

文章编号:0253-4339(2017)03-0030-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2017.03.030

R1234ze(E) 与 R32 混合工质在热泵系统中替代 R410A 的实验研究

王路路¹ 张 华¹ 邱金友²

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 福建工程学院生态环境与城市建设学院 福州 350118)

摘 要 新型制冷剂 R1234ze(E) 因较低的 GWP 备受制冷行业关注, 其与 R32 的混合工质作为热泵系统制冷剂的研究也在逐步展开, 本文以 R1234ze(E)/R32 (质量配比: 27%/73%, 命名为 L-41b, GWP = 493) 混合工质为研究对象, 在人工环境室中设计并搭建了空气源热泵测试系统, 对比研究了 L-41b 与 R410A 在热泵系统中的性能系数 COP、压缩机功耗、制热量、排气温度和循环压比。结果表明: 当恒定冷凝温度, 蒸发温度从 5 ℃ 增加到 13 ℃ 时, R410A 和 L-41b 的 COP 偏差从 8.6% 缩小到 2.8%。当恒定蒸发温度, 冷凝温度从 30 ℃ 提高到 42 ℃ 时, L-41b 的运行性能系数 COP 的降幅小于 R410A, 变工况实验表明在相对高温区 L-41b 替代 R410A 具有较好的替代性能。

关键词 R1234ze(E)/R32; 混合制冷剂; 空气源热泵; 运行工况

中图分类号: TB61; TQ051.5; TB64

文献标识码: A

Experimental Investigation of R1234ze(E)/R32 Replacing R410A in Heat Pump System

Wang Lulu¹ Zhang Hua¹ Qiu Jinyou²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou, 350118, China)

Abstract Nowadays, more and more attention is being paid to the new low Global Warming Potential (GWP) refrigerant R1234ze(E). Mixing this refrigerant with R32 has been studied in recent years. We focused on contrasting the actual performance of the R1234ze(E)/R32 mixture (mass ratio: 27%/73%, named L-41b, with a GWP value of 493) with R410A in a heat pump system. A test system of an air source heat pump was designed and built in an environmental chamber in order to compare the differences between L-41b and R410A under a wide range of working conditions. The compressor energy consumption (COP), heating capacity, refrigeration cycle pressure ratio, and discharge temperature of the compressor were discussed and compared with R410A under similar working conditions. The results shows that, in the variable-condition experiments, the COP deviation decreased from 8.6% to 2.8% when the evaporation temperature increased from 5 ℃ to 13 ℃ at a constant condensation temperature of 38 ℃. The COP deviation was minimized when the condensation temperature increased from 30 ℃ to 42 ℃ at a constant evaporation temperature of 5 ℃. The results further demonstrate that the L-41b mixture can be used to replace R410A in a heat pump system, particularly at relatively high cycle temperatures.

Keywords R1234ze(E)/R32; mixed refrigerants; air-source heat pump; operating condition

在目前经济与技术的条件下, 研究低 GWP 的混合替代制冷剂是当前制冷剂的替代趋势之一^[1-4]。新型制冷剂 R1234ze(E) (trans-1, 3, 3, 3-tetrafluoropropene) 因较低的 GWP 备受制冷行业关注, 近期的研究报告^[5]表明 R1234ze(E) 的 GWP 小于 1, 其作为空调、热泵的替代品已初步得到认可^[6-8]。但 R1234ze(E) 单一成分的热力学性能和传输特性并不

理想, 若直接应用于空调和热泵系统, 其系统性能系数(COP)和容积制冷量(VCC)均会低于目前常用工质 R134a 和 R410A。R32 属于 HFCs 类物质, 但其 GWP 并不高(GWP R32 = 675), 拥有较高的汽化潜热和良好的传输性能^[9-10], 在 R1234ze(E) 中混入 R32 成分可以有效改善其热力学性能和传输性能^[11]。

目前国内外对于环保制冷剂 R1234ze(E) 和

R1234ze(E)/R32 混合工质的研究近几年才逐步展开。K. Tanaka 等^[12]开展对 R1234ze(E) 及其与 R32 的混合物的热力学特性和制冷循环性能系数与其组分关系的研究,其所获得的 COP 和容积制冷量 VCC 与 R1234ze(E)的质量分数的依赖关系,对于指导正确配置 R1234ze(E)与 R32 混合制冷剂有参考价值。S. Koyama 等^[13]对纯 R1234ze(E)及质量比为 0.5:0.5 的 R1234ze(E)/R32 混合工质在 R410 系统上进行直接充灌研究,并与 R410A 比较。证明在 R1234ze(E)中添加 R32 可以提高系统性能系数 COP,且可提高系统制冷量。国内张志巍等^[14]对不同 R1234ze(E)/R32 混合比进行系统循环性能分析,指出 R410A 的替代方案应从 R32 适合配比与减少系统压力损失着手。邱金友等^[15]指出需要进行大量的实验

