

文章编号: 0253-4339(2012)06-0063-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.06.063

# 非共沸混合工质单级压缩回热循环实验研究

芮胜军<sup>1,2</sup> 张华<sup>1</sup> 吴裕庆<sup>1</sup>

(1 上海理工大学制冷技术研究所 上海 200093; 河南科技大学车辆与动力工程学院 洛阳 471003)

**摘要** 针对非共沸混合制冷工质单级压缩回热制冷循环, 分析了LHR循环的特点及主要研究问题。根据非共沸混合制冷工质的特性, 讨论并选取了适合于 $-70^{\circ}\text{C}$ 低温冷柜的混合制冷工质R23和R600a。利用制冷工质物性分析软件NIST Refprop 8.0初步研究了不同配比时制冷系统的特性, 然后通过实验方法从不同角度分析混合制冷工质的配比对系统性能的影响, 最终得到比较合理的混合制冷工质R23/R600a组分比例3:7。同时分析了该配比下制冷压缩机排气温度、压比、低温冷柜内温度等的变化特点, 最后对蒸发器的温度变化特性和回热器的温度变化特性进行了总结。

**关键词** 工程热物理; 混合工质; 单级压缩; 回热循环; 实验研究

**中图分类号**: TB61<sup>1</sup>; TB61<sup>2</sup>

**文献标识码**: A

## Experimental Study of Single-stage Compression Heat Regenerative Cycle of Zeotropic Refrigerant Mixtures

Rui Shengjun<sup>1,2</sup> Zhang Hua<sup>1</sup> Wu Yuqing<sup>1</sup>

(1. Institute of Refrigeration Technology, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Vehicle & Motive Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471003, China)

**Abstract** The single-stage compression heat regenerative cycle of zeotropic refrigerant mixtures was studied. The Linde-Hampson refrigeration cycle characteristics and the main problems were analyzed. The refrigerant mixture R23 and R600a was discussed and selected suitable for  $-70^{\circ}\text{C}$  low temperature refrigerator according to the zeotropic mixture refrigerant properties. The refrigeration system characteristics of different ratio were discussed using refrigerant property analysis software NIST Refprop 8.0. It was compared with the performance of the system through experimental methods under different ratio of refrigerant mixture from different aspects. Finally the reasonable refrigerant mixture R23 / R600a component ratio 3:7 was obtained. The proportion of refrigeration compressor discharge temperature, pressure ratio, and low temperature refrigerator temperature change characteristics was analyzed. And the evaporator and the heat regenerator temperature change characteristics were discussed.

**Keywords** Engineering thermophysics; Mixed refrigerant; Single-stage compression; Regenerative cycle; Experimental study

普通单级压缩回热循环采用单一纯制冷工质, 由于压缩机压比和制冷工质热物理特性的限制, 其制冷温度最低只能达到 $-40^{\circ}\text{C}$ 。而 $-40\sim-60^{\circ}\text{C}$ 则需采用双级压缩制冷循环系统,  $-60^{\circ}\text{C}$ 以下采用复叠制冷系统<sup>[1-3]</sup>。自动复叠制冷循环系统是采用单台压缩机和混合制冷工质的单级压缩制冷循环, 广泛应用于小型低温制冷领域<sup>[4-5]</sup>。

这里的实验对象为小型低温冷柜, 柜内温度要求 $-70^{\circ}\text{C}$ 左右。通过测试压缩机各项运行指标, 以使压缩机运行性能稳定, 压缩机使用寿命得以保证。通过测试蒸发盘管各段温度, 从中得出混合制冷工质在蒸发器内的温度分布情况, 并测试混合制冷工质在回热器中的温度变化规律, 对逆流套管式

回热器进行分析。

研究的小型低温冷柜实验装置制冷量为12W, 主要研究中温区单级压缩回热循环系统, 在环境温度不高于 $25^{\circ}\text{C}$ 的工况下, 蒸发温度达到 $-78^{\circ}\text{C}$ , 排气温度低于 $100^{\circ}\text{C}$ 。冷柜在冬季运行, 环境温度 $12^{\circ}\text{C}$ , 冷却水进口温度 $9^{\circ}\text{C}$ , 出口温度 $11^{\circ}\text{C}$ , 冷凝温度 $15^{\circ}\text{C}$ 。

