

回热对 R1270/CO₂ 复叠式制冷系统性能影响的试验研究

张业强 何永宁 贾明正 吴学红 金听祥

(郑州轻工业学院能源与动力工程学院 郑州 450001)

(TEL:15333829980;Email:zhangyeqiang@zzuli.edu.cn)

摘要: 针对 R1270/CO₂ 复叠式制冷系统搭建试验台, 研究了无回热、低温级回热、高温级回热以及高、低温两级回热等四种运行模式对 R1270/CO₂ 复叠式制冷系统性能的影响, 并进行了系统性能的焓分析。研究表明, 在蒸发温度 -30℃、冷凝温度 35℃ 时, 采用低温级回热时, 系统的制冷量和系统 COP 均为最高, 分别为 3.41kW 和 0.92W/W, 同时, 低温级回热能有效降低系统各部件的焓损失, 此时系统的焓效率最高为 0.271。另外, 不同回热运行模式均能提高 CO₂ 压缩机的绝热效率, 而高温级回热和高、低温两级回热能提高 R1270 压缩机的绝热效率。

关键词: R1270/CO₂; 复叠制冷; 回热试验

Experimental Study on the Performance Influence of R1270/CO₂ Cascade Refrigeration System with Regeneration

Yeqiang zhang, Yongning He, Mingzheng Jia, Xuehong Wu, Tingxiang Jin

(School of Energy & Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract An experimental system was built for a cascade refrigeration with the working fluids of R1270/CO₂. The influence on the performance of this cascade system was studied under the evaporation temperature -30℃ and the condensation temperature 35℃ with the four models: no regeneration, regeneration in low temperature stage, regeneration in high temperature stage and regeneration in two stages, as well as the exergy analysis. The results show that cooling capacity and the COP of this system reached maximum under the model of regeneration in low temperature stage, which are 3.41kW and 0.92W/W, as well as the exergy efficiency, which is 0.271. In addition, the adiabatic efficiency of CO₂ compressor could improve under regeneration, and the R1270 compressor adiabatic efficiency was improved under regeneration in high temperature stage and two stage.

Keywords R1270/CO₂; cascade refrigeration system; regeneration

0 前言

随着社会的发展和人们生活水平的显著提高, 热泵和制冷设备已经广泛应用于人们的日常生活中。但是, 目前使用的 HCFCs、HFCs 制冷剂对气候和环境产生的影响, 已经引起广泛的关注。从环境的长期安全性考虑, 使用自然工质代替 HCFCs、HFCs 制冷剂是一种切实可行的方案。CO₂ 作为一种对环境友好的自然工质, 具有安全、无毒、单位制冷量大等优点, 在热泵和制冷方面有着非常大的应用潜力。在制冷方面, 国内外学者主要针对 NH₃/CO₂^[1-5]、R134a/CO₂^[6-9]、R290/CO₂^[10-12] 等复叠式制冷系统进行了大量的理论和实验研究。而对于 R1270/CO₂ 复叠式制冷系统的研究较少, 主要有 Dubey AM 等^[13-15] 对以 R1270 为低温级制冷剂, CO₂ 为高温级制冷剂, 且 CO₂ 在高温级做跨临界循环的复叠式制冷系统进行了研究。

R1270 为 HCs 制冷剂, ODP=0, GWP 很小, 对臭氧层没有破坏, 温室效应非常小, 是一种环境友好型制冷剂, 但是 R1270 的安全等级是 A3, 因此在使用过程中需要特别注意, 防止泄露造成危险。

本文针对 R1270/CO₂ 复叠式制冷系统, 研究了回热对复叠制冷系统的性能影响。

1 R1270/CO₂ 复叠式制冷系统试验台

1.1 系统分析

R1270/CO₂复叠式制冷系统分为 R1270 高温级系统和 CO₂低温级系统两部分，高低温级采用冷凝蒸发器进行连接，高温级制冷剂 R1270 的蒸发过程（11-7）和低温级制冷剂 CO₂的冷凝过程（2-4）在冷凝蒸发器中进行。从冷凝蒸发器出来的 R1270 蒸汽经 R1270 压缩机进入冷凝器把热量传递到外部环境（6-7-8-9-10-11），从冷凝蒸发器中出来的 CO₂液体经节流装置进入蒸发器吸收被冷却介质的热量，最后进入压缩机完成整个循环（0-1-2-3-4-5）。系统循环流程图如图 1 所示。当系统低温回热运行时，阀门 F2 和 F5 关闭，阀门 F3、F4、F6 和 F7 打开；当系统高温级回热运行时，阀门 F12 和 F17 关闭，阀门 F13、F14、F18 和 F19 打开。

