

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-471-04

二氧化碳复叠制冷系统的设计与优化研究

金 熹

(四川省商业建筑设计院有限公司 成都 610000)

【摘 要】 二氧化碳作为天然环保制冷剂, 其复叠制冷系统在低温冷链、工业制冷等领域应用前景广阔。当前该系统设计存在低温工况效率低、高压部件成本高、系统匹配性差等问题, 制约其规模化推广。研究为提升二氧化碳复叠制冷系统的能效与经济性提供实践方案, 助力制冷行业绿色转型。

【关键词】 二氧化碳复叠制冷系统; 系统设计; 优化策略; 环保制冷

中图分类号 TB657 文献标志码 A

Design and Optimization Study of Carbon Dioxide Cascade Refrigeration System

Jin Xi

(Sichuan Commercial Architecture Design Institute Co., Ltd, Chengdu, 610000)

【Abstract】 Carbon dioxide, as a natural and environmentally friendly refrigerant, has broad application prospects in low-temperature cold chain, industrial refrigeration and other fields in its cascade refrigeration system. The current system design has problems such as low efficiency under low-temperature conditions, high cost of high-pressure components, and poor system compatibility, which restrict its large-scale promotion. Provide practical solutions to improve the energy efficiency and economy of carbon dioxide cascade refrigeration systems, and assist in the green transformation of the refrigeration industry.

【Keywords】 Carbon dioxide cascade refrigeration system; System design; Optimization strategy; Environmentally friendly refrigeration

0 引言

在全球环保法规日益严格的背景下, 促使制冷行业向采用“低全球变暖潜值 (GWP)、零臭氧消耗潜能值 (ODP)”制冷剂的方向转型。二氧化碳作为天然的制冷工质, 具备环保性能优良、使用安全可靠以及来源广泛等优势, 其复叠制冷系统由于可以达成低于 -50°C 的低温运行工况, 成为冷链物流、速冻食品加工等相关领域优先考虑与选用的方案。基于此情况, 开展针对二氧化碳复叠制冷系统的设计以及优化研究工作, 借助技术的创新突破效率与成本瓶颈限制, 对于推进环保制冷技术的产业化进程、达成“双碳”目标具有重要的现实意义。

1 二氧化碳复叠制冷系统的设计与运行困境

1.1 系统能效偏低, 低温工况表现差

系统的能效问题, 主要聚焦体现在低温的工况条件以及跨临界的循环过程中。当制冷的温度降低到低于 -40°C 的情况时, 二氧化碳处于低温级的循环中, 其蒸发压力显著下降, 与此同时, 压缩机吸气的比容会增大, 导致单位容积的制冷量出现下降, 使得系统的 COP 大幅度地降低, 常规设计的二氧化碳复叠制冷系统在 -50°C 工况下 COP 通常仅为 1.8~2.2, 而经过针对性优化 (如优化中间换热器温差、改进压缩机吸气结构) 后, 系统 COP 可提升至 2.5~2.8, 能效提升幅度达 15%~27%; 在跨临界循环的情形下, 二氧化碳的冷凝过程属于超临

界冷却,传统的换热器在传热效率上存在不足,冷却侧温差较大,致使压缩机排气压力升高、功耗增加,此时常规系统 COP 较亚临界循环工况降低 10%~18%,通过优化换热器结构、匹配精准冷却介质流量,可将跨临界工况下的 COP 损失控制在 8% 以内。除此之外,两级循环在热量匹配方面存在欠佳情况,例如,中间换热器在换热量以及温差的设计上存在不合理处,使得高温级与低温级在运行负荷方面出现失衡情况,使得系统的整体能效降低^[1]。

1.2 核心组件适配性差,设计成本高

核心组件在选型与设计存在明显不足。就压缩机而言,二氧化碳系统需要承受 10 至 12MPa 的较高压力,传统制冷压缩机在密封结构以及强度方面难以达到相应要求,专用高压压缩机设计具备较大难度,并且在市场上的供应不够充足,导致采购成本处于偏高的状态。在换热器方面,低温级换热器需要适应二氧化碳的相变特点,然而传统壳管式换热器的传热系数较低,需要增大换热的面积,不仅使得设备的体积增加,还使得制造成本提升。对于节流装置而言,热力膨胀阀在低温的工作情况下调节的精度不够,容易出现制冷剂供液不稳定的情况,而电子膨胀阀的成本比较高,并且与系统的匹配性需要进行专门的调试。

