

文章编号:0253-4339(2020)01-0026-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.01.026

R1234ze/HCs 非共沸混合工质热泵系统循环性能分析

王 方 袁秋艳 王帅琪 李志强 王鹏超

(中原工学院 能源与环境学院 郑州 450007)

摘 要 在热泵热水器名义工况下,本文建立了热泵系统循环热力学模型,利用 EES 程序对混合工质 R1234ze/HCs 及对应的纯工质热泵系统循环性能进行了对比分析。结果表明:R1234ze/R600 在质量分数(20/80)和 R1234ze/R600a 在质量分数(40/60)存在最优配比,对应的最大制热 COP_h 分别为 3.41 和 3.32,而 R1234ze/R290 则呈现单调下降趋势。R1234ze/R600(20/80)系统的制热 COP_h 比 R1234ze/R600a(40/60)、R1234ze、R290、R600、R600a 系统分别高 2.7%、17%、0.09%、16.3%和 17.8%,排气温度为 76.9℃,冷凝压力为 0.711 MPa,压比为 6.32,有望成为新型替代工质。

关键词 R1234ze/HCs;混合工质;最优配比;热泵;循环特性

中图分类号:TB61⁺2;TQ051.5 **文献标识码:**A

Performance Evaluation of Heat Pump System Using Non-azeotropic Refrigerant Blends R1234ze/HCs

Wang Fang Yuan Qiuyan Wang Shuaiqi Li Zhiqiang Wang Pengchao

(School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, 450007, China)

Abstract The thermodynamic model of a heat pump system was established under the nominal working conditions of heat pump water heater in this paper. A comparative analysis was made between the refrigerant blends R1234ze/HCs and the corresponding pure refrigerant through the EES program. The results show that the R1234ze/R600 blend has the best ratio in a mass fraction of (20/80) and R1234ze/R600a in mass fraction of (40/60). The corresponding maximum heating coefficient of performance (COP) are 3.414 and 3.321, respectively. The COP of R1234ze/R290 blend, however, exhibits monotonicity with the change of mass fraction. The heating COP of the R1234ze/R600 (20/80) system is 2.7%, 17%, 0.09%, 16.3%, and 17.8% higher than that of the R1234ze/R600a (40/60), R1234ze, R290, R600, and R600a systems, respectively. The discharge temperature, condensing pressure and compression ratio of the R1234ze/R600 (20/80) system are 76.9℃, 0.711 MPa and 6.32, respectively. The results are promising for the development of a prospective alternative working fluid.

Keywords R1234ze/HCs; refrigerant blends; optimal ratio; heat pump; cycle performance

氯氟烃(CFCs)和氢氯氟烃(HCFCs)的物理、化学性能较好,被广泛应用于制冷空调和其它小型制冷设备等行业,但其臭氧消耗潜能值(ozone depletion potential, ODP)较高,在大气中停留时间较长;温室效应潜值(global warming potential, GWP)也较高,是产生臭氧层破坏及温室效应的主要根源^[1-2]。热泵作为一种绿色高效节能技术,在能源与环境保护方面具有独特的优势^[3],在一些工业用热和建筑供热空调领域中的应用也越来越广泛。目前,常见的工质有 R134a、R22、R410A 和 R407C 等,这些制冷工质的

ODP 相对较低或为零,但 GWP 均较高。碳氢类工质(HCs)是自然工质中较有潜力的一类替代工质,如 R290、R600a 和 R600^[4]等,这类工质环保且热力性质优良,具有低碳和无氟的双重优势,与原有的系统兼容性较好且汽化潜热较高,但同时具有易燃、易爆等缺点^[5]。霍尼韦尔和杜邦公司推出的 R1234ze,无毒、不可燃、ODP 为零、GWP 较低,而单一纯质地使用其汽化潜热偏低,蒸发压力也稍低,若直接用于热泵系统,热力学性能不理想,系统性能系数 COP 与容积制冷量均低于目前常用的工

基金项目:国家自然科学基金(U1504501)和高端外国专家项目(GDW20164100039)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1504501) and High-End Foreign Experts Program (No. GDW20164100039).)

