

自复叠制冷系统的特性研究

朱珠^{1,2} 李奇贺^{1,2} 赵孝保^{1,2}

(¹南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京, 210042)

(²南京师范大学能源动力工程省重点实验室, 江苏 南京, 210096)

摘要:本文对自动复叠式制冷系统的循环特性进行了实验研究,以二级自动复叠的制冷系统为研究对象,采用非共沸混合制冷剂,利用混合制冷剂的沸点温度差异,获得比单一制冷剂更低的蒸发温度,实验对蒸发器温度、压缩机进出口压力、压缩机进出口温度和制冷量进行测量。通过理论对实验参数进行分析得出制冷机组的最佳工况。

关键词:混合制冷剂; 自动复叠制冷循环; 单级压缩; COP

Experimental research on two stage auto cascade refrigeration system

zhuzhu^{1,2}Li Qihe^{1,2}Zhao Xiaobao^{1,2}

(¹ School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

²Provincial Key Laboratory of energy and power engineering, Nanjing Normal University, Jiangsu, Nanjing, 210096)

Abstract: In this paper, the cycle characteristics of an automatic cascade refrigeration system are studied. The refrigeration system with two stages of automatic cascade refrigeration is taken as the research object. Using the non azeotropic refrigerant and using the difference of the boiling point temperature of the mixed refrigerant, the evaporation temperature is lower than that of the single refrigerant. The experiment on the evaporator temperature and the compressor inlet and outlet is carried out. The mouth pressure, compressor inlet and outlet temperature and refrigerating capacity were measured. Through theoretical analysis of the experimental parameters, the best working condition of the refrigeration unit is obtained.

Keywords: mixed refrigerant; auto cascade refrigeration cycle; cooling; cop

0 前言

自动复叠制冷循环与传统的制冷循环相比,其结构简单,可靠性高,操作简单,经济节能,特别是多级自动复叠制冷循环在低温领域应用越来越受到重视。因此越来越多的人集中研究自动复叠式制冷循环系统。Sivakumar和Somasundaram对使用非共沸混合制冷剂R290/R23/R14和R270/R170/R14的自动复叠式制冷系统进行了不同混合工质配比下的实验研究,通过对系统的能量和焓进行分析研究,得到了混合工质R290/R23/R14占质量比为0.218:0.346:0.436时,为该三级自动复叠式制冷系统的最佳工况,此时系统的COP为0.253^[1]。我国浙江大学的陈光明等人提出了单级压缩,一次精馏多元混合工质自动复叠循环,采用混合制冷剂R1150/R13/R12,在高压为1.5MPa、低压0.12MPa的运行工况下,制取了-73℃的低温,制冷量为35.8W,系统的COP为0.14^[2]。上海理工大学搭建了一套三级自动复叠式制冷系统的实验台,采用非共沸混合制冷剂R134a/R23/R14,对实验装置和混合工质配比进行了优化,制取了-100℃的低温,COP值为0.056^[3]。

本文以二级自动复叠式制冷系统为研究对象,分析其压力和温度变化特性,通过计算得出制冷机组的最佳运行工况。

1 实验方法

图 1 为二级自动复叠式制冷循环系统的示意图，本系统采用的混合制冷剂为 R14/R23/R227，表 1 为三种工质的主要物性参数，混合制冷剂的初始混合质量比 30/30/40。本实验装置采用分凝分离器^[4]，利用高压流体内部传热传质分离方式和低压返流提供分离驱动力，分离方式只依靠重力无须外来机械部件和特殊流道设计。

