

文章编号:0253-4339(2025)02-0162-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.02.162

带喷射器的跨临界 CO₂ 系统在大型冷库中的应用

赖坤 田健

(青岛海尔开利冷冻设备有限公司 青岛 266500)

摘要 大型冷库在经济发展中具有重要作用,其能耗和环境影响巨大。为了推动冷库的绿色低碳高效发展,主要以制冷剂替代和制冷系统优化为出发点,研究带喷射器的跨临界 CO₂ 系统在大型冷库中的应用。基于大型冷库的应用场景,综合考虑不同温区的负荷需求以及不同的气象条件,通过全年逐时能耗分析,获得了带喷射器跨临界 CO₂ 系统在特定运行条件下的性能表现和能耗特性。集成了特定优化设计喷射器的 CO₂ 跨临界系统,对低温冷库(-32 °C)、中温冷库(-8 °C)和高温冷库(0 °C)的大型冷库,在所有4个城市中的系统 COP 均优于 R507A 系统,但要在寒冷气候区域才能对 R717 系统显示出性能优势,在低温、中温和高温冷库中系统 COP 最高值分别为 2.45、4.86、5.98;考虑系统全年能耗,在北京 CO₂ 跨临界系统应用于低温、中温和高温冷库,相对于 R507A 系统分别可实现 7.9%、10.1%和 10.5%的节能效果,R717 系统用于低温冷库的节能率略高于 CO₂ 系统;但对中高温冷库,CO₂ 系统的优势更加明显;不同气候区域对 CO₂ 跨临界系统的能耗分布也有影响,CO₂ 系统在寒冷气候区域的节能效率可达 9.3%,优于 R717 系统;而在炎热气候区域,其节能效率降至 2.8%,略低于 R717,因此,合理选用温区和气候区域,CO₂ 跨临界系统的整体运行效率和节能性能可优于 R717 系统。对比分析了带喷射器跨临界 CO₂ 系统的能耗分布规律,指出其在不同应用场景下的适用性,为该系统的推广应用提供了重要参考,对实现“双碳”目标具有重要意义。

关键词 CO₂跨临界系统;喷射器;冷库;节能;碳减排

中图分类号:TB61⁺1; TB61⁺7; TB69

文献标识码: A

Application of Transcritical CO₂ System with Ejector in Large Cold Store

Lai Kun Tian Jian

(Qingdao Haier Carrier Refrigeration Equipment Co., Ltd., Qingdao, 266500, China)

Abstract Large cold storage systems play a significant role in economic development with substantial energy consumption and environmental impacts. To promote the green, low-carbon, and efficient development of cold storage, this study mainly focuses on refrigerant substitution, refrigeration system optimization, and the application of transcritical CO₂ systems with ejectors in large cold storage systems. The performance and energy consumption characteristics of different refrigeration systems were compared through a comprehensive annual hourly energy consumption analysis based on the cold storage demands at different temperatures and under various climatic conditions. The results show that the COPs of a transcritical CO₂ system integrated with specifically optimized ejectors are higher than that of the R507A system in all four cities for low-temperature (-32 °C), medium-temperature (-8 °C), and high-temperature (0 °C) cold storages. However, it exhibited performance advantages over the R717 system only in cold climate zones, with the highest system COPs of 2.45, 4.86, and 5.98 for low, medium, and high-temperature cold storages, respectively. Considering the system's annual energy consumption, the application of CO₂ transcritical systems in low, medium, and high-temperature cold storages in Beijing achieved energy savings of 7.9%, 10.1%, and 10.5%, respectively, compared to the R507A system. The energy savings of the R717 system were slightly higher than that of the CO₂ system in low-temperature cold storage, but the CO₂ system had more obvious advantages in medium- and high-temperature cold storage. The energy consumption of the CO₂ transcritical system also varied across climate zones. In the cold climate zone, the energy savings reached 9.3%, outperforming the R717 system, while in the hot climate zone, its energy savings dropped to 2.8%, slightly lower than that of R717. With the appropriate selection of temperature range and climate zone, the overall operational efficiency and energy-saving performance of the transcritical CO₂ system can surpass those of the R717 system. This study conducted a comprehensive analysis of the operational performance and energy consumption distribution characteristics of the CO₂ system and highlighted its applicability in different scenarios, providing important references for promoting and applying the system, which is crucial for achieving dual carbon goals.

Keywords CO₂ transcritical system; ejector; cold storage; energy saving; CO₂ emission reduction

大型冷库是专为大规模商品存储而设计的设施,通过先进的制冷技术控制温度和湿度,确保商品的质量和安全性,冷藏容量通常超过 1 万 t,广泛用于食品、医药、化工、物流等行业,大型冷库的应用有助于保鲜和储存大量的农产品、食品、药品等物品,提高冷链物流的效率和质量。随着社会经济的不断发展,对于冷库的需求越来越大。根据全球冷链联盟(Global Cold Chain Alliance, GCCA)的数据,2020 年世界冷库总容积达到 7.19 亿 m³,相比 2018 年增长了 16.7%。中国的冷库容量全球排名第 3,但城市居民人均冷库容量仅为美国的 25%,日本的 50%,仍有很大提升空间^[1]。长期以来,国内大型冷库基本以氨系统为主流技术。研究表明,R717 仍然是目前最成熟和经济的制冷剂,且今后仍将占据重要地位,R744(CO₂)则是重点关注的替代制冷剂^[2-3]。B. Ö. Fenni 等^[4]介绍了在安卡拉省 25 t 苹果冷库系统中应用 R507A 制冷剂的性能表现。Y. Heredia-Aricapa 等^[5]介绍了最新的 HFC/HFO/HC/R744 制冷剂混合物选项作为 R134a、R404A 和 R410A 制冷剂的替代品,并将其能效和性能与早期开发的混合物进行对比,研究表明 R744 是很好的替代品。2013 年以后,中国新建冷库中只有 15% 使用 R717(仅针对大型冷库);55% 采用氟利昂制冷剂,其中 R507A 使用最多,尤其是小型冷库;30% 使用 R744,主要用于 R717 或 HFCs 复叠系统中的低温循环或作为二次制冷剂;采用纯 R744(跨临界)的冷库极为罕见,主要是因为单纯的跨临界系统效率较低且初始投资成本较高^[6]。