室充灌与改型实验,获得对比性能数据,找出存在的问题,并根据 R1234ze(E) 及其与 R32 混合物的特点对压缩机、换热器的传热面积与传热方式、连接管、节流装置等方面进行优化设计,确保其性能达到或超过原有的设计水平,为下一步产品的优化设计奠定基础。

初步的研究论证了环保制冷剂 R1234ze(E) 及其与 R32 的混合工质具有与 R410A 相似的热物性和传输性能,有望成为新一代低 GWP 替代制冷剂,三者基本物性如表 1 所示。本文从 AHRI Low-GWP AREP 项目^[16-17]第一阶段对 R134a 和 R410A 的替代候选制冷剂中选择 L41b (R1234ze(E)/R32 (27%/73%))作为研究对象,探索其混合物在热泵系统中的运行性能。

表 1 R410A、R32 和 R1234ze(E) 的基本物性
Tab. 1 Physical properties of R410A, R32 and R1234ze(E)

制冷剂	沸点/K	摩尔质量/(kg/kmol)	临界温度/K	临界压力/MPa	ODP	GWP
R410A	247.1	102.3	374.21	4.059 3	0	1 430
R32	221	52.02	351.1	5.782	0	675
R1234ze(E)	254.2	114.04	382.52	3.6363	0	<1

1 实验装置与实验方案

1.1 人工环境室简介

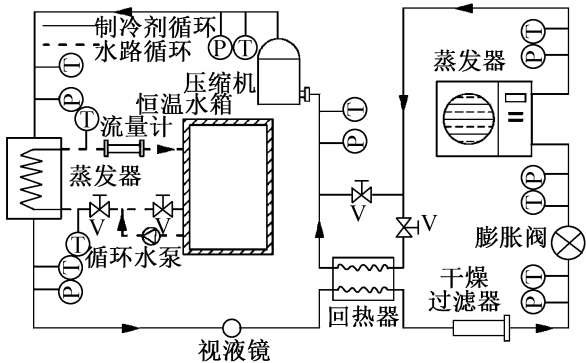
人工环境室主要由实验室外围保温结构、空气处理机组、温湿度采样装置、空气流量测试装置、系统控制系统及测量数据采集系统等组成。其中,空气调节处理系统主要由室内空气处理机组、水冷压缩冷凝机组、循环风机、电加热器、电加湿器及相关的控制设备组成。人工环境室的主要用途是提供测试机组性能时所需的各种工况,主要是保证室内的空气的温度、湿度、空气流动速度等达到实验所需的工况条件,使测试在一个稳定环境下进行,以准确测试空调器的性能。环境室内的温度和湿度参数采用两个 PID 控制器调节制冷系统、电加热器和加湿器来实现,表 2 列举环境室所能达到的测试工况。

表 2 环境室参数控制及精度

Tab. 2 Working condition of environmental chamber		
参数	控制范围	精度
温度/℃	0 ~ 50	测量 ±0.1 ℃;控制精度 ±0.2 ℃
湿度/%	30 ~ 95	测量 ±0.1 ℃;控制精度 ±0.2 ℃

1.2 空气源热泵系统实验台

图 1 所示为设计搭建的空气源热泵实验系统流程图及测点布置图。此系统包括两个循环回路:热泵系统制冷剂循环回路和冷凝器侧水循环回路。热泵系统制冷剂循环回路主要包括压缩机、水冷冷凝器、回热器、电子膨胀阀和翅片管式蒸发器等;冷凝器侧水循环回路主要包括恒温水箱、循环水泵和流量计等。压缩机采用变频滚动转子式压缩机,冷凝器采用水冷套管冷凝器,膨胀阀采用电子膨胀阀;蒸发器采用



T 温度传感器;P 压力传感器;V 手动阀

图 1 空气源热泵系统及测点布置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental bench and measuring points

