

文章编号:0253-4339(2026)04-0113-11
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250502002

R448A 替代 R404A 对制冷系统的性能-经济-环境影响研究

麻培成¹ 郑小海² 王勇强² 王子龙¹ 邵文静¹ 张 华¹

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 克拉玛依碳和网络科技有限公司 克拉玛依 834000)

摘 要 R404A 是一种常用的中温制冷剂,因具有出色的低温制冷效率以及对臭氧层无害的特性而被广泛应用于中低温制冷系统,但其全球变暖潜值(GWP 为 3 922)较高,即将被淘汰。R448A 因具有优异的热物性和较低的 GWP,目前已成为替代 R404A 的重要选择之一。本文基于一套高低温试验箱制冷系统,研究了等效工况下 R448A 替代 R404A 的系统特性,对比分析了 R448A 和 R404A 对系统经济和环境的影响。结果表明:R404A 和 R448A 系统制冷量和 COP 均随着充注量的增加呈现先增大后减小趋势;相比于 R404A, R448A 系统最佳充注量增加约 9.3%,但制冷量和 COP 分别提高 17.2% 和 17.1%;当系统蒸发温度相同时, R448A 系统对环境温度波动的敏感度显著低于 R404A 系统,环境温度每升高 1 °C, R404A 和 R448A 系统的制冷量分别下降 1.69% 和 0.86%,且系统 COP 最高可优于 R404A 的 9.9%;此外,使用 R448A 的投资回报周期约为 1 a,并随着系统使用周期年限的增加, R448A 系统的总年化成本(TAC)逐渐低于 R404A 系统,使用周期每增加 1 a,其系统成本可节约 0.6%~6.6%,将 R404A 更换为 R448A 后系统的碳排放总量可降低 32% 以上,其中约 27% 的降低来自运行周期内的制冷剂泄漏以及报废回收过程。

关键词 制冷剂替代;高低温试验箱;系统特性;碳标签;经济性评估

中图分类号: TB611;TB657.3

文献标识码: A

Study of the Performance-Economic-Environmental Impact of Replacing R404A with R448A in Refrigeration Systems

Ma Peicheng¹ Zheng Xiaohai² Wang Yongqiang² Wang Zilong¹ Gao Wenjing¹ Zhang Hua¹

(1. College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Karamay Carbon Neutral Network Technology Co., Ltd., Karamay, 834000, China)

Abstract R404A is a widely used medium-temperature refrigerant in low- and medium-temperature refrigeration systems because of its excellent efficiency and ozone-friendly properties. However, its high Global Warming Potential (GWP=3 922) has led to its scheduled phase-out by 2030. R448A has emerged as a key alternative, offering superior thermophysical properties and a significantly lower GWP. This study investigated a refrigeration system in high- and low-temperature test chambers to explore the operating conditions for the case of R404A replaced by R448A. The results showed that the cooling capacity and coefficient of performance (COP) of both systems initially increased and then decreased with increasing refrigerant charge. The optimal charge for R448A was approximately 9.3% higher than that for R404A, and its cooling capacity and COP improved by over 17%. At the same evaporation temperature, the R448A system was less sensitive to ambient temperature fluctuations. A 10 °C increase in ambient temperature resulted in a 16.9% decrease in cooling capacity for R404A, whereas R448A only experienced an 8.6% decrease. Additionally, the maximum COP of the R448A system was approximately 9.9% higher than that of R404A. The return on investment for R448A is approximately one year, and as the system's life cycle progresses, the total annualized cost (TAC) of R448A becomes lower than that of R404A, with annual savings ranging from 0.6% to 6.6%. Replacing R404A with R448A can reduce total carbon emissions by over 32%, with approximately 27% of this reduction attributed to refrigerant leakage during operation and end-of-life recycling.

Keywords refrigerant replacement; high- and low-temperature test chambers; system characterization; carbon label; economic evaluation

从上世纪末到本世纪初,大部分国家已经完成 了对于氯氟烃(CFCs)制冷剂的淘汰,使用零ODP(臭

基金项目:国家自然科学基金(52476211)和中央引导地方科技发展资金(YDZX20213100003002)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52476211) and the Central Leading Local Science and Technology Development Fund (No. YDZX20213100003002).)

收稿日期:2025-05-02;修回日期:2025-06-08;录用日期:2025-08-01

氧损耗潜值, ozone depletion potential) 制冷剂如 R134a、R410A、R404A 等替代 ODS (ozone depleting substances, 损耗臭氧层物质)。虽然大部分替代制冷剂不会对臭氧层造成破坏, 但普遍具有较高的 GWP (全球变暖潜值, Global Warming Potential)^[1-2]。近年来, 随着全球气候问题日益严重, 国际上通过条约、法规以及标准的建立引导制冷行业逐步淘汰高 GWP 制冷剂并采用更加环保的低 GWP 替代品^[3-5]。中国于 2021 年 9 月正式批准《〈蒙特利尔议定书〉基加利修正案》, 要求从 2024 年起冻结受控氢氟碳化合物 (HFCs) 的生产和消费至基线水平, 标志着全球最大的 HFCs 生产和消费国的制冷剂替代进入新阶段^[6]。在《基加利修正案》之前欧盟也已经实施了包含类似规定的 F-gas 法规, 据统计^[7], 到 2030 年对 HFCs 制冷剂冻结贡献最大的领域将是商业、交通运输业和工业制冷, 广泛应用于这些领域的高 GWP 制冷剂 R404A (HFCs 混合物) 即将被淘汰, 寻找其替代制冷剂成为全球学者的研究热点^[8]。

替代制冷剂的选择需要综合考虑制冷剂性能、环境、安全性和经济性等多个因素, 并要进行全面的评估和测试, 以确保替代制冷剂能够满足特定系统的需求^[9]。部分学者就 R404A 替代物的冷凝传热系数、压降等物性参数进行研究^[10-12], 结果表明, R404A 的传热系数高于众多替代制冷剂^[13]。此外, 还有针对替代制冷剂应用于不同系统的实验研究。R. Cabello 等^[14-15]分别基于水平冷冻柜系统和两级复叠系统研究了 R454C、R455A、R468A、R290 以及 R1270 替代 R404A 在相同蒸发温度下的系统能耗与 COP, 结果表明, R404A 替代物最高可实现约 10.2% 的 COP 提升。Zhang Lei 等^[16]对 1 种名为 RTJU-Z 的新型非易燃制冷剂在 R404A 冷库系统中的替代性能进行了实验研究, 结果表明, RTJU-Z 在特定温区下的制冷能力与 R404A 大致相同, 其 COP 相比 R404A 高 2.1% 以上, 而最佳充注量比 R404A 低 11.8%。P. Singha 等^[17]基于渔船制冷需求提出一种 R290 船用制冷系统, COP 比 R404A 系统高 13.4%, 但更替为 R290 系统的投资回报周期约为 14 个月; D. Sacasas 等^[18]在研究中指出, 在商业制冷领域中使用 R744 系统的能耗比 R404A 系统高 3%~21%, 但可以降低 13%~34% 的碳排放量; 而 R. Llopis 等^[19-21]对 R454C、R459B、R457A、R407H 和 R455A 在商业制冷系统替代过程中的能耗和碳排放量进行了评估比较, 结果表明, R455A 是直接碳排放量最高的一种替代品, R407H 系统的 COP 仅比 R404A 系统高约 4.0%, 而其他替代品的 COP 均仅能略高或持平于 R404A。

