

基于微空泡效应的疏水性展向微沟槽表面水下减阻研究*

王宝 汪家道† 陈大融

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2013年10月11日收到; 2013年12月30日收到修改稿)

超疏水表面在水下的减阻效果随着来流冲刷时间的增加会逐渐减小甚至会出现粗糙增阻的现象, 而这种现象的本质在于超疏水表面裂隙中驻留的气相结构在来流的作用下会不断地从表面脱离. 针对超疏水表面的裂隙中驻留的气相结构在水下不稳定的情况. 本文通过对表面微结构的设计, 利用疏水性展向微沟槽结构使驻留在沟槽内部的气相结构被相邻沟槽间的脊状结构挡住, 从而不能轻易的被水流冲刷掉. 实验结果表明该表面不仅能使气相结构在表面微结构内稳定驻留, 而且基于稳定驻留在表面结构内的气相结构, 在来流作用下会有新的气相结构生成. 虽然表面上不稳定的气相结构会随流速的增加而加剧地脱离表面, 但是可再生的气相结构能够补充由于冲刷从表面脱离的气体. 最终在固/液界面间构建相对稳定的气模. 通过粒子图像测速系统(PIV)对近壁面流场进行分析, 可得到大于15%的速度滑移量.

关键词: 水下减阻, 气相结构, 疏水性微沟槽表面, 滑移

PACS: 47.85.lb, 47.55.Ca

DOI: 10.7498/aps.63.074702

1 引言

水面舰船、水下航行体所受阻力主要包括压差阻力、兴波阻力及摩擦阻力其中摩擦阻力占最主要部分, 约占总阻力的50%—80% [1,2]. 因此, 降低表面摩擦阻力, 对于提高水面舰船及水下航行体的航速, 增加其航程, 提升战斗性能等有着重要的军事意义; 对于节约航运过程中的能源消耗, 增强管道运输能力等也具有极其重要的经济意义.

目前, 为减小航行体的表面摩擦阻力, 很多方法通过实现对近壁面流场结构的改变, 从而减低近壁面流场速度梯度实现减小阻力的目的, 如表面微结构 [3]、聚合物添加剂 [4] 及外加电磁场 [5,6]. 因气体的粘度要远小于水, 为了实现水面及水下航行体高效的减阻 [7-9], 人们开始关注水下气相结构减阻技术. 如果能在固/液界面间构建气相结构, 产生壁面滑移, 其摩擦阻力将大幅下降. 为了获得液固界

面间的气相结构实现减阻, 人们尝试了通过注入、热解、电解等多种主动产生气相结构的方法. 实验表明利用空气注入的方式船模整体阻力减小最大达14%, 局部摩擦阻力最高可达60% [2]. Vakarelski等 [10] 利用加热的金属球表面在水中形成蒸汽层, 获得了85%的减阻效果. 此外, 电解的方式也被用在固/液界面处构造稳定的气相结构 [11-13]. 这些主动的方法可以实现高效的减阻效果, 但需要额外的空气发生装置或能量供应, 这限制了主动气相结构减阻方法在实际中的应用.

为了克服以上这些缺点, 人们开始关注超疏水表面在液固界面减阻中的可能应用. Watanabe等 [14] 以加入氟铝酸烷与疏水硅涂层的丙烯酸酯为涂层材料, 接触角 150° , 在断面流速为0.093—0.156 m/s时, 获得约14%的减阻率. 田军等 [15] 以改性硅橡胶和聚氨酯为涂层材料, 接触角 164° , 在9 m/s以下水流实验中获得了18%—30%

* 国家自然科学基金(批准号: 51075228, 51021064)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangbao09@mails.tsinghua.edu.cn

的减阻率. Lee等^[16,17]在二元复合的超疏水形貌上利用流变仪获得了185 μm, 最大为400 μm的滑移长度. Choi等^[18,19]基于流变仪, 在规则排列的圆锥形纳米结构超疏水表面上获得了20 μm的滑移长度. Tsai等^[20]利用Micro-PIV研究了在层流条件下超疏水表面的流场情况, 并直接获得了3 μm的滑移长度.

