

A Review of Large-Scale Vapor Compression High Temperature Heat Pump Research and Application

Liqin zhang¹, Daoke Tang¹, Dingding Li², Qing Miao², Lin Fu^{1*}

¹Building energy conservation research center, tsinghua University, Beijing

²Beijing Tsinghua Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing

Email: *fulin@mail.tsinghua.edu.cn

Received: Apr. 8th, 2017; accepted: Apr. 27th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

Vapor compression high temperature heat pump (VCHTHP), which is an environmental friendly and energy conservation technology, is widely applied, especially the large-scale sets. In this article, the characteristics and necessity of large-scale VCHTHP were elaborated, and the research progress was reviewed and analyzed in terms of thermodynamic cycles and alternative refrigerants. It demonstrated that modified regular cycles and low GWP HFC & HFOs alternatives are the key parts for recent research and application of Large-scale VCHTHP, and the irreversible Lorenz cycle and non-azeotropic refrigerants have good prospects. At last, some application cases were also reviewed.

Keywords

VCHTHP, Thermodynamic Cycle, High Temperature Refrigerant

大型压缩式高温热泵技术研究及应用进展

张立钦¹, 唐道轲¹, 李丁丁², 苗青², 付林^{1*}

¹清华大学建筑节能研究中心, 北京

²北京清华同衡规划设计研究院有限公司, 北京

Email: *fulin@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017年4月8日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

*通讯作者。

摘要

压缩式高温热泵是应用广泛的节能环保技术，尤其是大型热泵机组，近年来随着能源结构调整和环境保护要求的不断提高而日益受到重视。本文分析了大型压缩式高温热泵的特点和必要性，并从该项技术的两个方面，即热力循环和高温工质，分别阐述了近年来大型压缩式高温热泵的研究现状，指出各类优化常规循环及低GWP的HFC及HFO类替代高温工质是今后一段时间该项技术研究和应用的重点方向，而变温循环和非共沸高温混合工质则具有良好的发展前景，需要进一步深入。此外简述了研究机构和设备制造商在大型压缩式高温热泵应用方面所取得的进展。

关键词

压缩式高温热泵，热力循环，高温工质

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 序言

压缩式高温热泵是在工业及市政工程领域中应用广泛的一类节能环保技术。作为高温热泵的一种，压缩式高温热泵可通过付出少量高位能的代价，将生产生活中常见但难以直接利用的低品位热源，如废水，工业余热冷却水，自然水体等，高效的转化为较高温度的热能，供建筑供热或是多种工业部门的工艺流程使用。压缩式高温热泵能够有效减少化石燃料和冷却介质的使用量，从而降低燃料燃烧带来的空气污染和废热排放带来的环境热污染，是有巨大发展潜力的环境友好型技术，尤其是规模大、能效高、集约化的大型压缩式高温热泵，更加适用于我国工业规模大，环保压力大的特点。

2. 大型压缩式高温热泵的特点和必要性

压缩式高温热泵的基本组成部件与蒸汽压缩式制冷机一致，包括压缩机、换热器、膨胀部件等，基本原理也相同，即通过少量外来能源的驱动，使工质发生状态循环变化，从而达到将大量热能从低温热源转移到高温热源的目的。根据冷凝温度的不同，压缩式热泵可分为常规热泵和高温热泵。出水温度在 $40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的为常规热泵，而出水温度高于 50°C 的称为高温热泵[1]。大型热泵并没有公认的精确定义，在这里将可提供兆瓦级别热功率及以上的称为大型热泵。原理示意图见图1。

2.1. 大型压缩式高温热泵的特点

虽然原理相同，但大型压缩式高温热泵有明显不同于制冷机或常规热泵的要求和限制。这是由其特点决定的。大型高温热泵的首要特点就是高温热源的溫度需求高。常规热泵的出水温度在 $50^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 以下；而热功率达到兆瓦、十兆瓦级的大型热泵则普遍远超高温热泵的门槛温度，例如集中供热领域里对一次网供水的温度要求需要达到 $80^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ ，而很多需要使用高温热的工业流程也要求 $80^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ 的高温水，乃至 100°C 以上的高温蒸汽。其次，大型高温热泵的低温热源温度比普通制冷机和常规热泵高。常规热泵利用空气或地下水等作为热源，其温度通常不超过 30°C [2]；而高温热泵要利用的低温热源，如电厂的锅炉乏气，工厂的余热冷却水等，则大都在 30°C 以上。再次，大型高温热泵低温热源和高温热

源之间的温度跨度更大。常规热泵从低温热源到高温热源的温度跨度通常为 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，而大型高温热泵跨度普遍超过 40°C 。见图 2 所示。最后，大型压缩式高温热泵需要大容量压缩机，这类产品设计生产的难度往往较高。以上这些需求使得大型压缩式高温热泵机组的热力循环和循环工质等必须进行针对性选择，同时也对设备制造商在大容量压缩机及耐压耐温的管路、阀门、轴承等关键零部件的生产能力提出新挑战。

