

二氧化碳储能系统透平膨胀机研究进展

沈代兵¹, 郝佳豪², 李亚南¹, 杨俊玲³

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 长沙博睿鼎能动力科技有限公司, 湖南 长沙 410205;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 储能技术被视为克服可再生能源波动性对电网稳定运行影响的路径之一, CO₂ 储能 (Carbon Dioxide Energy Storage, CES) 作为新型储能技术之一, 具有较高的能量密度且地理位置依赖度较低, 比较有发展潜力。透平膨胀机作为 CES 系统的核心部件, 直接影响系统的性能。本文介绍了 CES 的基本原理, 总结了 CO₂ 透平膨胀机的主要类型及特征, 归纳了关于膨胀机设计方法和数值分析的研究, 论述了部分进气和密封方式对透平膨胀机性能的影响规律, 并分析了已有的 CO₂ 实验研究系统, 归纳了其透平膨胀机的设计参数, 从而为 CES 系统及其透平膨胀机的设计开发提供参考。

关键词: CO₂ 储能; CO₂ 透平膨胀机; 设计方法; 部分进气; 密封方式

中图分类号: TK14 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.09.001

[引用本文格式] 沈代兵, 郝佳豪, 李亚南, 等. 二氧化碳储能系统透平膨胀机研究进展[J]. 热能动力工程, 2024, 39(9): 1-12.
SHEN Daibing, HAO Jiahao, LI Yanan, et al. Advances in turbine expander research for carbon dioxide energy storage systems[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 1-12.

Advances in Turbine Expander Research for Carbon Dioxide Energy Storage Systems

SHEN Daibing¹, HAO Jiahao², LI Yanan¹, YANG Junling³

(1. Technical Institute of Physical and Chemistry, CAS, Beijing, China, Post Code: 100190;
2. Changsha Borui Energy Technology Co., Ltd., Changsha, China, Post Code: 410205;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100049)

Abstract: For overcoming the impact of renewable energy fluctuations on grid stability, energy storage technology is considered as one of the solution paths. Carbon dioxide energy storage (CES), as one of the new energy storage technologies, has the advantages of higher energy density and lower geographic dependence, which becomes a promising energy storage technology. The turbine expander, as the core component of the CES system, has a direct impact on the performance of the system. The basic principle of CES technology is introduced first in this paper. Then the different types of CO₂ turbine expanders and their main features are further summarized. The study on the design methodology and numerical analysis of expander are summarized. The influences of partial intake and sealing method on the performance of turbine expander are discussed. Finally, the existing CO₂ experimental systems are analyzed and the design parameters of its turbine expander are summarized, which provides a reference for the design and de-

收稿日期: 2023-12-26; 修订日期: 2024-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(52206032)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52206032)

作者简介: 沈代兵(2000-), 男, 中国科学院理化技术研究所硕士研究生.

通信作者: 李亚南(1988-), 女, 中国科学院理化技术研究所助理研究员.

velopment of CES systems and their turbine expanders.

Key words: carbon dioxide energy storage, CO₂ turbine expander, design method, partial admission, sealing mehod

引 言

日益增长的资源需求带来的能源短缺以及温室气体排放引起的气候变化问题,促进了可再生能源的快速发展,特别是太阳能和风能。截至 2023 年 4 月底,我国风电和光伏发电装机分别达 3.8 亿 kW 和 4.4 亿 kW, 占全国发电总装机的 14.3% 和 16.6%^[1]。但是间歇性的可再生能源电力会对电网造成冲击,影响电网的稳定运行^[2]。为了更好地利用可再生能源,储能技术被视为关键解决路径之一,目前的储能方式主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、电池储能等^[3]。

在储能技术中,可以实现百兆瓦级长时大规模储能的主要是抽水蓄能和压缩空气储能^[4]。抽水蓄能发展较早,技术成熟,是应用最广泛的储能技术,但对于地势和水资源要求严格。压缩空气储能不需要太大的地势高度差且运行维护简单,是一种比较有前景的储能技术,其原理是将空气的内能、压力势能与电能相互转换,以此实现储能。先进绝热压缩空气储能 (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES)、液态空气储能 (Liquid Air Energy Storage, LAES) 等属于压缩空气储能的衍生技术,通过改变蓄热方式或工质存储形式,以提高系统的效率。在压缩空气储能技术的基础上,CO₂ 储能技术被提出。

CO₂ 的临界参数为 31.4 °C 和 7.38 MPa, 相比于空气的临界参数 -140.2 °C 和 3.77 MPa, CO₂ 更方便液化。虽然 CO₂ 的临界压力高于空气,但 CO₂ 的相对分子质量更大、更容易压缩,将常温常压的 CO₂ 与空气压缩至临界压力,CO₂ 的单位耗功更少^[5],所以 CO₂ 也可以作为储能介质。

CO₂ 储能系统的核心组成部件之一是透平膨胀机,其效率对于系统性能有直接影响。但是目前对于储能系统透平膨胀机的研究相对较少,对于 CO₂ 透平的研究主要集中在超临界 CO₂ 发电领域,因此研究超临界 CO₂ 透平膨胀机,对于 CO₂ 储能系统透

平膨胀机的开发具有参考意义。

本文介绍了 CO₂ 储能的原理及分类,并从理论设计和模拟仿真两个维度对超临界 CO₂ 透平膨胀机进行了介绍,分析了部分进气、密封方式对于透平膨胀机性能的影响和现阶段运行的 CO₂ 实验研究系统,并归纳了其透平的设计参数,为 CO₂ 储能系统透平膨胀机的设计研发提供参考。

1 CO₂ 储能系统原理

CO₂ 储能系统利用电能与 CO₂ 内能、压力势能的相互转换来实现电力的存储与释放,其系统流程如图 1 所示^[6]。在储能阶段,利用可再生能源富余的电力驱动压缩机压缩低压 CO₂, 将电能转换为 CO₂ 的内能和压力势能,且利用储热介质存储压缩热,压缩后的 CO₂ 存储于高压储罐。释能阶段利用储热介质对高压 CO₂ 进行预热,之后 CO₂ 经过透平膨胀机带动发电机发电,实现电能的释放,透平出口的 CO₂ 存储于低压储罐。

