

超临界二氧化碳离心式压缩机研究进展

刘晨光, 张磊

(华北电力大学动力工程系, 河北 保定 071003)

[摘要] 作为布雷顿循环的核心部件, 超临界二氧化碳离心式压缩机结构紧凑、效率高, 具有广阔的应用前景。基于此, 本文介绍了超临界布雷顿循环和超临界二氧化碳压缩机的发展历程和背景意义, 详细综述了目前超临界二氧化碳离心式压缩机在实验测试、数值模拟以及热力设计方面的研究成果及现状, 并针对超临界二氧化碳离心式压缩机的特点, 对其研究方向进行了展望。

[关键词] 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 离心式压缩机; 实验; 数值模拟; 热力设计

[中图分类号] TH432 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfd.202010268

[引用本文格式] 刘晨光, 张磊. 超临界二氧化碳离心式压缩机研究进展[J]. 热力发电, 2021, 50(期): 起始页码-终止页码.
LIU Chenguang, ZHANG Lei. Research progress of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(期): 起始页码-终止页码.

Research progress of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor

LIU Chenguang, ZHANG Lei

(Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: As the core component in Brayton cycle, supercritical carbon dioxide centrifugal compressor has the advantages of compact structure and high efficiency, which has broad application prospects. In this paper, the development history and background significance of supercritical Brayton cycle and supercritical carbon dioxide compressor are introduced, then the current experimental testing, numerical simulation and thermal design research status of supercritical carbon dioxide centrifugal compressors are reviewed in detail, and the characteristics of supercritical carbon dioxide centrifugal compressors are focused. At last, the research direction of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor is prospected.

Key words: supercritical carbon dioxide, Brayton cycle, centrifugal compressor, experiment, numerical simulation, thermal design

发电技术朝着高参数、大功率方向发展会使发电机组结构更加复杂、庞大, 而在高温高压工况下, 提高朗肯循环发电效率一般采用蒸汽超超临界机组, 这对材料特性也提出了更高要求^[1]。超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿动力循环能够很好地兼顾效率和安全问题, 不仅在化石能源发电方面具有较大应用价值, 而且在核能、地热能、太阳能发电等方面前景广阔^[2-4]。

离心式压缩机由于结构简单、单级压比高, 被广泛应用于工业生产中。Fleming 等人^[5]研究指出, 针对 50 MW 以内的 S-CO₂ 布雷顿循环, 选择离心

式压缩机具有较宽的稳定工作范围, 有助于 S-CO₂ 技术的前期探究。Liu 等人^[6]分别对离心式和轴流式压缩机进行了设计分析, 结果表明, 离心式压缩机由于结构简单、效率高, 更适用于 S-CO₂ 布雷顿动力循环。过去几十年, 离心式压缩机, 尤其是其工作机理, 得到了广泛研究, 但这些研究主要基于空气等介质, 而对于 S-CO₂ 流体作为介质的研究工作开展得并不深入。离心式压缩机作为 S-CO₂ 布雷顿循环的核心部件, 是在系统中具有“心脏”功能的关键设备, 为了深入了解其内部流动机理, 从而更好地设计离心式压缩机, 提高其安全运行效率, 有

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52076079)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52076079)

第一作者简介: 刘晨光 (1993), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为离心式压缩机内部流场的数值模拟, 2182214074@ncepu.edu.cn。

必要对 S-CO₂ 离心式压缩机开展详细的研究。

S-CO₂ 流体在离心式压缩机内不同位置流动时, 物理性质(物性)会发生相应变化, 从而导致压缩机表现出不同的性能。离心式压缩机内的 S-CO₂ 工质是否贴近临界点对压缩机性能影响较大, 压缩机进口越接近临界状态, 其压缩耗功越小, 系统性能越好。接近临界态的 S-CO₂ 在离心式压缩机内部流动时, 在弯曲流道处会出现加速减压的过程, 可能造成 S-CO₂ 流体进入两相区或产生“冷凝区”, 严重影响压缩机运行效率。研究两相区和“冷凝区”出现的位置和区域大小, 以及其影响因素, 对压缩机安全有效运行具有重要意义。

研究 S-CO₂ 离心式压缩机内的 CO₂ 流动特性, 不仅可以加深和完善对当前 S-CO₂ 物性变化的规律性认识, 具有重大的科学意义, 而且有助于形成先进的 S-CO₂ 离心式压缩机设计经验, 对离心式压缩机的高效率、安全稳定运行具有重要的实用价值。此外, 对 S-CO₂ 离心式压缩机内流体的物性变化及实际运行规律、不同组件之间的匹配等问题也需要进一步研究^[7]。

本文首先对离心式压缩机、布雷顿循环以及 S-CO₂ 流体进行简单介绍, 然后对当前国内外 S-CO₂ 离心式压缩机的研究进展进行总结和回顾, 最后对 S-CO₂ 离心式压缩机的研究方向进行展望。

1 S-CO₂ 离心式压缩机基础研究

1.1 离心式压缩机的结构和工作原理

离心式压缩机属于透平式压缩机的一种, 是指叶轮对流体做功时, 相对于叶轮的旋转轴中心线而言, 流体的流动方向主要是与其垂直的半径方向并指向离心方向。离心式压缩机主要由进气管道、离心叶轮、扩压器及集气管道(蜗壳)构成, 各部件的配合如图 1 所示。

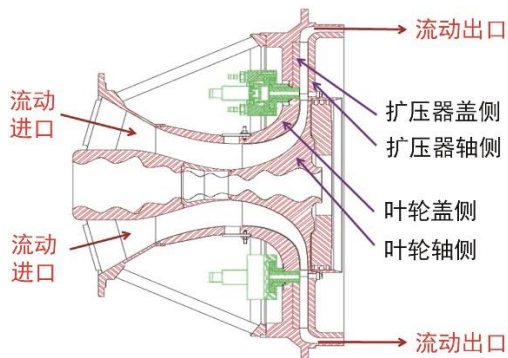


图 1 NASA CC3 型离心式压缩机结构简图^[8]

