

超临界二氧化碳向心透平设计与热流固耦合研究

赵攀¹, 温玉聪¹, 娄聚伟¹, 杨培军², 周林³, 张瑜¹, 王江峰¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安西热锅炉环保工程有限公司, 710054, 西安;
3. 国能长源汉川发电有限公司, 432000, 湖北孝感)

摘要: 为了适应兆瓦级超临界二氧化碳(SCO₂)布雷顿循环系统的需求,本文在 1 MW 功率等级 SCO₂ 向心透平设计基础上,通过雷诺平均 Navier-Stokes 方程(RANS)的方法开展了透平流道内流动的三维数值模拟,分析了透平的变工况性能,研究了叶顶间隙的大小对流动效率的影响规律。基于热流固耦合方法,根据数值模拟结果与透平叶轮的实际运行条件,施加相应热载荷与气动载荷,并考虑到轮背泄漏流引起的轴向推力,开展了透平动叶轮的运行安全性分析。结果表明:设计工况下透平的等熵效率达到 83.53%,输出功率达到 1 188.57 kW,所设计的透平具有良好的变工况性能;采用 TC4 钛合金制造的透平叶轮的最大总形变为 0.570 mm,其中最大轴向形变为 0.303 mm,叶轮结构的内部应力远小于材料的屈服强度。本文的工作可为未来兆瓦级 SCO₂ 布雷顿循环系统的透平研制提供基础数据与理论支撑。

关键词: 超临界二氧化碳;向心透平;热流固耦合方法

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202211009 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0083-12

Design and Thermal-Fluid-Solid Coupling Investigation of Supercritical Carbon Dioxide Radial Inflow Turbine

ZHAO Pan¹, WEN Yucong¹, LOU Juwei¹, YANG Peijun², ZHOU Lin³,
ZHANG Yu¹, WANG Jiangfeng¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Xire Boiler & Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Guoneng Changyuan Hanchuan Power Generation Co. Ltd., Xiaogan, Hubei 432000, China)

Abstract: In this paper, a 1 MW supercritical carbon dioxide (SCO₂) radial inflow turbine is designed to meet the requirement of a MW-class SCO₂ Brayton cycle system. The three-dimensional numerical simulation is carried out by RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) equations. The off-design performance of the turbine is analyzed and the influence of the tip clearance on the efficiency is also investigated. The operation safety of the turbine impeller is analyzed with the thermal-fluid-structure coupling method. Based on the numerical simulation results and actual operating conditions of the turbine impeller, the corresponding thermal load and aerodynamic load were applied in this process. The axial force caused by the leakage flow at the backface cavity of impeller is also considered. The results show that the isentropic efficiency and the output power of turbine under design conditions are 83.53% and 1 188.57 kW,

收稿日期: 2022-03-17。 作者简介: 赵攀(1983—),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876152,51976147);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2021JC-05)。

网络出版时间: 2022-07-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220706.1301.002.html>

respectively. The SCO_2 turbine exhibits good off-design performance. The maximum total deformation of the turbine impeller made of titanium alloy TC4 is 0.570 mm while the maximum axial deformation is 0.303 mm. The stress of the impeller is far smaller than the material yield strength. The research results can provide basic data and theoretical support for the turbine design of MW-class SCO_2 Brayton cycle system.

Keywords: supercritical carbon dioxide; radial inflow turbine; thermal-fluid-solid coupling method

当二氧化碳的温度与压力分别高于其临界点(30.98℃, 7.38 MPa)时,处于超临界态,形成超临界二氧化碳(SCO_2)流体。在物理性质方面, SCO_2 密度高而黏度与可压缩系数低,其载热能力接近于液体,而流动性近似于气体;在化学性质方面, SCO_2 无色无味无毒,化学性质稳定,不易燃易爆^[1]。已有诸多研究表明,以 SCO_2 为工质的布雷顿循环发电系统具有结构紧凑、循环效率高、可在高温场合安全运行等诸多优势,预计在第四代核能反应堆、高温余热回收和火力发电等领域具有广阔的应用前景^[2-4]。

近年来,国内外学者对 SCO_2 布雷顿循环开展了一系列相关研究工作,其中部分国外研究机构起步较早,在十余年前就已开展了 SCO_2 布雷顿循环系统的实验台搭建与试运行,例如日本东京工业大学(TIT)搭建的10 kW级 SCO_2 布雷顿循环系统^[5]、美国Sandia实验室(SNL)的250 kW再压缩闭式 SCO_2 循环实验系统^[6]、美国西南研究院(SWRI)的1 MW级 SCO_2 布雷顿循环系统^[7]以及韩国能源研究院(KIER)搭建的100 kW级 SCO_2 循环系统^[8]等。我国的研究机构也在近年陆续开展了若干 SCO_2 循环实验系统的建设,并有一定的成果报道,例如中国科学院工程热物理研究所于近日建成的兆瓦级 SCO_2 发电机组^[9]、上海电气集团有限公司的300 kW功率等级 SCO_2 透平-压缩机同轴涡轮机组样机^[10]、西安热工研究院的5 MW级分流再压缩式 SCO_2 发电实验平台^[11]等。

在 SCO_2 布雷顿循环系统中, SCO_2 透平将工质的内能转化为机械能并带动发电机做功,是系统的关键动力部件。在对 SCO_2 透平的研究中,国内外学者采用的方法主要包括基于透平一维设计与性能预测的理论研究方法以及基于计算流体动力学(CFD)的数值模拟方法,这些研究所关注的透平形式则以单级向心透平为主。

在国外, Lee等^[12]对应用于水冷小型模块化反应堆的 SCO_2 布雷顿循环系统提出了叶轮机械一维设计方法,给出了透平与压缩机的变工况性能,并指

出:在设计程序中用于计算透平内部流动损失的损失模型是基于空气透平以及蒸汽透平的相关研究成果的,可能不适用于 SCO_2 工质的叶轮机械。Uusitalo等^[13]用数值模拟方法研究了兆瓦级 SCO_2 向心透平的流动损失,比较了不同设计速比下损失模型方法与数值模拟方法对透平内各区域流动损失的预测结果,结果表明:当透平的速比在0.50~0.65之间时,两者的预测结果相差不大,但是若设计速比较低,则两者会有较大的偏差。Holand等^[14]对小功率等级 SCO_2 布雷顿循环系统进行了热力学建模分析,对其中的透平与压缩机开展了设计与数值模拟,在数值计算中采用了真实气体物性数据,结果表明透平的设计效率达到76%。Cho等^[15]对应用于钠快冷堆的 SCO_2 透平开展了一维与三维设计,获得了叶片型线的几何结构以及性能曲线。Kim等^[16]用数值方法对某实验系统中采用的 SCO_2 向心透平开展了气动分析,根据流动损失情况给出了叶片的改良设计方案。

