

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.03.007

迎面风速对电动汽车热泵系统蒸发器 除霜特性影响的实验研究

杨忠诚, 苏林, 方奕栋, 李康, 穆文杰, 刘旭阳

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:针对电动汽车热泵空调系统在冬季室外换热器结霜后除霜效率低的问题,课题组设计并搭建了电动汽车热泵空调系统的实验台架,研究了在环境温度 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度 85% 下,电动汽车热泵空调系统中的蒸发器结霜后,蒸发器迎面风速对除霜特性的影响。实验结果表明:在实验工况下,室外换热器所结霜层呈间隔式分布;在系统逆循环除霜过程中,压缩机吸排气压力和换热器进出口温度逐渐升高,但随着蒸发器迎面风速的增高而降低,同时系统的制冷量出现波动现象;在相同的结霜工况下,较高的蒸发器迎面风速能缩短除霜时间,蒸发器迎面风速从 0.8 m/s 增加至 2.3 m/s ,除霜时间缩短 37.4% ,但此时的HVAC出风温度降低 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此较低的蒸发器迎面风速则能提高HVAC出风温度,提高乘员舱舒适度。

关键词:电动汽车;热泵;除霜特性;蒸发器迎面风速

中图分类号:U469.72;TH45

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2021)03-0043-06

Influence of Evaporator Wind Speed on Defrosting Characteristics of Electric Vehicle Heat Pump System

YANG Zhongcheng, SU Lin, FANG Yidong, LI Kang, MU Wenjie, LIU Xuyang

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of low defrosting efficiency of electric vehicle heat pump air conditioning system after outdoor heat exchanger frosting in winter, the research group studied the influence of evaporator head wind speed on defrosting characteristics after evaporator frosting under $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 85% relative humidity. The experimental results show that the frosting layer of outdoor heat exchanger is spaced under the experimental conditions. In the process of reverse circulation defrosting, the inlet and outlet pressure of compressor and the inlet and outlet temperature of heat exchanger gradually increase, but decrease with the increase of evaporator head wind speed, and the cooling capacity of the system fluctuates. Under the same frosting condition, the higher head wind speed of evaporator can shorten the defrosting time. The head wind speed of evaporator increases from 0.8 to 2.3 m/s , and the defrosting time is reduced by 37.4% . However, the HVAC (heating, ventilation and air conditioning) outlet air temperature decreases by $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. So the lower evaporator wind speed can improve the outlet air temperature of HVAC and the comfort of passenger compartment.

Keywords: electric vehicle; heat pump; defrost characteristics; evaporator head wind speed

随着能源危机和环境问题的不断加剧,汽车行业采取节能环保措施势在必行,其中纯电动汽车作为汽车行业可持续发展的新途径而备受关注。汽车空调作为其不可缺少的子系统不仅保障了乘员舱的热舒适性,而且未来有可能整合电池与电子器件的热管理功

能^[1-2]。目前,针对冬季低温采暖,电动汽车更倾向于采用热泵空调系统。相比于电动汽车之前采用的PTC冬季采暖,热泵空调系统可以降低能耗,显著降低空调系统对电动汽车续航里程的消极影响^[4-5]。热泵空调系统也存在一些问题,特别是在低温、高湿的环境下,

收稿日期:2020-10-22;修回日期:2021-03-20

第一作者简介:杨忠诚(1997),男,土家族,湖北恩施人,硕士研究生,主要研究方向为制冷及低温工程。E-mail: yangzhongcheng419@163.com

当系统处于制热模式时,热泵空调系统的室外换热器容易结霜。室外换热器结霜造成风道堵塞,以致于通风阻力增大,使得外部换热器的整体热阻增大,从而导致霜的累积和增厚,严重影响汽车空调系统的工作性能和可靠性^[6-7]。

针对热泵空调系统冬季运行时的室外换热器的结霜和除霜问题,国内外很多学者对其进行了研究。刘斌等^[8]发现换热器表面温度对霜层厚度有一定影响,结霜速率则与空气相对湿度有关。Xu Bo 等^[9]对比了水平和竖直扁管型两种微通道换热器的循环结霜性能,发现竖直扁管型微通道换热器具有更好的排水能力,参数稳定性较好。Wang Feng 等^[10]研究了表面湿润性对翅片管换热器除霜性能的影响,结果表明超疏水换热器除霜性能最好,亲水换热器次之。Padhmanabhan 等^[11]比较了翅片式换热器与微通道换热器在除霜过程中的性能差异,发现翅片换热器的除霜时间约为微通道换热器的 2 倍,但微通道的结霜率明显高于翅片换热器。董军启等^[12]研究了横排和竖排两种布置结构形式的微通道换热器分别在 2 和 1 °C 的寒湿工况下的循环结霜和除霜的性能和机理,发现横排布置结构形式在结霜和除霜特性上均显著优于竖排布置结构形式。Qu 等^[13-14]研究了多管换热器的除

