

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-848-06

# 间歇热源供热下相变散热器蓄放热特性研究

李轲<sup>1</sup> 梁瑶<sup>1</sup> 唐晓波<sup>1</sup>

李鹏伟<sup>1</sup> 余晨沐<sup>1</sup> 曾伟益<sup>1</sup> 龚周<sup>2</sup> 王子云<sup>2</sup>

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司 成都 610017;

2. 四川大学建筑与环境学院 成都 610065)

**【摘要】** 太阳能热水供暖系统的能量输出受到日照条件的显著影响,表现出明显的间歇性特征,这与建筑对持续稳定供暖的需求存在矛盾。为解决这一问题,相变储能技术凭借其高效的能量存储特性,逐渐成为研究的热点。然而,目前关于相变散热器在建筑供暖领域的实验研究仍较为稀缺,尤其是在与热水管道系统集成方面存在较大空白。研究设计了一种新型相变散热器,并将其与热水循环系统相结合,探讨了热水供应流量对散热器系统换热性能、温度分布及潜热比的影响,同时评估了相变散热器对室内温度的贡献效果。结果表明,降低入水流量可增大散热器进出口热水的平均温差,延缓相变材料的熔化过程。同时,相变材料熔化时的潜热占储热量的比重随着流量的减小而降低。此外,实验结果显示,不同热水流量条件下的室内温度均高于参考温度,表明相变散热器具备良好的供暖性能。

**【关键词】** 热水循环; 相变散热器; 建筑供暖; 换热性能; 潜热

中图分类号 TU832.2 文献标志码 A

## Experimental Study on the Heat Storage and Release Characteristics of a Phase Change Radiator under Different Water Flow Rates

Li Ke<sup>1</sup> Liang Yao<sup>1</sup> Tang Xiaobo<sup>1</sup>

Li Pengwei<sup>1</sup> She Chenmu<sup>1</sup> Zeng Weiyi<sup>1</sup> Gong Zhou<sup>2</sup> Wang Ziyun<sup>2</sup>

(1. Sichuan Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd, Chengdu, 610017;

2. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065)

**【Abstract】** The energy output of solar water heating systems is highly dependent on solar radiation conditions, exhibiting significant intermittency. This characteristic conflicts with the continuous and stable heating demands of buildings. To resolve this discrepancy, phase change energy storage technology, known for its high efficiency in energy storage, has garnered increasing attention. However, experimental research on phase change heat sinks within the context of building heating remains limited, particularly regarding their integration with hot water pipeline systems. This study introduces a novel phase change heat sink integrated into a hot water circulation system, investigating the impact of hot water supply flow rate on the heat sink's heat transfer performance, temperature distribution, and latent heat ratio, while also evaluating the contribution of the phase change radiator to indoor temperature. The findings indicate that reducing the inlet water flow rate enhances the average temperature difference of hot

基金项目: 四川省交通勘察设计研究院有限公司科技项目 (No.232023009)

作者简介: 李轲 (1981.01-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: 34525592@qq.com

通讯作者: 梁瑶 (1982.03-), 女, 博士, 正高级工程师, E-mail: 239005507@qq.com

收稿日期: 2025-04-24

water between the heat sink's inlet and outlet and decelerates the melting process of the phase change material. Additionally, the proportion of latent heat released during the phase change material's melting decreases as the flow rate diminishes. Moreover, the experimental results indicate that indoor temperatures under varying hot water flow rates are consistently higher than the reference temperature, demonstrating that the phase change radiator possesses good heating performance.

