

综述与专论

超疏水材料防冰研究进展

彭华乔 李 林 夏祖西 苏正良

(中国民航局第二研究所,成都 610041)

摘 要 在结冰条件下,除去飞机表面的冰、霜、雪等污染物,是确保航空安全的基础。传统方法存在能耗大、效率低、环境污染等问题,其应用受到一定的限制。启示于自然界“荷叶效应”的超疏水材料具有微纳米结构和低表面能特性,其在飞机除防冰领域有着广阔的应用前景。综述了超疏水材料防冰研究进展,包括表面疏水、减小冰附着力和提升防冰时间等。超疏水材料要在飞机上应用,除了要构建特殊的微纳米结构和低表面能特性外,还要满足飞机涂料的适航性。

关键词 飞机,超疏水,防冰,冰附着力

Research progress in anti-ice performance of superhydrophobic material

Peng Huaqiao Li Lin Xia Zuxi Su Zhengliang

(The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041)

Abstract In order to ensure the civil aviation safety, the contaminations on the surface of aircraft including ice, frost and snow shall be removed under the freezing conditions. There are some disadvantages such as high energy consumption, ineffectiveness, environmental pollution in traditional deicing/anti-icing method. Based on the ‘lotus effect’, superhydrophobic materials with micro-nano structure and low surface energy have wide applications. The latest international and domestic research progresses in anti-ice performance of superhydrophobic materials were summarized, including hydrophobic, low ice adhesion and high holdover time. Not only construction of the special micro-nano structure and low surface energy, but also satisfaction of airworthiness for aircraft coatings if the superhydrophobic materials will be used in civil aviation in the future.

Key words aircraft, superhydrophobicity, anti-icing, ice adhesion force

冰、雪、霜对飞机运行安全会造成直接影响,使飞机外表变得粗糙,增加质量,限制操纵面的活动范围,导致仪表误差,严重时还引起飞机失速增加,从而使飞行性能下降。特别当飞机起飞时,使飞行姿态难以控制,严重则造成空难。发展除/防冰技术对预防因结冰造成的飞行事故,保障飞行安全具有重大意义。超疏水材料正是这种具有优异防冰性能的材料,也一直是国际上研究的热点。

启示于“荷叶效应”的超疏水材料具有微纳米结构和低表面能特性。水滴在这种表面上具有较大的接触角及较小的滚动角,使得水滴在表面的粘附力大大降低,极易流走^[1-5]。因而,超疏水材料具有优异的防冰性能,可潜在应用于飞机、公路、输电线等需要防冰的领域^[6-12]。笔者主要综述了超疏水表面

防冰研究进展,包括表面疏水、减小冰附着力和提升防冰时间等。

1 表面疏水

超疏水表面接触角大于 150° , 滚动角小于 10° , 水滴在上面可弹跳,也可在微小的扰动下,使静止在表面的液滴滚落,为防止飞机表面结冰提供了新方法。因此,在增加表面接触角,减小滚动角方面开展了很多研究工作^[13-15]。

1.1 含硅化合物

目前,大部分的研究都采用含硅化合物为基本原料,因为其表面能较低,有利于构筑超疏水表面。Prasad 等^[16]采用聚酰胺和纳米 SiO_2 在玻璃表面制备超疏水涂层。水滴在聚酰胺涂层表面的接触角为

66°, 当 SiO₂ 含量分别为 2% (wt, 质量分数, 下同) 和 4% 时, 接触角分别为 123° 和 159°。

Jiang 等^[17]在聚氨酯表面涂覆三甲氧基硅烷制备超疏水涂层, 当三甲氧基硅烷含量为 3% 时, 接触角达到 166.2°, 滚动角为 6.6°。增加三甲氧基硅烷的含量, 接触角逐渐下降, 滚动角增加。在制备过程中, 当干燥温度从 20℃ 升至 170℃, 接触角从 166.2° 降至 82.8°。这是因为当温度升高, 聚氨酯链段加速运动, 使其可以进入纳米粒子中间, 并包覆纳米粒子, 从而破坏表面的微纳米结构并降低粗糙度, 使疏水性能下降。

