

超疏水表面抑制结霜研究进展

陈小娇, 武卫东, 汪德龙

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 超疏水表面以其超高的表观接触角和很小的滚动角在工业中获得广泛的应用。综述了近期国内外超疏水表面在抑霜方面的研究新进展, 归纳了超疏水表面的冷凝、结冰和落霜过程的过程特点和疏水性对结霜过程的影响。超疏水表面能显著延迟冷凝发生和开始结霜的时间, 降低霜层的厚度。与普通表面相比, 超疏水表面的霜层结构更为蓬松脆弱, 可在外力作用下轻松去除, 表现出较好的抑霜性能。由于部分超疏水表面在冷凝阶段丧失疏水性从而丧失抑霜性能, 大大地限制了超疏水表面在抑制结霜方面的潜力。纳米结构超疏水表面较好地解决了上述问题, 一部分纳米表面由于冷凝液滴的弹跳现象而表现出极佳的抑霜性能。最后, 对超疏水表面研究的发展进行了展望。

关键词: 超疏水; 抑霜; 研究进展

中图分类号: O647 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)02-0087-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.017

Research Progress in Anti-frosting Performance of Super-hydrophobic Surfaces

CHEN Xiao-jiao, WU Wei-dong, WANG De-long

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Super-hydrophobic surfaces are widely used in manufacturing, owing to its high apparent contact angle and low sliding angle. This article summarized the latest international and domestic research progresses in the anti-frosting performance of super-hydrophobic surfaces and introduced the process characteristics of condensation, icing and frost depositing processes as well as the influence of super-hydrophobicity on the frosting process. A large body of evidence indicated that the time needed for condensing and frosting was extended with thinner frost layer, fluffier and weaker structure, which could be easily removed by external force. However, some super-hydrophobic surfaces suffered from loss of super-hydrophobicity during condensing, which limited the potential of super-hydrophobic surfaces as anti-frosting materials. Super-hydrophobic surfaces with nano-structures solve the aforementioned weakness, some of them show excellent performances owing to jumping of condensate on those surfaces. Finally, the future development of super-hydrophobic surfaces was prospected.

KEY WORDS: super-hydrophobic; anti-defrosting; research progress

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-12-17

Received: 2014-09-12; Revised: 2014-12-17

作者简介: 陈小娇(1991—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 主要研究方向为超疏水表面抑霜性能研究。

Biography: CHEN Xiao-jiao(1991—), Female, from Jiangsu, Master graduate student, Research focus: anti-frosting performance of super-hydrophobic surface.

通讯作者: 武卫东(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为制冷新技术。

Corresponding Author: WU Wei-dong(1973—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: advanced refrigeration technology.

当今社会,空调已成为高度普及的家用电器,在寒冷的冬季,热泵空调运行时,室外侧结霜会导致换热器散热翅片间的风道局部或全部被霜占据,从而增大热阻和风阻,导致蒸发温度下降,能效比降低;同时在化霜的过程中,如果不能合理的控制化霜时间和频率,会产生大量的能耗,降低空调的制热量^[1]。传统除霜的方法如人工除霜、电热融霜等不仅会影响制冷设备连续运转,还会消耗额外的能量^[2]。此外,结霜还能导致飞机机翼结冰^[3]以及风力发电机叶片和输电线路的覆冰^[4],产生极大地隐患,因此有必要从根源上分析结霜的原因,寻找主动减少结冰的抑冰/霜方法。

20世纪90年代以来,科学界掀起了超疏水表面的研究热潮。由于其特殊的疏水性质,在表面自清洁^[5]、防腐蚀^[6]、防结冰结霜^[7]等领域有巨大的应用前景。超疏水表面能延迟霜晶出现的时间,降低霜层厚度。本文对国内外近期超疏水表面抑霜方面的研究进展进行综述,以期为今后超疏水抑霜的研究提供基础。

1 超疏水表面上结霜过程

超疏水表面一个至关重要的应用便是防结冰结霜。大量文献^[8-17]证实了超疏水表面的防结冰结霜性能,然而超疏水性与抑霜性能之间的关系尚不明晰。结霜是十分复杂的相变过程,因此,探究超疏水表面的结霜过程特点对于加深表面特性认识、扩大应用范围和提高抑霜性能具有重要意义。

