

制冷冷库设计关键技术与实践研究

韩爽 苗旺 李婷

华商国际工程有限公司, 北京 100000

[摘要]制冷冷库的设计是冷链物流基础设施建设的重要组成部分,直接关系着制冷冷库的运行效果以及能耗和经济效益,文章对冷链储藏库的设计理论及基本原则进行了介绍,在此基础上针对当前冷链储藏库存在的设计问题进行分析,从负荷计算、制冷方案的选择、设备选型、隔热、气流分布、自动化、节能 7 个方面详细阐述了冷链储藏库的关键技术以及设计优化措施,通过实例项目的应用情况证明所提的技术是可行有效的,研究结果表明,科学合理的冷链储藏库设计必须兼顾技术和经济两方面的因素,追求整个使用过程中的最佳利益,从而推动冷链物流行业的发展。

[关键词]制冷冷库; 负荷计算; 制冷系统; 实践

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19846

中图分类号: TB6

文献标识码: A

Key Technologies and Practical Research on Refrigeration Cold Storage Design

HAN Shuang, MIAO Wang, LI Ting

Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract: The design of refrigeration cold storage is an important component of cold chain logistics infrastructure construction, directly related to the operation effect, energy consumption and economic benefits of refrigeration cold storage. This article introduces the design theory and basic principles of cold chain storage, and analyzes the current design problems of cold chain storage. It elaborates on the key design technologies and optimization measures of cold chain storage from seven aspects, including load calculation, refrigeration scheme selection, equipment selection, insulation, airflow distribution, automation, and energy saving. The application of example projects proves that the proposed technology is feasible and effective. The research results show that a scientific and reasonable design of cold chain storage must take into account both technical and economic factors, and pursue the best in the entire use process. Benefits, Thus promoting the development of the cold chain logistics industry.

Keywords: refrigeration cold storage; load calculation; refrigeration system; practice

引言

伴随着国内冷链物流行业的快速升温,冷库作为整个冷链系统中最重要的基础设备之一,建造数量也在不断增加,在很大程度上影响着冷库的制冷效果与能耗水平以及温度均匀程度,可以说是冷链工程项目的领头羊。但是由于冷库的设计涉及制冷技术、建筑设计、电气控制等多个方面,较为复杂,如果设计不合理就会造成运行能耗高、温差大、使用寿命低等一系列问题,所以有必要对制冷冷库的设计进行深入的研究并给出合理的改进措施来提高冷库施工的质量,减少后期运维成本,保证食品安全。

1 冷库设计的基本原理与总体原则

冷藏库的设计基本原理是根据热力学及传热学的知识进行设计,主要是利用保温隔热材料以及制冷装置对库房内的温湿度进行控制,使其处于相对稳定的低温环境中。

冷藏库设计的基本方针是:安全可靠,技术先进,经济合理,节能环保。对于冷藏库来说,应该能满足产品的温湿度要求,保证制冷设备正常运转,节约能源,选取绿色环保型的制冷剂,使得整个系统的寿命周期费用最低,设计冷藏库的主要步骤有:确定设计参数→核算冷量→选择制冷机→设计制冷系统→设计隔热层→设计控制系统等。设计时要严格执行《冷库设计标准》GB 50072-2021 的要求,保证设计方案满足相关标准。同时冷库的设计也要兼顾实用性、所在地区的气候变化以及投入成本等,合理地选择适合自己的设计方案。

2 制冷冷库设计中存在的主要问题

目前冷藏库的设计存在一些主要问题:一是负荷计算不准,有些设计者忽视负荷计算,采用经验估算代替精确计算,使制冷设备选得过大或过小,过大造成投资浪费与

运行费用增大, 过小造成制冷不足。二是制冷系统的方案选不对, 没有针对冷库的大小、所需的温度及所在地的特性作比较选择合适的制冷系统。三是结构保温设计失误, 冷桥解决不好, 防潮隔气层设置不合理, 致使围护结构散热量很大。四是气流组织不合理, 送风形式不对, 库内的温湿度分布不均, 影响储藏食品的质量^[1]。五是自动化管理水平差异较大, 一些冷库还是进行人工检测, 不能够做到精确控温和节电降耗。六是缺乏节能设计理念, 在使用上没有很好地利用好峰谷电价, 自然冷源等方式来达到节能减排的目标, 导致运行费用较高。

