

涡旋膨胀机研究进展及展望

杨旭, 胡昊宇, 曹锋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 随着“双碳”目标的提出, 涡旋膨胀机作为回收低品位能量的机械装置备受关注。首先, 对近年来涡旋膨胀机的理论研究成果进行了综述, 主要包括型线理论、热动力学和计算流体力学(CFD)仿真。然后, 对涡旋膨胀机在有机朗肯循环(ORC)中的应用进行了总结, 梳理了涡旋膨胀机在跨临界 CO₂ 制冷循环中的应用研究成果。最后, 对涡旋膨胀机未来的研究方向进行了展望。结果表明: 变壁厚涡旋膨胀机因其可以在不增加泄漏线长度的情况下增加内容积比, 因此将成为未来型线优化的主要方向; CFD 仿真已成为重要的研究工具; 润滑油是影响涡旋膨胀机性能的关键因素, 提高润滑油的黏度有利于提升效率, 而过量的润滑油则会使其性能下降; 工作压力是影响涡旋膨胀机性能的最主要的因素, 过膨胀、欠膨胀以及泄漏现象都会使其性能下降。此外, 涡旋膨胀-压缩一体机集成了膨胀机和压缩机两个功能单元于一个机壳中, 显著简化了系统结构并提高了能量回收效率, 是提升新能源车用 CO₂ 热泵空调系统性能的有效途径。基于当前的研究成果和行业需求, 提出涡旋膨胀机未来应继续深入研究和优化型线设计、减少泄漏、优化工作压力等, 以满足日益增长的能量回收和环境保护需求。

关键词: 涡旋膨胀机; “双碳”目标; 有机朗肯循环; 涡轮压缩-膨胀一体机

中图分类号: TK11; TB653 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202403001 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0001-14

A Review of Research Progress and Prospect of Scroll Expander

YANG Xu, HU Haoyu, CAO Feng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the proposal of the “carbon peaking and carbon neutrality” target, the scroll expander has garnered attention as a mechanical device for the recovery of low-grade energy. An overview of the theoretical research achievements of scroll expanders in recent years are provided, mainly including profile theory, thermodynamics, and computational fluid dynamics (CFD) simulation. Subsequently, the application of scroll expanders in organic Rankine cycles (ORC) is summarized. The application research results of scroll expanders in transcritical CO₂ refrigeration cycles are collated. Lastly, the future research directions for scroll expanders are projected. The findings indicate that the variable wall thickness scroll expander, which can increase the volumetric ratio without lengthening the leakage path, will become the main direction for future profile optimization; CFD simulation has emerged as a significant research tool; lubricant is a key factor affecting the performance of scroll expanders, where increasing the viscosity of the lubricant can enhance

收稿日期: 2023-06-09。 作者简介: 杨旭(1984—), 男, 副教授, 博士生导师; 曹锋(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金创新群体资助项目(51721004)。

网络出版时间: 2023-12-07

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231206.1044.002>

efficiency, while an excess of lubricant will reduce the performance; working pressure is the most critical factor affecting the performance of scroll expanders, with phenomena such as over-expansion, under-expansion, and leakage leading to decreased performance. Moreover, the integrated scroll compression-expansion unit, which combines the expander and compressor into one casing, significantly simplifies the system structure and improves energy recovery efficiency, proving to be an effective way to enhance the performance of CO₂ heat pump air-conditioning systems for new energy vehicles. Based on current research achievements and industry demands, future development of scroll expanders should continue to delve into and optimize profile design, reduce leakage, and optimize working pressure, to meet the growing needs for energy recovery and environmental protection.

Keywords: scroll expander; carbon peaking and carbon neutrality target; organic Rankine cycles; scroll compressor-expander unit

在“双碳”目标驱动下,提高能源利用效率、减少碳排放,是近年来我国各工业领域的热门研究课题。膨胀机技术是一种通过低品位能量回收提升常规动力循环效率,实现节能减排的有效技术。其中,基于涡旋式机械原理的涡旋膨胀机是一种通过容积变化来实现气体膨胀的新型能量转换装置,是目前在制冷、低品位余热回收等领域小流量范围内优选的膨胀机解决方案^[1]。鉴于涡旋膨胀机优良的机械性能和运行效率,涡旋膨胀机技术具有广阔的应用前景和巨大的经济效益。近年来,为支撑涡旋膨胀机产品设计与应用,国内外研究人员对涡旋压缩机的基本原理、机械机构、数学模型和流场仿真等方面进行了系统研究。然而,随着诸如新能源电动汽车等应用领域的扩展以及对膨胀机性能及可靠性要求的进一步提升,诸多理论和技术还需进一步研究。

为充分掌握涡旋膨胀机的理论研究现状、技术水平和应用情况,以指导产品的进一步优化和应用扩展,本文将从理论研究和应用研究两个方面入手,对涡旋膨胀机近年来的研究成果进行综述,并对涡旋膨胀机未来的研究方向进行展望。

1 涡旋膨胀机简介

涡旋式机械具有运行稳定、噪声低、效率高等特点。近年来,涡旋压缩机被广泛运用于各种空调、热泵系统中。涡旋膨胀机作为一种涡旋压缩机的逆向运用,也具有上述优点。由于涡旋式机械内部没有直接从高压腔向低压腔泄漏的通道,因此涡旋膨胀机只需取消压缩机排气口处的阀门,即可将压缩机改装成膨胀机,实现吸气—膨胀—排气的工作过程。

1.1 涡旋膨胀机的工作原理

与涡旋压缩机一样,涡旋膨胀机的结构主要包括动涡盘、静涡盘、防自转机构、平衡块、壳体及其他

附件等。涡旋膨胀机与涡旋压缩机的主要区别在于膨胀机去除了在压缩机排气处的阀片,而其他部件可以直接沿用,因此在早期研究中,多数涡旋膨胀机是由压缩机改进得来的。

动、静涡盘是组成涡旋膨胀机工作腔的核心部件,一般两者具有相同的型线参数,其相位角相差 $\theta = 180^\circ$,二者偏心啮合后形成数对封闭的月牙形工作容积,高压气体在工作容积中完成吸气、膨胀、排气的过程。涡旋膨胀机中气体流动的方向与涡旋压缩机相反,图1为涡旋膨胀机不同主轴转角下动、静涡盘的相对位置。

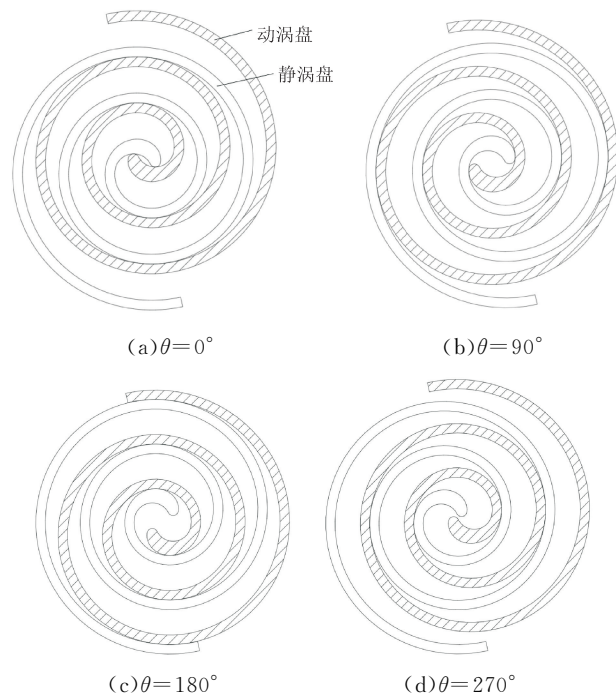


图1 涡旋膨胀机不同主轴转角下动、静涡盘的相对位置
Fig. 1 Relative positions of orbiting and fixed scroll at different shaft angles

1.2 涡旋膨胀机的分类方式

由于涡旋膨胀机与涡旋压缩机具有类似的工作原理和相同的组成部件,因此两者具有相同的分类方式。如图 2 所示,Song 等^[2]根据涡旋压缩机的分类标准,将用于有机朗肯循环(ORC)系统的涡旋膨胀机分为 3 种类型,即全封闭式涡旋膨胀机、半封闭式涡旋膨胀机和开启式涡旋膨胀机。