在国内, Luo等^[17]设计并用数值模拟方法研究了一台转速为6 000 r/min的单级离心式 SCO_2 透平,并研究了其变工况性能,指出提高透平转速有助于达到高的透平效率。Ma等^[18]在对 SCO_2 向心透平开展数值模拟时考虑了流经动静叶间隙与轮背空腔的泄漏流体,并分析了轮背空腔的压力分布,定量计算了泄漏流对叶轮结构造成的轴向推力。周奥铮等^[19]设计了转速为45 000 r/min的 SCO_2 向心透平,用一维方法以及三维数值模拟方法分别获得了透平的变工况特性曲线,同时还基于一维向心透平效率预测对超临界二氧化碳循环进行热力学分析^[20]。Lin等^[21]采用热流固耦合方法,对一动叶入口直径约为40 mm的小型 SCO_2 向心透平叶轮进行了单流道的流场数值模拟与强度校核,结果表明最大形变仅为0.1 mm,叶轮内部应力符合要求。Zhang等^[22]分别设计了1.5 MW的 SCO_2 向心透平以及15 MW的 SCO_2 轴流式透平,分别对轴流式透平的叶片与向心透平的叶轮结构开展了强度校

核。向心透平叶轮的强度校核中考虑了离心载荷与气动载荷的作用,但是未考虑温度的影响。吕国川等^[23]开发了 SCO₂ 向心透平的一维设计程序,研究了透平的一维变工况性能预测方法,并用数值模拟方法证明了一维方法的可靠性。李翔宇等^[24]基于遗传算法理念开发了向心透平热力优化设计程序与变工况性能预测程序,设计了 5 MW 级 SCO₂ 向心透平,并与 CFD 方法设计结果进行了对比。

目前国内外各实验系统的透平功率以及循环输出功率大多为百千瓦级,可预见更高功率等级的 SCO₂ 透平将在未来受到广泛关注。SCO₂ 向心透平转速高、尺寸小、叶片薄,并在运行中受到高温高压高密度 SCO₂ 工质的冲击与传热作用,使透平叶轮发生受力应变与热膨胀。此外,向心透平的流量与叶轮尺寸随着功率等级的提高而增大,相对于小功率等级的透平,大功率等级透平的形变效应更加明显。因此在设计较高功率等级的 SCO₂ 向心透平时,有必要衡量叶轮在实际运行时的形变幅度与强度性能,以综合设计系统中转子与静子的尺寸,避免发生动静部件干涉等安全事故。目前国内外对 SCO₂ 向心透平开展的研究主要为气动特性分析,运行安全性分析偏少,且当前已有的安全性研究往往未能综合考虑透平在实际运行时的全部载荷,影响了计算结果的可靠性。

本文在 1 MW 功率等级 SCO₂ 向心透平设计的基础上,用求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程(RANS)的方法开展三维数值模拟,分析了动叶轮的叶顶间隙对流动效率的影响,获得了透平的变工况性能曲线。使用热流固耦合方法,综合考虑透平实际运行中的旋转离心力、流体压力、温度以及轮背泄漏流对轴向推力的影响,确定了设计工况下透平叶轮的形变与应力分布,研究结果可为兆瓦级 SCO₂ 布雷顿循环系统的综合设计提供参考。

1 SCO₂ 向心透平一维设计

某 SCO₂ 布雷顿循环系统的主要组成部件包括热源、冷却器、回热器、透平与压气机,图 1 为该系统的流程图。表 1 所示为系统中向心透平的设计参数,图 2 为透平内部工质热力参数变化的焓-熵图。

向心透平的总-静等熵效率 η_{turb} 定义为工质在透平内的实际焓降与等熵焓降之比

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_{2s} - h_5}{h_{2s} - h_{5s}} \tag{1}$$

式中: h_{2s} 为静叶栅入口 CO₂ 的总焓; h_{5s} 为动叶轮出

口处 CO₂ 的等熵静焓; h_5 为动叶轮出口处的实际静焓。在透平的设计计算中,CO₂ 工质的物性数据均采用物性数据库 REFPROP 中的真实气体物性。

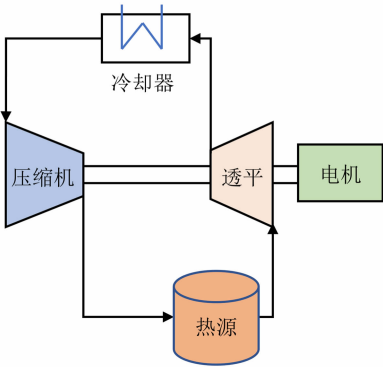


图 1 SCO₂ 简单布雷顿循环系统
Fig. 1 The layout of SCO₂ simple Brayton cycle system

表 1 SCO₂ 向心透平设计参数
Table 1 Design parameters of SCO₂ radial inflow turbine

参数	数值或需求
透平入口总温 $T_{\text{in},\text{total}}/\text{K}$	773.15
入口总压 $P_{\text{in},\text{total}}/\text{MPa}$	13.94
出口静压 $P_{\text{out},\text{static}}/\text{MPa}$	7.82
质量流量 $Q_m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	18
转速 $N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	30 000
总-静效率 $\eta_{\text{turb}}/\%$	≥ 80

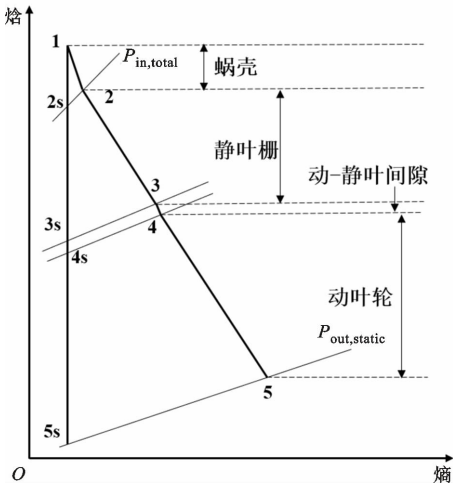


图 2 透平内部工质的热力过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of thermodynamic process of working medium in radial turbine

在向心透平的一维设计理论中,透平的结构设计方案由表 2 所示的 7 个关键设计参数决定。

表 2 7 个关键设计参数的取值范围

Table 2 The value ranges of 7 key design parameters

参数	取值范围
静叶速度系数 φ	0.90~0.97
动叶速度系数 ψ	0.8~0.9
轮径比 μ	0.35~0.50
速比 x_a	0.6~0.7
反动度 Ω	0.40~0.55
动叶入口绝对气流角 $\alpha_1/(^{\circ})$	14~20
动叶出口相对气流角 $\beta_5/(^{\circ})$	35~55

