

修饰不同微结构对疏水性表面浸润性的影响

翟广坤¹, 李曙林¹, 陈素素²

(1.空军工程大学, 西安 710038; 2.山东大学, 济南 250000)

摘要: **目的** 研究修饰微结构对疏水性材料表面浸润性的影响并指导制备超疏水表面。**方法** 基于有限元软件建立了水滴在修饰不同微结构的疏水性表面的润湿模型, 通过水滴表观接触角衡量分析了疏水材料表面修饰单一粗糙结构和复合粗糙结构对疏水性提升的效果, 利用硅树脂掺杂微粒制备了不同粗糙度的疏水性涂层, 涂层固化后测试其实际接触角大小, 并与仿真结果对比。**结果** 仿真结果显示, 对水滴接触角为 100° 的表面修饰单一粗糙结构后, 由于微结构形成的凹槽滞留空气, 阻碍了水滴在表面铺展, 使得水滴在表面的接触角增大至 133°。在原微结构基础上修饰更小一级的微结构后, 水滴在表面的接触角达 168°, 材料表面达到超疏水效果。实验中, 随涂层表面粗糙度的提升, 水滴在表面的接触角逐渐增大, 掺混两种微粒的疏水涂层固化后, 表面形成复合微观结构, 水滴接触角达 162°, 与仿真结果拟合较好。**结论** 在疏水性表面修饰微结构可显著提升其表面疏水性, 修饰复合结构后可达到超疏水效果, 此方法可用于实际工程制备超疏水表面。

关键词: 微结构; 单一粗糙结构; 复合粗糙结构; 接触角; 疏水; 硅树脂

中图分类号: O647 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0063-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.010

Effects of Modification of Different Microstructures on Wettability of Hydrophobic Surface

ZHAI Guang-kun¹, LI Shu-lin¹, CHEN Su-su²

(1.Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2.Shandong University, Jinan 250000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of microstructure modification on hydrophobic material surface, and provide guidance for preparation of superhydrophobic surface. Based on finite element software, a wettability model in which water droplets modify different microstructures of hydrophobic surface was established. The effects of single rough structure and composite rough structure modified with hydrophobic materials on improving hydrophobicity were measured and analyzed using apparent contact angle of water droplets. Hydrophobic coatings of different roughness were prepared using silicon resin-doped particles and then cured. Actual contact angle was tested and compared with simulation results. After single rough structure was modified for the surface with water droplet contact angle of 100°, contact angle of water droplet on the surface increased to 133° as groove formed by microstructure obstructed air and prevented water droplet from spreading on the surface. Then the contact angle reached 168° after smaller microstructure was modified on the original microstructure, which was similar

收稿日期: 2018-02-27; 修订日期: 2018-04-24

Received: 2018-02-27; Revised: 2018-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51477132)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51477132)

作者简介: 翟广坤 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为疏水表面改性。

Biography: ZHAI Guang-kun (1993—), Male, Master, Research focus: hydrophobic surface modification.

通讯作者: 李曙林 (1959—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞机结构强度与使用可靠性。

Corresponding author: LI Shu-lin (1959—), Male, Doctor, Professor, Research focus: aircraft structural strength and serviceability.

to superhydrophobic surface. The contact angle of water droplet increased as surface roughness increased in the actual experiment, which reached 162° as composite microstructure formed on the surface after curing of the hydrophobic coating containing two kinds of particles. The experimental data fitted well with the simulation result. Modifying microstructure on hydrophobic surface can significantly improve surface hydrophobicity. The surface will be superhydrophobic after composite structure is modified, which can be used for preparing superhydrophobic surface in actual engineering.

