

相变蓄能在热泵系统中的应用研究

周易^{1,2} 张时华² 徐笑锋^{1,2}

1. 上海交通大学机械与动力工程学院

2. 上海海立电器有限公司

摘要:“双碳”目标要求2030年达到碳达峰。供热与供冷能耗占据着碳排放的较大比例。热泵技术是实现节能减排的有效技术手段,但是热泵系统受环境温度、系统流程等影响较大。相变储能技术可有效地提升热泵系统能效,并解决低品位能量在时间、空间上的不匹配问题。结合相变储能技术与热泵系统,从热泵制冷、热泵供热及热泵除霜三方面对相关技术与研究进行了归纳总结,并着重对相变材料的性能进行了阐述。针对目前相变储能技术在热泵系统中的应用问题进行了探讨,发现提高材料储能密度、强化换热、结构优化等方面是未来的发展趋势,为进一步推广相变储能技术在热泵系统中的应用提供依据与支持。

关键词:“双碳”目标; 热泵系统; 相变蓄能; 相变材料

DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2023.11.011

Application Research on Phase Change Energy Storage in Heat Pump System

ZHOU Yi^{1,2}, ZHANG Shihua², XU Xiaofeng^{1,2}

1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University

2. Shanghai Haili Electric Appliance Co., Ltd.

Abstract: The "Double Carbon" goal requires reaching carbon peaking by 2030. Heating and cooling energy consumption accounts for a large proportion of carbon emissions. Heat pump technology is an effective technical means to achieve energy saving and emission reduction, but heat pump systems are greatly affected by environmental temperature and system processes. Phase change energy storage technology can effectively improve the energy efficiency of heat pump systems and solve the problem of mismatch between low-grade en-

收稿日期: 2023-04-14

第一作者: 周易(1969-10-),男,博士生,正教授级高级工程师,长期从事热泵领域压缩机技术的研发工作

ergy in time and space. Combined with phase change energy storage technology and heat pump system, the relevant technologies and research are summarized from three aspects: heat pump refrigeration, heat pump heating, and heat pump defrosting, and the performance of phase change materials is emphasized. The current application problems of phase change energy storage technology in heat pump systems are discussed, and it is found that improving material energy storage density, strengthening heat exchange, and optimizing structure are the future development trends, providing basis and support for further promoting the application of phase change energy storage technology in heat pump systems.

Key words: "Double Carbon" Goal; Heat Pump System; Phase Change Energy Storage; Phase Change Material

0 前言

国际能源署在会议报告中指出,全球化石能源危机加快了能源转型,需要缩小能源生产和消费之间的差距。风能和太阳能等可再生能源的使用量持续增长,但是其能源占比不足 15% (如图 1 所示)。热泵技术是一种充分利用低品位热能的高效节能装置,是实现碳达峰、碳中和目标的有效技术手段^[1]。目前,我国已将热泵技术划入可再生能源范畴,并在“十三五”计划中有所体现,但热泵受环境温度影响,在系统效率波动,冷热源利用等方面存在一定问题。

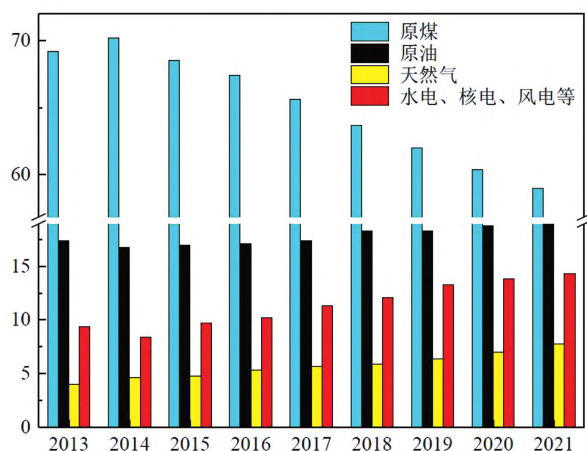


图 1 我国能源消耗的构成占比(%)