**【Keywords】** Hot water circulation; Phase change radiator; Building heating; Heat transfer performance; Latent heat

## 0 引言

解决太阳能供应的间歇性和波动性与建筑持续供暖需求之间的矛盾,是高原地区供暖面临的关键挑战之一。储热技术,尤其是相变材料(PCM)的应用,已成为应对此类问题的有效手段。

聚焦于建筑供暖场景,Rathore 等人<sup>[1]</sup>借助实验探究,发现将相变材料融入建筑外墙及屋顶结构,能够显著地平衡热负荷的波动,有效抑制室内温度的剧烈起伏。Zhou 等人<sup>[2]</sup>则着眼于集成相变材料的 Trombe 墙,研究表明,精准选择相变材料的相变温度并搭配适宜的厚度,可高效调控室内温度波动,进而大幅削减建筑能耗。此外,Li 等人<sup>[3]</sup>针对相变材料在窗户热管理中的应用展开研究,结果表明,配备相变材料的窗户可在热流波动过程中自如地吸收与释放热量,由此降低室内温度波动并减少建筑能耗。

在太阳能热水供暖领域,李等人<sup>[4]</sup>对多能互补热水系统的供暖效能展开研究,结果显示,借助多种能源系统的互补运行策略,建筑供暖效果得到显著提升。Teamah 等人<sup>[5]</sup>专注于相变材料在太阳能热水系统中的应用,深入挖掘其在增强系统热储存能力与温度稳定性方面的潜力。Chen 等人<sup>[6]</sup>创新性地提出一种将管道嵌入相变材料复合墙体的设计方案,实验结果表明,该设计可使墙体内表面温度降低 1.1℃,热流密度减少 9W/m<sup>2</sup>,最大热增益降低 39.3kWh/m<sup>2</sup>。

近年来,研究者们积极探索相变材料与散热器集成的传热性能。例如,刘等人<sup>[7]</sup>针对现有结构形式的相变散热器开展有限元仿真与实验,发现现有结构难以满足性能要求。通过深入剖析相变散热器结构与散热性能之间的内在关联,在尽量满足散热器风阻及外形尺寸等约束条件的前提下,提出通过增设散热相变通道来提升散热器性能优化方案。Li 等人<sup>[8]</sup>研究了配备相变材料的针翅散热器在电子设备热管理中的表现,结果表明,适当增加散热器针翅的数量与厚度,可显著增强散热性能。此外,

Deng 等人<sup>[9]</sup>深入探讨了电加热主动相变散热器在建筑供暖过程中的蓄热与散热耦合特性,研究表明,该相变散热器在提升热存储效率与潜热比方面成效显著。

尽管相变材料与太阳能热水系统集成用于建筑供暖的研究已取得阶段性进展,但在太阳能热水循环系统与散热器集成优化的细分领域,仍存在诸多研究空白亟待填补。为此,本研究精心设计了一种新型供暖用相变散热器,并对其热性能进行了系统实验分析。鉴于太阳能供应的间歇性和不稳定性,实验创新性地将电加热热水循环系统与相变散热器相结合,旨在保障热水供应的可靠性与稳定性,从而更加准确地评估该散热器结构在实际应用中的热性能表现。

## 1 实验描述

### 1.1 实验系统及工作原理

本研究搭建了实验平台,并在实际环境中开展了相关实验,实验现场的示意图如图 1 所示。实验于早晨 8:00 进行热水供应,下午 18:00 停止。白天,热水通过管网流经相变散热器,激活相变材料的相变过程,吸收并储存热量;夜间,当热水停止供应后,散热器逐渐释放储存的热量,维持室内温度的平衡。为确保实验的精确性,测量系统实时监控各环节的热量变化、温度波动及整体运行状态。

