

基于润湿阶跃的水下大尺度气膜封存方法

胡海豹 王德政 鲍路瑶 文俊 张招柱

Maintaining large-scale gas layer by creating wettability difference on surfaces under water

Hu Hai-Bao Wang De-Zheng Bao Lu-Yao Wen Jun Zhang Zhao-Zhu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 134701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.134701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

仿生射流孔形状减阻性能数值模拟及实验研究

Numerical simulation and experimental study on drag reduction performance of bionic jet hole shape

物理学报.2015, 64(3): 034703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034703>

八重准周期排列的短沟槽结构减阻机理分析

Drag reduction mechanisms of 8-fold quasi-periodic short groove structures

物理学报.2014, 63(8): 084704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084704>

基于微空泡效应的疏水性展向微沟槽表面水下减阻研究

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

物理学报.2014, 63(7): 074702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074702>

表面张力对疏水微结构表面减阻的影响

Drag reduction on micro-structured hydrophobic surfaces due to surface tension effect

物理学报.2014, 63(5): 054708 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054708>

基于润湿阶跃的水下大尺度气膜封存方法*

胡海豹^{1)†} 王德政¹⁾ 鲍路瑶¹⁾ 文俊¹⁾ 张招柱²⁾

1)(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2)(中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

(2015年12月18日收到; 2016年4月19日收到修改稿)

超疏水表面水下减阻效果通常与其微结构上封存气膜的厚度和面积正相关, 且气膜尺寸越大封存越困难. 构造亲疏水相间表面, 能在壁面形成润湿阶跃, 产生约束固-气-液三相接触线移动的束缚力. 通过监测切向水流作用下, 润湿阶跃为 54.8° , 84.7° , 103.6° 和 144.0° 的亲疏水相间表面上不同面积和厚度气膜的形态发现, 厘米尺度气膜可被长时间稳定封存, 且气膜破坏的临界流速随润湿阶跃和气膜厚度的增加而升高, 随气膜迎流宽度增加而降低. 同时, 该方法封存的气膜上能产生显著滑移量, 尺寸 $0.6\text{ cm} \times 0.5\text{ cm} \times 0.15\text{ cm}$ 的气膜上即可产生约占主流速度25%的稳定滑移速度. 期待该气膜封存方法能进一步提升超疏水表面水下减阻技术性能.

关键词: 超疏水表面, 亲水表面, 气膜, 滑移

PACS: 47.85.lb, 47.55.Ca

DOI: 10.7498/aps.65.134701

1 引言

受疏水现象启发, 越来越多的国内外研究者开始关注仿生疏水材料在水下减阻领域的潜在应用^[1-5]. Trethewey和Meinhart^[6]通过微通道试验发现, 疏水内壁上存在约占主流速度10%的滑移速度, 对应滑移长度达 $1\text{ }\mu\text{m}$. Ou和Rothstein^[7]在超疏水微通道流场 μ -PIV(粒子图像测速)测试中也证实, 在内壁的气液界面上有占主流速度50%的滑移速度. 这些早期文献均说明, 疏水微结构上存在的气膜层是其产生速度滑移和减阻的主因. Busse等^[8]通过对超疏水管道内滑移量和气膜厚度的理论推导又发现, 随气膜厚度增加, 滑移长度和减阻量均增大. 随后Kwon等^[9]在驻存微米级气泡的微通道试验中验证了Busse的结论. 而Samaha等^[10]在随机微结构超疏水表面减阻数值模拟中还发现, 减阻量随气膜面积增加而增大, 当气液面积分数为

0.98时减阻达30%. Jagdish等^[11]通过研究层流状态下超疏水表面气膜形态, 也给出了类似的结论. 可见, 通过提高封存气膜的面积和厚度将能够有效提升超疏水表面水下减阻效果. 但由于微结构中驻留的气相结构在来流的剪切作用下会不断地从表面脱离^[12], 致使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. 同时, 随气膜尺寸增大, 其封存难度也随之提高. 因此, 如何实现大尺度气相结构的稳定驻留, 已成为超疏水表面减阻研究的瓶颈问题. 为实现水下气相结构的封存, 国内外也已进行过多种尝试, Kwon等^[9]通过在微通道内设计矩形沟槽结构(槽宽 $100\text{ }\mu\text{m}$, 间距 $150\text{ }\mu\text{m}$), 实现了微米级气膜在 0.12 m/s 以下水速条件下的稳定封存, 并得到最大10%的减阻量. 国内王宝等^[13]采用垂直流向的微米级疏水凹槽结构, 也实现了对凹槽内气体的部分封存, 最大减阻达15%.

