

超疏水和超润滑防冰表面的制备 技术概述*

徐玉坤^{1,2}, 朱宝^{1,2}, 孙林峰³, 何洋^{1,2}

(1. 西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;

3. 西安爱生技术集团公司, 西安 710072)

[摘要] 对超疏水和超润滑防冰表面的制备方法进行了综述。分析了制备防冰表面的重要意义, 重点介绍了化学涂层、表面微纳结构和液体润滑层 3 种获得超疏水和超润滑防冰表面方法的研究现状, 并对防冰表面的发展进行了展望。

关键词: 防冰; 化学涂层; 表面微纳结构; 液体润滑层; 制备方法

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.14.044



徐玉坤

硕士研究生, 主要研究方向为超疏水表面的制备技术及其性能研究。

飞机结冰是当飞行器飞行于温度处于冰点附近或者更低的大气中, 飞机各部件(例如机翼、操纵面和发动机进气口处)表面发生结冰的现象^[1]。它是由云层中的过冷水滴或过冷雨碰到飞机机体后冻结形成的, 有时也会由水蒸气直接在机体表面凝华而成^[2]。美国 Safety Advisor 统计的 1990~2000 年的数据表明, 在所有气象因素引起的飞行事故中, 12% 是由飞机结冰导致的, 且其中 92% 是在飞行过程中发生的^[3]。飞机结冰使飞机的升力系数减小, 阻力系数增加, 引起各种信号故障和数据失真, 对飞机操纵性和稳定性有很大影响, 甚至可能导致飞机失控, 造成飞机坠毁^[4]。

飞机的防冰技术一直是飞机系统设计的重要研究课题。传统的防/除冰方法, 如气动除冰、气热防/除冰、电热防/除冰和液体防/除冰等防/除冰技术存在不足^[5]。气动除

冰会改变飞机的气动外形; 气热防/除冰从发动机引气会降低其效率; 电热防/除冰系统装置复杂且耗电量大; 液体防/除冰有效作用时间比较短, 且会对环境产生影响。综上, 飞机产业发展迫切需要一种环保、可靠、高效的飞机防/除冰技术。

近年来, 研究人员发现超疏水表面(Superhydrophobic Surfaces, SHS)和超润滑表面(Slippy Liquid-Infused Porous Surfaces, SLIPS)或称滑移液体浸润多孔表面可以延迟结冰时间、降低冰的黏附强度、有效减小覆冰量, 具有良好的防冰性能, 并且具有无能耗、无需额外机构、绿色环保等优点^[6-7]。

超疏水和超润滑防冰表面可以通过化学涂层、表面微纳结构以及液体润滑层的方法获得。

化学涂层

目前具有防冰性能的化学涂层

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51005187); 深圳市基础研究计划(JCYJ2016022917313); 爱生创新发展基金项目(ASN-IF2015-3107)。

一般指低表面能的材料黏覆在基底表面形成的防护层,例如含氟材料里含有碳氟键,从而使含氟材料具有良好的疏水疏冰特性。近年来,有研究者在防冰涂料中引入生物体内的防冻物质,例如抗冻蛋白等获得了防冰性能优异的涂层,这为结冰问题提供了一个新的解决方案。

美国麻省理工大学 Meuler 等^[8]将 21 种涂料,包括商业化的聚合物涂料和低表面能添加剂氟化多面体倍半硅氧烷(Fluorodecyl POSS)等,涂覆在光滑的钢基底表面。试验表明,涂有氟化 POSS 的钢表面比光滑的钢表面,冰的黏附强度降低了 4.2 倍。Buschhorn 等^[9]将定向碳纳米管阵列作为导电聚合物涂层对飞机表面进行化学改性,涂层大大提高了其电热防冰系统的防冰效率。冰风洞试验表明,在温度为 -20°C ,风速为 55.9m/s 的试验条件下,增加涂层的防冰系统运行正常。

上海交通大学丁桂甫等利用相位分离法制备十八烷基三氯硅烷(OTS)超疏水涂层,并验证了其防冰性能。在 -15°C 的环境条件下观察水滴的结冰过程,发现超疏水涂层可以有效延缓结冰时间,相对未涂覆 OTS 的表面冰黏附力显著降低^[10]。

