

200 kW 级 S-CO₂ 径流式透平的结构设计及性能模拟

陈 垚¹, 赵兵涛¹, 杨其国¹, 袁书生²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 合肥市太泽透平技术有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 为了确定小规模超临界二氧化碳(S-CO₂)热力透平的形式及其结构, 基于正向设计思路, 结合热力学计算、气动分析、数值模拟的方法, 对某 200 kW 级 S-CO₂ 径流式热力透平进行参数化设计, 并对其性能与叶片数量的响应分析, 对其内部三维速度、温度和压力场进行 CFD 数值模拟。结果表明: 透平结构等熵效率和功率分别为 85.54% 和 214 kW, 与实验值比较最大偏差为 2.03%, 设计结果可靠。当透平结构静叶个数从 20 增大到 32 时, 效率和功率分别上升 5% 和下降 20%, 最佳静叶片数为 26; 速度在喷嘴通道和喉道处变化明显, 温度和压力分布的变化趋势较为相似, 都随着流动方向逐渐降低。

关 键 词: 超临界二氧化碳; Brayton 循环; 透平; 结构设计; 热力学参数

中图分类号: TK14 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2022.11.004

[引用本文格式] 陈 垚, 赵兵涛, 杨其国, 等. 200 kW 级 S-CO₂ 径流式透平的结构设计及性能模拟[J]. 热能动力工程, 2022, 37(11): 22-27. CHEN Yao, ZHAO Bing-tao, YANG Qi-guo, et al. Structural design and performance simulation of 200 kW class S-CO₂ radial turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(11): 22-27.

Structural Design and Performance Simulation of 200 kW Class S-CO₂ Radial Turbine

CHEN Yao¹, ZHAO Bing-tao¹, YANG Qi-guo¹, YUAN Shu-sheng²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Hefei Taize Turbine Technology Co., Ltd., Hefei, China, Post Code: 230000)

Abstract: In order to determine the form of a small-scale supercritical carbon dioxide (S-CO₂) thermal turbine and its structure, a 200 kW class S-CO₂ radial thermal turbine was parametrically designed based on the forward design idea, combined with the methods of thermodynamic calculations, aerodynamic analysis and numerical simulations, and its performance was analyzed in response to the number of blades and its internal three-dimensional velocity, temperature and pressure fields by CFD numerical simulations. The results show that the isentropic efficiency and power of the turbine structure are 85.54% and 214 kW respectively, with a maximum deviation of 2.03% from the experimental value, indicating that the design results are reliable. When the number of stator blades of the turbine structure is increased from 20 to 32, the efficiency and power increase by 5% and decrease by 20% respectively, the optimal number of stator blades is 26. The velocity varies significantly at the nozzle channel and throat; the variation trends of temperature and pressure distribution are similar, both gradually decreasing with the flow direction.

Key words: S-CO₂, Brayton cycle, turbine, structural design, thermodynamic parameters

引 言

超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿循环是一种先进的发电系统。相比传统的朗肯循环,具有效率高,结构简单紧凑,负荷适应性强等特点^[1],在太阳能、核能和火电等领域有巨大应用潜力。其中,透平机械是其输出功的核心部件,其合理设计对整体的性能有重要影响。

当前对于 S-CO₂布雷顿循环关键部件热力透平的研究大多仍处于实验室研究阶段,功率规模从 20 kW~10 MW 不等,研究方法多采用实验和数值模拟。对于小规模透平多采用径流式设计,而对于中等规模以上的透平多采用轴流式设计。Steven 等人^[2]和 Brian 等人^[3]分别进行以太阳能为热源的 20 和 30 kW 级 S-CO₂布雷顿循环及透平设计,得到实验结果的数据集被用作计算机建模基准。Kimball 等人^[4]和 Pasch^[5]分别进行了 0.1 MW 级(效率 79.8%)S-CO₂和 0.2 MW 级(效率 87%)的透平试验。美国西南研究院^[6]建设了 1 MW 级的透平循环系统,而华能热工院^[7]运行了 3 MW 级(效率 77.07%)的 S-CO₂布雷顿循环透平系统。王智等人^[8]则用数值模拟方法研究了 10 MW 级(效率 84.37%)S-CO₂单级轴流透平的性能参数,结果表明误差为 1.02%。

