

综述

受猪笼草启发的仿生超滑表面研究进展

张静, 陈诚*

(新疆大学 特色纺织品与清洁染整技术重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 自然界中猪笼草的袋状叶片内壁呈多孔结构, 能锁住其分泌的蜡状物质, 受此启发, 向粗糙基底灌注低表面能液体以形成稳定的润滑油层, 进而制备出注液超滑表面, 其比超疏水表面具有更耐久的疏液、自清洁、防附着等性能, 成为当前研究的热点。基于此, 该文介绍了仿生超滑表面的润湿理论及作用机制, 综述了超滑表面构建技术策略, 包括粗糙基底成形-润滑油灌注与粗糙基底成形-基底化学修饰-润滑油灌注 2 种典型的路径; 全面总结了粗糙基底的制备方法, 包括刻蚀法、溶胶-凝胶法、呼吸图法、水热法, 并介绍了仿生超滑表面在油水分离、水雾收集、防腐蚀、液滴操控、防覆冰领域的应用进展; 最后, 对仿生超滑表面的发展前景进行了展望。

关键词: 仿生超滑表面; 构建策略; 制备方法; 多功能应用

中图分类号: TQ9; TB306 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2024) 01-0076-15

Research progress on biomimetic super-slippy surfaces inspired by *Nepenthes* pitcher

ZHANG Jing, CHEN Cheng*

(Key Laboratory of Characteristic Textiles and Clean Dyeing and Finishing Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: The wax material secreted by *Nepenthes* pitcher plant can be locked in the porous structure on the inner wall of its leaves, which inspires researchers pouring low surface energy liquid into the rough substrate to form a stable lubricating oil layer, and then a super-slippy liquid infused porous surface is created. Compared with superhydrophobic surface, super-slippy surface exhibits more durable characteristic such as hydrophobicity, self-cleaning, anti-adhesion, which makes it a research hotspot. Herein, the wetting theory and action mechanism of biomimetic super-slippy surface were firstly introduced, followed by summarization on its construction strategy of rough substrate forming-lubricating oil infusion and rough substrate forming-chemical modification of substrate-lubricating oil infusion. Then, a series of preparation methods for super-slippy surfaces, such as etching, sol-gel, breath figure, hydrothermal, were discussed comprehensively, while its application progress in the fields of oil-water separation, fog collection, anti-corrosion, droplet manipulation and anti-icing were also overviewed. Finally, the future development directions of biomimetic super-slippy surfaces were prospected.

Key words: biomimetic super-slippy surfaces; construction strategy; preparation methods; multi-functional application

自然界中荷叶表面存在微米级乳突, 乳突上分布有纳米级绒毛; 此二元协同所构成的微纳双级结

构与低表面能蜡质结晶物共同作用, 从而促成荷叶呈现超疏水特性^[1]; 随着对天然生物表面的不断深

收稿日期: 2023-03-20; 定用日期: 2023-05-29; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230216

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金青年科学基金项目 (2022D01C68); 新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学基金项目 (XJEDU2021Y007); 新疆维吾尔自治区天池博士计划科研启动项目 (TCBS202011); 新疆大学博士启动基金项目 (BS210215)

作者简介: 张静 (1999—), 女, 硕士生, E-mail: 2812664901@qq.com。联系人: 陈诚 (1988—), 男, 副教授, E-mail: 450548205@qq.com。

入研究, 科研人员在玫瑰花瓣、美洲大蓝蝶的翅膀上同样发现了微纳阶层结构, 该结构使其呈现出优异的超疏水特性^[2-3]。受此启发, 研究人员通过对低表面能材料进行粗糙化处理以及对粗糙结构进行低表面能修饰这 2 种路径, 制备了一系列超疏水材料^[4-7], 其主要依靠液滴与粗糙结构间的空气层, 阻隔二者的直接接触来实现超疏水功能。

猪笼草是一种热带食虫植物, 其捕虫囊的囊口内壁呈多孔结构, 可牢牢锁住分泌的蜡状黏液物质, 形成一层均匀的润滑膜。同时囊口内壁还布有蜜腺, 受蜜腺分泌的蜜汁引诱, 昆虫会落在囊口边缘因无法附着而掉入囊内被消化液消化^[8]。受此启发, WONG 等^[9]模拟猪笼草表面制作了一种海绵状多孔材料, 并将其填充润滑液体以制备光滑液体灌注多孔表面 (SLIPS)。SLIPS 是一种由固体-润滑油-液体组成的复合界面, 其中润滑油的效果与超疏水材料中的空气层类似, 用以隔绝环境液体与固体表面的直接接触; 但与其相比, SLIPS 能够适应高压高湿、往复摩擦、外界冲击等极端环境, 甚至其表面在受到轻微损伤时可以恢复原有形貌, 这些优良特性使其在防腐蚀^[10-11]、液滴操控^[12-13]、水雾收集^[14-15]等领域具有广泛的应用, 引起了科学家的研究兴趣及广泛关注。

本文归纳总结了仿生超滑表面润湿理论及作用机制, 详细介绍了仿生超滑表面的构建技术策略的研究进展, 并对于构建表面中关键的粗糙基底制备方法进行了全面综述, 基于仿生超滑表面的优良性能, 综述了其最新的应用进展。

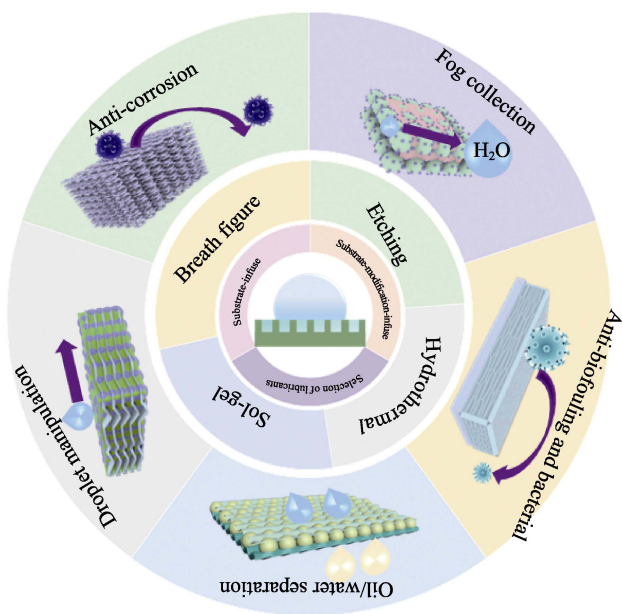


图 1 仿生超滑表面的应用及粗糙基底的制备方法
Fig. 1 Application of biomimetic super-slippery surface and preparation method of rough substrate

1 仿生超滑表面润湿理论及作用机制

SMITH 等^[16]研究了仿生超滑表面的润湿机制, 得出水相与油相在空气氛围下的铺展系数 [$S_{ow(a)}$] 为:

$$S_{ow(a)} = \gamma_{wa} - \gamma_{wo} - \gamma_{oa} \quad (1)$$

式中: γ 为不同相之间的界面张力, N/m; o 为油相; w 为水相; a 为空气氛围。

该科研团队经研究发现, 液滴在离子液体上时, 存在 $\theta_{os(a)} > 0$, $\theta_{os(w)} > 0$ (θ 为不同相之间的接触角; s 为固相), 此时在液滴周围存在 3 种三相接触线, 分别为油-水-空气接触线、油-固-空气接触线和油-固-水接触线; 而在硅油上的液滴周围并不存在上述 3 种接触线。基于此, SMITH 等推测液滴外部的界面 (在空气环境中) 存在 3 种状态, 分别为 A1 (干燥)、A2 (润滑油浸入固体基材并有涌现倾向) 和 A3 (润滑油被空气封装); 对于液滴下面的界面 (在水环境中) 也存在 3 种状态, 分别为 W1 (液体嵌入固体基材)、W2 (润滑油浸入固体基材, 液体有涌现倾向) 和 W3 (润滑油被液体封装), 其润湿结构示意图如图 2 所示。

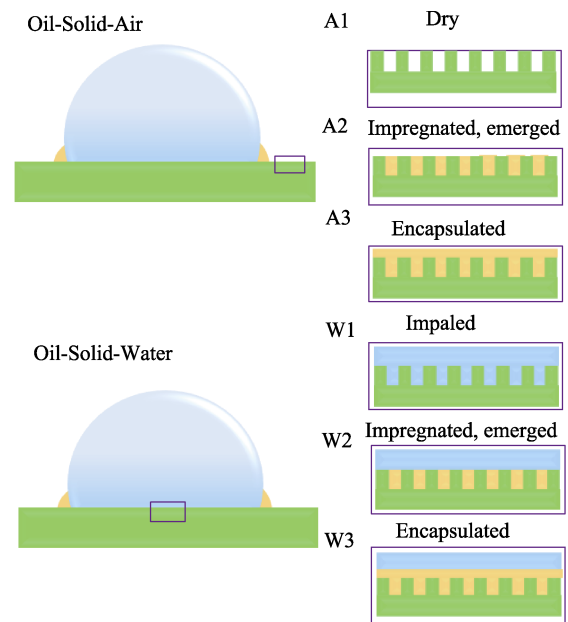


图 2 液滴外部环境的 3 种润湿结构以及液滴下方界面的 3 种润湿结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three wetting structures of the external environment of the droplet and the three wetting structures at the interface below the droplet

在空气氛围下液滴外部界面呈现的润湿状态取决于 A1、A2、A3 哪个能量最低。例如: 如果状态 A2 具有最低的界面总能, 即 $E_{A2} < E_{A1}$ 且 $E_{A2} < E_{A3}$, 则 A2 是稳定的状态, 可得出:

$$E_{A2} < E_{A1} \Leftrightarrow \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{os}}{\gamma_{oa}} > \frac{1 - \phi}{r - \phi} \quad (2)$$

$$E_{A2} < E_{A3} \Leftrightarrow \gamma_{sa} - \gamma_{os} - \gamma_{oa} < 0 \quad (3)$$

式中： ϕ 是固体所占表面投影面积的百分比； r 是总表面积与固体投影面积的比率。对于宽为 a ，边距为 b ，高为 h 的方柱， $\phi = \frac{a^2}{a^2 + b^2}$ ， $r = \frac{1 + 4ah}{a^2 + b^2}$ ，应用杨氏方程 $\cos(\theta_{os(a)}) = \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{os}}{\gamma_{oa}}$ ，式 (2) 可简化为：

$$\cos(\theta_{os(a)}) > \frac{1 - \phi}{r - \phi} = \cos \theta_c \quad (4)$$

进一步简化可得：

$$\theta_{os(a)} < \theta_c (\theta_c \text{ 为 } \phi \text{ 与 } r \text{ 的函数}) \quad (5)$$

式 (3) 中， $\gamma_{sa} - \gamma_{os} - \gamma_{oa}$ 为在空气氛围下油在固体基材表面的铺展系数，即 $S_{os(a)}$ ，整理可得：

$$\frac{\gamma_{sa} - \gamma_{os}}{\gamma_{oa}} < 1 \quad (6)$$

应用杨氏方程，可得 $\theta_{os(a)} > 0$ ；再用 $S_{os(a)}$ 来表达式 (2)，可得：

$$\frac{-\gamma_{oa}(r-1)}{(r-\phi)} < S_{os(a)} \quad (7)$$

润湿状态 A2 即可写为：

$$E_{A2} < E_{A1}, E_{A3} \Leftrightarrow \theta_c > \theta_{os(a)} > 0 \Leftrightarrow -\frac{\gamma_{oa}(r-1)}{(r-\phi)} < S_{os(a)} < 0 \quad (8)$$