R448A 具有零 ODP、无毒和不易燃的优点, 被认为是一种合适的 R404A 制冷剂的过渡替代物^[22-25], D. Tsimpoukis 等^[26]基于商用制冷系统建立了一套 R448A 系统能耗分析模型, 发现在环境温度高于 24 °C 时, R448A 系统相对于 R744 系统可降低约 27.8% 的能耗。Deng Qingqing 等^[27]将 R448A 应用于大型冷库系统中发现, 与 R404A 相比, 使用 R448A 可以使系统全年能耗降低约 2.9%。R448A 在大型制冷系统中展现出较好的替代性能, 但不同于近共沸混合物 R404A, R448A 的温度滑移较高, 将其应用于制冷系统时应考虑到重新设计系统部件以适应非共沸混合物 R448A^[28]。A. Mota-Babiloni 等^[29]在研究中指出使用 R448A 替代 R404A 无须对压缩机润滑油进行改变; 文献[30-31]研究结果也显示, R448A 的平均冷凝传热系数和摩擦压降分别比 R404A 高 17.25% 和 20.57%, 因此在使用 R448A 替代 R404A 时, 在相同的运行条件下应考虑减少换热器的传热面积, 且 R448A 的临界温度、蒸气密度与 R404A 差异较大, 系统的压缩机与蒸汽管道设计也应考虑进行修改^[29]。

虽然上述改进可能优化系统性能, 但使用 R448A 替代 R404A 时系统部件的改进势必会造成成本的增加, 这对于小型制冷系统的制冷剂替代而言是一个重要限制因素。目前, 尚未有文献对小型中低温制冷系统中直接使用 R448A 替代 R404A (在所有部件不进行改动的条件下) 的可行性与经济意义进行全面说明。综上所述, 本文搭建了一套高低温试验箱制冷系统, 在维持系统所有原始部件不变的条件下, 研究 R448A 直接替代 R404A 的实际效果; 分析了 2 种系统不同充注量在不同环境温度下的系统特性与降温特性, 并在等效工况下研究了直接替代后系统的性能、经济成本以及总等效温室效应指标, 从节能、成本以及环保的角度对使用 R448A 直接替代 R404A 进行了综合性评估, 为小型制冷系统环保工质的替代提供了理论依据。

1 实验系统

实验中高低温试验箱置于精度为 ± 0.5 °C 的焓差实验室内, 待焓差室实验环境温度稳定后, 先开启电加热装置将试验箱预热至 50 °C, 随后设定箱体目标温度 -40 °C, 启动制冷系统对箱体降温, 记录试验箱工作室温度由 50 °C 降至 -40 °C 的实验数据, 并将箱体温度控制在 -40 °C 稳定运行 30 min, 以 60 g 为梯度改变制冷剂的充注量并在不同实验环境温度下重复上述实验, 研究不同制冷剂充注量以及环境温度对试验箱制冷量、COP、降温速率等性能参数的影响, 并进

一步在等效蒸发温度工况、相同环境温度下,对比 R404A 和 R448A 系统的排气温度、COP、制冷量以及功耗,将所得到的系统功耗数据转化为电力成本纳入系统经济与环境综合分析。

1.1 实验工质与设备

高低温试验箱如图 1 所示,R404A 和 R448A 的物性参数如表 1 所示,实验设备参数如表 2 所示。由表 1 可知,R448A 的 GWP 相比 R404A 降低 67.5%,而热物性以及泡点曲线则与 R404A 十分相似^[32],可用来替代 R404A。高低温试验箱主要由下层的变频压缩机、冷凝器、毛细管、节流阀以及上层的蒸发器、工作室、电加热系统和循环风机组成。工作室温度通过上层循环风道中的蒸发器和电加热器进行控制,循环风机持续不断地进行送风和回风,采用上出风、下回风的结构设计,确保箱内温度均匀。驱动空气在风道内循环,从而精确控制箱内温度。上层隔热层和制冷系统管路填充聚氨酯泡沫,试验箱使用三相 380 V/50 Hz 的交流电源供电。



图 1 高低温试验箱

Fig.1 High- and low-temperature test chambers

表 1 R404A 和 R448A 的物性参数

Tab.1 Physical properties of R404A and R448A

项目	工质	
	R404A	R448A
组分	R125/R134a/R143a (44/4/52)	R32/R125/R134a/R1234yf/ R1234ze(E) (26/26/21/20/7)
101 kPa 下的泡点 温度、露点温度/℃	-46.5、-45.7	-46.4、-40.2
临界温度/℃	72.04	84.62
温度滑移/℃	0.8	6.2
GWP	3 922	1 273
安全性	A1	A1

1.2 热力学模型

图 2(a)所示为 R404A 系统与 R448A 系统的压焓

表 2 实验设备参数

Tab.2 Experimental equipment parameters

设备	型号	参数
压缩机	DTH254LDPC9EQ	排气量:25.4 cm ³ /r
		额定转速:3 600 r/min
冷凝器	YDWF68L35P4-300P-250S	传热面积:5.820 m ²
		风量:1 810 m ³ /h
蒸发器	紫铜管加铝制翅片	传热面积:2.730 m ²
		风量:295.485 m ³ /h
节流阀	毛细管	长度:0.138 m
		内径:0.8 mm
热电偶	日本大华千野 T 型热电偶	量程:-200~350 ℃
		精度:±0.5 ℃
压力传感器	NS-P-I-4B5	量程:0~4 MPa、0~1 MPa
		精度:0.25%FS

图,为展示 R448A 在单级压缩系统中的循环过程,并与 R404A 进行对比,本文对非共沸制冷剂 R448A 的压焓图进行了简化,将带状区域饱和区简化为一条饱和曲线,同时也将两相区等温线做近似水平处理。图 2(b)所示为高低温试验箱制冷系统原理。下述为系统各部分能量计算。

