

近临界 CO₂ 透平膨胀机设计与内流平衡相变研究

姜 华¹, 魏丽红¹, 郭芮伶², 宫武旗³

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018;
3. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 基于均相理论及流体动力守恒原理, 对进口处于近临界区、出口为两相状态及质量流量为 5.5 kg/s 的透平膨胀机进行设计, 得到膨胀机蜗壳、喷嘴和工作轮的基本几何参数, 再采用平衡相变模型对膨胀机内流相变特性进行数值分析。结果显示: 喷嘴入口处开始产生气体, 叶轮出口气体质量分数为 27%, 等熵效率为 65%, 与设计值相差 9.72%。结果表明, 此设计方法可以用来设计两相状态 CO₂ 透平膨胀机, 平衡相变模型适用于 CO₂ 透平膨胀机的内流相变特性研究。

关 键 词: 透平膨胀机; CO₂; 膨胀机设计; 平衡相变

中图分类号: TB653 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.11.003

[引用本文格式] 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 Li-hong, GUO Rui-ling, 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.

Design and Study on Near-critical CO₂ Turboexpander and Internal Flow Equilibrium Phase Change

JIANG Hua¹, WEI Li-hong¹, GUO Rui-ling², GONG Wu-qi³

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China, Post Code: 710054;
2. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co. Ltd, Xi'an, China, Post Code: 710018;
3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: The turboexpander with the inlet in near-critical region, outlet in two-phase state and mass flow rate of 5.5 kg/s was designed and the basic geometric parameters of expander volute, nozzle and rotor were obtained based on homogeneous phase theory and hydrodynamic conservation principle. The characteristics of internal flow phase change in the expander was numerically analyzed with equilibrium phase change model. The results show that gas appears at the nozzle inlet, the mass fraction of gas is 27% at the impeller outlet, and the isentropic efficiency is 65%, which is 9.72% lower than design value. This design method can be used to design the two-phase CO₂ turboexpander, and the equilibrium phase change model is suitable for studying the internal flow phase change characteristics of CO₂ turboexpander.

Key words: turboexpander, CO₂, expander design, equilibrium phase change

符号说明

A_2 —叶轮出口处截面积/m²
 c_1 —工作轮入口绝对速度,m/s
 h —焓值,kJ/kg
 h_0 —膨胀机进口焓值,kJ/kg
 h_4 —工作轮出口焓值,kJ/kg
 $h_{4,s}$ —工作轮出口等熵焓值
 h_{mix} —混合物焓值,kJ/kg
 $h_{\text{sat},l}(p)$ —压力对应的饱和液焓值,kJ/kg
 $h_{\text{sat},v}(p)$ —压力对应的饱和气焓值,kJ/kg
 q_m —质量流量,kg/s
 r_α, r_β —气相、液相的体积分数
 S_1 —叶高轮径比
 S_{MS} —连续方程的质量源项
 u_1 —工作轮周速度,m/s
 α_1 —喷嘴出口叶片角,(°)
 β_1 —工作轮入口叶片角,(°)
 α'_1 —喷嘴出口气流角,(°)
 ρ_1 —工作轮入口流体密度,kg/m³
 ρ_α, ρ_β —气相、液相的密度,kg/m³
 ω_1 —工作轮入口相对速度,m/s
 ξ_N —喷嘴能量损失系数
 ξ_r —工作轮能量损失系数
 ξ_K —余速损失系数
 ξ_B —轮背摩擦损失系数
 ξ_i —内泄露损失系数
 η_M —机械效率
 τ_1 —工作轮进口减缩系数
 τ_N —喷嘴出口减缩系数
 μ_1 —出口叶高轮径比
 μ —粘度,Pa·s
 λ_β —液相导热系数,W/(m·K)
 D_N —喷嘴出口直径,mm

引 言

近年来,CO₂成为新一代首选制冷剂^[1]。CO₂膨胀机的开发是 CO₂循环系统成功应用的关键^[2-8],因此,许多学者展开了针对 CO₂循环系统及膨胀机的研究。

目前,由于二氧化碳近临界区域的物性波动以及膨胀两相流动理论不完善,针对膨胀过程涉及超临界状态膨胀至亚临界状态或液气相变的二氧化碳膨胀机的研究处于瓶颈阶段。现有研究多为理论研究,数值模拟和实验研究很少,且实验仅限于超临界到气态的跨相态研究,此条件下轴流式透平膨胀机等熵效率约 55%^[9],径流式透平膨胀机等熵效率在

