

文章编号: 0253-4339(2023) 01-0024-11
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2023.01.024

CO₂ 气液两相小型膨胀机的研究进展

秦鹏伟¹ 马一太¹ 党超斌² 刘楷³ 李敏霞¹ 霍文明¹ 王派¹

(1 天津大学机械工程学院 中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津大学热能研究所 天津 300072;
2 福井大学工学系研究科 福井 9100017; 3 欧悦冰雪投资管理(北京)有限公司 北京 100040)

摘 要 随着国际社会环境意识的提高,臭氧层破坏、温室效应问题受到持续广泛的关注,越来越多的学者将注意力集中于环保制冷剂。CO₂ 因简单易得、安全可靠、传热性能和流动性好等优点受到重视。本文对 CO₂ 气液两相小型膨胀机的研究进展进行分析和总结,发现在循环中将节流阀换成 CO₂ 膨胀机可有效提高系统的制冷效率,经过计算得到带膨胀机跨临界 CO₂ 循环的制冷、制热效率分别比 R134a 循环高 6.9%、4.6%,比带节流阀的循环高 25.76%、16.17%;CO₂ 膨胀机的等熵效率越高,系统制冷、制热效率越大,若 CO₂ 膨胀机的等熵效率大于 32%,则带 CO₂ 膨胀机的系统性能优于带回热器循环的系统性能。不同 CO₂ 膨胀机由于结构不同导致效率、泄漏和摩擦损失不同,活塞式、转子式等膨胀机结构简单,但同时泄漏损失也较大;滑片式、旋转叶片式、涡旋式等膨胀机效率得到了很大提高,但其结构较为复杂,制造难度大,生产成本较高;同时对当前存在的一些问题提出解决办法,如进行合理的设计减小泄漏与摩擦损失、将压缩功提供给压缩机、在膨胀过程中加入其他气体以及设计可调节膨胀比的 CO₂ 膨胀机。目前 CO₂ 膨胀机的研究基本集中于实验室,在工程中应用较少。因此未来应以实验和理论相结合,进一步研究 CO₂ 膨胀机效率提升、关键零部件技术开发等问题。

关键词 跨临界循环;膨胀机;膨胀功;等熵效率;泄漏;CO₂

中图分类号: TB61⁺1; TB653

文献标识码: A

Research Progress of Small-scale CO₂ Two-phase Expanders

Qin Pengwei¹ Ma Yitai¹ Dang Chaobin² Liu Kai³ Li Minxia¹ Huo Wenming¹ Wang Pai¹

(1. Thermal Energy Research Institute, Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 2. School of Engineering, University of Fukui, Fukui, 9100017, Japan; 3. EUROJOY Ice & Snow Investment Management (Beijing) Co., Ltd., Beijing, 100040, China)

Abstract With the increased awareness in the international community, the problems of ozone depletion and greenhouse effect have received extensive attention, more and more scholars are focusing on environmental-friendly refrigerants. CO₂ demonstrated its value in terms of simplicity, availability, safety, reliability, and good heat transfer performance. This paper analyzes and summarizes the research progress of small-scale CO₂ gas-liquid two-phase expanders. It is found that replacing the throttle valve with a CO₂ expander in the cycle can effectively improve refrigeration efficiency. The cooling and heating efficiency of the cycle is 6.9% and 4.6% higher than that of the R134a cycle, and 25.76% and 16.17% higher than that of the cycle with a throttle valve, respectively. The higher the isentropic efficiency of the CO₂ expander, the greater the system efficiency. As long as the isentropic efficiency of the expander is greater than 32%, the performance of the system with a CO₂ expander is better than that with a regenerator. Different CO₂ expanders have different efficiency, leakage, and friction loss due to their different structures. Piston type, rotor type, and other expanders have simple structures, while their leakage loss is relatively large. The efficiency of the sliding vane type, rotary vane type, and scroll type expander has been greatly improved, but their structure is more complicated, leading to more complicated manufacturing and increased production costs. The compression work is supplied to the compressor, increasing the flow rate during the expansion process, which requires designing a CO₂ expander with an adjustable expansion ratio. At present, the research of CO₂ expanders is basically concentrated in the laboratory, and this technology has not been commercialized yet. Therefore, the future development direction should combine experiments and theory to further study the efficiency improvement of CO₂ expanders and the development of key components technology.

基金项目:国家重点研发计划(2021YFF0306801,2021YFF0306805)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFF0306801 & No. 2021YFF0306805).)

收稿日期:2022-03-24;修回日期:2022-05-03

Keywords transcritical cycle; expander; expansion work; isentropic efficiency; leakage; CO₂

随着社会的不断发展,臭氧层破坏、温室效应不断加剧,各国对臭氧层破坏、温室效应引起的全球变暖问题的关注程度不断加深。近一百多年来,全球平均气温总体呈上升趋势,2016 年气温达到了最近一百年以来的峰值。相关学者预测结果表明,若对温室气体的排放不加以控制,至 2100 年地球平均气温将至少上升 4 ℃,至 2200 年会上升 8 ℃^[1]。为缓解温室效应,各国共同商议制定了系列条例《巴黎协定》,并把将全球气温升高幅度控制在 2 ℃ 范围内作为首要条例内容。2016 年 10 月《蒙特利尔议定书》基加利修正案^[2-4]规定减少 HFCs 的生产和使用,使全球温度在 21 世纪的温升减少 0.5 ℃。

越来越多学者将目光集中于天然工质,认为使用天然工质替代常规工质,可以有效减缓温室效应。CO₂ 作为常用的自然工质,具有环境友好性 (ODP = 0, GWP = 1),无毒且不可燃,安全性较高,在制冷与热泵循环中 CO₂ 因传热性能好、价格低廉等优点得到广泛应用^[5]。但 CO₂ 跨临界循环系统节流过程会造成很大的能量损失,为减少节流损失,使用膨胀机代替节流阀,膨胀机利用流体的膨胀做功,进而使所做膨胀功可以得到进一步利用考虑膨胀机的效率,可回收膨胀过程 50% 以上的可用能量,这对于系统制冷、制热效率的提升非常重要。

研究 CO₂ 膨胀机对提高系统制冷、制热效率,更好的推动 CO₂ 膨胀机的应用具有指导意义。本文对 CO₂ 膨胀机系统及膨胀机种类的国内外研究进展与应用情况进行介绍和分析,同时指出现有 CO₂ 膨胀机研究中存在的问题,并对未来的发展方向进行预测。

1 带膨胀机跨临界 CO₂ 循环系统分析

G. Lorentzen^[6]首次提出将膨胀机引入至制冷循环的理论,认为当节流阀被膨胀机取代时,膨胀机做的功可以得到利用,从而提升系统效率。图 1 所示为 CO₂ 跨临界循环的 *T-s* 图,3-4 为节流过程,若循环系统利用膨胀机代替膨胀阀,则该过程变为 3-4',循环的单位制冷量增大。由图 1 可知,CO₂ 膨胀机入口流体处于超临界状态,在膨胀过程中降压降温,流体经饱和液线,进入两相区,膨胀机出口流体为两相流体,因此本文研究对象是 CO₂ 气液两相膨胀机。