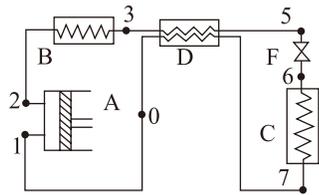
### 1 混合工质单级压缩回热循环

非共沸混合工质单级压缩回热循环通常称为Linde-Hampson refrigeration (LHR循环)<sup>[6]</sup>, 如图1所示。LHR循环结构简单, 采用混合工质可达到较低的制冷温度, 可降低运行压力和压比。通过合理设

基金项目: 国家自然科学基金(51176124)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(No.51176124).)

收稿日期: 2012年2月24日

计回热器两端水当量,可减少回热损失,使节流前工质充分预冷,降低节流损失从而提高热力学效率。但是由于LHR循环采用混合制冷工质,所以工质的种类选取、组分比例、气液平衡分析以及系统特性研究等都比较复杂。



A压缩机 B冷凝器 C蒸发器 D回热器 F节流阀

图1 Linde-Hampson制冷机系统原理图

Fig.1 Principle diagram of Linde-Hampson refrigeration system

LHR循环采用二元混合工质相对于多元混合工质比较简单,所以应用较多。制冷工质的选择是单级压缩混合工质节流制冷机的首要问题,制冷工质选择的好坏直接影响系统的可靠性。对于不同的系统,采用不同的制冷工质和不同的混合配比,可以获得不同的蒸发温度<sup>[6-7]</sup>。制冷工质R23的标准沸点为 $-82.1^{\circ}\text{C}$ ,与要达到的制冷温度 $-70^{\circ}\text{C}$ 所需的蒸发温度 $-78^{\circ}\text{C}$ 比较接近。结合非共沸混合工质的特性,根据制冷温度及混合工质组分选取原则,选取五种相关的制冷工质进行研究,这些工质的常用热物理特性如表1所示<sup>[8]</sup>。选择R23分别与R134a, R600a, R290, R22四类制冷工质组合,并利用NIST Refprop 8.0软件对这四类混合工质按不同的配比进行模拟计算分析<sup>[9]</sup>。

表1 工质热物性参数

Tab.1 Thermal physical parameters of refrigerant

工质	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
R134a	-26.1	-96.6	101.1	4.06
R600a	-11.73	-160	135	3.645
R23	-82.1	-155	25.6	4.833
R290	-42.07	-187.7	96.8	4.254
R22	-40.76	-160	96	4.974

在混合制冷工质中使用了低沸点的组分,可得到低的泡点温度和较低的制冷温度。而使用高沸点的组分会得到高的露点温度,进而得到高临界温度和较大的单位制冷量<sup>[9-10]</sup>。通过适当的高低沸点制冷工质组分得到比较理想的混合工质配比,在要求较低的制冷温度下达到较大的单位制冷量。

综合考虑制冷工质的选配原则以及各种制冷

工质的热物理特性,以及选择制冷工质应该符合的物理化学要求,如热力学性质方面,迁移性质方面,同时考虑到碳氢化合物的可燃性以及运行压力高等因素<sup>[11]</sup>,结合所研究的 $-70^{\circ}\text{C}$ 温区的制冷温度,通过Refprop软件分析了混合工质饱和蒸汽压力与温度、气液平衡等特性,选择了比较符合要求的工质组合R23和R600a。

工质种类选定以后,就要确定工质组分比例和充注量。首先对R23/R600a在2:8, 3:7, 4:6, 5:5四种配比的工况下,应用Refprop软件初步进行分析,得出相对比较合理的的组分配比3:7。然后对分别充入这些比例的制冷工质系统进行实验研究,对不同配比时系统的特性进行分析比较,总结并验证组分配比3:7为比较理想的配比。

