

## 表面强化及功能化

## 柔性表面织构化在海洋装备减阻与防污上的应用

秦立果<sup>a,b</sup>, 杨浩<sup>a,b</sup>, 董光能<sup>a,b</sup>, 张雅利<sup>c</sup>(西安交通大学 a.设计科学与基础部件研究所 b.现代设计及转子轴承系统  
教育部重点实验室 c.生物医学信息教育部重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 首先详细论述了生物污损的形成过程及原因, 总结了生物污损对海洋装备服役的危害, 并明确指出船体表面污着生物附着问题已成为阻碍船体表面减阻技术研究的一大难题。众多研究表明, 研究表面结构与功能的统一性, 实现表面的高效防护与减阻是海洋装备未来发展的必由之路。调控表面的形貌参数和物理化学性能, 如润湿性等, 以及研发抑制微生物的附着和繁殖, 研制合适的防污剂, 是当前两种主要研究思路。依据上述思路, 基于海豚、鲨鱼柔性皮肤快速游动的减阻原理, 考察常见防污涂层(聚氨酯)这种柔性表面, 引入织构减阻。考察柔性表面及织构化参数在服役条件下对减阻行为及防污着生物附着的双重调控, 有望实现海洋装备在服役工况下的节能降耗。最后展望了结合抗生物附着的细菌及其天然代谢物镶嵌、接枝到海洋装备表面, 从而实现驱避和对抗污着生物附着功能的研究方法。

**关键词:** 表面防护; 抗生物附着; 柔性; 织构; 减阻

**中图分类号:** TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)06-0150-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.017

## Application of Textured Surface Flexible Materials in Drag Reduction and Antifouling of Marine Equipment

QIN Li-guo<sup>a,b</sup>, YANG Hao<sup>a,b</sup>, DONG Guang-neng<sup>a,b</sup>, ZHANG Ya-li<sup>c</sup>

(a.Institute of Design Science and Basic Component, b.Key Laboratory for Modern Design &amp; Rotary-Bearing System of Ministry of Education, c.Key Laboratory of Biomedical Information of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**ABSTRACT:** Marine equipment plays an increasingly important role in marine economic construction and marine defense. The problem of fouling organisms on the surface of water is still a key factor restricting the service life of marine equipment. The work firstly discusses the formation process and causes of biofouling, summarizes the harm of biofouling to marine equipment service, and clearly points out that the problem of fouling on the surface of hull has become a major problem hindering the research of hull surface drag reduction technology. Numerous studies have shown that studying the unity of surface structure and function and achieving effective surface protection and drag reduction are essential for the future development of marine equip-

收稿日期: 2019-01-10; 修订日期: 2019-04-08

Received: 2019-01-10; Revised: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51605370); 博士后基金(2016M602802); 陕西省博士后基金(2017BSHEDZZ122); 陕西省自然科学基金(2017JQ5009); 中央高校基本科研业务费专项(xjj2018245)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605370), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2016M602802), Postdoctoral Science Foundation of Shaanxi Province (2017BSHEDZZ122), the Natural Science Fund of Shaanxi Province (2017JQ5009) and the Fundamental Research Funds for the Central University (xjj2018245)

作者简介: 秦立果(1986—), 男, 博士, 主要研究方向为生物摩擦学。

**Biography:** QIN Li-guo (1986—), Male, Doctor, Research focus: biotribology.

通讯作者: 张雅利(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物材料。

**Corresponding author:** ZHANG Ya-li (1972—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: biomaterials.

ment. The current two main research ideas are to regulate the physical and chemical properties of the surface, such as wettability and surface topography and to develop suitable antifouling agents for inhibiting the attachment and propagation of microorganisms. According to the above ideas, based on the principle of drag reduction of dolphins and sharks flexible skin, the flexible surface of common antifouling coating (polyurethane) was investigated, and the drag reduction by texture was introduced. Investigating the dual regulation of flexible surface and texture parameters on drag reduction behavior and anti-fouling bio-adhesion under service conditions is expected to achieve energy saving and consumption reduction of marine equipment under service conditions. At the end, the research methods of combining anti-biofouling bacteria and natural metabolites into the surface of marine equipment to achieve the function of repelling and resisting the adhesion of organisms are proposed.

**KEY WORDS:** surface protection; antibiotic attachment; flexibility; texture; drag reduction

随着陆地资源，包括矿产、土地、生物等的日益枯竭，海洋及海岸也正成为各国争相开发资源、能源的目光聚集之地。海洋装备如潜艇、舰船、海上平台等，是人类探索并开发广阔海洋不可或缺的工具，因而其发展直接促进着各国航海运输和海军力量的发展。海洋环境十分复杂多变，这严重影响着海洋装备的性能发挥，其中海洋生物污损所带来的危害尤为突出。生物污损实际上是生物群落在海洋装备材料表面的形成过程，该过程中首先发生的是多糖、脂类和蛋

白质分子等有机物的富集，随后是细菌和藻类等微生物在富集有机物周围的附着生长。这些附着的微生物为了进一步提高自身与材料表面的附着力，以及与正在发展着的生物膜中其他生物间的粘着能力，会继续分泌更多新的胞外多聚物，继而形成一层由水、有机物、微生物及其胞外代谢多聚物组成的生物膜。生物膜的形成会促使藤壶、牡蛎、贻贝和大型海藻等污损生物在海洋装备表面附着、生长，最终形成复杂的污损生物生态群落<sup>[1-3]</sup>，如图 1 所示。

