刊首语

在人类日常生活和工农业生产中,热能是不可或缺且无处不在的基本能源。从满足人类基本舒适需要的供暖空调、热水洗浴,到农作物干燥、食品加工等,热能已深入到国民经济建设的诸多方面。在国家大力倡导节能减排、推动绿色发展、建设美丽中国的背景下,热泵作为仅需要消耗少量高品位能源就能获得大量可用能源的装置,具有广阔的应用前景。空气源热泵、地源热泵、污水源热泵等各式各样的热泵已经走进了人们的生产生活中,北方"煤改电"等清洁供暖方式的推广更使普通老百姓近距离接触到了热泵。可以毫不夸张地讲,大力发展热泵技术、提高热泵性能,是解决现有热能制取方式存在的能源利用效率低、能源消耗量大、环境污染严重等问题的有效措施,同时也是保障民生、建设美丽中国、促进社会可持续发展的重要任务。

本期"热泵专题"组织了 17 篇热泵相关的论文,包括一些相对较新的热泵技术,如二氧化碳热泵技术、混合动力热泵系统等;也有一些是热泵应用中比较热点的问题,如空气源热泵结霜问题、热泵与建筑相耦合的优化运行问题、水源热泵的控制策略问题、过冷却回路对多联机性能的影响等;还有一些是探索性研究和应用,如复叠式中高温热泵混合制冷剂分析、新型一体式除湿热泵空调循环、冷热联供的燃气机热泵机组等,从中可以看到,热泵在我国发展很快,研究和应用面均很广,并存在很大的发展空间。

本刊希望通过"热泵专题",使更多的同行关注热泵技术的发展与应用领域的进一步拓展;也欢迎各位同仁就"热泵专题"的内容与形式提出宝贵意见,促进《制冷学报》学术水平的进一步提升。

文章编号:0253 - 4339(2018) 05 - 0001 - 09
doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2018. 05. 001

CO_2热泵研究现状及展望

李 椿[1] 王志华[1,2] 王沣浩[1,2] 许怡博[1] 戢坤池[1] 高秀芝[1]

(1 西安交通大学人居环境与建筑工程学院 西安 710049; 2 西安交通大学建筑节能研究中心 西安 710049)

摘 要 本文概述了 CO_2 热泵目前在国内外的研究现状,总结了其在应用过程中的突出问题,分析了压缩机、换热器、节流装置等部件及系统的特点与缺陷,介绍了提高系统效率的最新技术方法,并对其在我国的发展予以展望。制约 CO_2 热泵推广的原因主要为系统压力较高、制造工艺要求更严格及专用压缩技术尚不成熟等导致的开发成本高。CO_2 热泵未来研究内容主要为改良系统,优化部件及结合精准的计算机控制技术,实现软硬件同步发展,确保 CO_2 热泵高效、安全、可靠地运行,促进自然工质在制冷与供热方面的研究与应用。可以预测,CO_2 热泵技术在我国将有更广泛的应用前景和研发空间。

关键词 CO_2 热泵;跨临界循环;综述;供热;制冷
中图分类号:TB61$^+$1; TQ051. 5 **文献标识码**: A

Research Status and Prospects of the CO_2 Heat Pump

Li Chun[1] Wang Zhihua[1,2] Wang Fenghao[1,2] Xu Yibo[1] Ji Kunchi[1] Gao Xiuzhi[1]

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi′an Jiaotong University, Xi′an, 710049, China; 2. Center for Building Energy Conservation, Xi′an Jiaotong University, Xi′an, 710049, China)

基金项目:国家自然科学基金(51606139) 和中国博士后科学基金(2016M590950,2017T100753) 资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51606139) and China Post Doctoral Science Foundation (No. 2016M590950 & No. 2017T100753).)

收稿日期:2017 年 7 月 30 日

Abstract The research situation of CO_2 heat pumps at home and abroad is reviewed, and the important problems in its application process are summarized in the paper. The characteristics and drawbacks of the components and systems, such as the compressor, heat exchanger, and throttle device, are introduced in detail. The latest technological means to improve the efficiency of the system are analyzed, and its development in China is forecasted. The primary reasons for restricting promotion of the CO_2 heat pump is high development cost, strict processing technology, and immature, costly, dedicated compression technology. The main research content of the CO_2 heat pump in the future is to improve the system, optimize the components, and to combine accurate computer control technology with the achievement of the simultaneous development of hardware and software, so that CO_2 heat pump will be operated efficiently, safely, and reliably. It can be predicted that the CO_2 heat pump technology will have promising development in China.

Keywords CO_2 heat pump; transcritical cycle; review; heating; refrigeration

随着生活水平的提高,人们对人居环境要求越来越高,环保问题和节能问题也日益突出。满足人们舒适生活条件的建筑能耗占社会总能耗的比例已超过30%,而采暖、热水所消耗能量占建筑能耗的56% ~ 58%[1]。因此,如何在满足人们舒适性的要求和环境友好、节能发展之间寻找最优答案成为关注热点。空气源热泵作为通过消耗一小部分高品位的电能,把空气中的低品位热量提取并加以利用的装置,具有环保、节能、安全和便捷等特点,越来越受到重视。然而,传统热泵使用的制冷剂存在破坏环境、臭氧层空洞和温室效应的问题,对人们的生产生活造成巨大的影响。在极端天气工况下,传统工质热泵的稳定性和制热能力受到限制,使得人们必须寻找新的制冷剂,以满足对于工作效率和环保方面的要求。P. Nekså[2]指出:CO_2 工质是一种少有的天然制冷剂,无毒无可燃性,廉价且易于获得,对自然环境没有破坏,在用作制冷剂方面具有很大的优势。陈光明等[3]分析归纳了几种自然工质在国外的研究进展,认为自然工质在工业、民用制冷设备中推广具有较大可行性。李连生[4]对制冷剂替代进程进行总结,认为自然工质潜力巨大。CO_2 工质 ODP 为 0,GWP 为 1,且具有良好的热力学特性,既能够保证优良的工作特性,又能减小当前传统制冷剂对环境的破坏,被公认为是一种很有前途的替代工质。

