

# 基于 PyroSim 的老年公寓火灾烟气 运动规律模拟

贾世龙<sup>1</sup>, 綦 韦<sup>1,2</sup>, 李 畅<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁理工职业大学建筑学院, 辽宁 锦州 121007)

**摘要** 目的 对某高层老年公寓火灾烟气分布特征和人员疏散规律进行研究, 科学地进行疏散路径决策, 提高疏散效率, 以减少老年公寓火灾造成的人员伤亡。方法 以苏州某高层老年公寓为研究对象, 通过 PyroSim 软件进行火灾仿真模拟, 分析火灾发生后温度、能见度、O<sub>2</sub> 浓度、CO 浓度和烟气层高度的变化规律。结果 火灾模拟考虑温度、能见度、O<sub>2</sub> 和 CO 浓度、烟气层高度 5 个因素的人体耐受临界值, 得到可用疏散时间为 172 s; 位于 2 层及以上楼层的老年人在 134 s 之前可通过 3 个楼梯间中的任意一个进行疏散, 134 s 到 142 s 之间可通过 2、3 号楼梯间进行疏散, 142 s 后只能通过 3 号楼梯间进行疏散。结论 得出老年公寓火灾燃烧产物的时空分布规律, 计算出疏散时间, 为老年公寓火灾疏散提供理论依据。

**关键词** 老年公寓; 火灾烟气; PyroSim; 数值模拟; 疏散时间

中图分类号 TU352.5

文献标志码 A

## Simulation of Fire Smoke Movement Law in Senior Apartment Based on PyroSim

JIA Shilong<sup>1</sup>, QI Wei<sup>1,2</sup>, LI Chang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Architecture, Liaoning Vocational University of Technology, Jinzhou, China, 121007)

**Abstract:** In order to develop evacuation route scientifically, improve evacuation efficiency, and reduce casualties caused by fire in elderly apartments as far as possible, the fire smoke distribution characteristics and evacuation rules of a high-rise elderly apartment were studied. Taking a high-rise elderly apartment in Suzhou as the research object, PyroSim software was used to conduct fire simulation to analyze the changes of temperature, visibility, O<sub>2</sub> concentration, CO concentration and smoke layer height after fire. Considering the critical values of human tolerance of five factors including temperature, visibility, concentration of O<sub>2</sub> and CO, and height of flue gas layer, the available safety egress time is 172 s. Elderly people located on the 2nd floor and

above can be evacuated through any of the 3 stairwells before 134 s, through stairwell 2 and 3 between 134 s and 142 s, and only through stairwell 3 after 142 s. The temporal and spatial distribution of fire products in the elderly apartment was obtained, and the evacuation time was calculated to provide theoretical basis for the fire evacuation of elderly apartments.

**Key words:** senior apartment; fire smoke; PyroSim; numerical simulation; evacuation time

防灾减灾是火灾研究的重要方面,近年来,世界各地老年公寓火灾事故频发,老年人成为火灾中最大的受害群体。了解老年公寓中火灾烟气的运动规律,以缩短老年人疏散时间。G. Hadjisophocleous 等<sup>[1]</sup>使用 FDS 软件对一座 10 层塔楼进行火灾模拟研究,并将其与实际试验数据进行了对比,最后得出,计算机仿真可以比较准确地模拟出高层建筑火灾发展过程及烟气蔓延情况,为排烟和疏散等提供一定数据指导,推动了计算机火灾数值模拟的发展。T. Tanaka 等<sup>[2]</sup>研究了小尺寸竖井内的烟气特性,结合大量试验数据,得到烟气在竖井内的扩散规律,为了解高层老年公寓楼梯间烟气蔓延情况提供理论基础。王伟昱等<sup>[3]</sup>利用 FDS 软件模拟了某居民楼火灾情况,分析了火灾引起的 CO 浓度、能见度、烟气层高度变化情况,给出了影响人员安全的极限值,为实际应用提供参考。王维平<sup>[4]</sup>建立了某医院建筑模型,通过火灾仿真软件模拟多个工况下的 CO 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度、O<sub>2</sub> 浓度、能见度和温度等变化情况,结合人员疏散软件进行模拟,提出火灾产物会降低人员疏散速度。刘海舰<sup>[5]</sup>以某老年公寓为研究对象,使用 FDS 仿真软件进行火灾模拟,总结出温度并不是消防安全、合理疏散需要着重考虑的关键因素,火灾产生的烟气对建筑内人员安全的影响更大。上述研究多集中于普通人使用的公共建筑且未考虑水喷淋系统的作用,缺少对老年人照料设施类建筑火灾蔓延方面的研究<sup>[6-8]</sup>。

