

文章编号:0253-4339(2022)06-0011-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2022.06.011

油循环率对电动汽车 CO₂ 热泵系统性能的影响

邹慧明^{1,2} 汤鑫斌^{1,2} 唐坐航^{1,2} 唐明生¹ 田长青^{1,2}

(1 中国科学院理化技术研究所 空间功热转换技术重点实验室 北京 100190;2 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 本文搭建了一套带油循环率测试装置的电动汽车 CO₂ 热泵系统实验台,实验研究了典型车辆工况下热泵系统油循环率对压缩机与热泵性能的影响,实验结果表明:制冷工况下,油循环率由 1.17% 升至 5.26% 时,压缩机容积效率和等熵效率分别提升 13.6% 和 5.6%;制热工况下,油循环率由 1.51% 升至 6.68% 时,压缩机容积效率和等熵效率分别提升 7.2% 和 15.7%,压缩机排气温度由 155.5 ℃ 降至 146 ℃;相较于高温段气冷器流阻和换热,油循环率对低温段蒸发器影响更大,高温段换热器流阻仅为低温段的 28%;根据油循环率对热泵系统整体性能影响分析,油循环率在 4% 附近时热泵系统具有较佳的综合性能。

关键词 油循环率;CO₂;电动汽车;热泵系统

中图分类号:TB657.2;U469.72

文献标识码:A

Effect of Oil Circulation Rate on the Performance of CO₂ Heat Pump System for Electric Vehicles

Zou Huiming^{1,2} Tang Xinbin^{1,2} Tang Zuohang^{1,2} Tang Mingsheng¹ Tian Changqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Space Energy Conversion, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract In this study, a CO₂ heat pump system test bench for electric vehicles with an oil circulation rate testing device was built to investigate the influence of the oil circulation rate on the performance of the compressor and the heat pump under typical vehicle operating conditions. Under refrigeration conditions, the increase in the oil circulation rate from 1.17% to 5.26% increased the volumetric and isentropic efficiencies of the compressor by 13.6% and 5.6%, respectively. Under heating conditions, when increasing the oil circulation rate from 1.51% to 6.68%, the volumetric and isentropic efficiencies of the compressor increased by 7.19% and 15.7%, respectively, while the discharge temperature of the compressor decreased from 155.5 ℃ to 146 ℃. Unlike the flow resistance and heat exchange capacity of the air cooler in the high-temperature section, the oil circulation rate exhibited a significant effect on the evaporation process in the low-temperature section. The analysis of the influence of the oil circulation rate on the overall performance of the heat pump system demonstrated that the heat pump system performance improved when the oil circulation rate is approximately 4%.

Keywords oil circulation rate; CO₂; electric vehicle; heat pump system

相比于传统燃油汽车,电动汽车缺少发动机冷却液用于解决冬季工况下车舱的采暖需求,常规 R134a 和 R1234yf 热泵系统存在温室效应和低温适应性问题^[1-2],直接采用 PTC (positive temperature coefficient) 电加热元件又会极大缩短电动汽车续航里程。CO₂ 热泵技术凭借优异的环保性、宽温区适应性及与车辆系统的兼容性已经成为相关行业的研究热点,CO₂ 热泵空调系统将是未来电动汽车热泵空调领域的重要发展方向^[3]。

电动汽车 CO₂ 热泵系统能量传递过程包括做功

和传热,系统有用功的输入主要通过压缩机部件,而热量的传递主要通过换热器。对于系统部件的做功过程和换热过程,润滑油对于各部件运行的可靠性和高效性起着至关重要的作用。对于热泵系统做功部分的压缩机部件而言,润滑油在压缩机运行时起到对运动副的润滑及配合面的密封作用,同时,润滑油能及时带走压缩过程因机械和电磁损耗产生的废热,有效改善压缩过程^[4-6]。