综上所述, 目前微米尺度气相结构封存方法已

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 51335010, 51109178)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(批准号: 3102015ZY017)和西北工业大学研究生创新创业种子基金(批准号: Z2016055)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huhaibao@nwpu.edu.cn

有所突破, 但更大尺度气膜的封存方法仍有待探索. 本文通过理论分析、静态接触角测试、水下气膜状态监测以及PIV流场测试, 提出了一种通过在壁面构造润湿阶跃来封存厘米尺度气膜的新方法.

2 水下大尺度气膜封存机制

2.1 润湿阶跃束缚三相接触线原理

不同壁面因化学组成和微观组织结构的差异, 会展示出不同润湿行为. 水滴表观接触角大于 90° 为疏水表面, 超过 150° 为超疏水表面. 图1(a)和

图1(b)分别为亲水和疏水光滑表面上水滴三相接触线处受力平衡状态示意图. 图1(a)中, θ_1 为亲水表面水滴接触角, γ_{slh} 和 γ_{sgh} 分别表示亲水表面上液固表面张力和气固表面张力; 图1(b)中, θ_2 为疏水表面水滴接触角, γ_{sls} 和 γ_{sgs} 分别为疏水表面上液固表面张力和气固表面张力. 对应的力学模型均可由经典杨氏方程统一描述:

$$\gamma_{gs} = \gamma_{sl} + \gamma \cos \theta, \quad (1)$$

这里, γ_{sl} 为液固表面张力, γ_{gs} 为气固表面张力, γ 为气液表面张力, θ 为液滴接触角.

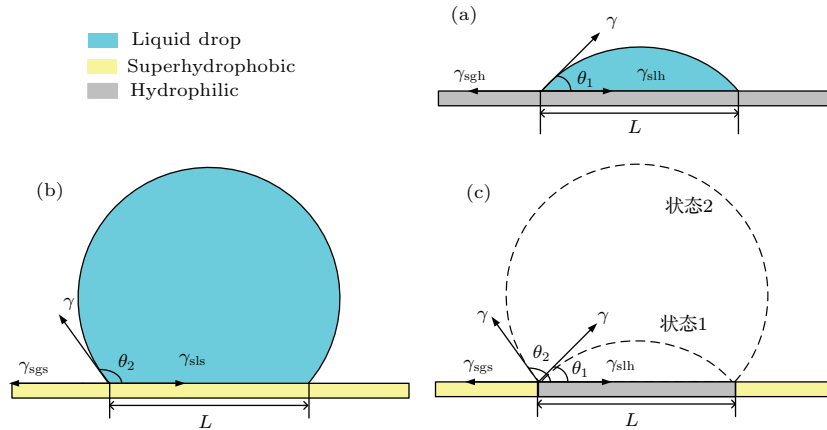


图1 (网刊彩色) 水滴典型接触状态示意图 (a) 亲水表面; (b) 疏水表面; (c) 亲疏水相间表面

Fig. 1. (color online) The typical contact state of water droplet on solid surface: (a) Hydrophilic surface; (b) hydrophobic surface; (c) hydrophilic surface surrounded by hydrophobic surface.

依据(1)式, 高表面能表面水滴接触角小, 低表面能表面水滴接触角大. 若用不同表面能材料制备出如图1(c)所示的光滑亲疏水相间表面(内部为亲水圆形区域, 外侧为疏水区域), 则水滴将呈现出奇特的接触角规律: 当在上述光滑亲疏水相间表面放置一不超过图1(a)所示水滴时, 水滴三相接触线未受到外圈疏水区域影响, 将呈现内侧亲水表面接触特性(图1(c)中状态1的水滴体积与图1(a)等大, 对应接触角为 θ_1); 当放置水滴体积大于图1(a)时, 水滴三相接触线将同时受内、外两侧区域影响, 三相接触线始终保持在亲疏水相间处, 即展现出很大的接触角滞后现象(图1(c)中状态2的水滴体积与图1(b)等大, 对应接触角为 θ_2).

