

自动化立体库制冷系统防结露技术优化研究

王立国

青岛海尔生物医疗股份有限公司 山东 青岛 266000

摘要：自动化立体库制冷系统防结露技术优化研究旨在提升冷链物流存储效率与质量。本研究针对自动化立体库中制冷系统易结露问题，提出采用新型保温材料、智能温湿度控制系统及优化通风除湿系统的综合方案。通过实际应用案例验证，优化方案显著降低了结露发生率，提高了制冷系统效能，降低了能耗与货物损耗。研究结果显示，该优化方案不仅提升了立体库运行稳定性，还带来了显著的经济效益，为冷链物流行业的可持续发展提供了技术支持。

关键词：自动化立体库；制冷系统防结露技术；优化方案

引言：自动化立体库作为现代冷链物流的核心设施，其高效运行与货物品质保障至关重要。然而，制冷系统在运行中常面临结露问题，这不仅影响设备的稳定性和使用寿命，还可能导致货物受潮变质，造成重大经济损失。因此，对自动化立体库制冷系统防结露技术进行深入研究 with 优化，对于提升仓储效率、降低能耗及运营成本、保障货物品质具有迫切的现实意义。本文旨在探讨并提出有效的防结露技术优化方案，以为冷链物流行业提供技术参考与支持。

1 自动化立体库制冷系统概述

1.1 自动化立体库的基本构成与功能

(1) 关键设备包括货架系统、堆垛机、输送线和制冷系统。货架系统采用高强度钢材搭建多层立体架构，实现货物集约化存储，提升空间利用率达80%以上；堆垛机配备激光定位与伺服驱动系统，可在狭窄巷道内精准完成货物存取，运行速度达120米/分钟；输送线由滚筒、链条等设备组成，连接入库口、出库口及货架区域，形成闭环物流路径；制冷系统作为核心，通过恒温控制保障货物品质。(2) 在冷链物流中，应用场景广泛。生鲜行业用于果蔬、肉类的分级存储，如将香蕉、荔枝等热带水果存于12-15℃区域，冻肉存于-18℃以下区域；医药领域为疫苗、血液制品提供2-8℃的恒温环境，满足GSP认证要求；同时也适用于冰淇淋、速冻食品等冷冻品的规模化仓储，支持多温区协同管理。

1.2 制冷系统的组成与工作原理

(1) 主要部件有压缩机、冷凝器、蒸发器和膨胀阀。压缩机压缩制冷剂使其成为高温高压气体；冷凝器将气态制冷剂冷凝为液态；蒸发器通过制冷剂蒸发吸收热量，降低库内温度；膨胀阀控制制冷剂流量并节流降压。(2) 制冷循环流程为：压缩机压缩制冷剂为高温高压气体，经冷凝器放热冷凝成液态；液态制冷剂经膨胀

阀节流后进入蒸发器，吸收库内热量蒸发为气体，再返回压缩机循环。温度控制通过传感器实时监测，调节压缩机运行频率、风机转速等，维持设定温度稳定^[1]。

1.3 制冷系统结露问题的成因分析

(1) 空气温度降至露点温度以下时，空气中水汽会凝结成露。空气湿度越高，露点温度越接近空气温度，结露风险越大。(2) 冷库内外温差大时，外界湿热空气接触库内低温表面，温度骤降导致水汽凝结。门体频繁开启处，冷热空气交换剧烈，结露现象更为突出。(3) 制冷系统运行参数影响显著：蒸发器温度过低，与周围空气温差过大易结露；风机风量不足使局部温度低于露点；制冷剂充注量异常、节流装置调节不当，会改变换热效率引发结露。

2 自动化立体库制冷系统防结露技术现状

2.1 现有防结露技术措施概述

(1) 增加保温层厚度是基础防护手段，通过选用高密度聚氨酯、挤塑板等保温材料，增厚库体围护结构（墙体、屋顶、地面）及设备表面的保温层，减少外界热量传入，降低冷量流失，从而缩小内外温差，抑制结露。(2) 采用新风除湿机或除湿装置是主动控湿方式。新风除湿机通过引入外界空气并进行降温除湿处理，再送入库内，降低空气中的水汽含量；局部除湿装置则针对易结露区域（如货架连接处、堆垛机轨道）精准除湿，减少空气中的水分凝结条件。(3) 优化通风系统设计通过合理布局送风口、回风口，提升库内空气循环效率。采用变频风机调节风量，使冷空气均匀分布，避免局部区域温度过低；同时在门体附近设置风幕机，形成气帘阻隔外界湿热空气侵入，减少冷热空气直接交换。

