

空气源热泵超疏水抑霜的机理分析及性能研究

何桂香¹, 谷雅秀¹, 段佳慧²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 广州市交通设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 为解决空气源热泵室外换热器在低温潮湿的工况下运行时的结霜问题, 从结霜影响因素及霜层生长条件出发, 改善了一种抑霜表面改性方法, 制备出接触角为 158.3° 的超疏水铝基翅片; 基于超疏水抑霜机理分析, 并通过所建立的模拟低温、高湿环境的强制对流可视化实验平台, 对超疏水铝基翅片的抑霜/融霜效果进行理论及实验研究。结果表明, 超疏水表面液滴成核位垒大、冰桥传播慢、液滴与冷表面接触面积小、液滴频繁发生合并-弹跳-滚动-滑落现象; 霜层初始生长阶段, 超疏水铝基表面较常规铝基表面结霜时间延迟 165 s、霜层覆盖率增速小; 强制对流下的结霜过程中, 超疏水铝基翅片结霜量为常规铝基翅片的 69.8%、生长速率为常规铝基翅片的 65.2%; 融霜过程中, 超疏水铝基翅片融霜时间为常规铝基翅片的 64%、残留化霜水比例减少 47.9%。超疏水表面表现出良好的抑制结霜、快速融霜的特性, 初步揭示了超疏水技术应用于空气源热泵室外机换热器表面进行有效抑霜的可行性及其实际应用价值。

关键词: 空气源热泵; 超疏水; 抑霜; 融霜

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0860-07

Mechanism analysis and performance research on superhydrophobic frost suppression of air source heat pump

HE Guixiang¹, GU Yaxiu¹, DUAN Jiahui²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Guangzhou Traffic Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Based on the influencing factors and conditions of frost layer growth to suppress frost, this paper improves a surface modification method to solve the problem that the outdoor heat exchanger of air source heat pump will frost while operating under low temperature and high humidity. By this means, superhydrophobic aluminum fins with contact angle of 158.3° are prepared. To experimentally study the frost suppression / thawing effect of superhydrophobic aluminum fins, the frost suppression mechanism of superhydrophobic surface is analyzed, and a forced convection visualization experimental platform which simulates low temperature and high humidity environment is established. The results show that the superhydrophobic surface has large nucleation barrier, slow ice bridge propagation, less contact area between droplets and cold surface, and frequent merging-bouncing-rolling-sliding of droplets. In the initial growth stage of frost layer, the frosting time of superhydrophobic aluminum fin is 165 s later than that of conventional aluminum fin, and the growth rate of frost layer coverage is small. During the frosting process under forced convection, the frosting amount of superhydrophobic aluminum fin is 69.8% of that of conventional aluminum fin, and the growth rate is 65.2% of that of conventional aluminum fin. During the defrosting process, the defrosting time of superhydrophobic aluminum fin is 64% of that of conventional aluminum fin, and the proportion of residual defrosting water is reduced by 47.9%. The superhydrophobic surface shows good characteristics of inhibiting frosting and rapid defrosting. The results preliminarily reveal the feasibility and practical application value of superhydrophobic technology, which is applied to the surface of outdoor unit heat exchanger of air source heat pump.

Key words: air source heat pump; superhydrophobic; frost suppression; defrosting

收稿日期: 2021-05-11

修改稿日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51106014); 陕西省自然科学基金面上基金项目(2018JM5084); 陕西省建设厅建设科技计划管理基金项目(2015-K14); 中央高校基本科研业务费(自然科学类)高新技术研究培育项目(300102289203)

第一作者: 何桂香(1998-), 女, 硕士生。主要从事空气热泵抑霜除霜研究。E-mail: 2020128091@chd.edu.cn

通信作者: 谷雅秀(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事制冷与暖通空调系统节能与优化研究。E-mail: guyaxiu@chd.edu.cn

空气源热泵已经成为国内居民建筑应用最广泛的空调设备,具有运行成本低、节能效果好、投资回报周期短和环保无污染等特点^[1]。但热泵系统的环境温度为 $-12.8 \sim 5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,且相对湿度大于67%的工况下运行时,室外机盘管壁面容易结霜^[2]。结霜问题是影响空气源热泵推广应用的重大障碍。

