

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-679-08

跨临界 CO₂ 制冷技术发展现状及其改进途径综述

杨艳艳 乔家辉 李连生

(青岛科技大学 青岛 266061)

【摘要】 跨临界 CO₂ 制冷是一种以 CO₂ 作为制冷剂气体冷却过程在临界点以上的新型制冷技术。对近年来 CO₂ 制冷技术的发展进行了概括及分析。针对传统制冷剂与 CO₂ 制冷剂的特点, 重点分析了二者在物理性质上的区别, 说明了 CO₂ 作为新型制冷剂的可行性; 针对提升制冷系数的目标, 讨论了两级压缩、膨胀机、回热器的工作原理以及对系统性能的影响。综述了新型双级压缩 CO₂ 制冷循环的研究现状, 归纳了 CO₂ 制冷循环进一步改善性能的技术途径。

【关键词】 性能改进途径; 制冷剂对比; 双级压缩; 跨临界 CO₂ 制冷

中图分类号 TB61 文献标识码 A

Review of Development Status and Improvement Approaches of Transcritical CO₂ Refrigeration Technology

Yang Yanyan Qiao Jiahu Li Liansheng

(Qingdao University of science and technology, Qingdao, 266061)

【Abstract】 Transcritical CO₂ refrigeration is a new type of refrigeration technology in which CO₂ is used as refrigerant in the process of gas cooling above the critical point. This paper summarizes and analyzes the development of CO₂ refrigeration technology in recent years. According to the characteristics of traditional refrigerant and CO₂ refrigerant, the differences in physical properties of the two are analyzed, and the desirability of CO₂ as a new refrigerant is illustrated. Aiming at improving the refrigeration coefficient, the working principle of two-stage compression, expander and regenerator and its influence on the system performance are discussed. The research status of a new type of two-stage compression CO₂ refrigeration cycle is reviewed, and the technical ways to further improve the performance of CO₂ refrigeration cycle are summarized.

【Keywords】 performance improvement approach; refrigerant comparison; two-stage compression; transcritical CO₂ refrigeration

0 引言

制冷技术已在各行各业和日常生活中得到广泛应用^[1,2]。基于节能和环保目的, 对制冷剂选择及制冷系统的性能要求也越来越高。CO₂ 作为天然制冷剂凭借着其不破坏臭氧层^[3]以及全球变暖^[4]影响几乎可以忽略的优良特性, 越来越受青睐。

目前, 针对 CO₂ 制冷循环, 由于系统运行压力较高、节流损失较大^[5], 使其性能系数明显低于传统制冷循环系统^[6-8]。CO₂ 有异与传统制冷剂的各种特点, 使循环系统在结构上有一定的改善空间^[9]。学者们主要从与传统制冷剂的对比、双级压

缩、膨胀机、回热器等方面进行探讨研究^[10], 通过各设备之间的不同组合^[11], 实现系统的最优运行, 进而推动其在生产生活中进一步推广、应用。

1 CO₂ 制冷剂与传统制冷剂比较

随着全球气候问题的日益严峻, 制冷剂的 ODP 及 GWP^[12] 值成为应用选择的重要依据。CO₂ 的天然特性正成为工程应用的主要制冷剂之一^[13]。表 1 列出了常用传统制冷剂和 CO₂ 制冷剂的物性参数, 通过比较可以看出, R22^[14] 对臭氧层有一定破坏性且 GWP 值较高, 已逐渐被淘汰。R134a^[15,16]、

作者简介: 杨艳艳 (1999-), 女, 研究生, E-mail: yyy796863@163.com

通讯作者: 李连生 (1962-), 男, 教授, E-mail: 15255135923@126.com

收稿日期: 2023-04-18

R410a^[17]曾被作为 R22 的替代制冷剂, 虽然它们不破坏臭氧层, 却导致全球变暖, 需进一步替代的 R32^[18]GWP 虽然较低, 但仍有 675, 依然是一种过

渡性制冷剂, R290 的易燃易爆性则影响到其应用推广。

表 1 常用制冷剂的物性参数^[19]

Table 1 Physical parameters of common refrigerants ^[19]

制冷剂	ODP	GWP	临界压力/Pa	临界温度/°C	沸点/°C	缺点	发展趋势
R22	0.05	1700	4.97*10 ⁶	96	-40.8	破坏臭氧层	面临淘汰
R134a	0	1430	4.07*10 ⁶	101.1	-26.1	系统成本高, 加剧全球变暖	面临替代
R744	0	1	7.38*10 ⁶	31.1	-78.46	运行压力高, 系统成本高	推广应用
R32	0	675	5.78*10 ⁶	78.1	-51.7	易燃易爆	过渡性应用
R410a	0	2100	4.81*10 ⁶	72.5	-51.6	加剧全球变暖, 轻度易燃	面临替代
R290	0	20	4.25*10 ⁶	96.7	-42.1	易燃易爆	谨慎使用