2.2. 开发大型压缩式高温热泵的必要性

尽管开发大型压缩式热泵的难度远大于小型常规热泵，但其对我国的能源现状而言仍具有相当的必要性。据统计，随着国民经济的快速发展，我国的年能源消耗总量还在不断攀升，其中煤的占比始终居

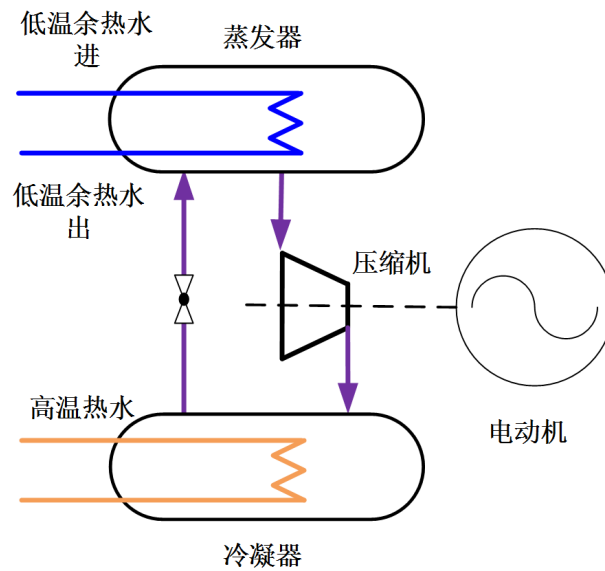


Figure 1. Schematic diagram of compression heat pump

图 1. 压缩式高温热泵原理示意图

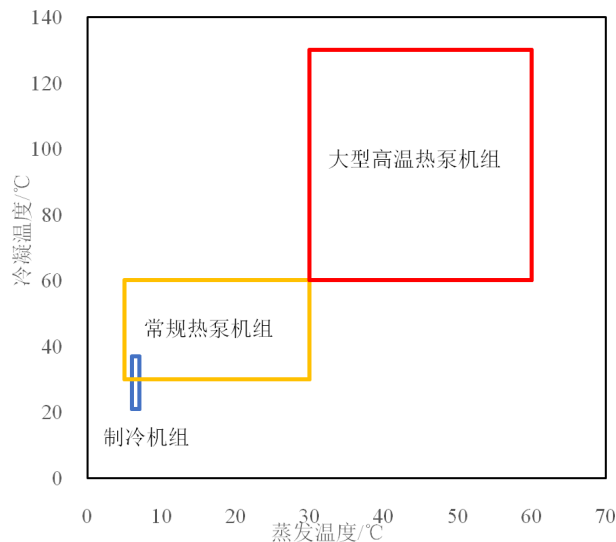


Figure 2. Schematic diagram of large scale high temperature heat pump

图 2. 大型高温热泵运行范围示意图

高不下,其燃烧后排放的粉尘、二氧化硫和氮氧化物等污染物对环境造成了巨大的负面影响。能源总消耗中有 60% 以上的能源消耗用于各类制造工业,再加上冬季耗能大户的供暖热电行业,其实际用能热效率只在 15%~45% 之间,也就是 55%~85% 的能源最终是在某一温度下以余热的形式被直接排放,同时为了排热,还要浪费大量水资源[3]。这就造成了目前我国的能源低效利用局面,即存在大量分布广泛又相对集中的工业余热,同时为了满足更多热能和电力需求,还在不断增加一次能源尤其是煤的消耗,导致了环境压力进一步加大。这类工业余热大多以水为载体,多处于 30℃~60℃ 温度区间内,虽然直接换热利用价值极低,但对大型高温热泵系统来说品味却很高,非常适合作为高温热泵的低温热源。如能采用高温热泵充分利用这部分热量,可对提高我国的用能效率起到显著作用,极大的减轻环境压力。不难看出,我国现有的大量工业余热资源是推广高温热泵极为有利的条件,对其回收再利用也是非常紧迫的现实需求,这使得大型压缩式高温热泵在今后一段时期内具有十分广阔的市场前景。经过学术界和工业界多年的努力,目前国内无论是换热器还是压缩机的设计生产技术都已达到了较高的水平,新的高温循环工质研究也已有一定深度,因此从技术上来讲,针对工业余热回收工况专门设计生产大型压缩式高温热泵已不存在困难。为了更好的推进这项研究,本文将从以下几方面进行现状阐述和分析。

3. 热力循环

3.1. 优化常规循环

常规循环即由蒸汽压缩,高压蒸汽放热冷凝,节流为低压液体,再从低温热源吸热汽化四步组成的基础方案,结构简单,但优化空间很大,现有的市面产品几乎全部是在基础循环中增加或替换一些部件以提高循环效率的优化循环,如带有液相/吸气热交换器、经济器、喷射器或可回收膨胀功的膨胀机等循环方案。对于这一类循环,已有大量的理论和实验研究,系统模型的构建也已达到相当完善的地步。Chasik Park [4]等回顾了近年来蒸汽压缩循环的研究进展,着重对过冷循环,膨胀功回收循环、喷射循环、多级循环及饱和循环等优化循环方案等逐一进行理论和模拟分析,给出了在不同工况和工质条件下各类循环的性能对比,指出了增加膨胀功回收和喷射环节可较好的提升循环性能,而多级饱和循环则具有很大提升潜力。这些结论在制冷或常规热泵工况下做出的,对压缩式高温热泵同样具有指导意义。从市面产品的设计来看,这类优化循环可以满足绝大多数案例的需要。因此优化常规循环的评价与组合仍是热力循环研究的重心。

