

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-212-07

小型制冷装置用换热器技术发展现状

吴家豪 应雨铮 刘国强 晏刚

(西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

【摘要】 换热器是小型制冷装置(冰箱、冷柜、空调、热泵等)的重要组成部分,从性能计算模型与方法、结霜与积灰特性及高效节能技术三个方面阐述了其技术研究进展和发展现状。分析表明,在高效节能技术方面,小管径、微通道以及抑霜与除霜等技术是主流方向。希望所综述内容能给行业技术人员提供一定参考。

【关键词】 换热性能计算; 结霜特性; 积灰特性; 高效节能技术

中图分类号 TB61/TB63+2 文献标识码 A

Development Status of Heat Exchangers for Small Refrigerators

Wu Jiahao Ying Yuzheng Liu Guoqiang Yan Gang

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

【Abstract】 Heat exchanger is an important component of small refrigerators (Refrigerator, freezer, air conditioning, heat pump, etc.). This paper summarize current technology and research situation of heat exchanger for small refrigerators from following three aspects: the calculation model and method for heat exchanger performance, frosting and fouling characteristics and high efficiency and energy saving technology of heat exchangers. For the high efficiency and energy saving technology of heat exchangers, the fin-and-tube heat exchangers using small diameter tubes, micro-channel heat exchangers and anti-frosting and defrosting technology have always been the mainstream. The review provide references for the technical personnel in refrigeration and air conditioning industry.

【Keywords】 Performance calculation of heat exchanger; frosting characteristics; fouling characteristics; high efficiency and energy saving technology of heat exchangers

作者简介: 吴家豪 (1999.3-), 男, 在读本科生, E-mail: wujh1123@163.com

通讯作者: 晏刚 (1971.3-), 男, 副教授, E-mail: gyan@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-17

0 引言

换热器作为冰箱、冷柜、空调、热泵等小型制冷装置的重要组成部分,不仅决定整体能效,也影响体积与成本。因此,对换热器的基础研究和优化设计是小型制冷装置产品开发的关键^[1]。本文主要对换热器性能计算模型与方法以及换热器结霜特性与积灰特性的研究现状进行综述,总结了换热器高效节能关键技术的研究与发展。

1 换热器性能计算模型与方法研究

1.1 换热性能计算模型适用性

目前,具有较高认可度与预测精度的空气侧换热特性理论预测模型包括 C C Wang 等^[2]在连续试验工况基础上提出的经验关联式, N H Kim 等^[6]在大量前人实验结果的基础上选择 $Re > 500$ 的数据所提出的关联式,以及 W Pirompugd 等^[7]采用有限环肋方法所建立的适用于全湿和部分湿条件下的传热传质关联式。

由于常用的换热性能关联式都有其适用范围, 所以有必要研究适用全工况下的计算模型。张嘉文等^[8]对上述三种常压模型进行了环境气压修正, 见表 1 所示。

出了低气压下 (40~100kPa) 平翅片管空气侧换热计算关联式, 使得三个关联式在低压环境下的预测精度均有大幅提高。修正的关联式结果如

表 1 对三种常压模型进行修正前后的结果^[8]

