

自然复叠制冷系统初探*

杜 垲 廖开蒙

(东南大学动力工程系 南京 210096)

摘要 自然复叠制冷系统是一种采用多元混合工质的制冷系统,它使用单台压缩机,通过自然分离、多级复叠的方法,在高沸点组分和低沸点组分之间实现了复叠,达到了制取低温的目的。详细介绍了自然复叠制冷系统的原理,将自然复叠循环与单级压缩、双级压缩、复叠式进行了分析比较,指出了自然复叠循环的优势。文中给出了自然复叠制冷系统的优化原则,并将用CFC作制冷剂的自然复叠循环的计算结果和两级压缩循环、复叠循环的计算结果进行了比较。对用非CFC物质作制冷剂的自然复叠制冷系统和适用于低温领域的自然复叠制冷系统进行了分析,说明自然复叠制冷系统具有较大的实用价值。

关键词 自然复叠系统 制冷 低温

1 前言

单级节流制冷机作为一种结构简单、运行可靠的制冷机,应用于国民经济的许多领域,但由于它使用的是单一制冷剂,在普冷领域,当制冷温度需要降低到低于 -60°C 时,循环的效率随着制冷温度的降低而降低。虽然复叠制冷系统可以通过增加级数来制取低于 -60°C 的温度,但随着级数的增加,系统的复杂性成倍增加,效率却降低很多。

自然复叠制冷系统使用混合工质通过单台压缩机实现了多级复叠,可以制取 -60°C 以下的低温,极大地简化了制冷系统。自然复叠制冷系统的研究最早始于1959年,当时前苏联气体研究所的A. P. Klimeenko教授采用碳氢化合物作制冷剂,用该系统来液化天然气。到了本世纪七八十年代,由于能源、环保等因素,随着对混合工质研究的深入,各国科学工作者开展了对自然复叠循环的研究,在美国有多项有关自然复叠制冷系统的专利,美国REVCO公司利用自然复叠循环的原理研制出了 -150°C 的低温箱。由于自然复叠制冷系统具有比较大的工作温区,无论是在普冷领域还是在低温电子、低温医学、冷冻干燥、气体液化等低温领域,都具有比较大的实用价值。

* 修改稿于2002年3月18日收到。杜垲,男,47岁,教授。
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

2 原理

现以两级自然复叠制冷系统(图1)为例,介绍自然复叠制冷系统的工作原理。该系统以二元混合工质为制冷剂,它是由两种不同沸点的工质组成。

从图1可以看到,当制冷剂从压缩机A排出后,进入冷凝器B,由于制冷剂的二元组分的沸点不同,在冷凝器中制冷剂中的大部分高沸点组分被冷凝成液体,制冷剂中大部分低沸点组分却仍然为蒸气。制冷剂从冷凝器出来后进入气液分离器D,在气液分离器中制冷剂分为主要成分为高沸点组分的液体和主要成分为低沸点组分的蒸气,其中液体部分经过储液器C1与节流阀J1后,在冷凝蒸发器E中蒸发吸热,蒸气部分在冷凝蒸发器E放热被冷凝为液体后,经过储液器C2、回热器G和节流阀J2,进入蒸发器F进行蒸发制冷。最后,从蒸发器出来的低沸点组分气体经回热器与从冷凝蒸发器出来的高沸点组分气体混合后进入压缩机,从而完成整个循环。

