

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.10.003

# 碳中和目标下热泵技术应用现状及前景分析

Application analysis and prospect of heat pump technology under the goal of carbon neutrality

孙健, 马世财, 霍成, 戈志华, 周少祥

SUN Jian, MA Shicai, HUO Cheng, GE Zhihua, ZHOU Shaoxiang

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

(College of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘要:**碳达峰和碳中和目标对各个行业降低碳排放都提出了更高的要求,未来我国能源结构也将进行重大调整,常规行业降低碳排放及可再生能源充分利用将成为重要的研究方向。在诸多节能减排技术中,热泵技术由于其显著的节能减排效果在民用及工农业中得到了广泛应用。针对热泵技术在分散式家用冷热领域,集中供热领域,农业、工业及储能行业的应用进行了综述分析。热泵技术研究未来将集中在新型循环流程、新型环保工质及关键部件研发等领域,在碳达峰、碳中和目标背景下成为具有显著节能减排效果的技术路线。

**关键词:**碳达峰;碳中和;节能减排;热泵技术;储能;热电协同

中图分类号:TK 123

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)10-0022-09

**Abstract:** Since the proposal of carbon peaking and carbon neutrality has made higher requirements for carbon emission reduction in different industries, the energy structure in China will make important adjustments accordingly. The research focuses on the way to reduce carbon emission in conventional industries and making full use of renewable energy. Among different energy saving and emission reduction technologies, heat pump technology has been widely used in civil, industrial and agricultural areas due to its remarkable performance of energy saving and emission reduction. The applications of heat pump technology in distributed household cooling and heating, centralized heating, agricultural, industrial and energy storage areas have been analyzed comprehensively. The main research direction of heat pump technology will focus on new circulation process, new environmental-friendly working medium, key component development, etc. Heat pump technology will be a significant energy saving and emission reduction technical route under the goals of carbon peaking and carbon neutrality.

**Keywords:** carbon peaking; carbon neutrality; energy conservation and emission reduction; heat pump technology; energy storage; synergy of thermoelectricity

## 0 引言

随着人类活动对全球气候的影响,气候危机正在逐渐加重。由于全球变暖,人类正在经历热浪、洪水、干旱、森林火灾和海平面上升等一系列灾害性天气气候事件<sup>[1]</sup>。全球平均气温正在以前所未有的速度上升,全球变暖水平保持在相比工业化前 1.5℃ 以下的可能性迅速降低,人类跨越不可逆转的翻转点的风险也在增加<sup>[2]</sup>。

2020年9月22日,中国在第75届联合国大会上提出将力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标。碳达峰,就是二氧化碳的排放不再增加,达到峰值后再慢慢降下去;碳中和,就是净零排放,指人类经济社会活动所必须的碳排放通过森林碳汇和其他人工技术或工程手段加以捕集、利用或封存,从而使排放到大气中的温室气体净增量为零<sup>[3]</sup>。

目前,我国工业能源消耗约占全国能源消耗总量的70%,而工业能源利用率低于世界平均水平,加工工业消耗的能源有50%以上转变为废气和废水形式的余热<sup>[4]</sup>。据统计,仅有30%的废热得到再利用,这是能源利用率低的主要原因<sup>[5]</sup>。建筑领域碳排放量每年约20亿t,约占到全国总碳排放量的

收稿日期:2021-05-08;修回日期:2021-08-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0104900);国网江西省电力有限公司科技项目(KH20010013);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020MS009)

20%,如考虑相关建材生产、运输等,将占到全国总排放量的近40%<sup>[6]</sup>。工业中低温余热的高效回收利用和建筑供暖、制冷及生活热水供能形式改造为热泵技术提供了广阔的应用场景。

热泵是一种通过输入少量高品位能量,从而将低温物体的热量转移到高温物体的装置。按驱动方式可分为压缩式热泵和吸收式热泵。压缩式热泵以氟利昂等工质为循环介质,通过消耗电力或机械功,实现热量由低温热源向高温热源的转移,制热性能系数(COP)可达3.0~7.0;吸收式热泵按用途分为增热型和升温型。增热型指利用少量高温热源热能,产生大量中温有用热能,制热COP可达1.6~2.4;升温型指利用大量中温热源热量产生少量高温有用热能,制热COP为0.4~0.6。

热泵技术比传统锅炉等方式可以显著降低煤、石油和天然气等一次能源消耗,进而显著降低碳排放,因此将成为实现碳达峰、碳中和目标的有效技术路线。

## 1 热泵在民用及工农业中的应用

热泵技术在民用及工业行业已广泛应用,本文针对热泵不同应用领域进行分析,具体包含以下几个方面。

### 1.1 分散式家用冷热领域

2018年全国建筑全寿命周期碳排放总量为49.3亿t CO<sub>2</sub>,占全国能源碳排放的51.2%,其中建筑运行阶段碳排放为21.1亿t CO<sub>2</sub>,占建筑全寿命周期碳排放的42.8%,占全国能源碳排放的21.9%<sup>[7]</sup>。为降低建筑运行阶段的碳排放,节能高效的分散式系统成为研究的主要方向。对分散式供暖的研究包括燃气壁挂炉、电采暖、中央空调、太阳能及空气能等可再生能源系统,其中空气源热泵以其节能性强、运行稳定性高等优势,在舒适家居及商用热水领域迅速占领市场。根据不同资源条件和用能对象,目前对多能互补供暖系统,如太阳能-空气源热泵等,在分散式冷热领域的应用展开研究。

文献[8]以西宁市一独立建筑为例,介绍了以空气源热泵为核心搭建的太阳能-空气源热泵联合供热系统,通过系统模型仿真和实际供暖效果测试,空气源热泵加热系统COP的平均值为2.4,室内平均温度维持在21.9℃左右,满足供热需求。并将联合供热系统与单纯的空气源热泵热水机组进行经济性和CO<sub>2</sub>排放量的比较。结果表明,联合供热系统的年均费用比单纯的空气源热泵热水机组下降了24.4%,一个供暖季内联合供热系统的CO<sub>2</sub>排放量比单纯的空气源热泵热水机组减少了41.6%,

