文章编号:0253-4339(2020) 06-0022-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.06.022

# 微通道换热器结霜特性研究现状与展望

熊 通　晏 刚　樊超超　鱼剑琳

(西安交通大学能源与动力工程学院　西安　710049)

**摘　要**　微通道换热器在低温工况下用作蒸发器时存在结霜速度较快的问题,制约了其在制冷系统的应用。针对微通道换热器的结霜现象,本文归纳了影响微通道换热器结霜特性的因素、改善微通道换热器结霜特性的方案和微通道换热器结霜的相关仿真研究,介绍了微通道换热器结霜特性的研究现状和方向,发现目前影响微通道换热器结霜特性的因素主要分为:外部因素(环境参数、表面温度、凝水),结构因素(换热器布置方向、翅片结构、翅片密度、涂层、结垢)和内部因素(制冷剂分布)。改善微通道换热器结霜特性的研究集中在调整翅片的结构以实现更好的排水性能和更均匀的霜层分布,未来研究的重点在于开发抑霜性能更好的微通道换热器和建立更高精度的仿真模型。

**关键词**　微通道换热器;结霜特性;影响因素;翅片结构
**中图分类号**:TB61; TB63$^{+}$2　　**文献标识码**: A

# Review on Research Status of Frosting Characteristics of Microchannel Heat Exchanger

Xiong Tong　Yan Gang　Fan Chaochao　Yu Jianlin

(School of Energy and Power Engineering, Xi′an Jiaotong University, Xi′an, 710049, China)

**Abstract**　When operated under low ambient temperature conditions, the frosting rate of a microchannel evaporator is high, which restricts its application in refrigeration systems. In terms of the frosting phenomenon of a microchannel heat exchanger, this paper summarizes the factors that affect the frosting characteristics, the research on inhibition of frosting, and simulations of frosting characteristics. The factors that affect the frosting characteristics of a microchannel heat exchanger primarily include external factors (environmental parameters, surface temperature, and condensate), structural factors (heat exchanger installation direction, fin structure, fin density, coating, and fouling), and internal factors (refrigerant distribution). To improve the frosting characteristics of a microchannel heat exchanger, the fin structures can be optimized to obtain better drainage performance and more uniform frosting characteristics. Future research focuses on the development of a microchannel heat exchanger with better frost suppression performance and the establishment of a higher-precision simulation model.

**Keywords**　microchannel heat exchanger; frosting characteristics; impact factors; fin structure

微通道换热器与传统的翅片管换热器相比,在结霜工况下更易结霜并且除霜排水更难。很多学者对两种换热器的结霜特性进行了对比研究。Shao Liangliang 等[1]研究了微通道换热器和翅片管换热器热泵系统在结霜工况下的性能,结果表明微通道换热器热泵系统比翅片管换热器热泵系统的制热时间减少 20%;在结霜时间相同的情况下,微通道换热器热泵系统除霜时间比翅片管换热器热泵系统更长。S. Padhmanabhan 等[2]实验研究了结霜工况下微通道换热器和传统翅片管换热器热泵系统的性能,翅片管换热器结霜时间比微通道换热器结霜时间长 2 倍以上,且融霜后微通道换热器表面的残留水无法排净,在后续结霜过程中加快了霜层形成,实验发现湿表面条件下换热器的结霜时间相较于干表面条件缩短了 60%。J. H. Kim 等[3]对比研究了 4 种不同的微通道换热器和翅片管换热器在分体式热泵系统中的性能,发现微通道换热器热泵系统的除霜频率是翅片管换热器的 3 倍,微通道换热器系统平均制热量和系统性能都要低于翅片管换热器系统。P. Sankar 等[4]研究发现微通道换热器在结除霜周期的平均制热能力比翅片管换热器约低 22%,EER 低 13%。

微通道换热器在结霜工况下易结霜是阻碍其在制冷系统上应用的主要原因,如何遏制微通道换热器的快速结霜, 降低其除霜的频率和缩短除霜时间,

收稿日期:2020-05-01;修回日期:2020-06-15

是提高性能必须解决的难题。因此本文主要就微通道换热器用于蒸发器中会出现的结霜现象展开研究，根据近年来国内外学者的研究，总结归纳了影响微通道换热器结霜特性的因素、改善微通道换热器结霜特性的方案和微通道换热器结霜的相关仿真，并对微通道换热器的结霜研究进行展望。

## 1 影响微通道换热器结霜特性的因素

影响微通道换热器结霜特性的因素很多，如：空气相对湿度、风速、换热器表面温度、换热器表面特性、换热器结构参数、制冷剂分布均匀性及除霜后的除霜水残留量等。为更好的对影响微通道换热器结霜特性的因素进行总结，将影响因素归纳为外部因素、结构因素、内部因素三个方面。

