

太阳能蓄能/蒸发/集热器性能研究

苏鹏飞, 吴 薇, 高旭娜, 戴苏洲, 赵文杰, 孟志军

(江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 南京师范大学, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了一种新型的太阳能蓄能/蒸发/集热器, 建立了蓄能/蒸发/集热器的相变传热数学模型, 得到了充灌石蜡或癩酸的蓄能/蒸发/集热器在蓄能过程中温度场和液化率随时间的变化规律。在南京地区春季典型工况下对充灌水、癩酸或石蜡作为蓄能材料的太阳能蓄能/蒸发/集热器管内温度进行了实验对比研究, 结果表明充灌石蜡或癩酸等相变材料, 可将白天的太阳能储存下来在夜间利用。并对充灌三种介质的蓄能/蒸发/集热器瞬时集热效率随太阳辐射的变化规律进行了研究, 分别拟合得到了瞬时集热效率公式, 结果表明充灌石蜡的太阳能蓄能/蒸发/集热器瞬时集热效率最高。

[关键词] 太阳能蓄能/蒸发/集热器, 相变材料, 相变传热, 集热效率

[中图分类号] TK519 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0053-08

Performance Study of Solar Energy Storage/Evaporator/Collector

Su Pengfei, Wu Wei, Gao Xuna, Dai Suzhou, Zhao Wenjie, Meng Zhijun

(Engineering Laboratory of Energy System Process Conversion and Emission Reduction Technology of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: A new type of solar energy storage/evaporator/collector is presented. Mathematic model about phase change heat transfer of the storage/evaporator/collector is established. The change laws of temperature field and liquefaction ratio of solar energy storage/evaporator/collector filled with paraffin wax or decanoic acid are achieved. Experimental comparative study of temperature in the solar energy storage/evaporator/collector is done when using water, decanoic acid or paraffin wax as PCM under the typical operating conditions in spring in Nanjing. The result shows that the solar energy stored during the day can be used at night when PCMs as decanoic acid or paraffin wax has been filled in. And comparative study of instantaneous collection efficiency of the solar energy storage/evaporator/collector is done when using water, decanoic acid or paraffin wax. The change laws that varies with solar radiation is achieved. The formula of collection efficiency with three different medium have been fitted. The results indicate that the solar energy storage/evaporator/collector filled with paraffin wax has the highest instantaneous collection efficiency.

Key words: solar energy storage/evaporator/collector, phase change materials, phase change heat transfer, collection efficiency

太阳能是可再生清洁能源, 热泵节能优势明显, 太阳能与热泵联合运行的思想由 Jordan 和 Therkeld 于 20 世纪 50 年代提出后, 众多研究者开展了相关的研究, 结果表明太阳能可提供比环境温度高的热源, 作为热泵系统蒸发器侧热源后, 可同时提高太阳能集热效率和热泵的性能系数 $COP^{[1]}$ 。但是太阳辐射受各种复杂气象因素的影响强度随时变化, 上海交大搭建的直膨式太阳能热泵系统样机, 在春季运行 COP 达到 4.0~6.0 之间, 但是一旦太阳辐射强度低于 250 W/m^2 时, 集热温度比外界环境温度还低, 热泵蒸发器侧得不到足够的热量, 系统无法运行^[2]。因此太阳能热泵要得到推广面临的困难是克服太阳能辐射强度的不稳定性 and 间歇性, 解决夜间或阴雨天系统不能正常工作的问题。

马连湘设计了一种带有相变蓄热装置的直膨式太阳能热泵系统, 得出相变蓄能型太阳能热泵能提升

收稿日期: 2016-02-02.

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20151549)、江苏省太阳能技术重点实验室开放基金(JPKLSST201503)。

通讯联系人: 吴薇, 副教授, 研究方向: 制冷与节能技术研究. E-mail: wuwe@njnu.edu.cn

整个系统 COP 值和稳定性的结论^[3]. Kaygusuz K^[4]、姜益强教授等^[5]对相变材料 $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ 在太阳能热泵系统中的应用进行了研究,研究表明使用相变蓄热技术后,尤其在夜间太阳能热泵系统具有较好的供热性能,但是结晶水合盐类蓄能材料有过冷度大、易析出分离的缺点^[6]. Nallusamy^[7]选用石蜡作为相变材料,Eman-Bellah 等^[8]在石蜡中添加铝粉末作为相变材料,通过潜热储存太阳能供热泵利用,系统性能得到提高,但是系统利用水的显热来传递太阳能,再通过相变材料储存并传递给热泵系统,多级换热热损失大,而且水系统在冬季夜间有管路冻裂的危险. Bansal 等采用有机酸作为相变材料,建立太阳能集热器和相变蓄热相结合的传热模型,数值计算的结果表明,将相变材料和集热器直接结合比分别设置蓄热装置和集热器更具优势^[9]. 张小松教授提出了将热泵蒸发器、太阳能平板式集热器、相变材料蓄能容器集于一体的方案^[10]. 而真空管太阳能集热器的平均热损系数要比平板型集热器小,保温性能更好^[11].

