

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.04.007

# 相变储能技术在热泵系统中的应用综述

Application of phase-change energy storage technology in heat pump systems

王长君<sup>1</sup>, 闫君<sup>2\*</sup>, 董勇<sup>3</sup>, 宋占龙<sup>3</sup>

WANG Changjun<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>2\*</sup>, DONG Yong<sup>3</sup>, SONG Zhanlong<sup>3</sup>

(1.上海电气(安徽)储能科技有限公司,安徽 巢湖 238014;2.上海交通大学工程热物理研究所,上海 200240;

3.山东大学燃煤污染物减排国家工程实验室,济南 250100)

(1.Shanghai Electric (Anhui) Energy Storage Technology Company Limited, Chaohu 238014, China; 2.Institute of Engineering Thermophysics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3.National Engineering Laboratory of Coal Pollutant Emission Reduction, Shandong University, Jinan 250100, China)

**摘要:**实现“双碳”目标,需要提升新能源利用率并解决储能相关问题。相变材料(PCM)因其独特的物理特性能够在特定的温度下存储和释放能量,在能量存储方面有很广泛的应用。中低温相变储能技术的应用主要集中在建筑节能方面。分析了相变储能技术与热泵技术结合,在提升热泵的性能系数(COP)、减少热泵除霜时间和存储热泵热量/冷量等方面的应用进展情况。两者结合,能有效提升热泵COP、热泵机组运行稳定性以及用户端的舒适度,在建筑节能领域有着广阔的应用前景。指出了实际应用中存在的温度匹配、功率匹配、系统成本等问题,为未来研究提供可参考方向。

**关键词:**相变材料;相变储能;热泵;热泵性能系数;新能源;碳中和;建筑供暖

**中图分类号:**TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)04-0051-14

**Abstract:** Phase change material (PCM) can store and release energy at a specific temperature because of its unique physical properties. It has a widespread use in energy storage. Medium and low temperature phase-change energy storage technology is mainly applied to building energy conservation. To facilitate the integrated application of phase-change energy storage technology and heat pump technology, the ways to improve the coefficient of performance (COP) of heat pumps, reduce the defrosting time of heat pumps and strength the heat / cold storage capacity of heat pumps are analyzed. The integrated application can effectively improve heat pump COP, operational stability of heat pumps and the comfort level of users. This integration is promising in the field of building energy conservation.

**Keywords:** PCM; phase-change energy storage; heat pump; heat pump COP; new energy; carbon neutrality; heat supply of buildings

## 0 引言

在2020年,中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出力争于2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。碳达峰、碳中和目标的实现,需要在能量的应用/供给方面做很多文章,节能减排、储能等技术越来越受到人们的关注。

截至2020年年底,我国新能源利用中,风能与太阳能使用量在持续增加,但是其比重不足10%,我国当下能源消耗依然以煤炭等化石能源为主<sup>[1]</sup>,是

二氧化碳排放量的主要来源<sup>[2]</sup>。其中我国建筑行业的能源消耗一直在增长,接近全球能源消耗的40%<sup>[3]</sup>。典型建筑年能耗从15 kW·h/m<sup>2</sup>增长到200 kW·h/m<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。要降低二氧化碳排放,就需要提升新能源的利用率以及适合能源存储利用的相变材料(PCM)。

相变储能技术作为一种有效的热存储技术,主要应用在热能/冷能存储方面,实现了能量在供求方面空间/时间的对等,平衡了供求关系,并且相变储能技术的应用切实有效地提升了能量的利用效率。在建筑节能中,相变储能技术是一种切实有效的节能手段。同时,热泵作为一种节能设备,多年来广泛用于建筑供暖和热水领域,但热泵技术本身存在一定的应用限制,如低温性能差、换热器结霜等。

收稿日期:2022-01-15;修回日期:2022-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51706130);山东省能源碳减排技术与资源化利用重点实验室开放基金项目(ECRRU2020-01)

针对热泵技术的缺陷,许多学者提出将相变储能技术与热泵结合。提升热泵系统的性能,扩展热泵系统的应用范围,使得热泵技术在建筑节能领域有更广泛的应用。

本文主要根据相变储能技术与热泵技术的结合应用情况,分析相变储能技术在热泵系统中应用的有效性及其可行性。

### 1 PCM

PCM 是一类利用在某一特定温度下发生物理相态变化以实现能量存储和释放的储能材料。

PCM 按照相变形式分为固固材料、固液材料、液气材料、固气材料。按照材料特性分为有机材料、无机材料和共晶材料,如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

共晶 PCM 分为二元共晶(包含无机、有机共晶)材料、多元共晶材料等。

有机 PCM 主要为高脂肪烃、酸/酯类、醇、芳香烃、芳香酮、内酰胺、氟利昂、聚合物等。主要优点为物理化学稳定性好、热性能好、无腐蚀等。缺点

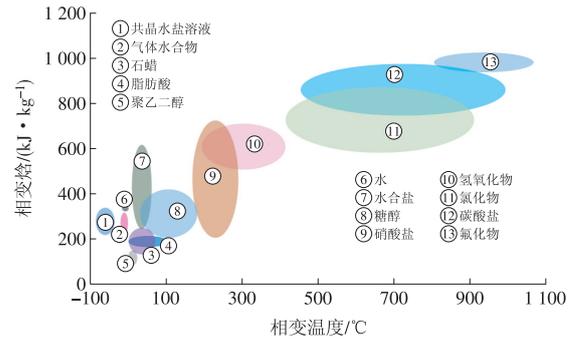


图 1 不同类型的 PCM<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Types of PCMs<sup>[5]</sup>

为储能密度低、导热系数低、熔点低、高挥发性、易燃、成本高等。无机 PCM 主要为水和盐等。主要优点为储能密度高、导热系数高、成本低等。缺点为易相分离、易过冷、腐蚀性强等。

本文主要讨论 PCM 在热泵系统中的应用。主要利用 PCM 的储热储冷性能,与热泵系统集成,用于供暖/供冷。在此种应用形势下,PCM 的主要温度区间为 0~100 °C。部分文献中出现的 PCM 的热物理性见表 1。

表 1 部分文献中出现的 PCM 的热物理性

Table 1 Thermo-physical properties of the PCM mentioned in some references

材料	相变温度/°C	比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	比热容/[kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	固态密度/(kg·L <sup>-1</sup> )	液态密度/(kg·L <sup>-1</sup> )	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	
无机材料	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O <sup>[6]</sup>	30.0	187.49	1.46(s)/2.13(l)	1.500	1.710	—
	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>[7]</sup>	40.0~65.0	—	—	—	—	0.600
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O <sup>[8-9]</sup>	32.4	241.00	1.80(s)/3.30(l)	1.460	1.330	0.700(s)/0.540(l)
石蜡类	RT6 <sup>[10]</sup>	8.0	140.00	1.80(s)/2.40(l)	0.860	0.770	—
	RT10 <sup>[11]</sup>	9.0	134.90	2.00	0.880	0.770	0.200
	RT11HC <sup>[12]</sup>	10.0~12.0	—	—	0.880	0.770	0.200
	A16 <sup>[13]</sup>	15.0~17.0	213.00	2.30~2.37	0.830	0.800	0.180
	RT22 <sup>[14]</sup>	19.0~23.0	200.00	2.00	0.880	0.770	0.200
	RT27 <sup>[10]</sup>	25.0	146.00	1.80(s)/2.40(l)	0.870	0.750	—
	Paraffin <sup>[9]</sup>	35.0	160.00	2.00	0.880	0.760	0.200
	Paraffin <sup>[15]</sup>	44.0	174.00	2.44(s)/2.53(l)	0.830	0.783	0.130
	RT44HC <sup>[16]</sup>	43.0	255.00	—	0.860	0.760	0.200
	Paraffin <sup>[17]</sup>	49.6~50.6	146.00	2.20(s)/3.62(l)	0.845	0.765	0.360
	Paraffin <sup>[17]</sup>	54.9~55.8	149.10	2.37(s)/3.16(l)	0.850	0.768	0.400
有机酸类	Paraffin <sup>[18]</sup>	52.0~54.0	140.00	2.40	0.920	—	5.380
	RT58 <sup>[19]</sup>	58.0	179.00	1.80(s)/2.40(l)	0.760	0.900	—
	Paraffin <sup>[17]</sup>	59.5~60.2	189.50	2.89(s)/4.31(l)	0.862	0.780	0.400
36%硬脂酸+64%棕榈酸 <sup>[7]</sup>	40.0~65.0	—	—	—	—	0.288	
65%癸酸+35%月桂酸 <sup>[20]</sup>	18.0	140.80	—	0.900	—	0.143	

### 2 PCM 在热泵系统中的应用

#### 2.1 概述

相变储能技术大量应用于降低建筑能耗,分为间接应用和直接应用。间接应用主要是指 PCM 与

建筑结合,被动降低建筑能耗。直接应用主要有电锅炉+热库系统采暖应用<sup>[4,21]</sup>。PCM 储能系统与热泵系统结合,应用于供暖/供冷。

由于 PCM 系统的集成,改善了热泵系统的性能系数(COP),使得系统运行更加稳定,所以很多学者

针对PCM与热泵结合做了很多研究。PCM储能与热泵系统结合应用主要分为以下3类。

第1类:PCM储能系统与热泵用能端结合,存储热泵系统能量。主要用于转移热泵运行的峰值负荷,利用低谷时段存储的能量,在尖峰时段释放,降低热泵系统能耗,同时PCM的恒温特性,也能提升用户用热/用冷的舒适度。

