

## 综述

## PDMS 仿生表面及其在防护领域的应用进展

张徐靖, 韩惠聪, 匡卫\*, 田荟琳, 王鑫

[齐鲁工业大学(山东省科学院)轻工学部、生物基材料与绿色造纸国家重点实验室, 山东 济南 250353]

**摘要:**近年来,生物启发的仿生功能表面设计与制备已经成为一个重要且引人注目的研究领域,在日常生活、工业及农业等领域具有广泛的应用。聚二甲基硅氧烷(PDMS)由于其高柔顺性、低表面能和化学稳定性,在仿生表面功能改性方面得到了广泛认可。该文综述了PDMS微纳粗糙型仿生表面和光滑型仿生表面的制备与性能调控方法及其在防腐、防冰、防生物污染和光学设备领域的防护应用进展。对比了不同类型的PDMS仿生表面制备方法的优缺点。阐述了表面性能的调控策略,并对其存在问题和发展趋势进行了总结和展望。

**关键词:**聚二甲基硅氧烷; 仿生表面; 防腐; 防冰; 防生物污染

**中图分类号:** TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2024) 03-0558-14

## Bionic surfaces of PDMS and their application in the field of protection

ZHANG Xujing, HAN Huicong, KUANG Wei\*, TIAN Huilin, WANG Xin

[Faculty of Light Industry, State Key Laboratory of Biobased Material and Green Papermaking, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, Shandong, China]

**Abstract:** The design and fabrication of bio-inspired bionic functional surfaces has become an important and fascinating research topic with a wide range of applications in daily life, industry and agriculture in recent years. Polydimethylsiloxane (PDMS) has been widely used for bionic surface modification due to its high flexibility, low surface energy and chemical stability. Herein, the preparation and performance control methods of PDMS with micro-nano rough and smooth biomimetic surfaces were reviewed, followed by introduction on their application fields and the application progress in the fields of anti-corrosion, anti-icing, anti-biofouling and optical protection. The advantages and disadvantages of preparation methods for different PDMS bionic surfaces were compared, and the control strategy of surface properties was described. Finally, the existing problems and future development directions were summarized and discussed.

**Key words:** polydimethylsiloxane; bionic surfaces; anti-corrosion; anti-icing; anti-biofouling

冰霜、腐蚀性物质和微生物等在设备表面上的沉积通常会降低其使用性能。例如:冰的积聚可能会造成电缆、道路、桥梁、飞机事故和其他危险的产生;腐蚀性物质会极大地缩短金属设备的使用寿命,造成经济损失并威胁工业安全;而微生物的侵蚀则会导致航海设备和生物医用设备失灵,对国家安全和人民健康产生重要影响<sup>[1-3]</sup>。为了解决上述问题,在过去的几十年里,人们从仿生角度开发了具有防污、防腐、防冰、自清洁和防生物污染等功能表面,并在防护领域得到了广泛应用<sup>[4-11]</sup>。

随着人们环保意识的提高,研究人员近年来倾向于使用非氟化合物〔如聚二甲基硅氧烷(PDMS)等〕来构建仿生功能表面<sup>[12]</sup>。在PDMS链段中,硅原子和氧原子电负性差异(O电负性3.5;Si电负性1.8)及其原子p轨道与d轨道的相互作用,导致了Si—O键和Si—C键的长度( $1.63 \times 10^{-10}$ 和 $1.90 \times 10^{-10}$  m)明显长于C—C键( $1.53 \times 10^{-10}$  m)。同时, Si—O—Si键角(143°)远远大于C—C—C键角(109°)。这些特性使单个硅原子上的甲基和对甲基彼此分离,同时具有很高的旋转自由度,PDMS

收稿日期: 2023-03-26; 定用日期: 2023-06-28; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230235

基金项目: 齐鲁工业大学(山东省科学院)揭榜制项目(2022JBZ01-05)

作者简介: 张徐靖(1997—),男,硕士生, E-mail: a18340083012@163.com。联系人: 匡卫(1979—),男,副教授, E-mail: kkwei@qlu.edu.cn。

的主链被甲基基团屏蔽, 聚合物链不能紧密聚集在一起, 表现出链段的高灵活性、高柔顺性, 同时降低了外部液体分子与表面分子间的范德华力<sup>[13-14]</sup>。因此, 硅氧烷主链的柔韧性允许分子链轻松重新排列, 从而产生多样的化学性质<sup>[15]</sup>。此外, 还可以通过模板法和光刻法等方法在 PDMS 弹性体表面上构建具有高稳定性的多尺度结构<sup>[16-17]</sup>。鉴于 PDMS 本身固有的低表面能性和 PDMS 弹性体简单的固化施工条件, 其在构筑仿生功能表面具有很强的竞争力。

本文首先将基于 PDMS 的仿生表面分为微纳粗糙型仿生表面和光滑型仿生表面; 其次重点介绍了不同仿生功能表面的制备方法和应用领域; 最后对其发展趋势进行了展望。

## 1 PDMS 微纳粗糙型仿生表面的制备方法

自然界中很多生物因具有独特的表面结构而展现出特殊的功能性。例如: 荷叶表面由具有微米乳突结构的表皮细胞构成, 其乳突的平均直径为 5~

15  $\mu\text{m}$ , 高为 1~20  $\mu\text{m}$ , 并且荷叶表面细胞外层覆盖了一层直径为 50~70 nm 的蜡晶, 在微米和纳米双尺度粗糙结构影响下, 荷叶具有超疏水特性, 水在荷叶表面的接触角 $>150^\circ$ , 滚动角 $<5^\circ$ , 从而实现了“出淤泥而不染”(图 1a)<sup>[18]</sup>。在红玫瑰的花瓣表面同样存在着层叠的微乳头和纳米褶皱的微纳结构, 为超疏水性提供了足够的粗糙度(图 1b)<sup>[19]</sup>。水稻叶片上的乳突在叶缘的平行方向呈准一维排列, 但在叶缘的垂直方向则是随机排列的, 呈现出各向同性润湿性(图 1c)<sup>[20]</sup>。同样, 在动物表面也具有类似的结构特点, 如鱼鳞表面的微纳尺度粗糙结构形成的油/水/固的复合界面, 可以实现截留水的功能, 可有效防止油滴渗透到膜表面, 从而产生超疏油性(图 1d)<sup>[21]</sup>。

近年来, 通过对动植物表面粗糙结构的模拟, 研究人员提出了许多构建 PDMS 及其功能性仿生表面的方法, 包括喷涂法、模板法、激光刻蚀法和气相沉积法等。

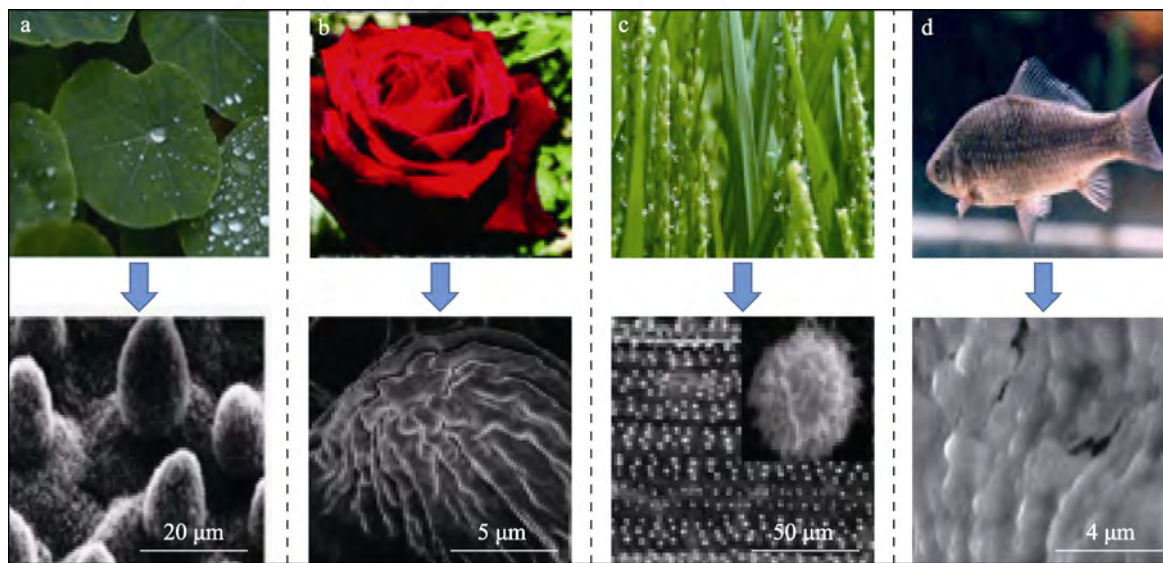


图 1 典型的具有微纳结构动植物及其表面结构: 荷叶及其表面微乳头结构(a)<sup>[18]</sup>; 玫瑰花瓣及其表面微乳头和纳米褶皱结构(b)<sup>[19]</sup>; 水稻叶及其表面准一维排列乳突结构(c)<sup>[20]</sup>; 鱼鳞及其表面微纳尺度结构(d)<sup>[21]</sup>

Fig. 1 Typical plants and animals with micro and nano structures and their surface structures: Lotus leaf and its surface micropapillary structure (a)<sup>[18]</sup>; Rose petal and its surface micro-papillae and nano-pleated structures (b)<sup>[19]</sup>; Pseudo-one-dimensional aligned papillae structures on rice leaves (c)<sup>[20]</sup>; Fish scale and its surface micro and nano scale structure (d)<sup>[21]</sup>

### 1.1 喷涂法

喷涂法是目前在绘画、印刷和工业涂料领域应用最成熟的方法之一, 可以实现大规模生产, 并适用于各种基材<sup>[22-23]</sup>。在此方法中, 最常使用的是利用纳米颗粒的自组装来实现粗糙表面的构筑。在喷涂 PDMS 之前, 可以将纳米颗粒引入到基材表面或将其分散在含有 PDMS 的溶液中进行喷涂<sup>[24-25]</sup>, ELZAABALAWY 等<sup>[26]</sup>研究发现, 纳米颗粒在溶剂

蒸发过程中能自发地进行自组装。如图 2a 所示, MA 等<sup>[27]</sup>报道了碳纳米管(CNT)嵌入式 PDMS 仿生表面的制备过程, 并研究了其表面润湿行为。首先, 将 CNT 和 PDMS 加入水中并剧烈搅拌, 用发泡剂〔十二烷基硫酸钠(SDS)〕和稳定剂(1-十二醇)制备 CNT/PDMS 泡沫匀浆; 然后, 用喷枪将匀浆喷洒在滤纸上, 得到了具有多层粗糙结构的自清洁导电仿生表面, 最大接触角为  $156.33^\circ$ 。此外,

