

基于R448A的高低温试验箱制冷系统特性实验研究

周利强^{1,2}, 张 华^{1,2}, 王子龙^{1,2*}, 郜文静^{1,2}

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海

Email: *wzl@usst.edu.cn

收稿日期: 2021年5月24日; 录用日期: 2021年7月8日; 发布日期: 2021年7月15日

摘 要

本文搭建了高低温试验箱实验台, 研究了R404A有无回热循环的性能对比, 在此基础上研究了新型制冷剂R448A制冷循环, 并对分析充注量对蒸发温度、制冷量、COP等各项系统性能参数的变化特性。结果表明: 在蒸发温度-25℃下, 与无回热循环相比, 带回热器的R404A制冷循环COP提高了25.19%; R448A循环比R404A循环的COP提高了3.72%。随着充注量的增加, 蒸发温度逐渐增大, 而制冷量和COP都呈现为先增大后减小的趋势。在充注量为240 g, 环境温度为20℃时, R448A制冷系统与R404A制冷系统的制冷量差值最大, 值为123.61 W。当环境温度从15℃升至25℃时, R448A制冷循环的COP降幅平均为11.96%, 而R404A制冷循环的COP降幅平均为25.84%, 表明R448A制冷系统的高温工况稳定性优于R404A制冷系统。

关键词

高低温试验箱, 回热器, 环保制冷剂, COP, 充注量

Research on Characteristics of Refrigeration System of High and Low Temperature Test Equipment Based on R448A

Liqliang Zhou^{1,2}, Hua Zhang^{1,2}, Zilong Wang^{1,2*}, Wenjing Gao^{1,2}

¹School of Energy and Power, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai

Email: *wzl@usst.edu.cn

Received: May 24th, 2021; accepted: Jul. 8th, 2021; published: Jul. 15th, 2021

*通讯作者。

Abstract

In this paper, a high and low temperature test equipment was built to study the performance comparison of R404A with or without a regenerative cycle. On this basis, the new refrigerant R448A refrigeration cycle was studied. The variation characteristics of the charge volume on the evaporating temperature, cooling capacity, COP and other system performance parameters are analyzed. The results show that at the evaporation temperature of -25°C , the COP of the R404A refrigeration cycle with regenerator is increased by 25.19% compared with the cycle without regenerator; the COP of the R448A cycle is increased by 3.72% than that of the R404A cycle. With the increase of the charge, the evaporation temperature gradually increases, while the cooling capacity and COP showed a trend of first increasing and then decreasing. When the charge volume is 240 g and the ambient temperature is 20°C , the difference in cooling capacity between the R448A refrigeration system and the R404A refrigeration system is the largest, with a value of 123.61 W. When the ambient temperature rises from 15°C to 25°C , the average drop in COP of the R448A refrigeration cycle is 11.96%, and the average drop in COP of the R404A refrigeration cycle is 25.84%, indicating that the high temperature stability of the R448A refrigeration system is better than that of the R404A refrigeration system.

Keywords

High and Low Temperature Test Equipment, Regenerator, Environmentally Friendly Refrigerant, COP, Filling Capacity

Copyright © 2021 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

高低温试验箱是一种可以自主调节温度、湿度等多种参数的密闭空间，其内部可以提供高、低温环境以及一定的湿度环境进行实验。高低温试验箱由于它的可靠性而广泛应用在电子电工、芯片、航空航天、移动设备等高科技产品领域[1][2]。由于生产和科研的实际需求，对试验箱的精度和节能要求也越来越高[3]。

制冷循环系统是高低温试验箱中比较重要的一部分，其性能可以直接影响到试验箱整体质量的高低。任立乾等[4]人研究了 R448A 和 R449A 在涡旋压缩机中的应用，发现相同工况下，较 R404A 相比，密度分别提高了 5.4%~11.2%和 5.7%~10.8%，并且其过冷液体的体积流量更小，表明制冷剂对循环系统的可靠性和性能有一定的影响。李思远等[5]人基于目前能耗高的情况研究了影响能耗的因素，研究表明在制冷/制热模式下，环境温度、试验负载的能力、电压波动、试验箱体积、供水温度都能对能耗产生影响。承磊等[6]人研制了氦气强制对流高低温试验箱，发现低温工况下，以液氮为冷源，初始降温速率可达 $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，降温速率是评定箱体工作性能的重要因素之一。刘西强等[7][8]人对高低温试验箱的远程控制系统以及集中监控系统进行设计，发现通过远程集中监控，提高了设备工作效率 60%且减低人工成本 30%以上。

