文章编号:1007 - 4252(2021)05 - 0005 - 445

超疏水表面水下减阻技术研究进展

张春来,王　潇,吴银涛,王　波*
(北京工业大学 材料与制造学部,北京 100124)

摘要:超疏水表面能够通过形成水下气液界面有效降低流体的摩擦阻力,具有良好的减阻性能,在水下航行器、微流体器件及管道运输等领域有着广阔的应用前景。本文基于超疏水表面的润湿特性,讨论介绍了其表面产生减阻现象的机理,重点总结了国内外超疏水表面减阻效率的影响因素与水下气液界面增稳、恢复问题的研究现状。最后,对超疏水表面在水下减阻应用上面临的问题和发展前景进行了探讨,为超疏水表面水下减阻技术的研发工作提供参考。

关键词:超疏水表面;减阻;微结构;气液界面
中图分类号:TH117.1　　**文献标识码**:A

Research on Underwater Drag Reduction Technology of Super-hydrophobic Surfaces

ZHANG Chun-lai, WANG Xiao, WU Ying-tao, WANG Bo*
(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Superhydrophobic surface can reduce the flow resistance of liquid by forming underwater gas-liquid interfaces and has good drag reduction performance. It has broad application prospect in the field of underwater vehicles, microfluidic devices and pipeline transportation. Based on the wettability of superhydrophobic surface, the mechanism of drag reduction on superhydrophobic surface is discussed and introduced, and then the research status of the factors affecting the drag reduction efficiency of superhydrophobic surfaces, stabilization and recovery of underwater gas-liquid interfaces at home and abroad is focused on. Finally, the problems and development prospects of the application of superhydrophobic surface in underwater drag reduction are discussed, which can provide reference for the development of superhydrophobic underwater drag reduction technology.

Key words: Superhydrophobic surface; Drag reduction; Microstructures; Air-water interface

---

收稿日期:2021-08-19;　　**修订日期**:2021-09-24
作者简介:张春来(1997-),男,硕士,研究方向为微结构润湿调控与减阻性能(E-mail:zclyouxiang@emails.bjut.edu.cn).
通信作者:王　波(1966-),男,博士,教授,主要从薄膜材料和表面改性以及低温等离子体方面的研究(E-mail:wangbo@bjut.edu.cn).

0 引言

近年来,随着国家对海洋权益保护与海洋开发程度的不断加强,涉水航行器的综合性能急需进一步提升,特别是水面及水下航行器的降耗节能及速度提升,而航行器在水中行驶时产生的摩擦阻力是影响其耗能和速度的最主要原因。对于一些高速的水面舰艇,其摩阻占比达到行驶总阻力的 40% 以上,而对于如鱼雷、潜艇等水下航行器,该比例最高可达 80%[1]。研究发现:在动力和能源一定的条件下,若摩擦阻力减小 10%,则涉水航行器的巡航速度和航程将同时增加约 3.57%[2]。因此,设法减少涉水航行体表面的摩擦阻力有着广泛的应用前景和重要的战略意义。

依靠各种先进加工制造技术、测试手段以及流体理论的不断发展,已有的水下减阻技术主要有沟槽表面减阻、超疏水表面减阻、气泡减阻、添加剂减阻及柔性表面减阻等[3-5]。在过去的二十年里,利用超疏水表面来减小固体表面与流体之间的摩擦阻力已经引起了学者的广泛关注。这种减阻技术通过模仿荷叶微纳尺寸结构产生的超疏水效应,加工制备不同微结构的超疏水表面,将其应用于航行器及微流体器件表面来达到减小水下摩擦阻力的效果。此外,由于超疏水表面还能够防止海藻等海洋生物在船体上聚集,减少海洋生物产生污垢积累与附加拖拽力,使其在减少水下航行器能耗与速度提升上有着可观的应用前景。

本文从超疏水表面的润湿特性出发,分析了超疏水表面产生减阻现象的机理,总结了近年来超疏水表面减阻技术的研究进程与技术难题,并对超疏水减阻的发展前景与面临的问题进行了展望与探讨。

1 超疏水表面润湿特性与减阻机理

1.1 超疏水表面的润湿特性

对于固体表面而言,其润湿性主要指液滴在其表面铺展大小的能力,而固体表面的润湿性与其表面能、微观形貌及润湿液体属性都有关系。一般地,采用静态接触角和滚动角来表征固体表面的润湿性能。接触角是固、液、气三相交点处的气液界面切线与固液界面的夹角,滚动角是指水滴在倾斜面上由于重力作用开始发生滚动时该倾斜面相对于水平的夹角角度,可以用来表征固体表面对液体的粘附行为。当固体表面静态接触角小于 90°时,该表面为亲水性表面;当静态接触角大于 90°时,该表面为疏水表面;而静态接触角大于 150°且滚动角小于 10°的固体表面则被称为超疏水表面。拥有如此高的接触角和小的滚动角是因为超疏水表面满足两个重要条件:表面的粗糙微纳结构和极低表面能。因此,其制备方法也主要有两种途径:一是具有在低表面能的固体表面构筑微纳粗糙结构;二是对较高表面能的粗糙表面采用低表面能物质进行修饰[6]。

理想光滑固体表面的接触角满足经典 Young 润湿方程,其润湿模型如下图 1(a)中所示

$$\cos\theta_{Y} = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \tag{1}$$

式中,γ_{sg}、γ_{sl}、γ_{lg}分别为气固、固液与气液界面的表面张力。从 Young 方程可以看出,固体表面的接触角与表面张力系数密切相关。由于 Young 方程基于理想的光滑平面,而实际固体表面通常具有微观的粗糙结构,Wenzel 则提出了修正后的 Young 方程:

$$\cos\theta_{W} = r\cos\theta_{Y} \tag{2}$$

式中 r 为粗糙度因子,即固液两相实际接触面积与表观接触面积的比值。Wenzel 方程适用于粗糙度均匀的固体表面。实际上,当水在超疏水表面流动时,液滴与超疏水表面的接触是一种复合接触,即在超疏水表面上的液体并不能填满粗糙表面上的凹槽结构,在液滴下方有截留的空气存在,表观上的液固接触面是由气液界面和气固界面两部分所构成。如下图 1(c)中所示,液滴所处这种润湿状态被定义为 Cassie-Baxter 状态,这类复合接触的润湿状态都能够通过该理论模型来解释,其理论公式为:

$$\cos\theta_{C-B} = f_1\cos\theta_1 + f_2\cos\theta_2 \tag{3}$$

$$\cos\theta_{C-B} = f_1(\cos\theta_1 + 1) - 1 \tag{4}$$

公式(3)中,f_1、f_2是液、气接触面积数值,f_1与f_2的和为 1。θ_1和 θ_2是复合接触两相的本征接触角。当第二相为空气时,由于固气接触角为 180°,由此便可得到公式(4)。由上述模型与理论公式可得,处于该润湿状态下液滴的接触角与两相所占的面积分数有关,当第二相为空气时,固液接触面积 f_1 越小,接触角就越大,固体表面的疏水性能也就越好。因此,处在 Cassie-Baxter 润湿状态下的固体表面,可以通过减小固液面积分数来增强表面的疏水性。

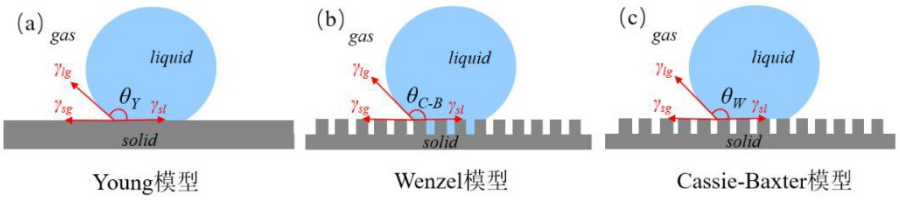

图 1　Young、Wenzel、Cassie-Baxter 经典润湿模型

Fig. 1 Classical models of surface wetting: (a) Young model; (b) Wenzel model; (c) Casssie-Baxter mode

1.2　超疏水表面的减阻机理

超疏水表面减阻特性背后的关键机制是微结构表面粗糙度和低表面能材料之间的协同作用。首先,一般的亲水固体表面存在较强的残余化学键,容易与液体分子之间产生很强的吸附能力。与亲水表面不同,由于超疏水表面本身所具有的低表面能效应,使得在固、液接触面上的超疏水固体分子对液体分子的吸引力比亲水固体分子要小,因此,液体流经这类固体表面时所受的阻力也要小[7]。

相比于表面的化学组成,超疏水表面的微观粗糙结构对流体流动阻力的影响则显得更为重要[8]。众多研究者一致认为:超疏水表面产生减阻现象的主要原因是其表面滑移现象的存在。如图 2(a)所示:当流体与固体表面之间存在一定的滑移速度,减小了流体与壁面之间的剪切力,则更接近理想状态的流体流动[9]。而超疏水表面上的气液界面是产生滑移现象的主要原因[7,10-13]。在下图 2(b, c)中:当超疏水表面微纳结构有液体流过时,由于微结构凹槽内部截留气体的存在造成与凹槽外部高速水流间的气液接触,形成的气液界面促使了滑移流动现象的产生。而滑移现象的存在减小了边界面上的速度梯度,从而降低了边界上的剪切力,推迟了层流附着面流态的转变,使得附着面的层流流态更加稳定,增加了层流边界层的厚度,产生减阻特性[14-15]。胡海豹等[16]采用模拟仿真的方法对湍流状态下具有特定微观尺寸的超疏水表面流场的减阻特性进行分析,结果表明: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。如图 3 所示,Wang 等[17]通过实验得到:当水流过表面时,微结构凹槽中形成涡流,涡流上部的旋转方向与来流方向一致,这使得流动剪切速率降低。凹槽中气体和涡流的存在会导致气液界面处产生滑移,该滑移会降低边界层的速度梯度,促使减阻效果的产生。此外,当超疏水表面与水接触时,表面可以固定一层气膜,利用空膜的阻隔作用,将原本的液固界面转换为气液界面和气固界面,从而减小液固接触带来的阻力[18]。

由于超疏水表面上的滑移效应、气液界面阻隔效应与表面组分中的疏水基团所产生低表面能效应的协同作用,使得超疏水表面在水下具有减小摩擦阻力的效果。

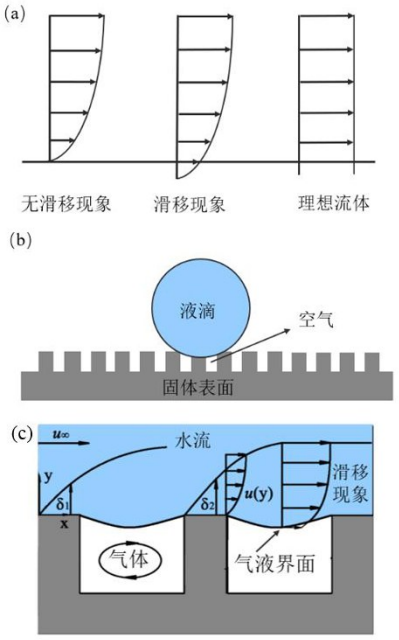

图 2　超疏水表面的滑移现象:(a)滑移表面对流体流动的影响;(b)超疏水表面液滴润湿状态;(c)超疏水表面滑移流动示意图[9,15]

Fig. 2 Slippage on superhydrophobic surfaces: (a) Effects of slip surface to fluid; (b) Wetting state of droplets on superhydrophobic surface; (c) Schematic of drag reduction mechanism of superhydrophobic surface [9,15]