收稿日期:2018-10-19;修回日期:2019-02-13

质 R134a 和 R410A。另外, R1234ze 除可用于制冷、空调与热泵系统^[6-9]外, 也可用作灭火与抑燃剂^[10], 故尝试将 R1234ze 与 HCs 相混合, 并按一定的质量配比组成混合制冷剂, 取长补短, 从而具有作为新兴替代工质的潜力。

牛永明等^[11]综合回顾了 R1234ze 和 R1234yf 在物理性质、传热特性及系统循环性能等方面的研究概况。曹睿等^[12]在 280.15 ~ 330.15 K 的温度范围内时, 测量了质量分数为 75%/25% 和 80%/20% 的 R1234ze/R600a 的 PVT 性质, 得到相应温度与压力下, 该混合工质的密度与气体维里方程, 为进一步研究该混合制冷剂作为新型替代制冷剂的性能提供了热物性参数。Qiu Jinyou 等^[13]研究了家用冰箱中低 GWP 混合制冷剂 R1234ze/R600a 替代 R600a 的可能性, 结果表明 R1234ze/R600a 的可燃性比 R600a 低很多且容积质量相似, 可以充注在大型制冷机组中。陈秀萍等^[14]基于量子化学理论, 模拟了二元混合制冷剂 R1234ze/R600a 和 R290/R227ea 气液相平衡的有关性质, 为热泵工质的替代研究提供必要的基础数据。

本文对 3 组 R1234ze/HCs 混合工质热泵系统循环的热力学特性进行系统分析, 并与常用的纯工质热泵系统进行对比, 为新型替代工质研究提供了理论基础。

1 热力学分析模型

1.1 热泵系统模型建立

图 1 所示为 R1234ze/HCs 作为混合工质的亚临界热泵系统循环流程, 为便于分析计算, 作如下假设^[15]: 1) 热泵系统与周围环境无热量损失; 2) 工质在各连接管路及换热设备中的压降忽略不计; 3) 润滑油对工质或混合工质热物性的影响忽略不计; 4) 工质在冷凝器、蒸发器出口处均为饱和液体状态; 5) 冷凝器和蒸发器中最小传热温差取 7 °C; 6) 压缩过程为绝热但不是等熵过程, 等熵效率取 0.7; 7) 节流过程为绝热节流。

混合工质的理论循环主要计算公式如下:

制热性能系数:

$$\text{COP}_h = (h_2 - h_3) / (h_2 - h_1) \quad (1)$$

式中: COP_h 为制热性能系数; h_1 、 h_2 、 h_3 分别为压缩机入口、压缩机出口、膨胀阀入口的工质比焓, kJ/kg。

单位功耗:

$$w = h_2 - h_1 \quad (2)$$

式中: w 为单位功耗, kW。

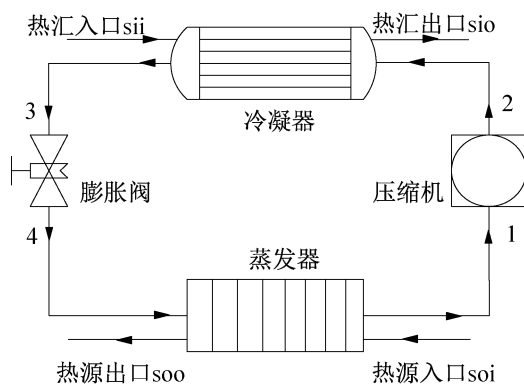


图 1 混合工质热泵系统循环流程

Fig.1 Flow chart of refrigerant blends heat pump system

单位质量制热量:

$$q_h = h_2 - h_3 \quad (3)$$

式中: q_h 为单位质量制热量, J/g。

压缩机压比:

