

DOI : 10.3901/JME.2014.02.159

两级自动复叠低温冰箱的理论及试验研究*

芮胜军^{1,2} 张 华¹ 黄理浩¹ 喻子达³ 王 袭³ 王晓影³

(1. 上海理工大学制冷技术研究所 上海 200093;

2. 河南科技大学车辆与动力工程学院 洛阳 471023;

3. 海尔集团技术研发中心 青岛 266103)

摘要: 两级自动复叠低温冰箱在科研和日常生活中逐渐增多, 研究并提高其制冷系统性能具有重要作用, 节能环保特性的研究也具有重要意义。单级压缩两级自动复叠制冷循环采用非共沸混合制冷工质, 根据工质在低温冰箱内的压力温度变化和气液平衡关系实现低温环境。利用制冷工质物性分析软件 NIST Refprop 8.0, 对两级自动复叠循环的空间压焓图和焓-浓度图进行分析。讨论并选取适合于-60℃ 低温冰箱的混合制冷工质 R600a 和 R23, 并对其系统运行过程中温度和压力变化趋势进行分析。通过试验研究两级自动复叠低温冰箱降温过程中温度和压力随时间的变化规律, 以及汇合点处工质物性的变化特性。对两级自动复叠低温冰箱制冷系统建立比较完整的概念, 对温度压力变化和和气液平衡有了理性的认识, 对提高此类冰箱性能和产品推广应用具有重要价值。

关键词: 低温冰箱; 自复叠制冷; 混合工质; 单级压缩

中图分类号: TB657

Theory and Experimental Study of Two-stage Auto-cascade Low Temperature Refrigerator

RUI Shengjun^{1,2} ZHANG Hua¹ HUANG Lihao¹ YU Zida³ WANG Xi³ WANG Xiaoying³

(1. Institute of Refrigeration Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;

2. Vehicle & Motive Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023;

3. Technology R&D Center, Haier Group, Qingdao 266103)

Abstract : It is increased gradually in scientific research and daily life of two-stage auto-cascade low temperature refrigerator. Study and improve the refrigeration system performance plays an important role; characteristics of energy saving and environmental protection research also has important significance. Single-stage compression two-stage auto-cascade refrigeration system using non-azeotropic mixture refrigerant, the low temperature environment could be realized according to the pressure and temperature changes of refrigerant in the low temperature refrigerator and the relationship of vapor-liquid equilibrium. Three dimensional pressure-enthalpy diagram and enthalpy-composition diagram of two-stage auto-cascade cycle are analyzed using refrigerant properties analysis software NIST Refprop 8.0. The mixed refrigerant R600a and R23 is discussed and selected suitable for -60℃ low temperature refrigerator, and the operation temperature and pressure of system are analyzed. The temperature and pressure and the refrigerant substances at the conjunction changes with time of two-stage auto-cascade low temperature refrigerator are studied through experimental methods. A relatively complete concept of two-stage auto-cascade refrigeration system for low temperature refrigerator is established; a rational realization of the temperature and pressure changes and vapor-liquid equilibrium is recognized. It is important to improve the performance of this kind of refrigerator and the products popularization.

Key words : low temperature refrigerator ; auto-cascade refrigeration ; mixed refrigerant ; single-stage compression

0 前言

环保制冷工质 R600a 现在广泛应用于家用冰

箱, 也有选用 R134a、R502 等其他工质的。近年来随着人们环保意识的不断增强, 使用环保工质已成为选用制冷工质的重要条件, 甚至在某些情况下以减小机械效率为代价。家用压缩式冰箱根据使用目的不同, 通常有 1~4 个贮存温度, 最常见的是两个贮存温区(冷冻室和冷藏室), 冷冻室的温度为-18

* 国家自然科学基金(51176124)、上海市优秀学科带头人(10XD1403100)和上海市重点学科建设(S30503)资助项目。20130324 收到初稿, 20130918 收到修改稿