美国弗吉尼亚大学 Davis 等^[11]利用喷铸聚氨酯、二氧化硅和氟化丙烯酸的方法在铝表面分别制备纳米复合材料涂层,其表面粗糙度分别为 $8.7\mu\text{m}$ 、 $2.7\mu\text{m}$ 和 $1.6\mu\text{m}$ 。对比抛光的光滑铝表面,粗糙表面具有更低的冰黏附力,且粗糙度为 $2.7\mu\text{m}$ 的表面表现最优,相对光滑铝表面冰黏附力减少了 60%。

丹麦技术大学 Chernyy 等^[12]通过原子转移自由基聚合的方法将聚合电解质刷涂层在玻璃表面成形,试验条件下连续测量表面冰的黏附力发现,超亲水的聚合电解质刷比疏水刷在 -10°C 具有更好的疏冰性能。

韩国汉阳大学 Gwak 等^[13]将肽

作为共轭因子混合在硅藻抗冻蛋白里作为涂层涂覆在铝表面,表现出良好的防冰性能,另外在涂料里混合海藻糖分子可以在不影响其性能的基础上大大增强防冰性能。

加拿大魁北克大学的 Brassard 等^[14]利用电化学沉积方法将锌镀在钢基底表面,然后涂覆一层超薄的硅酮橡胶获得接触角为 155° 的超疏水表面。在人工海水里测试其耐蚀性,有涂层的表面比普通钢表面表现出更优异的性能,且在离心附着力试验测量冰黏附力中发现,有涂层相对普通钢表面的冰黏附力减小了 84%。

浙江大学 Zhan 等^[15]通过表面催化剂催化原子转移自由基聚合的方法将二氧化硅纳米粒子复合到氟化聚合物链上,经化学改性处理,该表面表现出优异的热稳定性和超疏水性能,接触角高达 170.3° ,可以将结冰时间从 196s 延迟到 10054s。张庆华等还通过水解凝结的纳米二氧化硅溶胶、甲基三乙氧基硅烷(MTES)和全氟辛基磺酰胺丙基三乙氧基硅烷(HFTES)的方法获得氟化溶胶-凝胶法胶体涂层,涂覆该涂层的表面在试验条件下表现出了优异的超疏水和防冰性能^[16]。

天津大学 Zhang 等^[17]将乙烯基化聚二甲基硅氧烷(PDMS)、疏基化 PDMS 和可调量疏基修饰的氟化 POSS 甲基丙烯酸酯二嵌段共聚物进行紫外线固化反应处理,获得超疏水防冰涂层。试验表明,该涂层表面具有优异的防冰性能,其冰黏附力是光滑铝表面冰黏附力的 $1/8$,最低冰黏附力为 $(105 \pm 12)\text{kPa}$ 。

超疏水化学涂层已经有商业化的产品出现,但是化学涂层的防冰性能(例如冰黏附力减小程度)低于表面微纳结构和液体润滑层防冰表面的最新发展水平^[18]。

表面微纳结构

研究表明,荷叶表面的微纳结构

是其具有超疏水性的关键^[19]。受此启发,研究者通过在低表面能材料表面制备微纳结构,或者制备微纳结构之后再通过化学改性降低表面能,来获得超疏水防冰表面。

加拿大魁北克大学 Jafari 等^[20]通过电化学沉积法在铝表面制备微纳复合结构,然后涂覆聚四氟乙烯(PTFE)涂料获得超疏水表面。扫描电镜观察其表面为一个“鸟巢”式结构,冰黏附力测试结果表明,该表面比普通铝表面的冰黏附力减小了 71% 倍。

西北工业大学何洋等^[21]在反应离子深刻蚀的基础上引入金属纳米颗粒催化腐蚀方法,在硅表面获得微纳复合结构,使得表面获得了稳定的超疏水性能,发现改变双重尺度可以调控表面亲疏水性^[22],并且指出结构参数,尤其是微柱高度对其疏水性能有重要影响^[23]。研究表明,硅基微纳复合结构超疏水表面比光滑表面的冰黏附力减小了 79%^[24],纳米线高度的增加会降低冰黏附力,微纳结构形貌对冰黏附力的影响与接触面积和冰剪切断裂模式紧密相关^[25]。

