

船舶减阻表面工程技术研究进展

郭乐扬¹, 阮海妮¹, 李文戈¹, 高原², 姜涛¹,
刘彦伯³, 吴新锋¹, 赵远涛¹

(1.上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2.上海奇想青晨新材料科技股份有限公司, 上海 201505; 3.上海市纳米科技与产业发展促进中心, 上海 200237)

摘要: 船舶减阻是实现船舶节能减排, 构建绿色低碳船舶的关键。船舶被动减阻方法主要有仿生结构减阻、柔性壁减阻、超疏水表面减阻、防污涂层减阻等。按机理将被动减阻方法细分为结构型和物理化学型减阻, 结构型减阻是模仿自然界水下生物表面结构以达到减阻效果; 物理化学型减阻是赋予表面一定特点, 如柔性、超疏水性、防污性等, 以通过减少表面摩擦阻力、提高边界稳定性、减轻自重等方式达到船舶减阻的目的。结构型减阻表面构建方法主要有走丝线切割技术 (EDM)、滚压成型技术、压印法、浇筑翻模法、涂料喷涂加工技术、激光刻蚀法、三维打印法等; 物理化学型减阻表面构建方法主要有涂料喷涂加工技术、旋涂法、化学腐蚀法、溶胶-凝胶法、电化学沉积、静电纺丝、相分离、等离子体处理等。针对以上减阻技术研究现状进行综述, 主要从微观机理出发, 总结现有文献中制备船舶减阻表面的技术以及存在的问题, 并提出多种减阻方法协同作用解决现有问题, 指明船舶减阻技术的发展趋势, 为船舶减阻技术的研究与应用提供指导。

关键词: 仿生结构; 柔性壁; 超疏水; 防污涂层; 船舶减阻

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)09-0053-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.09.005

Research Progress of Surface Engineering Technology for Ship Drag Reduction

GUO Le-yang¹, RUAN Hai-ni¹, LI Wen-ge¹, GAO Yuan², JIANG Tao¹,
LIU Yan-bo³, WU Xin-feng¹, ZHAO Yuan-tao¹

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai MORFANT New Material Technology Co., LTD, Shanghai 201505, China;

3. Shanghai Nano Technology and Industry Development Promotion Center, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: Drag reduction of ship is the key to realize energy saving, emission reduction and green low-carbon ship building.

收稿日期: 2022-07-19; 修订日期: 2022-08-21

Received: 2022-07-19; **Revised:** 2022-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52072236); 上海市科技计划 (20DZ2252300); 上海高水平地方高校创新团队 (海事安全与保障); 国家自然科学基金青年项目 (52002242)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52072236); the Science & Technology Commission of Shanghai Municipality and Shanghai (20DZ2252300); Shanghai High-level Local University Innovation Team (Maritime Safety & Technical Support); the National Natural Science Foundation of China (52002242)

作者简介: 郭乐扬 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶新材料。

Biography: GUO Le-yang (1998-), Female, Postgraduate, Research focus: new materials for ships.

通讯作者: 李文戈 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶新材料和表面涂层技术与应用。

Corresponding author: LI Wen-ge (1966-), Male, Doctor, Professor, Research focus: new materials for ships, technology and application of surface coating.

引文格式: 郭乐扬, 阮海妮, 李文戈, 等. 船舶减阻表面工程技术研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 53-64.

GUO Le-yang, RUAN Hai-ni, LI Wen-ge, et al. Research Progress of Surface Engineering Technology for Ship Drag Reduction[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 53-64.

Ship drag reduction methods can be divided into active drag reduction and passive drag reduction. The former mainly includes ship structure optimization design, polymer drag reduction, air curtain drag reduction and so on. Active drag reduction reduce drag by optimizing the design of the ship, adding polymers or bubble curtains to the fluid. Passive drag reduction methods are more varied, which include bionic structure, flexible coating, super hydrophobic coating and antifouling coating. According to the mechanism, ship drag reduction is divided into structural type and physicochemical type in the paper. Structural drag reduction achieves the drag reduction by biomimetic construction of aquatic surface structures (such as shark skin and fish scales). The main types of biomimetic texture include pits, grooves, convex hull, ripples, scales and composite types. Physicochemical drag reduction gives the surface certain characteristics such as flexibility, super hydrophobicity, antifouling, etc. It achieves the purpose of drag reduction by reducing surface friction resistance, improving boundary stability and reducing dead weight. The construction methods of structural drag reduction surface mainly include wire cutting technology (EDM), rolling forming technology, embossing method, casting and turning method, coating spraying processing technology, laser etching method, three-dimensional printing method, etc. The construction methods of physicochemical drag reduction surface mainly include coating spraying processing technology, spinning coating method, chemical corrosion method, sol-gel method, electrochemical deposition, electrospinning, phase separation, plasma treatment and so on. In recent years, the research achievements of active drag reduction methods are relatively mature. The research on passive drag reduction methods is also increasing, but the research on passive drag reduction methods mainly focuses on drag reduction mechanism, drag reduction construction method and drag reduction effect simulation. The simulation and field experiment of passive drag reduction method and the research on the cooperative mechanism of multiple drag reduction methods are still lacking. Both the structural drag reduction surface and the physicochemical drag reduction surface have been proved to be effective in reducing drag. However, the single drag reduction mechanism will have unavoidable defects and bottlenecks. For example, in biomimetic structures, it is difficult to greatly improve drag reduction by simply changing the shape and distribution of grooves. The synergistic effect of structural drag reduction and physicochemical drag reduction has been proved to break through the limitations of the single drag reduction theory. The drag reduction efficiency of the synergistic effect is greater than that of the simple structural drag reduction, and the maximum drag reduction efficiency is even 50%, which can better achieve the ship drag reduction. Based on these, the research status of above drag reduction technology is reviewed in this paper. The mechanism and construction method of drag reduction, as well as the problems and poor effect of single drag reduction method are summarized. The synergy of various drag reduction methods are put forward to solve the existing problems. Finally, the development trend of ship drag reduction technology is indicated, which guide the research and application of ship drag reduction.

KEY WORDS: bionic structure; flexible coating; super hydrophobic; antifouling coating; ship drag reduction

在航运业“碳达峰、碳中和”的要求下,船舶作为重要的水上运载工具,其绿色低碳发展受到越来越多的关注,而船舶减阻技术是实现船舶节能减排、构建绿色低碳船舶的关键。船舶在航行中可受到水与空气等介质带来的阻力,使船舶航行动能降低,船舶能耗与排放增加。船舶航行阻力主要包括兴波阻力、空气阻力与摩擦阻力等,其中摩擦阻力是最主要的组成部分,约占全部阻力的 70%~80%。因此,减小船舶航行摩擦阻力对实现绿色航运具有重要意义。

船舶减阻方法可以分为主动减阻和被动减阻 2 类,前者主要包括船舶结构优化设计^[1-3]、高聚物减阻^[4-5]、气幕减阻^[6-7]等,是通过对船体优化设计或在流体中添加高聚物、气泡幕达到减阻的目的。被动减阻方法更加多样,如仿生结构减阻、柔性壁减阻、超疏水表面减阻、防污涂层减阻等,主要是通过对船舶表面加工改性来达到减阻的目的。按表面改性机理的不同可将被动减阻方法分为结构型和物理化学型减

阻。结构型减阻是通过仿生构建水生物表面结构(如鲨鱼皮和鱼鳞等)以达到减阻效果,其构建方法主要有走丝线切割技术(EDM)、滚压成型技术、压印法、浇铸翻模法、涂料喷涂加工技术、激光刻蚀法、三维打印法等。物理化学型减阻是赋予船舶表面其他特性,如超疏水、柔性、防污等,通过减少表面摩擦阻力、提高边界稳定性、减轻自重等方式达到船舶减阻的目的,加工方式多为涂料喷涂。近些年,主动减阻方法的研究成果较多且相对成熟,而被动减阻方法的研究也日益增多,但有关被动减阻方法的研究多集中于减阻机制、减阻构建方法及减阻效果模拟等方面,而对被动减阻方法的模拟及现场应用实验、多种减阻方法协同机制的研究仍较缺乏。

基于此,本文主要针对被动减阻方法进行分析,从结构型和物理化学型被动减阻的微观机理出发,总结现有文献中制备船舶减阻表面的技术以及存在的问题,并提出将 2 种及以上减阻方法协同作用的思