一般而言从蒸发温度到冷凝温度的跨度越大,系统 COP 越低,因此为了达到所需的温度,同时又具有较高的 COP,通常压缩式高温热泵都会采用多级压缩、逐级升温的方案,而大型的压缩式高温热泵由于余热总量大,温度跨度大,单一的常规循环很难做到较高效率,就需要设计者充分考虑循环方案,以达到最优的热量/温度梯级利用效果。日本九州大学的研究人员 Chieko Kondou 等[5]就针对四种复杂循环方案在压缩式高温热泵中的应用进行了探索,充分考虑了串联、并联、多级压缩加中间补气及复叠式循环的搭配组合,利用三台压缩机和其他部件搭建了高温热泵系统,同时评估了四种低 GWP 的氢氟烯烃(HFO)类工质在不同循环中的性能,从而利用 80℃ 热源将最终出水温度提高到 160℃。

3.2. 跨临界循环

在以上各类常规循环的搭配组合以外,与制冷循环不同的是,有一部分高温热泵研究采用的是跨临界循环,其包括了常规的液体气化吸热的低温侧和只有气相传热的高温侧。这是由于高温热泵的所需温度有可能显著高于循环工质的临界温度,故在高温热泵中应用时必须采用跨临界循环。

最常见的使用跨临界循环的工质是 CO₂。CO₂ 很早就作为循环工质而被研究,然而效果欠佳,很快为人造工质替代。但从上世纪 90 年代开始,由于 CFC 类制冷工质的臭氧破坏性,研究者开始重新尝试将自然存在的 CO₂ 作为工质应用于制冷或常规热泵系统中[6],特别是随着 2014 年欧盟率先颁布对 HFC

类高 GWP 工质的限制令(European Regulation N517/2014), CO₂ 跨临界循环热泵系统再次成为研究热点[7], 有大量研究持续努力将 CO₂ 跨临界循环应用于各类制冷、常规热泵和高温热泵之中。Groll 等[8]总结了这些应用性研究, 从理论上分析了各种 CO₂ 跨临界循环方案的性能, 并指出这类循环方案的推广使用仍然有赖于压缩机和换热设备的持续提升, 受限于投资成本与政策的变化。在国内, 天津大学就对跨临界 CO₂ 热泵系统较早的展开了研究[9]。西安交通大学建立了跨临界 CO₂ 系统试验台, 对 CO₂ 压缩机以及膨胀机进行了研究, 搭建的跨临界热泵系统可提供 90℃ 的出水[10] [11]。同济大学分析了跨临界循环中由于接近 CO₂ 临界温度而带来的 COP 损失[12]。

此外也有采用人造有机工质进行跨临界循环研究的尝试。东京电力公司的梅泽修一等[13] [14]研制了以 R134a 为工质的离心式高温热泵, 制取 130℃ 的高温高压水及高温空气, 用以木材干燥和变压器制造的工艺过程。该系统采用了跨临界多级循环流程, COP 达到 3.0, 节省了 27% 一次能源消耗量, 降低 CO₂ 排放量达 44%。西安交通大学的 Yu Jianlin 等[15]开发了采用 R290/R32 混合工质跨临界循环热泵系统, 可获得 90℃ 出水[15]。

3.3. 变温循环

压缩式热泵的冷凝器和蒸发器中不可避免存在着温差传热的不可逆损失, 同时低温热源与高温热源的热容量都不是无穷大, 不能视作恒温热源, 进、出口之间存在较大的温差。此时对于变温热源来说可逆的理想循环就不是逆卡诺循环, 而是由两个与热源做无温差传热的多变过程及两个等熵过程组成的洛伦兹循环[16]。这就意味着在理论上, 变温循环可利用较少的升温级数满足同样的系统性能要求。大型压缩式热泵的两端热源均是温度变化较大的变温热源, 而在两个热源之间的温度跨度通常也比普通热泵或制冷机要大, 如采用常规循环不可避免的会导致性能下降且级数较多。因此变温循环就成为该种热泵系统研究的一个重要方向。同济大学的 Xiang Cao 等[17]由独立的多级单质工质循环, 通过换热器串联拟合出了变温循环, 显著提高了整体系统的性能, 试验表明两级拟合和三级拟合变温循环分别将系统 COP 提高了 12.3% 和 18.7%。但就通常而言, 关于变温循环的研究主要是围绕存在相变温度滑移的非共沸混合工质而展开的, 而变温循环的表现也取决于工质本身的性能。