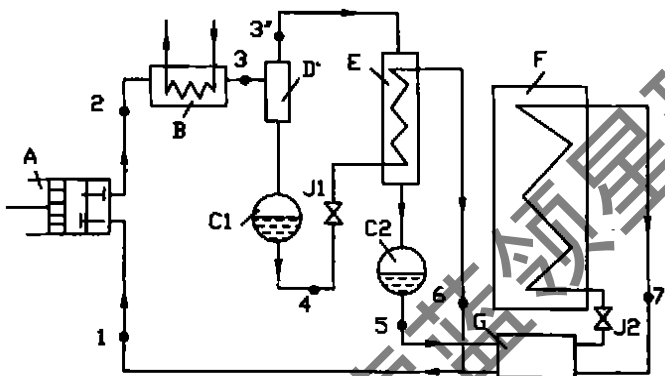


图1 自然复叠制冷系统

A—压缩机; B—冷凝器; D—气液分离器; E—冷凝蒸发器; F—蒸发器;
G—回热器; C1, C2—储液器; J1, J2—节流阀。

从该循环的工作原理可以看出,制冷剂的高沸点组分成为循环的高温制冷剂,制冷剂的低沸点组分成为循环的低温制冷剂,二者在冷凝蒸发器中实现了复叠。在冷凝器中冷凝液化的只是制冷剂的高沸点组分,其低沸点组分在冷凝蒸发器中冷凝,最后进入蒸发器取低温冷量。这就是自然复叠循环中的自然复叠与自然分离。

一般二级自然复叠可以制取 -80°C 的低温,要得到 -180°C 的低温从理论上讲要四级自然复叠。在四级自然复叠里,高沸点组分和低沸点组分在各级气液分离器中逐级分离,通过多级复叠实现了多个蒸发温度,直到沸点最低的组分进入蒸发器,得到所需的低温。

图2为二级自然复叠循环系统示意图。通过该图我们可以对自然复叠循环的工作原理有更清晰地了解。

通过该图我们看到低沸点组分和高沸点组分分别形成一个循环,这两个循环通过冷凝蒸发器联系起来,冷凝蒸发器既是高沸点组分循环的蒸发器,也是低沸点组分循环的冷凝器,从而实现了自然复叠。

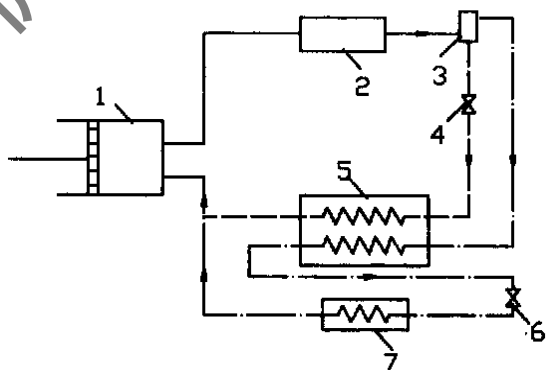


图2 自然复叠制冷系统示意图

1 压缩机; 2 冷凝器; 3 气液分离器; 4, 6 节流装置; 5 冷凝蒸发器; 7 蒸发器。

———高沸点组分循环 - - - - -低沸点组分循环

3 循环比较

自然复叠制冷循环通过自然分凝、多级复叠的方法获得较大的工作温区,从而制取较低的温度。对于单级蒸气压缩制冷循环,由于其使用的是单一制冷剂,如果采用低温工质,系统存在冷凝压力过高;如果采用高温工质又存在蒸发压力太低,而且这两种情况均存在压比较大的缺陷。这样不但造成循环性能下降,而且使循环运行的安全性受到影响。

双级蒸发气压缩制冷循环采用两个压缩机,通过分级压缩降低了每级的压比,但采用单一制冷剂的双级蒸气压缩制冷系统在制取低温时,仍然受到蒸发压力过低或制冷剂凝固温度的限制。如果蒸发压力过低,由于蒸气比容的增大和输气系数的降低,要达到某一制冷工况会使压缩机汽缸尺寸急剧增大。当采用低温制冷剂时,虽然在蒸气压力方面得到改进和提高,例如乙烷的蒸气压力为 542 kPa,但冷凝压力也随之提高,如冷凝温度为 30 °C,对于乙烷压力为 4 860 kPa,已经很接近其临界状态,当接近临界状态时,循环的节流损失会增加很多,而实现超临界循环时经济性很差。

采用两种或多种工质的复叠式制冷循环制冷时,使每台压缩机的工作压力适中,很好地解决了双级压缩循环的矛盾。但复叠循环使用了多个压缩机,使制冷系统过于复杂,而且复叠制冷系统存在着随着级数的增加,从设计制造到生产维护都需要比较多的投入问题。