本文对 R134a 循环、带节流阀跨临界 CO₂ 循环和带膨胀机跨临界 CO₂ 循环进行理论对比,忽略换热器、各部件及系统管路在运行中的热量损失和压力损失,为便于对比分析系统制冷、制热效率,压缩机等

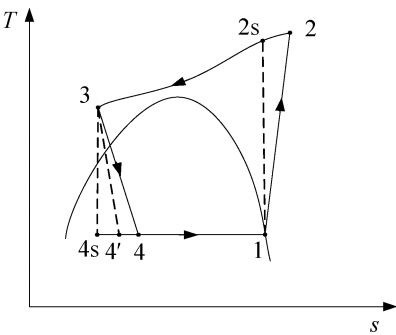


图 1 CO₂ 跨临界循环 *T-s* 图
Fig.1 *T-s* diagram of the CO₂transcritical cycle

熵效率均取 0.7,CO₂ 膨胀机效率取 0.7,计算工况如表 1 所示。R134a 与带节流阀跨临界 CO₂ 循环系统制冷、制热效率计算式分别如式(1)、式(2)所示,带膨胀机跨临界 CO₂ 循环系统制冷、制热效率计算式分别如式(3)、式(4)所示。

$$COP_c = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \tag{1}$$

$$COP_e = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \tag{2}$$

$$COP_{c'} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_{4'})} \tag{3}$$

$$COP_{e'} = \frac{h_2 - h_3}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_{4'})} \tag{4}$$

表 1 不同系统 COP 对比
Tab.1 COP comparison of different systems

循环类型	制冷工况	制热工况
R134a 循环	3.778 8	3.179 0
节流阀循环	3.211 2	2.862 2
膨胀机循环	4.038 3	3.324 9

注:制冷工况(蒸发温度 7.2 ℃,R134a 冷凝温度 50 ℃,CO₂ 气体冷却器出口温度 40 ℃,过热度 11.1 ℃,过冷度 5 ℃)^[7];制热工况(蒸发温度-17 ℃,R134a 冷凝温度 45 ℃,CO₂ 气体冷却器出口温度 35 ℃,过热度 5 ℃,过冷度 5 ℃)^[8]。

由表 1 可知,当 3 种系统在各自最优制冷、制热工况下,带膨胀机跨临界 CO₂ 循环系统的制冷、制热效率最高,分别达到 4.038 3 与 3.324 9,其次是 R134a 循环系统,其中带节流阀跨临界 CO₂ 循环最低。带膨胀机跨临界 CO₂ 循环的效率在最优工况下,相比 R134a 循环,制冷、制热性能分别提高 6.9% 与 4.6%,采用膨胀机的制冷循环一方面回收了膨胀

功,可以减少压缩功,另一方面制冷量增加。采用膨胀机的制热循环制热系数也增大,但仅是分母压缩功减小,制热量与节流阀循环相同。所以制热系数增大大量约为制冷系数增大量的 50%。

国内学者如谢英柏等^[9-11]以及国外学者 H. Ghazizade-Ahsaee 等^[12-14]均通过研究发现,在 CO₂ 跨临界循环中使用 CO₂ 膨胀机能够回收膨胀机所做的功,当 CO₂ 膨胀机效率大于 32%,带膨胀机跨临界 CO₂ 循环的系统优于带回热器跨临界 CO₂ 循环的系统性能。因此在系统中引入膨胀机是提高跨临界 CO₂ 循环效率的主要途径之一。

表 2 不同类型 CO₂ 膨胀机优缺点

Tab.2 Advantages and disadvantages of different types of CO₂ expanders

膨胀机类型	优点	缺点
活塞式膨胀机	适用于工质流量小的系统,泄漏损失较小,适用范围较广,在较宽的转速范围内运行流量小	进、排气阀流通面积很小,使进、排气阻力损失较大,整机较为笨重,在运行过程中摩擦损失与泄漏损失较大
滚动转子式膨胀机	耐高压、噪声小、运行平稳,加工制造方便	存在泄漏损失,效率低
摆动转子式膨胀机	滚环和摆杆一体,成为摆动转子,二者之间不存在密封和润滑问题,非常适合在 CO ₂ 跨临界循环高压差环境下工作	泄漏损失较大,滚环与气缸间的摩擦力大,摩擦损失增大
滑片式膨胀机	能够实现连续、稳定的膨胀过程,样机最佳容积效率可达 64%,消除了除叶面和轴承处以外的所有摩擦表面上的摩擦功率损失	滑片与滑片槽间的空隙较大,膨胀过程压力下降迅速,易产生过度膨胀,加工难度较大
涡旋式膨胀机	降低了膨胀机进、出口压差,从而降低膨胀机的压力损失,效率较高,无吸气阀、排气阀及余隙容积	动涡盘涡圈顶端的密封不严密,内部泄漏严重

2.1.1 CO₂ 活塞式膨胀机

CO₂ 自由活塞膨胀机概念是 1998 年由德国 Dresden 大学的 P. Heyl 等^[15]提出,通过观察研究空气分离系统中的自由活塞膨胀压缩机,发现可以在 CO₂ 双级压缩制冷系统中引入相同结构的自由活塞膨胀压缩机,并进行了相关的研制。1999 年, P. Heyl 等^[16]开发了第一代自由活塞膨胀机,如图 2 所示,虽然该膨胀压缩机解决了吸气阀与排气阀的问题,但吸排气活塞的位置却需要另外的控制确认以保证系统高效安全运行。2002 年, J. Nickl 等^[17]在此基础上开发了第二代自由活塞膨胀机,增加了摆杆齿轮使两个活塞的速度不同,通过数据发现第二代系统 COP 比第一代系统提高约 10%。2005 年, J. Nickl 等^[18]在第一代和第二代自由活塞膨胀机的基础上开发了第三代 CO₂ 自由活塞膨胀机,使损耗率降至膨胀机功率的 5%以下。

2 CO₂ 气液两相小型膨胀机研究现状

2.1 CO₂ 气液两相小型膨胀机的类型

通过上述介绍发现,CO₂ 膨胀机效率的高低直接影响系统制冷、制热效率的大小,因此对 CO₂ 膨胀机进行合理的设计优化至关重要。CO₂ 膨胀机主要分为容积型膨胀机和速度型膨胀机两类。不同类型 CO₂ 膨胀机的优缺点如表 2 所示,可以看出 CO₂ 活塞式膨胀机出现最早,作为第一代产品,其泄漏损失最大,效率较低,随着学者们的研究验证,CO₂ 膨胀机的效率得到大幅提高。

