层流状态下超疏水表面流场建模与减阻特性仿真研究

宋保维，袁　潇，胡海豹

(西北工业大学 航海学院，陕西 西安　710072)

摘　要：在充分发展层流状态下对具有规则微观结构的超疏水表面流场进行数值仿真研究，分析了超疏水表面流场的减阻特性。针对超疏水表面微观结构特点，采用 Cassie 接触模型，对计算域利用结构化网格进行划分，采用 VOF 多向流模型进行数值仿真。研究表明：超疏水表面凹槽附近产生压差阻力导致凹槽内部形成低速漩涡，产生推动效应与涡垫效应；超疏水表面减阻率随凹槽槽宽增大而增大，受凹槽深度影响不显著，矩形凹槽比 V 形凹槽与 U 形凹槽有更好的减阻效果。

关　键　词：超疏水表面，层流，减阻，滑移

中图分类号：O357.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-2758(2012)05-0712-06

所谓超疏水表面(Superhydrophobic surface)是指其上液滴的表观接触角大于 150°的固体表面。由 Young 方程，通过控制固体表面的化学组成，降低固体表面自由能，疏水表面最大接触角只能达到约 120°[1]，而要产生接触角大于 150°的超疏水性，其表面须具有尺寸在微纳米范围的微观结构，即低表面能和微纳米结构是影响超疏水表面疏水性的主要因素。为解释超疏水表面的接触角现象，Cassie 等修改并拓展了 Young 方程，在 Wenzel 接触模型的基础上提出了基于气/液接触模式的 Cassie 接触模型[2,3]。这种接触模型认为微纳米结构形貌之间的下凹部分驻留有气体，形成所谓固-液-气三相接触，很好地解释了超疏水表面所具有的特性，更加符合实际情况。

基于上述 Cassie 接触模型，国内外许多学者开展了超疏水表面减阻仿真研究。Ou J. 等[4]用矩形的微通道在层流状态下($Re<1\ 000$)测量了压降、流量和超疏水表面上微凸柱间的流体表面偏差，得出了气液交界面的存在使固液相仅在很小的有效面积上接触，从而减小了流动阻力的结论。Kevin B. Jeffs[5]采用直接数值模拟的方法对内壁有平行流动方向结构的微通道进行了研究。他用自由滑移表面模拟气液交界面，在层流状态下获得了 91% 的惊人减阻量。赵士林[6]报道了超疏水表面二维数值模拟研究，得出微通道高度越小，无量纲压降比越大，滑移长度越小；其无量纲压降比最大值为 18.5%，滑移长度达到最大值为 188 μm。刘占一[7]通过开展疏水表面流场理论模拟发现，流速一定时，壁面滑移速度越大，减阻量也越大；而当壁面滑移速度一定时，减阻量则随着流速的增大而逐渐减小。

本文基于超疏水表面的 Cassie 接触模型，在充分发展层流状态下开展对具有规则微观结构的超疏水表面两无限大平板间流场的数值仿真研究，尝试从速度分布、压强分布、滑移速度、减阻率等方面分析超疏水表面减阻机理。

1　超疏水表面流场建模方法研究

1.1　计算域建立与网格生成

本文基于超疏水表面 Cassie 接触模型，根据其微观结构的特点将其简化为具有规则微观结构的凹槽，采用充分发展的两无限大平板间流场进行数值仿真。其中计算域上壁面为光滑平板，下壁面设置为有规则形状的凹槽，在计算域的入口和出口段各取 100 μm 的平板段。为满足两无限大平行平板流动的条件，计算域高度及宽度均取 10 倍微观结构特

收稿日期：2011-10-28　　基金项目：国家自然科学基金重点项目(50838009)资助

作者简介：宋保维(1963—)，西北工业大学教授、博士生导师，主要从事水下航行体设计及减阻降噪技术等的研究。

征尺寸,保证计算结果的可信度。由于计算域高度足够高,可以忽略上下壁面处流场变化对彼此的影响,因此在与下壁面凹槽表面相对应长度的上壁面光滑平板处设置对比区域,通过对比上下壁面受力求解减阻率。计算域如图 1 所示,l 为肋宽,h 为槽高,w 为槽宽。

