

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200312.001

微纳结构超疏水表面的浸润性及防冰性能

武壮壮, 马国佳*, 崔向中, 刘星

(中国航空制造技术研究院 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 以 Ti 合金为基体材料, 通过超快激光加工微结构并复合纳米 SiO₂/氟化聚氨酯涂料, 获得微纳结构的涂层表面, 并与涂料喷涂获得的纳米涂层表面和未处理的 Ti 合金表面进行对比分析。分别采用扫描电镜、超景深显微镜、接触角和冰结合力测量仪, 研究分析未处理 Ti 合金表面、纳米结构表面、微纳结构表面的形貌、疏水性、防覆冰性能。结果表明: 具有微纳结构的涂层表面具有最佳的超疏水性, 接触角为 158.9°; 与未处理 Ti 合金表面、纳米结构表面相比, 微纳结构表面冰结合力显著降低, 表面冰结合强度约为 410 kPa。
关键词: 超疏水; 氟化聚氨酯; 纳米 SiO₂; 冰结合强度; 微纳结构

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2020)11-2769-07

Wettability and anti-icing performance of micro-nano structure superhydrophobic surface

WU Zhuangzhuang, MA Guojia*, CUI Xiangzhong, LIU Xing

(Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, China Aeronautical
Manufacturing Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: Ti alloy was used as the matrix material, the ultra-fast laser was used to process the microstructure and compounded nano SiO₂/fluorinated polyurethane coating to obtain the micro-nano structure coating surface, and this surface was compared and analyzed with the nano structure surface by spraying coating and the untreated surface. Scanning electron microscopy, ultra depth of field microscopy, contact angle and ice bonding force measuring instrument were used to study the surface morphology, hydrophobicity and anti-icing performance of the untreated Ti alloy surface, the nano structure surface and the micro-nano structure surface. The results show that the surface-prepared coating with micro-nano structure has the best superhydrophobicity, showing a contact angle of approximate 158.9°. Compared with the untreated Ti alloy surface and the nano structure surface, the ice adhesion strength of the micro-nano structure is significantly reduced, and the surface ice adhesion strength is about 410 kPa.

Keywords: superhydrophobic; fluorinated polyurethane; nano SiO₂; ice adhesion strength; micro-nano structure

由于高空环境中存在过冷水滴, 过冷水滴的状态不稳定, 飞机飞行过程中当机体表面温度过低时, 过冷水滴易在机体表面冻结聚集形成冰层。飞机积冰会增加飞机的重量, 改变重心和气动外形, 从而破坏原有的气动性能。如机翼和尾翼积冰使升力系数下降, 阻力系数增加, 并可引起飞机抖动, 造成操纵困难^[1]。飞机结冰问题严重影响飞机安全飞行。防冰问题是飞行器设计及制造的关键技术之一。现役飞机多采用复杂的防除冰

系统, 如: (1) 电热防除冰技术, 通过电阻丝加热升温防止表面结冰; (2) 气热防除冰技术, 通过将零件做成空心, 通入热空气加热来防止结冰; (3) 气动除冰; (4) 电排斥。现在应用最广泛的防除冰技术为热防除冰系统, 但由于其能耗大, 结构复杂, 制造工艺困难, 因此迫切需要低能耗或无能耗的防除冰技术支持^[2-3]。

超疏水表面的研究为上述问题的解决提供了思路, 超疏水材料是指液滴在材料表面接触角大

收稿日期: 2019-12-18; 录用日期: 2020-02-28; 网络首发时间: 2020-03-12 15:00:28
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200312.001>
通信作者: 马国佳, 博士, 研究员, 研究方向为微纳加工及仿生表面制备及工艺 E-mail: lemontree7678@163.com

引用格式: 武壮壮, 马国佳, 崔向中, 等. 微纳结构超疏水表面的浸润性及防冰性能 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2769-2775.
WU Zhuangzhuang, MA Guojia, CUI Xiangzhong, et al. Wettability and anti-icing performance of micro-nano structure superhydrophobic surface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(11): 2769-2775(in Chinese).

