

赵卫强,袁泉,句海洋.城镇“多合一”建筑火灾灾变机理研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):538-545.DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240045
ZHAO Weiqiang, YUAN Quan, JU Haiyang. Research on catastrophe mechanism of fires in urban multi-functional integrated buildings[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 538-545. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20240045

城镇“多合一”建筑火灾灾变机理研究

赵卫强¹, 袁 泉^{2*}, 句海洋¹

(1. 北京工业职业技术学院 城市安全学院, 北京 100042; 2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要:为解决城镇“多合一”建筑火灾中烟气致灾机理不清、人员疏散困难的问题,采用火灾动力学模拟(FDS)方法,构建典型案例数值模型,进行全过程火灾模拟研究。研究表明:热释放速率(HRR)曲线呈上升、稳定、迅速下降、缓慢下降的阶段特性;HRR变化与一氧化碳体积分数、温度、可见度显著相关,与有效剂量分数(FED)极弱相关。夹芯彩钢板墙烧穿是灾变关键节点,烟气毒性与消光性是主要致灾因素。控制HRR增速及烟气流动可争取约120 s的疏散时间。提出的“断链减灾”技术防御路径为制定此类建筑火灾防控措施提供理论依据。

关键词:火灾动力学模拟;“多合一”建筑;火灾灾变机理;火灾演化规律;烟气毒性

中图分类号:X928.7

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)05-0538-08

Research on catastrophe mechanism of fires in urban multi-functional integrated buildings

ZHAO Weiqiang¹, YUAN Quan^{2*}, JU Haiyang¹

(1. Urban Safety Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of unclear smoke disaster mechanism and difficult evacuation in urban “multi-in-one” building fires, the fire dynamics simulation (FDS) method was used to construct a numerical model of a typical case and carry out the whole process fire simulation research. The results show that the heat release rate (HRR) curve has the stage characteristics of rising, stable, rapid decline and slow decline; the change of HRR was significantly correlated with CO volume fraction, temperature and visibility, and was weakly correlated with effective dose fraction (FED). The burn-through of the sandwich color steel plate wall is the key node of the disaster, and the smoke toxicity and extinction are the main disaster-causing factors. The evacuation time of about 120 s can be obtained by controlling the growth rate of HRR and the smoke flow. The technical defense path of “chain-breaking disaster reduction” proposed by provides a theoretical basis for formulating fire prevention and control measures for such buildings.

Keywords: fire dynamics simulation; “multi-functional integrated” buildings; fire disaster mechanism; fire evolution patterns; smoke toxicity

0 引言

城镇“多合一”建筑(集生产、仓储、居住等功能于一体)因其复杂的空间布局、高密度火

荷载及疏散条件受限等特点,火灾风险尤为突出,是当前城镇消防安全治理的重点和难点^[1]。此类建筑一旦发生火灾,极易形成多点起火、烟气蔓延迅速、人员疏散困难的复杂灾变场景,可能造成

收稿日期:2025-01-12 修回日期:2025-03-28 接受日期:2025-04-12 责任编辑:张雯

基金项目:应急管理部研究中心、全国安全职业教育教学指导委员会科教融汇重点课题(AHLLCX2025008);北京工业职业技术学院科研课题(BGY2025KY-20)

作者简介:赵卫强(1982-),男,河北石家庄人,硕士,副教授,主要从事安全工程技术方面的研究。E-mail: 121168460@qq.com

通信作者:袁 泉(1995-),男,广西桂林人,硕士,助理工程师,主要从事安全工程方面的研究。E-mail: quany952008@163.com

重大人员伤亡和财产损失。深入揭示其火灾灾变机理, 对提升城镇火灾防控能力具有现实意义。

近年来, 火灾动力学模拟 (fire dynamics simulation, FDS) 在建筑火灾发展规律研究中得到了广泛应用。李强等^[2]、谷凡等^[3-4]、袁春燕等^[5]利用 FDS 对建筑群火灾蔓延进行了可视化分析, 研究了特定场景的防火间距及防火性能化设计。CHANTHAKHOT 等^[6]结合火灾动力学仿真与基于智能体的疏散仿真, 提出了一种仿真模型, 以评估火灾烟雾和能见度对疏散人员行为的影响。MYILSAMY 等^[7]采用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 技术进行湍流分析, 将涡耗散模型应用于火灾模拟, 预测了火灾的温度和关键化学组分, 结果与实验压力数据相符。

目前, 针对城镇典型“多合一”建筑的灾变全过程演化机理研究较少, 对火灾关键发展参数与烟气毒性、人员疏散关键时间窗口等指标之间的动态关联性, 以及时间滞后效应的深入探究较少。因此, 本文选取代表性案例, 采用火灾动力学软件 FDS 进行数值模拟, 还原火灾从发生、发展到灾变的全过程时空演化场景。定量分析热释放速率、一氧化碳体积分数、温度、能见度及有效剂量分数等参数在灾变各阶段的动态变化规律及相互关联性。基于模拟结果与事故致因理论, 构建“多合一”建筑火灾的四阶段灾变演化模型。

