

文章编号:0253-4339(2025)01-0032-14  
doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.01.032

热泵技术专栏

## 压缩式热泵耦合相变储热的研究进展

杨耿<sup>1</sup> 肖鑫<sup>1,2</sup> 王云峰<sup>2</sup>

(1 东华大学环境科学与工程学院 空气环境与建筑节能研究所 上海 201620; 2 云南省农村能源工程重点实验室 昆明 650500)

**摘要** 近年来,潜热储能热管理在热泵中的应用受到广泛关注。将相变蓄热技术与热泵结合可提升热泵性能及对可再生能源的利用率,但仍需进一步降本增效。综述了近年来压缩式热泵与相变材料耦合储热的研究进展,分类概述了不同应用场景下相变材料相关热物性的适用条件及其表征方法。概括了热泵储能系统性能的优化途径,包括相变材料选取原则与改良方法、储热器的优化设置思路和相关原理、系统的动态优化控制策略等。梯级相变蓄热型热泵在提升供给侧舒适性和提高可再生能源利用率等方面的突出表现,表明了梯级蓄热应用于热泵储能系统中的广阔前景,提出非共晶混合相变材料作为梯级蓄热备选材料的观点。指出需要总结和开发储能相变材料热物性可调控的新方法,使相变材料的选取和改良技术与梯级蓄热装置的热力学理论优化研究相适应,进一步提升相变蓄热型热泵的供热脱碳能力。

**关键词** 热泵储能;潜热储能;相变材料;梯级蓄热

中图分类号:TK02;TB657.5;TU831

文献标识码:A

## Research Progress of Compression Heat Pump Coupled with Heat Storage of Phase Change Materials

Yang Geng<sup>1</sup> Xiao Xin<sup>1,2</sup> Wang Yunfeng<sup>2</sup>

(1. Institute of Air Environment and Building Energy Conservation, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620, China; 2. Yunnan Provincial Rural Energy Engineering Key Laboratory, Kunming, 650550, China)

**Abstract** The application of latent thermal energy storage with heat pumps has been extensively studied in recent years. The combination of phase change heat storage and a heat pump can improve the performance of the heat pump and the utilization of renewable energy; however, further cost reduction and efficiency increase are required. Therefore, this study reviews the progress of heat pumps coupled with solid-liquid phase change materials and summarizes the applicable conditions and characterization methods for phase change materials applied to heat pumps. The optimization approaches for the performance of the heat pump system are summarized, including the selection and improvement of phase change materials, the optimal setting of the heat exchanger, and the dynamic optimization control strategy of the system. The outstanding performance of heat pumps with cascade heat storage in improving the supply-side comfort and utilization rate of renewable energy indicates the broad prospect of cascade heat storage being applied to heat pump energy storage systems. Herein, mixed, non-eutectic phase change materials are proposed as alternative materials for cascade heat storage. Notably, summarizing and developing new methods for adjusting the thermophysical properties of phase change materials for energy storage is necessary for adapting the selection and improvement of phase change materials to the optimization of the thermodynamic cycle of cascade heat storage devices and further improving the heating decarbonization ability of latent heat storage heat pumps.

**Keywords** heat pump energy storage; latent heat thermal storage; phase change material; cascade heat storage

在供热领域,热泵可以有效节约产自化石燃料燃烧的电能,从而减少硫化物和氮氧化物的污染以及温室气体的排放,被认为是供热脱碳的关键技术。据国际能源署跟踪统计,热泵目前仍只能满足全球建筑物供暖需求的约10%<sup>[1]</sup>。2021年全球用于供热的能源占据总能源消耗的约50%,而其中46%的能源用于建筑供暖和热水供应,可再生供热消耗同比增长超过

3.5%<sup>[2]</sup>。然而,热泵在利用低品位能源时存在时空不平衡问题。热能储存(thermal energy storage, TES)技术作为利用余热和可再生能源供热管理的重要解决方案,众多学者聚焦于热泵中集成TES技术的潜力。其本质是将蒸发器侧或冷凝侧的热能储存,按需为负荷侧供给热量。

集成TES装置的热泵系统储热形式目前主要分

为显热储能和潜热储能。常用水等显热蓄热介质在较宽的温度范围进行蓄/放热。但储热介质温度升高不利于热泵运行的稳定性<sup>[3]</sup>,且随着供热温度的升高或热源温度的降低间接导致压缩机的排气压力和功耗波动,热泵的性能均会出现不同程度的衰减<sup>[4]</sup>。而潜热蓄热原理是利用相变材料(phase change materials, PCM)在特定温度下的相态变化来储存能量。PCM 主要分为有机、无机、共晶和非共晶材料,本文主要关注为建筑供暖和热水生产的中低温(<100 °C)热泵,集成的材料以固液 PCM 为主。PCM 的高蓄热密度不仅可以减少蓄热单元的空间占用,而且可在较窄的温度范围内进行热泵需求侧管理,使 PCM 在热泵中的应用前景广阔。近年来,提高 TES 装置传热性能的课题一直是该领域的研究热点,主要集中于 TES 装置设计,包括热力学性能最优理论<sup>[5]</sup>、加装肋片<sup>[6]</sup>、设计尺寸与运行参数的多目标参数优化<sup>[7]</sup>和传热流体的流态<sup>[8]</sup>等。此外,单级潜热储能装置的传热流体(heat transfer fluid, HTF)流向温度的急剧下降导致相变热驱动力降低,PCM 的非一致性相变行为将会降低蓄热效率。而多个不同熔点的 PCM 模块呈梯级排布的梯级储热(cascade thermal storage, CTS)解决方案受到广泛关注。与单级 TES 装置相比,CTS 装置的优点在于工作温度范围更宽且 PCM 与 HTF 温差更均匀,能提高 PCM 的传热驱动力、充分利用 HTF 中的热能<sup>[9]</sup>、更快的蓄/放热过程<sup>[10]</sup>和实现热能的多重利用<sup>[11]</sup>。目前大多数关于 CTS 性能优化的研究基于确定的材料,对 CTS 装置的设计尺寸和运行参数进行多目标参数优化,但极大地降低了实际应用时储热集成的适用性和灵活性。从设计装置到材料的研究方法对 CTS 的构建具有较强的适应性和灵活性,关键在于 CTS 对材料相变温度呈梯级排布的要求。为了获得具有合适相变温度的 PCM,开发有效的方法来调节 PCM 的相变温度是必要的。常见的方法是将水合盐与其他无机物或有机物按一系列比例混合,从而形成水合盐基混合物。可将水合盐基混合物分为共晶和非共晶混合物。现阶段有较多研究报道了多元共晶和非共晶混合物对 PCM 熔化行为的改变,G. Baran 等<sup>[12]</sup>为潜热储能系统制备了一种相变点为 52.3 °C 的棕榈酸和硬脂酸的共晶混合物作为 PCM。Ling Ziye 等<sup>[13]</sup>为太阳能热水系统的潜热蓄热装置开发了共晶复合 PCM,实验表明质量分数为 35%~50%的  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  可与  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  形成共晶系,将  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  的熔点从 111 °C 调至 58 °C。但共晶混合物的共晶点测定方法成本高,耗时长,可供选择的相变温度单一<sup>[14]</sup>。然

而,非共晶复合 PCM 由于各组分占比的不同,凝固和熔化行为可在一定温度范围内发生改变,可供实际应用选择的相变温度范围更广,但如何保证其循环蓄/放热过程中性能的热可靠性是应用的重要环节。Fu Wanwan 等<sup>[14]</sup>在三水合乙酸钠(sodium acetate trihydrate, SAT)中加入甘氨酸形成非共晶混合物,实现了 48.34~58.38 °C 的系列相变温度调控,在 100 次循环蓄/放热实验后,相变范围无明显波动,相变焓仅下降了 6.9%。Jin Xin 等<sup>[15]</sup>为空气源热泵开发了以乙酰胺(acetamide, AC)作熔点改性剂的 SAT 非共晶 PCM,在 AC 不同添加量的复合 PCM 中实现了 42.8~53.0 °C 的系列相变温度调控,且通过增稠剂和成核剂的加入,有效解决了过冷和相分离问题,200 次循环蓄/放热的潜热损失仅为 7.4%。虽然已有较多研究报道了非共晶混合物对 PCM 熔化行为的改变,但少有研究将非共晶混合物作为 CTS 装置的备选材料。此外,如何有效描述 PCM 在固液相变过程中的自然对流传热效应<sup>[16]</sup>,对于数值模拟研究 PCM 的储热特性十分重要,特别是对蓄热装置底部传热不良区域的结构改进<sup>[17]</sup>。

目前关于 CTS 的 PCM 相关实验研究方向多数是从确定的材料出发,基于一定假设的梯级优化理论来优化设计 CTS 尺寸和排布。其中 PCM 选取缺乏对理论优化中关于材料物性假设的考虑,需要总结和开发新的方法,使 PCM 的选取和改良技术与 CTS 装置的热力学理论优化研究相适应。已有文献综述了 PCM 在热泵中的应用<sup>[18-19]</sup>,而关于 PCM 应用于热泵中相关热物性的适用条件、表征方法、性能改良材料及配比和系统性能优化途径鲜有全面综述。PCM 在压缩式热泵中的应用如图 1 所示,包括梯级蓄热优化原理和 PCM 选取与改良<sup>[15,20]</sup>、空气源热泵内集成<sup>[21]</sup>、地源热泵外集成<sup>[22]</sup>及太阳能热泵外集成<sup>[23]</sup>。本文从材料、蓄热装置和系统应用 3 个环节综述了相变储能热泵技术近年来的研究进展,阐明了相变材料选取原则与改良方法、储热器的优化设置思路和制定系统的动态优化控制策略的途径。