本文设计了一种太阳能蓄能/蒸发/集热器,并将其应用在蓄能型一体化太阳能热泵热水系统中,利用相变材料将瞬时或之前储存的太阳能传递给热泵蒸发器,提高热泵系统的蒸发温度从而提升热泵系统整体性能.

太阳能蓄能/蒸发/集热器是蓄能型一体化太阳能热泵热水系统的核心部件,其中相变材料的蓄能过程直接影响到集热器的集热效率和热泵系统的运行稳定性. Papanicolaou E 等^[12]对均匀加热条件下的全玻璃真空管空气集热器建立了三维插管式换热稳态模型,采用 FLUENT 软件对单管内的流场和温度场进行模拟研究,但是未涉及蓄能材料的相变传热过程,而相变传热过程属于具有移动边界的非线性过程. 熊辉东^[13]利用 Fluent 软件来模拟太阳能相变蓄热槽中相变材料的凝固和熔化时的温度场. 周慧涛^[14]利用 Fluent 对蓄热箱内不同直径的蓄热球其相变过程进行了研究,从而对蓄热箱的结构进行了优化. 本文利用 Fluent 对内插 U 型蒸发管并填充相变材料的太阳能蓄能/蒸发/集热器开展了模拟研究,对太阳能蓄能/蒸发/集热器中充灌不同相变材料后的温度场和液化率变化规律进行对比分析,其结论可为太阳能蓄能/蒸发/集热器的设计和优化提供理论依据.

1 一体化太阳能热泵热水系统及太阳能蓄能/蒸发/集热器简介

蓄能型一体化太阳能热泵热水系统原理如图 1 所示. 系统由太阳能蓄能/蒸发/集热器、压缩机、水冷冷凝器、热力膨胀阀、水泵、储水箱组成. 太阳能蓄能/蒸发/集热器集太阳能集热器、蓄能容器以及热泵系统的蒸发器于一体,如图 2 所示,将热泵系统的蒸发器以 U 形管蓄能容器的作用,蒸发管外每隔一定距离以盘绕的方式布置毛刷,起强化传热的作用,同时解决相变材料相变时由于固液相密度变化引起分布不均问题.

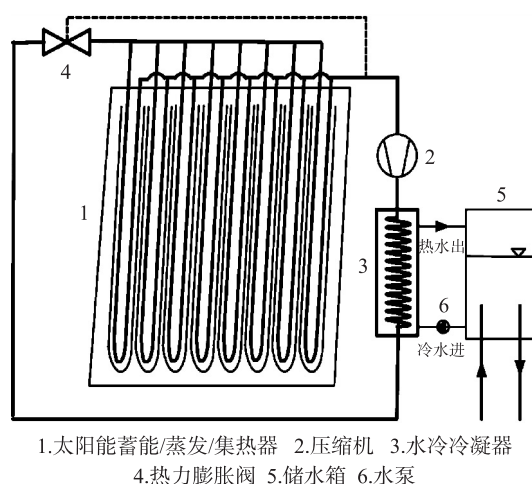


图1 蓄能型太阳能一体化热泵热水系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the system

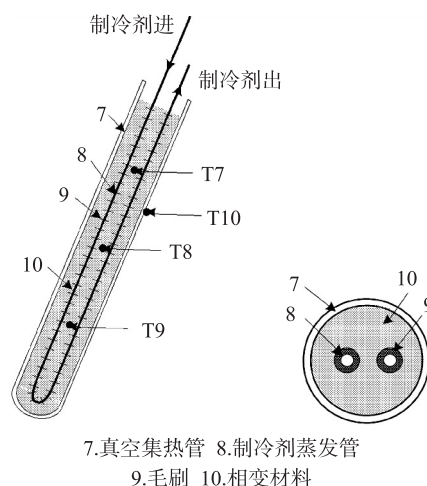


图2 太阳能蓄能/蒸发/集热器结构示意图

Fig.2 Diagram of solar storage/evaporator/collector

2 太阳能蓄能/蒸发/集热器相变传热过程模拟研究

太阳能蓄能/蒸发/集热器是蓄能型一体化太阳能热泵热水系统的核心部件,其中相变材料的蓄能直

会影响到太阳能集热器集热效率和热泵系统的整体性能.对太阳能蓄能/蒸发/集热器建立相变传热数学模型,通过 Fluent 软件模拟研究相变材料蓄能过程中温度场以及液化率随时间的变化规律.