随着《国务院关于印发"十三五"节能减排综合工作的通知(国发[2016]74 号)》、《能源发展"十三五"规划》等文件的发布,北方各省掀起了"煤改电"的热潮。包括北京、天津、河北等在内的 20 多个省份和直辖市均发布文件进行治污降霾,保卫蓝天。以自然工质 CO_2 作为制冷剂的 CO_2 空气源热泵,在保证系统较高 COP 的同时具有优良的环保特性,能够有效控制臭氧层的破坏,减少温室气体的产生,抑制煤的燃烧,降低雾霾天气的发生率并减少 $PM_{2.5}$ 浓度,同时将节能与环保相结合,系统跨临界循环产生热水的高效运行,有效节省用户采暖能耗,是我国北方采暖问题得以解决的重要方案。因此在我国具有广阔的市场和潜力。

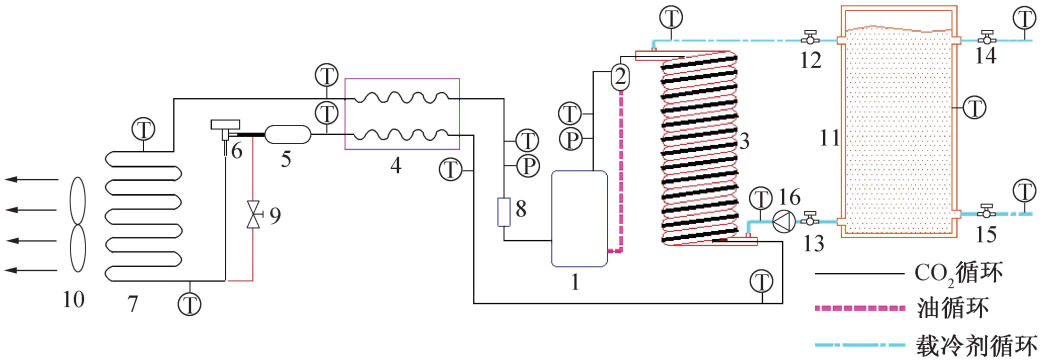
1 CO_2 热泵系统的发展现状

目前,正在研究的 CO_2 热泵热水系统基本采用跨临界循环系统。即被压缩的制冷剂气体放热过程不发生相变,在超临界区只通过显热交换进行换热。全世界多个国家的研究机构和企业均对 CO_2 热泵进行了大量的研究。挪威是最早提出并研究 CO_2 作为制冷剂利用其跨临界循环进行制冷和供热的国家,其理念与技术处于世界先进水平。挪威 SINTEF 研究所的 J. Petterson 等[5-6]率先研究了 CO_2 热泵技术,通过理论与实验相结合,研究了汽车用 CO_2 空调,验证了 CO_2 作为制冷剂在汽车空调中的优良性。P. Nekså 等[7]通过比较论证得出:CO_2 热泵跨临界循环相对于传统热泵供热系数高,结构紧凑,热水温度高,具有相当大的发展潜力。目前 CO_2 热泵热水器的系统形式主要有:单级蒸气压缩系统,双级压缩中间补气系统,喷射器回收膨胀功系统。CO_2 热泵系统原理如图 1 所示。

日本是世界上 CO_2 热泵热水器发展最快、技术领先的国家。在 1995 年,日本 CRIEPI、东京电力公司和 DENSO 公司[8]合作研究 CO_2 热泵系统,建立热泵热水器样机实验台,通过计算分析,发现 CO_2 热泵热水器供应热水时,性能高于传统工质热泵。经过数十年的发展,日本热泵产品已经统一使用 Eco Cute 商标名,目前已有松下、大金、三菱、东芝、三洋、电装等数十家公司生产不同规格型号的产品,在 2007 年日本本土家用 CO_2 热泵热水器的保有量已超过数百万台[9],并且已经推向欧洲市场。

挪威、丹麦、美国和德国等国家对 CO_2 热泵系统均进行了较多研究,取得多项成果,并已应用在商用和军用领域。丹麦的丹佛斯公司针对 CO_2 部件强度要求提出解决方案,可提供 CO_2 热泵的部件和零件。美国 Purdue 大学对 CO_2 专用压缩机进行了深入的研究,并成功举办多次压缩机大会。Maryland 大学和

Illinois 大学也对 CO_2 热泵进行了深入的研究,尤其是在汽车空调方面成绩显著。德国 Thermea 公司产品部分可以冷热二联供,用于供热时额定 COP 高达 5.5,英国 ICS 公司与意大利 DeLonghi 公司共同生产的商用产品出水温度超过 90 ℃。此外,欧洲市场还有 CO_2 汽车空调,家用冰箱、商用冷藏冷冻设备等。制冷、制热用 CO_2 热泵技术正在蓬勃发展。



1 压缩机;2 油分离器;3 气体冷却器;4 回热器;5 干燥过滤器;6 电子膨胀阀;7 蒸发器;8 气液分离器;9 融霜电磁阀;10 风扇;11 水箱;12 第一电磁阀;13 第二电磁阀;14 第三电磁阀;15 第四电磁阀;16 水泵;T 温度测点;P 压力测点。