2.2 现有技术的优缺点分析

(1) 增加保温层厚度能有效减少冷损，但存在明显限制：过厚的保温层会压缩库内有效存储空间，且材料

成本随厚度增加呈线性上升,对于大型立体库而言,整体造价提升显著;此外,保温层长期使用易出现老化、破损,需定期维护,否则会因局部失效导致结露。(2)除湿机可直接降低空气湿度,但能耗较高:为维持低湿度环境,除湿机需持续运行,尤其在高温高湿季节,耗电量占制冷系统总能耗的20%-30%;同时,除湿效率受环境温度影响大,低温环境下除湿效果会明显下降,难以满足精准控湿需求。(3)通风系统优化能改善空气循环,但设计复杂性高:需结合库体结构、货架布局进行CFD模拟分析,确保气流均匀性,前期设计成本较高;且通风设备(风机、风幕机)的日常维护量大,滤网堵塞、电机故障等问题会导致系统效率下降,增加后期运维成本。

3 自动化立体库制冷系统防结露技术优化方案

3.1 新型保温材料的应用

(1)新型高效保温材料中,气凝胶毡、真空绝热板(VIP)和纳米复合保温材料表现突出。气凝胶毡导热系数低至 $0.015\sim 0.020\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,仅为传统聚氨酯的1/4,且具有极佳的柔韧性,可随意裁剪贴合复杂设备表面,抗老化性能使其使用寿命达20年以上。真空绝热板由无机芯材与高阻隔膜组成,保温性能是普通保温材料的6-10倍,厚度仅3-10mm,能大幅节省空间。纳米复合保温材料则通过纳米颗粒填充孔隙,降低空气对流换热,同时具备防火、防潮特性,适应冷库高湿环境。(2)在制冷系统中,这些材料适用性广泛。气凝胶毡可包裹制冷管道、堆垛机金属部件,避免冷桥效应导致的局部结露;真空绝热板适合库体墙体、天花板铺设,在减少50%厚度的情况下,使冷损失降低40%,尤其适合空间紧张的立体库。纳米复合保温材料可用于货架立柱、输送线框架等承重结构,既满足强度要求,又能阻断热量传递,解决传统材料在低温下脆化、吸潮的问题,适配-40℃至常温的全温区制冷系统^[2]。

3.2 智能温湿度控制系统设计

(1)基于物联网技术的温湿度监测方案,采用分布式传感网络架构。在库内每50m²部署1个无线传感节点,节点集成温湿度、露点温度传感器,采样精度达 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2\%\text{RH}$,通过5G/NB-IoT网络实时上传数据至云平台。系统支持多区域分区监测,可生成温湿度热力图与露点预警曲线,当局部湿度接近露点1℃以内时,自动触发预警,响应延迟不超过10秒。(2)智能控制算法融合模糊控制与神经网络算法。算法通过学习历史运行数据,建立温湿度预测模型,能根据外界天气、货物吞吐量提前2小时调整运行策略。例如,预判到次日高温高湿天

气时,提前降低库内湿度至50%RH以下;检测到堆垛机频繁作业区域温度波动时,动态提升该区域制冷功率,较传统PID控制减少30%的温湿度超调量。(3)温湿度控制系统与制冷系统采用双向联动机制。控制系统根据监测数据向制冷系统发送实时指令,调节压缩机频率、膨胀阀开度及风机转速;制冷系统则反馈蒸发压力、冷凝温度等参数,供算法修正控制策略。当门体开启导致大量湿热空气涌入时,系统立即联动关闭对应区域蒸发器,启动风幕机与临时除湿装置,待温湿度恢复后再逐步重启制冷,避免冷热交替引发的结露。

3.3 通风与除湿系统的优化

(1)引入高效除湿技术并实现多系统整合。采用转轮除湿与溶液除湿复合系统,转轮除湿模块处理低湿段(湿度30%-60%RH),利用硅胶吸附材料实现深度除湿;溶液除湿模块针对高湿段(湿度>60%RH),通过溴化锂溶液吸收水汽,两者通过PLC控制系统自动切换,除湿效率提升至95%,能耗较单一系统降低25%。同时整合热泵回收技术,将除湿过程中释放的热量用于预热新风,减少制冷负荷。(2)通风量与通风方式采用动态自适应策略。基于CFD流场模拟,设计“上送下回+侧送侧回”复合通风模式,货架顶部布置旋流送风口,底部设置条形回风口,形成垂直循环气流。通风量根据实时温湿度自动调节,夏季高温时段每小时换气6-8次,冬季低温时段降至2-3次,门体开启时瞬时提升30%风量形成气幕,阻止外界湿热空气侵入^[3]。(3)通风系统与制冷系统协同工作通过时序控制与能量耦合实现。制冷系统启动前10分钟,通风系统先运行内循环,均衡库内温度;制冷运行时,通风风机转速随压缩机频率同步调节,确保冷量均匀扩散;制冷停机除霜时,通风系统切换为低风量模式,维持最小气流扰动,避免局部温度骤升。通过能量回收装置,将排风余热转移至新风,使新风预热至5-8℃,降低制冷系统负荷15%以上,实现节能与防结露的双重效益。