### 1.1 外部因素

1）空气相对湿度、风速及温度对微通道换热器结霜特性的影响。Zhang Ping 等[5]研究了空气相对湿度对微通道换热器结霜周期的影响，结果表明：空气相对湿度在 65%~95%时，随着空气相对湿度的增加，霜层增长速率越快，换热器结霜周期越短。这是由于相对湿度越大的空气流过换热器表面时，水蒸汽分压差较大更易析出水分，加剧翅片表面结霜。朱建民等[6]实验研究了不同环境参数对微通道换热器结霜特性的影响，发现风速、空气相对湿度、空气温度对微通道换热器的霜层增长速率和结霜量增长速率影响各不相同，对霜层的增长速率影响为：空气相对湿度>风速>空气温度；对结霜量的增长速率影响为：空气温度>风速>空气相对湿度。实验通过测量进出口空气的含湿量来确定结霜量，发现随着结霜过程的进行，结霜量先呈现线性快速增长后缓慢增长的趋势，翅片表面霜层增长随时间呈“加速-匀速-减速”的规律，空气侧阻力呈现指数增长后匀速增长的趋势。E. Moallem 等[7-8]研究了空气相对湿度和风速对微通道换热器影响。结果表明：当空气相对湿度由 72%增至 92%时，微通道换热器结霜速度增加了 5.2 倍，微通道换热器换热能力降低了 14%，空气湿度是影响微通道换热器结霜的主要因素，而风速对微通道换热器的结霜增长速率影响不大。梁志豪等[9]研究了空气相对湿度、风量和空气温度对微通道换热器结霜的影响，发现送风量越大结霜面积占比越小；空气相对湿度越大，水蒸汽越快在换热器上凝结，结霜发生时间越早，结霜量也越大；空气温度越低，与换热器表面接触换热后的温度越低，更容易达到过饱和的状态，有助于换热器表面结霜以及霜层的生长。

2）表面温度对微通道换热器结霜特性的影响。E. Moallem 等[7-8]研究了表面温度对微通道换热器结霜特性的影响，结果表明：当翅片表面温度由-7 ℃降至-9 ℃时，微通道换热器的结霜循环周期缩短了 80%，说明表面温度是影响微通道换热器结霜的重要因素之一。Wu Jianghong 等[10]研究指出，微通道换热器结霜是从表面温度最低的地方开始的。

对于某一特定的制冷或热泵系统，微通道换热器表面温度、空气速度、空气温度、空气相对湿度对于微通道换热器的结霜是相互影响的，各个因素对微通道换热器的结霜影响机理为：表面温度越低，湿空气水蒸汽分压和表面温度饱和水蒸汽分压之差越大，导致结霜量增加；空气相对湿度越大，水蒸汽在冷表面上凝露和结霜的驱动力越大，结霜量越大；空气流速越大，湿空气过冷速度越快，水蒸汽相变驱动力越大，同时，气流扰动的增大导致了湿空气中水蒸汽的对流扩散速率增大，最终导致结霜量增加；空气温度越低，导致蒸发温度越低，湿空气水蒸汽分压和对应的冷表面饱和水蒸汽分压之差越大，结霜速率越大。

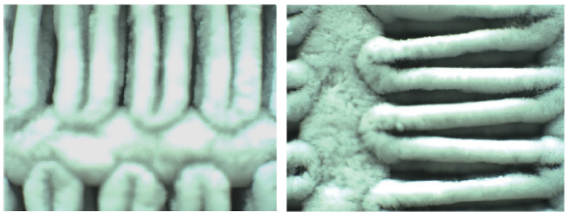
3）凝水对微通道换热器结霜特性的影响。E. Moallem 等[7,11]研究了凝水残留量对微通道换热器结霜的影响，结果表明微通道换热器干启动比部分湿启动（200 g 凝水）和完全湿启动（500 g 凝水）结霜时间分别长 17%和 28%。Xu Bo 等[12]定量研究了微通道换热器上除霜残留凝水对结霜性能的影响，当凝水残留量为 300 g 时换热器性能降低 5%，除霜残留凝水增至 800 g 时换热器性能下降 21%。Xia Y.[13]研究了循环结霜过程中换热系数和空气侧压降的变化过程，通过观察发现凝水残留对下一次结霜过程的压降和换热系数变化有明显影响。S. Padhmanabhan[14]通过压缩氮气吹走换热器表面的凝水，使下一次结霜的时间增加了 4%。

### 1.2 结构因素

1）翅片结构对微通道换热器结霜特性的影响。P. S. Hrnjak 等[15]研究了微通道换热器百叶窗开窗角度对微通道换热器结霜的影响，结果表明在几个结霜周期后，具有最大开窗角度的微通道换热器在整体传热系数、压降和排水性能方面最佳。E. Moallem 等[7]研究了翅片结构对微通道换热器结霜的影响，结果表明翅片长度以及翅片宽度对换热器结霜周期影响较小，但翅片密度对微通道换热器结霜周期有明显的影响，翅片密度较低时换热器结霜周期相对较长。Zhang Ping 等[5]研究结果也表明翅片密度较低，换热器结霜周期较长，但翅片密度较低时，换热器换热效率较低。

2）换热器布置方向对微通道换热器结霜特性的

影响。Xu Bo 等[12]实验研究了扁管布置方向对微通道换热器结霜、融霜过程的影响。指出相对于水平扁管,垂直扁管具有更好的排水性能,结霜周期较长,相同结霜时间下,两种扁管布置方式的结霜情况如图 1 所示。随着结霜融霜循环的进行,水平扁管的保水性增加,使得其结霜更加严重。



(a) 扁管水平布置　　(b) 扁管垂直布置

**图 1 相同时间内两种扁管布置方式的结霜情况对比[12]**

**Fig.1 Comparison of frost accumulation of two flat tube arrangements in the same time[12]**

3)表面涂层对微通道换热器结霜特性的影响。E. Moallem 等[11]研究了亲水和疏水涂层对微通道换热器结霜特性的影响。结果表明,亲水和疏水表面涂层微通道换热器其结霜类型、外观和形态存在明显差异,结霜周期、传热速率和空气侧压降与无涂层的微通道换热器相似,亲水和疏水涂层微通道换热器在结霜时性能最多提升 15%。Hu Yifeng 等[16]研究了微通道换热器结垢对其结霜的影响,微通道换热器少量的结垢能提高换热性能,所以轻微的结垢能提高微通道换热器霜层的增长速率,但是严重的结垢抑制了微通道换热器的换热,结霜速率相对干净的微通道换热器更慢。

