文章编号:0253-4339(2019) 03-0072-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.03.072

低温热泵系统中 R290 替代 R22 的性能研究及优化

张 耘[1,2] 柳慈翀[1,2] 陈晓宁[1,2] 李大伟[3] 史俊茹[3] 陈江平[1,2]

(1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 上海市高效冷却系统工程技术中心 上海 200240; 3 浙江盾安人工环境股份有限公司 诸暨 311835)

摘 要 本文针对低温热泵系统,采用 R290 替代 R22 进行性能实验研究,对比不同工况下两者的性能差异发现:直接在原系统中将 R22 抽出并灌装非等量 R290 后,系统运行时,换热量与 COP 均有所衰减,且在相同的低温环境工况下,R290 系统的压缩机排气温度和排气压力均高于原 R22 系统。通过分析系统部件可知,上述现象出现的主要原因是 R22 系统压缩机排量过大、与 R290 系统不匹配,因此为同时满足系统的安全性要求以及提高 R290 在低温热泵系统中的整体性能,考虑在系统中更换与 R290 更为匹配的排量更小的压缩机。实验结果表明:对 R290 低温热泵系统压缩机排量进行优化能有效降低系统的排气温度和压力、提高系统整体性能;压缩机优化后的 R290 低温热泵系统 COP 较原 R22 系统提高 6.5%,低温环境下排气温度降低 36%,至 80 ℃以下。

关键词 热泵;压缩机;制冷剂替代;R290
中图分类号:TB61+2; TQ051.5 **文献标识码**: A

Performance Study and Optimization on Alternative Refrigerant R290 in R22 Low Temperature Heat Pump System

Zhang Yun[1,2] Liu Cichong[1] Chen Xiaoning[1,2] Li Dawei[3] Shi Junru[3] Chen Jiangping[1,2]

(1.Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2.Shanghai High Efficient Cooling System Research Center, Shanghai, 200240, China; 3. Zhejiang Dun'an Artificial Environment Co., Ltd., Zhuji, 311835, China)

Abstract This study addresses the experimental performance of the alternative refrigerant R290 in the R22 low-temperature heat pump system. Results show that when R22 was directly replaced by R290 in the original system, both the heat exchange and coefficient of performance (COP) of the system decreased, and the exhaust temperature and pressure of the R290 system were higher than those of the original R22 system at low temperatures. Through the analysis of the system components, reducing the displacement of the compressor of the R290 heat pump system can effectively improve overall performance and reduce the discharge temperature and pressure. After the optimization of the compressor, the R290 system achieved a 6.5% higher COP compared to the original R22 system, and the exhaust temperature was decreased to 80 ℃, which is 36% lower than the R22 system.

Keywords heat pump; compressor; refrigerant replacement; R290

R22 是 HCFC 类制冷剂,广泛应用于家用及商用领域,然而由于其对大气臭氧层的破坏作用和一定的温室效应潜值,在《蒙特利尔议定书》中已对 R22 的禁用提出了明确的期限。对于 R22 的替代,国内外主要分为两个方向:一是以美国、日本为主的 HFCs 替代方案[1],二是以中国、欧洲为主的以 R290(丙烷)等天然制冷剂作为替代物[2]。

对于 R22 替代制冷剂的选择,已有不少学者进行了相应研究[3-6]。李晓燕等[7]利用新混合制冷剂 R417A 对 R22 热泵热水系统进行了替代研究。张明方等[8]同时也在家用空调领域采用 R417A 进行 R22 的替代研究。史琳等[9]通过对比 R22 和 R32 的热物理性质,研究了家用及商用领域的 R22 空调替代。姚寿广等[10]通过建立相应的参数关系方程式对 R22 和 R290 的热物理性质进行了热力循环的性能模拟。其中 R32 系统的排气压力温度均高于 R22,因此在替代使用中需要对空调部件进行额外的改造;而 R417A、R290 与 R22 热物理性质相似,对现有的 R22 系统不需要进行过多的改进。其中由于 R290 的 ODP = 0, GWP < 20,具有优秀的环保性

收稿日期:2018-04-10;修回日期:2018-06-20

能[11],因此对于低温热泵系统,R290 是 R22 的理想替代物质[12]。

现有 R290 替代 R22 制冷剂的研究主要关注于 R290 作为替代工质在制冷系统中的表现及替代时的相关问题和解决方案。对于 R290 在热泵系统中,尤其在低温环境下的替代性能研究还较为缺乏。

