

相变蓄热供热装置热性能试验研究与系统经济性分析

段 洋,陈久林,王志雄

(思安新能源股份有限公司,陕西 西安 710075)

摘 要:为分析相变蓄热装置在充热和放热过程中的热性能,设计并搭建一套相变蓄热供热装置中试实验系统,研究主要运行参数对相变蓄热装置热性能的影响;在此基础上,结合项目案例,对相变蓄热供热系统经济性进行分析。结果表明:相变材料(Phase Change Material, PCM)凝固过程中的传热主要受相变介质内部导热控制;而在其熔化过程中自然对流对传热起重要控制作用;蓄热装置充热速率快于放热速率。提高传热流体流量有助于增强 PCM 中的热传递,缩短充/放热时间,但蓄热装置内 PCM 温度分布均匀性有所降低;为降低系统能耗,提高储放热效率,优先选用小流量进行充/放热。该相变蓄热供热项目的动态投资回收期为 3.55 年,具有良好的经济性。研究结果可对相变蓄热供热系统的设计及应用推广提供参考依据。

关 键 词:清洁供暖;相变蓄热;热性能;经济性分析

中图分类号:TB34 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.016

[引用本文格式]段 洋,陈久林,王志雄.相变蓄热供热装置热性能试验研究与系统经济性分析[J].热能动力工程,2022,37(4):117-123. DUAN Yang, CHEN Jiu-lin, WANG Zhi-xiong. Experimental study on thermal performance and system economic analysis of phase change heat storage heating unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4):117-123.

Experimental Study on Thermal Performance and System Economic Analysis of Phase Change Heat Storage Heating Unit

DUAN Yang, CHEN Jiu-lin, WANG Zhi-xiong
(Suunpower Co. Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710075)

Abstract: In order to analyze the thermal performance of the phase change heat storage device during the charging and discharging process, a phase change heat storage heating system was designed and constructed, and the effect of major operating parameters on the thermal performance of the phase change heat storage device was studied. On this basis, combined with the project cases, the economy of phase change heat storage heating system was analyzed. The results show that the heat transfer of phase change material (PCM) during discharging process is mainly controlled by the internal thermal conduction mechanism, while the natural convection effect plays an important role in controlling heat transfer during the charging process. The charging rate is faster than the discharging rate. Increasing the flow rate of the heat transfer fluid (HTF) during the charging and discharging process can obviously enhance the heat transfer rate in PCM and shorten the charging/discharging time, but the uniformity of temperature distribution in PCM decreases. In order to reduce the energy consumption of the system and improve the charging and discharging efficiency of the heat storage device, low-flow HTF is preferentially selected for charging and discharging of the device. Economic analysis shows that the dynamic investment payback period of phase change heat storage heating system is 3.55 years, which has good economy. The research results can provide ref-

收稿日期:2020-12-01; 修订日期:2021-01-28

基金项目:陕西省重点研发计划(2020GY-133)

Fund-supported Project: Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (2020GY-133)

作者简介:段 洋(1988-),男,湖北荆州人,思安新能源股份有限公司工程师。

通讯作者:陈久林(1992-),男,陕西汉中,思安新能源股份有限公司工程师。

erence for the design and application of phase change heat storage heating system.

Key words: clean heating, phase change heat storage, thermal performance, economic analysis

引 言

近年,我国北方冬季利用燃煤供暖带来了严重的空气污染问题,在部分地区,燃煤供暖对冬季 NO_x 排放的贡献率达到 40%^[1]。“煤改电”等重要清洁供暖技术受到广泛关注,但直接采用电加热直供的方式易导致电网峰谷用能差距增大;此外,峰电阶段该供暖方式运行成本较高。蓄热技术可有效解决用能端和供能端在时间和空间上不匹配的问题,因此有必要将电采暖与蓄热技术相结合^[2]。

目前,显热蓄热供暖技术在国内外已有较多应用,蓄热介质常采用水^[3-4]、混凝土^[5-6]和镁砖^[7]等。但其普遍存在取热温度波动大、储能密度较低等缺陷,采用相变蓄热技术可有效弥补上述不足^[8]。近年来,学者对储热装置的传热数值模拟及试验研究主要集中在单管束结构,在分析储放热时均未考虑多管束之间热扰的相互影响^[9-10];此外,大多数试验研究仅停留在实验室阶段^[11-12],其研究结果外推到产品级时往往存在不足。