## 2 系统在各制冷剂配比下的特性分析

针对制冷系统混合制冷工质充注比例进行调试。首先向系统充入不足量的制冷工质R23和R600a,观察压缩机的吸排气压力及吸排气温度等参数,这些参数直接反映压缩机的运行状态;同时观察毛细管节流后的温度和蒸发盘管出口温度,观察是否能达到设计的温度值;然后根据这些参数值,逐步加大R23和R600a充入量。当压力达到一定值时停止充注。确定制冷工质的量后,初步对R23和R600a以2:8, 3:7, 4:6, 5:5的质量比例进行实验。由于R23的标准沸点较低,每次加大R23的比例都会显著提高压缩机排气压力及排气温度,这对混合工质的冷凝条件及压缩机的运行状况都有较大的影响。

制冷工质的充注量根据系统各部件(包括连接管路)的空间大小和系统各点的设计状态来确定。充注量计算时,分别计算每个设备混合制冷工质的充注量,所需充注制冷工质的量根据制冷工质在系统各设备中所占空间的体积和设计时所处状态的密度乘积之和来确定。计算制冷工质在各设备中所占空间时,要考虑各部件的具体尺寸、制冷工质的配比以及制冷工质气液相所占比例。制冷工质的密度由该点温度(或温度及压力共同)确定。

制冷装置充注制冷工质可以采用定量充注法、称重量充注法和压力观察充注法。实验采用称重量充注法向系统内充入总量为60g的混合制冷工质。具体的充注方法如下:将装有制冷工质的小钢瓶放在电子秤或小台秤上,将耐压胶管一端接在三通阀上,另一端接在钢瓶的出气阀上;打开出气阀将耐压胶管中的空气排出,拧紧接头以防止泄漏。

然后,称出小钢瓶的重量。打开三通阀向制冷系统充加制冷工质。在充注制冷工质的过程中,应注意观察电子秤的读数值变化,当达到相应的充灌量时,关闭三通阀和小钢瓶上的出气阀,充注工作结束。

### 2.1 各配比时压缩机排气温度比较

图2为制冷剂不同配比时压缩机的排气温度随运行时间的变化曲线。随着低沸点制冷工质R23比例的增多,压缩机的排气温度增高。在工质以5:5配比的情况下,压缩机排气温度在2h内温度达到95℃,在2:8的配比下,压缩机排气温度在2h内保持在83℃以下。在3:7和4:6的配比情况下,压缩机的排气温度曲线比较接近,3:7的排气温度稍低,维持在88℃以下。说明混合制冷工质以3:7配比运行时,压缩机排气温度在合理的范围之内。

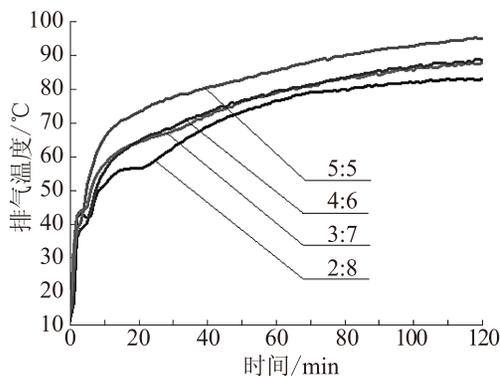


图2 不同配比的排气温度曲线  
Fig.2 Exhaust temperature curve of different ratio

### 2.2 各配比时压缩机压比比较

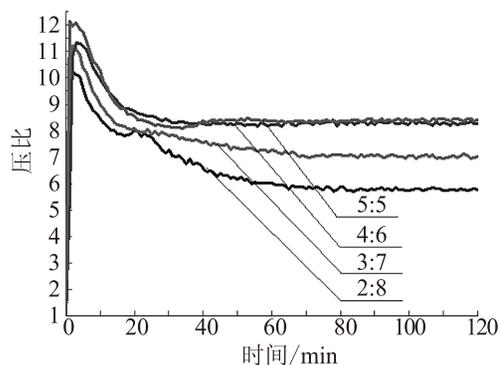


图3 不同配比的压比曲线  
Fig.3 Pressure ratio curve of different ratio

图3为不同配比时压缩机吸排气压比随运行时间的变化曲线。随着低沸点制冷工质R23比例的增多,压比逐渐增高。最高压比均是出现在刚开机时,而后逐渐稳定在一个压比。5:5配比时,最高压比达到12.1,最低压比(平衡压比)也在8.4左右。

