

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08  
doi:10.12465/issn.0253-4339.20250915004

# 面向太阳能采暖系统的相变储热换热器换热特性研究

赖智超 杨英英 陈思源 郑铭杰 李家佑 武卫东

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

**摘要** 为解决太阳能的间歇性和不稳定性问题,将工业级石蜡作为相变储能介质应用于太阳能集热与采暖领域,对翅片管式相变储热换热器在多种工况下的换热性能开展了实验研究。重点分析了不同入口水温(45、55℃)与流速(0.5、1.0、1.5 m/s)对流体沿程温度分布、出口水温及换热量的影响机制,并对瞬时换热量与总换热量进行了定量计算。本研究系统揭示了流速与入口温度对相变储热换热器热行为的影响规律,所获结果可为实现太阳能供需调节设备的研发提供实验依据与理论参考。

**关键词** 相变储能;换热器;流速变化;水温变化;储热量

中图分类号:TK512;TB34

文献标识码:A

## Design and Heat-Transfer Characteristics of Phase-Change Thermal-Storage Heat Exchanger for Solar Heating Systems

Lai Zhichao Yang Yingying Chen Siyuan Zheng Mingjie Li Jiayou Wu Weidong

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

**Abstract** To address the intermittency and instability of solar energy, this study applies industrial-grade paraffin as a phase-change material (PCM) to the field of solar thermal acquisition and heating. An experimental study was conducted to investigate the heat-transfer performance of a finned-tube phase-change thermal-storage heat exchanger under various operating conditions. Specifically, the effects of different inlet water temperatures (45 °C and 55 °C) and flow velocities (0.5, 1.0, and 1.5 m/s) on the fluid's axial temperature distribution, outlet water temperature, and heat-transfer capacity were analyzed. Quantitative calculations were performed for both the instantaneous and total heat-transfer amounts. This study systematically reveals the effects of flow velocity and inlet temperature on the thermal behavior of a phase-change thermal-storage heat exchanger. The results provide experimental evidence and theoretical reference for the development of solar-energy supply - demand regulation devices.

**Keywords** phase change thermal storage; heat exchanger; flow velocity variation; water temperature variation; heat storage capacity

全国建筑与建筑业建造碳排放总量为51.3亿t CO<sub>2</sub>,占全国能源相关碳排放的比重为48.3%,其中建筑采暖是能源消耗的重要组成部分,也是碳排放的重要来源<sup>[1]</sup>。太阳能资源丰富且分布广泛,太阳能供暖系统在建筑领域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。然而,其固有的间歇性和不稳定性使其面临重大挑战,相变储能技术能够有效缓解能源的供求在时间和空间上不匹配的矛盾<sup>[3]</sup>,利用相变材料(phase change materials, PCMs)将太阳辐射吸收和热能储存集成在一起,在降低能耗的同时显著增强了室内热舒适性<sup>[4]</sup>。图1所示为采用相变储能技术的建筑采暖系统,与单水箱系统相比,太阳能保证率可提高约30%。

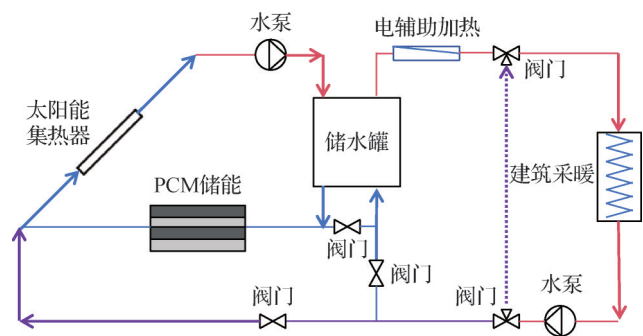


图1 基于相变储热的建筑采暖系统<sup>[5]</sup>  
Fig.1 The building heating system based on phase change thermal storage<sup>[5]</sup>

相变储热换热器是相变储能技术的核心设备,

基金项目:国家自然科学基金(52176018)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52176018).)

收稿日期:2025-09-15;修回日期:2025-09-27;录用日期:2025-11-20

凭借其高储能密度与等温放热特性,可在用水高峰期保障稳定热水供应因而成为适应用户高品质用热需求的关键技术。利用相变材料的潜热特性进行热能交换,是提升余热利用效率的有效途径之一<sup>[6]</sup>。与传统的显热蓄能方式相比,相变潜热蓄能具备更高的能量存储密度和更窄的工作温区,在余热回收应用中优势显著。该技术有助于缓解能量供需在时间与空间上的不匹配问题,从而全面提升能源利用效率,推动建筑节能目标的实现<sup>[7-9]</sup>。