70%左右^[10]。

对于涉及液气相变的 CO₂膨胀机,目前公开发表的文献多为膨胀相变理论研究,与试验研究及数值模拟方法相关的几乎没有。但针对其他工质的相变膨胀装置已经有了一些研究,陈良等人^[11]利用平衡相变模型及非平衡相变模型模拟了氮气在喷嘴中的两相膨胀流动。马一太教授课题组针对 CO₂热泵系统及 CO₂用滚动活塞式膨胀机进行了理论分析及可视化研究,且将 CO₂视为均质流,不考虑相变,对膨胀过程中压力变化特性进行数值模拟,得到了膨胀机中间通道长度、直径最优值,以此为依据对膨胀机进行改造并进行试验测试,显示膨胀机的等熵效率达到了 42.3%^[12-15]。马娟丽等人^[16]分析了不同等熵效率透平膨胀机 CO₂循环系统性能的影响,发现透平膨胀机等熵效率为 60% 时,系统性能系数可提高近 30%。封旭等人^[17]利用均相模型模拟了引射器内超临界 CO₂ 两相流动过程,并利用该模型模拟了现有的关于 R134a 引射器的实验数据,模拟所得引射系数与实验数据计算得到的引射系数相对误差最大值为 9.4%,在可接受范围内,验证了均相模型用于超临界 CO₂ 两相膨胀流动的合理性。

本文研究的膨胀机进口状态处于临界点附近,膨胀过程涉及液气相变,CO₂近临界点处物性参数波动较大,膨胀液气相变过程数值模拟困难,造成 CO₂膨胀机设计及内流特性研究困难^[18-19]。首先,基于均相理论及流体动力守恒原理,设计得到膨胀机蜗壳、喷嘴和工作轮的基本几何参数,再利用软件 CFX 中的均相模型对膨胀机内流相变特性进行数值分析,为近临界 CO₂透平膨胀机设计应用提供理论支持。

1 设计建模

透平膨胀机主要由蜗壳、喷嘴和叶轮组成。流体通过蜗壳沿管道均匀分配到喷嘴环上;流体进入喷嘴之后,压力下降,速度增加,温度降低;当流体从喷嘴进入工作轮后,由于气流继续膨胀,因而温度和压力继续降低,流体的速度由于叶轮输出轴功而减小。

在设计过程中,假设流道中两相膨胀过程为均相流,气液两相有相同的温度场与压力场,采用一元

流动方法进行透平膨胀机设计^[20],两相区域物性参数采用气液混合物的物性。入口总温为 300.76 K、总压为 6.830 7 MPa,出口压力为 3.485 1 MPa,质量流量为 5.5 kg/s,利用进出口热力参数确定喷嘴、叶轮的进出口直径、轴向长度和叶高等基本尺寸,从而得到透平膨胀机子午面形状。

叶轮直径:

$$D_r = \sqrt{\frac{q_m}{\pi S_1 \omega_1 \rho_1 \tau_1 \sin \beta_1}} \quad (1)$$

喷嘴叶片高度:

$$l_N = \frac{q_m}{\rho_1 c_1 \pi D_N \tau_N \sin \alpha_1} \quad (2)$$

叶轮出口平均直径:

$$D_{2m} = \mu_1 D_r \quad (3)$$

叶轮出口内径:

$$D_2' = \sqrt{D_{2m}^2 - \frac{2A_2}{\pi}} \quad (4)$$

叶轮出口外径:

$$D_2'' = \sqrt{D_{2m}^2 + \frac{2A_2}{\pi}} \quad (5)$$

导叶采用苏联莫斯科动力学院公布的 TC-3P 叶型数据。叶轮导流段曲线按照二次抛物线方程确定,蜗壳型线采用变宽度矩形截面。最终得到的透平膨胀机喷嘴、叶轮的基本造型参数如表 1 所示。透平膨胀机三维整机模型如图 1 所示。

表 1 喷嘴、叶轮的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of nozzle and impeller