相变储能技术是以潜热储能为主要载体,提供

较高的能量储存密度,与传统的显热储能系统相比,潜热储能系统需要更小的重量和在给定能量下的物质体积。另外,潜热储能有能力在一个常数或接近恒定的温度下释放能量^[2],同时热泵作为节能、高效、低碳的设备,广泛应用于室内供暖和热水供应领域,但本身的技术短板限制了应用场景,如低温环境工况下能耗比低,换热器表面结霜,热水箱占地大。为解决热泵技术短板,多数学者开发了蓄热型热泵系统,提高了热泵能耗性能,应用范围进一步扩展。

本文根据相变储能技术和热泵技术的结合应用,分析相变储能应用于热泵系统的可行性。从相变储能应用于热泵供冷系统、相变材料应用于热泵供热系统以及热泵除霜等方面对现有研究进行归纳,梳理了相变材料应用于热泵系统的重要影响因素与系统流程,并重点针对相变材料的热物性进行了重点阐述,论证相变储能技术在热泵供热系统中应用的有效性。

1 相变材料的分类

相变材料可分为有机物、无机盐和共晶金属三种,其材料特性如表 1 所示。相变温度必须与应用温度操作范围相匹配。相变储能技术对相变材料筛选要求其具有相变潜热高、体积变化小、导热系数高、化学稳定性高、无腐蚀、无毒、难燃、可重复成

表1 相变材料潜热蓄热特性研究

	有机石蜡化合物	有机糖醇	无机盐水合物	无机金属
相分离	无	无	严重	无
化学稳定性	稳定	稳定	高温时失水,不稳定	稳定
体积变化	约10%	约10%	约10%	无
热导率	低	低	高	高
在热能中的应用存储	广泛应用	广泛应用	广泛应用	应用率低

核而无相分析、过冷度低、价格低、供应充足等优良性能^[3]。

相变储能技术的高效性与相变材料换热性能是密不可分的。目前,大多数研究围绕着复合相变材料的强化相变传热,优化单一材料的短板,用于提升相变蓄热装置传热效果。其主要有五种方法(如图2所示):

- 1)加翅片或者肋片,增大换热面积^[4]。
- 2)加入高导热系数材料,如纳米金属,形成符合相变材料,增大导热系数^[5]。
- 3)加入多孔介质,如金属泡沫网,制备复合相变材料,强化导热路径,增大换热系数^[6]。
- 4)用聚合物包裹材料形成相变微胶囊,增大换热面积的同时,防止材料泄漏或中断与周边反应^[7]。
- 5)多温区相变材料组合构造,改善蓄热装置内不同换热单元相变速率的均匀性,提高了换热效率^[8]。

