

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.04.016

# CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环冷藏柜性能实验研究

刘业凤, 钟文轩, 孟德忍

(上海理工大学, 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:**针对目前商用冷藏柜所使用的 CFC 类制冷剂存在高臭氧衰减指数以及温室指数高的问题,为使冷藏柜更环保,课题组提出了使用 CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环取代传统氟利昂制冷剂单级压缩制冷循环的设想。课题组以某容积为 500 L 的冷藏柜为框架搭建一套实验系统,并根据可口可乐公司对商用冷藏柜的测试要求进行负载降温测试,并与其他课题组成果进行对比。结果表明采用 CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环系统的冷藏柜比采用单级压缩的同类型冷藏柜能效比提高,排气温度降低 34.6 °C。经测试,CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环冷藏柜性能满足可口可乐公司制定的标准,CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环在冷藏柜中应用是可行的。

**关键词:**制冷剂替代;冷藏柜;CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环;负载降温测试;能效比

中图分类号:TB657.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)04-0084-04

## Experimental Study on Performance of CO<sub>2</sub> Two-Stage Compression Refrigeration Cycle Refrigerator

LIU Yefeng, ZHONG Wenxuan, MENG Deren

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In view of the problems of high ODP and high GWP of CFC refrigerants used in commercial refrigerators at present, the idea of using CO<sub>2</sub> two-stage compression refrigeration cycle to replace traditional Freon refrigerant single-stage compression refrigeration cycle was put forward, so as to make refrigerators more environmentally friendly. The research group built an experimental system with a 500 L refrigerator as the frame, and tested the load cooling according to the Coca-Cola's test requirements for commercial refrigerators, and compared it with other research results. The results show that the CO<sub>2</sub> two-stage compression refrigeration system meets the test requirements. Compared with the same type of refrigerators with single-stage compression, energy efficiency ratio increases, and the exhaust temperature decreases 34.6 °C.

**Keywords:** refrigerant replacement; refrigerator; CO<sub>2</sub> two-stage compression refrigeration cycle; load cooling test; EER (energy efficiency ratio)

目前世界面临的主要环境问题大多由臭氧层的破坏以及全球暖化引起<sup>[1]</sup>。而在制冷空调热泵行业中广泛采用的 CFC 和 HCFC 类物质对臭氧层有破坏作用和产生温室效应,需要进一步发展替代物。

二氧化碳曾经作为重要的制冷剂在 20 世纪初被广泛使用,随后被 CFC 制冷剂取代。如今,环境问题严峻,CO<sub>2</sub> 作为环保制冷剂又重新受到重视。但其作为制冷剂应用于常规制冷系统时,高压侧压力容易超

过临界压力(7.38 MPa),可达 10 MPa,使得系统能效比不高。为此 Lorentzen 等<sup>[2-3]</sup>在 1994 年提出了 CO<sub>2</sub> 跨临界循环和实现循环高效的措施并成功搭建了以 CO<sub>2</sub> 为制冷剂的一套汽车空调系统,随后国内外学者就开始对 CO<sub>2</sub> 制冷循环进行大量的研究。Ge 等<sup>[4-5]</sup>对采用传统制冷剂的展示柜制冷系统的蒸发器进行了改进,使其更好地适用于跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷系统,同时研究了在食品零售中跨临界 CO<sub>2</sub> 制冷系统的优化控制。

收稿日期:2018-11-02;修回日期:2019-03-10

基金项目:上海市浦江人才计划资助(17PJ1407200)。

第一作者简介:刘业凤(1973),女,山东枣庄人,博士,教授,主要从事制冷空调新技术的研究。E-mail:yfliu209@163.com

Evans 等<sup>[6]</sup>对测试条件下采用跨临界 CO<sub>2</sub> 循环的商用展示柜的性能和能耗进行的实验测试和分析,发现展示柜形式的不同对其性能和能耗的影响很大。Sawalha<sup>[7]</sup>从理论上分析了跨临界 CO<sub>2</sub> 循环用于超市制冷系统的可行性和经济性。由于 CO<sub>2</sub> 无毒,泄露对食品无污染,所以目前被用作制冷剂以及载冷剂广泛地应用于食品的冷冻和冷藏<sup>[8]</sup>。

课题组采用 CO<sub>2</sub> 为制冷剂,设计搭建一个小型 CO<sub>2</sub> 双级压缩循环的冷藏柜,通过负载降温实验以及性能对比来探索 CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷循环应用于冷藏柜中的可行性。