## 1 用于热泵系统的相变材料

### 1.1 应用特性

热泵根据工作原理主要分为吸收式和压缩式,本文主要关注压缩式热泵。压缩式热泵通常由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器构成,将 PCM 集成在不同换热器侧,其特定温度的相变行为和热物性参数对系统的性能影响起主导作用。热泵理论性能系数(coefficient of performance, COP)定义为<sup>[24]</sup>:

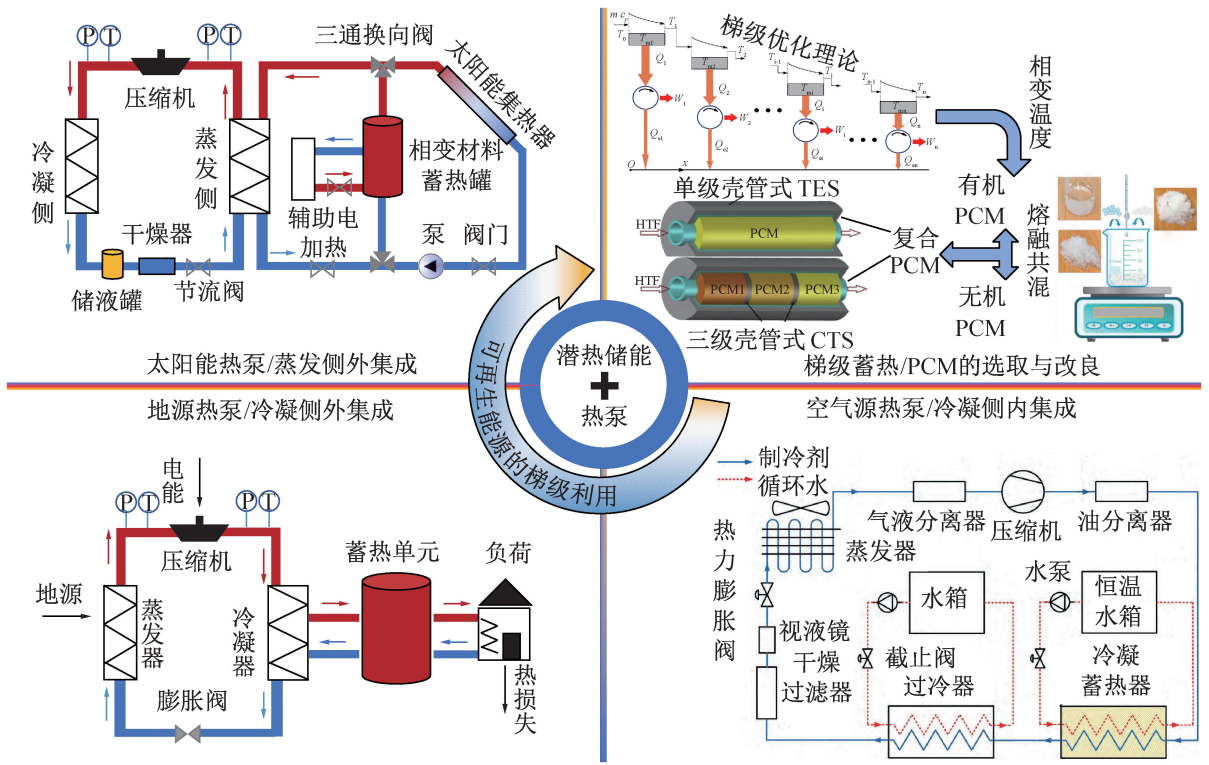


图 1 PCM 在压缩式热泵中的应用

Fig.1 Application of PCM in compressed heat pump

$$\begin{aligned}
 \text{COP} &= \frac{T_c}{T_c - T_v} = \frac{T_m + \Delta T_c}{T_m + \Delta T_c - (T_{\text{amb}} - \Delta T_v)} \\
 &= \frac{T_m + \Delta T_c}{T_m - T_{\text{amb}} + (\Delta T_c + \Delta T_v)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中:  $T_c$  为冷凝温度;  $T_v$  为蒸发温度;  $T_m$  为供热介质温度;  $\Delta T_c$  为冷凝温度与供热介质温差;  $T_{\text{amb}}$  为低品位热源温度;  $\Delta T_v$  为蒸发温度与低品位热源温差, 上述所有温度单位均为  $^{\circ}\text{C}$ 。若  $\Delta T_v$  固定, 理论 COP 会随着  $\Delta T_c$  的增加而减小。若 PCM 集成在冷凝器侧, 吸收冷凝器放热从而发生相变达到储热的目的, 其温度变化可忽略不计, 这使换热介质与冷凝器之间的温差保持较小, 从而提高系统 COP。此外, 若使用的 PCM 储存其他热源的热量集成于蒸发器侧, 为热泵在低温热源运行工况下进行补能, 或作为热泵逆循环除霜的辅助热源<sup>[25]</sup>。用于热泵系统的无机 PCM 具有潜热大、不可燃的特性, 但由于存在过冷和相分离的现象, 制约了其在需要循环使用的热泵系统中的应用。用于热泵系统的有机 PCM 有石蜡、乙二醇(聚合物)和脂肪酸等<sup>[26-27]</sup>。有机 PCM 物理化学稳定性好、无腐蚀等, 但大部分缺点为储能密度低、导热系数低、易燃、成本较高等。其中石蜡具有化学惰性, 在  $500^{\circ}\text{C}$  以下稳定, 熔融时体积变化小, 因此国内外学者对不同熔点和形态石蜡<sup>[28-30]</sup> 这类烷烃的混合物进行了大量研究。石蜡被用作 PCM 与太阳能集热器组

合, 用作生活热水加热<sup>[31]</sup>。Wu Jianghong 等<sup>[32]</sup> 使用膨胀石墨(expanded graphite, EG)改善石蜡的导热系数, 将 EG/石蜡复合 PCM 与换热器相结合应用于空气源热泵热水器。在热泵系统应用 PCM 实验研究的纯材料的热物性如表 1 所示, 复合 PCM 的热物性如表 2 所示。

## 1.2 热物性表征

PCM 在热泵系统中的应用离不开对材料的热物性表征, 其传热和储热能力决定着 TES 装置对热泵系统的热管理效果。为了提高 PCM 的储热效能、集成于热泵运行的灵活性和稳定性, 传统的方法是将具有高导热性的材料与纯 PCM 复合形成复合 PCM, 如 EG<sup>[32]</sup>、石墨烯<sup>[43-44]</sup>、泡沫金属<sup>[45-46]</sup> 等。复合 PCM 的制备原理有: 将微小或纳米级的高导热粒子分散至 PCM 中、将 PCM 渗透至高孔隙率和高导热系数的多孔结构中等。为增强 PCM 导热性, 可将 EG 压缩成石墨泡沫, 也可直接与液体 PCM 混合并浸渍以形成复合 PCM<sup>[44]</sup>。此外, 在多孔泡沫金属中浸渍 PCM 也是制备导热性能优异的复合 PCM 的有效方式<sup>[45]</sup>。常用的低温共熔法、物理吸附法是比较简易的制备方法, 特点是操作简单, 成本较低, 但缺点是制成的材料通常孔隙率较大, 由于接触热阻的存在, 试样的表面粗糙度会极大地影响后续热物性测量精度<sup>[46]</sup>。而真空浸渍法在制备石蜡-碳泡沫复合 PCM 中被证明十

表 1 用于热泵系统中的单一相变材料的热物理性质

Tab.1 Thermophysical properties of single phase change material used in a heat pump system

类型	相变材料	相变温度/℃	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	导热系数/[W/(m·K)]	相变潜热/(kJ/kg)
无机材料	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O <sup>[33]</sup>	29.9	1 710	0.57	190.0
石蜡类	石蜡 RT4 <sup>[28]</sup>	2.0~4.0	880(s)/770(l)	0.20	180.0
	石蜡 <sup>[29]</sup>	21.0	850	0.20	
	石蜡 C21H44 <sup>[30]</sup>	40.0	800	0.14	220.0
	石蜡 RT-44HC <sup>[34]</sup>	43.0	860(s)/760(l)	0.20	255.0
	石蜡(P-116) <sup>[35]</sup>	44.0	817	0.16	226.0
	石蜡 <sup>[31]</sup>	53.5	810(s)/790(l)	0.21	266.0
	正癸酸 <sup>[36]</sup>	31.6	878		155.4
有机材料	聚乙二醇 6000 <sup>[37]</sup>	52.0~66.0			
	硬脂酸 <sup>[35]</sup>	58.1	965	0.29	169.0

注:s 代表固态,l 代表液态。

表 2 用于热泵系统中的复合改良相变材料的热物理性质

Tab.2 Thermophysical properties of composite modified phase change materials used in heat pump systems