Fig.1 The configuration of NASA CC3 compressor^[8]

当流体被吸入压缩机腔室时, 叶轮对流体做功, 导致流体总体压力、速度和温度升高, 但是在叶轮局部位置压力和温度也会出现相反的情况。由于离心叶轮出口流体速度大, 在叶轮出口与集气管道之间设置扩压器, 可使流体减速增压。最后, 高压流体经过蜗壳和管道出口。

S-CO₂ 离心式压缩机的设计方案选择原则也是当前亟需研究的问题。对于大多数气体, 离心式压缩机都有很好的设计指导原则, 并且可以根据特定的速度或流量系数来确定压缩机的最佳几何形状。但是, 对于 S-CO₂ 离心式压缩机, 特定的设计指导并不能很好地匹配。针对当前压缩机设计中不同的 S-CO₂ 布雷顿动力循环功率, 图 2 总结了不同尺寸对应的的设计指导原则, 包括相应的涡轮转速、尺寸、类型, 以及轴承的密封、封严的类型、发电机的频率和轴的配置等。

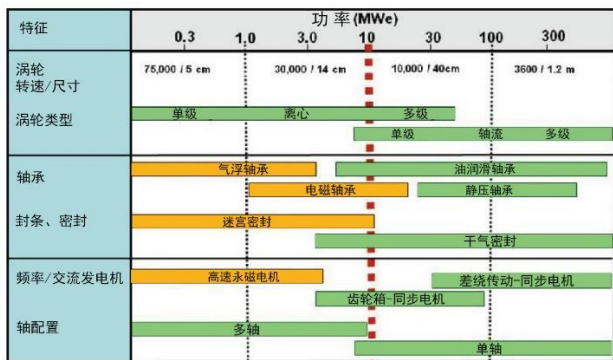


图 2 压缩机设计方案选择原则^[5]

Fig.2 Selection principle of compressor design scheme^[5]

1.2 S-CO₂ 布雷顿动力循环简介

S-CO₂ 离心式压缩机在布雷顿动力循环系统内工作, 其运行工况和系统运行状态息息相关。

布雷顿循环由美国工程师布雷顿于 1872 年提出, 包括绝热压缩、定压加热、绝热膨胀、定压冷却 4 个过程。随着科技的发展, 在布雷顿循环系统中, 有时还会加入中间冷却、分流、再压缩等过程以提高循环效率^[9]。

S-CO₂ 布雷顿动力循环一般包括发电机、热源、回热器、冷却器、压缩机和透平等部件。图 4 为最常见的简单 S-CO₂ 布雷顿动力循环示意。在简单 S-CO₂ 布雷顿动力循环中, 压缩机将 S-CO₂ 流体加压后送入透平, 带动透平转动、做功, 发电机发电; S-CO₂ 流体从透平流出后, 经过回热器、冷却器, 再次到达压缩机, 如此循环往复。

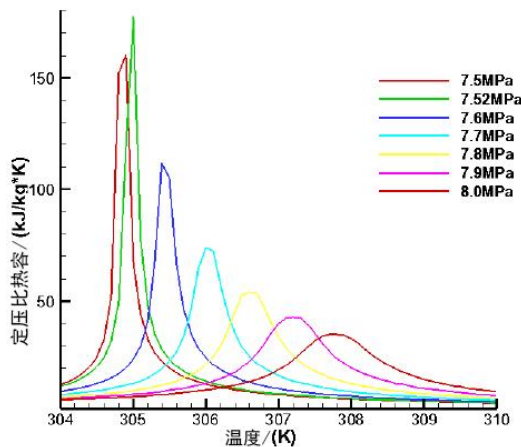
S-CO₂ 布雷顿循环具有以下优点: 循环效率高, 系统与部件整体尺寸小, CO₂ 性质稳定、无毒、不

易燃易爆、循环系统更安全^[10], 经济性显著^[11-12]。

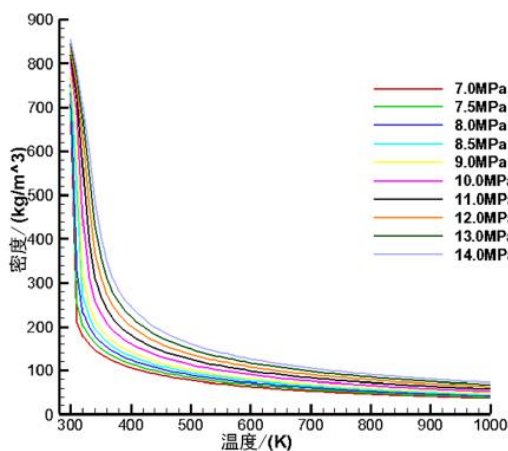
1.3 S-CO₂ 流体简介

超临界流体是指其状态位于气态和液态之间, 既有类似气体的特性, 比如与气体相近的黏性, 即黏性大大低于液体介质; 又有部分液体的性质, 如压缩性接近液体, 远小于气体^[13]。当 CO₂ 的温度和压力高于临界状态 (临界温度 304.1 K、临界压力 7.38 MPa) 时, 就称为 S-CO₂^[14]。在此状态下, CO₂ 的化学性质不活泼, 无毒无味, 不燃且不助燃, 高温腐蚀性较低, 导热系数高, 黏性低^[10]。

对于 S-CO₂ 布雷顿动力循环和离心式压缩机的运行效率和设计, S-CO₂ 的物性既是优势, 也是挑战。一方面, S-CO₂ 在临界状态的高密度、低黏性、高传热效率特性可以有效减少压缩机耗功; 另一方面, 随着温度、压力等条件的变化, 尤其当靠近临界点时, S-CO₂ 物性会发生急剧变化 (图 3), 对于循环系统和离心式压缩机的设计都是一个巨大挑战, 这也是当前研究人员最关注的问题。



a) 比定压热容



b) 密度

图 3 S-CO₂ 的物性变化^[15]

