

# 防排烟措施对火灾下高层建筑人员疏散的影响

杨振军<sup>1</sup>, 于亚萍<sup>2</sup>, 王庆贺<sup>2</sup>

(1. 宜都市消防救援大队, 湖北 宜昌 443000; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 为明确火灾下高层建筑防排烟设施对人员疏散的影响, 优化建筑中防排烟设施配置, 降低建筑火灾事故损失并保障人员疏散安全, 采用火灾数值模拟与人员疏散仿真相结合的方法, 对高层建筑火灾动态蔓延与人员疏散过程进行模拟分析, 揭示机械排烟设施与空气幕设施作用对火灾下高层建筑人员疏散的影响。结果表明: 火灾模拟结果与实验数据的误差不超过17%, 疏散模拟误差在10%以内, 仿真软件建模技术具有一定可靠性; 相对于无防排烟设施作用, 建筑火灾中机械排烟与空气幕装置协同工作下人员疏散安全性最高, 整体人员疏散用时降低4.58%; 确保防排烟系统的合理设置、定期维护及可靠运行, 可最大限度降低火灾风险, 保障人员疏散安全。

**关键词:** 防排烟设施; 高层建筑; 火灾模拟; 人员疏散

**中图分类号:** X928.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.06.013

## Impact of Smoke Control Measures on the Evacuation in High-rise Buildings in the Fire

YANG Zhenjun<sup>1</sup>, YU Yaping<sup>2</sup>, WANG Qinghe<sup>2</sup>

(1. Yidu Fire and Rescue Division, Yichang 443000, China; 2. Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** To clarify the impact of smoke control facilities on occupant evacuation in high-rise buildings under fires, optimize the configuration of smoke control facilities in buildings, reduce losses caused by fire accidents and ensure the safety of evacuation of people, this study adopts the method of combining fire numerical simulation and evacuation simulation to model and analyze the dynamic spread of fire and evacuation process in high-rise buildings, and reveals the effects of mechanical smoke exhaust facilities and air curtains on the evacuation of people in high-rise buildings under fires. The results show that: the error between the fire simulation results and the literature data is not more than 17%, and the error of evacuation simulation is within 10%, and the modeling technology of simulation software has a certain degree of reliability. Compared with the role of no smoke control facilities, the evacuation of people in building fires is the safest under the synergistic work of the mechanical smoke exhaust facilities and air curtains. The overall evacuation time of people reduces 4.58%. Ensuring the reasonable setup, regular maintenance and reliable operation of the smoke prevention and exhaust system can minimize the risk of fire and ensure the safety of personnel evacuation.

**Key words:** smoke control facility; high-rise building; fire simulation; personnel evacuation

高层建筑火灾中的烟囱效应会导致烟雾在竖井内迅速垂直扩散,给建筑人员疏散安全带来巨大挑战<sup>[1]</sup>。鉴于高层建筑火灾疏散的复杂性与危险性,建筑防排烟设施的设计正由处方式向性能化演进,以确保更高水平的建筑防火安全效能<sup>[2-3]</sup>。性能化防排烟设施的设计是以人员疏散安全为目标,因此,研究防排烟设施的工作状态对建筑火灾发展与人员疏散安全的影响至关重要。

高层建筑火灾荷载大、火势蔓延快、蔓延途径多,其复杂性与危害性引起学者高度关注。Yan等<sup>[4]</sup>利用 Pyrosim 软件模拟了超高层商业建筑火灾发展情况,获得了火灾基本参数与可用安全疏散时间。赵江平等<sup>[5]</sup>利用仿真软件模拟了高层建筑环廊区域不同火源空间位置的烟气温度、浓度和能见度变化规律及其对安全区划分的影响,结果表明,走廊断面交界处与环形走廊四角等区域危险性较高。高层建筑火灾中,由可燃物燃烧产生的高温有毒有害烟气是最主要危害因素,建筑中竖井是其蔓延的主要通道,具有重大火灾隐患。基于高层多单元住宅建筑,Mckeen等<sup>[6]</sup>利用计算流体动力学分析了建筑中楼梯间防火门的开启对烟雾扩散的影响,并确定了一系列防火门烟气泄漏对应的可用安全疏散时间。He等<sup>[7]</sup>采用大涡流模拟(LES)技术模拟研究了环境压力和热释放率对全尺寸楼梯间烟气运动的影响,结果表明,楼梯井空气质量流量与环境压力正相关,随热释放率增加,烟囱效应增强,烟雾产量增加。目前,高层建筑火灾发展及烟气运动研究主要采用数值模拟与场地实验的方法,以探究火灾动力学行为、优化建筑防火设计,提升人员疏散效率。

