面越大, 由此对流体流动的堵塞作用越明显, 因而 θ_n 减小。此外, 图 4 表明, $\theta_{opt} \approx 0^\circ$ 时的减阻效果最为显著, 但 Ou 等^[15] 的实验观测指出, 气-液界面很难保持平面, 因此 $\theta_{opt} \approx 0^\circ$ 情形在一定程度上夸大了实际减阻效果, 应考虑界面曲率带来的影响。

图 4 表明, 当 $\theta = \theta_{opt}$ 时, 随 δ 增大, Π 和 β 提高; 这是因增大 δ 将减小无滑移的固-液接触面积, 由此降低粘性阻力、减阻效果突出。当 $\theta \approx 90^\circ$ 时, 增大 δ 后, Π 和 β 反而减小, 这是因向液侧过分变形的气-液界面对流体产生阻碍作用, 且界面越长, 对流体阻碍作用越明显。当 $\delta = 0.8$ 、 $\theta_{opt} \approx 5^\circ$ 时, Π 和 β 分别为 37.1% 和 0.197, 减阻效果显著。由此可见, 合理选择超疏水微通道的流动和结构参数, 进而控制气-液界面曲率对于提高减阻效果至关重要。

图 5(a) 为微通道中第 20 个周期单元气-液界面上的速度分布, 其中 $Re = 20$ 、 $P = 0.8$ 、 $\theta = 30^\circ$ 。由图 5 可知, 界面速度 u_x^* 随自由剪切面积比 δ 增大而提高, 这是因提高 δ 使得自由剪切气-液界面扩大, 由此使界面中心处速度得以增加。超疏水表面具有周期性分布的微观结构, 其壁面阻力包括粘性阻力和压差阻力。



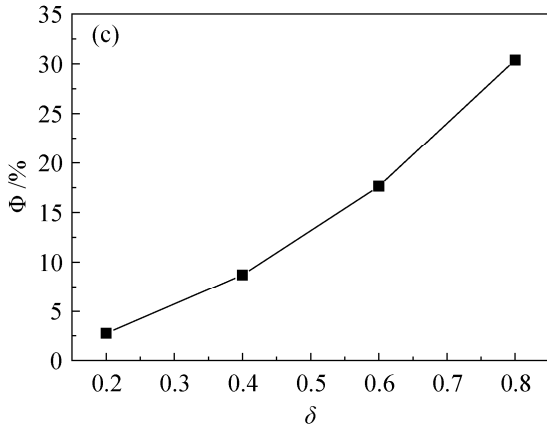


图5 自由剪切面积比对气-液界面速度分布、壁面阻力和减阻率的影响

Fig. 5 Effect of shear-free fraction on velocity distribution at gas-liquid interface, wall resistance and drag reduction rate

为进一步理解自由剪切面积比对微通道减阻的影响,图5中(b)和(c)给出了自由剪切面积比对微通道壁面阻力和减阻率的影响,其中 $Re=20$ 、 $P=0.8$ 、 $\theta=30^\circ$ 。随 δ 增加,粘性阻力逐渐下降,而压差阻力逐渐提高,总阻力则表现为缓慢减小。这是因为粘性阻力是流体流经固-液界面时,因粘性作用被固体壁面粘滞所产生;当增加 δ 时,气-液界面所占比例增加,从而减小了固-液接触面积,由此粘性阻力减小。另外,当周期单元长度一定时,增加 δ 则扩大了气-液界面,并使界面上、下游区域的流速差增大,即上、下游压强差增大,因此压差阻力提高。由此可见,增大自由剪切面积比在抑制粘性阻力的同时,也导致压差阻力的提高,由此改变了粘性阻力和压差阻力的比例,从而影响总阻力。由图5(c)可知,减阻率 Φ 随 δ 增加近似呈线性增长变化,其中当 $\delta=0.8$ 时,减阻率可达30.4%,减阻效果显著。

2.3.2 周期单元长度的影响

为分析无量纲周期单元长度 P 对减阻效果的影响,图6中(a)和(b)给出了压降比 Π 和滑移长度 β 随凸出角 θ 的变化,其中 $Re=20$ 、 $\delta=0.6$ 。当 $\theta=\theta_{opt}$ 时,随 P 增大, Π 和 β 均显著提高,与Davies等^[12]所得结果趋势一致。这是因增大 P 将提高超疏水表面面积与流体体积之比,由此超疏水表面的作用

