

水下航行体减阻技术综述

崔乃刚, 陈亮, 曹伽牧, 白瑜亮

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 空/水跨介质飞行器经空中飞抵目标水域后高速入水, 对目标实施快速打击, 具有隐蔽性好、突防能力强等特点。但在水下航行中, 固/液界面阻力及绕流流场变化等问题严重影响了航行速度与稳定性。减小航行体表面阻力干扰、流场优化是保障水下高速稳定航行的关键。旨在探讨适用于水下高速航行体的表面减阻与流场优化方法, 对表面微结构减阻、超疏水表面减阻、超空泡减阻和微气泡减阻4种最具代表性的固/液界面减阻技术进行论述, 分析各种减阻技术的机理与应用可行性, 探讨适用于水下高速航行体的减阻技术发展方向。

关键词: 水下减阻; 微结构; 超疏水表面; 超空泡; 微气泡

中图分类号: O3

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 01-0001-13

Review of Drag-Reduction Techniques for Underwater Vehicles

CUI Naigang, CHEN Liang, CAO Jiamu, BAI Yuliang

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The air-water trans-medium aircraft can enter the water at high speed and attack the target swiftly after flying to the target water region with powerful breakthrough defense capabilities as well as excellent concealment. However, in underwater navigation, problems such as the resistance of the solid/liquid interface and the change of flow field around the vehicle have a severe impact on navigation speed and stability. Thus, the key to ensuring high-speed and stable underwater navigation is reducing surface resistance interference and optimizing the flow field. This work seeks to discuss the flow field optimization technique and surface drag-reduction technology appropriate for underwater high-speed vehicles. Hence, here we choose four of the most representative and promising drag reduction methods for detailed description, namely surface microstructures, superhydrophobic surfaces, supercavitation and microbubbles. Additionally, the mechanism and application feasibility of various drag reduction technologies are analyzed. Meanwhile, we also discuss the development direction of drag-reduction technology suitable for high-speed underwater vehicles.

Key words: Underwater drag reduction; Microstructure; Super-hydrophobic surface; Supercavitation; Microbubbles

收稿日期: 2022-09-08; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (62004051)

作者简介: 崔乃刚 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为飞行力学与控制、飞行器组合导航等。

E-mail: cui_naigang@163.com

0 引言

空/水跨介质飞行器近期受到广泛关注,飞行器经空中飞抵目标水域后高速入水,对目标实施快速打击,可大幅提高攻击隐蔽性,提升突防能力。水下航行过程中,航行体固/液界面阻力不仅严重影响航行速度,还可引发航行体迎、背水面侧向力不平衡。两侧受力不均会使航行体质心之上产生侧向合力并形成纵倾力矩,从而导致航行体失稳^[1-2]。此外,在复杂来流环境下的固/液界面绕流流场变化剧烈,导致流体动力及载荷产生强烈变化,极易引起航行体结构破坏或姿态失稳。因此,减小航行体表面阻力干扰、绕流流场优化是保障水下高速稳定航行的关键^[3-5]。研究表明一些减阻技术对于减小阻力及缓解航行体失稳具有明显作用。深入研究水下固/液界面减阻技术对于提高水下航行体航行速度和稳定性具有重要意义。

为了探索可用于水下高速航行体的减阻方法,本文对微结构减阻、超疏水表面减阻、超空泡减阻和微气泡减阻4种最具代表性的减阻方法进行了详细的阐述,分析了各减阻方法的机理和应用可行性,探讨了未来水下高速航行体减阻技术的发展方向。

1 微结构减阻

1.1 微结构减阻研究简述

表面微结构减阻技术是一种凭借改变物体表面微结构形状实现减阻的技术。微结构设计思路起初大多来自海洋生物表皮结构,人们通过观察剑鱼、鲨鱼等能在水下快速移动的生物,发现它们的表面具有粗糙的特殊微结构。人们通过模拟这些生物皮肤表面的微结构实现固/液界面的减阻效果,进一步通过实验和仿真对微结构的形态、分布、几何参数以及相应减阻机理进行了大量的研究。20世纪80年代起,NASA以航空器为研究对象,通过大量的试验研究解释了突出高度理论等沟槽条纹减阻机理,并且得出了沟槽条纹最多可以产生约8%减阻效果^[6]的结论。Bacher等先后在1985年和1997年提出了二次涡理论和肋条高度为相邻肋条间距的1/2时有最佳减阻效果^[7]的结论。随着3D打印技术的兴起,2014年,Lauder课题组利用3D打印技术复制了鲨鱼皮结构并制作了一个含有打印鲨鱼皮的游动装置,并发现其游动速度相对

于平常的游动装置提升了6.6%^[8]。

最典型的减阻结构是复制鲨鱼表皮的齿结构,鲨鱼体表的齿结构称为盾鳞(placoid scales)。盾鳞的长度通常为100~200 μm ,肋条间的宽度为50~100 μm 。盾鳞上的这种肋条结构能够优化鲨鱼体表流体边界层的流体结构,抑制和延迟紊流的发生,有效减小水体阻力^[9]。这种齿结构由外层和内层组成:外层由珐琅质构成,内层为坚硬的骨骼结构,共同构成一个复杂的脊状3D系统^[10],不同身体位置的帽头鲨皮肤表面的环境扫描电子显微镜图像如图1(a)所示。通过改变齿的角度、形状及尺寸,可获得不同的减阻效果,依此即可对表面齿结构进行优化以达到更优的减阻效果。目前,通过制造鲨鱼皮表面齿结构来实现减阻已取得了较为可观的成果。如Qin等^[11]的研究得出:这种优化的鲨鱼皮齿表面结构相对平盘结构能够实现36.7%的减阻效果。然而鲨鱼表皮的齿结构复杂,难以大规模生产,因此采用简化齿结构是一个可行的方案。这种简化的齿结构截面形状包括三角形、梯形、圆形、矩形、波浪形、V形等^[12-14],如图1(b)所示。这些微结构的形状和尺寸等特征参数同样会影响其在一定的条件下(如流体介质和流体速度)的减阻能力^[15]。目前设计比较成功的简化齿结构有V形^[16]、波浪形^[17]、球形^[18]等,均取得了与鲨鱼皮齿结构类似的减阻效果。

除了鲨鱼之外,其他海洋生物的表皮结构也具有很大的参考价值。如欧洲黑鲈,其鳞片结构(如图1(c))可以保持鱼体表面的层流效果以减小体表摩擦阻力^[19]。Rong等的研究即参考该结构,取得了可观的减阻效果^[20]。另外,河豚体表的刺状结构也被用来作为减阻结构的参考,该结构(图1(d))具有可通过产生回流涡减小黏滞阻力的特点^[21-22]。在此基础上,Zhou等^[23]的研究发现错开排列、高度为0.2 mm的刺状结构减阻效果最好,其表面阻力比平面结构的小5.9%。为进一步提高传统简化仿生表面结构的减阻率,Wang等^[24]提出了一种在传统矩形槽微结构之间嵌套小槽结构,旨在改善传统周期性单层槽表面结构的性能,如图1(e)所示。最终发现,这种结构与传统的沟槽表面结构相比,表面积进一步减小,最大减阻率达到18.76%。Lin等^[25]参考海豚纹设计出了另一种层次式褶皱结构,这种结构上的大小褶皱相互垂直,如图1(f)所示。由于平行于水流流动方向的

