

DOI: 10.19666/j.rlfed.202303046

储能系统中二氧化碳压缩机的研究进展

李红, 刘超, 何青

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 随着全球气候的不断变暖, 对空气中的 CO₂ 进行捕获利用已经成为可以减少温室气体污染的有效措施之一。CO₂ 储能系统不仅可以对空气中的 CO₂ 进行储存利用, 而且还可以用来消耗过量的电力以填补用电高峰期电力供应匮乏。压缩机作为 CO₂ 储能系统中的核心设备, 其性能的优劣直接影响着系统的整体性能。总结了 7 种不同形式的 CO₂ 压缩机的应用范围、性能特点以及国内外的研究现状; 论述了活塞式、离心式、轴流式 3 种压缩机在 CO₂ 储能系统应用时可能存在的潜在问题; 并给出了相应建议及改进思路。研究结果可为设计优化 CO₂ 压缩机提供参考。

[关键词] 二氧化碳; 储能系统; 压缩机; 改进思路

[引用本文格式] 李红, 刘超, 何青. 储能系统中二氧化碳压缩机的研究进展[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 1-10. LI Hong, LIU Chao, HE Qing. Research progress of carbon dioxide compressor in energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 1-10.

Research progress of carbon dioxide compressor in energy storage system

LI Hong, LIU Chao, HE Qing

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As the global climate continues to warm, capturing carbon dioxide in the air has become one of the most effective measures to reduce greenhouse gas pollution. Carbon dioxide storage systems not only store carbon dioxide in the air, but also consume excess electricity to fill the shortage of electricity supply during peak periods. As the core equipment of CO₂ storage system, the performance of the compressor directly affects the overall performance of the system. This paper summarizes the application scope and performance characteristics of seven different forms of carbon dioxide compressors and the current status of research at home and abroad. The potential problems that may exist in the application of piston, centrifugal and axial flow compressors in CO₂ energy storage systems are discussed, and corresponding suggestions and improvement ideas are given. The results of the study can provide a reference for the design and optimization of CO₂ compressors in the future.

Key words: carbon dioxide; energy storage system; compressor; improvement ideas

CO₂ 是世界公认温室气体的主要来源, 对大气中的 CO₂ 进行回收利用已经成为可以减少 CO₂ 污染的有效措施之一。与空气相比 CO₂ 具有诸多优点, 如 CO₂ 的热力性能好, 气流密度高, 液体黏度低, 临界参数低 (7.38 MPa, 31.4 °C), 易于存储, 做功能力强, 传热性能好, 安全无毒等。因此, CO₂ 被广泛应用于跨临界和超临界功率循环、热泵循环、布雷顿循环以及储能系统中^[1]。

目前因压缩 CO₂ 储能 (compressed carbon dioxide energy storage, CCES) 示范及实验系统缺

乏, 针对 CCES 系统中压缩机选型问题方面的研究较少。同时, 由于 CO₂ 物性的特殊性, 目前 CO₂ 压缩机还存在着部分问题。压缩机作为 CCES 系统中一个重要组成部分, 对其进行深入研究和优化, 将有助于提高整个系统的性能和效率。

本文首先对 CCES 系统的发展历程、工作原理及工作特点进行了介绍; 然后对不同类型 CO₂ 压缩机的应用范围、性能特点及国内外研究现状进行了总结; 最后对 CCES 系统中压缩机应用的潜在问题进行了分析, 并给出相应建议及改进思路。

收稿日期: 2023-03-26 网络首发日期: 2023-09-13

第一作者简介: 李红 (1974), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为动力机械, bjlh@ncepu.edu.cn.

1 压缩 CO₂ 储能系统简介

洛桑联邦理工学院的 Morandin 教授等人^[2]最早于 2012 年提出了将跨临界 CO₂ 循环与电热储能系统 (thermo-electrical energy storage, TEES) 相结合的想法,并首次将 CO₂ 作为工质应用于储能系统。杨科等^[3]以压缩空气储能 (compressed air energy storage, CAES) 技术为基础提出了以 CO₂ 为工质的 CCES 系统。CCES 系统可依据系统中膨胀机出口处 CO₂ 的状态,区分为跨临界 CO₂ 储能系统 (transcritical carbon dioxide energy storage, TC-CES) 和超临界 CO₂ 储能系统 (supercritical carbon dioxide energy storage, SC-CES), 即膨胀机出口处压力与温度低于 CO₂ 临界点 (7.38 MPa, 31.4 °C) 为 TC-CES 系统, 高于临界点为 SC-CES 系统^[4]。然而, 部分学者针对 TC-CES、SC-CES 系统对容器材料要求较高且储能密度相对较低的问题, 提出了液态 CO₂ 储能 (liquid carbon dioxide energy storage, LCES) 系统, 即高压侧与低压侧 CO₂ 均以低压液态 (0.5~1.0 MPa, -56~-40 °C) 形式储存, 极大程度上降低了存储压力, 提高了储能密度。近年来研究者提出将 CCES 系统与风电、光电、火电等其他能源系统进行耦合, 以提高整体能源转换效率^[5]。但是, 目前对 CCES 系统的研究还主要停留在系统理论设计及分析阶段, 示范应用方面较为缺乏。

图 1 为 CCES 系统的工作原理。该系统主要由高、低压储罐、压缩机、透平以及蓄热蓄冷单元组成。依据能量转换方向的不同, CCES 系统的工作过程可分为储能与释能 2 个工作阶段。在储能阶段, CCES 系统利用富余的电能或风能等可再生能源驱动压缩机对经过蓄冷换热器的气态 CO₂ 进行压缩, 压缩后的 CO₂ 再经过再冷器吸收压缩热后变为液态存储在高压储气罐内。在释能阶段, 高压储罐内的液态 CO₂ 经过再热器加热后进入膨胀机, 驱动透平膨胀机做功并对外输出电能, 输出的电能可以用来消除用电高峰期电力供应的匮乏隐患, 从而起到削峰填谷的作用^[5]。

由于 CO₂ 在释放储存能量时膨胀速度较快, 因此与 CAES 系统相比 CCES 系统的响应速度较快, 通常其可用分钟级来衡量。同时, CCES 系统规模可以为几十千瓦到几百兆瓦, 灵活性较高。基于 CCES 系统响应速度快、灵活性高的特点通常适用于以下应用场景 (表 1)。