本文通过对原系统和系统进行一定改动后,进行了实验研究,探究了 R290 在低温热泵系统中的性能效果并对低温热泵中 R22 的替代研究给出了优化建议与方向。

1 理论分析

表 1 所示为 R290 与 R22 的基本物性对比。由表 1 可知,R290 的主要物理性质与 R22 极其相近。且 R290 的 ODP = 0,GWP 很小,所以具备替代 R22 的基本条件[13]。

表 1 R290 与 R22 的基本物性对比

Tab.1 Comparison of physical properties of R290 and R22

参数	R22	R290
分子式	$CHCLF_2$	C_3H_8
分子量	86.47	44.09
标准沸点/℃	−40.78	−42.07
凝固点/℃	−160	−187.7
临界压力/MPa	4.974	4.254
临界温度/℃	96.2	96.8
临界比容/(m^3/kg)	0.001 904	0.004 545
沸点汽化潜热/(kJ/kg)	234.5	430
饱和液密度/(kg/m^3)	1 412	582
ODP	0.055	0
GWP	1 600	<20

图 1 所示为 R22 与 R290 饱和蒸气压力与温度曲线。由图 1 可知,R22 和 R290 的饱和蒸气压力非常接近,因此可以在对原 R22 系统不进行大的改动下直接将 R22 抽出灌装 R290[14]。

通过 R22 和 R290 的基本热物性对比,可以得出 R290 的特点主要为[15-16]:

1)R290 的汽化潜热是 R22 的 1.84 倍,这说明在相同制热量下,采用 R290 可减少工质的循环量。

2)R290 绝热指数低于 R22,在相同压缩比时,可减少功耗,并使排气温度降低,输气系数提高,同时减少压缩过程气体与气缸间的热交换,减少不可逆损耗,并能够改善冷凝器的工作状况,减少传热不可逆损失,降低能耗。

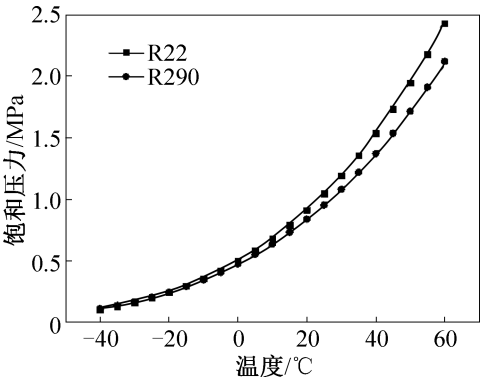


图 1 R22 与 R290 饱和蒸气压力与温度曲线

Fig.1 The curve of saturated steam pressure and temperature of R22 and R290

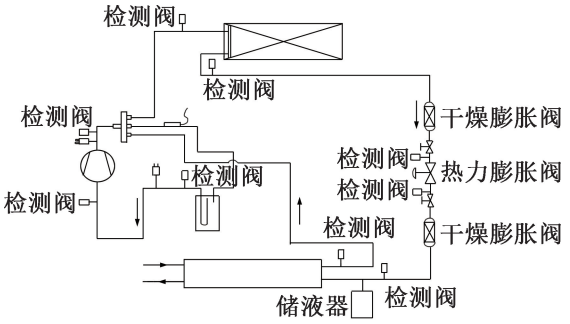
3)R290 导热系数高于 R22,可改善压缩机的散热条件,同时提高冷凝器和蒸发器的传热系数,进一步降低系统能耗。

2 实验介绍

为研究 R290 低温热泵系统在不同工况下,特别是低温环境下的性能,对原有 R22 热泵系统进行替代实验。原 R22 系统充注量为 5 kg,R290 系统充注量为 3 kg,满足 GB 4706.32—2012《家用和类似用途电器的安全热泵、空调器和除湿机的特殊要求》[17]标准中关于具有机械通风条件的热泵系统制冷剂充注量 M<LFL · 130 m^3 的相关标准。

该热泵系统主要由涡旋压缩机、管翅式换热器、壳管式换热器、热力膨胀阀、气液分离器和储液罐组成。实验在焓差室中进行,焓差室主要分为蒸发室和冷凝室两部分。在蒸发室和冷凝室分别放有一个风洞,用于调节蒸发器和冷凝器的进风量及测量蒸发室和冷凝室的干湿球温度。蒸发室和冷凝室的温、湿度环境各由一个制冷机组、电加热器及加湿器进行控制。在原机管路上,分别在各部件前后打孔并布置了用于测量系统压力及温度的传感器。实验原理及实验台如图 2 所示,实验台精度分析如表 2 所示。