在图1(c)所示的水滴接触线保持不动, 而接触角(体积)增大的过程中, 其三相接触线处受力始终维持平衡, 即(1)式恒成立. 由此可推出, 水滴三相

接触线维持在亲疏水相间处的条件为

$$\gamma_{gss} - \gamma_{slh} \leq \gamma \cos \theta' \leq \gamma_{gsh} - \gamma_{slh}, \quad (2)$$

式中, θ' 为表观接触角, 其他符号指代同上. 因此, θ' 的变化范围为

$$\theta_1 \leq \theta' \leq \cos^{-1} \frac{\gamma_{gss} - \gamma_{slh}}{\gamma}, \quad (3)$$

这里, 因 $\gamma_{slh} > \gamma_{sls}$ [14], 故 $\cos^{-1} \frac{\gamma_{gss} - \gamma_{slh}}{\gamma} > \cos^{-1} \frac{\gamma_{gss} - \gamma_{sls}}{\gamma}$, 因而 θ' 的上临界值 θ'_{\max} 略大于 θ_2 . 由此, 亲疏水相间表面可以实现的接触角滞后范围为

$$\Delta\theta = \theta'_{\max} - \theta_1 \approx \theta_2 - \theta_1, \quad (4)$$

文中, 用 $\Delta\theta$ 表征亲疏水相间表面形成的润湿阶跃大小.

同理, 因水下表面上静止气泡的存在状态与空气中表面上水滴相似, 所以气泡在固体表面上静止

驻存时的三相接触线受力平衡关系同样适用上述理论方程. 即通过构造亲疏水相间表面, 同样能实现水下大体积气泡/气膜的贮存.

另外, 上述亲疏水相间表面所形成的大接触角滞后, 能产生更大的束缚气泡沿壁面运动的切向毛细力 (capillary force)^[15], 其表达式为

$$F = L\gamma(\cos\theta_R - \cos\theta_A), \quad (5)$$

这里, F 为毛细力; L 为气泡宽度; γ 为气液表面张力; θ_R, θ_A 分别为气泡在壁面上的后退角和前进角, 这里分别对应于气泡在亲疏水相间表面上的最小接触角 θ'_{\min} ($=\theta_1$) 和最大接触角 θ'_{\max} ($\approx\theta_2$).

2.2 原理验证

在尺寸为 76.2 mm × 25.4 mm 的光洁载玻片上, 构造出两种内区直径 5 mm 的亲疏水相间表面

(图 2(c)): 1) 内区亲水, 外区超疏水, 用于水滴静态接触试验; 2) 内区超疏水, 外区亲水, 用于气泡静态接触试验. 其中, 疏水区域直接喷涂超疏水涂层 (Ultra-Ever Dry, Ultratech 公司, 美国), 厚度约 10 μm, 表面粗糙度约 2.4 μm, 表观接触角约 165°, 接触角滞后约 2°; 亲水区域为光洁玻璃表面, 表观接触角约 22°. 图 2(d) 为亲疏水相间线处扫描电镜图 (SEM), 左侧为有随机微纳复合结构的超疏水表面, 右侧为光滑玻璃表面.

图 2(a) 和图 2(b) 分别为不同体积的水滴和气泡在 1) 和 2) 试件的亲疏水相间表面上的稳定驻存形态. 从中可见, 表观接触角随水滴/气泡体积增加而增大, 而其三相接触线却始终位于亲疏水交界处: 水滴体积由 10 μL 增加到 50 μL 时, 接触角由 23.5° 增至 167.5°; 气泡体积由 5 μL 增加到 25 μL, 接触角由 13.5° 增加到 82.5°.