相对于普通建筑,高层建筑人员基数大、垂直距离长、设备设施复杂,其火灾下人员疏散安全面临更大挑战。李成龙等<sup>[8]</sup>利用 Building EXODUS 软件模拟建筑人员疏散过程中的拥挤情况,分析了建筑出口状态的疏散影响,结果表明,相同条件下“十”字形安全出口中人员疏散用时更短,拥挤程度更小。李俊梅等<sup>[9]</sup>研究了不同年龄段及烟气环境对人员下行疏散速度的影响,结果表明,浓烟环境中人员沿楼梯下行的速度明显快于无烟和轻烟环境,青少年下行速度明显快于其他年龄段同性别人群。Rasa等<sup>[10]</sup>等分析了90名疏散人员在楼梯上面临不同临时障碍物时的行为表现,确定了影响人员下行疏散过程中行动决策的关键因素。基于装配式高层住宅建筑,刘朝峰等<sup>[11]</sup>采用仿真软件模拟建筑火灾疏散过程,分析火灾烟气

蔓延对疏散影响与电梯协同楼梯疏散策略的可行性。现有建筑火灾疏散安全研究多针对极端危险状态,忽略了建筑实际消防能力,一定程度上造成了救援力量的浪费<sup>[12]</sup>。因此,在建筑火灾疏散研究中,应综合考虑建筑实际消防能力和火灾情况,精准配置消防资源并优化疏散安全性能。

在建筑火灾中,消防设施作为火灾防范和扑救工作的重要构成,与火灾下建筑人员疏散的安全紧密相连<sup>[13]</sup>。随着高层建筑火灾疏散安全问题的复杂化,多种控烟措施协同应用正逐步成为建筑消防未来的发展方向<sup>[14-15]</sup>。在某工厂车间火灾疏散模拟研究中发现<sup>[16]</sup>,能见度是影响工厂车间人员能否全部安全疏散的主要因素,通过增加机械排烟装置和扩宽楼梯可实现建筑火灾下疏散安全性能的改善。Baalisampang等<sup>[17]</sup>基于液化石油气热释放模拟模型,采用CFD方法分析了火灾下建筑疏散通道的能见度,通过优化烟雾探测器布局与机械排烟系统配置,提高了建筑物走廊逃生路径的能见度。程鑫等<sup>[18]</sup>深入探讨了在站台层与站厅层楼梯通道处设置单吹式空气幕对火灾烟气蔓延的影响,结果表明,空气幕作用可延缓烟气层沉降速度,降低热释放速率。针对建筑火灾中烟囱效应风险,Choi等<sup>[19]</sup>在公寓建筑中综合分析了风速和压差对烟雾控制的影响,确定了开放区域顶层防止烟气倒流所需的风速与非开放区域防止烟囱效应所需的压差。目前研究大多集中于单独控烟设施的阻烟效果,较少关注传统控烟设施与空气幕联用时的烟气控制性能。

本文基于某高层建筑火灾疏散案例,通过软件模拟验证可靠性,采用火灾动力学模拟与人员疏散仿真相结合的方法,模拟考虑防排烟设施影响的高层建筑火灾蔓延与人员疏散情况。综合建筑消防系统现状与实际火情特征,在机械排烟单独作用、空气幕单独作用与机械排烟和空气幕协同作用下,分析建筑火灾产物演变过程与人员疏散用时情况,并对比有无防排烟设施作用对火灾下高层建筑人员疏散安全的影响。

## 1 建筑防排烟设施设置

### 1.1 工程概况

某高层民用建筑由A塔、B塔和建筑连廊(25层~28层)三部分组成,建筑总高度99.95 m,共28层,公寓面积36 529.80 m<sup>2</sup>。建筑因B座19层住户内意外失火引燃外保温材料,致使建筑A塔、

B塔和上部连廊内外侧受火,建筑着火层布局及火源位置见图1。

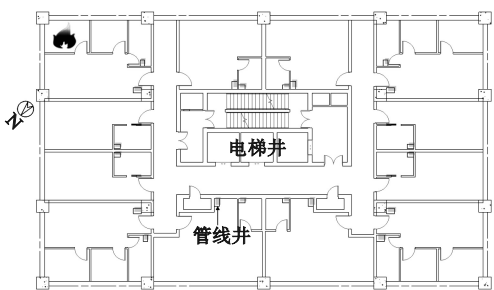


图 1 建筑着火层布局与火源位置

Fig.1 Layout of building fire layer and location of fire source

### 1.2 工况设置

结合建筑实际情况,在不考虑环境风和自然排烟的影响下,将建筑着火层划分为2个防烟分区,建筑着火层机械排烟装置与空气幕装置设置情况见图2。

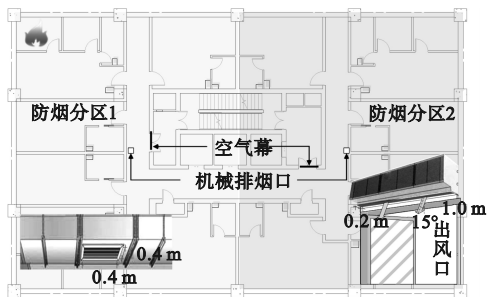


图 2 机械排烟装置与空气幕装置设置

Fig.2 Mechanical smoke exhaust and air curtain installation

机械排烟装置位于着火层走廊中间位置,单个排烟区域面积为 272 m<sup>2</sup>,排烟口大小为 0.4 m × 0.4 m,排烟量为 9 200 m<sup>3</sup>/h,机械排烟开启时间为 80 s。空气幕装置位于建筑着火层安全出口正上方<sup>[20]</sup>,尺寸为 1.0 m × 0.2 m,喷射角度为偏向火源侧 15°,喷射速度 11 m/s。

