

# R1234ze/R32 混合工质冷藏集装箱循环性能分析

丁德锋<sup>1</sup>, 陈武<sup>2</sup>, 郑超瑜<sup>1</sup>, 刘世杰<sup>3</sup>

(1. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 上海海事大学商船学院, 上海 201306;

3. 海南热带海洋学院, 海南 三亚 572022)

**[摘要]** 针对冷藏集装箱制冷机组普通 HFCs (氢氟碳化物) 存在的不环保、无法直接替代等问题, 提出一种新型混合工质 DN01 (R1234ze/R32 的质量比为 85:15)。建立该工质的热力循环模型, 基于 Matlab 计算平台, 调用 Refprop 物性参数, 编制混合工质计算程序, 结合国家标准, 对新的混合工质进行变工况计算, 并与已有的工质 R410A、R404A 和 R134a 对比分析。研究表明, 该新型混合工质的循环性能优于常用 HFCs 制冷工质, 且环境性能优良: ODP (ozone depression potential) 为 0, GWP (global warming potential) 小于 150; 在变冷凝温度和变蒸发温度工况下, DN01 的冷凝压力低于 2.4 MPa, 排气温度在 120 °C 以下。DN01 有望成为新型低 GWP 值替代工质。

**[关键词]** R1234ze/R32; 冷藏集装箱; 循环性能; 混合工质

**[中图分类号]** TB 64

## Performance Evaluation of Refeer Container Using Refrigerant Blends R1234ze/R32

DING Defeng<sup>1</sup>, CHEN Wu<sup>2</sup>, ZHENG Chaoyu<sup>1</sup>, LIU Shijie<sup>3</sup>

(1. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

3. Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of non-environmental protection and inability in directly replacing the ordinary hydrofluorocarbons (HFCs) currently used on reefer containers, a new type of mixed working fluid DN01 (R134a/R1234yf, mass ratio is 85:15) is proposed. The thermodynamics cycle model was established, Matlab was used for theoretical circular calculation of the mixture by employing property parameters from Refprop developed by NIST. Combined with national standard, it is calculated for variable conditions, compared and analyzed with existing working fluids R410A, R404A and R134a. The research results show that by the same model the cycle performance of the new mixed working fluid is better than those of the commonly used HFCs refrigerants. And its environmental performance is excellent, ODP is zero, GWP is less than 150. Under variable condensation temperatures and variable evaporation temperatures, the condensation pressure of DN01 is lower than 2.4 MPa, and the exhaust temperature is below 120 °C. It is shown that DN01 is expected to be the new low GWP value refrigerants in the future.

**Keywords:** R1234ze/R32; refrigerated container; cycle performance; mixed working fluid

**[收稿日期]** 2020-06-22

**[基金项目]** 福建省中青年教育科研项目 (JAT200240); 福建省中青年教育科研项目 (JAT170313); 国家自然科学基金项目 (51679107); 福建省自然科学基金项目 (2017J01705)

**[作者简介]** 丁德锋 (1986—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事船舶节能及制冷空调技术研究。通信作者: 陈武 (1973—), 男, 教授, 博导, 从事能源利用技术研究。

0 引言

冷藏集装箱具有优良的隔热性和气密性,并能维持一定低温,适用于易腐食品的运输和贮存<sup>[1]</sup>。目前全球正在运营的全集集装箱船有 3 500 艘<sup>[2]</sup>,全球船用冷藏集装箱已超过 290 万 TEU,当前采用蒸汽机械压缩式制冷方式的冷藏集装箱中,以 HFCs(氢氟烃)制冷剂为主流<sup>[3]</sup>。在 HFCs 中,常见的制冷工质有 R134a、R410A、R407C 等,这些制冷工质虽臭氧消耗潜能值 ODP(ozone depression potential)为 0,但温室效应潜能值 GWP(global warming potential)较高。近年国际社会相继签署了相关法规,以控制氢氟烃制冷剂的使用和排放。欧盟在 2014 年对 F-Gas 法规进行了修订,新 F-Gas 法规规定自 2022 年 1 月 1 日起禁止在商用冰箱和冷冻机上使用 GWP 大于 150 的 HFCs 类制冷剂<sup>[4]</sup>。为此,开发环境性能优良的新型制冷工质成为冷藏集装箱行业的研究热点。

