

水平多管式换热器内部相变石蜡储热特性实验研究

宋杨凡, 薛国强, 杨思杨, 陈鸿伟
(华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003)

摘要:设计并搭建了水平多管式相变储热系统,以水为传热流体(HTF)、石蜡为相变材料(PCM),通过实验对储热系统的具体蓄热特性和不同操作条件下 HTF 与 PCM 之间的传热特性进行定量分析,评估了 HTF 体积流量和进口温度对紧凑型低温相变储热系统功率输入、吸热完成时间以及储存能量的影响。该系统主要由一个聚碳酸酯壳和水平定向的多管换热器以及石蜡组成,其中石蜡相变温度约为 41 °C。结果表明:随着 HTF 进口温度或体积流量的增加,吸热完成时间减少,平均吸热功率增大,且增加速率都随着进口温度的增大而变小;HTF 体积流量分别为 4.5、6.0 和 7.5 L/min 时,吸热过程耗时 300.7、252.9 和 226.7 min;在 58、64 和 70 °C 的进口温度下,吸热完成时间分别为 270.1、226.7 和 204.9 min;提高 HTF 进口温度,会导致换热结束时石蜡温度与 HTF 出口温度出现越来越靠近的趋势,而在提高 HTF 体积流量时,却呈现相反的趋势。

关键词:水平多管;蓄热特性;相变储热

中图分类号:TU83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.11.012

[引用本文格式]宋杨凡,薛国强,杨思杨,等.水平多管式换热器内部相变石蜡储热特性实验研究[J].热能动力工程,2023,38(11):98-105. SONG Yang-fan, XUE Guo-qiang, YANG Si-yang, et al. Study on thermal storage characteristics of phase change paraffin inside horizontal multi-tube heat exchangers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11):98-105.

Study on Thermal Storage Characteristics of Phase Change Paraffin inside Horizontal Multi-tube Heat Exchangers

SONG Yang-fan, XUE Guo-qiang, YANG Si-yang, CHEN Hong-wei

(Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)

Abstract: We designed and built a horizontal multi-tube phase change heat storage system with water as the heat transfer fluid (HTF) and paraffin wax as the phase change material (PCM), quantitatively analyzed the specific heat storage characteristics of the heat storage system and the heat transfer characteristics between HTF and PCM under different operating conditions through experiments, and evaluated the effects of HTF volume flow rate and inlet temperature on the power input, heat absorption completion time and stored energy of the compact low-temperature phase change heat storage system. The system mainly consisted of a polycarbonate shell and a horizontally oriented multi-tube heat exchanger and paraffin, where the paraffin phase change temperature was about 41 °C. The results show that the heat absorption completion time decreases and the average heat absorption power increases as the HTF inlet temperature or volume flow rate increases, and the increase rate becomes smaller with the increase of the inlet temperature; the heat absorption process spends 300.7, 252.9 and 226.7 min at HTF volume flow rates of 4.5, 6.0 and 7.5 L/min, respectively; at inlet temperatures of 58, 64 and 70 °C, the heat absorption

收稿日期:2023-02-25; 修订日期:2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金(52106199);河北省自然科学基金(E2023502067)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52106199); Natural Science Foundation of Hebei Province(E2023502067)

作者简介:宋杨凡(1990-),男,华北电力大学副教授.

通讯作者:陈鸿伟(1965-),男,华北电力大学教授.

completion time are 270.1, 226.7 and 204.9 min, respectively; and increasing the HTF inlet temperature results in a trend that the paraffin temperature at the end of heat transfer is increasingly close to the HTF outlet temperature, while the opposite trend is observed when the HTF volume flow rate is increased.

