

跨临界 CO₂ 制冷循环系统与应用研究进展

Research progress of trans-critical CO₂ refrigeration cycle system and application

轩福臣^{1,2} 谢晶^{1,2,3,4}

XUAN Fu-chen^{1,2} XIE Jing^{1,2,3,4}

(1. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306; 4. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 4. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:对跨临界 CO₂ 制冷系统中压缩机、蒸发器、气冷器的研究进展进行了分析, 得出了提高跨临界 CO₂ 制冷系统制冷效率和换热效率的方法, 并对跨临界 CO₂ 制冷循环在 CO₂ 汽车空调、热泵、食品冷冻冷藏中的应用进行了讨论, 分析了 CO₂ 制冷循环系统在汽车空调、热泵以及食品行业中应用需要注意的问题, 最后提出跨临界 CO₂ 制冷循环中开发无油压缩机是未来研究的主要方向之一, 并展望了 CO₂ 制冷系统在水产品的蒸煮速冻、肉类的屠宰、冰淇淋的冷藏运输中的应用。

关键词: 自然工质; 二氧化碳; 跨临界; 优化; 应用

Abstract: In this review, the research progress of compressor, evaporator and air cooler in trans-critical CO₂ refrigeration system was analyzed. It was concluded that the method of improving the refrigeration efficiency and the optimum heat transfer efficiency of the trans-critical CO₂ refrigeration system was obtained. The application of trans-critical CO₂ refrigeration cycle in CO₂ automotive air conditioning, heat pump and food processing were also discussed. The problems of high system pressure in CO₂ refrigeration cycle in heat pump were analyzed. Finally, it was proposed that the development of oil-free compressor in trans-critical CO₂

refrigeration cycle was one of the main research directions in the future. The application of CO₂ refrigeration system in steaming and freezing of aquatic products, slaughtering of meat and refrigerating transportation of ice cream was prospected.

Keywords: natural working medium; carbon trans-critical; optimization; application

当今世界面临着非常严峻的环境问题, 尤其是臭氧层破坏的问题, 为此, 全社会都在寻找节能环保的绿色制冷方式^[1]。斯德哥尔摩人类环境会议指出: 为了人类的将来, 保护环境已成为我们这一代人重要的任务, 这个任务要与世界和平、经济发展协调实现^[2]。

CO₂ (R744) 作为自然工质, 从自然界中容易获得, 在 19 世纪末到 20 世纪中期开始使用, 但 CO₂ 亚临界制冷循环的效率偏低, 随着外界温度的升高, CO₂ 系统的制冷效率会变低, 能耗变大, 因而 CO₂ 未受到普遍关注^[3], 取而代之的是氨、卤代烃 (CFCS、HCFCs、HFCs) 制冷剂开始出现。随着臭氧层破坏成为全世界共同关注的问题, 人们逐渐认识到卤代烃是导致臭氧层破坏的主要原因; 由于跨临界 CO₂ 制冷循环的深入研究, 目前 CO₂ 已作为清洁、环保、绿色的制冷剂被逐渐采用^[4]。CO₂ (ODP=0, GWP=1) 作为一种自然工质, 非常符合替代卤代烃制冷剂的要求; 同时, CO₂ 作为制冷剂具有高密度、低黏度, 流动损失小、传热效果良好等优点^[5], 但 CO₂ 临界压力高, 对压缩机及管路设备有耐高压要求, 制冷剂容易发生泄漏, 另外, 中国对跨临界 CO₂ 换热器的研究起步较晚。因

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目 (编号: 2018YFD0400605); 上海市科委平台能力建设项目 (编号: 16DZ2280300); 上海市科委公共服务平台建设项目 (编号: 19DZ2284000)

作者简介: 轩福臣, 男, 上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 谢晶 (1968—), 女, 上海海洋大学教授, 博士。

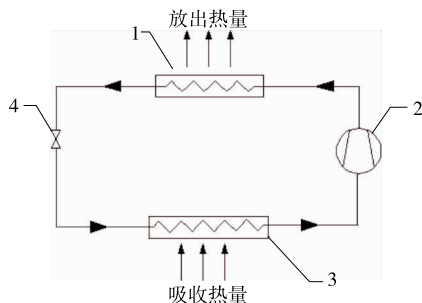
E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2019-03-14

