

# 疏水表面制备及应用

魏志昕

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年2月20日; 录用日期: 2026年3月14日; 发布日期: 2026年3月26日

## 摘要

疏水表面在清洁能源、航空航天等多领域具有重要应用价值, 其制备核心为构筑微纳结构与修饰低表面能成分。本文阐述Young's方程、Wenzel模型、Cassie-Baxter模型三大经典润湿性理论, 梳理近几年化学刻蚀、阳极氧化、有机-无机杂化及飞秒激光加工等疏水表面制备技术的研究进展, 重点分析飞秒激光加工无接触、高精度、可调控润湿性的技术优势及相关研究成果。总结疏水表面在防冰防霜、耐腐蚀、防污抗菌等领域的应用特性与研究成果, 证实其工程应用潜力。指出当前疏水表面存在机械耐久性不足、部分制备技术成本高效率低、性能演变规律不明、功能单一等产业化瓶颈, 从技术联用、工艺优化、模型建立、绿色材料开发及多功能复合等方面展望未来研究方向, 为疏水表面的规模化工程应用提供参考。

## 关键词

疏水表面, 制备技术, 表面润湿性, 功能应用

# Fabrication and Applications of Hydrophobic Surfaces

Zhixin Wei

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: February 20, 2026; accepted: March 14, 2026; published: March 26, 2026

## Abstract

Hydrophobic surfaces hold significant application value in diverse fields such as clean energy and aerospace. The core of their fabrication lies in constructing micro/nano structures and modifying low-surface-energy components. This article elaborates on three classical wettability theories: Young's equation, the Wenzel model, and the Cassie-Baxter model. It reviews the research progress in recent years on fabrication techniques for hydrophobic surfaces, including chemical etching, anodization, organic-inorganic hybridization, and femtosecond laser processing. The technical ad-

vantages of femtosecond laser processing—such as non-contact operation, high precision, and tunable wettability—are analyzed in detail, along with related research findings. The application characteristics and research outcomes of hydrophobic surfaces in areas like anti-icing/frost, corrosion resistance, and antifouling/antibacterial properties are summarized, confirming their potential for engineering applications. Current industrialization bottlenecks are identified, including insufficient mechanical durability, high cost and low efficiency of some fabrication techniques, unclear performance evolution mechanisms, and limited functionality. Future research directions are proposed from the perspectives of technique combination, process optimization, model establishment, green material development, and multifunctional integration, providing a reference for the large-scale engineering application of hydrophobic surfaces.

## Keywords

Hydrophobic Surfaces, Fabrication Techniques, Surface Wettability, Functional Applications

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

疏水表面可为清洁能源[1][2]、环境保护[3][4]、航空航天[5][6]、生物医疗[7]-[9]等领域的系统性难题提供有效解决方案,各领域对具备优异疏水性的材料表面需求持续攀升,推动了疏水表面从实验室基础研究向产业化引用迈进。

目前,疏水表面的制备核心围绕两大关键因素展开:一是提升材料表面粗糙度,二是降低材料表面能。其中,表面粗糙度的提升主要通过基底表面构筑微纳米结构实现,表面能的降低则依靠低表面能化学成分的修饰与附着。基于此,疏水表面的常规制备策略主要分为两类,其一为在基底材料表面先构建微纳米结构,再修饰低表面能成分;其二是直接在本身具备低表面能特性的材料表面构筑微纳米结构。

本文系统梳理了近年来国内外关于疏水表面制备技术研究进展,同时总结了各类疏水表面的实际应用方向与研究成果,将从理论模型、制备技术、应用研究及未来展望四个方面进行系统综述。

## 2. 疏水表面润湿性

### 2.1. 表面润湿性模型

润湿性模型是探究材料表面润湿性的核心工具,Young's 方程、Wenzel 模型与 Cassie-Baxter 模型这三大经典润湿性模型,为科研领域分析与研究表面润湿性提供了坚实的理论支撑。

1832 年,英国科学家 Thomas Young 基于热力学平衡的原理提出第一个经典润湿性模型——Young's 方程[10]:

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

式中,  $\theta_Y$  为杨氏接触角,亦称为本征接触角,是材料表面的固有润湿属性;  $\gamma_{SV}$ 、 $\gamma_{SL}$  和  $\gamma_{LV}$  分别为固-气界面张力、固-液界面张力和液-气界面张力。Young's 方程表明,本征接触角  $\theta_Y$  由三相界面的表面张力相对大小决定,通过该方程可定量分析液体在理想光滑固体表面的润湿状态,为表面润湿性的研究奠定了基础理论框架。

1936年, Wenzel 针对表面粗糙度对润湿行为的影响, 对 Young's 方程进行修正[11]。由于实际固体表面均存在微观粗糙度, Wenzel 提出将表面粗糙度作为固液实际接触面积的几何修正因子, 并推导出:

$$\cos \theta_W = r \cdot \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} = r \cdot \cos \theta_Y \quad (2)$$

式中,  $\theta_W$  为粗糙表面的表观接触角,  $r$  为表面粗糙度因子。Wenzel 模型指出, 粗糙度因子  $r$  放大了材料表面的本征接触角  $\theta_Y$ , 仅能增强固体表面的固有润湿性, 而无法改变其润湿类型(亲水/疏水)。

1944年, Cassie 和 Baxter 针对液体与固体表面接触时能够形成“复合界面”状态, 提出 Cassie-Baxter 模型[12]。设液体与固体表面的实际接触面积分数为  $f_{SL}$ , 液滴与空气的接触面积分数为  $f_{LV}$ , 可得:

$$\cos \theta_{CB} = r \cdot f_{SL} \cdot \cos \theta_Y + f_{LV} \cdot \cos \theta_{LV} \quad (3)$$

式中  $\theta_{CB}$  为 Cassie-Baxter 状态的接触角,  $\theta_Y$  为固体表面的本征接触角,  $\theta_{LV}$  为液滴在空气界面的接触角,  $r$  为表面粗糙度比。通常情况下,  $\theta_{LV} = 180^\circ$ , 且  $f_{SL} = 1 - f_{LV}$ , 因此可以进一步得到:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{CB} &= r(1 - f_{LV}) \cos \theta_Y + f_{LV} \cos 180^\circ \\ &= r \cdot \cos \theta_Y - f_{LV} (r \cdot \cos \theta_Y + 1) \end{aligned} \quad (4)$$

当  $f_{LV} \rightarrow 1$  时, 液 - 气界面成为主导, 符合超疏水表面的特性:

$$\cos \theta_{CB} \approx -1 \Rightarrow \theta_{CB} \approx 180^\circ \quad (5)$$

