

# 充注量对回热循环高低温试验箱性能影响研究

周利强<sup>1,2</sup>, 王子龙<sup>1,2\*</sup>, 郜文静<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

<sup>2</sup>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6月7日; 录用日期: 2021年7月20日; 发布日期: 2021年7月28日

## 摘要

制冷系统是高低温试验箱的关键部分, 其性能直接影响试验箱整体质量的高低。因此, 本课题的研究目标是通过在国标环境温度15℃、20℃和25℃下对不同充注量下高低温试验箱的性能影响变化进行实验研究, 分析R404A充注量对降温速率、压缩机排气温度、蒸发温度以及制冷系统的COP和制冷量的影响变化趋势。实验研究表明, 随着充注量的增加, R404A制冷系统的降温速率、COP和制冷量均表现为先增大后减小的趋势, 在充注量为240 g时系统的性能最佳, 当环境温度为15℃、20℃和25℃时, 降温速率分别为0.0794℃/s、0.0727℃/s和0.0638℃/s, 系统的COP分别为3.779、3.445和3.226。而随着充注量的增加, 压缩机排气温度变为先减小后增大的趋势, 当充注量为240 g时, 系统的排气温度最低, 值分别为44.70℃、50.24℃和58.14℃。

## 关键词

充注量, 高低温试验箱, 降温速率, 排气温度, COP, 制冷量

# Research on the Effect of Charge Amount on the Performance of Regenerative Cycle High and Low Temperature Test Chamber

Liqiang Zhou<sup>1,2</sup>, Zilong Wang<sup>1,2\*</sup>, Wenjing Gao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Power, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai

Email: \*wzl@usst.edu.cn

Received: Jun. 7<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 周利强, 王子龙, 郜文静. 充注量对回热循环高低温试验箱性能影响研究[J]. 建模与仿真, 2021, 10(3): 725-733. DOI: 10.12677/mos.2021.103073

## Abstract

The refrigeration system is a key part of the high and low temperature test box, and its performance directly affects the overall quality of the test box. Therefore, the research goal of this subject is to conduct experimental research on the changes in the performance of the high and low temperature test chamber under different charging amounts at the national standard environmental temperature of 15°C, 20°C and 25°C, and the article analyzes the influence of R404A charge on the cooling rate, compressor discharge temperature, evaporating temperature, and the changing trend of the COP and refrigeration capacity of the refrigeration system. Experimental research shows that with the increase of the charge, the cooling rate, COP and cooling capacity of the R404A refrigeration system all show a trend of first increasing and then decreasing. The performance of the system is the best when the charge is 240 g. When the temperature is 15°C, 20°C and 25°C, the cooling rate is 0.079°C/s, 0.0727°C/s and 0.0638°C/s, and the COP of the system is 3.779, 3.445 and 3.226, respectively. With the increase of the charge volume, the compressor discharge temperature becomes a trend that first decreases and then increases. When the charge volume is 240 g, the system discharge temperature is the lowest, with values of 44.70°C, 50.24°C and 58.14°C respectively.

## Keywords

Charge, High and Low Temperature Test Chamber, Cooling Rate, Exhaust Temperature, COP, Cooling 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

当前,节能环保和生态文明建设日益受到国家和社会的重视,各行各业纷纷响应党中央号召,逐步从过去的高耗能、高污染的粗犷发展方式转向节约、低碳、环保型社会发展方式。环境试验设备作为环境适应性的主要测试设备,是验证产品设计及质量的主要手段[1],其已经成为实验室、科研院所、生产企业的常规配置设备,具有适用面广、拥有量大、能耗高及工作时长等特点[2] [3]。

在众多的环境影响因素中,温度影响始终是所占比最大的一方面。高低温试验箱是指一种温度可调节的密闭箱体或空间,既能提供高温环境,又可提供低温环境,有的还可以做湿度实验,其目的是测试产品在高/低温下的可靠性。随着科学技术的发展,制冷技术的应用越来越广泛,颇为重要的应用之一就是环境试验设备。制冷系统是高低温试验箱中关键部分,其性能直接影响试验箱整体质量的高低[4]。