此,文章对跨临界 CO₂ 循环制冷设备的研究及其应用进行了综述,并对目前存在的问题进行了讨论,提出了解决思路,旨在为跨临界 CO₂ 设备的研究以及应用提供更好的指导。

1 跨临界 CO₂ 制冷循环系统所用设备

跨临界 CO₂ 循环系统由压缩机、节流装置、换热器等组成封闭回路,见图 1。CO₂ 在蒸发器中吸收周围环境中的热量,然后进入 CO₂ 压缩机被压缩,从压缩机出来后进入空气冷却器放出热量,然后节流变为湿蒸气,重新进入蒸发器吸热蒸发,进而连续制冷。目前对跨临界 CO₂ 制冷循环系统的研究大部分仍停留在计算机模拟仿真、理论分析、试验探索阶段,进入大规模应用的案例较少。由于跨临界 CO₂ 循环中压力高,容易出现气缸泄漏问题,且 CO₂ 的高扩散性能和低黏滞性会对密封产生不良影响,为了降低泄漏,系统需采用更有效的密封方式^[6]。



1. 气体冷却器 2. CO₂ 压缩机 3. 蒸发器 4. 节流阀

图 1 跨临界 CO₂ 制冷循环系统图

Figure 1 Diagram of trans-critical CO₂ refrigeration cycle system

1.1 CO₂ 制冷压缩机

CO₂ 压缩机是使 CO₂ 增压并实现输送的制冷设备。CO₂ 的临界压力高(7.38 MPa),临界温度较低(31.3 ℃)。因此,CO₂ 压缩机的运行要求耐高压,对管材、管件、阀门有较高要求,运动部件间隙控制要求更加精确,压缩机的入口温度要高于临界温度。如果 CO₂ 系统中存在水分,不但会造成冰堵,由于 CO₂ 与水反应会生成碳酸,从而引起压缩机的腐蚀,因此对 CO₂ 压缩机材料有一定的要求;CO₂ 压缩机内部压力较高,压缩机内部的回油系统要求也更加严格。

侯秀娟^[7]采用 ANSYS 软件对 CO₂ 活塞式压缩机的曲柄连杆机构和涡旋式压缩机的动涡盘进行了模拟研究,进而对活塞连杆机构和动涡盘进行了优化设计,提高了系统的制冷效率。Ma 等^[8]对跨临界 CO₂ 压缩机吸气和排气阀片的运动特性进行了研究,并在 CO₂ 压缩机的吸气管段中加入了冷却机构,减少了不可压缩液体对吸气和排气阀片造成的不良影响。Ling 等^[9]对 CO₂ 压缩机

的运转频率展开了研究,建立了 CO₂ 压缩机工作频率与室外风扇转速之间的数学模型,进而对跨临界 CO₂ 系统进行了优化。薛卫东等^[10]设计了微型 CO₂ 压缩机,运动结构用油泵进行润滑,为了防止制冷剂泄漏,曲轴伸出端采用机械密封。Kus 等^[11]对无油涡轮式 CO₂ 压缩机进行了研究,评估了无油 CO₂ 压缩机制冷系统运行的可行性。

孙玉等^[12]对多种形式的 CO₂ 压缩机进行了分析讨论,对于 CO₂ 涡旋式压缩机,主要解决了制冷剂泄漏的问题;CO₂ 活塞式压缩机可以耐高压,并采用橡胶密封环减少制冷剂的泄漏;滑片式 CO₂ 压缩机比 R134a 压缩机更适合在高转速的条件下运行,但在 CO₂ 压缩机中,机械结构的润滑、压缩腔的泄漏、轴承的选用、制冷剂的泄漏等问题比较突出,另外,氟化橡胶中的 CO₂ 渗透扩散作用大于其他橡胶,因此 CO₂ 和润滑油的相互作用、CO₂ 和橡胶的渗透作用是研究的重点,也可以开发新型 CO₂ 压缩机来解决润滑、泄漏等问题。