综上所述，高低温试验箱目前存在较大的能耗问题，不符合新时代节能经济发展要求；另外在制冷系统性能优化及新型环保制冷剂对高低温试验箱特性的影响方面缺乏相关研究。因此，本文优化了高低温试验箱制冷系统，研究了冷凝温度和制冷剂充注量对具有回热循环的高低温试验箱制冷特性的影响规律。此外，本文还探究了替代工质环保制冷剂 R448A 对系统制冷性能的影响。

2. 实验装置及方法

本文根据 GB/T 10592-2008《高低温试验箱技术要求》[9]进行测量分析。

2.1. 实验装置

实验系统原理图和测试台实物图如图 1 和图 2 所示, 本文所使用的高低温试验箱的有效容积为 26.2 L, 制冷系统管路包裹有导热系数为 0.024 W/(K·m)的保温棉。本文设计了有效换热面积为 31.40 cm²的套管式换热器, 如图 3 所示。

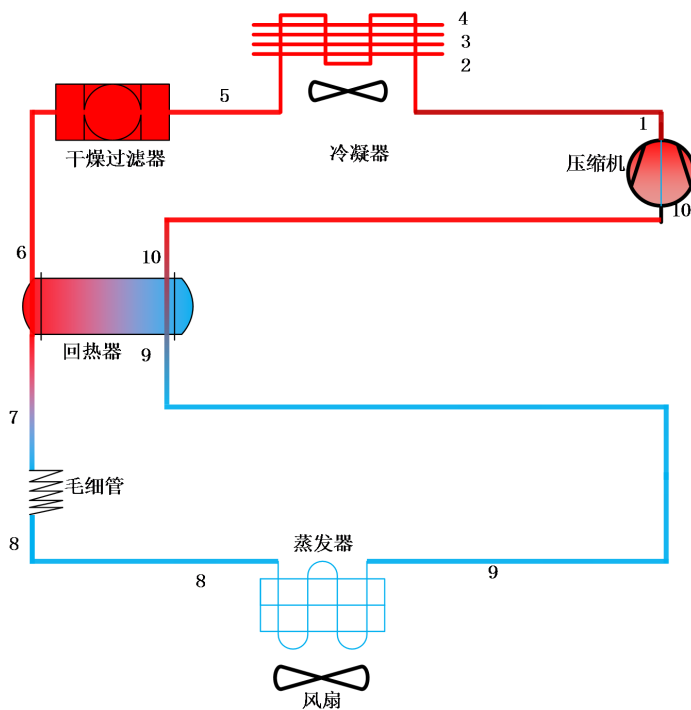


Figure 1. Schematic diagram of the experimental system

图 1. 实验系统原理图



Figure 2. Experimental system test bench

图 2. 实验系统测试台

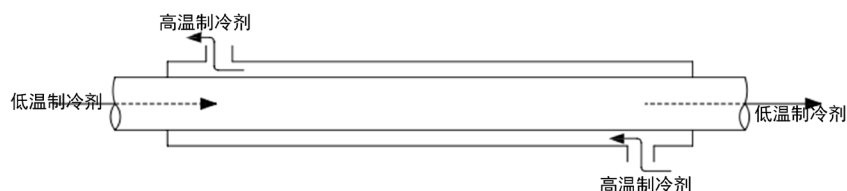


Figure 3. Structure diagram of double-pipe regenerator

图 3. 套管式回热器结构图

系统布置 10 根 T 型热电偶, 来测量各个部件的温度。实验采用压力变送器和安捷伦来采集 T 型热电偶的温度信号和压力变送器的电压信号, 其中扫描时间间隔设定为 10 s。

