

蓄能型热泵机组供热水运行特性

王 洋,曹 琳,倪 龙,马最良,姜安玺

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,150090 哈尔滨,hz_jts@126.com)

摘 要: 为了解蓄能型空气源热泵机组供热水运行特性,通过实验研究蓄能型空气源热泵机组在不同工况下的性能.结果表明:该机组在不同工况下供应热水时均运行较好,当供热水流量较小时,运行能效较高;当热水循环流量较大时,对蓄热罐内扰动较强,会导致热水供应中断现象的发生,且中断时间随室外温度降低而延长;此外,室外环境温度对机组能效影响较大,室外温度越低,机组供热能力和平均能效比(R_{EE})会越小.

关键词: 空气源热泵;供热水;特性;实验研究

中图分类号: TU831.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0109-05

Performance of energy-storage air source heat pump in hot water supply mode

WANG Yang, CAO Lin, NI Long, MA Zui-liang, JIANG An-xi

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology,
150090 Harbin, China, hz_jts @ 126.com)

Abstract: To discuss the operating characteristics of a new kind of energy-storage air source heat pump when supplying hot water, the unit's performance in different conditions was studied by experiments. The results show that the unit can operate efficiently and stably, and the unit's mean R_{EE} reduces with the increase of hot water supply flux. There also exists a break of hot water supply because the high flow rate of circulation water causes intensive disturbance in the heat storage tank, and the time of break is prolonged with the decrease of outdoor temperature. Moreover, the heat supply ability and mean R_{EE} of the unit reduces with the decrease of outdoor temperature.

Key words: air source heat pump; hot water supply; characteristics; experimental research

随着我国经济社会不断发展和人们生活水平的日益提高,现代公共建筑中热水供应能耗越来越大,其所占建筑能耗的比例也不断升高.据统计,目前我国写字楼、商场等公共建筑中热水供应能耗占建筑总能耗比例最高已超过40%^[1].在国家节能减排、低碳经济等宏观政策引导下,在经济效益、社会效益、环境效益杠杆及资源压力的综合作用下,传统的化石燃料锅炉和电锅炉等公共建筑热水供应设备将逐渐被高效节能的热泵系统所

替代.当前,具有热水供应功能的空气源热泵机组主要有2种形式:一种是单纯以供应热水为目的的空气源热泵热水机组^[2-4];另一种是以空调运行为主的带热水供应的空气源热泵空调机组^[5-7].这2种形式的热泵热水机组在供应热水时都存在一定不足,前一种是夏季供应热水时无法回收宝贵的空调冷量;后一种是在空调停止运行或在冬季、过渡季节不使用空调时,热水的供应只能靠辅助电加热作为热源.因此,亟需对这些常规的空气源热泵机组加以改进,以进一步挖掘其节能潜力,为确保其全年高效节能运行,文献[8]提出了一种改进的空气源热泵机组,即蓄能型空气源热泵冷热水机组.该机组以热水制备功能为主,同时在

收稿日期:2010-07-20.

基金项目:广东省教育部产学研合作项目(2008B080501013).

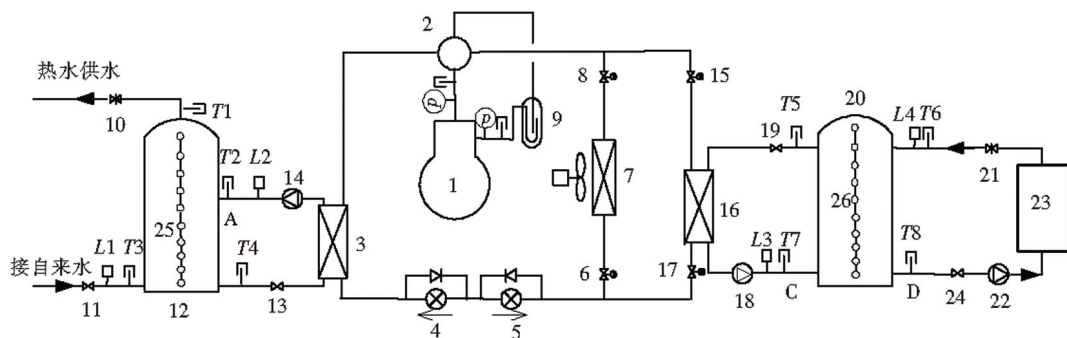
作者简介:王 洋(1979—),男,博士;

姜安玺(1938—),男,教授,博士生导师.