2 超疏水表面减阻特性的研究现状

2.1 超疏水表面减阻效果的有效性验证

超疏水表面与光滑固体表面和其他微结构亲水表面相比,减阻效果的有效性已经得到充分证实。如今,先进加工制备技术与流体测试技术不断进步,国内外的研究者在前人的研究基础之上,通过各种方法制备多样的超疏水表面,评价其在减阻试验中的减阻效果。在各类超疏水微结构表 面与其他表面的减阻测试中发现:在一定条件下,超疏水表面带来的减阻效果明显大于其他表面,且在层流与湍流环境中都存在一定的减阻效果[17]。王二丹[19]利用高时间分辨率粒子图像测速技术,对超疏水壁面湍流边界层减阻机理进行了实验,研究发现:在雷诺数约为 13,500 时,超疏水壁面摩擦阻力减小 10.1%,超疏水壁面流体的平均速度明显大于相同流动条件下亲水壁面对应的位置速度。Liu 等[20]以鲨鱼皮肤表面为模板复制 PDMS 与 SiO_2混合物后再制成超疏水表面,如下图 4 所示,与亲水的鲨鱼表面结构相比减阻特性大大增强,实验中采用旋转粘度计测量时,最大的减阻率为 21.7%。Bhushan[21]通过测量通道中层流和湍流的压降验证了:超疏水性的管道可以带来减阻效果,且在湍流的减阻率高于层流。Park[22]同样验证了在湍流条件下超疏水表面的减阻效果,在其流动测试实验中减阻效果可达 75%。Tuo 等[23]采用水热方法在铝箔上制造了超疏水表面,用片状结构的薄膜来构造微观结构并减少其表面能,经实验表明在 2~5 m/s 的水流速度下,该超疏水表面在自行搭建的测试设备中的减阻率约为 20%~30%。Hossein 等[24]用 PDMS 和蜂蜡改性的 SiO_2纳米粒子制备超疏水表面,减阻试验表明,在雷诺数为 20,000 的内部湍流下,通过测量管道压降得出制得的表面可以减少高达 24%的阻力。

2.2 超疏水表面减阻效果影响因素

现阶段,随着对超疏水表面减阻性能的研究越来越多,在超疏水表面减阻效果有效性得到认证的同时,为追求最佳减阻效果,研究者们开始了对超疏水表面减阻效果影响因素的研究。Rastegari[25]利用格子玻尔兹曼方法分析发现:减阻率的大小与超疏水表面微观几何形状、尺寸、流体雷诺数都有关系。

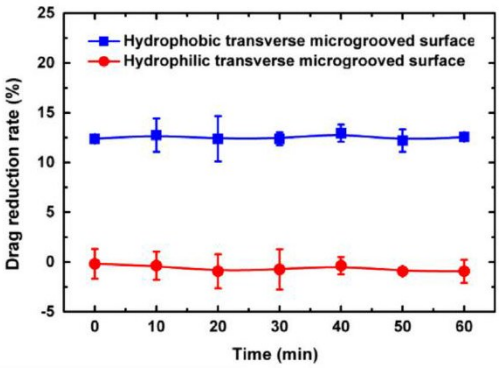

图 3 超疏水微沟槽表面与亲水微沟槽表面的减阻效果[17]

Fig. 3 The drag reduction effects of super-hydrophobic microgrooved surface and hydrophilic microgrooved surface [17]

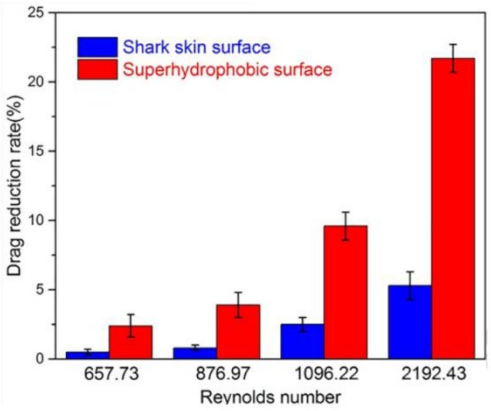

图 4 鲨鱼皮表面与超疏水表面在不同雷诺数下的减阻率[20]

Fig. 4 The magnitude of the drag reduction by using shark skin surface and superhydrophobic surface at different Reynolds numbers [20]

Michael[26]采用直接数值模拟也证明超疏水表面微特征几何构型影响着流体的滑移速度与壁面剪切应力。众多研究成果表明:超疏水表面减阻效果一方面与超疏水表面微结构的结构参数和排布有关,另一方面受超疏水表面流体环境状态的影响。

2.2.1 表面微结构尺寸对减阻效果的影响

研究发现,超疏水表面的微结构尺寸是影响液体浸润状态稳定性及减阻效果的重要因素[8,12]。研究者们通过设计,制备出规则、尺寸可控的微结构表面,来探究不同微结构宽度、间距、深度等尺寸参数对减阻效果的影响。Daeian[27]对有沟槽疏水壁的通道中的流动进行模拟分析:更大的微凹槽间距和更小的固液接触面积更有利于实现压降的降低。同

时,凹槽的宽度直接关系到减阻和增阻效果的转变。Mohammadi 等[28]研究四类沟槽结构在层流状态下的减阻效果,经研究表明:对于每一类凹槽,都存在一个最佳的凹槽间距来实现其最佳的减阻效果。宋保维[29]采用数值仿真方法来探究超疏水表面凹槽结构在层流状态下的减阻效果发现:超疏水微结构表面的减阻率随槽宽的增大先增大后减小,但受凹槽微结构的深度影响不明显。喻超[30]用同样的方法发现:呈微凸起形状的微结构间距对超疏水表面的减阻效果有显著影响,微凸起间距增大,超疏水表面在层流下的减阻效果也明显增强。而对于复杂的湍流状态,崔庆泽[31]在布置有微结构的超疏水通道中发现无量纲压降比和微通道平均摩擦因子均随凹槽宽度增大而减小,当凹槽宽度增大到某一值时出现减阻的效果,但受凹槽深度的影响不显著。由以上研究可以发现超疏水表面微结构尺寸对于减阻效果的影响规律:超疏水表面的减阻效果受微结构深度的影响不大,随微结构间距的增大而增大,但随微结构宽度的增大呈现先增后减的趋势。事实上,无论是增大微结构间距还是增加其宽度,当其尺寸变化趋向于产生更大的气液接触面积时,则更有利于水下摩擦阻力的减小。

