混合工质低温制冷系统的优化控制方案

潘垚池[1],刘金平[1,2],许雄文[1,2],李国立[1],林郁聪[1]
(1. 华南理工大学电力学院,广州 510640;
2. 广东省能源高效清洁利用重点实验室,广州 510640)

摘要:混合工质低温制冷系统存在能效比较低,压缩机排气温度及压力较高的问题。为提高低温制冷系统的降温性能,保证其安全可靠运行,通过搭建五元混合工质低温实验台,分析以膨胀储气罐和控制阀联合作用对系统性能的影响。结果表明,该控制方案可提高系统降温速度,优化系统运行组分,同时也可减小压缩机总耗功,控制排气压力及温度在安全范围。

关键词:非共沸混合工质;优化;控制;性能
中图分类号:TB657 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7086(2018)01-0066-05
DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2018.01.012

THE OPTIMIZATION AND CONTROL STRATEGY OF ULTRA-LOW TEMPERATURE CRYOGENIC SYSTEM FOR MIXED REFRIGERANT

PAN Yao-chi[1], LIU Jin-ping[1,2], XU Xiong-wen[1,2], LI Guo-li[1], LIN Yu-cong[1]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The energy efficiency ratio of ultra-low temperature mixed refrigerant cryogenic system is low. The problems that high compressor exhaust temperature and pressure always exist. For the sake of improving the ultra-low temperature cryogenic performance and ensure its safe and reliable operation, constructing a five-element mixed refrigerant ultra-low temperature test bed is essential. The method that combined operation of the expansion tank and the control valve on the performance was analyzed. The results show that the strategy can not only improve the system cooling rate, optimize the system running components, but also reduce the total power consumption of the compressor, control the exhaust pressure and temperature in the safe range.

Key words: non-azeotropic mixed refrigerant; optimization; control; performance

0 引言

随着现代高科技领域的发展,-40 ℃以下到深冷温区的制冷技术也不断开展,以非共沸混合工质作为冷媒的单级节流制冷技术最具有优势。通过充灌不同工质及不同配比,可以灵活改变系统所能制取的最低温度(-43~-193 ℃)。由于该制冷系统结构简单,运行调节便利,适用温区广泛,已被普遍应用于低温电子、低温医学、低温生物等领域[1-5]。

混合工质单级制冷循环的设想最先由Podbielniak于1936年提出[6]。前苏联Kleemenko采用多元混合工质、多次分凝的自复叠流程液化天然气,标志着混合工质制冷技术开始进入工业应用领域[7]。自此,国内外学者相继开展了一系列关于混合工质制冷的研究[8-12]。罗二仓等[13]采用Ne、Ar、N_2、O_2的四元工质,在开式内复叠循环中获得了-222 ℃的低温。在混合工质自复叠单级和多级系统中,张华团队着重研究组分选择和最佳浓度配比对整机性能的影响[14-16]。刘金平等[17]重点考察制冷系统相积存、节流阀开度对系统性能的影响,并联立遗传算法和Aspen Plus揭示了混合工质自复叠制冷系统在降温

收稿日期:2017-11-17
基金项目:国家自然科学青年基金(51506057)、华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2015ZC13、2016KA01)、中国科学院低温工程学重点实验室开放基金(CRYO201616)
作者简介:潘垚池(1991-),男,广州人,硕士研究生,主要从事制冷系统优化及设计。E-mail:403811263@qq.com。

过程中最优的组分需求规律:在系统高、低压一定时,为使系统的降温过程处于最优状态,高沸点组分需求量逐渐减少,低沸点组分需求量逐渐增多[18-20]。

对于一个容积固定的制冷系统,在压缩机启动初期,几乎是全部气态的工质通过节流单元,排气压力将会很高。尤其当其降温到深冷温区时,低沸点组分的作用又会使排气压力和温度变大,造成安全威胁。目前混合工质制冷系统不但存在上述问题,还存在降温速度慢、制冷效率低的问题,故掌握系统的动态工作特性,适时改变组分运行浓度,对改善系统降温性能具有重要意义。搭建了自适应的混合工质超低温实验台,根据混合工质制冷系统最优组分需求规律,提出以膨胀储气罐和控制阀联合作用的优化控制方案,进行相关实验比较其对系统工作性能的影响,验证该策略的可行性。