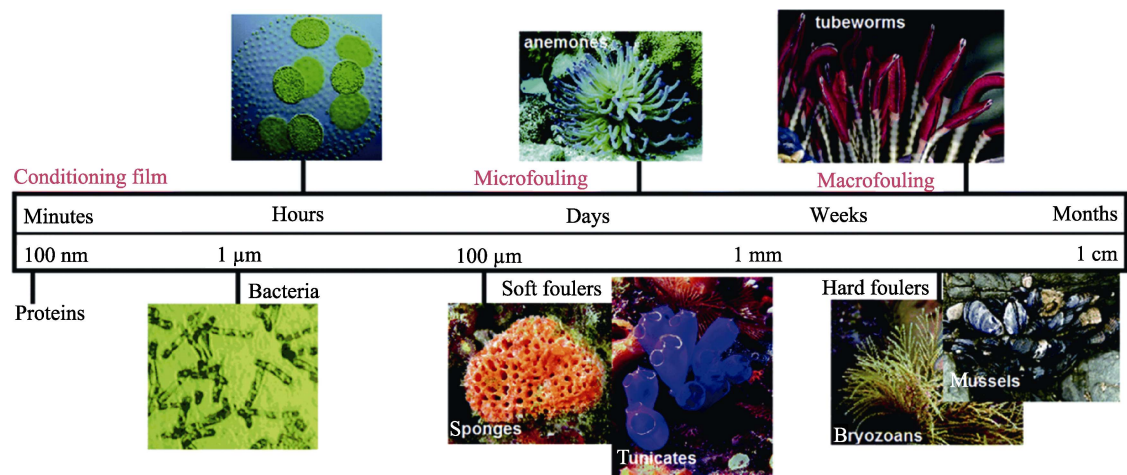


图 1 生物污损现象<sup>[1-3]</sup>  
Fig. 1 Biofouling phenomena

生物污损的发生会对海洋环境中服役的设备造成非常严重的影响，主要体现在以下几个方面：

1) 附着性污损生物附着在海洋装备（如船体）表面，当附着量达到一定程度时，聚集的海洋附着生物会影响船体外形流畅程度，大大增加了船舶航行时的阻力，继而导致船舶航行速度下降，燃料损耗剧增。大量的油耗，一方面增加了航运作业的成本，据估算，每年仅用于全球船舶防污及美观工艺的花费就有约 7 亿美元<sup>[4-5]</sup>；另一方面又加大了废气的排放量，造成大气的污染。海洋污损生物的繁殖与生长速度，在一些水温适宜、水体富营养化的海域会变得极快。仅仅在这样的码头停泊数天，船舶的螺旋桨、船身表面就会长满藤壶、贝类、海藻等污损生物（如图 2 所示），

严重时甚至需要经过人工清理后舰船才能起动。这既拖延了航行任务，也造成巨大人力、物力的浪费。



图 2 船舶表面的生物污损<sup>[6]</sup>  
Fig. 2 Biofouling on the surface of the ship<sup>[6]</sup>

2) 海洋装备被生物附着后, 可能会改变舰船壳体金属的表面特性, 加速金属的腐蚀。被污着生物大量附着后, 船体表面会出现局部应力集中现象, 致使表面的防污涂层出现微小的裂纹。在海水这种良好电解质溶液环境中, 裂纹周围会形成原电池。原电池的形成即意味着电化学反应的发生, 这会加速金属腐蚀, 改变腐蚀过程, 最终导致局部腐蚀加剧, 乃至穿孔腐蚀<sup>[7]</sup>。因此, 随着对海洋装备的续航和灵活性要求的日益增加, 在动力和能源受限的情况下, 如何提高海洋装备的服役寿命, 降低航行功耗, 缩短维修周期, 已成为当前亟待解决的问题。

现有的防护技术, 如表面防污涂层技术, 对延长海洋装备的使用寿命和减少运行能耗起到了较好的作用, 但依然存在维修周期长、费用高、防污与减阻效率低等缺点<sup>[8]</sup>。同时传统防污涂层(有机锡)对海洋生态平衡的破坏作用也受到越来越多学者的关注, 因为一旦这种涂层受到物理性的损伤, 设备必须紧急停航, 进行修复、维护, 不利于海洋装备服役的灵活性与机动性<sup>[9]</sup>, 因而现如今船舶防污技术的发展已经进入了一个不含锡的新时期。随着世界各国越发重视对海洋生态环境的保护, 对海洋环境及其生态系统有毒有害的防污剂定将被全面淘汰, 研发环境友好型及高性价比的防污涂层已经成为时代的需要。

向大自然学习借鉴, 研究表面结构与功能的统一性, 以实现表面高效的污着防护与减阻是海洋装备未来发展的必由之路。自然界中一部分生物表面具有特殊的微观结构, 如图3中鲨鱼皮的脊、槽(即盾鳞)结构, 荷叶表面的乳突, 水稻、水龟的微纳二级结构等<sup>[10-12]</sup>。同时, 其他一些生物体, 如海豚等的表皮能分泌出特殊的粘液, 使得海洋生物不易于附着。这些生物体优异的减阻和自清洁性能给了我们无穷的设计灵感, 例如由此设计并制造出的“超级节能飞机蒙皮”和“超级泳衣”(如图4所示)。