第2类:PCM系统与热泵系统的能源端结合,热泵系统供应恒温能量,使得热泵系统不受环境温度影响。提升热泵系统的运行效率,主要有PCM储能与太阳能结合为热泵供能。

第3类:PCM系统与热泵能源端结合,为热泵系统除霜,降低系统除霜时长,提升用户体验。

本文将按照以上3种分类展开综述。

## 2.2 PCM储能系统与热泵用能端结合应用

PCM储能系统作为储能单元,直接与热泵系统供能端结合,存储能量。大部分的研究都是利用PCM与热泵系统结合进行供暖应用。此类储热应用适合的PCM温度在25~60℃,包括六水氯化钙、十水硫酸钠、石蜡等材料。储冷应用的材料温度范围为8~11℃,主要应用材料为无机水合盐和石蜡类。

文献[22]开发了一种地源热泵PCM潜热储存系统,在冬季利用可再生能源供暖,如图2所示<sup>[22]</sup>。系统采用地源热泵为PCM储能系统充热,利用PCM系统为温室供暖,并在文献[23]中对系统进行了进一步分析,发现PCM储能系统与热泵系统结合是一种可行的供暖方式。PCM储能系统的加入有效降低了热泵系统运行成本。

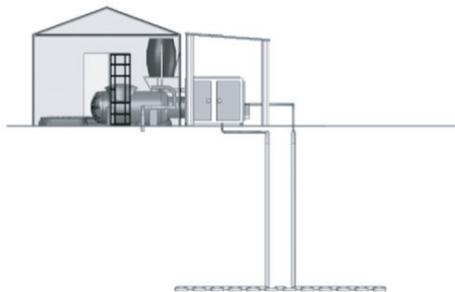


图2 温室供暖系统<sup>[22]</sup>

Fig. 2 Heating system for a greenhouse<sup>[22]</sup>

在热泵与相变储能结合提高能源利用率方面,多位学者进行了系统研究。文献[24]针对典型的英国独立住宅,建立了热泵供暖系统模型,分析了PCM(含/不含)储能系统对热泵非峰值热量的转移,系统如图3所示<sup>[24]</sup>。结果表明,相同的热量需求,PCM蓄热系统体积是水蓄热系统的1/2,但是与无PCM储能系统相比,热泵系统能耗增加了60%以

上。但该系统能够有效转移峰值电力负荷,缓解峰值用电压力。

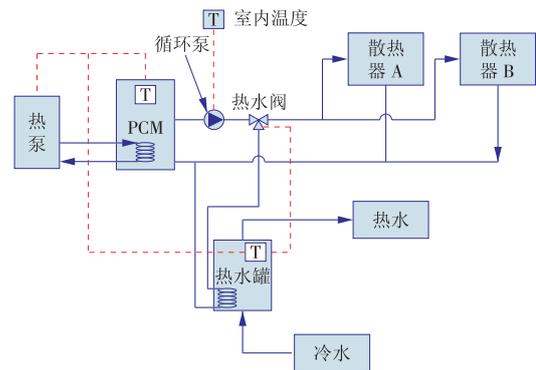


图3 PCM储能热泵系统<sup>[24]</sup>

Fig. 3 PCM energy storage system with heat pumps<sup>[24]</sup>

文献[10]应用计算流体力学(CFD)模拟了用于地源热泵的PCM储能系统及系统瞬时运行状态。同时在一座商业建筑中搭建了实际系统。文章提出并模拟了2种提升系统效率的方法,系统如图4所示<sup>[10]</sup>。

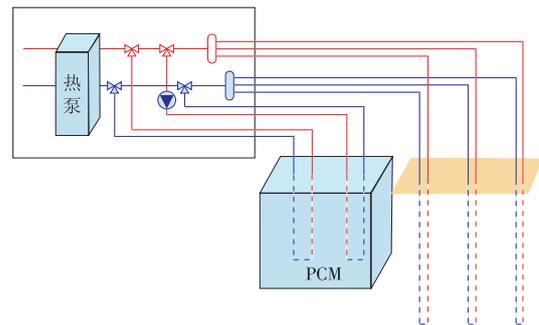


图4 PCM储能热泵系统<sup>[10]</sup>

Fig. 4 PCM energy storage system with heat pumps<sup>[10]</sup>

首先根据实测数据验证了CFD模型。模拟结果表明:加热模式模拟显示钻孔入口温度(+2.6℃)显著增加,热泵的COP从3.4增加到4.2,节能约20%。热泵与地面的热交换效率更高(11.6~13.2),节能12%。系统总COP从2.9增加到3.4。在冷却模式下,热泵和钻孔泵的节能率为4%。系统COP从3.2增加到3.4。模拟典型工况下的制热/制冷循环,系统COP分别为4.12和5.73。使用2层PCM蓄热器对系统进行了进一步改进。在典型工况下,温度更稳定,系统性能也略有提高。在加热模式下COP为4.13,在冷却模式下COP为5.89。PCM蓄热器的总体积比水箱小10倍,可以轻松地放置在室内。

文献[7]开发了一种列管式PCM储热系统模型,如图5所示<sup>[7]</sup>。与仅使用水的储热器相比,集成了PCM的储热器,具有在较小温度范围内储存大量热能的优势。建立模型对比了PCM储热器与热泵

结合系统与传统燃气锅炉的运行效果。结果表明,使用PCM储热器的热泵系统,年CO<sub>2</sub>排放量可平均减少58%,并且PCM储热器的应用可转移热泵系统运行中的峰值电负荷,实现移峰填谷,有效降低电网负荷。但是PCM系统成本较高,不利于进一步推广应用。

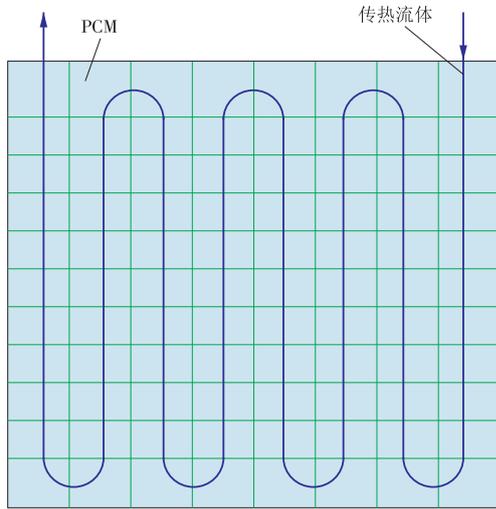


图5 储能装置截面<sup>[7]</sup>

Fig. 5 Cross section of a PCM energy storage device<sup>[7]</sup>

文献[8]开发了一种太阳能热泵加热系统,该系统具有双水箱PCM系统。文章定义了1个新参数——日平均收集效率,来衡量PCM集成热泵系统效率,系统如图6所示<sup>[8]</sup>。

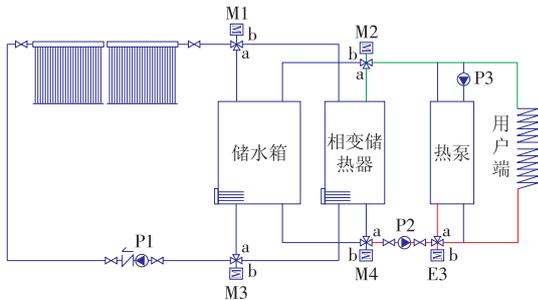


图6 双相变储热水箱与太阳能热泵联用系统<sup>[8]</sup>

Fig. 6 Integration of a dual-tank PCM heat storage system and SAHP<sup>[8]</sup>

文献[8]设计并制造了一个集成系统试验装置,在2—3月北京的供暖季节进行了4次试验。结果表明:(1)因受到太阳能集热器上太阳辐射的影响。常规COP不能准确反映系统性能。因此,文章定义了第2个度量——日平均效率,等于存储在热水箱和PCM储热箱中的总能量除以收集器上的太阳辐射。使用COP和日平均效率的组合评估复合系统的能源效率。(2)选择合适的运行策略,复合系统可以存储最多的热能。(3)与显热储存相比,使用潜热储存箱可以获得更好的系统能效性能。在本

研究的试验条件下,在显热储存系统和双水箱系统之间,日平均效率从约0.64增加到0.96,增加了50%。双水箱潜热储存系统的COP峰值为10.03,是水蓄能系统的近3.5倍。

相变储能技术的应用提升了太阳能热泵系统的能源效率,使得热泵在寒冷的北方地区也能有较高的采暖效率。

PCM储能系统与热泵系统的结合,不只是能够用于建筑供暖,还可以选择合适的PCM材料用于冷储存,与热泵系统结合供冷。

文献[25]提出了一种试验装置模型,该系统由1个耦合了PCM储能箱的热泵系统组成,并搭建了1个小型的试验房间,模拟夏季条件进行了供冷试验测试,试验装置如图7所示<sup>[25]</sup>。