基于以上研究,笔者以苏州某高层老年公寓为研究对象,通过 PyroSim 软件进行水喷淋系统作用下的火灾仿真模拟,通过对温度、能见度、O<sub>2</sub> 和 CO 浓度以及烟气层高度

的时空分布特征进行分析,得到老年人最长可用疏散时间为 172 s。位于 2 层及以上楼层的老年人在 134 s 之前可通过 3 个楼梯间中的任意一个进行疏散,134 ~ 142 s 可通过 2、3 号楼梯间进行疏散,142 s 后只能通过 3 号楼梯间进行疏散。

## 1 老年公寓火灾模型

### 1.1 模型建立

该老年公寓平面呈“L”型,建筑面积为 9 331.2 m<sup>2</sup>,层高为 3.3 m,共 8 层,建筑长 102 m、宽 33 m;东西向走廊长 94.2 m,南北向走廊长 25.3 m,疏散走廊净宽为 1.9 m。首层设有 3 个通往室外的安全出口;2~8 层每层均设有可以通往 1 层的 3 个楼梯和 4 部电梯。为使火灾模拟更加符合实际情况,模型在餐厅内布置桌椅,卧室内布置衣柜、床头柜,休息室布置沙发和茶几。

参照老年公寓 CAD 平面图纸绘制 Revit 三维建筑模型。首先绘制标高、轴网以确定垂直和水平方向的定位;其次,根据水平轴线与竖向轴线的位置依次对内外墙、门窗、楼梯和楼板等地上主体部分进行绘制。其构件清单如表 1 所示。

表 1 模型构件清单

Table 1 Model component list

专业分类	构件名称	建模内容
建筑构件	填充墙	几何尺寸、结构层和面层材质
	门、窗	洞口、材质、样式
	楼梯	梯井、栏杆、踏步、休息平台尺寸
	屋面	坡度
	其他	雨棚、散水的几何尺寸、材质
结构构件	柱	横截面尺寸、结构层和面层材质
	墙	几何尺寸、结构层和面层材质
	梁	几何尺寸、结构层和面层材质
	板	厚度、结构层和面层材质
设备及装饰构件	消防设备 桌椅等障碍物	感应探测器、喷淋的位置、数量 几何尺寸、材质

建模完成后需要进行模型检查,针对“错、漏、碰、缺”和构件位置偏移等现象进行检验修正。最后以 IFC 格式作为中间文件导出,并将其导入到 PyroSim 软件中建立模型,如图 1 所示。

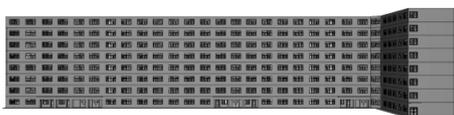


图 1 老年公寓火灾模型

Fig. 1 The fire model of senior apartment

PyroSim 中网格划分的大小对于模拟结果具有十分重要的影响。一般来说,网格大小的经验值  $\delta$  取为火焰特征直径  $D^*$  的 1/4 到 1/16,  $D^*$  通过计算可得<sup>[9]</sup>:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为火源热释放速率, kW;  $\rho_{\infty}$  为空气密度, 一般取为  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ;  $c_p$  为空气比热, 取为  $1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_{\infty}$  为环境空气温度, 取  $293 \text{ K}$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

经过计算,  $D^*$  为  $1.388 \text{ m}$ , 为了提高仿真速度且保持仿真精度, 网格大小取为  $D^*$  的 1/5.5, 设为  $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ , 且由于此老年公寓模型为 L 型, 建筑物东西长度较长, 若使用一个矩形网格模型, 会造成无建筑物区域网格较多, 降低仿真速度, 因此使用多重网格, 建筑物南北向网格为 Mesh01, 东西向网格命名为 Mesh02, 参数如表 2 所示, 最终网格个数共 2 408 320 个。

