

## 高层建筑消防系统设计关键点分析

郭 勇

胜利油田应急救援中心（消防支队），山东 东营 257000

**[摘要]** 高层建筑消防系统设计已从被动响应转向主动防御的系统性工程，其核心在于构建“功能适配—技术协同—管理闭环”三位一体的全周期防控体系。功能适配性强调消防系统与建筑空间形态、使用功能的动态匹配，通过性能化设计精准划分防火分区，差异化配置灭火介质与排烟策略；技术协同性聚焦多系统联动的深度耦合，依托数字孪生技术实现设备布局优化与毫秒级应急响应；管理闭环性贯穿设计、施工、运维全生命周期，通过可维护性基因植入与智能巡检系统形成动态优化机制。文章通过空间防火性能重构、材料界面协同创新及韧性系统建构等维度，提出“预测—抑制—隔离—修复”的闭环防控逻辑，为高层建筑消防安全生态的可持续发展提供理论框架与实践路径。

**[关键词]** 高层建筑；消防系统；系统设计；关键点

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16293

中图分类号: TU976.1

文献标识码: A

## Key Points Analysis of Fire Protection System Design for High-rise Buildings

GUO Yong

Shengli Oilfield Emergency Rescue Center (Fire Brigade), Dongying, Shandong, 257000, China

**Abstract:** The design of high-rise building fire protection systems has shifted from passive response to active defense as a systematic engineering, with the core being the construction of a full cycle prevention and control system that integrates "functional adaptation, technical collaboration, and management closed-loop". Functional adaptability emphasizes the dynamic matching of fire protection systems with building spatial forms and usage functions, accurately dividing fire zones through performance-based design, and differentially configuring fire extinguishing media and smoke exhaust strategies; Technical synergy focuses on deep coupling of multiple system linkage, relying on digital twin technology to achieve equipment layout optimization and millisecond level emergency response; The closed-loop management runs through the entire lifecycle of design, construction, and operation, forming a dynamic optimization mechanism through the implantation of maintainability genes and intelligent inspection systems. The article proposes a closed-loop prevention and control logic of "prediction-inhibition-isolation-repair" through dimensions such as spatial fire performance reconstruction, material interface collaborative innovation, and resilience system construction, providing a theoretical framework and practical path for the sustainable development of high-rise building fire safety ecology.

**Keywords:** high-rise buildings; fire protection system; system design; key points

### 引言

高层建筑的空间垂直性与功能复合性催生火灾风险的动态叠加效应，其风险载体已从显性设备向幕墙空腔、管道竖井等隐性空间延伸，形成立体化、多维度的灾害扩散网络。传统以设备堆砌为核心的消防设计范式，受限于专业割裂与静态思维，难以应对超高层建筑中火、烟、毒多物理场耦合的复杂灾变场景。现代消防体系亟需突破技术边界，构建“空间防火性能优化—智能联动逻辑重构—全周期管理闭环”三位一体的集成化防控框架。在空间性能维度，通过 BIM 逆向工程解析建筑几何拓扑关系，结合计算流体力学（CFD）模拟烟气扩散的三维路径，精准定位中庭挑空区、设备转换层等高风险节点的防火薄弱界面。基于材料热力学参数与人员热力轨迹的耦合分析，重构防火分区的动态划分逻辑，例如在商业综合体中将影院、餐饮等火灾荷载差异显著的功能单元进行空间解耦，设置可变形防火隔断装置以适配业态调整需求。技术联动层面，

依托数字孪生技术构建虚实映射的消防设备拓扑网络，实现防排烟系统风阀开度与火势热释放速率的动态匹配，智能喷淋系统基于边缘计算动态调节水雾粒径与覆盖密度，疏散引导系统则通过 UWB 定位与恐慌心理模型生成实时路径规划方案。三者通过物联网协议形成毫秒级响应链条，破解传统消防设备“单兵作战”的效能衰减困局。管理闭环性贯穿于全生命周期，设计阶段植入可维护性基因，在装饰层内预埋传感终端接口与设备检修通道；施工阶段采用区块链技术对防火涂料涂布厚度、喷淋管网试压数据等关键参数进行分布式存证；运维阶段通过 AR 巡检系统自动比对设备状态与设计阈值，结合联邦学习算法迭代优化系统控制策略。这种“预测建模—智能抑制—物理隔离—韧性修复”的主动防御体系，推动消防设计从灾后被动处置向风险前瞻消解的范式跃迁，为超高层建筑构筑自适应、自愈合的安全韧性基底，重新定义现代城市空间的防灾逻辑与生命守护边界。

