

文章编号:0253-4339(2015)01-0065-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.01.065

两种换热器在车用四通阀热泵系统中的对比研究

严瑞东¹ 王颖¹ 高天元¹ 陈江平¹ 宋吉² 高屹峰²

(1 上海交通大学 上海 200240; 2 国际铜业协会上海代表处 上海 200020)

摘要 PTC 加热效率较低对电动汽车行驶里程影响较大,因此开发效率更高的热泵系统十分必要。实验搭建了四通阀热泵系统,并将两种不同流程排布的小管径换热器与微通道换热器分别被用于室外侧,在制冷、制热模式下进行了实验对比,由实验结果可知,在制热模式低风速下,小管径换热器相比微通道换热器,能力可以高出 10.5%,而 COP 与微通道换热器相近;在制冷模式低风速下,小管径换热器样件能力可高出 3.8%,COP 可高出 22.8%。但随风速的提高,小管径换热器能力和 COP 提升并不明显,而微通道换热器随风速提升幅度较大,由上可知,在风速较低的怠速和城市工况中,使用小管径换热器作为车用热泵的外侧换热器使用拥有一定的优势。

关键词 电动汽车;能力与能效;四通阀热泵系统;换热器

中图分类号:TQ051.5.5; TB61⁺1; U463.85⁺1

文献标识码: A

Experimental Study on Two Kinds of Heat Exchangers in Four-way-valve Heat Pump System of Electric Vehicles

Yan Ruidong¹ Wang Ying¹ Gao Tianyuan¹ Chen Jiangping¹ Song Ji² Gao Yifeng²

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China; 2. International Copper Association Shanghai Office, Shanghai, 200020, China)

Abstract Low efficiency of PTC in electrical vehicles would cut down its travelled distance, so it's necessary to design high efficiency heat pump system. Two kinds of heat exchangers were used as outside heat exchangers (HX) in four-way-valve heat pump system, and experimental study was finished under both heating and cooling modes. The results showed, under low face velocity in heating model, small diameter tube HX had higher capacity by 10.5%, and the same COP compared with parallel flow HX. Under low face velocity in cooling model, small diameter tube HX had higher capacity by 3.8%, and higher COP by 22.8% compared with parallel flow HX. With the increasing of wind velocity, capacity and COP with small diameter tube HX increased little; however, the one with parallel flow HX had a higher increasing. It is concluded that heat pump system used small diameter tube HX had a potential prospect under low wind velocity.

Keywords electrical vehicles; capacity and COP; four-way-valve heat pump system; heat exchanger

传统燃油汽车给交通带来许多便利,但也带来很多问题。据统计目前有 46% 的石油被燃油汽车消耗,同时伴随着排放和污染的问题,在欧盟二氧化碳排放的统计中,私人汽车的贡献可以达到 60%^[1]。由于电动汽车环保、低噪声等优点,我国已投入大量人力物力推动电动汽车的发展。

尽管目前电池行业飞速的发展,使电动汽车的行驶里程被大幅度提升,但仍有较多的能量被浪费,如空气阻力造成的损失、电功转化效率的损失等,其中空调造成的能源损失占 33%^[2]。区别于传统燃油车,纯电动汽车使用蓄电池作为动力,没有用来采暖的发动机余热,不能提供冬天用于制热的热量,而目

前常用的 PTC 电加热系统效率较低,因此对电动汽车的行驶里程有较大的影响,需要寻求更高效、效果更好的制热方式^[3]。Meyer J 等^[4]把车用空调改造成使用 R134a 的热泵,并测量了车内温升曲线,发现与对比数据相比热泵系统在采暖性能上更优越。

当微通道换热器用于电动汽车热泵空调时存在流量分配不均匀的问题,多流程蒸发器存在严重的流量分配不均匀的问题,制热工况下,车外换热器流量分配不均导致即使在环境温度不低的情况下,换热器仍有严重的结霜,极大地降低了热泵循环效率^[5]。韦伟等^[6]在电动汽车三换热器热泵系统中,用小管径换热器替代传统微通道换热器作为车外换热器使