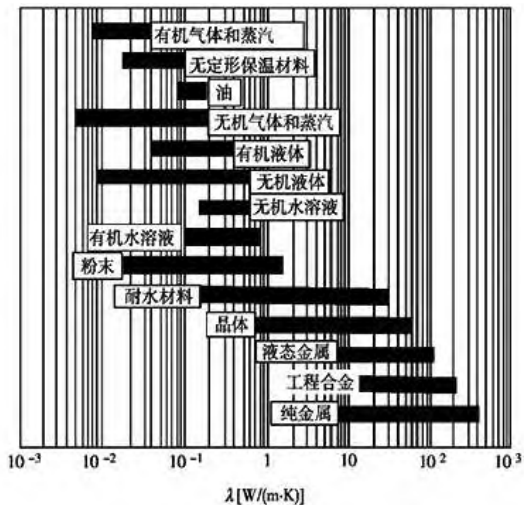


图2 各种物质热导率的范围

为进一步探求相变材料的熔融特性和传热分析,相关学者从宏观尺度和微观层面分别展开试

验。Zheng 等^[9]利用定向加热和可视化试验,探求加热布局对泡沫铜-石蜡复合相变材料换热性能的线性关系。Jin 等^[10]使用不同孔径泡沫铜和饱和石蜡配置复合材料。观测相变过程中温度场典型时间刻度瞬态变化,从宏观尺度进行可视化试验,可以直观地观测相变过程,优化复合相变材料的配置,利用电子显微镜研究相变材料的微观层面,推演相变过程。Wang 等^[11]制备一种碳结构相变微胶囊,得到了不同质量分数膨胀石墨与复合材料导热系数的数学模型。通过晶体分析,Sari 等^[12]得到相变转变过程中形貌特征,预测相变进行时长,与无相变材料的换热流体相比,提高了换热流体的比热容,由于增加了分散相的面容积比而提高了换热速率,减少了换热器和系统网络。综上所述,在寻求适合热泵系统的相变材料同时,提高相变材料的储热密度与传热特性仍是当下面临的较大问题。

2 相变材料应用于热泵供冷系统

相变储能技术应用在空调系统中可提高能源利用效率。夜间通常使用相变蓄冷材料、复合冰进行蓄冷,白天使用可以克服高峰和非高峰时段的能量需求不匹配问题。复合冰是指使用低于冰点3~6℃的乙二醇或盐水溶液,通过冰罐或去离子水封装的塑料球循环产生的二元混合相变蓄冷材料。由于在充冷循环中消除了聚变潜热,从而使水转化为冰时获得更高的存储容量。吴赞侠等^[13]利用热力学软件对符合冰和相变蓄冷材料进行了蓄冷和放冷仿真模拟,分析对比两种材料在相变过程中蓄冷量和蓄冷时间的变化规律。潜热值的影响使得相变材料蓄冷量更大。在相同体积下,冰蓄冷放冷速率高,放冷更快,相变材料导热系数的影响使其

放冷时间长,温度较稳定。

针对蓄冷空调系统换热系数较低的情况,李天阳^[14]提出耦合相变材料与换热装置形成蓄冷器,模拟换热过程,分析了载冷剂进口质量流量对蓄冷速率和出口温度的影响。在蓄冷过程中,相变材料完成度无法预知。王聪^[15]设计了一种管肋状蓄冷换热器,探索中心部分材料相变进度影响因素。设计是由管内载热流体与外壁相变材料换热,建立相应的传热数学模型,利用热力学软件分析相变材料温度变化过程和相界面移动状况。

大多数蓄冷型空调系统采用球形胶囊填充床储能,利用每单位体积的储能单元容量高。Fang等^[16]用直径100 mm、壁厚1 mm的聚合物球形胶囊填充水作为相变材料填料床蓄热单元,对蓄冷空调系统的性能进行了实验研究。实验系统由制冷循环回路(1-4-3-2)、充冷循环回路(4-18, 17-9-6-15-12)、放冷循环回路(6-15-13-7-9)和供冷循环回路(7-8-11)组成(如图3所示)。结果表明,在相变材料潜热蓄冷期间,系统蒸发器和冷凝器压力降低,系统性能系数在4.1~2.1之间变化。蓄冷箱放冷速率在8.5~3.4 kW之间变化,在放冷期间放冷量逐渐增加到45 MJ。实验表明采用球形胶囊填料床的蓄冷空调系统具有更好的性能,在充放冷期间能够稳定工作。

Paramesh等^[17]对可持续性热能储存(包括建筑应用的潜热能和冷热能)进行了理论研究,得出了不同的建筑结构和暖通空调设备相结合的蓄热材料性能评估,微纳米封装的相变材料将提高热能储存的整体性能,被动式建筑设计可达到约10%~15%的节能效果,主动技术可达到45%~55%的节能效果。

冰蓄冷空调发展较为成熟,因其蓄冷材料价格低廉、储能密度大的优点已经实现规模化应用。大多数学者专家将蓄冷材料应用于系统蒸发段进行潜热蓄冷,不仅大大提升了热泵供冷系统的能效,更提高了制冷量,减小了压缩机工作负荷。目前,用于热泵供冷系统的蓄冷材料温度区间多集中在5℃左右,但是其强化传热、系统循环稳定性仍是研究热点。

