

文章编号:0253-4339(2023)06-0001-12

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.06.001

工业高温热泵发展现状与展望

胡斌^{1,2} 姜佳彤^{1,2} 吴迪^{1,2} 蔡宏¹ 王如竹¹

(1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240;2 上海诺通新能源科技有限公司 上海 200240)

摘要 当前中国能源结构仍以煤炭为主,替代难度大,非化石能源发展面临多重制约,产业的高耗能、高排放、低能效问题并存,绿色低碳技术亟需加强。工业过程供热占据能源消耗的 50%,因此实现工业过程供热的低碳化是实现碳中和的重要部分。为达到工业过程供热所需的体量和温度,高温/蒸汽热泵需要深入研究和广泛推广。本文从国内外工业热泵技术现状,分析目前工业热泵通常采用的系统循环型式、制冷剂压缩技术、水蒸气压缩技术;结合第四代低全球变暖潜值制冷剂发展现状,给出环保工业热泵的适用制冷剂;提出工业热泵技术发展展望,最后结合双碳目标的实现和工业锅炉替代市场分析,展开了工业热泵应用场景的拓展分析。

关键词 工业热泵;高温热泵;蒸汽热泵;低 GWP 制冷剂

中图分类号:TB657.5;TU833

文献标识码:A

Development Status and Prospects of Industrial High-temperature Heat Pumps

Hu Bin^{1,2} Jiang Jiatong^{1,2} Wu Di^{1,2} Cai Hong¹ Wang Ruzhu¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. Shanghai Nuotong New Energy Technology Co., Ltd., Shanghai, 200240, China)

Abstract Currently, China's energy consumption is heavily reliant on coal, which is difficult to replace. The development of non-fossil fuels faces multiple constraints, and the industry is adversely affected by the issues of high energy consumption, high emissions, and low energy efficiency. Therefore, innovative low-carbon technologies urgently require further development. Heating accounts for half of all energy consumption; therefore, low-carbon heating is important for achieving carbon neutrality. To meet the capacity and temperature requirements of industrial heating, high-temperature water/steam heat pumps must be developed. This paper presents an analysis of the current status of industrial heat pump technology, including system cycles, refrigerant compression technology, and steam compression technology. Based on the development status of fourth-generation low-global warming potential refrigerants, the corresponding heat pump technologies should be well developed. Furthermore, industrial heat pump development prospects are discussed based on the development status and applications. Finally, application scenarios are predicted based on the market capacity and carbon reduction potentials.

Keywords industrial heat pump; high-temperature heat pump; steam heat pump; low GWP refrigerant

2020 年全年,中国共排放 CO₂ 103.76 亿 t,其中工业排放 CO₂ 最多,排放量为 51.63 亿 t,占比 50%^[1],因此实现碳中和目标的关键是有效控制工业碳排放。工业部门的脱碳手段包括提高工艺效率和应用新工艺两方面来减少最终能源消耗,如余热回收、使用可再生能源代替化石能源等。

热能是最大的能源终端用户,占全球最终能源消耗的 50%^[2]。2020 年,中国消耗了全球热量的 25%^[3],其中 60%以上用于工业过程^[4],通常这些热量由工业锅炉提供。工业锅炉在制造行业中被广泛采用,多以分散式安装运行,平均容量约为 3.8 t/h。

近年来,我国工业锅炉正向电气化、燃气化发展,小型锅炉产品在统计产品中占比逐年上升,其中台数占比已超过 50%。中国各部委发布了一系列与工业锅炉相关的政策,包括国家锅炉行动计划^[5],以减少能源使用和控制燃煤工业锅炉的污染。目前燃煤锅炉的替代品(如燃油锅炉、燃气锅炉、电锅炉和生物质锅炉)具有明显的局限性和缺点,一定程度上限制了其推广应用。因而,采用工业热泵取代工业锅炉将成为供热脱碳的重要解决方案^[6]。

我国工业消耗的能源有 50%以上以废气和废水的形式转化为余热,其中仅 30%被重新利用^[7],这是

能源利用效率低下的原因之一。作为一种主动热回收装置,工业热泵可借助外部能源将工业过程中的余热温度提至更高温度,以用于同一过程或其他过程的热需求。工业热泵的价值在于通过使用低碳电力减少供暖碳排放的能力,具有提供大规模、灵活性的热能潜力以及降低平衡电力系统和在用户端消耗热能的成本。因此,工业热泵可从根本上实现热量和电力的脱碳。本文将回顾国内外工业热泵的发展现状,对高温/蒸汽热泵及其在工业领域的应用潜力进行分析,对节能和碳减排潜力进行估算,为后续推进高温/蒸汽热泵技术进一步发展以及在工业领域的应用发展提供指导。

1 工业热泵技术现状

1.1 系统循环

蒸汽压缩热泵系统是基于逆卡诺循环并通过理想等熵压缩和等焓膨胀进行改进。最常见的循环是单级压缩循环,包括原始的单级、带有补气增焓或喷射器以改善循环性能的单级循环以及配有经济器和中间换热器的单级循环。多级系统采用多次压缩,以机械能消耗为代价,实现更高的输出温度。复叠式热泵系统将两种或多种工质的循环耦合起来,以实现更大的温升。混合热泵系统将蒸汽压缩热泵与吸收、吸附、太阳能或化学热泵等其他热力系统集成在一起。

余热回收热泵系统的典型循环包括单级、多级、复叠热泵和并联热泵。在这些基本配置的基础上,有效的改进(增加过冷器、中间换热器、补气增焓、喷射器等)可以进一步提高系统效率或降低排气温度。单级热泵是基本循环,具有连接、运行、维护简单的优点,但由于压缩比较低,温升受到限制,且用于大容量机组时,组件需要定制。带过冷器的单级热泵可增加制热量,改善系统性能。安装在蒸发器后的中间换热器通过吸收冷凝器后过冷液体的热量,在蒸汽进入压缩机之前对其进行预热,提高压缩机入口温度可提高排气温度,进一步扩大应用范围。热泵中增加的喷射器可将低压饱和蒸汽从高压输送至中压,降低压缩机功耗,节省投资。多级压缩式热泵可大幅提高温升,适用于热源和热量需求相差较大的情况。中间冷却、补气增焓、喷液冷却在降低压缩机排气温度方面表现良好,确保了压缩机的安全运行。通过组合使用不同制冷剂的两个热泵系统,复叠热泵可利用不同工质在不同温区的优势,实现更高的温度提升,系统性能受制冷剂匹配和中间换热温度的影响。并联热泵系统一般分为并联压缩和并联循环两种,可实现热水的梯级加热,降低传热温差和换热损失,与并联压缩相比,

并联循环在系统性能改善方面表现更好。上述热泵系统循环是目前较为成熟的循环形式,工业热泵主要用于生产高温热水(热空气)和蒸汽,下文将重点分析适用于工业热泵的系统循环形式。

1.1.1 热水(热空气)制备循环

在供暖、干燥、洗涤和消毒等工艺过程中均需使用大量热水,通常由工业锅炉供应,锅炉以煤炭、石油或天然气为燃料,生产过程中产生的余热由冷却塔冷却。

干燥过程广泛应用于各种生产线,如工业原料、化肥、食品和医疗用品、日用品等。干燥的操作和温度不仅取决于产品的物理性质和条件,还取决于过程的规模和频率。例如,作为缩短干燥时间的一种方法,在挥发、干燥涂漆过程中,通常使用约 120 ℃ 的热空气,该热空气一般通过锅炉、燃烧器或电加热器产生。