于 150°，滚动角小于 10°，具有特殊浸润性能的材料^[4]。自然界中许多动植物通过亿万年进化，其表皮已经具有超疏水功能，如荷叶、水龟腿、蝉翼、水稻叶、花瓣、蝴蝶翅膀、孔雀羽毛、壁虎脚掌等都具有超疏水性。自 Neinhuis 等^[5]提出荷叶效应以来，以荷叶、水稻叶、蝴蝶翅膀、水龟腿等为代表的生物原型受到极大关注，引发了仿生超疏水涂层的研究热潮。众多研究表明：液滴在材料表面的接触角与材料表面形貌及材料表面能有关，其在材料表面与固体表面的接触面积越小，液滴的接触角越大，滚动角越小，在材料表面的黏附力越小^[6]。纳米结构和微米结构表面可以降低液滴与材料表面的接触面积，从而增大材料表面接触角。由于微纳多级结构具有更大的接触角及更小的接触滞后性，过冷水滴在材料表面的黏附力极小，且易发生滚动脱落，从而降低过冷水滴在机体表面冻结几率，起到一定的防冰作用^[7-8]，因此通过低表面能材料复合表面形貌控制技术，获得具有低黏附力的仿生表面，从而起到防霜、防冰的效果，其在地面卫星天线、输电线等防冰具有重要的应用价值，在飞机防除冰领域也具有一定的潜在价值^[9]。

基于控制材料表面能和表面形貌两个基本原则，研究人员利用多种技术制备了超疏水表面，如电化学、溶胶凝胶、激光刻蚀、模板法、分子自组装等^[10-15]。本文以 Ti 合金为基体材料，采用超快激光加工方法在 Ti 合金基体上构筑微结构，然后采用纳米 SiO₂/氟化聚氨酯涂料修饰，获得微纳结构涂层表面，同时与涂料喷涂后获得的纳米结构涂层表面和未处理的 Ti 合金表面进行对比分析。分别研究分析未处理的 Ti 合金表面、纳米结构表面、微纳结构表面的表面形貌、疏水性、防覆冰性能及疏水表面的功能持久性，验证了微纳结构涂层表面的防冰优越性。

1 实验材料与方法

1.1 原材料

Ti 合金；氟化聚氨酯组分 A、B，中国科学院化学研究所；纳米 SiO₂，纯度为 99.8%，平均粒径为 20 nm，阿拉丁试剂；正己烷，分析纯，北京伊诺凯科技有限公司；丙酮，分析纯，北京化工厂。

1.2 微结构的实验设计

图 1 为未处理表面、纳米结构表面、微纳结构表面的润湿关系。液滴在超疏水微纳结构表面

接触方式为固液、液气的复合接触。利用 Cassie-Baxter 方程进行表面微结构设计^[16-17]，如下式：

cos θ_E = f₁ (1 + cos θ_r) - 1 (1)

式中：θ_E为材料表面表观接触角；θ_r为固液界面本征接触角；f₁为表面复合接触中固体面积占整个投影面积分数。微结构选用方阵柱形，边长、间距和高度分别为 L、P、H，如图 2 所示。

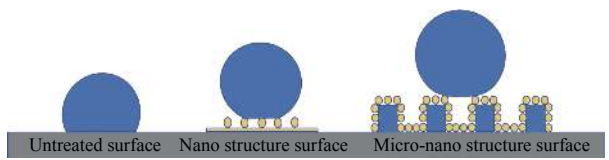
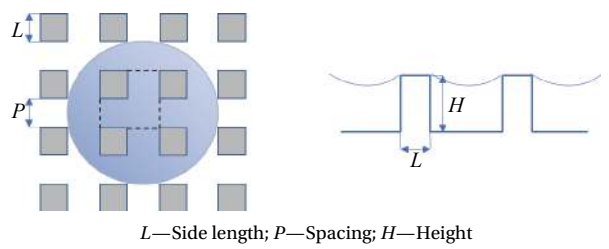


图 1 未处理表面、纳米结构表面、微纳结构表面润湿关系
Fig. 1 Wetting relationships of untreated surface, nano structure surface and micro-nano structure surface



L—Side length; P—Spacing; H—Height
图 2 方阵柱微结构示意图
Fig. 2 Diagram of squarematrix column microstructure