3 制冷冷库设计关键技术分析

3.1 冷库负荷计算技术

冷库负荷的计算是冷冻系统设计的基础, 直接影响着对冷冻设备的选择以及运行中的能量消耗量。冷库负荷可分为两大部分: 冷间的冷却设备热负荷以及冷库的机械制冷热负荷, 建议使用逐时计算或者基于工程系数调整的稳态计算方式。冷间的冷却设备负荷应当包括冷间围护结构的传热量、物品的散热和传热量、通风换气传热量、电动机传热量, 以及工作人员身体散发的热量等五个方面; 而围护结构热量中又要考虑太阳辐射的影响, 在墙体与屋顶外表面处选取夏季空调室外计算日平均温度作为计算依据。冷物本身的传热量主要由食品传热量、食品包装材料及运输车辆的传热量、食品冷却、冷冻过程中的呼吸传热量几部分构成。食品热负荷在降温时是不一样的, 在降温时应该采用降温阶段的最大热负荷来计算。通风换气热负荷包含呼吸作用所需要的食品新鲜空气热负荷以及工作人员所需的空气热负荷。电动机运行热负荷包括制冷装置、搬运车辆、食品加工设备配套的电动机运行发热量。操作热负荷包括照明产生的热量散发、冷藏室门打开带来的空气热量及操作人员的发热量等。制冷系统的机械负荷在冷间的冷却设备负荷上再加上制冷设备本身的冷却损失量以及管道冷却损失量后, 再乘以工程系数以调整各热负荷峰值出现的时间不同所引起的误差。

3.2 制冷系统方案设计技术

制冷方案的选择是整个冷库存储设计方案的关键决定因素, 它关系到前期投入以及后期运行的能耗及系统保障程度。目前主要的制冷方案有氨制冷方案, 氟制冷方案以及二氧化碳复叠式制冷方案等。其中氨制冷方案优点是制冷系数高, 单位造价便宜, 适合大规模冷库及食品工厂, 缺点是有毒气体须有防漏电自动检测报警装置以及应急喷水设备; 氟制冷方案以 R404A、R507 为代表, 结构简单, 维修方便, 控温准确, 适用于中小规模冷库。但是由

于部分制冷剂温室效应系数太高, 受到国家政策限制^[2]。二氧化碳复叠系统绿色环保, GWP 值是 1, 它具有良好的低温制冷性能, 适用于-25℃以下低温库房, 但是初期投资比较高。选择制冷系统并不是一锤子买卖的事情, 要根据安装费、运行费用、公用事业费单价、建筑物以及系统的选型等因素来判断。对于有很严格的对压缩机运转时间要求的制冷系统, 机械设备负荷则应该用工程修正系数加以调整。复叠式换热器的设计选择非常重要, 使用板壳式换热器, 它的体积小、传热能力强、泄露概率少, 在 CO₂系统中最为常用。

表 1 不同制冷系统方案对比分析

对比维度	氨制冷系统	氟利昂系统	CO ₂ 复叠系统
适用温度	中高温、低温	中高温、低温	低温、超低温
初期投资	较高	较低	最高
运行能耗	低	中等	较低
制冷效率	高	中等	较高
环保性能	天然工质	较高 GWP	GWP=1, 环保
安全要求	有毒、易燃	无毒、不燃	无毒、不燃
适用规模	大中型	中小型	大中型

3.3 制冷设备选型与配置技术

制冷装置的选择对整个系统的性能及使用寿命有着举足轻重的作用, 压缩机的选择需考虑冷藏库容量、蒸发温度以及工作状态等多种因素, 螺杆式压缩机适合大型冷藏库, 活塞式和涡旋式压缩机适合小型或中型冷藏库; 冷凝器的选择要考虑到当地的气象情况还有水的情况, 蒸发式冷凝器省水省电, 但是投资成本高; 风冷冷凝器安装简单方便但是受外界气温变化的影响很大; 蒸发器的要求有换热面积大小、翅片距离、除霜方式等一些参数, 翅片太密集容易出现结冰堵塞现象, 翅片间隙太大换热效果差。制冷装置中的制冷压缩机配套使用的电动机所占的比例达到了总能耗的百分之六十以上, 所以选择节能性的电动机尤为重要。在设备的选择上要选性能好的节能型设备、恰当地确定设备大小, 防止出现大马拉小车、小马拉大车的现象, 在蒸发温度比较低的情况下, 适宜使用双级压缩或者复叠式制冷系统, 从而达到节电的效果。另外, 在设备安置的时候应该考虑到维修的空间以及操作方便的问题, 制冷机房应尽量靠近负荷中心, 减少管道冷损失等。

