

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.02.004

冷凝器流程数和放置形式对热泵空调系统 制冷性能的影响

张超波, 苏林*, 刘旭阳, 谷晓阳

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:为揭示冷凝器流程数和放置形式对热泵空调系统制冷性能的影响,课题组设计了热泵空调系统制冷实验。通过实验研究了不同流程数和放置形式的冷凝器对系统制冷量、能效比 R_{EE} 和出风温度等参数的影响;通过红外热像仪记录了冷凝器表面温度分布特性,并采用Otsu算法分析了冷凝器高温区域面积占比。研究表明:二流程倒置较其他布置方案有更大的制冷量,更高的 R_{EE} 值以及更低的出风温度;二流程布置方案较三流程有较低的冷凝压力,较低的压比以及较小的压缩机进出口比功;不同流程、不同放置形式的微通道冷凝器,其表面温度分布有差异,二流程较三流程温度分布均匀性好;二流程倒置时高温面积占比大,压缩机转速为4 000 r/min时,冷凝器高温区域占比达62.1%。选用倒置形式的二流程微通道换热器作为冷凝器,可有效提升热泵空调系统制冷效果。

关键词:微通道冷凝器;制冷性能;Otsu算法;流程数;放置形式;能效比

中图分类号:TH184;TK122

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2022)02-0021-007

Effects of Condenser Flow Number and Placement Form on Refrigeration Performance of Heat Pump Air Conditioning System

ZHANG Chaobo, SU Lin*, LIU Xuyang, GU Xiaoyang

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

Abstract: In order to reveal the influence of condenser flow path number and placement form on the refrigeration performance of heat pump air conditioning system, a refrigeration experiment of heat pump air conditioning system was designed. Through experimental tests, the effects of condensers with different flow path numbers and placement forms on the refrigeration capacity, energy efficiency ratio, outlet air temperature and other parameters of the system were studied. The surface temperature distribution characteristics of condenser were recorded by infrared thermal imager, and the area proportion of high temperature area of condenser was analyzed by Otsu algorithm. The results show that compared with other layout schemes, the two-flow condenser inverted form has larger refrigeration capacity, higher energy efficiency ratio and lower air outlet temperature. Compared with the three-flow condenser, the two-flow condenser has lower condensing pressure, lower pressure ratio and less compressor power consumption. The surface temperature distribution of micro-channel condenser with different flow numbers and different placement forms is different. The temperature distribution uniformity of the two-flow condenser is better than that of the three-flow condenser. When the two-flow condenser is inverted, the high-temperature area accounts for a large proportion. At a compressor speed of 4 000 r/min, the high-temperature area of the condenser accounts for 62.1%. The cooling effect of heat pump air conditioning system can be effectively improved by selecting an inverted two-flow micro-channel heat exchanger as the condenser.

收稿日期:2021-11-26;修回日期:2022-01-18

第一作者简介:张超波(1995),男,内蒙古兴安人,硕士研究生,研究方向为汽车热管理技术。通信作者:苏林(1962),男,福建厦门人,博士,教授,研究方向为汽车热管理技术,车用空调热泵技术,汽车热管理系统、零部件设计及优化。E-mail: 13213663559@163.com

Keywords: micro-channel condenser; cooling performance; Otsu algorithm; flow path number; placement form; energy efficiency ratio

热泵空调系统是电动汽车耗能最大的辅助子系统,开启该系统会极大地减小电动汽车续航里程^[1-3]。为改善空调系统能耗,电动汽车需要换热性能更好的换热器。微通道换热器因在微尺度下,表面作用增强,面体比增大^[4],相较传统换热器拥有更强的换热能力。因此体积小、换热效率高的微通道换热器迅速取代了传统换热器,被广泛应用在电动汽车上。

