

SEBS/h-SiO₂ 复合涂层疏水性能研究

薛森, 石涛, 彭华乔, 苏正良

(中国民航局第二研究所, 成都 610041)

摘要: **目的** 在飞机常用材料 AMS 4037 铝合金表面制备超疏水复合涂层, 并研究其疏水性, 以避免液滴在飞机表面停留, 减少结冰, 保证飞机在冰雪天气中安全航行。**方法** 以苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS)、疏水二氧化硅 (h-SiO₂) 为原料, 通过提拉法在铝合金表面制备 SEBS/h-SiO₂ 超疏水复合涂层。借助扫描电子显微镜、红外光谱仪、接触角测定仪、激光共聚焦显微镜对涂层的显微结构、官能团、粗糙度、接触角进行表征。**结果** 当 SEBS 与 h-SiO₂ 质量比为 1 : 3 时, 涂层表面粗糙度为 1.11 μm, 涂层疏水性能达到最佳, 与水的静态接触角大于 160°滚动角小于 1°。涂层表面分布着许多尺寸为 10 μm 的微/纳双重结构。通过 Cassie 模型分析得出, 涂层水接触面积为 12%, 截留 88% 的空气。稳定性测试显示, 涂层在水中持续浸泡 120 min, 依然能保持良好的疏水性。**结论** SEBS/h-SiO₂ 复合涂层具有二元微/纳米粗糙结构和低表面能, 当液滴接触时, 形成气垫, 从而呈现优异的疏水性能。同时, 该涂层表现出良好的稳定性和类似荷叶的自清洁能力。

关键词: 铝合金; 超疏水; 复合涂层; 粗糙度; 接触面积; 自清洁

中图分类号: TG146.2; O647 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)01-0265-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.01.028

Study on Hydrophobicity of SEBS/h-SiO₂ Composite Coating

XUE Sen, SHI Tao, PENG Hua-qiao, SU Zheng-liang

(The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

ABSTRACT: In order to avoid the droplets staying and freezing on the surface of aircraft, and ensure the safe flight of aircraft in ice and snow weather, the superhydrophobic composite coating was prepared on the surface of AMS 4037 aluminum alloy, and its hydrophobicity was studied. Using styrene-ethylene-butylene-styrene block copolymer (SEBS) and hydrophobic silica (h-SiO₂) as raw materials, SEBS/h-SiO₂ superhydrophobic composite coating was prepared on aluminum alloy by dip-coating method. The microstructure, functional group, roughness and contact angle of the coating were characterized by scanning electron microscope, infrared spectrometer, laser confocal microscopy and contact angle tester. When the mass ratio of SEBS to h-SiO₂ is 1 : 3, the surface roughness of the coating is 1.11 μm, and the hydrophobicity of the coating is best, in which the static contact angle with water is more than 160°, and the rolling angle is less than 1°. Many micro/nanostructure with a size of 10 μm is distributed on the coating surface. According to Cassie model analysis, the water contact area of the coating is 12%, and 88%

收稿日期: 2021-01-24; 修订日期: 2021-06-25

Received: 2021-01-24; **Revised:** 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1833202)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1833202)

作者简介: 薛森 (1991—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为航空化学。

Biography: XUE Sen (1991—), Male, Assistant engineer, Research focus: aviation chemistry.

通讯作者: 彭华乔 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为航空化学。

Corresponding author: PENG Hua-qiao (1978—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: aviation chemistry.

引文格式: 薛森, 石涛, 彭华乔, 等. SEBS/h-SiO₂ 复合涂层疏水性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 265-271.

XUE Sen, SHI Tao, PENG Hua-qiao, et al. Study on Hydrophobicity of SEBS/h-SiO₂ Composite Coating[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 265-271.

of the air is trapped. Through the stability test, the high hydrophobicity can be maintained within 120 min after continuous immersion in water. The SEBS/h-SiO₂ composite coating has a binary micro/nano rough structure, along with the low surface energy of SEBS and h-SiO₂. The air cushion is formed when the droplets are contacted with coating, resulting in excellent superhydrophobic properties. At the same time, the coating shows good stability and self-cleaning ability similar to a lotus leaf.