复合相变材料	相变温度/℃	导热系数/[W/(m·K)]	相变潜热/(kJ/kg)
35%月桂酸/65%癸酸 <sup>[38]</sup>	19.8	0.14	133.2
60%癸酸/24%月桂酸/10%SiO <sub>2</sub> /6% EG <sup>[36]</sup>		1.53	109.2
33.8%十二酸/41.1%十四醇/20.1%十六醇/5% EG <sup>[39]</sup>	26.1		172.2
80%石蜡/20% EG <sup>[40]</sup>	27.3	9.80	156.6
FCA/环氧烷 <sup>[26]</sup>	33.9~35.8	0.48~0.53	211.7
SAT/AC 复合物 <sup>[15]</sup>	47.8		219.8
SAT/KCl 复合物 <sup>[24]</sup>	47.8		242.0
10%癸酸/90%62#石蜡 <sup>[41]</sup>	29.6~59.0		192.5
75%石蜡/25% EG <sup>[32]</sup>	52.0~54.0	5.38	140.0
36%硬脂酸/64%棕榈酸 <sup>[12]</sup>	52.3	0.28	181.7
41%MgCl <sub>2</sub> ·(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> /59%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> <sup>[42]</sup>	40.0~65.0	0.60	

分有效<sup>[47]</sup>,浸渍率接近 100%。多孔结构浸渍不充分导致微孔内气泡的残留,这将会降低复合 PCM 的传热性能。因此,对复合 PCM 的微观形貌分析是必要的。可使用扫描电子显微镜,在微观层面上直观显示复合 PCM 的结合情况。

由表 1 可知,单一 PCM 的导热系数较低,如石蜡 RT-44HC<sup>[34]</sup>导热系数仅为 0.20 W/(m·K)。在蓄热热泵的蓄能装置中,复合 PCM 的导热系数直接影响 PCM 熔化和凝固所需的温度梯度以及响应时间,低导热系数必然导致蓄/放热的周期过长。针对壳管式潜热储能装置,忽略相变过程的导热系数变化,在蓄热阶段管壁沿外径方向的传热过程可看作半无限大

物体非稳态导热,其热渗透层与热扩散率和特征时间乘积的几何均值呈线性相关。在保证最外层 PCM 蓄热有效性的前提下,相变材料的导热系数对其厚度进行了一定的限制,即存在最大值。其他形式的蓄热装置在设计时仍应当考虑 PCM 物性参数,进行参数优化设计。为了量化分析复合 PCM 导热性能优劣,导热系数是必要的测量物理量之一。常用的表征方法有:瞬态平面源法<sup>[48]</sup>、热线法<sup>[49]</sup>、闪光法<sup>[50]</sup>等。此外,添加各种高导热性的材料无疑会减少单位体积下 PCM 的占比,以损失部分相变潜热量为代价来提升 PCM 导热系数,进而减小其储热密度和储热量。因此,导热系数的改良有一定限度,需要保证复合后的

PCM 具有可观的相变潜热,保留 PCM 在缩减储热容积的优势。

探明 PCM 相变点的目的是让 PCM 相变点与系统 HTF 的工作温度相匹配。研究表明,为了使 PCM 在系统循环中发生全相变,蓄热热泵 HTF 在加热过程中的工作温度应高于 PCM 的熔化温度。表征 PCM 的相变点和相变潜热常用差示扫描量热法。如表 1 和表 2 列出的 PCM 物性参数,大多数的无机盐

类 PCM 的相变潜热较有机类 PCM 要高。但无机盐类 PCM 比有机类 PCM 存在较大的过冷现象,即凝固点小于熔点的现象。这将导致传热过程温度变化滞后,使系统无法在预设的温度下正常放热。消除或减少过冷最常用方法是向 PCM 中添加成核剂以降低过冷度。石墨烯和硼砂是常用的成核剂。这类材料具有用量小、效率高的特点。表 3 总结了部分 PCM 应用时的过冷度和熔点调控方法的相关研究。

表 3 用于热泵系统中的相变材料的过冷度和熔点调控方法

Tab.3 Methods for controlling the supercooling and melting temperature of phase change materials in heat pump systems

作者	材料组成、熔点和过冷度	过冷度改善方法及材料	相变点改性方法及材料	调控效果
Jin Xin 等 <sup>[15]</sup>	SAT 58.0 °C >30.0 °C	4%十二水磷酸氢二钠 作成核剂	10%的乙酰胺 非共晶混合	相变点从 53.1 °C 降至 42.8 °C, 200 次冷循环 过冷度近乎消除
刘旋等 <sup>[33]</sup>	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 29.9 °C 21.1 °C	10%EG、2%SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O		过冷度降至 2 °C 以内
胡小东等 <sup>[40]</sup>	石蜡 28.4 °C 1.5 °C		20% EG	相变点降至 27.3 °C, 过冷度降低 0.6 °C
Li Minqi 等 <sup>[51]</sup>	SAT 58.0 °C >30.0 °C	1.5%十二水磷酸二钠 作成核剂	8%KCl 和 3%尿素为 熔点改性材料	相变点为 47.8 °C 过冷度降至 2.8 °C
G. Baran 等 <sup>[12]</sup>	64.2%棕榈酸/ 35.8%硬脂酸		二元体系共晶	共晶相变点 52.3 °C
C. Kutlu 等 <sup>[52]</sup>	SAT 58.0 °C >30.0 °C	采用电触发装置利用 过冷度特性		电触发结晶 20 s 内温度从 20.0 °C 升至 56.4 °C
杜文清等 <sup>[53]</sup>	81%癸酸/ 19%石蜡		二元体系共晶	共晶相变点 27.4 °C

在应对 PCM 过冷度这一特性上,C. Kutlu 等<sup>[52]</sup>认为合理利用 PCM 的过冷度可减少储能损失,通过在过冷 SAT 储存单元设置电触发器,实现可控的结晶和熔化。对比之前添加成核剂改性 PCM 的研究,这种电触发机制提升了带有过冷度的 PCM 在蓄热热泵中的适用性,且特别适用于长期储热的情况。除了电触发的方法以外,控制 PCM 结晶来实现灵活蓄/放热的方法还包括冲击振动<sup>[54]</sup>、局部冷却<sup>[55]</sup>、注入气泡<sup>[56]</sup>等,但电触发具有低成本、简单、易实现自动化的优势,有望在未来实现长期储热的灵活控制。另一种相变点调控方法是混合不同相变点的 PCM 来形成(准)共晶系 PCM<sup>[57]</sup>。(准)共晶系 PCM 优势在于:诸如烷酸类等有机物以共晶点比例混合后相变介

质性能稳定,具有稳定的相变点和相变潜热,应用于蓄热热泵中可以有效防止封装后的填料在循环相变中出现相分离和分布不均的现象。如表 3 所示,G. Baran 等<sup>[12]</sup>用不同比例的棕榈酸和硬脂酸制备了一系列二元体系,结果显示棕榈酸和硬脂酸的二元体系以质量比 64.2 : 35.8 混合形成共晶。杜文清等<sup>[53]</sup>研发的二元共晶 PCM 在 500 次结晶循环中相变点的最大偏差为 1.46%,显示出共晶 PCM 具有可靠的循环储热潜力。J. P. Da Cunha 等<sup>[42]</sup>实验制备了质量分数为 41%的六水硝酸镁和六水氯化镁共晶混合物,其能量密度是同体积水的近 3 倍。PCM 作为蓄热材料应用于热泵系统中,连续的熔化和凝固需要 PCM 的化学成分保持稳定,其稳定性优劣是决定

能否应用于实际热泵系统的关键,这也是关于非共晶 PCM 需要表征的重要环节。对于 PCM 稳定性的评价内容主要包括热稳定性、化学稳定性、化学相容性和循环稳定性。材料的热稳定性采用热重分析法测量,通过分析热重曲线,得出材料不同温度下的质量变化。G. A. Lane<sup>[58]</sup>指出石蜡暴露在空气中会缓慢氧化,因此需要封装容器。它们通常与所有的金属容器兼容,但会令一些塑料容器变软。对 PCM 的热稳定性表征对封装容器的选择和设计具有指导意义。PCM 化学相容性主要采用傅里叶变换红外光谱技术来表征,循环稳定性分析主要是将 PCM 重复进行加热冷却,相变点与相变潜热变化情况仍然可采用差示扫描量热仪分析。

## 2 热泵储能装置

在热泵储能系统中,除了选择热物性合适的 PCM 备受关注以外,PCM 的 TES 装置的结构组成以及与热泵系统匹配协调也是国内外学者研究的热点。对热泵的不同应用场合, TES 装置的集成形式和部位各异。热泵生活热水供应系统负荷主要集中于早和晚, TES 装置蓄热的时间约为 8 h。此外,为实现蓄热热泵“谷时”电能的利用,需将 TES 装置集成在冷凝器侧,同时热量需求对装置的容积和包覆 PCM 的厚度进行了限定。对于传统的空气源热泵供暖场景,热泵系统需要考虑周期性的切换循环模式来进行除霜,将 TES 置于蒸发器侧,可在逆循环除霜时充当辅助热源。有研究将 TES 装置集成于冷凝器出口,用于回收离开冷凝器的制冷剂中所含的显热,通过内置的三通阀改进逆循环进行除霜<sup>[59]</sup>。两种除霜方式对 PCM 熔点的要求范围不同,这根据不同制冷剂和室内设定温度范围与地区的差异进行具体分析。针对集成低品位热源的热泵系统,如太阳能热泵干燥技术,则是侧重对分散性太阳能辐射热的收集,通常将 TES 装置集成在蒸发器侧,在日落后作为热泵的辅助热源。该场景下 PCM 的相变点要求与集热器的出口水温进行匹配。 TES 装置与热泵集成分内集成和外集成两种形式,对一体式热泵机组,内置的蒸发器和冷凝器与外部水循环系统进行热量交换。 TES 装置的外集成形成 PCM—水换热器,这与集成在机组内部形成 PCM—制冷剂换热器的要求不同,压缩管道多为铜管, TES 装置的集成应考虑对集成部位制冷剂压降的影响<sup>[38]</sup>、对管道的压力和腐蚀情况、是否用分隔构件等。 TES 装置按照耦合部位的不同主要分 3 种形式:带 PCM 的组合型换热器、填充 PCM 的蓄热罐和热泵源侧的 PCM 集成。