1 FDS 模型构建

1.1 城镇火灾的 FDS 模型构建

以河南“6·25”重大火灾事故为案例构建模型。该事故发生于 2021 年 6 月 25 日, 河南省柘城县远襄镇北街村, 造成 18 人死亡, 11 人受伤, 直接经济损失 2 153.7 万元, 属重大火灾事故。事故中建筑为典型的“多合一”建筑, 屋内火荷载大, 逃生路线单一, 火灾隐患大, 室内设计与建材不符合消防规范。在较广范围内城镇地区的建筑群落中, 此建筑消防状况具有典型性与代表性。

模型尺寸按事故调查报告中建筑平面图 1:1 比例还原, 模型一层的长为 17 440 mm, 宽为 11 180 mm, 高为 4 100 mm; 二层长为 17 440 mm, 宽为 11 980 mm, 高为 3 800 mm, 普通墙厚度为 200 mm, 被烧穿的聚苯乙烯夹芯彩钢板墙厚度为 300 mm。

为分析火场核心区域燃烧过程和房间内烟气运移, 加密火场核心区域与一层部分区域的网格, 网格尺寸取 100 mm, 其余部分取 300 mm, 模型的网格单元总数为 374 448。忽略模型中无需计算和

划分的部分, FDS 计算区域见图 1。

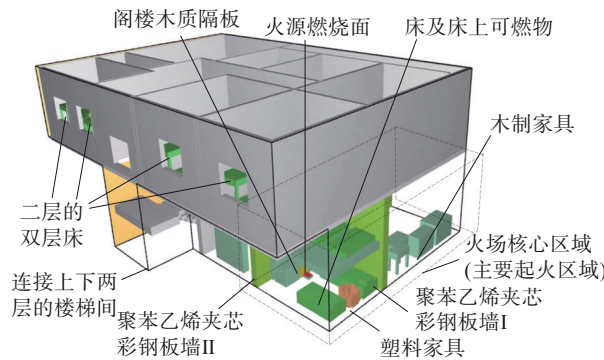


图 1 FDS 计算区域
Fig.1 FDS calculation area

结合火场特征、物件分布与当地当天的气候等因素, 选用以热释放速率 (teat release rate, HRR) 描述的 t^2 火灾模型^[8-10], 设置聚苯乙烯泡沫、木制品、纺织品、瓦楞纸板等物件的密度、燃点及单位面积热释放速率等材料参数^[11-12]。根据火灾发生时气象条件设置初始环境参数, 见表 1。

表 1 模型初始环境参数 Tab.1 initial environmental parameters of the model				
室外风速/ (m·s ⁻¹)	风向/(°)	温度/℃	气压/kPa	相对湿度/%
2.62	140	27	99	63

1.2 模型原理

采用大涡模拟进行计算, 控制方程组基于质量守恒方程、动量方程、能量守恒方程及物质运输方程建立^[13]。质量守恒方程为

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \tilde{u}) = 0, \tag{1}$$

滤波后的动量方程为

$$\partial (\rho \tilde{u}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \tilde{u}^2) = \nabla \cdot \tau - \nabla \cdot \tilde{p} + \rho g + f, \tag{2}$$

能量守恒方程为

$$\partial (\rho \tilde{h}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \tilde{h} \tilde{u}) = d\tilde{p}/dt + \widehat{q}''' - \nabla \cdot \widehat{q}'' + \varepsilon, \tag{3}$$

物质输运方程为

$$\partial (\rho \tilde{Y}_i) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \tilde{Y}_i \tilde{u}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla \tilde{Y}_i), \tag{4}$$

式 (1) ~ 式 (4) 中: ρ 为密度, kg/m³; $\tilde{u}$ 为滤波速度, m/s; τ 为亚网格应力项, Pa; $\tilde{p}$ 为修正压力, Pa; $\tilde{h}$ 为显焓, J/kg; $\widehat{q}'''$ 为化学反应热, W/m³; $\widehat{q}''$ 为热通量, W/m²; $\tilde{Y}_i$ 为组分 i 滤波后的质量分数; D_i 为扩散系数, m²/s; t 为时间, s; g 为重力加速度, m/s²; f 为体积力密度, N/m³; i 为物质组分下标索引。

亚网格应力通过 Smagorinsky 模型封闭, 亚网格应力张量分量为

$$\tau_{ij} = -2\rho v_t (\widetilde{S}_{ij} - 1/3 \widetilde{S}_{kk} \delta_{ij}), \quad (5)$$

式中: $\widetilde{S}_{ij}$ 为滤波应变率张量, s^{-1} ; $\widetilde{S}_{kk}$ 为应变率张量迹, s^{-1} ; δ_{ij} 为 Kronecker delta 函数; i, j, k 为空间方向标识符; v_t 为湍流黏度, m^2/s , $v_t = (C_s \Delta)^2 |\widetilde{S}|$, 其中, C_s 为经验常数, 取 0.2, Δ 为滤波尺度, m 。

1.3 模型测点布置

一层布设 4 个测点, 分别位于主要起火区域、大厅和楼梯口。二层布设 7 个测点, 分别位于楼梯口和各宿舍门口。测点位置示意图 2。探测器能够监测火灾烟气性质及流动情况的一氧化碳体积分数、烟气温度、环境可见度。

