

酒店大堂空调夏季结露现象的成因与设计缺陷追溯

吴海涛

中南建筑设计院股份有限公司 湖北武汉 430061

摘要: 空调系统结露现象在夏季高温高湿地区的酒店大堂中较为常见,其防治工作因环境条件复杂而颇具挑战,严重影响建筑的使用功能与室内环境品质。本文以某酒店大堂中央空调系统为研究对象,从空气湿度、表面温度差、保温措施及气流组织等维度展开结露成因分析,结合现场实测数据与系统设计图纸,追溯管道保温厚度不足、风口布置不合理、冷凝水排水不畅等设计缺陷,探究结露现象与设计环节的关联性,为同类工程的结露防治提供理论依据与改进方向。

关键词: 酒店大堂空调; 夏季结露现象; 成因与缺陷分析

引言

酒店大堂作为宾客活动的核心公共区域,其空调系统的稳定性与舒适性直接影响建筑整体体验。夏季高温高湿环境下,大堂空调设备表面易因空气露点温度高于物体表面温度而产生结露,导致吊顶滴水、墙面发霉、设备锈蚀等问题。从工程实践来看,结露现象的频发与设计阶段的气候参数匹配度、设备选型、管道保温设计及气流组织方案密切相关。现有研究多聚焦于结露机理分析,对设计缺陷的系统性追溯仍需深化。为此,应结合具体案例,从设计源头剖析结露成因,梳理保温材料选择、风口送风参数、排水系统设计等环节的不足,为优化空调系统设计、提升大堂环境品质提供实践参考。

一、依托工程

某酒店总建筑面积约758000m²,主体功能涵盖客房、大堂、餐饮及会议空间,其中大堂区域层高9米,空间开阔且人员流动频繁。空调系统设计总冷负荷11100kW,冷源由5台制冷量为2350kW的离心式冷水机组提供,冷冻水供回水温度设定为6~13℃,采用一次泵变流量系统,冷冻水管径根据负荷计算选型,主干管采用橡塑保温材料,设计保温厚度为30mm。本工程地处亚热带与暖温带过渡区,气候具有显著的季风性与过渡性特征,夏季平均气温达28~32℃,相对湿度常年维持在65%~85%,高温高湿环境持续时间较长,对空调系统的防潮与防结露设计提出较高要求。项目部在创优阶段检查发现,空调系统结露问题集中出现在大堂区域,主要表现为空调出风口边缘持续凝水、冷冻水管绝热层

外表面大面积结露,部分管道下方吊顶出现水渍渗漏。经现场实测,大堂中部空气露点温度约为18~20℃,而空调出风口表面温度低至12~14℃,管道绝热层外表面温度约16~18℃,均低于环境空气露点温度,导致湿热空气与低温表面接触时迅速冷凝^[1]。

二、结露分析及防治措施

空气湿度大是结露的基本条件,而末端设备表面温度低于环境空气露点温度是直接诱因,其中出风口结露主要源于送风参数不合理、风口材料导热性能差或保温措施不足。结合工程实测数据,大堂夏季空气露点温度约18~20℃,而原设计出风口表面温度低至12~14℃,温差达6~8℃,远超临界结露温差,导致湿热空气在风口边缘迅速冷凝。以下从材料选型、参数调整、保温优化、气流组织等方面制定针对性防治策略,所有措施均以主动控制为核心,聚焦末端出风口结露问题的系统性解决^[2]。

1. 末端出风口结露

夏季空调送风温度低于房间露点温度时,风口外沿因温度梯度大成为冷凝高发区,防治需从降低表面热损失、平衡送风参数、增强隔热性能三方面入手。具体实施策略如下:

(1) 采用低导热系数材料优化风口材质

选择导热系数小于0.15W/(m·K)的防结露风口材料(如天然木质、ABS工程塑料或酚醛树脂复合材料),替代原设计中导热系数达16W/(m·K)的铝合金风口。以木质风口为例,其密度控制在450~550kg/m³,含水率低于12%,表面做防潮封闭处理,使风口本体热阻值

提升至 $0.8 \sim 1.2 (\text{m} \cdot \text{K}) / \text{W}$ ，显著延缓热量传递速度，确保风口表面温度高于露点温度 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 。安装时采用嵌入式安装方式，风口边缘与吊顶之间预留 5mm 缓冲间隙，填充闭孔橡塑保温条，阻断冷桥传导路径。