R1234ze(四氟丙烯)具有无毒、不可燃等特性,且 ODP=0, GWP=6,具有良好的环保性能。Sánchez 等<sup>[5]</sup>研究了 R1234yf、R1234ze、R600a、R290 和 R152a 替代 R134a 的可行性,结果表明 R1234ze 的 COP 比 R134a 低 8.6%。Mota-Babiloni 等<sup>[6]</sup>分析了不燃型制冷工质 R450A(R1234ze 与 R134a 的质量比为 58:42)的特性,并与 R134a 的性能进行对比,R450A 的压缩机耗功低于 R134a,而在 COP 方面,R450A 比 R134a 约高 1%。王方等<sup>[7]</sup>对 R1234ze/HCs 非共沸混合工质热泵系统的循环性能进行了分析,研究结果显示,在名义工况下,R1234ze/R600 混合工质的最优质量配比为 20:80,而 R1234ze/R600a 的最优质量配比为 40:60,在该最优质量配比下,对应的制热性能系数最高,分别为 3.41 和 3.32,而 R1234ze/R290 的性能系数随 R1234ze 质量分数的增加呈现单调下降的趋势,R1234ze/R600(20/80)系统的制热性能系数比 R1234ze/R600a(40/60)、R600、R600a 系统分别高 2.7%、16.3%和 17.8%。张雷等<sup>[8]</sup>在焓差实验室内,在名义工况下,对分别采用 HFO-1234ze、R417A 和 R22 作为工质的空气源热泵热水器进行了测试,研究表明,HFO-1234ze 可以作为 R22 与 R417a 的替代制冷剂,在热泵热水器中使用。张志巍等<sup>[9]</sup>优化了 R32/R1234ze 的交互系数,建立了 PR 方程与混合法则模型,在压强为 500 kPa 时,R32 与 R1234ze 质量混合比为 0.25:0.75 时温度滑移最大,达到 12.7℃。

由于纯质 R1234ze 的汽化潜热值较小,容积制冷量也较低,制约了它在商业制冷上的广泛应用,常作为灭火或抑燃剂<sup>[10]</sup>;而 R32 虽具低度可燃性,但其单位容积制冷量较大<sup>[11-12]</sup>,为此可以尝试将 R1234ze 与 R32 相混合,以取长补短,形成混合工质。针对 R1234ze/R32 混合工质的实际应用效果,王路路等<sup>[13]</sup>在人工环境中对比分析了 R1234ze 质量分数占 27%的 R1234ze/R32 混合工质在热泵系统上的运行性能,结果表明,在相对高温区,混合工质替代 R410A 具有较好的替代性能。Koyama 等<sup>[14]</sup>对 R1234ze 质量分数占 50%的 R1234ze/R32 混合工质在 R410 系统上进行直接充灌研究,结果表明,在 R1234ze 中添加 R32 可以提高系统性能系数,且混合工质的压降与 R410A 接近,但流量较小。鲜少见到 R1234ze/R32 混合工质在冷藏集装箱制冷机组上的实验研究。本文主要针对 R1234ze/R32 混合制冷工质在冷藏集装箱制冷机组上的运行特性进行循环分析,并与当前常见的 HFCs 类制冷工质进行对比,以探究将 R1234ze/R32 混合工质应用在制冷机组上的可行性。

1 制冷剂工质性质

利用 Refprop 数据库软件对工质物性参数进行计算,对于单质 R134a,利用 32 参数维里方程进行计算,而对于 R410A、R404A 及 DN01 等混合工质,则采用通用赫姆霍兹自由能混合法则进行计算,该法则可以直接调用纯工质状态方程,以计算混合工质的热物性<sup>[15-16]</sup>。

1.1 环保和安全性

由表 1 可知,这几种工质的 ODP 均为 0,R1234ze 的 GWP 仅为 6,且大气寿命仅为 18 d,R410A、R404A 的 GWP 分别为 2 100、3 520。R32 虽具有弱可燃性,GWP 值为 675,属中等值,故 R1234ze 与 R32 组成的混合工质对环境的影响比 R410A 和 R404A 小得多,具有一定的环保优势。为