用,进行了实验研究,由结果得出,小管径换热器在一定程度上可以提高热泵系统的 COP,并且使原微通道换热器结霜不均、排水不畅的问题得到改善。

王颖等^[7]通过实验对比了三换热器热泵系统和四通阀热泵系统的性能,发现两个系统的能力相近,但四通阀系统 COP 可提高 7%~15%。X Zeng 等^[8]在混合动力的乘用车上,采用热泵系统与冷却水暖风芯体并联的方式,对乘员舱内进行供暖,取得较好的效果。目前,电动汽车热泵系统普遍存在能力不足,出风温度较低的问题,当冬季需要除霜除雾时,热泵系统不能满足实际使用。而对于三换热器系统,第三个换热器替代原 HVAC 内的 PTC 加热器,此时没有可用于辅助加热的手段实现除霜除雾,因此四通阀热泵系统外加辅助 PTC 加热器,将会是更优的选择。

本文设计并搭建了一种四通阀热泵系统,并设计开发了 5 mm 小管径换热器替代微通道换热器作为室外侧换热器使用,分别在制冷与制热模式下进行实验研究,对使用两种换热器时的系统能力与能效进行了对比。

1 热泵系统实验台

如图 1 所示,整个实验系统被安装在由室内、室外两个环境室组成的实验仓内。它采用两个换热器,其中室内侧空调总成 HVAC 内使用的换热器为微通道换热器,室外侧有外部小管径换热器,并使用四通阀进行制热、制冷模式切换。

室内/外侧两个环境室均可通过制冷机组、电加热器以及加湿器的 PID 调节,分别控制其环境温湿度,以保持测试条件的稳定。电动压缩机转速由其自身的控制器进行调节,室外侧换热器的迎面风速通过

轴流风机的变频器调节。实验系统管路中安装有五个温度/压力测点以及一个质量流量计,用以采集实验中测点处制冷剂状态信息。除此之外,实验中还需采集电动压缩机的输入电压及电流、环境室的干/湿球温度以及外部换热器的迎面风速。传感器类型及测量精度如表 1 所示。

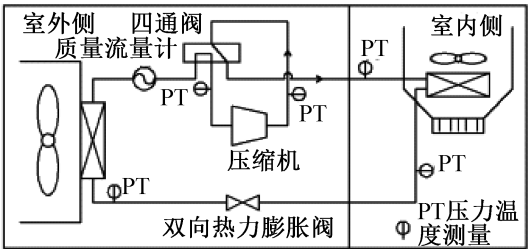


图 1 热泵系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four-way-valve heat pump system

表 1 测量设备参数

Tab. 1 Characteristics of instrumentation

测量项目	传感器类型	精度
温度	K 型热电偶	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
压力	压阻式压力传感器	$\pm 10.0\text{ kPa}$
制冷剂质量流量	科氏力质量流量计	$\pm 0.5\text{ kg/h}$
电流	钳式万用表	$\pm 0.4\text{ A}$
电压	钳式万用表	$\pm 4.8\text{ V}$
风速	旋叶式风速仪	$\pm 0.05\text{ m/s}$

实验对比了两个不同流程的 5 mm 小管径换热器与微通道换热器在该热泵系统中作为室外侧换热器使用时的制冷、制热能力。三个样件参数如表 2。

表 2 室外侧换热器参数

Tab. 2 Main parameter of outer heat exchanger

项目	微通道	项目	小管径 1#	小管径 2#
外形尺寸/mm	550 × 370 × 16	外形尺寸/mm	590 × 500 × 22	590 × 345 × 22
扁管长度/mm	532	铜管外径/mm	5	5
扁管数	55	管排数	2	2
扁管孔数	16	每排管数	26	18
扁管孔径/mm	0.629	排布方式	4 进 4 出	3 进 3 出
扁管间距/mm	0.3	翅片间距/mm	19	19
翅片宽度/mm	16.4	翅片厚度/mm	0.105	0.105
翅片高度/mm	5.4	翅片形式	百叶窗	百叶窗