霜性能,结果表明上层管的除霜时间快于下层管,其除霜效率可达 34.5%。

以上研究主要集中在换热器的类型和结构以及环境温湿度对换热器的结霜和除霜特性的影响。因蒸发器迎面风速会影响蒸发器表面的对流换热,从而影响室外换热器的结霜和除霜。陈轶光^[15]通过数值模拟结合实验,发现结霜量与蒸发器迎面风速不呈正相关的线性增长,而是呈现开口向上的凹形。现阶段蒸发器迎面风速对室外换热器除霜特性的影响尚不明确,因此课题组设计并搭建了电动汽车热泵空调系统的实验台架,研究了在同等结霜工况下,蒸发器侧风机送风风速对系统除霜特性的影响。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验装置

为模拟汽车行驶环境,整个系统搭建在焓差室中。焓差室由室内侧和室外侧 2 部分构成,通过独立的环境控制系统来控制 2 侧房间的温湿度,达到模拟车内和车外环境的效果。整个实验装置和系统测试示意图如图 1 所示,通过室内外环境控制系统中的冷冻机组、电加热器和电加湿器控制室内侧/室外侧的温度和湿度,同时由两侧风洞装置控制风量大小。

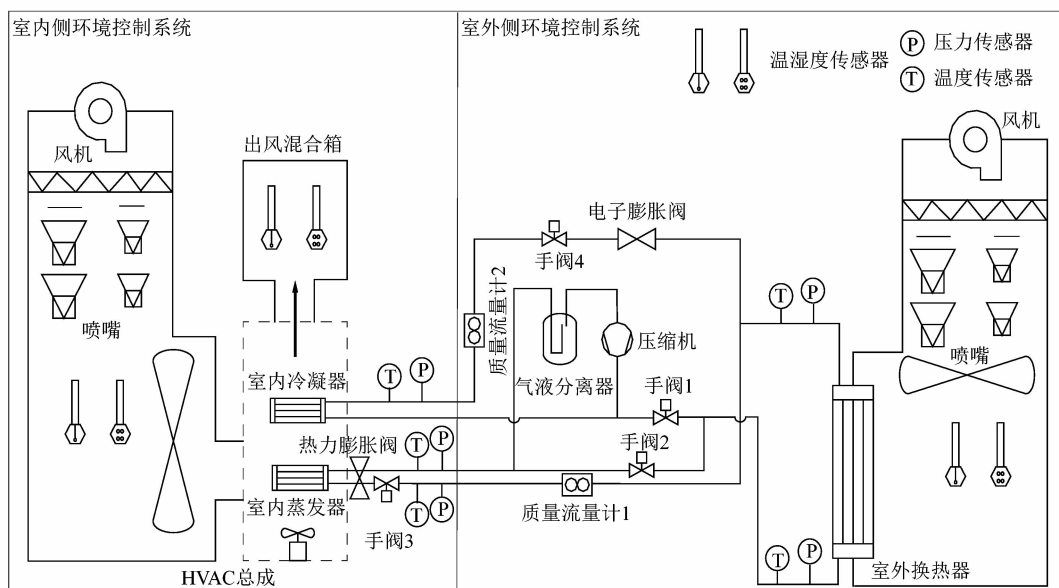


图 1 空气源热泵系统实验装置示意图

Figure 1 Experimental diagram of air source heat pump system

实验采用的电动汽车热泵系统为 3 换热器系统,制冷剂为 R134a。系统包括电动涡旋压缩机(容量为 34 ml,电压 320 V)、室外换热器(630 mm × 360 mm ×

20 mm,竖排 3 流程)、室内蒸发器(250 mm × 247 mm × 48 mm,竖排 4 流程)、室内冷凝器(200 mm × 180 mm × 30 mm,竖排 4 流程)、电子膨胀阀(功率 50 W,直流电