使混合工质 R1234ze/R32 的 GWP 满足欧盟 F - Gas 的法规要求, R1234ze 所占质量不能低于 78.4%。

在可燃性上, R32 属于低度可燃工质, 而其他 4 种为不可燃工质, 由于 R1234ze 的加入可以显著降低 R32 的可燃性。

表 1 R1234ze、R410A、R404A 与 R134a 的热力性质  
Tab. 1 Thermal properties of R1234ze, R410A, R404A and R134a

工质 Refrigerant	成分 Composition	摩尔质量 Molar mass /(g · mol <sup>-1</sup> )	安全等级 Safety grade	ODP	GWP	大气寿命/年 Atmospheric lifetime/a
R1234ze	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	114.00	A1	0	6	0.049
R32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	52.02	A2	0	675	4.900
R134a	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	102.00	A1	0	1 300	14.000
R410A	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub> (50:50)	72.58	A1	0	2 100	—
R404A	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> (44:52:4)	97.60	A1	0	3 520	—

1.2 油溶性

由于 HFO - 1234ze 与矿物油、烷基苯、聚烯醇油、改性聚烯醇油、乙烯醚油、PAG、POE 等都具有良好的互溶性<sup>[17]</sup>。且 R32 与 R134a、R404A 同属 HFCs 类制冷工质, 由此可见, R1234ze/R32 能够有效提高混合工质与润滑油的相溶性, 对于当前冷藏集装箱常用的 R410A、R404A 及 R134a 制冷工质, 可以实现直接充注替换, 无需更换原机组所采用的润滑油。

1.3 温度滑移特性

温度滑移是制冷工质泡点温度和露点温度的差值。在不同压强下, R1234ze 和 R32 组成的混合制冷剂的滑移温度随 R1234ze 质量分数的变化趋势如图 1 所示。从图 1 可知, 在不同压强下, 滑移温度随 R1234ze 质量分数变化的趋势基本相同, 在 1 个标准大气压下, 混合工质在 R1234ze 质量分数为 82% 时, 滑移温度最大, 达 14.1℃。压强为 1 MPa、1.5 MPa 和 2.0 MPa 时, 滑移温度均在 R1234ze 质量分数约为 80% 时达最大。为使混合工质的 GWP 低于 150, 且尽可能利用 R32 的热力性能, 本文所用混合制冷工质, 其 R1234ze/R32 的质量分数为 85:15, 记为 DN01。

1.4 饱和蒸汽压力

为进行替代, 替代工质的饱和压力线需与被替代工质尽可能相近, 这样可以减少管路和部件的替代成本。4 种 HFCs 工质的饱和压力线如图 2 所示, 由图 2 可知, 在这 4 种工质中, R410A 的饱和蒸汽压力最高, 而 R134a 最低, R410A 的饱和蒸汽压力约比 R404A、DN01 平均高 16.1%、32.7%, 同时 DN01 的饱和蒸汽压力基本与 R134a 持平。仅从压力角度看, 将 DN01 直接充注在使用 R410A、R404A 或 R134a 的原型机上, 有利于系统稳定运行, 不需对原有系统进行大的改动, 降低了替代成本。

1.5 汽化潜热

4 种工质的汽化潜热如图 3 所示。从图 3 可知, 4 种工质的汽化潜热均随压力的增大逐渐降低, 其中 R410A 的汽化潜热最大, R404A 的汽化潜热最小, R134a、DN01 的汽化潜热介于 R410A 和 R404A 之间, 当压力在 0.1 ~ 3.0 MPa 时, DN01 的汽化潜热约比 R410A 低 16.4%, 但比 R404A、

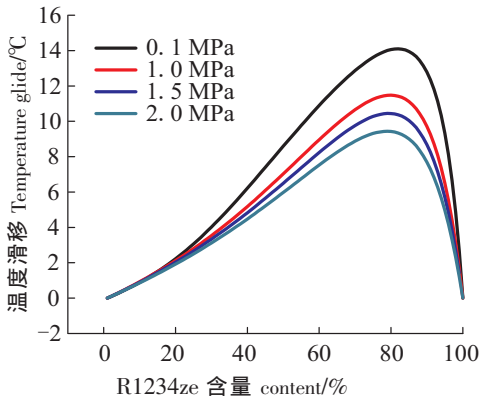


图 1 不同大气压力下温度滑移随 R1234ze 质量分数的变化趋势

Fig.1 Temperature glide with R1234ze content changes at different atmosphere pressures