当  $f_{LV} \rightarrow 0$  时, 固 - 液界面成为主导, 模型退化为 Wenzel 方程, 液滴完全润湿粗糙结构:

$$\cos \theta_{CB} = r \cdot \cos \theta_Y \quad (6)$$

从热力学的角度来看, Cassie-Baxter 状态的优势在于, 低自由能的液 - 气界面在“复合界面”的占比极高, 可大幅度降低系统的总界面自由能。因此, 即使材料表面的本征接触角仅中度疏水 ( $90^\circ < \theta_Y < 150^\circ$ ), 也可以通过合理的微观结构设计, 使其表观接触角超过  $150^\circ$ , 实现超疏水性能。

## 2.2. 接触角滞后与润湿状态稳定性

除静态接触角外, 接触角滞后是评价表面润湿动态行为的关键参数。接触角滞后定义为前进角(液滴增大时固液界面扩展的临界接触角)与后退角(液滴减小时固液界面收缩的临界接触角)之差, 其大小反映了液滴在表面上的移动难易程度。滚动角则是液滴开始滚动的最小倾斜角度, 与接触角滞后密切相关。通常, 超疏水表面要求接触角滞后小于  $10^\circ$ , 滚动角小于  $5^\circ$ 。

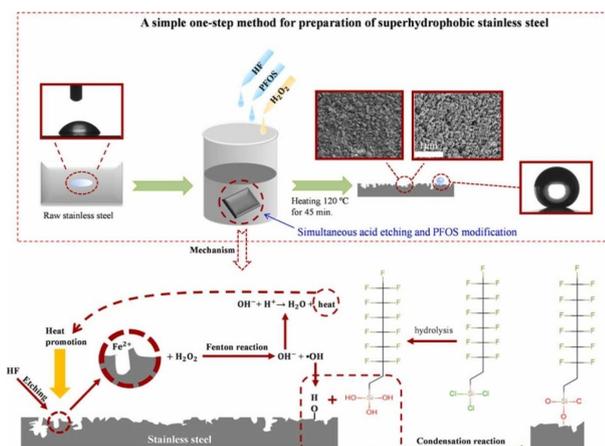
接触角滞后的根源在于三相接触线在表面微观结构上的钉扎效应。当表面具有不均匀的化学组成或粗糙结构时, 接触线会发生变形, 导致能量势垒, 阻碍液滴运动。此外, 润湿状态的稳定性是疏水表面应用的关键。Cassie 状态虽然具有高接触角, 但可能在外界压力、振动或温度变化下不可逆地转变为 Wenzel 状态, 丧失疏水性能。因此, 设计稳定的 Cassie 状态需考虑微观结构的几何参数(如深宽比、间距)以及表面能, 以抵抗润湿转变。近年来, 研究者通过调控微结构的形貌和分布, 成功提高了 Cassie 状态的稳定性, 例如构建再入式结构或多级结构以捕获更多空气, 增大能量势垒。

## 3. 疏水表面制备技术

近年来, 随着微观结构制备工艺的不断进步与超疏水涂层材料的创新发展, 科研人员已开发出多种疏水表面制备技术。这些技术能够在金属[13][14]、玻璃[15][16]、半导体[17][18]及聚合物[19][20]等多种材料表面直接构建疏水结构, 或通过涂覆疏水涂层赋予基材疏水性能。常用的疏水表面制备技术包括化学刻蚀、阳极氧化、有机 - 无机杂化以及飞秒激光加工等。

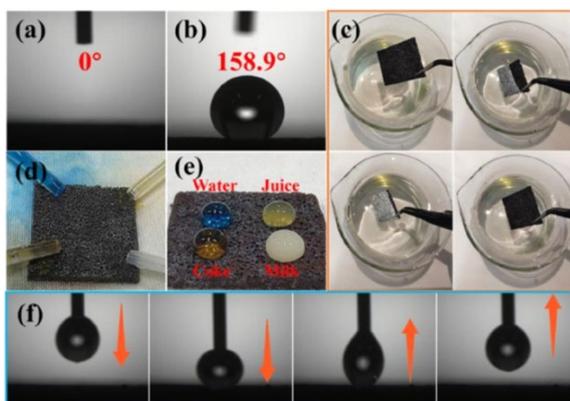
### 3.1. 化学刻蚀技术

2022 年, Chen Y S 等人为了简化传统的超疏水不锈钢的制备工艺, 结合  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、HF 和全氟乙基三氯硅烷(PFOS)的协同作用, 开发了一种化学刻蚀 - 表面修饰单步制备法[21]。制备过程如图 1 所示, 该研究同时探讨了试剂混合比与反应时间对制备效果的影响。结果表明,  $\text{H}_2\text{O}_2$  对不锈钢表面疏水性能的影响最为显著, 当  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HF}$  的摩尔比在 0.2/1~0.4/1 范围内时, 所制备的样品展现出优异的超疏水性, 最大水接触角达  $161.78^\circ$ , 最小滚动角为  $1.94^\circ$ 。耐腐蚀性与耐久性测试结果显示, 超疏水不锈钢表面的耐腐蚀性为原始表面的 6 倍; 在空气中暴露 3 个月后, 其超疏水性无明显衰减, 经胶带剥离 12 次后, 水接触角仍接近  $150^\circ$ 。



**Figure 1.** Superhydrophobic surface was fabricated via a one-step process using  $\text{H}_2\text{O}_2$ , HF, and PFOS  
**图 1.** 通过  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、HF 和 PFOS 一步制备超疏水表面

2025 年, Liu Z L 等人采用化学刻蚀结合表面改性的方法, 成功制备出具备多级微纳结构的光热超疏水泡沫铁[22]。如图 2 所示, 所制备样品表面因兼具多级微纳结构与低表面能特性, 水接触角达  $158.9^\circ$ , 滚动角为  $2.6^\circ$ , 且对多种液体均表现出良好的拒液性。经砂纸循环打磨与水流冲击实验后, 样品仍能保持良好的疏水性。



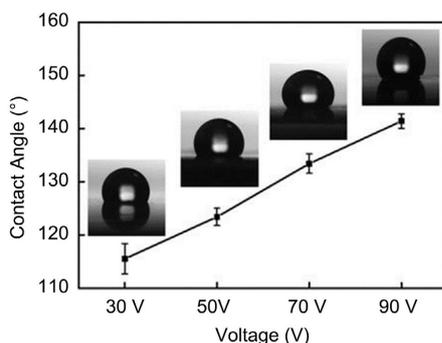
**Figure 2.** Hierarchical micro/nano structured iron foam fabricated by chemical etching and surface modification: (a) (d) Surface wettability before modification; (b) (e) Surface wettability after modification; (c) Aerophilicity of the hydrophobic surface; (f) Hydrophobic iron foam surface with extremely low adhesion