## 1 CO<sub>2</sub> 双级压缩冷藏柜及其工作原理

实验以某品牌单玻璃门风冷冷藏柜为框架进行改造,冷藏柜容积为 500 L,出风口设置在冷藏室背部。设计工况为:蒸发温度 -5 ℃,环境温度 32 ℃。冷藏柜采用二氧化碳为制冷剂,采用转子式双级压缩机;蒸发器、气体冷却器和中冷器选择的是管翅式换热器,内部回热器采用的套管式换热器。由于 CO<sub>2</sub> 跨临界循环比常规制冷剂制冷循环压力要高,一般平衡压力 4~5 MPa,运行时达 10 MPa 以上,所以对所有部件都需要考虑耐压性和安全性。因此换热管采用紫铜管,选用毛细管作为节流机构。为了节省空间,将气冷器与中冷器集成在了一个换热器上。制冷系统做成一个整体安放在冷藏柜下部,如图 1 所示。

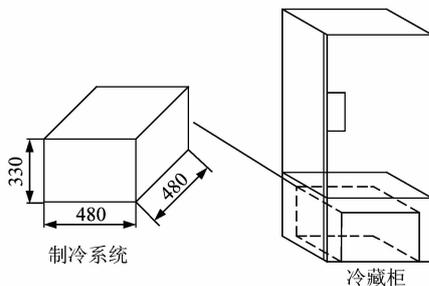


图 1 制冷系统尺寸以及其在冷藏柜中位置

Figure 1 Size of refrigeration system and its location in freezer

制冷系统工作原理如图 2 所示。制冷工质由蒸发器出口的状态点 1 经过回热器到达状态点 2,随后进入压缩机低压级被压缩到状态点 3;接着进入中间冷却器从状态点 3 降温到状态点 4,进入压缩机高压级进行第 2 次压缩;压缩完成的制冷剂气体通过气冷器降温至状态点 6,随后进入回热器作进一步降温。然后通过毛细管从状态点 7 节流到状态点 8 再进入蒸发器蒸发吸热完成循环。

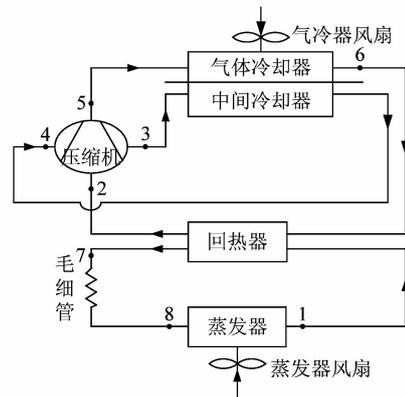


图 2 冷藏柜工作原理图

Figure 2 Working principle diagram of freezer

## 2 实验系统介绍

### 2.1 测试标准

可口可乐公司对用于冷藏柜的制冷机组有着严格的审核标准,即可口可乐冷藏柜设计标准<sup>[9]</sup>,以下简称标准,具体内容如表 1 所示。

机组的性能和运行的环境条件有很大关系,在一种工况条件下运行良好的机组,换个工况运行可能效果就比较差。标准中对用于冷藏柜的制冷机组的运行环境(即气冷器进风温度)进行了严格的规定,同时也对冷藏柜内负载初始条件(初始温度)状态进行了规定。文中设计判断机组是否满足标准要求的依据就是柜内负载温度能否在规定时间内降到所规定的温度。

表 1 测试条件及要求

Table 1 Testing conditions and requirements

| 实验工况    | 环境条件   |        | 初始温度/℃     | 降温要求   |        |
|---------|--------|--------|------------|--------|--------|
|         | 干球温度/℃ | 相对湿度/% |            | 降温时间/h | 负载温度/℃ |
| C(亚热带型) | 32.2   | 65     | 32.2 ± 1.1 | ≤19    | 0~7.2  |
| D(热带型)  | 40.6   | 75     | 40.6 ± 1.1 | ≤24    | 0~7.2  |

### 2.2 数据测量以及采集系统

实验研究分析系统的性能需要对机组和柜内负载的相关参数(温度、压力和时间等)进行测量和采集,通过分析采集到的数据得到冷藏柜用 CO<sub>2</sub> 两级压缩循环制冷机组的运行性能。合理地建立数据采集系统有助于提高测试结果的准确性。

机组内部测温点根据测试标准均匀分布在冷藏室内部区域以及各负载中。为方便数据采集和处理,实验中测温采用热电偶是康铜-镍镉(K型)热电偶。K型热电偶测量的范围是 -200~350 ℃,精度为 0.1 ℃,实验过程中各测点温度约为 -20~120 ℃,不会超过 K 型热电偶的使用范围。