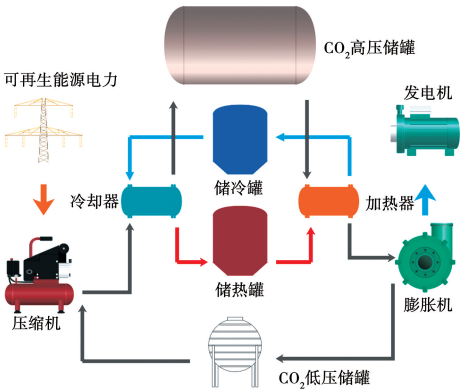


图 1 CO₂ 储能系统流程图

Fig. 1 Flow chart of carbon dioxide energy storage system

对于 CO₂ 储能系统,就 CO₂ 的存储状态而言,有液态储能^[7]和超临界态储能^[8];就储室的形式而言,有人造罐体储室和地下洞穴储室^[5]。对于不同的系统,主要利用往返效率、储能密度、度电成本等指标评估其性能。目前研究 CO₂ 储能系统的论文中,其膨胀机设计参数如表 1 所示。

表 1 CO₂ 储能系统膨胀机参数对比

Tab. 1 Comparison of turbine expander parameters for carbon dioxide energy storage systems

文献	入口参数		出口参数		流量/kg·s ⁻¹	功率/kW	透平效率/%
	温度/K	压力/MPa	温度/K	压力/MPa			
Liu ^[9]	433.60	17.00	322.83	1.00	13.88	2 000.00	85
Xu ^[10]	823.15	24.65	685.48	7.67	66.81	10 016.00	90
Liu ^[5]	873.00	20.00	763.71	8.04	1.00	123.58	87
Zhang ^[11]	438.88	15.00	322.28	3.57	1.00	69.86	85
Fu ^[12]	668.15	19.60	558.35	2.00	1.00	222.80	87
Wu ^[13]	420.18	22.00	308.87	1.50	83.81	10 000.00	85

2 CO₂ 透平膨胀机主要类型及特性

为提升 CO₂ 储能系统的效率,需要开发适用于储能系统的透平膨胀机。目前,针对大流量 CO₂ 膨胀机的研究主要集中在超临界 CO₂ 发电领域,因此参考超临界 CO₂ 透平的研究,为储能系统透平膨胀机的设计开发提供指导。

透平膨胀机主要部件包括蜗壳、喷嘴、叶轮和扩压器^[14],其结构如图 2 所示^[15]。蜗壳沿着管道均匀地将流体分配到喷嘴环上,维持喷嘴内部流动的稳定性;喷嘴处流体膨胀降压,将压力能转变为动能;叶轮处流体推动叶片转动,带动相连的发电机发电;扩压器对叶轮出口的流体扩压降速,减小余速损失。

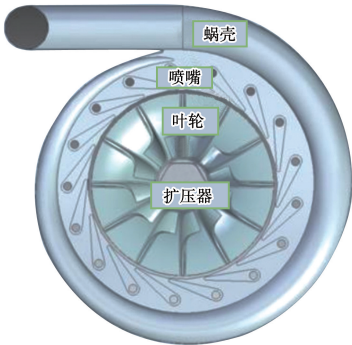


图 2 透平膨胀机结构示意图^[15]

Fig. 2 Schematic diagram of turbine expander structure^[15]

透平膨胀机的类型分为径流式和轴流式,两者的工质流动方向不同。径流式透平中气体在垂直于转轴的平面内沿着半径方向流动,轴流式透平中气体沿着平行于叶轮转轴的方向流动。径流式透平膨胀机按照流动方向的不同,又可以分为径向流入式

和径向流出式;轴流式透平膨胀机按照级数的不同,又可以分为单级轴流式和多级轴流式。

相较于水蒸气透平,CO₂ 透平属于新型工质透平,关于该类透平的设计经验和实验数据略有欠缺,且 CO₂ 的物性特性也给透平稳定运行带来挑战。CO₂ 的密度较大,由伯努利定律可知,动能变化相同时,压力的变化更大。在透平喷嘴尾缘和叶轮前缘处,易产生低压区域,导致流动回流与分离。CO₂ 的相对质量偏大,相同马赫数下 CO₂ 的流速较低、边界层较厚,增加了流动摩擦损失。

为降低低压 CO₂ 的存储成本,CO₂ 储能系统膨胀机通常将压力由几兆帕降低到大气压附近,膨胀比和质量流量均比较大,因此多采用多级轴流式膨胀机,但需要对多级膨胀机的级数和每级的膨胀比进行选择,以保证设计的合理性,降低加工成本。

由质量守恒定律可知,相同质量流量下 CO₂ 透平的尺寸较小、转速较高,需选择适用于高转速透平的气体轴承,但大功率的气体轴承有待开发。

3 设计方法及数值分析研究

3.1 设计方法

3.1.1 气动设计

径流式透平的设计方法主要为一维气动设计,即假设热力学参数和速度在垂直于流线的截面上均匀分布,仅沿着流线变化,将三维结构转换成流动子午面^[16]。在喷嘴、转子进出口等特征点使用质量、动量和能量守恒方程,确定各点的热力参数和气动几何参数^[17]。一维设计不仅可以利用损失关系式简化机械内部的流动,还可以通过获得基本尺寸来初始化设计^[18],在透平的设计中是一种广泛应用的

方法。

径流式透平中使用较多的是径向流入式透平,韩国先进科学技术研究院(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)^[19]对反应堆散热系统的 CO₂ 径向流入式透平进行了设计,通过与 NASA 和 SNL(Sandia National Laboratories)的实验数据进行对比,引入乘数因子对叶轮圆盘摩擦损失进行修改,所设计透平的等熵效率为 81.9%。Lee 等人^[16]对比 3 种一维设计方法,并根据每种方法分别设计了 4 种功率下对应的 12 个透平,结果表明,3 种设计方式会导致转子叶片高度有所不同,叶片高度和转子入口半径主要受到设计参数和运行工况的影响。

径向流出式透平中流体的流动方向和叶轮布置方向与径向流入式相反,径向流出式透平中的流体从轴向流入,沿叶轮半径方向流向四周,因此叶轮出口的圆周速度大于叶轮入口,根据欧拉公式,径向流出式透平中的焓降低于径向流入式。Luo 等人^[20]对超临界 CO₂ 径向流出式透平膨胀机进行设计,通过调整叶片厚度和叶片角度分布改善气动性能,优化后透平的等熵效率和输出功率分别为 89.02% 和 10.07 MW。Grönman 等人^[21]设计了超临界 CO₂ 径向流出式透平,并与径向流入式透平进行比较,结果表明,径向流入式和径向流出式透平的等熵效率均较高,且径向流出式透平可以在更宽比转速范围内保持较高的效率,但其叶轮承受的应力也更高。