左右,冷藏室的温度为 $0\sim 10$ 。不同的贮存温度很好地满足了食品所需要的低温环境,但目前冰箱制冷系统只有一级与冷冻室温度相匹配的蒸发温度 -30 。这种“一拖多”的方式使冷冻室蒸发温度得到满足,但造成冷藏室、保鲜及果蔬贮藏室蒸发温度与低温环境传热温差较大,使整个系统有效能利用系数降低,而且过低的蒸发温度造成冷藏室中货物干耗增加,加速了果菜的老化过程^[1]。针对这种传统冰箱制冷循环存在的不足,西安交通大学宴刚等^[2-3]提出了非共沸混合工质自动复叠双温冰箱循环系统,两个不同的蒸发温度分别满足高温环境和低温环境的蒸发温度需求。R600a/R32(质量比 70/30)可以为冷藏室和冷冻室在相同的蒸发压力下分别提供 -5 和 -30 的蒸发温度,具有合适的压力比和较高的系统运行效率,并且系统运行稳定,控制方便^[1]。

$-20\sim -60$ 的低温环境在低温电子、低温医学、冷冻干燥和速冻设备等方面应用广泛,本文针对这个温度区间的冰箱进行研究。这种冰箱的冷凝温度和蒸发温度将近 100 的温差,用纯工质一级压缩一级节流的传统冰箱制冷系统很难实现,因为单台压缩机的压比是有限的,过高的压比使制冷工质吸气比容很大,效率降低明显。这种大温差冰箱可以通过两级压缩系统或复叠式制冷系统来实现,但这都需要两台压缩机,系统相对比较复杂,自复叠冰箱相对于这两种系统具有结构简单、工作温差大、性能可靠等特点。KIM 等^[4]对 R134a /R744 和 R290/R744 在低温冰箱中的应用进行研究,二氧化碳单独作为制冷循环工质在环境温度下进行的是跨临界循环,如果加入部分 R134a 或 R290 形成非共沸混合工质,可以使系统运行压力降低后稳定在一个比较合理的范围。DU 等^[5]以 R134a /R23 作为循环工质,对自复叠制冷系统的性能系数,制冷量,蒸发温度,制冷工质各点的压力和温度进行测量和数值分析。牛宝联等^[6]通过对自复叠制冷系统吸排气压力的研究,液体旁通自复叠式制冷系统有效地降低了压缩机的排气温度,且不存在压缩机液击的危险,适合于低温冰箱并且提供变负荷制冷量。刘金平等^[7]通过节流阀开度对自复叠制冷循环冷凝蒸发器换热性能进行研究,发现自复叠制冷循环中冷凝蒸发器的能量效率损失是换热器中最大的,通过调节主流节流阀和支流节流阀的开度可以减小冷凝

蒸发器换热过程的能量效率损失。

1 二元非共沸混合工质

1.1 混合工质制冷机

20 世纪 50 年代以来,对于混合制冷工质特别是非共沸混合工质的研究,极大地推动了单级压缩节流制冷机的快速发展^[8-9]。到目前为止,有两种类型的单级压缩混合工质节流制冷机得到了很大的发展,它们分别是 Linde-Hampson 型节流制冷机(Linde-hampson refrigeration cycle, LHR)和自动复叠节流制冷机(Auto-cascade refrigeration cycle, ARC)^[10-11],这两种制冷循环如图 1 所示。图 1a 为 LHR 制冷循环,它与传统制冷循环系统的区别是增加了一个回热器,回热器使工质经过冷凝器后温度进一步降低。图 1b 为 ARC 制冷循环,它与传统制冷循环系统的区别是增加了一个回热器和汽液分离器,汽液分离器使气相和液相制冷工质分别在各自的回路中参与循环,也称作相分离器。

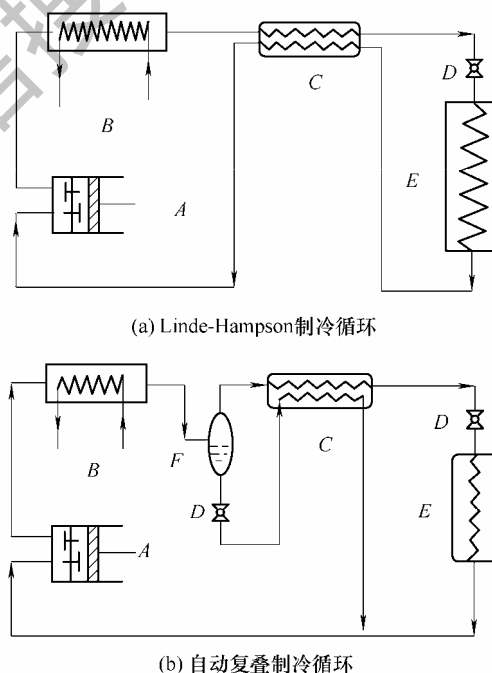


图 1 混合工质节流制冷机

A——压缩机 B——冷凝器 C——回热器 D——节流阀
E——蒸发器 F——汽液分离器

1.2 自动复叠制冷系统

自动复叠制冷系统兼有单级压缩基本循环和复叠式制冷循环的特点,仅用一台压缩机实现复叠制冷循环的效果。如图 2 所示,混合工质经压缩机压缩为高温高压气体,在冷凝器中冷凝为气液混合物,气液两种物质的比例与冷凝最终温度、冷凝压