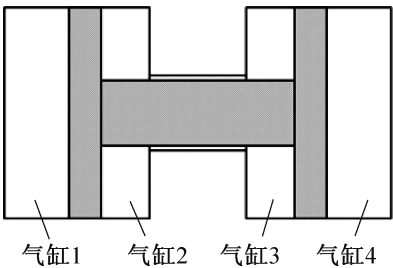


图 2 第一代自由活塞膨胀机

Fig.2 The first generation free piston expander unit

美国普渡大学的 J. S. Baek 等^[19-20]在跨临界 CO₂ 系统中将节流阀换成 CO₂ 活塞式膨胀机,靠系统中 CO₂ 膨胀机的输出功带动水泵运行。通过实验验证发现,带膨胀机跨临界 CO₂ 系统效率比带节流阀跨临界 CO₂ 系统制冷、制热效率高 10%,当 CO₂ 活塞式膨胀机的等熵效率为 10.79%,CO₂ 膨胀机的输出功仅为 36.53 W。西安交通大学学者也对 CO₂ 活

塞式膨胀机进行了研究。2007 年,Zhang B. 等^[21]设计了 CO₂ 双作用自由活塞膨胀机,如图 3 所示,发现最佳工作频率的范围是 10~17 Hz,可获得 62% 的等熵效率。

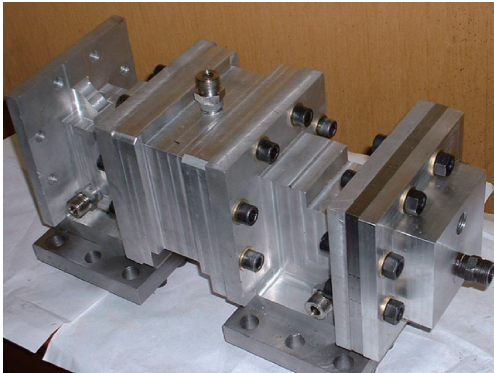


图 3 双作用自由活塞膨胀机
Fig.3 Double-acting free-piston expander

2012 年,P. Heyl 等^[22]对第三代 CO₂ 自由活塞膨胀-压缩机进行了改进,改为两级膨胀、一级压缩,实测结果表明该机构可使系统 COP 提高 9.9%。2014 年,M. Fukuta 等^[23]研究了一种 CO₂ 径向活塞式膨胀机,该膨胀机具有 4 个气缸和径向排列的活塞。研究发现,该膨胀机在较宽的转速范围内运行流量小,总效率达到 40%。

2016 年,G. Ferrara 等^[24]对以液压马达研制的 CO₂ 径向活塞往复式膨胀机进行了实验分析,膨胀机的最高等熵效率为 19%,并指出 CO₂ 膨胀机的等熵效率受机械损失尤其是摩擦损失的影响很大,若进一步改善泄漏和减少机械损失,CO₂ 膨胀机的等熵效率可以达到 41%。因此,通过考虑合理的机械效率约 65%,与简单节流阀的制冷系统相比,采用径向活塞往复式膨胀机的 COP 提高 7.4%,若合理地减少机械损失 COP 可提高 20.5%。

马一太等^[25]提出了 CO₂ 单缸滚动活塞膨胀机设计开发的依据,并对带膨胀机跨临界 CO₂ 循环系统进行了深入实验研究,发现当负荷越大时,CO₂ 膨胀机的转速越低,对系统的影响越大,同时 CO₂ 膨胀机的输出功随转速的变化存在最大值,当转速为 1 300 r/min 时,CO₂ 膨胀机输出功最大为 330 W。姜云涛等^[26]研制了新型 CO₂ 双缸滚动活塞膨胀机样机,并实验测试了该样机的性能,实验发现当该新型 CO₂ 膨胀机转速为 780~1 100 r/min 时,效率主要在 28%~33% 范围内,但由于实际加工精度的原因导致该效率低于设计期望值。管海清^[27]在对 CO₂ 往复式膨胀机的损失进行分析的基础上进行了热力学分析,发现在运行过程中摩擦损失与泄漏损失对效率的影响以

及它们各自所占的比例,并提出合理选择缝隙可使损失达到最小。

2.1.2 CO₂ 滚动转子式膨胀机

2002 年,魏东等^[28-30]对 CO₂ 转子式膨胀机的优越性进行了理论论证,并经过理论设计和实际样机(图 4)进行实验验证,证明了该 CO₂ 转子式膨胀机的优越性,得到该型膨胀机相比于活塞式膨胀机,运行状态平稳,适合在高压情况下运行,泄漏量较少,但膨胀机效率较低。2003 年,李敏霞^[31]在原有滑板滚动转子膨胀机的基础上进行改进,开发了新一代滑板滚动转子 CO₂ 膨胀机(图 5)。对膨胀机进行了优化改进,并对零件表面进行了精细加工,达到更好的贴合效果,使配合间隙更小;将滑板厚度增大等措施减少了不可逆损失,数据表明,相比原有样机,新型样机理论效率得到提高,等熵效率在 35%~47% 之间。



图 4 CO₂ 转子式膨胀机样机
Fig.4 CO₂ rotor expander prototype

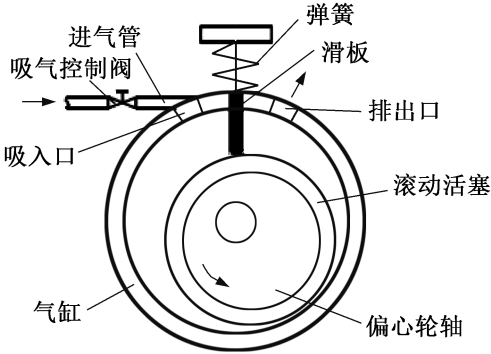


图 5 CO₂ 滚动转子式膨胀机
Fig.5 CO₂ rolling rotor expander

2007 年,曾宪阳^[32]将滚动转子式 CO₂ 膨胀机应用于跨临界 CO₂ 水-水热泵系统实验台,对该转子膨胀机的动态压力进行了实验测量,并研究了膨胀机在不同转速下的运行特性和不同转速对膨胀机内部可能产生的 3 种膨胀过程的影响。CO₂ 膨胀机在不同转速下的膨胀过程分为过膨胀、正常膨胀和欠膨胀。实验得到当膨胀机在设计转速附近运行时,膨胀机效

率处于最佳值,因此该系统的回收功、性能系数能够达到最大值。

姜云涛^[33]在 2009 年成功研发出两缸滚动转子 CO₂ 膨胀机样机,并在跨临界 CO₂ 水-水热泵实验系统上进行了实验,实验结果显示其效率约为 28.33%。对 CO₂ 膨胀机结构进行优化和采用功率更大的压缩机进一步降低了泄漏损失,提高了膨胀机等熵效率。2011 年,张美兰等^[34-35]在姜云涛^[33]研究的基础上,设计开发了第四代 CO₂ 转子式膨胀机,在原基础上把含有密封圈的中间隔板做成一个整体;通过对转子端面进行金属镀层有效减小了摩擦损失和泄漏损失;并设立单独的供油系统对膨胀机进行润滑。在跨临界 CO₂ 水-水热泵实验台上对改进后的膨胀机性能进行了实验测试。在实验最优工况下,CO₂ 膨胀机回收功率最高达 200 W,效率最高达 42.3%。2015 年,Hu Jing 等^[36]对张美兰等^[34-35]改进的 CO₂ 双滚动式转子式膨胀机在 CO₂ 水-水热泵系统中进行了测试。测试结果表明,修订后的 CO₂ 膨胀机的效率得到提高,在 867 r/min 的转速下,膨胀机最大效率为 77%,最大恢复膨胀功率为 242 W,同时发现膨胀机效率对入口参数十分敏感。