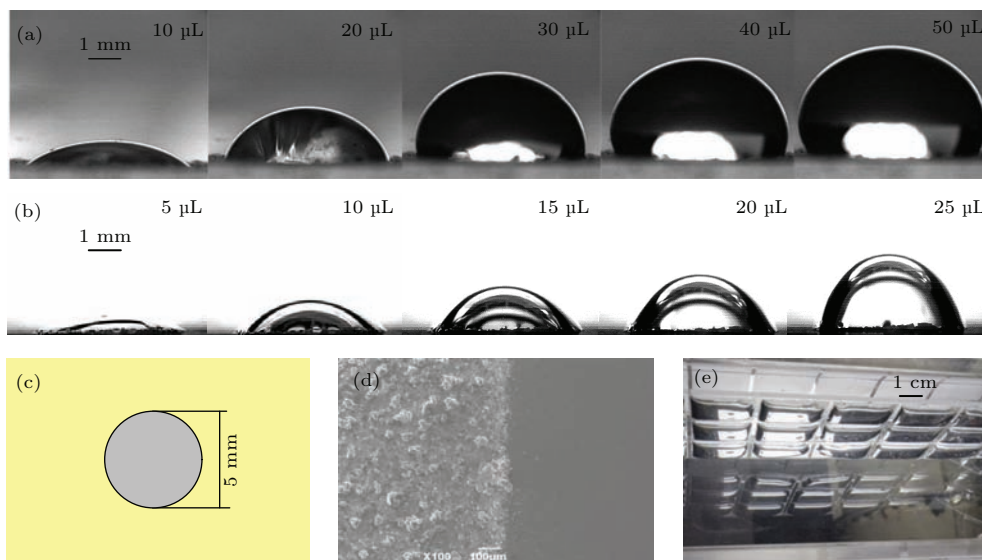


图 2 亲疏水相间表面静态接触试验结果 (a) 亲疏水相间表面水滴接触状态; (b) 亲疏水相间表面气泡接触状态; (c) 亲疏水相间表面示意图; (d) 亲疏水相间处 SEM 图; (e) 亲疏水相间表面气膜封存效果

Fig. 2. Contact angle test on hydrophilic and hydrophobic patterned surfaces: (a) Contact angle test of liquid droplet on hydrophilic surface surrounded by hydrophobic surface; (b) contact angle test of bubble on hydrophobic surface surrounded by hydrophilic surface; (c) schematic diagram of a hydrophilic and hydrophobic patterned surface; (d) scanning electron microscope test figure of the test model; (e) large scale gas layers trapped by wettability difference under water.

上述接触角变化范围远大于超疏水涂层和光洁玻璃表面上的接触角滞后, 说明亲疏水相间表面的确能束缚三相接触线运动, 形成显著润湿阶跃. 另外, 采用该原理, 通过构造阵列化的亲疏水相间表面, 同样能实现平板表面大面积气膜的稳定贮存, 图 2(e) 所示为尺寸 250 mm × 100 mm 的平板表面上水下气膜整体驻存效果.

3 切向水流下润湿阶跃封存气膜性能测试

3.1 试验方法

分别选用材质为玻璃、铝、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 和聚四氟乙烯 (PTFE), 尺寸为

100 mm × 250 mm 的光滑平板作为基底材料. 通过在基板中心长方形区域喷涂前述超疏水涂层 (内区尺寸为 20 mm × 10 mm, 10 mm × 35 mm, 15 mm × 35 mm 和 20 mm × 35 mm, 喷涂前对外区做物理隔离), 构造出不同亲疏水相间表面. 各试验板表面亲水区域粗糙度均低于 0.38 μm (TR101 粗糙度仪, 北京时代), 超疏水区域呈随机微纳复合结构 (与图 2(d) 类似). 表 1 为各试验板表面接触角测试结果 (DSA-100 接触角仪, Kruss, 德国), 测量误差 ±3.0°.

表 1 试验板表面接触角 (CA)

Table 1. Contact angle list of test samples.