$$r = p_c / p_e \quad (4)$$

式中: r 为压缩机压比; p_c 、 p_e 分别为冷凝压力、蒸发压力, MPa。

在热力循环计算过程中, 混合工质在换热器中的温度变化为非线性, 考虑到热力学计算是基于换热器中传热窄点的控制, 冷凝器中每处热汇和工质的温差均满足^[16]:

$$t_{\text{ppc}} = \min \left\{ \left[t_v - (t_{\text{sii}} + \frac{h_v - h_3}{h_2 - h_3} (t_{\text{sio}} - t_{\text{sii}})) \right], (t_2 - t_{\text{sio}}), (t_3 - t_{\text{sii}}) \right\} \quad (5)$$

式中: t_{ppc} 为热汇与工质的温差, °C; t_{sii} 、 t_{sio} 分别为热汇入口、热汇出口温度, °C; t_v 、 t_2 、 t_3 分别为工质在冷凝压力下的饱和和蒸气温度、工质在冷凝器入口、出口处的温度, °C。

蒸发器中每处热源和工质温差满足^[16]:

$$t_{\text{ppe}} = \min [(t_{\text{soi}} - t_1), (t_{\text{soo}} - t_4)] \quad (6)$$

式中: t_{ppe} 为热源与工质的温差, °C; t_{soi} 、 t_{soo} 分别为热源入口、热源出口温度, °C; t_1 、 t_4 分别为工质在蒸发器出口、入口处的温度, °C。

1.2 计算工况的选择

根据国家标准 GB/T23137—2008《家用和类似用途热泵热水器》^[17]设定名义工况, 其中, 热汇进口温度为 15 °C, 出口温度为 55 °C; 热源进口温度为 15 °C, 出口温度为 10 °C。利用 EES^[18]开发程序对混合工质 R1234ze/HCs 进行理论模拟计算, 其中混合工质的热力学参数利用接口程序调用美国 NIST 开发的 REFPROP 9.0^[19]软件得到。

2 计算结果与分析

在相同的工况条件下,为了便于对比工质间循环参数的变化情况,分别计算了纯质 R1234ze、R290、R600、R600a 作为工质的热泵系统循环性能,具体参数如表 1 所示。

表 1 R1234ze、R290、R600 和 R600a 的循环参数
Tab.1 Cyclic parameters for R1234ze, R290, R600, and R600a

工质	COP	$q_h/$ (J/g)	$w/$ (J/g)	$p_c/$ MPa	r	$t_2/^\circ\text{C}$
R1234ze	2.835	162.5	42.4	1.24	4.15	65.99
R290	3.411	295.4	74.5	1.99	3.73	77.61
R600	2.857	351.2	123.8	0.76	8.02	84.16
R600a	2.806	309.6	112.9	1.06	7.10	80.87

2.1 热泵系统性能系数 COP

系统性能系数 COP 随混合工质 R1234ze/HCs 质量配比的变化如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知,混合工质 R1234ze/R600 的制热性能系数 COP_h 始终高于 R1234ze/R600a 和 R1234ze/R290,且 R1234ze/R600 热泵系统 COP_h 随质量配比的增加呈现先增后减的趋势,在质量配比(20/80)处存在一个最大值 3.41。由图 3 可知, R1234ze/R600 的制冷性能系数 COP_r 表现出与 COP_h 相同的变化趋势,其最大制冷性能系数 COP_r 达 2.41; R1234ze/R600a 在质量配比(40/60)处也存在一个最大 COP_h 为 3.32,整体的变化趋势平缓; R1234ze/R290 的系统 COP_h 随质量配比的增加而单调递减。R1234ze/R600 在最优配比(20/80)处, COP_h 比 R600、R290、R1234ze、R600a、

R1234ze/R600a (40/60) 分别增加 16.3%、0.1%、16.9%、17.8%、2.7%。由上述结果可知,通过工质间的混合,有望得到性能优良的新型替代工质。

