

建筑一体化的蓄能型太阳能热泵热水器初步研究

王玲珑,吴 薇,赵士林,吴宇翔,倪周珂

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对普通太阳能热水器在夜间和连续阴雨天无法正常工作的状况,提出了一种新型的建筑一体化蓄能型太阳能热泵热水器.蓄能型振荡热管太阳能集热器基于振荡热管作为热传递媒介,将瞬时太阳能或者集热器中相变材料储存的太阳能传递给热泵系统蒸发器,并利用热泵循环加热热水,用以提供生活热水.对系统进行相变材料的选择和蓄能特性的分析.以南京冬季为例,开展了建筑一体化的蓄能型太阳能热泵热水器节能特性理论计算,结果表明该热水器在节能和减少污染物排放方面都优于目前市场上的热水器.在建筑物密集化、单位居民住宅太阳能辐射占有率较低的情况下,建筑一体化的提出将节约空间,减少能源消耗和污染物排放,具有十分广阔的应用前景.

[关键词] 建筑一体化,蓄能型太阳能热泵热水器,振荡热管

[中图分类号]TK519 [文献标志码]A [文章编号]1672-1292(2013)03-0045-07

Preliminary Study of Storage Type Solar Heat Pump Water Heater Integrated With Buildings

Wang Linglong, Wu Wei, Zhao Shilin, Wu Yuxiang, Ni Zhouke

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: A novel storage type solar heat pump water heater integrated with buildings is presented against the fact that ordinary solar water heater cannot work normally during the nights and consecutive rainy days. Based on oscillating heat pipe as a heat transfer medium, it transfers instantaneous solar energy or the energy stored by PCM in the collectors to the evaporator of heat pump system. Moreover, the system uses heat pump to heat water and provide domestic hot water. Then a suitable PCM is chosen and PCM's storage characteristics are analyzed. The energy efficiency calculation of the storage type solar heat pump water heater integrated with buildings is carried out. The results show that the type solar heat pump water heater integrated with buildings is superior to a variety of water heaters on the market in energy efficiency and reducing emissions of pollutants. The proposal of integration with buildings will save space, reduce energy consumption and pollutant emissions under the conditions of intensive buildings and low share of unit residential solar radiation. It has a very broad application prospect.

Key words: integration with buildings, storage type solar heat pump water heater, oscillating heat pipes

1 研究背景和现状

随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,人们对热水供应的要求也越来越强烈.目前应用较为广泛的水热器主要有燃气热水器、电热水器、太阳能热水器和热泵热水器,特别是太阳能热水器和电热水器的市场占有率较大.燃气热水器能源消耗多、CO₂ 排放量大;电热水器有漏电隐患,消耗高品质的电能;太阳能热水器在夜间或连续阴雨天无法运行,需要开启电加热辅助,消耗电能;热泵热水器热效率受环境气候影响,性能波动大.如果将热泵技术和太阳能利用技术结合起来,利用太阳能作为热泵的低温热源,则可以提高热泵系统的整体性能,克服寒冷季节效率低的缺陷.

收稿日期:2013-05-31.
基金项目:江苏省自然科学基金面上研究项目(BK2011791).
通讯联系人:吴薇,副教授,研究方向:制冷与节能技术. E-mail: wuwei@ njnu. edu. cn

20 世纪 50 年代以来,很多发达国家已经开始研究、开发太阳能热泵系统^[1-3]. 90 年代以后,上海交通大学、天津大学、东南大学、哈尔滨工业大学、台湾国立大学等高校开始对各种型式的太阳能热泵系统进行了理论、实验及模拟研究,并且取得了一定的成果. 但是这些系统或多或少存在一些问题,例如,上海交通大学搭建的直膨式太阳能热泵热水器实验样机^[4,5],系统 COP 受太阳辐射的影响较大,太阳辐射强度范围在 250 ~ 955 W/m² 之间时,COP 的变化值为 3.1 ~ 6.6,若太阳辐射强度低于 250 W/m²,则无法正常制取热水. 东南大学张小松教授^[6,7]设计了一种由热泵系统和太阳能热水器复合而成的复合热源太阳能热泵系统,可根据太阳辐射强度选择在不同模式之间切换,但都没有涉及将太阳能在太阳辐射强时储存起来,待到太阳辐射强度不足时再利用. 哈尔滨工业大学提出的太阳能季节相变蓄热热泵系统^[8],夏季利用相变材料(CaCl₂·6H₂O)将太阳能储存起来,冬季通过热泵系统将储存的热量从相变材料中取出来,不仅解决了显热蓄能的种种缺陷,还解决了冬季利用热泵效率低的问题,但是系统复杂,需要另设蓄热装置. 马最良教授^[9]将太阳能热泵和空气源热泵通过 3 套管蓄能换热器有机结合,太阳能加热热水后,通过蓄能材料传热给制冷剂,但增加了传热损失.