单位质量制冷量:

$$q_0 = h_{1'} - h_6 \tag{1}$$

系统制冷量:

$$Q_0 = q_m(h_{1'} - h_6) \tag{2}$$

压缩机功耗:

$$W = q_m(h_{2'} - h_{1'})/\eta_s \tag{3}$$

制冷效率(COP):

$$\text{COP} = Q_0/W \tag{4}$$

式中: h 为制冷剂的焓值,下标 1'、2'、6 表示在图 2(a)中的对应状态点; q_m 为制冷剂质量流量,kg/s; η_s 为压缩机等熵效率; Q_0 为系统制冷量,kW; W 为压缩机功耗,kW。

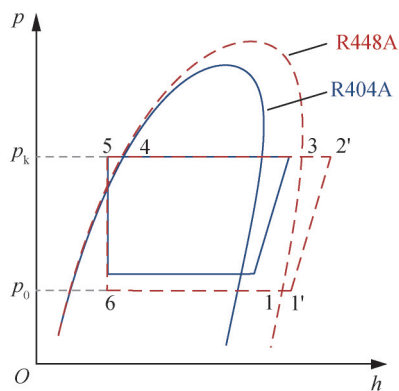
平均降温速率^[33]:

$$V_{\text{TL}} = 0.8 \frac{(T_{\text{H}} - T_{\text{L}})}{t_2 - t_1} \tag{5}$$

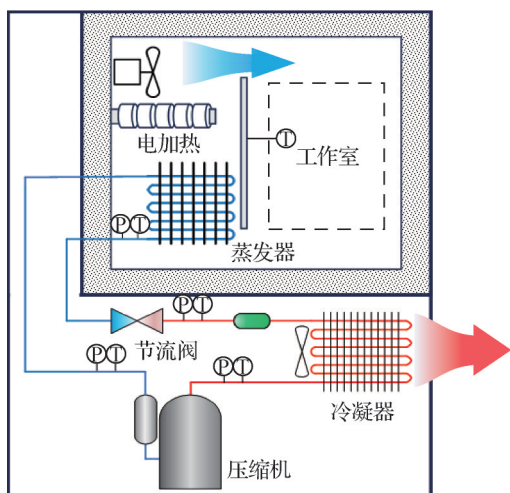
式中: V_{TL} 为平均降温速率,℃/min; T_{H} 为检验温度的高温值,℃; T_{L} 为检验温度的低温值,℃; t_1 为温度由 T_{H} 降至 90%($T_{\text{H}} - T_{\text{L}}$)的时间,min; t_2 为温度由 T_{H} 降至 10%($T_{\text{H}} - T_{\text{L}}$)的时间,min。

2 经济性及碳排放分析模型

总年化成本(TAC,total annualized cost)是总设备



p_0 为蒸发压力; p_k 为冷凝压力。
(a) R404A系统与R448A系统的lgp-h图



(b) 高低温试验箱制冷系统原理

图2 实验系统基本原理

Fig.2 Experimental system basic principles

成本 (CAPEX, capital expenditures)、电力成本 (OPEX, operating expenditures)、环境成本 (ENV, environmental costs) 和部署成本 (SET, set-up costs) 的年度化总和, 是混合工质在替代部署和使用成本的货币化指标^[34], 各部分计算如下:

$$C_{TAC} = \sum C_{CAPEX} + C_{OPEX} + C_{ENV} + C_{SET} \quad (6)$$

$$\Delta C_{TAC} = \frac{C_{TAC, R404A} - C_{TAC, R448A}}{C_{TAC, R404A}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: C 为年度化货币化成本指标, 下标分别表示不同成本类型以及不同制冷剂; ΔC_{TAC} 为 R448A 替代 R404A 后系统总年化成本的无量纲波动情况。

总设备成本 (CAPEX) 为系统运行周期中所有设备的总设备成本的年度化值 (\$/a):

$$C_{CAPEX} = \frac{\sum C_k \varphi X_{CRF}}{3600A} \quad (8)$$

$$X_{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (9)$$

式中: C_k 为每个循环中所有设备的年化总设备成本; X_{CRF} 为每种制冷剂的设备成本总和和使用资本回收因子; φ 为系统维护因子; A 为年运行时间, h。

电力成本 (OPEX) 是系统运行中的电力消耗成本 (\$/a), 受压缩机配置和制冷剂种类的影响:

$$C_{OPEX} = \sum W A \alpha_{el} \quad (10)$$

环境成本 (ENV) 是对于年度温室气体排放的罚没成本, 也称为减排成本 (\$/a):

$$C_{ENV} = m_{CO_2, e} C_{CO_2} \quad (11)$$

$$m_{CO_2, e} = E_a \beta \quad (12)$$

$$\beta = a e^{-b(y-s)} \quad (13)$$

部署成本 (SET) 是系统运行周期中制冷剂总量成本 (\$/a), 包括系统运行初期的初始制冷剂充注量 and 在使用周期内因泄漏造成的补充充注量:

$$C_{SET} = (m + mLn) C_{RP} \quad (14)$$

式中: W 为单台耗电设备功率, kW; α_{el} 为电力单价, \$/(kW \cdot h), 取决于运行区域及其能源结构; $m_{CO_2, e}$ 为年温室气体间接排放量, kgCO₂eq/a; C_{CO_2} 为单位减排成本, \$/(kgCO₂eq); b 为碳排放衰减系数; y 为系统运行评估年份; s 为碳排放衰减模型基准起始年份; E_a 为系统年能耗, kW · h; β 为间接排放系数, kgCO₂eq/(kW · h), 取决于所评估区域能源结构以及年份; m 为初始制冷剂充注量, kg; L 为制冷剂年泄漏率; n 为系统运行周期年限; a ; C_{RP} 为单位制冷剂价格, \$/kg。

总等效温室效应 (TEWI, total equivalent warming impact) 是计算制冷系统从使用到报废期间总环境影响 (以 CO₂ 当量排放量表示) 的最广义指标^[35-36]。该指标由 2 部分组成: 1) 制冷剂泄漏导致的直接碳排放量 (E_{direct} , kgCO₂eq); 2) 能源消耗引起的温室气体间接碳排放量 ($E_{indirect}$, kgCO₂eq), 各部分计算如下:

$$E = E_{direct} + E_{indirect} \quad (15)$$

式中: E 为总碳排放量, kgCO₂eq。

E_{direct} 与制冷剂的 GWP 有关, 包括其在运行周期内的泄漏和报废回收过程中的温室气体排放:

$$E_{direct} = m G_{WP} [nL + (1 - \theta)] \quad (16)$$

式中: θ 为系统使用寿命结束时制冷剂的回收率; G_{WP} 为全球变暖潜值。

间接碳排放量:

$$E_{indirect} = m_{CO_2, e} n \quad (17)$$

3 实验结果与分析

3.1 系统性能

图 3(a) 所示为不同制冷剂充注量对系统 COP、制冷量和压缩机功耗的影响。图 3(b) 所示为不同制冷剂在最佳充注量、不同环境温度下的系统性能。由图 3(a) 可知, 在相同环境温度下, 2 种制冷剂系统