Zha Shitong 等^[37]研究了滚动转子式 CO₂ 膨胀机的膨胀过程,并在实验工况下对影响效率的两种损失进行测量,发现泄漏损失与摩擦损失之和几乎占膨胀机理想输出功的 50%。Li Minxia 等^[38]对 CO₂ 膨胀机的结构进行改进得到一台实验样机,其主要特点是密封柱的凹圆面与转子外圆重合,这样能够减少泄漏。样机实验表明,CO₂ 膨胀机测量得到的等熵效率高达 58.7%,在测试条件下性能系数至少提高 10%。

2009 年,安青松^[39]研究了 CO₂ 滚动转子膨胀机内部相变过程,并根据气泡核化生长的驱动力将膨胀过程分为 3 个阶段,认为工质在 CO₂ 膨胀机内部进行相变会加快膨胀过程,同时发现气化核心的数量与大小也会影响 CO₂ 膨胀机效率的高低。2019 年,李昱翰^[40]研究了滚动转子式双缸 CO₂ 膨胀机,解析法分析了 CO₂ 膨胀机内外泄漏的影响因素,发现 CO₂ 膨胀机吸气阶段产生的工质外泄漏量占总泄漏量的 78.4%,当工质中存在润滑油时,膨胀机的泄漏量会有大幅降低,说明润滑油有助于提升 CO₂ 膨胀机效率。2021 年,李沛昀等^[41]对三角转子膨胀机应用于跨临界 CO₂ 制冷循环进行了数值模拟和分析,得到在跨临界 CO₂ 制冷系统中引入三角转子 CO₂ 膨胀机替换节流阀可有效提高循环制冷量,制冷系数提高 23.7%。

2.1.3 CO₂ 摆动转子式膨胀机

自 2006 年起,天津大学李敏霞等^[42]就对 CO₂ 摆动转子式膨胀机进行研究,发现当处于高压差的工作环境下,CO₂ 摆动转子膨胀机运行状况较为平稳。并且通过实验发现摆动转子膨胀机的效率在 33%~44%。图 6 所示为 CO₂ 摆动转子式膨胀机示意图。2008 年,李敏霞等^[43]对 CO₂ 摆动转子膨胀机的转子进行了受力计算,结果表明,由于转子的运动形式的不同,致使 CO₂ 摆动转子膨胀机的摩擦损失大于滚动转子的摩擦损失,效率较低。2006 年, Guan Haiqing 等^[44]开发设计了带有偏心轮轴进气控制阀的 CO₂ 摆动转子膨胀机样机,由发电机发电负荷控制膨胀机的转速以得到所需电量,与此同时,样机效率随转速变化可以达到 28%~44%。M. Matsui 等^[45]开发了一台等熵效率为 60%的跨临界 CO₂ 双转子膨胀机样机,在实验中将 CO₂ 膨胀机与涡旋压缩机进行同轴连接,对等熵效率和系统 COP 的提升情况进行了验证。

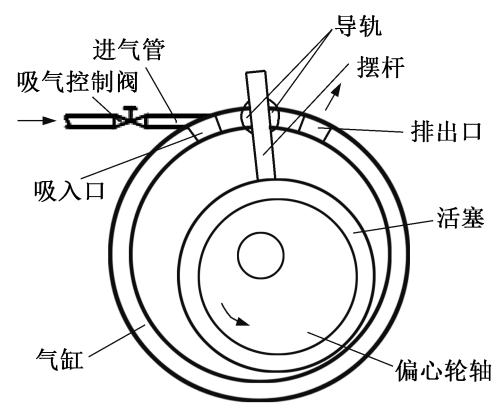


图 6 CO₂ 摆动转子式膨胀机
Fig.6 CO₂ swinging rotor expander

2.1.4 CO₂ 滑片式膨胀机

2001 年, M. Fukuta 等^[46]对 CO₂ 滑片式膨胀机性能效率进行了模拟和实验,发现泄漏对 CO₂ 膨胀机的性能具有重要影响。在实验工况下,CO₂ 膨胀机的最佳容积效率可达 64%,总效率可达 43%。但当转速降至 500 r/min 时,两个值均会降至约 20%。M. Fukuta 等^[47]对 CO₂ 膨胀机进行了更深入的研究,在之前研究^[46]基础上对由于滑片引起的泄漏损失进行了优化,研制了新一代样机,发现转速对 CO₂ 膨胀机的效率具有很大影响,当处于最优转速时膨胀机效率为 60%。

2008 年,孙少毅等^[48]设计开发了一种 CO₂ 滑片膨胀机,工作原理如图 7 所示,并对 CO₂ 膨胀机内部

泄漏、摩擦和膨胀机效率等问题进行了研究,研究表明,CO₂ 膨胀机能够在实验工况下稳定运行,CO₂ 膨胀机绝热效率为 20%,但在 CO₂ 膨胀机中由于压降及较大的泄漏,会导致 CO₂ 膨胀机发生过膨胀,因此通过对 CO₂ 膨胀机结构进行改进,使泄漏损失大幅减少。

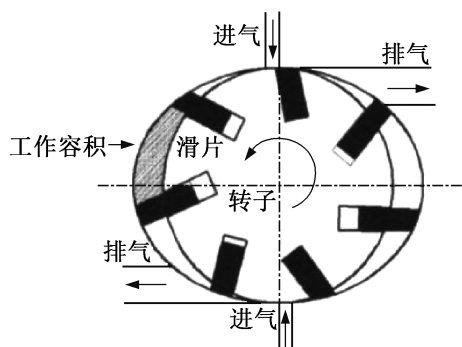


图 7 CO₂ 滑片膨胀机的工作原理

Fig.7 Working principle of CO₂ sliding vane expander

2009 年, A. Subianto 等^[49]研究了旋转叶片式 CO₂ 膨胀机,指出虽然设计与滚动式活塞机的设计类似,但其设计消除了除叶面和轴承以外的所有摩擦表面上的摩擦功率损失。同时提出了一个数学模型,从几何模型、热力学模型、运动学模型和动力学模型来分析 CO₂ 膨胀机的工作特性。理论分析结果表明,轴承处的摩擦损失最大,机械效率可达 94.2%。

