

文章编号:0253-4339(2020)01-0010-10
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.01.010

R1234yf 热泵技术综述与潜力分析

刘雨声 李万勇 施骏业 陈江平

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 为了满足逐步严苛的环保法规要求,R1234yf 成为车用热泵制冷剂 R134a 的热门替代制冷剂之一。本文对 R1234yf 热泵技术的研究进行了综述与分析,其 GWP<1,各方面性质均符合车用热泵系统的工作需求。在传热效果上,R1234yf 的沸腾传热性能略优于 R134a,且冷凝过程压降比 R134a 低 5%~10%,优于 R134a 系统。在诸多 R1234yf 和 R134a 系统的仿真和实验研究中,R1234yf 热泵性能略低于 R134a,但可以通过优化零部件、强化补气、改善工况等方式使其与 R134a 十分接近甚至超越。R1234yf 低压饱和压力比 R134a 高约 15%,可以适配更高的压缩机转速,低温下制热性能比 R134a 更好,且较低的压缩机排气温度使系统工作更为稳定,强化补气的效果也优于 R134a。因此,R1234yf 在车用热泵中具有较好的工作性能和发展前景,可以作为 R134a 的替代制冷剂。

关键词 电动汽车;热泵;R1234yf;传热系数;系统性能

中图分类号:TB61⁺1;TQ051.5;U469.22

文献标识码:A

Review and Potential Analysis of R1234yf Heat Pump Technology

Liu Yusheng Li Wanyong Shi Junye Chen Jiangping

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract To meet the gradual and stringent environmental regulations, R1234yf becomes one of the popular alternative refrigerants for vehicle heat pump refrigerant R134a. The research on R1234yf heat pump technology is reviewed and analyzed in this paper. The properties of R1234yf are in line with the work requirements of vehicle heat pump systems with the global warming potential (GWP) of less than 1. The system operation characteristics and performance are also very similar to R134a. In terms of heat transfer, the boiling heat transfer performance of R1234yf is slightly better than that of R134a. The condensation heat transfer coefficient is different in the research conclusions of various scholars, but the pressure drop in the condensation process of R1234yf is 5%~10% lower than that of R134a, which benefits the performance improvement. In the simulation and experimental research of many R1234yf and R134a systems, the performance of R1234yf heat pump is similar to R134a, but it can surpass R134a by optimizing components, economized vapor injection (EVI), and improving working conditions. R1234yf's saturation pressure at a low saturation temperature is approximately 15% higher than R134a and can adapt to higher compressor speeds. Therefore, it has a better heating performance at low temperatures than R134a; its lower compressor discharge temperature makes the system work more stable. The relative improvement using EVI is also better for R1234yf than for R134a. Therefore, R1234yf has a better working performance and prospects for vehicle heat pumps and can, therefore, be used as an alternative refrigerant for R134a.

Keywords electric vehicle; heat pump; R1234yf; heat transfer coefficient; system performance

随着人们对环境保护和能源经济的日益重视,电动汽车成为全球范围汽车市场的主流趋势^[1]。与传统燃油汽车相比,电动汽车没有充足的发动机余热以满足冬季供暖需求,通常采用的 PTC 加热器效率较低,热泵技术因具有较高的效率在电动汽车空调技术中成为研究热点^[2-3],而制冷剂替代的问题成为热泵技术必不可少的一项研究课题。近年来,全球范围都制定了更为严格的制冷剂使用法规。欧盟出台的 F-Gas 法规规定,至 2017 年,所有车

辆都禁止使用 GWP>150 的制冷剂^[4]。美国环境保护局(EPA)2016 年规定,建议在冰箱、冷风机、大型车辆空调、喷涂泡沫中禁止使用 HFC 类制冷剂。日本经济产业省(METI)规定,2015—2025 年逐步限制车用及家用空调、商业冰箱、发泡剂中高 GWP 的 HFC 类制冷剂使用。韩国自 2016 年起对车用空调中 HFC 制冷剂的替代实行信贷积分政策^[5]。澳洲 2016 年开始逐步禁止 HFC 制冷剂的使用。目前绝大多数汽车空调采用的制冷剂为 R134a^[2],属于

HFC 类制冷剂, $GWP = 1\ 300^{[6]}$, 已无法满足当前日益严苛的环保法规要求, 因此必然逐渐被低 GWP 的制冷剂替代。虽然汽车空调制冷剂替代的选择暂无定论, 但多数研究人员的主流想法还是在对现有汽车空调装置不进行大改的前提下, 选择合适的制冷剂替代。

R1234yf 是新一代汽车空调制冷剂, $ODP = 0$, $GWP < 1^{[6]}$, 非常符合当前的环保理念并能满足最严苛的法规要求。曹霞^[7]研究了 R1234yf 制冷剂用于车用空调系统的性能测试, 研究发现 R1234yf 具有与 R134a 十分相似的热物理性质。R1234yf 在热泵系统中的工作性能与 R134a 相似, 在 Y. Lee 等^[8]的测试结果显示仅相差 2%~4%, 且经 Xu Shuxue 等^[9]的测试 R1234yf 单级热泵系统可在 $-25\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蒸发温度下工作, 低温工作性能稳定, 可以在不改变汽车现有空调系统、仅优化小范围部件的情况下直接替代 R134a。在安全性方面, R1234yf 的 ASHRAE 安全级别为 A2L, 无毒弱可燃, 美国机动车工程师学会 (SAE) 多年的研究中表明, R1234yf 在汽车空调的工作环境条件下不会被点燃, 具有与 R134a 相同的安全性^[10]。因此, R1234yf 被看作较有前景的汽车热泵系统新一代替代制冷剂之一。

目前, 在汽车空调技术行业内对 R1234yf 替代 R134a 已有较大的认可度, 自 2009 年美国机动车工程师学会也对 R1234yf 作为汽车空调制冷剂进行了测试和研究^[11], 认为 R1234yf 可以作为新一代汽车空调制冷剂在世界范围推广, 欧洲、美国、日本、韩国及中国出口的新型车都开始采用 R1234yf 制冷剂。近年来也有较多对 R1234yf 与 R134a 制冷剂汽车空调系统的研究^[11-12], 针对电动汽车在低温环境中制热量、电池电量、行驶里程下降的问题, 提出了强化补气 (EVI) 热泵的优化方法。