用翅片管的形式,回热器两端连接旁通管路。

1.3 实验工况方案设定

考虑到系统运行的工况未必恒定不变,同时也为了更全面的掌握新型工质 L-41b 的运行性能,研究了 R410A 与 L-41b 两种工质在固定蒸发温度或冷凝温度下运行性能随另一侧温度的变化情况。实验的方式通过改变人工环境室的温度、蒸发器风机风量、冷凝器进口载热流体温度和冷凝器载热流体流量的参数来实现对工质侧的蒸发温度和冷凝温度的控制。为了避免冷凝温度过高导致压缩机停机,设定冷凝温度在 38℃ 附近。同时考虑到人工环境室工况的限制,蒸发温度设定在 4℃ 以上,以此分别设定了三组实验方案,如表 3 所示,改变蒸发温度,保持冷凝侧参数恒定。如表 4 所示,改变冷凝温度,保持蒸发侧工质参数恒定。

表 3 变蒸发温度工况表

Tab.3 Variable evaporation temperature working condition

实验编号	蒸发温度/℃	冷凝温度/℃
Z1	4	38
Z2	8	38
Z3	12	38

表 4 变冷凝温度工况表

Tab.4 Variable condensation temperature working condition

实验编号	蒸发温度/℃	冷凝温度/℃
N1	5	30
N2	5	36
N3	5	42

2 实验结果及性能对比分析

2.1 循环性能系数 COP 的对比

图 2 和图 3 分别给出了 R410A 和 L-41b 在固定一侧温度,循环性能系数 COP 随另一侧的变化规律。以图 2 分析为例,在固定冷凝侧温度为 38℃ 附近的工况下,蒸发温度从 5℃ 左右提高到 13℃ 左右时, R410A 和 L-41b 的 COP 分别从 3.52 和 3.30 提升到 3.92 和 3.81, R410A 和 L-41b 的 COP 偏差从 8.6% 缩小为 2.8%,说明随蒸发温度的升高, L-41b 的 COP 的增幅大于 R410A。在图 3 中同样可以看出 L-41b 的 COP 随冷凝温度升高时的降幅小于 R410A,相互印证了在较高温区间 L-41b 与 R410A 具有更相似的运行性能,且随着温区的提高, L-41b 表现出了一定

的优越性。

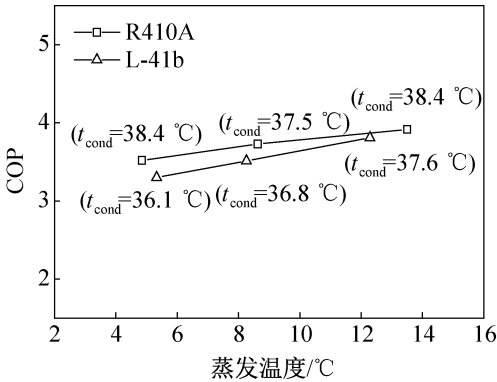


图 2 COP 随蒸发温度的变化
Fig.2 COP varies with evaporation temperature

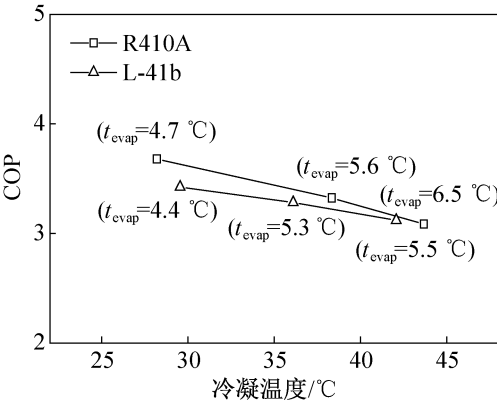


图 3 COP 随冷凝温度变化
Fig.3 COP varies with condensation temperature

2.2 压缩机功耗的对比

图 4 和图 5 所示分别为 R410A 和 L-41b 在固定一侧温度,压缩机功耗随另一侧的变化规律。由图 4 可知,当冷凝侧温度固定约为 38℃ 时,两者的压缩机功耗均随蒸发温度的增大而增加,这是因为当蒸发温度提高时,循环压比降低,工质流量减小,从而功率降