SHEN 等<sup>[28]</sup>通过在预固化的 PDMS 表面喷涂氟化二氧化硅 ( $\text{F-SiO}_2$ ) 的 PDMS 溶液, 经加热固化制备了具有良好耐腐蚀性能的仿生表面, 微纳结构形成的空气层可以提供卓越的物理屏障和防护作用。此外, 利用相分离策略来构建粗糙表面, 可以简化工艺, 减少纳米粒子的使用。由于 PDMS 的表面能很低, 其与相对极性的聚合物〔如聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)〕的兼容性较差, 因此可利用相分离策略来构建粗糙表面以简化工艺, 减少纳米颗粒的使用。例如: LIU 等<sup>[29]</sup>首先将质量比为 1:1 的 PDMS 和 PMMA 溶解在四氢呋喃 (THF) 中; 然后将混合溶液喷洒在海绵、织物和纸张上, 制备了超疏水仿生表面 (SHS)。该体系在 THF 蒸发过程中自发地发生了相分离, 产生了微尺度的凹凸结构, 从而赋予基材优异的表面润湿性。

虽然喷涂法可以很好地大规模和低成本地构建多种层次结构的仿生表面, 但其表面形态的精确控制仍具有极大的挑战。此外, 喷涂法通常需要借助挥发性有机溶剂, 出于环保的要求, 其工业化应用过程受到了诸多限制。因此, 发展精细化、无毒化的仿生表面喷涂工艺将是未来重要的研究方向。

## 1.2 模板法

模板法是通过挤压或浇筑的方式来实现对模板微观结构的复制, 从而在基材表面引入微纳粗糙结构, 然后对微纳结构进行疏水基团修饰以获得特殊润湿性表面<sup>[30]</sup>。其主要优点是可以制备出与模板表面微观结构和润湿性一致的自清洁表面, 但此方法对基体的几何形状和材料性能要求较高<sup>[31]</sup>。最初的模板法是直接以天然生物表面为模板, 通过 PDMS 沉积固化以复刻微纳结构, 实现特殊润湿性表面的复制构建<sup>[32-33]</sup>。

随着现代科技的发展, 激光刻蚀已广泛用于精确、大规模生产仿生表面的模板<sup>[34]</sup>。如图 2b 所示, WANG 等<sup>[35]</sup>通过改变激光刻蚀距离制备了不同润湿性的 6061 铝合金管模板, 以 PDMS 为复制品, 进一步在柔性管上制备了仿生表面, 水和血液的接触角分别达到  $162.8^\circ$  和  $152.1^\circ$ , 在生物医学设备领域展现出广阔的应用前景。另外, 化学刻蚀技术也可用于模板法规模制备 PDMS 微纳粗糙型仿生表面。XU 等<sup>[36]</sup>首先探究了化学刻蚀液浓度和刻蚀时间对镍模板刻蚀结构的影响, 随后通过典型的卷对卷热固化工艺, 利用带有微米级金字塔阵列的模板在 PDMS 上制备了具有超疏水性的大面积微纳结构仿生表面。值得注意的是, 在某些情况下, 化学刻蚀会产生一层约  $100\text{ }\mu\text{m}$  厚的分级微米结构, 使制备的表面很难在不损坏的情况下从模板上剥离<sup>[37]</sup>。针对这一问题, HOSHIAN 等<sup>[38]</sup>通过原子层沉积 (ALD)

在铝模板上沉积了保护性的  $\text{TiO}_2$  层, 然后通过酸溶模板法将沉积的  $\text{TiO}_2$  转移到 PDMS 弹性体上, 实现了超疏水仿生表面的制备。

模板法具有制备简单、形貌可控等优点, 可以有效地制备 PDMS 仿生表面。目前, 其向大规模连续生产制备的方向发展。但模板的使用次数受到限制, 加工成本大, 性能的可靠性并不稳定。降低生产成本、提高模板精度和表面微结构的机械稳定性将是未来的工作重点之一。

## 1.3 激光刻蚀法

激光刻蚀法几乎可以对任何基材进行刻蚀加工, 通过直写处理就可在基材表面构建各种微纳结构<sup>[39]</sup>。目前, 基于激光直写技术, 在 PDMS 弹性体表面构建粗糙结构来实现超疏水性的制备方式已得到广泛研究<sup>[40]</sup>。例如: LIU 等<sup>[41]</sup>通过  $\text{CO}_2$  激光在 CNT/PDMS 导电弹性体上刻蚀了不规则的凸结构, 通过调整激光扫描间隔、扫描速率和功率, 成功制备了高稳定性的超疏水导电仿生表面。FANG 等<sup>[42]</sup>报道了一种稻叶和蝴蝶翅膀启发的三向各向异性滑动的仿生表面 (图 2c)。首先, 通过选择性的飞秒激光烧蚀法构建了一个微槽阵列结构 (MGA) 的 PDMS 表面。然后, 在微凹槽中引入类似台阶 (SLS) 的结构, 实现了三向各向异性的滑动超疏水性。该仿生表面在智能微流控系统中具有巨大的应用潜力。其中, 在加工操作 I 中,  $L$  为每个激光照射区域的宽度,  $l$  为每个激光烧蚀区域的间隔。调整  $L$  以调整各向异性, 并将  $L$  固定 (MGA 为  $60\text{ }\mu\text{m}$ , SLS-in-MGA 为  $100\text{ }\mu\text{m}$ )。在不同高度的 MGA 的制作过程中 (II 和 III),  $L_1$  ( $300\text{ }\mu\text{m}$ ) 保持不变, 通过调整飞秒激光烧蚀的扫描数来控制微槽的高度。为了在 MGA 中引入“台阶”结构 ( $L_1=300\text{ }\mu\text{m}$ ), 在第二次烧蚀过程中, 使  $L_2=L_1-100$  (IV); 在第三次烧蚀过程中将使  $L_3=L_2-100$  (V)。

最近, 通过激光刻蚀在 PDMS/形状记忆聚合物 (SMP) 的弹性体上构筑智能响应表面引起了广大科技工作者的研究兴趣<sup>[43]</sup>。JIANG 等<sup>[44]</sup>首先使用飞秒激光直写策略在 SMP 薄膜上创建一个规则的矩形孔阵列, 然后将液体 PDMS 和羰基铁粉的混合物浇注在 SMP 模具上并进行加热固化, 成功获得了具有磁响应特性的高长径比 PDMS 微板阵列, 其具有的 Janus 润湿特性可以通过外部磁场驱动进行可逆切换。

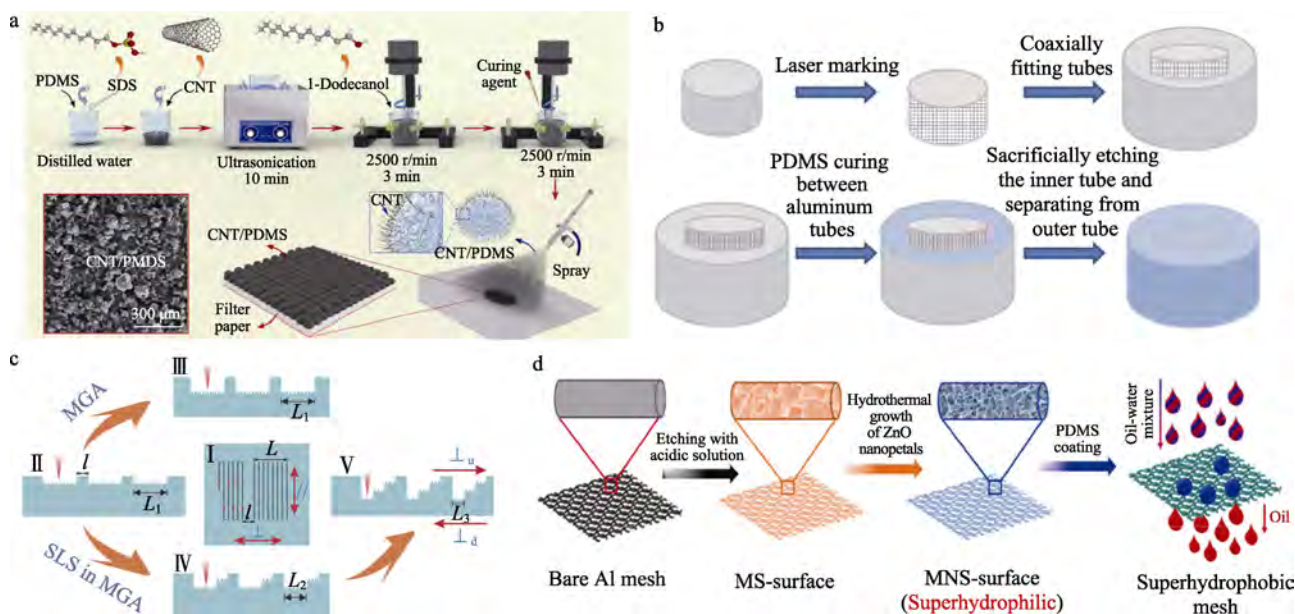
此外, PDMS 的表面自由能可以通过氧等离子体辐射将  $\text{Si-CH}_3$  基团转变成亲水性硅醇自由基, 可实现不同润湿性表面的转换。YONG 等<sup>[45]</sup>通过飞秒激光一步法烧蚀, 在 PDMS 表面构筑了分层微纳结构, 制备的表面在空气中显示出超疏水性, 在水



中显示出超亲水性。进一步,通过等离子体处理其表面则会表现出很好的水下抗气泡能力,制得的PDMS表面上球形气泡的接触角达到 $156^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ ,只要表面倾斜 $2^{\circ}$ 以上,气泡就会迅速滚走。

激光刻蚀法作为一种无接触式绿色制备PDMS粗糙仿生表面的方法,具有可控性强、精密度高的

优点,但需依赖精密的加工设备,导致成本过高,因此不适用于工业上的大规模制备。在目前绿色发展要求下,激光刻蚀加工制备PDMS仿生功能表面具有广泛应用前景,未来将在环境工程、医疗器械和柔性电子产品等多个领域发挥重要作用,极大地促进了科技创新与产业升级。



注:  $\perp_u$  和  $\perp_d$  分别代表楼上和楼下方向

图2 基于PDMS的微纳粗糙型仿生表面的制备方法:喷涂法(a)<sup>[27]</sup>;模板法(b)<sup>[35]</sup>;激光刻蚀法(c)<sup>[42]</sup>;气相沉积法(d)<sup>[48]</sup>

Fig. 2 Preparation of micro-nano rough bionic surface based on PDMS: Spraying method (a)<sup>[27]</sup>; Template method (b)<sup>[35]</sup>; Laser etching (c)<sup>[42]</sup>; Vapor deposition (d)<sup>[48]</sup>

#### 1.4 气相沉积法

气相沉积法通常将气态物质或元素沉积在固体基材上来制备非挥发性固体涂层/薄膜表面,具有价格低廉、快速、简便且易于放大的特点,也可用于PDMS基特殊润湿性表面的构建<sup>[46-47]</sup>。在此过程中,挥发性硅氧烷首先以短PDMS链在基底上沉积形成一个保形层;随后,通过有机硅交联,形成了疏水的表面。如图2d所示,BARTHWAL等<sup>[48]</sup>首先通过盐酸刻蚀铝基材形成微观结构表面(MS),然后在 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 溶液中借助水热法处理其表面构筑双尺度微纳结构(MNS),最后在 $120^{\circ}\text{C}$ 下沉积2 h,用PDMS对结构表面进行气相沉积改性,从而实现了超疏水性能。MOSAYEBI等<sup>[49]</sup>在固有粗糙结构的沙砾表面,通过化学气相沉积法负载了PDMS,然后将其置于漏斗中,实现了油水分离器的制备。

