

空气制冷技术的现状及发展探讨

李敏华 巫江虹

(华南理工大学动力机械工程系)

摘要 介绍了空气制冷循环及其特性,分析了空气制冷技术的应用现状和发展前景,并对其关键技术作出深入的研究和探讨。

关键词 空气制冷 特性 低温 空调 性能系数 关键技术

RESEARCH ABOUT THE ACTUALITY AND DEVELOPMENT OF AIR REFRIGERATION TECHNOLOGY

LI Minhua WU Jianghong

ABSTRACT In this paper, both air refrigeration cycle and its characteristics are introduced, the actuality and development of air refrigeration technology is analyzed, and the key techniques concerned are researched deeply.

KEY WORDS Air refrigeration Characteristic Low temperature Air conditioning COP Key technique

1 引言

氟利昂制冷工质对臭氧层有极大的破坏作用,《蒙特利尔协议》的签订意味着氟利昂在不久的将来会被全面禁止使用,寻求氟利昂的替代工质是大势所趋。虽然如今对一些氟利昂的合成替代工质的研究取得了一定的进展,但是就目前情况看,这些替代物并不十分理想,不但价格昂贵,而且对人类健康和环境有无不可预测的危害也是一个未知数。而空气作为人类的生命之源,对环境完全友好,随处可取且取之不尽,因此,以空气作为工质的空气制冷技术重新引起了人们的关注。但是,由于

空气制冷在较高制冷温度下运行性能相对较低,一些关键技术上尚未成熟,因此有必要针对这些技术进行深入的探讨。而且,目前我国对空气制冷技术的研究和应用现状与世界格局极不协调,需要进一步明确空气制冷技术的发展前景和方向。

2 空气制冷基本理论

空气制冷循环,又称为逆布雷顿循环,通过压缩空气在膨胀机中绝热膨胀获得低温气流实现制冷。其理想的工作过程包括等熵压缩、等压冷却、等熵膨胀及等压吸热四个过程,如图1^[1]所示。这与蒸气压缩式制冷循环的四个工作过程相近,两者

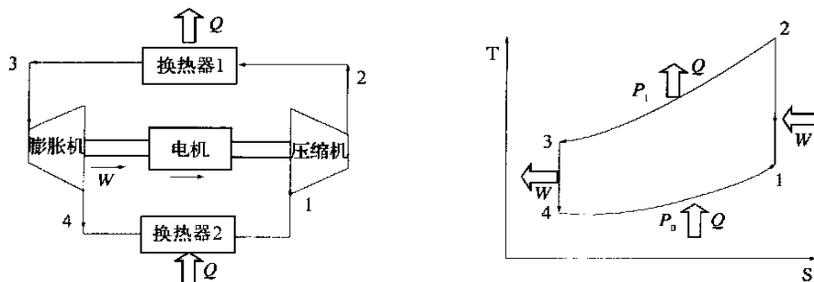


图1 空气制冷基本理论循环

的区别在于:空气制冷循环中空气不发生相变,无法实现等温吸热;空气的节流冷效应很低,降压制冷装置必须以膨胀机代替节流阀。

3 空气制冷循环的特性

空气制冷循环是能满足大气环境生态要求的最佳制冷循环,具有某些其它制冷循环不可替代的优良特性。

3.1 制冷工质的环保性和无相变性

空气是天然工质,无毒无害,对环境没有任何破坏作用,而且可以随时随地自由获取。在制冷循环中,空气只起着传递能量的作用,无论是它的化学成分还是物理相态都不发生变化(始终处于气态),这是区别于其他工质作为制冷剂的制冷循环的最明显的特征。

3.2 制冷温度范围宽,低温下运行性能优良

空气制冷循环可以满足 0℃ 以上 ~ -140℃ 的温度要求,虽然制冷温度在 -50℃ 以上时,其 COP 与蒸气压缩制冷循环相比较小,但随着制冷温度的降低,空气制冷循环的 COP 下降比蒸气压缩制冷缓慢得多,到 -50℃ 以下基本相差不大,特别是当制冷温度在 -72℃ 以下时,其制冷性能甚至优于蒸气压缩制冷机^[2]。因此空气制冷装置在很宽的较低制冷温度范围内(-50℃ ~ -100℃ 以下)具有优良的运行性能,这是蒸气压缩制冷系统所无法比拟的。