KEY WORDS: aluminium alloy; superhydrophobic; composite coating; roughness; contact area; self-cleaning

随着科技的进步,人类对材料性能的要求越来越高。日常生活中时常发现一些生命体拥有一些特殊的生存技能,给科学家们带来不同的研究思路 and 方向,使得仿生材料学成为一项热门研究学科^[1-2]。其中,受荷叶效应启发的超疏水材料引起了世界各地学者的广泛关注^[3]。

铝合金是一种常见的工程材料,因其具有比强度高、易于加工等优点,广泛应用于船舶、航空、建筑等领域。然而在潮湿环境中,铝合金表面易结冰和腐蚀,这限制了它的使用范围。超疏水表面是指与一定体积的水滴的接触角大于 150°,同时滚动角小于 10°的表面。这类表面不仅具有针状、片状、蜂窝状、柱状等多尺度微纳米粗糙结构^[4-5],同时具有较低的表面能。这种特殊浸润性表面具有优异的防水、防结冰、抗污、减阻自清洁性能^[6-10],在延长材料使用寿命以及拓展应用领域等方面具有巨大的潜力。目前,此表面的制备方法主要有刻蚀法^[11-13]、溶胶-凝胶法^[14-15]、气相沉积法^[16-17]、相分离法^[18]、层层自组装^[19-20]、激光处理^[21]、电化学处理^[22]等。但这些方法在实际应用中,仍然避免不了设备要求高、制备工艺复杂以及化学条件苛刻等缺陷,且不能用于大面积加工。

热塑性弹性体苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)不含不饱和双键,具有良好的溶解性、稳定性和耐老化性,已广泛应用于汽车组件、电线电缆、聚合物改性、食品器件及医疗制品等,在性能和技术方面都具有较强的市场竞争优势^[23-25]。但目前利用其对铝合金表面进行疏水改性的研究还较少。本工作创新性地引入 SEBS 作为涂层基体,选择价廉易得的疏水二氧化硅为改性剂,将其和 SEBS 共混,再利用提拉法在铝合金表面制备了超疏水复合涂层,研究了成分对涂层宏观润湿性能的影响,以及该涂层的稳定性和自清洁性能。不仅制备过程容易实施、耗时短、无毒性及刺激性气味产生,而且原材料价格低廉。

1 实验

1.1 试剂及仪器

实验所用原材料和试剂为:AMS 4037 铝合金(尺寸 20 mm×20 mm×2 mm),砂纸(1200 目),苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS,疏水二氧化硅(h-SiO₂)),四氢呋喃(THF),丙酮,无水乙醇,去离子水。实验所用仪器包含:SCIENTZ-1500F 超声

波分散仪;AL 204 电子天平;KRUSS 接触角测定仪;OLYMPUS Ix70 OLS4000 激光共聚焦显微镜;Hitachi SU8220 扫描电子显微镜;Thermo Fisher Nicolet Is5 红外光谱仪。

1.2 超疏水表面涂层的制备

用丙酮对 AMS 4037 铝合金表面进行除胶,然后用 1200#砂纸进行打磨,依次用去离子水、丙酮、无水乙醇各超声清洗 5 min,晾干备用。

为了研究 SEBS 的用量对表面润湿性的影响,称取 0.05 g 疏水二氧化硅加入到 5 g 四氢呋喃中,超声分散,然后分别加入质量分数为 0.1%、0.5%、1%和 3%的 SEBS,充分溶解后,放入铝合金试件,使液面浸没试件,静置 10 min 后取出,自然晾干,备用。同时,制备未加 SEBS 的试样作为对照。

为了研究 h-SiO₂ 的用量对表面润湿性的影响,称取质量分数分别为 0.5%、1%、2%和 3%的 h-SiO₂,通过超声均匀分散在 5 g 四氢呋喃中。后各加入 0.05 g SEBS,充分溶解后,放入铝合金试件,使液面浸没试件,静置 10 min 后取出,自然晾干,备用。同时,制备未加 h-SiO₂ 的试样作为对照。

1.3 测试与表征

采用红外光谱仪对涂层进行红外分析。采用扫描电子显微镜(SEM)观察涂层表面形貌,按照一定尺寸(10 mm×20 mm)裁剪样品,喷金后,将其固定到样品台,加速电压为 10 kV。采用激光共聚焦显微镜(LSM)测试涂层的粗糙度,确定取样长度为 0.8 mm,样品表面与传感器触针保持垂直,每个样品分别在 3 个不同位置处测量,结果取其平均值。采用光学接触角测试仪测量涂层对水的静态接触角,水滴大小为 2 μL,选取 3 个不同位置测量,取其平均值。涂层对水的滚动角测量方法为:水滴大小为 10 μL,转动速度为 90 (°)/min,最大转动角 30°,选取 3 个不同位置测量,取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 h-SiO₂ 和 SEBS 的浓度对表面润湿性的影响

2.1.1 h-SiO₂ 用量对表面润湿性能的影响

铝合金表面 h-SiO₂ 纳米颗粒的附着量会影响液

滴与铝合金的实际接触状态, 从而影响静态接触角 (CA) 与滚动角 (SA) 的大小。固定溶剂和 SEBS 用量, 测得 h-SiO₂ 的用量对涂层表面 CA 和 SA 的影响。由图 1 可知, 当无 h-SiO₂ 时, CA 为 119°, SA 大于 30°, 随着 h-SiO₂ 的用量逐渐增大, CA 逐渐增大, SA 逐渐减小。当 h-SiO₂ 和 SEBS 质量比为 3 : 1 时, CA 大于 160°, SA 小于 1°。这是因为 SEBS 在铝合金表面形成的高分子涂层具有良好的粘接性能, 使得 h-SiO₂ 纳米颗粒进入到涂层中, 并形成一定的粗糙结构, 改变液滴接触状态, 从而引起表面润湿性能的变化。当质量比为 3 : 1 时, 粗糙结构更完整, 疏水性能达到最佳。