2.2. 计算公式

制冷量的计算[10]如下:

$$Q = q_0 \times q_m \quad (1)$$

式中: q_0 ——单位质量制冷量, 单位为 kJ/kg;

q_m ——压缩机理论质量流量, 单位为 kg/h。

$$q_m = \frac{q_{vt}}{v_1} \quad (2)$$

式中: q_{vt} ——理论容积输气量, 单位为 kg/h;

v_1 ——进气口处吸气状态下气体的比体积, 单位为 m^3/kg 。

$$q_{vt} = 60inV_p = 47.12inSD^2 \quad (3)$$

式中: i ——压缩机的气缸数;

n ——压缩机的转速, 单位为 r/min;

S ——活塞行程, 单位为 m;

D ——气缸直径, 单位为 m;

V ——活塞移动一个行程所扫过的气缸工作容积, 单位为 m^3 。

其中压缩机的具体参数值如表 1 所示。

Table 1. Compressor parameters

表 1. 压缩机参数

名称	尺寸
气缸直径	27.43 mm
活塞行程	0.62 in
压缩机气缸数	1
压缩机转速	3600 rpm
气缸工作容积	9.35 cc
压缩机理论容积输气量	2.02 m^3/h

2.3. R404A 和 R448A 理化性质对比

本文实验工质 R404A 和 R448A 的理化性质如表 2 所示。由表中的数据可知, 新型制冷剂 R448A 的 ODP 为 0, 较 R404A 相比, GWP 分别降低了 67.7%。

Table 2. Basic properties of experimental working fluid
表 2. 实验工质的基本性质

工质名称	R404A	R448A
组分(质量百分比)	R125/134a/143a (44/52/4)	R32, R125, R134a,R1234yf, R1234ze (26/26/21/20/7)
ODP	0	0
GWP	3943	1273
温度滑移/°C	0.75	6.18
临界温度/°C	71.968	83.656
临界压力/MPa	3.723	4.495
密度/kg·m ⁻³	486.7	477.25

3. 制冷系统优化和制冷剂性能对比分析

3.1. 制冷系统性能优化研究

在同一蒸发温度 -25°C 下过冷度对制冷系统性能的影响如图 4 所示。过冷度的增加使得系统的吸气温度和吸气压力上升,但由于同一蒸发温度下对应的充注量不同,导致系统的冷凝压力降低,降幅为 0.25 MPa ,故使得系统单位质量制冷量增加,同时单位理论功增加,系统 COP 提高了 25.19% 。这是因为在同一蒸发温度下,蒸发压力不变,因增加回热器系统过冷度增大,单位质量制冷量和单位理论功都增大,而单位质量制冷量增加的幅度 19.48 kJ/kg 比单位理论功增加的幅度 3.34 kJ/kg 大,故制冷系统的 COP 增大。

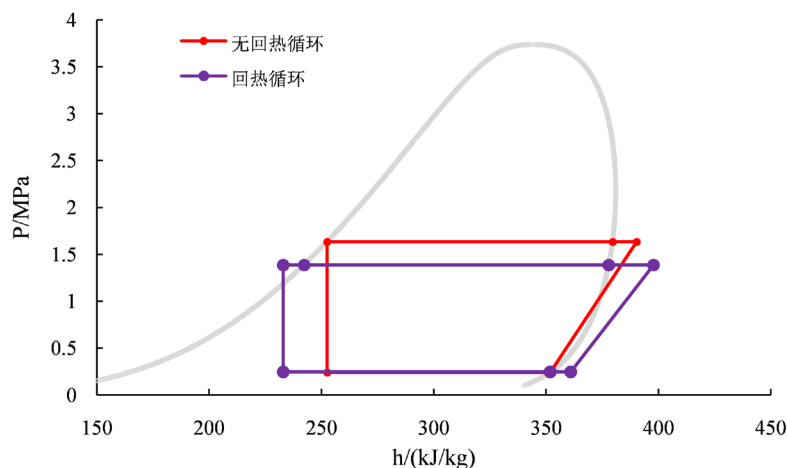


Figure 4. Pressure enthalpy diagram with or without regenerator performance comparison
图 4. 有无回热器性能对比压焓图