本文对 R1234yf 和 R134a 制冷剂的物性进行了对比, 并基于现有文献的实验数据, 对比了 R1234yf 与 R134a 两种制冷剂热泵系统的制热性能差距, 分析系统运行参数的影响, 给出了 R1234yf 用于热泵系统的可行性及优化潜力。

1 R1234yf 物性分析

制冷剂是汽车空调系统中的传热介质, 对系统性能具有重要影响, 因此制冷剂需要在热物理性质、传递参数、材料相容性、环境友好性、安全性等多方面均满足汽车空调工作的需求。

1.1 热物理性质

表 1 列举了 R1234yf 与 R134a 的常用性质。

表 1 R1234yf 及 R134a 常用性质
Tab.1 Common properties of R1234yf and R134a

项目	R1234yf	R134a
分子质量	114. 04	102. 03
GWP ^[6]	<1	1 300
临界温度/ $^{\circ}\text{C}$	94. 7	101. 1
临界压力/kPa	3 382	4 059
沸点/ $^{\circ}\text{C}$ (大气压力 101. 3 kPa 下)	-29. 4	-26. 1
液相密度/(kg/m^3) (25 $^{\circ}\text{C}$ 时)	1 092	1 206
汽化潜热/(kJ/kg) (25 $^{\circ}\text{C}$ 时)	145	178

图 1 所示为 R1234yf 和 R134a 在汽车空调中制冷循环的压焓图, 可以看出二者的蒸发压力和冷凝压力基本相同。在用 R1234yf 直接替代 R134a 的系统性能测试中, R1234yf 的工作能力和能效与 R134a 略有差距, 主要是由于在汽车空调的常用工作温度范围 ($-25\sim40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 内, 相同工作压力下 R1234yf 的相变潜热低于 R134a, 导致 R1234yf 在直接替代 R134a 时, 介质冷凝放热过程焓差降低, 虽然 R1234yf 的气相密度高, 增加了制冷剂流量, 但仍不能完全弥补焓差的差距, 所以系统制热性能略低。

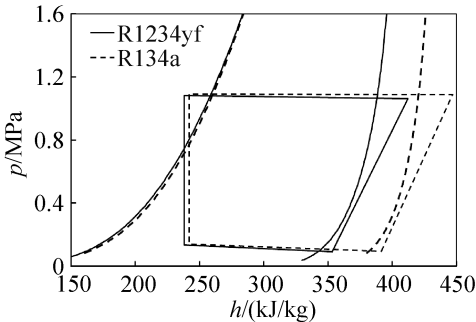


图 1 R1234yf 与 R134a 理论循环压焓图
Fig.1 Theoretical cyclic p - h diagram of R1234yf and R134a

通过 REFPROP9.0 的计算, 可以得到 R1234yf 与 R134a 在不同饱和温度下各项物性的比值^[14], 图 2 所示为两种制冷剂的主要热物理性质对比。由图 2 可知, R1234yf 两相的比热和饱和压力、饱和温度的条件与 R134a 十分相近, 相差不到 10%, 所以二者制冷剂循环的条件十分相似, 也为 R1234yf 替代 R134a 提供了前提。

R1234yf 的气相密度比 R134a 高 15%~20%, 可为压缩机提供更高的质量流量, 这也弥补了部分 R1234yf 焓差较小的不足。同时, R1234yf 的液相密度比 R134a 小约 10%。

1.2 传递参数

图 3 所示为 R1234yf 与 R134a 的各项传递参数

比值随饱和温度的变化。二者气相的黏度、导热系数、 Pr 及液相 Pr 相差均小于 10%，而 R1234yf 液相黏度和导热系数比 R134a 低 20%，且液相密度较小，这会使换热过程中在换热面上覆盖一层面积更大且更厚的液膜^[15]，蒸发传热系数更大，使蒸发器的换热效果更好，但在冷凝器中也会产生大量热阻，使冷凝器换热性能略有下降。Wang Chichuan^[14] 介绍了重新设计优化冷凝器可能会解决由于 R1234yf 液相导热系数较低导致的不足。

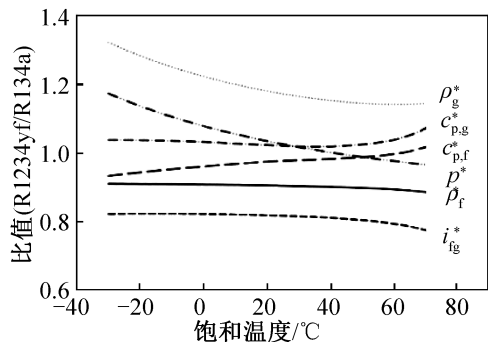


图 2 热物理性质对比^[14]

Fig.2 Comparison of thermophysical properties^[14]

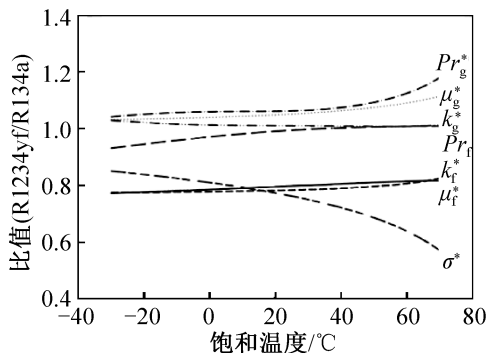


图 3 传递参数比值随饱和温度的变化^[14]

Fig.3 Comparison of transport properties^[14]

1.3 冷凝换热表面传热系数

冷凝换热表面传热系数是影响热泵系统工作性能的重要参数之一。K. J. Park 等^[16] 在饱和蒸气温度为 39 °C、过冷度为 3~8 °C 下的涡轮增压管、低翅片管、光管中分别进行了测试，结果显示 3 个管中 R1234yf 系统的冷凝换热表面传热系数均与 R134a 相差不到 3%。

其他学者对该研究有不同的结论，由 Nusselt 方程可知光滑管的内部冷凝关联式：

$$h_c = 0.728 \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g) g i_{lg} \lambda_f^3}{\mu_l(T_s - T_w) d_o} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中： h_c 为冷凝换热表面传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； ρ_l 与 ρ_g 分别为制冷剂液相密度与液气相密度， kg/m^3 ；

i_{lg} 为液相与气相的焓差， kJ/kg ； λ_f 为液相导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； μ_l 为液相黏度， $kg/(m \cdot s)$ ； T_s 与 T_w 分别为饱和温度与扁管温度， $^{\circ}C$ ； d_o 为管外径， m 。