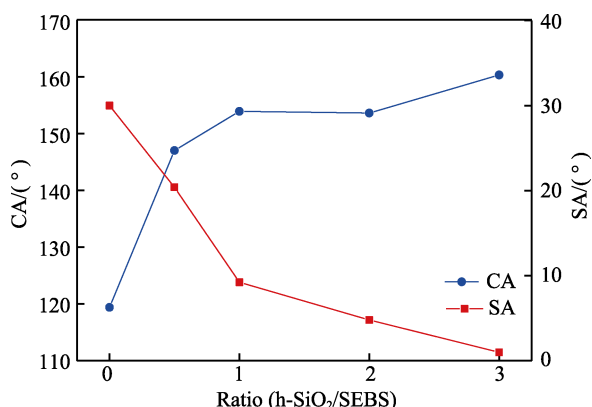


图 1 h-SiO₂ 用量对涂层润湿性能的影响

Fig.1 The mass ratio of h-SiO₂ content on wettability of coatings

2.1.2 SEBS 用量对表面润湿性能的影响

固定溶剂和 h-SiO₂ 用量, 测得 SEBS 的用量对 CA 和 SA 的影响, 结果如图 2 所示。由图 2 可见, 当体系没有 SEBS 时, CA 为 145°, SA 大于 30°。当加入微量的 SEBS 后, 表面疏水性得到显著提高, SA 由 30°以上减小至 10°以内, 达到超疏水要求。当质量比为 1 : 2 时, CA 和 SA 均达到最佳。随着 SEBS 用量增加, CA 逐渐减小, SA 逐渐增大。这是因为当体系没有 SEBS 时, h-SiO₂ 在铝合金表面易产生聚集,

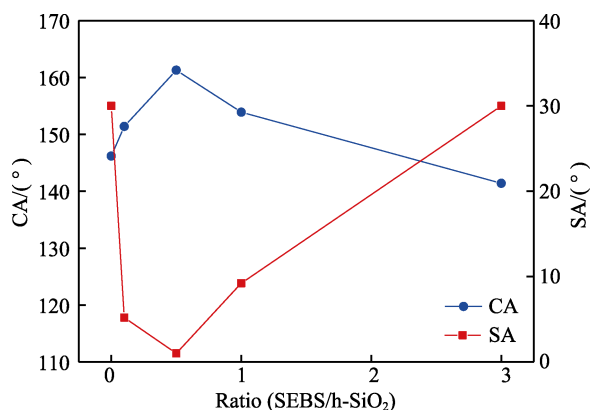


图 2 SEBS 用量对涂层润湿性能的影响

Fig.2 The mass ratio of SEBS content on wettability of coatings

且分布不均匀, 实际接触仍然以液滴与铝板接触为主, 所以虽然较纯铝板, 其 CA 增大, 但不能达到超疏水要求。当加入 SEBS 时, 铝合金表面形成一层薄薄的 SEBS 涂层, 更多的 h-SiO₂ 纳米颗粒分散到涂层当中, 形成一定的粗糙结构, 从而引起疏水性能提高, 达到超疏水要求。当 SEBS 的含量超过 h-SiO₂ 时, SEBS 涂层厚度增加, 且均匀性受到影响, 使得 h-SiO₂ 纳米颗粒部分被覆盖, 形成的粗糙结构被破坏, 所以表面润湿性由超疏水向疏水性转变。

2.2 红外光谱分析

为研究 SEBS/h-SiO₂ 涂层的化学性质, 分别对 SEBS 涂层和质量比为 1 : 3 的 SEBS/h-SiO₂ 涂层进行红外光谱图对比, 如图 3 所示。在 SEBS 红外光谱中, 2925 cm⁻¹ 和 2849 cm⁻¹ 为亚甲基的不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰; 1450 cm⁻¹ 为亚甲基的不对称剪式振动; 1378 cm⁻¹ 为亚甲基的对称剪式振动; 943 cm⁻¹ 为亚甲基的面外弯曲振动。与 SEBS 红外谱图相比, SEBS/h-SiO₂ 红外光谱在 1048、806 cm⁻¹ 处出现新的硅氧键 (Si—O) 伸缩振动峰和碳硅键 (C—Si) 伸缩振动峰, 说明 h-SiO₂ 附着在 SEBS 涂层表面, 并且二氧化硅表面存在疏水基团, 呈现出一定的疏水性^[26]。

