

文章编号:1673-9469(2020)04-0087-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.04.014

## 超疏水换热器抑霜/化霜性能的实验研究

范来富<sup>1</sup>,曹先齐<sup>2</sup>,戴晶晶<sup>1</sup>,文先太<sup>2</sup>,汪峰<sup>3,4\*</sup>

(1. 国网淮安供电公司,江苏淮安 223001;2. 南京工程学院 能源与动力工程学院,江苏南京 211167;  
3. 扬州大学 电气与能源动力工程学院,江苏扬州 225127;4. 东南大学 能源与环境学院,江苏南京 210096)

**摘要:**超疏水表面可有效抑制结霜,但其在换热器尺度的制备及抑霜/化霜研究较为缺乏,限制了超疏水改性技术在解决空气源热泵结霜问题上的应用。为获取超疏水换热器的抑霜/化霜性能,通过对常规翅片管换热器进行溶液刻蚀和表面氟化,整体化制备了超疏水换热器。搭建了换热器结霜/化霜实验系统,对比研究了亲水、常规和超疏水换热器的结霜与化霜特性。结果表明:在相同实验工况下结霜 60 min,超疏水换热器的结霜量比亲水和常规型分别减少了 18.0%和 38.6%;化霜时,得益于霜层从翅片表面直接剥落,超疏水换热器的化霜时间短、能耗低。

**关键词:**翅片管换热器;超疏水表面;抑霜;化霜;纳米结构

中图分类号:TK124

文献标识码:A

## Experimental Study on Anti-frosting/Defrosting Performances of Superhydrophobic Heat Exchanger

FAN Laifu<sup>1</sup>, CAO Xianqi<sup>2</sup>, DAI Jingjing<sup>1</sup>, WEN Xiantai<sup>2</sup>, WANG Feng<sup>3,4\*</sup>

(1. State Grid Huaian Power Supply Company, Huaian, Jiangsu 223001, China;  
2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China;  
3. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China;  
4. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Superhydrophobic surface can effectively inhibit frosting, but its application in the scale of heat exchanger and the study on its anti-frosting/defrosting behaviors are relatively lacking, which limits the application of superhydrophobic modification technology in solving the frosting problem of air source heat pump. In order to get the anti-frosting/defrosting performances of superhydrophobic heat exchanger, fin-tube heat exchanger with superhydrophobic surface was prepared integrally in this paper by etching bare unit in solution and then surface fluorinating. A frosting/defrosting experimental system was constructed to study the frosting and defrosting processes on heat exchangers with different surface characteristics. Experimental results showed that the frost mass on the superhydrophobic unit was reduced by 18.0% and 38.6% compared with that of the hydrophilic and bare units, when frosting 60 min under the same experimental conditions. In the aspect of defrosting, because of the direct peeling of the frost layer from fin surface, the superhydrophobic unit had short defrosting time and low defrosting energy consumption.

**Key words:** fin-tube heat exchanger; superhydrophobic surface; anti-frosting; defrosting; nanostructure

空气源热泵以环境空气作为低位热源,与电加热、锅炉供暖等方式相比,具有更高的一次能源利用率,而且可避免因燃煤造成的环境污染,是一

种既节能又环保的供暖方式<sup>[1-2]</sup>,其应用有利于提高能源利用效率,促进节能减排,并缓解我国北方“煤改清洁能源”工程中出现的天然气短缺问题。

收稿日期:2020-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52006186);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB470037)

作者简介:范来富(1973-),男,江苏淮安人,硕士研究生,高级工程师,从事综合能源利用方面的研究。

\* 通讯作者:汪峰(1989-),男,江苏南京人,博士,讲师,从事热泵空调技术方面的研究。

但是,空气源热泵冬季制热运行存在结霜问题。由于霜层的生长,室外翅片管换热器与空气间的传热热阻增大,空气流量减小,导致热泵机组的蒸发温度和压力下降,制热效率降低,严重影响机组运行稳定与安全<sup>[3-4]</sup>。因此,研究如何抑制换热器表面结霜,保障空气源热泵稳定高效运行,已成为推动空气源热泵发展的重要课题。