3.4 冷库保温结构设计技术

隔热构造设计对冷库围护结构传热量起着重要的影响作用。隔热材料的不同会影响到隔热的效果与寿命长短, 常用的隔热材料有聚氨酯硬质泡沫塑料 (PU)、挤塑聚苯乙烯 (XPS)、聚苯乙烯泡沫塑料 (EPS)。聚氨酯硬质泡沫塑料热阻大、隔热效果好用于低温冷库, 聚苯乙烯泡沫

塑料价格便宜、施工简便适用于高温冷库，隔热层厚度的设计需要经过技术上的比较来选择，适当加厚可以节约运行费用但是加大了初始投资。冷桥的处理也是隔热构造中的难点，库板之间的接口处以及管道穿过墙壁的地方、库门边框都会产生冷桥现象，要加强隔热措施。防水透气膜的施工也十分必要，它可以避免潮气渗透到墙体保温层造成保温效果变差^[3]。地基防冻胀措施对低温库来说更是不可或缺，在此可以应用空心楼板、通风供暖或者是电热等措施达到预防地基冻融的目的。而冷藏库则是要减少围护结构的散热损失即围护结构散热量与围护结构每平方米传热量呈正相关关系，从而采取选择导热系数低的隔热材料以及加厚的方式减少每平方米的传热量。

表 2 冷库常用保温材料性能对比

对比维度	聚氨酯 (PU)	挤塑聚苯乙烯 (XPS)	聚苯乙烯 (EPS)
导热系数 [W/(m K)]	0.018~0.024	0.028~0.033	0.035~0.041
保温性能	最优	中等	较差
抗压强度	高	较高	低
吸水率	低	极低	较高
防火性能	B1/B2 级	B1/B2 级	B2 级
价格	最高	中等	最低
适用场景	低温冷库	地坪保温	高温冷库

3.5 冷库气流组织与温控技术

气流组织设计方案对库内的温度分布以及速度分布的影响程度不同也就会影响食品存储的质量好坏。常用气流组织设计方式有：布风道送风自然回风、普通送风垂直孔板回风、无动力送风自然回风等方式，研究表明无动力送风自然回风方式的温度不均匀系数为 0.18，相比其他送风方式提高了 60%以上，布风道送风自然回风方式的速度场均匀性提高了 15%以上。对于高大空间的物流冷库推荐使用无动力式的送风自然回风或者是低压差送风自然回风的方式。纺织品风管系统可以保证冷气均匀地送到每一个角落，使得库内在任何地方都可以达到预定的温度。温控方法主要有三种：温度设定、温差控制、融霜方式。蒸发温度与库房的温差要尽可能地小，这样可以加大冷凝的效果并且也更加省电。融霜时应根据结霜量适时进行，不要过于频繁，当蒸发器表面霜层还比较薄，空气阻力较小的时候，可以不用融霜，减少损耗。

3.6 自动化控制与智能监控技术

自动控制是保证冷库精准温控以及节电运行的重要手段。目前大多数冷库采用的是 PLC 或者 DCS 控制系统

来对压缩机、冷凝器、蒸发器、冷风机进行自动控制。借助能源管理和智慧运营管理系统可以做到全天候 24h 监测，并由系统自动解析之后推送故障详情以及解决方案到操作终端上。智能化监测包含温度、压力、耗电量等一系列数值的监测和分析，在出现异样的时候会发出警报并且提供解决方案。威海综保区冷链产业园项目的智慧库房使用传感器采集了包括 200 多个参数在内的信息，借助 AI 算法得出最佳调度策略从而达到运维的远程化、智能化。智能化电能管理系统可以精确记录每个用户的用电情况，做到对能源消费管理科学化、公开化。自助控制系统的应用使得冷冻库工作性能优化的同时，也减少了人力投入以及人员失误概率。

