

自复叠双温冰箱的流程改进和性能分析

任娜颖, 晏刚, 颜俊, 吴业正

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统双温冰箱制冷循环存在的不足, 提出了自复叠双温冰箱循环, 在以前设计流程的基础上研究了4种流程改进方案, 并分析了换热器不同布置方式、不同换热效果和分凝分离级数对冰箱性能的影响。模拟计算结果表明: 在冷藏室蒸发器前增加逆流换热器只能降低冷藏室蒸发器的温度而不能提高系统性能系数(C_{COP}); 在冷冻室蒸发器前增加逆流换热器可以提高系统 C_{COP} ; 在气液分离器前增加逆流换热器可以通过提高气液分离效率来改善系统性能, 但 C_{COP} 提高不大; 采用两级分凝分离方式可以较好地提高气液分离效率, 降低压缩机的压力比, 提高系统 C_{COP} , 也达到了改进系统性能的目的, 但流程较复杂。这4种改进流程从不同方面改善了循环工作参数, 为改善实际装置的系统性能提供了理论基础。

关键词: 双温冰箱; 自复叠循环; 改进流程; 逆流换热器; 两级分凝分离

中图分类号: TB657.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0549-04

Improvement on the Flow of Two-Stage Temperatures Refrigerator Using Auto Cascade Cycle and Analysis of the Performance

Ren Nuoying, Yan Gang, Yan Jun, Wu Yezheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The auto-cascade refrigeration cycle for two-stage temperature refrigerator was proposed and four kinds of modified flow paths were studied. The influence of different locations and efficiency of a heat exchanger and different separating steps on performance of the refrigerator was also analyzed. The results of simulating calculation show that the evaporating temperature of fridge chamber is reduced but the coefficient of performance (COP) is not increased when a counterflow heat exchanger is set ahead of the evaporator of fridge chamber; the COP is improved when the heat exchanger is set ahead of the evaporator of freezer chamber; the vapor-liquid separating efficiency is improved but the COP is not increased significantly when the heat exchanger is set ahead of the vapor-liquid separator. Moreover, the vapor-liquid separating efficiency can be improved by using two steps dephlegmation and separation, and thus the pressure ratio of the compressor is decreased and the COP is increased, but the flow path of the refrigerator is more complex.

Keywords: two-stage temperatures refrigerator; auto cascade cycle; modified flow; counterflow heat exchanger; two steps dephlegmation and separation

符号表

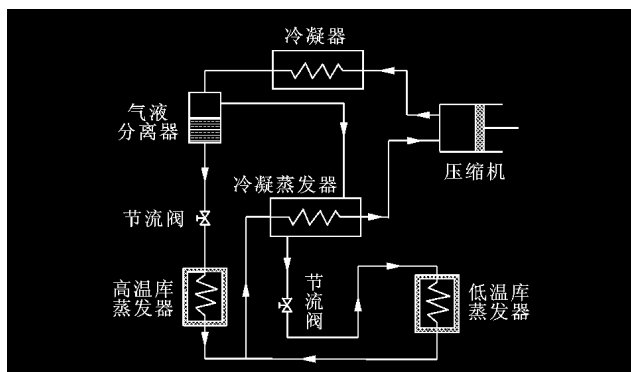
ϵ	压缩机压力比	h	焓, J/g	p_e	蒸发压力, MPa
C_{COP}	系统性能系数	t	温度, $^{\circ}\text{C}$	p_c	冷凝压力, MPa
q	单位质量制冷量, J/g	Δt	温度差, $^{\circ}\text{C}$		

目前,用于储存食品的冰箱普遍采用的是“一机多温”型的结构,为了适应不同储物不同储存温度的要求,需要用一套制冷装置提供两级或多级间室温度。但是,传统的双温冰箱制冷循环中制冷剂经毛细管节流后依次进入冷冻室和冷藏室蒸发器,循环中只提供一级与冷冻室温度相匹配的蒸发温度,这使得冷藏室中存在着较大的传热温差,会造成较大的不可逆损失,导致制冷系数降低,并且货物干耗增加。

