

文章编号:0253-4339(2015)03-0102-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.03.102

相变蓄热系统放热过程性能实验研究

张志强 陈华 周楚

(天津商业大学 机械工程学院 天津 300134)

摘 要 本文通过对热泵空调系统的相变蓄热冷凝热回收装置进行放热实验,分别测试了不同冷水进水温度和不同水流量下蓄热箱中石蜡及蓄热箱热水出口温度的变化情况。实验结果表明:水流量对石蜡凝固过程的影响较小,提高水流量或者冷水温度可以在一定程度上缩短获取热水时间,但会相应增加能耗;石蜡初始温度提高,石蜡释放显热的速率加快,可以缩短获取热水时间;提高系统的蓄热效率对冷凝热的回收和利用有较大意义。

关键词 放热过程;相变蓄热;相变材料;实验研究

中图分类号:TU831.3;TB34

文献标识码:A

Experimental Study on Performance of Discharging Process of Phase Change Thermal Storage System

Zhang Zhiqiang Chen Hua Zhou Chu

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract In this paper, the discharging performance of phase change thermal storage system recovering the condensation heat of heat pump air-conditioning system was experimentally investigated. Variation of outlet temperature of the hot water and paraffin in the heat storage tank were respectively tested under different inlet temperature of cold water and different water flowrate. The experiment results show that the solidification process of paraffin is less affected by the water flowrate. When the water flowrate or the temperature of cold water is increased, the time of getting hot water will be shortened to some degree, however, the energy consumption will increase. When the initial temperature of paraffin is raised, the rate of releasing sensible heat of paraffin becomes faster and the time of getting hot water will be shortened. The improvement of efficiency of the thermal storage system is significant for the recycling and utilization of the condensation heat.

Keywords discharging process; phase change thermal storage; phase change material; experimental study

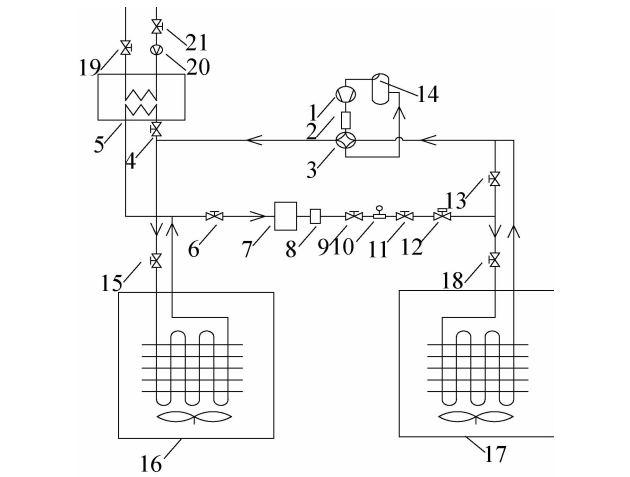
我国经济与社会发展已进入大量消耗能源阶段,空调系统能耗作为主要能耗之一,其制冷运行工况所产生的冷凝热量很大,如直接排入大气,不仅浪费能源,而且会导致环境温度升高。所以,可以考虑将冷凝热回收利用^[1]。在建筑能耗中,住宅用生活热水的能耗占除采暖外住宅总能耗的 23% 左右^[2],而住宅生活热水的需求量仍在不断增加^[3],可将回收的冷凝热用于加热生活用水。空调冷凝热回收系统主要包括热回收器和蓄热装置^[4]。蓄热装置可采用水蓄热式和相变蓄热式两种形式,水蓄热式存在系统体积庞大、输入功率大等问题,而相变式蓄热式既解决了热水供应时间和数量不同步的问题,又有箱体小,灵活布置的特点^[5]。朱家玲等^[6]对地源热泵供热系统中,利用低谷电蓄能的相变蓄能装置进行研究,模拟结果显示,采用相变材料蓄热可充分利用谷电,节约运行成本,具有良好的经济性。