振荡热管比起普通热管,具有结构简单、体积小、成本低、热响应快等优点,传热性能更优良,适应性更强,可根据使用要求弯曲^[10]. 振荡热管是由日本的 Akachi 于 20 世纪 90 年代初提出的^[11]. Rittidech^[12,13]等发现充有 R134a 工质的开放和闭合回路的振荡热管应用到太阳能集热器中,集热效率分别可达 62% 和 76%,能够和普通热管太阳能集热器相媲美,但价格更低廉,且具有抗冻优势.

1998 年 10 月国家经贸委和建设部提出了我国太阳能系统建筑一体化问题的必要性和紧迫性. 太阳能热水器与建筑一体化包括:建筑的使用功能与太阳能热水器的利用有机地结合在一起,形成多功能的建筑构件,高效利用空间;同步规划设计,同步施工安装,节省太阳热水系统的安装成本和建筑成本等.

鉴于以上研究,现提出建筑一体化的蓄能型太阳能振荡热管热泵热水器,其具有储热量大和运行效率高的优点,将大大提高热水器的能源利用率、减少污染物排放、保障热水器高效率地工作. 从节能和减少污染物排放的角度都优于传统的燃气热水器、电热水器、热泵热水器以及电辅助加热的太阳能热水器,对于节能减排和我国能源战略的可持续发展具有重要意义.

2 建筑一体化的蓄能型太阳能热泵热水器工作原理

如图 1、2 所示,建筑一体化的蓄能型太阳能热泵热水器将蓄能型太阳能振荡热管集热器通过框架和螺母固定在建筑屋顶或外墙上,热泵系统置于屋顶或贴着外墙布置,不占用室内空间,实现与建筑的一体化.

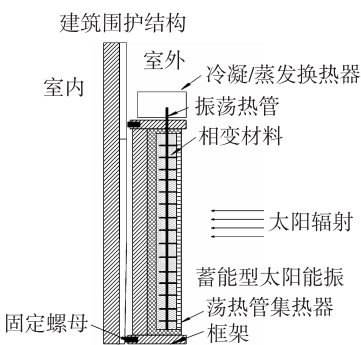
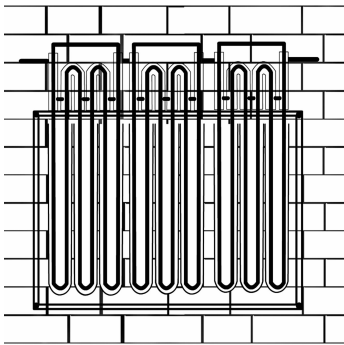


图 1 蓄能型太阳能热泵热水器与墙体结合示意图

Fig. 1 Diagram of storage type solar heat pump water heater integrated with wall

图 2 蓄能型太阳能热泵热水器与墙体结合侧视图

Fig. 2 Lateral view of storage type solar heat pump water heater integrated with wall

该系统的原理图如图 3 所示,系统由蓄能型振荡热管太阳能集热器(1)、冷凝/蒸发换热器(2)、压缩机(3)、水冷冷凝器(4)、节流阀(5)、储水箱(6)和水泵(7)组成. 由多个热泵蒸发器、压缩机、水冷冷凝器、节流阀串联连接成一个闭合的制冷剂循环回路. 由水冷冷凝器、水泵和储水箱串联连接成水循环回路.

