

文章编号: 0253-4339(2012)06-0073-06

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.06.073

## 水箱水温对CO<sub>2</sub>热泵热水器性能影响的实验研究

吕静 任莹莹 杨杰 豆君君 胡特特

(上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093)

**摘要** 通过实验对比研究了循环加热和一次加热热水时,水箱水温对CO<sub>2</sub>热泵热水器性能的影响。循环加热工况时,随着水温的升高,压缩机的进、排气压力逐渐升高,功耗增加;气体冷却器的CO<sub>2</sub>进、出口温度升高,内侧CO<sub>2</sub>和外侧水的温差逐渐减小,换热量减小;CO<sub>2</sub>热泵系统的COP下降。一次加热工况时,进水温度一定,系统的各项运行参数稳定,COP基本保持不变。以水温度17℃为例,系统COP在3.5左右,远远高于循环加热的COP。实验结果表明水箱水温对系统的性能有一定影响。根据实验结果提出了水箱结构改进方案,使气冷器入口水温稳定在较低水平,可有效提高系统的性能。

**关键词** 热工学; CO<sub>2</sub>热泵热水器; 循环加热; 一次加热; 水箱水温; COP

**中图分类号**: TQ051.5; TB61<sup>+</sup>1

**文献标识码**: A

## Experimental Study on the Influence of the Water Temperature to the Performance of CO<sub>2</sub> Heat Pump Water Heater

Lü Jing Ren Yingying Yang Jie Dou Junjun Hu Tete

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

**Abstract** The performance of CO<sub>2</sub> heat pump water heater was studied experimentally in this paper by comparing a loop heating and a direct heating hot water. In the loop heating mode, with an increase of the water temperature, the compressor inlet and exhaust pressure increased gradually, the power consumption increased and the gas cooler inlet and outlet temperature increased, too. The temperature difference between carbon dioxide and cooling water and heat transfer decreased, the COP of CO<sub>2</sub> heat pump system decreased. The operating parameters of the system were stable and the COP remained unchanged in direct heated condition. When the water temperature is 17℃, the COP of the system is about 3.5, much higher than that in loop heating. The results show that the lower inlet temperature can be obtained by modifying the water tank structure and it is a very effective way to improve system performance.

**Keywords** Pyrology; CO<sub>2</sub> heat pump water heater; Loop heating mode; Directed heated condition; Water tank temperature; COP

节能环保是21世纪科学发展的两个重要议题,CFCS替代成为全世界共同关注的问题,因此CO<sub>2</sub>作为自然工质又一次受到重视,二氧化碳热泵热水器受到广泛关注<sup>[1-2]</sup>。随着日本二氧化碳热泵热水器商业化的成功,对二氧化碳热泵热水器的研究在世界范围内开展<sup>[3]</sup>,热水器水箱中的水温对热水器性能的影响很大,改进水箱结构,使水箱温度分层,从而使参与换热的水保持在较低的温度,从而减少热损失,提高效率<sup>[7]</sup>。日本的家用二氧化碳热泵热水器产品对水箱进行了改进,如采用绝热真空型水箱,内置式水箱或分体式小水箱,不仅节省了空间,也节约了能耗<sup>[5]</sup>。我国对于二氧化碳热泵热水器的研究目前主要集中在CO<sub>2</sub>换热特性的研究及提高压缩机效率,提高换热器效率,改进循环方式<sup>[6]</sup>。王祥等<sup>[7]</sup>对采用417A工质的热泵热水器的内

置盘管蓄热水箱进行研究,分析产生水温分层和涡流等现象的原因,得出温度场与速度场相互耦合能促进水温分布的均匀性,提出加大内置盘管间距和在水箱中布置插入物,提高热水的加热速度。张厚雷等<sup>[8]</sup>提出一种新型往复流动加热双水箱热泵热水器,内部采用了浮子卷套结构,可减少冷热水混合的不可逆损失,储热性能优于常规变温加热型热水器。刘志国等<sup>[9]</sup>采用FLUNT软件,对内部沉浸冷凝盘管的封闭式绝热卧式水箱的非稳态温度场进行数值模拟,模拟计算了冷凝盘管的长度及水箱径高比对箱内温度场的影响。

