

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.001

仿生液体滑移表面减阻技术研究综述

刘嘉琳¹, 陶炫臻¹, 李宏源^{1,2}

(1. 北京大学力学与工程科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学南昌创新研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 流动减阻对于节能减排和提升装备性能具有重大意义。受猪笼草启发, 仿生液体浸润表面 (Liquid-Infused Surface, LIS) 作为新型界面减阻技术, 通过在微结构基底中锁固与外部流体互不相溶的润滑液, 构建出稳定液-液滑移界面, 有效解决了传统超疏水表面空气层在压力、高剪切下易失稳的问题。本文综述了 LIS 减阻技术的研究进展, 从 Navier 滑移理论阐明核心减阻机理, 重点分析润滑液体与外部流体的黏度比 (M)、雷诺数 (Re) 对滑移特性及减阻效果的影响, 指出 $M \ll 1$ 是减阻先决条件, 且 LIS 在层流区与湍流区的减阻行为及稳定性表现存在显著差异; 梳理了 LIS 的制备方法 (如光刻、喷涂、阳极氧化), 概述其在船舶、管道运输、微流控及生物医学领域的应用探索; 最后, 总结了工程应用所面临的核心挑战, 并展望了基底结构优化、湍流减阻机理等未来重点研究方向。

关键词: 液体浸润表面; 流动减阻; 湍流; 黏度比; 雷诺数

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0001-13

流动减阻能够降低流固界面摩擦阻力、有效抑制流动分离, 进而实现能量高效利用与装备性能提升, 在船舶航行^[1-2]、油气长距离运输^[3-4]、微流控系统^[5]及航空航天^[6]等领域具备重大科学意义与广阔应用前景^[7-10]。在众多减阻策略中, 超疏水表面凭借独特的界面调控机制展现出极高的潜力, 通过其表面微纳结构捕获空气层, 构建气-液滑移界面^[11-16]。由于气体的动力黏度远低于液体 (如空气黏度仅为水黏度的约 2%), 该气-液界面可近似为无剪切的理想滑移边界^[17-18], 能够大幅削弱流体流经壁面时的黏性剪切作用, 表现出优异的减阻性能。然而, 在高流速剪切^[19]、外部压力波动^[20]等复杂流动条件下, 气-液界面极易失稳或被液体浸润^[21], 导致其滑移减阻性能大幅衰减甚至完全丧失^[22], 极大制约了超疏水减阻技术的大规模工程应用, 亟须通过界面结构优化与稳定性调控技术来突破这一应用

局限。

受自然界猪笼草通过光滑蜡质表面与分泌液协同实现昆虫捕获的生物机制启发, WONG TS 等^[23]提出了一种新型仿生滑移界面——液体浸润表面, 如图 1 所示。其核心设计是在多孔或粗糙基底表面, 通过毛细作用与界面张力协同锁存一层与目标工作流体 (如水、原油等) 不互溶的润滑液体 (如全氟聚醚、硅油等), 最终以分子级光滑、均匀且稳定的液-液界面, 替代了传统超疏水表面中易失稳的气-液界面。润滑液体的不可压缩性和流动性, 使液体浸润表面不仅具备优异的压力稳定性^[24]和损伤自修复能力^[23], 还兼具自清洁^[25]、防污^[26-27]、抵抗各种液体浸润^[28]、定向收集水^[29]等多重功能^[30]。其减阻机理源于外部工作流体在润滑层表面形成的滑移边界, 滑移性能 (通常用滑移长度表征) 主要取决于润滑液体与工作流体的黏度比及外部流动的雷

收稿日期: 2025-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12202010)

作者简介: 刘嘉琳 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事跨介质航行器减阻降噪研究。E-mail: jlliu.tech.2023@stu.pku.edu.cn

通信作者: 李宏源 (1989—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事流固耦合力学和跨介质航行器设计研究。

E-mail: lihongyuan@pku.edu.cn

诺数^[31-34]。尽管现有研究表明, 较低的黏度比有利于实现更显著的减阻效果^[35], 但对滑移特性与减阻率之间的内在物理机制, 目前仍缺乏清晰的定

量描述^[36]; 同时, 针对开放流动环境下可长效稳定锁存润滑液体的表面制备技术, 也尚未形成成熟方案。

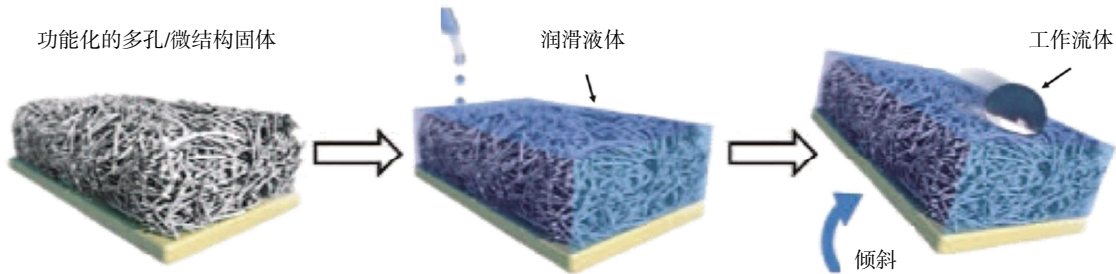


图1 液体浸润表面设计^[37]

本文旨在系统综述仿生液体浸润表面减阻技术的研究进展。首先, 阐述液体浸润表面的减阻原理, 并从理论层面探讨其滑移特性的关键影响因素; 接着, 重点回顾不同实验条件下 (尤其关注黏度比和雷诺数的变化) 液体浸润表面滑移性能与减阻效果的实验研究成果; 然后, 探讨液体浸润表面的制备方法及其工程应用; 最后, 对该领域当前面临的挑战进行总结, 并对未来的研究方向和应用前景进行展望。

1 液体浸润表面减阻的基本原理与影响因素

液体浸润表面的减阻性能源于其独特的固-液-液三相界面构型。与传统固液直接接触不同, 它通过一层稳定的润滑液体将外部工作流体与固体基底隔开, 从而构建了一个液-液滑移界面。本节将从经典的边界条件理论出发, 阐述其减阻机理, 并深入探讨影响其滑移特性的关键物理参数。

1.1 滑移边界条件与减阻机理

在流体力学中, 描述流体在固体壁面附近流动行为的基本假设是“无滑移边界条件”。该条件认为, 流体与固体壁面直接接触的流体分子, 其速度与壁面速度相同。对于静止壁面, 即壁面处的流体速度为零。因此, 在壁面附近会形成一个速度梯度, 流体黏性效应由此产生壁面剪切力, 即摩擦阻力, 其大小由牛顿内摩擦定律定义, 见式(1)。