M. B. Dominick 等<sup>[28]</sup>设计了一种以石蜡 RT4 为 PCM 的蒸发器 TES 模块,研究了该模块的 PCM、制冷剂 and HTF 通道的不同排列对热交换器性能的影响, TES1 和 TES2 组成如图 2 所示, TES3 与 TES2 区别是将制冷剂管路直接叠置于传热流体管路上方。实验表明,通道的不同排列会影响 TES 模块和热交

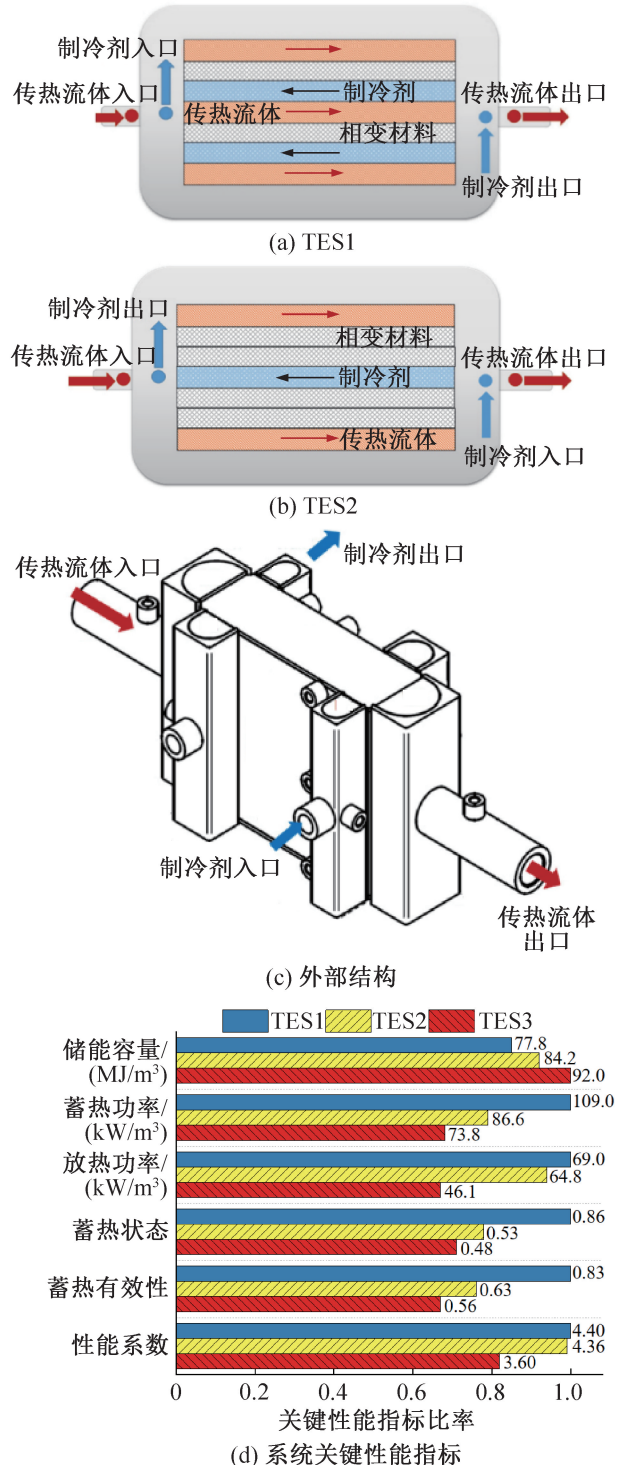
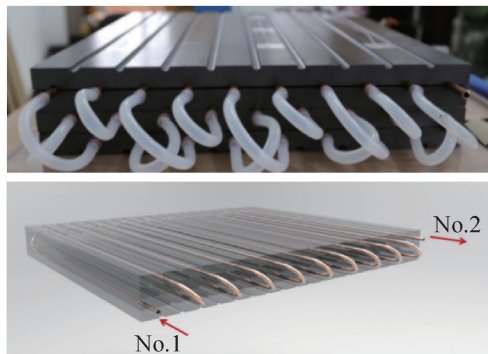


图 2 蒸发器-TES 模块的组成及其性能<sup>[28]</sup>

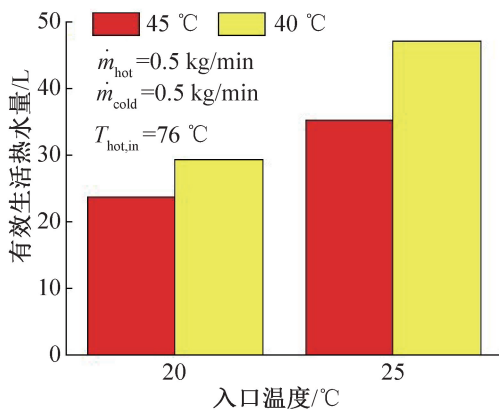
Fig.2 Composition and performance of the evaporator-TES module<sup>[28]</sup>

换器模块的性能,其中, TES2 各项性能指标较为适中。

Wu Jianghong 等<sup>[32]</sup>设计了如图 3 所示的 EG/石蜡热交换器,对空气源热泵热水器中冷水从冷凝器吸收热量的过程进行了模拟。实验中入口温度与有效生活热水量(温度高于 45.0 °C)呈正相关,而流速对其影响相反。此外,出口侧的热量利用不足是相变换热器的最大性能弱点。



(a) 外形图



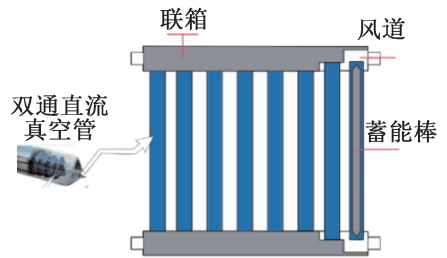
(b) 不同流量下有效生活热水量的变化

图 3 EG/石蜡热交换器<sup>[32]</sup>

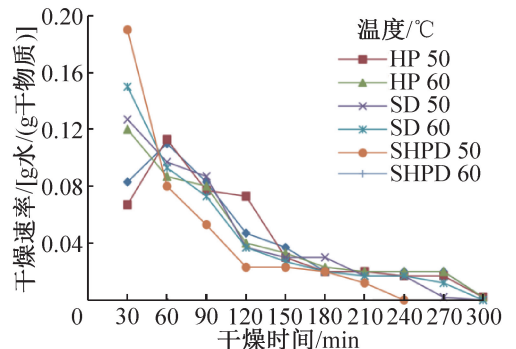
Fig.3 EG/paraffin heat exchanger<sup>[32]</sup>

传统的蓄热罐以蓄热水箱的形式被安置于热泵的冷凝器侧,在热泵供热系统中起着缓冲水温、平衡供需的作用。目前完全用 PCM 替代水箱的做法在经济性等方面还存在挑战,其较低的蓄热速率无法完全取代水箱对循环工质(通常为水)缓冲作用。因此,PCM 常被集成到集热水箱中或与水箱分体连接使用。Zou Deqiu 等<sup>[34]</sup>提出了一种使用水-石蜡 RT-44HC 储热罐,为了增加有效传热面积将冷凝器盘管缠绕在 PCM 层中使其充分接触,使 PCM 蓄热罐储热量增加了 14%,运行时间缩短了 13%,提升了供热水温的均匀性和系统 COP。以太阳光为代表的可再生能源常被作为热泵源侧对象,利用 PCM 将白天辐射较强时的太阳能贮存起来,作为夜晚或阴天热泵的低品位补充热源,可解决热泵供热效率过低的问题。吴

薇等<sup>[60]</sup>设计了一种蓄热型太阳能热泵热水器系统,以正葵酸作为真空集热管填充材料,对该系统进行能耗分析,分别与常见的生活热水供应方式的折合电价进行了对比。该系统比电热水器节能 84.37%,比空气源热泵热水器节能 22.81%,而初投资仅比空气源热泵热水器高 30.43%。此外,耦合 PCM 的太阳能热泵系统蓄热技术分为光伏和光热技术,通常集热器的流体出口温度随太阳辐射的增强而升高,基于此波动热源的特性,如何对其集成后的热量进行调度管理是提高热泵性能的关键。朱传辉等<sup>[61]</sup>将带 PCM 蓄能芯的真空管与热泵集成,设计了一种用于太阳能热泵干燥的集热器装置,如图 4 所示。在干燥温度设置为 50.0 °C 和 60.0 °C、风速为 2~3 m/s 条件下,对干燥室运行工况的温度分布及风速分布进行模拟分析,太阳能供热量占比约为 66%,COP 可达 3.5。