氟化聚氨酯的本征接触角为 114°，利用 Cassie-Baxter 方程可得到微结构边长 L 及间距 P 的关系。以周期性排列的微结构的一个周期计算表面固体所占面积分数。则 f₁ = L² / (L + P)²，代入式 (1) 可得：

cos θ_E = L² / (L + P)² (1 + cos 114°) - 1 (2)

超疏水材料接触角 150° < θ_E < 180°，代入式 (2) 中可得 L 和 P 的关系为：0 < L/P < 0.925。拟定材料表观接触角为 160°，则 L/P = 0.476。微结构尺寸可设定为边长 L = 100 μm，间距 P = 210 μm，高度 H = 50 μm。

1.3 SiO₂/氟化聚氨酯涂料及微纳结构表面制备

取质量分数为 13wt% 的纳米 SiO₂ 分散到 25 mL 正己烷溶剂中，超声分散 30 min。采用磁子搅拌将氟化聚氨酯 A 组分和 B 组分按 A : B 质量比 = 10 : 1 混合均匀，然后将其加入到正己烷混合溶液中，磁子搅拌 30 min 混合均匀。最后，将制备好的混合溶液喷涂到 Ti 合金表面，80℃ 下固化 2 h 得到纳米 SiO₂/氟化聚氨酯纳米结构涂层。

根据设计的表面微结构形貌、尺寸，采用超

快激光加工方法在 Ti 合金表面构筑微结构，最后采用纳米 SiO₂/氟化聚氨酯涂料修饰得到微纳结构表面。

1.4 性能测试与表征

采用光学接触角测试仪 (SDC-350 型，东莞盛鼎精密仪器有限公司) 测试涂层表面的接触角，接触角测试液滴体积为 4 μL，每个试样测定 5 个点取平均值。

采用场发射扫描电镜 (SUPRA55 型，德国卡尔蔡司公司)、超景深显微镜 (VHX-6000 型，基恩士有限公司) 观察涂层表面微观形貌。

采用冰结合力测试仪 (SSMC 型拉压力传感器，深圳优众力公司) 测试涂层表面静态冰结合强度，测试装置主要包括：低温冷却循环系统，用于控制试验台温度；推力测试系统，用于测试冰结合力，包括电动滑台、推杆、拉压力传感器、激光定位灯。实验环境温度为 25℃，相对湿度为 50%，冷却温度选择典型明冰结冰温度 (-10℃)，圆柱套筒内径为 12mm，注水高度为 5mm。冰结合强度 $\sigma = F/S$ (σ 为冰结合强度， F 为结合力， S 为接触面积 $S=\pi r^2$ ， r 为冰柱半径)。具体过程为圆柱套筒内水在低温环境下逐渐冷却凝固并黏附在试样表面；通过步进电机的控制器设定电动滑台的移动速度和距离，启动电动滑台，推杆前端的接触边接触圆柱套筒底端并逐渐增加推力，最终将冰柱推离试样表面，推杆的行进速度为 0.5 mm/s；记录拉力计的最大推力作为冰柱与试样表面间的结合力，

该力除以接触面积得到冰结合强度。图 3 为冰结合力测试装置实物图及测试试验图，分别测试三种表面的冰结合强度。

2 结果与讨论

2.1 SiO₂/氟化聚氨酯涂层的表面形貌

图 4 为 Ti 合金基体上方阵柱复合 SiO₂/氟化聚氨酯涂层构成的微纳结构表面、SiO₂/氟化聚氨酯构成的纳米结构表面和未处理的 Ti 合金表面的微观形貌。由图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 可以看到，表面方形微结构边长为 ~100 μm，间距为 ~210 μm，高度为 ~50 μm，且纳米 SiO₂ 覆盖在整个微结构表面，形成双尺度的微纳结构，微结构尺寸关系符合 Cassie-Baxter 方程，微结构的间隙可以“捕获”空气，其表面与液滴之间形成固液、液气的复合接触，这种接触方式使液滴在表面的黏附力极低，极易从表面滚落，从而起到防冰效果。由图 4(d) 和图 4(e) 可以看到，纳米结构表面由纳米 SiO₂ 构成，与基体树脂交联覆盖在整个基材表面。由图 4(f) 可以看到，未处理的 Ti 合金表面无任何结构。