图 2 3 种不同类型的涡旋式压缩机^[2]
Fig. 2 Three different types of scroll compressors^[2]

全封闭式涡旋压缩机的制冷能力较小,但其密封性能优于半封闭式和开放式涡旋压缩机。它的内部动、静涡盘和电机通过一个共用的轴组装并焊接在一个密闭的机壳中,这使得它不易于改装成膨胀机。相比之下,半封闭式涡旋压缩机只需去除排气阀门就可以改装成膨胀机。开放式涡旋压缩机广泛应用于汽车空调系统,它的机壳内不安装电机,而是通过外部离合器驱动。因此,当将其改装为膨胀机时,易于与发电机连接,特别适用于膨胀机的实验研究^[2]。

1.3 涡旋膨胀机的主要应用领域

目前涡旋膨胀机的主要应用领域主要集中在两个方面,一是余热回收,二是跨临界 CO₂ 循环系统中的膨胀功回收。

1.3.1 余热回收

Lemort 等^[3]和 Wang 等^[4]指出,近年来人类对低品位热的回收需求急剧增长,并衍生出了各种解决方案,如太阳能热电、地热、发动机废气和家用锅炉等。在目前所提出的方案中,ORC 系统是应用最广泛的。ORC 系统将有机物作为工质,可以回收不同温度范围的低温热能并将其转换为电能,具有能量转换率高、适应性好、操作方便以及传输距离短和储存限制少等^[5]优点,是目前提升能源回收利用的有效途径。图 3 为典型的 ORC 发电系统的原理图。与传统的蒸汽朗肯循环相比,ORC 系统可以在较低的热源温度工作,因此具有更广泛的应用范围;同时,由于 ORC 系统中为有机工质,其循环的压力和流量小于蒸汽朗肯循环中的水蒸汽,因此可以显著减小系统管道的尺寸和占地面积,同时较低的压

力对材质的要求也更低。

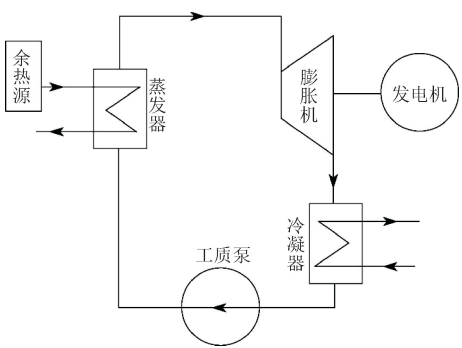


图 3 典型的 ORC 发电系统
Fig. 3 Typical ORC power generation system

目前,在 ORC 中应用的膨胀机主要有两种类型,第一种是速度式,如轴向涡轮和径向流涡轮;另一种是容积式,如涡旋膨胀机、螺杆膨胀机、活塞膨胀机和旋转叶片膨胀机^[6]。其中,涡轮膨胀机不适合小型机组,通常应用在输出功率大于 50 kW 的系统中^[7],这是由于其转速随涡轮输出功率的降低呈现出指数级增加^[8]。与其他形式的膨胀机械相比,涡旋膨胀机的转速低、阀门少、对两相流的耐受性和可靠性高使其适用于输出功率从几百 W 到 10 kW 的小型或微型 ORC 系统^[3,4,9-11],在运行成本方面也具有优势^[12-13]。Zanelli 等^[14]也指出,由于涡旋膨胀机具有运动部件少、可靠性高、输出范围宽的优点,在 ORC 系统中有很好的应用前景。由于涡旋膨胀机容量较小且需要润滑,因此不适用于大型的余热回收系统^[10],也不适合所需压比较大的场景^[15]。

如图 4 所示,对于 ORC 发电系统,可以将涡旋膨胀机设计为膨胀机-发电机组,将 2 台结构参数相同的涡旋膨胀机和 1 台发电机进行组合,2 台膨胀机对称安装在发电机的两侧,发电机与膨胀机共用一个主轴。气体被吸入膨胀机后,分两路同时推动两侧的膨胀机以及中间的发电机转动,实现由气体

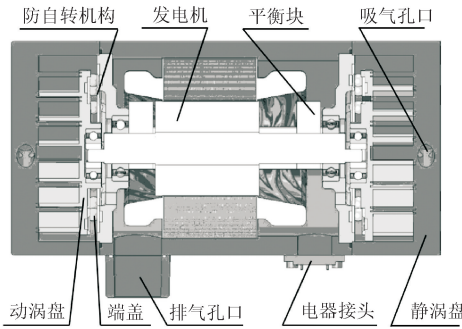


图 4 涡旋膨胀机-发电机组
Fig. 4 Scroll expander generator unit

的压力能向电能的转化。膨胀后的低压气体经机壳上的通道汇集于发电机内,实现对电机的冷却,再经排气孔排出。由于涡旋膨胀机的对称安装,两侧动涡盘及平衡块惯性力产生的力矩得到平衡,因此,不需要添加二次平衡块来实现惯性力矩平衡。

1.3.2 跨临界 CO_2 循环系统中的膨胀功回收

为了解决臭氧层破坏等问题,人类开始限制使用包括 R134a 在内的氢氟烃类以及其混合物的制冷剂。 CO_2 作为一种安全、稳定、单位制冷量高、运动黏度低并且循环压比相较于传统工质制冷循环更低^[16]的制冷剂由此便广受关注。然而,跨临界 CO_2 循环在发展过程中也遇到了许多困难:一方面是由于其工作压力高,对系统设备的密封性提出了更高的要求;另一方面则是其循环过程中的不可逆损失相比传统制冷循环更大^[17],跨临界 CO_2 循环的制冷性能系数常比常规循环低 20% 左右^[18]。为了降低节流过程中的能量损失,可以利用膨胀机和喷射机代替节流阀。马一太等^[19]的研究结果表明,在相似的条件,带膨胀机的循环性能高于带喷射器的循环。图 5 为典型的带膨胀机的跨临界 CO_2 循环系统原理图。

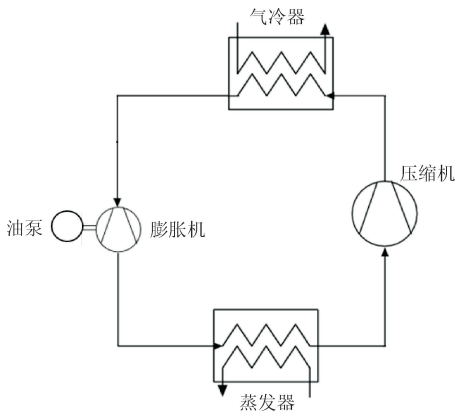


图 5 典型的带膨胀机的跨临界 CO_2 循环系统

Fig. 5 Typical transcritical CO_2 cycle system with expander

跨临界 CO_2 制冷循环的膨胀比一般在 2~4 之间,仅为常规工质的 1/10,其可供回收的膨胀功的比例也更大^[17]。魏东^[20]详细研究了跨临界 CO_2 的膨胀过程,发现 CO_2 系统的膨胀过程与通常的高压气体的膨胀做功是不同的:一般的高压气体的膨胀是自发过程,主要靠其他的体积膨胀输出做功;而 CO_2 的膨胀过程中出现气液相变,但体积变化不大,主要靠压力势能和气液相变提供输出功。马一太等^[18]对比挪威、德国以及美国等西方国家有关

CO_2 跨临界循环的部分研究结果发现,不同研究者得出的 CO_2 跨临界制冷循环与传统制冷循环制冷性能系数之比很不一致,由此提出了当量温度法,解决了 CO_2 跨临界循环与常规循环对比分析的基准问题,并组建滚动转子式膨胀机样机以及实验平台,针对带膨胀机的跨临界 CO_2 循环对其热力学模型和工作过程进行了计算和实验分析,验证了回收跨临界 CO_2 膨胀功的可行性^[20-21]。在文献[19]所比较计算的工况下,跨临界 CO_2 循环带膨胀机相比带喷射器,前者在回收膨胀功方面具有明显的优势,其制冷性能系数提升 30% 以上,而膨胀-压缩机机组的总效率为 57%。上述研究表明,利用膨胀机可以有效回收跨临界 CO_2 循环中的膨胀功,从而提高系统的工作效率。Huff 等^[22]将用于汽车空调的涡旋压缩机改装成为膨胀机,实现了对跨临界 CO_2 循环膨胀功的回收。同时,膨胀-压缩一体机也是 CO_2 制冷系统中的一项关键技术^[23]。Kim 等^[24]开发了一种由涡旋膨胀机和涡旋压缩机组成的一体机机组。图 6 为涡旋式压缩-膨胀一体机的侧面剖视图。该结构型式可实现压缩机对膨胀机回收功的直接利用,结构紧凑,非常适用于新能源车用 CO_2 热泵空调系统。