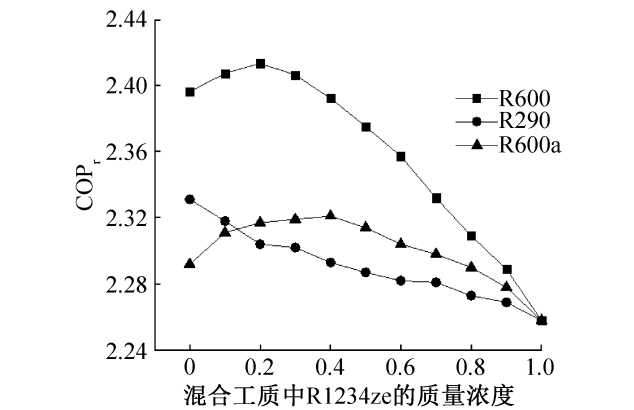


图 3 COP_r 与混合工质配比的关系
Fig.3 The relationship between COP_r and mass fraction of refrigerant blends

2.2 热泵系统单位质量制热量和单位质量功耗

系统的单位质量制热量 q_h 随混合工质 R1234ze/HCs 的质量分数变化如图 4 所示。由图 4 可知,混合工质 R1234ze/R290、R1234ze/R600、R1234ze/R600a 的单位质量制热量 q_h 均随 R1234ze 的质量配比的增加而增加, R1234ze/R290 的增加速度相对最快,而 R1234ze/R600 和 R1234ze/R600a 的变化较为缓慢。其中, R1234ze/R600 在最优配比(20/80)处单位质量制热量为 204.5 J/g, 比 R1234ze、R1234ze/R600a 和 R1234ze/R290 分别增加 20.5%、9.6%、17.1%,但系统的单位质量制热量小于纯质 R600、R600a 和 R290。R1234ze/R290 和 R1234ze/R600a 最优质量配比(40/60)处的单位质量制热量为 207.8 J/g, 相比 R1234ze/R600 的单位质量制热量 225.1 J/g 低 8.33%; R1234ze/R290 和 R1234ze/R600 在质量配比(60/40)处的单位制热量为 251.3 J/g, 相比 R1234ze/R600a 的单位制热量 235.2 J/g 高 6.41%。系统在最优配比处,相同的运行工况下,单位质量制热量越大系统更为紧凑。

单位质量功耗 w 随混合工质 R1234ze/HCs 质量配比的变化如图 5 所示。由图 5 可知,混合工质 R1234ze/R290、R1234ze/R600、R1234ze/R600a 的系统功耗 w 均随着 R1234ze/HCs 的质量配比的增加而递增, R123ze/R600 和 R1234ze/R600a 的变化相对较缓慢。其中,在最优质量配比(20/80)处 R1234ze/R600 的功耗 59.91 J/g, 与 R1234ze/R600a 和 R1234ze 相比分别增加 6.9%、29.2%,但相比 R290、

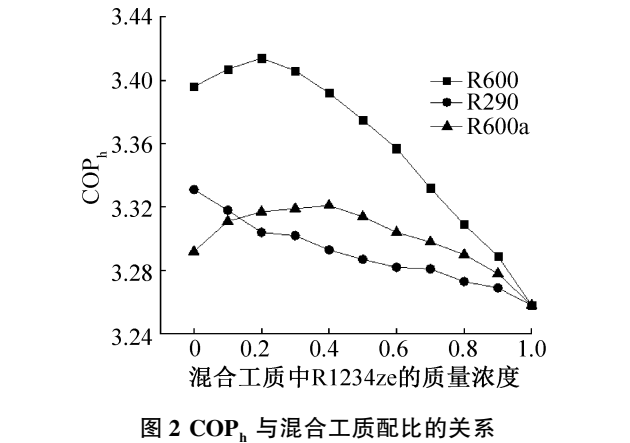


图 2 COP_h 与混合工质配比的关系
Fig.2 The relationship between the COP_h and mass fraction of refrigerant blends