国内外学者对空气源热泵结霜、除霜问题进行了大量的研究,提出了多种除霜技术以解决热泵的结霜问题,如电加热除霜、逆向除霜、蓄热除霜等^[3]。然而,这些方法或存在频繁化霜、化霜不尽、消耗电能大、温度波动大等缺点^[4]。超疏水涂层仿生荷叶效应,在抑制制冷表面结霜方面具有独特优势,是空调热泵领域的研究热点。Barthlott 和 Neinhuis^[5]学者首先对疏水性荷叶表面进行电镜扫描,发现其表面具有微米级乳突结构及蜡状膜层,并认为这是实现其自清洁特性的重要原因。王贤林等^[6]分析了水蒸气在低化学能表面冷凝、凝结成霜并滚落的过程,发现将低能超疏水表面应用在热泵室外机表面可阻止或延缓结霜并加快除霜。Hayashi 等^[7]通过观测液滴的结霜过程,将结霜的过程分为“霜核期”、“霜层生长期”和“霜层完全发展期”三个阶段。梁彩华、汪峰等^[8]对超疏水翅片表面的抑霜机理和融霜特性做了大量可视化实验研究,提出增大疏水表面的接触角和减小滚动角有利于抑霜和化霜过程。然而,目前超疏水技术还处在实验研究阶段,需进一步探索使之能运用于实际问题。此外,是否能提出一种与超疏水技术相结合的无霜方法,或者是否可实现与废热利用相结合的综合无霜技术,目前国内外研究较少,仍有很大的研究空间。

本文从超疏水抑霜机理及效果两个方面展开研究。首先利用化学刻蚀法构造出超疏水铝基表面,然后对不同润湿性铝基表面霜层生长及融化过程开展对比实验,探究超疏水技术抑霜的机理及效果,为进一步设计及应用超疏水抑霜技术提供理论及实验基础。

1 超疏水表面抑霜机理

1.1 成核位垒

如图1所示,假设冷凝液滴在壁面呈冠球形,液滴与壁面颗粒表面上产生固-液、液-气、固-气

三个界面^[9-10],设界面面积分别为 A_{SL} 、 A_{LV} 、 A_{SV} ,界面自由能分别为 σ_{SL} 、 σ_{LV} 、 σ_{SV} , ΔG_{V} 为单位体积液核气相与液相 Gibbs 自由能差值,表面接触角 θ ,冠球形液核体积 V_{S} ,壁面尺寸半径 R ,液体晶核尺寸半径 r 。

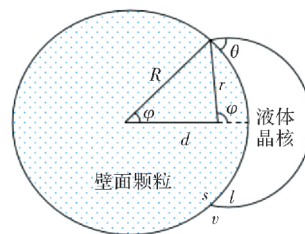


图1 蒸汽冷凝成核示意图

Fig.1 Schematic diagram of steam condensation nucleation

令 $m = \cos\theta$,系统平衡时满足 Young's 方程:

$$m = (\sigma_{\text{SV}} - \sigma_{\text{SL}}) / \sigma_{\text{LV}} \quad (1)$$

等温等压情况下,生成的凝结液核系统吉布斯自由能变化量 ΔG 为

$$\Delta G = \Delta G_{\text{V}} V_{\text{S}} + \sigma_{\text{LV}} A_{\text{LV}} + (\sigma_{\text{SL}} - \sigma_{\text{SV}}) A_{\text{SL}} \quad (2)$$

将(1)代入(2)中得到:

$$\Delta G = \Delta G_{\text{V}} V_{\text{S}} + \sigma_{\text{LV}} (A_{\text{LV}} - \cos\theta A_{\text{SL}}) \quad (3)$$

式中:

$$V_{\text{S}} = \frac{1}{3} \pi r^3 (2 - 3\cos\phi + \cos^3\phi) -$$

$$\frac{1}{3} \pi R^3 (2 - 3\cos\phi + \cos^3\phi);$$

$$A_{\text{LV}} = 2\pi r^2 (1 - \cos\phi);$$

$$A_{\text{SV}} = A_{\text{SL}} = 2\pi R^2 (1 - \cos\phi)$$

令 $\frac{\partial(\Delta G)}{\partial r} = 0$,得到临界半径 r_c 与相应临界自由能 ΔG_c 的表达式为

$$r_c = \frac{-2\sigma_{\text{LV}}}{\Delta G_{\text{V}}} \quad (4)$$

$$\Delta G_c = \frac{8\pi\sigma_{\text{LV}}^3}{3(\Delta G_{\text{V}})^2} f(m, x) \quad (5)$$

式中:

$$f(m, x) = 1 + \left(\frac{1-mx}{g}\right)^3 + x^3 \left[2 - 3\left(\frac{x-m}{g}\right) + \left(\frac{x-m}{g}\right)^3\right] + 3mx^2 \left(\frac{x-m}{g} - 1\right);$$

$$x = \frac{R}{r_c};$$

$$g = (1 + x^2 - 2mx)^{\frac{1}{2}}$$

在铝基表面生成一层低化学能薄膜时,由于自身自由能降低,液-气界面自由能 σ_{LV} 降低,导致临界半径 r_c 与临界能障 ΔG_c 增大,冷凝液滴难

以在表面产生.