### 1.3 内部因素

除了上述列举的影响因素外,微通道换热器内部制冷剂的分布也是影响结霜性能的重要因素。陈小康[17]通过实验研究了微通道蒸发器的结霜过程,结果表明:霜层通常在温度最低的翅片和扁管表面开始形成,微通道蒸发器的制冷剂分配不均匀使得表面温度分布不均匀,并引起结霜不均匀,可以通过提高制冷剂分配的均匀性来改善结霜。周健等[18]通过在微通道换热器集流管内增加分液孔的方法改善换热器布液均匀性,有效降低了换热器结霜不均匀度,延长了结霜周期。Wu Jianghong 等[10]研究指出微通道内制冷剂流量分布不均匀导致的表面温度分布不均匀,最终导致霜层分布不均匀。Shao Liangliang 等[1]研究表明制冷剂在微通道换热器中的分布均匀性是影响微通道热泵结霜性能的关键因素。包佳倩等[19]研究了多流程微通道换热器的结霜特性,结果发现两相制冷剂密度不同,受重力影响导致气液分离,使制冷剂分布不均匀,各流道结霜不均匀。李雪丽等[20]研究了具有相同换热面积的单层和双层微通道换热器,双层微通道换热器迎风面液相区面积比单层微通道换热器大,导致双层微通道换热器迎风面结霜面积大,结霜 30 min 时,单层蒸发器和双层蒸发器的换热量分别减少 56.4%、72%,单层微通道换热器的制冷剂分布均匀性也比双层微通道换热器的好,所以单层微通道换热器更适合于结霜工况。

微通道换热器的结霜情况也会对内部制冷剂的分布造成影响,盛伟等[21]研究了微通道换热器结霜对内部制冷剂分布的影响,随着结霜时间的增加,过热区减小,制冷剂分布更加均匀。图 2 总结了影响微通道换热器结霜的因素。

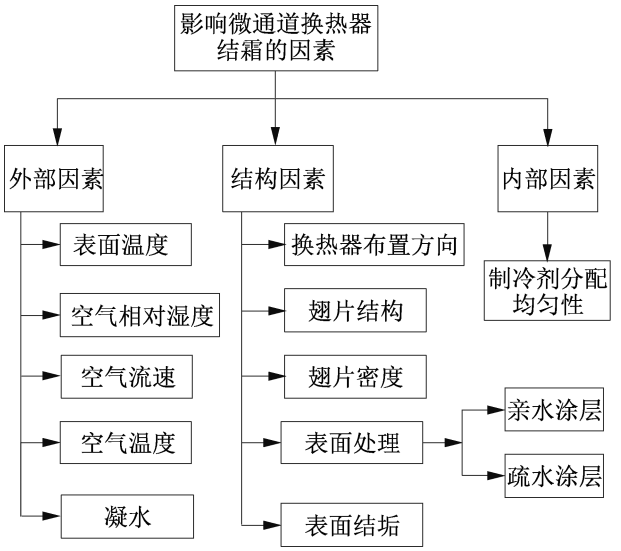



**图 2 影响微通道换热器结霜的因素**

**Fig.2 Factors affecting frosting in microchannel heat exchanger**

## 2 改善微通道换热器结霜特性的方案

通过对微通道换热器结霜性能的研究,许多学者提出了改善微通道换热器结霜特性的方案,主要措施是优化微通道换热器的翅片结构来提高结霜均匀性和排水性。K. Kim 等[22]研究了不同设计参数下微通道换热器结霜时迎风面、背风面霜层增长的均匀性和换热器热力学性能。如图 3 所示,霜层的增长主要集中在换热器迎风面,减小翅片密度可以有效提高换热器结霜均匀度,从而改善其热力学性能。Zhang Ping 等[23]发现在微通道换热器中使用平直翅片代替百叶窗翅片,可以增强其排水性能,延长其结霜周期。J. S. Park 等[24]提出了一种变间距百叶窗翅片,即沿空气流动方向百叶窗间距递增或递减,如图 4 所示,沿空气流动方向百叶窗间距逐渐减小的翅片表面结霜

更加均匀,换热器的平均换热系数相对提高了 21%。M. H. Kim 等[25]同样提出了一种非对称式百叶窗翅片,增强了翅片表面的排水性能,提高了换热器在结霜及融霜过程中的热力学性能。Xu Bo 等[26]提出了一种具有排水功能的新型波纹翅片微通道换热器,结构如图 5 所示,并和波纹翅片结构微通道换热器、百叶窗翅片结构微通道换热器进行对比,研究表明具有排水功能的新型波纹翅片微通道换热器在湿工况和结霜工况下性能最佳。