3.3 可采用节能的直接冷却或放热的开式系统

空气和环境气体具有同一性,可随处自由获取,而且在整个制冷循环中都处于气体状态,这使得空气制冷系统可以在某些具体场合采用节能的直接供气冷却或排气放热的开式流程。直接供气冷却开式流程中,空气既是制冷剂,又是载冷剂,供冷无需换热器,冷空气直接进入需要冷却的环境消除热负荷,系统正压;直接排气放热开式流程中,则把大气环境看成是无限大的换热器,从压缩机出来的高温空气直接排到大气中,同时膨胀机吸入的是环境中的常温空气,系统负压。开式系统可省却供冷端换热器及其送风设备或放热端换热器及其冷却设备,还把风扇和换热器的不可逆损失减至最低,提高系统性能。

3.4 设备可靠性高,维护方便

空气制冷装置结构简单,可靠性高,安全性好,制冷剂可随时随地自由获得补充,不必担心泄漏问题。另外,空气制冷循环装置拆装、移动方便,无需

回收制冷剂,便于维护。

4 研究应用现状与前景分析

进入 20 世纪 90 年代以来,随着环保问题的日益突出,空气制冷技术又一次成为世界关注的焦点,先后有美国、澳大利亚、德国、日本、英国、中国等进行了空气制冷装置的研究试验,研究范围涉及住宅及列车空调到食品冷冻和冷藏的几乎所有的制冷技术应用领域^[3]。

4.1 低温领域的应用

空气制冷机极易制取低温,并在很宽的冷却负荷和低温运行工况范围内具有优良的性能,特别适用于需要低温和工况条件变化较大的场合。

现代食品冷冻和冷藏工艺有不断向低温方向发展的趋势,根据不同的食品 and 不同的冷冻或冷藏工艺要求,要求库温在 0℃ ~ -100℃ 大范围内可调节,并要求制冷系统长期在 -30℃ 以下运行,采用单级蒸气压缩制冷很难满足这种低温要求和运行工况,采用多级压缩或复叠式蒸气制冷,则导致系统 COP 的降低和投资的增加。空气制冷系统在低温下宽温度范围内运行性能优良,工质无臭无害和制冷速度快的特性使其非常适合于食品的冷冻冷藏。文献[4]提出了一种带蓄冷器的开式空气制冷系统用于冷库,通过改变冷却空气和室外空气的混合比例来调节各个冷冻间和冷藏间的库温,可以达到很好的节能效果。

有资料表明,食品加工业将是空气制冷在低温领域应用的最大市场。文献[5]详细分析了闭式空气制冷系统用于美国食品加工业的市场状况。虽然美国目前只有少数闭式空气制冷机组用于食品加工,但据统计,75% 的食品加工厂家希望使用空气制冷系统,而且 47% 有强烈的使用意向。这说明空气制冷在食品加工业有极广阔的发展前景。

除此之外,空气制冷在冷凝回收工业有害挥发性有机化合物、天然气液化、冷藏运输、制药业的控制低温反应及冷冻干燥处理和石化工业的存贮及加工等领域具有很大的发展潜力。

4.2 空调领域的应用

长期以来,空气制冷在空调领域的应用只局限于飞机空调,因为飞机座舱空气制冷空调装置能充分利用飞机原有设备和条件:利用飞机涡轮喷气发动机作为制冷系统的动力源和压缩机,以机外冲压空气作为冷却介质,只增加透平膨胀机及其附属设备,提高设备利用率,实现系统小型化。

然而,要使空气制冷技术在空调领域得到推广,必须把其性能放在第一位考虑,这是当今世界能源紧缺的现实要求,也是产品具有竞争力的标志。近年来,欧美国家对空气制冷应用于住宅和列车空调的研究取得了很大的进展,美国早在 1993 年就设计出用于住宅和商业建筑空调(采暖、空调)的闭式空气循环制冷装置样机,由 Normalair - Garrett Limited 设计及制造的列车用闭式空气制冷空调系统于 1998 年在往返于德国和荷兰的 ICE - 3 高速列车上投入使用^[6]。国内在这方面的研究尚处在实验阶段,文献[7]提出了一种开式双级正升压空气制冷空调系统,可实现制冷和供热;文献[1]分析了应用在列车空调中的空气制冷系统的各种可行性方案,并认为最适合列车空调制冷系统的是开式负压空气制冷系统。文献[8]提出的单级逆升压空气制冷空调系统也为空气制冷技术应用于民用空调提供了新思路。