减碳效果尤为显著。太阳能-空气源热泵联合供热系统流程如图1所示。

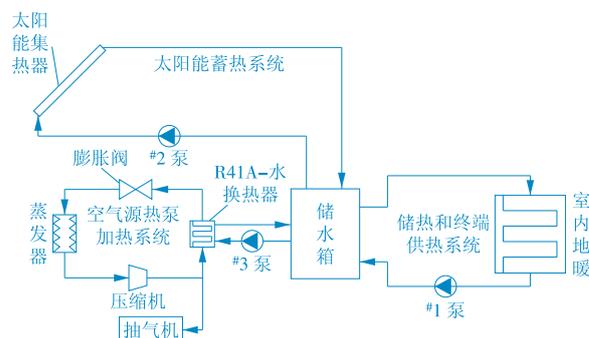


图1 太阳能-空气源热泵联合供热系统流程<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Flow of solar energy-air source heat pump hybrid heating system<sup>[8]</sup>

文献[9]在长江流域某住宅安装了空气源热泵和辐射地板供暖系统,通过对供暖效果进行测试,发现辐射地板采用35℃的热水供暖时,能够维持室内温度16~18℃,而且垂直方向温差在1℃以内,温度分布均匀,实现了较好的舒适性。

文献[10]对图2所示的多功能家用热泵空调系统进行了制冷兼制热水、单独制热水、供热兼制热水等7种运行模式的试验研究。图中T1—T12为温度传感器。结果表明,在合理的控制策略下,该多功能家用热泵空调器是可以连续稳定运行的,既能满足全年制冷、供热、除湿等需求,又能提供生活热水,同时还有夜间低能耗模式,既实现了家用热泵空调与热水器的一体化,一机多用,又可以集成安装,在家用冷热领域有广阔的应用前景。

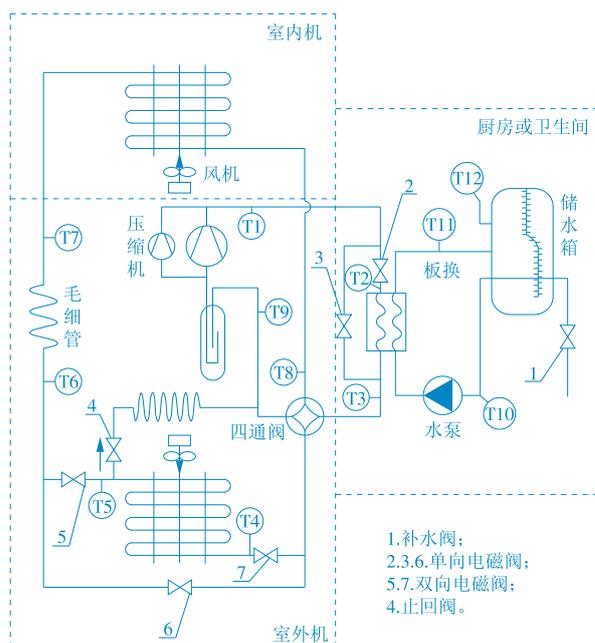


图2 多功能家用热泵空调系统原理<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Schematic working principle of the multi-functional household heat pump air conditioning system<sup>[10]</sup>

### 1.2 集中供热领域

《中国区域清洁供暖发展研究报告》中提出,中国拥有全球最大的集中供暖系统,管网长度超过 200 Mm,供暖面积接近 90 亿 m<sup>2</sup>,其中集中供热占全部供热负荷的 80%<sup>[11]</sup>。热电厂及燃气、燃煤锅炉作为集中供热的热源,其中有大量的热量可以回收利用。为了实现集中供暖为清洁供暖,相关研究对锅炉进行超低排放改造,对管网运行方式进行优化,采用吸收式热泵和压缩式热泵进行余热回收利用。

文献[12]以 2 台 300 MW 机组供热系统为例,对采暖抽汽压力、背压及一次网温度等因素对热源供热能力及供热能耗的影响进行讨论分析。结果显示,采用吸收式热泵换热技术降低一次网回水温度并配合提高背压是降低热源供热能耗的有效途径。此外,降低一次网回水温度对于增加既有管网输送能力也有明显作用。吸收式热泵供热系统流程如图 3 所示。

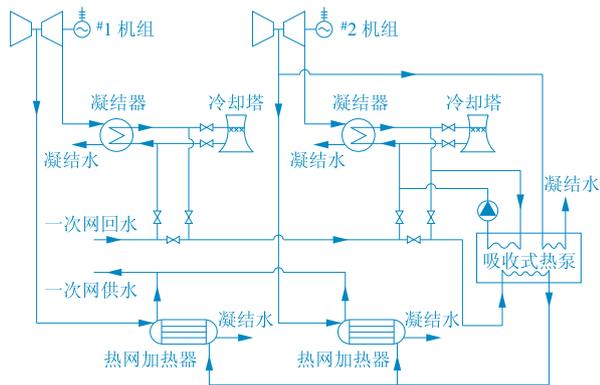


图 3 吸收式热泵供热系统流程<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Flow of the absorption heat pump heating system<sup>[12]</sup>

文献[13]提出一种大型空气能自适应热泵,其示意图如图 4 所示,具备较大制热负荷且占地面积较小,同时解决了多台空气能热泵同时使用空气侧相互影响的难题。此外,空气能自适应热泵还可在不同的室外温度下自动调节内部循环工质的质量和调节不同风机转速,进而解决了空气温度变化时制热量不能满足用户需求的难题。同时,空气能自适应热泵采用新型智能热水除霜系统,可以自动判断结霜区域并进行分区除霜。