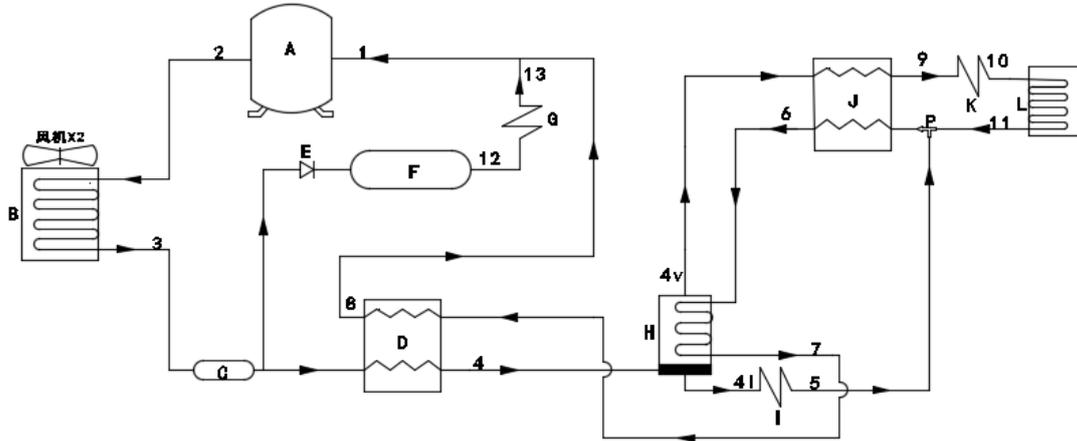


图 1 两级自动复叠制冷循环系统图

A:压缩机；B:冷凝器；C:干燥过滤器；D:一级回热换热器；E:限压阀；F:缓冲罐；

G、I、K:毛细管；H:分凝分离器；J:二级回热换热器；L:蒸发器；P:汇合点；1-13:测点

二级自动复叠制冷系统工作流程：混合工质经压缩机 A 压缩后，进入冷凝器 B，在冷凝器 B 中进行变温冷凝，其中高温工质冷凝为液体，而中、低温工质任然保持为气态。从冷凝器出来的气液混合物进入一级回热换热器 D，进入分凝分离器 H，在重力作用下气体和液体实现分离，低温高压工质的液体经分凝分离器底部送至毛细管 I，低温高压气体经过二级回热换热器 J 进行冷却送至毛细管 K，然后气体进入蒸发器 J 变成高温低压气体和从毛细管 I 出来的低温低压液体在 P 点处混合进入二级回热换热器 J 变成低温低压液体进入分凝分离器 H，在分凝分离器 H 中上升气流和下降液体之间进行热传递，而且分离的液体中高沸点组元含量高且分离后气体会被冷却到更低温度。从分凝分离器 H 中出来的高温低压液体进入一级回热换热器 D 变成低温低压液体进入压缩机 A,完成整个循环。

图 2 为二级自动复叠式制冷系统的压焓图，在 3 点处表示混合制冷剂从冷凝器出来后气液平衡，4 点表示混合制冷剂进入气液分离器实现气液分离，4v 表示富含 R23 的气体。4l 表示富含 R227 的液体，4v-9-10-11 表示富含 R23 的制冷剂在蒸发器里面的过程，4l-5-6 表示富含 R227 的制冷剂在二级换热器里面的过程，点 4、5、9、10 表示的节流的过程，点 1 和 2 表示压缩机进出口。

