

文章编号:0253-4339(2019)03-0066-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.03.066

供水温度对低温空气源热泵制热性能的影响

吴学红¹ 徐 帅¹ 桂许龙¹ 何永宁¹ 苟秋平²

(1 郑州轻工业学院能源与动力工程学院 郑州 450000; 2 郑州欧纳尔冷暖科技有限公司 郑州 451100)

摘 要 本文通过设置环境温度分别为-12℃、-6℃,初始水温为20℃,开启热泵进行加热,研究了不同供水温度对空气源热泵的制热量、系统功耗、能效、排气温度、压缩比等的影响。结果表明:在相同初始水温下,随着加热的进行,压缩机的制热量先增加后降低,供水温度为40℃时的制热量最大;当环境温度为-12℃,供水温度从25℃增至55℃时,系统功耗从11 905 W增至24 417 W,增加了105%,系统能效从4.03降至2.11,下降了47.6%。
关键词 低温空气源热泵;供水温度;制热量;制热能效
中图分类号:TB61⁺1; TQ051.5; TU832 **文献标识码**: A

Effect of Water Supply Temperature on the Performance of Low Temperature Air Source Heat Pump System

Wu Xuehong¹ Xu Shuai¹ Gui Xulong¹ He Yongning¹ Gou Qiuping²

(1.School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450000, China; 2. Zhengzhou Onaer Cold and Warm Technology Co., Ltd., Zhengzhou, 451100, China)

Abstract In this paper, the effect of the water supply temperature on the thermal performance of a heat pump is analyzed. The influence of the water supply temperature on the performance of a heat pump system is investigated for an ambient temperature -12℃ and -6℃ and an initial water supply temperature of 20℃. The experimental results indicate that, under the same initial temperature, the heating capacity of the compressor system first increased and then decreased, with a maximum heating capacity reached for a water supply temperature of 40℃. When the ambient temperature was at -12℃, the water was heated by the heat pump from 25℃ to 55℃. The power consumption of the system increased from 11 905 W to 24 417 W, an increase of 105%, and the system energy efficiency decreased from 4.03 to 2.11, a decrease of 47.6%.
Keywords low temperature air source heat pump; water supply temperature; heating capacity; COP

传统燃煤供暖方式严重污染环境,清洁能源的使用已成为大家关注的焦点^[1]。空气源热泵利用逆卡诺循环原理,消耗少量电能,可将空气中的低品位热能转为高品位热能来制取所需冷量或生活热水^[2]。空气源热泵虽具有节能、环保、高效、安装使用方便等特点,但在北方低温工况下运行时会出现排气温度过高、制热量骤减、能效较低、容易结霜等问题,阻碍了其发展和应用^[3-4],国内外学者针对这些问题展开了大量的研究。
Zhang Ze 等^[5-7]研究了空气源热泵热水器不同制冷剂充注量和膨胀阀开度下的制热特性,结果表明,热泵的制热性能随充注量的增加,先增加后减小,在最佳充注量下,不同的膨胀阀开度对系统的性能影

响较大。Jiang Mingliu 等^[8-10]研究了电子膨胀阀调节对空气源热泵热水器性能的影响,研究表明,在电子膨胀阀开度一定时,制热量和能效存在最大值,当开度不同时,加热初期开度越大制热量越大,而后期则相反。O. Ibrahim 等^[11-12]对空气源热泵热水器的冷凝器盘管进行数值模拟,研究冷凝盘管的长度对热泵性能的影响,考虑到成本因素,最终确定了与最佳能效匹配的最短冷凝盘管长度。张洁等^[13]对空气源热泵的节流机构进行了改进和优化,研究表明,环境温度较高时,采用粗而短的毛细管性能较好,而环境温度较低时,采用细而长的毛细管性能较好。Peng Jingwei 等^[14]在不同外温和不同水温条件下,对比了热泵热水器不同节流设备的性能,研究发现电子膨胀

基金项目:国家自然科学基金(51476149)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51476149).)
收稿日期:2018-05-11;修回日期:2018-06-19