采用热泵技术生产热水(热空气),可根据温升的大小,采用单级压缩、双级压缩、复叠压缩等循环方式,在热源温度较低时可采用跨临界 CO₂ 循环^[8-9]。循环流程如图 1~图 3 所示。

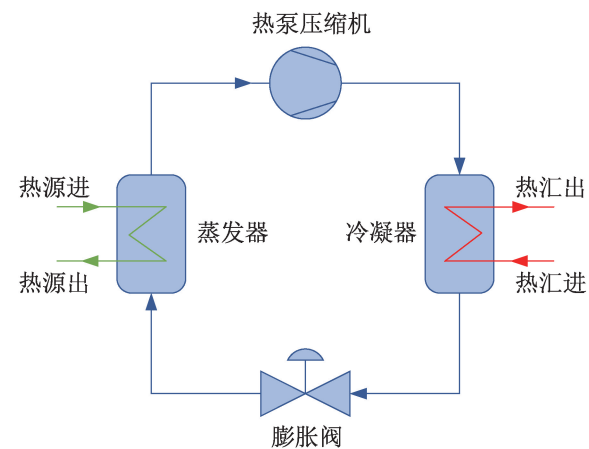


图 1 单级压缩循环
Fig.1 Single-stage compression system

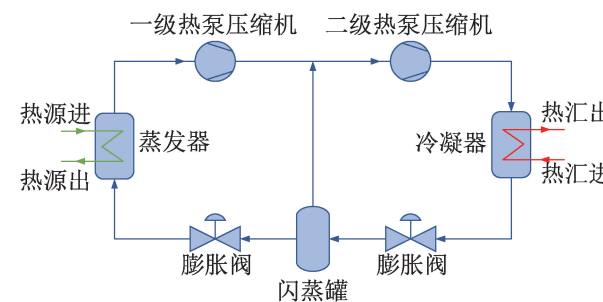


图 2 双级压缩循环
Fig.2 Double-stage compression system

亚临界热泵循环的温度上限由制冷剂临界温度

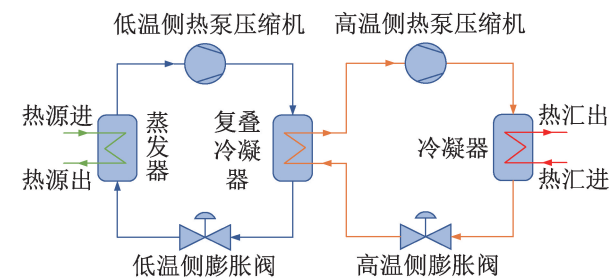


图 3 复叠循环
Fig.3 Cascade system

决定,必须保持与所需冷凝温度之间约 10~15 K 的温差,以确保亚临界热泵运行。冷凝温度越接近临界点,冷凝焓和 COP 越小。 CO_2 适用于跨临界或超临界热泵循环^[10],在气体冷却器中, CO_2 温度滑移大,因此适合作热水器、加热空气,被推荐作为 80~100 ℃ 热水、热空气的热泵机组。

1.1.2 蒸汽制备循环

蒸汽具有高潜热和传热性能,是一种便捷的加热流体。与其他加热流体(如空气)相比,蒸汽的流速和管道直径更加合理。与液态水相比,蒸汽具有更高的比热容,可在无需高压的情况下过热到高温。此外,冷凝过程中可在恒定温度下利用蒸汽的高潜热,加热效率远高于单相液态水。为得到不同温度的热水,可采用蒸汽与热水混合的方法。因此蒸汽是较为理想的用热载体。

具有巴氏杀菌等应用的工业过程中干燥和蒸馏在 100~125 ℃ 的温度范围内有热需求,该温度区间正好是微压蒸汽热泵机组(热水温度<120 ℃)的适用范围。微压蒸汽热泵机组应用于低品位回收领域,可回收余热水、乏汽、乏风等余热,生产微压蒸汽。微压蒸汽的制备可视温升的不同采用单级压缩^[11]、双级压缩、复叠压缩等配合闪蒸罐^[12]的循环方式,循环流程见图 4~图 6。

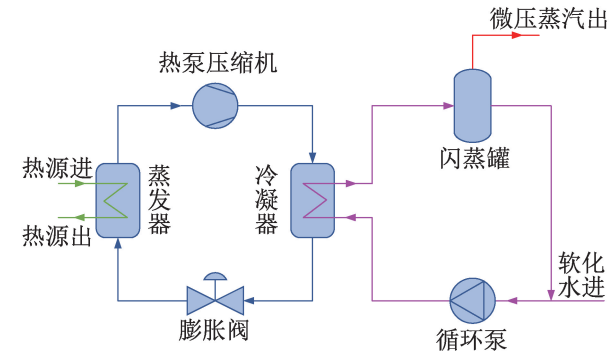


图 4 单级压缩+闪蒸循环
Fig.4 Single-stage compression + vapor flash system

当热水温度大于 120 ℃,大部分低 GWP 制冷剂脱

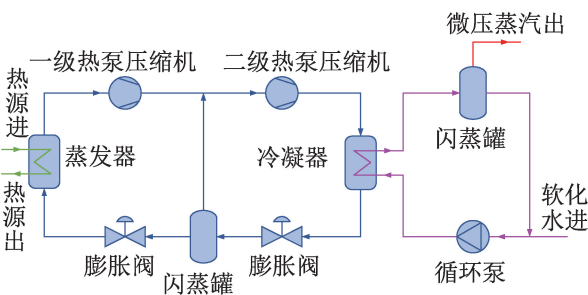


图 5 双级压缩+闪蒸循环
Fig.5 Double-stage compression + vapor flash system

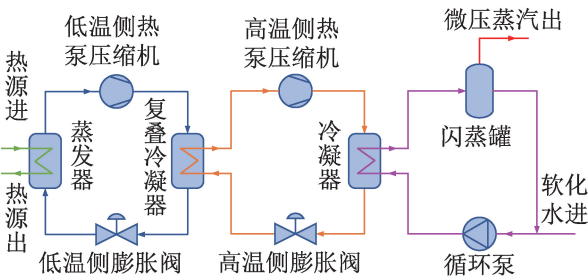


图 6 复叠压缩+闪蒸循环
Fig.6 Cascade system + vapor flash system

离亚临界状态,少数能使用的制冷剂(如 R1336mzz(Z)、R1234zd(E))由于冷凝温度接近临界温度,冷凝潜热和 COP 较低。此时在微压蒸汽热泵机组基础上,增加水蒸气压缩机直接对闪蒸罐出口的微压蒸汽进行升温升压,蒸汽使用温度最高可达 175 ℃。本文将制备 120~175 ℃ 饱和水蒸气的热泵机组称为低压蒸汽热泵机组。

在 120~175 ℃ 的温度区间内,低压蒸汽热泵机组进一步提升了高温热泵的使用范围,可渗透至过去未能触及的领域(如医药与食品的消毒和灭菌、化学行业的分离、纸张行业的烘干)。低压蒸汽的制备可视温升的不同采用单级压缩、双级压缩、复叠压缩等配合闪蒸罐的循环方式,循环流程见图 7~图 9。