2 实验设计及数据处理方法

实验所用压缩机为涡旋式电动压缩机,其排量为 $24 \text{ cm}^3/\text{r}$ 并且可实现转速的自由调整,由于电动汽车热泵空调目前还没有行业测试标准,因此制冷模式参考车用空调国家测试标准,制热模式参考家用热泵空调的测试标准,设计如表 3 所示的实验工况。通过改变室外侧换热器的迎面风速,模拟车速变化时对应的车外侧换热器风速变化。

表 3 实验工况
Tab. 3 Experiment conditions

控制参数	制冷模式	制热模式
室内侧温度/内 (相对湿度%)	27 (50)	20
室外侧温度/外 (相对湿度%)	35	7 (50)
压缩机转速/(r/min)	2000, 3000, 4000, 5000	
外部换热器迎面风速/(m/s)	1.5, 3.0, 4.5	
HVAC 风机电压 VDC	12	
外部换热器出口过冷度/℃	5 ~ 10	
制冷剂	R134a	

在每个工况的实验中,待室内外侧环境温度湿度以及各测点的制冷剂状态稳定后,进行数据的读取和保存,实验通过采集各点的温度和压力来确定制冷剂侧焓值,通过质量流量计测定管路中的制冷剂流量,从而得到制冷剂侧系统的制冷、制热能力以及 COP 等,分别使用小管径样品 1#和样品 2#与微通道换热器进行对比实验,其他所有部件和实验条件保持相同,对采集得到的数据进行分析对比。

各参数的计算方式如下,电动压缩机耗电量:

$$W_{\text{comp}} = I_{\text{comp}} \times U_{\text{comp}} \quad (1)$$

制热模式下,系统的制冷量可通过经过室内换热器的制冷剂侧焓差计算:

$$Q_{\text{heat}} = \dot{m} \times (h_{\text{cond,out}} - h_{\text{cond,in}}) \quad (2)$$

制热模式下的系统运行效率为:

$$\text{COP}_h = Q_{\text{heat}}/W_{\text{comp}} \quad (3)$$

制冷模式下,系统的制冷量可通过经过室内换热器的制冷剂侧焓差计算:

$$Q_{\text{cool}} = \dot{m} \times (h_{\text{evp,out}} - h_{\text{evp,in}}) \quad (4)$$

制冷模式下的系统运行效率为:

$$\text{COP}_c = Q_{\text{cool}}/W_{\text{comp}} \quad (5)$$

3 实验结果与分析

3.1 制热模式

切换四通换向阀使系统处于制热的工作状态,各个电动压缩机转速和迎面风速下的制热能力如图 2 所示,对于小管径换热器样品 1 与样品 2 随其迎面风速的提升能力变化并不大,而微通道换热器的随其迎面风速的提升能力变化较大,在低风速下小管径样品 1 相比微通道换热器能力高出 10.5%。