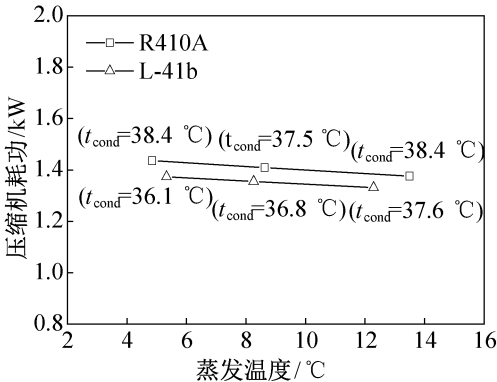


图 4 压缩机功耗随蒸发温度的变化
Fig.4 The work of compressor varies with evaporation temperature

低,但 R410A 的运行功率始终大于 L-41b。由图 5 可知,R410A 的运行功率始终大于 L-41b,而且当冷凝温度从 30℃ 左右升高到 42℃ 时,R410A 运行功率的增幅大于 L-41b,表明在相对高温区 L-41b 替代 R410A 有一定的优越性。

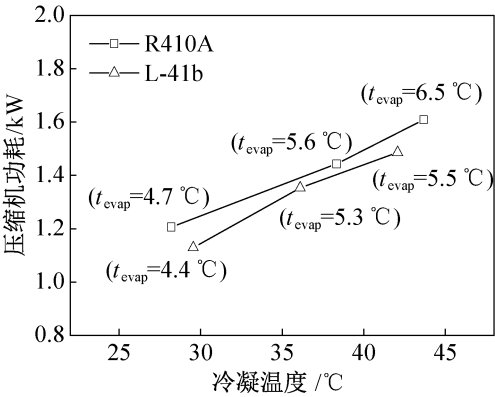


图 5 压缩机功耗随冷凝温度变化

Fig. 5 The work of compressor varies with condensation temperature

2.3 制热量的对比

图 6 和图 7 所示分别为 R410A 和 L-41b 在固定一侧温度,制热量 Q_h 随另一侧的变化规律。其中制热量是通过载热流体的进出口温度和载热流体回路循环流量计算得到。由两图可知,两者工质的制热量均随着蒸发温度或冷凝温度的升高而增大,总体上 L-41b 的制热量小于 R410A,但同时由上可知其总体功耗也比 R410A 小,因此 L-41b 的 COP 与 R410A 总体偏差不大。

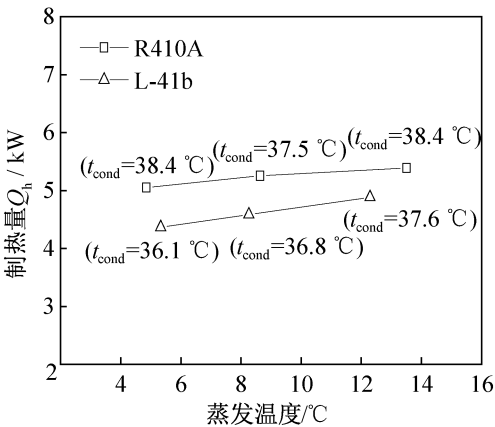


图 6 制热量随蒸发温度的变化

Fig. 6 Heating capacity varies with evaporation temperature

2.4 压缩机排气温度的对比

图 8 和图 9 所示分别为 R410A 和 L-41b 在固定一侧温度,压缩机排气温度随另一侧的变化趋势。由两图可知,在整个工况温区内,L-41b 的压缩机排气

温度始终低于 R410A。且当固定冷凝侧温度,两者工质排气温度随蒸发温度的变化时,L-41b 的排气温度平均较 R410A 低 9.6℃。压缩机排气温度较低有助于延长压缩机的使用寿命,从排气温度角度考虑 L-41b 替代 R410A 具有较优的性能。

