

低碳目标下冷链基础设施的绿色改造技术路径

吴邦喜 刘汉尚

华商国际工程有限公司 北京 100069

摘要: 在全球气候变化加剧与“双碳”战略深入推进的背景下, 冷链物流作为保障食品安全、医药安全和居民生活品质的关键环节, 其高能耗、高排放问题日益凸显。本文聚焦于“双碳”目标约束下冷链基础设施绿色转型的迫切需求, 系统梳理了当前我国冷链基础设施在能源结构、设备能效、系统集成及运营管理等方面存在的主要碳排放瓶颈。在此基础上, 从制冷系统能效提升、可再生能源融合、建筑围护结构优化、智能化管控系统构建以及全生命周期碳管理五个维度, 提出了一套系统化、多层次的绿色改造技术路径。研究进一步探讨了政策激励、标准体系、金融支持与产业协同等支撑机制, 并通过典型案例分析验证了技术路径的可行性与减排潜力。研究表明, 通过多技术协同与制度创新, 冷链基础设施可在保障功能的前提下显著降低碳足迹, 为实现冷链物流领域乃至全社会的绿色低碳转型提供有力支撑。

关键词: 低碳目标; 冷链基础设施; 绿色改造; 制冷技术; 智能管控; 碳管理

引言

我国经济高质量发展下, 生鲜食品等温控产品消费量猛增, 冷链物流需求爆发式扩张。据中国物流与采购联合会数据显示, 2024年我国冷链物流市场规模超5300亿元, 冷库容量超2.6亿立方米, 冷藏车保有量超45万辆。但冷链物流依赖能源密集型制冷系统, 能耗高, 是物流领域碳排放重要来源, 年碳排放量超5000万吨二氧化碳当量且持续上升。国家“双碳”目标对各行业提出减排要求, 《“十四五”现代物流发展规划》《绿色高效制冷行动方案》政策文件强调推动冷链物流绿色低碳发展。在此背景下, 如何在保障冷链服务品质与效率的同时降低碳排放强度, 是亟待解决的重大课题。冷链基础设施是冷链物流网络载体, 其运行效率与能耗决定系统碳足迹。对现有冷链基础设施进行绿色改造, 是响应“双碳”战略、提升行业竞争力的关键。

1 冷链基础设施碳排放现状与瓶颈分析

1.1 能源结构依赖化石燃料

当前, 我国冷链基础设施的能源供应仍以电网电力为主, 而我国电力结构中煤电占比仍高达60%以上。这意味着即使冷链设备本身能效较高, 其间接碳排放依然巨大。尤其在中西部地区, 电网清洁化程度相对较低, 冷链设施的碳强度更为突出。此外, 部分偏远地区或应急场景下的冷库仍依赖柴油发电机供电, 不仅运行成本高昂, 而且直接燃烧化石燃料产生的二氧化碳、氮氧化物等污染物对环境造成双重压力。这种对高碳能源的高度依赖, 使得冷链基础设施难以摆脱“隐性高碳”的困境, 成为制约行业绿色转型的根本性障碍。

1.2 制冷系统能效低下

制冷系统是冷链基础设施的核心耗能单元, 其技术水平直接决定整体能效表现。然而, 大量早期建设的冷库仍在使用R22等全球臭氧层消耗潜能值(ODP)的制冷剂, 这类物质不仅对臭氧层具有破坏性, 其温室效应也极为显著。即便部分设施已完成制冷剂替换, 系统整体能效仍普遍偏低, 这主要源于压缩机选型不合理、蒸发器与冷凝器换热效率下降、管路设计冗余或保温不良等问题, 导致系统实际运行性能系数(COP)远低于设计值[1]。更严重的是, 许多运营单位缺乏专业维护能力, 设备及制冷系统长期处于“带病运行”状态, 进一步加剧了能源浪费。这种“重建设、轻运维”的模式, 使得制冷系统成为冷链碳排放的最大源头。

1.3 建筑围护结构热工性能差

冷库的保温隔热性能是影响冷量损失的关键因素。许多上世纪90年代至2000年代初建成的冷库, 墙体、屋顶普遍采用聚苯乙烯(EPS)或普通岩棉作为保温材料, 这些材料导热系数高、易吸湿老化, 随着时间推移, 保温性能急剧下降。在实际运行中, 库内冷量通过围护结构持续向外界散失, 制冷系统不得不频繁启动以维持设定温度, 形成恶性循环。此外, 装卸作业区往往缺乏有效的气密措施, 频繁开关门导致大量热空气涌入, 显著增加瞬时冷负荷。部分冷库甚至未设置缓冲间或风幕系统, 冷热空气直接对流, 进一步放大了能量损耗。这种结构性缺陷使得即使采用高效制冷设备, 也难以实现整体节能目标。