Table 1 Results before and after correction of three atmospheric pressure models

研究者	修正前的常压模型	修正后的低压模型
C C Wang 等 ^[4]	$j = 19.63 Re_{D_c}^{n_1} \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{1.352} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.680} N_l^{-1.291}$ <p>其中, $n_1 = 0.3745 - 1.554 \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{0.24} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.12} N_l^{-0.19}$</p>	$j_h = 12.584 Re_{D_c}^n \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{1.352} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.680} N_l^{-1.291}$ <p>其中, $n = 1.003 \left(\frac{P_c}{P_s} \right)^{0.083} - 0.626 - 1.554 \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{0.24} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.12} N_l^{-0.19}$</p>
N H Kim 等 ^[6]	$j_{N_l=3} = 0.163 Re_{D_c}^{-0.369} \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{0.106} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.106} \left(\frac{P_t}{D_c} \right)^{0.13}$ $j_{N_l=1,2} / j_{N_l=3} = 1.043 [Re_{D_c}^{-0.14} \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{-0.123} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{-0.564} \left(\frac{P_t}{D_c} \right)^{1.17}]^{(3-N_l)}$	$j_h = 0.163 Re_{D_c}^n \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{-0.3552+0.123N} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{-1.586+0.564N} \left(\frac{P_t}{D_c} \right)^{3.64-1.17N}$ <p>其中, $n = -0.255 \left(\frac{P_c}{P_s} \right)^{0.0856} - 0.17173$</p>
W Pirompugd 等 ^[7]	$j = 0.5284 Re_{D_c}^{n_1} \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{-0.04426N_l+0.45839} \left(\frac{A_o}{A_t} \right)^{-0.1407N_l+0.67158} N_l^{0.2310}$ <p>其中, $n_1 = 0.02940N_l - 0.0307 \frac{F_p}{D_c} - 0.03072 \frac{P_l}{D_c} - 0.01959 \frac{P_t}{D_c} - 0.5294$</p>	$j = 19.63 Re_{D_c}^{n_1} \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{1.352} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.680} N_l^{-1.291}$ <p>其中, $n_1 = 0.3745 - 1.554 \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{0.24} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0.12} N_l^{-0.19}$</p>

由

表 1 可见, 在指数中加入了环境气压修正因子, 这是由于环境压力对空气侧 Re 有一定的影响修正前的常压模型在低压下相对实验值的最大偏差到了 127.4%, 而修正后的低压模型预测精度有了较大程度的提高, 最大偏差分别为 32.63%、24.91% 和 21.74%, 平均偏差为 1.79%、-2.90% 和 -8.59%, 可认为张嘉文等提出的关联式可为低压工况平翅片管空气侧换热性能计算提供参考。

1.2 表面排水性能计算模型

冷凝水滞留不仅会降低传热性能、增大空气侧流动阻力与压降, 同时也为细菌滋生提供条件, 损害用户健康。因此有必要建立换热器表面排水性能的计算模型。

换热器翅片的表面特性通过影响表面液滴状态而对表面排水性能有较大的影响 S F Lunkad 等^[9]研究了垂直或倾斜表面上液滴的状态。此外, 冷凝

水总滞留量与液滴在翅片表面的尺寸分布有关, 并需要考虑水桥形成的影响。对此, 徐象国等^[10]将液滴体积 v 表示为液滴接触线 $\zeta(\varphi)$ 和液滴沿接触线一周变化的接触角 $\theta(\varphi)$ 的方程, 引入 bond 数 (液滴所受重力和表面滞留力的比值) 后, 对椭圆轮廓线模型计算得到简化后的液滴体积公式为:

$$V = \frac{\pi D^3}{24} \frac{2 - 3 \cos \theta_0 + \cos^3 \theta_0}{\sin^3 \theta_0} \quad (1)$$

其中, D 是液滴直径, θ_0 是最大接触角和最小接触角的平均值^[11]。至于液滴的尺寸分布, 采用 YIN 等^[12]验证过的方程:

$$\begin{cases} n_s = Q_s D^{B_s} & D_{\min} \leq D \leq 0.2D_{\max} \\ n_b = Q_b D^{B_b} & 0.2D_{\max} < D \leq D_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Q_s 、 B_s 、 Q_b 、 B_b 是根据表面性质确定的常数, 进而可以计算得到换热器上冷凝水的总滞留

量为:

$$m = \rho_w \int_{A_f} \int_D V(D)n(D)dDdA \quad (3)$$

其中, ρ_w 是水的密度。

目前,在小型制冷装置用换热器的性能、结露、结霜等方面的研究有了一定的进展与成果,尤其是换热系数与阻力系数关联式的研究。然而,这方面的研究仍存在模型与方法实验验证不足、微观与宏观尺度建模未耦合的问题,对此都需要进一步完善与验证。