Fig.3 Changes of physical property of S-CO₂^[15]

2 S-CO₂ 布雷顿循环研究进展

2.1 国外研究

针对 S-CO₂ 布雷顿循环的研究已经进行了几十年。1950 年, Sulzer 兄弟公司提出 S-CO₂ 动力循环的理念^[16]; 20 世纪后半叶, 苏联的 Gokhstein 和 Verhivker 继续对该系统进行了研究; 20 世纪 60 年代, Angelino 和 Feher 提出在封闭的布雷顿循环系统中将 S-CO₂ 作为介质, 在最佳循环温度下, 利用少量的压缩功就可以使系统循环效率更高^[17-18]; 2010 年前后, 美国、日本、韩国、捷克等国家的研究机构先后开展了 S-CO₂ 布雷顿循环的实验和系统设计研究, 并将研究由核能推向太阳能、地热能等多个领域。其中, 美国较早进行了相关研究, 目前在国际上处于领先地位^[7]。

美国桑迪亚国家实验室^[19]较早进行了 S-CO₂ 布雷顿循环系统的实验研究并给出了详细的实验过程, 同时也针对更高功率的 S-CO₂ 布雷顿循环开展研究^[20], 以便进一步提高其循环效率, 希望可以开发 10 MW 布雷顿循环系统。麻省理工学院^[21]首先提出将 S-CO₂ 布雷顿循环应用于核反应堆系统, 并提供了反应堆的整体方案, 对其效率进行了优化。

日本东京工业大学^[22]在超临界布雷顿循环研究中, 提出一种将 S-CO₂ 部分预冷直接循环的方法, 主要是在布雷顿循环中增加了分流、中间压缩以及中间冷却过程, 用冷却的方式降低热量, 从而提高循环效率。东京工业大学^[23]还研究了太阳能 S-CO₂ 布雷顿循环, 采用中间冷却和回热方法可使系统效率最高达到 47%。

韩国科学技术院^[24]同样对 20 MW 的 S-CO₂ 布雷顿循环系统开展了研究。

捷克布拉格理工大学^[25]对 500 kW 的 S-CO₂ 布雷顿循环系统进行研究时, 在第 2 阶段选取离心式压缩机, 并预计效率可以达到 50%, 但由于某些原因并未达到预期效果。

近几年, 印度科学研究院^[26]也在进行 S-CO₂ 布雷顿动力循环的设计工作, 其为某 20 kW 闭环 S-CO₂ 布雷顿循环回路设计的试验设备如图 4 所示。

2.2 国内研究

国内的 S-CO₂ 布雷顿循环实验研究起步较晚, 相关报道有限。图 5 为中国科学院 (中科院) 工程热物理研究所自主设计并搭建的国内首座 MW 级 S-CO₂ 压缩机试验平台。目前, 国内高校和研究机构, 如浙江大学、上海交通大学、西安交通大学、武汉理工大学、西安热工研究院有限公司 (西

安热工院)以及七一一所等,正在组织筹措搭建 S- CO_2 布雷顿循环试验平台。



图 4 IISc 班加罗尔的简单回热 S- CO_2 布雷顿循环测试回路设施^[26]

Fig.4 The simple recuperated S- CO_2 Brayton cycle test loop facility at IISc Bangalore^[26]

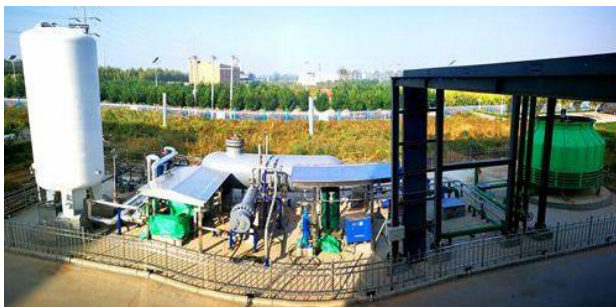


图 5 中科院自主设计搭建的国内首座 MW 级 S- CO_2 压缩机试验平台^[27]

Fig.5 The first MW-level S- CO_2 compressor experimental platform designed by Chinese Academy of Sciences^[27]

清华大学、厦门大学、哈尔滨工业大学、东南大学、西安热工院等院校和机构也针对 S- CO_2 布雷顿循环的循环设计、参数优化等展开研究。段承杰等^[28]建立了 S- CO_2 布雷顿循环再压缩模型,研究了温度、压力对循环效率的影响,并对系统进行了优化,解释了 S- CO_2 高效能量转化的机理。张一帆等^[29]针对含分流再压缩和再热的 S- CO_2 布雷顿循环,分析了分流系数、主压缩机出/入口压力、透平入口温度等对系统循环效率的影响,发现 S- CO_2 动力循环系统存在最佳压缩机出、入口压力和分流系数,使系统具有最佳循环效率。Wang 等人^[30]通过利用联合循环再压缩 S- CO_2 布雷顿循环的余热,发现跨临界二氧化碳(T- CO_2)与 S- CO_2 循环的组合较其他循环组合具有明显优势。陶志强等^[31]通过自主开发的程序对双级回热分流再压缩的 S- CO_2 布雷顿循环进行模拟发现,在任意给定的输入参数下存在 1 个使热效率和焓效率同时最优的最佳分流比,且透

平入口温度对最佳分流比无影响。

目前来看,国外对 S- CO_2 布雷顿循环的研究相对全面和深入,不仅有实验探究也有参数优化,而国内实验研究还处于起步阶段,主要工作集中于参数优化等方面。

3 S- CO_2 离心式压缩机研究进展

伴随着 S- CO_2 布雷顿循环研究的开展,其循环中各核心零部件的研究也在同步进行,但是与超临界布雷顿动力循环相比,关于 S- CO_2 离心式压缩机的研究进行得要晚一些。