1 实验装置及流程介绍

1.1 实验装置

混合工质超低温制冷系统的流程如图1所示。其主要部件有压缩机、冷凝器、气液分离器、中间回热器、电子膨胀阀、膨胀储气罐、蒸发器(电加热器)和控制单元。其中,中间回热器作为冷凝蒸发器,膨胀储气罐与控制阀、毛细管联立接入压缩机吸气管路。

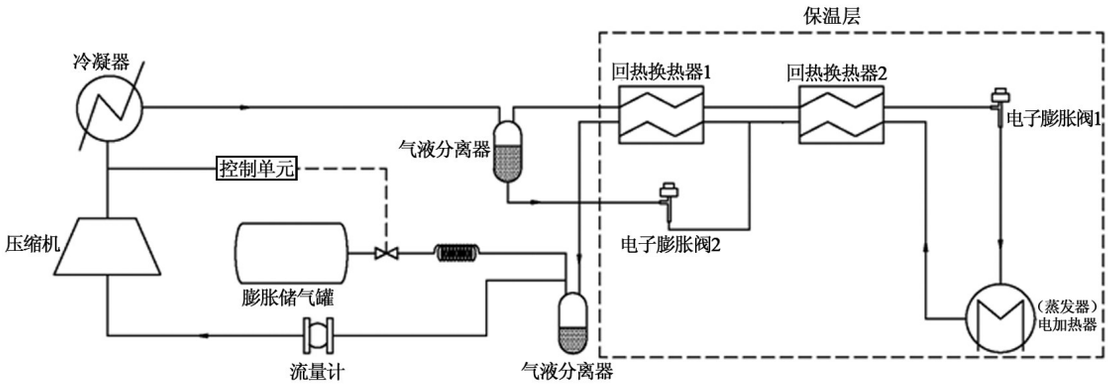

图1 混合工质超低温制冷系统流程图

Fig. 1 The process of ultra-low temperature cryogenic system for mixed refrigerant

在制冷流程中布置了两个气液分离器,对混合工质进行分凝,使得整个循环中不同沸点的组分之间同时流动并进行换热作用,以复叠式循环制取低温。混合工质先经过压缩机做功成为高温高压的气体,进入冷凝器换热后工质冷凝,其中大部分的低沸点工质保持气态;经气液分离器进行气液分离后,气相工质进入冷凝蒸发器的热流通道,降温冷凝后进入节流阀节流降温后进入蒸发器进行蒸发换热,制取低温环境;工质吸热后进入回热器的冷流通道回热;冷凝器后的气液分离器液相出口流出的工质大部分为高沸点工质,通过节流阀后,与从回热器出来的低沸点工质混合进入冷凝蒸发器进行回热,最后返回压缩机,完成循环。

1.2 工质的选取

以-150 ℃的节流后温度作为制冷温度展开实验,选取异丁烷(R600a)作为系统的高沸点组分(重组分),丙烷(R290)、乙烷(R170)作为中间沸点组分(中间组分),甲烷(R50)、氮气(R728)作为低沸点组分(轻组分)。表1为通过NIST REFPROP 9.1查得的工质物性参数,A1表示不燃,A3表示可燃,所选工质的ODP均为0,其100年的GWP值也较小,属于环保工质。R50、R170、R290、R600a、R728的充注质量比为:0.0796、0.1149、0.158、0.5226、0.1249。

表1 工质物性参数

Table 1 The physical parameters of working medium

组分	化学式	摩尔质量/(g/mol)	标准沸点/℃	三相点/℃	临界温度/℃	GWP(100年)	可燃性
R50	CH_4	16.04	-161.48	-182.45	-82.59	25	A3
R170	C_2H_6	30.17	-88.58	-182.78	32.17	20	A3
R290	C_3H_8	44.10	-42.11	-187.63	96.74	20	A3
R600a	$CH(CH_3)_3$	58.12	-11.75	-159.42	134.66	20	A3
R728	N_2	28.01	-195.80	-209.99	-146.96		A1

1.3 实验流程

实验在同一室温25 ℃中进行，每次实验恢复至室温，所有电子膨胀阀设定好开度后不进行变动，节流后的目标温度均为-150 ℃。系统启动时，由于压差的存在，打开的控制阀可使膨胀储气罐中的冷剂组分充入系统，从而增加降温所需的冷剂组分，促进冷量的生成。系统关闭时，膨胀储气罐可存储大部分的气相轻组分，同时降低停机压力，提高开机安全性。