系统的各项性能参数如表 3 所示。本文按照试验箱每日运行 8 h ,根据国标选取试验箱在环境温度为 15°C 、 20°C 和 25°C 下, R404A 和 R448A 制冷循环使冷藏室箱体在 -20°C 的稳定工况下维持 1 h ,从而计算出日平均耗电量,如图 5 所示。由图 5 可以看出,在环境温度为 15°C 、 20°C 和 25°C , R448A 制冷循环的日平均耗电量比 R404A 制冷循环的日平均耗电量分别减少了 3.99% 、 4.75% 和 4.74% 。

Table 3. Performance parameters with or without regenerator
表 3. 有无回热器性能参数

性能参数	无回热循环	回热循环
过冷度/°C	0	5.93
单位质量制冷量/(kJ/kg)	99.33	118.81
单位理论功/(kJ/kg)	33.48	36.82
COP	2.58	3.23

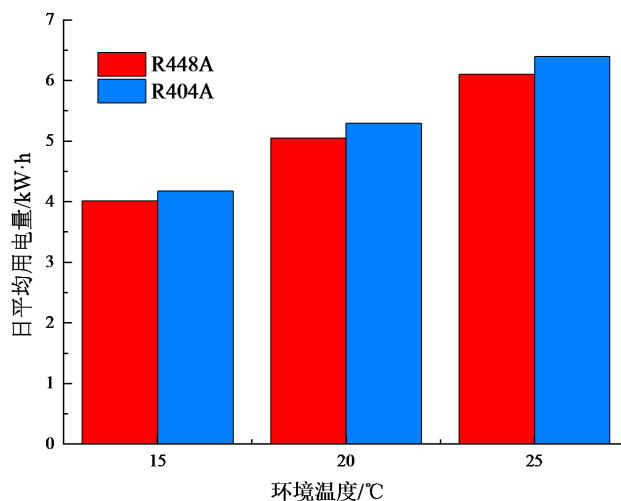


Figure 5. Diagram of average daily power consumption of R448A and R404A cycles
图 5. R448A 和 R404A 循环的日平均耗电电量图

3.2. 制冷剂对系统性能的影响

R404A 和 R448A 制冷系统的理论循环特性如图 6 所示, 各项性能参数如表 4 所示。根据表 4 数据计算可得, 当蒸发温度为 -25°C 时, R448A 和 R404A 系统的过冷度、单位质量制冷量、单位理论功和 COP 较 R404A 分别增大了 19.5%、28.8%、23.8% 和 4.04%, 如表 5 所示。表明 R448A 可显著降低系统能耗, 提升系统制冷效率。

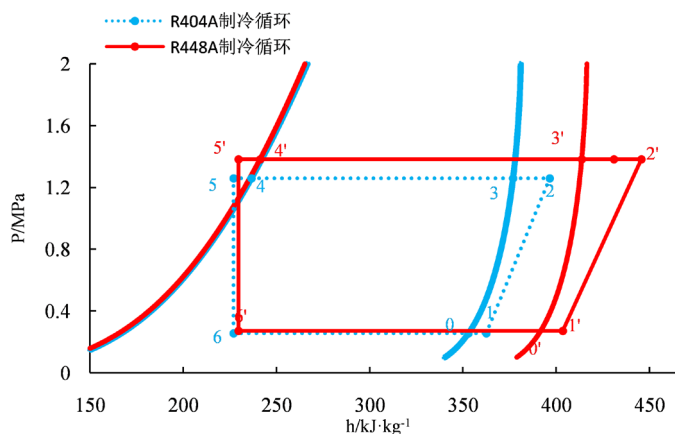


Figure 6. R448A system and R404A system pressure enthalpy diagram
图 6. R448A 系统和 R404A 系统压焓图