2.2 SiO₂/氟化聚氨酯涂层表面的润湿性

图 5 为 Ti 合金基体上方阵柱复合 SiO₂/氟化聚氨酯涂层构成的微纳结构表面、SiO₂/氟化聚氨酯构成的纳米结构表面、未处理的 Ti 合金表面的接触角。可知，微纳结构表面接触角为 158.9°，纳米结构表面接触角为 148.4°，未处理 Ti 合金表面接触角为 69.03°。

材料表面的润湿关系包括 Wenzel 态、Cassie-



图 3 冰结合力测试装置及测试试验照片
Fig. 3 Photographs of ice adhesion test device and test

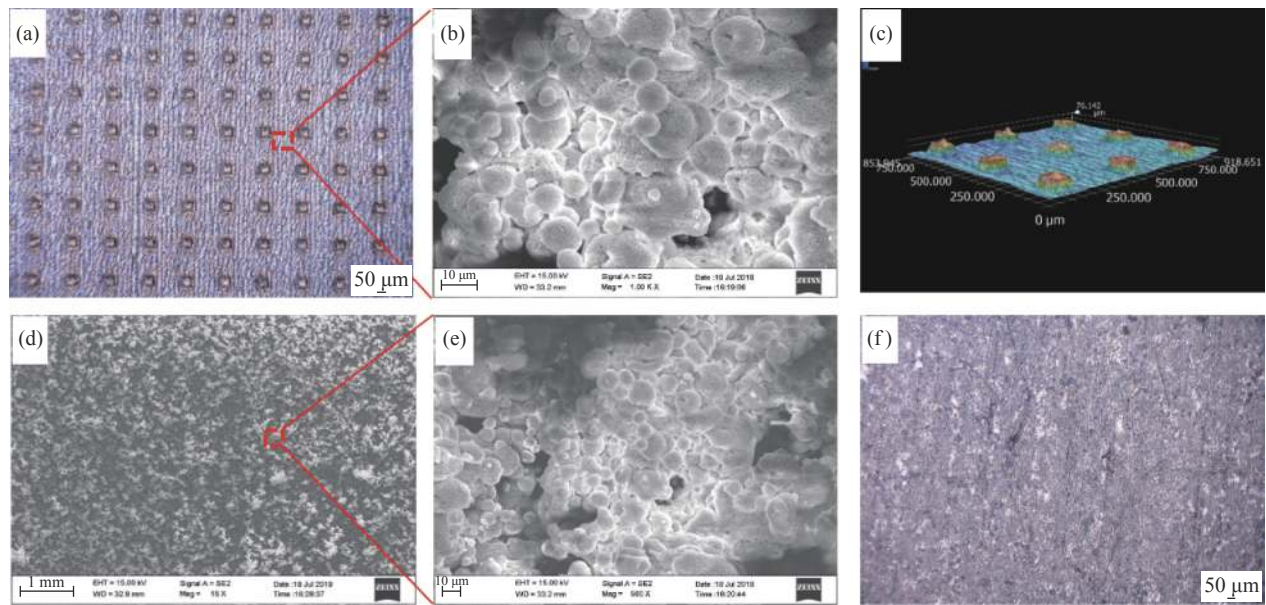


图 4 Ti 合金基体上的未处理表面、纳米结构表面、微纳结构表面的微观形貌：
(a) 微纳结构表面；(b) 纳米结构 (SiO₂)；(c) 微纳结构表面的三维形貌；(d) 纳米结构涂层表面形貌；(e) 纳米结构 (SiO₂)；(f) 未处理的 Ti 合金表面

Fig. 4 Surface morphologies micro-nano structure surface, nano structure surface and untreated surface on Ti alloy substrate: (a) Micro-nano structure formed by square matrix column; (b) Nano structure (SiO₂); (c) Three-dimensional topography of micro-nano structure surface; (d) Surface morphology of nano structured coating; (e) Nano structure (SiO₂); (f) Untreated Ti alloy surface

