

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-469-07

# 跨临界二氧化碳制冷系统优化方案的研究综述

孙知晓<sup>1</sup> 姚海清<sup>2</sup> 张文科<sup>1</sup> 庄兆意<sup>1</sup> 孙文峰<sup>1</sup> 李文静<sup>1</sup> 满意<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学热能工程学院 济南 250101;

2. 山东中瑞新能源科技有限公司 济南 250101)

**【摘要】** 跨临界二氧化碳(CO<sub>2</sub>)制冷循环系统因其节能环保的优势受到国内外专家学者的广泛关注,对该系统的研究在近些年取得了重要进展。介绍了CO<sub>2</sub>制冷剂的环境优势与应用方式,阐述了跨临界CO<sub>2</sub>制冷循环系统的基本结构,总结了现有系统的四种优化方案:在系统中增设回热器、利用膨胀机代替节流阀、在系统中增设喷射器和采用双级压缩循环方式,随后分析了各种方案的工作原理及特点,并介绍了每种方案的现有研究内容。CO<sub>2</sub>作为一种非常具有发展潜力的制冷剂,对其跨临界制冷循环系统进行优化可有效的提升系统的制冷系数(COP),有利于充分发挥系统的节能环保优势,从而促进该类型系统的推广应用。

**【关键词】** 跨临界循环; 二氧化碳; 回热器; 膨胀机; 喷射器; 双级压缩

中图分类号 TB61 文献标识码 A

## Review of the Prioritization Scheme of Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle System

Sun Zhixiao<sup>1</sup> Yao Haiqing<sup>2</sup> Zhang Wenke<sup>1</sup> Zhuang Zhaoyi<sup>1</sup> Sun Wenfeng<sup>1</sup> Li Wenjing<sup>1</sup> Man Yi<sup>1</sup>

(1.School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101;

2.Shandong Zhongrui New Energy Technology Limited Company, Jinan, 250101)

**【Abstract】** The trans-critical carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) refrigeration cycle system has attracted widespread attention from experts and scholars at home and abroad because of its energy-saving and environmental protection advantages. Important progress has been made in the research of this system in recent years. In this paper, the environmental advantages and application methods of CO<sub>2</sub> refrigerants were introduced, the basic structure of the trans-critical CO<sub>2</sub> refrigeration cycle system was expound, and four optimization schemes of the existing system were summarized: adding a regenerator to the system, using an expander instead of a throttle valve, adding an ejector to the system, and adopting a two-stage compression cycle method. Then the working principles and characteristics of various schemes were analyzed, and the existing research content of each scheme was introduced. CO<sub>2</sub> as a refrigerant with great potential for development, we can effectively improve the cooling coefficient (COP) of the system by optimizing its trans-critical refrigeration cycle system, which is conducive to giving full play to the energy-saving and environmental protection advantages of the system, thereby promoting the popularization and application of this type of system.

**【Keywords】** trans-critical cycle; carbon dioxide; regenerator; expander; ejector; two-stage compression.

基金项目: 国家自然科学基金(51808321); 山东省重点研发计划项目(2019GGX103046);  
菏泽市科技创新突破计划项目(KJCXTP202006)

作者(通讯作者)简介: 孙知晓(1998.2-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 17866605883@163.com

收稿日期: 2021-09-18

## 0 引言

随着我国经济的快速发展和国民生活水平的迅速提高,制冷空调与热泵技术在生产生活中的应用也大大增加。我国已经是空调热泵领域的使用和

制造大国,无论是设备装机容量还是制造使用的种类,均已位居世界前列。但是,在随着空调热泵的大范围应用提高了人们生产生活质量的同时,随之也产生了一系列环境能源问题,如大量的电能消耗、

各类制冷剂泄露加重温室效应和臭氧层破坏等。为此，研究者们开发了各类节能环保的绿色制冷方式和新式制冷剂。作为一种纯天然制冷剂，二氧化碳（CO<sub>2</sub>）的臭氧消耗潜势（ODP）为 0，全球变暖潜能值（GWP）仅为 1，具有无毒不可燃，临界温度低，来源广泛等诸多优点。利用 CO<sub>2</sub> 作为制冷剂的跨临界循环系统，对于节能减排，推进社会可持续发展，助力实现“碳达峰、碳中和”这一战略目标具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。