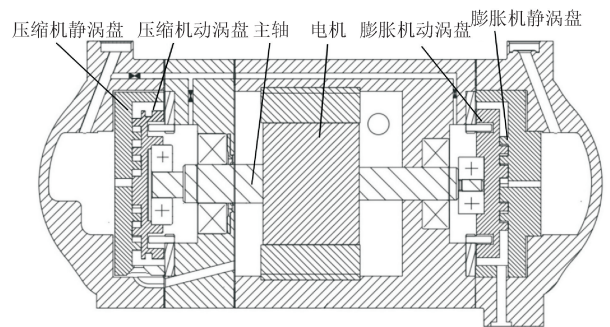


图 6 涡旋压缩-膨胀一体机^[25]

Fig. 6 Scroll expander-compressor unit^[25]

2 涡旋膨胀机的理论研究

涡旋膨胀机构与涡旋压缩机构只是运行的方式相反,其主要工作原理与机构部件是一致的,因此,对涡旋膨胀机的研究可以建立在涡旋压缩机的基础上。本节将结合涡旋压缩机的现有研究成果,从型线理论研究、热动力研究以及计算流体动力学(CFD)仿真 3 个方面,对涡旋膨胀机的理论研究进展进行总结。

2.1 涡旋膨胀机型线理论研究

由于涡旋膨胀机与涡旋压缩机在结构上具有相

似性,膨胀与压缩互为逆向过程,因此涡旋压缩机的型线理论研究是涡旋膨胀机型线选型与优化的基础。樊灵等^[26]指出,常见的涡旋压缩机型线主要有圆渐开线、正多边形渐开线、线段渐开线、半圆渐开线、阿基米德螺旋线、代数螺旋线、变基圆渐开线、包络型线以及通用型线等,并从压缩机的小型化、轻量化、容积效率、运行平稳性、加工精度以及提高效率等方面,提出了对涡旋压缩机型线优劣的判别准则。彭斌等^[27]也对涡旋压缩机型线的研究进行了系统性的总结,将其分为单一型线、通用型线、组合型线和修正型线4大类,表明今后的研究将朝着开发和研究新型组合型线和涡旋齿齿头修正型线的方向进行。冯诗愚等^[28]研究了对称圆弧修正、不对称圆弧修正、对称圆弧加直线修正和不对称圆弧加直线修正这4种涡旋型线圆弧修正方式,并给出了不同圆弧修正的排气角的计算方法。

近年来,为了提升涡旋膨胀机的性能,研究人员针对涡旋膨胀机的工作特点,对其型线理论和几何模型进行了深入的研究。2016年,朱兵国^[29]分别利用法向等距法和积分法模拟了涡旋膨胀机工作腔容积随主轴转角的变化,对比发现法向等距法与实际模型的最大相对误差为8.76%,而积分法的最大相对误差为15.95%。同时,在综合考虑泄漏与传热因素后,利用Fortran软件模拟得到了膨胀机工作腔压力随主轴转角的变化曲线。彭斌等^[30]在现有涡旋型线几何理论的基础上,对圆、线段和正四边形渐开线以及变径基圆渐开线和组合型线的几何特性进行了详细的探讨,采用控制变量的方法,对比分析了不同涡旋型线几何参数和结构参数之间的相互关系。2017年,张朋成^[31]根据啮合原理和曲面共轭接触条件以及变截面涡旋齿基线的构建方法,推导出了变截面涡旋膨胀机的型线方程,并构建了详细的数学模型。同年,彭斌等^[32]以圆渐开线型线对涡旋膨胀机的几何模型展开研究,并以双圆弧修正为基础,得出了双圆弧加直线修正后膨胀机的吸气容积,并利用积分法对双圆弧加直线修正型线进行分析,使用Matlab编程得出容积变化和变化率曲线,发现该修正方法对膨胀机容积的变化影响较小,且通过增大修正角可以增大膨胀机的吸气容积。2018年,彭斌等^[33]基于能量守恒与质量守恒构建了涡旋膨胀机的整体模型,得到了膨胀机工作腔的压力、温度等随主轴转角的变化规律,并利用欧拉法和Newton-Raphson法对不同几何参数的定量分

析,揭示了等截面与变截面涡旋膨胀机几何参数对膨胀机性能的影响。2018年,Emhardt等^[15]指出,涡旋膨胀机的内容积比越大,其工作压力越大,从而可以提升轴功率,但对于固定壁厚的涡旋膨胀机,内容积比的增加会使涡齿的长度大幅增加,从而引起泄漏量增加和润滑困难的问题。同时指出,利用可变壁厚的涡旋膨胀机,可以在不增加涡齿长度的情况下增加内容积比。2022年,彭斌等^[34]根据啮合型线的啮合原理,对变径基圆涡旋膨胀机的型线公式进行了推导计算,发现随着基圆变化控制系数(k)的增加,各个工作腔的容积减小,因此,对于变基圆涡旋膨胀机, k 的值应小于0。

涡旋膨胀机的型线理论研究主要涉及不同型线参数和几何模型对于性能的影响,近年来研究人员进行了大量的研究。总的来说,对于变截面涡旋膨胀机,尤其是变基圆型线的研究,将成为未来涡旋膨胀机优化设计的重要研究方向。

2.2 涡旋膨胀机热动力研究

一直以来,研究人员都试图建立一个完整的数学模型,对涡旋膨胀机的热力学过程进行描述,以预测涡旋膨胀机的热力性能。Lemort等^[3]指出,影响膨胀机热力性能的主要损失是内部泄漏,其次是供给压降和机械损失。马一太等^[35]指出,无论开发研制哪种膨胀机面临的主要困难都是密封与寿命问题。由于工质在涡旋膨胀机间隙处的流动方式和泄漏途径与涡旋压缩机的完全一致,因此在描述涡旋膨胀机的泄漏模型时,涡旋压缩机的泄漏研究成果是重要依据。

1998年,江波等^[36]对泄漏工质的流态做了进一步的研究,认为是否单相泄漏取决于泄漏通道的大小,并给出了临界间隙值的求解方法。2002年,Chen等^[37]给出了切向间隙和径向间隙的计算公式,根据膨胀机或压缩机的具体几何参数,采用压比的线性函数表示。2016年,Peng等^[38]在文献[37]的基础上对涡旋膨胀机在不同转角下泄漏间隙进行分析,对膨胀腔室的个数(N_c)进行了讨论,并得到了 $N_c=0$ 、 $N_c=1$ 和 $N_c>1$ 这3种情况下的径向泄漏生成角。2002年,王向红等^[39]对涡旋膨胀机的泄漏损失分别做了数值计算和分析。2013年,Liu等^[40]建立了详细的描述涡旋膨胀机稳态和动态过程的数学模型,并建立了实验系统,对涡旋膨胀机的性能进行了测试,表明涡旋式膨胀机的容积效率随转速的增大而增大,在试验条件下,其最大值为