CCES 系统的转换效率通常为 60%~70%, 比起

目前示范应用的 CAES 系统 (表 2), CCES 系统的转换效率相对较高。由于对设备的耐高温、耐高压性要求较高, 相比于 CAES 系统, CCES 系统的成本相对较高。随着技术的发展和规模化应用, 未来 CCES 系统成本有望降低。

压缩机作为 CCES 系统储能阶段中的关键设备, 其性能的优劣直接影响着系统的转换效率, 因此对 CO₂ 压缩机性能研究对提升 CCES 系统的转换效率来说意义重大。

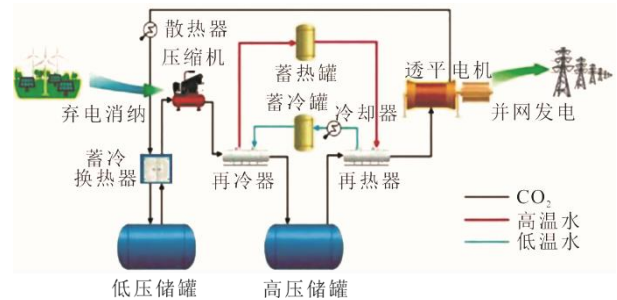


图 1 CO₂ 储能系统原理

Fig.1 Carbon dioxide energy storage system schematic

表 1 CCES 系统适用场景

Tab.1 Application scenarios for CCES systems

应用场景	具体说明
园区分布式供能	参与园区用户侧电能质量调节, 同时提供冷能、热能、结晶空气等多种能源
备用能源	可以用作备用能源, 减少电力系统投资, 提高电力系统安全性和可靠性
调峰、调频	可用于电网调峰、调频, 削减电网符合峰谷差, 平衡电力负荷, 提高电网输送能力与稳定性
与可再生能源结合	与可再生能源结合, 有利于改善新能源的输出特性, 优化各类电源估摸配比, 提高可再生能源消纳和发电品质
峰谷差价	在低谷电价时段储能, 在高峰电价时段放电, 基于峰谷电价用电成本管理稳定收益

表 2 CCES 与 CAES 系统转换效率对比

Tab.2 Comparison of conversion efficiency between CCES and CAES systems

储能系统	转换效率/%
压缩 CO ₂ 储能系统	60.0~70.0
河北廊坊 1.5 MW 超临界压缩空气储能示范	54.0
山东肥城 10 MW 压缩空气储能示范	60.2
中盐金坛 60 MW 盐穴压缩空气储能示范	58.2

2 CO₂ 压缩机的分类及性能比较

按照压缩工质方式的不同, 压缩机通常可以分为容积式压缩机、透平式压缩机 2 大类。容积式压缩机是通过改变压缩机工作腔内有效工作体积的方式提高工质的压力, 即工质压力的提升是通过压

缩工质体积实现的。透平式压缩机工质压力的提升则是通过使工质随着压缩机叶轮高速旋转的方式实现的。这种高速旋转可以让工质流动速度迅速增加，随之而来的高速流动的工质会通过静止的扩压元件减速，从而达到增加压力的效果。

依据容积式压缩机工作容积改变方式的不同，可以将其分为往复式压缩机与回转式压缩机 2 类。其中活塞式压缩机是应用最广泛的往复式压缩机；回转式压缩机则包括螺杆式压缩机、涡旋式压缩机、滑片式压缩机以及滚动转子式压缩机等。透平式压缩机可以依据气体流动方向的不同，将之区分为离心式压缩机与轴流式压缩机 2 类。

由于各类压缩机结构及运行机理的不同，其适用的环境以及其本身所表现出的优缺点也不相同。图 2 为 7 类压缩机排气量及压力的适用范围^[6-7]，表 3 总结了这 7 类压缩机的工作特点及应用情况。对比各类压缩机的特点与适用范围可以得出以下结论：活塞式压缩机适用于高压、中小流量以及

较小排气量的压缩需求；回转式压缩机通常适用于低压、中小流量的压缩需求；透平式压缩机则通常被用于高流量需求的场合。因此，在选取压缩机过程中，需要根据实际需求来选择合适的类型和规格。

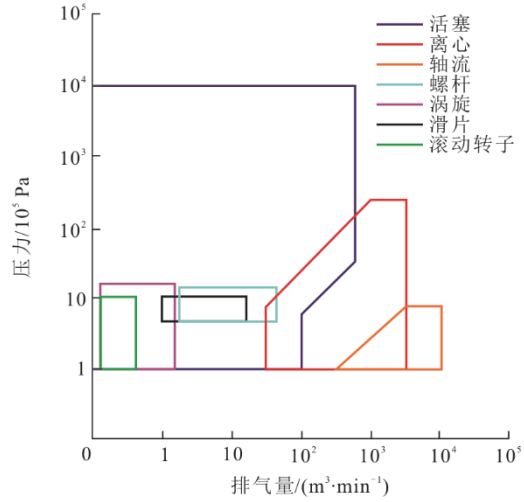


图 2 各类压缩机适用范围
Fig.2 Scope of application for each type of compressor

表 3 各类压缩机特点及应用情况
Tab.3 Characteristics and applications of each type of compressor

机型	优点	缺点	应用情况
往复式 活塞式	从低压到高压，适用压力范围广；热效率高；排气压力稳定，几乎不受气量调节影响	结构复杂制造麻烦，易损件多，维修工作量大；转速低，大型时仅 300~500 r/min；排气不连续，气流脉动大	商用冰机、超市冷柜、汽车空调；医药、食品加工等行业的制冷设备；超临界 CO ₂ 萃取、CO ₂ 储存
容积式压缩机 回转式	螺杆式	结构简单，维修方便，无故障连续运转时间长；排气连续，运转平稳且无气流脉动；比较能耐气体中杂质、油、水等（杂质<100 μg/m ³ ）	高温熔体的制冷、金属处理等工业领域；商用冷柜、家用空调
	涡旋式	无气阀，阻力小；进、排气连续，无气流脉动；多个腔可同时工作，转速均匀	型线加工精度要求高；密封困难；流量小，排气压力低；工作腔难以实现外冷却
	滑片式	可靠性较高并可以长时间连续工作；无单独吸气阀，容积效率较高；运转平稳，噪声低，振动小且气动冲击小	泄漏摩擦损失较大，机械效率较低；排气压力受限。
	滚动转子式	无吸气阀，吸气压损小，活塞与气缸接触为滚动摩擦，摩擦损失少；功耗小，振动小，运转平稳；结构紧凑，零件数少；能适应变工况运行	制造精度要求高；高转速、大功率时，压缩机的震动与磨损增大
透平式压缩机	离心式	结构简单，制造方便，转速高，尺寸小，重量轻；适应温度范围广（100~350 ℃）；排气平稳，无气流脉动	排气压力会随流量改变而改变；热效率低；流量小制造有困难，目前工业上最小为 10 m ³ /min；不耐杂质与液滴
	轴流式	气流流动摩擦损耗较小，效率较高；流量大，且易于调节	稳定工作范围小；对气体中灰尘污染敏感；气体动力引起的振动易于造成叶片的损坏

