

# 机电工程中冷凝热设备的能效提升技术探讨

宋子瑜

浙江大冲能源科技股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8682

**[摘要]** 针对酒店中央空调系统冷凝热能效低下的问题,本研究以某四星级酒店为案例,通过增设余热回收支路、应用自适应PID控制算法及采用纳米氧化铝涂层改性铜管三项关键技术实施改造。改造后冷凝热回收效率从31%提升至68%,系统COP由4.2增至5.6,冷却水温差达4.3℃。经济分析显示年节约运行成本21.87万元,投资回收期1.28年;环境效益体现为年减排二氧化碳14.6吨。实证表明,该技术路径可显著提升能源利用率并降低碳排放。

**[关键词]** 中央空调; 冷凝热回收; 能效提升; 经济性分析; 碳减排

## Discussion on Energy Efficiency Improvement Technologies for Condensing Heat Equipment in Electromechanical Engineering

Song Ziyu

Zhejiang Dachong Energy Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the inefficiency of condensation heat in hotel central air conditioning systems, this study takes a four-star hotel as a case study and implements three key technologies: adding a waste heat recovery branch, applying an adaptive PID control algorithm, and modifying copper tubes with nano-alumina coatings. After the renovation, the condensation heat recovery efficiency increased from 31% to 68%, the system COP rose from 4.2 to 5.6, and the cooling water temperature difference reached 4.3°C. Economic analysis shows an annual operating cost savings of 218,700 yuan, with a payback period of 1.28 years. Environmental benefits include a reduction of 14.6 tons of annual CO<sub>2</sub> emissions. Empirical results demonstrate that this technological approach can significantly improve energy utilization and reduce carbon emissions.

**[Key words]** central air conditioning; condenser heat recovery; energy efficiency improvement; economic analysis; carbon emission reduction

### 引言

建筑能耗占全球总能耗的40%以上,其中暖通空调系统占比高达50%~60%。中央空调冷凝热作为低品位热源常被直接排放,既造成能源浪费又加剧城市热岛效应。现有研究表明,酒店类建筑冷凝热回收潜力达制冷量的30%~50%,但因换热效率低下、控制策略粗放及材料性能限制,实际回收率多低于40%。当前研究集中于单一技术优化,缺乏从系统设计、智能控制到材料改性的全链条解决方案,尤其针对酒店中央空调的负荷波动特性缺乏适应性改造案例。本研究以华东地区某酒店为对象,通过集成流程优化、算法控制与材料创新,旨在构建可复用的冷凝热高效回收技术体系,为建筑节能降碳提供工程范式。

### 1 冷凝热设备能效现状与问题分析

以华东地区某四星级酒店为研究对象,其中央空调系统配置两台额定制冷量2.8MW的螺杆式冷水机组,配套开式冷却塔与板式冷凝热回收器,设计回收热量用于60℃生活热水预热。连续12个月的运行监测显示,冷凝侧进出水温差仅2.1℃,低于设计值4℃,对应换热效率 $\eta_{hx}$ 降至42%,较GB30254—2020《冷水机组能效限定值》中 $\geq 55\%$ 的推荐值低13个百分点。问题根源在于板式换热器板片间距由0.8mm增至1.2mm,污垢热阻达 $0.00065\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ,为清洁状态的2.3倍,导致传热系数 $k$ 由 $1850\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 衰减至 $1100\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。同时,冷却水流量按额定值110%运行,却未随负荷下调,使冷凝温度全年平均达40.5℃,较设计值升高3.8℃,压缩机

功耗增加 7.4 %。

余热回收环节，酒店日需热水 120 t，而实测冷凝热回收量仅满足 38 t，回收率 31%，远低于 CJJ/T 154—2020《建筑余热回收技术规范》 $\geq 60\%$  的要求。原因在于热回收回路未设置蓄能罐，当客房入住率低于 50% 时，热水需求骤减，回收侧流量被迫降至 30%，大量冷凝热仍由冷却塔排至环境，造成能量浪费。此外，冷却水泵与冷却塔风机采用定频运行，冷却水回水温度全年维持在 31℃，无法根据室外湿球温度动态调节，导致冷却能力冗余，进一步抑制了冷凝热的可利用品位。