2.2.2 表面微结构形貌对减阻效果的影响

在一些理论研究中,具有相同的固体面积分数的超疏水被认为具有相同的减阻效果[11]。但在实际实验研究中,一些固体面积分数相同、微结构形状不同的超疏水表面的减阻效果却相差甚远,这是由于不同形状的微结构对气液界面的稳定效果与流体之间的相互作用也不相同[32-33]。因此,众多周期性排布且不同形貌的微结构表面(如图 5 所示)对减阻效果的影响受到研究人员的广泛关注[34]。Mohammadi 等[28]设计研究三角形、梯形、矩形和圆形四类沟槽结构在层流状态下的减阻效果发现:在实验可控参数范围内,梯形沟槽可以获得更好的减阻效果,而三角形沟槽的减阻效果最差。李春曦[35]应用数值模拟的方法研究矩形、梯形、三角形和燕尾形 4 种不同微坑形状对于表面压降和压降比的影响,结果如图 6 所示,研究发现,相比于其他 3 种形状,燕尾形微坑更有利于气相内旋涡运动的发生,从而在气液界面处产生更大的局部滑移速度。宋保维[29]研究的矩形、U 形、V 形三种凹槽结构在相同层流状态和尺寸参数下,矩形凹槽比另外两种形状展现出了更优的减阻效果,且在来流速度加大的情况下,矩形凹槽上的滑移速度依然高于 U 形、V 形两种。

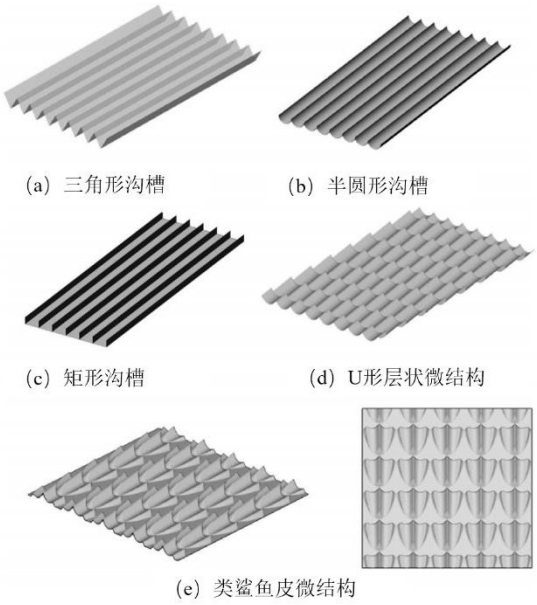

图 5　五种不同形貌沟槽型微结构:(a)三角形沟槽;(b)半圆形沟槽;(c)矩形沟槽;(d)U 形层状微结构;(e)类鲨鱼皮微结构[34]

Fig. 5 Five types of micro-structured surfaces. (a) Triangle grooves; (b) Semicircular grooves; (c) Rectangle grooves; (d) U-shaped grooves; (e) Shark-like skins microstructure [34]

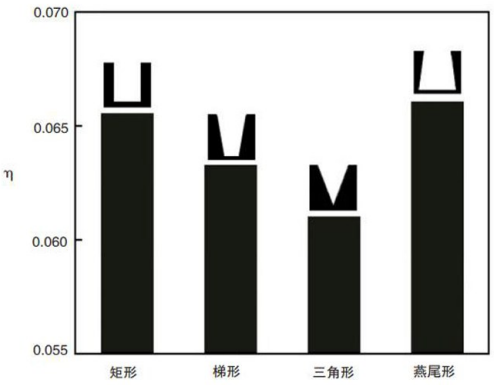

图 6　四种不同微坑形状对压降比影响[35]

Fig. 6 Effect of cavity shapes on reduction in pressure drop [35]

2.2.3 表面微结构排布对减阻效果的影响

除微结构的形状与尺寸外,微结构的排布也会对减阻效果产生影响。国内众多研究中主要有两种微结构排布方式:流向排布与展向排布。研究发现,

当超疏水表面微结构排布方向与流体流动方向一致时,即按流向排布时,其减阻效果最好。而当微结构按照展向排布,即与流体流动方向垂直时,在一定条件下则会增加表面的流动阻力。在 Mohammadi[28]的研究中发现:当微结构凹槽对准流动方向并对称分布时的减阻效果最佳。且在两个壁面上放置相同的凹槽,与只在一个壁面上排布凹槽相比,可以减少最多四倍的阻力。崔庆泽[31]在具有展向微观结构的超疏水表面微通道发现了展向排布微结构所带来的增阻现象。Woolford 等[13]在雷诺数从 4,800 到 10,000 的范围内,采用粒子图像测速技术比较了流向与展向微结构对于减阻效果的影响,研究发现:流向微结构相比于展向具有较低的湍流强度以及较低的底部壁面附近总剪切应力和湍流应力,流向排布的微结构减阻效率达 11%,而展向微结构则增阻 6.5%。

2.2.4 流体对减阻效果的影响

除受超疏水表面微结构的影响外,流经超疏水表面流体的速度与状态对表面本身发挥减阻性能也有极为重要影响。对于一定尺寸形状的超疏水微结构表面,随着流体雷诺数的增加,其减阻效果与可持续性都会降低[25],甚至可能出现增阻现象。Jagdish[36]采用涂覆疏水涂层的微结构进行水下气层减阻的可持续性研究,如图 7 所示,观察从低流速过渡至高流速时表面上气层的分布状态发现:气层由原来的稳定附着变化至逐步脱附状态,气层的脱附也造成了减阻效果的减弱与丧失。同时众多的研究也表明:超疏水表面的减阻效果随着来流速度的增大而减弱。刘征[18]对超疏水微通道建立数学模型,研究其中的流体流动状态并与实验结果进行比对,研究发现随着雷诺数的增加,数值模拟与实验结果中的滑移长度都在减小。Song[37]利用环带实验测试疏水涂层的减阻特性发现:低雷诺数下各疏水涂层都具有减阻效果,但随着雷诺数的增加,减阻效果都迅速减弱,并存在一个临界的雷诺数值,决定着增阻效果的产生。李春曦等[10]探究了微通道壁面阻力和减阻率随雷诺数的变化,随着雷诺数的增加,压差阻力、粘性阻力及总阻力均呈线性增长,减阻率则呈线性下降趋势。