的功耗均随充注量的增加而增大,COP和制冷量均随充注量的增加先增大后减小。在充注量不足时,制冷剂的质量流量较少,导致制冷量较少,制冷效率低;随着制冷剂充注量继续增加,制冷剂质量流量增大,系统功耗增大的同时,蒸发器有效传热面积增大,制冷量不断增加,COP逐渐升高;当充注量过多时,蒸发温度升高,传热温差减小,多余的制冷剂液体会积聚在冷凝器和蒸发器中,减小了蒸发器的有效传热面积,换热能力下降,制冷量减少,COP降低。当环境温度为 20℃时,R404A 系统的最佳充注量以及对应的制冷量和 COP 分别为 860 g、810.6 W 和 1.3,而 R448A 系统的最佳充注量以及对应的制冷量和 COP 分别为 940 g、961.1 W 和 1.5。相比于 R404A 系统,R448A 系统最佳充注量增加约 9.3%,但制冷量和 COP 分别提高 17.2%和 17.1%。

由图 3(b)可知,当 R404A 系统和 R448A 系统的制冷剂充注量为最佳时,在相同环境温度下,两者的系统功耗表现接近,最大差异仅为 1.4%。随着环境

温度逐渐升高,系统的功耗逐渐增加,环境温度每升高 5℃,系统功耗增加约 11.2%,导致系统 COP 下降约 12.3%,然而 R448A 系统的制冷量和 COP 始终优于 R404A 系统。在相同环境温度下,R448A 系统的制冷量比 R404A 系统高 17.2%~21.2%,COP 高 16.4%~19.4%。

3.2 降温速率

试验箱在 20℃下的降温过程如图 4(a)和图 4(b)所示,为在同一时间尺度下更清晰地对比 R448A 系统与 R404A 系统的降温曲线变化趋势,本研究对系统的降温过程引入无量纲时间。由图 4(a)、图 4(b)可知,当箱内温度降至-20℃以下时,系统降温速率呈现显著的非线性变化特征。为更精确地评估 R404A 系统和 R448A 系统的降温性能,本文将不同环境温度下的试验箱降温速率分为 2 个温度区间(-20~50℃、-40~-20℃),并以此计算各环境温度下不同制冷剂的平均降温速率,平均降温速率随充注量和环境温度的变化如图 4(c)和图 4(d)所示。由图 4(c)、图 4(d)可知,在环境温度相同时,系统的降温时间先缩短后加长,即系统平均降温速率先增大后减慢,这与图 3(a)中系统性能随充注量的变化趋势基本吻合,制冷剂充注量过多时,蒸发温度升高,蒸发器与环境换热量减少,系统制冷能力下降,进而导致系统的降温时间先缩短后加长,即系统平均降温速率先增后减,在达到最快平均降温速率前,每增加 60 g 制冷剂,R404A 系统与 R448A 系统平均降温速率分别增加约 4.4%和 2.1%。

由图 4(c)、图 4(d)还可知,当环境温度为 15℃、制冷剂充注量为最佳时,R404A 系统与 R448A 系统的平均降温速率均达到最快,分别为 1.45℃/min 和 1.38℃/min。而随着环境温度的升高,系统的平均降温速率逐渐变慢。这是由于环境温度越高,系统的热负荷越大,箱体内外温差越大,为了平衡内外温差,制冷系统需要长时间运行,所以制冷效率低,平均降温速率也越慢。环境温度每上升 5℃,R404A 系统平均降温速率下降约 6.3%~12.3%,而 R448A 系统平均降温速率仅下降约 7.2%~8.3%。在系统不考虑 R448A 温度滑移而使用相同换热器条件下,R448A 系统与 R404A 系统的平均降温速率相差较小,在低温环境下介于 0.5%~8.1%,在高温环境下介于 1.6%~9.1%。