3.4. 小结

在制冷机组中已经得到广泛应用的各类优化常规循环可以满足绝大部分情况下大型压缩式高温热泵的需求, 然而由于大型热泵普遍温升较大, 为保证系统总性能和运行成本满足要求, 需合理安排逐级升温 and 循环优化, 这又将增加设备的初投资成本, 如何平衡需根据具体工况而定; 跨临界循环由于对设备有特殊要求, 目前仍停留在实验室研究和示范应用阶段; 变温循环具有适应大温度跨度的特性, 十分适合用于高温化、大跨温的需求场合, 但有赖于性能较好的非共沸混合工质的开发研究。

4. 高温工质

高温循环工质是压缩式高温热泵的基础, 蒸汽压缩循环的具体参数与工质直接相关, 而压缩机设计要求也直接决定于工质状态变化。R134a 和 R123 这两种当前代表性高温工质, 基本可以覆盖 50℃~100℃ 和 100℃~150℃ 这两个常用温度区间, 容量范围也较宽, 但随着京都议定书的签订, R134a (高 GWP 类 HFC) 和 R123 (HCFC) 工质均在被限制使用的名录之中面临淘汰。然而遗憾的是, 目前还没有一种公认的性能优越, 适用温度区间和容量范围宽, 各方面指标均能满足要求的替代高温循环工质。

4.1. 高温工质的基本需求

通常对高温工质的要求包括如下几点: (1) 适中的冷凝压力, 应低于现有常规部件的承压能力; (2) 蒸

发压力在 0.1 MPa 以上, 防止在系统中形成负压; (3) 具有零臭氧消耗潜能值(ODP), 较低的全球变暖潜能值(GWP, 应低于 150); (4) 不可燃, 与系统材料和润滑油兼容, 毒性低; (5) 较高的单位容积制热量; (6) 循环理论 COP 较高, 至少应大于 3 [18] [19]。大型高温热泵相对常规小型热泵的工质灌注量更大, 冷凝温度更高, 使得对安全性和管路系统承压的要求也更高。因此在选择替代工质时, 不可燃性和低毒性是非常重要的安全考量, 同时冷凝压力也应该更低。

4.2. 单质高温工质

对于高温工质的选择有两种趋势, 一种是使用自然工质, 另一种是使用人造工质。自然工质价格远比人造工质低, 已有一部分实际应用, 如德国基伊埃公司(GEA)开发了采用自然工质氨为制冷剂的大型工业用热泵系统, 该系统使用特制的高压螺杆压缩机, 出水最高温度达 90℃, COP 在 3.5~4.0 之间。单台制热量可达 10 MW [20]。另外如前文所述更加环保的 CO₂ 也是欧洲国家较为关注的方向。然而 CO₂ 和 NH₃ 缺点也非常明显, 两者压力都显著高于人造工质, 而且 NH₃ 还具有可燃性和较高毒性, 不利于大型热泵的安全性。此外 HC 类自然工质也由于其易燃易爆的特性, 并不适合大型热泵, 使用仍局限在小型制冷装置中。

近几年发达国家的研究人员对人造化合物工质研究的更为偏重, 尤其是一系列新型低 GWP 的氢氟烃(HFC)和氢氟烯烃(HFO)类工质。如霍尼韦尔公司开发了 R1234yf, R1234ze(E)及 R1233zd 等[21] [22] 工质; 杜邦公司的 Kontomaris 等[23]研究了 DR-2、DR-12、DR-14 等一系列替代工质的化学性能及在高温热泵中性能, 并与 R245fa 和 R134a 等工质进行了对比; 九州大学的 Koyama 和 Fukuda 等[24] [25]先后研究了 R1234ze(E)单质和与 R32 的混合工质在高温热泵中的性能, 以及 R1234ze(E)和 R1234ze(Z)作为高温热泵工质在冷凝温度达到 75℃、105℃和 125℃时的性能表现。

以下选取几种目前较热门的人造替代工质进行对比, 包括 R245fa、R1234yf、R1234ze(E)(以下均写作 R1234ze)、R1233zd、R365mfc 和 R1336mzz(Z) (以下均写作 R1336mzz), 其基本物理特性见表 1 所示。从临界温度上来看, R1234yf、R1234ze 与 R134a 接近, 而其余工质与 R123 接近。值得注意的是 R245fa 的 GWP 也非常高, 因此很快也将面临淘汰。