63%;等熵效率在低转速下先增大后减小,最大值为36.4%;膨胀机的总效率和系统效率随转速的增大先增大后减小,最大值分别为41%和2.9%,卡诺效率为21.2%,理论效率最大值为8%。回收车辆的发动机余热也是涡旋膨胀机的重要应用场景,因其发热量可能会根据运行条件而变化,因此膨胀机的工作有时处于非设计工况条件下运行。Kim等^[43]基于涡旋膨胀机在非设计工况下的效率特性,提出了一种优化双回路模式发动机余热回收系统中正排量膨胀机设计压力比的分析方法。2015年,Morini等^[41]采用集成逆向工程-计算流体动力学方法,获取了涡旋压缩机的真实几何形状,通过简化的二维模型进行数值模拟得出了由涡旋压缩机改装为膨胀机后的间隙泄漏特性影响因素。2016年,Garg等^[42]通过估计涡旋膨胀机的泄漏损失、入口压降损失、机械损失等,开发出了一个针对不同规格的ORC系统,得到最高效的膨胀机几何模型的通用框架,并且发现在某一固定的操作工况下,涡旋膨胀机存在唯一的高度或者高宽比,使得其等熵效率最高。2017年,彭斌等^[32]给出了涡旋膨胀机泄漏线长度和泄漏面积的计算方法,并作出了径向泄漏线长度随转角的变化曲线,发现径向泄漏线的长度随着主轴转角的增大而增大。Yang等^[11]的研究表明,不同的制冷剂对于带膨胀机的ORC循环的性能会产生很大的影响,并对R1233zx(E)与R245fa进行了实验对比,利用遗传算法对经验模型的计算结果进行了验证。2020年,王建吉等^[43]通过建立数学计算模型并对模型运算求解,采用有限元分析软件对涡旋压缩机的工作过程进行仿真模拟,对比了两种方法得到的结果,对轴向间隙泄漏模型展开深入研究,提出了一种变齿厚涡旋齿轴向间隙的泄漏量计算模型,定量计算不同轴向间隙时的径向泄漏量,得出轴向间隙控制在0.025 mm以下较为恰当。2022年,彭斌等^[34]在对变基圆涡旋膨胀机的研究中发现,在涡盘直径(D)一定的条件下,切向泄漏线长度(h)与基圆半径变化率(k)成正比,径向泄漏线长度(L_r)与 k 成反比,对于变基圆涡旋膨胀机,应选择 $k < 0$ 来减小泄漏。

综上所述,建立一个完整描述涡旋膨胀机工作过程的数学模型的难点在于对泄漏过程的研究,控制泄漏是涡旋膨胀机优化设计的一个重要方向。前文中提到的有关涡旋膨胀机型线的研究表明,采用变基圆型线的涡旋膨胀机可以有效减小泄漏线的长

度,从而提高整体性能。除此之外,优化密封系统、加强部件设计和制造质量控制,也是减小涡旋膨胀机泄漏的关键措施。

2.3 涡旋膨胀机 CFD 仿真研究

CFD 仿真是一种模拟仿真技术,其基本原理是数值求解控制流体流动的微分方程,得出流体流动的流场在连续区域上的离散分布,从而近似模拟流体流动情况。由于涡旋膨胀机独特的工作原理,利用传统方法很难对其工作腔内部的流动情况进行研究,因此 CFD 仿真是研究涡旋膨胀机的重要工具。特别是近五年针对涡旋机械的研究,大多都集中于 CFD 仿真模拟领域。

2015年,Morini等^[41]利用 CFD 方法,对实际涡旋膨胀机和涡旋压缩机的性能和流动特性进行了综合分析,发现涡旋膨胀机工作腔内部的非对称现象、压缩机吸气腔处的回流现象以及泄漏速度会受到间隙尺寸的影响。2015年,Song等^[44]基于 CFD 对不同吸入口位置的涡旋膨胀机进行了三维数值模拟,分析了涡旋膨胀机吸入口脉动质量流量、内部流动的非对称分布、涡旋所受气体力和力矩等气动参数的瞬态特征。2015年,Wei等^[45]基于动网格技术,采用三维瞬态计算流体动力学数值研究方法,对R123涡旋膨胀机吸力过程中的非定常流动进行了研究,深入了解涡旋式膨胀机的吸气过程,对涡旋式膨胀机吸气口和涡旋顶部型线的优化设计具有重要的指导意义。2017年,Song等^[46]提出了一种基于动网格和局部网格细化技术的三维数值模拟方法,研究了两个轴向间隙的径向泄漏的流场,并分析了上下轴向间隙的泄漏流量差异以及对工作腔的影响。2017年,吴竺等^[47]从径向间隙对涡旋膨胀机的影响角度,以某涡旋压缩机改造而成的涡旋膨胀机作为研究对象,在建立其三维模型的基础上,利用Pumplinx流体计算软件,从输出性能、受力情况等方面对其进行动态模拟和研究分析。2018年,Yang等^[11]将涡旋膨胀机的建模和优化准则集成到ORC循环中,用以研究制冷剂R1233zd(E)作为R245fa替代方案的可行性。结果表明,两种制冷剂的系统性能几乎相同,而R245fa的等熵效率略高、内泄漏损失较小。同时发现,提高涡旋膨胀机的转速可以减小其内部的泄漏损失。2018年,Song等^[48]提出了一种新型的涡旋扩张器双向对称排气结构,并与采用CFD方法的单边排气结构进行了比较,表明对称排气结构可以平衡排气间的压力脉动

水平,使驱动力矩提高 6.38%。2018 年,Peng 等^[49]基于 CFD 对涡旋膨胀机进行了三维非定常流动数值模拟,详细分析了涡旋式膨胀机在不同转速下的流动特性、机械性能及输出扭矩和功率。Emhardt 等^[50-51]建立了变壁厚涡旋膨胀机的 CFD 模型,并利用 R123 作为工作流体,研究了几何形状对变壁厚涡旋膨胀机内部流动特性的影响。研究结果表明,涡旋膨胀机在低压比为 2.5 时出现过膨胀现象,而高压比为 5.5 时出现欠膨胀现象;可变壁厚的涡旋膨胀机与定壁厚的涡旋膨胀机相比,在不增加涡旋圈数和膨胀机尺寸的情况下,可以增加容积比,但定壁厚涡旋膨胀机具有更高的等熵效率。

CFD 技术是研究涡旋膨胀机工作腔内部非定常流动的重要手段,也是近年来的研究热点。以上研究为涡旋膨胀机的设计和优化提供了重要的理论基础和指导,为进一步提高涡旋膨胀机的性能和效率提供了有益的参考和借鉴。

3 涡旋膨胀机在 ORC 系统中的应用

膨胀机作为 ORC 循环发电系统的核心设备,直接影响整个系统的性能和效率,因此开发一款高效率的膨胀机具有重要的现实意义^[1]。近年来,研究人员开发了用于各种 ORC 系统的涡旋膨胀机,并对其进行了详细的性能测试,结果见表 1 所示。

表 1 ORC 涡旋膨胀机样机性能实验数据
Table 1 Performance test data of ORC scroll expander prototype

年份	作者	涡旋机种类	工质	膨胀机功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)	膨胀比	膨胀机效率/%
1994	Zanelli 等 ^[14]	全封闭	R134a	1.0~3.5	2 400~3 600	2.4~4.0	63~65
2003	Kane 等 ^[52]	全封闭	R134a, R123	3.0~10		1.6~4.8	50~68
2007	Saitoh 等 ^[53]	开启式	R113	0~0.45	1 800~4 800		63
2007	Manolakos 等 ^[54]	开启式	R134a	0~2.05	0~4 000		0~65
2008	Peterson 等 ^[7]	开启式	R123	0.187~0.256	600~1 400	3.28~3.87	45~50
2009	Mathias 等 ^[55]	全封闭	R123	1.20,1.38	3 670	8.8,5.5,3.1	67,81
2009	Wang 等 ^[56]	开启式	R134a	0.560~0.625	2 000~3 800	2.65~4.84	61.0~77.5
2009	Lemort 等 ^[3]	开启式	R123	0.39~1.82	1 771~2 660	2.75~5.40	42~68
2011	Hoque ^[57]	半封闭	R134a	1.5	2 000	2.5~3.0	80
2011	Bell 等 ^[58]		R410a			1.61	35~66
2012	Lemort 等 ^[9]	全封闭	R245fa	0.2~2.0		2.0~5.7	45~71
2012	Woodland 等 ^[59]	开启式	R134a		500~5 000	1.25~4.30	45~70
2012	Twomey ^[60]	开启式	R134a	0.104~0.552	479~1 256	1.3~1.7	57~59
2012	严雨林 ^[61]		R245fa		550~1 200		77
			R134a	0.148~0.419	1 548~1 937	1.48~1.58	82.63~99.19
2012	韦伟等 ^[62]		R245fa	0.050~0.459	3 361~3 419	2.72~2.79	85.88~90.62
			R22	0.195	2 264	1.32	89.90
			R32	0.104	1 525	1.12	92.88
2013	Bracco 等 ^[63]	全封闭	R245fa	1.0~1.5	3 000,4 500	5.0~6.5	57~75
2013	Liu 等 ^[40]	半封闭	R123	0.46~7.6	1 200~2 066	4.4~4.8	36.4
2013	Declaye 等 ^[64]	开启式	R245fa	2.1	2 000~3 500	3~8	55~75.7
2013	Zhou 等 ^[65]	开启式	R123	0.645	300~1 300		
2014	Jradi 等 ^[66]	半封闭	HFE~7100	0.5		4.6	80
2014	潘登等 ^[67]		R123	2.425	1 550~2 165		55
2015	Chang 等 ^[68]	开启式	R245fa	0.97~2.30	1 535~2 970		52.5~73.1

