

高层建筑的火灾模拟与逃生行为研究*

王海蓉¹, 陈清光², 余愿¹, 袁智², 晏建波¹, 梁栋¹

(1. 中山大学工学院//广东省消防科学技术重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 广东省安全生产技术中心, 广东 广州 510060)

摘要:以广州天河某商业中心为例,运用FDS和Pathfinder模拟器,研究了火灾场景时高层建筑内的烟气蔓延速度、温度、CO浓度和能见度的变化规律,以及室内人员的疏散行为特征。结果表明:①高层建筑中,在人员可用的安全疏散时间内,对人员逃生起决定作用的是中间过程阶段。在中间过程阶段,人员的移动速度会因路径选择难度的加大而变得缓慢,若适当地进行诱导,将有利于提高疏散速度。②本例中,仅通过疏散楼梯来进行人员疏散是不切实际的。考虑高温有毒的烟气有可能通过缝隙蔓延进电梯内,消防疏散电梯应仅停避险层、底楼或临近火灾区域的楼层。③FDS可以直接导入Pathfinder人员模拟器。通过FDS模拟高层建筑火灾,并结合Pathfinder进行人员疏散模拟,能根据实际情况找出最佳疏散时间,从而为实际应用中的疏散演练和应急诱导疏散规划等问题提供理论依据。

关键词: 高层建筑; 火灾模拟; 人员逃生

中图分类号: X928.7 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2014)03-0150-05

Study on Simulation and Escape Behavior of High-rise Building Fire

WANG Hairong¹, CHEN Qingguang², YU Yuan¹, YUAN Zhi², YAN Jianbo¹, LIANG Dong¹

(1. Department of Engineering, //Guangdong Provincial Key Laboratory of Fire Science and Technology Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Center of Guangdong provincial safety production technology, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The commercial center of Guangzhou Tianhe is as an example for the study of the smoke spread speed, temperature, the CO concentration, variation of visibility and evacuation behavior characteristic of indoor personnel in the high-rise building fire scene through FDS and Pathfinder. The simulation results show that the intermediate stage process plays a decisive role on personnel evacuation during the available safe evacuation time in the high-rise building fire scene. In the intermediate stage process, personnel movement speed becomes slow because of the increase of path selection difficulty. The evacuation speed will improve if suitably induced or increase diversion facilities to avoid congestion. In this case, only through the evacuation stairs for evacuation is unrealistic. Considering the high temperature gas toxic may spread through the gap into the elevator, fire evacuation elevator should only stop hedging layer, ground floor or floor near the fire area. FDS case can directly import into the Pathfinder simulator. The best evacuation time will be find out according to actual situation through the FDS simulation of high-rise building fire combined with Pathfinder simulation of evacuation in the actual case.

Key words: high-rise building; fire simulation; evacuation

* 收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2011A030200004)

作者简介: 王海蓉(1974年生),女;研究方向:燃烧与安全;E-mail: wanghairong11@126.com

在各种类型的火灾中，建筑火灾尤其是高层公共建筑火灾的危害最为直接、严重，对人类的伤害最大^[1-2]。随着经济的不断繁荣，在建和准备投入使用的高层建筑还将不断增加，而且其规模和结构形式也将不断提高、更新。高层建筑布局紧密、防火分隔差、防火分区小，电力负荷较大，一旦发生火灾，因其内部封闭性强，通风和换热主要依靠通风系统，散热缓慢，内部空间温升快，发烟量较大。火灾产生的有毒气体会使疏散缓慢的人员窒息或视野模糊，易出现相互拥挤、践踏的现象，造成人员大量伤亡^[3-6]。因此，高层建筑在火灾发生时的人员逃生和应急疏散非常困难。

环境中烟毒气的蔓延、通风系统对烟毒气的控制都将通过人员的心理因素体现在疏散速度上。同时，不同场所中，人员疏散的规则也具有其场所自生的特点。英国格林威治大学的 BuildingExodus、英国爱丁堡大学的 Simulex 等疏散模型主要考虑建筑物的人口承载量，强调宽度和容量的作用，并未考虑环境和人群之间的相互影响^[7-10]。实际上，在人员疏散过程中，人与人之间、人与环境（如建筑物）之间的相互作用对人员疏散的行为、速度和效率起着关键作用^[11]。Pathfinder 人员模拟器，引入了人与人之间的摩擦力，以及人与建筑之间的排斥力。排斥力表现为人与人之间及人与墙之间躲闪、避让的行为。在人员密集的情况下，摩擦力往往对人员疏散起着比排斥力更大的作用。摩擦力表现为人与人、人与墙接触时的减速行为。因此，本文基于 FDS 和 Pathfinder 模拟器，对广州天河某商业中心进行了火灾过程和人员应急疏散行为的模拟仿真，以期为该场所提供一种可靠的安全疏散方式，同时也为这类建筑的疏散性能设计提供理论依据。

