

应用于热泵系统的复合纳米涂层冷凝及抑霜性能研究

朱龙潜*, 贺 伟

广州市香港科大霍英东研究院, 建筑物能源研究中心, 广东 广州

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月8日

摘 要

热泵系统是冬季或寒冷地区的主要供热设备之一。结霜会削弱换热器的换热性能, 导致热泵的性能下降, 与此同时, 除霜的能耗占到了热泵系统总能耗的10%以上。现有的抑制结霜的技术效果不佳, 新型抑霜技术的研发和应用受到了大量学者的重视。本文研发了一种复合纳米结构的表面涂层, 通过在超疏水表面上添加亲水的二氧化硅微米级颗粒, 控制液滴在表面的大小, 加强液滴在表面的自弹跳现象, 具有加快冷凝速度、抑制结霜的效果。经实验验证, 与铜表面相比, 复合纳米涂层冷凝速度提高了约80%; 与常见的疏水涂层相比, 复合涂层出现结霜现象由4.5分钟延迟到12.3分钟, 从结霜出现到覆盖表面80%面积所需要的时长从0.8分钟延迟到3.3分钟。

关键词

复合纳米涂层, 冷凝速度, 抑霜, 热泵

Performance Investigation on the Condensation and Frost-Controlling of a Composite Nano Coating in Heat Pump Systems

Longqian Zhu*, Wei He

Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 朱龙潜, 贺伟. 应用于热泵系统的复合纳米涂层冷凝及抑霜性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(9): 1705-1711.
DOI: 10.12677/ms.2025.159182

Abstract

A heat pump system is one of the main heating equipment in winter or cold regions. However, frosting can weaken the heat transfer performance of the heat exchanger, leading to a decrease in the performance of the heat pump. At the same time, the energy consumption of defrosting accounts for more than 10% of the total energy consumption of the heat pump system. The existing frost suppression techniques are ineffective, and the development and application of new frost suppression technologies have received a lot of attention. This article develops a composite nano surface coating, which can control the size of droplets on a superhydrophobic surface by adding hydrophilic silica micro nano particles, enhance the self bouncing phenomenon of droplets on the surface. It can accelerate condensation speed and suppress frosting. Through experimental verification, compared with the copper surface, the condensation speed of the composite nano coating has been increased by about 80%. Compared with a common hydrophobic coating, the occurrence of frosting in composite coatings is delayed from 4.5 minutes to 12.3 minutes, and the time required from frosting to covering 80% of the surface area is delayed from 0.8 minutes to 3.3 minutes.

Keywords

Composite Nano Coating, Condensation Speed, Frost Suppression, Heat Pump

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

区域能源系统是为了满足某一特定区域内建筑群落的集中供热、供冷需求, 由专门的区域能源站集中制造热冷源等, 并通过输配管网进行供给的一个或多个大规模生活热水、空调热、冷源系统。空气能热泵热水器是区域能源系统内主要设备之一。由于空气能热泵主要在冬季或寒冷地区使用, 室外换热器受环境空气温度、湿度的影响, 表面会结霜, 不断累积的霜层会阻碍盘管间的空气流动, 削弱换热性能, 从而导致热泵的性能下降。因此热泵需要采用适当的方法抑制换热器表面结霜, 或者进行周期性除霜。有相关的研究表明: 除霜过程的能耗占到了空气源热泵制热运行总能耗的 10% [1]。现有的抑制结霜的技术并不能起到很好的效果; 而且常规的周期性除霜, 容易导致除霜不干净, 从而有部分霜残留, 在长年累月下, 依旧会较大的影响热泵性能。

针对实际运行中常规除霜的方法存在的不足, 国外也提出了一些新型除霜的系统形式和除霜的控制方式来优化除霜过程[2]。Hayashi 等将霜层的形成过程分为霜晶的形成阶段、霜层成长阶段和霜层完全发展阶段[3]。Lee 等探究了霜层厚度的增长随着冷表面温度降低和空气含湿量增大而加快[4]。在热泵技术 2001 年进入到国内后, 国内学者对于空气源热泵的多种除霜方法展开了大量研究[5]-[7]。