1.2 冰桥传播

受液滴分布的影响,冰桥传播过程可分为两种情况^[11-12].如图 2(a),距离较近的已冻结与未冻结液滴间存在水蒸气分压力差,已冻结液滴不断吸收水分子形成“冰桥”并逐渐向周围未冻结液滴延伸.如图 2(b),已冻结液滴距离未冻结液滴较远,或者未冻结液滴直径较小时,已冻结液滴不断吸收未冻结液滴热量,使未冻结小液滴被蒸发,冻结行为不能继续传递.图中蓝色代表已冻结液滴;白色代表未冻结液滴.

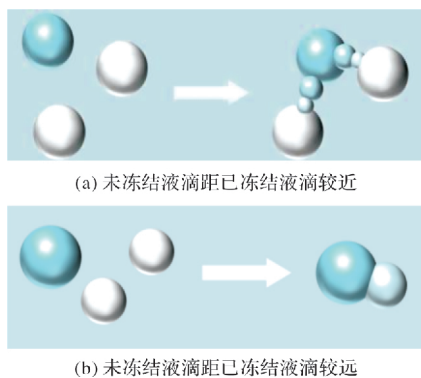


图 2 冰桥传播现象示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ice bridge propagation phenomenon

表面接触角对“冰桥”形成过程的影响主要在于对液滴半径及液滴分布的影响.一方面,超疏水表面黏附性低,在凝结阶段液滴频繁发生合并弹跳并从表面脱附.因此,在液滴冻结初期,超疏水表面小液滴所占比例更大,液滴完全蒸发而不形成“冰桥”的可能性大.另一方面,接触角越大、疏水性能越好的表面液滴分布越稀疏,“冰桥”越难以形成.

1.3 Cassie-Baxter 理论

Cassie 和 Baxter 在研究自然界中表面超疏水特性的过程中提出了复合接触的概念,即认为液滴在粗糙表面上的接触是一种复合接触^[13-15].当表面结构疏水性较强时,在疏水表面上的液滴并不能填满粗糙表面上的凹槽,在液珠下将有空气存在,于是表观上的液固接触面其实由如图 3 所示的固体和气体共同组成.设 f_{12} 为固液界面占比, f_{23} 为液气界面占比,且 $0 < f_{12}$, $f_{23} < 1$, θ_0 为表面的本征接触角.

平衡时可得 Cassie-Baxter 理论浸润性方程.

$$f_{12} + f_{23} = 1 \quad (6)$$

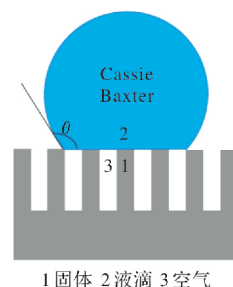


图 3 Cassie-Baxter 理论示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Cassie-Baxter theory

$$\cos\theta = f_{12}(\cos\theta_0 + 1) - 1 \quad (7)$$

由上式可知,超疏水表面接触角大,液滴与冷表面的接触面积小,导致液滴与冷表面的传热量小,从而抑制了霜层的形成与生长.

1.4 液滴的合并-弹跳-滚动-滑落现象

由能量守恒方程,系统自由能的变化会引起液滴重力势能和动能的变化^[16-19].设液滴合并前后体积均在 μL 数量级,忽略重力势能变化.将冷凝液滴与其冷表面看作一个体系, γ_{LV} 、 γ_{SL} 、 γ_{SV} 分别表示液-气、固-液、固-气界面张力, ρ 为液滴密度, V 、 R 分别为液滴合并后体积、半径, U 为合并液滴运动初速度, f 为固-液接触面积比例分数, A_{SL}^* 表示合并后固-液界面接触面积.

