

一种蓄能型一体化太阳能热泵热水器性能分析

吴 薇, 刘兆亮, 陈 磊, 程 清, 赵 亮

(南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了一种新型的集热/蓄能/蒸发一体化太阳能热泵热水器. 该系统将太阳能集热器、蓄能容器以及热泵系统的蒸发器集于一体, 减少了现有蓄能型太阳能热泵系统多级中间换热的热损失及制造成本. 在集热/蓄能/蒸发器中加入相变材料, 以固-液相变潜热对太阳能进行储存, 利用太阳能作为热泵的低温热源制得热水, 将显著提高热泵的制热效率, 同时有效解决太阳能的间歇性所带来的系统运行不稳定问题. 虽然初投资费用有所提高, 但是该系统无论是在节能还是在节约运行费用方面都优于市场上的各种热水器, 和现有的蓄能型太阳能热泵热水器相比则降低了成本, 简化了系统, 提高了运行可靠性, 具有十分广阔的应用前景.

[关键词] 蓄能型热水器, 集热/蓄能/蒸发一体化, 相变材料

[中图分类号] TU 831.7+4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)01-0028-07

Performance Analysis on a Novel Solar Storage Heat Pump Water Heater Integrated With Collector/Storage/Evaporation

Wu Wei, Liu Zhaoliang, Chen Lei, Cheng Qing, Zhao Liang

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract A novel solar heat pump water heater integrated with collector, storage and evaporation is presented, and this novel system can reduce heat exchanging losses and manufacturing cost. By adding phase change materials into the collector/storage/evaporator, the solar energy is stored as latent heat of solid-liquid phase materials. By making use of the solar energy as low-temperature source to produce hot water, the thermal efficiency of heat pump system can be significantly increased. Moreover, the operating instability of the heat pump system caused by interval solar energy can be drastically solved. Though the initial investment is increased, the system is better than the existing water heaters in the market in terms of whether saving energy or saving costs. Compared with the existing solar energy storage heat pump water heater, the advantages of lower cost, simplified system and higher reliability would bring this novel heat pump water heater to be widely applied.

Key words storage type water heater, collector/storage/evaporation integration, phase change materials

随着我国经济的持续增长和人民生活水平的不断提高, 家庭生活用热水供应的需求越来越高, 这方面的能源消耗占家庭总能源消耗的比重也逐年增加. 目前市场上的热水器主要以电热水器、燃气热水器、太阳能真空管热水器和热泵热水器为主. 我国常规能源并不富裕, 作为市场上的主流产品, 燃气热水器和电热水器给本来就紧张的能源及环境增加了压力. 我国的太阳能资源非常丰富, 我国陆地表面年接收的太阳能总量为 5×10^{19} kJ, 相当于 164 000 个完全建成后的三峡水电站的年发电量, 具有诱人的利用前景. 太阳能又是一种节能环保、具有显著社会效益的新能源, 所以太阳能热水器得到了广泛的应用. 由于太阳能的不连续性和对天气的依赖性, 普通的太阳能热水器在夜间和连续阴雨天无法正常工作, 需要开启电加热辅助, 消耗电能, 不节能也不环保. 市场上新兴的热泵热水器与传统热水器相比已有较大的节能效果, 但是其制热效率受到环境条件的制约, 尤其在寒冷天气, 效率较低. 如果将太阳能利用技术和热泵技术结合起来, 以太阳能作为热泵的低温热源, 可大大提高热泵的制热性能, 实现系统节能、稳定地提供生活热水.

收稿日期: 2008-11-13
基金项目: 江苏省高校自然科学基金(07KJB480060)资助项目.
通讯联系人: 吴 薇, 副教授, 研究方向: 制冷与节能技术. E-mail: wuwe@njnu.edu.cn

1 太阳能热泵研究现状

太阳能与热泵联合运行的思想, 最早由 Jordan 和 Thekehl^[1]于 20 世纪 50 年代提出, 此后世界各地众多研究者相继进行了研究. 日本神奈川科技研究所的 Ito 和 Miura^[2]做了一系列的理论与实验研究, 建立了太阳能热泵的数学模型对系统的运行特性进行模拟, 并开展实验研究, 分析研究采用不同结构、尺寸的集热板对系统性能的影响. 墨西哥的 E. Torres-Reyes, J. Cervantes de Gortari^[3]进行了系统的热力学最优化. 墨尔本大学的 Lu Aye^[4]等人对直接膨胀式太阳能热泵热水器在澳大利亚的实际使用进行了性能测试与研究, 证明了在太阳辐射较强区域, 此热水系统的实际运行稳定、高效, 节能效果显著.

