文章编号：0253-4339(2013)01-0035-05
doi：10.3969/j.issn. 0253-4339. 2013. 01. 035

车用热泵用小管径管片式换热器性能研究

韦 伟[1] 赵 宇[1] 陈江平[1] 宋 吉[2] 高屹峰[2]

（1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240；2 国际铜业协会上海代表处 上海 200020）

摘 要 目前车用空调冷凝器均为平行流冷凝器，作为热泵蒸发器时易结霜，且化霜时排水不畅。而圆管翅片换热器换热性能较差，难以满足结构布置要求。开发了Ø5管径的小管径换热器，与平行流换热器进行了性能对比测试。结果表明:采用小管径管片式换热器时，制冷模式下COP提高了17.4%~23.7%，热泵模式下COP提高12.6%~35.8%，且在热泵模式下可降低压缩机排气温度15~28℃。小管径管片式换热器在电动汽车热泵系统应用前景广阔。

关键词 电动汽车空调；热泵；小管径管片式换热器；电动压缩机；COP
中图分类号：U463.851; TB657.5 **文献标识码**：A

Feasibility Study of the Ø5 Tube-and-fin Heat Exchanger in Automotive Heat Pump System

Wei Wei[1] Zhao Yu[1] Chen Jiangping[1] Song Ji[2] Gao Yifeng[2]

(1. Inst. of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong Univ., Shanghai, 200240, China; 2. International Copper Association Shanghai Office, Shanghai, 200020, China)

Abstract The parallel flow microchannel (PFM) heat exchanger is widely used in automotive air conditioning system, but it has the disadvantage of easy-frost and difficult in water-drain in defrost . The traditional tube and fin heat exchanger can overcome the frost and defrost problem but has low efficiency. In this paper a Ø5 tube and fin heat exchanger is developed for the automotive heat pump. Performances of small diameter tube-and-fin heat exchanger and PFM heat exchanger are compared based on benchmark test. Results show that the system with small diameter tube-and-fin heat exchanger has 17.4%~23.7% higher COP in air conditioning mode, 12.6%~35.8% higher COP and 15~28℃ lower compressor discharge temperature in heat pump mode, which indicates that small diameter tube-and-fin heat exchanger is a promising solution to the automotive heat pump system of electric vehicle.

Keywords electric vehicle air conditioning; heat pump; small diameter tube-and-fin heat exchanger; electric compressor; COP

传统燃油汽车的空调系统通常采用发动机驱动压缩方式，在高温时供冷。而在低温时，则是利用发动机冷却液的余热，来加热空气。电动汽车由于取消了发动机而没有热源，必须采用其他方式解决，现在的电动汽车通常采用PTC电加热器或燃油加热器来进行制热，但这些制热设备通常价格高且效率低下。车用热泵系统的放热量等于压缩机的耗功加上室外侧换热器的吸热量因其节能高效而备受关注。

热泵在电动汽车空调上的应用最早见于1990年代[1]。Meyer等[2]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。由于CO_2超临界循环的优势，作为热泵时制热能力更好，Bullard等[3]对CO_2汽车热泵系统进行了实验研究。

当空调系统作为热泵运行时，室外侧换热器是作为蒸发器，在外部气温较低时，其表面会结霜。家用和商用空调的室外侧换热器通常采用管片式换热器，化霜时产生的水容易排除。但现今车用空调的室外侧换热器均为采用百叶窗翅片的微通道换热器，作为蒸发器使用时，化霜过程产生的水大多积存于翅片之间，不易除去，在化霜结束时会再次结冰，使换热器的性能大幅下降[4-5]。为了克服这一缺点，保证车用热泵系统的高效运行，可采用管片式换热器替代为车用空调室外侧换热器，但传统管片式换热器的换热效率低于微通道换热器，需在结构上进行优化和改进，采用小管径换热器是提升换热器能力的有效途径之一。Ø5小管径铜管的管片式换热器，相对于Ø7和Ø9管径，可节省40%左右的成本[6-8]，且经过优化设计后可获得良好的性能。