近年来,随着表面改性技术的迅速发展,许多学者制备出具有纳米结构或微纳二级结构的超疏水表面,并将其用于抑霜研究<sup>[5-7]</sup>。当液滴置于固体表面,两者间形成的夹角称为表面接触角 $\theta$ 。当 $\theta < 90^\circ$ ,表面为亲水表面;当 $90^\circ < \theta < 150^\circ$ ,为疏水表面;当 $\theta > 150^\circ$ ,为超疏水表面<sup>[8]</sup>。Kim等<sup>[9]</sup>在可视化观测中发现,结霜初期超疏水表面的凝结液滴分布稀疏,液滴尺寸较小且接近球形。徐文骥等<sup>[10]</sup>通过实验研究表明,超疏水表面可延迟初始凝结液滴的冻结。周艳艳等<sup>[11]</sup>比较了超疏水表面和常规表面的结霜量,在表面温度为 $-24.5^\circ\text{C}$ ,结霜120 min后,超疏水表面的结霜量为常规表面的58.3%。Jing等<sup>[12]</sup>对比了从超亲水到超疏水等5种具有不同接触角表面的结霜过程,实验结果表明超疏水表面具有最好的抑霜能力。超疏水表面不仅抑霜效果好,同时能改善化霜过程,提高化霜效率<sup>[13-15]</sup>,因而在解决空气源热泵结霜问题上具有较好的应用前景。

目前,超疏水表面抑霜的研究主要针对平板等简单几何表面,由于超疏水表面大尺度制备技术的匮乏,难以实现对换热器的整体化改性,导致换热器尺度的超疏水表面抑霜研究较少。但是,只有实现超疏水表面在换热器尺度的应用及抑霜与化霜研究,才能为超疏水抑霜技术在空气源热泵上的实际应用提供更加准确的指导。为此,本文提出了超疏水翅片管换热器的整体化制备技术,并对其抑霜与化霜性能进行研究。

## 1 超疏水翅片管换热器的制备

本文采用亲水和常规翅片管换热器与所制备的超疏水翅片管换热器进行结霜/化霜实验的对比研究。亲水和常规换热器通过换热器厂家直接购买,而超疏水换热器则是通过在实验室对常规换热器进行表面改性获得。超疏水换热器的整体化制备主要有3个步骤,依次为溶液刻蚀、去离子水煮沸和表面氟化处理。首先,将去除表面污垢后的常规换热器放入浓度为 $0.2\text{ mol/L}$ 、温度为

$80^\circ\text{C}$ 的NaOH溶液中刻蚀3 min,从而在其表面形成微米结构;然后,将具有微米结构的换热器放入沸水中持续煮沸约90 min,从而进一步在微米结构表面形成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 纳米结构;最后,将具有微纳二级表面结构的换热器放入真空罐内,利用温度为 $150^\circ\text{C}$ 的全氟癸基三乙氧基硅烷蒸气对换热器表面进行氟化处理,从而获得低能表面。

为了能够准确获得3种换热器表面的润湿性能,从每种换热器的不同位置截取4份翅片样品,并测量每份样品的接触角,取平均值后得到亲水、常规和超疏水翅片的平均接触角分别为 $13.7^\circ$ 、 $95.3^\circ$ 和 $156.8^\circ$ 。此外,超疏水翅片的滚动角为 $3.8^\circ$ ,具有高接触角和低滚动角特征,体现出换热器表面良好的超疏水性能。换热器实物图见图1,3种换热器具有相同的结构参数,翅片类型为平翅型,管路为叉流型布置,尺寸为 $300\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),管排数分别为8和2,管间距为25 mm,排间距为22 mm,管外径为10 mm,翅片间距为1.66 mm,翅片厚度为0.12 mm。

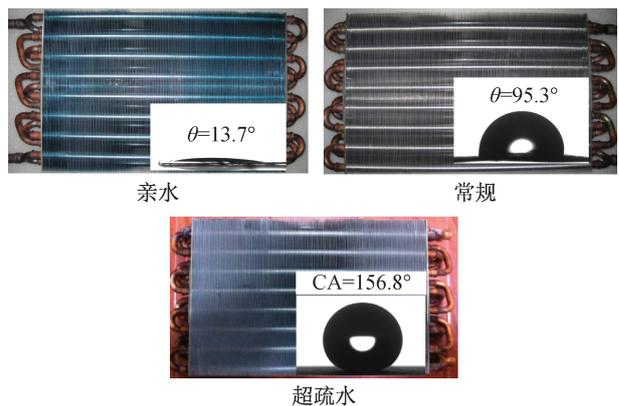


图1 翅片管换热器及翅片表面的接触角  
Fig. 1 Prepared fin-tube heat exchangers and contact angles of fin surfaces

## 2 抑霜/化霜性能实验系统

为了实现换热器表面的结霜/化霜以及对其性能参数的测量,搭建了翅片管换热器结霜/化霜实验系统,如图2所示。采用两台恒温槽分别作为换热器结霜与化霜时的冷源和热源,恒温槽温度调节范围为 $-20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ ,温控精度为 $0.01^\circ\text{C}$ 。两台恒温槽内均加入质量浓度为42.6%的乙二醇溶液(冰点为 $-24.9^\circ\text{C}$ ,沸点为 $106.1^\circ\text{C}$ )。作为冷源的恒温槽用于冷却乙二醇溶液,而作为热源的恒温槽则用于加热乙二醇溶液,恒温槽与换热器的联管路设置有三通换向阀,实现结霜/化