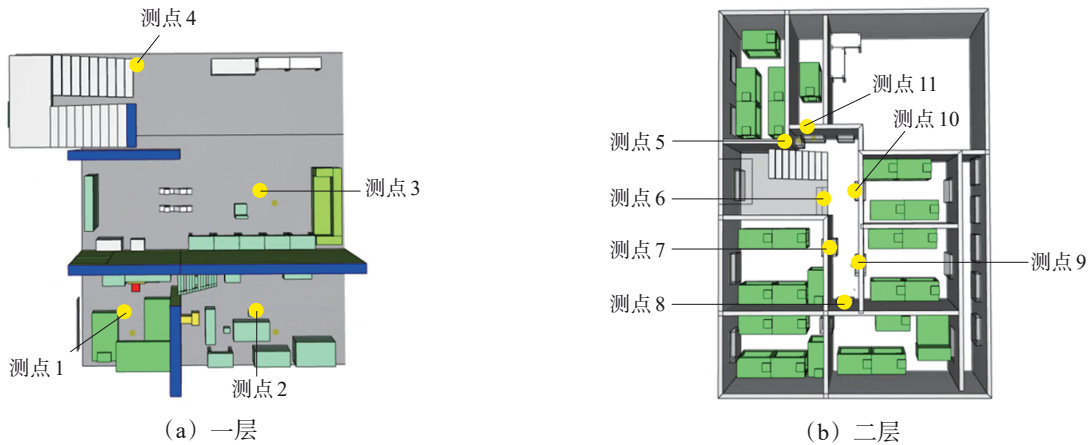


图2 测点位置示意
Fig.2 position of measuring point

2 模拟结果及分析

2.1 火灾发展过程阶段化分析

数值模拟计算 2 400 s, 实际用时约 813 600 s,

火场核心区域火灾发展进程见图 3。得到火灾热释放速率 h 曲线, 并将火灾过程划分为 4 个阶段, 见图 4。

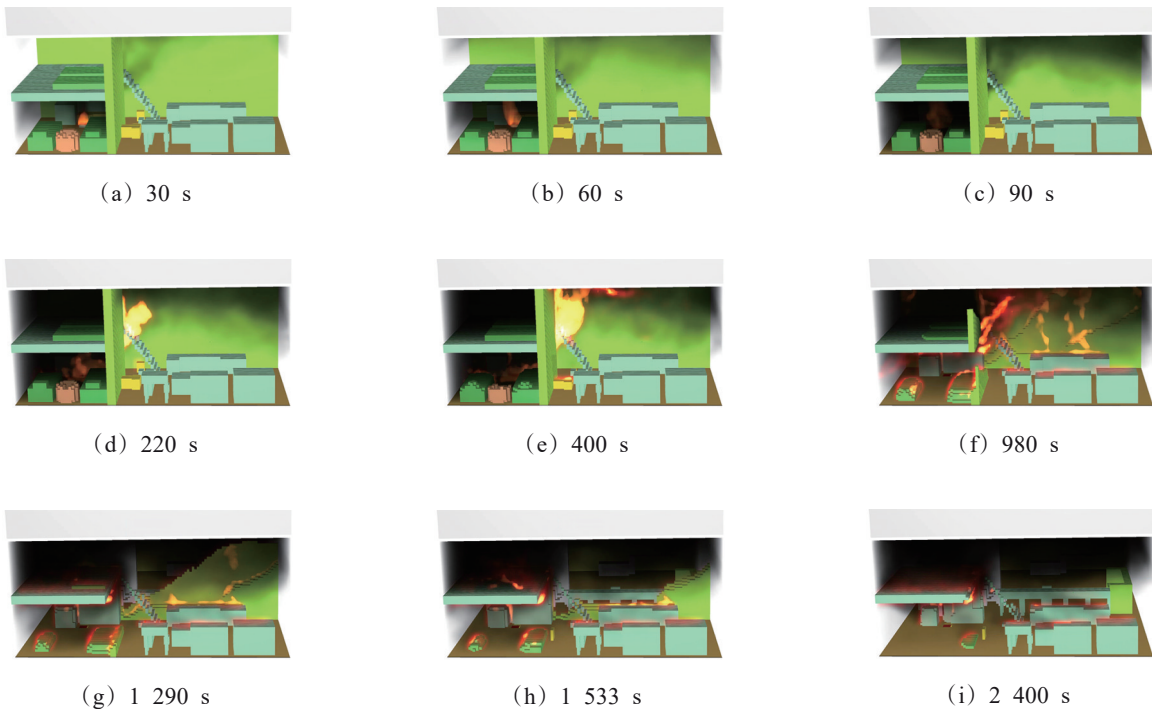


图3 火场核心区域火灾发展进程
Fig.3 fire development process in the core area of the fire scene

