

三级自复叠制冷系统模拟研究

张昌东, 芮胜军, 刘阳, 贺滔

河南科技大学车辆与交通工程学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2024年6月10日; 录用日期: 2024年7月3日; 发布日期: 2024年7月10日

摘要

以采用R236fa/R23/R14非共沸混合工质为制冷剂的三级自复叠制冷装置为分析对象, 借助模拟软件实现对参数的精准控制, 分析不同工况下的模拟结果, 比较制冷系统的吸排气温度、压缩机功耗、系统制冷量和性能系数, 研究不同工况对制冷系统性能的影响规律。结果表明, 在组分配比相同时, 增加混合工质质量流量能够增加系统制冷量, 但是压缩机功耗增加更为显著, 导致系统性能系数下降; 降低冷凝器出口温度, 有助于改善压缩机运行工况, 提高系统整体性能; 进入蒸发器制冷的并不是纯净的R14, 冷凝温度过低会减小进入蒸发器的工质流量, 降低系统制冷量; 在工质流量相同时, 增加低沸点组分比例可以增加系统制冷量, 获得更低的制冷温度, 但会增大压缩机功耗, 系统性能系数下降。研究结果为制冷装置的改进和优化提供了参考。

关键词

自复叠, 制冷系统, 非共沸混合工质, 组分配比

Simulation Study of Three-Stage Auto-Cascade Refrigeration System

Changdong Zhang, Shengjun Rui, Yang Liu, Tao He

School of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Jun. 10th, 2024; accepted: Jul. 3rd, 2024; published: Jul. 10th, 2024

Abstract

A three-stage auto-cascade refrigeration device using R236fa/R23/R14 non-azeotropic mixture as refrigerant is taken as the analysis object. The simulation software is used to realize the accurate control of the parameters, and the simulation results under different working conditions are analyzed. The suction and discharge temperature, compressor power consumption, system cooling capacity and coefficient of performance of the refrigeration system are compared, and the influ-

ence of different working conditions on the performance of the refrigeration system is studied. The results show that increasing the mass flow rate of the mixed refrigerant can increase the cooling capacity of the system, but the power consumption of the compressor increases more significantly, resulting in a decrease in the coefficient of performance of the system. Reducing the outlet temperature of the condenser helps to improve the operating conditions of the compressor and improve the overall performance of the system. It is not pure R14 that enters the evaporator for refrigeration. If the condensation temperature is too low, the flow rate of the working fluid entering the evaporator will be reduced and the cooling capacity of the system will be reduced. When the flow rate of the working fluid is the same, increasing the proportion of low boiling point components can increase the cooling capacity of the system and obtain lower cooling temperature, but it will increase the power consumption of the compressor and decrease the coefficient of performance of the system. The research results provide a reference for the improvement and optimization of the refrigeration device.

Keywords

Auto-Cascade, Refrigeration System, Non-Azeotropic Mixtures, Composition Ratio

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自复叠制冷(ACR)系统采用二元或多元非共沸混合工质,用一台压缩机压缩,利用混合工质组分之间沸点的差异,实现高低沸点组分之间的分离和复叠,达到制取低温的目的,具有结构简单紧凑、灵活性和可靠性高、制冷温区广阔等优点[1] [2]。非共沸混合工质的选择和配比对 ACR 系统性能影响很大,是 ACR 系统研究的方向之一[3]。Sivakumar 等[4]在五种不同三元非共沸混合工质中筛选,最终选择了两种组合 R290/R23/R14 和 R1270/R170/R14。研究了不同质量分数下系统的性能系数(COP)、焓损失、焓效率和达到的蒸发温度。祁影霞等[5]-[7]依据量子化学计算信息、统计热力学理论、Burnett 法等研究了单一制冷工质的饱和蒸汽压和混合制冷工质的气液相平衡性质,模拟数据与实验数据有很好的一致性。郭辉红等[8] [9]使用 ASPEN 软件模拟了多种混合工质在 ACR 系统中的理论性能,寻找环保制冷剂替代方案,通过对系统焓损失的分析发现换热器在系统中的焓损失最高。Qin 等[10]对 R1234yf/R23/R14、R1234yf/R41/R14、R1234yf/R170/R14 和 R1234yf/R14 系统的循环特性进行了全面的比较分析,研究了不同成分和蒸汽质量下的系统性能。