图 1 为 CO₂ 以及常用传统制冷剂饱和压力随饱和温度的变化曲线图^[20]。由图可见, CO₂ 的饱和压力明显高于传统制冷剂, 且随饱和温度上升的增幅也较大, 相同工况下压差大、温差小是 CO₂ 制冷剂应用的特点。

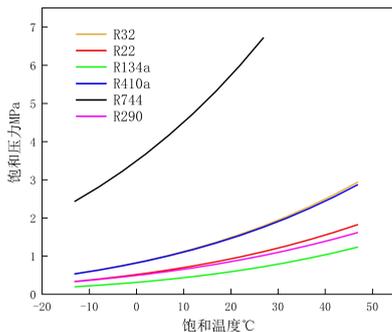


图 1 主要制冷剂物理性质

Fig.1 Physical properties of main refrigerants

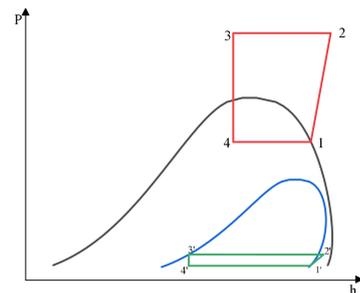
目前, CO₂ 已成为食品冷冻冷藏领域的首选制冷剂^[21]。此外, CO₂ 的单位容积制冷量大^[13], 为缩小制冷设备尺寸、实现微小型发展提供了可能。

2 跨临界CO₂制冷循环性能改进

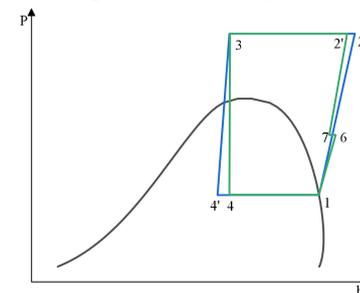
2.1 CO₂ 制冷循环

由于 CO₂ 的临界温度较低 (31.1°C), 以它作为制冷剂的循环多为跨临界循环^[22], 如图 2 (a) 所示, 而传统制冷剂循环则多为亚临界循环^[23], 这一区别使跨临界 CO₂ 制冷循环具备如下特点: 冷凝放热过程不发生气液相变, 气冷器内 CO₂ 工质相对于传统制冷剂具有较高的流动性, 增加了其传热性能; 单位容积制冷量大有利于减小设备尺寸, 但高压侧与低压侧的压差大容易造成压缩过程气体的内泄漏; 在同一条件下, 跨临界 CO₂ 制冷循环存在最优蒸发

压力, 使其效率达到最大值, 且高压侧压力的改变对制冷循环性能有显著影响^[24]。



(a) CO₂ 制冷循环与传统循环对比;



(b) 循环系统改进

图 2 制冷循环压焓图

Fig.2 Pressure enthalpy diagram of refrigeration cycle

此外, 高的工作压力降低了系统的安全性, 且 CO₂ 制冷循环的制冷性能系数远低于传统制冷剂制冷循环, 是其推广应用面临的最大挑战。

在“碳达峰、碳中和”的双碳目标^[25]下, CO₂ 制冷剂的应用研究成为热点。为改进跨临界 CO₂ 制冷循环的 COP 值, 主要研究集中在加设回热器^[26]、将节流阀换成膨胀机^[27]、双级压缩^[28]等。

2.2 双级压缩跨临界 CO₂ 制冷循环

两级压缩是近年来用于提升跨临界 CO₂ 制冷循环性能的一项重要措施^[28,29], 采用多级压缩可使

压缩过程更接近绝热过程, 在两级压缩之间加设中间中间冷却器, 能够进一步缩小与绝热过程的差距^[31], 且减小了第二级入口温度, 有利于提高压缩效率。本文分别对相同工况条件下的 CO₂ 单级制冷循环和双级 CO₂ 制冷循环过程进行模拟, 压缩过程在 p-h 图上的变化如图 2 (b) 所示, 双级压缩耗功明显小于单级压缩, 且排气温度随之降低。

为提升双级 CO₂ 制冷循环系统的性能, 孙志利、马一太^[32]比较了跨临界 CO₂ 单级循环和跨临界 CO₂ 双级循环的性能特点, 重点分析了回热器和膨胀机对 CO₂ 制冷循环性能的影响。Cho^[33]等人通过仿真模拟得出结论, 带中间冷却器的双级 CO₂ 制冷循环系统的 COP 比基本 CO₂ 制冷循环系统提升了 13%。wang^[34]等人通过实验的方法预测了双级 CO₂ 冷柜系统的高压和中压的最佳组合, 并通过实验验证了组合的准确性。Chen^[35]等人基于汽车空调系统, 通过实验对比了不同条件下双级制冷循环对 CO₂ 基本制冷循环系统的性能提升效果, 验证了双级 CO₂ 制冷空调的可行性。大量研究表明, 同一工况条件下, 双级 CO₂ 制冷循环的 COP 高于单级 CO₂ 制冷循环, 配备中间冷却器的制冷循环的 COP 高于不采用中间冷却器的制冷循环。目前, 全球已有三万多家超市或便利店采用 CO₂ 增压制冷系统, 欧洲地区居多。2018 年我国首个安装了 CO₂ 增压制冷系统的商场开业, 并逐渐向工业制冷、人工冰场等领域发展。