CO₂ 径流式透平的效率一般为 80%~87%,单级膨胀比通常在 2~5^[22]。径向流出式透平的输出功率更高,变工况性能更好,但在膨胀过程中其焓降较低,且叶轮的应力载荷也更大。因此,在确定径流透平形式时,需要结合功率、效率及转子稳定性进行选择。

轴流式透平的设计也采用一维气动设计方法,且相较于径流式透平,气流在轴流式透平内沿着轴向流动,流道内的损失更小,透平效率较高,一般在 82% 以上,因此轴流式透平更适合大流量工况。单级轴流式透平的膨胀比较低,一般在 2 以下,适用于低膨胀比工况。王智等人^[23]对超临界 CO₂ 单级轴流式透平进行气动特性分析,透平入口压力和出口压力分别为 15 和 9.5 MPa,研究进出口压力、入口

总温、转速变化对于透平性能的影响,结果表明,入口压力变化对透平等熵效率的影响大于出口压力,转速变化的影响次之,入口总温的影响最小。刘亚丽^[24]研究入口质量流量变化对 CO₂ 单级轴流式透平性能的影响,透平等熵效率为 85.6%,且增加入口质量流量可以提高透平的输出功率,但会导致效率的下降。

多级轴流式透平适用于大流量、大膨胀比的工况。韩万龙等人^[25]设计了超临界 CO₂ 两级轴流式透平,其质量流量和输出功率分别为 85 kg/s 和 3 175 kW,其叶片形式采用直叶片,结果表明,考虑动静叶泄漏混掺损失的等熵效率为 84.88%。Han 等人^[26]还提出了一种带二次分流的再压缩超临界 CO₂ 循环回路,系统包含高、低压两个两级轴流式透平,系统的总膨胀比为 2.38,高低压透平膨胀机的输出功分别为 3 280 和 6 287 kW,透平等熵效率分别为 82.88% 和 82.26%,均具有良好的流动特性和变工况性能。

根据一维设计结果,采用三元流动理论可更准确地求解并校核透平内的速度场,为型线的设计与改进提供指导,但该方法计算复杂且需要进行简化处理。

3.1.2 损失模型

在透平的气动设计中选择合适的损失公式,以便对效率进行更准确的评估。透平叶轮损失包括入射损失、流道损失、间隙损失、尾缘损失、风阻损失、出口损失等,叶轮损失在透平中的分布^[27]如图 3 所示。

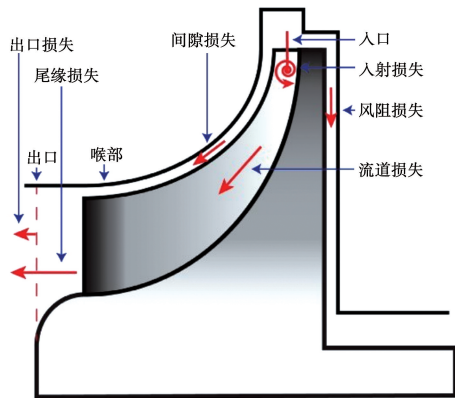


图 3 透平叶轮损失分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of turbine impeller loss distribution

对于透平膨胀机,流道、间隙和出口损失约占据总损失的 90%。流道损失主要由流体在叶间通道内的摩擦、堵塞和二次流动所导致,流道损失模型主要包括李红等人^[17]和 Persky 等人^[27]提出的 Wasserbauer 和 Baines 模型。Wasserbauer 模型基于转子叶片内的平均动能计算流道损失。Baines 模型不仅考虑叶轮入口和出口相对速度的影响,还考虑几何形状对于流道损失的影响。Qi 等人^[28]在透平设计中采用 Baines 模型进行研究,结果表明,采用更大的叶片和流动面积有利于减小流道损失。Hu 等人^[29]采用 Wasserbauer 模型进行研究,计算的流道损失占总损失的 44.25%。

间隙损失主要由叶轮叶片与轮盖之间的泄漏流所导致。Lyu 等人^[18]在透平设计时,对于间隙损失模型进行对比,结果表明,间隙损失采用 Baines 模型时,设计结果与模拟结果和实验数据吻合度较高,并且在低膨胀比时预测效果较好。Qi 等人^[30]在透平设计中采用 Futral 等人^[31]提出的模型,该模型是由实验数据拟合得到的经验关系式,并针对高叶尖间隙进行了优化,在未达到叶顶间隙制造极限时,间隙损失约为总损失的 7.4%。

出口损失主要由出口动能引起,模型区别在于是否考虑扩压器恢复系数,若不考虑扩压器的影响,则表达式为:

$$q_k = v_{out}^2/2$$

(1)

式中: q_k —透平出口损失, J/kg; v_{out} —透平出口气流速度, m/s。

若考虑扩压器的影响,则表达式为:

$$q_k = (1 - C_d) \frac{v_{out}^2}{2}$$

(2)

式中: C_d —扩压器恢复系数。

为简化计算,设计时多使用式(1)。对比采用不同损失模型的设计,其结果如表 2 所示。

表 2 膨胀机损失模型对比

Tab. 2 Comparison of turbine expander loss models

损失	Qi ^[30]	Hu ^[29]	Persky ^[27]	Uusitalo ^[22]	Lyu ^[18]
入射	Whitfield	Glassman	Glassman	Whitfield	Glassman
流道	Baines	Wasserbauer	Baines	Baines	Wasserbauer
间隙	Futral	Baines	Baines	Jansen	Baines

入射损失主要由叶轮入口切向速度引起,不同模型关于该损失的计算结果差异不大。流道损失中 Wasserbauer 模型主要基于进出口平均速度,计算较为简便。Baines 模型考虑了叶片长径比等结构参数对于损失的影响,计算结果更准确,但模型形式较为复杂。间隙损失模型的形式较多,Futral 模型由实验数据拟合得到,Baines 模型与实验结果较为吻合,这两种模型的计算准确性更高。