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (1)$$

式中, τ_w 为壁面剪切应力; μ 为流体的动力黏

度; $(\partial u / \partial y)_{y=0}$ 为壁面处的速度梯度。

然而, 对于液体浸润表面, 外部工作流体接触的是一层可流动的润滑液体, 而非静态的固体壁面。由于润滑液体可以在工作流体剪切作用下发生流动, 使得工作流体在界面处的速度不为零, 即产生了“滑移”。这种现象可以用 Navier 滑移边界条件来描述, 见式(2)^[38]。

$$u_s = b_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2)$$

式中, u_s 为界面处的滑移速度; b_{eff} 为等效滑移长度。等效滑移长度是一个关键的物理参数, 它量化了表面的滑移能力。从几何上看, 等效滑移长度可以理解为从壁面向流体内部延伸, 速度线性外插至零的虚拟距离。一个理想的光滑无滑移表面, $b_{eff} = 0$; 而对于滑移表面, $b_{eff} > 0$ 。等效滑移长度越大, 意味着在相同的壁面剪切率下, 流体能获得更高的界面速度, 滑移效应越显著。

液体浸润表面的减阻机理正是源于滑移边界条件的建立。图 2(a)和图 2(b)分别为单一液体浸润的固体表面 (无滑移边界条件) 和两种流体系统中的滑移边界条件。滑移的存在 ($u_s > 0$) 使得壁面附近的速度剖面变得更加平缓, 即速度梯度 $(\partial u / \partial y)_{y=0}$ 减小。根据式 (1), 壁面剪切应力 τ_w 也随之降低, 从而实现了宏观上的流动减阻。因此, 研究液体浸润表面的减阻性能, 其核心在于理解并调控其等效滑移长度 b_{eff} 。

1.2 理论模型与关键影响因素

为了定量分析液体在微结构表面 (处于 Cassie 状态, 即凹槽内填充有第二种不相溶流体) 的滑移

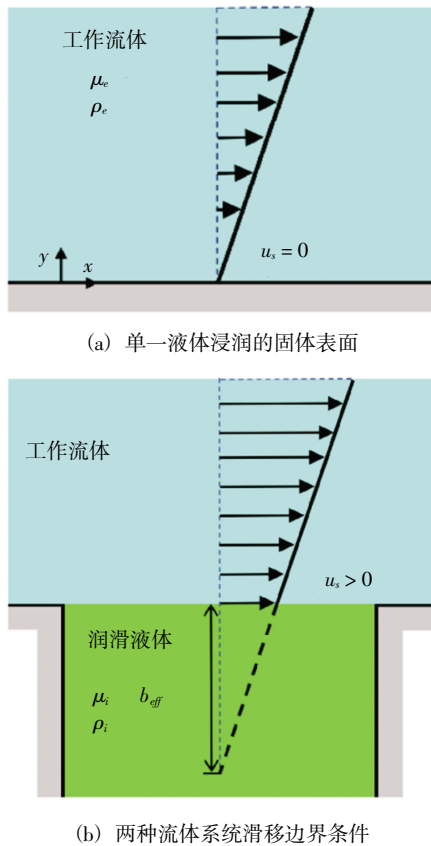


图 2 两种边界条件示意图 (灰色部分为固体边界)

性能, 可以建立一个更为精确的流体力学模型。该模型考虑了工作流体与凹槽内流体之间的相互作用。通过求解该双层流体剪切流问题, 可以推导出该复合界面的等效滑移长度, 其归一化形式见式(3)^[39]。

$$\beta_i^* = \frac{\ln\left(\cos\left(\frac{\pi}{2}a\right)\right)}{2\pi + \frac{1}{2aD_l M} \ln\left(\frac{1 + \sin\left(\frac{\pi}{2}a\right)}{1 - \sin\left(\frac{\pi}{2}a\right)}\right)} \quad (3)$$

式中, $M = \mu_o/\mu_w$ 为润滑油与工作流体的黏度比; β_i^* 为归一化滑移系数 (无量纲参数), 正比于等效滑移长度; a 为流体界面分数, $a = b/L$, b 为凹槽的宽度, L 为一个重复单元的周期长度, 如图 3 所示; D_l 为归一化的最大局部滑移长度, 为凹槽深宽比的函数。

式(3)揭示了影响此类微结构表面滑移性能的核心因素。其巧妙之处在于, 它将经典的理想滑移模型 (分子) 与实际的物理限制 (分母中的修正项) 结合了起来。

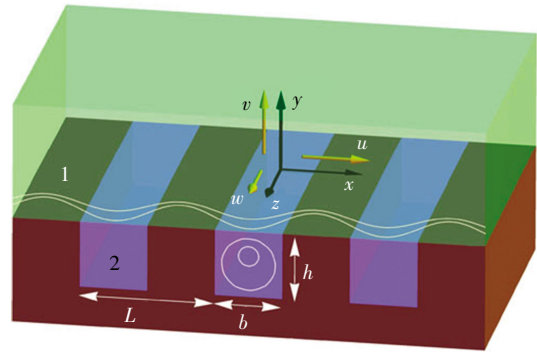


图 3 具有坐标和速度方向的微结构表面示意图^[39]

(1) 表面几何构型 (由 a 和 D_l 体现)

流体界面分数: a 为凹槽宽度与周期长度的比值 (即液-液接触面积的比例), 是影响滑移性能的主导因素。当 a 增大 (即滑移区域占比增加) 时, 分子项会急剧增大, 预示着滑移长度的显著提升, 这是获得大滑移的基础。

凹槽内部流场效应: D_l 为归一化的最大局部滑移长度。凹槽内的流体在上方剪切力的驱动下会形成涡流, 这个涡流的强度和形态决定了界面处的局部滑移。 D_l 的值随凹槽深宽比的增加而增加, 但在凹槽深宽比达到约 1 之后便趋于饱和。这意味着, 无限加深凹槽并不能带来无限的滑移增益, 因为起决定性作用的是界面附近的主涡流, 其尺寸已基本稳定。

(2) 黏度比

量化真实物理耗散、区分理想模型与现实情况的核心物理量。在式(3)中, 黏度比直接出现在分母的修正项里, 与耗散成正比。

当凹槽内是气体, 而工作流体是液体时 (如超疏水表面), 黏度比是一个很小的数。这使得分母中的修正项变得很小, 整个公式的结果接近于理想的 Philip 解。这从理论上完美解释了为何气-液界面能够被合理地近似为“无剪切”边界, 并产生显著的减阻效果。

当凹槽内流体的黏度不可忽略甚至更高时, 黏度比增大导致分母中的修正项显著增大, 从而抑制了整体的等效滑移长度。这表明凹槽内流体的黏性耗散会产生“拖拽”效应, 削弱减阻效果。