通常透平设计是基于远离临界点而设计的,但没有具体的设计方法^[9]。Zhang 等人^[10]对 1.5 MW 径流和 15 MW 轴流规模 S-CO₂的布雷顿循环进行设计、材料校核及性能预测,发现流体压力对透平性能有相当大的影响。对于径流透平,Zhou 等人^[11]设计了针对 S-CO₂再压缩循环的透平并进行性能预测,比较了恒涡轮和一维透平模型的预测效率,当热源质量流量变化时,后者更为准确。王春阳^[12]设计了 70 MW 级的 S-CO₂向心透平,研究透平的结构参数对性能的影响,结果表明,叶顶间隙越小效率越高,进口角度和叶片数分别与来流方向和转速有关。王俊峰等人^[13]设计了以 S-CO₂为工质的透平发电设备,采用同轴设计结构,研究透平部分与发电机的气密性,实现了对于外部的零泄露,提高了效率。此

外,CFD 数值模拟也被应用于热力透平结构设计。王雨琦等人^[14]采用有限体积法,选取 RNG $k-\varepsilon$ 模型对 75 kW 的 S-CO₂向心透平进行设计,研究了进口、喷嘴以及动叶流道内的压力、温度、马赫数分布,证明流道内流态的紊乱会导致内旋涡增多,加大了进气损失,为提升透平进气效率提供思路。施东波等人^[15]比较热力设计与 CFD 的优缺点,采用新的设计思路,将高斯过程回归结合模拟退火方法建立了一种快速自适应设计优化的方法,可以很好地结合粗略和高精度模型,将等熵效率提升至 91%,具有较高的工程应用价值。

综上所述,多数研究致力于操作参数对透平性能的影响,以求在最合适操作参数下使透平性能达到最佳。而鲜有基于透平本身结构以及变结构对性能变化影响的研究;尚未有成熟的正向设计的理念与方法;相较于传统大型汽轮机及燃气轮机,由于透平结构紧凑、零部件小,导致喷嘴、转子等部件在设计计算上存在困难;设计完成后,透平内部的速度、温度和压力分布情况尚未完全得到认知,无法准确确定其流场的分布和变化。

本文针对一台 200 kW 级 S-CO₂循环的热力透平,采用正向设计的理念与方法,根据实际的操作条件获得其一维设计的最优化结构参数,并在此基础上确定关键结构参数对于热力学性能参数的影响,使用三维数值模拟进行校验设计并进一步获得其速度、温度、压力分布。最后对设计流程方法的纵深化发展提出展望。

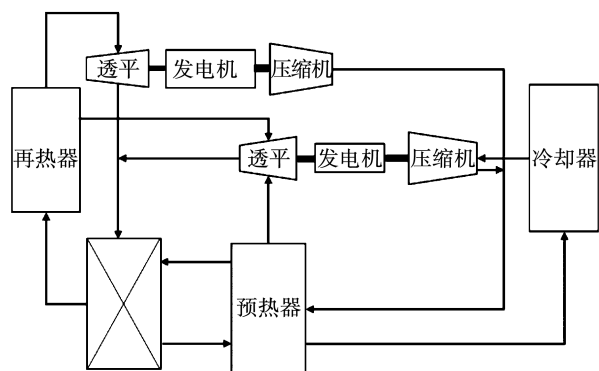
1 循环与透平

本文所采用的超临界二氧化碳布雷顿循环是美国 Sandia 实验室于 2012 年搭建的 200 kW 分流再压缩循环,主要由一个主压缩机、一个再压缩机、两个透平、两个发电机、加热器、再热器及冷却器组成。循环系统如图 1 所示。其边界条件如表 1 所示。

表 1 边界条件

Tab.1 Boundary conditions

透平入口 压力/MPa	透平入口 温度/K	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	质量流量/ $kg \cdot s^{-1}$	压比
13.499	810	75 000	3.15	1.712