张红瑞、廖海蛟、贺鹏和叶三宝等^[7-10]分别设计并改进了相变蓄热系统,为相变蓄热系统的设计和优化提供了理论支持和参考。刘永坤等^[11]建立了壳管式相变蓄热单元的三维模型,模拟得出采用带有外翅片的强化传热管,不仅削弱自然对流引起的固-液界面不均匀性问题,而且强化了相变蓄热单元的蓄热性能。Hawlder 等^[12]在实验研究中,制成一种胶囊型相变材料,将石蜡作为相变材料,明胶与阿拉伯树胶作为胶囊体材料,乙醇与甲醛作为溶剂,结果表明,该新型胶囊相变蓄热效果令人满意。而在向相变材料中加入铜环等填充材料后,不仅可以缩短蓄热器的蓄放热时间,还使温度场的分布更加均匀合理^[13-18]。

本文通过对热泵空调系统的相变蓄热冷凝热回收装置进行放热研究,测试蓄热箱中石蜡各个测点的温度改变值及蓄热箱热水出口温度的变化情况,最终得出较好的控制方案。

1 实验系统介绍

本实验台可以实现单独制冷、单独制热水(独立热回收)、同时制冷与热回收等功能。与常规热泵系统一样,只是在原来的基础上添加了相变蓄热装置,其工作流程也同普通制冷循环类似,系统结构图如图 1 所示。



1 压缩机 2 油分 3 四通换向阀 4(6,9,11,13,15,18)制冷剂阀 5 蓄热箱 7 储液器 8 干燥器 10 制冷剂流量计 12 热力膨胀阀 14 气液分离器 16 室外模拟环境 17 室内模拟环 19 (21)水阀 20 水泵

图 1 实验系统图

Fig. 1 The diagram of experimental system

在相变蓄热阶段,压缩机排出的高温高压制冷剂在蓄热箱内通过管壁与管外的相变材料进行换热,以潜热的形式将冷凝热储存在其中,而后制冷剂从蓄热箱出口流出,经过节流元件、蒸发器后回到压缩机完成蓄热阶段;蓄热实验结束后即可进行放热实验,冷水通过水阀 21 流入相变蓄热箱与相变材料进行热量交换,经过水泵强制循环将水加热至 40 ℃,由水阀 19 流出提供热水。相变材料物性参数见表 1。石蜡放热实验分别改变冷水进水温度和水流量,通过控制阀门开度和流量计示数来控制水流量,进水温度可通过电加热和向水箱加冷水来控制,测试蓄热箱中石蜡各个测点的温度改变值。

蓄热箱内部盘管结构见图 2。制冷剂与水管路以螺旋的方式平行交错,管外填充相变材料,制冷剂管路与水管路的进出口位置都是上进上出。采用铜-康铜热电偶的 6 个测点为:相变蓄热箱中相变材料的温度测点、以及水管路进口水温测点。相变材料温度测点布置方式如图 3 所示,主要测量仪表及其参数见表 2。

表 1 相变材料物性参数^[19]
Tab. 1 Phase change material physical parameters

凝固点/ ℃	熔点/ ℃	密度/ (kg/m ³)	体积/ m ³	导热系数/ (W/(m·K))
54. 25	58. 00	920 (固) 795 (液)	0. 09	0. 21

表 2 主要测试仪表
Tab. 2 Measuring instruments

仪表名称	型号	测量范围	精度
涡轮流量计	LWGB - 15	0 ~ 6 m ³ /h	0. 5 级
热电偶	T 型	- 200 ~ 350 ℃	± 0. 1 ℃
数据采集器	MX100	—	10 ms

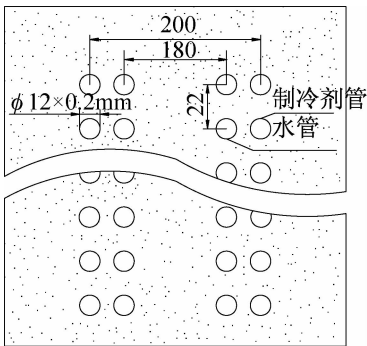


图 2 蓄热箱内部盘管结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the coil structure in thermal storage tank