通常电动汽车 CO₂ 热泵系统无专门的油分离装置,意味着润滑油参与包括蒸发器和气冷器在内的所

有换热部件的换热过程。由于润滑油与 CO_2 工质的黏度和传热特性等物性差异较大,润滑油会影响系统循环中的传热过程,尤其蒸发器处于低温状态时,润滑油黏性变大,导致制冷剂与润滑油混合物流动阻力增加,甚至部分润滑油会附着于传热管内壁,进而影响换热器传热效率和系统整体能效^[7-9]。

目前,电动汽车空调用压缩机主要以涡旋压缩机为主,在高 CO_2 运行压力工况下,涡旋压缩机的动静涡盘在大压差作用下导致泄漏增加,如何有效解决其泄漏问题,同时保证运行时动静涡盘的可靠润滑是提升压缩性能的关键。方金湘等^[10-12]通过理论和实验研究指出采用合适的油循环率是保证涡旋压缩机运行可靠和高效的关键。田俊义等^[13]建立涡旋压缩机滑动轴承流体润滑模型,计算制冷剂含油率对滑动轴承摩擦功耗的影响,指出当含油率在 5%~12% 时,滑动轴承功耗相应从 50.0 W 降至 40.6 W。陶宏等^[14]搭建了电动汽车空调压缩机性能实验台,研究润滑油循环率对电动汽车空调涡旋压缩机性能的影响,实验结果表明:压缩机容积效率和电效率与油循环率呈正相关性(油循环率范围:1%~10%),润滑油循环率还会影响压缩机排气温度和壳体温度,系统适度的油循环率为 5%。

微通道换热器由于具有结构紧凑和换热高效的优势已在车用空调行业得到广泛应用^[15],了解制冷剂和润滑油混合物在微小尺寸结构内的流动和传热特性,对于提升系统性能具有至关重要的作用^[16]。朱国梅等^[17]指出影响润滑油与 CO_2 制冷剂互溶的因素主要有介电常数、密度、扩散系数和添加剂等,而介电常数的表征是极性, CO_2 在超临界状态下表现出非极性溶剂的性质,因而超临界状态 CO_2 对于非极性润滑油的溶解能力高于亚临界状态下的 CO_2 。秦红^[18]搭建了整车管路空调系统的实验台架,研究油循环率对空调系统换热量的影响,通过不同工况的实验研究,油循环率在 4.72%~7.87% 范围内时制冷系统换热量变化率在 5% 之内,当油循环率从 4.72% 增至 19.63% 时,换热量衰减了 21.28%。

本文搭建了一套带油循环率测试装置的电动汽车 CO_2 热泵系统实验台架,重点研究分析典型车辆工况下热泵系统油循环率对压缩机和换热器运行状态及整体系统性能的影响特性。

1 电动汽车 CO_2 热泵系统及油循环测试装置

1.1 实验装置

为研究油循环率对电动汽车 CO_2 热泵系统性能

的影响,本文搭建了如图 1(a) 所示的测试平台。系统采用三换热器结构形式,换热器均为微通道平行流换热器;车内空调箱 HVAC(heating ventilation air conditioning) 包括两个并排布置的车内气冷器和车内蒸发器,空气侧气流先流经车内蒸发器,然后流过车内气冷器;压缩机采用 $5.3\text{ cm}^3/\text{r}$ 的 CO_2 涡旋压缩机;车外换热器布置于车头。为模拟车辆工况,热泵系统布置于汽车空调环境实验室。该焓差室由室内侧和室外侧两个独立的环境控制室组成,可同时模拟车内外温湿度工况。具体台架布置情况如图 1(b) 所示。

