

# 矩形及楔形装置蓄热性能的对比实验研究

胡志培<sup>1</sup>, 李安桂<sup>2</sup>, 高 然<sup>2</sup>

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 选择有机材料 RT28HC 作为相变蓄热材料, 对等壁温(竖向)条件下矩形及楔形蓄热装置的热性能进行对比实验研究, 包括蓄热过程典型时刻的相界面记录及多点温度的监测。结果显示: 所述矩形及楔形装置均具有二维传热特性; 与传统的矩形装置相比, 楔形的几何形状可有效改善装置的竖向温度分布, 消除装置底部的传热及融化死角, 实现强化传热。热源温度越高时, 楔形几何形状的强化传热效果越显著。

**关键词:** 相变材料; 矩形装置; 楔形装置; 相界面; 温度分布

中图分类号: TU83; TK02

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0134-06

## A comparison study on the thermal performance between rectangular and wedge-shaped thermal storage units

HU Zhipei<sup>1</sup>, LI Angui<sup>2</sup>, GAO Ran<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** An experimental study by contrast on melting performance of the rectangular and wedge-shaped thermal storage units was conducted. The organic RT28HC is employed as latent heat thermal energy storage material and melts in the unit heated from one vertical side. The solid-liquid interface distribution is recorded and temperature of multipoint is monitored during the melting process. Results show that both the rectangular and wedge-shaped unit show two-dimensional heat transfer characteristics. Compared with the traditional rectangular unit, there are significant improvements in the temperature distribution and melting process of wedge-shaped unit. The dead space of melting and heat transfer has been eliminated in this geometry, so the wedge-shaped unit can enhance the heat transfer of melting. Moreover, the higher the heat source temperature is the more significant is the heat transfer enhanced.

**Key words:** phase change material(PCM); rectangular unit; wedge-shaped unit; solid-liquid interface; temperature field

能源危机及环境污染的双重作用下, 提高能源利用效率、开发清洁无污染的可再生能源成为当今社会发展的必然选择, 而这两类措施都离不开蓄热技术。基于此, 高蓄热密度、蓄/放热过程恒温的相变蓄热日益成为最具发展前景的热能储存技术之一, 并在太阳能利用、工业余/废热回收、建筑热环境控制及电子器件热管理等领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

相变材料的热物性直接影响蓄热系统的热性能。各类材料中, 有机类材料石蜡因性能稳定、相变潜热高、价格便宜等优点而备受关注。但是, 该类材料的导热系数普遍较低, 常通过向其中添加金属、碳纤维、石墨等高导热性物质制得复合蓄热材料实现其热性能的增强<sup>[4-6]</sup>。

通过固-液相变完成蓄/放热过程的相变材料常被封于蓄热装置内, 其中以矩形、圆柱及球形装置的应用最为广泛<sup>[7]</sup>。矩形装置结构简单、易于制造, 一直以来都是学术研究及实际应用的关注热点。文献[8]对矩形装置内月桂酸的融化及传热过程进行实验研究, 揭示了蓄热过程传热机制转化及其对相变材料融化速率的影响。文献[9]指出蓄热过程矩形装置倾角对液相材料内自然对流产生及发展有重要影响, 并导致装置传热及材料融化速率的差异。文献[10]针对等壁温条件下矩形装置上下边长之比对材料传热及融化速率的影响进行分析, 并据此提出楔形截面蓄热装置。文献[11]对添加 CuO 纳米颗粒的有机复合材料在恒热流矩形腔的融化过程进行研究, 分析了装置不同

收稿日期: 2017-12-12

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAJ03B03); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTCL01-13)

第一作者: 胡志培(1986—), 女, 博士, 讲师, 主要从事相变蓄热及强化传热研究。E-mail: huzhipei@usts.edu.cn

高度材料融化状况及其相界面分布的变化. 文献 [12]通过实验和数值计算的方法研究了斯蒂芬数、瑞利数及傅里叶数对矩形装置内癸酸融化过程的影响.