图1 S-CO₂布雷顿循环系统Fig. 1 S-CO₂ Brayton cycle system

2 方法与流程

2.1 设计方法与流程

参考热力学理论、气动分析、CFD 模拟和编程代码等参数化设计方法,结合流体力学和热力学原理进行透平设计^[16]。基于正向设计的理念,在给定操作参数的条件下设计其主要结构参数,具体流程如图2所示。在此基础上改变动静叶数量,研究透平的性能响应特性。

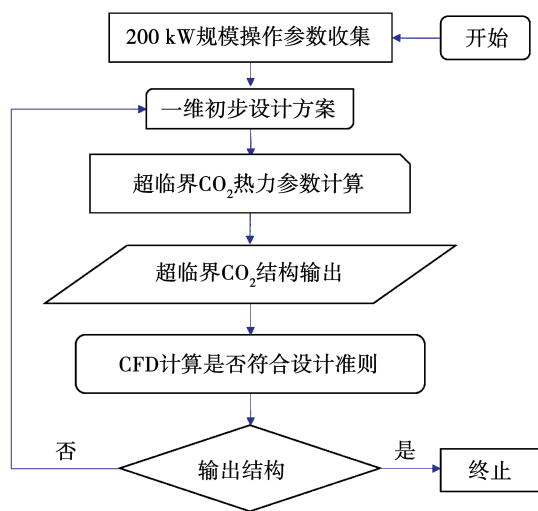


图2 正向设计思维导图

Fig. 2 Forward design flow chart

2.2 数值模拟方法

根据上述结构参数建立了数值模拟计算区域,模拟结果与网格质量、数量等有密切的联系,在划分过程中建立了网格总数分别为199 100,456 374 和

946 020 3 种方案。以透平输出功为考量标准,3 种方案的输出功率分别为0.211,0.213 和0.214 kW。考虑到网格数量对计算精度和速度的影响,最终确定计算域网格数量为199 315,如图3所示。

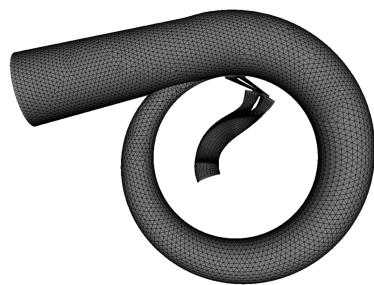


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

应用剪切应力传输(SST) $k-\omega$ 模型模拟湍流。采用无滑移边界条件以及二阶高精度离散格式,喷嘴与转子之间的数据转换选用冻结转子的形式。冻结转子法通过插值处理转子和静子之间的信息,充分考虑了气流参数沿周向分布的不均匀性,相比于混合平面法采用周向平均,所得结果体现了旋流角和压力分布等的影响。主要操作参数的设置与实验一致。全局残差收敛极限控制为 10^{-5} 。

SST $k-\omega$ 湍流模型为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + F_k - Y_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + F_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (2)$$

式中: k —湍流动能; t —时间; ρ —密度; $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ —湍流速度平均值; x_i, x_j —坐标分量; ω —湍流特殊耗散; Γ_k, Γ_ω —有效扩散系数; F_k, F_ω — k, ω 的耗散项; D_ω —扩散项。

3 结果与讨论

3.1 结构参数及性能模拟

根据上述设计思路结合一维计算得到的透平结构参数如表2所示。结构由蜗壳、转子、喷嘴及两个无叶段组成。蜗壳的最大半径为67.8 mm,动叶片

14 个,静叶片 26 个。透平结构参数为设计计算的理想值,考虑材料应力强度及加工精度的影响,设计参数可适当调整以满足实际需求。

表 2 透平主要几何结构参数

Tab.2 Main geometric structure parameters of the turbine

参数	数值
喷嘴出口半径与转子进口半径之比	1.053
喷嘴叶片数	26
蜗壳出口半径与喷嘴进口半径之比	1.03
转子进口平均半径/mm	3.108
转子叶片数	14
转子轴向长度/mm	2.147
转子叶顶前缘厚度/mm	1
转子叶顶尾缘厚度/mm	1
转子前缘间隙/mm	0.011
转子尾缘间隙/mm	0.011
转转子午向速度比	1.07
转子出口半径比(轮毂与轮盖之比)	0.185