单个体系合并前后总自由能变化 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{1}{6} \rho \pi R^3 U^2 (2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta) \quad (8)$$

冷表面对合并液滴的粘滞功 W 为

$$W = \gamma_{LV} f \pi R^2 \sin^2\theta (1 + \cos\theta) \quad (9)$$

当 $\Delta E < W$ 时,液滴在表面停留;当 ΔE 逐渐增大至 W 时,可得到液滴发生弹跳现象的临界半径 R_c 为

$$R_c = \frac{6\gamma_{LV} f \sin^2\theta (1 + \cos\theta)}{\rho U^2 (2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)} \quad (10)$$

与常规表面相比,液滴在超疏水表面接触角大,接触面积小,则合并液滴在超疏水表面上可发生弹跳现象的临界半径比常规表面小,液滴更易发生自弹跳从表面滚落,使表面液滴覆盖率有效降低.

2 实验部分

2.1 超疏水铝基翅片制备

本文应用化学刻蚀法制备超疏水表面^[20-21],采用裸铝翅片为基体材料.将翅片依次置于丙酮及无水乙醇中超声清洗;接着,将用 5 wt% 氢氧

化钠水溶液浸泡去除表面氧化层;然后放入盐酸、氢氟酸混合溶液中刻蚀出表面微-纳二级结构;最后,用1.0 wt%十三氟辛基三乙氧基硅烷的乙醇溶液浸泡进行低表面能修饰,然后将翅片放入120℃的烘箱中加热固化,可成功制备出接触角达158.3°的超疏水铝基表面.观察液滴在各处理过程所得表面上的形态并利用接触角测量仪分别测量表面接触角值如图4.

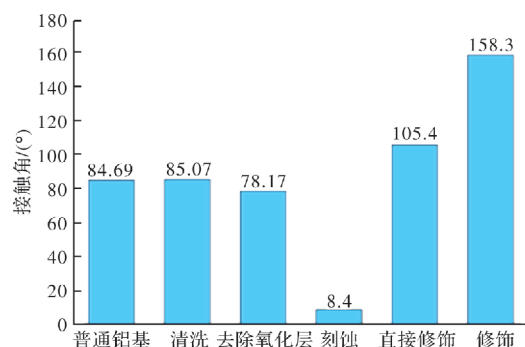


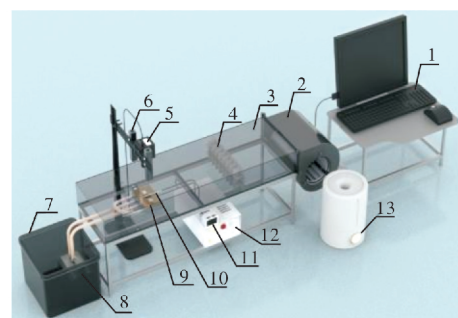
图4 各制备阶段液滴形态及接触角值

Fig. 4 Droplet morphology and contact angle at each preparation stage

由图4可知,翅片经刻蚀后,表面接触角急剧下降至8.4°,呈超亲水性.并且,刻蚀后试片再经修饰后其表面接触角迅速提升约150°.这是因为刻蚀后翅片表面呈微-纳双重结构,该结构迫使液滴在铝基表面朝微-纳洞孔流入,故翅片呈超亲水性.同样,刻蚀后翅片的超亲水性使得修饰液在微-纳孔隙中得到充分填充,再经加热固化,棉絮状的氟硅烷物质在孔隙中均匀留存,超疏水表面得以形成.

2.2 实验装置

如图5所示,实验装置主体部分经整流格栅划分为三段:空气加湿段、均匀送风段以及制冷段.加湿段利用空气加湿设备控制风机进风的相对湿度,可使进风相对湿度升至92%,模拟室外高相对湿度工况.均匀送风段采用EM133C-2型号风机送风,并且在距风机20 cm位置固定导流格栅使送风以1.2~1.3 m/s的速度均匀送入半导体制冷段.制冷段由制冷台、水箱、温度控制器、温度传感器、直流电源五部分组成,可为翅片提供可变的低温环境.其中,型号为MX1101温湿度记录仪的测量精度为:±0.21℃(温度)、±2%(湿度);型号为WFWZY万向风速记录仪的测量精度为:±0.05 m/s;型号为HOBO温度传感器的测量精度为±0.1℃.



1-电脑2-离心风机3-可视化亚克力箱体4-整流格栅5-摄像机
6-冷光源7-水箱8-循环水泵9-半导体制冷台10-温度传感
11-温湿度记录仪12-电源13-加湿设备

图5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of suppression experimental apparatus

3 超疏水表面的抑霜/融霜性能

3.1 超疏水表面在霜层初始生长阶段的抑霜性能

为探究霜层初始生长阶段不同湿润性表面霜层覆盖率随时间的变化情况,利用上述实验平台创造一个低温高湿的实验环境对两种湿润性铝基平片表面展开对比实验.翅片大小均为2 cm×2 cm,环境温度5℃,为模拟低温下的结霜现象,调节冷表面温度为-13℃.测得实验台内相对湿度86%,送风风速1.3 m/s,实验得到两种表面霜层覆盖率随时间的变化情况如图6.