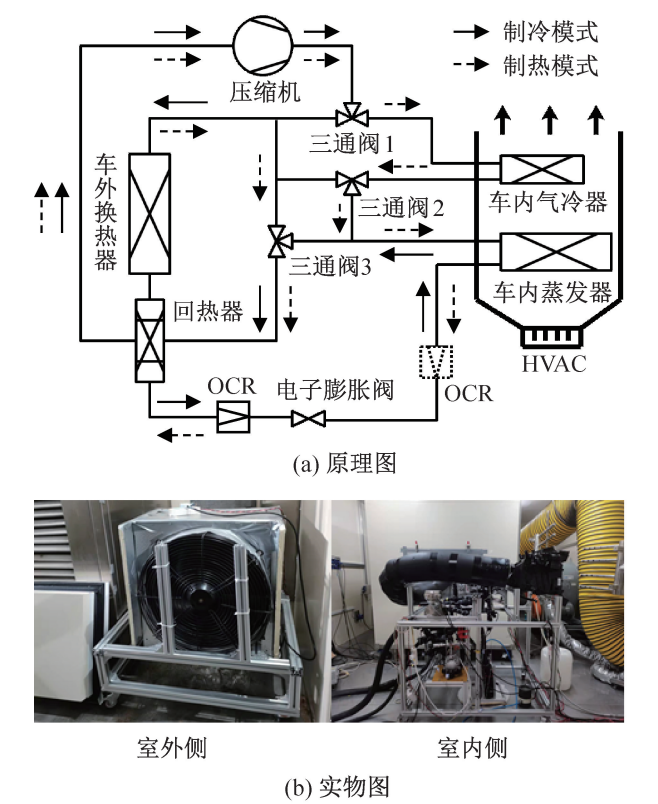


图 1 实验台架
Fig.1 Test bench

该热泵系统通过三组三通阀通断实现制冷和制热模式的切换,制冷模式测量系统润滑油循环率(oil circulation rate, OCR) 时,将 OCR 测量仪布置于回热器和电子膨胀阀之间,制热模式测量系统 OCR 时,OCR 则布置于电子膨胀阀和车内蒸发器之间,以保证热泵系统处于不同模式工作,OCR 测点位置润滑油和 CO_2 制冷剂混合物温压状态满足 OCR 测量仪要求。

测试过程中,通过调节压缩机注油量调整系统中润滑油的循环率,润滑油循环率利用布置的 OCR 测量仪进行测量记录。系统中 OCR 测量仪采用耐高压的密度传感器,该密度传感器基于 U 型振荡管的原理测量润滑油和 CO_2 混合物的密度,通过混合物密

度与润滑油浓度、介质温度和压力关系计算并实时采集记录系统 OCR。焓差室空气侧干湿球温度采用高精度铂电阻测量,测温精度为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$;压缩机输入电功采用功率计 8920 测量,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。结合科氏质量流量计和油循环率测量值计算确定系统中循环的制冷剂质量流量。制冷剂侧主要测量仪器参数如表 1 所示。

表 1 主要测量仪器参数

Tab.1 Parameters of principal measuring instruments

仪器	量程	精度
温度传感器	-40~150 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
压力传感器	低压侧:0~6 MPa 高压侧:0~18 MPa	$\pm 0.1\%$
质量流量计	0~400 kg/h	$\pm 0.2\%$
OCR 测量仪	温度:0~44 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3\%$
	压力:6~13 MPa(绝压)	
	润滑油 ACC HV:0~10%	
	温度:35~55 $^{\circ}\text{C}$	
	压力:9.5~13 MPa(绝压)	
	润滑油 ACC HV:0~10%	

1.2 实验工况

基于电动汽车热泵系统典型运行工况,开展不同 OCR 条件下热泵系统性能测试,测试工况如表 2 所示。为了对比分析不同 OCR 对系统性能的影响,实验采用控制变量法,制冷工况设定压缩机转速 n 为 4 500 r/min,电子膨胀阀相对开度为 32%;制热工况设定压缩机转速 n 为 4 800 r/min,电子膨胀阀相对开度为 20%;为提高 CO₂ 热泵系统制热模式下高压侧的换热能力,本文制热工况测试时通过三通阀通断将室内蒸发器和室内气冷器串联,热泵系统制冷剂充注量为 590 g,制冷剂采用高纯 CO₂(体积分数 $\geq 99.999\%$),压缩机润滑油采用 ACC HV 冷冻油。