图 1 CO_2 热泵系统原理

Fig. 1 The principle of CO_2 heat pump system

我国的 CO_2 热泵热水器尚处于研发阶段,起步较晚,但目前已经有越来越多的企业和研究机构对 CO_2 热泵进行研究与实验。天津大学王景刚等[10]建立了热泵实验台,对 CO_2 跨临界循环系统在热泵中的应用和各关键部件进行了理论和实验研究。并对单级跨临界 CO_2 带膨胀机循环与 4 种双级循环进行对比分析。西安交通大学徐洪涛等[11]对 CO_2 热泵循环进行了理论和实验研究,致力于专用压缩机的研发。邓建强等[12]针对跨临界 CO_2 引射系统进行研究,探究喷射器特性、系统控制特性以及系统性能等。胡斌等[13]对跨临界循环最优排气压力进行极值搜索控制。中南大学廖胜明[14]进行了 CO_2 跨临界循环的理论分析和循环参数优化,提出了最佳换热-压力关联式。上海交通大学叶菁菁等[15]研究了 CO_2 热泵用于汽车空调,并将 CO_2 热泵与地源热泵系统耦合,改善其运行环境,降低运行费用。清华大学张宇等[16]对 CO_2 热泵水平管换热进行了研究,并与企业合作对微通道进行实验研究与模拟。另外,大连交通大学、中原工学院[17]等高校和单位也对 CO_2 热泵系统展开了研究。CO_2 热泵系统已经成为国内热泵空调界的一个热点研究领域。寇宏侨等[18]设计了一种应用于寒冷地区的大功率 CO_2 热泵供热大温差小流量集中热水供暖系统,实际数据表明系统运行高效、稳定,具有良好的节能与经济效益。

2 CO_2 热泵各部件发展现状

尽管 CO_2 热泵技术与传统热泵相比有较大的优势,但是每个新产品问世的时候均存在诸多问题,CO_2 热泵存在的问题主要有:1)系统压力高。系统运行压力较高,润滑效果不佳,压缩机和各部件容易老化,碳化甚至被烧坏。2)控制调节较难。只有优良的控制策略才能充分体现节能性,否则仅仅是理论上的节能。3)系统效率较低。CO_2 节流装置前后压差甚至能够达到 9 ~ 10 MPa,故此系统压比小,压差大,具有较大的节流损失。4)结霜结垢问题。CO_2 系统适用于低温地区,导致蒸发器侧容易结霜;气冷器加热热水的过程中热水温度十分适于结垢;而结霜结垢问题很大程度影响系统效率,甚至破坏换热器。5)热源局限性问题。常见 CO_2 热泵低温热源为空气,即常见的空气源热泵,其弊端在于负荷越大时正是天气恶劣时,极大影响了热泵运行效率。6)其他问题。如 CO_2 热泵系统(配水箱)体积较大,占地大、不美观。

针对这些问题,改进 CO_2 热泵系统性能可分为 3 个方面:1)改进系统,利用补气增焓技术,中间冷却技术,多级压缩技术等措施改进系统,提高系统性能。2)优化部件,对各部件的材料,结构,形状,大小,布置等进行优化改进,消除或减小短板因素。3)增强控制。硬件达到一定程度时,软件则成为提高性能的重要保证。改进控制技术,提高控制精度,真正实现理想化运行。

2.1 CO_2 热泵专用压缩机

CO_2 热泵中最核心的部件为压缩机,其优劣直接决定整个系统能否高效运行。因 CO_2 的比体积小,

吸气量大,压缩机尺寸可大大减小。但是工作压力高对压缩机在零部件强度和密封性能上的要求较高,所以 CO_2 压缩机技术在很大程度上影响了商用热泵热水器发展。CO_2 热泵压缩机根据不同形式主要分为活塞式压缩机、涡旋式压缩机,螺杆式压缩机和滑片式压缩机等类型[19]。由于活塞式压缩机耐高压、压比小、泄漏量小,所以早期人们均采用简单的活塞式压缩机。为了减小压缩机余隙,提高压缩机工作效率,日本 SANYO 设计开发了两级滚动活塞压缩机,采用两级压缩,使轴上 2 个滚动活塞呈 180°分布,平衡性能好,噪声小,因一级中间压力可达 5 MPa,减少因压力高导致的机器变形和气体泄漏,可在 -20 ℃工况使用,系统运行更加平稳高效;DARKIN 设计开发了摆动活塞式压缩机,增加了旋转衬套,噪音控制在 38 dB 以下,提高了压缩机绝热效率,降低压缩机应力强度[20]。与常规热泵压缩机的发展和改进相似,涡旋式压缩机和螺杆式压缩机大大提高了压缩机的容积效率和稳定性。目前除了以上企业,日本松下、东芝、日立和电装、BOCK、DANFOSS、DORINE、EMB RACO、ACC 等公司以及中国的上海日立,西安庆安和广东美芝均能够依靠自主设计开发 CO_2 专用压缩机,并且正在研究以改良现有技术[21]。H. Nakao 等[22]改进了传统的 R410 压缩机,利用 DLC-Si 技术改进了单级转子压缩机,有效减小了叶片磨损。但由于压缩机排气压力和吸气压力之差是传统压缩机压力差的数倍,导致了更加严重的压缩机的气体泄漏和机械损耗。两级压缩的分离减小了密封处的泄漏,保证了较高的压缩效率。有的双级压缩机中反向布置的活塞有效减小压缩机振动,减少噪声,此外,中间压力的设计使压缩机壁厚减小 35%,减小了系统自重。韩毅等[23]研究发现大功率 CO_2 压缩机与同类产品相比运行效率约高 11.5%。当系统利用膨胀机代替膨胀阀时,采用膨胀-压缩一体机能够有效回收一部分膨胀功,增大系统 COP。西门子公司生产的 CO_2STC-GV 整体齿轮式压缩机,可达 6 个压缩级,其设计 CO_2 流量约为 141 000 m^3/h,是其原有设备的近两倍。