阀仍是热泵系统中最佳的节流设备,节流短管次之,毛细管最差。曲明璐等^[15]为解决复叠式空气源热泵除霜问题,提出增设蓄热器的除霜系统,与传统热气旁通除霜相比,其除霜时间明显缩短,除霜能耗大幅降低。Xue Liping 等^[16]研究了环境温度、相对湿度、迎面风速对翅片管式换热器结霜性能的影响,研究表明虽然更低的环境温度或相对湿度可以降低换热器结霜量,但会增加霜层密度,提高迎面风速可以减小制热能力的下降程度。张超等^[17]模拟了气冷器进水流量对热泵热水器性能的影响,发现系统制热量、COP 及出口水温均随进水流量的增加而增加。吕静等^[18]研究了水箱水温对 CO₂ 热泵热水器性能的影响,结果表明:随着水温的升高,功耗增加,系统制热量和能效降低,并根据实验结果对水箱提出了改进方案,有效提高了系统的性能。袁朝阳等^[19]研究了初始水温对空气源热泵热水器制热性能的影响,结果表明初始水温相同时,随着加热的进行,COP 下降,当初始水温不同时,受压缩机吸气带液

的影响,COP 先升高后下降。凌拥军等^[20]研究了水侧温度对 CO₂ 空气源热泵热水机性能的影响,结果表明在进水温度不变时,随着出水温度升高,系统 COP 降低,在出水温度不变时,随着进水温度的升高,系统 COP 也降低。

从以上研究进展可以看出,为了提高低温空气源热泵的制热性能,前人在热泵系统匹配和换热器结霜融霜方面进行了较多研究,但很少以供水温度作为研究的切入点,来改善热泵的制热性能,关于空气源热泵将水加热至何种供水温度最节能的研究也较少。本文从提高低温空气源热泵的制热性能出发,研究供水温度对热泵制热性能的影响,找到最节能的供水温度点,为实际工程应用提供参考。

1 实验原理及方法

1.1 实验设备

低温空气源热泵性能检测系统如图 1 所示,由制冷剂循环和水循环两部分组成。

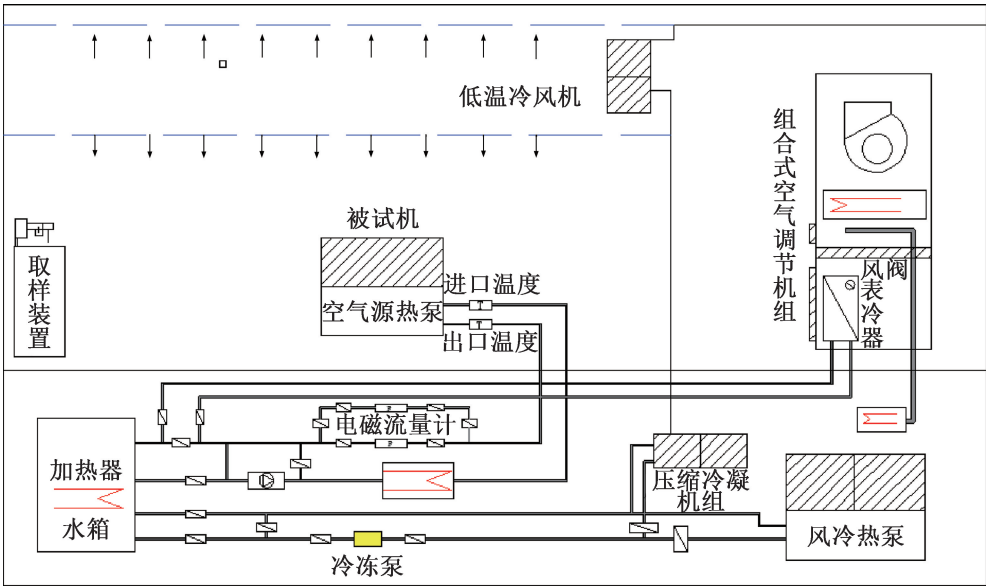


图 1 低温空气源热泵性能检测系统

Fig.1 The test system of low temperature air source heat pump performance

制冷剂循环部分由压缩机、板式冷凝器、高压贮液器、翅片式蒸发器、过滤器、气液分离器、经济器、电子膨胀阀等组成。压缩机采用带中间补气的涡旋式压缩机,定频 50 Hz,额定制热量 92.2 kW,额定功率 13 kW。制冷剂选用 R410A,充注量为 20 kg。冷凝器采用高效的钎焊板式换热器,规格为 495 mm×247 mm×201 mm,传热面积为 6.4 m²,总板片数为 66,有效板片数为 64。翅片管式风冷式蒸发器采用铜管铝翅片,肋片厚度为 0.10 mm,肋片间距为 2.5 mm,换热器规格为 1 850 mm×1 000 mm×65 mm,3 排 40 孔,