## 2 模型建立与验证

### 2.1 建筑火灾模型建立

采用火灾数值模拟软件建立足尺建筑火灾模型,模拟建筑火灾蔓延过程。建筑初始环境温度为 25 ℃,相对湿度为 50%,大气压为 101 325 Pa。火源尺寸为 0.5 m × 0.5 m,火源最大热释放率为 2.5 MW,火源热释放速率( $Q$ )的计算式为

$$Q = \alpha t^2 \quad (1)$$

式中: $t$ 为火灾发展时间; $\alpha$ 为火灾增长系数,模拟选取超快速火灾,取值为 0.178。

综合考虑计算精度与耗时,在建筑着火层及以上两层网格精度设置为 0.2 m × 0.2 m × 0.2 m,其余部分网格设置为 0.4 m × 0.4 m × 0.4 m,建筑着火层火灾模型如图 3 所示,建筑材料性质见表 1。

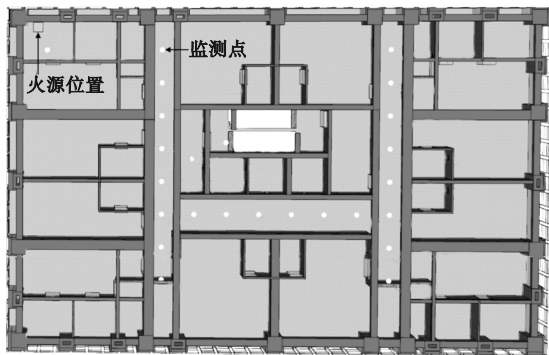


图 3 建筑着火层火灾模型

Fig.3 Modeling of fire at building fire layer

表 1 建筑材料性质

Table 1 Properties of construction materials

材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/ (kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热导率/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热辐射系数
聚氨酯保温板	41	1.38	0.024	0.9
混凝土	2 280	1.04	1.08	0.9

### 2.2 建筑疏散模型建立

采用仿真软件对考虑防排烟设施作用的建筑火灾下人员疏散情况进行模拟,依次对 Geometry Mode(几何模式)、Scenario Mode(情景模式)、Population Mode(人群模式)和 Simulation Mode(模拟模式)四种模式进行设定,构建建筑人员疏散模型如图 4 所示。

在 Geometry Mode 中,构建由二维节点网组成的建筑几何模型,其模型的建立主要包括节点填充与节点连接两部分。在 Scenario Mode 中,基于建筑火灾发展状态依次对危险区域、危险数值及危险情景进行设定。在 Population Mode 中,依据建筑实际居住情况及人员构成,设置疏散总人数为 1 920 人,具体人员数量比例及属性如表 2 所示。将疏散人员以“一人占据一节点”的规则分布于建筑空间。在 Simulation Mode 中,观察人员疏散过程并查看模拟结果。

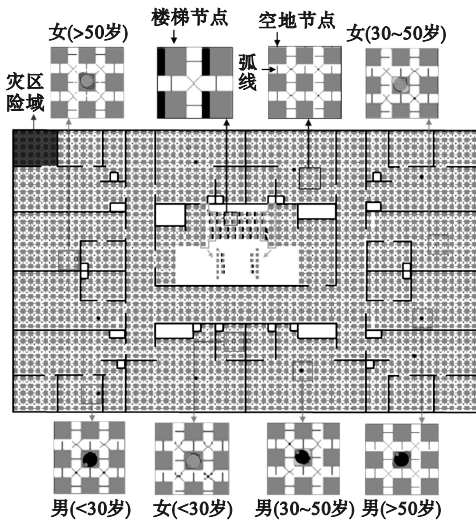


图4 建筑疏散模型

Fig. 4 Building evacuation model

表2 人员数量比例及属性设置

Table 2 Personnel ratio and attributes settings

年龄/岁	性别	比例/%	体重/kg	身高/m	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	耐力/s	反应时间/s
5~18	男	5.0	40~90	1.5~2.0	0.6~1.5	1~5	0~120
19~50	男	40.0					
51~80	男	5.0					
5~18	女	5.0					
19~50	女	40.0					
51~80	女	5.0					