透平内各损失所占比例会随着透平的功率而变化。Wang 等人^[32]分析间隙损失和尾缘损失随透平功率的变化规律,结果表明,透平功率增加时,泄漏效应减弱,透平的间隙损失减低;透平功率增加使尾迹流与主流的混合阻塞作用变弱,尾缘损失降低。

透平的损失模型多依据实验数据拟合而成,或结合机理分析进行修正,对叶轮损失起主要作用的是间隙损失、流道损失和出口损失,且损失所占比例随透平功率的变化而变化。

3.1.3 优化算法

一维设计方法在 CO₂ 透平膨胀机的设计中广泛使用,基于给定的热力参数,确定结构参数的取值。但各结构参数均处于一定的经验范围内,且并非独立影响设计结果,因此为得到最优解需要进行大量尝试。将优化算法与一维设计方法相结合可以有效解决上述问题,在多变量的约束下,选择合适的设计参数组合,使得目标函数性能最优。常见的优化算法有顺序二次规划算法、遗传算法和模拟退火算法等^[17]。

Lyu 等人^[18]对径向流入式透平的设计进行了优化,采用顺序二次规划算法将非线性问题转化为一系列近似二次规划子问题,以总静效率为目标函数,以速度比、反应度等为约束条件进行设计优化,结果显示,优化前后透平的总静效率由 83.1% 提升到 85%,且流道损失和出口速度损失减小。Uysal 等人^[33]预设计了两个超临界 CO₂ 轴流式透平,其级数分别为四级和七级,利用混合整数分布式蚁群算法对设计参数进行优化,七级轴流式透平的总静效率由 81.55% 提升至 82.48%,四级轴流式透平的总静效率由 76.84% 提升至 80.42%,表明四级轴流式透平的改进潜力更大。

在一维设计时采用优化算法来提高计算效率,

一般以透平效率等为目标函数,以速度比、轮径比、反应度等气动参数为约束条件,以此选择最优的气动参数组合。在选择优化算法时,需要综合考虑优化后效率和收敛速度。

一维设计方法有助于简化透平内部复杂流场的计算,并且利用经验关系式量化损失,在透平设计中使用广泛。单级径流式透平的膨胀比更大,径向流出式透平比径向流入式透平的变工况性能更好,但叶轮所用应力载荷更大。轴流式透平流道损失较小,透平的效率更高,单级轴流式透平的膨胀比较低,且性能主要受到入口压力的影响,大流量的情况下多使用轴流式透平。为更准确地估算透平效率,需要选择合适的透平通道、间隙和出口损失模型,损失所占份额随着透平功率的变化而变化。此外,利用优化算法并结合设计经验,选取合适的气动参数,

提高透平设计效率。

3.2 数值分析

数值分析作为实验的辅助手段,用于对设计结果进行初步验证。模拟时对流场进行分析,明确减少流动损失的方法;对叶片应力进行分析,以此对结构设计进行改进。透平模拟主要是利用 NUMECA、ANSYS-CFX 等商业软件进行,且三维模拟可以更真实地反映透平内部的流场状况。

透平模拟时采用的湍流模型主要为雷诺平均方程下的零方程、一方程、二方程等。零方程模型包括 BL 模型,一方程模型包括 SA 模型,二方程模型包括 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 和 SST $k-\omega$ 模型。表 3 总结了在透平模拟时采用的模型^[34-37],目前使用较多的是一方程模型和二方程模型的基本形式和改进形式。

表 3 透平膨胀机模拟模型对比

Tab. 3 Comparison of turbine expander simulation models

模型类型	类型	入口温度/℃	入口压力/MPa	膨胀比	转速/r · min ⁻¹	效率/%
SST $k-\omega$ ^[34]	轴流	392	13.5	1.75	45 000	65.70
SST $k-\omega$ ^[34]	轴流	420	15.0	1.67	60 000	77.00 ~ 79.00
SST $k-\omega$ ^[34]	轴流	500	15.0	1.35	10 000	86.00 ~ 91.80
$k-\varepsilon$ ^[35]	径流	400	19.3	2.53	40 000	82.50
SST $k-\omega$ ^[34]	径流	560	17.0	2.20	247 980	83.19
$k-\varepsilon$ ^[36]	径流	500	20.0	1.67	37 000	84.80
SA ^[37]	径流	550	24.6	2.90	42 000	85.70
$k-\varepsilon$ ^[34]	径流	500	13.0	1.63	45 000	85.00
$k-\varepsilon$ ^[34]	径流	430	20.0	2.50	130 000	80.00

在模拟 CO₂ 透平时采用实际气体属性文件 (Real Gas Property, RGP) 或实际气体状态方程,以保证数值模拟的收敛性和准确性。Odabae 等人^[38]分别采用 RGP 文件和实际气体状态方程对 100 kW 超临界 CO₂ 径流式透平进行了数值模拟,对比结果表明,实际气体状态方程在计算热力学参数时会导致很大误差,而 RGP 文件的计算结果与 REFPROP 数据库吻合良好,所需时间与实际气体状态方程相当。透平模拟时通常对透平膨胀机的单个流道进行分析,即模拟结构只包括 1 个喷嘴流道和 1 个叶轮流道。由于蜗壳的流动截面逐渐缩小,因此加上蜗壳后每个喷嘴内的流动是非均匀的,考虑蜗壳时需对全部的喷嘴和叶轮流道进行流场分析。

Zhang 等人^[39]分别设计了 1 台 15 MW 的 CO₂ 轴流式透平和 1 台 1.5 MW 的 CO₂ 径流式透平。对两台透平的叶轮进行强度分析,结果显示,最大应力和最大变形值随着流体压力的增加而增加,轴流式透平的最大应力和变形量分别为 646.79 MPa 和 0.061 mm,且最大变形量位于叶片顶端;径流透平的最大应力和变形量分别为 702.74 MPa 和 0.446 mm,且最大变形量出现在转子尾部尖端,均处于材料的应力承受范围内。

利用数值模拟对气动设计进行初步验证,且可根据模拟结果指导设计改正。流场模拟时多采用一方程和二方程湍流模型,且模拟时采用 RGP 文件,代入更准确的 CO₂ 物性进行计算,以保证数