(2) 调整送风参数提升出风口表面温度

通过空调自控系统重新设定送风温度，将原设计 $12 \sim 14^\circ\text{C}$ 送风温度提高至露点温度以上 $2 \sim 3^\circ\text{C}$ （即 $19 \sim 21^\circ\text{C}$ ），同时将送风速度从原设计 $1.5 \sim 2.0\text{m/s}$ 提升至 $2.5 \sim 3.5\text{m/s}$ ，增强送风射流动能，减少送风在风口附近的滞留时间。结合大堂 9m 层高，采用旋流风口替代原单层百叶风口，送风角度调整为 45° 上倾，使冷气流沿顶棚扩散形成贴附射流，避免直接向下冲击人员活动区。实测数据显示，调整后风口表面温度可提升至 $19 \sim 20^\circ\text{C}$ ，与露点温度基本持平，冷凝现象可有效消除。

(3) 增加风口边缘保温层强化隔热效果

在风口边框内侧粘贴 $20 \sim 30\text{mm}$ 厚B1级闭孔橡塑保温材料（导热系数 $\leq 0.034\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，吸水率 $\leq 1\%$ ），保温层覆盖范围延伸至风管内壁 100mm ，采用铝箔胶带满粘密封，确保接缝处无漏热。对于异形风口或转角部位，提前预制弧形保温件，避免拼接缝隙形成冷桥。保温施工后，对风口表面进行温度扫描，要求任意测点温度均不低于露点温度 1°C ，且各点温差不超过 2°C ，确保保温层均匀性。

(4) 优化气流组织减少局部涡流现象

针对大堂开阔空间，重新规划风口布置间距，将原 $8 \sim 10\text{m}$ 间距调整为 $6 \sim 8\text{m}$ ，避免送风盲区导致的局部湿度聚集。在柱廊及挑空区域增设导流叶片，引导气流均匀分布，降低风口后方静压箱内的湍流强度。同时，将新风入口设置在大堂侧上部，新风量从原 $20\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{h})$ 提升至 $30\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{h})$ ，通过引入干燥新风将室内相对湿度控制在 60% 以下，从源头降低空气露点温度（目标露点温度 $\leq 17^\circ\text{C}$ ）。配合空调机组的焓值控制模式，实时监测送风露点，动态调整表冷器冷冻水流量，确保送风温度始终高于室内露点温度 3°C 以上。

2. 管道绝热层外表面结露

管道绝热层外表面结露的核心诱因是绝热材料的导热系数、厚度及施工质量不满足防结露要求，导致管道表面温度低于环境空气露点温度。结合工程实测，大堂夏季空气露点温度约 $18 \sim 20^\circ\text{C}$ ，原设计采用 30mm 厚难燃B1级发泡橡塑保温材料（导热系数 $0.038\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ），经热工计算，其表面温度仅 $16 \sim 18^\circ\text{C}$ ，低于露点温度，

需从材料性能提升、厚度优化、施工工艺管控及检测验收四方面制定防治策略，确保绝热层持续有效阻隔冷量传递^[1]。

施工前对管道表面进行清洁除锈，涂刷防潮底漆，确保保温层与管道紧密贴合。采用错缝搭接方式敷设保温材料，纵缝与环缝均预留 10mm 搭接量，使用专用胶水满粘密封，接缝处粘贴 50mm 宽铝箔胶带压实，禁止出现空鼓或缝隙。对于阀门、弯头、法兰等异形部位，采用预制保温套覆盖，保温层厚度增加 10% （即 40mm ），避免局部热桥。立管保温层每隔 1.5m 设置防下滑托架，托架与管道间垫 3mm 厚橡胶隔冷块，阻断金属托架与管道的直接热传导。

在保温层外侧增设 0.3mm 厚聚乙烯隔汽膜，采用螺旋式缠绕方式覆盖，搭接宽度不小于 50mm ，并用丁基胶带密封接口，阻止水蒸气渗入绝热层内部。外防护层选用 0.5mm 厚铝皮或彩钢板，采用自攻螺钉固定，螺钉间距不大于 200mm ，接缝处打密封胶防水。对于穿越墙体或楼板的管道，在洞口周边 200mm 范围内增加 10mm 厚保温层，形成环状保温加强区，防止冷热桥效应。

3. 管道支架部位结露

管道支架部位结露的主因是金属支架直接接触低温管道，形成导热通道（即“冷桥”），导致支架表面温度低于空气露点温度。本工程大堂管道支架采用 $\angle 50 \times 5$ 角钢制作，其导热系数达 $50\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，远高于保温材料，实测支架表面温度仅 $15 \sim 17^\circ\text{C}$ ，低于夏季露点温度 $18 \sim 20^\circ\text{C}$ ，成为冷凝水聚集滴落的源头。

选用导热系数 $\leq 0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的复合材料支架（如玻璃纤维增强尼龙或酚醛树脂支架），其密度控制在 $1200 \sim 1500\text{kg}/\text{m}^3$ ，抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$ ，支架截面尺寸与原角钢支架一致（ $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ ），确保承重能力不变。对于DN100以上管道，支架宽度增加 10mm （即 60mm ），增大与保温层接触面积，分散热传导。安装时，支架与管道保温层之间预留 2mm 间隙，填充闭孔橡塑保温胶泥，阻断支架与管道的直接热接触。