表 2 网格参数

Table 2 Mesh parameters

网格名称	轴	最小值/m	最大值/m	网格数
Mesh01	X	-1.0	103.0	416
	Y	-1.0	10.0	44
	Z	0.0	26.5	106
Mesh02	X	91.0	103.0	48
	Y	-24.0	-1.0	92
	Z	0.0	26.5	106

## 1.2 火灾场景设置

依据最不利原则, 起火位置设在火灾发生几率比较高或产生危害最大的区域<sup>[10]</sup>。火灾发生时烟气等产物先在房间和走廊内横向传播, 进入楼梯间后受到“烟囱效应”影响, 火灾产物不断向上蔓延<sup>[11]</sup>, 据此判定, 首层起火危险性更大。因此, 将起火位置设在一层起居室内。由于该老年公寓设有喷淋系统, 根据《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB51251—2017)<sup>[12]</sup>的规定, 设定火源最大单位热释放速率(HRR)为  $2500 \text{ kW/m}^2$ , 火源面积为  $1 \text{ m}^2$ ; 老年公寓中存放大量衣物、被褥等, 根据《消防安全工程》<sup>[13]</sup>的规定, 设定火灾增长类型为快速火, 火灾发展系数  $\alpha$  取为  $0.0469 \text{ kW/s}^2$ 。为便于分析, 将 3 个楼梯间分别命名为 1 号、2 号、3 号楼梯间, 按建筑平面将模型划分为 4 个区域: A、B、C、D, 起火点位于 B 区域内, 如图 2 所示。

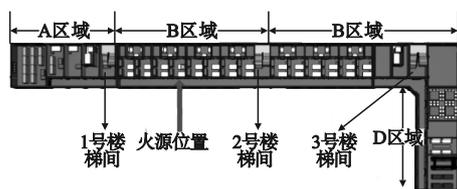


图 2 1 层平面图和火源位置

Fig. 2 Layout of the first floor plan and fire location

该老年公寓地处江苏省, 属于温带季风向亚热带季风过渡的气候, 查阅物理参数设定其环境温度为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 模拟时间为  $600 \text{ s}$ 。着火房间上方装有光电感烟探测器。火灾报警  $10 \text{ s}$  后着火房间门开启,  $67.4 \text{ s}$  后其他房间及楼梯间的门开启, 火灾产生的烟气等迅速向外扩散。

## 1.3 测点和切片设置

杨胜州等<sup>[14-15]</sup>将火灾中人员的死亡原因归纳为化学窒息死亡、单纯窒息死亡、吸入黑烟、吸入热气。因此, 笔者综合考虑各个因素, 将温度、能见度、 $\text{O}_2$  和  $\text{CO}$  浓度、烟气层高度 5 个因素的人体耐受临界值作为判断火灾达到危险状态的标准, 如表 3 所示。

表3 各因素的危险临界值

Table 3 The critical risk values for each factor

火灾产物	温度 / $^{\circ}\text{C}$	能见度 /m	CO 体积分数/%	O <sub>2</sub> 体积分数/%	烟气层高度/m
危险临界值	$\geq 70$	$\leq 10$	$\geq 0.2$	$\leq 15$	$\leq 2$