夏季可回收冷量用于空气调节,并且通过夜间蓄能,可实现电力负荷的削峰填谷.文献[9]对该机组名义工况下的蓄热、蓄热蓄冷、单供热水、同时供应热水和冷水等4种模式的性能进行研究,结果表明名义工况下机组各种模式均可实现高效运行.由于该新型热泵机组的主要功能为热水供应,因此研究其不同工况下的供热水运行特性对于了解整个机组的特性乃至相关产品的研发至关重要.为此,本文在文献[9]研究的基础上,对该机组在不同工况下的供热水运行特性进行了实验研究.

1 蓄能型热泵机组组成

图1给出了蓄能型热泵冷机组的组成原理及



1—压缩机;2—四通换向阀;3—板式冷凝器;4、5—热力膨胀阀;6、8、15、17—电磁阀;7—风冷翅片管蒸发器;9—气液分离器;10、21—截止阀;11、13、19、24—调节阀;12—蓄热罐;14—热水循环泵;16—板式蒸发器;18—冷水循环泵;20—蓄冷罐;22—冷水供水泵;23—风机盘管。

图1 蓄能型热泵机组组成原理以及实验测点分布图

2 实验方案

为深入分析机组在供热水运行时的特性,在国家压缩机制冷设备质量监督检验中心认定的某空调公司测试中心开展了实验研究.在试验台的室内侧和室外侧均设置有温、湿度采样器,通过干湿球温度计来测量环境的温度、湿度,其他各项参数的测点分布如图1所示.其中,机组各处制冷剂温度采用精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的铂电阻温度传感器测量,蓄热罐、蓄冷罐内部温度均采用精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的铜-康铜热电偶,压缩机吸排气压力采用精度为 10^{-3} MPa 的压力变送器,蓄热罐和蓄冷罐进水口、板式冷凝器和蒸发器出水口流量均采用精度为 10^{-5} m^3 的流量计.

3 实验结果及分析

测试3种工况:名义工况(干球温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低温工况(干球温度 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$)和除霜工况(干球温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿球温度

样机实验测点分布.该机组的主要运行模式有:蓄热模式、单供热水模式、蓄热蓄冷模式和供热水同时供冷水模式4种.当机组供应热水时,可能出现2种运行模式,即蓄热模式和单供热水模式.其中,在蓄热模式下,制冷剂的运行流程为:1→2→3→5→6→7→8→2→9→1,而热水则通过热水循环泵14经板式冷凝器循环加热,最后蓄存在蓄热罐12中;单供热水模式是在蓄热模式运行后,开启阀门10和11,冷水从蓄热罐底部进入,热水从蓄热罐上部流出.当热水温度下降至不足以继续供应时,机组切换到蓄热模式,直到热水温度达到供应要求.按照图1所示的组成原理,本文试制了额定制热量为 15 kW 的蓄能型热泵机组样机,具体各部件参数可详见文献[9].

$4\text{ }^{\circ}\text{C}$).测试时间:样机完成蓄热过程后,即蓄热罐循环热水进水温度达到设定值 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始供应热水,至下一次压缩机开启,完成蓄热过程的一个完整的供热水周期.

3.1 名义工况下机组供热水运行特性

图2给出了机组的热水出水流量为 200 L/h ,在名义工况下供热水模式运行时,热水供水温度及蓄热罐内热水平均温度随时间的变化规律.从图中可看出,在运行 $0\sim 45\text{ min}$ 时,压缩机启动温度控制点温度始终维持在 $52\text{ }^{\circ}\text{C}$,但在 $45\sim 50\text{ min}$ 时,该点温度由 $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而启动压缩机,对蓄热罐内的热水进行循环加热.在压缩机启动后的 10 min 内,由于蓄热罐内水温度层受循环水流的影响而被不断破坏,蓄热罐内的热水温度逐渐趋向均匀,最终使机组供水温度低于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.此时,出水温度过低热水供应被迫中断.在停水 15 min 以后,供水口温度重新升高到 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,继续向用户供应热水.此后,蓄热罐内热水平均温度和供水温度不断上升,直至蓄热罐循环热水进水温度

