

CO₂ 跨临界动力循环性能理论及实验研究

潘利生 魏小林 李 博

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要 非常规工质动力循环具有高效回收低品位热能的显著优势, CO₂ 环境友好, 是较为理想的利用低品位热能的动力循环工质。采用理论和实验方法研究了 CO₂ 跨临界动力循环的理论循环性能和膨胀机性能。研究表明, 无回热时导热油出口温度随加热压力的升高而升高, 并且不随膨胀机进口温度的变化而变化; 有回热时导热油出口温度受回热器换热的影响存在极大值。随着超临界加热压力的升高, 循环热效率和净输出功率存在极大值; 回热能够显著提高循环热效率和净输出功率。初步实验结果表明内部泄露对 CO₂ 滚动转子膨胀机性能具有重要影响, 为提升膨胀机性能需尽量降低膨胀机内部泄露。

关键词 CO₂; 跨临界动力循环; 回热器; 滚动转子膨胀机

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)03-0478-04

Theoretical and Experimental Study on Performance of CO₂ Transcritical Power Cycle

PAN Li-Sheng WEI Xiao-Lin LI Bo

(State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Power cycle using unconventional working fluid has significant advantages in recovering low-grade heat energy efficiently. CO₂ is environment friendly and is an ideal working fluid for power cycle using low-grade heat energy. Theoretical and experimental methods are used to study on theoretical cycle performance of CO₂ transcritical power cycle and expander performance. The results show that when regenerator is not used, thermal oil outlet temperature increases with the increase of heating pressure and doesn't vary with inlet temperature at turbine entrance. When regenerator is used, there is maximum of thermal oil outlet temperature with the increase of heating pressure. There are maximum thermal efficiency and net power output with the increase of heating pressure. Regenerator can enhance thermal efficiency and net power output significantly. Preliminary experimental results show that internal leakage impacts on CO₂ rolling rotor expander performance and internal leakage should be as lower as possible in order to enhance expander performance.

Key words CO₂; transcritical power cycle; regenerator; rolling rotor expander

0 前 言

低温热能的开发或回收利用, 对缓解化石能源不足的压力具有重要意义, 有利于人类社会的可持续发展。采用非常规工质的动力循环具有高效回收低温热能的潜力。

学者对有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, ORC) 开展了大量研究。对于工质的研究主要集中在针对不同参数的热源 (种类、形式和温度) 优选适当的工质。Tchanche 等^[1] 针对低温太阳能 ORC, 在考察了 20 种工质的理论循环性能的基础

上指出 HFC134a 最适合作为小型太阳能 ORC 的工质。Madhawa Hettiarachchi 等^[2] 提出低温地热 ORC 经济性目标函数, 并考察了氨、HCFC123、戊烷、PF5050 四种工质, 指出以氨为工质的循环系统经济性最优, 氨的湿流体性质是其劣势。Wang 等^[3] 对以发动机废热为热源的 ORC 工质展开分析, R11、R141b、R113 和 R123 热效率较高, 但 ODP 均较高, 相比之下 R245fa 和 R245ca 的环境性能更好。

收稿日期: 2014-02-10; **修订日期:** 2015-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51306198)

作者简介: 潘利生 (1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事低品位热能高效利用理论及技术研究。

被广泛关注的有机工质主要包括 HCFCs、HFCs 和 HCs，而 HCFCs 和 HFCs 的环境性能较差，HCs 属于易燃易爆类工质。CO₂ 是自然工质，环境性能良好，不可燃。Chen 等 [4] 针对低温热能，对比了分别以 CO₂ 和 HFC32 为工质的两种跨临界动力循环性能。Garg 等 [5] 针对碳氢化合物类工质的可燃性，对 CO₂ 与碳氢化合物的混合物工质性能进行了研究。Zhang 等 [6] 搭建了太阳能 CO₂ 跨临界循环实验系统，获得了 8.78%~9.45% 的发电效率。Kim 等 [7] 针对低温和高温热源，对 CO₂ 跨临界循环和超临界循环开展了研究。

