

厘米尺度亲疏水间隔表面水下气膜维持效果及机理研究

张照, 许晓慧, 黄金艺, 牟震林, 苑伟政, 何洋, 吕湘连*

(西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 目的 面向水下航行器减阻技术挑战, 克服现有全超疏水表面气膜维持效果较差的问题, 提出了厘米尺度的亲疏水间隔表面水下气膜维持思路, 以获得更高的水下减阻性能。方法 采用 $k-\omega$ 湍流模型对厘米尺度的亲疏水间隔表面、全超疏水表面进行了流速 0.5 m/s 的水流冲刷模拟仿真, 其中亲疏水间隔表面设定凹槽中的超疏水表面接触角为 165° , 亲水间隙接触角为 45° ; 全超疏水表面的接触角均为 165° 。随后基于仿真结果, 对厘米尺度的 2 种表面在不同水流速度和供气条件下进行水流冲刷实验, 研究了这 2 种表面在不同实验条件下的气膜形状变化。结果 仿真结果显示亲水间隙的存在使凹槽内的气体受到钉扎束缚作用, 可以实现气膜维持。实验结果显示在厘米尺度下, 全超疏水表面在流速为 0.55 m/s 的条件下气膜维持情况较好, 但在流速达到 0.94 m/s, 雷诺数为 $Re=14\ 030$ 时, 实验部分的流动状态为湍流状态, 凹槽内气膜覆盖的面积时有变化, 能覆盖的面积一般不超过凹槽面积的 50%, 很难维持完整的气膜; 而在 0~1.2 m/s 的流速范围内, 亲疏水间隔表面能够在超疏水区域始终维持稳定气膜表面, 具有好的气膜维持效果。结论 相比均匀的全超疏水表面, 亲疏水间隔表面能够因其前后接触角差异为气膜提供最大的束缚力, 具有良好的气膜维持性能; 由于其能束缚的气膜厚度更大, 表面速度滑移更大, 所以能产生更好的水下减阻效果。

关键词: 亲疏水间隔表面; 厘米级气膜; 主动供气; 气膜维持

中图分类号: O647.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)12-0188-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.12.017

Underwater Gas Film Maintenance Effect and Mechanism of Centimeter-scale Alternant Hydrophilic and Superhydrophobic Surface

ZHANG Zhao, XU Xiao-hui, HUANG Jin-yi, MU Zhen-lin,
YUAN Wei-zheng, HE Yang, LYU Xiang-lian*

(Key Laboratory of Micro/nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The unique surface properties of superhydrophobic surfaces make them capable of sealing the air film underwater. With excellent underwater drag reduction effects, it has become an international research hotspot. The maintenance

收稿日期: 2023-08-05; 修订日期: 2023-11-10

Received: 2023-08-05; Revised: 2023-11-10

基金项目: 翼型、叶栅空气动力学重点实验室稳定支持经费项目 (61422010102, 6142201200403)

Fund: Foundation of National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research (61422010102, 6142201200403)

引文格式: 张照, 许晓慧, 黄金艺, 等. 厘米尺度亲疏水间隔表面水下气膜维持效果及机理研究[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 188-196.

ZHANG Zhao, XU Xiao-hui, HUANG Jin-yi, et al. Underwater Gas Film Maintenance Effect and Mechanism of Centimeter-scale Alternant Hydrophilic and Superhydrophobic Surface[J]. Surface Technology, 2023, 52(12): 188-196.

*通信作者 (Corresponding author)

of air films on superhydrophobic surfaces is the key to its application in underwater drag reduction. Some studies show that the air film at large scales has a good drag reduction effect. However, previous studies have mostly focused on the maintenance of air films at millimeter and smaller scales, and the maintenance of air films at centimeter scales has not yet been reported. In this paper, in order to overcome the problems of poor air film maintenance on existing fully superhydrophobic surfaces and insufficient drag reduction effect of millimeter-scale air films, the idea of centimeter-scale air film maintenance on alternant hydrophilic and superhydrophobic surfaces underwater was proposed to obtain high drag reduction performance underwater. Firstly, the $k-\omega$ turbulence model was used to simulate the water scouring of the centimeter-scale alternant hydrophilic and superhydrophobic surface and fully superhydrophobic surfaces at a flow rate of 0.5 m/s, in which the contact angle of the superhydrophobic surfaces in the groove on the alternant hydrophilic and superhydrophobic surface was set to 165° , and the hydrophilic gaps were set to 45° . The contact angles of the fully superhydrophobic surfaces were all set to 165° . Then, based on the simulation results, water scouring experiments were carried out on the two surfaces at a centimeter scale under different water flow rates and air supply conditions, and the changes in the air film shapes of the two surfaces under different experimental conditions were investigated. The simulation results showed that a hydrophilic gap made the gas in the groove subject to a pinning and binding effect, which allowed gas film maintenance. The experimental results showed that the air film on the fully superhydrophobic surface at the centimeter scale was maintained better at a flow rate of 0.55 m/s. However, when the flow rate reached 0.94 m/s, with the calculated Reynolds number of $Re = 14\ 030$, the flow state in the experimental section was turbulent, the area covered by the air film in the groove changed from time to time, and the area that could be covered was generally no more than 50% of the area of the groove, which made it difficult to maintain the complete air film. While in the flow rate range of 0~1.2 m/s, the alternant hydrophilic and superhydrophobic surface and hydrophobic spacer surfaces could maintain a stable air film surface in the superhydrophobic region, which had a good effect on maintaining the air film. Based on the experimental results and mechanism analysis, it is concluded that, compared with the fully superhydrophobic surface, the alternant hydrophilic and superhydrophobic surface can provide the maximum binding force to the air film due to the difference in advancing and receding contact angle of the alternant hydrophilic and superhydrophobic surface, which has good air film maintenance performance. The greater thickness of the air film and the greater surface velocity slip result in better underwater drag reduction.