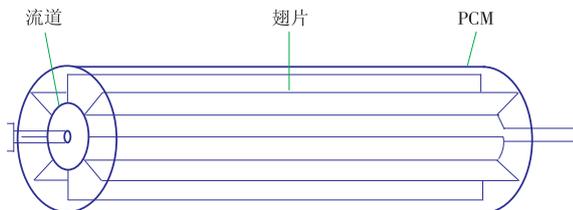
图7 试验装置<sup>[25]</sup>

Fig. 7 Experimental set-up<sup>[25]</sup>

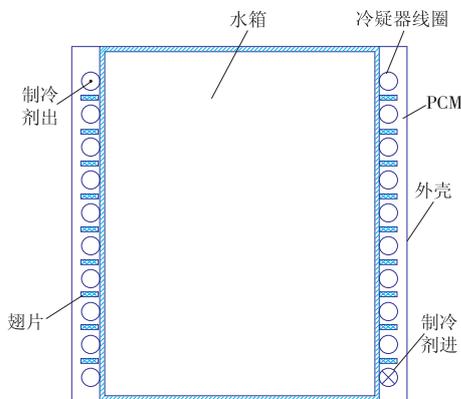
结果表明:PCM储能箱与水储能箱相比,在容量相同的情况下,储能量增加了35.5%,相应的充能时间增加了4.55倍。传热介质温度直接影响PCM储能箱的储冷量。传热介质温度越高,储冷量越多。介质温度增加1.7℃,储冷量增加了38%。PCM材料因导热性低,并且为塑料封装容器,也降低了系统内的传热速率,导致材料存在不同程度的过冷。提升传热速率,能够有效降低充放冷时长。PCM储能箱较水储能箱,储能量增加了14.5%,但水储能箱的能效比更高。设定室内温度(21.0±0.5)℃条件进行试验测试,PCM储能系统供冷时间为298 min,较水储能箱时长增加了20.65%。PCM储能系统并不能满足全天的供冷需求,但可以用于调峰使用。

文献[9]分析了集成在空气源热泵冷凝器中的PCM系统,并采用Dymola建立的动态模型模拟了PCM系统的热容量、尺寸、传热过程和热容控制。文章指出,PCM的低导热性限制了PCM系统的应用,所以很多学者针对如何提高传热能力进行了研究。文献[19]研究了翅片导热增强的PCM储热系统,如图8所示<sup>[19]</sup>。验证了PCM储热系统与热泵的联合应用,用来转移供暖需求的电力峰值电量。PCM系统由1个圆柱壳体(外径375 mm)和1个同心圆管(外径65 mm)组成,其表面由8个纵向翅片支

撑连接。导热介质流经内管道,PCM填充在2个圆管之间。文章分析了不同的换热流体温度与PCM温度、充热时间的关系以及不同建筑面积与PCM储热系统容量的关系。研究表明,采用翅片式换热系统,能有效提升PCM的导热性能,PCM储热系统的体积明显小于显热储热系统。同时系统也能够将供暖的电力需求转移到非高峰时段。

图8 PCM储能器<sup>[19]</sup>Fig. 8 PCM energy storage device<sup>[19]</sup>

文献[16]也对带有翅片换热器的PCM储热器进行了研究,并且与热泵原有的储热水箱结合,如图9所示<sup>[16]</sup>。试验结果表明:储热量增加了14%,当水从15℃加热到55℃时,PCM系统的第1次运行时间与常规热泵系统的正常运行时间几乎相同,但第2次运行时间缩短了13%,并且PCM热泵系统具有良好的水温均匀性,COP有一定提升。

图9 储罐示意<sup>[16]</sup>Fig. 9 Schematic of the storage tank<sup>[16]</sup>

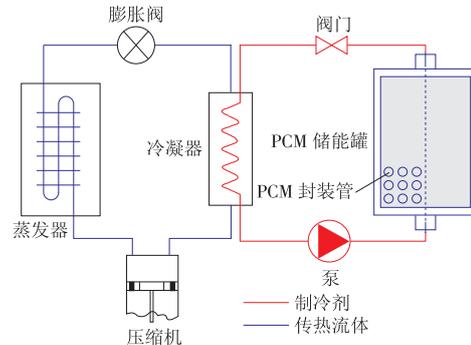
文献[18]研究了石墨导热增强PCM储能系统与空气源热泵结合应用,分析了系统的放热行为,验证了系统的可行性。

研究表明:(1)在73.5℃条件下,储热系统的最大膨胀率为6.25%。(2)在放热循环中,换热介质流速为0.5 L/min。45℃时,可用热水体积增加83.12%;在40℃时,可用热水体积增加194.00%,系统能够有效减少储热器体积。(3)PCM储热器中滞留的水很少,大部分为流动水,所以水的洁净度更高。(4)流量对可用热水量有显著影响,但对总热量的影响不大。影响热水温度的主要因素是水与PCM之间的温差。换热水流速越小,PCM优势越

明显。

为了提供研究效率及预测系统系统,很多学者在数值模型研究方面进行了许多探索研究。

文献[15]研究了空气源热泵与PCM蓄热罐的结合应用,如图10所示<sup>[15]</sup>,模拟了充放热时间与流量的关系。当使用PCM储罐时,充热完成时间和总能量消耗与充热水流量呈非线性关系。

图10 空气源热泵与PCM蓄热罐的结合应用系统<sup>[15]</sup>Fig. 10 Integration of ASHP and a PCM heat storage system<sup>[15]</sup>

作者对空气源热泵集成相变储能槽充热过程进行了全面的研究。利用TRNSYS和Matlab搭建了系统的仿真平台。对空气源热泵的稳态模型进行了求解,并用试验装置的实测数据进行了验证。利用稳态模型输入和输出变量的典型值确定TRNSYS中空气源热泵模型所需的修正系数。作者提供了一种有效的分析方法,用于研究使用空气源热泵为PCM储罐充热的能量性能。该方法能有效地确定换热介质流量与放热量之间的关系,为空气源热泵与相变储能系统的优化设计提供了指导。

文献[26]研究了PCM填充常规水箱储热器的储热性能。作者使用直径为50 mm、高度为170 mm的聚乙烯小塑料瓶来封装PCM,然后将172个填充有PCM的圆柱形小瓶安装至储水罐体上部。水作为换热和储热介质在装置中循环。试验结果表明,储水箱内的PCM占水箱总体积的15%,提升了水箱的储能总量70%,系统如图11所示<sup>[26]</sup>。

文章还对系统进行了建模分析,结果表明,在储能温差为32~20℃,32~15℃,40~20℃和40~15℃时,PCM储热罐的储热量分别比单纯的储水罐的储热量高49%,35%,26%和17%。文章指出,在储能温差32~15℃、水温箱升至25℃时,温度低于PCM的相变温度(27℃),使水箱内15%的PCM处于完全放热状态,系统储热量仅有总储热量的70%。这意味着这种PCM储能箱可用于具有低初始温度和低温差的系统,能有效提升热泵效率。

文献[27]提出了一种新型的 geothermal heat pump system,该系统具有集成的低温至中温无水和盐的PCM储能

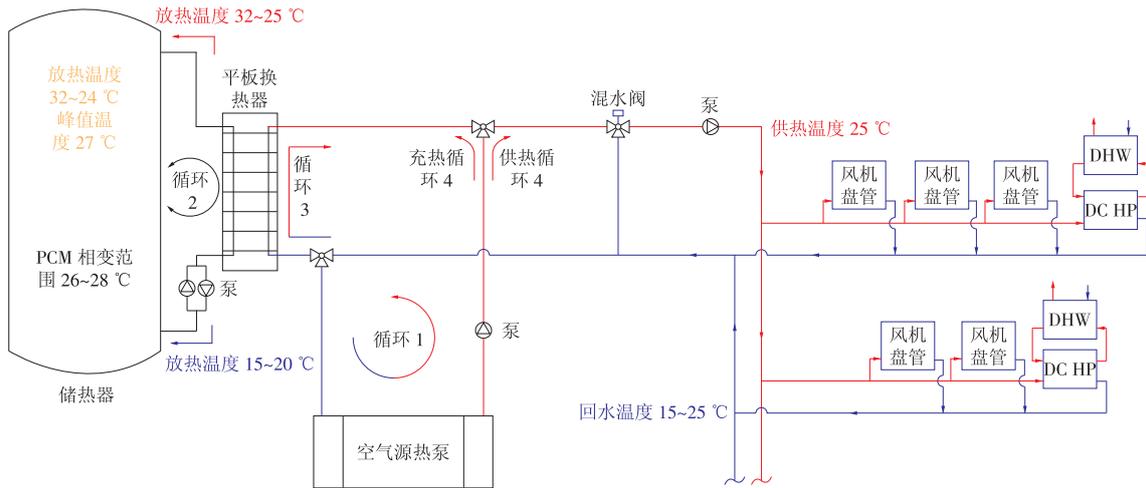


图 11 放热系统<sup>[26]</sup>

Fig. 11 Scheme of the heating system<sup>[26]</sup>

罐,用于寒冷气候下的建筑供暖,系统如图 12 所示<sup>[27]</sup>。文章根据美国中西部 1 座实际建筑的能耗数据,用 TRNSYS 进行建模分析,结果表明:在 PCM 储能热泵系统模型中,PCM 相变温度影响系统的重要参数。27 °C 的相变温度可实现模型中最低 PCM 储罐尺寸和成本。但是地下热交换器和 PCM 储热箱尺寸存在多种最优组合,因此引入成本和物理限制等其他因素。分析表明,根据典型的钻井成本和 PCM 储罐成本,地下热交换器尺寸可减少 50% 以上。