除了上述因素, 外部流动条件, 特别是雷诺数, 也对减阻效果产生决定性影响。雷诺数表征了流体惯性力与黏性力的相对大小, 决定了流动的状态。

态（层流或湍流）。

层流区（低雷诺数）：流动稳定，流线光滑。此时的减阻机理主要是前述的壁面剪切力直接降低。减阻效果通常随雷诺数变化不大，且与式(3)的理论预测吻合较好。

湍流区（高雷诺数）：流动变得复杂且无序，阻力主要由近壁区的湍流脉动和拟序结构（如涡旋、条带结构）产生。液体浸润表面的减阻机理也更为复杂。一方面，滑移边界依然可以降低壁面剪切力；另一方面，液-液界面可能与湍流结构发生相互作用，通过抑制近壁区湍流脉动、抬升或破坏相干结构（如发卡涡）来进一步实现减阻。然而，在高雷诺数下，强烈的湍流脉动也可能引发液-液界面的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性，导致润滑液体乳化、流失，从而使减阻效果衰减甚至失效。

此外，实际的液体浸润表面还受到表面微结构与润滑液体锁定机制的影响。固体基底的微纳结构（如孔洞、沟槽的几何形状、尺寸、孔隙率）通过毛细作用来锁定润滑液体，其稳定性直接决定了表面减阻性能的持久性。同时，微结构的存在也可能导致液-液界面并非完全平整，而是存在微小的弯液面。这些界面形貌的变化会影响局部的流动，可能引入额外的形状阻力，从而对整体减阻效果产生复杂的影响。

综上所述，液体浸润表面的减阻性能是一个由润滑液物性（黏度）、工作流体物性（黏度）、流动状态（雷诺数）及基底微结构共同决定的复杂多物理场耦合问题。其中，黏度比和雷诺数是决定其减阻特性的两个最为关键的无量纲参数，也是后续实验研究关注的焦点。

2 液体浸润表面滑移与减阻特性的实验研究进展

为验证理论模型并探索液体浸润表面在实际流动条件下的减阻性能，研究者们设计了多种实验方法来定量表征其滑移特性。本节首先介绍主要的实验测量技术，然后重点综述黏度比和雷诺数对滑移长度及减阻率影响的实验研究成果。

2.1 实验测量方法

目前，用于表征液体浸润表面滑移性能的实验

方法主要可分为间接测量和直接测量两大类。

(1) 间接测量法：这类方法通过测量宏观流动参数（如压降、力或扭矩）的变化，来反推表面的等效滑移长度或计算整体减阻率，主要包括压降测量法、流变仪法和力学天平/测力计法。

压降测量法：这是评估管道或通道流动减阻最常用的方法。通过在入口和出口处设置压力传感器，精确测量流体流过测试表面与光滑参照表面时的压力损失。根据泊肃叶流动理论，对于相同的流量，压力的减小量可以换算为减阻率（Drag Reduction, DR）。该方法操作直观，适用于评估宏观减阻效果。

流变仪法：利用锥板或平行板流变仪是测量滑移长度的常用手段。将待测的液体浸润表面作为底板，通过测量驱动顶板旋转所需扭矩的变化来推算滑移长度。在低雷诺数剪切流下，该方法测量精度高，尤其适用于系统性地研究润滑液物性（如黏度比）对滑移的影响。

力学天平/测力计法：将样品浸入流体中（如放置在水洞或拖曳水池中），直接测量样品受到的流体拖曳力。通过对比液体浸润表面与普通光滑表面的受力差异，可直接计算减阻率。该方法适用于评估外流场（如平板边界层流动）中的减阻性能。

(2) 直接测量法：这类方法旨在直接观测近壁流场，获得界面处的滑移速度，从而计算滑移长度，主要采用粒子图像测速技术（Particle Image Velocimetry, PIV），如图4所示。通过在流体中掺入示踪粒子，并用激光片光照亮拍摄，分析粒子位移来重构流场速度分布。特别是显微粒子图像测速（ μ -PIV），能够以微米级的分辨率精确捕捉到紧邻壁面几个微米内的速度剖面，从而直接获得界面滑移速度 u_s 和壁面速度梯度 $(\partial u/\partial y)_{y=0}$ ，根据式(2)计算得到滑移长度 b_{eff} 。这是目前测量滑移长度最可靠、最直观的方法之一。

2.2 黏度比的影响

黏度比（ $M = \mu_o/\mu_w$ ）是决定液体浸润表面本征滑移能力的核心参数。SOLOMON B R 等^[41]利用锥板流变仪进行了一系列开创性实验。他们通过改变工作流体（不同浓度的甘油-水溶液）和润滑液体（不同黏度的硅油），系统地研究了黏度比在所测雷

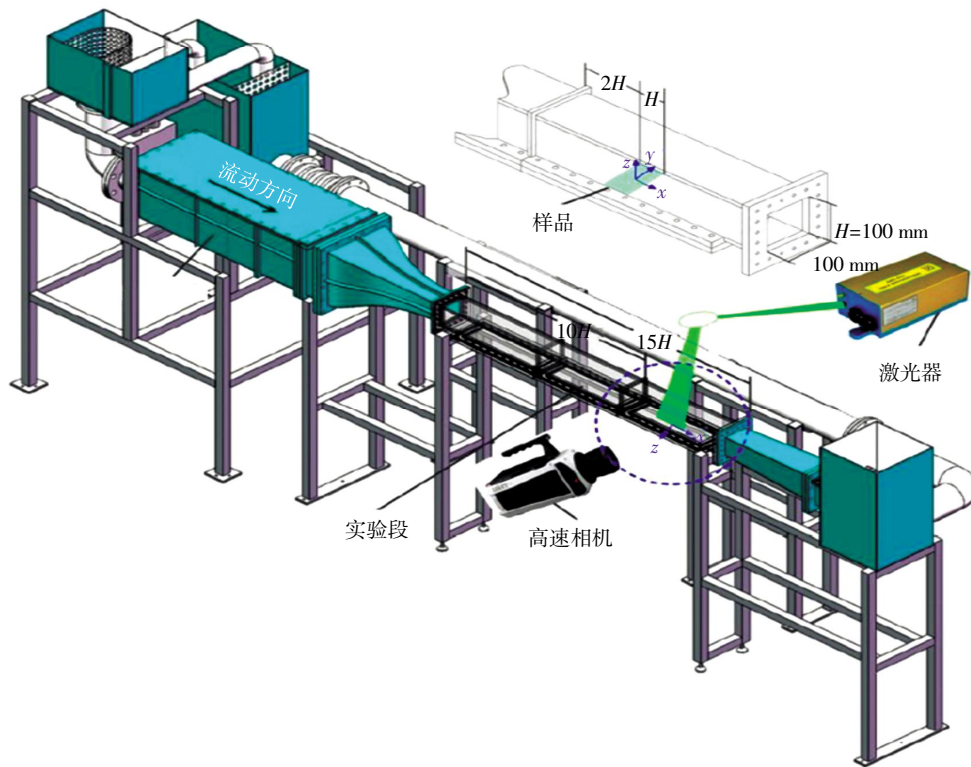


图 4 PIV 流场测试系统示意图^[40]