针对上述问题,本文设计并搭建了被动式-多管束结构相变蓄热装置及中试实验系统,研究了传热流体(Heat Transfer Fluid, HTF) 流量对蓄热装置热性能的影响,并获取了适宜的运行参数。在此基础上,结合已有项目案例,对西安地区某相变蓄热供

热项目的经济性进行分析。

1 试验测试系统

1.1 系统流程及温度测点分布

相变蓄热供热装置试验系统如图 1(a)所示,该系统由软化水装置、水箱、循环水泵、电加热锅炉、相变蓄热装置、换热器、风机盘管、管路电磁流量计、压力和温度传感器以及数据采集系统组成。图中一次侧管路为热源与换热器之间的管路、二次侧管路为换热器与用热末端之间的管路。其中,通过数据采集系统收集温度($T_1 \sim T_{10}$)、压力(P_1 、 P_2)和流量(F_1 、 F_2)的测量信号,采集周期为 1 min。相变蓄热装置为管壳式结构,内胆内为 HTF 通道及 PCM 区域,其中,HTF 通道采用多列并联蛇形盘管,材质为紫铜,直径 12 mm,总换热面积约为 10 m²。内胆与外壳套的间隙填充有 50 mm 的保温材料。为探究相变材料(Phase Change Materi, PCM)在充热和放热过程中的温度变化情况,在相变蓄热装置内布置 5 个精度为 ± 0.5 °C 的 Pt100 热电阻,蓄热装置几何尺寸及温度探头测点分布如图 1(b)所示。为避免 PCM 对热电阻的腐蚀, T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_5 测点的热电阻固定在细长的不锈钢测温盲管中, T_4 、 T_5 测点对称分布,以便分析有/无测温盲管对温度测量的影响。其中, T_2 、 T_3 测点距离内胆底面 228 mm, T_1 、 T_4 和 T_5 测点距离内胆底面 1 228 mm。

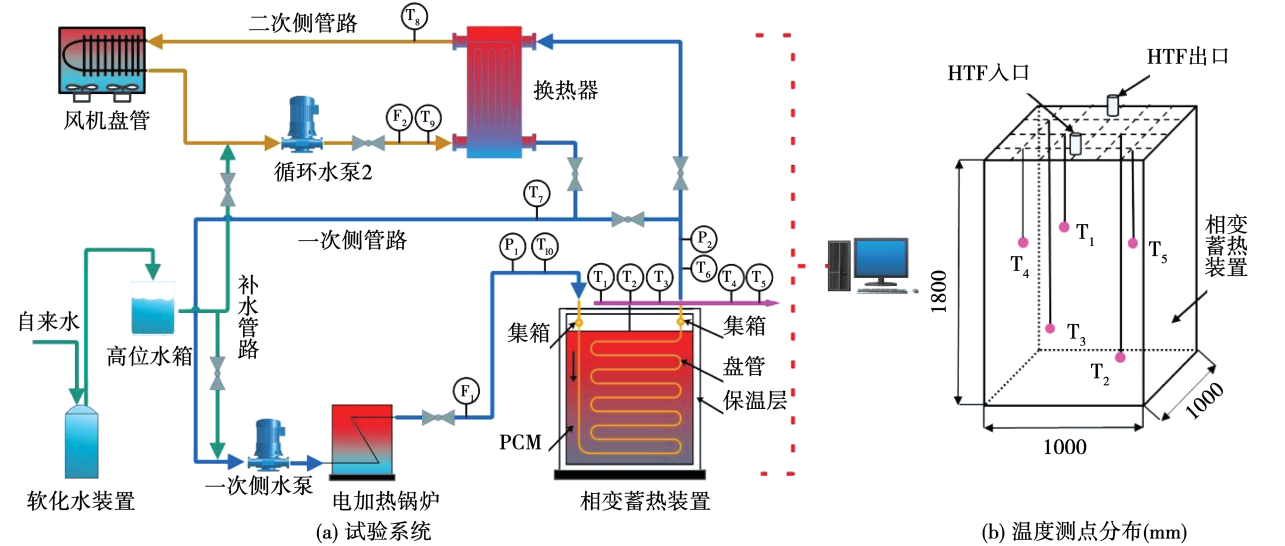


图 1 相变蓄热供热装置试验系统及温度测点分布

Fig. 1 Test system of phase change heat storage heating device and temperature measurement point distribution