2.1 太阳能蓄能/蒸发/集热器数学模型的建立

以内插 U 型管的真空集热管为研究对象,玻璃真空集热管外径 58 mm、内径 47 mm、长 1.8 m,制冷剂管道为内径 12 mm、壁厚 0.6 mm 的紫铜管,U 型管 2 根对称分布,两管中心距为 27.6 mm.真空集热管参数如表 1 所示.

表 1 真空集热管参数
Table 1 Parameters of the vacuum tube

型号	重量	外管直径	内管直径	集热管长度	外管透射率	吸收率	发射率
HQB-1800	1.92 kg	58 mm	47 mm	1.8 m	0.91	0.93	0.06

基于焓法模型,假设相变材料固、液两相比热、导热系数为常数,蒸发温度及蒸发管壁温度恒定,且不考虑自然对流时,蓄能过程控制方程有:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = k \nabla^2 T, \tag{1}$$

式中,

$$T - T_m = \begin{cases} (h - h_s)/c_s, & h < h_s, \\ 0, & h_s \leq h \leq h_l, \\ (h - h_l)/c_l, & h > h_l, \end{cases} \tag{2}$$

$$(\rho, k) = \begin{cases} \rho_s, k_s, & h < h_s, \\ \rho_l, k_l, & h > h_l, \end{cases} \tag{3}$$

其中, h_s 和 h_l 分别为固相和液相的饱和焓, c_s 和 c_l 分别为固相和液相的比热, T_m 为相变材料平均温度, ρ_s 和 ρ_l 分别为固相和液相的密度, k_s 和 k_l 分别为固相和液相的导热系数.

真空管截面网格图和 U 型管局部网格图如图 3 所示.

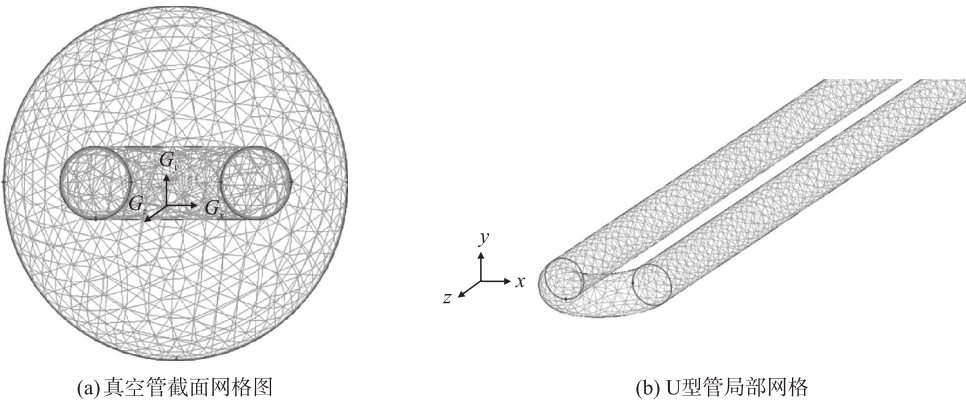


图 3 网格图
Fig.3 Diagram of grid

表 2 蓄能材料的物性参数

Table 2 The physical parameters of energy storage materials

名称	相变温度/℃	比热/(kJ·(kg·K) ⁻¹)		密度/(kg·m ⁻³)		相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)
		固态	液态	固态	液态	
癩酸	32	1.95	1.72	1 004	878	152
石蜡	48	3		912	769	234

相变材料的物性参数如表 2 所示,太阳能集热器选硼硅玻璃真空管,密度为 2 230 kg/m³,比热为 900 J/(kg·K),导热系数为 1.2 W/(m·K).边界条件设置:真空管向阳面设置为恒热流,根据南京地区气象资料,模拟热流量为 800 W/m²;背阴面与空气对流换热,自然对流换热系数为 3~10 W/(m²·K),内插 U 型蒸发管为恒壁温取值 15 ℃.