本实验系统冷藏柜配有温度控制模块,用于控制柜内温度达到标准要求。课题组选用回风温度作为控制参数,当回风温度小于3℃时,机组停止运行;当回风温度大于7℃时,机组恢复运行,使柜内负载温度保持在规定的范围内。控制流程图如图3所示。

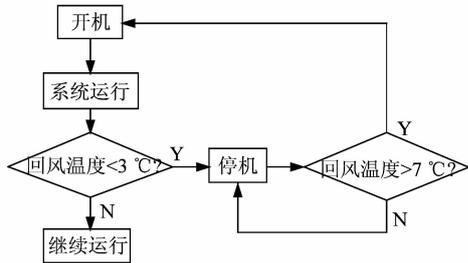


图3 控制流程图

Figure 3 Control flow chart

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 负载降温实验

通过实验数据的分析和处理,C工况下冷藏柜内负载温度随时间的变化曲线如图4所示。

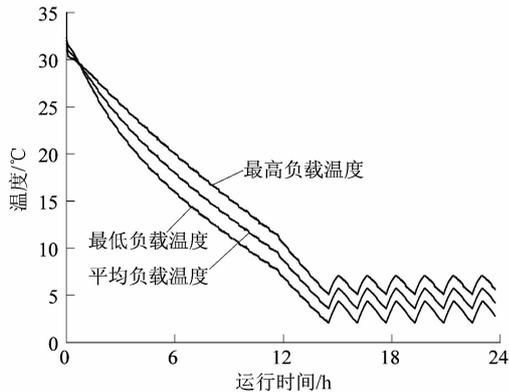


图4 工况C负载温度随时间变化曲线

Figure 4 Working condition C load temperature versus time curve

机组在开机运行13h后,柜内负载的平均温度已经达到7.2℃,满足可口可乐公司提出的不超过19h的标准。因此该机组在C工况下是符合测试要求的。机组继续运行到14.5h,回风温度达到温控器设定值,机组首次停机。此时最高的负载温度是4.7℃,最低负载温度2.1℃,平均负载温度3.6℃。

首次停机时的负载内最大温差为2.6℃,通过测点对比,发现靠近柜体后壁出风口的负载温度最低,而靠近柜门的负载温度最高。这是冷风与负载由后往前,自上而下发生热交换的结果。

D工况下柜内负载温度随时间的变化曲线如图5

所示。

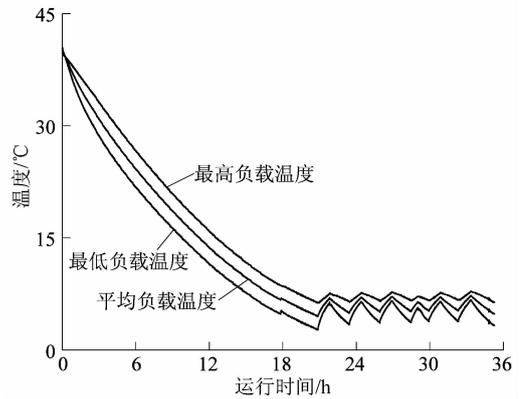


图5 工况D负载温度随时间变化曲线

Figure 5 Working condition D load temperature versus time curve

由图5可以看出,机组在开机运行19h后,柜内负载的平均温度已经达到7.2℃左右,满足可口可乐公司提出的不超过24h的标准。因此该机组在D工况下也是符合测试标准要求的。机组继续运行到20.5h左右时,回风温度达到温控器设定值,机组首次停机。此时最高的负载温度是5.6℃,最低负载温度2.7℃,平均负载温度4.5℃。

D工况下,负载最大温差为2.9℃。柜内负载温度分布类似C工况,靠近柜体后壁出风口的负载温度最低,而靠近柜门的负载温度最高。而且最高负载温度在后续间断性起停过程中的变化幅度明显弱于最低温度的变化幅度。

通过实验数据对比,该机组在C,D工况下均满足可口可乐公司对降温速度的要求,可用作后续比对。

#### 3.2 与其他机组的对比实验

有学者进行了CO<sub>2</sub>单级压缩循环(a机组)和R134a单级压缩循环(b机组)应用于冷藏柜的实验<sup>[10-11]</sup>。现将C工况a,b,c机组(c机组为本课题组研究的机组)对降温时间、排气温度、平均制冷量、平均功耗和能效比做简单对比分析,具体如表2所示。

表2 降温时间以及排气温度对比

Table 2 Comparison of cooling time and exhaust temperature

| 机组编号 | 降温时间/h | 排气温度/℃ |
|------|--------|--------|
| a    | 11.5   | 120.1  |
| b    | 16.0   | 86.2   |
| c    | 14.5   | 85.5   |