在表 2 标准工况条件下, 对比压缩机排气压力对系统 COP 及压缩机耗功的影响。图 3 显示, 随排气压力增大, 两个系统的 COP 均呈现先增大后减少的趋势, 存在最佳排气压力^[36]。其中, 压缩机为 9.8MPa 时, 单级压缩制冷循环的 COP 取到最大值 2.13; 排气压力为 10.2MPa 时, 两级压缩制冷循环的 COP 取到最大值 2.37; 采用两级压缩后的系统 COP 较单级压缩提升了 11%, 与相关文献所得结论相符。

表 2 CO₂ 制冷压缩机名义工况 (GB/T 29030-2012)

Table 2 Nominal Working Conditions of CO₂ refrigeration compressor (GB/T 29030-2012)

蒸发温度/°C	吸气温度/°C	排气压力/MPa	冷凝温度/°C	环境温度/°C
10	20	10	-	35

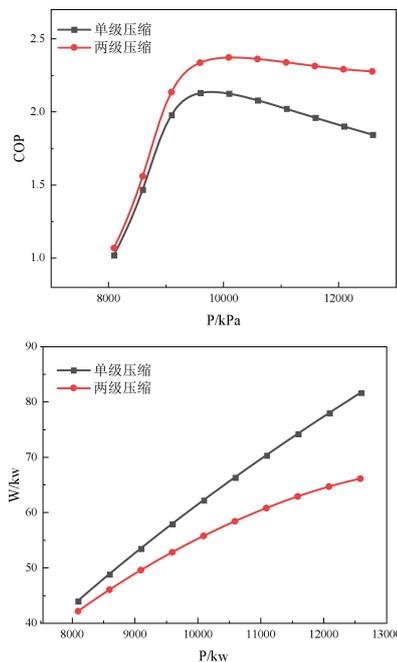


图 3 单级与双级系统 COP 以及压缩机耗功随气体冷却器出口压力的变化

Fig.3 COP of single-stage and two-stage systems and compressor power consumption as a function of gas cooler outlet pressure

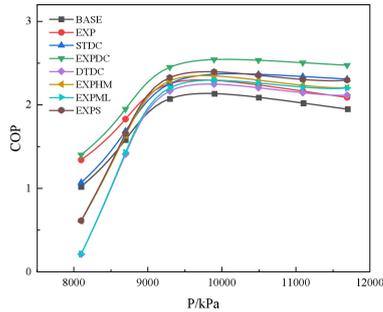
2.3 带膨胀机的双级压缩跨临界 CO₂ 制冷循环

如图 2 (b) 所示, 将 CO₂ 制冷循环中的节流阀替换为膨胀机^[37], 不仅会降低膨胀过程的焓损, 而且膨胀机与压缩机同轴连接^[38], 可以回收部分膨胀功, 提升系统的焓效率, 增加制冷循环的经济性。此外, 用膨胀机代替节流阀, 在增大制冷量的同时, 减少系统耗功, 可提高系统 COP 值。

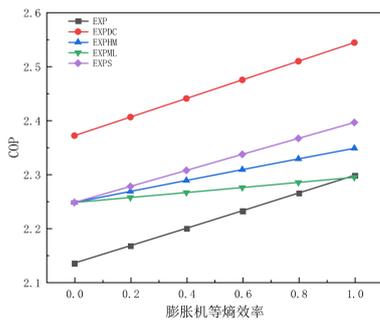
图 2 (b) 中 1-2-3-4-1 为带节流阀的理想跨临界 CO₂ 制冷循环的 p-h 图, 1-2-3-4'-1 为带膨胀机的理想跨临界 CO₂ 制冷循环的 p-h 图, 3-4 以及 3-4' 分别为等焓节流过程和等熵膨胀过程。由图可以看出, 采用膨胀机代替节流阀可增加跨临界 CO₂ 制冷循环的制冷量。在 6-7 阶段增设中间冷却器, 通过两次节流的方式可进一步改善制冷循环性能。