4 优化方案的实施与效果评估

4.1 优化方案的实施步骤

(1)确定改造范围与目标是实施的首要环节。需结合立体库的实际运行状况,通过前期调研明确易结露区域,如货架底层、堆垛机轨道连接处、门体周边等,将这些区域列为重点改造范围。同时,设定具体目标:使库内结露发生率降低80%以上,制冷系统能耗下降15%-20%,温湿度控制精度提升至 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 5\%\text{RH}$ 以内,确保改造方向清晰可衡量。(2)制定详细施工方案与时间表需细化到每日任务。施工方案包括新型保温材料的铺设

流程、智能控制系统的安装调试步骤、通风除湿设备的改造方案等,明确各环节的技术标准。时间表需预留缓冲期,例如:第1-3天完成旧保温层拆除,第4-7天进行新型材料铺设,第8-12天安装温湿度传感器与控制模块,第13-15天调试通风除湿系统联动,第16-20天进行整体试运行,确保施工有序推进。(3)组织施工队伍与物资准备要保障资源到位。施工队伍需包含制冷工程师、物联网技术人员、保温施工人员等专业人员,提前进行技术培训,熟悉新型材料安装规范与智能系统操作流程。物资准备需核对材料清单,如气凝胶毡、真空绝热板的数量与规格,温湿度传感器、智能控制器的型号参数,除湿设备的配件等,提前3天完成进场验收,避免因物资短缺影响施工进度^[4]。

4.2 效果评估方法

(1)建立结露监测指标体系需涵盖多维度参数。包括:结露发生频率(每日各区域结露次数)、结露面积占比(结露区域与总区域的百分比)、露点温度与实际温度差值(反映结露风险)、温湿度波动幅度等,通过量化指标客观评估防结露效果。(2)采用前后对比法进行效果评估需选取相同周期的数据。对比改造前3个月与改造后3个月的结露指标、能耗数据、设备故障率等,例如:改造前每月平均结露次数为50次,改造后降至8次;改造前日均能耗为800kWh,改造后降至650kWh,通过差值分析优化方案的实际效益。(3)收集用户反馈与意见需覆盖不同岗位人员。包括仓库管理员对操作便捷性的评价、维护人员对设备故障率的反馈、物流调度人员对货物存储质量的观察等,通过问卷调查、座谈会等形式汇总意见,针对性评估优化方案的实用性与改进空间。

4.3 实际应用案例分析

4.3.1 选取某大型生鲜电商自动化立体库作为试验对象

该库占地面积5000m²,存储容量10万托盘,主要存放果蔬与肉类,此前因结露问题导致每月货物损耗率达3%,制冷系统日均能耗900kWh,符合典型冷链立体库的

特征,具备代表性。

4.3.2 实施优化方案后记录相关数据

改造后3个月的监测显示:新型保温材料铺设区域的冷损失减少40%,智能控制系统使温湿度波动幅度控制在 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 4\%\text{RH}$,通风除湿系统联动运行后,结露发生频率从每日15次降至2次。同时,记录设备运行参数,如压缩机运行频率、除湿机启停次数、风机转速等,形成完整数据链。

4.3.3 分析优化方案对制冷系统性能与能耗的影响可见显著成效

系统性能方面:制冷效率提升25%,蒸发器结霜周期从7天延长至15天,设备维护成本降低40%;能耗方面:日均能耗降至680kWh,较改造前下降24.4%,按年运行300天计算,可节省电费约10.8万元。货物损耗率降至0.5%,间接减少经济损失约20万元/年,验证了优化方案的经济性与有效性。

结束语

综上所述,本文针对自动化立体库制冷系统防结露技术进行了全面优化分析。通过应用新型保温材料、智能温湿度控制策略及通风除湿系统整合,有效解决了传统制冷系统中的结露问题。这些优化方案不仅显著提升了制冷效率与能耗比,还确保了货物存储环境的稳定性。实践验证表明,本研究提出的优化措施切实可行,为自动化立体库的稳定运行与能效提升提供了有力支持,具有重要的行业应用价值与推广意义。

参考文献

- [1]王冰.暖通空调制冷系统中的环保节能技术[J].科技风,2020,(06):68-69.
- [2]伍伙华.自动化冷库制冷系统设计要点分析[J].建筑工程技术与设计,2020,(11):92-93.
- [3]施晓宇.暖通空调制冷系统中的环保节能技术[J].造纸装备及材料,2020,(03):53-54.
- [4]王晴晴.暖通空调制冷系统的优化与控制技术分析[J].科技创新与应用,2020,(16):157-158.