R134a 分别高 22.5%、10.6%。

1.6 饱和气体黏度

工质黏度影响着制冷剂与管道及管道内部的流动阻力, 进而影响着系统的运行费用。低黏度的工质由于在管道内流动时附着层小, 有利于传热系数的增大。从图 4 可知: 四种工质的饱和气体在温度低于 40 ℃ 时, 黏度随温度的变化较为平缓, 且 DN01 的黏度低于 R410A, 高于 R134a 及 R404A。在 -50 ~ 70 ℃ 间 R410A 的黏度比 R404A、DN01 分别约高 11.2%、12.0%; 在温度高于 40 ℃ 时, DN01 的黏度随温度的变化最为平缓, 这有利于制冷工质在冷藏集装箱制冷系统高温段的换热。

1.7 饱和气体导热系数

制冷工质的导热系数影响着工质在蒸发器和冷凝器内的热量传递过程, 导热系数越大, 越有利于系统换热。4 种工质的导热系数随温度的变化过程如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在低温下 4 种工质的导热系数相差不大, 但在温度高于 0 ℃ 时, 4 种工质的导热系数剧增。在这 4 种工质中, R410A 的导热系数最大, R134a 最小, DN01 的导热系数比 R134a 高 2.2%。

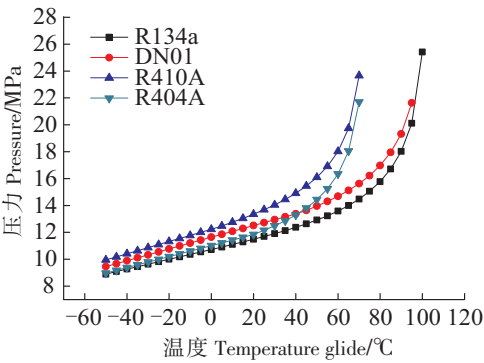


图 2 饱和蒸汽压力随温度的变化

Fig.2 Variation of saturation steam pressure with temperature

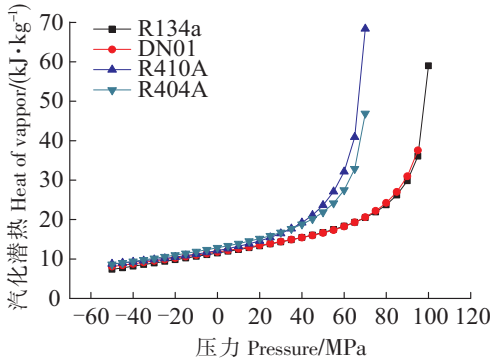


图 3 汽化潜热随压力的变化

Fig.3 Variation of the latent heat of vaporization with pressure

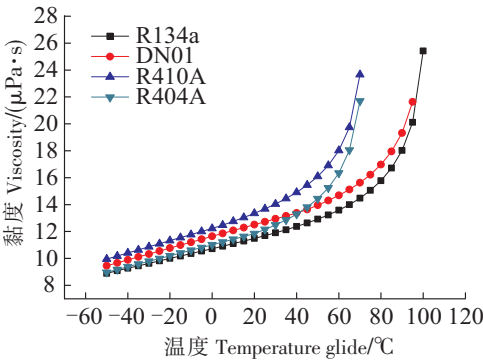


图 4 饱和气体黏度比较

Fig.4 Viscosity comparison of saturated gases

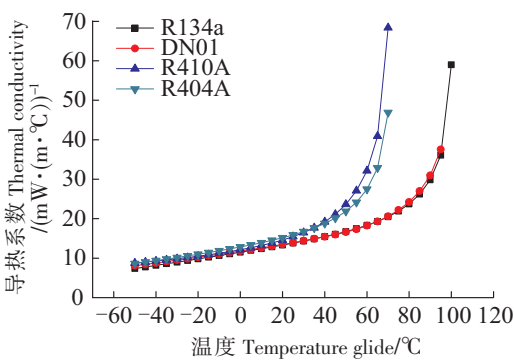


图 5 饱和气体导热系数比较

Fig.5 Thermal conductivity comparison of saturated gases

2 混合工质循环性能分析

为分析冷藏集装箱制冷机组 R1234ze/HFCs 的性能, 绘制系统压焓图, 如图 6 所示。建立冷藏集装箱制冷机组的能量分析方程, 作如下假设<sup>[18]</sup>: 工质稳定流动; 在各连接管路及设备内工质的压降为零; 压缩和膨胀过程绝热; 节流过程为绝热节流。

混合工质在冷藏集装箱制冷机组的理论循环主要计算公式如下:

压缩机的能量方程:  $W_{\text{com}} = q_{\text{mr}} \cdot (h_2 - h_1)$ 。式中:  $q_{\text{mr}}$  为制冷剂质量流量, kg/s;  $h_1$  为压缩机进口焓值, kJ/kg;  $h_2$  为压缩机的实际出口焓值, kJ/kg;  $W_{\text{com}}$  为压缩机的耗功, kW。



压缩机的质量流量： $q_{mr} = \eta_v \cdot V_{dis} \cdot n / (60 \cdot v_1)$ 。式中： $V_{dis}$ 为压缩机的排气量， $m^3/r$ ； $n$ 为压缩机的转速， $r/min$ ； $v_1$ 为压缩机进口制冷剂的比体积， $m^3/kg$ ； $\eta_v$ 为压缩机的容积效率， $\eta_v = 0.9 - 0.0035 \cdot p_2/p_1$ 。式中： $p_1$ 为压缩机进口压强，MPa； $p_2$ 为压缩机的出口压强，MPa。

压缩机的实际出口焓值： $h_2 = h_1 + (h_3 - h_1)/\eta_{is}$ 。式中： $h_3$ 为等熵压缩时压缩机的理论出口焓值， $kJ/kg$ ； $\eta_{is}$ 为等熵效率， $\eta_{is} = 0.874 - 0.0135 \cdot p_2/p_1$ 。

冷凝器的能量方程： $Q_H = q_{mr} \cdot (h_2 - h_6)$ 。式中： $h_6$ 为冷凝器的出口焓值， $kJ/kg$ 。

蒸发器的能量方程： $Q_e = q_{mr} \cdot (h_1 - h_7)$ 。式中： $h_7$ 为蒸发器的进口焓值， $kJ/kg$ 。

本文采用单级蒸汽压缩式制冷循环，选用型号为 S4BCF-5.2（Y）的船用比泽尔压缩机作为压缩机模型，该压缩机转速为 1 450 r/min，排气量为 19.0 m<sup>3</sup>/h。利用 Matlab 软件对 R134a，R410A，R404A，DN01 工质进行理论模拟计算，其中工质的热力学参数通过接口程序调用 NIST 开发的 Refprop 9.1 软件得到。

为研究混合工质 DN01 的循环特性，参照国家标准 GB/T21145-2007《运输用制冷机组》<sup>[19]</sup>，分别在不同冷凝温度和蒸发温度条件下对该工质的循环性能进行分析：蒸发温度为 -20℃，冷凝温度为 35~70℃；冷凝温度为 40℃，蒸发温度为 -25~0℃。

2.1 冷凝温度对循环性能的影响

压缩机的排气温度影响着机组的安全运行，压缩机若长期高温运行，会降低润滑油的黏度，使压缩机性能恶化，对集装箱制冷机组造成一定的危害，故选用制冷替代工质时必须严格控制压缩机的排气温度。从图 7 可以看出，4 种工质的排气温度均随冷凝温度的升高而升高，DN01 的排气温度在 62~118℃ 间变化，在压缩机的允许范围内，R410A 的排气温度最高，比 DN01、R134a 和 R404A 分别约高 18、23、31℃。