虽然超疏水表面在一定条件下能够使气相结构在表面的裂隙中驻留, 但这种表面微结构是基于获得超疏水效应的目的而设计和制造的, 表面气相结构在水中是不稳定的, 随着浸入水中的时间和剪切速度的增加, 气相结构会逐渐消失, 减阻效果也将逐渐减小, 并最终会可能出现因表面粗糙而增阻的现象^[21]. 目前研究结果表明, 很多超疏水表面在静水中能够使气相结构在其表面微结构内驻留几十小时甚至更久, 但在水流中其表面气相结构会在几分钟内从表面脱离, 并且气相结构的脱离随水流速度增高而加剧^[22,23]. 气相结构的不稳定性限制了超疏水表面在水下减阻领域的实际应用. 因此如何在液气界面构建稳定的气相结构对获得有效的减阻效果有着重要意义.

本文设计了一种疏水性展向微沟槽结构表面使气相结构在沟槽内稳定驻留, 并在水流中对表面气相结构进行直接观测. 最后通过粒子图像测速(PIV)系统研究近壁面流场状态, 从而对疏水性微沟槽表面的减阻效果进行分析.

2 实验方法

2.1 表面形貌设计

为在固/液界面间构建稳定的气相结构, 气相结构必须在表面微结构内稳定的驻留而不能被来流从表面直接冲刷掉. 因此我们希望利用展向微沟槽结构实现气相结构在表面微观结构内稳定驻留. 与普通超疏水表面不同, 该结构在来流的作用下, 相邻沟槽间的脊状结构有效的阻挡了沟槽内气体被水流带走. 此外, 为实现表面微结构在水下不被直接浸润, 微沟槽的几何形状及表面疏水性能都要满足一定要求. 如图1所示为一个周期的沟槽截面示意图.

对于图1中所示的沟槽结构, 基于Laplace-Young方程, 液/气界面的表面张力可承受一定

的液相与气相之间的压力差, 其关系可描述为

$$P_L - P_G = \sigma/R, \quad (1)$$

式中, P_L 为液相压力; P_G 为气相压力; σ 为液/气界面表面张力; R 为液/气界面的曲率半径. 真实的表面接触角 θ_0 仅由其表面能决定, 对于同一表面真实接触角是不变的. 考虑到实际上沟槽边缘处存在圆角(如图1中插图A中所示), 液/气界面相对于理论上理想的几何形状(如图1插图A中虚线所示)的表观接触角 θ_a 会因三相接触线在圆弧段的位置不同而变化. 由如图1所示为展向微沟槽的几何形状, 忽略沟槽边缘圆弧半径对沟槽开口宽度 D 的影响, 经简单的几何计算可得

$$R = D/2 \cos(\pi - \theta_a + \alpha), \quad (2)$$

式中, D 为沟槽开口宽度; θ_a 为表观接触角; α 为沟槽斜边倾角; 当液相压力增加时, 三相接触线位置会在沟槽边缘圆弧处向下发生微小变化, 从而导致表观接触角 θ_a 增加, 但表观接触角的最大值为真实接触角 θ_0 . 如果液相压力继续增加, 三相接触线会移动到沟槽侧面上, 即液体侵入到沟槽之中. 将(2)式代入(1)式中可得

$$P_L - P_G = 2\sigma \cos(\pi - \theta_a + \alpha)/d, \quad (3)$$

式中 d 为同一沟槽内三相接触线间的距离. 由(3)式可知, 液/气界面所能承受的最大压力差由沟槽开口宽度及真实表面接触角(表观接触角的最大值)决定. 如果液体为水($\sigma = 0.0727$ N/m, 20°C , $\theta_0 = 115^\circ$, $\alpha = 10^\circ$) 沟槽开口宽度为 $10 \mu\text{m}$, 此时液/气界面所能承受的压力差为 0.003 MPa. 在这种条件下, 由于流动引起界面处压力变化的最大值不超过该值, 液相将不能浸润到沟槽内部.