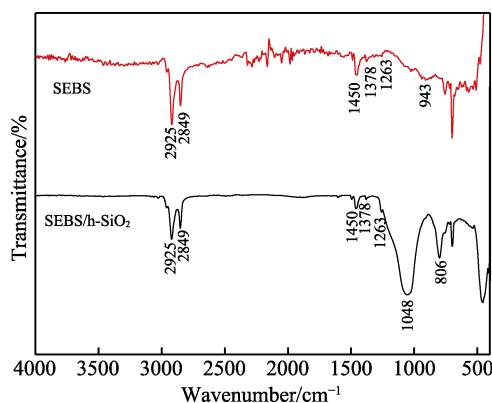


图 3 SEBS 和 SEBS/h-SiO₂ 涂层红外光谱图

Fig.3 FT-IR spectra diagram of SEBS and SEBS/h-SiO₂ coating

2.3 SEBS/h-SiO₂ 表面形貌分析

利用扫描电镜 (SEM) 研究了 SEBS 涂层和 SEBS/h-SiO₂ 复合涂层在不同放大倍数下的微观形貌, 如图 4 所示。SEBS 在铝合金表面形成一层均匀、平整的涂层 (图 4a、b), 涂层上分布有许多不同大小的凸起和孔洞, 尺寸在 500~600 nm (图 4c)。SEBS 涂层具有一定的疏水性质, 其水滴接触角为 120°。图 4d—f 为 h-SiO₂ 和 SEBS 质量比为 3 : 1 时试样的表面形貌图。可以看出, 涂层表面分布着许多大小约为 10 μm 的微凸体, 在单个微凸体之上堆砌了直径为 50 nm 左右的二氧化硅颗粒。这种二元微纳米粗糙结构与二氧化硅上的疏水基团相结合, 使得表面润湿性达到超疏水要求。

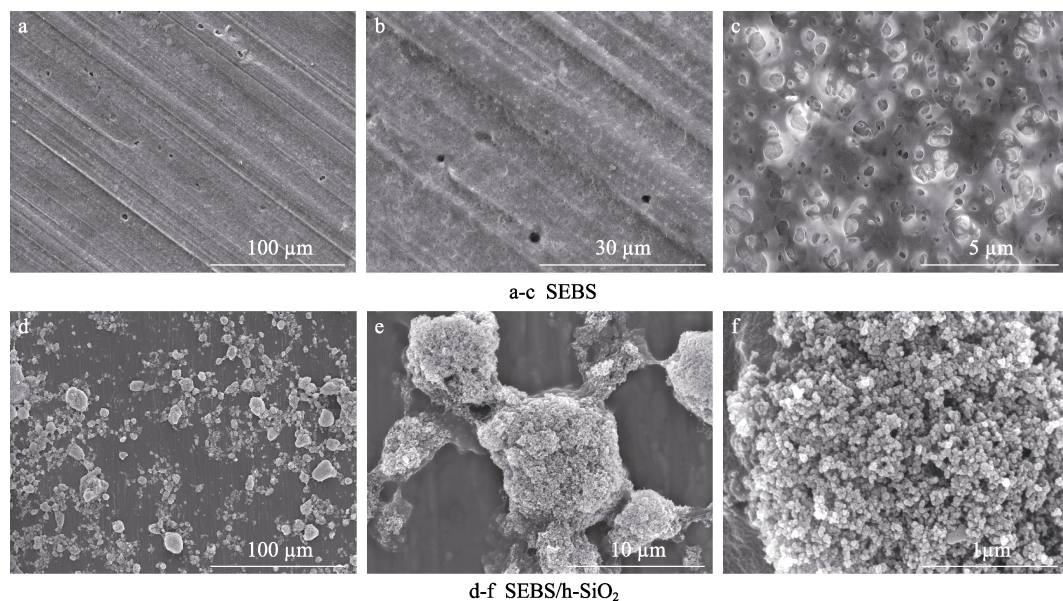


图4 SEBS 和 SEBS/h-SiO₂ 涂层的微观形貌
Fig.4 Microstructure of SEBS and SEBS/h-SiO₂ coatings

为进一步研究其表面粗糙结构,采用激光扫描共焦显微镜测量表面的均方根粗糙度 (R_q),相应的三维图像如图5所示。经打磨处理的铝合金表面有明显的划痕(图5a),其 R_q 为 0.610 μm 。经 SEBS 处理后的铝合金表面形成一层 SEBS 薄膜(图5b)。由于

SEBS 具有一定的凸起结构,所以该表面 R_q 增大为 0.729 μm 。而经 SEBS/h-SiO₂ 处理的铝合金表面,由 h-SiO₂ 构筑的凸起结构明显,其粗糙度进一步增大为 1.11 μm (图5c)。这种表面粗糙度的变化情况与 SEM 分析的结果基本一致。