3 CO₂ 压缩机的研究现状

3.1 活塞式压缩机

由于活塞式压缩机能够适应较广的压力范围，早在 19 世纪便开始使用。随着活塞式压缩机制造技术和维修技术的日益成熟，至今其仍在冰箱、空调制冷以及储能系统领域中被广泛应用。

针对 CO₂ 活塞式压缩机工作过程的数学模拟方面。Tuhovcak 等人^[8]对比分析了 Disconzi、Adair、Annand、Woschni、Aigner 5 种常用的传热模型^[9-13]。这 5 种传热模型的共同点在于都使用了无量纲努塞特数作为无量纲传热系数，并使用雷诺数表现气体的速度特性。在分别改变气缸表面温度、吸气温度以及曲轴转速的条件下，得出了以下结论：Adair 模型对气缸表面温度变化的敏感性最弱；Disconzi 模型中的热通量值及压缩阶段开始时气体温度值最大，气缸与气体之间传递的总热量不会随着曲轴转速的降低而发生显著变化。Wang 等人^[14]针对 CO₂ 活塞式压缩机内部传质的过程，提出了一种测量气缸内 CO₂ 质量的新方法。该方法可以有效地分析气缸内 CO₂ 质量的变化过程，通过该方法计算得到的 CO₂ 的质量流量的值与实际测量的结果进行对比，其误差小于 5.2%。

Liu 等人^[15]采用数值方法研究了阀门参数对跨临界 CO₂ 活塞式压缩机性能的影响，经过模拟研究得出了阀门处的压力损失随弹簧刚度变化的规律及弹簧刚度过小会产生阀门回流的结论，同时也得出了随着阀片质量的变化，缸内气体质量的变化规律以及缸内气体压力随着进、排气口面积变化的规律。Tao 等人^[16]通过建立三维流固耦合 (FSI) 模型研究了压缩机的转速及阀门参数对阀门振荡和阀门延迟关闭的影响，并最终得到了可以预测特征转速的经验关系式。

Ma 等人^[17]开发了一种可以应用于跨临界 CO₂ 制冷循环的半封闭式活塞式压缩机 (图 3)。通过改变压缩比、气阀参数及转速等设计参数，利用活塞式压缩机在跨临界 CO₂ 制冷循环中进行实验，首次对活塞式压缩机排气阀的运动进行了测量，并研究了影响排气阀运动的主要因素。这项研究为今后活塞式压缩机的研究提供了有益参考，同时也为跨临界 CO₂ 制冷循环的优化提供了实验基础。

对于 CO₂ 活塞式压缩机来说，目前世界上占据重要市场的生产制造商主要包括意大利 Dorin 压缩

机公司、Frascold 压缩机公司、Refcomp 压缩机公司以及德国 Bizer 制冷技术有限公司等。表 4 总结了这 4 个制造商代表性的 CO₂ 压缩机产品系列。因 Bizer 压缩机适配变频器的特点，2022 年北京冬奥会采用了 20 台 Bizer ECOLINE+ 系列的 CO₂ 压缩机，与传统制冷压缩机相比，可节能 40% 以上^[18]。



图 3 CO₂ 活塞式压缩机
Fig.3 CO₂ piston compressor

表 4 CO₂ 活塞式压缩机制造商及产品特性
Tab.4 Manufacturers and product features of CO₂ piston compressor

制造商	产品系列	适用范围	排气量/(m ³ ·h ⁻¹)
Dorin	CD	跨临界	1.12~59.53
	CDS	亚临界	1.90~48.80
Bizer	ECOLINE	跨临界	3.30~38.20
	ECOLINE+	跨临界	4.50~39.50
Frascold	SL	亚临界	1.30~46.90
	SK	亚临界	1.70~19.80
	TK	跨临界	1.90~25.30
Refcomp	SPS	亚临界	1.50~48.50
	SPT	跨临界	4.40~25.50

3.2 螺杆式压缩机

西安交通大学的 Wang 等人^[19]通过采用多元回归的分析方法得出了 CO₂ 双螺杆压缩机容积效率与等熵效率随吸入压力和压比变化的函数表达式，且该表达式的结果与实验数据的最大偏差小于 8%。同时，该团队还研究了喷油压力对压缩机性能的影响，得出了在保证压缩机工作的前提下，为提高压缩机效率，喷油压力不宜取过高的结论。

曲宏伟等^[20]针对 CO₂ 工质对螺杆式压缩机进行了优化设计，该 CO₂ 螺杆式压缩机转子型线采用新型双边非对称全圆弧包络线，转子齿数采用 5/8 齿，压缩机的轴承采用滚动轴承与滑动轴承结合的方式，这大大提高了压缩机的使用寿命，具体如图 4 所示。

剧成成等^[21]通过对螺杆式压缩机进行试验，发现螺杆式压缩机具有排气连续、运行稳定无气流脉

动、维护方便且成本低等优点，非常适用于亚临界 CO₂ 制冷系统。同时，该团队指出，CO₂ 螺杆式压缩机在运行过程中会受到多种因素的影响，导致工作条件多变，为了提高螺杆式压缩机的性能和稳定性，未来需要对其转子、型线、密封、油路等方面进行改进和优化。

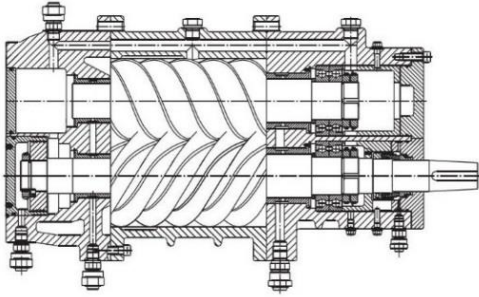


图 4 螺杆式压缩机结构

Fig.4 Structure of screw compressor

目前，生产 CO₂ 螺杆式压缩机的厂商主要包括烟台冰轮集团有限公司、福建雪人集团有限公司以及上海汉钟精机股份有限公司等^[22]。表 5 总结了 3 个公司生产的 CO₂ 压缩机产品的特性。