目前的研究中常见的相变储热换热器主要有3种基本形式:板式、管壳式和填充式<sup>[10]</sup>,目前已有学者在相变储热换热器领域进行了数值模拟和实验研究。M. Caliano等<sup>[11]</sup>通过数值模拟研究了应用于寒冷环境的热能储存系统在储能释能过程中的性能,揭示了PCM容器尺寸与其热性能之间的量化关系:较大尺寸的容器更有利于实现稳定的能量储存,而较小尺寸的容器则有助于实现更快的热响应速度。在对换热热流体、换热管、翅片与相变材料之间的传热关联规律研究上,Dong Xiaodong等<sup>[12]</sup>模拟结果发现翅片数量过多或过少均不利于提高传热效率,而适当的翅片数量对换热器传热效率的影响比冷却液流速更为显著,H. E. Abdellatif等<sup>[13-15]</sup>分析了不同翅片结构对PCM熔融行为的影响。Lu Zhe等<sup>[16-19]</sup>实验研究表明通过添加纳米颗粒可增强复合相变材料的导热系数使热传递更快捷高效,并将相变储热换热器与太阳能热水系统结合可快速制备197.86 kg热水,占地面积较传统水箱减少74%,适用于太阳能热水系统紧凑化储能,缩短了热存储设备的充放热时间。同时,为解决PCM的低导热性并强化换热器性能,I. Ata等<sup>[20]</sup>对换热器翅片类型进行优化,增强

了热传导效率,使PCM的热能分布更均匀。

本研究面向太阳能采暖系统的实际需求,以工业级石蜡为相变储能介质,通过实验方法研究了翅片管式相变储热换热器在多种工况下的热性能,系统揭示了流速与入口温度对其热行为的作用机制。研究成果可为该类储热换热器在太阳能采暖系统中的结构与运行策略提供实验依据与理论支持。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 相变材料

石蜡的DSC(differential scanning calorimeter)差示扫描量热曲线如图2所示。由熔化过程的峰形分析可得,其相变潜热为212.1 J/g,相变峰值温度为40.3 °C;由凝固过程的峰形分析可得,相变潜热为159.1 J/g,相变峰值温度为23.4 °C。

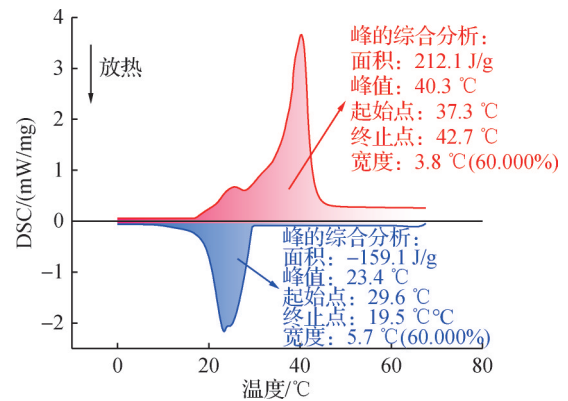


图2 石蜡DSC热分析曲线

Fig.2 DSC thermal analysis curve of the paraffin

### 1.2 实验系统

实验主要涉及仪器设备如表1所示。

表1 实验设备参数

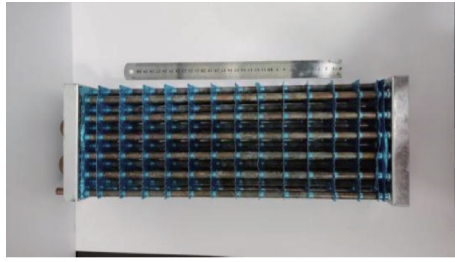
Tab.1 Specifications of the experimental apparatus

设备名称	型号	制造商	精度
恒温水槽	DC-2006	上海比朗仪器制造有限公司	± 0.05 °C
数据采集仪	Agilent 34970A	美国惠普(安捷伦)有限公司	± 0.004%
差示扫描量热仪	DSC 200F3	德国耐驰仪器制造有限公司	± 0.1%
无刷直流水泵	JK-329	广州烈德有限公司	± 5%
热电偶	K型	兴化市苏玛电器仪表有限公司	± 0.2 °C

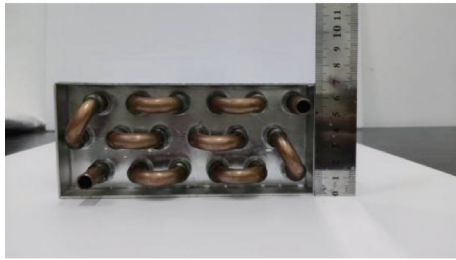
实验采用的恒温水槽可设定温度为-20~100 °C,功率为1 000 W,翅片管式相变储热换热器实物如图3所示。该换热器外形尺寸为440 mm×158 mm×68 mm,翅片间距为30 mm,材质为铝,利用其高导热系数以增强传热效果。盘管采用铜材,外径为9.52 mm,