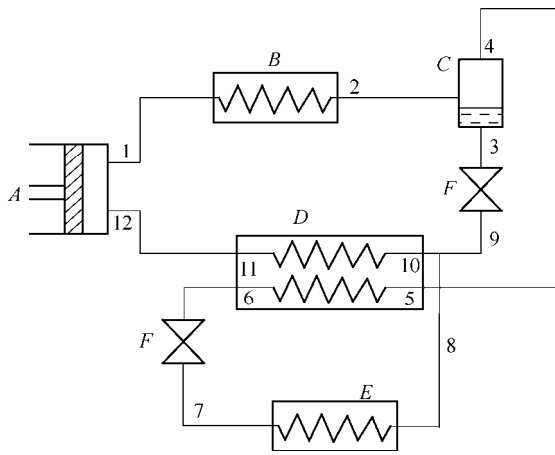


图 2 两级自动复叠制冷系统

A——压缩机 B——冷凝器 C——气液分离器 D——回热器
E——蒸发器 F——节流装置

表 1 制冷工质的热物理特性

工质符号	化学式	相对分子量	正常沸点/	凝固点/	临界温度/	临界压力/kPa	临界比体积/(L/kg ⁻¹)
R600a	C ₄ H ₁₀	58.13	-11.73	-160	135.0	3 645	4.526
R23	CHF ₃	70.02	-82.10	-155	25.6	4 833	1.942

实线为实际的循环表示过程，虚线为辅助线，箭头方向表示循环的发展方向。12~1 为混合工质在压缩机中的压缩过程，1~2 为混合工质的冷凝过程。到 2 以后分为两路，分别为富含 R600a 的组分 3 和富含 R23 的组分 4，组分 3 经节流降温以后到 9，组分 4 在回热器中进一步降温后再节流吸收热量。自复叠的特点主要体现在回热器，制冷工质在循环系统中多次降温，温度多次降低以后再节流得到更低的温度。自复叠利用循环工质中的一部分(高沸点组分)作为吸热工质，它的任务就是把另一部分(低沸点组分)的温度进一步降低，高沸点组分不参与蒸发器的吸热。这种自身内部温度接力降低了工质在节流装置前的温度，节流装置的降温以压力减小为代价，压差决定了工质在节流装置中温度降低的大小。通过接力赛使进入蒸发器时工质的温度进一步降低，利用高沸点组分的冷量传递实现自身内部复叠。

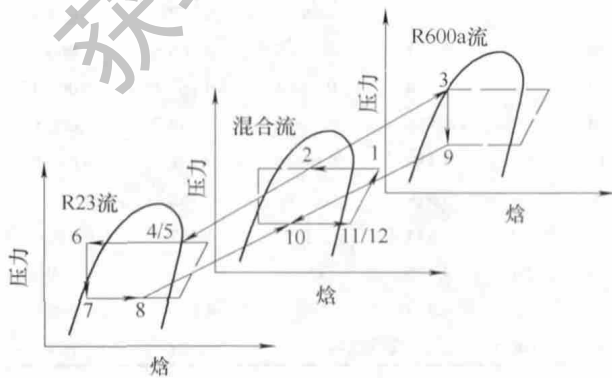


图 3 循环系统的空间压焓图

力等有关。本文以试验所用的 R600a/R23 混合工质为例进行分析，其充注质量比例为 0.7 0.3。两种纯制冷工质的热物理性质如表 1 所示。

冷凝以后液体为富含 R600a 的组分，气体为富含 R23 的组分，气液混合物在气液分离器中分离为两路。富含 R600a 的组分经节流装置降温降压后冷却富含 R23 的组分，成为过热气体后回到压缩机。富含 R23 的组分经过回热器吸收冷量后成为过冷液体，经节流装置降温降压，在蒸发器中吸收热量，最后通过回热器成为过热气体回到压缩机。