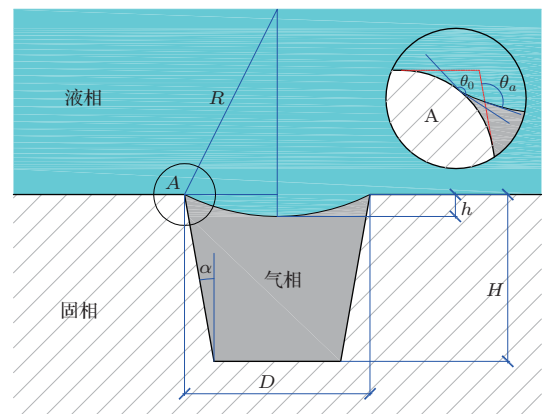


图1 液下微沟槽内气相结构示意图

2.2 表面加工及改性处理

根据上述表面结构的设计, 利用高速切削的方法在管状的硬铝试样(外径为 39 mm, 长度为 325 mm)上加工展向微沟槽. 如图 2(a)所示, 沟槽横截面为倒梯形, 沟槽开口宽度为 13 μm , 深度为 12 μm , 沟槽斜面与上下底面的铅垂面夹角为 10° . 表面疏水性能也是沟槽不被液体浸润的必要条件, 因此为实现在固壁面微结构内构件稳定的气相结构, 固壁表面疏水性能也需要提高. 作为低表面能材料, FAS-17, 分子式 $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7(\text{CH}_2)_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$, 广泛用于各种疏水性表面的表面修饰. 我们选用该涂层来提高试样表面疏水性能. 将 FAS-17 溶到己烷中室温下搅拌 12 h, 得到质量分数 3% 的 FAS-17 的正己烷溶液. 将准备好的试样在室温下浸泡在 FAS-17 溶液里 24 h. 然后在空气中晾干, 再在烤箱里加热到 100°C , 持续 1 h^[24]. 如图 2(b)和(c)所示, 液滴在硬铝基底的光滑试样表面 ($R_a < 0.8$), 其接触角为 65° , 经 FAS-17 修饰后的平板试样的接触角达到 115° , 根据已有研究结果^[25], 该表面微沟槽能使气相结构在微沟槽内存在, 不被液体浸润.

2.3 实验设备

为研究疏水性展向微沟槽表面在水下能否获

得相对稳定的气相结构, 我们在矩形管路中对表面状态进行直接的观测. 如图 3(a)所示, 该流动管道长 40 mm, 横截面为 $35\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的矩形, 从管状试样切下的小试样被镶嵌在通道底面, 水在泵的驱动作用下垂直流过微沟槽结构表面. 流动过程中, 透过测试段上端的光学玻璃, CCD 可记录试样表面的状态. 此外为研究该表面的能否实现减阻效果, 通过 PIV 测试, 我们也分析了光滑表面和疏水性微沟槽表面的近壁面流场. PIV 流场分析系统包括, 双脉冲激光器(最短时间间隔为 200 ns), 同步器, 相机及流场分析软件. 测试过程中, 作为示踪粒子, 荧光颗粒以适当比例添加在水中用来表征流体的运动, 双脉冲激光器产生片光源(波长 532 nm)使待测面内的荧光颗粒(聚苯乙烯: 入射光为绿光, 波长 532; 激发出红光, 波长 598)激发出红光. 如图 3(b)所示, 相机在同步器作用下通过测试段侧面光学玻璃窗口分别记录下两次激光脉冲时荧光粒子的位置. 拍摄过程中, 安装在相机镜头前带通的滤光片(可通过的波长范围: 588—608 nm)使噪声信号不能被相机接受, 只有荧光颗粒在激光作用下激发出的红光信号能够被相机记录, 这使得测试结果更加准确. 最后通过流场分析软件进行互相关计算来获得两激光脉冲时间间隔内荧光颗粒的运动矢量, 最终得到拍摄区域的流场状态.