由式(1)可知，冷凝传热系数与制冷剂的液相密度、焓差、导热系数成正相关，尤其导热系数($h_c \sim \lambda_f^{\frac{3}{4}}$)，与制冷剂黏度成负相关。由上述分析可知，R1234yf 的这 4 个物性参数均小于 R134a，除 μ_l 外，其他 3 个参数与 R134a 相比均使 h_c 下降。Wang Chichuan^[15] 用关联式(1)对 R1234yf 和 R134a 在管外径为 19.05 mm、表面温度为 20 °C 条件下的冷凝换热表面传热系数进行了计算，计算可得 R1234yf 的冷凝换热表面传热系数比 R134a 低 30%~50%。

D. D. Col 等^[17] 在直径为 0.96 mm 的细管中测试了 R1234yf 与 R134a 的冷凝换热表面传热系数，饱和温度为 40 °C，质量流速范围为 200~1 000 $kg/(m^2 \cdot s)$ ，实验结果如图 4 所示。由图 4 可知，R1234yf 的冷凝换热表面传热系数与 R134a 的差值随着制冷剂干度的升高而增大， $x=0.4$ 时差值约为 13%，在 $x=0.8$ 时约为 30%。R1234yf 的冷凝换热表面传热系数比 R134a 低的原因之一是 R1234yf 在冷凝时会产生比 R134a 更厚的液膜，同时，R1234yf 的导热系数低，阻碍冷凝换热，因此冷凝换热表面传热系数较低。由质量流速分别为 400、600、800 $kg/(m^2 \cdot s)$ 时压降的实验结果(图 4(d))可知，在相同质量流速下，R1234yf 的冷凝压降比 R134a 低 10%~12%，性能略优于 R134a。

Wang Chichuan^[15] 也在 D. D. Col 等^[17] 的测试条件下利用 Shah 关联式^[18] 进行了计算：

$$h_c = h_f \left(1 + \frac{3.8}{Z} \right) \quad (2)$$

其中，

$$Z = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.8} (p^*)^{0.4} \quad (3)$$

$$h_f = \frac{\lambda_f}{d_i} 0.023 \left(\frac{G(1-x)d_i}{\mu_l} \right)^{0.8} Pr_l^{0.4} \quad (4)$$

式中： x 为干度； p^* 为制冷剂的工作压力与其临界压力之比； G 为质量流速， $kg/(m^2 \cdot s)$ ； d_i 为管内径， m ； Pr_l 为液相普朗特数。

以上计算结果与 D. D. Col 等^[17] 的实验结果基本一致。

F. Illán-gómez 等^[19] 也测试对比了质量流速为 350~940 $kg/(m^2 \cdot s)$ 、饱和温度为 30~55 °C 下 R1234yf 和 R134a 的冷凝换热表面传热系数，认为密度、黏度、导热系数均有较大影响，且传热系数随蒸气

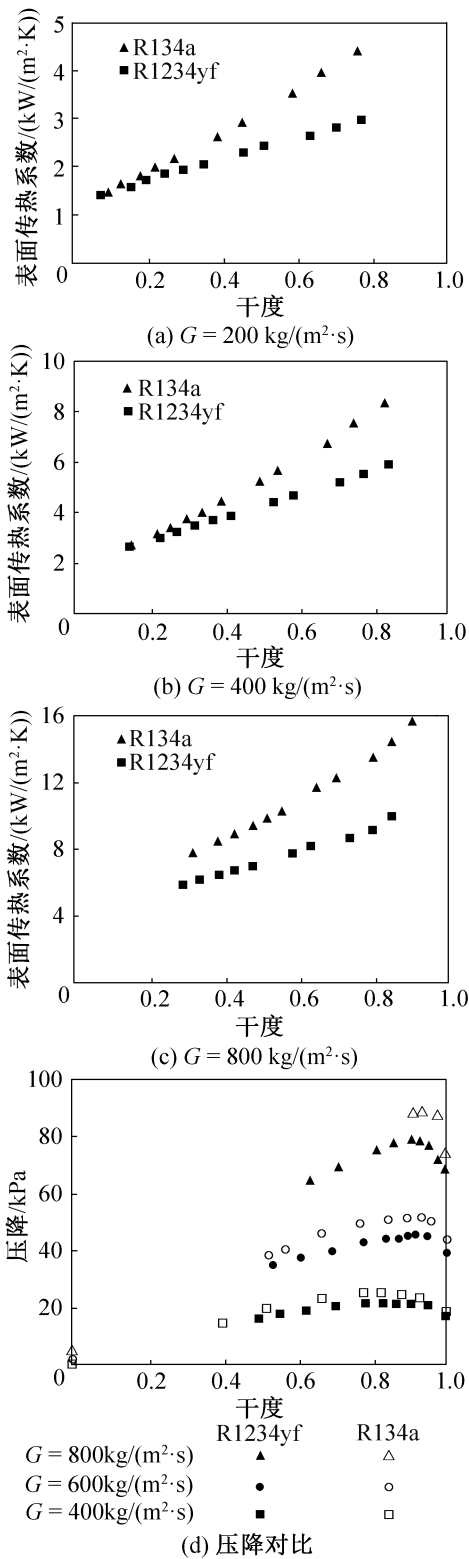


图 4 R1234yf 与 R134a 在 0.96 mm 管中、40 °C 饱和温度下冷凝换热与压降实验结果^[17]

Fig.4 Condensation heat transfer and pressure drop test results of R1234yf and R134a in 0.96 mm tube at 40 °C saturation temperature^[17]

含量的增大而增大,在绝热和非绝热两相流压降的测试中,R1234yf 的压降比 R134a 低 5%~7%,性能略优

于 R134a。M. Padilla 等^[20]对 R1234yf 和 R134a 冷凝压降的测量结果也十分相似。

1.4 沸腾换热表面传热系数

G. Moreno 等^[21]进行了饱和温度为 40 °C 和 60 °C 的池沸腾实验,结果显示当热流密度 < 200 kW/m^2 时 R1234yf 与 R134a 的沸腾换热表面传热系数基本相等,当热流密度较大时 R1234yf 的沸腾换热表面传热系数比 R134a 低约 5%~10%。

S. Saitoh 等^[22]在内径为 2 mm 的光滑水平细管中进行了 R1234yf 管内强制对流沸腾换热的实验研究,饱和温度为 15 °C,热流密度为 6~24 kW/m^2 ,质量流速为 100~400 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,实验结果如图 5 所