Yang^[39]等人对比了 CO₂ 单级节流阀循环和单级膨胀机循环, 发现 COP 平均提升了 32%。查世彤^[40]发现 CO₂ 作为制冷剂的膨胀比远小于 R134a, CO₂ 膨胀机可回收约 37% 的膨胀功, 具有较高的应用潜力。并且 CO₂ 膨胀机的容积比和压缩机的容积比相差较小, 更容易实现膨胀机和压缩机同轴连接。Zhang^[41]等人发现 CO₂ 双级膨胀机循环的 COP

比 CO₂ 双级节流阀循环的 COP 最大提升了 1.7%。Yang^[42]等人发现膨胀机与高压级压缩机同轴连接的 CO₂ 双级膨胀机制冷循环的 COP 和膨胀机与低压级同轴连接的 CO₂ 双级膨胀机制冷循环、最佳中间压力条件下的 CO₂ 双级膨胀机制冷循环以及 CO₂ 单级膨胀机制冷循环的 COP_x 相比, 分别提升了 11.32%、0.72%和 9.65%。



(a) 随排气压力的变化



(b) 随膨胀机等熵效率的变化

图 4 双级 CO₂ 制冷循环 COP 的变化

Fig.4 COP changes in two-stage CO₂ refrigeration cycle

作者研究了标准工况条件下跨临界 CO₂ 制冷循环的 COP 随高压侧压力以及膨胀率的变化趋势在, 如图 4 所示。其中, BASE、EXP、STDC、EXPDC、DTDC、EXPHM、EXPML、EXPS 分别表示一次节流阀单级跨临界 CO₂ 制冷循环、一次膨胀机单级跨临界 CO₂ 制冷循环、一次节流阀双级跨临界 CO₂ 制冷循环、一次膨胀机双级跨临界 CO₂ 制冷循环、二次节流阀跨临界 CO₂ 制冷循环^[43]、二次高压级为膨胀机的双级跨临界 CO₂ 制冷循环、二次低压级为膨胀机的商机跨临界 CO₂ 制冷循环、二次膨胀机双级跨临界 CO₂ 制冷循环。由图 4 (a) 可见, 节流阀循环系统和膨胀机循环系统均存在一个最佳高压侧压力, 使系统 COP 取得最大值。膨胀机系统的最佳排气压力所对应的最佳 COP 显著大于节流阀系统, 对比 EXPHM 和 EXPML 系统发现,

制冷循环系统中膨胀机布置在不同的阶段所对应的 COP 也是不同的, EXPS 系统提升制冷循环性能的效果最为明显, 其次是 EXPHM、EXPML 提升制冷循环性能的效果最小。这就表明, 膨胀机提升制冷循环性能的效果会受到膨胀机数目和位置的影响。

由图 4 (b) 可见, 制冷循环系统的最佳 COP 与膨胀率呈线性关系, EXPDC 系统的最佳 COP 值最大, 随膨胀效率的增大与 EXPHM 和 EXPLM 的差距越大, 膨胀机的使用将会大幅度提升跨临界 CO₂ 制冷循环的制冷系数, 跨临界 CO₂ 制冷循环的系统性能逐渐接近传统制冷循环, 使 CO₂ 作为制冷剂替代传统制冷剂成为可能。

2.4 带回热器的双级压缩跨临界 CO₂ 制冷循环

制冷系统加设回热器后, 气冷器出口处高温工质产生的余热, 一部分被压缩机入口处的低温工质吸收, 气体冷却器出口处工质温度降低, 压缩机入口处工质温度升高, 系统单位质量的制冷量增大^[44]。另外由于吸气压力上升, 相同压力比下功耗增大。当单位制冷量增大幅度小于功耗增大幅度时, COP 减小; 单位制冷量增大幅度大于功耗增大幅度时, COP 增加。

Yiyu Chen^[35]等人通过实验发现, 环境温度为 45℃时, 带回热器的 CO₂ 双级压缩制冷循环系统的制冷量和 COP 比基本循环系统分别提升了 19.8% 和 12.8%。Joneydi Shariatzadeh^[45]等人从焓分析的角度比较了是否带膨胀机和回热器的四种循环, 结果表明: 采用回热器能够有效提升节流阀系统的 COP, 但对膨胀机系统是不利的。边煜竣^[29]等分析了回热器对单级节流和双级节流系统性能的影响, 发现回热器的采用对系统性能的改善效果并不明显, 甚至会产生负面影响。龚毅^[46]等人通过实验验证了带回热器的 CO₂ 制冷循环系统比不带回热器 COP 提升 6.5%~10.4%。M Yari^[47]基于循环仿真发现, 带回热器的两级压缩制冷循环的最佳中间压力近似等于其级间压力的几何平均值。