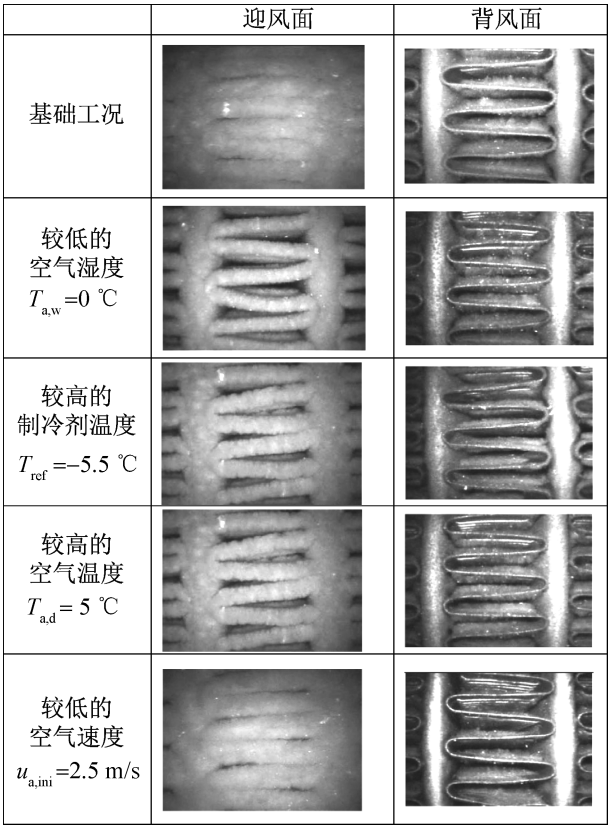



**图 3 微通道换热器迎风面和背风面的结霜情况[22]**
**(基础工况:$T_{a,w}$=1.0 ℃,$T_{ref}$=−8 ℃,$T_{a,d}$=2 ℃,$u_{a,ini}$=5 m/s)**

**Fig.3 Frosting on the front and rear views of a microchannel heat exchanger[22] (Basis condition: $T_{a,w}$=1.0 ℃, $T_{ref}$=−8 ℃, $T_{a,d}$=2 ℃, $u_{a,ini}$=5 m/s)**

针对传统百叶窗微通道换热器易结霜的特点,丁周良等[27]提出了插片式微通道换热器来改善其结霜性能,插片式微通道换热器在翅片上设置导流结构,具有更好的排水性能,同时翅片和扁平管插入式的接触,能够减小散热器的整体热阻,插片式微通道换热器具体结构如图 6 所示,相较于常规微通道换热器,插片式微通道换热器具有更好的换热性能和抗结霜性能。如图 7 所示,抗结霜性能大约能够提高 30%。党聪聪[28]对比研究了插片式微通道换热器和翅片管换热器应用在热泵系统上的性能,相较于翅片管换热

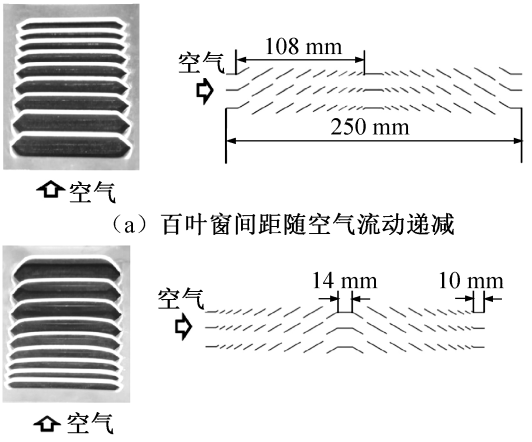



**图 4 两种变间距百叶窗翅片结构示意图[24]**

**Fig.4 Schematic diagram of two variable-pitch shutter finned structures[24]**

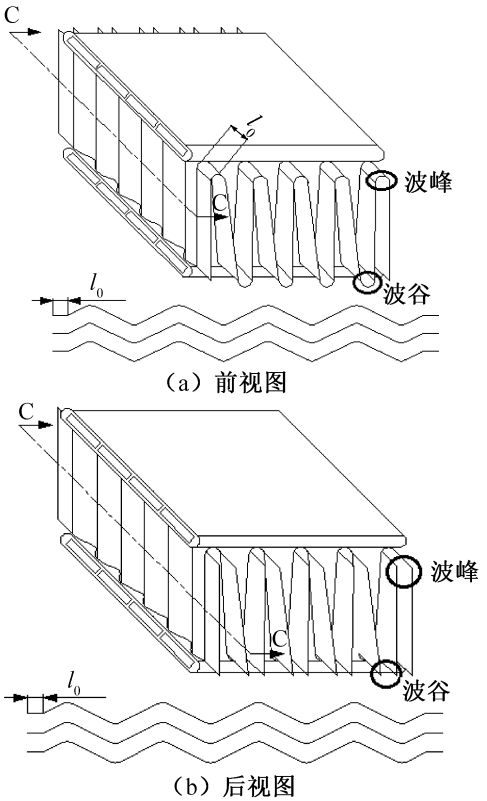



**图 5 新型波纹翅片微通道换热器[26]**

**Fig.5 A new type of corrugated fin microchannel heat exchange[26]**

器热泵系统,插片式微通道换热器热泵系统平均换热量提升了 2.5%,全年能源消耗效率(APF,annual performance factor)提升了 3.2%,在结霜工况下插片式微通道换热器平均换热量也能达到翅片管的 95.06%,说明插片式微通道换热器应用在热泵系统