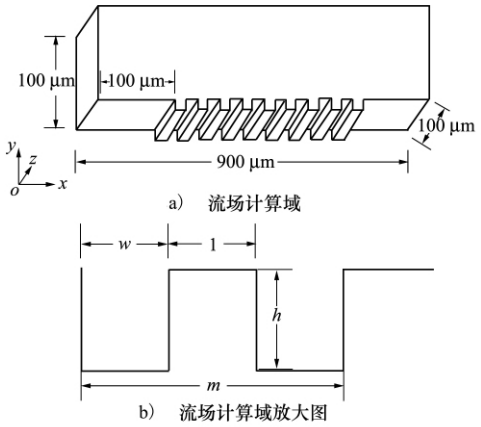


图 1　计算域示意图

采用局部网格加密策略,在对流场影响较大的近壁面区域和流场变化较剧烈的超疏水表面区域对网格进行加密处理。结合计算域的特点,采用四边形结构化网格,网格数量介于 $90\times10^4\sim120\times10^4$ 之间。

1.2　流场数学模型与物理模型建立

本文数值仿真在定常条件下充分发展层流流场展开,流体介质为水,粘性为不可压缩。计算雷诺数时,特征长度取计算域高度 100 μm,速度取来流速度的最大值 10 m/s,由雷诺数计算公式,可知雷诺数在来流速度取最大值时有 $Re<2\,000$,保证数值仿真在层流状态下进行。

首先建立数学模型,连续方程表达式为

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

由于几何尺寸微小,可以忽略重力影响,动量方程表达式为

$$\begin{cases}\rho\left(u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+w\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)=-\dfrac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\\ \rho\left(u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+w\dfrac{\partial v}{\partial z}\right)=-\dfrac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\\ \rho\left(u\dfrac{\partial w}{\partial x}+v\dfrac{\partial w}{\partial y}+w\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)=-\dfrac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)\end{cases}$$

式中 u、v、w 分别是流体在 x、y、z 方向速度,p 为流体压力,ρ 为流体密度,μ 为流体粘性系数[8]。

本文研究的实质为一个气液两相流问题,因此建立的流场物理模型为 VOF 多相流模型,计算域内初始化为凹槽内空气体积分数 100%,其它计算域内水体积分数 100%。

本文边界条件设置为: 微通道的左端设为均匀速度入口,右端为压力出口,前后壁面设为对称边界条件模拟无限大平板,其它壁面设为无滑移壁面,并设置气液交界面达到模拟滑移表面的目的。

1.3　滑移速度和减阻率定义

1) 定义滑移速度

$$U_s=\sum_{i=1}^{n}U_i/n$$

式中 U_s 为滑移速度,U_i 为气液交界面与凹槽下壁面上沿流向采样直线上采样点的速度,n 为采样点个数。由滑移速度定义,当采样点位于凹槽下壁面处时由于其为无滑移壁面,$U_i=0$; 当采样点位于气液交界面处,U_i 为采样点的滑移速度,又本模型采用对称边界条件来模拟无限大平面,可知对所有采样点的速度求均值即可表征超疏水表面滑移速度。

2) 光滑壁面总阻力 f_g 全部由粘性阻力 f_{gvf} 构成,超疏水表面总阻力 f_j 则由压差阻力 f_{jpf} 和粘性阻力 f_{jvf} 构成。定义减阻率

$$\theta=\frac{f_g-f_j}{f_g}\times100\%=\frac{f_{gvf}-(f_{jpf}+f_{jvf}(\mathrm{j})}{f_{gvf}}\times100\%$$

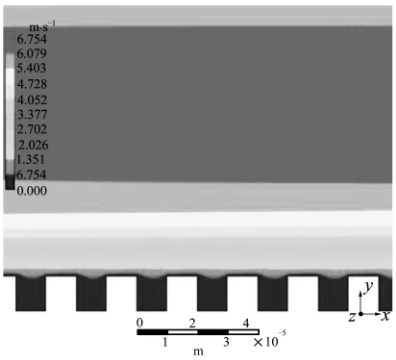
式中 $f_g=f_{gvf}$,$f_j=f_{jpf}+f_{jvf}$,f_g 为光滑壁面上所受的阻力,f_{gvf} 为光滑壁面粘性阻力,f_j 为超疏水表面上所受的阻力,f_{jpf} 为超疏水表面所受压差阻力,f_{jvf} 为超疏水表面所受粘性阻力。