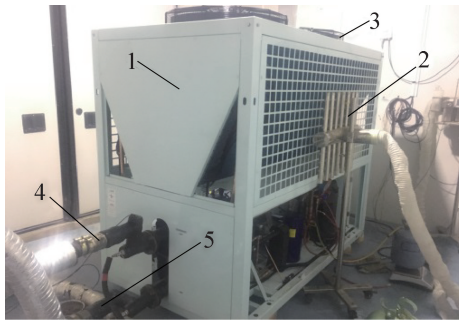
孔距为 25 mm,排距为 21.65 mm。节流机构采用电子膨胀阀,可对热泵工况进行更高精度的调节。

水循环部分由循环水泵,电加热箱和蓄水箱、电磁流量计等组成,水泵扬程为 20 m,水体积流量为 12.87 m³/h,电加热箱可用来调节水箱温度,蓄水箱规格为 1.2 m×1.2 m×1.2 m,体积为 1.73 m³,热水从水箱上部流入,下部流出,使热泵系统完成对水的循环加热。

该检测系统用于模拟低温空气源热泵室外运行环境。当热泵开启制热模式运行时,组合式空气调节

机组通过开启变频风机,辅助压缩冷凝机组释放冷量,冷量由低温冷风机扩散到被试机运行空间内,平衡被试机产生的热负荷,并按照国标要求,使实验台系统维持实验所需的环境温度;为了防止蓄水箱的温度过高,用风冷热泵机组来调节蓄水箱温度;取样装置用来测量计算实验操作系统的干湿球温度和相对湿度。

实验测量的参数有:空气相对湿度,蒸发器进风温度,进、供水口温度,板换温度、盘管温度、压缩机吸排气温度及其对应的压力,水泵流量等。空气相对湿度和蒸发器进风温度由取样风机测量,测量精度为 0.01℃,进出口水温由康铜-铂铜温度传感器测量,测量精度为 0.01℃,冷凝器板换温度、蒸发器盘管温度、压缩机吸排气温度由布置在其上的热电偶测量,压缩机吸排气压力由压力传感器测量,水泵流量由电磁流量计测量,实验装置如图 2 所示。



1 空气源热泵;2 取样风机装置;3 风机;4 供水口;5 进水口。

图 2 低温空气源热泵的实验装置
Fig.2 Experimental installation of low temperature air source heat pump

1.2 实验方法

本实验在低温热泵性能实验室中进行,选择低温空气源热泵机组进行实验,根据 GB/T 25127.1—2010 低环境温度空气源热泵(冷水)机组^[21]的要求,调节组合式空气调节机组,设置室外温度-12℃,并添加室外温度-6℃进行对照实验,控制电子膨胀阀开度为 25°(反复实验确定的最佳开度),调节水泵循环水体积流量为 12.87 m³/h,设置初始水温为 20℃,开启热泵加热,提高系统供水温度,当供水温度分别为 25、30、35、40、45、50、55℃时,分析热泵机组的吸排气温度、压缩比、制热量、制热能效、输入功率的变化规律,总结影响空气源热泵能效的重要因素。

1.3 计算公式

在热泵性能检测实验室,可测得总功耗 W、进口水温 $t_{\text{wat, in}}$ 、供水温度 $t_{\text{wat, out}}$,通过理论计算可得:

系统制热量 Q_{hot} :

$$Q_{\text{hot}} = c p_{\text{水}} q_{\text{V}} (t_{\text{wat, out}} - t_{\text{wat, in}})$$

热泵 COP:

$$\text{COP} = Q_{\text{hot}} / W$$

2 实验结果分析

2.1 供水温度对热泵系统制热量的影响

图 3 所示为系统制热量随供水温度的变化。可知,当外界环境温度相同时,低温空气源热泵将水从 20℃加热至 55℃,制热量呈先升高后降低的趋势,即制热量存在一个最大值,这是因为随着加热过程的进行,热泵系统内流过的制冷剂流量不断增加,压缩机的吸排气温度和压缩比逐渐升高,制热量增加,当加热至约 40℃时,制热量达到最大值(环境温度-12℃时,约为额定制热量的 0.6 倍),且能满足用户对供热的需求。当继续加热,在蒸发温度不变的情况下,冷凝温度不断增加,冷凝压力增加,压缩机的排气温度和压缩比增加,超过正常范围值,压缩机容积效率降低,制热过程开始恶化,导致热泵系统的制热量减小,系统制热量将不能满足用户需求。