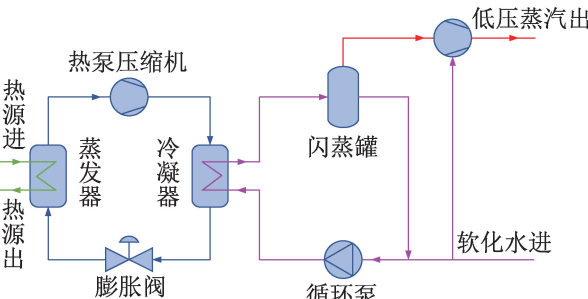


图 7 单级压缩+闪蒸+蒸汽压缩循环
Fig.7 Single-stage compression + vapor flash + vapor compression system

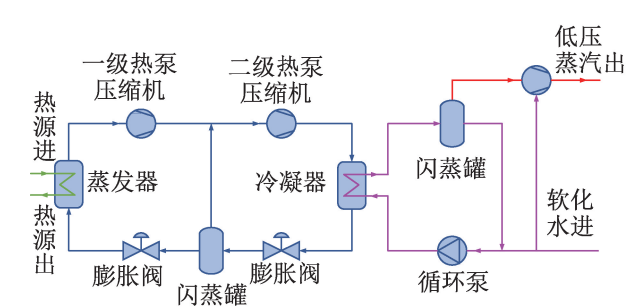


图 8 双级压缩+闪蒸+蒸气压缩循环
Fig.8 Double-stage compression + vapor flash + vapor compression system

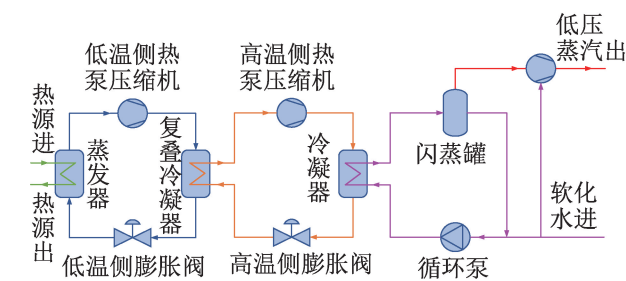


图 9 复叠压缩+闪蒸+蒸气压缩循环
Fig.9 Cascade system + vapor flash + vapor compression system

1.2 制冷剂压缩技术

热泵机组是制冷剂、结构、部件的集成,对热泵性能具有决定性影响,压缩机是热泵机组的核心部件,本节总结了目前适用于工业热泵的主要压缩机型式。

1.2.1 往复压缩机

往复式压缩机迄今仍是应用最广泛的一种机型。Viking 与 AVL Schrick 合作开发了 HeatBooster 高温热泵^[13],制热量为 200 kW,最高输出温度为 150 ℃,使用活塞式压缩机,该压缩机可在高达 200 ℃ 的温度下工作 40 000 h,工质使用 R1336mzz(Z),润滑油使用聚烯烃油(POE)。

来自 Mayekawa 的 Eco Sirocco 高温热泵^[14]采用 CO₂ 跨临界循环,可提供 100~120 ℃ 的热空气,当回收 25 ℃ 废热水并提供 120 ℃ 的热空气(进气温度为 20 ℃)时,系统 COP 达到 2.9,热泵的制热量约为 90 kW。

Dürr thermea 的 thermeco2 高温热泵^[15]可工作的热源温度为 8~40 ℃,供热温度高达 110 ℃,制热量为 0.051~2.2 MW。根据要求的容量,最多可并联 6 台活塞式压缩机。thermeco2 HHR1000 热泵在供热温度为 80 ℃(入口温度为 20 ℃)和热源温度为 20 ℃(温升为 60 ℃)时的 COP 为 3.9。

Combitherm GmbH 的 HWW R245fa 系列高温热

泵产品^[16]使用活塞式压缩机,供热温度高达 120 ℃,制热量为 62~252 kW。在与 Dürr Ecoclean GmbH 的一个合作项目中使用了该机组,回收工件清洗厂 50 ℃ 的余热,供热温度达到 100 ℃,COP 为 3.4。

Johnson Controls 生产的单级 Sabroe HeatPAC HPX 热泵^[17]中使用的活塞式压缩机可承受高达 6 000 kPa 的压力,在热源温度为 39 ℃、供热温度为 90 ℃ 下,以 4.0 的 COP 提供 326~1 324 kW 的热量。

奥地利格拉茨理工大学^[18]开发了一种 R600 热泵样机,制热量为 40 kW,使用改进的、变频驱动的分离罩活塞压缩机,首次实验表明,在热源温度为 60 ℃、供热温度为 110 ℃ 条件下可稳定运行,COP 为 3.5。

1.2.2 涡旋压缩机

为将蒸气压缩循环的能耗降至最低,一个关键方法是降低压缩机的能耗,以达到所需的压缩比。近年来,涡旋压缩机的发明被认为是压缩机技术的重大突破。涡旋压缩机的效率比标准往复式压缩机约高 10%,这种改善主要有 3 方面原因:1)吸入和排出过程是分开的,与往复式压缩机相比,涡旋压缩机吸入气体进入压缩机时不会向其添加热量;2)压缩过程在 540° 旋转范围内缓慢进行,而往复式压缩机的旋转范围为 180°,因此,驱动扭矩的波动仅为往复式压缩机的 10%;3)涡旋压缩机能够消除吸入阀和排出阀,这是往复式压缩机压力损失的来源。此外,由于涡旋压缩机运动部件较少,且在液击条件下能更好地运行,因此具有更高的可靠性。

AlterECO 项目^[19]设计了一台最高冷凝温度为 140 ℃、制热量为 200 kW 的高温热泵,使用新型 ECO3 混合制冷剂(含有 R245fa),两台功率均为 75 kW 的涡旋压缩机并联运行。

天津大学^[20]研究了一种新的二元近共沸混合物 BY-5,应用于带有涡旋压缩机、储液罐和气液分离器的单级高温热泵。制热量为 16~19 kW,供热温度高达 130 ℃。在热源温度为 80 ℃、供热温度为 130 ℃ 时,COP 约为 2.2。

格力空调研究了使用恒速涡旋压缩机和 R245fa 作为制冷剂的单级热泵系统的性能。最高出水温度为 114 ℃、冷凝温度为 120 ℃、温升为 49 ℃、COP 可达 5.18。

1.2.3 双螺杆压缩机

双螺杆压缩机是一种工作容积作回转运动的容积式气体压缩机械,它依靠原始容积的周期性变化来完成吸气、压缩和排气的过程。按运行方式的不同,双螺杆压缩机分为无油双螺杆压缩机和喷油双螺杆

压缩机。双螺杆制冷压缩机均采用喷油润滑的方式运行。在喷油双螺杆压缩机中,大量的润滑油被喷入所压缩的气体介质中,起到润滑、密封、冷却和降低噪声的作用。压缩机不设置同步齿轮,阳转子直接带动阴转子旋转。

Kobelco 的 HEM-90A 高温热泵^[21]采用半封闭变频双螺杆压缩机,从环境空气中输送高达 90 ℃ 的热水,用于食品、饮料、汽车和化学工业。使用的制冷剂为 R134a 和 R245fa 的混合物。以 10~40 ℃ 的空气为热源,制热量约为 70~230 kW, COP 为 1.7~3.0。

最新一代 GEA Grasso^[22]双螺杆压缩机的压力高达 6 300 kPa,因此可将温度降至 90 ℃。当热源温度为 35 ℃,供热温度为 80 ℃时, COP 为 5.0,制热量为 14 MW。