续表

年份	作者	涡旋机种类	工质	膨胀机功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)	膨胀比	膨胀机效率/%
2017	Miao 等 ^[69]		R123	2.14~2.65	800~2 400	2.27	
2017	Feng 等 ^[70]	全封闭	R123	1.20~2.78		3	69.10~85.17
2017	Yang 等 ^[71]	全封闭	R245fa	1.40~2.64		3.24	64.25~79.56
2017	李亚楠 ^[72]	全封闭	R123	12.89	2 900	4	
2019	孙健 ^[73]			0.90~1.26	1 200~3 000		
2021	曹鑫鑫等 ^[74]		R245fa	0.753	2 000~3 600		44~55
2021	曹鑫鑫 ^[75]	开启式	R245fa	0.72~0.86	2 000~3 000		
2022	刘帅 ^[5]		R245fa	3.1~14.9	1 500		
2023	彭斌等 ^[76]		R245fa	1.875~2.700	500~3 000		
2023	石磊等 ^[77]		R245fa	2.02~3.14	1 200~2 100		

对涡旋膨胀机在 ORC 系统中的应用研究发现,润滑油和工作压力是影响涡旋膨胀机性能的关键因素,润滑油黏度高有利于效率提升,而过膨胀、欠膨胀现象和过量润滑油都会使得性能降低。Kane 等^[52]将两个不同工作容积的涡旋膨胀机集成到一个由两个 ORC 系统组成的小型太阳能发电系统中,发现过膨胀、欠膨胀以及过量的润滑油都会使膨胀机系统的性能降低。Peterson 等^[7]将涡旋空气压缩机改装成膨胀机,实验结果表明,高黏度的润滑油有利于效率的提升。Mathias 等^[55]通过对制冷涡旋压缩机的改装,将其作为 ORC 系统的膨胀机,最大输出功率为 2.96 kW,最大等熵效率达到 83%;结果还表明,欠膨胀会降低膨胀机的效率。Lemort 等^[3]研究了开启式无油 R123 涡旋膨胀机的性能特点,结果表明,其最大输出功率为 1.8 kW,最大等熵效率可达 68%,且过度膨胀可能会对膨胀机的效率产生很大的影响。Woodland 等^[59]的研究也表明,涡旋膨胀机的过膨胀与欠膨胀都会降低其工作效率,这与前人的研究结果一致。Bracco 等^[63]对由全封闭涡旋压缩机改装而成的涡旋膨胀机进行了性能测试,其最大输出功率为 1.5 kW,实验结果表明,在欠膨胀状态下等熵效率由 75%下降至 60%。Zhou 等^[65]对烟气余热回收的 ORC 系统进行了实验研究,同样发现由于过度膨胀的影响,使膨胀机的最大输出功率低于设计值。

除此之外,研究人员对用于 ORC 系统的涡旋膨胀机也进行了大量的实验研究。Saitoh 等^[53]将开启式车用涡旋压缩机改装为膨胀机,并应用在小 型太阳能 ORC 系统中,实验结果表明,在转速为 1 800 r/min 的条件下,膨胀机最大输出功率可达

0.45 kW。Manolakos 等^[54]则将涡旋膨胀机应用于反渗透海水淡化太阳能 ORC 系统中,结果表明,在转速 1 000~3 000 r/min 的范围内,膨胀机的效率在 60%左右。Wang 等^[56]将小型涡旋压缩机改装成膨胀机,经过测试发现,膨胀机的性能会受转速、膨胀比和工作压力的影响。Hoque^[57]将一台半封闭的车用空调涡旋压缩机改装成以 R134a 为工质的 ORC 系统的膨胀机,其最大等熵效率可达 80%。Bell^[58]的实验表明,在膨胀机的压力比略高于其内 置体积比时,等熵效率达到最大值。Lemort 等^[9]研究 了油质量分数对热泵用的压缩机改装的全封闭涡旋 膨胀机性能的影响,得到整体的最大等熵效率为 71.03%。Twomey^[60]将汽车涡旋压缩机改装成膨 胀机,实验得到的最大效率为 59%。严雨林^[61]针对 涡旋膨胀机的内泄漏这一最重要的不可逆损失中最 重要的因素进行了分析和探讨,结合实验得到了泄 漏系数的平均值。韦伟等^[62]搭建了采用涡旋式膨 胀机的小型 ORC 系统,并使用 R134a、R245fa、R22 和 R32 这 4 种不同的工质,测试了 ORC 系统的整 体性能以及涡旋式膨胀机的工作特性。Liu 等^[40]设 计了一种半封闭的涡旋膨胀机,测试了其转速对等 熵效率和容积效率的影响。Declaye 等^[64]将一种无 油涡旋空气压缩机改装成膨胀机,其最大等熵效率可 达 75.5%,最大功率为 2.1 kW。Jradi 等^[66]将半封 闭式汽车空调涡旋压缩机改装为膨胀机,并以 HFE- 7100 作为工质,在系统压比为 4.6、热源为 9.6 kW 的情况下,膨胀机输出功率为 0.5 kW,等熵效率为 75%。潘登等^[67]搭建以 R123 为工质,设计输出 功率为 3 kW 的 ORC 涡旋膨胀机试验平台,对其在不 同工况下的性能进行了试验研究,验证得到涡旋膨

胀机的最大输出功率为 2.425 kW,最高等熵效率为 55%。Chang 等^[68]研究 ORC 系统中开启式涡旋膨胀机的实验性能,结果表明,膨胀机的最大功率并不对应于实际循环的最大循环效率,且膨胀机的工作压差和转速是影响其性能的主要因素。Miao 等^[69]对内置容积比为 2.27 的涡旋膨胀机进行了实验,其最大功率可达 2.65 kW。Feng 等^[70]则研究了膨胀机、泵、蒸发器、冷凝器这 4 大部件对 ORC 循环性能的影响,随着质量流量的增加,膨胀机的等熵效率大幅提高,最高可达 85.17%。Yang 等^[71]的研究结果表明,增加膨胀机的压降可以改善 ORC 系统的性能,而质量流量的增加也可以提升膨胀机的轴功率和等熵效率。孙健^[73]搭建了以压缩空气为驱动工质的涡旋膨胀机性能测试平台,借助测试平台对所建立的热力学模型进行了试验验证。曹鑫鑫等^[74]对比了膨胀机在有无润滑条件下的性能,并对膨胀机的性能进行了全面测试。此外,还进行了针对 ORC 系统的涡旋膨胀机的全工况下热力输出特性实验研究,为涡旋膨胀机的全工况输出特性规律提供了更全面的指导^[75]。刘海伦等^[78]对涡旋膨胀机进行了变工况分析,得到了不同工况下涡旋膨胀机的性能变化规律。刘帅^[5]、彭斌等^[76]以及石磊等^[77]都通过实验研究验证了所建立数学模型的准确度,可以为涡旋膨胀机性能分析提供一定的借鉴意义。

4 涡旋膨胀机在跨临界 CO₂ 循环系统中的应用

利用涡旋膨胀机可以有效回收跨临界 CO₂ 制冷循环的膨胀功,研究人员对此进行了大量的理论分析和实验研究。针对 CO₂ 涡旋膨胀机的性能实验结果如表 2 所示。随着天然工质 CO₂ 在各领域的应用推广,引入膨胀机提升跨临界 CO₂ 系统性能,是目前最为有效的手段之一。然而,近年来相关新的研究成果较少,也意味着此领域仍需进一步的研究和探索。