1.2 CO₂ 制冷循环系统换热器

CO₂ 换热器主要由盘管和散热片两部分组成。盘管向液体提供升华过程所需的管程和热量,促使液体沸腾汽化;散热片是为了扩大热交换面积。

马一太等^[13]对 CO₂ 水—水泵展开了试验探究,并将降膜式蒸发器引入到 CO₂ 热泵系统,得出了吸气过热度的升高会影响压缩机的排气温度,但不会对系统运行的效率造成影响。吕静等^[14]将 CO₂ 与微通道技术相结合,展开了 CO₂ 在微通道蒸发器内沸腾换热的研究,为 CO₂ 微通道蒸发器的设计提供了理论基础。Ayad 等^[15]研究了不同管路在微型通道中 CO₂ 蒸发,建立了小通道内 CO₂ 沸腾换热试验数据库,同时建立了小通道内 CO₂ 蒸发换热系数的预测模型,并利用建立的水平流动试验数据库对该模型进行了验证,该数据库涵盖了汽车空调中 CO₂ 蒸发器的运行情况。与卤代烃制冷剂不同的是,提高 CO₂ 的质量速度并不能显著改善传热系数,且加速了干涸现象的出现。在 CO₂ 超低温级并联热泵系统的蒸发器蒸发过程中,常常由于干冰堵塞使得系统操作失败,Yamasaki 等^[16]对蒸发/升华过程的扩展通道进行了设计,并解决了此问题。

跨临界 CO₂ 制冷循环的制冷效率与气体冷却器的种类和换热性能有必然的联系,为了提高系统的制冷效率,需对其进行优化分析。毛航等^[17]对 CO₂-气冷器的特性展开了研究,通过改变翅片的结构,采用 ANSYS 软件建立数学模型,并将建立的数学模型导入 mode FRONTIER 软件,应用 NSGA-II 遗传算法对其进行优化设计,整理出了最优参数。胡海涛等^[18]研究了新型带有气冷器的 CO₂ 地源热泵系统,搭建了该系统的试验模型,并将两种不同的系统进行对比分析,发现 CO₂-气冷器地源热泵比 R134a 地源热泵初投资低 20%。湛盈盈等^[19]创建了带

气体冷却器跨临界 CO₂ 热泵热水系统模型,对管内 CO₂ 和水侧的流动特性和传热性能进行了模拟研究,结合最佳排气压力,得出了使系统高效运转的方法,为气冷器的优化提供了理论基础。马瑞芳等^[20]建立了新型套管式气体冷却器热力学仿真模型,从结构和运行参数两方面对双级套管式气体冷却器换热特性的影响进行了模拟研究,结果表明,在流量变化很小的情况下,调整管路两侧的换热系数来增加总的换热系数,进而提高制冷效率。

Tassou 等^[21]将 CO₂ 气体冷却器与现有的 CO₂ 增压器制冷试验台相连接,采用分布(详细模型)和集总(简单模型)方法建立了翅片管式 CO₂ 气体冷却器模型,分析和比较了 CO₂ 气体冷却器的尺寸和控制对系统运行的影响。Tsamos 等^[22]在工程方程求解器平台上建立了详细的数学模型,并在实验台上对试验结果进行了验证,对两种气体冷却器在 CO₂ 制冷循环系统中单独安装和试验设计中,制定了 CO₂ 气体冷却器的设计准则。

换热器是 CO₂ 制冷系统中重要的换热设备,其换热效果对制冷效率有着重要的影响。目前对换热器的增强换热是后续探索的重要方向,主要包括两个方面:换热器

内流体状态的变化和对各结构的优化,其中研究的方法有三类:数值模拟计算、试验方式研究、理论探究。中国对于换热器的研究起步比较晚,换热器的理论研究还有待提高,换热器的模型建立大多停留在一维、二维方面,三维的换热器模型研究比较少^[23]。

2 跨临界 CO₂ 制冷系统的应用

中国每年对食品的需求量巨大,为了减少食品不必要的损失,食品低温冷冻及加工过程显得非常重要,CO₂ 作为自然工质,无毒,可代替卤代烃制冷剂运用于食品冷冻及精加工过程中。此外,CO₂ 的气化潜热大,单位体积制冷量约为卤代烃制冷剂的 5~8 倍;由于 CO₂ 的导热系数高,液体和蒸气的密度比值小,节流过后通过各管路的制冷剂分配比较合理,压缩机及整个系统的尺寸可以设计得更小,使跨临界 CO₂ 制冷系统比卤代烃制冷循环系统更加紧凑。因此,跨临界 CO₂ 制冷循环系统在食品行业、汽车空调、热泵方面有很好的前景,其在不同行业中的应用见表 1,在应用中的 SWOT 分析见表 2。由表 2 可知,CO₂ 的冷凝压力约为 10 MPa,为 R134a 的 11 倍,对设备及其阀门有较高要求,且需要采用中温级和低温级的双级工作系统,前期投资较大。