3.3 排气温度

图 5 所示为 R404A 系统和 R448A 系统的排气温度在相同蒸发温度下随环境温度的变化。由图 5 可知,在蒸发温度相同时,R448A 系统的排气温度略高

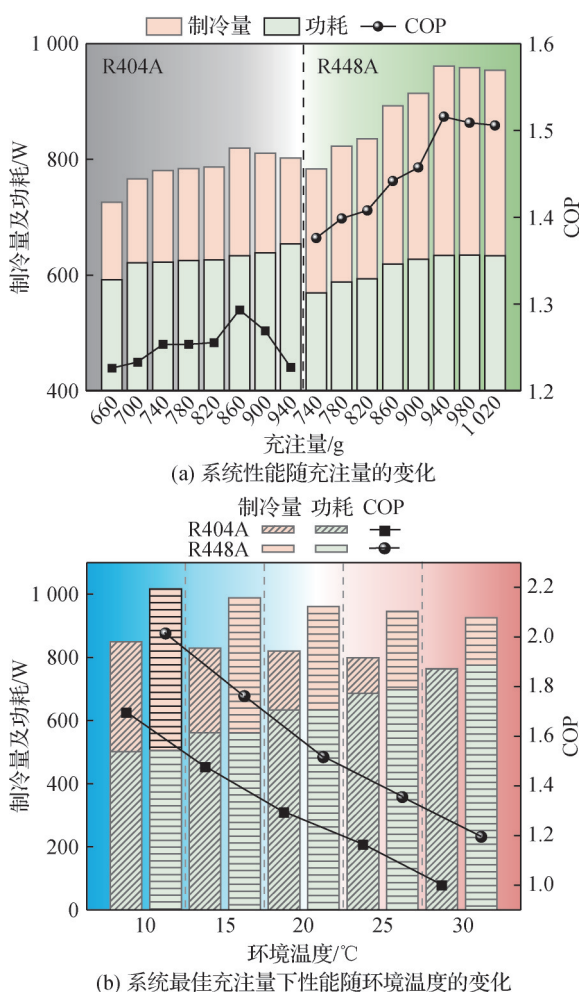


图 3 充注量和环境温度对系统性能的影响

Fig.3 Effect of filling volume and ambient temperature on system performance

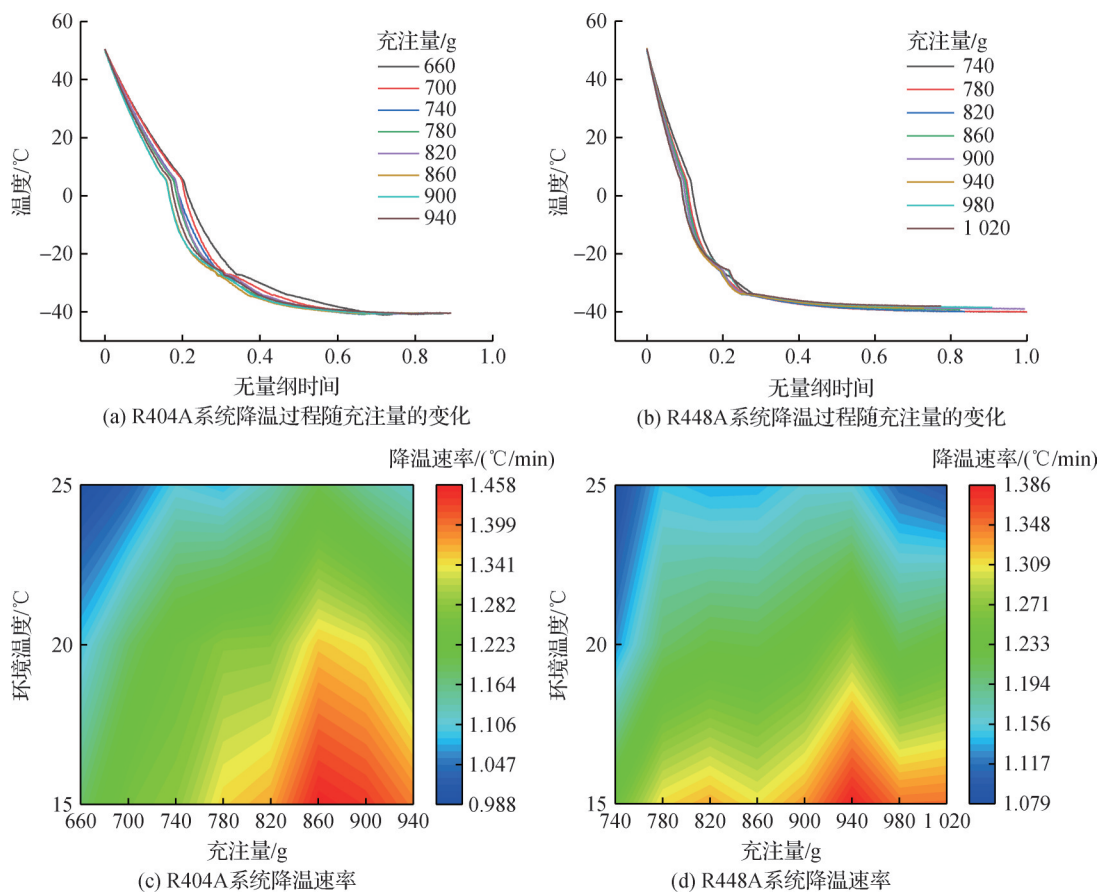


图 4 充注量和环境温度对系统降温性能的影响

Fig.4 Effect of charge volume on system refrigeration performance

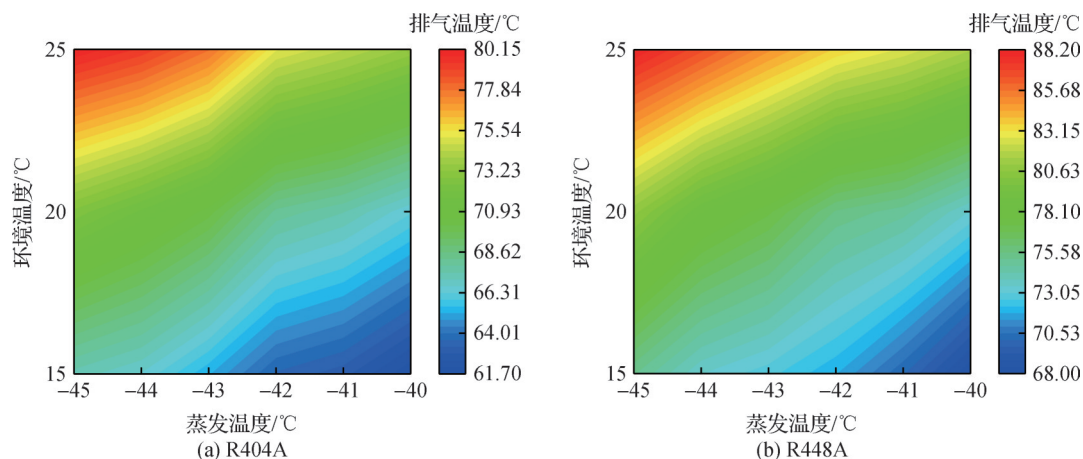


图 5 等效工况下排气温度随环境温度的变化

Fig.5 Variation of exhaust temperature with ambient temperature

于 R404A 系统约 9.1%~12.9%, 且在不同环境温度下均保持同样的趋势。当环境温度为 20 °C, 蒸发温度为 -40 °C、-45 °C 时, R448A 系统的排气温度比 R404A 系统分别高 10.6%、11.1%。假设压缩机的压缩过程为绝热过程, R448A 需要更高的压缩比才能达到目标冷凝效果, 在相同的蒸发温度下 R448A 系统的蒸发压力较低, 冷凝压力较高, 其压缩比大于 R404A 系统, 在吸气温度相差较小时, 较高的压比导致 R448A

系统压缩机的容积效率较低, 同时也导致系统排气温度高于 R404A, 在低温蒸发温度下为 7.9~8.1 °C, 在高温蒸发温度下为 6.2~8.1 °C。对于大多数制冷应用, 一般建议将排气温度保持在 107 °C 以下, 以避免润滑油分解或碳化。由图 5 还可知, R448A 系统压缩机排气温度始终维持在安全范围内, 且仍然具有 10% 以上的安全设计裕度, 所以在小型中低温制冷系统中直接使用 R448A 替代 R404A 时无须对压缩机进

行重新设计与修改。

3.4 相同蒸发温度下的系统性能

图 6 所示为 R404A 系统和 R448A 系统在相同蒸发温度下的性能对比。由图 6 可知,在相同的蒸发温度下,R404A 系统的制冷量始终大于 R448A 系统,当蒸发温度为 -40°C 、 -45°C 时,R448A 系统的制冷量分别比 R404A 系统低 2.6%~11.4%,但系统 COP 最高可比 R404A 系统提升 9.9%。这是由于在相同蒸发温度下,R448A 的密度低于 R404A,其质量流量较小。