路, 为船舶减阻设计与应用提供指导。

1 结构型减阻法

受海洋生物表面结构启发, 研究发现具有一定仿生纹理的物体表面较光滑平面所受水下阻力更小^[8-9]。仿生纹理主要类型包括凹坑、凹槽、凸包、波纹、鳞片及复合类型。加工这些仿生结构的技术主要包括中走丝线切割技术 (EDM)、滚压成型技术、压印法、浇筑翻模法、涂料喷涂加工技术、激光刻蚀法、三维打印法等^[10-11]。以下针对各种仿生减阻结构及其加工方法进行综述。

1.1 鲨鱼皮减阻

研究发现, 鲨鱼的身体表面均匀分布着 V 型凹槽结构, 可减少水流湍流以及剪切应力, 降低对水运动的阻力, 保持高速运动^[12]。现有鲨鱼皮凹槽减阻机理主要为: (1) 基于湍流相关理论的“第二涡群”理论^[13] (图 1), 同为顺流向的凹槽与“反向旋转涡对”诱发了方向相反的“二次涡”, “二次涡”的产生能有效抑制“反向旋转涡对”, 减少低速流体向上抬升, 使湍流猝发频率减少、强度降低, 从而达到凹槽表面湍流摩擦阻力减少的目的; (2) 基于黏性理论的“突出高度”理论 (图 2) 以及之后补充提出的“突出高度之差”理论^[14] (图 3), 凹槽遇到横流时, “突出高度”下面大部分区域的流动都因黏性而阻滞, 使湍流变化减弱, 从而减少阻力, 但对纵流的阻滞作用远不及对横流的。

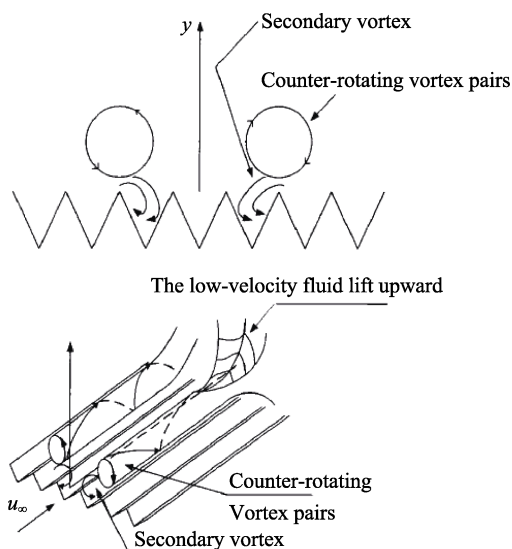


图 1 “第二涡群”理论^[13]
Fig.1 "Second vortex group" theory^[13]

张子良等^[15]通过数值模拟与实验分析研究了鲨鱼皮减阻技术的机理。研究发现, 凹槽的存在减弱了近壁区的湍流运动, 湍流猝发概率降低, 凹槽底部为

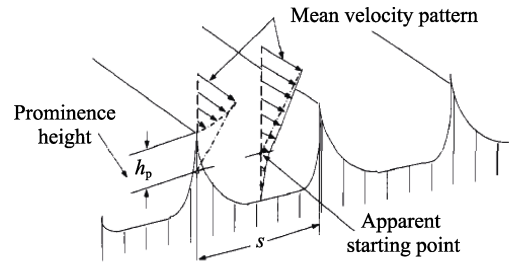


图 2 突出高度理论^[13]
Fig.2 "Prominence height" theory^[13]

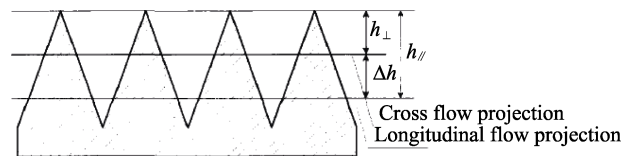


图 3 “突出高度之差”理论
(横流突出高度 h_{\perp} , 纵流突出高度 h_{\parallel})^[13]
Fig.3 "Difference in protrusion height" theory (height of cross flow projection h_{\perp} , height of longitudinal flow projection h_{\parallel})^[13]

减阻区, 而尖端部分为增阻区, 这都符合“第二涡群”理论。另外, 凹槽形状变化时, 法向涡量的变化会使尖端增阻区减小, 减阻区增大, 有利于整体的减阻。

Cui 等^[16]使用晶格玻尔兹曼 (LBM) 数值分析方法进行仿真, 发现在凹槽内形成的二次涡能使表面水流动的压差减小。减阻率计算公式为:

$$\eta = \frac{\Delta P_{\text{smooth}} - \Delta P_{\text{groved}}}{\Delta P_{\text{smooth}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔP_{smooth} 是普通光滑表面流动的压差, ΔP_{groved} 是具有凹槽表面流动的压差。他们同样发现凹槽的不同形状带来不一样的减阻效果, 减阻率由高至低分别为脊形、V 形、盘状、肋形 (图 4)。宽度与高度比较小的脊形凹槽用于较低的雷诺数流体, 反之则更适合用于较大的雷诺数流体。

于乾一等^[17]使用中走丝线切割加工技术 (EDM) 在钛合金表面加工出仿生鲨鱼皮结构。经过优选后确定加工参数为: 脉冲宽度 34 μs , 脉冲间距 7 μs , 加工电流 2 A, 进给速度 80 mm^2/min , 切削液浓度 10%。结果显示, 相同层流状态下, 仿生鲨鱼皮表面具有比普通光滑表面明显的减阻效果, 最大减阻率可达 14% 左右, 减阻率会随雷诺数的增加而逐渐减小到 6% 左右。另外, 对比钛、铝合金制备的仿鲨鱼皮表面减阻性能, 发现材料对减阻效果的影响不大, 表面结构是影响减阻效果的最大因素。

杨雪峰等^[18]用滚压成型技术在 PVC 薄膜表面构造了直径分别为 0.2 mm 和 0.5 mm 的 2 种凹槽结构, 背压轮温度分别为 70 $^{\circ}\text{C}$ 和 60 $^{\circ}\text{C}$, 压印轮温度均为 70 $^{\circ}\text{C}$, 滚筒速度均为 1 r/min, 压缩比分别为 2.27 和 1.54。结果显示, 在相同湍流流动状态下, 凹槽直径

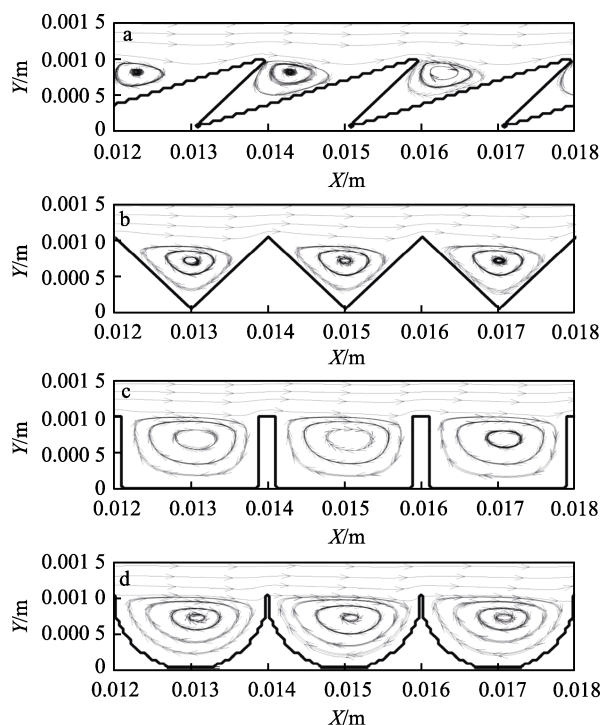


图4 盘状凹槽 (a)、V形凹槽 (b)、肋形凹槽 (c) 和脊形凹槽 (d) [16]

Fig.4 The streamlines of microchannel flow with placoid-shaped grooves (a), V-shaped grooves (b), riblet-shaped grooves (c), and ridge-shaped grooves (d) [16]

越小或深宽比越小, 其减阻效果越好。

除了中走丝线切割加工技术、滚压成型技术, 制备仿生结构的方式还有三维打印技术、浇注翻模法、压印法等。张伟等^[19]用熔融沉积成型 (FDM) 三维打印技术制备了鲨鱼皮结构, 以分层厚度 0.1 mm、打印速度 30 mm/s、挤出宽度 0.36 mm 为打印参数。黄志平等^[20]用翻模法制备该结构, 先以新鲜鲨鱼皮表面作为模板, 用不饱和树脂和玻璃纤维制得模具, 最后用硅橡胶浇注翻模得到鲨鱼皮表面结构。Guo 等^[21]用 UV-LIGA 技术以及压印法在 PVC 膜上实现大规模复制鲨鱼皮结构, 模具温度为 70 °C, 压缩比为 1.22, 轧制速度为 1 r/min, 该参数下减阻率约为 12%。