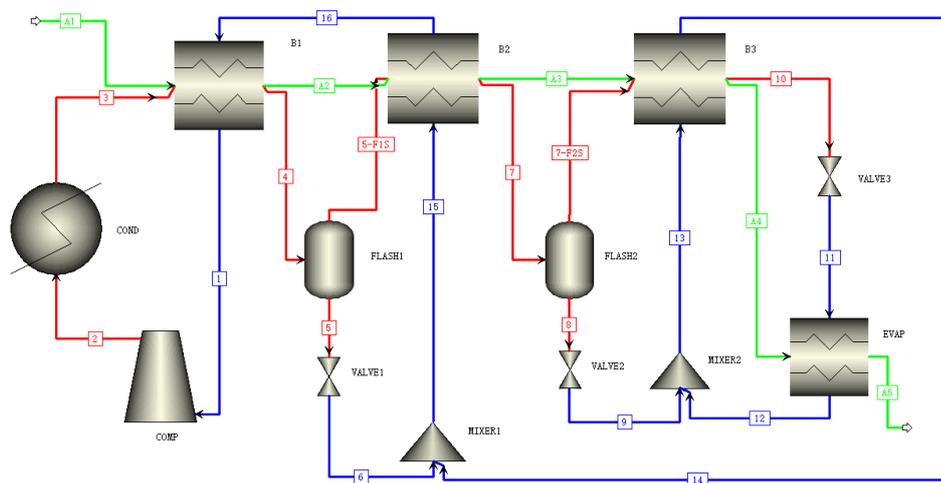
以上研究体现了非共沸混合工质复杂多变的组分迁移特性和不同组分对 ACR 系统性能的研究,但关于 R236fa/R23/R14 混合工质的研究较少。为了提高搭建的三级 ACR 装置的性能,对装置进行模拟研究,分析不同条件和混合工质组分配比下的计算结果,比较制冷系统的吸排气温度、压缩机功耗、系统制冷量和 COP,找到不同工况对制冷系统性能的影响规律,为制冷装置性能的优化和改进提供参考。

2. 模型建立

2.1. 模型工作流程

根据三级 ACR 装置建立的系统模型如图 1 所示,蓝色流股表示低压状态,红色流股表示高压状态,绿色流股表示空气的流动路线。混合工质在压缩机压缩后进入冷凝器中冷凝,其中的高沸点工质被冷凝

为液体，其余组分仍保持气体状态。气液混合工质在回热器再次降温后进入相分离器 1，在重力作用下气体和液体自动分离，分为两路分别从顶部和底部流出。富含高沸点工质的液体从底部流出，通过节流阀 1 节流为低温低压状态，富含中、低沸点工质的气体从顶部进入冷凝蒸发器 1 与节流后的高沸点工质换热，其中的中沸点工质变为液体，低沸点工质状态不变。随后气液混合工质进入相分离器 2，液体从底部流入节流阀 2 进行节流，气体从顶部出来先通过冷凝蒸发器 2 降温，再进入节流阀 3 进一步节流到更低的温度，最后进入蒸发器蒸发制冷与前面两个节流阀节流后的组分混合被压缩机吸入压缩，完成整个制冷循环。空气沿流动路线先后在回热器、冷凝蒸发器 1、冷凝蒸发器 2、蒸发器中获得冷量。



COMP——压缩机，COND——冷凝器，EVAP——蒸发器，VALVE1, 2, 3——节流阀，B1——回热器，B2, B3——冷凝蒸发器，FLASH1, 2——相分离器，MIXER1, 2——混合器