值模拟的收敛性和准确性。强度模拟用于检验透平结构设计和材料选择的合理性,最大变形量出现在转动叶片顶部,设计时需要对其进行强度校核。

4 部分进气方式和密封方式

4.1 部分进气方式

在低功率水平下,CO₂透平的整体尺寸较小,采用部分进气方式可以增加转子入口直径和叶片叶高,降低制造难度,改善透平内部的流动性能^[40-41]。叶高的增加降低了叶顶间隙比,减少了间隙泄漏损失,但部分进气也会导致额外的鼓风损失和弧端损失,这些损失随着进气度的减小而增加,因此需要对进气度进行合理选择。

对于进气度的选取,可由喷嘴出口面积与叶轮入口面积的比值进行初步确定,当该比值等于1时,应该采用全周进气;当该比值小于1时,所得结果即为进气度。如式(3)所示^[42]:

$$e = \frac{A_s}{A_r} = \frac{Z_s P_s H_s}{2\pi r H_r} \tag{3}$$

式中: e —部分进气度; A_r —叶轮入口面积, m²; A_s —喷嘴出口面积, m²; r —叶轮入口半径, m; H_r —叶轮入口叶高, m; Z_s —喷嘴叶片数; P_s —喷嘴叶间距, m; H_s —喷嘴出口叶高, m。

王雨琦等人^[43]研究了部分进气对于超临界CO₂径流式透平的影响,设计了一个功率为75 kW、部分进气度为0.3的径流式透平,并进行气动分析,结果表明,进气弧段内的温度、压力和马赫数分布合理;非进气弧段内流动紊乱且熵增较大,存在明显的部分进气损失。张静^[44]研究了部分进气对于CO₂轴流式透平性能的影响,结果显示,部分进气会引起工质向非进气区域流动,造成透平内的流动损失和能量损失。通过对动静叶入口、出口角进行正交优化,以减小部分进气导致的透平效率和输出功率的损失。Huang等人^[45]设计了超临界CO₂部分进气轴流式透平,用于重型柴油机的余热回收,透平膨胀机的结构如图4所示。分析表明,部分进气流道分布不均匀引起的轴线振动磨损了密封内壁,使轴套与密封间隙变大,泄漏量增大,从而导致透平效率降低,该透平的最大等熵效率为53.43%。

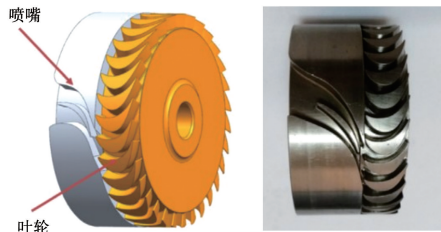


图4 部分进气轴流式透平膨胀机几何形状示意图

Fig.4 Schematic diagram of partial admission axial turbine expander geometry

综上可知,采用部分进气可以增加转子入口直径和叶高,降低加工和安装难度,但非均匀进气会导致流动紊乱和轴线振动,引起额外的损失或泄漏问题,造成功率率和效率的下降。因此,需要综合考虑各部分损失和透平效率,选择合适的进气度,并且对部分进气损失进行量化建模,分析其与CO₂透平的适应性。此外,泄漏也会对透平性能产生影响,需要分析透平泄漏的机理及解决措施。

4.2 密封方式

叶顶间隙是透平叶片顶部与透平机体之间的间隙,叶顶间隙可以避免转动部件与静止部件之间的摩擦,但也会导致流体从高压侧流向低压侧,造成流动损失^[24]。通常采用密封方式来减少泄漏量,以降低叶顶间隙损失,常见的密封方式有迷宫密封、干气密封等,其中干气密封比较适用于CO₂透平。

由于超临界CO₂密度大,透平高速运转引起的叶顶泄漏不可忽略^[46],因此需要分析叶顶间隙对于透平效率的影响。邢浩等人^[37,47]研究了叶顶间隙对CO₂单级轴流式透平流场的影响,结果表明,叶顶间隙增大会导致流体的泄漏量增大,从而引起泄漏流与主流混掺,使压力和温度的分布更加不均匀。

以上关于叶顶间隙和泄漏的研究表明,减少泄漏量有助于提升透平性能,因此需要对叶顶进行密封,常用的密封形式有迷宫密封、干气密封等。Du等人^[48]对比了无泄漏、光滑泄漏通道、迷宫密封和干气密封4种密封方式对CO₂透平泄漏的影响,结果表明,4种密封的泄漏量分别为0, 6.28, 1.45和0.008 9 kg/s,干气密封的泄漏量比迷宫密封减少99.38%,等熵效率和功率分别增加1.56%和0.88%。相比于迷宫密封,采用干气密封透平的效

率和功率对于叶顶间隙的变化不敏感。在干气密封的基础上,杜秋晚等人^[49]提出了串联式干气密封,即将两个干气密封结构串联,如图 5 所示。采用串联式干气密封的泄漏量相比于单独采用第 1 级或第 2 级干气密封更低、效率更高,且在大密封间隙时性能更突出。

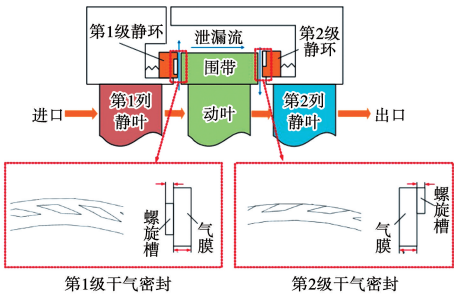


图 5 串联式干气密封
Fig.5 Tandem dry gas seal

叶顶间隙以及吸力面与压力面的压差过大,造成透平内部的流体泄漏和出口焓值的增加,降低透平的输出功率,且径向间隙对于效率的影响约为轴向间隙的 2 倍。采用密封方式减少二次流动并提升透平效率,对比采用不同密封方式透平效率的变化,其结果如表 4 所示^[46,48,50]。由表 4 可知,相较于迷宫密封,干气密封及串联式干气密封能显著减少泄漏量,提高透平效率。

表 4 不同密封形式对透平性能的影响
Tab.4 Effect of different seal forms on the performance of turbine

密封形式	初始	密封后	相对变化量/%
	效率/%	效率/%	
叶冠密封 ^[50]	84.10	85.50	1.66
轮背密封加密封气 ^[46]	85.40	89.90	5.27
迷宫密封 ^[48]	86.07	90.17	4.76
干气密封 ^[48]	86.07	91.72	6.56

5 实验研究

通过实验研究获得 CO₂ 透平膨胀机准确的运行数据,且确定进气方式、密封方式以及轴承选择对透平性能的影响规律,对各研究机构已经搭建的 CO₂ 循环实验系统进行总结。

