

现代冷库工程设计技术与发展研究

韩爽¹ 李婷¹ 田继源²

1. 华商国际工程有限公司, 北京 100000
2. 北京奕信通科技有限公司, 北京 100000

[摘要] 文章从整体上对现代冷库工程设计方案的技术架构和未来趋势进行了探讨。在对冷库工程整体规划、功能区划分、建筑物保温隔热设计技术进行分析的基础上, 又分别就制冷设备的选择方式及节能措施、气流组织管理和能耗削减对策、自动控制系统和高精度温湿度检测手段的应用、高效率低能耗、自动化无人驾驶等方面的发展方向进行了阐述。形成一个完整的冷库工程设计方案技术体系, 在此基础上给现今冷库建设工程设计工作提供一些参考依据和技术支持。

[关键词] 冷库工程; 制冷系统; 节能设计

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19478

中图分类号: TU267

文献标识码: A

Research on Modern Cold Storage Engineering Design Technology and Development

HAN Shuang¹, LI Ting¹, TIAN Jiyuan²

1. Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China
2. Beijing Yixintong Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract: This article explores the technical architecture and future trends of modern cold storage engineering design schemes as a whole. On the basis of analyzing the overall planning, functional zoning, and building insulation design technology of cold storage engineering, the development directions of refrigeration equipment selection and energy-saving measures, airflow organization management and energy consumption reduction measures, automatic control systems and high-precision temperature and humidity detection methods, high efficiency and low energy consumption, and automated unmanned driving were elaborated. Form a complete technical system for cold storage engineering design, and provide some reference and technical support for current cold storage construction engineering design work based on this.

Keywords: cold storage engineering; refrigeration system; energy-saving design

引言

伴随着冷链物流行业迅速发展, 冷库是冷链的重要基础设施之一, 它的工程设计方案水平直接影响着冷藏食物的质量以及能源利用的效果, 在“双碳”目标下, 冷库工程设计必须进行向节能环保和智能化方向转变的发展趋势。现阶段的传统冷库设备型号选择随意、耗电量过高、温度控制不够准确, 必须构建起完整的现代化冷库工程设计技术体系, 本文从冷库整体工程的设计、制冷系统的设计、智能化控制系统的设计以及发展趋势这四个方面对冷库工程的设计进行了探讨, 以期能够对冷库建设有所帮助。

1 冷库工程设计基础理论与技术体系

1.1 冷库总体布局与功能分区设计技术

冷库布置要根据物流工艺合理、运输路线最简、防止曲折相交的要求来安排。库址的选择应符合当地的总体规

划, 采用氨制冷的冷库应当选择与附近居民区相邻的地方, 并且要远离有害气体、烟尘、粉尘等污染区。在总平面布置上, 库房要根据物流工艺、运输、管理以及设备管线合理安排及防火要求来进行布置。以公路运输为主的应将仓库布置在靠近冷库出入口的位置处, 以便货物及时流转。而根据不同的设计温度则要将冷间分开设置、分开堆放, 使得保温隔热围护结构的外表面积最小化, 从而节省冷量损耗。冷藏车间的平面柱距以及层高的大小需要依据储存产品的种类以及包装规格、搬运堆放方法、托盘大小以及堆放高度等因素来决定, 还要结合建筑尺度以及结构的选择来进行决定。冷库工程的容量按照冷藏间或者冰库的名义容积来计算, 名义容积超过 20000m³ 的为大型冷库, 5000m³ 到 20000m³ 之间的为中型冷库, 低于 5000m³ 的就属于小规模冷库。库房应该设穿堂或者是站台区, 其温

度应当符合冷藏的要求，站台宽度不应小于 5m，并且边沿处应该安装缓冲橡胶条块，涂刷防撞警示线。

1.2 建筑结构与围护保温系统设计技术

冷库围护结构的设计着重考虑保温隔热以及防水透气的问题。冷库设计的要求对冷库的整体热阻大小有规定，要以经济合理的方式选取合适值，同时不能低于规定的最小总热阻。仓库屋顶最好增设通风隔热层，尤其是在夏热冬暖区要设有通风间层或者使用热反射涂料面层以降低太阳辐射引起的冷负荷。而装配式冷库围护结构外墙也要加上通风隔热层来避免因温差引起的结露、开裂、变形等现象产生。对于防止冷桥的问题也是整个冷库围护结构设计的重要步骤，仓库下面几个地方都要做相应的处理：因为承重构件连续而导致的保温隔热层中断的地方；门洞以及设备、管线穿过保温隔热层四周的部分。冷藏间、冻结间的门洞穿过穿堂处变形缝的局部地坪以及楼面。这种构造做法能够有效地防止冷能的流失以及出现结露的情况。库房屋顶排水应设外天沟或檐墙外露明装雨水管。冷间建筑物地面架空层应采取防水措施以防止地面积水入侵。新型绿色建材如硬质聚氨酯保温夹心板、气凝胶复合板、相变蓄热材料等应用于隔墙时可以使冷库的保冷效果提高 30% 以上，大幅减少了冷量损失。