Figure 1. Simulation diagram of three-stage auto-cascade refrigeration system

图 1. 三级自复叠制冷系统模拟图

2.2. 模型验证

实际循环和理论循环是存在差异的，为了使模型能够更加准确的模拟出制冷装置的运行结果，以实验参数作为模拟参数进行模拟，比较两者的差异，对模型进行改进。实验结果与模拟结果如表 1 所示。由表中结果可以看出，规定两者制冷量相同时，压缩机功耗、节流阀 3 出口温度、蒸发器出口温度误差和 COP 误差较大，分别为 8.3%、16.8%、13.0%和 9.3%，COP 误差是由于压缩机误差造成的，蒸发器出口温度误差与节流阀 3 出口温度误差有关，其余参数比较接近。压缩机功耗的误差可通过调整压缩机的等熵效率和机械效率使模型接近实际，节流阀 3 出口温度的误差可通过调整节流阀的开度减小误差。通过对模型的调整，使模拟结果更加准确。

Table 1. Comparison of experimental data and simulation data

表 1. 实验数据与模拟数据对比

运行参数	单位	实验结果	模拟结果
压缩机吸气温度	℃	20.4	20.4
压缩机排气温度	℃	107.3	102.8
压缩机吸气压力	MPa	0.37	0.37
压缩机排气压力	MPa	1.96	1.96

续表

压缩机耗功	W	1828.84	1676.09
回热器冷端进口温度	°C	-9.0	-9.9
冷凝蒸发器 1 冷端进口温度	°C	-32.6	-31.8
冷凝蒸发器 2 出口温度	°C	-52.3	-52.3
节流阀 1 出口温度	°C	-22.6	-21.4
节流阀 2 出口温度	°C	-54.2	-58.4
节流阀 3 出口温度	°C	-76.3	-89.1
蒸发器出口温度	°C	-61.4	-69.4
空气冷负荷	W	1065.10	1065.10
COP	/	0.582	0.636
干燥空气进口温度	°C	-75.3	-75.3

2.3. 模型参数

通过理论分析和实验设备的基本参数，对模型中各参数进行设定：混合工质选择 R236fa/R23R14 组分配比在 52/36/12 左右，系统高低压力设置为 2.2 MPa 和 0.3 MPa，冷凝器出口温度根据风冷冷凝器的冷凝效果设置在 30~40°C，相分离器 1 温度设置为 10~20°C，相分离器 2 温度设置为 -30~-20°C，蒸发器出口温度设置为 -75°C，混合工质总质量流量在 20~40 g/s，空气流量根据实验条件设置为 510 L/min。

3. 模拟结果及分析

通过对压缩机吸气温度 T_{suc} 、压缩机排气温度 T_{dis} 、压缩机功耗 W_{com} 、制冷量 Q_e 和 COP 等参数评估系统性能的优劣，分析不同工况对制冷系统性能的影响规律，为制冷装置性能的优化和改进提供参考。

3.1. 系统性能随质量流量的变化

在组分配比相同时，系统的运行参数随混合工质质量流量的变化情况如图 2 所示。由图可以看出，随着质量流量的增加，压缩机的吸气温度和排气温度均呈下降趋势，压缩机功耗增加，系统制冷量增加，但是 COP 下降。压缩机的吸排气压力不变，随着质量流量的增加，压缩机需要压缩更多混合工质气体，增加了压缩机的负荷，导致压缩机功率消耗增加。压缩机压缩了更多气体，使系统中混合工质的循环量增加，系统能够提供更多的冷量，流股携带的冷量增加，吸气温度下降，排气温度也随之下降。压缩机功耗的增加比例大于制冷量的增加比例，系统 COP 减小。因此，增加系统中混合工质的质量流量能够增加系统制冷量，但压缩机功耗增加更为显著，导致系统 COP 下降。同时将增大冷凝器和蒸发器的负荷，需要更大的换热面积或更高效的换热器，最后导致设备体积增大，不利于系统的紧凑设计和成本控制。