火灾发生时,建筑内人员的疏散路线为房间—走廊—楼梯间—安全出口,因此,在走廊及楼梯间关键位置布置5种相应的监测设备。

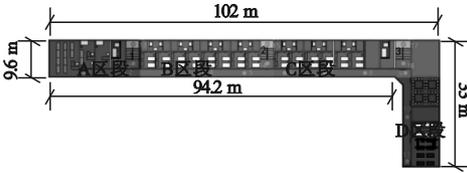
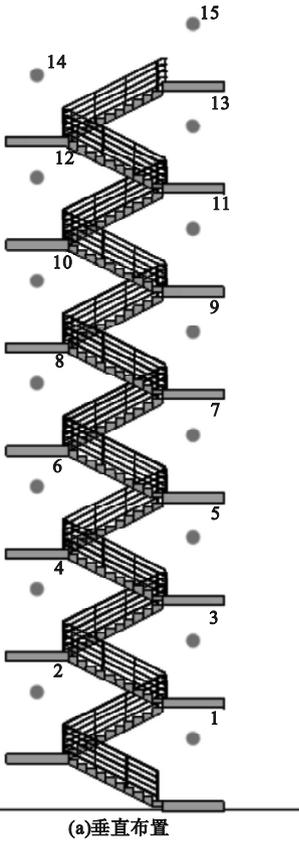


图3 走廊监测设备布置

Fig. 3 The layout of monitoring equipment at corridor



(a)垂直布置



(b)水平布置

图4 楼梯间监测设备布置

Fig. 4 The layout of monitoring equipment in stairwells

## 2 模拟结果分析

PyroSim 火灾动态仿真软件能够对火灾发生过程中建筑内的烟气、温度和有害气体浓度等进行仿真模拟。图5为火灾热释放速率模拟结果。热释放速率最终稳定在设定值2 500 kW附近,证明模拟网格大小设置适当。

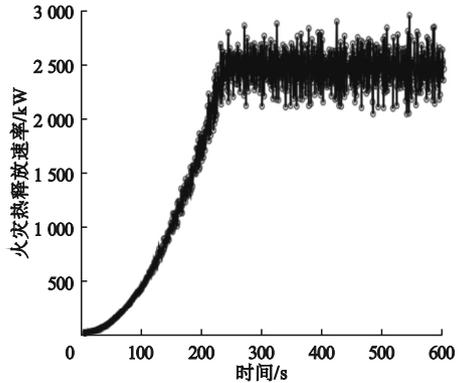


图5 火灾热释放速率变化曲线

Fig. 5 The release rate of fire heat

### 2.1 温度分布规律

图6为1层温度监测结果图。监测结果显示,2~8层温度均在危险临界值以下,起火位置所在的1层受火灾影响最为严重。在109 s时B区域走廊温度迅速达到70 $^{\circ}\text{C}$ ,到394 s时整个B区域的温度达到危险值,火灾发展到456 s时B区域走廊大部分喷淋设备已启动,直到模拟结束,整个B区域不可用于人员疏散。A、C、D区域走廊在模拟时间内温度波动很小,低于临界值。

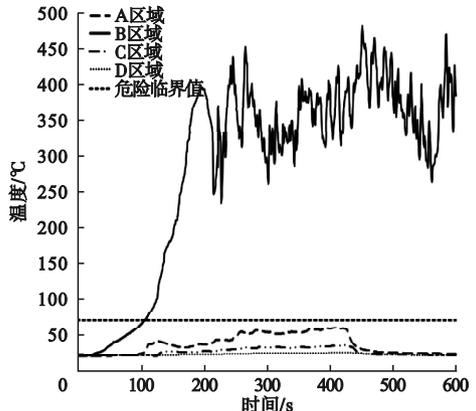


图6 1层走廊温度变化曲线

Fig. 6 Temperature curve on the 1st floor corridor

3个楼梯间的温度均在安全限值以内,纵向温度切片如图7所示,其中1号和2号楼梯间受火灾影响相对较大。绘制1、2号楼梯间温度曲线如图8所示,由于5层及以上温度未受火灾影响,维持在环境温度20℃,因此5~8层楼梯间温度曲线没有绘出。