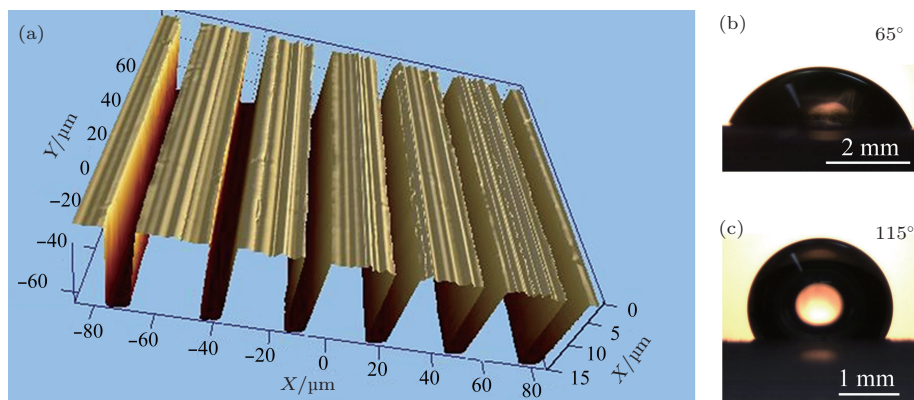


图2 (a) 沟槽结构表面三维形貌; (b) 光滑基底材料表面接触角; (c) 经 FAS-17 修饰后表面接触角

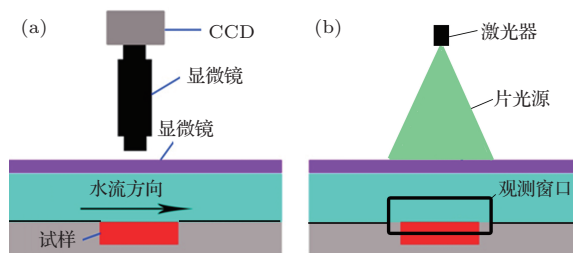


图3 (a) 试样表面状态观测试验装置示意图; (b) PIV 试验装置示意图

3 结果与讨论

3.1 表面气相结构观测

由于液气界面反光, 水下气相结构会呈现高亮度状态^[26], 如图4所示, 表面气相结构的观测结果表明, 在流速为1.75 m/s的来流作用下, 疏水性沟槽试样表面, 亮度较高的条带纹没有变化, 这表明疏水性微沟槽表面能够使气体在微结构内稳定驻留. 不仅如此, 如图4所示, 由于微沟槽内存在稳定

的气相结构, 在来流作用下, 气相结构在试样表面会有明显的变化, 表面气泡随着流动作用的时间增加逐渐长大, 当气泡尺寸达到足够大时, 气泡被水流从试样表面冲刷掉. 当气泡消失后, 会有新的气泡产生并且重复上述过程. 该实验现象表明, 在来流作用下, 表面气相结构会在微沟槽内稳定存在, 并且会有气相结构源源不断地产生. 此外, 未做疏水处理沟槽表面在水下会被直接浸润, 并且不会观测到表面气相结构的存在, 因此微沟槽内驻留的气相结构是进一步自发生成气相结构的必要条件.

