

大型公共建筑中庭防排烟设计方案对比研究

于 杭

中国中元国际工程有限公司 北京 100000

【摘 要】大型公共建筑中庭空间通透、竖向贯通，火灾烟气扩散速度快，防排烟设计直接影响建筑消防安全与人员疏散效率。本文依据 GB 51251-2017 规范，采用数值模拟与工程量化测算方式，对四种主流中庭防排烟设计方案开展多维度对比分析。量化各方案在控烟效果、经济成本、运行能耗及施工适配性的差异，结合不同建筑工况提出方案优选与系统优化策略，为同类工程设计提供参考。

【关键词】大型公共建筑；中庭；防排烟设计

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.076

引言

大型公共建筑中庭跨层贯通的结构特性，大幅削弱楼层烟气分隔能力，火灾烟气极易沿竖向快速蔓延并阻塞疏散通道，是建筑消防设计的重点难点。当前国内中庭防排烟方案选型多依托设计经验，各类排烟体系的适用场景与综合性能缺少系统化论证。本文通过试验模拟与工程测算，对比不同防排烟方案的应用优劣，为中庭防排烟设计的科学化选型与精细化优化提供支撑。

1 大型公共建筑中庭烟气流动特性与设计核心要求

大型公共建筑中庭竖向空间贯通，火灾高温烟气在浮力作用下向上汇集，于中庭顶部形成稳定烟气层^[1]。依据防排烟规范配套试验数据，中庭烟气层自然下沉平均速率可达 0.12 m/s。跨层结构会促使烟气快速向周边回廊扩散，破坏常规楼层的防火分隔效果，增加人员疏散与火灾扑救难度。中庭防排烟设计以管控烟气层高度、保障室内可视环境为核心，计算流程严格遵循 GB 51251-2017 规范，排烟量计算模型根据中庭净空高度确定。烟气层高度、环境温度、能见度、CO 浓度是评判防排烟效果的核心指标，指标临界值为方案有效性判定提供核心依据。中庭造型、外立面开口、室外风压波动等因素均会改变烟气蔓延路径，设计阶段需综合考量各类干扰条件，保证防排烟体系与建筑工况适配。

2 大型公共建筑中庭主流防排烟设计方案概述

2.1 自然排烟设计方案构造形式与适用场景

自然排烟依托火场热压与室外风压的气压差，通过中庭顶部及侧面开窗排出烟气，系统由电动排烟窗、控制模块与气象监测装置组成，排烟窗有效开启面积符合规范计算标准。该体系无需风机与配套风管，设备体量小、运维压力低，适合净空 12 m 以内、室外风速稳定、周边无高层遮挡的中庭空间。试验数据表明，满足规范开口面积要求的自然排烟系统，可将烟气层下沉速率控制在 0.07 m/s 以内。强风与低温环境会弱化热压排烟效果，风压复杂的城市核心区大型中庭，一般不单独采用该体系作为主力排烟方式。

2.2 机械排烟设计方案系统组成与工作原理

机械排烟系统由排烟风机、通风风管、板式排烟口及联动控制柜组成，火情触发报警后，排烟口与风机同步启动，强制抽取中庭顶部高温烟气，稳定室内烟气层结构。系统排烟量应依据 GB 51251-2017 规范按中庭周围场所排烟条件分类计算：当中庭周围场所设有排烟系统时，中庭机械排烟量应按周围场所防烟分区中最大排烟量的 2 倍计算，且不应小于 107000 m³/h；当中庭周围场所不需设置排烟系统、仅在回廊设置排烟系统时，中庭机械排烟量不应小于 40000 m³/h。机械排烟不受气象条件影响，控烟稳定性优于自然排烟，适配大体量、高净空中庭。系统需占用吊顶及夹层空间布置管线，风机持续运行产生能耗，设备定期联动测试也会增加建筑后期运维成本。

2.3 自然排烟+机械补风复合式防排烟设计方案

自然排烟搭配机械补风的复合体系，以自然排烟为主要排烟气道，通过机械补风设备向中庭下部补入新风，平衡排烟产生的负压，避免周边空气倒灌破坏烟气层形态。补风风量不低于排烟量的 50%，参数取值符合规范条文要求。复合体系保留自然排烟低能耗优势，可有效改善大风天气烟气倒灌问题。消防科研试验证明，补风设备运行后，中庭底部负压可稳定控制在 -8 Pa 以内。该体系运行效果依赖建筑外立面开口条件，墙体遮挡密集的中庭，气流调节性能会受到明显限制。

2.4 机械排烟+加压送风联动防排烟设计方案

机械排烟与加压送风联动体系适配中庭与回廊互通的空间特点，通过机械排烟抽排顶部烟气，搭配加压送风在回廊、前室形成正压屏障，阻挡烟气侵入疏散区域。整套系统由火灾报警控制器联动管控，探测器报警后设备同步启动，防护区域压差维持在 25 Pa~30 Pa。该体系控烟、隔烟能力优异，可应对多点起火复杂工况，多用于多业态贯通的商业综合体。系统管线设备密集、联动逻辑复杂，初期建设成本高，设备时序调试难度大，故障隐患点位多于其他方案。