霜时冷热乙二醇溶液的切换。风道主要由矩形风道、圆形风道、风机和变频器构成。换热器被放置于矩形风道内。圆形风道用于安装风量计以及实现空气的平稳流动,从而便于精确测量流经换热器的风量。

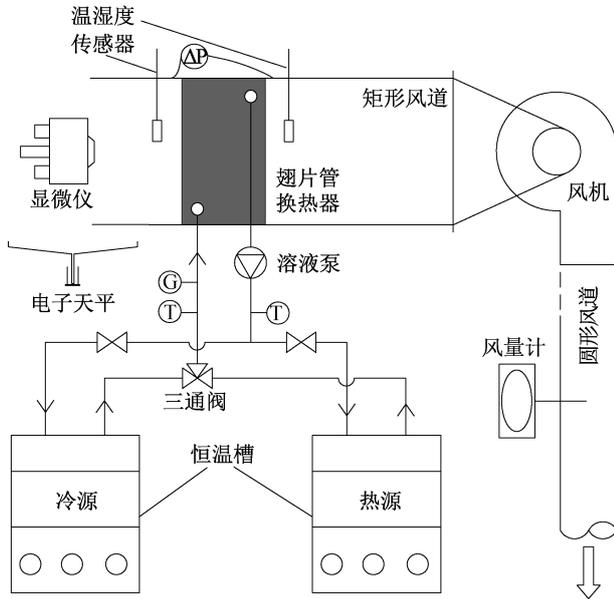


图2 结霜/化霜实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of frosting/defrosting experimental system

实验中需直接测量的参数包括换热器进出口溶液的温度和流量,换热器空气侧进出口空气的温湿度和风量,换热器表面的结霜高度以及结霜/化霜过程的可视化图像。换热器空气侧进口空气的温度和相对湿度( $T_{a,in}$ 和 $RH_{a,in}$ )由安装在换热器空气侧进口处的温湿度传感器测量,出口空气的温度和相对湿度( $T_{a,out}$ 和 $RH_{a,out}$ )通过安装在换热器空气侧出口处的温湿度传感器测量,温湿度传感器的温度量程为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度量程为 $0\sim 100\%$ ,精度为 $\pm 1.0\%$ ;流经换热器的空气体积流量( $V_a$ )由安装在圆形管道上的CP300型差压变送器测量,其测量精度为 $\pm 0.5\%$ ;通过测得空气的温湿度和风量,进而可计算出空气的含湿量和换热器表面的结霜量。利用安装在溶液管道上的PT100铂热电阻测量换热器进出口溶液温度( $T_{r,in}$ 和 $T_{r,out}$ ),其测量范围为 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;溶液质量流量( $G_r$ )由安装在管道上的转子流量计测量,其测量精度为 $\pm 1.5\%$ ;通过测得溶液温度和流量,进而可以计算出溶液流经换热器时的换热量。霜层高度的测量采用自带标尺的显微仪,通过标定可自动读取霜

层高度,并具有照相和录像功能,实现对结霜/化霜过程的可视化观测。结霜/化霜实验工况如表1所示。

表1 结霜/化霜实验工况

Tab. 1 Frosting/defrosting experimental conditions

工况	环境温 度/ $^{\circ}\text{C}$	环境相 对湿度	空气流量 / $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	入口溶液 温度/ $^{\circ}\text{C}$	溶液流量 / $(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$
结霜	0	90%	250	-10	44
化霜	0	90%	0	40	44

实验中需通过计算获得的参数包括结霜量、换热器的换热量及化霜耗热量。通过测量换热器空气侧进出口空气的温度和相对湿度,得到进出口空气的含湿量分别为 $d_{a,in}$ 和 $d_{a,out}$ ,则换热器表面单位时间的结霜量可表示为:

$$m_f = V_a \rho_a (d_{a,in} - d_{a,out}) = m_a (d_{a,in} - d_{a,out}) \quad (1)$$

式中, $m_f$ ——单位时间结霜量, $\text{kg/s}$ ;  $V_a$ ——空气的体积流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\rho_a$ ——空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $m_a$ ——空气的质量流量, $\text{kg/s}$ ;  $d_{a,in}$ 、 $d_{a,out}$ ——进口、出口的空气含湿量, $\text{g}/\text{kg}$ 。