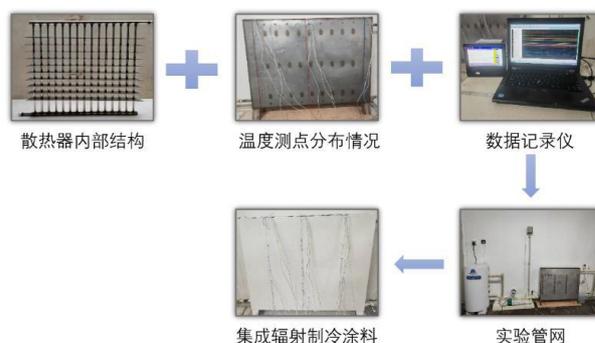


图 1 实验现场示意图

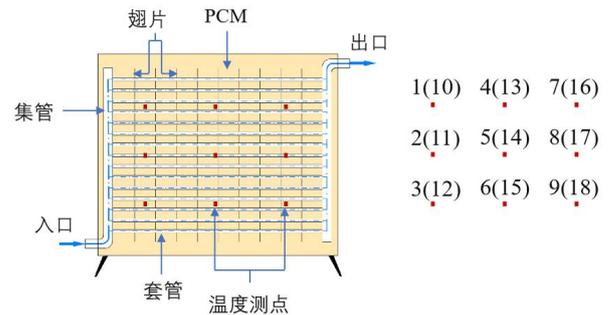
Fig.1 Schematic diagram of the experimental site

### 1.2 实验设备和材料

本研究设计的散热器结构如图 2 所示，并标注了实验温度数据测量点的分布。散热器采用 S304 不锈钢制造，外表面尺寸为 1000mm×120mm×800mm。内部结构包括 15 根直径为 20mm 的水平套管和两根直径为 25mm 的竖向集管，管道系统通过金属翅片与散热器外壳连接，以提高热交换效率和系统稳定性。外部热水循环管道采用聚丙烯热塑管进行连接。散热器内部填充了由中国石油股份有限公司抚顺石化分公司生产的符合 GB/T 446-2023 标准的全精炼 58 号石蜡。为了评估相变材料的热物性，本研究采用差示扫描量热法 (DSC) 对石蜡进行了热物性测试，测试结果如图 3 所示。此外，为确保相变材料封装泄漏并解决系统运行中的承压问题，整个结构采用激光焊接工艺加工而成。

本实验使用巴雷西落地式电加热器为实验提供热水，并在散热器的入水口和出水口分别安装了压力传感器和 PT100 热电阻温度传感器，用于测量热水通过散热器后的压差和温差。为确保热水温度的准确性并避免室内热源干扰，散热器外部管道均采用保温隔热棉包裹，以最大程度减少热量损失。

此外，为了精确分析散热器的传热性能，本实验在 PCM 内部均匀设置了 9 个测量点 (Mp1-9)，并采用 PT100 热电阻进行温度数据采集。同时，在散热器外表面相应位置设置了 9 个外部测点 (Mp10-18)，并使用 T 型热电偶进行温度数据采集。为测量热水循环的流量与压力，本实验配置了水泵和涡轮流量计进行增压与流量监控。实验采用了供水流量为 0.19m<sup>3</sup>/h、0.29m<sup>3</sup>/h 和 0.39m<sup>3</sup>/h 三种工况对散热器的热性能进行分析。所有实验数据通过多通道数据采集仪进行记录。



(a) 散热器立面示意图 (b) 温度测点分布

图 2 相变散热器简化示意图

Fig.2 Simplified diagram of the phase change radiator

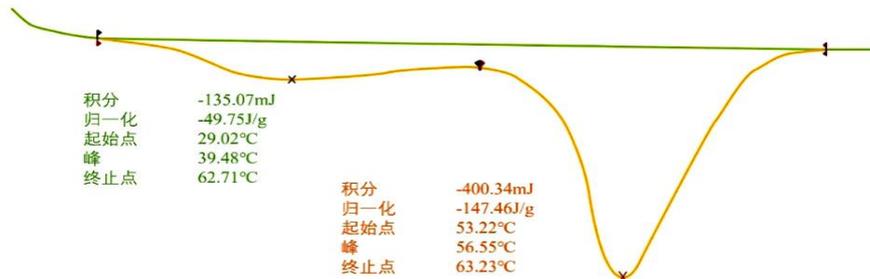


图 3 相变材料的 DSC 曲线

Fig.3 DSC curve of the phase change material

### 1.3 实验方案

为确保实验数据的可靠性与一致性，本研究在加热温度设定为 75°C、供水流量为水泵运行最大流量 (0.39m<sup>3</sup>/h) 的条件下，开展了 24 小时的循环实验。次日，系统重新启动，调整散热器的入口流量，分别设定为 0.39m<sup>3</sup>/h、0.29m<sup>3</sup>/h 和 0.19m<sup>3</sup>/h，并采集相应实验数据。为定量分析散热器对室内温度的贡献，在无其他热源影响的条件下，于实验前连续三天进行室内温度监测，并以各时刻测得温度的日均值作为室温参考基线。通过分析在不同流量条件下相变散热器的蓄热性能以及室内环境温度变化情况，评估流量对散热器热性能的影响。