1.2 鱼鳞减阻

研究发现, 鱼鳞具有方向性减阻作用, 顺鱼鳞方向较逆鱼鳞方向更易减少流体阻力。这是由于顺、逆鱼鳞方向上表面的粗糙度不同, 顺鱼鳞方向上粗糙度更小, 因此液体流过表面时造成速度梯度下降的趋势也具有方向性, 表面受到的流体阻力也不同, 从而产生方向性的减阻效果。另外鱼鳞表面存在微米级洞穴, 其中充满气体而非液体, 这样固-液界面就会被气-液界面取代, 可减少层流的摩擦, 还可抑制湍流的产生。

WU 等^[22]用数值模拟和理论计算的方法对比了普通光滑平面与仿生鱼鳞表面的总阻力随流速的变

化。结果显示, 仿生鱼鳞表面的总阻力小于普通光滑平面的总阻力, 流速为 0.66 m/s 时, 仿生鱼鳞表面对比普通光滑平面达到最大减阻率 3.014%。且随着流速的增加, 减阻率会逐渐减小, 这与鲨鱼皮结构表面的研究结果一致, 因此这类仿生减阻微纳结构更适合应用于低速流体环境。

毕丽慧等^[23]将鱼鳞仿生结构应用到燃料电池 (PEMFC) 水管理领域中, 采用数值模拟的方法构建了如图 5 所示的 PEMFC 流道, 加快液态水从流道中通过的速度, 提高电池排水的效率。结果显示, 仿生鱼鳞结构的导流板的排列以及倾斜角度与液体离开流道的速度有很大关系, 当导流板如鱼鳞般交错排列、倾斜角度为 15° 时, 液滴流动速度最快。其他计算域的各项物理参数为: 导流板横向间距 2.75 mm, 纵向间距 2.5 mm 或 2 mm, 厚度 0.5 mm, 宽度 1.5 mm 或 1 mm。Muthukumar 等^[24]也在仿真实验中证明了仿生鱼鳞阵列对减阻效果的影响, 鱼鳞的交错排列阵列可以很好地稳定层流边界层, 抑制湍流的产生, 理论可减少约 27% 的减阻率。

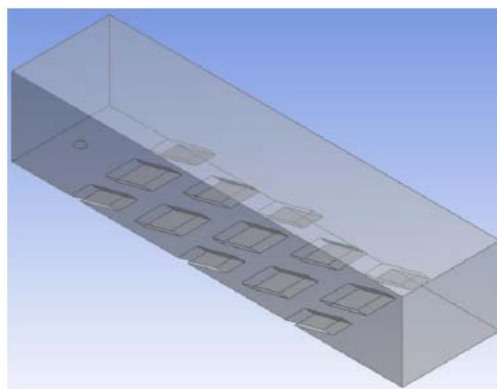


图5 最优化尺寸下的仿生鱼鳞流道计算域示意图^[23]

Fig.5 Schematic diagram of calculation domain under optimal size^[23]

Wang 等^[25]用激光加工的方法在铝合金表面制备鱼鳞结构, 制备参数为: 激光源和样品距离 195 mm, 纳秒激光器光斑直径 50 μm, 重复设定频率 20 kHz, 脉冲持续时间 1 μs, 处理功率 10 W, 扫描速度 500 mm/s。制备出的样品表面超疏水, 接触角为 154.9°, 相比光滑铝合金表面, 减阻率为 4.814%。Dou 等^[26]用喷涂技术制备涂层, 模仿构造鱼鳞中的微米级洞穴, 涂料中包含 12% 乙酸丁酯、8% 二甲苯、6% 金属氧化物微粒、62% 氟乙烯乙烯基醚共聚物树脂、2% 聚二甲甲基硅氧烷树脂和 10% 六亚甲基二异氰酸酯, 最高减阻效率约 10%。

综上可知, 仿生结构减阻主要聚焦于鲨鱼皮结构与鱼鳞结构减阻的研究, 通过减小湍流发生的概率和强度, 保持稳定层流, 达到减小摩擦阻力的目的。仿生结构的形状以及排列方式都会影响整体减阻效果。

但目前对精细复杂表面结构的研究仍主要依赖于数值模拟理论计算, 应用实验研究开展仍相对不足, 且多数实验研究未考虑材料本身产生的腐蚀、磨损与裂纹等问题对减阻结构稳定性与时效性的影响。现有仿生结构制备方法有多种, 但每种方法各有优劣, 如滚压成型技术相较于传统的热压成型效率有较大的提升, 理论上可实现大面积复制, 但存在精度较低、工艺参数(滚筒速度、压力和温度)难以控制等问题; 压印法理论上也可实现大面积复制, 但成本昂贵, 对准技术仍达不到精准; 激光刻蚀精度高、成本低, 但不能满足大批量生产。因此, 后续应结合数值模拟, 开展水面、水下仿真与现场实验研究, 并选择合适的制备方法与材料, 分析制备方法的适用性与材料性质对减阻效果的影响。

2 物理化学型减阻法

近些年, 研究发现超疏水、防污、柔性等表面性能也可实现船舶减阻的目的, 制备方法主要有涂料喷涂加工技术、旋涂法、化学腐蚀法、溶胶-凝胶法、电化学沉积、静电纺丝、相分离、等离子体处理等技术, 以下做详细阐述。

2.1 超疏水减阻

超疏水涂层减阻的机理研究较多的是 Navier 壁面滑移, 如图 6 所示, 近壁面流体有一定的滑移速度, 流动更接近理想流体, 流体与壁面之间的剪切力降低, 从而减少摩擦阻力^[27]。Tretheway 等^[28]用微米分辨率粒子图像测速技术来测量涂有超疏水涂料(十八烷基三氯硅烷) 30 mm×300 mm 通道中的流速。结果显示, 水流在超疏水表面出现滑移现象, 滑移速度约为自由流速度的 10%, 滑移长度约 1 mm, 该通道中距壁 25 mm 的速度约为自由流速度的 95%。Min 等^[29]采用直接数值模拟方法(DNS)证明了顺流向滑移的确能产生减阻效果, 且近壁湍流强度减弱, 这是因为随着流动滑移, 壁面剪切应力相应减小, 达到减阻的目的。Ahmad 等^[30]发现滑移的发生不只是因为涂层表面疏水性好、润湿性差, 他们将同一种超疏水涂料(十八烷基三氯硅烷)涂覆在光滑与粗糙基材表面并观察滑移现象, 结果显示, 后者表面流动表现出更明显的滑移, 说明粗糙度对滑移的影响优于润湿性。Ou 等^[31-32]发现具有微观粗糙度的超疏水涂层有微纳米凸出结构, 与液滴接触时具有气-液界面, 符合 Cassie-Baxter 模型(图 7)。在气-液界面才会出现更明显的滑移, 固-液界面几乎不会出现滑移现象(图 8)。Ren 等^[33]用多体耗散粒子动力学模拟方法也证明了这一理论, 并深入研究了边界滑移条件。滑移使边界面上的速度梯度减小, 从而减小了边界剪切力, 减少了摩擦阻力, 也使层流边界层厚度增加, 更加稳定,

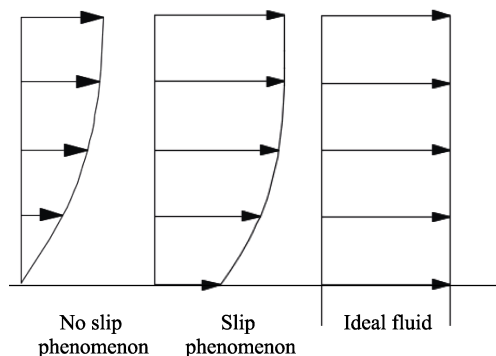


图 6 滑移表面对流体流动的影响
Fig.6 Effect of slip surface on fluid flow

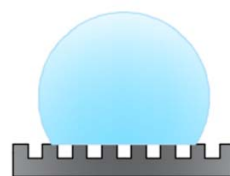


图 7 Cassie-Baxter 模型
Fig.7 Cassie-Baxter model

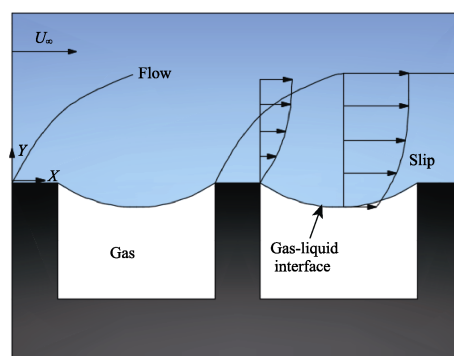


图 8 超疏水表面的滑移现象
Fig.8 Slip phenomenon on superhydrophobic surface of Cassie-Baxter model