除了考虑制冷剂的选择,为了减小冷库的环境影响,提高运行效率,研究者对具体的制冷系统进行了研究,分析不同制冷系统在冷库中的性能表现。大型冷库(>100 m³)通过优化使用策略、对现有设备进行修复和节能改造,总体节能潜力在 8%~72%^[7]。李坤等^[8]以双蒸发温度的大型冷库作为研究对象,对 R717/R744 复叠制冷系统、R507A/R744 复叠制冷系统、R717 制冷系统、R507A 制冷系统的性能系数进行理论计算,对比了 4 种系统特定传热温差下的优劣。孙炳岩等^[9-10]分析了冷库中氨制冷系统、复叠式制冷系统和氟利昂制冷系统的工作原理、适用场合以及在国内外研究进展,提出优化和改进的措施和方法。钱让龙^[11]针对我国南北方的几个城市物流冷库,从同制冷系统、不同库体类型、不同库容量 3 个角度对冷库制冷系统的能耗进行运算,提供最优的技术方案。

从上述研究情况可知,目前国内外针对冷库应用的制冷系统,在逐步由传统氟利昂系统向天然环保型制冷剂系统发展,其中 R744 复叠系统得到越来越多

的使用。但无论是替代类制冷剂和 R744 复叠,还是氨和 R744 复叠,均存在各自的问题,以现在应用较为广泛的替代类制冷剂 R507A 为例,虽然其臭氧损耗潜值(ozone depletion potential, ODP)为 0,但全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)为 3 985,仍有不容忽视的环境影响;而氨由于其固有的毒性和爆炸性,面临的监管和使用限制也越来越严格;随着环保要求的不断提高,市场期待一种更加环境友好,纯天然工质的制冷系统,因此,全 R744 的跨临界系统作为一种很有潜力的解决方案受到关注。R744 作为一种天然制冷剂,具有良好的环保性能,其 ODP = 0, GWP = 1,不破坏臭氧层,温室效应潜能低,是替代传统制冷剂的理想选择;R744 无毒、不易燃、不爆炸,相对于氨制冷剂具有较高的安全性;R744 的单位容积制冷量高,有利于减少系统工质的容积循环量,实现制冷设备小型化。基于以上优势,R744 在冷库系统中的应用将得到更加广泛的推广,并带来显著的节能减排效益。

跨临界 R744 循环的高压侧气体蕴含了大量的能量,在标准的 R744 跨临界系统中,高压侧的气体在通过节流阀时,其压力急剧下降,同时伴随着温度下降,该过程为非等温过程,不能做功,因此过程中的能量未被有效利用,造成了能量的浪费;由于 R744 的特殊物性,高低压侧之间的压差较常规制冷剂更大,节流损失更为明显,为了回收这部分能量,研究者引入了喷射器的概念,目前关于 R744 跨临界系统及喷射器的研究越来越多,在传统跨临界系统中结合过冷和喷射器技术成为最新的研究方向,目标是开发高效、可靠的单一 R744 制冷系统,并拓宽其应用范围^[12-13]。M. E. Ahammed 等^[14]对带喷射器的 R744 系统(refrigeration cycle with ejector for pasteurization, RCEP)和不带喷射器的传统 R744 系统(conventional refrigeration cycle for pasteurization, CRCP)进行性能对比,结果表明,与 CRCP 相比,生产率提高了约 13%,节能效果显著。P. Gullo 等^[15]介绍了多喷射器概念在其他高耗能建筑(如酒店、健身房、水疗中心)中显著的节能效果,以及食品零售应用中的 R744 喷射器平行蒸气压缩系统;针对其他能源密集型应用的跨临界 R744 蒸气压缩装置中采用多喷射器概念所获得的经验。R744 制冷系统在商超中的应用方式较为多样,主要以亚临界复叠系统为主,跨临界系统也在逐步发展。V. Sharma 等^[16]分析了多种商超制冷系统,包括 R744 复叠系统、R744 载冷剂系统、R744 跨临界系统(增压或平行压缩),这些系统在超市应用中变得越来越流行。在美国 8 个气候区域将 R744

制冷系统的性能与基准 R404A 直膨系统进行对比,在环境温度低于 8 °C 时,带平行压缩的跨临界增压系统(transcritical booster system with bypass compressor, TBS-BC)的能耗最低,TBS-BC 在美国北部 2/3 地区的性能接近或优于 R404A 直膨系统。近年来,商超中带喷射器的 R744 系统应用逐渐增多,Á. Á. Pardiñas 等^[17]介绍了具有多个喷射器的集成跨临界 R744 平行压缩系统,与标准增压系统相比,当使用平行压缩时,系统的总功耗在环境温度为 30 °C 时降低了 19%,使用 1 组或 2 组喷射器可进一步降低功耗约 5%和 8%。E. Söylemez 等^[18]分析了超市中集成多喷射器的 R744 系统在里斯本温暖气候下运行的制冷效果和性能。喷射器提高系统中温段的制冷能力达 17.4%,启用喷射器的系统总功耗降低了 7.5%。带喷射器的跨临界 R744 循环在商超和冷库中的使用场景相似,因此,商超的带喷射器 R744 系统应用可为冷库采用该技术提供一些借鉴。

综上所述,带喷射器的 R744 跨临界系统,在大型建筑供冷、商超、食品零售领域已经获得了一定的应用,但是针对大型冷库的应用还较为罕见,目前国内尚未有相关案例,因此,本文将基于冷库的使用场景,分析带喷射器的 R744 跨临界系统的应用和性能表现。