从表2可以看出,a机组的降温速度最快,11.5h即达到停机温度;c机组次之,用时14.5h;b机组降温

速度最慢,用时 16 h。但是 a 机组是 3 个对比机组里排气温度最高的,到达 120.1 °C,而 c 机组排气温度最低,为 85.5 °C。这是由于 c 机组中采用了双级压缩。同工况下,c 机组制冷剂在第 1 次压缩后经过中间冷却器,使温度降下来,再经过第 2 次压缩后的排气温度比只进行一次压缩的 a 机组要低。

从表 3 可看出,a 机组制冷量为 800 W,制冷量最大,c 机组次之。耗功方面,a 机组最高为 550 W,b 机组以及 c 机组差别不大。能效比方面,c 机组最高,a 机组次之,b 机组最低。综合来看,虽然 a 机组制冷量最高,但是 c 机组能效比以及耗功方面优于 a 机组,而且排气温度仅为 85.5 °C,整体来说 c 机组性能比较好。

表 3 机组性能对比

Table 3 Unit performance comparison

| 机组编号 | 制冷量/W | 耗功/W | 能效比  |
|------|-------|------|------|
| a    | 800   | 550  | 1.45 |
| b    | 300   | 400  | 0.75 |
| c    | 650   | 420  | 1.55 |

#### 4 结论

经过实验研究,可得出以下结论:

1) 当冷藏柜采用这套二氧化碳双级压缩循环制冷系统后,C 工况下降温时间为 13 h,满足标准规定的 C 工况下的降温时间小于等于 19 h;柜内负载最高温度为 4.7 °C,最低温度 2.1 °C,平均负载温度 3.6 °C,达到标准要求的负载温度。D 工况下,降温时间为 19 h,满足标准规定的 C 工况下的降温时间小于等于 24 h。柜内负载最高温度为 5.6 °C,最低温度为 2.7 °C,负载平均温度 4.5 °C,达到标准要求的负载温度范围。

2) c 机组的排气温度只有 85.5 °C,与排气温度最高的 a 机组相差了 34.6 °C。对于使用同种工质的制冷系统,排气温度越低,对压缩机影响越小,耗功越小,系统整体寿命越长。机组性能对比显示,采用二氧

化碳双级压缩系统的 c 机组耗功为 420 W,与耗功最小的 b 机组的耗功 400 W 接近,制冷量虽小于 a 机组,但 c 机组的能效比最高。整体性能上 c 机组在 3 个机组当中最好。

#### 参考文献:

- [1] 王如竹. 制冷技术与全球环境问题[J]. 系统工程理论方法应用,1997(1):10-14.
- [2] PETERSEN J, LORENTZEN G. A new efficient and environmentally benign system for automobile air conditioning[J]. SAE Transactions, 1993, 102(5):135-145.
- [3] PETERSEN J. Efficient new automobile air-conditioning system based on CO<sub>2</sub> vapor compression[J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(2):657-658.
- [4] GE Yunting, TASSOU S A. The impact of geometric structure and flow arrangement on the performance of CO<sub>2</sub> evaporators in multi-deck medium temperature display cabinets[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 35(1):142-149.
- [5] GE Yunting, TASSOU S A. Control optimisation of CO<sub>2</sub> cycles for medium temperature retail food refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6):1376-1388.
- [6] EVANS J A, SCARCELLI S, SWAIN M V L. Temperature and energy performance of refrigerated retail display and commercial catering cabinets under test conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 30(3):398-408.
- [7] SAWALHA S. Theoretical evaluation of trans-critical CO<sub>2</sub> systems in supermarket refrigeration part I: modeling, simulation and optimization of two system solutions [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(3):516-524.
- [8] 于志强. CO<sub>2</sub>在冷冻冷藏业的应用[C]//2013年中国制冷空调工程节能减排新技术研讨会论文集. 烟台:烟台冰轮股份有限公司, 2013:2-9.
- [9] 可口可乐公司. 冷藏柜/GDM 全球性能要求[R]. 上海:可口可乐公司, 2009:100-101.
- [10] 王栋, 刘训海, 李蒙. 应用于展示柜的 CO<sub>2</sub>蒸气压缩式制冷系统循环的分析[J]. 制冷与空调, 2010, 10(4):85-87.
- [11] 张华俊, 陈浩, 冯倩莹, 等. 陈列柜制冷系统中使用 R134a 的探讨[J]. 制冷与空调, 1999(2):57-60.