刘清江等^[18]观察有憎水涂层表面上的结霜过程,发现疏水面上先产生冷凝液滴,液滴持续增大到一定程度后冻结为冰珠,环境中的水蒸气在冰珠上凝华成霜。这与普通表面的结霜过程存在较大区别,后者的冷凝液滴在表面形成水膜,冻结成连续均匀的冰层,在均匀的冰层上发生结霜。

1.1 超疏水表面的冷凝

有研究人员^[19]在自然对流环境中观察普通铜面和超疏水表面($CA = 162^\circ$)的冷凝过程发现,普通铜表面在实验开始30 s后就可以观察到冷凝液滴,而超疏水表面在620 s后才出现极少量的冷凝液滴,即使是在普通铜面开始结冰之后,超疏水表面上的冷凝液滴仍然保持液态。

文献^[20]中,与普通铜面相比,石蜡疏水表面上刚开始形成的水珠较小且数量较少,虽然冷凝液滴出现的较晚,但冷凝持续的时间较长,液滴尺寸稳步生

长,最终形成大颗的冷凝液滴。测量数据显示,裸铜表面($CA = 56^\circ$)上冷凝液滴直径大约 $10\ \mu\text{m}$,同时覆盖了含氟聚合物疏水涂层的铜表面($CA = 110^\circ$)上冷凝液滴直径 $0.142\ \text{mm}$ 。

刘清江^[21]通过实验观察到,超疏水表面上露珠的曲率半径小,生长缓慢。相同环境下,刚观察到结露时,超疏水表面比普通表面低了 $3\ ^\circ\text{C}$ 。这间接说明超疏水性能降低表面结露所需的过冷度。杨剑^[22]从能量变化的角度解释了超疏水表面冷凝的滞后,单个蒸汽状态的水分子转变为液核的势垒与接触角相关,疏水表面接触角越大,则水蒸气凝结时需克服的能量势垒就越大,空气中水分子成核的概率就越小。

与普通表面相比,超疏水表面上冷凝液滴不仅出现时间晚、数量少,且能长时间保持在液态,最终形成尺寸较大的冷凝液滴。一方面,冷凝的滞后很可能引起整个结霜过程的滞后;另一方面,由于超疏水表面较高的接触角和较小的滚动角,冷凝液滴很容易滚落。但这种冷凝是有前提的,即冷凝液滴以复合接触的Cassie浸润模式存在,且冷凝发生后的超疏水表面仍保持高疏水性。

1.2 超疏水表面上冷凝液滴的结冰

文献^[19]中,在普通铜面和接触角为 162° 的超疏水表面进行实验,开始60 s后普通铜面上的冷凝液滴冻结成冰,超疏水表面在620 s后才出现极少量的冷凝液滴,并长时间保持液态。文献^[23]中,超疏水表面冷凝液滴比普通表面推迟50 min才开始冻结。

文献^[20]表明,即使不考虑因为冷凝滞后带来的时间上的影响,超疏水表面上冷凝液滴从液态被冻结到冰珠所需的时间也比普通表面长,且随着表面温度的降低,两种表面开始结冰的时间之间的差距逐步减小。作者对此解释为,表面温度越低,临界成核半径越小,导致结冰需克服的相变能量壁垒变小,因此水珠会冻结得更快,液滴冻结时间的减小自然引起超疏水表面和裸铜面上液滴冻结时间的差别减小。John^[24]对初始成霜过程进行显微观察发现,接触角越大结冰阶段的冰核生长越慢。

凝结核过程主要通过以下方式产生抑霜效果:1)超疏水表面上冷凝液滴出现的较晚,冷凝的滞后推动整个结霜过程的滞后;2)超疏水表面上冷凝液滴发生缓慢的凝并现象,最终形成的液滴直径较大,由于与超疏水表面间的接触角大而滚动角小,表面稍有倾斜甚至轻微的振动,液滴便会滚落;3)最终形成的冷

凝液滴体积较大,接触角也比较大,与粗糙间隙里的空气和粗糙结构间形成复合接触,不利于传热,过冷度较低,不易于冻结。但这3条原因都有一个共同的前提,即冷凝过程中表面仍保持超疏水性。