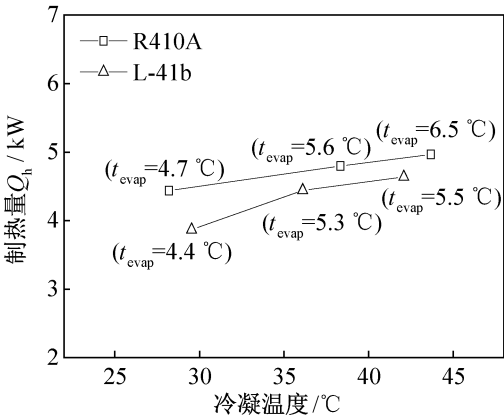


图 7 制热量随冷凝温度变化

Fig. 7 Heating capacity varies with condensation temperature

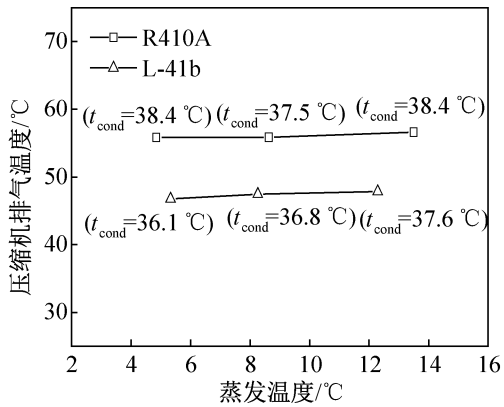


图 8 压缩机排气温度随蒸发温度变化

Fig. 8 The discharge temperature of compressor varies with evaporation temperature

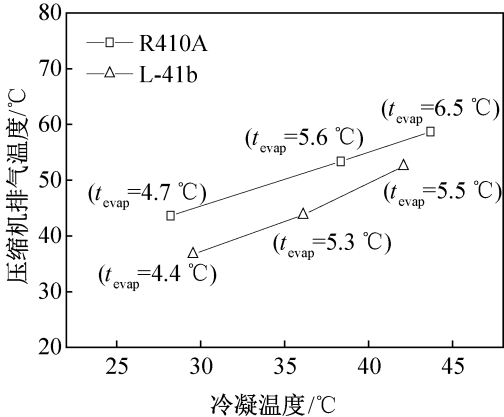


图 9 压缩机排气温度随冷凝温度变化

Fig. 9 The discharge temperature of compressor varies with condensation temperature

2.5 循环压比的对比

表 5 和表 6 所示为 R410A 和 L-41b 在固定一侧温度,循环性能另一侧的变化趋势。由表 6 可知,当蒸发温度恒定为 5℃时,两种工质的压缩机吸排气压比均随冷凝温度的提高而逐渐增大,当冷凝温度为 30℃左右时,R410A 的循环压比小于 R1234ze(E),

偏差为 8.2%。随冷凝温度的提升,当冷凝温度提高到 43℃左右时,R410A 循环压力大于 L-41b,偏差为 3.1%。其压比的变化规律与变蒸发温度实验相似,即两工质在较高温度区运行时,L-41b 的循环压力小于 R410A,有利于系统运行性能的提高,表明在较高循环温区中 L-41b 替代 R410A 的可行性。

表 5 变蒸发温度实验测试数据表
Tab.5 The test results in the condition of variable evaporation temperature

工况编号	工质	蒸发压力	冷凝压力	压比	蒸发温度	冷凝温度
		$p_{\text{evap}}/\text{MPa}$	$p_{\text{cond}}/\text{MPa}$	p_r/MPa	$t_{\text{evap}}/\text{℃}$	$t_{\text{cond}}/\text{℃}$
Z1	R410A	0.952	2.289	2.404	4.90	38.48
	L-41b	0.809	1.971	2.436	5.33	36.03
Z2	R410A	0.963	2.194	2.278	8.63	37.50
	L-41b	0.905	1.996	2.206	8.26	36.84
Z3	R410A	1.028	2.297	2.234	13.50	38.44
	L-41b	0.983	2.122	2.159	12.29	37.61

表 6 变冷凝温度实验测试数据表
Tab.6 The test results in the condition of variable condensation temperature

工况编号	工质	蒸发压力	冷凝压力	压比	蒸发温度	冷凝温度
		$p_{\text{evap}}/\text{MPa}$	$p_{\text{cond}}/\text{MPa}$	p_r/MPa	$t_{\text{evap}}/\text{℃}$	$t_{\text{cond}}/\text{℃}$
N1	R410A	0.888	1.826	2.056	4.71	28.24
	L-41b	0.772	1.717	2.224	4.41	29.54
N2	R410A	0.927	2.235	2.411	5.61	38.34
	L-41b	0.838	1.996	2.382	5.52	36.10
N3	R410A	0.934	2.650	2.837	6.50	43.68
	L-41b	0.859	2.364	2.752	5.45	42.58

3 结论

本文在人工环境室中设计和搭建了空气源热泵测试实验系统,对比研究了 L-41b 与 R410A 在热泵系统中的运行性能,为 L-41b 在热泵系统中的应用提供参考和必要的数据基础,得出如下结论:

1)在整个工况温区内,两者工质的制热量均随着蒸发温度或冷凝温度的升高而增大,总体上 L-41b 的制热量小于 R410A,但同时总体功耗也小于 R410A,所以 L-41b 与 R410A 总体的 COP 偏差不大。而 L-41b 的压缩机排气温度始终低于 R410A,从压缩机排气温度较低有助于延长压缩机使用寿命的角度,L-41b 替代 R410A 具有较好的可行性。

2)两工质在较高温度区(工况 Z3 和 N3)运行时,L-41b 与 R410A 的 COP 已较为接近,且随着温区

的提高,L-41b 的 COP 表现出了一定的优越性。同时 L-41b 的循环压比小于 R410A,有利于 L-41b 运行性能的提高,表明在相对高温区 L-41b 替代 R410A 具有较优的替代性能。

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): 53-58. (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): 11-17. (MA Yita, WANG Wei. Substitution and postponable technology of refrigerants [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31 (5): 11-17.)

[3] McLinden M O, Kazakov A F, Brown J S, et al. A thermo-

- dynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 38(1): 80-92.
- [4] Wang X D, Amrane K. AHRI low global warming potential alternative refrigerants evaluation program (low-GWP AREP)-summary of phase I testing results[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(3): 996-1000.
- [5] Calm M J. The next generation of refrigerants historical review consideration and outlook [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(2): 1123-1133.
- [6] Atilla G D, Vedat O. Characteristics of some new generation refrigerants with low GWP [J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 1452-1457.
- [7] Molés F, Navarro-Esbríet J, Peris B, et al. Theoretical energy performance evaluation of different single stage vapour compression refrigeration configurations using R1234yf and R1234ze(E) as working fluids [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 44(1): 141-150.
- [8] Lai N A. Equations of state for HFO-1234ze(E) and their application in the study on refrigeration cycle [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 43(7): 194-202.
- [9] 杨申音,王勤,唐黎明,等. 常规空调热泵系统的 R32 替代研究述评[J]. *制冷学报*, 2013, 34(6): 59-68. (YANG Shenyin, WANG Qin, TANG Liming, et al. Review of the application of R32 on air conditioners and heat pump systems[J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(6): 59-68.)
- [10] 田镇,谷波,王婷,等. HFC-32 制冷剂饱和液体热力性能参数计算模型 [J]. *制冷学报*, 2013, 34(2): 28-32. (TIAN Zhen, GU Bo, WANG Ting, et al. Calculation model of thermodynamic properties of saturated liquid for HFC-32 refrigerant[J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(2): 28-32.)
- [11] Onaka Y, Miyara A, Tsubaki K, et al. Cycle evaluation of refrigerant mixtures of CO₂/DME and HFC-32/HFO1234ze(E) [C]//The 23rd IIR International Congress of Refrigeration, Prague, Czech Republic, 2011.
- [12] Tanaka K, Higashil Y, Akasaka R. Thermodynamic property modeling of HFO-1234ze(E) + HFC-32 mixtures for evaluating cycle performance [C]//The 23rd IIR International Congress of Refrigeration. Prague, Czech Republic: Chalmers Publication Library, 2011.
- [13] 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.
- [14] 张志巍,李敏霞,马一太. HFC32 /HFO1234ze 二元混合工质的热物性模型[J]. *工程热物理论*, 2014, 35(2): 218-222. (ZHANG Zhiwei, LI Minxia, MA Yitai. Thermophysical properties model for binary mixtures working fluid of HFC32 /HFO1234ze [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(2): 218-222.)
- [15] 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, 60. (QIU Jinyou, ZHANG Hua, QI Yingxia, et al. A study on new refrigerants R1234ze(E) and its mixtures [J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(3): 9-16, 60.)
- [16] 汪训昌. AHRI 低 GWP 替代制冷剂评价计划(第一阶段)成果综述 [J]. *暖通空调*, 2014(5): 55-65. (WANG Xunchang. Result summary of AHRI Low-GWP AREP (the first phase) [J]. *Journal of HV&AC*, 2014(5): 55-65.)
- [17] Amrane K, Wang X D. Overview of AHRI low global warming potential alternative refrigerants evaluation program [C]//JRAIA International Symposium, 2012.

通信作者简介

张华,男,教授,博士生导师,上海理工大学制冷与低温工程研究所, (021)55275542, E-mail: zhanghua3000@163.com。研究方向: 制冷低温过程与系统。

About the corresponding author

Zhang Hua, male, professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 21-55275542, E-mail: zhanghua3000@163.com. Research fields: system process of refrigeration and cryogenics.