最近,基于蜡烛烟灰气相沉积构建PDMS型粗糙仿生表面得到了广泛的研究<sup>[50]</sup>。ZHANG等<sup>[51]</sup>首先将PDMS混合物 $[m(\text{PDMS}):m(\text{固化剂})=10:1]$ 均匀刮在铝合金表面;然后放置在石蜡烛的中焰位置30 s,以使蜡烛烟灰在表面沉积。制得的表面具

有优异的机械坚固性和耐腐蚀性。XIAO等<sup>[52]</sup>利用蜡烛烟灰作为牺牲模板,得到了具有蜡烛烟灰微结构的PDMS层,然后通过十六烷基三甲氧基硅烷进一步疏水改性后制备了透明无氟的仿生表面。

气相沉积法的优势在于可以实现高质量、高可控的微观结构和表面改性,同时具有良好的可重复性和稳定性;不足之处在于需要专业设备和技术,并且可能存在大面积涂层不均匀、结晶不完全等问题。未来研究重点应探索更加环保、经济、可持续、高效的气相沉积法制备技术,提高大面积均匀仿生表面的可实现性;同时提高仿生表面的机械稳定性和化学稳定性,增强其使用寿命。

#### 1.5 电泳沉积法

电泳沉积法是一种传统的、低成本的方法,可以将金属或金属合金的薄层制备成所需的结构,以修改其表面行为,如针状、棒状、带状、管状、纤维和花状结构等各种形态<sup>[53]</sup>。此技术的原理是通过在电解液中施加电场,引发氧化还原反应,从而将电沉积金属的阳离子从电极还原到导电表面<sup>[54]</sup>。ZHANG等<sup>[55]</sup>首先通过电泳沉积在碳钢表面构建了

SiO<sub>2</sub> 薄膜;然后通过长烷基链有机硅烷进行低能表面改性,得到了具有防腐性能的超疏水薄膜。但由于 SiO<sub>2</sub> 薄膜的上部是高度粗糙的,表面的微纳结构在受到物理磨损时容易被破坏。而靠近金属表面的剩余 SiO<sub>2</sub> 薄膜太少,无法确保足够的粗糙度,从而导致超疏水性的消失。如果在此基础上加入 PDMS,将构建坚固粗糙度表面<sup>[56]</sup>。PDMS 与 SiO<sub>2</sub> 的 Si—O 键缩合反应使制得的表面具有优异的抗机械磨损和耐腐蚀性能。

电泳沉积工艺制备 PDMS 仿生表面具有精确控制表面形貌、多样性和可调性、良好的复制性以及可控厚度和精确控制等优势。然而,此工艺存在制备复杂、依赖电解液选择、沉积速率不均匀和基材选择受限等问题。因此,在具体应用中需要综合评估工艺特点和需求,选择适合的制备方法,并进行工艺优化和控制,以获得所需的 PDMS 粗糙型仿生表面。

## 2 PDMS 光滑型仿生表面的制备方法

猪笼草捕虫笼内表面具有由一排排表皮细胞构成的一级和二级径向脊的规则多尺度微观粗糙结构,通过毛细管力可以紧紧锁定水滴并迅速扩散,形成均匀的光滑水膜,使疏水的昆虫脚无法站立而被捕获(图 3a)<sup>[57]</sup>。受此启发,WONG 等<sup>[58]</sup>于 2011 年首次提出了注入液体多孔表面(SLIPS)。即通过在预先构建的多孔/纹理基材内部灌注低表面能的含氟润滑油或者 PDMS 硅油,以制备一种稳定、无缺陷的光滑表面。然而,含氟物质对环境 and 人类健康存在的不良影响使其在全球范围内的应用受到限制<sup>[59-60]</sup>。因此,近年来含硅无氟材料被广泛应用于光滑型仿生表面的开发和应用。目前,常见的制备方法主要有接枝法、静电纺丝法、水热法和电化学法等。

### 2.1 接枝法

通过将 PDMS 化学接枝到具有不同表面特性的基板上,可以有效制备光滑型仿生表面。此方法不受制备基板形状或结构的限制,可以构建在各种材料上,如玻璃,金属,聚合物和陶瓷。接枝法可以将一部分 PDMS 接枝到表面上形成疏水层,另一部分硅油形成润滑层,由于疏水层和润滑层的分子结构是相同的,可将两者界面能量降到最低,因此,润滑层可以稳定地存在于疏水层表面,两者协同形成光滑型仿生表面<sup>[61]</sup>。基于此,CHEN 等<sup>[62]</sup>借助一步加热法,将三甲基硅氧烷封端的 PDMS 部分裂解并共价键合接枝到基材表面上以形成均匀的 PDMS 刷层,从而制备了具有疏水疏油性能的仿生表面。此外,如图 3b 所示,TESLER 等<sup>[63]</sup>通过紫外

线照射(UVB)诱导 PDMS 分子中特定键的光解,将其接枝在陶瓷、金属等表面上实现了具有防腐抗菌性能仿生表面的构建。

此外,应当控制接枝 PDMS 的用量以使其通过表面偏析迁移到涂层表面形成聚合物刷而不残留未接枝硅油,人们还开发了类液体润滑表面,其不仅能呈现出类似液体的润滑疏液性质,还能提升仿生润滑表面的黏接牢度和机械耐久性,在防腐、减阻、自清洁和防涂鸦等领域应用需求迫切<sup>[64-65]</sup>。共价接枝的 PDMS 分子刷结构不能被接触的液体溶解或破坏,表现出良好的耐高温和耐光降解能力<sup>[66]</sup>。因此,此类表面能有望解决超疏水/超疏油表面机械性能弱、透光率低,SLIPS 润滑液体流失等问题。

基于此,HU 等<sup>[67]</sup>和 HUANG 等<sup>[68]</sup>将 PDMS 接枝在低聚物多元醇上(多元醇-g-PDMS),然后使用六亚甲基三异氰酸酯三聚体(HDIT)进行固化,得到了类液体润滑防污表面。在表面形成和固化过程中,与多元醇-g-PDMS 在表面上富集以形成接枝单层,表现出动态润湿特性。此外,YU 等<sup>[69]</sup>合成了 PDMS 改性的可逆加成-断裂链转移聚合(RAFT)试剂,然后将其与丙烯酸聚合并中和后得到了水性 PDMS-丙烯酸树脂,这类树脂构建的类液体润滑表面具有优异的疏液和防涂鸦性能。

接枝法成本低廉、易于大规模生产,且对基材种类适应性强,可用于各种表面。但是,在制备过程中需要考虑接枝效率、反应物添加量和反应时间,否则容易产生不均匀或不完全接枝的情况。探索更简单、高效、绿色的接枝法,开发更多在特定领域有突出应用价值的新型 PDMS 光滑型仿生表面是具有重要价值的。

### 2.2 静电纺丝法

静电纺丝法是通过施加外加强电场方式将聚合物溶液在喷射孔形成喷射流,同时在静电场中进行拉伸,最终形成纤维固化在接收板上。作为一种具有成本效益和可扩展的制备策略,其常被用于构建 PDMS 基 SLIPS 仿生表面。例如:TAS 等<sup>[70]</sup>借助静电纺丝,制备了具有大比表面积的聚(偏氟乙烯-六氟丙烯)纳米纤维膜,以 PDMS 作为润滑剂构建了透明疏冰的 SLIPS 仿生表面。此外,PDMS 还可作为纺丝溶液用于构筑负载润滑剂的多孔/纹理基材,HABIB 等<sup>[71]</sup>首先使用低温等离子体处理聚合物表面以提高其黏附性能;然后使用 PDMS 与聚酰胺相结合的电纺工艺,构建了多孔微结构;最后将天然黑籽油作为润滑剂渗入生产的纤维膜,成功制备了具有疏液抗菌性能的 SLIPS 仿生表面。

静电纺丝法可以制备出具有高度均质性和可重

复性的微纳功能表面, 不仅过程简单、成本低廉, 还可以实现对表面形貌的精确控制, 进而调控表面性质。但需对实验条件进行精细控制, 如相对湿度、温度等因素会影响静电纺丝效果。此外, 制得的 PDMS 仿生表面较为脆弱, 转移使用时容易破损, 需进一步改进静电纺丝设备及工艺参数, 以提高其制备效率和质量。

### 2.3 水热法

目前来说, 借助简单合成策略, 大规模合成具有长期稳定性的光滑型仿生表面仍是一个难题。水热法作为一种低成本、可再生和环保的技术, 有望克服这一挑战<sup>[72]</sup>。YAO 等<sup>[73]</sup>通过水热法在 AZ31 镁合金上原位合成了具有纳米多孔结构的 Mg-Al 层状双氢氧化物 (MgAl-LDHs); 然后借助浸涂苯甲酸钠 (NaB) 缓蚀剂、全氟癸基三乙氧基硅烷 (PFDS) 和注入硅油, 实现了具有防腐性能光滑仿生表面的构建 (图 3c)。另外, 为了进一步提高所构建表面的耐腐蚀性和耐磨性, 将  $\text{SiO}_2$  掺入硅油中, 以有效密封 MgAl-LDH 中的纳米孔<sup>[74]</sup>。随着  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒浓度的增加, MgAl-LDH 的纳米片微结构逐渐被  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒的分层结构所覆盖, 形成的复合光滑表面表现出优异的疏水性、耐腐蚀性和耐磨性。

但水热法在制备过程中通常需要较长时间和高温高压等苛刻条件。优化反应条件和实现精准调控产物形态将是以后的发展方向。

### 2.4 电化学法

电化学法可以通过电极阳极对金属基材进行电解刻蚀, 从而在金属表面产生特殊的粗糙表面, 然

后向其中灌注硅油等润滑液体, 以实现 PDMS 光滑型仿生表面的构建。与其他制备多孔结构的方法相比, 电化学刻蚀具有环境污染小、操作方便和制备成本低等优点<sup>[75]</sup>。SAKURABA 等<sup>[76]</sup>在草酸水电解质中用铂电极对铝电极进行阳极氧化, 形成了具有圆柱形孔通道的纳米阳极氧化铝层, 然后通过十四烷基磷酸进行低表面能改性以及注入硅油, 实现了防腐自修复光滑表面的构建。CHEN 等<sup>[77]</sup>通过一步阳极氧化法, 在乙二醇/氟化铵电解液体系中制备了具有规则形貌的高度有序  $\text{TiO}_2$  纳米管表面 (图 3d); 然后灌注硅油, 制备了具有防腐性能的光滑表面。闭孔和高长径比的  $\text{TiO}_2$  纳米管结构提供了强大的毛细管力, 提高了润滑油层的稳定性。WEI 等<sup>[78]</sup>通过阳极氧化反应制备了均匀的多孔锡氧化物表面, 然后在多孔基质上化学接枝一层多巴胺薄膜, 经过疏醇改性得到了超疏水表面。进一步注入 PDMS 后, 实现了光滑表面的构建。防腐测试表明, 制备的表面可以有效地抑制金属锡在盐溶液中的腐蚀。即使是经过多次机械磨损, 此表面仍能保持较高的缓蚀性, 在苛刻的使用条件下表现出自我修复特性。

