

高层建筑消防安全疏散设计及措施

尚应超

黑龙江省伊春市南岔县消防救援大队 黑龙江伊春 153000

DOI:10.12238/ems.v7i6.13782

[摘要] 随着城市化进程的加快,高层建筑和复杂结构建筑日益增多,消防安全成为城市管理中不可忽视的重要环节。在火灾等突发事件中,如何高效、有序地疏散人员,减少人员伤亡,成为亟待解决的问题。传统疏散方案往往依赖于预先设定的固定路径,难以实时应对火灾现场复杂多变的情况。数字孪生技术的出现,为动态疏散方案的制定提供了新的思路。通过将现实世界的物理模型映射到数字世界中,构建三维数字镜像模型,并结合传感器实时监测数据,可以实现火灾现场的动态仿真与路径优化。

[关键词] 建筑;数字孪生;消防安全;疏散方案;数字模型;

为了解决高层建筑和复杂结构建筑在火灾中的高效疏散问题,提出了基于数字孪生驱动的疏散方案思路,构建了三维数字镜像模型,并结合传感器实时监测数据。然后,通过火灾模拟分析,验证了该方案在能见度、CO 体积分数和温度等关键特征值上的有效性。

一、高层建筑火灾特点

1. 火势蔓延快,途径多样。烟囱效应引发垂直扩散。楼梯间、电梯井等竖向通道加速火势蔓延,烟气垂直扩散速度可达 3-4m/s,高温烟气在竖向通道内上升速度比水平扩散快 5 倍。可燃材料助长蔓延。大量使用易燃外墙保温材料、装饰材料及室内可燃物,易形成多层立体燃烧;风力影响下,建筑越高火势扩散越迅猛。

2. 安全疏散难度高。逃生路径受限。垂直距离长(如百米高楼徒步疏散需 20 分钟以上)、楼梯间易被烟气侵入,且火灾时电梯禁用。人员拥堵与恐慌。人员密集易引发踩踏,恐慌心理降低逃生效率;疏散通道堆放杂物或安全出口堵塞进一步加剧风险。

3. 扑救难度极大。外部救援受限。举高消防车普遍工作高度低于 50 米(约 17 层),超高层建筑外攻灭火手段受限。内部设施依赖性强。室内消防设施若因断电、故障无法启用(如消防栓水压不足),将严重影响自救能力。

4. 火灾荷载与安全隐患叠加。火灾荷载大。可燃家具、装修材料及电气设备增多,燃烧释放大量有毒气体(如一氧化碳)。隐患多样复杂。电缆井堆放杂物、电动车违规充电、防火封堵不严等问题频发,易引发火灾。

5. 易形成立体燃烧。多方位引燃。燃烧物质坠落引燃下层外立面,玻璃幕墙破裂后形成多燃烧面;高温烟气通过竖向通道引燃上部楼层。

二、高层建筑消防安全疏散设计要点

1. 疏散通道设计。垂直疏散核心设施。至少设置两个独立疏散楼梯,优先采用防烟楼梯间设计(前室+防火门阻烟),确保任意楼层均有双向逃生路径。疏散楼梯宽度按百人宽度指标计算,高层公共建筑首层疏散楼梯净宽不低于 0.65m/百人。超 100 米建筑每 50 米间隔设置避难层,提供临时避险空间并配备独立通风、消防设施。水平疏散路径规范。确保房间至最近安全出口的直线距离符合规范(病房 $\leq 24\text{m}$,其他区域 $\leq 40\text{m}$)。疏散走道净宽不小于 1.1m,禁止设置固定障碍物或堆放杂物。

2. 辅助设施配置。防排烟系统联动。楼梯间采用正压送风系统阻隔烟气,走道设置机械排烟设施加速排烟。防火门采用乙级防火标准并保持常闭状态,延缓火势蔓延。应急指引系统。沿疏散走道设置灯光疏散指示标志(距地面 $\leq 1\text{m}$),间距 $\leq 20\text{m}$;安全出口顶部安装“安全出口”标志。配备消防

应急照明系统,断电时地面水平照度 $\geq 3\text{lx}$,关键区域(如避难层) $\geq 10\text{lx}$ 。火灾自动报警系统与应急广播联动,提供实时语音逃生指引。

3. 动态疏散策略。路径选择优化。火灾位于下方时,优先向上转移至避难层或屋顶平台等待救援。相邻单元间通过消防连廊实现跨区域疏散。特殊设施应用。超过 60 米住宅设置两个独立疏散单元,通过防火隔墙分隔。消防电梯配备独立供电与防水设计,在确保无烟气侵入时可辅助疏散。

4. 管理与维护要求。设施可靠性保障。定期检测消防水泵、防排烟风机等设备,确保联动响应正常。蓄电池备用电源维持应急照明 ≥ 30 分钟持续供电。应急能力提升。每季度组织疏散演练,强化人员应急反应能力。建立微型消防站,配置逃生缓降器、防烟面罩等辅助工具。