兰州化学物理研究所的 Zhang 等^[26]利用两步水热法在硅基底表面制备氧化锌纳米线,通过硬脂酸改性,使纳米线长度、宽度和方向均一,获得了性能稳定的超疏水表面。试验表明,该表面接触角为 150.1° ,具有超疏水性能。

华北电力大学 Wang 等^[27]在铝表面制备微纳米小孔,经氟硅烷(FAS)沉积处理后获得超疏水防冰表面。在 -6°C 的试验条件下,表面接触角大于 150° ,滚动角小于 8.2° ,冰黏附强度大大减小。

北京航空航天大学 Wen 等^[28]用热传递方法和结晶增长技术将氧化锌纳米线和聚偏二氟乙烯(PVDF)微米棘齿复合在一起获得具有微纳复合结构的防冰表面,该表面表现出优异的防雾和延迟结冰性能,

在 -10°C 的高湿环境下,其表面液滴 7360s 后才完全结冰。Wang 等^[29] 制备了由 PDMS 微米结构复合氧化锌纳米线的防冰表面,在 -20°C 、湿度为 90% 的试验条件下,该表面在 3 个月的时间内一直保持着良好的疏水疏冰性能。

俄罗斯科学院 Ganne 等^[30] 将铝合金表面浸泡在盐酸和氢氟酸混合溶液中进行湿化学腐蚀,然后在磷酸溶液中进行阳极氧化反应处理,最后氟硅烷沉积处理,获得了具有网格状结构的铝合金表面,该表面具有良好的防冰性能。

南京航空航天大学 Zheng 等^[31] 通过阳极氧化反应处理铝表面获得了具有分层的微纳复合结构,经化学改性后,其表面表现出了优异的防冰性能,其接触角为 156° ,滚动角为 2.54° ,冰黏附力为 0.04MPa ,经过沙粒磨损和化学耐久性测试后表面性能基本不受影响。陶杰等^[32] 用光刻和化学刻蚀的工艺方法在铝基底上制备了具有微米坑和纳米层复合的层状结构,试验表明,分层的微纳复合结构表面优于单层结构表面,其接触角为 173° ,滚动角为 4.5° ,且冰黏附力从 710.5kPa 降低为 75kPa 。

美国弗吉尼亚大学 Yong 等^[33] 报告了一个简单低成本的防冰表面制备方法,即通过激光在铝表面刻蚀微米结构,然后用热压工艺将微米结构压印到聚全氟乙丙烯(FEP)薄膜表面,得到接触角为 160° ,滚动角为 4° 的超疏水表面,并且该表面具有较小的冰黏附强度。其中,铝模板可以重复使用,制作过程也确保了薄膜的结构完整性。

通过构建微纳结构获得的表面具有优异的超疏水性能,液滴在其表面的快速脱落阻止了冰核的形成,从而有效减少覆冰量,微纳结构使得接触面积减小,从而减小表面冰黏附力。但是表面微纳结构的形貌可控制备需要依靠昂贵精密的试验设备,

成本较高,而成本较低的化学腐蚀方法又不能保证微纳结构的形貌可以控制^[34]。另外,经过多次结冰/除冰循环,微纳结构形貌有可能会被磨损破坏,其长期稳定性有待进一步提高^[17]。

液体润滑层

2011 年,美国哈佛大学 Wong 研究小组^[7] 首次提出了一种基于猪笼草捕食效应的超润滑表面(SLIPS),从而大大降低了冰在超润滑表面的黏附强度,引起了研究者的极大关注。

Wong 等^[7] 将一定量的润滑液体填充多孔聚合物获得稳定、无缺陷的液体润滑层,当材料表面结冰时,润滑液阻隔了冰与基材的直接接触,从而使黏附极大降低。此方法适用于各种低表面能的材料基底,例如多孔聚四氟乙烯表面等。此外, Kim 等^[35] 将不溶于水的液体作为润滑层注入到纳米结构孔中,该结构表面经化学改性后和注入的液体有很好的融合和互锁,从而获得了润滑液体填充的多孔材料,并开发了在铝表面直接制备润滑层的方法。试验表明,具有润滑层的铝表面不仅可以有效的抑制积冰,还表现出了极低的冰黏附力。