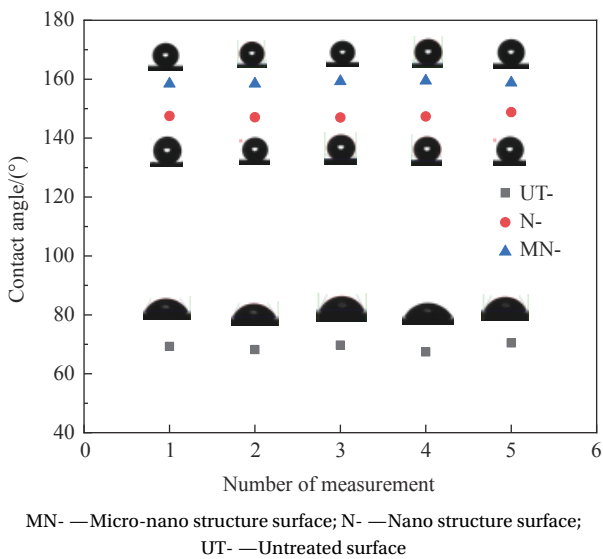


图 5 Ti 合金基体上的微纳结构表面、纳米结构表面、未处理表面的接触角

Fig. 5 Surface contact angles of micro-nano structure surface, nano structure surface and untreated surface on Ti alloy substrate

Baxter 态及 Wenzel 态和 Cassie-Baxter 态的中间态^[18-19]。Wenzel 态是指液滴在材料表面接触方式为“湿接触”，表现为液滴填入表面间隙，显示亲水性，材料表面的接触角较小，液滴滚落需克服一定能垒，因此在 Wenzel 态下液滴不易滚落，表面具有高的黏附性。Cassie-Baxter 态是指液滴

在材料表面接触方式为固液、液气界面的复合接触，表现为液滴未填入表面间隙，表面间隙“捕获”空气，与液滴之间形成复合接触，固液接触面积减小，显示疏水性，材料表面接触角较大，液滴易从表面滚落，具有较低的黏附性^[20-21]。未处理的 Ti 合金表面接触角较小，液滴在材料表面为 Wenzel 态，具有较高的黏附性。纳米结构表面和微纳结构表面接触角较大，显示疏水性，液滴与材料表面的接触方式为 Cassie-Baxter 态，两者固液接触面积不同，因此分别表现为疏水态及超疏水态，具有不同的黏附性。

微纳结构表面与其他表面相比，接触角最大，达到超疏水性能，这是由于虽然微纳结构与纳米结构的结构间隙都会“捕获”空气，形成“空气膜”，减少液滴与固体接触面积，从而使其接触角变大，但微纳结构的结构间隙与纳米结构表面相比，其“捕获”空气更多，当液滴与材料接触时，更不易排出，固液接触面积进一步降低，根据 Cassie-Baxter 方程，固液接触面积分数 f_1 越小，表观接触角 θ_E 越大，由于 $f_{1MN-} < f_{1N-}$ (其中， f_{1MN-} 为微纳结构表面固液接触面积分数， f_{1N-} 为纳米结构表面固液接触面积分数)，因此微纳结构表面接触角最大，可以“捕获”更多空气，使液滴悬挂在材料表面，具有更好疏水性能。

2.3 SiO₂/氟化聚氨酯涂层表面的冰结合强度

图6为-10℃下Ti合金基体上方阵列柱复合SiO₂/氟化聚氨酯涂层构成的微纳结构表面、SiO₂/氟化聚氨酯构成的纳米结构表面、未处理的Ti合金表面的静态冰结合强度。可知,未处理的表面冰结合强度约为1 050 kPa,纳米结构表面冰结合强度约为660 kPa,相比其他两个表面,微纳结构表面的冰结合强度最低,约为410 kPa。