地源热泵系统利用建筑物周围深埋的埋管系统与浅层能源(热源或冷源)接触,通过输入少量高品位能量,实现住宅内部与地热能完成热量交换。冬季热泵利用电能从土壤中取热,将热量传输给建筑物实现供暖;夏季热泵又利用电能将温度较高的室内热量排入土壤,为建筑物制冷<sup>[14]</sup>。地源热泵消除了传统空气源热泵制热效率低的应用缺陷,从长期来看,具有良好的发展前景。

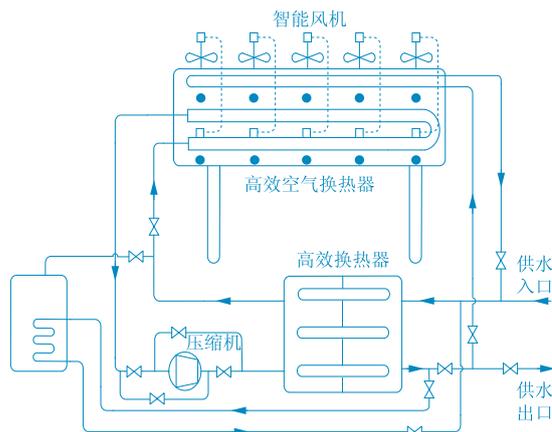


图 4 空气能自适应热泵系统示意<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Schematic air energy adaptive heat pump system<sup>[13]</sup>

太阳能热泵供热系统按照太阳能集热器和热泵蒸发器的连接方式,可以分为直膨式和非直膨式 2 种类型。直膨式太阳能热泵供热系统中的太阳能集热器与热泵蒸发器直接连接,而非直膨式太阳能热泵供热系统通过中间介质连接太阳能集热器与热泵蒸发器<sup>[15]</sup>。以某总建筑面积为 3 200 m<sup>2</sup>的示范小区为例,建筑物年供暖设计负荷 40 W/m<sup>2</sup>,供暖期为 180 d 为例计算,采用太阳能光热系统供暖,使用寿命期内节约常规能源代替量为 6 t 标准煤,CO<sub>2</sub>减排量为 14.9 t/a。建筑年采暖期天然气运行费用为 9.3 万元,太阳能光热系统运行费用为 3.7 万元,每年可节省运行费用 5.6 万元,节能减排和技术经济性良好。

在建筑供暖中采用太阳能热泵供暖技术,可以让太阳能资源替代常规能源,减少常规能源消耗,利于降低建筑供暖对常规能源的依赖,大幅度节省建筑能耗,而且太阳能热泵供暖技术基本是零排放、零污染,环境友好程度高,符合可持续发展的核心内涵<sup>[16]</sup>。

### 1.3 农业行业应用

为了保证农产品储藏品质,干燥已成为农产品加工过程中普遍的单元操作,而农产品干燥能耗仅次于造纸干燥能耗<sup>[17]</sup>。因此,在保证农产品干燥品质的前提下,需要寻求降低干燥过程能耗的方式<sup>[18]</sup>。热泵干燥是随着热泵技术的兴起而发展起来的,与传统干燥方式相比具有实现大气污染物和温室气体协同减排效果<sup>[19]</sup>。近年来,随着我国“煤改电”和“煤改气”政策的推广和落实,热泵干燥技术在农业方面的应用已成为干燥领域关注和研究的热点,包括对烟叶、玫瑰花和枸杞等的干燥都已得到一定应用<sup>[20]</sup>。

文献[21]研发设计了一种新型太阳能-热泵联合干燥装置,并进行干燥香菇试验验证。系统原理

如图 5 所示,图中 T1—T6 为温度传感器。试验结果表明,所设计的太阳能热泵联合干燥系统的 COP 在 3.50~4.35 之间,能源利用率在 0.58~0.78 之间,在