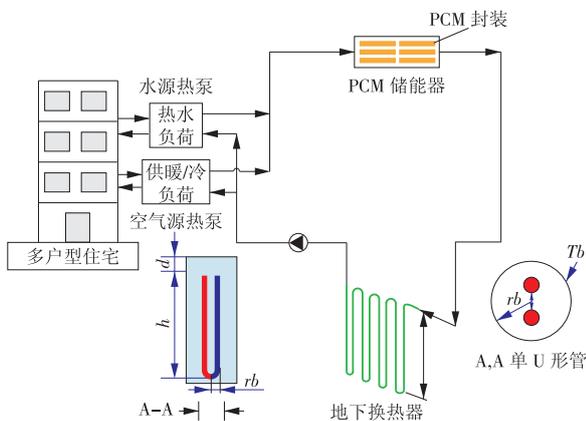


图 12 PCM 储能热泵系统<sup>[27]</sup>

Fig. 12 PCM heat storage system with heat pumps<sup>[27]</sup>

文献[12]建立了一种 PCM 蓄冷热泵系统的传热模型,研究了含 PCM 的蓄冷热泵系统在不同冷负荷温度和室内温度条件下的性能。结果表明:(1)蓄冷热泵系统的总电能消耗随着室内温度的升高而增加。在所研究条件下,当室内温度设定值从 24 °C 增加到 30 °C 时,系统的总电能消耗从 197.8 kW·h 增加到 264.8 kW·h,增加 33.87%。(2)传统热泵系统和蓄冷系统的总电能消耗几乎没有差别。而在峰谷电价条件下,PCM 蓄冷系统比常规系统的

电费节省率为 9.07%~11.28%。一般来说,随着室内温度设定值的降低,电费节省率增加。(3)蓄冷温度越高,能效越高,其蓄冷量与所需冷量相关(第 2 天的冷却需求),但蓄能时间更长。蓄冷温度在 5~7 °C 的系统比 7~9 °C 的系统,蓄能 58.46 kW·h 冷量消耗的电能要多 9.58%,但充能速度要快 35.34%。(4)与使用 7~9 °C 蓄冷温度的系统相比,5~7 °C 和 6~8 °C 的情况下,可储存的总冷量分别增加 19.5% 和 11.9%,热泵机组的开关时间分别减少 59.1% 和 36.4%。(5)带数字涡旋压缩机的热泵机组或带变频压缩机的热泵机组可能是与带有 PCM 储能的制冷系统集成的理想选择,主要是因为它们可以减少或消除热泵机组的开关时间。

综上所述,在 PCM 储能系统与热泵用能端结合应用方面,学者已经在试验系统、数值模拟分析、传热性能等各个方面进行了探索,获得了一些有意义的探索,但是在实际应用过程中还存在一些问题,如相变储能系统传热功率、PCM 温度选择、系统成本等。

### 2.3 PCM 储能系统与热泵能源端结合

最早的 PCM 储能与热泵系统结合的应用是 PCM 储能与太阳能系统结合,作为能源端与热泵系统集成。主要用于为热泵系统提供恒温能源,提升热泵的 COP。此类应用的 PCM 温度范围分布较广,从 5~60 °C 的材料都有涉及,主要为六水氯化钙、十水硫酸钠和石蜡类材料等。

文献[28]开发了一个试验模型,用于分析一种干燥谷物颗粒的太阳能辅助热泵系统,如图 13 所示<sup>[28]</sup>。系统包含太阳能集热器、PCM 储能罐、热交换器和热泵。PCM 储热器通过热交换器与热泵相连,作为热源为热泵供热,以提升热泵冷端的温度。

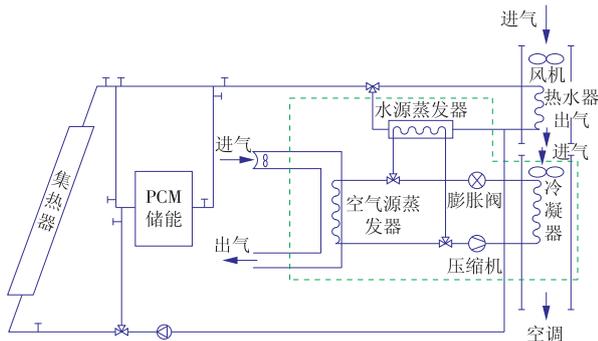


图 13 带 PCM 储能系统的太阳能热泵系统<sup>[28]</sup>

Fig. 13 Integration of SAHP and a PCM heat storage system<sup>[28]</sup>

文献[29]研究了带 PCM 储能的太阳能系统与热泵系统结合供暖的应用方式。系统运行模式为:白天,在太阳辐射下,太阳能集热器提供热水为 PCM 系统充热,同时为热泵供热;夜间或无辐射条件下,PCM 储罐为热泵供热,以改善热泵性能。同时热泵也可以使用环境空气作为热源。此外,PCM 储热也可以用来直接为用户供热。

文献[30-31]对于带 PCM 储能的双源热泵系统建立了计算机模型,进行了理论与试验研究。

文献[32]根据天气数据,搭建了一个 PCM 储能太阳能热泵系统模型,进一步补充了文献[29]的研究。

文献[33]从试验和理论 2 方面研究了热泵式太阳能采暖系统,建立了带有 PCM 储热系统的太阳能辅助串联热泵系统的热力学模型,根据试验数据确定了系统参数。结果表明,并联热泵系统比串联热泵系统更节能,但系统实际应用需要进行经济性分析。

文献[34]开发了一个用于太阳能热泵串联系统的 PCM 储热器模型,用于分析 PCM 储热系统的瞬态行为,并在 1998 年对模型进行了进一步的研究<sup>[35]</sup>,结构如图 14 所示<sup>[34]</sup>。图中  $R_{c,inn}$  是 PCM 封装壳体内半径,  $R_{c,out}$  是 PCM 封装壳体外半径,  $L_c$  为 PCM 封装壳体及 PCM 储热器长度。

文章分析了不同 PCM 制备的储能系统,认为即使传热流体入口温度较高,PCM 完全融化也需要很长时间(至少 8 h),PCM 的塑料封装及系统结构影响了 PCM 储热系统的性能。

文献[6]对带 PCM 储热器的太阳能热泵系统进行了系统模拟分析,系统如图 15 所示<sup>[6]</sup>。文章使用了定义相变单元瞬态行为的仿真模型<sup>[30]</sup>。在储罐中,PCM 位于圆柱形管内,传热流体与之平行流动。采用基于焓的有限差分法对模型的传热问题(视为二维)进行了数值求解,并用试验数据进行了验证。

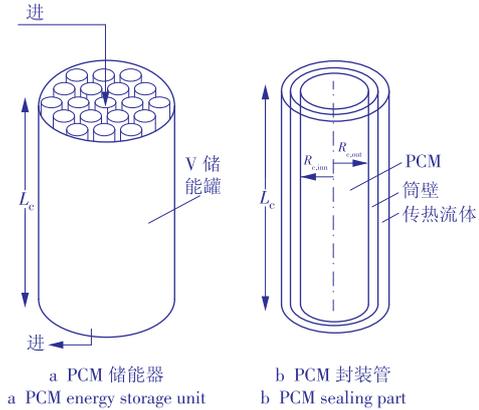


图 14 PCM 储热器模型<sup>[34]</sup>

Fig. 14 Model of a PCM energy storage system<sup>[34]</sup>

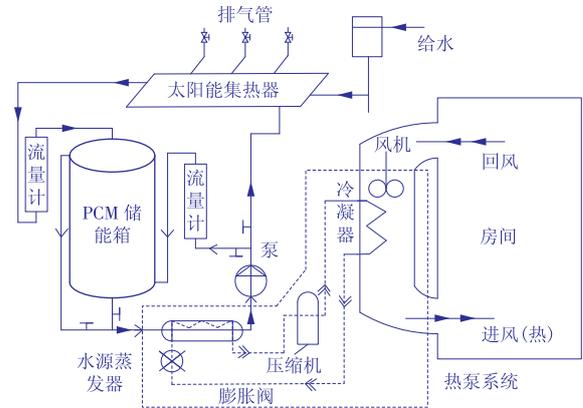


图 15 带 PCM 储能器的太阳能辅助热泵系统<sup>[6]</sup>

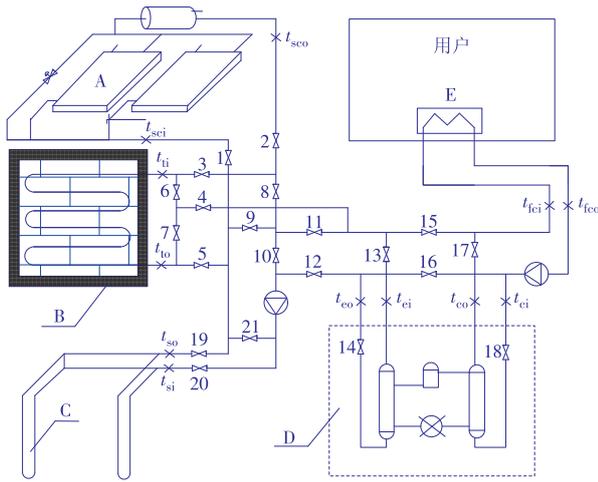
Fig. 15 Integration of SAHP and a PCM heat storage system<sup>[6]</sup>

在 1992—1993 年和 1993—1994 年的 11 月至 5 月进行了试验测试,以测量 PCM 系统内的平均温度与进出口传热流体温度。试验获得的进口传热流体温度作为模拟模型的进口温度,确定了储罐内的理论温度和储存热能分布。