虽然较小的质量流量使 R448A 系统的制冷量相对降低,但同时也显著减少了压缩机功耗,从而使其 COP 在不同环境温度下始终优于 R404A 系统。进一步分析环境温度的影响发现,当蒸发温度为 -40°C 时,环境温度升高 10°C ,R404A 系统的制冷量下降约 16.9%,COP 下降约 22.8%;而 R448A 系统的制冷量仅下降约 8.5%,COP 下降约 16.5%。由此可见,R448A 系统对环境温度波动的敏感度显著低于 R404A 系统,稳定性更好。

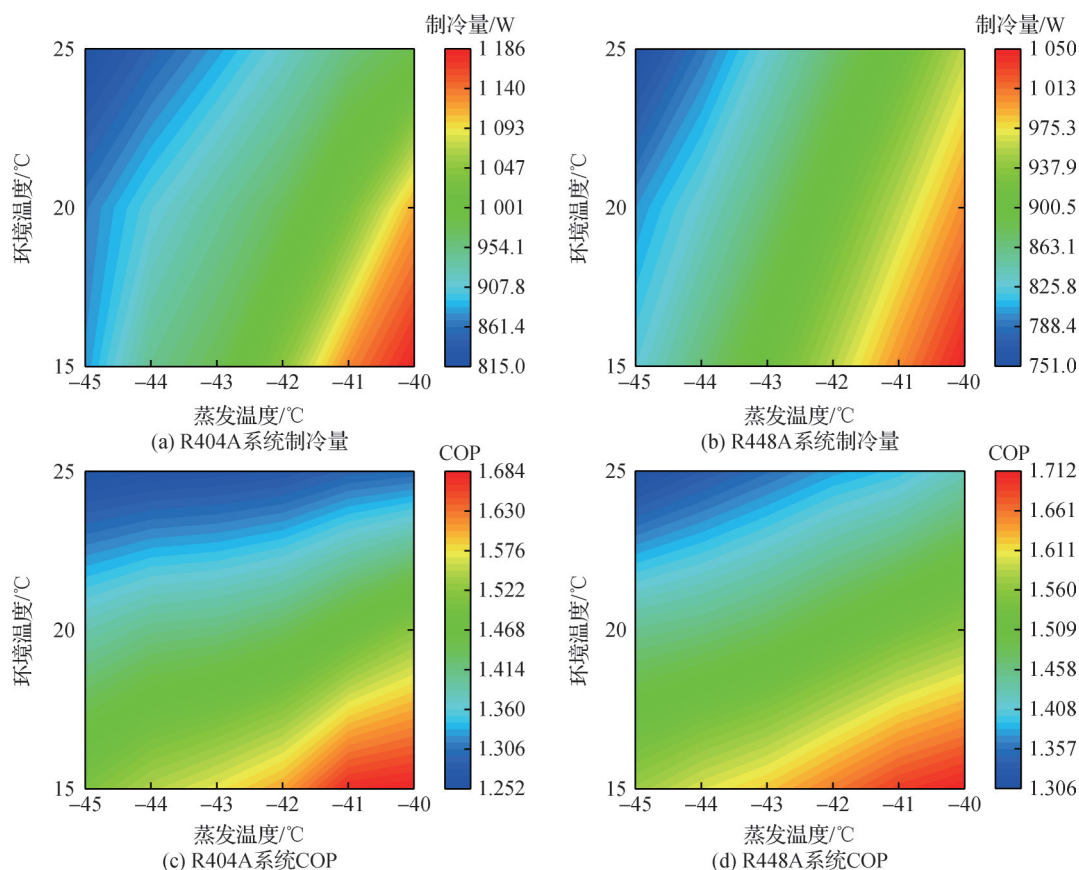


图 6 等效工况下 R404A 和 R448A 系统性能对比

Fig.6 Performance comparison of R404A and R448A systems under equivalent operating conditions

4 经济-环境耦合分析

4.1 系统经济性评估

图 7 所示为 R404A 系统和 R448A 系统不同环境温度以及不同区域下的经济性对比。表 3 所示为 R404A 系统和 R448A 系统在相同环境温度下,TAC 随设备使用周期的变化。系统的经济性评估是在制冷量相同情况下,选取 3 个不同的地理区域(中国、美国和欧盟)进行。由于在制冷剂替代过程中,R404A 系统和 R448A 系统设备部件不进行更替修改,所以忽略年化设备成本(C_{CAPEX}),主要使用总年化成本其他组成部分(即 C_{OPEX} 、 C_{ENV} 、 C_{SET})作为评价指标。如图

7 所示,就地理区域而言,R404A 系统和 R448A 系统每台设备每年在中国的 TAC 总量相比欧盟低 47.8%~50.4%,而美国与中国的 TAC 差距较小,仅为 5.5%~9.5%;这主要由于欧盟地区受 F-gas 法规严格限制,R404A 与 R448A 的使用成本偏高,且欧盟地区受能源税、可再生能源附加费等影响,工业用电电价远高于中国和美国,使每台设备的 TAC 远高于中国和美国。

在系统使用周期为 1 a,环境温度为 20°C 时,中国地区 R448A 系统的 TAC 高于 R404A 系统,差值为 $-16.2\text{ \$}/\text{a}$,但第二年时 ΔC_{TAC} 由负转正,所以使用 R448A 的投资回报周期约为 1 a;且使用周期每增加

1 a,系统成本可节约 0.6%~6.6%。 ΔC_{TAC} 越大,成本节约效果更明显。当系统使用周期为 5 a 时,成本最大可节约 4.4%。所以从系统长期投资的角度考虑,使用 R448A 系统节约成本效果更明显。且在系

统使用周期第 1 年内,随着环境温度的增加, ΔC_{TAC} 逐渐减小,由 21.7% 减至 1.6%。因此,在环境温度较高的地区更适合使用 R448A 系统来替代 R404A 系统。