相同的干燥温度条件下,太阳能热泵联合干燥系统的太阳能利用率较普通热泵干燥系统高,节能减碳效果显著。

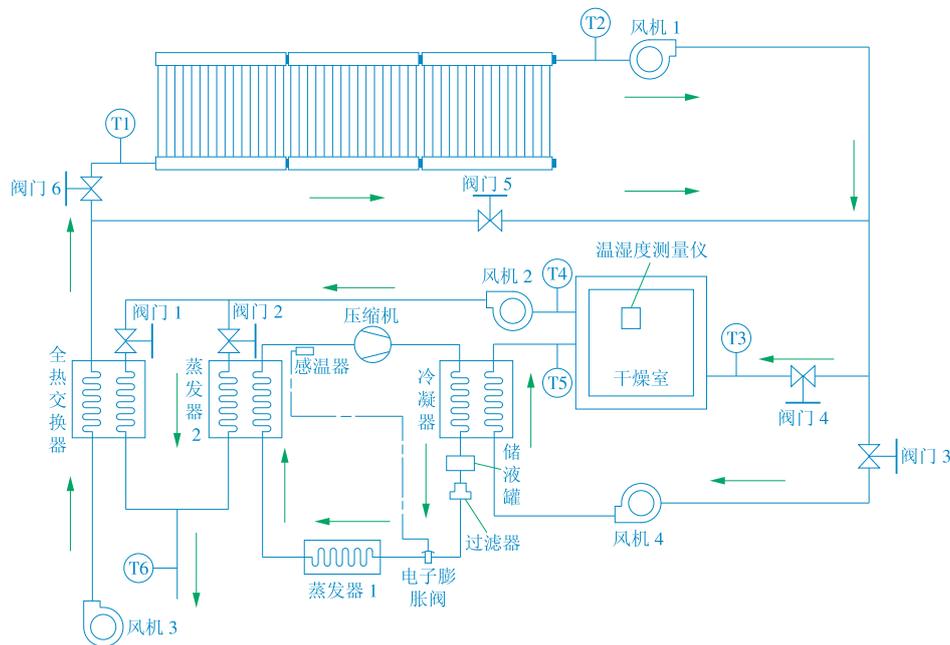


图 5 干燥系统原理<sup>[21]</sup>

Fig. 5 Working principle of the drying system<sup>[21]</sup>

文献[22]针对图 6 所示的半封闭式热泵干燥机,建立了空气处理流程与准二级压缩热泵系统耦合方案,建模分析了基于准二级压缩的过冷器和闪发器 2 种热泵系统流程的性能。结果表明,与传统热泵系统相比,2 种准二级压缩热泵系统均能降低压缩机排气温度;在冷凝温度为 50 ℃,蒸发温度为 -25~0 ℃ 工况下,过冷器系统制热 COP 提高了 5.0%~7.1%,闪发器系统制热 COP 提高了 2.3%~6.6%,为新型热泵干燥机开发提供依据。

品烘干上的应用,通过对比分析烘干机运行数据,得出热泵-电加热联合烘干的热风成本仅为纯电加热的 60.9%,在节能降耗和降低生产成本上有明显优势。

随着热泵干燥技术的日趋成熟,其优异的节能减排效果已被各种试验研究所证明,加之人们对环境问题的关注,热泵干燥技术已显现出广阔的应用前景。结合热泵多能互补的研究思路,针对热泵干燥系统与太阳能、微波和电热等系统的耦合研究已成为农产品干燥行业新的研究热点,为进一步实现农产品干燥的节能、降本、提质和增效提供了方向。此外,通过开发高温热泵来提高热泵干燥效率,是热泵干燥技术研究的另一个发展方向。

#### 1.4 工业行业应用

我国工业生产的能源效率为 20%~60%,余热总量非常巨大<sup>[25]</sup>。工业余热广泛存在于冶金、建材、食品及化工等行业,而我国对工业余热的资源回收率仅占 30%<sup>[26]</sup>,将工业余热充分回收利用作为常规能源的一部分替代品,是节能减排的有效途径。热泵作为回收工业余热的有效途径之一,在火力/核发电、印染、轮胎、油田和制药等行业低温余热回收过程中发挥了关键作用。

目前工业行业研究较多的是用压缩式热泵和吸收式热泵进行余热回收。压缩式热泵中以水源热泵技术应用最为广泛。例如,电厂以循环水或工

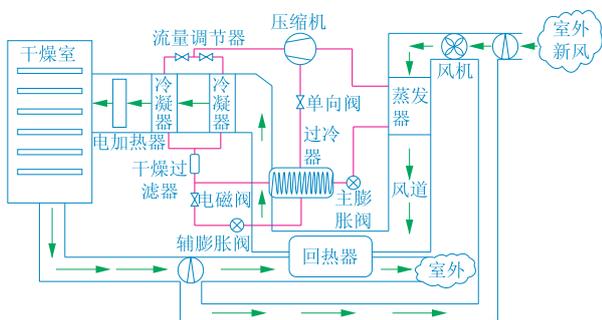


图 6 半封闭式热泵干燥机系统<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Schematic semi-closed heat pump drying system<sup>[22]</sup>

文献[23]介绍了空气源热泵机组在粮食烘干领域的应用特点,并与不同热源粮食烘干成本对比,发现空气源热泵初投资虽高于燃煤、燃油和电加热等烘干方式,但低运行成本及优良的环保特性为其今后在烘干领域的应用提供了保证。

文献[24]介绍了热泵-电加热联合烘干机在食

艺产热水作为热源水,通过热泵机组提升锅炉给水的品位,减少锅炉对燃煤的需求量,从而达到节能减碳的目的。在目前余热回收领域对吸收式热泵的应用研究有回热、多效、多级和压缩-吸收复合等技术,基于余热能量梯级利用原理,有效提升能源利用效率。此外,新型高温热泵等技术的设计研发势必会成为未来热泵在工业行业的主要研究方向。

文献[27]介绍了目前大多数印染企业都使用燃煤或燃油蒸汽锅炉,将生产工艺用水加热至 55~95 ℃,而印染结束后排出的废水温度高达 40~50 ℃,即常温水由 15 ℃ 加热至最终的排放温度 40~50 ℃ 所需要的能量全部来自于燃煤或者燃油,这部分能量却被直接排放。而利用水源热泵系统不仅可以充分利用地热尾水的余热,还能降低近 50% 的蒸汽耗量,进而减少 50% 左右的煤耗。煤耗每减少 1 t,排放粉尘可减少 21 kg,SO<sub>2</sub> 可减少 20 kg,NO<sub>x</sub> 可减少 7 kg。

以日排印染废水 10 000 t 的印染厂为例,平均日用煤量达到 120 t 以上,采用工业热泵系统回收废热来制取生产用热水,至少每天可节约用煤 60 t,每年可减少粉尘、温室气体及有害气体的排放量超过 720 t。每天可节约运行费用 44 887 元,按年运行 300 d 估算,每年可节约运行费用达 1 347 万元,当年即可收回用于工业热泵系统的所有投资[27]。

文献[28]以双钱集团股份有限公司载重轮胎分公司的改造为例,介绍热泵技术在轮胎工业中的应用,改造后的工业热泵系统工作原理如图 7 所示。改造后工业热泵系统在完成工艺冷却的同时通过间歇地利用机组的部分热回收和全热回收功能回收冷却过程中所排放出的热量,并使原有进入除氧器的软化水由 15, 20 和 25 ℃ 加热至 50 ℃,从而减少了蒸汽消耗,节省了燃煤用量,实现了能量的有序利用,同时 30 ℃ 的工艺冷却水不再经过水-水换热器,而是直接进入工业热泵机组蒸发器,这样可使机组的能效比大大提高,同时省去一套换热器和中间循环水泵,降低系统的能耗。该热泵系统稳定运行后,平均每小时可节约用煤 237.3 kg,每天节约用水 48 t,平均每小时节约用电 124.4 kW·h。以热泵系统 20 a 寿命计算,减排 CO<sub>2</sub> 343 320 t,SO<sub>2</sub> 1 114 t,NO<sub>x</sub> 970 t,减碳效果尤为显著。