1 带喷射器的跨临界 R744 系统在大型冷库中的应用

1.1 带喷射器的 R744 跨临界系统概述

喷射器是一种能量交换装置,利用高压 R744 气体通过喷嘴时产生的速度势能,将低压 R744 气体引射升压,从而实现降压。喷射器的示意图如图 1 所示。

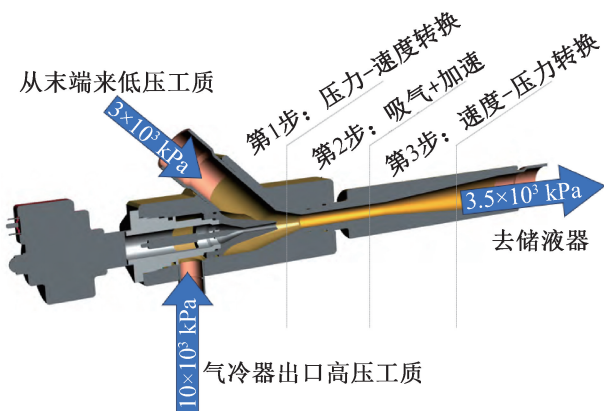
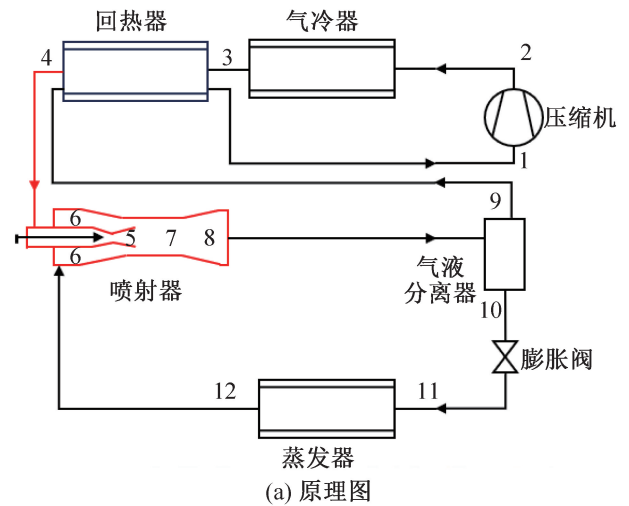


图 1 喷射器示意图

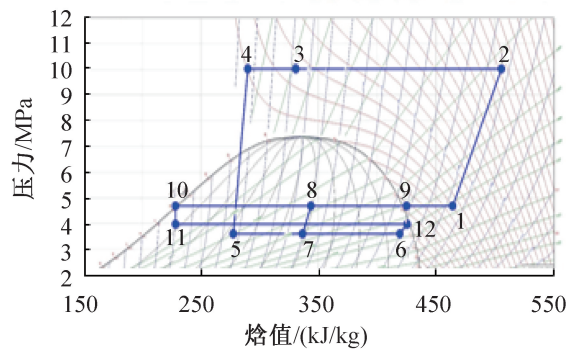
Fig.1 Schematic of the ejector

带喷射器的 R744 跨临界系统是一种新型制冷

系统,在高压侧用喷射器代替传统的节流阀,实现 R744 工质的降压,并利用高压流体来引射蒸发器中的低压流体,从而降低节流过程中的能量损失,提高系统效率。图 2 所示为带喷射器的基本 R744 跨临界循环,该循环包括 R744 压缩机、冷凝器、回热器、蒸发器和特别设计的喷射器。R744 气体经过压缩形成跨临界状态的高温高压气体,然后通过冷凝器,回热器进行冷却,释放热量。喷射器利用高压气体蕴含的能量将低压气体引射回中压储液罐,提高了压缩机吸气口的压力,降低压缩机压比和功耗,提高系统可靠性。



(a) 原理图



(b) 压焓图

图 2 带喷射器的基本 R744 跨临界循环

Fig.2 Basic R744 transcritical cycle with ejector

R744 系统集成的喷射器采用最新的可调制喷射技术,能够使压缩机在更高的吸入压力下运行,同时维持系统的制冷需求工况,系统能够在不同温度和负荷条件下实现优越的性能,可显著提高系统 COP 并降低能耗,利用 R744 在超临界状态下的特性,既实现了高效制冷,又具备环保性。喷射器的使用还能简化系统结构,降低系统成本,为大型冷库等应用领域提供了可靠而高效的制冷解决方案。

1.2 冷库基本参数

为了研究带喷射器跨临界 R744 系统在大型冷

库中的应用效果,本文以某大型冷库为研究对象,该冷库由1栋独立建筑构成,总面积约为28 839 m²,分为低温冷藏区、变温冷藏区、高温冷藏区和穿堂等不同功能区,总设计负荷为3 561.63 kW(蒸发温度分别为-32、-8、0℃);冷库机组采用单工况设计,设置1个机房,具体信息如表1所示。

表1 冷库基本参数
Tab.1 Parameters of cold storage

温区	功能区	面积/ m ²	蒸发温 度/℃	制冷量/ kW
低温	低温、变温冷藏区	21 316	-32	1 897.97
中温	高温冷藏区	1 817	-8	545.97
高温	穿堂	5 706	0	1 117.70
合计		28 839		3 561.63

1.3 制冷系统方案

按照“分区制冷,单独控温”的方式,采用带可调节喷射器和液泵的跨临界R744系统来满足冷库高温、中温、低温的负荷需求。在目前的冷库应用中,R404A和R507A用于替代R22,特别是在一些新建项目中,R507A几乎完全取代了R22;此外,R717在大型冷库中仍然占据主导地位,因此为了对比分析,选择R507A制冷剂系统作为比较基准,用R744和R717两种工质设计对照方案,即R507A作为HFCs(氢氟碳化物)类制冷剂的代表,而R717则代表另一种自然工质类制冷剂,通过不同类型制冷剂系统的对比分析,探讨在冷库应用中使用纯R744系统的可行性,具体方案如表2所示。