上具有较大的优势。

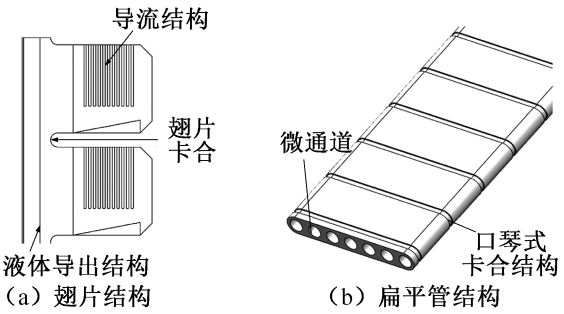



图 6 插片式微通道换热器结构[27]

**Fig.6 Structure of insert-plate microchannel heat exchanger[27]**

上述方案均是通过改进微通道换热器的结构来改善其结霜性能，当微通道换热器用在制冷系统中时，制冷系统的控制和调节对微通道换热器的结霜特性也会有较大影响。因此部分学者也从系统控制角度对微通道换热器的除霜、结霜过程进行了优化。A. Steiner 等[29]通过仿真的方法研究了微通道换热器制冷系统除霜过程阀开度对系统性能的影响，在除霜过程中存在最佳阀开度，使系统除霜效率较高，除霜时间较短，当在最佳阀开度基础上减小 30%的阀开度，系统的平均 COP 将比制热模式下低 47%，而最佳阀开度时系统的平均 COP 只比制热模式低 13%。A. Steiner 等[30]还研究了热气旁通除霜的微通道换热器制冷系统，结果表明除霜开始的时间点对系统的性能有较大影响，并且最佳除霜时间点也和旁通阀的开度有关，同时膨胀阀开度对除霜过程也有较大影响，当制冷剂和空气温差在 10～20 K 时，通过调节膨胀阀开度，可以获得最高的平均 COP。Zhou Guanghui 等[31]提出了一种带经济器补气方式的纯电动客车热泵空调系统，如图 8 所示，通过研究不同因素对微通道换热器除霜性能的影响，提出了一种快速除霜的方案，该方案通过提高室内温度、压缩机转速、室内风机出风量、减少室外风机送风量以及控制补气膨胀阀适当的开度，可以明显缩短除霜时间，使除霜时间控制在 100 s 以内。周光辉等[32]在结霜工况下，对带经济器的纯电动客车制冷系统的补气压力进行了研究，结果表明，采用中压补气时，系统的蒸发温度最高，微通道换热器的结霜得到了改善，当系统运行 120 min 后，采用中压补气的系统 COP 降低了 28.4%，而不补气的系统 COP 则降低了 41.4%。

## 3 微通道换热器结霜仿真研究

结霜过程是一个涉及传热传质的复杂物理过程，目前提出的大部分预测模型是针对在平板或平直翅片表面的结霜过程。Liu Yaomin 等[33]以分形理论的 DLA(diffusion limited aggregation)生长模型为基础，建立了霜晶生长的二维平面模型，模拟的霜晶生长过程图像与实验图像取得了较好的一致性。Y. B. Lee 等[34]假定霜层表面水蒸汽为饱和态，利用 Clausius-Clapeyron 方程求解水蒸汽压力梯度，建立了预测霜层厚度的预测模型。C. J. L. Hermes 等[35]将理论模型与实验数据相结合，提出了一种根据时间和修正 Jakob 数预测霜层密度的半经验模型。J. M. Armengol 等[36]采用移动边界法，提出了一种二维的霜层生长速率预测模型，使得霜层生长更加符合实际物理现象。S. K. Padhmanabhan 等[37]建立了一个半经验模型，用来预测不同制冷剂进口温度、不同空气温湿度以及不同空气流速等条件下换热器非均匀结霜时的霜层厚度。

对于微通道换热器复杂翅片表面的结霜过程，目前多为实验研究，仿真研究还相对较少。Xia Y.等[38]建立了微通道换热器在结霜工况下性能随时间变化

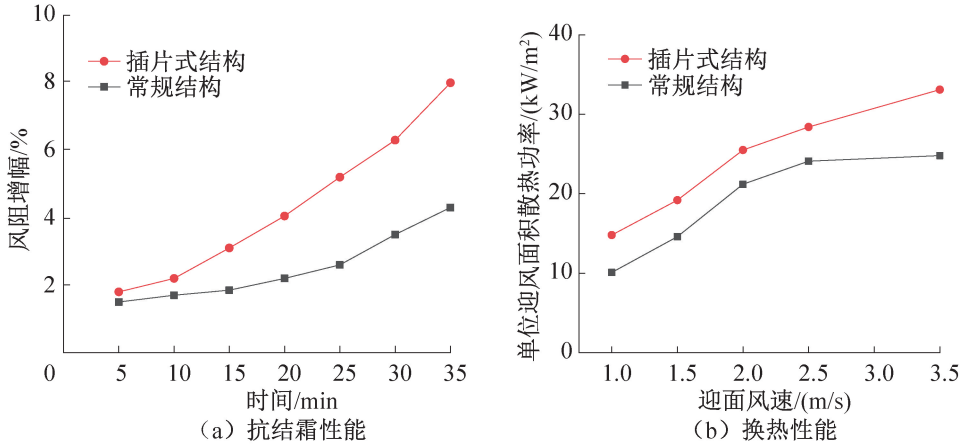



图 7 两种微通道换热器性能对比[27]