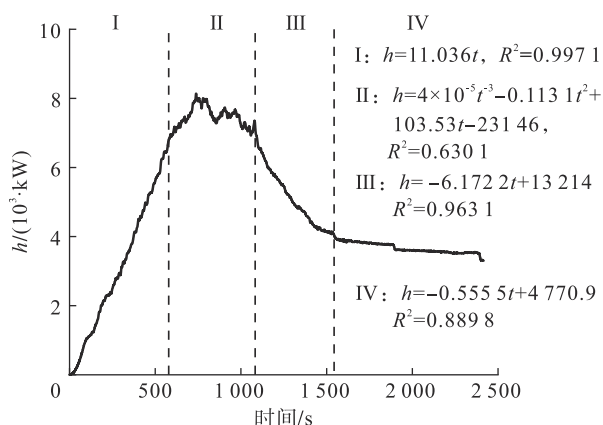


图4 火灾热释放速率

Fig.4 heat release rate

由图3、图4可知,阶段I为0~600 s。在约12 s时,阴燃的蚊香点着紧邻的纸箱,明火出现,并产生少量烟气。60 s时,烟气涌出阁楼下部,并开始灌入阁楼上方。90 s时,火源上方阁楼区域烟气温度快速增长,阁楼下方的环境温度达350℃,火源侧可燃物进入燃烧状态,火源附近夹芯彩钢板墙II受火焰的烘烤。220 s时,阁楼区域烟气温度升至300℃左右,阁楼下床铺及床上衣物被引燃,随后火势蔓延至阁楼木制隔板及阁楼床铺。330 s时,阁楼上下方的平均温度均超过500℃。火灾热释放速率(HRR)随时间迅速增长,原因是失火房间的火荷载太大且可燃物燃点低,在明火和高温烟气的持续作用下相继燃烧。400 s时,外部顶棚温度达400℃,已经进入轰燃阶段^[4]。

阶段II为600~1080 s。750 s时,夹芯彩钢板墙I开始穿孔。980 s时,夹芯彩钢板墙II自火源附近被烧穿,形成空洞,有毒高温烟气随之进入测点3所在的训练室,开始向室内蔓延。阶段II中HRR曲线在7000 kW与8000 kW之间波动,导致拟合效果较差,原因是隔间的木制家具较低矮且间距略大,房间内的烟气体积分数不断上升,氧气含量逐渐减少,限制了火灾继续快速蔓延。说明发生轰燃后,火灾由受燃料表面的热解速率控制,转变为受空气流动速率控制。

阶段III为1080~1533 s。1290 s时,夹芯彩钢板墙II的空洞面积接近原墙面积的50%。1533 s时,烟气的蔓延不再受到夹芯彩钢板墙II的影响。阶段III中HRR曲线衰减率为6.172 kW/s,速度较快,原因是纺织物、纸板之类火荷载大又易燃,可燃物的燃烧反应接近尾声,可燃物总量明显减少。

阶段IV为1533~2400 s。此阶段HRR曲线衰减率为0.556 kW/s,下降缓慢。训练室可燃物间隔

大,明火不再向室内方向蔓延,所以HRR曲线没有较大起伏。在2400 s模拟结束时,木制家具表面仍在缓慢燃烧放热。符合事故报告中木制家具尽管过火而表面发黑,但火灾后却基本得到留存的现象,证明了模拟的可靠性。

2.2 烟气一氧化碳体积分数、烟气温度及可见度

火灾亡人的主要原因是高温有毒烟气致人缺氧、中毒。火灾中人员的危险临界条件包括对流热、辐射热、烟气能见度和烟气毒性几个方面。安全逃生疏散时的临界条件^[15-17]如下:环境温度不高于60℃,可见度大于10 m,烟气减光系数小于0.1 m⁻¹,烟气均温小于180℃,一氧化碳体积分数低于0.25%。事故全时段各测点的一氧化碳体积分数、温度、可见度见图5~图7。

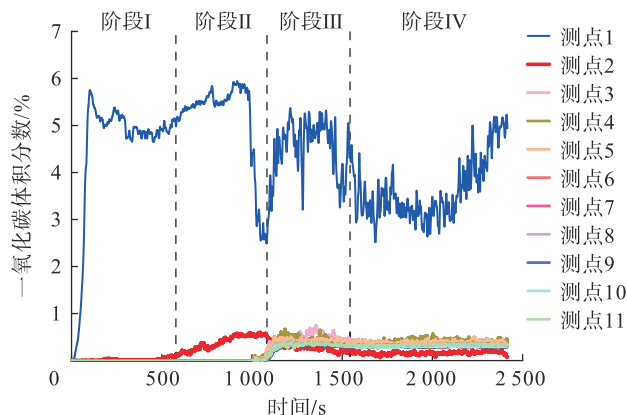


图5 各测点体积分数

Fig.5 volume fraction of each measuring point

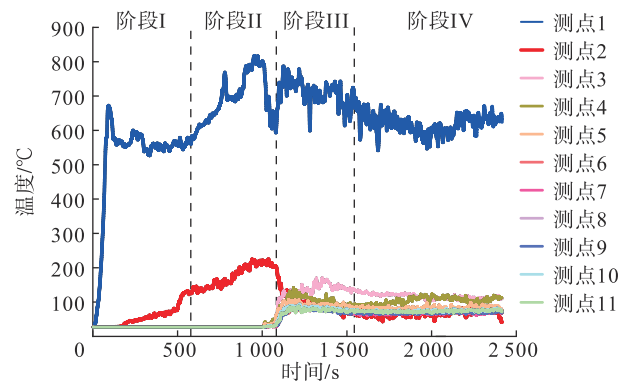


图6 各测点温度

Fig.6 temperature of each measuring point

由图5可知,测点1~11的一氧化碳体积分数曲线在4个阶段内具有明显的分区特性。测点1位于火场核心位置,对影响火灾灾变的各项指标最为敏感。测点1的一氧化碳体积分数在初始时迅速上升,并在接下来近800 s的时间内保持在5.00%附近。随着燃烧变为通风控制型,一氧化碳体积分数在阶段II后期迅速下降。随着夹芯彩钢板墙II