1.3 超疏水表面冰层上落霜过程

张友法^[25]制备了CA分别为160°和158°的两个超疏水表面,结霜实验开始4 min后,普通钢片表面已形成均匀霜层,超疏水表面只有稀疏的霜晶且增长缓慢,10 min时普通钢片表面霜高为0.14 mm,两个超疏水面上霜高却只有36.8 μm和25.7 μm,这表明超疏水表面与水滴接触时可截留空气形成“气垫”,减小了霜层与表面的热量交换,从而抑制在已有霜层上新霜的形成和生长。

研究人员^[26]在-7.2℃,相对湿度55%的环境下观察结霜过程,发现裸铜面(CA=64°)仅50 s后即出现霜晶,CA=120°的表面上120 s后出现霜晶,CA=150°的超疏水表面上150 s后才出现霜晶。同样实验环境下将超疏水表面竖直放置,600 s后超疏水表面上几乎没有霜。

除了开始结霜的时间,霜层高度有区别之外,进一步的研究还发现,超疏水表面的霜层结构也与普通表面存在较大区别。Liu等^[27-28]模拟了自然对流环境实施结霜实验,超疏水表面(CA=162°)上霜比普通铜面上的霜结构更疏松脆弱,霜层更薄,更易清除,呈簇状的菊花形。实验还发现超疏水表面上霜晶大多沿着水平方向增长而不是像普通表面那样沿着垂直方向,研究者认为可能是气流的存在和表面上温度分布不均匀而引起的。

分析超疏水性与抑霜效果之间的关系,Yeongae Kim等^[29]发现,结霜环境相同时,高疏水性表面刚开始结霜的温度比普通金属表面低了3℃。这间接说明疏水性会增大结霜所需的过冷度条件。刘清江^[30]认为,在冻结的冰珠上成霜系统增加的表面自由焓比直接在金属上成霜小很多,因此稀疏的霜上更容易落霜,霜层就更疏松。

由于超疏水性的存在,超疏水表面的结霜过程与普通表面有较为明显的区别。普通表面的霜在均匀致密的冰层上生成,霜层结构紧凑,分布均匀,沿着竖直方向向上增长。而超疏水表面霜在冷凝液滴冻结而成的冰珠表面生成,霜晶大多附着在冰珠表面朝水平方向增长,最终形成类似于菊花的簇状,结构脆弱,霜高远低于普通表面,在外力作用下可轻松除去。

2 超疏水表面冷凝导致的疏水失效

在结霜过程中,表面疏水性的保持对于超疏水表面的抑霜应用至关重要,它决定着接下来的结冰和冰上落霜的过程是否按照疏水表面特有的方式进行。然而,研究表明,部分超疏水表面在冷凝过程中会丧失疏水性(疏水失效)。Cheng^[31]发现蒸汽的凝结可以破坏荷叶表面天然的疏水性。文献[32—35]中,冷凝发生后,超疏水表面接触角由153.5°和157.5°分别减小到72°和82°。

对于冷凝条件下疏水失效现象,较一致的解释是冷凝发生在表面微结构的间隙里,是原存于间隙里的空气被部分移除导致的。Yang^[36]的实验表明,由于表面微结构的存在,超疏水表面更为粗糙,冷凝液滴出现在超疏水表面微结构的任何位置(顶端、侧边和间隙),微结构间隙里的冷凝液滴结冰后,冰与微结构形成一种“锚定”的作用,致使冰层与表面的粘附力比普通表面更大。

如何在冷凝过程中保持疏水性成为众多研究者关注的热点。He^[37]制备了一系列固-液接触分数不同的超疏水表面,发现固-液接触分数小于等于0.068的表面结露后接触角仍大于150°。固-液接触分数低于0.068的表面能在结露情况下较好的保持疏水性。

Oberli^[38]认为只有在表面粗糙度与液滴尺寸相比较足够小的情况下,不浸润的Cassie状态液滴才可能出现。这个结论从常理角度考虑也是非常容易理解的。Lafuma^[39]的研究表明,纳米微结构超疏水表面能在冷凝过程中保持疏水性。文献[40]中,He成功制备了带有ZnO纳米柱阵列的超疏水表面,这些表面甚至可以在温度低于冰点温度时仍保持超疏水性。

冷凝发生在表面微结构间隙里,极大地破坏了表面的疏水性,造成疏水失效,致使超疏水表面无法正常发挥抑霜效果,甚至造成冰层粘附力增大。为了保证疏水性,可以通过表面微结构参数的优化设定,如选取最耐冷凝的固液接触分数的表面或采用纳米结构超疏水表面。

