文章编号:0253-4339(2019) 03-0079-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.03.079

带废热回收的家用热泵热水装置实验研究

范秀颂　许树学　马国远　邵月月

(北京工业大学环境与能源工程学院　北京　100124)

摘　要　为回收家庭洗浴废水中的废热,提高能源利用率,本文设计了一种带废热回收的热泵热水装置,并通过搭建实验台研究了该装置制取热水的循环性能。在进水温度为 16 ℃,出水温度为 36~46 ℃时进行实验测试,研究制热量、制热 COP、压缩机功率、出水量等参数随出水温度和制冷剂充注量的变化规律。实验结果表明:适当提高制冷剂充注量有利于制热量、制热 COP 的稳定,在最小的制冷剂充注量为 1.4 kg 时,获得最大制热量为 7.9 kW,制热 COP 为 7.7;在出水温度为 36~46 ℃,随出水温度的升高,压缩机功率增大,出水体积流量下降。该装置能够有效回收废水中的热量,制热量稳定在约 7.5 kW,制热 COP 大于 6.0。

关键词　废热回收;热泵热水器;制冷剂充注量

中图分类号:TQ051.5; X703　　**文献标识码**: A

Experimental Study on Domestic Heat Pump Water Heater with Waste Heat Recovery

Fan Xiusong　Xu Shuxue　Ma Guoyuan　Shao Yueyue

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

Abstract　To recover waste heat from household bath wastewater and improve energy efficiency, a heat pump water heater with waste heat recovery was designed. Experimental benches were set up for experimental studies. The experiment was carried out with an inlet water temperature of 16 ℃ and an outlet water temperature of 36-46 ℃ to study the variation of parameters such as the heating capacity, heating coefficient of performance (COP), compressor power and volume flow of water outlet with the water outlet temperature and refrigerant charge. The experimental results show that increase refrigerant charge appropriately is beneficial to the heating and heating COP stability. The maximum heating capacity is 7.9 kW, and the heating COP is 7.7 at the minimum refrigerant charge 1.4 kg. The compressor power increases and the volume flow of water decreases with outlet water temperature from 36 ℃ to 46 ℃. The device can effectively recover the heat from the waste water, and obtain the stable heating at approximately 7.5 kW and the heating COP above 6.0.

Keywords　waste heat recovery; heat pump water heaters; refrigerant charge

随着生活水平的提高,人们对生活热水的需求量和品质要求也发挥来越高。热泵技术是近年来备受关注的新能源技术,采用热泵技术可以节约大量能源。家用淋浴废水温度较高,含有大量低品位能量,大量废水排走的同时也带走了热量。利用热泵回收淋浴废水中的热量,可以提高热水装置的能量利用率[1]。废水产生时热量和水量同步,这也为热泵系统即时利用废热提供了可能[2]。

近年来,关于暖通空调领域的研究大都集中在建筑空调节能及大型集中式热回收装置中[3]。针对小型家用热回收设备的研究较少,带热回收的热泵热水器研究更少[4]。国内外许多学者已对热泵热水器进行了研究,雷博等[5]实验研究了家用污水源热泵热水器,其实验系统中有电热辅助系统;李卫国等[6]研究表明采用合适的电子膨胀阀开度可以提高系统性能;杨强等[7-8]研究了热泵系统中制冷剂充注量,提出以过冷度和过热度为标准判断热泵系统制冷剂充注量。其他学者在此方面也进行了大量研究[9-16]。本文提出一种带废热回收的热泵热水装置的循环原理,并搭建了实验样机[16-17],通过实际测试研究其制取热水的循环性能,为开发高效的热泵热水装置提供参考。

1 工作原理

图 1 所示为带废热回收的热泵热水装置系统原理。整个装置主要由压缩机、冷凝器,节流阀、蒸发器、预热器组成,工作过程:自来水首先进入与淋浴废水连接的预热器中进行一次升温,然后进入冷凝器进