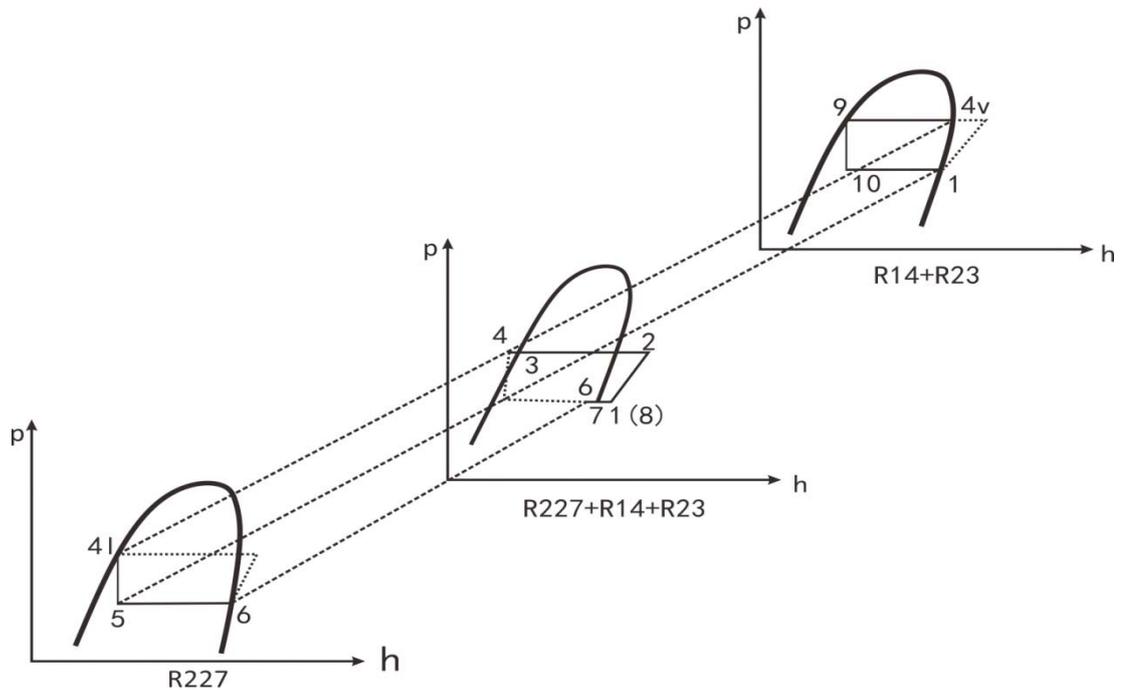


图2 二级自动复叠式制冷循环的压焓图

工质 R227 在循环里面的温度超过其临界温度，全部以气态形式存在，这会导致管内平衡压力偏高，所以设置限压阀和缓冲罐，目的是降低制冷机停机后的平衡压力和压缩机启动时的排气压力。

对于复叠制冷循环，R23 适用的蒸发温度范围是 $-70\sim-110^{\circ}\text{C}$ ，R14 适用的蒸发温度范围是 $-110\sim-140^{\circ}\text{C}$ 。考虑本文选择蒸发温度是 -80°C ，冷凝温度为 30°C ，选用的三种工质^[5]：R23、R14、R227，其主要热物性质如表 1 所示。三种工质都不会对臭氧层有破坏作用。

表 1 三种工质的主要热物性参数

工质	分子式	分子量	ODP	GWP	标准沸点/ $^{\circ}\text{C}$	凝固温度/ $^{\circ}\text{C}$	临界温度/ $^{\circ}\text{C}$	临界压力 /MPa
R23	CHF_3	70.01	0	14800	-82.1	-160.0	25.9	4.68
R14	CF_4	88.01	0	-	-127.9	-184.0	-45.5	3.75
R227	CF_3CHF_3	170.03	0	-	-15.6	-	102.8	2.98

2 理论分析与实验研究

2.1 循环系统的理论性能分析

基于热力学的第一定律对二级自动复叠式制冷循环系统的性能进行理论评价，作出如下假设^{[6]-[9]}：

- (1) 系统中所有的部件均假设为稳定和循环过程假设为稳定过程；
- (2) 压缩机的过程都是不可逆；
- (3) 毛细管内的节流过程为等焓过程；
- (4) 分凝分离器的蒸汽和液体都是饱和的；

- (5) 蒸发器出口的蒸汽和冷凝器出口的液体都是饱和的；
- (6) 制冷剂的压降和循环过程中的热损失忽略不计。

本文研究主要基于以下参数：制冷量和性能系统，基于上述假设，从质量和能量守恒的角度，根据图2可以得到下列主要成分的方程。

$$(a) \text{ 压缩机做功: } W_c = m(h_2 - h_1) \quad m = m_1 + m_2 + m_3$$

$$(b) \text{ 冷凝器排热量: } Q_1 = m(h_2 - h_3) + (m_2 + m_3)(h_{4v} - h_9) \quad m = m_1 + m_2 + m_3$$

$$(c) \text{ 蒸发器吸热量: } Q_2 = m_1(h_6 - h_5) + (m_2 + m_3)(h_{11} - h_{10})$$

$$(d) \text{ 毛细管节流: } h_{14} = h_5 \quad h_9 = h_{10}$$

$$(e) \text{ 忽略换热器中能量的损失, 能量的平衡: } h_3 - h_4 = h_7 - h_8 \quad h_{4v} - h_9 = h_{11} - h_{10}$$

$$\text{循环系统性能: } COP = \frac{W_c}{Q_2}$$

2.2 制冷机组降温特性

本文所研究的自动复叠式制冷机组要求：冷凝温度为 30℃。通过功率表测得冷凝机组的输入功率为 3560 W，制冷量为 151 W，运行性能系数 COP 为 0.042。系统运行进入稳定阶段后，高压稳定在 1.65MPa 左右，低压稳定在 0.35 MPa，压缩机压比 5。