近年来,微通道换热器日益受到各方关注。有学者针对平行流微通道换热器进行了研究。张萍等^[5]针对微通道平行流冷凝器,分析了迎面风速、进风温度及制冷剂流量对冷凝器换热性能和压降的影响。谢翌等^[6]研究了车用平行流微通道冷凝器的流程扁管布置,提出了一种平行流冷凝器流程扁管数分配的优化设计方法。杨润泽等^[7]建立了车用多元平行流冷凝器仿真模型,发现车用平行流冷凝器的流程数不宜过多。赵宇等^[8]对2组不同流程结构的蒸发器进行了性能分析,发现二流程设计比四流程设计具有更好的传热与压降特性。唐伟伟^[9]对采用平行流换热器的汽车空调系统性能和充注量进行了仿真研究,观察了不同充注量对系统性能和制冷剂分布的影响。另有学者对微通道换热器的温度分布进行了研究。巫江虹等^[10]研究了电动汽车热泵空调微通道换热器的温度分布特性,采用红外热成像仪记录了车外换热器温度分布变化情况,发现改善气液两相的分配均匀性比改善气相的分配均匀性更利于系统性能的提升。唐启天等^[11]对室外侧换热器在不同充注量和转速下的表面温度分布均匀性进行了实验研究,发现充注量适中时,在不同转速下制冷性能和换热器温度分布均匀性同时达到最优。胡莎莎等^[12]对3个不同流程布置的微通道冷凝器进行了系统制冷实验并记录了冷凝器表面的温度分布,发现随流程数增加,冷凝器换热量和压降增大,且二流程冷凝器温度分布均匀性好于其他情形。

各方学者已对微通道换热器进行了大量研究,但是,对电动汽车竖直流微通道换热器研究相对较少,缺少竖直流微通道换热器放置形式及流程数对系统性能影响的研究。本研究中的放置形式指冷凝器安装方

向,并分为正置和倒置2种情况。正置指制冷剂从冷凝器上部进入,倒置则相反。

针对搭载不同流程数和放置形式的微通道冷凝器的热泵空调系统,课题组通过实验研究了系统制冷性能和冷凝器表面温度分布特性。一方面,利用新能源汽车空调基础综合评估实验室,探究冷凝器在不同流程数和放置形势下对热泵空调系统制冷性能的影响;另一方面,利用红外热像仪观察并分析微通道冷凝器的温度分布,探究不同流程数和放置形式的微通道冷凝器换热特性。

1 实验装置及测试方法

1.1 实验装置

实验在新能源汽车空调基础综合评估实验室中进行,实验室由室内侧和室外侧2部分构成。通过各自独立的环境控制系统来控制室内外的送风温度、风量和相对湿度等实验参数。图1为实验原理及测试系统图。如图所示,该实验测试系统主要由电动涡旋式压缩机、微通道冷凝器、微通道蒸发器、储液罐、气液分离器、质量流量计、电磁阀和电子膨胀阀等组成。来自蒸发器的低压制冷剂气体被涡旋式压缩机压缩成高温高压的制冷剂气体后进入冷凝器。冷凝后的制冷剂液体依次流过储液罐和质量流量计,在电子膨胀阀处被节流降压,以两相态的形式流入蒸发器。制冷剂蒸发吸热后流入气液分离器,然后进入压缩机吸气口,最终形成一个完整循环。在整个循环中,储液罐和气液分离器起到分离制冷剂气液两相的作用。此外,该实验系统还利用红外热像仪对冷凝器的温度分布进行了观测。

本实验所使用的涡旋式压缩机排量为27 mL/r,输入电压为144 V。蒸发器采用竖直流双排4流程微通道换热器,其长×宽×厚为200 mm×200 mm×48 mm,扁管数为50,流程布置为12-13-12-12。气液分离器与储液罐容积分别为700和900 mL。质量流量计测量范围为0~300 kg/h。压缩机的功率用输入电压和电流的乘积表示。电子膨胀阀和电磁阀均为12 V直流驱动,其中电子膨胀阀容量为3.517 kW。红外热像仪测温范围为-40~150℃,精度为读数的±2%。