(a) 集热器外形



(b) 不同模式下香菇逐时干燥速率

图 4 空气源热泵耦合 PCM 太阳集热器<sup>[61]</sup>

Fig.4 Air-source heat pump coupled PCM solar collector<sup>[61]</sup>

与太阳能集热效率随进口温度升高而下降类似,光伏发电效率随工作温度升高而线性下降是太阳能利用效率不足的主要问题。Liu Wenjie 等<sup>[62]</sup>将光伏和光热技术结合,对提出的一种直接膨胀式光伏和光热热泵系统进行了实验研究,通过工作流体流经冷却组件(吹胀板)带走光伏组件产生的余热来提高发电效率,同时集热器作为热泵机组的蒸发器用于回收余热。结果表明,集热模块面积与压缩机排量比值越大,COP 越高,但集热效果下降,比单一的光伏或光热系统对太阳能的综合利用率提升 17%。该项研究

为 PCM 在光伏和光热热泵技术的集成提供了新的思路,PCM 模块组合光电模块协同作用,提高太阳能的综合利用率。

在 HTF 与 PCM 温差较大的情形,沿流动方向上 HTF 温度的急剧下降导致相变热驱动力降低,这将降低 TES 蓄/放热效率,不利于热泵性能的提升。为了解决单级 TES 装置的传热驱动力降低的问题, M. M. Farid 等<sup>[63]</sup>最早提出 CTS 的概念,被用于增加系统储存容量和储存不同温度范围的热能。国内外学者对 CTS 装置的性能分析和数值预测已开展了多项研究。Xu H. J. 等<sup>[64]</sup>基于热力学原理建立了梯级蓄热系统模型,并对 CTS 系统的 PCM 温度、级数、HTF 温度等参数进行了优化,结果显示,系统级数布置小于临界级数可提高热效率,对于固定热量的入口优化,级数应大于临界级数,但这将增加系统复杂性和运行成本。R. V. Seeniraj 等<sup>[65]</sup>基于焓法对具有翅片管和 CTS 的管壳式换热器的热性能进行了数值模拟,得出单级和多级 PCM 换热器的出口 HTF 无因次温度随无因次时间的变化特性,如图 5 所示。

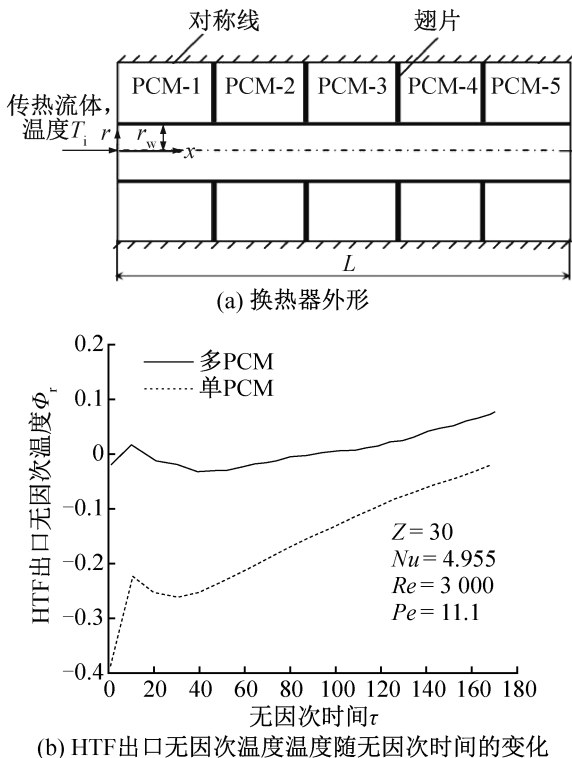


图 5 CTS 管壳式换热器<sup>[65]</sup>

Fig.5 CTS shell and tube heat exchangers<sup>[65]</sup>

与单一 PCM 蓄热模块相比,沿流动方向提供了较高的 HTF 和 PCM 的传热温差,使换热出口温度均匀性得到提升,显著提高了储热性能。Guo Weimin 等<sup>[66]</sup>数值研究了不同 PCM 胶囊体积比下梯级蓄热系统的平均传热速率,发现 3 种不同 PCM 存在最优

体积比。本文对 CTS 装置的优化设置及其系统优化研究总结了如下原则:

1) 根据不同的优化思路采用不同的优化模型,一般以焓(最大)优化或熵(最小)的条件来对各自目标优化函数进行数值求解,从而确定设计参数的有效范围,结合用户侧需求和填充的 PCM 的相变点和导热系数等物性参数指导 CTS 装置的设计。

2) 由于理论计算大多数是假定 PCM 的物性参数进行计算,通过确定的 CTS 装置可求得 PCM 的梯级最优排布,而 PCM 的热物性一般非假设般处于理论最优状态,这也是目前 CTS 装置材料选取和改性的关键。在确定的设计尺寸和流动条件下,理论计算得到相变点梯级排布的相变温度,用于指导材料选取和改性。对于现存的热泵系统,该方法具有较强的适应性和灵活性。

3) 另一种思路是依据确定种类的 PCM,对 CTS 装置的级数、级面积和容积等设计参数与系统运行参数进行多目标参数的优化匹配研究。

### 3 热泵储能系统

热泵储能系统的设计、运行和维护需要依靠系统模拟。一方面通过动态的数据实时交互可以缩短开发周期与降低成本,另一方面模型与实物系统可以相互验证,特别是热泵储能在不同地区和不同用途的设计中显得尤为重要。用户侧冷热源取用(如热水、空调等)的需求及其舒适性的保证关键在冷库出水温度动态变化的优化控制。在耦合 PCM 的热泵动态运行中,优化控制难点在于蓄热装置进、出水温度与压缩机工况以及循环工质流速有关。如何合理地控制和匹配这些时变参量是热泵系统 COP 优化的研究方向。表 4 总结了部分梯级热泵储能系统的模拟和实验方法。

Jin Xin 等<sup>[15]</sup>为提升空气源热泵系统 COP,研制了测试包含不同配比的 SAT/AC 复合 PCM,将其封装在潜热储罐中与储热水箱串联使用,如图 6 所示。实验结果表明,当流量为 10~38 g/s 时,热泵的 COP 从 2.27 增至 3.12;系统的整体效率也呈上升趋势,COP 从 2.13 提升至 2.71。

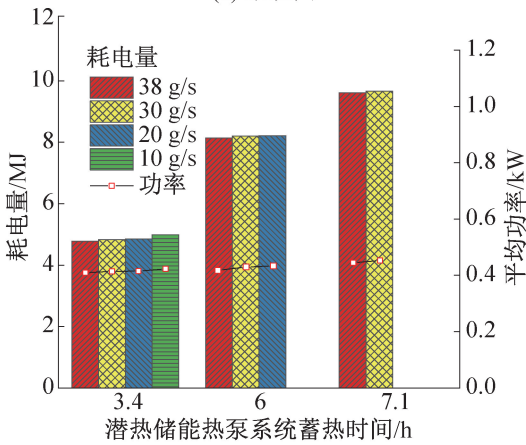
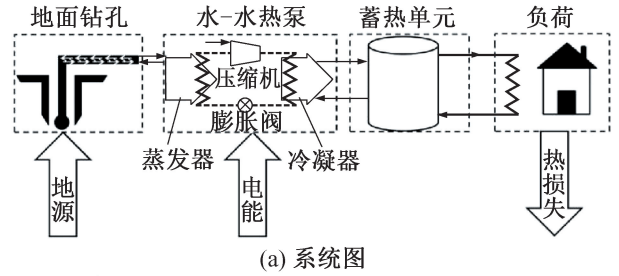
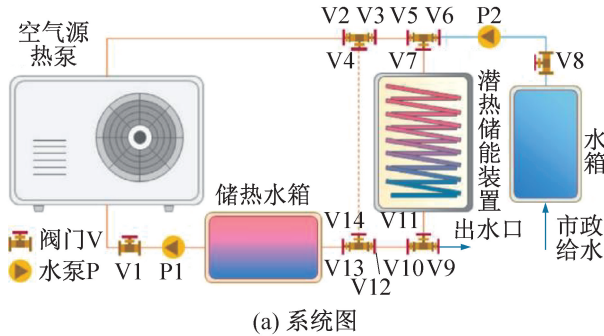
为达到供暖系统在用电高峰期实现负载转移的目的,R. Hirmiz 等<sup>[22]</sup>构建了蓄热热泵供暖系统的验证数值模型,如图 7 所示。该潜热储能罐的储热量是纯水储罐的 3 倍以上,6 h 的用电负荷转移需要 2.5 m<sup>3</sup> 的水量,从系统优化层面上揭示了储罐容量与实际应用需求的联系。

C. Kutlu 等<sup>[52]</sup>对太阳能辅助热泵与 PCM 储热

表 4 梯级热泵储能系统的模拟和实验方法

Tab.4 Simulation and experimental methods of cascade heat pump energy storage system