	内区尺寸/mm	内区 CA/(°)	外区 CA/(°)	润湿阶跃 Δθ/(°)
1#	10 × 35	165.1	80.4	84.7
2#	20 × 10	22.1	22.1	0
3#	20 × 10	165.1	110.3	54.8
4#	20 × 10	165.1	80.4	84.7
5#	20 × 10	165.1	61.4	103.6
6#	20 × 10	165.1	22.1	144.0
7#	15 × 35	165.1	80.4	84.7
8#	20 × 35	165.1	80.4	84.7
9#	5 × 6	165.1	80.4	84.7

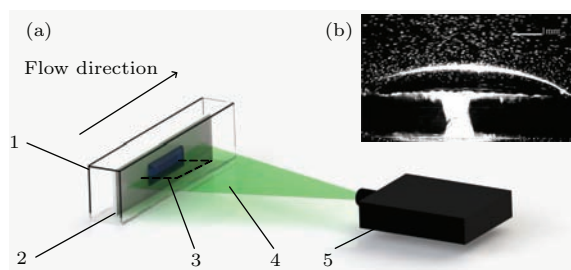


图 3 (网刊彩色) 实验装置原理图 (a) PIV 布局示意图 (1, 流道; 2, 试验板; 3, 气膜; 4, 光片; 5, 激光器); (b) 气膜观测窗口

Fig. 3. (color online) Schematic diagram of experimental setup: (a) Layout of PIV (1, test section; 2, test sample; 3, gas layer; 4, light sheet; 5, laser); (b) test area.

试验中, 先将待试验板固联于低速水槽实验段 (尺寸 100 mm × 100 mm × 500 mm, 流速 0—1.2 m/s) 的中心平面上, 然后采用医用微量注射泵 (WZS-50F2, 史密斯双通道微量注射泵) 向水下试件的超疏水区域精确通入定量气体, 形成特定厚度

气膜 (气膜覆盖区与超疏水区基本等大). 为增强气膜监测效果, 采用 40 W LED 平板灯从距离气膜约 200 mm 的侧后方打光. 气膜形态变化过程由布置于正前方的高速摄像机 (Red Lake, IDT N4) 实时记录, 采样频率取 200 fps.

另外, 通过搭建基于 532 nm 连续激光和高速摄像机的多功能 PIV 系统 (图 3(a)), 还进行了气液界面上滑移流动的直接测量 (图 3(b)). 因荧光粒子价格昂贵, 该试验在长 100 mm、宽 20 mm、高 15 mm 的小型流道内完成, 超疏水区尺寸仅为 5 mm × 6 mm, 气膜厚 1.5 mm.

3.2 结果与分析

3.2.1 切向水流下亲疏水相间表面气膜封存过程

图 4 为不同流速作用下 1# 试验板的亲疏水相间表面上气膜变形和破坏过程. 从中可以发现, 气膜随切向流速增加会经历变形、后接触线 (气膜左边迎流侧的三相接触线) 前移及气体脱落等阶段. 当流速低于 0.3 m/s 时, 气膜形态基本保持静止时的对称形状 (图 4(a), (b)), 说明水流对其拖拽力较小; 当流速超过 0.3 m/s, 同时小于 0.9 m/s 时, 气膜变形为左右明显不对称的后倾姿态 (前接触角 β 增大, 后接触角 α 减小, 图 4(c)), 使得壁面束缚气膜的切向毛细力增加, 正好平衡因流速增加引起的拖

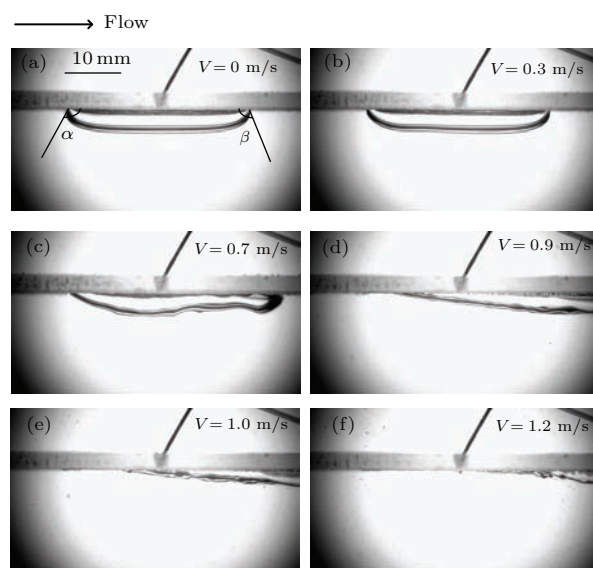


图 4 流场作用下气膜破坏过程

Fig. 4. Failure process of gas layer under tangential flow.