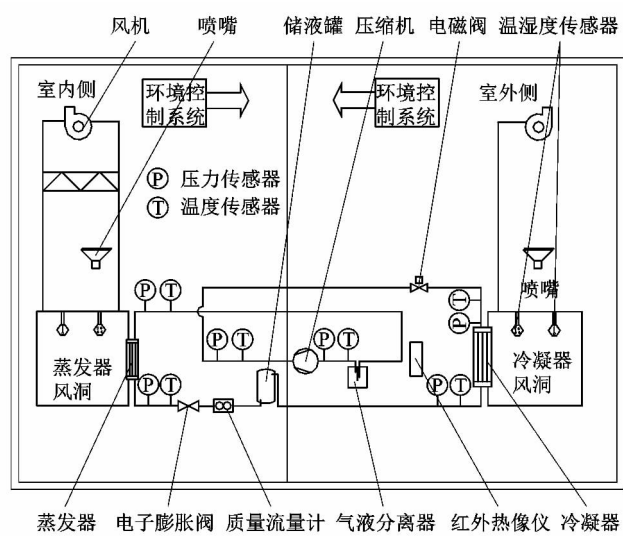


图1 实验原理及测试系统

Figure 1 Experimental principle and test system

该系统共有6个温度和压力测点,分别在压缩机、室内蒸发器和室外冷凝器的进出口。同时,在环境控制系统中,每个风洞内部还安装有温度和相对湿度传

感器。该实验系统实验设备主要参数测量精度如表1所示。

图2为冷凝器样件流程示意图,图中展示了2个几何尺寸相同的样件的流程布置及制冷剂走向。表2为2个样件具体结构参数,2样件除流程布置不同,其余结构参数均相同。在本实验中,2个冷凝器样件和蒸发器均采用竖直流微通道的结构。这种设计综合考虑了制冷剂在换热器中各位置分布的均匀性以及冷凝水的排离便利性^[13]。

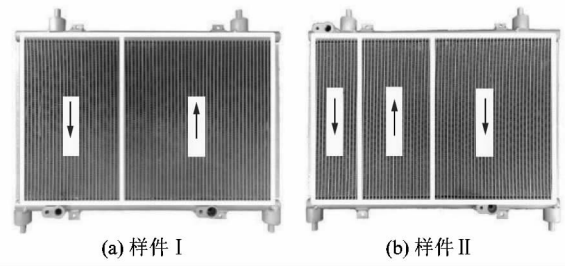


图2 冷凝器流程示意图

Figure 2 Flow diagram of condenser

表1 主要参数测量精度

Table 1 Measurement accuracy of main parameters

测量精度					
制冷剂侧压力/kPa	制冷剂侧温度/℃	空气侧相对湿度/%	空气侧温度/℃	制冷剂流量/(kg·h ⁻¹)	压缩机功率/W
±10	±0.1	±1	±0.1	±0.5	±1

表2 冷凝器结构参数

Table 2 Structural parameters of condenser

名称	长×宽×厚/ (mm×mm×mm)	流程 布置	扁管 数量	换热面 积/m ²	换热器 类型
样件 I	465×325×16	28-42	70	0.15	微通道式
样件 II	465×325×16	14-21-35	70	0.15	微通道式

1.2 实验方法与测试工况

本实验中制冷剂采用 R134a,通过充注量试验,确定实验系统最佳充注量为 1.7 kg。为研究在不同转速下冷凝器的流程数及放置形式对整个热泵空调系统的

制冷性能影响,实验首先将二流程冷凝器样件正向放置,依次测试涡旋压缩机转速在 2 000,3 000 和 4 000 r/min 下热泵空调系统制冷性能;然后,改变二流程冷凝器样件的放置形式,重新测试不同转速下空调系统性能参数。三流程冷凝器样件的测试方法与二流程冷凝器样件测试方法相同。最后,综合采集到的实验数据和红外热像仪拍摄到的冷凝器温度分布照片,对该空调系统性能进行分析。参考国家相关汽车测试标准以及空调行业测试标准^[14-15],本次实验测试工况如表 3 所示。