3 相变材料蓄热供热

蓄热型空气源热泵是对传统热泵的优化改进。环境温度高时,热泵制热能力高,同时将多余热量存储,环境温度过低时,将这部分储存的热量利用到热泵系统中,缓解供需不匹配的矛盾。

马素霞等^[18]设计开发了相变蓄热式空气源热泵装置,环境温度较低时,利用相变蓄热器有效解决除霜和启动延迟问题。相变蓄热装置是由蓄热

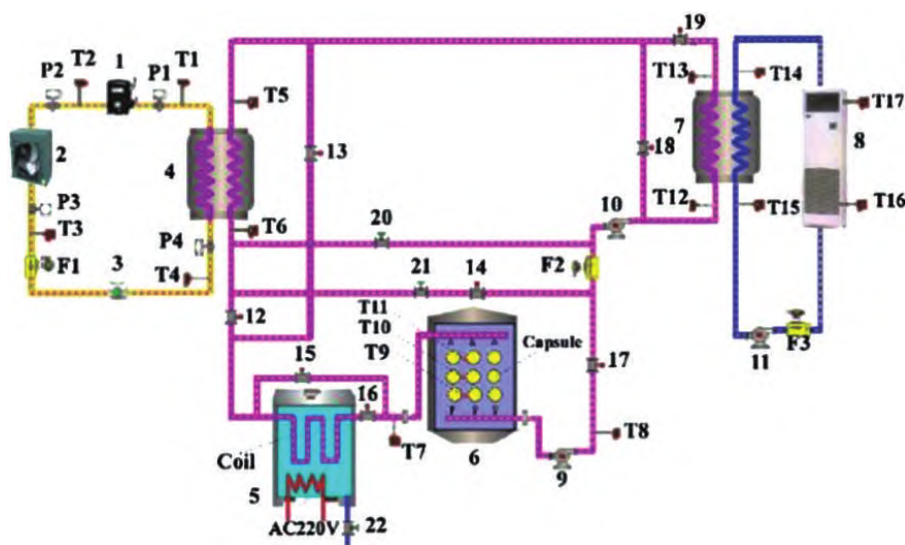


图3 蓄冷空调多功能试验系统循环图

1.压缩机 2.冷凝器 3.节流膨胀装置 4.蒸发器 5.预热器 6.蓄冷桶 7.板式换热器 8.室内风机盘管机组 9~11.循环泵 12~19.电磁阀 20~22.开关阀

材料、冷凝盘管和橡塑保温层组成。系统设置了供热—蓄热—放热—除霜几种模式。在焓差实验室内以环境温度为控制变量,分析装置的蓄放热速率和除霜特性效果。实验结果可知,蓄热式热泵设备的蓄放热能力可以满足低温工况下的供热需求,有效解决传统热泵供需矛盾,同时除霜功能有效地缩短了50%除霜时间,提高整体装置的供热性能。刘梦云^[19]通过经济体系模型和实际工况模拟分析蓄热型热泵供暖系统,提出相变蓄热器承担建筑热负荷的蓄热比定义。当蓄热比为60%时,经济模型年值最低,经济性较好,同时谷电费用占比近70%,一定程度上可以缓解城市弃电时间段问题,整体系统具有良好的市场前景。

传热热泵热水器在设备安装和用户使用方面存在的问题。安装空间需求大,同时热水箱占地较大,出水时需要配合热水循环泵,后期维护成本高。商用大功率热泵机组配置开放式水箱,水箱水温变化幅度较大和箱体腐蚀泄漏问题对整体系统运行存在重大隐患。

LONG 等^[20]优化传统热泵热水器结构,设计了相变蓄热式热泵热水机组,从系统原理图4看出,该系统充分利用环境温度源作为低温端,蒸发器内制冷剂蒸发吸收低温段热量,再用压缩机压缩成高温高压的气态,通过冷凝盘管放热给相变材料,进行相变储能。当用户端盘管用水时,高温相变材料进行逆过程释放热量,达到加热冷水的目的。实验测得系统热泵输入功率和相变材料释放热量总值,得出系统能效比值超过3.08。