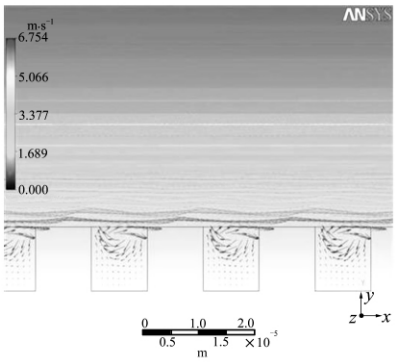
2　超疏水表面流场减阻特性研究

2.1　超疏水表面流场特性研究

根据经典 Cassie 接触模型理论,超疏水表面接触模式为复合接触,气体将会驻留在凹槽内。在本文模拟中,气液交界面出现了动态变化,水进入了凹槽并与气体相互作用,形成了一种亚稳定状态。

在来流速度为 5 m/s 下,超疏水表面的凹槽尺寸固定为肋宽 $l=10$ μm,槽深 $h=10$ μm,槽宽 $w=10$ μm,对其进行数值仿真。超疏水表面流场速度分布云图、超疏水表面近壁面区速度矢量图、超疏水表面近壁面区静压力分布云图、沿流向超疏水表面壁面处速度分布图如图 2 ~ 图 5 所示。





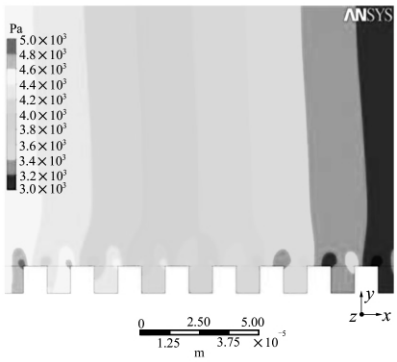


图2　超疏水表面流场速度分布云图　图3　超疏水表面近壁面区速度矢量图　图4　超疏水表面近壁面区静压力分布云图

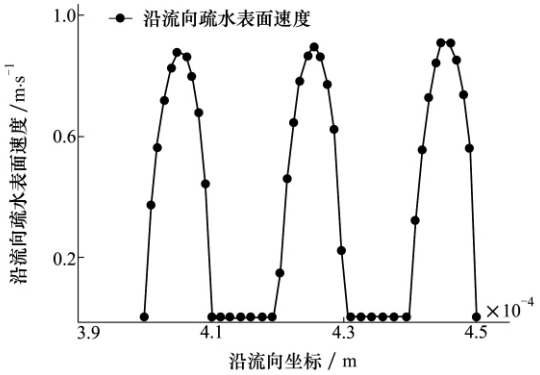


图5　沿流向超疏水表面壁面处速度分布图

由图2可以看到，超疏水表面存在着明显的边界层，近壁面区的速度梯度是产生粘性阻力的主要原因。两无限大平板中间部分流体速度值即为来流速度值，靠近上壁面和超疏水表面流体速度逐渐降低。另外，流场的整体分层结构并未因凹槽的存在而被扰乱，凹槽仅在近壁面区影响流场，这也再次证明建立计算域时所取尺寸的可信度。

由图3看出，当流体流经超疏水表面时，气液交界面并非理想平面，流体在凹槽内形成了低速漩涡，这些漩涡上部速度方向与来流速度方向一致，下部速度方向与来流速度方向相反。低速漩涡的形成对空气在凹槽中的驻留起了重要作用，是影响超疏水表面减阻效果的主要因素。另外，固-液-气三相界面间的表面张力平衡，也对气液交界面稳定的亚稳态起了重要作用。

由图4看出，流场静压力整体分布较为均匀，只在近壁面区受到凹槽的明显影响；另外，在每个凹槽的迎流面处部分区域压强增大，而背流面处部分区域压强较低，说明凹槽不仅产生了内部低速漩涡，还在其附近产生了流场静压力的变化，进而产生了压差阻力，导致凹槽内部形成了图6所示的低速漩涡。

由图5可以看到，超疏水表面处的流动由凹槽处的滑移流动和凹槽之间的无滑移流动构成。凹槽之间是固液交界面，符合经典无滑移边界，壁面速度为零。在凹槽内因驻留有空气，形成无剪切气液交界面，产生了壁面滑移。每个凹槽内部，速度沿来流方向先增大后减小，在凹槽中点附近达到速度峰值。凹槽间隔分布于超疏水表面，凹槽处气液交界面能增大滑移量，凹槽间固液交界面则减小滑移量，因此在达到速度峰值前速度以较大的速度梯度随滑移量的增大而增大，达到速度峰值后滑移速度随滑移量的减小而减小。