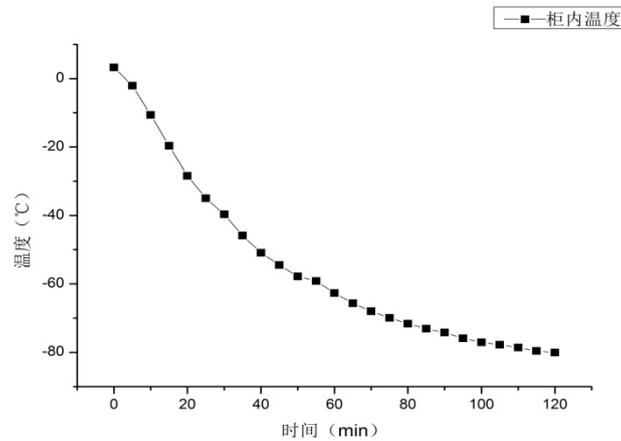


图3 制冷机组降温曲线图

图3为在30℃的环境温度下，制冷机组的降温过程，由图3可知降温过程不是匀速的，根据降温特点把降温过程分为4个阶段：延迟段、快速段、慢速段、稳定调整阶段。实验测试系统运行2个小时后，制冷机组温度下降-80℃，并稳定在-80℃。机组温度前20分钟下降比较缓慢，刚开始运行时压缩机时混合工质中R227最先被分离出来，在系统循环的实际操作过程中，混合制冷剂浓度与实际浓度是有差异的^[10]。从图3可以看出R227的含量比较低，所以开始的温度下降较缓慢。

2.3 吸排气压力和温度特性

循环系统中安装缓冲罐之后，压缩机可以顺利启动运行，排气高压峰值在2.2 MPa以内。图3反映了压缩机从启动到运行的整个过程中吸排气压力的变化情况，由于膨胀容器中混合

气体源源不断地充注到系统中给系统压力带来影响，运行期间系统高压仍有0.1MPa幅度的波动。系统运行进入稳定阶段后，高压稳定在1.65MPa左右，低压稳定在0.35 MPa，压缩机压比为5。

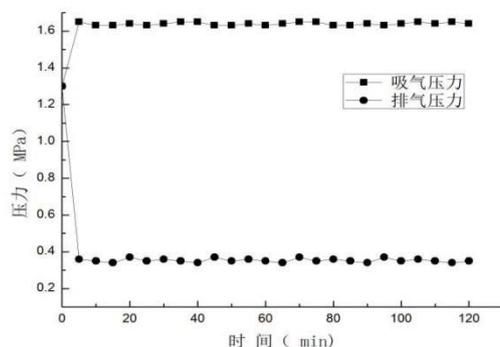


图4 压缩机的吸排气压力

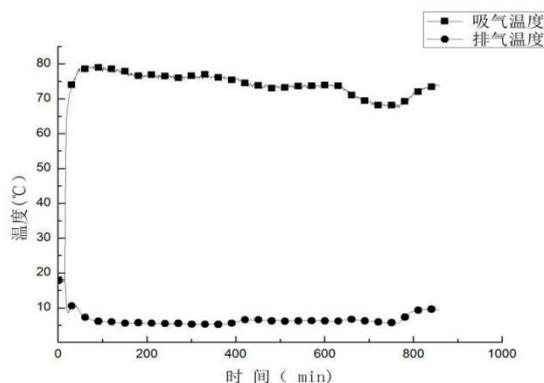


图5 压缩机的吸排气温度

图5为压缩机的吸排气温度变化情况，吸排气温度在开机后变化幅度均较大，运行60min后才开始进入稳定阶段。系统开机时参与循环的工质量较少，排气温度并不太高，吸气温度下降也较少。随着膨胀容器中工质的不断充入。流经压缩机的工质流量持续增大，排气温度很快上升到约80℃；随着工质流量的增加，吸气温度开始降低，运行约2h后，吸气温度降至5℃。系统平衡后，吸气温度稳定在5℃附近，排气温度稳定在78℃附近，压缩机的排气温度相对较高。造成排气温度过高的因素主要有两个：一是压缩机压比较大；另一是R227/R23/R14工质在常温下的绝热压缩指数较大。