同理，如果 $E_{A3} < E_{A2}$ 且 $E_{A3} < E_{A1}$ ，则 A3 是稳定的状态。若 $E_{A1} < E_{A2}$ 且 $E_{A1} < E_{A3}$ ，则 A1 是稳定的状态，按照类似上述的简化程序可以得到：

$$E_{A3} < E_{A1}, E_{A2} \Leftrightarrow \theta_{os(a)} = \theta_c \Leftrightarrow \gamma_{sa} - \gamma_{os} - \gamma_{oa} \equiv S_{os(a)} \geq 0 \quad (9)$$

$$E_{A3} < E_{A1}, E_{A2} \Leftrightarrow \theta_{os(a)} < \frac{\cos r}{\cos 1} \Leftrightarrow S_{os(a)} > -\gamma_{oa} + \frac{-\gamma_{oa}}{r} \quad (10)$$

$$E_{A1} < E_{A2}, E_{A3} \Leftrightarrow \theta_{os(a)} > \theta_c \Leftrightarrow \frac{-\gamma_{oa}(r-1)}{(r-\phi)} \quad (11)$$

同理，在水环境中的液滴下界面呈现的润湿状态取决于 W1、W2、W3 哪个能量最低。运用上述相同运算，得到 W1、W2、W3 分别为：

$$E_{W1} < E_{W2}, E_{W3} \Leftrightarrow \theta_{os(w)} = 0 \Leftrightarrow \gamma_{sw} - \gamma_{os} - \gamma_{ow} \equiv S_{os(w)} \geq 0 \quad (12)$$

$$E_{W2} < E_{W1}, E_{W3} \Leftrightarrow \theta_c > \theta_{os(w)} > 0 \Leftrightarrow \frac{-\gamma_{ow}(r-1)}{(r-\phi)} < S_{os(w)} < 0 \quad (13)$$

$$E_{W3} < E_{W1}, E_{W2} \Leftrightarrow \theta_c > \theta_{os(w)} > 0 \Leftrightarrow \gamma_{sw} - \gamma_{os} - \gamma_{ow} < S_{os(w)} \quad (14)$$

基于上述研究，SMITH 协同科研团队进一步探索了粗糙固体基材、润滑油、外界液体、空气环境 4 个相态所能组合的 12 种表面，并给出各状态下的判别形式，如图 3 所示。其列举的 12 种形式涵盖了构建仿生超滑表面的所有情况，当铺展系数 $S_{ow(a)} > 0$ 时，会发生包裹现象，即润滑油包裹液滴从固体基材表面滑落，导致润滑油的损耗，从而破坏超滑表面的润湿性能；当铺展系数 $S_{ow(a)} < 0$ 时，不会发生包裹现象，但只有当润滑油在空气和水存在的情况下都能完全浸润粗糙基底，并形成封装状态时（图 3 蓝框框选区域），水滴不会嵌入粗糙基底表面且具有较小的滑动角，此时才可形成标准的超滑表面。

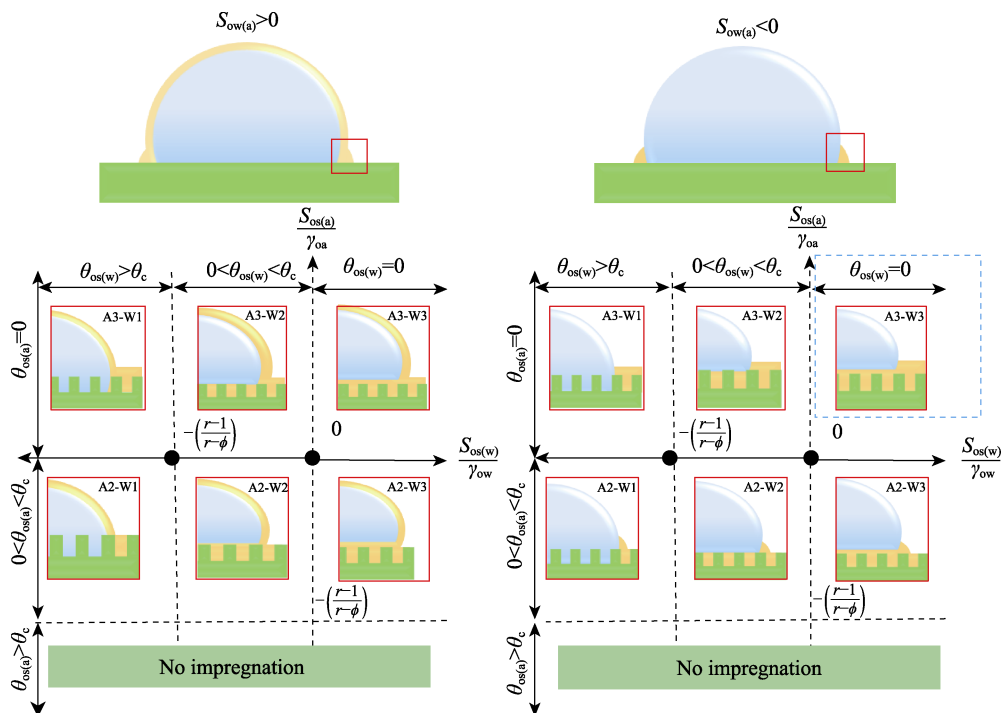


图 3 超滑表面的 12 种润湿状态
Fig. 3 Twelve wetting states of super-slippy surface

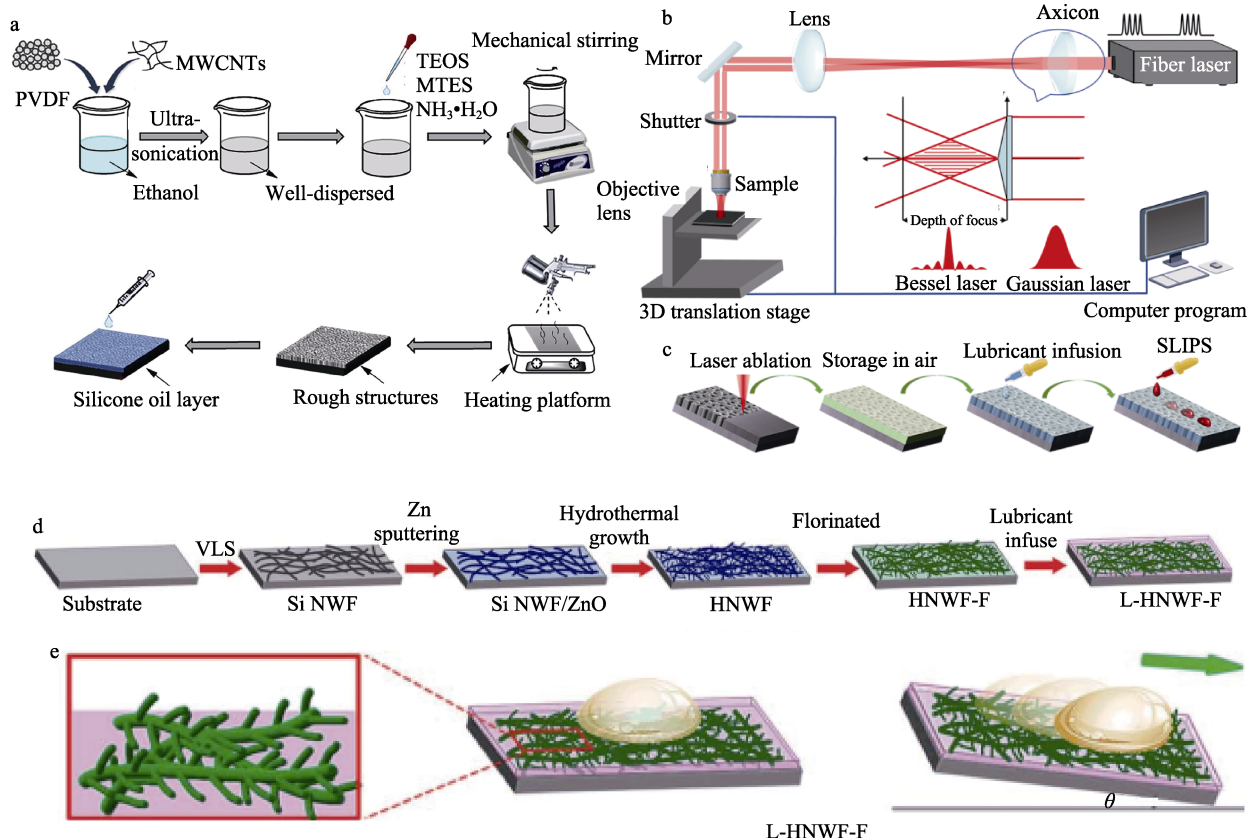
2 仿生超滑表面构建技术策略

2.1 粗糙基底成形-润滑油灌注路径

粗糙基底成形-润滑油灌注是先通过化学方法构筑粗糙基底, 赋予基底折皱、多孔、沟槽、阵列等形式, 以增强基底粗糙度、增大与润滑油的接触面积、提供锁住润滑油的毛细力, 防止润滑油的耗散, 而后进行润滑油灌注的超滑表面构建路径^[17]。

YUAN 等^[18]以具有良好理化及热稳定性、低表面能与抗降解的聚偏二氟乙烯 (PVDF) 为聚合物基体, 再引入 SiO_2 纳米颗粒与多壁碳纳米管 (MWCNTs), 二者的相互作用使复合材料的层次结构形态更为丰富, 增加了微孔数量, 提高了复合材料的机械强度和表面粗糙度, 再向其表面注入硅油, 成功地构建出具有微纳多孔的 PVDF/CNTs/ SiO_2 有机/无机杂化超滑复合涂层 (图 4a), 该涂层具有抗腐蚀性能和机械稳定性, 在工业及极端环境中具

有潜在的应用价值。CHENG 等^[19]将普通高斯光束转变为锥形贝塞尔光束, 飞秒贝塞尔光束通过物镜聚焦到镍钛合金 (NiTi) 表面。大部分激光能量被定位在 NiTi 合金表面的自由电子吸收, NiTi 合金发生强烈的等离子体喷射, 形成深层多孔组织 (图 4b), 降低其表面能, 并向孔隙中注入润滑剂后成功制备了 SLIPS (图 4c), 其可显著改善 NiTi 基体的血液相容性。HANG 等^[20]采用化学气相沉积法, 通过气-液-固生长机制 (VLS) 引导生成硅纳米线薄膜 (Si NWF), 并与氧化锌纳米穗进行树枝化改性, 形成超疏水性能良好的粗糙基底, 再注入全氟润滑剂, 以生成阶层纳米线薄膜 (L-HNWF-F) (图 4d), 液滴于 L-HNWF-F 表面接触以及排斥的状态如图 4e 所示, 其可作为生物化学传感器用于监测细胞中的电气、机械或化学信号、生物分子, 如脱氧核糖核酸 (DNA)、核糖核酸 (RNA)、蛋白质、多肽以及气体 (如 CO 、 H_2), 并且能够保护纳米线传感器免受液体污染, 从而提高传感器的稳定性和耐久性。



TEOS 为四乙氧基硅烷; MTES 为甲基三乙氧基硅烷; HNWF 为阶层纳米线薄膜; HNWF-F 为氟化阶层纳米线薄膜; L-HNWF-F 为润滑油注入氟化阶层纳米线薄膜