**图 2.** 化学刻蚀和表面改性的多级微纳结构泡沫铁: (a) (d) 改性前的表面润湿性; (b) (e) 改性后的表面润湿性; (c) 疏水表面亲气性; (f) 具有极低粘附性的疏水泡沫铁表面

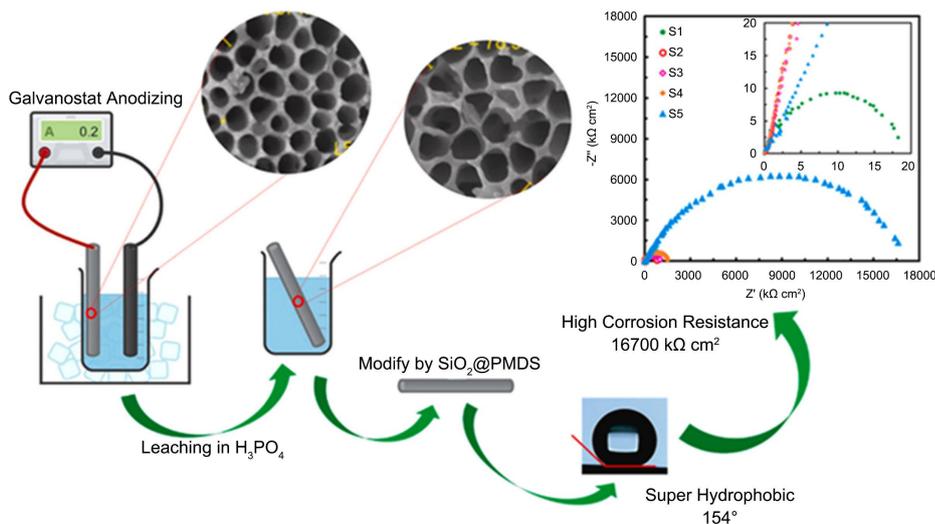
化学刻蚀技术操作简单、成本较低，适用于多种金属基底，但存在以下局限：1) 刻蚀过程通常使用强酸或强氧化剂，环境友好性差；2) 难以精确控制微结构的均匀性和几何参数，重复性受限于溶液更新和基底表面状态；3) 所得表面的机械耐久性有限，尤其在经历摩擦后易失去疏水性；4) 对某些惰性材料(如聚合物)刻蚀效果不佳。

### 3.2. 阳极氧化技术

2022年，Chanyoung Jeong 等人[23]将阳极氧化工艺应用于 316L 不锈钢制备出多孔纳米结构，显著提升了不锈钢表面的疏水性能。表面润湿性能和 PDP 测试结果如图 3 所示。通过在 316L 不锈钢表面分别施加 30、50、70、90 V 电压 3 个小时，并在 0.1 M 磷酸中浸泡 10 分钟，观察到表面氧化物结构发生改变。之后使用全氟癸基三氯硅烷(FDTS)对表面进行改性，结果显示，施加的电压越高，FDTS 涂层的超疏水氧化物薄膜，孔径更大，氧化膜厚度更大，表面的孔隙内能够存储更多的空气，更能防止腐蚀物接触 316L 不锈钢表面，其防腐蚀效率更高，最高可达 96%。



**Figure 3.** Hydrophobic properties of porous stainless steel under different applied voltages  
**图 3.** 不同施加电压下多孔不锈钢的疏水性能



**Figure 4.** Fabrication process of porous anodic alumina and its corrosion resistance  
**图 4.** 多孔阳极氧化铝的制备过程及其防腐蚀性

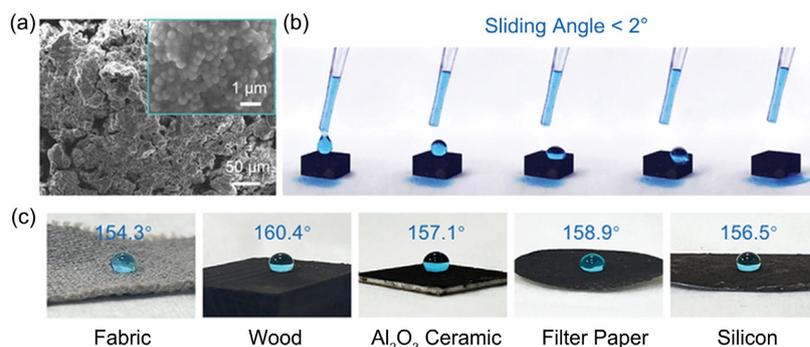
2024年，Abdolmaleki M 等人[24]使用阳极氧化在铝基底上制备出圆形多孔纳米结构，并通过化学刻蚀进一步扩大圆孔直径，最后使用 CVD 在样品表面沉积  $SiO_2/PMDS$  颗粒，形成超疏水表面。制备过程

如图 4 所示。阳极氧化铝的水接触角可达  $153^\circ$ ，经过化学刻蚀和 CVD 后的水接触角可达  $154^\circ$ 。改性后，阳极氧化刻蚀铝超疏水表面的电荷转移电阻是纯铝的 900 倍，腐蚀电位正移 0.385 V，腐蚀电流减少了 3 个数量级。实验说明，通过阳极氧化处理、化学刻蚀和表面改性的流程能够使铝的防腐蚀性能大幅度提升。

阳极氧化技术可在大面积金属表面制备均匀的纳米多孔结构，但存在以下问题：1) 主要适用于贵金属(如 Al、Ti、Mg 等)，对不锈钢等材料的工艺复杂且需特殊电解液；2) 氧化膜较脆，机械耐久性不足，摩擦后易剥落；3) 工艺中包含高压电和化学试剂，能耗较高且废液处理成本大；4) 难以在复杂曲面或非金属基底上应用。

### 3.3. 有机 - 无机杂化技术

2023 年, Shi, Z 和 Zeng, H 等人[25]以  $\text{SiO}_2$  颗粒为纳米粗糙单元, 聚多巴胺 PDA 为黏合剂, 全氟癸基三乙氧基硅烷 FAS-17 为疏水改性剂, 实现材料表面超疏水改性。如图 5 所示, 通过 SEM 表征改性后的 Nd-Fe-B 表面呈现层级结构, 水接触角可达  $169.5^\circ$ , 滚动角小于  $2^\circ$ 。电化学测试表明, 超疏水 Nd-Fe-B 的 Icorr 值比裸 Nd-Fe-B 磁体低三个数量级, 证明 Nd-Fe-B 基底上有效的腐蚀保护。该制备方式同样适用于织物、木材、陶瓷等多种基材, 提供了疏水涂层制备新思路。