1.2 试验方法

采用自主研制的无机复合相变材料,相变温度为 76 ~ 78 °C,储热密度达 600 MJ/m³。结合供暖用热温度需求,将放热阶段流体出口温度降至 45 °C 时,定义为放热终止状态;充热过程中 HTF 加热温度设置为 92 °C,将蓄热装置中测点最低温度($T_1 \sim T_5$)升至 85 °C 时,定义为充热终止状态。试验中采用连续充/放热模式,选取 HTF 流量 F_1 为 2.0, 2.5, 3.0 和 3.5 m³/h 进行系统性能试验研究。

在充热过程中,换热器通道关闭,旁通支路打开,经电加热锅炉升温后的一次侧 HTF 被输送至相变蓄热装置中,将热量传递至 PCM 进行储存。在放热过程中,电锅炉停止加热,换热器通道打开,旁通支路关闭,一次侧和二次侧循环水泵工作,由一次侧 HTF 带出蓄热装置中的热量,再经换热器传递至二次侧 HTF,为末端(风机盘管)供热。

1.3 评价参数

采用充热量、充放热效率和放热过程中 HTF 出口温度 3 个评价指标对蓄热装置性能进行分析。

储热量

$$Q_{\text{cha}} = \sum_{i=1}^N \frac{F_{1i} C_p (T_{10i} - T_{6i}) \times 60}{3600} \quad (1)$$

放热量

$$Q_{\text{dis}} = \sum_{j=1}^N \frac{F_{1j} C_p (T_{6j} - T_{10j}) \times 60}{3600} \quad (2)$$

储放热效率

$$\eta = \frac{Q_{\text{dis}}}{Q_{\text{cha}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Q_{cha} 和 Q_{dis} —储热量和放热量, kW · h; F_1 —一次侧 HTF 流量, kg/s; T_{10} —HTF 进口温度, °C; T_6 —HTF 出口温度, °C; 下标 i 表示充热过程, 下标 j 表示放热过程。

2 实验结果与分析

2.1 相变蓄热装置内 PCM 温度分布

2.1.1 充热过程

图 2 为充热过程中不同位置测点温度变化情况, HTF 流量为 3.5 m³/h。蓄热装置底部 PCM(T_2 、 T_3 测点位置)温升速率较快,原因是高温 HTF 首先流入蓄热装置底部流道,然后沿换热流道依次向顶

部流动,底部区域 PCM 与 HTF 传热温差大,最先熔化。测点 T_4 和 T_5 温度曲线变化一致,平均温度差值为 2 °C,这是因为盲管具有一定热阻,导致测量值偏低且具有滞后性。由于沿进、出口集箱长度的压力分布特性,可能引起各并列盘管中流量分配的不均匀,导致装置外侧 T_4 测点温度略高于中心 T_1 测点。测点 $T_1 \sim T_5$ 测点几乎同时升温充热,所需相变充热时间相差较小,表明该相变蓄热装置具有良好的时效性。

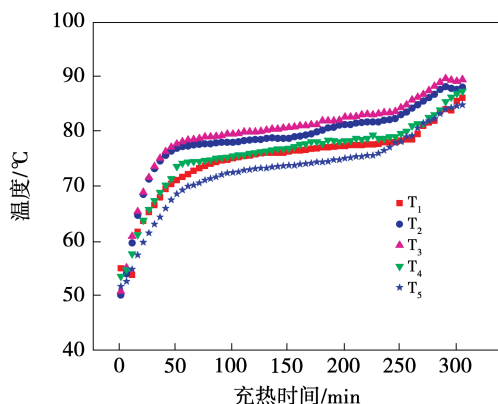


图 2 充热过程装置内部各测点位置 PCM 温度变化情况
Fig. 2 Temperature variation trends of PCM at different measurement points inside the heat storage device during charging process