表2 制冷系统方案
Tab.2 Solutions of cold storage

冷库	机组系统		
	方案1	方案2	方案3
低温	R507A/R744 复叠	R717/R744 复叠	双级跨临界 R744带喷射器
中温	单级R507A	单级R717	单级跨临界 R744带喷射器
高温	单级R507A	单级R717	单级跨临界 R744带喷射器

根据冷库各功能区的不同蒸发温度制冷需求,整个冷库制冷系统包括低温系统、中温系统和高温系统。机组系统蒸发端采用满液式蒸发布置,冷凝端采用蒸发式冷凝布置。

1) 方案1:R507A系统(基准)。

采用R507A/R744复叠系统满足低温需求,其中低温级使用6PME-40K系列活塞压缩机,中温级使用OSK8591系列螺杆压缩机;

单级R507A系统满足中温需求,使用HSK8591-180系列螺杆压缩机;

单级R507A系统满足高温需求,使用HSK8591-180系列螺杆压缩机。

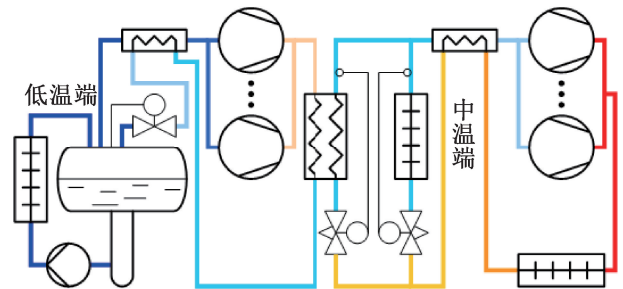
复叠系统中,低温级设计工况为蒸发温度-32℃,冷凝温度-8℃,工质为R744;中温级蒸发温度为-13℃,冷凝温度为45℃,工质为R507A,中温级和低温级通过复叠换热器连接,两级之间传热温差为5K。

2) 方案2:R717系统。

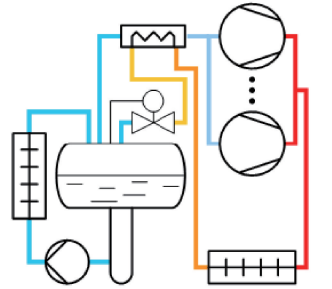
采用R717/R744复叠系统满足低温需求,低温级使用6PME-40K系列活塞压缩机,工质为R744,中温级使用OSNA95103系列螺杆压缩机,工质为R744;

单级R717系统满足中温需求,使用OSKA8581系列螺杆压缩机;

单级R717系统满足高温需求,使用OSKA8591系列螺杆压缩机。其他系统参数设定与基准方案相同。方案2的系统布置与方案1相同,其低温系统、中温系统和高温系统原理如图3所示,只是制冷剂由R507A替换为R717。



(a) 低温系统-R507A/R744复叠



(b) 中温/高温系统-R507A单级

图3 方案1 制冷系统原理

Fig.3 Refrigeration system principle of solution 1

3) 方案3:R744跨临界系统。

低温系统为带喷射器的双级跨临界R744系统,

其中低温级使用 6PME-40K 系列活塞压缩机, 中温级使用 6CTEU-50LK 系列活塞压缩机;

中温系统为单级跨临界 R744 系统, 使用 6CTEU-50LK 系列活塞压缩机;

单级跨临界 R744 系统满足高温需求, 使用 6DTEU-50LK 系列活塞压缩机。

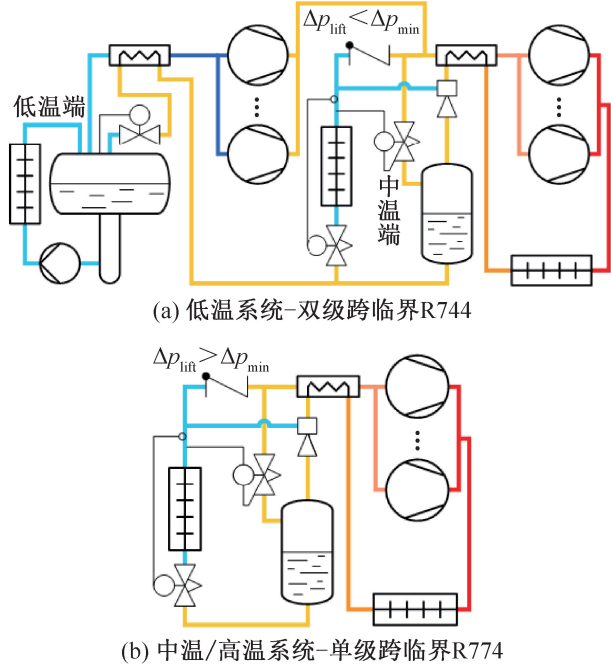


图 4 方案 3 制冷系统原理

Fig.4 Refrigeration system principle of solution 3

单级跨临界喷射器循环有两种不同的操作模式: 喷射器模式和气体旁通模式, 在喷射器模式下, 气体旁通阀完全打开, 止回阀关闭 (灰色), 如图 5 (a) 所示; 当喷射器压升 (Δp_{lift}) 无法大于最小压升 (Δp_{min}) 时, 气体旁通阀开始关闭, 将储液器与吸入管路之间的压差控制在最小压升 (Δp_{min}), 止回阀打开, 气体旁通模式开启, 如图 5 (b) 所示, 确保系统中的膨胀阀压降最小, 最小压升 (Δp_{min}) 可调整。

两级跨临界喷射器循环的工作原理类似于单级跨临界喷射器, 但包括低温级和中温级两级。低温级压缩机产生的气体连通到中温级压缩机的吸气口。通过中温蒸发器的工质全部进入喷射器。如果喷射器提供的压升小于指定的最小值, 则循环将以气体旁通模式运行。