**Figure 5.** Superhydrophobicity achieved by self-assembled  $\text{SiO}_2$ @polydopamine core-shell nanosphere coating: (a) SEM image of the modified Nd-Fe-B surface; (b) Rolling behavior of a water droplet on the modified Nd-Fe-B surface; (c) Superhydrophobicity enabled on various substrate surfaces by the PDA-doped  $\text{SiO}_2$  particle coating

**图 5.** 自组装  $\text{SiO}_2$ @聚多巴胺核壳纳米球涂层实现超疏水性：(a) 改性 Nd-Fe-B 表面的 SEM 图像；(b) 液滴在改性 Nd-Fe-B 上的滚动行为；(c) PDA 掺杂  $\text{SiO}_2$  颗粒涂层实现不同基材表面的超疏水性

2024 年, Xu Yuan 等人使用环氧树脂作为粘合剂, 混合疏水性二氧化硅颗粒, 将其喷涂在碳纤维复合材料表面, 制备出了水接触角  $158^\circ \pm 1^\circ$ 、滚动角  $1^\circ \pm 0.5^\circ$  的超疏水表面[26]。该表面具有出色的动态防水性能, 液滴在表面可弹跳三次以上。经过摩擦损伤测试后, 样品表面结构磨损程度很小, 表面仍能保持超疏水状态。即使将表面浸没在不同 pH 值的溶液中, 表面也未受到明显的腐蚀, 接触角保持在  $155^\circ$  以上。

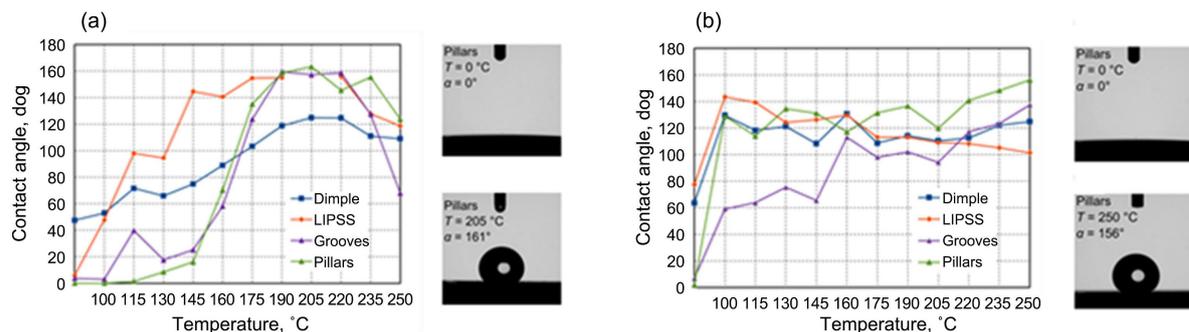
有机 - 无机杂化涂层技术工艺简单、基底适应性广, 但存在以下问题：1) 涂层与基底的结合力有限, 长期使用或外力作用下易脱落；2) 涂层的机械耐久性(如耐磨、耐刮擦)仍待提升, 多数研究仅进行短期测试；3) 涂层厚度和均匀性难以精确控制, 可能影响光学透明性或热传导等性能；4) 部分疏水改性剂含氟, 环境友好性有待改进。

### 3.4. 飞秒激光加工技术

飞秒激光加工通过调控激光功率、扫描速度、脉冲数、扫描间距等参数, 精确控制微结构的几何尺

寸(如凹坑直径、深度、周期、LIPSS 的周期等), 进而影响粗糙度因子  $r$  和空气捕获面积分数  $f_{LV}$ 。

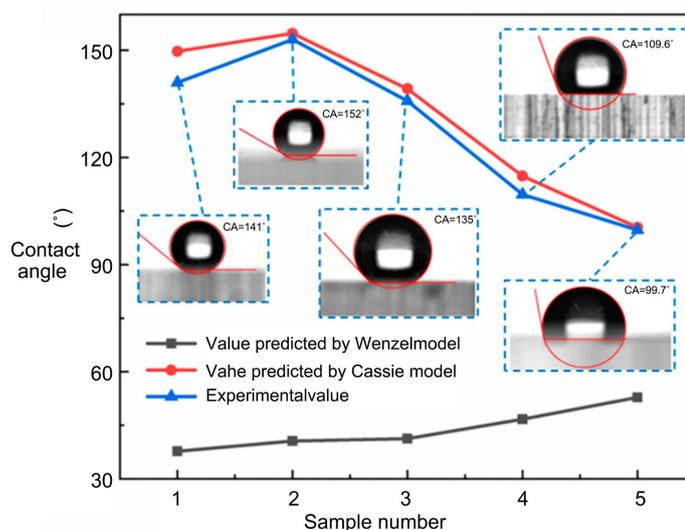
2022 年, Cereska D 等人[27]使用飞秒激光加工协同梯度热处理的方案, 在铝、不锈钢等工业金属合金表面上制备出按需调控的润湿性表面。实验证实, 相同/微调的激光参数可适配多种合金, 结合  $100^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$  梯度热处理后, 可快速转变为疏水/超疏水。结果如图 6 所示。其中铝可调性最强(接触角  $0^{\circ}\sim 161^{\circ}$ ), 钢在  $100^{\circ}\text{C}$  以上即可实现超疏水, 疏水表面性能可以维持 10 个月。



**Figure 6.** Surface wettability after heat treatment at different temperatures: (a) Aluminum; (b) Stainless steel

**图 6.** 经过不同温度热处理后的表面润湿性能: (a) 铝; (b) 不锈钢

2022 年, Wang BF 等人[28]构建了 PMMA 的飞秒激光去除模型, 并通过飞秒激光加工制造了 PMMA 表面的初级和次级微观结构, 如图 7 所示。之后使用超深三维显微镜和接触角测量仪对微观结构的表面形态和润湿性进行测量和分析。结果显示, 飞秒激光直接写入表面微观结构使 PMMA 表面的润湿性从亲水状态转变为疏水状态。同时, PMMA 表面多级微结构的尺寸参数也得到了数值模拟的优化。优化后的微观结构接触角可超过  $150^{\circ}$ , 实现 PMMA 表面的超疏水性。