KEY WORDS: alternant hydrophilic and superhydrophobic surfaces; centimeter-scale air film; active air supply; air film maintenance

受自然界超疏水现象启发,超疏水表面因其独特的表面特性和优良的减阻性能受到了越来越多研究者的关注。同时,越来越多国内外研究者开始关注超疏水表面在水下减阻方面的潜在应用^[1-4]。

目前,学者普遍认为,由于超疏水表面的低表面能和微纳米结构,使其在水下能稳定封存一层气膜,原有的无滑移壁面被部分滑移壁面所替代,从而实现减阻^[5-7]。Wang 等^[8]设计了一种垂向沟槽疏水表面,该表面可以在水流冲击下保存凹槽内的气体。Jagdish 等^[9]在层流条件下维持了超疏水表面微气泡存在,且微气泡能够互相融合形成气膜。朱效谷等^[10]设计了一种电解反应自适应控制的凹坑结构,通过电解水反应生成气泡且稳定驻留在微凹坑中。Hemeda 等^[11]设计改进了一种横向凹槽中的水-油-空气三相系统,成功实现了气膜的封存,并实现了更大滑移。Hu 等^[12]通过在旋转圆柱表面构造亲疏水相间环形条带,成功实现了圆柱表面数百微米厚气环的稳定封存。Kwon 等^[13]通过在管道内表面制作方形凹坑阵列(边长 100 μm , 间距 150 μm),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。胡海豹等^[14]基于润湿阶跃在水下封住了尺寸 6 mm \times 5 mm \times 1.5 mm 的气膜,实现了毫米级气膜在 0.11 m/s 以下水速条件下的封存,并产生了约占主流速度 25% 的稳定滑移速度,随后上述研究针对毫米以及更小尺度下的气膜束缚作出了解释。陈正云等^[15]通过在超疏水表面增加毫米级网格纹理,有效提高了其气膜维持性能和减阻效果。张春来等^[16]制备了具有超疏水表面的沟槽型微纳复合结构,有较好的气膜稳定性,在沿垂直于沟槽方向运动时其减阻率可以达到 20.82%。

有研究发现更大尺度的气膜的减阻效果更好, Samaha 等^[17]在随机超疏水表面减阻数值模拟中发现,减阻量随气膜面积的增加而增大。随着气膜尺寸的增大,束缚气膜所需的力也要相应增大,但是超疏水表面的束缚力是一定的,随着表面面积的增大,使用单一的超疏水表面很难束缚表面气膜。因此,气膜面积的增大对气膜本身的束缚是一个巨大的挑战,如何才能实现大面积气膜的稳定束缚是一个非常值得

探究的问题。

本文考虑采用亲疏水间隔的方式来实现厘米尺度气膜的束缚。首先对厘米尺度的亲疏水相间表面和全超疏水表面进行水流冲刷模拟仿真,探索气膜在 2 种表面的形态变化过程,并基于此对厘米尺度的亲疏水间隔表面、全超疏水表面进行水流冲刷实验,研究在不同流速和供气速度条件下各表面的气膜形态,并对其气膜束缚能力进行比较,分析其束缚机理。

1 仿真分析

1.1 实验段内流场仿真

为了确保实验表面所在区域水流流速较为均匀,需要对实验段内流场进行仿真,模拟不同长度的实验段内部流场的情况,寻找流场开始趋于稳定的位置,确定流场较为稳定的区域的长度。

仿真出的计算域流线和速度云图如图 1 所示,仿真结果表明流动发展的趋势,即靠近入口处流动的速度和方向都有剧烈的突变,离入口越远流速越均匀,方向变化越小,在离入口大约 196 mm 处的位置往后,流线近似平行,各处流速几乎相同,据此确定亲疏水表面的起始位置。

如果采用在亲水性表面喷涂超疏水涂料的方式制备亲疏水表面,那么实际形成的亲疏水表面因其超疏水区域的涂层具有厚度,会高出周围亲水性区域,表面所束缚的气膜必然是凸出表面的,不利于抵抗水流冲刷。为了进一步增强表面对气膜的束缚能力,在亲疏水表面加入凹槽结构,使凹槽内表面为超疏水表面,凹槽之间高出凹槽的表面为亲水性表面。亲疏水间隔表面将原本完整的超疏水表面覆盖的大面积气膜分割成若干小气

膜,亲水区域的加入降低了表面气膜的占比。因此为了提高气膜覆盖的面积,超疏水区域的图案应选择矩形等能够在表面近似密铺排布的图形,且超疏水区域应当具有较窄的间距。

因此采用圆角矩形的凹槽形状,将离入口 196 mm 处作为凹槽起始位置,凹槽流向宽度为 25 mm,沿流向宽度为 6 mm,圆角半径为 1.5 mm,深度为 0.3 mm,凹槽间距为 1 mm。

1.2 仿真模型设计

在设定流速条件下,以实验段水力直径为特征长度计算出的雷诺数为 $Re=8\ 209$,流动状态为湍流状态,采用 $k-\omega$ 湍流模型,黏性子层中适用稳定性更好的低雷诺数公式,包含压缩性效应、转捩流动和剪切流修正,对反压力梯度流模拟得更好,在本次实验的仿真分析中适用该模型进行仿真分析。

分别进行由 2 个凹槽组成的亲疏水间隔表面与全超疏水表面的水流冲刷实验仿真。亲疏水间隔表面选定凹槽内超疏水表面接触角为 165° ,亲水间隙接触角为 45° ;全超疏水表面选定表面接触角均为 165° 。水流流速为 0.5 m/s,仿真时间长度为 0.02 s。流道模型如图 2 所示。

1.3 仿真结果与分析

亲疏水间隔表面气膜随时间变化如图 3a 所示,水流方向为自上而下。由于亲水间隙的存在,凹槽内的气体会受到较强的钉扎束缚作用,且气膜不会从一个凹槽流向下一个凹槽,而是直接被水流冲刷带走。在凹槽的前缘和后缘(沿流向方向)仍存在少量的气膜。如果此时在凹槽底部开孔进行供气,那么凹槽内的气膜将重新饱和,从而实现气膜维持。