3.2. 系统性能随冷凝器出口温度的变化

在相同的组分配比和总质量流量条件下，系统的运行参数随冷凝器出口的变化情况如图 3 所示。由图可以看出，随着冷凝器出口温度的升高，压缩机的吸排气温度也升高，压缩机的功耗增加，制冷量基本稳定，系统 COP 下降。模拟设置了系统的高低压不变，各个换热器的出口温度不变，特别是回热器的出口温度不变，导致冷凝器出口温度变化对后续循环的影响很小，系统制冷量不变。但回热器的热负荷会增大，设计尺寸也相应增加。回热器中换热量增加使吸气温度上升，排气温度也随着上升，在压力不变的情况下，单位容积制冷量下降。为了保持相同的制冷量，压缩机需要增加转速或增大容量，从而增

加功耗, 造成系统 COP 下降。因此, 可以改变冷凝器出口温度来调整系统的运行状态, 出口温度下降, 有利于改善压缩机的运行工况, 降低压缩机的功耗, 提高制冷系统的性能。

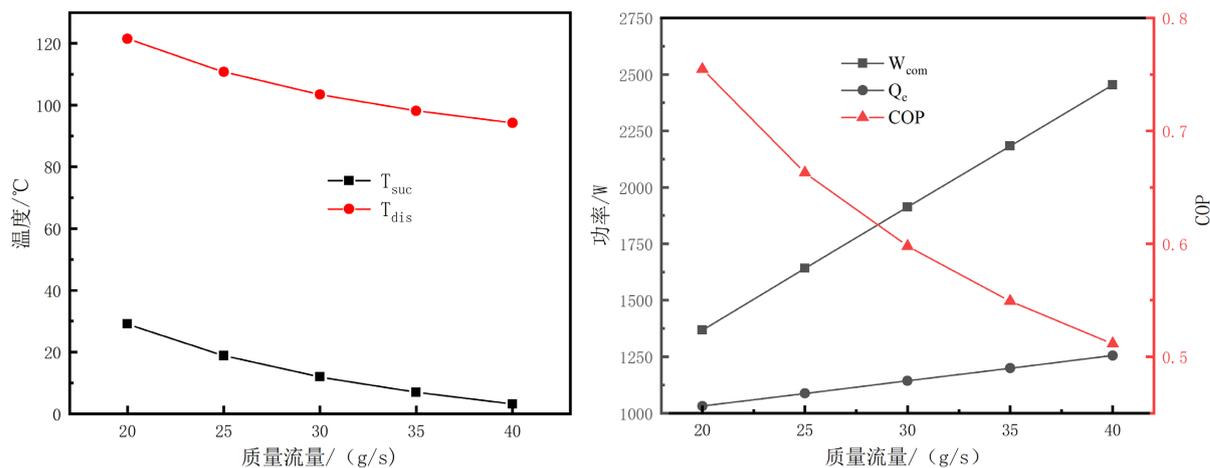


Figure 2. Variations in T_{suc} , T_{dis} , W_{com} , Q_e and COP with mass flow rate