表 2 测试工况

Tab.2 Testing conditions

工况	室内温度/ $^{\circ}\text{C}$	室内风量/(m^3/h)	室外温度/ $^{\circ}\text{C}$	室外风量/(m^3/h)
制冷	27	450	35	1 800
制热	20	500	0	1 800

1.3 数据处理

热泵系统 HVAC 通过风管与焓差室受风箱连接,利用焓差室受风箱和空气取样器测量 HVAC 进

出口空气的干湿球温度及风量,系统制冷量和制热量 Q 为:

$$Q = \frac{q(h_{a1} - h_{a2})}{3.6v'_a(1 + W_a)}$$

(1)

式中: q 为被测空调器室内侧测点风量, m^3/h ; h_{a1} 、 h_{a2} 分别为空调器室内侧进、出风空气焓值, kJ/kg ; v'_a 为喷嘴前空气比容, m^3/kg ; W_a 为喷嘴前空气含湿量, $\text{g}/(\text{kg 干空气})$ 。

系统性能系数 COP:

$$\text{COP} = \frac{Q}{W}$$

(2)

式中: W 为压缩机功耗, W 。
压缩机等熵效率 η_s 和容积效率 η_v 分别为:

$$\eta_s = \frac{h_d - h_s}{h'_d - h_s}$$

(3)

$$\eta_v = \frac{q_m}{60\rho_s n V_s}$$

(4)

式中: h_d 为压缩机等熵压缩排气比焓, h_s 为吸气比焓, h'_d 为实际排气比焓,单位均为 kJ/kg ; q_m 为系统质量流量, kg/h ; ρ_s 为吸气密度, kg/m^3 ; n 为压缩机转速, r/min ; V_s 为压缩机排量, m^3/r 。

换热器两侧换热比 η_{evap} 和 η_{HVAC} 分别为:

$$\eta_{\text{evap}} = \frac{Q_{\text{air-c}}}{Q_{\text{r-c}}}$$

(5)

$$\eta_{\text{HVAC}} = \frac{Q_{\text{air-h}}}{Q_{\text{r-h}}}$$

(6)

式中: $Q_{\text{air-c}}$ 、 $Q_{\text{r-c}}$ 分别为室内蒸发器空气侧制冷量和制冷剂侧制冷量, W ; $Q_{\text{air-h}}$ 、 $Q_{\text{r-h}}$ 分别为 HVAC 空气侧制热量和制冷剂侧制热量, W 。

2 实验结果分析

2.1 压缩机效率与运行特性

图 2 (a) 所示为制冷工况下 OCR 对压缩机排气温度和等熵效率的影响。OCR 在 1.17%~3.83% 范围内变化时,压缩机排气温度和等熵效率变化不超过 0.5%,但当 OCR 增至 5.26% 时,由于润滑油冷却作用的增强,压缩机排气温度相比于 OCR 为 1.17% 时降低 3.4 $^{\circ}\text{C}$,等熵效率提高 13.6%。

图 2 (b) 所示为制热工况下 OCR 对排气温度和等熵效率的影响。相比于制冷工况,压缩机排气温度在制热工况下整体显著升高,且等熵效率整体更低。在低 OCR 情况下润滑油对压缩机排气温度影响显著,当 OCR 为 1.51% 时,压缩机排气温度升至 155.5 $^{\circ}\text{C}$,随着 OCR 的增加,由于润滑油对压缩过程的冷却