本文采用理论和实验方法，考察了 CO₂ 跨临界动力循环性能理论循环性能和实验系统的滚动转子膨胀机性能。

1 理论研究方法及实验系统介绍

在低温热能发电利用时，若热源为液态介质时，可采用液态介质与循环工质直接换热；若热源为气态介质时，一般采用导热油作为中间介质，导热油从烟气中吸热，再向循环工质放热（采用中间介质间接换热可以缓解热源不稳定性对系统的影响及减小系统加热器面积）。因此，本文理论及实验研究时均采用导热油作为低温热源介质。循环工质 CO₂ 的基本热物性和环境特性参数见表 1。

表 1 CO₂ 的基本热物性和环境特性参数 [8]

Table 1 Basic thermal and environment properties of CO₂ [8]

$t_b /$ °C	$t_c /$ °C	$p_c /$ MPa	LFL/ %	大气寿命/ a	ODP	GWP 100 a
-78.4	31.1	7.38	none	>50	0.00	1

如图 1 所示，系统无回热时，导热油在超临界加热器中加热 CO₂，使 CO₂ 在超临界状态下被加热至

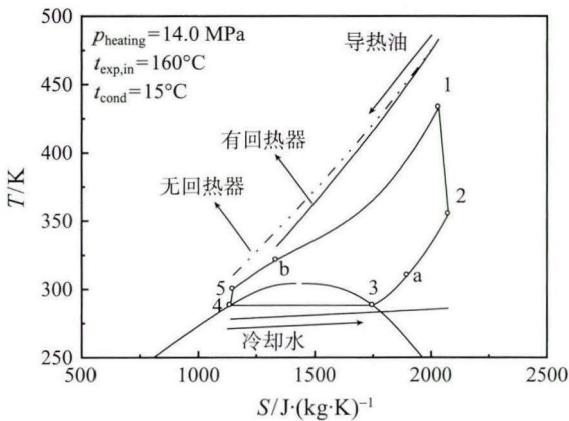


图 1 CO₂ 跨临界动力循环示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CO₂ transcritical power cycle

状态点 1，然后 CO₂ 进入膨胀机膨胀至状态点 2 并对外输出轴功，从膨胀机出来的低压 CO₂ 进入冷凝器被冷却水冷却冷凝至状态点 4，达到饱和液状态，工质泵将低压 CO₂ 增压并输送至状态点 5，最后从工质泵中出来的高压液态 CO₂ 进入超临界加热器被导热油加热，完成一个循环；系统有回热时，工质在 2(a) 过程放出的热量被工质在 5(b) 过程吸收，换热过程在回热器中完成。从图 1 可以看出，对于跨临界循环或一些干工质的亚临界循环，在某些工况下，膨胀机出口温度显著高于冷凝温度，采用冷却水直接冷却将损失大量较高温度的热能，若采用回热器将循环中 2(a) 过程工质放出的热量用来加热 5(b) 过程的工质，将显著提高循环热效率。

理论研究中指定如下参数：导热油质量流量为 10 kg/s；导热油比热容为 1.8 kJ/(kg·K)；导热油密度为 850 kg/m³；超临界加热压力为 8.0~20.0 MPa；膨胀机进口温度为 100~200°C；工质泵等熵效率为 0.75；膨胀机等熵效率为 0.75。

CO₂ 跨临界动力循环实验系统包括导热油循环回路、CO₂ 跨临界动力循环回路和冷却水循环回路，如图 2 所示。采用电加热器加热导热油，模拟实验系统的热源；采用制冷机组制取低温冷却水，模拟实验系统的冷源（由于 CO₂ 临界温度为 31.1°C，采用冷却塔得到的常规冷却水无法将 CO₂ 冷凝）；采用滚动转子膨胀机作为 CO₂ 膨胀做功设备；实验研究时采用回热器回收膨胀机出口 CO₂ 的热能。