图 2. T_{suc} 、 T_{dis} 、 W_{com} 、 Q_e 和 COP 随质量流量的变化

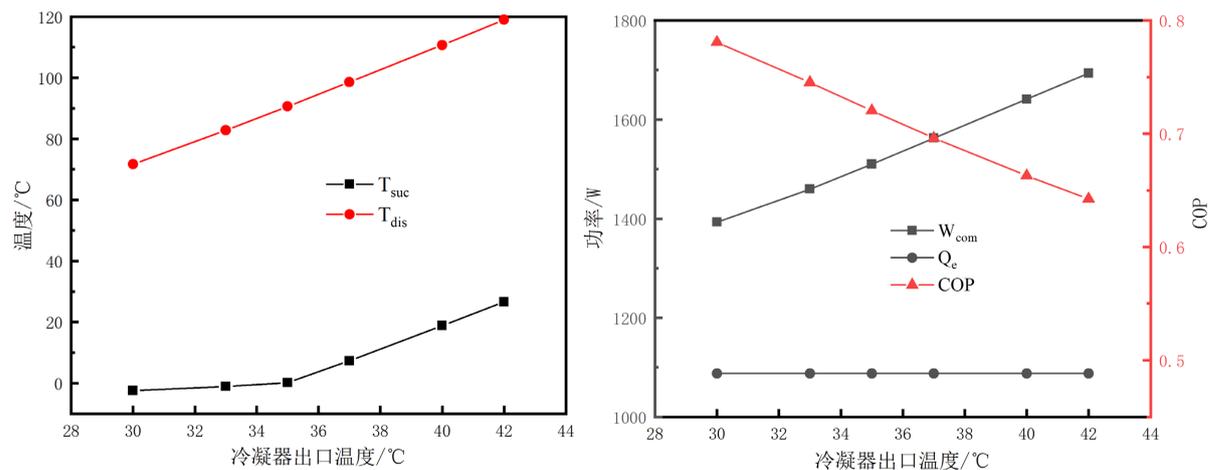


Figure 3. Variations in T_{suc} , T_{dis} , W_{com} , Q_e and COP with the outlet temperature of the condenser

图 3. T_{suc} 、 T_{dis} 、 W_{com} 、 Q_e 和 COP 随冷凝器出口温度的变化

3.3. 系统性能随相分离器温度的变化

在相同的组分配比和总质量流量条件下, 系统的运行参数随相分离器 2 温度的变化情况如图 4 所示。由图可以看出, 随着相分离器 2 温度的升高, 压缩机耗功、系统制冷量和 COP 都呈上升趋势, 进入蒸发器的总混合工质质量流量和各组分质量流量都增加。蒸发器中的混合工质并不是纯制冷工质 R14, 主要组分为 R23 和 R14, 当温度降低时, R14 组分比例升高。因为当制冷系统设置的其他温度不变时, 相分离器 2 的温度影响混合工质的分离效果, 温度越低, 冷凝的混合工质液体质量越多, 气体质量越少, 从相分离器 2 顶部出来流向蒸发器的混合工质气体质量流量减少, 造成系统的制冷量下降。但温度越低, 分离效果越好, 气相混合工质中 R14 组分比例升高, 系统可以达到更低的蒸发温度。为了增加系统的制冷量, 提高系统的性能, 应该控制第二级相分离器的温度, 确保有足够多的混合工质进入蒸发器。

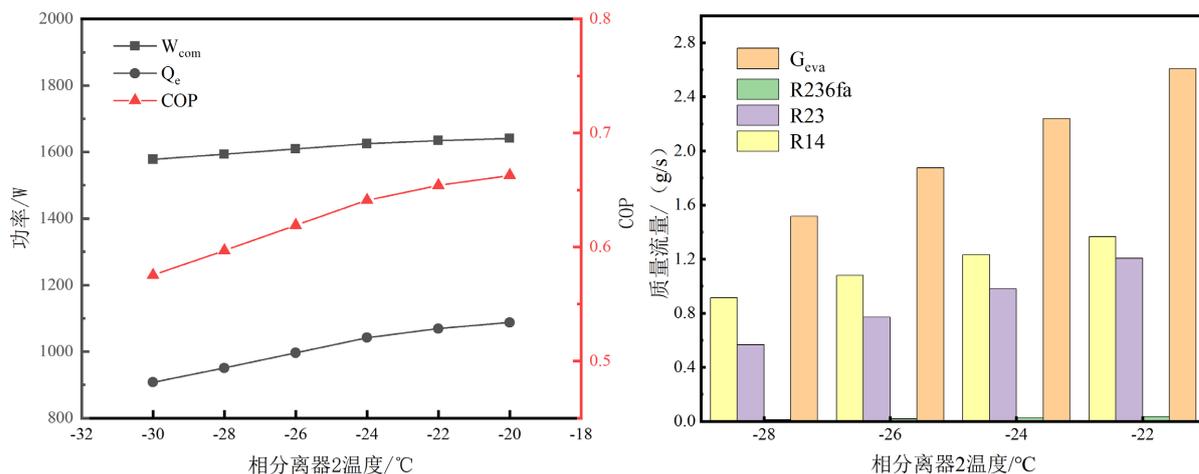


Figure 4. Variations in W_{com} , Q_e , COP and mass flow rate with the temperature of phase separator 2