雷诺数范围内的滑移特性。结果显示, 在 $M < 1$ 的情况下, 滑移长度 b_{eff} 与 M 成反比关系, 与理论预测高度吻合; 当 M 接近 1 时, 滑移效应几乎消失; 而当 $M > 1$ 时, 即润滑液体比工作流体更黏稠, 表现出“增阻”效应, 其等效滑移长度为负值。这为液体浸润表面的设计提供了关键指导, 必须选择黏度远低于工作流体的润滑液体才能实现减阻。

2.3 雷诺数的影响

雷诺数决定了流动的状态, 液体浸润表面的减阻行为在层流和湍流区表现出显著差异。

(1) 层流区 (低雷诺数)

在层流状态下, 流动稳定, 液体浸润表面的减阻效果通常比较稳定且可预测。大量的微流道和流变仪实验表明, 在层流区, 减阻率对雷诺数的变化不敏感, 减阻主要是由于稳定的液-液界面滑移带来的壁面剪切力降低, 其效果主要由黏度比和润滑层厚度等参数决定, 与流速 (雷诺数) 的关联性较弱。

(2) 湍流区 (高雷诺数)

湍流是工程应用中更常见的流动状态, 其减阻研究也更具挑战性和实际意义。与层流不同, 湍流减阻不仅与滑移有关, 还与液-液界面和湍流结构

的复杂相互作用有关。ROSENBERG B J 等^[24]首次通过 Taylor-Couette 实验证明了在湍流状态下, 液体浸润表面具有减阻效果。在实验测试的雷诺数范围内 ($100 \leq Re \leq 140$), 减阻率基本保持恒定, 约为 14%。实验结果表明, 在湍流状态下, 液体浸润滑移表面对高流动压力和湍流波动具有很好的鲁棒性。这证明了液体浸润表面在高速湍流中同样具有减阻潜力。然而, 研究也发现, 减阻效果与润滑液体的稳定性密切相关。

图 5 所示为液体浸润表面减阻率随雷诺数和黏度比的变化。

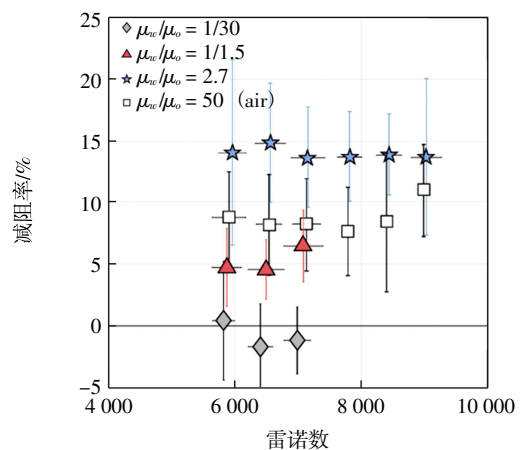


图 5 液体浸润表面减阻率随雷诺数和黏度比的变化^[24]

稳定性的挑战是湍流减阻研究的核心问题。在高雷诺数下,强烈的湍流脉动和压力波动会对润滑液体产生巨大的剪切和法向应力,可能导致以下失效模式。

(1) 润滑液剥离与流失:高速水流直接将润滑油从表面“刮走”,导致润滑层变薄甚至消失,减阻效果随时间衰减。

(2) 界面失稳与乳化:在液-液界面处可能发生 Kelvin-Helmholtz 不稳定性,导致界面产生波纹,甚至破碎成微小的油滴混入水中(乳化),这不仅会消耗润滑剂,还会增加流动阻力。

综上所述,实验研究已经清晰地揭示了黏度比和雷诺数对液体浸润表面减阻性能的关键影响。低黏度比是实现减阻的先决条件,而在不同雷诺数区间,其减阻机理和性能表现存在本质差异。如何平衡减阻性能与润滑层稳定性,是该技术未来发展的核心挑战。

3 液体浸润表面减阻的数值模拟研究进展

近年来,随着计算流体力学方法的不断发展,数值模拟,特别是直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)和大规模计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,已成为探究液体浸润表面减阻机理、预测其性能并指导结构优化的关键工具。数值方法能够提供全流场的高时空分辨率数据,从而揭示实验中难以捕捉的复杂流固液耦合现象及界面动力学细节。其研究进展主要体现在:从参数化性能评估到湍流减阻深层机理的揭示,再到对新型复杂设计的探索。

数值模拟在系统性评估 LIS 性能参数方面展现出巨大优势。早期的模拟工作验证了 LIS 在层流和湍流中减阻的可行性。近年来的研究则更加精细化,致力于构建减阻效果与关键参数之间的量化关系。例如, KANT K 等^[42]采用 CFD 方法,对层流微通道中的液体浸润表面进行了系统的参数化研究,清晰地揭示了表面纹理的固相分数、沟槽深宽比及润滑液黏度如何共同影响摩擦系数,为特定应用场景下的表面“按需设计”提供了直接的数值指导。NGUYEN H T 等^[43]通过数值模拟研究了超疏水表面

不同固相分数和分布形状对湍流减阻的影响,其研究思路和参数化分析方法对 LIS 的 CFD 参数研究具有重要参考价值。而在湍流方面, CHANG J 等^[44]通过 DNS 对带润滑微沟槽表面的湍流通道流展开研究,证实减阻效果与润滑液黏度、沟槽宽度及深宽比高度相关,还建立了庚烷润滑表面的减阻预测模型,进一步细化了湍流场景下 LIS 参数与减阻的量化关系。DIG S 等^[45]通过 DNS 研究了不同尺寸和雷诺数下的棱纹表面与 LIS 的减阻特性,发现二者均通过抑制波峰处的垂直速度脉动实现减阻,还建立了基于垂直速度方差的减阻参数化模型,为湍流场景下 LIS 的参数优化提供了新的分析维度。