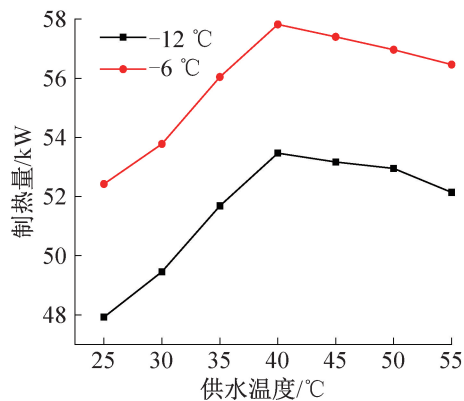


图 3 系统制热量随供水温度的变化
Fig.3 The heating capacity changes with water supply temperature

此外,对于环境温度-12℃和-6℃两种工况,当供水温度接近 40℃时,制热量均存在一个最大值。这是因为同一环境温度下,热泵加热水的过程中,系统的质量流量呈先增加后减小的趋势^[22],在供水温度接近 40℃时,系统质量流量达到最大值,即系统的制热量也达到一个最大值,但不同的环境温度所对应的最佳供水温度也不同,在工程实际应用中,应根据不同环境温度确定对应的最佳供水温度,以确定最佳运行工况点。

由图 3 还可知,在相同的供水温度下,提高环境

温度,热泵系统的制热量增加。这是因为提高环境温度,系统的蒸发温度上升,压缩比下降,热泵制热性能改善,当供水温度为 40 ℃ 时,将环境温度从-12 ℃ 升至-6 ℃,制热量从 53 469 W 升至 57 816 W,增幅为 8.1%。

2.2 供水温度对热泵系统功耗的影响

图 4 所示为系统功耗随供水温度的变化。由图 4 可知,当外界环境温度相同时,低温空气源热泵加热水的过程中,热泵系统的总功耗呈上升趋势。这是因为环境温度不变时,蒸发压力不变,而冷凝压力受供水温度变化的影响,当供水温度增加时,冷凝温度、冷凝压力、压缩比、压缩机的输入功率均增加,最终导致系统的总功耗 W (包括压缩机输入功率和风机的功率等)也随之增加。

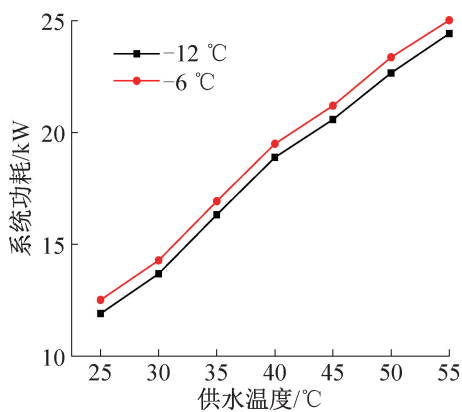


图 4 系统功耗随供水温度的变化

Fig.4 The power consumption changes with water supply temperature

热泵在环境温度-12 ℃ 工况下运行,供水温度从 25 ℃ 增至 55 ℃,系统总功耗从 11 905 W 增至 24 417 W,增加 105%,因此,热水被加热的过程中,总功耗增加十分迅速。

由图 4 还可知,在相同的供水温度情况下,提高环境温度,热泵系统功耗增加。这是因为在冷凝温度不变的情况下,环境温度、蒸发温度、蒸发压力均增加,压缩比下降,吸气比容减小,制冷剂的质量流量增加,引起压缩机的输入功率增加,而风机等设备的功率基本不变,当供水温度为 40 ℃ 时,将环境温度从-12 ℃ 提高至-6 ℃,热泵系统功耗从 18 887 W 升至 19 495 W,增幅为 3.2%。

2.3 供水温度对热泵系统 COP 的影响

图 5 所示为系统 COP 随供水温度的变化。可知,当外界环境温度相同时,低温空气源热泵加热水的过程中,COP 不断下降。这是因为当蒸发温度不变,随着供水温度的升高,冷凝压力不断增加,压缩比