Table 4. Point pressure enthalpy value of R404A and R448A cycle parameters**表 4.** R404A 和 R448A 循环参数点压焓值

参数状态点	R404A		参数状态点	R448A	
	压力/MPa	焓值(kJ/kg)		压力/MPa	焓值(kJ/kg)
0	0.257	352.88	0'	0.273	403.48
1	0.257	362.49	1'	1.384	445.52
2	1.260	396.45	2'	1.384	430.9
3	1.260	376.75	3'	1.384	413.68
4	1.260	236.54	4'	1.384	241.27
5	1.260	226.93	5'	1.384	229.55
6	0.257	226.93	6'	0.273	229.55

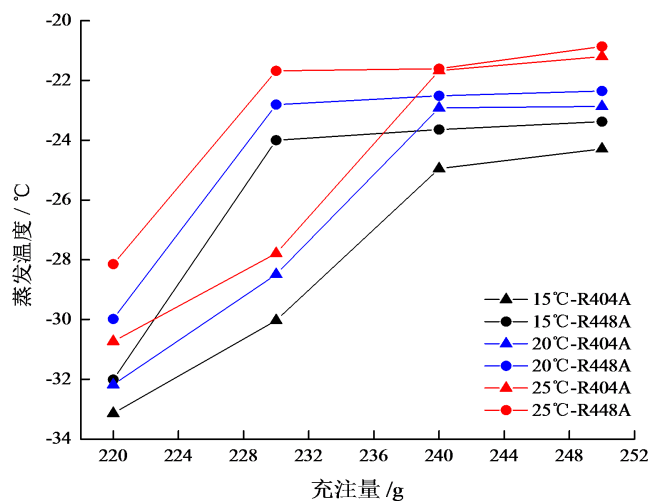
Table 5. R404A refrigeration cycle and R448A refrigeration cycle parameter table**表 5.** R404A 制冷循环和 R448A 制冷循环参数表

性能参数	R404A	R448A
过冷度/°C	6.35	7.59
单位质量制冷量/(kJ/kg)	125.95	162.21
单位理论功/(kJ/kg)	33.96	42.04
COP	3.71	3.86

4. 实验对比分析

4.1. 充注量对蒸发温度的影响

当环境温度为 15°C、20°C 和 25°C，制冷剂充注量对蒸发温度的影响如图 7 所示。由图 7 可知，蒸发温度随制冷剂充注量的增加而增大。环境温度为 25°C，制冷剂充注量从 220 g 增大到 250 g 时，R404A

**Figure 7.** The influence of refrigerant charge on evaporating temperature**图 7.** 制冷剂充注量对蒸发温度的影响变化

制冷系统的蒸发温度从 -30.73°C 升高到 -21.20°C ，而 R448A 制冷系统的蒸发温度从 -28.15°C 升高到 -20.87°C ；环境温度为 20°C 时，R404A 制冷系统的蒸发温度从 -32.18°C 升高到 -22.87°C ，而 R448A 制冷系统的蒸发温度从 -29.99°C 升高到 -20.36°C ；环境温度为 15°C 时，R404A 制冷系统的蒸发温度从 -33.14°C 升高到 -24.29°C ，而 R448A 制冷系统的蒸发温度从 -32.01°C 升高到 -23.38°C 。制冷剂从 220 g 到 230 g 时，R448A 的蒸发温度增幅较 R404A 相比较较大，是因为 R448A 单位容积制冷量比 R404A 的单位容积制冷量大。

随着充注量的增大，蒸发量增加，因而蒸发温度也随之升高。蒸发温度随着环境温度的上升而增大。这主要是因为当压缩机转速和实验工况不变的前提下，随着环境温度升高，冷凝压力增大，蒸发压力随之增大。

4.2. 充注量对制冷量的影响

当环境温度为 15°C 、 20°C 和 25°C ，制冷剂充注量对制冷量的影响如图 8 所示。当环境温度为 25°C ，制冷剂充注量从 220 g 增大到 250 g 时，R404A 制冷系统的制冷量从 591.33 W 升高到 914.40 W ，而后减小到 677.53 W ，而 R448A 制冷系统的制冷量从 765.48 W 升高到 1021.62 W ，然后减小到 962.94 W 。当充注量为 230 g 时，R404A 的制冷量最大，为 914.40 W ，当充注量为 240 g 时，R448A 的制冷量最大，为 1021.62 W 。