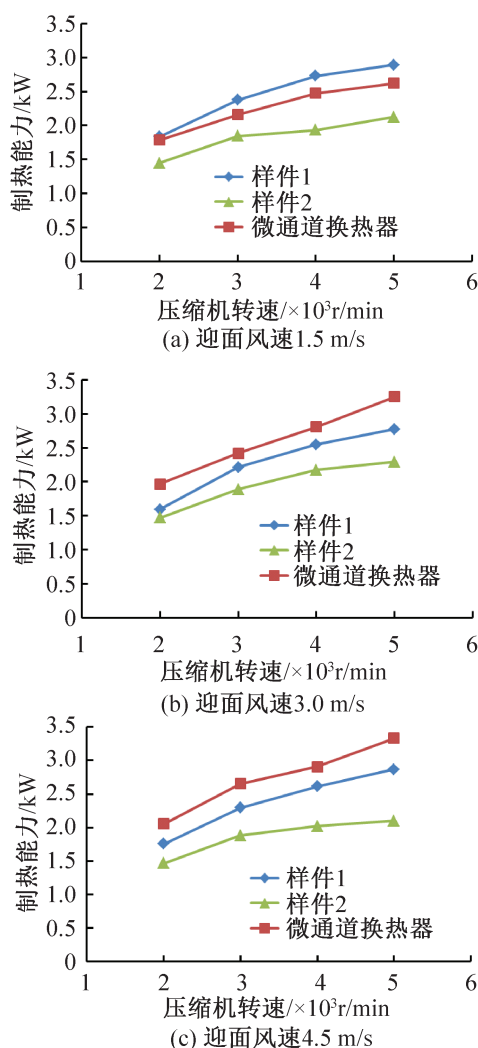


图 2 风速和转速对制热能力的影响

Fig. 2 The effect of face velocity and rotate speed on capacity

各个电动压缩机转速和迎面风速下的能效如图 3 所示,对于小管径换热器样品 1 与样品 2 随其迎面风速的提升 COP 变化不大,而微通道换热器的随其迎面风速的增大, COP 提升较大,这是由于风速高,较多的提高了微通道换热器的换热能力,从而使 COP 提升更为明显,而在低风速下小管径样品 1 相比微通道换热器具有相近的 COP。

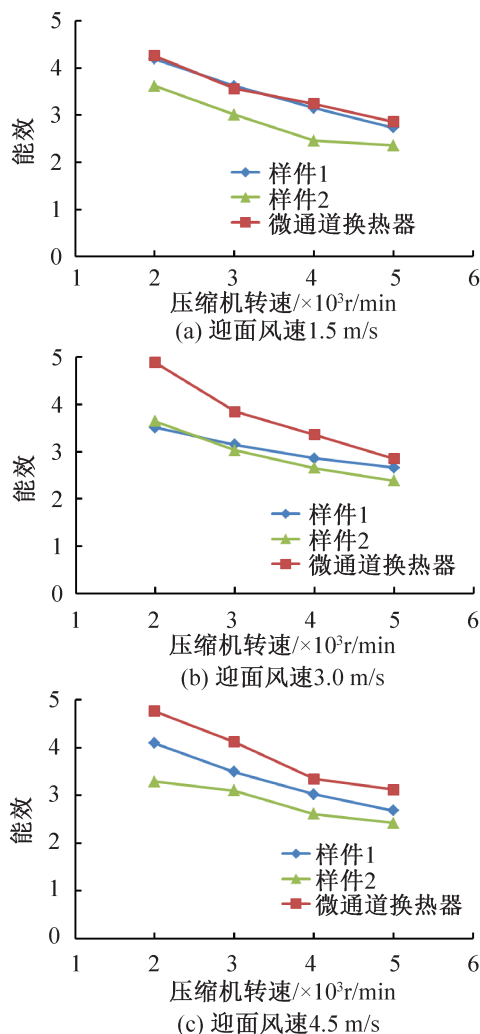


图 3 风速和转速对能效的影响

Fig. 3 The effect of face velocity and rotate speed on COP

3.2 制冷模式

切换四通换向阀使系统处于制冷的状态,各个电动压缩机转速和迎面风速下的制热能力如图 4 所示,明显区别于制热模式下的趋势,在制热模式下能力和 COP 较低的小管径样品 2,在制冷模式下拥有更好的能力和 COP,在低风速下,能力可以分别高出 3.8% 和 3.5%,这是由于其流程排布更为简单,降低了制冷剂侧的压降,从而在作为制冷模式冷凝器使用时可以获得更好的效果,同样,随风速的提高,小管径样品 1 和样品 2 能力提升并不明显,而微通道换热器随风速的提高能力增加幅度更大。

各个电动压缩机转速和迎面风速下的能效如图 5 所示,在低风速下,小管径样品 1 和样品 2 在 COP 方面明显高出微通道换热器,分别高 22.8% 和 15.2%,而随风速的增加,使用微通道换热器的系统 COP 增加幅度更大,在风速 4.5 m/s 时与小管径样品 1 和样品 2 基本达到一致,此时对应车速 40 km/h,在