研究类型	作者	系统用途	TES 模拟或实验方法	热泵系统模拟或实验方法
数值模拟	R. Hirmi 等 <sup>[22]</sup>	转移供暖系统负荷	TRNSYS 中(修改的 Type4a)混合水-PCM 水箱	TRNSYS 中 Type927 组件单级水-水热泵模型
实验、模拟	Zhu Chuanhui 等 <sup>[23]</sup>	建筑采暖,峰谷电能利用	TRNSYS 中 Type1270 模型	TRNSYS 系统仿真
数值模拟	C. Kutlu 等 <sup>[52]</sup>	太阳能热泵供暖	基于 MATLAB 建立的 PCM 储热罐数值模型	使用 REFPROP 获取制冷剂的物理特性
实验	Yu Zhibin <sup>[59]</sup>	回收离开冷凝器制冷剂中的显热除霜	采用水箱	搭建热泵实验台
数值模拟	Huang Haotian 等 <sup>[68]</sup>	太阳能供热系统源侧热管理	基于 MATLAB 建立的 PCM 蓄热单元数值模型	通过 Type155 实现数值模型和基于 TRNSYS 搭建的系统的联合仿真



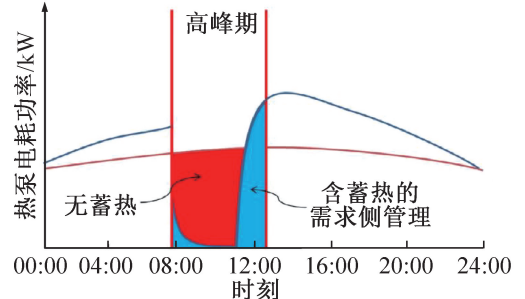
(b) 不同流速下耗电量和平均功率与蓄热时长的关系

图 6 热泵与潜热 TES 结合<sup>[15]</sup>

Fig.6 Heat pump combined with latent heat TES<sup>[15]</sup>

单元的耦合进行了模拟研究,如图 8 所示。采用 12 L/min 的循环流量下,热水输送温度保持高于 43 ℃,且对于给定的供热截面,PCM 水箱和建筑物之间的水循环对输送温度无显著影响,使该系统有适应天气波动的潜力。

Yu Zhibin 等<sup>[59]</sup>基于 Evans-Perkins 热泵循环,设计了一种集成蓄热器到蒸气压缩式循环中的柔性热泵系统,如图 9 所示,集成的蓄热器用来回收离开冷凝器的制冷剂中所含的显热。这种灵活的热泵循环



(b) 用电高峰期有无蓄热系统的耗电量

图 7 冷凝器侧集成潜热储能罐的热泵供暖系统<sup>[22]</sup>

Fig.7 Heat pump heating system of latent heat storage tank is integrated on the condenser side<sup>[22]</sup>

可为 PCM 等蓄热材料提供结合位点,允许低品位热源和外部余热回收的进一步集成,为热泵供热和除霜提供辅助热源,提升系统整体 COP。

曲明璐等<sup>[67]</sup>研究了复叠式空气源热泵在相变蓄能除霜循环中,消耗的相变蓄热器、系统管路和压缩机所提供热量的占比。在温湿度分别为 -9 ℃ 和 85%,结霜量为 1.5 kg 的室外工况下,相变蓄热器可提供 45.2% 的除霜能耗。为提高供热系统对太阳能的利用效率,Huang Haotian 等<sup>[68]</sup>研究了 PCM 蓄热罐与水箱在不同系统配置下对太阳能供热系统效率的影响,系统配置如图 10 所示。结果表明,串联系统的

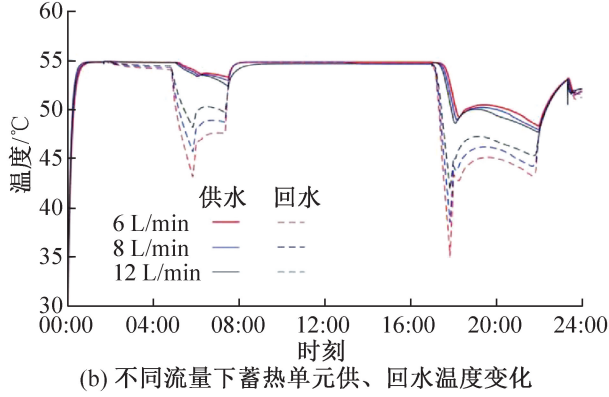
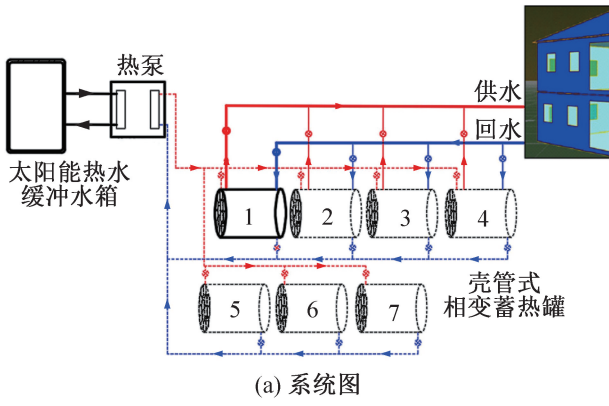


图 8 太阳能辅助热泵耦合 PCM 储热系统<sup>[52]</sup>  
Fig.8 Solar-assisted heat pump coupled PCM heat storage system<sup>[52]</sup>

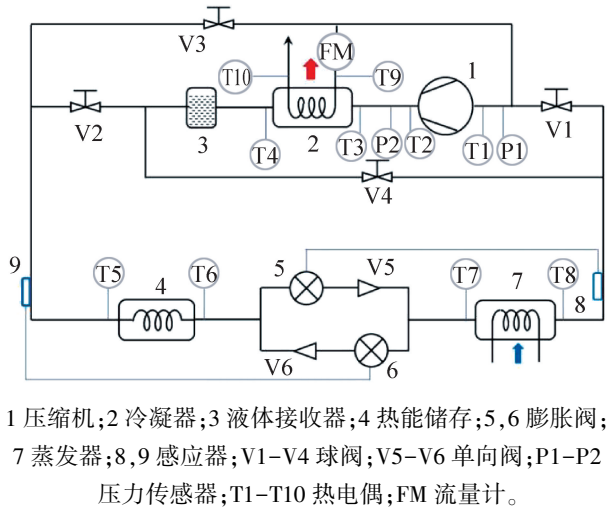


图 9 蒸气压缩式柔性热泵循环原理<sup>[59]</sup>  
Fig.9 Principle of steam compression flexible heat pump cycle<sup>[59]</sup>

太阳能利用率比单水箱系统提高约 30%，比并联系统提高 5%~12%。其中 PCM 蓄热罐与水箱的串联连接可以降低集热器进口温度，是提高太阳能集热效率的主要因素，同时强化了系统对供热温度的平衡性。

Zhu Chuanhui 等<sup>[23]</sup>在太阳供热热泵系统源侧集

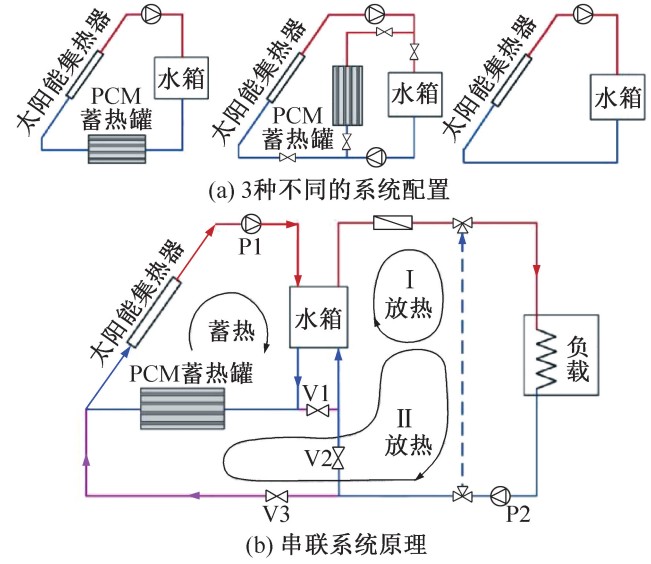


图 10 太阳能潜热储能供热系统<sup>[68]</sup>  
Fig.10 Solar latent heat energy storage heating system<sup>[68]</sup>

成了相变储热罐，如图 11 所示，并对该系统进行了实验和 TRNSYS 动态仿真研究。结果表明，该系统的供热用电量约为无储热罐热泵供热系统的 72.8%，日运行成本降至无储热罐热泵供热系统的 41.2%，系统太阳能供热占比可达 27.2%。