压 24 V)、气液分离器、质量流量计和阀等部件。系统通过阀的通断来实现制冷和制热模式的切换。当系统运行制热模式时,阀 2 和 4 开启,阀 1 和 3 关闭,此时从压缩机排出的高温高压制冷剂通过室内冷凝器向 HVAC 总成内的空气散热,制冷剂之后依次通过电子膨胀阀、蒸发器和气液分离器回到压缩机。系统室外换热器除霜则通过逆循环实现,即关闭阀 2 和 4,开启阀 1 和 3,高温高压的制冷剂从压缩机排出后经过室外换热器,释放热量实现霜层融化,制冷剂再依次经过热力膨胀阀、室内蒸发器和气液分离器回到压缩机。

为测量制冷剂的温度和压力,在压缩机、室外蒸发器、室内冷凝器、室内蒸发器的进出口分别布置温度和压力传感器,均通过安捷伦数据采集仪采集数据。温度传感器为四线制 PT100 铂电阻;压力传感器为 NS-P 系列显型压力传感器测量,量程为 0 ~ 4 MPa;空调箱出风温度可通过出风混合箱测得。实验参数测量精度如表 1 所示。

表 1 试验台测量装置精度
Table 1 Measuring device accuracy

制冷剂侧 温度 误差/℃	空气侧 温度 误差/℃	空调箱 出风温度 误差/℃	制冷剂侧 压力 误差/MPa	制冷剂质量 流量误差/ (kg · h ⁻¹)	压缩机 功率 误差/W
±0.2	±0.2	±0.1	±0.01	±0.5	±1

1.2 实验工况和方法

蒸发器容易在高湿度、非极低环境温度、低风速和高换热量工况下结霜^[16],系统采用全新风模式,室内侧和室外侧温湿度均保持一致,空气干球温度取 2 ℃,空气相对湿度取 85%。蒸发器迎面风速由通过风速标定实验的室外风机的风量来控制。在实验过程中,通过定时拍照的方式记录室外换热器的结霜和除霜情况。在结霜过程中,每隔 1 min 拍照一次,在除霜过程中,每隔 2 s 拍照一次。为研究蒸发器迎面风速对除霜过程的影响,需要确保结霜量相同,故蒸发器迎面风速 1.5 m/s 作为统一结霜风速。当换热器表面完全结霜后,系统切换成逆循环制冷模式来实现除霜,压缩机转速设定为 4 000 r/min,同时调节蒸发器迎面风速的大小,依次分析迎面风速为 0.8,1.3,1.5,1.8 和 2.3 m/s 时对除霜的影响。

2 实验结果分析

2.1 结霜

实验开始前将室外侧空气的相对湿度设定为 50%,系统稳定运行后,通过室外侧的环境控制系统,

将室外侧空气的相对湿度增加至 85%,热泵系统的蒸发器开始结霜,观察结霜情况。

当系统稳定运行后开启电加湿器,8 min 后,蒸发器表面开始出现结霜迹象,29 min 后结霜完毕。结霜过程中蒸发器表面变化如图 2 所示。霜层分布呈现间隔式,第 II 流程出现左半流道未结霜的现象。

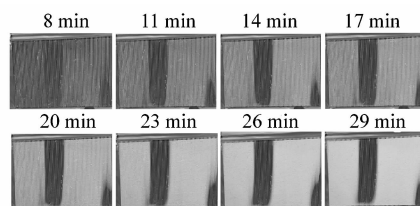


图 2 蒸发器结霜变化图

Figure 2 Frost formation diagram of evaporator

蒸发器的流程分布和制冷剂流向如图 3 所示。制冷剂经过电子膨胀阀节流之后,进入蒸发器,当蒸发器表面温度低于周围空气的露点温度与水的冰点温度时,空气中的饱和或过饱和水蒸气就会在蒸发器表面凝结成核,凝结液滴会进一步冻结。随后周围空气中的水蒸气不断在冻结的液滴上凝华结霜,霜将整个表面覆盖。第 I 流程的换热器扁管中,制冷剂因重力作用从上往下流入底部集液管,此流程的扁管中液态和气态制冷剂均匀分布,因此霜层分布较为均匀;制冷剂进入第 II 流程时,气态制冷剂密度较小,易从集液管进入扁管,并集中在第 II 流程左半部分扁管,导致这部分制冷剂未发生蒸发吸热^[17],所以出现右半部分扁管结霜,左半部分扁管未结霜的现象;制冷剂进入第 III 流程后,同样因重力作用自上而下流动,因气态制冷剂流速较快,聚集在换热器第 III 流程右部,液态制冷剂很难到达该位置进行换热,导致换热器第 III 流程的右下角部分扁管未结霜^[18]。