**Fig.7 Performance comparison of two kinds of microchannel heat exchangers[27]**

的关联式和模型,该模型能够预测微通道换热器的传热性能,但其预测压降特性的能力有待进一步提升。F. Breque 等[39]提出动态三维模型来预测微通道换热器的不均匀霜层生长、风压损失、空气速度以及换热性能,建立了空气侧压降的关联式,该关联式考虑了霜层对摩擦系数的影响,并且通过实验数据验证该模型具有较好的精度。E. Moallem 等[40]通过测量翅片迎风侧的霜层厚度、空气流速以及相应的传热系数和压降,建立了微通道换热器结霜的半经验关联式,建立的传热关联式在结霜工况下预测 $j$ 因子的误差在±16.7%以内。表 1 总结了部分学者对微通道换热器结霜特性的研究内容及方法。

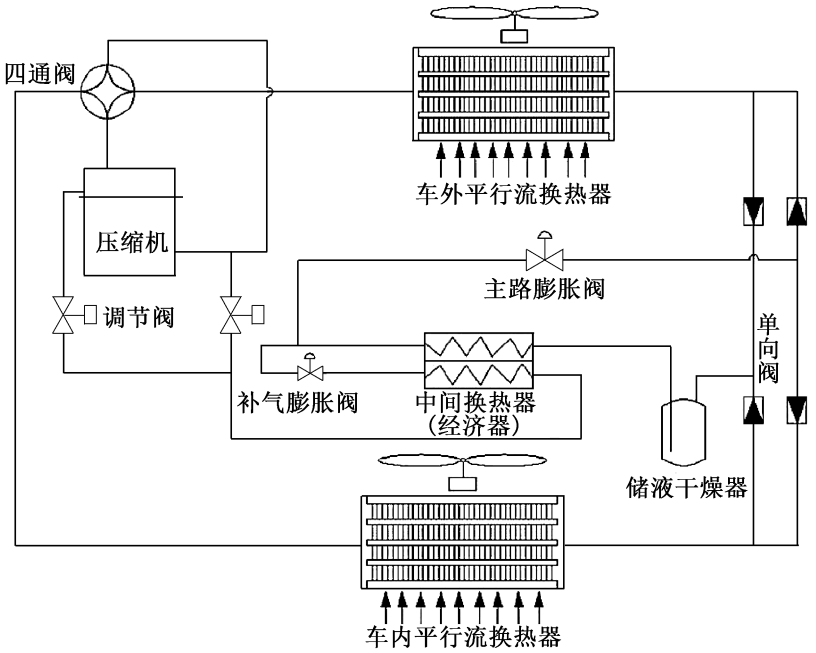



图 8 带经济器补气的纯电动客车热泵空调系统[31]

**Fig.8 The heat pump air conditioning system with economizer for only electric-driven vehicle at vapor injection modes[31]**

表 1 微通道换热器结霜特性的研究内容及方法

**Tab.1 Research contents and methods of frosting characteristics of microchannel heat exchangers**

| 研究人员 | 年份 | 研究方法 | 研究参数 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 表面温度 | 空气温度 | 空气相对湿度 | 空气流速 | 凝水 | 结构参数 | 涂层 | 结垢 | 制冷剂分布 |
| Xia Y.等[13] | 2006 | 实验 | | | | √ | √ | √ | | | |
| Shao Liangliang 等[1] | 2010 | 实验/仿真 | √ | | √ | √ | | √ | | | √ |
| Zhang Ping 等[5] | 2010 | 实验 | | | √ | √ | √ | √ | | | |
| Wu Jianghong 等[10] | 2010 | 实验 | √ | | | | | √ | | | √ |
| Zhang Ping 等[22] | 2010 | 实验 | | | √ | √ | | √ | | | |
| Xia Y.等[38] | 2010 | 仿真 | | √ | √ | √ | | √ | | | |
| E. Moallem 等[7] | 2012 | 实验 | √ | | √ | √ | √ | | | | |
| E. Moallem 等[11] | 2012 | 实验 | √ | | √ | √ | √ | √ | √ | | |
| E. Moallem 等[8] | 2013 | 实验 | √ | | √ | √ | √ | √ | | | |
| Xu Bo 等[12] | 2013 | 实验 | | | | | √ | √ | | | |
| K. Kim 等[22] | 2014 | 实验 | √ | √ | √ | √ | | √ | | | |

续表 1

| 研究人员 | 年份 | 研究方法 | 研究参数 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 表面温度 | 空气温度 | 空气相对湿度 | 空气流速 | 凝水 | 结构参数 | 涂层 | 结垢 | 制冷剂分布 |
| Xu Bo 等[26] | 2015 | 实验 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | |
| J. S. Park 等[24] | 2016 | 实验 | √ | | √ | √ | | √ | | | |
| M. H. Kim 等[25] | 2016 | 实验 | | | | | √ | √ | | | |
| 朱建民等[6] | 2017 | 实验 | | √ | √ | √ | | | | | |
| 梁志豪等[9] | 2017 | 实验 | | √ | √ | √ | | | | | |
| P. S. Hrnjak 等[15] | 2017 | 实验 | | | √ | | √ | √ | | | |
| F. Breque 等[39] | 2017 | 仿真 | | | √ | √ | | | | | |
| E. Moallem 等[40] | 2017 | 仿真 | √ | | √ | √ | √ | √ | | | |
| 党聪聪[28] | 2019 | 实验 | | | √ | √ | √ | √ | | | |
| Hu Yifeng 等[16] | 2020 | 实验 | | | √ | √ | | | | √ | |
| 包佳倩等[19] | 2020 | 实验 | √ | | | | | | | | √ |
| 李雪丽等[20] | 2020 | 实验 | √ | | | | | √ | | | √ |