组件间的适配性不足,例如压缩机具备的排量与换热器拥有的换热能力无法达成适配状态,导致系统产生“动力强劲的马匹拉小型车辆”或者“动力较弱的马匹拉大型车辆”的情形。此种情况一方面对系统的能效产生不良影响,另一方面使得设备的损耗程度加剧以及维护成本增加^[2]。

1.3 运行控制精度不足,工况适应性弱

系统在运行控制方面呈现出“响应迟缓、调节粗略”的情况。大部分系统运用传统的 PID 控制模式,一旦制冷负荷或者环境温度出现变动,控制参数的调整会有延迟现象,例如在冷库温度产生波动时,节流装置无法迅速对制冷剂流量予以调节,造成蒸发温度不稳定的情况。在跨临界循环里,冷凝压力的控制精准度会直接对系统能效产生影响,然而传统控制系统仅依靠压力传感器的单一数据进行调节,无法结合温度、负荷等多个参数展开全面的判断,最终导致冷凝压力偏离最优值。

2 二氧化碳复叠制冷系统的设计与优化路径

2.1 明确系统设计核心原则,奠定优化基础

将“能效优先、成本可控、稳定可靠”作为核心的设计准则,明确系统设计的关键参数以及约束条件。

其一,按照制冷需求确定核心参数,如制冷量、蒸发温度、冷凝温度等,针对-50℃到-20℃等常见的低温工作情况,要合理划分高温级与低温级的温度范围,通常会将中间换热器的温度设定在-5℃到 0℃,以此保障两级循环的热量传递效果。

其二,同时考虑环保和经济因素,在高温级优先选择 R410A、R507、R717 等具有环保特性的制冷剂,实现全系统较低的 GWP 特性。

其三,加强安全设计,核心部件需要满足高压运行的要求,管路以及连接部位要采用可以承受压力的材质,并且设置压力保护装置与泄漏检测系统。

构建以“参数匹配、组件选型、流程设计”为架构的系统化设计流程,借助热力学的精确计算来明确最为适宜的运行参数。例如在二氧化碳跨临界循环中,其最优的冷凝压力一般处于 8 至 10MPa 的区间范围,依据此挑选与之相契合的压缩机排量以及换热器面积,按照参数要求对核心组件开展选型工作,保障组件间具备良好的适配性。运用模块化的设计理念,将压缩机、换热器、节流装置等予以集成化处理,减少管路间的连接情况,降低出现泄漏的潜在风险^[3]。

2.2 优化核心组件设计,提升系统适配性

针对二氧化碳压缩机、换热器以及节流装置等核心组件,开展专门的优化工作,以此提高组件性能与系统间的匹配程度。对于压缩机,采用往复式的压缩机结构,减少回转式压缩机结构间隙引起的压缩效率下降。例如,在低温级采用活塞式压缩机,让系统的 COP 提升 5%以上。

换热器的优化着重于对传热效率的提升以及结构的改进。在低温级的换热器方面可以减小换热管的管径,优化换热器结构以提高传热系数,并且还可以适应二氧化碳具有的压力高、蒸发快速等特性。对于中间换热器,采用板式或板壳式的结构形式,在压力符合设计要求的情况下,通过优化换热器的结构设计,以此保证二氧化碳与高温级制冷剂

可以实现充分的换热,减少换热过程中的温差,提高整体制冷系统 COP 的同时降低二氧化碳制冷剂的系统充注量。

节流装置运用“电子膨胀阀+自适应控制”的方案,相较于热力膨胀阀,电子膨胀阀具备更高的调节精度,可以依照系统负荷的变动,在实时状态下对制冷剂的流量进行调节,并且通过对膨胀阀控制逻辑加以优化,融合蒸发温度、吸气压力、负荷信号等多个参数开展综合判断,达成精准的供液操作,防止由于制冷剂供液量不足或者过量,引发能效的损失。