3.1 国外实验研究

与国内相比,国外各大高校和科研院所针对 S- CO_2 离心式压缩机的研究相对深入和全面,美国桑迪亚国家实验室、韩国科学技术院和日本东京工业大学是最先开展相关实验研究的机构。

2010 年,美国桑迪亚国家实验室^[32]搭建了 S- CO_2 离心式压缩机实验平台,并对其设计的 S- CO_2 离心式压缩机进行了实验研究,结果证明了在近临界点进行 S- CO_2 压缩的可行性,同时发现离心式压缩机可以在临界点附近的单相、两相态宽广相态范围内稳定运行。图 6 为桑迪亚国家实验室的离心式压缩机叶轮,可以直观看出, S- CO_2 离心式压缩机的叶轮直径比硬币尺寸略大,结构更加紧凑。



图 6 美国桑迪亚国家实验室离心式压缩机叶轮^[32]

Fig.6 The centrifugal compressor impeller designed by Sandia National Laboratory, USA^[32]

韩国原子能研究所^[33]在实验中,将压缩机进口态设定为亚临界态,出口设置为超临界态,使整个工质发生跨临界压缩流动,结果发现:在低转速情况下,当压缩机工质从亚临界态进入超临界态时,没有产生明显的扰动;转速增加后,亚临界态受到的影响增加。

美国天然气技术研究院和西南研究院^[34]联合开展了 MW 级压缩机试验设计,但目前仍处于规划阶段。同时,美国 Echogen 公司^[35]也在试验 MW 级发电系统,据称该 CO_2 压缩机可以压缩两相或超临界工质,最高运行转速为 36 000 r/min,压缩机实验效率为 80%~85%。

3.2 国外数值模拟研究

国外学者针对 S-CO₂ 离心式压缩机内流场的变化进行了数值模拟, 主要分为 2 个方面: 一是计算程序设计和精度对流场模拟结果的影响; 二是压缩机结构和 CO₂ 介质对压缩机内部流场的模拟分析。

韩国科学技术院的 Lee 等人^[36]针对低压比实验条件下在临界点附近运行的 S-CO₂ 离心式压缩机性能测量具有高不确定性, 指出低压比压缩机等熵焓升较小, 增加了测量的不确定性, 随后针对实际气体模型对 S-CO₂ 离心式压缩机设计的影响, 对 3 种不同方法进行了评估, 结果表明, 基于定义的方法可提供最高的准确性, 但消耗大量计算时间, 而基于实际气体等熵指数的方法虽然准确性没有定义法准确, 但可以节省大量计算时间^[37]。荷兰代尔夫特理工大学的 Pecnik 等人^[38]通过 CFD 方法对工作在气液临界点以上的离心式压缩机叶轮进行了模拟, 验证了一种更精确的数值模拟方法。芬兰 Ameli 等人^[39]通过不同分辨率的实际气体属性表对 S-CO₂ 离心式压缩机进行模拟发现, 较高分辨率的模拟会减少计算精度的误差, 如图 7 所示。因此, 在模拟中计算设置的细微变化会对压缩机性能结果造成重大影响, 在模拟中要尽量实现足够的精度。

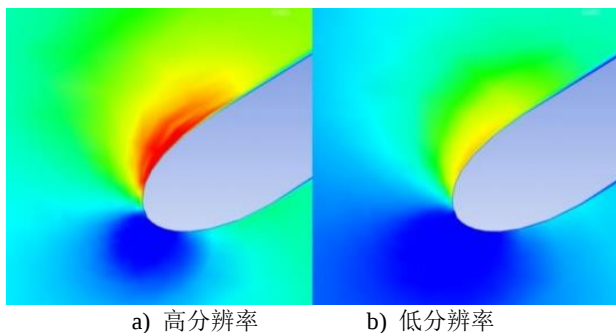


图 7 主叶片前缘马赫数分布^[38]

Fig.7 Distribution of the Mach number at leading edge of the main blade^[38]

荷兰代尔夫特理工大学^[40]对 S-CO₂ 离心式压缩机展开了定常数值模拟, 发现在压缩机主叶片的前缘和尾缘处出现了冷凝现象。针对该现象, 麻省理工学院的 Lettieri 等人^[41]提出了一种新的评估方法, 即建立一个无量纲标准, 用以确定是否可能发生冷凝。该标准涉及稳定液滴形成所需的时间, 而该时间取决于通过蒸气压力曲线的膨胀以及在饱和条件下流体的停留时间。当 2 个时间的比率远小于 1 时, 两相流动影响可以忽略不计, 并且通过实验证明了在模拟过程中不会发生冷凝。

Timothy 等人^[42]针对进口条件接近两相区时,

压缩机入口附近因流体加速导致的冷凝或气蚀现象, 分析了避免相变所需要的条件与入口压力、温度和马赫数的关系, 发现在 31.1~66.95 °C 范围存在 1 个不发生相变的临界总温, 且该临界总温随马赫数的增加而增加, 低于这个阈值的低温也可以避免发生相变。Brinckman 等人^[43]针对 S-CO₂ 压缩机在亚临界条件下是否有足够的凝结停留时间, 采用非平衡相变模型对液滴的凝结进行了预测。虽然模拟中有冷凝出现 (图 8 是 2 种方法模拟结果的液相体积分数的对比), 并且在非平衡模型中液滴有足够的停留时间形成局域成核位点, 但由于模型预测液滴将迅速汽化, 液滴的寿命预计较短。

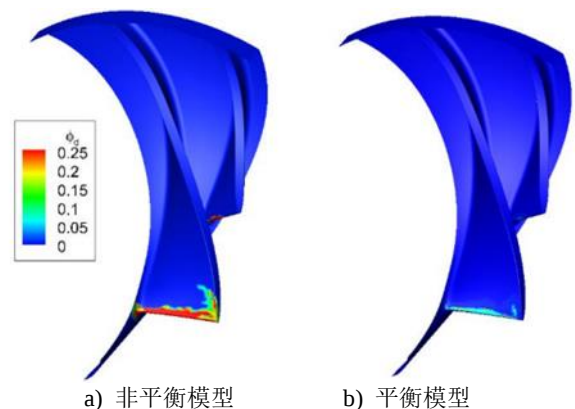


图 8 叶轮叶片上的液滴体积分数的轮廓^[43]