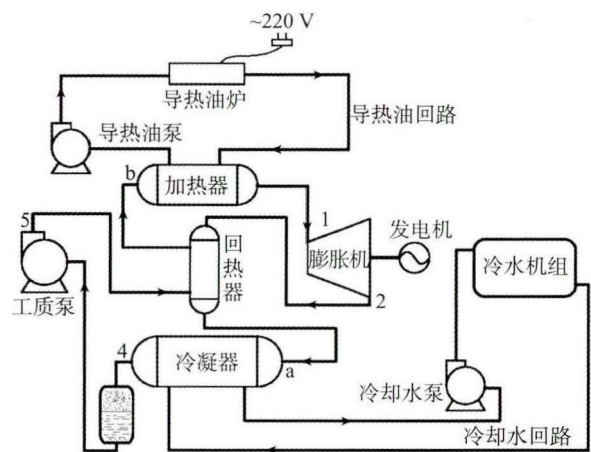


图 2 CO₂ 跨临界动力循环系统流程图

Fig. 2 Flow chart of CO₂ transcritical power cycle system

2 理论研究结果

采用理论研究方法，研究循环性能（导热油出口温度、工质质量流量、循环热效率和循环净输出功

率) 随超临界加热压力和膨胀机入口温度的变化规律, 并对比分析了回热对循环性能的影响。

如图 3(a) 所示, 无回热时, 超临界加热器出口导热油温度随加热压力的升高而升高, 不随膨胀机进口温度的变化而变化; 有回热时, 导热油出口温度随加热压力的升高存在极大值, 随膨胀机进口温度的升高而升高。无回热时, 加热器传热窄点位于工质入口, 窄点温差保持不变时, 导热油出口温度随加热压力的升高而升高, 不随膨胀机进口温度的变化而变化。有回热时, 导热油出口温度受加热器中工质进口压力和回热器液态工质出口温度两个因素的影响。加热压力较低时, 加热器中工质进口压力影响较大, 加热器出口导热油温度随加热压力的升高而升高, 加热压力较高时, 随着加热压力的升高, 膨胀机出口工质温度降低, 过热度减小, 回热器液态工质出口温度降低, 从而造成加热器出口导热油温度随加热压力的升高而降低。膨胀机进口温度越高, 出口温度越高, 回热器液态工质出口温度越高, 导热油出口温度越高, 因此导热油出口温度随膨胀机进口温度的升高而升高。

如图 3(b) 所示, 工质质量流量随膨胀机进口温度的升高而降低; 无回热时, 工质质量流量随加热压

力的升高而升高, 有回热时, 工质质量流量随加热压力的升高存在极小值 (膨胀机进口温度较高时, 极小值未出现在考察加热压力范围内)。无回热时, 随膨胀机进口温度的升高, 加热器导热油出口温度和工质吸热量不变, 而工质在加热器中的比焓值升高, 从而导致工质质量流量随膨胀机进口温度的升高而降低。无回热时, 工质质量流量的变化趋势主要受工质比焓增的影响, 而有回热时, 工质质量流量的变化趋势主要受导热油出口温度的影响。

如图 3(c) 所示, 随着超临界加热压力的升高, 循环热效率存在极大值 (膨胀机进口温度较高时, 极大值未出现在考察加热压力范围内); 有回热时的循环热效率显著高于无回热时的循环热效率, 膨胀机进口温度越高有回热循环的优势越明显。动力循环中, 工质平均吸热温度越高, 平均放热温度越低, 循环热效率越高。在 CO_2 跨临界动力循环中随着超临界加热压力的升高, 工质平均吸热温度升高, 而膨胀机出口工质过热度降低造成循环放热温度降低, 因此循环热效率随超临界加热压力的升高而升高。由于 CO_2 跨临界动力循环中, 膨胀机出口工质温度很高, 具有较大的过热度, 若不采用回热器, 则有较多的热能直接排入冷凝水中, 使循环热效率较低, 采用