### 1.4 评价指标

热水通过管道流经散热器后释放的能量分为三部分：相变材料储存的显热、潜热，以及散热器向环境释放的热量。为了评估相变散热器的换热性能，采用以下公式进行计算。

$$P_w = M_w \cdot c_w \cdot \Delta T_w \quad (1)$$

$$M_w = \rho_w \cdot V_f \quad (2)$$

$$\Delta T = T_m - T_{out} \quad (3)$$

$$Q_s = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T_p \quad (4)$$

$$Q_i = P_w \cdot t \quad (5)$$

$$Q_i = L_f \cdot m_p \quad (6)$$

$$Q_d = Q_i - Q_s - Q_e \quad (7)$$

式中:  $P_w$  为热水对相变散热器的供热功率;  $c_w$  为水的热容;  $\Delta T_w$  为散热器出入口热水的平均温差;  $M_w$ 、 $V_f$  分别为散热器进口热水的质量和体积流量;  $\rho_w$  为水的密度;  $c_p$  和  $m_p$  为相变材料的热容和质量; 而  $\Delta T_p$  为相变材料熔化时的温度变化量;  $t$  是指热水供应时间;  $Q_i$ 、 $Q_l$ 、 $Q_s$  和  $Q_d$  分别为散热器吸收的总能量、相变材料相变过程储存的热量、熔化过程吸收的显热和散热器向环境散失的热量; 而  $L_f$  为相变材料的熔化潜热。

## 2 结果与讨论

### 2.1 散热器热交换与流动阻力

图 4 展示了三种流量下相变散热器在热水循环系统运行期间的换热情况。结果表明, 不同热水流量下, 散热器进口平均水温分别为 71.65℃、71.88℃和 72.05℃, 整体变化较小, 差异在 0.3%以内。出口平均水温分别为 64.94℃、64.88℃和 64.29℃。散热器进出口平均温差分别为 6.71℃、7.00℃、7.76℃, 呈现出逐渐升高的趋势, 这一现象的主要原因在于, 当流量较小时, 水流速度减缓, 热水在循环过程中与相变材料的接触时间增加, 使得相变材料吸收热量的时间增加, 从而导致热水的

温度变化更为显著。

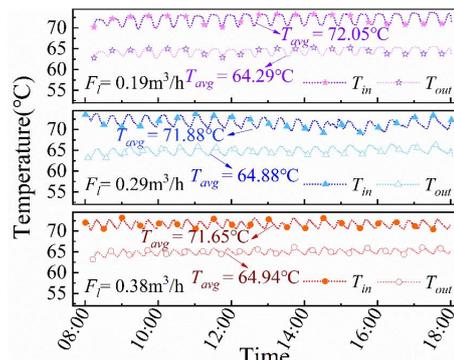


图 4 不同热水流量下相变散热器出入口的温度变化情况

Fig.4 Temperature variation at the inlet and outlet of the phase change radiator under different hot water flow rates

此外, 三种流量下入口平均水压分别为 9.86kPa、9.18kPa 和 8.56kPa, 出口平均水压分别为 35.96kPa、33.86kPa 和 32.18kPa, 出入口热水的平均压差分别为 26.1kPa、24.68kPa 和 23.62kPa, 呈现出逐渐降低的趋势。这是因为, 随着流量的减小, 水流速度降低, 流动阻力减小, 水流通过管道时的压力损失减少, 因此入口和出口之间的热水平均压差逐渐减小。