数值模拟的核心贡献在于揭示了 LIS 湍流减阻的深层物理机理,尤其是液-液界面的动态行为及其对近壁湍流结构的调控作用。这是一个从现象到本质的深化过程。FU M K 等^[46]的开创性 DNS 工作首次证实,即使润滑液黏度高于工作流体($M > 1$), LIS 依然能实现湍流减阻,其关键在于润滑液的内部循环产生的有效滑移。在此基础上, BERNARDINI M 等^[47]进一步通过高精度 DNS,生动地展示了可变形的液-液界面如何与湍流相干结构相互作用。他们的模拟结果表明,界面能够被动地响应壁面湍流的压力脉动,通过抬升和减弱近壁区的准流向涡,有效抑制了湍流猝发循环中的“扫掠”和“喷射”事件,从而显著降低了雷诺剪切应力。CARTAGENA E J G 等^[48]通过 DNS 研究了纹理表面和韦伯数对 LIS 与超疏水表面阻力的影响,采用水平集方法追踪液-液界面变形,揭示了界面动力学对壁面阻力的影响规律,补充了界面行为与湍流相互作用的研究细节。为了更清晰地定位 LIS 的优势, ARENAS I 等^[49]开展了对比性的 DNS 研究,比较了液体浸润表面、超疏水表面和常规粗糙表面的水动力学特性。研究明确指出, LIS 通过稳定的液-液界面避免了超疏水表面在较高压力下容易发生的“Cassie-Wenzel”转变问题,展现出更强的鲁棒性,并且润滑液的流动本身对总滑移量有重要贡献。VEGA-SANCHEZ C 等^[50]通过数值模拟证实了 LIS 在高静压环境下的滑移特性和减阻稳定性,进一步佐证了 LIS 相较于超疏水表面在复杂压力工况下的优势。

近期的数值模拟研究开始探索更复杂的表面构

型和实际应用中面临的挑战,反映了该领域的前沿方向。PAKZAD H 等^[51]系统总结了数值模拟在阐明 LIS 减阻机理、影响因素和失效模式方面取得的进展,并强调了模拟在指导设计高耐久性 LIS 方面的重要性。HEMEDA A A 等^[52]提出的液封空气型液体浸润表面设计,通过数值模拟预测其减阻效果比传统 LIS 高出 20%~37%,为 LIS 的新型结构设计提供了创新思路。紧随其后,创新的模拟研究不断涌现。秦声雷等^[53]基于格子玻尔兹曼方法对 LIS 的滑移现象进行模拟,探究了润滑油溶解密度和外部剪切率对滑移长度的影响,为非规则结构 LIS 的数值模拟提供了新的方法参考。为了解决润滑剂在长期剪切下的流失问题,REN L 等^[54]通过数值模拟,提出了一种新颖的“润滑剂环”设计。结果表明,这种非连续的润滑剂分布模式不仅能够实现减阻,还能在流动中更有效地“锚定”润滑剂,为提升 LIS 的寿命开辟了新的设计思路。这些前沿的模拟工作,正推动着 LIS 技术从实验室走向更广阔的工程应用。

4 液体浸润表面的制备与工程应用

将液体浸润表面的减阻潜力应用于实际工程,前提是能够高效、可控且低成本地制备出能够在复杂工况下稳定锁住润滑液体的表面。同时,针对不同的应用场景,研究者们也开展了广泛的探索。本节将系统梳理液体浸润表面的制备方法,并综述其在关键领域的应用进展。

4.1 液体浸润表面制备方法

液体浸润表面的核心是“基底微结构+润滑液体”的复合体系。因此,其制备过程主要包括两个步骤:首先构建具有特定形貌的微纳结构基底,然后将与之相溶的润滑液体浸润其中。基底微结构的构建是整个制备过程的关键,其目标是形成足够强的毛细作用力以抵抗外部流体的剪切力,从而稳定地锁定润滑液体。目前,制备方法可分为“自上而下”和“自下而上”两大类。

(1)“自上而下”方法:该类方法通过对块体材料进行刻蚀或去除,来形成预设的微观结构。其优点是结构精确可控,重复性好,便于进行机理研

究,主要包括光刻与刻蚀技术、激光加工和机械加工。

①光刻与刻蚀技术:通过光刻定义图案,再结合干法(如反应离子刻蚀)或湿法(如化学腐蚀)刻蚀,可以在硅、玻璃等基底上制造出微米甚至纳米级别的柱阵、沟槽等规则结构。这类方法制备的表面形貌规整,适合用于研究结构参数对润滑液体锁定能力和滑移性能的影响。

②激光加工:利用高能激光束(如飞秒激光)在材料表面进行烧蚀,可以快速、灵活地制造出复杂的微纳结构。该技术对材料选择范围宽,无需掩模,适合在金属、聚合物等多种工程材料上直接构筑纹理。

③机械加工/压印:通过微铣削、金刚石车削或热压/紫外固化压印等方式,可以将预设的微结构模具“复印”到目标材料表面。该方法具有较高的生产效率,被认为是实现大面积制备的潜力技术之一。

(2)“自下而上”方法:该类方法通过原子、分子或纳米颗粒的自组装来构建微结构。其特点是易于形成复杂的多级结构,且通常工艺简单、成本较低,更适合大规模制备,主要包括喷涂法、阳极氧化法等。

①喷涂法:将含有纳米颗粒(如二氧化硅、二氧化钛、聚四氟乙烯等)的悬浮液通过喷枪均匀喷涂于基材表面,待溶剂挥发后即可形成粗糙的多孔涂层。该方法工艺简单、快速,可适用于各种复杂形状的工件,是目前最具工业化潜力的制备技术之一。

②阳极氧化法:主要用于铝、钛等阀金属。通过电化学方法,可在金属表面原位生长出具有纳米级孔洞阵列的氧化物层(如多孔氧化铝),具有极高的孔隙率和深径比,对润滑液体有非常强的锁定能力。

③溶胶-凝胶法:通过化学溶液反应生成凝胶,再经干燥和热处理,可以形成多孔的无机或杂化网络结构。该方法可在较低温度下进行,易于调控涂层的化学成分和孔隙结构。

④化学/电化学沉积:通过在基底上沉积金属、合金或聚合物,可以形成珊瑚状、枝晶状等微纳结构。

在获得多孔基底后,通过旋涂、浸涂、滴涂或真空辅助灌注等简单方式即可将润滑液体注入微结构中,完成液体浸润表面的制备。

为直观比较各类方法的优劣,总结如表1所示。“自上而下”方法(如光刻、激光加工)具有结构精度高、可控性好的优点,但其成本高、工艺复杂、难以实现大面积制备,限制了其工业化应用。相比之下,“自下而上”方法(如喷涂、阳极氧化)

在制备效率、成本控制和规模化生产方面展现出巨大优势。特别是喷涂法,因其工艺简单、基材普适性强、可处理复杂曲面,是将液体浸润表面技术推向船舶、管道等大型装备应用中最具前景的途径之一。未来发展趋势在于结合两类方法的优点,利用低成本的“自下而上”方法构建基础多孔结构,再通过“自上而下”的精细加工进行表面修饰,兼顾成本、效率与性能。