表 1 跨临界 CO₂ 制冷循环在不同行业中的应用

Table 1 Application of cross-critical CO₂ refrigeration cycle in different industries

食品	热泵	汽车空调	其他
肉类屠宰加工、果蔬加工、水产品加工冷藏、冷藏物流库、副食品加工、工业制冰、冰淇淋的冷藏运输	肉类蒸煮、纺织印染、化工、水产恒温、烟叶烘干、大棚采暖、别墅地暖、家庭用水、动物养殖、桑拿美发、余热回收	制冷采暖	滑雪场、溜冰场

表 2 跨临界 CO₂ 制冷循环在应用中的 SWOT 分析

Table 2 SWOT analysis of cross-critical CO₂ refrigeration cycle in application

优势	劣势	机会	挑战
ODP=0、GWP=1、蒸发潜热大、单位容积制冷量高、稳定性高、节能环保、系统更加紧凑	系统运行压力较高(10 MPa)、管路设备要求耐高压、初投资较高、制冷剂容易泄漏、回油系统要求严格、压缩机容易腐蚀	市场广阔、需求量大、国家环保政策支持	技术发展不成熟、寒冷地区 COP 低

2.1 跨临界 CO₂ 制冷循环系统在食品行业中的应用

CO₂ 作为制冷工质,可以应用于商超领域来冷冻冷藏食品,并以跨临界方式运行,如果发生制冷剂泄漏,由于 CO₂ 无毒无害,化学性质稳定,不会产生较大的人员与食品安全的损失^[24]。因此,跨临界 CO₂ 制冷循环系统在食品行业中得到了普遍的应用,截止 2018 年 3 月,全球主要国家跨临界 CO₂ 制冷商超分布数量见图 2。由图 2 可知,大约有 10 000 家超市采用了跨临界 CO₂ 制冷循环系统,大部分集中在日本和欧洲地区;在欧洲所有超市中,采用跨临界 CO₂ 制冷循环系统的超市占大多数。跨临界 CO₂ 制冷系统具有高效节能的优点,与卤代烃制冷

系统对比经济性节能分析如图 3 所示。挪威的 EEMA1000 超市采用了跨临界 CO₂ 循环制冷系统,实现了节能 30% 的效果。德国的麦德龙在 Real 商场中使用了跨临界 CO₂ 系统^[25-26]。在食品加工的水温冷热联供上,徐建楚^[27]将跨临界 CO₂ 制冷循环系统与卤代烃制冷系统冷水机组的焓进行了比较,最后得出跨临界 CO₂ 制冷系统的焓效率高于卤代烃制冷系统的冷水机组。在挪威海岸运行的水产品加工 CO₂ 制冷系统中,对蒸发器、喷射器进行了数值研究,性能提高了 70%^[28]。

CO₂ 机组制冷时,相关数据^[29]显示:CO₂ 机组的冷凝热是制冷量的 1.2 倍,随意排放冷凝热,会造成能源的损

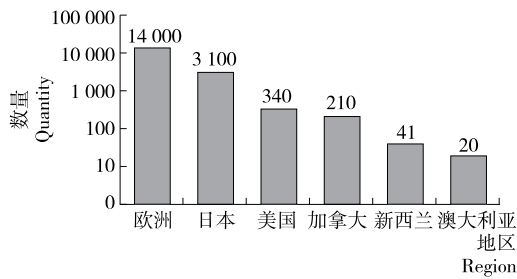
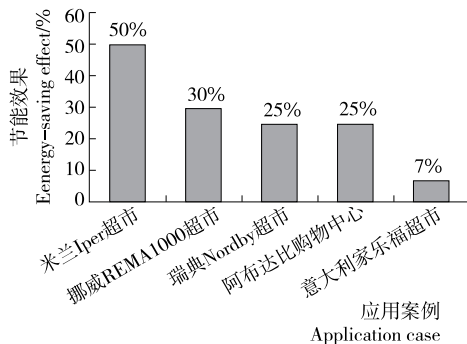
图2 全球主要国家跨临界 CO₂ 制冷系统商超数量Figure 2 The number of trans-critical CO₂ refrigeration systems in major countries