单位容积制冷量体现着一定体积工质的制冷能力，在制冷量一定时，单位容积制冷量小的工质需要更大的循环量，匹配更大的制冷机组。在 R1234ze 中加入一定量的 R32 能够有效提高工质的单位容积制冷量。在图 7 中，虚线显示的是单位容积制冷量随冷凝温度的变化趋势，由图 7 可知：当压缩机输气量一定时，4 种工质的单位容积制冷量随冷凝温度的升高而降低，其中 DN01 的单位容积制冷量基本和 R134a 相同，在冷凝温度为 35℃ 时为 990.8 kJ/m<sup>3</sup>，冷凝温度为 35~70℃ 时，单位容积制冷量在 595~990 kJ/m<sup>3</sup> 间变化，比 R410A 平均低 60%，比 R404A 平均低 37%。

压缩机耗功随冷凝温度的变化关系如图 8 虚线所示。从图 8 中可以看出：4 种工质的压缩机耗功均随冷凝温度的升高而升高，其中，R404A 的压缩机耗功最高，R134a 的压缩机耗功最低，DN01 的压缩机耗功比 R404A 平均低 6.0%，比 R134a、R410A 分别平均高 13.0%、7.5%。

系统在 4 种工质下的 COP 如图 8 实线所示。可以看出，随冷凝温度的升高，4 种工质的 COP 均

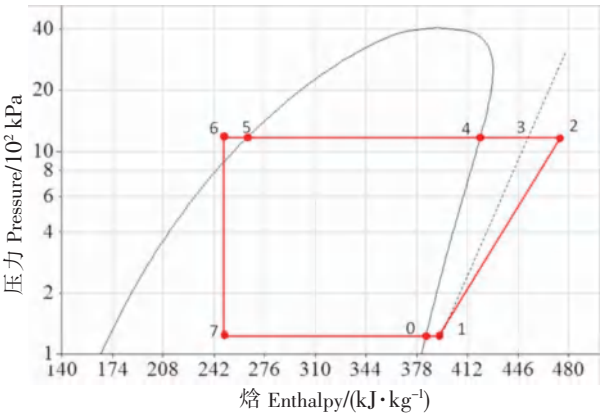


图 6 系统压焓图  
Fig.6 Diagram of the system pressure enthalpy

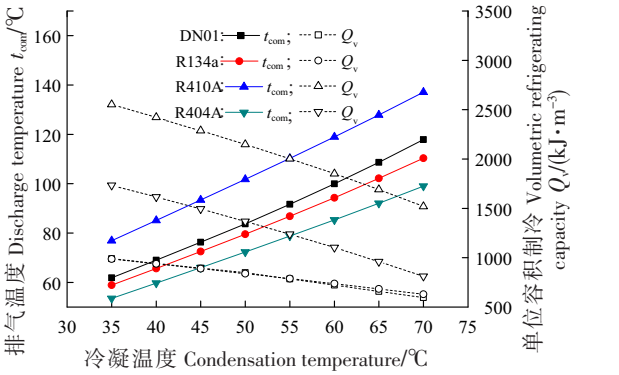


图 7 排气温度及单位容积制冷量随冷凝温度变化关系  
Fig.7 Variation of the discharge temperature and volumetric refrigerating capacity with the condensation temperature

逐渐下降。其中, R404A 的 COP 随冷凝温度的升高, 下降最为剧烈, 而 R134a 的 COP 最高, 在冷凝温度 35 ℃ 时为 2.32, 在冷凝温度为 70 ℃ 时为 0.85。

2.2 蒸发温度对循环性能的影响

在冷藏集装箱制冷系统中, 当冷凝温度一定时, 蒸发温度的升高会导致压缩机吸气压力增大, 吸气比容降低, 压缩机的质量流量增加。图 9 和图 10 分别表示 4 种工质的循环特性随蒸发温度的变化关系。