在跨临界 CO<sub>2</sub> 循环过程中，定压放热过程位于临界点以上的超临界区域内，定压吸热过程在亚临界区域内进行，循环过程会跨越 CO<sub>2</sub> 的临界压力，因此被称为跨临界循环，其典型循环系统如图 1 所示，图 2 为该系统 *P-h* 图<sup>[3]</sup>。典型跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统主要由压缩机、气体冷却器、节流阀、蒸发器组成，与其他典型的亚临界循环相比，由于放热过程中不存在介质相变，因此循环系统中的高压侧换热器由冷凝器换为气体冷却器<sup>[4]</sup>。跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环已成为当前研究应用的热点，国内外学者对此开展了大量的研究，取得了颇多成果。

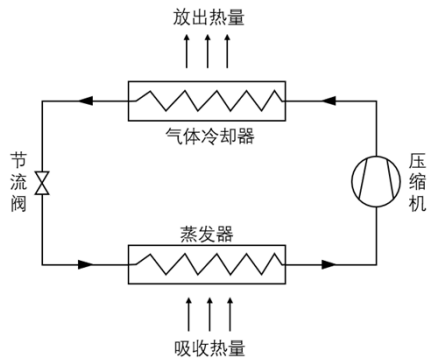


图 1 典型跨临界 CO<sub>2</sub> 循环系统图

Fig.1 A typical transcritical CO<sub>2</sub> cycle system

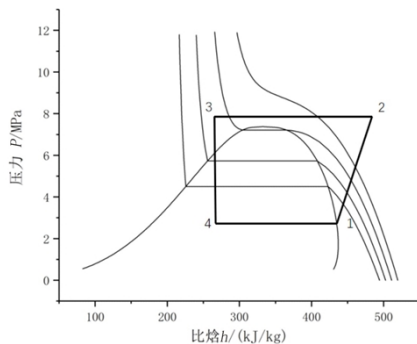


图 2 典型跨临界 CO<sub>2</sub> 循环 *P-h* 图

Fig.2 Temperature-entropy of a typical transcritical CO<sub>2</sub> cycle

近年来，跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统因其在节能环保方面的优势，成为了国内外专家学者研究的热点问题。但是，对于此系统而言，由于系统运行压力高，放热温度较高，且高低压的压差较大，使得其相较其他传统制冷剂系统循环性能较低。由于 CO<sub>2</sub> 具有异于其他传统制冷剂的各类特性，决定了可以在其循环系统的基本结构上加以优化和改进。跨临界循环过程中 CO<sub>2</sub> 制冷剂要从超临界区被节流到两相区，因此该循环过程中产生的节流损失远大于常规亚临界循环，故跨临界循环系统的性能系数通常低于常规系统<sup>[5]</sup>。为了提高跨临界循环系统性能，可以采用带有回热器的回热循环，或采用膨胀机或喷射器来代替节流阀，回收部分膨胀功以减少节流损失。另外，也可采用双级压缩循环来降低排气温度和减少压缩机耗功，提高系统性能<sup>[6]</sup>。以下对上述几种改进方案分别进行介绍。

### 1 带回热器的循环系统

该优化方案在典型循环系统的基础上增设一个回热器，使来自蒸发器中的低温气态制冷剂在进入压缩机之前，先进行一次预热。在回热器内，流出蒸发器的低温蒸汽与来自气体冷却器的超临界流体进行热交换，低温蒸汽在恒定压力下被加热到过热段，而温度较高的超临界流体被定压冷却<sup>[7]</sup>。

图 3 即为带回热器的跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统图。CO<sub>2</sub> 制冷剂经回热器过热后，变为过热蒸汽状态 1，进入压缩机后被压缩至超临界状态（1→2），在气体冷却器中定压放热（2→3），在回热器高压侧放热至状态 4，再经节流阀节流至两相态（4→5），在蒸发器中定压吸热后（5→6），经回热器加热，返回压缩机被重新压缩，开启新的循环过程<sup>[8]</sup>。图 4 为该循环系统的 *P-h* 图。