换热器的换热量可取空气侧换热量 $Q_a$ 和溶液侧换热量 $Q_r$ 的平均值,其中:

$$Q_a = V_a \rho_a (h_{a,in} - h_{a,out}) \quad (2)$$

$$Q_r = C_{p,r} G_r (T_{r,out} - T_{r,in}) \quad (3)$$

式中, $h_{a,in}$ 、 $h_{a,out}$ ——进口、出口的空气焓值, $\text{J}/\text{kg}$ ;  $G_r$ ——溶液的质量流量, $\text{kg}/\text{h}$ ;  $T_{r,in}$ 、 $T_{r,out}$ ——进口、出口的溶液温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

通过误差传递公式计算间接计算参数的测量误差。以结霜量为例,根据公式(1)并结合误差传递公式,得到单位时间结霜量 $m_f$ 的绝对误差 $\Delta m_f$ 和相对误差 $\Delta m_f/m_f$ 分别为:

$$\Delta m_f = \sqrt{(d_{a,in} - d_{a,out})^2 \Delta m_a^2 + m_a^2 \Delta d_{a,in}^2 + m_a^2 \Delta d_{a,out}^2} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta m_f}{m_f} = \sqrt{\frac{\Delta m_a^2}{m_a^2} + \frac{\Delta d_{a,in}^2 + \Delta d_{a,out}^2}{(d_{a,in} - d_{a,out})^2}} \quad (5)$$

本文结霜实验工况下,计算得到单位时间结霜量的绝对误差为 $0.01\text{ g/s}$ ,相对误差为 $5.5\%$ 。同理可计算换热量的相对误差为 $4.6\%$ ,化霜耗热量(溶液侧换热量)的相对误差为 $3.2\%$ 。

### 3 实验结果及分析

为排除3种换热器换热性能的差异可能导致结霜/化霜性能的不同,首先对比了干工况下换热器的换热性能。亲水、常规和超疏水换热器的换

热量分别为 869.6、873.0 和 886.1 W,亲水与超疏水换热器的换热量相差不到 2.0%。这表明非结霜工况下换热器的换热性能受表面改性的影响很小。

### 3.1 抑霜性能

图 3 所示为 3 种换热器表面霜层生长的图片。结霜 10 min 后,换热器表面均出现了少量霜晶,表面特性对霜层生长的影响不明显。结霜 30 min 后,3 种换热器表面出现了明显区分:亲水和常规换热器翅片表面已经被霜层覆盖,而超疏水换热器表面结霜程度轻微,霜层只覆盖了少部分翅片。结霜 50 min 后,常规换热器的翅片间隙已完全被霜层堵塞,亲水换热器的翅片间隙也已基本堵塞,而超疏水换热器的结霜严重程度远低于它们,翅片间隙仍然清晰可见。因此,从结霜图片可以直观看出,相比于亲水和常规换热器,超疏水换热器的抑霜效果显著。

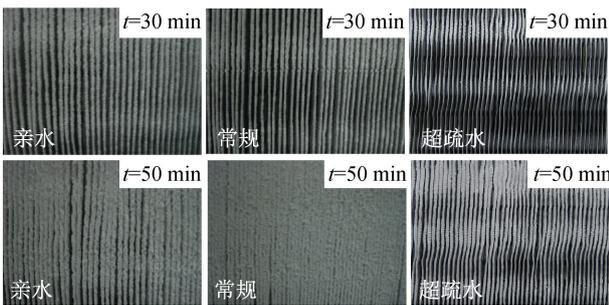


图 3 换热器表面霜层生长的图片

Fig. 3 Photographs of frost layer growth on fin-tube heat exchangers

图 4 所示为 3 种换热器表面霜层高度随结霜时间的变化。总体上,3 种换热器表面的霜层生长呈先快后慢的变化趋势。结霜初期,霜层高度随时间快速增长,在结霜时间为 20 min 时,亲水、常规和超疏水换热器表面的霜层高度分别为 0.49、0.57、0.41 mm。结霜时间达到 30 min 时,霜层的生长速度逐渐减慢。这是因为:一方面,霜层的生长逐渐阻塞了翅片间隙,进而使得空气流量降低,霜层生长速度因此减慢;另一方面,当霜层厚度达到一定高度时,水蒸气主要用于增加霜层的密度而不是霜层高度。综合这两方面原因,霜层的生长速度在结霜后期会慢慢减缓。结霜 35 min 时,常规翅片表面的霜层已经堵塞了翅片间隙,实验上已无法再测得其霜层高度,因此认为霜层高度不再增加。亲水翅片和超疏水翅片分别在 45 min 与 50 min 时堵塞翅片间隙,高度不再增加。