为分析该热泵系统在不同环境条件下的工作性能,共设计了如表 3 所示的 15 组实验工况,用于分析对比不同环境温度、出水温度条件下两系统的性能差异。



(a) 实验原理

(b) 实物图

图 2 实验台结构

Fig.2 Experimental bench structure

表 2 实验台精度分析

Tab.2 Experiments measurement accuracy

实验器材	不确定度
功率计	±0.2%
电子秤	±10 g
压力传感器	±10 kPa
温度传感器	±0.5 K
电子喷嘴压差	±2 Pa

3 实验结果及讨论

在不同工况下分别对 R290 和 R22 进行系统性能测试,为分析二者的具体性能差异,选择不同环境温度下,同一出水温度工况下的制热量、COP 及排气压力、排气温度等参数进行对比。

3.1 系统换热量与 COP 的对比

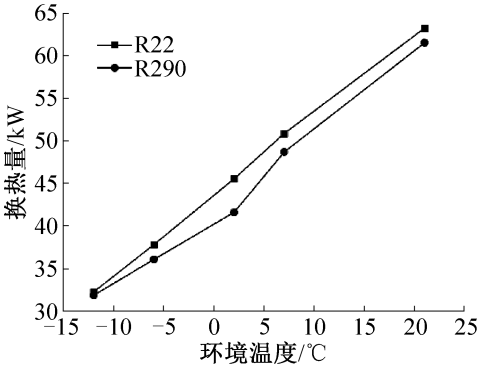
图 3 所示为 R22 与 R290 系统换热量和 COP 的对比。由图 3(a)可知,系统换热量随环境温度的降低而降低,使用两种制冷剂的系统差别较小,替换为 R290 的系统换热量下降约 4%。由图 3(b)可知,系统 COP 随环境温度的降低而降低,在 21 ℃工况时 R290 系统 COP>R22 系统,但 R290 系统性能衰减幅度>R22 系统,21 ℃以下工况时 R22 系统 COP>R290 系统。

表 3 实验工况

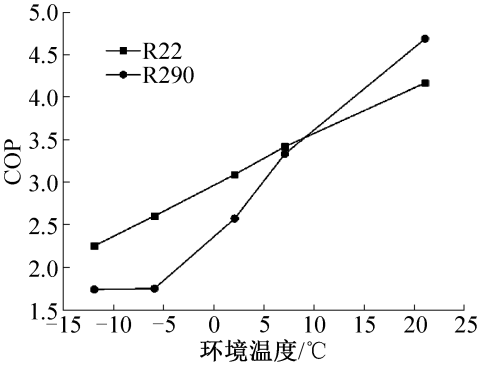
Tab.3 Experiments test conditions

制热工况	环境温度/℃	出水温度/℃
1	21	40
2	21	45
3	21	60
4	7	40
5	7	50
6	7	60
7	2	40
8	2	50
9	2	55
10	−6	40
11	−6	45
12	−6	50
13	−12	40
14	−12	45
15	−12	50

