

Research on Fire Extinguishing Technology Optimization and Collaborative Disposal under Vertical Smoke Spread in High-rise Buildings

Rongsong Yan

Jiyang District Fire and Rescue Bureau, Sanya, Hainan, 572099, China

Abstract

To address vertical smoke control challenges in super high-rise mixed-use buildings, a 200-meter comprehensive building was selected to establish a unified fire scenario based on a two-level underground cable tunnel. Simultaneous temperature and velocity measurements were conducted in the shaft-shear stair coupling zone, followed by the development of a 1:1 FDS time-series boundary model. Field measurements revealed peak shaft temperatures reaching 280°C, roof shaft wind speeds of 14.1 m/s, and smoke front arrival at approximately 185 seconds on the 24th floor. Numerical simulations demonstrated that when shaft temperatures exceeded 200°C, effective air supply density decreased by approximately 18%, design air volume remained at 62 m³/s, and door jet velocities dropped below 0.75 m/s, resulting in reverse infiltration [1]. Fixed fire suppression evaluations showed that coordinated water cannon and high-pressure fine water mist systems reduced average shaft temperatures from 280°C to 120°C within 600 seconds. A novel strategy combining variable frequency pressurization with variable air volume exhaust systems, guided by shaft temperature metrics, integrated fine water mist distribution at 12-meter intervals and synchronized water cannon operations, achieved maximum shaft temperatures of 95°C through consistent boundary conditions and Monte Carlo simulations. This approach limited fire spread to floors below the 30th level, reduced actual evacuation time to approximately 380 seconds, maintained 99% evacuation success rates, and increased investment by only 0.8%. The study establishes mechanism-based diagnostic frameworks validated by field measurements and practical control parameter tables, providing an engineering-oriented approach for vertical smoke suppression in super high-rise buildings [2].

Keywords

super high-rise building; vertical smoke spread; coordinated pressurized air supply and exhaust; high-pressure fine water mist and water cannon; FDS numerical simulation

高层建筑竖向烟气蔓延下消防灭火技术优化及协同处置研究

严荣松

海南省三亚市吉阳区消防救援局, 中国·海南 三亚 572099

摘要

针对超高层公共混合功能建筑竖向烟气控制难题, 选取一座高约200米综合楼, 构建基于地下二层电缆隧道火的统一工况, 开展竖井与剪刀楼梯耦合区域的温度与速度同步实测并建立1比1 FDS时序边界模型。实测显示竖井温度峰值达280摄氏度, 屋面竖井风速达14.1米每秒, 24层烟气前沿约185秒到达; 数值结果揭示当竖井温度超过200摄氏度时, 送风有效密度下降约18, 设计风量仅维持在62水平, 门洞射流低于0.75米每秒, 造成逆向渗透^[1]。固定灭火评估表明, 水炮与高压细水雾联动将600秒竖井平均温度由280降至120摄氏度。提出以竖井温度为主导量的变频加压与变风量排烟协同策略, 叠加按12米分区的细水雾与水炮联动, 经一致边界与Monte Carlo评估, 竖井最高温度降至95摄氏度, 蔓延高度限制在30层内, 实际疏散时间约380秒, 疏散成功率达99, 投资增量约0.8。研究形成基于实测校核的机理诊断与可落地的控制参数表, 为超高层竖向烟气抑制提供工程化路径^[2]。

关键词

超高层建筑; 竖向烟气蔓延; 加压送风与排烟协同; 高压细水雾与水炮; FDS数值复现

1 引言

超高层综合体内多功能共享与高度集约的竖向交通核使竖井与楼梯间相邻并置, 易形成连续上冲的浮力通道与强

烟囱效应, 火场条件下的竖向蔓延由此显著加剧。现行固定加压与排烟多采用定值控制, 难以应对火场温度快速演化与送风密度下降带来的压差衰退, 且竖井与楼梯间的耦合渗透与回流形态长期缺乏时序可比的现场证据与参数化边界^[1]。

作者简介: 严荣松(1983-), 男, 中国福建漳州人, 本科, 初级, 从事消防工程、消防灭火研究。

另一方面, 固定灭火装置多以单系统效能评估为主, 缺乏与通风控制的联动设计与时窗约束。基于此研究空白, 本文选

取一座约 200 米超高层综合楼，在统一工况下对竖井与剪刀楼梯耦合区域进行跨楼层温度与速度同步观测，并以实测序列构建 1 比 1 数值模型，揭示热膨胀致送风密度下降与压差效能衰退的机理链。