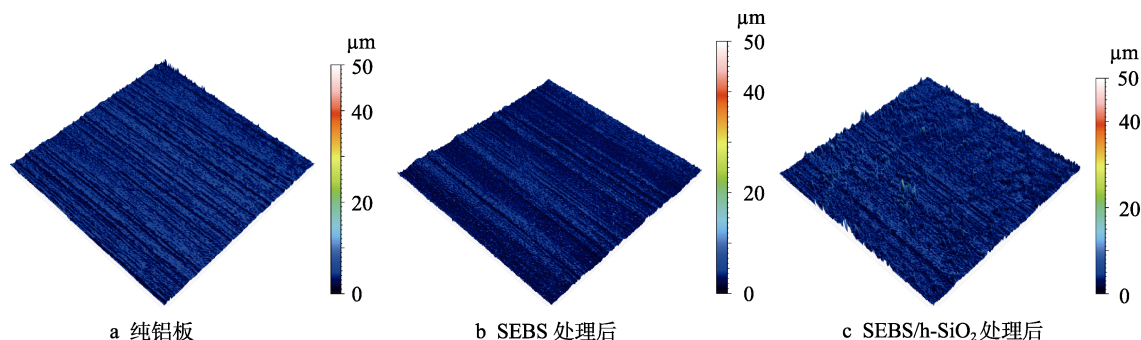


图5 不同工艺处理后涂层表面 LSM 图像
Fig.5 Surface LSM images: a) pure aluminum plate; b) after SEBS treated; c) after SEBS/h-SiO₂

2.4 SEBS/h-SiO₂ 复合涂层的稳定性

为验证 SEBS/h-SiO₂ 复合涂层的稳定性,在水中浸泡不同时间后,测试铝合金表面的 CA、SA,结果如图6a、6b所示。由图可知,CA 变化波动较小,在 120 min 内,均能保持在 160°左右,但随着浸泡时间的增长,SA 逐渐变大,且变化趋势明显,可以预测 2 h 后,超疏水表面将会失效。但是经过干燥后,SA 恢复初始水平。这是因为随着浸泡时间增长,更多的水分子进入复合涂层孔隙之中,使得液滴与铝合金表面接触面积增大,受到的结合力增大,从而不利于液滴滚动。经过干燥后,孔隙中水分子消失,液滴与铝合金表面接触状态发生改变,从而呈现超疏水性。复合涂层处理的铝合金放置在空气中 30 天后,其 CA 的变化见图 6c,液滴与表面的粘附状况见图 6d。结

果显示,CA 基本无变化,表面的抗粘附性能表现良好。所以,SEBS/h-SiO₂ 复合涂层表现出优异的稳定性。

2.5 超疏水表面自清洁性能研究

受荷叶的疏水现象启发,超疏水表面具有较高的静态接触角,在自清洁领域有着潜在的应用。利用炭黑作为污染源,测试光滑铝板和经过 SEBS/h-SiO₂ 涂层处理的铝板的表面自清洁性能。利用细筛向两块铝板表面平铺一层薄薄的炭黑,后放置在一个倾斜角度为 10°且擦拭干净的玻璃板上。滴加液滴,观察液滴滑落路径。如图7所示,未处理铝板上 5 滴液滴聚集在一起,未发生移动。而处理后的铝板上液滴滚动,并脱离,且每次带走一定数量的炭黑,最后形成一道清晰路径。所以,SEBS/h-SiO₂ 涂层表面具有和荷叶一样的自清洁能力,这种性能在防污领域有着潜在的应用前景。