根据循环中各点温度及焓值变化，两级自动复叠制冷循环过程可以表示为图 3 所示的由三个平面压焓图组成的空间压焓图。其所标的数字与图 2 对应，

循环系统的焓值变化和质量分数之间的关系可以用焓-质量分数图表示，如图 4 所示，图 4 中各状态点标号与图 2 中各状态点对应。 P_k 、 P_0 分别为循环系统的冷凝压力和蒸发压力，上面的曲线表示气相等压线，下面的曲线表示液相等压线。 t_k 、 t_0 分别为系统循环的最低冷凝温度和最低蒸发温度，324 线是两相区的冷凝温度线。1 点为排气状态点，2 为冷凝终了气液混合状态点，它由液体状态 3 点和气体状态 4 点按杠杆原理(线段 24 与 23 的比例)混合而成。9 点为富含 R600a 的液体 3 节流后的状态，富含 R23 的组分 4 经回热器到 6 再节流到 7 状态。7 到 8 为富含 R23 的组分在蒸发器内的吸热过程 8 和 9 混合成 10 再回热到 11 状态，最后经压缩机压缩^[13]。

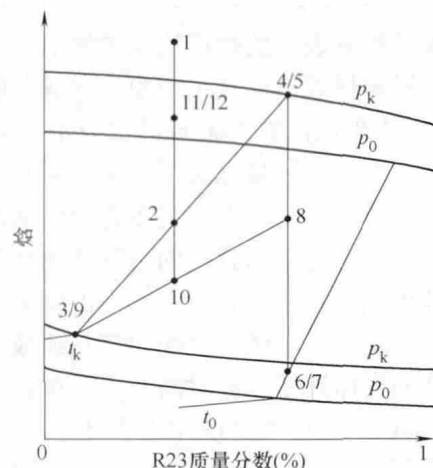


图 4 循环系统的焓-质量分数图

2 过程分析

2.1 恒压过程分析

自复叠制冷装置系统通常不考虑工质流动的压力损失，压缩机和节流装置作为唯一的升压和降压设备，将管道系统工质的压力分为两部分，高压系统和低压系统。非共沸混合工质没有共沸点，在定压下冷凝或蒸发时，气相和液相的成分不同，温度也不断变化。表 2 为压力分别为设计冷凝压力 1 MPa 和设计蒸发压力 0.1 MPa 时，混合制冷工质 R600a/R23 不同质量分数的泡点温度和露点温度。R600a 和 R23 总质量守恒，随着 R23 成分不断增加 (R600a 成分不断减小)，泡点温度和露点温度都呈减小趋势，泡点温度最初减小比较剧烈后期比较平缓；露点温度最初减小比较平缓后期比较剧烈。不同的冷凝压力具有不同的泡点温度和露点温度，但其变化趋势基本相似，随着压力升高，泡点温度和露点温度都呈减小趋势。

表 2 泡点温度和露点温度

质量分数(%)		1 MPa 压力		0.1 MPa 压力	
R600a	R23	泡点温度/	露点温度/	泡点温度/	露点温度/
100	0	66.186	66.186	-12.085	-12.085
90	10	18.898	61.516	-72.122	-14.376
80	20	-3.0457	56.539	-80.148	-16.916
70	30	-11.903	51.138	-81.515	-19.761
60	40	-15.997	45.156	-81.134	-22.997
50	50	-18.363	38.364	-80.36	-26.757
40	60	-20.249	30.414	-79.739	-31.253
30	70	-22.213	20.705	-79.528	-36.868
20	80	-24.498	8.028	-79.853	-44.413
10	90	-27.175	-10.785	-80.761	-56.281
0	100	-30.217	-30.217	-82.245	-82.245

图 5 是根据表 2 的数据绘制的泡点温度和露点温度图。横坐标表示混合工质中两种成分的质量百分数，沿着横坐标向右 R600a 的成分不断减小，R23 的成分不断增加，纵坐标表示温度。对应的一组曲线中，下边一条曲线是在一定压力下的泡点温度，即不同组分溶液开始沸腾时的温度，也称为液相线或沸腾等压线；上边一条曲线露点温度表示在同一压力下不同温度时与液相平衡的气相组成，它表示不同组分的气体开始冷凝时的温度，称为气相线或冷凝等压线。根据本文设计工作状态，冷凝温度 30 和蒸发温度 -70 与 R23 质量分数为 0.3 时的交点为系统设计冷凝状态点和蒸发状态点，它们分