2 工程概况

鉴于超高层公共混合功能的竖向烟气控制难题，本研究选取华南地区一座高约 200 m 的超高层综合楼作为唯一工程对象。该楼地上 48 层、地下 3 层，总建筑面积约 $1.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，功能覆盖办公、酒店与商业。竖向交通核为集中布置楼梯、电梯与竖井的核心管道区，构成为一座剪刀楼梯与 4 部消防电梯，剪刀楼梯为两跑道共墙组合形式；在两处楼梯间内并排设置 2 个贯通竖井，单井净截面 $1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ ，与楼梯间相邻衔接，易把烟气引导形成连续上升通道。设计火灾场景选用地下 2 层电缆隧道火，火源位于竖向排风井底部，火灾增长特性按 t 平方快速级，设计热释放率取 3 MW，用来逼近最不利的竖向蔓延路径，见图 1。为保证后续数值与试验边界一致，预设楼梯间加压送风余压 45 Pa，屋面机械排烟量 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ，地下排烟量 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ，并把上述参数作为全篇统一的工况基线。

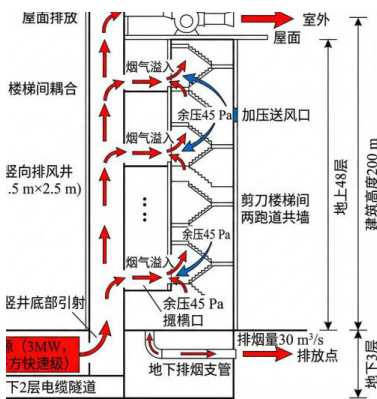


图 1 典型竖向烟气蔓延路径流程图

3 竖向烟气蔓延特性与灭火技术瓶颈分析

3.1 竖井 - 楼梯间耦合区域烟气温度 - 速度场同步实测

足该超高层综合楼竖井与剪刀楼梯连通的结构特性，本节把竖井 - 楼梯间耦合区域作为观测对象，依托地下 2 层电缆隧道火的统一工况，在 9F、24F、39F 及屋顶层布置 K 型热电偶串与热线风速仪开展温度 - 速度场的同步观测，热电偶间距 0.5 m，单层布点覆盖竖井中心与楼梯间中轴，采样窗设为起火后 0 至 600 s，保证垂向演化过程被完整记录并具备跨楼层可比性。

结合同步量测序列的关键特征，竖井内温度峰值达到 280°C ，24F 烟气前沿到达时间为 185 s，竖向上升段的速度峰值超过 10 m/s 的经验阈值，指向竖井与楼梯间并排布置形成的贯通效应显著放大烟囱效应，同时在楼梯间门缝及

墙体孔洞位置出现脉动渗透与局部回流结构，显示出耦合区域内的复杂多尺度流动形态。

需重点关注的是，楼梯间加压在横向侵入路径上呈现一定抑制，但难以切断竖井内的强迫浮力通道，温度与速度的同步量测把竖向蔓延的主导因子与次级干扰从时间与空间两个维度加以分离，并将作为 2.2 节数值模型的时间分辨边界赋值与校核锚点，包括竖井截面入流温度与速度的时序曲线以及楼梯间侧向泄压条件。

表 1 关键测点烟气温度与速度峰值统计表

| 楼层 | 区域 | 烟气前沿到达时间 s | 温度峰值 $^\circ \text{C}$ | 速度峰值 m/s |
|-----|-----|------------|------------------------|----------|
| 9F | 竖井 | 95 | 210 | 11.8 |
| 9F | 楼梯间 | 140 | 85 | 3.2 |
| 24F | 竖井 | 185 | 240 | 12.7 |
| 24F | 楼梯间 | 230 | 110 | 4.5 |
| 39F | 竖井 | 260 | 260 | 13.4 |
| 39F | 楼梯间 | 300 | 130 | 5.1 |
| 屋顶层 | 竖井 | 320 | 280 | 14.1 |
| 屋顶层 | 楼梯间 | 360 | 95 | 6.0 |