**Figure 7.** Theoretical prediction and experimental contact angles of cross-shaped secondary microstructures

**图 7.** 十字形次级微观结构的理论预测与实验接触角

2024 年, Duan JY 等人[29]提出单步飞秒激光加工结合全氟硅烷改性的方案, 如图 8 所示, 成功在硅表面构建出“周期性微结构 + LIPSS + 纳米颗粒”的多层级微纳结构。该研究通过调控结构高度、占空比与尺寸, 揭示其对反射率和疏水性的影响机制。最优参数下, 硅表面可呈现  $172.3^{\circ} \pm 0.8^{\circ}$  的静态接触角



飞秒激光加工具有无接触、高精度、可加工多种材料等优势，但也存在以下局限：1) 对于复杂三维曲面，加工路径规划困难；2) 激光加工后表面往往需后续化学修饰才能达到超疏水，增加了步骤；3) 尽管部分研究展示了较好的机械耐久性，但微结构在强烈摩擦下仍可能被破坏，需进一步强化。

### 3.5. 表面制备技术对比

为便于直观对比各类疏水表面制备技术的特点，表 1 从制备精度、设备成本、可处理面积、基底适用性、机械耐久性、环境友好度等维度进行了比较。

**Table 1.** Comparison of fabrication techniques for hydrophobic surfaces

**表 1.** 疏水表面制备技术对比

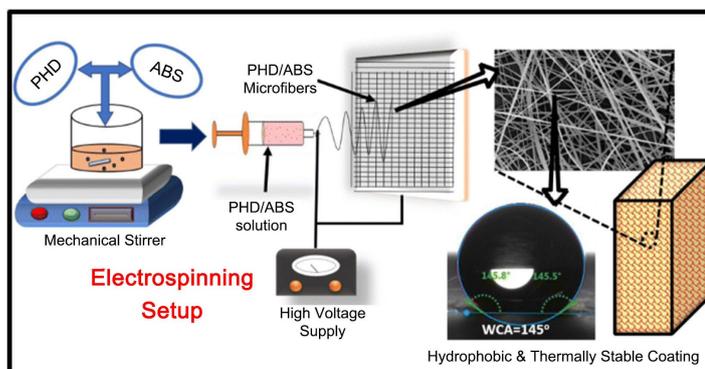
技术类型	制备精度	成本	可处理面积	适用性	耐久性	环境友好性
化学刻蚀	中等	低	大	金属为主	中等	低 (使用酸/氧化剂)
阳极氧化	高	中等	中等	金属为主	中等	中等 (废液处理)
有机-无机杂化	中等	低	大	广泛	中等	中等 (部分含氟化合物)
飞秒激光加工	极高	中等	中等	广泛	高	高

## 4. 疏水表面的应用

疏水表面因其独特的拒液性能，在不同应用环境下展现出丰富多样的表面特性与功能优势。在低温环境中，疏水表面可有效延缓冰霜成核与附着，表现出优异的防冰防霜能力；在腐蚀性介质中，其通过减少液滴接触面积与停留时间，显著提升基底的耐腐蚀性能。此外，疏水表面还具备良好的防污与抗菌潜力，能够抑制微生物附着与生物膜形成。

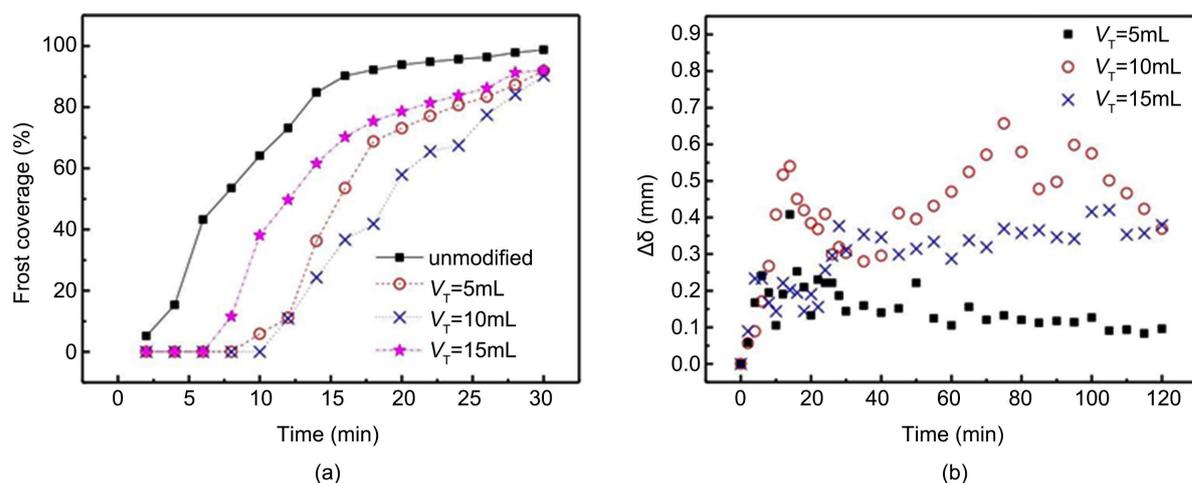
### 4.1. 防冰防霜应用

2020 年，Pawan Kumar 等人[32]通过溶液共混-静电纺丝技术与 ABS 复合，制备 PHD/ABS 功能化微纤维，如图 10 所示。FESEM 表征显示，微纤维呈多孔非织造分层结构，PHD 与 ABS 因不互溶形成相分离，提升表面粗糙度。0.4 wt% PHD/ABS 表面的静态水接触角达  $145^\circ \pm 2^\circ$ ，其热稳定达  $350^\circ\text{C}$  (优于纯 PHD 的  $200^\circ\text{C}$ )。冰粘附测试中，78 kPa 气压下 8 s 可移除  $-80^\circ\text{C}$  冻滴。实验结果表明，制备的微纤维兼具高疏水性、高热稳定性与低冰粘附性。



**Figure 10.** Hydrophobic fibers prepared by electrospinning, along with their SEM images and static contact angles  
**图 10.** 静电纺丝制备疏水性纤维及其 SEM 图像和静态接触角

2021年, Fan Pengyan 等人[33]使用溶胶-凝胶法成功制备了基于  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒的透明疏水防霜表面, 并确定 TEOS 最佳添加量为 10 mL, 此时表面兼具较好的疏水性(静态接触角  $128.4^\circ$ , 较未改性玻璃提升 44.1%)、良好透光性(可见光透过率大于 87.1%)。如图 11 所示, 防霜实验表明, 该表面霜晶初始出现时间长达 660 s, 较未改性表面延长 540 s, 霜传播速度仅  $47.5 \mu\text{m/s}$ , 降低 29.6%, 霜覆盖率与厚度增长显著抑制。同时该团队发现的冰桥机制为理解透明疏水表面的防霜机理提供了新视角。