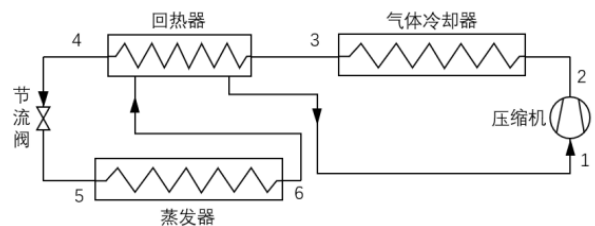
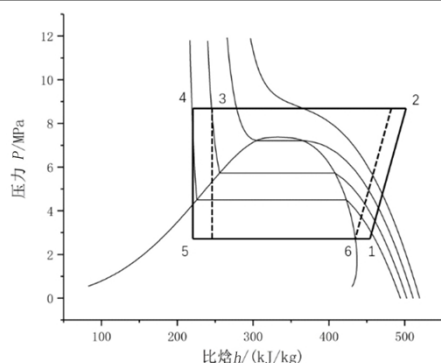


图 3 带回热器的跨临界 CO<sub>2</sub> 循环系统图

Fig.3 Diagram of transcritical CO<sub>2</sub> cycle system with regenerator

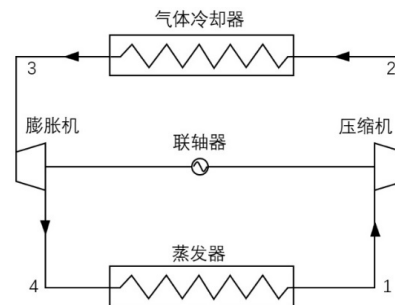
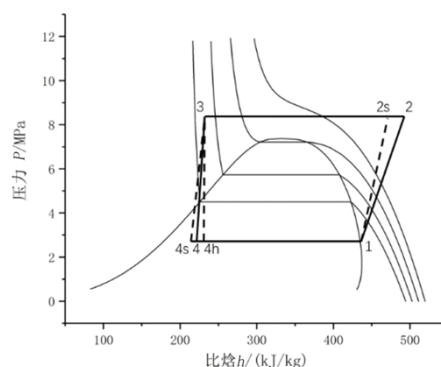
图 4 带回热器的跨临界 CO<sub>2</sub> 循环系统 P-h 图Fig.4 Temperature-entropy of transcritical CO<sub>2</sub> circulation system with regenerator

目前,对于增设回热器以提高跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统性能,国内外的学者们进行了许多的研究与优化。王洪利<sup>[8]</sup>等通过实验,比较了带回热器与不带回热器两种单级循环系统运行的性能效率。结果表明,回热循环系统的平均性能较常规系统可提高约 5%,且带回热循环最优排气温度稍高些。回热器循环系统 COP<sub>h</sub> 和 COP<sub>c</sub> 分别提升了约 11.4% 和 14.3%。其后续又针对双级压缩带回热器和不带回热器的循环系统建立了数学模型<sup>[9]</sup>,并基于 Visual Basic 程序进行了性能分析。经分析得,相同条件下,双级压缩回热循环系统平均性能较常规双级压缩循环高约 5%~10%,最优中间压力比常规系统低约 5%~15%。李东哲<sup>[10]</sup>等通过基于 Modelica 语言的仿真平台 Dymola,建立了带有回热器的循环系统模型,并进行了回热器对系统影响的研究。结果表明,有回热器可显著降低压缩机最优排气压力。在压缩机最优排气压力下,随着环境温度上升,系统过热度及再冷度下降;随着水入口温度上升,过热度及再冷度上升。方健珉<sup>[11]</sup>等通过实验研究,发现增设回热器不仅有效提升了系统性能,还一定程度减小了系统中的制冷剂流量,继而减少了节流过程中由过高的压降所产生的不可逆损失,但同时会引起压缩机排气温度的升高和压缩机压比增大。在不同的环境温度下,系统性能的提升均会随着回热度的增加而减缓,故应选用适宜系统规格的回热器。Ying Chen<sup>[12]</sup>等模拟了压缩机最优排气压力,发现其与回热器效率有关。由于回热器内可能存在 CO<sub>2</sub> 相变,在临界压力附近区域比热变化较大,因此传统的热交换效率表达式不再适用,并在文中采用了一种基于焓差的实用回热器有效

性表达式,用以回热器设计计算。然而,回热器对跨临界循环系统性能的提升同时也存在负面影响。由于吸入温度升高导致压缩机容积效率降低、功耗增加,同时容易引起部件磨损、产生生成物、引起高温烧毁等严重事故,故回热器应谨慎设计使用<sup>[13]</sup>。