相关研究表明,水箱温度分层效果与水箱进出口几何特性、入口流量、水箱结构设计等因素有关,选用“高度/直径”<sup>[10]</sup>之比大的水箱,在水箱中间加设浮动挡板或加隔热板<sup>[11]</sup>,或采用双水箱系

统<sup>[12]</sup>均可减少水箱内部上下层高温水和低温水的换热。这里通过对二氧化碳热泵热水器的实验研究,得出水箱水温对系统运行参数和性能的影响,提出几种水箱结构的改进方案。

## 1 实验装置

### 1.1 二氧化碳热泵热水器及工况选取

跨临界二氧化碳热泵热水器的实验装置原理如图1所示。实验装置由图中左侧的水系统和右侧的制冷系统两部分组成。制冷系统由压缩机、气冷器、电子膨胀阀、蒸发器、气液分离器及辅助部件组成;水系统由贮水箱、水泵、气冷器、恒温水浴及辅助部件组成。水系统中的冷水与制冷系统中高温高压的二氧化碳在气体冷却器中进行热量交换,由冷水变为温度较高的热水后回到水箱中。根据冷水一次或多次流经气体冷却器,将加热方式分别称为一次加热和循环加热。实验台蒸发器侧采用了空气冷却的形式,为了减小不同工况下环境温度对系统性能的影响,利用焓差室模拟环境温度。

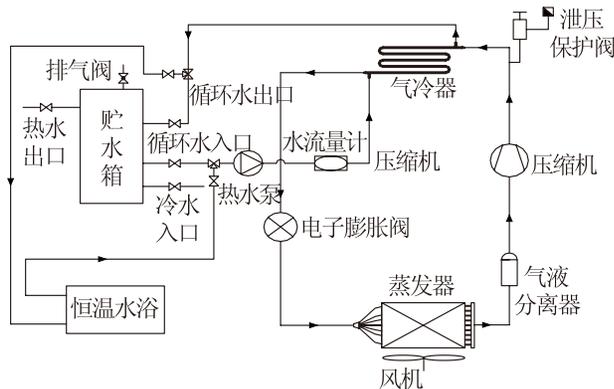


图1 二氧化碳热泵热水器实验装置原理图  
Fig.1 Schematic of test facility

### 1.2 水箱结构及工作原理

水箱分为单混合水箱、双混合水箱和双温度水箱等。最简单和最常用的为混合式水箱。实验设计了混合式保温承压循环加热水箱,结构如图2所示,其容积为120L,热水产率为70L/h,最高可承受1MPa的压力。水箱上部留有热水出口、循环水出口两个接口,下部留有循环水入口、冷水入口两个接口。在循环水出口管道上接出一热水管道。