Key words: horizontal multi-tube, thermal storage properties, phase change heat storage

引 言

当前能源活动是 CO₂排放的主要来源,相应排放量约占全社会 CO₂排放总量的 87%^[1]。目前,空间供暖和生活热水占很大的碳排放比例,为了有效实现碳减排^[2],可用储热系统与热泵或太阳能集热器结合使用^[3],将热量长时间储存^[4],以克服热量供需矛盾。因此,应用储热技术实现削峰填谷^[5]是十分有必要的。

储热技术是一种技术和经济上都可以实现规模化处理的储能技术。储热技术的核心和关键是储热材料,相变储热^[6]是利用相变材料发生相变时吸收或释放热量。相同储热体积下,相变储热材料具有储热密度高^[7]、吸放热过程中温度变化较小等优点,受到国内外学者的广泛专注^[8]。目前,针对储热系统的许多研究主要集中在设计和操作参数上,包括 HTF 方向、体积流速、进口温度和换热器朝向等。Seddegh 等人^[9]对换热器的水平和垂直设计进行对比发现,水平定向比垂直定向具有更高的熔化速率。Larrinaga 等人^[10]研究发现,HTF 和相变材料之间的温差对吸热过程中的热功率有很大影响。Kousha 等人^[11]通过实验研究了在吸热过程中倾角变化对相变储热系统熔化过程的影响,结果表明,在水平位置时传热速率最强。Ren 等人^[12]研究发现,HTF 进口温度是影响相变传热系统热性能最主要的参数,其次是管道长度、体积流量、管道布局和相变材料导热率。Amagour 等人^[13]发现,增加散热翅片的数量可以缩短吸热时间并提高储热功率。Diao 等人^[14]把泡沫铜插入相变材料中以克服相变材料的低导热性,结果表明,储热系统的平均吸热效率约为 0.383。Saeed 等人^[15]对基于板式换热器的储热装置进行了热性能评估,结果显示,1 英寸板间距比 2 英寸板间距具有更好的热性能。从之前的研究中

可看出,储热装置的传热性能受换热器设计的影响很大,并且水平定向布置的换热器有利于熔化过程中的自然对流,可加速相变材料的熔化。然而,很少有通过实验研究对水平定向多管换热器的具体储热特性和不同条件下相变材料与 HTF 之间的传热特性进行定量分析,并测定相变材料在不同相态下的传热和温度分布,从而确定最佳使用工况,达到最佳储热能力。因此,本文搭建了以石蜡为相变材料的管壳式相变储热系统进行实验研究,评估了相变材料在不同 HTF 进口温度和体积流量下的热性能,并在新的标准下进行了有效性分析。

1 实验研究

1.1 实验材料

选用商用有机石蜡 YT#40 作为储能系统的相变储热材料。其相变温度 t_m 约为 41℃,具体的物性参数如表 1 所示。有机石蜡 YT#40 相变潜热值大,具有优异的热物理稳定性和标称熔化温度,无腐蚀性和毒性,价格相对便宜(约 35 元/kg),并且较低的相变温度可以更好地适用于太阳能热水系统和热泵等。

表 1 相变石蜡的热物理性质
Tab. 1 Thermophysical properties of phase change paraffin wax

参数	数值
相变温度/℃	41
熔化潜热/J·g ⁻¹	207
固相比热/J·(g·K) ⁻¹	2.70
液相比热/J·(g·K) ⁻¹	2.70
固相导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.20
液相导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.20
密度(固相)/g·cm ⁻³	0.85

(2) 将恒温水浴桶的加热温度设定为测试所需的进口温度,当 HTF 达到设定温度并稳定后可启动吸热过程。如图 1,阀门用于控制 HTF 体积流量并维持整个系统 HTF 的循环过程。当启动吸热过程时,打开阀门 AV2 和阀门 AV4,关闭阀门 AV1 和 AV3,以保护水泵并确保闭环。再用旁通阀门 AV5 来设定相应的体积流量;

(3) 从启动水泵开始计时,每隔 10 s 记录一次数据。当 HTF 进口和出口温度差不高于 1.5 °C 时,认为吸热过程已完成,储热系统内所有的相变材料都熔化;

(4) 通过调节阀门冷却石蜡,重复上述实验步骤;

(5) 整理实验数据,进行数据处理。

1.2.4 热性能分析

计算石蜡输入的瞬时热功率(W):

$$P_{in} = q_{m,HTF} c_{p,HTF} (t_{in} - t_{out}) \quad (1)$$

式中: $q_{m,HTF}$ —HTF 的质量流量,kg/s; $c_{p,HTF}$ —HTF 的比定压热容,J/(kg·K); t_{in} —HTF 进口温度,°C; t_{out} —HTF 出口温度,°C。