为解决高温热泵运行时热源温度波动大、压缩机外压比变化导致的内外压比不相同问题,邢林芬等^[23]提出采用经济器补气过程调节双螺杆压缩机运行过程中的压缩最终压力,消除欠压缩过程,使压缩过程接近多变过程,提高压缩效率与热泵能效。

1.2.4 单螺杆压缩机

单螺杆压缩机具有回转压缩机普遍具有的结构简单、体积小和无气阀组件等特点。同时还具有许多独特的优点:结构合理,具有理想的力平衡性;单机容量大,无余隙容积;高速轻载,易于建立流体动力润滑。上述优点主要是由于两个星轮在螺杆两侧对称配置产生的。单螺杆压缩机的主要缺点是中、高频率的噪声较大,啮合副与机壳的几何形状和相互位置精度要求高。不同于双螺杆压缩机,单螺杆压缩机不存在同步齿轮结构,因此转子与星轮需要良好的润滑来减少直接接触带来的磨损,这表明单螺杆压缩机主要用于喷油压缩。

Ochsner^[24]使用单螺杆压缩机的高温热泵机组,供热温度为 95~130 ℃。余热温度为 35~55 ℃时采用单级压缩结合经济器的循环,余热温度为 8~25 ℃时采用复叠循环,系统制热量为 170~750 kW,通过连接多台机组(如 1.5 MW 的双机组)可实现更高的容量。

Star Refrigeration 的 Neatpump 热泵^[25]可产生高达 90 ℃ 的热水,制热量为 380~2 600 kW。采用特殊铸钢设计的 Vilter 单螺杆压缩机技术(VSSH 系列)可承受高达 7 600 kPa 的压力。在热源温度为 50 ℃,输出温度为 90 ℃时,可实现 COP 约为 4。

1.2.5 透平压缩机

与容积式压缩机相比,透平压缩机技术被视为一

个有吸引力的选择。透平压缩机的优势如下:高效率的潜力、在高压比下运行的可能性、紧凑的设计和无油运行。过去几十年,该技术的进步,尤其高速发电机的引入,使透平式压缩机甚至可应用于制冷和热泵领域的小型机组。

丹佛斯的 Turbocor TG310^[26]是一款双透平压缩机,其磁性轴承可实现无油制冷剂回路,制冷剂为 R1234ze(E),透平压缩机的标称容量为 65~310 kW。

Friotherm AG 的 Unitop 系列^[27]采用两级透平压缩机,工作温度为 40~90 ℃。Unitop 50 可实现高达 20 MW 的极高热容量。该大型热泵通常是定制的,斯德哥尔摩地区供暖网络已建造一台最大的热泵,配备了 6 台并联的 Unitop 50FY 机组。为达到更高温度,Friotherm 将使用临界温度为 165.5 ℃ 的低压制冷剂 R1233zd(E)。

格力电器的 PSF 透平式热泵^[28]采用补气增焓的两级压缩、全工况压缩机气动、高速电机直接驱动两级叶轮、高速永磁同步变频电机和四象限可控整流器等关键技术,与传统的单级变频透平式热泵相比,压缩机效率和加热系数提高较大。

无油直接驱动变速制冷透平压缩机的最新发展和技术(主动磁轴承技术、高速永磁电机技术)也有诸多研究,进一步提升透平压缩机的性能。

1.3 水蒸气压缩机技术

由于水蒸气的特殊物理性质,机械压缩机应满足如下技术要求:1) 由于水蒸气的高比体积而产生的大体积流量;2) 避免腐蚀和侵蚀的特殊材料;3) 严格的轴封要求,以保证压缩蒸汽纯度;4) 压力比高,使压缩蒸汽的饱和温升足够高,以取代锅炉蒸汽;5) 压力较高时,排放蒸汽温度低或压缩蒸汽过热度低;6) 效率高,成本合理。

不同于开式循环中的机械式蒸气压缩技术(mechanical vapor recompression, MVC)用于高温热泵的水蒸气压缩机在系统中运行温升高、压比大,适用于温升较低的罗茨水蒸气压缩机与单级透平水蒸气压缩机已不能胜任,而多级透平压缩机与带喷水功能的双螺杆压缩机开始进入人们的视野。

1.3.1 多级透平压缩机

对各种高温热泵工作介质的对比表明,水是冷凝温度高于 100 ℃ 的最有效介质。对于高温操作,水是一种优越的工作流体。水蒸气的一个缺点:当蒸发温度低于 80 ℃ 时,蒸汽密度相对较低,要求热泵压缩机具有较高的容积容量。透平压缩机具有非常高的体积流量容量,是水蒸气热泵的最好解决方案之一。

透平式水蒸气压缩机是一种速度型压缩机。它

首先通过叶轮的旋转增加水蒸气速度,然后将水蒸气的动能转化为膨胀室中的压力能,从而增加水蒸气压力。随着先进制造技术的发展,越来越多的透平式水蒸气压缩机被用于特定系统中。透平式水蒸气压缩机的效率不断提高,压比范围也不断扩大。虽然透平式水蒸气压缩机主要用于大流量压缩设备,但热泵系统中也使用了小流量透平式水蒸气压缩机,表明小流量透平式水蒸气压缩机也具有一定的应用市场。

以色列 IDE Technologies 公司在 20 世纪 60 年代至 80 年代一直是透平式水蒸气压缩机技术的先驱。水蒸气透平压缩机已应用于热蒸发器/浓缩器和海水淡化厂。R718 透平式冷水机由德国德累斯顿 Für Luft 研究所和 Kältetechnik^[29] 于 20 世纪 90 年代末开发和制造。

1.3.2 双螺杆压缩机

在无油双螺杆压缩机中,气体在压缩时不与润滑油接触。在压缩机运行过程中,转子并不直接接触,相互间存在一定的间隙。阳转子通过同步齿轮带动阴转子高速旋转,同步齿轮在传输动力的同时,还确保了转子间的间隙。所谓的“无油”,是指气体在被压缩过程中,完全不与润滑油接触,即压缩机的压缩腔或转子之间无油润滑。但压缩机中的轴承、齿轮等零部件,仍采用普通润滑方式进行润滑。仅在这些润滑部位和压缩腔之间,采取了有效的隔离轴封。为降低干式螺杆压缩机的排气温度,提高单级排气压力,发展了向压缩腔喷水的无油螺杆压缩机。

自 2001 年以来,神户制钢^[30]一直以 Kobelco 品牌销售蒸汽发生热泵 SGH120 和 SGH165。SGH165 型号能够在 165 °C 的温度下从 35~70 °C 的工艺余热中产生蒸汽,并将 120 °C 的蒸汽重新压缩至 165 °C (700 kPa)。该热泵首选的应用领域是食品和饮料的灭菌,液体和果汁的浓缩、干燥过程以及酒精的蒸馏。半密封双螺杆压缩机是专门为高压和高温而开发的,余热温度为 70 °C 时,输出 165 °C 蒸汽,流量为 890 kg/h, COP 为 2.5。

里昂大学^[31]利用改进密封和水蒸气喷射的双螺杆压缩机建造了一座实验装置,以 85~95 °C 的余热为热源,冷凝温度为 145 °C 时,可提供超过 300 kW 的热量输出。

2 低 GWP 制冷剂技术

制冷剂的选择在蒸汽压缩热泵中起着关键作用,制冷剂的物性决定了蒸汽压缩热泵的性能。目前,制冷剂选择原则优先考虑制冷剂的全球变暖潜值 (Global Warming Potential, GWP) 和臭氧损耗潜值