由图 9 可知: 对于 4 种工质, 当蒸发温度低于 0 ℃ 时, 压缩机的排气温度都随蒸发温度的升高而降低, 其中, R410A 的压缩机排气温度最高, R134a 次之, R404A 的排气温度随蒸发温度的升高变化最为平缓, DN01 的排气温度最低, 为 56.6 ~ 74.3 ℃; 虚线显示的是 4 种工质的 COP 随蒸发温度变化的趋势, 可以看出, 4 种工质的 COP 均随蒸发温度的升高而增大, 其中, DN01 最大, 在蒸发温度为 0 ℃ 时, COP 达到 3.5, R404A 最小, R410A 的 COP 在蒸发温度为 0 ℃ 时, 与 R404A 基本一致, 蒸发温度在 -25 ~ 0 ℃ 的变化过程中, DN01 的 COP 较 R134a, R410A, R404A 分别平均高 7.2%, 12.3%, 15.0%。

由图 10 可知: 4 种工质的单位容积制冷量均随蒸发温度的升高而升高, 其中 R410A 的单位容积制冷量最高, R404A 次之, 而 DN01 和 R134a 基本持平。当蒸发温度在 -25 ~ 0 ℃ 间变化时, R410A 的单位容积制冷量较 R404A 平均高 46.2%, 较 DN01 平均高 140.3%; 随蒸发温度的变化, R134a 的压缩比最大, DN01 次之, R410A 与 R404A 基本相同。

3 结论

本文对 DN01、R410A、R404A 和 R134a 4 种制冷工质的热力学性能进行了对比, 同时对工质在冷藏集装箱制冷机组上的循环性能进行了分析, 得出以下结论:

- 1) DN01 (R1234ze/R32 质量比为 85:15) 的 GWP 值低, 油溶性好, 饱和蒸汽压力与 R134a 持平, 比 R410A、R404A 低; DN01 的汽化潜热介于 R410A、R404A 之间, 比 R134a 高 10.6%; 在温度高于 40 ℃ 时, 运动黏度随温度的变化比较平缓, 导热系数低于 R410A、R404A, 比 R134a 高 2.2%。
- 2) 4 种工质的 COP 均随冷凝温度的升高而逐渐下降, 其中 DN01 下降最为平缓, R134a 的 COP 最高, 冷凝温度在 35 ~ 70 ℃ 间变化时, DN01 平均约比 R134a 低 11.3%; 蒸发温度在 -25 ~ 0 ℃ 的变化过程中, 随着蒸发温度的升高, 4 种工质的 COP 均逐渐升高, 同时 DN01 的 COP 较 R134a、

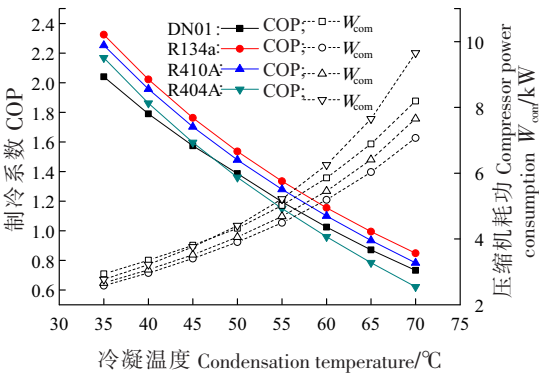


图 8 COP 和压缩机耗功随冷凝温度变化关系

Fig.8 Variation of COP and the power consumption of compressor with the condensation temperature

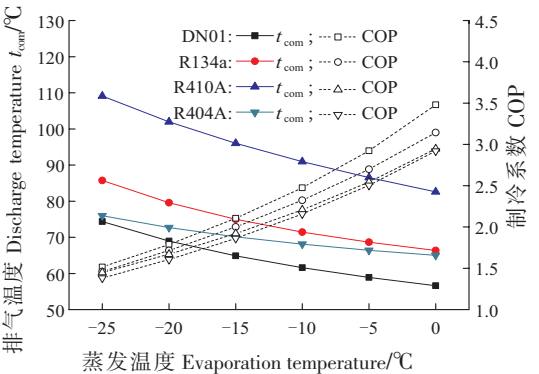


图 9 排气温度及 COP 随蒸发温度的变化关系

Fig.9 Variation of the discharge temperature and COP with the evaporation temperature