针对跨临界 CO₂ 循环的涡旋膨胀机最早由 Huff 等^[22]于 2003 年将 R134a 汽车空调涡旋压缩机涡盘高度减小,改装成为膨胀机,得到最高等熵效率为 50%,最大容积效率为 68%。2004 年,Westphalen 等^[79]针对在高温环境下运行的跨临界 CO₂ 空调系统研制了一种涡旋膨胀机样机。发现预估的膨胀机总效率为 72%;对于功率为 10.5 kW

的膨胀机,泄漏损失估计约为 20%,摩擦损失占 15%左右,将减少系统 1.5~2 kW 的输入功率,节能将近 20%。2006 年,Fukuta 等^[80]讨论了 CO₂ 涡旋膨胀机中泄漏量的计算方法并进行了计算,结果表明当泄漏间隙为 0.01 mm、转速 3 600 r/min 时,膨胀机的总效率约为 60%。此外,利用一个涡旋压缩机的机械元件研制了涡旋膨胀机样机,在没有对元件进行任何重大改进的情况下,实验得到容积效率为 80%,总效率为 55%。同年,Kohsokabe 等^[23]研制了一种膨胀压缩机组,该机组采用了涡旋式膨胀机和滚动转子副压缩机,并将两者用一根传动轴相连。作者将此膨胀压缩机组用于两级压缩的跨临界 CO₂ 循环实验中,结果表明循环的制冷性能系数提升了 30%以上,同时膨胀压缩机组的总效率为 57%。2008 年,Kim 等^[24]开发了一种由涡旋膨胀机和涡旋副压缩机组成的膨胀压缩机组,利用传动轴将膨胀机回收的膨胀功直接传输给副压缩机,利用数值模拟的方法给出了在压缩机吸气压力为 3.5 MPa、排气压力为 10 MPa,膨胀机吸气温度为 35℃时,主压缩机减少功耗 12.1%,系统制冷性能系数提升 23.5%。此外,讨论了膨胀机参数的变化对其性能的影响,结果表明制冷性能系数的改善会随着膨胀机入口温度的降低而增加,同时也会随吸入压力的增加而降低。Hiwata 等^[81]则对其原型机进行了力学分析,重新设计开发了涡圈型线,使得涡旋膨胀机的工作过程过度膨胀,从而避免动涡盘与静涡盘在轴向上的分离,样机的容积效率为 92%,膨胀机的工作效率可达 62%。Kakuda 等^[82]和 Nagata 等^[83]设计、制造和测试了一种由涡旋膨胀机和涡旋副压缩机组成的膨胀压缩机组,用于带中间冷却的两级压缩跨临界 CO₂ 循环中,发现通过中间冷却,制冷性能系数提升了 10%;在中冷器和膨胀机组合的条件下,制冷性能系数提升了 30%左右;对于主压缩机,膨胀机的存在使其功耗下降约 25%;系统的容积效率为 104%。

涡旋膨胀机在跨临界 CO₂ 循环中的应用研究结果表明,涡旋膨胀机可以有效回收跨临界 CO₂ 制冷循环中的膨胀功;利用膨胀机与副压缩机组合形成的一体机可提升制冷性能系数和循环效率,并降低功耗,该技术是能源车用 CO₂ 热泵空调系统能效提升的有效手段。同时,过膨胀和泄漏对膨胀机性能有不利影响,如何改善泄漏并避免过膨胀是 CO₂ 涡旋膨胀机优化的重要方向。

表 2 CO₂ 涡旋膨胀机样机性能实验数据^[84]
Table 2 Performance test data of CO₂ scroll expander prototype^[84]

年份	作者	工作转速/ (r·min ⁻¹)	工作压力/ MPa	膨胀机 总效率/%	膨胀机 容积效率/%	制冷性能系数 提升率/%	能耗下降率/ %
2004	Westphalen 等 ^[79]	3 500		72			20
2006	Fukuta 等 ^[80]	2 000~4 000	4.0~10.0	55	80		
2006	Kohsokabe 等 ^[23]	1 000~4 000	8.20~3.96	57		30	
2008	Kim 等 ^[24]	3 500	3.0~11.0			23.5	12.1
2009	Hiwata 等 ^[81]	3 000	4.1~7.1	62	96		
2009	Kakuda 等 ^[82]	1 800~3 600	1.30~3.19		104	30	
2010	Nagata 等 ^[83]	2 760	1.69~4.16		104	30	

5 总结与展望

随着全球环保意识的不断提高,涡旋膨胀机作为一种高效、节能、环保的新型能源装备,受到了越来越多的关注和重视。在“双碳”目标的引领下,节能减排已经成为了社会的新共识,在这样的时代背景下涡旋膨胀机有着良好的发展前景和广阔的应用空间。本文从理论研究与应用研究两个方面入手,对近年来国内外的针对涡旋膨胀机的研究成果进行了总结。国外在涡旋膨胀机的应用领域的研究相对比较充分,在制冷和余热回收领域都取得了一定的研究成果。相比之下,国内的研究进展较慢,特别是针对 CO₂ 涡旋膨胀机的研究较少,因此国内在涡旋膨胀机的设计、制造、测试等方面的技术还需要进一步提升。本文认为,为了提升涡旋膨胀机的性能,拓宽应用范围,未来的研究重点将集中在以下几个方向。

(1)涡旋膨胀机的内置容积比越大,其工作压力也越大,可以有效提升轴功率。传统定壁厚型线的涡旋膨胀机在增加内容积比的同时势必会使涡圈长度增加,其泄漏线的长度也会增加,这对密封和润滑提出了很高的要求。而变壁厚型线可以在不增加泄漏线长度的条件下增加涡旋膨胀机的内置容积比,因此可以有效提升膨胀机的性能。现阶段对于变壁厚型线的研究还不够充分,未来应加强型线研究。

(2)由于跨临界 CO₂ 循环的工作压力较高,因此对涡旋膨胀机的密封提出了很高的要求,解决涡旋膨胀机在高压下的泄漏问题,是未来 CO₂ 涡旋膨胀机的研究重点之一。

(3)由于涡旋机械的特殊结构,利用传统方法很难对其工作腔内部的工作状态进行研究,在未来的

研究与发展中,CFD 仿真技术仍是研究涡旋膨胀机内部流场的有效工具。

(4)涡旋膨胀-压缩一体机集成了膨胀机和压缩机两个功能单元,其突出优点在于将两者放置于一个机壳中,实现高度集成与轻量化,同时提高了能量回收效率,是目前新能源车用 CO₂ 热泵空调系统能效提升的有效手段。对膨胀-压缩一体机的开发与研究还需深入探究,以便未来能够更好地挖掘跨临界 CO₂ 制冷循环的性能潜力。

致谢 感谢广东省重点领域研究计划项目(2023B0909050005)对本研究的支持。

参考文献:

[1] 彭斌,张朋成. 变截面涡旋膨胀机的数学模型及试验研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(7): 115-120.
PENG Bin, ZHANG Pengcheng. Research on the mathematical model and experiment of a variable thickness scroll expander[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(7): 115-120.

[2] SONG Panpan, WEI Mingshan, SHI Lei, et al. A review of scroll expanders for organic Rankine cycle systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 54-64.

[3] LEMORT V, QUOILIN S, CUEVAS C, et al. Testing and modeling a scroll expander integrated into an organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14/15): 3094-3102.

[4] WANG Tianyou, ZHANG Yajun, PENG Zhijun, et al. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(6): 2862-2871.

[5] 刘帅. ORC 低温余热发电系统的变工况特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.

