

doi: 10.12052/gdutxb.180017

# 翅片盘管式相变储热器传热性能研究

李南烁, 汤梓聪, 伍健宜, 张锦梁, 谢安治, 陈观生

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 翅片盘管可以强化盘管外侧的换热。本文研制了一种翅片盘管式相变储热器, 以石蜡R54为相变材料, 在3组不同流量工况下, 分别对3种不同翅片间距的储热器进行了实验研究, 分析了其不同工况下的温度分布和传热系数情况, 得出了该类型相变储热器的储热效率及传热系数与流量成正比、与翅片间距成反比的结论。

**关键词:** 翅片盘管; 相变; 储热; 石蜡; 传热

**中图分类号:** TK124

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7162(2019)02-0091-06

## An Experimental Research of Heat Transfer of Finned-coil Phase Change Heat Storage Unit

Li Nan-shuo, Tang Zi-cong, Wu Jian-yi, Zhang Jin-liang, Xie An-zhi, Chen Guan-sheng

(School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** It is well known that attaching fins on the tube surfaces can enhance the heat transfer into and out of the phase change materials. The results of an experimental study of the thermal characteristics of finned coil latent heat storage unit (LHSU) using paraffin as the phase change material (PCM) are presented. The measurement is carried out under 3 fin pitches and 3 water flow rates in the charging and discharging process respectively. The temperature distribution and heat transfer coefficient in different cases are analyzed. It is concluded that the heat storage efficiency and heat transfer coefficient of this type of phase-change heat storage unit are proportional to the flow rate and inversely proportional to the spacing of the fins.

**Key words:** finned coil; phase change; heat storage; Paraffin wax; heat transfer

全社会能源需求不断增加, 能源短缺已成为人类面临的严峻问题, 节能技术的研究和利用成为支撑社会发展的必要手段<sup>[1-3]</sup>。

在各种节能技术中, 相变储能技术得到了较为广泛的应用。电厂排烟废热、工业锅炉废热以及各种内燃机排气的废热等都可以采用相变储热技术使之得到有效的利用, 从而节省大量的能源<sup>[4]</sup>。太阳能热利用、热泵制热等是当前较为成熟的节能技术, 结合相变温度为40~60℃的低温相变储热技术则可以使太阳能热水系统、热泵热水系统在生活热水领域具有更好的应用前景<sup>[5-7]</sup>。

适用于生活热水领域的相变储热材料主要有石蜡、醋酸钠等。这些材料最大的缺点是导热系数低,

这也成为它们大规模推广应用的主要障碍<sup>[8]</sup>。为克服这一障碍, 很多研究人员进行了大量的工作, 包括相变传热强化机理的分析<sup>[9-11]</sup>、相变材料导热系数的提升等<sup>[12-13]</sup>, 其中利用各种翅片来强化储热体中相变材料侧的换热是一种比较简单而且有效的做法<sup>[14-18]</sup>。

本研究以石蜡为相变材料, 对翅片盘管式相变储热器进行换热实验, 得出该相变储热器内的温度分布及其储、放热特性。

## 1 实验装置

实验用的翅片盘管式相变储热器主要由箱体、保温层、翅片盘管、相变材料(Phase Change Material, PCM)等构成, 其剖视图如图1所示。

**收稿日期:** 2018-01-31

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2014BAA01B02); 佛山市顺德区产学研合作项目(2014CXY12)

**作者简介:** 李南烁(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为相变储能技术。

**通信作者:** 陈观生(1970-), 男, 副教授, 主要研究方向为相变储能及太阳能热利用技术。E-mail: chengs@gdut.edu

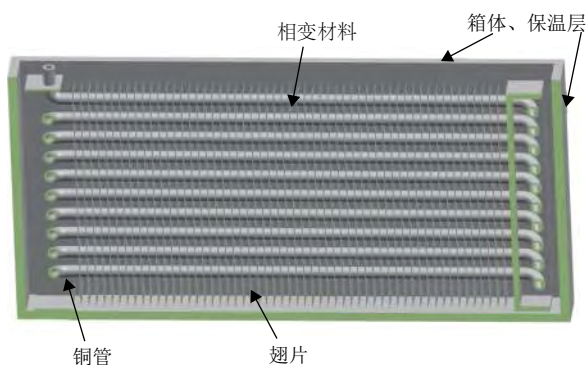


图1 翅片盘管式相变储热器结构

Fig.1 Finned-coil Phase Change Heat Storage device structure

### 1.1 翅片盘管式相变储热器

盘管为铜管,翅片为铝片,盘管与翅片相互垂直,相变材料填充在翅片管与箱体之间,翅片间距可调.实验用的翅片盘管式相变储热器详细参数见表1.石蜡质量为5 070.5 g.