2.2　不同凹槽宽度对超疏水表面减阻的影响

在来流速度为5 m/s，超疏水表面的凹槽尺寸固定为肋宽 $l=10$ μm，槽深 $h=10$ μm，槽宽 w 分别取5 μm、10 μm、15 μm、20 μm，对其进行数值仿真。

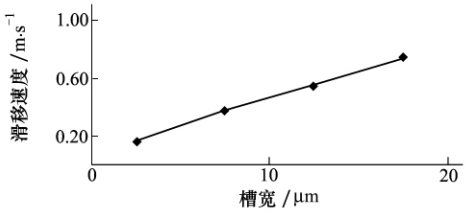


图6　滑移速度与槽宽的关系

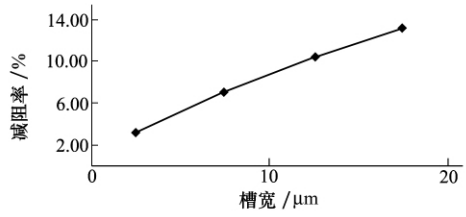


图7　减阻率与槽宽的关系

从图 6、图 7 可以看出,随着凹槽宽度的增加,超疏水表面滑移速度和减阻率均明显增加,并且呈近似线性关系。增大凹槽宽度,必然会导致边界中有滑移部分比例的增加,增大滑移速度,提高减阻率。

2.3　不同凹槽深度对超疏水表面减阻的影响

在来流速度为 5 m/s,超疏水表面的凹槽尺寸固定为槽宽 $w = 10$ μm,肋宽 $l = 10$ μm,槽深 h 分别取 5 μm、7.5 μm、70 μm、12.5 μm、15 μm,对其进行数值仿真。图 8 为滑移速度与槽深的关系,图 9 为减阻率与槽深的关系。

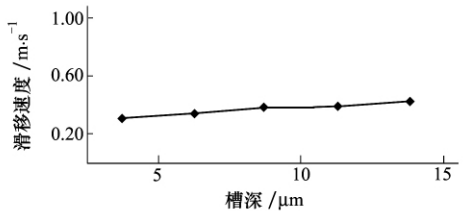


图 8　滑移速度与槽深的关系

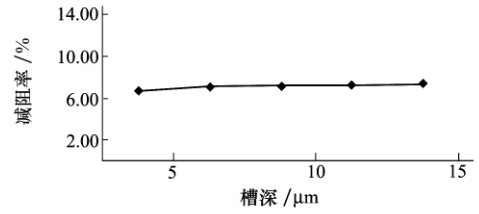


图 9　减阻率与槽深的关系

从图中可以发现,当槽宽不变而凹槽深度在 5 ~ 15 μm 的范围内变化,滑移速度和减阻率基本保持不变。槽深的增大并不影响能产生减阻效果的滑移部分的比例,因此超疏水表面的滑移流动状况基本不受槽深的影响。

2.4　不同来流速度对超疏水表面减阻的影响

超疏水表面的凹槽尺寸固定为槽宽 $w = 10$ μm,肋宽 $l = 10$ μm,槽深 $h = 10$ μm,取来流速度 v 分别为 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s、10 m/s,对其进行数值仿真。图 10 为滑移速度与来流速度的关系,图 11 为减阻率与来流速度的关系。从图中可以看出,当凹槽槽宽和槽深不变时,随着来流速度的增大,滑移速度呈近似线性增大,而减阻率随之减小,特别在来流速度范围为 4 ~ 6 m/s 时减阻率降低的梯度较大。

由图 12 可以看到,在仿真速度范围内总有 $f_g > f_j > f_j$,随着来流速度增大,f_{gvf}、f_{jpf}、f_{jvf} 以及 f_j 不同幅度的增大,且前者曲线比后三者曲线都要陡,其增大幅度比后三者都大。当来流速度增大时,水会更多地进入凹槽内而减小滑移程度,并且近壁面区速度梯度增大,从而导致粘性阻力明显增大。由图 12 可以看到,超疏水表面粘性阻力远大于压差阻力,成为超疏水表面所受阻力的主要部分。在进行具有更高流速来流的仿真中发现,当水流速度足够高时,很难维