收稿日期:2018-04-14;修回日期:2018-06-23

行二次换热升温,达到所需的 36~46 ℃出水温度,经淋浴器喷出供淋浴使用。淋浴废水流经预热器、再流过蒸发器回收其中热量后排出。

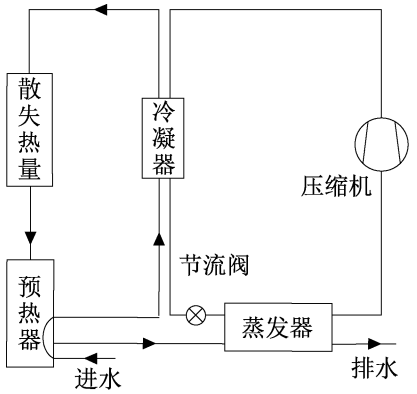

图 1 废热回收热泵热水装置系统原理

Fig.1 The principle of waste heat recovery heat pump water heater system

与普通空气源热泵热水装置相比,带废热回收的热泵热水装置没有泵和风机,制热 COP 更高。回收热量后废水的温度从 35 ℃降至 15 ℃排出,基本等于同时期地表水温度,对环境友好。另外,带废热回收的热泵热水装置只受进水温度的影响,因此其工况条件稳定。

2 理论计算

理论计算条件:进水温度 16 ℃;出水温度 36~42 ℃;预热器温升 2~7 ℃;冷凝温度比出水温度高 3 ℃,制冷剂过冷温度比出水温度低 5 ℃;蒸发温度低于排水温度 8 ℃;吸气过热度 5 ℃。

计算过程:先假定一个进水量,设定不同出水温度,计算出所需热量。制冷剂回路迭代计算制热量。对比两次计算结果,差值小于 1%即迭代完成。得出系统运行各点参数。计算流程如图 2 所示。

以额定功率为 2 HP 的压缩机为例计算制热量、供水量等,图 3 所示为制热量随出水温度的变化。由图 3 可知,制热量随出水温度的升高略有下降,变化较小,稳定在约 10 kW。当出水温度为 36 ℃时,制热量为 10.05 kW;当出水温度为 46 ℃时,制热量为 9.99 kW,仅降低 0.6%。表明带热回收的热泵热水器制热量稳定。

图 4 所示为制热 COP 随出水温度的变化。压缩机 COP 是冷凝器制热量与压缩机功率的比值,制热 COP 是冷凝器制热量加预热器制热量与压缩机功率的比值。由图 4 可知,出水温度越高,制热 COP 越低。当出水温度为 36~46 ℃时,预热器的效果对制