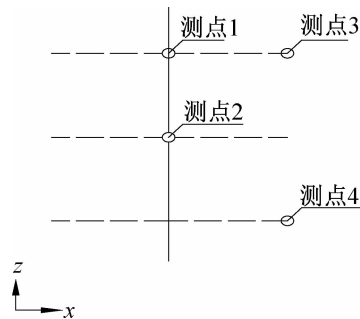


图 3 温度测点分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature measuring points distributing

由于蓄热时间较长和天气等外部环境条件的影响,放热过程中石蜡初始温度无法得到精确控制,分析过程忽略由石蜡初始温度不同所造成的影响。选取 2 个不同冷水进口温度 and 2 个不同水流量进行实验,4 种工况见表 3。

表3 实验工况
Tab.3 The experimental conditions

序号	水流量/(m ³ /h)	进水温度/℃
1	0.5	20
2	1.0	20
3	0.5	25
4	1.0	25

2 实验结果分析

2.1 水流量对石蜡温度变化的影响

1) 进水温度 20 ℃, 水流量不同时蓄热箱内石蜡温度变化情况。

图4所示为蓄热箱中不同位置石蜡温度测点随时间变化的温度曲线。从图中可以看出四条线中测点1和测点2的曲线变化趋势相近,而测点3和测点4的曲线变化趋势基本相同。测点1和测点2的曲线在实验初始阶段较为平缓,100 min后其曲线斜率开始变大,之后又不断减小,至实验结束前其温度趋于热水温度;测点3与测点4的曲线变化趋势相似,其曲线斜率开始很大,随时间推移逐渐减小。四个测点处石蜡温度下降原因不同,实验初始时测点1和测点3处的石蜡为液态,水与石蜡的换热方式为自然对流和导热,但在前300 min内,测点3的曲线斜率一直大于测点1的曲线斜率,因为测点3的位置更靠近冷水进口管路,水与石蜡传热温差大,换热效率高且换热速度快,石蜡快速放热凝固,而测点1附近的石蜡与水换热温差小,石蜡放出热量少,导致初始阶段出现一段近似温度持续稳定的平滑曲线。随着石蜡逐渐凝固,石蜡与水只通过导热进行换热,传热温差进一步减小,三条曲线趋势变得一致,即开始迅速降温,曲线最终趋向平缓。测点2和测点4附近的石蜡在开始时为固体状态,其与水的换热方式只有导热。在实验开始前100 min内,测点2曲线的斜率小于测点4曲线的斜率,其原因与测点1和测点3的原因相同,而后随着传热温差的减小,曲线斜率减小直至最终接近直线。

对比图5与图4可知,四个测点的石蜡温度变化趋势明显不同。相比图4中平缓的石蜡降温速率,图5中四个测点的石蜡降温速率均高于图4。实验开始时,图4中测点1和测点3还有图5中的测点1、测点2和测点3处石蜡为液态,在进行到约360 min时,石蜡温度达到其凝固点54.3℃,两工况所需时间基本一致,因此相同进水温度时,水流量对石蜡的凝固过