三、特殊场景下的高层建筑消防设计

1. 超高层建筑(>100 米)。垂直避险体系。每 50 米设置避难层,采用封闭式设计,配备独立通风、消防水源及应急通信系统,确保人员临时避险期间安全。疏散楼梯在避难层强制转向或错位布置,确保人员必须经过避难层上下通行,强化疏散引导。复合防排烟系统。楼梯间采用正压送风系统(压力梯度 $\geq 25\text{Pa}$)阻烟,走道设置机械排烟设施联动火灾报警系统。玻璃幕墙区域强化防火封堵,防止火势通过幕墙空腔竖向蔓延。

2. 多功能综合体。防火单元划分。商业、酒店、办公等混合业态区域独立设置防火单元,采用耐火极限 ≥ 2 小时的防火墙分隔。大空间区域(如中庭)采用“防火舱”设计,通过耐火罩棚(≥ 1 小时)覆盖高火灾荷载区域,抑制火势扩散。智慧化消防联动。集成火灾自动报警、水炮定位灭火及应急广播系统,实现火源定位与疏散指引同步。设备层与避难层合并设计,集中布置消防水泵、备用电源等关键设施,降低维护成本。

3. 异形结构建筑。疏散路径冗余设计。螺旋形、退台形建筑增设环形疏散走道或跨层连廊,确保任一位置至少有两个方向逃生路径。曲面幕墙区域设置外挂式逃生梯或缓降装置,补充传统楼梯覆盖盲区。动态防火分区。采用可升降防火卷帘+智能温感控制,根据火情实时调整防火分区边界。钢结构主体喷涂膨胀型防火涂料(耐火极限 ≥ 3 小时),延迟建筑坍塌时间。

4. 历史建筑改造。适应性消防升级。保留原有砖木结构的同时,增设独立消防水源(如屋顶水箱+地下泵房双备份)。利用天井、采光廊等历史空间改造为自然排烟通道,减少对建筑风貌的破坏。微型消防站嵌入。每 200 米服务半径设置微型站,配备高压细水雾装置及防毒面具,弥补外部救援响应延迟。

5. 规范与实施保障。一类高层住宅 (>54 米) 及 4 万^m² 以上地下车库需通过消防图纸专项审查, 验收阶段重点核查疏散通道有效宽度及设施联动性能。采用 BIM 技术模拟火灾烟气扩散路径, 优化排烟口布局与疏散标识密度。

四、高层建筑消防安全措施实施要点

1. 管理责任体系。主体责任落实。业主、使用人为消防安全第一责任人, 需委托专业消防服务机构明确职责分工并写入服务合同。超 100 米建筑实行楼长制, 每日巡查电气线路、疏散通道及消防设施状态。制度建设规范。制定消防安全自查清单, 重点核查消防设施故障率、疏散通道占用率及电动自行车违规充电行为。每季度组织消防演练, 模拟火情提升居民应急响应能力。

2. 硬件设施保障。消防系统配置。火灾自动报警系统联动应急广播, 实现火源定位与语音疏散指引同步。临时施工阶段需同步配置楼层消火栓、高压水泵, 满足高层水压需求。疏散设施标准。疏散通道净宽 ≥ 1.1 米, 安全出口间距病房 ≤ 24 米/其他区域 ≤ 40 米, 严禁堆放杂物。避难层每 50 米设置一次, 配备独立通风系统及防火通信设备, 禁止挪作他用。

3. 动态风险管控。隐患整治重点。重点排查防火卷帘故障、消防登高面占用、电动车违规停放等 10 类隐患。幕墙空腔、电缆井等区域强化防火封堵, 阻断火势竖向蔓延路径。智慧化监测升级。利用 BIM 技术模拟烟气扩散路径, 优化排烟口布局与疏散标识密度。消防控制室 24 小时双人值守, 实时监控设备运行状态。

4. 施工期专项管理。临时消防体系。施工现场环形消防车道宽度 ≥ 4 米, 楼层临时消火栓水压 ≥ 0.35 MPa。动火作业实施分级审批, 配备专职安全员全程监督。结构防火保护。钢结构喷涂膨胀防火涂料 (耐火极限 ≥ 3 小时), 延迟坍塌时间。临时用房禁用可燃夹芯板材, 宿舍区与作业区保持 20 米防火间距。

五、高层建筑防火措施日常维护方法

1. 责任制度落实。主体责任明确。业主、使用人应与专业消防服务机构签订合同, 明确消防设施维护、隐患排查等权责分工。超 100 米建筑实行专职消防管理员制, 每日巡查电气线路、疏散通道及消防设施运行状态。维保周期管理。消防水泵、防排烟风机每半年至少启动测试一次, 确保带水运行稳定。防火门闭门器、应急照明系统每月检查功能性, 故障部件 24 小时内更换。

2. 设施维护重点。消防系统维护。消火栓接口、水带保持无锈蚀破损, 水压 ≥ 0.35 MPa, 每季度测试出水流量。火灾自动报警系统联动广播、排烟设备, 每月模拟火警测试响应速度。疏散设施保障。安全出口及疏散通道每日清理杂物, 确保净宽 ≥ 1.1 米, 严禁电动自行车违规停放。避难层防火门密封条定期更换, 独立通风系统滤网每季度清洗除尘。