综上所述, 自然对流对蓄热过程材料的融化速率及相界面分布有决定性影响, 而装置的几何形状则一定程度上影响蓄热过程自然对流的产生及发展. 基于此, 本文在传统矩形装置的基础上, 优化得到楔形相变蓄热装置, 并通过实验对两装置的热性能进行对比研究, 所得结论对相变蓄热装置的设计及优化具有指导意义.

1 实验装置及过程

为实现蓄热过程材料融化及传热特性的分析, 本文设计如图 1 所示的实验系统, 包括封装相变材料的蓄热装置、热源、热电偶、数据采集系统及相界面记录系统. 蓄热装置包括矩形及楔形两种,

其几何尺寸见表 1. 蓄热装置采用 5 mm 的透明有机玻璃制成, 左侧壁面为热源. 有机类材料 RT28HC 为蓄热材料, 熔点为 27~29 ℃, 相潜热为 245 kJ/kg, 导热系数为 0.2 W/(m K), 热膨胀系数为 0.005 /K. 考虑到固相材料融化后的体积膨胀, 特在装置上部留有 2 mm 的空隙. 热源与蓄热装置间设薄云母片, 与 PCM 间设高导热性铜板, 在减少热源向环境散热损失的同时, 实现其与 PCM 的均匀传热. 装置外侧采用 6 mm 厚保温板进行覆盖.

实验用热源系统主要由加热板、感温探头、交流接触器和温度控制仪表组成, 通过 PID 调节实现热源温度的控制, 加热板尺寸为 160 mm×60 mm×2 mm. 蓄热过程的相界面分布由带存储功能的高清摄像机拍摄完成, 固定时刻取下装置外侧的保温板记录相界面分布.

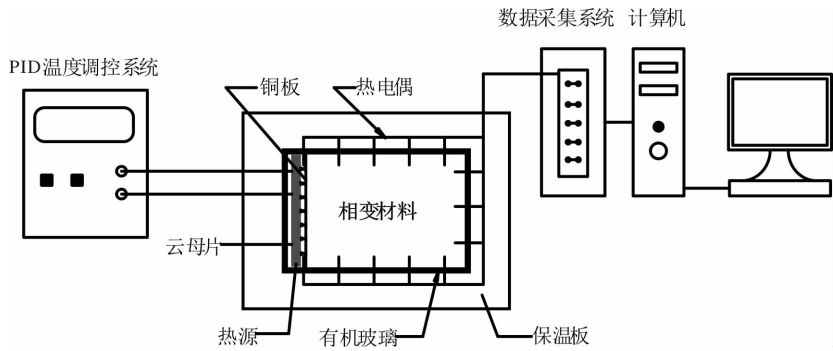


图 1 实验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

表 1 矩形及楔形蓄热装置的几何尺寸  
Tab. 1 Geometric dimensions of the rectangular and wedge-shaped unit

蓄热装置 的几何形状	$x$ 方向	$y$ 方向	$z$ 方向		上下边 长之比
	上边长 /mm	下边长 /mm	高度 /mm	宽度 /mm	
矩形	62	62	161	60	1
楔形	102	22	161	60	5

注: 红色粗线表示热源; 蓝色圆点表示装置上的小孔, 用于穿入固定热电偶的铁丝; 黑色叉点表示测点

蓄热过程采用铜-康铜 T 型热电偶对装置内的多点温度进行监测, 并由 mobrey 35 951C IMP 数据采集板进行收集, 采样周期为 1 min. 装置内的测点布置如图 2 所示, 某点的温度表示为  $T_{ij}$ , 其中  $i$  为横坐标(自下向上分别为  $i=1, 2\cdots 5$ ),  $j$  为纵坐标(从左向右分别为  $j=1, 2\cdots 8$ ). 矩形和楔形竖向测点均为 5 行, 相邻测点间距为 20 mm; 水平向相邻测点间距为 10 mm, 矩形装置水平测

点均为 5 列, 楔形装置自下向上逐渐增加, 测点数为 2 到 8 列不等. 另在装置中心测点  $T_{43}$  的前、后对称设置  $T_r, T_l$  两个测点.