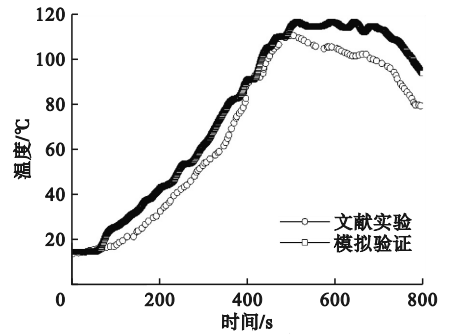
## 2.3 建筑火灾疏散模型验证

### 2.3.1 建筑火灾模型验证

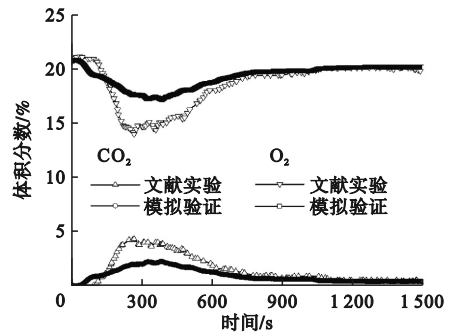
基于多火源厂房建筑燃烧数据<sup>[21]</sup>, 多层建筑燃烧数据<sup>[22]</sup>, 缩尺寸高层建筑燃烧数据<sup>[23]</sup>与建筑保温材料燃烧数据<sup>[24]</sup>, 对火灾模型建模技术进行验证, 建筑火灾模拟结果与文献数据如图5所示。

经火灾模拟得到, 厂房建筑中不同点火时间和瞬时通风条件下的火灾烟气蔓延情况, 其建筑空间10 m高度处烟气层内部温度预测与试验结果误差在1.45%~15.28%; 在多层住宅建筑中, 建筑火灾下气体浓度预测与模拟结果误差在10%以内。

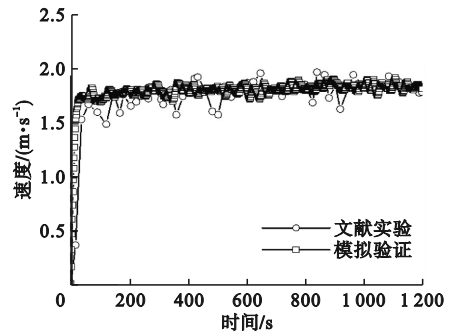
在缩尺寸高层建筑火灾模型中, 建筑楼梯井内0.22 m高度处气流速度预测与试验结果最大误差为17%; 在建筑保温复合体系外墙表面火灾燃烧中, 其火灾竖向温度预测与试验结果平均误差为10.52%, 表明建筑火灾模型能够准确预测多种建筑类型与火灾场景下的火灾蔓延动态与产物发展规律, 建模技术具有一定可靠性。



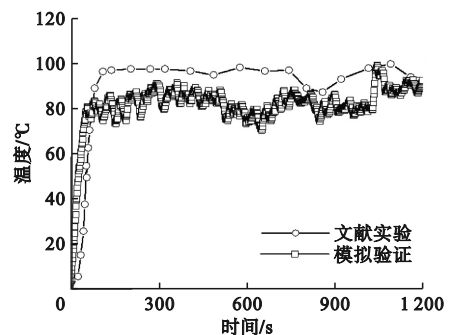
(a) 多燃烧源厂房建筑火灾烟气温度



(b) 多层建筑火灾气体浓度



(c) 高层建筑楼梯井火灾气流速度



(d) 建筑外立面保温材料燃烧温度

图5 建筑火灾模拟验证结果

Fig. 5 Validation results of building fire simulations

### 2.3.2 建筑疏散模型验证

基于1组单空间疏散数据<sup>[25]</sup>、3组高层住宅火灾疏散数据<sup>[11,26-27]</sup>和2组火灾紧急疏散演习数据<sup>[28-29]</sup>验证建模技术, 数据包括不同安全出口宽度、数量和位置的单空间建筑中人员疏散情况; 高层住宅建筑中, 不同建筑布局在正常与火灾条件下人员疏散情况; 酒店与办公建筑中在消防疏

散演习下人员疏散情况,以此验证疏散模型的准确性。建筑人员疏散模型在相应工况下的模拟验证结果如图 6 所示,最终预测疏散时间和文献疏散时间误差为 6.62%,表明疏散模型可以较好地模拟建筑内人员疏散行为,软件建模具有一定的可靠性。

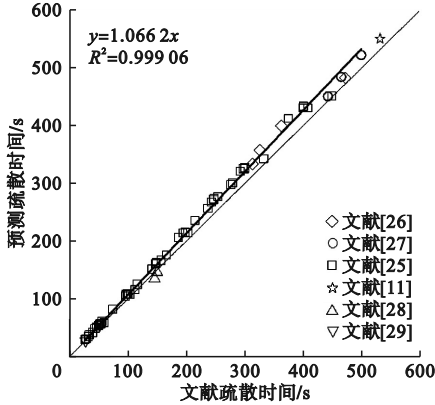


图 6 建筑疏散模拟验证结果

Fig. 6 Validation results of building evacuation simulations

### 3 模拟结果与讨论

#### 3.1 防排烟设施对建筑火灾发展影响分析

##### 3.1.1 火灾危险状态判定

建筑火灾中,高温热辐射、有毒烟气蔓延与能见度降低等火场环境,对建筑结构稳定与疏散人员安全构成双重威胁。研究表明<sup>[30]</sup>,当烟气层高度高于 1.8 m 时,大多数人员的疏散行为不会受