而2:8配比时,最高压比在10.2,最低压比(平衡压比)在5.8左右。3:7的配比当压比稳定后其值为7左右。

### 2.3 各配比时柜内温度比较

图4为不同配比时低温冷柜柜内温度随运行时间的变化曲线。当制冷工质以3:7配比时,柜内降温速度最快,30min柜内温度就达到-70℃,并且温度继续下降,到106min时,柜内温度降至-77℃。系统最低蒸发温度并不是在R23/R600a配比为4:6或5:5时实现,而是在3:7时,说明系统并不是随着低沸点制冷工质R23的比例的增多蒸发温度一直降低。

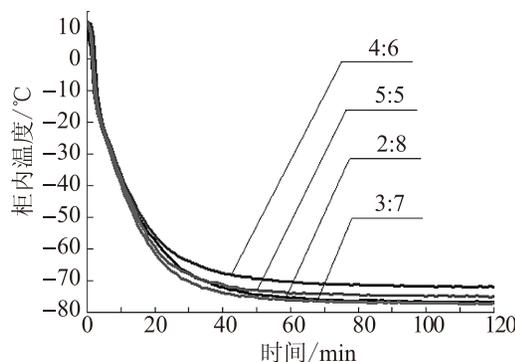


图4 各配比的柜内降温曲线  
Fig.4 Refrigerator cooling curve of different ratio

通过以上三方面的比较,可以看出R23/R600a在配比为3:7时比较理想,各项性能参数均略优于其他的配比。根据软件分析和实验验证相结合的方法,对于这种以R23/R600a为混合工质的单级压缩回热循环,其最优工质配比应在3:7附近,不同的具体装置系统其最优值应略有差异。

### 3 制冷工质最优配比时运行特点

当混合工质R23/R600a以3:7比例充入系统运行时,最低蒸发温度达到-84.6℃,柜内温度也以最快的速度降至-75℃。压缩机刚开机电流为2.2A左右,然后随着降温过程的进行,电流逐渐减小,最后达到-84℃时的电流为1.35A。

图5为R23/R600a以3:7的充注比例时柜内降温曲线。前半小时柜内温度就降至-70℃,以后下降速度明显减慢,到72min后温度降至-77℃,之后温度一直维持在-77℃左右。

图6为R23/R600a以3:7配比时蒸发器各段降温曲线。蒸发器从进口到出口等分为四个阶段,每个阶段用一个中间温度值表示,分别用1,2,3,4表示这四段的蒸发温度。当温度趋于平衡时,1,2,3段温度