抑制湍流的产生, 超疏水表面在上述诸多因素下共同作用产生减阻效果。

Li 等^[34]通过逐层热压工艺(HoP)在 Kevlar 织物表面纤维上构建菱形十二面体晶体结构 ZIF-8, 再浸入 1H,1H,2H,2H-全氟辛基三乙氧基硅烷(PFOTES)降低表面能。结果显示, 表面接触角为 152.2°, 用如图 9 所示的装置进行表面减阻性能测试, 将测试小船底面覆盖经过处理的以及未经处理的 Kevlar 织物, 不锈钢球顺着 U 型钢槽滚入测试船, 然后船沿直线开始在水面上前进。测量球的总移动距离和总移动时间可以计算得到船的漂移速度, 覆盖有经过处理超疏水 Kevlar 织物的测试船的平均漂移速度为 3.75 cm/s, 未经处理 Kevlar 织物的测试船的平均漂移速度为 1.875 cm/s。两艘船有相同的驱动力, 驱动力由相同的重力势能转化而来, 而不同的移动速度则说明船体对水的阻力不同。

展学平等^[35]以碳纤维复合材料层合板作为基材,

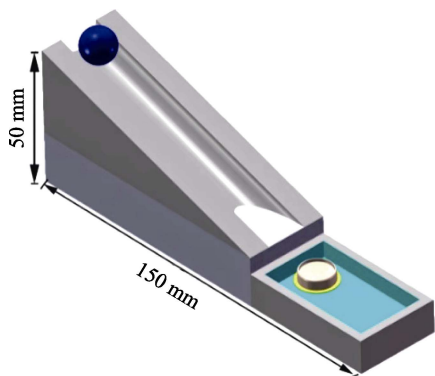


图9 测试 Kevlar 织物小船减阻

效果的装置图^[34]Fig.9 Device diagram for testing drag reduction effect of Kevlar fabric boat^[34]

通过匀胶机在其上涂覆由聚氨酯和纳米 SiO_2 构成的超疏水材料,成功在表面构建微纳米结构。结果显示,加入质量分数为 5%、粒径为 100 nm 的纳米 SiO_2 时,接触角为 152.1° ,此时涂层的减阻效果最好,悬挂式测量法和热线风速法下测得的减阻率分别为 15.56% 和 16.92%。

Mohammad 等^[36]使用喷涂的方法在载玻片表面涂覆由聚二甲基硅氧烷 (PDMS)/疏水性 SiO_2 纳米粒子组成的纳米复合涂层。 SiO_2 /PDMS 比率为 100% 时,接触角和滑动角分别为 $(161.6 \pm 2)^\circ$ 和 $(4.1 \pm 0.5)^\circ$ 。用压差流阻评价法测得减阻率和滑移长度分别为 25% 和 $70 \mu\text{m}$ 。 SiO_2 含量较小的涂层的滑移长度较小。

李思奇等^[37]采用化学腐蚀技术在铝合金表面制备微纳级粗糙结构,在 3 mol/L 盐酸中 20 min 完成腐蚀后,在天然松香溶液中浸泡 5 min 进行表面改性,最后刷涂质量分数为 10% 的炭黑悬浊液。结果显示,该超疏水表面接触角为 155° ,滚动角为 1.38° ,用悬挂式测量法测得减阻率在海水流速 0.8~3.5 m/s 范围内达到 20%~30%。

Wen 等^[38]在铝缸表面喷涂由丙烯酸、聚四氟乙烯和碳管组成的疏水材料,以降低表面能和增加表面粗糙度。结果显示,当雷诺数 Re 小于 3 800 时,处于 Cassie-Baxter 状态的疏水涂层具有显著的减阻效果;但当雷诺数 Re 大于 6 600 时,疏水涂层变为 Wenzel 状态,疏水涂层的粗糙度开始影响流场,减阻作用消失。Hu 等^[39]同样发现这个结论,随着水流速度的增大,表面的空气囊在剪切力作用下逐渐消失,表面最终被水完全润湿变为 Wenzel 状态,导致壁面滑移消失,随后固体表面的粗糙度便成为可能会增加阻力的主要因素。这也是限制疏水表面应用的主要缺陷,目前研究认为有 2 种方法可以解决这个问题。第一种是改进疏水表面的制造工艺,使空气囊不易消失, Cassie-Baxter 状态在水下保持高稳定性和耐久性;第二种是实现疏水表面的空泡效应,这涉及到流体力学

领域,空化是一种非常复杂的两相流,它发生在局部压力下降到足够低的压力时(通常是液体的蒸汽压)。当空化数足够低时,会发生超空化现象,使整个浸没体被包围在一个气腔中。通过合理的结构和制造方法,可以实现微特征上的空化^[40]。

构建微纳米级粗糙结构的方式还有很多,比如溶胶-凝胶法^[41-43]、电化学沉积^[44-45]、静电纺丝^[46-47]、相分离^[48-49]、等离子体处理^[50-52]和化学蚀刻^[53-54]等。Huang 等^[55]用溶胶凝胶法制得 SiO_2 纳米颗粒,与甲基硅树脂混合后涂覆在玻璃片表面,接触角为 157.2° 。彭华乔等^[56]用盐酸对铝合金表面进行化学蚀刻,盐酸浓度为 3 mol/L、刻蚀时间为 20 min、刻蚀温度为 25°C 时,效果最佳,接触角为 156° 。Yang 等^[57]用电化学沉积法在铜片上构建微纳米结构,氯化镍、乙醇和肉豆蔻酸作为电解液,电解时间为 10 min,改性后表面接触角为 160.3° 。上述方法都能成功在基材表面构建出微纳米粗糙结构,但是在实际应用中都有所限制。溶胶-凝胶法所使用的原料一般价格昂贵,有些甚至对健康有危害,且制备周期较长,需要几天或几周。化学刻蚀和电沉积通常不能大规模生产,也不能处理大面积的基材,且会产生大量化学废液。静电纺丝法产量较低,同样不适合大规模生产。在实际应用时,应考虑需构建微纳米粗糙平面的工件大小、使用环境等各方面因素,选择方便、可行、经济的构建方法。

2.2 柔性壁减阻

柔性壁的减阻机理主要是由于柔性涂层的弹性形变可以抑制流体的压力脉动,有效地吸收湍流动能,再通过形变回弹释放能量,有利于延缓层流边界层向湍流的转换,提高边界稳定性,柔性壁涂层变形示意图如图 10 所示。

为精确测量柔性壁作用时发生变形表面的摩擦

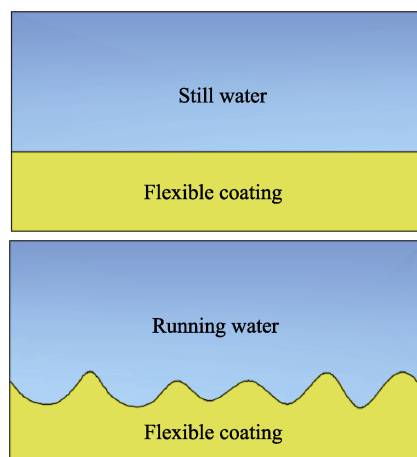


图10 柔性壁涂层变形示意图

Fig.10 Deformation diagram of flexible coating

力以及减阻效果, 顾建农等^[58]利用粒子图像全场测速技术 (PIV) 可有效地分析柔性壁近壁区域平均速度剖面与摩擦阻力。结果显示, EA/BA 乳液共聚物以 50/50 的比例作为柔性壁时, 其在雷诺数为 9.36×10^5 的流体中, 减阻率为 5.263%。孙卫红等^[59]用乳液聚合法合成了聚氨酯-聚丙烯酸乙酯 (PU/PEA) 质量比为 40/60 的乳液混合物并涂覆在铝板上制成柔性壁, 同样用 PIV 测量技术结合小型水洞平板阻力测试方法进行减阻效果测试, 结果显示, 流速为 3.0 m/s 时, 减阻率达到 8.8%。图 11 为 PIV 测得的铝板表面和 PU/PEA 柔性壁表面速度矢量分布图, 上边界为刚性壁或柔性壁表面, 观察上方粒子位置可以清楚地发现普通刚性壁和柔性壁表面流态的不同, 柔性壁表面有法向的速度, 具有波动的特点, 而刚性壁则无。