3 纳米结构超疏水表面的抑霜

纳米技术是现代科学与现代技术结合的产物,纳米技术的出现为科学界带来一场新的革命,同样,纳米技术应用于超疏水表面也产生了新的成果。

丁云飞^[41]制备了7种分别具有单纯微米颗粒结构、微米颗粒/纳米纤维混合结构和单纯纳米纤维结构的疏水表面。结霜实验发现,综合对比霜晶出现时间和霜晶覆盖率,有全纳米结构的表面,抑霜效果最好,这可能是由于纳米微结构足够狭小,冷凝液滴未侵入到微结构间隙里,表面保持了超疏水性。

上文已经指出,纳米粗糙结构超疏水表面更耐蒸汽冷凝,从而具有更好的抑霜效果。然而纳米粗糙结构的特点不仅如此,其上冷凝液滴的自发弹跳现象^[42-43]和由此引发的快速除霜方法为超疏水表面的实际应用带来更大可能。

Boreyko等^[44-45]认为,纳米尺寸的粗糙结构使得冷凝的成核密度最小,促使绝大部分的冷凝液滴能够在粗糙表面以 Cassie 状态存在而不是与其他液滴合并,从而推迟凝结-结霜的时间。在 21 ℃,相对湿度为(32±5)%环境下,85 s内将表面温度从 20 ℃降至-20 ℃,超疏水表面出现了很多球状的过冷小液滴(冷凝液),这些液滴呈现出强烈的弹跳现象,表面几乎不能形成霜,但是表面边缘瑕疵处霜层开始萌发并通过一种“液滴间霜波”向表面其他位置蔓延^[46],紧接着朝上长出树枝状的霜晶。霜厚达到 1 mm 时,保持表面倾角 10°,将表面温度升高到 0 ℃;1 min 后,表面即出现干燥现象,冰浆层(部分熔化的霜和水的混合物)与表面的接触线自发退后形成接触角较大的液滴,大部分表面恢复干燥,霜-水混合物团成球状,在重力作用下从表面完全滑落;若在表面温度 25 ℃,倾角 10°情况下,只需 10 s 霜就已完全滚落消除。

此前也有文献^[47]声称部分超疏水表面上的外加水结冰之后再融化成的水能自动团聚成球形液滴,同时表面自动干燥。还有报告^[48-49]称正在移动的冰能推动邻近的液滴从水平放置的超疏水表面上脱落。但是 Boreyko 首次实现加热已初步成片的霜,使其部分融化就实现表面干燥并形成易滚动的 Cassie 状态液滴,而且在反复 10 次的结霜-融霜过程之后,表面疏水性没有损伤。

这些研究一定程度上肯定了纳米微粗糙结构超疏水表面的抑霜效果,一方面能显著耐湿,减少落霜;另一方面,除霜的过程变得十分迅速快捷,节约了大量的时间和能量。此外,其反复结霜-融霜过程中表现出的耐久性^[50-51]也十分值得关注。纳米结构超疏水表面在冷凝过程中能保持超疏水性,保证接下来的液滴冻结过程和落霜过程按照超疏水表面特有的方式进行,对于超疏水表面的推广应用至关重要,部分

结构特殊的超疏水表面上的冷凝液滴甚至可以自发弹离表面,这将大大提高抑霜效率,真正实现的动态除霜。然而纳米结构超疏水表面目前存在加工技术不成熟的问题,仍需针对制备过程进一步进行研究。

4 结论

超疏水表面由于极高的接触角和较小的滚动角,在工业中有巨大的应用前景。与普通表面相比,超疏水性能影响结霜过程,引起冷凝滞后、冷凝液冻结滞后、霜层松散,呈现良好的抑霜性能。某些超疏水表面在冷凝过程中丧失疏水性,无法达到理想的抑霜效果,可能是冷凝发生在表面微结构间隙中造成的。因此,采用尺寸更小的纳米微结构超疏水表面等方法来提高冷凝过程中的疏水稳定性,对于抑霜性能十分重要。除了在耐冷凝,纳米结构超疏水表面冷凝液滴还能自发弹离表面,并可实现较低温度下的极速除霜和较好的抑霜耐久性,因此实现这种表面的优化设计和快速制备是研究超疏水抑霜表面的重要思路。