表3 实验测试工况

Table 3 Test condition of experiment

温度/℃		风量/(m ³ ·h ⁻¹)		相对湿度/%		压缩机转速/
室内送风	室外送风	室内送风	室外送风	室内送风	室外送风	(r·min ⁻¹)
27	35	450	950	60	40	2 000,3 000,4 000

2 实验结果与分析

2.1 流程数及放置形式对系统性能的影响

图3表示空调系统制冷量随压缩机转速变化情况。从图3可以看出,在相同温度、相同迎风面积情况下,冷凝器的不同流程和放置形式均会对该系统制冷量产生影响。一方面,二流程倒置的制冷量高于其他布置形式,在不同转速下,二流程倒置的制冷量较二流程正置高2.57%~5.52%,较三流程倒置高1.72%~4.59%。压缩机转速在4 000 r/min时二流程倒置制冷量高达3.37 kW。这是因为倒置强化制冷剂扰动,会增强换热。另一方面,4种情况下的微通道冷凝器系统制冷量均随压缩机转速的升高而增加,但制冷量的增幅均呈减缓趋势。造成这种情况的原因为制冷量受换热器换热能力、迎面风速和制冷剂等因素的制约。

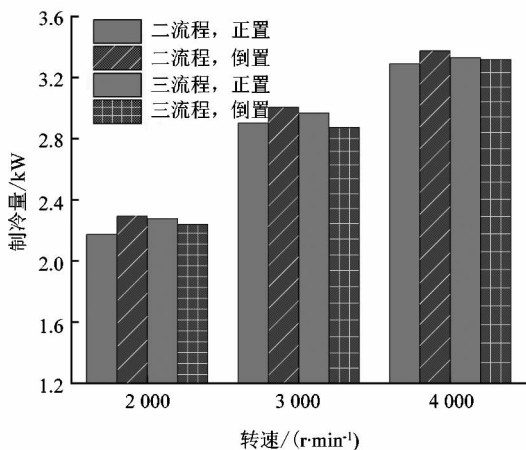


图3 制冷量随转速变化情况

Figure 3 Variation of refrigerating capacity with rotating speed

图4为系统能效比 R_{EE} 随转速变化情况。由图4可知,二流程倒置工况下系统的 R_{EE} 最高;不同转速下,二流程倒置工况下系统的 R_{EE} 较二流程正置高0.98%~2.87%,较三流程倒置高10.68%~11.36%。各系统的 R_{EE} 均随压缩机转速的升高而降低,降幅随转速增加而趋缓。这是因压缩机转速提高,压比增大,压缩机中的功耗增加。虽然压缩机转速提高,制冷剂流量增加,制冷量上升,但制冷量的增幅不及压缩机功耗的增幅,导致压缩机转速上升,系统 R_{EE} 值下降。

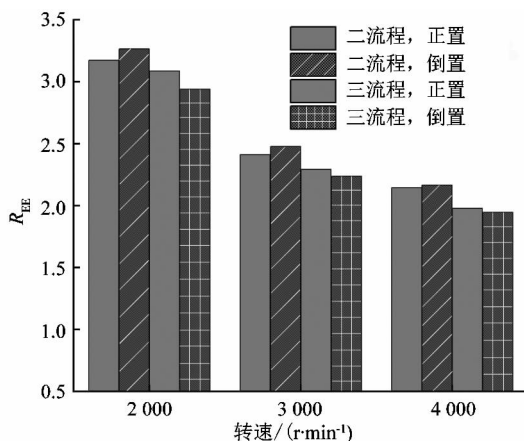


图4 系统 R_{EE} 随转速变化情况

Figure 4 Variation of system R_{EE} with rotating speed

空调箱出风温度随转速变化如图5所示。首先,随压缩机转速增加,蒸发器出风温度降幅趋缓。这是因为,受压缩机性能、换热器结构和循环风量等影响,出风温度不可能一直降低,压缩机转速越高,下降趋势会趋于平缓。此外,二流程倒置形式在所有转速中较其他方案出风温度更低,在4 000 r/min时,出风温度为14.84℃。