计算储热过程中石蜡存储的总能量:

$$Q_{cum} = \int_0^{\tau_{total}} P_{in} d\tau \quad (2)$$

式中: τ_{total} —储热过程的总时间,s; τ —测量的时间间隔,s。

为了验证存储能量的计算结果,将测量值与装置的理论蓄热能力进行比较。考虑到相变材料的显热和潜热以及聚碳酸酯储热壳的显热,计算了装置的理论蓄热能力:

$$Q_{th} = m_{PCM} [c_{p,s}(t_m - t_{PCM,i}) + \Delta h_m + c_{p,l}(t_{PCM,f} - t_m)] + Q_{shell} \quad (3)$$

式中: Q_{th} —蓄热系统的理论储存能量,J; m_{PCM} —相变石蜡的质量,kg; $c_{p,s}$ —石蜡固相比定压热容,J/(kg·K); $c_{p,l}$ —石蜡液相比定压热容,J/(kg·K); t_m —石蜡的相变温度,°C; $t_{PCM,i}$ 和 $t_{PCM,f}$ —相变石蜡的初始温度和最终温度,°C; Δh_m —石蜡相变潜热,J/kg; Q_{shell} —聚碳酸酯保温壳存储的热量,J。

其中壳体存储的热量为:

$$Q_{shell} = m_{shell} c_{p,shell} (t_{shell,f} - t_{shell,i}) \quad (4)$$

式中: m_{shell} —保温外壳的质量,kg; $c_{p,shell}$ —保温外壳

的比定压热容,J/(kg·K); $t_{shell,i}$, $t_{shell,f}$ —保温外壳的初始温度和最终温度,°C。

忽略铜管吸收的热量和散失到保温外层的热量,可近似认为 Q_{th} 等于 Q_{cum} 。由式(3)可知,蓄热量增加,即 HTF 输入总能量增加,储热过程中装置的平均功率(kW)为:

$$P_{avg} = Q_{cum} / \tau_{total} \quad (5)$$

每次记录数据后,计算整个相变储热系统内石蜡的平均温度:

$$t_{PCM,avg} = \frac{\sum_{n=1}^{24} t_n}{24} \quad (6)$$

式中: t_n —每个测点石蜡的温度,°C。

2 实验结果与分析

2.1 HTF 体积流量对吸热过程的影响

在体积流量为 3.0,4.5,6.0 和 7.5 L/min 时,设置进口温度恒定为 64 °C 对系统进行加热,研究体积流量对熔化速度的影响。整个吸热过程可分为固体石蜡阶段和液体石蜡阶段,相变温度 41 °C 之前,固体石蜡占比多,称为固体石蜡阶段,相变温度 41 °C 之后液体石蜡占比多,称为液体石蜡阶段。

图 3 反映进口温度为 64 °C 时,不同体积流量下的 HTF 进、出口温度和石蜡平均温度的变化趋势。由图 3 可知,在液体石蜡阶段,HTF 体积流量分别为 3.0,4.5,6.0 和 7.5 L/min 时,到储热结束所需时间分别为 269.2,198.5,153.7 和 128.7 min,所需时间随着体积流量的增加大幅减少。这一阶段液体石蜡的比例增加,自然对流开始主导传热,石蜡传热侧热阻降低。因此,在液体石蜡阶段增加水侧的体积流量可以明显提高总的传热速率。当 HTF 体积流量分别为 3.0,4.5,6.0 和 7.5 L/min 时,吸热过程总耗时 373.8,300.7,252.9 和 226.7 min。可以看出,体积流量越高,加热过程越短,这是因为 HTF 和换热器内表面之间的强制对流增加,导致 HTF 和石蜡之间的整体传热增加。通过观察图 3 还可发现,随着 HTF 体积流量变大,换热结束时的石蜡温度与 HTF 出口温度的差值逐步变大。这是由于当 HTF 体积流量变高时,相同质量的 HTF 在换热器中换热时停留的时间变少,导致石蜡和换热器之间的换热不够充分。