Zhou 等^[18]制备了含聚二甲基硅氧烷、聚苯乙烯、聚(甲基丙烯酸丁基多面体低聚倍半硅氧烷) (PiBuPOSSMA) 的三嵌段共聚物超疏水涂层。PiBuPOSSMA 含量的增加可提高涂层表面的粗糙度, 使表面接触角增至 157.3°, 且具有较低的滚动角(3°), 并表现出稳定的超疏水性。

1.2 硬脂酸

硬脂酸表面能较低, 价格低廉, 也常用来制备超疏水材料。晏忠钠等^[19]通过硬脂酸的醇水溶液一步浸泡法成功获得了超疏水铝合金表面, 接触角可达 156.2°, 滚动角小于 5°。铝合金表面形成了许多均匀的“孔状”和“脊”结构。凸起的脊之间相互交错联结, 形成了均匀的花瓣状多孔结构, 这种具有花瓣状的微纳米级结构对超疏水性的产生具有重要影响。

Wang 等^[20]采用硬脂酸改性, 在玻璃表面制备了含 TiO₂ 的超疏水涂层, 其接触角为 157°, 滚动角为 2°。从 10cm 处滴落 5μL 水滴, 水滴不会浸入涂层, 也不会再在涂层上扩散, 而是在涂层上弹跳 2 次后停留在表面。

Jain 等^[21]通过电沉积法并经硬脂酸改性后, 制备超疏水铜表面, 接触角为 162°, 滚动角约为 3°, 表现出良好的超疏水性。在较高的超电势作用下, 涂层表面较大的球状凸起逐渐被更小的球状凸起覆盖, 导致不同级别的球状微凸体出现, 这种多尺寸球状凸起的共存有利于接触角的增加, 并形成更加稳定的 Cassie 状态。

1.3 碳纳米管

碳纳米管具有较大的比表面积和长径比, 可提高表面的粗糙度, 也可制备超疏水材料, 但价格偏高。Zhang 等^[22]将双酚 A 二缩水甘油醚(BADGE)环氧树脂与多壁碳纳米管(MWCNTs)结合, 制备超

疏水性纳米复合涂层。当 MWCNTs 含量增至 30% 时, 涂层呈现出粗糙和多层微纳结构, 最高接触角为 154°, 当 MWCNTs 进一步增加时, 接触角下降。这是因为涂层表面粗糙度越大, 使越来越大的孔能捕捉到更多的空气, 这些空气作为物理屏障, 减少了水与表面的接触。

Rajiv 等^[23]利用 MWCNTs 和聚四氟乙烯(PTFE)在玻纤增强塑料表面制备超疏水材料。随着 MWCNTs 含量的增加, 接触角逐渐增大, 当 MWCNTs 含量为 30% 时, 分散性最好, 且 PTFE 纳米颗粒能更好地团聚在 MWCNTs 表面, 增加了表面粗糙度, 从而使涂层具有良好的粗糙结构, 水接触角高达 162.7°。

2 减小冰附着力

如果水未脱离超疏水涂层, 由于涂层表面特殊的微纳结构, 使水滴在其表面呈 Cassie 状态, 即使结冰, 其与涂层表面间的附着力与普通表面的附着力相比也大大降低^[24-27], 有利于在较小外力作用下将冰从超疏水表面清除。

Brassard 等^[28]采用体积分数为 40% 的 HCl 处理铝板, 然后再喷涂含硅密封胶制备超疏水表面。未处理铝板表面的冰附着力为 0.600 ± 0.030 MPa, 而经处理后的超疏水表面的冰附着力仅为 0.051 ± 0.014 MPa。附着力的降低主要是由于超疏水表面的微纳结构吸附了空气导致表面结冰区域减小所致。

Bharathidasan 等^[29]发现亲水性的聚氨酯涂层和聚甲基丙烯酸甲酯涂层具有较大的冰附着力, 分别为 820kPa 和 1535kPa; 超疏水涂层 R2180-EH5 和 RTV11-EH5 的冰附着力在 250 ± 20 kPa 范围内, 比亲水性涂层明显下降。

Zheng 等^[30]在铝合金表面制备了超疏水涂层, 在 -10℃ 的环境中, 未经处理的铝合金表面的冰附着力为 1.024 ± 0.283 MPa, 而超疏水表面的冰附着力为 0.065 ± 0.022 MPa。超疏水涂层表面的水滴处于凸面, 不易结冰, 且冰层和涂层之间保持的空气减小了接触面积, 导致相互作用力降低, 冰附着力减小。