图 4 PVDF/CNTs/ SiO_2 有机/无机杂化超滑复合涂层的制备过程示意图 (a)^[18]; 基于飞秒贝塞尔激光束的微细加工系统示意图 (b) 及 SLIPS 制造工艺示意图 (c)^[19]; L-HNWF-F 制备示意图 (d) 及 L-HNWF-F 液体接触与液体排斥状态示意图 (e)^[20]

Fig. 4 Schematic diagram of preparation process of PVDF/CNTs/ SiO_2 organic/inorganic hybrid super-slippy composite coating (a)^[18]; Schematic diagram of microfabrication systems based on femtosecond Bessel laser beams (b) and schematic diagram of SLIPS manufacturing process (c)^[19]; Schematic diagram of L-HNWF-F preparation (d) and schematic diagram of L-HNWF-F liquid contact and liquid rejection (e)^[20]

粗糙基底成形-润滑油灌注的制备路径简便易操作，所制备的超滑表面可达到预期的耐腐蚀、抗污染等性能，但粗糙基底长时间暴露于外界极端环境下，其粗糙结构易遭到破坏而导致润滑油的耗散，超滑表面功能特性的丧失。

2.2 粗糙基底成形-基底化学修饰-润滑油灌注路径

粗糙基底成形-基底化学修饰-润滑油灌注路径是通过化学方法对粗糙基底进行低表面能修饰，以增强表面的疏液性能。常见的修饰物为：含有疏水基团的硅烷偶联剂，可增强基底的锁油能力；含氟碳的润滑油的疏水性可降低粗糙基底表面能，有助于防止润滑油的耗散^[21]。通过该路径构建的超滑表面性能更加稳定，应用较为广泛。BARTH WAL 等^[22]将化学刻蚀法与阳极氧化相结合制备超疏水表面，采用聚二甲基硅氧烷（PDMS）对其进行低表面能修饰再灌注硅油，进而制得微/纳米级聚二甲基硅氧烷涂层（SOIP）（图 5a），与超疏水涂层相比，其

冰附强度较低，且相较于纳米结构表面来说具有更强的抗结冰性能，可用于生产耐用的防冰涂料。ZHANG 等^[23]以聚乙二醇（PEG）为牺牲模板，采用微相分离技术构造聚苯乙烯（PS）基多孔结构，然后用 3-(三甲氧基硅基)丙基二甲基十一烷基氯化铵（QAC-硅烷）对多孔表面展开共价改性，以获得接触杀灭抗菌性能（图 5b），再将硅油润滑剂引入多孔结构，获得的超滑表面对革兰氏阳性和阴性菌具有优异的抑制能力。HE 等^[24]将透明氧化铟锡（ITO）沉积在玻璃上用作导电基板，再将聚四氟乙烯（PTFE）多孔薄膜浸入 1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-全氟癸基三乙氧基硅烷（PFOTS）中，以达到低表面能化，灌注硅油后制取一种新型的低压可逆电润湿材料（图 5c），通过控制电压，可控制液滴在超滑表面的接触角（CA），进而实现润湿性能的切换（图 5d），可应用于微滴操控、芯片实验室（Lab-On-Chip）、微变焦透镜及印刷等领域。

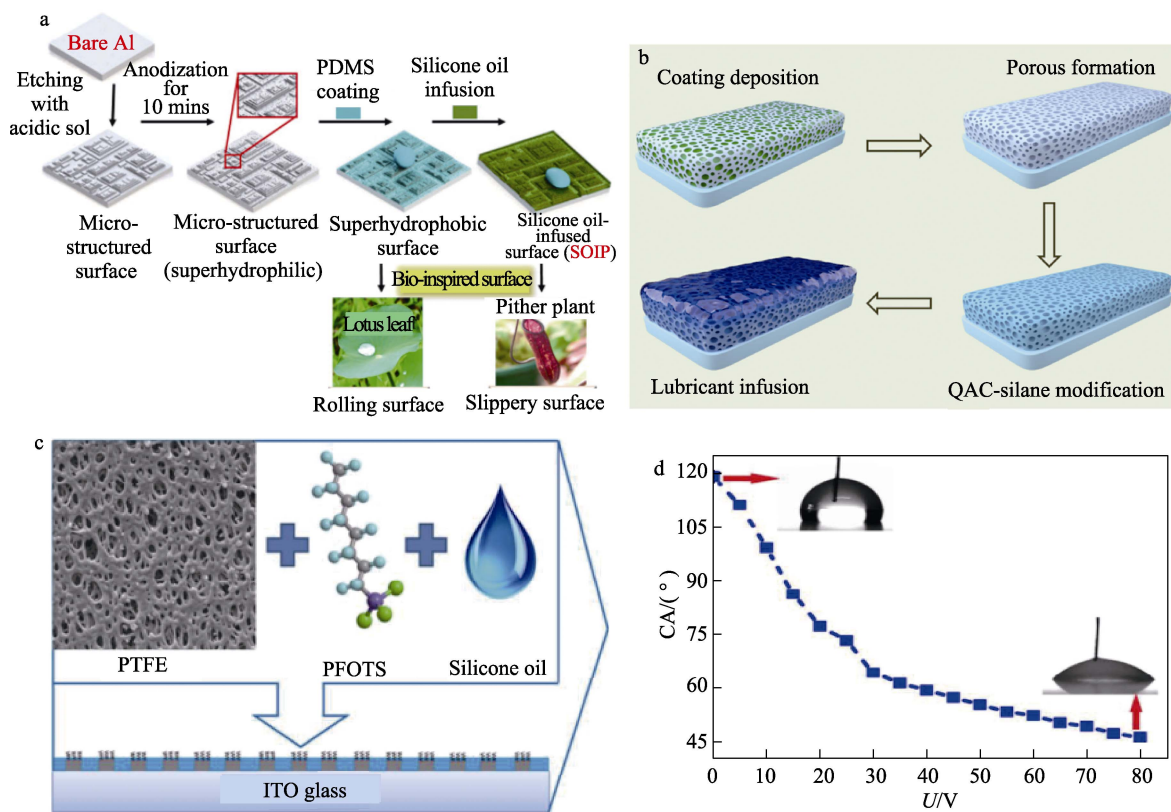


图 5 SOIP 涂层制备超滑表面的示意图 (a)^[22]；超滑涂层的制备示意图 (b)^[23]；用 PFOTS 改性硅油浸渍聚四氟乙烯膜实现低压电润湿示意图 (c) 及在不同电压下，SOIP 涂层润湿性能的切换 (d)^[24]

Fig. 5 Schematic diagram of preparation of super-slippery surface by SOIP coating (a)^[22]; Schematic diagram of preparation of super-slippery coating (b)^[23]; Schematic diagram of low-pressure electro-wetting achieved by impregnating PTFE membrane with PFOS-modified silicone oil (c) and switching of wetting properties of SOIP coating at different voltages (d)^[24]

2.3 润滑油的选择

仿生超滑表面通常是通过将润滑油灌注粗糙基底或将粗糙基底浸入润滑油中来实现，此时，与外部环境直接接触的是润滑油而不是粗糙基底，因此，

能否达到预期的超滑性能与润滑油的合理选择密不可分，据相关研究表明^[25]，润滑油的选择需要满足以下几个条件：（1）与水及其他化学物质不混溶；（2）与基底及接触物质不发生任何化学反应；

(3) 具有合适的黏度, 较低的黏度利于液滴的流动, 但过低的黏度则可能造成液滴的流失; (4) 具有低表面能, 可浸入并扩散到粗糙结构中。

HAO 等^[26]研究了氟醚、硅油、矿物油、离子液体对各种侵蚀液体(水、乙醇、己烷、甲苯、乙二醇)的互溶性。结果表明, 全氟聚醚油的化学惰性最好, 除了能与其分子结构相似的全氟己烷相溶外, 基本不与其他侵蚀液体互溶(图 6)。图 6a 从左至右依次为深红色染料在全氟聚醚中、亮绿色染料在全氟聚醚中、深红色染料在硅油中、亮绿色染料在硅油中的不互溶状态; 图 6b~f 分别为全氟聚醚油与水、乙醇、正己烷、乙二醇的不互溶状态以及全氟聚醚油与全氟己烷的互溶状态, 从左至右分别为混合前、刚混合、混合 5 min 后以及混合 1 h 后的液体状态。超滑表面的稳定性还会受到润滑油注入体积、黏度、厚度、蒸汽压等因素的影响。WARE 等^[27]研究了润滑剂注入的体积对表面光滑度防污性能的影响,

结果发现, 润滑油体积越大, 水滴滑动角越小, 防污性能越好, 最终选定由 $0.9 \mu\text{L}/\text{cm}^2$ 硅油制成的超滑表面, 其在海水中表现出优异的稳定性, 能够去除 65% 的藻类海洋污垢(图 6g)。YUAN 等^[28]将环保润滑油注入多孔表面以获得防污涂层, 并用 3 种海藻的黏附量直观地表示防污性能, 结果表明, 黏度适宜的润滑油能够平衡维度稳定性及润滑性, 以使超滑表面的防污效果显著提升。LIAO 等^[29]在苯并三氮唑、乙二醇、哌嗪等反应物上接技酰胺基、酯基和长链烷基等基团, 合成了 4 种含氮多功能润滑油添加剂, 该润滑剂比氟醚、硅油、矿物油更绿色环保, 且具有良好的热稳定性、油溶性、抗腐蚀性能和摩擦学性能。

综上所述, 需要根据超滑表面的具体使用环境选择适宜体积、黏度特性的润滑油。此外, 需考虑润滑油的生物降解性、环境友好等因素, 以便构建性能稳定、绿色环保的仿生超滑表面。

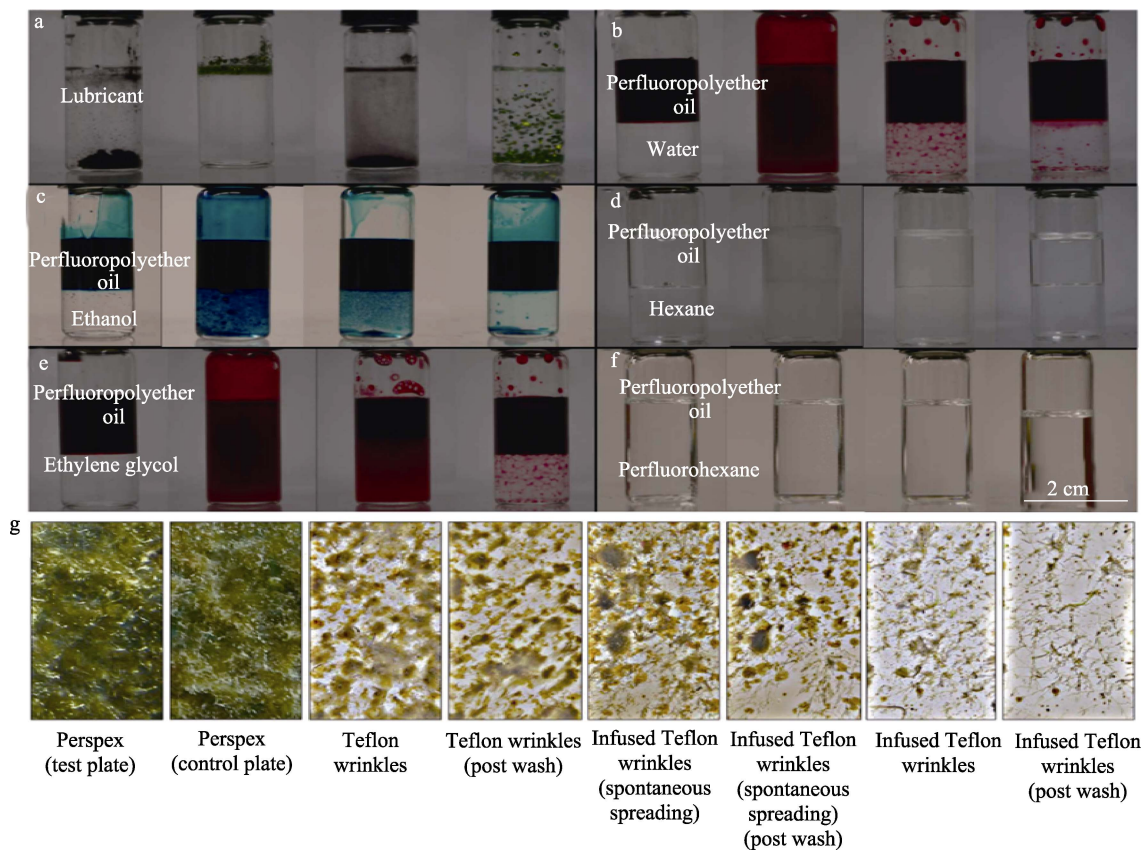


图 6 染料在润滑油中的不溶性(a)、全氟聚醚油与水(b)、乙醇(c)、正己烷(d)、乙二醇(e)的不互溶状态^[26]; 全氟聚醚油与全氟己烷的互溶状态(f)^[26]; 冲洗后超滑表面藻类污垢的光学图像(g)^[27]