为减少集热器的传导换热损失、对流换热损失和辐射换热损失,提出了真空管集热器,为提高太阳能集热器运行温度,研究了热管式真空管集热器,在此基础上提出了蓄能型振荡热管太阳能集热器,其结构

如图 4 所示,包括太阳能集热管(10)、振荡热管(11)及翅片(12)和相变材料(13). 振荡热管的蒸发段以 U 形管形式布置在太阳能真空集热管内,管外有翅片加强传热,振荡热管与真空管之间以相变材料填充,发生固液相变起到蓄能作用. 振荡热管的冷凝段与热泵蒸发器组合成冷凝/蒸发换热器.

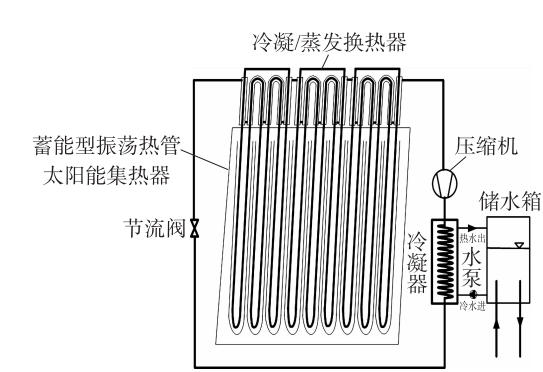


图 3 系统原理图

Fig. 3 Principal diagram of the system

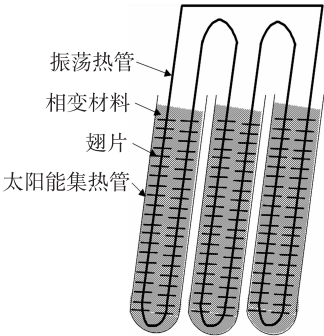


图 4 蓄能型振荡热管太阳能集热器结构示意图

Fig. 4 Diagram of storage type oscillating heat pipes of solar collector

振荡热管也称为脉动热管、自激振荡流热管、回路热管等,其工作机理不同于普通热管,管中的工作介质因为沸腾、冷凝、表面张力、压力等原因,形成汽液栓振荡两相循环流动,导热能力可达到现有金属材料的数十倍^[14]. 因此,考虑利用振荡热管做媒介将太阳能集热器中相变材料释放的热量传递给热泵系统蒸发器,缩短热泵系统的管路,有效提高系统整体性能.

当太阳能充足时,太阳能真空集热管的相变材料将一部分热量通过固-液相变储存起来,另一部分热量传递给振荡热管. 当太阳能不足或者没有太阳能可利用时,真空管内相变材料通过液-固相变将之前储存的太阳能释放出来,传递给振荡热管,实现对太阳能的移峰填谷作用. 振荡热管将热量传递给热泵蒸发器中的制冷剂,制冷剂得到热量汽化成蒸气,经压缩机加压后进入冷凝器,在其中放出热量冷却凝结,释放的热量用以加热冷凝器另一侧的水,冷却凝结后的制冷剂液体通过节流阀节流后进入热泵蒸发器,继续吸收振荡热管传递的热量,如此完成一个循环. 冷凝器另一侧的水吸热后升温用以提供生活热水.

3 相变材料的选择

3.1 相变材料的类型

常用相变储能材料有癸酸、石蜡、十水硫酸钠、月桂酸、正十七烷、正十八烷等,根据相变温度和价格等因素,选择癸酸、石蜡、月桂酸作为相变储能材料进行理论计算. 其相关参数如表 1 所示.