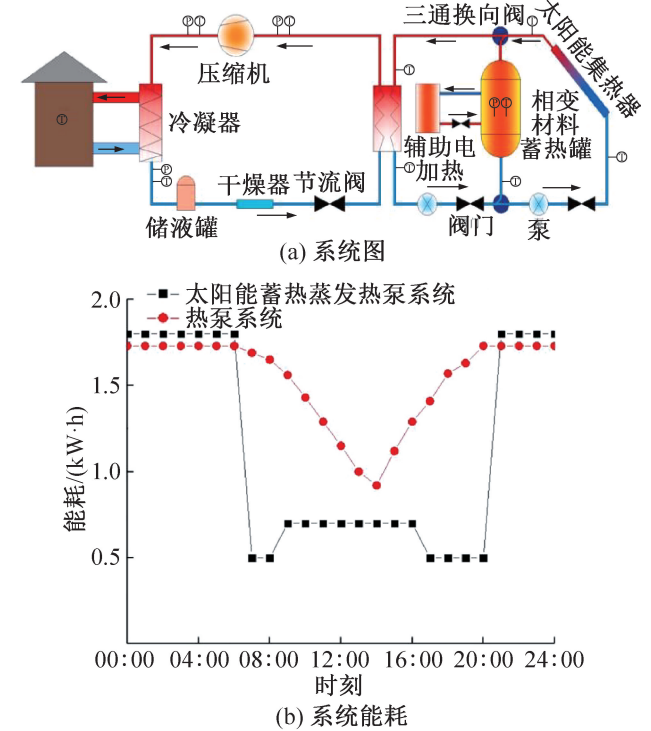


图 11 蒸发侧蓄热的太阳能热泵系统<sup>[23]</sup>  
Fig.11 Solar heat pump system for evaporation side heat storage<sup>[23]</sup>

为优化蓄热热泵能源储存效率，Liu Fang 等<sup>[69]</sup>将蓄能过程控制参数恒定，保持压缩频率和热水流量

恒定,并基于实验制定膨胀阀开度和冷水流量与 COP 的经验相关性的动态控制策略。杨鹤等<sup>[70]</sup>建立了热泵储能系统的数值模型并进行热力学分析,采用多目标优化遗传算法对系统的状态点参数进行数值优化,得到往返效率与储能密度和功率密度的关系,表明储能密度和功率密度最优值的选择存在折中。此外,在大规模应用 PCM 模块的同时应考虑成本控制,以提高经济适用性。结合本文对材料、蓄热装置和系统集成形式的综述,可考虑从材料到系统运行策略制定环节的互相适应并形成闭环的全局优化。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本文综述了压缩式热泵与 PCM 耦合储热的研究进展,分类概述了不同应用场景下相变材料相关热物性的适用条件及其表征方法,总结了热泵储能系统性能的优化途径,得到如下结论:

1) 各项研究表明将蓄热技术与热泵结合可提升热泵的性能,PCM 储热密度高,温度波动范围小,在热泵供热管理具有较大优势,利用复合 PCM 对改善热泵系统性能有广阔的前景。

2) 不同场合对 PCM 换热器的蓄/放热周期、集成部位的应用要求为 PCM 选取和蓄热集成方式指明了方向。对 PCM 相变点和过冷特性的理论优化要求可为 PCM 的制备和改良提供理论依据,需要对 PCM 各项物性参数进行表征。

3) 蓄热型热泵系统的优化途径包括寻找和改良高性价比的 PCM、蓄热器结构的优化设置、系统的布置及其动态优化控制策略。目前 PCM 选取缺乏对理论优化中关于材料物性假设的考虑,需要总结和开发新的方法,使 PCM 的选取和改良技术与 CTS 装置的热力学理论优化研究相适应。

### 4.2 展望

目前,在实现梯级蓄热技术在热泵系统的集成中,非共晶混合 PCM 的相关研究显示出其作为备选材料的潜力,有必要对其进行数值和实验研究。未来值得研究的方向主要包括:

1) 在提高 PCM 导热性和稳定性的同时,探明兼顾其合适的相变点、可观的储热量、较低的过冷度、稳定的热循环性能的方法,以满足多样化需求。而非共晶混合 PCM 展现的较共晶混合 PCM 大的相变温度范围的特点,可对其进一步研究。此外,对于严寒地带热泵系统长期储热的场景区别于短期储热,长期存放对 PCM 储热稳定性的要求需要重新处理并利用 PCM 的过冷度,需要开发除了低温触发之外的新的

放热触发方式。

2) CTS 装置作为比单级 TES 装置工作温度范围更宽、HTF 温差更均匀、蓄/放热效率更高的潜热储能集成方式,是热泵储能系统未来很有前景的研究方向。可基于已有的 CTS 装置的热力学优化原理计算适配参数范围,沿该思路与现有的 PCM 改性方法结合,可探明合适的储能基材和性能改良材料以及合适的配比,为制备性能稳定高效的 PCM 提供指导。

3) 热泵系统耦合 TES 装置的优化匹配还缺乏定量研究。可基于有限元分析软件的流固耦合传热接口,对 TES 装置运行工况进行数值仿真,得到其温度响应特性。该特性作为耦合热泵运行动态仿真的重要环节,是制定优化控制策略的重要途径。未来在系统的动态仿真和实验方面还有待进一步研究。

本文受上海市科委浦江人才计划(20PJ1400200),云南省农村能源工程重点实验室开放基金项目(2022KF001),中央高校基本科研业务费专项基金(2232021D-11)资助。(The project was supported by Shanghai Pujiang Program (No. 20PJ1400200), Yunnan Provincial Rural Energy Engineering Key Laboratory (No. 2022KF001), Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. 2232021D-11).)

### 参考文献

- [1] IEA. Heat pumps[EB/OL]. (2023-07-11)[2023-12-06]. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps>.
- [2] IEA. Heating[EB/OL]. (2023-07-11)[2023-12-06]. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heating>.
- [3] HEINZ A, GRITZER F, THÜR A. The effect of using a desuperheater in an air-to-water heat pump system supplying a multi-family building[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104002.
- [4] LI Jin, ZHANG Ying, LI Ming, et al. Study on heating performance of solar-assisted heat pump drying system under large temperature difference [J]. Solar Energy, 2021, 229: 148-161.
- [5] CHENG Xiwen, ZHAI Xiaoqiang. Thermal performance analysis and optimization of a cascaded packed bed cool thermal energy storage unit using multiple phase change materials[J]. Applied Energy, 2018, 215: 566-576.
- [6] KARAMI R, KAMKARI B. Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 45-60.
- [7] GAO Long, DONG Liwei, LIU Zhongze, et al. Thermal performance analysis and multi-objective optimization of thermal energy storage unit with cascaded packed bed in a solar heating system [J]. Applied Thermal Engineering,

- 2023, 219: 119416.
- [8] RADOUANE E, HAMID E Q. Numerical study of a shell-and-tube latent thermal energy storage unit heated by laminar pulsed fluid flow[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2017, 38(17): 1466–1480.
- [9] SHABGARD H, ROBAK C W, BERGMAN T L, et al. Heat transfer and exergy analysis of cascaded latent heat storage with gravity-assisted heat pipes for concentrating solar power applications[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(3): 816–830.
- [10] XU H J, ZHAO C Y. Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change materials (PCMs). Part II: unsteady cases [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 945–957.
- [11] WATANABE T, KIKUCHI H, KANZAWA A. Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperatures[J]. *Heat Recovery Systems and CHP*, 1993, 13(1): 57–66.
- [12] BARAN G, SARI A. Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(20): 3227–3246.
- [13] LING Ziyi, LIU Junwan, WANG Qianhao, et al.  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ - $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  eutectic/ $SiO_2$  composite phase change material with improved thermal reliability and enhanced thermal conductivity[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 172: 195–201.
- [14] FU Wanwan, ZHOU Wei, LYU Geyun, et al. Phase change temperature adjustment of  $CH_3COONa \cdot 3H_2O$  to fabricate composite phase change material for radiant floor heating[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 42: 102773.
- [15] JIN Xin, WU Fengping, XU Tao, et al. Experimental investigation of the novel melting point modified phase-change material for heat pump latent heat thermal energy storage application[J]. *Energy*, 2021, 216: 119191.
- [16] SABINE M, ROBERT D. Influence of natural convection and volume change on numerical simulation of phase change materials for latent heat storage [J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2746.
- [17] GUO Shaopeng, ZHAO Jun, WANG Weilong, et al. Numerical study of the improvement of an indirect contact mobilized thermal energy storage container [J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 476–486.
- [18] RASHIDI S, SHAMSABADI H, ESFAHANI J A, et al. A review on potentials of coupling PCM storage modules to heat pipes and heat pumps [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 140(4): 1–59.
- [19] GU Heng, CHEN Yuanyuan, YAO Xiaoyan, et al. Review on heat pump coupled with phase change material (PCM) for thermal energy storage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140701.
- [20] XU H J, ZHAO C Y. Thermal efficiency analysis of the cascaded latent heat/cold storage with multi-stage heat engine model [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 228–237.
- [21] 彭亚君, 林樱, 江龙, 等. 相变蓄热型空气源热泵系统的模拟 [J]. *制冷学报*, 2022, 43(4): 158–166. (PENG Yajun, LIN Ying, JIANG Long, et al. Numerical research on air-source heat pump system combined with latent heat thermal energy storage [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(4): 158–166.)
- [22] HIRMIZ R, TEAMAH H M, LIGHTSTONE M F, et al. Performance of heat pump integrated phase change material thermal storage for electric load shifting in building demand side management[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 190: 103–118.
- [23] ZHU Chuanhui, LI Baoguo, YAN Shubin, et al. Experimental research on solar phase change heat storage evaporative heat pump system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113683.
- [24] LI Minqi, LIN Zhongqi, SUN Yongjun, et al. Preparation and characterizations of a novel temperature-tuned phase change material based on sodium acetate trihydrate for improved performance of heat pump systems [J]. *Renewable Energy*, 2020, 157: 670–677.
- [25] OSTERMAN E, STRITIH U. Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 39: 102569.
- [26] LEONG K Y, RAHMAN M R A, GURUNATHAN B A. Nano-enhanced phase change materials: a review of thermo-physical properties, applications and challenges [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 18–31.
- [27] SARIER N, ONDER E. Organic phase change materials and their textile applications: an overview [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 540: 7–60.
- [28] DOMINICK M B, GABRIEL Z, DAVID V, et al. Experimental assessment of the influence of the design on the performance of novel evaporators with latent energy storage ability [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4): 1813.
- [29] ZHOU Guobing, ZHANG Yiping, ZHANG Qunli, et al. Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(10): 1068–1077.
- [30] 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.