内径为9 mm,铜管总长为7 920 mm,管内水容量约为503.85 mL。换热器周围填充相变石蜡3.0 kg。

图4所示为实验装置,在换热器管长的1/6、3/6、5/6和出水口处分别布置热电偶,用于记录管内水温沿程变化,入口水温由恒温水槽确定。外部以亚克



(a) 换热器俯视图



(b) 换热器侧部盘管分布

图3 翅片管式换热器整体实物图

Fig.3 Photograph of the finned-tube heat exchanger

力板作为封装壳体,在安装过程中,首先将石蜡加热至其相变温度以上直至完全熔融,随后以可控速率将换热器浸入其中。安装完毕后,对系统实施全面保温处理:换热器外表面包覆挤塑聚苯乙烯(extruded polystyrene, XPS)隔热材料作为保温层,低温恒温槽与换热器之间的循环管路则采用保温棉包裹。该保温设计可有效降低系统与外界的对流与导热热损失,从而提高实验数据的准确性与可靠性,将系统误差控制在允许范围内。

储热实验开始前,首先向低温恒温槽中注入常温水,并设定预热目标温度。待槽内水温稳定后,在换热器进口与出口处安装热电偶以监测温度变化。随后接通无刷水泵,通过调节输入电压,控制循环流量,流速0.5、1.0 m/s对应电压分别为7.5、16.0 V。启动水泵后实验正式开始,数据采集系统以30 s为间隔自动记录各测点温度。当出口水温趋于稳定时,可判定储热阶段结束。实验工况如表2所示。

### 1.3 参数计算

根据不同流速出水口温度采用加权平均温差法

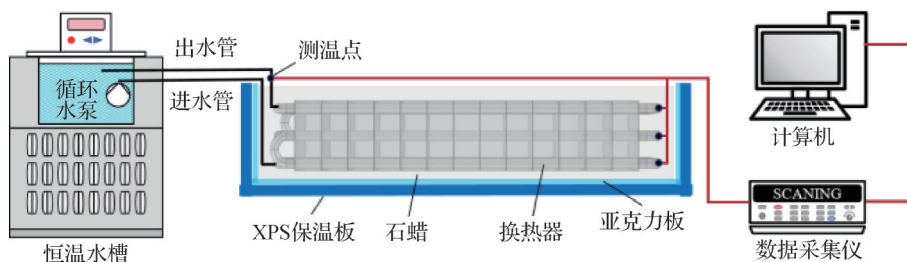


图4 实验装置

Fig.4 The experimental setup

表2 实验工况

Tab.2 Specifications of the experimental apparatus

类型	温度/°C	流速/(m/s)
工况1	45	0.5
工况2	45	1.0
工况3	45	1.5
工况4	55	0.5
工况5	55	1.0
工况6	55	1.5

计算,计算过程如下。

流动特性计算,管径横截面积:

$$A = \pi(d/2)^2 \quad (1)$$

式中: $d$ 为铜管内径,m; $A$ 为铜管内径的横截面积, $m^2$ 。

单位时间内体积流量:

$$Q_{\text{water}} = Av \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{water}}$ 为单位时间内体积流量, $m^3/s$ ;  $v$ 为铜管内流速, $m/s$ 。

单位时间内质量流量体积:

$$m = \rho_w Q_{\text{water}} \quad (3)$$

式中: $m$ 为单位时间内质量流量, $kg/s$ ;  $\rho_w$ 为水的密度, $kg/m^3$ 。采用加权平均温差法计算每30 s间隔内的瞬时换热能量:

$$Q_i = mc_p \frac{(T_{\text{exit},i} - T_{\text{inlet}}) + (T_{\text{exit},i-1} - T_{\text{inlet}})}{2} \Delta t \quad (4)$$

式中: $c_p$ 为水的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$ ;  $\Delta t$ 为时间步长,取30,总换热量通过求和得到。

### 1.4 不确定度分析

测试设备自身的不确定度根据B类不确定度的计算方法计算<sup>[21]</sup>:

$$u_i = a/k \quad (5)$$

式中: $a$ 为被测量可能值区间的半宽度; $k$ 为置信因子误差均匀分布时取 $\sqrt{3}$ 。

将所有独立分量的标准不确定度合成为系统的合成标准不确定度 $u_c$ 。采用方和根法,因为它反映了

误差的统计合成规律。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (6)$$

数据采集仪精度相对其他设备可忽略,上述实验系统:

$$u_c = \sqrt{(0.029)^2 + (0.115)^2 + (0.029)^2} \quad (7)$$

扩展不确定度  $U$ :

$$U = ku_c \quad (8)$$

$k$ 通常取2对应95%的置信水平,扩展不确定度  $U$ 为0.244 °C。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 入口温度 45 °C 实验分析