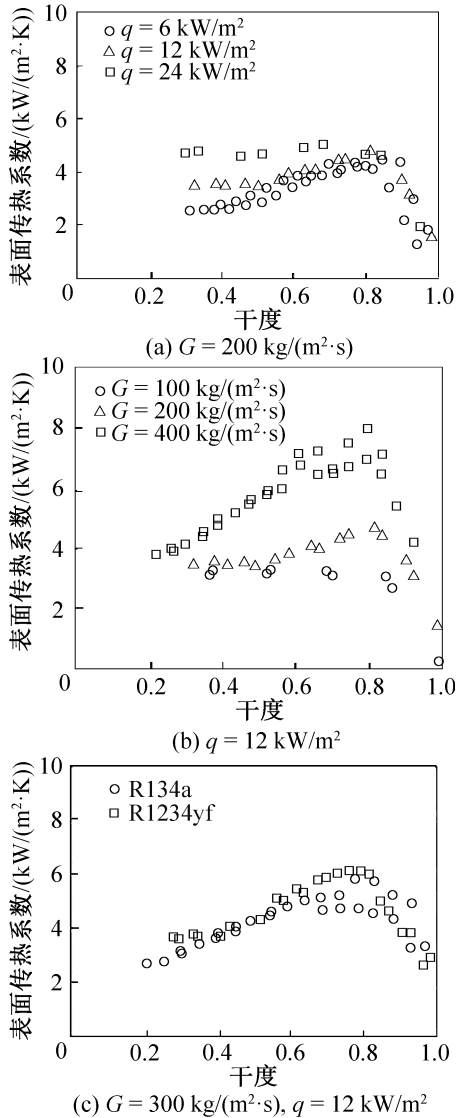


图 5 R1234yf 与 R134a 在 2 mm 管中、15 °C 饱和温度下强制沸腾换热实验结果^[22]

Fig.5 Forced boiling heat transfer test results of R1234yf and R134a in 2 mm tube at 15 °C saturation temperature^[22]

示。由图 5(a)可知,当热流密度为 6 kW/m^2 不变时,沸腾换热表面传热系数随蒸气含量的提升而增大。在蒸气含量较小的范围内,核沸腾为主要换热形式,热流密度越高,沸腾换热表面传热系数越大。图 5(b)显示在质量流速为 $200\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 和 $400\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 、 $x>0.4$ 的范围内,沸腾换热表面传热系数随蒸气含量的提升而增大,而干度对质量流速为 $100\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 时的沸腾换热表面传热系数影响很小,说明蒸气含量较大时,强制对流沸腾为主要换热形式。图 5(c)对比了 R1234yf 与 R134a 在质量流速为 $300\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 、热流密度为 12 kW/m^2 时的沸腾换热表面传热系数,可以看出二者在大部分范围内差异很小, $x=0.6\sim 0.8$ 时 R1234yf 的沸腾换热表面传热系数略高于 R134a。Wang Chichuan^[15] 也计算了 R1234yf 和 R134a 在饱和温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、热流密度为 $20\sim 40\text{ kW/m}^2$ 、管内径为 10 mm 时的沸腾换热表面传热系数,结果几乎无差异。这是因为 R1234yf 在蒸发过程中形成的更厚的液膜,提升了蒸发器的换热性能。

经计算,Lockhart Martinelli 关联式对蒸发压降的测试结果与 S. Saitoh 等^[22] 的实验测量结果一致。

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right) = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_L \varphi_L^2 = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_G \varphi_G^2 \quad (5)$$

其中,

$$\varphi_L = \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}\right)^{0.5} \quad (6)$$

$$\varphi_G = \left(1 + CX + X^2\right)^{0.5} \quad (7)$$

式中: p 为压力,Pa; C 为流动状态系数,当气液两相均为湍流时 $C=20$,当气相为湍流液相为层流时 $C=12$; X 为 Lockhart Martinelli 参数,定义是假设液体单独流动时与假设气体单独流动时 p^* 之比的平方根。

1.5 与润滑油互溶性

与润滑油的互溶性也是考量制冷剂的重要指标之一,若制冷剂在润滑油中溶解度不够,将导致润滑油在换热管道表面附着一层油膜,使系统换热性能下降。R1234yf 在低温下与压缩机常用润滑油互溶性良好,S. Bobbo 等^[23] 对 R1234yf 与汽车空调常用的 PAG 油在 $258.15\sim 338.15\text{ K}$ 之间的溶解度进行了测试,结果显示温度升高时,溶解度降低。

2 R1234yf 热泵系统性能研究

王洪利等^[24] 采用纯理论分析针对 R1234yf 热泵系统建立能量平衡方程和焓平衡方程,分析了不同蒸发温度($-20\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$)及不同冷凝温度($40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$)下过热度对系统各参数的影响,结果表明:R134a 系统 COP 和制热量比 R1234yf 系统高 5% 以内,随着过热度的提高,两系统 COP 和制热量的差值不断减小。同时,R134a 系统的排气温度也比 R1234yf 系统平均高 $8.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。许树学等^[25-26] 搭建了带闪蒸罐的强化补气 R1234yf 低温热泵系统实验台如图 6 所示,冷凝器侧采用冷却水塔冷却,蒸发器侧采用第二制冷剂量热法对 R1234yf 的低温制热性能进行实测,并与 R134a 进行对比,得出如下结论:1) R1234yf 的排气温度更