在透平的一维设计计算中,首先在表 2 中选取一组数据作为初始值,然后通过向心透平一维设计理论确定透平的各关键几何参数,并用下式得到透平效率的预测值为

$$\eta_{\text{turb}} = 2x_a(\mu\psi\cos\beta_5 \cdot \sqrt{\Omega + (1 - \Omega)\varphi^2 - 2x_a\varphi\cos\alpha_4} \sqrt{1 - \Omega} + \mu^2x_a^2 + \varphi\cos\alpha_4 \sqrt{1 - \Omega} - \mu^2x_a) \quad (2)$$

之后从透平的几何结构出发,用损失模型^[23]估算透平运行时的各项流动损失,从流动损失方面获得透平效率 $\eta_{\text{turb,model}}$,如果 η_{turb} 与 $\eta_{\text{turb,model}}$ 之差小于准许误差 ϵ ,则认为透平的设计方案合理。图 3 所示为透平的总体设计流程,其中准许误差取 0.5%。

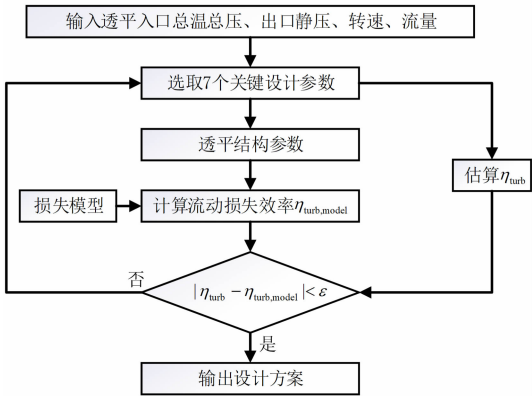


图 3 SCO₂ 向心透平的一维设计流程

Fig. 3 The 1D design procedure of SCO₂ radial inflow turbine

向心透平一维设计程序可在表 3 所列的各参数取值范围中开展透平的一维设计并进行设计方案的筛选,通过不断迭代搜索,最终确定向心透平设计工况处的所有效率收敛且结构合理的透平设计方案。采用这些方案中效率最高的方案开展后续研究,表 3 给出了 SCO₂ 向心透平的一维设计结果。

表 3 SCO₂ 向心透平一维设计结果

Table 3 The 1D design results of SCO₂ radial inflow turbine

设计参数	数值
透平输出功率/kW	1 207.12
透平等熵效率/%	82.12
静叶入口直径/mm	220.14
静叶出口直径/mm	176.11
动叶入口直径/mm	169.05
动叶出口轮毂直径/mm	53.69
动叶出口轮盖直径/mm	91.68
静叶叶高(动叶入口叶高)/mm	4.42
动叶叶顶间隙/mm	0.30
动叶轴向长度/mm	28.48
静叶弦长/mm	44.87
静叶安装角/($^{\circ}$)	33
动叶出口叶片角/($^{\circ}$)	25
静叶栅叶片数	17
动叶轮叶片数	13
轮径比 μ	0.43
反动度 Ω	0.46
速比 x_a	0.66
动叶入口绝对气流角 $\alpha_1/(^{\circ})$	19
动叶出口相对气流角 $\beta_5/(^{\circ})$	55

2 透平三维结构与数值模拟方法

2.1 透平三维几何结构确定与网格划分

根据向心透平一维设计方案的各项参数,使用 ANSYS Bladegen 建立透平动叶轮与静叶栅的三维几何模型,其中静叶栅采用 TC-2P 叶型,之后在 ANSYS Turbogrid 中进行动叶轮与静叶栅流道的流体域网格划分,其中动叶轮的网格包括了设计值为 0.3 mm 的叶顶间隙。图 4 与图 5 分别给出了本文设计的向心透平动叶轮与静叶栅的流道结构以及网格划分结果。

在 ANSYS CFX 中开展单流道、定常的三维数值模拟,为准确表示超临界态下 CO₂ 的物性,将物性数据库 REFPROP 中的 CO₂ 物性参数编制为高精度表格并由 CFX 调用。数值模拟基于求解雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程与 $k-\epsilon$ 湍流模型,边界条件为给定动叶轮出口静压 7 820 kPa、静叶栅入口温度 773.15 K 以及质量流量 18 kg/s;动静交界面设置为冻结转子模型,此模型适用于动、静叶网

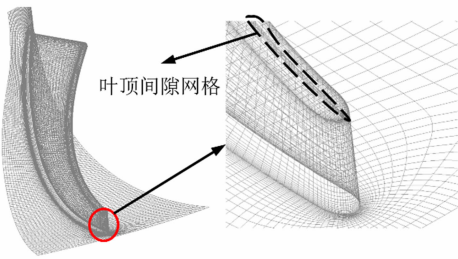


图 4 动叶轮流道结构与网格划分

Fig. 4 The structure and grid partition of turbine impeller passage

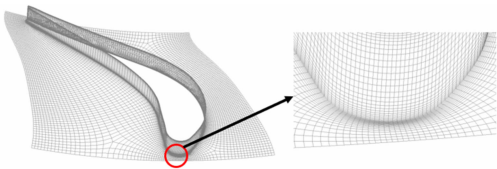


图 5 静叶栅流道结构与网格划分

Fig. 5 The structure and grid partition of turbine vane passage

格能够较好贴合的情况,具有鲁棒性好且计算资源消耗少的优点;数值计算的收敛残差设置为 10^{-5} 。

2.2 网格无关性验证

为了分析网格数对计算结果的影响,静叶栅和动叶轮单流道的计算网格数均分别选取为 20 万~90 万,并在相同的边界条件下开展数值模拟。

表 4 给出了网格无关性验证结果,可见当网格数大于 50 万后,仿真结果偏差较小。综合考虑计算机算力以及计算精度的需求,后续研究中动叶轮与静叶栅的网格数均选取 50 万。

表 4 网格无关性验证结果

Table 4 The results of grid independence study

网格数	静叶入口总压/ kPa	相对静叶入口总压 设计值偏差/%
20 万	13 609.3	2.37
30 万	13 617.5	2.31
50 万	13 620.4	2.29
70 万	13 619.9	2.30
90 万	13 620.7	2.29

表 5 给出了 SCO_2 向心透平关键参数的一维设计值与数值模拟值的对比结果,可见各参数的相对偏差较小,最大偏差为 2.35%,说明透平的一维设计方法可行。

表 5 SCO_2 向心透平关键参数设计值与模拟计算结果的对比

Table 5 The comparison between design and simulation for several key parameters of SCO_2 radial inflow turbine

数值类型	透平入口总压/ kPa	总-静效率/ %	轴功率/ kW
设计值	13 940.00	82.12	1 207.12
数值模拟值	13 620.40	83.53	1 188.57
相对偏差/%	2.35	1.69	1.54