表1 液体浸润表面主要制备方法对比

方法类别	具体技术	优点	缺点	主要应用场景
自上而下	光刻与刻蚀	结构精确可控、重复性好	成本高、工艺复杂、仅限平面和小面积、基材选择性强	基础科学研究、微流控芯片
	激光加工	无需掩模、灵活性高、材料普适性较好	效率相对较低、成本较高、可能引入热影响区	精密器件表面功能化、模具制造
	机械加工/压印	生产效率高、适合批量复制	初始模具成本高、对复杂结构加工能力有限	大面积聚合物表面、光学元件
自下而上	喷涂法	成本低、效率高、可大面积制备、适用于复杂曲面	结构随机性强、均匀性和附着力控制难度较大	工业级涂层(船舶、管道)、防冰防污
	阳极氧化法	结构规整(纳米孔阵列)、与基底结合力强	仅适用于特定金属(铝、钛等)、过程耗时	航空航天铝合金部件、精密仪器
	溶胶-凝胶法	工艺简单、可在低温下进行、成分可调	涂层较脆、易开裂、厚度有限	光学涂层、防腐蚀涂层
	电化学沉积	可形成复杂三维结构、导电基材适用性好	过程控制复杂、均匀性不易保证	催化剂载体、传感器电极

4.2 液体浸润表面工程应用

凭借其优异的减阻、防污、自修复等综合性能,液体浸润表面在多个领域的应用潜力正被不断发掘。

(1) 船舶航行减阻

船舶航行所消耗的燃料约有50%~80%用于克服阻力,其中摩擦阻力是主要成分。将液体浸润表面应用于船体表面,是极具吸引力的节能减排方案。然而,海洋环境极其严酷,长期面临高盐、生物附着、机械刮擦等挑战。如何保证润滑涂层在长周期下的稳定性和润滑液体的“零流失”,是该技术走向远洋船舶应用必须攻克的核心难题。目前的研究多集中于提升涂层的机械耐磨性和润滑液的锁定稳定性。

中国科学院宁波材料技术与工程研究所团队开发“类液态”动态界面材料(固体有机物接枝柔性分子刷),耦合0.1~0.2 mm微结构柔性基底,应用于30万吨级超大型油轮螺旋桨表面,实船测试显示整体油耗降低2%,年节油300 t以上^[55]。

(2) 油气管道运输

在长距离管道输送高黏度原油时,巨大的流动

阻力导致泵送能耗极高。同时,原油中的蜡、沥青质等物质易在低温管壁沉积,造成堵塞。利用液体浸润表面改造管道内壁,可以形成一个润滑层,显著降低原油与管壁的摩擦。例如,以水作为润滑剂来输送原油,由于水的黏度远低于原油,可实现极高的减阻率。实验研究表明,这种“液体内衬”技术可将压降降低一个数量级以上,并能有效抑制蜡质沉积。该应用场景相对封闭,环境可控,被认为是液体浸润减阻技术最有可能实现商业化的领域之一。

中国石油天然气集团有限公司东北管网大庆原油管道采用纳米降凝剂,原油凝点和黏度显著下降,降低开采过程中的采油压力和清洗井口凝油的频率,节约大量的燃料油;另外,可以有效提高管道输送量和运行效率,降低管道维护成本,有效减少燃油加热设备投入和场地占用,减少甚至避免了废弃热水的排放,从而减少了有害污染物和二氧化碳的排放,具有显著的生态效益和环境效益^[56]。

(3) 微流控与生物医学

在微流控芯片中,由于尺寸效应,表面张力和壁面摩擦占主导。液体浸润表面可以极大地降低微

通道内的流动阻力, 实现低压驱动。更重要的是, 其动态的液-液界面能够有效防止蛋白质、细胞、细菌等生物分子或颗粒在通道壁上的吸附和残留, 避免交叉污染, 提高检测灵敏度。在生物医学领域, 将该技术应用于导尿管、血管支架、植入式医疗器械等表面, 有望解决血栓形成、细菌感染等致命问题。

南京大学医学院赵远锦教授联合鼓楼医院整形外科烧伤科研究团队受猪笼草超滑结构启发, 利用微流控 3D 打印方法连续纺织了液体石蜡注入的聚氨酯微纤维, 制备了一种具有超滑多孔表面的立体织物, 实现了复杂维度下的液滴操控, 其与负压封闭引流技术相结合, 可为进一步提高创面引流效率提供新的思路^[57]。

(4) 多功能应用拓展

除了流动减阻, 液体浸润表面的液-液界面还赋予了其卓越的防污、防结冰、自清洁、防腐蚀等多种功能。这些功能往往是相辅相成的。例如, 在船舶应用中, 减阻涂层同时也必须具备优异的防海洋生物污损能力。因此, 开发集减阻、防污、耐用性于一体的多功能液体浸润涂层, 是当前研究的重要方向。

近年来, 多功能应用已取得工程突破, KIM W Y 等^[58]提出“光聚合诱导多相材料+数字打印”组合策略, 制造超滑结构, 并结合数字技术实现精准调控。经多维度测试, 可实现液体“零滞留”、冰黏附强度下降 90%, 还具备优异的防污性能, 适配多场景; 江雷院士团队开发的双仿生超滑杯, 通过“图案化亲水-超疏水过渡带+超疏水凹口”, 实现车载、运动场景液体溢出率接近零, 为日用品、新能源领域应用提供新范式^[59]。

5 结 论

液体浸润表面通过在微结构中锁定一层稳定的润滑液体, 构建出独特的液-液滑移界面, 在流动减阻领域展现出巨大的应用潜力。相较于依赖气-液界面的超疏水表面, 液体浸润表面在压力稳定性、自修复能力及多功能性(如防污、防冰)方面具有显著优势。本文系统综述了液体浸润表面减阻

技术的研究进展, 涵盖了基本原理、关键影响因素、实验验证、数值模拟、制备方法及工程应用。

尽管液体浸润表面减阻技术已取得长足进步, 但从实验室走向大规模工程应用仍面临诸多挑战。结合当前的研究瓶颈与未来的发展需求, 以下几个方向值得重点关注和深入研究。

(1) 润滑层的长效稳定性与耐久性

这是制约液体浸润表面减阻技术实用化的首要难题。在远洋航行、管道输运等开放、高速且长时程的流动环境中, 润滑液体的流失现象难以避免, 直接导致减阻性能衰减甚至失效。因此, 未来研究需重点围绕提升润滑层稳定性展开, 开发具有高剪切稳定性、低溶解度且具备一定黏弹性的智能润滑液体(如离子液体、高分子凝胶等), 使其在受到流动冲击时仍能稳定“锁存”于基底结构中。