使用回热器进行过冷是提高系统 COP 最普遍的,也是最简单的方法,回热器的使用已经广泛推广到合理运行条件的系统上。虽然回热器可能会造成压缩机排气温度过高等负面问题,但其在降低压缩机的最佳排气压力、减少系统的节流损失和增加循环的制冷量方面起到了重要的作用。在下一步的研究中,可针对过热温度与压缩器吸气温度的最佳选值展开模拟计算,已达到获取最优过热温度,提高系统总体性能的目的。

## 2 膨胀机取代节流阀的循环系统

图 5 带膨胀机的跨临界 CO<sub>2</sub> 循环系统图Fig.5 Diagram of transcritical CO<sub>2</sub> cycle system with expander图 6 带膨胀机的跨临界 CO<sub>2</sub> 循环 P-h 图Fig.6 Temperature-entropy of transcritical CO<sub>2</sub> cycle with expander

从 P-h 图可以看出,跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环节流过程中压差很大,由此带来的节流损失使该系统的循环效率比传统系统低 20%~30%,抵消了 CO<sub>2</sub> 优

异的环境效益。1994 年, G Lorentzen<sup>[14]</sup>提出了利用膨胀机替代节流阀,回收部分膨胀功以提升系统性能系数的方案。由于跨临界 CO<sub>2</sub> 循环的容积比是 2~4,远小于常规制冷系统的 20~30,而且经回收的膨胀功可以占到系统压缩功的 20%~30%,可以显著减小节流损失,提升系统 COP<sup>[15]</sup>。

图 5 为跨临界 CO<sub>2</sub> 循环带膨胀机系统的系统图。与节流阀系统不同,来自气体冷却器出口的超临界 CO<sub>2</sub> 流体进入膨胀机内做膨胀功,并通过连轴将其转化为部分压缩功加以利用,其实际膨胀过程(3~4)介于等熵膨胀(3~4h)和等焓膨胀(3~4s)之间。降压后的 CO<sub>2</sub> 进入蒸发器内定压吸热,最后返回压缩机,完成整个循环。如图 6 系统 P-h 图所示。

孙志利<sup>[16]</sup>对 CO<sub>2</sub> 单级压缩加膨胀机循环与四种双级压缩循环进行了热力学分析,证明利用膨胀机代替节流阀是提高系统 COP 的重要途径。杨俊兰<sup>[17]</sup>等分别从系统的 COP、效率、中间压力以及排气温度等方面,对典型的双级压缩、膨胀机与高压级压缩机同轴连接以及膨胀机与低压级压缩机同轴连接三种循环系统进行热力学分析,并进行了比较,证明带膨胀机的单级循环的 COP 高于双级压缩循环的 COP。Simarpreet Singh<sup>[18]</sup>等通过 CFD 模拟方法,研究了涡旋式膨胀机内 CO<sub>2</sub> 制冷剂的流动特性。结果表明,通过进一步优化泄漏空间,可以减少内泄漏 CO<sub>2</sub>,从而提高涡旋式膨胀机的整体效率。姜云涛<sup>[19]</sup>等在原有单缸滚动活塞膨胀机的基础上,设计加工了一种新型双缸膨胀机样机,并对其性能进行了测试,测得其膨胀效率为 28%~33%。

增设膨胀机有利于回收系统膨胀功,但在实际应用中可能存在膨胀机内工质不能完全排除等问题。由于膨胀机出口 CO<sub>2</sub> 为气液两相流体,膨胀机的余隙容积将会对其效率产生重要影响。在膨胀机的设计工作中应充分考虑跨临界循环中 CO<sub>2</sub> 膨胀做功的特点,注意进出口控制合理,尽量减少摩擦、泄露及余隙容积等损失。理想情况下采用膨胀机可以完全回收节流损失,但在实际膨胀过程中,由于制冷剂的摩擦等因素,会产生不可逆损失,这部分损失可以通过提升设备的工艺水平而减小<sup>[20]</sup>,故研发高效可靠的 CO<sub>2</sub> 膨胀机是促使该系统成功应用的关键。此外,膨胀机的应用也受到系统容量的制约,对于小型热泵系统,膨胀机的结构尺寸很小,