拽力增量; 当流速达到 0.9 m/s 时, 气膜后接触角 α 缩小至超疏水表面气泡接触角 (约 15°), 此时由润湿阶跃产生的切向毛细力达到最大 (图 4(d)); 当流速进一步增加时, 毛细力将无法平衡水流拖拽力, 气膜左侧的后接触线首先沿流向移动 (图 4(e)), 致使气体逐步向前聚集, 直至完全从超疏水区内脱落 (图 4(f)). 本文中定义气膜完全脱离试验板时的流速为临界破坏流速.

3.2.2 润湿阶跃对水下气体封存能力的影响

图 5 为 2#—6# 试验板上获得的亲疏水相间表面润湿阶跃 $\Delta\theta$ 与气膜临界破坏流速 V_C 的关系. 需要特别指出, 鉴于 4 种润湿阶跃为 0 (内外区接触角均为 $22.1^\circ, 61.4^\circ, 80.4^\circ$ 和 110.3°) 的壁面上气膜最大破坏流速相差不大 (在 165.1° 接触角表面通入的气体直接在表面大面积铺展, 无法形成大尺度厚气膜); 同时接触角为 22.1° 时, 气膜厚度与存在润湿阶跃平板上的气膜厚度又较接近, 故这里选取接触角为 22.1° 条件下润湿阶跃为 0 时气膜最大破坏流速来对比反映润湿阶跃存在对气膜最大破坏流速的显著提升作用. 可以看出, 破坏流速 V_C 随润湿阶跃 $\Delta\theta$ 增加而增大, 但增速逐渐趋缓. 该趋势与切向毛细力 ((5) 式) 随润湿阶跃变化规律相一致, 说明提高亲疏水相间表面的润湿阶跃 $\Delta\theta$ 有利于气膜稳定封存. 而增速趋缓的原因可能在于以下两个因素: 气膜破坏临界状态时, 后接触角 α 达到超疏水表面气泡接触角 (最小接触角 θ'_{\min}), 但前接触角 β 并未增至亲水表面气泡接触角 (最大接触角 θ'_{\max}), 故亲疏水相间表面产生的实际气泡束缚力小于 (5) 式预测结果; 随流速增加, 水流对气膜的拖拽力增幅加剧.

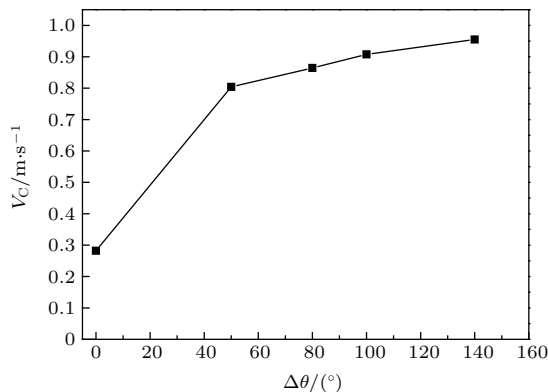


图 5 润湿阶跃与气膜破坏流速的关系
Fig. 5. The variation of critical flow velocity V_C under different wettability difference $\Delta\theta$.

3.2.3 气膜尺寸对水下气体封存能力的影响

图 6 为 1#, 7# 及 8# 试验板上测得的不同迎流宽度气膜上膜厚 h 与临界破坏流速 V_C 的关系. 可以发现, 随气膜厚度 h 增加, 气膜完全阻碍了所需流速的增大, 说明厚气膜反而更稳定. 其原因在于: 随气膜厚度增加, 其前接触角 β 和后接触角 α 的初始值均相应增大, 意味着气膜迎流侧的后接触线更难达到在疏水区域移动的临界条件 (后接触角 α 减小至超疏水表面气泡接触角 θ'_{\min}), 即能承受更高流速拖拽. 另外, 随气膜迎流宽度增加, 气膜完全破坏所需流速降低. 这是由于随气膜迎流宽度/迎流面积增大, 气膜所受流向压差阻力迅速增大, 致使水流对气膜的拖拽力增量大于毛细力增量.