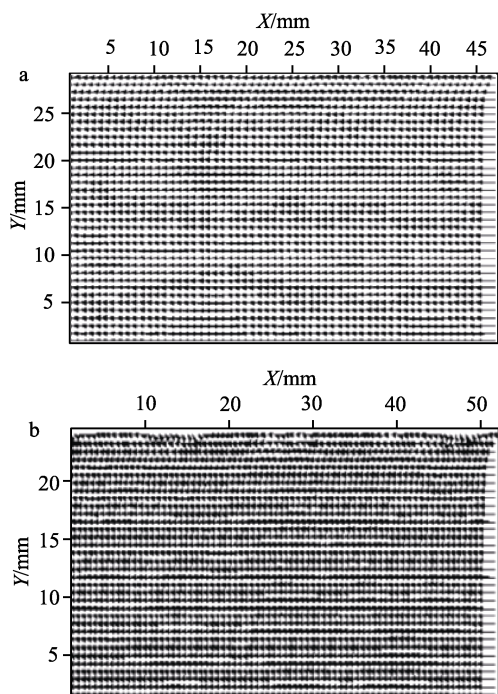


图 11 铝板表面速度矢量分布图 (a),
PU/PEA 柔性壁表面速度矢量分布图 (b)^[59]
Fig.11 Diagrams of velocity vector distributions
in surface of (a) aluminum plate;
(b) PBA/PU flexible film^[59]

郝翰林等^[60]用喷涂法将质量比为 2:3 的乳胶和氨水混合溶液在转盘上制成厚度为 0.2 mm 柔性壁涂层。用转盘测阻法测试发现, 转盘转速为 100 r/min, 即雷诺数为 4.170×10^5 时, 该涂层达到最大减阻率 15%。

Li 等^[61]用喷涂法将不同质量比的聚二甲基硅氧烷和乙酸乙酯混合溶液喷涂在铝盘上获得仿生柔性涂层。聚二甲基硅氧烷和乙酸乙酯质量比为 10:1.2 时, 用转盘测阻法测得该涂层在 50 r/min 下的减阻率为 21.6%。结果显示, 弹性是促进涂层减阻性能的主要因素, 但并非发生的形变越大减阻效果越好, 形变

幅度超过近壁区域边界层的厚度时, 连续边界层在近壁区域中断, 这反而会增加湍流强度和阻力。

柔性壁的制备方法不难, 在实验室测试中都有良好的表现, 通过研究材料的分子结构及力学性能可以得到较高减阻率的柔性表面。但在实际应用中限制条件颇多, 如柔性表面与刚性部分的衔接、逆压梯度、来流的湍流水平等, 且某一种的柔性壁多只固定适用于某一雷诺数范围的流体, 雷诺数过大会导致柔性壁发生永久变形, 无法释放能量, 从而得不到减阻的效果^[62]。

2.3 防污涂层减阻

船体生物污损可导致船舶阻力增大 60%, 航速降低 10%, 这需增加最多 40% 的燃料进行补偿^[63], 同时船体表面性能丧失, 寿命减短。防污涂层的减阻机理就是通过减少海洋生物在船体表面的附着, 从而减少船舶接触界面摩擦阻力, 保持航行速度, 减少燃油消耗。防污涂层第一类是传统的有机锡自抛光防污涂层材料和无锡自抛光防污涂层材料。无锡自抛光防污涂层是国际海事组织 (IMO) 禁止使用有机锡自抛光防污涂料 (TBT) 后的新研发热点。采用毒性小的铜、锌及硅等元素代替锡元素通过酯键接到丙烯酸共聚物侧链, 接触海水后酯键发生水解, 释放出具有防污功能的元素。残留的共聚物生成亲水性的羧基, 逐渐溶解, 并将内部新的防污涂层露出。第二类是不含杀虫剂或者含有绿色天然产物类杀虫剂的新一代防污涂层。

张建斌等^[64]将长链线型有机硅自润滑组分化学键合到自抛光黏结树脂中, 与一定的无机填料复配, 通过喷涂的方法制备了具有自润滑特性的自抛光防污减阻涂层。当有机硅质量分数超过 20% 时, 涂层的防海藻黏附效率达到 97%, 减阻率达到 10% 以上, 且防污效率与减阻率成正比。

宋美艳等^[65]将表面含有“毛发状”PEG 支链的聚苯乙烯微球与丙烯酸酯聚合物乳液共混, 同时加入甲基丙烯酸缩水甘油酯 (GMA) 作为共聚单体, 引入环氧基团, 使微球与聚合物之间发生交联, 避免微球脱落, 最后采用涂覆法制备完成防污涂层。抗蛋白吸附效率均在 90% 以上, 减阻率最大为 34%。

江学志等^[66]将草甘膦以酰胺键的形式共价接枝到丙烯酸树脂上, 合成一种侧链接枝草甘膦丙烯酸树脂, 通过树脂与海水的水解反应来释放防污剂。结果显示, 随着接枝的草甘膦含量增加, 涂层抑藻性也逐渐增加。草甘膦接枝量为 20% 时, 对藤壶生长的抑制率达 58.7%, 对硅藻附着的抑制率达 68.2%。

Ma 等^[67]将可水解的聚三异丙基甲基硅烷基丙烯酸酯 (PTSA) 作为侧链制备了具有可降解聚酯链段的聚氨酯, 并将其作为有机防污剂 4,5-二氯-2-辛基-异噻唑酮 (DCOIT) 的载体。结果显示, 聚合物的降

解速率随着主链中酯基密度或侧链长度的增加而增加, 防污剂的释放速率随着侧链长度的增加而增加。Chen 等^[68]制备了具有可降解聚酯链段的聚己二酸乙酯(PEA)、聚己二酸 1,4-丁酯(PBA)和聚 1,6-六亚甲基己二酸酯(PHA), 使用 4,5-二氯-2-辛基异噻唑酮(DCOIT)作为有机防污剂。结果显示, 聚氨酯的降解速率随着结晶度的降低而增加, 随酯基密度的增加而增加, 随可降解链段含量的增加而增加, 因此 PEA 作为链段且质量分数为 80%的聚酯基聚氨酯降解速率最高, 在静态水中的防污测试中, 该组样品也有最优的表现。

对自抛光防污涂料缺点的改进一直有持续的研究, 从有机锡到无锡自抛光防污涂层材料, 再到一些新型环保自抛光防污涂料, 涂料的毒性逐渐减弱, 防污减阻能力逐渐提高。虽然传统防污涂料的毒性一直在改进, 逐渐减小, 但长期使用依然有悖于绿色船舶的理念, 因此发展新型环保、毒性小、不向海洋释放有毒防污剂乃是大势所趋。但由于这类涂料都基于接枝技术, 因此其投入大规模生产应用不可避免有一些问题。比如, 防污剂作为侧链接枝前通常需要改性, 这将降低防污剂的防污能力; 接枝技术通常工艺复杂, 制备要求高, 这使该项技术的应用常常止步于实验室阶段。因此, 保证防污剂效果的前提下寻找适合工业化生产的接枝工艺路线仍需要更多的研究。

3 结构型减阻和物理化学型减阻协同作用

上述表面单独作用下都被证实对减阻有很好的效果, 但单纯改变凹槽形状、分布用以提高减阻效果已进入瓶颈, 单一的减阻机理也会存在无法避免的缺陷和短板。因此对船舶减阻表面的研究不应只拘泥于一种减阻机理, 可以考虑多种减阻机理协同作用以取得更好的效果。

张祯华等^[69]尝试把鲨鱼皮的仿生结构和柔性壁结合, 制备新型减阻材料。将甲苯二异氰酸酯(TDI)与聚四氢呋喃二醇(PTMG)反应生成 NCO-基团含量为 4.80%的聚氨酯(PU)预聚体, 3,3'-二氯-4,4'-二氨基二苯基甲烷(MOCA)、4-丁二醇(1,4-BD)作为扩链剂。用翻模法复制出鲨鱼皮表面结构, 再通过浇注成型法得到仿生结构与柔性壁协同减阻的表面, 厚度约 2.0 mm。用转盘扭矩测阻方法测得, 转速为 398 r/min 时, 减阻率为 20.7%, 高于无仿生结构的纯柔性壁 PU 表面, 展现了仿生结构和柔性壁对摩擦阻力起到的协同减阻效应。