水蒸气在冷表面上凝结过程的时间以及数量和大小都会对结霜的过程有着重要的影响, 而凝结的状况又与表面特性息息相关, 因此冷表面特性将会对霜层的形成过程起着至关重要的作用[8]-[10]。周艳艳制备了仿生疏水表面, 具有一定的抑霜效果[11]。有研究指出, 亲水表面在相对低温低湿的环境下抑霜效果较好, 而疏水表面在相对高温高湿的环境下抑霜效果较好[12] [13]。何桂香等制备出超疏水铝基翅片, 表现出良好的抑制结霜、快速融霜的特性[14]。单一的亲水或疏水涂层已经被大量验证能对抑制结霜有所帮助, 然而性能仍然不够理想, 同时亲疏水复合涂层对抑制结霜、提高除霜效率的研究仍有不足。

本文是以提高空气能热泵除霜效率为目的, 开发新型除霜换热器, 改善制热结霜, 提高能效; 针对不同的热泵使用环境, 调整优化应用于翅片上超疏水-亲水混合纳米结构的表面涂层, 加强液滴在表面的自弹跳现象, 极大提升液滴从表面脱离的速度, 加快除霜速度, 同时加强换热抑制结霜、提高除霜效率。

2. 实验详解

在本文中, 研发了一种复合纳米结构的表面涂层, 涂覆在翅片表面。该涂层通过在超疏水表面上添加亲水的二氧化硅微纳米级颗粒而形成的混合纳米结构涂层, 控制液滴在表面的大小, 加强液滴在表面的自弹跳现象。通过超疏水的特性, 极大的降低液滴对表面的附着力, 液滴从表面脱离的速度, 提高除霜效率的同时, 提升换热效率[15]。针对不同使用环境的智能热泵供热系统需求, 在超疏水-亲水混合纳米结构的表面涂层的基础上进行了有针对性的改良和完善, 通过数值仿真、实验测试等手段, 研究、调整、优化局部亲水颗粒的尺寸、间隔、密度等, 实现最佳性能。

2.1. 复合纳米涂层的制备

复合纳米涂层制备主要包括制备超疏水基底及亲水化两步, 具体步骤如下[16]:

(a) 依次使用 400 目、600 目、800 目、1200 目、1500 目及 2000 目的砂纸将铜板打磨光滑;

(b) 将铜板浸入丙酮溶液 10 分钟并取出;

(c) 将铜板浸入乙醇溶液 10 分钟并取出;

(d) 将铜板浸入 AgNO_3 溶液 20 分钟并取出;

(e) 将铜板浸入十七氟-1-十硫醇(HDFT)二氯甲烷溶液 30 分钟并取出, 铜板表面将形成超疏水界面, 形成超疏水基底;

(f) 将 3.5 g 醇溶性尼龙和 100 mL 甲醇溶液混合, 在常温下以 100 rpm 的速度搅拌 24 小时; 随后在 60°C 的温度下以 100 rpm 的速度搅拌 1 小时, 形成亲水溶液;

(g) 将亲水溶液雾化成颗粒, 通过静电喷涂方式, 将颗粒沉积在超疏水基底上, 完成复合纳米涂层的制备。

静电喷涂过程中, 基底竖直放置, 喷嘴与基底间隔 110 mm 水平放置。溶液挤出速度为 0.12 mL/h, 液滴会因电场作用自动从喷嘴(-0.5 kV)射向基底(+5.5 kV)。制备完成后, 具有复合纳米涂层的铜板如图 1 所示。



Figure 1. Copper plate with composite coating
图 1. 具有复合涂层的铜板

通过水滴在铜片、超亲水涂层、超疏水涂层表面的接触角实验确定其特性。实验结果如表 1 所示。

Table 1. Results of the contact angle experiment

表 1. 接触角实验结果

铜片表面	超亲水表面	超疏水表面
79°	3°	164°

2.2. 冷凝性能测试平台搭建及实验测试

测试平台实物图如图 2 所示。测试平台搭建于控温控湿的环境仓内，主要部件有：恒温水箱、水泵、电动球阀、换热器、电子秤以及各类传感器等。

实验过程中，具有复合涂层的实验样品背面紧贴在换热器上，正面裸露在环境仓中。通过恒温水箱提供稳定温度及流量的冷却水及换热器。冷凝水在实验样品正面冷凝并滴落到采集器中，并通过电子秤测量冷凝水重量。实验平台中，所有由传感器所得到的数据都由数据采集设备所采集并直接导入电脑中。在电脑中的数据采集界面由 NI LabVIEW 构建。数据每 3 秒采集一次并上传到电脑中。