除临界温度以外, 评价工质性能还可从两个重要指标来分析。首先是单位容积制热量 Q_{vol} 。在给定

Table 1. Physical parameters of common high temperature substitute refrigerants

表 1. 常见高温替代工质的物性参数

代号	R1234yf	R134a	R1234ze	R245fa	R1233zd	R1336mzz	R123	R365mfc
ODP	0	0	0	0	0	0	0.012	0
GWP	4	1300	≤1	858	1	9.4	120	0
大气寿命[年]	0.029	14	0.0493	7.7	0.071	0.06	1.4	8.6
可燃性	不可燃	不可燃	低可燃	不可燃	不可燃	不可燃	不可燃	低可燃
毒性	有毒	无毒	无毒	有毒	无毒	无毒	有毒	无毒
标准沸点[°C]	-19.4	-26.1	-19.0	15.1	18.3	33.4	27.7	15.3
临界温度[°C]	95.0	101.1	109.4	154.0	165.6	171.3	183.7	186.9
临界压力[MPa]	3.4	4.1	3.6	3.7	3.8	2.9	3.7	3.3
冷凝温区[°C]	50~80	50~90	50~100	90~140	100~150	110~150	110~150	120~150
容积制热量[kJ/m ³]	2400~3800	2700~5300	2000~4500	2200~4700	2400~5000	2600~5100	2400~4600	2100~3300
制热 COP	5~5.37	5.18~5.62	5.05~5.63	5.59~6.2	5.91~6.43	6.2~6.58	6.55~6.69	6.26~6.46

的总制热量下,其决定了压缩机的排量,管道及换热器的尺寸,表征了设备的初投资成本。其次是制热 COP,其为评价循环工质理论性能的核心指标,表征了设备的运行成本。如采用从低温热源到高温热源有 40℃ 温度跨度的工况进行理论计算,可以得到不同冷凝温度下工质的 Q_{vol} 和 COP。可以看出在适宜的温度区间内,除了 R1234yf 和 R365mfc 较低以外,大部分工质的 Q_{vol} 均与 R134a 和 R123 基本相当,而 COP 则都处于 5~7 之间。这说明 R1234ze 在 100℃ 以下温区内对 R134a 具有较好的替代性,而 R1233zd 和 R1336mzz 在 100℃~150℃ 温区内对 R123 具有较好的替代性。

实际上 Q_{vol} 和 COP 两项指标在冷凝温度上升时其变化趋势并不相同,因此在不同工况和系统配置下如何平衡这两项关键指标就成为选择循环工质的关键点,部分相关研究即着眼于此。如 P.A. Domanski [26] 等采用基于帕累托最优边界的优化遗传算法,对在指定的几种常见循环条件中的工质性能进行分析,给出了制冷工况条件下一系列新型工质综合 COP 与 Q_{vol} 优化的性能结果,并指出了工质的临界温度 T_{crit} 是平衡这两项特性的决定性因素。

4.3. 混合高温工质

在国内,大部分循环工质替代研究则是基于混合工质而展开的。清华大学相继开发了以 R124/R142b/R600a 为组分的混合工质 HTR01、HTR02、HTR03 和 HTR04,可覆盖 60~90℃ 的温度要求 [27] [28]。上海交通大学利用混合工质 R22/R141b 将冷凝水从 70℃ 加热到 80℃ [29]。天津大学也进行了一系列高温工质研究,包括以 R21/R152a/R22 和 R123/R290/R600a 为组分的混合工质,最高制热温度达到 88℃;以及采用自主研发的高温工质 M1A、M1B、M1C (R152a/R245fa)、MB85、BY-3 等的混合制冷剂,在热源温度 40℃ 左右,冷凝温度 70℃~100℃ 不等的工况下测试了其性能, COP 均超过 3 [30] [31]。

尽管在理论上具有很多优点,设备制造商仍然倾向于采用单质工质循环,而极少有混合工质在大型压缩式高温热泵上的应用报告。这主要是因为非共沸混合工质的相变温度滑移随着温度变化而呈现出非线性趋势,这就导致传热窄点的存在 [32] [33];其次,在冷凝过程中,混合物中较不易挥发的组分会在换热表面带来较大的传质阻力,极大的劣化了其他组分的换热能力 [34];第三,混合工质发生泄漏以后,其组分比很容易随之变化,从而导致系统性能的恶化。然而研究表明 [35] 混合工质在提高单一工质热力学性能上的优点仍然表现明显,也非常适合热源温度大幅度变化的大型热泵,因此,针对变温循环的非共沸混合工质研究仍需继续深入。

4.4. 小结

从以上分析中可以看出, CO_2 和 NH_3 等自然工质,也可以满足高温工况,但普遍需要特殊的跨临界循环或高压管路设备,因此其综合替代能力不如人工工质,尤其是以 R1234ze、R1233zd 及 R1336mzz 为代表的 HFC 及 HFO 类高温工质,而理论性能较好的非共沸混合工质的开发也需要符合性能及环保要求的单质化合物为基础。然而国内企业在现阶段想要发展低 GWP 的 HFC 及 HFO 类工质却面临很多障碍,主要因为国际领先企业已在相关产品的制备和应用方面进行了全面的专利布局,自行开发将是一项长期任务。因此一方面国内的研究应对新型的 HFC 及 HFO 化合物工质研究保持跟踪,另一方面也应加大对大型自然工质热泵相关部件,如压缩机、膨胀机等开发。

5. 大型压缩式高温热泵的应用

热泵技术很早就建筑室内环境调节中得到广泛应用。而高温热泵可以直接将供水温度提高到 60℃ 以上乃至更高,基本能够达到北方供热的标准,使末端散热装置不受限制,因而该类热泵既可以作为普通建筑的供热热源,也可以用于老建筑的改造 [18]。目前发达国家的设备制造商已经推出了不同规格的压