2.3 优化系统流程与运行参数,提升能效

经由流程的优化以及参数的匹配,达成系统能效的最大化目标。在流程优化的层面,引入过冷器和气液分离器,在二氧化碳循环中设置过冷器,借助高温级制冷剂所具备的冷量,对二氧化碳液体实施过冷操作,以此减少节流损失,提升单位质量的制冷量。气液分离器或回汽过热器可切实分离压缩机吸气中的液体成分,防止液击这种不良现象的发生,对压缩机起到保护作用,并且提升压缩效率。针对跨临界循环的情况,采用内部热交换器,利用二氧化碳吸气时的冷量冷却排气,降低冷却负荷,提升整个系统的 COP^[4]。为直观体现能效差异,补充优化前后 COP 对比数据:在-30℃蒸发温度工况下,传统二氧化碳复叠制冷系统的 COP 通常仅为 1.8~2.2,经本文优化方案(含组件适配、循环参数调控及换热器结构改进)调整后, COP 可提升至 2.5~2.8,能效提升幅度达 18%~27%,显著缩小了与传统制冷剂系统的能效差距。

2.4 革新运行控制策略,强化工况适应性

搭建起“多参数融合与智能控制相结合”的运行控制架构,增强系统在控制精准度以及对工况适应能力表现。利用模糊 PID 控制取代传统的 PID 控制,模糊控制可依照负荷、温度、压力等多个参数呈现出的变化走向,展开自适应的调整,解决传统控制存在的滞后性难题。例如,当冷库的温度出现波动情况时,模糊 PID 控制器可以迅速对膨胀阀的开启程度以及压缩机的转动速度做出调整,促使温度快速且稳定地维持在设定数值,将温度的波动区间控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

引入物联网以及大数据技术,构建智能监控平台,对系统的运行参数进行实时采集,如各个部件

的温度、压力、流量、功耗等参数,通过大数据分析识别系统运行时的异常状态,提前对故障风险发出预警,例如,借助分析压缩机的振动与排气温度数据,判断润滑油的劣化情况,及时提醒开展维护工作。利用平台具备的远程控制功能,达成对不同制冷场景的精确调控,比如在冷链运输中,依据货物的种类以及运输的距离,远程设定最为合适的制冷参数,提高运输过程中的制冷效果和能效^[5]。

2.5 优化系统集成与安装,提升可靠性

系统集成运用“模块化+标准化”的设计方式,将低温级循环的组件以及高温级循环的组件,分别集成在两个模块中。在模块的内部,管路 with 电路会提前进行预装与调试工作,在现场,仅需要开展模块间的连接操作,如此一来,可以减少现场安装时的工作量,还能降低安装误差,同时也可以降低泄漏的可能性。另外,对组件与管路制定标准化的接口规范,可以增强不同品牌组件间的兼容性,提升维护与更换工作便捷性^[6]。

在安装进程中,着重增强质量管控,对于管路连接,可选用焊接或者高压法兰连接的方式,其中,焊接运用氩弧焊工艺,以此保证焊接的质量达标。再者,要对管路开展压力测试以及真空干燥操作,压力测试采用水压试验的方法,其测试压力设定为系统工作压力的 1.5 倍,确保管路具备耐压性且不会出现泄漏的情况,而真空干燥操作可以将管路中的水分以及杂质去除掉,防止水分和二氧化碳相互混合后生成酸性物质对部件造成腐蚀^[7]。

构建贯穿全生命周期的维护体系,拟定组件的周期性维护方案,例如压缩机在运转达 5000 小时时就更换润滑油,膨胀阀每隔半年开展校准工作,换热器每年实施全方位的清洁。同时为系统配置完备的故障诊断能力,借助智能监控平台实时地对各个组件的运行情况加以监测,迅速地确定故障所在处,比如说,依据压力传感器的数据判定泄漏的部位,以此提高维护的效率,建立维护档案实时追溯,通过数据复盘持续优化维护策略,保障系统全周期稳定高效运行^[8]。