3 不同中庭防排烟设计方案多维度对比分析

3.1 排烟效率与烟气控制效果对比分析

排烟效率与烟气控制效果的对比测试结合 FDS 火灾动力学模拟与 1:10 缩尺模型试验开展, 统一搭建 18 m 净空高度中庭仿真模型, 2.5 MW 地面火源热释放速率参照大型商业中庭火灾试验标准取值^[2]。试验全程监测起火后 0 s 至 600 s 时段内, 中庭烟气层界面高度、1.8 m 人员活动高度能见度、CO 体积分数三项核心指标, 量化四类方案的实际烟气控制效能。室外风速小于 2 m/s 的平稳工况下, 自然排烟体系起火 600 s 时烟气层界面高度可达 8.7 m, 人员活动区域能见度超出 10 m, 现场烟气控制状态良好。室外风速提升至 4 m/s 时, 室外风压抵消烟气热压动力, 排烟效率大幅衰减, 烟气层界面高度降至 4.1 m, 能见度仅为 3.2 m, 无法满足人员疏散安全标准。

机械排烟体系不受室外气象条件约束, 相同火灾工况下, 起火 600 s 烟气层界面可稳定维持在 9.2 m, 1.8 m 高度 CO 体积分数控制在 0.005% 以下, 运行稳定性优势显著, 仅采用机械排烟会在中庭下部形成负压环境, 周边回廊烟气易倒灌至中庭堆积。补风风量设定为排烟量 60% 的自然排烟+机械补风复合体系, 可将中庭底部负压控制在 -7 Pa 以内, 彻底解决烟气倒灌问题, 起火 600 s 烟气层界面高度可达 9.0 m, 室外风速小于 3 m/s 的工况中, 综合控烟性能接近纯机械排烟体系。

机械排烟联合加压送风的联动体系, 可将疏散回廊静压稳定维持在 28 Pa, 依托正压屏障阻隔烟气蔓延, 多点火源的复杂工况下, 回廊 1.8 m 高度能见度始终维持 10 m 以上, 完全杜绝烟气侵入疏散通道, 复杂建筑场景中烟气控制性能最优。研究采用加权评分法完成量化评价, 烟气层高度、能见度、CO 浓度权重分别设定为 0.4、0.3、0.3, 规避定性分析带来的主观偏差, 保障对比结果客观准确。

3.2 设备造价、施工成本与运维费用对比

本次成本核算采用工程量清单计价模式, 选取建筑面积 8500 m² 的大型公共中庭作为统一测算模型, 从设备采购、现场施工、年度运维三个维度, 统计四类防排烟方案的全生命周期经济成本, 测算标准参照 2023 版建筑消防安装工程预算定额。自然排烟体系构造简洁, 核心设备包含电动排烟窗、联动控制模块与开窗执行机构, 设备采购整体费用约 21.6 万元。施工流程简单, 仅需完成窗框固定、线路敷设、单点系统调试等基础工序, 施工总投入约 9.8 万元。体系无动力运行设备, 后期运维压力极小, 年度运维工作仅包含机构润滑养护与线路故障检测, 年度运维费用约 0.7 万元。纯机械排烟体系需配套排烟风机、防火风管、板式排烟口及全套固定支吊架结构, 设备采购费用约 47.2 万元。

施工环节需要结合中庭顶部钢结构预留吊装点位, 完成整体风管布设与设备固定作业, 施工难度更高, 总施工费用约

26.5 万元。风机、排烟口等动力设备存在常规损耗, 年度需要开展设备空载测试、启闭性能试验、老旧配件更换等工作, 年度运维费用约 2.3 万元。自然排烟结合机械补风的复合体系, 在自然排烟设备基础上增设补风机组与专用补风管道, 设备采购费用约 33.5 万元。施工过程需要精准把控排烟窗与补风口的相对位置, 规避气流对冲扰动烟气层结构的问题, 施工总费用约 17.4 万元, 年度运维工作需同步核查两套设备的运行状态, 运维费用约 1.4 万元。机械排烟搭配加压送风的联动体系, 配置两套独立的排烟、送风设备及一体化联动控制系统, 设备采购费用约 64.8 万元。

施工阶段需要分区分布两套管线体系, 规避管线交叉冲突问题, 完成多区域风压精准调试, 施工总费用约 37.1 万元。体系联动点位繁多、控制逻辑复杂, 年度全系统联动调试工作量大, 运维费用约 3.6 万元。研究以建筑 20 年使用周期为核算基准, 汇总各类方案全生命周期投入成本, 直观呈现初始造价与长期运维的经济性差异, 为工程方案选型提供经济层面的数据支撑^[3]。

3.3 系统能耗、稳定性与安全可靠性对比

能耗与可靠性对比采用连续工况模拟结合故障树分析法, 区分设备待机常态与火灾短时运行状态, 量化不同体系能耗水平与故障发生概率, 可靠性统计数据参考 2024 版国内消防设施年度检测报告。自然排烟体系待机状态仅产生控制回路微弱电能消耗, 待机功率不超过 0.3 kW, 火灾工况依托自然热压完成排烟作业, 无额外动力能耗, 节能特性突出。体系故障问题集中于排烟窗机械卡滞、室外气象条件干扰两类情况, 年度失效概率为 0.021, 断电工况下可手动开启排烟窗, 维持基础排烟功能。机械排烟体系控制柜长期通电待机, 待机功率约 1.1 kW, 火灾工况风机满负荷运行功率可达 42 kW, 整体能耗水平偏高。