热泵工作温度范围如图 8 所示。现有热泵技术受热力循环、工质物性及压缩机耐温耐压限制,只能工作在适宜的温度范围,难以满足大温差余热回收的温度范围,阻碍了热泵在某些场合的应用。针对以上问题,相关研究提出了耦合热泵技术。

耦合热泵是将吸收式热泵和压缩式热泵进行

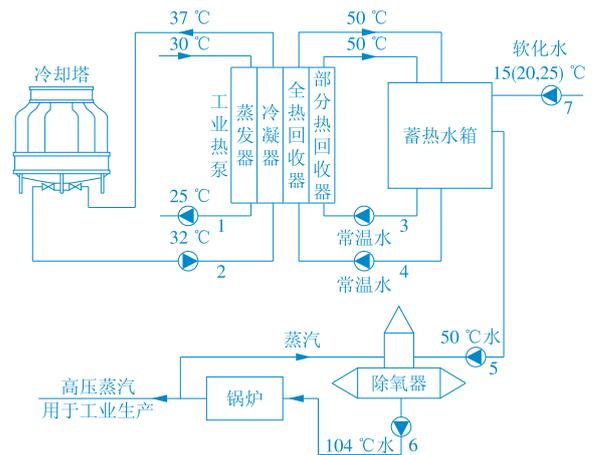


图 7 改造后工业热泵系统工作原理<sup>[28]</sup>

Fig. 7 Working principle of the industrial heat pump system after the transformation<sup>[28]</sup>

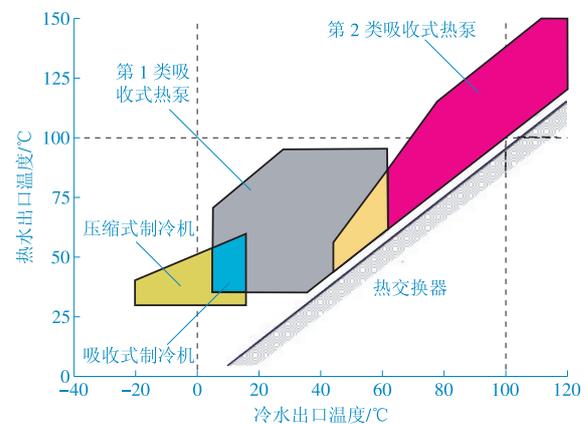


图 8 热泵工作温度范围

Fig. 8 Operating temperature range of the heat pump

深度耦合的系列热泵技术,相比于传统余热回收热泵,拓宽了吸收式热泵的升温区域,降低了压缩式热泵的耗电量,显著提升了工作温度范围和设备性能。

文献[29]针对一种用于直接回收工业余热制取高温热水的耦合热泵换热器,建立耦合热泵换热器的数学模型,对模型进行求解并分析了关键参数对耦合热泵换热器性能影响的变化规律。在设计工况下,当制取 133 ℃ 热水时,耦合热泵换热器 COP 达 3.6,压缩机排气压力为 1.2 MPa,排气温度为 79 ℃,远低于压缩机耐温耐压上限和润滑油失效温度,因此耦合热泵换热器在利用余热制取高温热水或蒸汽领域具有一定的应用潜力。耦合热泵换热器循环流程如图 9 所示。

### 1.5 储能行业应用

在实现碳达峰、碳中和目标背景下,未来风光电比例会大幅度提升。由于风光电负荷波动性强,经常会造成弃风、弃光现象,为了保证电网的稳定与安全,相关储能技术在电网调频中得到了广泛应

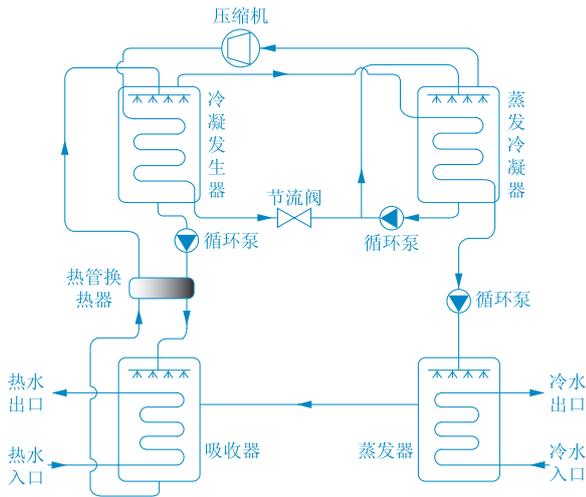


图 9 耦合热泵换热器循环流程

Fig. 9 Circulation process of the system coupled heat pump heat exchanger

用。储能系统与可再生能源发电配套可灵活调控风电、光伏等的出力,响应速度快,起到调峰调频和无功支撑的作用,有效解决高比例可再生能源发电的随机性、波动性和间歇性给电网带来安全和可靠方面的问题<sup>[30]</sup>。

目前对储能技术的研究主要集中在电储能、相变储能及化学燃料储能等形式上,并对多种储能形式的未来发展和应用趋势进行了展望。在未来大比例风光电的电源结构背景下,热泵在低温蓄冷蓄热等方面定有广阔的应用前景。

