

## 环境效应与防护

## 间接制冷换热器除霜方案研究

马建军, 刘海燕

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 对以载冷剂为冷媒, 用于极端低温气候环境实验室的换热器的除霜问题进行研究, 获得可行的除霜设计方案。**方法** 从抑霜和融霜两个方面出发, 设计包含变片距结霜换热器的内融霜和外融霜两种除霜方案, 并搭建实验台对除霜方案进行实验研究。**结果** 变片距结霜换热器迎风面结霜严重, 背风面轻度结霜, 内融霜可在 3.5 min 完成, 而外融霜需要 2 倍的时间。内融霜结束后继续加热换热器, 并配合新风置换可在 20 min 内除去化霜后的附着水。**结论** 变片距结霜换热器能够有效对来流空气进行预除湿, 抑制主换热器结霜, 内融霜效果最好且目前以蒸汽为热源、内融霜为主、新风吹扫为辅的除霜系统已应用于大型气候环境实验室。

**关键词:** 气候环境实验室; 载冷剂; 结霜换热器; 变片距; 除霜

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.011

**中图分类号:** TJ07

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)07-0050-05

## Defrost of Heat Exchangers Using Secondary Refrigerant

MA Jian-jun, LIU Hai-yan

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT: Objective** To solve the frost problem of heat exchangers used in extreme low temperature climatic test chamber with liquid secondary refrigerant as coolant to obtain feasible design scheme for defrost. **Methods** Based on the aspects of restrain-frost and defrost, two defrost systems including variable fin spacing frost-heat exchanger were designed and studied by experiment. **Results** The windward side of the variable fin spacing frost-heat exchanger frosted heavily while the leeward frosted lightly. Defrost time consumed by inner-defrost system was 3.5min while out-defrost system needs 7min. In combination with replacement of refresh air, water retained on the surface of frost-heat exchanger could be removed in 20min by flowing heat after inner-frost. **Conclusion** The variable fin spacing frost-heat exchanger can pre-dehumidify the air and protect the main heat exchanger. The inner-defrost system with good inner defrosting effect supported by fresh air purging and with steam as the heat source is successfully applied in large climatic environmental test laboratory.

**KEY WORDS:** climatic environmental test chamber; secondary refrigerant; frost-heat exchanger; multiple fin pitch; defrost

气候环境实验室采用翅片管式换热器对空气进行直接温度处理<sup>[1-2]</sup>, 可实现极端温度范围为-55~+74℃, 换热器采用液态载冷剂作为冷媒。在低温环境下还要进行降雪、冻雾、冻雨等低温高湿试验, 这将导致换热器结霜。在结霜早期, 由于霜层的形成增加了传热表面的粗糙度以及换热面积, 使总换热系数有所增加。随着霜层厚度和导热热阻逐渐增加, 风侧

阻力增大, 总换热系数降低<sup>[3]</sup>。若不及时除霜将导致实验室温度失控, 甚至导致试验失败。除霜的方式<sup>[4-5]</sup>可概括为两种: 抑制结霜和主动融霜。抑制结霜技术手段主要包括通过降低来流湿度、表面改性等被动手段来抑霜, 利用外加电场、磁场、超声波等主动手段抑霜。以上抑霜手段推迟了结霜发生的时间或减小结霜速度, 并不能完全避免结霜。换热器结霜后,

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-05-07

作者简介: 马建军(1989—), 男, 安徽阜阳人, 主要研究方向为飞机气候环境试验技术。

还须采取措施进行融霜。目前针对换热器的融霜研究主要集中在制冷剂直膨式蒸发器的融霜, 有多种成熟手段<sup>[6-12]</sup>, 如电加热融霜、反向循环热气融霜、液体冷媒融霜、基于能量存储的旁通融霜等。对于采用液体冷媒的超低温换热器的除霜缺乏研究。

## 1 换热器除霜方案设计

为将空气处理至极端低温, 通常需要两套或多套适用温度不同的换热器, 不同的换热器内充注适用温度不同的载冷剂, 如图 1 所示。中温换热器用于  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的工况, 低温换热器用于  $-25\sim-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  的工况。由于实验室温度低至  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 且有低温高湿的试验工况, 换热器的结霜将很严重, 若频繁进行融霜, 势必会影响实验室温度稳定性。因此, 换热器的除霜将从两方面考虑: 一是采取措施抑制结霜, 降低结霜的影响, 避免频繁进行融霜; 二是设计融霜系统, 在适当的时机对换热器进行融霜。