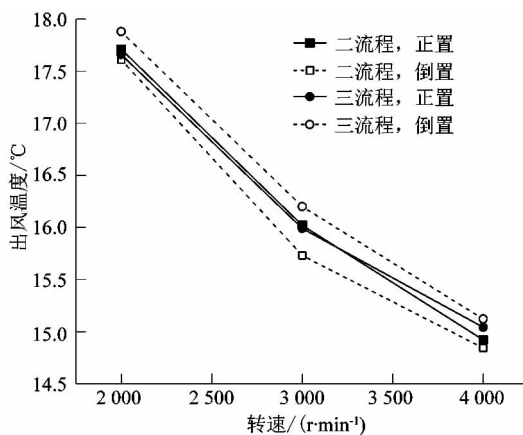


图5 出风温度随转速变化情况

Figure 5 Variation of air outlet temperature with rotating speed

图6为压缩机转速在4 000 r/min时,不同方案下的系统热力学循环压焓图。由图6可知,一方面,二流程方案较三流程方案有更低的冷凝压力和更小的压比,且倒置形式冷凝压力稍高于正置。二流程正置、倒置的冷凝压力比三流程正置、倒置的冷凝压力分别低155.69和158.08 kPa,压比分别低0.37和0.38。另

一方面,二流程有较小的压缩机进出口比功。二流程正置、倒置与三流程正置、倒置相比,压缩机进出口比功分别低 7.59 和 7.44 kJ/kg。

综上,通过对系统制冷量、 R_{EE} 、出风温度及系统热力学循环的分析,采用二流程微通道冷凝器的热泵空调系统综合性能优于三流程,且冷凝器采用倒置形式时,热泵空调系统拥有更好的制冷性能。

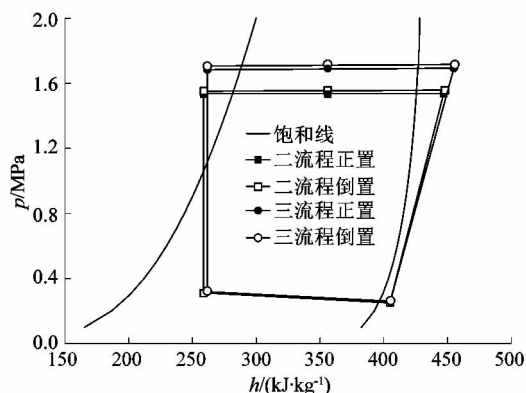


图 6 不同方案下系统 $p-h$ 图

Figure 6 System $p-h$ diagram under different schemes

2.2 流程数及放置形式对温度分布的影响

图 7 为 2 微通道冷凝器在 35 °C, 压缩机转速为 4 000 r/min 时, 不同布置形式下的冷凝器表面温度分布。

样件 I 和样件 II 分别为二流程和三流程冷凝器。由图 7(a) 和 7(b) 可知, 二流程冷凝器倒置相较正置, 第 1 流程制冷剂进口两侧扁管温度较低, 第 2 流程上部温度较高, 下部温度较低。造成这种差异的原因是: 一是受换热器结构及流动特性影响, 第 1 流程中间相较两侧流阻较小, 高温制冷剂优先从中间通过; 二是制冷剂受重力因素影响, 二流程倒置制冷剂在第 2 流程气液分离, 导致第 2 流程上部充斥高温制冷剂气体。二流程倒置虽比正置温度分布均匀性差, 但换热面积更大, 迎风面积相同情况下换热量更多, 有更高的换热效率。由图 7(c) 和 7(d) 可知, 三流程冷凝器温度分布规律与二流程冷凝器类似, 但其均匀性不如二流程。原因即为三流程冷凝器结构更复杂, 流阻较二流程更大, 影响制冷剂均匀流动。微通道冷凝器流程数越多, 冷凝器的温度分布均匀性越差^[16]。

