

文章编号: 0258-1825(2012)02-0233-05

湍流状态下超疏水表面流场减阻特性数值仿真研究

宋东, 胡海豹, 宋保维

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:通过对湍流状态下具有特定微观尺寸的超疏水表面流场进行数值仿真计算,对超疏水表面流场的减阻特性进行了分析。针对超疏水表面矩形微观形貌特点,计算域采用结构化网格进行划分,采用VOF多相流模型,Realizable湍流模型,对超疏水表面流场进行仿真。结果表明:受微观形貌的影响,超疏水表面在宏观上的壁面滑移、微观凹坑处的低剪应力和近壁面的低湍流度是其具有减阻特性的重要原因;超疏水表面减阻特性受凹坑内空气体积比影响很大,但是在凹坑内全充满液体条件下,依然具有减阻效果。

关键词:湍流;超疏水表面;减阻;滑移;空气体积比

中图分类号:V211.3 **文献标识码:**A

0 引言

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,在防水、防污染、防氧化、自清洁等多种领域具有广阔的应用前景,超疏水表面减阻因其巨大的潜在应用价值,近几年引起人们越来越多的关注。影响疏水表面疏水性的因素主要有表面能和微观形貌两方面,而仅仅依靠表面能的光滑疏水表面,根据理论推导最大接触角只能达到 120° ^[1]。要解释自然界中的超疏水现象,还要考虑微观形貌的影响。为此,Cassie等在Wenzel提出的粗糙表面接触模型的基础上提出了气/液接触模式的Cassie模型^[2-3],其理论模型如图1所示。

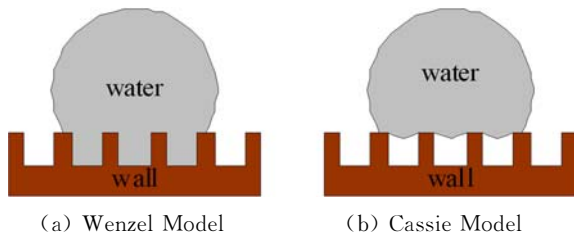


图1 Wenzel模型和Cassie模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Wenzel and Cassie Model

对超疏水表面,由于表面微结构内部滞留气体,使流体流经疏水表面时实际固/液接触面积减小,降低了表面的粘性阻力,从而产生减阻效果^[4]。Ou J.

等^[5]对微脊超疏水表面微通道流动进行了数值模拟,发现微脊空隙的增加和微通道宽度的减少,将减少无量纲压降比,减弱滑移效果,并且在自由剪切面处获得了大于主流平均速度60%的滑移速度,但是滑移速度对流动的影响不会向远离壁面处扩展。李健等^[6]根据固/液界面的复合接触模式,考察了液体在光栅疏水表面上的流动,数值模拟得到了管道内流体的速度分布、压强分布和减阻情况,计算结果表明,流体在光滑与光栅疏水表面构成的管道中的压强分布存在一定差异,光栅疏水表面具有一定的减阻性能。然而超疏水表面在湍流状态下是否具有减阻效果仍存在争议^[7-8],Kim等人采用直接数值模拟的方法(DNS)对此进行了研究,发现湍流流动边界层流向上的滑移是流动阻力减小的原因,而展向上的滑移流动则会造阻力增大,要想在湍流流动中获得明显的减阻效果,必须使流向上的滑移长度大于某一特定的值;国内的吕田等^[9]对具有纵向微观结构的疏水表面圆管内湍流流动特性进行了研究,发现其流场中存在临界雷诺数(Re),当 Re 大于此临界值时,超疏水性圆管内的湍流流动表现为减阻;反之则表现为增阻,并认为超疏水表面无滑移壁面与自由剪切面的综合效果是导致这一现象的主要原因。

本文在湍流状态下对具有横向微观结构超疏水表面的两无限大平板间流场进行了数值仿真,从壁面

* 收稿日期:2011-01-23; 修订日期:2011-05-12

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838009);国家自然科学基金(51109178);西北工业大学博士论文创新基金

作者简介:宋东(1987-),男,山东省潍坊市人,博士研究生,研究方向为流体力学. E-mail: songdong1226@163.com

剪应力、压强分布、壁面滑移等方面,分析了超疏水表面减阻机理,并研究了微观结构内不同气体体积分数对超疏水表面减阻的影响。

1 数值仿真方法

1.1 计算域及其网格的生成

本文基于不连续气层滑移流动假设,对充分发展的两无限大平板间流场进行仿真。平板间距为2mm,在计算域的入口和出口段各取0.5mm的平板段,超疏水区域长度为1mm;微观结构尺寸取 $s=0.01\text{mm}$, $w=h=0.015\text{mm}$ 。具体尺寸如图2所示。