2.2 蓄能时温度场随时间的变化规律

太阳能蓄能/蒸发/集热器内相变材料为石蜡时,不同时刻蓄能过程温度分布如图4所示,从图中可见:温度场由向阳面管外壁向内层温度逐层递减;向阳面圆周处石蜡直接吸收热流量,温度最高,熔化速度快;管内其它位置温度升高速率随着时间的增加越来越快,如中心点位置的温度升高速率在800 s~1 800 s、1 800 s~3 600 s、3 600 s~5 400 s之间分别为 5×10^{-3} 、 6×10^{-3} 、 1.6×10^{-2} ;随着时间的推移,液相区由向阳面向背阴面及内层不断扩大, $\tau=200$ s时仅向阳面外圈的石蜡熔化, $\tau=5 400$ s时除背阴面的1/4圆周及其紧贴部分以外石蜡均已熔化, $\tau=7 200$ s时整个集热管内石蜡都已熔化。

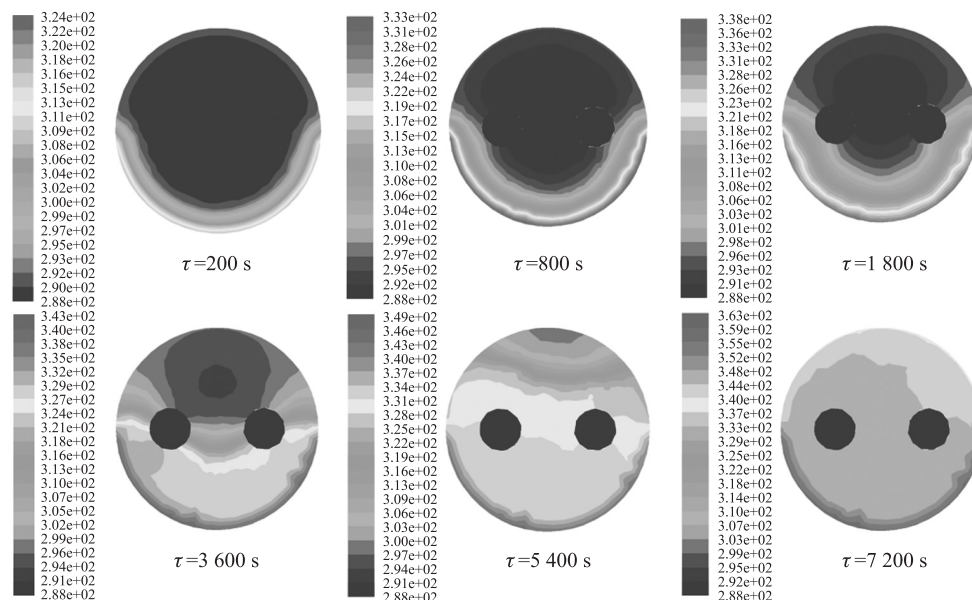


图4 不同时刻石蜡蓄能过程温度分布图

Fig.4 The temperature distribution of paraffin wax at different time

太阳能蓄能/蒸发/集热器内相变材料为癩酸时,不同时刻蓄能过程温度分布如图5所示,其温度随时间的变化规律与石蜡的温度变化规律相似,但癩酸的熔化进程稍快,在 $\tau=3 600$ s时集热管内癩酸都已熔化。