注:其中净水体积流量均为 7.8 m^3/h。



(a) 换热量

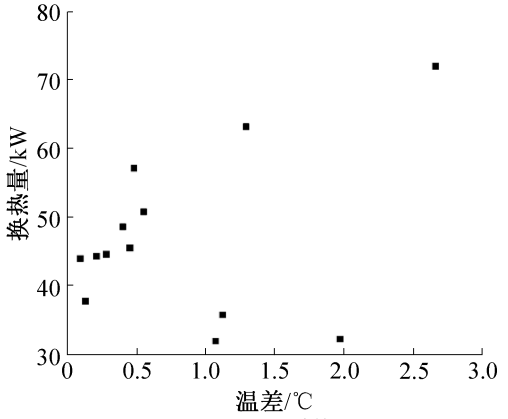


(b) COP

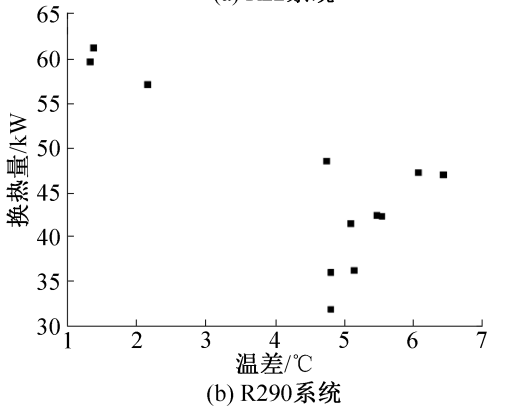
图 3 R22 与 R290 系统换热量与 COP 的对比

Fig.3 Comparison of heat exchange and COP between R22 and R290 system

由于 R290 的汽化潜热>R22,原 R22 系统所用的压缩机排量对于 R290 而言过大,而较大的制冷剂流量意味着同等换热量条件下系统所需的传热温差更大。图 4 所示为 R22 与 R290 系统的换热量对比。通过对比 R22 与 R290 系统冷凝器与出水温度间的温差和换热量之间的关系可知:R290 系统的整体传热温差>R22,且 R22 系统整体换热量>R290,因此 R22 系统整体的传热效率>R290 系统。值得注意的是 R22 在低温环境中制热能力出现明显的衰减(图 4(a)中下部三点),说明在低温环境中 R22 的传热效率较低而 R290 在低温时的传热效率变化相对稳定。这在二者 COP 的变化中也有所体现:R290 在-6 ℃以下的低温环境时 COP 变化趋于平稳而 R22 的 COP 衰减更为剧烈。另外由于在室温为 21 ℃时系统整体的换热需求较小、制冷剂流量整体较小,因此压缩机排量对 R290 系统的影响较小,凭借较大的汽化潜热 R290 系统此时的传热效率较高(图 4(b)左上三点所示),这也解释了为何在室温为 21 ℃时,R290 系统 COP>R22 系统。



(a) R22系统



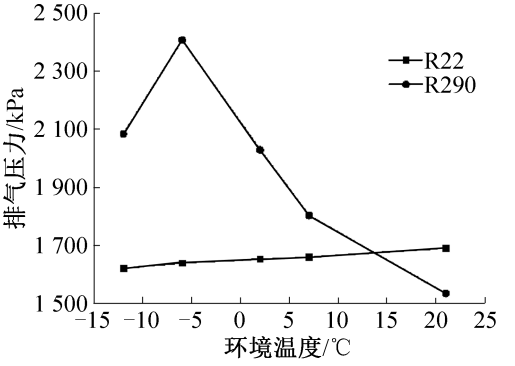
(b) R290系统

图 4 R22 和 R290 系统换热量对比

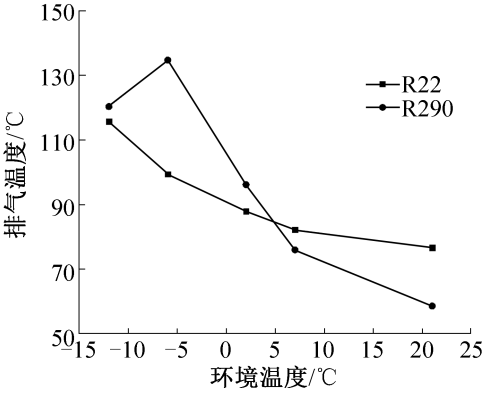
Fig.4 Comparison of heat exchange of R22 and R290 system

3.2 排气温度与压力的对比

为具体分析压缩机排量对系统性能的影响,对比了二者的排气温度和排气压力,如图 5 所示。由图 5(a)可知,R290 系统排气压力整体高于 R22 系统。R22 系统排气压力随环境温度的降低而略有降低,R290 系统排气压力随环境温度的降低先升高后降低,于-6 ℃时达到最高。由图 5(b)可知,R290 系统排气温度在 2 ℃以上工况时低于 R22 系统,在 2 ℃以下工况的低温环境中高于 R22 系统。R22 系统排气温度随环境温度的降低而升高,R290 系统排气温度随环境温度的降低先升高后降低,于-6 ℃时达到最高。



(a) 排气压力



(b) 排气温度

图 5 R22 与 R290 系统排气压力和排气温度的对比

Fig.5 Comparison of exhaust pressure and exhaust temperature between R22 and R290 system