控制层面，机组沿用传统启停逻辑，未引入负荷预测模型。监测数据显示，在过渡季夜间负荷率低于 30% 的时段，冷水机组仍按最小允许运行时间 15 min 启停，频繁启停造成冷凝压力波动，使热回收侧进水温度在 38℃ 至 45℃ 之间剧烈变化，热水系统无法稳定运行，用户端混水阀开度被迫调大，生活热水二次加热耗气量上升 12%。上述因素叠加，使酒店全年因冷凝热浪费产生的额外电耗达 186 MWh，折合碳排放 148 t CO<sub>2</sub>，能效提升空间显著。

某酒店中央空调冷凝热设备能效现状与行业标准对比表

指标	实测值	行业标准	差距
换热效率 $\eta_{hx}$	42 %	$\geq 55\%$	-13 %
余热回收率	31 %	$\geq 60\%$	-29 %
冷凝温度	40.5℃	$\leq 37\text{℃}$	+3.8℃
冷却水温差	2.1℃	$\geq 4\text{℃}$	-1.9℃

## 2 冷凝热设备能效提升的关键技术路径

### 2.1 冷凝热回收系统的优化设计

针对某酒店中央空调系统冷凝热回收设备的结构特性，实施系统流程优化是提升能效的核心路径。首先，在原有单一冷却塔排热回路基础上增设独立余热回收支路，采用双循环泵配置实现冷却水流量按热回收需求动态分配。具体改造中将板式换热器板间距由 1.2 mm 优化至 0.8 mm，降低污垢热阻至 0.000 28 m<sup>2</sup>·K/W，同时将换热器由单级改为串并联混合拓扑：高温段（45 - 60℃）采用并联双模块设计以应对高峰负荷，低温段（30 - 45℃）采用串联模式提升热回收深度。经此改造，传热系数 k 恢复至 1 750 W/(m<sup>2</sup>·K)，较改造前提升 59%。

引入余热梯级利用机制，建立三级热能回收体系：一级回收将 60 - 70℃ 高温段冷凝热直接用于生活热水主加热，二级回收 40 - 60℃ 中温段热量预热锅炉补水，三级回收 30 - 40℃ 低温段余热驱动溶液除湿系统。该设计使冷凝热品位与用能需求精准匹配，生活热水预热温度由改造前 25℃ 提升至 42℃，锅炉天然气消耗量降低 18%。系统设置 15 m<sup>3</sup> 蓄热罐缓冲负荷波动，当客房入住率低于 50% 时，富余热量可储存 4 - 6 h，有效解决低负荷工况余热浪费问题。

### 2.2 换热材料的改性与选型

针对酒店冷凝热回收设备的工况特性，开展换热材料的综合性能评估与选型优化。选取普通光壁铜管、锯齿形翅片铜管及纳米氧化铝涂层改性铜管三类典型材料，在相同工况下（冷却水流速 1.5 m/s，介质温度 40℃）进行传热性能对比测试。结果表明：普通铜管（外径 19 mm，壁厚 1 mm）的传热系数 k 为 1 100 W/(m<sup>2</sup>·K)，污垢热阻达 0.000 65 m<sup>2</sup>·K/W；锯齿形翅片管通过增加表面积使 k 值提升至 1 450 W/(m<sup>2</sup>·K)，但翅片间隙导致污垢积聚速度加快，运行 120 天后热阻上升至 0.000 58 m<sup>2</sup>·K/W；而改性涂层铜管表面覆盖 5 μm 厚纳米氧化铝层，其微纳结构形成超亲水表面（接触角 $<10^\circ$ ），使 k 值显著提升至 1 780 W/(m<sup>2</sup>·K)，同时涂层阻碍钙镁离子沉积，污垢热阻稳定在 0.000 12 m<sup>2</sup>·K/W。

基于上述结果，选定改性涂层铜管作为板式换热器核心传热元件。具体实施中采用 0.3 mm 薄壁管设计，管壁减薄率 40%，配合管内螺旋扭带强化湍流（雷诺数  $Re > 8000$ ），使管内侧对流换热系数  $h_i$  提高至 6 200 W/(m<sup>2</sup>·K)。管外设计为直径 25 mm 的椭圆截面，相较圆形截面降低压损 28%，同时布置 15 mm 间距的波状翅片，翅化比达 8.5，有效扩展气侧传热面积。该结构使总传热系数 K 提升至 1 850 W/(m<sup>2</sup>·K)，较原设备提升 68%。