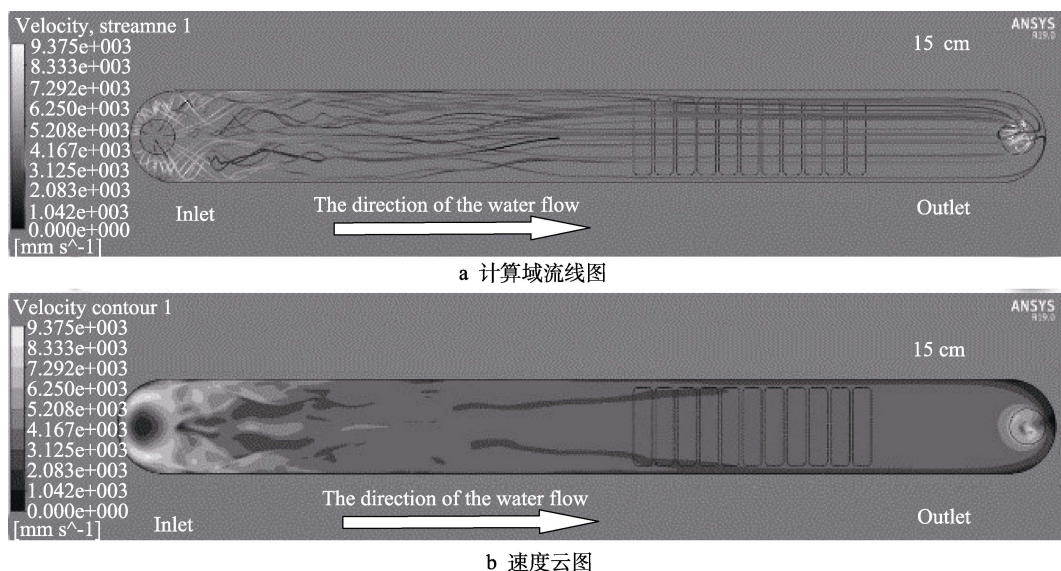


图 1 计算域流线和速度云图

Fig.1 Computational domain streamline diagram and velocity contour: a. computational domain streamline diagram; b. velocity contour

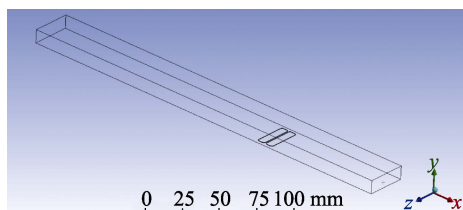


图 2 流道模型
Fig.2 Flow channel model

全超疏水表面的气膜变化如图 3b 所示, 由于没有亲水间隙, 在水压作用下气膜在第一时间从上一个凹槽迅速蔓延至下一个凹槽, 从而使得凹槽内的气膜迅速消失, 几乎对气膜没有束缚作用。

仿真结果证明了亲疏水间隔表面的气膜束缚效果比全超疏水表面更好。通过亲疏水间隔能够更好地实现气膜的稳定维持。

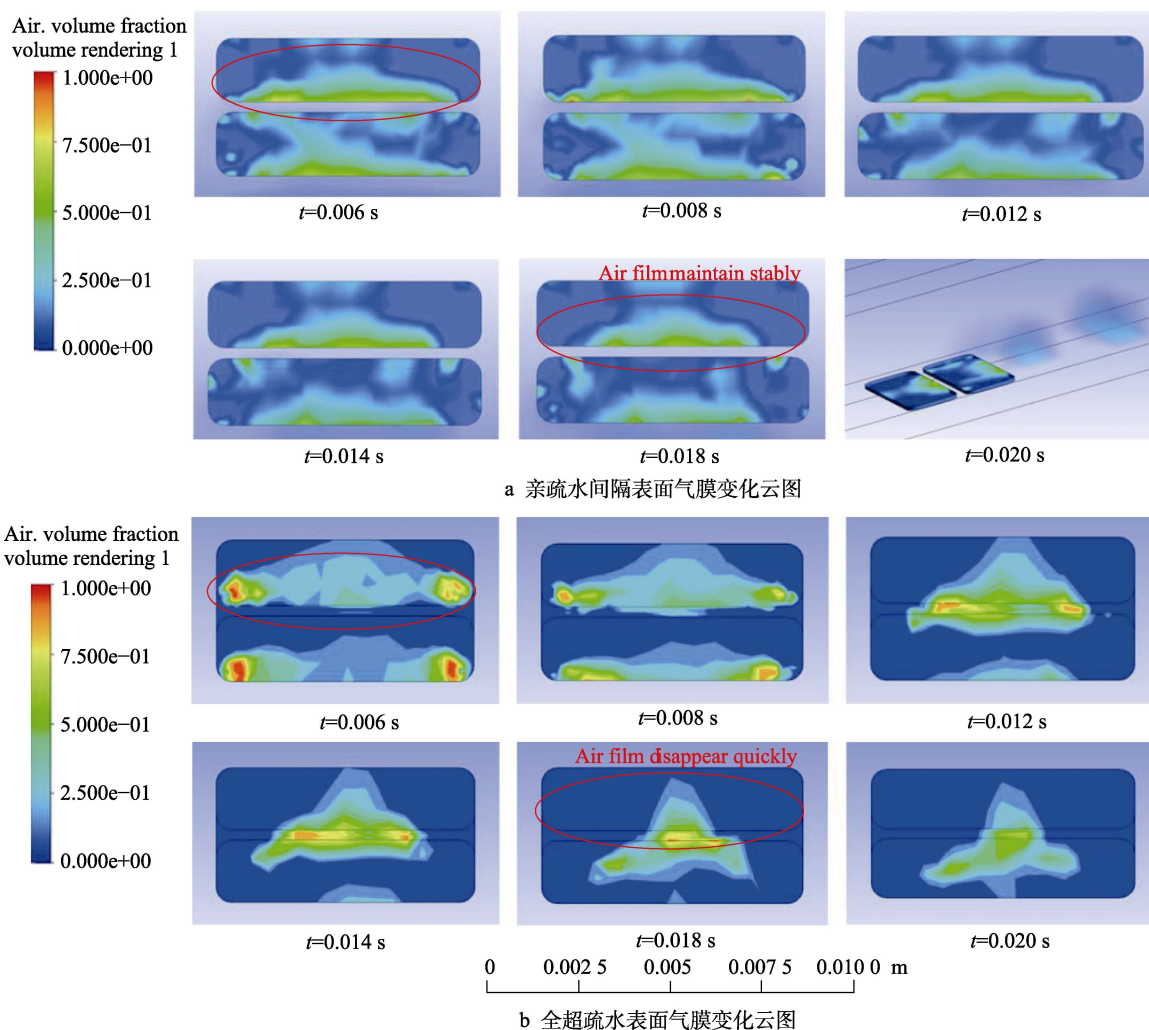


图 3 不同时刻 2 种表面气膜变化云图

Fig.3 Contour of gas film change in the groove at different time: a. contour of gas film on alternant hydrophilic and superhydrophobic surface, b. contour of gas film on fully superhydrophobic surface