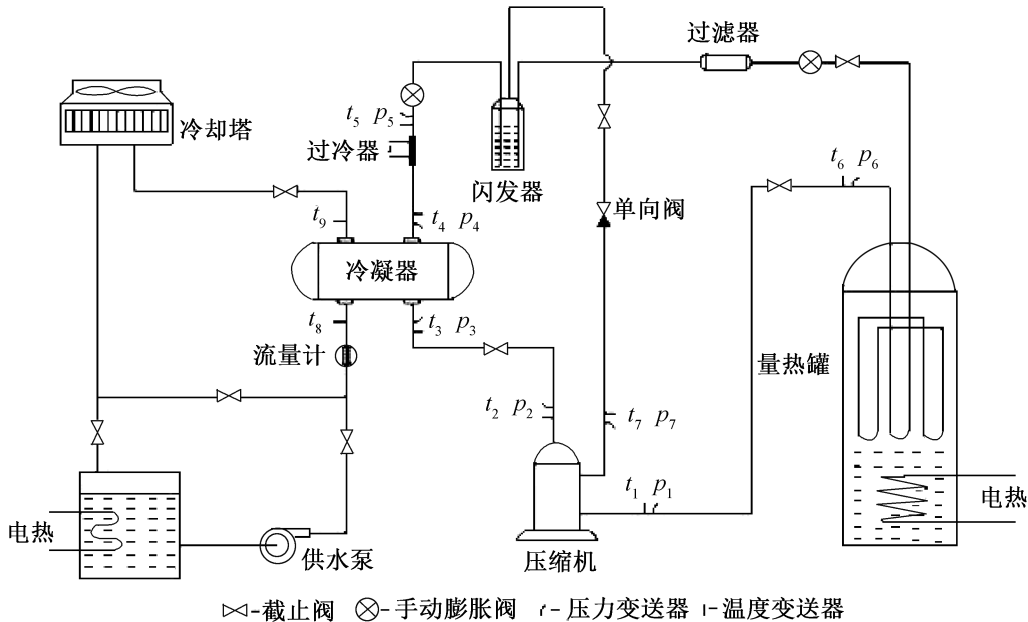


图 6 R1234yf 低温热泵系统实验台^[25]

Fig.6 Low-temperature heat pump system experimental bench of R1234yf^[25]

低:蒸发温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,R1234yf 的排气温度比 R134a 低 $12.91\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,R1234yf 比 R134a 低 $22.33\text{ }^{\circ}\text{C}$,大大提高了压缩机低温工况下运行的稳定性;2) $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时补气后 R134a 的制热量提高 8.6% , R1234yf 提高 17.4% ,补气后 R134a 的制热 COP 提高 5.5% ,R1234yf 提高 12.9% 。补气对制热量及制热 COP 的提升,R1234yf 优于 R134a。

Zou Huiming 等^[27]搭建了一套电动汽车热泵空调系统,对比了不同工况下 R1234yf 和 R134a 热泵系统的工作性能。图 7 所示为不同室内外温度及压缩机转速分别为 $3\ 000$ 、 $5\ 000$ 、 $7\ 000\text{ r/min}$ 时,两种制冷剂的系统制热量和 COP 的对比。其中,当室内外温差大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,为了保护压缩机,转速为 $7\ 000\text{ r/min}$ 工况下不进行测试。由图 7 可知,二者的系统制热量和 COP 相差在 10% 以内,且差值与膨胀阀的开度、压缩机转速、风量等有很大关系。

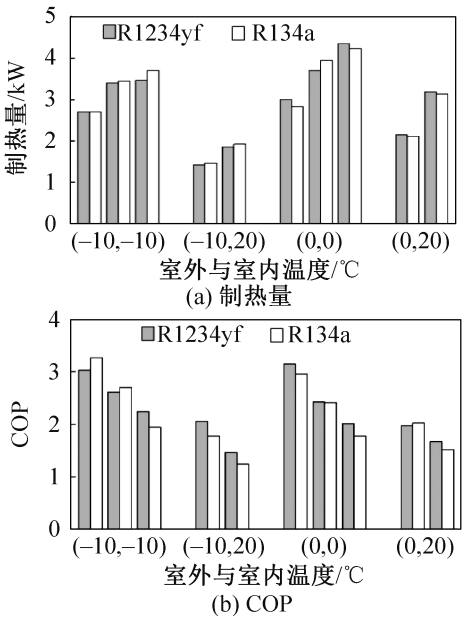


图 7 R1234yf 与 R134a 制热性能对比^[27]
Fig.7 Comparison of heat performance of R1234yf and R134a^[27]

李宴辉等^[28]搭建了一套电动汽车热泵空调系统,系统原理如图 8 所示。常规系统下 R1234yf 制冷性能较 R134a 低 $5.6\% \sim 7.5\%$,COP 低 $5.4\% \sim 7.1\%$ 。通过增加回热器、回冷器及提高压缩机转速等策略,R1234yf 的制冷量和 COP 与 R134a 的差距将小于 1% 。

为提升 R1234yf 的制热性能,有学者提出在 R1234yf 中添加其他制冷剂,组成混合制冷剂来提升热泵性能。范晓伟等^[29]在热泵热水器的名义工况下,对 R32/R12334yf 混合工质热泵循环性能进行计

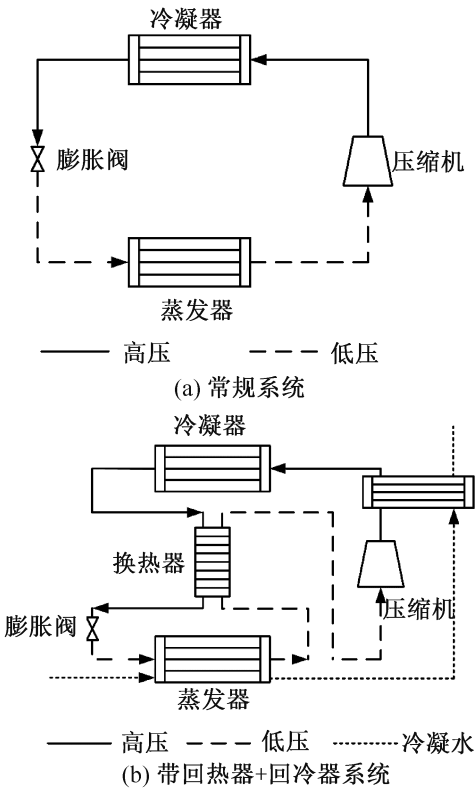


图 8 电动汽车空调系统循环原理^[28]
Fig.8 Cycle schematic of electric vehicle air conditioning system^[28]

算分析。结果表明:R32/R1234yf 的最优质量配比为 $60/40$,使制热性能系数达到最大值 4.727 ,较 R22 系统增大 8.64% ;在最优质量配比下,R32/R12334yf 系统的单位容积制热量、单位质量制热量和冷凝压力均比 R22 系统大,但其压比和排气温度均低于 R22 系统。但该混配工质的 $\text{GWP} = 407$,无法满足日益严苛的法规要求,且温度滑移对系统设计带来更多挑战。