这种变化趋势主要是由制冷剂与压缩机排量之间的匹配问题引起,当处于室温环境 21 ℃时,系统整体的换热需求较小、制冷剂流量小,因此压缩机排量对 R290 系统的影响较小,此时 R290 系统的排气压力与温度均<R22 系统。随着环境温度的降低,系统热负荷变大,此时不匹配的压缩机使 R290 系统的制冷剂流量大幅高于 R22 系统,说明 R290 系统压缩机负荷>R22 系统、R290 系统的排气压力与温度>R22 系统。在-6 ℃时,R290 系统排气温度与压力突然升高,这主要是由于在该工况条件下膨胀阀开度过小导致的系统过热度过大。

3.3 数据分析

通过分析上述数据可知,在 R22 系统中直接用 R290 进行替换时系统整体性能有所下降,系统换热

量与 COP 均有所衰减。在低温环境中 R290 系统的压缩机排气温度和排气压力均高于 R22 系统。由于过高的排气压力和排气温度会对压缩机的安全性造成影响,对系统运行较为不利。通过分析系统部件,可知上述现象出现的主要原因是 R22 系统压缩机排量过大,与 R290 不匹配。压缩机排量过大意味着 R290 制冷剂流量较大,因此为达到同水平的制热量,系统所需的传热温差也更大,这就造成 R290 的压缩机排气温度和压力更高[18]。因此为同时满足系统的安全性要求和提高 R290 在低温热泵系统中的整体性能,考虑在系统中更换与 R290 更为匹配的排量更小的压缩机。

4 系统优化

为保证 R290 低温热泵系统安全高效的运行,将原 R22 系统中的 $1.2\times^{-4}$ m^3 排量的压缩机更换为更适合 R290 的 $8.5\times^{-5}$ m^3 的小排量压缩机,此时系统 R290 的最佳充注量降为 2.6 kg。在相同环境工况下完成测试,并对比改进压缩机后的 R290 系统与 R22 系统性能,如图 6 所示。

由于使用了更小排量的压缩机,改进后的 R290 系统总体换热量略小于原 R22 系统,但此时 R290 系统整体 COP 较原 R22 系统提升约 6.5%。

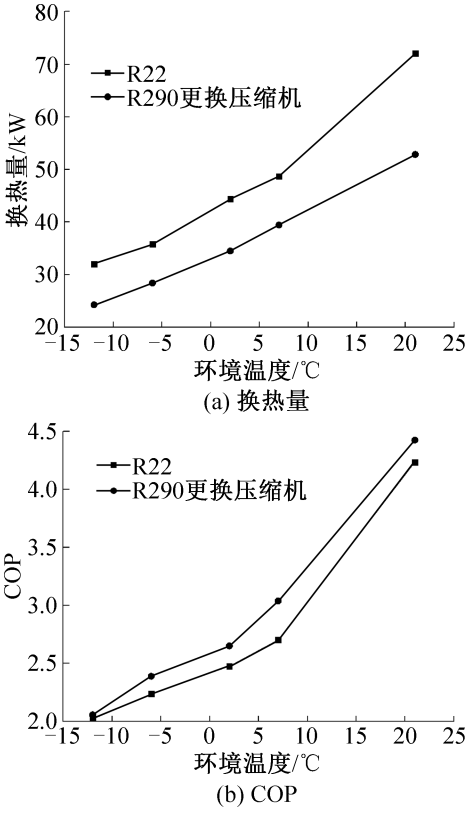


图 6 R22 系统与改进后的 R290 系统换热量和 COP 对比

Fig.6 Comparison of heat exchange and COP between R22 system and improved R290 system

图 7 所示为 R22 系统与改进后的 R290 系统排气压力和排气温度对比。从压缩机运行状况可知改进后的 R290 系统的排气压力与温度均得到大幅改善:在 2 ℃以上工况时,改进后的 R290 系统能有效降低压缩机的排气压力,在低温环境 2 ℃以下工况时 R290 系统也能达到与 R22 系统相同的水平。改进后的 R290 系统同时也能大幅降低系统的排气温度,特别是在低温环境下能使原 R22 系统的排气温度下降 36%以上。