值得注意的是,无论是低温领域还是空调领域,我国在空气制冷技术的实用化方面基本空白,除飞机空调外,目前只限于低温环境试验装置、橡胶的低温粉碎和矿场开采工作面的现场冷却^[9],这与世界的空气制冷技术的应用格局极不协调,有关部门应该尽快加大推动空气制冷技术实用化的力度,否则,我国的空气制冷技术将永远落后于世界。

5 关键技术的研究和探讨

由于空气的多变指数较高,相同压比下耗功较大,而且在相同的工况下压比大,传热温差大,不可逆损失也较大,因此一般情况下空气制冷循环的效率较低。应用和推广空气制冷技术,最重要的是提高其效率,这就涉及到许多关键技术。

5.1 回热技术

图 2 是回热空气制冷循环和无回热循环的对比,其中回热循环是 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 1,无回热循环是 1 - 3 - 5 - 6 - 1。由图可知,与无回热循环相比,在相同的制冷量下,回热循环可降低压力比,不仅可以减小压缩机和膨胀机的单位功,而且减小压缩过程、膨胀过程和热交换过程的不可逆损失,提高循环 COP。特别是应用高效透平机械后,当制取 - 70 ~ - 90 的低温时,定压回热空气制冷机比其他任何制冷机的经济性都高^[3]。但目前定压回热气体制冷机的应用还不普遍,原因是其热交换设备较庞大,而且,当使用透平机械时只适

用于大型的制冷装置。不过,由于回热循环降低了循环压力比,这就为采用增压比不能很高的离心式压缩机和膨胀机、实现空气制冷系统的小型化提供了条件。

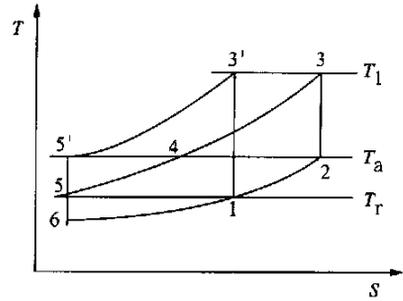


图 2 回热空气制冷循环和无回热循环的对比

5.2 双级压缩中间冷却技术

气体压缩最省功的过程是等温压缩,但实际上不可能达到。多级压缩是从等熵压缩向等温压缩的一种过渡,可以减少压缩机总耗功,提高循环的 COP。但这种循环是以增加一个压缩机、一个换热器为代价的,应结合具体实际慎重选用,开式负压系统可省却一个冷却器,比较适合运用双级压缩中间冷却技术。实际设计中可采取循环的一级压缩机直接由电机驱动,二级压缩机则由膨胀机的输出功驱动的方案。图 3 为两级压缩循环的 T-s 示意图。

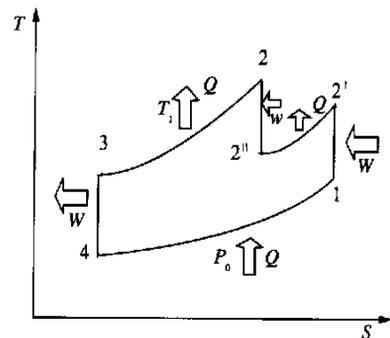


图 3 双级压缩中间冷却循环

5.3 混合工质技术

混合工质循环所用的制冷工质包含气体成分和相变成分两部分,可以视为蒸气压缩式循环和布雷顿循环的组合循环,兼有两者的优点。

目前,在空调领域,混合空气制冷循环大多用水作为相变成分。这是因为水环保无害,能满足系

统采用开式循环的要求,汽化潜热大且易于雾化。对于开式负压系统,一般的做法是在供冷换热器的进口处将适量的水喷射到从膨胀机出来的低温空气中,水和空气的混合物通过换热器吸收载冷剂的热量,部分水雾蒸发吸热可大大增强换热效果,剩余水雾在压缩机内的增压增温过程中汽化吸热也能减小压缩功。