Fig.8 Contours of droplets' volume fraction on the impeller blade^[43]

此外, 麻省理工学院的 Baltadjiev 等人^[44]通过 CFD 方法研究了实际气体对 S-CO₂ 压缩机性能和匹配性的影响, 发现在典型 S-CO₂ 压缩机运行范围内, 无需考虑气体动力学效应的影响。接近临界点时, 由于等熵指数增加, 压缩机节流裕量会降低。

3.3 国外热力设计研究

国外学者同样也在探索更适合 S-CO₂ 离心式压缩机的热力设计方法。Ameli 等人^[45]研究了接近临界点时不同离心式压缩机的设计方法, 将基于各个焓损耗模型的内部平均线设计与阶段效率相关设计方法进行了比较, 发现出口温度、功率和效率的 CFD 模拟和基于焓的平均线的方法预测的边际偏差很小, 且计算精度同样可以接受。Cho 等人^[46]针对 S-CO₂ 布雷顿循环干冷循环效率下降的问题, 提出了一种改进的 S-CO₂ 离心式压缩机设计方法, 压缩机采用后掠式叶轮可以获得更高的压力比, 并随着质量流量的减小可在更大范围内稳定运行, 因此建议采用更小的后掠角设计。Lee 等人^[47]针对实际气体近似值对压缩机设计的影响分析了基于定义

的方法、基于理想气体的方法和基于实际气体等熵指数的方法 3 种静态到滞止的转换方法, 并指出: 基于定义的静态到滞止转换方法提供了最佳准确性, 但计算量比较大; 基于理想气体的设计方法存在较大误差; 基于实际气体等熵指数的转换方法介于两者之间, 虽然具有设计误差, 但计算精度比基于理想气体法高, 计算时间比基于定义法短。

总体来讲, 国外针对 S-CO₂ 离心式压缩机的研究比较全面, 实验研究、数值模拟、热力设计并行发展, 但是依旧有许多不足以及未解决的难题, 比如热力设计标准, MW 级实验运行中压缩机效率较低, 以及非稳态模拟问题等。

3.4 国内研究现状

近年来, 国内各大高校和科研院所对于 S-CO₂ 离心式压缩机的研究逐渐增多, 主要集中于热力设计、流动分析等方面, 而对于实验研究和理论设计涉猎较少。2018 年, 中科院工程热物理研究所在国内率先开展了关于 S-CO₂ 离心式压缩机的实验研究, 对其自主设计并搭建的国内首座 MW 级离心式压缩机进行了多进口工况全载实验^[27], 并观察到压缩机进口从饱和态过渡到临界态以及超临界态后, 压缩机效率显著增加。此外, 国内其他机构和院校也在积极搭建该类型平台, 如西安热工院设计的 5 MW 试验平台采用了 1 个 8 500 r/min 的离心式压缩机 (图 9)。



图 9 西安热工院采用的闭式叶轮压缩机^[48]
Fig.9 The closed impeller compressor used in Xi'an Thermal Power Research Institute^[48]

西安交通大学赵航等研究发现^[49]发现: 在 S-CO₂ 离心式压缩机中, 对于不同叶顶间隙的叶顶两相流动, 会在叶片叶顶前缘出现明显的低温、低压区域, CO₂ 在此处进入两相区; 随着叶顶间隙增加, 叶片前缘顶部尖角处的低温、低压更加明显, 可能会引起更严重的“凝结”现象, 但其两相流的影响范围会有效减小。中科院蒋雪峰等^[14]通过对某 5 MW 级热功率 S-CO₂ 布雷顿循环主压缩机进行模拟

发现, 在保证效率稳定的情况下, 适当增加后弯角且在与其它几何参数相匹配时, 可以增加离心式压缩机的压比和喘振裕度, 并抑制吸力面冷凝区域的发展。秦政等^[50]通过对带分流叶片的 S-CO₂ 离心式压缩机进行数值模拟发现: 增加分流叶片的长度能够改善叶轮内部流动, 有效抑制叶片表面的分离流动, 并明显影响 CO₂ 的冷凝现象; 改变分流叶片的周向分布对冷凝影响较小, 同时向主叶片吸力面偏移可以减少流道的堵塞, 改善分流叶片与主叶片吸力面之间的流场分布, 扩宽压缩机稳定运行的工况。上海交通大学徐骏等^[51]通过对不同温度、压力进口条件下压缩机入口凝结性能分析发现, 温度对气流凝结的影响更突出。

Guo 等人^[52]通过模拟定常和非定常条件下的流线、压力和温度发现: 流线的分布大致相同, 但是旋涡的分布则有区别; 非定常情况下压力、温度分布更散乱, 扩压器叶片前缘对非定常情况下的流动影响更大; 非定常条件的模拟结果更接近热力学设计。Chen 等人^[53]通过理论分析发现: 进口密度高、可压缩系数低是 S-CO₂ 压缩机压缩功低的原因; 当进口压力增大或进口温度降低时, 在固定转速下容易发生失速或喘振, 反之, 则容易发生堵塞; 当进口压力增大时, 总压比增大, 这是因为可压缩系数大小随进口条件的变化而急剧变化; 因此, 压缩机的稳定运行范围和性能受入口条件的影响较大。陈俊君^[54]对 S-CO₂ 离心式压缩机进行优化发现, 等面积型无叶扩压器具有最高的多变效率和总压比, 从进口到出口静压分布更均匀, 压力上升梯度更明显, 流道内相对马赫数分布较为均匀, 流动损失更小, 且流场内无明显回流及二次流现象出现, 可使压缩机性能达到最佳。