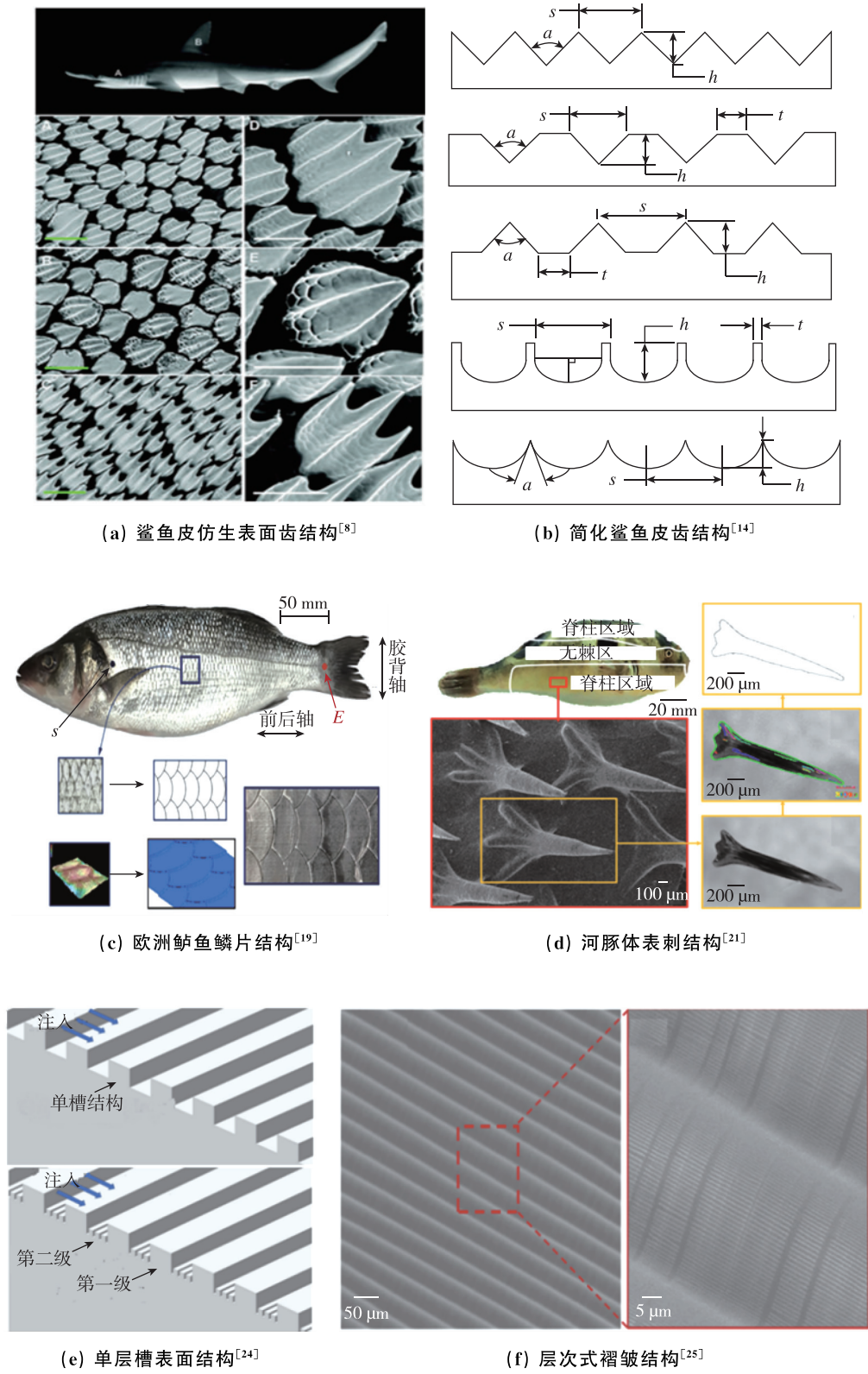


图 1 典型减阻微结构

Fig. 1 Typical drag reduction microstructure

大褶皱可以减小黏性阻力,垂直于流动方向的小褶皱可以显著减小大褶皱引导的压力阻力,两者的协同作用可使减阻率达到8.6%。

1.2 表面微结构减阻机理

为设计更有效的减阻结构,关于微结构减阻的理论支持是必要的,各种微结构减阻机理也被提出。在湍流中,当动物或物体在流体中快速移动时,会产生涡流,从而导致阻力增大。但沟纹表面剪切应力小于光滑表面的现象引起了学者们的关注。Bechert等^[26]提出的突出高度理论强调在纵向流源和横向流源之间存在突出高度差,从而增加沟槽对横向流的束缚和对动量传递程度的限制,减小壁面剪切应力。另一方面,Bixler等^[2]认为沟槽促成的各向异性流动和涡流在近壁面边界的抬升是摩擦阻力减小的原因之一。Choi等^[27]的数值模拟结果表明,微结构减阻机理是沟槽的微间距限制了那些接触高速流体的区域,如图2(a)所示。此外,Fu等^[28]认为边坡表面的黏滞阻力减小是由于回流现象的存在,如图2(b)所示,这一观点也得到了相关实验的验证。但到目前为止,还没有完整的理论和实验能够全面揭示微结构减阻机理,微结构减阻机理的研究仍有待深入。

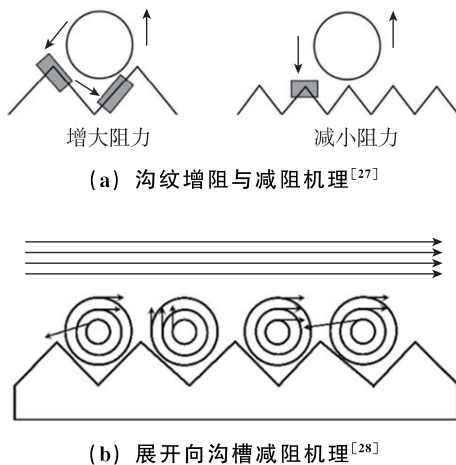


图2 表面结构减阻机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the surface structure drag reduction

1.3 表面微结构减阻的应用展望

表面微结构减阻法受到了各国科研工作者和工业界人士的关注。目前,基于鲨鱼、海豚等生物的表面微结构,设计者采用了多种制造技术,已制备多种不同的减阻微结构,并获得良好的减阻效果。Oeffner等^[29]使用了一种扑翼箔设备来精确测定由