图3 经济性节能分析

Figure 3 Economic and energy saving analysis

失,因此可以将排放的冷凝热加以回收利用,用来制备热水,可以用在肉类屠宰、水产品的蒸煮等方面。

经研究^[30]表明,跨临界 CO₂ 制冷系统的制冷系数比卤代烃制冷循环系统的高,即跨临界 CO₂ 制冷循环系统能源利用率高,因此,跨临界 CO₂ 制冷系统可以节约大量的能源。由于 CO₂ 的临界温度较低,运行压力为卤代烃制冷剂的 6~8 倍,对设备要求高,且 CO₂ 配件的研发和生产技术多被欧洲发达国家掌握,如何使跨临界 CO₂ 制冷系统在全球范围内更加高效、低廉的冷冻冷藏食品是未来研究的方向。

2.2 跨临界 CO₂ 制冷循环系统在汽车空调中的应用

由于环境问题,为避免汽车空调行业面临 R134a 替代困难的问题,必须加大对环保制冷剂的研究力度。金纪峰等^[31]研究了由微通道换热器、气液分离器等制冷设备组成的 CO₂ 跨临界汽车空调系统,并对该系统进行了在线测试,发现制冷性能比 R134a 稍差,并测试了节流阀的开度、CO₂ 压缩机的转速等对 CO₂ 汽车空调性能产生的影响,该系统与传热效率非常高的微通道气冷器相结合,提高了 CO₂ 汽车空调的制冷效率,并得出当压缩机转速 900 r/min,环境温度 25 °C,系统 COP 达到最高为 2.83。简林桦等^[32]对 CO₂ 汽车空调中的气冷器进行了分析,用 ANSYS 软件对 CO₂ 气体冷却器的换热特性展开了讨论,研究了内部速度场和温度场的变化,分别分析了排气压力、制冷剂流量等对气体冷却器的换热影响,研究表

明,减小气冷器的 CO₂ 出口温度时,排气压力的提高有助于增加制冷效率,通过增加冷却水的流量来减小气冷器的出口温度,也有助于提高制冷系统的性能。叶禾等^[33]从压缩机、换热器、膨胀阀等设备出发,对汽车 CO₂ 制冷系统部件进行了状况分析,并从理论上说明了 CO₂ 制冷剂可以替代现有的卤代烃制冷剂,但 CO₂ 制冷空调工作的环境压力较高,对管路材料及其设备有较高的耐高压要求。

为了提高 CO₂ 制冷空调的效率,Yu 等^[34]将不同比例的 CO₂ 和丙烷进行混合,探究了不同比例下 CO₂ 和丙烷对 CO₂ 空调制冷效率的影响,并得出了 CO₂ 和丙烷的混合比例为 3:2 时,此时系统 COP 达到最大值。CO₂ 汽车空调系统中,压缩机是耗能的主要部件,石明星等^[35]建立了 CO₂ 汽车空调压缩机稳态模型,得出 CO₂ 的质量流量、压缩机的输入功率、排气温度随压缩比的增加而增加。

2.3 跨临界 CO₂ 制冷系统在热泵技术中的应用

热泵是一种高效加热装置,可将能量由低温处传送到高温处,工作原理是逆卡诺循环。目前 CO₂ 热泵技术已开始应用于宾馆、医院、写字楼等场地^[36]。以某宾馆为例,按每年热水需求量 25 440 L,出水温度 65 °C,进水温度 15 °C,杨德宇等^[37]研究了不同热源的热水器年耗能量和年耗费用,如表 3 所示。由表 3 可知,CO₂ 热泵热水器的年实际耗能量和年运营费用比其他类型的水器低,经济性能非常优越。