蓄热过程开始前, 充分冷却装置使其各点温度均匀一致并低于 RT28HC 的熔点, 达到设定值后, 蓄热过程开始, 直至装置内的固相材料全部完成融化, 蓄热过程结束.

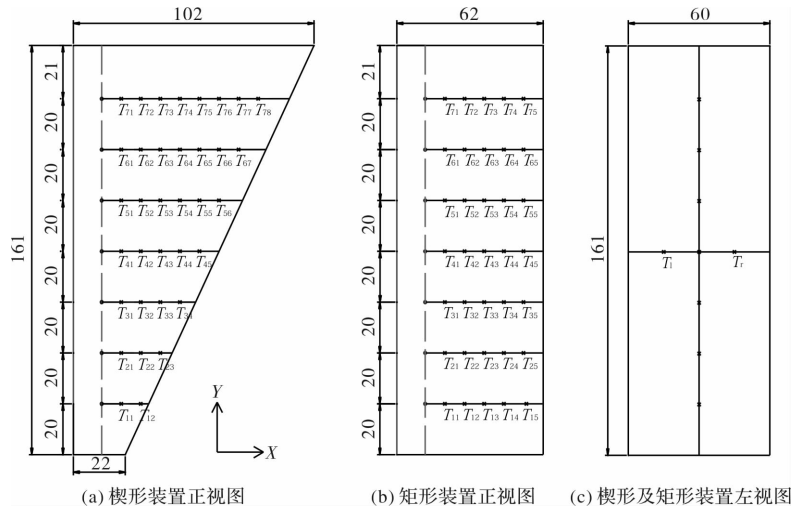


图2 蓄热装置的测点分布图

Fig. 2 Arrangement of thermocouples inside the thermal storage units

## 2 实验结果及分析

### 2.1 装置的二维传热特性

图3为两装置典型测点温度随时间的变化情况,其中测点 $T_{43}$ 位于装置中心位置, $T_r$ 、 $T_l$ 与 $T_{43}$ 的关系如图2(c)所示.可以看出,矩形及楔形装置内三个测点的温度分布呈现较高一致性,即本文的矩形及楔形装置均具有二维传热特性.装置中心断面系列测点的温度分布具有一定代表性,可用于反映蓄热过程装置的热性能,这也是为后续阐述装置的融化及传热特性奠定基础.

### 2.2 融化特性

热源温度 $T_w=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,RT28HC融化过程的典型相界面分布如图4所示. $t=15\text{ min}$ 的初始阶段,矩形和楔形装置内材料的融化状况基本相同,热源附近均出现均匀分布的薄液相层,形成与热源平行分布的相界面.

随融化过程进行,装置内液相材料增多. $t=65\text{ min}$ 时出现相界面的显著弯曲.其中,矩形装置顶部的相界面到达装置右侧,楔形装置顶部材料的融化速率也较底部更快.这是蓄热过程传热机制从最初热传导向导热-对流共同作用转变的结果.即自然对流一方面加快了固相材料的融化速率,但同时导致材料融化速率的竖向不均匀,这一点从后面的温度分布也可得出.