水箱内循环水出口附近布置温度测点。在水箱侧壁打孔倾斜布置盲管,将感温器置于盲管中。水箱顶部设有一个排气阀,防止压力过高。

水箱可用作一次加热也可用作循环加热。一次加热时,循环水入口和热水管开启,热水出口关

闭;循环加热时,循环水出口和热水出口开启,热水管关闭。

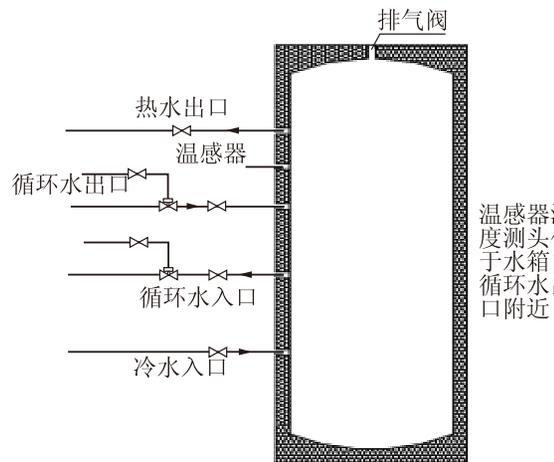


图2 保温承压水箱示意图

Fig.2 Schematic of the insulation pressure tank

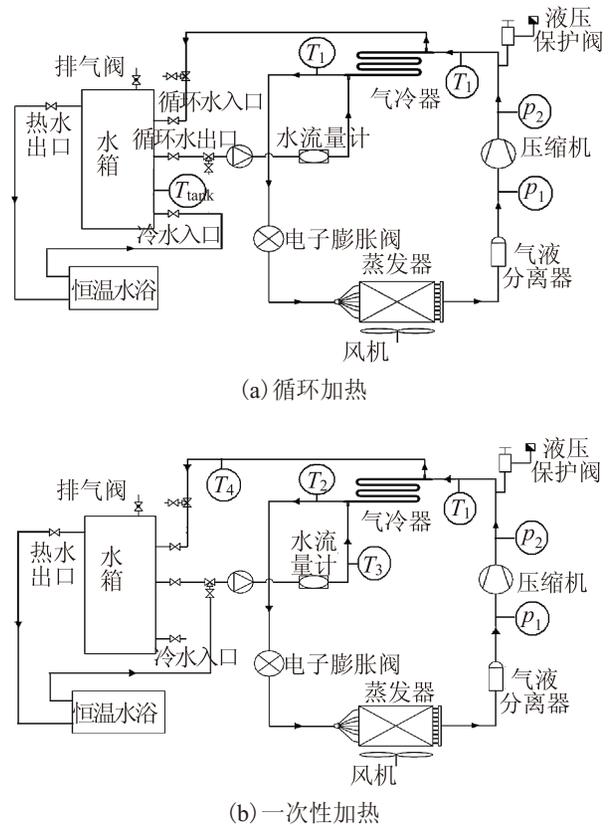


图3 循环加热、一次加热和测点布置  
Fig.3 Loop heating cycle, direct heating cycle and arrangement of measuring points

跨临界CO<sub>2</sub>热泵热水器在循环工况下运行时,首先将120L水箱充满恒温水,充水时冷水入口、热水出口阀门开启,循环水出、入口阀门关闭。水箱充满水后系统运行,此时冷水入口、热水出口阀门关闭,循环水出、入口阀门开启。水箱内的热水循环不断的流经气冷器被加热。

一次性加热水时，将水箱上的循环水出入口与焓差室的恒温供水系统的供回水口相连，从而获得17℃的恒温冷水进入气冷器。循环加热与一次性加热水工况系统原理如图3所示。

图3中， $T_1$ 为气冷器进口CO<sub>2</sub>温度，也即压缩机排气温度； $T_2$ 为气冷器出口CO<sub>2</sub>温度； $T_3$ 为气冷器入口水温，由焓差室提供； $T_4$ 为气冷器出口水温； $p_1$ 为压缩机进口处压力； $p_2$ 为压缩机的排气压力； $T_1$ 为气冷器进口CO<sub>2</sub>温度，也即压缩机排气温度； $T_{\text{tank}}$ 为水箱温度，也即气冷器入口水温。 $T_3$ 为气冷器入口水温，由焓差室提供； $T_4$ 为气冷器出口水温。

### 1.3 数据采集

温度的测量：水箱温度的测量选用铂电阻Pt100来测量，其测温范围为-100℃~500℃，测量精度为0.5%。压力的测量：根据压力设备的高压和低压的要求，分别选用了NS-F和NS-17两种类型的压力传感器。温度传感器利用恒温水浴进行标定，压力传感器利用上海理工大学建筑环境与设备工程实验室的活塞式压力计进行标定。标定之后运用最小二乘法对实验数据进行校核和处理。

功率的测量：采用上海理工大学空调实验室空气焓差法检测数据系统自带的功率测量程序。

流量测量：实验台采用容积式水流量计对水循环的流量进行测量。一次加热实验工况下水流量由焓差室控制柜直接控制，通过焓差室数据采集系统软件记录读取；循环加热实验工况采用水流量计，多次读取几组数据取平均值，得到循环水流量的相对准确的数值，忽略误差等因素对结果的影响。