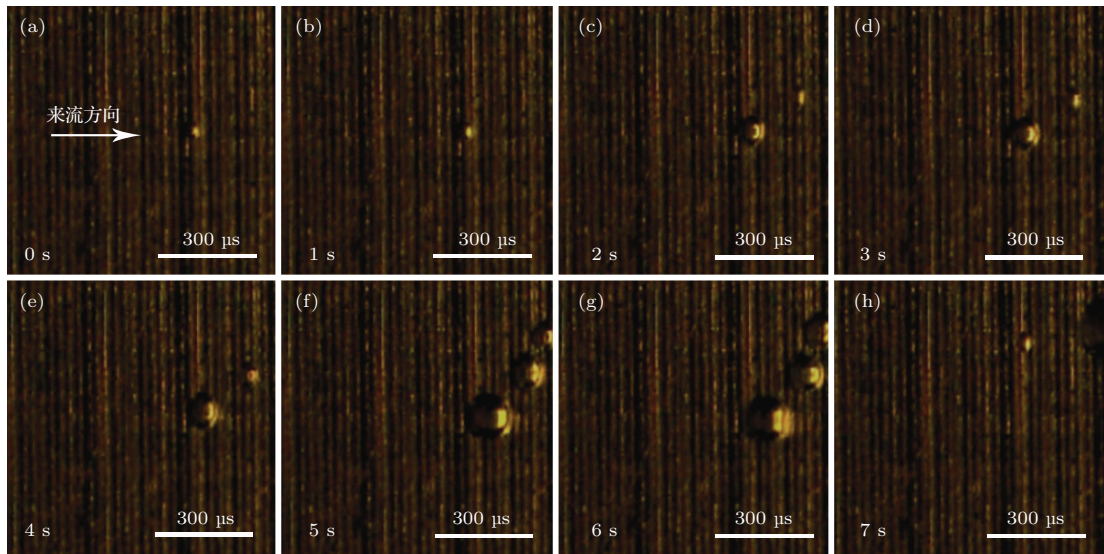


图4 疏水性展向微沟槽表面状态

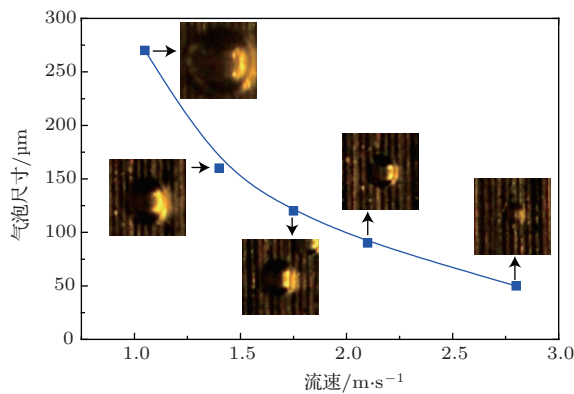


图5 不同流速条件其表面气泡尺寸

在表面气泡生成、长大、脱落的过程中, 气泡在脱落之前达到的最大尺寸随着流速的增加而减小. 如图5所示, 微气泡尺寸由几百微米(流速为0.75 m/s)减小到几十微米(流速为2.75 m/s). 该现象可归咎为表面张力与流动带来使气泡脱离表面的剪切应力之间相互竞争的结果. 气泡在表面受到的

阻力可有气泡在流动中的前进角、后退角及气泡尺寸决定, 由接触角滞后现象可知气泡受到的阻力可描述为^[27]

$$F = L\sigma(\cos \theta_R - \cos \theta_A), \quad (4)$$

式中, F 为壁面对气泡的阻力; L 为气泡宽度; σ 为液气界面的表面张力; θ_R 为后退角; θ_A 为前进角. 气泡在脱离表面的过程中其状态由固壁面及流体特性决定, 气泡受到的阻力组要取决于气泡的尺寸及表面物理特性. 而气泡受流体的冲刷带来的剪切应力不仅取决于气泡的尺寸及状态, 而且受到流速的影响. 随着流速增加气泡受到的冲刷力逐渐增加, 当流速较低, 冲刷力不足以使得一定尺寸的气泡重表面脱离, 当流速增加, 气泡受到的冲刷力增大, 最终平衡壁面给气泡带来的阻力使得气泡在表面发生移动. 当流速足够高时(3 m/s以上)表面上明显的气泡不能被直接观测到, 取而代之的是表面明暗交替变换. 这说明当气相结构受到来流带

来的剪切应力足够大时,生成的气相结构在形成明显气泡前被冲刷掉.随着流速提高,表面不断交替的明暗变换的频率增快.这表明:虽然表面不稳定的气相结构被来流不断地冲刷掉,而且随着流速增加气相减少的速度也提高,但是气相结构重新生成的速率也随着流速的增加而提高,从而补充了表面气相结构的损失,最终在表面构建相对稳定的气相结构.