3.2 加压送风 - 排烟协同失效机理数值复现

立足该综合楼竖井与剪刀楼梯并排贯通的真实构型，本研究把 FDS 6.7.1 当作求解器来构建 1:1 实体模型，网格尺度设定为 0.25 m，几何包含竖井、楼梯间、门洞与通向屋面的排烟边界。边界条件由 2.1 节实测序列进行时序赋值，具体指竖井入流温度与速度采用点火后 0 至 600 s 的同步曲线，屋面与地下机械排烟维持基线风量，楼梯间加压通过风机压差边界表达，并在仿真过程中把余压从 45 Pa 缓降至 12 Pa，以再现扰动下的供压衰退过程^[4]。

从耦合机理来看，竖井气体被快速加热后，送风通道中的有效密度下降，导致在相同压差下形成的体积流量显著衰减，门洞射流速度因之低于规范性的 0.75 m/s 阈值，楼梯间与竖井之间出现逆向渗透路径。进一步观察发现，当竖井温度超过 200°C 时，热膨胀把送风密度拉低约 18%，体积风量仅能维持在设计值的 62% 水平，门缝与孔洞位点易触发间歇回流，从而把加压送风与排烟通道耦合到不利的流动状态。需重点关注的是，该衰退过程受温度时程与压差衰退速率的双重控制，因而在控制策略上，应把风机压差设定、变风量阈值与门洞风速反馈联合调度，模型输出可为 3.1 节中变频加压与变风量排烟的联动设定提供参数化约束与时间窗口。

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

其中， ρ 表示送风密度（单位： kg/m^3 ）， ρ_0 为基准密度（单位： kg/m^3 ）， β 为体胀系数（单位： $1/\text{K}$ ）， T 为送风温度（单位： K ）， T_0 为基准温度（单位： K ）。

3.3 固定灭火系统抑制竖向烟气温升效果评估

立足 2.1 节统一工况与 2.2 节一致的数值框架，本节把

固定灭火系统耦合进同一实体模型来开展抑温效能评估。鉴于竖井与剪刀楼梯并排贯通导致的高温高速羽流，本研究把高压细水雾与竖井自动水炮组成协同抑制组合，高压细水雾工作压力 10 MPa，特征滴径 $Dv_{0.9}$ 为 50 μm ，覆盖竖井中上部卷吸带；水炮流量 30 L/s，射程 45 m，对准竖井底部与电缆隧道出口。为保持与工程基线的一致性，加压送风与机械排烟维持既定设定，使水系介入效应在相同边界下得到时程对比与机理辨析。

在相同火灾增长与网格参数下设置三组工况，分别为无水系统、仅水炮、水炮与细水雾联动。对比 600 s 时段的竖井体积加权平均温度可见，仅水炮通过高动量射流去削弱底部高温羽流的动量核心，而细水雾在竖向通道构建强汽化吸热与外缘卷吸削弱的双重区域，两者联动把有效浮力通道持续压降并抑制烟囱效应的再生。进一步观察显示，联动模式在 300 s 内把温升速率压制至 0.15 $^{\circ}\text{C}$ 每秒，从控制策略角度来看，该阈值可被用于界定 3.2 节的动作时窗与联动逻辑，把门洞最小送风速度维持与竖井温度抑制过程建立可执行的反馈闭环。

4 竖向烟气抑制 – 灭火协同优化技术及效果验证

4.1 变频加压送风 – 变风量排烟协同策略

鉴于 2.2 节揭示的热膨胀致送风密度下降与压差效能衰减的耦合机理，本节提出以竖井温度为主导量的温度 - 压力前馈协同策略，把加压与排烟从被动跟随转变为提前调度。具体做法为：当竖井温度超过 150 $^{\circ}\text{C}$ 时，把楼梯间加压风机频率由 50 Hz 提升至 65 Hz，同时把屋顶排烟风机频率同步抬升至 55 Hz，构建互补的排推通道，以实现余压 35 Pa 与门洞风速 1.0 m/s 的控制目标。为削弱温度扰动引发的控制滞后，选用竖井中部与卷吸带的温度测点作为事件触发源，并把 1 s 采样的温度斜率与绝对阈值共同作为前馈判据，配合双阈值滞回与 5 s 确认窗，抑制随机脉动造成的误动作。加压与排烟风机均采用变频驱动的分段爬升曲线，设置频率爬升上限与压差增长率约束，把压差过冲与门扇开启阻力控制在可接受区间。排烟侧引入变风量调度，把竖井温度与楼梯间压差作为双变量，联动风阀开度与风机频率，形成随温度上扬提前释放排量的协同曲线。