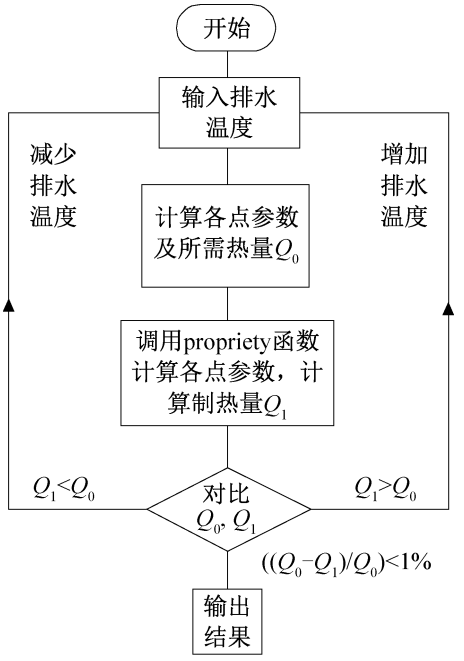

图 2 计算流程

Fig.2 The calculation process

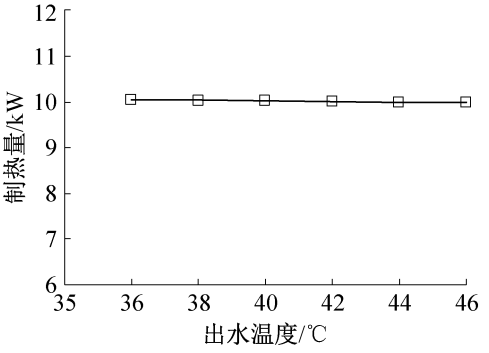

图 3 制热量随出水温度的变化

Fig.3 The variation of heating capacity with outlet water temperature

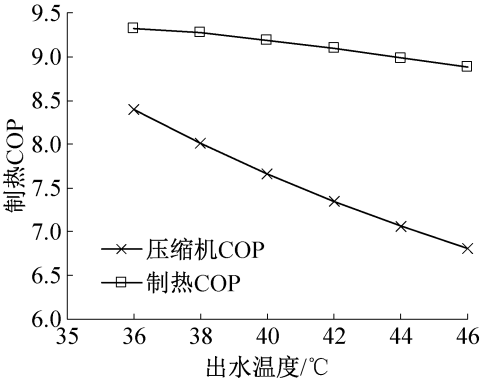

图 4 制热 COP 随出水温度的变化

Fig.4 The variation of heating COP with outlet water temperature

热 COP 影响从 10%增至 23%。表明在高出水温度下,预热器对提高系统的 COP 作用较大,原因主要是,出水温度高时,淋浴废水的温度也较高,提高了预热器的传热温差。

3 实验研究

实验测试工况为:进水温度 16 ℃,出水温度 36~46 ℃。实验台组成:蒸发器 1 盘管放水箱中,启动时提供热量;蒸发器 2 采用流道隔开的环形盘管,回收淋浴废水热量;预热器采用环形盘管;压缩机额定功率为 2 HP;毛细管节流阀和盘管冷凝器。对 R22 工质系统进行实验研究,实验稳定后采集数据。表 1 所示为实验用测试仪表数据。

表 1 实验仪器精度

Tab.1 Sensors accuracy

仪器名称	品牌	测试精度	量程
水流量计	格乐普	1.5 级	0.15~1.5 m^3/h
功率计	爱博精电	0.2 级	10.0 kW
压力传感器	Huba	0.5 级	0~4.0 MPa
温度传感器	Pt100	±0.15 ℃	−150~150 ℃
数据采集器	安捷伦	0.2 级	—

图 5 所示为实验测点安装位置图。温度测点安装在热水器进水及冷凝器的进出水处。压力测点安置在压缩机的排气口和吸气口。

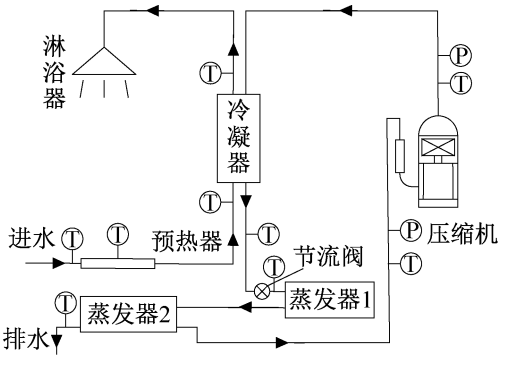

图 5 实验装置测点位置图

Fig.5 The experimental testing device of heat pump water with measuring point

采用水量调节阀控制水流量,来控制不同的出水温度,每次出水温度波动在 0.5 ℃内。

制热量:

$$Q=3.6\times10^6\rho cv\Delta t \tag{1}$$

式中:Q 为制热量,kW;ρ 为自来水密度,kg/m^3;c 为水的定压比热,kJ/(kg·℃);v 为自来水体积流量,L/h;Δt 为热水器进出水温差,℃。

4 结果与讨论

4.1 实验结果分析

图 6 所示为不同制冷剂充注量下系统的制热量随出水温度的变化。由图 6 可知,充注量为 1.4、1.7、2.0 kg 时,制热量随出水温度的提高总体稳定,波动范围为 4.5%~10%。但不同充注量下系统的制热量偏差随出水温度升高而增大。当出水温度从36 ℃升至 46 ℃时,制热量偏差从 0.19 kW 增至 1.04 kW。