R600 和 R600a 功耗下降显著;混合工质 R1234ze/R600a 在最优配比 (40/60) 处的功耗和 R1234ze/R290 相同为 62.57 J/g,相比 R1234ze/R600 系统减少 6.04%。

下,较高的排气温度有利于热泵温升,但在满足工况条件下,较低的排气温度利于制冷剂和润滑油的稳定性,与此同时,会减少由制冷剂、润滑油和材料之间的相容性而引发的问题,相应延长压缩机的使用寿命。

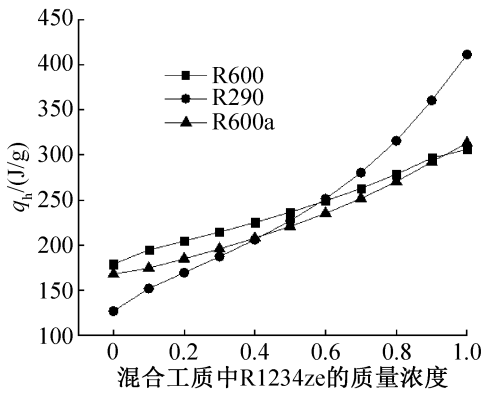


图 4 单位质量制热量与混合工质配比的关系
Fig.4 The relationship between the heat capacity and mass fraction of refrigerant blends

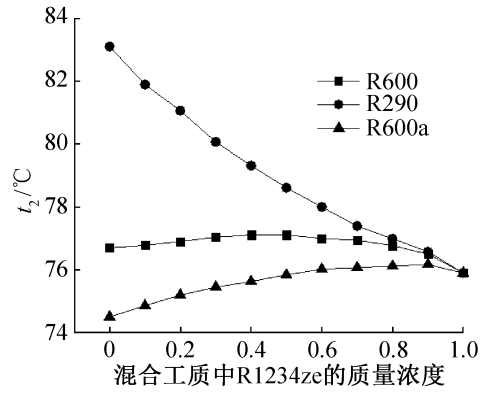


图 6 系统排气温度与混合工质配比的关系
Fig.6 The relationship between discharge temperature and mass fraction of refrigerant blendse

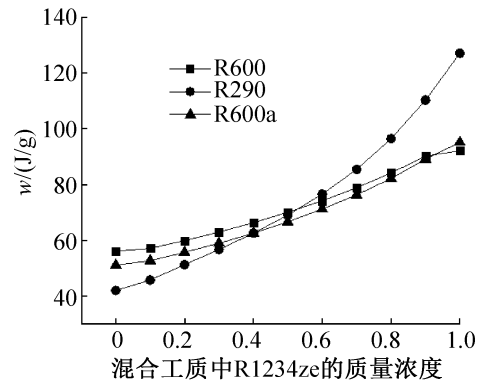


图 5 单位质量功耗与混合工质配比的关系
Fig.5 The relationship between compressor power and mass fraction of refrigerant blends

2.3 热泵系统的排气温度、冷凝压力和压比

排气温度、冷凝压力和压比在一定范围内的降低有利于系统运行的稳定和提高安全性。系统的排气温度 t_2 随混合工质 R1234ze/HCs 质量配比的变化如图 6 所示。由图 6 可知,R1234ze/R290 系统的 t_2 相对最低且随质量分数的增加缓慢增加,R1234ze/R600 系统的 t_2 变化较平缓,在 76~77 °C 左右波动,而 R1234ze/R290 系统的压缩机 t_2 随混合工质配比的增加而减小。最优配比的情况下,混合工质 R1234ze/R600 (20/80) 的 t_2 为 76.9 °C,比 R290、R600 和 R600a 系统分别低 0.71 °C、7.26 °C 和 3.97 °C;R1234ze/R600a (40/60) 的 t_2 为 75.63 °C,同样低于系统 R290、R600 和 R600a。另外,排气温度也是热泵系统性能的一个重要参数,一般情况