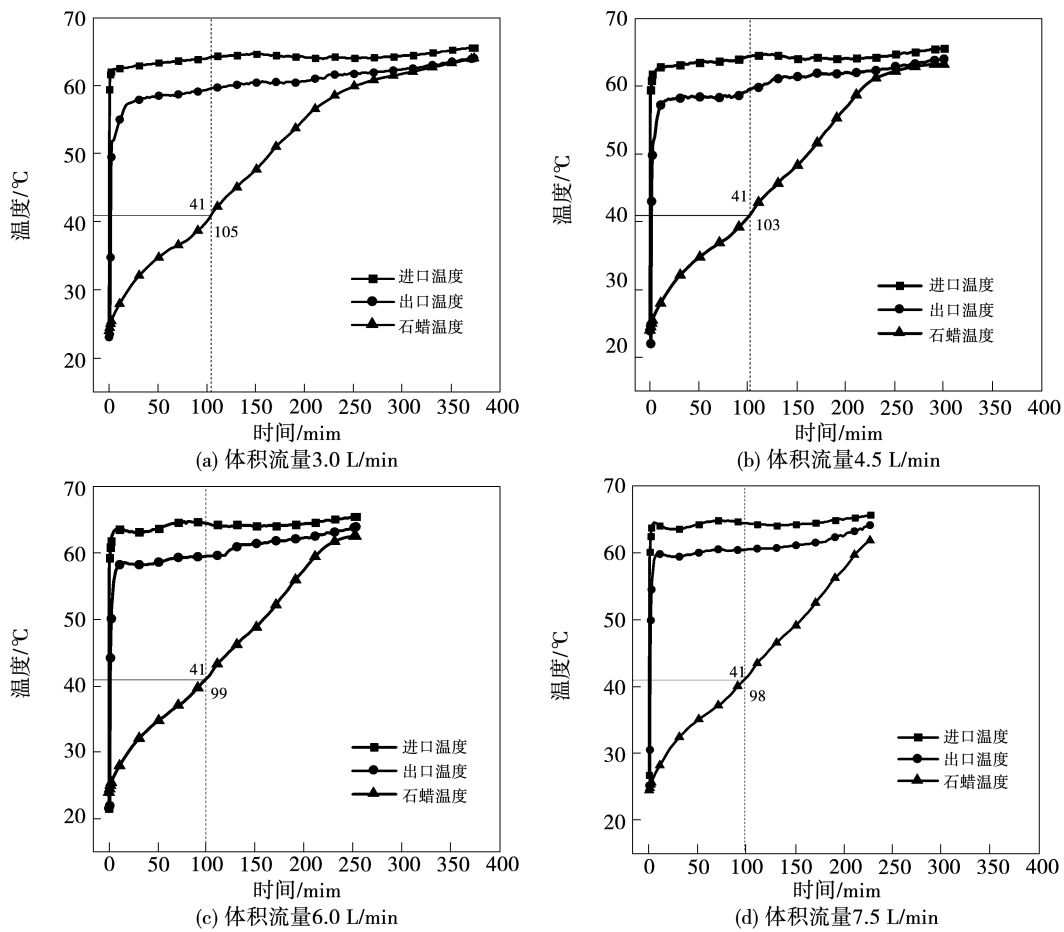


图 3 进口温度为 64 °C 时,不同体积流量下的 HTF 进、出口温度和石蜡平均温度的变化趋势

Fig.3 Variation trends of HTF inlet and outlet temperatures and average paraffin temperature at different volume flow rates and at an inlet temperature of 64 °C

图 4 为体积流量对加热过程中的平均输入功率的影响。可以发现,平均输入功率的增大与体积流量的增加大致呈线性关系。通过将体积流量从 3.0 L/min 分别增加到 4.5,6.0 和 7.5 L/min,平均功率增加了 21.9%,38.3% 和 50.8%。