愈加显著,减阻效果更好。

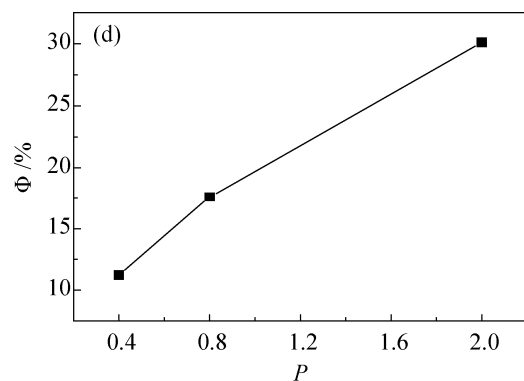
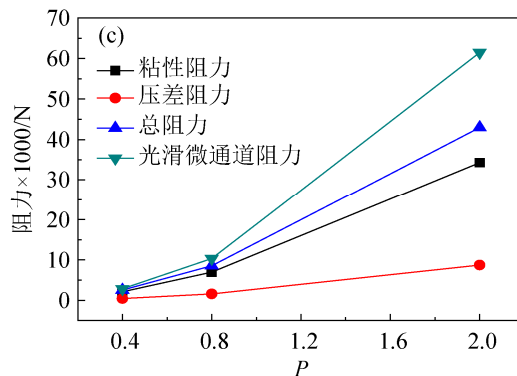
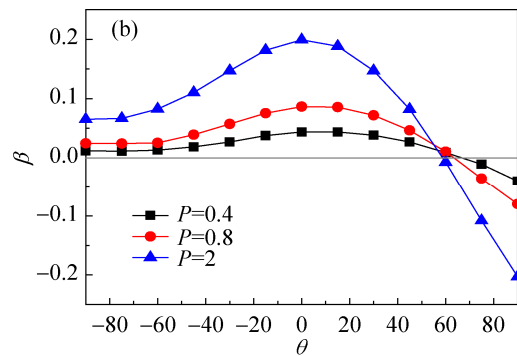
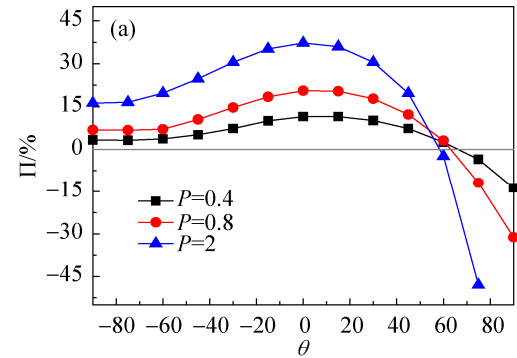


图6 周期单元长度对压降比、滑移长度、壁面阻力和减阻率的影响

Fig. 6 Effect of periodic cell length on pressure drop ratio, slip length, wall resistance and drag reduction rate

当 $\theta \approx 90^\circ$ 时, 气-液界面向液侧变形过多, 此时超疏水表面不再具有减阻作用, 反而阻碍流体流动; 此时 P 越大, 超疏水表面增阻作用越显著, 即 Π 和 β 越小。因此, 对于超疏水微通道, 只有合理设计气-液界面的变形程度, 使其满足 $\theta < \theta_n$, 并尽可能使 $\theta \approx \theta_{opt}$, 才能达到最佳超疏水表面的减阻效果。图 6 中(c)和(d)为周期单元长度 P 对微通道壁面阻力和减阻率 Φ 的影响, 其中 $Re=20$ 、 $\delta=0.6$ 、 $\theta=30^\circ$ 。随 P 增大, 即随微通道高度减小时, 超疏水表面的压差阻力略有增加, 而粘性阻力则快速提高, 总阻力也相应增大; 另外, 光滑微通道阻力随 P 增加最为显著, 明显快于超疏水微通道, 由此说明超疏水微通道具有显著的减阻作用。减阻率 Φ 随 P 增大近似呈线性增长变化, 其中当 $P=2$ 时, 与光滑微通道相比, 横向微槽产生的减阻率达到 30.1%。