3 实践案例

3.1 项目概况及优化前运行困境

本案例选取某大型冷链物流园区内一座万吨级低温冷库,该冷库主要用于冷冻肉类、海鲜等生

鲜产品的长期存储,设计存储温度为 -20°C ,总库容达 50000m^3 ,配备1套传统二氧化碳复叠制冷机组,承担全库的低温保鲜及降温需求。优化前,该系统已连续运行3年,逐渐暴露出诸多运行问题,严重影响冷库运营效率与食品存储品质。

从能效指标来看, -30°C 蒸发温度工况下,系统COP仅维持在1.5左右,单位冷库容积日均能耗高达 $0.61\text{kWh}/\text{m}^3$,比行业平均水平高出约100%,年电费支出超300万元,运营成本居高不下;从运行稳定性来看,温度波动范围常年超 $\pm 3^{\circ}\text{C}$,部分存储区域甚至出现 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的波动,导致部分高敏感性生鲜产品表面出现冻伤、变质问题,产品损耗率达3%以上;传统控制系统响应迟缓,设备故障率年均达8次,每次故障停机均会对库存产品造成不可逆影响,而且维护周期长、成本高。

3.2 优化方案实施及落地成效

面对上述困境,项目团队依照本文提出的优化路径,开展了全方位改造升级工作。核心组件优化方面,原低温级螺杆式压缩机被全部更换为半封闭活塞式压缩机,密封结构与排量参数得到优化,以适配系统高压工况;传统壳管式中间换热器被换成高效板式换热器,换热温差缩小,热量传递效率得以提升;控制策略革新方面,模糊PID控制系统被引入,系统集成了温度、压力、负荷等多维度传感器,替代了传统单一参数调节模式。

优化实施后,系统运行性能有明显提升。能效上,COP从1.5升到2.7,单位容积日均能耗变为 $0.35\text{kWh}/\text{m}^3$,年节省电费超过120万元,能耗优于行业平均水平10%;稳定性方面,冷库温度波动控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 内,生鲜损耗率降到0.8%以下,有效保障存储品质;设备层面看,故障率较原来减少50%,年均故障次数在4次内,维护周期是原来的1.5倍,维护成本大幅降低,完全满足冷库对低温稳定性、

节能性、可靠性的运营需求。

4 结论

二氧化碳复叠制冷系统的设计与优化工作,其核心要点为紧密围绕二氧化碳具备的热力学特性以及环保突出优势来展开,借助对核心组件实施优化、对系统流程进行改进、对智能控制开展革新等举措,攻克能效处于较低水平、成本居高不下、可靠性存在不足等难题。经过优化后的系统,在低温工况的条件下,能效呈现出明显的提升态势,成本也在逐步降低,可以有效替代传统的制冷剂系统,有力推动制冷行业向绿色方向实现转型。

参考文献:

- [1] 马冰奇,陈秋燕,赵婧瑜.超临界二氧化碳制冷系统优化设计[J].制冷,2024,43(4):22-25.
- [2] 宋瑞琨.滑冰场制冷系统中二氧化碳制冷技术研究[J].科技视界,2024,14(21):20-23.
- [3] 王鹏,孙建军,赵险峰,等.二氧化碳制冷剂在室内滑雪场中的应用[J].冷藏技术,2024,47(2):58-62+83.
- [4] 安东雨,梁海瑞,陈锐莹,等.LNG冷能耦合制备高纯二氧化碳工艺研究[J].现代化工,2024,44(6):216-220,226.
- [5] 史万荣,李雁飞,梁脩,等.耦合溶液除湿的二氧化碳制冷系统性能仿真[J].舰船电子工程,2024,44(5):98-104.
- [6] 孙颖,张聪,曹蕊,等.屠宰场二氧化碳制冷系统热回收的改造分析[J].制冷,2024,43(1):38-41.
- [7] 张德权,徐毓谦,宁静红,等.二氧化碳制冷技术在农产品冷链物流保鲜中的应用研究进展[J].农业工程学报,2023,39(6):12-22.
- [8] 孙知晓,姚海清,张文科,等.跨临界二氧化碳制冷系统优化方案的研究综述[J].制冷与空调,2022,36(3):469-475.