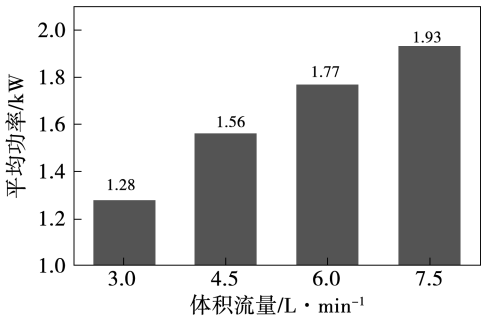


图 4 进口温度为 64 °C 时,不同体积流量下输入平均功率的比较

Fig.4 Comparison of average input power at different volume flow rates and at inlet temperature of 64 °C

图 5 为进口温度为 64 °C 时不同体积流量下装置中的总能量输入。由于壳体本身具有热容量,贮存在壳体中的能量为 $0.33 \pm 0.02 \text{ kW} \cdot \text{h}$,本实验储存的总能量为 $7.0 \pm 0.15 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。两者之和与总能量输入 $7.55 \pm 0.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 很接近。

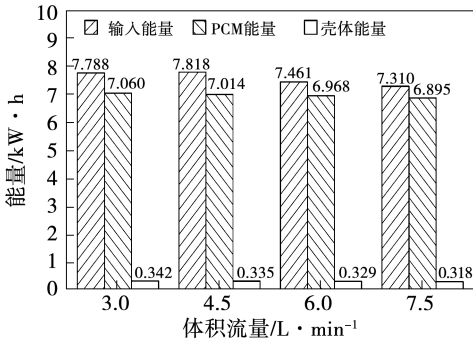


图 5 进口温度为 64 °C 时,不同体积流量下装置中的总能量输入

Fig.5 Total energy input in the device at different volume flow rates and at inlet temperature of 64 °C

进口温度为 64 ℃ 时,不同体积流量下的吸热实验输入功率如图 6 所示。由图 6 可知,实验开始时的输入功率较高,这是由于残留在换热器中的冷流体会先流经出口,随后输入功率迅速降低到 3.0 kW 以下。由于储热装置中热流体和石蜡之间的温度差恒定,因此在吸热过程 70% 以上的时间内,输入功率几乎保持恒定。

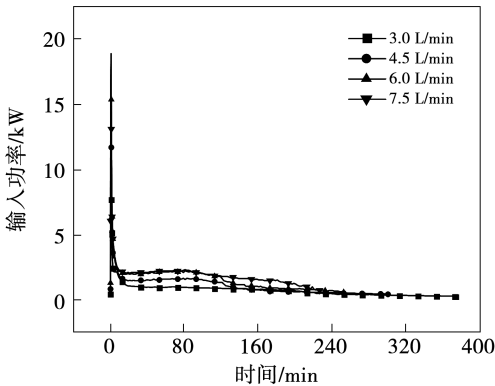


图 6 进口温度为 64℃ 时,不同体积流量下输入功率的比较
Fig. 6 Comparison of input power at different volume flow rates and at inlet temperature of 64 ℃

2.2 HTF 进口温度对吸热过程的影响

在 58,64 和 70 ℃ 不同进口温度下,对 HTF 进口温度对熔化速率的影响进行了参数研究。实验设计系统在 7.5 L/min 的体积流量下吸热,储热装置的初始温度约为 24 ℃。吸热过程中 HTF 进口和出口温度以及石蜡平均温度的变化如图 7 所示。由图 7 可知,在 58,64 和 70 ℃ 的进口温度下,吸热完成时间分别为 270.1,227 和 204.9 min,进口温度越高,吸热时间越短。在固体石蜡阶段,当进口温度分别为 58,64 和 70 ℃ 时,达到相变温度所需时间分别为 142,98 和 75 min,石蜡达到相变温度所需时间明显减少。由此可知,提高 HTF 进口温度,可以明显强化固体石蜡阶段的传热,而在提高体积流量时强化传热效果很差。通过观察图 7 还可以发现,随着 HTF 进口温度变高,换热结束时石蜡温度与 HTF 出口温度的差值越来越小。这是因为当 HTF 进口温度变高时,传热温差变大,单位时间内石蜡吸收的热量变多,由于每次实验所用石蜡质量相同,所以当进口温度变高时,石蜡的温度也会升高得更快。