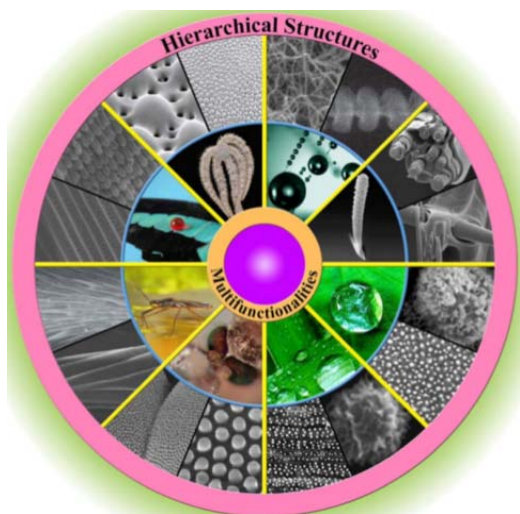


图3 自然界中生物表面的微观结构<sup>[13]</sup>  
Fig. 3 Microstructure of biological surfaces in nature<sup>[13]</sup>

织构化表面柔性材料的制备拟通过仿生设计的方法, 采用激光织构化的方法研究出合适的复型工艺, 构建多重功能结构。同时在服役流场的挤压作用下, 实现防污着生物附着抑制剂的分泌, 可望实现海洋装备在流体环境下高效对抗生物附着与减阻节能的功能。



图4 功能化减阻表面<sup>[14-15]</sup>

Fig. 4 Functionalized drag reducing surfaces<sup>[14-15]</sup>: a) aircraft skin; b) drag reducing film; c) drag reduction swimsuit

从学科发展的相关理论与方法角度来看, 织构化表面柔性材料的研究具有环保、高效和长期稳定性的优点, 将为仿生防污涂层的制备及使用积累经验, 提供技术支持。从加快我国舰船等相关海洋装备的技术革新角度来看, 可实现船舶的节能减排, 提高其可靠性, 延长耐用年限, 增强机动性和作战能力, 具有深远的战略意义和巨大的经济效益。

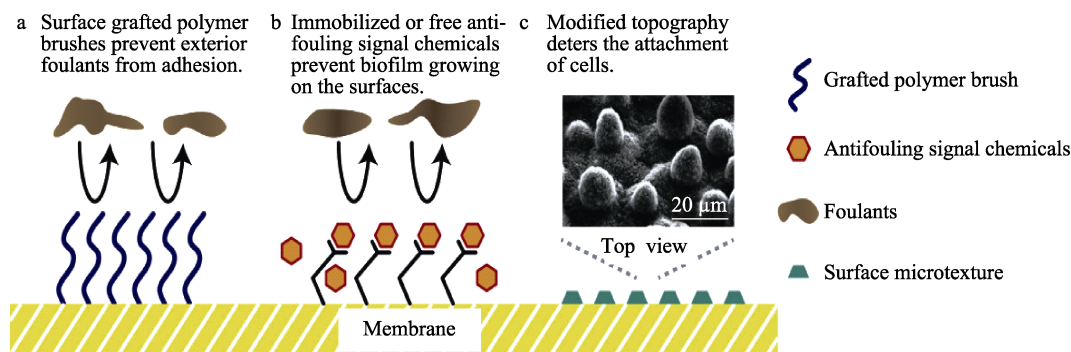
## 1 研究现状及分析

### 1.1 涂层防污

防污涂层对海洋装备的保护与减少污着生物附着的研究思路主要有两点: 其一是通过研发可以改变涂层表面物理化学性能的新型防污高分子材料, 使污损生物不易附着在海洋装备浸水表面, 常见的如硅酸盐无机分子防污、低表面能防污、表面微结构型防污以及表面植绒防污等<sup>[16-19]</sup>; 其二是在不污染海洋环境的前提下, 抑制微生物的附着和繁殖, 这是对过去通过杀灭污着生物达到防污效果的方式的改进。该思路的重点在于研制合适的防污剂, 如低表面能防污涂料、天然防污剂和导电防污涂料等<sup>[20-23]</sup>。其中, 低表面能防污涂料通过改变涂料基材的构成, 形成具有低表面自由能的涂层。涂层因其低表面能特性, 可使微生物分泌的体外生物粘液难以在涂层表面润湿, 使海洋污损生物难以附着或附着不牢, 从而实现海洋装备表面清洁的效果<sup>[24]</sup>(如图5所示)。

C. Anitha<sup>[26]</sup>报道了一种以稻壳为二氧化硅源, 制备二氧化硅颗粒的方法, 通过硅烷处理使二氧化硅材料的润湿性从 60°增加到近 150°, 并具备超疏水性。有研究者还对污垢缓释(Foul-Release或FR)纳米涂层进行了广泛研究。那种纳米复合材料系统是动态的不粘表面, 通过物理抗粘附技术阻止任何污垢附着。



图 5 防止海洋生物污损附着的方式<sup>[25]</sup>Fig. 5 Ways to prevent the attachment of marine organisms<sup>[25]</sup>