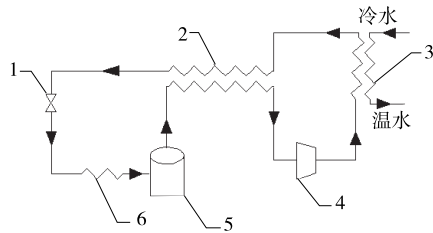
叶笋等^[18]分析了带气冷器的 CO₂ 热泵系统,并对系统的特性进行了预测,得出该系统比传统的 R134a 系统节能 23%。刘忠彦^[13]应用 CFD 软件研究了 CO₂ 热泵的蒸发器,并分析了该换热器的换热特性。易长乐等^[38]开发了一种小型家用 CO₂ 热泵系统,并对该系统的主要部件进行了选型设计。CO₂ 热泵热水器具有高效、环保的优点,车媛媛等^[39]搭建了一套 CO₂ 热泵热水器循环装置(图 4),并对循环的参数进行了设计计算,通过改变循环水的进口温度、进口流速等设计参数研究对系统性能的影响。陆军亮等^[40]研究了水源型 CO₂ 热泵热水器系统,测试了换热器的进水温度对系统性能系数的影响。邹春妹等^[41]在跨临界 CO₂ 热泵热水器中引入了喷射嘴,并对该 CO₂ 热泵热水装置进行了试验研究,分别分析了换热效率、喷射效率等参数对系统产生的影响。刘东岳等^[42]对 CO₂ 热泵热水系统中毛细管的布置、内外部影响因素进行了分析,并对并联的 3 条毛细管用于节流进行了试验论证。Liu 等^[43]利用 CO₂ 变频压缩机制冷系统,对膨胀阀的开度、冷热水流量进行调节,研究发现,当压缩机的频率为 50 Hz,膨胀阀的开度为 330 脉冲,冷热水流量分别为 0.2、0.1 m³/h 时,CO₂ 热泵 COP 达到最大。Song 等^[44]从理论和试验上研究了水温对 R134a 和跨临界 CO₂ 系统的影响,并得出在 -20~7 °C,水温从 15 °C 上

表 3 不同热源热水器的经济性对比[†]

Table 3 Economic comparison of water heaters with different heat sources

热水器类型	进水温 度/℃	出水温 度/℃	年运行 天数/d	年加热水 量/L	热源	热源单价	热效率/ %	年实际耗 能/kJ	年耗费 用/元
燃煤锅炉	15	65	365	25 440	煤	0.85 ^a	64	3.04×10 ⁹	143 808
燃气锅炉	15	65	365	25 440	天然气	2.84 ^b	75	2.59×10 ⁹	205 008
燃油锅炉	15	65	365	25 440	柴油	6.5 ^a	85	2.29×10 ⁹	349 066
电热水器	15	65	365	25 440	电	0.8 ^c	95	2.05×10 ⁹	455 912
太阳能热水器	15	65	365	25 440	太阳能/电	0.8 ^c	95	0.67×10 ⁹	150 796
CO ₂ 热泵热水器	15	65	365	25 440	电	0.8 ^c	310	0.63×10 ⁹	105 639

[†] 热源单价:a. 元/kg;b. 元/m³;c. 元/(kW·h)。



1. 节流阀 2. 内部热交换器 3. 气体冷凝器 4. CO₂压缩机
5. 储液器 6. 蒸发器

图 4 CO₂跨临界热泵循环装置图

Figure 4 Diagram of CO₂ trans-critical heat pump circulator

升到 32 ℃时,CO₂热泵系统能耗有所下降,此时供热能力达到最佳。

CO₂作为制冷剂应用于热泵系统,与其他常规制冷剂相比可以达到更高的排气温度,CO₂压缩机由于排气压力较高,压缩比较小,因此,压缩机的绝热效率较高,更加节能。对 CO₂跨临界系统的研究包括理论、试验研究、模型的建立,并利用中温和低温压缩技术、过冷技术进行优化设计。CO₂热泵推广面临的首要问题是系统压力较高,对材料的要求及制造工艺更加严格,压缩技术有待完善,未来的 CO₂热泵技术可以与计算机控制深度融合,从而使 CO₂热泵更加高效、稳定、安全的运行^[45]。