表 1 4 种相变材料相关参数

Table 1 Parameters of four phase change materials

名称	相变温度/℃	比热/kJ/(kg·K)		密度/(kg·m ⁻³)		相变潜热/(J·g ⁻¹)	单价:元/kg
		固态	液态	固态	液态		
癸酸	32	1.95	1.72	1 004	878	152	47
月桂酸	44	1.76	2.27	883	883.2	177	72
48#石蜡	48	3		912	769	234	38
54#石蜡	54	3		912	769	280	38

3.2 选用不同相变材料后系统的理论计算

计算参数选取说明:

①根据国标(GB/T50331—2002)规定,平均每人每天约消耗 50℃~60℃热水 40~50 L,以城市三口之家为例,则热水器系统每天需制取 55℃淋浴用热水 140 L;

②以南京为例,取热泵系统冷凝器进口水温为 15℃;

③热泵系统的制冷工质为 R134a;

④取蒸发器出口的过热度为 10℃,冷凝器出口的过冷度为 3℃,热泵系统冷凝器侧传热温差为

10 ℃^[15];

⑤热管蒸发侧与相变材料传热温差 15 ℃,冷凝侧与热泵蒸发器的传热温差取 10 ℃^[16];

⑥热泵系统机械效率 $\eta_m=0.9$,指示效率 $\eta_i=0.8$ ^[15];

⑦循环过程过冷度取 3 ℃,过热度取 10 ℃;

⑧相变材料价格来源:南京晚晴化玻仪器有限公司.

热泵系统冷凝器热负荷总量:

$$Q_k=C\cdot m\cdot \Delta t=4.18\times 140\times (55-15)=23\,408\text{ kJ}.$$
 (1)

由 R134a 的 P-h 图(图 5)查得相关参数,进行循环的热力计算,得到所需相变材料的质量、费用及系统的日耗电量,结果如表 2 所示.

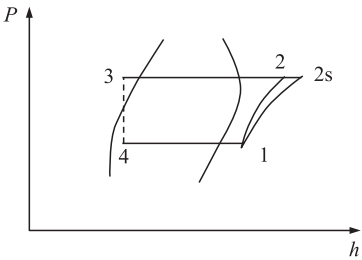


图 5 蓄能型太阳能热泵热水器循环图
Fig.5 Circulation diagram of storage type solar heat pump water heater

表 2 4 种相变材料费用对比

Table 2 Cost comparison of four phase change materials				
相变材料	相变材料质量/kg	相变材料费用/元	日耗电量/(kw·h)	系统 COP
癸酸(CA)	126.00	5 922.00	1.52	4.27
月桂酸(LA)	116.43	8 382.92	1.07	6.05
48#石蜡	88.51	3 363.36	1.04	6.24
54#石蜡	75.30	3 360.77	0.94	6.93

根据 4 种相变材料所对应的初投资费和日耗电用量进行对比分析,最终选定 54#石蜡为本系统真空管内充灌的相变材料.

4 石蜡的蓄能特性实验分析

在南京地区 2013 年 4 月某晴天,针对石蜡的蓄能特性进行了实验研究,并分析太阳辐射强度对其影响.实验前一天,取两个真空管,一根充灌石蜡,一根未充灌相变材料,即填充的是空气.在两根真空集热管内上中下均匀布置热电偶,如图 6 所示.测试所需设备及仪器,如表 3 所示.某晴天 6:00~24:00,得到真空管内温度随太阳能辐射强度的变化,如图 7 所示.两根管内的温度变化趋势和太阳辐射强度变化趋势相一致,呈正弦分布.空气在 11:30 达到最大值 231.0 ℃,此时太阳辐射强度最高,以空气的起始温度 4.2 ℃为参考,可吸收热量 0.92 kJ.随着太阳辐射强度的减弱,空气内储存的热量迅速散失,0:00 时,空气的温度仅为 9.6 ℃,空气中余热 0.02 kJ.这是由于空气利用显热储存太阳能,比热低,升温快,散热也快.由于前一天储存了一部分热量,石蜡在 6:00 时的温度为 45.7 ℃,储热量为 0.35 MJ.6:00~7:30,石蜡的温度基本保持在相变温度附近,升温缓慢,吸收热量 0.80 MJ.7:30~13:30,进入过热蓄热阶段,以显热蓄热,升温很快,石蜡在 13:30 左右达到峰值 193.6 ℃,吸收热量 1.24 MJ.随着太阳辐射强度的减弱,0:00 时石蜡的温度略高于相变温度为 61.5 ℃,过热显热几乎全部散失,石蜡最终储存热量 1.13 MJ,推及理论计算所需 26 根管,共储存热量 29.38 MJ,大于低温热源端所需热量 21.08 MJ.由于石蜡具有较高的蓄热能力,在太阳辐射强的时候储存太阳能,在太阳辐射弱的时候释放出,以供热泵系统运行时用.因而系统在 7:30~0:00 间可以随时启动制取热水.尤其在夜间可利用白天储存的太阳能,实现对太阳能的移峰填谷,使得建筑一体化的蓄能型太阳能热泵热水器在运行时取得更高的经济性.