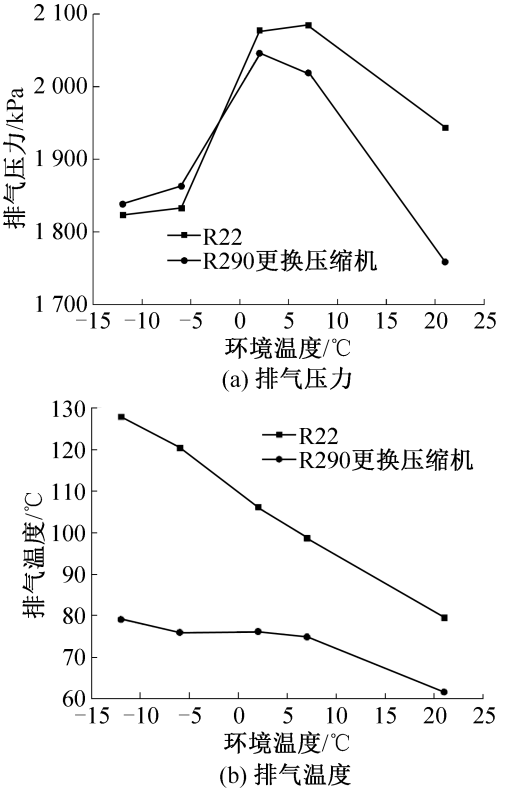


图 7 R22 系统与改进后的 R290 系统排气压力和排气温度对比

Fig.7 Comparison of exhaust pressure and exhaust temperature between R22 system and improved R290 system

由以上数据可知,对压缩机进行优化后,R290 低温热泵系统整体性能有一定幅度的提升,特别是大幅降低了压缩机的排气温度,有效提升了系统整体的安全性能。

5 结论

本文在不同工况下分别对 R290 和 R22 系统进行性能测试,选择不同环境温度,同一出水温度下的制热量、COP 及排气压力、排气温度等参数进行对比。从实验的角度分析了低温热泵系统中 R290 替

代 R22 的可行性,通过对比的实验结果可得出如下结论:

1)R290 的热物理性质基本与 R22 相近,在汽化潜热、ODP、GWP 等方面优于 R22,具备替代 R22 的基本条件。

2)针对 R290 低温热泵系统中压缩机排量进行优化后,能有效降低压缩机的排气温度,提高系统的整体性能。

3)经过压缩机优化后的 R290 低温热泵系统性能较原 R22 系统整体上有较大幅度的提升:COP 提高 6.5%,低温环境下排气温度下降 36%以上。

4)在低温热泵系统中使用 R290 替代 R22 具有效率高、安全性好且改动成本低的特点,具有良好的应用前景。

参考文献

[1] KIM S G, KIM M S, RO S T. Experimental investigation of the performance of R22, R407C and R410A in several capillary tubes for air-conditioners[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5):521-531.

[2] 刘忠民. R22 制冷剂的替代技术[J]. 制冷与空调(北京),2001,1(3):47-53.(LIU Zhongmin. Study on alternative refrigerant of R22[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2001, 1(3):47-53.)

[3] MOHANRAJ M, JAYARAJ S, MURALEEDHARAN C. Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants—a review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(1):108-119.

[4] ROCCA V L, PANNO G. Experimental performance evaluation of a vapour compression refrigerating plant when replacing R22 with alternative refrigerants[J]. Applied Energy, 2011, 88(8):2809-2815.

[5] BOLAJI B O. Performance investigation of ozone-friendly R404A and R507 refrigerants as alternatives to R22 in a window air-conditioner[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11):3139-3143.

[6] 张杰, 李德英. R410A 替代 R22 制冷剂的研究[C]//2011 中国制冷学会学术年会论文集.南京:中国制冷学会, 2011.(ZHANG Jie, LI Deying. A Study on replacing refrigerant R410A With R22[C]//Proceedings of 2011 CAR Annual Meeting. Nanjing: Chinese Association of Refrigeratiion, 2011.)

[7] 李晓燕, 闫泽生. R417A 在热泵热水系统中替代 R22 的实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(4):1-4. (LI Xiaoyan, YAN Zesheng. Experimental study on replacement of R22 with R417A in heat pump heating water system[J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(4):1-4.)

[8] 张明方, 李鹏荣. R417A 替代家用空调器用 R22 的实验研究[J]. 制冷与空调(北京), 2006, 6(5):80-82. (ZHANG Mingfang, LI Pengrong. Experimental study on room air conditioner using R417A instead of R22[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(5):80-82.)

[9] 史琳, 朱明善. 家用/商用空调用 R32 替代 R22 的再分析[J]. 制冷学报, 2010, 31(1):1-5. (SHI Lin, ZHU Mingshan. Re-analysis on using R32 to substitute for R22 in household/commercial air-conditioning[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1):1-5.)

