

船舶多温冷库新型自复叠制冷循环的研究

晏 刚, 任娜颖, 徐荣吉, 吴业正
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统船舶一机多温冷藏系统在不同蒸发压力下提供不同蒸发温度所存在的问题, 提出将改进的自复叠制冷循环用于船舶多温冷库. 新型自复叠制冷循环使用非共沸混合工质, 可以在相同的蒸发压力下提供不同的蒸发温度. 根据船舶双温冷库的间室温度, 选取 R600a 和 R32 组成的非共沸混合工质作为制冷剂, 并对系统进行了流程设计、模拟计算, 得到了设计工况下蒸发压力、冷凝压力、压缩机压缩比和性能系数随 R600a 质量分数变化的曲线, 发现当 R600a/R32 的质量分数为 0.7/0.3 时系统的综合性能最优. 为了更好地满足船舶储存食物的温度要求, 设计了自复叠三温冷库的流程图, 为进一步研究三温冷库提供了新方法.

关键词: 船舶; 多温冷库; 自复叠制冷循环; 非共沸混合工质

中图分类号: TB657.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)05-0536-03

Studies on a New Type of Auto-Refrigerating Cascade Circle for Marine Multi-Stage Temperature Refrigerator

Yan Gang, Ren Nuoying, Xu Rongji, Wu Yezheng
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problems existing in a typical marine multi-stage temperature refrigeration system which provides different evaporation temperatures under different evaporation pressures, a new type of auto-refrigerating cascade cycle was proposed. The new cycle, employing non-azeotropic mixture refrigerant, can provide different evaporation temperatures under an evaporation pressure. According to the temperature of compartments of marine two-stage temperature refrigerator, the non-azeotropic mixture refrigerant composed of R600a and R32 was employed. The flow chart of the system was designed and the performance of the system was calculated. The curves expressing the changes of evaporation pressure, condensation pressure, pressure ratio of compressor, and coefficient of performance with different mass percent of R600a were obtained. The results show that the general performance is optimal when the mass proportion of R600a/R32 is 0.7/0.3. To meet the requirement of temperature of food stored in marine better, the flow chart of auto-refrigerating cascade cycle for three-stage temperature refrigerator was also designed.

Key words: marine; multi-stage temperature refrigerator; auto-refrigerating cascade circle; non-azeotropic mixture refrigerant

各类船舶都离不开用于储存食物的冷库装置, 其好坏直接影响着船员和乘客最重要的饮食问题, 因此船舶冷库的高效运行是船舶顺利出海航行的保

证. 由于需要储存的食物包括鱼类、肉类、蔬菜类和粮食类, 为了保证各种食物都能在其需要的适宜温度下储存, 船舶冷库一般都做成双温或三温的形

式^[1]. 又因为船舶冷库的库容较小,只用一台制冷装置就可以满足各冷库所需的制冷量,所以目前使用最多的就是一机多库冷藏系统. 这种冷藏系统可以减少机电装置的数量,相应减少了投资和装置的占地面积.

如果一机多库冷藏系统只提供一级蒸发温度,使高温库和低温库在相同的蒸发压力和温度下换热,高温库蒸发器由于较大的传热温差会导致制冷系数降低,货物干耗增加. 采用如图1所示的制冷循环,可使高、低温库在不同的蒸发压力下具有不同的蒸发温度. 即在高温库蒸发器回气管上安装压力调节阀,高温库在调节阀后回气管内的压力与低温库基本相等,在低温库蒸发器回气管上安装气体止回阀,避免当压缩机停用时,高温库的回气向低温库倒流. 但是,在图1所示的循环中高温库制冷剂经蒸发压力调节阀节流降压后的这部分能量未能充分利用,直接与低温库相同压力的制冷剂混合后进入压缩机,使压缩机的吸气压力降低,制冷循环的压力比增大,能耗必然增加,没有达到节能的目的. 参考文献[2]中提出了用喷射器代替蒸发压力调节阀,用来提高压缩机的回气压力,使能耗减小,但由于喷射器的工作性能不稳定,导致该系统的可靠性变差,所以目前该系统一直没有实际应用.