相近, 蒸发器出口段蒸发温度 $t_4$ 上升, 温升现象表现出来。

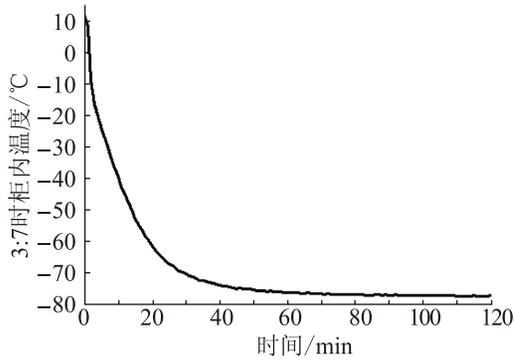


图5 柜内降温曲线  
Fig.5 Refrigerator cooling curve

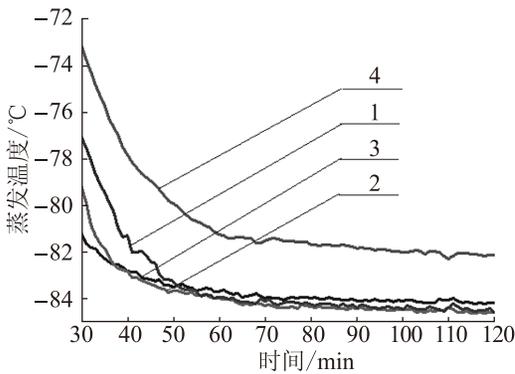


图6 蒸发器降温曲线  
Fig.6 Evaporator cooling curve

图7为R23/R600a以3:7配比时回热器温度变化曲线。回热器热侧进出口温差为 $3^{\circ}\text{C}$ , 出口温度为 $6.5^{\circ}\text{C}$ ; 冷侧进出口温差为 $18.5^{\circ}\text{C}$ , 出口温度为 $-49^{\circ}\text{C}$ 。冷热流体出口温差 $55^{\circ}\text{C}$ , 说明回热器设计并不是很好, 还需要进一步改进。

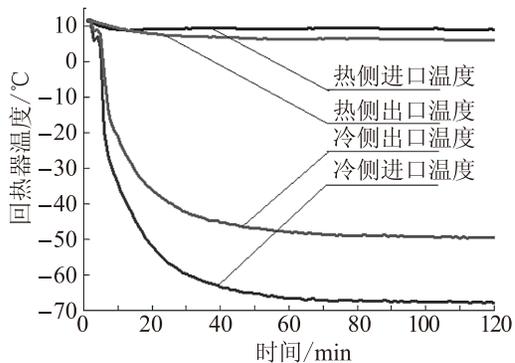


图7 回热器温度曲线  
Fig.7 Evaporator temperature curve

根据实验中混合制冷工质各状态的物性参数, 在Refprop软件中输入相应的温度和压力, 与图1相对应得出各状态的焓值。如表2所示。

表2 各点物性参数

Tab.2 Physical parameters of each state point

状态点	温度/K	压力/MPa	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	焓/( $\text{kJ}/\text{kg}$ )
6	189	0.07	15.562	82.24
7	196	0.07	12.118	102.73
1	295	0.07	1.7716	518.54
5	283	0.49	29.355	321.79
3	323	0.49	12.059	549.5
2	360	0.49	10.554	609.19

各状态点的焓值 $h_1=518.54\text{kJ}/\text{kg}$ ,  $h_2=609.19\text{kJ}/\text{kg}$ ,  $h_6=82.24\text{kJ}/\text{kg}$ ,  $h_7=102.73\text{kJ}/\text{kg}$ 。

理论 $\text{COP} = (h_7 - h_6) / (h_2 - h_1) = (102.73 - 82.24) / (609.19 - 518.54) = 0.226$ 。

当达到极限温度时, 制冷负荷仅是箱体漏热负荷。在实验中, 冷柜不加热, 当柜内温度变化不大时, 可视为近似恒热流率的有限低温热源。

## 4 结论

主要从三方面对非共沸混合制冷工质单级压缩回热制冷循环进行研究: 1) 混合制冷工质选择。根据不同的制冷工质热物理特性, 在主要考虑制冷工质沸点和蒸发温度的情况下, 结合混合后工质特性得出比较实用的组合。2) 混合制冷工质配比。通过软件分析和实验研究相结合的方法, 从不同角度分析混合制冷工质的配比, 3:7的混合制冷工质运行后制冷系统各种特性参数相对较高。3) 混合制冷工质充注量。根据冷凝器、蒸发器等设备的容积初步估计系统的充注量, 再通过实验研究具体系统混合制冷工质充注量, 观察在充注过程中系统的压力变化。

当环境温度为 $12^{\circ}\text{C}$ 时, 充入混合工质R23/R600a约60g, 并确定最佳配比在3:7附近, 毛细管节流后温度达到了 $-84^{\circ}\text{C}$ 。讨论了实验调试过程, 分析了压缩机的运行特性和系统的降温特性, 并对实验结果进行总结。