达到 55 ℃ 时,压缩机停止运行,完成 1 个热水供应周期。

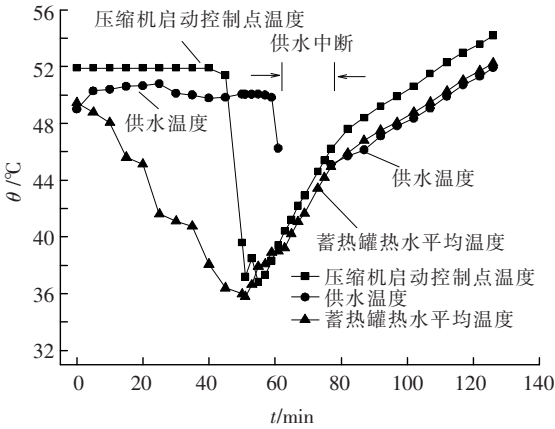


图 2 热水温度随运行时间的变化

图 3 是机组供水运行时,蓄热罐内水温分布随时间变化曲线。从图中可看出,由于蓄热罐罐体直径较大,供热水流量较小,则蓄热罐内水流速很小,因此,从蓄热罐底部进入到蓄热罐内的冷水对于蓄热罐内水温分布扰动很小,蓄热罐内的水温分布形成非常明显的冷热水分界现象,随着供水时间的增长,分界面逐渐上升,分界面经过的位置,该处温度都会发生骤降,这也就造成了图 2 中出现的热水供水温度在某时刻发生突然下降的现象。

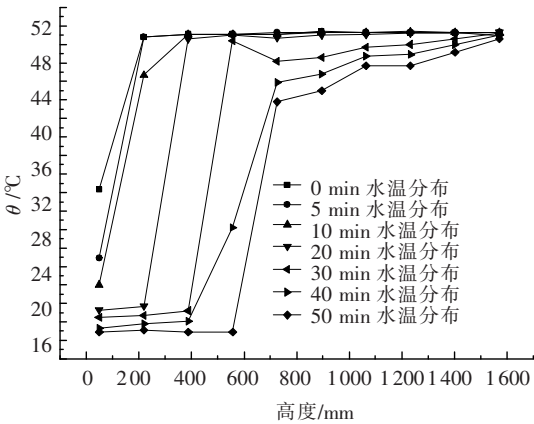


图 3 蓄热罐内水温分布随时间变化

图 4 给出了在名义工况条件下,机组的制热功率、供热功率、耗功率和能效比 R_{EE} 随时间的变化情况。从图中可以看出,从供水开始到供水中断前 1 min,由于供水温度一直维持在 50 ℃ 附近,故机组供热功率比较稳定。压缩机刚启动时,由于蓄热罐下部热水温度较低,则板式换热器进水温度较低,机组制热功率和 R_{EE} 都较高。但随着压缩机启动后运行时间的延长,蓄热罐内的热水在循环水流的作用下逐渐趋向均匀,板式冷凝器进水温度升高,机组制热功率下降,机组的 R_{EE} 也随着下降,而耗功率则不断升高。在供热水中断后,由于无温度较低的冷水进入蓄热罐底部,致使板式冷凝器进水温度上升,制热功率

和机组的 R_{EE} 都有所下降。在恢复供热水后,由于温度较低的冷水重新进入蓄热罐底部,板式冷凝器的进水温度下降,机组制热功率和 R_{EE} 有所上升,此后又开始下降,这是因为供热水流量相对循环热水流量较小,冷水补水量对于机组制热功率和 R_{EE} 的提升有限。经计算,1 个供热水周期内机组的平均 R_{EE} 约为 3.25。