刘洋等人[5]为了研究系统效率,测量了在不同热侧冷却方式下系统的 COP。承磊等人[6]研制了充注氮气的高低温试验箱,开展了高低温箱的性能验证试验,包括设计温度的上限和下限,达到目标温度的升降温速率以及温场均匀等,来评估其工作性能。刘西强等人[7] [8]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。

综上所述,目前对于试验箱的研究主要集中在隔热层传热特性、制冷系统方式选择与设计、制冷量调节、系统控制等[9] [10] [11] [12] [13]方面,而在试验箱性能研究方面十分有限。本文探究了制冷剂 R404A 在不同充注量下对高低温试验箱降温速率的影响。此外,本文还对制冷系统的压缩机排气温度、制冷循环 COP 和制冷量进行了定量分析。本文根据高低温试验箱国标[14]选择了环境温度 15°C~25°C 进行测量分析。

## 2. 实验系统

高低温试验箱是一个边长为 300 mm 的不锈钢正方体，有效容积 27 L，试验箱制冷系统管路外层包裹有保温棉来减少散热导致的热损失。在试验箱中采用型号为 AE2420Z-GS1B 泰康压缩机。冷凝器采用风冷式翅片管式散热器。采用 Danfoss 干燥过滤器来去除制冷系统中的杂质和水分。实验采用 SS-9005TT-Z 杭州沈氏套管式换热器，内管径 10 mm，外管径 16 mm，长 120 mm。系统布置 10 根热电偶，其中两根在压缩机的进出口上测量进出口温度，其余的布置在各器件上，如图 1 所示。实验采用型号 NS-P-I-4B5-4MPaA250(015)压力变送器和 Agilent 34970 的数据记录仪，用以采集铂电阻的温度信号和压力变送器的电压信号，扫描时间间隔设定为 10 s。

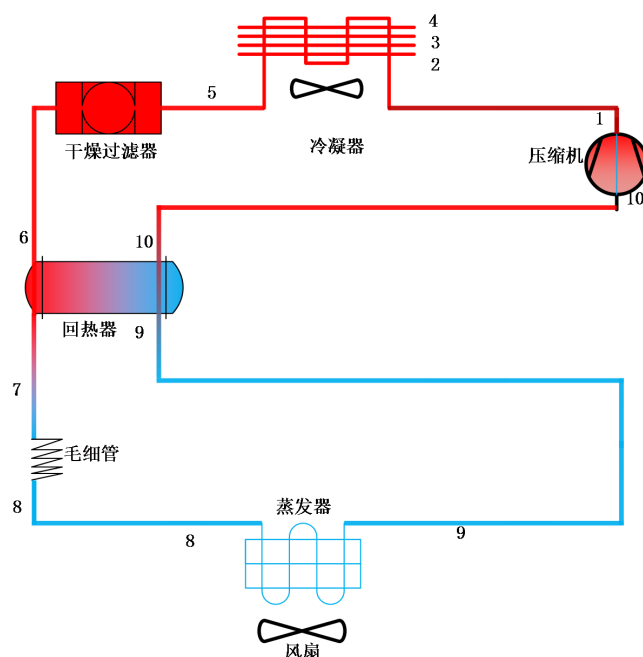


Figure 1. Schematic diagram of the experimental system

图 1. 实验系统原理图

实验中为了提高换热效率，采用了套管式回热器来增加系统的过冷度，所用到的套管式换热器如图 2 所示。低温制冷剂从管内流过，高温制冷剂在壳内从管外流过。

为了表示回热器的回热量，定义回热度[15] [16]