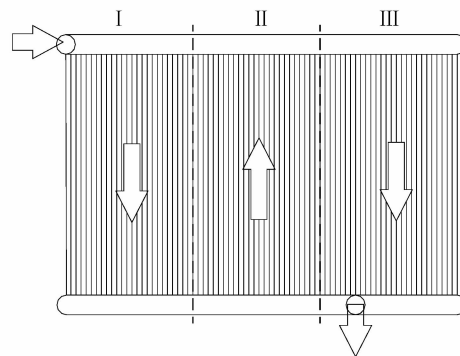


图 3 蒸发器模型

Figure 3 Model of evaporator

2.2 除霜

结霜完成后,关闭压缩机,关闭阀 2 和阀 4,打开阀 1 和阀 3,将系统切换到制冷模式,通过逆循环达到除霜的目的。在除霜过程中 2 s 拍照一次记录蒸发器表面霜层变化过程。设定蒸发器迎面风速为 1.5 m/s ,除霜过程中的蒸发器表面变化如图 4 所示。随着时间的推移,蒸发器的第Ⅲ流程表面的霜层首先融化,60 s 后第Ⅲ流程的霜全部融化,直到 380 s,第Ⅰ流程的霜层才全部融化。

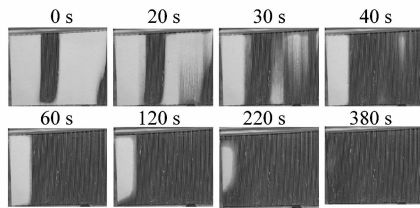


图 4 室外换热器除霜变化
Figure 4 Defrosting change of outdoor heat exchanger

由图 5 得知,在制冷模式下,压缩机排出的高温制冷剂从换热器的第Ⅲ流程下方的集液管进入换热器的扁管,第Ⅲ流程的扁管因最先与制冷剂发生换热,所以第Ⅲ流程的扁管除霜最快。制冷剂依次经过 3 个流程的换热器扁管换热后,制冷剂温度逐渐降低,第Ⅰ流程的扁管除霜时间较长。

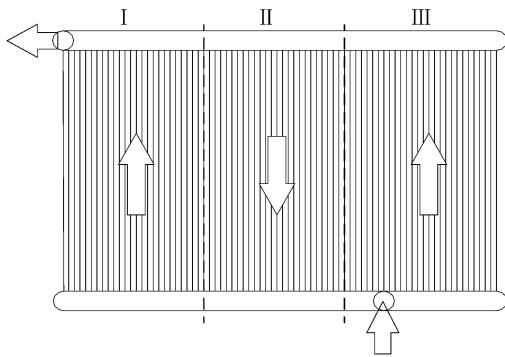


图 5 除霜时蒸发器里制冷剂流向
Figure 5 Refrigerant flow in evaporator during defrosting

2.3 迎面风速对除霜特性的影响

2.3.1 迎面风速对除霜时间的影响

在相同的结霜工况下,改变蒸发器迎面风速,比较所需除霜时间。经实验测得数据得出除霜时间与蒸发器迎面风速关系如图 6 所示。由图可知,增大蒸发器迎面风速,除霜时间缩短。说明高风速增大了空气与

室外换热器表面的对流换热量,除霜效率提高。

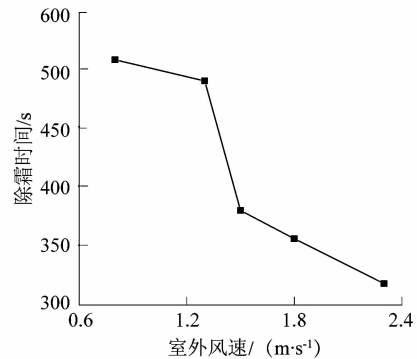


图 6 除霜时间和蒸发器迎面风速关系
Figure 6 Relationship between defrosting time and evaporator head wind speed

2.3.2 迎面风速对压缩机特性的影响

除霜过程中压缩机吸排气压力随风速变化情况如图 7 所示。系统处于制冷模式,随着除霜时间的增加,压缩机吸排气压力均迅速升高^[19],除霜 200 s 后压缩机吸排气压力增大幅度放缓。从图 7 中还可以看出,加大蒸发器迎面风速(室外风速),压缩机吸排气压力逐渐降低,蒸发器迎面风速从 0.8 m/s 提高到 2.3 m/s ,除霜完成时压缩机吸排气压力分别降低至 15.6% 和 15.3%。