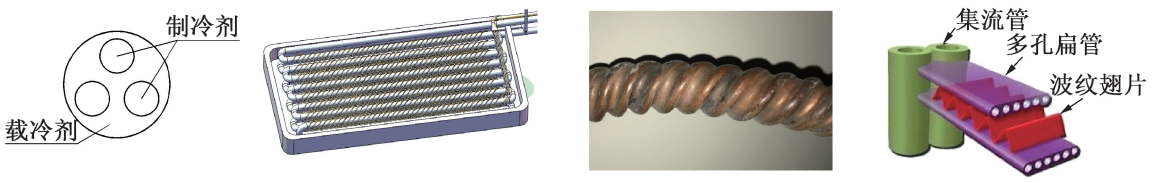
目前的主要改良方向:1)设计开发高承压强度的高效压缩机形式,减小容隙。2)改进能量调节方式,针对不同形式的压缩机,依靠类似于变频技术,不同的能量调节方式,实现根据负荷进行调节。3)提高 CO_2 热泵可靠性,降低运动部件磨损。4)降低压缩机运行噪音。5)开发双级压缩机或压缩-膨胀一体机,回收膨胀功,增大效率。

2.2 换热器的研究

CO_2 热泵系统中,换热器主要有 3 部分:气体冷却器、蒸发器和回热器。

相对于传统热泵而言,气体冷却器相当于冷凝器,特点是压缩机排出的制冷剂气体不发生相变,利用显热完成换热过程。由于跨临界循环过程中,高温高压的 CO_2 气体在超临界区比容大、流量小、压力高、温度滑移大,导致所需的气体冷却器耐压强度高、管径小、换热强等特点。杨亮等[24]分析了超临界 CO_2 流动与换热特性并得到相应计算关联式。伊利诺伊大学 J. M. Yin 等[25]采用有限元分析法建立了超临界交叉流气体冷却器模型,准确地估计近临界点附近热力学及流动特性的变化,并认为三通气冷器是单层板式换热器中效果最佳的,同时,使用多层板式换热器能够进一步提高换热性能。这是因为在超临界区域内换热时,靠近临界点的位置传热系数骤然提高,能够快速将工质中的热量提取出来,对于提高平均传热效率有显著意义。

当前气冷器形式主要有:套管式[26]、外绕式和微通道式换热器[27]。发展历程经历了从套管式到外绕式再到微通道式的过程,如图 2 所示。S. Taira[28]对比 3 种气体冷却器,分别为普通套管式换热器、光管外绕式换热器和光管盘式换热器。套管式换热器重量大、造价高、不容易减小体积;光管外绕式能够减小 10% ~30% 的体积,将光管外绕式换热器盘在一起,能够进一步减小换热器体积,增大换热能力。从气冷器趋势来看,制冷剂与水换热正在由对流为主导向以导热为主导发展,既考虑了传热效率,又考虑了安全性,防止二次爆炸。3 种换热器通过减小流道面积,



(a) 套管式　(b) 光管外绕式　(c) 凹槽外绕式　(d) 微通道式

图 2 气体冷却器发展趋势

Fig. 2 Development trend of gas cooler

增大传热面积,能够利用 CO_2 比容大、黏度低的特点,充分发挥流动优势,提高传热效率。

T. Okada[29]分析了新型具有带凹槽的外绕式换热器,不仅能增大传热面积,减小换热器的体积,还能增大换热器水侧的扰动,破坏边界层,提高传热系数,进一步减小传热面积,另外制冷剂经过分液能够减小其在换热器内压降,对于 CO_2 热泵气冷器是一个巨大的进步。日本大金公司采用外绕式气冷器,在近临界点处,CO_2 热容突然剧烈增长,导致传热效率急剧升高,而将 CO_2 管路绕在水管外进行换热,并通过缠绕的密度控制换热的强度,能够迅速提取近临界区内的热量,缺点是不易加工制造,工艺要求高。微通道换热器即通道水力直径为 10 ~ 1 000 μm 的换热器。微通道换热器由于通道面积减小,单位质量流量制冷剂的传热面积大大增加,有效减小换热器体积,增大传热效率。但由于超临界区域内的 CO_2 特点,利用微通道式换热器容易出现分液(分气)不均的现象,缺乏良好的流路设计,影响换热。同时微通道式换热器的研究处于起步阶段,新式材料的可靠性问题以及价格的原因暂时制约了其应用。饶荣水等[30]研究微通道换热器换热能力,指出微通道换热器是应对国家 2 级能效要求的很好的技术解决方案。随着进一步的研究和改进,微通道式换热器将会成为气冷器甚至蒸发器的一种优良选择,具有良好的前景。

CO_2 热泵多用作热水器,在 50 ~ 70 ℃温度范围内容易产生水垢,并由于流道面积的减小较难清除,实际设计过程中可采用控制热水器的出水温度及改变气体冷却器的放热回路等措施。

蒸发器的形式较简单,由于蒸发器侧制冷剂压力和温度较常规热泵机组差别较小,所以大部分仍使用翅片管式换热器,以紫铜制管,铝制翅片,这种换热器技术成熟,传热效率较高,除霜方便且应用较广。另外微通道式换热器作为一种新兴的换热器,主要是针对汽车空调提出,现在有拓展到住宅用空调和热泵的趋势。与气冷器用微通道式换热器类似,由于工质为液体,分液不均的问题更为严重,这是制约微通道式换热器发展的主要因素。由于蒸发器侧传热温差小,所需传热面积大,采用微通道式换热器能有效增大传热面积,使设备更加紧凑。因此,目前微通道式换热器成为 CO_2 热泵蒸发器换热器形式的研究重点。

回热器较为单一,很多企业回热器形式与气冷器形式相同,仅将气气换热变为气液换热。目前最常见的形式是套管式和接触式,由于结构单一不再赘述。

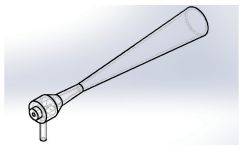
由于系统压强整体较高,对换热器等设备的承压能力均有较高要求,但工质自身密度大、黏度低,其换热管道及连接管道均较细,因此承压能力较容易解决,管道密封及接口的焊接质量要求相对更高。