2009 年, Yang B. 等^[50-51]在滑片式 CO₂ 膨胀机的基础上设计开发了新型旋转叶片式 CO₂ 膨胀机,研究主要集中于 CO₂ 膨胀机内部泄漏与摩擦,分析了加入弹簧和叶片后的膨胀机热力过程。弹簧和叶片与气缸壁之间的紧密接触显著改善了热力学过程,CO₂ 膨胀机表现出合理的膨胀过程。同时通过在叶片槽内放置弹簧,并在密封弧处将密封叶片布置在气缸内,容积效率由 17% 提高至 30%,从而实现系统制冷、制热效率的提高。在测试条件下,最大性能系数比基础节流循环高 14.2%。

2010 年, A. Subianto 等^[52]对旋转叶片 CO₂ 膨胀机进行了设计与改进,发现当叶片附着在转子上,转子也用作驱动元件,设计较为合理,并发现其具有较高的机械效率和较理想的功率变化。1985 年, O. Badr 等^[53]提出 CO₂ 弹簧式膨胀机,在旋转叶片式 CO₂ 膨胀机的叶片下方的每个叶片槽中放入两个弹簧,以使其快速回弹到气缸壁并保持紧密接触,从而显著改善叶片尖端和气缸壁之间的密封。但 CO₂ 弹簧式膨胀机有两个缺点:1) 槽中的弹簧被快速且频繁地压缩和回弹,容易导致弹簧断裂从而使膨胀器死

锁;2) 由于弹簧力在工作循环中一直作用在气缸壁上会引起的过大的摩擦力。2011 年, 西安交通大学的 Jia Xiaohan 等^[54]改进了 CO₂ 弹簧式膨胀机和 CO₂ 旋转叶片式膨胀机,将高压气体引入 CO₂ 旋转叶片式膨胀机,用于解决泄漏和摩擦等问题。通过测试发现在叶片槽内引入高压气体会导致膨胀机等熵效率大幅提高,相比于原始 CO₂ 膨胀机的 15% 和带弹簧 CO₂ 膨胀机的 23%,分别提高了 30% 和 22%。此外,发现当 CO₂ 膨胀机中引入高压气体时,系统 COP 显著提高,最大可达 2.38,相比带节流阀的系统,最大 COP 增幅可达 27.2%。

2.1.5 CO₂ 涡旋式膨胀机

CO₂ 涡旋式膨胀机主要靠动、静两个涡旋盘进行相对运动时,形成封闭空间,导致内部气体体积膨胀,并随着涡旋盘运动向径向移动,具体结构如图 8 所示^[55]。2001 年, M. Preissner^[56]设计开发了两台 CO₂ 涡旋膨胀机样机,并对两台样机进行了关于动涡盘顶部密封泄漏分析,发现由于动涡盘顶端存在密封不严问题,导致样机发生泄漏,经过加装密封槽,CO₂ 膨胀机泄漏问题得到解决,效率提升。2003 年, J. Huff 等^[57]对由涡旋压缩机改制而成的 CO₂ 涡旋膨胀机进行了研究,发现 CO₂ 膨胀机的最优转速为 1 800 r/min 时,CO₂ 膨胀机等熵效率达到最大。2006 年, M. Fukuta 等^[58]设计了一个 CO₂ 膨胀机样机,其结构由热泵热水器的涡旋压缩机部件改装而来,并进行了关于确定膨胀机最优容积效率以及最佳效率的实验。结果表明,样机的最优容积效率可达 80%,CO₂ 膨胀机的最佳效率可达 55%。



图 8 涡旋膨胀机

Fig.8 Scroll expander

2008 年, H. Kohsokabe 等^[59]开发了一款 CO₂ 涡旋膨胀机,并对 CO₂ 涡旋膨胀机的等熵效率进行了深入研究,实验测出该款膨胀机的最大等熵效率为 83%,最大转速范围为 2 200~3 400 r/min。2015 年, 张振迎^[60]发现当膨胀机转轮内部 CO₂ 为气液两相时,机组制冷量会得到提高,同时 CO₂ 涡轮膨胀机效率也得到提高,在该研究基础上设计开发了两相 CO₂ 涡轮膨胀机及机械测功装置,经过实验证明,当膨胀

机转速达到 2 000 r/min 时,膨胀机的回收功与效率达到最佳值,同时也发现存在最优速度比区间 0.08~0.12,由此可知,CO₂ 膨胀机效率主要受转速与速度的影响。2017 年,王吉岱等^[61]对 CO₂ 涡旋膨胀机进行动态分析,由工程热力学基础理论推导得到 CO₂ 涡旋膨胀机的有效热效率表达式,由实验得到 CO₂ 膨胀机主轴存在最佳速度,可使效率达到最大。

D. Westphalen 等^[62]在 CO₂ 空调循环下引入了 CO₂ 涡旋式膨胀机,通过理论计算与分析,得到当系统运行期间膨胀机效率为 60% 时,系统的输入功率能够减少 20%,并提出将膨胀机与压缩机一体化的想法,实现 CO₂ 膨胀机做的功能够提供给压缩机,抵消压缩机所消耗的功,从而达到提高系统效能的目的。

2.2 CO₂ 膨胀机目前存在的问题

2.2.1 泄漏问题

在跨临界 CO₂ 系统中,从气冷器出来的 CO₂ 压力很大,节流过程存在约 4~5 MPa 的压差,使节流过程中损失大于普通制冷剂循环,同时也因进入蒸发器的 CO₂ 存在液相,其黏性更小密度更大,当 CO₂ 膨胀机与普通工质膨胀机处于同一间隙下,CO₂ 膨胀机的泄漏量更大,泄漏问题更严重^[63]。因此,CO₂ 膨胀机的外泄漏问题需要受到重视和改进。很多研究者为了降低泄漏采用各种方法,如改进 CO₂ 膨胀机中的转子类型、减小接触间隙及在涡旋盘上加装密封槽等。刘圣春等^[64]研究了润滑油泄漏对 CO₂ 膨胀机效率的影响,润滑油的存在使 CO₂ 转子膨胀机中的泄漏通道表面形成油膜,泄漏量可减少 40%。

2.2.2 摩擦问题

摩擦问题是影响膨胀机寿命长短的重要因素,对 CO₂ 膨胀机而言,由于 CO₂ 在膨胀机中的泄漏量比普通膨胀机更大,要求膨胀机运转部件之间保持更小的间隙,但与此同时会附带较大的摩擦损失,因此 CO₂ 膨胀机运转部件之间保持合适的间隙至关重要^[65]。对膨胀机零件加工应更加精细,保证结构参数达到最优工况,使摩擦损失与泄漏损失之和最小^[66],从而达到提高 CO₂ 膨胀机效率的目的。因此,合理的间隙即使泄漏和摩擦损失之和达到最小。有研究者为了降低接触面的摩擦而采用滚动轴承。

2.2.3 回收功利用

为了能够回收利用膨胀功,更多的研究者将 CO₂ 膨胀机与压缩机同轴连接,或将膨胀腔与压缩腔交替工作,以使 CO₂ 膨胀机做的功更好的传给压缩机,使膨胀功得到充分利用,从而提高系统循环效率。