由图 7 可知,R1234ze/R290 系统的冷凝压力 p_c 随质量配比的增大而逐渐减小,而 R1234ze/R600 和 R1234ze/R600a 系统的 p_c 为单调增加。其中,R1234ze/R600 系统的 p_c 始终小于 R1234ze/R290 和 R1234ze/R600 系统;在最优配比处,R1234ze/R600 (20/80) 系统的 p_c 为 0.711 MPa,相比 R600、R600a、R1234ze、R1234ze/R600a (40/60) 系统分别降低了 6.4%、48.9%、73.9% 和 35.9%,R290 系统 p_c 是其 2.8 倍。

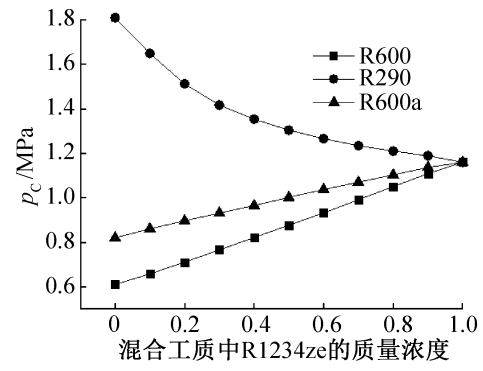


图 7 冷凝压力与混合工质配比的关系
Fig.7 The relationship between condensation pressure and mass fraction of refrigerant blends

系统压比 r 随混合工质 R1234ze/HCs 的质量配比的变化如图 8 所示。由图 8 可知,R1234ze/R600 的压比逐渐减小,R1234ze/R600a、R1234ze/R290 的压比随质量分数的增大而增大,其中 R1234ze/R290 的上升趋势较快。最优配比的条件下,R1234ze/

R600(20/80)的压比为 6.32,比 R1234ze/R600a 系统高 8.54%,比 R600、R600a 系统分别低 26.93%、12.36%;R1234ze/R600a(40/60)的 r 为 5.84,低于 R600、R600a 系统,而高于 R290 和 R1234ze 系统。

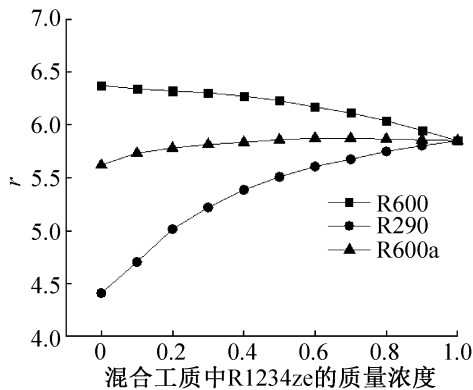


图 8 压比与混合工质配比的关系

Fig.8 The relationship between pressure ratio and mass fraction of refrigerant blends

2.4 混合工质的温度滑移

混合工质相变过程为非等温相变,整个过程会出现露点和泡点的温度差,非共沸混合工质的这种温度滑移特性,能够通过较好的配比和逆流换热的流体间实现最佳的温度匹配,提高能源利用效率,降低由于传热温差引起的不可逆损失。在饱和压力为 1 MPa 时,R1234ze/HCs 混合工质温度滑移随质量配比的变化如图 9 所示。由图 9 可知,R1234ze/R600 的温度滑移相对较小,整体呈先增后减的抛物线形状,在最优配比处温度滑移达到 8.1℃;R1234ze/R600a(40/60)温度滑移为 11.6℃,变化趋势与 R1234ze/R600 相似,而 R1234ze/R290 的温度滑移较高,主要原因是纯质组元间的标准沸点差越大,混合工质的温度滑移就越大。