增加,制热量的增加速率<输入功率的增加速率,制热效率下降。环境温度为-12 ℃ 时,将水从 25 ℃ 加热至 55 ℃,系统能效从 4.03 降至 2.11,整个系统能效下降 47.6%。因为水被加热到 40 ℃ 时,制热量最大,且能满足人们的供热需求,若继续加热,能效下降,制热恶化,供热不足,所以,环境温度-12 ℃ 时,供水温度 40 ℃ 为最佳供水温度点。

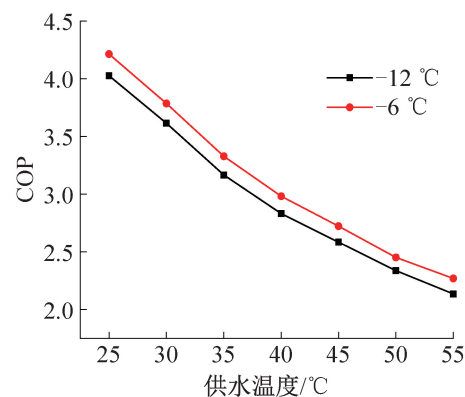


图 5 系统 COP 随供水温度的变化

Fig.5 COP changes with water supply temperature

由图 5 还可知,在相同的供水温度下,提高环境温度,热泵系统 COP 增加。这是因为当冷凝温度不变时,提高环境温度,蒸发温度和蒸发压力增加,压缩比下降,吸气比容减小,制冷剂的质量流量增加,制热效果改善,系统的制热能效增加,当供水温度为 40 ℃ 时,将环境温度从-12 ℃ 提高至-6 ℃,系统能效从 2.83 升至 2.97,增幅为 4.9%。

2.4 供水温度对热泵系统排气温度的影响

图 6 所示为系统排气温度随供水温度的变化。由图 7 可知,当外界环境温度相同时,低温空气源热泵将水从 20 ℃ 加热至 55 ℃,压缩机的排气温度不断增加。这是因为在蒸发温度不变时,水温增加,冷凝温度、冷凝压力、压缩比均增加,引起压缩机的吸气比容增加,流经整个回路的制冷剂流量减少,单位质量的制冷剂需要带走的热量增加,最终导致系统的排气温度上升。

由图 6 还可知,供水温度不变时,提高环境温度,压缩机的排气温度下降。这是因为当冷凝温度不变时,提高环境温度,蒸发温度和蒸发压力上升,压缩比下降,流经整个回路的制冷剂流量增加,单位质量的制冷剂需要带走的热量减小,最终排气温度下降。当供水温度为 40 ℃ 时,环境温度从-12 ℃ 升至-6 ℃,排气温度从 83 ℃ 降至 78 ℃,降幅为 6.0%。

2.5 供水温度对热泵系统压缩比的影响

图 7 所示为系统压缩比随供水温度的变化。由

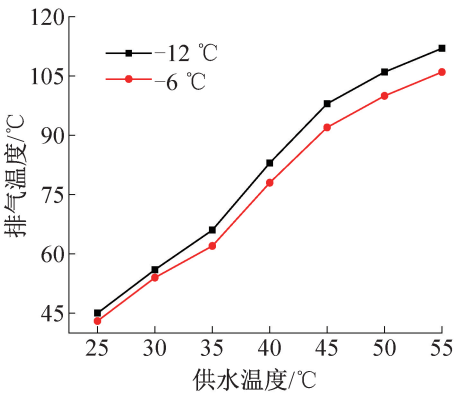


图 6 排气温度随供水温度的变化

Fig.6 The exhaust temperature changes with water supply temperature

图 7 可知,当外界环境温度相同时,低温空气源热泵将水从 25 °C 加热至 55 °C,压缩机的压缩比不断增加。这是因为当环境温度不变时,蒸发压力不变,随着供水温度的升高,对应的冷凝温度升高,压缩机的排气温度和冷凝压力升高,引起系统的压缩比增加。

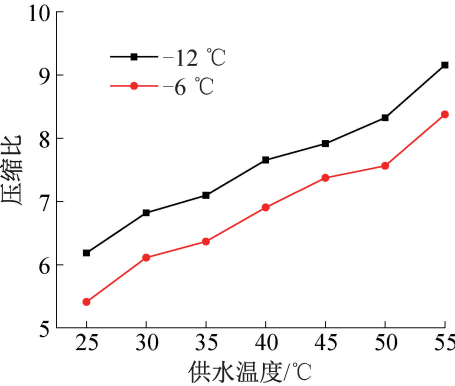


图 7 系统压缩比随供水温度的变化

Fig.7 The compression ratio changes with water supply temperature

由图 7 还可知,供水温度不变时,提高环境温度,压缩机的压缩比下降。这是因为供水温度不变时,冷凝压力不变,提高环境温度,蒸发温度和蒸发压力上升,引起压缩比下降。当供水温度为 40 °C 时,将环境温度从 -12 °C 升至 -6 °C,压缩比从 7.66 降至 6.91,降幅为 9.8%。

