

# 折流板相变储能水箱蓄放热能力分析

李慧星,刁兴宇,冯国会,黄凯良,孙昊

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 确定相变材料与相变储能水箱体积的最优比,提高相变储能水箱的蓄、放热能力. 方法 对储能水箱实验台储能单元体积蓄、放热进行实验研究,分别测试加入相变材料占相变储能水箱不同体积比的蓄、放热效果. 结果 当加入的相变材料占相变储能水箱体积比为5%、8%、11%和15%时,相变水箱的蓄热能力提高5%、14%、27%和38%;放热能力提高17%、25%、28%和40%.相变材料与相变储能水箱体积的最优比为20%左右时,相变储能水箱的蓄、放热能力分别提高了53%和55%左右. 结论 相变储能水箱蓄、放热能力随着相变材料占相变储能水箱体积比的增加逐渐增强,蓄、放热能力呈线性关系增长.

**关键词** 相变储能;蓄热;放热;最优比

中图分类号 TU50 文献标志码 A

## Analysis of Storage and Release Capacity of Baffled Phase Change Energy Storage Tanks

LI Huixing, DIAO Xingyu, FENG Guohui, HUANG Kailiang, SUN Hao

(School of Municipal and Environment Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The optimal volume ratio of phase change materials to the phase change energy storage water tank paper was studied to improve the heat storage and release capacity of the phase change energy storage water tank. The effect of phase change materials on the heat storage and release capacity of phase change energy storage tanks is studied. The results show that the volume ratio of the phase change material to the phase change energy storage water tank is 5%, 8%, 11% and 15%, the heat storage capacity of the phase change water tank is increased by 5%, 14%, 27% and 38%; the exothermic capacity of the phase change water tank is increased by 17%, 25%, 28% and 40%. The optimal volume ratio of the phase change material to the phase change energy storage tank is about 20%, the heat storage and exothermic capacity of the phase change energy storage tank is increased by 53% and 55%, respectively. The heat storage and release capacity of the phase change energy storage water tank increases linearly with the increase of the volume ratio.

**Key words:** phase change energy storage; heat storage; exothermic; optimal ratio

收稿日期:2019-11-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0601701)

作者简介:李慧星(1964—),女,教授,主要从事相变储能理论与技术、可再生能源综合利用方面研究.

我国建筑能源消耗的比重在总能源消耗中逐年升高<sup>[1-3]</sup>。根据建筑功能的不同,建筑的能耗也不相同,所以单一能源的使用就存在许多问题,例如新能源利用时一般都有间歇性和不稳定性等缺点,在应用过程中需求方与供给方在时间和空间上往往不能相匹配,使得大规模的应用新能源的时候受到了限制,能量的高效储存是缓解这个问题的关键技术之一<sup>[4-10]</sup>,其中热能的储存和转化在能源的使用中占据了很大的比重,所以,研究高效率的储能技术,大力开发利用余热,可以降低建筑能耗,减少常规化石能源的消耗。为了提高相变储能水箱的蓄、放热能力,笔者设计了折流板相变储能水箱模型,测试加入相变材料占相变储能水箱不同体积比时相变储能水箱蓄、放热的时间,进而确定相变材料占相变储能水箱体积的最优比。

## 1 相变储能水箱模型实验台

### 1.1 实验设备材料

相变储能水箱模型实验台主要由相变蓄热水箱、加热设备、热水管、保温材料(橡塑保温棉)等组成。相变储能水箱体积为 $0.18\text{ m}^3$ ,综合考虑加工材料不锈钢板制作工艺,水箱实验模型长宽高为 $800\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ ,板厚为 $2\text{ mm}$ (见图1)。



图1 水箱内部图

Fig. 1 Internal view of water tank

实验过程测试随着水温上升相变蓄热水箱内部水温分布及变化。选择电加热水龙头作为实验稳定热源,热源热水出水温度在 $30 \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ ,

热水温度恒定。蓄热水箱与加热设备通过管径为DN15的软管连接。为保证实验测试过程最终测试结果的可靠性,减少热量损失,对相变蓄热水箱进行保温处理,保温材料选用导热系数为 $0.035\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、厚度为 $15\text{ mm}$ 的橡塑保温棉,最高使用温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 相变单元封装