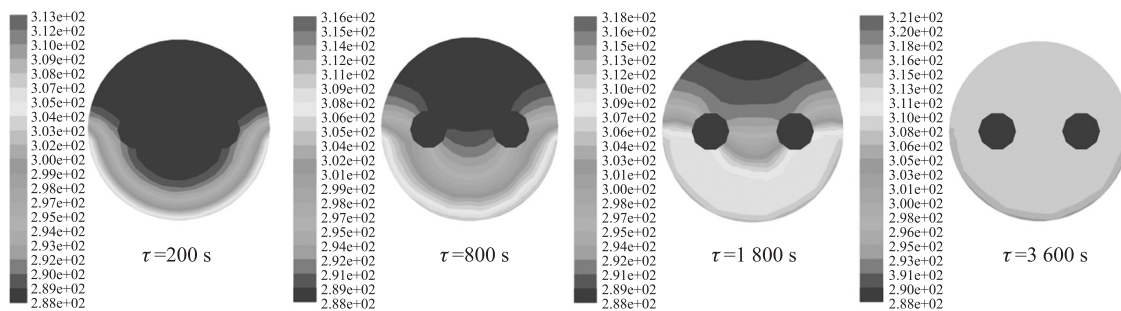


图5 不同时刻癩酸蓄能过程温度分布图

Fig.5 The temperature distribution of decanoic acid at different time

2.3 蓄能时液化率随时间的变化规律

液化率是相变材料已发生相变的液体量与相变材料总量的比值。图6为相变材料为石蜡时蓄能过程平均温度和液化率随时间的变化规律。从图中可见,石蜡在 $\tau=280$ s之前始终处于显热升温过程,温升较快,液化率为0。当 $\tau=280$ s时向阳面的石蜡开始出现液化,液化率逐步增加,直至 $\tau=1 600$ s液化率达到50%,处于相变过程的石蜡温度不再升高,因此平均温度升高变缓,直至 $\tau=1 600$ s。当 $\tau=1 600$ s~2 750 s时,从图4可知,液化区域由向阳面的外层向内层不断推进,圆周处仅向阳面处于液相,背阴面的相变材料仍处于被加热状态,因此液化率保持在50%,而平均温度波动上升。从图6的曲线可见,当 $\tau=2 750$ s时,背阴面开始液化,整个圆周面的液化率逐步上升,直至 $\tau=6 500$ s时,整个圆周面的平均液化率达到80%。当 $\tau=7 200$ s时,整个圆周大部分区域处于相变过程,只有极小部分处于显热温升过程。

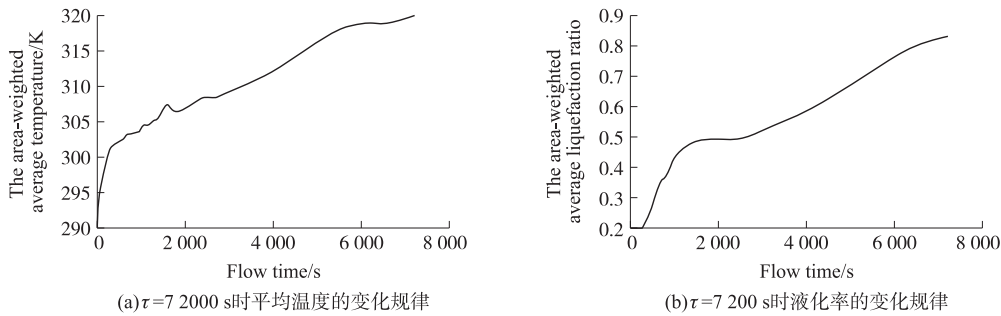


图6 不同时刻石蜡加权平均温度与液化率的变化规律

Fig.6 The change laws of the area-weighted average temperature and liquefaction ratio of paraffin wax at different time

从图6蓄能过程平均温度和液化率随时间的变化规律可知,随着时间的增加石蜡的蓄能过程分为四个阶段:第一阶段 $\tau=280$ s之前,向阳面的相变材料处于显热蓄热阶段;第二阶段 $\tau=280\sim1\,600$ s之间,向阳面的相变材料处于潜热蓄热阶段;第三阶段 $\tau=1\,600\sim2\,750$ s之间,背阴面的相变材料处于显热蓄热阶段;第四阶段 $\tau=2\,750$ s之后,背阴面的相变材料处于潜热蓄热阶段.随着相变区域逐渐扩大,从液化率随时间变化的曲线图可以看出其斜率逐渐减小,这是因为随着液相区域的扩大,石蜡固液两相界面离热流面越来越远,传热热阻也逐渐增大,导致固液两相界面处的传热变得困难,剩余的固体石蜡熔化速度逐渐减小.

图7为癸酸蓄能过程平均温度和液化率随时间变化的模拟结果.从图中曲线可见,相变材料在 $\tau=75$ s之前始终处于显热升温过程,温升较快,液化率为0.当 $\tau=75$ s时,向阳面的相变材料开始出现液化,液化率逐步增加,直至 $\tau=750$ s液化率达到50%,处于相变过程的癸酸温度不再升高,因此整个圆周面的平均温度升高变缓.当 $\tau=750\sim1\,300$ s时,液化区域由向阳面的外层向内层不断推进,而圆周处仅向阳面处于液相,背阴面的相变材料处于被加热状态,因此液化率保持在50%,而整个圆周面的平均温度波动上升.当 $\tau=1\,350$ s后,液化区域向内层进一步不断推进,直至液化率达到85%.随着时间的增加癸酸的蓄能过程也可分为四个阶段,只是所需时间更短.