2.3 超疏水表面气液界面增稳与可恢复性研究

众多的研究结果证明,超疏水表面虽在静水下

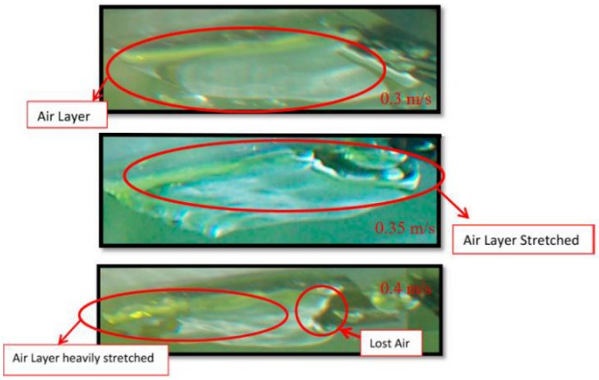

图 7 不同流速下表面气层的附着状态[36]

Fig. 7 Adhesion state of air layer at different velocity [36]

表现出好的气体覆盖效果,但是一旦暴露于剪切流,其表面气体覆盖率则急剧下降[38]。当面对复杂的湍流环境,受流速、水深、水压等因素的影响,流体开始渗入超疏水微结构表面的粗糙处,液体的润湿状态也将发生改变。Zheng 等[39]采用数值模拟的方法揭示了液滴从 Cassie-Baxter 到 Wenzel 润湿状态的转变过程,发现其转变特征是存在临界水压与临界的气液界面下沉深度。处于 Wenzel 状态的微结构内部气体会消失,固体和液体之间的接触面积较之前状态大大增加,微结构表面不能再提供减阻效果。此外,在某些情况下,施加在表面上的阻力很可能超过原始表面上的摩擦阻力,从而带来增阻效果。因此,如何提高气液界面的稳定性以抵抗浸润转变过程,以及在液气界面失稳之后,如何实现浸润过程以提高液气界面的可恢复性能,具有重要的科学研究意义和应用价值,尤其是现阶段的气液界面稳定与持续的研究多集中于静水环境,而面对复杂的流体状态,气液界面的增稳与恢复也是超疏水减阻技术真正应用于工程领域所要面临的重要问题。

2.3.1 微结构调控对气液界面的增稳效果

现有实验研究表明:合理的双尺度微结构表面设计是提高液气界面的稳定性、可恢复性从而实现长效减阻行之有效的方法[40-41]。双尺度结构由于添加纳米二级结构使原有表面的固体面积分数再次减小,拥有更大接触角和滚动角的同时为气液界面提供了更多的钉扎位置,从而进一步提高了气液界面的稳定性。处于 Cassie 润湿状态的双尺度超疏水表面也更难向 Wenzel 状态转变,这使得这类表面在复杂的湍流中能够更好维持疏水特性[19]。Lee 和

Kim[42]通过 Au 辅助多孔硅结合硅 DRIE 刻蚀工艺制备双尺度超疏水微纳结构，经研究发现：由于双尺度复合微纳结构为原有的气液界面提供了更多的钉扎位置，同时使得微结构表面的非润湿稳定性大大增强，使得该双尺度结构实现了最大 400 μm 的滑移长度，相比于单尺寸结构提升了 100%。杨松默[43]制造了位于微结构侧壁与底部的多级结构，探讨了不同位置、不同构型的次级结构对液气界面的稳定性和可恢复性的影响机制，指出位于侧壁的双尺度微结构增加了气液界面的稳定性，而处于底部封闭式的多尺度微结构更有益于纳米气泡的封存和水中气体的捕捉聚集，从而促进了气液界面和恢复。Taghvaei 等[33]验证了具有分级结构粗糙度的微、纳米颗粒涂层表面比单一纳米颗粒涂层表面有更好的减阻特性，如下图 8 所示，双尺度涂层可以在更大的流速与雷诺数范围保持稳定的减阻效果。Zhang[44]在钢基底上采用刻蚀 ZnO 纳米线的化学工艺，使所得的样品表面呈现出二元的多层次微观纳米结构，经实验测量样品的减阻率达到 40%~50%。

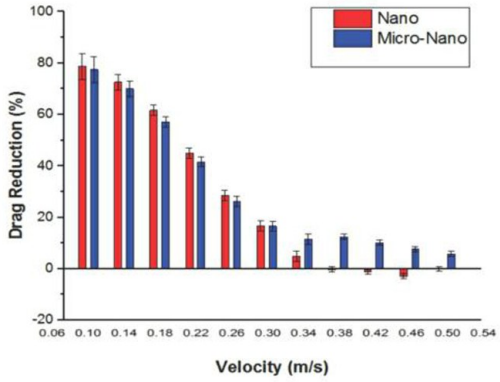

图 8　单、双尺度微结构涂层在不同流速下的减阻率[33]

Fig. 8 Drag reduction for 2 different samples: Nano particle coating and micro-nanoparticle coating [33]

除微结构的层级外，超疏水表面气液界面的稳定性与微结构尺寸、形貌均有一定关系。与结构简单可重复性好的简单微结构相比，具备特殊尺寸和形貌的微结构可以有效防止气液界面失稳并延长其寿命。Liu 等[45]在二氧化硅结构表面加工出双折型圆台微柱，微结构扫描电镜图如图 9(a)所示，此微结构在亲水时也可以维持 Cassie-Baxter 状态，同时展现出优异的抗液体侵入能力提高了气液界面的稳定性。Luo 等[46]设计并采用自组装与光刻工艺相结合的方法制备了具有优异超疏水性的周期性镂空金字塔微结构，该微结构在其微柱之间保留了相当大气体的空间，而被镂空金字塔状结构包围的间隙则更有利于空气的滞留，因此该表面展现出出色的在水下保留空气的能力。姚朝晖[11]研究了 6 种不同微纳结构的超疏水表面的减阻效果以及表面微结构形状对气液界面稳定性的影响，并设计了一种具有双内凹形(伞状)微结构表面的微槽道，从图 10 中液滴在各个微结构的钉扎状态看出：相比于简单的柱状微脊和单内凹 T 形状微脊结构，其结构内部的气液界面最终钉扎在形微结构的第二拐角处，壁面对界面的张力完全用来与槽道压差相抗衡，表面张力的能效发挥到最大。研究表明：在伞状表面为亲水性材料的同时，也能够有效捕捉气体，形成稳定的气液界面。