2 冷库制冷系统能耗分析

2.1 气象条件及负荷匹配

本文选取了 4 个典型的气象条件城市进行对比分析, 这 4 个城市在地理分布上按由南到北, 纬度逐渐升高, 涵盖了炎热到寒冷气候区域。城市的月平均

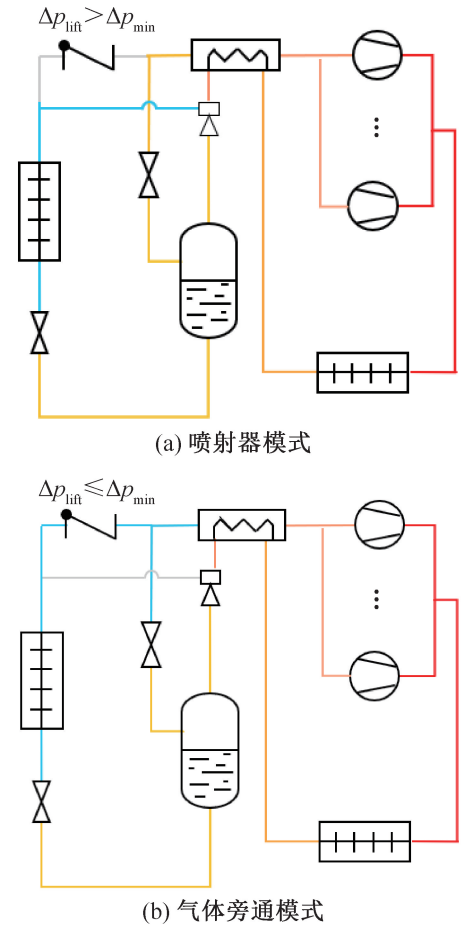


图 5 单级跨临界喷射器循环

Fig.5 Single-stage transcritical ejector cycle

气温如图 6 所示。

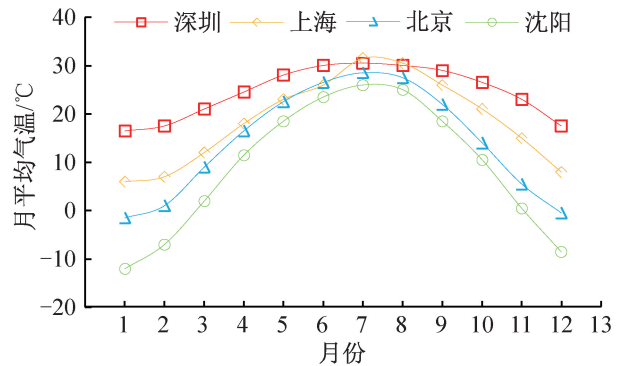


图 6 不同城市年度月平均气温

Fig.6 Monthly average temperatures in different cities

在单次计算中, 不同制冷系统使用相同的年度负荷率和气象条件, 针对每个系统进行 8 760 h 的逐时能耗计算, 单位时间点的负荷需求由负荷曲线决定, 压缩机根据负荷需求曲线按阶梯或时间占比输出, 以精确匹配负荷量。

2.2 冷库制冷系统运行性能分析

针对低温冷库、中温冷库和高温冷库的负荷需求, 分别以深圳、上海、北京、沈阳的气象条件为基础,

以系统平均 COP 为指标来评估不同制冷方案的运行性能表现,如图 7 所示。

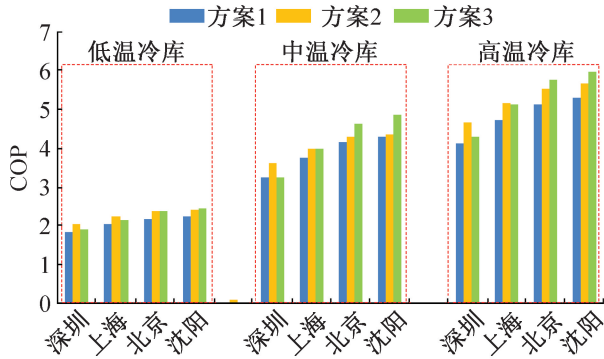


图 7 制冷方案在不同城市的性能系数

Fig.7 The system COP of solution in different cities

由图 7 可知,R744 系统应用于 3 种温区冷库,在所有 4 个城市的 COP 均优于 R507A 系统,相比于 R717 系统,R744 则要在寒冷气候区域才能显示出性能优势。对于低温冷库,在 4 个城市中 R744 系统的 COP 从 1.90 逐渐增至 2.45, R744 系统在沈阳比 R507A 系统和 R717 系统分别高 9.4%、0.8%;对于中温冷库,R744 系统 COP 最高可达 4.86,在北京和沈阳 R744 系统均显示出最优的性能,在沈阳比 R507A 系统和 R717 系统分别高 13.0%、11.2%;对于高温冷库,R744 系统 COP 最大值为 5.98,在沈阳比 R507A 系统和 R717 系统分别高 12.8%、5.5%。