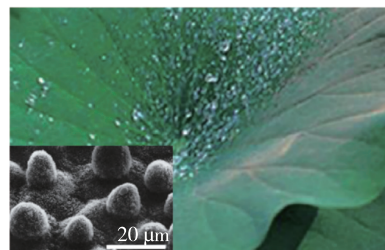
鲨鱼皮表面微结构制成的刚性和柔性膜状箔片的自推进游泳速度及其运动性能。结果表明鲨鱼皮表面微结构增强了前缘吸力,能够有效增强推力,并减小阻力。目前,鲨鱼皮表面微结构已实际应用于泳衣中。然而,表面微结构减阻法在刚性表面的应用仍面临挑战,对于一些复杂的应用情况,尤其是水下高速航行减阻应用方面仍然存在许多问题^[30-31],微结构的寿命及稳定性尚不足以支持该类应用需求,还需要开展更广泛、更深入的研究,短期内难以实现在水下高速航行体上的应用。

2 超疏水表面减阻

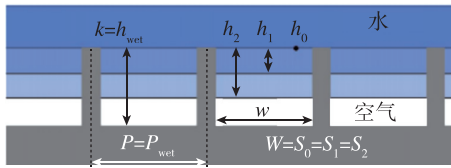
2.1 超疏水表面减阻研究简述

一般以表面与水滴的接触角大于 150° 作为评判超疏水表面的依据^[32]。超疏水表面在20世纪初被发现,直到1997年,Neinhuis等^[33]、Barthlott等^[34]才对“荷叶效应”进行了深入解释。自此,对自然界中超疏水现象的观察引起了人们的兴趣与关注,如图3(a)所示^[35]。随着超疏水表面技术的不断发展,在流体减阻方面的应用引起了研究者的极大兴趣。

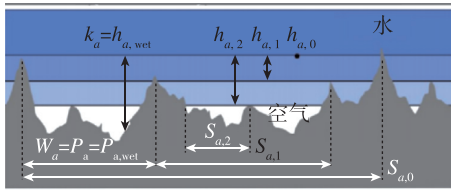
研究者对形貌有规律的超疏水表面进行了大量的研究,制备和测试如图3(b)和(c)所示的微槽和微柱^[36],这有助于从物理角度理解表面形貌与流体流动行为之间的关系。当水在微/纳米结构的超疏水表面流动时,超疏水表面上的水滴无法填满粗糙表面上的凹槽结构,在流动的水下方仍有空气存在,水滴和超疏水表面的接触面实际上是固液气三相接触面,如图3(d)所示。超疏水表面气膜的存在是减阻技术生效的必要前提,在此条件下超疏水表面和液体之间可产生一定的滑移速度,即滑移现象(如图3(e)),最终导致减阻效果的实现(如图3(f))。但实际情况下气膜会受到多种环境变量影响而消失,因此大多数超疏水减阻技术的研究成果仅仅在实验室条件下有效^[37]。



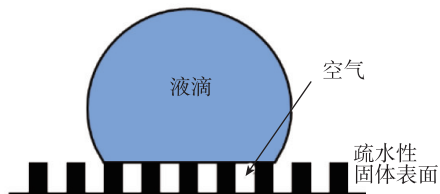
(a) 荷叶的超疏水现象^[35]



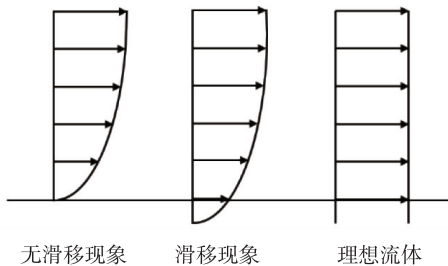
(b) 形貌有规律超疏水表面示意图^[36]



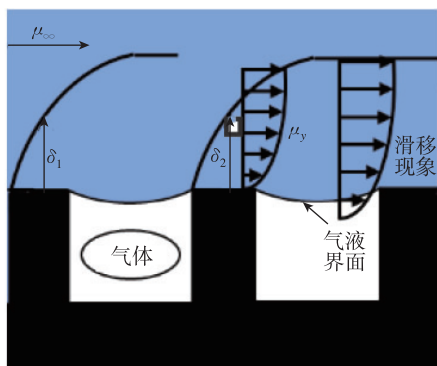
(c) 形状和粗糙度随机分布的超疏水表面示意图^[36]



(d) 超疏水表面液滴润湿状态



(e) 滑移表面与传统无滑移边界对比



(f) 超疏水表面滑移流动示意

图 3 超疏水表面形貌及滑移流动示意图

Fig. 3 Superhydrophobic surface morphology and slip flow diagram

Henoch 等^[38]在 2006 年测量了一组由纳米级微柱组成的超疏水表面阻力变化,结果显示层流减阻率可达 50%,湍流减阻率仅为 10%。Woolford 等^[39]在 2009 年通过粒子图像测速仪 (PIV) 研究发现具有纵向沟槽的超疏水表面产生的湍流比光滑表面少约 11%,而具有横向沟槽的超疏水表面产生的湍流比光滑表面增加了 6.5%。同年, Daniello 等^[40]发现改变超疏水表面的槽隙宽度 w ,虽然在层流区没有明显的减阻效果,但在湍流区有明显的减阻效果。随后, Park 等^[41]在 2014 年采用硅微光刻工艺,在浮动元件和弯曲梁上整体制作了具有纵向沟槽的超疏水表面,减阻率得到了显著提高。另一方面, Van Buren 等^[42]在 2017 年测试了一个带有纵向凹槽的超疏水表面对应的摩擦扭矩的变化,研究发现在雷诺数范围内,减阻率一般随雷诺数的增加而增大,然而这一趋势随着槽宽 w 的变化而变化。最近, Xu 等^[43]在 2021 年使用具有相似纵向凹槽的超疏水表面,在高速拖曳水池实验中减阻率可达 30%。

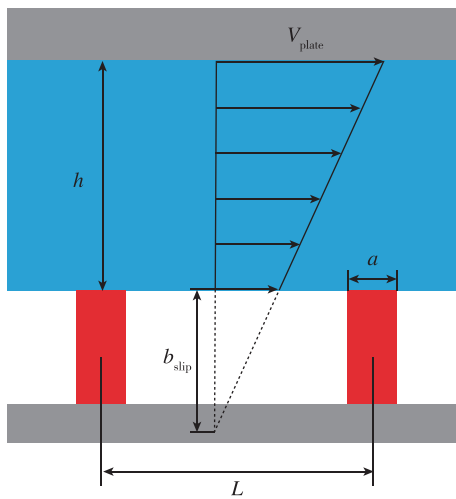
虽然有序的形貌可以更清晰地显示形貌与流体流动行为之间的关系,但目前在实际工程中还无法在相对大的体表面积上制备这样有序的超疏水表面。因此,许多研究人员制备了形状和粗糙度随机分布的超疏水表面,并在各种流动条件下进行了测试,如图 3 (c) 所示^[36]。Zhao 等^[44]在 2007 年采用阳极氧化法制作了一个大型的铝制超疏水板,然而没有在湍流中观察到任何明显的减阻效果。2013 年, Aljallis 等^[45]在大型铝板上应用了一种可喷涂的疏水二氧化硅纳米颗粒涂层,在高速拖曳槽中减阻率约为 30%。Zhang 等^[46]在 2015 年测量同一类型超疏水表面减阻率为 10%~24%。Ling 等^[47]在 2016 年使用数字全息显微镜测量了几个具有不同随机纹理特征的超疏水表面在湍流中的阻力,在有明显滑移速度的情况下,减阻率约为 35%。