(ozone depletion potential, ODP), 为保护环境,首选 ODP 为 0, GWP 小于 150 的制冷剂^[32]。基于上述要求,低 GWP (GWP<150) 制冷剂,如天然制冷剂、碳氢化合物 (HCs)、氢氟烯烃 (HFOs)、氢氯氟烃 (HCFOs) 近期在蒸汽压缩热泵中得到广泛使用和研究。

氢氟碳化合物 R245fa 是工业高温热泵中使用的主要制冷剂。但其 GWP 为 858,很可能在未来几年被淘汰(或削减)。天然制冷剂、HFOs、HCFOs 被认为是有望取代 HFCs 的第四代低 GWP 制冷剂。在高温热泵和有机朗肯循环 (organic rankine cycle, ORC) 发电应用中, R245fa 的主要替代品是 R1366mzz (Z)、R1234ze (Z)、R1233zd (E)、R1224yd (Z) 以及碳氢化合物 R601 (正戊烷) 和 R600 (正丁烷)。

2.1 HFOs

适用于高温热泵的 HFOs 工质包括 R1336mmz (Z)、R1336mmz (E)、R1234ze (Z)、R1234ze (E)。在 HFOs 制冷剂中, R1336mmz (Z) 可以在相对较低的压力 (2 900 kPa) 下提供较高的临界温度 171.3 °C。该制冷剂不易燃 (安全级别为 A1)、ODP 为 0、GWP 为 2、大气寿命为 22 d。R1336mmz (Z) 在 250 °C 以下稳定,因此适用于余热回收、ORC 和蒸汽产生等应用。其异构体 R1336mzz (E) 的 GWP 约为 18、临界温度为 137.7 °C。关于 R1234ze (Z) 的信息相对较少, R1234ze (Z) 被认为是轻度易燃,但很难点燃 (安全级别为 A2L、燃烧速度低于 10 cm/s)。

在亚临界温度条件下, R1234ze (E) 被认为是最合适的制冷剂, R1234ze (E) 的 COP 在较宽的工作范围内均保持相对较高,这表明其非常适合常规热泵的工作条件,能够很好地适应各种热需求和热源。相对于其他 HFOs 工质, R1234ze (E) 的体积热容量仅低于 R1234yf, 优于其他工质。随着冷凝温度的升高, R1234yf 相比 R1234ze (E) 的 COP 衰减严重, R1234ze (E) 的压比逐渐大于 R1234yf。至于过热程度, R1234ze (E) 介于 2.6~4.9 °C 之间,在较宽的工作区域内始终低于 5 °C,且不存在湿压缩问题。

2.2 HCFOs

适用于高温热泵的 HCFOs 工质包括 R1233zd (E) 与 R1224yd (Z)。

在可用的 HCFOs 中, R1233zd (E) 被认为是适用于高温热泵的制冷剂。其 ODP 为 0.003 4、GWP 为 1、临界温度为 166.5 °C、临界压力为 3 620 kPa、安全类别为 A1。已被证实用于高温热泵时具有优异的性能^[33]。

R1224yd (Z) 是一种安全类别为 A1 的非易燃制冷剂,主要用于透平式制冷机和余热回收热泵。由于

ODP(大气寿命为 21 d)几乎为 0, GWP 低于 1, R1244yd(Z)对环境的影响较小。其物理性质与 R245fa 和 R1233zd(E)非常接近。此外,它还与最常用的金属、塑料和弹性体具有良好的相容性,并且可与合成油(如 POE)混溶。根据分析,与经典热泵工质相比,R1233zd(E)可在 COP 和单位体积制热量(VHC, volumetric heating capacity)之间做出很好的折中^[34],其 VHC 较高(当 VHC 是唯一标准时,它是供热出口温度低于 140 ℃的首选流体),同时 COP 也较高,因此可能是一种适合的流体,尤其适用于热源入口温度大于 65 ℃的范围。

2.3 天然工质

适合高温热泵的天然制冷剂有水(R718)、二氧化碳(R744)、氨(R717)、碳氢化合物(HCs)等。

2.3.1 水

水作为制冷剂具有自身的特点,优点如下:1)水的 ODP 为 0, GWP 小于 1,表明水对臭氧层无损害,对全球变暖的影响较小,是一种环境友好的制冷剂,未来不会受到限制;2)原料易得、成本低,自然界中有大量的水,与任何其他种类的制冷剂相比,水是最容易获得和最经济的制冷剂,自来水、经处理的废水或经过粗过滤的河水均可直接用作补给水;3)安全性好,水无毒、不易燃、不易爆,不具有其他危险性质,无论发生液体或气体泄漏,水均不会造成安全问题,是最安全的制冷剂,这也保证了水在使用后无处理问题;4)稳定性好,经久耐用,水的化学性质非常稳定,长期使用不会分解;5)巨大的汽化潜热,与丙烷、氨和二氧化碳相比,水的蒸发潜热和单位质量制冷量较大;6)系统运行安全,水压差较小,减少了安全防护措施;7)理论性能系数高,与 CFCs 相比,水具有较高的 COP;8)以水为制冷剂的系统可使用直接热交换器进行蒸发和冷凝。

水蒸气作为制冷剂缺点如下:高压比(由高比容所致),以及由此产生的压缩机出口温度较高。上述缺点均可通过专门开发的压缩机来克服,尤其是带有级间冷却器的多级涡轮增压机。当前, COP 高的制冷系统是主要目标,但其并非决定使用何种制冷剂的唯一因素。ODP 和 GWP 等环境参数愈发严格,还需考虑制冷剂的经济成本和安全性能。就上述方面和上述特定操作条件而言,水是最好的制冷剂。

2.3.2 二氧化碳

CO₂ 热泵机组通常尺寸较小,已实现较普及的商业化应用。依靠气体冷却器中的高跨临界温度滑移, CO₂ 热泵跨临界循环系统中供热温度可达 90 ~ 120 ℃。

天然制冷剂 CO₂ 属于第一代制冷剂。相比 NH₃ 更安全,可用于冷却和加热场合。CO₂ 具有高流体密度和工作压力,可使用轻型热泵系统。CO₂ 体积制冷量是 CFCs、HCFCs、HFCs 和 HCs 制冷剂的 3 ~ 10 倍^[35],在制冷循环中优势巨大。虽然临界温度低至 31 ℃,但临界压力高达 7 360 kPa,几乎是传统制冷剂的 5 ~ 10 倍,因此在一定程度上限制了 CO₂ 的高温应用。对于供暖,跨临界循环是使用最广泛的 CO₂ 热泵配置。从 CO₂ 的 *T-s* 图和 *T-h* 图可知,在接近临界温度时,随着温度的降低,焓和熵急剧下降,提高了气体冷却器的加热性能,具有高压阻力的气体冷却器确保了通过更高的流速改善传热的可能性,紧凑型热交换器更适合高压,使 CO₂ 成为一种特别适用于家庭的冷水加热和进回水温差较大的其他工艺。此外,巨大的压差导致膨胀过程中不可逆节流损失高, COP 较低。

2.3.3 氨

NH₃ 是一种良好的制冷剂,具有优异的热力学性能和传热性能,已广泛应用于加热和冷却系统。在美国,超过 95% 的工业制冷使用 NH₃, NH₃ 在欧洲也占据较高的市场份额。虽然 NH₃ 在一定浓度下具有毒性,必须采取某些安全防护措施,但其存在明显的刺鼻气味,泄漏时易察觉。