为进一步理解凸出角 θ 对气-液界面上速度分布的影响, 图 7 给出了微通道中第 20 个周期单元壁面处的速度分布, 其中 $P=0.8$ 、 $Re=20$ 、 $\delta=0.6$ 。

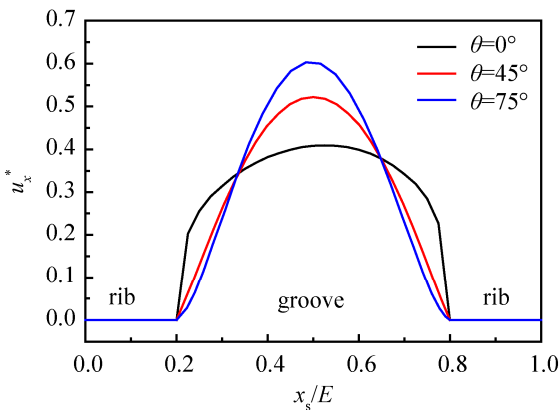


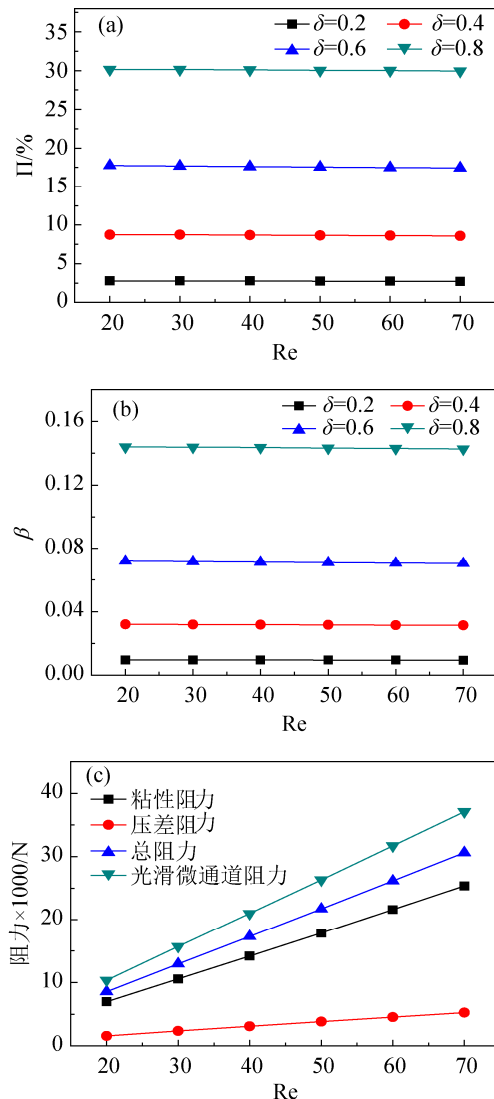
图 7 凸出角对气-液界面速度分布的影响
Fig. 7 Effect of protrusion angle on velocity distribution at gas-liquid interface

图 7 表明, 速度分布受凸出角 θ 影响显著, 尤其在微脊和微槽交界点附近。 θ 越大, 气-液界面中心处的 u_x^* 也越大; 这是因界面向液侧的显著变形减小了流通面积, 致使流动速度提高。

2.3.3 雷诺数的影响

图 8 中(a)和(b)为雷诺数 Re 对压降比 Π 和滑移

长度 β 的影响, 其中 $P=0.8$ 、 $\theta=30^\circ$ 。由图可知, Π 和 β 受雷诺数影响并不明显, 这表现在: 当 δ 较小时, Π 和 β 几乎不受 Re 影响; 当 δ 较大时, 随 Re 增大, Π 和 β 略有减小; 该结果与 Davies 等^[12]、常允乐^[13]所得结论一致。图 8 中(c)~(d)给出了微通道壁面阻力和减阻率 Φ 随雷诺数 Re 的变化, 其中 $P=0.8$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $\delta=0.6$ 。随 Re 增大, 各阻力均呈线性增长, 压差阻力略有增加, 而粘性阻力则快速提高, 总阻力也相应增大; 光滑微通道阻力也随 Re 增大而快速增长, 且增长率高超疏水微通道。减阻率 Φ 随 Re 增大呈线性降低趋势, 但变化量极小, 当 Re 由 20 增至 70 时, Φ 仅下降了 0.9%, 说明雷诺数对减阻效果影响很小。