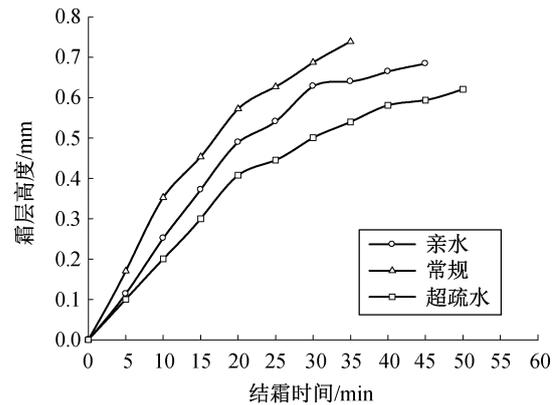


图 4 换热器表面霜层高度随时间的变化

Fig. 4 Frost thickness changing with time on fin-tube heat exchangers

图 5 为 3 种换热器表面结霜量随结霜时间的变化。结霜量的增长与时间近似成线性关系,随着时间的增加,结霜量也均匀增加。对比霜层高度随结霜时间的变化可以看出,霜层高度停止增长后结霜量仍在不断增大,这是空气中的水蒸气渗入霜层内部,霜层密度不断增加所致。结霜工况运行 60 min 后,常规、亲水和超疏水换热器表面的结霜量分别为 0.27、0.36、0.22 kg。与亲水和常规换热器相比,超疏水换热器表面的结霜量分别减少了 18.5%和 38.9%。从以上结霜高度和结霜量的对比分析可见,换热器的表面特性对霜层的生长有着显著影响,相比于亲水和常规换热器,超疏水换热器表面的抑霜效果最佳。

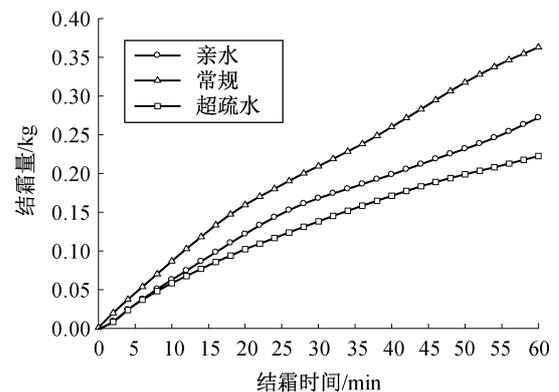


图 5 换热器表面结霜量随时间的变化

Fig. 5 Frost mass changing with time on fin-tube heat exchangers

换热器表面的结霜特性,除了直接通过霜层高度和结霜量对比外,也可以间接通过风量和换热器的换热量体现。当换热器表面结霜程度越严重时,通风量和换热量衰减越严重。图 6 给出了 3 种换热器的通风量随结霜时间的变化。结霜开始

时,换热器的风量稳定在  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 。结霜初始阶段,常规换热器的风量迅速下降,而亲水和超疏水换热器的风量下降缓慢。在结霜前 20 min 内,常规换热器的风量从  $248.5 \text{ m}^3/\text{h}$  下降到  $198.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,风量衰减了 19.9%,而亲水和超疏水换热器的衰减率分别为 4.8% 和 3.9%。之后,常规换热器的风量一直保持较大的下降幅度,而亲水和超疏水换热器呈现先缓慢下降后迅速下降的变化规律。结霜 60 min 后,常规换热器的风量接近为 0,表明翅片间隙已完全被霜层堵塞。亲水和超疏水换热器的风量分别为  $49.6 \text{ m}^3/\text{h}$  和  $125.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,降幅分别为 79.7% 和 49.9%。可见,在相同的结霜工况下,超疏水换热器表面的风量衰减最弱,由此也可推断出超疏水换热器的换热性能受结霜的影响最小。

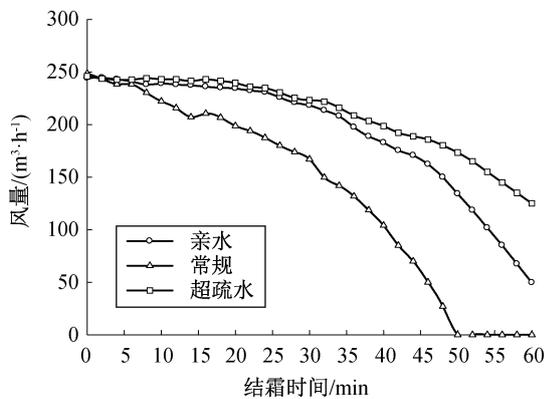


图6 换热器风量随时间的变化

Fig. 6 Air volume of fin-tube heat exchangers changing with time

图7为换热器的换热量随结霜时间的变化。在结霜 60 min 内,常规换热器的换热量从  $850.0 \text{ W}$  衰减至  $49.5 \text{ W}$ ,衰减率近 94.2%;亲水换热器的换热量从  $855.7 \text{ W}$  衰减至  $214.2 \text{ W}$ ,衰减率为 75.0%;而超疏水换热器的换热量从  $870.0 \text{ W}$  衰减至  $397.7 \text{ W}$ ,衰减率仅为 54.1%。可见,超疏水换热器通过抑制表面霜层生长,从而减轻了结霜对其换热性能的影响。