CFD 的模拟结果、一维设计值与实验值的比较如表 3 所示。与实验值相比,两者误差分别为 0.58% 和 0.4%,在合理范围内。故可认为本文所设计的透平结构符合设计准则。

表 3 一维与 CFD 数值模拟结果误差

Tab.3 Error of 1D and CFD numerical simulation results

参数	实验值	一维设计	CFD 模拟
等熵效率/%	87	85.54	85.23
误差/%	/	1.68	2.03
输出功率/kW	213	214.2	213.9
误差/%	/	0.58	0.4

3.2 性能对叶片数的响应

图 4~图 5 为通过一维计算方法得到的性能随叶片数变化曲线。当透平转子的动叶片数从 10 增加到 18 的过程中,透平功率由 212 kW 增大到 215 kW,变化不大;而等熵效率由 85.72% 下降至 85.21%,下降约 0.5%。当静叶片数由 20 增加到 32 时,功率由 242 kW 降至 192 kW,下降了约 20%;等熵效率从 83.18% 上升到 86.56%,上升约 5%,随着叶片数的增加,效率增加的幅度减缓。当叶片数过少无法稳定控制流道内流体的流向转变时,流动

损失会增大,效率降低;而过多的叶片数会使附面层变厚,流道过于狭窄,易产生漩涡,导致功率降低^[12]。可以看出,静叶数比动叶数对透平性能影响更大。根据图 5,最佳静叶数约为 26 个。

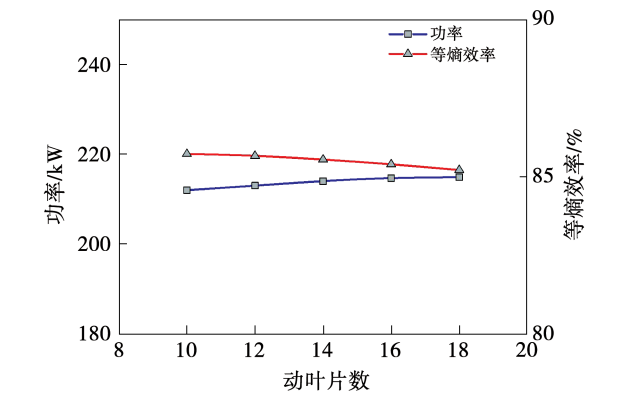


图 4 动叶片数对性能影响

Fig.4 The effect of the number of rotor blade on performance

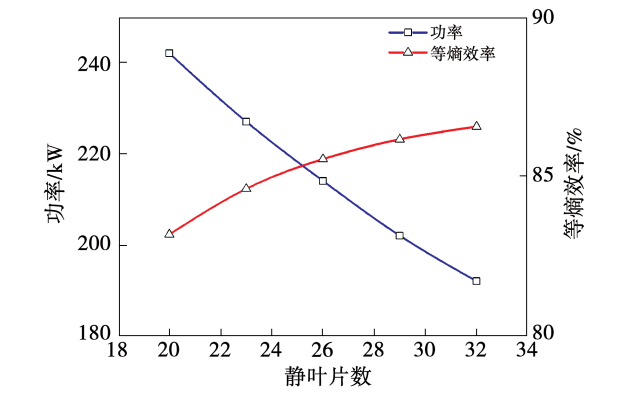


图 5 静叶片数对性能影响

Fig.5 The effect of the number of stator blade on performance

3.3 速度、温度和压力分布

研究表明,三维模拟结果对透平的性能优化具有指导意义^[17]。本文通过三维 CFD 数值模拟基准工况,得到 S-CO₂布雷顿循环透平部件蜗壳和流道内部的速度、温度和压力分布,如图 6~图 8 所示。从图 6 中可以看出,蜗壳内部流动较为顺滑,流动速度最小且分布均匀,说明蜗壳的设计合理有效。叶片的叶根处流速较小,约为 3.1 m/s,速度最大处为无叶段中部,沿流动方向逐渐降低,在喷嘴通道和喉道处变化较为明显。