表 3 设备及测试装置

Table 3 Equipments and testing devices		
设备名称	规格及型号	备注
太阳能集热管	T18/Φ58	全玻璃真空集热管
太阳能辐射采集计	WE300	测试范围 0~2 000 W/m ² ,光谱范围 0.3~3 μm,精度±2%,跟踪精度 96 h+30 s
太阳能辐射记录仪	GL500-2-1Data Logger	测温范围:-40 ℃~85 ℃
热电偶	K 型	测量范围-200 ℃~1 300 ℃,精度±0.75% t
数据采集仪	Agilent 34970A	20~120 个通道,6.5 位分辨率,0.004% 基本直流电压精度,扫描速率 250 通道/s

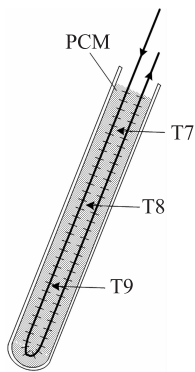


图 6 太阳能集热管内测点布置图
Fig. 6 Distribution of measuring points of solar collector tubes

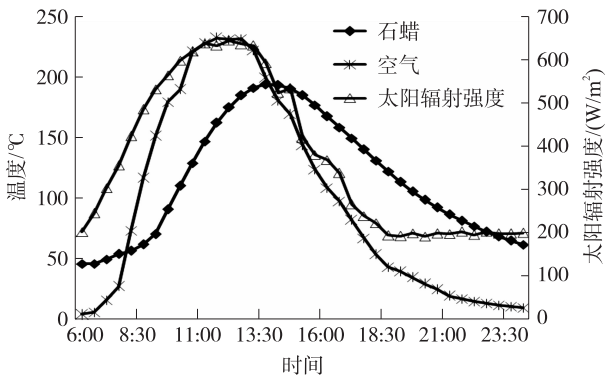


图 7 石蜡蓄能特性随太阳辐射强度的变化曲线
Fig. 7 Various curves of paraffin storage characteristics with solar radiation

5 经济性分析

根据国标(GB/T50331—2002)规定,平均每人每天约消耗 50℃~60℃热水 40~50 L,以城市中以三口之家为例,则热水器系统每天需制取 55℃的水 140 L,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如式(1)所得 23 408 kJ.

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 4.

(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%,则煤气消耗为 $\frac{Q}{0.8 \times 15\,900} = 1.84$ m³,折合 CO₂ 排放量 1.39 kg. 城市煤气供应价格为 2.4 元/m³,所以运行费用为 4.42 元,折合电量 $W = \frac{4.42}{0.52} = 8.5$ kW·h.

(2)天然气

天然气热值取为 35.6 MJ/m³,燃气热水器加热效率通常取为 80%,则天然气消耗为 $\frac{Q}{0.8 \times 35\,600} = 0.82$ m³,折合 CO₂ 排放量 1.55 kg. 管道天然气平均供应价格为 2.2 元/m³,燃气热水器冬季运行费用约为 1.8 元,折合电量 $W = \frac{1.8}{0.52} = 3.46$ kW·h.

(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%,则消耗液化气为 $\frac{Q}{0.8 \times 95\,000} = 0.31$ m³,折合 CO₂ 排放量 0.83 kg. 液化气的价格为 12 元/m³,所以运行费用为 3.72 元,折合电量 $W = \frac{3.72}{0.52} = 6.64$ kW·h.

(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 元/kW·h,则电热水器耗电约为 $\frac{Q}{0.9 \times 3\,600} = 7.22$ kW·h,折合 CO₂ 排放量 4.98 kg. 运行费用约为 3.75 元.