M. S. Selim 等<sup>[27]</sup>报道了几种功能性 FR 纳米复合材料涂层可以代替生物杀灭剂溶液来抵抗生物污垢和生物腐蚀,具有较好的环境友好效应。H. O. G. Benschop 等<sup>[28]</sup>对现有的 FR 涂层进行了改性,发现虽然硅藻粘附和现场浸泡测试确实证明了与无纹理表面相比,沟槽可以促进生物膜的生长,但是肋状图案并没有显著增加藤壶沉降。Nina 等人<sup>[29]</sup>报道了一种主要成分为甲基丙烯酸羟乙酯的纳米共聚物,这种共聚物具有优良的力学性能,并且对细菌的附着起到较好的抑制作用,但存在与基体连接强度低的缺点。污着生物对海洋装备强有力的附着同时给我们以灵感,贻贝通过足丝盘蛋白(主要作用成分为多巴胺)可以实现几十倍于自身重量的粘附力,类似的还有从藤壶中提取的藤壶凝胶。相较于传统的粘结剂,这类超强的生物粘附粘结剂具有应用面广(几乎所有的无机、有机表面)、快速、可生物降解及环境友好等特点,尤其是浸水环境下高的粘结可靠性。同时,已有研究表明,这些粘结剂,如多巴胺、三羟甲基氨基甲烷等,在材料表面粘结后,可以提供丰富的固定位点,从而枝接其他聚合物,据此可望实现表面的功能化<sup>[30]</sup>。例如将含硫醇基或氨基的聚合物(聚乙二醇、PEG)共价枝接到多巴胺上,发现修饰后的表面明显降低了对蛋白质的吸附<sup>[31]</sup>。

## 1.2 生物防污

在自然界中,存在着多种生物能分泌一种或几种化学物质,从而达到规避其他生物附着的目的。如珊瑚、海草、藻类以及海绵等,就能够分泌和代谢出对附着生物具有避忌、抑制作用的化学成分。海绵动物体是地球上存在的最原始多细胞动物之一,具有分布范围广泛、栖息环境多样等特点,在其体内就发现含有大量的生理活性物质。当中的某些次级代谢产物,对线管虫、海鞘、藤壶等污损生物的幼虫和孢子在海洋装备上的附着和萌发具有抑制作用<sup>[32]</sup>。海洋环境中的海蟹就可以分泌出一种能抑制附着生物产生生物胶凝固的酶,从而防止污损生物的附着,实现自身壳体光洁的功能。具有“游泳健将”称号的海豚,其表

皮能分泌出一种特殊的粘液,具有超强的吸水性,可以在海豚体表形成光滑的粘膜,以此维持皮肤洁净。蚯蚓具有自润滑机制,因为其复杂的表皮腺体可以在外部机械刺激下持续分泌粘液,而由宏观环状和微小乳头组成的粗糙皮肤可以稳定地分泌粘液,用以形成粘膜层<sup>[33]</sup>。由海草 *Zostera* 产生的硫酸化酚酸,对几种微生物和大型污染生物具有十分显著的抗污着潜力,同时还具有高水溶性、低生物累积性和无生态毒性,证明其自身作为安全防污剂的潜力<sup>[34]</sup>。罗爱玲等<sup>[35]</sup>利用环境扫描电镜(ESEM)对鲨鱼表皮的形貌结构进行了观察,同时用 X 射线能谱(EDX)测定了鲨鱼鳞片结构的元素组成及分布。在实验室环境下,通过进行贻贝成体和硅藻的生物附着试验,对非活体状态下鲨鱼表皮的防附着作用进行了测评。其测试结果表明,非活体状态下的鲨鱼表皮对贻贝成体的抗附着能力较弱,但对微观生物硅藻的附着具有较为明显的抑制效果。

同时,众多学者也在提取具有抗污着生物附着及生长的天然活性物质方面开展了大量的研究。如 Almeida 等<sup>[36]</sup>从蓝藻细菌中提取了具有抑制无脊椎动物幼虫附着作用的乙酰胆碱酯酶。Kharchenko<sup>[37]</sup>在实验室条件下培养了铜绿假单胞菌菌株细胞,随后将这些菌株固定于环氧涂层中,实验结果表明,涂层具备了一定的防污效果。这些天然防污物质的发现与提取拓宽了我们研究防污涂层的思路,但如何在保持活性的同时,将这些天然防污物质固定到涂层上,并实现长效及稳定的对抗功能,依然是一项重大的挑战。

在保证生物分子的活性等方面,学者们同样开展了较为广泛的研究。Yang 等<sup>[38]</sup>在不锈钢表面运用层层沉积的方法制备了聚合物分子刷表面,研究发现,这种改性方式使 *Escherichia coli* 细菌的粘附数量下降了 60%~70%。Xu 等<sup>[39]</sup>采用类似的方法发现,修饰后的不锈钢表面细菌生长和藻类附着明显降低。Lee 等<sup>[40]</sup>通过两步法在聚碳酸酯、铜等基材上进行了胰蛋白酶的固定实验,发现其生物活性几乎没有受到影响。这些研究都没有涉及到抑制剂的损耗。

### 1.3 柔性表面减阻

海洋装备运行的摩擦阻力是其能源消耗的主要部分<sup>[41-42]</sup>。早期关于减阻的研究多是通过减少表面粗糙度,从而获得低阻力航行的表面。随着湍流理论的发展,一些新的减阻技术也相继出现,如表面活性剂减阻、微气泡减阻、超疏水减阻以及仿生减阻等<sup>[43-44]</sup>。其中,仿生减阻是指基于仿生学理念,向在海水中游行速度较快的动物(如鲨鱼)学习,从中汲取灵感,根据其表面结构和器官功能,设计减阻表面的技术。