喷水的关键技术就是喷水雾化和喷水量的控制。一方面要求喷水的雾化程度很高,以使雾滴在极短的时间内吸热蒸发,因此对喷嘴的要求很高;另一方面,如喷水量过大,会造成机械锈蚀和润滑油变稀,甚至引起压缩机内的液击,实际喷水量应比饱和喷水量略少。

对于低温工程,由于水的凝固点太高,不适合做混合空气制冷循环的相变成分,今后应努力寻求适用于低温下混合空气制冷循环的相变物质。

5.4 部件优化

膨胀机、压缩机和换热器效率的提高均使空气制冷循环的 COP 增大,但膨胀机的等熵效率对制冷系数的影响最显著^[10],因此提高膨胀机的效率是提高其制冷效率最有效的手段。

近年来,随着透平膨胀机技术的进步,使空气制冷技术得到了迅速发展。有试验结果表明,当透平膨胀机的效率从 85% 提高到 90% 时,空气制冷系统的 COP 可以提高 36%^[11]。另外,其它场合应用的透平机械用在空气制冷循环系统中效率很低,必须针对空气制冷系统的特性利用先进的透平膨胀机设计技术进行专门设计。

透平膨胀机与压缩机的匹配技术对空气制冷循环实际运行性能的提高也有重要意义。要使压缩机和膨胀机在最佳综合效率下工作,必须通过大量的实验得到各自详细的性能曲线,通过对转速、流量、压缩比、效率和功率等进行反复计算来确定压缩机和膨胀机的最佳匹配参数。

另外,空气制冷循环中的换热器都是气-气换热器,传统的换热器应用于空气制冷系统效率不高,应针对气-气换热的特性专门设计适合气-气换热的高效紧凑的换热器。

5.5 系统小型化

实现系统小型化是空气制冷技术普及的必要条件。一方面,要实现其各个部件的小型化。透平膨胀机的小型化技术已相当成熟,对于透平压缩机的小型化,提高其转速是终极手段。另一方面,要

充分利用空气制冷的优良特性,根据具体情况和应用场合减少设备的投建和提高设备的利用率,充分利用飞机原有的设备和条件实现空气制冷,采用开式空气制冷空调系统以省却换热器等就是其中的典范。

5.6 降噪

透平机械的涡轮运行产生的噪声较大,这直接影响到空气制冷技术的实际使用。在设计涡轮中尽量降低其转速是降低涡轮的气流噪声最有效的手段,但这不利于透平机械的小型化,需要寻找两者的平衡点。将透平机械置于封闭的内衬吸音材料的壳体内,可起到一定的隔声作用。

5.7 系统运行参数的优化匹配

在其他条件不变时,空气制冷循环的制冷量必然随压力比的增大而增大,但压力比增大的同时也使压缩功增加,实际上对于 COP 存在一个最佳压力比。而且在实际循环中制冷量和 COP 并非成线性关系,而是抛物线关系,也有和 COP 对应的最佳制冷量^[12],因此不能为了提高制冷量盲目增大压力比,应根据具体情况充分考虑各方面的影响,实现各种运行参数的优化匹配,使系统能达到最佳运行工况。

5.8 除湿

工质中存在的水汽是空气制冷循环最大的天敌,水汽在膨胀机出口处凝结甚至冻结,不但放出潜热造成冷量损失,而且如果产生冰粒还会对透平膨胀机的叶片造成磨损,甚至堵塞换热器管路,使系统瘫痪。

对于低温系统,必须通过使用密封闭式循环或干燥器在空气进入膨胀机前去除水分,也可以利用蓄冷器作为冷干装置,即达到除湿目的又降低了运行费用,还能实现开式流程,但这些措施同时也带来系统造价高、运行能耗大或密封工艺困难等问题。而对于空调系统,则可把膨胀机出口温度控制在 0℃ 以上,防止结冰,同时将收集的冷凝水雾化后喷淋至放热端换热器,利用水雾吸热蒸发补偿冷量,这种措施的关键技术在于喷水器雾化能力的提高。