2 不同表面水流冲刷实验

2.1 实验装置设计

根据实验段内流场分析结果, 制备出如图 4 所示的试验段, 流道长度为 300 mm, 流道宽度和高度分别为 30 mm 和 10 mm。采用机械铣削加工的方式加工凹槽, 结构尺寸与仿真中的结构尺寸相同, 垂直流向宽度为 25 mm, 沿流向宽度为 6 mm, 圆角半径为 1.5 mm, 深度为 0.3 mm, 凹槽间距为 1 mm。在制备出的实验段

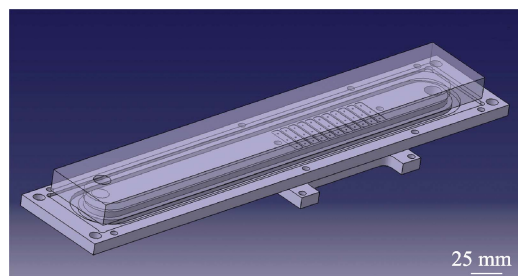


图 4 实验段示意图
Fig.4 Schematic diagram of experimental section

下底板上的每个凹槽内都开3个通气孔,用于供气。喷涂超疏水涂料,刮去实验段底板上表面超疏水涂层,只保留凹槽内表面为超疏水表面,制备出亲疏水间隔表面;对实验段下底板喷涂超疏水涂料,制备出全超疏水表面。如图5所示,测得亲疏水间隔表面凹槽内超疏水表面接触角为 151.6° ,亲水间隙接触角为 45.3° ;全超疏水表面选定表面接触角为 152.8° 。

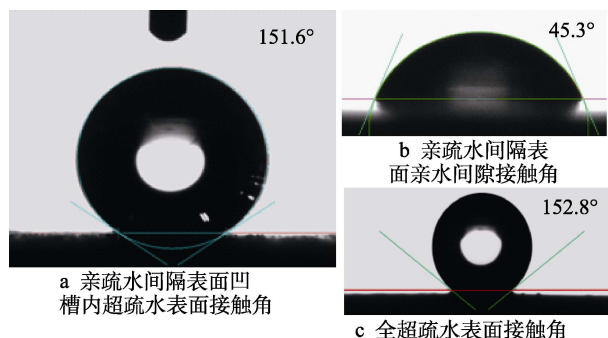


图5 亲疏水间隔表面和全超疏水表面接触角

Fig.5 Contact angle of alternant hydrophilic and superhydrophobic surfaces and fully superhydrophobic surfaces: a) contact angle of superhydrophobic surfaces in the groove on the alternant hydrophilic and superhydrophobic surface; b) contact angle of the hydrophilic gap on the alternant hydrophilic and superhydrophobic surface; c) contact angles of the fully superhydrophobic surface

考虑在通气孔和输气管路间加入一层具有防水透气性能的半透膜,从而实现单向供气维持气膜,因此无法采用传统水槽和水洞实验段将样品贴附在实验段内壁上的安装方式,所需水流冲刷实验装置必须自行设计。装置由实验段、产生水流的动力源和配套管路组成。

本文设计搭建了以水泵为动力的循环式水槽实验装置。搭建完成的整套水流冲刷实验装置如图6所示。

由于实验段内水流的流动状态为湍流,表面束缚的气膜处水流的速度大小和方向时刻都在改变,导致气膜的形状也在时刻改变,因此使用高速相机拍摄气膜受水流冲刷时的形状变化。为了能清楚拍摄到气

膜,采用在实验段上方布置LED平板光源的补光方式,高速相机在实验段侧面拍摄,能够使拍摄到的气膜呈黑色,超疏水表面呈粗糙的银白色,亲水表面呈平整的银白色。

2.2 亲疏水间隔表面水流冲刷实验

对实验段采用60 ml容量的注射泵进行供气,保持注射泵活塞推进速度为15 mm/min,改变实验段内流速,在不同流速下拍摄的亲疏水间隔表面气膜如图7所示,在每个超疏水凹槽表面都有气膜覆盖,并以红色椭圆圈出其中一个气膜以便区分气膜和周围亲水性表面。

由图7可见,在注射泵活塞推进速度为15 mm/min的条件下,亲疏水间隔表面在水流冲刷实验装置所能提供的0~1.2 m/s的流速范围内都能够将气膜维持在表面上。当流速为0.55 m/s时,单个凹槽表面覆盖的气膜各处形状并不一致,但局部外形仍然是平滑的。气膜能够以较高的高度束缚在表面上,且只有变形程度较大的气膜才会形成气泡脱离表面。随着流速的提高,气膜受到水流冲刷外形变化越发剧烈无序。在较高流速下,气膜在某一瞬间可能会有一定面积的超疏水表面暴露在水中,从图7可见超疏水表面的粗糙结构(红色方框标出),其可能是裸露的超疏水表面也可能是仍有一层极薄的气膜覆盖,但随即又会被气膜覆盖。在0~1.2 m/s的流速范围内,同一时刻大部分的超疏水表面都有气膜覆盖。