Brassard 等^[31]采用电沉积法在钢板上沉积了锌薄膜, 并利用硅橡胶进行功能化, 最终获得了超疏水锌涂层。在 -10℃ 的环境中, 裸钢表面的冰附着力为 0.617 ± 0.004 MPa, 而超疏水镀锌钢表面冰附

着力为 $0.098 \pm 0.012 \text{ MPa}$, 其冰附着力比裸钢低 6.3 倍, 有效地减小了冰附着力。

Yeong 等^[32]制备了含氟的超疏水涂层, 冰粘附实验表明, 裸铝表面的冰附着力约为 1000 kPa , 而含氟的超疏水表面的冰附着力约为 20 kPa , 仅为裸铝表面的 2%。

3 提升防冰时间

超疏水表面独特的微纳结构, 使其表面具有不结冰或结冰时间延迟的特殊现象^[33-37]。Liao 等^[38]采用 CuCl_2 、 HCl 和十六烷基三甲氧基硅烷对铝改性, 水滴在未处理铝表面的结冰时间为 6s, 而在超疏水铝表面 200s 时基本没有结冰, 在 382s 时水滴才结冰, 结冰时间大大延迟。超疏水铝表面的微纳结构降低了固液之间的接触面, 减缓了水滴与铝表面的热量交换, 水滴在结冰前可聚集成较大的液滴, 从表面滚落, 从而达到防冰效果。

Shen 等^[39]在铝合金表面分别制备含多层微纳结构的超疏水表面(HN)和含纳米片结构的超疏水表面(SN)。在 -10°C 和相对湿度 65% 的条件下, 水滴在未处理铝合金表面、HN 表面和 SN 表面的完全结冰的时间分别是 13.5s、769s 和 605s。水滴在超疏水表面的防冰时间有明显提高, 这是因为超疏水表面的空气起到隔热作用, 延缓了结冰的发生。

Shen 等^[40]在 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 钛合金上制备超疏水表面, 在 -10°C 条件下, 含氟的超疏水表面的冰核形成时间为 750s, 比普通表面大幅提升, 且超疏水表面的冰晶生长速率也较低。

季银炼等^[41]利用溶液刻蚀-沸水法制备具有纳米结构的铝基表面, 超疏水表面的液滴从 17min 开始冻结, 直到 26min 才全部冻结, 而裸露表面的液滴在 4min 内就全部冻结。

Liu 等^[42]在玻璃纤维布表面制备了含 SiO_2 的超疏水涂层, 在 $-35 \pm 5^\circ\text{C}$ 的环境下测试防冰性能, 在 30s 后裸铝表面基本全部被冰覆盖, 而超疏水涂层表面结冰速度较慢, 仅有 24% 的区域被冰覆盖。

丁云飞等^[43]以多孔阳极氧化铝表面为模板, 以高密度聚乙烯(HDPE)为压印热塑材料, 制备柱状微结构表面。对其表面进行十三氟辛基三乙氧基硅烷(FAS)修饰后, 获得了超疏水性表面。与光滑 HDPE 试片、FAS 修饰的光滑 HDPE 试片相比, 喷金并进行 FAS 修饰的柱状微结构 HDPE 试片表面初始结冻时间分别延迟了 375s 和 330s。

汪峰等^[44-45]在铝箔表面制备含氟硅的超疏水涂层, 结霜初期, 超疏水表面的凝结液滴分布稀疏, 而亲水表面的凝结液滴分布密集, 呈铺展状态。亲水表面霜层出现在实验进行 4min 时, 而超疏水表面的霜层出现在 9min 时。实验进行 60min 时, 超疏水和亲水表面的霜高分别为 1.73mm 和 0.95mm, 超疏水表面霜高比亲水表面减少了 45%, 表明超疏水表面比亲水表面的抑霜效果更好。

Wang 等^[46]利用化学刻蚀与喷砂相结合的方法制备超疏水铝表面。在 -15°C 的条件下, 水滴在裸铝表面的完全结冰时间为 99s, 而超疏水铝表面直到 3942s 也未完全结冰, 防冰时间明显提升。这是因为超疏水铝表面存在准液层, 其粗糙表面的曲面半径比稳定冰核的最小尺寸还小。此外, 微纳结构增加降低了固-液之间的润湿区域, 减少了固-液界面的热传递。