2 换热器结霜与积灰特性研究

2.1 结霜特性

在结霜机理方面,霜层形成的过程可分为三个时期^[13],如图1所示。

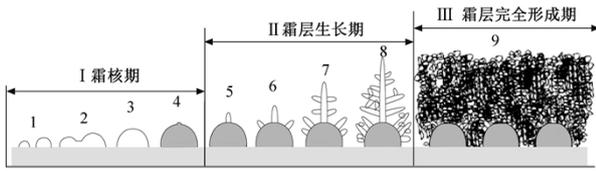


图1 冷表面典型结霜过程^[14]

Fig.1 The typical frosting process on cold surface

比起结霜机理的微观研究,更值得关注的是霜层生长的宏观特性以及结霜对换热特性的影响,目前,对前者的研究较为有限。对此,郭宪民教授团队对霜层生长特性做了大量的研究工作^[15],不仅对比了条缝与平直翅片管换热器的结霜特性^[16],发现前者在结霜初始段的霜层增长速度远高于后者,而且通过实验研究了环境参数对翅片管换热器表面结霜特性的影响^[17],获得了换热器表面霜层厚度、结霜量等参数在不同空气温度、相对湿度及迎面风速下的变化规律。图2-图4可看出结霜量随空气温度、相对湿度以及迎面风速的减小而降低。陈轶光等^[19]对低温高湿环境下的翅片管换热器结霜特性进行研究,结果与上述结论一致,还发现霜层厚度的增长分为初始的线性段和中后期的加速段。

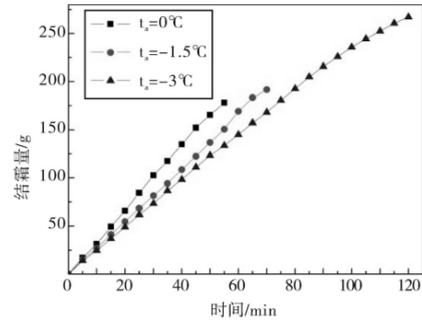


图2 不同空气温度对结霜量的影响^[17]

Fig.2 Frost mass under different air temperatures

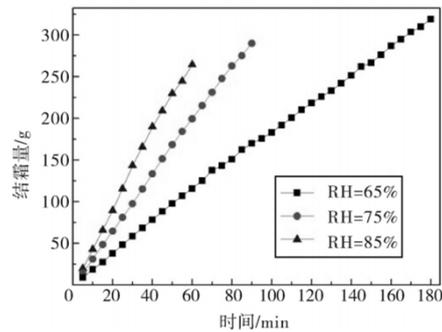


图3 不同相对湿度对结霜量的影响^[17]

Fig.3 Frost mass under different RH

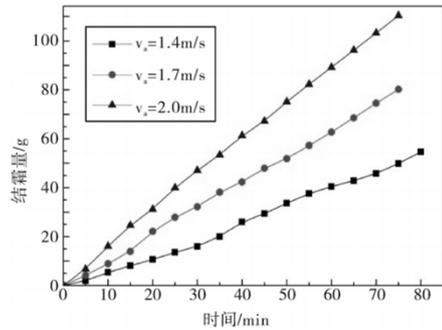


图4 不同迎面风速对结霜量的影响^[17]

Fig.4 Frost mass under different face velocities

2.2 积灰特性

2012年5月,中国质量认证中心(CQC)发布了我国第一部关于空调器长效节能评价的标准^[20],选取“换热器积灰”这一因素对空调器的长效节能进行考核评价。目前,对换热器的积灰特性的研究包括积灰机理、积灰对换热器性能的影响、积灰的影响因素以及相应的除尘技术方法等^[21]。