程影响较小,此时应选择小流量以降低水泵能耗。

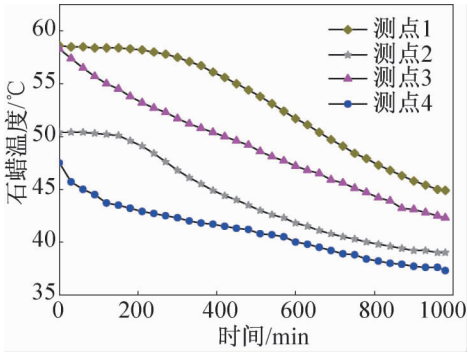


图4 水流量为 0.5 m³/h 时的石蜡温度
Fig.4 Paraffin temperature with water flow is 0.5 m³/h

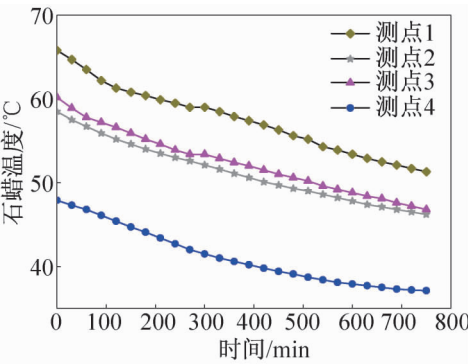


图5 水流量为 1.0 m³/h 时的石蜡温度
Fig.5 Paraffin temperature with water flow is 1.0 m³/h

2) 进水温度 25 ℃, 水流量不同时蓄热箱内石蜡温度变化情况。

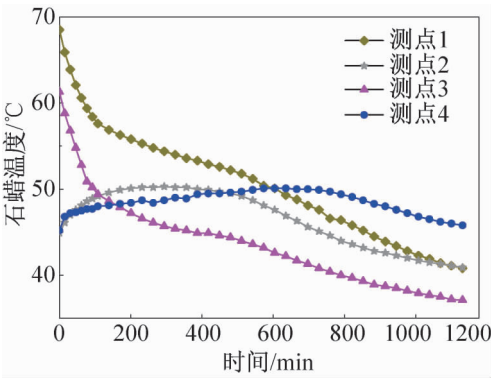


图6 水流量为 0.5 m³/h 时的石蜡温度
Fig.6 Paraffin temperature with water flow is 0.5 m³/h

图6和图7为冷水进水温度25℃,水流量不同时蓄热箱内各测点石蜡温度随时间的变化曲线。由图6看出,测点1和测点3在实验开始时温度均在60℃以上,开始100 min内温度下降速率较大,200 min之后二者温度下降速率逐渐放缓,曲线变得平滑,随

着实验的进行其斜率越来越小,最终趋于零。而开始时测点2和测点4处石蜡未达到熔融状态,所以在实验开始400 min内,其温度出现不降反增的现象,在实验进行600~800 min期间,测点4的温度出现小幅上升并随后下降的趋势,测点2温度在实验500 min时开始下降,从曲线走势可知两曲线斜率随着时间的推移逐渐减小,最终趋于平缓。

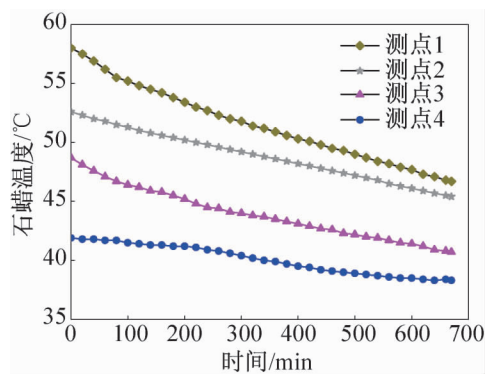


图7 水流量为1.0 m³/h时的石蜡温度

Fig. 7 Paraffin temperature with water flow is 1.0 m³/h

四个测点温度变化趋势的原因如下:1)测点1和测点3在开始100 min内温度下降剧烈,是因为此时液态石蜡温度高于其相变温度,释放的热量为显热,实验初期石蜡与水的换热温差大,导致开始两个测点处的石蜡降温速率较大。之后两曲线变得平缓,是由于石蜡达到了凝固点,开始相变并释放潜热,温度变化较小,降温速率也较前100 min时减小。2)测点2和测点4曲线的变化是因为实验开始时靠近水管壁面下端的石蜡最先凝固,而远离管壁的石蜡仍处于液态,由于石蜡固液密度差产生自然对流现象,蓄热箱上部液态石蜡与下部固态石蜡之间换热加强,其升温速率很小是因为测点处的固态石蜡与液态石蜡换热的同时,还与水进行换热,所以在400 min内测点2与测点4的温升不是很大,这就是位于蓄热箱中部及下部测点2和测点4在实验开始400 min内温度不降反升的原因。3)测点2在500 min时温度开始下降,是由于此时蓄热箱内石蜡基本完全凝固,且此时测点1和测点3温度与测点2温度之差越来越小,同时又与冷水管路中的水进行换热,这就使得测点2的温度开始下降,最后趋于热水出水温度。4)测点4在500~600 min间出现微弱的温度上升趋势,是由于测点1此时处于固液共存的状态,自然对流现象可能存在也可能已经消失,但是测点4的温度低于测点1的温度,又由于测点4位于蓄热箱底部,其换热方式只有导热,故温度改变速率较小。随着石