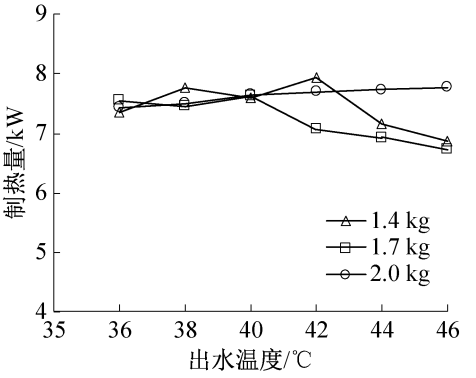

图 6 不同制冷剂充注量下制热量随出水温度的变化

Fig.6 The variation of heating capacity with outlet water temperature under different refrigerant charge

图 7 所示为不同制冷剂充注量下制热 COP 随出水温度的变化。由图 7 可知,充注量为 1.4、1.7、2.0 kg 时,制热 COP 随出水温度的上升不断减小。增加充注量有利于制热 COP 的稳定。如充注量为 1.4、1.7、2.0 kg 时,出水温度分别为 36 ℃和 46 ℃时,制热 COP 分别减小 20%、11%和 8%。充注量为 1.7 kg 和 2.0 kg 系统的制热 COP 数值大小和波动范

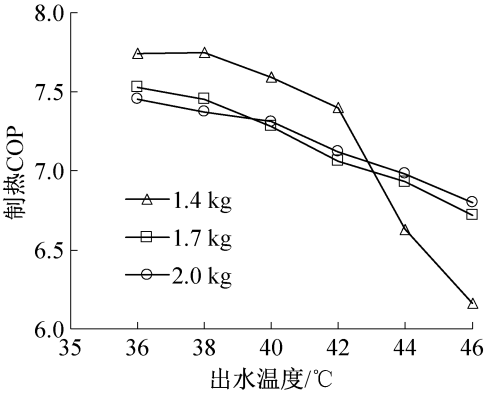

图 7 不同制冷剂充注量下制热 COP 随出水温度的变化

Fig.7 The variation of heating COP with outlet water temperature under different refrigerant charge

围相同。由实验结果可知,有限度地增加充注量有利于制热 COP 的稳定。出水温度为 36~38 ℃时,制热 COP 的大小顺序为 1.4 kg>1.7 kg>2.0 kg;出水温度为 38~42 ℃时,制热 COP 大小顺序为 1.4 kg>2.0 kg>1.7 kg。结果表明,出水温度越低,充注量越少时制热 COP 越高。

图 8 所示为不同制冷剂充注量下压缩功率随出水温度的变化。由图 8 可知,充注量为 1.4、1.7、2.0 kg 时,压缩机功率随出水温度的升高而增大,原因是冷凝温度升高。在相同的出水温度下,充注量为 1.4 kg 时压缩机功率最小,充注量为 1.7 kg 和 2.0 kg 时压缩机功率基本一致。压缩机功率随制冷剂充注量的增大而增大,但增至一定值后压缩机功率不再增加。充注量为 1.4、1.7、2.0 kg,出水温度为 36 ℃时和 46 ℃时相比,压缩机功率分别增大 10%、7.8%、7.2%。表明增加充注量会使压缩机功率增大,但也会造成压缩机功率波动幅度减小。

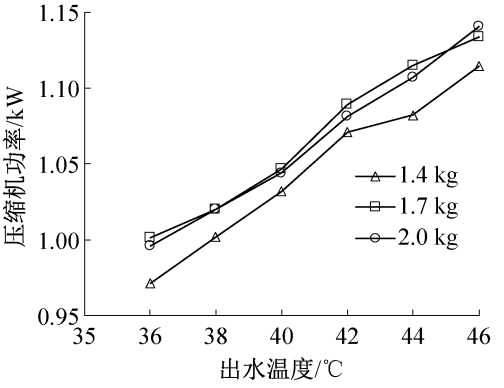

图 8 不同制冷剂充注量下压缩机功率随出水温度的变化

Fig.8 The variation of compressor power with outlet water temperature under different refrigerant charge