美国桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratories, SNL) 最早开始搭建超临界 CO₂ 动力循环实验系统,系统循环功率为 250 kW^[51],该循环中透平、交流发电机和压缩机共用 1 根转轴,即透平 – 交流发电机 – 压缩机组 (Turbo-Alternator-Compressor, TAC) 单元,使用高速永磁电机和迷宫密封来降低转子腔内压力,使用气体箔片轴承代替球轴承以提升润滑效果。在入口温度为 537 ℃、入口压力为 13.8 MPa、转速为 75 000 r/min 的设计工况下,透平系统效率预计为 32%。东京工业大学 (Tokyo Institute of Technology, TIT)^[52] 搭建了净输出功率为 10 kW 的超临界 CO₂ 再压缩循环系统,对小尺寸透平膨胀机进行研究,该循环中透平叶轮直径为 35 mm,设计转速为 100 000 r/min。由于轴承等辅件的设计困难,实际运行时转速仅为 55 000 r/min。贝希特尔船舶推进公司 (Bechtel Marine Propulsion Corporation, BMPC) 搭建了双轴回热型超临界 CO₂ 循环系统,其输出功率为 100 kW,采用双径流式透平设计,变转速透平驱动压缩机,恒转速透平驱动发电机。

韩国能源研究院 (Korea Institute of Energy Research, KIER)^[53] 对超临界 CO₂ 透平膨胀机设计进行改进,透平采用叶冠密封,且前后两侧的轴封和径向面积相等,使得净轴向力最小。预计的轴向力为 200 N,处于推力轴承的最大允许载荷 (700 N) 范围内。此外,通过安装增压器来降低二次流带来的流动损失。

中国西安热工研究院 (Thermal Power Research Institute, TPRI) 搭建了首套兆瓦级化石燃料超临界 CO₂ 实验系统^[54],该系统采用再压缩再热循环,系统采用高、低压两段轴流式透平。透平采用干气密封并使用可倾瓦轴颈和推力轴承来承担轴向和径向载荷,叶片采用耐高温高压的镍基合金,叶片最大应力出现在根部靠近前缘处。该透平的设计效率为 82%,但由于透平尺寸过小且冷却流量消耗较大,使得透平的实际运行效率为 77.07% ~ 79.21%。

Li 等人^[55] 对上述实验回路进行动态特性分析,结果表明,该系统能够在 0 ~ 100% 设计功率范围内稳定运行,加载速率和减载速率是朗肯循环的 3 ~ 4 倍,从而实现宽范围和快负荷调节。对上述已有的实验回路用透平膨胀机进行总结,参数如表 5 所示。

表 5 各实验系统透平膨胀机的运行参数对比

Tab.5 Comparison of operating parameters of turbine expander for each experimental system

参 数	SNL	TIT	BMPC	KIER	TPRT
功率/kW	92.0	11.9	100	10.5	2 610/4 790
转速/ $r \cdot \min^{-1}$	75 000	100 000	75 000	45 000	9 000
流量 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	3.5	1.40	5.35	1.69	80.67
入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	537	277	300	392	600
入口压力/MPa	13.80	11.20	13.5	9.8	20/14.65
叶轮直径/mm	68.3	35.0	50.8	48.60	—
设计效率/%	87	65	79.8	51	85

注:表中“—”表示文献中无此数据。

6 技术难点

对于 CO₂ 透平,径流式透平和轴流式透平各有其适用范围。在设计透平时,为提高透平效率,应从间隙、流道和出口损失着手,采用优化算法,以提高设计效率。

在模拟透平时,使用准确的 CO₂ 物性参数以保证结果的准确性。在透平结构方面,采用部分进气方式可提高设计的灵活性,采用干气密封较迷宫密封能显著减少叶顶间隙处泄漏量。

从工程实施及市场应用的角度来看,适用于 CO₂ 储能系统且性能更优的 CO₂ 透平膨胀机还有待进一步研究。需要从以下 6 方面进行改进:

(1) 透平内部的速度场分析。一维设计忽略了各截面参数的变化,运用三元流动理论对叶片中的速度场进行更准确的求解与校核,并对叶片的型线进行设计和改进。

(2) 透平效率与功率容量的依赖关系。透平内部各损失随着功率变化而变化,研究透平内各损失与功率的依赖关系,为透平的优化设计提供指导,进而提高透平的效率。

(3) 透平叶片角度的优化。在透平喷嘴尾缘和叶轮前缘处,对叶片的角度进行优化匹配,降低压力损失和回流的产生。

(4) 蜗壳内流动对流场的影响。考虑蜗壳内的非均匀流动,分析并优化蜗壳的设计与加工方式,尽量降低蜗壳内的能量损失。在透平模拟时采用全周流道模拟确定流场分布。

(5) 多级透平的膨胀比分配。大流量、高膨胀比的储能系统透平,对多级透平的膨胀级数和膨胀

比进行合理选择分配,以保证效率最大化并降低加工成本。

(6) 透平辅件的选择。研究适用于大功率 CO₂ 透平的轴承和电机,以保证透平实际性能接近设计要求。

7 结 论

可再生能源装机量不断提高,但是其间歇性发电的特点将会给电网造成冲击。CO₂ 储能作为长时大规模储能技术,有助于更好地利用太阳能等可再生能源。储能系统的核心部件之一是透平膨胀机,直接影响着系统的性能。本文介绍了 CO₂ 透平膨胀机的主要类型及特征;梳理了设计方法及数值分析方面的研究,从气动设计、损失模型和优化算法 3 方面对设计方法进行论述,分析了部分进气和密封方式对于透平性能的影响,介绍了目前已有的 CO₂ 实验研究系统,归纳了其膨胀机设计参数,探明了 CO₂ 储能透平膨胀机的技术难点和主要研究方向。