## 4 总结与展望

微通道换热器易结霜特性是制约其在制冷系统应用的主要因素,本文总结了现有的国内外对微通道换热器结霜现象的研究,得出如下结论:

1)由于微通道换热器结构紧凑的特点,导致霜的成核点较多,更容易在翅片表面结霜,同时由于除霜时排水较难,较多除霜水残留在换热器上,导致下一个周期的结霜更快。

2)影响微通道换热器结霜的因素大致可以分为外部因素、结构因素、内部因素,其中表面温度和空气相对湿度是影响微通道换热器结霜的主要因素。

3)现有改善微通道换热器的结霜特性的方案主要是通过优化翅片结构来改善微通道换热器排水性能和改善结霜均匀性,插片式换热器相较于常规微通道换热器具有更高的传热效率和更好的抗霜性能,在结霜工况下的平均换热量和翅片管相当,在制冷系统上的应用具有较大的潜力。

4)现有的微通道换热器结霜模型,能够较好的预测微通道换热器的换热性能和传热系数,但是对于空气侧的压降预测偏差还较大,这是由于微通道换热器复杂的翅片结构导致霜层的增长较难预测。

尽管微通道换热器的结霜特性已经取得了初步的研究成果,并且一些改善方案得到了一定的应用,但仍有一些问题值得研究:

1)插片式微通道换热器在结霜工况下具有更好的抑霜性能,但是对其研究还相对较少,如何完善插片式微通道换热器在制冷系统上的应用效果还有待进一步研究。

2)现有的文献主要是通过实验来研究微通道换热器的结霜特性,对于仿真研究还较少,建立高精度的微通道换热器结霜模型还有待进一步研究。

### 参考文献

[1] SHAO Liangliang, YANG Liang, ZHANG Chunlu. Comparison of heat pump performance using fin-and-tube and microchannel heat exchangers under frost conditions [J]. Applied Energy, 2010. 87(4): 1187-1197.

[2] PADHMANABHAN S, CREMASCHI L, FISHER D. Comparison of frost and defrost performance between microchannel coil and fin-and-tube coil for heat pump systems [J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2011, 19(4):273-284.

[3] KIM J H, GROLL E A. Performance comparisons of a unitary split system using microchannel and fin-tube outdoor coils [J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(2):219-229.

[4] SANKAR P, RENZO C L. Comparison of frost and defrost performance between microchannel coil and fin-and-tube coil for heat pump system[C]//International Refrigeration and Air Conditional Conference. Purdue, 2008:14-17.

[5] ZHANG Ping, HRNJAK P S. Air-side performance of a parallel-flow parallel-fin (PF2) heat exchanger in sequential frosting [J]. International Journal of Refrigeration,

2010, 33(6):1118-1128.

[6] 朱建民, 王丹东, 陈江平. 环境参数对平行流蒸发器结霜动态性能的影响 [J]. 制冷技术, 2017, 37(2): 44-50. (ZHU Jianmin, WANG Dandong, CHEN Jiangping. Effects of environmental parameters on frosting dynamic performance of parallel flow evaporator [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(2): 44-50.)

[7] MOALLEM E, PADHMANABHAN S, CREMASCHI L, et al. Experimental investigation of the surface temperature and water retention effects on the frosting performance of a compact microchannel heat exchanger for heat pump systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(1): 171-186.

[8] MOALLEM E, HONG T, CREMASCHI L, et al. Experimental investigation of adverse effect of frost formation on microchannel evaporators, part 1: effect of fin geometry and environmental effects [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(6): 1762-1775.

[9] 梁志豪, 巫江虹, 金鹏, 等. 电动汽车热泵空调系统结霜特性及除霜策略 [J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 168-176. (LIANG Zhihao, WU Jianghong, JIN Peng, et al. Frost formation and defrost methods of electric vehicle heat pump air conditioning system [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1):168-176.)

[10] WU Jianghong, OUYANG Guang, HOU Puxiu, et al. Experimental investigation of frost formation on a parallel flow evaporator [J]. Applied Energy, 2011, 88(5): 1549-1556.

[11] MOALLEM E, CREMASCHI L, FISHER D E, et al. Experimental measurements of the surface coating and water retention effects on frosting performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 39:176-188.

[12] XU Bo, HAN Qing, CHEN Jiangping, et al. Experimental investigation of frost and defrost performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems [J]. Applied Energy, 2013, 103(1): 180-188.

[13] 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(7):1066-1079.

[14] PADHMANABHAN S, FISHER D E, CREMASCHI L, et al. Comparison of frost and defrost performance between microchannel coil and fin-and-tube coil for heat pump systems [C]//12th International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Purdue West Lafayette, IN, USA, Paper No. R2202, 2008.

[15] HRNJAK P S, ZHANG Ping, RENNELS C. Effect of louver angle on performance of heat exchanger with serpentine fins and flat tubes in frosting: Importance of experiments in periodic frosting [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 84: 321-335.

[16] HU Yifeng, YUILL D P, EBRAHIMIFAKHAR A. The effects of outdoor air-side fouling on frost growth and heat transfer characteristics of a microchannel heat exchanger: an experimental study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020,151: 119-423.

[17] 陈小康. 基于微通道换热器的中央空调的研究[D].广州:华南理工大学, 2010. (CHENG Xiaokang. Analysis for the microchannel heat exchanger on air conditioning equipment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)

[18] 周健, 邢小邗. 基于平行流蒸发器结霜问题的实验研究及解决方案 [J]. 汽车电器, 2011,(7): 23-26.(ZHOU Jian, XING Xiaohan. Research and solution on the frosting problem of parallel-flow evaporator [J]. Auto Electric Parts, 2011, (7):23-26.)