对于亲疏水间隔表面,气膜无法跨越凹槽之间的凸起部分向下游移动,而是形成气泡被水流冲刷走。水流速度越高,气膜脱离时形成的气泡越小、数量越多。

实验段采用60 ml容量的注射泵进行供气,保持实验段内流速为0.94 m/s,改变注射泵活塞推进速度。在不同供气速度下拍摄的亲疏水间隔表面气膜如图8所示,图8中在每个超疏水凹槽表面同样都有气膜覆盖,红色椭圆圈出的是在拍摄瞬间每张图中超疏水表面未被气膜覆盖的部分。

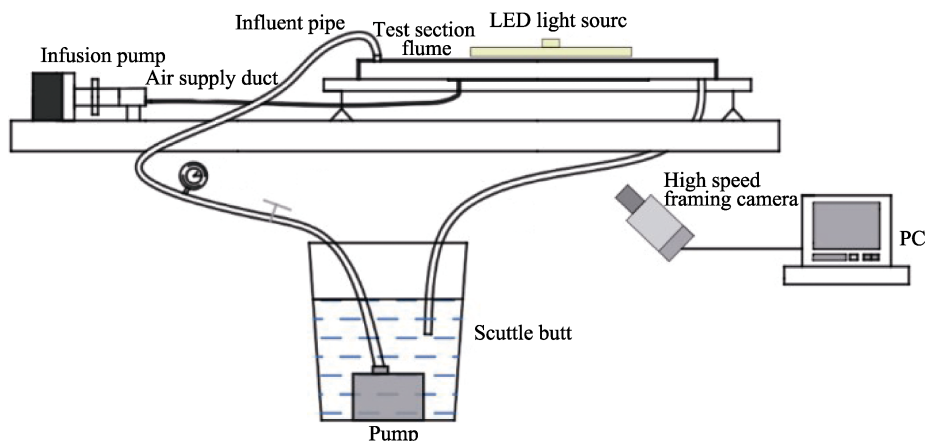


图6 水流冲刷实验装置

Fig.6 Experimental device for water flow scouring

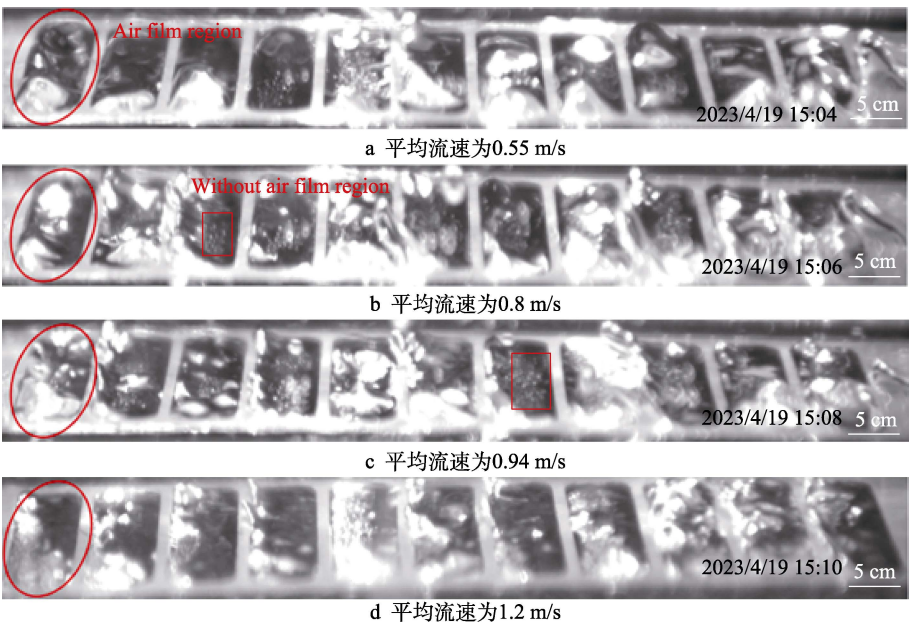


图 7 不同水流速度下拍摄的亲疏水间隔表面气膜
Fig.7 Films on alternant hydrophilic and superhydrophobic surfaces taken at different water flow speed: a) the average flow rate is 0.55 m/s; b) the average flow rate is 0.8 m/s; c) the average flow rate is 0.94 m/s; d) the average flow rate is 1.2 m/s

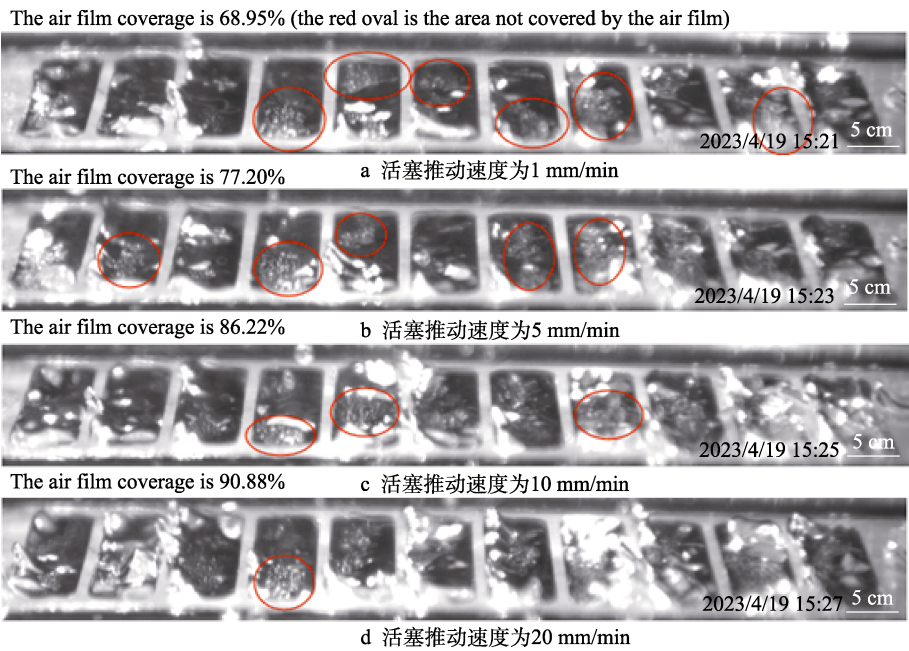


图 8 不同供气速度下拍摄的亲疏水间隔表面气膜
Fig.8 Films on alternant hydrophilic and superhydrophobic surfaces taken at different air supply speed: a) the piston pushes at 1 mm/min; b) the piston pushes at 5 mm/min; c) the piston pushes at 10 mm/min; d) the piston pushes at 20 mm/min