KEY WORDS: microstructure; single rough structure; composite rough structure; contact angle; hydrophobic; silicone resin

水滴在材料表面的存在形态与材料表面性质关联密切,超疏水表面由于其特殊的物理性质,使得水滴在其表面难以稳定存留,这一特性在防冰、防污、流动减阻等实际工程领域的应用前景巨大^[1-4]。研究发现固体表面浸润性由自身表面能和表面粗糙度决定,表面能越低、表面结构越粗糙,其疏水效果越好^[5-6]。材料表面能由自身组成的分子确定,不改变材料性质而降低表面能较困难,对某种材料进行表面微观结构修饰来制备超疏水表面则更简便^[7]。

自 Barthlott 等^[8]发现荷叶具有“自清洁效应”是因表面存在规则排列的特殊微观结构以来,微结构的形状、尺寸等对表面疏水性的影响研究一直备受关注。随着技术的进步,江雷等^[9]对荷叶微观结构做进一步研究时发现,荷叶表面除微米级结构外,还存在纳米级微结构,并形成特殊的双重微观结构。李小兵等^[10]理论计算分析了这种特殊结构对表面接触角的影响,发现这种特殊结构可显著提升材料表面的接触角,这对于制备类似荷叶的超疏水表面具有重要意义。根据杨氏方程,水滴在疏水性表面的润湿计算应综合考虑表面能决定的本征接触角和表面粗糙度,目前仿真分析水滴在不同疏水性表面的润湿多利用分子动力学方法,该方法设置不同分子间的相互作用,通过众多微观分子的宏观运动来模拟该过程。刘冰等^[11]利用上述方法研究了含盐水滴在砂岩表面的润湿过程,但该方法建模复杂,仿真计算精度受设定的分子数量的影响较大。

为更精确地研究类似“荷叶”复合微观结构对材料表面疏水性的影响,本文基于 Comsol Multiphysics 有限元软件中层流两相流模块,建立了水滴在单一粗糙结构表面和双重复合粗糙结构表面的浸润仿真物理模型,模拟了在疏水性表面修饰微结构后的水滴润湿过程,设计制备了不同粗糙结构的疏水表面涂层并进行实验研究,利用硅树脂低表面能、较好疏水性且耐热等特性^[12-13],对其进行改性,并通过掺混微粒进行固化,修饰特殊粗糙结构来制备疏水涂层,并对比涂层接触角的大小。

1 仿真分析粗糙度润湿表面

水滴在粗糙表面润湿的过程中,气-液两相流动

与润湿角相互联系^[14]。因此,建立水滴润湿粗糙表面数值模型,应综合考虑粗糙表面上水滴的润湿过程、气相与液相的流动、压力场和重力场等因素^[15-16]。

在等温条件下,两相交界面处的气-液表面张力为稳定常量,水滴润湿过程满足 Navier-Stokes 方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{u} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 为密度。等式(1)右侧依次为压力项、黏性项、重力项和表面张力项。表面张力 \mathbf{F}_{st} 表达式为:

$$\mathbf{F}_{st} = -\sigma (\nabla \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \delta \quad (3)$$

式中: σ 为表面张力系数 (N/m); \mathbf{n} 为相交界面法向向量(指向气相为正); δ 为交界面处 Dirac 分布。体积分数函数 ϕ 表达式满足:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (4)$$

在液相中 $\phi = 1$, 气相中 $\phi = 0$, 两相交界面处 $0 < \phi < 1$ 。可得两相交界面处的密度 ρ 和动力黏度 μ 的表达式:

$$\rho = \rho_{\text{water}} + (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{water}}) \phi \quad (5)$$

$$\mu = \mu_{\text{water}} + (\mu_{\text{air}} - \mu_{\text{water}}) \phi \quad (6)$$