通过优化实验参数, 如阳极氧化电压、温度和时间, 可以很容易地控制纳米孔的尺寸、极间距离、多孔氧化物层的生长速率以及由此产生的表面粗糙度。目前, 刻蚀法存在表面耐久性较差和粗糙结构较容易破坏的缺点, 开发电化学共沉积以构建具有优异机械性能 PDMS 仿生表面, 具有重要研究价值。

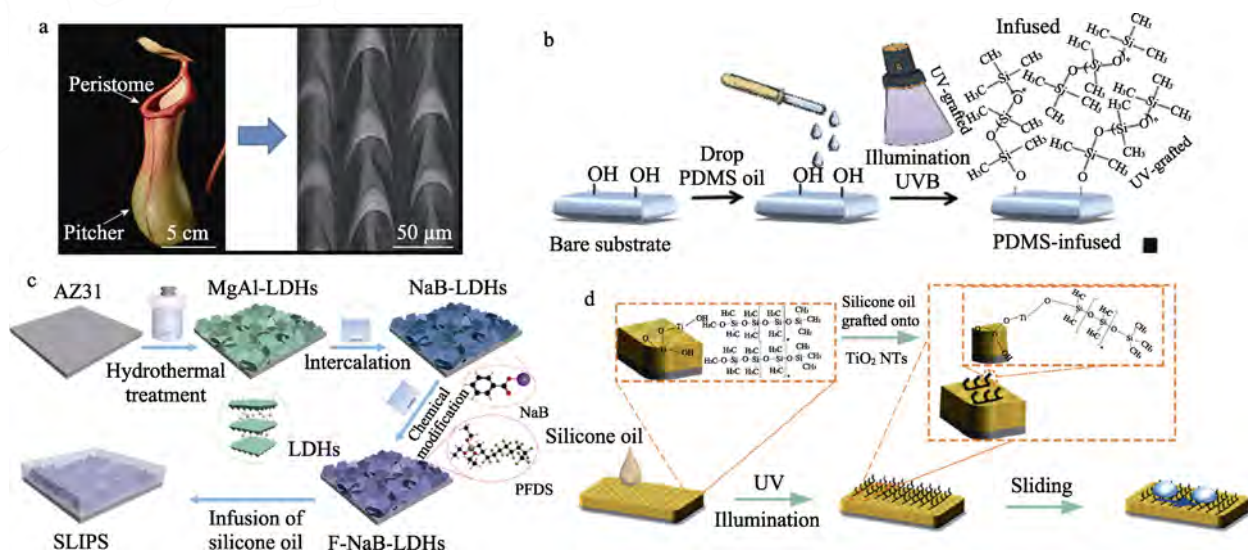


图3 基于PDMS光滑型表面的仿生对象及制备方法: 猪笼草及其捕虫笼微结构示意图(a)<sup>[57]</sup>; 接枝法(b)<sup>[63]</sup>; 水热法(c)<sup>[73]</sup>; 电化学法(d)<sup>[77]</sup>

Fig. 3 Bionic object and preparation of slippery surface based on PDMS: Schematic diagram of pogonia and microstructure of its insect trap cage (a)<sup>[57]</sup>; Grafting method (b)<sup>[63]</sup>; Hydrothermal method (c)<sup>[73]</sup>; Electrochemical method (d)<sup>[77]</sup>



### 3 表面性能的调控

#### 3.1 润湿性能

液体与基底表面保持接触的能力被称为润湿性,其是衡量固液表面相容性的重要指标<sup>[79]</sup>。通常,表面润湿性是通过表面接触角(CA)来衡量的,即液滴在三相相交点处,气-液接触界面切线与液滴方向上固-液交界线所呈夹角<sup>[80]</sup>。此外,液滴在各种固体表面上滑落的最小倾斜角度,即滑动角(SA)也被常用来表征涂层的润湿疏液性能。通过改变涂层材料的表面形貌和化学组成,可以调节其CA和SA,从而实现特殊的表面润湿性和抗污染性能。

对于PDMS微纳粗糙型仿生表面而言,表面润湿性主要取决于2个主要因素:表面微观结构和表面化学成分。通过控制表面微观结构的尺寸和形状可影响固体/液体之间的相互作用力<sup>[81-82]</sup>。ELZAABALAWY等<sup>[26]</sup>探究了不同溶剂对氨基功能化PDMS改性环氧树脂表面微观形貌的影响。当以丙酮为溶剂时,表面存在着微米级和纳米级的分级球形SiO<sub>2</sub>颗粒,展现出优异的超疏水性;而以乙醇为溶剂时,则会由于乙醇的低挥发性产生空腔,导致超疏水性的降低。此外,还可以通过改变表面化学成分来调整涂层的润湿性。KIM等<sup>[83]</sup>通过控制PDMS和甲苯的稀释比来研究铝表面润湿性的变化(图4a)。在PDMS和甲苯稀释比为2的情况下,观察到了较弱的疏水性,在更高的比率下,疏水性得到了加强。当PDMS和甲苯稀释比>20时,微观结构变得清晰,与水的CA

(WCA)也达到164.94°。这种特性一直持续到PDMS和甲苯稀释比为100时,随后WCA急剧下降。这是因为,在涂层形成过程中,低含量的PDMS不足以形成连续的PDMS涂层。

近年来,具有可控润湿性的PDMS光滑型仿生表面已在可重写的功能生物芯片、微流体、液体收集和转移系统的应用中引起了越来越多的关注<sup>[84-85]</sup>。目前,常用的调控策略主要有电场刺激和光学调控。例如:CHE等<sup>[86]</sup>通过在导电的定向还原氧化石墨烯多孔膜中分别填充不导电的硅油和导电的离子液体,实现了表面对水滴的智能控制。对这2种材料的测试结果表明,在低电场下,2种材料均能实现液滴在其表面的各向异性滑动(平行于纤维方向的水、1 mol/L KCl溶液、甘油和乙二醇液滴的SA分别为 $28.2^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$ 、 $30.1^{\circ} \pm 2.1^{\circ}$ 、 $37.2^{\circ} \pm 2.4^{\circ}$ 和 $52.3^{\circ} \pm 3.5^{\circ}$ ,而垂直方向上的SA分别为 $56.1^{\circ} \pm 2.1^{\circ}$ 、 $57.4^{\circ} \pm 1.9^{\circ}$ 、 $63.3^{\circ} \pm 2.3^{\circ}$ 和 $76.8^{\circ} \pm 4.3^{\circ}$ )。如图4b所示,RAO等<sup>[87]</sup>将4-苯基偶氮苯酚(HAB)、硅油(HXSi)和交联剂异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)均匀混合,然后在特定的温度下固化,制备了紫外响应可控润湿性的硅油(PDSI)注入多孔光滑表面(UVRS)。然后将UVRS与非紫外响应光滑表面(NUVRS)集成形成复合紫外响应表面(CUVRS)。由于偶氮苯基团在紫外光照射下的构象转变,可以重建润湿层以形成新的光滑表面。此外,表面的颜色也随之变化,为监测润湿性变化和液滴滑动路径提供了新的途径。

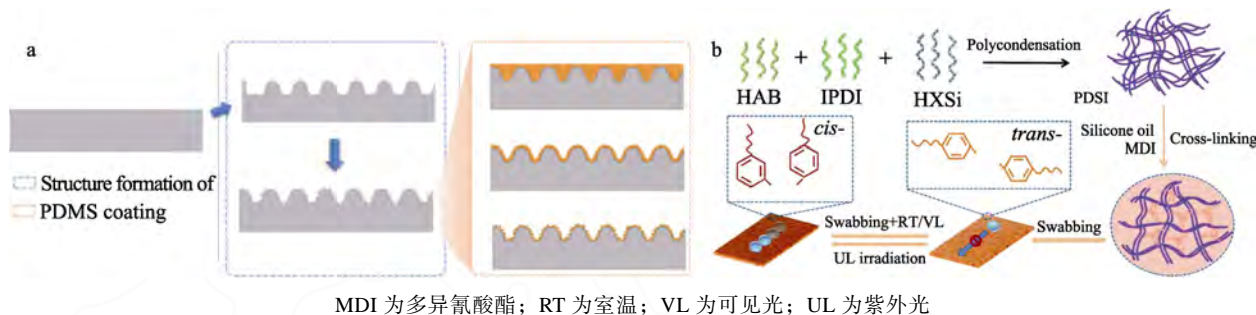


图4 PDMS仿生表面表面润湿性调控策略:粗糙型仿生表面(a)<sup>[83]</sup>;光滑型仿生表面(b)<sup>[87]</sup>

Fig. 4 Surface wettability regulation strategies for PDMS bionic surfaces: Rough bionic surface (a)<sup>[83]</sup>; Slippery bionic surface (b)<sup>[87]</sup>

#### 3.2 力学耐久性能

力学性能是影响涂层质量和持久稳定性的关键因素之一,设计具有较强力学性能的PDMS仿生表面对满足实际生活中的应用具有重要意义<sup>[88-89]</sup>。

PDMS粗糙型仿生表面中微纳结构易受到损害而导致超疏液性能的丧失,提高机械稳定性以延长其使用寿命迫在眉睫。通过设计合理的结构、构建化学键和赋予材料自愈合性能等策略,将有效实现

力学耐久性能的调控。ZHANG等<sup>[90]</sup>采用多尺度结构设计,将SiO<sub>2</sub>微纳米双尺度颗粒与环氧树脂和PDMS相结合,通过简单的喷涂法将其喷涂在玻璃、滤纸、铜板和聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜等各种基材上,构建了耐磨的PDMS微纳粗糙型仿生表面。其可承受75次的砂纸磨擦循环,并能承受诸如手指夹和胶黏剂剥离的损害,表现出良好的机械稳定性。如图5a所示,CHEN等<sup>[91]</sup>将PDMS改性的亚微米

级  $\text{SiO}_2$  颗粒浸涂在棉织物上, 在固化过程中涂层表面与基材之间通过  $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷 (APTES) 交联反应形成了强的共价键, 从而形成了耐用且坚固的微纳结构。同时, 这种仿荷叶状的分层突起结构不仅有效改善了表面粗糙度, 而且为水滴和涂层表面之间提供了大量气穴, 显著提高了疏水性。NI 等<sup>[92]</sup>通过负载 PDMS 的介孔聚多巴胺 (PDA) 微球与疏水的  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒混合, 并使用水性硅树脂作为黏合剂, 获得了智能自愈合坚固的 PDMS 粗糙型仿生表面。PDA 微球的电正性在较低的 pH 下产生了 PDA 和 PDMS 之间的静电排斥, 导致 PDMS 从介孔 PDA 微球中释放出来, 随后迁移并富集到表面。因此, 该仿生表面可以在近红外或 pH 的刺激