K. Nawaz 等^[30]分析了分别采用 R134a 和 R1234yf 制冷剂的热泵热水器,发现不同的蒸发器换热面积、不同的冷凝器制冷剂内径下两者制热性能不完全相同。在蒸发器换热面积相同,冷凝管内径由 0.31 mm 提升至 0.5 mm 时,R1234yf 比 R134a 制热性能提升 2.1% 。同时 R1234yf 排气温度较 R134a 低 $12 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷凝器侧压降较 R134a 大 30% 。

3 R1234yf 热泵技术潜在优势分析

3.1 过冷度、过热度、压缩机容积效率与压缩机效率

Qi Zhaogang^[31]对 R1234yf 车用空调性能优化的潜力进行了理论分析。图 9(a)所示为蒸发器出口过热度对系统制冷量和 COP 的影响,当过热度从 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统制冷量与 COP 分别增加 3.7% 和

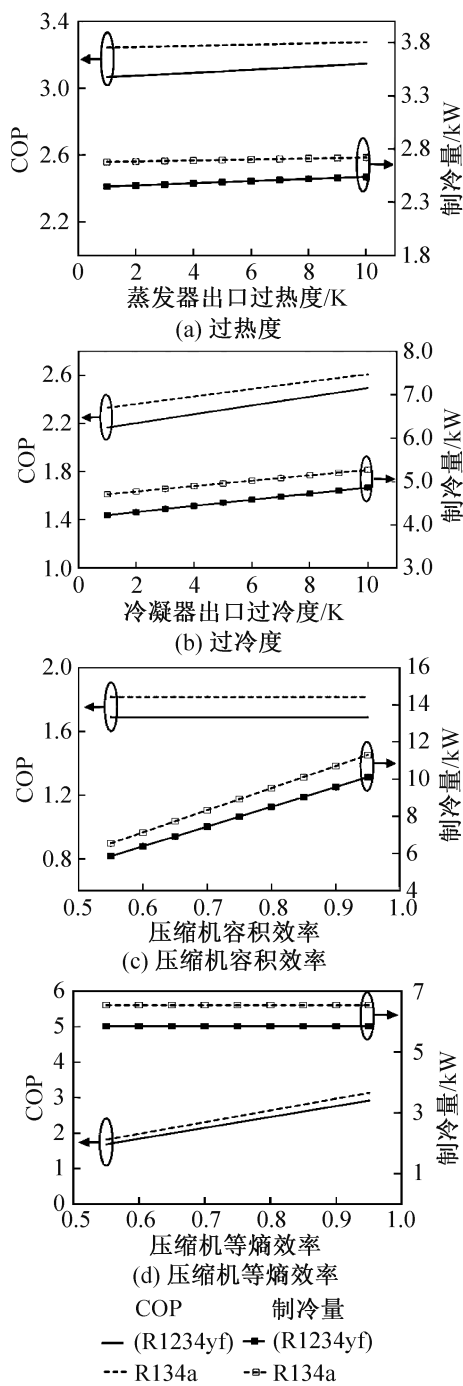


图 9 过热度、过冷度、压缩机容积效率、压缩机等熵效率对系统性能的影响^[31]

Fig.9 Effects of system performance due to superheat, subcooling, compressor volume efficiency and compressor isentropic efficiency^[31]

2.6%,影响较小。在冷凝器出口过冷度为 1~10℃ 的范围内(图 9(b)),系统性能随过冷度增大而提升;由于制冷量随压缩机容积效率的升高而增大,而系统 COP 不变,所以压缩机功耗增大,当压缩机容积效率由 0.55 提升至 0.95 时,系统制冷量提升 72.8%;当压缩机等熵效率提升时,系统 COP 增大,

而制冷量不变,因此压缩机功耗减小,当压缩机等熵效率从 0.55 提升至 0.95 时,系统 COP 提升 72.7%。

3.2 低压饱和压力

当热泵在较低的环境温度中(温度低于-20℃)工作时,吸气蒸发压力可能低于大气压出现真空负压,导致空气和水分泄漏至非密封部件中,造成系统损坏,因此压缩机不能在最高转速运行,必须降低压缩机转速,确保吸气压力大于外部大气压,但压缩机转速的降低也导致低温下制热性能急剧下降。图 10 所示为 R1234yf 与 R134a 的低压饱和曲线对比。由图 10 可知,R1234yf 的低压饱和压力比 R134a 高约 15%,与大气压力对比可知,R134a 在饱和温度约为-25℃时饱和压力就低至大气压,而 R1234yf 在饱和温度为-29℃时才到达大气压,因此 R1234yf 可以适用更低的蒸发压力,即在相同低温环境中,R1234yf 可以比 R134a 匹配更高的压缩机转速,提供更高的制热量。Feng L. 等^[32]对低温环境中 R1234yf 及 R134a 车用热泵性能进行了测试对比,结果显示在-20℃的环境温度中,R1234yf 系统的制热量比 R134a 高 28%,这是因为 R1234yf 所匹配的压缩机运行转速更高,而在 0℃的中等环境温度中,R1234yf 与 R134a 车用热泵压缩机均在最高转速运行,所以最大制热量并无明显差异。

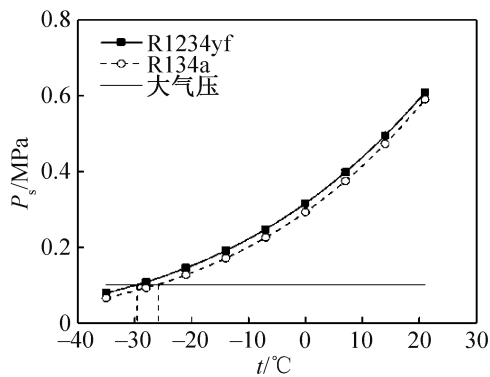


图 10 R1234yf 与 R134a 低压饱和曲线对比

Fig.10 Comparison of low saturation pressure curve of R1234yf and R134a

3.3 压缩机排气温度

压缩机排气温度是影响系统工作稳定性的重要参数之一,压缩机排气温度过高,将导致压缩机容积效率下降,功耗增加,且排气过热也会使润滑油、制冷剂及各部件间产生不良反应、磨损,严重影响系统稳定性及安全性,且降低压缩机的使用寿命。C. Zilio 等^[33]对 R1234yf 与 R134a 在车用空调系统中性能的对比进行仿真,结果表明 R1234yf 系统压缩机的排气温度比 R134a 低 4.9~7.6℃。Y. Lee 等^[8]对