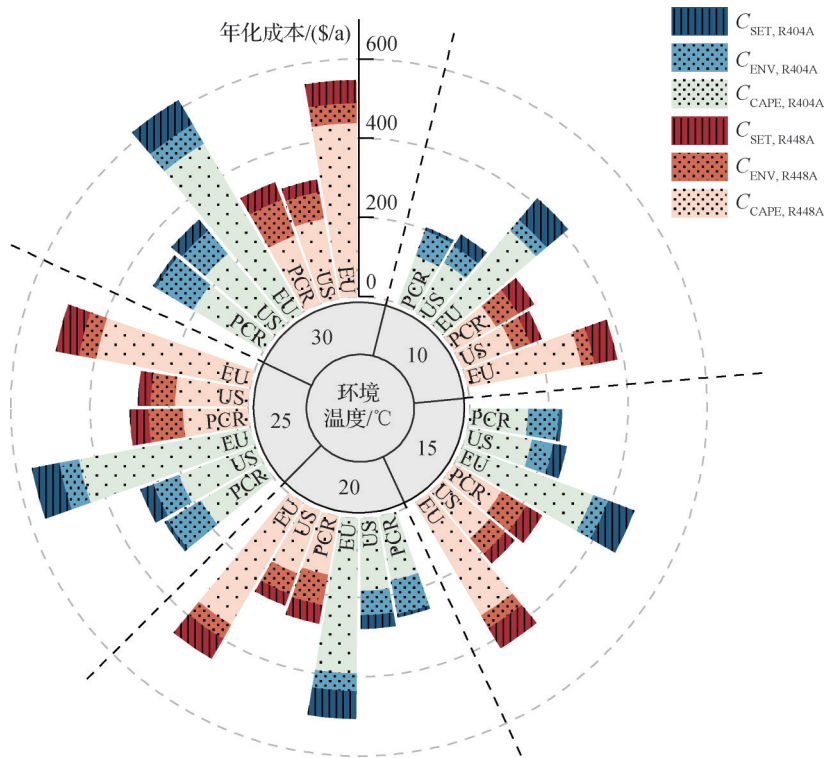


图 7 R404A 和 R448A 系统经济性对比

Fig.7 Comparison of R404A and R448A system economics

表 3 中国地区 R404A 和 R448A 系统 TAC 随使用周期的变化
Tab.3 Changes in TAC with life cycle for R404A and R448A systems in China

项目	使用周期/a				
	1	2	3	4	5
$C_{TAC, R404A}/(\$/a)$	258.6	510.2	761.8	1 013.4	1 264.9
$C_{TAC, R448A}/(\$/a)$	274.8	508.3	741.7	975.4	1 208.9
$\Delta C_{TAC}/\%$	-6.2	0.4	2.7	3.8	4.4

4.2 碳排放量

针对中国地区的制冷剂替代应用,本文对比了环境温度为 20 °C 时,使用周期为 5 a 的 R404A 系统与 R448A 系统的直接、间接碳排放量差异及碳排放总量构成。图 8 所示为不同制冷剂系统在等效制冷量工况下的直接、间接和碳排放总量对比。由图 8 可知, R448A 系统的碳排放总量显著低于 R404A 系统,这是由于 R448A 的 GWP 更低,来自运行周期内的制冷剂泄漏碳排放显著降低。且对于相同系统而言,将 R404A 替换为 R448A 后系统的碳排放总量可降低 32% 以上,其中约 27% 的降低来自运行周期内的制

冷剂泄漏以及报废回收过程,而其余约 5% 的降低则来自间接碳排放。此外, R404A 系统与 R448A 系统的碳排放均以间接碳排放为主,分别占碳排放总量的 60.7% 和 82.1%,而来自系统运行周期末期制冷剂的报废回收过程的碳排放占比较低,分别为 12.5% 和 5.9%。

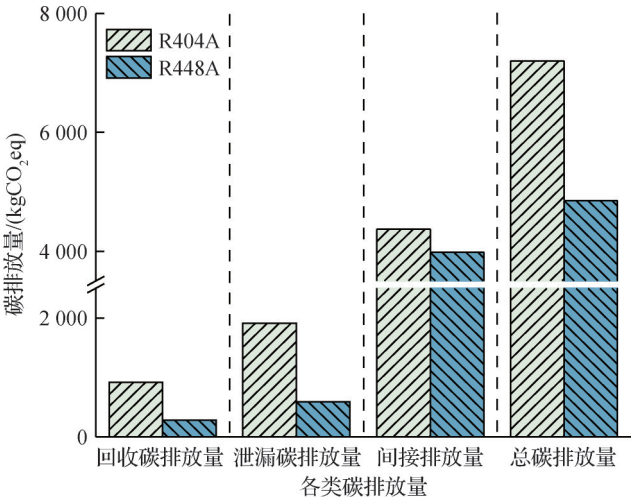


图 8 R404A 和 R448A 系统排放量对比

Fig.8 Comparison of R404A and R448A system emissions

5 结论

本文基于高低温试验箱制冷系统,对于 R448A 替代 R404A 的应用表现进行了实验研究,分析了不同充注量、环境温度对 R404A 系统和 R448A 系统的影响,并在等效工况下对不同系统的性能、经济性以及碳排放指标进行对比,得到结论如下:

1)在相同环境温度下,R404A 系统和 R448A 系统的 COP 和制冷量均随充注量的增加呈现先增后减趋势。最佳充注量分别为 860 g 和 940 g,R448A 系统最佳充注量增加约 9.3%,但制冷量和 COP 系统分别提高 17.2% 和 17.1%。

2)在相同蒸发温度下,R448A 系统对环境温度波动的敏感度显著低于 R404A 系统,环境温度升高 10 °C,R404A 系统的制冷量下降 16.9%,而 R448A 系统的制冷量仅下降 8.6%,系统 COP 最高可优于 R404A 约 9.9%;直接使用 R448A 代替 R404A 系统的压缩机排气温度始终维持在安全范围内。

3)使用 R448A 的投资回报周期约为 1 a,随着系统使用周期增加, ΔC_{TAC} 逐渐增大;当系统使用周期为 5 a 时,系统成本最大可节约 4.4%。且使用周期每增加 1 a,系统成本相对于上一年可节约 0.6%~6.6%。从系统长期投资的角度考虑,使用 R448A 系统节约成本效果更明显,且 R448A 更适合在高温地区来替代 R404A。

4)对于相同系统,将 R404A 更换为 R448A 后系统的碳排放总量可降低 32% 以上,其中约 27% 的降低来自运行周期内的制冷剂泄漏以及报废回收过程,而其余约 5% 则来自间接碳排放的降低。

本文受上海市“科技创新行动计划”(24DZ2201800)资助。(The project was supported by the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan (No. 24DZ2201800).)