此后两装置内材料的融化均呈现显著的竖向不均匀性,且矩形装置尤为明显.直至蓄热后期 $t=245\text{ min}$ ,两装置上部的材料均已全部融完,仅少量固相材料分布于装置中下部.不同点在于矩形装置的右下角完全被占据,出现融化死角并大

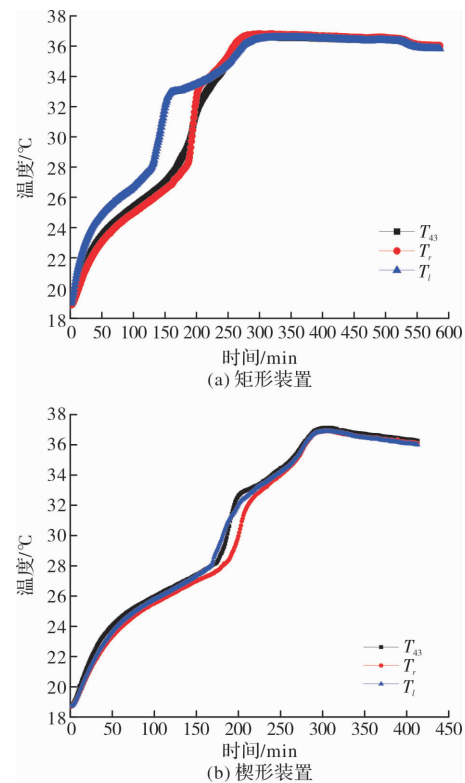


图3 蓄热装置的二维传热特性

Fig. 3 Two dimensional heat transfer characteristics of 大延长蓄热时间;而楔形装置内仅相对少量固相材料沿装置右壁下部均匀分布,一定程度改善了底部材料的融化状况.

图5所示为不同热源温度下矩形及楔形装置中心测点 $T_{43}$ 温度随时间的变化情况.随热源温度上升,两装置的蓄热时间均显著缩短;同一温度下,楔形装置的蓄热时间明显小于矩形装置.由前述的相界面分析可知,由于蓄热后期相变材料融化速率的差异,导致两装置蓄热时间的不同.如 $T_{43}$ 的温度变化所示,当该点材料完成融化处于过热

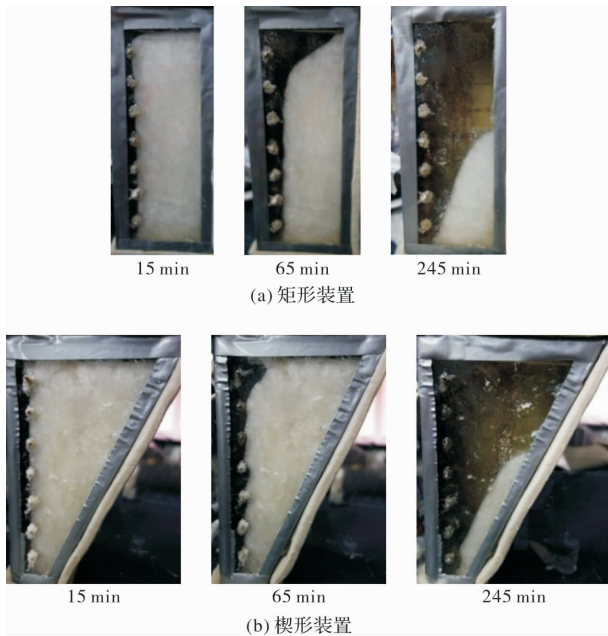


图4  $T_w = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时蓄热过程的相界面分布

Fig. 4 Instantaneous photographs of the RT28HC melting in for hot wall temperature of  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