### 3.2 化霜性能

实验中观察到3种翅片表面的化霜行为及化霜滞留水差异较大,如图8所示。对于亲水和常规换热器,当翅片表面温度升高,与表面直接接触的底部霜层最先融化。融化后形成的化霜水被其上部的霜层吸收,使得霜层演变为霜-水混合物。伴随着底部霜层的不断融化,霜-水混合物中化霜水的比例逐渐增大,致使混合物出现类似于“滑冰”

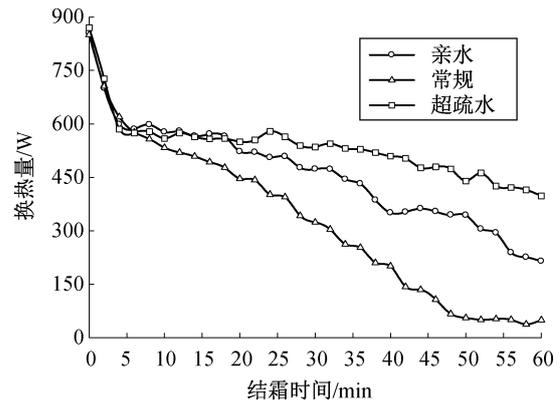


图7 换热器换热量随时间的变化

Fig. 7 Heat transfer rate of fin-tube heat exchangers changing with time

的运动,即在重力作用下沿着翅片表面向下滑动。在下滑过程中,霜-水混合物不断从翅片表面吸收热量用于霜层融化以及化霜水的蒸发。对于超疏水换热器,其表面化霜过程的特性完全不同。从图中可以看出,在经历了短暂的霜层预热和底部霜层的部分融化后,由于超疏水翅片的低粘附效应,霜-水混合物难以在翅片表面附着,因而在重力的作用下从换热器表面直接剥离,整个过程未观察到霜层融化和水膜运动。霜层融化后,对于润湿性极好的亲水换热器,化霜水平铺在翅片表面,形成了一层薄薄的水膜,这是霜-水混合物从翅片表面滑落时黏附在表面的。对于常规换热器,翅片表面形成了许多大小分布不一的“水桥”。“水桥”的形成阻碍了霜-水混合物的滑落,对化霜过程是不利的。而对于超疏水换热器,由于霜层在基本未融化的情况下从翅片表面脱落,翅片表面保持相对干燥,没有发现明显地化霜水滞留。

为了量化比较3种换热器的化霜性能,对比了评价化霜效率的两个重要指标:化霜时间和化霜能耗。实验中,亲水、常规和超疏水换热器的化霜时间分别为 180、185、105 s。与亲水和常规换热器相比,超疏水换热器的化霜时间分别缩短了 41.7% 和 43.2%。化霜总耗热量可通过单位时间耗热量在化霜时间内的叠加计算得到。亲水、常规和超疏水换热器的化霜耗热量分别为 218.6、303.3、115.5 kJ。与亲水和常规换热器相比,超疏水换热器的化霜耗热量分别减少了 47.2% 和 61.9%。可见,超疏水换热器可以大幅缩短化霜时间,节约化霜能耗。