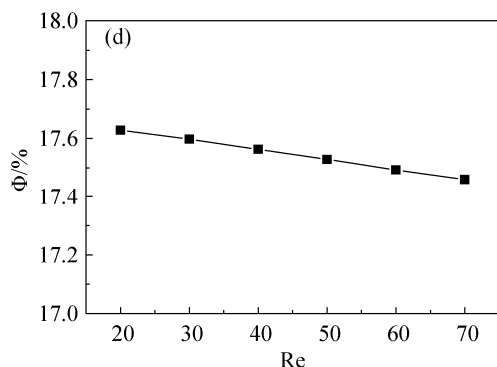


图8 Re对压降比、滑移长度、壁面阻力和减阻率的影响
Fig. 8 Effect of Re on pressure drop ratio, slip length, wall resistance and drag reduction rate

3 结论

流体在超疏水微通道壁面上存在明显滑移特征；当增大自由剪切面积比和周期单元长度时，将提高气-液界面速度，而雷诺数变化对气-液界面速度影响很小。

当反映气-液界面曲率的凸出角改变时，压降比和滑移长度均呈单驼峰曲线变化，对应最大压降比和零压降比存在最优凸出角 θ_{opt} 和中性凸出角 θ_n 。当 $\theta=\theta_{opt}$ 时，增大自由剪切面积比可提高压降比和滑移长度；但当 $\theta\approx 90^\circ$ 时，提高自由剪切面积比将减小压降比和滑移长度。增加自由剪切面积比在抑制粘性阻力的同时，也导致压差阻力提高，由此改变粘性阻力和压差阻力的比例，从而影响总阻力。减阻率随自由剪切面积比增加近似呈线性增长变化。

当 $\theta=\theta_{opt}$ 时，随周期单元长度增大，压降比和滑移长度提高，减阻效果越好；但当 $\theta\approx 90^\circ$ 时，增加周期单元长度将导致压降比和滑移长度降低，增阻越显著。减阻率随周期单元长度增大近似呈线性增长变化。压降比和滑移长度受雷诺数Re影响很小；减阻率随Re增大线性降低，但变化量很小。

参考文献：

[1] 狄勤丰, 沈琛, 王掌洪, 等. 纳米吸附法降低岩石微孔道水流阻力的实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 125-128.
Di Qinfeng, Shen Chen, Wang Zhanghong, et al.

Experimental Research on Drag Reduction of Flow in Microchannels of Rocks Using Nano-particle Adsorption Method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 125-128.

[2] 侯智敏. 水下航行器低表面能涂层减阻研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
Hou Zhimin. Research on drag reduction of Low Surface Energy Film of Underwater Crafts[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

[3] Cassie A B D, Baxter S. Wettability of Porous Surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society (S0014-7672), 1944, 40(3): 546-551.

[4] 宋保维, 任峰, 胡海豹, 等. 表面张力对疏水微结构表面减阻的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 54708.
Song Baowei, Ren Feng, Hu Haibao, et al. Drag Reduction on Micro-structured Hydrophobic Surfaces due to Surface Tension Effect[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 54708.

[5] 吕鹏宇, 薛亚辉, 段慧玲. 超疏水材料表面液-气界面的稳定性及演化规律[J]. 力学进展, 2016, 46: 179-225.
Lü Pengyu, Xue Yahui, Duan Huiling. Stability and Evolution of Liquid-gas Interfaces on Superhydrophobic Surfaces[J]. Advances in Mechanics, 2016, 46: 179-225.

[6] Bonnavard M, Dalibard A L, Gérard-Varet D. Computation of the Effective Slip of Rough Hydrophobic Surfaces via Homogenization[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences (S0218-2025), 2014, 24(11): 2259-2285.

[7] 胡海豹, 鲍路瑶, 黄苏和. 不同润湿性纳米通道内库埃特流动的模拟[J]. 力学学报, 2013, 45(4): 507-514.
Hu Haibao, Bao Luyao, Huang Suhe. Simulation of the Liquid Couette Flow in a Nano-channel with Different Wettability[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4): 507-514.