文献[36]介绍了一种季节性相变储热太阳能热泵系统的结构并建立了 PCM 系统模型,进行了模拟分析。结果表明,PCM 系统能有效提升太阳能集热器的效率,但使用 PCM 储能的主要缺点在于其成本和系统复杂性更高,需要进一步经济性分析。试验结果表明,PCM 储能的太阳能热泵系统效率高于空气源热泵。

文献[37]研究了带 PCM 储能罐的太阳能辅助地源热泵供暖系统,建立了系统的数学模型,并根据该模型进行了瞬态数值仿真,原理如图 16 所示<sup>[37]</sup>。文章分析了哈尔滨市采暖季供热系统的运行特点。试验结果表明,PCM 提高了储罐单位容积的储热能力,大大减小了储罐尺寸,降低了系统运行时储罐温度的波动范围,使系统运行更加稳定,提高了集热器的效率。

文献[38]开发了一种新型的 3 套管相变储能换热器,具有同心管和 3 个通道,PCM 嵌入中间管和内



A.太阳能集热器; B.PCM 储能器; C.地源热交换器;  
D.热泵机组; E.风机盘管; 1—21.阀门。

图 16 PCM 储能地源热泵系统原理<sup>[37]</sup>

Fig. 16 Working principle of the PCM heat storage system with GSHP<sup>[37]</sup>

管之间,如图 17 所示<sup>[38]</sup>。换热器与太阳能系统、热泵系统结合应用,热泵的制冷剂流经内管,来自太阳能集热器的流体应流经外环。PCM 系统可实现热储存和冷储存,并可在 8 种不同模式下运行,以适应全年不同的天气条件。

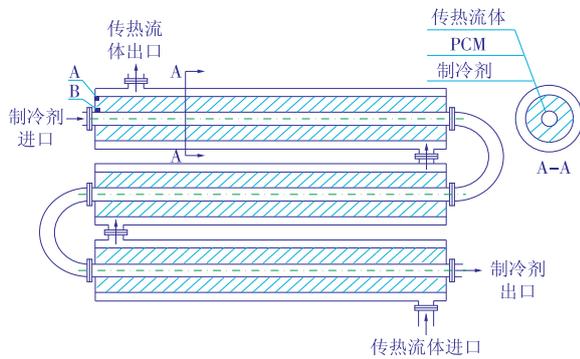


图 17 PCM 储能系统结构<sup>[38]</sup>

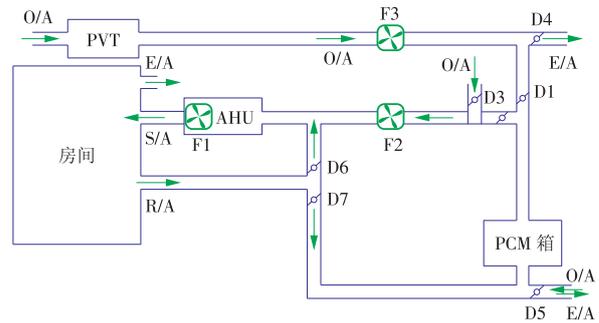
Fig. 17 Structure of a PCM heat storage system<sup>[38]</sup>

文献[39]研究了 3 套管储能换热器强化热泵系统的性能和充放热行为。分析了系统运行瞬态特性,包括温度、压力和传热速率。结果表明:在传热流体(水)温度和流速恒定的运行模式下,系统 COP 增加,直到系统进入稳定运行阶段。当 3 种传热介质(水/PCM/制冷剂)达到稳态时,最终 COP 可达 3.9。试验结果显示了一个有趣的现象,即水和制冷剂之间的传热过程是一个动态平衡过程。PCM 温度和蒸发器进出口水温差在一些平衡点附近有规律地波动。

文献[40]使用了文献[38]同样的设计,但在 3 套管储能换热器中使用了 5 °C 的石蜡,测试不同运行模式下的系统性能,开发了 PCM 储能太阳能热泵样机,进行了供热/供冷运行试验。结果表明,该系

统在调整热电供需平衡方面有明显优势。在供冷运行条件下 COP 提升 17%。在环境温度较低的条件(-10 °C),性能优于空气源热泵,并可利用太阳能热量。

文献[41]提出了一个基于太阳能集热器和 PCM 储能器的循环热泵系统,如图 18 所示<sup>[41]</sup>,并对该系统进行了建模分析。系统主要原理是利用太阳能收集热量为 PCM 系统供热或直接向室内供热。PCM 系统可以为热泵循环系统供热或直接向室内供热,文章对复合系统进行了模拟,证明了系统运行的可行性。



S/A:送风; O/A:室外风; R/A:回风; E/A:排风; F:风机; D:阻尼器。

图 18 带 PCM 储能的太阳能辅助暖通空调系统<sup>[41]</sup>

Fig. 18 Solar-assisted HVAC system with the PCM heat storage system<sup>[41]</sup>

文献[42]研究了 2012 年欧洲太阳能 10 项全能赛期间在小型、中型、大型(SML)原型系统上安装和测试的热泵系统,如图 19 所示<sup>[42]</sup>。该系统包含 2 个 PCM 储能箱体,以满足热泵系统在制冷工况应用。其中一个低温 PCM 蓄冷箱用于存储冷量,测试建筑冷负荷。另一个高温 PCM 储能箱用于降低热泵系统热端温度,提升系统的制冷 COP。文章对该系统进行了模拟运算和测试,进行了 2 种工况条件(全年平均较低负荷工况、大赛期间高负荷条件工况)的模拟和试验。结果表明:低温 PCM 储能箱,可以在低负荷时段存储冷量,在高负荷时段释放,转移制冷峰值负荷,同时使系统运行更加稳定,延长机组使用寿命。高温 PCM 储能箱,能有效提升系统 COP,系统节能 18.97%。但 2 个独立的 PCM 储能箱导致系统的总体积非常大,不利于安装。

文献[14]研究了一种 PCM 储能制冷系统,其中 PCM 模块在夜间储存冷能,并作为散热器在白天制冷期间降低热泵的热侧温度,从而提高系统的 COP,系统如图 20 所示<sup>[14]</sup>。文章对 PCM 集成热电冷却系统建立数值模型并进行了试验测试。对比 2 种工作模式下的系统如下。

模式 1:通过空气-水热交换器将产生的热量直接释放到室外空气中;模式 2:将热量释放到管壳式

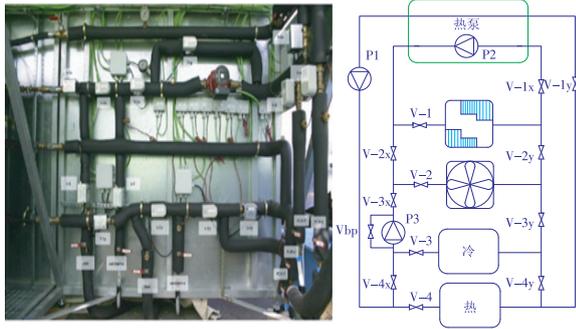


图 19 系统示意<sup>[42]</sup>

Fig. 19 Schematic system<sup>[42]</sup>

PCM 储热单元。结果表明,由于 PCM 集成,系统平均制冷 COP 提高了 56%(从 0.50 提高到 0.78)。供冷系统的累积散热量与 PCM 的体积相关。

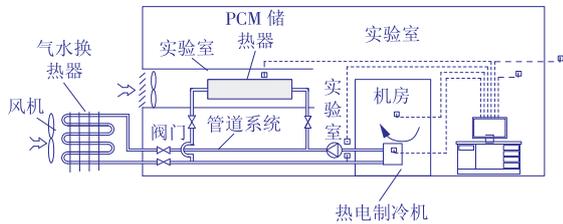


图 20 PCM 储能制冷装置系统示意<sup>[14]</sup>

Fig. 20 Refrigerator in the PCM heat storage system<sup>[14]</sup>

文献[43]提出了一种由空气源热泵、PCM 单元和太阳能集热器组成的 PCM 辅助空气热泵系统,并分析了 PCM 储能单元的传热特性,如图 21 所示<sup>[43]</sup>。结果表明,系统在供冷模式和供热模式下的性能都有一定增强。PCM 储能系统除供冷/供热能源的需求侧和供应侧之间的差异,有效提升了热泵系统在低温环境下的性能,但在供冷模式下,环境对系统仍存在显著影响。

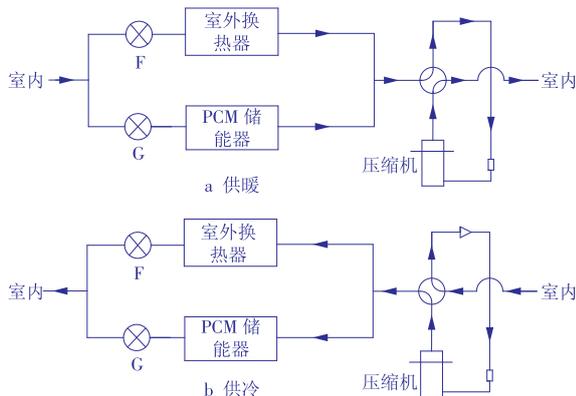


图 21 制冷/制热 PCM 储能热泵系统<sup>[43]</sup>

Fig. 21 PCM heat storage system with heat pumps being able to provide cold and heat energy<sup>[43]</sup>

文献[44]搭建了一个配置 PCM 储热器的太阳能热泵集成系统,可用于每天为英国标准住宅供应 350 L 生活热水,如图 22 所示<sup>[44]</sup>。