R1234yf 与 R134a 系统进行实验,结果表明 R1234yf 的排气温度比 R134a 低 6.4~6.7℃。因此,R1234yf 可为系统提供更低的排气温度使压缩机运转更稳定。

3.4 强化补气

强化补气(enhanced vapor injection,EVI)技术可以通过提升蒸发器中的焓差改善系统循环稳定性和工作性能。Zhang Ziqi 等^[34]对低温环境下 R134a 热泵系统的强化补气进行了测试,系统制热量随着补气压力的升高而增加,且环境温度越低,强化补气的效果越好。当环境温度为-20℃时,EVI 模式下制热量平均提升 57.7%;当环境温度为-10℃时,EVI 模式制热量平均提升 44.1%,对经济器进行更合适的优化可以使 COP 和制热量再各提升约 14%,因此强化补气可以很好的解决热泵系统低温下制热性能下降的问题。R1234yf 的物性与 R134a 极其相似,且因气相密度较大,可以提供更高的质量流量,因此 R1234yf 将比 R134a 更适合强化补气系统,制热性能的提升也将比 R134a 更好。许树学等^[25-26]搭建的闪蒸罐式强化补气热泵系统实验结论也验证了这一点,-25℃时补气后 R134a 的制热量与 COP 分别提高 8.6%和 5.5%,R1234yf 分别提高 17.4%和 12.9%,R1234yf 低温环境的强化补气性能优于 R134a。

3.5 蒸发器制冷剂分配均匀性

热泵系统中,蒸发器中制冷剂分配的均匀性对蒸发器换热性能具有很大的关联性,改善蒸发器中制冷剂分配的均匀性也是热泵系统优化的必要内容。周国梁等^[35]用红外热像仪对 R134a 系统中双排四流程微通道蒸发器的表面分布均匀性进行了研究,结果显示当蒸发器进风温度由 21℃提升至 42℃时,蒸发器焓损先增大后减小,在 27℃与 42℃时分别达到最大值 0.21 kW 和最小值 0.16 kW,表面温度也在 27℃时分布最不均匀,在 42℃时分配最为均匀。控制进风温度为 27℃,压缩机转速由 2 500 r/min 提升至 3 250 r/min 再至 4 000 r/min 时,表示表面温度分布均匀性的 σ 值分别减小 22.1%与 81.5%。因此,适当提升蒸发器进风温度与压缩机转速可以显著改善蒸发器表面分布均匀性。

蒸发器各管口的布置也对制冷剂分配的均匀性有较大影响,刘研等^[36]对平行流四流程微小通道蒸发器进行 CFD 仿真测试,得到一种优化结构,当进口管相对集管位置为 0.591、出口管相对集管位置为 0.402、扁管与集管相对组合高度为 0.239 时,不均匀度比初始数值减少 20%,制冷剂分布均匀性最好。

4 结论

本文对近年来 R1234yf 汽车热泵空调技术的相

关研究进行了综述与分析,得到如下结论:

1) R1234yf 热物理性质、传递参数、材料相容性、环保性、安全性各方面均较适合汽车热泵空调系统,且与 R134a 在物性上区别较小,与润滑油互溶性良好,仅对汽车空调小范围的部件进行优化便可保证系统工作性能。

2) 在换热过程中,R1234yf 会产生比 R134a 更厚的液膜,其在蒸发过程管中沸腾换热表面传热系数略高于 R134a,沸腾换热性能较好。R1234yf 在冷凝过程中的压降比 R134a 低约 5%~10%,性能略优于 R134a,但冷凝换热表面传热系数与 R134a 的对比各学者结论不同。在直接替代 R134a 的热泵系统时 R1234yf 运行特点及性能与 R134a 十分相似,其制热量与 COP 比 R134a 略低,通过增加回热器与回冷器、优化零部件、强化补气、改善转速等工况条件的方式可使其工作性能超越 R134a,成为汽车空调替代 R134a 的下一代新型制冷剂。

3) R1234yf 的低压饱和压力比 R134a 高约 15%,可以匹配更高的压缩机转速,在低温下的制热性能优于 R134a。R1234yf 的压缩机排气温度低于 R134a,系统工作运行更加稳定。提升压缩机效率可以显著提升热泵系统的工作性能。强化补气可以显著提升热泵系统在低温环境中的制热性能。在环境温度为-20℃时,R134a 热泵在 EVI 模式下制热量平均提升 57.7%,且 R1234yf 气相密度大,可以提供更高的质量流量,具有比 R134a 更适合用于强化补气热泵系统的优势,补气效果优于 R134a。

综上所述,R1234yf 在车用热泵中具有较好的工作性能和发展前景,可以作为 R134a 的替代制冷剂。可以预测,R1234yf 热泵技术将在世界各地汽车空调行业中有更为深入的发展。

参考文献

- [1] BROWN S, PYKE D, STEENHOF P. Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market [J]. Energy Policy, 2010, 38(7):3797-3806.
- [2] FENG L, HRNJAK P. Experimental study of an air conditioning-heat pump system for electric vehicles[C]//SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE Technical Paper, 2016.
- [3] HIROTA Y, IWATA R, YAMAUCHI T, et al. Development of a compact adsorption heat pump system for automotive air conditioning system[C]//SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE Technical Paper, 2016.
- [4] The National Archives. Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of the Council of on certain