3 结论与展望

由于 CO₂无毒无味,化学性质稳定,作为制冷剂时,在食品行业、汽车空调、热泵中被逐渐采用,其中跨临界 CO₂制冷循环在食品冷冻冷藏及商超领域发展迅速,并可以通过高温冷凝热的回收生成高品质的热源,实现安全、低碳、高效的利用价值;跨临界 CO₂制冷循环应用于汽车空调上不仅可以减少环境污染,还可以提高制冷系数,因此,跨临界 CO₂循环汽车空调在未来有很大的应用空间;CO₂热泵系统与普通的热泵系统相比,跨临界 CO₂热泵系统可以一次性得到 90 ℃的热水,可以将低品位能源高效地转化为高品位能源,在高温热泵领域有相当大

的优势,与其他类型热水器相比,其经济性能非常优越,但目前对家用热泵与大型 CO₂热泵的研究仍属于空白部分,有相当大的研究前景。

跨临界 CO₂系统换热器三维模型建立的研究较少,因此需进一步展开研究。此外,换热器增强换热也是未来研究的重点。CO₂的临界温度低,排气压力高,节流损失比较大,因而对 CO₂和润滑油的相互作用及压缩机材料的密封性是未来研究的热点,以及开发无油压缩机和压缩机的微型化设计也将是重点关注的方向。总之,在大力倡导“绿色、环保、节能”的前提下,跨临界 CO₂制冷系统能够实现能源的节约,减少环境的破坏,符合环境友好型发展的需求。

参考文献

[1] 冯凯,蔡觉先. CO₂制冷技术的研究发展[J]. 节能, 2017, 36 (12): 8-14, 2.
[2] 吕静. 二氧化碳跨临界循环及换热特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005: 2-8.
[3] 李先碧, 冯雅康. 二氧化碳跨临界循环制冷的开发与研究进展[J]. 制冷与空调: 四川, 2008, 22(2): 99-103.
[4] 季阿敏. 二氧化碳制冷循环研究综述[C]//山东制冷空调—2009 年山东省制冷空调学术年会“烟台冰轮杯”优秀论文集. 济南: 山东省制冷学会, 2009: 2.
[5] 马飙,冀兆良. 二氧化碳制冷剂的应用研究现状及发展前景[J]. 制冷, 2012, 31(3): 36-43.
[6] 李先碧, 冯雅康. 二氧化碳跨临界循环制冷的研究进展[J]. 真空与低温, 2007, 26 (3): 173-177.
[7] 侯秀娟. CO₂跨临界循环压缩机的性能研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2012: 6-12.
[8] MA Yuan, HE Zhi-long, PENG Xue-yuan, et al. Experimental investigation of the discharge valve dynamics in a reciprocating compressor for trans-critical CO₂ refrigeration cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32(1): 13-21.
[9] LING Xiao-yang, WEI Xin-li, XIANG Qin, et al. Experimental study on the effect of compressor frequency on the performance of trans-critical CO₂ heat pump system with re-