在管道与支架接触的上下方各 100mm 范围内，将原 35mm 厚橡塑保温层加厚至 50mm ，采用双层错缝粘贴，内层保温层延伸至支架外侧 50mm ，外层覆盖整个支架表面。保温层与支架结合处涂刷 3mm 厚弹性防水密封胶，形成连续隔热层。对于立管支架，在支架上方 200mm 处设置倒梯形滴水盘（采用 0.8mm 厚不锈钢板，边长比支架大 100mm ），引导冷凝水沿滴水盘边缘滴落至专用引流

管,避免直接滴落至吊顶。

4.冷媒管道穿楼板固定支架鳍形钢板结露

冷媒管道穿楼板处的鳍形钢板(通常为5mm厚Q235钢板)因直接接触低温管道,且未做有效保温,成为冷热桥集中区域。本工程鳍形钢板表面温度实测仅16~18℃,低于大堂夏季露点温度18~20℃,导致钢板周边混凝土楼板冷凝返潮,楼板底面出现水渍及霉菌。

为此,可取消原5mm厚钢制鳍形钢板,改用导热系数 $\leq 0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的硬质聚氨酯绝热垫板(密度 $\geq 300\text{kg}/\text{m}^3$,抗压强度 $\geq 10\text{MPa}$),垫板尺寸与原钢板一致(边长300mm \times 300mm,厚度20mm),并在垫板中心开设比管道外径大20mm的圆孔,确保管道与垫板无直接接触。垫板与楼板混凝土之间涂刷界面剂,增强粘接力,避免因振动导致垫板移位。

在管道穿越楼板上下各500mm范围内,将冷媒管保温层从35mm加厚至50mm,采用B1级闭孔橡塑保温材料,保温层与垫板圆孔边缘预留10mm间隙,填充弹性保温密封胶。楼板上表面管道周围设置高度150mm的柔性防水隔汽层(采用0.5mm厚聚乙烯膜),沿管道周向缠绕3层,并用不锈钢扎带固定,防止水蒸气渗入保温层。对于多根管道并列穿楼板场景,管道间距小于100mm时,在管道之间填充30mm厚岩棉毡,阻断管道间的热辐射传导。

安装绝热垫板前,对楼板预留洞口进行清理,涂刷两道聚氨酯防水涂料,厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ 。管道与垫板圆孔之间采用可压缩性橡塑保温套(厚度20mm,长度300mm)紧密包裹,两端用耐低温密封胶(固化后导热系数 $\leq 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)密封,形成柔性绝热层。楼板底面管道周围用石膏基防火密封胶填充,表面做防裂处理,确保密封层兼具绝热性与防火性(耐火极限 ≥ 2 小时)。

施工完成后,采用红外热成像仪检测鳍形钢板区域(即绝热垫板周边)表面温度,要求任意测点温度 $\geq 19^\circ\text{C}$,且与相邻管道保温层表面温差 $\leq 1^\circ\text{C}$ 。使用气密性检测仪对穿楼板节点进行压力测试(压力50Pa,持续10分钟),压降不超过5Pa为合格。定期核查绝热垫板的抗压变形量,要求使用1年后压缩率 $\leq 5\%$,确保长期绝热性能稳定。对于高层酒店,每层穿楼板节点不少于3处进行现场露点测试,验证极端湿度条件下的防结露效果。

结束语

综上所述,酒店大堂空调夏季结露是高温高湿环境、设备表面低温及设计缺陷共同作用的结果,核心在于空气露点温度与物体表面温度的差值控制。本研究通过工程实例揭示,结露防治需从末端风口材质优化、管道绝热层厚度提升、支架节点冷桥阻断等多维度切入,聚焦材料导热性能、送风参数匹配、施工工艺细节三大关键环节。实践表明,精准核算露点温度与表面温度差、严格执行保温材料性能指标、强化节点构造的绝热处理,是消除结露隐患的核心策略。在工程设计与施工中,应建立从气候参数分析到细部节点设计的全流程控制体系,重视材料选型与现场检测的联动,避免因局部热桥或保温失效导致结露问题。

参考文献

- [1]高亚欣.微孔顶板辐射空调系统供冷供暖性能的模式研究[D].哈尔滨工程大学,2023.
- [2]朱赤.诱导送风与辐射复合空调系统运行性能及策略研究[D].东南大学,2021.
- [3]佟思辰.基于冷梁的室内环境热舒适性与空调系统性能优化[D].北方工业大学,2019.