将相变单元放置于储能水箱当中,充分考虑蓄热单元与水的热量交换能力<sup>[12-14]</sup>。为了使其与水的换热效果达到最佳,相变材料选用较适于采用分散式封装方式的46#石蜡。蓄热单元外形采用板式封装体,外形长宽高为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ,蓄热板上端采用带纹螺母与板子焊接密封,上端用螺帽连接,便于相变材料的灌装。

### 1.3 相变单元连接与排列

将相变单元完全堆积在蓄热水箱当中足够长的时间过后,相变材料能够完全融化并储存水箱热量。为使相变材料在最佳时间内发挥最大的蓄热能力,相变单元在相变蓄热水箱中的放置形式要合理。流动的水与相变蓄热单元之间的换热为对流换热,结合相变蓄热单元外形尺寸,为增加换热流体在水箱中扰动换热效果实验选择将相变蓄热板双侧交替排列放置,板间间距为 $60\text{ mm}$ ,实现水体和相变蓄热板的折流式换热(见图2)。



图2 相变储能水箱实物图

Fig. 2 Physical picture of water storage tank

### 1.4 测点布置

相变蓄热水箱中共设置7个测点,如图

3所示,标号为1至7,1至5号测点是测试水箱高度及长度方向水温的分层情况,6号、7号测点分别位于水箱进、出口处,用于测试蓄、放热过程中进出口温度随着时间的变化。当加入相变材料后,在相变蓄热单元内部增设一个测点8,用于检测相变蓄热单元内部相变材料的温度变化情况。

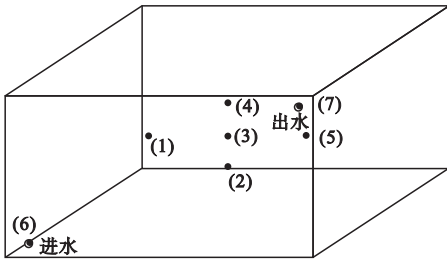


图3 小型相变蓄热水箱内测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points in phase change hot water storage tank

## 1.5 水箱实验台测试模式

相变蓄热水箱模型实验的测试模式分为两种:一是蓄热水箱中未加入石蜡相变材料时,仅依靠水箱水体自身热容储存热量;二是在水箱中加入石蜡相变蓄热板,依靠水体和相变单元共同对热量进行储存。笔者第二种测试模式设置了相变材料占相变储能水箱体积比5%、8%、11%、15%的4种情况。

## 2 模型实验结果与蓄、放热能力分析

### 2.1 蓄热能力分析

当未加入石蜡相变蓄热单元时,蓄热水箱模型完全依靠热水龙头水体的自身来进行热量的储存。笔者测试未加入相变蓄热单元时,蓄热水箱内部垂直和水平方向上的温度分布,以及出水温度达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所用时间。

图4为测点1、3、5的温度测试结果,测点1、3、5位于相变蓄热水箱垂直方向中心,水平方向均匀分布的测点。3个测点温度上升稳定,且各测点温差基本相对恒定。由于测点1位置靠近水箱入口,水箱入口温度要高于出口温度,从图4可以看出,测点1和测点

3的温差大于测点3和测点5的温差,这是由于测点1相比测点3、5距离进水口更近,故温度高;测点3和5的温差较小是由于高温进水与水箱内的低温水进行了充分换热,而测点3和测点5位于测点1之后,其温度自然低于测点1,由于换热后的温度相对均匀稳定,因此测点3、5的温差较小,根据数据的测试结果,3个测点最高和最低温度之差为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

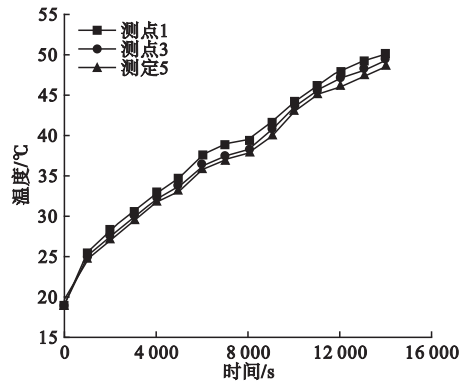


图4 测点1、3、5温度随时间变化

Fig. 4 Temperature change curve of measuring points 1, 3 and 5

图5为测点2、3、4的温度测试结果,测点2、3、4位于相变蓄热水箱的水平方向中心、垂直方向均匀分布的测点,其中测点2位于水体垂直方向上下部,测点3在中间位置,测点4位于垂直方向上部。从图5可知,测点2、3的温差较小,测点3、4点温差相对较大,说明蓄热水箱的中、上部温度分布比较均匀,