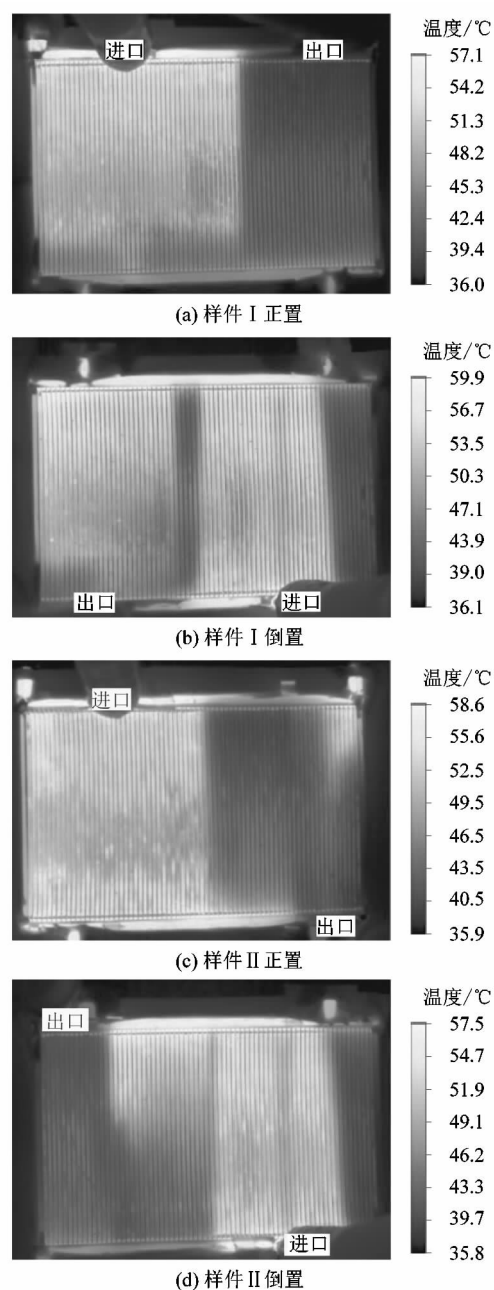


图 7 冷凝器样件 I 和 II 表面温度分布

Figure 7 Surface temperature distribution of condenser sample I and II

为比较不同情形下冷凝器高温区面积占比, 课题组对温度分布图像进行了二值化处理。因 Otsu 阈值算法稳定性好、成功率高、速度快^[17], 且处理换热器温度分布图像效果好, 故采用 Otsu 阈值算法处理冷凝器温度分布图像。微通道冷凝器温度分布图像经裁剪和二值化处理后, 效果如图 8 所示。由图 8 可知, 二值化图像较好地还原了冷凝器温度分布细节。

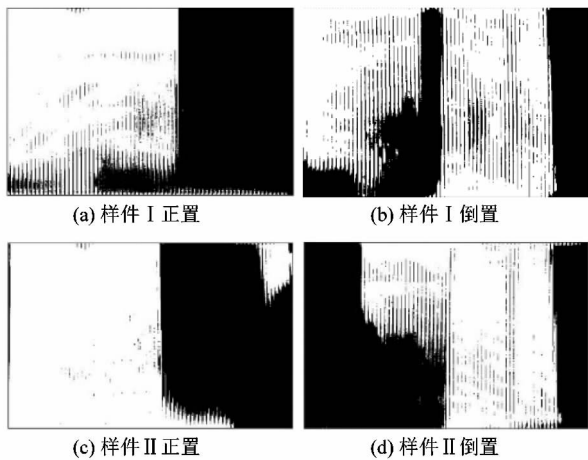


图8 冷凝器样件 I 和 II 温度分布图像二值化处理
Figure 8 Binarization of temperature distribution image of condenser sample I and II