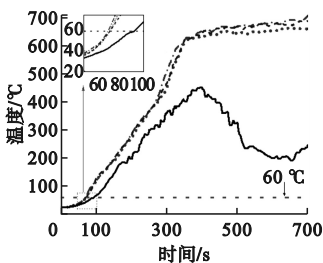
到烟气层影响。因此,以 1.8 m 为最小清晰高度,确定建筑火灾危险判定条件为<sup>[25]</sup>:最小清晰高度处的烟气温度高于 60 °C、CO 浓度达到 450 ppm 或能见度低于 5 m。

##### 3.1.2 火灾发展过程及结果分析

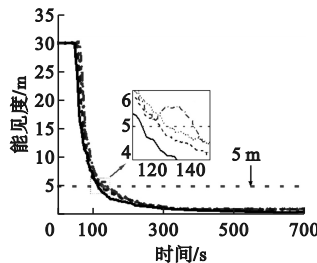
在无防排烟设施工作、空气幕设施单独工作、机械排烟设施单独工作及机械排烟与空气幕设施协同工作的情况下,建筑中火灾温度、能见度与 CO 浓度变化情况如图 7 所示。由图 7 可知,在建筑火灾发展过程中,建筑空间内 CO 气体浓度最先升高,随后环境温度逐渐升高,能见度降低。

建筑着火房间火灾产物演变过程见图 7(a)~7(c),相对于无防排烟设施工作,有防排烟设施工作的情况并未对抑制建筑着火房间的火灾发展带来积极影响,甚至加剧了着火房间温度的升高。通过对建筑火灾蔓延过程的观察发现,由于防排烟设施设置于建筑着火层的走廊与安全出口位置,建筑疏散通道排烟优先于房间排烟,房间内热量未及时排出产生温度积聚。

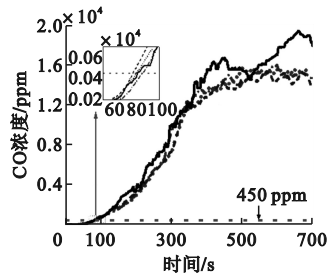
建筑着火层走廊区域火灾产物演变过程如图 7(d)~7(f)所示,相对于无防排烟设施工作,有效的防排烟设施作用可遏制火灾发展态势,显著降低建筑火灾危害。建筑连廊楼层疏散通道区域火灾产物演变过程如图 7(g)~7(i)所示,在着火层防排烟设施的有效运行下,建筑高层区域的疏散通道基本未受到火灾的影响,确保了高层建筑人员疏散的安全性。