参数	数值
导叶个数	23
导叶出气角/(°)	16
喷嘴叶高/mm	2.6
导叶进口半径/mm	50
导叶出口半径/mm	38.5
动叶叶片数	14
动叶出口外径/mm	46.6
动叶出口内径/mm	24.9
动叶轴线长度/mm	22.5
等熵效率/%	72
机械效率/%	97
转速/r·min ⁻¹	21 965

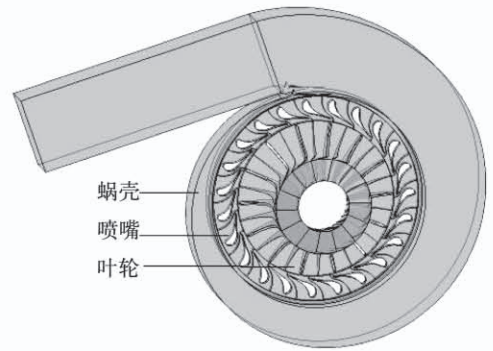


图 1 整机三维模型

Fig. 1 3D model of turboexpander

在设计时考虑到了各通流部分的水力损失及轮背摩擦损失、内泄露损失,所得到的等熵效率计算式为:

$$\eta = 1 - (\xi_N + \xi_r + \xi_k + \xi_B + \xi_1) \quad (6)$$

转速计算式为:

$$n = \frac{60u_1}{\pi D_r} \quad (7)$$

2 数值模拟

2.1 数值模拟方案

采用 Turbogrid 及 ICEM 软件分别对蜗壳、喷嘴、叶轮进行网格划分,并对喷嘴叶片及叶轮叶片壁面等关键区域的网格进行了局部加密处理,图 2 为蜗壳网格以及喷嘴、叶轮叶片单流道网格示意图。选取总网格数为 822 万、908 万、952 万进行全流道数值模拟,得到的等熵效率误差小于 1%,满足网格无关性要求。

入口边界给定总温为 300.76 K、总压 6.830 7 MPa;出口边界给定质量流量 5.5 kg/s;所有壁面设置为绝热、无滑移壁面;动静交界面采用 Frozen Rotor 连接;湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型。

由于 CO₂ 临界点附近的物性波动较大,近临界区的物性难以准确预测,利用 Peng-Robinson^[21] 方程预测温度小于 303 K、压力处于 5 ~ 35 MPa 范围内的液态 CO₂ 密度时,绝对平均误差小于 7.1%。而选用目前整体精度较高的基于霍姆赫兹自由能的 FEK 模型预测密度为 300 ~ 600 kg/m³ 的近临界区域物性时,平均误差也达到 8%^[22-23]。考虑到 P-R 方程比其他多参数方程更简洁、易于求解,且其在预测温度低于临界温度时,CO₂ 物性的精度在可接

受范围内,因此,选用该方程对 CO₂物性进行求解。

算式见文献[23-24]。

利用等熵效率评价透平膨胀机流道内部能量转换的完善程度。透平膨胀机进出口实际比焓降与等熵比焓降的比值为:

$$\eta_s = \frac{h_0 - h_4}{h_0 - h_{4,s}} \quad (8)$$

透平膨胀机轴功率为:

$$W = \eta_M m (h_0 - h_4) \quad (9)$$

气体质量分数为:

$$x = \frac{h_{\text{mix}} - h_{\text{sat},l}(p)}{h_{\text{sat},v}(p) - h_{\text{sat},l}(p)} \quad (10)$$

为了更直观地展示透平膨胀机流道内部的参数变化,利用 CFX-Post 软件对模拟结果进行了后处理,得到了喷嘴及叶轮流道内部温度、压力及气体质量分数云图,如图 3 所示。

由图 3(a)、(b)可知,工质的温度与压力从喷嘴入口处沿流道方向逐渐降低,出口处压力降至 5.95 MPa,温度降至 294.52 K。进入叶轮以后,工质继续膨胀,压力及温度进一步降低,分别达到 4.76 MPa和 285.18 K。说明两相透平基本达到所需膨胀效果。但由于入口气流的冲击,使得叶轮叶片前缘处有局部的温度、压力突增区域。

由图 3(c)、(d)可知,在喷嘴入口处已有少量气体,流道通流截面逐渐变小,气体质量分数逐渐增加,在喷嘴出口处达到了 17%,在叶轮入口主流段气体质量分数呈现阶梯式增加,基本达到了 27%左右,而叶轮出口导流段气体质量分数基本不变,维持在 27%左右。