3 数值模拟结果分析

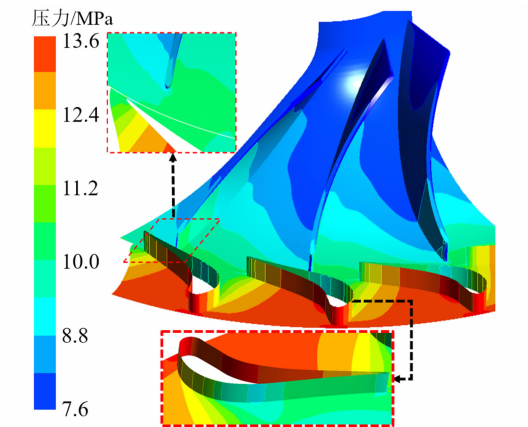
3.1 透平内部流动分析

图 6 分别给出了设计工况下 SCO_2 向心透平轮毂面与叶片表面的压力分布、流道内的流线分布以及各叶高截面的熵分布。

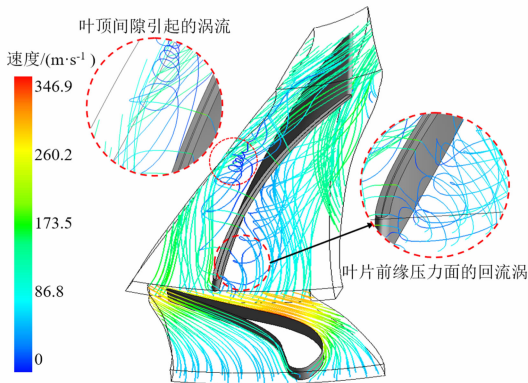
由图 6(a)可知,透平内部压力随流动方向连续降低,静叶栅入口处的平均压力为 13.62 MPa,透平的膨胀比为 1.74,与设计值基本一致。在静叶栅中,流道的压力分布与叶高无关,轮毂面上的等压线基本与工质的流动方向垂直,静叶栅喉部处的压力梯度最大,动-静叶交界面处的流体压力分布较为均匀,平均压力为 10.82 MPa;在动叶轮中,工质的压降主要发生在流道的前半段,叶片压力面受到气流冲击作用,其压力高于吸力面。

由图 6(b)可知,工质在静叶栅中基本贴合叶片壁面流动,在静叶栅流道内,工质流速先增大后减小,在叶栅喉部达到最大值,最大流速为 346.9 m/s,对应马赫数为 0.842。动叶入口气流角接近于 90° ,基本实现了轴向进气。动叶入口处有部分流体冲击叶片压力面前缘,并在叶片的压力面附近形成了小范围的回流涡与流动分离;在动叶轮的叶顶部位,部分流体并未推动叶片做功,而是通过叶顶间隙从压力面侧泄漏进入吸力面侧,那之后流体速度明显降低并形成了涡旋,干扰了主流流动。

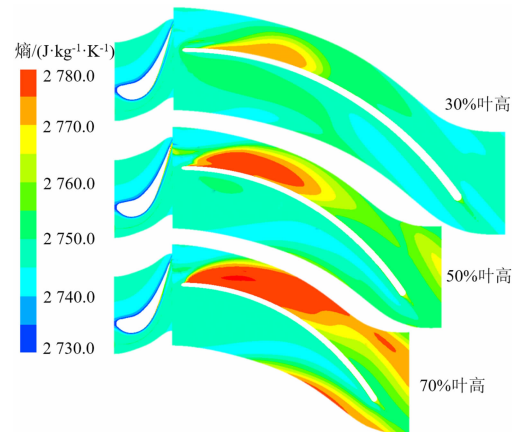
透平流道内的熵增区域一般对应着流动损失较大的区域,由图 6(c)可知,动叶流道内,各叶高的熵增区域均始于叶片前缘,其中吸力面附近存在明显的熵增区域,其面积随叶高的增大而增大,说明能量损失随叶高增大,推测此处的熵增现象是由叶顶间隙泄漏流引起的;而压力面附近的熵增现象则弱于吸力面,且随着叶高的增大而减弱,推测此处的熵增是由叶片前缘压力面的回流涡引起的,可见其造成的流动损失相对较小。



(a)叶片与轮毂面的压力分布



(b)整体流线分布与局部流动特征



(c)各叶高处的熵分布

图 6 透平内部总体流动状况

Fig. 6 Overall flow characteristics in radial turbine

3.2 叶顶间隙对透平效率的影响

叶顶间隙泄漏流动影响了透平的通流性能,需要尽量减小叶顶间隙的取值,但是过小的叶顶间隙会使动叶轮的叶片容易与静止的轮盖面发生碰撞,影响运行安全性。本文研究了泄漏流的流动特征,确定了叶顶间隙大小与透平效率的关系。

图 7 所示为 0.3 mm 叶顶间隙(6.78%动叶入口叶高)与 1.1 mm 叶顶间隙(25%动叶入口叶高)下叶顶间隙泄漏流体的流线分布。可见工质在经过叶顶间隙后发生了流动分离,流动速度明显降低并在叶片吸力面附近形成涡旋流动。在 0.3 mm 的叶顶间隙下,泄漏流的影响范围约占流道体积的 1/4,涡旋局限于叶片吸力面与轮盖面附近,其沿流动方向先以较慢的速度扩张,然后逐渐消散,叶片中后部的涡旋现象已不明显;在 1.1 mm 的叶顶间隙下,泄漏流的影响范围约占据了流道体积的 1/2,叶片吸力面附近的涡旋随流动方向扩张很快,涡旋甚至可达下一叶片的压力面附近,对主流形成了强烈的扰动作用。

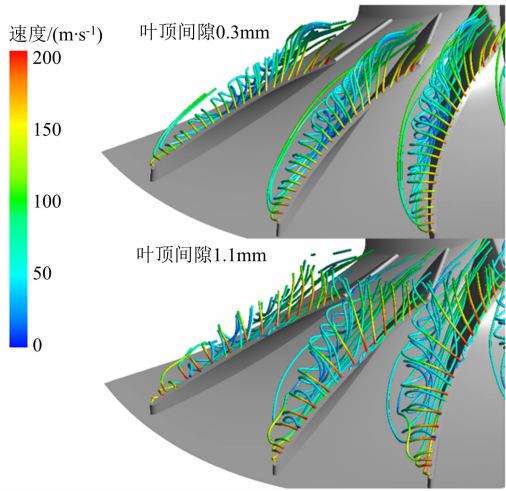


图 7 不同叶顶间隙大小下的泄漏流流线分布

Fig. 7 Streamlines of leakage flow for different tip clearances

图 8 给出了不同叶顶间隙大小的 SCO_2 向心透平在额定工况运行时的总-静等熵效率,可见效率随叶顶间隙的增大以越来越快的速率减小。在叶顶间隙从 6.78%入口叶高逐步增大至 40%入口叶高的