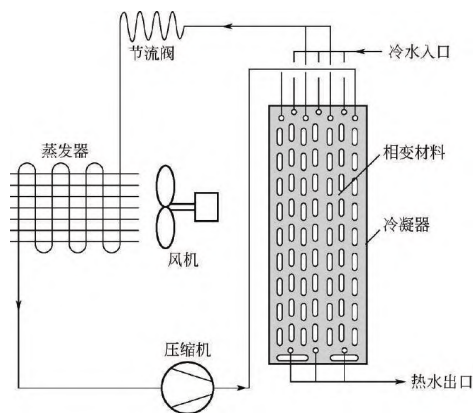


图4 相变蓄热式热泵热水器系统

为选择最合适的蓄热材料用于蓄热型热泵热水器,巫江虹等^[21]对三水醋酸钠和石蜡的蓄热性能进行比较。研究采用添加增稠剂和成核剂,复合相变材料的储(放)热时间比石蜡的大幅度减少。所制备的相变材料应用于复叠式蓄热型空气源热泵热水器^[22],分析耦合系统的蓄热和放热过程。实验发现,蓄热阶段系统电功率快速上升,机组瞬时能效比缓慢减低。水箱中测量点的温度变化速率不一致,水箱内呈现出分层加热现象。放热阶段,相变材料的温度变化比同高度的水温波动较慢,相变材料固液相变时内部热阻高,换热有延迟(见图5)。

热泵供热系统中,相变储能技术多用于冷凝器与压缩机端的热量回收利用。压缩机出口温度最高可达90℃以上,该部分热能的利用不仅可提高系统能效,还可以提高整体系统的焓效率。大多数学者针对热泵供热制备了55~80℃的相变材料,其潜热值较蓄冷材料较低,且循环稳定性未知。蓄热式热泵供热系统多利用无机相变材料,其腐蚀性与毒性也是限制其应用的关键因素。

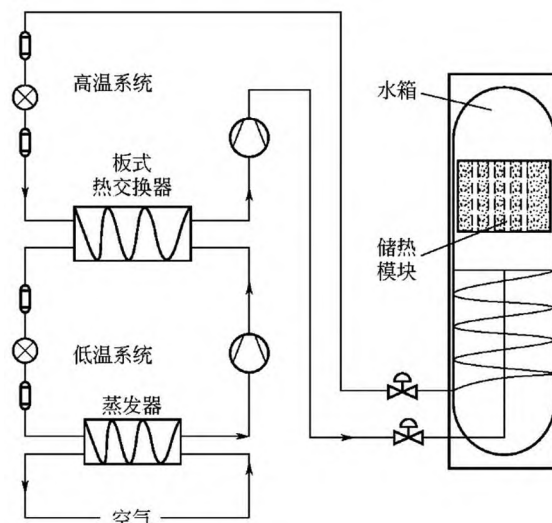


图5 复叠式蓄热型空气源热泵热水器原理图

4 相变材料蓄热除霜

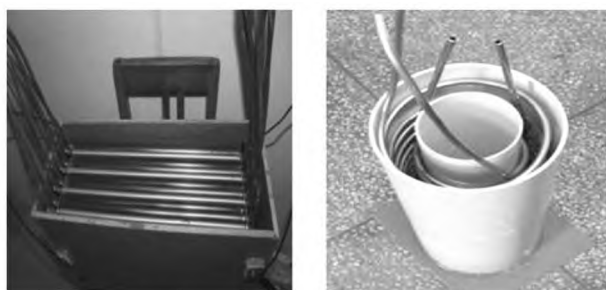
空气源热泵系统优化和节能技术的关键是除霜和抑制结霜。蒸发器表面结霜主要的影响因素是空气露点温度和蒸发器管壁温度。蒸发器的总传热系数、取热量和空气温度等因素决定了蒸发温