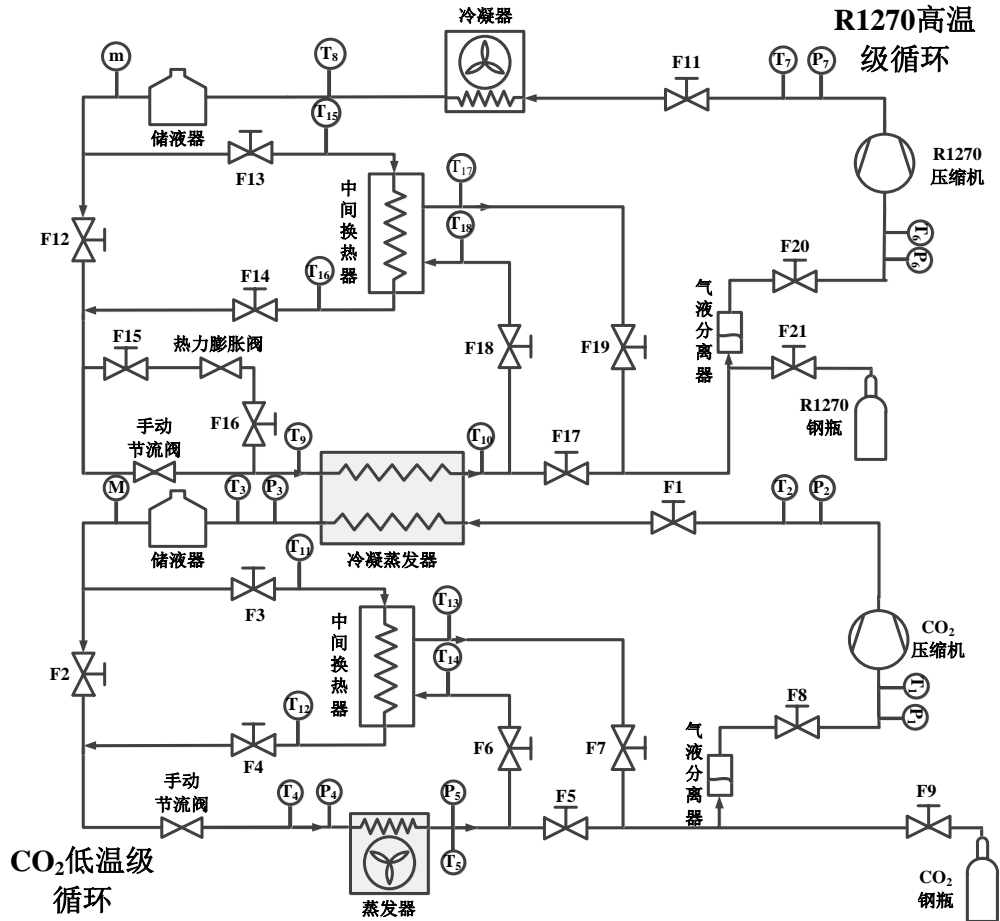


图 1 R1270/CO₂复叠式制冷系统试验流程图

1.2 实验设备

试验系统由 R1270/CO₂复叠式制冷系统、电控系统和数据采集系统组成。

复叠式制冷系统主要包括：意大利 Dorin 公司生产的 CO₂亚临界循环压缩机和 R1270 防爆压缩机，冷凝器选用微通道换热器，冷凝蒸发器选用同轴套管式换热器，CO₂走外侧，外侧采用不锈钢管，R1270 走内侧，内侧采用紫铜管。R1270 节流阀选用热力膨胀阀，CO₂节流阀选用手动膨胀阀。蒸发器选用盘管式蒸发器，放入盛乙二醇水溶液的冷冻箱中，冷冻箱由内胆和保温箱构成，内胆外侧缠绕加热带。通过“热平衡法”进行制冷量的测量。

电控系统由系统电控、加热电控和数据采集电控组成。

数据采集系统由安捷伦的 Agilent Technologies 34972A 型数据采集仪和电脑组合而成，通过 PT100 热电阻、压力变送器、流量计采集系统的温度、压力和流量。压缩机和加热带的用电量通过电度表直接得到。测量仪器的主要参数如表 1 所示。