Fig. 6 Insolubility of dyes in lubricating oil (a)^[26]; Perfluoropolyether oil immiscible with water (b), ethanol (c), hexane (d), ethylene glycol (e)^[26]; Perfluoropolyether oil miscible with perfluorohexane (f)^[26]; Optical image of algal dirt after rinsing (g)^[27]

3 粗糙基底的制备方法

3.1 刻蚀法

粗糙基底与润滑油接触面积较大, 可提供锁住

润滑油的毛细力。目前, 用于构造超滑表面粗糙基底的刻蚀法主要是将刻蚀材料浸泡在腐蚀液中进行腐蚀以形成粗糙基底, 灌注润滑油后制得超滑表面的湿法刻蚀技术^[30]; 基于金属在电解质溶液中发生阳

极溶解的原理,通过电解作用将金属进行刻蚀,以得到粗糙结构,再进行润滑油灌注的操作来获得超滑表面的电化学刻蚀技术^[31];以及利用气压为 10~1000 Pa 的特定气体(或混合气体)的辉光放电以产生能与薄膜发生离子化学反应的分子或分子基团,生成的挥发性反应产物在低气压的真空室中被抽走,从而实施刻蚀以构筑粗糙纹理,并浸灌润滑剂,制得超滑材料的等离子刻蚀技术^[32]。LUO 等^[33]将纯锌板浸入由 NaCl

和 NaNO₃ 组成的混合中性电解质中,利用电化学蚀刻法构筑粗糙表面,然后借助三甲氧基(十八氟癸基)硅烷(FAS)以降低其表面能,再将低黏度硅油灌注于粗糙表面后制得三维玫瑰花状超滑表面,其具有优良的拒水及防冰性能。WANG 等^[34]以粒径约为 128 nm 的树枝状介孔二氧化硅纳米颗粒(DMSNs)为基材,通过浸渍法与等离子体刻蚀技术协同制备了能够防止微生物腐蚀的多功能纳米超滑涂层(图 7a)。

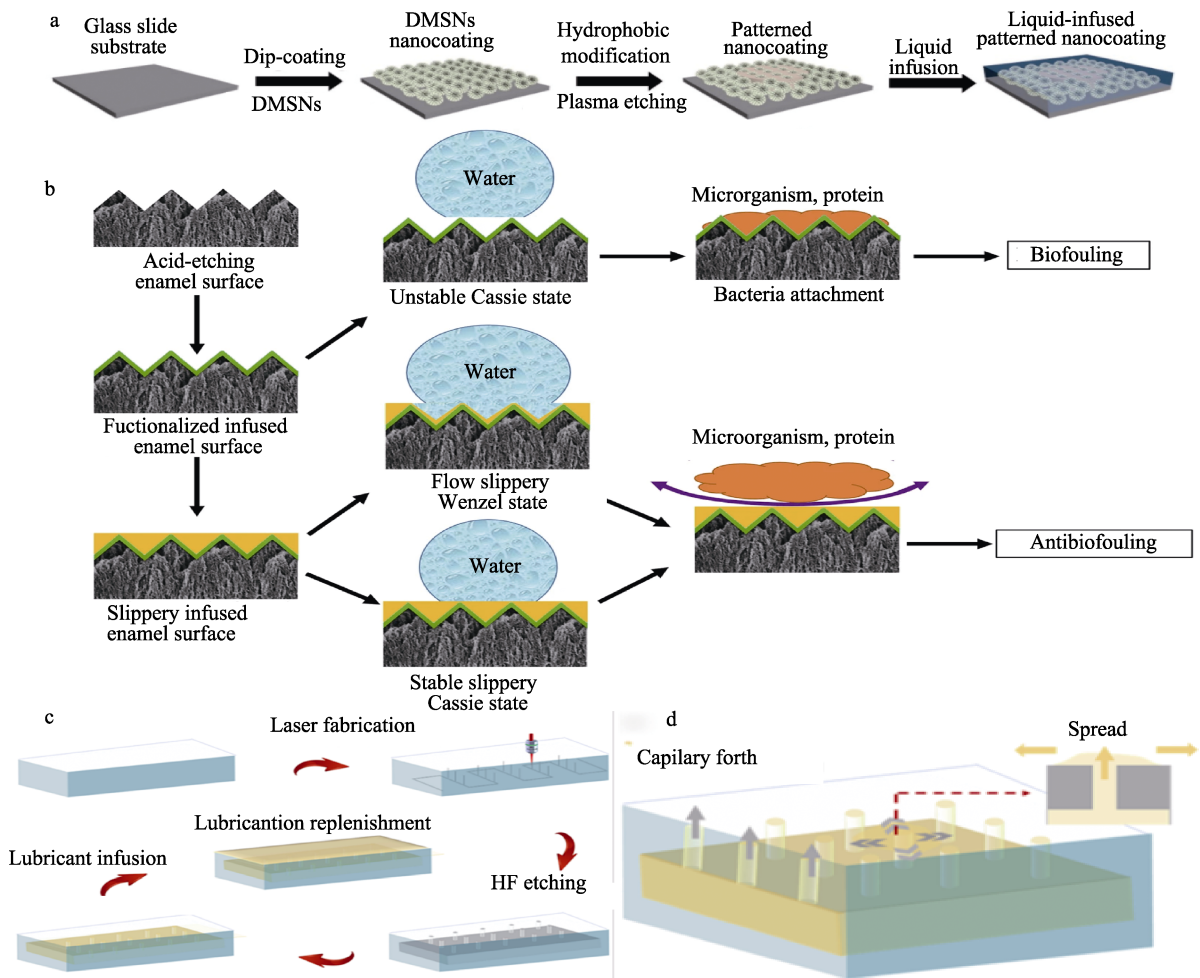


图 7 纳米超滑涂层的制造工艺示意图 (a)^[34]; 光滑表面的构造方案及其抗污机理示意图 (b)^[36]; CS-SLIP 的制备过程示意图 (c) 及高耐久性机理 (d)^[37]

Fig. 7 Schematic diagram of super-slippy nanocoating (a)^[34]; Manufacturing process of super-slippy coating and its anti-fouling schematic diagram (b)^[36]; Schematic diagram of CS-SLIP preparation process (c) and its high durability mechanism (d)^[37]

STODDARD 等^[35]基于化学蚀刻以及电沉积纹理技术,在铜管上构建了超滑表面,其在热水浸泡和射流冲击的极端条件下均表现出良好的耐久性。YIN 等^[36]对珐琅表面进行刻蚀处理,以构筑微/纳多孔结构,随后用疏水性硅烷对其进行低表面能修饰,再将氟碳润滑剂注入到珐琅表面,制得能够显著抑制牙菌斑滋生的超滑表面(图 7b)。LIANG 等^[37]采用飞秒激光湿法刻蚀方法,在光学玻璃材料上制备了一种全新的三维仿生超滑表面(CS-SLIP)(图 7c),

其能够实现长效抗污染能力并保持光学材料原有的透光性;另外,通过在玻璃内部制备舱室,可将润滑油储存在其中,并在加工出的三维毛细管辅助作用下,存储的润滑液可以根据其损耗情况源源不断地输送到光学窗口表面。与普通的超滑表面相比,CS-SLIP 包含狭窄的开口和封闭的侧壁(图 7d)。狭窄的开口可以支撑表面的液滴,从而阻碍液体的流动,封闭的侧壁防止了润滑液的流失,因此,该新颖的仿生超滑结构大幅度地增强了超滑表面

的耐久性。

3.2 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是将含有高化学活性组分的化合物进行水解缩合形成溶胶体系, 溶胶经陈化缓慢聚合形成凝胶, 再经干燥处理后形成微观粗糙形貌, 粗糙形貌有利于牢固锁住润滑油以制备超滑材料^[38]。

LI 等^[39]将受贻贝启发的聚多巴胺 (PDA) 作为功能材料设计的构建块和界面, 通过溶胶-凝胶工艺、氟化以及润滑剂填充的连续处理, 获得由 PDA 连接的超滑表面 (PDA-mediated SLIPs) (图 8a), 其具有高透明度、抗湿以及防生物污染物黏附的功能, 故可应用于防污领域。