$$\Delta t = t_{without} - t \quad (1)$$

式中： $t$  是使用回热器后系统的节流机构前温度； $t_{without}$  是相同工况下不使用回热器时节流机构前温度。

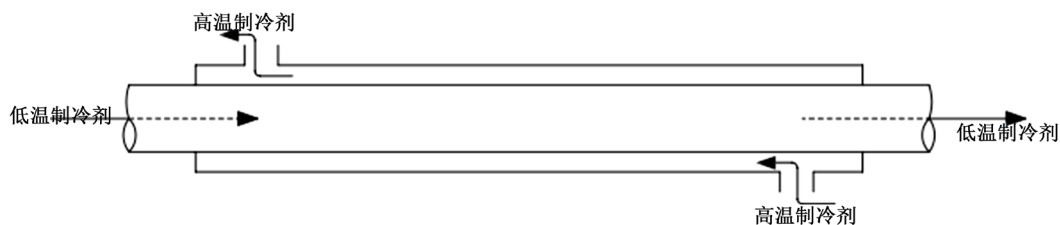


Figure 2. Structure diagram of double-pipe regenerator

图 2. 套管式回热器结构图

### 3. 回热制冷循环系统计算

液体过冷对提高循环性能指标有好处，但要实现液体过冷需要有温度更低的冷却介质，利用回热使节流前的制冷剂液体与压缩机吸入前的制冷剂蒸汽进行热交换，使液体过冷、蒸汽过热。实验中利用回热循环来实现较大过冷度，提高制冷循环的制冷系数。

#### 3.1. 回热器设计计算

回热器的传热面积[17]按公式(2)来计算，即

$$A = \frac{Q_{hr}}{K\Delta t_m} \quad (2)$$

式中， $Q_{hr}$  为回热交换器的热负荷(kW)； $\Delta t_m$  为对数平均温差(°C)； $K$  为回热式热交换器的传热系数，一般  $K = 100 \sim 250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

$$Q_{hr} = q_m (h_j - h_c) / 3600 \quad (3)$$

式中， $q_m$  为通过热交换器的气体流量(kg/h)； $h_j$  为进热交换器的制冷剂气体的比焓(kJ/kg)； $h_c$  为出热交换器的制冷剂液体的比焓(kJ/kg)。

$$\Delta t_m = \frac{(t_1 - t_2) - (t_2 - t_1')}{2.31g \frac{t_1 - t_2'}{t_2 - t_1'}} \quad (4)$$

式中， $t_1$  为进热交换器的制冷剂液体温度； $t_2$  为出热交换器的制冷剂液体温度； $t_1'$  为进热交换器的制冷剂气体温度； $t_2'$  为出热交换器的制冷剂气体温度。

#### 3.2. 回热循环性能指标计算[18]

回热循环流程是制冷剂液体在回热器中被低压蒸汽冷却，然后经节流机构进入蒸发器。从蒸发器流出的低压蒸汽进入回热器，在其中被加热后再进入压缩机压缩，压缩后的制冷剂气体进入冷凝器中冷凝。

如图3所示为回热循环 1-2-3-4-5-6-7-1 的 p-h 图，图中 1-2 为蒸汽过热过程，5-6 为液体的过冷过程。过热和过冷是在回热器内进行的。实验中不计回热器与外界环境之间的热交换，则液体过冷的热量等于使蒸汽过热的热量，其热平衡关系为

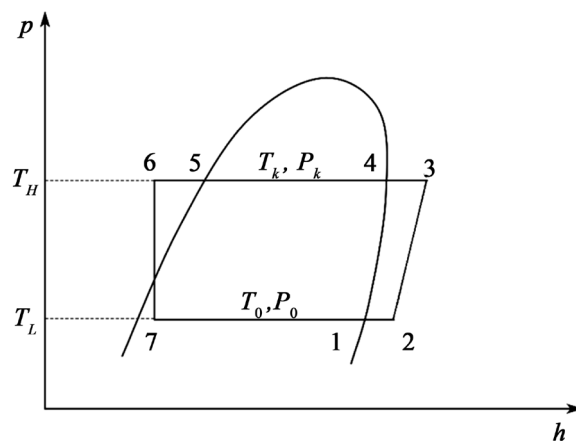


Figure 3. Representation of heat recovery cycle on p-h diagram

图3. 回热循环在 p-h 图上的表示

$$h_2 - h_1 = h_5 - h_6 \quad (5)$$

为了表示制冷系统循环的性能,采用了一些性能指标,这些均可通过循环各点的状态参数来确定。  
单位质量制冷量

$$q_0 = h_1 - h_6 = h_2 - h_5 \quad (6)$$

单位理论功

$$w = h_3 - h_2 \quad (7)$$

制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_0}{w} = \frac{h_1 - h_6}{h_3 - h_2} \quad (8)$$