5.9 开式系统的选择

采用开式空气制冷系统可节省设备投建,减小循环的不可逆损失,提高系统性能。但是这种系统容易受环境条件的影响,如湿度、尘埃、油等。

开式流程使循环内水汽大大增加,若应用于低

温工程,空气制冷系统就必须增加除湿设备,增加了系统造价的同时还增大了运行能耗;对于空调工程,开式正压系统是直接送风,需要使用无油机械并增加过滤器等附加设备,而开式负压系统似乎不是不错的选择,但实验表明,空气制冷系统在闭式和较高压力的条件下运行系统性能较高^[8]。因此应根据实际慎重选用开式系统,否则可能得不偿失。

5.10 与冰蓄冷及低温送风技术的结合

当今世界能源紧缺、供电紧张,应用与推广冰蓄冷空调系统已十分迫切,而蓄冰与低温送风系统相结合更被称为暖通空调工程中继变风量系统之后最重大的变革^[13],代表着暖通空调的发展方向。要在暖通空调领域推广空气制冷,必须将其与冰蓄冷及低温送风技术结合起来。国内这方面的研究仍然空白,今后应引起学者们的充分重视。

笔者认为,空气制冷技术和蓄冷及低温送风技术的结合有其特有的优势。一方面,空气工质在循环中的无相变性使蓄冰过程易于实现直接接触式换热这种最经济的换热方式(如直接将冷空气通入蓄冰器的冰水里制冰),蓄冰装置则可同时为空气

制冷系统除湿,提高设备利用率;另一方面,由于空气制冷系统可采用开式流程,在不使用蓄冷器供冷的运行工况下,可将低温空气与新风按一定比例混合后实现低温送风,并降低系统造价。

6 总结

(1) 空气制冷循环是能满足大气生态环境要求的最佳制冷循环,并具有其它制冷循环所不具备的优良特性。

(2) 空气制冷技术在低温领域有广阔的发展前景。空气制冷在低温领域应用的最大市场是食品加工工业,并在工业有害物回收、天然气液化、冷藏运输、制药业和石化工业等领域具有很大的发展潜力。要把空气制冷技术推广到空调领域,最重要的是要提高其在空调工况下的COP。

(3) 应用和推广空气制冷循环还需解决许多关键技术,其中包括回热技术、双级压缩中间冷却技术、混合工质技术、部件优化、系统小型化、降噪、系统运行参数的优化匹配、除湿、开式系统的选择、与冰蓄冷及低温送风技术的结合等。

参考文献

- 1 刘云霞等. 列车空调用空气制冷系统的方案设计[J]. 流体机械, 2003, 31: 48.
- 2 赵雁纪. 空气制冷与蒸气压缩制冷在气候环境模拟试验中应用的经济性分析[J]. 低温工程, 2000, 3: 42.
- 3 杜建通. 空气制冷循环的特性及其在制冷空调中应用的关键技术[J]. 低温与超导, 1999, 27(8): 32.
- 4 郑爱平. 利用空气制冷的地下冷库[J]. 西北建筑工程学院学报, 1994, 2: 73.
- 5 Thomas Pelsoci. Closed - Cycle Air Refrigeration Technology[M]. Chicago: National Institute of Standards and Technology, 2001: 18.
- 6 S. Hamlin, R. Hurt, S. A. Tassou. Enhancing the performance of evaporative spray cooling in air cycle refrigeration and air conditioning technology[J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18: 1139.
- 7 刘忠宝等. 双级正升压空气制冷系统在铁路列车空调中的应用[J]. 真空与低温, 2001, 7(3): 33.
- 8 刘忠宝, 王浚. 单级逆升压空气制冷系统在房间空调中的应用[J]. 真空与低温, 2000, 6(3): 42.
- 9 黄伯儒等. KKL101 矿用无氟空气制冷机的研制与应用[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(10): 13.
- 10 刘井龙等. 空气制冷机制冷系数影响因素的分析[J]. 低温工程, 2002, 2: 31.
- 11 Spence S W T, Doran W J, Artt D W. Optimization of turbo machinery performance for air cycle refrigerationsystem[J]. AIRAH Journal, 1998, (5): 25.
- 12 LINGEN CHEN, CHIN WU, FENGRUI SUN. Cooling load versus cop characteristics for an irreversible air refrigeration cycle [J]. Energy Conversion and Management, 1998, 39(1): 117.
- 13 武彬彬. 蓄冰——低温送风空调系统[J]. 能源研究与利用, 2001, 6: 27.