表 5 CO₂ 螺杆式压缩机制造商及产品特性
Tab.5 CO₂ screw compressor manufacturers and product applicability

制造商	压缩机类型	特性
冰轮集团	CO ₂ 螺杆式压缩机	适用于 NH ₃ /CO ₂ 复叠式系统，与传统氨双级压缩机相比，制冷效率提高了 8.8%
雪人集团	开启式喷油螺杆压缩机	可用 CO ₂ 为制冷剂，排气量范围为 161~10 000 m ³ /h
汉钟精机	半封闭式螺杆压缩机	适用于亚临界 CO ₂ 系统

3.3 涡旋式压缩机

涡旋式压缩机是由 1 个固定渐开线的涡旋盘和 1 个呈偏心回旋平动的渐开线的运动涡旋盘组成，其工作原理是通过使运动涡旋盘不断转动改变压缩腔的体积，进而改变气体的压力。Hao 等人^[23]建立了可以预测 CO₂ 涡旋式压缩机性能的模拟程序，并分析了压比及压缩机转速对压缩机效率的影响，程序模拟结果与实验结果进行对比误差在 5% 以内。

切向泄漏是 CO₂ 涡旋式压缩机普遍存在的问题，Rak 等人^[24]针对这一问题进行了深入的研究。研究发现当面临高体积气体损失时，流入和流出工作腔的泄漏流会显著影响工作腔内的传热。因而 Rak 等人提出了一种包括切向泄漏流修正因子的新的努塞尔数关系式，并将计算的结果与数值模型对

比误差小于 15%。北京理工大学的 Zheng 等人^[25]研究了径向间隙和侧壁粗糙度对切向泄漏的影响规律。研究发现由于超临界 CO₂ 高密度，切向泄漏对径向间隙的变化会变得非常敏感。与径向间隙为 16 μm 的模型相比，径向间隙为 20 μm 和 24 μm 模型的容积效率分别降低了 5.48% 和 16.35%。由于侧壁粗糙度的增大会有效地增大 CO₂ 的流动阻力，模型的容积效率和等熵效率随着侧壁粗糙度逐渐增加而不断增大。

Zheng 等人^[26]针对 CO₂ 涡旋式压缩机径向泄漏的问题，讨论了涡旋齿顶部微槽的几何参数对径向泄漏的影响。结果表明，增加槽数和隔板能有效地降低镜像泄漏量，但随着微槽深度的不断增加，径向泄漏量会先减小后增大。Oh 等人^[27]对 CO₂ 涡旋式压缩机中定涡盘与动涡盘之间的摩擦磨损特性进行了研究。结果表明，磨损量会随法向载荷和转速的增加而增加，随表面粗糙度的减小而减小，在该压缩机中使用 PAG（多元醇酯）润滑剂比使用 POE（聚亚烷基二醇）润滑剂更具优势。

日本的 DENSO 公司、松下（MATSUSHITA）公司、三菱重工（MITSUBISHI）公司分别研制并生产了 CO₂ 涡旋式压缩机，该种压缩机被广泛应用于 CO₂ 热水器中^[28]。

3.4 滑片式压缩机

滑片式压缩机属于容积式压缩机的一种。由于其转子表面与划片端部表面存在间隙，因此在工作过程中会存在气体泄漏现象，特别是对于 CO₂ 压缩机，泄露相对更大。由于泄露损失受压缩机转速影响，转速越高压缩机的泄露损失越小，因此 CO₂ 滑片式压缩机更适合在高转速条件下工作^[29]。

日本静冈大学的 Fukuta 与美国马里兰大学的 Radermacher^[30]合作进行了 CO₂ 跨临界制冷循环中滑片式压缩机的应用研究。研究发现，相对于 R134a 滑片式压缩机，CO₂ 滑片式压缩机存在更大的泄露损失和相对较低的容积效率。如果保持与 R134a 滑片式压缩机相同的容积效率，CO₂ 滑片式压缩机的总余隙必须减少到 R134a 滑片式压缩机总余隙的 2/3。此外，CO₂ 跨临界制冷循环中的滑片式压缩机还可以设计成 2 级压缩。相比于单级压缩，2 级压缩可以减小滑片上的压差，从而提高阀门的强度可靠性和压缩机的机械效率。

3.5 滚动转子式压缩机

滚动转子式压缩机作为回转容积式压缩机的

一种,其主要依靠气缸中偏心圆筒形转子的运动对工质进行有效压缩,主要基本部件包括气缸、转子、弹簧等。

上海交通大学的 Yang 等人^[31]开发了一种可用于跨临界 CO₂ 循环的新型 2 级滚动转子式压缩机,该压缩机的特点为壳体内背压高、润滑性好、油流量低。该团队对该压缩机进行了详尽的实验研究,最终发现 2 级的排气通道损失要远远高于压缩机的其他损失。

在数学模型方面,新加坡南洋理工大学的 Ooi^[32]建立了滚动转子式压缩机的数学模型,用来评估跨临界 CO₂ 循环中压缩机的性能。结果表明:摩擦损失会随排气压力线性增加;机械效率在给定排气压力范围内(7~12 MPa),变化小于 1%;在给定压缩机的容量下,该压缩机在较高速度和较低气缸高度下运行压缩效率更高。

日本大金(Daikin)公司分别对 4.5、6.0、7.2 kW 的 CO₂ 滚动转子式压缩机的滑片覆盖了一定厚度的 DLH-SI 涂层,增加了压缩机的耐磨性,并于 2005 年 10 月起批量生产。该压缩机被广泛应用于 CO₂ 热泵热水器中^[33]。

3.6 离心式压缩机

美国 Sandia 实验室率先设计并搭建了发电功率 250 kW 的分流再压缩实验循环^[34-35],图 5 为 Sandia 实验室离心式压缩机叶轮。由图 5 可以直观地看出,超临界二氧化碳(S-CO₂)离心式压缩机的叶轮直径略大于硬币尺寸,结构更加紧凑。美国 Sandia 实验室的实验循环包括主压缩机和再压缩机,实验最高转速为 65 000 r/min,为设计转速的 92.8%,压缩机的气动效率为 60%~70%,与设计值基本一致,气动效率低的原因主要是采用半开式叶轮且叶轮叶顶间隙与出口叶片高度比达到 12%,压缩机内部存在严重的流动损失^[36]。