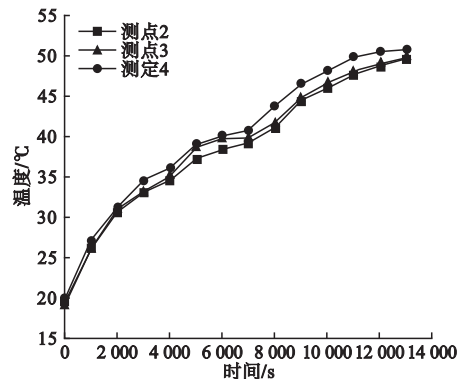


图5 测点2、3、4温度随时间变化

Fig. 5 Temperature change curve of measuring points 2, 3, 4

温度高于下部水温,原因是由于水箱底部贴近地面,未加设保温层,导致底层水体与地面换热明显,所以下部水温较低,测点 2、3、4 最高与最低温度之差为 1.6 °C。

图 6 为蓄热水箱进水和出水温度变化,由图可知,水箱进水温度基本维持在 50 °C 左右,而出口温度随着时间逐渐上升,出口温度由 19.8 °C 上升至 50 °C 所用时间 14 000 s。

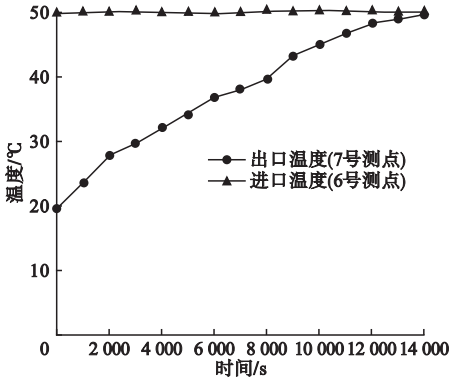


图 6 进、出口温度随时间变化

Fig. 6 Inlet and outlet temperature change curve

在加入相变单元情况下,4 种不同体积比的相变材料放置于蓄热水箱当中,不同相变储能单元出水温度变化如图 7 所示。

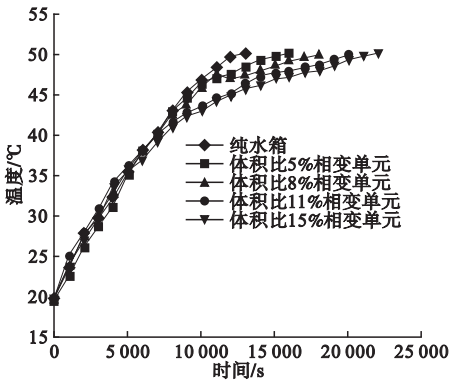


图 7 不同相变单元出水温度变化

Fig. 7 Outlet water temperature changes of different phase change units

从图 7 可以看出,加入 8%、11%、15% 体积比的相变单元后,水箱内部温度分布与加入 5% 相变蓄热单元测试结果类似,垂直方向上均存在着较小的温度梯度。随着相变蓄热单元数量的增大,出口温度升至 50 °C 的

时间变长,明显看出,加入相变蓄热单元后,水箱的蓄热能力明显增加。

加入不同体积比相变单元的蓄热水箱能力如表 1 所示,表 1 中蓄热时间为出水温度从 20 °C 升至 50 °C 所用时间;延长时间为加入相变蓄热单元后的蓄热时间和常规水箱蓄热时间之差;蓄热能力提升为延长时间与未加入相变单元时蓄热时间之比。

表 1 加入不同体积比相变单元的蓄热能力

Table 1 Phase change unit heat storage capacity

体积比/%	蓄热时间/s	延长时间/s	蓄热能力提升/%
0	13 600	—	—
5	14 300	700	5
8	15 500	1 900	14
11	17 300	3 700	27
15	18 800	5 200	38