表1 翅片盘管式相变储热器参数

Tab.1 Finned-coil Phase Change Heat Storage Parameter

类别	间距/mm	翅厚/mm	管径/mm	管厚/mm	管数/条	长度/mm	宽度/mm	高度/mm
1	6.5	0.3	10	0.5	20	360	45	270
2	5.0	0.3	10	0.5	20	360	45	270
3	2.5	0.3	10	0.5	20	360	45	270

### 1.2 实验测试系统

通过管内冷、热流体(本次实验以水作为工质)与箱体内石蜡进行热量交换,对翅片盘管式相变换热器的储热、放热特性进行实验研究.恒温水箱保证供应的水温度恒定.实验系统图如图2所示.

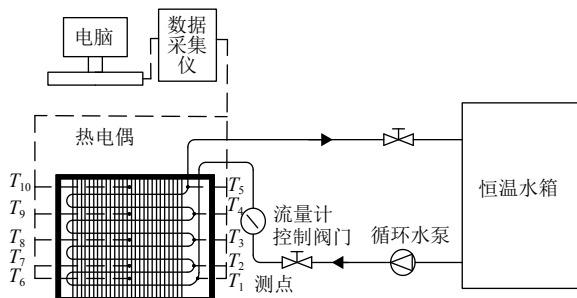


图2 实验系统图

Fig.2 Experimental system diagram

在箱体管槽内布置T型热电偶温度测点,如上图所示.其中 $T_1$ 、 $T_5$ 分别为进水管处测点, $T_2 \sim T_4$ 为内部管路测点, $T_6 \sim T_{10}$ 为内部石蜡测点.水流量通过控制阀门控制并由涡轮流量计测量(0.667~6.667 L/min,  $\pm 0.5\%$  R).用安捷伦数据采集仪对温度进行数据

采集.

相变材料为石蜡RT54,液相密度:780 kg/m<sup>3</sup>,固相密度:900 kg/m<sup>3</sup>;液相比热容:2.4 kJ/(kg·K),固相比热容:7.8 kJ/(kg·K);液相热导率:0.20 W/(m·K),固相热导率:0.27 W/(m·K);相变潜热:170 kJ/kg;凝固温度:54 ℃;熔化温度:52 ℃.忽略工质温度变化对热物性的影响.

### 1.3 实验过程

储热阶段:接通电源,在恒温水箱中把水加热到65 ℃,然后开启数据采集仪,同时开启循环水泵,调节流量控制阀到一定的流量值,进行储热阶段的实验.当石蜡完全熔化,并且在数据采集仪上观察温度不再升高时停止实验,储热阶段实验结束.

放热阶段:考虑到储热器的最大储热量,储热阶段实验结束后,马上进行放热阶段实验.将另一台设定温度30 ℃的恒温水箱替换储热阶段的恒温水箱,如图2所示接入实验线路.调节相同大小的流量值,进行放热阶段的实验.待石蜡完全凝固,并且温度分布基本均匀时停止数据采集,完成放热阶段的实验.

## 2 实验结果及分析

对翅片间距为2.5 mm、5.0 mm和6.5 mm的翅片盘管相变储热器在水流量分别为1.0 L/min, 1.3 L/min及1.6 L/min的情况下进行储、放热实验.安捷伦每5 s采集一次数据,记录每次实验流量情况.忽略弯管效应和工质温度变化对热物性的影响,根据水和石蜡的温度、水的流量以及传热面积等,翅片储热器的传热效率 $Q$ 和传热系数 $k$ 可以通过式(1)~(4)计算:

$$Q_c = \frac{\rho v C_p (t_1 - t_5)}{60}, \quad (1)$$

$$Q_d = \frac{\rho v C_p (t_5 - t_1)}{60}, \quad (2)$$

$$K_c = \frac{Q_c}{A \Delta t_{mc}}, \quad (3)$$

$$K_d = \frac{Q_d}{A \Delta t_{md}}. \quad (4)$$

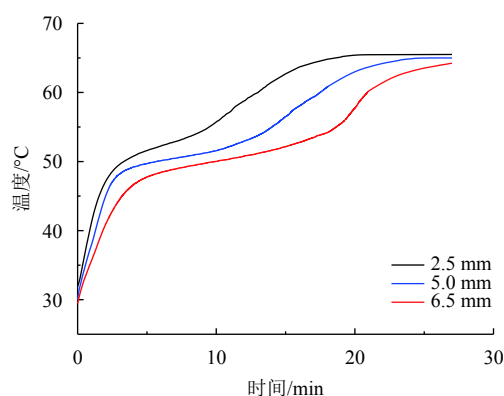
其中c表示储热,d表示放热; $\rho$ 为水的密度(g/L); $v$ 为水的流量(L/min); $C_p$ 为水的比热容(J·g<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>); $A$ 为储热器中管路的传热面积(m<sup>2</sup>); $\Delta t_m$ 为储热器的对数平均温差(℃),由式(5)~(6)计算:

$$\Delta t_{mc} = \frac{(t_1 - t_{10}) - (t_5 - t_6)}{\ln \frac{t_1 - t_{10}}{t_5 - t_6}}, \quad (5)$$

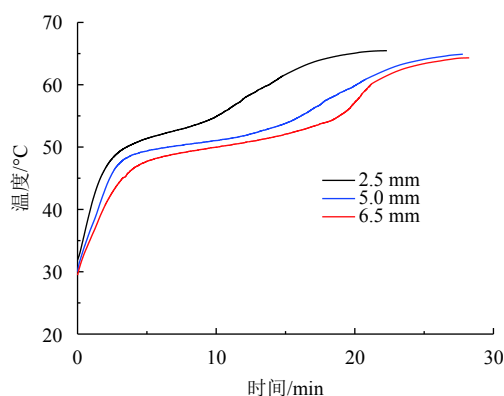
$$\Delta t_{md} = \frac{(t_{10} - t_1) - (t_6 - t_5)}{\ln \frac{t_{10} - t_1}{t_6 - t_5}}. \quad (6)$$

## 2.1 温度分布情况

设定恒温水箱65℃的情况进行储热实验,进水管温度基本保持恒定.图3(a)及图3(b)分别表示当进水量为1.6 L/min、翅片间距为2.5 mm、5.0 mm及6.5 mm时储热过程中石蜡 $T_8$ 测点温度及出水管 $T_5$ 测点温度随时间的变化曲线.



(a) 石蜡  $T_8$ 测点温度随时间变化曲线



(b) 出水管  $T_5$ 测点温度随时间变化曲线

图3 水流量为1.6 L/min的储热过程

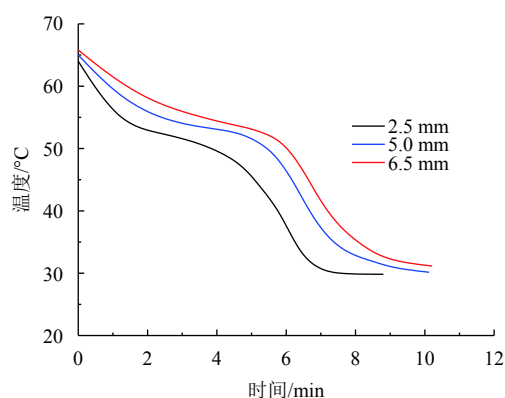
Fig.3 Heat storage process with water flow rate of 1.6 L/min

由图3(a)可知石蜡在50~55℃的范围内温度较为平稳,局部温度呈上升趋势,可知这个温度区间为石蜡开始相变的温度区间.由图3(b)看出,在进水管温度恒定情况下,出水温度的变化过程与石蜡温度的变化过程基本一致,间距为2.5 mm的储热器出水温度率先接近进水温度,说明翅片间距小储热过程进行得比较快,传热能力强.