Zhang 等^[47]在镍合金板上制备含 ZnO 的超疏水表面, 当表面温度为 -20°C 时, 水滴在未处理表面 3min 内完全凝结, 而在超疏水 ZnO 表面 10min 内仍表现出良好的抗冷凝和防结霜性能。

Pan 等^[48]将聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和二氧化硅纳米颗粒(SNs)的混合物喷洒在钢表面, 制备超疏水涂层。在 -20°C 下进行防冰实验, 结果表明水滴在裸钢表面很快形成冰膜, 而在超疏水表面仍保持水滴状态, 表现出较好的防结冰性能。

Liu 等^[49]通过电化学方法制备铝基超疏水表面。实验研究了小雪堆在不同倾角的低温表面上融化结冰的过程, 结果表明在 10° 倾角裸铝表面小雪堆融化较快, 且雪水粘在表面, 最后在表面形成一层冰膜。在超疏水表面, 小雪堆融化速度明显降低, 在成冰之前也会从表面滑落, 表现出良好的防冰性能, 且小雪堆在超疏水表面融化时间较长, 间接说明超疏水表面的气垫能够防止热传导, 从而极大降低了冰雪覆盖的可能性。

Kim 等^[50]定量分析了超疏水铝合金表面和裸铝合金表面的防冰性能。超疏水铝合金表面相比裸铝合金表面液滴的最初冰核形成时间延迟了 22%~92%, 表现出较好的防冰性能。

4 超疏水材料防冰性能存在的问题

随着超疏水材料研究的深入, 人们对其功能和应用的要求越来越高, 如何进行材料的结构设计, 使材料能应用于飞机具有重要意义。目前超疏水材料

防冰性能还存在一些问题值得研究。

(1) 纳米 SiO_2 等物质表面能非常大, 处于热力学非稳定状态, 极易团聚, 难以均匀分散, 同时表面亲水疏油, 与有机基体之间结合力差, 造成界面缺陷, 使材料性能降低, 在实际应用中还是受到了诸多因素的限制。

(2) 超疏水材料在实际应用环境(包括温度、湿度、雨水、日照等)中, 其表面会被破坏, 使防冰性能下降, 如何获得具有耐久性的超疏水材料值得研究。

(3) 超疏水材料要在民航飞机上使用, 必须满足飞机材料的适航性, 这方面的研究极少。

(4) 超疏水材料制备工艺复杂, 价格昂贵, 如何解决这一问题, 还需要深入研究。

5 结语

由于雨雪天气产生于飞机表面的冰、霜、雪等污染物是飞行安全的隐患。为了保障正常航运和飞行安全, 必须除去飞机表面的冰霜积雪。目前使用的红外除冰、机械除冰、液体除防冰等方法存在能耗大、效率低、环境污染等问题。因此, 研发新型除防冰技术具有重要意义, 超疏水材料正是值得期待的新材料。目前, 超疏水材料的研究主要是理论研究, 实际运用极少。另外, 超疏水材料的研究主要集中在公路、电力等领域, 在民航领域的研究较少。特别是民航飞机要在高紫外辐射、高盐雾、低温等苛刻环境条件下运行, 必须满足飞机材料的适航性, 这对超疏水材料提出了更高的要求。