加入不同体积相变单元相变储能水箱出水温度从 20 °C 升至 50 °C 所用时间如图 8 所示。

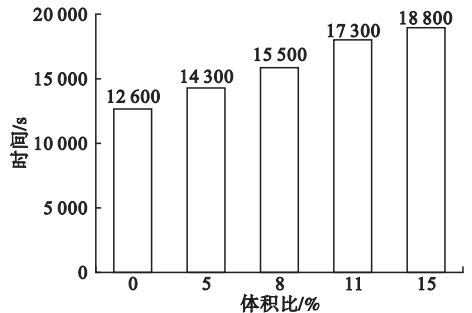


图 8 加入不同体积比相变单元后出水温度变化蓄热时间统计

Fig. 8 Storage time of phase change unit

从表 1 和图 8 可知,随着所加入的相变单元体积比不断增大,蓄热时间越来越长。当加入体积比为 15% 的相变单元后,可提升相变储能水箱 38% 的蓄热能力。

## 2.2 放热能力分析

相变储能水箱的放热实验同蓄热实验相同。分别加入体积比 5%、8%、11%、15% 相变材料,初始状态为水箱完成蓄热后,即水箱出水温度达到 50 °C,放热实验水箱入口温度为 20 °C,其他条件与蓄热实验完全相同。测

点的设置也与蓄热实验的测点设置完全相同.加入不同相变单元出口温度随时间变化测试结果如图9所示.

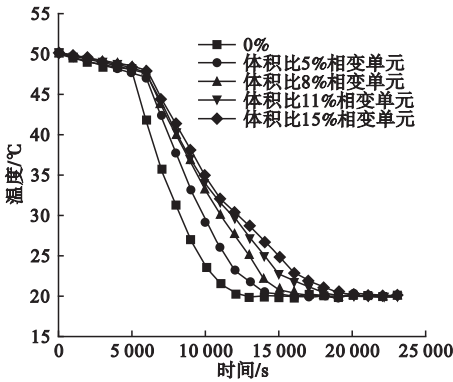


图9 加入不同体积比相变单元出口温度随时间变化

Fig.9 Temperature change of different heat storage unit outlets

加入不同体积比相变单元后放热能力如表2所示,表2中放热时间为出水温度从50℃下降至40℃所用时间;延长时间为加入相变单元后的蓄热时间和常规水箱蓄热时间之差;放热能力提升为延长时间与未加入相变单元时放热时间之比.

表2 加入不同体积比相变蓄热单元后放热能力

Table 2 Heat release capacity after adding phase change heat storage units

体积比/%	放热时间/s	延长时间/s	放热能力提升/%
0	6 400	—	—
5	7 500	1 100	17
8	8 010	1 610	25
11	8 240	1 840	28
15	8 980	2 580	40

从图9和表2可知,随着所加入的相变单元体积比不断增大,放热时间越来越长,当加入体积比为15%的相变单元后,可提升相变储能水箱40%的放热能力.

### 2.3 相变单元最优比分析

经过对相变储能水箱模型实验的测试可

知,随着相变单元的体积比的增大,相变储能水箱的蓄热能力越来越大.但相变储能水箱的整体蓄热能力并不会随着相变单元的增大而一直增大.因为加入石蜡相变单元的相变储能水箱的蓄热能力是依靠水体和石蜡相变单元的共同换热作用,相变材料的相变储热的过程并不是瞬间或者短时间内就可以完成的,而是一个长时间较复杂的过程.所以随着石蜡相变单元的增多,相变储能水箱内的水量也相应减少,必然存在一种临界状态即水箱内水的温度达到了入口温度而相变单元内部中的相变材料仍未完全融化.这时不仅无法发挥相变材料蓄热能力强的储热优势,反而会使水箱的蓄热能力减小.因此需要确定石蜡相变单元的最优用量.

#### 2.3.1 相变单元最优体积比确定

石蜡相变单元最优量的衡量方法为当水箱出水温度达到入口温度50℃时相变蓄热单元内部温度.依据该衡量方法,当相变储能水箱出水温度达到50℃时,统计加入不同体积比相变单元中心处最高温度.拟合曲线如图10所示.

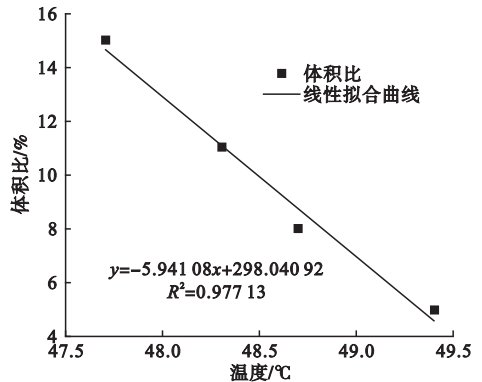


图10 相变单元体积比与相变单元内部温度拟合

Fig.10 Fit curve of volume and temperature of phase change unit

相变单元与相变储能水箱体积比与相变单元中心处最高温度拟合关系为

$$y_1 = -5.94108x_1 + 298.04092. \quad (1)$$

式中: $y_1$ 为相变单元与相变储能水箱体积比,%; $x_1$ 为相变单元中心处最高温度,℃.