积灰特性的研究方法主要分为数值模拟和实验研究。刘金伟等^[22]研究了冰箱微通道换热器积灰的外部影响因素,发现粉末状灰尘加入纤维成分后积灰量和积灰速度显著增大,有电压时在积灰初期能加快风量衰减速度。T Välikangas等^[23]将流动模

拟与颗粒相沉积模拟相耦合,建立了一种新的计算模型(CFD-DEM),可用于研究不同环境、不同翅片形状以及不同颗粒类型下的空调用翅片管换热器的体积积灰率。Hu Yifeng 等^[24]首次将积灰与结霜结合起来进行研究,通过实验研究了积灰对微通道换热器霜层生长特性与换热特性的影响,并发现轻度的积灰能够增加换热与霜层生长速率。

丁国良教授团队在换热器积灰特性方面进行了一系列研究工作^[25],不仅建立了许多相关的数学模型^[26,28,31],例如,预测翅片表面颗粒沉积速率的模型^[26]、翅片效率计算模型^[28]、湿颗粒层形状与颗粒沉积质量的计算模型^[31]。而且通过实验先后研究了干工况与湿工况下换热器表面积灰特性,发现在析湿工况下,开窗翅片管换热器的管排数越多,其单位面积积灰量就越少^[27],而且相同析湿工况下的复杂结构开窗翅片(如百叶窗翅片)和小翅片间距更易积灰,从而更易增大空气侧压降^[29]。

目前对于小型制冷装置用换热器结霜与积灰特性的理论与实验研究较为成熟,但是很多研究结果仅适用于某种特定类型换热器,存在适用性不足的问题,此外需要对研究结果所直接对应的抑霜、除霜与除尘技术开展进一步的研究。

3 换热器高效节能技术研究与发展

3.1 小管径技术

小管径换热器具有紧凑、节材、降低制冷剂充注量等优点。任滔等^[32]从理论上分析了空调器采用小管径对传热、压降及系统性能的影响,分析表明,小管径换热器具有更高的传热效率,但可能会有制冷剂侧压降过大、翅片阻力过大、制热效果不好等问题。吴极等^[33]通过仿真与实验对比了在蒸发工况相同制冷量下,5mm、7mm 管径换热器的性能,结果发现,5mm 管径换热器的管内外换热系数都更高,制冷剂质量流量更少,但制冷剂侧各类压降更高。江俊等^[34]基于一台 15kW 的商用空调机组,将铜管管径由 9.52mm 替换为 5mm,结果表明,替代后不仅换热性能、制冷能力有所提高,制冷剂充注量减少,而且除霜性能也显著提升。丁国良等^[1]表明小管径会使蒸发温度下降,冷凝温度上升。而细径化的另一个明显优点即既可以减少材料消耗量与成本,可从表 2 看出。也可以因内容积的减少而明显降低制冷剂充注量,例如,采用 5mm 铜管

替代原 9.52mm 铜管,会使单位管长的铜用量减少 47.4%,充注量减少为原来的 25%。

表 2 换热器的内螺纹铜管规格^[35]

Table 2 Specification of inner copper tube of the heat exchanger

外径/mm	$\phi 5$	$\phi 7$	$\phi 7.94$	$\phi 9.52$
米克重/(g/m)	33	57	71	94
内径/mm	4.60	6.50	7.38	8.92
平均壁厚/mm	0.20	0.25	0.28	0.30

3.2 微通道技术

由于微通道换热器具有轻量节材、换热效率高、制冷剂充注量少等优势,在制冷空调领域有较为广泛的应用。一种微通道换热器的示意图如图 5 所示。

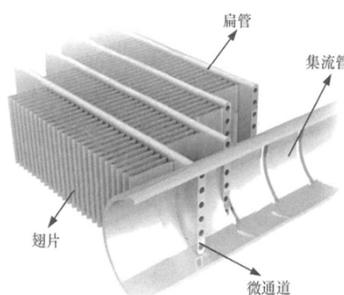


图 5 一种微通道换热器结构简图^[36]