加工成本高,且膨胀机内部泄露和摩擦损失等不可忽视,故小型热泵系统中采用此方案需谨慎<sup>[5]</sup>。

### 3 增设喷射器的循环系统

在传统的跨临界热泵系统中,节流阀前后压差较大产生了大量节流损失,极大制约了系统 COP 的提升。该方案在跨临界循环系统中增设喷射器,可回收一部分膨胀过程中损失的可用能,显著减小节流损失,提高系统 COP<sup>[21]</sup>。

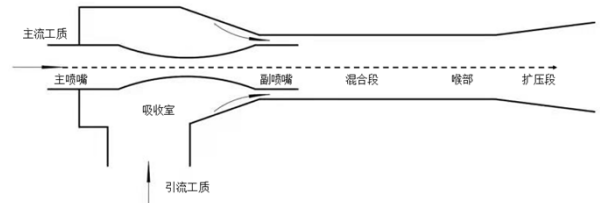


图 7 喷射器结构图

Fig.7 Ejector structure diagram

喷射器是一种非容积型的节流机构,长期以来在能源动力领域、化工领域、建筑土木、废气污水的处理方面等有着重要的应用。它可以将工作流体的膨胀能转化为动能,再将动能转化为制冷剂的加压能进行回收<sup>[22]</sup>。工作原理是以高压流体为驱动,吸引低压引射流体进入喷射器并与之混合,形成中压混合流体并排出。喷射器通常由四部分组成:喷嘴及吸收室、混合段、喉部和扩压段。该系统如图 8 所示。图中的 1-2-5-6-3-4-1 循环过程表示了工作流热力循环过程,10-7-6-3-8-9-10 循环过程表示了引射流热力循环过程,各状态点与图 9 的各状态点相对应。

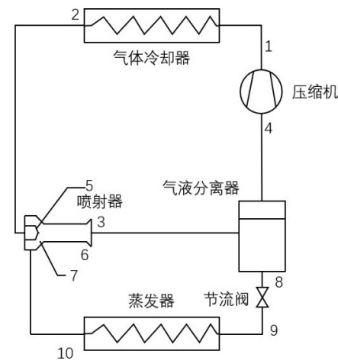
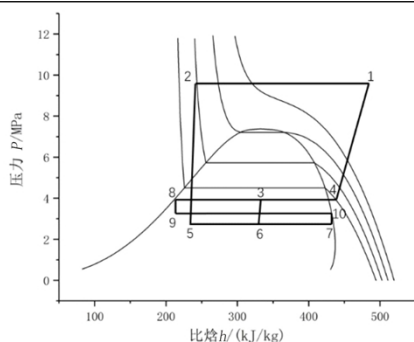


图 8 带喷射器的跨临界 CO<sub>2</sub> 循环系统图

Fig.8 Diagram of Transcritical CO<sub>2</sub> Cycle System with Ejector

图 9 带喷射器的跨临界 CO<sub>2</sub> 循环系统图 P-h 图Fig.9 Temperature-entropy of the transcritical CO<sub>2</sub> cycle system with Ejector

李浩<sup>[23]</sup>等通过实验研究发现,喷射器在不同工况下能够提升系统 COP 1.65%~12.60%; 室外温度对 CO<sub>2</sub> 喷射制冷系统的性能影响显著,该系统在高温环境下会出现明显的性能衰减。邹春妹<sup>[21]</sup>等通过实验证明,随着热水体积流量的减小或其出口温度的升高,引射比将逐渐减小,喷射器效率会逐渐提高。随着喷射器的引入,系统高压侧的压力显著下降,这有利于系统安全稳定运行。Haida M<sup>[22]</sup>等构建了 CO<sub>2</sub> 两相流喷射器的 CFD 模型,并设计制造了一种带有热电偶的喷射器,用于研究超市制冷和空调应用的典型边界条件下喷射器内壁的温度分布,用以研究热传递对喷射器性能的影响。李涛<sup>[24]</sup>等建立了 CO<sub>2</sub> 喷射制冷系统中喷射器的数学模型并进行分析,发现当工作流的流量等于扩压段的出口蒸汽流量时,系统可以稳定运行;喷射循环的 COP 随蒸发温度的升高而提高,但提高程度随蒸发温度的升高而减小。王征<sup>[25]</sup>等人利用涡流管对气体膨胀具有较高效率的优势,将涡流管与喷射器相结合,提出了一种新型制冷系统,有效提高了系统 COP 约 15%,该系统尤其以 R744 (CO<sub>2</sub>) 作为工质时性能较优。