实验分为两组：第一组（罐全开组）将膨胀储气罐与控制阀保持打开状态进行降温实验，系统的最高排气压力限制为2.3×10^6 Pa；第二组（控压组）利用控制单元、膨胀储气罐、控制阀进行自适应的调节。第二组实验在开机前期，设定好控制单元的压力范围$1.7\sim1.85\times10^6$ Pa（根据实际要求设置），当压缩机排气压力高于1.85×10^6 Pa时，控制单元检测到超压信号，使膨胀储气罐前的控制阀关闭。此时随着系统温度的降低，压缩机排气压力逐渐降低，当其压力低于1.7×10^6 Pa时，控制单元再次检测到超压信号，打开膨胀储气罐的控制阀，如此往复，直到停机。实验过程中使用Agilent34970A和Labview数据采集程序对压缩机功耗、系统的高低压、各测点温度进行采集。

实验中通过系统组分采集平台对降温过程中不同的节流后温度点进行组分采集，采集温度有9个：-30 ℃、-60 ℃、-90 ℃、-100 ℃、-110 ℃、-120 ℃、-130 ℃、-140 ℃、-150 ℃，采集点位于压缩机吸气口，通过GC-1690热导型（TCD）气相色谱仪进行组分比例的分析。

2 实验结果与分析

通过两次相同工况下的实验对比，分析两组降温实验节流后温度、压缩机排气压力、排气温度、耗功大小、组分浓度等参数变化，如图2~图7所示。

由图2可知，在开机15 min前，控压组的降温速度与罐全开组的降温速度较为相同；15 min后，控压组的降温速度优于罐全开组；降温后期，两者的降温速度又近似相同，控压组的最终温度略低于后者。明显可知，控压组的操作更易使系统降到-150 ℃，比罐全开组快了10 min左右。

图3的两条曲线代表控压组和罐全开组的压缩机排气温度变化，罐全开组的排气温度普遍高于控压组，最高排气温度达115 ℃，最终稳定在112 ℃的温区；控压组的最高排气温度达103 ℃，最终稳定在100 ℃。从图4可看出，控压组的最大排气压力达1.85×10^6 Pa，由于控制单元的操控作用，使得系统压力值呈现上下波动，且整个过程的波动较为稳定，而罐全开组的排气压力在开机前期会升到$2.3\times10^6\sim2.4\times10^6$ Pa，长期处于高压区，变化波动不稳定，易造成安全威胁。