不同系统中回热器对制冷循环系统的 COP 的影响也是不同的, 作者计算了蒸发温度 $t_c=10^\circ\text{C}$, 冷凝温度 $t_g=40^\circ\text{C}$, 环境温度 $t_a=35^\circ\text{C}$, 冷库温度为 $t_f=5^\circ\text{C}$, 高压压力取最优值条件下, 膨胀效率分别取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 时, 双级制冷循环系统 COP 随回热度的变化趋势, 如图 5 结果显示:

随回热效率的增加,同时采用回热器和节流阀的循环系统的 COP 呈逐渐上升趋势,约为 23%。说明回热器的使用,一定程度上可以提升 CO₂ 制冷循环系统的 COP,此外,结合其他改善措施,可以进一步提升 CO₂ 制冷循环的 COP。对于回热器与膨胀机结合的制冷循环系统,当膨胀效率增大时,随回热器效率的增加,系统 COP 增大,但上升幅度逐渐减小,系统 COP 最大可达到 2.77,较带回热器的节流阀系统提升了 17%左右。因此,双级跨临界 CO₂ 制冷循环系统采用膨胀机与回热器的相结合的方式可有效提升在制冷循环系统的性能。

此外,回热器与节流阀、喷射器、两级压缩相结合的系统 COP 均是增加的。在带膨胀机的两级压缩制冷循环中,若增设级间冷却器,系统的 COP 也是增加的。回热器对不同制冷循环的 COP 均有一定的影响,变化范围约在 0.2 左右。其中,由节流阀组成的带中间冷却器的两级压缩制冷系统以及带膨胀机的两级压缩系统受回热器的影响最明显。

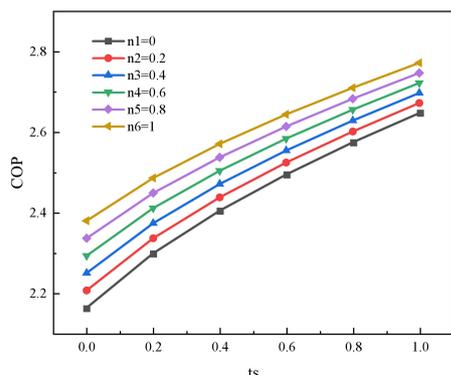


图 5 CO₂ 双级制冷循环 COP 随回热器换热效率的变化

Fig.5 COP changes with heat recovery efficiency in CO₂ two-stage refrigeration cycle

如图 6 所示,在相同工况下,以 R410a 和 R32 为制冷剂的传统制冷循环的 COP 分别为 3.11 和 3.16,采用回热器循环一定程度上可以提升 CO₂ 制冷循环的 COP,但与传统制冷循环的性能系数之间仍有一定差距。在单级 CO₂ 制冷循环系统中,膨胀机的使用对循环制冷性能的影响明显大于回热器,回热器效率较低时膨胀机对循环性能的影响更明显,对系统 COP 的提升范围更大。双级带膨胀机并且增设回热器 CO₂ 制冷循环的 COP 可达 2.77。上述分析中,回热过程均在压缩机入口与气冷器出口之间进行,回热器的位置也会对跨临界 CO₂ 循环

制冷系数造成影响。

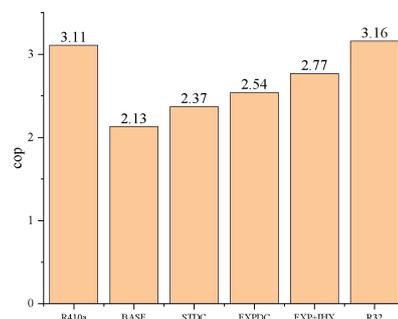


图 6 CO₂ 制冷循环与传统制冷循环对比

Fig.6 Comparison between CO₂ refrigeration cycle and traditional refrigeration cycle

3 进一步改进跨临界 CO₂ 制冷循环性能的技术途径

为了综合考虑性能提升和制造成本增加等因素,需要进一步对跨临界 CO₂ 制冷循环系统进行改进,以获得应用性能和生产成本平衡,从而加快 CO₂ 制冷剂的推广应用。在两级压缩的基础上,CO₂ 制冷循环系统改进方法还包括用喷射器替代节流阀、在气冷器后采用机械过冷和在蒸发器前增设闪蒸器等。此外,还可以通过平行压缩的方式提升制冷系统的性能系数。

3.1 喷射器及闪蒸器

用喷射器替代节流阀的 CO₂ 制冷循环过程,从气冷器出来的高温高压的 CO₂ 工质,经喷射器膨胀后变成两相流体,两相流体节流、升压后在气液分离器中分离为饱和气体和饱和液体后分别进入压缩机和蒸发器,从蒸发器出来的高温制冷气体进入喷射器,与喷射器内的工质混合,混合后的 CO₂ 工质经分流后再次进入压缩机和蒸发器,喷射器的使用通过蒸发器出来的制冷剂与喷射器内的制冷剂混合换热的方法,达到提升蒸发器换热效果的目标,进而提升 CO₂ 制冷循环系统的性能。