2.4 制冷机组最佳性能

二级自动复叠式制冷系统采用R227/R23/R14混合制冷剂，分在不同的混合制冷剂的配比的下，通过计算得出相应的性能系数COP和制冷量。

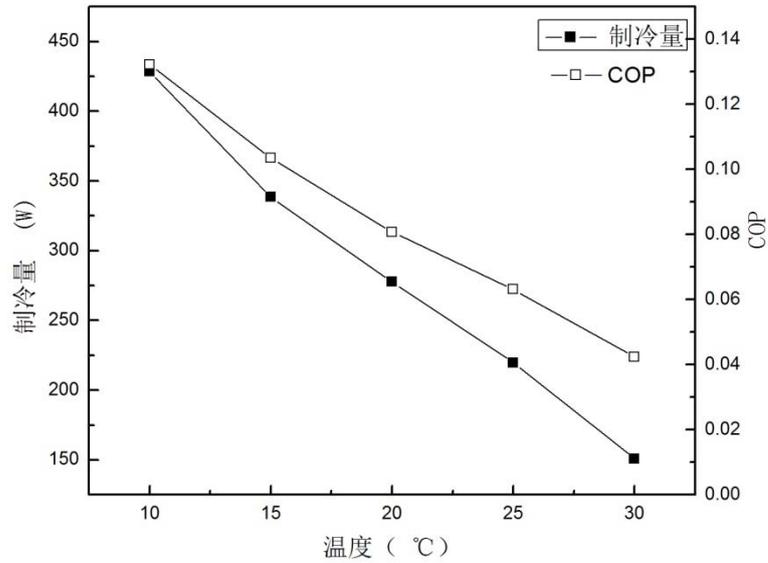


图7 不同温度下的机组性能曲线图

由图7可知，制冷量随着环境温度的降低而降低，系统循环最佳性能为环境温度10℃，制冷量为428W,COP为0.132，机组温度下降至-80℃并且运行稳定可靠。通过计算得出R214/R23/R227的质量比为：30/55/15。

4 结论

自动复叠制冷循环通过单级压缩、多级分凝产生低温环境，结构简单，运行安全，造价低，自动复叠式制冷系统成为低温节流制冷机的一个重要发展方向。通过理论和实验研究，可以得到以下结论:本文研制的三元非共沸混合工质 R14/R23/R227 自动复叠低温设备，在环境温度为10℃和混合工质 R14/R23/R227 质量比:30/55/15时，为制冷机组最佳运行工况，制冷系数COP为0.132，此时制冷机组的温度可降至并稳定在-80℃并且运行稳定可靠。

参考文献

- [1] M.Sivakumar,P.Somasundaram.Exergy and energy analysis of three stage suto refrigerating cascade system using Zeotropic mixture for sustainable development [J].Energy Conversion and Mangement 84,2014,589-596
- [2] 张绍志,王剑锋,张红线等.具有精馏装置的自动复叠制冷循环分析.工程热物理学报.2001,22(1);25-27.
- [3] 张华等,一种三级自动复叠制冷系统的实验研究,低温于超导,2005,33(4):24-26.
- [4] 吴业正.制冷原理及设备[M].西安交通大学出版社, 2015.
- [5]马一太, 高志明, 陈东等.多元混合工质筛选及配比原则的研究[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(1) : 17 -20.
- [6]Gong Maoqiong,Wu Jianfeng,Luo Ercang.Study of the single-stage mixed-gases refrigeration cycle for cooling temperature-distributed heat loads [J].International Journal of Termal Sciences,2004,43:31-41.
- [7] 牛宝联,张于峰.CO₂/R290 应用于复叠制冷低温环路浓度配比实验研究[J].制冷学报,2010,31(01):35-38.
- [9] 郑大字, 刘卫党, 颜涛等.-80℃环保型低温设备的设计 [J] .哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2011, 27(5) : 725—728.
- [10] Dale J Missimer, Refrigerant conversion of auto-refrigerating cascade (ARC)systems, Int. J. Refrig. 20 (3) (1997) 201–207.