2 冷库制冷系统与节能优化设计技术

2.1 制冷系统类型与设备选型技术

冷库制冷是冷库工程的重点环节之一，而制冷系统的选用直接决定了冷库的工作效率和耗电量大小问题。目前常见的冷库制冷系统主要有氨制冷系统、氟里昂制冷系统以及二氧化碳复叠制冷系统三类。其中氨制冷系统高效低成本，适用于大规模的集约化冷藏库；氟里昂制冷系统安全可靠适合小型到中等规模的冷藏库使用；二氧化碳复

叠式制冷系统绿色环保可靠适用于规模庞大的低温库或者大超市的冷柜。制冷压缩机的选择需要根据所处环境条件的不同进行相应的选择，比如对于功率范围的需求、能效比的要求以及适用冷量的大小等。螺杆式制冷压缩机功率有从小至大的不同如 50~1000kW 之间，具有较高的能效比，在大型中型冷库中有广泛的应用并且使用寿命可达 15~20 年。表 1 对各类制冷系统及压缩机的技术参数进行了系统对比。

2.2 气流组织与温湿度精准控制技术

空调设计对冷冻室内的温差及产品质量有着决定性的作用。冷冻库使用冷却机、吹风方法。肉类冷冻库大多用落地式冷却机，无管道短分管，大孔径圆形口集中吹风，通过空气冲击力进行空气更新。肉类产品冷冻库应选用冲击式冷却机配合较大孔径圆形口集中吹风的方式，孔径约 200~300mm，孔口出风速度约为 20-25m/s，射程为孔径大小的 60~100 倍，保证冷风可以到达冷库深处。针对冷冻果蔬冷却间来说，应使用冷风机搭配均匀孔洞的送风管或者布袋风管来达到均匀低速送风，风速保持在 0.5~2m/s 左右，防止高速气流对果蔬表面进行冲击导致干耗现象发生。纵向吹风冷却间冷风机安装的位置应该是在库房的一侧，通风风向长度，射速不应该过大超过 20m/s，一般设计成长度 12~18m，宽度 6m，高度 4.5~5m 规格。喷嘴口径是 200~300mm，喷嘴位置气流速度要达到 20~25m/s，喷嘴喷射距离为风口直径的 60~100 倍。冻结间内气流流动的设计应当考虑的是快速冻结的同时减少干耗的程度。使用强制循环冷风机搭配侧送侧排或者上供下排的气流组织方式，库内风速应维持在 0.5~3m/s 之间，送风温度同气温温差最好控制在 8~12℃。而针对速冻设备来说可以使用流态化的速冻工艺，即用强制性的气流来

表 1 制冷系统类型与压缩机选型对比

制冷系统类型	适用温区	常用制冷剂	优点	缺点	适用场景
氨制冷系统	中低温	NH ₃	能效高、成本低	毒性、易燃	大型集中式冷库
氟里昂系统	中高温	R22/R404A/R507	安全、稳定	环保受限	中小型冷库
CO ₂ 复叠系统	低温	R744	环保、安全	压力高、投资大	大型低温库、超市
氟泵供液系统	中低温	R22/R404A	能效高、回油好	投资略高	大中型冷库
压缩机类型	功率范围(kW)	能效比	适用冷量	维护成本	使用寿命
活塞式	5~200	中等	中小型	较高	10~15 年
螺杆式	50~1000	高	大中型	中等	15~20 年
离心式	300~3000	最高	大型	较低	20 年以上
变频涡旋式	10~100	高	中小型	较低	12~18 年