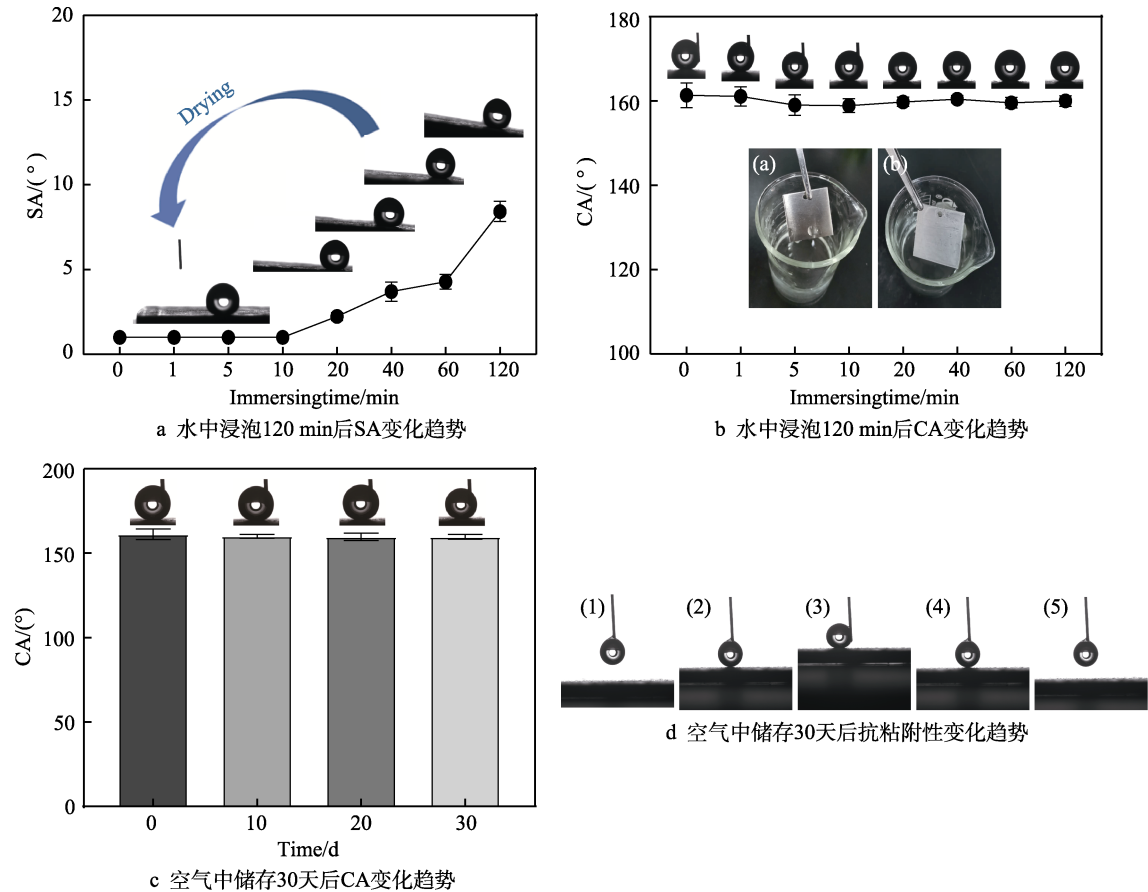


图 6 SEBS/h-SiO₂ 复合涂层稳定性测试

Fig.6 Stability test of SEBS/h-SiO₂ composite coating; a) change trend of SA after soaking in water for 120 min; b) change trend of CA after soaking in water for 120 min; c) change trend of CA after 30 days in air; d) change trend of anti-adhesion after 30 days in air

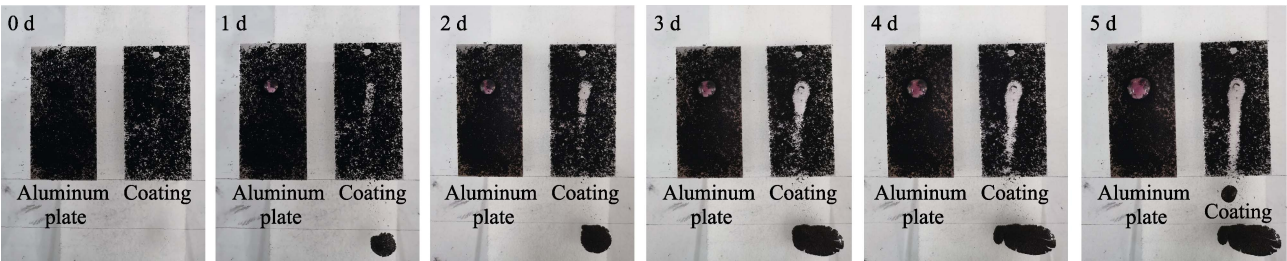


图 7 SEBS/h-SiO₂ 涂层自清洁效果展示

Fig.7 Self cleaning effect display of SEBS/h-SiO₂ coating

2.6 SEBS/h-SiO₂ 涂层的 Cassie 模型分析

固体表面润湿性能与固体表面微观结构密切相关, 研究中常采用 Cassie 模型对超疏水表面进行解释。当固体表面具有一定范围内的粗糙度时, 经过合适的低表面能物质修饰后, 液滴与固体表面接触时, 由未处理之前的固-液接触变成固-液-气三相接触, 如图 8 所示。由 h-SiO₂ 液构建的凸起结构之间滞留一部分的空气, 通过减小液滴与固体表面的接触面积, 使得固体表面向超疏水性能转变。此时液滴在固体表面形成复合接触, 满足 Cassie-Baxter 方程^[27]:

$$\cos\theta^* = f\cos\theta + f - 1$$
 (1)