2.3 节流装置的研究

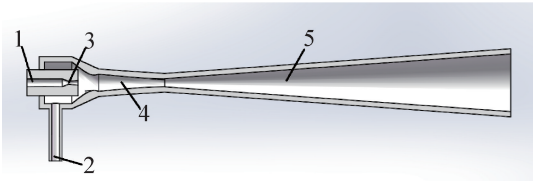
对于节流装置,CO_2 高压侧压力能达到 9 ~ 14 MPa,低压侧一般为 3 ~ 4 MPa,因此,膨胀阀必须能够承受 15 MPa 以上的压强,目前很多厂家不能提供。节流装置两侧压差达 6 ~ 10 MPa,过热损失和节流损失均较大,尽管用回热循环并调节最佳压缩比可有一定改善,但问题仍较大。学者研究发现解决此问题的方法主要有两方面:

1)通过改变节流装置,回收膨胀功。针对 CO_2 跨临界循环膨胀比小,而膨胀功大(压缩功的 25% ~ 30%)的问题,Gustav Lorentzen 首先提出用膨胀机代替节流阀。天津大学管海清[31]通过实验证实采用膨胀机对 CO_2 跨临界循环系统的 COP 有明显提高作用。一般工况下,可提高 20% ~ 40%。但膨胀机加工制造困难,成本高,不适用于小型系统,而采用结构简单、成本低、无运动部件、对两相流工况适应性好的喷射器回收部分节流膨胀过程损失的功,构成 CO_2 跨临界喷射/压缩式制冷可能是一种可行的途径。J. P. Liu 等[32]首次提出在跨临界 CO_2 制冷压缩循环中采用喷射器代替节流阀来回收膨胀功,通过建立计算模型,得出系统 COP 较常规的节流阀系统提高 6% ~ 14%。J. Sarkar[33]通过应用热力学循环模拟获得了最佳排气压力对蒸发温度和气体冷却器出口温度的函数,并分析得出带喷射器的跨临界 CO_2 循环的㶲效率可比传统的节流阀系统最多高 9%。中国科学院、西安交通大学、浙江大学、上海交通大学、东南大学等均对空调、热泵系统用喷射器进行了研究,包括喷射器特性、结构设计、数值模拟及软件开发等内容。大连理工大学范昊[34]设计了空气源 CO_2 热泵热水器的喷射器,并用数值模拟的方法对喷射器内部流场进行了分析。大连理工大学李熠桥[35]进行了可调式蒸气喷射器性能的计算分析,建立模型并运用 Fluent 模拟实际运行过程中工况改变对喷射器性能的影响。河北工业大学陶金亮[36]实验研究了变工况蒸气喷射式热泵可调式喷射器。可调式喷射器,即利用步进电机的电脉冲信号驱动喷针向前向后移动,从而改变喷嘴喉部面积来调节最优高压侧压力,能够针对不同工况进行能量调节,从而提高系统循环效率。不同机构研究结果吻合,可以得出结论:使用喷射器能够减小节流损失,系统 COP 提高约 10%,可有效提高压缩机的吸气温度,降低压比,提高压缩机效率。

2)通过减小节流装置两侧压差,从而减小节流损失。通过设置回热器或利用过冷技术能够有效降



(a) 喷射器外形



(b) 喷射器结构

1 工作流体入口;2 引射流体入口;3 主喷嘴;
4 混合管;5 扩压管。

图 3 喷射器外形及结构

Fig. 3 Shape and structure of ejector

低气冷器出口即膨胀阀入口处温度,很大程度减少节流损失,提高系统性能。此部分内容在系统研究中详细介绍。

对于改进节流装置主要的研究有:1)大型设备中考虑采用膨胀机代替膨胀阀,回收膨胀功,减少节流损失;2)小型或中型设备中采用喷射器代替膨胀阀,研究带喷射器的蒸气压缩式热泵循环及利用可调式喷射器进行能量调节;3)设置中间换热器(回热器)或利用过冷技术减小节流装置入口制冷剂温度。

2.4 系统的研究

许多学者对 CO_2 跨临界系统进行了理论、实验分析及模拟,通过制冷剂流路的变化及零部件的增设,利用双级压缩技术、补气增焓技术、回热循环、过冷技术、与其余高效系统耦合技术等对系统进行了优化改进。基于热力学第二定律,对 CO_2 跨临界系统建立了㶲经济分析模型,通过实际的工程数据,理论上计算分析了系统各部件的㶲损失和比率[37-38]。对于低温环境下 CO_2 热泵系统运行性能较差的问题,王沣浩等[39]总结了国内外学者关于改善系统在低温环境下适应性的研究,分析了空气源热泵在低温环境下存在的弊端,并根据最新的研究进展提出空气源热泵的发展方向。金磊等[40]提出 4 种 CO_2 热泵的改进方案,通过计算和对比,为 CO_2 热泵在低温寒冷地区的应用提供了理论依据。许多研究还将 CO_2 跨临界循环与其他制冷剂循环联合使用以改善循环性能。例如将 R134a 热泵循环与 CO_2 跨临界循环相结合用于空间加热,研究表明,环境温度为 -20 ~ 0 ℃时,联合系统循环的加热容量和 COP 分别增加了 32.6% 和 18.2%[41]。Song Yulong 等[42]对用于空间加热的联合 R134a/CO_2 热泵系统和级联 R134a/CO_2 系统进行了性能比较。发现联合系统在高温环境和高进出水温差时表现较好。并提出了一个操作条件系数,该值在大于 0.263 时,联合系统性能更优越。近年来还有很多学者将新兴的技术运用到 CO_2 热泵系统中,以提高系统性能。华南理工大学项招鹏[43]将相变蓄热技术和复叠式循环应用于 CO_2 热泵系统,提高了热泵热水器系统运行的经济性。刘剑等[44]提出了一种用于住宅采暖和全年供应热水的太阳能辅助 CO_2 热泵供热系统,通过示范住宅对系统进行性能测试,并对结构参数进行了优化分析。结果表明,系统在整个采暖季的耗电量最小且太阳能的保证率达 65.7%。意大利 DORIN 公司针对 CO_2 热泵热水温度滑移及优良的热物理性能,研制出大型冷热联供系统。BIZER 与 DORIN 公司均高度重视新一代双级压缩技术,即平行压缩技术,并将其推广应用在实际工程项目中。