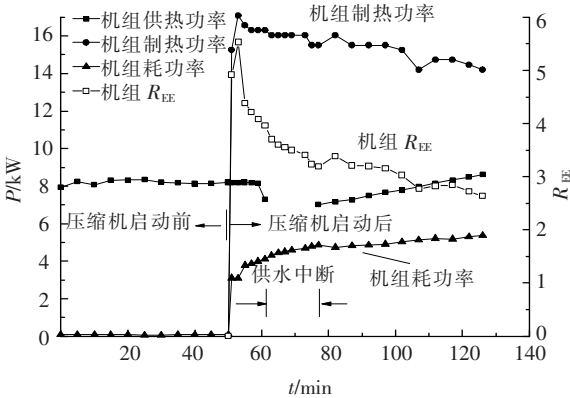


图 4 供热水模式下机组制热功率、供热功率、耗功率和 R_{EE} 随时间的变化

3.2 不同室外工况对机组供热水运行特性的影响

图 5 和图 6 分别给出了在低温工况和除霜工况下,供热水流量为 200 L/h 时,蓄热罐内平均温度和供热水温度、机组的供热功率、制热功率和耗功率随时间的变化规律。

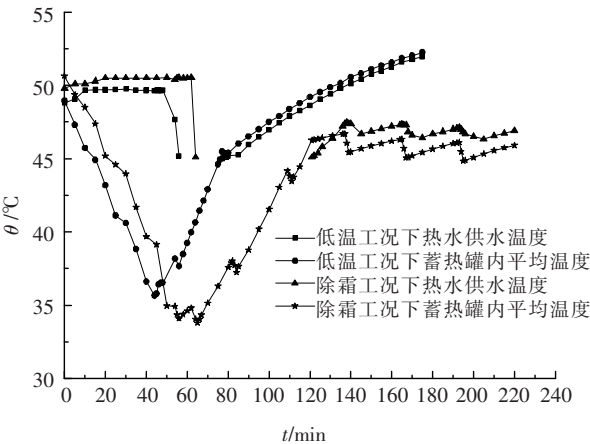


图 5 不同室外工况蓄热罐内平均温度和供水温度随时间的变化

名义工况如图 2 和图 4 所示,低温和除霜工况如图 5 和图 6 所示,对比不同工况下机组供热水模式下的运行特性曲线,可见名义工况和低温工况均在压缩机启动后蓄热罐内热水平均温度不断上升,最终在板式冷凝器出水温度达到 55 ℃ 时停机并完成 1 个供水周期,但在除霜工况下,由于机组每隔一段时间就要除霜,导致蓄热罐内的水温在除霜过程中有所下降,当除霜结束后,蓄热罐

内的水温又会不断上升,最终使出水温度维持在 45~46 ℃ 之间波动,板式冷凝器的出水温度也不会达到 55 ℃ 而停机.实质上是由于机组制热量不足导致的,在机组产品化过程中,可以采取加大风冷翅片管蒸发器蒸发面积等措施予以改进.