## 2 实验结果及分析

实验分为循环加热和一次加热，一次加热又可以根据季节、进水温度及水流量分为以下五种工况：冬季工况、设计工况、名义工况和夏季工况。在此为了能够直观的与循环加热进行对比，一次加热实验时，实验工况参考国家标准GB/T 23137—2008《家用和类似用途热泵热水器》<sup>[13]</sup>，水流量0.044679kg/s。实验循环加热在名义工况基础上进行：干球温度16±1.0℃；湿球温度12±0.5℃。进水温度：17℃；

### 2.1 一次加热

进水温度分别取9℃、17℃、24℃，水流量为0.033812kg/s，电子膨胀阀自动调节，其开度分别

为50、60、75时，利用数据采集装置记录下的其中15min内各参数随时间的变化情况。

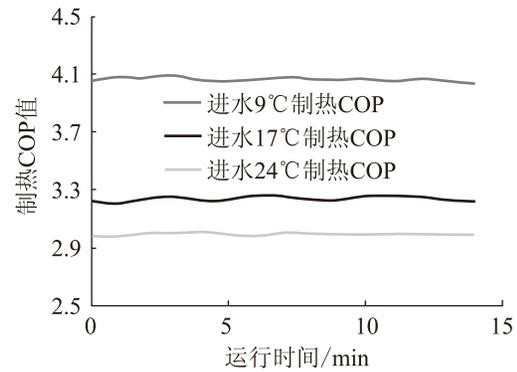


图4 不同进水温度下系统制热COP随时间的变化曲线  
Fig.4 The curve of the system COP with the time in different inlet water temperature

从图4中可以看出，进水温度为9℃时，系统COP最高为4.0左右，进水温度升高到17℃和24℃时，系统COP降低到3.2和3.0左右。随着气冷器进水温度的升高，气冷器进、出水温差在逐渐降低，而压缩机耗功在增加，制热COP值随着气冷器进口温度的升高而降低，即系统的性能随气冷器进口温度的升高而下降。

采用一次加热工况，当气体冷却器进水温度为17℃时，压缩机进出口压力、气体冷却器内的温度变化、系统COP的变化情况如下所示。

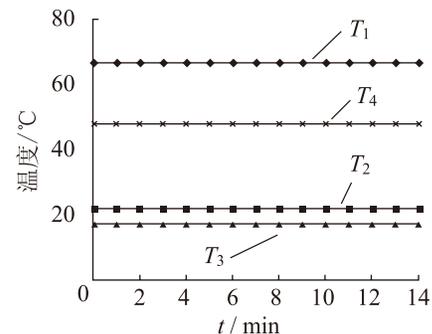


图5 一次加热时气冷器中二氧化碳及水温变化  
Fig.5 The temperature of CO<sub>2</sub> and water in gas cooler in direct heating cycle

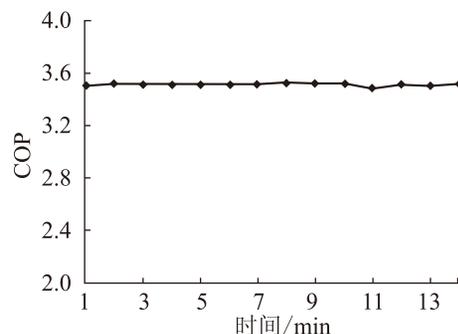


图6 一次加热水时系统的COP  
Fig.6 The COP in direct heating cycle

由图5和图6可以看出, 采用一次性加热水时, 进水温度为17℃时, 水流量0.044679kg/s, 系统的COP在3.5左右, 远远高于循环加热的COP, 且各项运行参数比较稳定, COP波动也很小。因此使用二氧化碳热泵热水器时尽量加热到需使用的温度, 不要冷热水混合使用(例如生活热水不要超过45℃)。