该换热器的传热机理包含3个连续环节,首先,管内供水与铜管内壁之间发生对流传热;其次,热量通过高导热性的铜管及翅片进行轴向与径向的传导;最终,热量传递至石蜡,先使其显热升温,后触发固液相变。从强化传热角度分析,提高流速主要通过削弱水侧热边界层以降低对流热阻,依据牛顿冷却定律,此举可有效提升对流传热系数;而增大温差则直接加大了传热温压,是增强热驱动力最直接的方式。

图5所示为入口温度45 °C不同流速的出口水温变化。可知,实验过程中流速为0.5 m/s时的出口水温低于流速为1.0 m/s和1.5 m/s的工况。在0~150 s时段内,流速0.5 m/s与1.0 m/s的出口水温较为接近;而在250~600 s时段内,1.0 m/s与1.5 m/s流速下的出口水温更接近。

图6所示为工况45 °C下不同流速下瞬时换热量变化,采用加权平均温差法计算,随着实验的进行,瞬时换热量逐渐降低,随后趋于平缓并达到稳定状态。同时,随着流速的增加,在同一时刻下的瞬时换热量也相应增大。不同时间段换热量趋于平缓后,流速1.0 m/s和1.5 m/s相对0.5 m/s时瞬时换热量增长22.8%和75.9%。

图7所示为45 °C工况下不同流速对总换热量的影响。总换热量通过对图6中各时间段的换热量进行累加得到。由图7可知,总换热量随实验进程整体呈上升趋势,且随着流速的增大而增加。原因是流速增大导致单位时间内质量流量增加,流体能够运输更多热量。尽管由图5和图6可知,流速增大会引起出口水温升高,但流速仍是影响换热量的主导因素。在实验初期,总换热量增长较快;进入实验中后期后,增长逐渐趋于平稳。在实验时间为600 s时,与0.5 m/s工况相比,流速为1.0 m/s和1.5 m/s时的总

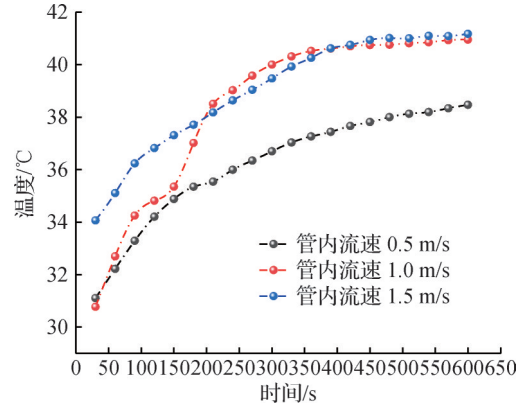


图5 入口温度45 °C不同流速的出口水温变化

Fig.5 Variation of outlet water temperature at different flow velocities with an inlet temperature of 45 °C

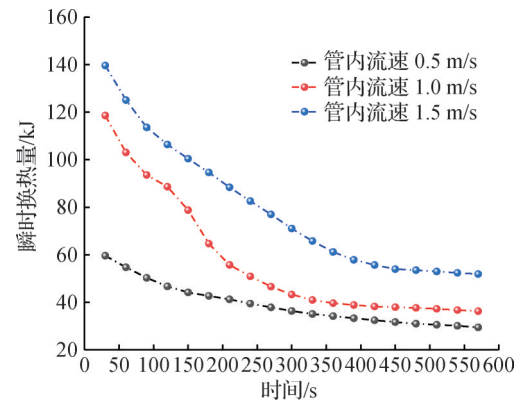


图6 入口温度45 °C不同流速下瞬时换热量变化

Fig.6 Variation of instantaneous heat transfer amount under different flow velocities with an inlet temperature of 45 °C

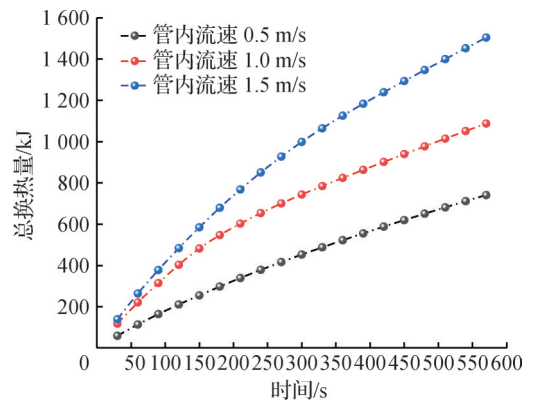


图7 入口温度45 °C不同流速总换热量变化

Fig.7 Variation of heat transfer amount during different time intervals under various flow velocities with an inlet temperature of 45 °C