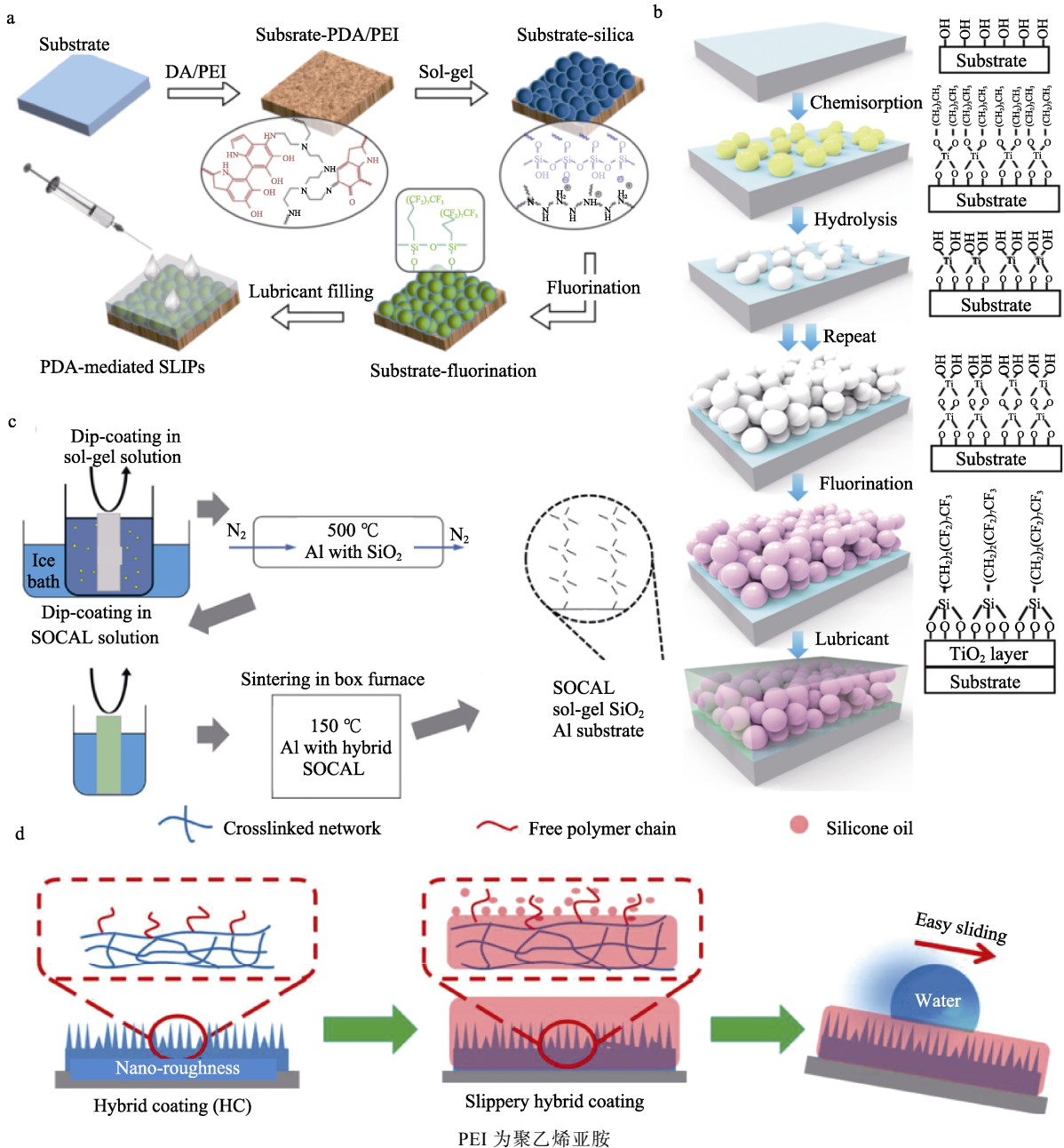


图 8 PDA-mediated SLIPs 制备过程示意图 (a)^[39]; 基于逐层溶胶-凝胶法构建超滑表面的过程示意图 (b)^[40]; 超滑涂层的制备过程示意图 (c)^[41]; 光滑杂化涂料 (SHC) 的制备流程示意图 (d)^[42]

Fig. 8 Schematic diagram of preparation process of PDA-mediated SLIPs (a)^[39]; Schematic diagram of super-slippery surface construction based on layer-by-layer sol-gel method (b)^[40]; Schematic diagram of super-slippery coating preparation process (c)^[41]; Schematic diagram of SHC preparation process (d)^[42]

HE 等^[40]基于逐层溶胶-凝胶法, 将纳米二氧化钛层浸入丁氧化物钛 (IV) 的乙醇溶液中, 实施层层沉积, 而后借助氟化硅烷对二氧化钛层进行表面功能化并灌注润滑油, 构建了防污性能稳定的超滑

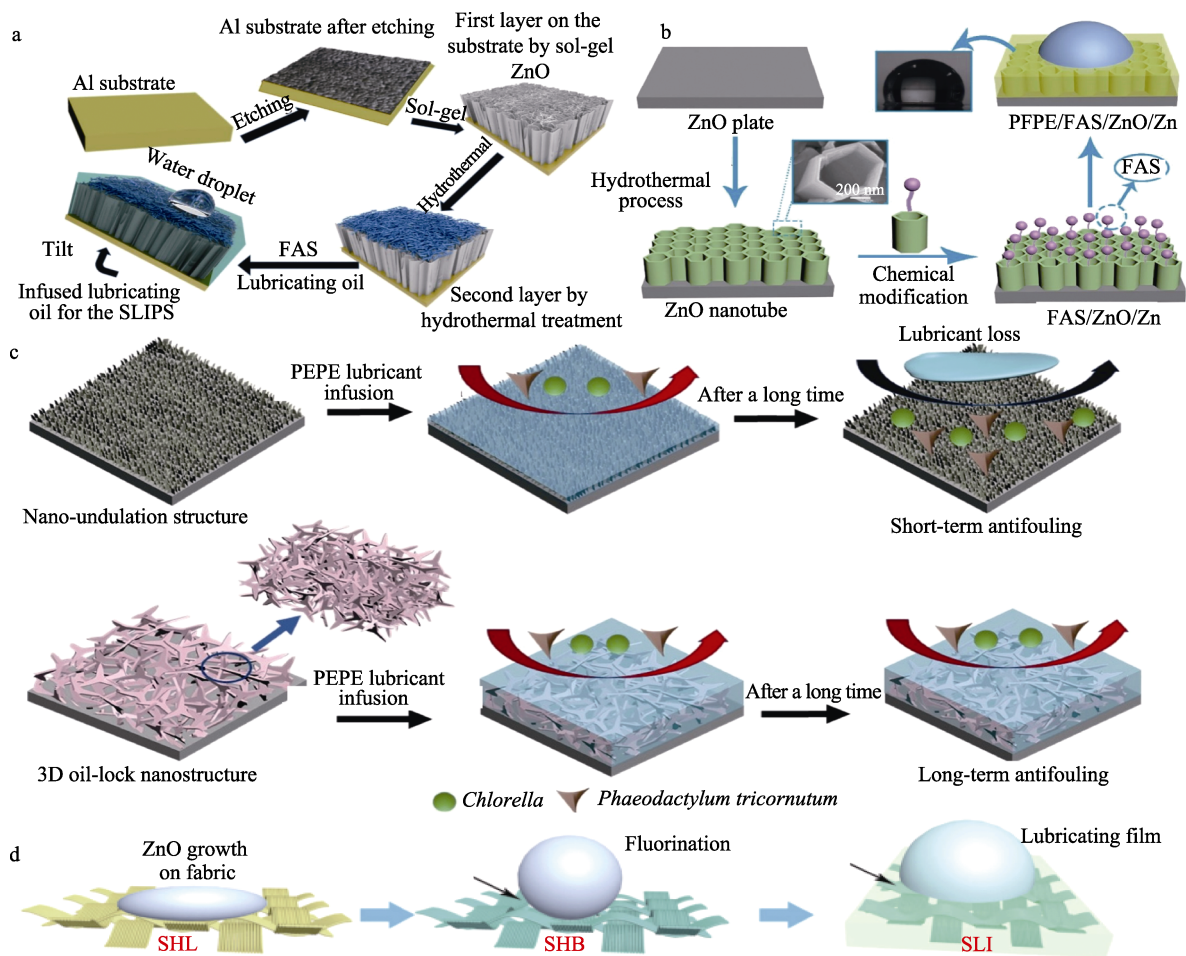
表面 (图 8b)。ZHAO 等^[41]以 Al 片为基材, 通过溶胶-凝胶法制备了 SiO₂ 涂层, 将其作为夹层腐蚀屏障, 再将其浸入全硫共价附着液体 (SOCAL) 中进行疏水处理, 制得超滑涂层 (图 8c), 其在防污

领域展现了一定的应用潜力。HE 等^[42]采用溶胶-凝胶法在玻璃表面沉积纳米二氧化钛，再通过水解缩合在二氧化钛表面接枝疏水分子，并灌注润滑油后制得超滑表面（图 8d），该表面为海洋光学仪器的生物污染问题提供了新的解决方案。WEI 等^[43]通过溶胶-凝胶法制得纳米复合涂层，并对其灌注不同黏度的硅油，制备出稳固的透明光滑杂化涂料，其在高剪切速率、高蒸发和流动水浸等极端条件下仍表现出稳定的超滑效果，在生物医学领域具有潜在的应用价值。

3.3 水热法

水热法是指在特制的密闭反应器中，采用水溶

液作为反应体系，通过对反应体系加热、加压，创造一个相对高温、高压的反应环境，促使通常难溶或不溶的物质溶解，再进行重结晶，以制备超滑表面的微纳米粗糙结构。ZHANG 等^[44]采用溶胶-凝胶法和水热法相结合的手段在铝基板上合成了双层氧化锌，其底层呈花状，上层呈杆状。而后将其浸入润滑油中得到铝基双层氧化锌（Al@ZnO）超滑锌表面（图 9a），该表面展现出良好的耐腐蚀性能。FAN 等^[45]以 ZnO 纳米管为基底，分别采用水热法、低表面能改性和润滑油灌注的制备方法，构建了超滑锌表面（图 9b），其具有理化稳定性、抗腐蚀和抗结冰性。



FAS 为氟烷基硅烷；SHL 为超亲水；SHB 为超疏水；SLI 为超滑

图 9 Al@ZnO 超滑表面制备路径 (a)^[44]；超滑锌表面制备示意图 (b)^[45]；纳米超滑表面制备路径 (c)^[46]；超滑织物构建过程示意图 (d)^[47]

Fig. 9 Preparation path of Al@ZnO super-slippy surface (a)^[44]; Schematic diagram of preparation of zinc super-slippy surface (b)^[45]; Preparation path of nano-super-slippy surface (c)^[46]; Schematic diagram of super-slippy fabric construction process (d)^[47]

XIE 等^[46]利用水热法在钛合金表面构建了三维网状、草状及线性的独特纳米结构表面，再将全氟聚醚（PFPE）润滑剂灌入到这些纳米结构中，获得具备持久防污性能超滑表面，可作为海洋防污材料

加以应用（图 9c）。GAO 等^[47]通过简便的水热法在棉织物表面制备了氧化锌纳米结构，然后对其进行氟化处理，获得具有粗糙形貌且富含氟酸盐的表面，该表面能够牢固地锁住润滑膜，形成抗酸、抗

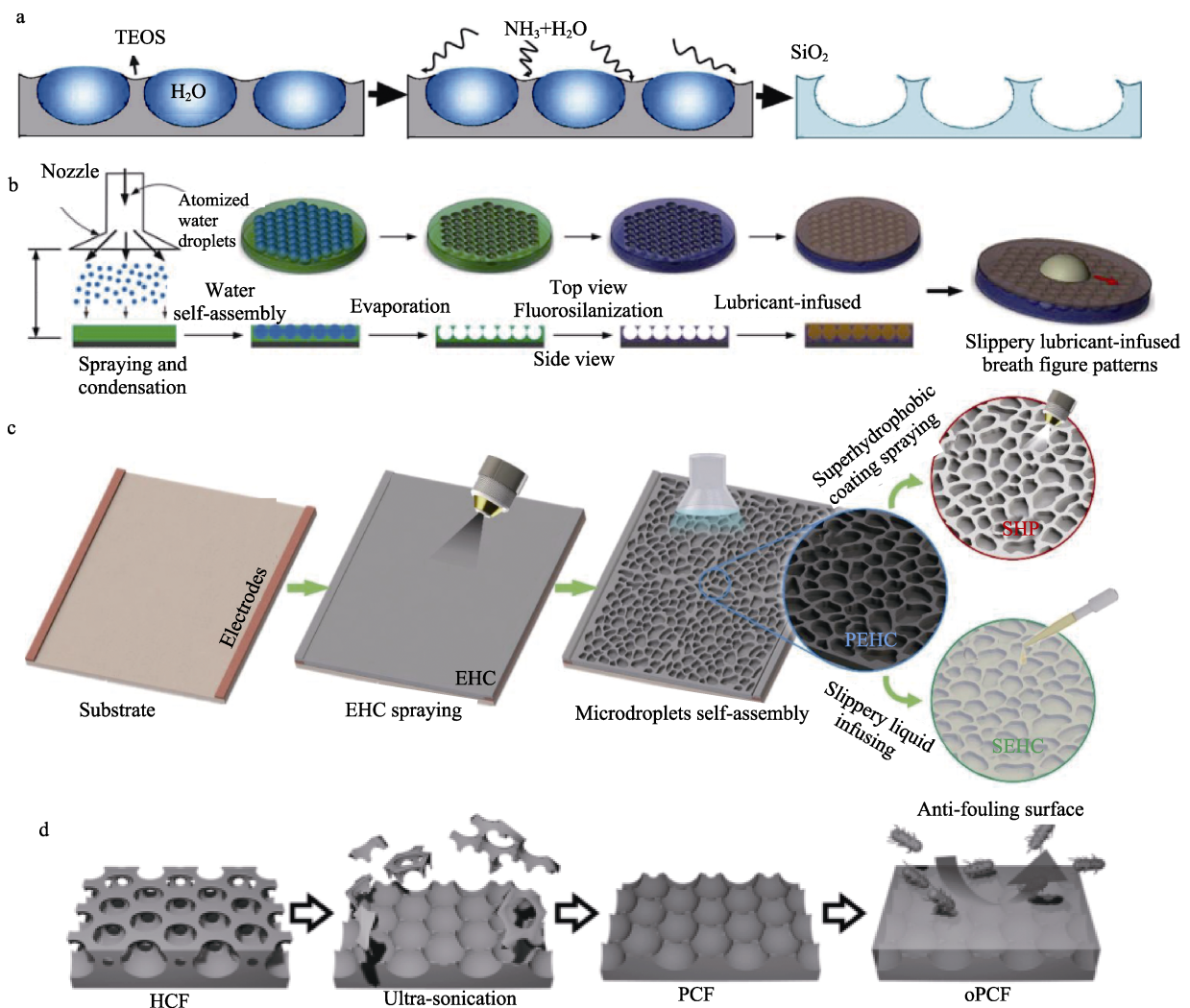
碱、耐盐以及拒油的超滑织物 (图 9d)。WANG 等^[48]采用简单的水热法,在不锈钢表面制备了尺寸可控的氧化钨纳米纤维网络薄层,再向其表面注入全氟油,直至表面完全被润滑油覆盖后构建出具备抗菌特性的超滑表面,其在医疗器械的表面改性方面具有潜在的应用价值。