### 3.3 抑霜/化霜性能分析

相比于亲水和普通翅片,超疏水翅片能起到

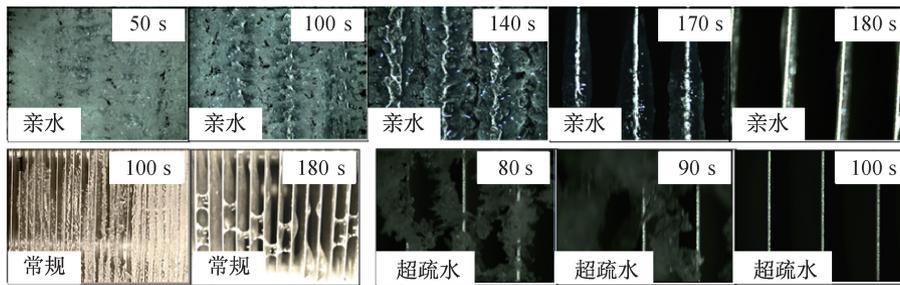


图8 换热器翅片表面的化霜行为对比

Fig. 8 Comparison of frost melting behaviors on fin-tube heat exchangers

抑制结霜和改善化霜的效果,这与其表面结构特点密切相关。通过扫描电子显微镜获得了所制备的超疏水表面的微结构,如图9(a)所示,超疏水表面存在大量分布均匀的纳米结构,并呈散开的倒楔形花状。结霜初始阶段的凝结液滴冻结后,水蒸气在其表面凝华形成霜晶,可以说,初始凝结液滴是后续霜层生长的基体。超疏水表面的纳米结构及低能表面确保了凝结液滴不会润湿表面微结构,即凝结液滴以 Cassie 模式存在于翅片表面,如图9(b)所示。图9(c)中,当凝结液滴与翅片表面呈 Cassie 状时,固-液接触面积  $A_{sl} = f\pi r_1^2 \sin^2 \theta, f < 1$ ,从而减少了液滴与翅片表的实际接触面积(导热面积)。因此,构造翅片表面的纳米结构,使凝结液滴呈 Cassie 状,对削弱翅片与液滴间的传热,延缓后续霜晶的生长具有重要意义。对于具有纳米结构的超疏水翅片,冻结液滴与表面呈 Cassie 状,导致翅片与冻结液滴间的传热削弱,从而延缓了冻结液滴表面的温降,减少了热力过冷度,起到减缓霜晶生长速率的作用。

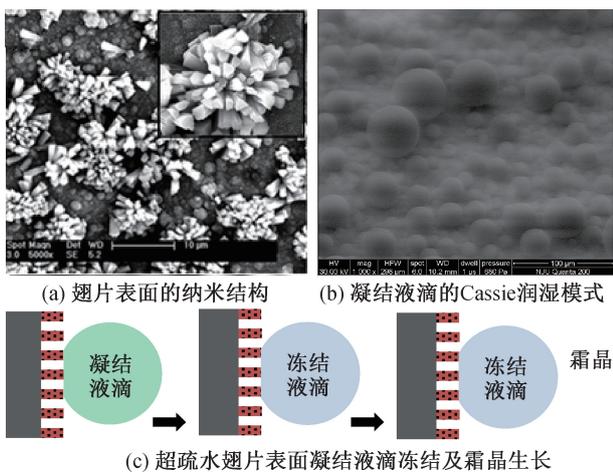


图9 超疏水翅片抑制结霜的原理图

Fig. 9 Schematic diagram of anti-frosting of superhydrophobic fin

化霜方面,如上文所述,冻结液滴与翅片表面呈 Cassie 状,因而在冻结液滴与超疏水翅片的纳米粗糙结构间形成了空气垫。图10为超疏水翅片化霜时霜层脱落的原理示意图。在纳米结构与霜层形成的封闭空间内,霜层受到内部空气产生的压力  $F_{ip}$ 。同时,霜层还受到大气压力  $F_{atm}$ 、超疏水翅片的黏附力  $F_{sf}$  以及自身重力  $F_g$ 。当化霜开始,在纳米结构与化霜水形成的封闭空间内,空气受热膨胀,压力  $F_{ip}$  变大。由于超疏水翅片的黏附性较弱,化霜水在热气压的作用下与翅片分离,并在重力作用下与未融化的霜层一起脱离表面。因此,要使得霜层在化霜初期从翅片表面脱离,关键是纳米结构与霜层形成的封闭空间内空气受热膨胀,同时翅片表面的黏附性较弱才行。

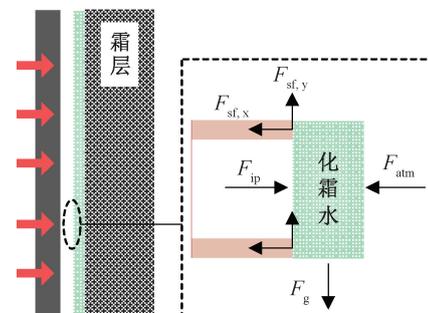


图10 超疏水翅片化霜时霜层脱落的原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of frost shedding from superhydrophobic fin surface

### 4 结论

1) 通过对常规翅片管换热器进行溶液刻蚀和表面氟化,整体化制备了具有超疏水表面的换热器。翅片表面的接触角和滚动角分别为  $156.8^\circ$  和  $3.8^\circ$ ,具有高接触角和低滚动角特征。

2) 结霜工况运行 60 min 后,与亲水和常规换热器相比,超疏水换热器表面的结霜量分别减少了 18.0% 和 38.6%,抑制效果最佳。由于超疏水换热器表面霜层生长缓慢,风量衰减最弱,其换热