一般情况下,冷却介质及被冷却物体不能看作为恒温热源,单级压缩、双级压缩及复叠循环使用的是单一制冷剂,制冷剂在同热源传热的过程中存在着较大的传热温差,致使系统不可逆损失增加,降低了制冷循环的效率。自然复叠循环用非共沸制冷剂作为工质,利用其在等压下蒸发或冷凝时温度变化的特性,使冷却介质及被冷却介质的温度变化始终分别与制冷剂的冷凝温度和蒸发温度同步,减小了传热温差,提高了制冷循环的效率。采用混合工质的自然复叠制冷循环,系统仅采用单台压缩机,制冷剂的高沸点组分成为循环的高温制冷剂,制冷剂的低沸点组分成为循环的低温制冷剂,这样就有比较宽的工作温区,在制取低温时就不存在使制冷剂的蒸发压力过低或冷凝压力过高的情况。

4 应用初探

自然复叠制冷系统设计时需要考虑几个方面:

(1) 混合工质的组成。一般是根据需达到的蒸发温度,由组元的热力性质、凝固点温度来选择,当然还要考虑组元的化学稳定性、毒性、对大气臭氧层的破坏性等问题,可供选择的制冷剂有 R14, R23, R134a, R142b, CH₄, C₂H₆, N₂, O₂, Ne, Ar 等^[4,7]。

(2) 混合工质的最佳配比确定及循环运行参数的确定。混合工质的最佳配比就是使循环效率达到最大的混合工质配比。循环的运行参数包括循环的高低压力及循环的冷凝温度、蒸发温度。一般蒸发温度、冷凝温度是已知的,而循环的高低压力和混合工质的配比有关,通过优化压力工况,可得到最佳配比,使循环的效率达到最大。

较早的自然复叠制冷循环采用的工质一般由 R11, R14, R12, R13 等制冷剂组成,由文献 [1] 根据 R12, R13 组成的混合工质的 $h-\xi$ 图,在图上确定出循环各点,得出各点焓值,可求出循环效率。采用该方法计算结果如下:先确定最低冷凝温度为 25 °C,最低蒸发温度为 -67 °C,计算时取冷凝压力范围为 (100~200) kPa,蒸发压力范围为 (800~1 500) kPa,输气系数为 0.7,指示效率为 0.694,机械效率为 0.88,可求得工质配比为 0.27,制冷系数

为 1.03。

由文献 [2]，采用两级氟利昂压缩机的制冷系统，制冷剂为 R22，冷凝温度 27°C ，蒸发温度 -65°C ，中冷器温差 5°C ，回热器温差 8°C ，中间温度取 -23°C ，高低压缩输气系数分别为 0.67, 0.623，可计算其制冷系数为 1.17；对工作于相同温区的复叠制冷系统，高温制冷剂为 R22，低温制冷剂为 R13，选取低温部分 R13 的冷凝温度 -23°C ，高温部分 R22 的蒸发温度 -28°C ，冷凝蒸发器温差为 5°C ，高低压输气系数分别为 0.61, 0.55，可计算其理论制冷系数为 1.06。

由上可知，采用 R12, R13 的自然复叠制冷循环的制冷系数与同温区的两级压缩循环、复叠制冷循环的制冷系数相差不多，不失为一种有效的制取低温的方式。

自人们发现 CFC 类物质对大气臭氧层有破坏作用，对这类物质的生产与使用进行了禁止与限制，R11, R12 是首批受禁物质^[3]，所以必须寻找新的混合工质。而混合工质组分的选择必须根据各组分工质的热力特性，由 R142b, R134a, R23, R14, R740 组成的混合工质比较适合，其 ODP 值只有 0.06。由文献 [7]，以 R142b (25.5%)，R134a (23.2%)，R23 (12.8%)，R14 (23.7%)，R740 (14.8%) 组成混合工质，利用自然复叠制冷系统可达到 -150°C 的低温，如果只要达到 -90°C 以上的温度就无需用 R740。如果将该制冷剂直接应用于原用 CFC 作制冷剂的自然复叠制冷系统，由于制冷剂迁移物性（如粘度、导热系数、扩散系数等）的变化，会引起制冷剂不平衡流动，降低了制冷剂对压缩机的冷却效果，造成压缩机过热，危害系统运行。可以通过增加一个毛细管或膨胀阀，将从第一级气液分离器引出的一部分液体节流，然后将其引入压缩机，对压缩机进行喷液冷却，这样可以使更多的高沸点组分更快的返回压缩机，改善了压缩机的工作，解决了压缩机过热的问题。这样在相同外界条件下，用非 CFC 物质作制冷剂的自然复叠制冷系统和用 CFC 作制冷剂的自然复叠制冷系统的压比相差不多，而且在制取低温时二者的制冷效率差不多。