Shi 等人^[55]对 S-CO₂ 离心式压缩机流道几何形状对压缩机性能的影响进行了模拟。对比方形前后缘、圆形前后缘和 2 种椭圆形前后缘对压缩机效率的影响, 发现: 焦距大的椭圆前缘使总压力比最大, 效率最高; 而后缘焦距小的椭圆尾缘效率更高, 总压力变化不大。而对不同角度的进口掠角进行对比发现, 后掠前缘的总压比比正常前缘稍大, 但是后掠前缘的效率低于正常前缘, 当后掠角增大时, 效率降低, 且性能下降的趋势增大。

Shi 等人^[55]还模拟了叶轮叶片到扩压器叶片的不同间隙对压缩机性能的影响, 得到了不同间隙时叶轮叶片到扩压器叶片的流线图, 如图 10 所示。由图 10 可以看到, 当叶轮叶片到扩压器叶片的间隙

小于 8 mm 时, 在扩压器叶片吸入侧的后缘附近, 由于流动分离而产生涡流, 涡流随间隙的减小而增加, 大大降低了压缩机性能。

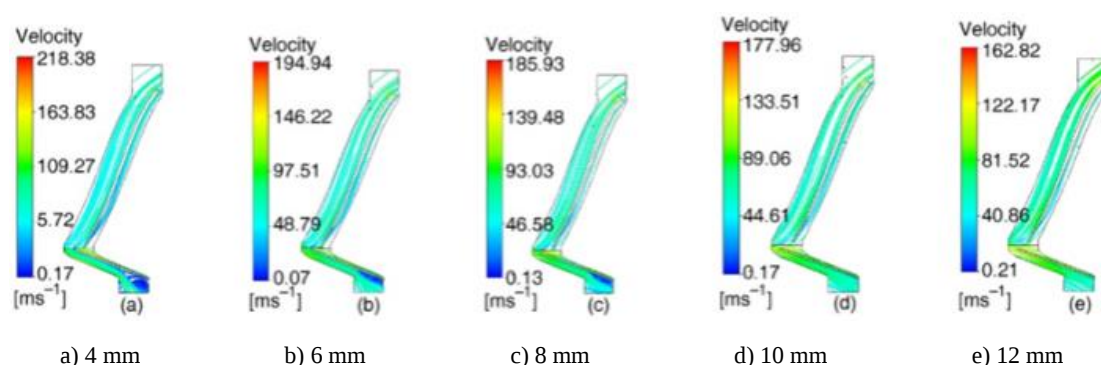


图 10 不同间隙时叶轮叶片到扩压器叶片的流线图[55]

Fig.10 The streamline distributions with different clearances[55]

施东波等^[56]基于一维热力设计方法, 采用大小叶片分流结构设计了 1 台 5 MW 的 S-CO₂ 离心式压缩机, 并对此压缩机进行了详细的数值分析, 模拟结果符合当前的研究认知, 且数值计算结果与热力学设计结果基本吻合。滕庚等^[57]以运行工况流量系数和设计工况流量系数比值作为修正因子, 对传统损失模型进行了修正, 修正模型预测结果与实验数据拟合较好。

4 总结和展望

压缩机是布雷顿循环的核心部件, 世界各国对 S-CO₂ 布雷顿循环的研究曾经主要是作为一个整体来进行的。对于单个部件, 尤其是核心部件——压缩机的研究开展稍晚, 相关实验数据、热力设计经验并不详细和全面, 同时对压缩机内部流体的流通状态认知也较少, 对压缩机的设计、效率等的影响因素了解也不够全面。此外, 研究 S-CO₂ 离心式压缩机的性能、流场特性、热功转换、模型设计等问题, 对于了解 S-CO₂ 布雷顿循环优于常规循环的原因以及提高整体和部件的效率和稳定性也具有重大意义。

当前, 国内外均主要通过实验方法、数值模拟和理论设计方法进行压缩机的研究。实验方法主要是气动参数以及动态压力数据收集, 对于靠近临界点的 CO₂, 其温度、压力传感器的精度尤其重要, 如何有效减小测量误差是当前实验中值得注意的问题。同样, 由于压缩机的高转速、高压可能会造成泄漏, 对循环效率产生较大影响, 建议尝试选用干气密封方式降低泄漏量。当前的实验设计还未形成完整的规律和经验体系, 依旧需要不断地进行新的实验内容。

对于数值模拟, 主要集中在计算程序的设计选择、热力学模型的构建、结构的优化设计几个方面,

但模拟计算的收敛是个难题, 避免或者减少跨临界现象的发生依旧需要探索, 如何保持压缩机的最佳效率同样重要, 需要进行源程序的设计和优化理论参数, 以减小模拟过程的计算偏差。

热力设计参考的离心式压缩机设计经验有限, 尤其是对两相区的模型设计缺乏相关经验系数, 由于 CO₂ 物性在临界点附近变化剧烈, 与理想气体相差较大, 对于经验是否正确匹配所有超临界压缩机的设计依旧缺少足够的认知, 需要进一步以实验和模拟数据验证、完善精确的参数设计流程。

[参考文献]

- [1] AHA Y, BAE S J, KIM M, et al. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(6): 647-661.
- [2] 丰镇平, 赵航, 张汉桢, 等. 超临界二氧化碳动力循环系统及关键部件研究进展[J]. 热力透平, 2016, 45(2): 85-94.
FENG Zhenping, ZHAO Hang, ZHANG Hanzhen, et al. Research progress of supercritical carbon dioxide power cycle system and key components[J]. Thermal Turbine, 2016, 45(2): 85-94.
- [3] SABAU A S, YIN H, QUALLS A L, et al. Investigations of supercritical CO₂ Rankine cycles for geothermal power plant[R]. Oak Ridge National Laboratory, 2011: 9.
- [4] IVERSON B D, CONBOY T M, PASCH J J, et al. Supercritical CO₂ Brayton cycles for solar-thermal energy[J]. Applied Energy, 2013, 111: 957-970.
- [5] FLEMING D, HOLSCHUH T, CONBOY T, et al. Scaling considerations for a multi-megawatt class supercritical CO₂ Brayton cycle and path forward for commercialization[C]. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012: 953.
- [6] 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): 595-615.
- [7] 谢永慧, 王雨琦, 张荻, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环系统及透平机械研究进展[J]. 中国电机工程学报,