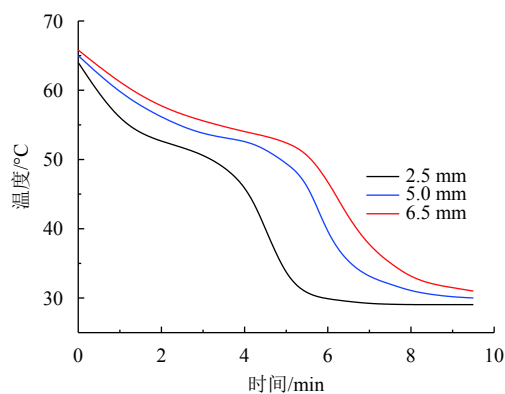
设定恒温水箱30℃的情况进行放热实验,进水管

管温度基本保持恒定.图4(a)及图4(b)是水流量为1.6 L/min、翅片间距为2.5 mm、5.0 mm及6.5 mm时放热过程石蜡 $T_8$ 测点温度及出水管温度 $T_5$ 随时间的变化曲线.

从图4(a)中可以看出,石蜡的放热过程进行得比较快.在50~55℃区间的范围内温度较为平稳,储热体处于相变阶段;在相变完成后,石蜡迅速被冷却,温度接近管内流体温度.由图4(b)看出,与储热类似,出水温度的变化与石蜡温度的变化保持一致,间距为2.5 mm的储热器率先完成放热过程.



(a) 石蜡  $T_8$ 测点温度随时间变化曲线



(b) 出水管  $T_5$ 测点温度随时间变化曲线

图4 水流量为1.6 L/min的放热过程

Fig.4 Exothermic process with water flow rate of 1.6 L/min

## 2.2 传热系数变化情况

图5、图6及图7分别表示流量为1.0 L/min、1.3 L/min及1.6 L/min时翅片盘管相变储热器储热过程中传热系数随石蜡温度的变化关系.

由图5~7可看出,在石蜡温度为50℃以下区域,不同翅片间距的相变储热器传热系数基本维持在5~18 W/(m<sup>2</sup>·K)之间;随温度及流量的增加,传热系数也相应增大,在进入相变阶段时迅速增大,这是因为早期的储热过程,PCM还未融化,传热过程由热传导起决定作用,进入相变阶段时PCM的融化,在管壁上

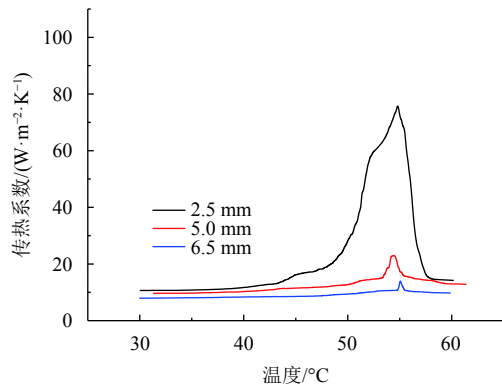


图5 流量1.0 L/min时储热过程传热系数

Fig.5 Heat transfer coefficient of heat storage process with flow rate of 1.0 L/min

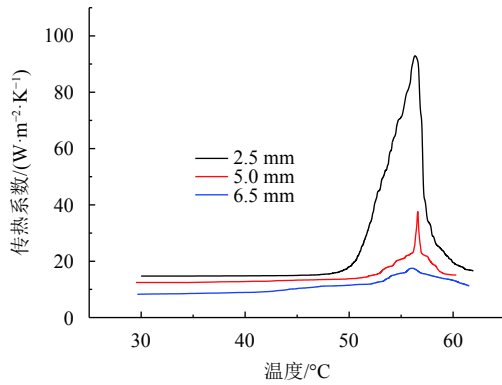


图6 流量1.3 L/min时储热过程传热系数分布

Fig.6 Heat transfer coefficient of heat storage process with flow rate of 1.3 L/min

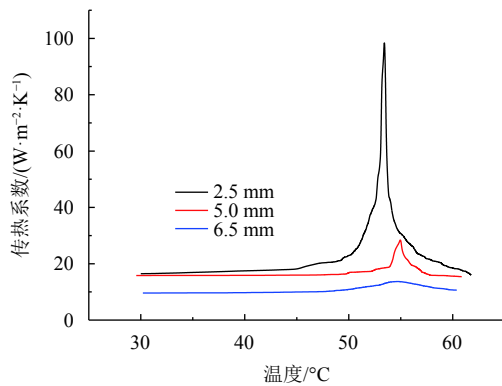


图7 流量1.6 L/min时储热过程传热系数分布

Fig.7 Heat transfer coefficient of heat storage process with flow rate of 1.6 L/min