Bixler 等^[70]将疏水的 SiO₂ 颗粒涂覆在仿生凹槽结构上制备不同润湿性的沟槽, 具有疏水性纳米结构的涂层比单纯的凹槽结构减少了更多的压降, 展示了

仿生结构和超疏水表面协同作用下更优异的减阻效果。王晨飞等^[71]用数学模拟的方法分析了一种具与仿生结构相结合的超疏水减阻表面。使用雷诺时均法(RANS)对凹槽仿生结构参数进行优化, 大涡模拟(LES)分析沟槽附近的流场特征。结果显示, 锯齿形凹槽在流体雷诺数 Re 为 2 900 时的减阻率为 7.3%, $Re=15\ 000$ 时, 减阻率为 9.1%, 而仿生结构与超疏水表面协同作用的模型, 无滑移比例(即固壁占整个表面的比例) $f=0.16$ 、雷诺数 Re 为 15 000 时, 减阻率达到 63%。

Rong 等^[72]制备了一种各向异性自润滑表面(LIASSs), 以铝镁合金为基板, 用纳秒激光扫描技术在表面烧蚀仿生鱼鳞微纳米结构, 将润滑液浸渍入微纳米结构中, 实现表面氟化。结果显示, 鱼鳞结构弧度半径为 100 μm 、中心角为 120°时, 该表面减阻效果最好, 接触角为 121°, 滚动角顺鱼鳞方向 0.5°, 逆鱼鳞方向 3°, 顺鱼鳞方向和逆鱼鳞方向的减阻率分别为 51.09%和 44.88%, 且随着速度的增加, 减阻率也可以保持在 50%左右, 表现了该表面在高水流速度下的稳定性和稳健性。

张腾蛟等^[73]用激光刻蚀法在铝合金表面制备了仿生鱼鳞表面, 并用硅氧烷乙醇溶液进行低表面能处理。改变仿生鱼鳞表面鱼鳞圆弧半径的尺寸(图 12), 直至形貌最接近真实鱼鳞。得到最优制备参数为: CAD 图案元素间距 12.5 μm , 激光占比 70%, 刻蚀次数 1~4 次, 鱼鳞圆弧半径 100 μm 。在该条件下, 制备出的仿生鱼鳞表面接触角达到 158°, 滚动角顺鱼鳞方向 0.5°, 逆鱼鳞方向 2.5°, 顺鱼鳞方向的减阻率高达 40%。但存在高速水流冲击下减阻率下降的缺点, 这是由于高速水流易将表面微纳米结构中的空气带走, 从而增加了水流与表面的接触面积, 增大了阻力。

综合分析上述文献不难发现, 单一的减阻技术达到的减阻效率均小于 30%, 结构型减阻效率甚至小于 15% (除计算模拟结果), 而将结构型与物理化学型结合, 减阻效率均大于单纯结构型减阻, 最高甚至达到 50%。因此结构型减阻与物理化学型减阻(超疏水减阻、柔性壁减阻、防污涂层减阻)协同作用, 是十分可行并且有研究前景的, 可突破单一减阻理论带来的局限, 更好地实现船舶减阻。在结合过程中, 可取两者各自最优的制备方案, 再根据实验数据调节制备参数, 以获得最优的减阻效率。而研究多方协同作用的过程中, 困难之处在于影响实验结果的因素过多, 难以确定和分析影响数据的主要因素, 从而难以对应调整制备参数。因此, 在后续研究中, 可从少因素开始, 分析每个因素对效果产生的影响, 再逐渐累积到多因素协同作用, 以最终研发出优异性能的减阻材料。

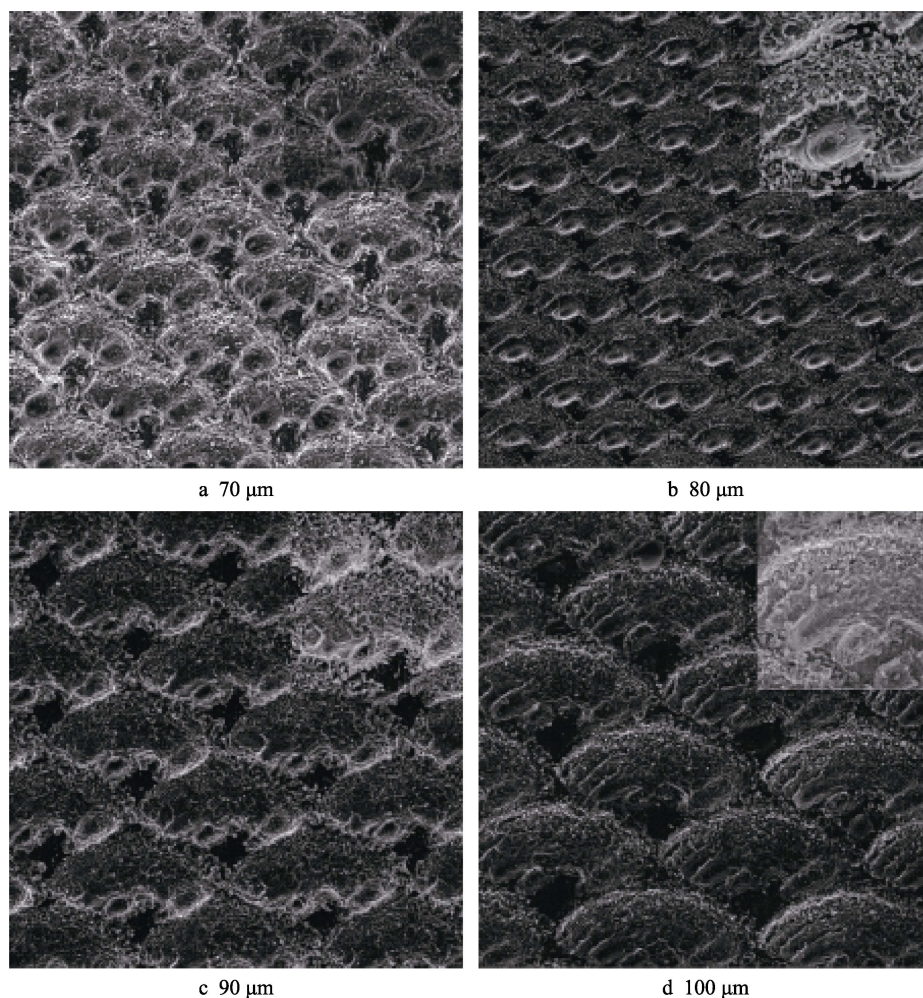
图 12 直径分别为的仿生鱼鳞表面 SEM 图^[73]

Fig.12 The diameters were (a) 70 μm ; (b) 80 μm ; surface SEM images of (c) 90 μm and (d) 100 μm biomimetic fish scales^[73]

4 总结

目前可应用于绿色船舶的被动减阻方法主要包括结构型、物理化学型减阻,通过改变船舶表面微观结构、柔性、超疏水性、防污性能等,实现稳定边界层、减少湍流转变、减轻船舶重量,最终减少船舶阻力。但现有研究过多注重于单一的仿生结构或材料减阻等方面,而单一的减阻形式往往难以实现船舶减阻的有效突破,开展结构型与物理化学型减阻方法的协同研究,可实现船舶减阻的提升。后续性能测试中也应注重并加强现场应用研究。

另外,随着先进制造方法的出现,如激光 3D 打印增材制造技术、激光熔覆、图像识别智能喷涂等技术,可为实现船舶减阻结构型与物理化学型有效结合提供条件。例如,可采用 3D 打印增材制造技术直接制备具有耐磨、耐蚀、抗菌或超疏水材质的仿生结构,实现船舶的长时效、高效减阻。在实际应用中,也应关注所选制备方法与制备选材的稳定性、广泛适用性、经济实用性及标准统一性等问题,以便减阻技术的市场化应用,推动航运业实现“碳达峰、碳中和”。

参考文献:

- [1] 芮桃明, 孙磊. 不同深度 V 沟槽结构的圆柱绕流减阻机理[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 128-135.
RUI Tao-ming, SUN Lei. Drag Reduction Mechanism of Circular Cylinder with V-Groove Structure with Different Depths[J]. Ship Engineering, 2021, 43(4): 128-135.
- [2] 姚丁元, 蒋一, 沈冬祥, 等. 深 V 型双断级滑行艇水动力特性的初步数值研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(10): 41-46.
YAO Ding-yuan, JIANG Yi, SHEN Dong-xiang, et al. Preliminary Numerical Study on Hydrodynamic Characteristics of Deep-V Planing Boat with Double Steps[J]. Ship Engineering, 2020, 42(10): 41-46.
- [3] 李冬琴, 李鹏, 章易立, 等. 分段式尾压浪板对高速船阻力性能的影响[J]. 船舶工程, 2019, 41(7): 37-43.
LI Dong-qin, LI Peng, ZHANG Yi-li, et al. Influence of Segmented Stern Flap on Resistance Performance of High Speed Craft[J]. Ship Engineering, 2019, 41(7): 37-43.
- [4] 霍苗苗, 柴清平, 张忠政, 等. 高分子聚合物减阻类型及影响因素探讨[J]. 辽宁化工, 2021, 50(1): 42-45.
HUO Miao-miao, CHAI Qing-ping, ZHANG Zhong-zheng, et al. Study on Reluctance Reduction Types and