为了解决船舶一机多库冷藏系统目前存在的这些问题,本文提出了使用自复叠制冷循环在相同蒸发压力下为多温冷库提供2级或3级蒸发温度^[3],可以通过选择合适的工质对和组分使系统的压力比、性能系数都能很好地达到要求,是一种适用于船舶冷库的新制冷循环.

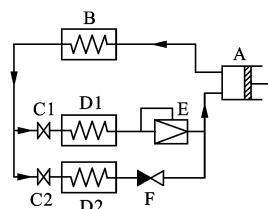
1 船舶双温冷库的设计

1.1 船舶自复叠双温冷库的工作原理

自复叠制冷循环是利用非共沸混合工质在相平衡时气、液相成分不同的特点,通过冷凝器和气液分离器将高沸点工质和低沸点工质分离并进入2个制冷循环进行复叠^[4]. 目前,自复叠制冷循环是-120~-80℃低温冰箱的主要制冷型式,但大都提供单个间室温度,并没有将其推广应用到多温冰箱系统,本文将自复叠制冷循环用于船舶多温冷库系统,所设计的自复叠双温冷库的系统流程如图2所示.

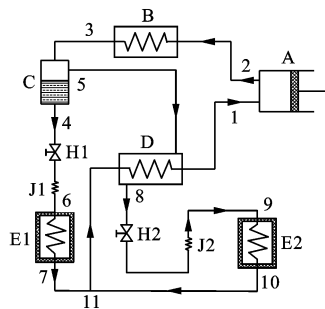
将自复叠双温冷库系统流程图的各个状态点表示在压-焓图($p-h$ 图)上,可以更清楚地了解循环过程中工质的状态,如图3所示.

针对船舶冷库的温度需求,文中所设计的高温



A: 压缩机; B: 冷凝器; C1、C2: 节流阀; D1: 高温库蒸发器;
D2: 低温库蒸发器; E: 蒸发压力调节阀; F: 单向阀

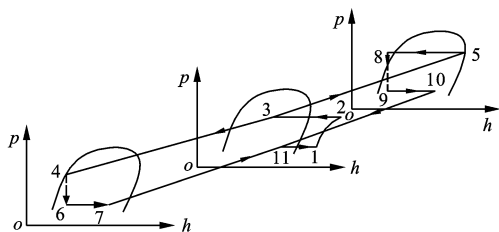
图1 不同蒸发压力的双温冷库循环



A: 压缩机; B: 冷凝器; C: 气液分离器; D: 冷凝蒸发器; E1: 高温库蒸发器; E2: 低温库蒸发器; H1、H2: 节流阀;
J1、J2: 毛细管; 1~11: 循环过程中各状态点

图2 自复叠双温冷库系统流程图

库温度为0℃,用于储存粮食和蔬菜类;低温库温度为-30℃,用于储存鱼类、肉类及打捞的海产品等. 根据2个冷库的温度,非共沸混合工质选择R600a(标准沸点-11.6℃)作为高沸点组分,R32(标准沸点-52℃)作为低沸点组分.



1~11: 循环过程中各状态点,与图2中状态点相对应

图3 系统流程在压-焓图上的表示

如图2、图3所示,自复叠双温冷库中制冷剂的循环过程如下所述. 从压缩机出来的气态高温高压混合工质R600a/R32(见状态点2)经冷凝器向冷却介质(水或空气)放热,由于二元组分的沸点不同,在冷凝器中大部分高沸点的R600a和少量低沸点的R32先冷凝成液体,而大部分R32仍保持气态. 气液两相混合工质出冷凝器后(见状态点3)进入气液分离器,富R32气体(见状态点5)和富R600a液体(见状态点4)分离. 富R600a液体经节流阀节流降

温降压后(见状态点 6)进入高温库蒸发器,向高温库提供冷量.从高温库蒸发器出来的富 R600a 两相工质(见状态点 7)与从低温库蒸发器出来的富 R32 工质(见状态点 10)混合后(见状态点 11)进入冷凝蒸发器吸热成为低压气体(见状态点 1),然后被压缩机吸入、压缩,成为高温高压气体(见状态 2 点),从而完成整个循环.富 R32 气体在冷凝蒸发器中被冷凝成液体,富 R32 液体从冷凝蒸发器出来后(见状态点 8)经节流阀节流降温降压后(见状态点 9)进入低温库蒸发器,吸收低温库的热量完成蒸发过程,成为两相工质(见状态点 10).