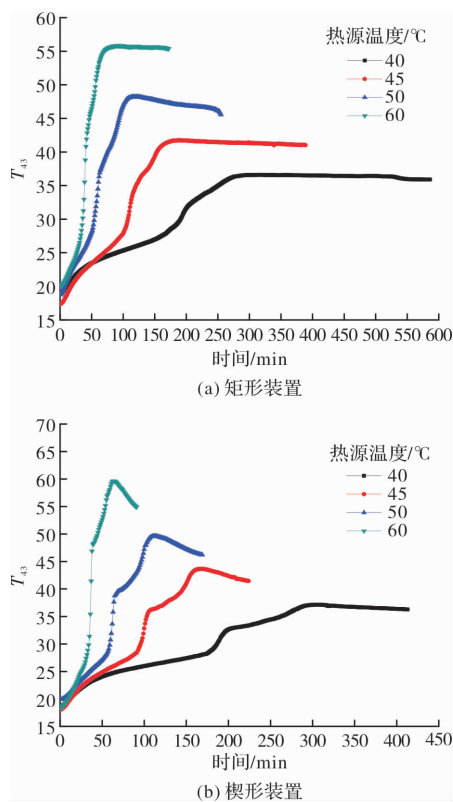


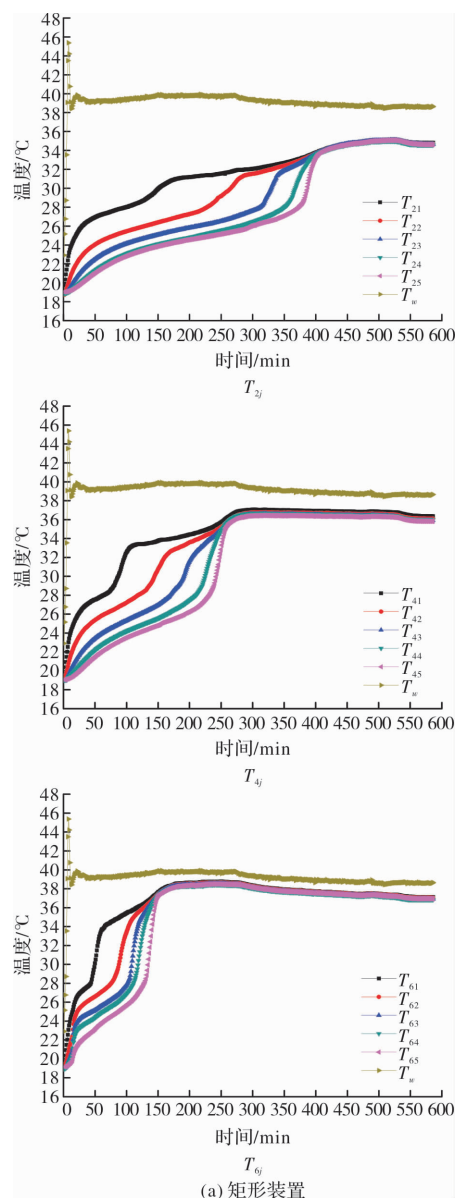
图5 装置中心温度随时间的变化曲线

Fig. 5 Temperature variations in the center of

状态时, 楔形的几何形状更有利于其热量向低温固相材料的传递, 表现为后期阶段  $T_{43}$  温度的迅速下降。相比之下, 矩形装置后期阶段  $T_{43}$  的温度下降更为平缓。热源温度越高时, 楔形装置的这一传热特性也越显著。

## 2.3 传热特性

为进一步分析蓄热过程相变材料的传热特性, 本文以  $T_{2j}$ 、 $T_{4j}$ 、 $T_{6j}$  测点为例分析不同高度测点温度随时间的变化情况。如图6所示, 图中最上方曲线为热源温度, 整个蓄热过程维持恒定。同一高度距热源距离不等的各点, 其温差先增大后减小, 最终各点趋于一致。现引入“温差比”表示前期温差阶段占整个蓄热过程的百分比, 经计算, 矩形装置沿高度方向自下向上其值逐渐从底部  $T_{1j}$  的 87.4 % 减小到顶部  $T_{7j}$  的 25.8 %; 楔形装置的“温差比”较矩形装置有所增加。而且, 两装置中  $T_{1j}$  到  $T_{7j}$  的温度逐渐升高。即蓄热过程装置内存在竖向温度梯度, 装置上部的液相材料处于过热状态而下部的固相材料仍为过冷状态, 由此形成如图4所示蓄热后期的相界面分布。