### 2.2 相变散热器温度分布

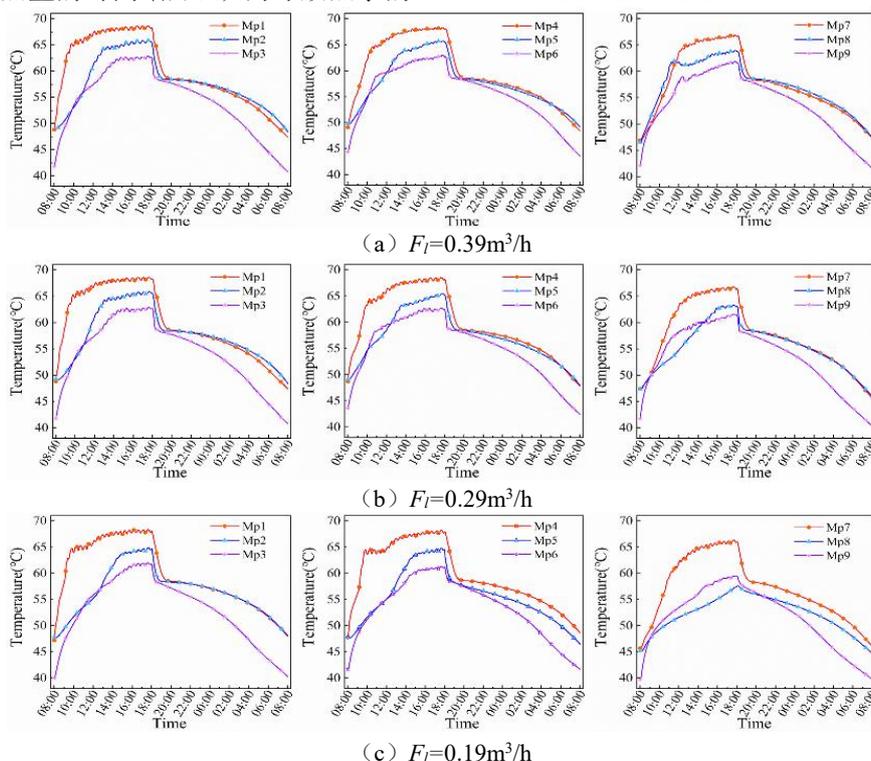


图 5 不同流量下相变材料的温度变化情况

Fig.5 Temperature variation of phase change materials under different flow rates

图 5 展现了不同流量下相变材料温度随时间的变化情况。结果显示，相变材料的温度变化经历了四个阶段：迅速上升阶段、稳定阶段、急剧下降阶段和缓慢下降阶段。系统运行时，热水流经散热器，将热量快速传递给相变材料。由于热水与相变材料温差大，热传导效率高，相变材料温度迅速升高至相变点，从而发生相变并储存潜热。在相变过程中，材料内部形成显著的温度梯度和密度差，触发自然对流，使得热量重新分布，导致局部温度波

动。此时热水温度仍高于相变材料，但差异较小，热传导速率降低，相变材料温度缓慢上升，最终达到稳态。系统停止运行后，由于金属的高导热性和散热器与环境的温差，系统热量迅速散失。相变材料温度快速下降，约 2 小时后降至相变点并开始凝固，释放潜热，一定程度上延缓了温度下降速度。随着相变材料逐渐凝固，与外界温差减小，整体温度变化速率变慢。但由于相变材料热导率低，内部温度梯度变化增大，导致温度下降速度加快。