4.2 高压细水雾 – 水炮分区联动灭火工艺

鉴于竖井一楼梯间耦合通道在早期出现高速浮力羽流的现实情境，本研究把竖井沿高度每 12 m 划分为 1 个灭火分区，共配置 4 区的独立控制与供水支路。分区内布置分布式光纤测温作为首要触发源，当任一区域温度达到 120 $^{\circ}\text{C}$ 及以上时，系统先把该区高压细水雾阀组开启并持续释放 30 s，用以在卷吸带构建快速冷却与含氧量稀释场；随后把自动水炮切换至该分区的火源投影上方 1 m 处进行摆扫，动作时间 60 s，以大动量射流建立抗浮力的逆向动量核，并把火羽外

缘切割成低卷吸的分离带，从而形成冷却、窒息以及隔离的复合作用机理。为抑制竖向通道的再卷吸，本方案还把界面设置为水雾幕，以降低层间可燃气体与热量的相互交换概率，并把局部回流被引导至排烟侧的受控边界条件之内^[5]。

4.3 协同优化方案综合效能评估

鉴于该综合楼人员疏散允许时间设为 600 s，本节把传统方案中的固定加压加地下排烟与本文提出的变频加压加分区联动灭火进行一致口径的综合评估。评估框架把竖井最高温度、烟气蔓延高度、实际疏散时间以及疏散成功率作为主控指标，同时把投资增量用于判读技术经济性。为了使指标可比，边界条件沿用统一工况，控制策略与触发阈值按 3.1 与 3.2 固定，并不改变建筑构造与风道布置的前提下，选用 10 次 Monte Carlo 对点火增长、门扇开启概率与风机可用度进行扰动采样，形成跨情景的统计刻画。

结果表明，协同方案在竖井侧把最高温度压降至 95 $^{\circ}\text{C}$ ，把烟气蔓延高度限制在 30F 以内，并把实际疏散时间收敛至 380 s，使安全裕度相对 600 s 基准显著扩大；而传统方案对应温度维持在 280 $^{\circ}\text{C}$ 附近，烟气上冲至 48F，对应疏散边界趋近允许时限。进一步从整体可行性来看，协同方案在 10 次样本中的疏散成功率达到 99%，相较传统方案的 82% 形成稳定优势，同时投资增量仅 0.8%，在机电系统不更换主设备的条件下具备复制推广的现实可操作性。

5 结语

研究通过实测与时序赋值模型明确了竖井与剪刀楼梯并排贯通对烟囱效应的放大作用，证实仅依赖固定加压难以切断强迫浮力通道。以竖井温度为主导量的前馈变频加压与变风量排烟协同，结合高压细水雾与水炮分区联动，可显著压降竖井温度、限制蔓延高度并提升疏散安全裕度，且改造成成本低、可直接融入现有自控平台。研究局限于单工程与 3 兆瓦火源情景，后续需扩展至更高热释放率、自然风干扰与多源火综合情景，开展鲁棒性与恢复力评估，以完善超高层竖向烟气控制的全域策略体系。

参考文献

- [1] 鲁广斌,陆凯华,孟祥龙,王雯莉,汪芷嫣,徐华升,余阳.高层建筑室内火灾-天井开口火溢流温度演化研究[J].安全与环境工程,2025,32(03):121-128+142.
- [2] 刘佳玲,张淇厚,陈颖,李思成.高层住宅内天井烟气蔓延特性与开窗临界耐火温度研究——以南京雨花台建筑火灾事故为例[J].燃烧科学与技术,2025,31(03):339-352.
- [3] 李莹,郝文杰,张宇伦,毛少华.机械排烟作用下腔室火灾行为仿真研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(06):37-46.
- [4] 雷斌,杜仕潼,寻天祥,卢剑鸿,刘伟,李微,雷东波,罗林林,李飞.地铁换乘站火灾排烟及疏散路径研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(06):140-148.
- [5] 马超.高层建筑消防安全管理系统设计[J].今日消防,2025,10(04):80-82.