3.4 呼吸图法

呼吸图法通过将目标聚合物溶于强挥发性溶剂中,形成聚合物溶液并涂敷成膜,溶剂在一定湿度下挥发而导致其周围环境温度下降,引发水滴在聚

合物液膜表面成核生长,待溶剂及水滴挥发后,进而形成具有多孔结构的聚合物表面以便进行后续润滑油灌注来构筑超滑表面^[49]。

XIAO 等^[50]以透明玻璃为基底,借助旋转作用使正硅酸四乙酯 (TEOS) 流体扩散在玻璃表面,然后将被 TEOS 覆盖的玻璃放入氨气和水蒸气环境中,通过呼吸图法以及水解作用不断形成具有互联结构的 SiO_2 , 并接枝长链有机分子实现疏水改性,再经油相润滑后制得能有效抑制生物污垢生长的超滑表面 (图 10a)。



EHC 为电热涂层; PEHC 为多孔电热涂层; SHP 为超疏水多孔电热涂层

图 10 互联结构 SiO_2 制备示意图 (a)^[50]; 基于呼吸图形的光滑表面形成示意图 (b)^[51]; 超滑多孔电热涂层的制备示意图 (c)^[52]; 防污超滑表面构建过程示意图 (d)^[53]

Fig. 10 Schematic diagram of preparation of interconnected structure SiO_2 (a)^[50]; Schematic diagram of smooth surface formation based on respiration pattern (b)^[51]; Schematic diagram of porous electroheated coating (c)^[52]; Schematic diagram of anti-fouling and super-slippy surface construction process (d)^[53]

ZHANG^[51]在玻璃基板上通过呼吸图法形成了具有相互连通孔隙的大面积呼吸图形,然后在其表面添加合适的润滑剂制备了光滑表面。呼吸图形模式 (BFPs) 中的孔隙能够将润滑剂液体固定在适当

的位置,进而构建具有高效自清洁性能的超滑复合表面 (图 10b)。LIU 等^[52]在 MWCNTs/聚合物基涂层上采用呼吸图法构筑了排列紧密的微孔,再向微孔中注入硅油,得到超滑多孔电加热涂层 (SEHC) (图

10c), 其有望应用于防冰领域。SHIMURA 等^[53]利用呼吸图法设计了一种超滑防污表面, 并通过胶带剥离和超声波去除蜂窝状薄膜 (HCF) 上层, 构制带有柱状阵列的针垫结构薄膜 (PCF), 向其灌注润滑油后得到 o-PCF (图 10d)。与 HCF 表面相比, PCF 具有更小的表面积以及更优的防污性能。乔燕芳等^[54]

以环形树脂为基底, 通过呼吸图法构筑了多孔结构, 利用聚二甲基硅氧烷对其进行改性处理并灌注二甲基硅油后制备了超滑涂层, 其可应用于防覆冰领域。

基于上述几种仿生超滑表面, 本文将主要制备策略的优缺点进行对比, 并对未来的发展方向进行了论述, 结果如表 1 所示。

表 1 仿生超滑表面制备策略总结
Table 1 Overview of preparation strategy of biomimetic super-slippery surfaces

| 制备策略 | 优势 | 局限性 | 未来的发展方向 | 参考文献 |
|--------|---------------------|------------------------|----------------------------------|---------|
| 湿法刻蚀 | 稳定性和耐腐蚀性较好 | 制备周期长, 可能会降低基底强度 | 与干法刻蚀或其他表面处理工艺相结合 | [30] |
| 电化学刻蚀 | 适应性强, 均匀性较好 | 所用化学物质有害环境 | 创新电化学基础理论和发展先进的研究方法 | [31] |
| 等离子刻蚀 | 良好的刻蚀选择性和较高的刻蚀速率 | 设备昂贵 | 刻蚀的均匀性有待进一步研究 | [32] |
| 溶胶-凝胶法 | 易于实施 | 部分反应时间耗时过长 | 结合溶剂热法等创新方法 | [39-43] |
| 水热法 | 产品物相均匀、纯度高、结晶良好、产率高 | 对生产设备的依赖性比较强 | 与其他方法的结合, 例如: 微波水热法、水热磨球法和水热沉淀法等 | [44-47] |
| 呼吸图法 | 简便、低成本、绿色清洁 | 对有机溶剂、聚合物的结构设计以及选择难度较高 | 对特定形貌的精细化控制 | [50-53] |

4 仿生超滑表面的多功能应用

仿生超滑表面因润滑油具有较低的表面能, 液滴不易在其表面附着浸润^[54-55], 该功能特性在油水分离、水雾收集、防腐蚀、液滴操控、防覆冰等领域展现出广阔的应用前景。在油水分离方面, 石油泄漏和液体工业废物排放会导致大量有毒化合物释放到大气环境中, 进而对全球生态系统构成明显威胁, 因此, 研究人员致力于探索出能够以经济、高效和环保的方式分离油和水的新策略。目前, 表界面技术的快速发展为油水分离提供了新的研究方向, 超滑材料表面的光滑液体会形成连续的润滑油层, 油对于油相会产生吸引力, 而对于水相则因互不相溶而表现为抵抗, 因此可截水运油进而实现油水分离。

在水雾收集方面, 水是生命之源, 但由于近百年来世界人口的急剧扩增、工业用水量的需求剧增和环境污染的进一步恶化, 使得世界各地呈现出不同程度的水资源危机。尤其在沙漠和基础设施有限的内陆地区, 缺水问题已经对人类的基本生存造成了极大的威胁。因此, 科研人员不断发展新兴的技术用以缓解水资源危机, 在这其中, 通过制备超滑表面以收集水滴的研究层出不穷^[56]。在空气氛围下, 超滑表面的润滑油变现为亲油拒水, 雾滴对于油相的接触角滞后小、拒水稳定性高, 微小的雾滴会轻易凝结并扩增成较大的液滴, 达到一定重量会因重力而掉落, 进而收集淡水。

在防腐蚀方面, 自然界中, 材料与外界介质接触发生物化反应会使材料破坏或性能下降, 这将会限制功能材料在各领域的应用, 因此, 通过表面处理技术提高功能材料的耐腐蚀性能, 延长其使用寿命具有重要的意义。目前, 常用的防腐策略是制备超疏水表面、合金化处理、阴极保护、添加缓蚀剂和涂层等^[57-58]。其中, 涂层工艺简单、成本低、施工方便, 是最有前景的技术。

然而, 绝大多数涂料具有毒性, 会对生态环境以及人体造成影响, 且容易老化, 甚至失去其防腐作用。因此, 发展可持续防腐涂料的意义非凡。近年来, 受猪笼草启发的超滑表面的低表面能物质避免了腐蚀液体与基底表面的直接接触, 保护基材免受外界液体的腐蚀, 已成为一种具有优异拒水性和低接触角滞回的新型防腐蚀涂层^[59-60]。

在液滴操控方面, 近年来, 基于猪笼草的特殊润湿结构, 科学家已制备了许多功能性超滑表面, 而将超滑表面与环境刺激响应性材料协同制备的材料可实现在外界刺激下对目标液滴动态操控, 这种精准控制液滴运输的智能润滑表面在生物芯片和微流控等领域的展现出巨大应用潜力, 因此引起了科研人员的广泛研究兴趣。目前, 科研人员已通过力、热、电、磁和光诱导等外界刺激来调控表面润滑油的形态, 当润滑油为液态时, 液滴可在其表面滑动; 当润滑油为固态时, 液滴则被固定以达到液滴操控的效果^[61-62]。

在防覆冰方面, 诸多基础设施的冷却系统中都

会遇到结冰的难题, 因此, 开发防结冰涂层在节能和安全方面具有重要意义。目前, 大多数研究都是开发超疏水表面, 但是在湿度大或者有雾条件下超疏水表面容易发生液滴冷凝, 使超疏水性能失效甚至会加剧结冰, 而超滑表面润滑油稳定均匀, 可降低冰在高湿度环境下的形核速率, 降低冰的附着力^[63]。

目前, 仿生超滑材料的应用领域越来越广泛, 但也面临一些挑战, 例如: 超滑涂层易于脱落, 为增强涂层的稳定性和耐久性, 可借助于环氧树脂、固化胶等黏合剂增强涂层与基底的结合力; 当超滑

表面在极端环境下遭到破坏时, 可通过环境刺激响应, 使温度达到聚合物的黏流温度, 引发聚合物共混来实现材料的自修复功能; 在长时间的水雾收集应用中, 粗糙基底所提供的毛细力不足以抵抗在水雾的剪切力, 这可能会导致润滑油的损耗, 因此, 可构筑微纳米粗糙基底或蜂窝状、沙漏状等结构比开孔结构更能有效地防止润滑油的流失, 以扩展其在各领域中的应用。