在 CO_2 跨临界循环系统中增设回热器形成回热循环,不仅保证压缩机吸气过热度,防止压缩机发生液击,同时增大气体冷却器制冷剂出口过冷度,降低节流装置入口处压力与温度,减少节流损失,增大系统效率。C. Aprea 等[45]对使用回热器(internal heat exchanger, IHX)改善 CO_2 跨临界循环的效果进行了实验性评估。结果表明:使用 IHX 的情况下,气体冷却器入口的空气温度从 40 ℃降至 25 ℃时,COP 增加高达 10.5%。E. Torrella 等[46]实验研究了使用 IHX 时,CO_2 跨临界循环在 3 种不同蒸发温度(-5、-10、-15 ℃)和两种不同的气体冷却器出口温度(31、34 ℃)工况下的循环性能。结果显示,冷却量和循环效率的最大增量达 12%。A. Cavallini 等[47]通过理论和实验研究了具有 IHX 的两级压缩循环性能。结果表明,IHX 提高了冷却能力,降低了最优高压,IHX 的使用可以提高循环 COP 约 10%。利用过冷技术同样可以降低气体冷却器制冷剂出口处温度与压力,达到降低节流损失,提高系统效率的目的。目前常用的过冷方式分为 3 种:1)机械式过冷,即在传统循环中增设过冷循环,通过对制冷剂出口处制冷剂进行过冷从而提高系统 COP。德国 BIZER 等厂家已将其作为提高系统能效的方法进行应用,得到预期效果。2)依靠自身冷量过冷。对冷凝器出口的制冷剂进行分流,部分制冷剂节流后将另一部分过冷。合理分配两部分制冷剂流量,可达到系统效率最大值。3)蓄冷式过冷。这是一种相对成熟的技术,对于热泵供暖,可利用余热加热室内,或利用余热除霜达到对制冷剂过冷,尤其蓄热除霜,不仅解决了除霜热源的问题,同

时降低节流损失,对能量梯级利用,增大能量利用率。4)采用地下水过冷。狭义上即采用地下水工质对气体冷却器出口 CO_2 工质进行过冷,广义上可将地下水引申,即采用一切可采用的工质对制冷剂进行冷却,冷却为超临界区域内的液体或气体。

改进系统循环,主要是将 CO_2 循环回路加以变化或结合制冷采暖新技术提高系统效率。例如蒸气压缩/喷射系统,补气增焓,双级压缩,太阳能-CO_2 热泵耦合采暖系统,CO_2 热泵蓄热除霜系统等。优化方案,改良系统,从宏观角度改变制冷剂循环方式,从原理角度对热泵进行优化。

3 结论与展望

国内外学者越来越关注对 CO_2 热泵系统的改进和优化。通过提高 CO_2 热泵各部件的效率或改进系统运作方式优化热泵系统。优化项目涉及各个部件、各个方面,使整个系统尽量利用 CO_2 跨临界循环的优势,提高系统的可靠性和高效性。同时产生了越来越多的新技术、新思路对 CO_2 热泵系统进行改良。如何同时提高系统的实用性和可靠性是当前 CO_2 热泵研究领域的重点内容。

因此,结合当今国内外 CO_2 热泵系统的研究现状和存在的问题,对 CO_2 热泵热水器未来的发展提出展望:1)开发新的适于 CO_2 热泵系统的循环过程,降低系统对环境温度的依赖性,提升系统运行的稳定性。例如采用补气增焓技术及多级压缩技术保证其在低温工况中的效率。2)对跨临界循环系统部件进行优化,如降低气冷器出口温度,采用喷射器或膨胀机减少节流损失;改进气冷器与蒸发器形式,提高换热效率;开发新型高效高强度专用压缩机,降低压比,提高压缩机效率。3)将新兴技术如相变材料蓄热技术及太阳能技术等与 CO_2 热泵系统结合,充分发挥各自优势,使系统性能得到进一步提升。4)完善系统的仿真模型,利用计算机仿真技术,开发高效控制系统,软硬件结合,实现有效、准确的模拟系统的运行状态和性能分析。

参考文献

[1] 高原原. 二氧化碳热泵供热系统的理论分析及实验研究[D]. 天津:天津大学, 2012. (GAO Yuanyuan. Theoretical analysis and experimental study of CO_2 heat pump heating system [D]. Tianjin:Tianjin University, 2012.)

[2] NEKSÅ P. CO_2 heat pump systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(4):421 – 427.

[3] 陈光明,蒋皓波. 自然制冷剂在国外的研究进展[J]. 低温与特气,1996(4):14 – 17. (CHEN Guangming, JIANG Haobo. Research progress of natural refrigerants in foreign countries [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 1996 (4): 14 – 17.)

[4] 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势[J]. 制冷学报, 2011, 32(6):53 – 58. (LI Liansheng. Study and development trend of refrigerant replacement technology [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32 (6): 53 – 58.)

[5] PETTERSEN J, LORENTZEN G. A new, efficient and environmentally benign system for automobile air conditioning [J]. Carbon Dioxide, 1993,16(1):4 – 12.