自上世纪 90 年代后期, 太阳能热泵开始被国内一些高校关注. 东南大学针对典型太阳能热泵系统, 给出了系统各设备的能量平衡方程^[5], 对太阳能热泵系统的校核与设计具有指导意义. 上海水产大学采用层次分析法对不同类型的太阳能热泵进行了综合评价^[6], 建立了太阳能热泵层次结构模型, 对太阳能热泵系统设计时系统形式的选择和系统运行效果综合评价均具有借鉴意义. 台湾国立大学、浙江大学、天津大学、哈尔滨工业大学、青岛理工大学、上海交通大学、上海水产大学、北京工业大学等科研单位也都对太阳能热泵系统进行了理论和实验方面的研究. 此外东南大学陈振乾、施明恒^[7]等对太阳能驱动的第二类吸收式热泵的性能进行了数值模拟, 天津大学的田琦^[8]对太阳能喷射式制冷系统的能耗进行了研究, 中科院广州能源所的李戡洪^[9]等对溴化锂太阳能吸收式制冷机运行参数系统特点进行了研究. 我国众多企业也做了大量的尝试, 如北京中科院能源高科技有限公司、山东康特姆新能源有限公司等. 这些都推动了太阳能热泵供热水系统的进一步发展.

但是太阳能热泵要得到实际应用和普遍推广面临的最大问题是要解决如何在阴雨天、夜间或太阳辐射不足时仍能高效、稳定地工作. 东南大学^[10]、上海交通大学^[11-13]等一些学者考虑到同时利用太阳能和空气源, 系统采用制冷剂作为太阳能集热介质直接在集热板中吸热蒸发, 太阳能集热板同时作为热泵蒸发器, 通过热泵将热量释放给水箱中被加热的水. 太阳能充足时集热效率高热泵性能提高; 太阳辐射较弱时, 制冷剂同时吸收太阳辐射能和空气中热量, 太阳能和空气源同时作为低温热源驱动热泵; 没有太阳能可利用时直接利用空气源作为热泵的低温热源. 中科院广州能源所^[14]提出了太阳能、空气双热源热泵热水系统, 采用直流式真空管太阳能集热器和双热源热泵机组. 太阳能充足时, 太阳能热水经换热器直接给热水箱加热; 太阳能不足时, 低温太阳能热水进入双热源热泵机组辅助热泵工作, 热泵机组再给热水箱加热; 没有太阳能时, 空气源热泵直接对热水箱加热. 这些系统虽然保证了全年、全天候供应热水, 但初投资成本高, 系统需要根据太阳辐射进行多种工况切换运行比较复杂, 而且寒冷季节热泵效率低. 青岛理工大学热泵实验室^[15-16]建立了太阳能热泵试验台, 考虑通过蓄能来解决太阳能热泵的关键问题, 以工业酒精-水溶液为载热介质, 阴雨季节利用载热介质的显热来储存太阳作为热泵的低温热源从而获得生活热水.

但是这些太阳能热泵或没有蓄能装置, 或仅仅以溶液(水溶液、乙醇溶液等)为介质通过显热来储存太阳能, 储存的能量很有限. 为此哈尔滨工业大学^[17]提出了太阳能季节性相变蓄热热泵系统, 在蓄热器中充入相变材料($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 利用相变蓄热材料将夏季或冬季白天辐射较强时的太阳能贮存起来, 作为冬季夜晚或阴天热泵的低位热源, 解决了冬季利用热泵直接供热效率过低的问题. 而且该系统利用相变潜热贮存能量, 比利用显热蓄热时蓄热装置体积明显减小, 蓄热效率提高. 但是该系统比较复杂, 利用载热介质从蓄热器中取出热量作为热泵低位热源, 二次传热损失大.