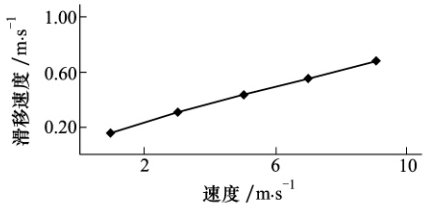


图 10　滑移速度与来流速度的关系

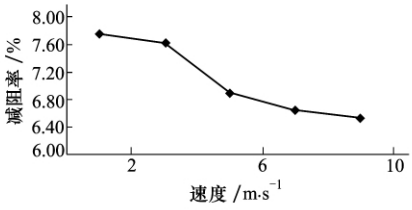


图 11　减阻率与来流速度的关系

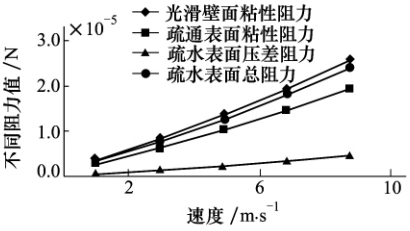


图 12　来流速度与不同表面上不同阻力值的关系

持亚稳态的气液交界面,最终水进入凹槽全部取代空气,转变为 Wenzel 接触模型。

2.5　不同微观结构形状对超疏水表面减阻的影响

固定槽宽 $w = 10$ μm,肋宽为 $l = 10$ μm,取边长为 10 μm 的正三角形组成的 V 形凹槽、直径为 10 μm 的半圆形组成的 U 形凹槽、边长为 10 μm 的矩形凹槽,对其进行数值仿真。图 13 为 3 种不同形状凹槽下滑移速度与来流速度的关系,图 14 为 3 种不同形状凹槽下减阻率与来流速度的关系。

从图 13 中可以看出,3 种不同形状凹槽超疏水表面均能产生壁面滑移,并且滑移速度随来流速度的增大而近似线性的增大。而且,矩形凹槽下的滑移速度明显高于 V 形凹槽和 U 形凹槽,后两者的滑移速度较为接近,说明矩形凹槽能产生更好的滑移

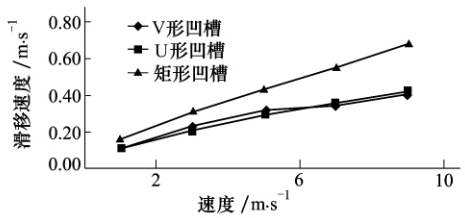


图13 3种不同形状凹槽下滑移速度与来流速度的关系

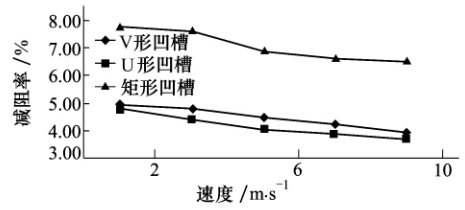


图14 3种不同形状凹槽下减阻率与来流速度的关系

效果。

从图14中可以看出，随着来流速度的增大，3种不同形状凹槽超疏水表面减阻率均不断下降，这与前面2.4节所述的规律相同。而且，矩形凹槽的减阻率明显高于V形凹槽与U形凹槽，这与图15所示的矩形凹槽的滑移速度明显高于V形凹槽和U形凹槽的滑移速度的规律相仿，进一步印证了矩形凹槽能产生更好的滑移和减阻效果。

3 超疏水表面流场减阻机理研究

超疏水表面具有的良好的减阻性能与其表面上的微观凹槽结构密切相关。图15为3种凹槽形状近壁面区速度矢量局部放大图。由图15看出，凹槽内的低速漩涡下部速度方向与来流速度方向相反，因此在凹槽底部产生的摩擦阻力与来流方向相反，摩擦阻力在凹槽底部作为一种附加动力产生了推动效应[9]。

另外，当流体流经超疏水表面时，由于凹槽内部的低速漩涡造成与凹槽外部高速水流之间的气-液接触，形成了涡垫效应[9]，因而产生了滑移流动，交界面处速度梯度减小，使得附着面的层流流态保持得更加稳定，并且减小了气液交界面上的剪切力。上述2种效应的共同作用使得超疏水表面具有优越的减阻性能。