参考文献

- [1] 张朝晖,陈敬良,高钰,等.制冷空调行业制冷剂替代进程解析[J].制冷与空调(北京),2015,15(1):1-8.(Zhang Zhaohui, Chen Jingliang, Gao Yu, et al. Analysis of refrigerant substitution process in the refrigeration and air conditioning industry [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2015, 15(1): 1-8.)
- [2] 朱明善. CFCs 和 HCFCs 替代制冷剂的趋势与展望[J].制冷学报,2000,21(1):2-9.(Zhu Mingshan. Trends and prospects of CFCs and HCFCs substitute refrigerants [J]. Journal of Refrigeration, 2000, 21(1): 2-9.)
- [3] Sovacool B K, Griffiths S, Kim J, et al. Climate change and industrial F-gases: a critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110759.
- [4] Solomon S, Alcamo J, Ravishankara A R. Unfinished business after five decades of ozone-layer science and policy[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 4272.
- [5] Birmpili T. Montreal Protocol at 30: the governance structure, the evolution, and the Kigali Amendment [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2018, 350(7): 425-431.
- [6] Hu Shan, Yang Ziyi, Yan Da, et al. Emissions of F-gases from room air conditioners in China and scenarios to 2060 [J]. Energy and Buildings, 2023, 299: 113561.
- [7] Mota-Babiloni A, Makhnatch P. Predictions of European refrigerants place on the market following F-gas regulation restrictions [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 127: 101-110.
- [8] 张朝晖,陈敬良,高钰,等.《蒙特利尔议定书》基加利修正案对制冷空调行业的影响分析[J].制冷与空调(北京),2017,17(1):1-7.(Zhang Zhaohui, Chen Jingliang, Gao Yu, et al. Analysis on the influence of Kigali Amendment to Montreal Protocol to refrigeration and air-conditioning industry [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(1): 1-7.)
- [9] Höges C, Wissing L, Vering C, et al. Choosing the optimal refrigerant in heat pumps: influence of the ecologic evaluation method [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 263: 125313.
- [10] Zeng Minqiang, Zou Lingeng, Peng Zhaorui, et al. Numerical study of condensation heat transfer characteristics of R134a/R290 and R134a/R1270 refrigerant blends as alternatives to replace R404A [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 243: 122644.
- [11] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Barragán á, et al. Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 81-90.
- [12] Kim C H, Kim N H. Evaporation heat transfer and pressure drop of the interim (R-448A, R-449A) and long term (R-455A, R-454C) low GWP R-404A alternative refrigerants in a smooth tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 181: 121903.
- [13] Kim C H, Kim N H. Evaporation heat transfer and pressure drop of low GWP R-404A alternative refrigerants in a multiport tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 184: 122386.
- [14] Cabello R, Súnchez D, Llopis R, et al. Energy impact of

- the internal heat exchanger in a horizontal freezing cabinet. Experimental evaluation with the R404A low-GWP alternatives R454C, R455A, R468A, R290 and R1270 [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 137: 22–33.
- [15] Giménez-Prades P, Navarro-Esbrí J, Udriou C M, et al. Experimental retrofit of an R404A/R23 ultra-low temperature freezer using R448A and electronic expansion valves [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2025, 171: 217–227.
- [16] Zhang Lei, Yang Zhao, Zhai Rui, et al. Flammable performance and experimental evaluation of a new blend as R404A lower-GWP alternative [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 135: 113–120.
- [17] Singha P, Das C, Köster L, et al. Thermodynamic comparison of various refrigerants for an on-board R290 refrigeration system with economizer subcooling in small fishing boats [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 60: 103443.
- [18] Sacasas D, Cuevas C, Vega J, et al. Environmental and energetic impact of refrigeration systems using CO₂ (R744): a Cuban case study [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024, 68: 103873.
- [19] Llopis R, Calleja-Anta D, Sánchez D, et al. R-454C, R-459B, R-457A and R-455A as low-GWP replacements of R-404A: experimental evaluation and optimization [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 106: 133–143.
- [20] Llopis R, Calleja-Anta D, Maiorino A, et al. TEWI analysis of a stand-alone refrigeration system using low-GWP fluids with leakage ratio consideration [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 118: 279–289.
- [21] Llopis R, Sánchez D, Cabello R, et al. R-407H as drop-in of R-404A. Experimental analysis in a low temperature direct expansion commercial refrigeration system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 80: 11–23.
- [22] Beshr M, Aute V, Sharma V, et al. A comparative study on the environmental impact of supermarket refrigeration systems using low GWP refrigerants [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 56: 154–164.
- [23] Alam M S, Jeong J H. Calculation of the thermodynamic properties of R448A and R449A in a saturation temperature range of 233.15 K to 343.15 K using molecular dynamics simulations [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 116: 104717.
- [24] Gao Enyuan, Cui Qi, Jing Huaqian, et al. A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 128: 104–117.
- [25] Li Houpei, Hrnjak P. Experimental study of R448A flow boiling in a 24-port microchannel tube [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 158: 238–252.
- [26] Tsimpoukis D, Syngounas E, Bellos E, et al. Data-driven energy efficiency comparison between operating R744 and R448A supermarket refrigeration systems based on hybrid experimental-simulation analysis [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 53: 102776.
- [27] Deng Qingqing, Zhang Zhongbin, Hu Xinhao. Thermoeconomic and environmental analysis of an inverter cold storage unit charged R448A [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45: 101159.
- [28] Rajapaksha L. Influence of special attributes of zeotropic refrigerant mixtures on design and operation of vapour compression refrigeration and heat pump systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48 (2): 539–545.
- [29] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Peris B, et al. Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 756–762.
- [30] Yang J, Lee D C, Lee S, et al. Condensation heat transfer characteristics and generalized correlations of R404A, R448A, and R454C in a plate heat exchanger [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 147: 106975.
- [31] Jacob T A, Matty E P, Fronk B M. Comparison of R404A condensation heat transfer and pressure drop with low global warming potential replacement candidates R448A and R452A [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 116: 9–22.
- [32] 邵文静, 王子龙, 周颖. R448A 和 R455A 在复叠制冷系统中替代 R404A 的性能分析 [J]. *上海理工大学学报*, 2021, 43 (6): 536–544. (Gao Wenjing, Wang Zilong, Zhou Ying. Performance analysis of R448A and R455A replacing R404A under cascade refrigeration system [J]. *Journal of Shanghai University of Technology*, 2021, 43 (6): 536–544.)
- [33] 高低温试验箱技术条件: GB/T 10592—2023 [S]. (Specifications for high/low temperature testing chambers: GB/T 10592—2023 [S].)
- [34] Alkhatib I I I, Albà C G, Llovel F, et al. Delicate balance between energy, exergy, cost and environmental impact in finding sustainable cooling systems: alternative refrigerants and advanced cycles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 262: 125316.
- [35] Mota-Babiloni A, Barbosa J R, Makhnatch P, et al. Assessment of the utilization of equivalent warming impact metrics in refrigeration, air conditioning and heat pump systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

2020, 129: 109929.

- [36] Ceglia F, Marrasso E, Roselli C, et al. An innovative environmental parameter: expanded total equivalent warming impact[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 980-989.

通信作者简介

王子龙,男,教授,上海理工大学能源与动力工程学院,

13816982695, E-mail: wzl@usst.edu.cn。研究方向:制冷设备,相变储能,高效换热技术。

About the corresponding author

Wang Zilong, male, professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-13816982695, E-mail: wzl@usst.edu.cn. Research fields: refrigeration, phase change energy storage, high efficiency heat transfer technology.