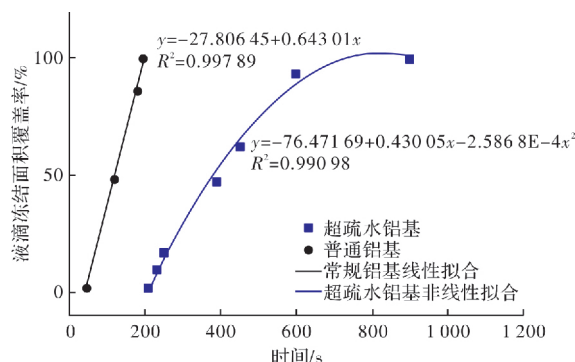


图6 表面霜层覆盖率随时间的变化

Fig. 6 Variation of frost coverage with time

由图6可知,常规铝基表面45 s开始结霜,至250 s时,表面霜层均匀分布.而超疏水铝基表面210 s开始结霜,900 s时表面液滴完全冻结.说明常规铝基表面液滴冻结发生时间明显早于超疏水铝基.此外,结霜过程中超疏水铝基在任意时刻表面霜层覆盖率增速均明显小于常规铝基.由图7可知,常规铝基表面霜层的密度及厚度基本一致,而超疏水铝基表面霜层生长稀疏、不均匀,且表面出现“冰桥”现象.表明常规铝基表面传热

效率基本一致,“冰桥”传播现象不明显。

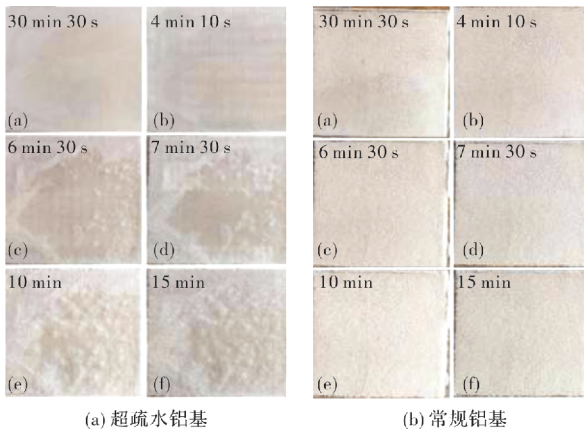


图7 两种湿润性表面在 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时“冰桥”传播

Fig. 7 Ice bridge propagation on two kinds of wettability surfaces at $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.2 超疏水表面在强制对流结霜过程的抑霜性能

将不同润湿性铝基翅片竖直放置在实验台中,翅片间距为 1 mm 。室外环境温度 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到此实验中制冷板为多个翅片提供冷量,为使各个翅片上形成均匀针状霜层,调节冷表面温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测得翅片前后两侧室内温度均为 $6.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,翅片迎风侧、背风侧相对湿度分别为 90% 、 77% ,翅片迎风侧、背风侧风速分别为 0.6 m/s 、 0.73 m/s 。实验观测每 5 min 直至结霜 60 min 的两翅片表面霜层重量、厚度及密度的变化情况。

(1)两种翅片霜层重量对比分析

每五分钟测量霜层重量汇总并进行线性拟合如图8所示。

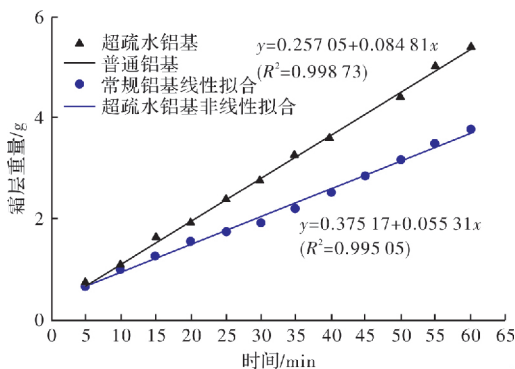


图8 霜层重量随时间的变化

Fig. 8 variation of frost weight with time

由图8可知,开始结霜 5 min 时,两翅片表面均已生成霜晶。超疏水及常规铝基翅片结霜量分别为 0.658 g 、 0.721 g 。结霜 25 min 时,霜层处于“霜层完全发展期”,两种表面各处均出现霜层。超疏水铝基翅片及常规铝基翅片结霜量分别为 1.746 g 、 2.382 g 。超疏水铝基结霜量仅是常规铝基翅片的 73.29% ,可见超疏水表面在结霜