参考文献

- [1] 冯杰,卢津强,秦兆倩.超疏水表面抗结冰性能研究进展[J].材料研究学报,2012,26(4):337—343.
FENG Jie, LU Jin-qiang, QIN Zhao-qian. Research Progress on Anti-icing Performance of Super-hydrophobic Surfaces [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2012, 26(4): 337—343.
- [2] 房振乾,陈群志,董兵,等.飞机结构表面涂层体系改进研究[J].装备环境工程,2013,10(5):102—107.
FANG Zhen-qian, CHEN Qun-zhi, DONG Bing, et al. Improvement of Aircraft Structure Surface Coating System [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 102—107.
- [3] 陈棋,罗勇水,刘伟江,等.风电机组抗冰冻设计[J].装备环境工程,2013,10(5):32—36.
CHEN Qi, LUO Yong-shui, LIU Wei-jiang, et al. Anti-freezing Design of Wind Turbine Generator [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 32—36.
- [4] 黄硕,吴仲岩,易辉,等.疏水性自清洁涂层的制备与性能研究[J].表面技术,2012,41(1):106—108.
HUANG Shuo, WU Zhong-kui, YI Hui, et al. Fabrication and Properties of a Self-cleaning Hydrophobic Coating [J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 106—108.
- [5] 陈志磊,帅茂冰.阴极刻蚀法制备超疏水铝镀层及其抗

- 腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 59—62.
- CHEN Zhi-lei, SHUAI Mao-bing. Preparation of Super-hydrophobic Aluminum Coating by Cathodic Etching and the Study on Its Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 59—62.
- [6] 周艳艳, 于志家. 铝基超疏水表面抗结霜特性研究[J]. 高校化工学报, 2012, 26(6): 929—934.
- ZHOU Yan-yan, YU Zhi-jia. The Defrosting Behavior of the Super-hydrophobic Aluminum Surfaces [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012, 26(6): 929—934.
- [7] SAITO H, TAKAI K, YAMAUCHI G. Water and Ice-repellent Coatings [J]. Jocca-Surf Coating Int, 1997, 80(4): 168—177.
- [8] 张友法, 余新泉, 周荃卉, 等. 超疏水低粘着铜表面制备及其防覆冰性能 [J]. 物理化学学报, 2010, 26(5): 1457—1462.
- ZHANG You-fa, YU Xin-quan, ZHOU Quan-hui, et al. Fabrication and Anti-icing Performance of a Super Hydrophobic Copper Surface with Low Adhesion [J]. Acta Physico Chimica Sinica, 2010, 26(5): 1457—1462.
- [9] CAO L L, ANDREW K J, VINOD K S, et al. Anti-icing Super-hydrophobic Coatings [J]. Langmuir, 2009, 25(21): 12444—12448.
- [10] KULINICH S A, FARZENEH M. Ice Adhesion on Super-hydrophobic Surfaces [J]. Application Surface Science, 2009, 255: 8153—8157.
- [11] NAKAJIMA A, HASHIMOTO K, WATANABE T. Recent Studies on Super-hydrophobic Films [J]. Fuel Chemical, 2001, 132(1): 31—41.
- [12] WANG Xian-lin, JIANG Shao-jian. Discuss on Hydrophobic Surface for Preventing Frosting and Speeding Defrosting of Heat Pump [J]. Energy Conservation Technology, 2004, 22(5): 37—38.
- [13] WU Yan-peng, ZHANG Chao-ying. Analysis of Anti-condensation Mechanism on Super-hydrophobic Anodic Aluminum Oxide Surface [J]. Chemical, 2013(58): 664—669.