表 1 测量仪器的型号及精度

测试变量	仪器	量程	精度
------	----	----	----

温度	pt100 热电阻	-50—300℃	±0.2℃
CO ₂ 的压力	压力变送器	0—7Mpa	±0.2%
CO ₂ 的流量	体积流量计	0—10m ³ /s	±0.5%
R1270 的压力	压力变送器	0—3.5Mpa	±0.2%
R1270 的流量	质量流量计	0—1000kg/h	±0.2%
功率	三相电度表		±1%

2 试验结果分析

在试验过程中，分别对 R1270/CO₂ 复叠制冷循环系统的低温级、高温级以及高、低温级进行回热试验，并与系统无回热运行模式进行对比，分析不同运行模式时的系统性能。

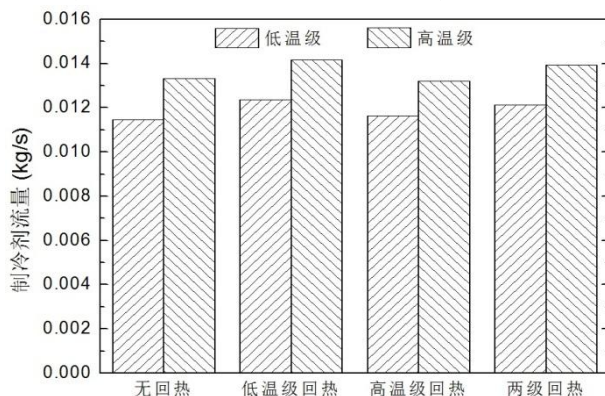


图 2. 不同运行模式下制冷剂流量

在不同运行模式，高温级制冷剂 R1270 的质量流量的变化很小，分别为 0.0133kg/s, 0.0142 kg/s, 0.0132 kg/s 和 0.0139 kg/s，最大相差 0.001 kg/s；而低温级制冷剂 CO₂ 的质量流量在不同运行模式下分别为 0.0115 kg/s、0.0124 kg/s、0.0116 kg/s 和 0.0121 kg/s，最大相差不到 0.001kg/s，如图 2 所示。

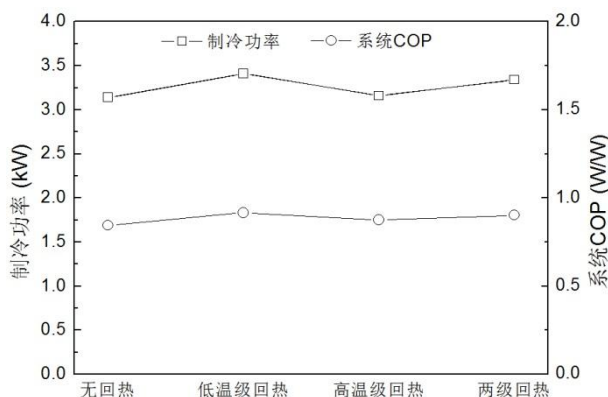


图 3. 不同运行模式下系统制冷量和系统 COP

R1270/CO₂ 复叠制冷系统的制冷量随不同运行模式的变化如图 3 所示。从图中可以发现，当低温级回热时，系统的制冷量最大为 3.41kW，比系统无回热时大 0.27kW，提高 8.60%。其次，高、低温两级均回热时，系统的制冷量 3.34kW，比系统无回热时提高 6.37%，而高温级回热对提高系统的制冷量效果不明显，仅仅提高制冷量 0.02kW。在采取回热时，系统 COP 均比无回热时的系统 COP 高。不同运行模式下系统 COP 分别为 0.84W/W、0.92 W/W、0.88 W/W 和 0.90 W/W。可以看出，当低温级回热时系统 COP 最高，比无回热时系统 COP 提高 9.52%，其次是高、低温两级回热，比无回热时系统 COP 提高了 7.14%。

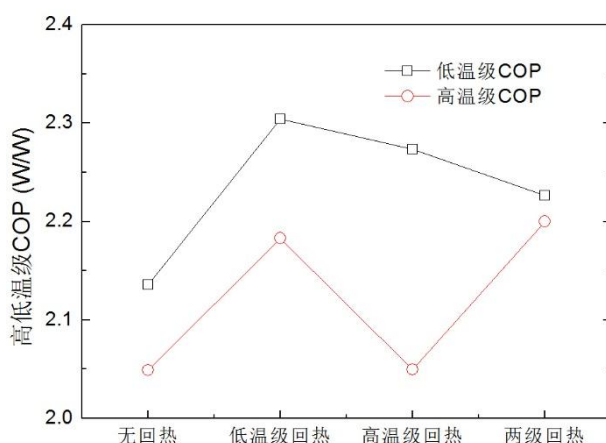


图 4. 不同运行模式下的高、低温级 COP

而高、低温级的 COP 在不同运行模式下的变化如图 4 所示。从图中可以发现，高温级的 COP 在低温级和高、低温级均回热时都得到提高，分别从无回热时的 2.05 W/W 提高到 2.18 W/W 和 2.2 W/W，而高温级回热时高温级的 COP 没有提高，为 2.05；而三种回热运行模式对低温级的 COP 均有提高，分别从无回热时的 2.14 提高到 2.30 W/W、2.27 W/W 和 2.23 W/W，其中低温级回热对低温级 COP 的提高最大，提高了 7.48%。