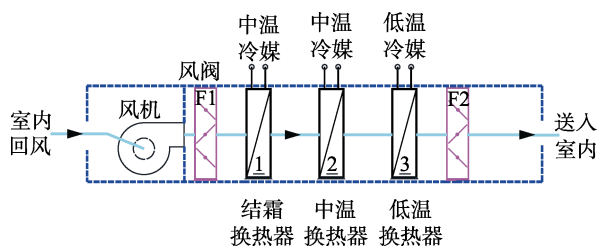


图 1 气候实验室空气处理机组

低温工况下, 换热器首先在迎风面开始结霜, 在风道内增加一台“结霜换热器”, 置于主换热器前面, 对来流空气进行预除湿, 进而降低主换热器的结霜风险, 保证主换热器的换热能力。结霜换热器为变翅片间距换热器, 迎风面片距较大, 背风面片距较小。这种结构可以保证即使迎风面结霜严重也不会阻塞空气流通<sup>[13]</sup>, 提高系统对结霜的耐受度, 避免频繁停机融霜。

随着换热器结霜越来越严重, 空气流通面积会越来越小, 阻力会越来越大, 因此还需要采取措施对换热器进行融霜。可利用蒸汽作为热源, 设计加热系统, 在合适时机对换热器进行加热融霜。第一种融霜方案是增设一套冷媒旁路循环, 串联一台蒸汽加热器, 如图 2 所示。需要进行融霜时, 关闭主路阀门 K1 和风阀 F1、F2, 打开旁路阀门 K2, 开启循环泵和蒸汽加热器, 通过循环加热换热器内的冷媒, 进而加热换热器, 对换热器进行加热融霜。称这种对换热器由内及外加热的方式为内融霜方案。

第二种融霜方案是增设一套空气旁路循环, 串联一台蒸汽加热器, 如图 3 所示。需要进行融霜时, 关闭主路风阀 F1、F2, 打开旁路风阀 F3、F4, 启动蒸汽加热器和旁路风机, 将换热器段的空气循环加热, 对换热器进行热空气吹扫融霜。称这种对换热器由外

及内加热的方式为外融霜方案。

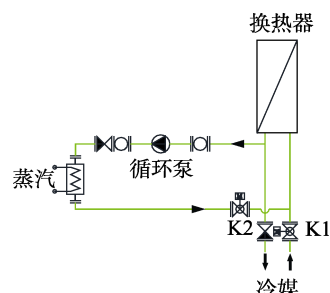


图 2 内融霜系统方案

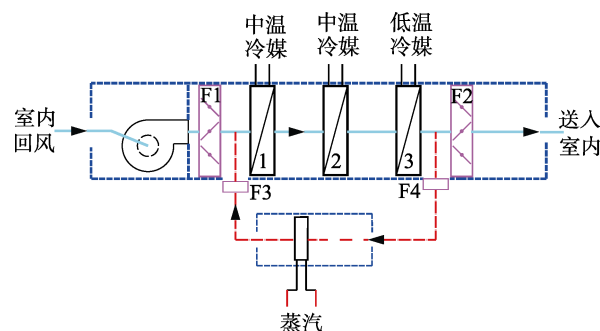


图 3 外融霜系统方案

## 2 除霜方案实验研究

### 2.1 实验系统

根据气候环境实验室空气处理机组的运行原理和除霜系统的设计方案, 搭建了融霜试验平台, 如图 4 所示。对结霜换热器的功能和内、外融霜方案的可行性进行了实验研究。

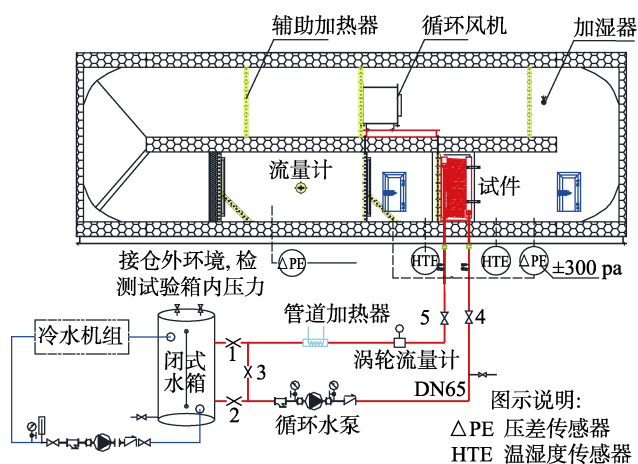


图 4 换热器融霜实验平台结构

试验系统主要包括以下部分。

- 1) 冷水机组: 为单级压缩制冷机组, 通过蒸发器冷却冷媒, 为系统提供冷源。
- 2) 闭式水箱: 为冷媒循环提供稳定的压力, 冷媒为 SH-60。

3) 变频循环水泵: 驱动冷媒在管道和换热器内流动, 泵的流量为  $16 \text{ m}^3/\text{h}$ 。实际运行中根据涡轮流量计来控制流量, 使得换热器管内载冷剂流速与设计值  $1.33 \text{ m/s}$  保持一致。