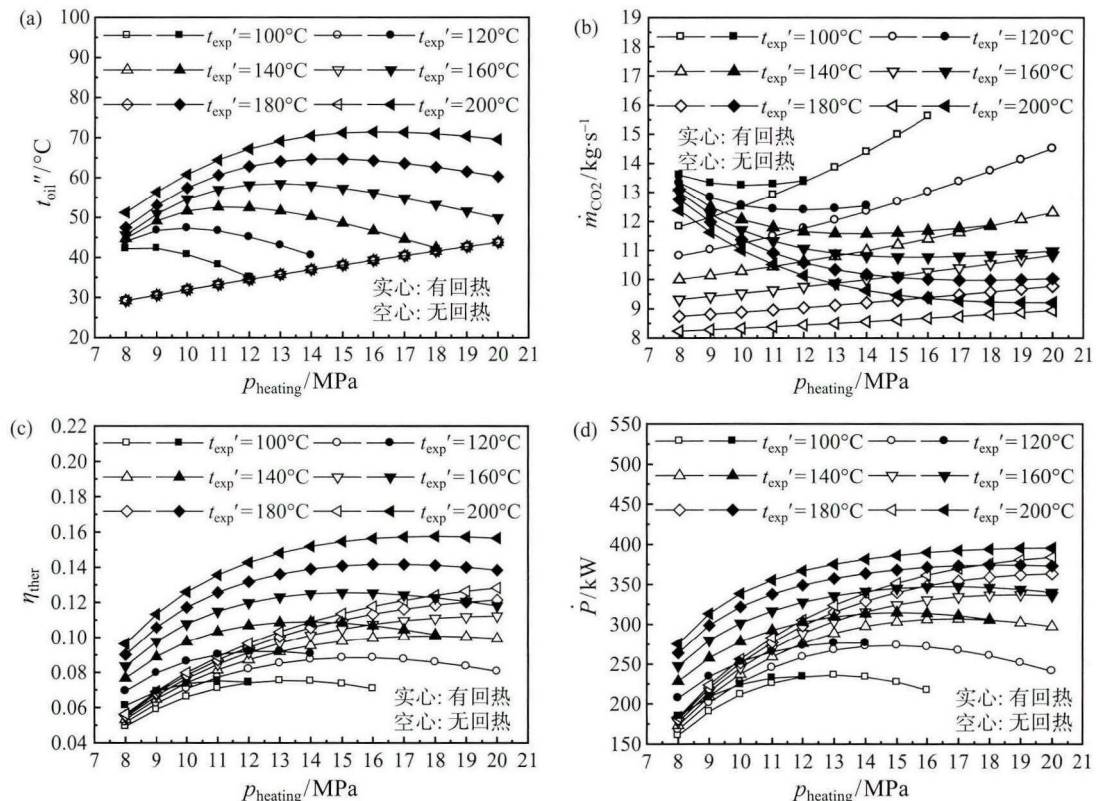


图 3 CO_2 跨临界动力循环性能的变化 ((a) 加热器中导热油出口温度; (b) 工质质量流量; (c) 循环热效率; (d) 循环净输出功率)

Fig. 3 Variation of CO_2 transcritical power cycle performance

((a) thermal oil outlet temperature in heater, (b) mass flow rate of fluid, (c) cycle thermal efficiency, (d) cycle net power output)

回热器可将这些热能重新回收进入循环,从而显著提高循环热效率。值得注意的是,超临界加热压力较高而膨胀机进口 CO₂ 温度较低时,膨胀机出口 CO₂ 过热度较小,无法采用回热器。

如图 3(d) 所示,随着超临界加热压力的升高,循环净输出存在极大值(膨胀机进口温度较高时,极大值未出现在考察加热压力范围内);有回热时的净输出功率显著高于无回热时的净输出功率。循环净输出功率主要受循环热效率和加热器中工质吸热量的影响,在两个因素的影响下,循环净输出功率随加热压力的变化存在极大值。

3 实验研究结果

在以滚动转子膨胀机为膨胀部件的 CO₂ 跨临界动力循环系统上,进行初步实验研究。考察了膨胀机工作情况,并改进了膨胀机内部密封措施。

实验过程中,保持冷却水温度为 10°C,循环冷凝温度为 25°C(冷凝压力为 6.3 MPa),超临界加热压力从 10.0 MPa 逐步上升至 11.7 MPa(工质质量流量从 500 kg/h 上升至 800 kg/h),膨胀机进口温度为 85°C(内部泄漏严重,工质流量较大,加热器热容量相对较小,造成膨胀机进口工质温度较低)。根据实验数据整理了膨胀机效率和工质质量流量随实验时间的变化规律,如图 4 所示。在工质流量从 500 kg/h 逐渐上升至 800 kg/h 过程中,工质流量较小的时候,膨胀机效率相对较高,能够达到 20% 以上,工质流量较大时,膨胀机效率很低,平均值在 10% 左右。根据对发电功率实时的监测,实验过程持续获得了 345 W 左右的发电功率。