中国科学院化学所 Chen 等^[36] 通过表面引发的自由基聚合,将丙烯酸单体接枝到硅基底表面的微孔中形成交联的聚丙烯酸,得到典型的自润滑液态防冰水层。测试表明,该表面具有自修复和耐腐蚀性能,具有水润滑层的硅基材表面相对普通硅表面的冰黏附强度可以从 210kPa 降低至 60kPa 。Dou 等^[37] 还报道了一种双组分水溶性聚氨酯防冰涂料,该防冰涂料的聚氨酯链段中含有亲水性基团,能够自发吸收水分,在材料表面与冰层之间形成冰点较低的液态润滑层,隔绝冰层与材料表面,且这种防冰涂层可以直接应用于不同的基底上,与未涂覆的基底相比,涂料表

面的冰黏附强度可以大大降低。风洞试验证明,润滑层表面的冰极易脱落,即使温度降至 -53°C ,该防冰涂层也能保持较小的冰黏附力。

南京大学 Zhu^[38] 等将不同剂量的硅油注入到 PDMS 涂料中获得防冰表面。一方面,化学基团的改变使材料表面能大大降低,另一方面,该表面结冰后,冰层与流动的硅油大面积接触,显著降低了材料表面的冰附着强度。试验表明,该表面的接触角为 115° ,当硅油的重量百分比为 20%~40% 时,材料表面的冰黏附强度低于 0.075MPa ,约为铝表面冰黏附强度的 5%。

清华大学杨颖等^[39] 通过电喷射和相分离的方法制备液体润滑液浸没分层微米结构的硅酮橡胶表面。试验表明该表面具有良好的防冰特性,润滑剂可以通过微纳米孔结构的衬底覆盖整个表面,从而减少了非均匀冰成核和霜传播速度,有效抑制积冰。

美国亚利桑那州立大学的 Sun 等^[40] 制备了一种智能应激反应并分泌防冻剂的防冰涂层,该涂层由表层的超疏水多孔渗透层和注有防冻剂的类似灯芯的内层构成。通过凝结结霜、模拟冻雾和冻雨试验,研究者发现这种涂层表面的冰形成时间,比被只涂上一层防冻剂的表面结冰时间长 10 倍。

美国弗吉尼亚大学 Yeong 等^[41] 通过激光刻蚀工艺获得了具有微纳结构的铝模板,然后将该结构复型到有润滑油注入的 PDMS 弹性体表面,获得防冰性能。该表面接触角大于 150° 且滚动角小于 10° ,相对普通铝表面减小 95% 的冰黏附力,且经 3 个月的老化试验后,该润滑层的润湿性能和冰黏附强度基本不变。

基于液体润滑层的超润滑表面可以大大降低冰的黏附强度,然而,润滑液会随着冰层的脱落损耗掉,还会在重力、温度等作用下逐渐挥发流

失^[42-43],使超润滑表面失去防冰性能,因此如何保持该表面的长效稳定性仍然是一个挑战。

结论

超疏水和超润滑防冰表面在飞机防/除冰技术方面有非常广阔的发展前景。然而受目前的技术与成本限制,各种新型防冰表面的制备大多还停留在试验室阶段,在实际应用中,产业化及商品化的防冰表面仍然以涂层为主。今后还需深入研究超疏水表面和超润滑表面的防冰机理,不断探索成本低廉、工艺简单、绿色环保、便于大规模生产的制备方法,以实现新型防冰表面的工程应用。另外,飞机飞行环境的复杂多变防冰表面的发展带来了挑战的同时也提供了方向,如向着长寿命、耐盐雾腐蚀、机械性能稳定、损伤自修复、环保可循环利用等方向不断拓展。