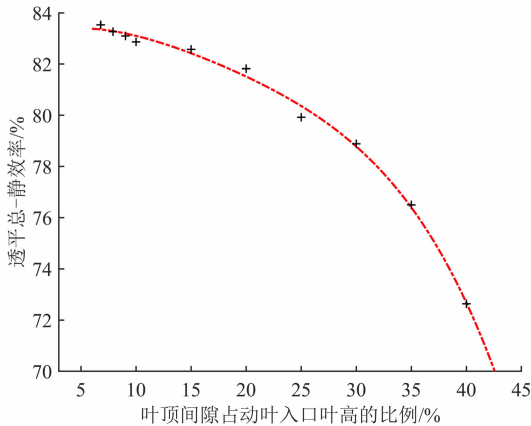


图 8 叶顶间隙大小与透平效率的关系

Fig. 8 The effect of tip clearance on turbine efficiency

过程中,透平效率从 83.53%降低至 72.63%。当叶顶间隙较小时,透平效率仍可保持在 80%以上,且此时叶顶间隙的增大对透平效率的影响较小,当叶顶间隙达到 20%入口叶高后,透平效率的降低幅度明显加快。因此,对于所设计的兆瓦级 SCO_2 透平,为保证较好的通流效率,叶顶间隙不宜超过动叶入口叶高的 20%。

3.3 透平的变工况性能

透平的变工况数值模拟的边界条件为给定入口总压、入口温度与出口静压,同一转速选取多个入口总压进行仿真分析,得到了兆瓦级 SCO_2 向心透平在设计工况与变工况下的运行性能。

图 9 为 25 000 r/min、30 000 r/min 以及 35 000 r/min 3 种不同转速下的透平膨胀比-效率曲线。可见 3 个转速下均存在使透平总-静效率达到最高的最佳膨胀比,当转速为设计转速 30 000 r/min 时,透平的总-静效率在设计工况的膨胀比 1.74 附近具有最大值 83.53%;当转速偏离 30 000 r/min 时,透平效率的最大值点有所偏移,在 25 000 r/min 与 35 000 r/min 的转速下,透平的最佳膨胀比分别为 1.56 与 1.96,对应的最大总-静效率分别为 79.24% 与 85.72%。总体而言,本文设计的兆瓦级 SCO_2 向心透平可在膨胀比 1.7~4.0、转速 25 000 r/min~35 000 r/min 的范围内保持较高的效率,说明其变工况性能良好。

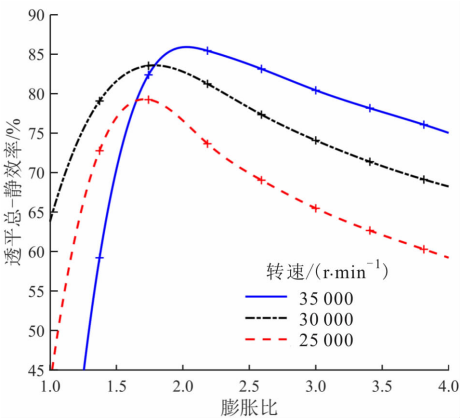


图 9 透平总-静效率变工况特性曲线

Fig. 9 The off-design characteristic curves for turbine total-to-static efficiency

4 透平叶轮热流固耦合安全性分析

4.1 热流固耦合结构强度计算设置

由 SCO_2 透平的数值模拟结果可见,透平动叶轮毂面与叶片在运行时将受到 7 MPa~14 MPa

的流体压力作用,同时流道内工质温度的取值范围约为 400℃~500℃,因此叶轮结构在运行时会发生受力变形与热膨胀。为了准确评估叶轮的形变特征,保障透平的安全运行,本文综合考虑了透平实际运行中受到的各项载荷,使用热流固耦合方法计算了所设计的兆瓦级 SCO_2 透平在设计工况稳定运行时的强度性能。

4.1.1 透平全周流动性能数值模拟

使用 CFX 的 Transform Mesh 功能,由已有的单流道网格得到透平动叶轮与静叶栅的全周计算网格。在透平的设计工况下开展了全周数值模拟,获得了透平全周流道内的温度与压力分布,为后续的透平叶轮运行安全性分析提供基础数据。表 6 分别给出了全周计算与单流道计算得到的透平功率、入口总压以及总-静效率,可见两者差异很小。

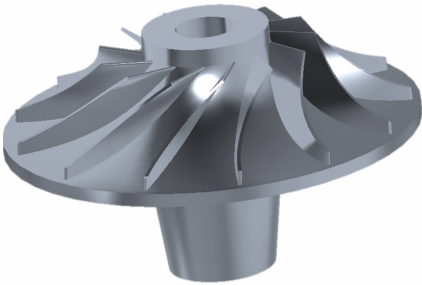
表 6 透平全周计算结果与单流道计算结果的对比

Table 6 Results comparison of single flow passage and whole flow passage			
计算结果	入口总压/kPa	透平功率/kW	总-静效率/%
单流道	13 620.4	1 188.53	83.53
全周	13 622.7	1 189.48	83.91

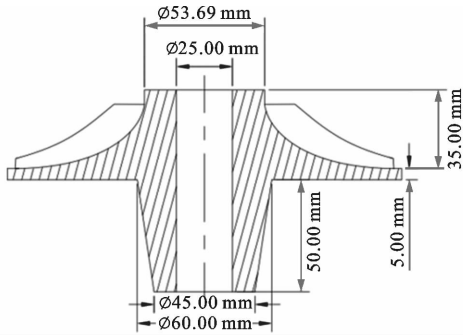
4.1.2 透平叶轮实体模型建立与网格划分

叶轮流道部分的几何结构由前文数值模拟研究给出的轮毂面形线与叶片曲面确定,其余部分的设计则参考了 Sandia 实验室的再压缩 SCO_2 布雷顿循环系统^[6]所用的透平叶轮形式,叶轮采用轴孔-轴的方式与主轴配合,轮背中心轴孔处设计了圆台以方便密封结构的加工并保证足够的轮-轴配合尺寸。透平叶轮的几何模型如图 10(a)所示,其剖面图与关键几何尺寸如图 10(b)所示。

透平叶轮材料选择为牌号 TC4 的钛合金(Ti-6Al-4V),该材料可在 SCO_2 向心透平的运行工况下保持良好的高温力学性能,在 400℃~600℃的温度范围内,其屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 在 376.7 MPa~504.9 MPa 之间^[25]。