4) 管道电加热器: 加热功率为  $20 \text{ kW}$ , 对冷媒进行加热。为方便搭建系统, 在此以电加热器代替蒸气加热器作为热源, 不影响试验结果。

5) 变频循环风机: 驱动空气流过换热器, 风机功率为  $5 \text{ kW}$ , 风量为  $14\,800 \text{ m}^3/\text{h}$ , 使换热器迎面风速与设计值  $3.93 \text{ m/s}$  一致。

6) 辅助电加热器: 加热功率为  $15 \text{ kW}$ , 对空气加热, 以电加热代替蒸汽加热, 不影响试验结果。

7) 干蒸汽加湿器: 对空气进行加湿, 湿空气遇到低温换热器结霜。

8) 换热器试件: 换热器的迎风面尺寸为  $1200 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ , 为变片距换热器, 材质为铜管铝翅片, 一共 10 排, 尺寸分别为  $3R24 \text{ mm}+3R12 \text{ mm}+4R8 \text{ mm}$ 。铜管外径为  $16.6 \text{ mm}$ , 翅片厚度为  $0.3 \text{ mm}$ 。

## 2.2 实验步骤

在实验室  $-5^\circ\text{C}$  左右的冻雨试验中, 实验室中的湿度最大, 换热器表面最易结霜, 因此主要进行了  $-5^\circ\text{C}$  的结霜和除霜实验。实验共分为两个阶段, 第一阶段是换热器结霜, 第二阶段进行换热器内融霜或外融霜, 各阶段的实验步骤如下。

1) 换热器结霜: 打开阀门 1、2、4、5, 关闭阀门 3; 开启循环水泵、制冷机组、循环风机; 观察载冷剂温度及舱内空气温度; 待空气温度达到目标温度  $-5^\circ\text{C}$  后, 开启干蒸汽加湿器向舱内送入蒸汽, 换热器结冰, 待换热器两侧的压差  $\Delta P$  增加值达到  $300 \text{ Pa}$  后, 关闭加湿器, 结霜完成。

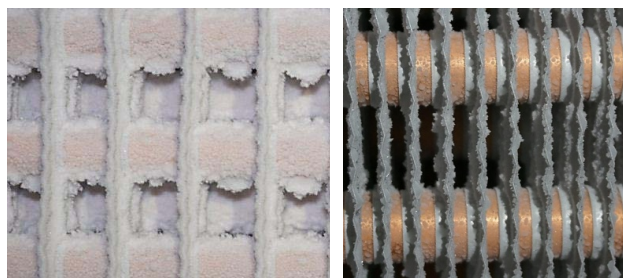
2) 换热器内融霜: 关闭风机, 关闭阀门 1、2, 打开阀门 3, 切换到全旁通状态; 将管道电加热投入, 加热功率为  $20 \text{ kW}$ , 对冷媒进行加热, 切换到内融霜模式; 观察并记录融霜过程中霜的变化及冷媒温度的变化, 直至融霜完成。

3) 外融霜: 关闭阀门 4、5 或停止循环水泵, 使载冷剂停止流动; 开启空气辅助电加热, 加热功率为  $15 \text{ kW}$ , 连同风机  $5 \text{ kW}$  电功率, 加热功率一共  $20 \text{ kW}$ ,

与内融霜加热功率相同, 切换到外融霜模式; 观察并记录融霜过程中霜的变化及空气温度的变化, 直到融霜完成。

## 2.3 实验结果

换热器的结霜状态如图 5 所示, 迎风面片距较大, 为  $24 \text{ mm}$ , 背风面片距为  $8 \text{ mm}$ 。在迎风面结霜严重, 霜层厚度约  $2 \text{ mm}$ , 背风面轻度结霜, 仅有小冰晶出现, 结霜情况对空气流通影响不大。可见变片距结构的结霜换热器可有效预先对来流空气进行除湿, 降低后续换热器的结霜风险, 保证换热性能。