参考文献

- [1] CEBECCI T, KAFYEKE F. Aircraft icing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 11-21.
- [2] 王晋, 纪双英, 益小苏, 等. 飞行器防/除冰技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2015(S2): 30-32.
WANG Jin, JI Shuangying, YI Xiaosu, et al. Progress of the aircraft anti-icing/de-icing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S2): 30-32.
- [3] 朱永峰, 方玉峰, 封文春. 某型飞机发动机短舱防冰系统设计计算[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1326-1331.
ZHU Yongfeng, FANG Yufeng, FENG Wenchun. Design and calculation of aircraft nacelle anti-icing system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1326-1331.
- [4] 周莉, 徐浩军, 龚胜科, 等. 飞机结冰特性及防除冰技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(6): 105-110.
ZHOU Li, XU Haojun, GONG Shengke, et al. Aircraft icing characteristics and the research of anti-icing technology[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(6): 105-110.
- [5] MOIR I, SEABRIDGE M. Aircraft systems: mechanical, electrical and avionics subsystems integration[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] CAO L, JONES A K, SIKKA V K, et al. Anti-icing super hydrophobic coatings[J]. Langmuir, 2009, 25(21): 12444-12448.
- [7] WONG T S, KANG S H, TANG S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. Nature, 2011, 477: 443-447.
- [8] MEULER A J, SMITH J D, VARANASI K K, et al. Relationships between water wettability and ice adhesion[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(11): 3100-3110.
- [9] BUSCHHORN S T, KESSLER S S, LACHMANN N, et al. Electrothermal icing protection of aerosurfaces using conductive polymer nanocomposites[J/OL]. AIAA Journal, <https://doi.org/0.2514/6.2013-1729>, 2013.
- [10] GE L, DING G, WANG H, et al. Anti-icing property of superhydrophobic octadecyltrichlorosilane film and its ice adhesion strength[J]. Journal of Nanomaterials, 2013(10): 3.
- [11] DAVIS A, YEONG Y H, STEELE A, et al. Super hydrophobic nanocomposite surface topography and ice adhesion[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(12): 9272-9279.
- [12] CHERNYY S, JARN M, SHIMIZU K, et al. Superhydrophilic polyelectrolyte brush layers with imparted anti-icing properties: Effect of counter ions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(9): 6487-6496.
- [13] GWAK Y, PARK J, KIM M, et al. Creating anti-icing surfaces via the direct immobilization of antifreeze proteins on aluminum[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 12-19.
- [14] 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.
- [15] ZHAN X, YAN Y, ZHANG Q H, et al. A novel superhydrophobic hybrid nanocomposite material prepared by surface-initiated AGET ATRP and its anti-icing properties[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(24): 9390-9399.
- [16] TANG Y, ZHANG Q, ZHANG X, et al. Superhydrophobic and anti-icing properties at overcooled temperature of a fluorinated hybrid surface prepared via a sol-gel process[J]. Soft Matter, 2015, 11(22): 4540-4550.
- [17] ZHANG K, LI X, ZHAO Y, et al. UV-curable POSS-fluorinated methacrylate diblock copolymers for ice phobic coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 93: 87-96.
- [18] KREDER M J, ALVARENGA J, KIM P, et al. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(1): 1-15.
- [19] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. Planta, 1997, 202(1): 1-8.
- [20] JAFARI R, MENINI R, FARZANEH M. Superhydrophobic and icephobic surfaces prepared by RF-sputtered polytetrafluoroethylene coatings[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(5): 1540-1543.
- [21] HE Y, JIANG C, YIN H, et al. Superhydrophobic silicon surfaces with micro-nano hierarchical structures via deep reactive ion etching and galvanic etching[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2011, 364(1): 219-229.
- [22] HE Y, JIANG C, YIN H, et al. Tailoring the wettability of patterned silicon surfaces with dual-scale pillars: From hydrophilicity to superhydrophobicity[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 7689-7692.
- [23] HE Y, JIANG C, WANG S, et al. Control wetting state transition by micro-rod geometry[J]. Applied Surface Science, 2013, 285(21): 682-687.
- [24] HE Y, JIANG C, CAO X, et al. Reducing ice adhesion by hierarchical micro-nano-pillars[J]. Applied Surface Science, 2014, 305: 589-595.
- [25] HE Y, JIANG C, WANG S, et al. Ice shear fracture on nanowires with different wetting states[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(20): 18063-18071.