- [6] QIU Guoquan, LIU Hao, RIFFAT S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (16): 3301-3307.
- [7] PETERSON R B, WANG H, HERRON T. Performance of a small-scale regenerative Rankine power cycle employing a scroll expander [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2008, 222(3): 271-282.
- [8] QUOILIN S. Sustainable energy conversion through the use of organic Rankine cycles for waste heat recovery and solar applications [D]. Liege, Belgium: University of Liege, 2011.
- [9] LEMORT V, DECLAYE S, QUOILIN S. Experimental characterization of a hermetic scroll expander for use in a micro-scale Rankine cycle [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2012, 226(1): 126-136.
- [10] BAO Junjiang, ZHAO Li. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 325-342.
- [11] YANG Jingye, SUN Ziyang, YU Binbin, et al. Modeling and optimization criteria of scroll expander integrated into organic Rankine cycle for comparison of R1233zd(E) as an alternative to R245fa [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 386-393.
- [12] KIM H J, KIM H J. Design of a swash plate type of steam expander for waste heat recovery [J]. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 2011, 23(5): 313-320.
- [13] KIM Y M, SHIN D G, KIM C G. Optimization of design pressure ratio of positive displacement expander for vehicle engine waste heat recovery [J]. *Energies*, 2014, 7(9): 6105-6117.
- [14] ZANELLI R, FAVRAT D. Experimental investigation of a hermetic scroll expander-generator [C]//International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 1994: 459-464.
- [15] EMHARDT S, TIAN Guohong, CHEW J. A review of scroll expander geometries and their performance [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 1020-1034.
- [16] 马一太, 王景刚, 魏东. 自然工质在制冷空调领域里的应用分析 [J]. *制冷学报*, 2002(1): 1-5.
MA Yitai, WANG Jinggang, WEI Dong. Analysis of natural refrigerants applied in refrigeration and air conditioning [J]. *Journal of Refrigeration*, 2002(1): 1-5.
- [17] 马一太, 魏东, 王景刚, 等. CO₂ 跨临界制冷循环中应用两相螺杆膨胀机的理论分析 [J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(2): 137-140.
MA Yitai, WEI Dong, WANG Jinggang, et al. A theoretical analysis of the application of the two-phase flow screw expander in CO₂ transcritical refrigeration cycle [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(2): 137-140.
- [18] 马一太, 王侃宏, 杨昭, 等. 带膨胀机的 CO₂ 跨(超)临界逆循环的热力学分析 [J]. *工程热物理学报*, 1999, 20(6): 661-665.
MA Yitai, WANG Kanhong, YANG Zhao, et al. Thermodynamic analysis on CO₂ transcritical cycle with expander [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1999, 20(6): 661-665.
- [19] 马一太, 袁秋霞, 李敏霞, 等. 跨临界 CO₂ 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.
MA Yitai, YUAN Qiuxia, LI Minxia, et al. A performance comparison of the transcritical CO₂ refrigeration cycle with expander and ejector [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2011, 39(5): 36-41.
- [20] 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.
- [21] 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, 2002.
- [22] HUFF H J, RADERMACHER R, PREISSNER M. Experimental investigation of a scroll expander in a carbon dioxide air-conditioning system [C]//21st IIR International Congress of Refrigeration: Serving the Needs of Mankind. Paris, France: International Institute of Refrigeration, 2003: ICR0485.
- [23] KOHSOKABE H, FUNAKOSHI S, TOJO K, et al. Basic operating characteristics of CO₂ refrigeration cycles with expander-compressor unit [C]//18th International Compressor Engineering Conference & 11th International Refrigeration and Air-Conditioning Conference. Paris, France: International Institute of Refrigeration, 2006: 789.
- [24] KIM H J, AHN J M, CHO S O, et al. Numerical simulation on scroll expander-compressor unit for CO₂ trans-critical cycles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(13): 1654-1661.
- [25] 西安交通大学. 一种涡旋式压缩膨胀一体机结构及其操作方法: CN 202211515883.0 [P]. 2023-05-09.
- [26] 樊灵, 屈宗长, 靳春梅. 涡旋压缩机型线研究的概述 [J]. *机械工程学报*, 2000, 36(9): 1-4.
FAN Ling, QU Zongchang, JIN Chunmei. Status and development of profile designing for scroll compressor [J].

- Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(9): 1-4.
- [27] 彭斌, 赵生显, 李要红, 等. 涡旋压缩机型线的综述与展望 [J]. 压缩机技术, 2017(3): 56-64.
- PENG Bin, ZHAO Shengxian, LI Yaohong, et al. Review and prospect of the scroll compressor profile [J]. Compressor Technology, 2017(3): 56-64.
- [28] 冯诗愚, 顾兆林, 李云. 涡旋机械的涡旋体始端型线研究 [J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(1): 90-94.
- FENG Shiyu, GU Zhaolin, LI Yun. Study on top profile for scroll fluid machines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(1): 90-94.
- [29] 朱兵国. 涡旋膨胀机的数学模型及试验研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [30] 彭斌, 朱兵国. 涡旋型线对涡旋压缩机性能的影响 [J]. 流体机械, 2016, 44(6): 17-23.
- PENG Bin, ZHU Bingguo. Effect of scroll profiles on the performance of scroll compressors [J]. Fluid Machinery, 2016, 44(6): 17-23.
- [31] 张朋成. 变截面涡旋膨胀机的性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [32] 彭斌, 李要红, 赵生显, 等. 基于圆渐开线涡旋膨胀机几何模型的研究 [J]. 流体机械, 2017, 45(10): 18-24.
- PENG Bin, LI Yaohong, ZHAO Shengxian, et al. Investigation on the geometrical model of scroll expander based on circle involute [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(10): 18-24.
- [33] 彭斌, 李要红, 赵生显. 涡旋膨胀机的性能模拟 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(8): 965-970.
- PENG Bin, LI Yaohong, ZHAO Shengxian. Performance simulation for scroll expanders [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(8): 965-970.
- [34] 彭斌, 蒋龙. 变径基圆渐开线涡旋膨胀机几何及泄漏模型的研究 [J]. 机械设计与制造, 2022(1): 66-69.
- PENG Bin, JIANG Long. Study on geometry and leakage model of variable diameter involute scroll expander [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(1): 66-69.
- [35] 马一太, 魏东, 查世彤, 等. 二氧化碳膨胀机的热力计算与选型分析 [J]. 流体机械, 2002, 30(10): 43-46.
- MA Yitai, WEI Dong, ZHA Shitong, et al. Thermodynamic calculation and analysis of carbon dioxide expander [J]. Fluid Machinery, 2002, 30(10): 43-46.
- [36] 江波, 畅云峰, 朱杰, 等. 涡旋式压缩机内部泄漏的流态分析 [J]. 压缩机技术, 1998(2): 19-21.
- JIANG Bo, CHANG Yunfeng, ZHU Jie, et al. Flow analysis of internal leakage in scroll compressors [J]. Compressor Technology, 1998(2): 19-21.
- [37] CHEN Yu, HALM N P, GROLL E A, et al. Mathematical modeling of scroll compressors: part I compression process modeling [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6): 731-750.
- [38] PENG Bin, ZHU Bingguo, LEMORT V. Theoretical and experimental analysis of scroll expander [C]//International Compressor Engineering Conference. Purdue Mall, West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2016: 2450.
- [39] 王向红, 沈永年, 王洪明. 涡旋式膨胀机泄漏损失的数值计算与分析 [J]. 流体机械, 2002, 30(9): 18-20.
- WANG Xianghong, SHEN Yongnian, WANG Hongming. Numerical calculation and analysis of leakage loss in a scroll expander [J]. Fluid Machinery, 2002, 30(9): 18-20.
- [40] LIU Guangbin, ZHAO Yuanyang, YANG Qichao, et al. Theoretical and experimental research on scroll expander used in small-scale organic Rankine cycle system [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E Journal of Process Mechanical Engineering, 2015, 229(1): 25-35.
- [41] MORINI M, PAVAN C, PINELLI M, et al. Analysis of a scroll machine for micro ORC applications by means of a RE/CFD methodology [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 132-140.
- [42] GARG P, KARTHIK G M, KUMAR P, et al. Development of a generic tool to design scroll expanders for ORC applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109, Part B: 878-888.
- [43] 王建吉, 刘涛, 胡天林. 变截面无油涡旋压缩机轴向间隙泄漏模型的研究 [J]. 流体机械, 2020, 48(9): 12-17.
- WANG Jianji, LIU Tao, HU Tianlin. Study on axial clearance leakage model of oil-free scroll compressor with variable section [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(9): 12-17.
- [44] SONG Panpan, WEI Mingshan, LIU Zhen, et al. Effects of suction port arrangements on a scroll expander for a small scale ORC system based on CFD approach [J]. Applied Energy, 2015, 150: 274-285.
- [45] WEI Mingshan, SONG Panpan, ZHAO Ben, et al. Unsteady flow in the suction process of a scroll expander for an ORC waste heat recovery system [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 460-470.
- [46] SONG Panpan, ZHUGE Weilin, ZHANG Yangjun, et al. Unsteady leakage flow through axial clearance of an ORC scroll expander [J]. Energy Procedia, 2017,