自复叠制冷循环系统利用非共沸制冷剂的分凝原理,仅用一台压缩机实现复叠制冷,使得运动部件减少,系统简单可靠^[1]。由于自复叠制冷循环可以实现从低于 80 K 的液氮温区到 230 K 的传统蒸汽压缩制冷循环制冷温区,无论是在普冷领域还是在半导体工业,低温医学中的血液、药品保存,食品的冷冻储存,气体液化等深冷领域,都具有比较大的实用价值,因此吸引了许多制冷公司开发采用自复叠循环的低温冷冻箱。目前,采用此循环的低温冰箱生产厂家主要集中在欧美和日本,如美国的 REVCO 公司和日本的 SANYO 公司^[2]。但是,对于自复叠循环的利用目前还主要集中在单温冷冻箱,并没有推广到普冷温区的双温冰箱。

本文作者在文献[3]中提出的将自复叠循环用于船舶双温冷库的循环流程如图 1 所示,该装置可以在相同蒸发压力下为双温冷库提供与间室温度相匹配的两级蒸发温度,将此循环流程用于双温冰箱就可以在制取较低蒸发温度的同时解决冷藏室传热温差大的问题。根据文献[3],当选用非共沸混合工质 R600a 和 R32(质量分数为 0.7 和 0.3)、压缩机工作压力为 1.3 和 0.135 MPa 时,系统可提供-5、-35℃两级蒸发温度,但系统的性能系数 C_{OP} 只有 1.1,这是该装置的主要缺点。

为了改善自复叠双温冰箱的工作性能,需要对



1~11:循环过程中各状态点

图1 自复叠双温冷库系统流程图

系统流程进行改进。对自复叠循环性能影响较大的因素包括制冷剂的选择、逆流换热器的结构、气液分离效率等^[4-6]。基于以前的研究结果,R600a 和 R32(其质量分数分别为 0.7 和 0.3)在文献[3]所设计的温区内已经是较优的混合制冷剂,因此本文提出了 4 种自复叠双温冰箱流程的改进方案,并编写了不同改进方案的模拟程序,来研究这 4 种改进流程对冰箱性能的影响。

1 模拟计算程序中参数的设定

计算时采用美国国家标准技术研究所开发的 NIST REFPROP 7.0 数据库软件,并在自复叠双温冰箱模拟程序中调用其内部热物性计算函数。为了使模拟程序简单,易于比较,在程序中作如下设定:

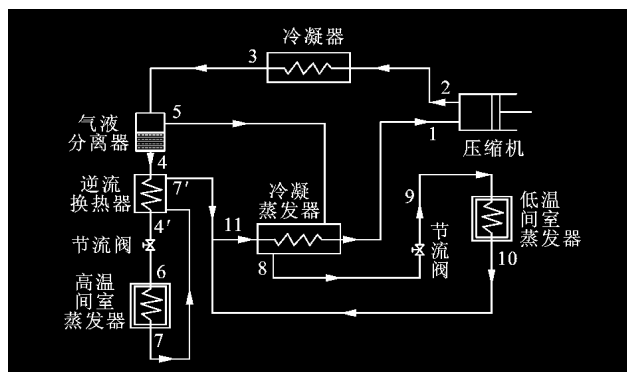
- (1)系统参数中冷凝器出口温度 $t_3 = 45^\circ\text{C}$,冷冻室蒸发器出口温度 $t_{10} = -35^\circ\text{C}$,冷藏室蒸发器出口温度 t_7 取值的范围为 $-5 \sim -10^\circ\text{C}$;
- (2)冷藏室和冷冻室的制冷量相等;
- (3)换热器的换热过程为理想情况,无能量损失;
- (4)节流过程为等焓过程;
- (5)蒸发压力 p_e 和冷凝压力 p_c 应首先保证冷冻室蒸发器的温度满足要求。

2 自复叠双温冰箱改进流程方案

2.1 冷藏室蒸发器前增加逆流换热器

采用如图 2 所示的循环,在冷藏室蒸发器前增加逆流换热器,从冷藏室蒸发器出来的低温低压制冷剂过节流阀前的液相工质,这样可以降低节流后工质的温度和干度,使冷藏室蒸发器入口处的工质温度降低。

假设逆流换热器的换热过程为理想情况,即 $h_4 - h_{4'} = h_7' - h_7 = \Delta h$,节流过程为等焓节流,即 $h_{4'} =$