从图8中可以看出,2个楼梯间最高温度出现在1楼楼梯间入口处,楼层数越高温度所受影响越小;各层温度始终保持在70℃以下,因此,3个楼梯间均是有效的逃生通道。

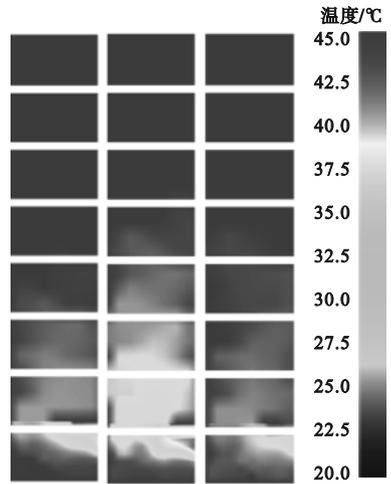


图7 三个楼梯间的温度切片

Fig. 7 Temperature slices of three stairwells

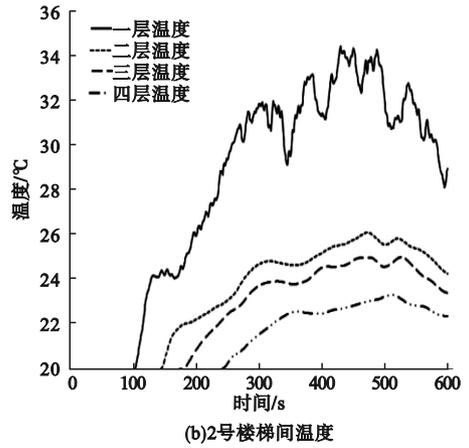
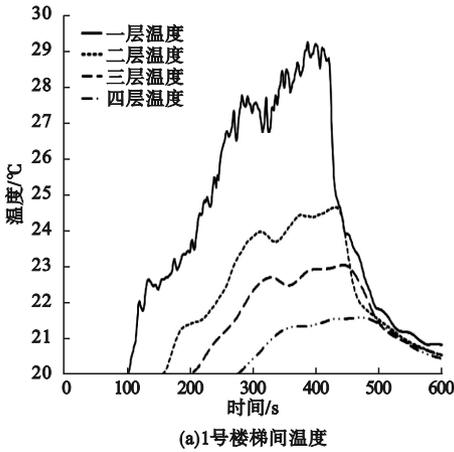


图8 1号和2号楼梯间温度曲线

Fig. 8 Temperature curves of stairwell 1 and 2

2.2 能见度分布规律

图9为起火层的能见度云图,黑色区域的能见度小于或等于危险临界值10 m,30 s

后1层的能见度开始降低,172 s时整个起火层能见度均下降到10 m以下。

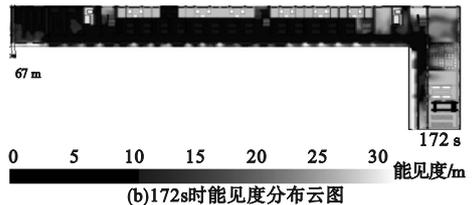
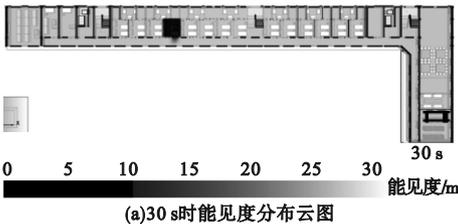


图9 起火层能见度分布云图

Fig. 9 The cloud map of visibility distribution at the floor on fire

图10为起火层各区域走廊的能见度变化曲线。B区域走廊下降最快,在36 s时即

达到危险值,A、C、D区域走廊分别在98 s、130 s、172 s时能见度降到10 m。

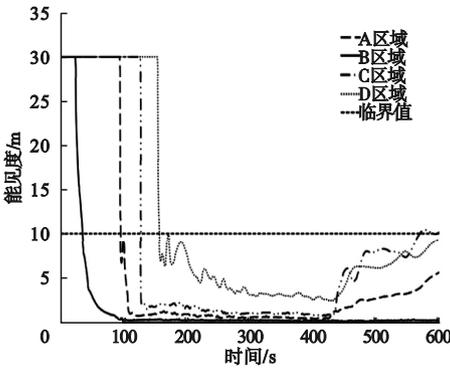


图 10 起火层能见度情况

Fig. 10 Visibility of the fire floor

图 11 为一层 3 个楼梯间的能见度变化曲线。1 号楼梯间在 390 s 时能见度达到 10 m, 在 489 s 时降到最低, 接近最低值; 2 号楼梯间从一层开始迅速向上蔓延, 在 246 s 后能见度达到临界值, 340 s 后 4 层及以下能见度均达到临界值; 3 号楼梯间由于距离较远, 烟气进入较慢, 在 460 s 达到临界值。