A. Subiantoro 等^[67-69]将 CO₂ 膨胀机与辅压缩机同轴联动布置,研究运行时各参数对系统的影响,系统 COP 随蒸发温度的升高而升高,同时驱动压缩机需要的部分功可以由膨胀机提供,能够较大程度的回收膨胀功,达到提高经济价值的目的。但由于 CO₂ 膨胀机与压缩机同轴连接时两者之间存在很大的温差,易发生热断路现象,不仅会减少制冷量,还存在安全问题。

2.2.4 膨胀过程的研究

CO₂ 在膨胀机中的膨胀过程存在相变滞后现象,同时其中还会进入其他气体,既影响膨胀过程,也影响膨胀比的设计。安青松^[39]、Tian Hua 等^[70]研究了不凝性气体的存在对带 CO₂ 膨胀机热泵循环性能的影响,证明了不凝性气体可以对相变过程起到催化促进作用,从而促进膨胀过程,使膨胀机性能得到提升。实验证明 CO₂ 膨胀机效率的提升幅度与加入的不凝性气体的比例有关,不凝性气体的比例越大,效率的提升幅度越大。

2.2.5 CO₂ 膨胀机的调节问题

CO₂ 膨胀机是在标准工况下设计的机械装置,当非设计工况时,膨胀存在过膨胀和欠膨胀情况,因此有必要重视调节合适工况以保证 CO₂ 膨胀机高效运行。王派等^[71]提出了膨胀比可以自由调节的 CO₂ 膨胀压缩机及其热泵系统,可在不同运行工况下调节压缩比、膨胀比,达到不同工况下的稳定运行,有效回收膨胀机所做的功。

3 结论

本文详细介绍了 CO₂ 膨胀机在跨临界 CO₂ 循环中的优越性以及不同类型 CO₂ 膨胀机的研究现状,并对 CO₂ 膨胀机研究过程中存在的问题进行了分析讨论,为 CO₂ 膨胀机的优化提供一些建议,得到如下结论:

1) 带膨胀机跨临界 CO₂ 循环的效率在最优工况下,相比 R134a 循环,制冷、制热性能分别提高 6.9%、4.6%,在跨临界 CO₂ 循环中将节流阀换成膨胀机可有效提高系统的制冷效率。发现若膨胀机的绝热效率大于 32%,则带膨胀机的系统性能优于带回热器循环的系统性能。

2) 不同 CO₂ 膨胀机由于结构不同导致效率、泄漏和摩擦损失不同,活塞式、转子式等 CO₂ 膨胀机结构简单,但泄漏损失较大;滑片式、旋转叶片式、涡旋式等 CO₂ 膨胀机效率得到大幅提高,但由于结构较为复杂,制造难度大,导致生产成本较高。

3) CO₂ 膨胀机目前仍存在很多问题,本文提出了

一些问题的解决办法,进行合理的设计使泄漏和摩擦损失之和达到最小,从而提高 CO₂ 膨胀机效率;可以将 CO₂ 膨胀机与压缩机同轴连接,使 CO₂ 膨胀机做的功得到最大化利用;当膨胀机工作时其他气体的存在会对 CO₂ 相变过程起到催化促进作用,促进膨胀过程。

4) 目前 CO₂ 膨胀机在工程中的应用较少。因此未来发展要以实验和理论相结合,进一步研究 CO₂ 膨胀机效率提升、关键零部件技术开发等问题。随着 CO₂ 膨胀机效率的进一步提高,CO₂ 跨临界循环效率也会得到提高,应用领域会更加广泛。

本文受中国制冷学会课题项目 (CAR20190701) 资助。
(The project was supported by the Project of Chinese Association of Refrigeration (No. CAR20190701).)

参考文献

- [1] National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate Change: Global Temperature [EB/OL]. (2015-07-01) [2021-11-22]. <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.
- [2] 李小燕, 代宝民, 滑雪, 等. 基于引射器的双温蒸发 CO₂ 热泵系统性能分析[J]. 制冷学报, 2022, 43(2): 54-61. (LI Xiaoyan, DAI Baomin, HUA Xue, et al. Performance analysis of CO₂ dual-temperature evaporation heat pump system with an ejector[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(2): 54-61.)
- [3] 宋昱龙, 王海丹, 殷翔, 等. 跨临界 CO₂ 蒸汽压缩式制冷与热泵技术综述[J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 1-24. (SONG Yulong, WANG Haidan, YIN Xiang, et al. Review of transcritical CO₂ vapor compression technology in refrigeration and heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(2): 1-24.)
- [4] 代宝民, 张鹏, 刘圣春, 等. 采用非共沸工质机械过冷跨临界 CO₂ 热泵供暖性能分析[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 51-58. (DAI Baomin, ZHANG Peng, LIU Shengchun, et al. Performance of transcritical CO₂ air-source heat pump heating system with mechanical subcooling using zeotropic refrigerant[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(6): 51-58.)
- [5] 曾钰培, 罗二仓, 王晓涛, 等. 新型 CO₂ 超音速两相膨胀制冷循环的理论研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 8-14. (ZENG Yupei, LUO Ercang, WANG Xiaotao, et al. Theoretical study of a novel CO₂ supersonic two-phase expansion refrigeration cycle[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(6): 8-14.)
- [6] LORENTZEN G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant [J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17(5): 292-301.
- [7] 代宝民, 剧成成, 梁梦桃, 等. 机械过冷跨临界 CO₂ 热泵供暖系统性能分析[J]. 制冷学报, 2019, 40(4): 29-36. (DAI Baomin, JU Chengcheng, LIANG Mengtao, et al. Performance analysis of a transcritical CO₂ heat pump with mechanical subcooling for space heating[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(4): 29-36.)
- [8] 齐海峰, 代宝民, 刘圣春, 等. CO₂ 空气源热泵供暖系统性能分析[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 37-44. (QI Haifeng, DAI Baomin, LIU Shengchun, et al. Performance analysis of CO₂ air-source heat pump heating system [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 37-44.)
- [9] 谢英柏, 孙刚磊, 张雪东, 等. CO₂ 跨临界双级压缩带低压膨胀机制冷循环性能分析[J]. 流体机械, 2009, 37(8): 71-74, 79. (XIE Yingbai, SUN Ganglei, ZHANG Xuedong, et al. Research on the performances of CO₂ trans-critical two stage compression refrigeration cycle with a low pressure expander[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8): 71-74, 79.)
- [10] 郭兴龙, 宋新南, 胡自成. 采用膨胀机和喷射器的跨临界二氧化碳热泵热水器热力循环比较研究[C]//2011 中国制冷学会学术年会. 南京: 中国制冷学会, 2011. (GUO Xinglong, SONG Xinnan, HU Zicheng. A comparative study on the thermodynamic cycle of a transcritical carbon dioxide heat pump water heater using expanders and ejectors [C]//2011 Academic Annual Conference of Chinese Association of Refrigeration. Nanjing: Chinese Association of Refrigeration, 2011).
- [11] 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. (SUN Zhili, MA Yitai. Thermodynamic analysis of one kind of single-stage with expander and four kinds of two-stage transcritical carbon dioxide refrigeration cycle[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 53-59.)
- [12] GHAZIZADE-AHSAEE H, AMERI M, ASKARI I B. A comparative exergo-economic analysis of four configurations of carbon dioxide direct-expansion geothermal heat pump [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114347.
- [13] ZHANG Zhenying, TIAN Lili, CHEN Yanhua, et al. Effect of an internal heat exchanger on performance of the transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with an expander[J]. Entropy, 2014, 16(11): 5919-5934.
- [14] SHARIATZADEH O J, ABOLHASSANI S S, RAHMANI M, 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.
- [15] HEYL P, PREUSSER S, KRAUS W E. The CO₂ heat