图 5 美国 Sandia 实验室离心式压缩机叶轮
Fig.5 The centrifugal compressor impeller in American Sandia laboratory

国内西安热工研究院有限公司建设了一套发电功率为 5 MW S-CO₂ 实验测试循环,压缩机采用 3 级串联的结构方式,叶轮采用闭式叶轮。在初步设计中,压缩机转速为 8 500 r/min,设计压比为 2.682 5,由于压缩机级数较多且转速较低,使得压缩机设计效率仅达到 72%^[37]。中科院工程热物理研究所自主设计并建成了兆瓦级 S-CO₂ 压缩机实验测试平台,并完成了质量流量 13 kg/s、实验最高转速 32 000 r/min 的多进口工况 S-CO₂ 离心式压缩机全载实验,总压比接近 2.0,等熵效率为 82%^[38]。

对于 CO₂ 离心式压缩机理论研究方面,大连理工大学的邵文洋等^[39]在 S-CO₂ 离心式压缩机的设计过程中引入了“凝结裕量”的概念来评估叶轮进口处工质的状态,基于“凝结裕量”这一参数来确定压缩机进口的速度比,控制压缩机进口的物性状态,并通过建立出口宽度、叶片数及转速的函数来确定叶轮出口的几何参数及速度三角形。滕庚等^[40]发现在偏离设计工况条件下传统的离心式压缩机预测模型存在较大误差,因而针对这一问题该团队提出引入流量系数作为修正因子,并将修正后的预测模型与实验数据对比最大误差小于 3%。

对于 CO₂ 离心式压缩机数值模拟方面,王泉等^[41]针对叶轮中出现冷凝现象的问题,通过对不同叶轮几何参数的比较分析,发现叶片进口角、前(后)掠角、轮毂进口半径在影响 CO₂ 冷凝程度以及冷凝区域大小方面具有明显的影响,而叶片包角对冷凝现象的影响相对较小。同时,王泉等^[42]还研究了 S-CO₂ 离心式压缩机流场内密度、比热和黏度等物性参数以及冷凝区域的分布状况。研究表明,在 S-CO₂ 离心式压缩机中,CO₂ 的物性特性对叶轮内流场有显著影响,并且冷凝现象的形成规律和原因也得到了深入的解析。但计算方法存在一些局限,如不能对液滴形成及其运动进行计算。Bao 等人^[43]对不同入口温度下压缩机的气动性能进行了研究,获得了各部件对进口温度的灵敏度特性。结果表明,当入口条件接近 S-CO₂ 临界点时,叶轮内两相区域增大,周向不均匀性加剧,在温度 309 K 时,两相区域会导致叶尖处产生焓上升的波动,叶片出口处会发生焓差。

CO₂ 离心式压缩机制造厂商主要包括丹佛斯(Danfoss)、三菱重工(Mitsubishi)、阿特拉斯(ATLAS COPCO)等公司,其生产的 CO₂ 离心式压缩机的特性及适用性见表 6。

表 6 CO₂ 离心式压缩机制造商及产品特性
Tab.6 CO₂ centrifugal compressor manufacturers and product applicability

制造商	产品系列	特性	适用性
Danfoss	Turbocor	磁悬浮轴承技术, 提高效率并降低了振动和噪声	适用于商业和工业制冷应用
Mitsubishi	CO ₂ NX	采用经济冷却功能, 降低损耗	
Atlas Copco	CD+	可变频驱动, 能够适应不同的负荷条件	

3.7 轴流式压缩机

Gou 等人^[44]针对大功率超临界 CO₂ 布雷顿循环系统中压缩机的应用问题, 设计了一台质量流量为 1 000 kg/s 的 S-CO₂ 轴流式压缩机, 并针对该压缩机进行了数值模拟研究。研究发现, 该压缩机设计点处的性能满足设计目标, 但设计点非常接近失速条件。经详细的流场显示, 轮毂附近出现小的拐角分离, 压缩机的顶部存在流体泄漏, 叶片前缘附近存在前临界区。

西安交通大学的李金星等^[45]设计了一台 4 级 S-CO₂ 轴流式压缩机, 并使用有限体积法对其气动性能进行了详细分析。研究结果表明, 叶顶间隙泄漏流受到流动加速和引射作用的影响, 可能导致叶尖吸力侧区域的流体温度和压力降低, 从而产生冷凝现象。

中国科学院工程热物理研究所的 Liu 等人^[46]针对 100 MW 超临界 CO₂ 布雷顿循环系统, 设计了一台轴流式压缩机, 并针对该压缩机进行了数值模拟分析。结果表明, 随着轴流式压缩机级数的增加, 每一级的效率会严重下降, 最后一级的效率比第一级低 7.3%。然而, 由于 S-CO₂ 密度大以及冷凝问题, 进口轴向速度和圆周速度会受到严重限制, 即轴流式压缩机需要相当多的级来达到目标压力比。据计算一台 S-CO₂ 再压压缩机大约需要 20 级, 如此多的级会降低压缩机的效率及可靠性, 并增加设备成本。

CO₂ 轴流式压缩机的制造厂商相对较少, 目前主要的生产厂商包括德国 MAN Energy Solutions 及英国 Howden。

4 CO₂ 储能系统中压缩机潜在的应用问题

由于 CO₂ 储能系统高压侧压力较大 (一般为 10~25 MPa), 回转式压缩机通常不适用于 CO₂ 储能系统。又因受流量的限制, 活塞式压缩机通常适用于小流量的 CO₂ 储能系统, 透平式压缩机适用于大

规模的 CO₂ 储能系统。表 7 总结了 CO₂ 活塞式压缩机、CO₂ 离心式压缩机、CO₂ 轴流式压缩机工作温度要求以及运行时绝热效率范围。

由于 CO₂ 具有黏性小、密度大、临界点低 (7.38 MPa, 31.4 °C) 等独特性质, CO₂ 储能系统中压缩机在工作时可能会存在部分潜在问题。

表 7 CO₂ 压缩机运行工况特点
Tab.7 CO₂ compressor operating conditions characteristics

CO ₂ 压缩机	绝热效率/%	最低工作温度范围/°C	排气温度的限制范围/°C
活塞式压缩机	65~80	-50 左右	50~120
离心式压缩机	75~85	-40~-60	40~100
轴流式压缩机	82~90	-30~-50	50~110