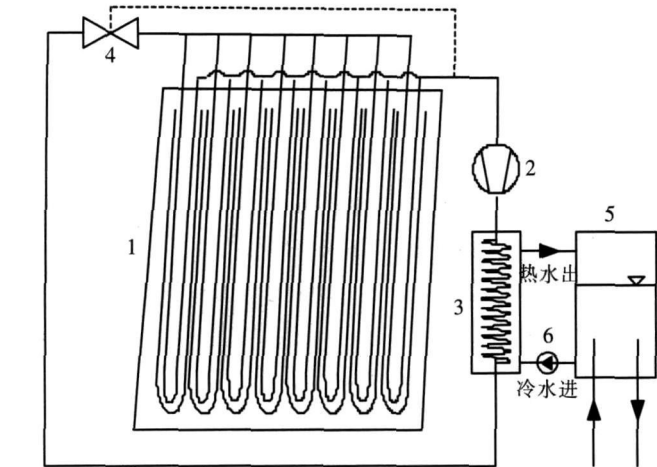
鉴于以上研究, 本文提出了一种新颖的蓄能型一体化太阳能热泵热水器系统.

2 集成蓄能型太阳能热泵热水器系统原理

2.1 系统原理

本系统将太阳能集热器和热泵蒸发器进行有机结合, 在太阳能集热器中加入有机相变材料, 以固-液相变潜热对太阳能进行储存. 如图 1 所示, 系统由太阳能集热/蓄能/蒸发器(1)、压缩机(2)、水冷冷凝器(3)、电子膨胀阀(4)、水箱(5)、水泵(6)组成. 太阳能集热/蓄能/蒸发器和压缩机、水冷冷凝器的制冷剂管、电子膨胀阀串联连接成一个闭合的回路; 水冷冷凝器水冷管、水泵、水箱串联连接成一个闭合的回路. 经过电子膨胀阀节流降压后的制冷剂经过主管分别送至 U 形蒸发管, 吸收太阳能或真空集热管内相变材

料储存的太阳能后蒸发, 经过制冷剂出口主管统一进入压缩机, 再经过水冷冷凝器后与电子膨胀阀相连. 水冷冷凝器放出的热量由冷却介质——水带走, 储存在水箱中, 用来提供生活热水.



1. 太阳能集热/蓄能/蒸发器; 2. 压缩机; 3. 水冷冷凝器; 4. 电子膨胀阀; 5. 储水箱; 6. 水泵; 7. 真空集热管; 8. 制冷剂蒸发管; 9. 毛刷; 10. 相变材料

图 1 蓄能型太阳能热泵热水器系统原理图

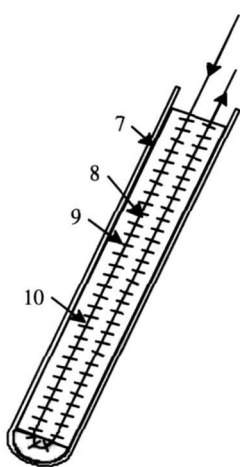


图 2 太阳能集热/蓄能/蒸发器结构示意图

Fig.1 Schematic of the integrated solar-energy heat pump water heater

Fig.2 Diagram of solar collector / storage / evaporator structure

太阳能集热 /蓄能 /蒸发器如图 2 所示, 集太阳能集热器、蓄能容器以及热泵系统的蒸发器于一体. 热泵系统的蒸发器以 U 形蒸发管的形式布置于太阳能真空集热管中, 每根蒸发管与真空集热管中间均以相变材料填充起到蓄能容器的作用. 蒸发管外每隔一定距离以盘绕的方式布置毛刷, 解决相变材料相变时由于密度变化引起分布不均问题, 同时起到了肋片强化传热的作用.

2. 2 系统运行模式

2 2 1 集热 /蓄能 /蒸发器蓄热、供热模式

当太阳能辐射强度高时如夏季白天, 系统以太阳能为低位热源, 同时太阳能集热器中的蓄能介质融化以固 - 液相变潜热对太阳能进行储存, 蓄热并导热. 通过太阳能真空集热管、相变蓄能介质、蒸发器传热管的共同作用, 可把热泵蒸发温度相对于环境温度提高, 系统性能系数提高.

2 2 2 集热 /蓄能 /蒸发器部分释热模式

当太阳辐射不足时如冬季阴雨天, 制冷剂吸收太阳辐射能, 同时集热 /蓄能 /蒸发器中的蓄能材料部分发生液 - 固相变将储存的太阳能释放出来, 作为低温热源驱动热泵.

2 2 3 集热 /蓄能 /蒸发器释热模式

连续阴雨天气或夜间没有太阳能可利用时, 集热 /蓄能 /蒸发器中的蓄能材料发生液 - 固相变将储存的太阳能释放出来, 作为热泵系统低温热源驱动热泵系统.