度,理论设计中结霜的进程是根据空气的干球温度和相对湿度判定。空气源热泵在低温高湿地区供热,室外蒸发器会结霜,霜层堵塞翅片间隙,减小了空气的流速,增加了换热热阻,影响了机组的制热性能。抑制结霜首先可以改变蒸发端周边空气参数,其次改变热泵系统内热流体的流程,再者直接从霜的结构入手,添加外在驱动力干涉成形。

电除霜的电耗能占比过大,经济性较低。逆循环除霜对用户体验影响较大。热气旁通法可以有效解决除霜且不会降低室内用户舒适性,但由于其除霜时间过长,所损失的能耗较大,节能效果不佳。蓄热除霜可以分为水蓄热和相变蓄热。水蓄热利用显热蓄热,经济性好,比热较小,蓄热占用体积过大。相变蓄热除霜利用相变材料高潜热值,蓄热器体积可控,结合热泵系统布局,有较好的除霜效果。与其他除霜技术对比,蓄热除霜同时提高了压缩机的吸排气压力和系统稳定性。

丁艳等^[23]搭建了相变除霜系统,利用热力学软件对系统传热模型进行分析,探讨蓄热器换热管数量、换热温度差对除霜效果的影响。研究发现,换热管数量的增加对换热性能的提升有着显著效果,提高管内制冷剂温度与相变材料的温度差,能耗对比除霜效果成正比关系。董建锴等^[24]针对多联机空气源热泵系统,设计相变蓄能除霜系统,对换热结构和强化换热方法进行实验分析,对比了翅片管型和盘管型蓄能器的性能特性。实验结果显示,热泵机组满负荷运行时,相变蓄能装置蓄热,盘管型换热结构有效降低了换热时间,制冷剂流程较长。从蓄放热整体供热周期对比发现,翅片式换热结构对系统供热影响更小。除霜过程中,翅片管型系统的吸气温度最低位 -6.2°C ,接近于正常供热的吸气温度,而螺旋盘管型相变蓄能器系统的最低吸气温度降低至 -19.9°C ,并持续较长时间(见图6)。

研究表明,相变储能技术可有效地解决热泵系统的结霜问题。多数学者设计的蓄热除霜系统较为稳定可靠,较传统的热气旁通除霜与电除霜系统COP可升高5%与35%左右。但是因为相变材料的储热密度有限,干燥剂的再生存在一定问题。



a. 翅片管型相变蓄能器

b. 螺旋盘管型相变蓄能器

图6 翅片管型相变蓄能器和螺旋盘管型相变蓄能器

5 结论

本文从相变材料分类、热泵供冷、热泵供热及热泵除霜等方面总结了相关研究,对相变储能技术应用于热泵系统的现状进行了分析阐述,探索了相关系统当下的发展现状与问题,主要得出以下结论:

1)相变储能材料的导热率、过冷度和相分离问题存在着一定的性能优化空间。

2)相变材料用于热泵供冷需要进一步可行性研究,材料放冷速率和系统匹配性需要大量实验论证。

3)热泵供热系统利用储能技术,使得热水供热更加稳定,对原有储罐式水箱进行了极大的体积优化。同时,对提高相变材料热转换率,提高相变材料的循环稳定性,解决腐蚀性等问题有待进一步研究。