图 4. W_{com} 、 Q_e 、COP 和质量流量随相分离器 2 温度的变化

3.4. 系统性能随组分配比的变化

为了探究组分配比对制冷系统性能的影响,在总质量流量相同时,分别模拟混合工质中高沸点组分、中沸点组分、低沸点组分保持不变时,另外两种工质配比变化对系统性能的影响,如下图所示。

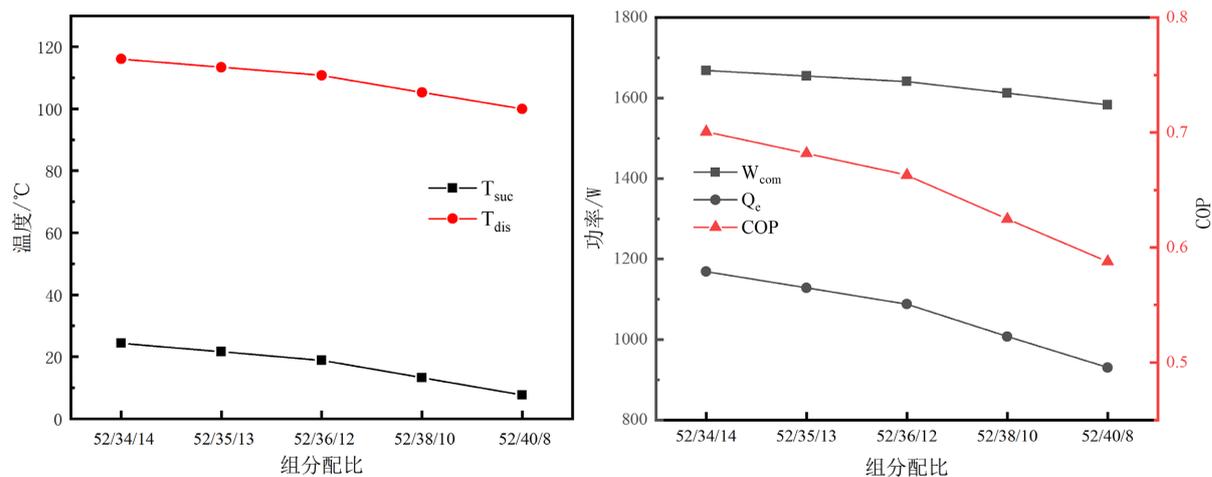


Figure 5. The change of system performance when R236fa ratio is constant

图 5. R236fa 配比不变时系统性能的变化

由图 5 可以看出,当 R236fa 组分配比不变时,增加 R23 组分比例,减少 R14 组分比例可以降低压缩机的吸排气温度,减少压缩机耗功,改善了系统运行工况,但同时也降低了系统的制冷量和 COP。这与非共沸混合工质复杂的迁移特性有关,当减少 R14 组分比例并增加 R23 组分比例时,相分离器流出的液相成分中 R236fa 的相对组分比例减少,前两级节流阀的出口温度下降,间接改善了压缩机的吸排气温度。在蒸发压力和蒸发器出口温度不变时,制冷量随着流向蒸发器的 R14 质量流量的减少而显著减少,系统的能效减低。

由图 6 可以看出,当 R23 组分配比不变时,降低 R236fa 组分比例,增加 R14 组分比例,压缩机的吸排气温度上升,压缩机耗功增加,系统制冷量增加,系统 COP 变化很小。R14 在三种制冷工质中是沸

点最低的工质，系统蒸发压力不变，增加 R14 组分比例使混合工质的整体性质开始向 R14 的特性靠拢，蒸发温度降低，前两级相分离器流出的液相中 R236fa 比例相对增加，节流后的温度和压缩机吸排气温度上升。当混合工质总质量流量相同时，流向蒸发器的 R14 质量流量增加，制冷量增大，R14 组分比例升高还可以获得更低的制冷温度。