下恢复超疏水性, 有效提高了耐久使用性。

对于 PDMS 光滑型仿生表面而言, 力学耐久性能主要通过基材选择和表面结构调控来实现<sup>[11]</sup>。如图 5b 所示, HUANG 等<sup>[93]</sup>借助水热法在铝合金基材上制备了花瓣状结构, 然后通过硬脂酸低表面能改性和 PDMS 注入, 实现了光滑型表面的构建。此表面显示出良好的机械和化学稳定性, 即使经过 5000 r/min 的剪切测试后仍具有 43.06% 的润滑剂保留能力。JING 等<sup>[94]</sup>在紫外光下将 PDMS 接枝到 ZnO 纳米棒上, 以残留的非结合硅油作为润滑剂, 制备了 PDMS 光滑型仿生表面。即使在高达 7000 r/min 的高剪切速率、长期浸泡 400 h 和强酸/强碱等极端操作条件下, 制备的表面仍展现出优异的稳定性。

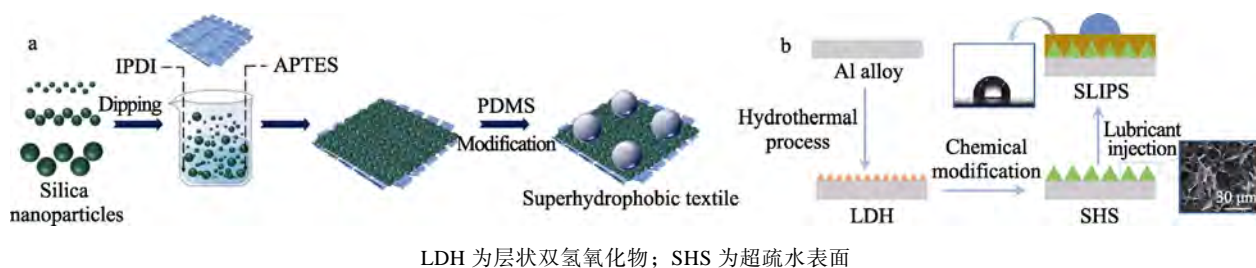


图5 PDMS 仿生表面表面力学耐久性能调控策略: 粗糙型仿生表面 (a)<sup>[91]</sup>; 光滑型仿生表面 (b)<sup>[93]</sup>

Fig. 5 Surface mechanical durability performance modulation strategies for PDMS bionic surfaces: Rough bionic surface (a)<sup>[91]</sup>; Slippery bionic surface (b)<sup>[93]</sup>

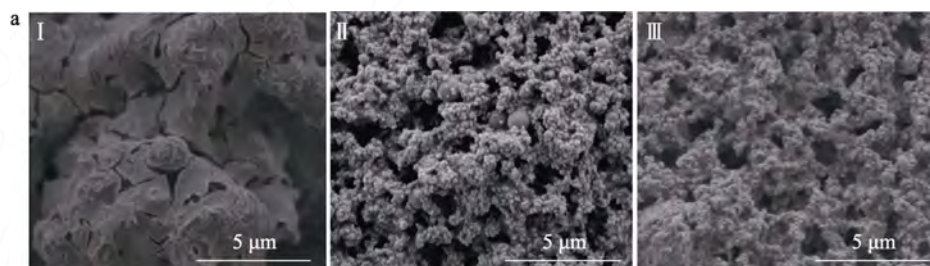
## 4 PDMS 仿生表面在防护领域的应用

生物在自然界中所具有的某些特性是对环境适应的结果。因此, 人们所研究的仿生材料必然离不开应用场景。在过去的几十年里, 各种 PDMS 基仿生合成策略被用来构造具有防护功能的特殊润湿表面。在此, 将重点介绍 PDMS 仿生表面在金属防腐、防冰和防生物污染等防护领域的应用进展。

### 4.1 金属防腐领域的应用

广泛存在的腐蚀现象给现代工业社会带来了巨大的经济损失和破坏, 甚至严重威胁到人类健康和生存环境<sup>[95]</sup>。开发具有防腐性能的 PDMS 仿生表面, 可有效提高金属的耐腐蚀性和使用寿命, 其中, 金属防腐的关键在于金属与腐蚀性介质的隔离<sup>[96]</sup>。PDMS 粗糙型仿生表面存在的微纳结构可以捕获

一层空气, 并排斥液滴在金属上的附着, 从而减少金属表面与腐蚀性介质之间的接触面积和接触时间, 以提供优异的防腐性能<sup>[97-98]</sup>。基于此, XIE 等<sup>[99]</sup>在镁合金上构筑了 PDMS 粗糙型仿生表面。电化学测试结果显示, 电化学测试前后样品的形貌与未腐蚀样品相比没有明显差异, 展现出良好的稳定性(图 6a)。此外, 此表面的自腐蚀电流密度也比基体的自腐蚀电流密度减少了 2 个数量级, 有效提高了基体的耐腐蚀性。ZHANG 等<sup>[100]</sup>以铝合金为阳极, 在氯化铁和肉豆蔻酸的混合溶液中进行阳极电沉积, 制备了具有防腐性能的粗糙型仿生表面。在电沉积过程中, 铝首先被氧化成  $\text{Al}^{3+}$ , 然后与来自肉豆蔻酸的  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COO}^-$  结合, 形成肉豆蔻酸铝并沉积在阳极表面。电化学实验表明, 基体的腐蚀电位从 -1.280 V 变为 -0.869 V, 腐蚀电流密度降低了 85%, 展现出良好的腐蚀保护效果。





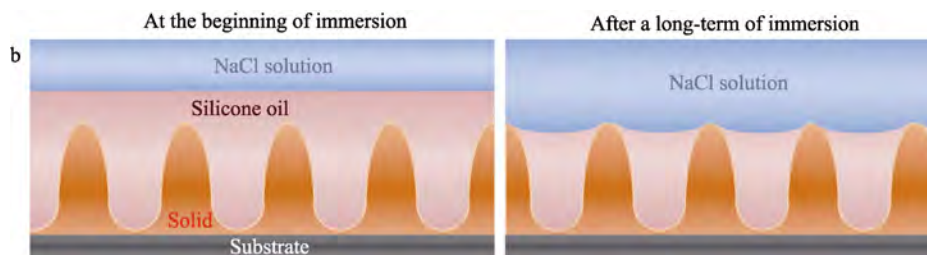


图 6 基于防腐应用的 PDMS 仿生表面: 腐蚀后的镁合金 (I)、腐蚀前 (II) 和腐蚀后 (III) 的 PDMS 粗糙型仿生表面的 SEM 图 (a)<sup>[99]</sup>; PDMS 光滑型仿生表面长期防腐机制示意图 (b)<sup>[104]</sup>

Fig. 6 PDMS surfaces based on anti-corrosion applications: SEM images of magnesium alloy after corrosion (I), PDMS rough bionic surface before (II) and after corrosion (III) (a)<sup>[99]</sup>; Schematic diagram of long-term corrosion prevention mechanism of PDMS slippery bionic surface (b)<sup>[104]</sup>

PDMS 光滑型仿生表面则可作为一个很好的屏障, 防止包括水、离子和溶解氧在内的腐蚀性介质的渗透以抑制电子转移, 而且表面液体层的存在可大大减少材料内部缺陷的形成<sup>[101-102]</sup>。其中, 以 PDMS 硅油为润滑剂灌注在多孔表面制备光滑型表面在防腐领域得到了广泛研究<sup>[103]</sup>。ZHU 等<sup>[104]</sup>在镁合金基材上用无机磷酸铝黏合具有天然多孔结构的海泡石, 并灌注硅油, 制备了光滑型仿生表面。结果表明, 镁合金的腐蚀电流密度从  $1.368 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  降至  $2.431 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 展现出优异的耐腐蚀性能 (图 6b)。此外, JOO 等<sup>[105]</sup>将硅油浸渍在镁合金、铝合金、不锈钢和铜的纳米多孔氧化物中, 通过热处理形成硅烷炭化的 PDMS 涂层。该涂层在  $0.1 \text{ mol/L}$  盐酸中进行了抗腐蚀测试, 结果表明, 镁合金的腐蚀电流密度从  $4.41 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$  降至  $1.76 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ , 抑制效率为 99.99%。

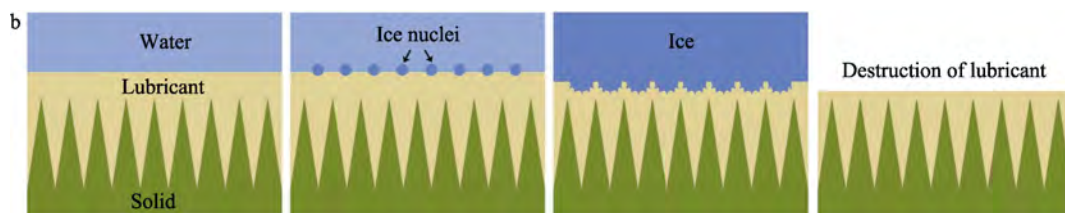
#### 4.2 防冰领域的应用

水结冰是一种普遍存在的自然现象, 给人们的生活带来了诸多不便。此外, 结冰对飞机、船舶、电网、交通和某些能源设备也有潜在的损害<sup>[106]</sup>。近年来, 越来越多的研究表明, PDMS 仿生表面具有良好的防冰性能, 在防冰领域展现出广阔的应用前景<sup>[107]</sup>。PDMS 粗糙型仿生表面上存在的空气层有助于水滴在其表面上轻松滑动。因此, 水滴冻结的停留时间将大大缩短, 抑制了霜冻的形成<sup>[108]</sup>。

JIANG 等<sup>[109]</sup>在铝基材上制备了 PDMS 粗糙型仿生光热表面, 该表面具有足够好的光热转换性能, 即使在  $0.2$  个太阳强度下也能防止  $100 \mu\text{L}$  水滴结冰 (图 7a)。同时, 在此条件下, 冰粒可以通过表面的光热效应很容易融化清除。此外, XIAO 等<sup>[110]</sup>通过两步沉积法, 将  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @PDMS 混合液沉积在铝基板上, 快速制备了光热超疏水表面。结果表明, 在室温 ( $23^\circ\text{C}$ ) 下模拟太阳光辐射  $10 \text{ min}$  后, 表面温度可以上升到  $85^\circ\text{C}$ 。同时, 得益于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒和 PDMS 组合所赋予的超疏水性 ( $\text{WCA}=160^\circ$ ), 光滑型仿生表面可以大大延缓液滴在表面的停留和冻结时间。

PDMS 光滑型仿生表面具有较小的水滑动角和极低的冰黏附强度, 从而有利于机械除冰。此外, 其表面的润滑层可以防止冰霜的生长, 有效降低霜/冰的附着力<sup>[111]</sup>。LONG 等<sup>[112]</sup>通过在粗糙微纳结构上灌注硅油, 实现了防冰光滑型仿生表面的构筑, 该仿生表面的冰黏附强度仅为  $6.2 \text{ kPa}$ , 即使经过 12 次冷冻和拉伸循环, 作为固体基质的光滑型表面多孔结构仍未被破坏, 水接触角依然相对稳定, 具备卓越的防冰稳定性能 (图 7b)。SATTARI 等<sup>[113]</sup>通过化学刻蚀和碳化硅粉末研磨构建了多孔铝, 然后灌注硬脂酸和硅油, 实现了防冰光滑表面的制备。润滑层的流动性和不可溶性会促进固体冰的滑动。因此, 冰和光滑表面之间的相互作用极低。与纯铝表面相比, 结冰时间延迟了  $9 \text{ min}$ , 冰黏附强度降低了  $115 \text{ kPa}$ 。