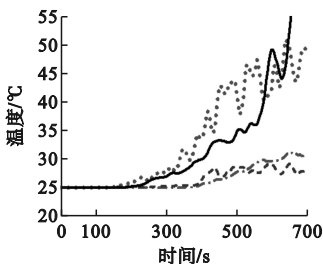
(a) 着火层房间温度



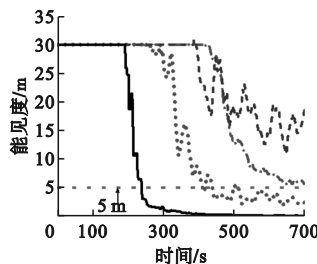
(b) 着火层房间能见度



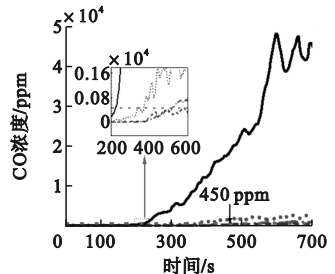
(c) 着火层房间 CO 浓度



(d) 着火层走廊温度



(e) 着火层走廊能见度



(f) 着火层走廊 CO 浓度

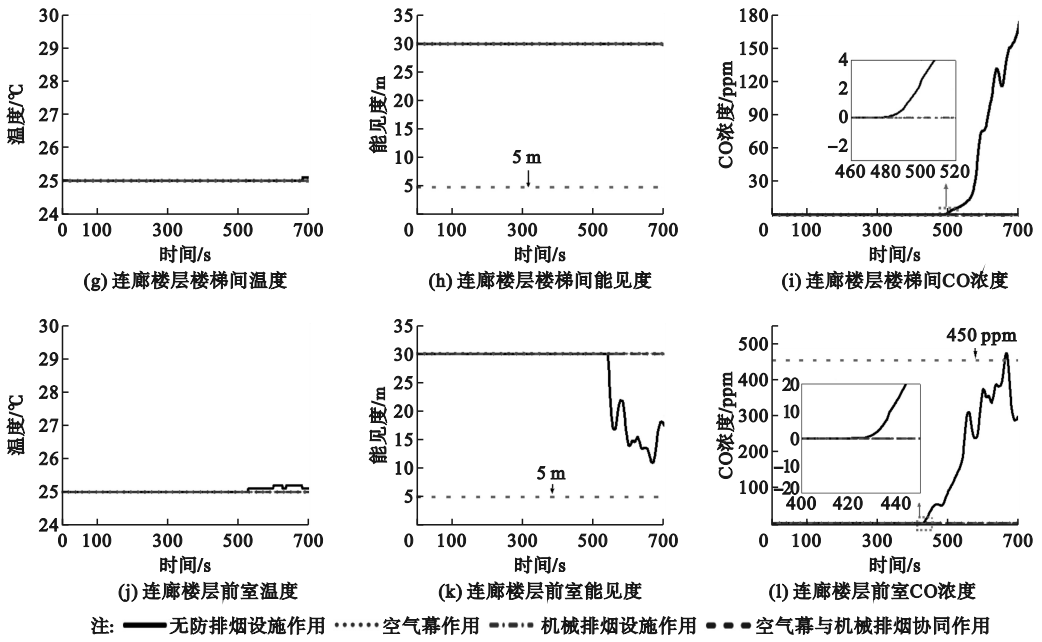


图7 建筑火灾产物演变过程

Fig.7 Evolution of building fire products

### 3.2 防排烟设施对建筑人员疏散影响分析

#### 3.2.1 疏散危险状态判定

火灾下建筑人员疏散中,通常采用可用安全疏散时间(available safety evacuation time, ASET)与必需安全疏散时间(required safety evacuation time, RSET)评价建筑疏散安全性能,两者的计算式<sup>[26]</sup>分别为

$$T_{ASET} = \min \{ T_a, T_b, T_c, T_d \} \quad (2)$$

$$T_{RSET} = T_{alarm} + T_{resp} + T_{move} \quad (3)$$

式中: $T_{ASET}$ 和 $T_{RSET}$ 分别可用安全疏散时间和必需安全疏散时间; $T_a$ 为温度对人体造成伤害的临界时间; $T_b$ 为能见度阻碍人体运动的临界时间; $T_c$ 为CO对人体造成伤害的临界时间; $T_d$ 为其他对人体造成伤害的临界时间; $T_{alarm}$ 为探测报警时间; $T_{resp}$ 为人员反应时间; $T_{move}$ 为人员疏散运动时间。建筑发生火灾时,当 $T_{ASET} > T_{RSET}$ 时,判定为建筑人员疏散安全。因此,为保证火灾下建筑人员疏散过程的安全,建筑消防工作应采取减小RSET或增大ASET的方式实现。

#### 3.2.2 疏散过程及结果分析

在建筑有防排烟设施作用下,着火房间在69.3 s时温度达到危险界限,由于着火房间人员反应时间为0~30 s,且着火区域人员在60 s内已撤离现场,因此,该状况并未对房间人员疏散构成威胁,同时疏散通道中防排烟设施为疏散人员提供了相对安全的环境,疏散过程未受到火灾产物影响。在建筑无防排烟设施作用下,火灾发展至

220 s时着火层疏散通道开始受到火灾产物影响,火灾发展至662 s时连廊层疏散通道受到火灾产物影响,对人员疏散安全构成威胁。

在不同建筑防排烟设施工作条件下,采用人员疏散仿真软件对建筑火灾下人员疏散情况进行模拟,火灾下建筑着火层及连廊层人员疏散路径见图8。

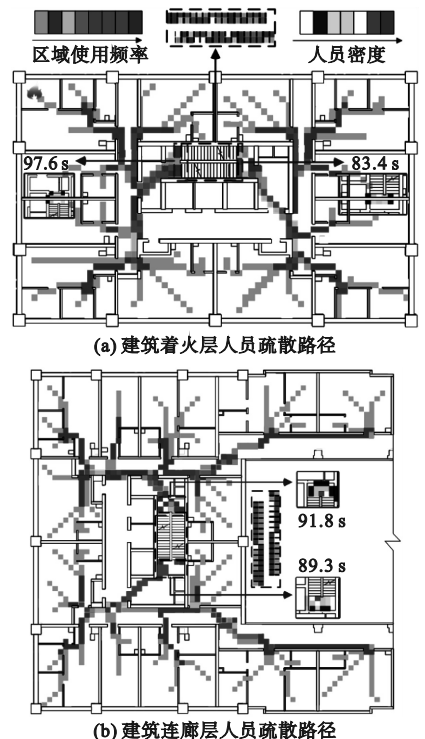


图8 建筑人员疏散路径

Fig.8 Evacuation routes for evacuees

在水平疏散过程中,人员会沿着墙体有序疏散,并未出现人员拥挤情况。当疏散人员进入楼梯间时,受建筑上层下行人员的汇流影响,楼梯平台区域人员密度显著增加,局部区域出现人员拥挤情况。