别位于各自对应压力的泡点温度和露点温度之间，即冷凝和蒸发终了状态两种混合工质处于气液混合状态。混合工质的气液平衡关系可根据与泡点温度和露点温度的交点所对应的质量分数，结合质量守恒定律和杠杆原理进行分析。

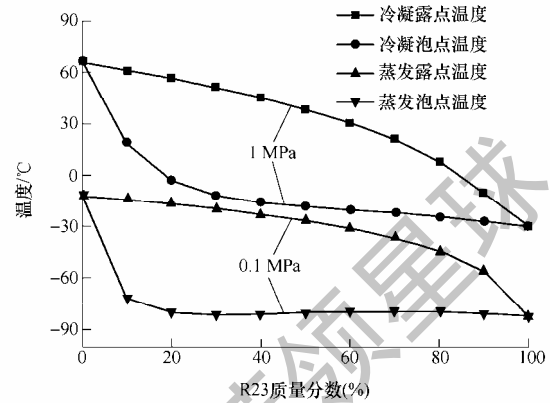


图 5 泡点温度和露点温度图

2.2 恒温过程分析

两级压缩自复叠制冷系统有两个重要的温度 (冷凝温度和蒸发温度)，本文以所对应的设计温度 30 和 -70 为例进行分析。表 3 为温度为 30 和 -70 时泡点压力和露点压力。随着 R23 成分不断增加 (R600a 成分不断减小)，泡点压力和露点压力都呈增大趋势，泡点压力最初增加比较平缓，后期比较剧烈；露点压力最初比较剧烈，后期比较平缓。不同的冷凝温度具有不同的泡点压力和露点压力，但其变化趋势基本相似，随着温度增大，泡点压力和露点压力都呈增大的趋势。

表 3 泡点压力和露点压力

质量分数(%)		30 温度		-70 温度	
R600a	R23	泡点压力/MPa	露点压力/MPa	泡点压力/MPa	露点压力/MPa
100	0	0.4047	0.4047	0.0048	0.0048
90	10	1.21	0.4459	0.1082	0.0052
80	20	1.81	0.4977	0.1524	0.0058
70	30	2.253	0.5647	0.1665	0.0065
60	40	2.594	0.6554	0.1677	0.0074
50	50	2.888	0.7852	0.1647	0.0088
40	60	3.182	0.9876	0.1623	0.0107
30	70	3.519	1.35	0.1627	0.0141
20	80	3.941	2.189	0.1674	0.0207
10	90	4.495	3.979	0.1774	0.0406
5	95	4.839	4.839	0.1847	0.0805
0	100	过热气体		0.1937	0.1937

图 6 是根据表 3 的数据绘制的泡点压力和露点

压力图，横坐标表示混合工质中两种成分的质量分数，纵坐标表示压力。随着温度的不断降低，泡点压力和露点压力逐渐接近，两条曲线互相靠拢。当温度为 30℃ 时，R600a/R23 的质量比为 5/95 时达到临界状态，随着温度升高，其临界状态的 R23 质量分数逐渐减小，由表 1 可知，纯 R23 在 25.6℃ 时处于临界状态。当 R23 的质量分数为 0.3 时，设计冷凝压力 1 MPa 和设计蒸发压力 0.1 MPa 与其交点处于气液混合状态。