M Yari^[47]提出了一种带喷射器的新型跨临界 CO₂ 双级制冷循环系统,通过模拟并与带回热的跨临界 CO₂ 双级压缩制冷系统进行对比,结果表明,新型制冷系统的 COP 平均提升了 16.5%。Dazhang Yang^[48]等人建立了带喷射器和不带喷射器的跨临界 CO₂ 制冷循环系统,在气体冷却器压力 91bar、出口温度 33℃、电子膨胀阀开启 95%的条件下,带喷射系统的 COP 是相同工况下不带喷射器系统

的 2.28 倍, 并且存在最佳中间压力和最佳气体冷却器压力。

针对 CO₂ 闪蒸器制冷循环系统, 从气冷器出来的高温高压的 CO₂ 工质, 经闪蒸器扩容降压后, 饱和蒸汽经补气回路进入压缩机, 低温低压的 CO₂ 制冷剂进入蒸发器。闪蒸器闪蒸过程将一部分 CO₂ 制冷剂闪蒸成饱和蒸汽, 吸收大量热量, 提升蒸发器效率, 学者们进行了许多研究。

针对利用喷射器改善跨临界 CO₂ 制冷循环性能, 学者们进行了许多研究。刘业凤^[49]等人通过建立热力学模型对比两种 CO₂ 双级压缩制冷循环, 发现带闪蒸器的循环系统比带中冷器的循环系统的 COP 更高。胡键^[50]等人提出了循环分离法, 用于 CO₂ 制冷循环系统优化。与直接优化相比带闪蒸器的双级压缩制冷循环系统的 COP 直接误差和平均误差分别减少了 0.85% 和 0.15%。Bruno Yuji Kimura de Carvalho^[51]等人针对商用 CO₂ 两级变容压缩制冷循环系统, 以带两级压缩机和中冷器的循环系统为基准进行研究。得出结论, 压缩机在转速为 40、60 和 75Hz 时闪蒸器旁通循环的 COP 分别提高了 15.5%、18.4% 和 18.1%。

3.2 机械过冷

机械过冷是指在气冷器后增设机械过冷装置, 从气冷器出来的高温 CO₂ 工质在机械过冷设备内进一步降温, 温度更低的 CO₂ 工质可以在蒸发器内吸收更多的热量, 增加制冷量, 从而提高制冷性能系数。

机械过冷^[52]是提升双级跨临界 CO₂ 制冷循环系统性能的有效方法。P D Agaro^[53]等提出了一种确定带机械过冷的喷射器混合冷却循环最佳设计参数和性能的方法, 使跨临界 CO₂ 制冷循环系统的效率提高了 32.7%。Shengchun Liu^[54]等人旨在获得跨临界 CO₂ 制冷系统的最大性能系数, 对五种带有 R290 机械过冷单元的制冷系统进行了热力分析, 发现带机械过冷的双级压缩制冷循环可获得较高的 COP。

3.3 平行压缩

平行压缩跨临界 CO₂ 制冷循环在优化储液器压力的同时, 可以优化高压压力。郭晓鹏^[5]指出喷射器与平行压缩相结合的跨临界 CO₂ 制冷循环系统在温暖的环境条件下具有显著优势。Laura Nebot-Andrés^[55]等人提出了一种机械过冷与平行

压缩相结合的跨临界 CO₂ 制冷循环系统, 在 35℃ 环境条件下, 新循环的 COP 相较于单级循环从 11.7% 提升到 15.9%。

4 结论

综上所述, CO₂ 作为一种天然制冷剂, 替代传统制冷剂的应用领域正不断扩大。本文综述了跨临界 CO₂ 制冷循环的研究现状, 主要结论如下:

(1) 传统制冷剂破坏臭氧层并加剧全球变暖, 急需一种新型制冷剂替代。CO₂ 优良的热物理特性及其环境友好性, 正成为传统制冷剂替代的首要选择。

(2) 跨临界 CO₂ 制冷循环与传统制冷循环相比, 高压高温气体处于超(跨)临界状态, 故没有冷凝过程, 且循环压力较高, 对设备承压要求也较高。

(3) 单级压缩跨临界 CO₂ 制冷循环的性能系数明显低于传统制冷剂制冷循环。通过采用两级压缩并将节流阀替换为膨胀机、增设回热器等措施可有效提升系统的 COP 值。

(4) 两级压缩虽然可以提升跨临界 CO₂ 制冷循环的系统性能, 但仍达不到传统制冷剂制冷循环的水平。有必要基于两级压缩制冷循环, 研究增设喷射器、机械过冷、闪蒸器、平行压缩等技术改进措施, 以进一步提高跨临界 CO₂ 制冷循环的综合性能。

参考文献:

- [1] 史敏, 贾磊, 张秀平, 等. CO₂ 应用于我国工商制冷行业的适用性研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(6): 97-103.
- [2] 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.
- [3] 轩福臣, 谢晶. 跨临界 CO₂ 制冷循环系统与应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 226-231.
- [4] 杨大章, 吕静. CO₂ 制冷特性和应用分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2009, 30(3): 15-18.
- [5] 郭晓鹏. 带喷射器的 CO₂ 制冷系统运行特性研究[J]. 制冷技术, 2020, 40(6): 70-74.
- [6] 李丽霞, 姬长发, 赵文秀. CO₂ 制冷系统的技术进展[J]. 应用能源技术, 2008(5): 285-289.
- [7] 黄龙飞, 曹锋. 跨临界 CO₂ 循环中过冷强化技术的发展综述[J]. 流体机械, 2021, 49(1): 88-96.
- [8] 耿旭东, 周啸虎, 邵双全, 等. 集成式 CO₂ 超市制冷系统的

- 研究进展[J].流体机械,2022,50(9):66-75,84.
- [9] 孙知晓,姚海清,张文科,等.跨临界二氧化碳制冷系统优化方案的研究综述[J].制冷与空调,2022,36(3):469-475.
- [10] BINBIN YU, JINGYE YANG, DANDONG WANG, et al. An updated review of recent advances on modified technologies in transcritical CO₂ refrigeration cycle[J]. Energy, 2019,189:116147.
- [11] 冯凯,蔡觉先.CO₂制冷技术的研究发展[J].节能,2017,36(12):8-14,2.
- [12] 肖学智,周晓芳,徐浩阳,等.低GWP制冷剂研究现状综述[J].制冷技术,2014,34(6):37-42.
- [13] 马一太,王派,李敏霞,等.温室效应及第四代制冷工质[J].制冷技术,2017,37(5):8-13.
- [14] W CHEN. A comparative study on the performance and environmental characteristics of r410a and r22 residential air conditioners[J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28(1):1-7.
- [15] 岳镇宇,陈焕新,钟昌.R134a汽车空调回热系统热力性能参数的优化分析[J].制冷学报,2016,37(5):26-32.
- [16] 吴乾坤,谢应明,陈嘉雯,等.采用压缩式制冷循环的R134a水合物蓄冷释冷特性试验研究[J].流体机械,2021,49(8):7-14.
- [17] 马娟娟,王敬欢,张昌.R410A回热循环的热力分析[J].制冷与空调,2013,27(1):82-85.
- [18] G. LILLO, R. MASTRULLO, A.W. MAURO, et al. Flow boiling of r32 in a horizontal stainless steel tube with 6.00 mm id. experiments, assessment of correlations and comparison with refrigerant r410a[J]. International Journal of Refrigeration, 2019,97:143-156.
- [19] 罗惠芳.R410A、R32、R290、R134a和R404A在两级压缩制冷循环下的特性对比[J].冷藏技术,2019,42(1):53-56.
- [20] IAN H. BELL, JORRIT WRONSKI, SYLVAIN QUOILIN, et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014,53(6):2498-2508.
- [21] D SÁNCHEZ, A ANDREU-NÁCHER, D CALLEJA-ANTA, et al. Energy impact evaluation of different low-gwp alternatives to replace r134a in a beverage cooler. experimental analysis and optimization for the pure refrigerants r152a, r1234yf, r290, r1270, r600a and r744[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 256:115388.
- [22] BRIAN T AUSTIN, K SUMATHY. Transcritical carbon dioxide heat pump systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(8):4013-4029.
- [23] 杨俊兰,沈士杰,高思雨,等.CO₂跨临界循环与传统制冷循环的性能比较[J].流体机械,2019,47(1):80-83,74.
- [24] AKLILU TESHAMICHAEL BAHETA, SUHAIMI HASSAN, ALLYA RADZIHAN B. REDUAN, et al. Performance investigation of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle[J]. Procedia CIRP, 2015,26:482-485.
- [25] 安青松,闫若雪,孙博阳,等.“双碳”背景下天然工质的改革及减排潜力[J].华电技术,2021,43(11):85-90.
- [26] 刘圣春,刘坤,王嘉豪,等.带内部热交换器的CO₂增压制冷系统热力学分析[J].流体机械,2022,50(2):64-70.
- [27] 张振迎,郝佳伟,许禹菲,等.带透平膨胀机的跨临界CO₂制冷循环热力性能研究[J].流体机械,2022,50(3):40-46.
- [28] 刘业凤,王东亮,陈申.CO₂双级压缩制冷循环气冷器的改进[J].轻工机械,2019,37(5):84-88.
- [29] 边煜竣,申江.CO₂两级压缩不同循环模式热力学对比分析[J].低温与超导,2017,45(5):65-69.
- [30] 刘圣春,马一太,刘秋菊.CO₂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.
- [31] BIAGIO CITARELLA, RITA MASTRULLO, ALFONSO W. MAURO, et al. Performance assessment of a two-stage CO₂ small scale mt refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2021,131:887-896.
- [32] 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.
- [33] HONGHYUN CHO, MOO-YEON LEE, YONGCHAN KIM. Numerical evaluation on the performance of advanced CO₂ cycles in the cooling mode operation[J]. Applied Thermal Engineering, 2009,29(8-9):1485-1492.
- [34] DONG WANG, SHENGONG MEI, ZHIPAN GU, et al. The prediction for optimum combination of high pressure and intermediate pressure on a small refrigerated cabinet with CO₂ transcritical two-stage cycle[J]. International Journal of Refrigeration,