1.4 系统集成度与智能化水平不足

传统冷链设施普遍存在“子系统孤岛”现象，制冷、照明、通风、搬运等系统各自独立运行，缺乏协同优化机制。例如，制冷系统通常按固定时间表或恒定温度运行，无法根据库存动态、开门频率或室外气象条件进行自适应调节；照明系统多为常开模式，无法实现按需启停；通风和搬运设备调度也缺乏与温控系统的联动。这种粗放式的管理模式不仅造成大量无效能耗，还降低了系统响应灵活性。更关键的是，由于缺乏统一的数据采集与分析平台，管理者难以准确掌握能耗构成与碳排放来源，无法开展精准的能效诊断与优化决策，使得绿色改造缺乏数据支撑和方向指引。

1.5 全生命周期碳管理缺失

当前冷链基础设施的碳管理多局限于运营阶段的能耗统计，缺乏覆盖“建材生产—施工建造—运营维护—拆除回收”全生命周期的系统性视角。在项目规划初期，很少进行碳排放影响评估，导致高碳建材和低效设备被默认采用；在建设阶段，施工过程中的隐含碳（如水泥、钢材生产排放）未被纳入考量；在运营阶段，虽有电表记录总用电量，但缺乏分项计量与碳排放实时核算能力；在设施报废阶段，旧设备往往被简单拆解或填埋，其中蕴含的可回收材料与潜在减碳价值被忽视。这种碎片化的管理方式，使得冷链基础设施的碳足迹难以全面量化，绿色改造的综合效益也无法充分体现。

2 低碳目标下冷链基础设施绿色改造技术路径

2.1 制冷系统能效提升与环保替代

制冷系统的绿色升级是冷链基础设施脱碳的核心突破口。近年来，以天然工质为基础的高效制冷技术展现出巨大潜力。例如，二氧化碳（CO₂）作为一种零臭氧消耗潜值（ODP）、GWP仅为1的天然制冷剂，在跨临界复叠系统中可实现优异的低温制冷性能，尤其适用于-25℃以下的冷冻库及速冻间中。氨（NH₃）则凭借高能效和零GWP特性，在大型工业冷库中广泛应用，配合二氧化碳复叠等间接供冷系统可有效规避安全风险。碳氢化合物如丙烷（R290）在小型商用冷柜中也逐步推广。这些环保制冷剂的替代不仅直接削减了制冷剂泄漏带来的温室效应，还因其优良的热力学性能提升了系统整体能效[2]。与此同时，变频驱动技术的普及显著优化了设备运行效率。通过在压缩机、冷风机、蒸发冷、水泵等关键部件加装变频器，系统可根据实际冷负荷动态调节功率输出，满足制冷系统在部分负荷状态下仍能高效运行，同时避免传统定频设备频繁启停造成的能量冲击与磨损。此外，制冷系统冷凝余热回收技术的应用进一步挖掘了系统余能价值，制冷过程中产生的高温废热可通过热交换器或

热泵机组进行回收，用于库区办公供暖、员工生活热水或冷风机自动化融霜，替代原有的电加热或燃气锅炉供热，并实现能源梯级利用。某华东冷库改造案例显示，仅热气融霜一项技术即可降低融霜能耗30%以上。系统层面的优化同样不可忽视，通过基于历史数据与机器学习算法的精准负荷预测，可实现设备选型的科学化与运行策略的精细化，从根本上提升制冷系统的经济性与环保性。

2.2 可再生能源深度融合

推动冷链基础设施用能结构清洁化，必须加速可再生能源的本地化消纳。屋顶及墙面光伏一体化是最具可行性的路径之一。冷库通常拥有大面积平整屋顶，且用电负荷稳定，非常适合安装分布式光伏发电系统。通过“自发自用、余电上网”模式，不仅可直接降低外购电量，还能在电价高峰时段减少电费支出。为进一步提升绿电利用率，配套建设储能系统（如锂电池或液流电池）可有效平抑光伏发电的间歇性，实现夜间或阴天时段的持续供能。在具备地热资源的地区，地源热泵或空气源热泵可作为辅助冷热源，在夏季提供冷却水，在冬季为办公区供暖，显著降低对传统能源的依赖。对于无法自建可再生能源设施的企业，参与绿电交易市场或购买绿色电力证书（GreenCertificates）也成为实现用电端间接脱碳的有效补充手段。这种“自产+外购”相结合的绿电策略，为冷链设施构建了多元、灵活、低碳的能源供应体系。