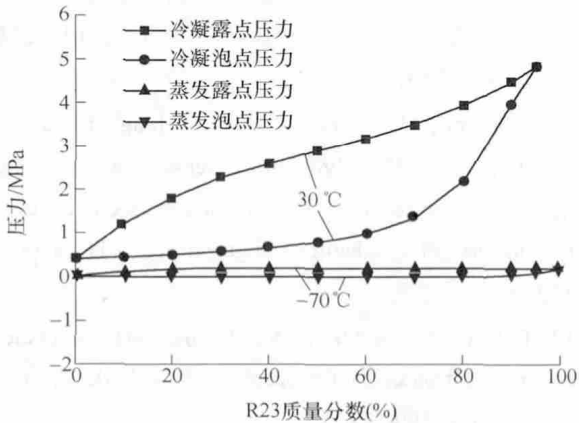


图 6 泡点压力和露点压力图

3 试验结果分析

试验台性能测试在 32℃ 环境温度下进行，混合工质经过水冷式冷凝器后的冷凝温度在 30℃ 左右，系统启动 3 h，中心温度降至 -60℃ 左右。

3.1 降温特性分析

试验装置系统排气温度、冰箱中心温度和主节流毛细管后温度变化趋势如图 7 所示。排气温度在开机前 0.5 h 内增加比较快，0.5~1 h 增加比较缓慢，1 h 后排气温度已达到 100℃ 左右，随后趋于稳定。主毛细管节流温度刚开机时急剧减小到约 -50℃，稳定 0.5 h 后再缓慢减小，开机 1 h 达到 -60℃，最后逐渐稳定在 -70℃ 左右。冰箱中心温度的降低并不是匀速的，根据降温特点把降温过程可以分为 4 个阶段：延迟段、快速段、慢速段、稳定调整段。开机初期工质逐渐冷却，冷量传递需要一段时间差，系统在这一段时间里，蒸发器前主毛细管入口处工质完全是气态或干度较大的气液混合物，节流之后温度变化很小，因此冰箱中心温度几乎没有变化，这一阶段称之为延迟段。延迟段持续约 20 min 后，冰箱温度进入快速降温段，这时回热器冷凝产生的富含 R23 组分冷凝液可以完全封住主毛细管，节流温度迅速下降，由于蒸发盘管与箱内空气温差较大，冰箱温度变化速度显著加快，在 1.5 h 内，温度降至 -50℃，3.5 h 后冰箱中心温度降至 -60℃ 左右。

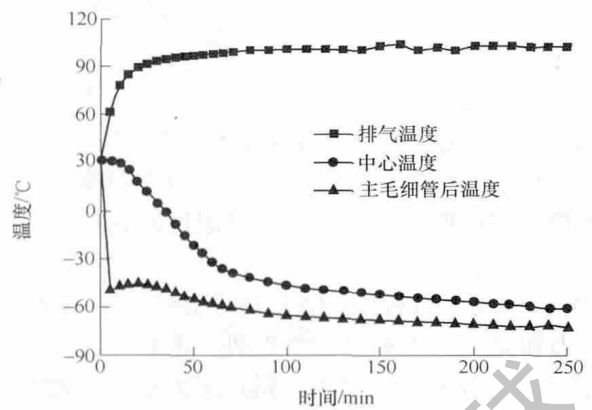


图 7 压缩机排气温度和降温曲线图

3.2 汇合特性分析

根据图 2 中 10 点工质的流动状态，副毛细管后富含 R600a 的高沸点工质与蒸发器出口富含 R23 的低沸点工质汇合，汇合流经过回热器后进入压缩机。汇合点 10 的温度变化如图 8 所示。蒸发器出口温度与冰箱中心的温度变化趋势类似，温度稳定在 -55℃ 左右。副毛细管温度与主毛细管温度的变化趋势类似，刚开机时变化较剧烈，最后稳定在 -15℃ 左右。理想汇合过程应满足能量守恒，流进工质的焓值等于流出工质的焓值，汇合过程是一个不可逆过程(熵增大过程)。在开机 30 min 内，汇合流温度始终低于两个支流温度，30 min 以后，才介于两者之间。按照习惯性经验，汇合流温度应该介于两个支流温度之间，其原因可以分析如下：两种工质没有相变汇合时汇合后的温度应介于两个支流工质温度之间；如果有相变存在，相变潜热使同温度的液体与气体相互转化，但温度基本不变。刚开机 30 min 内，汇合使较多的 R23 成分气化吸收相变潜热，而 R600a 冷凝的较少，宏观上表现为汇合物温度降低。30 min 以后，系统温度比较低，汇合时 R23 成分气化量与 R600a 冷凝量对温度的影响不显著，汇合后工质温度介于两者之间。