Fig.5 Structure diagram of a microchannel heat exchanger

近两年, Pan Minqiang 等^[37]研制了一种具有扇形空腔的微通道换热器,结果表明,其性能优于传统微通道换热器。盛伟等^[38]根据一种制冷剂分布参数的评定方法研究了结霜对微通道蒸发器内制冷剂分布特性的影响,发现两相区制冷剂的分布随着蒸发器表面霜层厚度的增加而更加均匀。Zhou Fang 等^[39]通过仿真与实验的方法研究了微通道形状对强化换热的影响,结果表明雨滴形和不规则雨滴形微通道的整体性能在所选 5 种形状中最好。

3.3 抑霜与除霜方法与技术

国内外研究学者在空调器抑霜与除霜的方法与技术上做了大量的总结性工作^[40]。空调器的抑霜与除霜方法包括但不限于逆循环、热气旁通、电加热、表面改性、超声波处理等。其中,在表面改性方面,相比于改变翅片类型,表面涂层技术是更为热门的研究。如图 6 所示,液滴接触角 $\theta < 90^\circ$ 、

90°<θ<150°以及θ>150°的表面分别为亲水表面、疏水表面以及超疏水表面。其中,亲水表面涂层在结霜初期能够达到一定的抑霜效果,但随着霜层变厚和时间延长效果会有显著的下降^[40],因此目前的研究多集中于疏水与超疏水表面涂层。

梁彩华教授团队在以超疏水表面涂层为主的表面改性方法上进行了大量研究^[44],主要通过实验对比研究了不同翅片表面特性对结霜、融霜的影响,不仅多次发现超疏水表面由于其与霜层间接接触面积小、热阻大而使其抑霜效果好、融霜时间短、滞留水量少^[44],而且还基于超疏水翅片和高速热气流提出了一种新型除霜方式,成功避免了当前许多除霜方式的缺点^[49]。

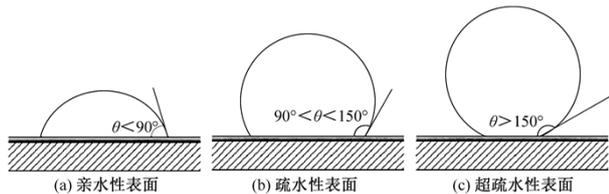


图6 不同特性表面上的液滴简图^[44]

Fig.6 Schematic diagram of a droplet on different surfaces

目前对于小型制冷装置用换热器高效节能技术的研究有较高的全面性,在小管径与微通道换热器技术以及抑霜与除霜方法上解决了许多机理性与技术性的问题,但存在综合性欠缺的问题,需要进一步对各方法与技术进行结合性研究,同时,各类新型高效节能换热器的各类特性也需要得到持续性的研究。

4 总结

(1) 换热器性能模型向高精度、宽范围的方向发展。性能计算常压模型通过适当修正 Re 后,在低压下的计算精度显著提高。

(2) 目前,对霜层生长的宏观特性研究较为有限,现有的研究主要从霜层增长速度、增长厚度及环境参数对霜层生长的影响等方面入手;积灰特性的研究主要从积灰量、积灰速率及积灰的影响等方面展开。

(3) 换热管细径化是小型制冷装置换热器的发展方向之一,小管径换热器、微通道换热器是目前的研究热点,主要围绕换热性能、耗材量、制冷剂分布等方面展开研究;换热器表面改性是抑霜、

除霜的方法之一,滞留水量少、抑霜效果好及融霜时间短是其发展目标。

参考文献:

- [1] 丁国良,吴国明,刘挺. 制冷空调换热器的研究进展(一)——小管径翅片管换热器[J]. 家电科技,2019,(4):40-45,58.
- [2] WANG C C, CHANG Y J, HSIEH Y C, et al. Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plane fins[J]. International Journal of Refrigeration, 1996,19(4):223-230.
- [3] WANG C C, HSIEH Y C, LIN Y T. Performance of plate finned tube heat exchangers under dehumidifying conditions[J]. Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme, 1997,119:109-117.
- [4] WANG C C, LIN Y T, LEE C J. An airside correlation for plain fin-and-tube heat exchangers in wet conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000,43(10):1869-1872.
- [5] WANG C C, CHI K Y, CHANG C J. Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part II: Correlation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000,43(15):2693-2700.
- [6] KIM N H, YOUN B, WEBB R L. Air-side heat transfer and friction correlations for plain fin-and-tube heat exchangers with staggered tube arrangements[J]. Journal of Heat Transfer, 1999,121(3):662-667.
- [7] PIROMPUGD W, WANG C C, WONGWISE S. Finite circular fin method for heat and mass transfer characteristics for plain fin-and-tube heat exchangers under fully and partially wet surface conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007,50(3/4):552-565.
- [8] 张嘉文,柳建华,张良,等.翅片管换热器空气侧换热模型在低气压环境下的适用性研究[J]. 制冷学报,2020,41(1):81-88.
- [9] LUNKAD S F, BUWA V V, NIGAM K D P. Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces[J]. Chemical Engineering Science, 2007,62(24):7214-7224.
- [10] 徐象国,詹思成,梁灏彬,等.空调换热器表面排水性能计算模型、整体影响及改进方法综述[J]. 机械工程学

- 报,2017,53(4):122-133.
- [11] ELSHERBINI A I, JACOBI A M. Liquid drops on vertical and inclined surfaces: II. A method for approximating drop shapes[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004,273(2):566-575.
- [12] YIN J, JACOBI A M. Condensate retention effects on the air-side heat transfer performance of plain and wavy-louvered heat exchangers[R]. Urbana-Champaign: Air Conditioning and Refrigeration Center. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000.
- [13] HAYASHI Y, AOKI A, ADACHI S, et al. Study of frost properties correlating with frost formation types[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1977,99(2):239-245.
- [14] LI Dong, CHEN Zhenqian. Experimental study on instantaneously shedding frozen water droplets from cold vertical surface by ultrasonic vibration[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science: International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics*, 2014,53:17-25.
- [15] GUO X M, CHEN Y G, WANG W H, et al. Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008,28(17):2267-2278.
- [16] 郭宪民,杨宾,陈纯正.翅片型式对空气源热泵机组结霜特性的影响[J].*西安交通大学学报*,2009,43(1):67-71.
- [17] 薛利平,郭宪民,邢震.环境参数对翅片管换热器表面结霜特性影响的实验研究[J].*低温与超导*,2017,45(4):66-71.
- [18] XUE L P, GUO X M, XING Z. Experimental Study of Frost Growth Characteristics on Surface of Fin-tube Heat Exchanger[J]. *Energy Procedia*, 2017,105:5114-5121.
- [19] 陈轶光,方笋,谷志攀.低温高湿环境下翅片管换热器结霜特性的研究[J].*冷藏技术*,2019,42(2):15-19.
- [20] CQC 9202 2012,空调器长效节能评价技术要求[S].北京:中国质量认证中心,2012.
- [21] 丁国良,詹飞龙,庄大伟,等.制冷空调换热器的研究进展(三)——换热器长效性能[J].*家电科技*,2019,(6):44-51.
- [22] 刘金伟,蒋甫政,何柳,等.冰箱微通道换热器积灰机理研究[J].*制冷学报*,2019,40(1):8-15.
- [23] Turo Välikangas, Jakob Hærvig, Heino Kuuluvainen, et al. Deposition of dry particles on a fin-and-tube heat exchanger by a coupled soft-sphere DEM and CFD[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,149:119046.
- [24] HU Y, YUILL D P, EBRAHIMIFAKHAR A. The effects of outdoor air-side fouling on frost growth and heat transfer characteristics of a micro-channel heat exchanger: An experimental study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,151:119423.
- [25] ZHAN F, TANG J, DING G, et al. Experimental investigation on particle deposition characteristics of wavy fin-and-tube heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016,99:1039-1047.
- [26] ZHAN F, ZHUANG D, DING G, et al. Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016,72:27-40.
- [27] 鞠培玲,唐家俊,庄大伟,等.析湿工况下管排数对翅片管换热器表面积灰影响的实验研究[J].*制冷技术*,2017,37(2):32-37.
- [28] ZHAN F, ZHUANG D, DING G. An analytical model for predicting the particle-deposited fin efficiency[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018,92:235-245.
- [29] ZHAN F, ZHUANG D, DING G, et al. Influence of wet-particle deposition on air-side heat transfer and pressure drop of fin-and-tube heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124:1230-1244.
- [30] 鞠培玲,詹飞龙,庄大伟,等.翅片管换热器在析湿工况下的积灰特性及对空气侧压降的影响[J].*制冷学报*, 2018,39(6):10-16.
- [31] ZHAN F, DING G, ZHUANG D. Numerical model of particle deposition on wet fin surfaces of heat exchanger under dehumidifying conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,149:119258.
- [32] 任滔,丁国良,韩维哲,等.空调器中采用小管径的影响分析及研发思路[J].*制冷技术*,2012,(1):49-52.
- [33] 吴极,王瑾,王哲旻,等.管径变化对蒸发器性能影响的仿真与实验研究[J].*制冷学报*,2015,36(6):104-110.
- [34] 江俊,张伟伟,宋晓.5mm管径铜管换热器在商用空调机组上的应用研究[J].*制冷与空调*,2016,16(12):87-91.
- [35] 杨丁丁,柳建华,宋吉,等.小管径内螺纹铜管在空调换