图 9 所示为不同制冷剂充注量下出水体积流量随出水温度的变化。由图 9 可知,充注量为 1.4、1.7、2.0 kg 时,出水体积流量随出水温度的上升而减少。充注量为 1.4 kg 时流量波动较大,因为此时制热量随出水温度的升高波动较大。充注量为 1.7、2.0 kg 时流量大致相同,因为在相同出水温度下制热量接近。出水量的变化规律基本与制热量变化规律相吻合,原因可能是冷凝器本身会储存一部分热量而引起制热量变化的滞后,即制热量的变化不会立刻反映到出水量的变化上。

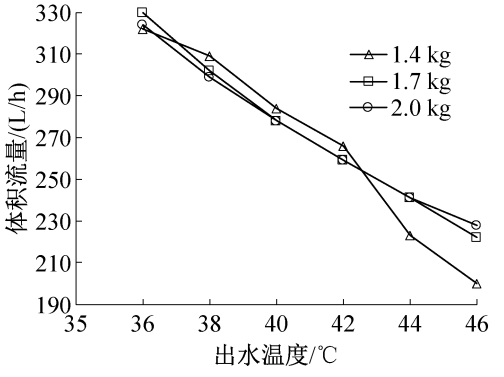

图 9 不同制冷剂充注量下体积流量随出水温度的变化

Fig.9 The variation of water flow rate with outlet water temperature under different refrigerant charge

4.2 理论结果与实验结果对比

对比图 3 和图 6 可知,理论计算和实验获得的制热量趋势一致,理论计算值高于实验值约 20%。对比图 4 和图 7 可知,制热 COP 的理论计算值与实验值趋势一致,但理论计算值较高。通过分析可知:假定条件下的蒸发温度较高,而实验设备的蒸发温度较低是造成理论计算的制热量、制热 COP 较高的主要原因。

5 结论

为回收家用热水器中废热的热量,本文提出了一种带废热回收的热泵热水装置,并搭建实验台进行测试。在进水温度为 16 ℃,出水温度为 36~46 ℃时,对带废热回收的热泵热水装置进行实验。得到主要结论如下:

1) 出水温度为 36~46 ℃ 时,系统制热量受制冷剂充注量影响较大。充注量为 2.0 kg 时系统可以获得最稳定的制热量。充注量为 1.4 kg 和 1.7 kg 时,系统的制热量随出水温度的升高而降低,最大降幅为 0.5 kW,充注量为 2.0 kg 时,系统的制热量随出水温度的升高而增大,最高增大 0.32 kW。

2) 出水温度为 36~46 ℃ 时,系统的制热 COP 随出水温度的上升而减小,充注量为 1.4 kg 时,可以获得最大制热 COP;充注量为 1.7 kg 时,制热 COP 保持在相对稳定的数值范围。

3) 出水温度为 36~46 ℃ 时,压缩机功率随着出水温度的升高而增大,出水温度每增加 2 ℃,压缩机功率增大 20~40 W。

4) 出水温度为 36~46 ℃ 时,随出水温度的升高,出水体积流量下降。测试结果显示,出水温度为 36 ℃ 时,水体积流量为 330 L/h,出水温度 46 ℃ 时,水体积流量变为 230 L/h。出水温度每增加 2 ℃,出水体积流量平均减少 17 L/h。

本文受北京市教委科技计划项目(SQKM201810005011),北京市优秀人才培养资助青年拔尖团队项目(2017000026833TDOZ)资助。(The project was supported by Beijing Mu-

nicipal Education Commission Science and Technology Plan Project (No.SQKM201810005011), Beijing Excellent Talent Development Funding Young Team Leader Project(No. 2017000026833 TDOZ).)

参考文献

[1] HAYAJAWAM N, WAKAZONO Y, KATO T, et al. Minimizing energy consumption in industries by cascade use of waste energy[J]. Energy Conversion IEEE Transactions on, 1999, 14(3):795-801.

[2] BAEK N C, SHIN U C, YOON J H. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source[J]. Solar Energy, 2005, 78(3): 427-440.

[3] 吴勇, 王凯, 曹锋,等. 浴室余热回收热泵系统设计方案研究[J]. 节能, 2007, 26(4):40-41. (WU Yong, WANG Kai, CAO Feng, et al. Study on design scheme of waste heat recovery heat pump system in bathroom[J]. Energy Saving, 2007, 26(4):40-41.)