- [31] METTAWEE E B S, ASSASSA G M R. Experimental study of a compact PCM solar collector[J]. *Energy*, 2006, 31(14): 2958–2968.
- [32] WU Jianghong, FENG Ye, LIU Chaopeng, et al. Heat transfer characteristics of an expanded graphite/paraffin PCM-heat exchanger used in an instantaneous heat pump water heater[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 644–655.
- [33] 刘旋, 巫江虹, 鲜婷, 等.  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$  复合相变材料的制备与性能研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(7): 1291–1297. (LIU Xuan, WU Jianghong, XIAN Ting, et al. Preparation and properties of  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{expanded graphite}$  composite phase change materials[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(7): 1291–1297.)
- [34] ZOU Deqiu, MA Xianfeng, LIU Xiaoshi, et al. Experimental research of an air-source heat pump water heater using water-PCM for heat storage[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 784–792.
- [35] BANSAL N K, BUDDHI D. An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder[J]. *Energy Conversion and Management*, 1992, 33(4): 235–242.
- [36] LI Xiangli, TONG Cang, DUANMU Lin, et al. Research on U-tube heat exchanger with shape-stabilized phase change backfill material[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 146: 640–647.
- [37] SADEGHI G, MEHRALI M, SHAHI M, et al. Progress of experimental studies on compact integrated solar collector-storage retrofits adopting phase change materials[J]. *Solar Energy*, 2022, 237: 62–95.
- [38] ZHANG Long, DONG Jiankai, JIANG Yiqiang, et al. A novel defrosting method using heat energy dissipated by the compressor of an air source heat pump[J]. *Applied Energy*, 2014, 133: 101–111.
- [39] ZHENG Chenxiao, YOU Shijun, ZHANG Huan, et al. Defrosting performance improvement of air-source heat pump combined refrigerant direct-condensation radiant floor heating system with phase change material[J]. *Energies*, 2020, 13(18): 1–17.
- [40] 胡小冬, 高学农, 李得伦, 等. 石蜡/膨胀石墨定形相变材料的性能[J]. *化工学报*, 2013, 64(10): 3831–3837. (HU Xiaodong, GAO Xuenong, LI Delun, et al. Performance of paraffin/expanded graphite composite phase change materials[J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(10): 3831–3837.)
- [41] 吴薇, 陈黎, 王晓宇, 等. 蓄能型太阳能热泵用复合相变材料热性能分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 206–212. (WU Wei, CHEN Li, WANG Xiaoyu, et al. Thermal performance analysis of composite phase change materials for energy storage solar heat pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 206–212.)
- [42] DA CUNHA J P, 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.
- [43] LAZZARIN R, NORO M, RIGHETTI G, et al. Application of hybrid PCM thermal energy storages with and without Al foams in solar heating/cooling and ground source absorption heat pump plant: an energy and economic analysis[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 1007.
- [44] ZHANG Peng, XIAO Xin, MA Zhiwei. A review of the composite phase change materials: fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement[J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 472–510.
- [45] XIAO Xin, ZHANG Peng, LI Ming. Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1357–1366.
- [46] XIAO Xin, ZHANG Peng, LI Ming. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 81: 94–105.
- [47] RON W, OMAR S, BRIAN M, et al. Development of methods to fully saturate carbon foam with paraffin wax phase change material for energy storage[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2013, 135(2): 1–8.
- [48] LING Ziye, LI Suimin, CAI Chuyue, et al. Battery thermal management based on multiscale encapsulated inorganic phase change material of high stability[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 117002.
- [49] MEHRABI-KERMANI M, HOUSHFAR E, ASHJAEI M. A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 141: 47–61.
- [50] LIN Ying, KANG Qi, WEI Han, et al. Spider web-inspired graphene skeleton-based high thermal conductivity phase change nanocomposites for battery thermal management[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13(11): 316–329.
- [51] LI Minqi, LIN Zhongqi, SUN Yongjun, et al. Preparation and characterizations of a novel temperature-tuned phase change material based on sodium acetate trihydrate for improved performance of heat pump systems[J]. *Renewable Energy*, 2020, 157: 670–677.
- [52] KUTLU C, TAPIA-BRITO E, AGBONAYE O, et al. Incorporation of controllable supercooled phase change material heat storage with a solar assisted heat pump: testing of crystallization triggering and heating demand-based modelling study[J]. *Journal of Energy Storage*,

- 2022, 55: 105744.
- [53] 杜文清, 费华, 顾庆军, 等. 癸酸-石蜡二元低共熔复合相变材料的制备及性能研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 251-256. (DU Wenqing, FEI Hua, GU Qingjun, et al. Preparation and properties of capric acid-paraffin binary low eutectic composite phase change materials[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(7): 251-256.)
- [54] ZHOU Guobing, LI Yun, ZHU Maochuan. Experimental investigation on space heating performances of supercooled thermal storage units with sodium acetate trihydrate[J]. Energy and Buildings, 2022, 271: 112329.
- [55] ENGLMAIR G, JIANG Yiliang, DANNEMAND M, et al. Crystallization by local cooling of supercooled sodium acetate trihydrate composites for long-term heat storage[J]. Energy and Buildings, 2018, 180: 159-171.
- [56] YANG Sheng, SHAO Xuefeng, SHI Hongyi, et al. Bubble-injection-enabled significant reduction of supercooling and controllable triggering of crystallization of erythritol for medium-temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 236: 111538.
- [57] 张寅平, 苏跃红, 葛新石. (准)共晶系相变材料熔点及融解热的理论预测[J]. 中国科学技术大学学报, 1995, 25(4): 474-478. (ZHANG Yinping, SU Yuehong, GE Xinshi. Prediction of the melting temperature and the fusion heat of (quasi-) eutectic PCM[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1995, 25(4): 474-478.)
- [58] LANE G A. Solar heat storage: Volume II: latent heat material[M]. United States: CRC Press, 2018.
- [59] YU Zhibin, MCKEOWN A, OUDERJI Z H, et al. A flexible heat pump cycle for heat recovery [J]. Communications Engineering, 2022, 1: 17.
- [60] 吴薇, 刘兆亮, 陈磊, 等. 一种蓄能型一体化太阳能热泵热水器性能分析[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2009, 9(1): 28-34. (WU Wei, LIU Zhaoliang, CHEN Lei, et al. Performance analysis on a novel solar storage heat pump water heater integrated with collector/storage/evaporation [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2009, 9(1): 28-34.)
- [61] 朱传辉, 李保国, 杨会芳, 等. 太阳能-热泵联合装置设计及香菇干燥实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 149-155. (ZHU Chuanhui, LI Baoguo, YANG Huifang, et al. Design of solar-heat pump combine device and experiment on drying of shiitake mushroom[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(11): 149-155.)
- [62] LIU Wenjie, YAO Jian, JIA Teng, et al. The performance optimization of DX-PVT heat pump system for residential heating[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 1106-1119.
- [63] FARID M M, ATSUSHI K. Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperatures: mathematical modeling[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1989, 111(2): 152-157.
- [64] XU H J, ZHAO C Y. Thermodynamic analysis and optimization of cascaded latent heat storage system for energy efficient utilization[J]. Energy, 2015, 90: 1662-1673.
- [65] SEENIRAJ R V, LAKSHMI NARASIMHAN N. Performance enhancement of a solar dynamic LHTS module having both fins and multiple PCMs[J]. Solar Energy, 2008, 82(6): 535-542.
- [66] GUO Weimin, HE Zhaoyu, MAWIRE A, et al. Parametric investigation of charging and discharging performances of a cascaded packed bed thermal energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106229.
- [67] 曲明璐, 张尧, 张童瑶, 等. 复叠式空气源热泵相变蓄能除霜能耗实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(4): 23-28. (QU Minglu, ZHANG Rao, ZHANG Tongyao, et al. Experimental study on the defrosting energy consumption of cascade air-source heat pump with phase-change energy storage for defrosting [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(4): 23-28.)
- [68] 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.
- [69] LIU Fang, ZHU Weiyan, CAI Yang, et al. Experimental performance study on a dual-mode CO<sub>2</sub> heat pump system with thermal storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 393-405.
- [70] 杨鹤, 杜小泽. 布雷顿循环热泵储能的性能分析与多目标优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 196-211. (YANG He, DU Xiaoze. Performance analysis and multi-objective optimization of brayton cycle pumped thermal energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 196-211.)

#### 通信作者简介

肖鑫,男,副教授,东华大学环境科学与工程学院,18964749723,E-mail: xin.xiao@dhu.edu.cn.研究方向:相变蓄能及柔性热管理。

#### About the corresponding author

Xiao Xin, male, associate professor, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, 86-18964749723, E-mail: xin.xiao@dhu.edu.cn. Research fields: latent thermal energy storage and flexible thermal management.