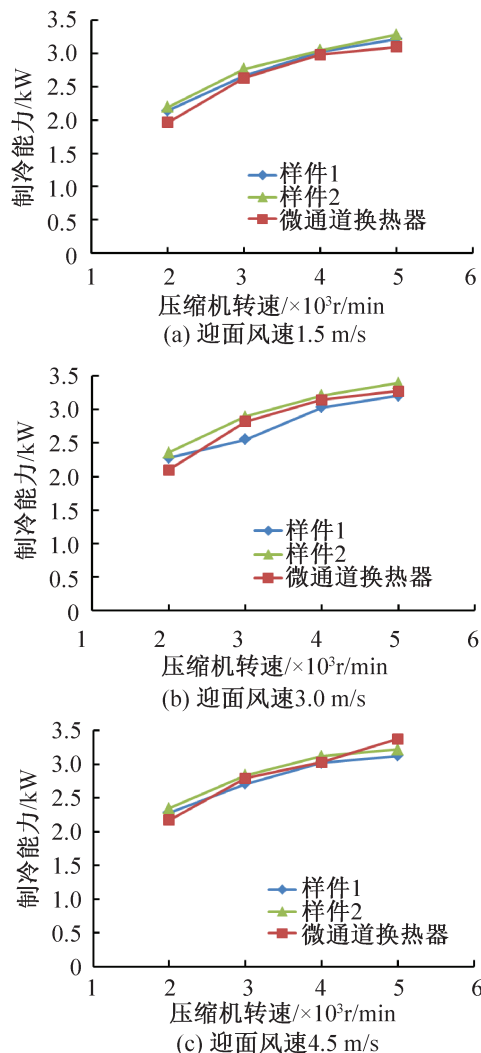


图 4 风速和转速对制冷能力的影响

Fig. 4 The effect of face velocity and rotate speed on capacity

高速工况下随风速进一步增大,微通道换热器的系统 COP 有进一步提升并超过小管径换热器的趋势。

4 结论

两种不同流程排布的小管径换热器与微通道换热器分别被用于热泵系统室外侧换热器,并在制冷、制热模式下进行了实验对比,由实验结果可知:

1) 在制热模式低风速下,小管径换热器样品 1 相比微通道换热器,在能力方面更有优势,其能力可以高出 10.5%,而在 COP 方面与原微通道换热器相近。但随风速的增大,微通道换热器的能力提升幅度相比小管径换热器更大,从而在高速下拥有更高的能力和 COP;

2) 在制冷模式低风速下,小管径换热器样品 1 和 2 相比微通道换热器,在能力和 COP 方面都有较大的优势,其能力可高出 3.8% 和 3.5%,由于小管径换热器流程排布更为简单,降低了制冷剂侧的压降,从而在