3 结论

本文从提高低温空气源热泵的制热性能出发,设定相同的初始水温,研究供水温度对热泵系统各制热参数的影响,得到如下结论:

1) 环境温度 -12 °C 和 -6 °C 两种工况,在持续

提高热泵系统供水温度的过程中,制热量呈先增加后降低的趋势。将水加热至约 40 °C 时,热泵系统制热量达到最大值,如需继续加热,建议采用其他加热方式(如太阳能辅助加热等),以达到节能目的。

2) 环境温度 -12 °C 工况,供水温度从 25 °C 增至 55 °C 时,系统功耗从 11 905 W 增至 24 417 W,增加 105%,功耗增长迅速,建议采用变速风机,以控制系统功耗的增加。

3) 环境温度 -12 °C 工况,低温空气源热泵将水从 25 °C 加热至 55 °C,系统能效从 4.03 降至 2.11,整个系统能效下降 47.6%,将环境温度升至 -6 °C,制热性能得到改善,因此,可采用提高环境温度等措施提高系统制热能效。

4) 当供水温度为 40 °C 时,将环境温度从 -12 °C 升至 -6 °C,系统制热量从 53 469 W 升至 57 816 W,增幅为 8.1%,系统功耗从 18 887 W 增至 19 495 W,增幅为 3.2%,系统能效从 2.83 升至 2.97,增幅为 4.9%,排气温度从 83 °C 降至 78 °C,降幅为 6.0%,压缩比从 7.66 降至 6.91,降幅为 9.8%。

符号说明

- t ——温度,℃
- $\rho_{\text{水}}$ ——密度,kg/m³
- q_v ——体积流量,m³/s
- c ——比热容,kJ/(kg·℃)
- W ——功耗,W
- Q_{hot} ——制热量,W

参考文献

[1] 吴章炜,李瑛,许治勇,等. 低温空气源热泵研究进展[J].轻工机械,2017,35(4):96-100. (WU Zhangwei, LI Ying, XU Zhiyong, et al. Research progress of low temperature air source heat pump[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(4): 96-100.)

[2] 闫丽红,王景刚,鲍玲玲,等. 低温空气源热泵研究新进展[J]. 建筑节能, 2016(8): 22-24. (YAN Lihong, WANG Jinggang, BAO Lingling, et al. New development of low temperature air source heat pump[J]. Building Energy Efficiency, 2016(8): 22-24.)

[3] 王泮浩,王志华,郑煜鑫,等. 低温环境下空气源热泵的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5): 47-54. (WANG Fenghao, WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, et al. Research status and prospect of air source heat pump in low temperature environment [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5): 47-54.)