- generator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150(2): 1 216-1 223.
- [10] 薛卫东, 任芳. 微型二氧化碳压缩机的开发[J]. *制冷技术*, 2014, 34(2): 55-59.
- [11] BARTOSZK, PETTER N. Oil free turbo-compressors for CO₂ refrigeration applications[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(5): 1 576-1 583.
- [12] 孙玉, 任晨曦, 张恒, 等. 二氧化碳制冷压缩机的研究进展[J]. *制冷技术*, 2014, 34(5): 67-71.
- [13] 刘忠彦. 二氧化碳跨临界循环热泵系统不同蒸发器的性能分析与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 25-32.
- [14] 石冬冬. 二氧化碳微通道蒸发器换热特性研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2015: 13-18.
- [15] FADIL A, RIAD B, ALI S. CO₂ evaporators design for vehicle HVAC operation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36(6): 330-344.
- [16] HARUHIKO Y, HIROSHI Y, KAZUYUKI H, et al. Experimental observation of CO₂ dry-ice behavior in an evaporator/sublimator[J]. *Energy Procedia*, 2017, 143(12): 375-380.
- [17] 毛航. 二氧化碳微通道气冷器优化设计及分子动力学模拟[D]. 郑州: 郑州大学, 2015: 20-25.
- [18] 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, 24.
- [19] 湛盈盈, 廖胜明, 黄珍珍. 跨临界二氧化碳热泵热水系统气冷器的仿真分析[J]. *制冷与空调*: 四川, 2007, 21(4): 26-31.
- [20] 马瑞芳, 李雯, 李世平, 等. CO₂热泵双级冷却套管式气体冷却器性能数值模拟[J]. *制冷与空调*: 四川, 2016, 30(5): 520-524, 548.
- [21] GE Y T, TASSOU S A, DEWASANTOSA I, et al. Design optimisation of CO₂ gas cooler/condenser in a refrigeration system[J]. *Applied Energy*, 2015, 160(6): 973-981.
- [22] ANTONIO R, SERGIO M, SILVIA M. Multi-physics simulation of CO₂ gas coolers using equivalence modeling[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 90(5): 99-107.
- [23] 汪波, 茅靳丰, 耿世彬, 等. 国内换热器的研究现状与展望[J]. *制冷与空调*, 2010, 24(5): 61-65.
- [24] RAVISHANKAR C N. Recent advances in processing and packaging of fishery products: A review[J]. *Aquatic Procedia*, 2016, 7(8): 201-213.
- [25] 张丽. 海外[J]. *家用电器*, 2018, 34(7): 13.
- [26] 曹锋, 叶祖樑. 商超跨临界 CO₂增压制冷系统及技术应用现状[J]. *制冷与空调*, 2017, 17(9): 68-75.
- [27] 徐建楚. 跨临界二氧化碳系统循环在食品行业中的应用与烟分析[J]. *制冷与空调*: 四川, 2009, 23(6): 92-97.
- [28] JAKUB B, ARMIN H, KRZYSZTO B, et al. Design and simulations of refrigerated sea water chillers with CO₂ ejector pumps for marine applications in hot climates[J]. *Energy*, 2018, 161(7): 90-103.
- [29] 门汝岩, 孟长再. 冷凝热回收的研究[J]. *价值工程*, 2012, 31(5): 43-44.
- [30] 王振超. 商用二氧化碳制冷系统的设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 10-14.
- [31] 金纪峰. 采用微通道换热器的二氧化碳汽车空调系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 11-16.
- [32] 简林桦, 梁子伟, 邢琳, 等. CO₂汽车空调气体冷却器的仿真分析[J]. *能源工程*, 2016, 35(5): 21-28.
- [33] 叶禾. 汽车空调制冷工质改善的研究浅析[J]. *科协论坛*: 下半月, 2012, 26(11): 76-77.
- [34] YU Bin-bin, WANG Dan-dong, LIU Ci-chong, et al. Performance improvements evaluation of an automobile air conditioning system using CO₂-propane mixture as a refrigerant [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88(4): 172-181.
- [35] 石明星, 吕静, 李果. 二氧化碳汽车空调压缩机的热力性能模拟[D]. 上海: 上海理工大学, 2018: 31-34.
- [36] 陈毅敏, 高为, 胡钰, 等. 二氧化碳热泵技术进展[J]. *化学工业*, 2016, 34(2): 38-41.
- [37] 杨德宇, 俞建荣, 蒋小明, 等. 二氧化碳热泵热水器技术与性能的对比分析[J]. *北京石油化工学院学报*, 2013, 21(2): 50-55.
- [38] 易长乐. 二氧化碳热泵系统中气体冷却器的数值模拟与实验研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018: 22-26.
- [39] 车媛媛. 空气源跨临界 CO₂热泵热水器系统的性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 13-20.
- [40] 陆军亮, 钱永康, 韩笑, 等. 二氧化碳热泵热水器系统运行特性[J]. *节能*, 2016, 35(1): 31-34, 3.
- [41] 邹春妹, 岑继文, 刘培, 等. 跨临界二氧化碳热泵喷射循环实验[J]. *化工学报*, 2016, 67(4): 1 520-1 526.
- [42] 刘东岳. 小型空气源二氧化碳热泵热水系统的开发与研究[D]. 唐山: 河北科技大学, 2016: 52-54.
- [43] LIU Fang, ZHU Wei-quan, CAI Yang. Experimental study of a dual-mode CO₂ heat pump system with thermal storage[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105(1): 4 078-4 083.
- [44] SONG Yu-long, LI Dong-zhe, CAO Feng, et al. Investigation of the optimal intermediate water temperature in a combined R134a and trans-critical CO₂ heat pump for space heating[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 79(7): 10-24.
- [45] 李椿, 王志华, 高秀芝, 等. CO₂热泵研究现状及展望[J]. *制冷学报*, 2018, 39(5): 1-9.