- 2018, 38(24): 7276-7286.
- XIE Yonghui, WANG Yuqi, ZHANG Di, et al. Research progress of supercritical carbon dioxide Brayton cycle system and turbine machinery[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7276-7286.
- [8] SKOCH G J. Experimental investigation of centrifugal compressor stabilization techniques[J]. Transactions of the ASME-T-Journal of Turbomachinery, 2003: 125(4): 704-13.
- [9] 吴柯, 鲍中凯, 段伦博, 等. 燃煤 sCO_2 布雷顿循环及其工质传热特性研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 9-21
- WU Ke, BAO Zhongkai, DUAN Lunbo, et al. Research progress of coal-fired SCO_2 Brayton cycle and its heat transfer characteristics[J]. Journal of Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 9-21.
- [10] 周奥铮, 宋健, 任晓栋, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环及其向心透平的设计与分析[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(6): 1233-1239.
- ZHOU Aozheng, SONG Jian, REN Xiaodong, et al. Design and analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and centripetal turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(6): 1233-1239.
- [11] 赵新宝, 鲁金涛, 袁勇. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电机组中的应用和关键热端部件选材分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 154-162.
- ZHAO Xinbao, LU Jintao, YUAN Yong. Application of supercritical carbon dioxide Brayton cycle in generator sets and analysis of material selection for key hot-end components[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 154-162.
- [12] YAMAGUCHI H, ZHANG X R, FUJIMA K, et al. Solar energy powered rankine cycle using supercritical CO_2 [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 2345-2354.
- [13] TANAKA H, NISHIWAKI N, HIRATA M, et al. Forced convection heat transfer to fluid near critical point flowing in circular tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1971, 14(6): 739-750.
- [14] 蒋雪峰, 田勇, 邵卫卫, 等. 超临界二氧化碳压缩机特性数值模拟[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1685-1694.
- JIANG Xuefeng, TIAN Yong, SHAO Weiwei, et al. Numerical simulation of supercritical carbon dioxide compressor characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(7): 1685-1694.
- [15] 王婉月. 超临界二氧化碳离心压气机流动特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 30.
- WANG Wanyue. Research on the flow characteristics of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 30.
- [16] SULZER G. Verfahren zur erzeugung von arbeit aus warme: Swiss Patent CH, 269599[P]. 1950-07-15.
- [17] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production[J]. ASME Journal of Energy and Power Transition, 1969, 10: 272-287.
- [18] FEHER E G. The Supercritical thermodynamic power cycle[J]. Energy Convers, 1968, 8: 85-90.
- [19] IVERSON B D, CONBOY T M, PASCH J J, et al. Supercritical CO_2 Brayton cycles for solar-thermal energy[J]. Applied Energy, 2013, 111: 1023-1024.
- [20] CONBOY T, WRIGHT S, PASCH J, et al. Performance characteristics of an operating supercritical CO_2 Brayton cycle[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen, Denmark: ASME, 2012: 941-952.
- [21] WANG Y, GUENETTE G, HEJZLAR P, et al. Compressor design for the supercritical CO_2 Brayton cycle[C]. International Energy Conversion Engineering Conference, 2004.
- [22] KATO Y, NIKTAWAKI T, YOSHIKAWA Y. Carbon dioxide partial condensation direct cycle for advanced gas cooled fast and thermal reactor[J]. Bulletin of the Research Laboratory for Nuclear Reactors, 2001, 25: 91-92.
- [23] UTAMURA M, TAMAURA Y. A solar gas turbine cycle with super-critical carbon dioxide as a working fluid[C]. ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. 2006: 329-335.
- [24] KIM S G, KIM M G, BAE S J, et al. Preliminary design of S- CO_2 Brayton cycle for KAIST micro modular reactor[C]. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2013.
- [25] DOSTAL V, KULHANEK M. Research on supercritical carbon dioxide cycles in the Czech republic[C]//Proceedings of the Supercritical CO_2 Power Cycle Symposium, Troy, NY, USA, 2009.
- [26] SESHADRI L, SATHISH S, KUMAR P, et al. Design of 20 kW turbomachinery for closed loop supercritical carbon dioxide Brayton test loop facility[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Phoenix, Arizona, USA: ASME, 2019.
- [27] 中科咨询网. 佚名. 中科院超临界 CO_2 布雷顿循环系统 [EB/OL]. (2020-03-04) [2020-10-04]. <http://www.consult.ac.cn/article-0-201902-10978.html>. Network in the Zhongke Consulting. Anonymous. Chinese Academy of Sciences supercritical CO_2 Brayton cycle system[EB/OL]. (2020-03-04) [2020-10-04]. <http://www.consult.ac.cn/article-0-201902-10978.html>
- [28] 段承杰, 杨小勇, 王捷. 超临界二氧化碳布雷顿循环的参数优化[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(12): 1489.
- DUAN Chengjie, YANG Xiaoyong, WANG Jie. Parameter optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(12): 1489.
- [29] 张一帆, 王生鹏, 刘文娟, 等. 超临界二氧化碳再压缩再热火力发电系统关键参数的研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(10): 827-833.
- ZHANG Yifan, WANG Shengpeng, LIU Wenjuan, et al. Study on key parameters of a supercritical fossil-fired power system with CO_2 recompression and reheat cycles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-833.
- [30] WANG X R, DAI Y P. Exergoeconomic analysis of utilizing the transcritical CO_2 cycle and the ORC for a recompression supercritical CO_2 cycle waste heat recovery: a comparative study[J]. Applied Energy, 2016, 170: 193-207.
- [31] 陶志强, 赵庆, 唐豪杰, 等. 应用于工业余热的超临界二氧化碳布雷顿循环系统的热力学和焓分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6944-6951.
- TAO Zhiqiang, ZHAO Qing, TANG Haojie, et al. Thermodynamic and exergetic analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle system applied to industrial waste heat recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6944-6951.
- [32] WRIGHT S A, RADEL R F, VERNON M E, et al. Operation and analysis a supercritical CO_2 Brayton cycle[R]. Sandia National Laboratories, 2010: 28.
- [33] YOONHAN A, JEKYOUNG L, SEONG G. Design consideration of supercritical CO_2 power cycle integral experiment loop[J]. Energy, 2015, 86: 115-127.