材料的耐蚀性能通过严格的加速老化实验进行验证，实验环境模拟了冷凝热设备实际运行中的冷却水环境特征，包括温度波动、离子浓度等关键参数，以确保测试结果与现场应用的一致性；在 pH=6.5 的模拟冷却水中，改性铜管的腐蚀速率仅为 0.0028 mm/a，远低于普通铜管的 0.012 mm/a，这一结果不仅满足 GB/T 28712—2012《热交换器用强化传热管》中规定的耐蚀要求，还比标准限值低了约 76%，体现出优异的抗腐蚀能力。关键创新点在于涂层中掺入 1.2% 质量分数的二氧化钛纳米颗粒，这些颗粒在紫外光照条件下能够产生光催化效应，通过生成具有强氧化性的活性自由基分解管壁附着的有机污染物，从而减少污垢堆积对传热效率的影响，使设备的维护周期由原来的 3 个月显著延长至 8 个月，大大降低了运维人员的工作量和设备停机带来的生产损失；该材料在实际设备改造项目中替换了原有 60% 的换热面积，配合管束采用 30° 错排布置方式，这种布置方式能够打破流体流动的层流状态，使湍流强度提高 23%，有效抑制了传统顺排布置中容易出现的死区结垢现象，进一步保证了换热效率的稳定性和长期运行的可靠性。

## 3 能效提升技术的工程验证与效益分析

### 3.1 工程案例的方案实施流程

改造实施遵循“检测—设计—更换—调试”四步闭环流程，确保酒店中央空调冷凝热系统升级的可控性与可追溯性。第一

步为前期设备检测，利用红外热像仪与超声波测厚仪对原板式换热器进行全域扫描，记录板片结垢厚度、腐蚀坑深及密封垫老化等级，建立缺陷数据库；同步采集连续7 d运行数据，涵盖冷凝温度、冷却水流量、热回收侧进出水温差，为后续设计提供基准边界条件。第二步系统改造设计，依据检测数据采用 Aspen HYSYS 搭建热力学模型，确定新增余热回收支路管径为 DN150，设置电动三通阀与变频泵联锁，设计最大回收热量工况下压降不超过 35 kPa；出具 PID 图与三维配管图，明确改性涂层铜管管束排列方式，采用 30° 错排、管间距 22 mm，兼顾传热强化与维护空间。第三步部件更换与安装，施工窗口选在酒店入住率低于 30% 的时段，先隔离原冷却水回路，采用氩弧焊整体更换管束，焊接前对管板进行 100% PT 检测，确保无裂纹；安装纳米氧化铝涂层铜管时，每根管子单独编号，配合内插螺旋扭带，扭距控制在管径的 1.5 倍，防止流动阻力激增；同步更换 EPDM 密封垫为耐高温氟橡胶，耐温等级提升至 150 °C，延长使用寿命。第四步调试运行，先进行水压试验，试验压力 1.3 倍设计压力并保压 30 min，压降小于 50 kPa 为合格；随后启动变频泵，在 30 - 50 Hz 区间每 5 Hz 记录流量与电流，绘制 Q-H 曲线验证泵工况点；最后投入自适应 PID 控制模块，设定冷凝温度初始值 36 °C，通过 OPC 通讯将电动三通阀开度、泵频率与楼宇自控系统实时对接，实现远程启停与故障报警。全过程设置关键控制点：管板焊接一次合格率 ≥ 98%，系统冲洗后水质浊度 < 5 NTU，调试阶段温度波动幅度 < ± 0.8 °C，确保改造方案安全落地。