2. 3 系统特点

(1) 太阳能集热 /蓄能 /蒸发器集太阳能集热器、蓄能容器以及热泵系统的蒸发器于一体, 减少了换热环节, 省去了热媒循环系统, 使制造成本降低, 同时由于通过太阳能真空集热管、相变蓄能介质、蒸发器传热管的共同作用, 可把热泵蒸发温度相对于环境温度提高并维持在 20~ 40℃ 之间, 加之减少了中间换热环节和环境热损失, 提高了热泵的供热系数.

(2) 蒸发管外每隔一定距离以盘绕的方式布置毛刷, 解决相变材料相变时由于密度变化引起分布不均问题, 同时起到了肋片强化传热的作用.

(3) 在太阳能集热器中加入相变材料, 以固 - 液相变潜热对太阳能进行储存, 保障热水器全天候地高效工作, 有效解决了太阳能的间歇性所带来的系统工作不稳定问题.

该系统除了适用于家庭生活外, 还可以节能环保地向宾馆、休闲场所、泳池、美容美发店等提供热水.

3 集成蓄能型太阳能热泵热水器系统能耗计算

根据国标 (GB/T 50331—2002城市居民生活用水量标准) 规定, 平均每人每天约消耗 50℃热水 80 L, 以城市中以 3 口之家为例, 则热水器系统每天需制取 50℃的水 240 L^[18], 设环境温度下冷水平均温度为 15℃, 则:

制取一天所用热水的需热量 $Q = cm \Delta t = 240 \times 4.18 \times (50 - 15) = 35\,112\text{ kJ}$ (1)

以南京地区冬季为例, 计算不同类型热水器耗电量及电费, 能源价格见表 1.

表 1 能源价格表
Table 1 List of energy price

项目	热值	价格	单位能耗价格
城市煤气	15.9 MJ/m ³	0.95 ¥/m ³	59.7 × 10 ⁻³ ¥/MJ
液化石油气	95.0 MJ/m ³	11.0 ¥/m ³	11.5 × 10 ⁻³ ¥/MJ
天然气	35.6 MJ/m ³	3 ¥/m ³	84.2 × 10 ⁻³ ¥/MJ
民用电	3.6 MJ/(kW·h)	0.52 ¥/(kW·h)	14.44 × 10 ⁻² ¥/MJ

3.1 城市煤气

煤气热值取 15.9 MJ/m³, 一般煤气加热形式热水器效率为 80%^[19], 城市煤气供应价格为 0.95 ¥/m³, 所以运行费用为 2.6元, 则:

煤气消耗量 $\frac{Q}{0.8 \times 15\,900} = 2.76\text{ m}^3$, (2)

折合电量 $W = \frac{2.6}{0.52} = 5\text{ kW} \cdot \text{h}$ (3)

3.2 天然气

天然气热值取为 35 600 kJ/m³, 燃气热水器加热效率通常取为 80%, 管道天然气平均供应价格为 3 ¥/m³, 燃气热水器冬季运行费用约为 3.69元, 则

天然气消耗量 $\frac{Q}{0.8 \times 35\,600} = 1.23\text{ m}^3$, (4)

折合电耗量 $W = \frac{3.69}{0.52} = 7.10\text{ kW} \cdot \text{h}$ (5)

3.3 液化石油气

液化石油气热值取 95.0 MJ/m³, 液化气的加热效率为 80%, 液化气的价格为 11 ¥/m³, 所以运行费用为 5.08元, 则:

消耗液化气量 $\frac{Q}{0.8 \times 95\,000} = 0.462\text{ m}^3$, (6)

折合电量 $W = \frac{5.08}{0.52} = 9.77\text{ kW} \cdot \text{h}$ (7)

3.4 电热水器

根据国标, 贮水式电热水器加热效率不能低于 85%, 取电热水器效率为 90%, 电价 0.52 ¥/(kW·h), 则:

电热水器耗电量 $\frac{Q}{0.9 \times 3\,600} = 10.84\text{ kW} \cdot \text{h}$ (8)

运行费用约为 5.64元人民币.