由于 NH₃ 具有较高的体积制热量,因此在大容量需求中具有竞争优势,小体积压缩机足以满足相同的供热能力。与其他制冷剂相比, NH₃ 的成本更低。NH₃ 高温热泵的输出温度也受高压特性的限制,例如, 97.5 ℃饱和温度对应饱和压力为 6 000 kPa。大多数 NH₃ 高温热泵的供应温度限制在 90 ℃^[36]。压缩机材料的改进使 NH₃ 压缩机在更高排气温度(约 110 ℃)下的压力增至 7 600 kPa 成为可能^[37]。

2.3.4 碳氢化合物

HCs 中正丁烷(R600)和戊烷(R601)是零 ODP 和极低 GWP 的制冷剂。价格低廉,在 3 800 kPa 和 3 370 kPa 时的临界温度分别为 152 ℃和 196.6 ℃。但 HCs 易燃性高(A3),必须采取特殊的安全措施,因此建议将 HCs 用于充注量小的小型系统。根据文献[38],实验室设备的 HCs 最大容量限制为 150 g,用于具有防爆资质的商业机组充注量限制为 2.5 kg。

3 工业热泵技术发展展望

在当前的电力结构下,由于热泵运行具有较高的 COP,实施该技术将直接减少一次能源消耗以及 CO₂ 排放。根据电力生产的平均 CO₂ 排放强度,热泵的实施使排放量减少至化石燃料驱动过程的 33%(减

少 67%)。若电力系统完全脱碳,热泵驱动过程的排放量将降至 0(100%减少)。随着可再生能源在电力结构中所占份额的增加,热泵的实施成为了一个强有力的行业选择。

工业热泵技术可成为供应温度低于 100 ℃ 的首选供热技术。对于供应温度在 100~200 ℃ 的技术,重点应放在开发和示范上,而更高的温度需要研究活动。示范项目应旨在打破应用障碍,解决大型热泵系统升级和广泛使用的问题。额外的研究活动应侧重于性能改进,并制定向完全可再生的过程热系统(包括热泵)过渡的能源战略。这些研发项目需要跨行业合作,涵盖从研发到制造和应用的整个范围。

3.1 大容量半封闭高温制冷剂压缩机

采用封闭式结构将电动机和压缩机连成整体,装在同一机体内共用一根主轴,因此可取消开启式压缩机中的轴封装置,避免由此产生的泄漏。半封闭压缩机用于制冷循环及常规热泵循环已经成熟,但用于高温热泵仍然受到一些限制。

目前小型半封闭高温压缩机(如往复式压缩机、涡旋式压缩机)不存在润滑油管理问题,当高温压缩机向大型化发展,螺杆式压缩机必然面临润滑油管理问题,因为工质和油必须在高温下兼容,且必须考虑回油的热回收。由于高排气温度和油的热稳定性,传统结构受到限制。采用多级磁悬浮离心压缩机是一种有效的解决方案,磁悬浮离心压缩机纯无油运行,不存在润滑油管理问题,在压缩机热力学方面不存在温度限制。但存在高温工况下(如蒸发温度 $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷凝温度 $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$)半封闭电机的散热问题,这需要平衡两个方面:电机冷却造成的热损失与电机过热引起的可靠性下降。

3.2 高温蒸汽压缩机

在可供选择的低 GWP 制冷剂中,R1336mzz(Z)由于临界温度达到 164.1 ℃,不易燃且无毒,将高温热泵的供热温度推向 155 ℃。当高温热泵供热温度的目标值为 175 ℃ 或更高时,采用水作为制冷剂是目前的最佳选择,因此要求开发高温蒸汽压缩机来适应该要求。综合考虑压缩机的运行原理、结构特点与操作特性,双螺杆蒸汽压缩机与离心蒸汽压缩机成为高温蒸汽压缩机的两个选择。

双螺杆蒸汽压缩机可结合喷水降温,当采用单级压缩时温升较大($>60\text{ }^{\circ}\text{C}$),由于容积式压缩采用刚性轴设计,适应变工况能力强,变转速范围宽。缺点是在高温工况下水蒸气经过转子的间隙产生较大的泄漏损失,导致效率偏低。同时高压水蒸气要求复杂

的轴封结构及系统来防止水蒸气漏入轴承侧污染润滑油,由于其双轴结构配备 4 套轴封,必然增大了双螺杆蒸汽压缩机的制造成本。可行的解决方案是提高双螺杆压缩机的运行转速来减少压缩机尺寸,提高压缩机效率,可通过采用高速永磁电机直驱来实现。双螺杆蒸汽压缩机在高速、高温下的可靠性问题是下一步需要研究的重要问题。

与双螺杆蒸汽压缩机相比,离心蒸汽压缩机的特点是结构简单、流量大、单轴设计时造价低。缺点是离心蒸汽压缩机作为速度式压缩机,适应变工况能力差,变转速范围狭窄。为了控制排气温度及确保一定的压缩效率,单级压缩温升一般不超过 18~22 ℃,导致大温差工况下需采用两级或多级压缩。据调研,国内市场上已有用于 MVC (mechanical vapor compression) 装置的两级和三级离心蒸汽压缩机,温升分别为 35、50 ℃,由此可预见,多级压缩不应成为离心蒸汽压缩机应用于高温热泵的技术障碍。但在 MVC 多级离心蒸汽压缩机技术引入高温热泵的过程中,如何使制造成本在批量化生产过程中获得大幅下降是关键。

3.3 跨临界 CO₂ 高温热泵

20 世纪 90 年代跨临界 CO₂ 热泵就在日本率先商业化,通过采用工作压力超过 10 MPa 的高压往复压缩机,CO₂ 热泵成功用于民用热水制备,并进一步拓展至工业领域的热空气制备,最高热水及热风温度可达 120 ℃。德国将工艺离心机技术引入跨临界 CO₂ 压缩,从而实现了大规模冷热电三联储能方案。

由于工艺用往复压缩机、离心压缩机的运行压力分别不低于 30、20 MPa,因此压缩机不会成为制约 CO₂ 热泵的瓶颈。技术难题可能在于 CO₂ 热泵用于工业领域的系统设计与匹配,达到运行性能与制造成本的最佳平衡。

3.4 带储能功能的高温热泵

随着可再生能源的发展,电力波动将大幅增加。储能系统可吸收或释放电力,被认为是消除电力波动、提高间歇性电力并网能力的有效技术。热泵与热能存储相结合,提供了全系统的灵活性服务(如负荷转移、调峰和需求侧管理)从而确保在非高峰时段提高多余可再生能源的利用率。热泵提供了利用热能存储系统转移电力负荷的潜力,并可用于需求侧管理策略。还可提供需求响应,从而降低系统运行成本,实现调峰和节能。

热泵与热能存储相结合,可在一定程度上实现大型热泵机组的连续运行,避免了频繁启停机时热泵压

压缩机容易出现的可靠性问题。而储能功能甚至可替代热泵机组的调频,实现热泵压缩机在工频下运行,这对高可靠性的离心热泵压缩机在高温热泵领域拓展应用极为有利。

4 工业热泵应用场景拓展分析

4.1 耦合空气源与可再生能源的集中式供热系统

工业领域用热温度较高(一般大于 80℃),采用分布式空气源热泵给工业装置供热如图 10 所示,目前还存在如下局限性:1) 空气源热泵的热源侧是环境空气,供热与热源温差较大,且温差随季节及昼夜波动较大,使空气源热泵的 COP 偏低,且环境温度的波动必然导致运行工况波动进而降低热泵机组的可靠性;2) 空气源高温热泵采用工业电驱动,由于工业电价较高,导致高温热泵机组运行费用大幅高于天然气锅炉;3) 工业领域余热资源较为丰富,在有余热资源利用的前提下,利用环境空气作为热源不是一个经济的选择。