蜡与水的换热,在600 min之后相变过程结束,测点1、测点2和测点3的曲线斜率开始变大,最终逐渐减小直至其温度与热水温度一致,测点4温度在其它三个测点曲线斜率增加时开始缓慢下降,最终趋于一条直线。

对比图6和图7可知:出水流量对石蜡凝固过程的影响同样较小,最终各测点温度趋于热水出水温度。因此,为了降低能耗建议采用小流量来获取热水。

2.2 冷水进水温度对石蜡温度变化的影响

1)水流量0.5 m³/h,不同进水温度对石蜡温度变化的对比分析。

对比图4与图6可知,两图中测点1石蜡温度变化趋势存在不同之处。图4中的测点1在实验开始300 min内温度几乎不变,而图6中的测点1出现温度变化较小是在200~600 min之间,原因是图4中石蜡起始温度低于图6中的石蜡起始温度,因此前者自然对流的作用远远低于后者,换热方式主要以导热为主,而后图中测点1温度变化缓慢是由于相变过程的发生。因此,从放热时间来看,排除如石蜡初始温度不同等因素的影响,提高冷水进水温度可以缩短石蜡放热时间,从而为获得40℃热水节省时间。

2)水流量1.0 m³/h,不同进水温度对石蜡温度变化的对比分析。

对比图5和图7可知,两图中对应的每个测点在实验过程中的温度变化趋势基本一致,实验初始由于石蜡与水温换热温差较大,石蜡温度下降速率较大,而后随着实验的进行,石蜡与水换热温差的减小以及自然对流作用的减弱,各测点曲线斜率逐渐降低。25℃工况下测点2和测点3变化趋势几乎相同,对比20℃工况中的测点2和测点3,差别较大,根本原因是前者产生了较强自然对流现象,换热方式以对流和导热为主,而后者只以导热为主。对于两图中测点1和测点4,其温度变化趋势则无太大区别。

2.3 进水温度和水流量对出水温度的影响

1)进水温度20℃时热水出水温度对比。

从图8中不同流量下热水出水温度的变化趋势可以看出,0.5 m³/h和1.0 m³/h工况基本一致。在实验开始400 min前,两工况的温升速率几乎一致,都随着时间的推移逐渐放缓。实验开始400~600 min期间,1.0 m³/h工况下的热水温升速率开始大于0.5 m³/h工况的温升速率,原因在于此时石蜡凝固过程基本结束,水和石蜡的换热方式为导热,水流量增大改善了水侧对流换热系数,从而增强水与石蜡的换热作用,最终缩短热水出水时间。

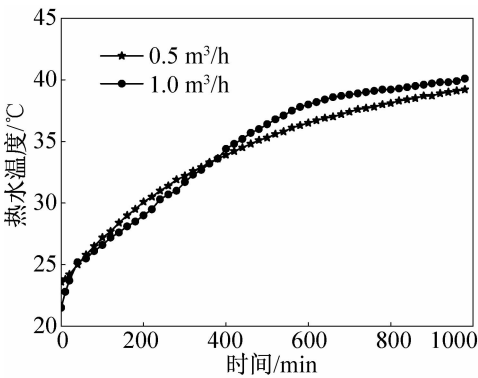


图8 冷水进口水温为20℃时的热水出水温度
Fig.8 Hot water outlet temperature with the cold inlet water is 20℃

2) 进水温度25℃时热水出水温度对比。

根据图9中热水温升变化趋势可知,1.0 m³/h工况下的热水温升速率大于0.5 m³/h工况的温升速率,可见冷水温度提高至25℃时,改变水流量对热水温度的变化仍存在影响。

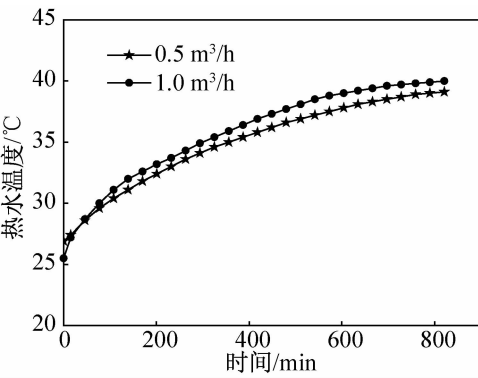


图9 冷水进口水温为25℃时的热水出水温度
Fig.9 Hot water outlet temperature with the cold inlet water is 25℃