## 2.2 循环加热工况

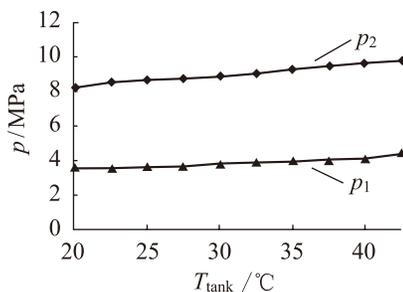


图7 压缩机进、出口压力随水箱温度的变化趋势  
Fig.7 The pressure change of compressor inlet and outlet with water tank temperature

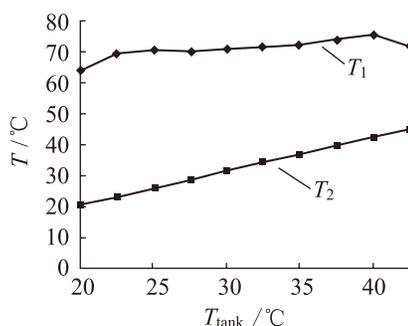


图8 压缩机排气和气冷器出口CO<sub>2</sub>温度的变化  
Fig.8 The CO<sub>2</sub> temperature change of gas cooler outlet and compressor exhaust

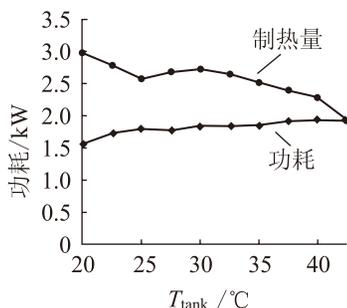


图9 制热量和功耗随水箱温度的变化  
Fig.9 The change schematic of heat transfer and power consumption

从图7可以看出, 随着水箱温度的升高, 压缩机进口压力 $p_1$ 、出口压力 $p_2$ 也逐渐升高,  $p_2$ 比 $p_1$ 升高的幅度大。压缩机的排气压力 $p_2$ 在20~40℃的温度范围内, 随着水温的升高呈线性增加; 进口压力 $p_1$ 开始时有3MPa上升至4MPa, 升高较快, 然后升

大幅度趋于平稳。说明水箱温度对压缩机排气压力影响较大。

从图8可以看出, 气冷器进口CO<sub>2</sub>温度 $T_1$ 和出口CO<sub>2</sub>温度 $T_2$ 均随水箱温度的升高而升高, 出口CO<sub>2</sub>温度 $T_2$ 与水箱温度呈线性关系, 且上升幅度较大。

图9给出了循环加热时制热量与功耗随水箱温度的变化关系。由于水箱温度的提高, 气冷器中CO<sub>2</sub>与水的温差逐渐减小, 则CO<sub>2</sub>与水的换热量减小, 制热量有比较大幅度的下降, 换热效果较差。而压缩机功耗随着水箱温度的增加而增加。

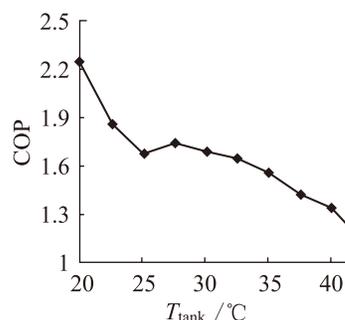


图10 系统COP随水箱温度的变化  
Fig.10 The COP change with the temperature of water tank

循环加热时, 水箱内的冷水与气冷器出口的高温水混合, 使水箱水温升高, 即气冷器进水温度升高。系统性能指标COP为制热量与制热消耗功率的比值, 从图10中可以看出, 随着水箱温度的升高, 由于换热量减小, 功耗增加, 系统的COP大幅度下降, 对系统性能造成影响。

## 2.3 水箱的改进

根据以上分析得出, 应尽量稳定和降低水箱的出水温度, 减少水箱中各部分冷热水的混合, 对水箱的内部结构进行改进。例如增加水箱保温, 选用高径比大的水箱, 加设浮动挡板或加隔热板, 采用双水箱等, 以减少水箱内部上下层高温水和低温水的换热, 从而降低气冷器进水温度, 提高系统性能。

这里提出以下四种水箱结构改进方案:

- 1) 增加横或竖挡板, 减少扰动。



图11 水箱加挡板  
Fig.11 Water tank with baffles

2) 增加一层或多层隔板, 使冷热流体分层, 减少冷热流体的混合。

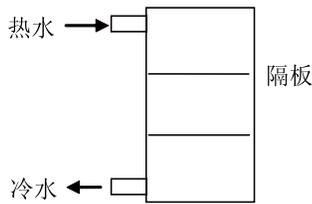


图12 水箱加隔板

Fig.12 Water tank with partition plate

3) 横竖挡板和隔板相结合, 减少冷热流体的混合。

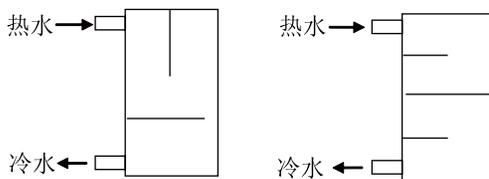


图13 水箱加隔板, 横竖挡板

Fig.13 Water tank with partition plate, horizontal and vertical baffles

4) 设置两个串联水箱, 以保证较低的供水温度。

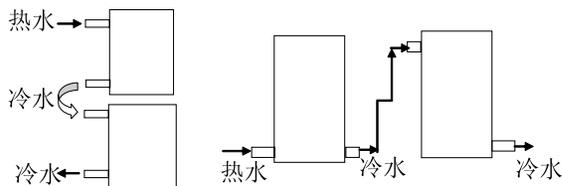


图14 两个水箱串联

Fig.14 Two tanks in series

水箱改造虽然增加了投入成本, 但与压缩机与换热器的优化、循环方式的改进、新型绝热材料的研究等方法相比, 改进水箱的方法相对简单有效, 是提高系统性能的一种有效手段。

### 3 结论

承压二氧化碳热泵热水器循环加热水箱采用普通的保温方法, 对系统性能影响较大。在此通过实验, 测试了循环加热方式(即常用热泵热水器加热方式)时的系统效率, 并与一次加热热水方式进行对比, 研究水箱水温变化对CO<sub>2</sub>热泵热水器性能的影响, 得出以下结论:

1) 采用一次加热工况, 进水温度由9℃、17℃和24℃逐渐升, 系统COP由4.0降低到3.0左右。气冷器进水温度的升高, 气冷器进、出水温差在逐渐

降低, 压缩机耗功在增加, 系统COP值降低。较低的气冷器进水温度, 可得到较高的COP。

2) 循环加热工况时, 随着水箱水温的升高, 压缩机的进、排气压力逐渐升高, 气冷器CO<sub>2</sub>进出口的温度升高, 且气冷器出口温度升高较快, 使得与进入气冷器的水的温差减小, 换热量大幅度减小而功耗增加, 二氧化碳热泵系统的COP大幅度下降。

3) 一次加热, 进水温度一定, 系统的各项运行参数稳定, COP基本保持不变, 当水温度17℃时, 系统COP在3.5左右, 高于相同运行条件下循环加热的COP。

4) 通过增设一层或多层挡板, 增设横、竖隔板, 设置两个串联水箱, 使冷热水避免相互混合, 使水箱温度分层, 保持气冷器进水温度在较低水平等方法, 可有效提高热水器系统的性能。

### 参考文献

- [1] Lorenzen G. The use of natural refrigerants: A complete solution to CFC/HCFC predicament[J]. Int J Refrig., 1995, 18(3): 190-197.
- [2] Kim M H, Pettersen J, Bullard C W. Fundamental process and system design issues in CO<sub>2</sub> vapor compression systems, progress in Energy and Combustion Science[J]. 2004, 30: 119-174.
- [3] Hihare E. R&D on heat pumps with natural working fluids in Japan[C]// 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, China, 2002: 272-279.
- [4] 罗刚, 彭三兵, 付祥钊. 一种新型水箱温度分层的相关特性研究[J]. 建筑科技, 2008, 10: 24-26. (Luo Gang, Peng Sanbing, Fu Xiangzhao. A Study on Characteristics of a New Water Tank Temperature Stratification[J]. Construction Science and Technology, 2008, 10: 24-26.)
- [5] Tatsujior Suzuki, kohts juraku. The Development and Diffusion Processes of Sustainable Technologies and Implications for Public Policy:A. Case Studies in Japan [C]// International Symposium on Dialogue between Social and Natural Sciences, February 26-28, 2007. Princess Kaiulani Hotel, Honolulu, Hawaii, U.S.A., 2007.
- [6] 王冬, 黄逊青, 钟家淞, 等. 二氧化碳热泵热水器技术发展与市场趋势[J]. 流体机械, 2009, 37(4): 72-78. (Wang Dong, Huang Xunqing, Zhong Jiasong, et al. Latest Technological Advances and Market Trends of Carbon Dioxide Heat Pump Water Heater[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(4): 72-78.)
- [7] 王祥, 刘颖, 王芳, 等. 基于仿真的R417热泵热水器蓄热水箱优化设计[J]. 流体机械, 2010, 38(9): 64-68. (Wang Xiang, Liu Ying, Wang Fang, et al. Optimum Design