根据车用热泵系统特点，开发了Ø5管径的管

收稿日期：2012年3月24日

片式换热器，并进行了车用热泵系统台架实验，以分析这一技术的应用可行性。

1 车用热泵系统结构

采用的热泵型系统结构如图1所示。测试的空调系统安装在由温湿度单独控制的室内和室外环境室。此空调系统由传统汽车空调改造而来，采用R134a制冷剂，压缩机改用排量24cc的电动压缩机。室内侧空调箱采用了原配的HVAC壳体、蒸发器以及热力膨胀阀，暖风芯体位置用内部冷凝器替换。内部蒸发器和内部冷凝器均为百叶窗翅片的全铝微通道换热器，这两个换热器的迎风面积分别为0.0604m^{2}和0.0355 m^2。实验对比两个不同的外部换热器，即小管径管片式换热器和原配的微通道冷凝器，两者的参数分别如表1所示。室外侧换热器入口处安装了热力膨胀阀，作为热泵模式下的节流部件，并且管路中加装了两个旁通阀，用于制冷/热泵模式的切换。

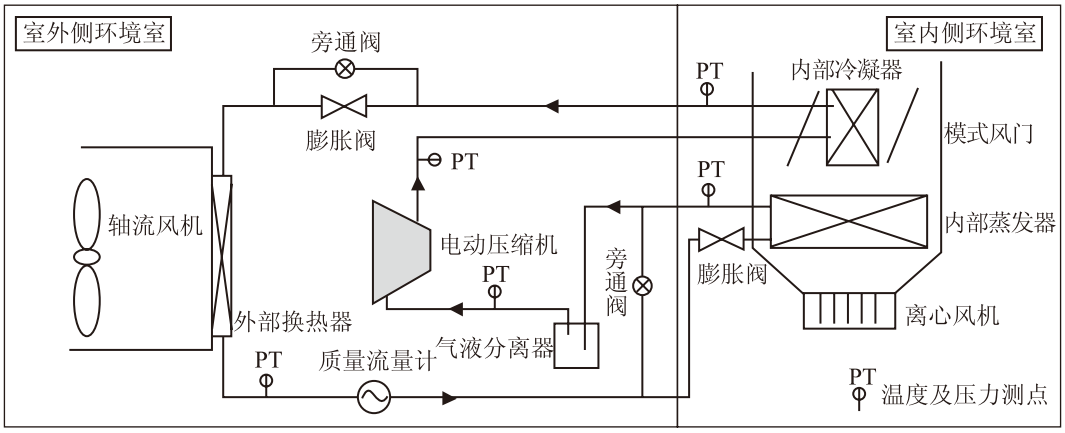

图1 热泵型电动汽车空调系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental electric vehicle air conditioning/heat pump system

表1 外部换热器参数

Tab. 1 Main parameters of outer heat exchangers

	管片式		微通道
外形尺寸	590mm×500mm×22mm	外形尺寸	555mm×370mm×16mm
换热面积	6.119 m^2	换热面积	5.802 m^2
管子外径	5 mm	扁管长度	532 mm
管排数	2	扁管数	55
每排管数	26	翅片宽度	16.4 mm
管子排布形式	4进4出	翅片高度	5.4 mm