- fluorinated green house gases [EB/OL]. (2006-05-17) [2018-09-25]. <http://www.dti.gov.uk/innovation/sustainability/fgas-es/page28889.html>.
- [5] Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Notification on methods of testing energy consumption efficiency, greenhouse gas emissions and fuel consumption rate of automobiles [EB/OL]. (2015-04-08) [2018-09-25]. <http://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2200000031861>.
- [6] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. The physical science basis. Contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. *Computational Geometry*, 2013, 18(2):95-123.
- [7] 曹霞. HFO-1234yf——新一代汽车空调制冷剂[J]. 制冷与空调(北京), 2008, 8(6):55-61. (CAO Xia. HFO-1234yf—new generation refrigerant for automobile air conditioner [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2008, 8(6):55-61.)
- [8] LEE Y, JUNG D. A brief performance comparison of R1234yf and R134a in a bench tester for automobile applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 35(1):240-242.
- [9] XU Shuxue, FAN Xiusong, MA Guoyuan. Experimental investigation on heating performance of gas-injected scroll compressor using R32, R1234yf and their 20wt%/80wt% mixture under low ambient temperature [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 75:286-292.
- [10] Designation and safety classification of refrigerants; ANSI/ASHRAE 34-2007 [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [11] POLLAK G. Summary of SAE CRP1234 refrigerant evaluation and risk assessment [EB/OL]. (2010-07-15) [2018-09-25]. <http://www.sae.org/events/aars/presentations/2010/T8.pdf>.
- [12] QIN Fei, XUE Qingfeng, VELEZ G M A, 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.
- [13] JUNG J, JEON Y, LEE H, et al. Numerical study of the effects of injection-port design on the heating performance of an R134a heat pump with vapor injection used in electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127:800-811.
- [14] WANG Chichuan. System performance of R-1234yf refrigerant in air-conditioning and heat pump system—an overview of current status[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(2):1412-1420.
- [15] WANG Chichuan. An overview for the heat transfer performance of HFO-1234yf [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19(1):444-453.
- [16] PARK K J, DONG G K, JUNG D. Condensation heat transfer coefficients of R1234yf on plain, low fin, and Turbo-C tubes [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(1):317-321.
- [17] COL D D, TORRESIN D, CAVALLINI A. Heat transfer and pressure drop during condensation of the low GWP refrigerant R1234yf [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(7):1307-1318.
- [18] SHAH M M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1979, 22(4):547-556.
- [19] ILLÁN-GÓMEZ F, LÓPEZ-BELCHÍ A, GARCÍA-CASCALS J R, et al. Experimental two-phase heat transfer coefficient and frictional pressure drop inside mini-channels during condensation with R1234yf and R134a [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 51:12-23.
- [20] PADILLA M, REVELLIN R, BONJOUR J. Two-phase flow visualization and pressure drop measurements of HFO-1234yf and R-134a refrigerants in horizontal return bends [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 39:98-111.
- [21] MORENO G, NARUMANCHI S, KING C. Pool boiling heat transfer characteristics of HFO-1234yf on plain and microporous-enhanced surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(11):577-587.
- [22] SAITOH S, DANG C, NAKAMURA Y, et al. Boiling heat transfer of HFO-1234yf flowing in a smooth small-diameter horizontal tube [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(8):1846-1853.
- [23] BOBBO S, ZILIO C, SCATTOLINI M, et al. R1234yf as a substitute of R134a in automotive air conditioning. Solubility measurements in two commercial PAG oils [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 40(1):302-308.
- [24] 王洪利, 张率华, 阚德民. 带回热器的 R1234yf 热泵系统能量分析和分析 [J]. 化学工程, 2018, 46(5):42-47. (WANG Hongli, ZHANG Shuaihua, KAN Demin. Energy and exergy analysis of R1234yf heat pump system with internal heat exchanger [J]. *Chemical Engineering*, 2018, 46(5):42-47.)
- [25] 许树学, 柴玉鹏, 马国远, 等. R1234yf 低温制热性能的实验研究 [J]. 家电科技, 2016(增刊1):178-181. (XU Shuxue, CHAI Yupeng, MA Guoyuan, et al. Experimental research on R1234yf heating performance under low temperature [J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2016(Suppl.1):178-181.)
- [26] 柴玉鹏, 马国远, 许树学, 等. R1234yf 和 R134a 制冷及

- 制热性能实验研究[J]. 制冷与空调(四川), 2017, 31(4):435-440. (CHAI Yupeng, MA Guoyuan, XU Shuxue, et al. Experimental research on cooling/heating performance using R1234yf and R134a[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2017, 31(4):435-440.)
- [27] ZOU Huiming, HUANG Guangyan, SHAO Shuangquan, et al. Experimental study on heating performance of an R1234yf heat pump system for electric cars[J]. Energy Procedia, 2017, 142:1015-1021.
- [28] 李宴辉, 熊发成, 轩小波, 等. R1234yf 在纯电动汽车空调上的应用实验研究[J]. 制冷与空调(北京), 2017, 17(5):96-100. (LI Yanhui, XIONG Facheng, XUAN Xiaobo, et al. Experimental research on R1234yf application in pure electric vehicle air conditioning[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(5):96-100.)
- [29] 范晓伟, 张鹿, 唐向阳, 等. R32/R1234yf 混合工质热泵循环性能分析[J]. 制冷与空调(北京), 2016, 16(12):49-51. (FAN Xiaowei, ZHANG Lu, TANG Xiangyang, et al. Analysis on performance of heat pump system using R32/R1234yf mixtures as refrigerant[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2016, 16(12):49-51.)
- [30] NAWAZ K, SHEN B, ELATAR A, et al. R-1234yf and R-1234ze(E) as low-GWP refrigerants for residential heat pump water heaters[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 82:348-365.
- [31] QI Zhaogang. Performance improvement potentials of R1234yf mobile air conditioning system[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 58:35-40.
- [32] FENG L, HRNJAK P. Performance characteristics of a mobile heat pump system at low ambient temperature[C]//SAE 2018 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE Technical Paper, 2018.
- [33] ZILIO C, BROWN J S, CAVALLINI A. Simulation of R-1234yf performance in a typical automotive system[C]//Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants. Delft: Royal Dutch Refrigeration Association and Dutch Association of Contractors and Suppliers of Refrigeration and HVAC Applications, 2009.
- [34] ZHANG Ziqi, LI Wanyong, SHI Junye, et al. A study on electric vehicle heat pump systems in cold climates[J]. Energies, 2016, 9(12):881-892.
- [35] 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. (ZHOU Guoliang, SU Lin, WU Longbing, et al. Experimental research on heat transfer characteristics of micro-channel evaporator under variable conditions[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4):87-93.)
- [36] 刘研, 孙柏林, 韩艳辉. 车用微小通道蒸发器制冷剂流量分配特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2):267-274. (LIU Yan, SUN Bolin, HAN Yanhui. Refrigerant flow distribution characteristics of vehicle mini-channel evaporator[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(2):267-274.)

通信作者简介

陈江平,男,教授,博士生导师,上海交通大学制冷与低温工程研究所,(021)34206775,E-mail: jpchen_sjtu@163.com。研究方向:车用空调与热系统,制冷剂替代技术,新能源技术中的传热传质。

About the corresponding author

Chen Jiangping, male, professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206775, E-mail: jpchen_sjtu@163.com. Research fields: automotive air-conditioning and thermal system, refrigerant replacement technology, heat and mass transfer in new energy technology.