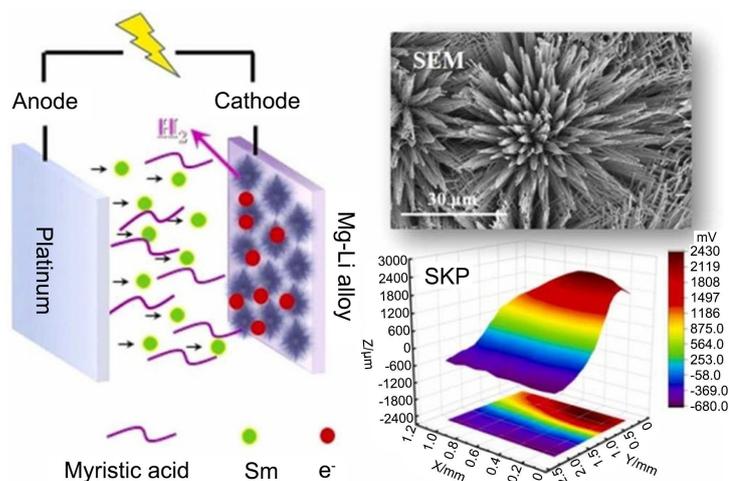


**Figure 11.**  $\text{SiO}_2$ @TEOS coating delays frost formation (a) and reduces frost thickness (b)

**图 11.**  $\text{SiO}_2$ @TEOS 涂层延迟结霜速度(a), 减小结霜厚度(b)

目前防冰防霜疏水表面在实际应用中面临以下挑战: 1) 在高湿度或结霜条件下, 微结构可能被霜层填充, 导致 Cassie 状态失效; 2) 机械耐久性不足, 冰层去除过程中可能损伤表面结构; 3) 部分场景的透明性要求限制了表面粗糙度的设计, 需在透光率和疏水性之间权衡。

## 4.2. 耐腐蚀应用



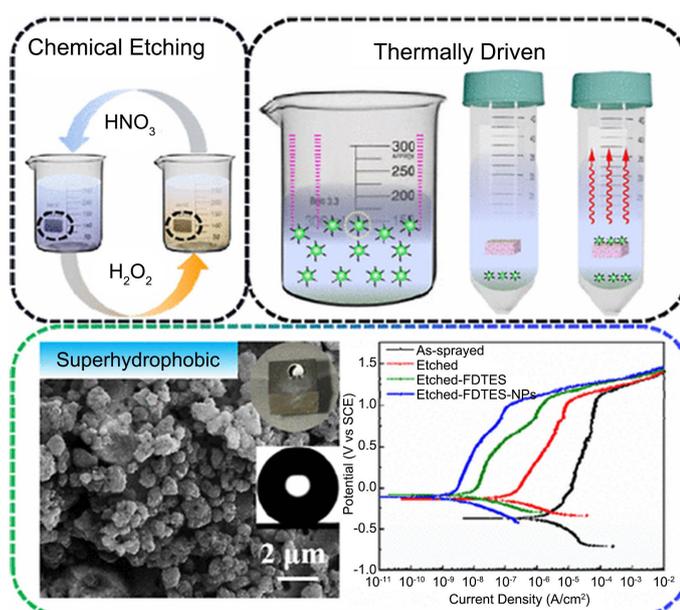
**Figure 12.** Electrochemical deposition achieves a highly efficient anticorrosion hydrophobic surface

**图 12.** 电化学沉积实现高效防腐疏水表面

2022年, Yibo Ouyang 等人[34]受生物启发, 采用一步电沉积法在镁锂合金(LA141)表面成功构筑了

超疏水涂层(水接触角高达  $167.4^\circ$ ，滚动角低至  $1^\circ$ )，如图 12 所示，实现高效腐蚀防护。通过瞬态图像捕捉技术揭示了水滴与超疏水表面的动态相互作用，证实了其对水相的强排斥性。通过电化学阻抗谱和动电位极化曲线技术，评估了不同电压和时间参数下制备的超疏水涂层在浸没状态下的耐腐蚀性能。结果表明，在  $40\text{ V}$  电压下电解 30 分钟所制备的涂层，其电化学阻抗高达  $5.62 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，较裸态镁锂合金提升了约 4 个数量级；同时，其腐蚀电流密度低至  $4.36 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ，也下降了约 4 个数量级，充分证明了本研究制备的涂层具有优异的耐腐蚀性能。

2023 年，Ma Tengda 等人[35]通过化学刻蚀结合热驱动制备策略设计了一种具有耐腐蚀性的超疏水铁基非晶涂层。如图 13 所示，制备出的涂层表现出超疏水性(接触角大于  $150^\circ$ )和优异的耐腐蚀性(腐蚀电流密度和钝化电流密度降低 3 个数量级)。结果表明，超疏水行为源于羟基诱导的表面微/纳米多级聚集(簇结构)的构建，沉积在团簇聚集表面的疏水剂层和构成团簇的纳米颗粒元素主导着涂层的耐腐蚀性能。



**Figure 13.** A superhydrophobic surface was fabricated by chemical etching combined with thermal driving, exhibiting excellent corrosion resistance

**图 13.** 化学刻蚀结合热驱动制备超疏水表面，具有优异的耐腐蚀性

目前，耐腐蚀疏水表面在实际工况中可能遇到的问题包括：1) 长期浸泡下空气层逐渐消失，表面转变为 Wenzel 状态，失去防护能力；2) 局部缺陷或损伤导致腐蚀介质渗透，引发点蚀。

### 4.3. 防污抗菌应用

2021 年，Wu Zhiyuan 等人[36]提出一种基于冷凝诱导的超疏水表面粉尘自清洁方法。首先制备超疏水表面并沉积粉尘颗粒，随后在冷凝可视化平台上观测粉尘去除过程。研究发现，冷凝初期颗粒接触点处形成的液桥是决定粉尘去除行为的关键。随着冷凝持续进行，自清洁过程呈现颗粒凝聚、冷凝液滑移与滚动三个连续阶段。在环境温度  $26^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、空气湿度  $60\% \pm 5\%$ 、冷台温度  $10^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$  的实验条件下，90 分钟内可清除表面超过 95% 的粉尘颗粒。

2023 年，Xinghua Wu 等人[37]制备了一种具有耐压性、化学稳定性、生物相容性及抗生物污损性能的水下稳定超疏水表面。实验表明，该表面在  $13.72\text{ kPa}$  水压作用下可维持超疏水特性长达 27 天。为验