总的来说,目前对于 CO₂ 透平的研究主要集中在设计方法和数值模拟上,未来还需要强化对 CO₂ 透平基础理论和实验运行的研究,完善透平内的速度分析和相应的损失关系,明确叶片角度匹配和蜗壳能量损失,积累实验系统运行和透平辅件的设计经验,为大功率、大流量 CO₂ 储能系统透平膨胀机的设计制造奠定基础。随着众多学者对于 CO₂ 透平膨胀机的研究,CO₂ 储能透平膨胀机将朝向大功率、高效率、低成本方向发展,将更好的服务于储能系统,为可再生能源的高效利用提供有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 孙珂. 我国风电光伏发电总装机突破8亿千瓦[N]. 国家电网报, 2023-05-30(5).
SUN Ke. China's wind power photovoltaic power generation total installed capacity exceeded 800 million kilowatts[N]. State Grid News, 2023-05-30(5).
- [2] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology[J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.
- [3] AI C, ZHANG L, GAO W, et al. A review of energy storage technologies in hydraulic wind turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 264: 115584.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张家俊, 李晓琼, 张振涛, 等. 压缩二氧化碳储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(6): 1928-1945.
ZHANG Jiajun, LI Xiaoqiong, ZHANG Zhentao, et al. Research progress of compressed carbon dioxide energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(6): 1928-1945.
- [7] 郑平洋, 郝佳豪, 常鸿, 等. 基于不同液化方式的液态二氧化碳储能系统研究进展[J]. 南方能源建设, 2023, 11(2): 102-111.
ZHENG Pingyang, HAO Jiahao, CHANG Hong, et al. Research progress of liquid carbon dioxide energy storage system based on different liquefaction methods[J]. Southern Energy Construction, 2023, 11(2): 102-111.
- [8] XU M, WANG X, WANG Z, et al. Preliminary design and performance assessment of compressed supercritical carbon dioxide energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116153.
- [9] LIU Z, LIU B, GUO J, et al. Conventional and advanced exergy analysis of a novel transcritical compressed carbon dioxide energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111807.
- [10] XU M, WANG X, WANG Z, et al. Preliminary design and performance assessment of compressed supercritical carbon dioxide energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116153.
- [11] ZHANG Y, YANG K, HONG H, et al. Thermodynamic analysis of a novel energy storage system with carbon dioxide as working fluid[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 682-697.
- [12] FU H, HE Q, SONG J, et al. Thermodynamic of a novel solar heat storage compressed carbon dioxide energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 247: 114757.
- [13] WU C, WAN Y, LIU Y, et al. Thermodynamic simulation and economic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105544.
- [14] 姜华, 魏丽红, 郭芮伶, 等. 近临界 CO₂ 透平膨胀机设计与内流平衡相变研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(11): 20-25.
JIANG Hua, WEI Lihong, GUO Ruiling, et al. Design and study on near-critical CO₂ turboexpander and internal flow equilibrium phase change[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 20-25.
- [15] LEE S, YAGANEHI G, MEE D J, et al. Part-load performance prediction model for supercritical CO₂ radial inflow turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 113964.
- [16] LEE S, GURGENCI H. A comparison of three methodological approaches for meanline design of supercritical CO₂ radial inflow turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112500.
- [17] 李红, 廖鹏飞, 何青. 超临界二氧化碳向心透平研究进展[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 21-28.
LI Hong, LIAO Pengfei, HE Qing. Review on research of supercritical carbon dioxide radial-inflow turbine[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 21-28.
- [18] LYU G, YANG J, SHAO W, et al. Aerodynamic design optimization of radial-inflow turbine in supercritical CO₂ cycles using a one-dimensional model[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 827-839.
- [19] CHO S K, LEE J, LEE J I, et al. S-CO₂ turbine design for decay heat removal system of sodium cooled fast reactor[C]//Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Seoul, South Korea; American Society of Mechanical Engineers, 2016: V009T36A006.
- [20] LUO D, LIU Y, SUN X, et al. The design and analysis of supercritical carbon dioxide centrifugal turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 527-535.
- [21] GRÖNMAN A, UUSITALO A. Analysis of radial-outflow turbine design for supercritical CO₂ and comparison to radial-inflow turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115089.
- [22] UUSITALO A, TURUNEN-SAARESTI T, GRÖNMAN A. Design and loss analysis of radial turbines for supercritical CO₂ Brayton cycles[J]. Energy, 2021, 230: 120878.