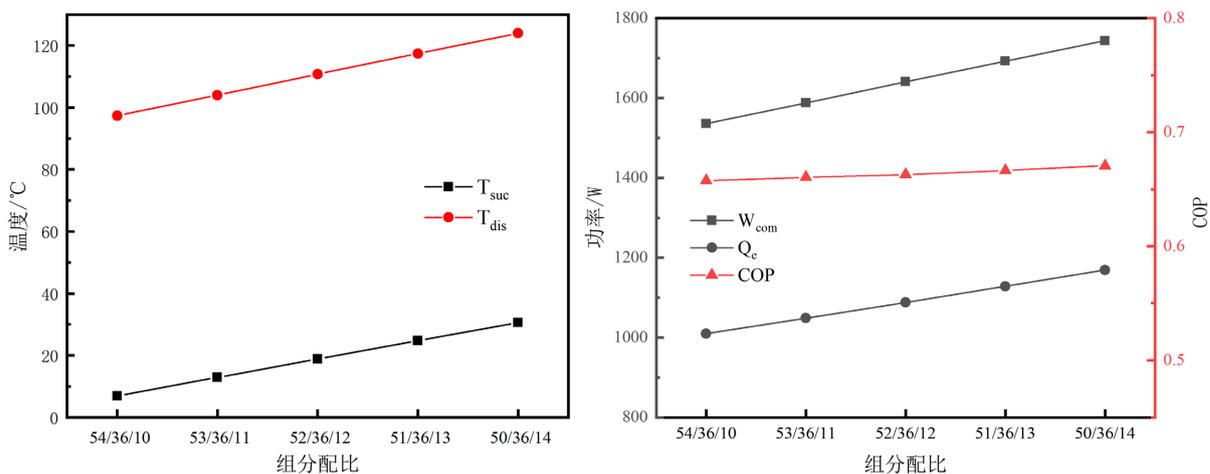


Figure 6. The change of system performance when R23 ratio is constant

图 6. R23 配比不变时系统性能的变化

由图 7 可以看出，当 R14 组分配比不变时，降低 R236fa 组分比例，增加 R23 组分比例，压缩机的吸排气温度升高，压缩机耗功增加，系统制冷量基本不变，COP 降低。R23 相对于 R236fa 也是低沸点工质，所以吸排气温度变化趋势与减少 R2326fa 组分比例、增加 R14 组分比例相似。吸气温度升高，在相同吸气体积下，进入压缩机的制冷剂质量减少，降低了单位容积制冷量，为了达到相同的制冷量，压缩机需要消耗更多的功，造成系统 COP 下降。