- 热器上的应用分析[J]. 有色金属材料与工程,2017,38(6):334-338.
- [36] 丁汉新,王利,任能.微通道换热器及其在制冷空调领域的应用前景[J].制冷与空调,2011,11(4):111-115,110.
- [37] PAN M, WANG H, ZHONG Y, et al. Experimental investigation of the heat transfer performance of microchannel heat exchangers with fan-shaped cavities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019,134:1199-1208.
- [38] 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.
- [39] ZHOU Fang, ZHOU Wei, ZHANG Chenying, et al. Experimental and numerical studies on heat transfer enhancement of microchannel heat exchanger embedded with different shape micropillars[J]. Applied Thermal Engineering, 2020,175:115296.
- [40] 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):1-7,81.
- [41] AMER M, WANG C C. Review of defrosting methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,73:53-74.
- [42] 刘业凤,吴琪.结霜机理及热泵除霜技术研究综述[J].节能技术,2018,36(3):195-200.
- [43] 张毅,张冠敏,张莉莉,等.空气源热泵结霜机理及除霜/抑霜技术研究进展[J].制冷学报,2018,39(5):10-21,46.
- [44] LIANG C, WANG F, LV Y, et al. Experimental study of the effects of fin surface characteristics on defrosting behavior[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,75:86-92.
- [45] 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,(4):745-750.
- [46] WANG F, LIANG C, YANG M, et al. Effects of surface characteristic on frosting and defrosting behaviors of fin-tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,75:1126-1132.
- [47] LIANG C, WANG F, LV Y, et al. Experimental and theoretical study of frost melting water retention on fin surfaces with different surface characteristics[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016,71:70-76.
- [48] WANG F, LIANG C, YANG M, et al. Effects of surface characteristics on liquid behaviors on fin surfaces during frosting and defrosting processes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015,61:113-120.
- [49] WANG F, LIANG C, YANG M, et al. Preliminary study of a novel defrosting method for air source heat pumps based on superhydrophobic fin[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,90:136-144.
- [50] 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.
- [51] WANG F, LIANG C, YANG W, et al. Effects of frost thickness on dynamic defrosting on vertical hydrophobic and superhydrophobic fin surfaces[J]. Energy & Buildings, 2020,223:110134.