2.1.2 放热过程

图 3 为放热过程中不同位置测点温度变化情况。在 0 ~ 100 min 和 550 ~ 768 min 内为 PCM 显热放热阶段,此阶段 PCM 温降速率较快;100 ~ 550 min 为潜热放热阶段,随着放热的进行,管壁侧的 PCM 最先凝固,热量须通过固液界面形成的固体层进行传输,温降曲线变得平缓。相对于充热过程,放热过程中 PCM 温度分布均匀性有所改善。底部 PCM(T_2 、 T_3 测点)温降较快, T_2 和 T_3 在潜热放热阶段的持续时间最短,表明底部 PCM 最先凝固,然后扩展至顶部。

2.2 不同 HTF 流量对蓄热装置进/出口温度的影响

图 4 为充热过程不同 HTF 流量下进/出口温度及温差变化情况。如图 4(a) 所示,进口 HTF 温度在最初 50 min 内迅速升高,这是因为试验系统启动

阶段管道内部 HTF 温度较低,需要一定时间预热升温。随着 HTF 流量的增加,进口温度略微下降,出口温度升高,原因是 HTF 流量越小,经锅炉预热升温时间越短,其携带进入蓄热装置的热量越少,大部分热量被 PCM 存储,导致 HTF 出口温度降低。

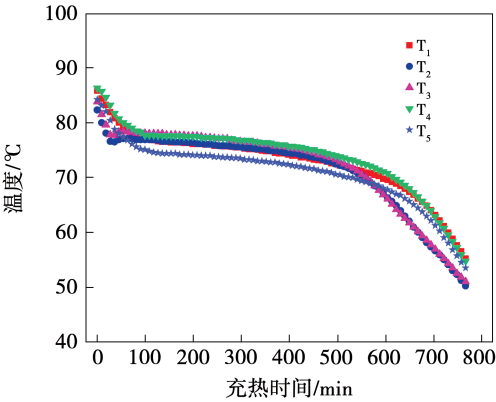


图 3 放热过程装置内部各测点位置 PCM 温度变化情况
Fig. 3 Temperature variation trends of PCM at different measurement points inside heat storage device during discharging process

图 4(b)显示 HTF 进出口温差随流量的增加而减小,当流量由 2.0 升至 3.0 m³/h 时,进出口平均温差由 9.25 °C 降至 7.23 °C。这是因为随着流量增大,HTF 换热系数变大,更多热量被传递至 PCM。此外,在不同 HTF 流量下,充热装置进出口温差均先出现峰值,而后缓慢降低,原因是随着充热时间的延长,HTF 与 PCM 的温差逐渐减小,换热能力减弱。

2.3 不同 HTF 流量对 PCM 熔化过程的影响

图 5 为充热过程 HTF 流量对 PCM 温度的影响。在充热起始阶段(0 ~ 320 min)内,流量对底部测点 T₃ 温升速率影响较小;在 320 min 后,随流量增加 T₃ 温升速率明显加快,原因是流量越大,液相区 PCM 的自然对流越旺盛,热传递增强。在充热中、前期,流量对上部测点 T₄ 的影响与 T₃ 类似;在充热后期,测点 T₄ 温升速率高于 T₃,这是由于底部高温液态 PCM 受浮升力上升,上部测点温升速率加快。随着 HTF 流量增加,PCM 相变阶段持续时间变短,达到最高温度所需的时间变少,充热速率明显加快。由此可见,提高 HTF 流量有利于充热过程的进行。

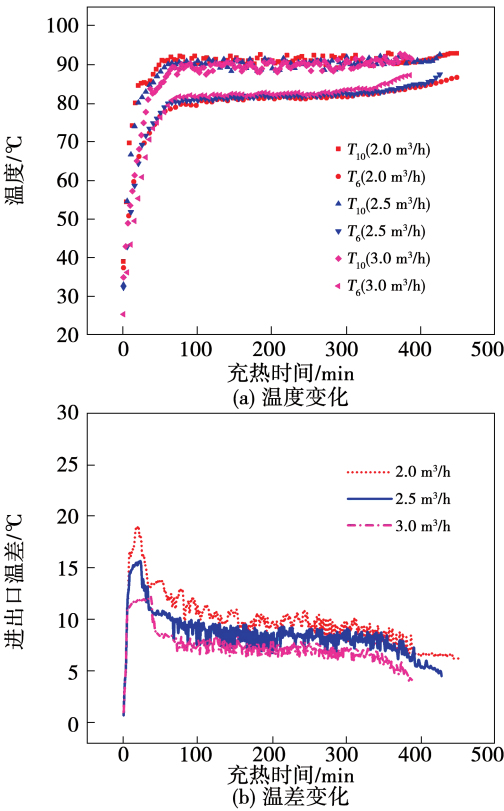


图 4 不同 HTF 流量下进/出口温度及温差的变化情况
Fig. 4 Changes of inlet/outlet temperatures and temperature differences under different HTF flow rates