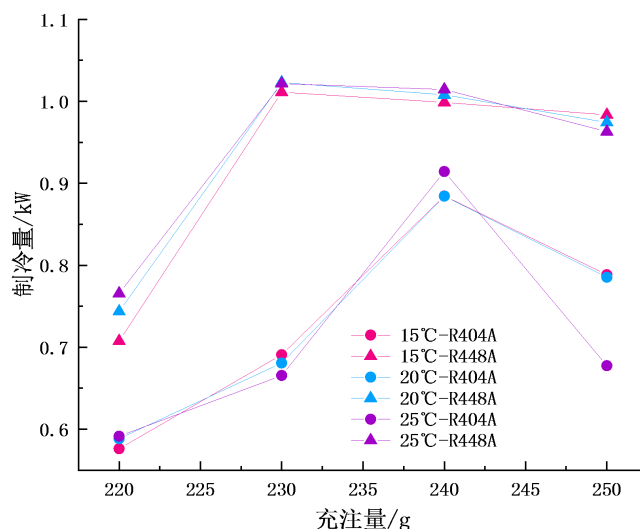


Figure 8. The change graph of the influence of refrigerant charge on refrigeration capacity
图 8. 制冷剂充注量对制冷量的影响变化图

由图 8 可知，制冷量随着充注量的增加呈现出先增大后减小的趋势，这是由于在制冷剂充注量不足时，系统内质量流量太小，导致换热量较小，制冷效率低，随着充注量的增加，系统的耗功不断增大，系统制冷剂流量、过冷度增加，使得蒸发器的有效换热面积增大，故制冷效率提高。但随着充注量的进一步增大，由于蒸发温度的升高使得传热温差变小，且过量的制冷剂积聚在冷凝器，减小了冷凝器的有效换热面积，抑制了制冷量的进一步增加，因此导致制冷量反而减小。

由图 8 还可看出当充注量从 220 g 增加到 230 g 时，R448A 的制冷量迅速上升，并达到最高值；而 R404A 的制冷量在 220 g 增加到 240 g 时，制冷量逐渐上升，且 R448A 上升的幅度大于 R404A 的幅度。因此达到相同的制冷效果，R448A 需要更少的制冷剂。

4.3. 充注量对 COP 的影响

当环境温度为 15℃、20℃和 25℃，制冷剂充注量对 COP 的影响如图 9 所示。由图可知，COP 随着充注量的增加呈现为先增大后减小的趋势。环境温度为 25℃，制冷剂充注量从 220 g 增大到 250 g 时，R404A 制冷系统的 COP 从 2.53 增大到 3.23，而后减小到 2.66，R448A 制冷系统的 COP 从 2.79 增大到 3.36，而后减小到 3.32。随着充注量的增加，R404A 制冷循环和 R448A 制冷循环的单位质量制冷量和单位理论功同时都增大，但在起始阶段，系统的单位质量制冷量增加的速度比单位理论功增加的速度快，所以 COP 呈上升趋势，当充注量达到最佳充注量，再进一步增加充注量，单位理论功的增加速度比单位质量制冷量增加速度快，故 COP 呈现下降趋势。