到目前为止,超疏水减阻在层流和湍流流动中都被证明是有效的,而且通过恰当的设计可以获得显著的减阻率。因此,各种关于超疏水表面减阻的机理也受到学者们的极大关注。

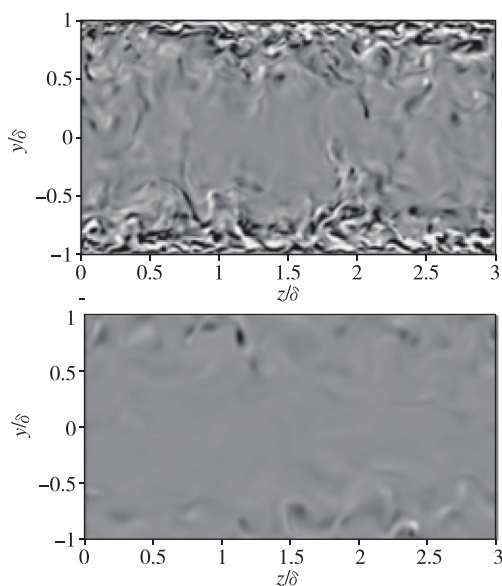
2.2 超疏水表面减阻机理

从超疏水表面减阻的应用研究可以看出,超疏水表面减阻的实现在很大程度上取决于表面微结构的设计,微观结构中的斥水和滞留空气是实现超疏

水表面减阻的主要原因^[48-51]。为了进一步明确机理,在分析中常常采用实验和数值模拟两种方法。但由于在实验过程中难以测量或控制气液界面,因此对超疏水表面湍流减阻机理的研究主要采用数值模拟的方法。典型的方法是将超疏水表面模拟为固液界面和气液界面组成的具有定向或非定向滑移的水平壁面。结果表明层流中剪切阻力的减小是界面处的速度滑移引起的^[52-53],见图4(a)^[54]。另外, Park等^[55]、Min等^[56]、Busse等^[57]、Jelly等^[58]的数值研究也揭示了近壁湍流会在超疏水表面被显著抑制,见图4(b),所以在湍流中也展现出良好的减阻效果。



(a) 超疏水表面上层流示意图^[54]



(b) 超疏水表面湍流抑制^[55]

图4 超疏水减阻机制

Fig. 4 Superhydrophobic drag reduction mechanism

根据上述理论,模型的数学表达式和机理解释也被提出。典型的例子是 Choi等^[50,59]用 b_{slip} 和 h 计算 Couette 流和 Poiseuille 流的减阻 (DR) 的表达式,分别为

$$DR = 1 / \left(1 + \frac{h}{b_{slip}} \right) \quad (1)$$

$$DR = 3 / \left(3 + \frac{h}{b_{slip}} \right) \quad (2)$$

此外, Dong等^[60]利用牛顿黏性定律中的假设对滑移边界理论进行了解释。

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (3)$$

到目前为止,大部分理论仍无法通过实验得到验证,也无法证明其准确性。因此,超疏水表面的减阻机理仍有待完善。

2.3 超疏水表面减阻的应用展望

超疏水表面减阻法是一种在液固界面相互接触时捕获气膜的减阻方法。目前,研究人员对该技术进行了大量研究,制备了不同超疏水表面微结构,取得了一定进展。Zhang等^[61]通过对超疏水表面摩擦阻力的直接测量,在实验标定的范围下,表面阻力减小了75%,证明超疏水结构能够减小湍流中的摩擦阻力。此外,众多科研工作者制备了各种具有特殊微/纳米结构的超疏水表面,并且自清洁^[62]、抗生物污染^[63]、抗结冰^[64-65]、油水分离^[61]等不同功能被不断发现和应用在超疏水表面。将超疏水减阻技术与表面微结构减阻技术相结合也是将来超疏水技术的重要应用。2022年, Zhang等^[66]制作出具有超疏水表面的植绒样品,其减阻率达到28%,同时样品在约1.6 kPa的表观压力下经受了超过500次的砂纸磨损循环,且无显著的超疏水性能衰减。然而,由于实际条件中许多环境变量会对超疏水表面气膜产生很大影响,大多数超疏水表面减阻成果仅仅在实验室条件下有效,无法进行实际应用^[45]。此外,对于水下航行器、跨介质武器等复杂应用情况,在水流剪切的作用下超疏水表面捕获气膜将快速流失,导致减阻性能丧失,甚至会带来增阻效果^[67]。因此,超疏水表面减阻技术在实际应用上还需进一步的深入研究。

3 超空泡减阻

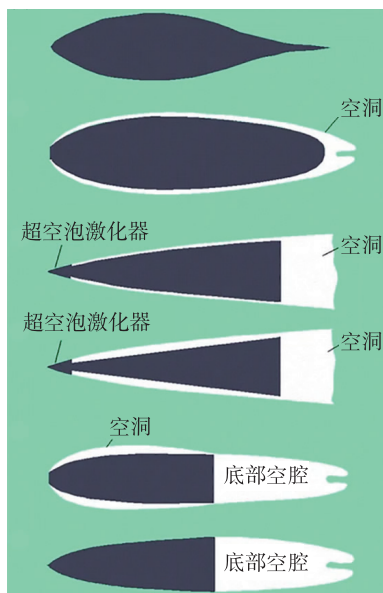
3.1 超空泡减阻研究简述

超空泡减阻是指水下航行体表面形成空气包

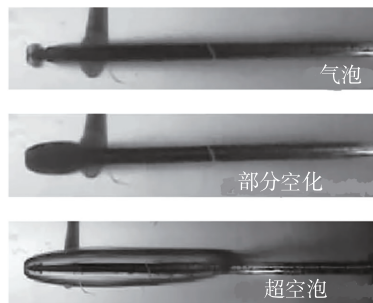
覆层，将固/液界面转化为固/气界面，使表面张力大幅度减小，达到超高速航行的目的。为保证低表面摩擦阻力和低压力阻力，须同时考虑壳体形状和空化器的形状，超空泡的主要流型如图 5 (a) 所示^[68]。