文献[31]建立了热电联产热力系统与电动热泵供热系统的变工况模型,研究变工况条件下机组耦合电动热泵余热回收系统供热时的热电解耦效果、煤耗特性以及相关影响因素。计算结果表明,热泵余热回收系统的加入有利于促进机组的热电解耦并产生节煤效益。此外,通过对比电动热泵和吸收式热泵 2 种余热回收技术的运行原理、调峰性能及节能性,发现电动热泵余热回收系统更适用于作为面向风电消纳问题时的电厂调峰手段。热电联产机组耦合电动热泵余热回水系统示意如图 10 所示,图中  $q_{m,o}$  为主蒸汽流量,  $t/h$ ;  $q_{m,h}$  为抽汽流量,  $t/h$ ;  $q_{m,p}$  为乏汽流量,  $t/h$ ;  $q_{m,c}$  为变工况调节级级后通过的蒸汽流量,  $t/h$ ;  $q_{m,j}$  为变工况后第  $j$  级抽汽流量,  $t/h$ ;  $Q$  为变工况后机组需输出的热出力,  $MW$ ;  $P$  为变工况后机组需输出的电出力,  $MW$ ;  $Q_{HP}$  为电动热泵供热量,  $MW$ ;  $P_{HP}$  为电动热泵驱动功率,  $MW$ 。

文献[32]提出一种电动热泵和蓄热装置联用的热电机组及其调峰方法,通过电动热泵和蓄热装置联用,根据热电厂的发电调度要求进行蓄热模式和放热模式切换,达到保证供热同时改变热电厂的上网发电量的目的;通过凝汽器和电动热泵的蒸发

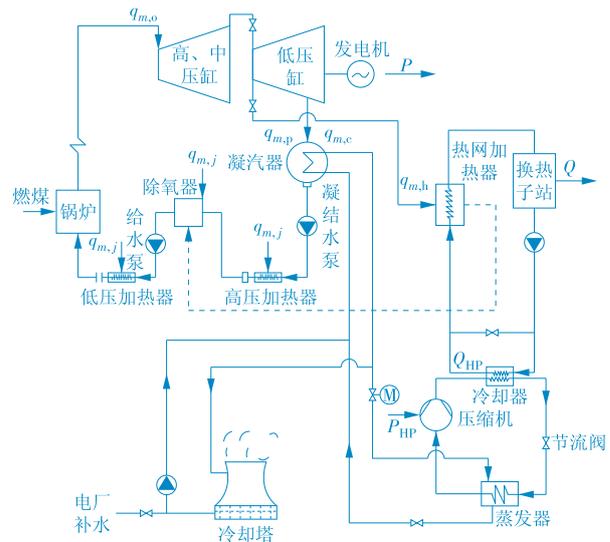


图 10 热电联产机组耦合电动热泵余热回水系统示意<sup>[31]</sup>

Fig. 10 Schematic waste heat return water system of CHP units coupled electric heat pumps<sup>[31]</sup>

器回收乏汽热量,降低热电厂的供热成本。文献[33]采用 Energy PRO 软件建模优化,认为热电联产机组耦合热泵与蓄热装置的联合辅助供热系统后可以提升系统整体能源利用率和经济性。

文献[34-36]基于热泵与蓄热装置的联合辅助供热系统提出了热电协同理念。热电协同概念下电动热泵耦合热水蓄热器的运行模式如图 11 所示。其基本运行流程为:在电负荷低谷期利用电热泵消耗电厂过剩电能供热,降低电厂上网电量,同时向蓄热器内储热;在电负荷高峰期,利用蓄热器放热,使得热电解耦后的机组可以视为纯凝机组发电。

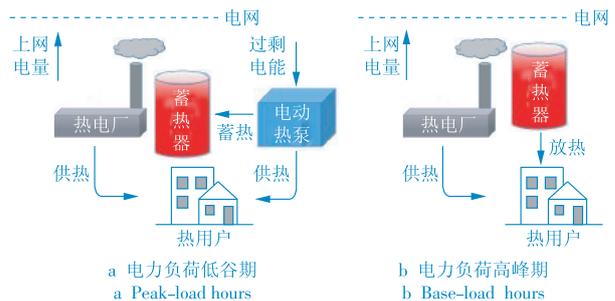


图 11 热电协同概念下电动热泵耦合热水蓄热器的运行模式<sup>[34]</sup>

Fig. 11 Operation mode of the electric heat pump coupled hot water accumulator under the concept of thermoelectric cooperation<sup>[34]</sup>

文献[37-39]介绍了基于相变储能的太阳能空气源热泵系统,该系统能够根据气象情况灵活切换 4 种供暖模式,大大减少了系统耗电量,通过独特设计的储能冷凝器,不仅可以调节太阳能空气源热泵系统能量分配,改善太阳能空气源热泵系统制热量和建筑热负荷之间不平衡的供需关系、提高太阳能利用率,还可以提高空气源热泵低温性能,快速恢

复供暖,从而实现提高太阳能空气源热泵系统整体性能的目的。在石家庄农村某户安装该系统进行研究。研究发现,一个供暖季(120 d)的运行费用约为 2 241 元,占燃油锅炉运行费用的 25.5%、燃气锅炉运行费用的 55.4%、电锅炉运行费用的 27.1%、空气源热泵运行费用的 65.6%、联合供暖系统运行费用的 88.7%,经济效益明显。此外,该系统整个供暖期总耗电量为 3 175.5 kW·h,相同耗电量对应消耗 0.6 t 标准煤,太阳能空气源热泵系统每年可节省标准煤 1.9 t,耗煤量的减少,使得 CO<sub>x</sub> 及 SO<sub>x</sub> 等的排放量减少,节能环保效益显著。

## 2 结论

为实现碳达峰、碳中和目标,在民用及工业行业要大量减少碳排放。本文通过热泵在不同行业应用的研究分析,发现热泵以其优异的节能减排效果,在所述各行业得到了广泛应用,并产生了显著的减碳效果。