C1 为 Ti (纯钛); C2 为 Ti/SiH-涂层 (纯钛不添加三氯生的超疏水涂层); C3 为 Ti/SiH-涂层-Triclosan (纯钛添加三氯生的超疏水涂层); C1、C2、C3 后面的 1、2、3 代表进行了 3 组平行实验; PS-F-S 为涂有硅油的聚苯乙烯薄膜; SLIPS-2 为不接枝二甲基十八烷基 3-三甲氧基硅丙基氯化铵 (QAC-silane) 的涂层; SLIPS-Q-2 为接枝 QAC-silane 的涂层

图 7 基于防冰应用的 PDMS 仿生表面: 裸铝基底 (I) 和 PDMS 粗糙型仿生表面 (II) 在 0.2 个太阳强度照射下的冰融化性能 (a)<sup>[109]</sup>; PDMS 光滑型仿生表面防冰过程示意图 (b)<sup>[112]</sup>

Fig. 7 PDMS bionic surfaces for anti-icing applications: Ice melting performance of bare aluminum substrate (I) and PDMS rough bionic surface (II) under 0.2 solar intensity irradiation (a)<sup>[109]</sup>; Schematic diagram of anti-icing process of PDMS slippery bionic surface (b)<sup>[112]</sup>

#### 4.3 防生物污染领域的应用

生物污染是一个持久而广泛的问题,是指细菌、真菌等微生物在船体、水管、生物传感器、过滤器等表面上大量积累,导致腐蚀、堵塞和污染等一系列问题<sup>[114]</sup>,而 PDMS 粗糙型仿生表面可以有效防止微生物的吸附,为防止生物污染提供了重要的解决方案<sup>[115]</sup>。ZHAO 等<sup>[116]</sup>在钛合金基材上构建了含有二氯苯氧氯酚的 PDMS 粗糙型仿生表面,可实现抗菌黏附和杀菌的同时作用,与不含二氯苯氧氯酚的裸钛合金基材相比,该仿生表面表现出对大肠杆菌的 99.98%抑制效率 (图 8a)。YE 等<sup>[117]</sup>以 PDMS 为黏合剂,将氟化介孔 SiO<sub>2</sub> 和季铵功能化介孔 SiO<sub>2</sub> 黏附在各种纺织品表面,构建了粗糙仿生表面。通过调节 2 种纳米颗粒的质量比,实现了微纳粗糙结构诱导的低表面能排斥与季铵化合物快速杀菌的协

同作用,对大肠杆菌和金葡萄球菌的抗菌率达到 99.9%。

PDMS 光滑型仿生表面可以在很大程度上避免细菌在表面的生长和繁殖,甚至杀死细菌,已引起了人们的广泛关注<sup>[103]</sup>。ZHANG 等<sup>[118]</sup>在石英玻璃、聚碳酸酯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚乙烯和硅胶导管等基材上构筑了 PDMS 光滑型仿生表面,其对常见的大肠杆菌和金葡萄球菌表现出卓越的防黏附和抗菌效果。即使经受 99 h 的细菌污染,样品仍能表现出高效的抗菌性能,抗菌活性 > 24% (图 8b)。此外,MANNA 等<sup>[119]</sup>通过聚乙烯亚胺和聚(2-乙烯基-4,4-二甲基氮杂内酯)的反应性逐层组装,制备了超疏水性的纳米多孔膜,然后灌注硅油,实现了抗菌光滑表面的构建。此表面可有效抑制真菌病原体白喉杆菌的短期和长期黏附及生物膜的形成。

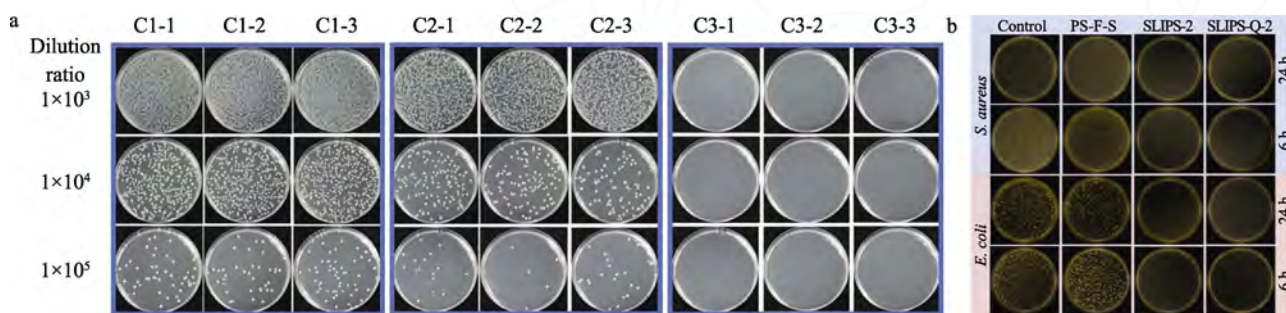


图 8 基于防生物污染应用的 PDMS 仿生表面: PDMS 粗糙型仿生表面抗菌性能表征 (a)<sup>[116]</sup>; PDMS 光滑型仿生表面抗菌性能表征 (b)<sup>[118]</sup>

Fig. 8 PDMS bionic surfaces based on anti-biofouling applications: Antimicrobial properties of PDMS rough bionic surface (a)<sup>[116]</sup>; Antimicrobial properties of PDMS slippery bionic surface (b)<sup>[118]</sup>

#### 4.4 光学领域应用

近年来,太阳能光伏 (PV) 板、聚光太阳能发电 (CSP) 系统的镜面/接收器和海洋光学探测器等光学器件的应用引起了研究人员的极大兴趣<sup>[120]</sup>。但是灰尘、污垢以及各种有机和无机污染物在光学器件表面的沉积会严重恶化其整体性能。PDMS 仿生

表面因其出色的防污自清洁性能提高了光电传输效率,从而在该领域得到了广泛应用。

LI 等<sup>[121]</sup>通过模板复制和硅烷疏水改性制备了 PDMS 仿生粗糙多尺度阵列表面 (MSA),如图 9a 所示。此表面不仅可以使环氧树脂封装的太阳能电池的光电转换效率从 17.50% 提高到 18.34%,还可以



将太阳能电池表面水的接触角从  $110.5^\circ$  提高到  $153.1^\circ$ , 从而赋予其优异的自清洁防污性能。此外, WANG 等<sup>[122]</sup>通过在玻璃基板上构建共价连接的 PDMS 层, 开发了一种用于海洋光学仪器的坚固仿

生光滑型表面 (SSS) (图 9b)。由于 PDMS 分子链的高弹性, 此表面可以在各种环境条件下有效地抑制海洋微生物 (细菌和藻类) 的黏附生长, 从而保持仪器较高的水下透明度和清洁性能。

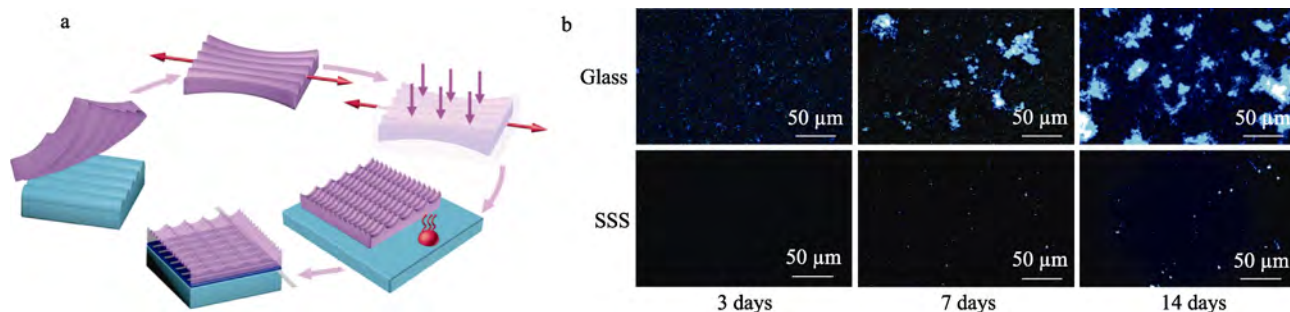


图 9 基于光学领域应用的 PDMS 仿生表面: PDMS 仿生粗糙多尺度阵列薄膜的制备过程 (a)<sup>[121]</sup>; PDMS 光滑型仿生表面用于海洋光学仪器的防污自清洁性能表征 (b)<sup>[122]</sup>

Fig. 9 PDMS bionic surfaces based on applications in optics: Preparation process of PDMS bionic rough multiscale array films (a)<sup>[121]</sup>; Characterization of antifouling self-cleaning properties of PDMS smooth bionic surfaces for marine optical instruments (b)<sup>[122]</sup>

## 5 结束语与展望

本文基于仿生角度综述了 PDMS 仿生表面的研究进展, 对制备方法和在防护领域的应用进行了阐述。虽然近年来 PDMS 仿生表面的制备及应用取得了很大的进步, 但仍面临以下的挑战和问题:

(1) 目前, PDMS 仿生表面制备过程通常会产生大量的挥发性有机物, 不仅增加了生产成本, 而且对操作环境和人体健康造成了严重影响。发展清洁、高效及可大规模制备的低成本方法是今后的重要努力方向。

(2) PDMS 仿生表面在防护领域的功能性开发及其机械耐久性研究是未来发展的重要趋势。开发具有电磁屏蔽、高温防护和抗冲蚀磨损等特殊防护性能的仿生表面将有效提高其在苛刻环境中应用的可能性。另外, 改善表面的机械耐磨性可以保持仿生表面微纳结构的长期稳定性, 将有助于提高其机械耐久性能, 延长服役寿命。

(3) 尽管 PDMS 仿生表面在防污、抗菌等方面表现出良好的性能, 但其应用范围还有待拓展。未来的应用研究方向可在能源、光电子学和生物医学等领域中进一步探索。例如: 将 PDMS 仿生表面应用在摩擦纳米发电机上, 增强器件的自清洁能力、灵活性和电输出性能。

总之, 通过改进制备方法、开发新的功能性和提高长期稳定性, 可以进一步拓展 PDMS 仿生表面的应用领域, 并促进其商业化和工业化发展。在未来的研究中, 需要跨学科的合作和持续的创新, 以推动 PDMS 仿生表面技术的进一步发展。