- pump project at the TU Dresden[J]. Iea Heat Pump Centre Sittard, 1998: 217-241.
- [16] HEYL P, QUACK H. Free piston expander-compressor for CO₂-design, applications and results[C]//Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration. Sydney, 1999.
- [17] NICKL J, WILL G, KRAUS W, et al. Design considerations for a second generation CO₂ - expander [C]//The Fifth IIR-Gustav Lorentzen conference on natural working fluids. Guangzhou, 2002.
- [18] NICKL J, WILL G, QUACK H, et al. Integration of a three-stage expander into a CO₂ refrigeration system[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(8): 1219-1224.
- [19] BAEK J S, GROLL E A, LAWLESS P B. Piston-cylinder work producing expansion device in a transcritical carbon dioxide cycle. Part I: Experimental investigation[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(2): 141-151.
- [20] BAEK J S, GROLL E A, LAWLESS P B. Piston-cylinder work producing expansion device in a transcritical carbon dioxide cycle. Part II: Theoretical model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(2): 152-164.
- [21] ZHANG B, PENG X, HE Z, et al. Development of a double acting free piston expander for power recovery in transcritical CO₂ cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(8/9): 1629-1636.
- [22] HEYL P, KRAUS W E, QUACK H. Expander-compressor for a more efficient use of CO₂ as refrigerant[J]. Science Et Technique Du Froid, 1998: 240-248.
- [23] FUKUTA M, ANZAI F, MOTOZAWA M, et al. Performance of radial piston type reciprocating expander for CO₂ refrigeration cycle[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 42: 48-56.
- [24] FERRARA G, FERRARI L, FIASCHI D, et al. Energy recovery by means of a radial piston expander in a CO₂ refrigeration system[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 72: 147-155.
- [25] 马一太, 李敏霞, 李丽新, 等. CO₂ 跨临界膨胀机的开发与实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(4): 5-9. (MA Yitai, LI Minxia, LI Lixin, et al. Development and experimental research on CO₂ transcritical expander[J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(4): 5-9.)
- [26] 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. (JIANG Yuntao, MA Yitai, LI Minxia, et al. Development of newly-designed expander used in CO₂ transcritical system[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(5): 1-4.)
- [27] 管海清. CO₂ 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. Research on expansion theory of CO₂ transcritical cycle and focus on rotary expander-compressor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.)
- [28] 魏东. 二氧化碳跨临界循环换热与膨胀机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002. (WEI Dong. The study of heat transfer and expansion mechanism for carbon dioxide transcritical cycle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.)
- [29] 王景刚, 马一太, 魏东, 等. CO₂ 跨临界双级压缩带膨胀机制冷循环研究[J]. 制冷学报, 2001, 22(2): 6-11. (WANG Jinggang, MA Yitai, WEI Dong, et al. Study of CO₂ transcritical two stage compression with turbine cycle[J]. Journal of Refrigeration, 2001, 22(2): 6-11.)
- [30] 马一太, 魏东, 王景刚, 等. 小型制冷装置二氧化碳膨胀机的研究[J]. 制冷学报, 2002, 23(3): 55. (MA Yitai, WEI Dong, WANG Jinggang, et al. The study of carbon dioxide expander applicable to small refrigeration units[J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(3): 55.)
- [31] 李敏霞. 二氧化碳跨临界循环转子式膨胀机的分析与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2003. (LI Minxia. Analysis and experimental study on rotary expanders in carbon dioxide transcritical cycle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.)
- [32] 曾宪阳. CO₂ 跨临界循环滚动活塞膨胀机和涡旋压缩机的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (ZENG Xianyang. Research on rolling piston expander and scroll compressor in CO₂ transcritical cycle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.)
- [33] 姜云涛. CO₂ 跨临界水—水热泵及两缸滚动活塞膨胀机的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (JIANG Yuntao. Research on CO₂ transcritical water-water heat pump and two-rolling piston expander[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.)
- [34] 张美兰, 马一太, 李敏霞. CO₂ 双缸滚动活塞膨胀机的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(3): 5-8. (ZHANG Meilan, MA Yitai, LI Minxia. Experiment research of CO₂ two-cylinder rolling piston expander[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(3): 5-8.)
- [35] 张美兰. CO₂ 双缸滚动活塞膨胀机的模拟计算及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (ZHANG Meilan. Simulation and experimental research on CO₂ two-cylinder rolling piston expander[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [36] HU Jing, LI Minxia, ZHAO Li, et al. Improvement and experimental research of CO₂ two-rolling piston expander[J]. Energy, 2015, 93: 2199-2207.
- [37] ZHA Shitong, MA Yitai. The development of CO₂ expander technology in CO₂ transcritical cycles[J]. International