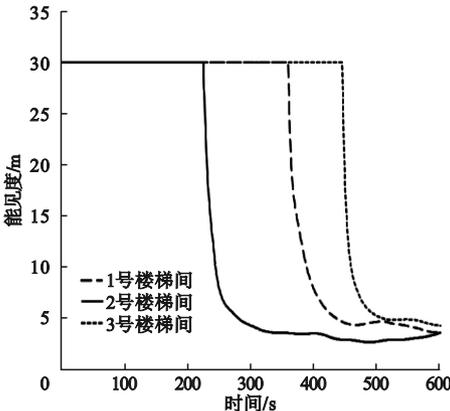


图 11 楼梯间能见度曲线

Fig. 11 The visibility curve of stairwell

### 2.3 CO 体积分数分布特征

起火层 B 区域 CO 体积分数在 350 s 时达到 0.2%, 但后期波动较大, 其他区域走廊的 CO 体积分数均在 0.004% 以下, 二层及以上楼层基本不受 CO 体积分数影响(见图 12)。

### 2.4 O<sub>2</sub> 体积分数分布特征

起火层 O<sub>2</sub> 体积分数分布曲线如图 13 所示。在 325 s 时起火层 B 区域走廊的 O<sub>2</sub> 体积分数降到危险临界值 15%, 其余区域走廊的 O<sub>2</sub> 体积分数略有下降, 对人员通行影响不大; 其他各层 O<sub>2</sub> 体积分数没有明显下降。

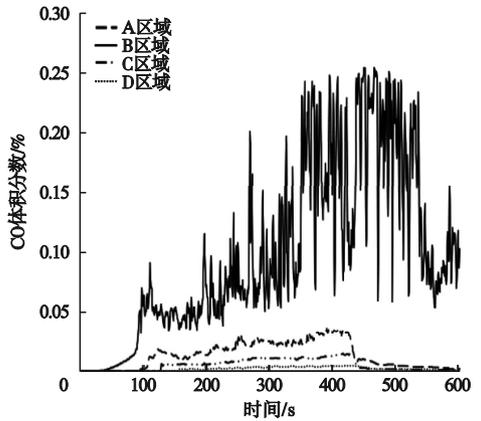


图 12 起火层走廊 CO 体积分数

Fig. 12 CO concentration at the fire floor corridor

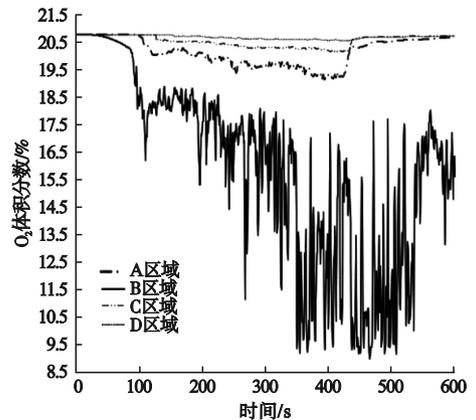


图 13 起火层的 O<sub>2</sub> 体积分数曲线

Fig. 13 O<sub>2</sub> concentration curve at the fire floor

图 14 为 3 个楼梯间的 O<sub>2</sub> 体积分数曲线。起火层楼梯间入口处 O<sub>2</sub> 体积分数最低, 3 个楼梯间的 O<sub>2</sub> 体积分数波动很小, 与正常值 21% 相差不大。