相较于膨胀阀节流,喷射器节流减少了节流前后的压差,流体做功能力增加,压缩机的功耗减少,相当于回收了使用膨胀阀节流损失的部分压能,从而提高了跨临界热泵循环系统的 COP<sup>[7]</sup>。在利用膨胀机工作时,CO<sub>2</sub> 流体会达到两相流状态,可能会对膨胀机造成损坏,而喷射器系统中设有气液分离器,不存在这一麻烦。此外,喷射器还具有无运动部件、结构简单、易于加工、成本低廉、工作可靠、密封性好的优势<sup>[23,26]</sup>。但由于喷射器内部存在超音速流动、湍流、卷吸混合、激波等非平衡、非定常

的复杂现象,设备实际应用过程中还存在流体混合过程形成的不可逆损失等问题,长期以来限制了其更好的应用发展。随着 CFD 技术的发展,人们对喷射器的流场模拟也从最开始的二维逐渐扩展到三维,其内部流场模拟更加精确,对喷射器性能的提高也有重要意义,今后也需进一步研究喷射器和 CO<sub>2</sub> 热泵系统之间的耦合,寻求既能使喷射器性能达到最优也能使跨临界 CO<sub>2</sub> 系统 COP 达到最佳的工况条件。

#### 4 采用双级压缩的循环系统

影响压缩机效率的因素有很多,对于跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统,高压段和低压段之间的泄漏问题是影响压缩机效率的主要原因。在跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环中,压缩机的压缩比较小(2~4),但压差比较大(一般在 6MPa 左右),导致压缩机高低压段间的泄漏量增加,部件受力和变形都很大。因此,从提高系统效率和减少组件的应力和变形出发,跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环可以采用双级压缩系 统<sup>[5]</sup>。

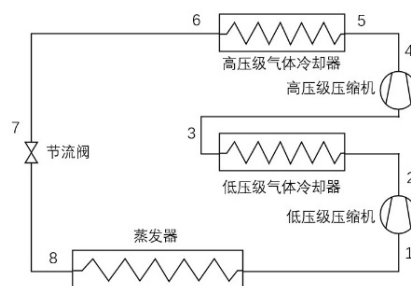
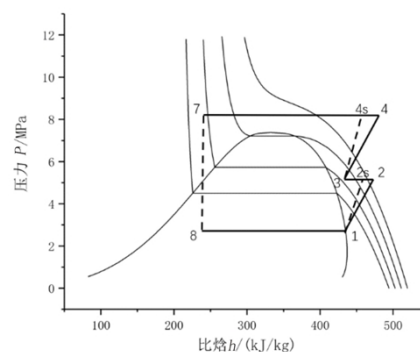
图 10 跨临界 CO<sub>2</sub> 双级压缩循环系统图Fig.10 Transcritical CO<sub>2</sub> two-stage compression cycle system diagram图 11 跨临界 CO<sub>2</sub> 双级压缩循环 P-h 图Fig.11 Temperature-entropy of transcritical CO<sub>2</sub> two-stage compression cycle

图 10 和图 11 分别表示为跨临界 CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环系统图和  $P-h$  图, 该系统主要包括高、低压级压缩机, 高、低压级气体冷却器, 节流阀和蒸发器。来自蒸发器的低温低压 CO<sub>2</sub> 制冷剂进入低压级压缩机, 压缩至中间压力后, 经低压级气体冷却器一次冷却后, 被高压级压缩机吸入, 压缩为高温高压的超临界 CO<sub>2</sub> 气体, 到达高压级气体冷却器进行二次冷却, 节流阀节流至蒸发压力后进入蒸发器蒸发吸热, 完成一个跨临界循环过程<sup>[26]</sup>。