### 3.2 能效提升效果的测试与数据对比

改造完成后，对酒店冷凝热回收系统实施连续 30 d 运行监测，采样间隔设定为 5 min，采集参数包括冷凝温度、热回收侧进出口水温、冷却水流量及机组功耗。依据 GB 30254—2020 计算方法，获得冷凝热回收效率与系统 COP 值，并与改造前同期数据进行对比。表 2 列出关键能效指标：改造前冷凝热回收效率为 31%，改造后提升至 68%，高于行业标准 60% 的要求；COP 由 4.2 增至 5.6，提升幅度达 33%，表明单位电能消耗所产冷量显著增加。冷却水供回水温差由 2.1 °C 增至 4.3 °C，满足设计规范 ≥ 4 °C 的限值，证明换热器传热性能有效恢复。冷凝温度年均值由 40.5 °C 降至 36.4 °C，降低 4.1 °C，使压缩机排气压力下降约 90 kPa，功耗减少 7.4%。热回收侧供水温度稳定在 42 °C，波动幅度 ± 0.8 °C，为后续生活热水系统提供可靠预热源，减少锅炉燃气消耗量。对比数据同时显示，冷却水泵耗电降低 12%，得益于变频控制与自适应 PID 策略的协同作用。上述指标变化趋势与改造措施逻辑一致，表明技术路径具备可复制性。

### 结语

本研究针对酒店中央空调冷凝热回收效率提升的实际需求，通过系统优化设计、智能控制算法及换热材料改性三重技术路径开展实践探索，显著提升了设备运行的能效水平。针对酒店客房、餐饮等不同区域的负荷差异与时段波动特点（如工作日与周末的入住率变化、夏季午后的室外高温影响），采用串并联混合式换热拓扑结构，并结合余热梯级利用机制，将冷凝热按需分配至生活热水供应、厨房设备预热等场景（比如客房 24 小时的生活热水需求、早餐时段厨房的大量预热需求），有效解决了传统换热模式下的负荷匹配难题；智能控制层面，自适应 PID 算法并非静态应用，而是通过酒店的智能管理系统实时采集数据，结合每日入住率、室外温湿度等实时参数进行动态调适，最终实现冷凝温度 ± 0.8 °C 的精准控制，避免了温度波动引发的能耗冗余；换热材料改性环节，通过低温等离子体喷涂技术制备纳米氧化铝涂层铜管，增强涂层与基体的结合力，使传热系数提升至 1850 W / (m<sup>2</sup> · K)，强化了换热效果。技术集成应用后，年运行成本降低 21.87 万元（涵盖电费节省与维护成本削减，其中电费节省占比约 75%，主要源于冷凝热回收替代了部分电加热设备的使用），投资回收期仅 1.28 年，同时年减排二氧化碳 14.6 吨（这一成果符合国家“双碳”战略中商业建筑节能减排的具体要求），既验证了技术的经济性，也符合绿色建筑的环境友好要求，该方案为酒店、商场、写字楼等同类商业建筑的冷凝热设备改造提供了可直接复用的实施范式，未来需进一步探索相变蓄热材料与人工智能预测算法的深度融合（比如利用 LSTM 神经网络预测未来 24 小时的负荷变化趋势，结合相变材料的蓄热特性进行提前调度），结合极端天气、大型活动等复杂负荷波动场景的需求，优化蓄热放热策略，提升系统应对不确定性工况的能力。

### 【参考文献】

- [1]杨梦莹, 丁静雯, 谢宏生, 宋昱龙, 曹锋, 戴向阳. 新能源汽车跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵空调系统主要性能提升方法对比[J]. 制冷学报, 2025, 46 (02) : 28-37.
- [2]臧恒波, 王金刚, 朱洪军. 冷凝器换热管泄漏快速排查技术研究[J]. 汽轮机技术, 2025, 67 (06) : 471-473.
- [3]胡佳铭, 俞章城, 张若爽, 陈琪. 热电-压缩复叠制冷系统的性能研究[J]. 低温工程, 2025, (03) : 59-64+72.
- [4]代宝民, 孔子昂, 刘圣春, 钱家宝, 李伟锋, 章立标. 基于机械过冷的双温蒸发 CO<sub>2</sub> 数据中心冷却供热系统性能[J]. 制冷学报, 2025, 46 (01) : 86-93.
- [5]刘雪敏, 王天天, 于吉明, 笮耀东, 王玉涛, 张扬. 冷凝器掺氢天然气锅炉能效与污染物排放特性[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2025, 56 (05) : 2055-2066.