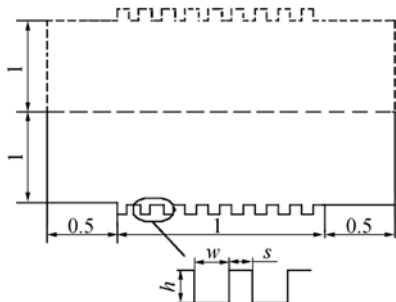


图2 计算域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computational domain

计算域采用结构化四边形网格进行网格划分,并对近壁面和超疏水表面区域网格进行加密处理。近壁面计算域网格划分如图3所示。

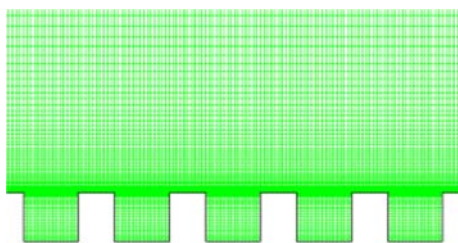


图3 超疏水表面近壁面网格

Fig. 3 Illustration of grid near superhydrophobic surface

1.2 数学模型

本文使用商用流体计算软件 FLUENT, 采用 VOF 多相流模型, 对超疏水表面流场进行仿真。VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法, 在该模型中, 不同的流体组分共用着一套动量方程, 计算时在全流场的每个计算单元内, 都记录下各相组分所占有的体积率^[10]。

跟踪相之间的界面是通过求解一相或多相的容积比率的连续方程来完成的。对第 q 相, 这个方程如下:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\alpha_q} \quad (1)$$

其中第 q 相流体的容积比率记为 α_q 。容积比率方程不是为主相求解的, 主相容积比率的计算基于如下的约束:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

在输运方程中各项属性是由存在于每一控制容积中的分相决定的。在气/液两相流系统中, 用下标 a 和 w 分别表示气相和水相, 如果水相的容积比率被跟踪, 那么每一单元中的密度由下式给出:

$$\rho = \sum \alpha_i \rho_i = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (3)$$

所有的其它属性(如粘度)都以这种方式计算。

控制方程采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程+湍流模型方法, 其中湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 两方程模型, 具体方程可参考文献[11]。

1.3 边界条件

本文中两无限大平板间流体介质为水, 密度 998.2kg/m^3 , 动力粘性系数 $0.001003\text{Pa} \cdot \text{s}$, 超疏水表面凹坑内部为理想空气, 密度 1.225kg/m^3 , 动力粘性系数 $0.000017894\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。对于超疏水表面的滑移流动, 微观形貌处气/液界面的曲率十分微小^[12], 假定气/液界面为一平面。入口法向速度分布采用幂函数形式定义, 具体表达式为:

$$\frac{U}{U_{\max}} = \left(\frac{r}{R} \right)^7 \quad (4)$$

法向截面平均速度取: 2m/s , 4m/s , 6m/s , 8m/s , 出口为自由流, 壁面为无滑移边界条件。

通过对比相同大小的超疏水表面和光滑表面所受总阻力(粘性阻力和压差阻力之和), 来评价减阻效果。其中, 减阻量:

$$\eta = \frac{F_{pl} - F_{hy}}{F_{pl}} \quad (5)$$

F_{pl} 、 F_{hy} 分别为光滑表面和超疏水表面所受总阻力。

2 数值仿真结果及分析

2.1 超疏水表面流场减阻特性分析

在 $V=6\text{m/s}$ 来流速度下, 对微观尺寸为 $s=0.01\text{mm}$, $w=h=0.015\text{mm}$ 的超疏水表面流场进行仿真, 图4、图5、图6分别为近壁面的速度矢量图、壁面剪应力曲线、近壁面压强分布云图。

可以看出由于表面微观形貌的存在, 凹坑内部形成了明显的涡, 使得凹坑内部的流体流向与外部相反, 凹坑底部所受剪应力与总阻力方向相反, 在一定程度上减小了超疏水表面的粘性阻力。另一方面, 从