1.2 船舶自复叠双温冷库的参数选择

由于船舶航行时环境温度具有一定的不确定性和不稳定性,为了在设计时简化问题,将环境温度定为 40 .设计工况规定如下:冷凝器出口温度 45 ,低温库蒸发器出口温度在 - 35 左右,高温库蒸发器出口温度在 - 5 左右,压缩机压缩单位质量混合工质时低温库和高温库得到相同数量的冷量,冷凝器的冷却方式采用风冷.对于自复叠双温冷库,高温库和低温库的蒸发压力是相等的,因此系统的冷凝压力和蒸发压力是惟一的.

为了对系统进行模拟计算,确定混合工质 R600a/ R32 中各组分的质量分数以及系统各点参数,我们编写了混合工质性质程序和自复叠双温冷库系统程序,计算了不同质量配比的 R600a/ R32 对系统参数的影响.图 4~ 图 6 列出了系统主要参数随 R600a 质量分数变化的曲线.

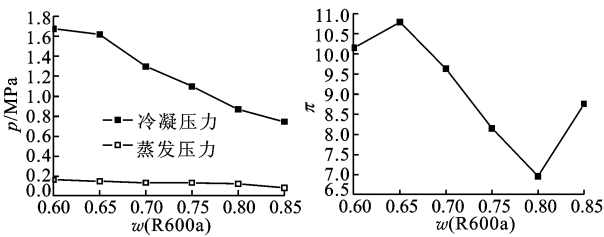


图 4 冷凝压力和蒸发压力 图 5 压缩机压缩比 随 R600a 质量分数变化的曲线

从图 4~ 图 6 可以看出,随着 R600a/ R32 中 R600a 质量分数的增加,冷凝压力迅速降低,蒸发压力发生较小变化,相应的压缩机压缩比 有较大波动,系统性能系数 C_{COP} 降低幅度增大.

综合考虑压缩机压缩比和系统性能系数,初步将 R600a/ R32 的质量分数确定为 0.7/0.3,此时系统压力比为 9.6,性能系数 C_{COP} 为 1.1,为了进一步

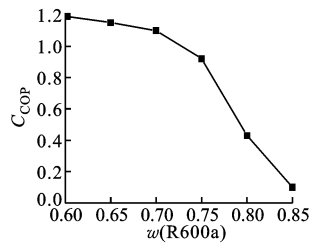


图 6 系统性能系数 C_{COP} 随 R600a 质量分数变化的曲线
了解在该组分下系统的工作状态,表 1 列出了 R600a/ R32 (0.7/0.3) 系统各状态点(与图 2、图 3 对应)的主要参数.

从表 1 可以看出:所设计的自复叠双温冷库高温库蒸发器的进、出口温度为 - 10.8 、 - 7.8 ,能够保证低温库维持在 0 ;低温库蒸发器的进、出口温度为 - 41.3 、 - 35 ,能够保证低温库维持在 - 30 ,并且压缩机对单位质量混合工质 R600a/ R32 (0.7/0.3) 做功为 103.4 J/g,可以向高、低温库提供相等的冷量 56.9 J/g,满足了设计工况的要求.

表 1 混合工质 R600a/ R32 (0.7/0.3) 系统主要参数

状态点	$t/$	p/MPa	$h/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$s/\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$
1	18.5	0.135	32.4	144.0
2	98.6	1.300	38.2	144.0
3	45.0	1.300	26.0	107.5
4	45.0	1.300	18.5	82.2
5	45.0	1.300	31.7	126.7
6	- 10.8	0.135	18.5	86.5
7	- 7.8	0.135	25.9	114.6
8	14.3	1.300	15.0	71.2
9	- 41.3	0.135	15.0	71.2
10	- 35.0	0.135	20.6	100.0
11	- 20.0	0.135	22.9	107.6

注: h 为焓; s 为熵.

2 船舶三温冷库的流程设计

如果要将船舶储存食物所要求的温度分为 3 个温区,例如蔬菜类(0)、肉类(- 18)、海产品类(- 35),则船舶冷库需要做成一机三温的形式.图 7 所示就是所设计的自复叠三温冷库系统流程图.

针对所设计的 3 个温区,可以选择给 R600a/ R32 中加入一种中间沸点的工质 R134a (标准沸点为 (下转第 557 页)

比都很小.