- 129: 355-362.
- [47] 吴竺, 方晓艳, 朱彤. 径向间隙对涡旋膨胀机性能的影响 [J]. 机械设计与制造, 2017(S1): 41-44.
WU Zhu, FANG Xiaoyan, ZHU Tong. Effects of radial clearance on performances of scroll expander [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(S1): 41-44.
- [48] SONG Panpan, WEI Mingshan, ZHANG Yangjun, et al. The impact of a bilateral symmetric discharge structure on the performance of a scroll expander for ORC power generation system [J]. Energy, 2018, 158: 458-470.
- [49] PENG Bin, LI Yaohong, ZHAO Shengxian. Unsteady numerical simulation of scroll expander based on CFD [C]//International Compressor Engineering Conference. Purdue Mall, West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2018: 2641.
- [50] EMHARDT S, SONG Panpan, TIAN Guohong, et al. CFD analysis of variable wall thickness scroll expander integrated into small scale ORC systems [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2272-2277.
- [51] EMHARDT S, TIAN Guohong, SONG Panpan, et al. CFD modelling of small scale ORC scroll expanders using variable wall thicknesses [J]. Energy, 2020, 199: 117399.
- [52] KANE M, LARRAIN D, FAVRAT D, et al. Small hybrid solar power system [J]. Energy, 2003, 28 (14): 1427-1443.
- [53] SAITOH T, YAMADA N, WAKASHIMA S I. Solar Rankine cycle system using scroll expander [J]. Journal of Environment and Engineering, 2007, 2(4): 708-719.
- [54] MANOLAKOS D, PAPADAKIS G, KYRITSIS S, et al. Experimental evaluation of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination [J]. Desalination, 2007, 203(1/3): 366-374.
- [55] MATHIAS J A, JOHNSTON J R Jr, CAO Jiming, et al. Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in, and energetic and exergetic modeling of, an organic Rankine cycle [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2009, 131(1): 012201.
- [56] WANG H, PETERSON R B, HERRON T. Experimental performance of a compliant scroll expander for an organic Rankine cycle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2009, 223(7): 863-872.
- [57] HOQUE S M E. Experimental investigation of an R134a based organic Rankine cycle [D]. Oshawa, Ontario, Canada: University of Ontario Institute of Technology, 2011.
- [58] BELL I H. Theoretical and experimental analysis of liquid flooded compression in scroll compressors [D]. Purdue Mall, West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2011.
- [59] WOODLAND B J, BRAUN J E, GROLL E A, et al. Experimental testing of an organic Rankine cycle with scroll-type expander [C]//International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Purdue Mall, West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2012: 1324.
- [60] TWOMEY B. Experimental test results from QGECE laboratory small-scale organic Rankine cycle using a scroll expander [EB/OL]. (2013-07-16) [2023-05-01]. <https://core.ac.uk/reader/15151430>.
- [61] 严雨林. 有机朗肯循环系统涡旋膨胀机工作过程分析与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [62] 韦伟, 严瑞东, 刘杰, 等. 采用涡旋式膨胀机的有机朗肯循环系统试验研究 [J]. 流体机械, 2012, 40 (11): 1-4.
WEI Wei, YAN Ruidong, LIU Jie, et al. Experiment study on organic Rankine cycle system using scroll expander [J]. Fluid Machinery, 2012, 40(11): 1-4.
- [63] BRACCO R, CLEMENTE S, MICHELI D, et al. Experimental tests and modelization of a domestic-scale ORC (organic Rankine cycle) [J]. Energy, 2013, 58: 107-116.
- [64] DECLAYE S, QUOILIN S, GUILLAUME L, et al. Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (organic Rankine cycle) system with R245fa as working fluid [J]. Energy, 2013, 55: 173-183.
- [65] ZHOU Naijun, WANG Xiaoyuan, CHEN Zhuo, et al. Experimental study on organic Rankine cycle for waste heat recovery from low-temperature flue gas [J]. Energy, 2013, 55: 216-225.
- [66] JRADI M, LI Jinxing, LIU Hao, et al. Micro-scale ORC-based combined heat and power system using a novel scroll expander [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, 9(2): 91-99.
- [67] 潘登, 高乃平, 谢飞博, 等. 有机朗肯循环涡旋膨胀机性能试验研究 [J]. 流体机械, 2014, 42(5): 10-14.
PAN Deng, GAO Naiping, XIE Feibo, et al. Experimental research on the performance of scroll expander used in organic Rankine cycle [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(5): 10-14.
- [68] CHANG J C, HUNG T C, HE Yaling, et al. Experimental study on low-temperature organic Rankine cycle

- utilizing scroll type expander [J]. *Applied Energy*, 2015, 155: 150-159.
- [69] MIAO Zheng, XU Jinliang, ZHANG Kai. Experimental and modeling investigation of an organic Rankine cycle system based on the scroll expander [J]. *Energy*, 2017, 134: 35-49.
- [70] FENG Yongqiang, HUNG T C, WU Shanglun, et al. Operation characteristic of a R123-based organic Rankine cycle depending on working fluid mass flow rates and heat source temperatures [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 131: 55-68.
- [71] YANG S C, HUNG T C, FENG Yongqiang, et al. Experimental investigation on a 3 kW organic Rankine cycle for low-grade waste heat under different operation parameters [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 756-764.
- [72] 李亚楠. 涡旋膨胀机在有机朗肯循环发电系统中的效率研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [73] 孙健. 涡旋膨胀机的热力学特性及试验研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [74] 曹鑫鑫, 舒歌群, 田华, 等. 涡旋膨胀机润滑系统设计及输出性能实验研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 91-97.
- CAO Xinxin, SHU Gequn, TIAN Hua, et al. Experimental study on output performance of scroll expander with designed lubrication system [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 91-97.
- [75] 曹鑫鑫. 涡旋膨胀机全工况热力特性实验及理论研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [76] 彭斌, 杨宝坤, 巩楷刚, 等. 有机朗肯循环无油涡旋膨胀机热力学特性研究及试验验证 [J]. *热力发电*, 2023, 52(8): 60-69.
- PENG Bin, YANG Baokun, GONG Kaigang, et al. Research on thermodynamic characteristics and experimental verification of ORC oil-free scroll expander [J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(8): 60-69.
- [77] 石磊, 赵亚珑, 彭斌. 基于小型 ORC 涡旋膨胀机变工况特性研究及实验验证 [J/OL]. *热力发电*: 1-10[2023-08-18]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfed.202306095>.
- SHI Lei, ZHAO Yalong, PENG Bin. Based on the study of variable operating conditions and experimental verification of a small-scale ORC with a scroll expander [J/OL]. *Thermal Power Generation*: 1-10[2023-08-18]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfed.202306095>.
- [78] 刘海伦, 王志奇, 刘湘杰, 等. 基于有机工质涡旋膨胀机的变工况特性分析 [J]. *节能*, 2021, 40(10): 19-22.
- LIU Hailun, WANG Zhiqi, LIU Xiangjie, et al. Off-design performance of scroll expander using organic working fluid [J]. *Energy Conservation*, 2021, 40(10): 19-22.
- [79] WESTPHALEN D, DIECKMANN J. Scroll expander for carbon dioxide air conditioning cycles [C]//International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2004: 690.
- [80] FUKUTA M, YANAGISAWA T, KOSUDA O, et al. Performance of scroll expander for CO₂ refrigeration cycle [C]//International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2006: 1768.
- [81] HIWATA A, IKEDA A, MORIMOTO T, et al. Axial and radial force control for a CO₂ scroll expander [J]. *HVAC&R Research*, 2009, 15(4): 759-770.
- [82] KAKUDA M, NAGATA H, ISHIZONO F. Development of a scroll expander for the CO₂ refrigeration cycle [J]. *HVAC&R Research*, 2009, 15(4): 771-783.
- [83] NAGATA H, KAKUDA M, SEKIYA S, et al. Development of a scroll expander for the CO₂ refrigeration cycle [C]//International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2010: 1952.
- [84] MURTHY A A, SUBIANTORO A, NORRIS S, et al. A review on expanders and their performance in vapour compression refrigeration systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 106: 427-446.

(编辑 亢列梅 杜秀杰)