- [34] ALLISON T C, SMITH N R, PELTON R, et al. Experimental validation of a wide-range centrifugal compressor stage for supercritical CO₂ power cycles[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(6): 061011.1-061011.9.
- [35] HELD T J. Initial test results of a megawatt-class supercritical CO₂ heat engine[C]//Proceedings of the 4th International Symposium: Supercritical CO₂ Power Cycles. 2014: 9-10.
- [36] LEE J, CHO S K, LEE J I. The effect of real gas approximations on S-CO₂ compressor design[J]. Journal of Turbomachinery, 2018, 140(5): 051007.1-051007.9.
- [37] LEE J, BAIK S, CHO S K, et al. Issues in performance measurement of CO₂ compressor near the critical point[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 111-121.
- [38] PECNIK R, RINALDI E, COLONNA P. Computational fluid dynamics of a radial compressor operating with supercritical CO₂[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(12): 122301.
- [39] AMELI A, TURUNEN-SAARESTI T, BACKMAN J. Numerical investigation of the flow behavior inside a supercritical CO₂ centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(12): 122604.1-122604.7.
- [40] RINALDI E, PECNIK R, COLONNA P. Steady state CFD investigation of a radial compressor operation with supercritical CO₂[C]. ASME Turbo Expo 2013, San Antonio, Texas, USA: ASME, 2013.
- [41] LETTIERI C, YANG D, SPAKOVSKY Z. An investigation of condensation effects in supercritical carbon dioxide compressors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137: 082602.1-082602.8.
- [42] TIMOTHY C, CLUNG A A. Limiting inlet conditions for phase change avoidance in supercritical CO₂ compressors[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. ASME, 2019.
- [43] BRINCKMAN K W, HOSANGADI A, LIU Z, et al. Numerical simulation of non-equilibrium condensation in supercritical CO₂ compressors[C]. ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 2019.
- [44] BALTADJIEV N D, LETTIERI C, SPAKOVSKY Z S. An investigation of real gas effects in supercritical CO₂ centrifugal compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(9): 091003.1-091003.13.
- [45] AMELI A, AFZALIFAR A, TURUNEN-SAARESTI T, et al. Centrifugal compressor design for near-critical point applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2018, 141: 2231.
- [46] CHO H, JEONG J H, LEE K. Direction for high-performance supercritical CO₂ centrifugal compressor design for dry cooled supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 4057.
- [47] LEE J, CHO S K, LEE J I. The effect of real gas approximations on S-CO₂ compressor design[J]. Journal of Turbomachinery, 2018, 140(5): 051007.1-051007.9.
- [48] 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, JIANG Yuyan, LIANG Shiqiang, et al. Progress in experimental research of supercritical carbon dioxide Brayton power generation cycle compressor[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 11-20.
- [49] 赵航, 邓清华, 黄雯婷, 等. 超临界二氧化碳离心压缩机叶顶两相流动分析[J]. 工程热物学报, 2015, 36(7): 1433-1436.
- ZHAO Hang, DENG Qinghua, HUANG Wenting, et al. Numerical investigation on the blade tip two-phase flow characteristics of a supercritical CO₂ centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(7): 1433-1436.
- [50] 秦政, 宋怀乐, 宋忠尚. 分流叶片对超临界二氧化碳离心压缩机内部流动特性的影响[J]. 压缩机技术, 2018(2): 41-46.
- QIN Zheng, SONG Huaile, SONG Zhongshang. Effect of splitter blade on internal flow characteristics of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[J]. Compressor Technology, 2018(2): 41-46.
- [51] 徐骏, 巢栩嘉, 范世望, 等. MW级超临界二氧化碳发电系统中主压缩机首级设计及其入口凝结性能分析[J]. 热力发电, 2018, 49(10): 41-46.
- XU Jun, CHAO Xujia, FAN Shiwang, et al. Design and condensation performance analysis on the first stage of main compressor in MW-level supercritical carbon dioxide power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 180-188.
- [52] GUO D, SHI D, ZHANG D. Investigation on steady and unsteady performance of a SCO₂ centrifugal compressor with splitters[J]. Thermal Science, 2017, 21: 185-192.
- [53] CHEN H X, ZHUGE W L, ZHANG Y J. Effect of compressor inlet condition on supercritical carbon dioxide compressor performance[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: GT2019-90647.
- [54] 陈俊君. 超临界二氧化碳离心压缩机的性能优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 34.
- CHEN Junjun. Study on performance optimization of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 34.
- [55] SHI D B, WANG Y Q, XIE Y H, et al. The influence of flow passage geometry on the performances of a supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[J]. Thermal Science, 2017, 22: 253-253.
- [56] 施东波, 王崇宇, 张荻, 等. 超临界二氧化碳分流式压缩机气动性能研究[J]. 热力透平, 2017, 46(3): 153-157.
- SHI Dongbo, WANG Chongyu, ZHANG Di, et al. Study on aerodynamic performance of supercritical carbon dioxide compressor with splitter blades[J]. Thermal Turbine, 2017, 46(3): 153-157.
- [57] 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.
- 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.

(责任编辑 李园)