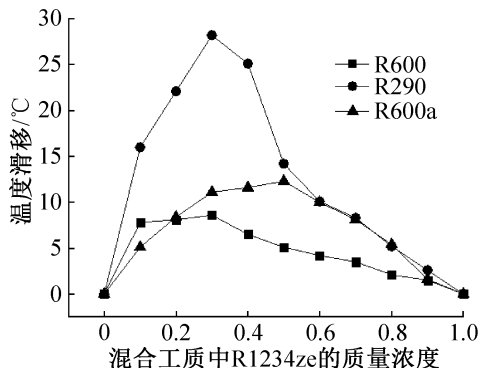


图 9 温度滑移与混合工质配比的关系

Fig.9 The relationship between temperature glide and mass fraction of refrigerant blends

3 结论

在热泵热水器名义工况下,对二元非共沸混合工质 R1234ze/HCs 热泵系统循环性能进行了分析,得到如下结论:

1) 混合工质 R1234ze/R600 和 R1234ze/R600a 分别在质量配比为 20/80 和 40/60 时存在最优配比,在该配比下,系统存在最大制热性能系数 COP_h 为 3.41 和 3.32。混合工质 R1234ze/R600 在最优配比(20/80)处, COP_h 比 R600、R290、R1234ze、R600a、R1234ze/R600a(40/60) 分别增加 16.3%、0.1%、16.9%、17.8%、2.7%。因此该混合工质 R1234ze/R600(20/80)有望成为新的替代工质。

2) 在最优配比的情况下,R1234ze/R600 的功耗为 59.91 J/g,相对 R290、R600 和 R600a 功耗显著下降;排气温度 t_2 为 76.9℃,分别低于 R290、R600 和 R600a 系统 0.71℃、7.26℃和 3.97℃;冷凝压力 p_c 为 0.711 MPa,相比 R600、R600a、R1234ze 系统分别降低 6.4%、48.9%和 73.9%;压比 r 为 6.32,比 R1234ze/R600a 系统高 8.54%,比 R600、R600a 系统低 26.93%、12.36%,高于系统 R290 和 R1234ze。而 R1234ze/R600a 的功耗和 R1234ze/R290 相同,均为 62.57 J/g,相比 R1234ze/R600 系统降低 6.04%;排气温度 t_2 为 75.63℃,低于 R290、R600 和 R600a 系统 1.98℃、8.53℃和 5.24℃;冷凝压力 p_c 为 0.966 MPa,低于 R600a 和 R1234ze 系统 9.6%和 28.1%,略高于 R600;压比 r 为 5.84,低于 R600、R600a 系统,高于 R290 和 R1234ze 系统。

3) 纯质组元间的标准沸点差值越大,混合工质的温度滑移越大,1 MPa 压力下,三种混合工质的温度滑移均呈先增后减的趋势。其中,R1234ze/R600 的温度滑移相对较小,在最优配比处温度滑移达到 8.1℃,R1234ze/R600a(40/60)温度滑移为 11.6℃,而 R1234ze/R290 的较高。

本文受河南省高校科技创新人才支持计划项目(20HASTIT019)资助。(The project was supported by Program for Science & Technology Innovation Talents in Universities of Henan Province (No. 20HASTIT019).)

参考文献

- [1] 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势[J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 54–57. (LI Liansheng. Research progress on alternative refrigerants and their development trend[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6): 54–57.)