NASA 兰利研究中心发现,顺着流体流向的微小沟槽表面能有效地减小壁面摩擦阻力,这项发现打破传统的大众认知,即表面越光滑,阻力越小<sup>[45]</sup>。CHEN Ping<sup>[46-47]</sup>等人同样通过实验证明了微槽纹理表面的摩擦系数低于无纹理表面,并且几何图案能显著影响润滑和未润滑状态下样品的摩擦学性能。Zhao 等人<sup>[48]</sup>运用真空铸造法在有机硅表面成功复现了鲨鱼皮的微观沟槽结构,实现了最大减阻率(18.6%)。Gregory D. Bixler 等<sup>[49]</sup>因为鲨鱼皮的低阻力肋条微结构适用于许多低阻力和自清洁特性,撰文概述了在开放通道(外部)和封闭通道(内部)流动实验中进行的鲨鱼皮相关研究,并开展实验,对实验参数(包括沟槽几何形状、流体速度(层流和湍流)、流体黏度(水、油和空气)、封闭通道高度尺寸、润湿性和可扩展性)进行探究。实验结果通过显示概念模型,表明了黏度、涂层以及涡流和肋状表面之间的相互作用的影响。还研究了两种水生表面,包括鱼鳞和鲨鱼皮,通过其阻力、自清洁能力、接触角和接触角滞后等数据,以理解润湿性、黏度和速度的作用,讨论并描述了与低阻力、自清洁和防污性能相关的表面结构作用的概念模型。另外,海豚之所以能够高速游动,和其皮肤的柔顺性有着很大关系<sup>[50]</sup>。为了分析海豚皮肤柔顺性的减阻机制,众多学者通过模拟海豚皮肤的方法进行了相关研究<sup>[51]</sup>。Pollack K A<sup>[52]</sup>博士用超支链氟化聚合物和线型聚乙烯乙二醇聚合物合成出微观上呈现纳米级别的亲水和疏水相间隔结构,并进行了一系列表征实验,表明该结构具有良好的防污性能,证明了海豚皮肤的微观结构和形状特性对防止污损生物的附着具有重要的作用。从流体力学角度来看,柔性表面可以延迟层流边界层向湍流边界层的转化,使边界层最大程度地保持了层流状态,从而减小阻力,这正是柔性表面能够实现减阻效果的主要原因。同时,观察海豚皮肤的结构特征时发现,海豚皮肤的外层由一层很薄且柔软的表皮-角质复合层构成,与角质层相连的是真皮层。测试角质层和真皮层的力学性能时发现,他们具有不同的硬度和弹性模量。海豚在快速游动时,其表皮受到水流的冲击作用,角质层和真皮层会耦合在一起,形成宏观上的“脊”(ridges)形貌,这是海豚减阻的另外一重要原因。因此若能利用柔性材料表面耦合出仿生非光滑结构(表面织构),实现对流

体进行主动控制,实现增效减阻功能,将极大减少海洋装备的航行阻力。

针对上述研究结果给出的启发,织构化表面柔性材料的研究拟采取具有生物对抗、织构化及自分泌等特点的复合功能涂层,开展海洋装备的污损防护与减阻机理研究。Yibin Liu 等人<sup>[53]</sup>基于鲨鱼皮图案微观结构,利用聚(2-全氟辛基甲基丙烯酸酯)(PFMA)刷的低表面能和刺激响应行为,制备具有超疏水、自修复和减阻性能的仿生 PDMS 膜。实验者首先在 PDMS 膜上复型鲨鱼皮表面,然后用 FMA 进行表面自发原子转移自由基聚合(SI-ATRP)的处理。PFMA 刷可以在乙醇或二甲基甲酰胺(DMF)中自组装成不同的分层结构,这使得仿生 PDMS 膜显示出不同的接触角。实验者分别用蘸水和不蘸水的手指擦拭仿生膜,以模拟机械损伤,发现仿生 PDMS 膜的疏水性均有所降低。然而,通过将破坏的 PDMS 膜浸入作为 PFMA 良好溶剂的 DMF 中,表面就恢复了超疏水性,这也使得该研究有望提供一种控制聚合物刷自组装的新方法,以制备超疏水和自愈合薄膜。Hui Liu 等<sup>[54]</sup>通过简单的喷涂技术,使用无氟且易于获得的材料,即 PDMS 和 PMMA 在 THF 溶液中的混合物,无需任何预处理/后处理,制造半透明的超疏水涂层。微观粗糙度的 PMMA 与低表面能的 PDMS 组合,有助于观察到超疏水性,所制备的 PDMS/PMMA 超疏水表面的水接触角为 157.5°,滑动角为 2.8°。在 Yu Wu 等人<sup>[55]</sup>的研究中,通过简单的逐层策略制造了一种高度灵活且机械强度高的超疏水 F-SiO<sub>2</sub>-聚二甲基硅氧烷(PDMS)涂层,并证明 PDMS 在固定 F-SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒和改善它们与基底材料的粘附方面起着粘合剂的作用。同时,PDMS 层赋予超疏水涂层以优异的机械柔韧性。最后构造出的超疏水涂层表现出优异的防水性,以及对动态移动水滴的超低粘性阻力。超疏水性 F-SiO<sub>2</sub>-PDMS 涂层与基材无关,没有任何限制,具有较高的柔韧性和机械强度,在腐蚀和机械磨损的恶劣环境下表现出强耐久性。涂层材料还可选为力学性能可调的改性柔性聚氨酯(PU),基于仿生设计的思想,在 PU 表面构建仿生减阻形貌,包埋具有驱避污着生物附着的组分,从而在流体作用下分泌形成具有防污功能的织构化生物膜<sup>[56]</sup>。郝路亭<sup>[57]</sup>以海豚皮为参考对象,构建了刚性平面和柔性表面模型,进行双向流固耦合分析。研究发现,柔性表面在高速流场(高于 10 m/s)中减阻效果较好。结合总位移云图和剪切应力云图发现,流速在 8~10 m/s 范围时,流体流动已达到完全湍流的状态,柔性表面的减阻率骤增,说明柔性表面可以减小湍流阻力。随着流速增大,柔性表面的大位移段沿着水流速度方向移动,说明柔性材料的形变可以减小湍流产生的阻力。由此验证了柔性表面的减阻是由于其延缓了流体从层流向湍流转换的理论。今后的研究应着重阐明自分泌仿生涂层