性能受结霜的影响也最小。

3)与亲水和常规换热器相比,超疏水换热器的化霜时间分别缩短了41.7%和43.2%,化霜耗热量分别减少了47.2%和61.9%。超疏水换热器可缩短化霜时间,节约化霜能耗,减少化霜水的滞留。

4)超疏水翅片表面的纳米结构,使凝结液滴在表面呈Cassie状,对削弱翅片与液滴间的传热,延缓后续霜晶的生长具有关键作用。并且,要使得霜层在化霜初期从翅片表面脱离,关键在于纳米结构与霜层形成的封闭空间内空气受热膨胀。

#### 参考文献:

- [1] SONG M J, DENG S M, DANG C B, et al. Review on Improvement for Air Source Heat Pump Units During Frosting and Defrosting[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 1150-1170.
- [2] 张又升, 赵敬德, 王金龙. 空气源热泵室外换热器翅片管的融霜过程分析[J]. *流体机械*, 2016, 44(6): 66-71.
- [3] 曲明璐, 李封, 余倩, 等. 空气源热泵不同蓄能除霜模式对室内热舒适度的影响[J]. *流体机械*, 2016, 44(1): 60-65.
- [4] LIU J D, SUN Y Y, WANG W, et al. Performance Evaluation of Air Source Heat Pump under Unnecessary Defrosting Phenomena for Nine Typical Cities in China[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 74: 383-396.
- [5] WANG F, LIANG C H, ZHANG X S. Research of Anti-frosting Technology in Refrigeration and air Conditioning Fields: A Review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 707-722.
- [6] ZHANG P, LV F Y. A Review of the Recent Advances in Superhydrophobic Surfaces and the Emerging Energy-related Applications[J]. *Energy*, 2015, 82: 1068-1087.
- [7] 汪德龙, 武卫东, 陈小娇. 金属基体超疏水表面抗凝露抗结霜特性的研究进展[J]. *制冷技术*, 2015, 35(1): 41-47.
- [8] ZHANG Y F, GE D T, YANG S. Spray-coating of Superhydrophobic Aluminum Alloys with Enhanced Mechanical Robustness[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, 423: 101-107.
- [9] KIM H, KIM D, JANG H, et al. Microscopic Observation of Frost Behaviors at the Early Stage of Frost Formation on Hydrophobic Surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 861-867.
- [10] 徐文骥, 宋金龙, 孙晶, 等. 铝基体超疏水表面结冰结霜特性研究[J]. *制冷学报*, 2011, 32(4): 9-13.
- [11] 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.
- [12] JING T, KIM Y, LEE S, et al. Frosting and Defrosting on Rigid Superhydrophobic Surface[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 276: 37-42.
- [13] WANG F, LIANG C H, ZHANG X S. Visualization Study of the Effect of Surface Contact Angle on Frost Melting Process under Different Frosting Conditions[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 64: 143-151.
- [14] BORETKO J B, SRIJANTO B R, NGUYEN T D, et al. Dynamic defrosting on nanostructured superhydrophobic surfaces[J]. *Langmuir*, 2013, 29(30): 9516-9524.
- [15] 汪峰, 梁彩华, 张小松. 超疏水翅片表面的抑霜机理和化霜特性[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5): 1066-1070.
- [16] ALEXANDROV D V, GALENKO P K. Selection Criterion for the Growing Dendritic Tip at the Inner Core Boundary[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2013, 46(19): 195101.
- (责任编辑 周雪梅)
- 
- (上接第56页)
- [5] 梁仁旺, 张明, 白晓红. 水泥土的力学性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2001, 22(2): 211-213.
- [6] 刘旭东. 预拌流态固化土技术在地下综合管廊基槽回填工程中的应用[J]. *建筑技术开发*, 2018, 45(04): 61-62.
- [7] 谢永利, 刘保健. 公路软基沉降计算新理论及其仿真计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2001, 1(3): 32-36.
- [8] TAVENAS F A. The Behavior of Embankment on Clay Foundations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 17(2): 236-259.
- [9] ZHANG Liming. Settlement Patterns of Soft Soil Foundations Under Embankments[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 774-781.
- [10] 陈建峰, 石振明, 沈明荣. 宽路堤软土路基沉降的有限元模拟[J]. *公路交通科技*, 2003, 20(4): 23-25.
- [11] HAN J, GABR M A. Numerical Analysis of Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Earth Platforms over Soft Soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(1): 44-53.
- [12] 司晓炜. 公路路基加宽施工中的土工格栅加筋优化技术应用[J]. *公路工程*, 2017(3): 184-186.
- [13] JTG D30—2015, 公路路基设计规范[S].
- [14] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
- (责任编辑 王利君)