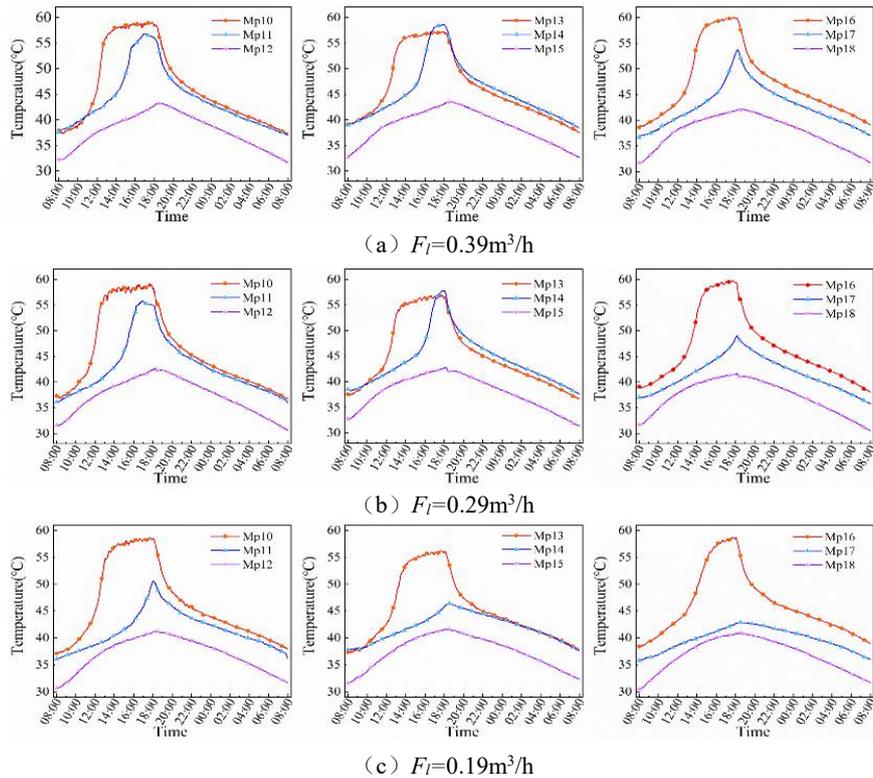


图 6 不同流量下相变散热器表面温度变化情况

Fig.6 Temperature variation on the surface of the phase change radiator under different flow rates

图 6 呈现了不同流量下散热器表面温度随时间变化的情况。结果表明，散热器表面温度的变化趋势与相变材料的温度变化明显不同。当流量为  $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$  时，散热器表面温度变化呈现出显著的区域差异。从散热器表面自上而下观察，较高位置的温度变化可分为三个阶段：急剧上升阶段、稳定阶段和迅速下降阶段。相比之下，较低位置的温度变化大致可分为上升阶段和下降阶段，且这两个阶段呈现出较为对称的趋势。

### 2.3 相变材料储热量变化

图 7 揭示了加热温度设定为  $75^\circ\text{C}$  时，不同热水流量下相变材料完全熔化时散热器系统的能量

变化情况。结果表明，当入水流量为  $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$  时，相变材料从开始升温到完全熔化耗时 3.5 小时。在此过程中，相变材料的储热量占热水释放热量的 49.84%，其中潜热占储热量的 78.29%。当入水流量降低至  $0.29 \text{ m}^3/\text{h}$  时，相变材料的升温 and 完全熔化时间延长至 4.0 小时，此时相变材料的储热量占热水释放热量的 54.92%，潜热占储热量的 78.09%。进一步降低入水流量至  $0.19 \text{ m}^3/\text{h}$  时，相变材料的熔化时间显著增加至 5.7 小时，此时相变材料的储热量占热水释放热量的 54.57%，潜热占储热量的 76.37%。在三种流量条件下，相变材料在相变过程中所吸收的潜热量基本一致；然而，随着进水流量

的减小,其换热效率降低,熔化所需时间逐渐延长。此外,由于夜间冷却效果不同,不同流量条件下相变材料在次日系统启动前的初始温度存在差异,从而导致完全熔化过程中吸收的显热量也有所不同。具体而言,流量越小,相变材料冷却后的初始温度越低,所需吸收的显热越多,因此相变完成时潜热在总吸热量中所占的比重相对较低。