在海洋装备服役工况下的污损防护与减阻机理, 最终实现海洋装备的可靠服役与减阻节能。

## 2 结语

纵观国内外研究现状, 不难总结出海洋装备的表面防护主要存在以下的难点和问题。

1) 柔性材料的设计与调控。控制柔性材料与边界层流体的相互作用是实现表面减阻的关键, 因此合成柔性材料对该技术的应用至关重要。现在普遍认为, 柔性材料需要具备以下几个基本条件: 剪切模量应与水动力同量级, 密度与水接近, 具有较小的阻尼以及较好的防水性。可选用聚氨酯为柔性材料的基材, 通过调配柔性链段及扩链剂的比例, 可以实现其力学性能的调控, 从而探明柔性材料物理性能及整体结构与减阻性能之间的关系。另外, 柔性材料在海洋装备表面的固定工艺, 将直接影响到服役使用寿命与稳定性。

2) 生物对抗膜活性的长期稳定性。海洋装备的服役环境日益复杂, 寻求新型的天然驱避与抗生物附着的生物或其代谢产物, 将有助于实现海洋装备的长效防护。对抗污着生物附着的生物或其代谢产物, 首先应该具备高效的抗污着生物附着的特性, 其次应该利于固定到柔性材料上, 并保持活性, 在长时间内维持稳定。如何兼顾上述服役性能的要求, 需要进行抗污着生物附着的机理和固定工艺的方法研究, 从而满足海洋装备复杂服役条件下的平稳运行需求。

3) 流体摩擦条件下, 柔性织构化减阻表面的机理研究。在静态条件下, 织构化的柔性表面能起到一定的抗污着生物附着能力。在流体摩擦条件下, 由于流体力学、材料力学性能及生物对抗膜的引入等多方面因素的影响, 使得研究柔性表面的减阻效果及机制极其复杂, 如何建立减阻模型, 考察柔性表面织构化参数在服役条件下对减阻行为的协同调控, 仍需深入研究。

### 参考文献:

- [1] DOBRETISOV S, RMM A, TEPLITSKI M. Mini-review: Inhibition of biofouling by marine microorganisms[J]. Biofouling, 2013, 29(4): 423-441.
- [2] 欧阳雄, 曹文浩, 张慧, 等. 大型海洋生物抗附着机制及展望[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 134-140.  
OUYANG Xiong, CAO Wen-hao, ZHANG Hui, et al. A review on the anti-fouling strategies of macrobenthos and nekton in the marine environment[J]. Marine science, 2015, 39(10): 134-140.
- [3] 胡静怡. 海洋生物防污作用机制及应用前景[J]. 科技创新导报, 2017(21): 114-116.  
HU Jing-yi. Mechanism and application prospects of marine biological antifouling[J]. Science and technology innovation review, 2017(21): 114-116.
- [4] NURIOGLU A G, ESTEVES A C C. Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications[J]. Journal of materials chemistry B, 2015, 3(32): 6547-6570.
- [5] KOSTINA N Y, SHARIFI S, ANDRES D L S P, et al. Novel antifouling self-healing poly (carboxybetaine methacrylamide-co-HEMA) nanocomposite hydrogels with supermechanical properties[J]. Journal of materials chemistry B, 2013, 1(41): 5644-5650.
- [6] BUSKENS P, WOUTERS M, RENTROP C, et al. A brief review of environmentally benign antifouling and foul-release coatings for marine applications[J]. Journal of coatings technology and research, 2013, 10(1): 29-36.
- [7] 许昆明. 海洋生物膜的形成及其对金属腐蚀的影响[J]. 海洋科学, 2008, 32(9): 71-75.  
XU Kun-ming. Marine biofilm formation and its effect on metal corrosion[J]. Ocean science, 2008, 32(9): 71-75.
- [8] 刘媛, 时甜甜. 仿生防污涂层材料在船舶防污上的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2013, 16(5): 29-34.  
LIU Yuan, SHI Tian-tian. Application of biomimetic antifouling surface coating materials used in preventing ship pollution[J]. Modern paint & finishing, 2013, 16(5): 29-34.
- [9] 张祝利, 王贤瑞. 我国渔船用防污漆的应用与监管现状及对策建议[J]. 渔业现代化, 2014, 41(3): 60-64.  
ZHANG Zhu-li, WANG Xian-rui. The status and countermeasures for the application and supervision of antifouling coating for fishing vessels in China[J]. Fishing modernization, 2014, 41(3): 60-64.
- [10] WANG G, GUO Z, LIU W. Interfacial effects of superhydrophobic plant surfaces: A review[J]. Journal of bionic engineering, 2014, 11(3): 325-345.
- [11] SOLGA A, CERMEN Z, STRIFFLER B F, et al. The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces[J]. Bioinspiration & biomimetics, 2007, 2(4): 126-134.
- [12] 张金伟, 蔺存国. 仿鲨鱼皮减阻防污材料的制备与表征[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(s2): 77-83.  
ZHANG Jin-wei, LIN Cun-guo. The preparation and characterization of bionic drag-reduction and antifouling materials inspired by shark skin[J]. Corrosion and protection, 2015, 36(s2): 77-83.
- [13] LIU K, JIANG L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration[J]. Nano today, 2011, 6(2): 155-175.
- [14] BALL P. Engineering sharkskin and other solutions[J]. Nature, 1999, 400(6744): 507-509.
- [15] SINGH A V, RAHMAN A, KUMAR N V G S, et al. Bio-inspired approaches to design smart fabrics[J]. Materials & design, 2012, 36: 829-839.
- [16] 丛非, 高昌录, 郭智仁, 等. 低表面能防污涂料研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(2): 87-90.  
CONG Fei, GAO Chang-lu, GUO Zhi-ren, et al. Research progress of low surface energy antifouling coatings[J].