2.3 冷库制冷系统全年能耗分析

2.3.1 不同温区冷库的能耗特性分析

以北京地区的低温、中温和高温冷库为分析对象,进行全年的逐时能耗计算,并按月分段统计,以获得不同温区冷库随月度变化的趋势,如图 8~图 10 所示。

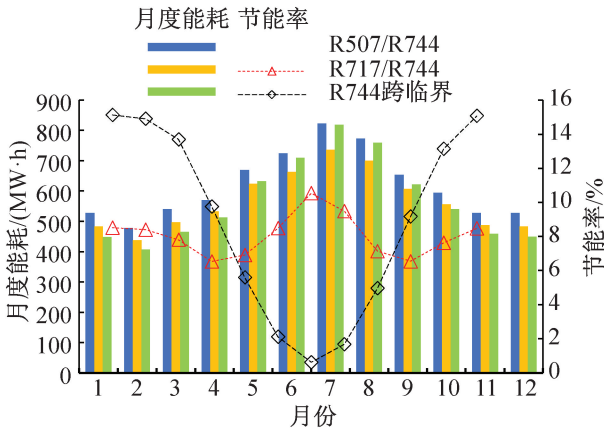


图 8 低温冷库月度能耗

Fig.8 Monthly energy consumption of low-temperature cold storage

由图 8 可知,相比于 R507A/R744 复叠系统,

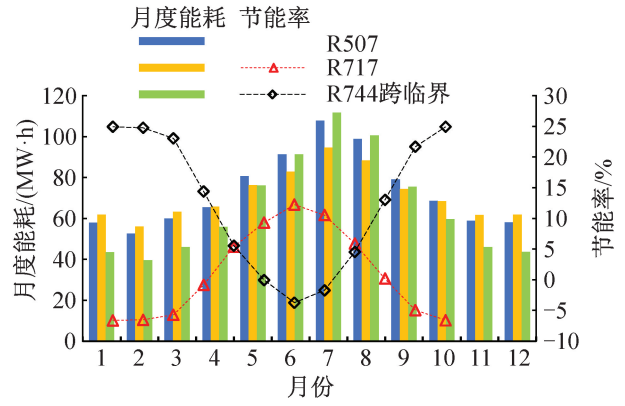


图 9 中温冷库月度能耗

Fig.9 Monthly energy consumption of medium-temperature cold storage

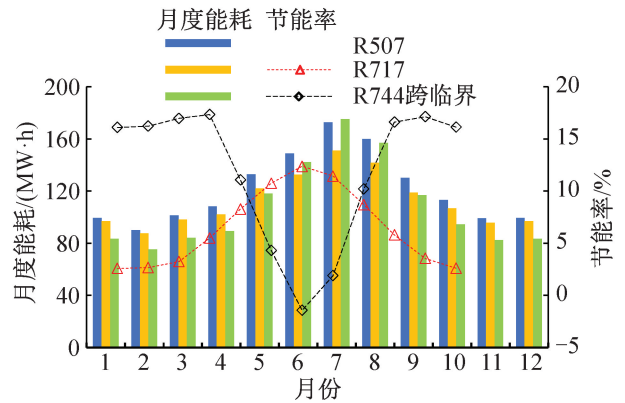


图 10 高温冷库月度能耗

Fig.10 Monthly energy consumption of high-temperature cold storage

R717/R744 复叠系统在满足低温冷库需求时,节能效率全年在 6.5%~10.5%,最低的节能效果出现在 4 月和 10 月,属于春秋季节,而最大节能效果出现在夏季 7 月,全年分布相对较为稳定,波动差值为 4.0%;R744 跨临界系统按月的节能率呈反抛物线分布,在 1 月和 12 月达到最大值 15.1%,在 7 月达到最小值 0.6%,全年的波动差值达 14.5%。综合全年来看,R717/R744 复叠系统相对于 R507A/R744 复叠系统节能 8.1%,而 R744 跨临界系统全年节能率为 7.9%,R717/R744 复叠系统略优于 R744 跨临界系统。

图 9 所示为中温冷库的月度能耗分布,R717 系统在 5—10 月显示出节能效果,7 月达到最大值 12.3%,其他月份均不节能,尤其 1 月和 12 月,比基准系统反而多耗能 6.6%;而 R744 跨临界系统在低温环境下显示出极佳的节能效果,1 月和 12 月可以达到 24.9%,然后随气温的升高而逐渐降低,6—8 月没有节能效果。全年来看,R717 系统相对于 R507A 系统节能 2.7%,而 R744 跨临界系统全年节能率为

10.1%, 明显优于 R717 系统。

对于高温冷库, R717 系统和 R744 跨临界系统的节能率随月度的变化趋势与中温冷库类似, 如图 10 所示, R717 系统冬季最低节能 2.6%, 夏季最大节能 12.4%; R744 跨临界系统冬季最高节能 16.1%, 夏季 7 月节能效果最差, 甚至比 R507A 系统低 1.4%。全年 R717 系统相对于 R507A 系统节能 7.2%, 而 R744 跨临界系统全年节能率为 10.5%, 仍然优于 R717 系统。

综上所述, 对于低温、中温和高温的冷库负荷需求, R717 系统和 R744 跨临界系统均比 R507A 系统的能耗表现更好。从时间上看, R717 系统在冬季低温环境下节能效果相对较差, 夏季高温条件下节能效果好; R744 跨临界系统正好相反, 节能效果冬季高而夏季低, 高温冷库甚至相对于 R507A 系统不节能。从负荷温区来看, 低温冷库 R717 系统的节能效果最好, 优于 R744 跨临界系统和 R507A 系统, 而中温和高温冷库, R744 跨临界系统均明显优于 R717 系统和 R507A 系统。

2.3.2 不同气候地区的能耗特性分析

针对高中低温冷库工况, 依据表 2 中的 3 个不同制冷系统方案, 采用 4 个城市的气象数据分别进行计算, 并对其各自的能耗表现进行对比分析。

图 11 所示为将方案 1 应用于 4 个不同城市, 满足高中低温冷库需求的月度总能耗, 4 个城市总体按气候区域由热到冷, 月度总能耗逐渐降低, 深圳最高, 到上海有所降低, 沈阳最低。可以看出, 包含低温、中温和高温冷库的总能耗, 在炎热地区较高, 而在寒冷气候区域的城市能耗偏低。以典型的炎热气候区域深圳和典型寒冷气候区域沈阳为例, 两个城市由气象条件带来的能耗差异, 在时间分布上看, 冬季和炎热季节相对较为接近, 沈阳比深圳低 13.1%~20.0%; 而在春秋这样的过渡季节, 能耗差距较为明显, 最大差异在 5 月, 沈阳比深圳低 27.8%。