3.5 太阳能热水器

查阅不同地区全年太阳辐射情况, 南京属第 4类太阳辐射量地区: 全年辐射总量为 4 190 ~ 5 016 MJ/m², 全年日照时数为 1 400 ~ 2 200 h^[20]. 冬季相对于全年的辐射总量和日照时数偏低, 所以分别取辐射量为 4 500 MJ/m², 日照时数 1 600 h, 则:

辐射功率 $P = 4\,500\text{ MJ}/1\,600\text{ h} = 0.78\text{ kW/m}^2$. (9)

设冬季平均吸收率为 0.34^[20], 平均热损失 0.9 W/(m²·℃), 240 L太阳能热水器配真空管 24根吸热

面积为 3.94m^2 , 则

传热损失

$$P_s = 0.9 \times 10^{-3} \times (50 - 15) = 0.0315 \text{ kW} / \text{m}^2,$$

(10)

真空管的实际吸收功率 $P = 0.78 \times 0.34 - 0.0315 = 0.2337 \text{ kW} / \text{m}^2,$

(11)

每天需要辐射时间

$$t = \frac{Q}{(3600 \times 0.2337 \times 3.94)} = 10.59 \text{ h}$$

(12)

冬季每天的日照时间平均约为 6 h 若想达到预定温度还要电加热辅助, 则:

每天所要消耗的电

$$(10.59 - 6) \times 0.2337 \times 3.94 = 4.23 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

(13)

运行费用约为 2.20 元人民币.

3.6 热泵热水器

选用 R22 作为制冷剂, 蒸发温度 10°C , 冷凝温度 55°C , 过冷度选 3°C , 过热度选 12°C , 指示效率 η_i 取 0.8 机械效率 η_m 取 $0.9^{[21]}$, 计算得出 $\text{cop} = 3.93$

需耗电

$$\frac{Q}{0.9 \times (1 + 3.93) \times 3600} = 2.20 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

(14)

运行费用约为 1.14 元人民币.

3.7 集热 / 蓄能 / 蒸发一体化太阳能热泵热水器

常用相变储能材料有十水硫酸钠、月桂酸、正十七烷、正十八烷等, 根据冬季太阳能集热温度即相变温度和储能材料的性能 (如十水硫酸钠相变后结晶水的数量会发生变化, 性能也随之变化), 同时考虑价格等因素, 综合分析后我们选用了癸酸作为实验的相变储能材料. 癸酸的基本性质见表 2

表 2 癸酸的基本性质
Table 2 Primary nature of the acid

名称	别名	分子式	相对分子量	熔点 / $^\circ\text{C}$	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	熔化潜热 / $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
癸酸	正硅酸	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	172.27	31.64	878.2	155.457

冬季太阳辐射较强时, 蒸发器中制冷剂吸收太阳辐射能的同时, 集热 / 蓄能 / 蒸发器中的蓄能材料部分发生固 - 液相变将太阳能储存起来; 太阳辐射不足时, 集热 / 蓄能 / 蒸发器中的蓄能材料发生液 - 固相变将储存的太阳能释放出来, 作为低温热源驱动热泵系统. 相变材料癸酸的相变温度为 31.64°C , 考虑传热温差选蒸发温度 24°C , 相对于冬季平均环境温度 15°C , 采用蓄能型太阳能热泵热水器比普通太阳能热泵热水器提高了系统的蒸发温度, 使得系统性能系数增加.

选用 R22 作为制冷剂, 冷凝温度 55°C , 蒸发温度取 24°C , 过冷度选 3°C , 过热度选 12°C , 指示效率 η_i 取 0.8 机械效率 η_m 取 $0.9^{[21]}$, 计算得出 $\text{cop} = 5.81$.

需耗电

$$\frac{Q}{0.9 \times (1 + 5.81) \times 3600} = 1.59 \text{ kW} \cdot \text{h},$$

(15)

运行费用约为 0.83 元人民币.