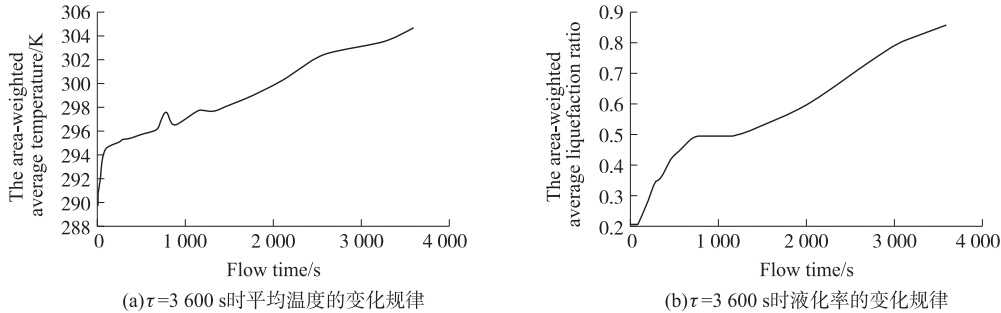


图7 不同时刻癸酸加权平均温度与液化率的变化规律

Fig.7 The change laws of the area-weighted average temperature and liquefaction ratio of decanoic acid at different time

3 太阳能蓄能/蒸发/集热器性能实验研究

3.1 蓄能/蒸发/集热器内温度随太阳辐射变化规律

将分别充灌水、癸酸和石蜡的太阳能蓄能/蒸发/集热器密封后在太阳下暴晒,真空管内按高度均匀布置三个测温点,真空管外布置一个测温点,如图8所示,用K型热电偶测量温度,通过Agilent34970A数据采集仪读取数据.南京4月某晴天,从6:00至次日6:00对水、石蜡和癸酸的温度变化进行24 h测量,太阳辐射强度与集热器内水、石蜡和癸酸温度变化情况如图8所示.

表3 测试仪器的规格、参数

Table 3 The specification and parameters of the testing devices

名称	规格
测温装置	TT-K-30-SLE 型热电偶,测温范围 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.75\%\text{t}$
数据采集仪	Agilent 34970A, 20~120 个通道, 6.5 倍分辨率, 0.004%基本直流电压精度, 扫描速度 250 通道/s
太阳能辐射仪	WE300, 测量范围 $0\sim1\,200\text{ W/m}^2$, 光谱范围 $0.3\text{ }\mu\text{m}\sim3\text{ }\mu\text{m}$, 精度 $\pm2\%$, 跟踪精度 $96\text{ h}\pm30\text{ s}$

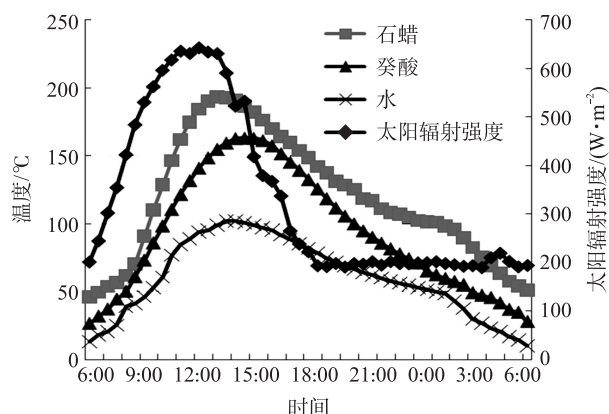


图8 不同材料温度随太阳辐射强度的变化曲线

Fig.8 Various curves of different PCMs' temperature change with solar radiation

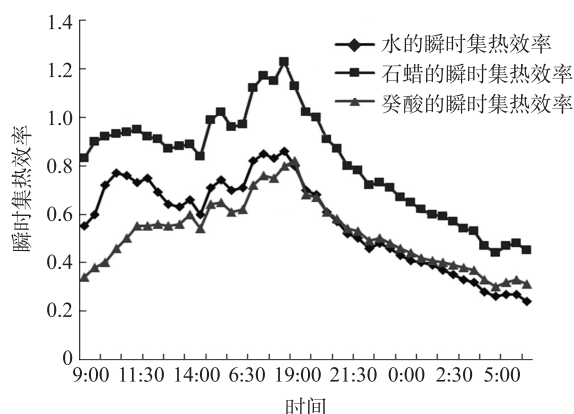


图9 不同蓄能材料瞬时集热效率的变化曲线

Fig.9 Curves of instantaneous collection efficiency with different energy storage materials