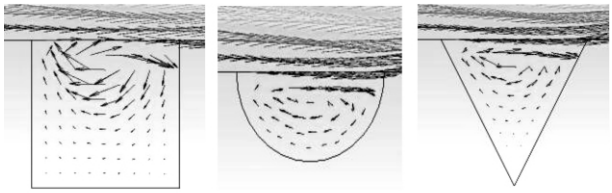


图15 3种凹槽形状近壁面区速度矢量局部放大图

4 结 论

本文开展了在充分发展层流状态下对具有规则微观结构的超疏水表面两无限大平板间流场的数值仿真研究，得到如下结论：

1) 超疏水表面Cassie接触模型中，近壁面区的速度梯度产生粘性阻力，凹槽结构只影响近壁面处的流场结构，而迎流面与背流面的压强差产生了压差阻力进而在凹槽内部形成了低速漩涡，后者对空气在凹槽中的驻留起了重要作用，粘性阻力是超疏水表面所受阻力的主要部分；

2) 超疏水表面的减阻率随凹槽槽宽增大而增大，随来流速度的增大而减小，而受凹槽深度影响不显著；V形凹槽、U形凹槽和矩形凹槽等不同微观结构形状的疏水表面均具有减阻效果，而矩形凹槽能产生更好的减阻效果；

3) 超疏水表面的凹槽内存在低速漩涡，凹槽底部摩擦阻力作为附加动力产生推动效应，并且低速漩涡能形成涡垫效应，减小气液交界面上剪切力，两种效应是超疏水表面具有减阻性的重要原因。

参考文献：

[1] Nishino T, Meguro M, Nakamae K, et al. The Lowest Surface Free Energy Based on-CF3 Alignment. Langmuir, 1999, 15(3): 4321-4323

[2] Wenzel R N. Surface Roughness and Contact Angle (letter). J Phys Colloid Chem, 1949, 53: 1466-1467

[3] Cassie A B D. Contact Angles. J Discuss Faraday Soc, 1948, 3: 11-16

[4] Choi C H, Westin K J A, Breuer K S. Apparent Slip Flow in Hydrophilic and Hydrophobic Microchannels. Physics of Fluids,

2003, 15 (10): 2897-2902

[5] Kevin B Jeffs. Numerical Study of Fully Developed Laminar and Turbulent Flow through Microchannels with Longitudinal Microsturctures. Master Degree Dissertation, Brigham Young University, 2007

[6] 赵士林,刘晓华. 超疏水表面滑移流动的模拟研究. 热科学与技术, 2010, 9(1): 6-10
Zhao ShiLin, Liu XiaoHua. Simulation Research on Super-Hydrophobic Surface Slip Flow. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(1): 6-10 (in Chinese)

[7] 刘占一. 疏水表面减阻特性数值模拟和实验研究 [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2011
Liu ZbanYi. Numerical Simulation and Experiment Research about Drag Reduction Characteristic over Hydrophobic Surfaces, Ph. D. Thesis. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011 (in Chinese)

[8] 景思睿,张鸣远. 流体力学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
Jing Sirui, Zhang MingYuan. Hydromechanics. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001 (in Chinese)

[9] 张成春,任露泉,王　晶. 旋成体仿生凹环表面减阻试验分析及数值模拟. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(1): 100-105
Zhang Chengchun, Ren Luquan, Wang Jing. Experiment and Numerical Simulation on Drag Reduction for Bodies of Revolution Using Bionic Scrobiculate Ringed Surface. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2007, 37(1): 100-105 (in Chinese)

Simulating Flow Field of Superhydrophobic Surface in Laminar Flow to Reduce Its Drag

Song Baowei, Yuan Xiao, Hu Haibao

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To our knowledge, there is almost no paper in the open literature dealing with what is mentioned in the title. Taking into account the micro-structural characteristics of a superhydrophobic surface, we use the Cassie model and the volume of fluid (VOF) model to simulate its flow field in the laminar flow between two infinitively large plates. To do so, we apply structural grids to dividing the computing domain. Then we analyze the drag reduction characteristics of the superhydrophobic surface in terms of velocity distribution, pressure distribution, slide velocity and drag reduction rate. The simulation results, given in Figs. 4 through 17, and their analysis show preliminarily that: (1) there is pressure difference drag near the groove of the superhydrophobic surface, producing a low-speed whirlpool inside the groove and both the thrust effect and the vortex cushion effect; (2) the drag reduction rate of the superhydrophobic surface increases with increasing width of the groove, decreases with increasing space between grooves and increases with increasing flow velocity, but does not increase with increasing depth of the groove; (3) the rectangular groove is more effective for drag reduction than both the V-shape groove and the U-shape groove.

Key words: drag, flow fields, laminar flow, mathematical models, drag reduction, superhydrophobic surface