式中, f 为液体的接触面积百分比, 即液体与固

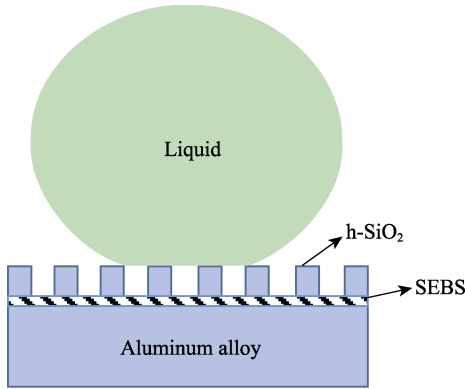


图 8 Cassie 模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of Cassie model

体接触面积与总接触面积之比。针对本文所制备的 SEBS/h-SiO₂ 涂层, θ^* 为液滴在复合涂层表面的 CA, 取平均数 160°, θ 为单独 SEBS 在铝合金表面成膜所测得的 CA, 取平均值, 约为 120°。计算得出复合涂层 f 仅为 12%, 即截留有 88% 的空气。形成的空气垫向上将水滴托起, 使得液滴在固体表面容易滚动。所以这种固-液-气的三相接触是超疏水固体表面的重要特性。

3 结论

在 AMS 4037 铝合金表面制备了 SEBS/h-SiO₂ 超疏水复合涂层。该涂层具有良好的稳定性与自清洁能力。当 SEBS 和 h-SiO₂ 质量比为 1:3 时, 得到了最佳 CA=160.4°, SA 小于 1°, 液滴在表面实际接触面积仅为 12%, 形成了有效气垫。涂层表面形貌为不规则的凸起均匀覆盖的粗糙表面, 同时 h-SiO₂ 表面具有疏水基团, 满足表面超疏水性能要求条件。

参考文献:

- [1] WANG Shu-tao, LIU Ke-song, YAO Xi, et al. Bioinspired Surfaces with Superwettability: New Insight on Theory, Design, and Applications[J]. Chemical Reviews, 2015, 115(16): 8230-8293.
- [2] HENSEL R, FINN A, HELBIG R, et al. Biologically Inspired Omniphobic Surfaces by Reverse Imprint Lithography[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2014, 26(13): 2029-2033.
- [3] BARTHOLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces[J]. Planta, 1997, 202(1): 1-8.
- [4] HE Meng, KWOK R T K, WANG Zheng-gang, et al. Hair-Inspired Crystal Growth of HOA in Cavities of Cellulose Matrix Via Hydrophobic-Hydrophilic Interface Interaction[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(12): 9508-9516.
- [5] MASOOD M T, HEREDIA-GUERRERO J A, CESERACCIU L, et al. Superhydrophobic High Impact Polystyrene (HIPS) Nanocomposites with Wear Abrasion Resistance[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 322: 10-21.
- [6] ZHU Ying, ZHANG Jing-chang, ZHENG Yong-mei, et al. Stable, Superhydrophobic, and Conductive Polyaniline/Polystyrene Films for Corrosive Environments[J]. Advanced Functional Materials, 2006, 16(4): 568-574.
- [7] GUO P, ZHENG Y, WEN M, et al. Icephobic/Anti-Icing Properties of Micro/Nanostructured Surfaces[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2012, 24(19): 2642-2648.
- [8] RUAN Min, LI Wen, WANG Bao-shan, et al. Preparation and Anti-Icing Behavior of Superhydrophobic Surfaces on Aluminum Alloy Substrates[J]. Langmuir, 2013, 29(27): 8482-8491.
- [9] 赵一鸣, 汪怀远, 陶瑞丰, 等. 超疏水表面制备及其减阻研究[J]. 化学工程师, 2018, 32(3): 33-36.
ZHAO Yi-ming, WANG Huai-yuan, TAO Rui-feng, et al. Preparation of Superhydrophobic Surface and Its Application to Drag Reduction[J]. Chemical Engineer, 2018, 32(3): 33-36.
- [10] 宋美艳, 赵曼, 石淑先, 等. 微球构筑防污减阻涂层的制备[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 134-141.
SONG Mei-yan, ZHAO Man, SHI Shu-xian, et al. Preparation of Anti-Fouling and Drag Reduction Coating Constructed by Microspheres[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 134-141.
- [11] SALEEMA N, SARKAR D K, GALLANT D, et al. Chemical Nature of Superhydrophobic Aluminum Alloy Surfaces Produced Via a One-step Process Using Fluoroalkyl-Silane in a Base Medium[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(12): 4775-4781.
- [12] HUANG Ying, SARKAR D K, CHEN X G. Superhydrophobic Aluminum Alloy Surfaces Prepared by Chemical Etching Process and Their Corrosion Resistance Properties[J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 1012-1024.
- [13] WANG S, FENG L, JIANG L. One-Step solution-Immersion Process for the Fabrication of Stable Bionic Superhydrophobic Surfaces[J]. Advanced Materials, 2006, 18(6): 767-770.
- [14] SU X, LI H, LAI X, et al. Vapor-Liquid Sol-Gel Approach to Fabricating Highly Durable and Robust Superhydrophobic Polydimethylsiloxane/Silica Surface on Polyester Textile for Oil-Water Separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(33): 28089-28099.
- [15] WU Xing-hua, FU Qi-tao, KUMAR D, et al. Mechanically Robust Superhydrophobic and Superoleophobic Coatings Derived by Sol-Gel Method[J]. Materials & Design, 2016, 89: 1302-1309.
- [16] SUN Wen, WANG Li-da, YANG Zheng-qing, et al. Fabrication of Polydimethylsiloxane-derived Superhydrophobic Surface on Aluminium Via Chemical Vapour Deposition Technique for Corrosion Protection[J]. Corrosion Science, 2017, 128: 176-185.
- [17] SAHOO B N, KANDASUBRAMANIAN B. Recent Progress in Fabrication and Characterisation of Hierarchical Biomimetic Superhydrophobic Structures[J]. RSC Advances, 2014, 4(42): 22053.
- [18] PILTAN S, SEYFI J, HEJAZI I, et al. Superhydrophobic Filter Paper Via an Improved Phase Separation Process for Oil/Water Separation: Study on Surface Morphology, Composition and Wettability[J]. Cellulose, 2016, 23(6): 3913-3924.
- [19] SU Xiao-jing, LI Hong-qiang, LAI Xue-jun, et al. Vacuum-Assisted Layer-by-Layer Superhydrophobic Carbon Nanotube Films with Electrothermal and Photothermal Effects for Deicing and Controllable Manipulation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(35): 16910-16919.