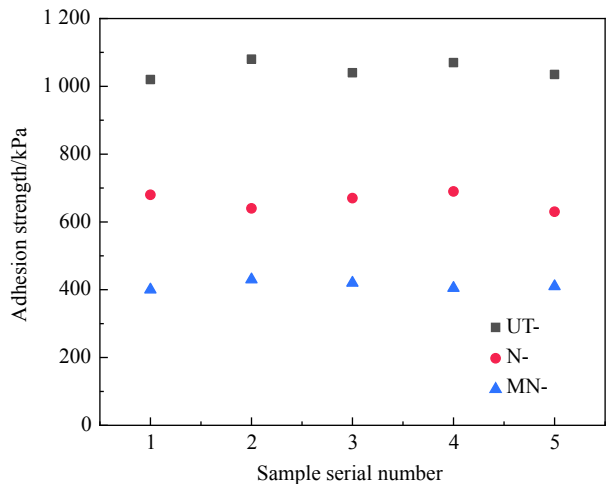


图6 -10℃下Ti合金基体上微纳结构表面、纳米结构表面、未处理表面冰结合强度
Fig. 6 Surface ice adhesion strength of micro-nano structure surface, nano structure surface and untreated surface on Ti alloy substrate at -10℃

目前的一些研究结果表明,冰结合强度影响因素与材料的疏水性能类似,也主要受材料表面能和表面形貌影响,但其机制有所不同。当材料表面能越低时,其表面张力和自由焓越小,表面冰结合强度越低^[22-23];材料表面形成微纳结构后,如果材料表面还具有低表面能特征,则微纳结构间隙容纳空气,可以减少水滴及冰层与固体的接触面积,同时冰层升华的水蒸气也会进入到微结构空隙,使微结构内气体压力大于冰层外部压力,从而导致微纳结构表面与冰的结合强度降低^[24-25],如果材料的表面能较高,则微纳结构会起到反作用,即对冰层的“钉扎”作用,与冰的结合强度会有较大幅度增强。

对于本文的微纳结构表面、纳米结构表面、未处理表面, $f_{1MN-} < f_{1N-} < f_{1UT-}$ (其中, f_{1UT-} 为未处理表面固液接触面积分数),因此表面黏附力关系为 $F_{MN-} < F_{N-} < F_{UT-}$ (其中, F_{MN-} 为微纳结构表面黏附力, F_{N-} 为纳米结构表面黏附力, F_{UT-}

为未处理Ti合金表面黏附力),使表面具有不同的防覆冰性能。基于以上冰结合强度影响因素机制讨论,本文制备的微纳结构超疏水表面由于涂层的修饰使其具有低表面能和纳米结构特征,同时还复合了微结构,因此其黏附力最小,并具有最小的冰结合强度。

2.4 SiO₂/氟化聚氨酯涂层防覆冰性能的持久性

图7为-10℃下测量20次的Ti合金基体上方阵列柱复合SiO₂/氟化聚氨酯涂层构成的微纳结构表面、SiO₂/氟化聚氨酯构成的纳米结构表面、未处理的Ti合金表面冰结合强度变化趋势。可知,未处理的Ti合金表面冰结合强度保持稳定,维持在1 050 kPa左右;纳米结构表面的冰结合强度开始约为650 kPa,但随着实验次数的增加,冰结合强度不断增大,在实验12次后,冰结合强度接近1 000 kPa,与未处理表面相当;微纳结构表面开始也显示出良好的防覆冰性,其冰结合强度约为410 kPa,随着循环次数的增加,冰结合强度也不断增大,在实验13次后,冰结合强度超过1 000 kPa,最大值达到1 500 kPa。

经过多次结冰循环后,纳米结构表面纳米粒子及低表面能涂层被破坏,脱落导致其表面能增加,疏水性能下降,表面冰结合强度增大;对于微纳结构表面,多次结冰循环后表面冰结合强度增大,其原因与纳米结构表面相同,同时由于微米结构粗糙度较大,因此液体浸润固体面积增大,导致冰层与固体接触面积比纳米结构大,使冰结合力增大,另一方面,在高表面能条件下,微结构的劣势显现,其“钉扎”冰层作用也促进冰结合强度大幅度提高,因此在使用13次后,微纳结构表面冰结合强度反而比纳米结构及未处理表面的冰结合强度大。

3 结论

- (1) 通过超快激光加工表面微结构,后喷涂修饰纳米SiO₂/氟化聚氨酯涂层,得到微纳结构仿生表面,水接触角达到158.9°。
- (2) 与未处理Ti合金表面和纳米结构表面相比,微纳结构涂层表面可以显著降低冰结合强度,表面冰结合强度约为410 kPa,在防冰领域表现出重要的潜在应用价值。
- (3) 采用侧推法测试冰结合强度重复试验中,纳米结构表面和微纳结构表面在重复试验约13次后,表面冰结合强度显著增大,涂层防覆冰性能