(2) 湍流减阻机理的深化理解

当前对液体浸润表面在湍流环境中的减阻机理认识仍不够深入, 尤其是液-液界面与湍流拟序结构的相互作用机制尚未明确, 这制约了减阻性能的精准调控与表面设计优化。未来研究需结合高精度数值模拟手段与先进实验观测技术, 从微观流动机理到宏观性能表征展开系统探究: 一方面需精细刻画液-液界面变形、波动过程与近壁区湍流猝发、涡旋动力学行为之间的关联, 明确界面通过抑制湍流脉动实现减阻的具体物理途径, 为表面结构与润滑液参数优化提供理论依据; 另一方面需基于多尺度流场数据, 发展能够准确预测液体浸润表面在不同湍流状态下有效滑移长度与减阻率的理论模型或半经验模型, 建立“结构-界面-湍流-减阻”的定量关联, 为工程应用中的表面设计与性能评估提供可靠工具。

(3) 多功能集成与智能化

随着工程应用需求的多元化, 未来仿生液体浸润表面将突破单一减阻功能局限, 向多功能集成化与智能化方向发展。在功能集成方面, 需将减阻能与防污、防腐、防冰、传感(监测流场参数)等功能进行协同设计, 通过多组分材料复合与结构一体化构建, 开发兼具多重防护与性能调控功能的一体化涂层; 在智能化方面, 需探索可响应外界环境

变化（如温度波动、pH值改变、流速变化等）的智能液体浸润表面，例如，设计在低速流动时保持普通稳定状态、在高速流动时主动“分泌”润滑液

体以增强减阻效果的自适应系统，实现基于工况需求的智能、节能型阻力调控，进一步拓展减阻技术在复杂环境中的应用场景。

参考文献：

- [1] ZHAO Y, ZHANG H, SUN S, et al. Drag reduction using a self-adaptive flexible coating[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(4): 041701.
- [2] FENG X, FAN D, TIAN G, et al. Coupled bionic drag-reducing surface covered by conical protrusions and elastic layer inspired from pufferfish skin[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(28): 32747–32760.
- [3] LV S, YANG F, YU Z, et al. Enhancing shear resistance in ultrahigh-molecular-weight polyolefin drag-reducing agents via siloxane bond integration[J]. *Energy*, 2025, 320: 135281.
- [4] YANG F, HUANG Z, XU S, et al. Synergistic improvement of rheological properties in Changqing waxy crude oil by ethylene vinyl acetate and surfactant combinations[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(12): 10727–10736.
- [5] ZHOU Y, WANG C, LIU J, et al. Metafluidic shaping: Simultaneous flow uniformity and drag reduction[J]. *Europhysics Letters*, 2025, 151(5): 53001.
- [6] QU Z, LI X, CHEN W, et al. Experimental and numerical investigation on the effect of boundary layer injection on skin friction in a scramjet combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2025, 163: 110264.
- [7] ZHAO Y, WU Y, WANG L, et al. Bio-inspired reversible underwater adhesive[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2218.
- [8] 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.
- [9] BOCQUET L, LAUGA E. A smooth future?[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(5): 334–337.
- [10] 李战华, 吴健康, 胡国庆, 等. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] SUN P, FENG X, TIAN G, et al. Ultrafast self-healing superhydrophobic surface for underwater drag reduction[J]. *Langmuir*, 2022, 38(35): 10875–10885.
- [12] FALDE E J, YOHE S T, COLSON Y L, et al. Superhydrophobic materials for biomedical applications[J]. *Biomaterials*, 2016, 104: 87–103.
- [13] DARMANIN T, GUITTARD F. Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature[J]. *Materials Today*, 2015, 18(5): 273–285.
- [14] LI Z, GUO Z. Bioinspired surfaces with wettability for antifouling application[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(47): 22636–22663.
- [15] XUE Y, LV P, LIN H, et al. Underwater superhydrophobicity: Stability, design and regulation, and applications[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2016, 68(3): 030803.
- [16] HUANG S, LV P, DUAN H. Morphology evolution of liquid-gas interface on submerged solid structured surfaces[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 27: 34–51.
- [17] LI D, LI S, XUE Y, et al. The effect of slip distribution on flow past a circular cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 51: 211–224.
- [18] ZHANG M, WANG J, VENNER C. Effect of boundary slips on thermal EHL in simple sliding finite line contact considering limiting shearing stress[J]. *Friction*, 2025, 13(4): 9440944.
- [19] XIANG Y, HUANG S, HUANG T Y, et al. Superrepellency of underwater hierarchical structures on *Salvinia* leaf[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(5): 2282–2287.
- [20] CHOI W, BYEON H, PARK J Y, et al. Effects of pressure gradient on stability and drag reduction of superhydrophobic surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(10): 101603.
- [21] WANG G, MA F, ZHU L, et al. Bioinspired slippery surfaces for liquid manipulation from tiny droplet to bulk fluid[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(37): 2311489.