1~11:循环过程中各状态点

图2 冷藏室蒸发器前增加换热器的冰箱流程图

h_6 . 从冷藏室支路流程可以看出

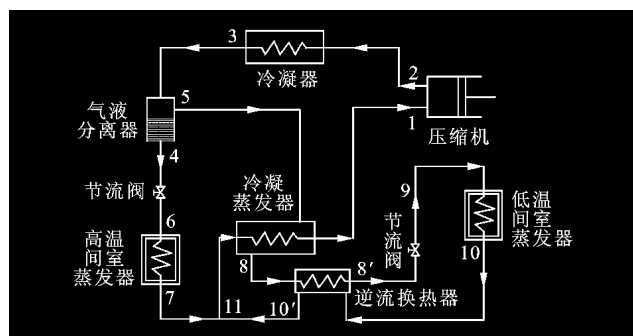
$$h_{7'} = h_6 + q + \Delta h = h_4 - \Delta h + q + \Delta h = h_4 + q \quad (1)$$

式中:下标数字对应图2中各状态点.

当 p_e 和 p_c 不变时,式(1)中的 h_4 是确定的,又因为冷冻室支路的参数没有改变,所以制冷剂的单位质量制冷量不变,即式(1)中 q 不变,因此 $h_{7'}$ 是确定的.冷藏室支路和冷冻室支路制冷剂混合后 h_{11} 和 h_1 是确定的,即压缩机进口温度 t_1 和单位制冷剂耗功不变,但冷藏室蒸发器的温度降低.

2.2 冷冻室蒸发器前增加逆流换热器

采用如图3所示循环,从冷冻室蒸发器出来的一 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两相工质过冷从冷凝蒸发器出来的液相工质,即降低冷冻室蒸发器入口处工质的温度和干度.



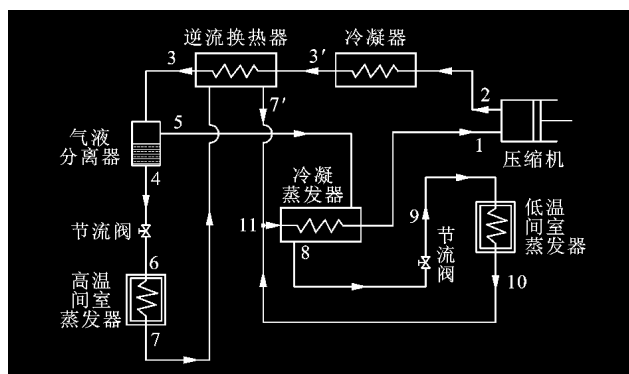
1~11:循环过程中各状态点

图3 冷冻室蒸发器前增加换热器的冰箱流程图

如图3所示,在状态点8到状态点8'之间增加逆流换热器时,在相同的 p_e 和 p_c 下,节流前制冷剂的过冷度增大,制冷剂在冷冻室蒸发器的进口温度 t_9 降低,因为冷冻室蒸发器的出口温度 t_{10} 保持 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$,单位质量制冷剂在冷冻室蒸发器中的制冷量增加,同时状态点10'的制冷剂温度 $t_{10'}$ 会有相应升高,又因为冷藏室蒸发器中温度和单位质量制冷剂的制冷量都没有变化,使得混合后的制冷剂温度升高(见状态点11),因此压缩机进口温度升高.为了优化系统参数,可以调节 p_e 、 p_c ,从而降低压缩机的压力比和进、出口温度.

2.3 气液分离器前增加逆流换热器

如图4所示,在气液分离器前增加逆流换热器,利用从冷藏室蒸发器出来的低温低压制冷剂降低进入气液分离器的工质温度,可以使更多的高沸点组分制冷剂冷凝成液体,这样气相工质中的低沸点组分质量分数增大,可以提高气液分离的效率,从而降低压缩机的压力比,提高系统的 C_{COP} .