3.2 近壁面流场分析

为了验证该表面气相结构可获得有效的水下减阻效果,我们对该表面近壁面流场进行分析.PIV作为一种无干涉的流场测试手段在流场分析

中得到广泛的应用.根据气相结构在疏水性微沟槽表面的尺寸,我们选用直径为 $6.8\ \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯球作为示踪粒子,互相关计算中查询窗口为 $32\ \text{像素}\times 32\ \text{像素}$,对应尺寸为 $120\ \mu\text{m}\times 120\ \mu\text{m}$;根据待测流场速度情况优化激光脉冲时间间隔为 $20\ \mu\text{s}$.如图6(a)所示,作为对比基准的光滑表面被多次测试,其近壁面的速度分布曲线复合无滑移的边界条件,如图6(b)所示,疏水性微沟槽表面的近壁面流场整体分布在主流速度一致的情况下在距壁面一定高度以上与光滑表面速度分布基本一致.通过数据分析,如图6(c)所示,疏水性微沟槽表面在距测试表面 $60\ \mu\text{m}$ 处获得15%的速度滑移量.这个明显的滑移效果表面,如图6(d)所示的气相结构可在水下获得明显的减阻效果.

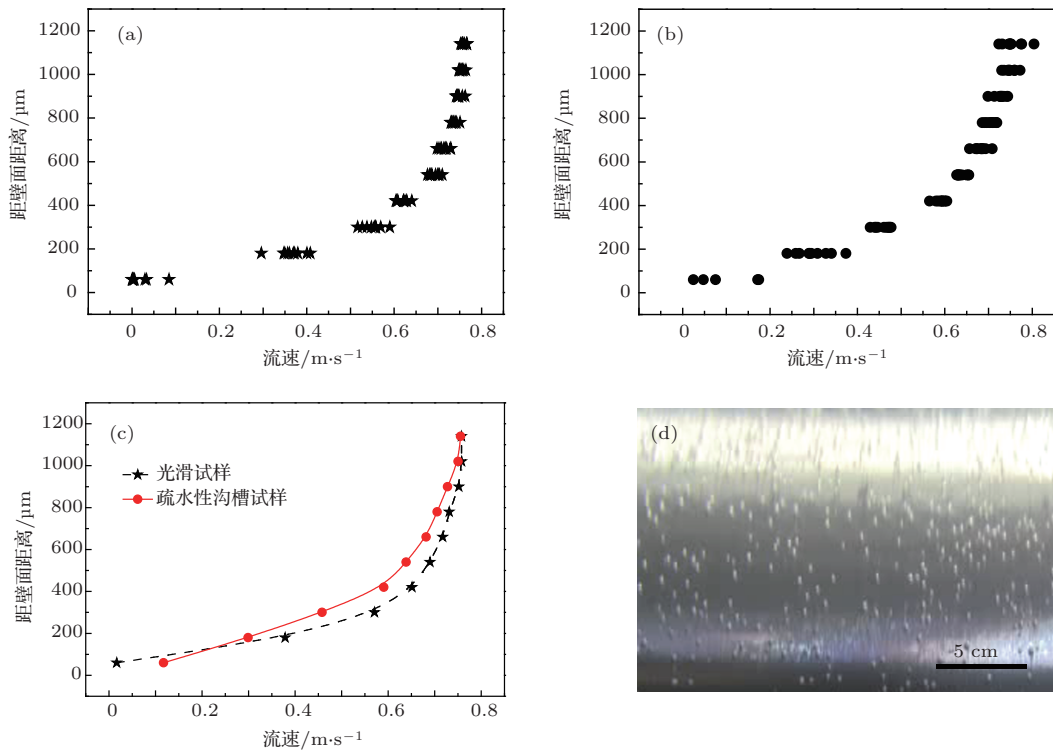


图6 (a)光滑表面速度分布曲线测试结果; (b)疏水性微沟槽表面速度分布曲线测试结果; (c)光滑表面与疏水性微沟槽表面速度分布曲线; (d)PIV测试过程中表面气相状态

在不同流速作用下,该表面的气相结构呈现不同的状态.已有的研究表明,疏水表面可获得有效的减阻效果,但这种减阻效果随着测试时间的增加及流速的增加逐渐减小^[26,28].该现象主要是由于表面气相结构不稳定,在随着测试时间与流速增加时,表面气相结构逐渐消失导致减阻效果减小甚至消失^[21].疏水性微沟槽表面可获得表面气相结构不断生成来补充由于液体冲刷带来的气体损失,最终在表面获得相对稳定的气相结构.虽然,