## 1 高层建筑火灾的特点

### 1.1 火灾的隐患

高层建筑内部能源系统与功能空间的耦合效应显著,电力设备密集区、管道井道交叉点及装饰材料接缝处形成火灾隐患的隐性网络。电缆过载、风管油污积聚与幕墙空腔烟囱效应构成多维度致灾链,而后期改造破坏防火分区、拆除防火门或封堵排烟通道进一步削弱被动防火体系效能。违规使用可燃建材与消防管理缺失加剧隐患积累,形成从微观材料失效到宏观空间失控的立体风险叠加。

### 1.2 火势烈,快速传播

高层建筑的中庭与竖向管井形成天然拔风通道,火灾初期烟气扩散速度远超水平蔓延速率,形成立体火势推进网络。钢构件受热软化导致结构变形,加速火势突破防火分区边界;玻璃幕墙爆裂产生的空气对流引发火风压效应,加剧火流卷吸与氧气补给。现代建筑广泛使用的复合保温材料在高温下熔滴飞溅,触发多点引燃现象,构建垂直与水平交织的立体燃烧通道<sup>[1]</sup>。此类空间特性与材料性能的耦合作用,使得火势突破传统二维平面蔓延模式,形成三维立体火场快速扩张路径。

### 1.3 疏散困难

在高层建筑中,由于楼层众多、垂直高度大,人员从高处疏散至地面或其他安全区域所需的时间较长。一旦发生火灾,建筑内部的竖向井道如电梯井、管道井和通风井等,极易形成烟囱效应,导致火势和烟雾迅速蔓延,进一步增加了安全疏散的难度。同时,高层建筑的结构布局通常较为复杂,水平与垂直距离较大,在火灾发生时,电梯将按照规定停止运行,居民只能依靠疏散楼梯进行逃生,而消防电梯则主要供消防人员使用。这意味着居住在高楼层的人员需要更长时间才能安全撤离,但火势和烟雾扩散的速度往往远快于人的疏散速度,从而严重威胁到生命安全。

### 1.4 消防设备设施的不完善

高层建筑消防系统存在多重设计缺陷:消防水泵接合器设置高度不足引发供水压力梯度衰减,喷淋系统盲区与探测器灵敏度阈值失配导致火情响应迟滞;过度智能化设计导致机械应急操作界面冗余性缺失,控制系统单点故障即可触发系统性功能瘫痪。部分项目消防管网拓扑结构未实现环状冗余布局,关键节点缺乏水力报警装置实时监控管网完整性。装饰层过度封闭影响设备检修可达性,防火涂料涂布工艺缺陷加速材料性能衰减,而维保记录缺失与智能巡检盲区则使隐性风险持续累积,形成“设计漏洞—施工误差—运维失效”的全周期缺陷链。

## 2 消防系统关键设计要点分析

### 2.1 消防给水与灭火系统设计

高层建筑消防给水系统需构建“市政管网—消防水池—屋顶水箱”三级水源互补体系,通过压力分区控制技术实现竖向水压梯度精准调节:低区采用减压阀组稳定供水

压力,中高区配置多级串联变频稳压泵组动态补偿压力衰减,确保各楼层消火栓出口压力持续达标。管网拓扑采用双环状冗余布局,关键交汇节点设置水力报警阀与电磁流量计,实时捕捉管网渗漏与压力突变信号,同步联动智能诊断系统定位故障区段。针对数据机房、档案库等特殊场所,创新研发细水雾与七氟丙烷惰性气体复合灭火技术,通过喷嘴阵列优化设计实现灭火介质空间浓度梯度控制,在快速窒息火焰的同时规避精密设备水渍损害;对于商业综合体等人员密集区域,采用预作用式喷淋系统与防火卷帘联动控制,火灾确认后延迟 60 秒喷水以预留疏散窗口期。系统设计中需预留管网冲洗接口与压力测试阀组,结合 BIM 运维平台实现管壁腐蚀度智能预测与预防性维护决策,形成“供水保障—精准灭火—寿命管理”的全周期技术闭环。