各种类型热水器投资费用和运行费用比较见表 3

表 3 不同类型的水热器投资和运行费用比较

Table 3 Comparison of investment costs and operation costs of water heaters

项目	理论耗能 / MJ	效率 / $\%$	运行费用 / 10^{-2} ¥L^{-1}	初投资 / ¥
城市煤气	35.112	80	1.08	1500
天然气		80	1.54	1500
液化气		80	2.12	1500
电热水器		90	2.35	1800
太阳能电辅助		90	0.90	2000
热泵热水器		393	0.48	2300
蒸发温度 24°C 时一体化太阳能热泵热水器		581	0.37	3000

由以上计算可知, 采用不同的热水器, 每 L 水耗能对比见图 3 不同热水器每天运行费用对比见图 4 从以上结果可以看出, 电热水器费用最高, 集热 / 蓄能 / 蒸发一体化热泵热水器耗能最少, 费用最少, 最节能. 从热力学第二定律的角度出发, 使用传统的燃气热水器和电热水器生产 50°C 的生活热水, 也是对高品位的石化能源和电能的一种低效率利用. 以蒸发温度 24°C 为例, 一体化热泵热水器分别比城市煤气、天

然气、液化石油气、电热水器、太阳能辅助热水器、热泵热水器节能 66.15%、76.15%、81.08%、84.37%、59.26%、22.81%。而每节约 1 kWh 电可减少排放二氧化硫 1.309×10^{-3} kg、二氧化碳 0.403 kg 氮氧化物 1.14×10^{-3} kg 故可知若大力推广新型的集热 / 蓄能 / 蒸发一体化太阳能热泵热水器可有效减少温室气体的排放, 达到明显的节能减排的效果。

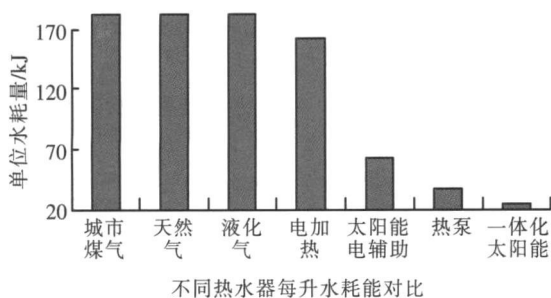


图 3 不同热水器每升水耗能对比

Fig.3 Energy cosumption comparison of water heaters

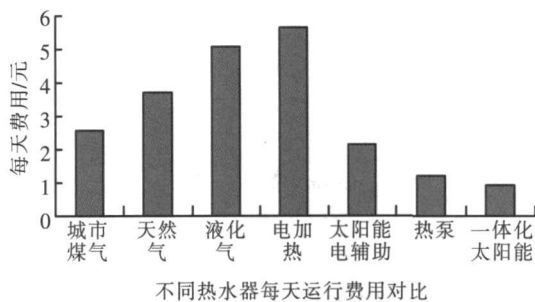


图 4 不同热水器每天运行费用对比

Fig.4 Operating costs comparison of water heaters

4 结 论

该系统冬季供热系数能达到 5.0 以上, 具有集热储热量大和系统运行效率高的优点, 将大幅度提高能源利用率和保障热水器稳定地工作。虽然初投资费用有所提高, 但是在节能和节约费用方面都优于市场上各类热水器, 比市场上各类热水器节能 20% 以上。与现有的蓄能型太阳能热泵热水器相比则降低了成本, 简化了系统, 提高了运行可靠性。可实现太阳能热水器高效、全天候、稳定地运行, 具有十分广阔的应用前景, 对于建筑节能和我国能源战略的可持续发展具有重要意义, 可望产生巨大的经济效益和社会效益。

在后续的工作中, 我们将继续完善该方案的研究。进一步建立集热 / 蓄能 / 蒸发器热量传递过程的数学模型, 研究集热 / 蓄能 / 蒸发器中热传递的规律; 通过实验研究集热 / 蓄能 / 蒸发器在不同环境条件、不同相变材料、不同传热管结构下蓄能和传热的工作特性。另外关于可全年工作的一体化热水器系统以及双热源集热 / 蓄能冷热水系统的研究也在开展中。

[参考文献] (References)