(a)叶轮的三维模型



(b) 叶轮的关键几何尺寸

图 10 透平动叶轮实体模型

Fig. 10 The geometric model of turbine impeller

在 ANSYS Mechanical 中开展叶轮的固体域网格划分,其中对叶轮轮毂面与叶片表面的网格进行了加密以确保热流固耦合数据传递的准确性。以气动载荷与温度载荷分别引起的最大形变为基准进行了网格无关性验证,结果见表 7,可见网格数达到 58 万之后,两最大形变的计算结果变化均不大,因此最终采用了 58 万的固体域网格数。图 11 所示为透平叶轮的网格划分结果。

表 7 透平叶轮固体域网格无关性验证

Table 7 The grid independence study for the turbine impeller solid field

网格数	气动载荷引起 最大形变/mm	温度载荷引起 最大形变/mm
25 万	0.502	0.822
32 万	0.505	0.823
58 万	0.514	0.830
77 万	0.517	0.828
89 万	0.513	0.831

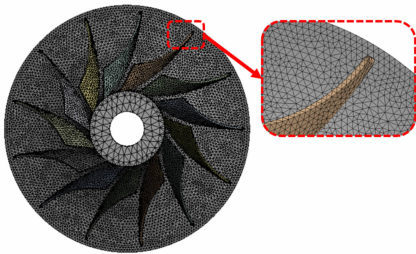


图 11 透平叶轮的网格划分结果

Fig. 11 Grid partition of turbine impeller

4.1.3 热流固耦合计算中各载荷的处理

在透平长期保持额定工况运行时,认为其传热达到稳定,此时 SCO_2 流体与叶轮实体无热交换,叶轮的固体壁面和流体底层保持温度相等。在 ANSYS Mechanical 的 Steady-State Thermal 模块中,

以透平全周流动数值模拟所获得的流体温度在流固交界面上的分布为初始条件,计算获得叶轮结构内部及其余表面的温度场。图 12 所示为透平叶轮的 温度分布,可见叶轮的最低温度与最高温度分别为 $418.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $483.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,总体温度分布具有旋转对称的特征。

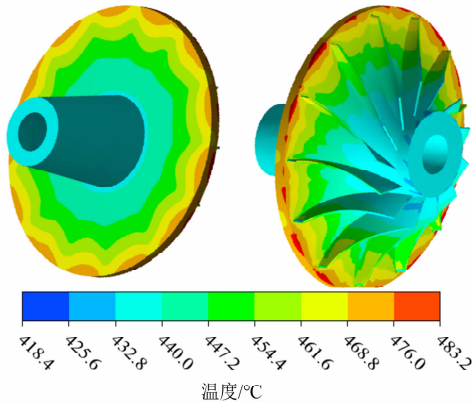


图 12 透平叶轮结构的温度分布

Fig. 12 The temperature distribution of turbine impeller structure

在透平的实际运行中,部分高温高压的 SCO_2 流体会经由动静叶间隙泄漏进入轮背与静子之间的空腔,轮背空腔内的泄漏流压力作用于轮背面上,形成轴向推力。为考虑其影响,本文基于 Ma 等^[18]关于轮背泄漏流压力分布的数值模拟结果推导出轮背面相对位置与压力的关系,据此在轮背面上加载了从轮缘处 10.82 MPa 线性降低至圆台边缘 9.33 MPa 的压力载荷。

透平叶轮的热流固耦合计算综合考虑了透平叶轮结构的温度场、叶片与轮毂面上的气动力、高转速引起的离心力以及轮背泄漏流对轮背面的压力,其计算设置见表 8。

表 8 SCO_2 向心透平叶轮热流固耦合计算设置

Table 8 The parameters setting of thermal-fluid-solid coupling analysis for SCO_2 radial turbine

参数类型	详细条件
温度载荷	温度数据来自透平叶轮温度场计算结果
气动载荷	施加于叶轮轮毂面与叶片表面,压力数据来自透平全周数值模拟
离心载荷	透平转速 $30\ 000\text{ r/min}$
泄漏流压力载荷	在轮背面上施加从轮缘处 10.82 MPa 线性减小至圆台边缘 9.33 MPa 的压力载荷
位移约束	以叶轮质心为基准约束轴孔圆柱面的平动与转动,但可发生形变

4.2 透平运行安全性分析

图 13 分别给出了气动载荷以及温度载荷引起的透平叶轮形变,其中轴向形变以叶轮的排气方向为正方向,且离心载荷默认加载。

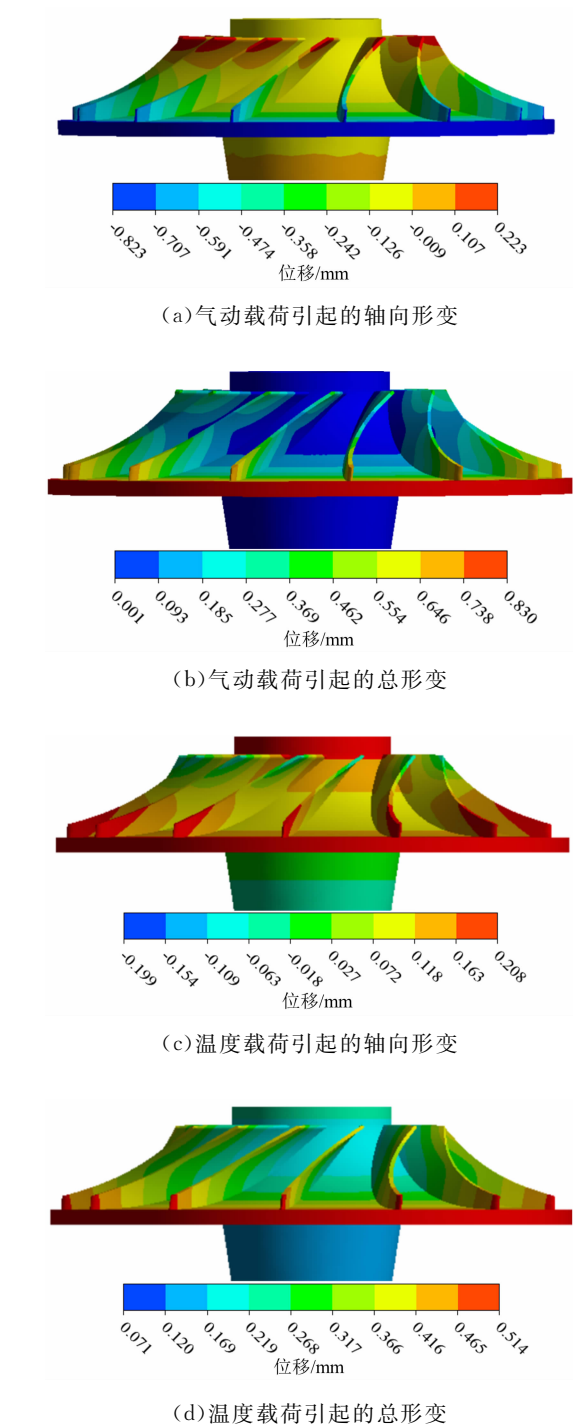


图 13 气动载荷与温度载荷分别引起的叶轮形变
Fig. 13 Deformation amount caused by aerodynamic load and temperature load