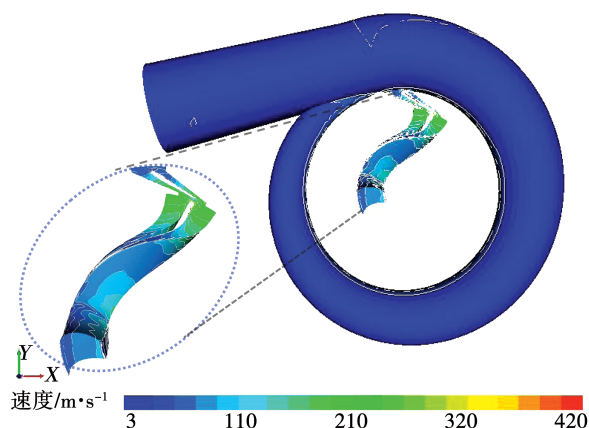


图6 速度分布云图

Fig. 6 Speed distribution cloud map

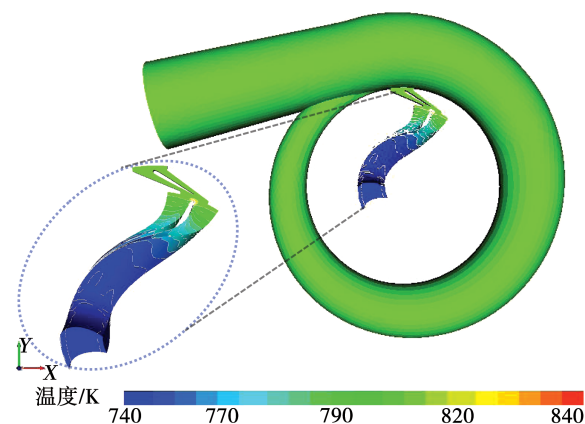


图7 温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution cloud map

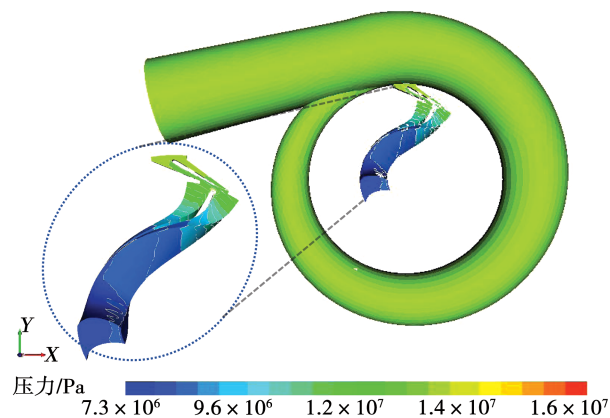


图8 压力分布云图

Fig. 8 Pressure distribution cloud map

图7和图8为温度、压力分布云图,从图中可以看出温度和压力在蜗壳内分布均匀,在叶根位置温度和压力达到最高值,分别为840 K和16.3 MPa。

在流道内温度和压力沿着流动方向减小至750 K和7.28 MPa,在喷嘴喉部和转子吸力侧中部变化较小,说明蜗壳对S-CO₂的引流作用达到预期。

4 结 论

(1) 基于一维设计,本文设计的S-CO₂透平结构的总静效率达85.24%。设计结构模拟结果与实验值的误差在合理范围内,表明设计结果可靠。

(2) 透平的几何结构对性能参数影响较大,动叶片数的改变对性能参数影响不大;随着静叶片数的增加,透平的输出功会呈明显下降趋势,而效率则不断提高。

(3) 透平内部温度和压力分布趋势较为相似,在整个蜗壳内流动都流畅均匀,流道内温度和压力随着流动方向逐渐减小。速度、温度、压力分布云图了解内部流场变化及后续的结构设计有较大的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 谢永慧,王雨琦,张 获,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 Yong-hui, WANG Yu-qi, 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.
- [2] WRIGHT S A, RADEL R F, VERNON M E, et al. Operation and analysis of a supercritical CO₂ Brayton cycle[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2010(9): SAND2010-0171.
- [3] IVERSON B D, CONBOY T M, PASCH J J, et al. Supercritical CO₂ Brayton cycles for solar-thermal energy[J]. Applied Energy, 2013, 111(4): 957-970.
- [4] KIMBALL K J, CLEMENTONI E M. Supercritical carbon dioxide Brayton power cycle development overview [C]//Copenhagen, Denmark: Proceedings of ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, 2012.
- [5] PASCH J, CONBOY T M, FLEMING D D, et al. Supercritical CO₂ recompression Brayton cycle: completed assembly description[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2012(10): SAND2012-9546.
- [6] MOORE J, BRUN K, EVANS N, et al. Development of 1 MWe supercritical CO₂ test loop [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015 (56802): V009T36A015.