作用及运动副之间的润滑作用增强,OCR 由 1.51% 增至 6.68% 时,压缩机等熵效率提升 15.7%。

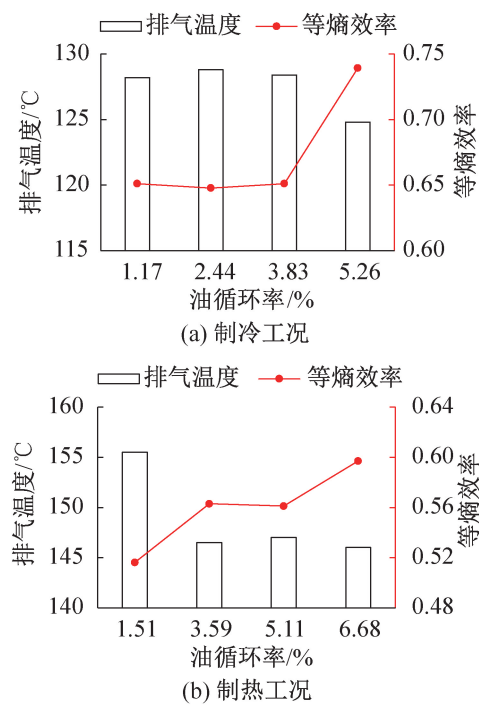


图 2 OCR 对排气温度和等熵效率的影响
Fig.2 Effects of OCR on exhaust temperature and isentropic efficiency

图 3 所示为 OCR 对吸气密度和容积效率的影响。可知,在低油循环率条件下,OCR 变化对压缩机吸气密度影响较小,制冷工况下 OCR 达到 5.26% 和制热工况 OCR 为 6.68% 时,压缩机吸气密度明显衰减。同时,随着 OCR 的增加,由于润滑油对涡旋压缩机动静涡盘配合面的密封效果增强,热泵系统容积效率均有所增加,且制热模式下,当 OCR 为 1.51% 时,较差的冷却和润滑作用导致压缩机在压缩过程由于不可逆损失产生的热量增加,压缩机排气和壳体温度整体升高,吸气过程的温升使得在较低 OCR 条件下,制热工况时压缩机的容积效率降低,相比于 OCR 为 3.59% 的情况,容积效率衰减 3.94%。

2.2 换热器流动与传热特性

图 4 所示为换热器流动阻力和换热比随 OCR 的变化,图中 Δp_H 表示高温段气冷器和 HVAC 压降, Δp_L 表示低温段蒸发器和车外蒸发器压降。可以看出,对于处于 $-8 \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度状态下的蒸发器而言,由于低温对润滑油黏度的影响,导致润滑油和 CO_2 制冷剂混合物在蒸发器内的流动阻力显著增加,具体表现为制冷和制热工况下,对于所有 OCR 运行条件,低温段蒸发器压降均大于高温段气冷器压降。由于制热工况蒸发器蒸发温度在 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,黏性阻力作用相比

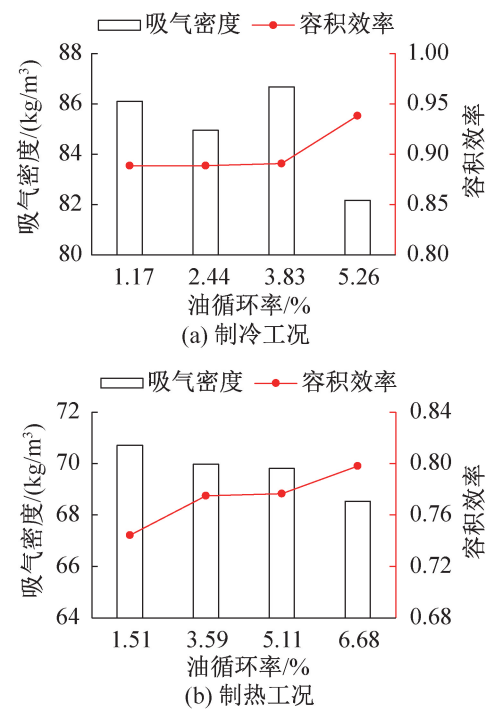


图 3 OCR 对吸气密度和容积效率的影响
Fig.3 Effects of OCR on suction density and volumetric efficiency