缩式高温热泵产品。如美国麦克维尔公司(McQuay)在本世纪初就推出了 Templifie 系列热泵机组,按不同功率等级分为回转式和离心式两大类型,其中离心式机组为兆瓦级,最高供水温度为 $60^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$,低位热源为 $12^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的余热,在热源 29.4°C 出水温度 60°C 工况下,COP可达5左右。瑞士孚瑞公司(Friotherm)开发了工质为R134a,最高冷凝温度为 90°C ,制冷量范围为2 MW到20 MW的离心式高温热泵机组。典型的应用项目是为瑞典斯德哥尔摩的Nimrod海水源热泵项目提供了4台Unitop 33/28CPY双机头离心式热泵机组,一共可生产48MW的制热量或36MW的制冷量,热水供水温度为 78°C ,冷水供水温度为 5°C ;以及在挪威奥斯陆Skoyen Vest采用Unitop 50FY离心式热泵机组,从 10°C 污水中制取 90°C 热水供热,总热功率达到12 MW [36]。美国江森自控(Johnson's control)旗下的约克公司(York)推出了Titan多级离心压缩式高温热泵, YDST单级离心式高温热泵, CYK双级离心式热泵机组、YK工业级离心式高温热泵机组等系列化的余热回收解决方案产品[37]。其中Titan多级离心压缩式高温热泵单机制热能力达30MW,单机热水出水温度可达 82°C 。这种单机制热量达到数十兆瓦量级的大容量热泵非常适合应用于区域能源中心、大型工业厂房、城市集中供暖等场合。

在国内,西安交通大学压缩机研究所集中于高温热泵系统的研究,开发了余热回收高温热泵系统测试台,采用带有喷油冷却的高温螺杆压缩机,使得冷凝温度达到 90°C ,出水温度达到 85°C ,并研究了油冷却技术对机组性能的影响[38]。在此基础上,与国内压缩机厂家合作研发高温热泵用螺杆压缩机,开发了制热量700 kW的油田余热回收高温热泵机组。机组采用两级冷凝器串联加热[39]。格力公司采用其研制的永磁同步变频离心式热泵回收低品位工业余热,用于北方城镇区域集中供暖,实验结果表明热功率1759 kW的永磁同步变频离心式热泵的制热COP达到7.0,热泵系统整体COP达到4.8,能效高于大型热电联产供热系统[40]。烟台冰轮集团也开发了螺杆式污水源热泵,可以提供 $45^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ 的热水,可以替代燃煤锅炉满足小区供暖需要,出水 55°C 时,制热COP达到4.1 [41]。

另一方面,在石化、轻工制造和城市环境工程等工业领域,高温热泵具有广泛的用途,例如原油加热集输,物料干燥,污水处理等过程。如日本神户制钢所研制的系列蒸汽高温热泵,采用高压比高温适用的两级螺杆式压缩机,工质采用高温工质R245fa,热功率380~660 kW,冷凝温度可达 120°C 或 160°C 以上,COP分别达到3.2和2.5,可对工厂内的温排水实施热回收,适用于食品、药品、轻化工等工业的原料浓缩及干燥等多种工序[42]。大庆油田采用热泵技术回收油田污水余热,利用 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 油田污水冷却水作为低温热源,将工艺水提升至 $60^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$,从而用于采暖和管道供热[43]。苏州某污水处理厂利用再生水作为低温热源,由高温热泵稳定产出 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 高温热水,可满足厌氧高温消化工序工艺温度要求。再生水源热泵相比于传统的燃煤、燃气锅炉加热方式能源利用率高出40% [44]。

可以看出我国在高温热泵应用方面仍有两点落后于国际先进水平,一是规模较小,在集中供热方面,以北欧地区为代表,其用于集中供热的大型压缩式高温热泵功率普遍达到了十几甚至几十兆瓦,可直接用于一次网供热,而我国目前高温热泵的应用案例仍停留在1~2 MW以下,只能保证小区或个别换热站的供热。二是出水温度相对较低,在工业应用方面,我国的高温热泵应用较多是 100°C 以下,缺乏 100°C 以上出水的设备。这两点均要求国内设备制造商进一步提高压缩机设计制造的水平 and 全系统的有效整合能力。此外,鉴于我国工业余热的规模庞大,更大容量高温热泵的需求也在不断出现,有必要进一步针对大容量的离心式以及混流、轴流式压缩机和高效换热器等进行优化甚至全新的设计,并相应升级加工工艺与关键通用零件,从而满足更多市场需求。

6. 总结

本文通过对压缩式高温热泵的概念、热力循环、替代工质及应用现状的梳理分析,总结了今后一段时间内大型压缩式高温热泵技术的重点方向。系统方面,变温循环更加适应大型高温热泵的需求,但有