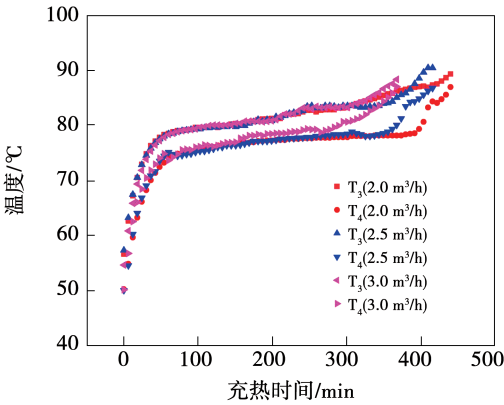


图 5 不同 HTF 流量对充热阶段 PCM 温度的影响
Fig. 5 The effects of different HTF flow rates on the temperature of PCM during charging process

2.4 不同 HTF 流量对蓄热装置出口温度的影响

图 6 为放热阶段不同 HTF 流量下蓄热装置出口温度的变化情况,为了获取在最大用热规模下放热温度的变化情况,将风机盘管调至最高档。随着放热的进行,出口温度逐渐降低。在放热前期和后期,分别进行液态和固态 PCM 的显热放热,此阶段

放热出口温度降幅较快;而在放热中期,装置出口 HTF 温度变化较为平缓,且维持时间较长,此过程主要进行 PCM 潜热放热。放热期间,当 HTF 流量由 2.0 增至 3.0 m³/h 时,出口 HTF 平均温度由 62.48 降至 60.96 ℃。由此可见,HTF 流量的降低有利于提高充热装置出口温度,延长有效取热时长。

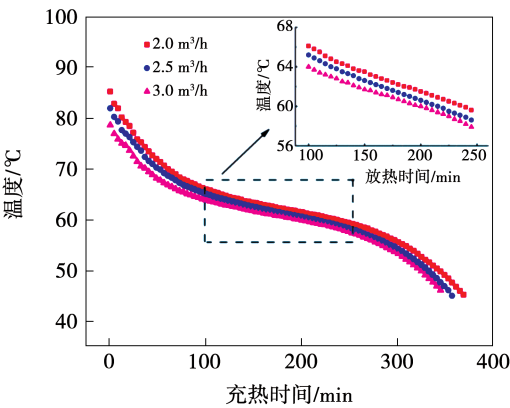


图 6 不同 HTF 流量对放热水温度的影响

Fig.6 The effects of different HTF flow rates on the outlet water temperature during the discharge process

2.5 不同流量对 HTF 放热功率的影响

图 7 为不同 HTF 流量下放热功率随时间的变化情况。放热功率和放热出口温度的变化类似,随放热时间的延长而逐渐降低,但放热功率随流量的增加而增大。在放热后期,增大流量对提高放热功率的作用逐渐减弱。原因是当 PCM 温度逐渐降低时,黏度增大,自然对流逐渐减弱,热阻变大,此时增大流量对换热影响较小。当流量由 2.0 升至 3.0 m³/h 时,平均放热功率由 22.08 增至 25.24 kW,但有效放热时间缩短。由此可见,减小 HTF 流量有助于获取更加平稳的放热功率。

2.6 不同 HTF 流量对装置储/放热量及储放热效率的影响

图 8 为不同 HTF 流量下相变蓄热装置储/放热量及储放热效率的变化情况。随着 HTF 流量的增加,蓄热装置储/放热量均有所降低,由于放热量降幅大于储热量,导致储放热效率降低。当流量为 2.0 m³/h 时,储热量、放热量及储放热效率分别为 164.73 kW·h、158.83 kW·h 和 96.48%;当流量