[4] PERLMAN M, MILLIGAN N H. Hot water and energy use in apartment buildings[J].ASHARE Transactions, 1998, 94(1): 1087-1098.

[5] 雷博,董建锴,沈德安,等.家用淋浴污水源热泵热水器系统实验[J].暖通空调,2014,44(4):14-17.(LEI Bo, DONG Jiankai, SHEN De'an, et al. Experiment on household shower sewage source heat pump water heater system [J]. Journal of HV & AC, 2014,44(4):14-17.)

[6] 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. Numerical simulation and experimental study of dynamic performance of heat pump water heaters using electronic expansion valve[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(4):25-29.)

[7] 杨强, 王怀信. 带有高压贮液器的热泵系统不同充灌量下的实验研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(3):50-53. (YANG Qiang, WANG Huaixin. Experimental study on different filling capacities of heat pump system with high pressure reservoir[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3):50-53.)

[8] 刘金平, 祁元龙, 曹乐. 制冷剂充灌量对冷藏柜制冷性能影响的试验研究[J].低温与超导, 2010, 38(12):36-43. (LIU Jinping, QI Yuanlong, CAO Le. Experimental study on the effect of refrigerant charge on refrigerating cabinet refrigeration performance[J]. Low Temperature and Superconductivity,2010, 38(12):36-43.)

[9] CHEN Zeshao, TAO Wenquan, ZHU Yanwen, et al. Performance analysis of air-water dual source heat pump water heater with heat recovery[J].Science China Technological Sciences, 2012, 55(8):2148-2156.

[10] 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):71-76,85.(WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, HAO Jibo, et al. Experimental investigation and performance analysis on R134a air source heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration, 2014,35(3):71-76,85.)

[11] TANGWE S, SIMON M, MEYER E. An experimental study to determine the performance and potential saving of swimming pool air source heat pump water heater[C]// 2016 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE). Cape Town, South Africa:IEEE, 2016:1-6.

[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] PEI Gang, LI Guiqiang, JI Jie. Comparative study of air-source heat pump water heater systems using the instantaneous heating and cyclic heating modes[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(2/3):342-347.

[14] 李胤, 王永镖,李炳熙.空气源热泵热水机组季节性能的实验研究[J].节能技术, 2005, 23(1):54-55,68.(LI Yin, WANG Yongbiao, LI Bingxi. Experimental research on air source heat pump water heater[J]. Energy Conservation Technology, 2005, 23(1):54-55,68.)

[15] 陈振豪,吴静怡,陆平,等. 空气源热泵热水器季节性能实验及优化运行研究[J]. 电力与能源, 2005, 26(3): 117-119.(CHEN Zhenhao, WU Jingyi, LU Ping, et al. Seasonal energy experiment and optimal operation of air source heat pump water heater[J]. Power and Energy, 2005, 26(3): 117-119.)

[16] 陈观生, 李凡. 水源热泵型家用热水器的试验研究[J]. 广东工业大学学报,2002,19(4):47-49. (CHEN Guansheng, LI Fan. Experimental study on water source heat pump domestic water heater[J]. Guangdong University of Technology, 2002, 19(4):47-49.)

[17] 江树林, 关远康. 一种浴室用废水余热回收装置: CN201310563265.8 [P]. 2014-02-12. (JIANG Shulin, GUAN Yuankang. A type of waste heat recovery device for bathroom: CN201310563265.8 [P]. 2014-02-12.)

通信作者简介

许树学,男,助理研究员,硕士生导师,北京工业大学制冷实验室,(010)67391613,E-mail: xsx@bjut.edu.cn。研究方向:热泵技术及其应用,自然工质,制冷系统测试技术。

About the corresponding author

Xu Shuxue, male, research assistant, master tutor,Lab of Refrigeration, Beijing University of Technology, +86 10-67391613, E-mail:xsx@bjut.edu.cn. Research fields: heat pump and its application, natural refrigerants, testing technology for refrigeration system.