超空化一般可分为自然超空化和通气超空化两大方向。自然超空化是指自然汽化形成的超空化现象，一般需要物体具有足够大的运动速度 ($>50 \text{ ms}^{-1}$) 或来流具有足够小的静水压力，从而使得物体的空化数 σ 小于航行体物面 (除驻点及驻点附近外) 最大压力系数的绝对值 $|C_{p_{\max}}|$ ，便会发生自然超空化现象。自然超空泡物理实验多以小型子弹为实验对象，虽然小型子弹实验的设备要求相对较低，但在全尺寸水下潜射航行体上实现超空化和维护是相当困难的。因此这种方法在实际中很少使用。

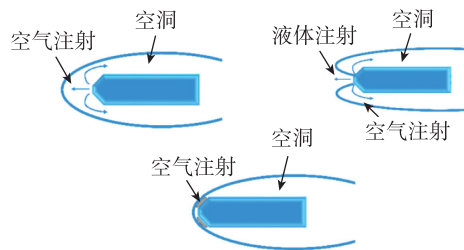
通气超空化指通过通气注入形成超空化，由于实现超空泡所需的速度要小得多，因此研究范围很广^[69]。通气超空化的发展过程如图 5 (b) 所示，从在空化器处形成的气泡到椭球形的一部分空化，最后过渡到超空化^[70]。通气超空化的制备方法可分为 3 种，如图 5 (c) 所示。第一种方法是利用空气喷射装置将气体从物体头部向液体流动方向喷射。在这种情况下，气体压力必须大于物体头部静止点处的液体压力，气体速度必须大于液体流速的 28 倍。第二种方法是利用液体喷射装置将液体从物体头部向流动方向喷射，同时向滞



(a) 超空泡的主要流型^[68]



(b) 通气超空化的发展过程^[70]



(c) 通气超空化的制备方法^[70]

图 5 超空泡的形态及形成方法

Fig. 5 Morphology and formation method of supercavity

止区注入气体。该方法是基于尾压完全恢复产生推力的理想条件，将物体头部的静力点转移到流体中。第三种方法是在物体高速运动时，当空化发生在空化发生器的锋利边缘时，向被分离部分注入空气，产生稳定、平滑的空化现象。当超空泡完全形成时，可以在物体的任何部位补充空气，这是目前实现超空泡最常见的方式。

3.2 超空泡减阻机理

超空泡减阻的主要机理是将固/液界面转变为固/气界面，从而使黏度降低，摩擦阻力也随之大幅减小。并且，气相速度梯度越小，切应力也越小。与此同时，随着空化数 σ 值的降低，空腔内分散液滴体积比逐渐变小，空泡厚度变薄，导致切向动量进一步减小。超空泡具有优异的减阻性能，减阻率为 90% 以上。对于圆锥体空泡发生器，当空化数 $\sigma = 0.01$ 时，减阻率可达 95%；当 $\sigma = 0.0001$ 时，减阻率可达 99.9%^[71]。

3.3 超空泡减阻的应用展望

超空泡减阻通过转换界面状态的机理来有效减小表面阻力，为验证这一结论，Zhang 等^[70]通过一系列弹丸和水隧道进行了实验以研究超空泡形状特征并描述了自然超空化和通气超空化的演化规律，得到了自然空化的涡旋频率。周景军^[72]通过建立均质平衡流动框架，二次开发语言 CEL

嵌入了4种经典的空化模型,并通过实验数据对空化模型进行了选择,实现了对超高速及超声速自然超空泡流动的数值模拟,对通气超空泡的一系列基本问题进行了研究,将实验和数值仿真技术相结合,可以大大加快超空泡流动的研究步伐。

超空泡技术主要是应用在水下航行体减阻提速上,利用超空泡技术研制的水下武器,突破了传统水下兵器的运动极限,从根本上改变了原有的武器格局^[72]。但是自然超空泡生成前提是要有足够大的速度,对于较大型的水下航行体,如鱼雷、潜艇,由于目前推进技术的限制,很难达到需要的高速,因此目前自然超空泡减阻技术主要用于体积较小且长细比很大的水下航行体,如高速射弹^[72]。超空泡射弹水下运动过程涉及复杂的超空泡流动问题,如射弹的弹丸与超空泡空腔之间的强相互作用导致了非线性力和记忆效应,因此射弹具体运动较难控制,其稳定性机理也十分复杂^[73]。与超空泡弹丸稳定性相关的主要问题可以概括为:1)超空泡空腔的产生和维持;2)射弹弹丸质量的平衡^[74]。目前研究人员多考虑尾拍力和空泡形态的变化,建立超空泡射弹的尾拍运动学方程,从而解释其具体的运动机理^[75]。对于通气超空泡,一般是在水洞中进行研究,在低速的情况下对模型利用外接气源通入气体的办法获得超空泡,水洞中通气超空泡的研究一般在20 m/s以下的速度进行^[76]。通气超空泡的形成及溃灭机理较复杂,且航行体受到外界干扰姿态发生变化时,航行体部分沾湿会受到很大的尾拍力矩影响,其长航时姿态稳定控制存在很大难度。另外,2022年,Jia等^[77]将超空泡减阻技术与超疏水减阻技术相结合,研究了疏水和亲水涂层弹丸的超空泡特性:在相同水深和空化数下,疏水弹丸的阻力系数较亲水弹丸可减小20%~40%,此外,观察到不同水深下,疏水涂层弹丸的弹道稳定性优于亲水涂层弹丸。因此,超空泡减阻技术与其他减阻技术结合运用也是重要的发展方向之一。

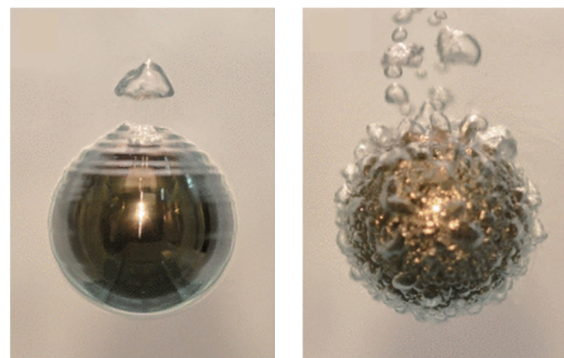
4 微气泡减阻

4.1 微气泡减阻研究简述

关于微气泡减阻的研究始于空气润滑理论,即通过人为的方式在壁面形成一层气泡与流体的混合层,通过改变近壁面流体的流动特性,减小黏性阻力,最终达到减小摩擦阻力的目的。国内

外对于微气泡减阻的研究重点采用先进的测量技术(如激光测速、总阻力测量、表面热模探头等壁面应力测量技术),研究微气泡对湍流边界层特性的影响、微气泡减阻的效果及影响因素、产生微气泡的方式等内容。