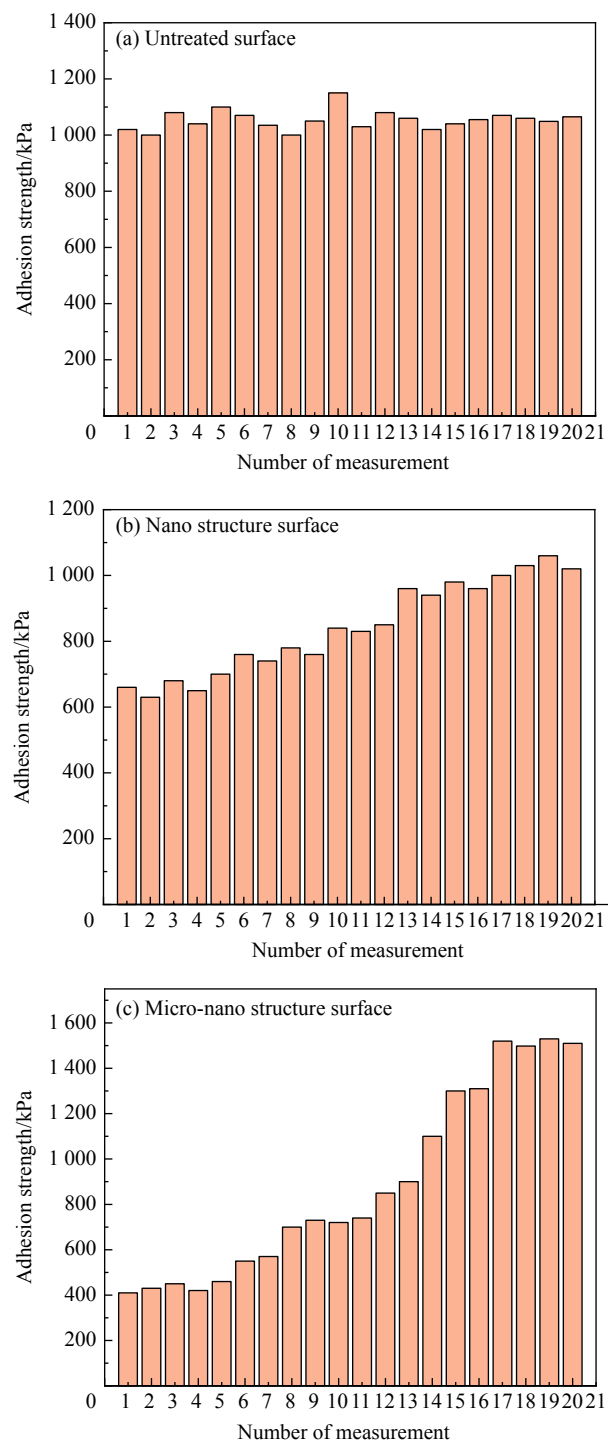


图7 -10°C 下测量20次的Ti合金基体上微纳结构表面、纳米结构表面、未处理表面冰结合强度变化趋势

Fig. 7 Trend of ice adhesion strength of micro-nano structure surface, nano structure surface and untreated surface on Ti alloy substrate measured 20 times at -10°C