4.1 活塞式压缩机存在的问题及建议

针对储能系统来说, 对压缩机效率的评价指标主要采用压缩机的绝热效率。压缩机作为 CO₂ 储能系统中的重要部件之一, 其绝热效率的大小很大程度上影响着整个储能系统的循环效率。据计算, 压缩机效率每提高 1.0%, CO₂ 储能系统循环效率约提高 0.5%。然而, CO₂ 活塞式压缩机绝热效率通常在 80% 以下, 因此未来有必要针对提高 CO₂ 活塞式压缩机的绝热效率进行研究。

压力损失对绝热效率有影响^[15-17]。气体在进入或排出气缸前后, 需经过滤清器、气阀、冷却器、管道等一系列阻力元件, 从而产生流动阻力造成压力损失, 其中产生的压力损失以经过气阀阻力元件为主。图 6 为自动气阀结构^[5]。在气体进入和排出气缸时, 气体需要克服气阀弹簧力及阀片惯性力, 这会导致其实际进出气压力分别低于和高于名义进出气压力。这种情况会导致压缩机实际指示功率变大, 从而影响其绝热效率。

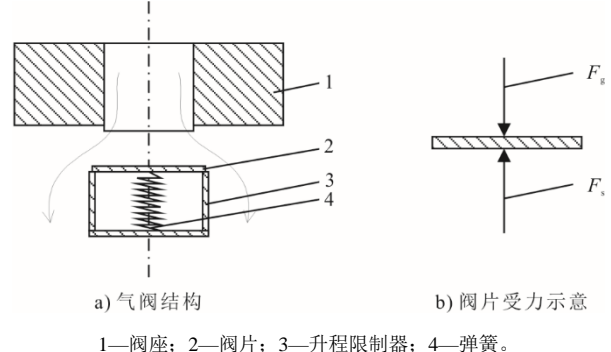


图 6 自动气阀结构
Fig.6 Structure of automatic valve

气体泄漏对绝热效率有影响^[6-7]。进、排气阀密封不好, 活塞环、填函的密封性能不佳等都会引起

气缸内气体向外泄漏或由相邻高压级向低压级气缸泄露。由于气体泄漏的影响,压缩机实际排出的气体量减小,气缸利用率降低,功率损耗增加,绝热效率减小。除此之外,气体的泄漏,对于多级压缩机来说,会改变级间压力分布,导致某级的压力比升高,排气温度增加,引起不安全因素。

针对压力损失的问题,未来可以从对压缩机的进、排气管道设计与气阀设计 2 方面进行研究分析。在进、排气管道设计过程中应尽量使得管道内壁光滑,同时保证压缩机在工作时管道不曲折,减少阻力损失。在气阀设计方面,应选择合适的气阀参数(气阀升程、弹簧刚度、气阀质量以及阀口面积等)与气体力相匹配。针对气体泄漏问题,未来可提高气缸、活塞环等元件的加工精度,合理优化活塞和缸体的几何结构,避免缸体和活塞间存在泄漏缝隙。除此之外,还应采用多道活塞环以起到多次节流的作用,增强压缩机的密封性,减少泄漏。

4.2 离心式压缩机存在的问题及建议

因受离心式压缩机流量工作范围的限制,通常 5 MW 级别以上的 CO₂ 储能系统可以采用离心式压缩机。因 CO₂ 具有黏性小、密度大、临界点低等特点,CO₂ 离心式压缩机在工作过程中主要存在 CO₂ 冷凝、叶顶间隙两相流动等问题^[41-43]。

由于 CO₂ 的临界点较低,接近临界态的 CO₂ 在压缩机内部流动时,特别是在弯曲流道处,会出现加速减压现象,从而使得在压缩机叶轮的叶片前缘会出现冷凝区域。这种冷凝现象如果长期存在会严重影响压缩机的安全运行和运行效率。

叶顶间隙两相流动问题是由于在叶顶间隙内流体受到“引射”与“叶顶前缘脱落涡”的共同作用,导致在主、分流叶片前缘均会出现明显的低压、低温区域,CO₂ 进入两相区。同时,叶顶前缘尖角位置工质状态低于临界点,会出现“凝结”的可能性。

为了应对冷凝问题和叶顶间隙两相流动问题,未来在 CO₂ 离心式压缩机叶轮设计的过程中,可以考虑以下几何参数:叶片进口角、前(后)掠角、轮毂进口半径、叶片包角以及叶顶间隙参数对这些现象的影响,并针对性地进行防冷凝设计,减少涡流对叶轮的影响,确保工质状态稳定,以增强压缩机的性能和可靠性。此外,还可以考虑在叶轮表面上喷涂特殊的涂层或采用特定的材料,以进一步提高耐腐蚀性和抗冷凝能力。

4.3 轴流式压缩机存在的问题及建议

与离心式压缩机相比轴流式压缩机适用于更大流量要求的 CO₂ 储能系统,轴流式压缩机的优势在于其绝热效率较高可达到 90%,但其缺点在于单级压比较低。为了满足 CO₂ 储能系统高压比的要求,轴流式压缩机的压缩工作级数必须设计较多。但是随着轴流式压缩机级数的增加,每一级的效率会严重下降^[46]。除此之外,与离心式压缩机类似,轴流式压缩机同样存在由于流动加速及引射作用在叶顶间隙处流体的温度和压力下降的现象。

为了应对轴流式压缩机单级压比低、级间效率差别大的问题,未来在 CO₂ 储能系统中压缩机应用时可以考虑采用轴流式压缩机与离心式压缩机组合使用的方案。具体而言,可以在低压区采用轴流式压缩机,在高压区则采用离心式压缩机,兼顾 2 种类型压缩机的优势,达到更高的效率和更好的性能。对于轴流式压缩机叶顶间隙处流体温度、压力下降问题,与离心式压缩机类似,未来可以从压缩机叶片设计的角度进行深入研究分析。