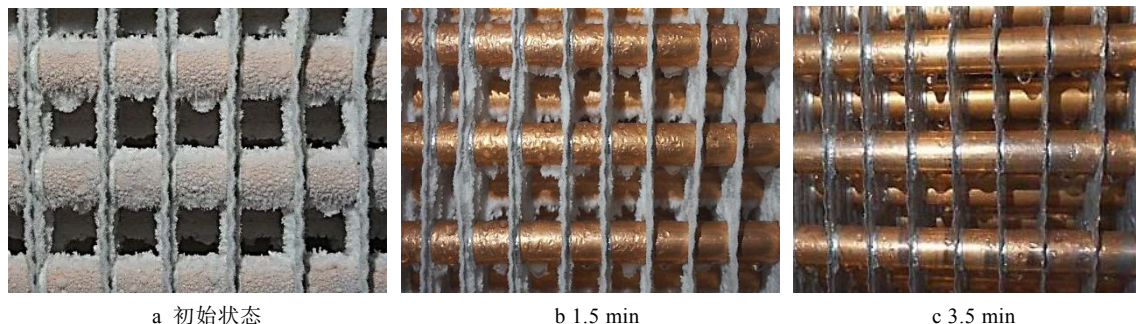
a 迎风面结霜状态

b 背风面结霜状态

图 5 换热器结霜状态

外融霜模式下霜的状态变化如图 7 所示。当空气温度上升至  $0^\circ\text{C}$  后, 霜开始融化。不同于内融霜, 外融霜模式下翅片和管表面的霜几乎同时开始融化, 但融霜速度比内融霜要慢得多, 需要 2 倍的时间才能完全融化, 且产生大量的水滴附着在换热器表面。

造成内融霜速率高于外融霜的原因主要有两点: 一是液体冷媒的热导性能远高于空气, 与管壁间的换热系数更高, 加热功率相同的情况下, 冷媒的温度响应更快。二是内融霜的能量利用率更高, 内融霜投入的加热量除用于冷媒、换热器的升温外, 其余用于融霜, 基本不会对周围空气产生影响; 而外融霜投入的加热量首先加热空气, 随后用于融霜, 为彻底融霜, 还须进一步加热换热器和冷媒以使换热器表面温度高于  $0^\circ\text{C}$ 。同时外融霜过程中, 空气的相对湿度一直保持在 95% 左右, 这表明还有一部分热量被用于水蒸发引起的潜热。