- [23] 王 智,刘亚丽,匡轩毅. 超临界二氧化碳单级轴流透平变工况特性分析[J]. 动力工程学报,2021,41(3):182-188.
WANG Zhi, LIU Yali, KUANG Xuanyi. Analysis of off-design characteristics of supercritical CO₂ single-stage axial-flow turbine[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(3):182-188.
- [24] 刘亚丽. 超临界二氧化碳布雷顿循环轴流透平流动特性研究[D]. 华北电力大学,2021.
LIU Yali. Flow characteristics research on supercritical carbon dioxide Brayton cycle axial flow turbine[D]. Beijing:North China Electric Power University,2021.
- [25] 韩万龙,丰镇平,王月明,等. 超临界二氧化碳高压涡轮气动设计及性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(7):192-198.
HAN Wanlong, FENG Zhenping, WANG Yueming, et al. Aerodynamic design and performance of sCO₂ high pressure turbines[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(7):192-198.
- [26] HAN W, ZHANG Y, LI H, et al. Aerodynamic design of the high pressure and low pressure axial turbines for the improved coal-fired recompression sCO₂ reheated Brayton cycle[J]. Energy, 2019, 179:442-453.
- [27] PERSKY R, SAURET E. Loss models for on and off-design performance of radial inflow turbomachinery[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150:1066-1077.
- [28] QI J, REDDELL T, QIN K, et al. Supercritical CO₂ radial turbine design performance as a function of turbine size parameters[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(8):081008.
- [29] HU D, LI S, ZHENG Y, et al. Preliminary design and off-design performance analysis of an organic Rankine cycle for geothermal sources[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 96:175-187.
- [30] QI J, REDDELL T, QIN K, et al. Supercritical CO₂ radial turbine design performance as a function of turbine size parameters[J]. Journal of Turbomachinery, 2016, 139:080081.
- [31] FUTRAL S M, HOLESKI D E. Experimental results of varying the blade-shroud clearance in a 6.02-inch radial-inflow turbine[R]. NASA-TN-D-5513. Washington, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1970.
- [32] WANG T, XU J, WANG Z, et al. Irreversible losses, characteristic sizes and efficiencies of sCO₂ axial turbines dependent on power capacities[J]. Energy, 2023, 275:127437.
- [33] UYSAL S C, WEILAND N. Turbomachinery design of an axial turbine for a direct fired sCO₂ cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 267:115913.
- [34] DU Y, TIAN G, PEKRIS M. A comprehensive review of micro-scale expanders for carbon dioxide related power and refrigeration cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201:117722.
- [35] ZHOU K, WANG J, XIA J, et al. Design and performance analysis of a supercritical CO₂ radial inflow turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167:114757.
- [36] 王巧珍. 7.5 MW 超临界二氧化碳向心透平气动设计及性能分析[D]. 华北电力大学, 2021.
WANG Qiaozhen. Aerodynamic design and performance analysis of a 7.5 MW supercritical carbon dioxide radial turbine[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2021.
- [37] 邢 浩. 超临界二氧化碳向心透平一维优化设计及变工况性能分析[D]. 天津理工大学, 2022.
XING Hao. One-dimensional optimization design and performance analysis of supercritical carbon dioxide radial inflow turbine under variable working conditions[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.
- [38] ODABAE M, SAURET E, HOOMAN K. CFD simulation of a supercritical carbon dioxide radial-inflow turbine, comparing the results of using real gas equation of state and real gas property file[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 846:85-90.
- [39] ZHANG H, ZHAO H, DENG Q, et al. Aerothermodynamic design and numerical investigation of supercritical carbon dioxide turbine[C]//Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles; Wind Energy. Montreal, Quebec, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V009T36A007.
- [40] 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):7276-7286,7454.
XIE Yonghui, WANG Yuqi, ZHANG Di, et al. Review on research of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and turbomachinery[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7276-7286,7454.
- [41] HUANG G, SHU G, TIAN H, et al. Development and experimental study of a supercritical CO₂ axial turbine applied for engine waste heat recovery[J]. Applied Energy, 2020, 257:113997.
- [42] WANG H, LUO K, HUANG C, et al. Numerical investigation of partial admission losses in radial inflow turbines[J]. Energy, 2022, 239:121870.
- [43] 王雨琦,施东波,张 荻,等. 部分进气超临界二氧化碳向心透平气动性能研究[J]. 热力透平, 2016, 45(3):184-188,195.
WANG Yuqi, SHI Dongbo, ZHANG Di, et al. Study on aerodynamic performance of a partial-admission supercritical carbon dioxide radial-inflow turbine[J]. Thermal Turbine, 2016, 45(3):184-188,195.
- [44] 张 静. sCO₂ 部分进气轴流式涡轮膨胀机优化及全工况性能研究[D]. 天津大学, 2021.
ZHANG Jing. Optimization and performance analysis of a partial admission axial turbine expander using sCO₂[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[45] HUANG G,SHU G,TIAN H,et al. Experiments on a small-scale axial turbine expander used in CO₂ transcritical power cycle[J]. Applied Energy,2019,255:113853.

[46] 杨岳鸣,秦 侃,韩奎华,等. 应用于燃气轮机余热回收系统的超临界 CO₂ 径流式透平性能探究[J]. 推进技术,2022,43(10):192-204.
YANG Yueming, QIN Kan, HAN Kuihua, et al. Performance of supercritical CO₂ radial turbine for gas turbine waste heat recovery system[J]. Journal of Propulsion Technology,2022,43(10):192-204.

[47] 童志庭,邢 浩,张 超,等. 叶顶间隙对超临界二氧化碳向心透平性能的影响[J]. 热能动力工程,2022,37(9):66-72.
TONG Zhiting, XING Hao, ZHANG Chao, et al. Influence of blade tip clearance on performance of supercritical carbon dioxide radial inflow turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(9):66-72.

[48] DU Q,ZHANG L,ZHANG D,et al. Numerical investigation on flow characteristics and aerodynamic performance of shroud seal in a supercritical CO₂ axial-flow turbine[J]. Applied Thermal Engineering,2020,169:114960.

[49] 杜秋晚,张 荻,谢永慧. 串联式干气密封对超临界二氧化碳轴流透平气动性能的影响[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4576-4585.
DU Qiuwan, ZHANG Di, XIE Yonghui. Effect of series dry gas seal on the aerodynamic performance of a supercritical carbon dioxide axial-inflow turbine[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(13):4576-4585.

[50] 刘红丹,王 磊,周 东,等. 超临界二氧化碳轴流透平进排气壳体性能影响研究与验证[J]. 热力发电,2023,52(6):135-145.
LIU Hongdan, WANG Lei, ZHOU Dong, et al. Numerical investigation and verification on the inlet and exhaust housings of a supercritical carbon dioxide axial turbine[J]. Thermal Power Generation,2023,52(6):135-145.

[51] 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.

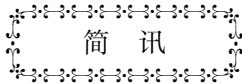
[52] UTAMURA M, HASUIKE H, YAMAMOTO T. Demonstration test plant of closed cycle gas turbine with supercritical CO₂ as working fluid[J]. Strojarstvo,2010,52(4):459-465.

[53] CHO J, CHOI M, BAIK Y J, et al. Development of the turbomachinery for the supercritical carbon dioxide power cycle; Turbomachinery for the supercritical carbon dioxide power cycle[J]. International Journal of Energy Research,2016,40(5):587-599.

[54] LI Hongzhi, ZHANG Yifan, YAO Mingyu, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO₂ power cycle pilot loop[J]. Energy,2019,174:792-804.

[55] LI Hongzhi, ZHANG Yifan, BAI Wengang, et al. Control strategies and dynamic experimental tests on the wide-range and rapid load regulation of a first pilot multi-megawatts fossil-fired supercritical CO₂ power system [J]. Energy Conversion and Management, 2023,279:116748.

(刘 颖 编辑)



简 讯

ESG 公司声称在新的测试中 100% 捕获 CO₂

日前,发电和碳捕获系统开发商 ESG 清洁能源公司宣布,其碳捕获系统已经实现了 100% 的燃烧废气捕获。本次测试是在该公司位于马萨诸塞州霍利奥克的 4.4 MW 燃气发电厂进行的。该公司称这是一个“巨大的里程碑”,并表示任何内燃机均有可能实现 CO₂ 零排放。

ESG 公司的碳捕获系统包括两个步骤:首先从废气中除去水,然后捕获 CO₂。干燥废气使 CO₂ 吸附剂的容量增加了一倍以上,从而使 100% 的碳被捕获,同时减少了系统的尺寸和成本。ESG 公司的除水系统由先进的陶瓷膜和机械冷却系统组成。据该公司介绍,CO₂ 捕获系统使用无毒且易于操作的固体吸附剂,提高了整个系统的适用性和节能性。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)