早在18世纪,国外学者就已开始进行类似微气泡减阻的实验。但由于气膜在航行体表面厚度的不可控性,气液交界面不稳定,研究的重点逐渐从这种气膜减阻转移到微气泡减阻。McCormick等^[78]的实验开启了有关微气泡应用于水下减阻的研究,其利用回转体表面电解产生的氢气气泡进行微气泡减阻实验,在低速时氢气微气泡减阻可高达50%。1984年,Madavan等^[79]通过在多孔壁中注入微气泡实现了局部摩擦阻力的大幅减小,约为80%。2011年,Vakarelski等^[80]利用莱顿弗罗斯特效应的热方法在球体表面产生连续而坚固的润滑蒸汽层,如图6(a)所示;随后产生剧烈的气泡,如图6(b)所示,该方法减阻率超过85%。Jamaluddin^[81]在微气泡对高速航行体的减阻特性方面进行了实验研究。通过电机牵航行体模型的方法模拟微气泡在航行中达到的减阻效果,可实现相对传统微气泡方法进一步减阻9%的效果。



(a) 在球体周围流动的薄蒸汽层 (b) 球体表面产生剧烈的气泡^[80]

图6 基于莱顿弗罗斯特效应的润滑蒸汽层

Fig. 6 Lubrication steam layer based on leighton frost effect

2014年,Jagdish等^[82]对微气泡在平板表面的驻留现象进行了实验,发现在层流条件下使用激光加工出微小表面结构的疏水表面可使微气泡稳定驻留在平板表面,如图7所示。研究得出,微气泡减阻并不需要持续注入微气泡,这有助于进一步降低能量消耗。2017年,Du等^[83]进行了疏水表面的微气泡停驻实验。发现通入微气泡后,微

气泡会覆盖表面，即在表面形成一层薄的驻留气膜。在具有气膜的边界层内，涡强度、剪切应力均明显下降，并取得了可观的减阻效果。

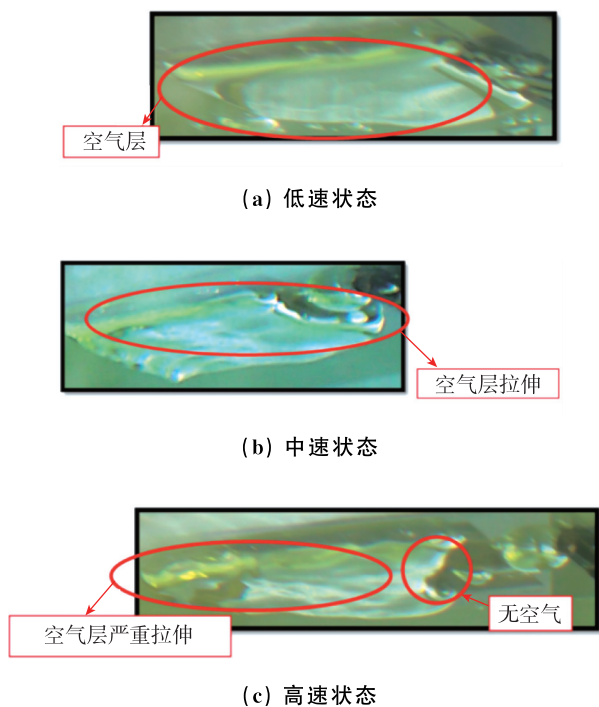


图 7 微气泡在平板表面不同速度时的驻留现象^[82]

Fig. 7 Adhesion state of air layer in different velocity^[82]

为进一步优化微气泡减阻效果，各种关于微气泡减阻的机理也被提出。通过减小摩擦系数、减小周围液体的密度或减小固体与周围液体接触的表面积可以实现减阻，并且流体密度的减小、气泡悬浮黏度的增加、湍流结构的改变会影响微气泡减阻的效果，在此基础上众多研究人员提出了微气泡存在下的黏性系数计算模型与边界层模型。

4.2 微气泡减阻机理

目前对微气泡减阻的理论研究同样存在实验先行、理论滞后的特点。多数理论分析还仅限于平板和管道流。主流的方法还是通过减小摩擦系数、减小周围液体的密度或者减小固体与周围液体接触的表面积实现减阻。在边界层内注入空气会形成含有气泡和水的流动，这会降低液体的密度和黏度并改变流体在壁面边界层流动结构形成气液两相流，从而减小黏性阻力^[84]，即实现微气泡减阻，如图 8 所示。还有理论研究表示，由于气泡的挥发性，在流体中施加剪切力产生的功一部分会转化为变形能，从而减少了减阻过程的能量损失。

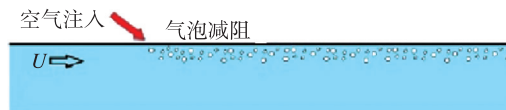


图 8 用于减小摩擦阻力的不同气泡减阻技术^[84]

Fig. 8 Different bubble drag reduction techniques for reducing frictional resistance^[84]

微气泡减阻机理的分析主要在于边界层结构的变化，微气泡对边界层结构至少有两个方面的影响：第一，微气泡可改变流体局部有效的黏度和密度，从而改变局部湍流的雷诺数；第二，微气泡可直接影响湍流边界层结构，使附壁区的流动发生变化。Legner^[85]提出了一个简单的剪切应力模型来解释湍流边界层注入微气泡后的减阻作用，将微气泡减阻归为 3 个因素的结果：流体密度的减小、气泡悬浮黏度的增加、湍流结构的改变。Madavan 等^[86]采用了混合长度理论的湍流单方程模型，通过用气泡浓度表达黏度和密度的局部变化来模拟气泡运动，得出了微气泡存在下的黏性系数计算模型与边界层模型。

目前，微气泡减阻研究还存在着明显的缺陷。首先，覆盖在航行体表面的气泡不稳定，容易产生裂纹从而扩大阻力和噪声，而如果气泡太小，所需的减阻效果就无法实现。此外，航行体表面覆盖的微气泡主要是电解水产生的氢气和氧气泡，对电能的需求和依赖程度很高。在实际中多用于船舶减阻^[79]，在水下航行体中的应用仍较少，特别是随着航行深度的增加，静压不断增大，对气泡的形成带来极大挑战，亟待深入研究。

4.3 微气泡减阻的应用展望

经过多年的实验和数值模拟，微气泡减阻已被证实了有效性和可行性，理论上可将水阻力减小约 85%。Song 等^[87]通过进行微气泡减阻实验和数值模拟，分析了微气泡流动的形貌和微气泡减阻特性。结果表明注入边界层的微气泡可以降低流场中湍流强度从而减小阻力，基于该特性，此技术可用于船舶或水下航行体的减阻研究。微气泡减阻具有污染小、综合设施成本相对较低、适用范围广等特点，是目前革命性的有效和环保的减阻方式，应用前景广泛。微气泡的研究除了集中在船舶减阻之外，还可应用于水下高速航行器和水下射弹等。