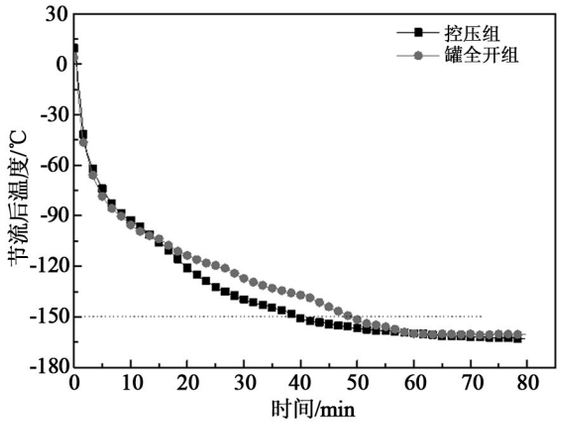

图2 两组实验的节流后温度变化曲线

Fig. 2 The change of throttling temperature

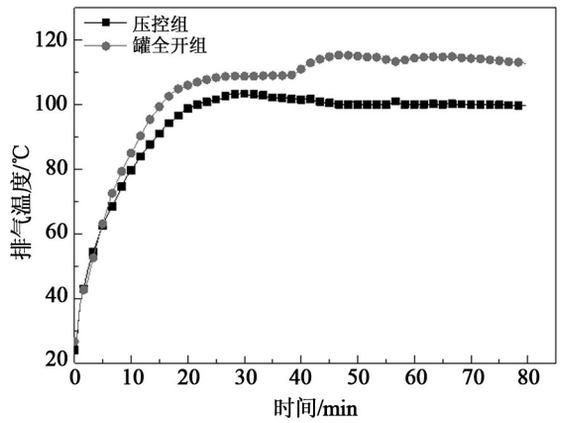

图3 压缩机排气温度变化曲线

Fig. 3 The change of compressor exhaust temperature

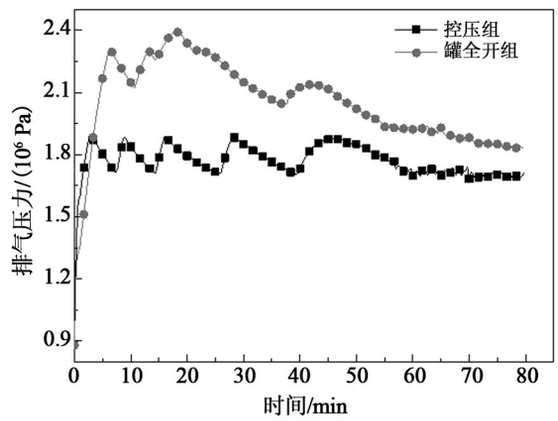

图4 实验的压力变化曲线

Fig. 4 The change of compressor exhaust pressure

由图5可知,在整个降温过程中,两组实验的压缩机耗功曲线与图4的曲线变化相似,罐全开组的耗功振幅较大,变化不稳定,最大耗功达2 300 W;而控压组的耗功能稳定在1 700~1 900 W的范围内,最大耗功为1 900 W。控压组的压缩机耗功比罐全开组的压缩机耗功要小,前者总耗功比后者小10.39%。控压组状态下的系统运行环境较为稳定,有利于提高压缩机运行寿命。

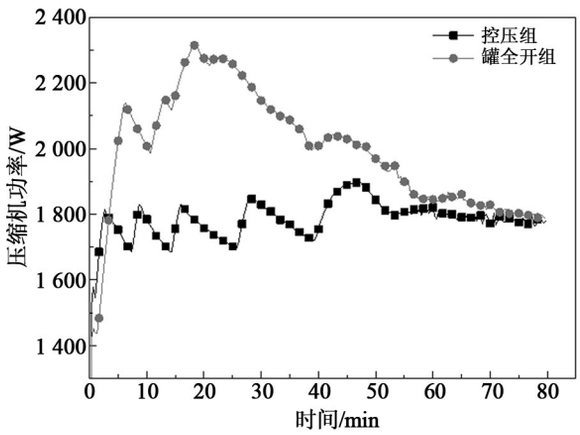

图5 压缩机耗功变化曲线

Fig. 5 The change of compressor power consumption

组分浓度比例分布的结果如图6和图7所示,图6为罐全开组,图7为控压组,两图比较分析可得,控压组的氮气和甲烷(轻组分)浓度较罐全开组具有更大的增长趋势,前者从46.25%增至57.95%,后者从48.34%增至55.24%;两图中的丙烷、乙烷(中间组分)在降温过程中浓度变化不大;异丁烷(重组分)的变化均呈减小的趋势。两组实验终了时,两图各自的五种工质组分浓度比例相似。

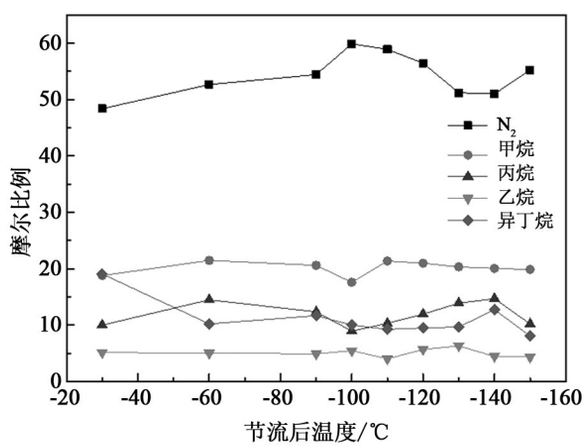

图6 不同节流后温度下组分变化(罐全开组)曲线

Fig. 6 The variation of composition under different throttling temperature(control pressure)

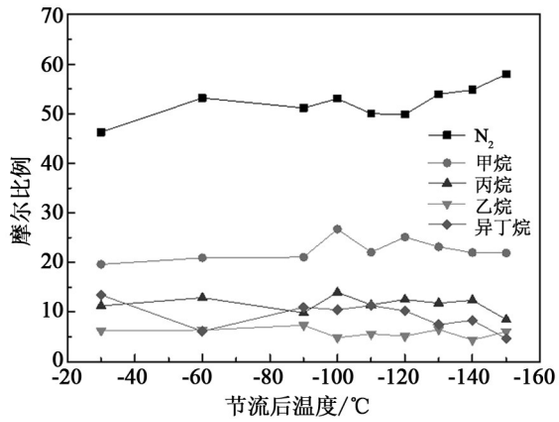

图7 不同节流后温度下组分变化(控压组)曲线

Fig. 7 The variation of composition under different throttling temperature(tank open)