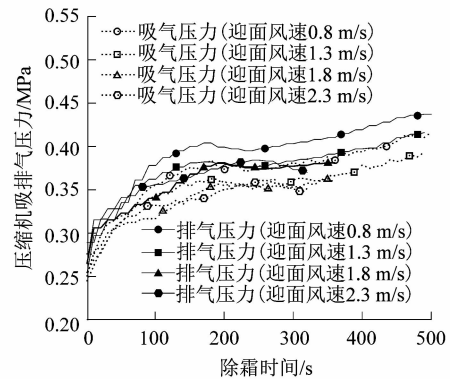


图 7 压缩机吸排气压力和除霜时间关系
Figure 7 Relationship between intake and exhaust pressure of compressor with defrosting time

压缩机在除霜过程中的功耗变化如图 8 所示,随着除霜时间的增加,压缩机功率瞬间上升再以较小的幅度缓慢增大。同时可以从图中看出,蒸发器迎面风速对压缩机功耗影响不大。

2.3.3 迎面风速对蒸发器进出口温度的影响

图 9 所示为在不同蒸发器迎面风速下,室外换热器进出口温度随除霜时间变化曲线。随着霜层的融

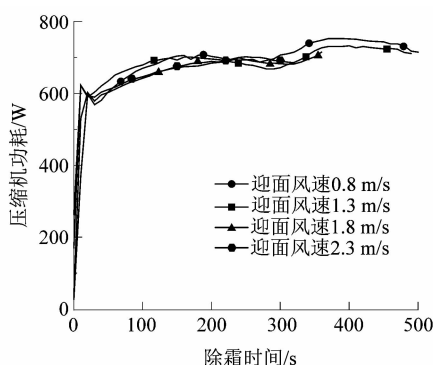


图8 压缩机功耗随除霜时间的变化
Figure 8 Variation of compressor power consumption with defrosting time

化,不同风速下的室外换热器进出口温度均随着除霜时间的增加而增加。在迎面风速 0.8 m/s 的蒸发器迎面风速下,室外换热器的出口温度最高,在迎面风速 2.3 m/s 的蒸发器迎面风速下,室外换热器的出口温度最低。这是因为高风速会增加室外换热器与空气的对流换热,加强了室外换热器内的制冷剂与空气侧的传热;在低风速下的压缩机排气压力较高,排气温度较高,换热器进口温度高于高风速工况,所以在除霜结束后,迎面风速 0.8 m/s 工况下的进出口温差比迎面风速 2.3 m/s 工况下的进出口温差高 7.8 ℃。

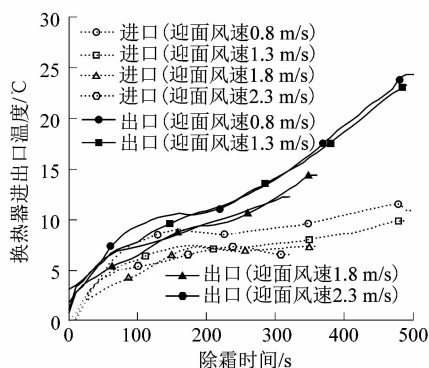


图9 室外换热器进出口温度随除霜时间的变化
Figure 9 Variation of inlet and outlet temperature of outdoor heat exchanger with defrosting time

2.3.4 迎面风速对 HVAC 出风温度的影响

图 10 所示为在不同室外风量下,随着除霜时间的增长,供暖通风与空气调节 (heating, ventilation and air condition, HVAC) 出风温度的变化情况。当逆循环开启后,系统开启制冷模式,故 HVAC 出风温度迅速降低。在除霜过程中,室外换热器左边第 I 流程的霜层融化变慢,因此在 HVAC 出风温度降低到最小值后会

出现变化幅度不大的现象;当除霜过程接近结束时,流出室外换热器的制冷剂温度逐渐升高,导致制冷量减少,HVAC 出风温度出现提高的现象;室外风量的变化也会导致 HVAC 出风温度的变化,对比迎面风速 0.8 和 2.3 m/s 的 HVAC 出风最低温度,前者比后者高 3.8 ℃,并且在除霜的最后时间,前者的 HVAC 出风温度高了 4.9 ℃,所以较小的室外风量能得到更高的 HVAC 出风温度。

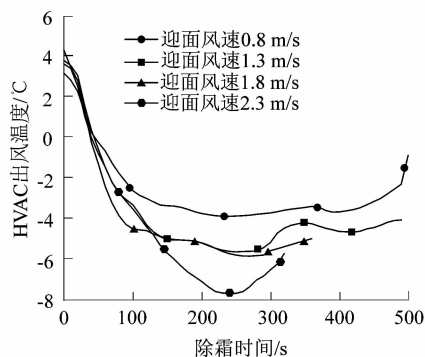


图10 HVAC 出风温度随除霜时间的变化
Figure 10 Variation of HVAC outlet air temperature with defrosting time