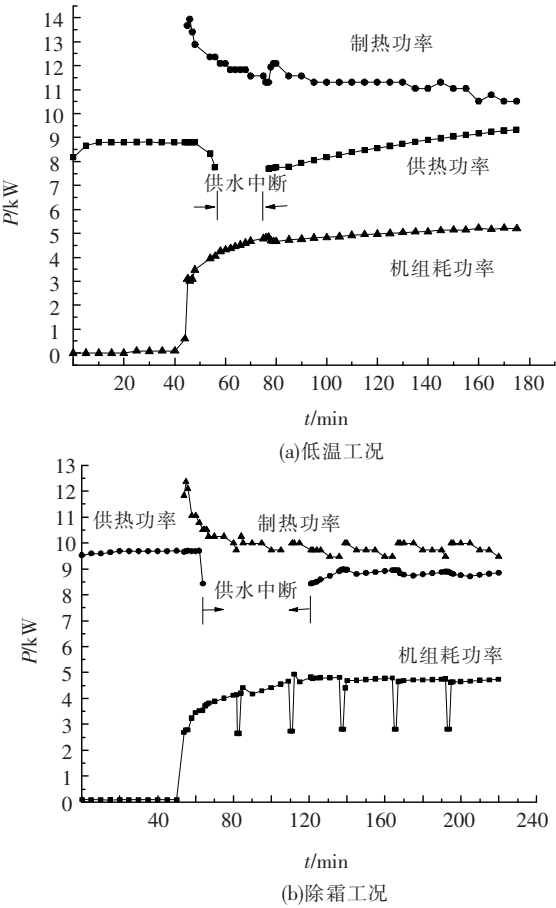


图 6 不同室外工况条件下供热水模式机组制热功率、供热功率和总耗功率随时间的变化

从图中还可看出,由于供热水流量均为 200 L/h,且压缩机启动控制点位置相同,故 3 种工况下压缩器启动前的时间相差不大.但是,三者的停水时间相差较大,低温工况的停水时间约为名义工况的 1.5 倍,除霜工况的停水时间约为名义工况的 3.5 倍.这是由于在室外温度较低时,自来水进水温度较低,造成压缩器启动时蓄热罐内平均水温较低,而且在低温条件下机组制热功率较小,最终使供水中断时间随着室外温度的下降而明显延长.温度较低时的制热功率的下降也造成机组在供水周期内平均 R_{EE} 的下降,经计算,低温工况下机组平均 R_{EE} 仅为名义工况下的 71.7%,除霜工况下机组平均 R_{EE} 仅为名义工况下的 55.6%.这是由于在较低的环境工况下,机组制热能力下降,同时机组除霜也需要消耗一定的制热量.

3.3 不同供热水流量对机组供热水运行特性的影响

图 7 和图 8 分别给出了在名义工况下,供热水流量分别为 100、300 L/h 时,蓄热罐内平均温度、供水温度和机组供热功率、制热功率、机组耗功率和 R_{EE} 随时间的变化规律.图 2 和图 4 均为 200 L/h 的供热水流量,图 7 和图 8 分别为 100、300 L/h 的供热水流量.对比名义工况下,不同供热水流量机组供热水运行特性曲线可见:由于压缩机启动控制点位置相同,供热水流量越大,压缩机启动前运行时间越短,100、200 L/h 和 300 L/h 流量下运行时间分别为 80、50 min 和 30 min.但是,在 3 种不同供热水流量下,压缩机启动后至供水中断之间的时间相差不大,都在 10 min 左右.这充分说明,由于热水供应流量相对循环热水流量较小,导致供水中断的主要原因是循环水流的扰动作用,使得蓄热罐内水温迅速达到一致.

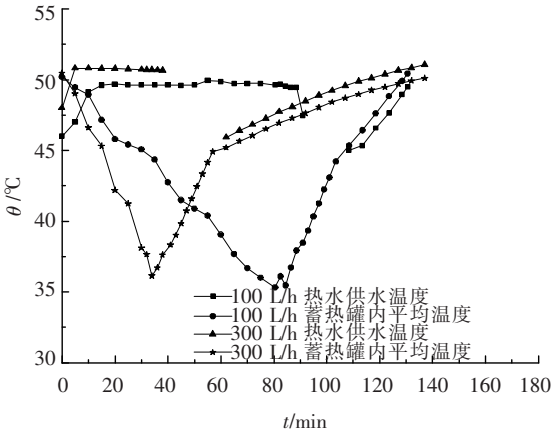


图 7 不同供水流量下热水温度随时间的变化

从运行周期上来看,供热水流量为 100 L/h 和 200 L/h 的运行周期时间相差不大(均为 130 min 左右),这是由于当供热水流量为 100 L/h 时,虽然压缩机启动前运行时间较长,但是在压缩机启动后由于供热水流量较少,蓄热罐内水温上升较快,使得压缩机启动后运行时间缩短,最终供热水周期时间与供热水流量为 200 L/h 时的基本相同.而在热水供水流量为 300 L/h 时,其运行周期约为 200 min.这是由于供热水流量大,蓄热罐内热水加热速度明显降低,尤其在蓄热罐内平均水温达到 50 ℃ 以上时,由于板式冷凝器进水温度较高,机组制热功率较低,蓄热罐内热水加热速度更为缓慢,最终造成机组供热水周期相比前两者有较大的增长,同时由于在较长时间内板式冷凝器的进水温度都在 50 ℃ 以上,也使得机组在 1 个供水周期内平均 R_{EE} 相对较低.经计算,当供热水流量为 100、200 L/h 和 300 L/h 时,机组的平均 R_{EE} 分别为 3.32、

3.25 和 3.05.因此,较小的供水流量对机组在供热水模式下运行更为有利,不仅能延长供水时间,也有利于机组保持较高的运行效率.