由图 8 可见,在实验段内水流速度为 0.94 m/s 的条件下,以 1 mm/min 到 20 mm/min 的注射泵活塞推动速度供气都能够在亲疏水间隔表面上维持气膜存在。在以 1 mm/min 的注射泵活塞推动速度供气时,亲疏水间隔表面上的气膜覆盖面积大体是不变的,由于供气量较少,供气只够维持表面原有的气膜存在,无法使气膜扩展到没有气膜覆盖的表面上。在以 10 mm/min 或更高的注射泵活塞推动速度供气时,能够确保每一

时刻亲疏水间隔表面的大部分超疏水区域都有气膜覆盖,仅部分超疏水区域可能在某一瞬间会由于水流冲刷而暴露在水中。可以发现,供气速度越低,变成气泡从表面脱离的气膜越少,供气速度越高,气膜受水流冲刷形状变化越剧烈,就会有越多的气膜变成气泡从表面脱离。

从亲疏水间隔表面的水流冲刷实验中可以发现,水流冲刷下的单个超疏水凹槽表面的气膜形状变化

剧烈,气膜各处受到冲刷可能会在气膜后缘形成多个相互独立的沿水流方向倾斜的凸起,但是气膜始终覆盖在凹槽内的超疏水表面,只有当供气过多使其气膜层过厚发生严重变形时才会以气泡脱离表面。

2.3 全超疏水表面水流冲刷实验

为了便于描述气膜和表面上凹槽的各边缘,将单个气膜或凹槽处于相对上游位置的边缘称为前缘,而处于相对下游位置的边缘称为后缘。

装置刚通入水时超疏水表面上会附着一层气膜,如果没有对表面进行供气,大部分气膜经过一段时间水流冲刷后会从表面上流失,如图9所示。只有在凹槽前缘处能够保留沿流向宽度极窄的气膜,凹槽边缘附近的黑色阴影即为气膜,为便于观察,用红色椭圆圈出其中一个气膜。



图9 未进行供气时的全超疏水表面
Fig.9 Fully superhydrophobic surface without air supply

对实验段采用60 ml容量的注射泵进行供气,在注射泵活塞推进速度为15 mm/min、实验段内平均流速为0.55 m/s的条件下,拍摄的气膜如图10a所示。可见在该流速和供气速度下气膜外形平滑,受到水流冲刷形状变化程度较小,气膜移动时始终紧贴超疏水表面,几乎没有气膜从表面脱离形成独立的气泡进入水流中。空气从通气孔中流出并在超疏水表面铺展形成气膜向下游移动,每一列通气孔流出的空气汇聚成长条形的气膜,能够跨越凹槽之间的凸起部分向下游移动。在每个凹槽内通气孔中流出的空气来不及铺满凹槽表面就被裹挟在这一列通气孔形成的长条形气膜向下游移动。凹槽表面只在前后边缘附近束缚有气膜,而凹槽的中间部分没有平滑的气膜覆盖。

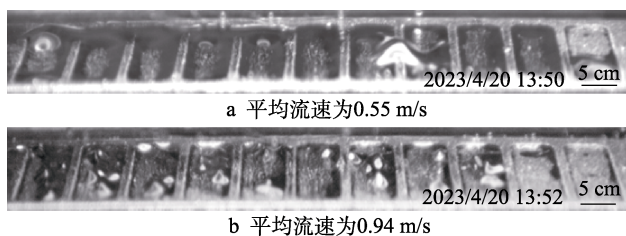


图10 不同水流速度下拍摄的全超疏水表面气膜
Fig.10 Fully superhydrophobic surface films taken at different water flow speed: a) the average flow rate is 0.55 m/s; b) The average flow rate is 0.94 m/s

保持供气速度不变,提高实验段内平均流速至0.94 m/s,拍摄的气膜如图10b所示。在0.94 m/s的实验段内平均流速下,以实验段水力直径为特征长度计算出的雷诺数为 $Re=14\ 030$,实验段内流动状态为湍流。从图10b中可见,气膜形状起伏较大,不再存

在能够在表面长时间存在的跨越多个凹槽之间的凸起部分向下游移动的长条形气膜。各凹槽内通气孔中流出的空气在凹槽内铺展汇聚成气膜,只有气膜前缘能够被凹槽束缚,气膜在凹槽上覆盖的区域时刻在变化,能够覆盖的面积基本不超过凹槽面积的50%。由于表面对气膜后缘几乎没有束缚作用,气膜会由于水流冲刷在某一瞬间跨越凹槽之间的凸起部分,使气膜内的一部分气体流入下游相邻凹槽内的气膜,几乎没有气膜从超疏水表面脱离形成独立的气泡进入水流中。气膜对表面的覆盖是动态的,气膜无法在整个凹槽表面铺展,也难以维持对凹槽内某一固定区域的覆盖。

3 水流冲刷下亲疏水间隔表面气膜束缚机理

通过使气膜三相接触线钉扎在亲水和超疏水区域分界处,亲疏水间隔表面能够在一定水流流速范围内将气膜束缚在超疏水区域表面。在水流速度不为零的情况下,亲疏水间隔表面上气膜的受力状态如图11所示。水流冲刷给气膜施加了一个沿来流方向的拖曳力 F_D ,亲疏水间隔表面产生了与 F_D 等大反向的束缚力 F ,与来流的拖曳力相平衡,从而将气膜束缚在原地。此外,气膜还受到周围水的压力 F_W 和表面对气膜的支持力 F_S 。