初期抑霜效果优异。结霜进行至 50 min 时,超疏水霜层结霜量仍为常规铝基的 71.36% 。经线性拟合,常规铝基霜层重量平均增速为 0.084 g/min ,超疏水铝基霜层重量平均增速为 0.055 g/min ,较常规铝基减缓了 34.81% 。说明在整个结霜过程中常规铝基霜层的生长速率均较超疏水铝基快。

(2)两种翅片霜层厚度对比分析

按迎风、背风方向将翅片分为前部、中部、尾部三部分。实验发现,三部分霜层厚度增长均经历“飞速”—“缓慢”的过程,且以中间部分变化最大,尾部背风侧变化最小。这是因为随着霜层厚度不断生长,霜层密度不断增加,翅片冷表面与室外空气间形成一层“隔热层”,影响了后续的传热效率。当霜层进入“完全发展期”后,传热效率趋于稳定,霜层生长缓慢。两润湿性铝基翅片三部分的厚度随时间的变化情况如图9所示。

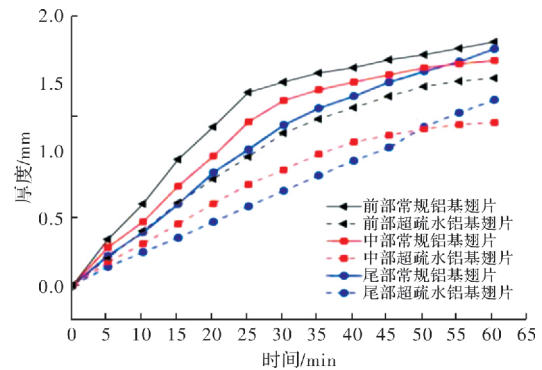


图9 翅片前部、中部、尾部霜层厚度随时间的变化

Fig. 9 Variation of frost layer thickness at the front, middle and tail of fins with time

由图9可知,在整个强制对流结霜过程中,超疏水铝基翅片表面及常规铝基翅片表面霜层最厚处均在迎风侧。结霜 60 min 时,超疏水铝基翅片及常规铝基翅片前部霜层厚度分别为 1.531 mm 及 1.799 mm ,超疏水铝基翅片霜层厚度为常规翅片的 85.10% 。同时,翅片中部霜层厚度分别为 1.203 mm 及 1.662 mm ,相比常规翅片减少了 27.62% 。尾部霜层厚度为 1.370 mm 及 1.747 mm ,相比常规翅片减少了 21.58% 。说明超疏水铝基表面的霜层厚度随时间增长的速率在任意位置均比常规铝基表面慢,整体表现出优良抑霜特性。

(3)翅片霜层密度增大成因分析

实验发现,随着结霜的进行翅片表面霜层密度逐渐增大,且结霜前期霜层密度生长速度迅猛,结霜后期,霜层密度增速减缓,但仍可见霜层越来越密实。如图10所示,在霜层的各个表面上均能明显看到有细小透明霜晶出现,说明此时此霜

晶正在发生“回融-冻结”过程。

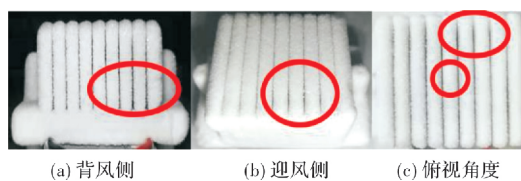


图10 翅片表面霜层晶体融化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of frost melting on fin surface

研究发现,当霜层增长至一定高度后,由于边缘霜层远离冷表面致使表面温度升高,当表面温度增至 0°C 以后,霜晶开始相变融化,融化后的冰晶水沿重力方向向下渗透,抑制了霜层高度的生长,并且向下渗透的冰晶水进入霜层内部后再次冷凝使得内部霜层越来越密实,霜层变密导致传热系数增加,边缘霜层温度下降,霜层得以继续增高,这也就是霜晶的回融-倒伏现象。

3.3 超疏水表面的融霜性能

结霜1 h后关闭制冷系统和送风系统,使两种湿润性翅片霜层在室外环境中(温度 7°C 、相对湿度37%、风速 1.0 m/s)融化,观测翅片表面霜层融化形态并记录表面霜层完全融化所需时间,融霜结束后测量干海绵吸取的化霜水重量,实验结果如图11所示。