的燃烧穿孔、氧气的补充及高体积分数一氧化碳向训练室扩散,测点1处一氧化碳再次回升。测点2的一氧化碳体积分数在阶段I、阶段II中线性上升,在阶段III下降,在阶段IV基本稳定在0.18%。分析测点3~11可知,自夹芯彩钢板墙II穿孔后,居人建筑二层各处一氧化碳体积分数在160 s内迅速升至0.30%以上,并在阶段III有不同程度的拱形波动,在阶段IV较稳定。

由图6和图7可知,火场核心区域环境均温为650℃左右,一层其他区域温度均低于200℃,二层各测点均低于125℃。另外,随着HRR曲线进入下降的阶段III和阶段IV,环境温度逐渐趋于稳定,且曲线拟合公式中斜率绝对值越接近0,其温度曲线的波动程度越小,环境温度越稳定。

火灾发生后,受浓烟消光作用,能见度从30 m骤降至5 m以下,耗时仅120 s。夹芯彩钢板墙II的逐渐穿孔,扰动了火场核心区域的测点2,使已经基本稳定的烟气层开始脉动起伏。这意味着,火场中烟气可流动区域的拓展,对原本稳定的烟

气层产生不稳定的脉动影响。

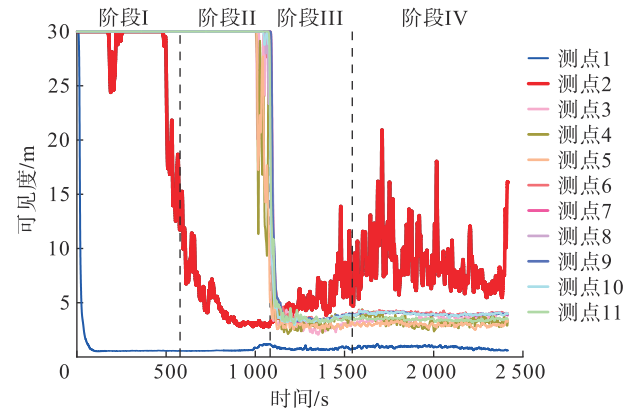


图7 各测点能见度

Fig.7 visibility of each measuring point

从物因角度来看,温度并非火灾灾变的主因,灾变的关键是燃烧和高温热解作用下产生的大量浓烟进入二层走廊,烟气毒性及消光性共同作用,推动火灾逐步向灾演化,最终导致人员死亡。各阶段一氧化碳分布及切片见图8。

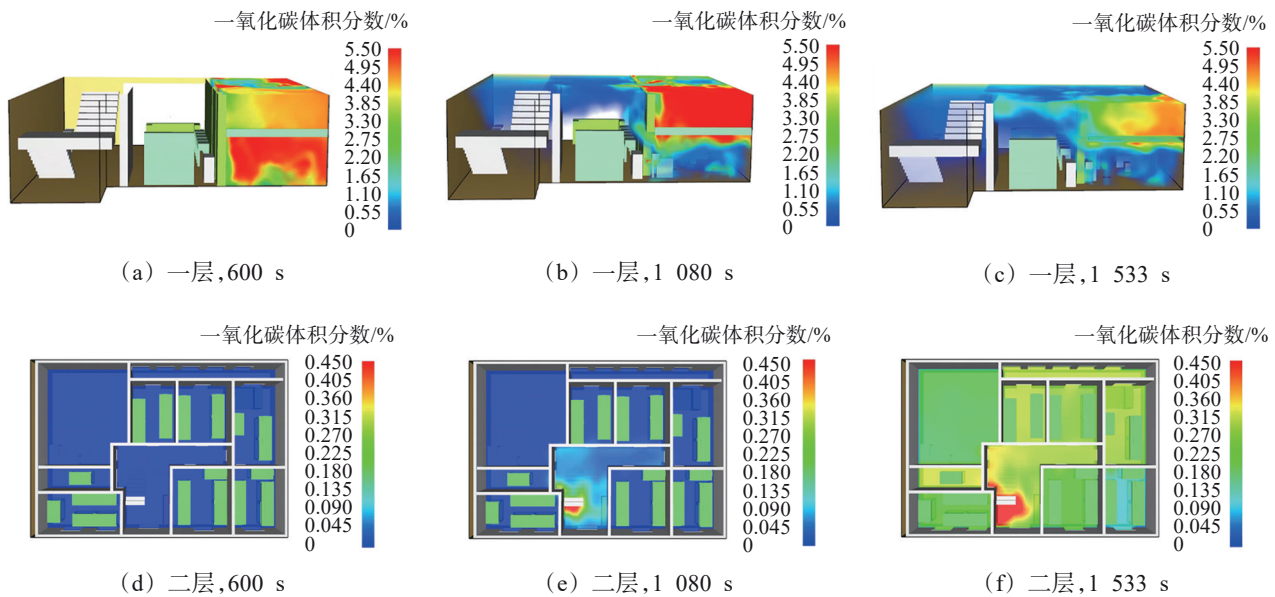


图8 各层一氧化碳体积分数

Fig.8 volume fraction of carbon monoxide in each layer

2.3 事故建筑FED分析

本研究采用有效剂量分数(fractional effective dose, FED)对火灾烟气毒性进行动态评估。FED值 F 表征火灾中特定位置处毒性气体累积暴露水平,为混合毒性气体累积剂量与致死剂量的比值。当 $F>0.1$ 时,表明人员因吸入过量毒性气体(如一氧化碳)丧失逃生能力,故取 $F=0.1$ 作为灾变判