[6] HAFNER A, PETTERSEN J, SKAUGEN G. An automobile HVAC system with CO_2 as the refrigerant [C]//IIR-Gustav Lorentzen Conference Natural Working Fluids. Norway: Olso, 1998.

[7] NEKSÅ P, REKSTAD H, ZAKERI G R, et al. CO_2 heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results[J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(3):172 – 179.

[8] LI Minxia, MA Yitai, GONG Wenjin. Comparison of two gas coolers in CO_2 heat pump water heater[C]//International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette: Purdue University,2008:1 – 7.

[9] ZHANG Jianfei, QIN Yan, WANG Chichuan. Review on CO_2, heat pump water heater for residential use in Japan [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 50:1383 – 1391.

[10] 王景刚, 马一太, 魏东,等. CO_2 跨临界双级压缩带膨胀机制冷循环研究[J]. 制冷学报, 2001,12(2):6 – 11. (WANG Jinggang, MA Yitai, WEI Dong, et al. Circulation research CO_2 transcritical two stage compression with cold expansion mechanism[J]. Journal of Refrigeration, 2001, 12(2): 6 – 11.)

[11] 徐洪涛, 袁秀玲, 李国强,等. 跨临界循环二氧化碳在热泵型热水器中的应用研究[J]. 制冷学报, 2001,12(3):12 – 16. (XU Hongtao, YUAN Xiuling, LI Guoqiang, et al. Application of transcritical cycle carbon dioxide in heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration, 2001, 12(3): 12 – 16.)

[12] 何阳, 张早校, 邓建强. 跨临界 CO_2 引射制冷系统控制性能[J]. 制冷学报, 2017, 38(3):1 – 6. (HE Yang, ZHANG Zaoxiao, DENG Jianqiang. Control performance of transcritical CO_2 ejector refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38 (3): 1 – 6.)

[13] 胡斌, 李耀宇, 曹锋,等. 跨临界 CO_2 热泵系统最优排气压力的极值搜索控制[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 81 – 87. (HU Bin, LI Yaoyu, CAO Feng, et al. Extreme value search control of optimal exhaust pressure for transcritical CO_2 heat pump systems[J]. Journal of Refrigera-

tion, 2016, 37 (3): 81 - 87.)

[14] 廖胜明. 跨临界二氧化碳制冷循环参数优化[J]. 铁道科学与工程学报, 1997, 15(4): 41 - 45. (LIAO Shengming. Parameters optimization for transcritical carbon dioxide refrigerating cycles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 1997, 15 (4): 41 - 45.)

[15] 叶菁菁, 胡海涛, 丁国良, 等. 带气冷器的二氧化碳地源热泵系统的性能分析[J]. 制冷技术, 2015, 35(5): 14 - 19. (YE Jingjing, HU Haitao, DING Guoliang, et al. Performance analysis of carbon dioxide ground source heat pump system with air cooler [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(5): 14 - 19.)

[16] 张宇, 姜培学, 石润富, 等. 竖直圆管中超临界压力 CO_2 对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 280 - 282. (ZHANG Yu, JIANG Peixue, SHI Runfu, et al. Experimental study of supercritical heat convection heat transfer in vertical tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 280 - 282.)

[17] 吕新刚. 低温空气源 CO_2 热泵热水器系统特性研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2016. (LYU Xingang. Research on system characteristics of low temperature air source CO_2 heat pump water heater [D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2016.)

[18] 寇宏侨, 罗会龙, 杜鸿儒, 等. 大功率 CO_2 热泵在寒冷地区的应用研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(5): 61 - 64. (KOU Hongqiao, LUO Huilong, DU Hongru, et al. Study on the application of high power CO_2 heat pump in cold area [J]. Building Energy & Environment, 2017, 36 (5): 61 - 64.)

[19] 郭蓓, 彭学院, 邢子文. 二氧化碳热泵热水器系统及压缩机的研发现状[J]. 家电科技, 2005(9): 42 - 44. (GUO Bei, PENG Xueyuan, XING Ziwen. Study on the development of carbon dioxide heat pump water heater system and compressor[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2005(9): 42 - 44.)

[20] 王磊, 俞建荣, 董晓慧, 等. CO_2 热泵热水器和热泵压缩机的发展[J]. 北京石油化工学院学报, 2014, 22(1): 16 - 19. (WANG Lei, YU Jianrong, DONG Xiaohui, et al. Development of CO_2 heat pump water heater and heat pump compressor [J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2014, 22(1): 16 - 19.)

[21] 周子成. 二氧化碳热泵热水器近期的发展[J]. 制冷, 2009, 28(3): 39 - 45. (ZHOU Zicheng. Recent development of carbon dioxide heat pump water heater [J]. Refrigeration, 2009, 28(3): 39 - 45.)

[22] NAKAO H, MAEYAMA H, HATTORI N, et al. Wear-reducing technologies for rotary compressors using CO_2 refrigerant[J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating & Air Conditioning Engineers, 2011, 25(4): 365 - 374.

[23] 韩毅, 吴静怡, ARMIN H. 大功率 CO_2 压缩机运行效率的实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(3): 7 - 12. (HAN Yi, WU Jingyi, ARMIN H. Experimental study on operation efficiency of high power CO_2 compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38 (3): 7 - 12.)

[24] 杨亮, 丁国良, 黄冬平, 等. 超临界二氧化碳流动和换热研究进展[J]. 制冷学报, 2003, 24(2): 51 - 56. (YANG Liang, DING Guoliang, HUANG Dongping, et al. Study on supercritical carbon dioxide flow and heat transfer [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(2): 51 - 56.)

[25] YIN J M, BULLARD C W, HRNJAK P S. R-744 gas cooler model development and validation[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(7): 692 - 701.