3 结论

课题组搭建电动汽车热泵空调系统试验台,研究了室外换热器在冬季运行时结霜特性,并比较分析了蒸发器迎面风速对室外换热器除霜特性的影响,得出如下结论:

1) 在实验测试工况下,受重力和两相流制冷剂密度不均导致的气液分离 2 个因素的影响,室外蒸发器所结霜层分布呈现间隔式分布。

2) 压缩机的吸排气压力和室外换热器进出口温度在逆循环除霜过程中,都会逐渐升高,都随着蒸发器迎面风速的增加而降低。但是系统的制冷量和 HVAC 出风温度在除霜过程中不稳定,会出现波动现象。

3) 在逆循环除霜过程中,较高的蒸发器迎面风速可以提高除霜效率。除霜过程中,蒸发器迎面风速为 0.8 m/s 工况下除霜时间比迎面风速为 2.3 m/s 时缩短 37.4%,但此时系统的制冷量增加,HVAC 出风最低温度降低 3.8 ℃。综合考虑除霜时间与 HVAC 出风温度,在除霜过程中,文中实验工况下的最佳蒸发器迎面风速为 1.8 m/s。

参考文献:

- [1] LIU Z F, SONG L, ZHAO D P, et al. Automotive air conditioning [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [2] QIN F, XUE Q F, ALBARRACIN VELEZ G M, et al. Experimental

- investigation on heating performance of heat pump for electric vehicles at 20 °C ambient temperature [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102: 39–49.
- [3] ZHANG Z Q, WANG D D, CHEN J P, et al. Electric vehicle range extension strategies based on improved AC system in cold climate —a review[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 141–150.
- [4] BELLOCCHI S, GUIZZI G L, MANNO M, et al. Reversible heat pump HVAC system with regenerative heat exchanger for electric vehicles: analysis of its impact on driving range [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 290–305.
- [5] 张子琦, 李万勇, 陈江平, 等. 电动汽车冬季负荷特性研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 39–44.
- [6] 张哲, 田津津. 风冷热泵蒸发器结霜特性的实验研究[C]//中国制冷空调工业协会, 中国制冷学会. 第十三届全国热泵与系统节能技术大会论文集. 敦煌: 中国制冷学会, 2008: 3.
- [7] 李海军, 周光辉, 李安桂, 等. 热泵型纯电动汽车空调结霜特性研究[J]. 低温与超导, 2014, 42(9): 60–63.
- [8] 刘斌, 杨永安, 杨昭. 低温结霜模型及影响因素的分析[J]. 制冷学报, 2004, 25(4): 40–42.
- [9] XU B, HAN Q, CHEN J P, et al. Experimental investigation of frost and defrost performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems[J]. Applied Energy, 2013, 103: 180–188.
- [10] WANG F, LIANG C H, ZHANG X S, 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.
- [11] PADHMANABHAN S, CREMASCHI L, FISHER D E, et al. 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.
- [12] 董军启, 张光华, 唐钦远, 等. 电动汽车热泵空调冷凝蒸发器的特性实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(6): 118–124.
- [13] QU M L, XIA L, DENG S M, et al. A study of the reverse cycle defrosting performance on a multi-circuit outdoor coil unit in an air source heat pump part I: Experiments[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 122–129.
- [14] QU M L, PAN D M, XIA L, et al. A study of the reverse cycle defrosting performance on a multi-circuit outdoor coil unit in an air source heat pump part II: Modeling analysis[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 274–280.
- [15] 陈轶光. 空气源热泵结霜/除霜特性的数值模拟与实验研究[D]. 天津: 天津商学院, 2006: 56–60.
- [16] QU X H, SHI J Y, QI Z G, et al. Experimental study on frosting control of mobile air conditioning system with microchannel evaporator [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14): 2778–2786.
- [17] 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): 58–64.
- [18] 周国梁, 苏林, 吴龙兵, 等. 变工况条件下微通道蒸发器换热特性实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 87–93.
- [19] 刘明康, 苏林, 方奕栋, 等. 电动汽车热泵空调系统冬季采暖性能实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 45–51.



www.QCtester.com

因为专业, 所以权威

因为用心, 所以收获更多

扫一扫 加入我们