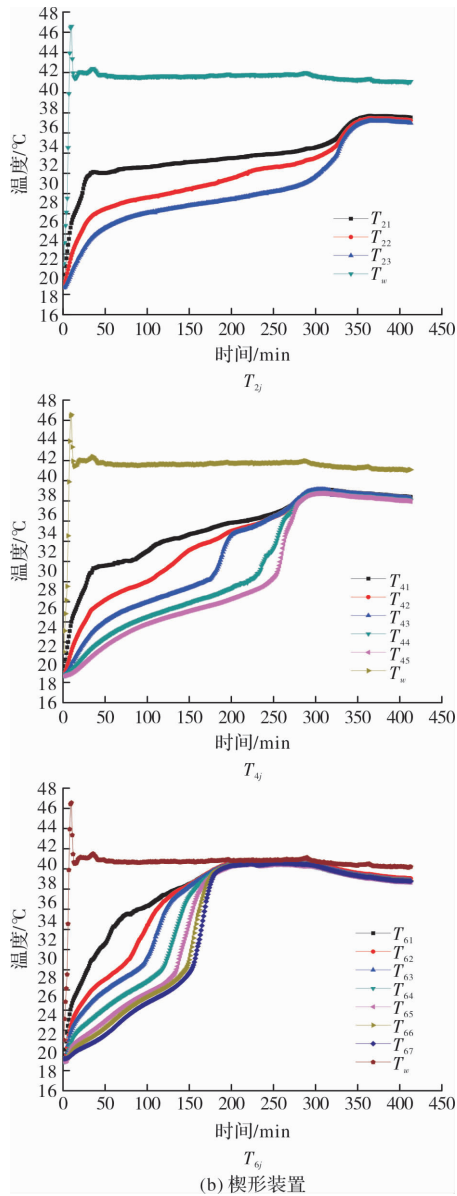


图6  $T_w=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同高度测点温度随时间的变化

Fig. 6 Temperature variations of a series of different heights of for hot wall temperature of  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

针对矩形和楔形装置下部传热特性的差异, 本文又选择底部  $T_{2j}$  测点进行对比分析。如图7所示, 初始阶段热传导作用下, 靠近热源  $T_{21}$  首先开始升温, 距离较远的其余各点仍处于过冷状态。随蓄热过程进行, 热量逐渐向更远处渗透, 形成装置内  $x$  方向的温度梯度。到蓄热后期同一高度的材料完成融化进入过热状态时, 楔形装置底部的温度较矩形装置的要高, 即楔形几何形状一定程度缓解了装置内的竖向温度分层, 使热源释放的热量更多用于装置下部固相材料的融化而非上部液相材料的过热, 这也是导致蓄热后期两装置融化速率差异的主要原因。

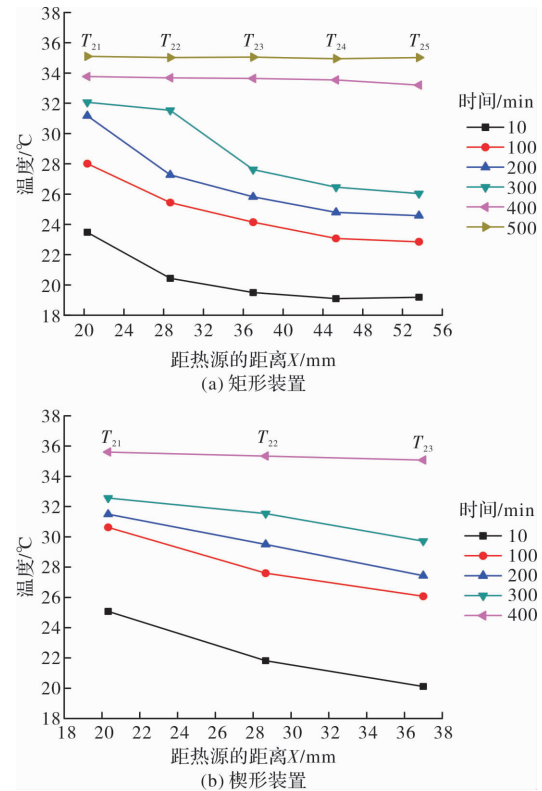


图7  $T_w=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时装置底部  $T_{2j}$  测点的温度分布