在不同运行模式下，不同部件的焓损失变化如图 5 所示。从图中可以发现，在不同运行模式下 R1270 压缩机和高温级膨胀阀的焓损失的变化不大，而蒸发器、冷凝器、冷凝蒸发器、CO₂ 压缩机以及低温级节流阀的焓损失均随低温级回热而降低，而在高温级回热时，各部件的焓损失变化很小。在各部件中，CO₂ 压缩机在低温级回热和高、低温两级回热时的焓损失降低较多，分别从无回热时的 39.45kJ/kg 降低至 31.70kJ/kg 和 32.10kJ/kg、而蒸发器在低温级回热和高、低温两级回热时的焓损失降低也较多，分别从无回热时的 15.80kJ/kg 降低至 9.51kJ/kg 和 9.51kJ/kg。

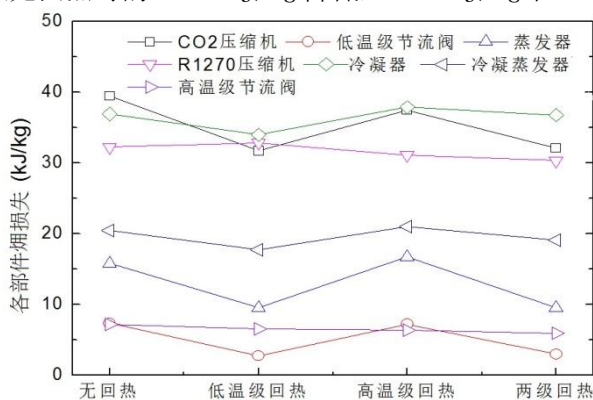


图 5. 不同运行模式下各部件的焓损失

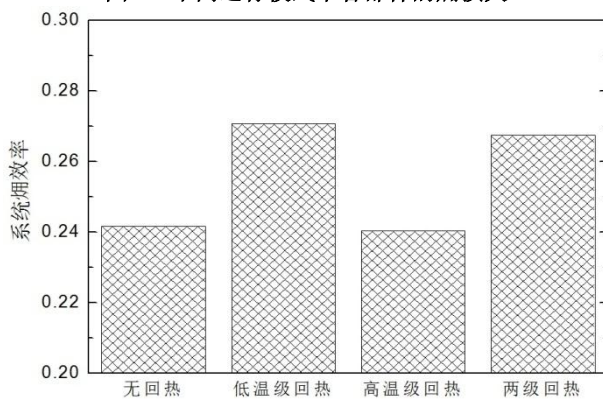


图 6. 不同运行模式下的系统焓效率

R1270/CO₂复叠制冷系统的焓效率在不同运行模式下的变化如图6所示。从图中可以看出,低温级回热和高、低温两级回热对提高系统的焓效率的作用比较明显,分别从无回热时的0.241提高至0.271和0.267,分别提高了12.45%和10.79,而高温级回热没有提高系统焓效率。

而在系统中焓损失最大的CO₂压缩机的绝热效率在不同运行模式下的变化如图7所示,不同回热运行模式均能提高CO₂压缩机的绝热效率,分别从52.66%提高至54.15%、54.05%和54.13%,因此,回热对提高CO₂压缩机的绝热效率有利。而R1270压缩机的绝热效率在高温级回热和高、低温两级回热时有所提高,分别从无回热时的64.79%提高至66.17%和66.12%,而在低温级回热时其绝热效率为63.89%,降低了0.9%。