换热量分别提高了46.69%和102.96%。

图8所示为45 °C工况、流速为0.5 m/s时沿程各测点水温的变化。可以看出,所有测点温度均呈逐渐上升趋势,实验初期升温较快,后期趋于平缓。同一时刻下,1/6处温度最高,随后在3/6、5/6和出口处

依次递减,表明流体在流动过程中持续向石蜡相变材料放热。实验至600 s时,各点温度趋于稳定,但仍可见水温沿流动方向阶梯式下降,1/6处与出口处的温差为2.8℃。

图9所示为45℃工况下流速为1.0 m/s时沿程各测点水温的变化情况。如图所示,各测点温度均呈现一致的逐渐上升趋势:实验初期升温较快,后期逐渐趋于平缓。从沿程分布来看,同一时刻1/6处水温最高,随后在3/6、5/6和出口处依次递减,表明流体在流动过程中持续向石蜡相变材料放热。值得注意的是,在1.0 m/s流速下,5/6处与出口处水温极为接近,说明换热主要发生在入口至5/6段之间,后续管段换热作用较弱。实验进行至600 s时,各测点温度已趋于稳定,但仍可观察到水温沿流动方向呈阶梯式下降,1/6处与出口处之间的温差为1.26℃。

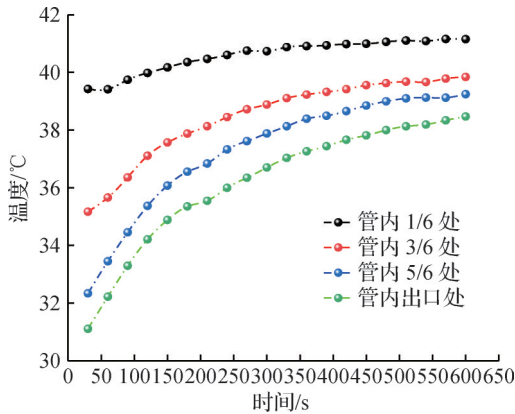


图8 入口温度45℃下0.5 m/s沿程各点的水温变化

Fig.8 Water temperature variation at discrete axial points under a flow velocity of 0.5 m/s and an inlet temperature of 45℃

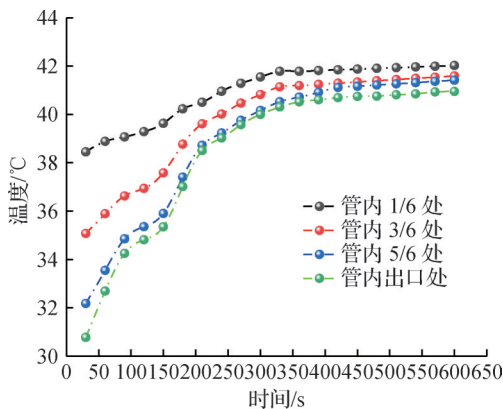


图9 入口温度45℃下1.0 m/s沿程各点的水温变化

Fig.9 Water temperature variation at discrete axial points under a flow velocity of 1.0 m/s and an inlet temperature of 45℃

## 2.2 入口温度55℃实验分析

图10所示为恒温水槽水温55℃时不同流速下出口温度的变化。可以看出,实验前期出口温度上升较快,后期逐渐趋于平缓。此外,在实验前期,流速为0.5 m/s和1.0 m/s工况下的出口温度较为接近;而在实验中后期,1.0 m/s与1.5 m/s流速下的出口温度更为接近。

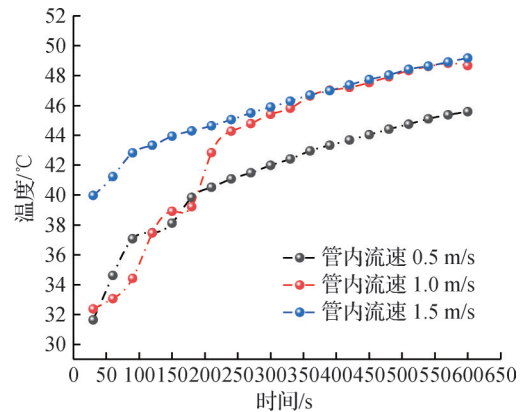


图10 入口温度55℃不同流速的出口水温变化

Fig.10 Variation of outlet water temperature at different flow velocities with an inlet temperature of 55℃

图11所示为55℃工况下不同流速对应的瞬时换热量变化,根据出水口温度采用加权平均温差法计算得到。由图11可知,随着实验进行,瞬时换热量逐渐降低,之后趋于稳定。同时,在同一时刻,瞬时换热量随流速的增大而增加。在换热量趋于稳定后,与0.5 m/s工况相比,流速1.0 m/s和1.5 m/s下的瞬时换热量分别提高了31.29%和87.76%。