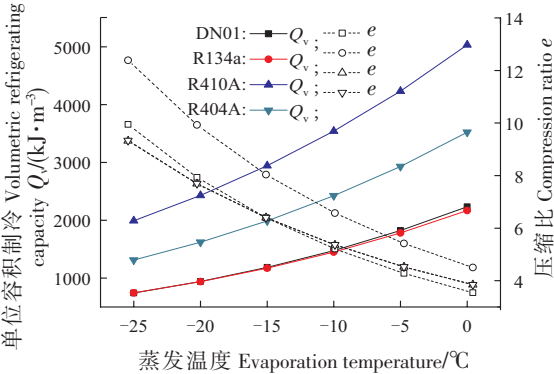


图 10 单位容积制冷量及压缩比随蒸发温度的变化关系

Fig.10 Variation of volumetric heating capacity and compression ratio with the evaporation temperature

R410A、R404A 平均高 7.2%、12.3%、15.0%。在变冷凝温度和变蒸发温度工况下, DN01 的冷凝压力低于 2.4 MPa, 排气温度在 120 ℃ 以下, 符合设计要求。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 胡亮, 周受钦. 冷藏集装箱监测系统的现状与发展趋势 [J]. 集装箱化, 2006(1): 43-46.
- [2] 丁贤根, 丁远彤. 船用冷藏集装箱技术中国专利综述 [J]. 船舶工程, 2020, 42(4): 78-85.
- [3] 蒋云雨, 王世魁. 冷藏集装箱冷冻机制冷剂替代趋势 [J]. 集装箱化, 2012, 23(1): 18-21.
- [4] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Regulation (EU) No 517 / 2014 of the European parliament and the council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing regulation (EC) No 842 / 2006 text with EEA relevance [J]. Official Journal of the European Union, 2014, 57(150): 195-230.
- [5] SÁNCHEZ D R, CABELLO R, LLOPIS, et al. Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze (E), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 74, 269-282.
- [6] ADRIÁN MOTA-BABILONI, JOAQUÍN NAVARRO-ESBRÍ, ÁNGEL BARRAGÁN-CERVERA, et al. Experimental study of an R1234ze (E) /R134a mixture (R450A) as R134a replacement [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 51.
- [7] 王方, 袁秋艳, 王帅琪, 等. R1234ze/HCs 非共沸混合工质热泵系统循环性能分析 [J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 26-31.
- [8] 张雷, 王芳, 王珂, 等. HFO-1234ze 在空气源热泵热水器中替代 R417A, R22 的研究 [J]. 制冷学报, 2014, 35(3): 102-108.
- [9] 张志巍, 李敏霞, 马一太. HFC32/HFO1234ze 二元混合工质的热物性模型 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(2): 218-222.
- [10] 周子成. HFO-1234ze (E) 及其与 R32 的混合物 [J]. 制冷, 2014, 33(4): 31-38.
- [11] 钟权, 董学强, 张海洋, 等. 环保混合工质 R290 + R1234ze (E) /R1234yf 的亥姆霍兹模型 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40(4): 737-743.
- [12] 赵宇. R1234yf 汽车空调系统性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [13] 王路路, 张华, 邱金友. R1234ze (E) 与 R32 混合工质在热泵系统中替代 R410A 的实验研究 [J]. 制冷学报, 2017, 38(3): 30-35.
- [14] KOYAMA S, TAKATA N, FUKUDA S. Drop-in experiments on heat pump cycle using HFO-1234ze (E) and its mixtures with HFC-32 [C] //International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Purdue, USA: Purdue University e-Pubs, 2010.
- [15] LEMMON E W, JACOBSEN R T. Equations of state for mixtures of R-32, R-125, R-134a, R-143a, and R-152a [J]. Journal of Physical & Chemical Reference Data, 2004, 33(2): 593-620.
- [16] KUNZ O, WAGNER W. The GERG2004 wide-range equation of state of natural gases and other mixtures [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(11): 103-116.
- [17] 王博, 张伟, 吕剑. 新型制冷剂 HFO-1234ze [J]. 化工新型材料, 2008(2): 10-12.
- [18] MAHMOOD MASTANI JOYBARI, MOHAMMAD SADEGH HATAMPOUR, AMIR RAHIMI, et al. Exergy analysis and optimization of R600a as a replacement of R134a in a domestic refrigerator system [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(4): 1233-1242.
- [19] 中国机械工业联合会. GB/T21145 - 2007 运输用制冷机组 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)