下降,涂层防覆冰性能持久性有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 陈凯,王强,夏祖西.飞机超疏水表面的防冰性能研究进展[J].应用化工,2016,45(10): 1969-1973.
- [2] 王冠,张德远,陈华伟.飞机防冰:从传统到仿生的发展[J].工业技术创新,2014,1(2): 241-250.
- [3] 马蕾,王贤明,宁亮.飞机防冰涂料的研究进展[J].中国涂料,2014,29(1): 11-14, 18.
- [4] 杨钦,罗荏竹,谭生,等.超疏水自清洁涂层防结冰技术的研究进展[J].中国表面工程,2016,29(4): 10-22.
- [5] YANG Qin, LUO Yizhu, TAN Sheng, et al. Research progress in anti-icing technology of superhydrophobic self-cleaning coating[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 10-22(in Chinese).
- [6] NEINHUIS C, BARTHOLOTT W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plantsurfaces[J]. Annals of Botany, 1997, 79(6): 667-677.
- [7] BHUSHAN B, JUNG Y C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction[J]. Progress in Materials Science, 2011, 56(1): 1-108.
- [8] ZHANG Q, JIN B, WANG B, et al. Fabrication of a highly stable superhydrophobic surface with dual-scale structure and its antifrosting properties[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(10): 2754-2763.
- [9] 翟广坤,李曙林,陈素素,等.氟化改性硅树脂制备的超疏水涂层防覆冰性能[J].工程科学学报,2018,40(7): 864-870.
- [10] ZHAI Guangkun, LI Shulin, CHEN Susu, et al. Anti-icing performance of superhydrophobic coating prepared by modified fluorinated silicone[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(7): 864-870(in Chinese).
- [11] LATTHE S S, SUTAR R S, KODAG V S, et al. Selfcleaning superhydrophobic coatings: Potential industrial applications[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 128: 52-58.
- [12] 刘建峰,肖新颜.溶胶-凝胶法超疏水含氟聚聚氨酯丙烯酸酯/ SiO_2 杂化涂层的制备[J].高分子材料科学与工程,2014,30(6): 130-135.
- [13] LIU Jianfeng, XIAO Xinyan. Preparation of superhydrophobic FSiPUA/ SiO_2 hybrid coatings via sol-gel method[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(6): 130-135.

- 130-135(in Chinese).
- [11] 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.
- [12] FENG L, LI S H, LI H J, et al. Super-hydrophobic surface of aligned polyacrylonitrile nanofibers[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2002, 41(7): 1221-1223.
- [13] MA M, HILL R M. Superhydrophobic surfaces[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2006, 11(4): 193-202.
- [14] EBERT D, BHUSHAN B. Durable lotus-effect surfaces with hierarchical structure using micro- and nanosized hydrophobic silica particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 368(1): 584-591.
- [15] BAKE A, MERAH N, MATIN A, et al. Preparation of transparent and robust superhydrophobic surfaces for self-cleaning applications[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2018, 122: 170-179.
- [16] 马国佳, 刘星, 张伟, 等. 超疏水仿生表面制造及其应用[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(6): 1866-1871.
- MA Guojia, LIU Xing, ZHANG Wei, et al. Fabrication and application of super-hydrophobic bionic surface[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(6): 1866-1871(in Chinese).
- [17] DARMANIN T, GIVENCHY E T D, AMIGONI S, et al. Superhydrophobic surfaces by electrochemical processes[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(10): 1378-1394.
- [18] 郝金明. 超疏水、超双疏材料的制备与研究[D]. 北京: 中国科学院化学研究所, 2008.
- XI Jinming. Fabrication and study of superhydrophobic and superamphiphobic materials[D]. Beijing: Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 2008(in Chinese).
- [19] 黄建业. 仿生超疏水表面的制备、疏水稳定性与应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- HUANG Jianye. Preparation, hydrophobic stability and application research of biomimetic superhydrophobic surfaces[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014(in Chinese).
- [20] 王强峰. 超浸润表面的制备及其防覆冰性能与机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG Qiangfeng. Fabrication of superwetting surfaces and research on properties and mechanisms for anti-icing application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [21] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S A. Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(14): 6264-6269.
- [22] KULINICH S A, FARZANEH M. How wetting hysteresis influences ice adhesion strength on superhydrophobic surfaces[J]. *Langmuir*, 2009, 25(16): 8854-8856.
- [23] HAO P F, LV C J, ZHANG X W. Freezing of sessile water droplets on surfaces with various roughness and wettability[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(16): 161609.
- [24] 杨钦. 工程实用性超疏水自清洁涂层防结冰行为及机理研究[D]. 重庆: 中国科学院大学, 2017.
- YANG Qin. Anti-icing behaviors and mechanism of engineering superhydrophobic self-cleaning coatings[D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017(in Chinese).
- [25] SCHUTZIUS T M, JUNG S, MAITRA T, et al. Spontaneous droplet trampolining on rigid superhydrophobic surfaces[J]. *Nature*, 2015, 527(7576): 82-85.