赖于成熟的非共沸混合工质，在此之前，以螺杆和离心式压缩机为核心的各类常规循环仍可满足大部分大型压缩式高温热泵的需求，具有很高实用价值，应在具体项目需求基础上进行设计；在工质方面应保持跟踪热门替代高温工质，同时继续探索自然工质在大型机组中的实用化可能；设备方面应该注重开发十兆瓦量级乃至更大容量的压缩式高温热泵机组，以及高于 100℃ 出水的高温热泵。2015 年国家颁布的《余热暖民工程实施方案》明确提出，在 2020 年之前，通过集中回收利用低品位余热资源，来替代燃煤供热 20 亿 m² 以上，减少供热用原煤 5000 万吨以上[45]。“十三五”能源规划也指出，要着重引导非化石可再生能源的利用，大力减少化石能源，尤其是煤的使用。因此，对大型压缩式高温热泵在供热领域和其他工业领域应用的深入研究，对调整能源结构，进而改善空气质量至关重要，也是相关设备厂商积极响应市场变化，提高供给能力的重要机遇。

参考文献 (References)

- [1] 中国机械工业联合会. GB/T 25861-2010, 蒸汽压缩循环水源高温热泵机组[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 中国机械工业联合会. GB/T 19409-2013, 水(地)源热泵机组[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [3] 方豪. 低品位工业余热应用于城镇集中供暖关键问题研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [4] Park, C., Lee, H., Hwang, Y., *et al.* (2015) Recent Advances in Vapor Compression Cycle Technologies. *International Journal of Refrigeration*, **60**, 118-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.005>
- [5] Kondou, C. and Koyama, S. (2015) Thermodynamic Assessment of High-Temperature Heat Pumps Using Low-GWP HFO Refrigerants for Heat Recovery. *International Journal of Refrigeration*, **53**, 126-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.018>
- [6] Lorentzen, G. (1994) Revival of Carbon Dioxide as a Refrigerant. *International Journal Refrigeration*, **17**, 293-301. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0140-7007(94)90059-0)
- [7] Pitarch, M., Navarro-Peris, E., Gonzalez, J., *et al.* (2016) Analysis and Optimisation of Different Two-Stage Transcritical Carbon Dioxide Cycles for Heating Applications. *International Journal of Refrigeration*, **70**, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.013>
- [8] Groll, E. and Kim, J.-H. (2007) Review of Recent Advances toward Transcritical CO₂ Cycle Technology. *HVAC&R Research*, **13**, 499-520. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390968>
- [9] 王侃宏, 马一太, 杨昭, 等. CO₂ 跨临界循环高压侧压力控制的热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(5): 537-540.
- [10] Yang, D., Song, Y., Cao, F., *et al.* (2016) Theoretical and Experimental Investigation of a Combined R134a and Transcritical CO₂. *International Journal of Refrigeration*, **72**, 156-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.016>
- [11] Song, Y., Wang, J., Cao, F., *et al.* (2016) Experimental Investigation on a Capillary Tube Based Transcritical CO₂ Heat Pump System. *Applied Thermal Engineering*, **112**, 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.033>
- [12] Yang, L., Li, H., Cai, S.W., *et al.* (2015) Minimizing COP Loss from Optimal High Pressure Correlation for Transcritical CO₂ Cycle. *Applied Thermal Engineering*, **89**, 656-662. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.023>
- [13] 梅沢修一, 上田憲治, 福島亮, 等. 高温高压水を供給するヒートポンプの乾燥工程への適用 [J]. 日本機械学会論文集 B 編, 2012, 78: 435-439.
- [14] 梅沢修一, 島田寛之, 宮本潤, 等. 排熱利用型高温ヒートポンプの開発[J]. 日本機械学会論文集 B 編, 2013, 79(799): 423-430.
- [15] Yu, J., Xu, Z. and Tian, G. (2010) A Thermodynamic Analysis of a Transcritical Cycle with Refrigerant Mixture R32/R290 for a Small Heat Pump Water Heater. *Energy & Buildings*, **42**, 2431-2436. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.016>
- [16] 华小龙. 非共沸混合工质制冷空调循环的发展及应用前景[J]. 制冷技术, 1991(1): 19-25.
- [17] Cao, X., Zhang, C.-L. and Zhang, Z.-Y. (2017) Stepped Pressure Cycle—A New Approach to Lorenz Cycle. *International Journal of Refrigeration*, **74**, 281-292. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.10.017>
- [18] 赵力. 高温热泵在我国的应用及研究进展[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 8-13.
- [19] 陈恒, 张世程, 孙鹏, 等. 中高温热泵技术在工业余热回收中的应用[J]. 中外能源, 2013, 18(11): 94-97.
- [20] 姚远, 龚宇烈, 陆振能, 等. 高温热泵及热泵蒸汽机的研究进展[J]. 新能源进展, 2014(3): 190-196.