综上两类工况,在进水温度相同的条件下,提高水流量可以缩短获取40℃热水的时间。若考虑到系统的经济性,在满足时间和热水要求的前提下,尽量选择小流量工况以降低水泵的耗能。

3) 水流量一定,进水温度对热水出水温度的影响对比。

从图8和图9可以看出,水流量为0.5 m³/h时,20℃与25℃两种工况热水出水温度变化趋势近似相同,实验开始400 min内石蜡与水换热温差大,热水温度上升速率快,待热水温度升高到37℃左右时,温升速率逐渐减小,曲线开始变缓。从热水达到要求温度值的时间来看,25℃冷水进水工况所需时间要比20℃工况所需时间短,其原因就是冷水进口温度提高,缩小了换热温差,从而在同样的工况下冷水进

水温度提高可以缩短热水出水时间。
水流量1.0 m³/h时,图8和图9中20℃与25℃两种工况热水温升速率在实验进行至50 min之前较大,而此后则开始下降,这是由于实验开始时石蜡与水换热温差较大,热水温度升高较快,此外由于石蜡自然对流作用加强了水与石蜡的换热,待石蜡相变过程结束后自然对流作用消失,这是500 min后曲线几乎变为直线的原因。
四种工况下,热水达到要求温度值所需要的时间如表4所示。

表4 热水达到需求温度时间
Tab.4 The time of hot water reaches the required temperature

工况	1	2	3	4
时间/ min	1160	980	1010	820

由表4可知:冷水进水25℃,1.0 m³/h的工况所需时间最短。综合以上4种工况可知:热水出水时间不仅受热源初始温度的影响,还受冷水进口温度的影响,适当提高热源初始温度和冷水进口水温可缩短获取热水所需时间。

3 结论

- 1) 本文对石蜡放热过程分别进行了20℃及25℃冷水温度下水流量为0.5 m³/h和1.0 m³/h四组实验,通过对比实验分析得出水流量对石蜡凝固过程的影响较小,排除如石蜡初始温度不稳定等不可控因素的影响,提高冷水进水温度可缩短石蜡放热时间。
- 2) 提高水流量或冷水温度可以在一定程度上缩短获取热水的时间,但会相应增加能耗,所以在水流量满足要求的前提下,适当提高冷水进口温度。石蜡初始温度的提升,增大了石蜡与冷水换热温差,石蜡释放显热速率加快,从而可以缩短获取热水时间。
- 3) 由于石蜡初始温度对石蜡放热和获取热水时间有一定的影响,所以提高相变蓄热系统的蓄热效率对冷凝热的回收和利用有较大的意义。

参考文献

[1] 章学来,于树轩,林原培,等. 相变蓄热冷凝热回收实验研究[J]. 化工学报, 2010, 61 (Suppl. 2): 43-48. (Zhang Xuelai, Yu Shuxuan, Lin Yuanpei, et al. Experiment research on heat recovery of condensation with phase change thermal storage [J]. CIESC Journal, 2010, 61 (Suppl. 2): 43-48.)