图 5(壁面剪应力分布曲线)可以看出,尽管凹坑间壁面剪应力要比光滑平板的大,但凹坑处壁面剪应力几乎为零(这点与文献 9 中的顺流向微观结构超疏水表面流场仿真结果类似),由于凹坑区域要比凹坑间区域大,因此超疏水表面总的剪应力要比光滑表面小很多,即超疏水表面的粘性阻力要比光滑表面的小,具体受力值如表 1 所示。

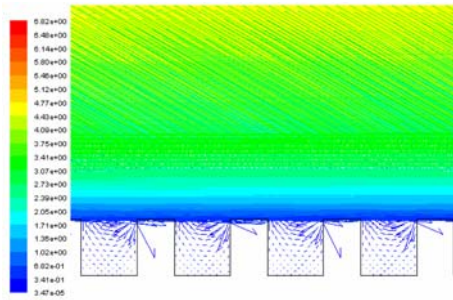


图 4 超疏水表面近壁面速度矢量图
Fig. 4 Illustration of velocity vector field near superhydrophobic surface

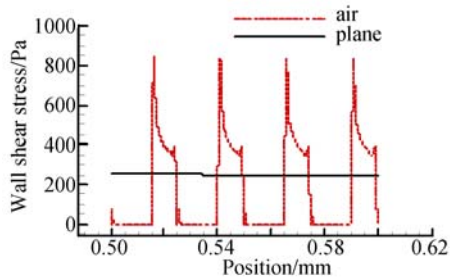


图 5 超疏水表面和光滑表面剪应力曲线
Fig. 5 Wall shear stress of superhydrophobic/plane surface

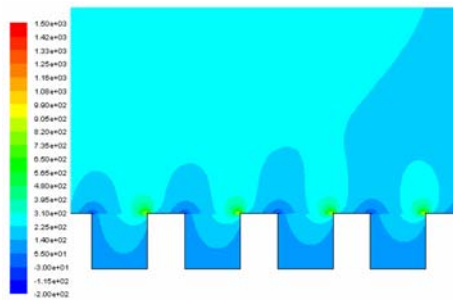


图 6 疏水表面近壁面压强分布云图
Fig. 6 Illustration of static pressure near superhydrophobic surface

表 1 不同速度下超疏水/光滑表面受力

Table 1 The value of the force on superhydrophobic/plane surface at different velocity

速度 (m/s)	光滑表面(N)		疏水表面(N)		减阻率 η
	粘性阻力	压差阻力	粘性阻力	总阻力	
2	0.047307	0.00700975	0.03744484	0.044455	6.03%
4	0.137777	0.02145688	0.10760183	0.129059	6.33%
6	0.256907	0.041143572	0.19889868	0.240334	6.45%
8	0.400825	0.06653393	0.30810908	0.374643	6.53%

从图 6 可以看出,凹坑被流面和迎流面处分别有一个压强减小和压强增大区域,从而导致疏水表面产生压差阻力。因此,疏水表面的减阻效果,受压差阻力和粘性阻力共同影响。从表 1 可以看出。尽管疏水表面有一定的压差阻力,但其粘性阻力要比光滑表面的小很多,总的受力小于光滑表面,整体上产生减阻效果。图 7~图 9 为沿法向的速度和湍动能分布曲线。从图 7 可以看出,疏水表面壁面处的流动明显分为两种:凹坑中间的滑移流动和凹坑之间的无滑移流动。这两种流动状况有显著的差别,凹坑之间的部分为固液接触面,壁面处速度为零,速度梯度大;而凹坑中间的部分,内部形成大小与微观结构尺寸相当的低速涡,气/液界面处速度不为零,壁面处的速度梯度小,产生宏观上的壁面滑移。

图 8、图 9 中,在远离壁面处疏水表面和光滑表面的流场速度、湍动能分布曲线基本重合,所以微观形貌对疏水表面流场的影响区域主要集中在近壁区内,尤其在边界层内,疏水表面的速度要比光滑表面的速度大,湍动能要比光滑表面的小。有资料表明,约有 80% 的湍流能量产生和耗散于近壁区内^[13],因此,疏水表面的微观结构,通过减弱近壁区的湍流脉动,产生减阻效果。