参考文献

- [1] 刘天庆, 孙玮, 孙相或, 等. 超疏水表面上冷凝液滴发生弹跳的机制与条件分析[J]. 物理化学学报, 2012, 28(5): 1206-1212.
- [2] Jafari R, Menini R, Farzaneh M. Superhydrophobic and ice-phobic surfaces prepared by RF-sputtered polytetrafluoroethylene coatings[J]. Applied Surface Science, 2010, 257: 1540-1543.
- [3] Wu Yanpeng, Zhang Chaoying. Analysis of anti-condensation mechanism on superhydrophobic anodic aluminum oxide surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58: 664-669.
- [4] Antonini C, Innocenti M, Horn T, et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(1): 58-67.
- [5] Zhang Rui, Hao Pengfei, Zhang Xiwen, et al. Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 395-402.
- [6] 高英力, 代凯明, 李学坤, 等. 超疏水沥青混凝土抗凝冰性能及评价[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 63-68.
- [7] 吴亚平, 李辛庚, 米春旭, 等. 输电线路超疏水防覆冰涂层研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 51-59.
- [8] Vaibhav B, Lidiya M, Benjamin H, et al. Predictive model for ice formation on superhydrophobic surfaces[J]. Langmuir, 2011, 27: 14143-14150.
- [9] Wang Lei, Gong Qihua, Zhan Shihui, et al. Robust anti-icing performance of a flexible superhydrophobic surface[J]. Advanced Materials, 2016, 28(35): 7729-7735.
- [10] 贾冬梅, 李龙刚, 李瑜. 超疏水涂层表面粗糙结构对防覆冰性能的影响[J]. 化学通报, 2015, 78(6): 483-488.
- [11] Shen Yizhou, Wang Guanyu, Zhu Chunling, et al. Petal shaped nanostructures planted on array micro-patterns for superhydrophobicity and anti-icing applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 319: 286-293.
- [12] Hu Jianlin, Xu Ke, Wu Yao, et al. The freezing process of continuously sprayed water droplets on the superhydrophobic silicone acrylate resin coating surface[J]. Applied Surface Science, 2014, 317: 534-544.
- [13] Nikolay P, Jagannath C, Georgi S, et al. Anti-icing superhydrophobic surfaces based on core-shell fossil particles[J]. Advanced Materials Interfaces, 2015, 2(11): 1500124.
- [14] Yuan Zhiqing, Bin Jiping, Wang Xian, et al. Preparation and anti-icing property of a lotus-leaf-like superhydrophobic low-density polyethylene coating with low sliding angle[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(11): 2310-2315.
- [15] Farhadi S, Farzaneh M, Kulnisch S A. Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 6264-6269.
- [16] Prasad G, Chakradhar R P S, Parthasarathi B, et al. Transparent hydrophobic and superhydrophobic coatings fabricated using polyamide 12- SiO_2 nanocomposite[J]. Surface and Interface Analysis, 2016, 49(5): 427-433.
- [17] Jiang Cheng, Zhang Yaoming, Wang Qihua, et al. Superhydrophobic polyurethane and silica nanoparticles coating with high transparency and fluorescence[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 129: 2959-2965.
- [18] Zhou Xin, Kong Junhua, Sun Jiaotong et al. Stable superhydrophobic porous coatings from hybrid ABC triblock copolymers and their anticorrosive performance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(35): 30056-30063.
- [19] 晏忠钠, 车彦慧, 冯利邦, 等. 超疏水铝合金表面的防覆冰和防黏附行为[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 25-29.
- [20] Wang Yanfen, Li Benxia, Liu Tongxuan et al. Controllable fabrication of superhydrophobic TiO_2 coating with improved transparency and thermostability[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 441: 298-305.