图 8 为进口温度对装置的平均功率的影响。可以看到,随着进口温度的升高,平均功率也升高。当 HTF 进口温度为 58,64 和 70 ℃ 时,平均功率分别为 1.4,1.93 和 2.35 kW。

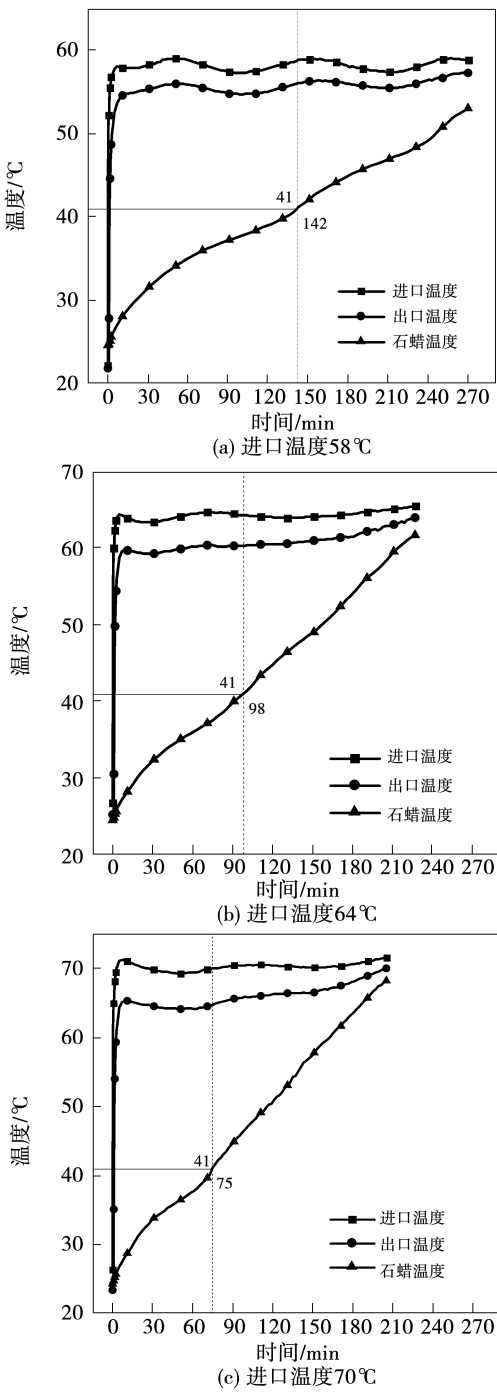


图 7 体积流量为 7.5 L/min 时,不同进口温度下的 HTF 进、出口温度和石蜡平均温度的变化趋势
Fig. 7 Variation trends of HTF inlet and outlet temperatures and average paraffin temperature at different inlet temperatures and at volume flow rate of 7.5 L/min

图 9 为进出口温度对装置储存总能量的影响。可以看到,当 HTF 进口温度为 58,64 和 70 ℃ 时,实验中存储的能量分别为 5.912,6.895 和 7.297 kW·h。提高进口温度会使液体石蜡阶段储存的能量增加,从而导致存储的总能量增加。

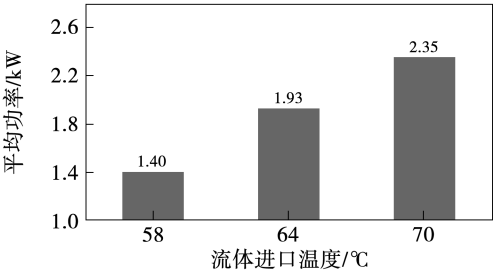


图 8 流量为 7.5 L/min、进口温度为 58,64 和 70 °C 时, 储热装置在吸热过程中的平均功率比较

Fig.8 Comparison of average power of heat storage device in heat absorption process at volume flow rate of 7.5 L/min and at inlet temperatures of 58, 64 and 70 °C