1~11:循环过程中各状态点

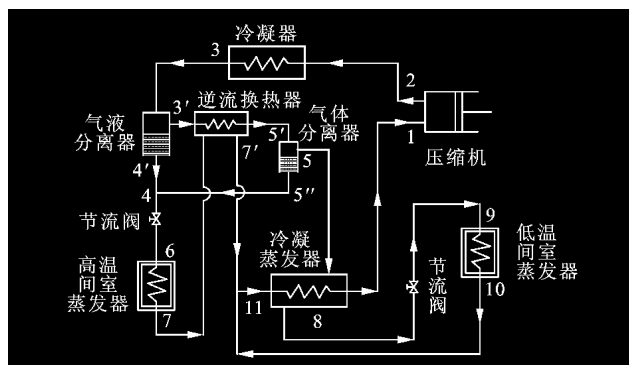
图4 气液分离器前增加换热器的双温冰箱系统流程图

2.4 采用两级分凝流程

传统上用于自复叠循环的气液分离器是采用等温等压下的平衡闪蒸方式,通过在流道上采取一些措施,将已经形成气液两相的流体中液相和气相分离.但是,这种分离方式不能够将工质中高沸点组分全部分离出来,其分离效率完全依靠工质在分离点的气液相平衡特性.在图1~图3中都采用的是一级分凝分离的方式,相应的计算结果表明,从气液分离器出来的气相中 R600a 的质量分数在 0.45~0.55 范围内,即高沸点组分的质量分数占一半左右,高、低沸点组分制冷剂的分离效率较差.虽然图4通过在气液分离器前增加逆流换热器来提高气液分离的效率,但提高得并不多.

如果采用图5所示的两级分凝分离方式,将气液分离的过程分两级进行,就可以将高、低沸点工质更好地分离,降低最终分离出的气体中高沸点组分制冷剂的质量分数,从而降低蒸发器的温度滑移,减少蒸发器的能量损失,并且能将润滑油更好地分离出来,防止低温端的节流元件阻塞^[7].

对于一定配比的混合工质,气液分离器中气相的组成取决于相平衡点的温度和压力,当给定混合



1~11:循环过程中各状态点

图5 两级分凝自复叠双温冰箱流程图

工质的配比、 p_c 和 t_3 时,气液分离器的分离效率是一定的,进入气液分离器的工质温度 t_5 (即换热器的换热效果)就是影响着第二级分离器分离效率的主要参数。

3 4种改进流程的性能分析

为了研究这4种改进方案对系统性能的影响,并进行比较,找到较优的改进方案,就要研究当换热器具有不同的换热效果时,即高温高压侧制冷剂在换热器中降低的温度 Δt (进口温度-出口温度)改变时,系统主要性能参数的变化(见图6、图7)。在“气液分离器前增加逆流换热器”和“采用两级分凝”2种方案中,为了保证进入气液分离器的混合工质处于两相区,仅考虑 Δt 小于 15°C 的情况。模拟计算结果表明:在这2组改进流程中,当高温高压侧制冷剂在换热器中的温度降低超过 15°C 时,从换热器出来的制冷剂接近于饱和液体状态,气体量太少。

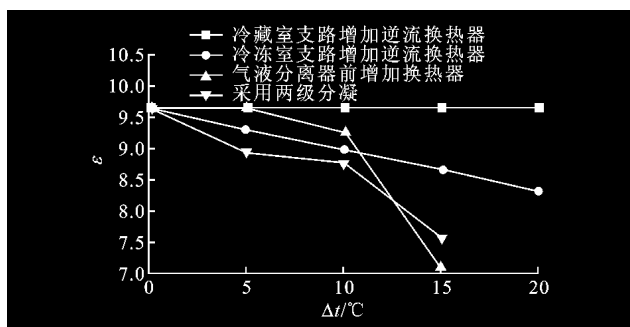


图6 4种方案中压力比 ϵ 随 Δt 的变化曲线

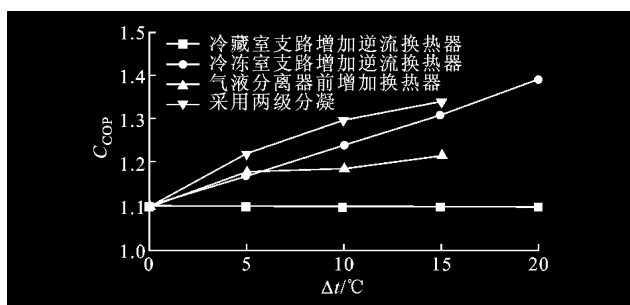


图7 4种方案中 C_{COP} 随 Δt 的变化曲线

图6、图7中的曲线说明如下规律:

(1)由于 p_e 和 p_c 是由冷冻室蒸发器的温度决定的,所以当在冷藏室蒸发器前增加逆流换热器并且冷藏室蒸发器的温度在 $-5\sim-10^\circ\text{C}$ 的范围内时, p_e 和 p_c 不需要调节。从上述分析可知,此时单位制冷剂的制冷量和耗功不变,同时 ϵ 和 C_{COP} 也不变,但冷藏室温度可以降低。当 Δt 为 20°C 时,冷藏

室蒸发器出口温度下降 1.8°C 。

(2)在冷冻室蒸发器前增加逆流换热器,可以通过增加节流前制冷剂的过冷度降低 ϵ ,提高系统的 C_{COP} ,实现优化设计。当 Δt 为 20°C 时,系统的 C_{COP} 提高 25.5% ,虽然增加逆流换热器使压缩机的进口温度增大,但由于 ϵ 有所降低,所以压缩机出口温度 t_2 不超过 120°C ,仍在许可范围内。

(3)在气液分离器前增加逆流换热器可以降低 ϵ ,提高 C_{COP} ,改进系统性能。但是,这种流程对于气液分离效率的提高并不大,系统的 C_{COP} 增加量也不大,当 Δt 为 15°C 时,系统的 C_{COP} 仅提高 10.9% 。

(4)采用两级分凝流程可以较好地提高气液分离效率,当 Δt 增加到 15°C 时,分离的气相工质中 R32 质量分数增加 28% , ϵ 降低 21.7% , C_{COP} 增大 17.9% ,对系统性能的优化作用比较明显。但是,两级分凝较单级分凝结构复杂,制造成本也较高。为了简化流程,降低成本,又使系统拥有更高的运行效率,可以通过对传统的单级分凝气液分离器进行特殊流道设计来提高气液分离器的分离效率,改善系统性能。

4 结 论

(1)在冷藏室蒸发器前增加逆流换热器可以降低冷藏室蒸发器的进出口温度,但不能提高系统的 C_{COP} ,可以用于需要降低冷藏室温度的装置中。

(2)在冷冻室蒸发器前增加逆流换热器可以在压缩机的出口温度满足要求的条件下,较好地降低压缩机的压力比 ϵ ,达到提高流程 C_{COP} 的目的。

(3)在气液分离器前增加逆流换热器,可以通过降低混合工质的温度来提高气液分离效率,达到提高系统 C_{COP} 的目的,但效果有限。

(4)两级分凝分离方式可以较好地提高气液分离效率,降低压缩机的压力比 ϵ ,提高系统的 C_{COP} ,改进系统性能,但由于系统结构较复杂,为了简化结构,可以通过对传统气液分离器进行改进,提高分离效率。

这4种改进流程从不同方面改善了系统参数,用于降低蒸发器温度或提高系统的 C_{COP} ,都可以作为实际装置的改进方案。

参考文献:

- [1] 吴业正. 制冷与低温技术原理[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [2] 韩润虎. 自然复叠系统与低温制冷[J]. 制冷学报,1999

- (4):59-61.
- Han Runhu. Autocascade system and low temperature refrigeration [J]. Journal of Refrigeration, 1999(4): 59-61.
- [3] 晏刚,任挪颖,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): 526-538.
- Yan Gang, Ren Nuoying, Xu Rongji, et al. Studies on a new type of auto-refrigerating cascade cycle for marine multi stage temperature refrigerator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2006, 40(5):526-538.
- [4] Agnew B, Ameli S M. A finite time analysis of a cascade refrigeration system using alternative refrigerants [J]. Applied Thermal Engineering, 2004(24):2557-2565.
- [5] Somasundaram P, Dinakaran R, Iniyar S. Exergy based refrigerant selection and simulation of auto-refrigeration cascade (ARC) system [J]. International Journal of Exergy,2004,1(1):60-80.
- [6] Kim S G, Kim M S. Experiment and simulation on the performance of an auto cascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration,2002(25):1093-1101.
- [7] 刘建丽,公茂琼,吴剑峰,等. 一种新型分凝分离式混合工质内复叠节流制冷机的实验研究[J]. 低温与超导, 2001,29(2):6-10.
- Liu Jianli, Gong Maoqiong, Wu Jianfeng, et al. Experimental research on a new type of mixed-refrigerant fractionation refrigeration cycle [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2001, 29(2):6-10.

(编辑 王焕雪)