PCM 系统主要用于在夜间或白天太阳辐照度

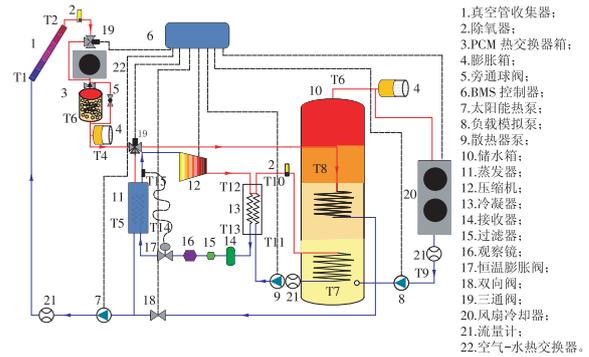


图 22 试验装置示意<sup>[44]</sup>

Fig. 22 Experiment facility<sup>[44]</sup>

较差时为热泵供热。该系统包含 2 个回路。

回路 1: 太阳能热循环,该循环通过太阳能集热器产生热水,同时为 PCM 储热器和用户侧储水箱充热,与传统太阳能热系统类似。如果太阳辐照度足以加热储水箱,则该回路将独立工作。

回路 2: 太阳能集热器作为热泵系统的热源运行。当太阳辐照度不足以直接加热用户侧储水箱,通过蒸发器作为热泵的热源为 PCM 储热器充热。当太阳能集热器供热温度低于 PCM 储热温度时,PCM 储热器作为热泵系统的热源。

结果表明,PCM 储热器使得系统运行更加稳定,使用 PCM 储热器的系统较未使用的系统,在晴天和阴天,平均 COP 分别提高 6.1% 和 14.0%。

文献[13]专门设计了一种带有螺旋线管的 PCM 换热器,用于太阳能热泵系统<sup>[14]</sup>,如图 23 所示<sup>[13]</sup>。

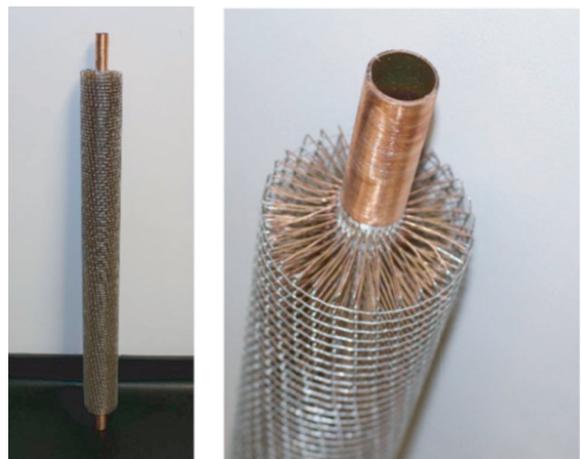


图 23 铜螺旋线管<sup>[13]</sup>

Fig. 23 Copper spiraltron<sup>[13]</sup>

作者建立详细的 3D CFD 模型,分析了带有螺旋线管 PCM 系统的充放热过程,模拟了 PCM 的温度变化,并通过测量进行了验证。此外,作者还研究了不同换热流体流速和温度对 PCM 熔化/凝固时间的影响。

文献[17]提出了一种太阳能辅助PCM储能跨临界CO<sub>2</sub>热泵系统。系统实现了对天然低品位热源的补充利用和储能利用,能够应用于严寒地区的建筑供暖。文章以中国沈阳某大厦为例建立模型,分析了随着建筑的热负荷变换,系统能耗、COP和太阳能集热器热量、PCM储热器的热量变化。详细分析了供暖季前期、中期和后期的系统数据变化。同时与北京、沈阳和哈尔滨的分散式燃煤锅炉运行数据进行了比较。系统运行模式如图24所示<sup>[17]</sup>。

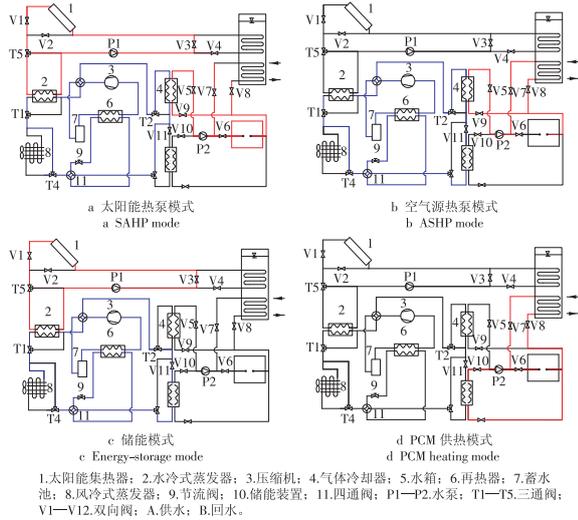


图 24 PCM 储能太阳能热泵系统<sup>[17]</sup>

Fig. 24 Integration of SAHP and the PCM heat storage system<sup>[17]</sup>

结果表明,系统实现了PCM储热和太阳能热泵的互补利用和能量储存。此外,该系统充分利用了可再生能源和热泵系统的优势,同时克服了单一热源热泵的常见问题,具有良好的运行性能和较高的能效。文章对热泵系统建立了数学模型,并以沈阳某大厦为例进行了实例分析,模拟了系统在供暖期间的性能。结果表明,该系统累计供热231.13 GJ,基本满足用户的采暖和热水需求。系统累计能耗为90.20 GJ,采暖季平均COP为2.56。太阳能热泵和PCM储热热泵的COP增长率分别为15.16%和14.34%。与传统的分散式燃煤供暖和热水供应方案相比,该系统在不同地区均具有显著的节能效果,北京、沈阳和哈尔滨的节能率分别为47.85%,43.55%和37.78%。

文献[45]设计了一种复合PCM填充的列管太阳能蓄热器,如图25所示<sup>[45]</sup>,与热泵结合如图26所示<sup>[45]</sup>。

2019年3月在广州一栋建筑物的屋顶上进行了试验。系统利用PCM具有高蓄热密度的特点,合理分配太阳能和空气能量,提高了系统在低温环境下的加热性能。太阳能集热器在白天可以积累多余的太阳辐射热,然后在夜间或下雨时释放热量,充

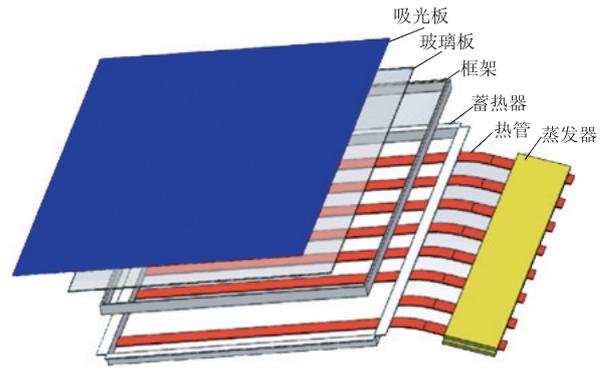


图 25 太阳能发电装置<sup>[45]</sup>

Fig. 25 PV generator<sup>[45]</sup>

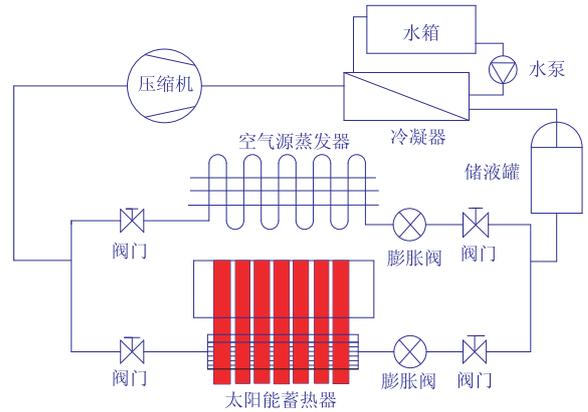


图 26 基于PCM储能的太阳能热泵系统<sup>[45]</sup>

Fig. 26 PCM energy storage system with solar assisted heat pumps<sup>[45]</sup>

当热泵的蒸发器,从而保证热泵全天连续运行。作者对太阳能蓄热器在不同工况下的动态特性进行了试验研究,得出以下结论。

(1)太阳能热泵系统较空气源热泵系统的COP和加热能力分别提高了72%和100%,同时将水温从15℃加热到55℃的时间缩短了50%。该系统在阳光充足的寒冷地区具有良好的应用前景。

(2)太阳能储热系统能够实现快速蓄热和放热,其蓄热效率和放热效率分别为65%和92%。可以直接作为热泵系统的替代蒸发热源,避免了二次传热,提高了能源利用率。

(3)PCM在放热过程中存在温度不均现象,从而降低了太阳能蓄热器的热效率和系统的运行性能,因此系统需要进一步优化。

(4)在太阳辐射不足的情况下,太阳能集热器与热泵协同加热。与以往的研究不同,该系统的双蒸发器采用组合或切换方式连接。无论是组合式还是切换式,复合热泵系统的供热性能都比普通热泵系统有显著提高。然而,与组合模式相比,当环境温度和换热水温分别为15℃和32℃时,切换模式的性能稍好。因此,有必要研究环境温度和换热水温对系统加热性能的影响。