[19] 包佳倩, 苏林, 刘明康, 等. 电动汽车热泵空调系统室外换热器结霜特性实验研究 [J]. 制冷学报, 2020, 41(3): 1-7.(BAO Jiaqian, SU Lin, LIU Mingkang, et al. Experimental study on outdoor heat exchanger frosting characteristics of a heat pump air-conditioning system for electric vehicles [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(3): 1-7.)

[20] 李雪丽, 盛伟, 兰庆云, 等. 结霜工况下不同结构微通道蒸发器换热性能实验研究 [J]. 制冷, 2020, 39(1): 1-9.(LI Xueli, SHENG Wei, LAN Qingyun, et al. Experimental research on heat transfer performance of microchannel evaporator with different structures under frost condition [J]. Refrigeration, 2020, 39(1): 1-9.)

[21] 盛伟, 兰庆云, 裴阳, 等. 结霜工况下微通道蒸发器制冷剂分布特性 [J]. 制冷学报, 2019, 40(2): 43-49. (SHENG Wei, LAN Qingyun, PEI Yang, et al. Distribution characteristics of refrigerant in micro-channel evaporator under frosting conditions [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2): 43-49.)

[22] KIM K, KIM M H, KIM D R, et al. Thermal performance of microchannel heat exchangers according to the design parameters under the frosting conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 71: 626-632.

[23] ZHANG Ping, HRNJAK P S. Effect of some geometric parameters on performance of PF2 heat exchangers in periodic frosting [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 334-346.

[24] PARK J S, KIM D R, LEE K S. Frosting behaviors and thermal performance of louvered fins with unequal louver pitch [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,

2016, 95:499-505.

[25] KIM M H, KIM H, KIM D R, et al. A novel louvered fin design to enhance thermal and drainage performances during periodic frosting/defrosting conditions [J]. Energy Conversion & Management, 2016, 110: 494-500.

[26] XU Bo, ZHANG Chi, WANG Ying, et al. Experimental investigation of the performance of microchannel heat exchangers with a new type of fin under wet and frosting conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2015,89: 444-458.

[27] 丁国良, 庄大伟, 李智强, 等. 制冷空调换热器的研究进展(二)——紧凑式换热器 [J]. 家电科技, 2019(5): 38-46.(DING Guoliang, ZHUANG Dawei, LI Zhiqiang, et al. Development of heat exchanger for refrigeration and air-conditioning (2)——compact heat exchangers [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2019(5):38-46.)

[28] 党聪聪. 插片式微通道换热器换热特性实验研究与三维参数化设计平台开发[D]. 杭州:浙江理工大学, 2019.( DANG Congcong. Experimental research on heat transfer characteristic of plate-fin microchannel heat exchanger and development of three-dimension parametric design platform[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.)

[29] STEINER A, RIEBERER R. Parametric analysis of the defrosting process of a reversible heat pump system for electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 393-400.

[30] STEINER A, RIEBERER R. Simulation based identification of the ideal defrost start time for a heat pump system for electric vehicles [J]. International Journal of Refrigeration, 2015,57: 87-93.

[31] ZHOU Guanghui, LI Haijun, LIU Enhai, et al. Experimental study on combined defrosting performance of heat pump air conditioning system for pure electric vehicle in low temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 677-684.

[32] 周光辉, 禹佩利, 李海军, 等. 带经济器的热泵型纯电动客车空调系统结霜特性研究 [J]. 低温与超导, 2019, 47(8): 75-79.(ZHOU Guanghui,YU Peili,LI Haijun, et al. Study on frosting performance of heat pump air conditioning system with economizer for pure electric bus [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(8): 75-79.)

[33] LIU Yaomin, LIU Zhongliang, HUANG Lingyan, et al. Fractal model for simulation of frost formation and growth [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(3):807-812.

[34] LEE Y B, RO S T. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2005, 29(6):685-696.

[35] HERMES C J L, LOYOLA F R, NASCIMENTO V S. A semi-empirical correlation for the frost density [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46:100-104.

[36] ARMENGOL J M, SALINAS C T, XAMÁN, J, et al. Modeling of frost formation over parallel cold plates considering a two-dimensional growth rate [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 104:245-256.

[37] PADHMANABHAN S K, FISHER D E, CREMASCHI L, et al. Modeling non-uniform frost growth on a fin-and-tube heat exchanger [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 2018-2030.

[38] XIA Y, JACOBI A M. A model for predicting the thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers under frosting conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 321-333.

[39] BREQUE F, NEMER M. Modeling of a fan-supplied flat-tube heat exchanger exposed to non-uniform frost growth [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 75: 129-140.

[40] MOALLEM E, CREMASCHI L, FISHER D E, et al. Effects of frost growth on louvered folded fins of microchannel heat exchangers on the time-dependent air side convective heat transfer coefficient [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 326-335.

**通信作者简介**

晏刚, 男, 副教授, 西安交通大学能源与动力工程学,029-82668738, E-mail: gyan@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:制冷与热泵系统新型循环及热物理过程、替代制冷剂。

**About the corresponding author**

Yan Gang, male, associate professor,School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82668738, E-mail: gyan@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: new cycle and thermophysical processes of refrigeration and cryogenic systems、alternative refrigerant.