- [2] 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 邓光蔚, 燕达, 安晶晶, 等. 住宅集中生活热水系统现状调研及能耗模型研究[J]. 给水排水, 2014, 40(7): 149-157. (Deng Guangwei, Yan Da, An Jingjing, et al. Investigation of the current situation of residential centralized hot water system and study on the energy consumption model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40, (7): 149-157.)
- [4] 史德福, 陈华, 黄耀坤. 带冷凝热回收的家用空调器的研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(5): 63-67. (Shi De-fu, Chen Hua, Huang Yaokun. Study on domestic air conditioner with condensing heat recovery[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012, 40(5): 63-67.)
- [5] 周楚, 陈华, 史德福, 等. 相变蓄热式热泵热水器性能实验研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(4): 5-9. (Zhou Chu, Chen Hua, Shi Defu, et al. Experimental study on performance of phase-transition thermal-storage heat pump water heater[J]. Building Science, 2014, 30(4): 5-9.)
- [6] 朱家玲, 李慧, 张伟. 螺旋管式相变蓄热过程的数值模拟与系统优化[J]. 天津大学学报, 2012, 45(10): 875-880. (Zhu Jialing, Li Hui, Zhang Wei. Numerical simulation and optimization of phase change heat storage process with spiral pipe[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(10): 875-880.)
- [7] 张红瑞. 空调废热回收热泵关键技术的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
- [8] 廖海蛟, 凌祥. 高温肋板式蓄热器蓄/放热特性的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 345-350. (Liao Haijiao, Ling Xiang. Numerical simulation of phase change heat transfer in high temperature fin-plate thermal storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(3): 345-350.)
- [9] 贺鹏, 冯毅. 相变蓄热体的热工特性数值模拟[J]. 低温与超导, 2012, 40(11): 80-84. (He Peng, Feng Yi. Numerical simulation on thermal performance of the regenerator with phase change[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012, 40(11): 80-84.)
- [10] 叶三宝, 刁彦华, 赵耀华. 新型平板热管相变蓄热器蓄放热性能分析[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 136-140. (Ye Sanbao, Diao Yanhua, Zhao Yaohua. Heat storage-release property of phase-change thermal storage system with new flat heat pipe[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 136-140.)
- [11] 刘永坤, 陶于兵, 唐宗斌. 相变蓄热单元性能强化的数值研究[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(3): 197-202. (Liu Yongkun, Tao Yubing, Tang Zongbin. Numerical study on performance enhancement of latent heat storage unit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(3): 197-202.)
- [12] Hawlader, Zhu H J. Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation[J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(2): 159-171.
- [13] 崔海亭, 张改, 蒋静智. 多排管式相变蓄热器熔化过程热性能数值模拟研究[J]. 流体机械, 2014, 42(4): 56-61. (Cui Haiting, Zhang Gai, Jiang Jingzhi. Numerical simulation on thermal performance of multiple-pipe heat storage[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(4): 56-61.)
- [14] 王永川. 相变储热热水器及其关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 杨莺, 梁艳南, 周子民, 等. 壳管式相变蓄热器传热效率研究[J]. 热科学与技术, 2011, 10(3): 226-230. (Yang Ying, Liang Yannan, Zhou Jiemin, et al. Research of heat transfer efficiency in phase change thermal storage[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2011, 10(3): 226-230.)
- [16] 朱恂, 廖强, 李隆键, 等. 添加物对石蜡相变螺旋盘管蓄热器蓄热和放热性能的影响[J]. 热科学与技术, 2005, 4(1): 14-18. (Zhu Xun, Liao Qiang, Li Longjian, et al. Effect of additive on thermal energy stored and discharged performance of wax phase change thermal storage with spiral pipe[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(1): 14-18.)
- [17] 李达志, 崔海亭, 刘凤青, 等. 填充泡沫铜对石蜡相变蓄热性能的试验研究[J]. 流体机械, 2012, 40(5): 54-57. (Li Dazhi, Cui Haiting, Liu Fengqing, et al. Experimental investigation on the heat storage by paraffin filled with high porosity copper foam[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(5): 54-57.)
- [18] 郭美茹, 周文, 周天, 等. 石墨烯/石蜡复合材料的热物理性能研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1200-1205. (Guo Meiru, Zhou Wen, Zhou Tian, et al. Investigation on the thermophysical properties of graphene/paraffin composites[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(6): 1200-1205.)
- [19] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 北京科学出版社, 2009: 125-127.

作者简介

张志强,男,硕士研究生,天津商业大学,天津市制冷技术重点实验室,18630897335, E-mail: zzqiangyx@sina.cn. 研究方向: 空调系统的节能与优化。

About the author

Zhang Zhiqiang, male, master degree candidate, Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, +86 18630897335, E-mail: zzqiangyx@sina.cn. Research fields: the energy saving and optimization of air conditioning system.