(5) 尽管复合热泵系统的初始成本高于其他系统,但二氧化碳排放、粉尘排放、二氧化硫排放和氮氧化物排放分别减少了 73.1%、73.5%、60.0% 和 58.3%,能有效保护环境。

由上可见,大部分学者使用此技术研究后发现可带来 COP 的显著提升,但同时也存在一些问题,如相变储能系统与空气的换热、储热量的选择以及相变储能系统的储热-放热循环特性。

### 2.4 PCM 储能系统的除霜应用

在热泵除霜应用中,涉及的 PCM 包含六水氯化钙、65% 癸酸+35% 月桂酸、RT10。

文献[20]利用 PCM 的储热特性,开发了一种基于 PCM 蓄热多联机空气源热泵试验装置,利用 PCM 储热系统解决除霜操作期间能量供应不足的根本问题。PCM 蓄热系统如图 27 所示<sup>[20]</sup>。试验结果表明:使用 PCM 储能系统,系统除霜时间缩短了 60%。系统 COP 从 1.3 增加到 3.1,供暖回复时间也缩短了 43%。

文献[46]采用动态数学模型研究了干燥剂材料、PCM 储能和热泵系统的组合模式。分析了固体干燥剂和 PCM 体积的匹配关系对热泵系统性能的影响,系统如图 28 所示<sup>[46]</sup>。结果表明,当 PCM 体积为 100 mL 时,随着干燥剂质量从 1.9 kg 增加到 3.5 kg,除霜效率从 31.8% 提升到 34.7%。当干燥剂 2.2 kg,PCM 体积为 1 100 mL 时,在相对湿度 80%,环境温度 0 °C 时,水温可在 1 个循环内加热至 55 °C,系统 COP 达 2.87,系统性能最佳。

文献[11, 47-48]为了解决级联式空气源热泵的除霜问题,提出了一种基于有机 PCM(RT10)的逆

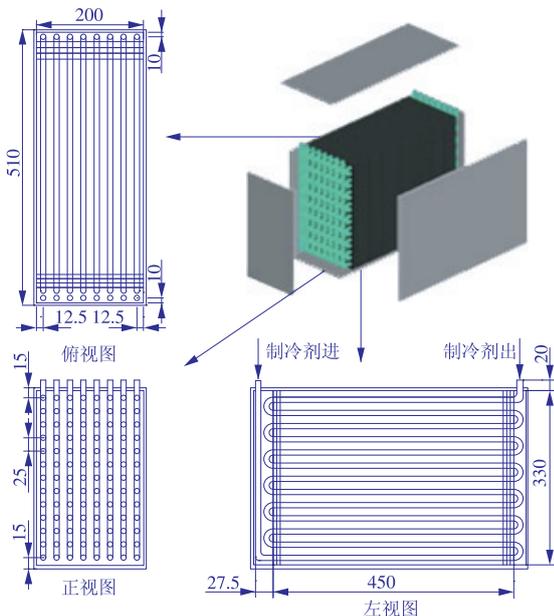
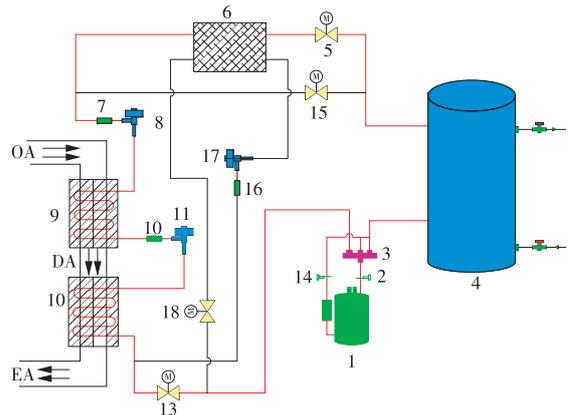


图 27 PCM 储能器结构<sup>[20]</sup>

Fig. 27 Construction of a PCM energy storage device<sup>[20]</sup>



1.压缩机; 2,14.高/低压保护装置; 3.四通阀; 4.水箱; 5,13,15,18.电磁阀; 6.储能装置; 7,10,16.过滤干燥器; 8,11,17.电子膨胀阀; 9.涂有固体干燥剂的热交换器; 12.室外交换器。

图 28 PCM 储能+干燥剂的无霜热泵系统<sup>[46]</sup>

Fig. 28 Frost-free heat pumps coupling with dehumidification and the PCM energy storage system<sup>[46]</sup>

循环除霜方法,并对系统进行了模拟。PCM 系统如图 29 所示<sup>[11]</sup>。作者研发的 PCM 储能系统能够同时为热泵的高温侧和低温侧供能。试验结果表明:(1)在-12 °C、相对湿度 85% 的条件下,PCM 向热泵低温侧供能占总供能的 62.3%。(2)在结霜量相同时,室外温度越低,低温侧获得能量的比例越高。(3)影响热泵两侧能量分布的主要因素是换热介质的流量(低温侧介质流量),受介质与 PCM 温差影响较小。

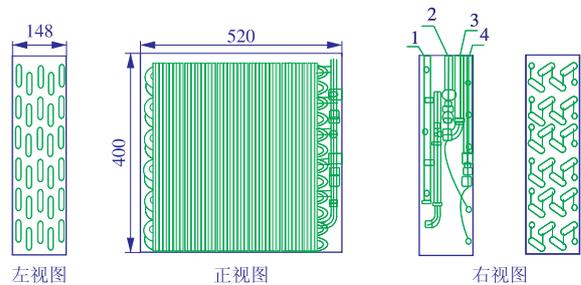


图 29 PCM 储能系统结构<sup>[11]</sup>

Fig. 29 Construction of a PCM energy storage system<sup>[11]</sup>

可见,PCM 储能系统的应用可以有效除霜,缩短热泵系统除霜运行时长,提升热泵 COP,提升用户舒适度。

### 3 结论

相变储热技术是一种热存储技术,与热泵系统的结合有一定的技术优势。国内外专家学者的研究结果如下。

(1) PCM 储能与热泵供能端结合应用,为建筑供暖切实可行;系统集成能够有效地转移峰值电力负荷,缓解峰值用电压力。PCM 储能的应用,使得用户端供热温度更加稳定,且有效降低了原有水储

能罐的体积。

(2)许多学者还研究了PCM导热增强系统与热泵系统的集成,如翅片式结构导热增强、石墨添加导热增强、列管式结构导热增强。

(3)PCM储能与热泵系统结合,还可为建筑提供冷量,在夏季进行供冷,可用于供冷调峰使用。

(4)PCM储热与热泵系统能源端结合,能有效提升热泵系统COP,扩展热泵系统的工作温度范围(超低温运行),使热泵系统能够应用于严寒地区的建筑供暖。

(5)使用PCM储能系统,有效缩短了热泵系统除霜时间,提升了系统COP。

同时,相关PCM储能技术与热泵系统的结合,在实际应用过程中还存在温度匹配、功率匹配、系统成本等问题,需要进一步改进和提升。此技术的发展与应用可以切实有效地提升热泵系统的性能,虽然系统成本有一定增加,但相信未来会有更多关于相变储能与热泵系统集成应用的研究,能够实现PCM储能式热泵的更广阔应用。

#### 参考文献:

- [1]陈永翀,冯彩梅,刘勇.双碳背景下中国储新比的发展趋势[J].能源,2021(8):41-45.  
CHEN Yongchong, FENG Caimei, LIU Yong, et al. Development trend of China's energy storage and new energy ratio under the background of double carbon [J]. Energy, 2021(8):41-45.
- [2]张俊锋,许文娟,王跃铸,等.面向碳中和的中国碳排放现状调查与分析[J].华电技术,2021,43(10):1-10.  
ZHANG Junfeng, XU Wenjuan, WANG Yueqi, et al. Investigation and analysis on carbon emission status in China on the path to carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(10):1-10.
- [3]LIU Y, YANG L, ZHENG W, et al. A novel building energy efficiency evaluation index: Establishment of calculation model and application [J]. Energy Conversion and Management, 2018(166):522-533.
- [4]DASCALAKI E G, DROUTSA K, GAGLIA A G, et al. Data collection and analysis of the building stock and its energy performance—An example for Hellenic buildings [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(8):1231-1237..
- [5]陈涛,孙韩雪,朱照琪,等.(准)共晶系相变储能材料的研究进展[J].化工进展,2019,38(7):3265-3273.  
CHEN Tao, SUN Hanxue, ZHU Zhaoqi, et al. Progress in studies of (quasi-) eutectic phase change energy storage materials [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(7):3265-3273.
- [6]ESEN M. Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump [J]. Solar Energy, 2000, 69(1):15-25.
- [7]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.
- [8]QU S, MA F, JI R, et al. System design and energy performance of a solar heat pump heating system with dual-tank latent heat storage [J]. Energy & Buildings, 2015, 105:294-301.
- [9]MAARAOUI S, CLODIC D, DALICIEUX P. Heat pump with a condenser including solid-liquid phase change material [C]//International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, USA, 2012.
- [10]BONAMENTE E, AQUINO A, COTANA F. A PCM thermal storage for ground-source heat pumps: Simulating the system performance via CFD approach [J]. Energy Procedia, 2016, 101:1079-1086..
- [11]QU M L, TANG Y B, ZHANG T Y, et al. Experimental investigation on the multi-mode heat discharge process of a PCM heat exchanger during TES based reverse cycle defrosting using in cascade air source heat pumps [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 151:154-162.
- [12]CHEN X M, ZHANG Q, ZHAI Z J, et al. Performance of a cold storage air-cooled heat pump system with phase change materials for space cooling [J]. Energy and Buildings, 2020, 228(5):110405.
- [13]YOUSSEF W. CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 157:498-510.
- [14]TAN G, ZHAO D L. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86:187-198.
- [15]LI Y, ZHANG N, DING Z. Investigation on the energy performance of using air-source heat pump to charge PCM storage tank [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28:101270.
- [16]ZOU D, MA X, LIU X, et al. Experimental research of an air-source heat pump water heater using water-PCM for heat storage [J]. Applied Energy, 2017, 206(15):784-792.
- [17]HAN Z, BAI C, XIAO M, et al. Study on the performance of solar-assisted transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system with phase change energy storage suitable for rural houses [J]. Solar Energy, 2018, 174:45-54.
- [18]WU J H, YE F, LIU C, 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.