(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. 冬季相对于全年的辐射总量和日照时数偏低于平均数,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 $P = 4\,500 \text{ MJ} / 1\,600 \text{ h} = 0.78 \text{ kW/m}^2$. 设冬季平均吸收率为

表 4 能源价格

Table 4 Energy prices

项目	热值	价格	单位耗能价格
城市煤气	15.9 MJ/m ³	2.4 元/m ³	0.15 元/MJ
天然气	35.6 MJ/m ³	2.2 元/m ³	0.06 元/MJ
液化石油气	95.0 MJ/m ³	12 元/m ³	0.13 元/MJ
民用电	3.6 MJ/(kW·h)	0.52 元/(kW·h)	0.14 元/MJ

0.34,平均热损失 $0.9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,140 L 太阳能热水器配真空管 14 根吸热面积为 2.3 m^2 ;
传热损失 $P_s=0.9\times10^{-3}\times(55-15)=0.036\text{ kW}/\text{m}^2$,
真空管的实际吸收功率 $P=0.78\times0.34-0.036=0.229\text{ 2 kW}/\text{m}^2$,
加热 140 L 水,每天需要辐射时间 $\frac{Q}{3\ 600\times0.229\ 2\times2.3}=12.33\text{ h}$.
冬季每天的日照时间一般约为 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量为
(12.33-6) $\times0.229\ 2\times2.3=3.34\text{ kW}\cdot\text{h}$,折合 CO_2 排放量 2.305 kg . 运行费用约为 1.74 元.

(6)热泵热水器
选用 R134a 作为制冷剂,蒸发温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷凝温度 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,过冷度选 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,过热度选 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,指示效率 η_i 取 0.8,机械效率 η_m 取 0.9,计算得出 $\text{COP}=3.93$. 需耗电 $\frac{Q}{0.8\times0.9\times3.93\times3\ 600}=2.30\text{ kW}\cdot\text{h}$,折合 CO_2 排放量 1.587 kg ,运行费用约为 1.20 元.

(7)蓄能型太阳能热泵热水器
选用 R134a 作为制冷剂,振荡热管蒸发段与相变材料侧传热温差取 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,振荡热管冷凝段与热泵蒸发器端部传热温差取 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷凝器侧传热温差取 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,过冷度取 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,过热度取 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,指示效率 η_i 取 0.8,机械效率 η_m 取 0.9. 分别对 4 种相变材料进行理论计算,结果见表 5.

表 5 不同类型的水热水器每天消耗电能和运行费用情况
Table 5 Daily electric consumption and operating costs of different types of water heaters

项目			耗能/MJ	效率/%	CO_2 排放量/kg	每天耗能 /MJ	每升水耗 能/kJ	每天费用 /元	每升水费用 / 10^{-2} 元
城市煤气			23.408	80	1.39	29.26	209.00	4.42	3.16
天然气			23.408	80	1.55	29.26	209.00	1.80	1.29
液化石油气			23.408	80	0.83	29.26	209.00	3.72	2.66
电热水器			23.408	90	4.98	26.00	185.71	3.75	2.68
太阳能热电辅助			23.408	90	2.31	26.00	185.71	1.74	1.24
热泵热水器			23.408	393	1.59	5.56	39.71	1.20	0.86
蓄能型太阳能振荡 热管热泵热水器	相 变 材 料	癸酸(CA)	23.408	427	1.05	5.48	39.18	0.79	0.57
		月桂酸(LA)	23.408	605	0.74	3.87	27.62	0.56	0.40
		48#石蜡	23.408	624	0.72	3.75	26.80	0.54	0.39
		54#石蜡	23.408	693	0.65	3.38	24.12	0.49	0.35

从计算结果可以看出,城市煤气费用最高,电热水器的 CO_2 排放量最高;蓄能型太阳能振荡热管热泵热水器耗能最少,费用最少,最节能,同时 CO_2 的排放量也最小.

根据经济性分析结果,选取 54#石蜡作为相变材料. 蓄能型太阳能振荡热管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、热泵热水器分别节能 88.46%、88.46%、88.46%、87.01%、87.01%、39.26%;相应的 CO_2 排放量减少率分别为 55.43%、58.24%、22.02%、87.00%、71.98%、59.29%.