(1)在分散式家用冷热领域,以空气源热泵为核心的多种供热制冷系统,减少了传统独立系统的能源消耗,拓宽了空气源热泵的工作温度范围,且具有良好的经济性和减碳效果。其中,太阳能-空气源热泵联合供热系统在满足建筑热负荷的基础上,年均费用比单纯的空气源热泵热水机组下降了 24.4%,1 个供暖季内 CO<sub>2</sub> 排放量减少了 41.6%;多功能家用热泵空调系统实现了家用热泵空调与热水器的一体化,一机多用,在家用冷热领域有广阔的应用前景。

(2)在集中供热领域,通过热泵技术来回收热电厂余热,可降低供热成本,提高能源利用率,减少煤炭消耗和污染物排放。《余热暖民工程实施方案》指出:截至 2020 年,通过回收利用余热,替代燃煤供热面积 20 亿 m<sup>2</sup> 以上,减少供热用煤 5 000 万 t 以上。此外,地源热泵和太阳能热泵供热系统在建筑供暖中,可大幅节省常规能源消耗,环境友好程度高,技术经济性良好。

(3)热泵干燥技术高效节能且对环境无污染,在农业行业发展潜力巨大。传统农业干燥技术的废气排放愈来愈严格,白烟和异味的控制成为重点,将热泵干燥技术用于农业生产可在减少能源消耗的同时实现近零碳排放。

(4)在工业领域,热泵技术回收余热资源显著降低生产运行成本的同时可起到良好的节能减碳效果,在双碳目标进程中有着举足轻重的地位。以印染和轮胎行业为例,在充分回收余热的基础上,可减少燃煤消耗,进而降低大气污染物的排放,同

时能取得良好的经济效益。为了进一步提高余热回收效率,降低余热回收成本,新型高温热泵等技术势必会成为该领域的重要研究方向。

(5)将可再生能源利用和热泵蓄热技术结合,可提高建筑可再生能源利用率,移峰填谷,调节电网侧用电负荷,提高供电质量和可靠性。蓄能装置和新型设备研发,采用蓄能技术实现能源的产用一体化,并基于智能电网技术,使得供电侧与热泵蓄冷蓄热系统相互配合,缓解地区性用电供需不平衡,同时实现建筑供热供冷清洁化、可持续化发展。

综上所述,热泵技术在未来实现碳达峰、碳中和目标进程中定会广泛使用,以产生显著的节能减碳效果。

## 参考文献:

- [1] 裴婉飞. 蓝色碳汇的思考与展望[N]. 中国海洋报, 2018-01-17(002).
- [2] 范振林. 开发蓝色碳汇助力实现碳中和[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(4): 12-18.  
FAN Zhenlin. Developing blue carbon sink to implement carbon neutralization [J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(4): 12-18.
- [3] 陈浮, 于昊辰, 卞正富, 等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1808-1820.  
CHEN Fu, YU Haochen, BIAN Zhengfu, et al. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1808-1820.
- [4] LI X Q, ZHANG Y F, FANG L, et al. Energy, exergy, economic, and environmental analysis of an integrated system of high temperature heat pump and gas separation unit [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111911.
- [5] ZHANG J, ZHANG H H, HE Y L, et al. A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China [J]. Applied Energy, 2016, 178: 800-825.
- [6] 王翠坤. 降低建筑领域碳排放 加快推进建筑低碳发展 [J]. 工程建设标准化, 2021(3): 17-18.
- [7] 中国建筑节能协会能耗统计专业委员会. 中国建筑节能研究报告(2020)[R]. 2020.
- [8] 全国兴. 一种基于空气源热泵的高海拔地区供暖系统 [J]. 能源与节能, 2020(11): 50-54.  
TONG Guoxing. A heating system suiting in high altitude area based on air source heat pump [J]. Energy and Conservation, 2020(11): 50-54.
- [9] 赵康, 吴明洋, 佟振, 等. 长江流域住宅分散式供暖改造案例及分析 [J]. 暖通空调, 2013, 43(6): 58-63, 57.