[10] 姚寿广, 王骏. 小型空调装置中 R22 与替代工质 R290 的性能对比研究[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2002,16(5):70-73. (YAO Shouguang, WANG Jun. Analysis of performance for R22 and the alternative refrigerant R290 in unit condition system[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition), 2002, 16(5):70-73.)

[11] RAHADIYAN L, GIM Y G, YOU S C, et al. Experimental study of Propane (R290) as an alternative refrigerant of R22[J]. Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2006(6):173-179.

[12] CASTRO J B, URCHUEGUÍA J F, CORBERÁN J M, et al. Optimized design of a heat exchanger for an air-to-water reversible heat pump working with propane (R290) as refrigerant: modelling analysis and experimental observations [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(14/15): 2450-2462.

[13] 杨瑞杰, 杨忠学, 孙蓉,等. 自然制冷剂 R290 与冷冻机油的相溶性研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(5):23-27. (YANG Ruijie, YANG Zhongxue, SUN Rong, et al. Investigation on the miscibility of lubricants with natural refrigerant R290[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5):23-27.)

[14] 李廷勋, 杨九铭, 曾昭顺,等. R290 灌注式替代 R22 空调整机性能研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(4):31-34. (LI Tingxun, YANG Jiuming, ZENG Zhaoshun, et al. Experiment on R290 substituting for R22 in a room air-conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4):31-34.)

[15] 张于峰, 唐汝宁. 丙烷及其混合物作为空调制冷剂可行性研究[J]. 制冷学报, 1999,20(2):18-24. (ZHANG Yufeng, TANG Runing. The theoretical and experimental research for natural refrigerant Propane (R290) and its mixtures as substitute for R22[J]. Journal of Refrigeration, 1999,20(2):18-24.)

[16] 王倩. 房间空调器 R290 替代 R22 的可行性分析[J]. 广东石油化工学院学报, 2005, 15(3):38-42. (WANG Qian. The feasibility study of Propane(R290) as substitute for R22 in room air conditioner[J]. Journal of Guandong College Petrochemical Technology, 2005,15(3):38-42.)

[17] 家用和类似用途电器的安全热泵、空调器和除湿机的特殊要求:GB 4706.32—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2013.(Household and similar electrical appliances—safety—particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers: GB 4706.32—2012[S].Beijing: Standards Press of China,2013.)

[18] 何国庚, 刘强, 倪敏慧,等. R290 替代 R22 的空调用旋转压缩机优化[C]//2009 中国制冷学会学术年会论文集. 天津:中国制冷学会, 2009.(HE Guogeng, LIU Qiang, NI Minhui, et al. Optimization of rotary compressor for air-conditioner using R290 to replace R22[C]//Proceedings of 2009 CAR Annual Meeting. Tianjin: Chinese Association of Refrigeration, 2009.)

通信作者简介

陈江平,男,博士,教授,博士生导师,上海交通大学制冷与低温工程研究所,(021)34206775, E-mail: jpchen_sjtu@163.com。研究方向:车用空调、节能环保技术、换热器设计优化等。

About the corresponding author

Chen Jiangping, male, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206775, E-mail: jpchen_sjtu@163.com. Research fields: mobile air-conditioning technology, energy saving and environmental protection technology, thermal design and optimization of heat exchangers.

(上接第 71 页)

[22] 袁朝阳,陶乐仁,虞中旸,等. 环境温度对空气源热泵热水器系统性能的影响[J]. 流体机械, 2017, 45(8): 48-52. (YUAN Chaoyang, TAO Leren, YU Zhongyang, et al. The effect of ambient temperature on the performance of air-source heat pump water heater system[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(8): 48-52.)

通信作者简介

吴学红,男,副教授,郑州轻工业学院能源与动力工程学院,18860373268,E-mail: wuxh1212@163.com。研究方向:制冷及其设备节能技术。现在进行的研究项目有:国家自然科学基金项目(51476148),河南省杰出青年基金项目(154100510014)和河南省教育厅创新人才团队项目(17IRTSTHN029)。

About the corresponding author

Wu Xuehong, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, +86 18860373268, E-mail: wuxh1212@163.com. Research fields: refrigeration and equipment energy-saving technology. The author takes on project supported by the Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51476148), Excellent Youth Foundation of Henan Scientific Committee and Innovation Scientists (No.154100510014) and Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province (No. 17IRTSTHN029).