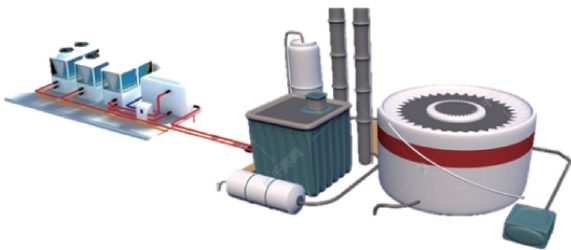


图 10 耦合空气源与可再生能源的集中式供热系统^[12]
Fig.10 Centralized hydronics coupling air-source and renewable energy^[12]

该情况下,在靠近可再生能源的附近建立空气源集中式供热系统,就近利用廉价的可再生电力来驱动工业热泵制备热水或蒸汽进行集中供热,同时大型化的热泵机组可降低投资回收期,有效避免分布式空气源热泵供热系统存在的弊端。

4.2 基于工业循环水余热回收的集中式供热系统

在大型应用场景中(如企业或工业园区),大部分工业装置的余热被循环冷却水带走,冷却水汇集后通过大型冷却塔降温再回到工业装置循环使用。循环水水温随季节变化在 25~45℃之间,且在一定时间跨度内波动较小,循环水经过大型冷却塔释放掉的热量为 10~100 MW,若对该循环水的热量加以利用并制备 80℃以上的高温热水,形成集中式供热系统给企业或园区的装置供热如图 11 所示,可大幅减少化石类燃料的消耗。

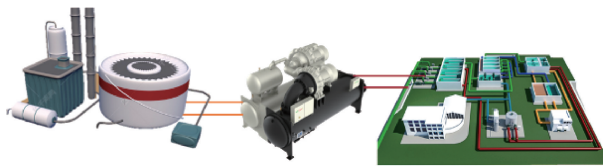


图 11 基于工业循环水余热回收的集中式供热系统^[39]
Fig.11 Centralized hydronics based on waste heat recovery of industrial circulating water^[39]

4.3 耦合高温热泵与 DAC 的分布式碳捕集装置

在钢铁、水泥、电解铝、石化、化工等行业存在大量的余热,由于余热与用热需求无法完全匹配,必然造成大量余热未经利用向环境排放,造成能量损失。直接空气捕获(direct air capture, DAC)是一种高效的负排放技术,可捕获分布式碳排放源。但 DAC 技术耗能大、成本高、无法商业化。DAC 的平均能源需求约为 80%的热能和 20%的电能,应用热泵技术回收工业余热来驱动 DAC 将是工业节能实现城市碳减排的一个重要技术途径。采用高温热泵从工业余热中生产 100~120℃的蒸汽,用于 DAC 设备中吸附剂的再生和净化,如图 12 所示^[39-41]。通过该能源系统集成设计,以及新型高温工业热泵和基于吸附的 DAC 系统耦合技术开发,降低 DAC 技术的总能耗,

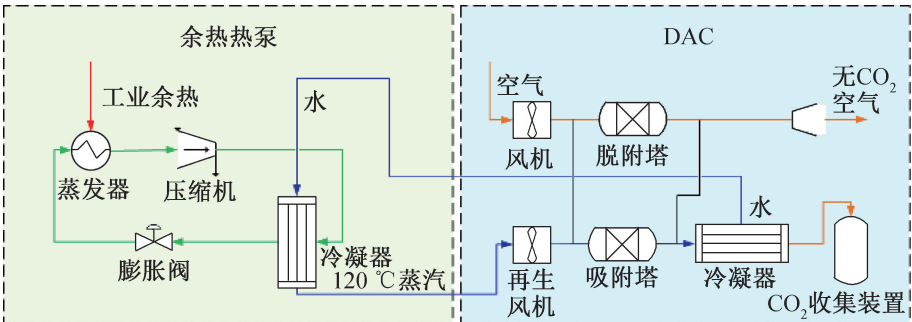


图 12 耦合高温热泵与 DAC 的分布式碳捕集装置^[40-41]
Fig.12 Distributed carbon capture device coupled with high-temperature heat pump and DAC^[40-41]

并将从空气中直接捕获 CO₂ 的运营成本大幅降低。

5 总结

面对 2030 碳达峰的阶段目标,工业用能的转型迫在眉睫,工业热泵技术是高能耗工业锅炉的理想替代技术,本文对目前典型工业热泵、高温/蒸汽热泵的系统循环形式、关键制冷剂压缩技术、水蒸气压缩技术进行总结,得到如下结论:

- 1)《基加利修正案》生效后,第四代低 GWP 制冷剂得到重点发展,工业热泵也需进一步发展以低 GWP 制冷剂为工质的系统。
- 2)基于目前工业热泵的技术现状,结合工业锅炉替代应用场景,本文提出工业热泵技术在大容量半封闭高温制冷剂压缩机、高温蒸气压缩机、CO₂ 高温热泵、带储能功能的高温热泵方面未来将会有进一步的发展。
- 3)结合未来工业热泵技术进一步拓展的方向,分析拓展的应用场景,工业热泵将会进一步拓展至结合可再生能源的民用集中供热、余热回收的工业集中供热领域和碳捕集余热回收流程中。

本文受上海市自然科学基金项目(21ZR1429800)资助。
(The project was supported by the Natural Science Foundation of Shanghai (No. 21ZR1429800).)

参考文献

[1] 广州碳排放权交易所. 碳中和报告(2020) [R]. 广州: 广州碳排放权交易所, 2021. (Guangzhou Carbon Emission Rights Exchange. Carbon neutrality report (2020) [R]. Guangzhou: Guangzhou Carbon Emission Rights Exchange, 2021.)

[2] International Renewable Energy Agency. Innovation outlook: thermal energy storage [M]. Bonn: IRENA, 2020.

[3] BP Amoco. Statistical review of world energy 2020 [M]. 69th ed. London: BP, 2020.

[4] JIA Teng, HUANG Junpeng, LI Rui, et al. Status and prospect of solar heat for industrial processes in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 475-489.

[5] 工业和信息化部, 国家发展改革委, 财政部, 等. 关于印发《工业能效提升行动计划》的通知 [EB/OL]. (2022-06-23) [2023-05-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/29/content_5698410.htm. (Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, etc. Notice on issuing the "Action Plan for

Improving Industrial Energy Efficiency" [EB/OL]. (2022-06-23) [2023-05-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/29/content_5698410.htm.)

[6] JIANG Jiatong, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112106.

[7] ZHANG Jing, ZHANG Honghu, HE Yaling, 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.

[8] Snowman Group. Powerbox-SRM open-type heat pump [EB/OL]. (2023-03-29) [2023-05-01]. https://www.snowkey.com/cn/product/powerbox_srm_open_type_heat_pump_90/c032a438392744d891706495a45a5b3c.html.

[9] Johnson Controls. Sabroe HeatPAC HPX heat pumps [EB/OL]. (2023-03-30) [2023-05-01]. <https://www.sabroe.com/en/products/chillers-and-heat-pumps/heatpac-heat-pumps/>.