- [19] AGYENIM F, HEWITT N. The development of a finned phase change material (PCM) storage system to take advantage of off-peak electricity tariff for improvement in cost of heat pump operation [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(9): 1552-1560.
- [20] DONG J, LI S, YAO Y, et al. Defrosting performances of a multi-split air source heat pump with phase change thermal storage [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 55: 49-59.
- [21] 王长君, 刘硕, 丁薛峰. 相变储能技术在清洁供暖中的应用研究 [J]. *华电技术*, 2020, 42(11): 91-96.  
WANG Changjun, LIU Shou, DING Xuefeng. The study on application of phase change energy storage technology in clean heating [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(11): 91-96.
- [22] BENLI H, DURMUS A. Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating [J]. *Energy & Buildings*, 2009, 41(2): 220-228.
- [23] BENLI H. Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 581-589.
- [24] KELLY N J, TUOHY P G, HAWKES A D. Performance assessment of tariff-based air source heat pump load shifting in a UK detached dwelling featuring phase change-enhanced buffering [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(2): 809-820.
- [25] MORENO P, CASTELL A, SOLÉ C, et al. PCM thermal energy storage tanks in heat pump system for space cooling [J]. *Energy & Buildings*, 2014, 82: 399-405.
- [26] KOELJ R, MLAKAR U, ZAVRL E, et al. An experimental and numerical analysis of an improved thermal storage tank with encapsulated PCM for use in retrofitted buildings for heating [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 248: 111196.
- [27] ALKHWILDI A, ELHASHMI R, CHIASSON A. Parametric modeling and simulation of low temperature energy storage for cold-climate multi-family residences using a geothermal heat pump system with integrated phase change material storage tank [J]. *Geothermics*, 2020, 86: 101864.
- [28] KAYGUSUZ K, AYHAN T, et al. Solar-assisted heat pump systems and energy storage [J]. *Solar Energy*, 1991, 47(5): 383-391.
- [29] COMAKLI O, KAYGUSUZ K, AYHAN T. Solar-assisted heat pump and energy storage for residential heating [J]. *Solar Energy*, 1993, 51(5): 357-366.
- [30] KAYGUSUZ K. Performance of solar-assisted heat-pump systems [J]. *Applied Energy*, 1995, 51(2): 93-109.
- [31] KAYGUSUZ K. Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems [J]. *Energy Conversion & Management*, 1995, 36(5): 315-323.
- [32] KAYGUSUZ K, AYHAN T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating [J]. *Energy Conversion and Management*, 1999, 40(13): 1377-1396.
- [33] KAYGUSUZ K. Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump [J]. *Renewable Energy*, 2000, 21(1): 79-102.
- [34] ESEN M, AYHAN T. Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials [J]. *Energy Conversion & Management*, 1996, 37(12): 1775-1785.
- [35] ESEN M, DURMU A, DURMU A. Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials [J]. *Solar Energy*, 1998, 62(1): 19-28.
- [36] QI Q, DENG S, JIANG Y. A simulation study on a solar heat pump heating system with seasonal latent heat storage [J]. *Solar Energy*, 2008, 82(8): 669-675.
- [37] HAN Z, ZHENG M, KONG F, et al. Numerical simulation of solar assisted ground-source heat pump heating system with latent heat energy storage in severely cold area [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(11): 1427-1436.
- [38] NIU F X, NI L, QU M L, et al. A novel triple-sleeve energy storage exchanger and its application in an environmental control system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(1): 1-6.
- [39] NIU F, NI L, YAO Y, et al. Performance and thermal charging/discharging features of a phase change material assisted heat pump system in heating mode [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58(1-2): 536-541.
- [40] QU D, NI L, YAO Y, et al. Reliability verification of a solar-air source heat pump system with PCM energy storage in operating strategy transition [J]. *Renewable Energy*, 2015, 84: 46-55.
- [41] FIORENTINI M, COOPER P, MA Z. Development and optimization of an innovative HVAC system with integrated PVT and PCM thermal storage for a net-zero energy retrofitted house [J]. *Energy & Buildings*, 2015, 94(7): 21-32.
- [42] REAL A, GARCIA V, DOMENECH L, et al. Improvement of a heat pump based HVAC system with PCM thermal storage for cold accumulation and heat dissipation [J]. *Energy & Buildings*, 2014, 83: 108-116.
- [43] NI L, QU D H. An experimental study on performance enhancement of a PCM based solar-assisted air source heat pump system under cooling modes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 434-452.

[44] YOUSSEF W, GE Y T, TASSOU S A. Effects of latent heat storage and controls on stability and performance of a solar assisted heat pump system for domestic hot water production[J]. Solar Energy, 2017, 150: 394-407.

[45] WU J, XIAN T, LIU X. All-weather characteristic studies of a direct expansion solar integrated air source heat pump system based on PCMs[J]. Solar Energy, 2019, 191: 34-45.

[46] WANG Z, WANG F, MA Z, et al. Performance evaluation of a novel frost-free air-source heat pump integrated with phase change materials (PCMs) and dehumidification [J]. Energy Procedia, 2017, 121: 134-141.

[47] 陈尔健, 贾腾, 姚剑, 等. 太阳能空调与热泵技术进展及应用[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 40-48.  
CHEN Erjian, JIA Teng, YAO Jian, et al. Progresses and applications of solar air conditioning and heat pump technologies [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 40-48.

[48] 陈健勇, 李浩, 陈颖, 等. 空气源热泵空调技术应用现状及发展前景[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 25-39.  
CHEN Jianyong, LI Hao, CHEN Ying, et al. Application status and perspectives of air-source heat pump air conditioning technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 25-39.

(本文责编:张帆)

作者简介:

王长君(1980),男,工程师,工学硕士,从事储电、储热/冷等项目的开发研究,02010891@163.com;  
闫君\*(1984),男,副教授,工学博士,从事高效储热技术研究,miraclebwh@sjtu.edu.cn。  
\*为通信作者。

\*\*\*\*\*

“固体氧化物电池”专刊征稿启事

化石能源是当今时代主要的燃料,燃烧时会释放出大量二氧化碳以及硫、氮氧化物,造成了严重的温室效应和环境污染。气候变化是人类面临的全球性问题,随着温室效应的进一步加剧,如何控制二氧化碳的排放量已经成为全球性的系统问题。在这一背景下,世界各国以全球协约的方式减排温室气体,我国由此提出了“2030年前碳达峰,2060年前碳中和”的战略目标。然而,想要实现“双碳”目标,还必须改变以化石能源为主体的能源结构,建立以清洁能源为源头、以氢能作为媒介的新型能源体系。在新型能源体系中,固体氧化物燃料电池(SOFC)和固体氧化物电解池(SOEC)将起到关键的作用。通过SOEC可将风光水电等低品质电能直接、高效地转化为储存在碳氢化合物中的高品质化学能,通过SOFC可将碳氢化合物中的化学能持续、高效、稳定地转化为电能,并且这个过程不受卡诺循环的限制。然而,想要真正发挥SOFC和SOEC在新型能源体系中的关键作用,必须要克服性能、衰退、规模这三大挑战。

鉴于当前的问题和机遇,《综合智慧能源》(原《华电技术》)特推出“固体氧化物电池”专刊,邀请武汉大学刘通副研究员、哈尔滨工业大学张雁祥教授、武汉大学王瑶副教授担任特约主编,共同探讨固体氧化物电池性能、稳定性和产业化发展等方面的研究进展,并对相关研究进行总结和展望,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1) 固体氧化物电池高温CO<sub>2</sub>电解研究。(2) 固体氧化物电池原位溶出纳米电极研究。(3) 管式电池及管式电池堆研究。(4) 平板电池及平板堆研究。(5) 固体氧化物电池电极材料研究。(6) 固体氧化物电池质子导体研究。(7) 固体氧化物电池电极表面过程研究。(8) 固体氧化物电池电极内传质行为研究。(9) 质子型固体氧化物电池堆研究。(10) 固体氧化物电池电极制备工艺研究。(11) 固体氧化物电池电极结构-性能模拟研究。

二、时间进度

专刊拟于2022年5月31日截稿,2022年择期优先出版。

三、征稿要求

- (1) 专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2) 按照《综合智慧能源》论文格式要求使用Word软件排版,论文模板请在网站(www.hdpower.net或www.ienergy.cn)首页作者中心下载。
- (3) 请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4) 论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1) 在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.ienergy.cn),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2) 邮箱投稿:liu\_tong@whu.edu.cn(刘老师);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3) 咨询联系:刘芳 0371-58501060/13838002988;杨满成 010-63918755/13801175292。