5 结论与展望

本文通过总结国内外不同形式的 CO₂ 压缩机的研究现状,以及分析 CO₂ 储能系统中 3 种压缩机应用时可能存在的潜在问题,得出了以下结论并给出了相应建议。

1) 不同形式的 CO₂ 压缩机,因排气量以及压力的适用范围不同,其工程适用性也不相同。通常活塞式压缩机适用于高压、中小流量的场合以及较小排气量的各种压力范围;回转式压缩机适用在低压、中小流量的场合;透平式压缩机则适用于大流量的情况。CO₂ 回转式与小型 CO₂ 活塞式压缩机因其结构特点,未来在商业制冷领域(商业空调、热泵热水器等)将有很好的应用潜力。大型 CO₂ 活塞式与 CO₂ 透平式压缩机因其运行工况的特点,未来更加适用于储能系统和工业制冷。

2) 回转式 CO₂ 压缩机普遍都存在气体泄露问题,其中涡旋式压缩机中的泄露以切向泄露为主。除泄露问题外,滑片式压缩机与滚动转子式压缩机还因存在较多摩擦损失导致其机械效率不高的问题。针对回转式 CO₂ 压缩机,未来可从降低气体泄露及减小摩擦损失的角度进行研究,优化压缩机型线的设计,加强型线加工精度,增强压缩机的密封性等。

3) 活塞式压缩机应用于 CO₂ 储能系统中存在

绝热效率低的问题。针对这一问题,未来可从减少活塞式压缩机压力损失与气体泄漏的角度出发,合理设计活塞式压缩机的气阀与进、排气管道的结构、增强气缸的密封性能,进而提高活塞式压缩机的绝热效率。

4) 透平式压缩机在 CO₂ 储能系统中应用可能存在叶片处 CO₂ 冷凝现象。除此之外,轴流式压缩机在应用的过程中还存在因级数过多导致压缩机效率降低、增加设备成本等问题。针对冷凝问题未来可从对压缩机叶轮设计的角度出发,在设计过程中考虑 CO₂ 冷凝,针对性做出防冷凝设计,提高透平式压缩机抗冷凝性能。对于轴流式压缩机单级压比低的问题,未来可考虑轴流式压缩机与离心式压缩机组合使用。

5) 由于目前 CCES 示范以及实验系统缺乏,本文仅分析了 CO₂ 压缩机在 CCES 系统中应用的潜在问题,并给出了相应建议。未来在 CCES 实验中压缩机工作时可能存在更多问题,应具体问题具体分析。

[参 考 文 献]

- [1] 何青,郝银萍,刘文毅.一种新型跨临界压缩二氧化碳储能系统热力分析与改进[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(5):93-101.
HE Qing, HAO Yingping, LIU Wenyi. Thermodynamic analysis and improvement of novel trans-critical compressed carbon dioxide energy storage system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(5): 93-101.
- [2] MORANDIN M, MARÉCHAL F, MERCANGÖZ M, et al. Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles-Part B: alternative system configurations[J]. Energy, 2012, 45(1): 386-396.
- [3] 杨科,张远,李雪梅,等.一种以二氧化碳为工质的压缩气体储能系统:CN203420754U[P].2014-02-05[2023-03-25].
YANG Ke, ZHANG Yuan, LI Xuemei, et al. A compressed gas energy storage system using carbon dioxide as the working mass: CN203420754U[P]. 2014-02-05[2023-03-25].
- [4] LIU H, HE Q, BORGIA A, et al. Thermodynamic analysis of a compressed carbon dioxide energy storage system using two saline aquifers at different depths as storage reservoirs[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 127: 149-159.
- [5] 郝佳豪,越云凯,张家俊,等.二氧化碳储能技术研究现状与发展前景[J].储能科学与技术,2022,11(10):3285-3296.
HAO Jiahao, YUE Yunkai, ZHANG Jiajun, et al. Research status and development prospect of carbon dioxide energy-storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3285-3296.
- [6] 林梅,孙嗣莹.活塞式压缩机原理[M].北京:机械工业出版社,1987:1.
LIN Mei, SUN Siying. Principle of piston compressor[M]. Beijing: Machine Press, 1987: 1.

- [7] 屈宗长.往复式压缩机原理[M].西安:西安交通大学出版社,2019:1.
QU Zongzhang. Principle of reciprocating compressor [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2019: 1.
- [8] TUHOVCAK J, HEJCIK J, JICHA M. Comparison of heat transfer models for reciprocating compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 607-615.
- [9] AIGNER R, STEINRÜCK H, SAVIC L. Modelling fluid dynamics, heat transfer and valve dynamics in a reciprocating compressor[C]//5th Conference of the EFRC. 2007: 171-180.
- [10] HE W, WANG J, WANG Y, et al. Study of cycle-to-cycle dynamic characteristics of adiabatic compressed air energy storage using packed bed thermal energy storage[J]. Energy, 2017, 141(PT.2): 2120-2134.
- [11] SOYHAN H S, YASAR H, WALMSLEY H, et al. Evaluation of heat transfer correlations for HCCI engine modeling[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 29(2/3): 541-549.
- [12] OOI K T, ZHU J. Convective heat transfer in a scroll compressor chamber: a 2-D simulation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(7): 677-688.
- [13] RAKOPOULOS C D, GIAKOUMIS E G. Second-law analyses applied to internal combustion engines operation[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2006, 32(1): 2-47.
- [14] WANG T, WANG J, GUO Y, et al. The study on mass transport process in the cylinder of CO₂ compressor based on p-V diagram[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 115314.
- [15] LIU Z, CAO X, WANG T, et al. Comparative evaluation of the refrigeration compressor performance under different valve parameters in a trans-critical CO₂ cycle[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 101: 34-46.
- [16] TAO W, GUO Y, HE Z, et al. Investigation on the delayed closure of the suction valve in the refrigerator compressor by FSI modeling[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 91: 111-121.
- [17] MA Y, HE Z, PENG X, et al. Experimental investigation of the discharge valve dynamics in a reciprocating compressor for trans-critical CO₂ refrigeration cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32: 13-21.
- [18] 范博文,杨俊玲,宋衍昌,等.基于专利分布的CO₂活塞压缩机市场分析[J].压缩机技术,2023(1):33-39.
FAN Bowen, YANG Junling, SONG Yanchang, et al. Market analysis of CO₂ piston compressor based on patent distribution[J]. Compressor Technology, 2023(1): 33-39.
- [19] WANG B M, XING Z W, WU H G. Experimental study on the performance of a twin-screw CO₂ compressor in NH₃/CO₂ cascade refrigeration system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, 224(8): 1141-1146.
- [20] 曲宏伟,李建风,邢子文.高效螺杆式CO₂制冷压缩机的优化设计[J].制冷与空调,2013,13(9):88-92.
QU Hongwei, LI Jianfeng, XING Ziwen. Optimization of high efficient CO₂ screw refrigeration compressor[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2013, 13(9): 88-92.
- [21] 剧成成,曲宏伟,李建风,等.CO₂亚临界循环用螺杆式压缩机的探讨[J].制冷与空调,2015,35(12):25-27.
JU Chengcheng, QU Hongwei, LI Jianfeng, et al. Discussion on screw compressor used in CO₂ subcritical system[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2015, 35(12): 25-27.