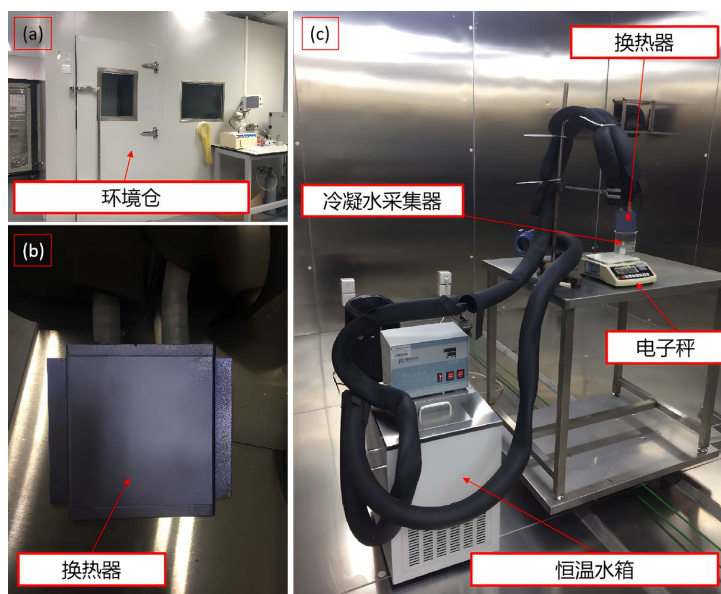


Figure 2. The testing platform (a) Environmental Chamber; (b) Heat exchanger; (c) Main part of the testing platform

图 2. 实验平台实物图(a) 环境仓；(b) 换热器；(c) 实验平台主体

表 2 为冷凝性能实验的运行参数设置。表 2 中， $T_{cool,in}$ 为冷却水进水温度； T_{ec} 为环境仓内温度； RH 为环境仓内相对湿度； \dot{m}_{cool} 为冷却水流速； t 为单组实验时间。通过控制变量法，逐个测试在不同的冷却水温度以及环境仓内相对湿度下的冷凝速度。测试冷却水温度对冷凝速度的影响时，相对湿度控制在 50%；测试相对湿度对冷凝速度的影响时，冷却水温度控制在 10℃。

在本文中，在不同的冷却水温度及湿度下对铜表面以及具有复合涂层的实验样品进行了实验研究，实验结果如图 3 及图 4 所示。随着冷却水温度的上升，铜表面以及实验样品表面，冷凝速度均有所下降。在实验过程中，实验样品表面的冷凝速度比铜表面平均提高了 81.5%。随着相对湿度的下降，铜表面以及实验样品表面，冷凝速度同样有所下降。在实验过程中，实验样品表面的冷凝速度比铜表面平均提高了 82.9%。

Table 2. Setting of operating condition
表 2. 运行参数设置

参数	数值	单位
$T_{cool,in}$	4, 7, 10, 13, 16	°C
T_{ec}	25	°C
t	120	min
\dot{m}_{cool}	2	kg/min
RH	35, 50, 65, 80, 95	%