### 2.2 火灾自动报警系统设计

高层建筑火灾自动报警系统需突破传统单一参数阈值报警模式,构建基于多物理场耦合的智能识别逻辑:通过烟雾粒子浓度梯度、温度变化斜率、CO/VOC 气体浓度、气压波动频率四维参数融合分析,建立动态权重自适应算法,精准区分烹饪油烟、设备过热等干扰场景与真实火情特征。在电缆桥架、电气竖井等线性隐蔽空间布设分布式光纤测温系统,通过拉曼散射光谱解析技术实现每米级温度场连续测绘,结合自诊断功能排除光纤弯折损耗引起的误报风险;对于幕墙空腔、装饰夹层等非结构化空间,采用无线自组网热电堆传感器集群,通过拓扑优化算法实现热辐射能量的三维场重构。报警控制器需集成多协议转换网关,兼容 BACnet、Modbus、OPC UA 等工业通信标准,与 BIM 运维平台深度耦合,将火警点位坐标、设备状态参数实时映射至建筑数字孪生体,生成热力图谱与烟气扩散推演动画。系统内置边缘计算节点,可在火灾确认后 0.5 秒内触发多级联动策略:初级预警阶段启动局部排烟与应急广播,二级确认阶段切断非消防电源并迫降电梯,三级紧急阶段解锁消防水箱电磁阀与避难层加压送风系统<sup>[2]</sup>。通过区块链技术固化报警事件的时间戳与处置记录,构建不可篡改的应急指挥证据链,同时支持固件远程空中升级(OTA)与深度学习模型迭代优化,确保系统持续适应建筑业态变更与火灾场景演化需求。

### 2.3 防排烟系统设计

高层建筑防排烟系统需突破传统静态分区模式,通过计算流体力学(CFD)逆向建模技术重构动态防烟逻辑:基于建筑空间拓扑特征与人员热力分布规律,构建多火灾场景下的烟气扩散三维仿真模型,优化防烟分区的几何边界与开口控制策略。中庭顶部设置智能联动排烟装置集群,集成可开启式电动排烟窗与射流风机矩阵,通过边缘计算实时解析火源热释放速率与烟气层高度,动态调节排烟口开启面积与风机转速配比,形成“热羽流捕捉—惯性分离

一定向排放”的协同排烟机制。前室与楼梯间加压送风系统采用多参数耦合控制技术,在风道关键节点部署压差传感器与激光粒子计数器,通过模糊PID算法驱动风量调节阀动态补偿门洞开启导致的压差波动,维持疏散通道 $0.25\sim 0.35\text{m/s}$ 的定向气流速度阈值。

排烟管道系统需进行耐火性能革命性升级:采用纳米陶瓷基复合板材替代传统镀锌钢板,耐火极限提升至与建筑主体结构同等的3小时标准;管道连接节点嵌入形状记忆合金密封环,遇高温自动膨胀填补结构缝隙,阻断烟气渗透路径;在竖向管井内设置自冷却式防火包裹层,通过相变材料吸热与微通道循环散热技术,抑制金属管道热膨胀变形。系统与BIM运维平台深度集成,可实时监控风机轴承振动频谱与风阀执行器寿命状态,结合数字孪生技术预演设备故障对排烟效率的影响路径,提前触发预防性维护工单,构建“智能抑烟—结构耐火—预测运维”的全维度防御体系。