- of the Storage Water Tank of Heat Pump Water Heater Using R417A Based on Emulation [J]. Fluid Machinery, 2010, 38 (9): 64-68.)
- [8] 张后雷, 刘心志, 陈士发, 等. 往复加热型双水箱空气源热泵热水器实验研究[J]. 流体机械, 2010, 38 (1): 61-66. (Zhang Houlei, Liu Xinzhi, Chen Shifa, et al. Experimental Investigation on Air Source Heat Pump Water Heater with Two Water Tanks based on Reciprocating Flow Heating[J]. Fluid Machinery, 2010, 38 (1): 61-66.)
- [9] 刘志国, 王瑞祥. 空气源热泵热水器卧式水箱内温度场研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2010, 26 (3): 29-32. (Liu Zhiguo, Wang Ruixiang. Investigation on the Temperature Distribution of the Water in Horizontal Tank of an Air Source Heat Pump Water Heater[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2010, 26 (3): 29-32.)
- [10] 王冬, 黄逊青. 二氧化碳热泵热水器水箱温度对系统性能的影响[J]. 流体机械, 2009, 37 (12): 58-61. (Wang Dong, Huang Xunqing. Influence of the Water Tank Temperature to the Performance of CO<sub>2</sub> Heat Pump Water Heater[J]. Fluid Machinery, 2009, 37 (12): 58-61.)
- [11] 时红巨. 跨临界二氧化碳热泵热水器系统仿真与水回路实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 50-55.
- [12] 陈士发. 往复加热型双水箱热泵热水器理论分析[D]. 南京理工大学, 2008: 47-63.
- [13] 全国标准化管理委员会. GB/T23137—2008家用和类似用途热泵热水器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

#### 作者简介

吕静, 女(1964-), 副教授, 上海理工大学, 环境与建筑学院, 021-55270275, E-mail: lvjing810@163.com。研究方向: 跨临界CO<sub>2</sub>循环系统的研究, 超临界CO<sub>2</sub>换热特性的研究。

#### About the author

Lü Jing (1964-), female, Associate Professor, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, 021-55270275, E-mail: lvjing810@163.com. Research fields: trans-critical CO<sub>2</sub> cycle system and the heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub>.

## 制冷学报

(1979年创刊, 双月刊)

2012年12月16日 第33卷 第6期

## Journal of Refrigeration

(Started in 1979, Bimonthly)

2012-12-16 Vol.33 No.6

主管单位: 中国科学技术协会

主办单位: 中国制冷学会

出版单位: 《制冷学报》编辑部

主 编: 吴元炜

印刷单位: 河北欣航测绘院印刷厂

发 行: 中国制冷学会秘书处

**Responsible Institution:** China Association for Science and Technology

**Sponsor:** Chinese Association of Refrigeration

**Published by:** "Journal of Refrigeration" Editorial Department

**Chief Editor:** Wu Yuanwei

**Printing by:** Printing plant of Hebei Xinhang Surveying and Mapping Institute

**Distributed by:** Chinese Association of Refrigeration

ISSN0253-4339  
CN11-2182/TB

境内定价: 人民币10元

境外定价: 美元8元