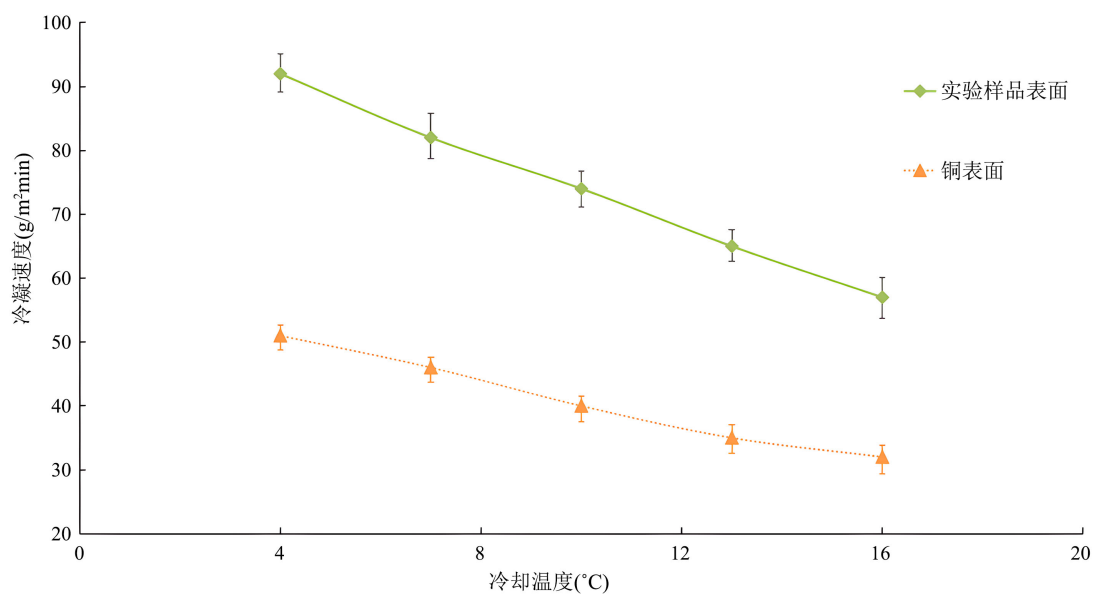


Figure 3. The influence of cooling temperature on condensation rate

图 3. 冷却温度对冷凝速度的影响

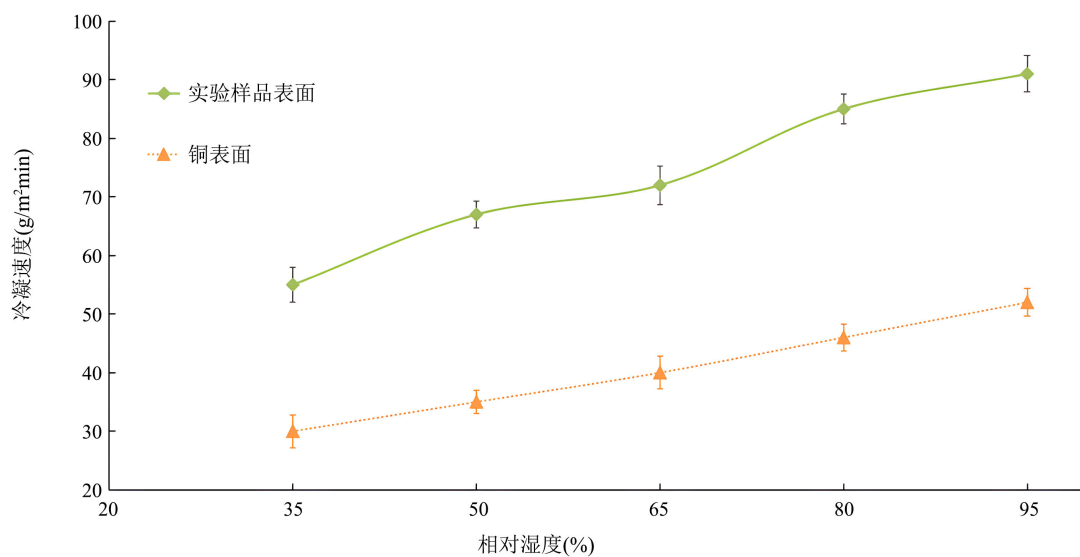


Figure 4. The influence of relative humidity on condensation rate

图 4. 相对湿度对冷凝速度的影响

2.3. 结霜速度实验测试

在本文中, 将本项目的实验样品表面涂层与常见的换热器表面疏水涂层进行了结霜速度对比。经接触角实验确定, 市面上常用的疏水涂层接触角约为 115° 。

为了营造稳定的测试环境, 环境仓内环境温度维持在 25°C , 并向仓内注满纯气态 N_2 , 用以消除液体蒸发及避免湿度变化。涂层背面则保持 -5°C 的温度, 用于启动从过冷凝结到液滴冻结的多相转变。

由图 5 可见, 在实验开始时, 实验样品表面涂层及疏水表面涂层均无液滴。随着时间增长, 2 个涂层表面均开始逐渐出现液滴。在 4.5 分钟时, 疏水表面涂层开始出现结霜现象; 在 5.3 分钟时, 疏水表面涂层约有 80% 的面积有结霜现象, 而实验样品表面涂层仍未见结霜。直至 12.3 分钟后, 实验样品表面涂层开始出现结霜现象, 15.5 分钟后, 实验样品表面涂层约有 80% 的面积有结霜现象。无论结霜出现的时间, 以及从结霜出现到覆盖 80% 面积所需要的时长, 均有所延迟。由此可见, 相对于常见的换热器表面疏水涂层, 本文的实验样品表面涂层对于结霜现象有较好的抑制作用。

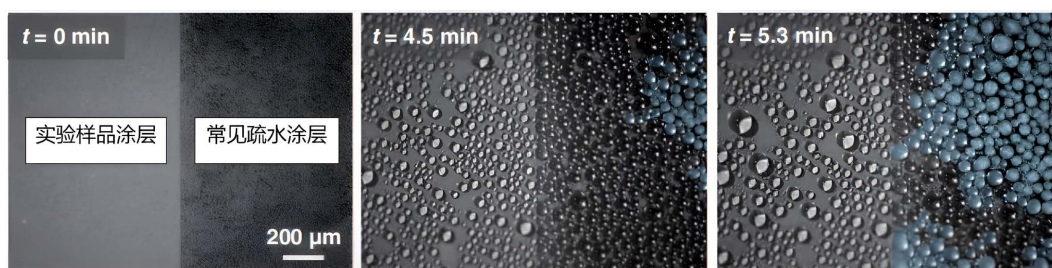


Figure 5. Comparison of condensation-to-freezing dynamics between the Experimental sample coating and common hydrophobic coatings for heat exchangers