使产品悬浮起来,在这种情况下流速一般维持在 5~10m/s,可以大大减少产品冻结的时间 30%~50%,冷风机放置的位置也会影响气流组织效果。冷风机要放置在冷间的纵向一端或者两边,不能放置在门洞上方。送风口与回风口的间距最好大于 5m,以免造成短路现象的发生。对气流组织模拟验证可以应用 CFD 技术进行数值仿真,预测温湿度场分布情况,调整出风口的位置以及送风参数等,确保仓库内的温差保持在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内。对于冷库的设计而言,冷藏间需要依据不同种类的食物所进行的冷冻保鲜技术来决定它的设计温湿度指标,在国家标准中规定:冷却物冷藏间的温差不应大于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;而冷冻物冷藏间的温差不应大于 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却间的室内温度一般是 0~4 $^{\circ}\text{C}$,冻结间的温度是-23~-18 $^{\circ}\text{C}$ 或者-30~-23 $^{\circ}\text{C}$;而对于不同的食物类型来说,冷却物冷藏间的室内温度是从-2 $^{\circ}\text{C}$ 到 16 $^{\circ}\text{C}$ 之间,相对湿度 80%~95%。冻结库冷藏间温度-20~-15 $^{\circ}\text{C}$ 或-25~-18 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 85%~95%,改进气流组织以达到冷库内较好的温度场、风场分布,从而使冷库内货物的不同位置上的食品在一个较短的时间范围内可以被冻结成冰,冻品效果好。

2.3 制冷系统节能设计与能效提升技术

制冷节能是冷库减少运营费用的重要手段之一。我国中小型冷库年耗电量占冷链物流总消耗的 40%以上。传统系统中的蒸发压力温差每增加 1K,冷量损失约为 9.6%,如果选用匹配的膨胀阀,可以大幅度提高能效,采用-18 $^{\circ}\text{C}$ 时,温度差锁定为 7K,制冷量从 18.4kW 提高到 32.8kW,提升了 50%,变频技术根据实际负荷调节压缩机的速度,节能效果大约为 15%~30%。热回收技术利用压缩机冷凝热用来融霜、地面供暖以及热水等,综合能耗下降了 15%以上,蒸发式冷凝与自然冷却系统的结合运用也可以提高能效等级。而在低温区域,运用低温条件下的空气自然制冷,节能空间有 20%~40%,蓄冷方法应用峰谷电价制冰蓄冷,能够达到 15%~25%左右的节能率。使用变频涡旋式或者螺杆式的压缩机,其能效比 COP \geq 3.0,节电超过 30%,现代冷库使用物联网管理系统使冷库更加节电,一些园区已经实现了完全用可再生能源供电。

3 冷库智能化与安全保障设计技术

3.1 冷库自动化控制系统设计技术

自动化控制系统是智慧冷库最重要的基础,在大中型冷库控制系统中,采用网络技术和现场总线的方式,主要包括有上位显示单元、主机处理单元、从机处理单元以及压缩机驱动单元,可以达到传感器信号无误差传递的效果,对数据信息进行共享。数字孪生技术应用于冷库运维越来越

越成熟,通过对虚拟冷链系统进行模拟试验,进行故障检测,远程监控维护等,在故障预测精准度可达 95%,仓库管理信息系统结合冷链物流系统使用,辅助仓库内部 AGV 小车工作,加快了货物流转速度 20%~50%之间。自动化立体冷库使用机械或者全自动化控制系统货柜,根据堆垛机的设计布局及结构仿真设计出最优方案来进行高效自动化存储取物。

3.2 温湿度智能监测与调控技术

冷库精确温湿度控制对保证食品储存质量至关重要。冷库电气自动化温湿度精确控制系统通过对高精度的温湿度传感器及高性能控制器的应用提高测量准确度以及控制反应灵敏性^[1]。在软件方面采用先进的控制算法例如自适应 PID 算法提高系统的稳定性和调节精度。经过系统的优化可以达到 ± 0.5 摄氏度的温度控制精度 $\pm 3\%$ RH 湿度控制精度。以某一食品冷库为例进行说明,在系统优化之后能耗降低到了百分之八降到百分之三节能百分之十五左右。温湿度智能化检测系统以物联网为基础形成一个全程冷链监测网。温湿度智能化控制设备能够达到 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的精准控温,而区块链技术对生鲜产品的整个供应链条上的温度情况进行追踪记录,使得产品的安全得到保障。冷库温湿度控制系统包括数据采集、传送以及处理三部分组成,传感器发出的信号经现场总线传送到主站处进行处理以实现实时监控并发出异常警报,针对冻结物冷藏库,在选择上尽可能地使用空气冷却器来达到良好的温度场效果^[2],运用温湿度一体化监测与调节技术可以减少货物损失的情况发生、提高冷库经营经济效益和管理水平。