- ZHAO Kang, WU Mingyang, TONG Zhen, et al. Decentralized heating for residential buildings in Yangtze River basin: A reforming case and analysis [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(6): 58-63, 57.
- [10] 张欣然. 多功能家用热泵空调器实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [11] 马红利, 王博, 李兴洋. 北方地区清洁供暖技术综述[J]. 兰州工业学院学报, 2018, 25(4): 48-53.
- MA Hongli, WANG Bo, LI Xingyang. Review on the technology of clean heating in northern region [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2018, 25(4): 48-53.
- [12] 李文涛, 袁卫星, 付林, 等. 利用吸收式热泵的电厂乏汽余热回收性能分析[J]. 区域供热, 2015(4): 23-28.
- LI Wentao, YUAN Weixing, FU Lin, et al. Performance analysis of waste heat recovery from waste steam in power plant using absorption heat pump [J]. District Heating, 2015 (4): 23-28.
- [13] 孙健, 戈志华, 杜小泽, 等. 空气能自适应热泵: CN210832203U[P]. 2020-06-23.
- [14] 李丹. 地源热泵系统的研究与应用[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(11): 172-175.
- LI Dan. Research and application of ground-source heat pump system [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(11): 172-175.
- [15] 崔艳梅, 李炜, 杨旭峰, 等. 青海地区太阳能结合水源热泵供热系统技术经济分析[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(2): 40-43.
- CUI Yanmei, LI Wei, YANG Xufeng, et al. Technical and economic analysis on solar heating system combined with water source heat pump in Qinghai province [J]. Building Technology Development, 2016, 43(2): 40-43.
- [16] 高铭. 太阳能热泵供热技术研究与应用[J]. 江西建材, 2017(20): 6.
- GAO Ming. Research and application of solar heat pump heating technology [J]. Jiangxi Building Materials, 2017(20): 6.
- [17] 姚斌, 张绪坤, 温祥东, 等. 国内外农产品变温干燥研究进展[J]. 食品科技, 2015, 40(7): 94-98.
- YAO Bin, ZHANG Xukun, WEN Xiangdong, et al. Developments of variable temperature drying technology for agricultural products at home and abroad [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(7): 94-98.
- [18] ONWUDE D I, HASHIM N, CHEN G N. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 57: 132-145.
- [19] CLAUSSEN I C, USTAD T S, STRØMMEN I, et al. Atmospheric freeze drying—A review [J]. Drying Technology, 2007, 25(6): 947-957.
- [20] 杨鲁伟, 魏娟, 陈嘉祥. 热泵干燥技术研究进展[J]. 制冷技术, 2020, 40(4): 2-8, 27.
- YANG Luwei, WEI Juan, CHEN Jiexiang. Research progress of heat pump drying technology [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(4): 2-8, 27.
- [21] 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 combined device and experiment on drying of shiitake mushroom [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(11): 149-155.
- [22] 董彬, 陈朝帅, 梁坤峰, 等. 准二级压缩热泵干燥系统特性分析[J]. 制冷技术, 2020, 40(4): 28-33.
- DONG Bin, CHEN Chaoshuai, LIANG Kunfeng, et al. Performance analysis of quasi two-stage compression heat pump drying system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(4): 28-33.
- [23] 李广伟, 孙玉田, 孙健超, 等. 空气源热泵机组在粮食烘干领域的应用[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(3): 55-57, 60.
- LI Guangwei, SUN Yutian, SUN Jianchao, et al. Application of air source heat pump unit in the field of grain drying [J]. Cereal & Food Industry, 2020, 27(3): 55-57, 60.
- [24] 李欢, 张鹏飞, 窦伟标. 热泵-电加热联合烘干机在食品烘干上的应用[J]. 轻工科技, 2020, 36(5): 6-7.
- LI Huan, ZHANG Pengfei, DOU Weibiao. Application of heat pump and electric heating combined dryer in food drying [J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(5): 6-7.
- [25] 祝侃, 许超. 工业余热——新型建筑替代能源的应用分析[J]. 建筑节能(中英文), 2017, 45(1): 30-34.
- ZHU Kan, XU Chao. Application of the new analysis of alternative building biergy: Industrial waste heat [J]. Building Energy Efficiency, 2017, 45(1): 30-34.
- [26] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. 科学通报, 2016, 61(17): 1856-1857.
- HE Yaling. Research on the major common basic problems of efficient comprehensive utilization of industrial waste heat [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(17): 1856-1857.
- [27] 国德防, 祝建军. 工业(废)热在水源热泵中的应用[J]. 制冷与空调, 2008, 8(z1): 140-145.
- GUO Defang, ZHU Jianjun. Application of industrial waste heat to water-source heat pump [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2008, 8(z1): 140-145.
- [28] 范宪. 热泵技术在轮胎工业中的应用[J]. 轮胎工业, 2008, 28(8): 500-505.
- FAN Xian. Application of the heat pump technology in tire industry [J]. Tire Industry, 2008, 28(8): 500-505.
- [29] 孙健, 马世财, 霍成, 等. 耦合热泵换热器的原理及变工

- 况性能研究[J].工程热物理学报,2021,42(1):9-15.
- SUN Jian, MA Shicai, HUO Cheng, et al. Study on a hybrid heat exchanger based on absorption and compression cycles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 9-15.
- [30] 苏伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 29-35.
- SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of evaluation method for economy of energy storage technology [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 29-35.
- [31] 张若瑜. 促进风电消纳的燃煤热电厂热电调峰一体化技术研究及其优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [32] 孙健, 戈志华, 杨勇平, 等. 电动热泵和蓄热装置联用的热电联产机组及其调峰方法: CN106287902B[P]. 2019-08-30.
- [33] WU Z X, WU J Z. Feasibility study of district heating with CHP, thermal store and heat pump [C]. Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET. Beijing, 2013.
- [34] 吴彦廷, 尹顺永, 付林, 等. “热电协同”提升热电联产灵活性[J]. 区域供热, 2018(1): 32-38.
- WU Yanting, YIN Shunyong, FU Lin, et al. Enhance the flexibility of cogeneration by synergism of heat and power [J]. District Heating, 2018(1): 32-38.
- [35] 方旭, 彭雪风, 张凯, 等. 燃煤热电联产系统冷端余能供热改造研究进展[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 48-56.
- FANG Xu, PENG Xuefeng, ZHANG Kai, et al. Development of heating retrofit using waste heat from coal-fired CHP system cold end [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 48-56.
- [36] 魏海蛟, 鹿院卫, 张灿灿, 等. 燃煤机组灵活性调节技术研究现状及展望[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 57-63.
- WEI Haijiao, LU Yuanwei, ZHANG Cancan, et al. Status and prospect of flexibility regulation technology for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 57-63.
- [37] 孙誉桐, 蒋绿林, 范文英. 基于相变储能的太阳能空气源热泵系统的研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 169-174.
- SUN Yutong, JIANG Lulin, FAN Wenyong. Research of solar air source heat pump system based on phase change energy storage [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(2): 169-174.
- [38] 赵惠中, 赵欣刚. 热电厂余热利用技术综述及工程实例[J]. 煤气与热力, 2018, 38(7): 1-5.
- ZHAO Huizhong, ZHAO Xingang. Overview of thermal power plant waste heat utilization technology and engineering example [J]. Gas & Heat, 2018, 38(7): 1-5.
- [39] 付林, 李永红. 利用电厂余热的大温差长输供热模式[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 56-61.
- FU Lin, LI Yonghong. Long-distance heat-supply mode with large temperature difference using waste heat of power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 56-61.

(本文责编: 张帆)

#### 作者简介:

孙健(1985—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士, 从事工业及民用领域新型热泵技术研发和应用方面的研究(E-mail: s@ncepu.edu.cn)。