图 5. 实验样品涂层与常见的换热器疏水涂层的结霜对比

3. 结果与讨论

在本文中, 通过在超疏水表面上添加亲水的二氧化硅微纳米级颗粒, 设计及制备了一种具有复合纳米结构的表面涂层。该涂层能控制液滴在表面的大小, 加强液滴在表面的自弹跳现象, 从而具有加快冷凝速度、抑制结霜速度的效果。

在冷凝测试中, 与铜表面相比, 复合纳米涂层冷凝速度提高了约 80%; 在结霜测试中, 与常见的疏水涂层相比, 复合涂层出现结霜现象由 4.5 分钟延迟到 12.3 分钟, 从结霜出现到覆盖表面 80% 面积所需要的时长从 0.8 分钟延迟到 3.3 分钟。

由此可见, 本文提出的复合纳米涂层, 在提升冷凝速度、抑制结霜方面均具有一定的优势, 未来在热泵系统室外换热器上有一定的应用潜力和空间。

基金项目

广州市科技计划市校(院)企联合资助项目(2024A03J0319)。

参考文献

- [1] 张朝晖, 王若楠, 高钰, 等. 热泵技术的应用现状与发展前景[J]. 制冷与空调, 2018, 18(1): 1-8.
- [2] 曾晓程, 王俊, 王铁军, 等. 空气能热泵智能除霜技术研究[J]. 低温与超导, 2017, 45(12): 91-94.
- [3] Hayashi, Y., Aoki, K. and Yohara, H. (1977) Study of Frost Formation Based on Atheoretical Model of the Frost Layer. *Heat Transfer Japanese Research*, **6**, 79-94.
- [4] Lee, Y.B. and Ro, S.T. (2002) Frost Formation on a Vertical Plate in Simultaneously Developing Flow. *Experimental*

Thermal and Fluid Science, **26**, 939-945. [https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(02\)00216-9](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(02)00216-9)

- [5] 王虹. 几种空气源热泵除霜方式及性能比较[J]. 内燃机与配件, 2017(18): 130-132.
- [6] 孙福涛, 蒲亮. 一种空气源热泵除霜新技术研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17(4): 7-10.
- [7] 胡斌, 王如竹, 骆名文, 等. 空气源热泵新型除霜技术及智能除霜策略[J]. 制冷技术, 2018, 38(5): 1-6.
- [8] 汪峰, 梁彩华, 吴春晓, 等. 疏水性铝翅片表面的结霜/融霜特性[J]. 中南大学学报, 2016, 47(4): 1368-1373.
- [9] 姜益强, 柴永金, 姚杨. 延缓空气源热泵机组结霜的研究现状与进展[J]. 制冷与空调, 2009, 23(1): 1-5.
- [10] 翟丽华, 邵英. 表面涂层抑制结霜的应用研究现状[J]. 家电科技, 2013(7): 76-77.
- [11] 周艳艳. 铝基超疏水表面抗结霜结冰特性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [12] 杨剑. 抑制结霜的实验研究和霜层生长的模拟与预测[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006.
- [13] 蔡亮亮, 侯普秀, 杨剑. 吸水性涂层在霜层生长初期的抑霜[J]. 江苏大学学报, 2008, 29(3): 227-230.
- [14] 何桂香, 谷雅秀, 段佳慧, 等. 空气源热泵超疏水抑霜的机理分析及性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2021, 53(6): 860-866.
- [15] Zhu, Y., Tso, C.Y., Ho, T.C., Leung, M.K.H. and Yao, S. (2021) Coalescence-Induced Jumping Droplets on Nanostructured Bipolar Surfaces with Contact Electrification Effects. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 11470-11479. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c22055>
- [16] Li, X., Wang, N., He, J., Yang, Z., Zhao, F., Wang, K., et al. (2020) One-Step Preparation of Highly Durable Superhydrophobic Carbon Nanothorn Arrays. *Small*, **16**, Article ID: 1907013. <https://doi.org/10.1002/sml.201907013>