根据对所采用的 46#石蜡 DSC 测试曲线可知,石蜡相变材料完全融化完成蓄热时的温度  $x_1$  为 46.8 °C 左右,将 46.8 °C 代入式(1)得到  $y_1 = 19.99\%$ ,即相变单元与相变储能水箱体积比为 20% 时,此时水箱的蓄热量达到最大值。

### 2.3.2 蓄热过程拟合

将相变单元与相变储能水箱体积比与出水温度升至 50 °C 所用时间的统计与线性拟合,得到石蜡相变单元的体积比与时间的拟合曲线如图 11 所示。

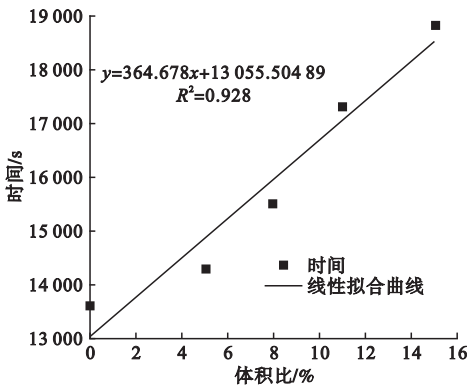


图 11 相变单元体积比与蓄热延长时间拟合

Fig. 11 Fitting curve of volume and heat storage time of phase change unit

相变储能水箱出水温度升至 50 °C 所用时间与相变单元与相变储能水箱体积比拟合关系为

$$y_2 = 364.678x_2 + 13055.50489. \quad (2)$$

式中: $y_2$  为相变储能水箱出水温度升至 50 °C 所用时间, s;  $x_2$  为相变单元与相变储能水箱体积比, %,  $0 < x < 20\%$ 。

根据相变单元最优量的结果,取相变蓄热单元的体积比为 20% 代入式(2)得到  $y_2 = 20893$  s, 延长时间为 7293 s, 所以当在水箱内加入 20% 体积比的相变单元时,相比于未加入相变单元的水箱,水箱的蓄热能力提高了 53% 左右。

### 2.3.3 放热过程拟合

当相变储能水箱出水温度由 50 °C 下降至 40 °C,加入不同体积比的相变单元时放热

延长时间,拟合曲线如图 12 所示

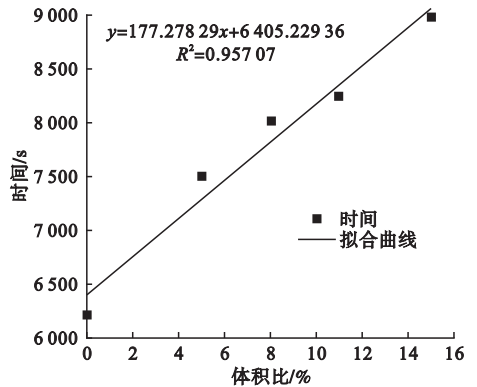


图 12 相变单元体积比与放热延长时间拟合

Fig. 12 Fitting curve of volume and heat release time of phase change unit

从图 13 可以看出,相关系数为 0.95707,相关系数接近于 1,相变储能水箱出水温度下降至 40 °C 所用时间与相变单元与相变储能水箱体积比拟合关系为

$$y_3 = 177.27829x_3 + 6405.22936. \quad (3)$$

式中: $y_3$  为相变储能水箱出水温度下降至 40 °C 所用时间, s;  $x_3$  为相变单元与相变储能水箱体积比, %。

根据蓄热时相变单元最优量的结果,取相变单元的体积比为 20% 代入式(3)得到  $y_3 = 9945$  s, 延长时间为 3545 s, 所以当在水箱内加入 20% 体积比的相变单元时,相比于未加入相变单元的水箱,水箱的放热能力提高了 55% 左右。