## 4. 实验分析

### 4.1. 同一环境温度下不同充注量对降温速率的影响

为了分析出同一环境温度下,不同的充注量从 100℃ 降到 -20℃ 所消耗的时间,如图 4、图 5 所示。

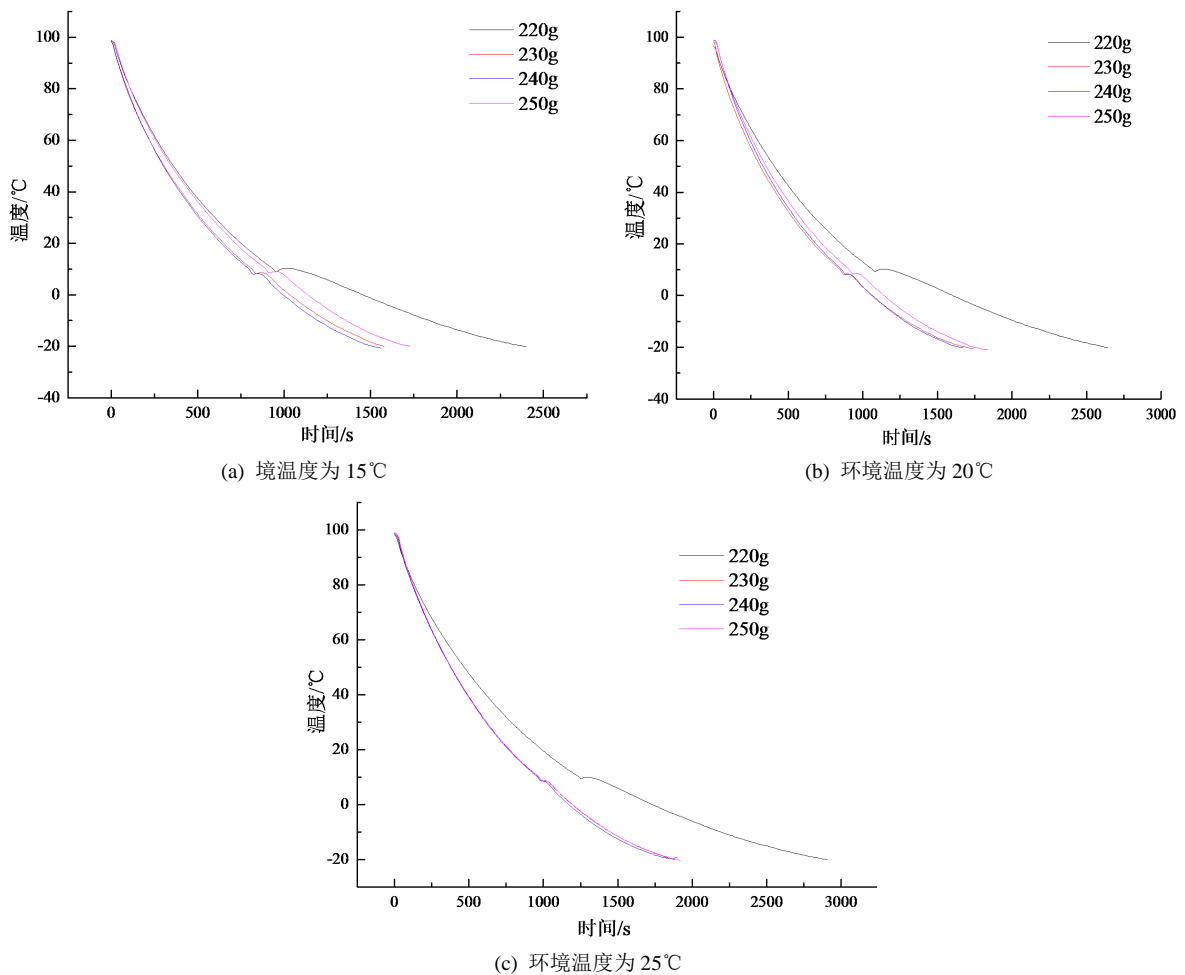
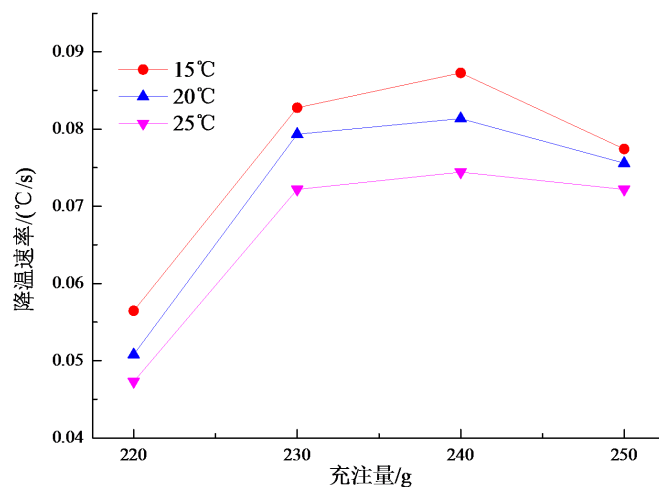