- [22] 李玲珊, 刘暘, 初琦. 2020年度中国压缩机市场发展分析[J]. 制冷技术, 2021, 41(增刊 1): 9-37.
LI Lingshan, LIU Yi, CHU Qi. Analysis on compressor Market of China in 2020[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(Suppl.1): 9-37.
- [23] HAO J Y, ZHAO Y Y, LI L S, et al. Theoretical and experimental study on the performance of CO₂ hermetic scroll compressor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, 224(7): 1019-1028.
- [24] RAK J, PIETROWICZ S. Internal flow field and heat transfer investigation inside the working chamber of a scroll compressor[J]. Energy, 2020, 202: 117700.
- [25] ZHENG S Y, WEI M S, HU C X, et al. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO₂[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(5): 971-983.
- [26] ZHENG S Y, WEI M, HU C, et al. Impact of micro-grooves in scroll wrap tips on the performance of a trans-critical CO₂ scroll compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 493-504.
- [27] OH S D, CHO S O, LEE Y Z. Friction and wear of POE and PAG oils in the carbon dioxide environment[C]//Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd., 2007, 120: 163-168.
- [28] 周子成. 二氧化碳热泵热水器近期的发展[J]. 制冷, 2009, 28(3): 33-39.
ZHOU Zicheng. The development of carbon dioxide heat pump water heater in recent years[J]. Refrigeration, 2009, 28(3): 33-39.
- [29] 杨德玺, 俞炳丰. 二氧化碳跨临界压缩机研究进展[J]. 制冷与空调, 2006, 6(2): 1-8.
YANG Dexi, YU Bingfeng. Review on transcritical CO₂ compressor[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2006, 6(2): 1-8.
- [30] FUKUTA M, RADERMACHER R. Performance of a vane compressor for CO₂ cycle[C]//4th HR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue University, USA. 2000: 339-346.
- [31] YANG J, QI Z, CHEN J, et al. Experimental study on a two-stage rolling piston CO₂ compressor based on p-V indicator diagrams[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(4): 995-1003.
- [32] OOI K T. Assessment of a rotary compressor performance operating at transcritical carbon dioxide cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(10): 1160-1167.
- [33] 郭蓓, 彭学院, 邢子文. 二氧化碳热泵热水器系统及压缩机的研究现状[J]. 家电科技, 2005(9): 42-44.
GUO Bei, PENG Xueyuan, XING Ziwen. Review on the development of carbon dioxide heat pump water heater system and its compressor[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2005(9): 42-44.
- [34] CONBOY T, WRIGHT S, PASCH J, et al. Performance characteristics of an operating supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(11): 111703.
- [35] WRIGHT S A, RADEL R F, VERNON M E, et al. Operation and analysis of a supercritical CO₂ Brayton cycle[R]. Albuquerque, NM, and Livermore, CA: Sandia National Laboratories (SNL), 2010: 1.
- [36] 朱玉铭. 超临界二氧化碳离心式压缩机研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2020: 1.
ZHU Yuming. Investigation on off-design performance and regulation law of the centrifugal compressor in compressed air energy storage system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Engineer Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2020: 1.
- [37] RAPP L M. Experimental testing of a 1 MW sCO₂ turbo compressor[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories(SNL-NM), 2019: 1.
- [38] 朱玉铭, 姜玉雁, 梁世强, 等. 超临界二氧化碳布雷顿发电循环压缩机实验研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 11-20.
ZHU Yuming, JING Yuyan, LIANG Shiqing, et al. Experimental research progress of supercritical carbon dioxide Brayton cycle compressor[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 11-20.
- [39] SHAO W, WANG X, YANG J, et al. Design parameters exploration for supercritical CO₂ centrifugal compressors under multiple constraints[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2016, 49873: V009T36A008.
- [40] 滕庚, 沈昕, 欧阳华, 等. 超临界二氧化碳离心压缩机性能预测模型研究[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 173-179.
TENG Geng, SHEN Xin, OUYANG Hua, et al. Research on performance prediction model of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 173-179.
- [41] 王泉, 饶杰, 朱晓农, 等. 几何参数对跨临界二氧化碳离心压缩机叶轮冷凝现象的影响研究[J]. 风机技术, 2020, 62(6): 18-22.
WANG Xiao, RAO Jie, ZHU Xiaonong, et al. The influence of geometrical parameters on the condensation phenomenon of the trans-critical carbon dioxide centrifugal compressor impeller[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(6): 18-22.
- [42] 王泉, 陈启明, 胡四兵, 等. 跨临界二氧化碳离心压缩机叶轮流场计算[J]. 流体机械, 2020, 48(10): 17-21.
WANG Xiao, CHEN Qiming, HU Sibing, et al. Numerical study of the flow field of the transcritical carbon dioxide centrifugal compressor impeller[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(10): 17-21.
- [43] BAO W, YANG C, WANG W, et al. Effect of inlet temperature on flow behavior and performance characteristics of supercritical carbon dioxide compressor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 380: 111296.
- [44] GOU J L, WANG W, MA C, et al. Numerical simulation of the performance of an axial compressor operating with supercritical carbon dioxide[C]//International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51524: V008T09A018.
- [45] 李金星, 王雨琦, 景祺, 等. 多级轴流超临界二氧化碳压气机气动性能研究[J]. 热力透平, 2019, 48(2): 83-88.
LI Jinxing, WANG Yuqi, JING Qi, et al. Investigation on aerodynamic performance of a multistage axial compressor for supercritical carbon dioxide power cycle[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(2): 83-88.
- [46] LIU Z Y, LUO W W, ZHAO Q J, et al. Preliminary design and model assessment of a supercritical CO₂ compressor[J]. Applied Sciences, 2018, 8(4): 595.

(责任编辑 邓玲惠)