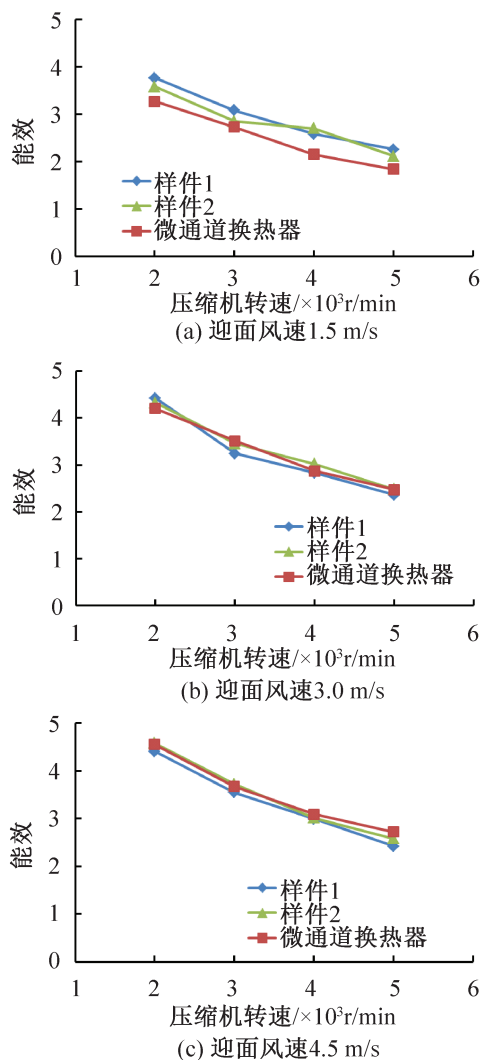


图 5 风速和转速对能效的影响

Fig. 5 The effect of face velocity and rotate speed on COP

作为制冷模式冷凝器使用时,可获得更好的效果,而在 COP 方面,小管径样品 1 和样品 2 明显高微通道换热器,分别高 22.8% 和 15.2%。同样,随风速的提高,小管径样品 1 和样品 2 能力提升并不明显,而微通道换热器随风速的提高能力增加幅度更大;

3) 由汽车空调国家测试标准,在怠速工况下,迎面风速为 2.5 m/s,城市工况下车速达到 40 km/h 时,迎面风速 4.5 m/s,因此在风速较低的怠速和城市工况中,使用小管径换热器作为车用热泵的外侧换热器使用拥有一定的优势。

符号说明

COP—系统运行效率
 T —温度, $^{\circ}\text{C}$
 p —压力, kPa
 H —比焓, kJ/kg
 W —耗电量, W
 U —电动压缩机供电电压, VDC

下标

cool—系统制冷模式
heat—系统热泵模式
comp. —电动压缩机
evp. in—蒸发器入口
evp. out—蒸发器出口
cond. in—冷凝器入口

I —电动压缩机供电电流, A
 Q —换热量, W
 $\dot{m}$ —制冷剂质量流量, kg/h

cond. out—冷凝器入口

参考文献

- [1] Manuel Frondel, Christoph M Schmidt, Colin Vance. A regression on climate policy: The European Commission's legislation to reduce CO₂ emissions from automobiles [J]. Transportation Research, 2011, 45(10): 1043-1051.
- [2] Atsushi Yokoyama. Thermal management system for electric vehicles [J]. SAE Int. J. Mater. Manuf., 2011, 4(1): 1277-1285.
- [3] 陈素梅. 纯电动空调系统分析 [C]//河南省汽车工程学会第八届科学学术研讨论文集. 河南: 河南省汽车工程学会, 2012: 182-183.
- [4] Meyer J, Yang G, Papoulis E. R134a heat pump for improved passenger comfort [C]//SAE 2004 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, United States, 2004.
- [5] 巫江虹, 谢方, 刘超鹏, 等. 电动汽车热泵空调系统微通道换热器适应性研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 141-147. (Wu Jianghong, Xie Fang, Liu Chaopeng, et al. Adaptability research on micro-channel heat exchanger applied to heat pump air conditioning system for electrical vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 141-147.)
- [6] 韦伟, 赵宇, 陈江平, 等. 车用热泵用小管径管片式换热器性能研究 [J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 35-39. (Wei Wei, Zhao Yu, Chen Jiangping, et al. Feasibility study of the biltube-and-fin heat exchanger in automotive heat pump system [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 35-39.)
- [7] 王颖, 施骏业, 陈江平, 等. 采用三换热器和四通阀的两种车用热泵系统的对比研究 [J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 71-76. (Wang Ying, Shi Junye, Chen Jiangping, et al. Comparative study of two kinds of automotive air conditioning system with three heat exchangers and four-way valve [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 71-76.)
- [8] X Zeng, G A Major, T Hirao. An automotive hybrid heating system for parallel hybrid passenger cars [C]//SAE 2000 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, United States, 2000.

作者简介

严瑞东, 男, 硕士研究生, 上海交通大学, 制冷与低温工程研究所, 15221575412, E-mail: qq358369820@126.com。研究方向: 电动汽车热泵, 小管径换热器在电动汽车上的应用, 电动汽车热泵系统的研究和优化。

About the author

Yan Ruidong, male, master, School of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, + 86 15221575412, E-mail: qq358369820@126.com. Research fields: heat pump in electrical vehicle, application of small diameter heat exchanger, heat pump system in electrical vehicle.