通过分析及实验研究, 得出R23/R600a为3:7时混合制冷工质运行后各种特性参数相对较高。由于制冷系统大小和设备结构不同, 配比组合的最优值会在某个比较小的范围内发生变化。即使对于某个确定的制冷系统, 设备在运行过程中处于动态平衡, 所以系统工质在传热传质、流动阻力、热物理性质等方面有较小的波动。这就很难确定一个最优的配比作为混合工质的最佳配比, 但对非共沸混合制冷工质单级压缩回热制冷循环的研究具有一定的参考价值, 为以后更进一步研究提供帮助。

本文受上海市优秀学科带头人项目(10XD1403100)和上海市重点学科建设项目(S30503)资助。(The project was supported by the Shanghai Outstanding Subject Leaders Project (No.10XD1403100) and Shanghai Leading Academic Discipline Project (No.S30503).)

### 参考文献

- [1] Dale J Missimer. Refrigerant conversion of Auto-Refrigerating Cascade (ARC) systems[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20 (3):201-207.
- [2] H Gurudath Nayak, G Venkatarathnam. Performance of an auto refrigerant cascade refrigerator operating in liquid refrigerant supply (LRS) mode with different cascade heat exchangers[J].Cryogenics, 2010,50 (11-12):720-727.
- [3] Kai Du, Shaoqian Zhang, Weirong Xu, et al. A study on the cycle characteristics of an auto-cascade refrigeration system[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009,33 (2):240-245.
- [4] 张爱民,王勤,陈光明,等. 一种-60℃制冷机的实验研究[J].流体机械, 2007, 35 (5): 54-57. (Zhang Aimin, Wang Qin, Chen Guangming, et al. Experimental research on -60℃ refrigerator[J].Fluid Machinery, 2007, 35 (5): 54-57.)
- [5] 卞荷洁, 谷波. -80℃低温冰柜的系统设计[J].低温工程, 2003, 132 (2): 54-59. (Bian Hejie, Gu Bo.A design for -80℃ low temperature refrigerator[J]. Cryogenic engineering, 2003, 132 (2): 54-59.)
- [6] M Q Gong, J F Wu, E C Luo. Performances of the mixed-gases Joule-Thomson refrigeration cycles for cooling fixed-temperature heat loads[J]. Cryogenics, 2004,44 (12): 847-857.
- [7] 刘红绍,肖传晶,张华,等. R600a/R23两级自动复叠制冷系统实验研究[J].低温与超导, 2008,36 (3): 11-14. (Liu Hongshao, Xiao Chuanjing, Zhang Hua, et al. Experimental study on R600a/R23 two stage auto-cascade refrigeration system [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2008,36 (3): 11-14.)
- [8] 陈光明,陈国邦.制冷与低温原理[M]. 第2版.北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] 吴裕庆,张华. 混合工质用于单级压缩制冷回热循环的理论研究与分析[J]. 低温与超导, 2010,38 (1): 37-43. (Wu Yuqing, Zhang Hua. Theoretical study and analysis of mixed for single-stage compression refrigeration regenerative cycles[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2010,38 (1): 37-43.)
- [10] 吴裕庆. 单级压缩混合工质制冷循环的实验研究[D].上海: 上海理工大学, 2010.
- [11] 王雁,杜凯. 混合工质R134a /R23焓-浓度图的绘制[J].制冷学报, 2005, 27 (2): 51-56. (Wang Yan, Du Kai. Enthalpy and composition diagram plotting for R134a/RR23[J].Journal of Refrigeration, 2005, 27 (2): 51-56.)

### 作者简介

芮胜军, 男(1975-), 博士研究生, 上海理工大学能源与动力工程学院制冷技术研究所, (021) 55273584, E-mail: sjrui@mail.haust.edu.cn. 研究方向: 小型制冷系统性能研究。

### About the author

Rui Shengjun (1975-), male, Ph. D. Student, University of Shanghai for Science and Technology, (021) 55273584, E-mail: sjrui@mail.haust.edu.cn. Research fields: Performance of a small refrigeration system.