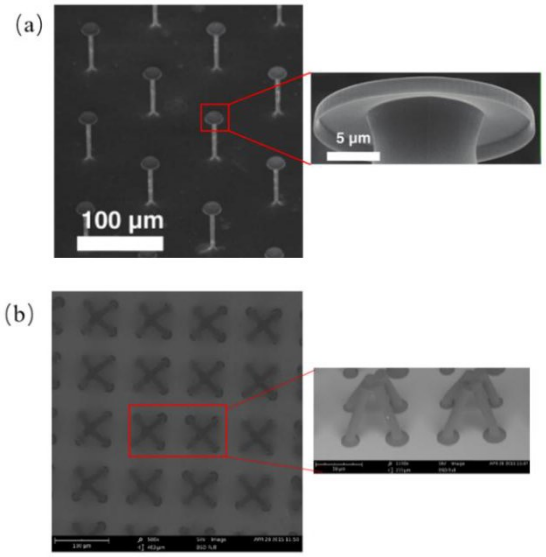

图 9　(a)双折型圆台微柱结构[45]与(b)周期性镂空金字塔微结构[46]

Fig. 9 SEM images of special microstructures: (a) Surface of microposts with doubly reentrant nanooverhangs [45]; (b) Surface of the hollowed-out pyramid-like aeeays [46]

2.3.2 气体补充对气液界面的维持与恢复作用

除采用微结构调控的方法来稳定或封存气体之外，对超疏水表面进行气体补充也是一种恢复维持气液界面减阻效果的有效途径。现阶段，关于气体补充的研究也可大致分为气体调节、原位产气、气体注入三大类。通过气体调节来进行气体补充的主要原理是通过改变微结构表面水的绝对温度或绝对压

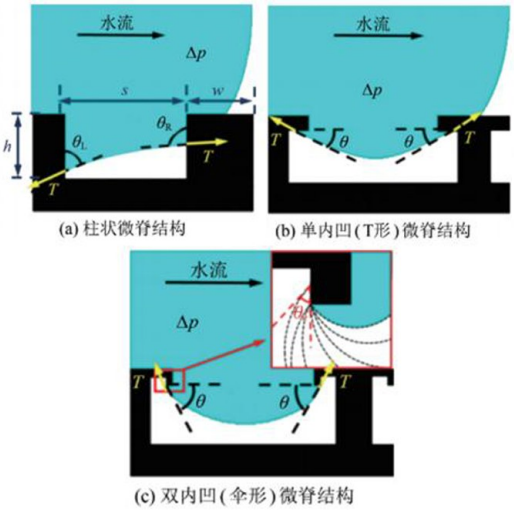

图 10 三种结构上方的气液界面情况及力平衡关系示意图[11]

Fig. 10 Schematic diagrams illustrating the air-water interface for three types of micro-ridge structures and force balance [11]

力调节气体在水中的溶解度,迫使水中溶解的气体释放出来对气层起到补充和维持的作用。Dilip[47-49]通过改变压力来改变水中空气的溶解度来恢复 Cassie-Baxter 状态,实现了表面气层的长时间维持,但考虑到要使水中的空气处于过饱和状态需要 Cassie 保持低于大气压的压力在实际工程应用中具有难度,Dilip[49]又探究了通过外部加热来改变微结构表面水的绝对温度从而维持气液界面存在的可能性,研究发现:通过改变外部的热量输入,能够使气泡长时间的维持在疏水表面,从而实现长效减阻。

在超疏水表面原位产气补气最为广泛的研究是水的电解。电解方法是通过外加电极的辅助,连接特殊设计的超疏水表面并接通电源,一旦超疏水表面气膜遭受破坏,水进入到微结构当中接通电极,电解水产生的气体使得超疏水表面气层重新恢复,从而使气层达到一种动态平衡。水电解方法涉及到复杂的微型电极与特殊微结构的设计与加工,但相比其他的补气方法,其功耗更低,产生的气体更加稳定,也更容易集中于系统中。Lee[50]利用电解水配合纳米微结构表面来进行超疏水的气体补充,在小电路的功耗下实现了在完全润湿的表面上气层的重新恢复。Stephani[51]用同样的电解技术在表面微结构中生长并维持气泡,经大块不间断气层附着平板的流动测试阻力减小达 32%。胡海豹等[52]利用外加石墨电极装置,通过电解海水补气装置实现了超疏水表面气膜的恢复和稳定,验证了在超疏水表面电解海水实现补气的可行性。除电解水的实验思路之外,Liu[53]采用加热的方法加热微结构表面液体使之转变为水蒸汽,使得丧失气液界面的微结构从更稳定的 Wenzel 状态转变为 Cassie 状态。Panchanathan 等[32]利用化学方法在超疏水表面上用催化涂层分解过氧化氢来进行原位的气体补充,在激光纹理化的铝表面上用二氧化锰催化剂制造合适的疏水结构,添加过氧化氢后,在微结构完全湿润的状态下获得 51±14%的气泡回复率。

气体注入的方式主要通过气体储存区域向所需供气位置提供持续的气体供应来实现,该方法需要很好地控制储气区域内的压力,才能有利于气体的扩散与补充,另外,排出的气体不会立即附着于所需位置,表面补气效率较低。将超疏水表面减阻特性与气体注入方式相结合,通过人工通气恢复超疏水表面 Cassie 的状态和气液界面上的滑移现象,在该方法下达到了 20%的减阻效果。冯家兴[54]进行超疏水沟槽表面通气减阻实验,分析其减阻规律以及气膜铺展状态,发现:通气是长期维持超疏水沟槽表面气膜层和减阻性能的一种有效方式,且在固定流动条件下存在减阻效果最佳的通气速率。

3 面临问题与发展前景

从上世纪末超疏水减阻技术被研究者发现至今,超疏水表面在水下减阻的有效性已经被逐步证实,同时大量的实验研究使其减阻机理渐渐清晰。但超疏水表面实际应用于水下工程领域仍需更多的科学证明与实验探索,而在这过程中有几个重要问题仍需解决:

1)关于超疏水表面的气液界面的增稳与恢复问题是需要攻克的技术难点。众多研究者采用各式各样的微结构调控气液界面,增加界面的稳定性。但这也带来了制作加工上的难度,形貌与尺寸复杂的微结构带来更持久减阻效果的同时也增加了其生产成本和工艺步骤,使其难以大规模制备成型。因此,开发经济、简单的加工方法获得特殊的微观结构,以达到稳定持久的减阻效果仍需要进一步的实验研究。气体补充来恢复与维持气液界面的方法的有效性虽已得到验证,但气体补充又引入了额外的能量消耗或化学物质,尤其面对大面积的补气供应,

需要更复杂的供气设施与气体管道,同时该方法带来的环境安全与环保问题仍需进一步考量。

2)面对复杂的水下环境,超疏水表面的微纳米级粗糙结构易受到摩擦、冲击等机械破坏与海水的化学侵蚀,使超疏水表面失去超疏水性能。这就要求超疏水表面有较好的硬度、耐腐蚀性、耐久性与抗冲击性能,而现如今许多超疏水表面加工制备技术的研究仍处于实验探索阶段。值得期待的是,已有很多的研究者在探究超疏水表面减阻效果的同时,兼顾到这些问题。Taghvaei[33]所制备的微、纳米颗粒涂覆的超疏水减阻表面在水中浸泡 80 h 后仍然具备超疏水性,具备较好的耐用性。Hossein[24]采用改性 SiO_2粒子所制得的超疏水表面浸泡在海水、酸性和碱性溶液等环境中表现出良好的耐久性。Luo 等[46]制备出的超疏水表面具有出色的环境耐用性与抗冲击性能,在减少水下摩擦阻力、自清洁等方面具有应用潜力。

3)各种减阻方法在减阻效果的稳定性、制造难度、生产成本等方面的差异决定了单一的减阻方法可能无法满足实际需求。多种减阻技术的结合无疑会大大提高适用性和减阻效果。例如:将超疏水表面与沟槽表面联合协同,利用沟槽特殊结构来减弱来流对超疏水表面气液界面的破坏作用,可以在大幅提升气液界面的稳定性的同时获得优异的减阻效果[42]。

超疏水表面减阻作为一种新型的水下减阻技术,在众多水下工程领域有着广阔的应用前景。如今,其减阻作用的有效性已经充分得到证实。目前普遍的超疏水表面水下减阻机理已经得到国内外研究者的公认,一系列实验研究也探明了影响超疏水减阻效果的众多因素。微结构内部气液界面的稳定性与超疏水表面浸润状态的转变与减阻效果的维持密切相关。因此,面对现实中水下复杂的湍流或高剪切流的环境,气液界面的增稳与恢复仍是接下来超疏水减阻技术发展过程中所需要探究的难点。另外,在保持疏水和减阻特性的同时应兼顾超疏水抗磨损性能与耐久性能,使超疏水表面真正在水下减阻领域得到广泛应用。

参考文献:

[1]Ren J. Research on drag reduction technology of underwater vehicle [J]. Machinery, 2012, 50(576): 51-53.

[2]Guo R S, Wei Q B, Wu Y, et al. Fabrication and drag reduction of controllable wetting surfaces [J]. Tribology, 2015, 35(1): 23-30.

[3]Huang C H, Wei J J, Wei W, et al. Experimental study on the collaborative drag reduction of surfactant and longitudinal microgrooves [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 150-156.

[4]Li E T, Hu X, Guo L H, et al. Coupling effect of microgroove and surfactant on turbulent drag reduction in a pipe flow [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(5): 959-966.

[5]Perlin M, Dowling D R, Ceccio S L. Freeman Scholar Review: Passive and Active Skin-Friction Drag Reduction in Turbulent Boundary Layers [J]. Journal of Fluids Engineering, 2016, 138(9): 1104-1119.

[6]Ren L Z, Hu H B, Song B W, et al. Research on underwater drag reduction of superhydrophobic surface [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2020, 3(3): 204-211+177.

[7]Hao X Q, Wang L, Ding Y C, et al. Study on the dray reduction of the superhydrophobic surface [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(9): 25-28.

[8]Ahmad K, Zhao X, Pan Y. Effect of surface morphology on measurement and interpretation of boundary slip on superhydrophobic surfaces [J]. Surface and Interface Analysis, 2017, 49(7): 594-598.

[9]Yu G F, Liu H W. Analysis on drag reduction of superhydrophobic surface based on slip theory [J]. Tribology, 2013, 33(2): 191-195.

[10]Li C X, Zhang S, Ye X M. Effect of interfacial curvature on drag reduction of superhydrophobic microchannels [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2405-2413.

[11]Yao Z H, Zhang J X, Hao P F. Effect of surface micro/nano-structure on gas-water interface stability and flow drag reduction [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(2): 73-79.

[12]Xu S, Ye X, Fan Z M, et al. Research on the drag reduction performance of biomimetic superhydrophobic surfaces [J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 2021, 27(2): 49-57.

[13]Woolford B, Prince J, Maynes D, et al. Particle image velocimetry characterization of turbulent channel flow with rib patterned superhydrophobic walls [J]. Physics of Fluids, 2009, 21(8): 5106-5117.

[14]Ke X G, Pan G, Huang Q G, et al. Summary of research on underwater drag reduction technology [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(5): 546-554.

[15] Huang Q G, Pan G, Wu H, et al. Investigation about drag reduction water tunnel experiment and mechanism of superhydrophobic surface [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(5): 21-25.

[16] Song D, Hu H B, Song B W. Numerical simulation research on drag reduction characteristics of superhydrophobic surface flow field in turbulent state [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(2): 233-237.

[17] Wang B, Wang J D, Dou Z L, et al. Investigation of retention of gases in transverse hydrophobic micro-grooved surfaces for drag reduction [J]. Ocean Engineering, 2014, 79(1): 58-66.

[18] Liu Z, Yu Z J. Numerical simulation of flow in superhydrophobic micro-circular tubes [J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(9): 897-900.

[19] Wang E D, Tian H P, Zang J X, et al. TRPIV experimental investigation of drag-reduction mechanism in turbulent boundary layer over superhydrophobic surfaces [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(12): 2870-2877.