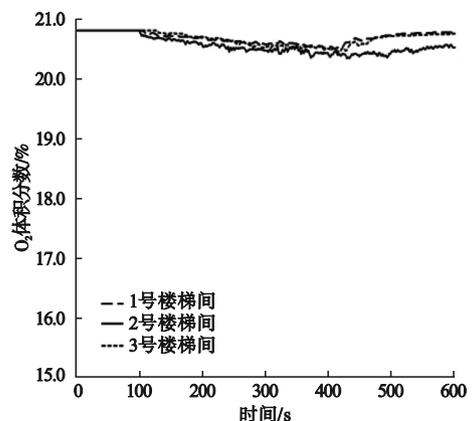


图 14 各楼梯间的 O<sub>2</sub> 体积分数曲线

Fig. 14 O<sub>2</sub> concentration curve at the stairwell of fire floor

### 2.5 烟气层高度分布特征

图 15 为老年公寓内的烟气蔓延情况。起火层 A 区域走廊烟气层高度在 123 s 时迅速降低到 2 m 以下, B 区域走廊烟气层稳定在 2 m 以下的时间为 108 s, C、D 区域分别在 130 s、306 s 时降到 2 m 以下;其余楼层走廊烟气层高度均未达到临界值,对人员疏散几乎不产生影响。

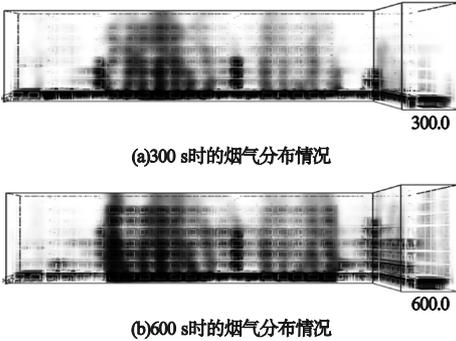


图 15 烟气分布情况

Fig. 15 The smoke distribution

图 16 为起火层各楼梯间的烟气层高度变化曲线。3 个楼梯间的烟气层分别在 134 s、142 s、172 s 时降到临界值以下,最终均维持在 1.8 m 左右。其余楼层烟气层高度均未达到临界值。

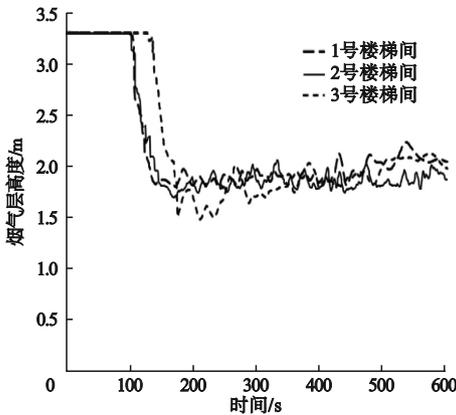


图 16 各楼梯间的烟气层高度

Fig. 16 The smoke level of the stairwells

### 2.6 模拟结果分析

对模拟结果进行分析,以得到可用疏散时间,表 4 为起火层各区域中各因素下的可用疏散时间。

表 4 起火层各区域可用疏散时间

Table 4 The available safety egress time in each area

区域	各因素下可用疏散时间/s				烟气层高度
	温度	能见度	CO 体积分数	O <sub>2</sub> 体积分数	
A 区域走廊	—	98	—	—	123
B 区域走廊	394	37	350	325	108
C 区域走廊	—	130	—	—	130
D 区域走廊	—	172	—	—	306
1 号楼梯间	—	390	—	—	134
2 号楼梯间	—	246	—	—	142
3 号楼梯间	—	460	—	—	172

当某一区域的某一项因素达到危险临界值后,该区域即不可用于人员疏散。尽管能见度会影响使老年人疏散速度,但没有致命伤害,故 A 区域人员应能在 123 s 内疏散到安全区域, B、C、D 区域人员的可用疏散时间分别为 108 s、130 s、306 s。烟气最先蔓延到起火层的楼梯间内,而其他楼层人员疏散又必须要经过楼梯间的一层,因此以 3 个楼梯间的一层可用疏散时间的最大值作为整个建筑物可用疏散时间<sup>[16]</sup>。根据表 4 中数据,1 号、2 号、3 号楼梯间的可用疏散时间分别为 134 s、142 s 和 172 s,当 1 号和 2 号楼梯间达到危险状态后,人员还可通过 3 号楼梯间进行疏散,位于 2 层及以上楼层的老年人在 134 s 之前可通过 3 个楼梯间中的任意一个进行疏散,134 ~ 142 s 可通过 2、3 号楼梯间进行疏散,142 s 后只能通过 3 号楼梯间进行疏散。故全楼可用安全疏散时间取为最大值 172 s。