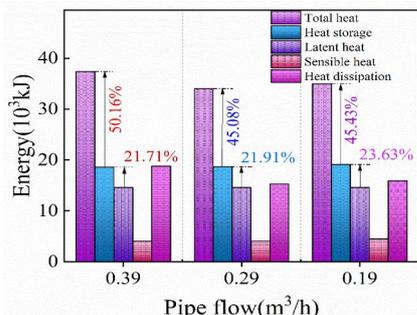


图 7 不同入口流量下相变材料的能量变化情况

Fig.7 Energy variation of phase change materials under different inlet flow rates

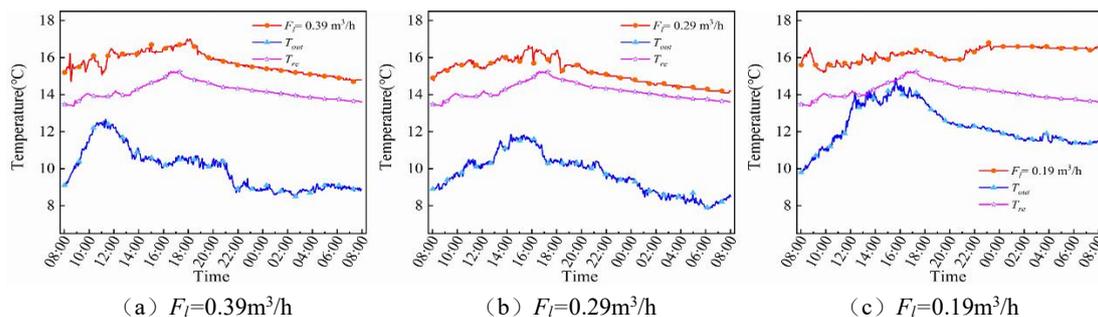


图 8 不同入口流量下室内温度变化情况

Fig.8 Temperature changes in the room under different air inlet flow rates

### 3 结论

本实验探讨了三种不同热水流量工况策略下,相变散热器与热水循环系统集成时的热性能表现。结果表明,不同供水流量下相变散热器的热性能表现存在明显差异。具体而言,流量越小,相变材料的换热效率越低,熔化速度越慢。此外,当流量分别为 0.39m³/h、0.29m³/h 和 0.19m³/h 时,相变散热器的出入口平均水温差异分别为 6.71℃、7.00℃和 7.76℃呈现出逐渐升高的趋势,而相变材料完全熔化时潜热占储热量的比重分别为 78.29%、78.08%和 76.37%,呈现出逐渐减小的趋势。此外,不同热水流量下,室内环境温度均高于室温参考值,表明相变散热器具有良好的供暖效果。

### 2.4 室内环境温度变化

图 8 展示了在加热温度设定为 75℃、室内平均参考温度为 14.18℃的条件下,不同热水流量实验过程中室内环境温度的变化情况。结果表明,相变散热器运行期间室内温度均高于参考值,说明其具有一定的供暖效果。具体来看,入水流量为 0.39m³/h 时,室外平均温度为 10.96℃,室内平均温度为 16.02℃,室内外温差为 5.06℃;当流量为 0.29m³/h 时,室外平均温度为 10.49℃,室内平均温度为 15.80℃,温差为 5.32℃;而在流量为 0.19m³/h 的条件下,室外平均温度为 12.81℃,室内平均温度为 15.91℃,温差为 3.10℃。需要指出的是,由于实验场所未实现完全保温,且室外气温存在一定波动,所测的室温数据不能完全评估相变散热器的实际供暖性能。

### 参考文献:

[1] Rathore P K S, Shukla S K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings[J]. Renewable energy, 2020,149:1300-1313.

[2] Zhou S, Bai F, Razaqpur G, et al. Effect of key parameters on the transient thermal performance of a building envelope with Trombe wall containing phase change material[J]. Energy and Buildings, 2023,284: 112879.

[3] Li C, Tang H. Phase change material window for dynamic energy flow regulation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024,189:113937.

(下转第 873 页)