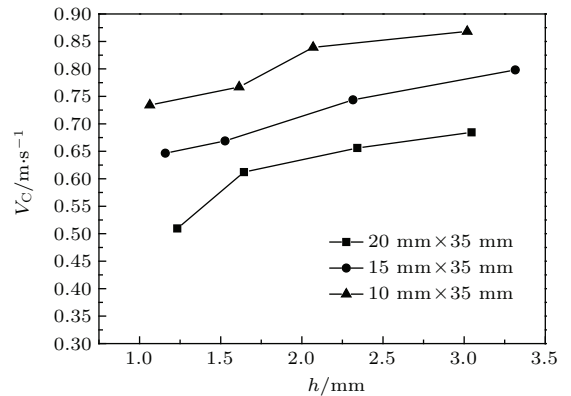


图 6 气膜高度与破坏流速的关系
Fig. 6. The plot of the critical flow velocity V_C under different gas layer thickness.

3.2.4 气膜界面上滑移速度

图 7 是主流流速为 0.06, 0.08 和 0.11 m/s 时, 9# 试验板上测得的气膜中心处流速沿法向分布曲

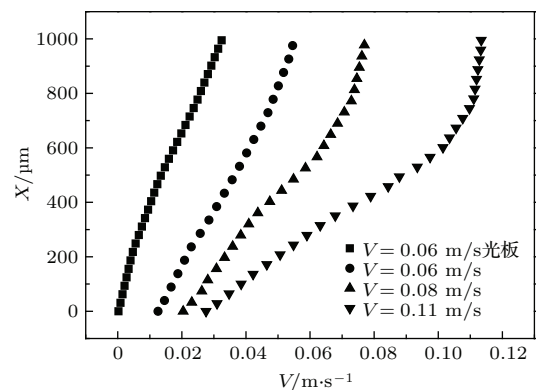


图 7 不同流速下法向速度剖面
Fig. 7. Comparison of distance-resolved evolution of velocity with different mean flow viscosity.

线. 与无气膜的亲水光板不同, 亲疏水相间表面封存的气膜上存在明显滑移速度: 0.06 m/s 时, 滑移速度约 0.013 m/s, 占主流速 20.9%; 0.08 m/s 时, 滑移速度约 0.020 m/s, 占主流速 25.5%; 0.11 m/s 时, 滑移速度约 0.025 m/s, 占主流速 22.3%. 这说明基于润湿阶跃的水下大尺度气膜封存方法能够实现非常显著的减阻效果.

4 结 论

通过理论和试验研究, 提出和验证了基于润湿阶跃的水下大尺度气膜封存方法, 并获得如下结论:

1) 构造亲疏水相间表面能形成润湿阶跃, 产生约束三相接触线移动的束缚力, 利于大尺度气膜的水下稳定封存;

2) 润湿阶跃值、气膜尺寸(厚度和迎流宽度)均影响气膜临界破坏流速; 适当流速范围内(文中最高稳定流速约 0.9 m/s), 厘米尺度气膜可长时间稳定封存;

3) 气膜界面上滑移速度与流速正相关, 本文试验中的最大滑移速度约占主流速度的 25%;

4) 当流速向最大破坏流速靠近时, 具有不同润湿阶跃的平板上气膜形态会显示出越来越大的差异, 对应的滑移特性差异可能也会逐渐扩大, 是一项同时涉及流速、润湿阶跃值及气膜形态等诸多因素的待研究课题.

与已有文献相比, 通过合理设计亲疏水相间表面和气膜参数等, 不仅封存气膜尺度更大, 而且便

于阵列化来形成大面积气液界面. 因此, 期待该方法能够有效提升超疏水表面减阻效果, 并拓宽应用范围.