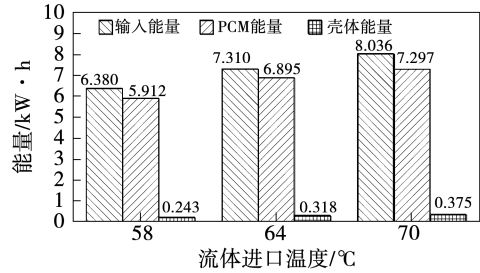


图 9 流量为 7.5 L/min、进口温度为 58,64 和 70 °C 时,装置储存的总能量

Fig.9 Total energy stored in the device at volume flow rate of 7.5 L/min and at inlet temperatures of 58, 64 and 70 °C

图 10 为吸热过程中储热装置的输入功率比较。可以看到,瞬时输入功率随进口温度的升高而增大,更高的进口温度使铜管壁温上升更快,并将更多热量传递给石蜡,使其更快熔化。

2.3 吸热过程中储热装置的性能评估

大量研究证明,有效性分析可用于评估储热装置设计的传热性能,有效性定义为实际传热量与最大可能传热量的比值。尽管相变石蜡中储存的大部分能量是潜热,但是由于整个实验过程中的石蜡始终处于固液混合物状态,所以应该对整个吸热过程进行评估,而不是仅对石蜡相变期间进行有效性分析。

瞬时有效性:

$$\varepsilon = (t_{in} - t_{out}) / (t_{in} - t_{PCM}) \tag{7}$$

平均有效性:

$$\varepsilon_{ave} = \int_0^{\tau_{total}} \varepsilon d\tau / \tau_{total} \tag{8}$$

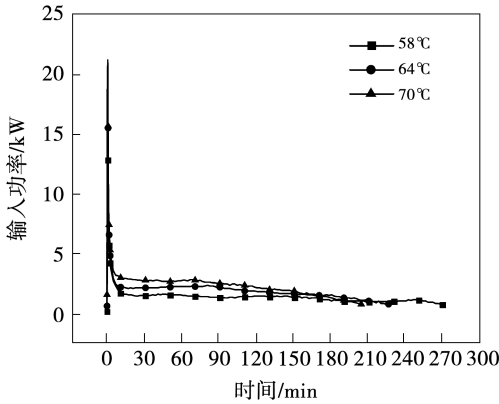


图 10 流量为 7.5 L/min、进口温度为 58,64 和 70 °C 时输入功率的比较

Fig.10 Comparison of input power at volume flow rate of 7.5 L/min and at inlet temperatures of 58, 64 and 70 °C

在不同进口温度下平均有效性与 HTF 单位截管面积上质量流量的关系如图 11 所示。

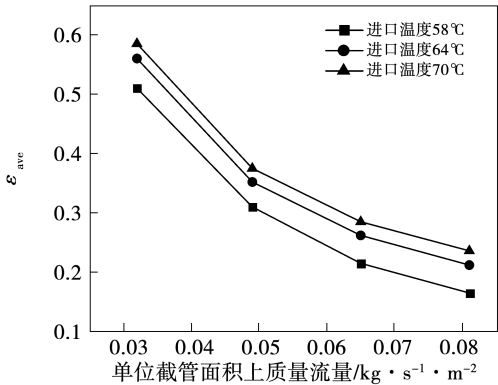


图 11 不同单位截管面积上质量流量和进口温度下, 吸热过程中的平均有效性比较

Fig.11 Comparison of average effectiveness in heat absorption process at different mass flow rates and inlet temperatures

可以看出,降低单位截管面积上的质量流量会使平均有效性越来越高,单位截管面积上的质量越低流量导致 HTF 在整个装置中的循环时间更长。尽管换热器管内的低流速会导致液膜层变厚,削弱热传导,但能够充分地将热量传递给石蜡,使传热过程更有效。

3 结 论

以石蜡作为相变材料,对水平多管式换热器相变蓄热过程的储热性能进行了实验研究,得到以下

结论:

(1) 由于石蜡温度的上升,增大了系统的散热损失,从而使平均吸热功率的增加速率变小,因此当 HTF 体积流量一定时,随着进口温度增加,平均吸热功率增大,且增加速率随着进口温度的增大而变小;