据。事故中各测点FED曲线见图9。

测点3~11的 F 由0升至0.1的平均间隔时间约120 s,灾变进展迅速。其中,测点7、测点9最晚出现灾变,二者于1 163 s时到达 $F=0.1$,此时可判定火灾导致人员安全状况完全灾变。此外,HRR曲线的4个阶段对范围0到0.2之间的FED曲线无明显分区作用,即FED对HRR的变化敏感性较弱。

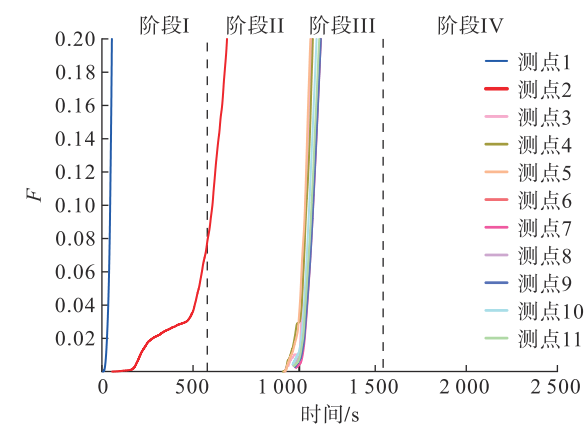


图 9 各测点 FED 值

Fig.9 FED values at each measurement point

3 城镇火灾灾变演化规律探析

通过解构典型案例时空灾变过程^[18-20], 结合城镇火灾特征, 构建 4 阶段灾变演化模型, 见图 10。

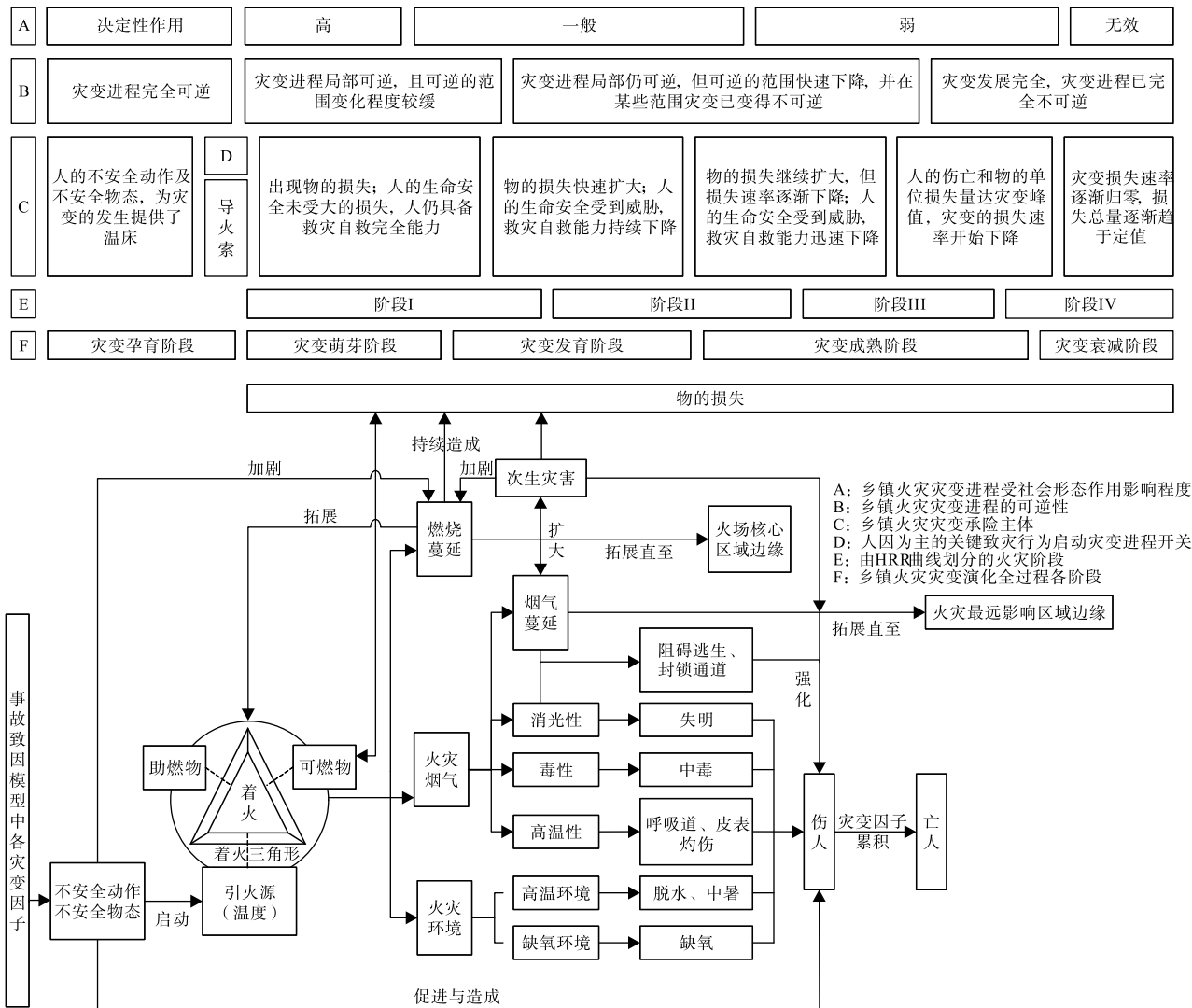


图 10 城镇“多合一”建筑火灾四阶段灾变演化模型

Fig.10 four-stage catastrophe evolution model of urban “multi-functional integrated” building fires