双级压缩循环可有效改善跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环的工况, 降低系统节流损失, 提高系统 COP, 国内外在此方面展开了不少研究。刘圣春<sup>[27,28]</sup>等, 对跨临界双级压缩循环的最优中间压力进行了模拟分析, 同时将单级压缩循环与考虑最优中间压力的双级循环进行比较, 找出了双级压缩循环的最优中间压力与最优高压之间的相关性, 为双级压缩系统的设计计算提供理论指导。谢英柏<sup>[29]</sup>等, 通过建立跨临界双级压缩循环系统的热力学模型, 分析比较了双级压缩循环中完全冷却和不完全冷却两种系统, 得出结论: 在最佳气体冷却器压力下, 系统 COP 随着高压级压缩机入口处 CO<sub>2</sub> 蒸汽过热度的增加而逐渐降低。Eunsung Shin<sup>[30]</sup>等通过实验, 以室外空气温度、室外风速和二级压缩机开度为变量, 模拟分析了两种不同蒸发温度下双级压缩系统的性能特征, 证明无论在结霜工况或无霜工况下, 系统性能对第二级压缩机的开度的变化都非常敏感。胡健<sup>[31]</sup>等提出一种循环分离法以简化计算, 将双级压缩循环分为两个复叠的单级压缩循环。高压循环为跨临界循环, 以中间压力为其蒸发压力。低压循环为亚临界循环, 中间压力为其冷凝压力。这种方法避免了循环过程中高压和中间压力同时优化, 且对于不同的双级压缩循环, 只需要单独优化系统的中间压力。上海交通大学杨军<sup>[32]</sup>等设计了一种新型全封闭旋转式 CO<sub>2</sub> 压缩机, 该压缩机采用中间冷却的双级压缩结构。研究表明, 压缩机容积效率基本与吸排气压缩比呈线性关系, 压缩机等熵效率在最佳压缩比下达到最大值, 压缩机吸气过热度及二级吸气温度对压缩机效率的影响很小。

采用双级压缩系统可以有效的缓解压缩机容积效率所带来的问题, 提升系统效率和减小部件的应力变形。但由于二级压缩机和气体冷却器的增设, 也会加大系统体积和设备初投资, 故应根据应用要

求全面考虑。对于双级压缩系统高低压缩机间的协调控制与一体化设计, 应是下一步研究工作的重点内容。

## 5 结论

由于 CO<sub>2</sub> 作为纯天然制冷剂具有良好的热力学、安全性以及环境友好性, 已受到学者们的广泛关注。而对跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统进行优化, 减小循环节流损失, 不可逆损失, 已成为国内外学者研究的热点。本文在增设回热器、膨胀机代替节流阀、增设喷射器和采用双级压缩循环几个方面对国内外研究进行了总结, 分析了几类优化方案存在的问题, 并对未来研究的发展动向作出展望:

(1) 目前几项优化方案的研究, 对提高跨临界系统性能起到了很大作用, 但仍存在一些不足之处, 如何进一步提升各组件效能, 如改变回热器的安装位置、改变喷射器喷口形状会对系统 COP 带来怎样的影响, 还需要深入研究。

(2) 几类优化方案并不互斥, 如何高效有机将其结合, 如带回热的喷射器系统, 双级压缩系统中膨胀机的应用, 并找到其最佳运行工况, 可作为系统的具体应用方式进行研究。

(3) 循环系统的经济性。当前国内研究中, 针对跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷系统实际运行经济性问题有待于进一步研究, 应结合具体工程案例进一步分析。

学界对跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统的研究正处于快速发展阶段, 此系统的各类商业应用都还处于起步阶段, 循环各部件的设计和研发还不够完善, 某些技术参数还不能和传统制冷剂系统相比。但是, 随着各项研究的深入, 跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统的运行性能和安全性将会有显著提升。在国内外大力提倡节能、环保的大环境下, 跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷循环系统在未来会有着很大的发展空间。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张仙平, 王凤坤, 马富芹, 等. 制冷空调领域 CO<sub>2</sub> 替代合成工质可行性分析[J]. 低温与超导, 2007, (3): 257-261.
- [3] 范晓伟, 张仙平, 王凤坤, 等. 采用 CO<sub>2</sub> 天然混合制冷剂的制冷系统热力学分析[J]. 低温与超导, 2009, 37(6): 63-66.