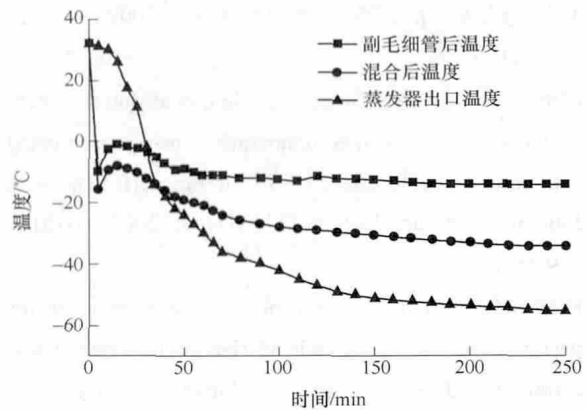


图 8 汇合点温度变化图

4 结 论

(1) 恒压变化过程中,随着低沸点组分的增加,泡点温度和露点温度都呈减小趋势,泡点温度最初减小比较剧烈后期比较平缓;露点温度最初比较平缓后期比较剧烈。

(2) 恒温变化过程中,随着低沸点组分的增加,泡点压力和露点压力都呈增大趋势,泡点压力最初增加比较平缓后期比较剧烈;露点压力最初比较剧烈后期比较平缓。

(3) 低温冰箱降温过程可以分为 4 个阶段:延迟段、快速段、慢速段、稳定调整段,开机 3.5 h 后冰箱中心温度降至 -60 左右。

(4) 开机运行初期,汇合流的温度低于两个支流的温度;运行一段时间后,汇合工质温度才介于两者之间。

参 考 文 献

- [1] 晏刚, 颜俊, 王维, 等. 自复叠制冷循环双温冰箱设计的理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 551-555.
YAN Gang, YAN Jun, WANG Wei, et al. Theoretical study on design of two-stage temperature refrigerator using auto-cascade refrigeration cycle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(5): 551-555.
- [2] 晏刚, 任娜颖, 徐荣吉, 等. 船舶多温冷库新型自复叠制冷循环的研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 536-539.
YAN Gang, REN Nuoying, XU Rongji, et al. Studies on a new type of auto-refrigerating cascade circle for marine multi-stage temperature refrigerator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 536-539.
- [3] 任娜颖, 晏刚, 颜俊, 等. 自复叠双温冰箱的流程改进和性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 549-553.
REN Nuoying, YAN Gang, YAN Jun, et al. Improvement on the flow of two-stage temperatures refrigerator using auto-cascade cycle and analysis of the performance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5): 549-553.
- [4] KIM S G, KIM M S. Experiment and simulation on the performance an autocascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 1093-1101.
- [5] DU Kai, ZHANG Shaoqian, XU Weirong, et al. A study on the cycle characteristics of an auto-cascade refrigeration system[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33: 240-245.
- [6] 牛宝联, 张于峰, 贡征峰, 等. 液体旁通复叠式制冷系统性能分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 192-197.
NIU Baolian, ZHANG Yufeng, GONG Zhengfeng, et al. Performance of cascade refrigeration with liquid refrigerant by-pass[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 192-197.
- [7] 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.
LIU Jinping, WU Xiao, GUO Lingbing. Effects of opening of throttle valves on condenser-evaporator heat transfer performance of auto-cascade refrigeration cycle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 152-157.
- [8] LITTLE W A, SAPOZHNIKOV. Low cost cryocoolers for cryoelectronics[C]//Cryocooler 9, New York: Pnum Press, 1997: 509-513.
- [9] DALE J. Missimer. Refrigerant conversion of auto-refrigerating cascade(ARC) systems [J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(3): 201-207.
- [10] GONG M Q, WU J F, LUO E C. Performances of the mixed-gases Joule-Thomson refrigeration cycles for cooling fixed-temperature heat loads[J]. Cryogenics, 2004, 44: 847-857.
- [11] ANDREY R. Refrigerating machine operating characteristics under various mixed refrigerant mass charges[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31: 1145-1155.
- [12] 荆磊. R600a/R23 自动复叠制冷系统及其应用[D]. 上海: 上海理工大学, 2007.
JING Lei. R600a/R23 auto-cascade refrigeration system and its application [D]. Shanghai :University Shanghai for Science and Technology, 2007.
- [13] 杜凯, 徐卫荣. R134a/R123 自然复叠式热泵系统浓度配比分析[J]. 制冷学报, 2009, 30(2): 33-38.
DU Kai, XU Weirong. Concentration optimization of R34a/R23 in auto-cascade heat pump systems [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(2): 33-38.

作者简介: 芮胜军(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士研究生。主要研究方向为混合工质制冷装置优化。

E-mail: sjrui@haust.edu.cn