本文对近年来关于仿生超滑表面应用的相关文献进行了简要总结, 如表 2 所示。

表 2 仿生超滑表面应用总结
Table 2 Overview of application of biomimetic super-slippy surfaces

| 应用分类 | 产品名称 | 制备方法 | 应用效果 | 参考文献 |
|------|---|------------|---|------|
| 油水分离 | 超滑 PET 膜 (SLI-PET) | 涂层法 | 对硅油的分离效率可达 98.6% | [55] |
| | 相变超滑表面 (PTSLIPS) | 涂层法 | 对甲苯的分离效率可达 99.1% | [64] |
| | 超滑油水分离膜 (PILMs) | 一步法光聚合 | 对十二烷的分离效率高达 99.7% | [65] |
| 水雾收集 | 微/纳多级高稳定超滑表面 (MNS-SLIPS) | 呼吸图法 | 水雾收集效率可达 0.852 g/(cm ² ·h) | [66] |
| | 端氨基丙基聚二甲基硅氧烷 (GFs-150-PDMS-NH ₂) 凝胶膜 | 溶剂蒸发聚合 | 集水效率可达 1.78 g/(cm ² ·h) | [67] |
| | 可润湿性图案光滑表面 (WPSS) | 旋转涂层法 | 集水效率可达约 4.462 g/(cm ² ·h) | [68] |
| 防腐蚀 | 超滑表面 (SLIPS) | 线切割法 | 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中, SLIPS 具有良好的耐腐蚀稳定性和耐久性 | [69] |
| | 硬脂酸 (SA) 和聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 超滑涂层 (SLIP-SA 和 SLIP-PDMS) | 电化学刻蚀 | 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中具有较低的腐蚀电位值 (-0.17 和 -0.18 V) 及较低的腐蚀电流密度 (6.49×10 ⁻⁸ 和 5.61×10 ⁻⁸ A/cm ²) | [70] |
| | 固体光滑表面 (SSS) | 化学镀 | 腐蚀电流密度为 2.301×10 ⁷ Ω·cm ² | [71] |
| | ZnO-Pt-FAS 超滑膜 | 水热法 | 在无光照条件下, ZnO-Pt-FAS 膜上的石蜡处于固态, 液滴被固定在表面; 在光照条件下, 铂纳米颗粒将光转化为热, 快速诱导温度超过熔解温度, 石蜡熔化成液态, 液滴在该表面自由滑动, 实现对各种液滴滑动行为的智能控制 | [72] |
| 液滴操控 | 近红外响应光滑表面 (G/NPGS) | 相分离 | 近红外辐照下, 基板体中的硅油可以局部释放到目标表面, 形成润湿性图案表面, 通过冷却处理, 即可将其擦除; 移动近红外光源或材料, 便可在几秒钟内生成任意润湿模式和按需可编程的液滴滑动路径 | [73] |
| | 滑磁响应微柱阵列 (SMRMA) | 飞秒激光刻蚀 | 在磁场的作用下, 微柱阵列弯曲并诱导液滴在超滑表面移动 | [74] |
| 防覆冰 | 防冰/除冰固体光滑表面 | 电化学氧化和热分解法 | 在 -10 °C 下, 可使结冰时间延迟 343 s | [75] |
| | 超滑-超疏水可切换表面 | 超快激光技术 | 低冰黏附强度与高效的光热除冰性能 | [76] |
| | 超滑涂层 (SOIP) | 化学蚀刻与阳极氧化 | 与超疏水涂层相比, SOIP 的冰附强度较低, 为 (22±5) kPa。此外, 当温度降低到 -25 °C 时, SOIP 涂层仍保持较低的冰附强度 (35±15) kPa; 在经过 20 次结冰/除冰循环后仍表现出较低的冰黏附力 (108 kPa); 在环境中暴露 4 个月后依旧保持着稳定的防冰性 (55±13) kPa | [77] |

5 结束语与展望

近年来, 受猪笼草启发的仿生超滑表面由于其

独特的润湿结构备受学界关注。超滑表面优异的抗机械损伤特性、自修复性以及光学特性使其在油水分离、水雾收集、液滴操控、防覆冰等领域中均展

现出一定的研究价值及应用潜力,但同时也面临着机遇与挑战。

(1) 随着科研人员对于物质微观结构的探索,现如今,通过构筑微/纳多级粗糙基底来制备超滑表面仍然是研究热点,而聚焦于构筑方法来讲,制备的粗糙基底在遭遇强酸强碱、高温高压、紫外线照射时,其微观结构可能会遭到破坏,从而影响其功能特性,不利于后续的超滑表面构建。因此,探究更为稳定的构筑策略、或结合现有方法的优势来制备性能稳定的粗糙基底是推动超滑表面发展的关键。

(2) 绿色可持续发展一直以来是科学研究所要遵循的一贯宗旨。在针对粗糙基底的改性中所使用的长氟化或全氟化修饰剂会对环境及人体造成危害,故限制了超滑表面的规模化应用。因此,如何在避免使用污染性或危害性化学品的同时达到增强粗糙基底的疏液特性,依旧是研究人员所要重点考虑的问题。

(3) 润滑油的合理选择是超滑表面得以成功构建的重点,选择润滑油不仅要严格遵循固有的原则,同时在实验中还需综合考虑其体积、厚度、蒸汽压对性能的影响;另外,润滑油在循环使用期间会逐渐流失耗尽,对于不同的应用环境,润滑油还需具有耐酸碱性、耐高温、耐光照等性能,因此,耐用型润滑油的复配或合成对超滑表面的稳定构筑仍是一项需针对性攻关的技术瓶颈,设计新结构来赋予润滑油自修复功能,在不同极端环境下仍能保持超滑表面本征的功能特性,有效延长其服役寿命是仿生超滑表面的规模化发展的关键;另外,常用的氟醚、硅油、矿物油等润滑油会对环境造成一定的污染,环境友好的润滑油,如植物油,其暴露于空气中会发生氧化,稳定性较差。因此,如何在保证润滑油稳定性的同时避免对环境及人体造成危害仍是一项亟待解决的问题。

(4) 为满足不同行业对超滑表面多功能及智能化的需求,超滑表面的功能与智能特性相结合的研究逐渐成为当今超滑材料的开发趋势,例如:在环境刺激响应下实现液滴操控。而对于油水分离、水雾收集等其他应用来说,同样可以赋予其智能响应特征,使其在温度、光热、磁场、电、pH 等环境因素刺激下迅速作出反馈行为,从而在基础科学与工程领域显现前景广阔的应用潜力。

参考文献:

- FENG L, LI S H, LI Y S. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial[J]. *Advanced Materials*, 2002, 4(24): 1857-1860.
- NISHIMURA R, HYODO K, SAWAGUCHI H. Fractal surfaces of molecular crystals mimicking lotus leaf with phototunable double roughness structures[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(32): 10299-10303.
- JIANG H B, ZHANG Y L, LIU Y M, *et al.* Bioinspired few-layer graphene prepared by chemical vapor deposition on femtosecond laser-structured Cu foil[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(3): 441-450.
- ZHU W C (朱文澄), GUI X F (桂雪峰), LI Z H (李志华), *et al.* Construction of PE-based polysiloxane/modified SiO₂ superhydrophobic film[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2021, 38(10): 2050-2056.
- TAYLOR N, MA W L, KRISTOPEIT A, *et al.* Evaluating nanoparticle hydrophobicity using analytical membrane hydrophobic interaction chromatography[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(24): 8668-8673.
- SAJI V S. Recent progress in superhydrophobic and superamphiphobic coatings for magnesium and its alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(3): 748-778.
- CUI X, LIU J, XIE L. Modulation of hydrophobic interaction by mediating surface nanoscale structure and chemistry, not monotonically by hydrophobicity[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(37): 11903-11908.
- LI J S, UEDA E, PAULSEN D, *et al.* Slippery lubricant-infused surfaces: Properties and emerging applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 19(4): 1802317.
- WONG T S, KANG S H, TANG S K, *et al.* Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, 477(7365): 443-447.
- DONG Z Q, SCHUMANN M F, HOKKANEN M J, *et al.* Superoleophobic slippery lubricant-infused surfaces: Combining two extremes in the same surface[J]. *Advanced Materials*, 2018, 38(45): 1803890.
- LEI W X, BRUCHMAN J, RUPING J L, *et al.* Biofilm bridges forming structural networks on patterned lubricant-infused surfaces[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(43): 1900519.
- MAEDA Y, LV F Y, ZHANG P, *et al.* Condensate droplet size distribution and heat transfer on hierarchical slippery lubricant infused porous surfaces[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115386.
- GENG H Y, CHO S K. Antifouling digital microfluidics using lubricant infused porous film[J]. *Lab on a Chip*, 2019, 19(13): 2275-2283.
- SADULLAH M S, PANTER J R, KUSUMAATMAJA H, *et al.* Factors controlling the pinning force of liquid droplets on liquid infused surfaces[J]. *Soft Matter*, 2020, 16(35): 8114-8121.
- PEPPOU-CHAPMAN S, HONG J K, WATERHOUSE A, *et al.* Life and death of liquid-infused surfaces: A review on the choice, analysis and fate of the infused liquid layer[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 40(11): 3688-3715.
- SMITH J D, DHIMAN R, ANAND S, *et al.* Droplet mobility on lubricant-impregnated surfaces[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(6): 1772-1780.
- SADULLAH M S, LAUNAY G, PARLE J, *et al.* Bidirectional motion of droplets on gradient liquid infused surfaces[J]. *Communications Physics*, 2020, 3(1): 166.
- YUAN S C, ZHANG X G, LIN D, *et al.* A novel slippery surface with enhanced stability and corrosion resistance[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 142: 105563.
- CHENG Y, YANG Q, LU Y, *et al.* A femtosecond laser for preparing a nontoxic slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) for improving the hemocompatibility of NiTi alloys[J]. *Biomaterials Science*, 2020, 8(23): 6505-6514.
- HANG T, CHEN H J, YANG C D, *et al.* Slippery surface based on lubricant infused hierarchical silicon nanowire film[J]. *RSC Advances*, 2018, 7(88): 55812-55818.
- GAO X Y, GUO Z G. Mechanical stability, corrosion resistance of superhydrophobic steel and repairable durability of its slippery