证其抗生物污损性能,将制备的样品置于天然湖泊中浸泡 50 天,结果显示表面经受水体冲刷和生物侵蚀的时间超过 35 天。通过砂纸摩擦试验评估其机械稳定性,发现经 12 米磨损后表面水接触角仍无衰减。

目前,防污抗菌疏水表面在应用中存在以下问题:1) 微生物分泌的胞外聚合物可能穿透微结构,造成不可逆附着;2) 表面微结构可能成为细菌的藏匿之处,导致感染风险增加;3) 抗菌性能需结合杀菌剂,但杀菌剂的释放会随时间衰减。

## 5. 总结与展望

近五年,疏水表面在制备技术与应用研究方面取得显著进展,形成了化学刻蚀、阳极氧化、有机-无机杂化、静电纺丝、飞秒激光加工等多技术并行的格局。各类方法均以“构筑微纳结构+低表面能修饰”为核心实现疏水性能,且各有优势。在应用方面,疏水表面正从基础研究向实际工程延伸,在防冰防霜、耐腐蚀、防污抗菌等领域展现出广阔潜力。

尽管研究取得诸多成果,但从实验室走向工业化仍面临三重核心瓶颈,需针对性突破:

现有表面机械耐久性不足,在摩擦冲刷下易失效,且极端环境适应性差、功能单一,难以满足光热、抗菌等复合需求。通过多种技术复合制备,增强表面机械强度与环境适应性,同时推动多功能复合,拓展在航空航天、生物医疗等高端领域的应用。

部分技术设备成本高、效率低,制约大规模制备。未来应当优化加工效率,开展产业化工艺研究,降低生产成本,实现从实验室到生产线的转化。

目前表面性能演变规律尚不明确,缺乏面向实际工况的寿命预测模型。未来应该深入探索性能衰减机理,结合理论与实验建立精准预测模型,为工程应用提供理论支撑。

此外,还需兼顾环保需求,开发新型绿色低表面能材料,在保证疏水性的同时提升生物相容性。

总体而言,随着制备技术的持续创新和功能复合化的发展,疏水表面凭借其独特性能,必将在更多工业领域实现规模化应用,为相关工程技术难题提供有效解决方案。

## 参考文献

- [1] Wu Yi-Zhi, and Xu Xiao-Liang, (2017) Fabrication of ZnO Nanowire-Silicon Pyramid Hierarchical Structure, and Its Self-Cleaning. *Acta Physica Sinica*, **66**, Article 096801. <https://doi.org/10.7498/aps.66.096801>
- [2] Hu, Q., Yang, H., Jiang, X., Shu, L. and Yang, X. (2022) Investigation on One-Step Preparation and Anti-Icing Experiments of Robust Super-Hydrophobic Surface on Wind Turbine Blades. *Cold Regions Science and Technology*, **195**, Article 103484. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103484>
- [3] Liu, S.Z., Zhang, Q., Liu, N., et al. (2020) One-Step Synergistic Hydrophobic Modification of Melamine Sponge and Its Application. *Chemical Journal of Chinese Universitie*, **41**, 521-529.
- [4] Zhu, Q., Tao, F. and Pan, Q. (2010) Fast and Selective Removal of Oils from Water Surface via Highly Hydrophobic Core-Shell Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@c Nanoparticles under Magnetic Field. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2**, 3141-3146. <https://doi.org/10.1021/am1006194>
- [5] Kim, P., Wong, T., Alvarenga, J., Kreder, M.J., Adorno-Martinez, W.E. and Aizenberg, J. (2012) Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with Extreme Anti-Ice and Anti-Frost Performance. *ACS Nano*, **6**, 6569-6577. <https://doi.org/10.1021/nm302310q>
- [6] Ng, Y., Tay, S. and Hong, L. (2018) Formation of Icephobic Surface with Micron-Scaled Hydrophobic Heterogeneity on Polyurethane Aerospace Coating. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 37517-37528. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13403>
- [7] Berendjchi, A., Khajavi, R. and Yazdanshenas, M.E. (2011) Fabrication of Superhydrophobic and Antibacterial Surface on Cotton Fabric by Doped Silica- Based Sols with Nanoparticles of Copper. *Nanoscale Research Letters*, **6**, Article No. 594. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-6-594>
- [8] Daskalova, A. and Angelova, L. (2023) Design of Surfaces with Persistent Antimicrobial Properties on Stainless Steel Developed Using Femtosecond Laser Texturing for Application in “High Traffic” Objects. *Nanomaterials*, **13**, Article 2396. <https://doi.org/10.3390/nano13172396>