疏水性微沟槽表面在水流作用下自发生成气相结构的机理目前还不明确,初步推测为基于稳定驻留在表面微结构内的气相结构,在流动作用下液气界面的蒸发效应加剧,但是可再生的气相结构使得该表面在10 h甚至更长时间内获得稳定的表面气相结构从而实现水下有效的减阻效果.并且随着流速增加过程中,疏水性沟槽表面的气相结构不同,气相结构脱离的速率也明显增加,但与此同时气相结构生成的速率也同样增加,最终实现在较高流速条

件下气相结构在该表面能稳定存在. 如图7所示, 疏水性微沟槽表面在主流速度为0.75—4.75 m/s过程中, 可获得有效的减阻效果.

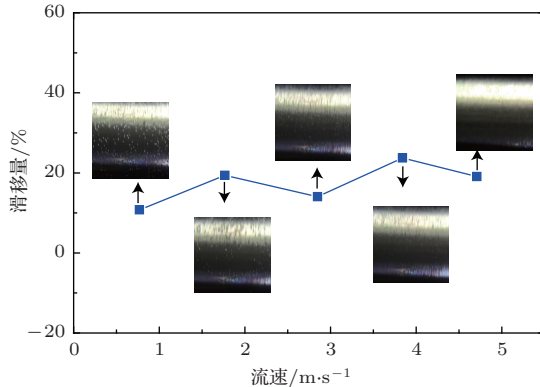


图7 疏水性微沟槽表面滑移量及相应的表面气相结构状态

4 结 论

本工作通过实验方法对疏水性微沟槽表面的气相结构及水下减阻效果进行研究, 得到以下结论:

1. 通过表面微结构的设计, 利用展向微沟槽结构可实现在流动作用下气相结构在表面微结构内稳定存在, 这种稳定驻留的气相结构为进一步空化提供必要条件.

2. 基于表面微结构内稳定存在的气相结构, 在流动作用下, 不断有新的气相结构生成. 在不同流速作用下, 该表面的气相结构呈现不同的状态. 疏水性微沟槽表面可获得表面气相结构不断生成来补充由于液体冲刷带来的气体损失, 最终在表面获得相对稳定的气相结构.

3. 通过PIV对近壁面流场进行测试, 结果表明可再生的气相结构使得该表面在10 h甚至更长时间内获得稳定的表面气相结构从而实现水下有效的减阻效果. 随着流速增加过程中, 疏水性沟槽表面的气相结构不同, 气相结构脱离的速率也明显增加, 但与此同时气相结构生成的速率也同样增加, 最终实现在较高流速条件下气相结构在该表面能稳定存在, 并在主流速度为0.75—4.75 m/s过程中, 可获得有效的减阻效果. 虽然气相结构生成机理还不明确, 需进一步分析研究, 该表面在水下用被动的方式获得表面稳定的气相结构, 为实现水下高效减阻效果提供了一种新的方法.

感谢北京理工大学机械与车辆工程学院王国玉教授和张敏娣老师在近壁面流场测试中给予指导和帮助.