[4] 江明旒,吴静怡,孙鹏,等. 两级冷凝热泵热水系统的实

- 验研究[J].制冷学报,2010,31(1):6-10.(JIANG Mingliu, WU Jingyi, SUN Peng, et al. Experimental study of two stage condensing heat pump hot water system[J]. Journal of Refrigeration,2010, 31(1): 6-10.)
- [5] ZHANG Ze, DONG Xiaojun, REN Zheng, et al. Influence of refrigerant charge amount and EEV opening on the performance of a transcritical CO₂ heat pump water heater[J]. Energies, 2017, 10: 1521.
- [6] 王志华,郑煜鑫,郝吉波,等. R134a 空气源热泵热水器实验研究与性能分析[J].制冷学报, 2014, 35(3):71-76. (WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, HAO Jibo, et al. Experimental research and performance analysis of R134a air source heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration,2014,35(3):71-76.)
- [7] 刘荣,陶乐仁,高立博,等. 小型空气源热泵热水机组实验研究[J].低温与超导,2011,39(2):64-68. (LIU Rong, TAO Leren, GAO Libo, et al. Experimental study of small air source heat pump hot water unit[J]. Low Temperature and Superconductivity,2011,39(2):64-68.)
- [8] JIANG Mingliu, WU Jingyi, WANG Ruzhu, et al. Research on the control laws of the electronic expansion valve for an air source heat pump water heater[J]. Building and Environment, 2011, 46(10): 1954-1961.
- [9] 李卫国,郭宪民,孙涛. 使用电子膨胀阀的热泵热水器动态性能数值模拟与实验研究[J].制冷学报,2011,32(4):25-29. (LI Weiguo, GUO Xianmin, SUN Tao, et al. Numerical simulation and experimental study on dynamic performance of heat pump water heater with electronic expansion valve[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(4): 25-29.)
- [10] 虞中旻,陶乐仁,袁朝阳,等. 电子膨胀阀调节对空气源热泵热水器性能的影响[J]. 制冷学报, 2017, 38(5):65-70. (YU Zhongyang, TAO Leren, YUAN Chaoyang, et al. Effect of electronic expansion valve on the performance of air source heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(5):65-70.)
- [11] IBRAHIM O, FARDOUN F, YOUNES R, et al. Air source heat pump water heater; dynamic modeling, optimal energy management and mini-tubes condensers [J]. Energy, 2014, 64:1102-1116.
- [12] ZHANG J, WANG R Z, WU J Y. System optimization and experimental research on air source heat pump water heater [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27 (5/6): 1029-1035.
- [13] 张洁,张良俊,王如竹,等. 空气源热泵热水器系统优化计算及实验研究[J].太阳能学报,2007,28(3):286-290. (ZHANG Jie, ZHANG Liangjun, WANG Ruzhu, et al. Optimization calculation and experimental study of air source heat pump water heater system[J]. Acta Energaie Solaris Sinical, 2007, 28 (3):286-290.)
- [14] PENG Jingwei, LI Hui, ZHANG Chunlu. Performance comparison of air-source heat pump water heater with different expansion devices [J]. Applied Thermal Engineering, 2016,99:1190-1200.
- [15] 曲明璐,李天瑞,樊亚男,等. 复叠式空气源热泵蓄能除霜与常规除霜特性实验研究[J].制冷学报,2017, 38(1):34-39. (QU Minglu, LI Tianrui, FAN Yanan, et al. Experimental study on characteristics of energy storage defrosting and conventional defrosting for cascade air source heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1): 34-39.)
- [16] XUE Liping, GUO Xianmin, XING Zhen. Experimental study of frost growth characteristics on surface of fin-tube heat exchanger[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 5114-5121.
- [17] 张超,吕新刚,胡冬阳,等. 低温空气源 CO₂ 热泵热水器系统特性研究[J]. 流体机械, 2017, 45(11):66-71. (ZHANG Chao, LYU Xingang, HU Dongyang, et al. Study on system characteristics of low temperature air source CO₂ heat pump water heater [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(11):66-71.)
- [18] 吕静,任莹莹,杨杰,等. 水箱水温对 CO₂ 热泵热水器性能影响的实验研究[J].制冷学报, 2012,33(6):73-78. (LYU Jing, REN Yingying, YANG Jie, et al. Experimental study on the effect of water tank temperature on the performance of CO₂ heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration, 2012,33(6): 73-78.)
- [19] 袁朝阳,陶乐仁,虞中旻. 初始水温对空气源热泵热水器系统性能的影响[J].制冷学报,2017,38(6):73-79. (YUAN Chaoyang, TAO Leren, YU Zhongyang. Effect of initial water temperature on the system performance of air source heat pump water heater [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(6):73-79.)
- [20] 凌拥军,袁旭东,胡继孙,等. 水侧温度对 CO₂ 空气源热泵热水机性能影响的试验研究[J].制冷与空调(北京),2017,17(9):40-42. (LING Yongjun, YUAN Xudong, HU Jisun, et al. Experimental study on the effect of water side temperature on the performance of CO₂ air source heat pump[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017,17(9):40-42.)
- [21] 低环境温度空气源热泵(冷水)机组第一部分:工业或商业用及类似用途的热泵(冷水)机组:GB/T 25127.1—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010. (Low ambient temperature air source heat pump(cold water) unit the first part:heat pumps (cold water) units for industrial or commercial use and similar purposes: GB/T 25127.1—2010 [S]. Beijing:China Standard Press,2010.)

[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 的空调用旋转变压器优化[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.)

(上接第 71 页)

[22] 袁朝阳,陶乐仁,虞中暘,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

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.

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).