参考文献

- [1] Bechert D W, Bruse M, Hage W, Meyer R 2000 *Naturwissenschaften* **87** 157
- [2] Song D, Daniello R J, Rothstein J P 2014 *Exp. Fluids* **55** 8
- [3] Song D, Song B W, Hu H B, Du X S, Zhou F 2015 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17** 21
- [4] Hu H B, Du P, Huang S H, Wang Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074703
- [5] Song B W, Guo Y H, Luo Z Z, Xu X H, Wang Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154701 (in Chinese) [宋保维, 郭云鹤, 罗莊竹, 徐向辉, 王鹰 2013 物理学报 **62** 154701]
- [6] Trethewey D C, Meinhart C D 2002 *Phys. Fluids* **14** 9
- [7] Ou J, Rothstein J P 2005 *Phys. Fluids* **17** 10
- [8] Busse A, Sandham N D, McHale G, Newton M I 2013 *J. Fluid Mech.* **727** 488
- [9] Kwon B H, Kim H H, Jeon H J, Kim M C, Lee I, Chun S, Go J S 2014 *Exp. Fluids* **55** 1722
- [10] Samaha M A, Tafreshi H V, Gad-el-Hak M 2011 *Phys. Fluids* **23** 012001
- [11] Jagdish B N, Brandon T Z X, Kwee T J, Dev A K 2014 *J. Ship Res.* **58** 30
- [12] Song B W, Ren F, Hu H B, Guo Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054708 (in Chinese) [宋保维, 任峰, 胡海豹, 郭云鹤 2014 物理学报 **63** 054708]
- [13] Wang B, Wang J D, Chen D R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074702 (in Chinese) [王宝, 汪家道, 陈大融 2014 物理学报 **63** 074702]
- [14] McHale G 2007 *Langmuir* **23** 15
- [15] Furmidge C G L 1962 *J. Colloid Sci.* **17** 309

Maintaining large-scale gas layer by creating wettability difference on surfaces under water*

Hu Hai-Bao^{1)†} Wang De-Zheng¹⁾ Bao Lu-Yao¹⁾ Wen Jun¹⁾ Zhang Zhao-Zhu²⁾

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

2) (*State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

(Received 18 December 2015; revised manuscript received 19 April 2016)

Abstract

Superhydrophobic surfaces with micro- and nano-scale structures are conducive to maintaining a gas layer where prominent slippage effect exists. It has been demonstrated that the drag reduction of superhydrophobic surface increases with growing the fraction of the gas-water interface and the rising of the thickness of gas layer. Whereas a large thick gas layer on the superhydrophobic surface collapses easily under tangential water flow. Here, we present a new method to maintain large-scale gas layer by creating hydrophilic patterns at the superhydrophobic surface, on which the binding force of air on the solid surface can be caused by wettability difference. Through testing the states of gas layer trapped on surfaces with wettability differences equal to 54.8° , 84.7° , 103.6° and 144.0° in apparent contact angle, respectively, the conditions of maintaining gas layer are mainly considered. We demonstrate that the critical velocity, over which the gas layer begins to collapse under the tangential water flow, is positively correlated with the thickness of the gas layer and the wettability difference between the superhydrophobic area and hydrophilic area, however, this is negatively correlated with the width of the gas layer in the crosswise direction. It is noteworthy that even a centimeter-scale gas layer can be kept steady in ~ 0.9 m/s through this method. Furthermore, an obvious slip velocity up to $\sim 25\%$ of bulk velocity is observed at the gas-water interface, through measuring the velocity profile above the 0.6 cm-long, 0.5 cm-wide and 0.15 cm-thick gas layer by using the PIV technology. We anticipate that this novel method of gas entrapment under water will effectively widen the applications of superhydrophobic surfaces for drag reduction.

Keywords: superhydrophobic surface, hydrophilic surface, gas layer, slip

PACS: 47.85.lb, 47.55.Ca

DOI: 10.7498/aps.65.134701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51335010, 51109178), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 3102015ZY017), and the Seed Foundation of Innovation and Creation for Graduate Students in Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. Z2016055).

† Corresponding author. E-mail: huhaiobao@nwpu.edu.cn