5 结语

水下航行体表面绕流流场变化复杂,减小固/液界面阻力是提升水下航行体航速及航行稳定性的关键。本文针对4种最具代表性的减阻方法的研究进展、减阻机理及应用前景进行了详细分析,其中表面微结构及超疏水表面法目前多处于实验阶段,微结构的可靠性目前尚不足以支持航行体水下减阻应用的需求;超空泡减阻法对航行体速度要求极高,适用于高速鱼雷等航行体,但存在姿态控制难等问题;微气泡减阻方法理论减阻率可达85%以上,能确保航行体的高初速与稳定性,在水下发射技术领域有更大的应用潜力,但仍存在水下减阻效果时间跨度小、大水深航行难以实现等问题。目前,提高各种减阻方法的工程实际应用能力仍然是一个有待解决的关键问题。为了给工程设计提供更充分的理论指导,不同减阻技术的作用机理仍需要进一步探索。未来水下航行体减阻技术可通过多学科融合的方法进行研究,其中数值模拟也将发挥重要作用。在实际应用中可尝试采用两种或两种以上减阻方法结合的方式达成水下航行体对减阻率、稳定性、抗高压流场等特定技术指标的需求。

参考文献

- [1] Ceccio S L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42: 183-203.
- [2] Bixler G D, Bhusan B. Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(36): 4507-4528.
- [3] Xiang Y L, Huang S L, Luv P Y, et al. Ultimate stable underwater superhydrophobic state [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(13): 134501.
- [4] Truscott T T, Epps B P, Belden J. Water entry of projectiles[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46: 355-378.
- [5] White C M, Mungal M G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40: 235-256.
- [6] Lee S J, Lee S H. Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface[J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 30(2): 153-166.
- [7] 刘明杰, 吴青山, 严昊, 等. 仿生减阻表面的进展与挑战[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(9): 1782-1790.
- [8] Wen L, Weaver J C, Lauder G V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(10): 1656-1666.
- [9] 刘宝胜, 吴为, 曾元松. 鲨鱼皮仿生结构应用及制造技术综述[J]. *塑性工程学报*, 2014, 21(4): 56-62.
- [10] Ott J, Lazalde M, Gu G X. Algorithmic-driven design of shark denticle bioinspired structures for superior aerodynamic properties[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(2): 026001.
- [11] Qin L G, Hafezi M, Yang H, et al. Constructing a dual-function surface by microcasting and nanospraying for efficient drag reduction and potential anti-fouling capabilities[J]. *Micromachines*, 2019, 10(7): 490.
- [12] Xu Y M, Song W B, Zhao D C. Efficient optimization of ringlets for drag reduction over the complete mission profile[J]. *AIAA Journal*, 2018, 56(4): 1483-1494.
- [13] Yadav N, Gepner S W, Szumbarski J. Determination of groove shape with strong destabilization and low hydraulic drag[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2021, 87: 108751.
- [14] Qiu H Y, Chauhan K, Lei C W. A numerical study of drag reduction performance of simplified shell surface microstructures[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107916.
- [15] Endrikat S, Modesti D, Garcia-Mayoral R, et al. Influence of riblet shapes on the occurrence of Kelvin-Helmholtz rollers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 913: A37.
- [16] Xiao G, He Y, Huang Y, et al. Bionic microstructure on titanium alloy blade with belt grinding and its drag reduction performance[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, 235(14): 2230-2239.
- [17] Wang J, Zhang C, Wu Z, et al. Numerical study on reduction of aerodynamic noise around an airfoil with biomimetic structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 394: 46-58.
- [18] Li D, Wu H, Zha Y, et al. A sound source reconstruction approach based on the machine vision and inverse patch transfer functions method[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 181: 108180.
- [19] Muthuramalingam M, Villemin L S, Bruecker C.

- Streak formation in flow over biomimetic fish scale arrays[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2019, 222, jeb205963.
- [20] Tian G Z, Fan D L, Feng X M, et al. Thriving artificial underwater drag-reduction materials inspired from aquatic animals: progresses and challenges[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(6): 3399-3428.
- [21] Zhou H G, Liu C Q, Tian G Z, et al. Research on the drag reduction property of puffer (Takifugu flavidus) spinal nonsmooth structure surface[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2020, 83 (7): 795-803.
- [22] Zhou H G, Jia C F, Tian G Z, et al. Numerical analysis of drag reduction characteristics of biomimetic puffer skin: effect of spinal height and tilt angle[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2021, 21(9): 4615-4624.
- [23] Zhou H G, Zhu Y S, Tian G Z, et al. Experimental investigations of the turbulent boundary layer for biomimetic surface with spine-covered protrusion inspired by pufferfish skin[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(3): 2865-2875.
- [24] Wang L, Wang C, Wang S, et al. Design and analysis of micro-nano scale nested-grooved surface structure for drag reduction based on 'Vortex-Driven Design' [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2021, 85: 335-350.
- [25] Lin G J, Li J Q, Xu Z, et al. Hierarchical surface patterns via global wrinkling on curved substrate for fluid drag control[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(1): 2001489.
- [26] Bechert D W, Bruse M, Hage W, et al. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application[J]. *Naturwissenschaften*, 2000, 87(4): 157-171.
- [27] Choi H, Moin P, Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 255: 503.
- [28] Fu Y F, Yuan C Q, Bai X Q. Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces[J]. *Biosurface and Biotribology*, 2017, 3(1): 11-24.
- [29] Oeffner J, Lauder G V. The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2012, 215(5): 785-795.
- [30] Zhou Z D, Yan Z X, Zhang K, et al. Bioinspired drag reduction surfaces via triple lithography method based on three-layer hybrid masks[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2022, 32(5): 055006.
- [31] Wu L Y, Jiao Z B, Song Y Q, et al. Water-trapping and drag-reduction effects of fish Ctenopharyngodon idellus scales and their simulations[J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(7): 1111-1117.
- [32] Zhang X, Shi F, Niu J, et al. Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(6): 621-633.
- [33] Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces [J]. *Annals of botany*, 1997, 79(6): 667-677.
- [34] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces [J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [35] 秦志磊. 铝合金表面梯度疏水结构制造及减阻性能研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021:2-3.
- [36] Park H, Choi C H, Kim C J. Superhydrophobic drag reduction in turbulent flows: a critical review[J]. *Experiments in Fluids*, 2021, 62: 1-29.
- [37] 张春来, 王潇, 吴银涛, 等. 超疏水表面水下减阻技术研究进展[J]. *功能材料与器件学报*, 2021, 27(5): 445-455.
- [38] Heno C, Krupenkin T, Kolodner P, et al. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces[C]. 3rd AIAA Flow Control Conference, 2006: 3192.
- [39] 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): 085106.
- [40] Daniello R J, Waterhouse N E, Rothstein J P. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21(8): 085103.
- [41] Park H, Sun G. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 747: 722-734.
- [42] Van Buren T, Smits A J. Substantial drag reduction in turbulent flow using liquid-infused surfaces [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 827: 448-456.
- [43] Xu M C, Yu N, Kim J, et al. Superhydrophobic drag reduction in high-speed towing tank[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 908: A6.
- [44] Zhao J P, Du X D, Shi X H. Experimental research on friction-reduction with super-hydrophobic surfaces [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2007, 6(3): 58-61.
- [45] Aljallis E, Sarshar M A, Datta R, et al. Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic

- flat plates in high Reynolds number boundary layer flow [J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(2): 025103.
- [46] Zhang J, Tian H, Yao Z, et al. Mechanisms of drag reduction of superhydrophobic surfaces in a turbulent boundary layer flow[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56: 1-13.
- [47] Ling H J, Srinivasan S, Golovin K, et al. High-resolution velocity measurement in the inner part of turbulent boundary layers over super-hydrophobic surfaces [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 801: 670-703.
- [48] Lee C, Choi C H, Kim C J. Superhydrophobic drag reduction in laminar flows; a critical review[J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(12): 176.
- [49] Truesdell R, Mammoli A, Vorobieff P, et al. Drag reduction on a patterned superhydrophobic surface [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(4): 044504.
- [50] Choi C H, Ulmanella U, Kim J, et al. Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(8): 087105.
- [51] Shi F, Niu J, Liu J, et al. Towards understanding why a superhydrophobic coating is needed by water striders [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19 (17): 2257-2261.
- [52] Liu Y B, Liu J, Tian Y, et al. Robust organic-inorganic composite films with multifunctional properties of superhydrophobicity, self-healing, and drag reduction[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(11): 4468-4478.
- [53] Ybert C, Barentin C, Cottin-Bizonne C, et al. Achieving large slip with superhydrophobic surfaces: scaling laws for generic geometries[J]. *Physics of Fluids*, 2007, 19 (12): 123601.
- [54] Zheng K Q, Zhang J D, Dodiuk H, et al. Effect of superhydrophobic composite coatings on drag reduction in laminar flow[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(4): 1614-1622.
- [55] Park H, Park H, Kim J. A numerical study of the effects of superhydrophobic surface on skin-friction drag in turbulent channel flow[J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(11): 110815.
- [56] Min T, Kim J. Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(7): 55-58.
- [57] Busse A, Sandham N D. Influence of an anisotropic slip-length boundary condition on turbulent channel flow[J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(5): 055111.
- [58] Jelly T O, Jung S Y, Zaki T A. Turbulence and skin friction modification in channel flow with streamwise-aligned superhydrophobic surface texture[J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(9): 095102.
- [59] 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.
- [60] Dong H Y, Cheng M J, Zhang Y J, et al. Extraordinary drag-reducing effect of a superhydrophobic coating on a macroscopic model ship at high speed[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(19): 5886-5891.
- [61] Zhang L H, Xu L D, Sun Y L, et al. Robust and durable superhydrophobic polyurethane sponge for oil/water separation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(43): 11260-11268.
- [62] Latthe S S, Terashima C, Nakata K, et al. Development of sol-gel processed semi-transparent and self-cleaning superhydrophobic coatings [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(15): 5548-5553.
- [63] Sun K, Yang H, Xue W, et al. Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 436: 263-267.
- [64] Cao L L, Jones A K, Sikka V K, et al. Anti-icing superhydrophobic coatings [J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2009, 25 (21): 12444-12448.
- [65] Zhang X, Huang Y L, Ma Z S, et al. From ice superlubricity to quantum friction: electronic repulsivity and phononic elasticity [J]. *Friction*, 2015, 3 (4): 294-319.
- [66] Zhang L, Huang Z, Cai W, et al. Hairy superhydrophobic surfaces with excellent mechanical robustness, underwater stability and drag-reduction property[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 174: 107323.
- [67] Feng X M, Sun P F, Tian G Z. Recent developments of superhydrophobic surfaces (SHS) for underwater drag reduction opportunities and challenges[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(2): 2101616.
- [68] Nesteruk I. *Supercavitation* [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012, 79-106.
- [69] Cameron P J K, Rogers P H, Doane J W, et al. An experiment for the study of free-flying supercavitating projectiles[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2011, 133(2): 1.
- [70] Zhang X W, Wei Y J, Zhang J Z, et al. Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(5): 564-571.
- [71] Savchenko Y N. *Supercavitation-problems and per-*

- spectives [C]. Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation, California, 2001: 20-23.
- [72] 周景军. 通气超空泡流动及航行体流体动力数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011:1-4.
- [73] Lin G, Balachandran B, Abed E. Nonlinear dynamics and control of supercavitating bodies [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006: 6445.
- [74] Goel A. Robust control of supercavitating vehicles in the presence of dynamic and uncertain cavity[M]. University of Florida, 2005: 7.
- [75] Mirzaei M, Alishahi M M, Eghtesad M. High-speed underwater projectiles modeling: a new empirical approach[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015, 37 (2): 613-626.
- [76] 张学伟, 魏英杰, 张嘉钟, 等. 模型结构对通气超空泡影响的实验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 203-208.
- [77] Jia H X, Xie R S, Zhou Y J. Experimental investigation of the supercavitation and hydrodynamic characteristics of high-speed projectiles with hydrophobic and hydrophilic coatings[J]. Fluids, 2022, 7(12): 363.
- [78] McCormick M E, Bhattacharyya R. Drag reduction of a submersible hull by electrolysis [J]. Naval Engineers Journal, 1973, 85(2): 11-16.
- [79] Madavan N K, Deutsch S, Merkle C L. Reduction of turbulent skin friction by microbubbles [J]. The Physics of Fluids, 1984, 27(2): 356-363.
- [80] Vakarelski I U, Marston J O, Chan D YC, et al. Drag reduction by Leidenfrost vapor layers [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(21): 214501.
- [81] Jamaluddin A. Micro-bubble drag reduction on a high speed vessel model[J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11: 301-304.
- [82] 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.
- [83] Du P, Wen J, Zhang ZZ, et al. Maintenance of air layer and drag reduction on superhydrophobic surface [J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 328-335.
- [84] Mäkiharju S A, Perlin M, Ceccio S L. On the energy economics of air lubrication drag reduction[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 4(4): 412-422.
- [85] Legner H H. A simple model for gas bubble drag reduction[J]. The Physics of Fluids, 1984, 27(12): 2788-2790.
- [86] Madavan N K, Merkle C L, Deutsch S. Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction [J]. Journal of Fluids Engineering, 1985, 107(3): 370-377.
- [87] Song W C, Wang C, Wei Y J, et al. The characteristics and mechanism of microbubble drag reduction on the axisymmetric body[J]. Modern Physics Letters B, 2018, 32(18): 1850206.

引用格式: 崔乃刚, 陈亮, 曹伽牧, 等. 水下航行体减阻技术综述[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(1): 1-13.

Citation: Cui N L, Chen L, Cao J M, et al. Review of drag-reduction techniques for underwater vehicles [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(1): 1-13.