- [26] ZHANG J, ZHANG J. A facile method for preparing a non-adhesive superhydrophobic ZnO nanorods surface[J]. *Materials Letters*, 2013, 93(7): 386–389.
- [27] WANG F, LV F, LIU Y, et al. Ice adhesion on different microstructure superhydrophobic aluminum surfaces[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2013, 27(1): 58–67.
- [28] WEN M, WANG L, ZHANG M, et al. Antifogging and icing-delay properties of composite micro- and nanostructured surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(6): 3963–3968.
- [29] WANG L, GONG Q, ZHAN S, et al. Robust anti-icing performance of a flexible superhydrophobic surface[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(35): 7729–7735.
- [30] GANNE A, LEBED V O, GAVRILOV A I. Combined wet chemical etching and anodic oxidation for obtaining the superhydrophobic meshes with anti-icing performance[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2016, 499: 150–155.
- [31] ZHENG S, LI C, FU Q, et al. Fabrication of a micro-nanostructured superhydrophobic aluminum surface with excellent corrosion resistance and anti-icing performance[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(83): 79389–79400.
- [32] WANG G, SHEN Y, TAO J, et al. Fabrication of a superhydrophobic surface with a hierarchical nanoflake-micropit structure and its anti-icing properties[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(16): 9981–9988.
- [33] YONG H Y, GUPTA M C. Hot embossed micro-textured thin superhydrophobic Teflon FEP sheets for low ice adhesion[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 313: 17–23.
- [34] LI X, REINHOUT D, CREGOCALAMA M. What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces[J]. *Chemical Society Reviews*, 2007, 36(8): 1350–1368.
- [35] KIM P, WONG T S, ALVARENGA J, et al. Liquid-Infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(8): 6569–6577.
- [36] CHEN J, DOU R, CUI D, et al. Robust prototypical anti-icing coatings with a self-lubricating liquid water layer between Ice and substrate[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(10): 4026–4030.
- [37] DOU R, CHEN J, ZHANG Y, et al. Anti-icing coating with an aqueous lubricating layer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(10): 6998–7003.
- [38] ZHU L, XUE J, WANG Y, et al. Ice-phobic coatings based on silicon-oil-infused polydimethylsiloxane[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(10): 4053–4062.
- [39] LIU Q, YANG Y, HUANG M, et al. Durability of a lubricant-infused electro-spray silicon rubber surface as an anti-icing coating[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 68–76.
- [40] SUN X, DAMLE V G, LIU S, et al. Bioinspired stimuli-responsive and antifreeze-secreting anti-icing coatings[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2015, 2(5): 1–15.
- [41] YEONG H Y, WANG C, WYNNE K J, et al. Oil-infused superhydrophobic silicone material for low ice adhesion with long term infusion stability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(46): 32050–32059.
- [42] 吕健勇, 王健君. 防冰涂料研究进展[J]. *涂料技术与文摘*, 2014(8): 37–41.
- LÜ Jianyong, WANG Jianjun. Progress in anti-icing coatings [J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2014(8): 37–41.
- [43] IRAJIZAD P, HASNAIN M, FAROKHNIA N, et al. Magnetic slippery extreme icephobic surfaces[J/OL]. *Nature Communications*, <http://doi.1038/ncomms13395>, 2016.

通讯作者: 何洋, 博士、副教授, 研究方向为微纳结构制备与应用, E-mail: heyang@nwpu.edu.cn。

Preparation of Superhydrophobic and SLIPS Anti-Icing Surfaces

XU Yukun^{1,2}, ZHU bao^{1,2}, SUN Linfeng³, HE Yang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Xi'an ASN Technology Croup Co., Ltd., Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The preparation of superhydrophobic and slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) is reviewed in this paper. The significance of the preparation of anti-icing surfaces is introduced firstly. Then the state of the arts of three kinds of preparation methods, including coating, micro/nanostructure and liquid lubrication layer, are mainly presented. Finally, the trend of anti-icing surfaces is discussed.

Keywords: Anti-icing; Coating; Micro/nano structure; Liquid lubrication layer; Preparation method

(责编 大漠)