1.1 物理模型建立

对疏水性表面修饰单一粗糙结构和复合微结构表面后,研究水滴在不同表面的润湿过程,基于 Comsol Multiphysics 有限元软件中的层流两相流模块,建立了如图 1a 所示的二维轴对称计算模型。计算区域为 $1.5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,水滴半径设定为 0.6 mm ,初始气-液界面为水滴在重力作用下即将接触润湿壁面的状态,润湿壁为具有一定疏水性的表面(假设初始接触角为 100°)。润湿壁上设置不同微结构,粗糙结构为阵列生成,单一粗糙结构的微单元构成 $4 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 矩形,用来模拟疏水表面一级凸起。复合结构在原一级微单元上添置 1/2 缩比的矩形,形成图 1a 右下方复合粗糙润湿壁所示的二级结构,模拟类似“荷叶”的复合微观结构。求解时间步长为 10^{-6} s ,网格采用自由剖分三角形网格,对气-液界面及粗糙结构处进行加密处理,如图 1b 所示,以更精确地计算不同时刻水滴在表面的接触角。

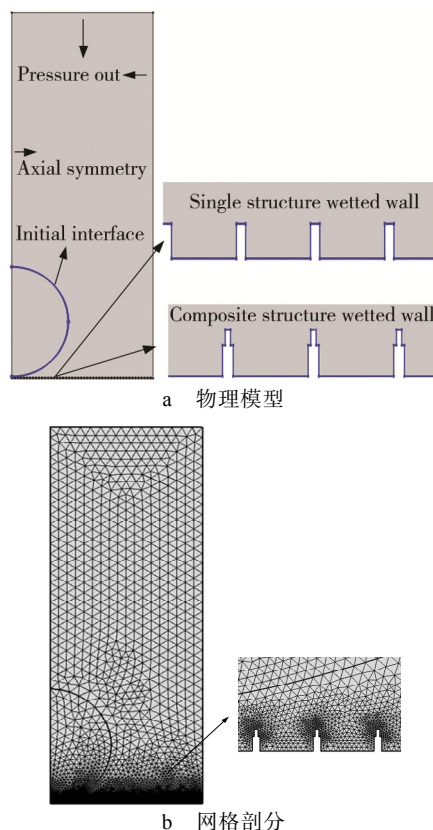


图 1 仿真物理模型

Fig.1 Simulation of physical model: a) physical model, b) mesh generation

1.2 结果与讨论

图 2 给出了水滴在单一微结构粗糙表面的润湿铺展过程, 图中蓝色部分为理想气体, 其余部分为水滴, 各分图下方为同时刻水滴三维形态图。可见水滴在重力作用下, 随着时间的增加, 在粗糙表面逐步铺展: $0 < t < 0.1$ ms 时, 水滴在粗糙表面铺展较快, 接触角逐步减小, 水滴形态变化明显; $t > 0.1$ ms 时, 水滴铺展过程基本结束, 铺展开始减缓; 至 $t = 0.3$ ms 时, 水滴在表面基本达到稳定状态, 接触角不再变化, 达到 $133^\circ \pm 0.5^\circ$, 较原设定的 100° 显著增大, 表面疏水性显著提升。

图 3 为水滴在单一微结构粗糙表面达到稳定状态后的气-液界面局部放大图, 由于微结构壁面具有一定的疏水性以及水滴自身存在的表面张力, 即使在重力作用下, 红色液相水滴仍无法将凹槽内的蓝色气体挤出, 无法完全浸入微结构形成的凹槽中, 使得凹槽中存留部分空气, 水滴原本与壁面接触的部分转为与空气接触, 形成气-液-固三相接触, 呈现 Cassie 接触状态。同时, 由于铺展过程中水滴克服凹槽内的空气阻力做功, 铺展速度逐步减小。在综合因素的影响下, 提升了水滴在润湿壁面的表观接触角。

图 4 展示了水滴在复合微结构粗糙壁面的润湿

铺展过程, 可见水滴在该表面的铺展程度较其在单一微结构粗糙壁面明显减小, 通过水滴三维图可直观看出, 水滴在该粗糙壁面稳定后, 表观接触角明显大于图 2 所示的水滴接触角, 达到 $167^\circ \pm 0.5^\circ$, 呈现超疏水表面特性。修饰更小一级微结构后, 壁面具备复合粗糙结构, 粗糙度进一步提升, 表观接触角增大, 这也证明了提升表面粗糙度可提升疏水性的结论。