参考文献

- [1] Shi X H, Wang X J 1995 *Introduction to underwater weapon (Torpedo)* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press) p28–33 (in Chinese) [石秀华, 王晓娟 1995 水中兵器概论(鱼雷部分)(西安: 西北工业大学出版社) 第28—33页]
- [2] Ke G X, Pan G, Huang Q G, Hu H B 2009 *Adv. Mech.* **39** 546 (in Chinese)[柯贵喜, 潘光, 黄桥高, 胡海豹 2009 力学进展 **39** 546]
- [3] Wang X N, Gen X G, Zang D Y 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 054701 (in Chinese) [王晓娜, 耿兴国, 臧渡洋 2013 物理学报 **62** 054701]
- [4] Li F C, Cai W H, Zhang H N, Wang Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 114701
- [5] Mei D J, Fan B C, Chen Y H, Ye J F 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 8335 (in Chinese) [梅栋杰, 范宝春, 陈耀慧, 叶经方 2010 物理学报 **59** 8335]
- [6] Li G, Li S M, Xu Y J, Zhang Y, Li H M, Nie C Q, Zhu J Q 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 4026 (in Chinese)[李钢, 李铁明, 徐燕骥, 张翼, 李汉明, 聂超群, 朱俊强 2009 物理学报 **58** 4026]
- [7] Chen G F, Gong M Q, Shen J, Zou X, Wu J F 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 8669 (in Chinese)[陈高飞, 公茂琼, 沈俊, 邹鑫, 吴剑峰 2010 物理学报 **59** 8669]
- [8] Gu C Y, Di Q F, Shi L Y, Wu F, Wang W C, Yu Z B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3701(in Chinese) [顾春元, 狄勤丰, 施利毅, 吴非, 王文昌, 余祖斌 2008 物理学报 **57** 3701]
- [9] Gong B Z, Zhang B J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1504 (in Chinese)[龚博致, 张秉坚 2009 物理学报 **58** 1504]
- [10] Vakarelski I U, Marston J O, Chan D Y C, Thoroddsen S T 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 214501
- [11] Niru K, Suresh V G 2011 *Langmuir* **27** 10342
- [12] Lee C, Kim C J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 014502
- [13] Kazuyuki H, Takao S, Fujio Y 2011 *Exp. Fluids* **50** 715
- [14] Watanabe K, Udagawa H 1999 *J. Fluid Mech.* **381** 225
- [15] Tian J, Xu J F, Xue Q J 1997 *J. Hydrodynamics* **12** 27 (in Chinese) [田军, 徐锦芬, 薛群基 1997 水动力学研究与进展 **12** 27]
- [16] Lee C, Choi C H, Kim C J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 064501
- [17] Lee C, Kim C J 2009 *Langmuir* **25** 12812
- [18] Choi C H, Ulmanella U, Kim J, Ho C M, Kim C J 2006 *Phys. Fluids* **18** 087105
- [19] Choi C H, Kim C J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 066001
- [20] Tsai P, Peters A M, Pirat C, Wessling M, Lammertink R G, Lohse D 2009 *Phys. Fluids* **21** 112002
- [21] Aljallis E, Sarshar M A, Datla R, Sikka V, Jones A, Choi C H 2013 *Phys. Fluids* **25** 025103
- [22] Sun W Y, Kim C J 2013 *IEEE 26th International Conference Taipei, IEEE January 20–24, 2013* p397
- [23] Sakai M, Nakajima A, Fujishima A 2010 *Chem. Lett.* **39** 482
- [24] Ding B, Ogawa T, Kim J 2008 *Thin Solid Films* **516** 2495
- [25] Wang J D, Chen D R 2008 *Langmuir* **24** 10174
- [26] Poetes R, Holtzmann K, Franze K, Steiner U 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 166104

Drag reduction on hydrophobic transverse grooved surface by underwater gas formed naturally*

Wang Bao Wang Jia-Dao[†] Chen Da-Rong

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 11 October 2013; revised manuscript received 30 December 2013)

Abstract

Low fluid friction is difficult to obtain on super-hydrophobic surfaces for a large flow velocity, because the entrapped gas within the surface is weakened substantially. Once the gas removed, the friction of the fluid increases markedly due to its own surface roughness. In this study, a hydrophobic transverse microgrooved surface is designed to sustain the air pockets in the valleys for a long time. Direct optical measurements are conducted to observe the entrapped gas when water flows past the surface in the perpendicular direction of grating patterns. More importantly, this hydrophobic transverse micro-grooved surface has been determined to have the capability of automatic formation of gas. Some of the gas is continually carried away from the surface and new gas is continually generated to substitute the lost gas. And the stable slippages at the surface are achieved corresponding to the relative stable gas on this designed surface.

Keywords: drag reduction underwater, gas, hydrophobic transverse grooved surface, slippage

PACS: 47.85.lb, 47.55.Ca

DOI: 10.7498/aps.63.074702

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51075228, 51021064).

[†] Corresponding author. E-mail: wangbao09@mails.tsinghua.edu.cn