- [22] CROWDY D G. Effective slip lengths for immobilized superhydrophobic surfaces[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 825: R2.
- [23] WONG T S, KANG S H, TANG S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, 477(7365): 443–447.
- [24] ROSENBERG B J, VAN B T, FU M K, et al. Turbulent drag reduction over air-and liquid-impregnated surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(1): 015103.
- [25] YIN J L, MEI M L, LI Q L, et al. Self-cleaning and antibiofouling enamel surface by slippery liquid-infused technique[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25924.
- [26] EPSTEIN A K, WONG T S, BELISLE R A, et al. Liquid-infused structured surfaces with exceptional anti-biofouling performance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(33): 13182–13187.
- [27] FENG X, ZHANG X, TIAN G. Recent advances in bioinspired superhydrophobic ice-proof surfaces: Challenges and prospects[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(16): 5960–5993.
- [28] WILSON P W, LU W, XU H, et al. Inhibition of ice nucleation by slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS)[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(2): 581–585.
- [29] DAI X, SUN N, NIELSEN S O, et al. Hydrophilic directional slippery rough surfaces for water harvesting[J]. *Science Advances*, 2018, 4(3): eaaq0919.
- [30] JING H, ZHANG L, HAO R, et al. Catechol-bonded universal flash coating toward liquid-like surfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025: e19210.
- [31] SONG D, SONG B, HU H, et al. Effect of a surface tension gradient on the slip flow along a superhydrophobic air-water interface[J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(3): 033303.
- [32] SCHAFFEL D, KOYNOV K, VOLLMER D, et al. Local flow field and slip length of superhydrophobic surfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(13): 134501.
- [33] BOLOGNESI G, COTTIN-BIZONNE C, PIRAT C. Evidence of slippage breakdown for a superhydrophobic microchannel[J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(8): 082004.
- [34] ZHANG M, WANG X, WANG J, et al. Measurement of slip length and friction reduction: An experimental study about bound-ary slip using omniphobic and 2D coatings[J]. *Tribology International*, 2025, 202: 110279.
- [35] SCHONECKER C, HARDT S. Longitudinal and transverse flow over a cavity containing a second immiscible fluid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 717: 376–394.
- [36] 赵亚溥. 表面与界面物理力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [37] HE W, LIU P, ZHANG J, et al. Emerging applications of bioinspired slippery surfaces in biomedical fields[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2018, 24(56): 14864–14877.
- [38] ROTHSTEIN J P. Slip on superhydrophobic surfaces[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42(1): 89–109.
- [39] SCHONECKER C, BAIER T, HARDT S. Influence of the enclosed fluid on the flow over a microstructured surface in the Cassie state[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 740: 168–195.
- [40] LI H, JI S, TAN X, et al. Effect of Reynolds number on drag reduction in turbulent boundary layer flow over liquid-gas interface[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(12): 122111.
- [41] SOLOMON B R, KHALIL K S, VARANASI K K. Drag reduction using lubricant-impregnated surfaces in viscous laminar flow[J]. *Langmuir*, 2014, 30(36): 10970–10976.
- [42] KANT K, PITCHUMANI R. Laminar drag reduction in microchannels with liquid infused textured surfaces[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 230: 116196.
- [43] NGUYEN H T, CHANG K, LEE S W, et al. Numerical prediction of turbulent drag reduction with different solid fractions and distribution shapes over superhydrophobic surfaces[J]. *Energies*, 2022, 15(18): 6645.
- [44] CHANG J, JUNG T, CHOI H, 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.
- [45] DIG S, LEONARDI S, PIROZZOLI S, et al. On the relationship between drag and vertical velocity fluctuations in flow over

- riblets and liquid infused surfaces[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, 86: 108663.
- [46] FU M K, ARENAS I, LEONARDI S, et al. Liquid-infused surfaces as a passive method of turbulent drag reduction[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 824: 688–700.
- [47] BERNARDINI M, GARCIA C E J, MOHAMMADI A, et al. Turbulent drag reduction over liquid-infused textured surfaces: Effect of the interface dynamics[J]. *Journal of Turbulence*, 2021, 22(11): 681–712.
- [48] CARTAGENA E J G, ARENAS I, BERNARDINI M, et al. Dependence of the drag over super hydrophobic and liquid infused surfaces on the textured surface and Weber number[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, 100(4): 945–960.
- [49] ARENAS I, GARCIA E, FU M K, et al. Comparison between super-hydrophobic, liquid infused and rough surfaces: A direct numerical simulation study[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 869: 500–525.
- [50] VEGA-SANCHEZ C, NETO C. Fluid slip and drag reduction on liquid-infused surfaces under high static pressure[J]. *Langmuir*, 2024, 40(8): 4460–4467.
- [51] PAKZAD H, NOURI-BORUJERDI A, MOOSAVI A. Drag reduction ability of slippery liquid-infused surfaces: A review[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 170: 106970.
- [52] HEMEDA A A, TAFRESHI H V. Liquid-infused surfaces with trapped air (LISTA) for drag force reduction[J]. *Langmuir*, 2016, 32(12): 2955–2962.
- [53] 秦声雷, 侯国祥, 郭文强, 等. 基于格子 Boltzmann 方法的液润表面减阻规律[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 163–171, 197.
- [54] REN L, ZHANG M, WEN J, et al. Drag reduction with lubricant rings over a patterned liquid-infused cylinder[J]. *Tribology International*, 2024, 198: 109870.
- [55] 王立平, 曾志翔. 油耗降 2%! 宁波材料所新材料人造“海豚皮”应用于超大型油轮[EB/OL]. (2024-07-08)[2025-12-17]. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_27999597.
- [56] 欧阳欣, 张冬敏, 阳明书. 纳米降凝剂在含蜡原油管输中的应用[EB/OL]. (2025-10-29)[2025-12-17]. <https://www.yjrcfw.com/mobile/achievement/show.php?itemid=382>.
- [57] ZHANG H, CHEN G, YU Y, et al. Microfluidic printing of slippery textiles for medical drainage around wounds[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(16): 2000789.
- [58] KIM W Y, YOON S M, PARK S R, et al. Digitally fabricated 3D slippery architectures for multifunctional liquid manipulation[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 9026.
- [59] MA J, ZHAN Z, ZHANG Z, et al. Bioinspired wettability boundary stabilizes water sloshing[J]. *Science Advances*, 2025, 11(46): eadz7099.

A Review of Drag Reduction Technology Based on Bio-Inspired Liquid-Infused Slippery Surfaces

LIU Jialin¹, TAO Xuanzhen¹, LI Hongyuan^{1,2}

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Nanchang Innovation Institute of Peking University, Nanchang 330096, China)

Abstract: Flow drag reduction is of great significance for energy conservation, emission reduction, and enhancing equipment performance. Inspired by the Nepenthes pitcher plant, the bio-inspired Liquid-Infused Surface (LIS) has emerged as a novel technology for reducing interfacial drag. It functions by immobilizing a lubricating liquid, which is immiscible with the working fluid, within a micro-structured substrate to create a stable liquid-liquid slippery interface. This approach effectively addresses the instability issue of the entrapped air layer on traditional superhydrophobic surfaces under high-pressure and shear conditions. This paper provides a systematic review of the research progress in LIS-based drag reduction technology. It begins by elucidating the core drag reduction mechanism based on the Navier slip theory. A key focus is placed on analyzing the influence of the viscosity ratio (M) between the lubricant and the working fluid, as well as the flow Reynolds number (Re), on the slip characteristics and drag reduction efficacy. The review highlights that a viscosity ratio much less than one ($M \ll 1$) is a fundamental prerequisite for achieving drag reduction, and it discusses the significant differences in the drag reduction behavior and stability of LIS between laminar and turbulent flow regimes. The fabrication methods for LIS, including photolithography, spray coating, and anodization, are summarized. The paper also outlines the exploratory applications of LIS in fields such as marine vessels, pipeline transport, microfluidics, and biomedical devices. Finally, the review concludes by summarizing the core challenges for practical engineering applications and prospecting future research directions, including the optimization of substrate structures, in-depth investigation of drag reduction mechanisms in turbulent flows, and the development of multifunctional integrated surfaces.

Keywords: Liquid-Infused Surface; flow drag reduction; turbulence; viscosity ratio; Reynolds number