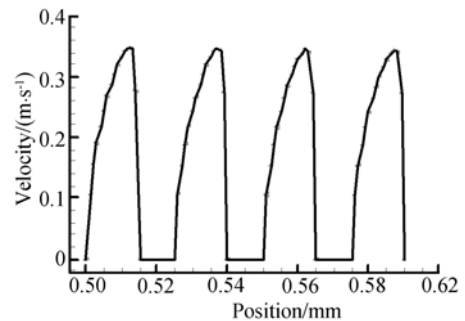


图 7 疏水表面壁面处沿流向速度分布
Fig. 7 Velocity of hydrophobic surface in flowing direction

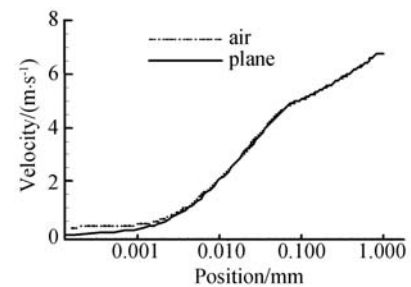


图 8 疏水表面和光滑表面微通道内法向速度分布对数曲线
Fig. 8 Velocity of hydrophobic and common surfaces along the line perpendicular to the flowing direction

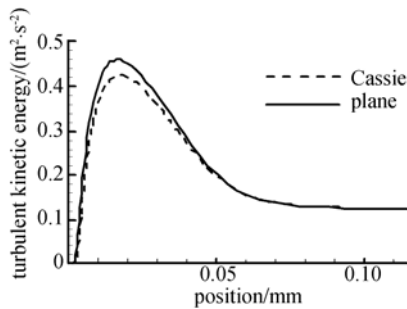


图 9 疏水表面和光滑表面近壁面法向湍动能分布曲线
Fig. 9 Turbulent kinetic energy of hydrophobic and common surfaces along the line perpendicular to the flowing direction

2.2 凹坑内不同气体体积分数对疏水表面减阻的影响

实际中疏水表面凹坑内部全充满空气的假设不一定是合理的,受流场压力、凹坑尺寸、气/液界面处表面张力等多方面影响,液体有可能“充入”凹坑内部,使流场特性发生变化,为此,本文对微观形貌尺寸为 $s=0.01\text{mm}$, $w=h=0.015\text{mm}$, 其内充满不同体积气体(空气高度在 $0.015\text{mm}\sim 0.008\text{mm}$ 之间)的疏水表面流场,在 $V=6\text{m/s}$ 来流速度下进行仿真。图 10 为凹坑内全充满空气(a)和空气高度为 0.013mm (b)的流场静压力分布局部放大云图;图 11 和图 12 分别为减阻率和压差阻力随凹坑内气体体积减小的变化规律曲线。

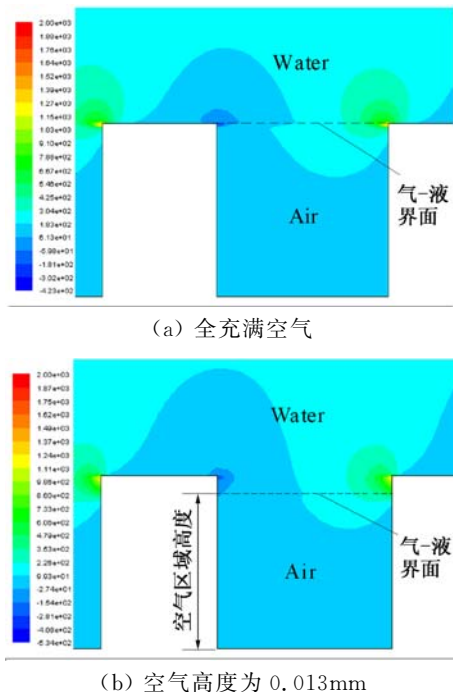


图 10 疏水表面静压力分布局部放大云图
Fig. 10 Illustration of static pressure near the superhydrophobic surface

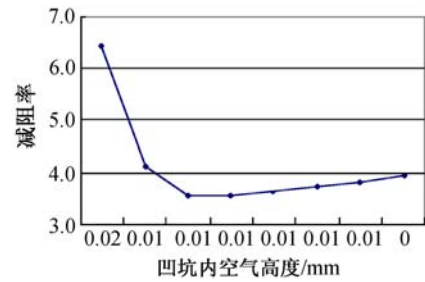


图 11 减阻率随气体体积变化
Fig. 11 Value of drag reduction ratio as a function of the height of air region