3 设计结果与模拟结果对比分析

按照设计工况进行模拟后的结果与设计结果的比较见表 2。模拟得到的等熵效率为 65%,与设计结果误差为 9.72%,模拟得到的轴功率为 30 kW,与设计结果误差为 9.09%。由于模拟过程可控制因素较少,而设计过程较为复杂,存在部分按照经验的估取值与选用值,对效率值有一定影响。模拟结果与设计结果存在一定的误差,但在可接受范围内,说明此设计方法可以较好地设计平衡相变透平膨胀机。

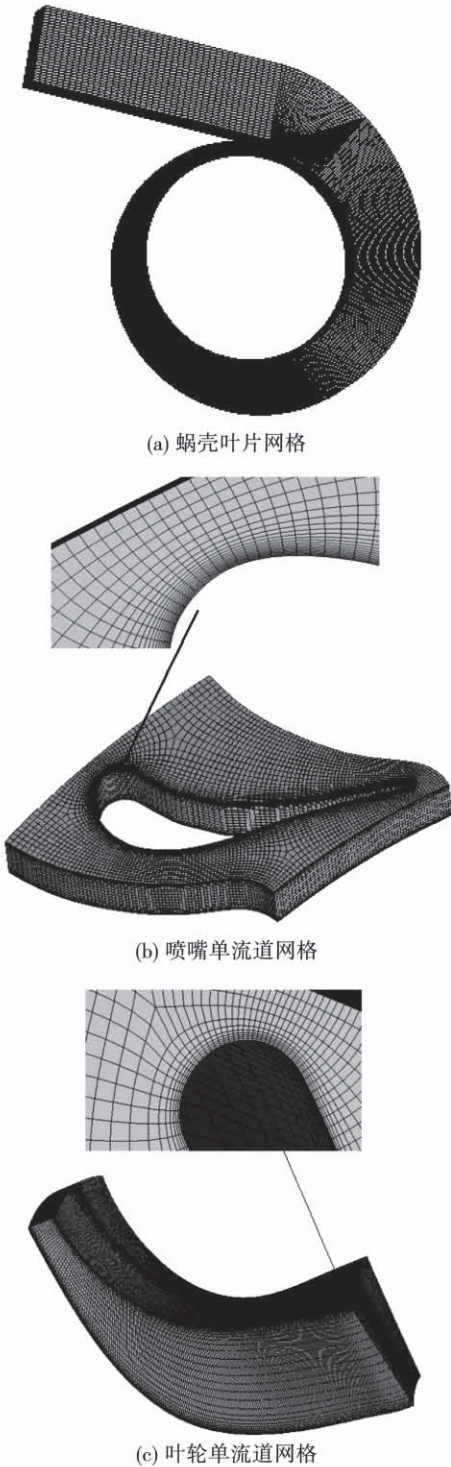
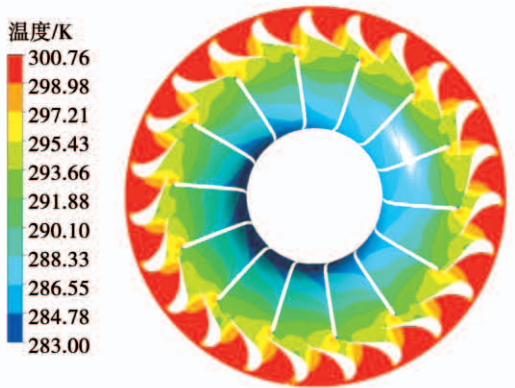