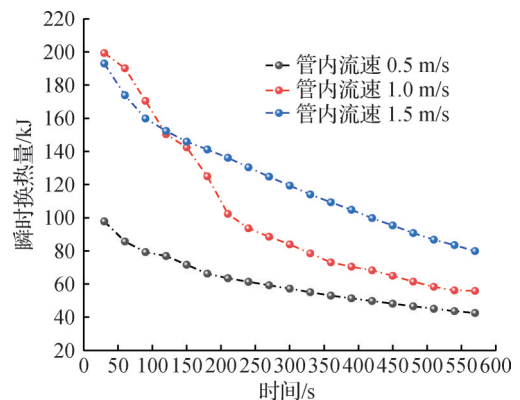


图11 入口温度55℃不同流速下瞬时换热量变化

Fig.11 Variation of instantaneous heat transfer amount under different flow velocities with an inlet temperature of 55℃

图12所示为55℃工况下不同流速对总换热量的影响。总换热量随实验进程呈上升趋势,且随流速的增大而增加。实验初期总换热量增长较快,且

在 1.0 m/s 和 1.5 m/s 流速下的累计换热量数值大致相同。至实验结束时,与 0.5 m/s 工况相比,流速 1.0 m/s 和 1.5 m/s 对应的总换热量分别提高了 67.56% 和 102.94%。

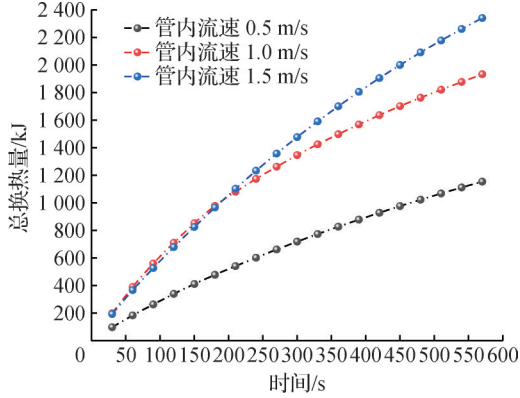


图 12 入口温度 55 °C 不同流速下总换热量变化

Fig.12 Variation of total heat transfer amount under different flow velocities with an inlet temperature of 55 °C

图 13 所示为 45 °C 工况、流速 0.5 m/s 时沿程各测点水温的变化。各测点温度均呈逐渐上升趋势,实验初期升温较快,后期趋于平缓。同一时刻下,1/6 处温度最高,随后在 3/6、5/6 和出口处依次递减,表明流体在流动过程中持续向石蜡相变材料放热。即使后期各点温度趋于稳定,仍可观察到水温沿流动方向呈阶梯式下降,1/6 处与出口处之间的温差为 3.24 °C。

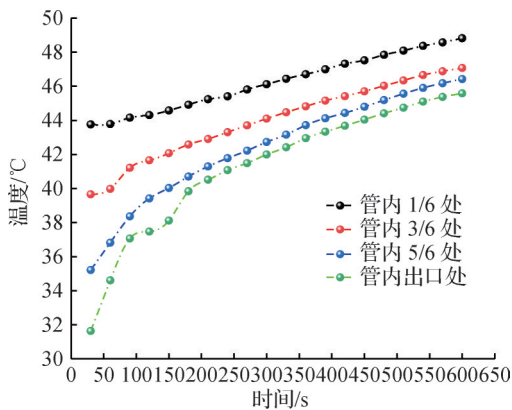


图 13 入口温度 55 °C 时 0.5 m/s 沿程各点的水温变化

Fig.13 Water temperature variation at discrete axial points under a flow velocity of 0.5 m/s and an inlet temperature of 55 °C

图 14 所示为 45 °C 工况、流速 1.0 m/s 时沿程各测点水温的变化。各测点温度在实验初期上升较快,后期升温趋缓。沿程分布显示,同一时刻 1/6 处水温最高,之后在 3/6、5/6 和出口处依次降低,表明流体持续放热。实验结束时温度已趋于稳定,但 1/6 处与出

口处之间仍存在 1.53 °C 的温差。

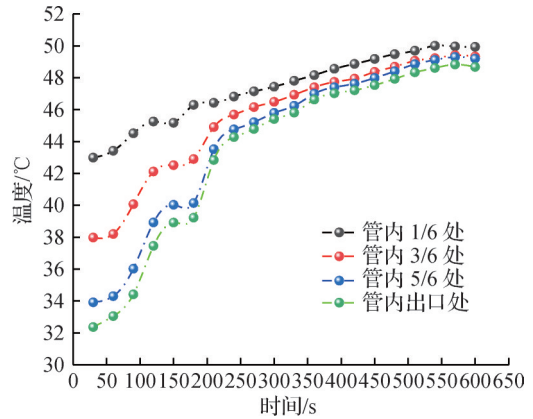


图 14 入口水温 55 °C 时 1.0 m/s 沿程各点的水温变化

Fig.14 Water temperature variation at discrete axial points under a flow velocity of 1.0 m/s and an inlet temperature of 55 °C