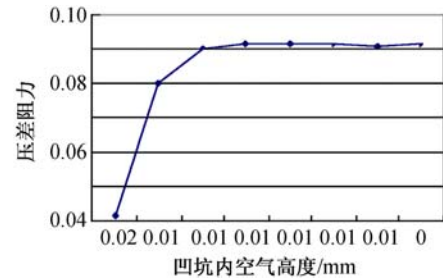


图 12 疏水表面压差阻力随气体体积变化
Fig. 12 Value of pressure drag as a function of the height of air region

随着凹坑内空气体积比的减小,疏水表面减阻效果先急剧下降然后后非常缓慢地增加。其中在全充满空气和气体高度下降 0.002mm 之间,减阻率出现较大的下降。从图 10 可以看出,这主要是因为在全充满水的状态下,随着气/液界面的降低,局部压强增大和减小区域的位置随之降低,从而增大了压差阻力,使得壁面受力增大,减阻率减低;当气/液界面下降到一定高度后,凹坑内部局部压强增大和减小区域的大小和位置已不再变化,即对压差阻力影响已很小,整体减阻效果变化速度随之变慢。从图 11 可以看出,即使当凹坑内全充满液体时,疏水表面依然具有减阻效果,这方面的减阻机理有待进一步研究。

3 结论

本文对固定尺寸的疏水表面流场进行了数值仿真计算,并从壁面滑移、湍流度,微观形貌处的压差阻力和壁面剪应力两方面对疏水表面流场减阻特性和机理进行了分析;并对微观形貌凹坑内部不同空气体积比的疏水表面减阻特性进行分析,得出:

- (1) 疏水表面宏观上的滑移和近壁面的低湍流度是其具有减阻特性的重要原因;同时由于微观形貌产生的压差阻力,要小于粘性阻力的减小值,整体上产生减阻效果。

(2) 随着凹坑内空气体积比的减小,疏水表面减阻效果先急剧增大后非常缓慢的减小,这种变化主要是由压差阻力变化所致;并且即使凹坑内部全充满液体,疏水表面依然具有减阻效果。

参 考 文 献:

- [1] NISHINO T, MEGURO M, NAKAMAE K, et al. The lowest surface free energy based on-CF₃ alignment[J]. *Langmuir*, 1999, 15(3): 4 321-4 323.
- [2] WENZEL R N. Surface roughness and contact angle(letter)[J]. *J. Phys. Colloid Chem.*, 1949, 53: 1466-1467.
- [3] CASSIE A B D. Contact angles[J]. *Transactions of the Faraday Soc.*, 1948, 44(3): 11-16.
- [4] CHOI C H, WESTIN K J A, BREUER K S. Apparent slip flow in hydrophilic and hydrophobic microchannels [J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 2897-2902.
- [5] OU J, ROTHSTEIN J P. Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces [J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17(10): 103606(10).
- [6] 李健,周明,蔡兰,等. 微结构表面上流体流动的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2605-2608.
- [7] WATANABE KEIZO, YANUAR, UDAGAWA HIROSHI. Drag reduction of newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall [J]. *J. Fluid Mech.*, 2002, 381: 225-238.
- [8] HENOCH C, KRUPENKIN T N, KOLODNER P, et al. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces [C]. 3rd AIAA Flow Control Conference, June, 2006, San Francisco, California.
- [9] 吕田,陈晓玲. 超疏水性圆管湍流减阻的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(8): 1280-1283.
- [10] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008.
- [11] 朱红钧. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [12] QU J, PEROT B, RPTJSTEOM J P. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces[J]. *Phys. Fluids*, 2004, 16(12): 4635-4643.
- [13] KLNIE S, ROBINSON S. Near-wall turbulence[A]. 1988 Zoran Zaric Memorial Conference[C]. Edited by KLINES, AFGAN N. Hemisphere, New York, 1990 (07): 220-230.

Numerical simulation of drag reduction of superhydrophobic surface in turbulent channel flow

SONG Dong, HU Hai-bao, SONG Bao-wei

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

Abstract: The turbulent flow in a channel with superhydrophobic surface was studied by numerical simulation, and the drag of the surface was analyzed. We applied structural grid to grid the field, and VOF model and Realizable $k-\epsilon$ turbulent model to make the simulation. It shows that; the wall slip and low turbulent energe near the wall are the importment factors that make the drag of hydrophobic surface reduced; the volume of the air in the cavity influences the drag of superhydrophobic surface obviously, however, the drag reduction still exit even if the cavity were full of water.

Key words: turbulent flow; superhydrophobic surface; drag reduction; slip velocity; volume of air