- [4] 李锋,司春强,马进.二氧化碳跨临界制冷系统的研究及应用进展[J].冷藏技术,2020,43(3):46-52.
- [5] 马一太,李敏霞,田华.自然工质二氧化碳制冷与热泵循环原理的研究与进展[M].成都:科学出版社,2017.
- [6] 丁国良.CO<sub>2</sub> 制冷技术新发展[J]. 制冷空调与电力机械,2002,(2):1-6,48.
- [7] 丁国良. 二氧化碳制冷技术[M]. 北京: 化学工业出版社,2007.
- [8] 王洪利,马一太,姜云涛.CO<sub>2</sub> 跨临界单级压缩带回热器与不带回热器循环理论分析与实验研究[J]. 天津大学学报,2009,42(2):137-143.
- [9] 王洪利,田景瑞,马一太.CO<sub>2</sub> 跨临界双级压缩带回热器与不带回热器循环分析[J]. 热能动力工程,2011,26(2):176-180,252-253.
- [10] 李东哲,殷翔,宋昱龙,等.跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵中间换热器对系统性能的影响研究[J].压缩机技术,2016,(4):6-11.
- [11] 方健珉,王静,孙西峰,等.回热器对电动汽车跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷系统影响的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2020, 54(6):155-160.
- [12] Ying Chen, Junjie Gu. The optimum high pressure for CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration systems with internal heat exchangers[J]. International Journal of Refrigeration, 2005,28(8).
- [13] J Sarkara, Souvik Bhattacharyya, M Ram Gopal. Erratum to 'Simulation of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications'[J]. International Journal of Refrigeration, 2007,30(4):744.
- [14] G Lorentzen. The use of natural refrigerants: a complete solution to the CFC/HCFC predicament[J]. International Journal of Refrigeration, 1995,18(3).
- [15] 查世彤.二氧化碳跨临界循环膨胀机的研究与开发[D]. 天津:天津大学,2003.
- [16] 孙志利,马一太.单级跨临界二氧化碳带膨胀机循环与四种双级循环的热力学分析[J]. 制冷学报,2016,37(3):53-59.
- [17] 杨俊兰,马一太,管海清,等.CO<sub>2</sub> 跨临界双级压缩循环中膨胀机的优化配置性能分析[J]. 流体机械,2005,(2):54-58,65.
- [18] Simarpreet Singh, Abhyuday Singh, M S Dasgupta. CFD Modeling of a Scroll Work Recovery Expander for Trans-critical CO<sub>2</sub> Refrigeration System[J]. Energy Procedia, 2017,109.
- [19] 姜云涛,马一太,李敏霞,等.二氧化碳跨临界循环系统用新型膨胀机的研发[J].制冷学报,2010,31(5):1-4.
- [20] 马一太,袁秋霞,李敏霞,等.跨临界 CO<sub>2</sub> 带膨胀机和带喷射器逆循环的性能比较[J]. 低温与超导,2011,39(5):36-41.
- [21] 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):1520-1526.
- [22] Haida Michal, Smolka Jacek, Hafner Armin, et al. Numerical investigation of heat transfer in a CO<sub>2</sub> two-phase ejector[J]. Energy, 2018,163.
- [23] 李浩,张振宇,宋霞,等.带喷射器的跨临界 CO<sub>2</sub> 车用空调系统实验研究[J]. 上海交通大学学报,2021,55(2):179-187.
- [24] 李涛,孙民,李强,等.利用喷射提高跨临界二氧化碳系统的性能[J].西安交通大学学报,2006,(5):553-557.
- [25] 王征,李涛,吴孔祥,等.一种利用喷射器和涡流管的新型制冷系统[J]. 工程热物理学报,2012,33(11):1843-1848.
- [26] 郑克敏.跨临界 CO<sub>2</sub> 蒸气压缩/喷射制冷循环性能分析与比较[D].南宁:广西大学,2016.
- [27] 刘圣春,李正.CO<sub>2</sub> 跨临界双级压缩制冷循环的热力学分析[J].制冷技术,2016,36(4):8-13,35.
- [28] 刘圣春,马一太,刘秋菊.CO<sub>2</sub> 跨临界循环双级压缩系统最优中间压力分析[J].流体机械,2008,(4):16-18,44.
- [29] 谢英柏,孙刚磊,刘春涛,等.CO<sub>2</sub> 跨临界双级压缩制冷循环的热力学分析[J].化工学报,2008,(12):2985-2989.
- [30] Eunsung Shin, Chasik Park, Honghyun Cho. Theoretical analysis of performance of a two-stage compression CO<sub>2</sub> cycle with two different evaporating temperatures[J]. International Journal of Refrigeration, 2014,47.
- [31] 胡健,邵亮亮,张春路.跨临界二氧化碳两级循环优化的循环分离法[J].制冷技术,2016,36(3):33-37.
- [32] 杨军,陆平,张利,等.新型全封闭旋转式 CO<sub>2</sub> 压缩机的开发及性能测试[J]. 上海交通大学学报,2008,(3):426-429, 435.