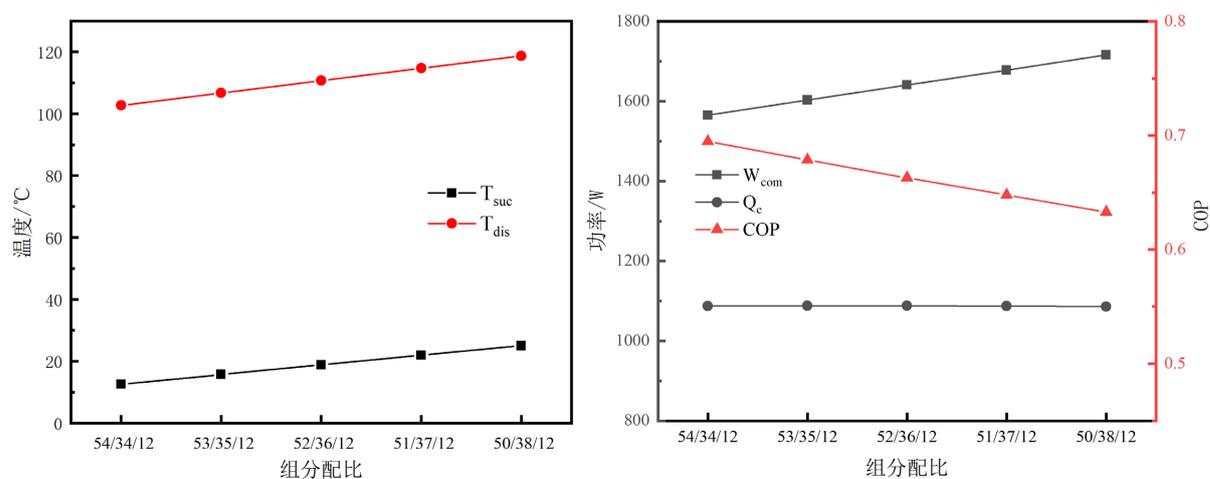


Figure 7. The change of system performance when R14 ratio is constant

图 7. R14 配比不变时系统性能的变化

4. 结论

本文对三级 ACR 系统进行了模拟研究，以模拟实现对参数的精准控制，分析不同条件和混合工质组

分配比下的模拟结果，找到了系统性能变化的规律：

1) 在混合工质配比相同时，增加混合工质质量流量能够增加系统的制冷量，但是压缩机耗功增加更为显著，导致系统 COP 下降。此外，会加重换热设备的负荷，需要更大的换热面积或更高效的换热器，对装置的紧凑设计和成本控制造成不利影响。

2) 模拟发现随着冷凝器出口温度的降低，压缩机吸排气温度下降，压缩机耗功减小，系统 COP 上升，有助于改善压缩机运行工况，提高系统整体性能。

3) 随着第二级相分离器温度的升高，进入蒸发器的各组分质量流量都增加，压缩机耗功、系统制冷量和 COP 都呈上升趋势。

4) 合理调节三级 ACR 系统中混合工质的组分配比有助于优化制冷系统的性能。提高混合工质的高沸点组分比例有利于降低压缩机的吸排气温度，提高低沸点组分比例有利于增加系统制冷量，获取更低的制冷温度。

基金项目

项目名称：低温制冷装置系统开发；项目编号：22010155。

参考文献

- [1] 孙欢, 杨凯, 吴冬夏, 等. 自复叠制冷技术研究进展[J]. 冷藏技术, 2024, 47(1): 79-85, 48.
- [2] 刘鹏鹏, 盛伟, 焦中彦, 高旭阳. 自复叠制冷技术发展现状[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 45-51.
- [3] 李银龙, 刘国强, 刘嘉瑞, 等. 自复叠制冷系统及其组分分离、迁移与调控研究进展[J]. 制冷学报, 2024, 45(1): 1-17.
- [4] Sivakumar, M. and Somasundaram, P. (2014) Exergy and Energy Analysis of Three Stage Auto-Cascade Refrigeration System Using Zeotropic Mixture for Sustainable Development. *Energy Conversion and Management*, **84**, 589-596. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.076>
- [5] 祁影霞, 王禹贺, 车闰瑾, 等. 混合制冷剂(R600a+R152a+R134)的气液相平衡分析[J]. 化学工程, 2018, 46(7): 42-46.
- [6] 穆德富, 陈日帅, 祁影霞, 等. 混合制冷剂 R1234yf/R32 热物性研究及分析[J]. 制冷技术, 2017, 37(2): 74-78.
- [7] 孙杨柳, 祁影霞, 张佳妮, 等. 基于 COSMO-RS 模型的制冷工质气液相平衡性质的模拟[J]. 制冷技术, 2017, 37(6): 26-28+61.
- [8] 邬辉红. 使用碳氢制冷剂的自复叠制冷系统性能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2023: 45-51.
- [9] 何永宁, 邬辉红, 许柯, 等. R600/R170/R14 三级自复叠制冷系统性能研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(5): 71-77+84.
- [10] Qin, Y.B., Li, N.X., Zhang, H., et al. (2021) Energy and Exergy Performance Evaluation of a Three-Stage Auto-Cascade Refrigeration System Using Low-GWP Alternative Refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, **126**, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.028>