附着一个薄的熔融层,由于浮力作用加剧对流运动,传热系数迅速增加,此后随着熔融层的加厚对流受阻, $k$ 值减少,超过60 °C后相变完成,逐渐趋于稳定;在其他参数相同时,翅片间距较小的储热器传热系数更大,翅片间距为2.5 mm时,相变过程进行得最快,石蜡熔化速度远远高于其余翅片间距下的情况。

图8、图9及图10分别是水流量为1.0 L/min、

1.3 L/min及1.6 L/min时翅片盘管相变储热器放热过程中传热系数随石蜡温度的变化关系。

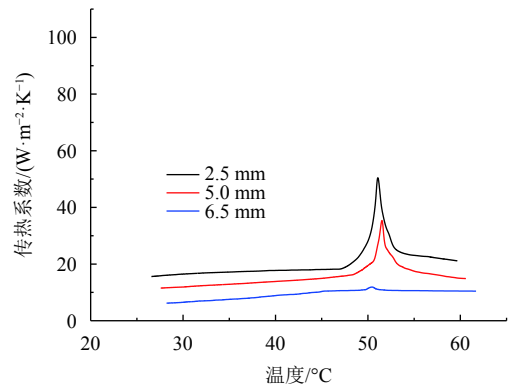


图8 流量1.0 L/min时放热过程传热系数

Fig.8 Heat transfer coefficient of exothermic process with flow rate of 1.0 L/min

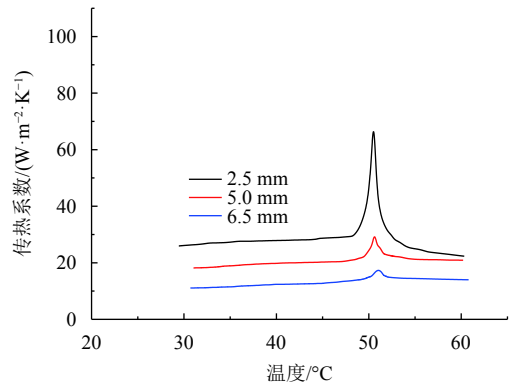


图9 流量1.3 L/min时放热过程传热系数

Fig.9 Heat transfer coefficient of exothermic process with flow rate of 1.3 L/min

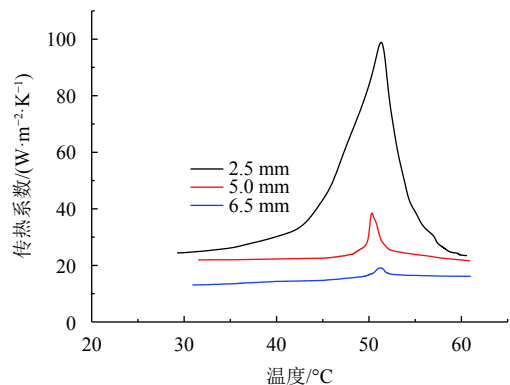


图10 流量1.6 L/min时放热过程传热系数

Fig.10 Heat transfer coefficient of exothermic process with flow rate of 1.6 L/min

通过图8~10可以看出, $k$ 值从最初的20 W/(m²·K)左右缓慢增加,进入相变阶段,由于PCM的固化,对流导热的综合作用下,迅速增大到峰值,在52 °C后,随着PCM的进一步固化,对流作用减弱, $k$ 值逐渐减



小,在相变结束时减小到 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右.在温度 $50^\circ\text{C}$ 以下区域,各组不同翅片间距的相变储热器传热系数变化比较平稳,并且随温度逐渐降低,传热系数也相应地变小,在流量为 $1.3 \text{ L}/\text{min}$ 和 $1.6 \text{ L}/\text{min}$ 时,传热系数基本在 $10\sim 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之间,而流量为 $1.0 \text{ L}/\text{min}$ 时,传热系数基本在 $5\sim 18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 范围内,可以看出流量的大小对传热系数存在一定影响.

在石蜡温度为 $50^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 区间内,各组翅片盘管相变储热器的传热系数出现峰值,如表2所示.

表2 传热系数峰值  
Tab. 2 Peak heat transfer coefficient  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

间距/mm	储热状态进水流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$			放热状态进水流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$		
	1.0	1.3	1.6	1.0	1.3	1.6
2.5	78	93	99	51	70	100
5.0	20	33	30	32	30	40
6.5	13	20	14	10	15	18

从表2中可以看出:在同一个流量下,翅片间距越小传热系数峰值越大;同一翅片间距时,流量越大传热系数峰值越大;储热器传热系数最大峰值出现在翅片间距为 $2.5 \text{ mm}$ 、流量为 $1.6 \text{ L}/\text{min}$ 的情况下.