建筑人员疏散用时如图 9 所示,高层建筑火灾时,正常工作的防排烟设施一定程度上能降低环境的危险性,减少建筑人员疏散用时,且有防排烟设施作用相对于无防排烟设施作用整体人员疏散用时降低 1.54%~4.58%。机械排烟与空气幕装置协同工作下建筑火灾中人员疏散安全性最高,机械排烟装置单独工作下安全性次之,空气幕装置单独工作下安全性较差。

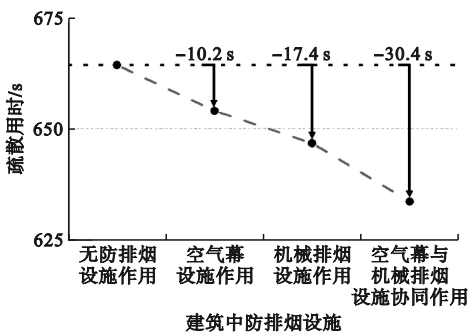


图 9 建筑人员疏散用时

Fig. 9 Building evacuation time

## 4 结论

采用火灾数值模拟与疏散仿真软件模拟高层建筑火灾蔓延和人员疏散过程,分析机械排烟与空气幕设施工作状态对建筑火灾疏散的影响,结论如下。

1) 验证模拟了不同建筑类型与火灾场景下的火灾蔓延与人员疏散过程,对比文献与模拟数据,火灾蔓延结果误差在 17% 以内,人员疏散结果误差在 10% 以内,表明火灾数值模拟与疏散仿真软件建模技术具有一定可靠性。

2) 有防排烟设施作用可有效提升疏散效率及安全性,相对于无防排烟设施作用,整体人员疏散用时降低了 1.54%~4.58%,其中机械排烟与空气幕协同作用的建筑防排烟条件最有利于人员疏散。

3) 防排烟设施等消防设备的配备齐全与正常工作是高层建筑的安全保障。通过对火灾烟气蔓延的有效控制,防排烟系统能够维持疏散通道的可通行性,为人员安全疏散争取时间。

## 参考文献 (References):

[1] CUI H M, CHEN J, DONG Z S, et al. Numerical study of the

fire-smoke temperature law in the shaft of a high-rise building under the chimney effect in winter [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2023, 17 (1): 2222811.

[2] WANG F Q, ZHANG Y X, DING S Z, et al. Optimizing phased-evacuation strategy for high-rise buildings in fire [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 95: 110084.

[3] SHARMA A, MISHRA K B. Performance assessment of stairwell smoke prevention techniques in a model high-rise building [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 53: 102725.

[4] YAN Z, WANG Y, CHAO L X. Simulation study on fire and evacuation of super high-rise commercial building [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52: 103519.

[5] 赵江平, 储小婷, 欧阳的华. 火源空间位置影响下环形走廊安全区域划分研究 [J]. *安全与环境学报*, 2023, 23 (3): 756-764.

ZHAO J P, CHU X T, OUYANG D H. Simulation study on safety zone division of circular corridor under the influence of fire source spatial location [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23 (3): 756-764. (in Chinese)

[6] MCKEEN P, LIAO Z Y. Numerical analysis on the hazards of open stairwell doors in high-rise residential buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54: 104561.

[7] HE J J, HUANG X Y, NING X Y, et al. Modelling fire smoke dynamics in a stairwell of high-rise building; Effect of ambient pressure [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 32: 101907.

[8] 李成龙, 李元洲, 孙焕, 等. 不同形状出口处的人员拥挤研究 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14 (1): 137-141.

LI C L, LI Y Z, SUN H, et al. Study on the layout of different shapes of the exits of the passenger crowds [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14 (1): 137-141. (in Chinese)

[9] 李俊梅, 王泽航, 董启伟, 等. 烟气环境对人员沿楼梯下行速度影响的实验研究 [J]. *建筑科学*, 2022, 38 (2): 181-186, 194.

LI J M, WANG Z H, DONG Q W, et al. Experimental study on the influence of smoke on people's moving speed when going downstairs [J]. *Building Science*, 2022, 38 (2): 181-186, 194. (in Chinese)

[10] RASA A R, XIA L, SONG X H, et al. Understanding human-obstacle interaction dynamics on staircases: Implications for emergency evacuation and fire safety in high-rise buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 98: 111082.

[11] 刘朝峰, 许强, 齐钦, 等. 高层住宅建筑火灾应急疏散模拟与策略研究 [J]. *灾害学*, 2022, 37 (2): 174-181.

LIU C F, XU Q, QI Q, et al. Study on simulation and strategy of fire emergency evacuation in high-rise residential buildings [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37 (2): 174-181. (in Chinese)

[12] GOLSHANI F, FANG L P. Assessing safety in buildings and of evacuees considering fire impacts [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2025, 118: 105259.

[13] YANG Y, DU H B, YAO G. A scientometric research on applications and advances of fire safety evacuation in buildings [J]. *Fire*, 2023, 6 (3): 83.