- Influencing Factors of Polymer[J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(1): 42-45.
- [5] 王超伟, 杨绍琼, 姜楠. 高分子溶液对湍流边界层减阻机理的实验研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2384-2391.
WANG Chao-wei, YANG Shao-qiong, JIANG Nan. Experimental Investigation of Drag Reduction in Turbulent Boundary Layer with Polymer Additives Solution[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(6): 2384-2391.
- [6] 徐庚辉, 张咏欧, 钟声驰. 两相流相互作用下的船模微气泡减阻性能数值仿真[J]. 船舶工程, 2019, 41(4): 31-35, 59.
XU Geng-hui, ZHANG Yong-ou, ZHONG Sheng-chi. Numerical Simulation of Ship Model Microbubble Drag Reduction Based on Two-Phase Flow Interaction[J]. Ship Engineering, 2019, 41(4): 31-35, 59.
- [7] 高丽瑾, 陈少峰, 恽秋琴, 等. 气层减阻技术关键因素影响研究[J]. 中国造船, 2018, 59(4): 1-13.
GAO Li-jin, CHEN Shao-feng, YUN Qiu-qin, et al. Research on Influence Factors in Air Layer Drag Reduction Technology[J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(4): 1-13.
- [8] TIAN Li-mei, KE Qing-peng, JIN E. Drag Reduction Characteristics of Bionic Structure Composed of Grooves and Mucous Membrane Acting on Turbulent Boundary Layer[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2022, 15(1): 256.
- [9] TIAN Gui-zhong, ZHANG Yao-sheng, FENG Xiao-ming, et al. Focus on Bioinspired Textured Surfaces Toward Fluid Drag Reduction: Recent Progresses and Challenges[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(1): 2100696.
- [10] COBLAS D G, FATU A, MAOUI A, et al. Manufacturing Textured Surfaces: State of Art and Recent Developments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 229(1): 3-29.
- [11] SRINIVAS S, BABU N R. Penetration Ability of Abrasive Waterjets in Cutting of aluminum-Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composites[J]. Machining Science and Technology, 2012, 16(3): 337-354.
- [12] HOU Qi-min, YANG Xue-feng, CHENG Jian, et al. Optimization of Performance Parameters and Mechanism of Bionic Texture on Friction Surface[J]. Coatings, 2020, 10(2): 171.
- [13] 柯贵喜, 潘光, 黄桥高, 等. 水下减阻技术研究综述[J]. 力学进展, 2009, 39(5): 546-554.
KE Gui-xi, PAN Guang, HUANG Qiao-gao, et al. Reviews of Underwater Drag Reduction Technology[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(5): 546-554.
- [14] LUCHINI P, MANZO F, POZZI A. Viscous Eddies over a Grooved Surface Computed by a Gaussian-Integration Galerkin Boundary-Element Method[J]. AIAA Journal, 1992, 30(8): 2168-2170.
- [15] 张子良. 仿鲨鱼皮二维肋条湍流减阻机理与模化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
ZHANG Zi-liang. Drag Reduction Mechanism and Modeling Strategy of Two Dimensional Shark-Skin-Inspired Riblets in Turbulent Flows[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [16] CUI Jing, FU Ya-bo. A Numerical Study on Pressure Drop in Microchannel Flow with Different Bionic Micro-Grooved Surfaces[J]. Journal of Bionic Engineering, 2012, 9(1): 99-109.
- [17] 于乾一. 钛合金表面微织构建及减阻性能研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
YU Qian-yi. Study on Surface Microstructure Fabricating and Drag Reduction of Titanium Alloy[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [18] 杨雪峰. 仿生鲨鱼皮大面积成型技术及减阻性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
YANG Xue-feng. Study on Large Area Molding Technology and Drag Reduction Performance of Bionic Shark Skin[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [19] 张伟. 三维打印技术在仿鲨鱼皮表面制备中的应用研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
ZHANG Wei. Study on the Application of Three-Dimensional Printing Technique to the Surface Preparation of Shark Skin[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.
- [20] 黄志平. 基于结构仿生的鲨鱼皮微沟槽复制技术基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
HUANG Zhi-ping. Basic Study on Replication Technology of Micro-Riblets of Shark Skin Based on Structural Bionics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [21] GUO Chun-fang, TIAN Qian-qian, WANG Hai-rui, et al. Roller Embossing Process for the Replication of Shark - Skin - Inspired Micro - Riblets[J]. Micro & Nano Letters, 2017, 12(7): 439-444.
- [22] WU Li-yan, JIAO Zhi-bin, SONG Yu-qiu, 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.
- [23] 毕丽慧. 基于新型鱼鳞仿生 3D 流道的 PEMFC 流型控制与引导[D]. 太原: 太原科技大学, 2020.
BI Li-hui. PEMFC Channel Pattern Control and Guidance Based on New Fish-Scale Bionic 3D Flow Channel[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.
- [24] MUTHURAMALINGAM M, PUCKERT D K, RIST U, et al. Transition Delay Using Biomimetic Fish Scale Arrays[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 14534.
- [25] WANG Yong-hua, ZHANG Zhong-bin, XU Jin-kai, et al. One-Step Method Using Laser for Large-Scale Preparation of Bionic Superhydrophobic & Drag-Reducing Fish-Scale Surface[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409: 126801.

- [26] DOU Zhao-liang, WANG Jia-dao, CHEN Da-rong. Bionic Research on Fish Scales for Drag Reduction[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, 9(4): 457-464.
- [27] 于广锋, 刘宏伟. 基于滑移理论的超疏水表面减阻性能分析[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(2): 191-195.
YU Guang-feng, LIU Hong-wei. Analysis on Drag Reduction of Super-Hydrophobic Surface Based on Slip Theory[J]. *Tribology*, 2013, 33(2): 191-195.
- [28] TRETHERWAY D C, MEINHART C D. Apparent Fluid Slip at Hydrophobic Microchannel Walls[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(3): L9-L12.
- [29] MIN T, KIM J. Effects of Hydrophobic Surface on Skin-Friction Drag[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(7): L55-L58.
- [30] AHMAD K, ZHAO Xue-zeng, PAN Yun-lu. Effect of Surface Morphology on Measurement and Interpretation of Boundary Slip on Superhydrophobic Surfaces[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2017, 49(7): 594-598.
- [31] OU Jia, ROTHSTEIN J P. Direct Velocity Measurements of the Flow Past Drag-Reducing Ultrahydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17(10): 103606.
- [32] OU Jia, PEROT B, ROTHSTEIN J P. Laminar Drag Reduction in Microchannels Using Ultrahydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(12): 4635-4643.
- [33] REN Liu-zhen, HU Hai-bao, BAO Lu-yao, et al. Many-Body Dissipative Particle Dynamics Study of the Local Slippage over Superhydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(7): 072001.
- [34] LI De-ke, GUO Zhi-guang. Metal-Organic Framework Superhydrophobic Coating on Kevlar Fabric with Efficient Drag Reduction and Wear Resistance[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 443: 548-557.
- [35] 展学平. 纳米 SiO_2 /聚氨酯低表面能涂层减阻性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
ZHAN Xue-ping. Study of Fabrication of Nano- SiO_2 /PU Coating Drag Reduction[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [36] SAADATBAKHS M, JAMALI ASL S, KIANI M J, et al. Slip Length Measurement of PDMS/Hydrophobic Silica Superhydrophobic Coating for Drag Reduction Application[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 404: 126428.
- [37] 李思奇, 刘晓为, 邱成军, 等. 用于固液界面减阻无氟超疏水表面制备新方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(10): 152-156.
LI Si-qi, LIU Xiao-wei, QIU Cheng-jun, et al. A New Method for Fluorine-Free Superhydrophobic Surface Used for Drag-Reduction at Solid-Liquid Interface[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(10): 152-156.
- [38] WEN Jun, HU Hai-bao, LUO Zhuang-zhu, et al. Experimental Investigation of Flow Past a Circular Cylinder with Hydrophobic Coating[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30(6): 992-1000.
- [39] HU Hai-bao, DU Peng, ZHOU Feng, et al. Effect of Hydrophobicity on Turbulent Boundary Layer under Water[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 60: 148-156.
- [40] RASHIDI I, PASSANDIDEH-FARD M, PASANDIDEH-FARD M. The Optimum Design of a Cavitator for High-Speed Axisymmetric Bodies in Partially Cavitating Flows[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2013, 135(1): 639.
- [41] 王芳, 洪英蕊, 逢艳, 等. 溶胶凝胶法制备光学透明的含氟超疏水复合涂层(英文)[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016(S1): 308-314.
WANG Fang, HONG Ying-rui, PANG Yan, et al. Sol-Gel Preparation of Optically Transparent Fluoride Superhydrophobic Hybrid Coatings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016(S1): 308-314.
- [42] 胡云浩, 石晓凯, 马小凡, 等. 硅橡胶表面原位生长 ZnO 纳米花构筑稳固超疏水表面[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1638-1647.
HU Yun-hao, SHI Xiao-kai, MA Xiao-fan, et al. Mechanically Stable Superhydrophobic Surface Fabricated by Self-Growth of ZnO Nanoflowers on Vulcanized Silicone Rubber[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1638-1647.
- [43] WU Xing-hua, FU Qi-tao, KUMAR D, et al. Mechanically Robust Superhydrophobic and Superoleophobic Coatings Derived by Sol-Gel Method[J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 1302-1309.
- [44] 顾秦铭. 激光-电化学沉积制备跨尺度超疏水表面及其 Cassie 状态稳定性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
GU Qin-ming. An Investigation into Preparation and Cassie State Stability Analysis of Multi-Scale Superhydrophobic Surface Produced by Laser Ablation and Electrodeposition[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [45] 周宝玉, 杨辉, 冯伟, 等. 超疏水材料表面冷凝液滴自移除及液滴尺寸分布规律[J]. *表面技术*, 2020, 49(5): 170-176, 190.
ZHOU Bao-yu, YANG Hui, FENG Wei, et al. Self-Propelled and Size Distribution of Condensate Droplets on Superhydrophobic Surfaces[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(5): 170-176, 190.
- [46] 蒋婷婷. 静电纺丝制备超疏水纤维膜及其在油水分离中的应用[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019.
JIANG Ting-ting. Preparation of Super-Hydrophobic Fiber Membrane by Electrospinning and Its Application in Oil-Water Separation[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.
- [47] 孟鑫, 谈书航, 曹齐茗, 等. 基于静电纺的超疏水超亲油串珠结构聚乳酸薄膜的制备及性能研究[J]. *中国塑料*, 2019, 33(4): 48-53.
MENG Xin, TAN Shu-hang, CAO Qi-ming, et al. Preparation and Properties of Super-Hydrophobic and Super-Lipophilic Polylactic Acid Electrospun Fiber Films with Bead Structure[J]. *China Plastics*, 2019, 33(4): 48-53.
- [48] 刘海露, 洪伟, 陈旭东. 相分离法制备超疏水丙烯酸聚氨酯及防伪应用[J]. *合成材料老化与应用*, 2018, 47(4): 1-8.