- [2] 马一太, 王伟. 制冷剂的替代与延续技术[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 12–17. (MA Yitai, WANG Wei. Substitution and postponable technology of refrigerants [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(5): 12–17.)
- [3] BLARKE M B, LUND H, Large-scale heat pumps in sustainable energy system and project perspectives[J]. Thermal Science, 2007, 11(3): 143–152.
- [4] LEE Y S, SU C C. Experimental studies of isobutane (R600a) as the refrigerant in domestic refrigeration system [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(5): 507–519.
- [5] WANG Ruzhu, LI Yuwu. Perspectives for natural working fluids in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(4): 56–81.
- [6] CALM J M. The next generation of refrigerants historical review consideration and outlook[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 1123–1133.
- [7] 邱金友, 张华, 祁影霞, 等. 新型制冷剂 R1234ze(E) 及其混合工质研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(3): 9–16. (QIU Jinyou, ZHANG Hua, QI Yingxia, et al. A study on new refrigerant R1234ze(E) and its mixtures[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(3): 9–16.)
- [8] 杨昭, 吴曦, 尹海蛟, 等. 低温室效应 HCFCs 替代物性能分析[J]. 制冷学报, 2011, 32(1): 1–6. (YANG Zhao, WU Xi, YIN Haijiao, et al. Analysis on alternatives for HCFCs with low greenhouse effect[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(1): 1–6.)
- [9] MCLINDEN M O, KAZAKOV A F, BROWN J S, et al. A thermodynamic analysis of refrigerants; possibilities and tradeoffs for low-GWP refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 38(1): 80–92.
- [10] 王博, 张伟, 吕剑. 新型制冷剂 HFO-1234ze[J]. 化工新型材料, 2008, 36(2): 10–12. (WANG Bo, ZHANG Wei, LYU Jian. A new refrigerant HFO-1234ze[J]. New Chemical Materials, 2008, 36(2): 10–12.)
- [11] 牛永明, 刘军, 周永, 等. R1234yf 及 R1234ze(E) 研究进展概述[J]. 制冷与空调(北京), 2015, 15(11): 82–91. (NIU Yongming, LIU Jun, ZHOU Yong, et al. General introduction of R1234yf and R1234ze(E) [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2015, 15(11): 82–91.)
- [12] 曹睿, 祁影霞, 郭志旺, 等. 新型环保制冷剂 R1234ze/R600a PVTx 性质[J]. 建筑节能, 2017, 45(5): 13–16. (CAO Rui, QI Yingxia, GUO Zhiwang, et al. PVTx properties of new environmental protection refrigerant R1234ze/R600a [J]. Building Energy Efficiency, 2017, 45(5): 13–16.)
- [13] QIU Jinyou, ZHANG Hua, WANG Zilong, et al. Theoretical analysis of low GWP mixture R600a/R1234ze as a possible alternative to R600a in domestic refrigerators [J]. Thermal Science, 2014, 25(15): 1516–1522.
- [14] 陈秀萍, 祁影霞, 陆岷山, 等. 新型二元混合制冷剂 (R1234ZE+R290, R290+R227ea) 气液相平衡研究[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(6): 713–718. (CHEN Xiuping, QI Yingxia, LU Minshan, et al. Vapor-liquid equilibrium properties of new binary mixture refrigerant (R1234ZE+R290, R290+R227ea) [J]. Computer and Applied Chemistry, 2014, 31(6): 713–718.)
- [15] 巨福军. 二氧化碳-烷类混合制冷剂热泵循环特性研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2013. (JU Fujun. Study on the cyclic characteristics of carbon dioxide-alkanes mixed refrigerant heat pump [D]. Zhengzhou: Zhongyuan Institute of Technology, 2013.)
- [16] SARKAR J, BHATTACHARYYA S. Assessment of blends of CO₂ with butane and isobutane as working fluids for heat pump applications [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(7): 1460–1465.
- [17] 家用和类似用途热泵热水器规范: GB/T23137—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. (Specification for heat pump water heaters for household and similar purposes: GB/T23137—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.)
- [18] Engineering Equation Solver (EES) [CP]. Academic Commercial Version 10.457. 2018.
- [19] LEMMON E W, MCLINDEN M O, HUBER M L. NIST Reference fluids thermodynamic and transport properties-REFPROP 9, standard reference database 23 [DB]. National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2013.

通信作者简介

王方, 男, 博士, 教授, 中原工学院能源与环境学院, (0371) 62506812, E-mail: wfzti@126.com。研究方向: 可再生能源与建筑节能, 热泵空调节能技术, LNG 冷能利用技术。

About the corresponding author

Wang Fang, male, Ph. D., professor, School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, + 86 371 – 62506812, E-mail: wfzti@126.com. Research fields: renewable energy and building energy saving, heat pump air conditioning technology, LNG cold energy utilization technology.