[14] ZHU B, CONG H Y, SHAO Z Y, et al. Numerical studies on the synergistic effects of smoke extraction and control performance by mechanical ventilation shafts during tunnel fires [J]. *Underground Space*, 2025, 21: 44-64.

- [15] ALIANTO B, NASRUDDIN N, NUGROHO Y S. High-rise building fire safety using mechanical ventilation and stairwell pressurization; A review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104224.
- [16] 战乃岩,尹海燕,姜泽旭,等.基于Pyrosim和Pathfinder大型工厂车间火灾及疏散模拟[J].*吉林师范大学学报(自然科学版)*,2024,45(3):110-117.  
ZHAN N Y, YIN H Y, JIANG Z X, et al. Fire simulation and safe evacuation of large-scale factory workshops based on Pyrosim and Pathfinder[J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(3): 110-117. (in Chinese)
- [17] BAALISAMPANG T, SALIBA E, SALEHI F, et al. Optimisation of smoke extraction system in fire scenarios using CFD modelling[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 149: 508-517.
- [18] 程鑫,卢平,余陶.地铁站台火灾空气幕阻烟的模拟研究[J].*湖北理工学院学报*,2022,38(4):13-17.  
CHENG X, LU P, YU T. Simulation research on fire smoke suppression by air curtain of subway platform fire[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2022, 38(4): 13-17. (in Chinese)
- [19] CHOI Y, YANG S, KIM S. The smoke control system to improve the possibility of evacuation from fire disasters in high-rise buildings[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 59: 103269.
- [20] YAN X, YANG H Y, MO H Q, et al. Numerical simulation on the smoke prevention performance of air curtains in an island-type subway station[J]. *Fire*, 2023, 6(5): 177.
- [21] VIGNE G, WEGRZYŃSKI W, CANTIZANO A, et al. Experimental and computational study of smoke dynamics from multiple fire sources inside a large-volume building[J]. *Building Simulation*, 2021, 14(4): 1147-1161.
- [22] HADJISOPHOCLEOUS G, JIA Q. Comparison of FDS prediction of smoke movement in a 10-storey building with experimental data[J]. *Fire Technology*, 2009, 45(2): 163-177.
- [23] ZHAO G X, BEJI T, MERCI B. Study of FDS simulations of buoyant fire-induced smoke movement in a high-rise building stairwell[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 276-283.
- [24] ZHOU B, YOSHIOKA H, NOGUCHI T, et al. Experimental study on vertical temperature profile of EPS external thermal insulation composite systems masonry façade fire according to JIS A 1310 method[J]. *Fire and Materials*, 2021, 45(5): 648-662.
- [25] 苏勇.高层建筑结构及楼梯类型对人员疏散时间影响的模拟研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
- [26] 刘慧峰.高层住宅建筑火灾发展及人员疏散研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [27] 孙少华.高层住宅公寓火灾发展与人员疏散模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [28] KOBES M, HELSLOOT I, DE VRIES B, et al. Exit choice, (pre-) movement time and (pre-) evacuation behaviour in hotel fire evacuation; Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 3: 37-51.
- [29] GAO J, ZHANG J J, HE J, et al. Experiment and simulation of pedestrian's behaviors during evacuation in an office[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 545: 123749.
- [30] 肖峻峰,胡涛涛,秦荣水,等.通风方式对非对称隧道火灾烟气蔓延的影响[J].*沈阳理工大学学报*,2025,44(1):90-96.  
XIAO J F, HU T T, QIN R S, et al. Influence of ventilation mode on smoke spread in asymmetric tunnel fires[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2025, 44(1): 90-96. (in Chinese)

(责任编辑:徐淑姣)

(上接第88页)

- [17] 何晓川,李英攀,彭波,等.基于DEMATEL-AISM的建筑业数字化转型影响因素研究[J].*工程管理学报*,2022,36(2):18-22.  
HE X C, LI Y P, PENG B, et al. Research on factors influencing the digital transformation of the construction industry based on DEMATEL-AISM[J]. *Journal of Engineering Management*, 2022, 36(2): 18-22. (in Chinese)
- [18] 张洪杰,聂俊杰,陈卫星,等.基于灰色DEMATEL-ISM的加油站安全运营影响因素研究[J].*武汉理工大学学报(信息与工程版)*,2024,46(1):21-27.  
ZHANG H J, NIE J J, CHEN W X, et al. Research on influencing factors of gas station safety operation based on grey DEMATEL-ISM[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2024, 46(1): 21-27. (in Chinese)
- [19] 杨玉胜,王紫武.基于模糊DEMATEL-ISM装配式建筑设计阶段成本影响因素研究[J].*工程管理学报*,2023,37(6):132-137.  
YANG Y S, WANG Z W. Research on cost influencing factors in the design phase of prefabricated buildings based on fuzzy DEMATEL-ISM[J]. *Journal of Engineering Management*, 2023, 37(6): 132-137. (in Chinese)

(责任编辑:徐淑姣)