### 3 结论

(1) 温度对于起火房间附近以及 3 号楼梯间影响较大;能见度对于起火楼层、以上楼层以及 2、3 号楼梯间影响较大;起火房间受烟气层高度的影响最严重,对其他区域影响不足以对人员疏散构成危害;火灾产物对于着火房间附近以及 1、2 号楼梯间影响较大,由于东西向走廊较长,且“L”形走廊在拐角处对火灾烟气产生阻碍作用,只有少部分烟

气流入3号楼梯间。

(2)计算得到老年公寓在火灾时的可用疏散时间最大值为172s,且3号楼梯间可使用时间最长。

## 参考文献

- [1] HADJISOPHOCLEOUS G, KO Y J. Using a CFD simulation in designing a smoke management system in a building [C]. IEEE: Simulation conference, 2006.
- [2] TANAKA T, FUJITA T, YAMAGUCHI J. Investigation into rise time of buoyant fire plume fronts [J]. International journal on engineering performance-based fire codes, 2000, 2(1): 14-25.
- [3] 王炜罡, 文虎, 贾勇锋. 基于FDS的高层居民楼火灾模拟[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(2): 314-320.  
(WANG Weigang, WEN Hu, JIA Yongfeng. High-rise residential building fire simulation based on FDS [J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2020, 40(2): 314-320.)
- [4] 王维平. 医院类高层建筑人员疏散数值模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
(WANG Weiping. Numerical simulation of evacuation in hospital class of high rise buildings [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.)
- [5] 刘海舰, 张文修. 养老院建筑火灾案例分析及数值模拟[J]. 门窗, 2019(23): 35-38.  
(LIU Haijian, ZHANG Wenxiu. Nursing home building fire case analysis and numerical simulation [J]. Doors & windows, 2019(23): 35-38.)
- [6] PROULX G. Occupant behaviour and evacuation [C]//Proceedings of the 9th international fire protection symposium. Iceland: Iceland Fire Authority, 2001: 219-232.
- [7] 刘翔. 不同重量行李对楼梯中人员疏散速度影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
(LIU Xiang. An experimental study on luggage of different weight on the speed on the stair [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.)
- [8] 李胜利, 李孝斌. FDS火灾数值模拟[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.  
(LI Shengli, LI Xiaobin. FDS numerical fire simulation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.)
- [9] 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 of crowd evacuation in fire scene of elderly apartment [J]. China safety science journal, 2020, 30(3): 137-142.)
- [10] SUN Q, TURKAN Y. A BIM-based simulation framework for fire safety management and investigation of the critical factors affecting human evacuation performance [J]. Advanced engineering informatics, 2020, 8(44): 13-28.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑防排烟系统技术标准: GB51251—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.  
(Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for smoke management systems in buildings: GB51251—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.)
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 消防安全工程: 第4部分 设定火灾场景和设定火灾的选择: GB/T31593. 4—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Fire safety engineering-part 4: selection of design fire scenarios and design fires: GB/T31593. 4—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.)
- [13] 杨胜州, 莫善军, 潘迁宏. 地下交通枢纽站火灾烟气控制数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 48-52.  
(YANG Shengzhou, MO Shanjun, PAN Qianhong. Numerical simulation of fire smoke control in underground transportation hub station [J]. Journal of safety science and technology, 2012, 8(12): 48-52.)
- [14] 张江涛, 王景刚, 龚凯. 基于FDS的办公大楼火灾数值模拟分析[J]. 建筑安全, 2015, 30(2): 14-17.  
(ZHANG Jiangtao, WANG Jinggang, GONG Kai. Numerical simulation analysis of office building fire based on FDS [J]. Construction safety, 2015, 30(2): 14-17.)
- [15] 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 Chaofeng, XU Qiang, QI Qin, 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.)
- [16] 田鑫, 苏燕辰, 李冬等. 地铁车站火灾疏散仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 333-337.  
(TIAN Xin, SU Yanchen, LI Dong, et al. Fire safety evacuation simulation analysis of subway station [J]. Science technology and engineering, 2017, 17(16): 333-337.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 范丽婷)