体系常见故障包含电机损毁、风管漏烟等, 年度失效概率为 0.034, 断电后动力排烟功能彻底失效。自然排烟+机械补风复合体系待机功率约 0.6 kW, 火灾工况补风机运行功率 18 kW, 能耗指标介于前两类体系之间。设备运行同时存在排烟窗机械故障与补风设备电气故障风险, 年度失效概率为 0.028, 运行稳定性容易受室外风速变化与室内气流组织状态影响^[4]。

机械排烟+加压送风联动体系设备配置规模最大, 待机功率约 1.7 kW, 火灾工况两套设备同步运行, 总运行功率可达 76 kW, 四类方案中能耗水平最高。体系联动节点密集、控制逻辑繁琐, 故障诱发因素多样, 年度失效概率为 0.042, 设备或电路故障会直接导致排烟、烟气阻隔功能失效。本次测试单独设置单设备故障、信号传输故障两类试验场景, 核验各体系故障状态下的应急适配能力, 区分常态待机能耗与火灾瞬时运行能耗, 摒弃传统平均能耗简化计算模式, 对比结果更贴合工程实际运行状态。

3.4 施工难度、适配性与后期改造空间对比

本节依托工程工序拆解法开展分析,通过梳理施工流程、统计交叉作业规模、核算改造工程量占比评判方案适配性,数据来源为2024版公共建筑机电改造工程案例库。自然排烟施工工序简洁,仅需完成排烟窗安装、线路布设与系统调试,和幕墙、钢结构施工交叉干扰少,适配各类新建中庭项目。后期改造仅替换局部设备与模块,无需大面积拆除装修及管线,改造工程量占比12%,施工难度极低。

机械排烟涉及风管吊装、设备固定、管线对接等多项工序,要求中庭顶部预留0.8m设备夹层,仅适配大空间中庭建筑,后期风管更换改造工程量占比35%,改造成本与难度相对更高。复合式防排烟体系需同步施工排烟与补风结构,精准调控气流方向,适配外立面可开窗的中庭场景,可针对性优化设备参数,整体改造占比21%。机械排烟加压送风联动体系管线密集、多专业协同施工要求高,仅适配业态稳定的大型综合体。建筑业态调整会倒逼分区与管线整体改造,工程量占比48%,为四类方案改造难度与成本之最。

4 不同场景下中庭防排烟设计方案优选与优化策略

结合前文多维度对比结果,中庭净空高度小于12m、周边无高层遮挡的新建建筑,优先选用自然排烟方案,可有效压缩

项目初始投资。中庭净空高度超过12m、室外风速波动大于3m/s的商业综合体,推荐采用机械排烟加加压送风联动方案,以此保障疏散通道烟气隔离效果。针对外立面具备开启条件但空间负压问题突出的中庭,自然排烟加机械补风复合方案更适配使用需求,选型判定指标参考GB 51251-2017相关计算要求。针对排烟效率短板开展参数优化时,可将补风风量控制为排烟量的55%至60%,该参数区间来自消防科学研究院烟气试验数据,能够降低补风气流对顶部烟气层的扰动。工程经济性优化可在满足防火规范前提下,合理精简风机冗余配置,选用低阻力风管降低系统长期能耗。多工况联动优化需要细化火灾报警时序逻辑,确保排烟设备与加压送风装置启动时差控制在3s以内,同步增加现场定期巡检点位,减少系统联动失效风险,提升复杂火灾场景下防排烟系统运行可靠性^[5]。

5 结语

本文通过模型试验、工程量测算与故障分析,完成四类中庭防排烟设计方案的全方位对比,明确自然排烟经济性优但受气象限制,机械联动方案控烟可靠性强但造价与能耗偏高。结合不同建筑净空、风压环境与业态条件,提出针对性方案优选与参数优化策略。研究有效弥补了当前中庭防排烟选型定性判断的不足,可为同类大型公共建筑防排烟设计、系统优化与施工改造提供可靠的理论与工程参考。

参考文献:

- [1] 徐良升.大型公共建筑消防疏散设计优化与效能评估研究[J].消防界(电子版),2025,11(21):19-21.
- [2] 岳海林.坡地公共建筑利用中庭解决高大空间功能需求的消防设计探讨[J].四川建筑,2025,45(5):44-46.
- [3] 尹路,田路.大型商业建筑消防设计分析[J].今日消防,2025,10(2):112-114.
- [4] 张静,段炼,袁宏琛.大型商业综合体防排烟系统设计——以合肥市某大型商业综合体为例[J].今日消防,2025,10(8):95-97.
- [5] 朱龙超.大型公共场所消防监督与设施管理难点及对策研究[J].水上安全,2025,(22):118-120.