图 2 网格示意图

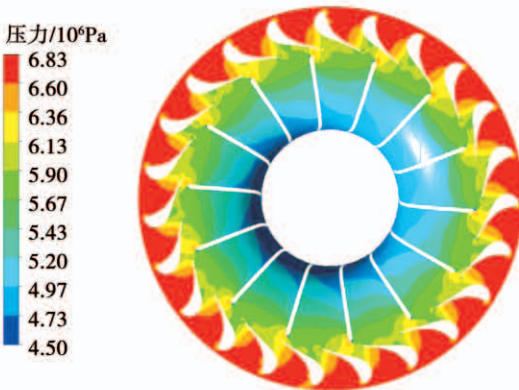
Fig.2 Schematic diagram of grids

2.2 数值模拟分析

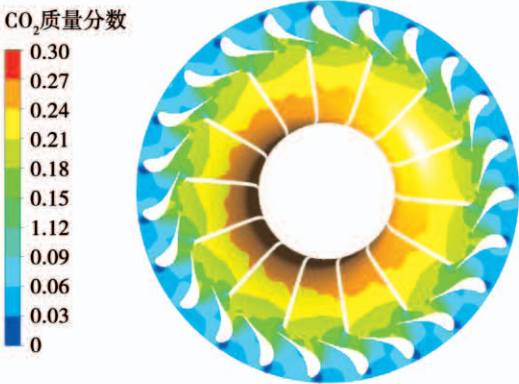
利用 CFX 数值模拟软件中的平衡相变模拟对全流道进行数值模拟,平衡相变模型假设液相中气体均匀分布,两相共用一个速度场、温度场,具体计



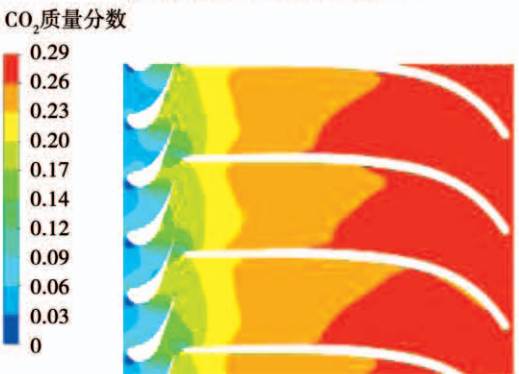
(a) 流道内部温度云图



(b) 流道内部压力云图



(c) 流道内部气体质量分数云图



(d) 叶展方向气体质量分数云图

图3 模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results

表2 模拟结果与设计结果的对比

Tab. 2 Comparison of simulation and design results

参数	设计值	模拟值	误差/%
等熵效率 η_s /%	72	65	9.72
轴功率/kW	33	30	9.09

4 结论

(1) 采用的均相设计方法可以较好地设计透平膨胀机内流相变过程,设计得到的等熵效率及轴功率分别为72%、33 kW,模拟得到的等熵效率及轴功率分别为65%、30 kW,误差分别为9.72%、9.09%,该设计方法可以为CO₂透平膨胀机设计应用提供理论支持。

(2) 模拟结果显示,模拟采用的均匀混合物物性模型及 Peng-Robinson 状态方程可以较好地描述近临界区 CO₂ 液态及两相物性,可为 CO₂ 临界点附近数值模拟物性描述提供参考。

(3) 模拟结果进一步显示该膨胀机工作性能良好,能达到设计要求,平衡相变模型能较好地模拟 CO₂ 透平膨胀机内流相变特性,该工作对膨胀机设计优化研究具有重要的实际指导意义。

参考文献:

- [1] 丁国良,黄冬平. 二氧化碳制冷技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
DING Guo-liang, HUANG Dong-ping. Carbon dioxide refrigeration technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] HANG Y. Comprehensive investigation of carbon dioxide refrigeration cycle[D]. College Park: University of Maryland, 1997.
- [3] LORENTZEN G. A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning[J]. International Journal of Refrigeration, 1993, 16(1): 4-12.
- [4] XU X X, CHEN G M. Experimental investigation on performance of transcritical CO₂ heat pump system with ejector under optimum high-side pressure[J]. Energy, 2012, 44(1): 870-877.
- [5] ROBINSON D M, GROLL E A. Efficiencies of transcritical CO₂ cycles with and without an expansion turbine[J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(7): 577-589.
- [6] JONEYDI S O, ABOLHASSANI S S, RAHMANI M. Comparison of transcritical CO₂ refrigeration cycle with expander and throttling valve including/excluding internal heat exchanger; exergy and en-