增至 3.0 m³/h 时,储热量、放热量及储放热效率分别降至 161.31 kW·h、153.72 kW·h 和 95.29%。原因可能是 HTF 流量增加,局部 PCM 温升或温降过快,装置内部 PCM 温度分布均匀性降低,导致标定充热/放热终止的温度测点较早达到目标温度,储/放热容量减小。在实际应用中,流量增加会引起水泵功耗增加。因此,在保证充热时间满足谷电时长的情况下,应选取小流量对系统进行充热及放热过程,以便提高储放热效率,降低系统能耗。对于本系统而言,充/放热时 HTF 流量宜采用 2.0 m³/h。

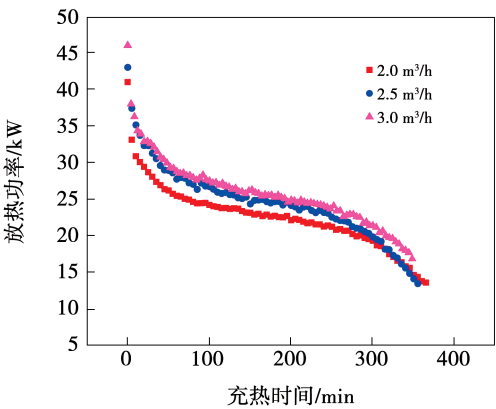


图 7 不同 HTF 流量对放热功率的影响

Fig.7 The effects of different HTF flow rates on the heat release power

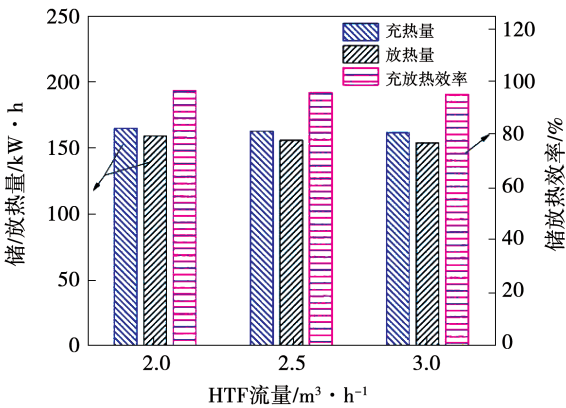


图 8 不同 HTF 流量对充/放热量及充放热效率影响

Fig.8 The effects of the HTF flow rates on charging and discharging capacity and thermal efficiency

3 系统经济性分析

3.1 固定资产投资

以西安某厂涂装车间供生活热水为例,该厂原

采用电锅炉直供加热方式,年电力消耗费用较高,现采用相变蓄热供热系统,每天可提供 45 ℃ 以上的热水 10.0 t。系统运行过程中采用全负荷蓄热策略,即在夜间低谷电时段(23:00 – 次日 7:00)启动电锅炉对蓄热装置进行充热,当装置 PCM 温度达到目标值时锅炉停机。该项目系统加热设备可利用改造前的电锅炉,无需再一次采购,系统固定投资费用如表 1 所示,合计 9.81 万元。

表 1 相变蓄热供热系统固定投资费用

Tab.1 Fixed investment costs of phase change
heat storage heating system

项目名称	数量	费用/万元
相变蓄热装置	2 台	6.50
循环水泵	2 台	0.36
换热器	1 台	0.15
补水箱及软化水装置	1 套	0.30
控制系统	1 套	1.00
阀门和仪表	/	0.50
安装费用	/	1.00

3.2 经济性分析

系统使用寿命取 20 年,年运行 330 天;固定资产的净残值率取 5%,维修费率取 3%。系统用电设备在峰、谷电时段的电费按照单价 0.866 和 0.234 元/(kW·h)计算。系统收益主要为项目实施后每年节约的电费值。计算得本系统年运行费用为 3.85 万元,其中电费为 3.09 万元。改造前该厂供给热水系统年耗电费用为 9.70 万元;改造后年节约电费 6.61 万元。采用动态投资回收期 and 净现值对本设计系统进行技术经济性分析,折现率取 5%,系统投资回收期为 3.55 年,净现值为 25.05 万元,该项目在经济上是可行的。计算结果如表 2 所示。

表 2 相变蓄热供热系统经济性指标

Tab.2 Economic indexes of phase change
heat storage heating system

项目	第 1 年	第 t 年
收益/万元	6.61	6.61
系统每年投资成本/万元	13.66	3.85
现金流/万元	-7.05	2.76

4 结 论

对多管束管壳式相变蓄热装置的热性能进行试验研究,探究了不同运行参数对装置性能的影响;并结合项目案例,进行系统经济性分析,研究表明:

(1) 充热过程中,蓄热装置底部区域 PCM 最先熔化,然后扩展至顶部;随着充热时间的延长,PCM 液相区域逐渐变大,自然对流效应增强,逐渐占据主导地位。放热过程中,PCM 传热以导热为主。蓄热装置充热速率快于放热速率。

(2) 提高蓄热装置进口 HTF 流量可缩短充热和放热时长,但会带来系统能耗增加及装置内部 PCM 局部区域温度分布均匀性下降等问题,影响装置充放热效率。工程应用中,在满足充热和放热时长的条件下,应优选小流量 HTF 对蓄热装置进行充热和放热,以便获取更加平稳的放热功率,延长有效取热时长。

(3) 相变蓄热供热系统初期投资成本较低,当峰谷电价差为 0.632 元/kW·h 时,投资回收期为 3.55 年,净现值为 25.05 万元,具有良好的经济性。且随着峰谷电价差值的扩大,相变蓄热供热系统的经济优势将更加显著,应用前景广阔。

参考文献:

[1] 方 豪,夏建军,林波荣,等. 北方城市清洁供暖现状和技术路线研究[J]. 区域供热,2018(1):11 – 18.
FANG Hao, XIA Jian-jun, LIN Bo-rong, et al. Research on the status and technical route of clean heating in northern cities[J]. District Heating, 2018(1):11 – 18.

[2] 张继皇,孙 利,杨 强,等. 相变储能技术在谷电蓄热供暖中的应用研究[J]. 电力需求侧管理,2016,18(2):26 – 29.
ZHANG Ji-huang, SUN Li, YANG Qiang, et al. Application research of phase change energy storage technology in valley heat storage heating[J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(2):26 – 29.

[3] VERDA V, COLELLA F. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks[J]. Energy, 2011, 36(7): 4278 – 4286.

[4] 王 昆. 水蓄热电锅炉作为中小建筑物冬季取暖热源的应用[J]. 河北理工大学学报(自然科学版),2010,32(1): 30 – 33.
WANG Kun. Regenerative electric boiler water as a heat source of small buildings winter[J]. Journal of Hebei Polytechnic University

(Natural Science Edition),2010,32(1): 30 – 33.

[5] LAING D,STEINMANN W D,FIB M,et al. Solid media thermal storage development and analysis of modular storage operation concepts for parabolic trough power plants[J]. Journal of Solar Energy Engineering,2008,130(1):011006.

[6] 李井永,刘春泽,周大伟,等. 硼泥陶粒混凝土用于低温热水地板辐射供暖[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005(6): 697 – 700.

LI Jing-yong,LIU Chun-ze,ZHOU Da-wei,et al. Application of the borax ceramsite concrete in low-temperature hotwater floor radiant heating[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science),2005(6):697 – 700.

[7] 刘晓东. 一种固体电储热供暖装置[P]. 中国:CN204043043U.2014.

LIU Xiao-dong. A solid electric heat storage heating device[P]. China:CN204043043U. 2014.

[8] SHARMA A,TYAGI V V,CHEN C R,et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (2): 318 – 345.

[9] LIU Z,YZO Y,WU H. Numerical modeling for solid-liquid phase change phenomena in porous media:shell-and-tube type latent heat thermal energy storage [J]. Applied Energy, 2013, 112 (12): 1222 – 1232.

[10] 邹 勇,仇汝冬,王 霞. 石蜡相变材料蓄热过程的模拟研究[J]. 储能科学与技术,2020,9(1):101 – 108.

ZOU Yong,Qiu Ru-dong,WANG Xia. Simulation study on thermal storage process of paraffin phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology,2020,9(1):101 – 108.

[11] LONGEON M,SOUPART A,FOURMIGUE J F,et al. Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection [J]. Applied Energy, 2013, 112 (12): 175 – 184.

[12] WANG Y F,WANG L,XIE N G,et al. Experimental study on the melting and solidification behavior of erythritol in a vertical shell-and-tube latent heat thermal storage unit[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2016,99:770 – 781.

(金圣迪 编辑)