城镇建筑结构与人员分布相对简单, 灾变前期进程易受社会因素影响, 如居民干预、管理政策等, 早期介入可显著改变灾变走向。城镇居民对小火具备一定处置能力 (灾变孕育期高可逆性), 但消防知识匮乏^[21], 形成“小火亡人”风险。火灾从成熟期向完全灾变过渡时呈速度快、损失大、非线性不可逆的特征。火荷载集中导致 HRR 阶段性跃升 (见图 4), 引发一氧化碳体积分数倍增 (大于 0.30%, 见图 5) 与能见度骤降 (小于 5 m, 见图 7), 验证了烟气毒性及消光性是灾变升级的核心动力。

结合灾变演化规律和灾害学中断链减灾基本原理, 构建火灾断链减灾技术路线, 见图 11。提出了灾变四阶段 (孕育期-发展期-临界期-灾变期) 的针对性措施, 构建“监测预警-物理阻隔-紧急疏散-高效救援”全链条防控范式。

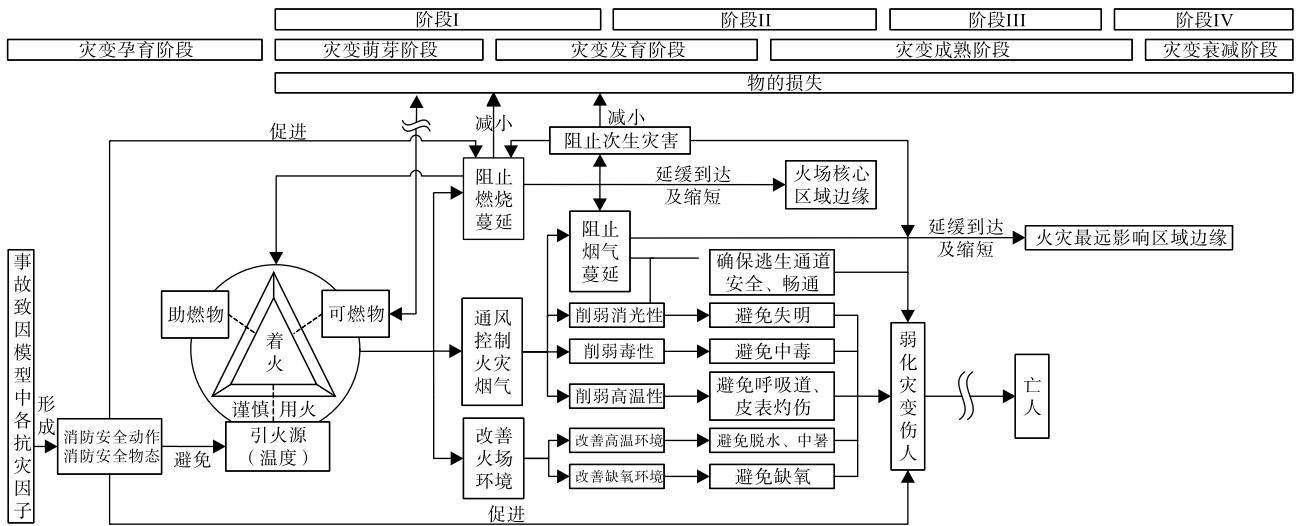


图11 火灾断链减灾技术路线

Fig.11 technical route of mitigating fire accidents by disrupting the disaster chain

4 结论

(1) HRR 曲线呈现上升、稳定、迅速下降、缓慢下降四阶段特征, 各阶段与一氧化碳体积分数、温度、可见度显著相关 ($R^2 > 0.63$), 但与 FED 值弱相关。表明烟气毒性累积存在滞后效应, 控制 HRR 增速可延缓灾变进程。

(2) 夹芯彩钢板墙烧穿是灾变升级的关键节点, 引发的烟气流动导致建筑二层一氧化碳体积分数在 160 s 内激增至 0.30% 以上, 可见度骤降至 5 m 以下, 证实烟气毒性 (FED) 与消光性是人员伤亡的主因。

(3) 基于灾变链阻断原理, 控制 HRR 增速及烟气流动可获得 120 s 黄金疏散窗口。据此构建的“断链减灾”技术路径, 如通过安装防火隔墙、设置独立疏散通道等措施, 可有效截断灾变链式反应。

(4) 建立的四阶段灾变演化模型量化了“小火高可逆→轰燃临界→灾变升级→完全灾变”的动态过程, 该模型对同类“多合一”建筑具有普适性, 但针对商业综合体等复杂场景需进一步验证网格敏感性。

参考文献(References):