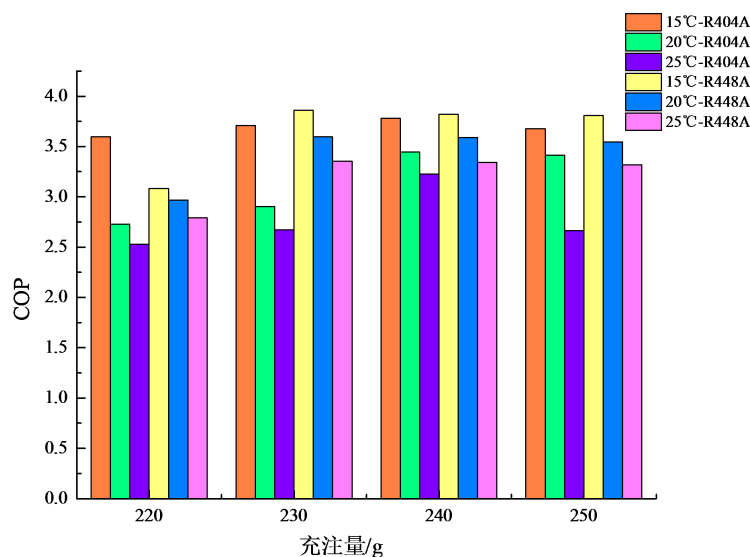


Figure 9. COP changes with filling volume
图 9. COP 随充注量变化图

由图 9 还可知，当充注量为 230 g 时，环境温度从 15℃上升到 25℃时，R448A 制冷循环 COP 降低了 12.86%，而 R404A 制冷循环 COP 降低了 29.34%。因此，在高低温试验箱的环境使用范围内，环境温度对 R448A 制冷循环的影响要小于 R404A 制冷循环，表明 R448A 系统的稳定性优于 R404A 系统，并且在高温工况下 R448A 系统具有更好的制冷效率，更加稳定。

5. 结论

本文搭建了高低温试验箱实验台，通过分析在不同充注量不同环境温度下对 R404A 和低 GWP 制冷剂 R448A 的制冷系统性能的影响，实验结果如下：

- 1) 当蒸发温度为-25℃，增加回热器，R404A 制冷系统的过冷度增加了 5.93℃，COP 提高了 25.19%。
- 2) 当蒸发温度为-25℃，与 R404A 相比，R448A 制冷系统过冷度增加 1.87℃，单位质量制冷量增加了 36.71 kJ/kg，COP 提高了 3.72%。
- 3) 制冷量、COP 都随着充注量的增加呈现为先增加后减小的趋势。在充注量为 240 g，环境温度 20℃时，R448A 制冷系统与 R404A 制冷系统的制冷量差值最大，值为 123.61 W。
- 4) 当环境温度从 15℃升至 25℃时，R448A 制冷循环的 COP 降幅平均为 11.96%，而 R404A 制冷循环的 COP 降幅平均为 25.84%，说明 R448A 制冷系统性能的稳定性优于 R404A 系统，并且在高温工况下

具有更好的制冷效率。

参考文献

- [1] 蔡良续, 龙德中, 宋小燕, 等. 温度环境试验及其标准综述(一)温度对装备的影响及温度试验的重要性[J]. 环境技术, 2014(4): 93-96.
- [2] 毛海莲. 高低温湿热试验室的自动控制系统[J]. 电机电器技术, 2002(5): 24-26.
- [3] Han, X. and Zhang, X. (2011) Experimental Study on a Residential Temperature-Humidity Separate Control Air-Conditioner. *Energy and Buildings*, **43**, 3584-3591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.029>
- [4] 任立乾, 黄志刚, 马海云. 低 GWP 制冷剂 R448A 和 R449A 在涡旋压缩机中的特性分析[J]. 制冷技术, 2019, 39(3): 42-45+61.
- [5] 李思远, 张桂玲, 王成城. 高低温试验箱能耗测试方法研究及能效探索[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2016(1): 35-38.
- [6] 承磊, 黄永华, 吴静怡, 等. 以液氮为冷源的氦气强制对流高低温箱实验研究[J]. 低温与超导, 2013, 41(12): 19-24.
- [7] 刘西强. 高低温试验箱集中监控系统的设计及实现[J]. 电子设计工程, 2017, 25(15): 122-125.
- [8] 刘西强, 刘锟龙, 赵向辉. 高低温试验箱远程控制系统的设计及实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(9): 28-32, 36.
- [9] 中国机械工业联合会. GB/T 10592-2008 高低温试验箱技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 吴业正, 李红旗, 张华, 等. 制冷压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.