a 初始状态

b 1.5 min

c 3.5 min

图 6 内融霜模式霜的状态变化

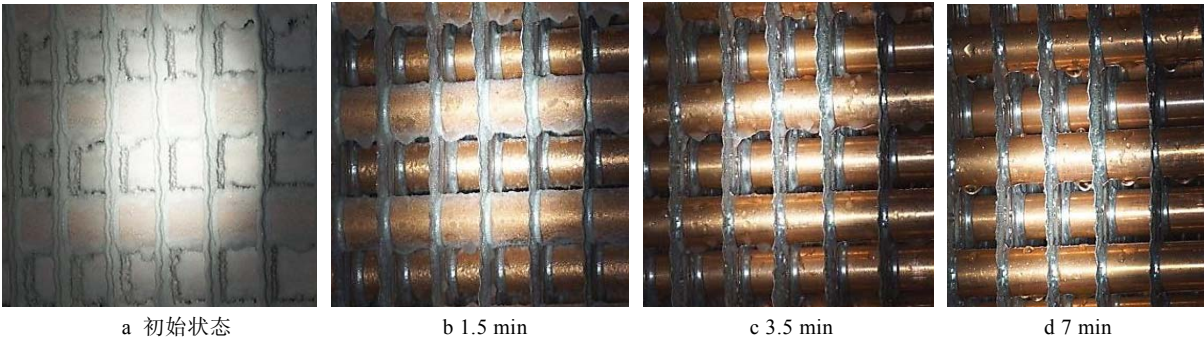


图 7  外融霜模式霜的状态变化

图 8 显示了内融霜模式下冷媒进出口温度和外融霜模式下空气进出口温度的变化趋势，相同加热功率下，冷媒的升温速率明显高于空气的升温速率。

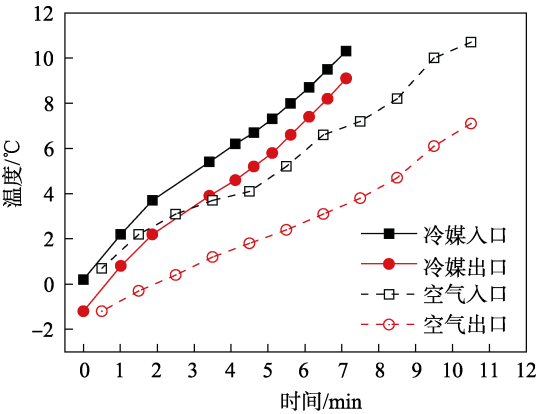


图 8  换热器冷媒进出口温度和空气进出口温度变化趋势

内融霜和外融霜完毕后，均有大量的水滴附着在换热器表面，若不将水滴清除，再次降温过程中，水滴将再次凝结成冰，因此融霜结束后需要去除换热器

表面的水。实验同时研究了除水方法，在内融霜完毕后，继续加热冷媒，将水加热蒸发，同时开启风机进行吹扫，将水蒸气排出试验箱。这种方法可以在 20 min 内将换热器表面的水完全去除。

3  结果应用

为了提高系统的可靠性、可控性和冗余度，气候环境实验室的空气处理系统通常由两套以上的独立机组构成。根据实验结果，融合结霜换热器、内融霜和外融霜的特性，设计了适用于采用载冷剂为冷媒的换热器的除霜系统方案，如图 9 所示。

为了避免单套机组由于融霜而完全停机，将机组分成了两个独立的通道，两个通道不同时融霜，每种冷媒各设计了一套内融霜系统。为降低融霜后换热器表面的附着水量以减少除水时间，可对换热器表面进行处理，形成疏水层<sup>[15-17]</sup>，并在融霜结束后继续加热载冷剂，使水蒸发，同时使用室外新风吹扫换热器，彻底除水。

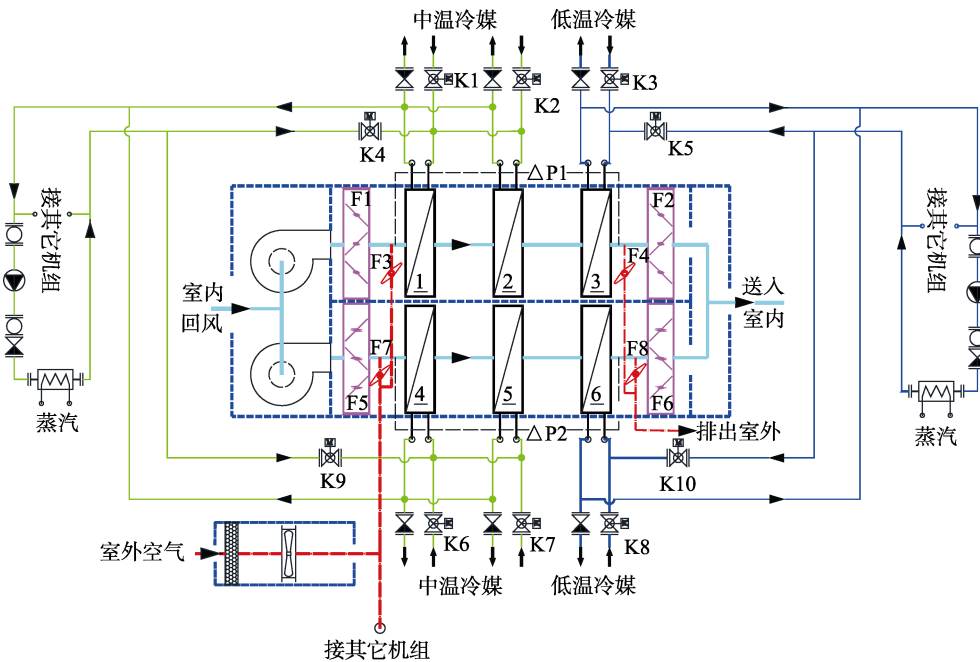


图 9  气候环境实验室换热器除霜系统

实验过程中通过检测换热器前后压差  $\Delta P$  的变化来判断是否需要融霜。可对单个或多个机组同时进行融霜, 灵活配置, 以适应不同的试验需求。目前该除霜系统已成功应用于大型气候环境实验室。