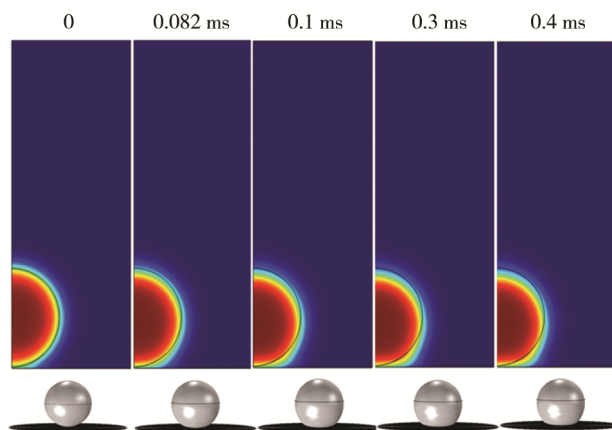


图 2 单一粗糙结构表面水滴铺展过程

Fig.2 Spreading process of water droplet on surface of a single rough structure

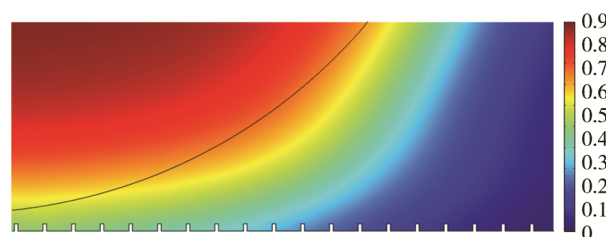


图 3 水滴在单一粗糙结构表面的稳定接触形态

Fig.3 Stable contact form of water droplet on surface of a single rough structure

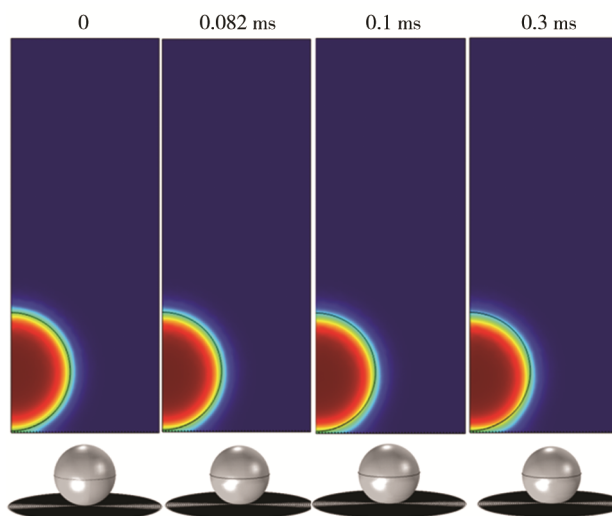


图 4 复合粗糙结构表面水滴铺展过程

Fig.4 Spreading process of water droplet on surface of a composite rough structure

图5为水滴在复合微结构壁面润湿稳定后的局部放大图。对比图3可见,红色部分明显上移,凹槽内的蓝色部分向上扩展,即右侧液相明显上移,水滴在表面铺展时,在复合结构形成的凹槽内存留了更多的气体,使得水滴浸入凹槽时需克服更大的空气阻力,铺展更困难,进而与气体接触的面积增大,水滴在表面的铺展程度减小,表观接触角增大。

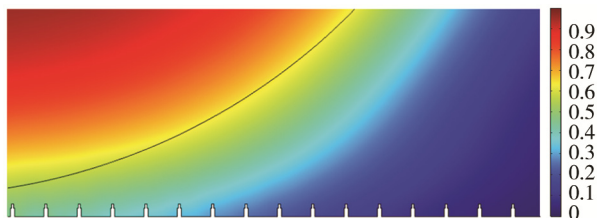


图5 水滴在复合粗糙结构表面的稳定接触形态
Fig.5 Stable form of water droplet on surface of a composite rough structure