由于二值化图像中白色像素分布与冷凝器高温区域分布一致,故用白色像素占比代表高温区域占比。经统计,4幅二值化图像均为 558×224 像素;图8(a)、8(b)、8(c)和8(d)白色像素点数分别为 1.468×10^5 、 1.227×10^5 、 1.142×10^5 和 1.026×10^5 。各二值化图像高温区域占比数据见表4。表4为压缩机转速在 $4\,000\text{ r/min}$ 时,各流程数和放置形式下的空调系统整体性能数据。由表4可知,二流程倒置高温区域占比达 62.1% ,较二流程正置、三流程倒置高温区域占比分别高 9.1% 和 10.1% 。另外,二流程倒置时系统性能最好,其制冷量高达 3.37 kW , R_{EE} 高达 2.17 ,出风温度最低为 $14.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综合来看,冷凝器的流程数和布置形式会对热泵空调系统的制冷性能产生影响,选用倒置形式的二流程换热器作为电动汽车空调系统冷凝器,相较其他3种方案,对系统制冷性能提升较为有利。

表4 $4\,000\text{ r/min}$ 时热泵空调系统制冷性能

Table 4 Refrigeration performance of heat pump air conditioning system at $4\,000\text{ r/min}$

样件及 放置形式	制冷 量/ kW	R_{EE}	出风温 度/ $^{\circ}\text{C}$	高温区域 占比/ $\%$
样件 I 正置	3.29	2.15	14.92	53.0
样件 I 倒置	3.37	2.17	14.84	62.1
样件 II 正置	3.33	1.98	15.04	57.8
样件 II 倒置	3.32	1.95	15.12	52.0

3 结论

针对采用竖直流微通道冷凝器的热泵空调系统,课题组在给定工况和样件情况下,重点研究了不同流程数和放置形式的冷凝器对系统制冷性能的影响,同时利用红外热像仪观察并分析了微通道冷凝器的表面温度分布,得出以下结论:

1) 二流程倒置工况下的系统制冷量、 R_{EE} 以及出风温度在不同转速下均优于其他布置形式。压缩机转速为 $4\,000\text{ r/min}$ 时,二流程倒置工况下的系统制冷量达 3.37 kW , R_{EE} 为 2.17 ,出风温度为 $14.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 二流程布置方案较三流程有较低的冷凝压力,较低的压比及较小的压缩机进出口比功。二流程正置、倒置与三流程正置、倒置相比,冷凝压力分别低 155.69 和 158.08 kPa ;压比分别低 0.37 和 0.38 ;压缩机进出口比功分别低 7.59 和 7.44 kJ/kg 。

3) 二流程温度分布均匀性好于三流程,二流程倒置时的高温区面积占比最大。压缩机转速为 $4\,000\text{ r/min}$ 时,二流程倒置时的高温区面积占比达 62.1% ,较二流程正置、三流程倒置高温区域面积占比分别高 9.1% 和 10.1% 。

参考文献:

- [1] 王磊. 新能源汽车换电站发展与应用研究[J]. 中国设备工程, 2021(17): 244-246.
- [2] 孟源. 我国电动汽车的研究现状及发展趋势[J]. 农机使用与维修, 2020(2): 19-21.
- [3] YOKOYAMA A, OSAKA T, IMANISHI Y, et al. Thermal management system for electric vehicles[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2011, 4(1): 1277-1285.
- [4] MEHENDALE S S, JACOBI A M, SHAH R K. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design[J]. Applied Mechanics Reviews, 2000, 53(7): 175-193.
- [5] 张萍, 谷波, 王婷, 等. 多元微通道平行流冷凝器理论模型与实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(11): 1738-1744.
- [6] 谢翌, 刘钊铭, 李夔宁, 等. 车用平行流式冷凝器流程扁管数布置的优化设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16): 126-133.
- [7] 杨润泽, 李杰. 车用多元平行流冷凝器热力性能及流程布置仿真研究[J]. 制冷与空调, 2020, 20(6): 79-83.
- [8] 赵宇, 祁照岗, 陈江平. 微通道平行流蒸发器流程布置研究与分析[J]. 制冷学报, 2009, 30(1): 25-29.
- [9] 唐伟伟. 汽车空调系统性能仿真及其充注量研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 55.

(下转第33页)