### 3 结语

通过对翅片间距为 $2.5 \text{ mm}$ 、 $5.0 \text{ mm}$ 及 $6.5 \text{ mm}$ 的翅片盘管相变储热器在水流量分别为 $1.0 \text{ L}/\text{min}$ 、 $1.3 \text{ L}/\text{min}$ 及 $1.6 \text{ L}/\text{min}$ 情况下的储、放热实验,简单得出以下结论:

(1) 在同一翅片间距下,水流量越大,储热器的传热系数越大,石蜡相变过程进行得越快.为加大换热效率、减小储热时间可以适当增加流量.

(2) 在同一水流量下,翅片间距越小,传热器的传热系数越大,石蜡相变过程进行得越快.在实际限定流量的应用中,应选择较小翅片间距的储热器.

(3) 忽略辐射的影响,在 $50^\circ\text{C}$ 以下范围内,石蜡还没发生相变或相变完成,传热过程主要为导热,传热系数较小;在 $50\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内,石蜡融化,对流传热起作用,传热系数变化较大;在 $60^\circ\text{C}$ 后,石蜡完成相变,导热再次起主导效果,传热系数变小.实际应用中选择相变区间跨度大的相变材料有助于增大储热器的传热特性.

#### 参考文献:

[1] 张瑞卿,周啸波,饶建业,等.中国分布式清洁能源发展现状和展望[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2017,13(4): 290-320.

ZHANG R Q, ZHOU X B, RAO J Y, *et al.* Status and outlook of distributed clean energy development in china [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2017, 13(4): 290-320.

[2] PRIETO M M, GONZÁLEZ B, GRANADO E. Thermal performance of a heating system working with a PCM plate heat exchanger and comparison with a water tank [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 122: 89-97.

[3] 郝添翼,王兴昱,顾姗姗,等.生物质电厂节能降耗改造能值分析[J].工业加热,2017,46(3): 61-67.

HAO T Y, WANG X Y, GU S S, *et al.* Energy conservation and energy analysis of biomass power plant [J]. *Industrial Heating*, 2017, 46(3): 61-67.

[4] 李伟,李国新.翅片管簇式相变蓄热器的实验研究[J].煤气与热力,2011,31(9): A09-A11.

LI W, LI G X. Experimental study of finned-tube bundle phase-change heat storage device [J]. *Gas&Heat*, 2011, 31(9): A09-A11.

[5] 闫全英,王威.低温相变石蜡储热性能的实验研究[J].太阳能报,2006,27(8): 806-810.

YAN Q Y, WANG W. Experimental study on the thermal performance of paraffin [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(8): 806-810.

[6] 陈泉,张仁元,柯秀芳,等.太阳能蓄热石蜡类相变材料循环稳定性[J].广东工业大学学报,2009,26(3): 10-12.

CHEN X, ZHANG R Y, KE X F, *et al.* Thermal cycling stability of paraffin wax as phase change materials for solar energy storage [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2009, 26(3): 10-12.

[7] 吴薇,陈黎,王晓宇,等.蓄能型太阳能热泵用复合相变材料热性能分析[J].农业工程学报,2017,33(13): 206-212.

WU W, CHEN L, WANG X Y, *et al.* Thermal performance analysis of composite phase change materials for energy storage solar heat pump [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 206-212.

[8] 钟秋,张威,赵春芳,等.固-固相变储热材料的研究进展[J].广州化工,2016,44(23): 4-6.

ZHONG Q, ZHANG W, ZHAO C F, *et al.* Research progress on polymer solid-solid phase transition materials for thermal energy storage [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2016, 44(23): 4-6.

[9] 陈亮,刘道平,杨亮.相变储能过程传热强化技术研究进展[J].化工进展,2017,36: 291-296.

CHEN L, LIU D P, YANG L. Progress of heat transfer enhancement technology in change energy storage process [J]. *Chemical Industry And Engineering Progress*, 2017, 36: 291-296.

[10] 陈颖,邓先和,李筱萍,等.圆柱形相变蓄热器放热性能的工业实验研究[J].广东工业大学学报,2002,19(2): 41-45.