定义水滴无量纲铺展系数 β , 令 $\beta = l/d_0$ (l 为水滴在表面的润湿长度, d_0 为水滴初始直径)。对比水滴在两种粗糙表面铺展系数的变化, 如图6所示。随着时间的延长, 水滴在粗糙壁面的铺展系数逐渐增大, 速度呈现先快后慢的趋势, 这是由于粗糙度的提升对水滴铺展产生一定的阻力, 而且微结构凹槽内滞留空气对水滴浸润也产生阻力作用。水滴在单一微结构修饰的疏水表面的铺展系数远大于复合结构修饰的表面, 且铺展速度较大, 铺展时间较长。相比于单一微结构表面, 0.09 ms时水滴在复合结构修饰的表面即达到稳定状态, 这是由于复合结构修饰的表面更粗糙, 微结构凹槽内滞留的空气更多, 进而使得水滴的铺展阻力更大。

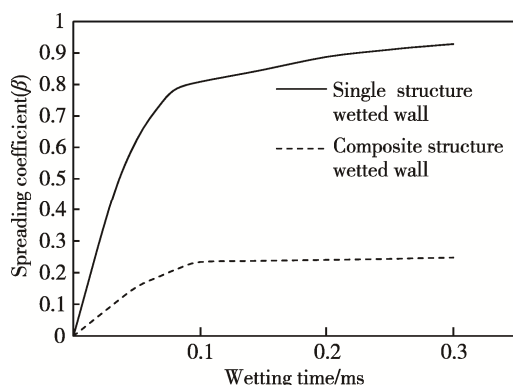


图6 水滴在不同粗糙表面铺展系数变化
Fig.6 Spreading coefficient changes of water droplet on different rough surfaces

通过仿真计算可发现, 提升疏水性表面粗糙度可显著提升表面疏水性, 具备复合微结构的粗糙表面较单一微结构粗糙表面的接触角更大, 疏水性更好。因此, 在实际工程应用中, 可选择利用低表面能材料在其表面修饰复合微结构来制备超疏水表面。

2 修饰微结构制备超疏水表面应用

仿真结果显示可通过对材料表面修饰特定的微结构来制备超疏水涂层, 同时为验证不同微结构对疏水性表面浸润性的仿真计算结果, 选用具有一定疏水效果的硅树脂 (MDT, 固化后水滴接触角约 100°) 作为基体材料, 掺杂二氧化硅微粒形成混合体系, 将混合液体涂覆于材料表面后进行固化, 可形成不同疏水性涂层, 测试水滴在不同涂层表面的接触角, 分析修饰微结构对提升表面疏水性的效果。

2.1 疏水涂层制备

考虑硅树脂与二氧化硅微颗粒混合固化后对微粒的包覆会增大固化后表面凸起尺度, 分别选用单一 500 nm 粒径和 500、15 nm 混合粒径的二氧化硅微粒作为掺杂体系, 制备不同悬浊液 A、B。A 为质量分数之比为 8:2 的硅树脂和粒径 500 nm 二氧化硅微粒的混合体系, B 为质量分数之比为 8:2:1 的硅树脂、粒径 500 nm 二氧化硅和粒径 15 nm 二氧化硅的混合体系。混合前对二氧化硅颗粒进行球磨处理, 以抑制微粒团聚。为使微粒在混合体系中分散均匀, 可选用挥发性较好的无水乙醇作为分散溶剂, 混合均匀后对混合体系进行机械搅拌 (转速 2500 r/min), 搅拌 2 h 后, 旋蒸除去体系中的部分无水乙醇溶剂, 之后再对悬浊液超声分散 30 min。