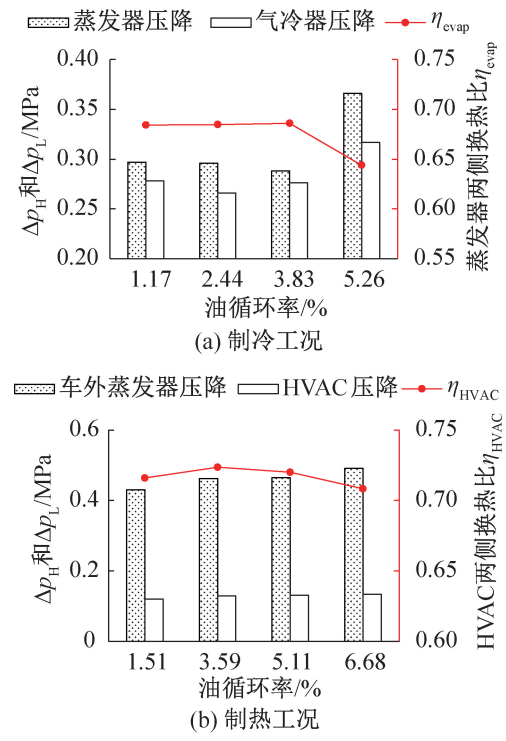


图 4 换热器流阻和换热比随 OCR 的变化
Fig.4 Flow resistance and heat transfer ratio of heat exchanger varies with OCR

于制冷工况更为明显,具体的,制热工况下,润滑油和 CO_2 制冷剂混合物在流经 HVAC 内部双换热器的情况下,流动阻力损失仍仅为低温侧蒸发器流阻的 28%。

换热器润滑油和制冷剂混合物与空气两侧的换热比在 0.64~0.72 之间,两侧热平衡的差值一部分来源于换热器和焓差室受风箱测量系统漏热量的影响,另一部分则是换热器本身的传热效率,而润滑油循环率是影响换热器传热效率的关键性因素,即对于制冷工况下蒸发器和制热工况下 HVAC 制冷剂侧及空气侧的换热比而言,润滑油对两侧换热比的影响主要取决于黏度和浓度。由于制热工况 HVAC 属于高温段,润滑油温度较高,工质流动性较好,较少的润滑油黏附于传热管内表面,只有当 OCR 较高时 (OCR=6.68%),润滑油浓度对传热的影响增强,此时制热工况下 HVAC 两侧换热比才有所衰减。对于制冷工况,OCR 范围在 1.17%~3.83% 时,润滑油的黏附作用增加了换热器的热阻,此时润滑油对蒸发器两侧换热比的影响由黏度起主导作用,因此两侧换热比基本不随 OCR 变化。当 OCR 达到 5.26% 时,参与沸腾传热的制冷剂流量的减少,导致蒸发器两侧换热比衰减了 6.15%。

2.3 热泵系统性能

图 5 所示为 OCR 对压缩机功耗和热泵系统性能的影响。对于制冷工况,与上述 OCR 对换热器流动和传热特性影响的分析一致,当 OCR 为 5.26% 情况下,由于润滑油对换热器换热的影响增强,导致系统制冷量由 2 678.5 W 降至 2 534.7 W,衰减了 5%,使得该 OCR 条件下系统制冷 COP 迅速降低。对于制热工况,在 1.51% 的低 OCR 条件下,由于压缩机等熵效率和容积效率的降低,压缩机整体性能变差,功耗相比于较高 OCR 运行条件增加约 2%,使得低 OCR 运行条件制热 COP 明显降低。

对于所测试的 OCR 范围内,制冷工况下,系统最佳制冷 COP 对应的 OCR 为 3.83%,制热工况下,最佳制热 COP 对应的 OCR 为 3.59%。综上,对于所开展的测试工况,当系统 OCR 在 4% 附近时,热泵系统具有较佳的综合性能。

3 结论

本文搭建了带油循环率测试装置的电动汽车 CO₂ 热泵系统实验台,在典型车辆工况下,开展了 OCR 对热泵系统性能影响的实验研究,得到结论如下:

1) 对于表征压缩机运行特性和性能参数的排气温度、吸气密度、容积效率及等熵效率而言,制冷工况下,OCR 范围在 1.17%~3.83% 内时,以上参数受 OCR 变化的影响较小,当 OCR 增至 5.26% 时,由于润滑油冷却作用的增强,压缩机排气温度相比于