[26] 吕静, 马逸平, 曹科, 等. 水冷套管式 CO_2 气冷器的设计及实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 113 - 118. (LYU Jing, MA Yiping, CAO Ke, et al. Design and experimental study of water-cooled casing CO_2 air cooler [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2): 113 - 118.)

[27] 王冬, 黄逊青, 钟家淞, 等. 二氧化碳热泵热水器技术进展与市场趋势[J]. 流体机械, 2009, 37(4): 72 - 78. (WANG Dong, HUANG Xunqing, ZHONG Jiasong, et al. Technical progress and market trend of carbon dioxide heat pump water heater [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(4): 72 - 78.)

[28] TAIRA S. The development of heat pump water heaters using CO_2 refrigerant[C]//2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology. Tokyo, 2010.

[29] OKADA T. Development of CO_2 heat pump hot water system "ECO CUTE" [J]. Mitsubishi Electric Advance, 2007, 120: 6 - 8.

[30] 饶荣水, 陈俊伟, 蔡宗军, 等. 微通道换热器在空调器上的应用研究[J]. 制冷与空调(北京), 2009, 9(4): 63 - 66. (RAO Rongshui, CHEN Junwei, CAI Zongjun, et al. Application of microchannel heat exchanger in the air conditioner [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2009, 9 (4): 63 - 66.)

[31] 管海清. CO_2 跨临界循环膨胀机理与转子式膨胀机 - 压缩机研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. (GUAN Haiqing. CO_2 transcritical cycle expansion mechanism and rotor expander compressor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.)

[32] LIU J P, CHEN J P, CHEN Z J. Thermodynamic analysis on transcritical R744 vapor-compression/ejection hybrid refrigeration cycle: preliminary proc [C]//5th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids. Guangzhou, 2002.

[33] SARKAR J. Optimization of ejector-expansion transcritical CO_2, heat pump cycle[J]. Energy, 2008, 33(9): 1399 -

1406.

[34] 范昊. 空气源二氧化碳热泵热水器的优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2014. (FAN Hao. Optimization design of air source CO_2 heat pump water heater [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.)

[35] 李熠桥. 可调式蒸汽喷射器性能计算分析[D]. 大连:大连理工大学,2015. (LI Yiqiao. Adjustable steam ejector performance analysis [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.)

[36] 陶金亮. 变工况蒸汽喷射式热泵蒸发喷射器的实验研究[D]. 天津:河北工业大学,2004. (TAO Jinliang. Experimental study of variable duty steam jet heat pump evaporation[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004.)

[37] 熊涛,罗会龙,向开根,等. 二氧化碳热泵㶲经济分析[J]. 煤气与热力, 2014, 34(1):26 - 29. (XIONG Tao, LUO Huilong, XIANG Kaigen, et al. Exergy analysis of carbon dioxide heat pump[J]. Gas and Heat, 2014, 34(1): 26 - 29.)

[38] 朱开鼎,陈海峰,窦丹,等. 二氧化碳热泵热水器的㶲分析[J]. 制冷与空调(北京),2011,25(5):501 - 504. (ZHU Kaiding, CHEN Haifeng, DOU Dan, et al. Analysis of carbon dioxide heat pump water heater [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 25 (5): 501 - 504.)

[39] 王沣浩,王志华,郑煜鑫,等. 低温环境下空气源热泵的研究现状和展望[J]. 制冷学报,2013,34(5):47 - 54. (WANG Fenghao, WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, et al. Progress and prospect of air source heat pump in low temperature environment[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34 (5): 47 - 54.)

[40] 金磊, 何永宁, 杨东方,等. CO_2 热泵在低温寒冷地区供暖应用的研究分析[J]. 流体机械,2015,43(9):67 - 72. (JIN Lei, HE Yongning, YANG Dongfang, et al. Research and application of CO_2 heat pump for heating in low temperature and cold area[J]. Fluid Machinery, 2015,43 (9): 67 - 72.)

[41] YANG Dongfang, SONG Yulong, CAO Feng, et al. Theoretical and experimental investigation of a combined R134a and transcritical CO_2, heat pump for space heating[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 72:156 - 170.

[42] SONG Yulong, LI Dongzhe, YANG Dongfang, et al. Performance comparison between the combined R134a/CO_2 heat pump and cascade R134a/CO_2 heat pump for space heating[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 74:592 - 605.

[43] 项招鹏. 复叠式蓄热型空气源热泵热水器性能优化分析[D]. 广州:华南理工大学,2010. (XIANG Zhaopeng. Performance optimization analysis of cascade regenerative air source heat pump water heater [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)

[44] 刘剑, 代彦军. 太阳能辅助 CO_2 热泵供热系统的试验与优化研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7):1118 - 1124. (LIU Jian, DAI Yanjun. Experimental study and optimization of solar assisted CO_2 heat pump heating system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35 (7): 1118 - 1124.)

[45] APREA C, MAIORINO A. An experimental evaluation of the transcritical CO_2 refrigerator performances using an internal heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(6):1006 - 1011.

[46] TORRELLA E, SÁNCHEZ D, LLOPIS R, et al. Energetic evaluation of an internal heat exchanger in a CO_2 transcritical refrigeration plant using experimental data[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1):40 - 49.

[47] CAVALLINI A, CECCHINATO L, CORRADI M, et al. Two-stage transcritical carbon dioxide cycle optimisation: a theoretical and experimental analysis [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(8):1274 - 1283.

通信作者简介

王沣浩,男,教授,博士生导师,西安交通大学建筑节能研究中心,E-mail: fhwang@ mail. xjtu. edu. cn。研究方向:建筑节能与可再生能源利用技术。

About the corresponding author

Wang Fenghao, male, professor, Ph. D. superviser, Center for Building Energy Conservation, Xi'an Jiaotong University, + 86 13227006940, E-mail: fhwang@ mail. xjtu. edu. cn. Research fields: building energy efficiency and renewable energy technology.