将制备的 A、B 涂层液体以均匀喷涂的方式涂覆于载玻片表面, 喷涂前对载玻片待涂覆表面进行除杂处理 (用丙酮冲洗 5 min, 再使用去离子水冲洗后烘干), 喷涂涂层厚度约为 0.5 mm, 之后对涂层液体进行固化形成粗糙表面结构。固化过程中要控制溶剂的挥发速度, 否则溶剂的快速挥发会引起硅树脂分子间的作用力迅速变化, 进而导致涂层固化过程中树脂基体开裂, 为此可将载玻片放入玻璃皿中并包覆带孔薄膜, 以延缓涂层液中无水乙醇的挥发速度。涂层分别编为 A₀、B₀, 涂层固化方式均采用预固化和高温固化结合的方式, 涂层 B₀ 的高温固化温度较 A₀ 低, 原因是由于单位体系内含树脂较少, 为防止上述基体开裂, 在不影响最终固化效果的前提下, 要进一步降低溶剂的挥发速度。涂层预固化前还需常温表干 1 h, 涂层固化阶段的温度和时间控制如表 1 所示。

表 1 不同涂层固化方式

Tab.1 Curing methods of different coatings

Coating number	Pre-curing	High temperature curing
A ₀	70 °C, 1 h	140 °C, 2 h
B ₀	70 °C, 1 h	120 °C, 2 h

2.2 结果与讨论

待涂层固化完全后, 观察 A₀、B₀ 涂层的微观形

貌，如图 7 所示。单一粒径掺混的 A_0 涂层固化后在表面形成微小凸起，使得表面具备了特殊粗糙结构。由于硅树脂的包覆作用，会在凸起上形成更小一级的微凸结构，但覆盖面积较小，总体以一级粗糙结构为主，形成的微结构尺度较单一。而不同粒径二氧化硅复合掺混的涂层比前者有更好的粗糙度，在原有粗糙结构上几乎覆满了更小一级的凸起，这是由于不同粒径的二氧化硅微粒在与树脂掺混过程中被包覆，形成不同尺度的微结构，使固化后的涂层表面具备了类似荷叶微观形貌的双重微观结构。

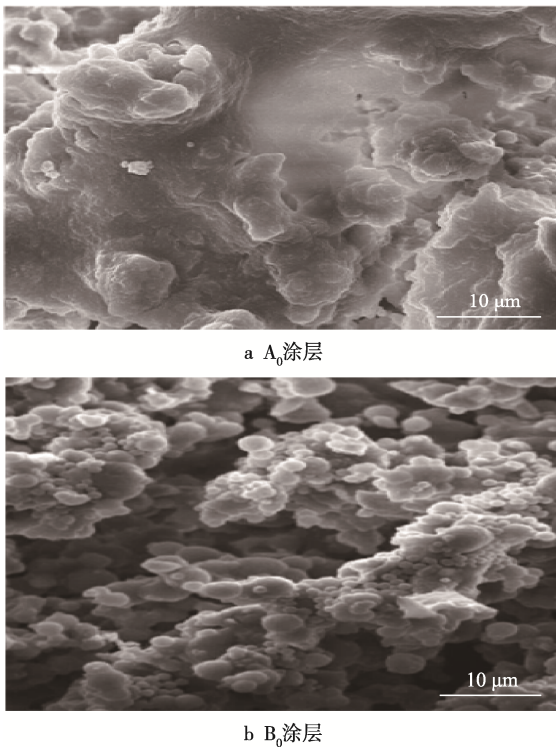


图 7 涂层表面微观形貌 (1000×)
Fig.7 Surface morphology of coating (1000×):
a) A_0 coating, b) B_0 coating

测试 A_0 、 B_0 涂层表面的水滴接触角，并与普通硅树脂表面进行对比。水滴在不同涂层表面的接触形态如图 8 所示，可知与普通硅树脂涂层相比，掺杂二氧化硅微粒后的疏水涂层固化后，水滴在其表面的铺展程度显著降低，涂层的疏水效果明显提升。掺杂两种不同粒径微粒的疏水涂层的疏水性进一步提升，水滴在其表面呈圆球状，几乎无法铺展。