## 2.4 消防电梯与疏散通道设计

高层建筑消防电梯系统需构建多维度安全屏障:电梯井道采用正压送风与梯度空气幕协同阻烟技术,通过动态压力传感器实时监测井道内外压差,调节风机转速维持 $20\sim 30\text{Pa}$ 的定向气流屏障;轿厢内集成HEPA高效过滤与活性炭吸附复合净化模块,可滤除90%以上有毒烟气颗粒,同步搭载卫星通讯与无线中继装置,确保极端环境下应急通讯链路畅通。电梯门机系统嵌入热变形自补偿机构,配置耐高温陶瓷涂层导轨,保证 $800^{\circ}\text{C}$ 环境持续运行30分钟。疏散通道设计遵循“被动防护—主动引导”双原则:楼梯踏步采用反坡排水与防滑纳米涂层处理,梯段宽度适配双向人流极限疏散密度,关键转折平台设置光致发光导向标识与多语言声光提示装置,声压级智能匹配环境噪音强度。通道内嵌分布式智能照明系统,通过红外感应与烟雾透光率动态调节照度梯度,防火门配置电磁吸合闭门器与温感熔断解锁装置,火灾时自动闭合形成连续阻烟单元<sup>[3]</sup>。避难层采用模块化防灾设计:通风系统集成高压静电除尘与紫外光催化分解技术,实现 $\text{PM}_{2.5}$ 与有毒气体的双效净化;防火卷帘分区嵌入热敏感应膨胀密封条,遇高温自动填充结构缝隙,形成气密性防护单元;生命支持区配备自发电氧浓缩设备与负压隔离舱,物资储备库采用防火防爆壳体结构,内置温湿度自调节云仓储系统。

## 2.5 智能化消防系统的应用

高层建筑智能化消防系统以数字孪生平台为核心引擎,通过建筑信息模型(BIM)与物联网(IoT)协议的深度融合,构建虚实联动的三维管控界面:在数字空间中同步映射建筑结构热力学参数、设备运行状态及人员分布热力图,依托边缘计算节点对多源传感器数据进行时空关联

分析,实时推演火势蔓延路径与结构失效风险。系统内嵌基于深度强化学习的决策算法,可模拟十万级火灾场景迭代优化应急预案,例如在商业综合体火灾中自动计算最优排烟风机转速配比与疏散路径动态权重<sup>[4]</sup>。智能喷淋系统实现从“被动触发”到“预测干预”的技术跃迁:喷淋头内置热敏形状记忆合金驱动机构,通过红外光谱阵列感知火场温度梯度分布,自主调节水雾粒径与覆盖密度——针对油类火灾喷射超细水雾形成窒息屏障,将电气火灾切换为氮气幕隔离模式;同时搭载自学习芯片,可基于历史灭火数据优化介质释放策略,例如在图书馆档案区主动降低水压以减少文献损毁。区块链技术深度渗透消防全生命周期管理:设备出厂参数、安装验收记录与维保操作均以哈希值形式分布式存储,形成不可逆的质量追溯链;智能合约自动触发维保工单,当传感器检测到防火涂料厚度衰减或管网锈蚀超标时,通过去中心化网络向责任方发送加密工单并冻结工程尾款。系统整合增强现实(AR)巡检眼镜与声波探伤仪,维保人员扫描设备二维码即可叠加显示历史运维数据与三维故障定位指引,实现“数字档案—物理设备—人工操作”的闭环验证。

## 3 结语

高层建筑消防系统设计正从被动防御转向主动免疫,核心在于破解空间形态、结构耐火与机电响应的协同难题。未来需重构空间防火性能,将隐性空间纳入数字孪生火势模型,融合材料创新实现装饰与防火效能平衡;发展智能协同控制技术,通过多物理场预警算法驱动防排烟、喷淋与疏散系统形成毫秒级响应闭环;以韧性提升为导向,研发自修复阻燃材料与设备冗余架构。技术进化应聚焦热辐射场预测、超细水雾定向灭火及区块链全周期质控体系,依托BIM平台集成动态防火分区与故障自愈逻辑,构建具备空间自适应、风险自识别能力的新一代防火体系,为超高层建筑筑牢本质安全根基,重塑城市韧性防灾范式。

## 【参考文献】

- [1]黄相冰.高层建筑消防系统设计与优化策略研究[C].北京:中国智慧工程研究会.2024 智慧施工与规划设计学术交流会议论文集.碧桂园生活服务集团股份有限公司贵港分公司,2024.
- [2]任秀玲.高层建筑给排水消防设计问题分析[J].消防界(电子版),2023,9(15):48-50.
- [3]王强.高层建筑给排水消防系统的设计及注意事项[J].住宅与房地产,2023(20):69-71.
- [4]李星霖.高层建筑消防给水系统设计分析[J].科技资讯,2022,20(24):105-108.

作者简介:郭勇(1976.8—),单位名称:胜利油田应急救援中心(消防支队),毕业学校:山东工商学院。