- [21] Jain R, Pitchumani R. Facile fabrication of durable copper-based superhydrophobic surfaces via electrodeposition [J]. *Langmuir*, 2018, 34(10):3159-3169.
- [22] Zhang Fan, Qian Hongchang, Wang Luntao et al. Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 341:15-23.
- [23] Rajiv S, Kumaran S, Sathish M. Fabrication of robust superhydrophobic coatings using PTFE-MWCNT nanocomposite: supercritical fluid processing [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2018, 50:464-470.
- [24] Thanh-binh N, Seungchul P, Hyuneui L. Effects of morphology parameters on anti-icing performance in superhydrophobic surfaces [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435:585-591.
- [25] Srinivas B S, Vitaliy K, Jurgen R, et al. Low ice adhesion on nano-textured superhydrophobic surfaces under supersaturated conditions [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(20):12583-12587.
- [26] Alexander D, Yong H, Adam S, et al. Superhydrophobic nanocomposite surface topography and ice adhesion [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(12):9272-9279.
- [27] 仇伟, 刘见祥, 曾舒, 等. 超疏水涂料的制备及其防覆冰性能 [J]. *表面技术*, 2012, 41(6):108-110.
- [28] Brassard J D, Laforte J L, Blackburn C, et al. Silicone based superhydrophobic coating efficient to reduce ice adhesion and accumulation on aluminum under offshore arctic conditions [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 144:135-141.
- [29] Bharathidasan T, Kumar S V, Bobji M S, et al. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 314:241-250.
- [30] Zheng Shunli, Li Cheng, Fu Qitao, et al. Development of stable superhydrophobic coatings on aluminum surface for corrosion-resistant, self-cleaning, and anti-icing applications [J]. *Materials and Design*, 2016, 93:261-270.
- [31] Brassard J D, Sarkar D K, Perron J, et al. Nano-micro structured superhydrophobic zinc coating on steel for prevention of corrosion and ice adhesion [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2015, 447:240-247.
- [32] Yeong H Y, Mool C G. Hot embossed micro-textured thin superhydrophobic teflon FEP sheets for low ice adhesion [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 313:17-23.
- [33] Ehsan R, Ali R, Ali D, et al. Shape evolution of water and saline droplets during icing/melting cycles on superhydrophobic surface [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 333:201-209.
- [34] 武卫东, 王菲菲, 申瑞, 等. 不同基底温度下铝基超疏水表面的抗结冰性能实验 [J]. *制冷学报*, 2017, 38(3):82-88.
- [35] 张友法, 吴洁, 余新泉, 等. 可控阵列微纳结构超疏水铜表面冰霜传质特性 [J]. *物理化学学报*, 2014, 30(10):1970-1978.
- [36] 徐文骥, 宋金龙, 孙晶, 等. 铝基体超疏水表面的抗结冰结霜效果分析 [J]. *低温工程*, 2010(6):11-15.
- [37] 周艳艳, 于志家. 铝基超疏水表面抗结霜特性研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2012, 26(6):929-933.
- [38] Liao Ruijin, Zuo Zhiping, Guo Chao, et al. Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum by continuous chemical etching and its anti-icing property [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 317:701-709.
- [39] Shen Yizhou, Wang Guanyu, Tao Jie, et al. Anti-icing performance of superhydrophobic texture surfaces depending on reference environments [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(22):1700836.
- [40] Shen Yizhou, Tao Jie, Tao Haijun, et al. Anti-icing potential of superhydrophobic $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ surfaces: ice nucleation and growth [J]. *Langmuir*, 2015, 31(39):10799-10806.
- [41] 季银炼, 张钧波. 结霜前期纳米结构超疏水表面的凝结-冻结特性 [J]. *中国表面工程*, 2017, 30(6):18-25.
- [42] Liu Xiaolin, Chen Huawei, Kou Weipeng, et al. Robust anti-icing coatings via enhanced superhydrophobicity on fiberglass cloth [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 138:18-23.
- [43] 丁云飞, 伍彬, 吴会军. 柱状微结构超疏水表面制备及其结霜性能研究 [J]. *表面技术*, 2015, 44(1):106-111.
- [44] 汪峰, 梁彩华, 张小松. 超疏水翅片表面的抑霜机理和融霜特性 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5):1066-1070.
- [45] 汪峰, 梁彩华, 张友法, 等. 结霜初期超疏水表面凝结液滴的自跳跃脱落及其对结霜过程的影响 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(4):757-762.
- [46] Wang Guanyu, Shen Yizhou, Tao Jie, et al. Facilely constructing micro-nanostructure superhydrophobic aluminum surface with robust ice-phobicity and corrosion resistance [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 329:224-231.
- [47] Zhang Wenwen, Wang Shanlin, Xiao Zhen, et al. Frosting behavior of superhydrophobic nanoarrays under ultralow temperature [J]. *Langmuir*, 2017, 33(36):8891-8898.
- [48] Pan Sai, Wang Nan, Xiong Dangsheng, et al. Fabrication of superhydrophobic coating via spraying method and its applications in anti-icing and anti-corrosion [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389:547-553.
- [49] Liu Yan, Li Xinlin, Yan Yuying, et al. Anti-icing performance of superhydrophobic aluminum alloy surface and its rebounding mechanism of droplet under super-cold conditions [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 331:7-14.
- [50] Kim J, Jeon J, Kim D R, et al. Quantitative analysis of anti-freezing characteristics of superhydrophobic surfaces according to initial ice nuclei formation time and freezing propagation velocity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126:109-117.

收稿日期:2018-09-05

修稿日期:2018-11-12