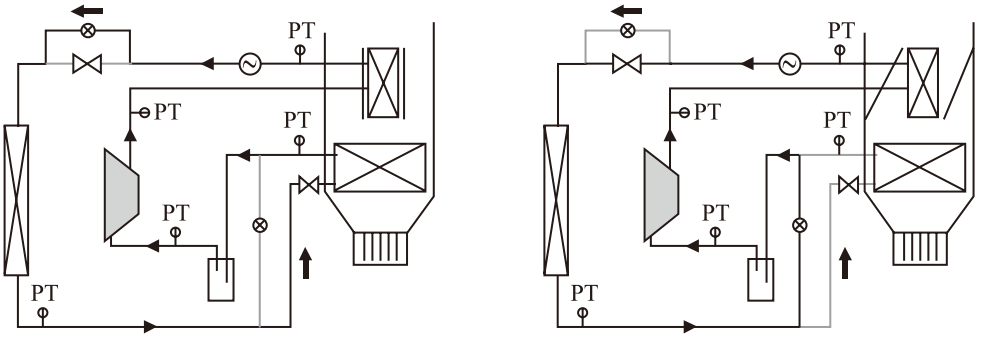

图2 两种模式运行示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two modes

热泵系统通过旁通阀的通断以及模式风门的配合来完成系统制冷制热模式的转换，如图2所示。在制冷模式下，内部蒸发器进出口侧的旁通阀关闭，外部换热器进口处的旁通阀打开，同时内部冷凝器旁的模式风门处于关闭状态。高温高压的制冷剂虽经过内部冷凝器但不与空气发生换热，此时外部换热器和内部蒸发器分别作为整个系统的冷凝器和蒸发器。在热泵模式下，内部蒸发器进出口侧的旁通阀打开，外部换热器进口处的旁通阀关闭，同时内部冷凝器旁的模式风门处于打开状态，内部冷凝器和外部换热器分别作为热泵系统的冷凝器和蒸发器，内部蒸发器被旁通而不起作用。

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2所示。

表2 测量设备参数

Tab.2 Characteristics of the instrumentation

测量项目	传感器类型	精度
温度	K型热电偶	±0.5℃
压力	压阻式压力传感器	±10.0kPa
制冷剂质量流量	科氏力质量流量计	±0.5kg/h
电流	钳式万用表	±（2%+5）A
电压	钳式万用表	±（0.8%+1）V
风速	旋叶式风速仪	±0.05 m/s

2 实验设计及数据处理方法

实验工况如表3所示。由于不同模式下系统中作为蒸发器的换热器不同，所以制冷模式下仅对室内侧环境的相对湿度进行控制，热泵模式则正好相反。每个工况都采用两种不同形式的外部换热器进行实验，以进行性能对比。

表 3 实验工况

Tab. 3 Test conditions

项目	制冷模式	热泵模式
室内侧离心风机电压/V	12	12
室外换热器迎面风速/(m/s)	3.0	3.0
室外侧环境温度/℃(相对湿度/%)	35	7(50)
室内侧环境温度/℃(相对湿度/%)	27(50)	20

在每个工况的实验中，待室内外侧环境温湿度以及各测点的制冷剂状态稳定后，就进行数据的读取和保存。

电动压缩机的供电是稳定的直流电，无论制冷还是热泵模式，在测量其供电电压U及电流I之后，就可计算得电动压缩机的耗电量：

$$W_{\text{comp.}} = I \times U \tag{1}$$

由于5个温度及压力测点处的R134a制冷剂均不处于两相状态，可通过测出的温度和压力查询得到其相应的比焓值。再由质量流量计测出的R134a质量流量$\dot{m}$，就可计算各换热器的换热量。

制冷模式下，系统的制冷量为：

$$Q_{\text{cool}} = \dot{m}(h_{\text{ie.out}} - h_{\text{ie.in}}) \tag{2}$$

制冷模式下的系统运行效率为：

$$\text{COP}_{\text{cool}} = \frac{Q_{\text{cool}}}{W_{\text{comp.}}} \tag{3}$$

热泵模式下，系统的制热量为：

$$Q_{\text{heat}} = \dot{m}(h_{\text{ic,in}} - h_{\text{ic,out}}) \tag{4}$$

热泵模式下的系统运行效率为：

$$\text{COP}_{\text{heat}} = \frac{Q_{\text{heat}}}{W_{\text{comp.}}} \tag{5}$$

3 实验结果及分析

图3~图6展示了在特定的环境温湿度及室外侧换热器型式下，制冷/制热能力、电动压缩机耗电量、系统效率及排气温度随电动压缩机转速的变化情况。

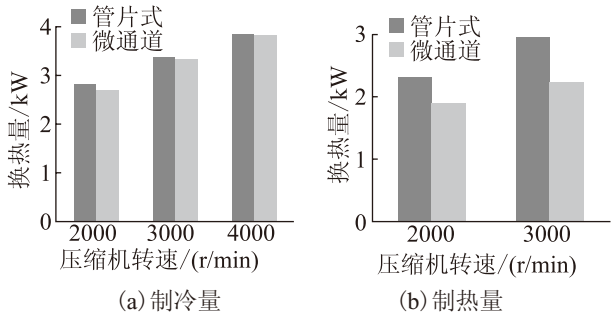

图3 制冷量和制热量随压缩机转速的变化曲线

Fig. 3 Variations in the cooling capacity and heating capacity with compressor speed