由图 13 可知,动叶轮的叶片受到工质的冲击作用,叶片尾缘的叶顶部分出现了正向最大 0.223

mm 的轴向形变;叶轮轮毂面受到高压工质的压力作用,使得轮缘处出现了负向最大 0.823 mm 的轴向形变,叶轮总形变的最大值为 0.830 mm,位于轮缘部位。在温度载荷的影响下,叶轮产生了较为均匀的膨胀,距离叶轮旋转轴最远的轮缘部分膨胀的最为剧烈,出现了 0.514 mm 的最大总形变,叶轮的轴向形变为-0.199 mm~0.208 mm。

图 14 给出了泄漏流压力载荷的作用下叶轮发生的轴向形变。由于叶轮轮缘部分结构最薄且受力最大,该处出现了 1.012 mm 的轴向形变,叶轮的轴向形变分布类似于上述透平气动载荷作用下的分布,但是方向相反。

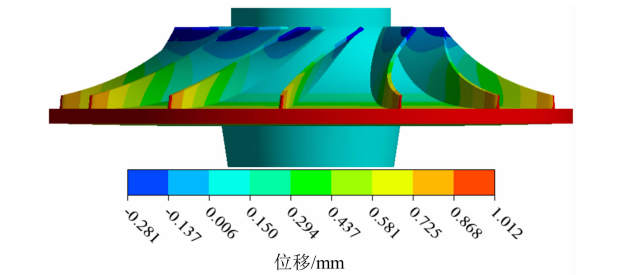
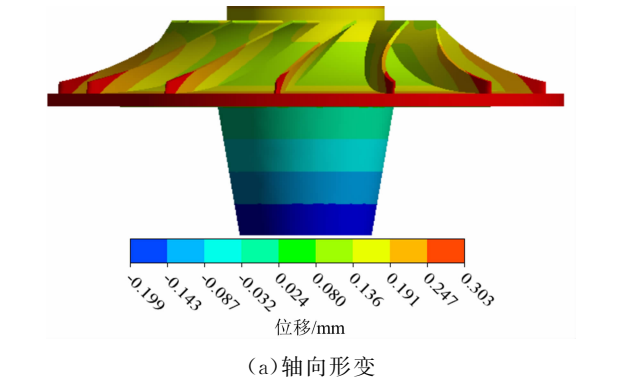


图 14 泄漏流压力载荷作用下的轴向形变
Fig. 14 Axial deformation amount caused by pressure load of leakage flow

图 15 给出了综合考虑温度载荷、离心载荷、气动载荷以及泄漏流引起的压力载荷时 SCO_2 向心透平的轴向形变、径向形变与总形变,可见透平叶轮的轴向形变在-0.199 mm~0.304 mm 之间,其中叶轮排气方向(正向)的最大轴向形变为 0.304 mm;在温度的影响下,叶轮在径向上表现出整体膨胀的趋势,叶轮结构的最大总形变出现在叶轮轮缘处,为 0.570 mm。

图 16 给出了考虑所有载荷时透平叶轮的 von Mises 等效应力分布图。可见透平叶片以及轮毂面上的应力均不超过 188.5 MPa,动叶片上的最大应力出现于叶片中前部与轮毂面的连接处,大小约为



(a) 轴向形变

5 结 论

本文在 MW 级 SCO_2 向心透平设计的基础上,使用三维数值模拟方法研究了透平的工质流动特征与变工况性能,使用热流固耦合方法对透平动叶轮在额定工况下的运行安全性进行了校核,得出了以下结论:

(1)在指定的初始设计参数下完成了兆瓦级 SCO_2 透平的设计,透平的设计功率为 1 207.12 kW,效率为 82.12%;在设计工况下透平功率的数值模拟值为 1 188.57 kW,透平气动效率达到 83.53%,透平功率与设计值偏差为 1.54%,验证了设计方法的可靠性。

(2)当叶顶间隙增大时,透平效率以越来越快的速率降低,为保证较好的通流性能,叶顶间隙应小于动叶入口叶高的 20%;变工况特性研究表明,该透平在膨胀比 1.7~4.0 以及转速 25 000 r/min~35 000 r/min 的运行范围内具有良好的通流性能。

(3)设计工况下,采用 TC4 钛合金材料的透平叶轮沿排气方向的最大轴向形变为 0.304 mm,在透平的实际运行中,叶顶间隙应避免动叶叶顶与轮盖面在运行时相互摩擦;叶轮结构的最大总形变为 0.570 mm,最大应力值为 284.2 MPa,最大应力远小于材料在相应温度下的屈服极限,表明其结构强度符合要求。

(4)透平在设计工况下运行时,温度载荷、气动载荷以及轮背泄漏流引起的轴向推力在透平轮缘处分别引起了 0.830 mm、0.514 mm、1.012 mm 的形变,三者的影响均不可忽略。因此,热流固耦合方法可以有效实现 SCO_2 向心透平的运行安全性研究,在指导相关科学研究与工程应用方面具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] KIMBALL K J, CLEMENTONI E M. Supercritical carbon dioxide Brayton power cycle development overview [C]// ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2012: 931-940.
- [2] AHN Y, BAE S J, KIM M, et al. Review of supercritical CO_2 power cycle technology and current status of research and development [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(6): 647-661.
- [3] 邓清华, 胡乐豪, 李军, 等. 超临界二氧化碳发电技术现状及挑战 [J]. 热力透平, 2019, 48(3): 159-165.