- ergy points of view[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 779 - 787.
- [7] 孙志利,马一太. 单级跨临界二氧化碳带膨胀机循环与四种双级循环的热力学分析[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 53 - 59.
SUN Zhi-li, MA Yi-tai. Thermodynamic analysis of one kind of single-stage with expander and four kinds of two-stage transcritical carbon dioxide refrigeration cycle[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 53 - 59.
- [8] 王洪利,田景瑞,马一太. CO₂跨临界双级压缩带回热器与不带回热器循环分析[J]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 176 - 180, 252 - 253.
WANG Hong-li, TIAN Jing-rui, MA Yi-tai. Analysis of a CO₂ trans-critical dual-stage compression cycle with and without a recuperator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(2): 176 - 180, 252 - 253.
- [9] 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 (Dec. 1): 113853. 1 - 113853. 11.
- [10] UTAMURA M, HASUIKE H, YAMAMOTO T. Demonstration test plant of closed cycle gas turbine with supercritical CO₂ as working fluid[J]. Strojarsvo asopis Za Teoriju I Praksu U Strojarsvtvu, 2010, 52(4): 459 - 465.
- [11] 陈 良,孙 皖,薛 绒. 低温喷嘴中氮气自发凝结两相流动的数值模拟[C]//南京:第十二届全国低温工程大会论文集, 2015.
CHEN Liang, SUN Wan, XUE Rong. Numerical simulation of two-phase flow of nitrogen spontaneous condensation in cryogenic nozzle[C]//Nanjing: Proceedings of the 12th National Conference on Low Temperature Engineering, 2015.
- [12] 马一太,安青松,李敏霞. CO₂膨胀机内部快速降压相变膨胀过程的可视化试验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 186 - 190.
MA Yi-tai, AN Qing-song, LI Min-xia. Visual experimental research on expanding and phase change process in CO₂ expander[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(2): 186 - 190.
- [13] 马一太,张美兰,田 华. CO₂双缸滚动活塞膨胀机 Fluent 模拟与分析[J]. 天津大学学报, 2011, 44(12): 1093 - 1099.
MA Yi-tai, ZHANG Mei-lan, TIAN Hua, et al. Fluent simulation and analysis of CO₂ two-cylinder rolling piston expander[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(12): 1093 - 1099.
- [14] 张美兰,马一太,李敏霞. CO₂双缸滚动活塞膨胀机模拟及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 36 - 39.
ZHANG Mei-lan, MA Yi-tai, LI Min-xia. The experiment research and simulation of the CO₂ two-cylinder rolling piston expander[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 36 - 39.
- [15] YANG J L, MA Y T, LI M X. Modeling and simulating the transcritical CO₂ heat pump system[J]. Energy, 2010, 35(12): 4812 - 4818.
- [16] 马娟丽,赵 叶,侯 予. 跨临界 CO₂制冷系统采用透平膨胀机的可行性分析[J]. 低温工程, 2010(5): 26 - 28, 32.
MA Juan-li, ZHAO Ye, HOU Yu. Feasibility analysis on application of turbo expander in carbon dioxide transcritical cycle[J]. Cryogenics, 2010(5): 26 - 28, 32.
- [17] 封 旭,刘秋杰,张振迎. 引射器内超临界 CO₂ 两相流动的数值模拟[J]. 低温与超导, 2019, 47(5): 64 - 68.
FENG Xu, LIU Qiu-jie, ZHANG Zhen-ying, et al. Numerical study on two-phase flow of transcritical CO₂ in ejector[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2019, 47(5): 64 - 68.
- [18] 蒋雪峰. 超临界 CO₂压缩机数值模拟与设计研究[D]. 中国科学院大学, 2017.
JIANG Xue-feng. Design and numerical investigation of supercritical CO₂ compressors[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [19] 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.
- [20] 计光华. 透平膨胀机[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
JI Guang-hua. Turboexpander[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1982.
- [21] PENG D Y, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state[J]. Industrial and Engineering Chemistry, Fundamentals, 1976, 15(1): 59 - 64.
- [22] 王 庆,吴晓东. 气、液、超临界 CO₂ 相态及物性计算模型研究[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2012, 26(2): 11 - 14.
WANG Qing, WU Xiao-dong. Study on calculation model of phase behavior and physical properties of gas, liquid and supercritical CO₂[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2012, 26(2): 11 - 14.
- [23] 章 聪,江锦波,彭旭东. 近临界区 CO₂ 物性预测模型对比与修正[J]. 化工学报, 2019, 70(8): 3058 - 3070.
ZHANG Cong, JIANG Jin-bo, PENG Xu-dong. Comparison and correction of CO₂ properties model in critical region[J]. CIESC Journal, 2019, 70(8): 3058 - 3070.
- [24] ANSYS Inc. ANSYS CFX: solver theory guide[M]. New York: ANSYS Inc., 2010.