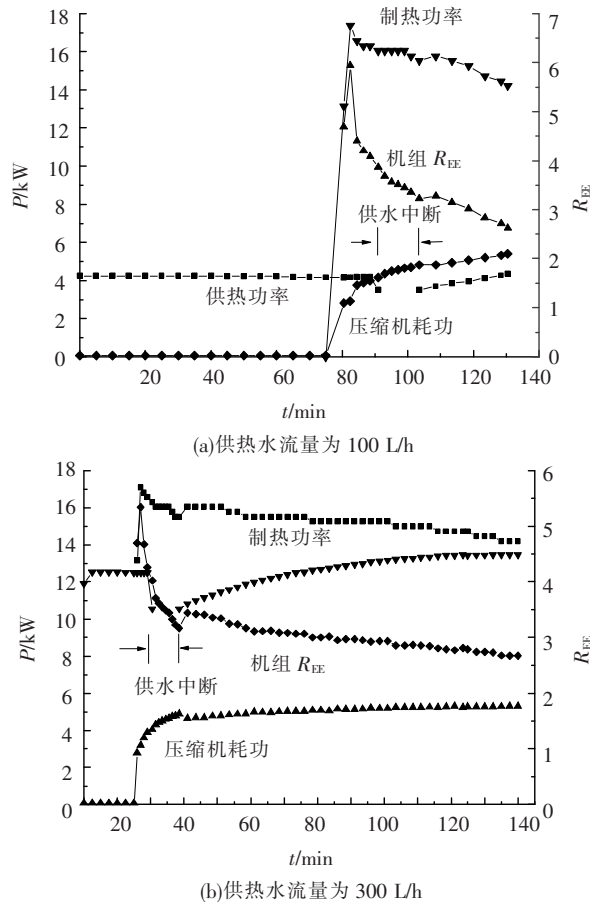


图 8 不同供热水流量下机组制热功率、供热功率、耗功率和 R_{EE} 随时间的变化

4 结 论

- 1) 机组在不同工况下供热水时均运行较好,其中名义工况下,一个运行周期内平均制热能效比 R_{EE} 可达到 3.25.
- 2) 在供热水时由于循环热水流量较大,对于蓄热罐内扰动较强,可能出现供水中断现象,且供水中断时间会随着室外温度的降低而延长.因此,针对热水供应量大且持续的场所,为避免供水中断现象,计算选择合理的热泵机组容量尤为重要.

同时,采用降低压缩机启动控制点位置或提高控制点温度,在蓄热罐循环热水进口增加布水器,减少热水循环水流对罐内水温分布的扰动等技术措施也有利于延缓该现象的发生.

3) 机组在供热水模式下运行受室外工况影响较大,室外温度越低,机组制热能力和平均 R_{EE} 越低,尤其在除霜工况下,由于机组制热量不足,造成机组热水供应温度较低.因此,在机组产品化过程中,可以采取加大风冷翅片管蒸发器蒸发面积等方法予以改进.

参考文献:

[1] 薛志峰. 商业建筑节能技术与市场分析[J]. 清华同方技术通讯,2000,3: 70-71.

[2] 陈振豪,吴静怡,陆平,等. 空气源热泵热水器季节性性能实验及优化运行研究[J]. 能源技术,2005,26(3): 117-119.

[3] WOOD C D, MEYER J P. Unsteady temperature distributions in vertical storage tanks heated with heat pumps [J]. Heat Transfer Engineering, 1998, 19(3): 18-24.

[4] 李胤,王永鏢,李炳熙. 空气源热泵热水机组季节性性能的实验研究[J]. 节能技术,2005,23(1): 54-55.

[5] ALI K Y, CIHAT A. Modeling of central domestic water heater for buildings [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(2): 269-279.

[6] JIANG Huimin, JIANG Yiqiang, WANG Yang, et al. An experimental study on a modified air conditioner with a domestic hot water supply (ACDHWS) [J]. Energy, 2006, 31(9): 1453-1467.

[7] JI J, PEI G, CHOW T T, et al. Performance of multi-function domestic heat-pump system [J]. Applied Thermal Energy, 2005, 80: 30-326.

[8] 林小苗,倪龙,江辉民,等. 公共建筑用空气源热泵热水机组初探[J]. 建筑科学, 2009,25(2): 55-59.

[9] 曹琳,倪龙,李炳熙,等. 蓄能型空气源热泵热水机组性能实验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(10):67-70.

(编辑 魏希柱)