6 结论与展望

系统综合利用太阳能集热管集热,相变材料(54#石蜡)储存热量,振荡热管高效传热作为热泵低温热源,提高系统热力性能,节约常规能源,减少环境污染,实现了能源利用的可持续性发展. 与现有的各类热水器相比,该系统在节约运行费用的同时也减少了温室气体 CO_2 的排放.

在后续的工作中,我们将进一步研究蓄能型太阳能振荡热管集热器的传热规律,通过实验研究系统在不同环境条件、不同相变材料下的工作性能,以确定系统各设备的结构尺寸、振荡热管的充注材料等. 同时重点研究本装置与墙体结合的相关技术参数以实现建筑一体化,力求早日投入市场.

- 189-196.
- [2] Cyng J P, Huang B J. Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater[J]. Solar Energy, 2003, 74(1): 33-44.
 - [3] Aydın Dikici, Abdullah Akbulut. Performance characteristics and energy-exergy analysis of solar-assisted heat pump system[J]. Building and Environment, 2008, 43(11): 1 961-1 972.
 - [4] Li Y W, Wang R Z, Wu J Y, et al. Experimental performance analysis and optimization of direct expansion solar-assisted heat pump water heater[J]. Energy, 2007, 32(8): 1 361-1 374.
 - [5] 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)
 - [6] Xu G Y, Zhang X S, Deng S M. A simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(11/12): 1 257-1 265.
 - [7] 杨磊, 张小松. 复合热源太阳能热泵供热系统及其性能模拟[J]. 太阳能学报, 2011, 32(1): 120-126.
Yang Lei, Zhang Xiaosong. Multi-heat source solar heat pump heat supply system and performance simulation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(1): 120-126. (in Chinese)
 - [8] 姜益强, 齐琦, 姚杨, 等. 太阳能季节相变蓄热热泵系统在哈尔滨应用的模拟研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(3): 15-20.
Jiang Yiqiang, Qi Qi, Yao Yang, et al. Simulation of a heat pump heating system based on seasonal solar energy storage by phase change material used in Harbin[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2007, 37(3): 15-20. (in Chinese)
 - [9] 杨灵艳, 倪龙, 姚杨, 等. 三套管蓄能型太阳能和空气源热泵集成系统可行性实验[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1 168-1 172.
Yang Lingyan, Ni Long, Yao Yang, et al. Experimental study on solar and air source heat pump integrated system with triple-sleeve energy storage exchangers[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(9): 1 168-1 172. (in Chinese)
 - [10] 苏磊, 张红, 丁雷江, 等. 单回路紫铜-水脉动热管传热性能的实验研究[J]. 热能动力工程, 2011, 26(6): 687-693.
Su Lei, Zhang Hong, Ding Leijiang, et al. Experimental study of the heat transfer performance of a single-loop copper-water pulsation heat pipe[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6): 687-693. (in Chinese)
 - [11] Akachi H. Looped capillary tube heat pipe [C]//Proceedings of 7th General Meeting Conference of JSME: Tokyo, 1994: 606-611.
 - [12] Rittidech S, Wannapakne S. Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11-12): 1 978-1 985.
 - [13] Rittidech S, Donmaung A, Kumsombut K. Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check value (CLOHP/CV) [J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2 234-2 238.
 - [14] Nishio S, Nagata S, Kubota T. Study on thermal performance of SEMOS heat pipe [C]//39 th National Heat Transfer Symposium of Japan: Sapporo, 2002.
 - [15] 吴业正, 朱瑞琪, 曹小林, 等. 制冷原理及设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2010: 24.
Wu Yezheng, Zhu Ruiqi, Cao Xiaolin, et al. Principle and Refrigeration Equipment [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010: 24. (in Chinese)
 - [16] 华贲, 许浩, 刘二恒. 基于火用经济评价的换热器最优传热温差[J]. 化工进展, 2009, 28(7): 1 142-1 146.
Hua Ben, Xu Hao, Liu Erheng. Exergy-economics based method about optional temperature difference in heat-exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(7): 1 142-1 146. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]