水滴在各表面的接触角数值如表 2 所示。在硅树脂中加入单一粒径的二氧化硅颗粒后，表面粗糙度有所提升，接触角增大至 131° ；当树脂基体中存在粒径量级不同的二氧化硅颗粒时，接触角提升至 163° ，复合粒径掺混涂层达到超疏水表面效果。

仿真和实验均从对比疏水表面修饰单一和复合微结构后水滴接触角的变化出发，分析仿真值和不同疏水涂层接触角的实际测量值，可见接触角的变化趋

势基本相同，在疏水表面修饰粗糙结构对提升表面疏水性作用明显，水滴在疏水表面的接触角随表面微结构的修饰变化显著。仿真和实验数值均表明，对疏水表面修饰粗糙结构能显著提升表面疏水性，且复合结构修饰表面的疏水效果较单一结构修饰的更好，达到了超疏水效果。实验值与理论仿真值存在误差，是由于真实粗糙表面结构与仿真并不完全一致，微粒掺混量决定了涂层表面粗糙度。

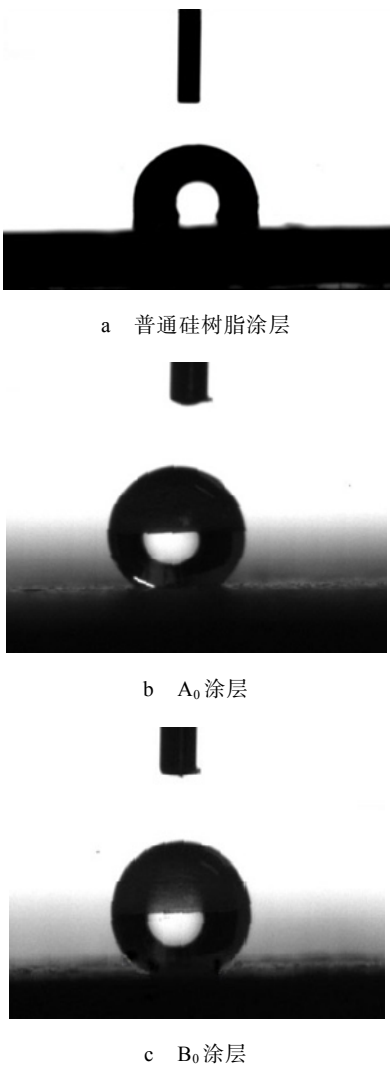


图 8 水滴在不同涂层表面接触形态
Fig.8 Contact form of water droplets on different coating surfaces: a) ordinary silicone resin coating, b) coating A_0 , c) coating B_0

表 2 各表面涂层测量参数与仿真值比较
Tab.2 Measurement parameters v.s. simulation value of surface coatings

Coating number	Contact angle/(°)	The simulation value/(°)	Error value/%
Initial	102±1.2	100	5.0
A_0	131±1.3	133	1.5
B_0	161±0.9	167	3.6

3 结论

1) 水滴在粗糙表面的铺展速度和程度均随着表面粗糙度的提升而降低, 复合微结构对水滴在疏水表面铺展的抑制作用最好。

2) 水滴在复合微结构修饰的表面铺展程度较单一微结构修饰的表面更低, 接触角更容易达到超疏水表面效果。

3) 利用修饰复合微结构提升疏水性方法, 在硅树脂中掺杂不同粒径的二氧化硅微粒形成的疏水表面接触角达到 161° , 远大于其本征接触角。

参考文献:

- [1] NOSONOVSKY M, BHUSHAN B. Multiscale Dissipative Mechanisms and Hierarchical Surface: Friction, Superhydrophobicity, and Biomimetics[M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 72-77.
- [2] 王一英, 李昌诚. 环境友好型无锡自抛光防污涂料的研制[J]. 材料导报, 2012, 26(2): 106-110.
WANG Yi-ying, LI Chang-cheng. Study on Design of Environmental-friendly Tin-free Antifouling Coatings [J]. Material Review, 2012, 26(2): 106-110.
- [3] 杨军, 张靖周, 郭文, 等. 超疏水表面技术在发动机防冰部件中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 26(1): 58-61.
YANG Jun, ZHANG Jing-zhou, GUO Wen, et al. Application of Superhydrophobic Surface Technique on the Anti-icing Components of Aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2013, 26(1): 58-61.
- [4] 江雷. 从自然到仿生的超疏水纳米界面材料[J]. 化工进展, 2003, 22(12): 1258-1264.
JIANG Lei. Superhydrophobic Surfaces From Natural to Artificial[J]. Progress In Chemistry, 2003, 22(12): 1258-1264.
- [5] WENZEL R N. Resistance of Solid Surface to Wetting by Water[J]. Industrial Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [6] 郑正龙, 涂吕星, 饶欢乐, 等. 聚碳酸酯基片超疏水表面的制备与表征[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(3): 272-273.
ZHENG Zheng-long, TU Lv-xing, RAO Huan-le, et al. Fabrication and Characterization of Superhydrophobic Surfaces of Polycarbonate Slab[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014 34(3): 272-273.
- [7] WU Jiunn-jong. Structure Function and Spectral Density of Fractal Profiles[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2001(12): 2481-2492.
- [8] BARTHOLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the Sared Lotus or Escape from Contamination in Biological Surface[J]. Planta, 1997, 202(1): 1-8.
- [9] JIANG Lei. A Lotus-leaf-like Superhydrophobic Surface: A Porous Microsphere/Nanofiber Composite Film Prepared by Electrohydrodynamics[J]. Angew Chem Int Ed, 2004, 43(33): 4338-4341.
- [10] 李小兵, 刘莹. 类似荷叶表面分形结构的润湿性研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(6): 7-8.
LI Xiao-bing, LIU Ying. Wettability on the Surfaces Similar to Fractal Structures of Lotus Leaf[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(6): 7-8.
- [11] 刘冰, 杨杰, 赵丽, 等. 盐水液滴在砂岩表面润湿性的分子动力学模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 148-153.
LIU Bing, YANG Jie, ZHAO Li, et al. Molecular Dynamics Simulation of Brine Droplet Wetting on Sandstone Surface[J]. Journal of China University of Petroleum(Nature Science Edition), 2014, 38(3): 148-153.
- [12] 陈美玲, 张力明, 杨莉, 等. 低表面能船舶防污涂料的疏水结构及防污性能[J]. 船舶工程, 2010, 32(6): 64-67.
CHEN Mei-ling, ZHANG Li-ming, YANG Li, et al. Hydrophobic Structure and Antifouling Performance of the Low Surface Energy Marine Coating[J]. Ship Engineering, 2010, 32(6): 64-67.
- [13] 王国刚, 赵悦菊, 张金玲, 等. 硅橡胶表面润湿特性对积污行为影响的研究进展[J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 15-20.
WANG Guo-gang, ZHAO Yue-ju, ZHANG Jin-ling, et al. Progress in Effect of Wetting Property of the Silicone Rubber on Pollution Accumulation[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(2): 15-20.
- [14] 徐威, 兰忠, 彭本利, 等. 微液滴在不同能量表面上润湿状态的分子动力学模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 0216801.
XU Wei, LAN Zhong, PENG Ben-li, et al. Molecular Dynamics Simulation on the Wetting Characteristic of Micro-droplet on Surfaces with Different Free Energies[J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(21): 0216801.
- [15] ZHANG Qing-yu, SUN Dong-ke, ZHU Ming-fang, et al. A Multicomponent Multiphase Lattice Boltzmann Model with Large Liquid-Gas Density Ratios for Simulations of Wetting Phenomena[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(8): 1-10.
- [16] 刘森云, 沈一洲, 朱春玲, 等. 液滴撞击超疏水表面的能量耗散机制[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 520710.
LIU Sen-yun, SHEN Yi-zhou, ZHU Chun-ling, et al. Energy Dissipation Mechanism of Droplets Impacting Superhydrophobic Surfaces[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 520710.