(2) 当 HTF 体积流量增大后,水侧的热阻占总热阻的份额变小,从而使强化效果变差,因此当 HTF 进口温度一定时,随着体积流量增加,平均吸热功率增大,且增加速率随着体积流量的增大而变小;

(3) 当提高 HTF 进口温度时,会导致换热结束时的石蜡温度与 HTF 出口温度出现越来越靠近的趋势,而在提高 HTF 体积流量时,却呈现相反的趋势;

(4) 由于在整个吸热过程中石蜡始终处于固液混合物,因此与仅对石蜡相变期间进行有效性分析相比,对整个吸热过程进行评估有更高的准确性。

参考文献:

[1] 李风雷,尹 璐,赵 吉,等.以能源转型推进“碳中和”的北欧经验借鉴与中国方案初探[J]. 可再生能源,2021,39(10): 1308–1313.
 LI Feng-lei, YIN Lu, ZHAO Ji, et al. The nordic experiences and China's choice for improving "carbon neutrality" by energy transition[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(10): 1308–1313.

[2] 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): 1058–1075.
 LENG Guang-hui, CAO Hui, PENG Hao, et al. The new research progress of thermal energy storage materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5): 1058–1075.

[3] CUNHA D P J, EAMES P. Compact latent heat storage decarbonisation potential for domestic hot water and space heating applications in the UK[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134: 396–406.

[4] 金 光,肖安汝,刘梦云.相变储能强化传热技术的研究进展[J]. 储能科学与技术,2019,8(6): 1107–1115.
 JIN Guang, XIAO An-ru, LIU Meng-yun. Research progress on heat transfer enhancement technology of phase change energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(6): 1107–1115.

[5] 徐蔚雯,章学来,华维三,等.微纳米粒子对辛酸–肉豆蔻酸相变储能体系热物性的影响[J]. 太阳能学报,2018,36(4): 17–24.
 XU Wei-wen, ZHANG Xue-lai, HUA Wei-san, et al. Influence of micro-nano particles on thermal properties of caprylic acid-myristic

acid phase change energy storage system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2018, 36(4): 17–24.

[6] PARK J, CHOI S H, KARNG S W. Cascaded latent thermal energy storage using a charging control method[J]. Energy, 2021, 38(4): 119–127.

[7] 李 传,葛志伟,金 翼,等.基于复合相变材料储热单元的储热特性[J]. 储能科学与技术,2015,4(2): 169–175.
 LI Chuan, GE Zhi-wei, JIN Yi, et al. Heat transfer behaviour of thermal energy storage components using composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 169–175.

[8] YUAN F, LI M J, MA Z, et al. Experimental study on thermal performance of high-temperature molten salt cascaded latent heat thermal energy storage system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118(6): 997–1011.

[9] SEDDEGH S, WANG X, HENDERSON D A. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 348–358.

[10] LARRINAGA P, DIARCE G, CAMPOS-CELADOR Á, et al. Parametric characterization of a full-scale plate-based latent heat thermal energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115441.

[11] KOUSHA N, HOSSEINI M J, ALIGOODARZ M R, et al. Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat storage unit – an experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112(14): 1497–1509.

[12] REN H, HE M, LIN W, et al. Performance investigation and sensitivity analysis of shell-and-tube phase change material thermal energy storage[J]. The Journal of Energy Storage, 2020, 33(2): 102040.

[13] AMAGOUR H E M, BENNAJAH M, RACHEK A. Numerical investigation and experimental validation of the thermal performance enhancement of a compact finned-tube heat exchanger for efficient latent heat thermal energy storage[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124238.

[14] DIAO Y H, MA C, CHEN C Q, et al. Experimental analysis of a latent heat storage unit with multichannel flat tube and copper foam[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 186: 116503.

[15] SAEED M R, SCHLEGEL J, SAWAFTA R, et al. Plate type heat exchanger for thermal energy storage and load shifting using phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 120–132.

[16] KOUSHA N, HOSSEINI M J, ALIGOODARZ M R, et al. Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat storage unit – an experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112(14): 1497–1509.