## 参考文献:

- [1] JIN H C, WANG J F, TIAN L M, *et al.* Recent advances in emerging integrated antifouling and anticorrosion coatings[J]. *Materials & Design*, 2022, 213: 110307.
- [2] JIANG S S, DIAO Y H, YANG H G. Recent advances of bio-inspired anti-icing surfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 308: 102756.
- [3] LI Z C, LIU P, CHEN S W, *et al.* Bioinspired marine antifouling coatings: Antifouling mechanisms, design strategies and application feasibility studies[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 190: 111997.
- [4] PARVATE S, DIXIT P, CHATTOPADHYAY S. Superhydrophobic surfaces: Insights from theory and experiment[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2020, 124(8): 1323-1360.
- [5] GOHARSHENAS M S, PARSIMEHR H, EHSANI A. Multifunctional superhydrophobic surfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 290: 102397.
- [6] NGUYEN-TRI P, TRAN H N, PLAMONDON C O, *et al.* Recent progress in the preparation, properties and applications of superhydrophobic nano-based coatings and surfaces: A review[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 132: 235-256.
- [7] CHEN C, LIU M M, ZHANG L P, *et al.* Mimicking from rose petal to lotus leaf: Biomimetic multiscale hierarchical particles with tunable water adhesion[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7): 7431-7440.
- [8] BRITO J, ASAWA K, MARIN A, *et al.* Hierarchically structured, all-aqueous-coated hydrophobic surfaces with pH-selective droplet transfer capability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(22): 26225-26237.
- [9] BUDDINGH J V, HOZUMI A, LIU G J. Liquid and liquid-like surfaces/coatings that readily slide fluids[J]. *Progress in Polymer Science*, 2021, 123: 101468.
- [10] PRAKASH C G J, PRASANTH R. Recent trends in fabrication of nepenthes inspired SLIPs: Design strategies for self-healing efficient anti-icing surfaces[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2020, 21: 100678.
- [11] YAO W H, WU L, SUN L D, *et al.* Recent developments in slippery liquid-infused porous surface[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 166: 106806.
- [12] LIU J, YAO Y, LI X H, *et al.* Fabrication of advanced polydimethylsiloxane-based functional materials: Bulk modifications and surface functionalizations[J]. *Chemical Engineering Journal*,



- 2021, 408: 127262.
- [13] ARIATI R, SALES F, SOUZA A, *et al.* Polydimethylsiloxane composites characterization and its applications: A review[J]. *Polymers*, 2021, 13(23): 4258.
- [14] WANG P, LI C Y, ZHANG D. Recent advances in chemical durability and mechanical stability of superhydrophobic materials: Multi-strategy design and strengthening[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 129: 40-69.
- [15] MARK J E. Some interesting things about polysiloxanes[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2004, 37(12): 946-953.
- [16] YONG J L, YANG Q, HOU X, *et al.* Nature-inspired superwettability achieved by femtosecond lasers[J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 9895418.
- [17] KIM S, HWANG H J, CHO H, *et al.* Repeatable replication method with liquid infiltration to fabricate robust, flexible, and transparent, anti-reflective superhydrophobic polymer films on a large scale[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 350: 225-232.
- [18] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [19] FENG L, ZHANG Y A, XI J M, *et al.* Petal effect: A superhydrophobic state with high adhesive force[J]. *Langmuir*, 2008, 24(8): 4114-4119.
- [20] FENG L, LI S, LI Y, *et al.* Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial[J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [21] LIU M J, WANG S T, WEI Z X, *et al.* Bioinspired design of a superoleophobic and low adhesive water/solid interface[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(6): 665-669.
- [22] JUMRUS N, SUTTANON N, SROILA W, *et al.* Durability and photocatalytic activity of superhydrophobic gypsum boards coated with PDMS/MTCS-modified  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  NPs[J]. *Materials Letters*, 2023, 330: 133342.
- [23] LI X W, YAN J Y, YU T, *et al.* Versatile nonfluorinated superhydrophobic coating with self-cleaning, anti-fouling, anti-corrosion and mechanical stability[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 642: 128701.
- [24] KONG L B, LI Y J, KONG X F, *et al.* A novel flexible and fluoride-free superhydrophobic thermal energy storage coating for photothermal energy conversion[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 232: 109588.
- [25] FOORGINEZHAD S, ZERAFAT M M. Fabrication of stable fluorine-free superhydrophobic fabrics for anti-adhesion and self-cleaning properties[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 464: 458-471.
- [26] ELZAABALAWY A, MEGUID S A. Development of novel superhydrophobic coatings using siloxane-modified epoxy nanocomposites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398: 125403.
- [27] MA Y W, HE Q. Preparation of superhydrophobic conductive CNT/PDMS film on paper by foam spraying method[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 648: 129327.
- [28] SHEN Y Z, LI K L, CHEN H F, *et al.* Superhydrophobic  $\text{F-SiO}_2\text{/PDMS}$  composite coatings prepared by a two-step spraying method for the interface erosion mechanism and anti-corrosive applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 413: 127455.
- [29] LIU H, HUANG J Y, CHEN Z, *et al.* Robust translucent superhydrophobic PDMS/PMMA film by facile one-step spray for self-cleaning and efficient emulsion separation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 330: 26-35.
- [30] HOODA A, GOYAT M S, PANDEY J K, *et al.* A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of superhydrophobic coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 142: 105557.
- [31] WANG X T, HAN Z Q, LIU Y, *et al.* Micro-nano surface structure construction and hydrophobic modification to prepare efficient oil-water separation melamine formaldehyde foam[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 505: 144577.
- [32] LIU Y H, LI G J. A new method for producing "lotus effect" on a biomimetic shark skin[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 388(1): 235-242.
- [33] WANG L, GONG Q H, ZHAN S H, *et al.* Robust anti-icing performance of a flexible superhydrophobic surface[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(35): 7729-7735.
- [34] GONG D W, LONG J Y, JIANG D F, *et al.* Robust and stable transparent superhydrophobic polydimethylsiloxane films by duplicating via a femtosecond laser-ablated template[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(27): 17511-17518.
- [35] WANG J P, WU Y L, ZHANG D G, *et al.* Preparation of superhydrophobic flexible tubes with water and blood repellency based on template method[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 587: 124331.
- [36] XU W T, YI P Y, GAO J, *et al.* Large-area stable superhydrophobic poly(dimethylsiloxane) films fabricated by thermal curing via a chemically etched template[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(2): 3042-3050.
- [37] WANG Q Y, SUN G, TONG Q D, *et al.* Fluorine-free superhydrophobic coatings from polydimethylsiloxane for sustainable chemical engineering: Preparation methods and applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 130829.
- [38] HOSHIAN S, JOKINEN V, FRANSSILA S. Robust hybrid elastomer/metal-oxide superhydrophobic surfaces[J]. *Soft Matter*, 2016, 12(31): 6526-6535.
- [39] ZHANG H Q, ZHAO G L, WU S W, *et al.* Solar anti-icing surface with enhanced condensate self-removing at extreme environmental conditions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(18): e2100978118.
- [40] YONG J L, CHEN F, YANG Q, *et al.* Femtosecond laser controlled wettability of solid surfaces[J]. *Soft Matter*, 2015, 11(46): 8897-8906.
- [41] LIU K, YANG C, SONG L H, *et al.* Highly stretchable, superhydrophobic and wearable strain sensors based on the laser-irradiated PDMS/CNT composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 218: 109148.
- [42] FANG Y, YONG J L, CHEN F, *et al.* Bioinspired fabrication of bi/tridirectionally anisotropic sliding superhydrophobic PDMS surfaces by femtosecond laser[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(6): 1701245.
- [43] BAI X, GOU X D, ZHANG J L, *et al.* A review of smart superwetting surfaces based on shape-memory micro/nanostructures[J]. *Small*, 2023, 19(15): e2206463.
- [44] JIANG S J, HU Y L, WU H, *et al.* Multifunctional Janus microplates arrays actuated by magnetic fields for water/light switches and bio-inspired assimilatory coloration[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(15): 1807507.
- [45] YONG J L, CHEN F, HUO J L, *et al.* Femtosecond laser induced underwater superaerophilic and superaerophobic PDMS sheets with through microholes for selective passage of air bubbles and further collection of underwater gas[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(8): 3688-3696.
- [46] ALDHALEAI A, TSAI P A. Fabrication of transparent and microstructured superhydrophobic substrates using additive manufacturing[J]. *Langmuir*, 2021, 37(1): 348-356.
- [47] WEN N, MIAO X R, YANG X J, *et al.* An alternative fabrication of underoil superhydrophobic or underwater superoleophobic stainless steel meshes for oil-water separation: Originating from one-step vapor deposition of polydimethylsiloxane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 204: 116-126.
- [48] BARTHWAL S, LIM S H. A durable, fluorine-free, and repairable superhydrophobic aluminum surface with hierarchical micro/nanostructures and its application for continuous oil-water separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 618: 118716.
- [49] MOSAYEBI E, AZIZIAN S, NOEI N. Preparation of robust superhydrophobic sand by chemical vapor deposition of polydimethylsiloxane for oil/water separation[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305(12): 2000425.
- [50] LIN X D, PARK S, CHOI D, *et al.* Mechanically durable