### 2.3 不同流体工况分析

图 15 所示为不同温度工况下流速 1.5 m/s 时各时间段换热量的对比结果。由图 15 可知,在 2 种工况温差为 10 °C 的条件下,当换热量趋于稳定时,55 °C 工况相较于 45 °C 工况的各时间段换热量提高了 53.75%。

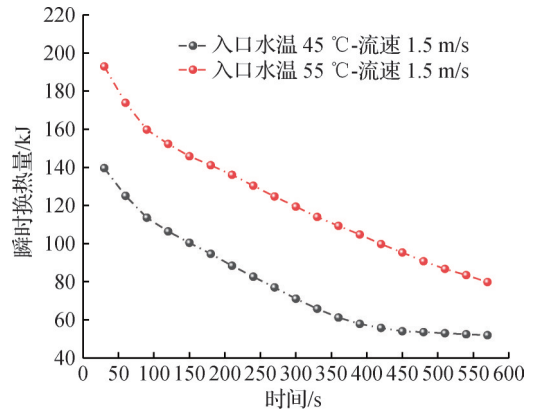


图 15 不同入口温度时 1.5 m/s 瞬时换热量对比

Fig.15 Comparison of instantaneous heat transfer amounts at a flow velocity of 1.5 m/s under different inlet temperatures

图 16 所示为不同温度工况下流速 1.5 m/s 时总换热量的对比结果。由图 16 可知,在 2 种工况温差为 10 °C 的条件下,实验结束时,55 °C 工况下的总换热量较 45 °C 工况提高了 55.59%。

### 3 结论

本文以工业级石蜡作为相变储能介质,研究了翅片管式相变储能换热器在采暖等应用中的热管理

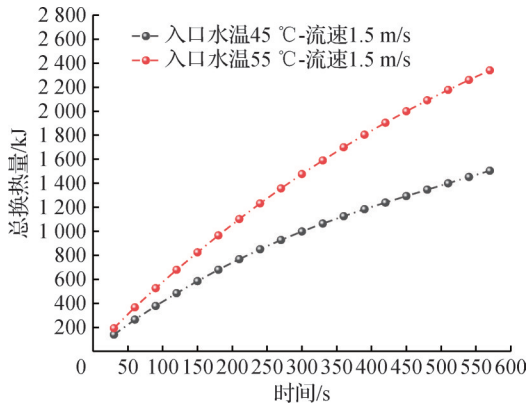


图16 不同入口温度时1.5 m/s总换热量对比

**Fig.16 Comparison of total heat transfer amounts at a flow velocity of 1.5 m/s under different inlet temperatures**

性能。通过搭建实验系统,分析了不同入口温度与流速对沿程水温、出口水温及换热量的影响,得到结论如下:

1)瞬时换热量随换热过程的推进而逐渐降低,初期下降较快,后期逐渐减缓。在入口温度为45℃条件下,流速为0.5、1.0、1.5 m/s时,稳定后的瞬时换热量较实验初期分别下降了50.5%、69.39%、62.82%;而在55℃入口温度下,降幅分别为56.54%、72%、58.65%。

2)流速越高,瞬时换热量与总换热量越大,但该影响在换热初期较高流速下并不显著。实验后期瞬时换热量趋于稳定,入口温度为45℃时,与0.5 m/s工况相比,流速1.0、1.5 m/s下的瞬时换热量分别提高了22.8%、75.9%,总换热量分别提高了46.69%、102.96%。在55℃入口温度下,瞬时换热量增幅分别为31.29%和87.76%。总换热量增幅分别为67.56%和102.94%。值得注意的是,在1.0 m/s和1.5 m/s较高流速条件下,入口温度为45℃时,实验前期1~150 s内总换热量差异仅为17.24%;而在55℃工况下,0~240 s内总换热量差异仅为4.79%。

3)在流速相同的条件下,入口温度越高,总换热量也越大。当温差为10℃、流速为1.5 m/s时,55℃工况相较于45℃工况,其瞬时换热量提高了53.75%,总换热量提高了55.59%。

本文受上海市启明星项目(24QA2705900)资助。(The project was supported by the Shanghai Rising-Star Program (No. 24QA2705900).)

#### 参考文献

[1] 蔡伟光,于艳辉,刘源.中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年)[J].建筑,2025(2):56-63.(Cai

Weiguang, Yu Yanhui, Liu Yuan. Research report on carbon emissions in urban and rural construction in China (2024) [J]. Construction and Architecture, 2025 (2) : 56-63.)