Figure 4. Diagram of cooling process

图 4. 降温过程图

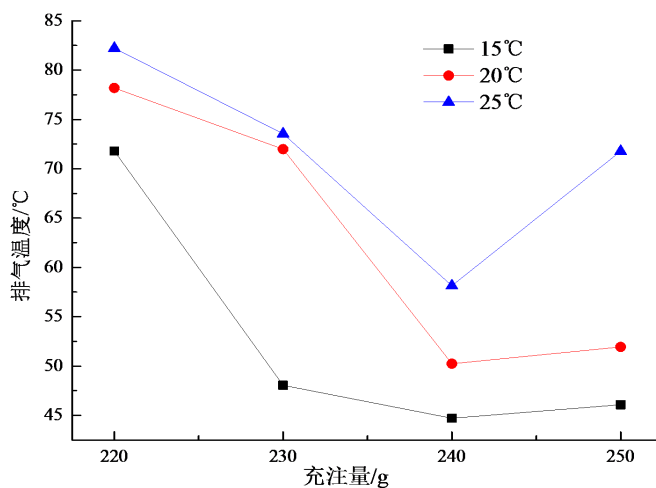


**Figure 5.** The change curve of the influence of the filling volume on the cooling rate  
**图 5.** 充注量对降温速率的影响变化曲线图

由图 4, 图 5 中可以看出, 当试验箱从 100°C 降温到 -20°C 过程中, 随着充注量的增加, 系统的降温时间先减少后加长, 即降温速率表现为先增大后减小的趋势。在 R404A 制冷系统的国标环境温度范围内, 当充注量为 240 g 时, 降温时间最短, 降温速率最快, 大约为 0.0873°C/s、0.0756°C/s 和 0.0722°C/s。当充注量为 220 g 时, 降温时间最长, 降温速率最慢, 大约为 0.0565°C/s、0.0508°C/s 和 0.0473°C/s。充注量过多对系统降温速率的影响小于充注量不足的影响。主要原因为当充注量较少时, 制冷剂的质量流量较小, 冷凝器中高温制冷剂与低温制冷剂换热不足, 则系统的降温时间较长; 而当充注量过多时, 多余的制冷剂积聚在冷凝器, 减小了冷凝器的有效换热面积, 并且平均换热温差减小, 换热量减小, 从而导致降温时间变长。

#### 4.2. 同一环境温度下充注量对压缩机排气温度的影响

为了进一步分析出不同充注量对排气温度的影响, 我们绘制了压缩机排气温度变化图, 如图 6 所示。



**Figure 6.** The change curve of the influence of the charge amount on the compressor discharge temperature  
**图 6.** 充注量对压缩机排气温度的影响变化曲线图

由图 6 可以看出, 随着制冷剂充注量的增加, 压缩机的排气温度表现为先降低后升高的趋势。制冷剂充注量从 220 g 增加到 250 g 时, 当环境温度为 15°C 时, 排气温度先从 71.80°C 降到 44.70°C, 然后升

高到 46.09℃；当环境温度为 20℃时，排气温度先从 78.20℃降到 50.24℃，然后升高到 51.94℃；当环境温度为 25℃时，排气温度先从 82.24℃降到 58.14℃，然后升高到 71.78℃。当制冷剂充注量为 240 g 时，系统的排气温度最低，值分别为 44.70℃、50.24℃和 58.14℃。

这是由于随着制冷剂充注量的增加，压缩机吸气过热度将逐渐减小，导致排气温度降低，此时系统运行比较稳定。而随着充注量的进一步增加，将导致蒸发压力提高，使得蒸发器中制冷剂的饱和温度上升，制冷量减少。这样即使过热度很小还是会使得压缩机吸气温度较高，从而导致排气温度上升。高温可能使压缩机润滑油失效，对系统的稳定运行带来不利的影响。而且制冷剂充注量过多会使压缩机吸气温度降低，使压缩机有液击的风险。