如图8, 三根真空管内的温度变化趋势和太阳辐射强度变化趋势基本一致, 呈正弦分布. 水温在13:30达到最高值102.19℃, 13:30以后, 随着太阳能辐射强度的降低, 水温开始降低. 而癸酸和石蜡的温度达到极值的时间相对太阳辐射强度最大值的出现时间有延迟. 6:00测试开始时, 癸酸和石蜡的温度分别为26.42℃和45.74℃. 6:00~8:00, 癸酸在相变温度附近处于潜热蓄热阶段, 升温速度缓慢, 8:00~14:30, 癸酸处于过热显热蓄热阶段, 温度迅速上升, 最高温度可达163.16℃, 14:30~次日6:00之间, 癸酸的温度随着太阳辐射能的减弱而降低, 20:00时温度降低至105.52℃. 而石蜡在6:00~7:30之间温度基本保持在相变温度附近, 7:30后进入过热显热蓄热阶段, 在13:00达到最高温度193.63℃, 随着太阳辐射强度的衰减而出现热量散失, 20:00时温度降低至128.50℃. 可见充灌石蜡或癸酸等相变材料, 可将白天的太阳能储存下来在夜间利用, 实现对太阳能的移峰填谷, 使得蓄能型一体化太阳能热泵热水器系统有更好的性能.

3.2 充灌不同介质后蓄能/蒸发/集热器的集热性能

集热器效率为稳态或准稳态条件下, 集热器内传热工质在规定时段内输出的能量与规定的集热器面积和同一时段内入射在集热器上的太阳辐照量的乘积之比. 为了研究蓄能/蒸发/集热器所吸收的能量与太阳辐射之间的关系, 参考文献^[15], 集热器的集热效率 η 根据公式(4)计算:

$$\eta = \frac{\text{制冷剂吸收的太阳能}}{\text{投射到集热器上的太阳能总量}} \quad (4)$$

南京4月某晴天, 对分别充灌水、癸酸和石蜡的蓄能/蒸发/集热器进行实验, 根据公式(4)分别得出充灌水、癸酸和石蜡时蓄能/蒸发/集热器的瞬时集热效率, 计算结果如图9所示, 充灌石蜡时瞬时集热效率最大. 充灌水的集热器, 实验开始时因为水的比热大, 升温快, 瞬时集热效率升高快, 但随着太阳辐射的增强, 瞬时集热效率降低快. 癸酸虽有相变过程会吸收相变潜热, 但是因为癸酸比热小, 所以充灌癸酸的集热器其瞬时集热效率和充灌水的相近. 由于石蜡的比热和潜热均比癸酸大, 蓄热能力强, 所以充灌石蜡的集热器瞬时集热效率最大.

根据参考文献^[16], 蓄能/蒸发/集热器的集热效率可拟合得出 η 与 $(T_s - T_a)/I$ 之间的关系如公式(5)所示.

$$\eta = A - B \frac{T_s - T_a}{I} \quad (5)$$

其中, T_s 为集热器内相变材料温度, T_a 为环境温度.

充灌石蜡的:

$$\eta = 0.44 - 1.44 \frac{T_s - T_a}{I} \quad (6)$$

充灌癸酸的:

$$\eta = 0.33 - 1.72 \frac{T_s - T_a}{I} \quad (7)$$

充灌水的:

$$\eta = 0.77 - 6.92 \frac{T_s - T_a}{I} \quad (8)$$

多组实验后通过线性拟合得到分别充灌水、癸酸和石蜡的蓄能/蒸发/集热器集热效率 η 与 $(T_s - T_a)/I$ 之间的关系如式(6)~(8)所示,拟合出得到的方程中的斜率绝对值,充灌石蜡的最小,其次是充灌癸酸的,充灌水的最大,即充灌石蜡的集热器热损失最小^[17],因而充灌石蜡的集热器瞬时集热效率最高。

4 结语

(1)提出了一种新型的太阳能蓄能/蒸发/集热器,建立了蓄能/蒸发/集热器的相变传热数学模型。

(2)模拟得到了充灌石蜡或癸酸的蓄能/蒸发/集热器在蓄能过程中液化率随时间的变化规律。模拟结果显示,随着时间的增加的蓄能过程分为四个阶段:向阳面的相变材料处于显热蓄热阶段;向阳面的相变材料处于潜热蓄热阶段;背阴面的相变材料处于显热蓄热阶段;背阴面的相变材料处于潜热蓄热阶段。

(3)实验对比研究了分别充灌水、癸酸或石蜡的太阳能蓄能/蒸发/集热器管内温度和瞬时集热效率随太阳辐射的变化规律,并拟合得到了分别充灌三种介质的太阳能蓄能/蒸发/集热器集热效率公式,结果表明充灌石蜡的太阳能蓄能/蒸发/集热器瞬时集热效率最高。

[参考文献](References)