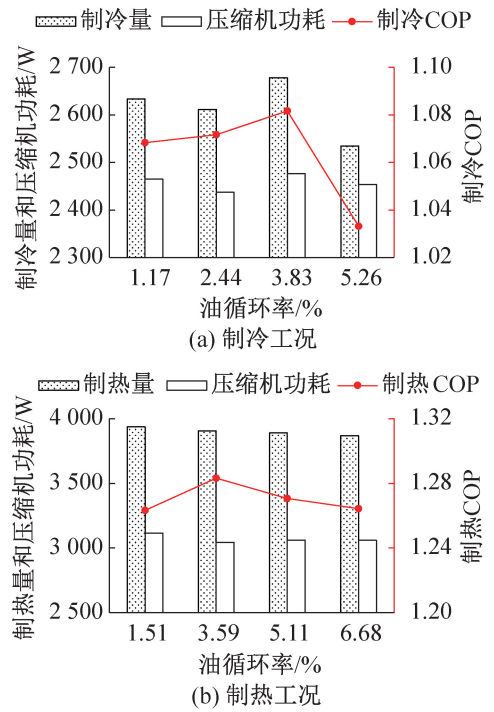


图 5 OCR 对压缩机功耗和热泵系统性能的影响

Fig.5 Effects of OCR on compressor power consumption and heat pump system performance

OCR 为 1.17% 时降低 3.4℃,等熵效率和容积效率分别提高 13.6% 和 5.6%。对于制热工况,压缩机运行状态随 OCR 的变化更为敏感,当 OCR 由 1.51% 增至 6.68% 时,容积效率和等熵效率分别增加 7.2% 和 15.7%,当 OCR 低至 1.51% 时,压缩机排气温度达到 155.5℃。

2) 相比于高温段的气冷器,处于低温状态的蒸发器的流阻和换热比受 OCR 变化的影响更大。润滑油和制冷剂混物流经 HVAC 内部双换热器的流阻仍仅为室外侧蒸发器流阻的 28%。低 OCR 范围,润滑油对换热器换热影响是黏度起主导作用,高 OCR 范围时则是混合物中润滑油的浓度起主导作用。

3) 对于本文测试工况,制冷模式系统最佳 COP 对应的 OCR 为 3.83%,制热模式最佳制热 COP 对应的 OCR 为 3.59%,该热泵系统 OCR 在 4% 附近时具有较佳的综合性能。