- Aging and application of synthetic materials, 2018, 47(2): 87-90.
- [17] 张新生. 核壳结构纳米 Ag@SiO<sub>2</sub> 的制备及其杀菌、防腐和应用性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.  
ZHANG Xin-sheng. Synthesis of core-shell Ag@SiO<sub>2</sub> nanoparticles and the studies of its antibacterial, anticorrosion and application properties[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [18] 张淑玉. 表面植绒型海洋防污材料的制备工艺及应用性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
ZHANG Shu-yu. Study on preparation tech and porperties of surface flocking materials for marine antifouling application[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [19] LEJARS M, MARGAILLAN A, BRESSY C. Fouling release coatings: A nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings[J]. Chemical reviews, 2012, 8(8): 4347-4390.
- [20] MOHAMED S S, SHERIF A E S, MAHER A E S, et al. Smart photo-induced silicone/TiO<sub>2</sub> nanocomposites with dominant exposed surfaces for self-cleaning foul-release coatings of ship hulls[J]. Materials and design, 2016, 101: 218-225.
- [21] 于欢. 石墨烯/TiO<sub>2</sub> 复合材料改性水性聚氨酯防污涂层研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.  
YU Huan. Study on preparation and performance of grapheme/TiO<sub>2</sub> modified water borne polyurethane composite coatings[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [22] 丁树丹, 顾彩香, 于阳, 等. 船舶防污涂料的研究进展[J]. 中国水运, 2011, 11(6): 22-45.  
DING Shu-dan, GU Cai-xiang, YU Yang, et al. Research progress of marine antifouling coatings[J]. China water transport, 2011, 11(6): 22-45.
- [23] 李善文. 呋喃改性硅丙树脂, 纳米 TiO<sub>2</sub> 低表面能船舶防污涂料[D]. 大连: 大连交通大学, 2008.  
LI Shan-wen. Antifouling paint of furan modified organosilicon-acrylate/nano-TiO<sub>2</sub> on vessels[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2008.
- [24] 马英华, 宋振伟, 何遥, 等. 低表面能防污涂料防污机理探讨[J]. 上海涂料, 2013, 51(5): 15-17.  
MA Ying-hua, SONG Zhen-wei, HE Yao, et al. Discussing about antifouling mechanism of antifouling coatings with low surface energy[J]. Shanghai coatings, 2013, 51(5): 15-17.
- [25] BARTHOLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. Planta, 1997, 202(1): 1-8.
- [26] ANITHA C, SYED A S, MAYAVAN S. Fluorine free superhydrophobic surface textured silica particles and its dynamics transition from impalement to impingement[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 711: 197-204.
- [27] SELIM M S, SHENASHEN M A, SHERIF A E S, et al. Recent progress in marine foul-release polymeric nanocomposite coatings[J]. Progress in materials science, 2017, 87: 1-32.
- [28] BENSCHOP H O G, GUERIN A J, BRINKMANN A, et al. Drag-reducing riblets with fouling-release properties: development and testing[J]. Biofouling, 2018, 34(5): 532-544.
- [29] BUSKENS P, WOUTERS M, RENTROP C, et al. A brief review of environmentally benign antifouling and foul-release coatings for marine applications[J]. Journal of coatings technology and research, 2013, 10(1): 29-36.
- [30] DONG Wei-wang, XIA Wu, LI Xia-long, et al. Improved antifouling properties of photobioreactors by surface grafted sulfobetaine polymers[J]. Biofouling, 2017, 33(10): 970-979.
- [31] BALL P. Engineering sharkskin and other solutions[J]. Nature, 1999, 400(6744): 507-509.
- [32] 曹文浩, 严涛, 刘永宏, 等. 美丽海绵提取物防污作用[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4285-4290.  
CAO Wen-hao, YAN Tao, LIU Yong-hong, et al. The antifouling activities of callyspongia sponge extracts[J]. Acta ecologica sinica, 2012, 32(13): 4285-4290.
- [33] ZHAO Huai-xia, SUN Qiang-qiang, XU Deng, et al. Earthworm-inspired rough polymer coatings with self-replenishing lubrication for adaptive friction-reduction and antifouling surfaces[J]. Advanced materials, 2018, 30(29): 71-75.
- [34] CÁTIA V B, EMÍLIA S, MADALENA P, et al. An antifouling model from the sea: A review of 25 years of zosteriac acid studies[J]. Biofouling, 2017, 33(10): 927-942.
- [35] 罗爱梅, 蔺存国, 王利, 等. 鲨鱼表皮的微观形貌观察及其防污能力评价[J]. 海洋科学, 2009, 28(6): 715-718.  
LUO Ai-mei, LIN Cun-guo, WANG Li, et al. Micromorphology observation of shark skins and evaluation of antifouling ability[J]. Marine science, 2009, 28(6): 715-718.
- [36] ALMEIDA J R, FREITAS M, CRUZ S, et al. Acetylcholinesterase in biofouling species: characterization and mode of action of cyanobacteria-derived antifouling agents[J]. Toxins, 2015, 7(8): 2739-2756.
- [37] KHARCHENKO U, BELENEVA I, DMITRIEVA E. Antifouling potential of a marine strain, *Pseudomonas aeruginosa* 1242, isolated from brass microfouling in Vietnam[J]. International biodeterioration & biodegradation, 2012, 75: 68-74.
- [38] YANG W J, CAI T, NEOH K G, et al. Biomimetic anchors for antifouling and antibacterial polymer brushes on stainless steel[J]. Langmuir, 2011, 27(11): 7065-7076.
- [39] XU L Q, PRANANTYO D, LIU J B, et al. Layer-by-layer deposition of antifouling coatings on stainless steel via catechol-amine reaction[J]. RSC advances, 2014, 4(61): 32335-32344.