自然复叠制冷系统也可用于低温领域制取低于 60 K 的温度，这时工质一般由 N_2 , O_2 , Ne, Ar 和一些碳氢化合物（如 CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 ）及氟利昂 R14 等组成。选定一台压缩机，工作压力上限为 9 MPa，使用多孔板逆流热交换器，以 N_2 , O_2 , Ne, Ar 为制冷剂组分建立制冷系统进行实验，可得到该制冷系统的降温曲线（图 3），可以看到降温效果还是比较明显的^[3]。

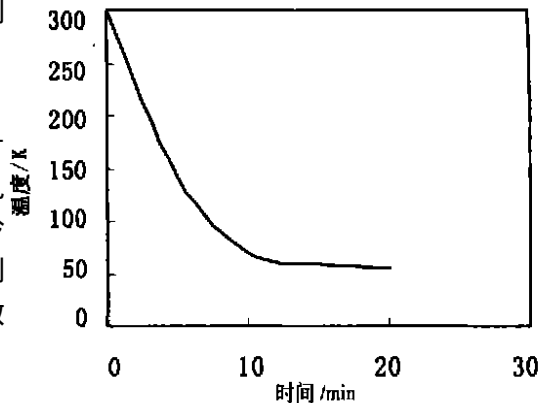


图 3 降温曲线

5 结论

自然复叠制冷系统在普冷、低温领域都具有较高的使用价值，是一个有发展前途的制冷循环系统，不过对它的研究还有待深入，需要通过不断的实验和理论计算，对该系统进行优化，找到更适用于自然复叠制冷循环系统的混合工质。

参 考 文 献

- 1 张祉 . 制冷原理及设备 . 第一版, 北京: 机械工业出版社, 1981
- 2 李寿松 . 制冷原理及设备 . 第一版, 上海: 上海科学技术出版社, 1988
- 3 吴业正 . 制冷原理及设备 . 第 2 版, 西安: 西安交通大学出版社, 1997
- 4 公茂琼, 罗二仓, 周远. 用于复叠温区的多元混合工质节流制冷机优化分析及实验研究. 制冷学报, 2000, (1): 20~26
- 5 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. 低温工程, 1999 (6): 12~16
- 6 韩润虎. 自然复叠系统与低温制冷. 制冷学报, 1999, (4): 59~61
- 7 Weng C. 1995. Non-CFC autocascade refrigeration system. U. S. Patent 5, 408, 848(April)
- 8 DiNovo, et al. 1989. Cryo-refrigeration system. U. S. Patent 4, 850, 199(July)

A RESEARCH ON AUTOCASCADE REFRIGERATION SYSTEM

Du Kai Liao Kaimeng

(Department of Power Engineering Southeast University, Nanjing 210096)

ABSTRACT Autocascade refrigeration system is a refrigeration system using mixed refrigerant. The system uses one compressor and achieves cascade between high boiling point component and low boiling point component by auto-segregate and multilevel cascade. So it can achieve low temperature. Detailed introduction to the theory of autocascade refrigeration system is given in the paper. The comparison among autocascade circle, single stage compress circle, double stage compress circle and cascade circle is made. The advantage of autocascade circle is pointed. The optimization principle of autocascade refrigeration system is presented. The result of autocascade circle using CFC refrigerant is contrast to the result of the double stage circle and the cascade circle. The autocascade refrigeration system using non-CFC refrigerant and autocascade refrigeration system applying to low temperature region are analysed. It is shown that autocascade refrigeration system has preferable practical value.

KEYWORDS autocascade system; refrigeration; low temperature