- [9] Grivet, M., Morrier, J.J., Benay, G. and Barsotti, O. (2000) Effect of Hydrophobicity on *in Vitro* Streptococcal Adhesion to Dental Alloys. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **11**, 637-642. <https://doi.org/10.1023/a:1008913915399>
- [10] Young, T. (1832) An Essay on the Cohesion of Fluids. *Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **183**, 171-172. <https://doi.org/10.1098/rspl.1800.0095>
- [11] Wenzel, R.N. (1936) Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial & Engineering Chemistry*, **28**, 988-994. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>
- [12] Cassie, A.B.D. and Baxter, S. (1944) Wettability of Porous Surfaces. <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>
- [13] Liu, Y., Li, L., Lu, G. and Yu, S. (2010) Preparation of Biomimetic Hydrophobic Coatings on AZ91D Magnesium Alloy Surface. *Science China Technological Sciences*, **53**, 2972-2975. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4142-x>
- [14] Rafieazad, M., Jaffer, J.A., Cui, C., Duan, X. and Nasiri, A. (2018) Nanosecond Laser Fabrication of Hydrophobic Stainless Steel Surfaces: The Impact on Microstructure and Corrosion Resistance. *Materials*, **11**, Article 1577. <https://doi.org/10.3390/ma11091577>
- [15] Wenting, K., Shaohai, F., Yunlu, P. and Xuezheng, Z. (2023) Ultraviolet Modified Hydrophobic Glass On-Demand Hydrophobic/Superhydrophilic Patterned Surface for Fog Harvesting and Underwater Oil Resistance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **673**, Article 131733. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131733>
- [16] Rehman, M.A., Nazar, R., Gill, Y.Q., Hanif, M., Umar, M., Younas, M., *et al.* (2025) Development of Novel Robust Polymer-Based Functional Coatings for Enhanced Self-Cleaning and Dust Mitigation on Glass Surfaces: Implications for Photovoltaic Efficiency Optimization. *Surfaces and Interfaces*, **72**, Article 107197. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.107197>
- [17] Yilbas, B.S., Salhi, B., Yousaf, M.R., Al-Sulaiman, F., Ali, H. and Al-Aqeeli, N. (2016) Surface Characteristics of Silicon Nanowires/Nanowalls Subjected to Octadecyltrichlorosilane Deposition and N-Octadecane Coating. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 38678. <https://doi.org/10.1038/srep38678>
- [18] Jian-Tao, W., Xiao-Hong, Z., Hui, W. and Xue-Mei, O. (2011) Super-Hydrophobic Silicon/Silica Hierarchical Structure Film. *Acta Physico-Chimica Sinica*, **27**, 2233-2238. <https://doi.org/10.3866/pku.whxb20110820>
- [19] Stanton, M.M., Ducker, R.E., MacDonald, J.C., Lambert, C.R. and Grant McGimpsey, W. (2012) Super-Hydrophobic, Highly Adhesive, Polydimethylsiloxane (PDMS) Surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, **367**, 502-508. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.07.053>
- [20] Hwang, E., Lee, Y., Lim, J., Kim, Y., Qu, W., Min, K., *et al.* (2021) Selective Laser Pyrolytic Micropatterning of Stretched Elastomeric Polymer Surfaces. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, **8**, 795-804. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00292-6>
- [21] Chen, Y., Deng, W., Zhu, S., Chen, G., Wang, L. and Su, Y. (2022) Preparation of Super-Hydrophobic Surface with Micro-Nano Layered Structure on 316 Stainless Steel by One-Step Wet Chemical Method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **655**, Article 130291. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130291>
- [22] Liu, Z., Xu, Q., Xu, N., Deng, W. and Chu, H. (2025) Preparation of Photothermal Superhydrophobic Iron Foam Coating and Its Application in Passive Anti-Icing/Active De-Icing and Anti-corrosion. *International Journal of Thermal Sciences*, **211**, Article 109745. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.109745>
- [23] Jeong, C. (2022) A Study on Functional Hydrophobic Stainless Steel 316L Using Single-Step Anodization and a Self-Assembled Monolayer Coating to Improve Corrosion Resistance. *Coatings*, **12**, Article 395. <https://doi.org/10.3390/coatings12030395>
- [24] Abdolmaleki, M., Allahgholipour, G.R., Tahzibi, H. and Azizian, S. (2024) Fabrication of Superhydrophobic Aluminum with Enhanced Anticorrosive Property. *Materials Chemistry and Physics*, **313**, Article 128711. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128711>
- [25] Shi, Z., Zeng, H., Yuan, Y., Shi, N., Wen, L., Rong, H., *et al.* (2023) Constructing Superhydrophobicity by Self-Assembly of SiO<sub>2</sub>@Polydopamine Core-Shell Nanospheres with Robust Oil-Water Separation Efficiency and Anti-Corrosion Performance. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article 2213042. <https://doi.org/10.1002/adfm.202213042>
- [26] Xu, Y., He, Q., Zhang, F., Ning, M., Shi, B., Li, P., *et al.* (2024) Preparation and Properties of a Simple Super-Hydrophobic Carbon Fiber Composite Surface. *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 11. <https://doi.org/10.1002/app.55087>
- [27] Čereška, D., Žemaitis, A., Kontenis, G., Nemickas, G. and Jonušauskas, L. (2022) On-Demand Wettability via Combining Fs Laser Surface Structuring and Thermal Post-Treatment. *Materials*, **15**, 2141. <https://doi.org/10.3390/ma15062141>
- [28] Wang, B. and Song, J. (2022) Hydrophobic Prediction Model and Experimental Study of PMMA Surface Microstructure Prepared by Femtosecond Laser Direct Writing. *Coatings*, **12**, Article 1856. <https://doi.org/10.3390/coatings12121856>

- 
- [29] Duan, J., Long, G., Xu, X., Liu, W., Li, C., Chen, L., *et al.* (2024) Hierarchical Micro/Nanostructures with Anti-Reflection and Superhydrophobicity on the Silicon Surface Fabricated by Femtosecond Laser. *Micromachines*, **15**, Article 1304. <https://doi.org/10.3390/mi15111304>
- [30] Chu, J., Feng, X., Li, Y., Li, F. and Tian, G. (2024) Hierarchical Structure with Microcrater Covered with Nanograss Enhancing Condensation and Its Antifrosting/Anti-Icing Performance Inspired by *Euphorbia helioscopia* L. *Langmuir*, **40**, 10313-10325. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00934>
- [31] Zuo, P., Zhu, D., Li, F., Tian, H., Han, W., Liu, T., *et al.* (2025) Fabrication of Superhydrophobic Micro/Nanostructures of Titanium Alloy by Femtosecond Laser. *ACS Omega*, **10**, 33178-33191. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02978>
- [32] Kumar, P., Gore, P.M., Magisetty, R., Kandasubramanian, B. and Shunmugam, R. (2020) Poly(1,6-Heptadiyne)/Abs Functionalized Microfibers for Hydrophobic Applications. *Journal of Polymer Research*, **27**, Article No. 14. <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1981-4>
- [33] Fan, P., Li, Y., Liu, Z., Yu, F., Chen, Y. and Li, Y. (2021) Preparation and Performance of Nanoparticles-Based Anti-Frosting Transparent Hydrophobic Surfaces. *International Journal of Refrigeration*, **130**, 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.05.024>
- [34] Ouyang, Y., Chen, Z., Guo, E., Qiu, R., Wang, X., Kang, H., *et al.* (2022) Bioinspired Superhydrophobic Surface via One-Step Electrodeposition and Its Corrosion Inhibition for Mg-Li Alloy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **648**, Article 129145. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129145>
- [35] Ma, T., Wang, D., Tong, W., Zhang, S. and Wang, J. (2023) Chemical Etching, Thermally Driven Combination Strategy to Fabricate Superhydrophobic Fe-Based Amorphous Coatings with Excellent Anticorrosion Property: Based on Hydroxylation Effect. *Langmuir*, **39**, 11864-11878. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01665>
- [36] Yuan, W., Liao, Z., He, K., Liu, Q. and Huang, S. (2021) An Experimental Investigation on Condensation-Induced Self-Cleaning of Dust on Superhydrophobic Surface. *Applied Surface Science*, **566**, Article 150702. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150702>
- [37] Wu, X., Xiao, M., Zhang, J., Tan, G., Pan, Y., Lai, Y., *et al.* (2023) An Underwater Stable Superhydrophobic Surface for Robust Ultra-Long-Lasting Biofouling Resistance. *Chemical Engineering Journal*, **462**, Article 142091. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142091>