- Journal of Global Energy Issues, 2003, 20(3): 233.
- [38] LI Minxia, MA Yitai, TIAN Hua. A rolling piston-type two-phase expander in the transcritical CO₂ cycle [J]. HVAC&R Research, 2009, 15(4): 729-741.
- [39] 安青松. CO₂ 滚动转子膨胀机内部相变膨胀过程机理分析与可视化试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (AN Qingsong. Mechanism analysis and visual experimental research on expanding and phase change process in CO₂ rolling piston expander[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.)
- [40] 李昱翰. 基于 LBM 的 CO₂ 膨胀机泄漏问题的模拟及优化[D]. 天津: 天津大学, 2019. (LI Yuhan. Simulations and optimizations for leakages in CO₂ expanders based on LBM[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.)
- [41] 李沛昀, 李杨, 王文彬, 等. 三角转子膨胀机在跨临界 CO₂ 制冷循环中的应用分析[J]. 化工学报, 2021, 72(增刊1): 161-169. (LI Peiyun, LI Yang, WANG Wenbin, et al. Application analysis of wankel expander in CO₂ trans-critical refrigeration cycle[J]. CIESC Journal, 2021, 72(Suppl. 1): 161-169.)
- [42] 李敏霞, 马一太, 李丽新, 等. 二氧化碳摆动转子膨胀机的受力分析[J]. 天津大学学报, 2006, 39(1): 96-99. (LI Minxia, MA Yitai, LI Lixin, et al. Force analysis of transcritical carbon dioxide swing expander[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(1): 96-99.)
- [43] 李敏霞, 马一太, 安青松, 等. CO₂ 跨临界循环水源热泵的封闭式摆动转子膨胀机[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 160-164. (LI Minxia, MA Yitai, AN Qingsong, et al. Hermetic swing expander in transcritical carbon dioxide cycle water source heat pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 160-164.)
- [44] GUAN Haiqing, MA Yitai, LI Minxia. Some design features of CO₂ swing piston expander[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(2/3): 237-243.
- [45] MATSUI M, HASEGAWA H, OGATA T, et al. Development of the high-efficiency technology of a CO₂ two-stage rotary expander[J]. HVAC&R Research, 2009, 15(4): 743-758.
- [46] FUKUTA M, RADERMACHER R, LINDSAY D, et al. Performance of vane compressor for CO₂ cycle [J]. Science Et Technique Du Froid, 2001: 350-357.
- [47] FUKUTA M, YANAGISAWA T, HIGASHIYAMA M, et al. Performance of vane-type CO₂ expander and characteristics of transcritical expansion process [J]. HVAC&R Research, 2009, 15(4): 711-727.
- [48] 孙少毅, 杨炳春, 彭学院. 空气系统中滑片膨胀机热力性能的试验研究[J]. 流体机械, 2008, 36(5): 1-5. (SUN Shaoyi, YANG Bingchun, PENG Xueyuan. Experimental investigation on the thermodynamic performance of a rotary vane expander in the air system[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(5): 1-5.)
- [49] SUBIANTORO A, TIOW O K. Introduction of the revolving vane expander [J]. HVAC&R Research, 2009, 15(4): 801-816.
- [50] YANG B, PENG X, SUN S, et al. Study of a rotary vane expander for the transcritical CO₂ cycle—Part I: Experimental investigation [J]. HVAC&R Research, 2009, 15(4): 673-688.
- [51] JIA Xiaohan, ZHANG Bo, YANG Bingchun, et al. Study of a rotary vane expander for the transcritical CO₂ cycle—Part II: Theoretical modeling [J]. HVAC&R Research, 2009, 15(4): 689-709.
- [52] SUBIANTORO A, OOI K T. Design analysis of the novel revolving vane expander in a transcritical carbon dioxide refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(4): 675-685.
- [53] BADR O, PROBERT S D, O'CALLAGHAN P. Multi-vane expanders: Vane dynamics and friction losses [J]. Applied Energy, 1985, 20(4): 253-285.
- [54] JIA Xiaohan, ZHANG Bo, PU Lei, et al. Improved rotary vane expander for trans-critical CO₂ cycle by introducing high-pressure gas into the vane slots [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(3): 732-741.
- [55] EMHARDT S, TIAN G, CHEW J. A review of scroll expander geometries and their performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 1020-1034.
- [56] PREISSNER M. Carbon dioxide vapor compression cycle improvements with focus on scroll expanders [D]. College Park: University of Maryland, 2001.
- [57] HUFF H J, RADERMACHER R, PREISSNER M. Experimental investigation of a scroll expander in a carbon dioxide air-conditioning system [C]//Proceedings of the 21th International Congress of refrigeration. Washington, 2003.
- [58] FUKUTA M, YANAGISAWA T, KOSUDA O, et al. Performance of scroll expander for CO₂ refrigeration cycle [C]//International Compressor Engineering Conference at Purdue. West Lafayette, USA, 2006.
- [59] KOHSOKABE H, KOYAMA M, TOJO K, et al. Performance characteristics of scroll expander for CO₂ refrigeration cycles [C]//International Compressor Engineering Conference at Purdue University. West Lafayette, USA, 2008.
- [60] 张振迎. 逆循环中能量回收涡轮膨胀机的理论和试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (ZHANG Zhenying. Theoretical and experimental research on energy recovery turbine in reverse cycle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [61] 王吉岱, 唐小庆, 魏军英, 等. 涡旋式膨胀机效率的研究

- 究[J]. 机床与液压, 2017, 45(6): 72–77. (WANG Jidai, TANG Xiaoqing, WEI Junying, et al. Study on efficiency of scroll expander[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(6): 72–77.)
- [62] WESTPHALEN D, DIECKMANN J. Scroll expander for carbon dioxide air conditioning cycles[D]. West Lafayette, USA: Purdue University, 2004.
- [63] ZHANG Zhenying, MA Yitai, LI Minxia, et al. Recent advances of energy recovery expanders in the transcritical CO₂ refrigeration cycle[J]. HVAC&R Research, 2013, 19(4): 376–384.
- [64] 刘圣春, 马一太, 刘秋菊, 等. 含润滑油 CO₂ 超临界流体平板泄漏的理论及实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 9–13. (LIU Shengchun, MA Yitai, LIU Qiuju, et al. Theoretical and experimental study on plane-plate leakage of CO₂ supercritical fluid with lubricant oil[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 9–13.)
- [65] ZHANG Zhenying, LI Minxia, MA Yitai, et al. Experimental investigation on a turbo expander substituted for throttle valve in the subcritical refrigeration system[J]. Energy, 2015, 79: 195–202.
- [66] TIAN Hua, MA Yitai, LI Minxia, et al. Study on expansion power recovery in CO₂ trans-critical cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2516–2522.
- [67] SUBIANTORO A, OOI K T. Study of torque matching of revolving vane compressor and expander[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2015, 90(1): 012037.
- [68] 陈江水, 吴永明, 谢海辉, 等. 二氧化碳跨临界带膨胀机制冷循环及制热循环[J]. 化学工程与装备, 2012(12): 3–7. (CHEN Jiangshui, WU Yongming, XIE Haihui, et al. Carbon dioxide transcritical zone expander refrigeration cycle and heating cycle[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012(12): 3–7.)
- [69] 王伟. CO₂ 双缸滚动活塞膨胀机的结构改进和实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. (WANG Wei. Structural improvement and experimental study on CO₂ double rolling piston expander[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.)
- [70] TIAN Hua, MA Yitai, LI Minxia, et al. Influence of a non-condensable gas on the performance of a piston expander for use in carbon dioxide trans-critical heat pumps[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(11/12): 1943–1949.
- [71] 王派, 马一太, 于宜禾, 等. 一种无电机可变膨胀比涡旋式膨胀压缩机及其热泵系统: 211623715U[P]. 2020–10–02. (WANG Pai, MA Yitai, YU Yihe, et al. A motorless variable expansion ratio scroll expansion compressor and its heat pump system: 211623715U[P]. 2020–10–02.)

通信作者简介

李敏霞, 女, 教授, 天津大学机械工程学院, 13012230877, E-mail: tjmxli@tju.edu.cn。研究方向: 制冷与热泵节能技术。

About the corresponding author

Li Minxia, female, professor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, +86 13012230877, E-mail: tjmxli@tju.edu.cn. Research fields: energy-saving technology of refrigeration and heat pump.