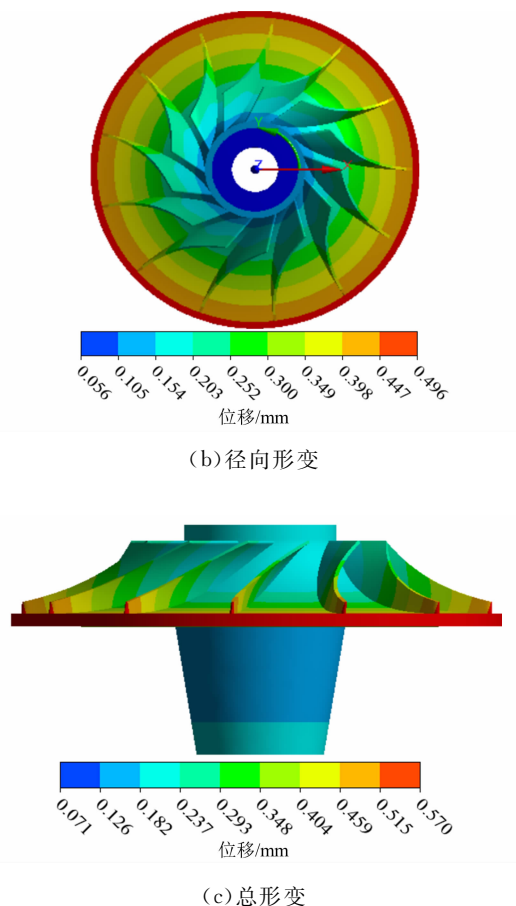


图 15 综合考虑所有载荷时的叶轮形变

Fig. 15 Impeller deformation amount under all load conditions

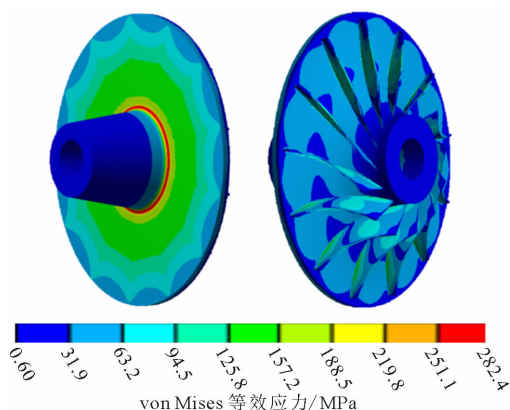


图 16 综合考虑所有载荷时叶轮结构的应力分布

Fig. 16 Impeller stress distribution under all load conditions

160 MPa;叶轮结构上的最大应力为 282.4 MPa,出现在圆台面与轮背面交界处的应力集中区域,此最大值远小于 TC4 材料在透平的工作温度范围下的屈服强度^[25],说明透平叶轮结构强度合格,在额定工况运行时不会出现明显的塑性形变。

- DENG Qinghua, HU Lehao, LI Jun, et al. State-of-art and challenge on technologies of supercritical carbon dioxide electric power generation [J]. *Thermal Turbine*, 2019, 48(3): 159-165.
- [4] 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 on supercritical carbon dioxide power cycle system and its power unit [J]. *Thermal Turbine*, 2016, 45(2): 85-94.
- [5] UTAMURA M, HASUIKE H, OGAWA K, et al. Demonstration of supercritical CO₂ closed regenerative Brayton cycle in a bench scale experiment [C]// *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. New York, NY, USA: ASME, 2012: 155-164.
- [6] 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.
- [7] MOORE J, BRUN K, EVANS N, et al. Development of 1 MWe supercritical CO₂ test loop [C]// *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. New York, NY, USA: ASME, 2015: V009T36A015.
- [8] CHOI B, CHO J, SHIN H, et al. Development of a hundreds of kWe-class supercritical carbon dioxide power cycle test loop in KIER [C]// *ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. New York, NY, USA: ASME, 2019: V009T38A013.
- [9] 岳鹏. 中科院工程热物理研究所兆瓦级超临界二氧化碳发电机组顺利竣工 [EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.csplaza.com/article-21317-1.html>.
- [10] 杨锐, 闫凯. 上海电气超临界二氧化碳循环发电机组成功“首秀” [EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.csplaza.com/article-21233-1.html>.
- [11] 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.
- [12] LEE J, LEE J I, YOON H J, et al. Supercritical carbon dioxide turbomachinery design for water-cooled small modular reactor application [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 270: 76-89.
- [13] UUSITALO A, GRÖNMAN A. Analysis of radial inflow turbine losses operating with supercritical carbon dioxide [J]. *Energies*, 2021, 14(12): 3561.
- [14] HOLAIN D N, BIANCHI G, DE MIOL M, et al. Design of radial turbomachinery for supercritical CO₂ systems using theoretical and numerical CFD methodologies [J]. *Energy Procedia*, 2017, 123: 313-320.
- [15] 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]// *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. New York, NY, USA: ASME, 2016: V009T36A006.
- [16] KIM T W, JEONG W S, SUH K Y. Numerical modeling and analysis of supercritical carbon dioxide turbine [J]. *Transactions of the American Nuclear Society*, 2008, 98(1): 449-450.
- [17] LUO Dan, LIU Yu, SUN Xiaojing, et al. The design and analysis of supercritical carbon dioxide centrifugal turbine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 527-535.
- [18] MA Can, QIU Zhiqiang, GOU Jinlan, et al. Axial force balance of supercritical CO₂ radial inflow turbine impeller through backface cavity design [C]// *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. New York, NY, USA: ASME, 2018: V009T38A016.
- [19] 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. The study and analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and its radial inflow turbine [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(6): 1233-1239.
- [20] 周奥铮, 李雪松, 任晓栋, 等. 基于向心透平效率预测的超临界二氧化碳循环的热力学分析 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(12): 2891-2899.
- ZHOU Aozheng, LI Xuesong, REN Xiaodong, et al. Thermodynamic analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle based on the prediction of the radial inflow turbine efficiency [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(12): 2891-2899.
- [21] LIN Yuansheng, WANG Yuqi, XIE Yonghui. Steady-state stress analysis in a supercritical CO₂ radial-inflow impeller using fluid solid interaction [J]. *Thermal Science*, 2017, 21(1): 251-258.
- [22] ZHANG Hanzhen, ZHAO Hang, DENG Qinghua, et al. Aerothermodynamic design and numerical investi-

- gation of supercritical carbon dioxide turbine [C] // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2015: V009T36A007.
- [23] 吕国川, 杨金广, 王晓放. 超临界二氧化碳向心涡轮设计及变工况性能预测 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(2): 314-320.
- LÜ Guochuan, YANG Jinguang, WANG Xiaofang. Aerodynamic design and off-design performance prediction of supercritical carbon oxide radial-inflow turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(2): 314-320.
- [24] 李翔宇, 冯永志, 冀文慧, 等. 5 MW 超临界 CO₂ 向心透平设计及变工况性能分析 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40(10): 2259-2265.
- LI Xiangyu, FENG Yongzhi, JI Wenhui, et al. Design and off-design performance analysis of 5 MW supercritical carbon dioxide centripetal turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(10): 2259-2265.
- [25] 王付胜, 王艾伦, 陈亚军, 等. 航空 TC4 钛合金高温力学性能 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 86-89, 93.
- WANG Fusheng, WANG Ailun, CHEN Yajun, et al. High temperature mechanical properties of aeronautical TC4 titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(10): 86-89, 93.
- (编辑 武红江 杜秀杰)