若不具备大功率加热的能力, 可对上述融霜系统稍加改进, 成为基于能量存储的融霜系统, 如图 10 所示。在融霜系统中串联一个储液罐, 并增加一个冷媒加热内循环。不需要融霜时, 关闭 K2, 打开 K1, 将储液罐及一部分管道内的冷媒循环加热至设定温度, 将热量存储起来。需要融霜时关闭 K1、打开 K2 将已经存储的热量送入换热器进行融霜。因此, 只需要小功率的加热源就可满足融霜需要, 如电甚至压缩机的排热。

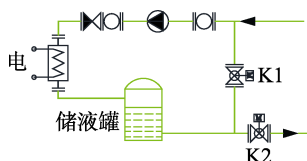


图 10 基于能量存储的融霜系统

## 4 结论

通过对结霜换热器、内融霜方案和外融霜方案的实验研究, 得出以下结论。

1) 变片距结霜换热器能够有效对来流空气预除湿, 提前结霜, 降低后续主换热器的结霜风险, 保证换热性能。

2) 内融霜和外融霜均能对换热器进行融霜, 内融霜效果最好。

3) 根据实验结果, 设计了一套采用蒸汽为热源、内融霜为主、新风吹扫为辅的适用于以载冷剂为冷媒的换热器的除霜系统方案, 已成功应用于大型气候环境实验室空气处理系统。

### 参考文献:

- [1] 刘海燕, 马建军, 张惠. 大型气候环境实验室空气处理系统方案讨论[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 107-113.
- [2] 张亚娟, 吴敬涛, 刘海燕. 气候环境实验室加湿系统设计的关键技术研究[J]. 环境技术, 2017, 35(6): 76-79.
- [3] XIA Y, ZHONG Y, HRNJAK P S, et al. Frost, Defrost, and Refrost and Its Impact on the Air-side Thermal-hydraulic Performance of Louvered-fin, Flat-tube Heat Exchangers[J]. International Journal of Refrigeration, 2006(29): 1066-1079.
- [4] MOHAMMED A, WANG Chi-chuan. Review of Defrosting Methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(73): 53-74.
- [5] 盛伟, 李伟钊, 刘鹏鹏, 等. 抑制冷表面结霜的研究进展[J]. 制冷与空调, 2016, 16(11): 1-7.
- [6] 李振华, 李征涛, 王芳, 等. 冷库热气融霜与电热融霜的对比分析[J]. 制冷与空调(四川), 2011, 25(6): 577-579.
- [7] 于志强, 刘昌丰. 热气融霜自控系统及经济性分析[J]. 制冷与空调, 2013, 13(1): 23-26.
- [8] 袁波, 臧润清. 小型冷库液体冷媒融霜系统的研究[J]. 低温与超导, 2013, 41(6): 68-71.
- [9] 王剑, 臧润清. 液体冷媒融霜制冷系统融霜过程制冷温度变化规律的实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 91-95.
- [10] 臧润清, 刘建勋, 袁波, 等. 制冷系统液体冷媒融霜与电热融霜的对比研究[J]. 热科学与技术, 2015, 14(1): 40-44.
- [11] QU Ming-lu, LI Tian-rui, DENG Shi-ming, et al. Improving Defrosting Performance of Cascade Air Source Heat Pump Using Thermal Energy Storage Based Reverse Cycle Defrosting Method[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 728-736.
- [12] LIU Zhong-bao, ZHAO Fei, ZHANG Ling-fei, et al. Performance of Bypass Cycle Defrosting System Using Compressor Casing Thermal Storage for Air-cooled Household Refrigerators[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1215-1223.
- [13] LEE M, KIM Y, DONG B, et al. Air-side Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Finned-tube Heat Exchangers with Large Fin Pitches under Frosting Conditions[J]. Heat Mass Transf, 2010, 53(13): 2655-2661.
- [14] XU Bo, HAN Qing, CHEN Jiang-ping, et al. Experimental Investigation of Frost and Defrost Performance of Microchannel Heat Exchangers for Heat Pump Systems[J]. Applied Energy, 2013, 103: 180-188.
- [15] WANG Feng, LIANG Cai-hua, ZHANG Xiao-song, et al. Effects of Surface Wettability and Defrosting Conditions on Defrosting Performance of Fin-tube Heat Exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 93: 334-343.
- [16] WANG Feng, LIANG Cai-hua, ZHANG You-fa, et al. Defrosting Performance of Superhydrophobic Fin-tube Heat Exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 229-237.
- [17] HISUK K, GUANGRI J, JAEHYEON J, et al. Defrosting Behavior and Performance on Vertical Plate for Surfaces of Varying Wettability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 481-489.