[20] Liu Y B, Gu H M, Jia Y, et al. Design and preparation of biomimetic polydimethylsiloxane (PDMS) films with superhydrophobic, self-healing and drag reduction properties via replication of shark skin and SI-ATRP [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356(9): 318-328.

[21] Jung Y C, Bhushan B. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2010, 22(3): 5104-5112.

[22] Park H, Sun G, Kim C J. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 747: 722-734.

[23] Tuo Y J, Chen W P, Zhang H F, et al. One-step hydrothermal method to fabricate drag reduction superhydrophobic surface on aluminum foil [J]. Applied Surface Science, 2018, 446(15): 230-235.

[24] Pakzad H, Liravi M, Moosavi A, et al. Fabrication of durable superhydrophobic surfaces using PDMS and beeswax for drag reduction of internal turbulent flow [J]. Applied Surface Science, 2020, 513(30): 145754.

[25] Rastegari A, Akhavan R. On drag reduction scaling and sustainability bounds of superhydrophobic surfaces in high Reynolds number turbulent flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 864: 327-347.

[26] Martell M B, Perot J B, Rothstein J P. Direct numerical simulations of turbulent flows over superhydrophobic surfaces [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 620: 31-41.

[27] Daeian M A, Moosavi A, Nouri-Borujerdi A, et al. Drag reduction in a channel with microstructure grooves using the lattice Boltzmann method [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(10): 5301-5310.

[28] Mohammadi A, Floryan J M. Numerical analysis of laminar drag reducing grooves [J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(4): 1-12.

[29] Song B W, Yuan X, Hu H B. Research of superhydrophobic surface flow field and simulation study of drag reduction characteristics in laminar flow [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(5): 712-717.

[30] Yu C, Chen X L, Sun L. Numerical simulation of the effects of surface morphologies on drag reduction of superhydrophobic surface in laminar flow [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 30(2): 312-322.

[31] Cui Q Z, Li C X, Ye X M. Effect of structural parameters on the turbulent resistance characteristics of superhydrophobic microchannels [J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(7): 52-57.

[32] Wu T, Chen W, Zhao A G, et al. A comprehensive investigation on micro-structured surfaces for underwater drag reduction [J]. Ocean Engineering, 2020, 218(2): 107902.

[33] Li C X, Zhang S, Xue Q X, et al. Drag reduction of superhydrophobic microchannels based on parabolic gas-liquid interfaces [J]. CIESC Journal, 2016, 67(10): 4126-4134.

[34] Jagdish B N, Brandon T Z X, 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.

[35] Song B W, Guo Y H, Luo Z Z, et al. Investigation about drag reduction annulus experiment of hydrophobic surface [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(15): 1-7.

[36] Hokmabad B V, Ghaemi S. Effect of flow and Particle-Plastron collision on the longevity of super hydrophobicity [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-10.

[37] Zheng Q S, Yu Y, Zhao Z H. Effects of hydraulic pressure on the stability and transition of wetting modes of superhydrophobic surfaces [J]. Langmuir, 2005, 21(26): 12207-12212.

[38] Jaehee C, Taeyong J, Haecheon C, et al. Predictions of the effective slip length and drag reduction with a lubricated micro-groove surface in a turbulent channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 874: 797-820.

[39] Lu S, Yao Z H, Hao P F, et al. Drag reduction in ultra-hydrophobic channels with micro-nano structured surfaces [J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy,

2010, 53(7): 1298-1305.

[40] Lee C, Kim C J. Maximizing the giant liquid slip on superhydrophobic microstructures bynano structuring their sidewalls [J]. Langmuir, 2009, 25(21): 12812-12818.

[41] Yang S M, Wang G, Cao Y L, et al. Stability and recoverability of liquid-gas interfaces on submerged hierarchically structured surfaces [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(2): 451-461.

[42] Taghvaei E, Moosavi A, Nouri-Borujerdi A, et al. Superhydrophobic surfaces with a dual-layer micro-nanoparticle coating for drag reduction [J]. Energy, 2017, 125: 1-10.

[43] Zhang H F, Tuo Y J, Wang Q C, et al. Fabrication and drag reduction of superhydrophobic surface on steel substrates [J]. Surface Engineering, 2018, 34(8): 596-602.

[44] LiuT Y, Leo, Kim C-J. Turning a surface super repellent even to completely wetting liquids [J]. Science, 2014, 346(28): 1096-1100.

[45] Luo W P, Yu B, Xiao D B, et al. Biomimetic superhydrophobic hollowed-out pyramid surface based on self-assembly [J]. Materials, 2018, 11(5): 1-12.

[46] Dilip D, Bobji M S, Govardhan R N. Effect of absolute pressure on flow through a textured hydrophobic microchannel [J]. Microfluidics and Nanofluidic, 2015, 19(6): 1409-1427.

[47] Dilip D, Jha N K, Govardhan R N, et al. Controlling air solubility to maintain "Cassie" state for sustained drag reduction [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 459: 217-224.

[48] Dilip D, Vijay Kumar S, Bobji M S, et al. Sustained drag reduction and thermo-hydraulic performance enhancement in textured hydrophobic microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 551-563.

[49] Lee C, Kim C J. Underwater restoration and retention of gases on superhydrophobic surfaces for drag reduction [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(1): 4502-4517.

[50] Stephani K A, Goldstein D B. An examination of trapped bubbles for viscous drag reduction on submerged surfaces [J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(4): 13031-13039.

[51] Zhang M Z, Hu H B, Du P, et al. Research on gas replenishment for submersed superhydrophobic surface by electrolysis [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(1): 67-71.

[52] Liu G, Rode A, Fu L, et al. Reply to comment on water droplet motion control on superhydrophobic surfaces: Exploiting the Wenzel-to-Cassie transition [J]. Langmuir, 2011, 27(22): 13962-13963.

[53] Panchanathan D, Rajappan A, Varanasi K K, et al. Plastron Regeneration on Submerged Superhydrophobic Surfaces Using in Situ Gas Generation by Chemical Reaction [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2018, 10(39): 33684-33692.

[54] Feng J X, Hu H B, Lu B J, et al. Experimental study on drag reduction characteristics of superhydrophobic groove surfaces with ventilation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(1): 24-30.