由于膨胀储气罐内存储较多的轻组分气体,在控压实验中,膨胀储气罐每次打开时,罐内的氮气和甲烷(轻组分)就会充入运行的系统,增加系统轻组分含量的同时,不断生成降温所需冷量,从而加快降温速度。异丁烷(重组分)浓度比例随系统温度的降低而减少。

综上分析可知,控压组的降温性能优于罐全开组的降温性能。控压组以膨胀储气罐和控制阀联合作用的方法可以增加系统降温速度,减小系统压缩机总耗功,系统的开机温度及压力也能得到安全控制。该实验也验证了轻组分浓度随系统温度的降低而增加、重组分浓度随系统温度的降低而减小的最优组分浓度需求规律,该规律指导下的控制方案可有效提高系统的降温性能。

3 结论

(1)以膨胀储气罐和控制阀联合作用的控制方案可以改变混合工质低温制冷系统的轻、重组分运行浓度,对系统运行环境进行自适应地往复调节,使轻组分浓度随系统温度的降低而增加、重组分浓度随之减小,从而达到优化降温的目的;

(2)在混合工质超低温制冷系统的实验中,该优化控制方案可以增加系统降温速度,减小系统压缩机总耗功,防止系统压缩机排气温度及压力过高,能有效提高系统的降温性能。

参考文献:

[1] 朱魁章. 多元混合工质制冷机的应用[J]. 制冷,1998(4):80-82.

[2] Yoon W J, Seo K, Chung H J, et al. Performance optimization

of a Lorenz- Meutzner cycle charged with hydrocarbon mixtures for a domestic refrigerator-freezer[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(1): 36-46.

[3] Vaclav C. Cryogenic mixed refrigerant processes[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 33(3): 648-649.

[4] 刘金平, 许雄文, 张志鹏, 等. 非共沸混合工质自复叠热泵循环试验研究[J]. 低温与超导, 2006, 34(6): 408-413.

[5] Gong M Q, Wu J F, Luo E G. Performances of the mixed-gases Joule-Thomson refrigeration cycles for cooling fixed-temperature heat loads[J]. Cryogenics, 2004, 44(12): 847-857.

[6] Walter J P. Art of refrigeration: U.S. Patent 2041725[P]. 1936-5-26.

[7] Kleemenko A P. One flow cascade cycle[C]//Proc of the 10th International Congress of Refrigeration, 1959: 34-39.

[8] Missimer D J. Control system for low temperature refrigeration system: US, US 3698202 A[P]. 1972.

[9] Missimer D. Self-balancing low temperature refrigeration system: US, US3768273[P]. 1973.

[10] Longsworth R C, Boiarsky M J, Khatri A. Cryostat refrigeration system using mixed refrigerants in a closed vapor compression cycle having a fixed flow restrictor: US5579654[P]. 1996.

[11] Little W A. Self-cleaning low-temperature refrigeration system: EP, US 5617739 A[P]. 1997.

[12] Little W A. Method for efficient counter- current heat exchange using optimized mixtures: US, US5644502[P]. 1997.

[13] 罗二仓, 公茂琼, 周远. 获得低于60 K温区的混合物工质内复叠节流制冷机的研究[J]. 低温工程, 1999(6): 12-16.

[14] 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): 37-40.

[15] 朱军韬, 张华. 单级自动复叠混合工质制冷循环的实验研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(8): 75-77.

[16] 张书春, 张华, 赵巍. 五级自动复叠制冷循环混合制冷剂特性分析与计算[J]. 低温与超导, 2013, 41(5): 48-50.

[17] 刘金平, 朱宇龙. 非共沸混合工质自复叠热泵相积存实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 5-10.

[18] 刘金平, 吴啸, 郭灵兵. 节流阀开度对自复叠制冷循环冷凝蒸发器换热性能影响的试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 152-157.

[19] 许雄文, 刘金平, 曹乐, 等. 非共沸混合工质在制冷循环中浓度偏移分析[J]. 化工学报, 2011, 62(11): 3066-3072.

[20] 潘垚池, 刘金平, 许雄文, 等. 自复叠制冷系统降温过程组分浓度优化及控制策略[J]. 化工学报, 2017, 68(8): 3152-3160.