参考文献:

[1] Robinson D M, Groll E A. Efficiencies of transcritical CO₂ cycles with and without an expansion turbine [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21 (7): 577-589.

[2] 刘军朴,陈江平. 跨临界二氧化碳蒸气压缩/喷射制冷循环 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 273-275.
[3] Li Daqing, Groll E A. Transcritical CO₂ refrigeration cycle with ejector-expansion device [A]. International Refrigeration Conference at Purdue [C]. Indiana, USA: Purdue Univ, 2004. 1377-1477.

(编辑 荆树蓉 王焕雪)

(上接第 538 页)

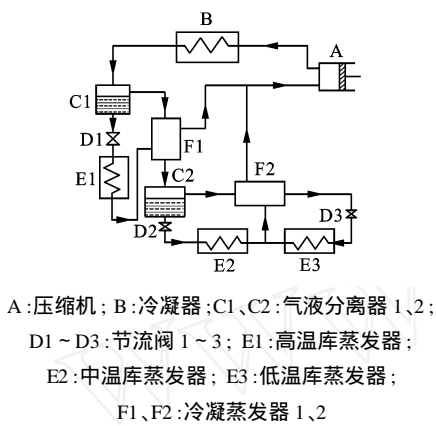


图 7 自复叠三温冷库系统流程图

- 26)作为自复叠三温冷库系统的制冷剂. 制冷剂流程为:从压缩机出来的气态高温高压混合工质 R600a/ R134a/ R32 经冷凝器向冷却介质(水或空气)放热,其中大部分 R600a 冷凝成液体,制冷剂 R134a 和 R32 少量冷凝,在气液分离器 1 中混合工质分离成 2 路流出,从气液分离器 1 下部出来的液体(R600a 占主要成分)经过节流阀 1 节流进入高温库蒸发器,为高温库提供冷量;从气液分离器 1 上部出来的气体(R134a 和 R32 占主要成分)进入冷凝蒸发器 1 被从高温库蒸发器出来的制冷剂冷凝,其中 R134a 大部分冷凝成液态制冷剂并进入下一级的的气液分离器 2 中进行分离,富 R134a 液体经节流阀 2 节流后进入中温库蒸发器,为中温库提供冷量;从气液分离器 2 出来的气体(R32 占主要成分)进入冷凝蒸发器 2 被冷凝成液态制冷剂,经节流后进入低温库蒸发器;从低温库蒸发器出来的富 R32 工质与从中温库蒸发器出来的富 R134a 工质混合后,经过冷凝蒸发器 2 吸热成为气体,再与从冷凝蒸发器 1 出来的富 R600a 工质混合进入压缩机,完成整个

循环.

船舶三温冷库可以更好地满足不同食物对于储存温度的要求,在这方面比双温冷库具有优势,对于其组分和参数的确定有待于我们进一步的研究.

3 结 论

(1) 针对现有船舶一机多库冷藏系统中由于高、低温冷库蒸发压力不同所造成的大能耗、高压比的问题,本文提出了将自复叠制冷循环应用于船舶一机多库系统,可以在相同的蒸发压力下提供不同的蒸发温度.

(2) 进行了自复叠双温冷库的流程设计,通过程序计算,得到了 R600a/ R32 不同质量配比时系统参数变化的曲线,由此确定 R600a/ R32 的质量分数为 0. 7/ 0. 3,由 R600a/ R32 (0. 7/ 0. 3) 系统各状态点的参数可以看出此时高、低温库的温度和冷量都达到了设计要求,具有可行性.

(3) 为了使冷库温度更好地与食物储存温度相匹配,设计了自复叠三温冷库系统流程,为进一步研究三温冷库打下了基础.

参考文献:

[1] 张 慧,徐茂堂. 从一机多库的使用要求展望我国舰船冷藏装置的发展[J]. 船舶,1998(4): 42-44.
[2] 徐合力,胡甫才. 船舶高、低温冷库制冷新循环理论分析与实验[J]. 中国航海,2004(4): 74-76.
[3] 晏 刚. 一种单机多温蒸气压缩式制冷装置[P]. 中国,实用新型,03262516. 2. 2003-07.
[4] 吴业正. 制冷与低温技术原理[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

(编辑 王焕雪)