4 现代冷库工程发展趋势与创新方向

4.1 高效节能与低碳化发展趋势

“双碳”目标驱动冷库工程发展向高效率、低能耗、零排放的方向迅速迈进,在冷库屋面安装了越来越多的光伏发电建筑一体化 BIPV 系统,屋顶分区域布置光伏组件及配套储能装置,优先使用绿电,已经有部分园区可以达到 100%的可再生能源供电。利用冷藏设备之后,农产品储存损耗率由 19.7%降至 7.1%,果蔬产品损耗率控制在 6%~8%,水产品冷藏前后的损耗量下降 14.9%。“十四五”期间中央财政投入资金 180 亿元用于农产品冷链物流仓储保鲜设施建设,新增冷库规模达 1964 万吨;整县推进项目 350 个,覆盖率达到 70%以上。绿色环保型制冷剂广泛应用是低碳发展的有效方式。目前我国库房主要使用的是 R507 和二氧化碳制冷剂,在二氧化碳以及氨制冷剂的基础上可以达到节能环保的效果同时符合碳排放指标。

表 2 冷库主要节能技术与低碳化发展路径

节能技术	原理	节能潜力	初投资	适用场景	成熟度
热回收技术	回收冷凝热用于融霜、地坪加热	10%~20%	中等	大中型冷库	成熟
蓄冷技术	利用峰谷电价制冰蓄冷	15%~25%	较高	峰谷电价地区	成熟
自然冷却	利用低温环境空气冷却	20%~40%	中等	寒冷地区	成熟
变频控制	根据负荷调节压缩机转速	15%~30%	中等	变负荷场景	成熟
光伏一体化	利用屋顶光伏发电	20%~50%	高	大型冷库	发展中
低碳技术	减排路径	CO ₂ 减排潜力	技术难点	政策驱动	
自然工质应用	替代高 GWP 制冷剂	30%~50%	系统压力高	基加利修正案	
能效提升	降低单位能耗	20%~30%	初始投资高	双碳目标	
可再生能源	替代化石能源	40%~60%	间歇性	绿电政策	
余热回收	能源梯级利用	10%~20%	热源匹配	节能政策	

自然工质 CO₂复叠循环系统所用的制冷剂是 R744，有着绿色环保的安全特性。表 2 对库房的主要节能技术和低碳途径做了系统的比较。

4.2 智能化与无人化冷库发展方向

智能与无人是冷冻库工程的发展方向。黑灯物流的概念以数字孪生赋能无人冷冻库的技术整合，使冷冻链从生产至发货全流程实现制冷自动化、智能化转型。数字孪生技术应用在仿真实验、故障诊断、远程维护等环节，使得冷冻库运行维护更便捷、准确。未来冷链物流行业将进入高自动化、智能化、数字化、绿色化融合的新时代，冷冻库由单纯的存储环节演变为包括存储、分拣、加工、配送在内的智能供应链中心。智慧冷链跨行业融合态势突出^[3]。温湿度智能管理系统精准调节温度，冷藏库区内 AGV 小车配合 WMS 系统工作，区块链保证所有冷链物流环节温控数据有源可循。在政策与市场需求双轮驱动下，中国的冷链物流行业或将沿着绿色化基础、智能化升级、网络化协作三阶段发展路径，在率先在全世界完成零碳智慧冷链商业闭环的同时也为实现双碳计划注入冷能量。零碳冷链示范基地已经在长三角地区、港珠澳区域等冷链枢纽节点开始建设，通过碳足迹追踪、碳抵消机制做到低能耗运营。

5 结语

当下冷库工程的设计技术正在发生着由传统的经验

性转向以大数据为基础的重大转变。本文对冷库工程设计的四大关键核心技术进行了系统的探讨并总结出：冷库的整体规划、保温隔热层的设计是冷库安全可靠运行的前提条件要严格按照相关标准来进行设计；对于制冷设备的选择以及节能降耗措施的有效实施关系到整个冷库能耗高低的问题，实现科学合理匹配及自动调节能够有效减少能源消耗；自动化、精准温湿度检测是提高冷库管理水平的重要方式，数字模拟技术和物联网有巨大的发展空间；高效率低能耗、自动化智能化无人值守是当前冷库工程建设的主要方向，绿色环保的技术将会带动行业升级。今后冷库工程建设要继续注重技术创新多元化融合，加快冷链物流行业现代化进程。

[参考文献]

- [1]魏兆汉.冷库电气自动化温湿度精准控制系统的优化与应用[J].中国食品工业,2025(10):50-53.
 - [2]周剑星.大型高架冷库和低温车间制冷系统方案对比分析[J].中国设备工程,2022(24):16-20.
 - [3]崔明星.大型超低温冷库氟利昂复叠制冷系统施工关键技术[J].安装,2025(04):15-18.
- 作者简介：韩爽（1990.06—），男，汉族，黑龙江肇东人，高级工程师，硕士研究生，研究方向为制冷及低温工程。