图 12 所示为方案 2 的月度总能耗, 分布趋势与方案 1 类似, 但总体能耗比方案 1 有所降低; 同时, 对比深圳和沈阳, 由城市气象条件带来的能耗差异, 在 3 月达到最大值, 沈阳比深圳能耗低 24.8%。气象条件对方案 2 的影响没有方案 1 显著。

图 13 所示为方案 3 的月度总能耗, R744 跨临界系统, 总体能耗表现依然在沈阳最好, 深圳和沈阳两个城市由气象条件带来的能耗差异, 冬季沈阳比深圳能耗低至少 24.3%, 夏季差距减小, 沈阳比深圳能耗低 11.4%, 过渡季差异明显, 最大差异在 3 月, 沈阳比深圳低 36.3%。

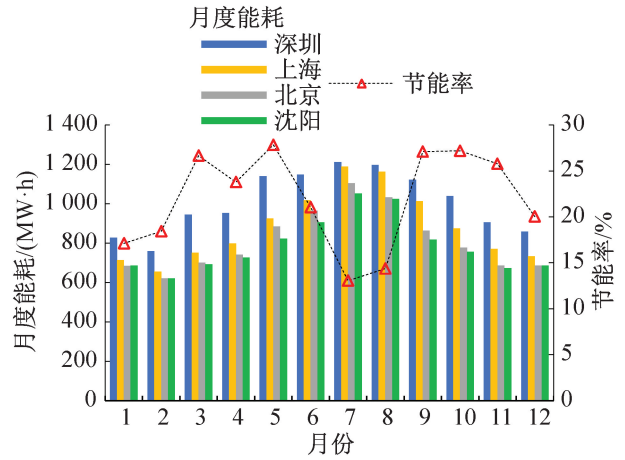


图 11 方案 1 在不同城市的月度总能耗

Fig.11 Total monthly energy consumption of solution 1 in different cities

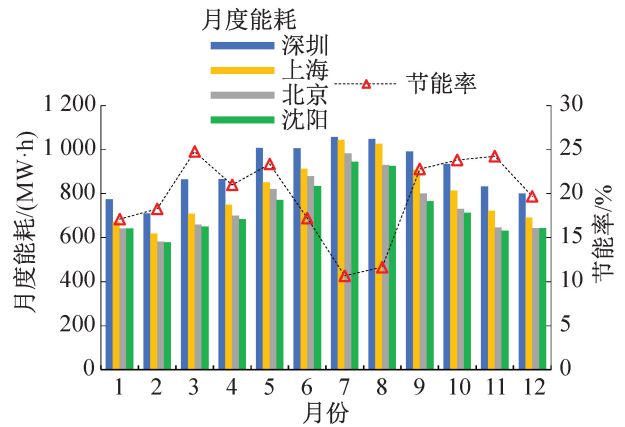


图 12 方案 2 在不同城市的月度总能耗

Fig.12 Total monthly energy consumption of solution 2 in different cities

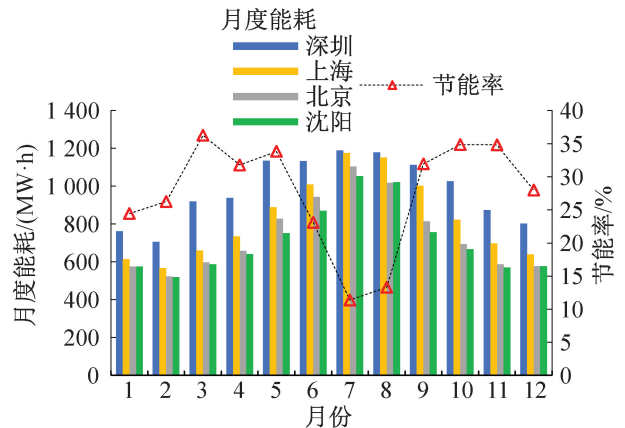


图 13 方案 3 在不同城市的月度总能耗

Fig.13 Total monthly energy consumption of solution 3 in different cities

综合考虑 3 个方案在 4 个不同城市的年度总能耗, 如图 14 所示。相比于 R507A 系统, R717 系统和

R744 跨临界系统均显示出一定的节能效果,R717 系统较为稳定,在炎热地区(深圳)节能效果最佳,达到10%,随着所选城市气温逐渐降低,节能效果呈下降趋势,在寒冷地区(沈阳)达到最小值7.2%,降幅较小;R744 跨临界系统则正好相反,在炎热地区节能效果最差,为2.8%,不及R717 系统,但是随着城市气温逐渐降低,节能效果呈快速上升趋势,在沈阳达到最优节能效果9.3%。从节能率曲线对比,以北京为界,R744 跨临界系统在北京以南地区节能效果不如R717 系统,在北京以北地区,节能效果优于R717 系统。

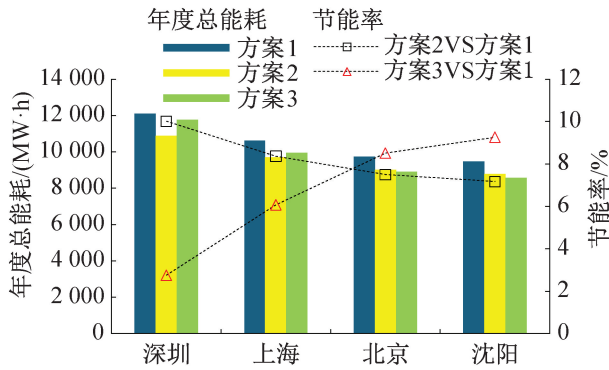


图14 不同城市年度总能耗

Fig.14 Total annual energy consumption in different cities

3 结论

本文集中探讨了带喷射器的R744跨临界系统在大型冷库中的应用,综合考虑不同温度的负荷需求,以及不同的气象条件,通过计算全年逐时能耗,获得了带喷射器的R744跨临界系统在特定运行条件下的性能表现和能耗特性,得到如下结论:

1) R744跨临界系统应用于低温、中温和高温冷库,在所有4个城市中COP均优于R507A系统,但需在寒冷气候区域才能对R717系统显示出性能优势,R744跨临界系统在低温、中温和高温冷库中COP最高分别可达2.45、4.86和5.98。

2) 考虑系统的全年能耗,在北京地区,R744跨临界系统对低温、中温和高温冷库分别比R507A系统节能7.9%、10.1%和10.5%;低温冷库R717系统效率略高于R744跨临界系统,而中温和高温冷库,R744跨临界系统均明显优于R717系统。

3) 从季节能耗分布看,R744跨临界系统冬季节能效果较好,而夏季偏低,甚至不节能。

4) 不同气候区域对R744跨临界系统的能耗影响显著,在炎热地区R744跨临界系统节能效果最差,为2.8%,不及R717系统,在寒冷地区达到最优节能效果9.3%,优于R717系统。

总体而言,集成了喷射器的R744跨临界系统性能系数表现明显优于氟利昂系统,只要合理选择使用温区和地域,其性能系数也优于氨系统。因此,将该系统应用于大型冷库中,其固有的环境友好特性,可以大幅降低直接碳排放;同时还能够通过效率提升带来节能效益,减少总体能源消耗和间接碳排放,对推进实现“双碳”目标具有重要意义。

参考文献

[1] 世邦魏理仕. 冷库投资与选址策略[J]. 物流技术与应用, 2022, 27(增刊2): 60-67. (CBRE. Cold storage investment and site selection strategy [J]. Logistics & Material Handling, 2022, 27(Suppl. 2): 60-67.)

[2] 李晶晶. 关于冷库制冷剂展方向的探讨[J]. 制冷, 2014, 33(2): 74-78. (LI Jingjing. A discussion about the future development of refrigerant [J]. Refrigeration, 2014, 33(2): 74-78.)

[3] 张建一, 徐颖. 国内外大中型冷库制冷剂的现状和发展动向[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 51-57. (ZHANG Jianyi, XU Ying. Development on refrigerants used in large and medium-size refrigerated warehouses [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 51-57.)

[4] FENNİ B Ö, KÖSE A, HEIDARNEJAD P. Design of a cold storage with R507A Refrigerant for the preservation of twenty-five tons of apples in the Ankara province [J]. International Journal of New Findings in Engineering, Science and Technology, 2023, 1(1): 1-14.

[5] HEREDIA-ARICAPA Y, BELMAN-FLORES J M, MOTABILONI A, et al. Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 111: 113-123.

[6] GAO Enyuan, CUI Qi, JING Huaqian, et al. A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 128: 104-117.

[7] EVANS J A, HAMMOND E C, GIGIEL A J, et al. Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 697-705.

[8] 李坤, 李俊明, 马进, 等. 大型冷库中不同制冷系统能效对比的理论分析[J]. 冷藏技术, 2020, 43(4): 19-24. (LI Kun, LI Junming, MA Jin, et al. Theoretical analysis of energy efficiency comparison of different refrigeration systems in large cold storage [J]. Journal of Refrigeration Technology, 2020, 43(4): 19-24.)

[9] 孙炳岩, 张文科, 姚海清, 等. 不同制冷系统应用于冷库的探讨[J]. 制冷与空调(北京), 2021, 21(11): 11

- 15. (SUN Bingyan, ZHANG Wenke, YAO Haiqing, et al. Discussion on application of different refrigeration systems in cold storage [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2021, 21(11): 11-15.)
- [10] 郭靖. 关于不同制冷系统应用于冷库的探讨[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(1): 122-123. (GUO Jing. Application of different refrigeration systems to cold storage [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(1): 122-123.)
- [11] 钱让龙. 基于南北方对比下冷库制冷系统的能耗分析[J]. 科学技术创新, 2020(34): 22-23. (QIAN Ranglong. Energy consumption analysis of cold storage refrigeration systems based on the comparison between the south and the north [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(34): 22-23.)
- [12] MOTA-BABILONI A, NAVARRO-ESBRÍ J, BARRAGÁN-CERVERA Á, et al. Commercial refrigeration-an overview of current status[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 57: 186-196.
- [13] SARKAR J. Ejector enhanced vapor compression refrigeration and heat pump systems—a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6647-6659.
- [14] AHAMMED M E, BHATTACHARYYA S, RAMGOPAL M. Analysis of CO₂ based refrigeration systems with and without ejector for simultaneous pasteurization and chilling of milk[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 95: 61-72.
- [15] GULLO P, HAFNER A, BANASIAK K, et al. Multi-ejector concept: a comprehensive review on its latest technological developments[J]. Energies, 2019, 12(3): 406.
- [16] SHARMA V, FRICKE B, BANSAL P. Comparative analysis of various CO₂ configurations in supermarket refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46: 86-99.
- [17] PARDIÑAS Á Á, HAFNER A, BANASIAK K. Novel integrated CO₂ vapour compression racks for supermarkets. Thermodynamic analysis of possible system configurations and influence of operational conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 1008-1025.
- [18] SÖYLEMEZ E, HAFNER A, SCHLEMMINGER C, et al. The performance analysis of an integrated CO₂ refrigeration system with multi-ejectors installed in a supermarket[J]. Energies, 2022, 15(9): 3142.

通信作者简介

田健,男,博士,青岛海尔开利冷冻设备有限公司,15800762296,E-mail: jian.tian@carrier.com。研究方向:制冷及设备,节能技术。

About the corresponding author

Tian Jian, male, Ph. D., Qingdao Haier Carrier Refrigeration Equipment Co., Ltd., 86-15800762296, E-mail: jian.tian@carrier.com. Research fields: refrigeration and equipment, energy-saving technology.