2.3 建筑围护结构绿色升级

围护结构的热工性能是决定冷库基础能耗的关键。针对老旧冷库保温层老化、导热系数高的问题，采用高性能保温材料进行整体或局部更换是必要之举。聚氨酯（PU）泡沫因其闭孔率高、导热系数低（约0.022W/(m·K)）而被广泛采用；更先进的真空绝热板（VIP）导热系数可低至0.004W/(m·K)，在同等保温效果下厚度仅为传统材料的1/5，特别适用于空间受限的改造项目。气凝胶复合材料虽成本较高，但在极端低温环境下表现出卓越的稳定性，适用于高端医药冷链场景^[3]。除材料升级外，气密性优化同样重要。在装卸月台加装快速卷帘门、高速堆积门及强力风幕机，可大幅减少开门作业时的空气对流导致冷量外泄；设置封闭式缓冲间或双门互锁系统，则能在货物进出时形成温度过渡区，有效阻隔外部热空气侵入。对墙体穿管孔洞、接缝处进行专业密封处理，亦可消除冷桥效应，全面提升围护结构的整体保温性能。

2.4 智能化管控系统构建

智能化是实现冷链基础设施精细化管理和能效跃升的关键赋能手段。通过部署物联网（IoT）传感器网络，

可对库内温度、湿度、门开关状态、设备运行参数及能耗数据进行实时采集,构建数字孪生模型,实现物理设施与虚拟系统的双向映射,并在此基础上,引入人工智能算法开发智能调控平台,能够基于多维数据动态优化运行策略。例如,系统可根据库存密度、货物进出频率、室外温湿度及电价信号,自动调整制冷机组启停时间、设定温度及送风量;通过预测性维护模型,提前识别压缩机轴承磨损、冷媒泄漏等潜在故障,避免非计划停机导致的能耗激增与货损风险。同时,集成照明、通风、搬运等子系统的能源管理系统(EMS),可实现多能互补与综合调度,不仅降低总能耗,还为碳排放的实时核算、对标分析与报告提供数据基础,使绿色运营从经验驱动转向数据驱动。

2.5 全生命周期碳管理体系建设

实现冷链基础设施的深度脱碳,必须跳出单一运营视角,建立覆盖全生命周期的碳管理体系。首先,应参照ISO14064、PAS2050等国际标准,制定适用于冷链行业的碳足迹核算方法学,明确建材生产、施工建造、运营维护及拆除回收各阶段的排放因子与计算边界。其次,在绿色供应链管理中,优先采购低碳建材(如再生钢材、低碳混凝土),并要求设备供应商提供产品碳足迹声明(PCF),推动上游产业链协同减排。再次,在设施运营阶段,通过智能电表与碳管理软件,实现分项能耗与碳排放的实时监测、预警与优化。最后,在设备更新或设施报废阶段,应评估旧设备的回收再利用价值,将可再制造部件纳入循环经济体系,最大化其残余碳资产价值。对于改造项目产生的节能量与碳减排量,可通过国家核证自愿减排量(CCER)机制进行核证与交易,形成“减排—收益—再投入”的良性循环,为绿色转型提供持续动力。

3 支撑机制与政策建议

要确保上述技术路径有效落地,必须构建强有力的制度与市场支撑体系。政府应强化顶层设计,将冷链基础设施纳入重点用能单位节能降碳改造目录,并加快制

定《绿色冷库评价标准》《冷链碳排放核算指南》等技术规范,为行业提供清晰指引。财政金融方面,设立冷链物流绿色改造专项基金,提供贴息贷款或投资补助,降低企业初期投入压力;同时鼓励发行绿色债券、开展ESG融资,引导社会资本流向低碳冷链项目。产业层面,应支持产学研用联合攻关,突破高效制冷、智能控制等关键技术瓶颈,并通过建设绿色冷链示范园区,形成可复制、可推广的商业模式。此外,应探索将冷链物流逐步纳入全国碳市场覆盖范围,对采用先进绿色技术的企业给予碳配额倾斜或税收减免,通过市场化机制激发企业内生减排动力。

4 结语

在“双碳”目标刚性约束下,冷链基础设施的绿色改造已从“可选项”变为“必选项”。本文提出的“五维一体”技术路径——即以高效制冷与环保替代为核心,以可再生能源融合为支撑,以围护结构优化为基础,以智能管控为纽带,以全生命周期碳管理为保障——构成了一个系统、协同、可操作的改造框架。通过多技术集成与制度创新,冷链基础设施完全能够在保障食品安全与供应链稳定的同时,实现能效跃升与深度脱碳。未来,随着新型制冷技术、数字孪生、绿氢储能等前沿科技的成熟,冷链基础设施的绿色转型将拥有更广阔的技术空间。政府、企业、科研机构需形成合力,加快标准制定、政策落地与模式推广,共同推动冷链物流迈向高质量、零碳化的新发展阶段,为构建绿色低碳循环发展经济体系贡献关键力量。

参考文献

- [1]刘卓卓,段文浩,李欢.绿色物流背景下生鲜产品冷链物流发展策略研究[J].中国储运,2025,(02):152-153.
- [2]《交通运输大规模设备更新行动方案》支持冷链设施设备升级改造[J].冷藏技术,2024,47(03):11.
- [3]李思聪,叶静.双碳目标下冷链运输绿色低碳发展对策[J].综合运输,2025,47(05):144-149.