- [14] GOU Li-jun. Experimental Study of the Surface Characteristics of the Frosting Process in the Vertical Cold Plate under Natural Convection Conditions [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [15] YU Zhi-jia, YU Yue-fei, LI Yan-feng, et al. Preparation and Characterization of Super-hydrophobic Surfaces on Aluminum and Stainless Steel Substrates [J]. Surface Letters, 2010, 17(3): 375—381.
- [16] ZHAO Kun, ZHAO Bao-ping, ZHANG Jun-yan. Preparation of EVOH/Nano-SiO₂ Composites by Solution Co-blending and Its Properties [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41: 80—83.
- [17] NOSONOVSKY M. Multiscale Roughness and Stability of Super-hydrophobic Biomimetic Interfaces [J]. Langmuir, 2007, 23(4): 3157—3161.
- [18] 刘中良, 黄玲艳, 勾昱君, 等. 结霜现象及抑霜技术的研究进展 [J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 12—16.
- LIU Zhong-liang, HUANG Ling-yan, GOU Yu-jun, et al. A Review on Frost Formation and Anti-frosting Technology [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 12—16.
- [19] LIU Zhong-liang, GOU Yun-jun, WANG Jieteng. Frost Formation on a Super-hydrophobic Surface under Natural Convection Conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 5975—5982.
- [20] 吴晓敏, 单小丰, 王维成. 冷面结霜的微细观过程及表面润湿性对其影响 [C]//中国工程热物理学会 2002 年热质传质学术会议论文集. 上海: 中国工程热物理学会, 2002.
- WU Xiao-min, SHAN Xiao-feng, WANG Wei-cheng. Effects of Wettability on Microscope Process of Frosting on Cold Surfaces [C]//Chinese Society of Engineering Thermophysics Academic Conference in 2002. Shanghai: Chinese Society of Engineering Thermophysics Academic, 2002.
- [21] 刘清江, 韩学廷. 憎水表面抑制结霜的研究 [J]. 流体机械, 2004, 32(4): 57—60.
- LIU Qing-jiang, HAN Xue-ting. Study of Hydrophobic Coating Restraining Frost Formation [J]. Fluid Mechanics, 2004, 32(4): 57—60.
- [22] 杨剑, 虞维平. 抑制结霜的实验研究和霜层生长的模拟与预测 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
- YANG Jian, YU Wei-ping. Experimental Study on Anti-frosting with Simulation and Forecast of Frost Layer [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [23] 勾昱君, 刘中良, 王皆腾. 自然对流条件下仿生超疏水表面的抑霜研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 631—633.
- GOU Yu-jun, LIU Zhong-liang, WANG Jie-teng. Anti-frosting Performance of Super-hydrophobic Surfaces in Natural Convection [J]. Journal of Engineering Thermo-physics, 2007, 28(4): 631—633.
- [24] JOHN L H. The Interaction Between the Substrate and Frost Layer Through Condensate Distribution [D]. USA Urbana-Champaign: University of Illinois, 2001.
- [25] 张友法, 余新泉. 超疏水钢表面的制备及其抗结霜性能 [J]. 东南大学学报, 2010, 40(6): 1318—1322.
- ZHANG You-fa, YU Xin-quan. Fabrication of Super-hydrophobic Steel Surface and Its Anti-frosting Performance [J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(6): 1318—1322.
- [26] WANG Hao, HAO Li-ming, WU Xiao-min. Fabrication and