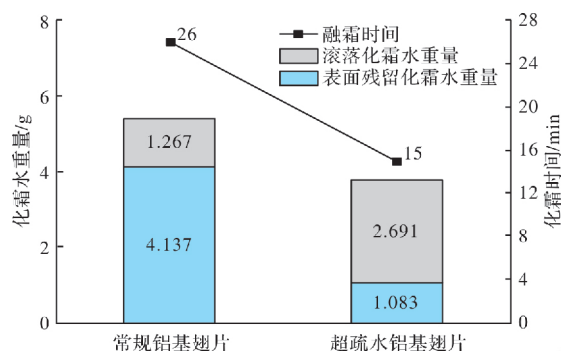


图11 翅片霜层重量、融化后化霜水停留位置及化霜时间对比图

Fig. 11 Comparison of the weight of the frost surface on the fins, the location of the defrosting water and the time of defrosting

实验发现,化霜完毕后常规铝基翅片底部聚集一大片厚度为 $1.5\sim 4.2\text{ mm}$ 的液膜,竖直翅片表面也存在较大尺寸的液滴粘附,而超疏水铝基翅片底部基本无液滴残留,且其竖直翅片上的残留液滴尺寸小、数量少,同时,这一实验结果验证了前述液滴在超疏水表面频繁发生弹跳-合并-滚动-滑落现象导致表面液滴覆盖率小这一超疏水表面抑霜机理。

由图11可知,常规铝基翅片掉落化霜水重 1.267 g ,残留在表面的化霜水重 4.137 g ;而超疏

水铝基翅片掉落化霜水重 2.691 g ,残留在表面的化霜水重 1.083 g 。常规铝基翅片上残留化霜水的比例为76.56%,而超疏水翅片上残留化霜水比例为28.70%,相比常规翅片减少了47.86%。此外,常规铝基翅片霜层全部融化需要 25 min ,而超疏水铝基翅片需要 16 min ,仅是常规铝基翅片的64%。说明超疏水技术的应用对减小化霜时间和抑制二次结霜起到了良好的改善作用。

4 结论

本文从影响结霜的因素及霜层生长条件出发,利用化学刻蚀法制备出超疏水铝基表面,搭建可视化实验平台,对不同润湿性表面霜层初始生长过程以及竖直翅片结霜/融霜过程开展相关实验研究,以验证超疏水的抑霜机理以及超疏水技术应用在竖直翅片上的抑霜/融霜效果,经过以上一系列研究,得出以下结论:

(1)超疏水抑霜技术的机理可归纳为四点:从液滴成核位垒角度出发,在超疏水冷表面上液核的临界半径与临界能障大,冷凝液滴难以产生;由冰桥传播原理,冷凝液滴在超疏水冷表面上冷凝速度慢;由于空气进入微-纳米空隙中导致冷凝液滴在超疏水冷表面上接触面积小;液滴在超疏水冷表面上可发生跳跃现象的临界半径小,液滴频繁发生合并-弹跳-滚动-滑落现象,使得超疏水冷表面的液滴覆盖率有效降低;

(2)采用化学刻蚀法可成功制备出接触角达 158.3° ,表面具有微-纳二次结构的超疏水铝基表面;

(3)冷表面温度为 -13°C 时,超疏水铝基平片表面开始结霜时间较常规铝基平片晚 165 s ,结霜过程中超疏水铝基在任意时刻表面霜层覆盖率增速均明显小于常规铝基,在霜层初始生长阶段表现出良好的抑霜性能;

(4)冷表面温度为 -18°C 时,超疏水铝基表面结霜量为常规铝基的69.79%,霜层的平均生长速率为常规铝基的65.19%。在室外环境中超疏水翅片霜层完全融化所需时间是常规翅片的64%,且常规铝基表面及超疏水铝基表面上残留化霜水的比例分别为76.56%、28.70%。超疏水铝基翅片在整个结霜/融霜过程中表现出良好抑制结霜、加快融霜的特性。

参考文献 References

- [1] SONG Mengjie, et al. Techno-economic analysis on frosting and defrosting operations of an air source heat pump unit applied in a typical cold city[J]. Energy &