- [40] LEE H, RHO J, MESSERSMITH P B. Facile conjugation of biomolecules onto surfaces via mussel adhesive protein inspired coatings[J]. *Advanced materials*, 2009, 21(4): 431-434.
- [41] 莫梦婷, 赵文杰, 陈子飞, 等. 海洋减阻技术的研究现状[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(4): 505-512.  
MO Meng-ting, ZHAO Wen-jie, CHEN Zi-fei, et al. Research status of marine drag reduction technologies[J]. *Tribology*, 2015, 35(4): 505-512.
- [42] MIN Shao-song, PENG Fei, WANG Zhan-zhi. Method of estimating the effect of marine fouling on frictional resistance of ships[J]. *Journal of ship mechanics*, 2017, 21(12): 1460-1467.
- [43] WEN L, WEAVER J C, THORNYCROFT P J M, et al. Hydrodynamic function of biomimetic sharkskin: Effect of denticle pattern and spacing[J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2015, 10(6): 066010.
- [44] 王家楣, 曹春燕. 船舶微气泡减阻数值试验研究[J]. *航海工程*, 2005(2): 21-23.  
WANG Jia-mei, CAO Chun-yan. Numerical simulation on drag reduction of a vessel by microbubbles[J]. *Ship ocean engineering*, 2005(2): 21-23.
- [45] JIN J W. Reviews and prospects in turbulent drag reduction over riblets surface[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(1): 31-34.
- [46] CHEN Ping, LI Jun-ling, LI Yun-long. Effect of geometric micro-groove texture patterns on tribological performance of stainless steel[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(2): 331-341.
- [47] CHEN Ping, XIANG Xin, SHAO Tian-min, et al. Effect of triangular texture on the tribological performance of die steel with TiN coatings under lubricated sliding condition[J]. *Applied surface science*, 2016, 389: 361-368.
- [48] ZHAO D Y, HUANG Z P, WANG M J, et al. Vacuum casting replication of micro-riblets on sharkskin for drag-reducing applications[J]. *Journal of materials processing technology*, 2012, 212(1): 198-202.
- [49] GREGORY D B, BHARAT B. Fluid drag reduction and efficient self-cleaning with rice leaf and butterfly wing bioinspired surfaces[J]. *Nanoscale*, 2013, 17(17): 7685-7710.
- [50] 田丽梅, 可庆朋, 金娥, 等. 形态/材料耦合仿生功能表面减阻特性及机制[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 10-16.  
TIAN Li-mei, KE Qing-peng, JIN E, et al. Drag reduction characteristics and mechanism of bionic coupling functional surface caused by bionic form and elastic material[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2015, 31(13): 10-16.
- [51] LUO Y H, YUAN L, LI J H, et al. Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications[J]. *Micron*, 2015, 79: 59-73.
- [52] POLLACK K A, IMBESI P M, RAYMOND J E, et al. Hyper-branched fluoropolymer-polydimethylsiloxane-poly(ethylene glycol)cross-linked terpolymer networks designed for marine and biomedical applications: heterogeneous nontoxic anti biofouling surfaces[J]. *Acs applied materials & interfaces*, 2014, 6(21): 19265-19274.
- [53] LIU Yi-bin, GU Hui-min, JIA Y U, et al. Marine biofilm formation and its effect on metal corrosion[J]. *Chemical engineering journal*, 2008, 32(9): 71-75.
- [54] YU W U, SHEN Yi-zhou, TAO Jie, et al. Facile spraying fabrication of highly flexible and mechanically robust super hydrophobic F-SiO<sub>2</sub>@PDMS coatings for self-cleaning and drag-reduction applications[J]. *New journal of chemistry*, 2018, 42: 18208-18216.
- [55] LIU H, HUANG J, CHEN Z, et al. Robust translucent super hydrophobic PDMS/PMMA film by facile one-step spray for self-cleaning and efficient emulsion separation[J]. *The chemical engineering journal*, 2017, 330: 26-35.
- [56] 张岩. 聚氨酯防污涂层的海水环境响应特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.  
ZHANG Yan. Investigation on the response characteristics in marine environment of polyurethane antifouling coatings[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [57] 郝路亭. 基于双向流固耦合的柔性表面仿生减阻研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
HAO Lu-ting. Research on bionic drag reduction of flexible surface based on bidirectional fluid-solid coupling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.