#### 4.3. 同一环境温度下充注量对蒸发温度的影响

当环境温度为 15℃、20℃和 25℃，制冷剂充注量对蒸发温度的影响如图 7 所示。

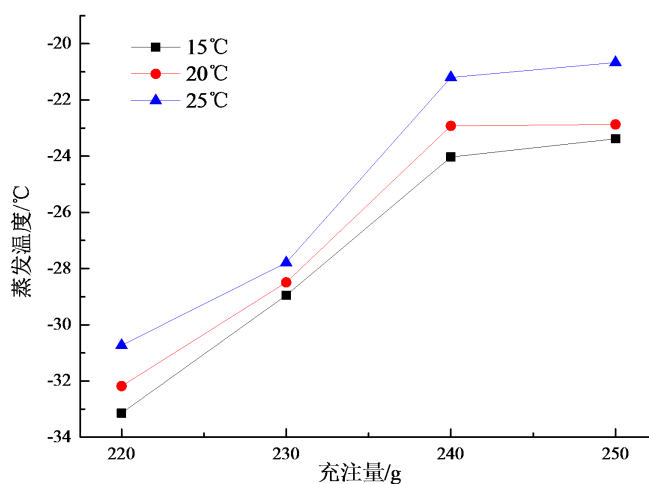


Figure 7. The change curve of the influence of the filling amount on the evaporation temperature  
图 7. 充注量对蒸发温度的影响变化曲线图

由图 7 可知，R404A 制冷系统的蒸发温度随制冷剂充注量的增加而增大。制冷剂充注量从 220 g 增大到 250 g 时，当环境温度为 15℃时，R404A 制冷系统的蒸发温度从-33.14℃升高到-23.38℃；当环境温度为 20℃时，R404A 制冷系统的蒸发温度从-32.18℃升高到-22.87℃；当环境温度为 25℃，R404A 制冷系统的蒸发温度从-30.73℃升高到-20.67℃。

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，即蒸发温度上升。

#### 4.4. 同一环境温度下充注量对 COP 和制冷量的影响

为了进一步分析出不同充注量对 R404A 制冷系统循环性能的影响，实验中我们使高低温试验箱在箱体-20℃稳定运行 1 h，在此基础上，我们分析了稳定运行时制冷系统的 COP 以及制冷量的变化趋势图，如图 8、图 9 所示。

由图 8、图 9 中可以明显看出，随着充注量的增加，制冷循环系统的 COP 以及制冷量均表现为先增加后减小的趋势。当充注量从 220 g 增加到 250 g 时，制冷循环的 COP 在充注量为 240 g 时达到最大值，值为 3.779、3.445 和 3.226，系统的制冷量在 240 g 时也达到最大值，值为 916.11 W、884.25 W 和 914.04 W。