- Buildings, 2018, 162: 65-76.
- [2] 王伟, 张富荣, 郭庆慈, 等. 空气源热泵在我国应用结霜区域研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(S2): 9-13
WANG Wei, ZHANG Furong, GUO Qingci, et al. Investigation of frost status for air source heat pump in different regions of China[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(S2): 9-13.
 - [3] 刘康, 吕静. 空气源热泵除霜研究[J]. 制冷与空调, 2011, 25(4): 421-424.
LIU Kang, LÜ Jing. Study of air-source heat Pump defrosting[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 25(4): 421-424.
 - [4] 张杰, 兰菁, 杜瑞环, 等. 几种空气源热泵除霜方式的性能比较[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 47-49.
ZHANG Jie, LAN Jing, DU Ruihuan, et al. The performance comparison of several defrosting modes for air-source heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(2): 47-49.
 - [5] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces[J]. Annals of Botany, 1997, 79: 667-677.
 - [6] 王贤林, 蒋绍坚, 艾元方, 等. 疏水表面用于延缓热泵结霜及加快除霜的探讨[J]. 节能技术, 2004, 14(5): 37-38.
WANG Xianlin, JIANG Shaojian, AI Yuanfang, et al. Discuss on hydrophobic surface for preventing frosting and speeding defrosting of heat pump[J]. Energy Conservation Technology, 2004, 14(5): 37-38.
 - [7] HAYASHI Y, AOKI A, ADACHI S, et al. Study of frost properties correlating with frost formation types [J]. Journal of Heat Transfer. 1977, 99(5): 23-28.
 - [8] 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.
WANG Feng, LIANG Caihua, ZHANG Xiaosong, Anti-frosting mechanism and frost melting on superhydrophobic fin surface[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 1066-1070.
 - [9] 梁彩华, 汪峰, 吕艳, 等. 翅片表面特性对结霜过程影响的实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 745-750.
LIANG Caihua, WANG Feng, LÜ Yan, et al. Experimental study on effect of surface characteristic of fin on frost formation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(4): 745-750.
 - [10] WU X M, DAI W T, SHAN X F, et al. Visual and theoretical analyses of the early stage of frost formation on cold surfaces[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2007, 14(3): 257-268.
 - [11] 苏伟. 空气源热泵抑霜机理及无霜热泵的初步探索[D]. 南京:东南大学, 2019.
SU Wei. Study on mechanism of frost suppression on air-Source heat pump and preliminary study on frost-free heat pump[D]. Nanjing:Southeast University, 2019.
 - [12] 罗倩妮, 梁彩华. 超疏水表面液滴冻结初期冻结行为传递特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1712-1718.
LUO Qianni, LIANG Caihua. Characteristics of frost spreading during initial stage of condensed droplet freezing on superhydrophobic surface[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1712-1718.
 - [13] HUANG L Y, LIU Z L, LIU Y M, et al. Preparation and anti-frosting performance of super-hydrophobic surface based on copper foil[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(4): 432-439.
 - [14] 陈小娇, 武卫东, 汪德龙. 超疏水表面抑制结霜研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 87-92.
CHEN Xiaojiao, WU Weidong, WANG Delong. Research progress in anti-frosting performance of superhydrophobic surfaces[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 87-92.
 - [15] WANG Z J, KWON D J, DEVRIES K L, et al. Frost formation and anti-icing performance of a hydrophobic coating on aluminum[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 60: 132-137.
 - [16] 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.
WANG Feng, LIANG Caihua, ZHANG Youfa, et al. Jumping of condensation droplets on superhydrophobic surfaces at early frosting stage and its effects on frost formation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(4): 757-762.
 - [17] ZHAO Y G, YANG C. Frost spreading on microscale wettability/morphology patterned surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 136-145.
 - [18] NIEDERER D H. Frost and defrosting effects on coil heat transfer [J]. ASHARE Transaction, 1976, 82(1): 467-473.
 - [19] 刘天庆, 孙玮, 孙相彧, 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 Tianqing, SUN Wei, SUN Xiangyu, Mechanism and condition analysis of condensed drop jumping on super-hydrophobic surfaces[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012, 28(5): 1206-1212.
 - [20] 谷雅秀, 王兴龙, 王俊伟, 等. 一种铝基抑霜性实验系统:CN209069615U[P]. 2019-07-05.
GU Yaxiu, WANG Xinglong, WANG Junwei, et al. An aluminum based frost Suppression Experimental System: CN209069615U[P]. 2019-07-05.
 - [21] 刘韬, 底月兰, 王海斗, 等. 化学刻蚀法制备金属超疏水表面的方法及机理研究[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 226-235.
LIU Tao, DI Yuelan, WANG Haidou, et al. Method and mechanism of preparing metal superhydrophobic surface by chemical etching[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 226-235.

(编辑 吴海西 沈 波)