- LIU Hai-lu, HONG Wei, CHEN Xu-dong. Superhydrophobic Polyurethane Prepared by Phase Separation and Its Application in Anti-Counterfeit[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2018, 47(4): 1-8.
- [49] 陈翰林, 郭玉海, 王峰, 等. 陶瓷膜超疏水改性及其膜蒸馏性能研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(3): 30-33, 38.
- CHEN Han-lin, GUO Yu-hai, WANG Feng, et al. Study on the Super-Hydrophobic Modification and Membrane Distillation Performance of Ceramic Membrane[J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(3): 30-33, 38.
- [50] 王嘉雨. 等离子体纳米织构化聚乙烯超疏水表面水滴撞击性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- WANG Jia-yu. Water Droplet Impacting on Superhydrophobic Polyethylene Surfaces by Plasma Nanotexturing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [51] 邓佳雯, 郭颖, 徐利云, 等. 低气压等离子体工艺参数对制备超疏水涤纶织物的影响[J]. *上海纺织科技*, 2019, 47(10): 51-56.
- DENG Jia-wen, GUO Ying, XU Li-yun, et al. Preparation of Super-Hydrophobic Polyester Fabric by Low Pressure Plasma[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2019, 47(10): 51-56.
- [52] 徐利云, 殷伟伦, 邓佳雯, 等. 超疏水棉织物的等离子体制备工艺及性能[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(5): 650-657, 694.
- XU Li-yun, YIN Wei-lun, DENG Jia-wen, et al. Plasma Preparation Process and Properties of Super-Hydrophobic Cotton Fabric[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2019, 45(5): 650-657, 694.
- [53] 童文建. 钛基体超疏水表面的刻蚀法制备及其性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- TONG Wen-jian. Fabrication and Characterization of Superhydrophobic Titanium Surface by Chemical Etching[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [54] WANG Ying, GU Zheng-peng, XIN Ya, et al. Facile Formation of Super-Hydrophobic Nickel Coating on Magnesium Alloy with Improved Corrosion Resistance[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 538: 500-505.
- [55] HUANG Zheng-yong, XU Wen-jie, WANG Yu, et al. One-Step Preparation of Durable Super-Hydrophobic MSR/SiO₂ Coatings by Suspension Air Spraying[J]. *Micro-machines*, 2018, 9(12): 677.
- [56] 彭华乔, 罗振军, 李开宇, 等. 盐酸刻蚀制备铝合金超疏水表面的工艺及自清洁性研究[J]. *应用化工*, 2019, 48(12): 2900-2904.
- PENG Hua-qiao, LUO Zhen-jun, LI Kai-yu, et al. Study on Preparation Process and Self-Cleaning Performance of Superhydrophobic Aluminum Surfaces Fabricated by Hydrochloric Acid Etching[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(12): 2900-2904.
- [57] YANG Zhen, LIU Xian-ping, TIAN Yan-ling. Fabrication of Super-Hydrophobic Nickel Film on Copper Substrate with Improved Corrosion Inhibition by Electrodeposition Process[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 560: 205-212.
- [58] 顾建农, 晏欣, 张志宏, 等. 基于 PIV 测量的柔性壁减阻试验[J]. *舰船科学技术*, 2012, 34(11): 82-85, 121.
- GU Jian-nong, YAN Xin, ZHANG Zhi-hong, et al. Experimental Investigation of Drag-Reducing for Compliant Wall by PIV Measurement[J]. *Ship Science and Technology*, 2012, 34(11): 82-85, 121.
- [59] 孙卫红, 刘波, 晏欣. 聚氨酯-丙烯酸酯柔性壁的减阻性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(9): 59-64.
- SUN Wei-hong, LIU Bo, YAN Xin. Drag Reduction Properties of Polyurethane-Poly(acrylate) Hybrid Emulsions[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(9): 59-64.
- [60] 郝翰林, 樊益明, 苏凤民. 基于转盘测阻法的天然乳胶涂层减阻特性研究[J]. *船舶工程*, 2021, 43(1): 108-112, 149.
- HAO Han-lin, FAN Yi-ming, SU Feng-min. Study of Drag Reduction Characteristics of Natural Latex Coating Based on Rotating Disc Test[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(1): 108-112, 149.
- [61] LI Lun-cao, LIU Bing, HAO Han-lin, et al. Investigation of the Drag Reduction Performance of Bionic Flexible Coating[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(8): 084103.
- [62] 李万平, 杨新祥. 柔性壁减阻的试验研究[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 1991, 6(S1): 108-112.
- LI Wan-ping, YANG Xin-xiang. An Experimental Study on the Drag Reduction of Compliant Walls[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1991, 6(S1): 108-112.
- [63] 叶章基, 陈珊珊, 马春风, 等. 新型环保海洋防污材料研究进展[J]. *表面技术*, 2017, 46(12): 62-70.
- YE Zhang-ji, CHEN Shan-shan, MA Chun-feng, et al. Development of Novel Environment-Friendly Antifouling Materials[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(12): 62-70.
- [64] 张建斌, 张朝阳, 孙立, 等. 有机硅自润滑组分对自抛光涂层防污、减阻性能的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(5): 274-282.
- ZHANG Jian-bin, ZHANG Chao-yang, SUN Li, et al. Effect of Self-Lubricating Organic Silicone Component on Antifouling and Drag Reduction Properties of Self-Polishing Coatings[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(5): 274-282.
- [65] 宋美艳. 微球构筑的仿生减阻防污涂层的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- SONG Mei-yan. Study on Bionic Drag-Reducing and Anti-Fouling Coating Using Microspheres[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [66] 江学志. 侧链接枝草甘膦丙烯酸树脂的合成及其海洋防污性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- JIANG Xue-zhi. The Synthesis of Glyphosate Acrylic Resin and Their Antifouling Properties[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.