4)使用相变储能系统,有效地缓解热泵除霜问题,提高了整体系统的能效比。干燥剂再生问题是未来研究的重点方向。

参考文献

- [1] 李宁.广义空气源热泵在中国的适用性研究[D].清华大学, 2015.
- [2] 赵洪运,邱国栋,宇世鹏.空气源热泵蓄热除霜研究进展[J].节能技术, 2019, 37(5): 429-434.
- [3] Kenisarin M, Mahkamov K. Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11: 1913-1965.
- [4] 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.
- [5] 华维三, 章学来, 罗孝学, 等. 纳米金属/石蜡复合相变蓄热材料的实验研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1723-1728.
- [6] Martinelli M, Bentivoglio F, Caron-Soupart A, et al. Experimental study of phase change thermal energy storage with copper foam [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 247-261.
- [7] 刘臣臻. 相变微胶囊储能过程传热与流动特性研究[D]. 中国矿业大学, 2017.
- [8] 王慧儒, 刘振宇, 姚元鹏, 等. 组合相变材料强化固液相变传热可视化实验[J]. 化工学报, 2019, 70(4): 1263-1271+1662.
- [9] ZHENG H P, WANG C H, LIU Q M, et al. Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 372-381.
- [10] Jin H Q, Fan L W, Liu M J, et al. A pore-scale visualized study of melting heat transfer of a paraffin wax saturated in a copper foam: Effects of the pore size [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 112: 39-44.
- [11] Wang T Y, Wang S F, Wu W. Experimental study on effective thermal conductivity of microcapsules based phase change composites [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 930-937.
- [12] Sari A, Bicer A, Alkan C. Thermal energy storage characteristics of poly(styrene-co-maleic anhydride)-graft-PEG as polymeric solid-solid phase change materials [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 219-225.
- [13] 吴赞侠, 吴刚, 曾强洪, 等. 蓄冷材料应用于潜艇空调的数值模拟[J]. 流体机械, 2008, 36(5): 75-79.
- [14] 李天阳. 空调蓄冷器相变蓄冷过程的强化传热研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.
- [15] 王聪. 高效相变蓄冷换热管实验研究及性能优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [16] Fang G, Wu S, Liu X. Experimental study on cool storage air-conditioning system with spherical capsules packed bed. Energy and Buildings, 2010, 42: 1056-1062.
- [17] Parameshwaran R, Kalaiselvam S, Harikrishnan S, et al. Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 2394-2433.
- [18] 文博, 马素霞, 蒋永明, 等. 蓄热蒸发型空气源热泵蓄热器特性实验研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(4): 922-927.
- [19] 刘梦云. 耦合相变蓄热器的空气源热泵系统应用模拟研究[D]. 内蒙古科技大学, 2020.
- [20] LONG Jianyou, ZHU Dongsheng. Numerical and experimental study on heat pump water heater with PCM for thermal storage [J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 666-672.
- [21] 巫江虹, 杨兆光, 吴青昊, 等. 热泵热水器用相变蓄热材料的性能研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 674-679.
- [22] 巫江虹, 王源霞, 游少芳, 等. 复叠式蓄热型空气源热泵热水器动态传热特性[J]. 化工学报, 2010, 61(s2): 69-71.
- [23] 丁艳, 蔡乐, 袁隆基. 低温空气源热泵相变蓄热除霜性能模拟研究[J]. 制冷与空调(四川), 2021, 35(3): 342-346+406.
- [24] 董建锴, 张龙, 姜益强, 等. 不同相变蓄能器对多联机空气源热泵蓄能除霜性能影响[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2332-2337.

(上接封三)

该平台将通过构建“一张地图”把握全区能源和“双碳”情况, 主抓重点用能建筑和重点用能单位“两个重点”, 覆盖“三个领域”建筑、企业和交通三大核心, 全方面提高区内能源消费和碳排放监测预警能力, 形成区级能源、碳排放数据统计、管理和对外发布的权威平台。

本次论坛从建设领域管理、绿色技术介绍、城市更新实例、绿色城区建设以及既有建筑改造等5个不同角度设立主题演讲, 系统介绍静安区碳排放全领域全过程管理思路, 以及全区重点用能建筑和重点用能单位的管理模式, 展示静安区“双碳”工作成效, 形成示范效应, 积极推进绿色低碳的更好发展。

上海市、区各相关部门, 上海市节能协会, 区分项计量重点楼宇、区重点用能单位代表受邀参加论坛。

(来源: 上海节能宣传)