- CHEN Y, DENG X H, LI X P, *et al.* An industrial experimental study on heat discharge performance of cylindrical phase-change thermal energy storage [J]. [Journal of Guangdong University of Technology](#), 2002, 19(2): 41-45.
- [11] 张承虎, 孙德兴. 两侧对流条件下平面冻结凝固相变换热分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(1): 76-79.
- ZHANG C H, SUN D X. Heat transfer analysis of plane freeze phase transition on double-convection condition [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2009, 30(1): 76-79.
- [12] 陈文振, 刘镇, 陈志云, 等. 水平圆管内相变材料接触熔化分析[J]. 太阳能学报, 2007, 28(4): 437-440.
- CHEN W Z, LIU Z, CHEN Z Y, *et al.* Contact melting analysis of phase change material inside a horizontal cylindrical tube [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2007, 28(4): 437-440.
- [13] CHEN H T, CHIU Y J, LIU C S, *et al.* Numerical and experimental study of natural convection heat transfer characteristics for vertical annular finned tube heat exchanger [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 109: 378-392.
- [14] 夏莉, 张鹏, 周圆, 等. 石蜡与石蜡/膨胀石墨复合材料充/放热性能研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5): 611-614.
- XIA L, ZHANG P, ZHOU Y, *et al.* Study on the charging/discharging characteristics of paraffin and paraffin/expanded graphite composite material [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2010, 31(5): 611-614.
- [15] 张黎, 柯秀芳. 掺杂对相变材料导热系数的影响[J]. [广东工业大学学报](#), 2010, 27(4): 39-41.
- ZHANG L, KE X F. The effect of doping on the thermal conductivity of phase change materials [J]. [Journal of Guangdong University of Technology](#), 2010, 27(4): 39-41.
- [16] 冷光辉, 曹惠, 彭浩, 等. 储热材料研究现状及发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1059-1072.
- LENG G H, CAO H, PENG H, *et al.* The new research progress of thermal energy storage materials [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(5): 1059-1072.
- [17] KONG Y Q, YANG L J, DU X Z, *et al.* Impacts of geometric structures on thermo-flow performances of plate fin-tube bundles [J]. [International Journal of Thermal Sciences](#), 2016, 107: 161-178.
- [18] KIM Y, KIM Y. Heat transfer characteristics of flat plate finned-tube heat exchangers with large fin pitch [J]. [International Journal of Refrigeration](#), 2005, 28(6): 851-858.

(上接第90页)

- [9] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(5): 655-661.
- [10] WANG Z X, DU D J, FEI M R. Average consensus in directed networks of multi-agents with uncertain time-varying delays [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(11): 2602-2608.
- [11] 蒋方翠. 具有非对称通信时滞和切换拓扑的高阶多智能体系统的一致性[J]. *系统科学与数学*, 2015, 35(3): 258-269.  
JIANG F C. High-order consensus for multi-agent systems with switching topologies and asymmetric communication delays [J]. *Sys Sci & Math Scis*, 2015, 35(3): 258-269.
- [12] 林茜, 吴晓锋. 时滞多智能体系统关于参考状态的信息一致性[J]. *系统工程学报*, 2010, 25(6): 841-846.  
LIN Q, WU X F. Consensus in multi-agent systems with delayed communication and reference state [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 25(6): 841-846.
- [13] 宋莉, 伍清河. 具有多时变时滞的多智能体系统在切换拓扑下的平均一致性[J]. *控制与决策*, 2013, 28(12): 1811-1816.
- [14] 高庆文, 樊春霞, 韦庆阳. 具有随机时延的多智能体系统的一致性研究[J]. *计算机技术与发展*, 2013(10): 52-55.  
GAO Q W, FAN C X, WEI Q Y. Research on consensus of multi-agent system with random time-delay [J]. *Computer Technology and Development*, 2013(10): 52-55.
- [15] ZUO Z, WANG C, DING Z. Robust consensus control of uncertain multi-agent systems with input delay: a model reduction method [J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2017, 27(5): 1874-1894.
- [16] DING Z. Consensus control of a class of Lipschitz nonlinear systems [J]. *International Journal of Control*, 2014, 87(11): 2372-2382.
- [17] ARTSTEIN Z. Linear systems with delayed controls: A reduction [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1982, 27(4): 869-879.
- [18] KWON W H, PEARSON A E. Feedback stabilization of linear systems with delayed control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, 25(2): 266-269.