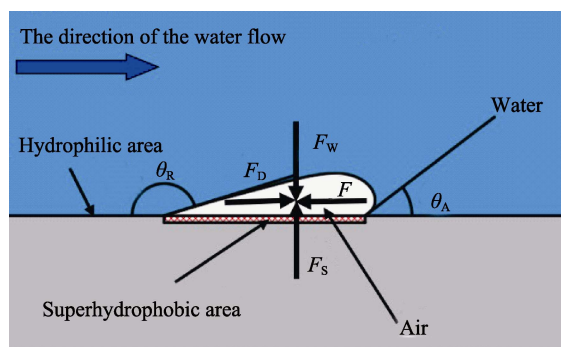


图11 气膜形变示意图
Fig.11 Schematic diagram of gas film deformation

水流的冲刷使气膜发生形变,造成气膜上游气体接触角减小,气膜下游气体接触角增大。一般认为,这种气膜前后接触角的不同产生了一个“卡特皮勒力”,或称“切向毛细力”,即为亲疏水间隔表面对气膜的束缚力 F 。该力的计算公式为:

$$F = \gamma_{AL} \omega (\cos \theta_A - \cos \theta_R) \quad (1)$$

式中, γ_{AL} 为气液表面张力, ω 为气膜的垂直流向宽度, θ_A 为气膜后缘的液体接触角, θ_R 为气膜前缘的液体接触角。

当气膜在表面上发生移动时,超疏水表面所在位置的部分气-液界面和固-气界面转变成新的固-液界面,即一部分超疏水表面发生沾湿;亲水性表面原本

完全是固-液界面, 气膜发生移动后转变为气-液界面和固-气界面, 即一部分亲水表面发生去沾湿。假设气膜垂直流向宽度为 ω , 位移距离为 dl , 则沾湿超疏水表面需要系统对外做功为:

$$W_1 = \gamma_{AL} \omega dl (1 + \cos \theta_R) \quad (2)$$

亲水表面发生去沾湿需要外界对系统做功为:

$$W_2 = \gamma_{AL} \omega dl (1 + \cos \theta_A) \quad (3)$$

气膜发生位移 dl 时外界所做的功为:

$$W = \gamma_{AL} (1 + \cos \theta_A) * \omega dl - \gamma_{AL} (1 + \cos \theta_R) * \omega dl \quad (4)$$

两边同除以 dl 可得到水流对气膜的拖拽力的合力为:

$$F = \gamma_{AL} (1 + \cos \theta_A) * \omega - \gamma_{AL} (1 + \cos \theta_R) * \omega \quad (5)$$

当气膜还未发生移动时, 表面对气膜的束缚力与水流的拖拽力等大反向, 将式(5)化简即得到式(1), 即为超疏水表面所能提供的最大的束缚力。

假设在均一的亲水性或超疏水表面上也能够形成三相接触线被束缚于表面上的气膜, 由于亲水性表面对空气表现为疏气性, 超疏水表面对空气表现为亲气性, 气膜截面形态和受力情况如图 12 所示。其中亲水性表面和超疏水表面对气膜提供的束缚力分别为 $F_{亲}$ 和 $F_{疏}$, 其大小仍然满足式(1)。

而对于图 12 中的亲水性表面, 气膜所受的束缚力为:

$$F_{亲} = \gamma_{AL} \omega (\cos \theta_{A亲} - \cos \theta_{R亲}) \quad (6)$$

式中, $\theta_{A亲}$ 和 $\theta_{R亲}$ 分别为水在亲水性表面上的后退角和前进角。

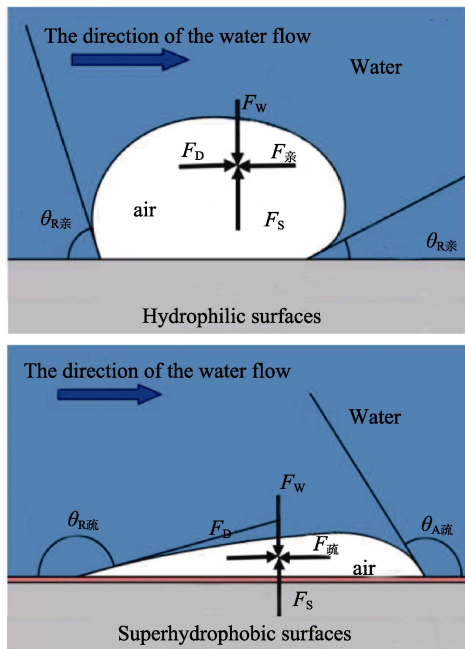


图 12 亲水表面和超疏水表面气膜形状变化示意图
Fig.12 Schematic diagram of the change of the gas film shape on alternant hydrophilic surfaces and superhydrophobic surfaces

对于图 12 中的超疏水表面, 气膜所受的束缚力为:

$$F_{疏} = \gamma_{AL} \omega (\cos \theta_{A疏} - \cos \theta_{R疏}) \quad (7)$$

式中, $\theta_{A疏}$ 和 $\theta_{R疏}$ 分别为水在超疏水表面上的后退角和前进角。

对于图 11 中的亲疏水间隔表面, 如果气膜发生移动将使亲水区域被去润湿而超疏水区域被润湿, 因此气膜两侧对应的液体接触角 $\theta_A = \theta_{A亲}$, $\theta_R = \theta_{R疏}$ 。

$$F_{亲} = \gamma_{AL} \omega (\cos \theta_A - \cos \theta_R) = \gamma_{AL} \omega (\cos \theta_{A亲} - \cos \theta_{R疏}) \quad (8)$$

由于 $\theta_{R亲} < \theta_{R疏}$, 对应的 $\cos \theta_{R亲} > \cos \theta_{R疏}$, 因此 $F_{亲} < F$; 同理, 由于 $\theta_{A疏} < \theta_{A亲}$, 对应的 $\cos \theta_{A疏} > \cos \theta_{A亲}$, 因此 $F_{疏} < F$ 。

从图 6~7 中可见, 水流冲刷下亲疏水间隔表面上束缚的气膜存在不同程度的起伏, 因此在垂直流向方向上气膜各个截面的前后接触角也并不相同, 因此需要对式(1)进行修正。在实际情况下, 气膜所受的束缚力应当为气膜在垂直流向方向上各个宽度为 dx 的截面按照式(1)计算出的束缚力之和, 即:

$$F_{亲} = \int_{x_1}^{x_2} \gamma_{AL} \omega (\cos \theta_A - \cos \theta_R) dx \quad (9)$$