由图3可看出，实验系统采用小管径管片式换热器时，相对于原装微通道换热器,在制冷模式下，制冷量略微提高了30~127W；而在热泵模式下，制热量上升了415~740W。

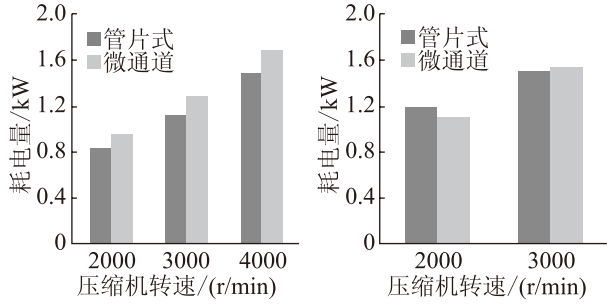

图4 两种模式下压缩机耗电量随压缩机转速的变化曲线
Fig. 4 Variations in the power of electric compressor with compressor speed for the two modes operations

由图4，实验系统采用小管径管片式换热器时，相对于原装微通道换热器,在制冷模式下，电动压缩机耗电量降低了126~206W；而在热泵模式下，电动压缩机耗电量各有高低，但相差不大，约为37~86W。

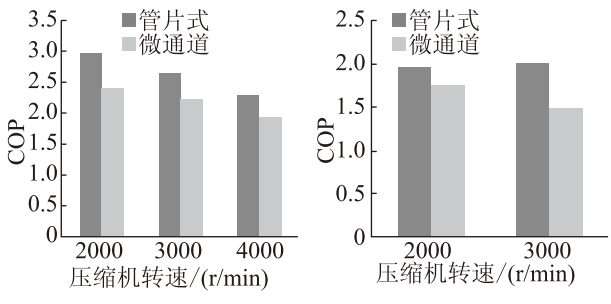

图5 两种模式下COP随压缩机转速的变化曲线
Fig. 5 Variations in COP with compressor speed for the two modes operations

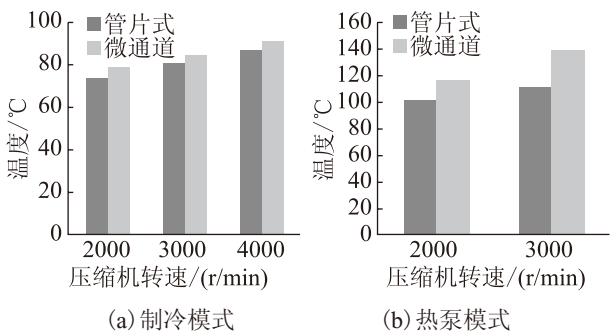

图6 两种模式下排气温度随压缩机转速的变化曲线
Fig.6 Variations in the compressor discharge temperature with compressor speed for the two modes operations

系统COP的变化规律与制冷/制热量及电动压缩机耗电量相对应。由图5可看出，实验系统采用小管径管片式换热器时，相对于原装微通道换热器，在制冷模式下，系统COP相比提高了17.4%~23.7%；而在热泵模式下，系统COP提高12.6%~35.8 %。

对于电动压缩机排气温度，如图6所示，在制冷模式下，采用小管径管片式换热器使排气温度降低了5℃左右；在热泵模式下排气温度的差别更为明显，采用小管径管片式换热器的系统的排气温度同比下降15~28℃。

由以上四个对比图，可见采用小管径管片式换热器的实验系统的各项性能均优于原装微通道换热器。其原因除了经优化设计的小管径管片式换热器的换热能力高于原装微通道换热器外，管片式换热器的压降远小于微通道换热器也是一大原因。在较高的电动压缩机转速下，微通道换热器的压降会超过150 kPa，而同比之下管片式的压降约为40 kPa。在热泵模式下，系统的蒸发压力大约在200~250 kPa的范围内，微通道换热器过大的压降会明显提高压缩机的压比，增加压缩机负担，降低压缩机效率；而系统采用管片式换热器作为外部换热器时，压降大幅减少，有利于压缩机的高效运作，保护电动压缩机。