- surface[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 512: 239-248.
- [22] BARTH WAL S, LEE B, LIM S H. Fabrication of robust and durable slippery anti-icing coating on textured superhydrophobic aluminum surfaces with infused silicone oil[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 496: 143677.
- [23] ZHANG B G, ZHANG Y X, MA S R, *et al.* Slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) with super-repellent and contact-killing antimicrobial performances[J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2022, 220: 112878.
- [24] HE X D, QIANG W B, DU C, *et al.* Modification of lubricant infused porous surface for low-voltage reversible electrowetting[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(36): 19159-19167.
- [25] YAN Y X, WANG J H, GAO J, *et al.* TiO₂-based slippery liquid-infused porous surfaces with excellent ice-phobic performance[J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 654: 129994.
- [26] HAO L W, JIANG R J, GAO J, *et al.* Metal-organic framework (MOF)-based slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) for purely physical antibacterial applications[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 27: 101430.
- [27] WARE C S, SMITH-PALMER T, PEPOU-CHAPMAN S, *et al.* Marine antifouling behavior of lubricant-infused nanowrinkled polymeric surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(4): 4173-4182.
- [28] YUAN J H, GU Q S, ZHENG G Z, *et al.* Novel environment-friendly grease-infused porous surface exhibiting long-term cycle effective antifouling performance[J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 627: 127196.
- [29] LIAO J X (廖俊旭), LU H (鲁浩), DAI K X (戴康徐), *et al.* Synthesis, characterization and lubricating properties of green nitrogen-containing multifunctional lubricant additive[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2018, 35(8): 1414-1420.
- [30] JAIN R, PITCHUMANI R. Fractal model for wettability of rough surfaces[J]. *Langmuir*, 2017, 33(28): 7181-7190.
- [31] ZHAO Y Z, KONG X, SHEARER M J. Chemical etching of screw dislocated transition metal dichalcogenides[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(18): 7815-7822.
- [32] JIANG X L, WU L X, YANG K, *et al.* Kinetic etch front instability responsible for roughness formation in plasma etching[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 543: 148862.
- [33] LUO H, YIN S H, HUANG S. Fabrication of slippery Zn surface with improved water-impellent, condensation and anti-icing properties[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 470: 1139-1147.
- [34] WANG Y L, DU X, WANG X, *et al.* Patterned liquid-infused nanocoating integrating a sensitive bacterial sensing ability to an antibacterial surface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(20): 23129-23138.
- [35] STODDARD R, NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R, *et al.* Fabrication and durability characterization of superhydrophobic and lubricant-infused surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 608: 662-672.
- [36] 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: 25924.
- [37] LIANG J, SHAN C, WANG H, *et al.* Patterned liquid-infused nanocoating integrating a sensitive bacterial sensing ability to an antibacterial surface[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(10): 2200708.
- [38] SONG J C, LIU M Y, SUN X X, *et al.* Antifouling and anticorrosion behaviors of modified heat transfer surfaces with coatings in simulated hot-dry-rock geothermal water[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 740-759.
- [39] LI R S, ZHAO L Z, YAO A F, *et al.* Design of lubricant-infused surfaces based on mussel-inspired nanosilica coatings: Solving adhesion by pre-adhesion[J]. *Langmuir*, 2021, 37(36): 10708-10719.
- [40] HE X Y, TIAN F, BAI X Q, *et al.* Biomimetic lubricant-infused titania nanoparticle surfaces via layer-by-layer deposition to control biofouling[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 515: 146064.
- [41] ZHAO H Y, KHODAKARAMI S, DESHPANDE C A, *et al.* Scalable slippery omniphobic covalently attached liquid coatings for flow fouling reduction[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(32): 38666-38679.
- [42] HE X Y, LOU T, YANG Z C, *et al.* Lubricant-infused titania surfaces with high underwater transparency for antifouling applications: A combined experimental and molecular dynamics study[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 543: 148848.
- [43] WEI C Q, ZHANG G F, ZHANG Q H, *et al.* Silicone oil-infused slippery surfaces based on sol-gel process-induced nanocomposite coatings: A facile approach to high stable bioinspired surface for biofouling-resistance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(50): 34810-34819.
- [44] ZHANG M L, LIU Q, CHEN R R, *et al.* Lubricant-infused coating by double-layer ZnO on aluminium and its anti-corrosion performance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 730-737.
- [45] FAN H F, GUO Z G. Robust multi-functional slippery surface with hollow ZnO nanotube structures[J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(36): 15483-15491.
- [46] XIE M Y, WANG Y J, ZHAO W J, *et al.* Design novel three-dimensional network nanostructure for lubricant infused on titanium alloys towards long-term anti-fouling[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 197: 111375.
- [47] GAO X Y, WEN G, GUO Z G, *et al.* Superhydrophobic and slippery cotton fabrics with robust nanolayers for stable wettability, anti-fouling and anti-icing properties[J]. *New Journal of Chemistry*, 2019, 43(42): 16656-16663.
- [48] WANG C X, YA Y X, DU D M, *et al.* WO₃-based slippery liquid infused porous surfaces with long term stability[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020, 12(26): 29767-29777.
- [49] ASHLEY M, BAXTER L R, JORDAN M K, *et al.* Tubulation of supported lipid bilayer membranes induced by photosensitized lipid oxidation[J]. *Langmuir*, 2021, 37(19): 6016-6021.
- [50] XIAO Y M, ZHAO J, QIU R, *et al.* Slippery liquid-infused surface from three-dimensional interconnecting netstructure via breath figure approach and its usage for biofouling inhibition[J]. *Progress in Organic Coating*, 2018, 123: 47-52.
- [51] ZHANG P F, CHEN H W, ZHANG L W, *et al.* Transparent self-cleaning lubricant-infused surfaces made with large-area breath figure patterns[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355: 1083-1090.
- [52] LIU X L, CHEN H W, ZHAO Z H. Slippery liquid-infused porous electric heating coating for anti-icing and de-icing applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 889-896.
- [53] SHIMURA R, ABE H, YABU H, *et al.* Biomimetic antibiofouling oil infused honeycomb films fabricated using breath figures[J]. *Polymer Journal*, 2021, 53(6): 713-717.
- [54] QIAO Y F (乔燕芳), WANG L Q (王利强). Preparation and properties of oriented anti-adhesion lubricating coating[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2019, 36(10): 2023-2027.
- [55] ZHAO S R (赵书瑞), SHEN T (申婷), LI Y T (李玉堂). Epoxy-resin-based slippery liquid infused anti-icing coating based on breath figure[J]. *Acta Polymerica Sinica (高分子学报)*, 2021, 52(12): 1622-1631.
- [56] ZHAO L Z, LI R S, XU R, *et al.* Antifouling slippery liquid-infused membrane for separation of water-in-oil emulsions[J]. *Journal of*

- Membrane Science, 2020, 611: 118289.
- [57] WANG F, LUO S H, XIAO S B, *et al.* Enabling phase transition of infused lubricant in porous structure for exceptional oil/water separation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 390: 122176.
- [58] DENG X, ZHANG J S, ZHANG L R, *et al.* Poly(ionic liquid)s coated meshes with opposite wettability for continuous oil/water separation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(14): 6672-6680.
- [59] YUE H, ZENG Q H, HUANG J X, *et al.* Fog collection behavior of bionic surface and large fog collector: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 8(20): 2100691.
- [60] FENG R, XU C, SONG F, *et al.* A bioinspired slippery surface with stable lubricant impregnation for efficient water harvesting[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 300: 102583.
- [61] CHEN Y, LIU W M, HUANG J X, *et al.* Lubricant self-replenishing slippery surface with prolonged service life for fog harvesting[J]. Friction, 2021, 10(10): 1676-1692.
- [62] LYU P, ZHANG X Y, PENG M Y, *et al.* Multibioinspired wettable patterned slippery surface for efficient water harvesting[J]. Advanced Materials Interfaces, 2021, 8(20): 2100691.
- [63] KUMERIA T. Advances on porous nanomaterials for biomedical application drug delivery, sensing, and tissue engineering[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2022, 8(10): 4025-4027.
- [64] KHAMMAS R, KOIVULUOTO H. Durable icephobic slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) using flame-and cold-spraying[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8422.
- [65] AMINI S, KOLLE S, PETRONE L, *et al.* Preventing mussel adhesion using lubricant-infused materials[J]. Science, 2017, 357(6352): 668.
- [66] HONG J K, RUHOFF A M, MATHUR K, *et al.* Mechanisms for reduced fibrin clot formation on liquid-infused surfaces[J]. Advanced Healthcare Materials, 2022, 11(21): 2201360.
- [67] GOU X L, GUO Z G. Reed leaf-inspired anisotropic slippery lubricant-infused surface for water collection and bubble transportation[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 411: 128495.
- [68] YU P, LIAN Z X, XU J K, *et al.* Slippery liquid infused porous surfaces with corrosion resistance potential on aluminum alloy[J]. RSC Advances, 2021, 11(2): 847-855.
- [69] XIANG T F, REN H W, ZHANG Y L, *et al.* Rational design of PDMS/paraffin infused surface with enhanced corrosion resistance and interface erosion mechanism[J]. Materials & Design, 2022, 215: 110450.
- [70] DING Z C, CHEN C Y, YU Y L, *et al.* Synthetic strategies to enhance the long-term stability of polymer brush coatings[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2022, 10(14): 2430-2443.
- [71] HE X Y, CAO P, TIAN F, *et al.* Infused configurations induced by structures influence stability and antifouling performance of biomimetic lubricant-infused surfaces[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 358: 59-166.
- [72] HAN K Y, WANG Z B, HENG L P, *et al.* Photothermal slippery surfaces towards spatial droplet manipulation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(31): 16974-16981.
- [73] RAO Q Q, TONG Z M, SONG L N, *et al.* NIR-driven fast construction of patterned-wettability on slippery lubricant infused surface for droplet manipulation[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 428: 131141.
- [74] PENG Y, LI C, JIAO Y, *et al.* Active droplet transport induced by moving meniscus on a slippery magnetic responsive micropillar array[J]. Langmuir, 2023, 39(16): 5901-5910.
- [75] LI Q, WU D H, GUO Z G, *et al.* Drop/bubble transportation and controllable manipulation on patterned slippery lubricant infused surfaces with tunable wettability[J]. Soft Matter, 2019, 15(14): 6803-6810.
- [76] XIANG T, CHEN X, LV Z, *et al.* Stable photothermal solid slippery surface with enhanced anti-icing and de-icing properties[J]. Applied Surface Science, 2023, 624: 157178.
- [77] WANG L, TIAN Z, ZHU D, *et al.* Environmentally adapted slippery-superhydrophobic switchable interfaces for anti-icing[J]. Applied Surface Science, 2023, 626: 157201.

(上接第 48 页)

- [79] WU L, WANG C C, CHU H Y, *et al.* Bisphenol A cleanup over MIL-100(Fe)/CoS composites: Pivotal role of Fe—S bond in regenerating Fe²⁺ ions for boosted degradation performance[J]. Chemosphere, 2021, 280: 130659.
- [80] GUILLEN S G, PARRÉS-GOLD J, RUIZ A, *et al.* pH-responsive metal-organic framework thin film for drug delivery[J]. Langmuir, 2022, 38: 16014-16023.
- [81] SO P B, CHEN H T, LIN C H. De novo synthesis and particle size control of iron metal organic framework for diclofenac drug delivery[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 309: 110495.
- [82] LAJEVARDI A, HOSSAINI S M, BADIEI A, *et al.* Synthesis and characterization of Fe₃O₄@SiO₂@MIL-100(Fe) nanocomposite: A nanocarrier for loading and release of celecoxib[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 307: 112996.
- [83] BARJASTEH M, VOSSOUGH M, BAGHERZADEH M, *et al.* MIL-100(Fe) a potent adsorbent of dacarbazine: Experimental and molecular docking simulation[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 138987.
- [84] CAO Y Y, GUO X F, WANG H. High sensitive luminescence metal-organic framework sensor for hydrogen sulfide in aqueous solution: A trial of novel turn-on mechanism[J]. Sensors and Actuators B, 2017, 243: 8-13.
- [85] LIU C, SHEN D, TU Z, *et al.* Improved room-temperature hydrogen storage performance of lithium-doped MIL-100(Fe)/graphene oxide (GO) composite[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47: 5393-5402.
- [86] UTHAPPA U T, SRIRAM G, ARVIND O R, *et al.* Engineering MIL-100(Fe) on 3D porous natural diatoms as a versatile high performing platform for controlled isoniazid drug release, Fenton's catalysis for malachite green dye degradation and environmental adsorbents for Pb²⁺ removal and dyes[J]. Applied Surface Science, 2020, 528: 146974.
- [87] WANG D, JING Z, WANG Y, *et al.* The novel magnetic adsorbent derived from MIL-100(Fe) loading with bimetallic Cu and Mn oxides for efficient Hg⁰ removal from flue gas[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134384.
- [88] SHI K X, QIU F, WANG P, *et al.* Magnetic MgFe₂O₄/MIL-88A catalyst for photo-Fenton sulfamethoxazole decomposition under visible light[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 301: 121965.
- [89] ASLAM S, SUBHAN F, LIU Z, *et al.* Magnetic Fe₃O₄@MIL-100(Fe) core-shells decorated with gold nanoparticles for enhanced catalytic reduction of 4-nitrophenol and degradation of azo dye[J]. Colloids and Surfaces A, 2023, 660: 130904.
- [90] LE Z, XUE J, WANG B, *et al.* MIL-100(Fe)/g-C₃N₄ composites with enhanced photocatalytic activity for UO₂²⁺ reduction under visible light[J]. Photochemical and Photobiological Sciences, 2023, 22: 59-71.