[2] 陈耀文,王登甲,柳砚铭,等.区域太阳能供暖集中式与分散式组合蓄热系统形式探讨[J].暖通空调,2024,54(9):136-142.(Chen Yaowen, Wang Dengjia, Liu Yanming, et al. Discussion on forms of a centralized and decentralized combined heat storage system for district solar heating [J]. Journal of HV&AC, 2024, 54 (9) : 136-142.)

[3] 薛晓强,张慧峰,屈逸飞,等.相变储能装置传热强化技术发展及展望[J].暖通空调,2025,55(3):1-10.(Xue Xiaoqiang, Zhang Huifeng, Qu Yifei, et al. Development and prospect of heat transfer enhancement technologies for phase change energy storage devices [J]. Journal of HV&AC, 2025, 55(3) : 1-10.)

[4] Xiao Qiangqiang, Wang Mengqian, Tang Hongda, et al. A potential building heating strategy integrating solar radiation absorption and thermal energy storage [J]. Solar Energy, 2025, 299: 113762.

[5] Huang Haotian, Xiao Yimin, Lin Jianquan, et al. Improvement of the efficiency of solar thermal energy storage systems by cascading a PCM unit with a water tank [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118864.

[6] Herbing F, Groulx D. Experimental comparative analysis of finned-tube PCM-heat exchangers' performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118532.

[7] Zhang Shengqi, Pu Liang, Xu Lingling, et al. Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115425.

[8] Xu Zile, Zhang Xuelai, Ji Jun. Research progress of phase change heat storage technology in the application of solar heat pump [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86: 111272.

[9] Ning Zhaozhong, Zhang Xuelai, Ji Jun, et al. Research progress of phase change thermal storage technology in air-source heat pump [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107114.

[10] 李洋,王彩霞,宗军,等.不同形式相变储热换热器的对比分析[J].储能科学与技术,2019,8(2):347-356.(Li Yang, Wang Caixia, Zong Jun, et al. A comparative analysis of different heat exchangers containing phase change materials [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 347-356.)

[11] Caliano M, Bianco N, Graditi G, et al. Numerical analysis of cold thermal energy storage systems using macro-encapsulated Phase Change Materials (PCM) in residential

- cooling applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 125: 117043.
- [12] Dong Xiaodong, Zhu Chuanhui. Research on the heat transfer performance of phase change heat storage heat exchangers based on heat transfer optimization [J]. *Energies*, 2024, 17(16): 4150.
- [13] Abdellatif H E, Belaadi A, Arshad A, et al. Enhancing thermal energy storage system efficiency: Geometric analysis of phase change material integrated wedge-shaped heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 262: 125268.
- [14] Liu Weidong, Mokhtari M, Abed Hussein M, et al. Investigation of the arrangement of aluminum fins on the thermal behavior of lauric acid as a phase change material in a two-pipe heat exchanger by CFD simulation [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 64: 105469.
- [15] Liu Huan, Jing Jianwei, Liu Jianxin, et al. Sugar alcohol-based phase change materials for thermal energy storage: Optimization design and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114528.
- [16] Lu Zhe, Wang Sheliang, Ying Honghao, et al. Preparation and thermal properties of eutectic phase change materials (EPCMs) with nanographite addition for cold thermal energy storage [J]. *Energy*, 2024, 290: 130148.
- [17] Abd H S, Jaddoa A A, Judran H K, et al. Phase change material nanocomposites for thermal energy storage applications on solar water heater [J]. *Results in Engineering*, 2025, 25: 104428.
- [18] Li Sheng, Xu Chong, Chao Jiacheng, et al. Performance study of solar assisted heat pump using phase change slurry as heat exchange medium [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 326: 119456.
- [19] Zhou Weiguan, He Yangjing, Xu Qing, et al. Numerical simulation and optimization of compact latent heat exchanger with micro-channel plate in shape-stabilized composite phase change material [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122740.
- [20] Ata I, Ozselcuk Y E. Experimental analysis of a phase change material (PCM) enhanced solar air heater for thermal energy storage [J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2025, 70: 102163.
- [21] 马国浩, 卢曦, 郭佳琳. 入口铝管内径对电池冷却器换热性能的影响 [J/OL]. *制冷学报*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250225.1050.002>. (Ma Guohao, Lu Xi, Guo Jialin. Influence of inlet aluminum tube inner diameter on heat transfer performance of battery coolers [J/OL]. *Journal of Refrigeration*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250225.1050.002>.)

#### 通信作者简介

杨英英, 女, 副教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 15618621489, E-mail: yingyingyang@usst.edu.cn。研究方向: 高效储能, 建筑节能, 制冷空调热泵新技术。

#### About the corresponding author

Yang Yingying, female, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-15618621489, E-mail: yingyingyang@usst.edu.cn. Research fields: high-efficiency energy storage; building energy efficiency; new technologies in refrigeration, air conditioning, and heat pumps.