- [20] BRAVO J, ZHAI Lei, WU Zhi-zhong, et al. Transparent Superhydrophobic Films Based on Silica Nanoparticles[J]. *Langmuir*, 2007, 23(13): 7293-7298.
- [21] NGO C V, CHUN D M. Control of Laser-ablated Aluminum Surface Wettability to Superhydrophobic or Superhydrophilic through Simple Heat Treatment or Water Boiling Post-Processing[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 974-982.
- [22] XU Na, SARKAR D K, GRANT CHEN X, et al. Superhydrophobic Copper Stearate/Copper Oxide Thin Films by a Simple One-step Electrochemical Process and their Corrosion Resistance Properties[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(42): 35466-35478.
- [23] GAN Zhan-hui, KONG De-yu, YU Qian-qian, et al. Fabrication Superhydrophobic Composite Membranes with Hierarchical Geometries and Low-surface-energy Modifications[J]. *Polymer*, 2020, 211: 123097.
- [24] 张小林, 程金星, 陶影, 等. 新型热塑性弹性体 SEBS 及其改性的研究进展[J]. *弹性体*, 2005, 15(6): 72-76.
- ZHANG Xiao-lin, CHENG Jin-xing, TAO Ying, et al. Advances in New Thermoplastic Elastomer SEBS and Its Modification[J]. *China Elastomerics*, 2005, 15(6): 72-76.
- [25] 徐慧. SEBS 弹性体的制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
- XU Hui. Studies on the Preparation and Propertise of SEBS Thermoplastic Elastomer[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2018.
- [26] RAMAKRISHNA S, SANTHOSH KUMAR K S, MATHEW D, et al. A Robust, Melting Class Bulk Superhydrophobic Material with Heat-healing and Self-cleaning Properties[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18510.
- [27] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of Porous Surfaces[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40: 546.

(上接第 246 页)

- [15] 刘方, 徐龙, 马晓迅. BP 神经网络的发展及其在化学化工中的应用[J]. *化工进展*, 2019, 38(6): 2559-2573.
- LIU Fang, XU Long, MA Xiao-xun. Development of BP Neural Network and Its Application in Chemistry and Chemical Engineering[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(6): 2559-2573.
- [16] RODEMERCK U, BAERNS M, HOLENA M, et al. Application of a Genetic Algorithm and a Neural Network for the Discovery and Optimization of New Solid Catalytic Materials[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 223 (1-3): 168-174.
- [17] SOLOOKINEJAD G, ROZATIAN A S H, HABIBI M H. ZnO Thin Film Characterization by X-Ray Reflectivity Optimization Using Genetic Algorithm and Fourier Transformation[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 258(1): 260-264.
- [18] DING Shi-fei, SU Chun-yang, YU Jun-zhao. An Optimizing BP Neural Network Algorithm Based on Genetic Algorithm[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2011, 36(2): 153-162.
- [19] YOU Xi-ming, CAO Xue-wu. Study of Liquid Lithium Coolant Interaction Based on BP Neural Network Optimized by Genetic Algorithm[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(4): 918-924.
- [20] MAN K F, TANG K S, KWONG S. Genetic Algorithms: Concepts and Applications in Engineering Design[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, 43(5): 519-534.
- [21] PILSKI M, SEREDYŃSKI F. An Energy Efficient Routing Algorithm Based on Genetic Algorithm for Ad Hoc Networks[J]. *Annales UMCS, Informatica*, 2008, 8(1): 31-41.