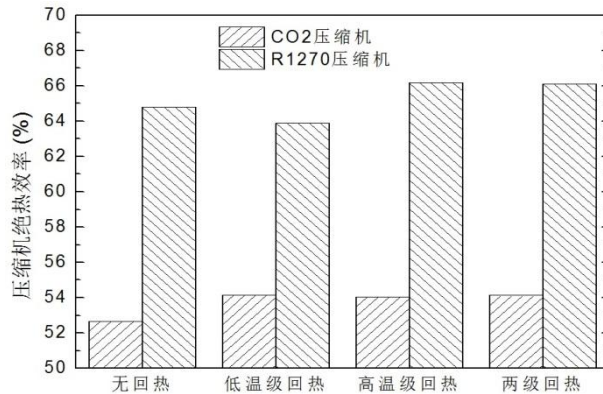


图7. 不同运行模式下压缩机的绝热效率

3 结论

通过对R1270/CO₂复叠式制冷系统进行回热试验研究,得出以下结论:

(1) 低温级回热和高、低温两级回热均能提高系统的制冷量和系统COP,制冷量提高了8.63%和6.37%,而系统COP提高9.52%和7.14%。

(2) 低温级回热和高、低温两级回热均能降低系统部件的焓损失、提高系统的焓效率,系统焓效率分别从无回热时的0.241提高至0.271和0.267,分别提高了12.45%和10.79%。

(3) 不同回热运行模式均能提高CO₂压缩机的绝热效率,而高温级回热和高、低温两级回热能提高R1270压缩机的绝热效率。

参考文献

- [1] Dopazo JA, Fernández-Seara J. Experimental Evaluation of a Cascade Refrigeration System Prototype with CO₂ and NH₃ for Freezing Process Applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 257-267.
- [2] Rezayan O, Behbahaninia A. Thermoeconomic Optimization and Exergy Analysis of CO₂/NH₃ Cascade Refrigeration Systems[J]. Energy, 2011, 36(2): 888-895.
- [3] Jankovich D, Osman K. A Feasibility Analysis of Replacing the Standard Ammonia Refrigeration Device with the Cascade NH₃/CO₂ Refrigeration Device in the Food Industry[J]. Thermal Science, 2015, 19(5): 1821-1833.
- [4] 陈曦, 王军, 王海霞, 等. NH₃/CO₂复叠式制冷循环系统的热力性能分析[J]. 低温与超导, 2016(03): 55-59+87.
- [5] 王强, 朱永宏, 剧成成, 等. 新一代AIST模块化CO₂复叠制冷系统[J]. 制冷与空调, 2017(09): 76-79.
- [6] Sanz-Kock C, Llopis R, Sánchez D, et al. Experimental Evaluation of a R134a/CO₂ Cascade Refrigeration Plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 41-50.
- [7] Sánchez D, Llopis R, Cabello R, et al. Conversion of a Direct to an Indirect Commercial (HFC134a/CO₂) Cascade Refrigeration System: Energy Impact Analysis[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 73: 183-199.

- [8] Song Y, Li D, Cao F, et al. Theoretical Investigation on the Combined and Cascade CO₂/R134a Heat Pump Systems for Space Heating[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 1457-1470.
- [9] 沈九兵, 胡斌, 邱建伟,等. R134a/ CO₂ 复叠制冷系统的实验研究[J]. *制冷学报*, 2013(04): 59-63.
- [10] 宁静红, 马一太, 李敏霞. R290 / CO₂ 自然工质低温复叠式制冷循环理论分析[J]. *天津大学学报*, 2006(04): 449-453.
- [11] 马一太, 代宝民, 田华, 等. CO₂/R290 复叠制冷系统热经济性及焓最优化分析[J]. *太阳能学报*, 2014(05): 795-801.
- [12] 宁静红, 李超飞, 曾凡星. 排气冷却 R290/ CO₂ 复叠式制冷系统性能分析[J]. *制冷与空调*, 2016(05): 46-49+53.
- [13] Dubey AM, Kumar S, Das Agrawal G. Thermodynamic Analysis of a Transcritical CO₂/Propylene (R744-R1270) Cascade System for Cooling and Heating Applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 774-783.
- [14] Dubey AM, Agrawal GD, Kumar S. Thermodynamic Analysis of a Transcritical CO₂/Propylene Cascade System with Split Unit in Ht Cycle[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2015, 37(4): 1365-1378.
- [15] Dubey AM, Agrawal GD, Kumar S. Performance Evaluation and Optimal Configuration Analysis of a Transcritical Carbon Dioxide/Propylene Cascade System with Vortex Tube Expander in High-Temperature Cycle[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015, 18(1): 105-122.
- [16] 王国鹏, 徐健, 王本义. 活塞压缩机排气温度过高的原因分析[J]. *压缩机技术*, 2017(06): 51-53+64.
- [17] 宁静红, 李惠宇, 彭苗. R290/CO₂ 复叠式制冷系统的性能实验[J]. *制冷学报*, 2007(06): 57-60.