Fig. 7 Temperature distributions of  $T_{2j}$  series at the bottom of for hot wall temperature of  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3 结论

通过对矩形及楔形装置蓄热性能的对比实验研究, 得到如下结论:

(1) 所述矩形及楔形装置均具有二维传热特性, 与热源垂直的任意断面可反映蓄热过程材料的融化及传热特性。

(2) 沿装置高度方向, 自然对流作用下装置内的相界面及温度分布存在极大不均匀性, 矩形装置内存在传热及融化死角。

(3) 与传统矩形装置相比, 所述楔形几何形状可有效改善装置内的竖向温度分布, 加快后期阶段装置底部材料的融化速率, 实现强化传热。

### 参考文献 References

- [1] FARID M M, KHUDHAIR A M, RAZACK S A K, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9/10):1597-1615.
- [2] ZHANG Y, CHEN C, QI D W. Review on phase change material storage in solar energy application[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 587-589(587/589):309-314.

- [3] NOMURA T, AKIYAMA T. High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016.
- [4] JEGADHEESWARAN S, POHEKAR S D. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2225-2244.
- [5] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2): 615-628.
- [6] 谢望平, 汪南, 朱冬生, 等. 相变材料强化传热研究进展[J]. *化工进展*, 2008, 27(2): 190-195.  
XIE Wangping, WANG Nan, ZHU Dongsheng, et al. Review of heat transfer enhancement of the PCMs[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2008, 27(2): 190-195.
- [7] DH Aidan N S, KHODADADI J M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43:449-477.
- [8] SHOKOUHMAND H, KAMKARI B. Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2013, 50(6): 201-212.
- [9] ISKHAKOV I, RIBAKOV Y. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 72(5):186-200.
- [10] HU Z, LI A, GAO R, et al. Effect of the length ratio on thermal energy storage in wedge-shaped enclosures [J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2014, 117(2):807-816.
- [11] DH Aidan N S, KHODADADI J M, AL-HATTAB T A, et al. Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 66(11):672-683.
- [12] 袁艳平, 曹晓玲, 白力, 等. 矩形单元内癸酸熔化特性的数值模拟与实验[J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(2):236-240.  
YUAN Yanping, CAO Xiaoling, Bai Li, et al. Melting behaviors of Capric Acid in rectangular enclosure [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(2):236-240.

(编辑 桂智刚)

(上接第 133 页)

- [22] 胡正生, 王辉, 孙建平, 等. 高层建筑迎风面风驱雨分布预测模型适用性的数值研究[G]//工程防震减灾新技术、新进展和新应用(下). 合肥:合肥工业大学出版社, 2016:811-818.  
HU Zhengsheng, WANG Hui, SUN Jianping, et al. Numerical simulation on suitability of the semi-empirical model on wind-driven rain distribution on tall building windwards facades [J]//New technology, development & application in engineering for seismic prevention and disaster mitigation. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2016:811-818.
- [23] 严济远, 徐家良. 上海气候[M]. 北京:气象出版社, 1996:1-10.  
YAN Jiyuan, XU Jialiang. *Shanghai Climate* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1996:1-10.
- [24] 中国气象局. 地面气象观测规范 [M]. 北京:气象出版社, 2003.  
China Metrological Administration. *Specifications for surface meteorological observation* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2003.
- [25] LACY R E. *Climate and Building in Britain* [M]. London, UK: Her Majesty's Stationery Office, 1977.
- [26] American Society of Civil Engineers. *Minimum design load for buildings and other structures: ASCE7-10* [S]. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2013.
- [27] PÉREZ-BELLA J M, DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ J, CANO-SUNNÉN E, et al. On the significance of the climate-dataset time resolution in characterising wind-driven rain and simultaneous wind pressure. Part I: scalar approach[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018(6): 1783-1797.

(编辑 桂智刚)