[8] Philip J R. Flows Satisfying Mixed No-slip and No-shear Conditions[J]. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP (S1420-9039), 1972, 23(3): 353-372.

[9] Lauga E, Stone H A. Effective Slip in Pressure-driven Stokes Flow[J]. Journal of Fluid Mechanics (S0022-1120), 2003, 489(6): 55-77.

[10] Teo C J, Khoo B C. Analysis of Stokes Flow in Microchannels with Superhydrophobic Surfaces Containing a Periodic Array of Micro-grooves[J]. Microfluidics and nanofluidics (S1613-4990), 2009, 7(3): 353-382.

- [11] Nizkaya T V, Asmolov E S, Vinogradova O I. Gas Cushion Model and Hydrodynamic Boundary Conditions for Superhydrophobic Textures[J]. *Physical Review E* (S1550-2376), 2014, 90(4): 043017.
- [12] Davies J, Maynes D, Webb BW, et al. Laminar Flow in a Microchannel with Superhydrophobic Walls Exhibiting Transverse Ribs[J]. *Physics of Fluids* (S1089-7666), 2006, 18(8): 087110.
- [13] 常允乐. 表面润湿性对微通道界面阻力影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
Chang Yunle. Effects of Surface Wettability on Interfacial Drag in Micro-channel[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [14] 刘占一, 宋保维, 黄桥高, 等. 基于壁面滑移的疏水通道减阻特性仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(5): 971-974.
Liu Zhanyi, Song Baowei, Huang Qiaogao, et al. Drag-reduction Characteristic Simulation Investigation about Hydrophobic Channels Based on Wall slip[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(5): 971-974.
- [15] Ou J, Perot B, Rothstein J P. Laminar Drag Reduction in Microchannels Using Ultrahydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids* (S1089-7666), 2004, 16(12): 4635-4643.
- [16] Choi C H, Ulmanella U, Kim J, et al. Effective Slip and Friction Reduction in Nanogated Superhydrophobic Microchannels[J]. *Physics of Fluids* (S1089-7666), 2006, 18(8): 087105.
- [17] 霍素斌, 于志家, 李艳峰, 等. 超疏水表面微通道内水的流动特性[J]. *化工学报*, 2007, 58(11): 2721-2726.
Huo Subin, Yu Zhijia, Li Yanfeng, et al. Flow Characteristics of Water in Microchannel with Super-Hydrophobic Surface[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(11): 2721-2726.
- [18] 卢思, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 具有微纳结构超疏水表面的槽道减阻特性研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40(7): 916-924.
Lu Si, Yao Chaohui, Hao Pengfei, et al. Drag Reduction of Micro-nano-structure Channels with Superhydrophobic Surface[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, 40(7): 916-924.
- [19] Tsai P, Peters A M, Pirat C, et al. Quantifying Effective Slip Length over Micropatterned Hydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids* (S1089-7666), 2009, 21(11): 112002.
- [20] Teo C J, Khoo B C. Flow past Superhydrophobic Surfaces Containing Longitudinal Grooves: Effects of Interface Curvature[J]. *Microfluidics and Nanofluidics* (S1613-4990), 2010, 9(2/3): 499-511.
- [21] Davis A M J, Lauga E. Geometric Transition in Friction for Flow over a Bubble Mattress[J]. *Physics of Fluids* (S1089-7666), 2009, 21(1): 011701.
- [22] Karniadakis G E M, Beskok A, Gad-el-Hak M. *Micro Flows: Fundamentals and Simulation*[J]. *Applied Mechanics Reviews* (S0003-6900), 2002, 55(4): 76.
- [23] Gaddam A, Garg M, Agrawal A, et al. Modeling of Liquid-gas Meniscus for Textured Surfaces: Effects of Curvature and Local Slip Length[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering* (S1361-6439), 2015, 25(12): 125002.
- [24] Maynes D, Jeffs K, Woolford B, et al. Laminar Flow in a Microchannel with Hydrophobic Surface Patterned Microribs Oriented Parallel to the Flow Direction[J]. *Physics of Fluids* (S1089-7666), 2007, 19(9): 093603.
- [25] Blevins R D. *Applied Fluid Dynamics Handbook*[M]. New York, Van Nostrand Reinhold Co, 1984.