- superhydrophobic PDMS-candle soot composite coatings with high biocompatibility[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 74: 79-85.
- [51] ZHANG B B, DUAN J Z, HUANG Y L, *et al.* Double layered superhydrophobic PDMS-candle soot coating with durable corrosion resistance and thermal-mechanical robustness[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 71: 1-11.
- [52] XIAO T, WEI K, WANG Y D, *et al.* Transparent and durable PDMS(O)/HDTMS anti-icing surfaces derived from candle soot[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 445: 128717.
- [53] ZHAO G C, LI J S, HUANG Y F, *et al.* Robust Ni/WC superhydrophobic surfaces by electrodeposition[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(71): 44896-44903.
- [54] KUANG Y L, JIANG F, ZHU T Q, *et al.* One-step electrodeposition of superhydrophobic copper coating from ionic liquid[J]. *Materials Letters*, 2021, 303: 130579.
- [55] ZHANG X F, CHEN R J, HU J M. Superhydrophobic surface constructed on electrodeposited silica films by two-step method for corrosion protection of mild steel[J]. *Corrosion Science*, 2016, 104: 336-343.
- [56] ZHANG X F, CHEN Y Q, HU J M. Robust superhydrophobic SiO<sub>2</sub>/polydimethylsiloxane films coated on mild steel for corrosion protection[J]. *Corrosion Science*, 2020, 166: 108452.
- [57] CHEN H W, ZHANG P F, ZHANG L W, *et al.* Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Nature*, 2016, 532(7597): 85-89.
- [58] 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.
- [59] RAZAVI S M R, OH J, HAASCH R T, *et al.* Environment-friendly antibiofouling superhydrophobic coatings[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(17): 14509-14520.
- [60] GHASEMLOU M, DAVER F, IVANOVA E P, *et al.* Bio-inspired sustainable and durable superhydrophobic materials: From nature to market[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(28): 16643-16670.
- [61] LAFUMA A, QUÉRÉ D. Slippery pre-suffused surfaces[J]. *Europhysics Letters*, 2011, 96(5): 56001.
- [62] CHEN L, PARK S, YOO J, *et al.* One-step fabrication of universal slippery lubricated surfaces[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(18): 2000305.
- [63] TESLER A B, PRADO L H, KHUSNIYAROV M M, *et al.* A one-pot universal approach to fabricate lubricant-infused slippery surfaces on solid substrates[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(27): 2101090.
- [64] CHEN L, HUANG S, RAS R H A, *et al.* Omniphobic liquid-like surfaces[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2023, 7(2): 123-137.
- [65] LIU P, ZHANG H D, HE W Q, *et al.* Development of "liquid-like" copolymer nanocoatings for reactive oil-repellent surface[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(2): 2248-2256.
- [66] HU J F, HUANG W J, WU Y, *et al.* "Liquid-like" surface topography waterborne polyurethane coatings with bio-based and easy-sliding oil repellency[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(7): 2100933.
- [67] HU H, WANG J, WANG Y, *et al.* Silicone-infused antismudge nanocoatings[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(10): 9029-9037.
- [68] HUANG S S, LIU G J, HU H, *et al.* Water-based anti-smudge NP-GLIDE polyurethane coatings[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 351: 210-220.
- [69] YU Q W, JI Y X. A novel approach to graft silicones onto waterborne polyacrylate for synthesizing anti-graffiti coatings by polydimethylsiloxane-functionalized RAFT agent[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(5): e53393.
- [70] TAS M, MEMON H, XU F, *et al.* Electrospun nanofibre membrane based transparent slippery liquid-infused porous surfaces with icephobic properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 585: 124177.
- [71] HABIB S, ZAVAHIR S, ABUSRAFA A E, *et al.* Slippery liquid-infused porous polymeric surfaces based on natural oil with antimicrobial effect[J]. *Polymers*, 2021, 13(2): 206.
- [72] WANG C X, YAN Y X, DU D M, *et al.* WO<sub>3</sub>-based slippery liquid-infused porous surfaces with long-term stability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(26): 29767-29777.
- [73] YAO W H, CHEN Y H, WU L, *et al.* Effective corrosion and wear protection of slippery liquid-infused porous surface on AZ31 Mg alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 429: 127953.
- [74] YAO W H, QIN J, CHEN Y H, *et al.* SiO<sub>2</sub> nanoparticles-containing slippery-liquid infused porous surface for corrosion and wear resistance of AZ31 Mg alloy[J]. *Materials & Design*, 2023, 227: 111721.
- [75] YAN W H, XUE S Y, BIN X, *et al.* Recent advances of slippery liquid-infused porous surfaces with anti-corrosion[J]. *Chemical Communications*, 2023, 59(16): 2182-2198.
- [76] SAKURABA K, KITANO S, KOWALSKI D, *et al.* Slippery liquid-infused porous surfaces on aluminum for corrosion protection with improved self-healing ability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(37): 45089-45096.
- [77] CHEN X S, HUANG J X, GUO Z G. Stable and biocompatible slippery lubricant-infused anode-oxidized titanium nanotube surfaces via a grafted polydimethylsiloxane brush[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(37): 17493-17502.
- [78] WEI Y S, YU Y Z, LI B Z, *et al.* Biomimetic liquid infused surface based on nano-porous array: Corrosion resistance for tin metal and self-healing property[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 656: 130482.
- [79] NOSONOVSKY M, BHUSHAN B. Patterned nonadhesive surfaces: Superhydrophobicity and wetting regime transitions[J]. *Langmuir*, 2008, 24(4): 1525-1533.
- [80] SHIRTCLIFFE N J, MCHALE G, ATHERTON S, *et al.* An introduction to superhydrophobicity[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, 161(1): 124-138.
- [81] MA Y C, WEI J, CAI Y Q, *et al.* Facile fabrication of self-roughened surfaces for superhydrophobic coatings via polarity-induced phase separation strategy[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 628: 777-787.
- [82] TAGLIARO I, SECCIA S, PELLEGRINI B, *et al.* Chitosan-based coatings with tunable transparency and superhydrophobicity: A solvent-free and fluorine-free approach by stearoyl derivatization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 302: 120424.
- [83] KIM J, KUMAR U P, LEE S J, *et al.* Implementation of enduring superhydrophobic surfaces through dilution rate control of the PDMS coating on micro-nano surface structures[J]. *Polymer*, 2023, 275: 125929.
- [84] TANG B, MENG C Z, ZHUANG L, *et al.* Field-induced wettability gradients for no-loss transport of oil droplets on slippery surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(34): 38723-38729.
- [85] LOU X D, HUANG Y, YANG X, *et al.* External stimuli responsive liquid-infused surfaces switching between slippery and nonslippery states: Fabrications and applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(10): 1901130.
- [86] CHE P D, HENG L P, JIANG L. Lubricant-infused anisotropic porous surface design of reduced graphene oxide toward electrically driven smart control of conductive droplets' motion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(22): 1606199.
- [87] RAO Q Q, ZHANG J W, ZHAN X L, *et al.* UV-driven self-replenishing slippery surfaces with programmable droplet-guiding pathways[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(5): 2481-2489.
- [88] LI S Y, ZHAO F, BAI Y P, *et al.* Slippery liquid-infused microphase separation surface enables highly robust anti-fouling, anti-corrosion, anti-icing and anti-scaling coating on diverse substrates[J]. *Chemical*

- Engineering Journal, 2022, 431: 133945.
- [89] SCARRATT L R J, STEINER U, NETO C. A review on the mechanical and thermodynamic robustness of superhydrophobic surfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 246: 133-152.
- [90] ZHANG J Z, ZHANG L G, GONG X. Large-scale spraying fabrication of robust fluorine-free superhydrophobic coatings based on dual-sized silica particles for effective antipollution and strong buoyancy[J]. *Langmuir*, 2021, 37(19): 6042-6051.
- [91] CHEN J Y, YUAN L H, SHI C, *et al.* Nature-inspired hierarchical protrusion structure construction for washable and wear-resistant superhydrophobic textiles with self-cleaning ability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(15): 18142-18151.
- [92] NI X X, GAO Y J, ZHANG X H, *et al.* An eco-friendly smart self-healing coating with NIR and pH dual-responsive superhydrophobic properties based on biomimetic stimuli-responsive mesoporous polydopamine microspheres[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 406: 126725.
- [93] HUANG J F, KANG J J, ZHANG J X, *et al.* Slippery surface with petal-like structure for protecting Al alloy: Anti-corrosion, anti-fouling and anti-icing[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2022, 19(1): 83-91.
- [94] JING X S, GUO Z G. Fabrication of biocompatible super stable lubricant-immobilized slippery surfaces by grafting a polydimethylsiloxane brush: Excellent boiling water resistance, hot liquid repellency and long-term slippery stability[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(18): 8870-8881.
- [95] YAO W H, LIANG W, HUANG G S, *et al.* Superhydrophobic coatings for corrosion protection of magnesium alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 52: 100-118.
- [96] KRISHNAN A, KRISHNAN A V, AJITH A, *et al.* Influence of materials and fabrication strategies in tailoring the anticorrosive property of superhydrophobic coatings[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2021, 25: 101238.
- [97] YUAN R X, LIU H, CHEN Y G, *et al.* Design ambient-curable superhydrophobic/electroactive coating toward durable pitting corrosion resistance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 374: 840-851.
- [98] CHEN H Y, WANG F F, FAN H Z, *et al.* Construction of MOF-based superhydrophobic composite coating with excellent abrasion resistance and durability for self-cleaning, corrosion resistance, anti-icing, and loading-increasing research[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 408: 127343.
- [99] XIE J, HU J, LIN X D, *et al.* Robust and anti-corrosive PDMS/SiO<sub>2</sub> superhydrophobic coatings fabricated on magnesium alloys with different-sized SiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 457: 870-880.
- [100] ZHANG D G, LI L H, WU Y L, *et al.* One-step method for fabrication of bioinspired hierarchical superhydrophobic surface with robust stability[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 473: 493-499.
- [101] LV Z X, YU S R, ZHOU X, *et al.* Preparation of a superhydrophobic coating on 6061 Al alloy substrate and its simplified truncated cone model[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2019, 16(4): 933-948.
- [102] DENG R, SHEN T, CHEN H, *et al.* Slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPSs): A perfect solution to both marine fouling and corrosion?[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(16): 7536-7547.
- [103] WANG X B, HUANG J X, GUO Z G. Overview of the development of slippery surfaces: Lubricants from presence to absence[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 301: 102602.
- [104] ZHU X D, HE J M, YAO Y L, *et al.* A substrate-friendly, sepiolite-based porous surface infused with slippery liquid with outstanding liquid repellency and metal corrosion resistance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 449: 128935.
- [105] JOO J, KANG M, MOON H S, *et al.* Design and experimental studies of self-healable anti-corrosion coating: Passivation of metal surfaces by silicone oil impregnated porous oxides[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 404: 126595.
- [106] SOTOUDEH F, MOUSAVI S M, KARIMI N, *et al.* Natural and synthetic superhydrophobic surfaces: A review of the fundamentals, structures, and applications[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 68: 587-609.
- [107] LIU Y B, GUO R Y, LIU J, *et al.* Robust PFMA/CNTs composite PDMS superhydrophobic film via Si-CuCRP method for efficient anti-icing[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 660: 130913.
- [108] ZAMAN KHAN M, MILITKY J, PETRU M, *et al.* Recent advances in superhydrophobic surfaces for practical applications: A review[J]. *European Polymer Journal*, 2022, 178: 111481.
- [109] JIANG L H, HAN M M, SUN J J, *et al.* Strong mechanical and durable superhydrophobic photothermal MWCNTs/SiO<sub>2</sub>/PDMS/PVDF composite coating for anti-icing and de-icing[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 174: 107282.
- [110] XIAO X, WEI X P, WEI J, *et al.* Multifunctional Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-based photothermal superhydrophobic composite coating for efficient anti-icing/deicing[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 256: 112313.
- [111] NATH S, AHMADI S F, BOREYKO J B. A review of condensation frosting[J]. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2017, 21(2): 81-101.
- [112] LONG Y F, YIN X X, MU P, *et al.* Slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) with superior liquid repellency, anti-corrosion, anti-icing and intensified durability for protecting substrates[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 401: 126137.
- [113] SATTARI M, OLAD A, MARYAMI F, *et al.* Facile fabrication of durable and fluorine-free liquid infused surfaces on aluminum substrates with excellent anti-icing, anticorrosion, and antibiofouling properties[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2023, 38: 102860.
- [114] HE Z K, YANG X C, WANG N, *et al.* Anti-biofouling polymers with special surface wettability for biomedical applications[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 807357.
- [115] ZHANG B B, XU W C. Superhydrophobic, superamphiphobic and SLIPS materials as anti-corrosion and anti-biofouling barriers[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(34): 15170-15179.
- [116] ZHAO Y, XU T, HU J M. A robust, room-temperature curable and molecular-level superhydrophobic coating with excellent antibacterial and antifouling properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 136557.
- [117] YE Z P, LI S Y, ZHAO S Y, *et al.* Textile coatings configured by double-nanoparticles to optimally couple superhydrophobic and antibacterial properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420: 127680.
- [118] 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.
- [119] MANNA U, RAMAN N, WELSH M A, *et al.* Slippery liquid-infused porous surfaces that prevent microbial surface fouling and kill non-adherent pathogens in surrounding media: A controlled release approach[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(21): 3599-3611.
- [120] MOZUMDER M S, MOURAD A H I, PERVEZ H, *et al.* Recent developments in multifunctional coatings for solar panel applications: A review[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 189: 75-102.
- [121] LI Y J, ZHANG Y J, LIN J, *et al.* Multiscale array antireflective coatings for improving efficiencies of solar cells[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 462: 105-111.
- [122] WANG W H, LI J W, WANG P, *et al.* Fabrication of polydimethylsiloxane-attached solid slippery surface with high underwater transparency towards the antifouling of optical window for marine instruments[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 623: 832-844.