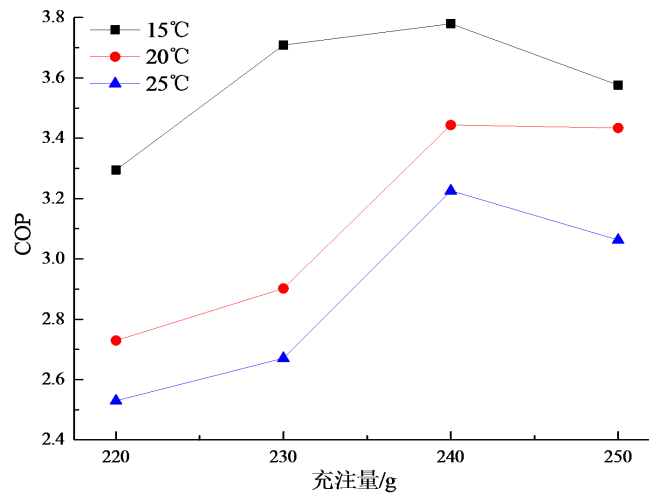


Figure 8. COP changes with filling volume

图 8. COP 随充注量变化图

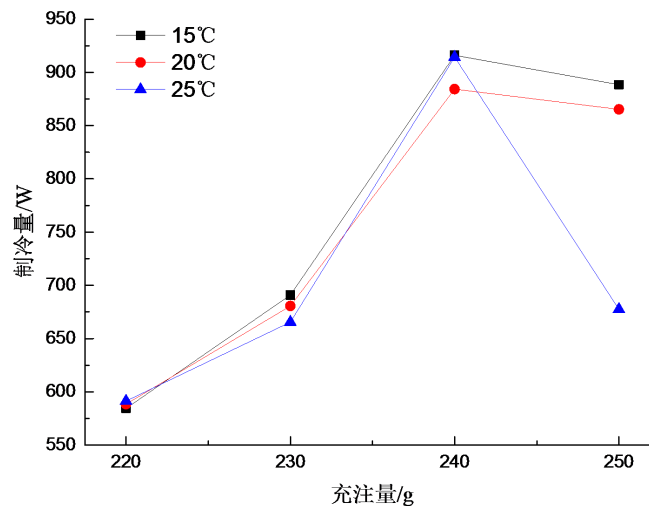


Figure 9. Change graph of cooling capacity with charge

图 9. 制冷量随充注量变化图

随着充注量的增加制冷量变化的原因主要是由于在制冷剂充注量不足时, 系统内质量流量太小, 导致换热量变小, 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。当传热温差与有效换热面积的变化量进行对比, 传热温差占主导地位时, 制冷量反而减小, 这就是系统的制冷量随着充注量的增加先增加后减小的原因。该制冷系统 COP 在充注量为 240 g 时取得最佳值, 制冷效率较好。

## 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 制冷系统回热循环性能的影响, 得出以下几个结论:

1) 随着充注量的增加, 降温速率表现为先增加后减小的趋势。综合考虑三种环境温度, 在 240 g 时降温速率最大, 在环境温度 15°C、20°C 和 25°C 下降温速率分别为 0.0794°C/s、0.0727°C/s 和 0.0638°C/s。



2) 通过分析充注量对排气温度的影响曲线图, 实验发现随着制冷剂充注量的增加, 压缩机的排气温度表现为先降低后升高的趋势, 当充注量为 240 g, 排气温度最低, 在环境温度 15℃、20℃和 25℃下的排气温度值分别为 44.70℃、50.24℃和 58.14℃。

3) 分析了充注量对蒸发温度的影响, 实验表明蒸发温度随充注量的增大而增大。

4) 分析了充注量对 COP 和制冷量的影响, 随着制冷剂 R404A 的充注量增大, 制冷系统的 COP 和制冷量均表现为先增大后减小的趋势。综合考虑三种环境温度, 在 240 g 时 COP 最优, 在环境温度 15℃、20℃和 25℃下 COP 值分别为 2.87、2.71 和 2.60, 得出为了使得制冷循环性能最佳, 制冷剂 R404A 的最佳充注量是 240 g。

## 参考文献

- [1] 何卉. 对环境试验技术及设备相关问题的探讨[J]. 建材与装饰旬刊, 2011(8): 16.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 邓海. 一种箱内尺寸可调节的高低温试验箱[P]. 中国专利, CN211246629U. 2020.
- [5] 刘洋. 顺流换热方式下多功能水源热泵的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [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, 刘锬龙, 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] 吴志勇. 环境试验箱变温工况的理论及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津商学院, 2006.
- [10] 吴志勇. 环境试验箱围护结构升温传热特性[J]. 家电科技: 制冷空调·维修, 2005(12): 24-28, 37.
- [11] 薄祥余. 环境试验箱制冷系统设计及其控制方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [12] 陈杰. 低温试验箱的制冷量调节[J]. 环境技术, 1996, 14(4): 19-21.
- [13] 高晓东, 胡芬, 唐力华. 高低温试验箱能效测试方法的探讨[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2015(5): 47-48.
- [14] 佚名. GB/T10590-2006 高低温/低气压试验箱技术条件[J]. 环境技术, 2007(5): 53-53.
- [15] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [16] 方健珉, 王静, 孙西峰, 等. 回热器对电动汽车跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷系统影响的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 155-160.
- [17] 申江. 制冷装置设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [18] 郑贤德. 制冷原理与装置[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.