## 3 结论

(1)加入不同体积比的相变单元后,相变储能水箱的蓄、放热时间增长,蓄、放热能力明显提高并呈线性关系增长。

(2)最优的相变单元体积比是相变单元占相变储能水箱体积比在 20% 左右,在此状态下,相变储能水箱的蓄、放热能力分别提高了 53% 和 55% 左右。

### 参考文献

- [1] WRIGHT C D, LIU Y, KOHARY K I, et al. Arithmetic and biologically-inspired computing

- using phase-change materials [J]. *Advanced materials*, 2011, 23(30): 3408 - 3413.
- [2] TYAGI V V, BUDDHI D. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage [J]. *Solar energy materials & solar cells*, 2008, 92(8): 891 - 899.
- [3] WRIGHT C D, LIU Y, KOHARY K I, et al. Arithmetic and biologically-inspired computing using phase-change materials [J]. *Advanced materials*, 2011, 23(30): 3408 - 3413.
- [4] 肖伟, 王馨, 张寅平, 等. 定形相变墙板改善轻质墙体夏季隔热性能研究[J]. *工程热物理论*, 2009, 30(9): 1561 - 1563  
(XIAO Wei, WANG Xin, ZHANG Yiping, et al. Thermal analysis of lightweight wall with shape stabilized PCM panel for summer insulation [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2009, 30(9): 1561 - 1563)
- [5] 王永川. 相变储热热泵热水器及其关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
(WANG Yongchuan. Study on key technologies of a heat pump water heater with energy storage system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [6] BONY J, CITHERLET S. Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials [J]. *Energy & buildings*, 2007, 39(10): 1065 - 1072.
- [7] ZHANG Y, RAO Z, WANG S, et al. Experimental evaluation on natural convection heat transfer of microencapsulated phase change materials slurry in a rectangular heat storage tank [J]. *Energy conversion & management*, 2012, 59(3): 33 - 39.
- [8] SAN A, KARAIPEKLI A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material [J]. *Applied thermal engineering*, 2007, 27(8/9): 1271 - 1277.
- [9] ZHAO C Y, LU W, TIAN Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs) [J]. *Solar energy*, 2010, 84(8): 1402 - 1412.
- [10] YUAN Y, TAO W, CAO X, et al. Theoretic prediction of melting temperature and latent heat for a fatty acid eutectic mixture [J]. *Journal of chemical & engineering data*, 2011, 56(6): 2889 - 2891.
- [11] 罗刚, 彭三兵, 付祥钊. 一种新型水箱温度分层的相关特性研究 [J]. *建设科技*, 2008(10): 24 - 26.  
(LUO Gang, PENG Sanbing, FU Xiangzhao. Research on the related characteristics of a new type of water tank temperature layering [J]. *Construction science and technology*, 2008(10): 24 - 26.)
- [12] 袁艳平, 吉洪湖, 杜雁霞. 相变储能单元融化过程的传热强化 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2008, 40(2): 151 - 156.  
(YUAN Yanping, JI Honghu, DU Yanxia. Enhancement of heat transfer for thermal storage cells during melting process [J]. *Journal of Nanjing university of aeronautics and astronautics*, 2008, 40(2): 151 - 156.)
- [13] 汪玺. 相变蓄热水箱的设计及其运行特性的实验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
(WANG Xi. Investigation on designing and operation characteristic of latent heat storage water tank [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [14] 汪玺, 袁艳平, 邓志辉, 等. 热水/电能一体化相变蓄热水箱的设计 [J]. *制冷与空调*, 2011, 25(增刊1): 113 - 116.  
(WANG Xi, YUAN Yanping, DENG Zhihui, et al. Design of water tank with phase change materials storing heat from hot water or electricity [J]. *Refrigeration and air conditioning*, 2011, 25(S1): 113 - 116.)
- [15] 崔海亭, 杨锋. 蓄热技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
(CUI Haiting, YANG Feng. Thermal storage technology and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.)
- [16] 一色, 尚次. 余热回收利用系统实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.  
(YI Se, SHANG Ci. Practical manual for waste heat recovery and utilization system [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.)
- [17] 王剑峰, 郑飞, 陈光明. 组合式相变材料蓄热系统中相变温度分布研究 [J]. *太阳能学报*, 1998, 19(3): 294 - 298.  
(WANG Jianfeng, ZHENG Fei, CHEN Guangming. Study on PCT distribution in thermal energy storage systems using composite phase change materials [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 1998, 19(3): 294 - 298.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)