- [1] Jordan R C, TherkeH J L Design and economics of solar energy heat pump systems[J]. ASME Journal Section, Heating Piping and Air Cond. 1954(26): 122-130
- [2] Ito N, M iura, W ang K. Perfomance of a heat pump using direct expansion solar collectors[J]. Solar Energy. 1999 65(3): 189-196
- [3] Torres Reyes E, Cervantes de Gortari J Optimal performance of an irreversible solar assisted heat pump[J]. Exergy Int J. 2001, 1(2): 107-111
- [4] Lu Aye, ChartersW W S, ChaichanaC. Solar heat pump systems for domestic hotwater[J]. Solar Energy. 2002, 73(3): 169-175
- [5] 张小松, 兰国彬, 杜垚, 等. 太阳能热泵组合系统中的设备能量平衡[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 19(1): 23-25.
Zhang Xiaosong, Lan Guobin, Du Kai, et al The energy balance of instruments in solar energy heat pump[J]. Building Energy and Environment. 2000, 19(1): 23-25 (in Chinese)
- [6] 刘立平, 葛茂泉. 太阳能热泵系统的综合评价[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(4): 343-346
Liu Liping, Ge Maoquan. Comprehensive evaluation of solar assisted heat pump[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(4): 343-346 (in Chinese)
- [7] 凌辰, 陈振乾, 施明恒. 太阳能驱动第二类吸收式热泵的模拟研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(1): 90-94
Ling Chen, Chen Zhenqian, Shi Mingheng. Numerical simulation of an absorption heat pump (Type II) driven by solar energy[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition. 2002 32(1): 90-94 (in Chinese)
- [8] 田琦, 张于峰, 陈冠益, 等. 冷暖联供太阳能喷射制冷系统的一次能耗. [J] 太阳能学报, 2004, 25(6): 826-831.
Tian Qi, Zhang Yufeng, Cheng Guanyu, et al Primary traditional energy consumption of solar ejector refrigeration system [sup

- pying cooling and heating[J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2004 25(6): 826-831. (in Chinese)
- [9] 李戡洪, 白宁, 马伟斌. 大型太阳能空调/热泵系统[J]. 太阳能学报, 2006 27(2): 152-158
Li Jianhong Bai Ning Ma Weibin Large solar powered air conditioning-heat pump system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2006 27(2): 152-158 (in Chinese)
- [10] 徐国英, 张小松. 太阳能-空气复合热源热泵热水器的性能模拟与分析[J]. 太阳能学报, 2006 27(11): 1148-1154
Xu Guoying Zhang Xiaosong Analysis on the operating characteristics of solar- air source heat pump water heater[J]. Acta Energiae Solaris Sinica 2006 27(11): 1148-1154. (in Chinese)
- [11] 李郁武, 王如竹, 王泰华, 等. 直膨式太阳能热泵热水器运行特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006 27(6): 923-925
Li Yuwu Wang Ruzhu Wang Taihua et al Experimental study on the operational characteristics of direct expansion solar assisted heat pump water heater[J]. Journal of Engineering Thermophysics 2006 27(6): 923-925. (in Chinese)
- [12] 马伟斌, 龚宇烈. 太阳能-空气双热源热泵中央热水系统[J]. 建筑新能源, 2006(5): 74-75
Ma Weibin Gong Yulie Solar air heat pump central hot water system[J]. Construction Science and Technology 2006(5), 74-75. (in Chinese)
- [13] 张喜明, 白莉, 王佩元. 太阳能热水系统的实验研究[J]. 节能技术, 2004 22(128): 56-57
Zhang Ximing Bai Li Wang Peiyuan Experimental study on solar water heating system[J]. Energy Conservation Technology 2004 22(128): 56-57 (in Chinese)
- [14] 姜益强, 姚杨, 马最良, 等. 太阳能季节性相变蓄热泵供暖系统的模拟研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(3): 15-20
Jiang Yiqiang Yao Yang Ma Zuiliang et al Simulation of a heat pump heating system based on seasonal solar energy storage by phase change material used in hab in[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning 2007, 37(3): 15-20 (in Chinese)
- [15] 王伟. 双级压缩空气源热泵热水器系统的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006 64-66
Wang Wei Study on two stage compression air source heat pump water heater system[D]. Nanjing Nanjing University of Technology 2006 64-66 (in Chinese)
- [16] 李舒宏, 武文斌, 张小松, 等. 太阳能热泵热水装置试验研究与应用分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 82-85
Li Shuhong Wu Wenbin Zhang Xiaosong et al Experimental study and application analysis on solar assisted heat pump water heater device[J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition 2005, 35(1): 82-85. (in Chinese)
- [17] 罗运俊, 何梓年, 王长贵. 太阳能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005 26-27, 235-240
Luo Yunjun He Zinian Wang Changgui Solar Energy application Technologies[M]. Beijing Chemical industry press 2005 26-27, 235-240. (in Chinese)
- [18] 吴业正, 韩宝琦. 制冷原理及设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1997: 44-57.
Wu Yezheng Han Baoqi Principle and Refrigeration Equipment[M]. Xi'an Xi'an Jiaotong University Press 1997 44-57 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]