[10] HUANG Rui, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. Thermodynamic and economic analysis of two-stage CO₂ heat pump with reverse Brayton cycle [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 143(1): 157-165.

[11] WU Di, JIANG Jiatong, HU Bin, et al. Experimental investigation on the performance of a very high temperature heat pump with water refrigerant [J]. Energy, 2020, 190: 116427.

[12] YAN H Z, HU B, WANG R Z. Air-source heat pump for distributed steam generation: a new and sustainable solution to replace coal-fired boilers in China [J]. Advanced Sustainable Systems, 2020, 4: 2000118.

[13] Viking, AVL Schrick. HeatBooster high temperature heat pump [EB/OL]. (2020-12-15) [2023-05-01]. <https://www.ispo.com/en/ispo-award/2020/winner/snowsports/viking-heatbooster-gtx-ski-gloves>.

[14] Mayekawa. Eco Sirocco (CO₂ heat pump air heater) [EB/OL]. (2022-01-15) [2023-05-01]. <https://www.mayekawa.com.au/products/heat-pumps/eco-sirocco/>.

[15] Dürer thermea. Hochtemperatur-Wärmepumpen [EB/OL]. (2015-04-01) [2023-05-01]. <https://www.energie-experten.org/hersteller/thermea>.

[16] Combitherm. High temperature heat pumps [EB/OL]. (2017-01-10) [2023-05-01]. <https://www.combitherm.de>.

[17] Johnson Controls. Sabroe HeatPAC HPX [EB/OL]. (2018-02-07) [2023-05-01]. <https://www.sabroe.com/en/products/chillers-and-heat-pumps/heatpac-heat-pumps/>.

- [18] MOISI H S, VERDNIK M, RIEBERER R, et al. Entwicklung einer R600-hochtemperatur wärmepumpen-simulation und erste messungen [C]//Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2017. 2017.
- [19] BOBELIN D, BOURIG A. Experimental results of a newly developed very high temperature industrial heat pump (140 °C) equipped with scroll compressors and working with a new blend refrigerant [C]//International Conference on Refrigeration and Air Conditioning. Purdue: Purdue University, 2012:1-10.
- [20] ZHANG Yan, ZHANG Yufeng, YU Xiaohui, et al. Analysis of a high temperature heat pump using BY-5 as refrigerant[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1461-1468.
- [21] OUE T, OKADA K. Air-sourced 90 °C hot water supplying heat pump “HEM 90A”[J]. Kobelco Technology Review, 2013(32): 70-74.
- [22] DIETRICH W, FREDRICH O. GEA grasso heat pumps using ammonia-the megawatt range [C]//2012ACHEMA Kongress. Frankfurt: DECHEMA, 2012: 1-25.
- [23] 邢林芬, 何永宁, 曹锋, 等. 高温热泵用双螺杆压缩机内压力比调节方式[J]. 制冷学报, 2017, 38(6): 94-98. (XING Linfen, HE Yongning, CAO Feng, et al. Adjustment method for internal pressure ratio of twin screw compressors used in high temperature heat pumps [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(6): 94-98.)
- [24] Ochsner. Maschinendaten 1-stufige Wasser-Wasser Hochsttemperatur Industrie-Wärmepumpen IWWDS ER3c4 [EB/OL]. (2017-01-01) [2023-05-01]. <https://www.ochsner-energietechnik.com/hoechsttemperatur-waermepumpen>.
- [25] REIBNER F. Experimental performance evaluation of new safe and environmentally friendly working fluids for high temperature heat pumps [C]//European Heat Pump Summit. 2013: 1-20.
- [26] Danfoss. Turbocor TG310 compressor using environmentally progressive HFO1234ze refrigerant [EB/OL]. (2021-05-15) [2023-05-01]. <https://www.docin.com/p-2116524840.html>.
- [27] Friothers AG. Uniturbo 50FY centrifugal compressor for large scale refrigeration plants and heat pumps [EB/OL]. (2022-08-15) [2023-05-01]. <https://www.friothers.com>.
- [28] LIU Hua, ZHANG Zhiping, LI Hongbo, et al. Research and development of a permanent-magnet synchronous frequency-convertible centrifugal compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 117: 33-43.
- [29] Für Luft, Kältetechnik. R718 turbine chiller [EB/OL]. (2021-03-15) [2023-05-01]. [https://smartwater-](https://smartwater-magazine.com/ide-technologies)
- magazine.com/ide-technologies.
- [30] WATANABE C. Trends in industrial heat pump technology in Japan [J]. IEA Heat Pump Newsletter, 2012, 30(1): 36-38.
- [31] CHAMOUN M, RULLIERE R, HABERSCHILL P, et al. Experimental investigation of a new high temperature heat pump using water as refrigerant for industrial heat recovery [C]//14th International Refrigeration and Air-conditioning conference. Purdue: Purdue University, 2012.
- [32] WU Di, HU Bin, WANG Ruzhu. Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138: 110571.
- [33] JIANG Jiatong, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. Experiments of advanced centrifugal heat pump with supply temperature up to 100 °C using low-GWP refrigerant R1233zd(E) [J]. Energy, 2023, 263: 126033.
- [34] MATEU-ROYO C, NAVARRO-ESBRÍ J, MOTABILONI A, et al. Theoretical performance evaluation of ejector and economizer with parallel compression configurations in high temperature heat pumps [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 119: 356-365.
- [35] KIM M H, PETTERSEN J, BULLARD C W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 119-174.
- [36] 宁静红, 刘华阳. 氨蒸气压缩高温热泵系统研究现状 [J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 53-60. (NING Jinghong, LIU Huayang. Research status of ammonia vapor compression high-temperature heat pump system [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(2): 53-60.)
- [37] EMERSON. VILTER-single screw ammonia heat pumps [EB/OL]. (2021-08-15) [2023-05-01]. <https://www.copeland.com/zh-cn/products/refrigeration/industrial-refrigeration/industrial-heat-pumps>.
- [38] Refrigerating systems and heat pumps-safety and environmental requirements Part 1: basic requirements, definitions, classification and selection criteria: EN 378-01-2016[S]. London: BSI Standards Limited, 2016.
- [39] HU Bin, LIU Hua, JIANG Jiatong, et al. Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: onsite application research [J]. Energy, 2022, 238: 121699.
- [40] 胡斌, 葛冰瑶, 朱炫灿, 等. 一种双热源热泵型空气碳直接捕集系统: 202210612102.3 [P]. 2022-05-31. (HU Bin, GE Bingyao, ZHU Xuancan, et al. A dual heat source heat pump type air carbon direct capture system: 202210612102.3 [P]. 2022-05-31.)
- [41] 胡斌, 蔡宏, 朱炫灿, 等. 一种工业余热驱动的近零能耗直接空气捕集系统: 202211298101.2 [P]. 2022-10-

21. (HU Bin, CAI Hong, ZHU Xuancan, et al. A near zero energy consumption direct air capture system driven by industrial waste heat; 202211298101.2 [P]. 2022-10-21.)

通信作者简介

王如竹,男,教授,上海交通大学机械与动力工程学院,021-34206548,E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn。研究方向:热泵技术

及其应用,规模化储热与能质调控。

About the corresponding author

Wang Ruzhu, male, professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 86-21-34206548, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn. Research fields: heat pump technology and application, large-scale heat storage and energy quality regulation.