4 结论

采用经优化后的小管径管片式换热器替代传统的车用平行流微通道换热器，用于电动汽车热泵系统中时，不仅解决了原微通道换热器化霜时排水不畅的问题，系统的COP也有明显的提升，其中制冷模式下COP提高了17.4%~23.7%，热泵模式下COP提高12.6%~35.8%。同时，热泵模式下系统压缩比较高，压缩机负担大，采用小管径管片式换热器能有效降低电动压缩机压比，以及排气温度15~28℃，有利于保护系统的安全运行。在成本方面，由前述文献可知，Ø5小管径管片式换热器相对于Ø7或Ø9的管片式换热器可节省40%的成本。综合考虑，小管径管片式换热器在电动汽车热泵系统中具有应用价值。

符号说明

COP —— 系统运行效率
T —— 温度，℃
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
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

下标

cool —— 制冷模式
heat —— 热泵模式
comp. —— 电动压缩机
ie.in —— 内部蒸发器入口
ie.out —— 内部蒸发器出口
ic.in —— 内部冷凝器入口
ic.out —— 内部冷凝器入口

参考文献

[1] Bhatti MS. Evolution of automotive heating-riding in comfort: Part I[J]. ASHRAE Journal,1999, 41(8):51-57.

[2] Meyer J, Yang G, Papoulis E. R134a heat pump for improved passenger comfort[C]//SAE 2004 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, United States , 2004.

[3] Bullard CW, Yin JM, Hrnjak PS. Transcritical CO_2 mobile heat pump and A/C system. Experimental and model results[J]. SAE Automotive Alternate Refrigerants Symposium, Scottsdale, Arizona, USA, 2000.

[4] 周健,邢小邗.基于平行流蒸发器结霜问题的试验研究及解决方案[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.)

[5] 孙少鹏,石泳,廖强,等.平行流蒸发器冷凝水排除问题研究[J].制冷与空调,2008,8(6):97-100.(Sun Shaopeng, Shi Yong, Liao Qiang, et al. Research on the condensed water removal in parallel flow evaporator[J]. Refrigeration and Air-conditioning,2008,8(6):97-100.)

[6] 尤顺义,张静,欧木良,等.新型小管径内螺纹铜管在空调换热器中的应用[J].顺德职业技术学院学报, 2008, 6(1):27-29.(You Shunyi, Zhang Jing, Ou Muliang, et al. Application of New Type Small Copper Tube with Inner Screw in Air Conditioner Heat Exchanger[J]. JOURNAL OF SHUNDE POLYTECHNIC, 2008, 6(1):27-29.)

[7] 尤顺义,张静,林灿洪,等.小管径内螺纹铜管在空调系统中的应用[J].制冷技术, 2010(2):22-25.(You Shunyi, Zhang Jing, Lin Canhong, et al. Application of small diameter copper tubes in air conditioner[J]. Refrigeration Technology,2010(2):22-25.)

[8] 吴扬,李长生,邓斌.采用小管径铜管空冷换热器的性能成本分析研究[J].制冷技术,2010(2):19-21,25.(Wu Yang, Li Changsheng, Deng Bin. Research on substitute of smaller diameter copper tube in fin-and-tube heat exchanger[J]. Refrigeration Technology, 2010(2):19-21, 25.)

作者简介

韦伟，男(1987–)，硕士在读，上海交通大学制冷与低温工程专业， 021-34206087，E-mail:15921549861@163.com。研究方向：汽车空调。目前进行的研究项目：电动汽车热泵开发、平行流换热器折叠管性能研究以及微通道换热器在家用空调上的应用等。

About the author

Wei Wei (1987–), male, Master Candidate, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, 021-34206087, E-mail:15921549861@163.com. Research fields: vehicle air conditioning. Recent projects: electric vehicle air conditioning and heat pump system, performent study on folded tube using in paralled heat exchanger, feasibility study of the application of micro-channel heat exchanger in domestic air-conditioning.