3. 隐患排查治理。重点区域管控。电缆井、幕墙空腔实施月度防火封堵检查, 使用防火泥填补 ≥ 1 cm 缝隙。厨房排烟管道每季度清除油污, 燃气阀门接口使用肥皂水检测泄漏。动态风险监测。可燃雨棚、防盗网逃生窗纳入年度改造计划, 禁用塑料等易燃材质。钢结构梁柱防火涂层每两年检测一次, 破损区域补涂至 ≥ 3 mm 厚度。

六、高层建筑消防安全技术最新进展

1. 智慧消防技术与系统集成。消防一体化平台。以物联网和大数据为核心, 构建“监测-预警-处置-评估”全闭环体系, 通过智能感知设备实时监测电气故障、燃气泄漏等隐性风险, 实现火灾预警响应时间缩短至 30 秒内。智慧消防系统集成火灾报警、应急广播和智能疏散指示功能, 可动态规划

逃生路径并通过语音引导人员避险。无人机与机器人协同作战。无人机集群实现高空破拆、灭火弹投掷及三维火场建模, 覆盖传统消防车无法触及的超高层区域 (如 200 米以上建筑)。消防机器人搭载热成像仪和高压水枪, 深入火场内部执行探火、降温任务, 可耐受 1000℃ 高温环境持续作业 30 分钟。

2. 新型消防设施与材料。动态疏散系统升级。应用 AR 增强现实技术, 在应急照明系统中投射动态逃生路线, 根据火势实时调整疏散方向。智能防火门搭载电磁闭门装置, 火灾时联动烟气传感器自动关闭并密封缝隙, 耐火极限提升至 2 小时以上。建筑结构防火技术。钢结构采用膨胀型纳米防火涂料 (喷涂厚度 ≤ 5 mm), 耐火极限突破 3 小时, 避免高温坍塌风险。历史建筑改造中创新应用泡沫铝等轻质防火材料, 兼具排烟功能与建筑美学需求。

3. 标准化与运维革新。检测技术规范升级。《建筑消防设施检测技术规范》新增消防供配电设施联动测试标准, 要求消防水泵启动时间 ≤ 30 秒, 水压波动范围控制在 $\pm 10\%$ 。消防技术服务引入信用评价体系, 通过平台公示机构服务质量, 淘汰故障修复率低于 95% 的运维单位。微型消防站效能优化。在 200 米服务半径内配置“1+3+N”装备组合 (1 台消防机器人+3 类无人机+N 种破拆工具), 实现 5 分钟快速响应。社区级消防站配备远程操控系统, 可一键启动相邻建筑排烟风机形成联合防烟屏障。

4. 施工期风险防控技术。智能监测技术应用。建筑工地部署多光谱热成像摄像头, 精准识别焊接火花、电线短路等潜在火源, 定位精度达 0.5 米。临时消防系统采用模块化设计, 预装压力传感器实时监测消火栓管网水压, 异常状态自动启动备用水泵。可燃物管控策略。推行“绿标”认证制度, 施工现场木质模板强制涂覆阻燃剂 (氧指数 $\geq 32\%$)。动火作业区设置负压集尘装置, 火星捕获效率提升至 98%, 降低飞火引燃风险。

5. 未来高层建筑消防技术预测与分析。(1) 智能监测与预警技术革新。全域感知网络构建。通过物联网传感器实时监测燃气泄漏、电气过载等隐患, 结合深度学习算法预判风险等级, 预警响应时间可缩短至秒级。城市级消防云平台整合建筑 BIM 模型与消防数据, 生成动态风险热力图, 辅助指挥中心快速决策。无人机与机器人协同应用。无人机搭载红外热成像与有毒气体监测模块, 可在火灾初期完成火源定位与有毒气体扩散路径建模, 并通过语音广播引导疏散。灭火机器人配备耐高温材料与自主导航系统, 替代人工进入高温核心区执行破拆、气体抑制等高危任务。(2) 应急疏散技术突破。动态疏散路径规划。基于数字孪生技术模拟火灾场景, 算法实时计算最优逃生路径, 通过 AR 眼镜或手机 APP 推送个性化导航。电梯逃生技术突破: 研发防烟防火电梯井与紧急供电系统, 火灾时电梯可作为辅助疏散工具。新型疏散装备普及。高层缓降器集成智能调速功能, 适用于不同年龄与体能人群; 逃生滑梯模块嵌入公共区域墙体, 30 秒内完成展开。

总之, 通过深入探索数字孪生技术在消防安全动态疏散中的应用, 数字孪生驱动的疏散方案具有广泛的应用前景, 为提升城市消防安全水平提供了有力支持。

【参考文献】

- [1] 文德. 基于数字孪生的超高层建筑火灾疏散路径规划研究. 2023.
- [2] 宋静. 基于数字孪生理念的复杂建筑消防安全疏散动态分析. 2022.