式中, x_1 和 x_2 为气膜在垂直流向方向上首尾位置的横坐标。在实际情况下, 由于无法准确测量气膜在沿流向方向上各个截面的前后接触角, 并且气膜的外形在实时变化, 因此以现有的技术手段并不能根据式(9)准确地计算出气膜所受的束缚力大小。但式(9)表明气膜所受的束缚力与超疏水区域的垂直流向宽度正相关, 而其沿流向宽度对束缚力影响不大。

综上所述, 相比均匀的亲水性表面或超疏水表面, 由亲水区域和超疏水区域组成的亲疏水间隔表面能够因其前后接触角差异为气膜提供最大的束缚力。

4 结论

本文对亲疏水间隔表面和全超疏水表面进行了模拟仿真, 仿真结果证明了亲疏水间隔表面的气膜束缚效果比全超疏水表面更好。对 2 种表面进行水流冲刷实验, 分析其实验现象可得:

1) 在 0~1.2 m/s 的流速范围内, 亲疏水间隔表面始终能够在超疏水区域表面束缚一层气膜, 气膜对表面的覆盖面积近似等同于表面上超疏水区域的面积, 且气膜厚度大于表面凹槽的深度。

2) 全超疏水表面在较低流速时能够形成面积较大的连续气膜, 并且能够在凹槽内束缚住在垂直流向方向上尺寸较宽的气膜, 但在较高流速下气膜对表面的覆盖面积较低。

综上所述, 厘米尺度的亲疏水间隔表面具有好的气膜维持性能。

本文并没有对亲疏水间隔表面进行速度滑移和减阻测试, 但可以预见的是: 由于亲疏水间隔表面相比于全超疏水表面能够束缚住的气膜厚度更大, 因此表面的速度滑移将更大, 进而将产生更好的减阻效果。

参考文献:

- [1] BUTT H J, SEMPREGON C, PAPADOPOULOS P, et al. Design Principles for Superamphiphobic Surfaces[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(2): 418-428.
- [2] SRINIVASAN S, CHHATRE S S, MABRY J M, et al. Solution Spraying of Poly(methyl methacrylate) Blends to Fabricate Microtextured, Superoleophobic Surfaces[J]. *Polymer*, 2011, 52(14): 3209-3218.
- [3] SRINIVASAN S, KLEINGARTNER J A, GILBERT J B, et al. Sustainable Drag Reduction in Turbulent Taylor-Couette Flows by Depositing Sprayable Superhydrophobic Surfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(1): 014501.
- [4] LEE C, KIM C J. Underwater Restoration and Retention of Gases on Superhydrophobic Surfaces for Drag Reduction[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 014502.
- [5] CHOI C H, KIM C J. Large Slip of Aqueous Liquid Flow over a Nanoengineered Superhydrophobic Surface[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(6): 066001.
- [6] CHOI C H, ULMANELLA U, KIM J, et al. Effective Slip and Friction Reduction in Nanogated Superhydrophobic Microchannels[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(8): 781-482.
- [7] LEE C, CHOI C H, KIM C J. Structured Surfaces for a Giant Liquid Slip[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(6): 064501.
- [8] WANG Bao, WANG Jia-dao, CHEN Da-rong. A Prediction of Drag Reduction by Entrapped Gases in Hydrophobic Transverse Grooves[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(12): 2973-2978.
- [9] JAGDISH B N, XIAN BRANDON T Z, KWEE T J, et al. Experimental Study of Air Layer Sustainability for Frictional Drag Reduction[J]. *Journal of Ship Research*, 2014, 58(1): 30-42.
- [10] 朱效谷, 李勇, 李文平. 电解水式驻留微气泡减阻技术及其可行性分析[J]. *船舶力学*, 2014, 18(10): 1165-1174.
ZHU Xiao-gu, LI Yong, LI Wen-ping. Feasibility Analysis of Drag Reduction Using Trapped Micro-Bubbles by Water Electrolysis[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, 18(10): 1165-1174.
- [11] HEMEDA A A, TAFRESHI H V. Liquid-Infused Surfaces with Trapped Air (LISTA) for Drag Force Reduction[J]. *Langmuir*, 2016, 32(12): 2955-2962.
- [12] HU Hai-bao, WEN Jun, BAO Lu-yao, et al. Significant and Stable Drag Reduction with Air Rings Confined by Alternated Superhydrophobic and Hydrophilic Strips[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1603288.
- [13] KWON B H, KIM H H, JEON H J, et al. Experimental Study on the Reduction of Skin Frictional Drag in Pipe Flow by Using Convex Air Bubbles[J]. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(4): 1722.
- [14] 胡海豹, 王德政, 鲍路瑶, 等. 基于润湿阶跃的水下大尺度气膜封存方法[J]. *物理学报*, 2016, 65(13): 201-207.
HU Hai-bao, WANG De-zheng, BAO Lu-yao, et al. Maintaining Large-Scale Gas Layer by Creating Wettability Difference on Surfaces under Water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(13): 201-207.
- [15] 陈正云, 张清福, 潘翀, 等. 超疏水旋转圆盘气膜层减阻的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(3): 52-59.
CHEN Zheng-yun, ZHANG Qing-fu, PAN Chong, et al. An Experimental Study on Drag Reduction of Superhydrophobic Rotating Disk with Air Plastron[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(3): 52-59.
- [16] 张春来, 张丽霞, 王潇, 等. 沟槽型微纳复合结构表面的制备与减阻性能研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(12): 239-243.
ZHANG Chun-lai, ZHANG Li-xia, WANG Xiao, et al. Preparation and Drag Reduction Performance of Grooved Micro-Nano Composite Structure Surface[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(12): 239-243.
- [17] SAMAHA M A, VAHEDI TAFRESHI H, GAD-EL-HAK M. Modeling Drag Reduction and Meniscus Stability of Superhydrophobic Surfaces Comprised of Random Roughness[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(1): 89.

责任编辑: 马梦遥