- [1] 谷凡, 郭莽声, 白月, 等. 夹芯镀锌钢板复合墙板对木结构建筑外部火灾蔓延的延缓与阻断作用研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 723-730.
- [2] 李强, 郝爱玲, 沈应波. 传统木结构建筑火灾蔓延特性试验研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(6): 773-778, 784.
- [3] LI Qiang, HAO Ailing, SHEN Yingbo. Experimental study on fire spread characteristics of traditional timber structure buildings [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(6): 773-778, 784.
- [4] 谷凡, 郭莽声, 白月, 等. 夹芯镀锌钢板复合墙板对木结构建筑外部火灾蔓延的延缓与阻断作用研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 723-730.
- [5] GU Fan, GUO Qiaosheng, BAI Yue, et al. Study on barrier effect of sandwich galvanized steel composite wallboard on outdoor fire spread of timber buildings[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2024, 40(4): 723-730.
- [6] 谷凡, 张玉玉, 姜喻涵, 等. 不同风速条件下村镇木结构建筑防火间距的数值模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 854-861.
- [7] GU Fan, ZHANG Yuyu, JIANG Yuhuan H, et al. Numerical simulation analysis of fire separation distance of rural timber structure buildings under different wind speeds[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(5): 854-861.
- [8] 袁春燕, 郎雨佳, 王坤, 等. 砖木结构古建筑不同风速下火灾蔓延规律研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 643-648.
- [9] YUAN Chunyan, LANG Yujia, WANG Kun, et al. Analysis on the fire spread law of brick-wood structured ancient buildings under different flow velocity[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(5): 643-648.
- [10] CHANTHAKHOT W, RANSIKARBUM K. Integrated IEW-TOPSIS and fire dynamics simulation for agent-based evacuation modeling in industrial safety[J]. Safety, 2021, 7(2): 47.
- [11] MYILSAM Y D, OH C B, JEON J. Large eddy simulations of pool fires and backdraft in a compartment using FDS and FireFOAM[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 72: 106337.
- [12] 李明海, 兰亚乐, 马骁, 等. 建筑火灾全局动态疏散路径规划研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 205-215.
- [13] LI Minghai, LAN Yale, MA Xiao, et al. Research on global dynamic

- path planning for evacuation during building fires[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1): 205-215.
- [9] 叶继红, 孙浩东. 受限空间建筑火灾蔓延影响因素对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(10): 31-41.
- YE Jihong, SUN Haodong. Comparative experimental study on factors affecting fire spread in enclosed buildings[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(10): 31-41.
- [10] 田垚, 常可可, 李奥. 基于FDS的古建筑火灾发展过程研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(1): 101-104.
- TIAN Yao, CHANG Keke, LI Ao. Study on fire development process of ancient building based on FDS[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(1): 101-104.
- [11] HOPKIN C, SPEARPOINT M, HOPKIN D. A review of design values adopted for heat release rate per unit area[J]. Fire Technology, 2019, 55(5): 1599-1618.
- [12] HOPKIN C. Defining a maximum heat release rate probability distribution function for design fires in sprinkler-protected residential buildings[J]. Fire and Materials, 2025, 49(1): 102-115.
- [13] 辛大波, 李佳宇, 张洪福, 等. 四叶片小型水平轴风力机尾流特征的数值模拟[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(3): 306-312.
- XIN Dabo, LI Jiayu, ZHANG Hongfu, et al. Numerical simulation on wind turbine wake characteristics of a small horizontal-axis wind turbine with four blades[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2023, 45(3): 306-312.
- [14] 韦善阳, 石美, 杨欢, 等. 木结构吊脚楼火灾轰燃临界值预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(2): 35-40.
- WEI Shanyang, SHI Mei, YANG Huan, et al. Prediction of critical value of fire flashover in stilted buildings with timber structure[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(2): 35-40.
- [15] 张彤彤, 樊乐, 吴苏皖, 等. 火灾环境下的超高层建筑标准层疏散走道优化设计[J]. 灾害学, 2024, 39(3): 54-59, 65.
- ZHANG Tongtong, FAN Le, WU Suwan, et al. Optimization design of evacuation walk for standard floors of super high-rise buildings caught in fire[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(3): 54-59, 65.
- [16] 黄丽蒂, 罗开洲, 刘莹, 等. 老年公寓火灾场景人群疏散模拟[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(3): 137-142.
- HUANG Lidi, LUO Kaizhou, LIU Ying, et al. Simulation study on fire evacuation of senior apartment[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(3): 137-142.
- [17] 张明空, 胡小兵, 王静爱. 考虑火灾动态扩散过程的高层建筑疏散路径研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 32-38.
- ZHANG Mingkong, HU Xiaobing, WANG Jing'ai. Research on evacuation route from high-rise building under real effect of fire spread[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 32-38.
- [18] 周扬, 夏登友, 高平. 城市商业综合体建筑火灾事故演变路径分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 170-174.
- ZHOU Yang, XIA Dengyou, GAO Ping. Analysis of evolution path of urban commercial complex fire accident[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 170-174.
- [19] HUANG C J, CHIANG T Y. An analysis of risk factors for emergencies in the Taipei dome complex[J]. Buildings, 2022, 12(4): 403.
- [20] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第6版的研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 12-19.
- FU Gui, CHEN Yiran, XU Surui, et al. Detailed explanations of 24Model and development of its 6th version[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 12-19.
- [21] 王文和, 刘林精, 张爽, 等. 城市综合应灾能力的耦合协调度评估[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(6): 79-84, 93.
- WANG Wenhe, LIU Linjing, ZHANG Shuang, et al. Evaluation of coupling coordination degree of urban comprehensive disaster response capability[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(6): 79-84, 93.