- [21] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Molés, F., *et al.* (2016) A Review of Refrigerant R1234ze(E) Recent Investigations. *Applied Thermal Engineering*, **95**, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.055>
- [22] Honeywell International Inc. (2012) Honeywell Solstice™ yf Refrigerants. <http://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2013/03/honeywell-solstice-yf-technical-bulletin.pdf>
- [23] Kontomaris, K., Zero, O.D.P. and Low, G.W.P. (2013) Working Fluids for High Temperature Heating from Low Temperature Heat: DR-14, DR-12 and DR-2. *Proceedings of the XV European Conference on The Latest Technologies in Air Conditioning and Refrigeration Industry*, Milan, 7-8.
- [24] Koyama, S., Takata, N. and Fukuda, S. (2010) Drop-In Experiments on Heat Pump Cycle Using HFO-1234ze(E) and Its Mixtures with HFC-32. *Proceedings of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, West Lafayette, IN, Paper 1155.
- [25] Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., *et al.* (2014) Low GWP Refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for High Temperature Heat Pumps. *International Journal of Refrigeration*, **40**, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.014>
- [26] Domanski, P.A., Brown, J.S., Heo, J., *et al.* (2014) A Thermodynamic Analysis of Refrigerants: Performance Limits of the Vapor Compression Cycle. *International Journal of Refrigeration*, **38**, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.036>
- [27] Liu, N., Shi, L., Han, L., *et al.* (2005) Moderately High Temperature Water Source Heat-Pumps Using a Near-Azeotropic Refrigerant Mixture. *Applied Energy*, **80**, 435-447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.02.005>
- [28] Shi, L., Zan, C. (2008) Research Methods and Performance Analysis for the Moderately High Temperature Refrigerant. *Science in China Series E: Technological Sciences*, **51**, 1087-1095. <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0143-4>
- [29] Li, T.X., Guo, K.H. and Wang, R.Z. (2002) High Temperature Hot Water Heat Pump with Non-Azeotropic Refrigerant Mixture HCFC-22/HCFC-141b.. *Energy Conversion & Management*, **43**, 2033-2040. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00150-9)
- [30] Pan, L., Wang, H., Chen, Q., *et al.* (2011) Theoretical and Experimental Study on Several Refrigerants of Moderately High Temperature Heat Pump. *Applied Thermal Engineering*, **31**, 1886-1893. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.035>
- [31] Zhang, S., Wang, H. and Guo, T. (2010) Experimental Investigation of Moderately High Temperature Water Source Heat Pump with Non-Azeotropic Refrigerant Mixtures. *Applied Energy*, **87**, 1554-1561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.001>
- [32] Venkatarathnam, G., Mokashi, G. and Murthy, S.S. (1996) Occurrence of Pinch Points in Condensers and Evaporators for Zeotropic Refrigerant Mixtures. *International Journal of Refrigeration*, **19**, 361-368. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(96\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(96)00023-0)
- [33] Venkatarathnam, G. and Murthy, S.S. (1999) Effect of Mixture Composition on the Formation of Pinch Points in Condensers and Evaporators for Zeotropic Refrigerant Mixtures. *International Journal of Refrigeration*, **22**, 205-215. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00056-5)
- [34] Karlsson, T. and Vamling, L. (2005) Flow Fields in Shell-and-Tube Condensers: Comparison of a Pure Refrigerant and a Binary Mixture. *International Journal of Refrigeration*, **28**, 706-713. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.008>
- [35] 邱金友, 张华, 祁影霞, 等. 新型制冷剂 R1234ze(E)及其混合工质研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(3): 9-16.
- [36] Jakobs, R., Cibis, D. and Laue, H.J. (2010) Status and Outlook: Industrial Heat Pumps. *Proceedings of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, West Lafayette, Paper 1081.
- [37] 佚名. 江森自控大型余热回收热泵荣获中国建筑学会科技进步奖[J]. 上海建材, 2016(5): 23-23.
- [38] 王凯, 曹锋, 邢子文. 一种新型余热回收高温热泵机组的性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1309-1312.
- [39] Wang, K., Cao, F., Wang, S., *et al.* (2010) Investigation of the Performance of a High-Temperature Heat Pump Using Parallel Cycles with Serial Heating on the Water Side. *International Journal of Refrigeration*, **33**, 1142-1151. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.04.016>
- [40] 刘华, 张治平, 王升. 高效离心式热泵在集中供热中的应用[J]. 暖通空调, 2015, 45(12): 44-48.
- [41] 胡斌, 王毅, 王凯, 等. 高温热泵技术在工业制冷领域的应用[J]. 制冷学报, 2011, 32(5): 1-5.
- [42] 神钢集团. 世界首次将可供应 120~165℃蒸汽的热泵系统实现产品化[EB/OL]. http://www.kobelco.co.jp/chinese/releases/1193477_15016.html, 2011.
- [43] 苗承武, 吴明利, 刘文多. 采用热泵技术回收油田污水余热[J]. 石油规划设计, 2007, 18(2): 22-24.

-
- [44] 田磊, 史琳, 吴静, 等. 再生水源热泵应用于污泥厌氧处理的能流分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(4): 47-50.
- [45] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委、住房城乡建设部关于印发《余热暖民工程实施方案》的通知[EB/OL]. http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151104_757519.html, 2015-10-29.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: se@hanspub.org