- 2022,140:82-89.
- [35] YIYU CHEN, HUIMING ZOU, JUNQI DONG, et al. Experimental investigation on refrigeration performance of a CO₂ system with intermediate cooling for automobiles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174:115267.
- [36] 赵瑞杰,申江,胡开永,等.跨临界 CO₂ 双级压缩增压系统热力学分析[J].低温与超导,2018,46(7):81-86.
- [37] 秦鹏伟,马一太,党超镔,等.CO₂ 气液两相小型膨胀机的研究进展[J].制冷学报,2023,44(1):24-34.
- [38] DAHAN SUN, TENG FEI, ZEKUAN LIU, et al. Performance analysis of a new transcritical r744 refrigeration cycle with expander-mechanical overheating[J]. Applied Thermal Engineering, 2023,218: 119285.
- [39] JUN LAN YANG, YI TAI MA, MIN XIA LI, et al. Exergy analysis of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with an expander[J]. Energy, 2005, 30(7):1162-1175.
- [40] 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.
- [41] ZHENYING ZHANG, LIRUI TONG, XINGGUO WANG. Thermodynamic analysis of double-stage compression transcritical CO₂ refrigeration cycles with an expander[J]. Entropy, 2003.
- [42] JUN LAN YANG, YI TAI MA, SHENG CHUN LIU. Performance investigation of transcritical carbon dioxide two-stage compression cycle with expander[J]. Energy, 2007,32(3):237-245.
- [43] 牛恒,肖寒松,李无言,等.两级节流中间完全冷却 CO₂ 跨临界双级压缩制冷循环特性研究[J].制冷学报,2022,43(5):1-9.
- [44] 郭雅琪,叶祖樑,王驿凯,等.跨临界 CO₂ 循环中回热器研究进展概述[J].流体机械,2019,47(1):84-88.
- [45] O JONEYDI SHARIATZADEH, SS ABOLHASSANI, M RAHMANI, et al. Comparison of transcritical CO₂ refrigeration cycle with expander and throttling valve including/excluding internal heat exchanger: exergy and energy points of view[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,93:779-787.
- [46] 龚毅,侯峰,梁志礼,等.带回热器的跨临界 CO₂ 制冷系统的试验研究[J].流体机械,2011,39(10):56-60.
- [47] M YARI. Second law optimization of two-stage transcritical CO₂ refrigeration cycles in the cooling mode operation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2009,223(5):551-561.
- [48] DAZHANG YANG, JIE ZHU, NAIXIN WANG, et al. Experimental study on the performance of trans-critical CO₂ two-stage compression refrigeration system with and without an ejector at low temperatures[J]. International Journal of Refrigeration, 2022:S014070072 2004285.
- [49] 刘业凤,唐丹萍,陈申.三种 CO₂ 跨临界制冷循环热力分析[J].能源工程,2020,(1):73-77.
- [50] 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.
- [51] BRUNO YUJI KIMURA DE CARVALHO, CLÁUDIO MELO, ROBERTO HORN PEREIRA. An experimental study on the use of variable capacity two-stage compressors in transcritical carbon dioxide light commercial refrigerating systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2019,106:604-615.
- [52] 代宝民,刘圣春,孙志利,等.机械过冷 CO₂ 跨临界制冷循环性能理论分析[J].制冷学报,2018,39(1):13-19.
- [53] P D AGARO, MA COPPOLA, G CORTELLA. Effect of dedicated mechanical subcooler size and gas cooler pressure control on transcritical CO₂ booster systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2021,182:116145.
- [54] SHENGCHUN LIU, FENPING LU, BAOMIN DAI, et al. Performance analysis of two-stage compression transcritical CO₂ refrigeration system with r290 mechanical subcooling unit[J]. Energy, 2019,189: 116143.
- [55] LAURA NEBOT-ANDRÉS, DANIEL CALLEJA-ANTA, DANIEL SÁNCHEZ, et al. Thermodynamic analysis of a CO₂ refrigeration cycle with integrated mechanical subcooling[J]. Energies, 2019,13(1):4.