3.7 节能与环保设计技术

节能降耗是制冷库设计理念之一。节能措施有：降低冷负荷、合理选择设备、合理的运行方式等等。对于隔热结构来说，可以通过优化隔热层的厚度以及材料来减少单位热流量。针对制冷装置，可以运用变频技术调整压缩机转速达到变负荷运行的效果，借助峰谷电价机制，在夜间电价最低的时候进行蓄冷，从而减少运转费用支出。在除霜时，使用热水融霜代替电加热融霜，可以省下 25%以上的电量。环保设计主要表现在所使用的制冷剂的选择上，应该先考虑那种 ODP 值为 0，GWP 小的新型环保物质^[4]。二氧化碳作为一种天然载冷剂，有着 GWP 小、无毒、不燃、价格便宜的优点，是取代传统的制冷剂很好的选择。南昌肉联集团冷链园区项目采用了“R507+中冷水”的环保制冷剂技术，完成了园区的“脱氨”工程，节约成本 15%，避免了氨制冷带来的安全隐患，分布式光伏发电系统和冷库相结合，例如威海综保区项目配套安装 4.02MW 光伏发电系统，每年可以发 560 万度电，整体节能 20%~30%。

4 制冷冷库设计优化策略

结合以上关键技术的研究，制冷冷库的设计优化可以从以下几个角度出发：第一，加强负荷计算的精确性，使用逐时或者工程系数调整法以防止出现由于经验估算法造成的误差；第二，改进制冷系统的方案选定，根据冷库大小、所需求的低温以及所在地区的气候条件来进行全寿命周期的技术经济对比；第三，适当地设定设备规格大小，既要考虑过大又不能太小的问题，并且要挑选高效率的节电设备；第四，做好保温构造设计，正确设定保温材料的厚度尺寸以及对冷桥部位进行有效的隔热措施并对防潮隔蒸气层进行设置；第五，优化空气流动模式，依据冷库的高度和货物摆放情况来选取合适的进排气方法。第六，

提高自动化控制系统,采用智能化监测系统,做到精确控温和节能降耗。第七,加大节能减排的设计力度,合理运用峰谷电费、自然冷却、清洁能源等方式,同时设计环节要实施限额设计及方案评选,使设计方案既达到使用功能的要求又做到技术先进、经济合理、性价比高。

5 制冷冷库工程实践应用分析

实验证明应用核心技术的效果。威海综保区冷链产业园智慧冷库项目利用先进的制冷技术和能源管理系统,冷库内部安装有织物风道以保证均匀送制冷气,在此基础上还建设了分布式光伏系统整体节能在 20%~30%之间,大大减少运营费用支出;南昌肉联集团冷链园区项目引进“R507+中冷水”的新型无污染环保制冷剂代替传统的容易发生事故的氨制冷剂,使园区实现了无氨化,降低能耗 15%,利用物联网传感器对温度湿度及机器运转情况进行监测,AI 算法自动得出最佳运行计划。华东地区一个 CO₂ 冷藏库工程项目设计了 R507/CO₂复叠制冷机组,使用板壳式换热器进行多温段设计,分别有高温段 0~5℃、低温段-23~-25℃、超低温段-55~-60℃,可以满足不同的储存要求;项目实例说明,良好的设计技术的应用能够明显提高冷藏库的工作性能,减少能耗,达到安全绿色的要求。

6 结语

冷库制冷系统的设计是一门比较复杂的工程问题,包括了负荷计算、制冷系统、设备选择、隔热结构、气流组织、自动化调控、节能降耗等一系列技术难题。文章较为系统地介绍了各主要的技术参数点,提出相应的改进方案,在实际项目中也得到了良好的效果验证。研究发现,制冷冷库系统的科学合理设计应兼顾技术水平和经济效益,重视其全寿命周期内综合效能。伴随着智能化、节能化的进步,冷链库的设计将会朝着更加节能、更加智能、更加环保的方向发展,助力我国冷链物流业高质量发展。

[参考文献]

- [1]李顺捷,连冠.冷库电气设计相关问题探讨[J].建筑电气,2025,44(3):16-19.
- [2]张柱,王棋卉,郭永慧,等.普通仓库改造为冷库的设计要点[J].冷藏技术,2021,44(4):31-35.
- [3]钱让龙,江发生,于强.港口冷库制冷安全与节能技术要点分析[J].中国高新科技,2021(2):159-160.
- [4]张伟秋.大型物流冷库的消防设计探讨[J].冷藏技术,2025,48(2):67-70.

作者简介:韩爽(1990—),男,汉族,黑龙江省肇东市人,高级工程师,硕士研究生,研究方向为制冷及低温工程。