- [1] ÇAĞLAR A, YAMALI C. Performance analysis of a solar-assisted heat pump with an evacuated tubular collector for domestic heating[J]. Energy and buildings, 2012, 54: 22-28.
- [2] KUANG Y H, SUMATHY K, WANG R Z. Study on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heating system[J]. International journal of energy research, 2003, 27(5): 531-548.
- [3] 马连湘, 林艳, 张江辉, 等. 相变蓄热对直膨式太阳能热泵性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(2): 285-290.
MA L X, LIN Y, ZHANG J H, et al. The research about the effects of phase change heat storage to the performance of direct expansion solar energy heat pump[J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(2): 285-290. (in Chinese)
- [4] KAYGUSUZ K. Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems[J]. Energy conversion and management, 1995, 36(5): 315-323.
- [5] 姜益强, 齐琦, 姚杨, 等. 太阳能季节性相变蓄热热泵在哈尔滨应用的模拟研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(3): 15-20.
JIANG Y Q, QI Q, YAO Y, et al. Simulation about application in Harbin of the seasonal phase change heat storage solar heat pump[J]. Journal of heating ventilating and air conditioning, 2007, 37(3): 15-20. (in Chinese)
- [6] 王永川, 陈光明, 张海峰, 等. 相变储能材料及其实际应用[J]. 热力发电, 2004, 11: 10-13.
WANG Y C, CHEN G M, ZHANG H F, et al. Phase change energy storage material and its practical application[J]. Thermal power generation, 2004, 11: 10-13. (in Chinese)
- [7] NALLUSAMY N, SAMPATH S, VELRAJ R. Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying(solar) heat sources[J]. Renewable energy, 2007, 32(7): 1 206-1 227.
- [8] EMAN-BELLAH S M, GHAZY M R A. Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system[J]. Solar energy, 2007, 81: 839-845.
- [9] BANSAL N K, BUDDHI D. Performance equations of a collector cum storage system using phase change materials[J]. Solar energy, 1992, 48(3): 185-194.
- [10] 周素娟, 张小松, 彭冬根, 等. 集热蓄能蒸发一体化太阳能热泵系统: ZL200710190062.3[P]. 2007-11-16.
ZHOU S J, ZHANG X S, PENG D G, et al. Solar energy heat pump with an integration of heat collection, energy storage and evaporation: ZL200710190062.3[P]. 2007-11-16. (in Chinese)
- [11] 何梓年, 李炜, 朱敦智. 热管式真空管太阳能集热器及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 55.
HE Z N, LI W, ZHU D Z. Vacuum tube solar collector with in-tube heat pipe and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 55. (in Chinese)
- [12] PAPANICOLAOU E, BELESSIOTIS V, LI X. Study of the thermal performance and airflow features of a solar air heater with evacuated tubes[C]. Beijing: Proceedings of ISES Solar World Congress, 2007: 627-633.
- [13] 熊辉东. 太阳能相变蓄热槽的数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.

- XIONG H D. Numerical simulation study of solar phase change heat storage tank [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006. (in Chinese)
- [14] 周慧涛. 太阳能供暖系统中相变蓄热器热性能研究[D]. 河北: 河北科技大学, 2014.
ZHOU H T. Study of thermal performance of the phase change thermal storage in solar heating system [D]. Hebei: Hebei University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 徐国英, 张小松. 复合热源热泵系统集成热/蒸发器的模型[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(增刊 1): 61-64.
XU G Y, Zhang X S. Simulation model of collector/evaporator for multi-source heat pump [J]. Journal of engineering thermophysics, 2006, 27(S1): 61-64. (in Chinese)
- [16] 彭冬根, 张小松, 董华, 等. 圆柱阵列式太阳能空气集热器性能研究-应用于溶液除湿空调系统再生[J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 443-448.
PENG D G, ZHANG X S, DONG H, et al. Performance study of cylindrical array typed solar energy air collector-applied in the regeneration of liquid desiccant air conditioning system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2008, 29(4): 443-448. (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, 2009: 45-49.
LUO Y J, HE Z N, WANG C G. Utilization technology of solar energy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 45-49. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]

(上接第22页)

- [13] 解翔, 袁月, 李振杰. 含微电网的新型配电网供电可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 67-72.
XIE X, YUAN Y, LI Z J. Reliability analysis of a novel distribution network with microgrid [J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(9): 67-72. (in Chinese)
- [14] 袁修广, 黄纯, 张磊, 等. 计及微网孤岛运行方式的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 690-697.
YUAN X G, HUANG C, ZHANG L, et al. Reliability evaluation of distribution network considering islanded operation of microgrid [J]. Power system technology, 2015, 39(3): 690-697. (in Chinese)
- [15] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE trans on power systems, 1996, 11(4): 1 670-1 676.

[责任编辑: 严海琳]