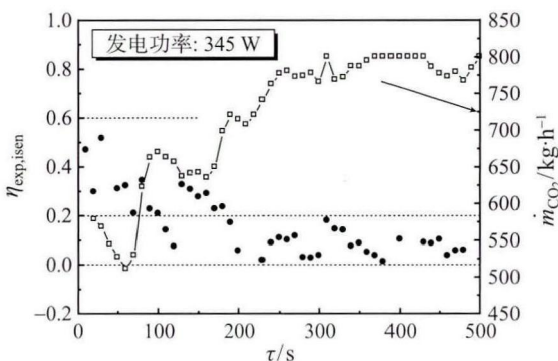


图 4 膨胀机效率和质量流量的变化

Fig. 4 Variation of expander efficiency and mass flow rate

在 CO₂ 跨临界动力循环,工质的工作压力很高,在膨胀机和工质泵等运动部件中,内部存在较大的压差,工质内部泄露严重影响了设备性能和系统性

能。实验中,随着膨胀机中工质流量的升高,膨胀压差从 3.7 MPa 上升至 5.4 MPa,膨胀机的内部泄露加剧,导致膨胀机等熵效率迅速下降。因此,为提高膨胀机及系统循环性能,改进了膨胀机内部密封措施。改进后,膨胀机等熵效率有所提升,在工质质量流量较小的情况下持续获得 1050 W 的发电功率。

4 结 论

本文对低温热源 CO₂ 跨临界动力循环进行了理论循环性能研究,给出了无回热和有回热时,循环性能随工况的变化规律,在 CO₂ 跨临界动力循环实验系统上进行了初步实验研究,得到以下结论。

1) 无回热时,导热油出口温度随加热压力的升高而升高,并且不随膨胀机进口温度的变化而变化;有回热时,导热油出口温度受回热器换热的影响存在极大值;随着超临界加热压力的升高,循环热效率和净输出功率存在极大值;回热能够显著提高循环热效率和净输出功率,并且膨胀机进口温度越高有回热循环的优势越明显。

2) 内部泄露对膨胀机效率具有重要影响,通过改进膨胀机内部密封措施,膨胀机及系统性能得到提升,持续获得 1050 W 的发电功率。

参 考 文 献

- [1] Tchanche B F, Papadakis G, Lambrinos G, et al. Fluid Selection for a Low-Temperature Solar Organic Rankine Cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 2468-2476
- [2] Madhawa Hettiarachchi H D, Golubovic M, Worek W M, et al. Optimum Design Criteria for an Organic Rankine Cycle Using Low-Temperature Geothermal Heat Sources [J]. Energy, 2007, 32: 1698-1706
- [3] WANG E H, ZHANG H G, FAN B Y, et al. Study of Working Fluid Selection of Organic Rankine Cycle (ORC) for Engine Waste Heat Recovery [J]. Energy, 2011, 36: 3406-3418
- [4] Chen H, Goswami D Y, Rahman M M, et al. Stefanakos EK. Energetic and Exergetic Analysis of CO₂- and R32-Based Transcritical Rankine Cycles for Low-Grade Heat Conversion [J]. Applied Energy, 2011, 88: 2802-2808
- [5] Garg P, Kumar P, Srinivasan K, et al. Evaluation of Carbon Dioxide Blends with Isopentane and Propane as Working Fluids for Organic Rankine Cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52: 439-448
- [6] Zhang X R, Yamaguchi H, Uneno D. Experimental Study on the Performance of Solar Rankine System Using Supercritical CO₂ [J]. Renewable Energy, 2007, 32: 2617-2628
- [7] Kim Y M, Kim C G, Favrat D. Transcritical or Supercritical CO₂ Cycles Using Both Low- and High-Temperature Heat Sources [J]. Energy, 2012, 43: 402-415
- [8] Calm J M, Hourahan G C. Refrigerant Data Summary [J]. Engineered Systems, 2001, 18(11): 74-88