[7] LI Hong-zhi, ZHANG Yi-fan, YAO Ming-yu, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO₂ power cycle pilot loop[J]. Energy, 2019, 174(5): 792 – 804.

[8] 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 Ya-li, KUANG Xuan-yi. 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.

[9] SAEED M, KIM M H. Analysis of a recompression supercritical carbon dioxide power cycle with an integrated turbine design/optimization algorithm[J]. Energy, 2018, 165(Part A): 93 – 111.

[10] ZHANG H, ZHAO H, DENG Q, et al. Aerothermodynamic design and numerical investigation of supercritical carbon dioxide turbine[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015(56802): V009T36A007.

[11] ZHOU A, LI X S, REN X D, et al. Thermodynamic and economic analysis of a supercritical carbon dioxide (S-CO₂) recompression cycle with the radial-inflow turbine efficiency prediction[J]. Energy, 2020(191): 1167566.

[12] 王春阳. 70 MW 级超临界二氧化碳闭式布雷顿循环向心透平设计分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

WANG Chun-yang. Design and improvement of a 70 MW radial turbine within a closed supercritical CO₂ Brayton cycle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[13] 王俊峰, 黄彦平, 咎元峰, 等. 一种以超临界二氧化碳为工质的透平发电机组: 201620803188. 8[P]. 2016 – 07 – 28.

WANG Jun-feng, HUANG Yan-ping, ZAN Yuan-feng, et al. A turbo-generator with SCO₂ as a working fluid: 201620803188. 8[P]. 2016 – 07 – 28.

[14] 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 Yu-qi, SHI Dong-bo, 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.

[15] 施东波, 刘天源, 谢永慧, 等. 基于 Gauss 过程回归的超临界二氧化碳透平设计 – 优化方法[J]. 动力工程学报, 2019, 39(11): 876 – 883, 892.

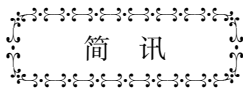
SHI Dong-bo, LIU Tian-yuan, XIE Yong-hui, et al. Design and optimization of an S-CO₂ turbine based on Gauss process regression[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(11): 876 – 883, 892.

[16] 赵兵涛, 杨其国, 李宇峰, 等. 千兆瓦级超临界 CO₂ 透平结构设计及性能分析[J]. 热能动力工程, 2021, 36(1): 33 – 37.

ZHAO Bing-tao, YANG Qi-guo, LI Yu-feng, et al. Design and performances of gigawatt-level supercritical carbon dioxide turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(1): 33 – 37.

[17] MUELLER L, ALSALIHI Z, VERSTRAETE T. Multidisciplinary optimization of a turbocharger radial turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(4): 1965 – 1976.

(姜雪梅 编辑)



三菱电力公司在印度尼西亚推进氨燃烧火力发电技术

氨是一种由氢和氮组成的高效的氢载体,还可直接作为燃料燃烧。近年来,氨的应用范围主要集中在两方面:通过向氢能环境过渡实现碳中和,以及将现有能源模式对环境的影响降到最低。

三菱电力公司(Mitsubishi Power)和印尼万隆技术研究所(ITB)签署了一项协议,合作研究燃气轮机燃用氨气技术。三菱电力表示,合作的目的是包括促进日本和印尼之间的技术发展、推动印尼采用清洁能源及减少该国的煤炭使用。

在与吉宝能源(Keppel Energy)的另一项合作协议中,三菱电力计划在新加坡裕廊岛挖掘纯氨燃烧燃气轮机的潜力。此前,吉宝能源于2022年8月宣布,将在岛上的 Sakra 地区开发新加坡第一个燃氢发电厂,由三菱电力和裕廊工程(Jurong Engineering)联合建造。

三菱电力公司正在研发纯氨燃烧的 H-25 燃气轮机,有望在 2025 年实现商业化运行。

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