- Anti-frosting Performance of Super Hydrophobic Coating Based on Modified Nano-sized Calcium Carbonate and Ordinary Polyacrylate[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253: 8818—8824.
- [27] LIU Zhong-liang, WANG Hong-yan. An Experimental Study on Minimizing Frost Deposition on a Cold Surface under Natural Convection Conditions by Use of a Novel Anti-frosting Paint Part II: Long-term Performance, Frost Layer Observation and Mechanism Analysis[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006(29): 237—242.
- [28] LIU Zhong-liang, ZHANG Xing-hua. Influences of Surface Hydrophilicity on Frost Formation on a Vertical Cold Plate Under Natural Convection Conditions [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007(31): 789—794.
- [29] JING Teng-yue, YEONGAE K, SANGMIN L. Frost and Defrosting on Rigid Super-hydrophobic Surface [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 276: 37—42.
- [30] 刘清江, 刘中良, 王洪燕. 自然对流条件下疏水表面与普通金属表面霜生长的对比研究 [J]. *化工*, 2004(4): 20—23.
- LIU Qing-jiang, LIU Zhong-liang, WANG Hong-yan. The Contrast Study of Frost Formation on Cold Hydrophobic Coating Surface and Common Metal Surface in Nature Convection [J]. *Chemical Engineering*, 2004(4): 20—23.
- [31] CHENG Y T, RODAK D E. The Lotus Leaf Superhydrophobic[J]. *Physics*, 2005(4): 1278—1298.
- [32] WIER K A, MCCARTHY T J. Condensation on Ultrahydrophobic Surfaces and Its Effect on Droplet Mobility: Ultra-hydrophobic Surfaces are not always Water Repellant [J]. *Langmuir*, 2006(22): 2433—2436.
- [33] LAFUMA A, QUERE D. Super Hydrophobic States[J]. *Mater*, 2003(2): 457—460.
- [34] HE B, PATANKAR N A, LEE J. Multiple Equilibrium Droplet Shapes and Design Criterion for Rough Hydrophobic Surfaces[J]. *Langmuir*, 2003(19): 4999—5003.
- [35] CAO L, HU H H, GAO D. Design and Fabrication of Micro-textures for Inducing a Super-hydrophobic Behavior on Hydrophilic Materials[J]. *Langmuir*, 2007(23): 4310—4314.
- [36] YANG Shu-qing, XIA Qiang. Research on the Ice-phobic Properties of Fluoropolymer-based Materials [J]. *Applied Surface Science*, 2011(257): 4956—4962.
- [37] MIN He, LI Hui-ling, WANG Jang-jun, et al. Super Hydrophobic Surface at Low Surface Temperature[J]. *Application Physics*, 2011(98): 1453—1490.
- [38] LINDA O, DEAN C. Condensation and Freezing of Droplets on Super-hydrophobic Surfaces[J]. *Colloid Interface*, 2013, 643: 134—146.
- [39] AURÉLIE L, DAVID Q. Super Hydrophobic States[J]. *Mater*, 2003, 2(7): 457—460.
- [40] MIN H. Super-hydrophobic Surfaces to Condensed Microdroplets at Temperatures Below the Freezing Point Retard Ice/Frost Formation[J]. *Soft Matter*, 2001(8): 78—129.
- [41] 丁云飞, 殷帅, 廖云丹, 等. 纳微结构超疏水表面结霜过程及抑霜特性 [J]. *化工学报*, 2012, 63(10): 3213—3219.
- DING Yun-fei, YIN Shuai, LIAO Yun-dan, et al. Frosting Mechanism and Suppression on Nano/Micro-structured Hydrophobic Surfaces [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(10): 3213—3219.
- [42] KATRINA M. Self-cleaning of Super-hydrophobic Surfaces by Self-propelled Jumping Condensate [J]. *PNAS*, 2013(110) 20: 7992—7998.
- [43] 刘天庆, 孙玮, 孙相戎, 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.
- LIU Tian-qing, SUN Wei, SUN Xiang-yu, et al. Mechanism and Condition Analysis of Condensed Drop Jumping on Super-hydrophobic Surfaces [J]. *Physics*, 2012, 28(5): 1206—1212.
- [44] JONATHAN B. Dynamic Defrosting on Nano-structured Super-hydrophobic Surfaces [J]. *Langmuir*, 2013, 29: 9516—9524.
- [45] CAO Liang-liang, ANDREW K J. Anti-icing Super Hydrophobic Coatings [J]. *Langmuir*, 2009, 25(21): 12444—12448.
- [46] JONATHAN B. Delayed Frost Growth on Jumping-drop Super-hydrophobic Surfaces[J]. *Physics*, 2013, 7(2): 1618—1627.
- [47] MISHCHENKO L. Design of Ice-free Nano-structured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets[J]. *ACS*, 2010(4): 7699—7707.
- [48] JING T. Frosting and Defrosting on Rigid Super Hydrophobic Surface[J]. *Surface Science*, 2013(276): 37—42.
- [49] YANG Jie, LI Wen. Preparation of Super-hydrophobic Surfaces on Al Substrates and the Anti-icing Behavior [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 576: 215—219.
- [50] 刘先兰, 邵锦钟, 金潇明. 仿生非光滑表面耐磨性的影响因素 [J]. *表面技术*, 2012, 41(1): 92—94.
- LIU Xian-lan, SHAO Jin-zhong, JIN Xiao-ming. Influence Factors of Wear Resistant with Bionic Non-smooth Surfaces [J]. *Surface Technology*, 2012, 41(1): 92—94.
- [51] 李颖, 杨喜存, 单勇军. 低温环境实验条件恢复的防凝露问题 [J]. *装备环境工程*, 2013, 10(5): 112—114.
- LI Ying, YANG Xi-cun, SHAN Yong-jun. Prevention of Water Condensation during Condition Restoration Phase of Low-temperature Environmental Test [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(5): 112—114.