参考文献

- [1] QI Zhaogang. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 754–764.
- [2] 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.
- [3] 郑思宇, 魏名山, 宋盼盼. 电动汽车热泵空调发展概述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(8): 14–23. (ZHENG Siyu, WEI Mingshan, SONG Panpan. Review of heat pump air conditioning system in electric vehicles[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2018, 32(8): 14–23.)
- [4] 诸铮杰, 钱锐, 王丹瑜. 汽车空调压缩机加油量对系统性能与可靠性的影响[J]. 制冷技术, 2020, 40(5): 58–61. (ZHU Zhengjie, QIAN Rui, WANG Danyu. Effect of oil charge amount of automotive air-conditioning compressor on system performance and reliability[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2020, 40(5): 58–61.)
- [5] 陈志明, 熊则男. 含油率对涡旋压缩机压缩过程的影响[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(7): 114–120. (CHEN Zhiming, XIONG Zenan. Oil rate influence on the performance of air-condition scroll compressor with self-adjusting back-pressure mechanism [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1995, 29(7): 114–120.)
- [6] 杨传波, 张薇, 郭漪, 等. 制冷系统含油量对制冷压缩机工作性能影响的理论分析和实验研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 19–23. (YANG Chuanbo, ZHANG Wei, GUO Yi, et al. Theoretical and experimental study of lubricant influence on performance of refrigeration compressors [J]. *Journal of Refrigeration*, 2005, 26(2): 19–23.)
- [7] 刘蕴青, 崔勇, 陈引生. 压缩机带油率对空调系统性能影响研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(11): 82–85, 90. (LIU Yunqing, CUI Yong, CHEN Yinsheng. Study on the effect of oil-carrying rate of compressor on the performance of air conditioning system[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2019, 47(11): 82–85, 90.)
- [8] 易丰收. 油循环率对汽车空调系统制冷性能的影响研究[J]. 制冷与空调(北京), 2018, 18(5): 69–72. (YI Fengshou. The investigation of the influence of OCR on refrigeration performance of MAC system[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2018, 18(5): 69–72.)
- [9] NAM D, LEE P, LEE G, et al. Experimental study about an amount of oil charge on electric driven scroll compressor for electric vehicle [C]//22nd International Compressor Engineering Conference. 2014:2320.
- [10] 方金湘. 新能源汽车空调电动涡旋压缩机技术的应用研究[J]. 内燃机与配件, 2021(19): 196–197. (FANG Jinxiang. Research on application of electric scroll compressor technology for new energy vehicle air condition[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2021(19): 196–197.)
- [11] OSSORIO R, NAVARRO-PERIS E. Study of oil circulation rate in variable speed scroll compressor working with propane[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 123: 63–71.
- [12] SHIBAMOTO Y, FUJIMOTO S, TAKANO S, et al. The characteristics of small capacity scroll compressors for residential air conditioners[C]//International Compressor Engineering Conference. 1990:703.
- [13] 田俊义, 刘四虎, 熊则男. 涡旋压缩机滑动轴承间隙参数对效率的影响[J]. 压缩机技术, 1997(5): 27–29. (TIAN Junyi, LIU Sihui, XIONG Zenan. Influence of clearance parameters of scroll compressor sliding bearing on efficiency[J]. *Compressor Technology*, 1997(5): 27–29.)
- [14] 陶宏, 张婷, 吴生礼, 等. 油循环率对电动汽车空调压缩机性能的影响[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 140–145. (TAO Hong, ZHANG Ting, WU Shengli, et al. Effect of oil circulation rate on the performance of compressor in electric vehicle air-conditioning[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(6): 140–145.)
- [15] 葛洋, 姜未汀. 微通道换热器的研究及应用现状[J]. 化工进展, 2016, 35(增刊1): 10–15. (GE Yang, JIANG Weiting. The research progress and application of the micro-channel heat exchanger[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(Suppl.1): 10–15.)
- [16] 陈建友, 邬志敏, 张华, 等. CO₂ 汽车空调系统紧凑型换热器的研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2001, 22(1): 9–12. (CHEN Jianyou, WU Zhimin, ZHANG Hua, et al. Development of compact heat exchanger of CO₂ motor vehicle air-conditioning [J]. *Construction Machinery for Hydraulic Engineering & Power Station*, 2001, 22(1): 9–12.)
- [17] 朱国梅, 刘何清. 润滑油在 CO₂ 冷剂系统中的溶解能力及传热研究分析[J]. 中原工学院学报, 2007, 18(6): 51–55. (ZHU Guomei, LIU Heqing. The state-of-art about lubricants influencing on heat transfer and dissolving capacity of SC-CO₂[J]. *Journal of Zhongyuan University of Technology*, 2007, 18(6): 51–55.)
- [18] 秦红. 空调系统冷冻油循环率对制冷性能影响的试验研究[J]. 汽车电器, 2017(6): 78–80. (QIN Hong. Research of the effect of compressor oil circulation rate on A/C cooling performance [J]. *Auto Electric Parts*, 2017(6): 78–80.)

通信作者简介

邹慧明, 女, 研究员, 中国科学院理化技术研究所, (010) 82543697, E-mail: zouhuiming@ mail. ipc. ac. cn。研究方向: 新型压缩机及热系统, 新能源汽车热管理技术, 制冷空调新技术, 人工环境新技术。

About the corresponding author

Zou Huiming, female, researcher, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, +86 10-82543697, E-mail: zouhuiming@ mail. ipc. ac. cn. Research fields: novel compressor and thermal system, thermal management of the electric vehicle, new technology of refrigeration, air-conditioning, and heat pump.