1 火灾场景

本文的研究对象共 49 层，建筑面积达 23 万 m²，建筑的第 6-39 层为写字楼，第 40-49 层为酒店公寓。第九层的平面布局如图 1 所示。图中，黄色部分为疏散楼梯，楼梯两侧分布有两台消防电梯，四周为办公室以及会议室。建筑首层高度 10 m，设有高效的分流系统和 3 个出口。按照国标规范，建筑的第 10、22、34 层设置为避难层。

2 FDS 和 Pathfinder 模型的建立

PyroSim 是美国 Thunderhead engineering 公司开发的火灾模拟（FDS）前处理和后处理软件，它最

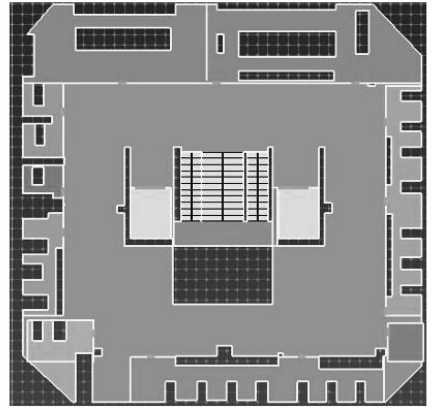


图 1 第九层的平面布置图

Fig. 1 Layout of ninth floor

大的特点是能提供可边编辑边查看的三维图形化处理功能^[12]。根据实际的建筑尺寸、运用 PyroSim，设置边界条件、火源、燃烧材料。模型中，火灾热释放速率为 1.5 MW，火灾增长时间为 160 s。火源位置设置在九楼储物室某个属性为 Obstruction 的桌子上。模型中各层人数见表 1^[13]。

表 1 楼内人员分布情况

Table 1 Distribution of building staff

| 楼层 | 1-5 | 6-9 | 10-49 |
|----|-----|-----|-------|
| 人数 | 280 | 150 | 576 |

由于 Pathfinder 支持绘图或自动从进口几何生成导航网，可以直接导入 FDS 模型^[14]。如图 2 所示，将 FDS 导入 Pathfinder，添加地板、门和相关人员，在 pathfinder 里设置人口密度以及类型，完成建模。

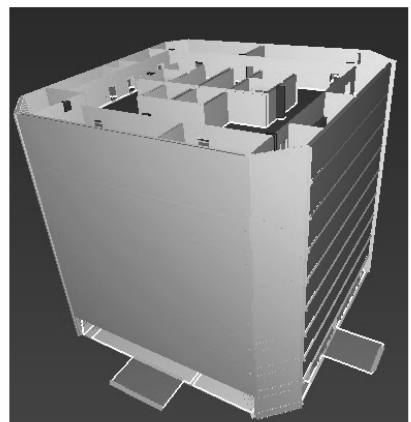


图 2 Pathfinder 界面下的疏散模型

Fig. 2 Evacuation model in pathfinder

3 模拟结果与分析

3.1 火灾模拟

研究表明, 当 CO 浓度在 2 500 mg/kg 时, 或温度达到 70 °C 时, 或可见度小于 10 m 时, 可认为该处人员处于“危险状况”^[15]。P1 (8.5 m, 8.0

m, 2.0 m) 和 P2 (9.5 m, 9.0 m, 2.0 m) 位置代表了燃烧房间门口的安全状况, P3 (21.0 m, 27.5 m, 2.0 m) 位置代表了楼梯口和整个层的安全状况。因此, 下面重点讨论 $Y=26.0$ m 处和 $Z=2.0$ m 处的 CO 浓度、温度、和可见度。其场浓度和温度、可见度, 如图 3-6 所示。

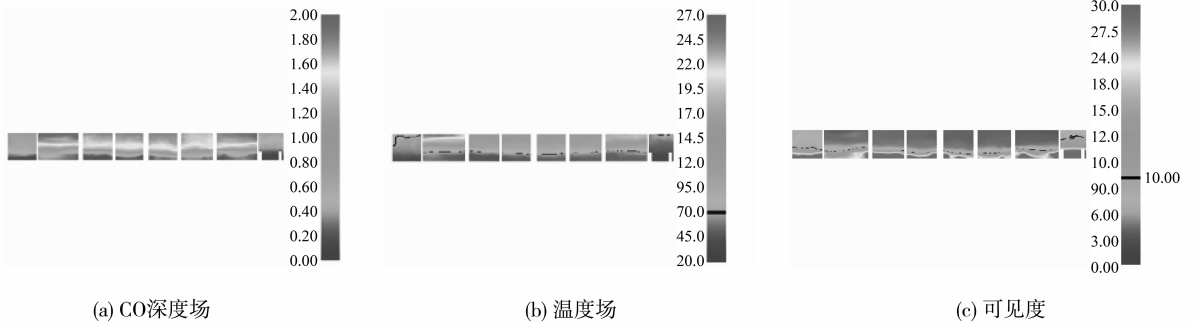


图 3 $T=180.0$ s 时, $Y=26.0$ m 处的 CO 浓度、温度和可见度

Fig. 3 (a) CO concentration field, (b) Temperature field and (c) Visibility at $Y=26.0$ m when $T=180.0$ s

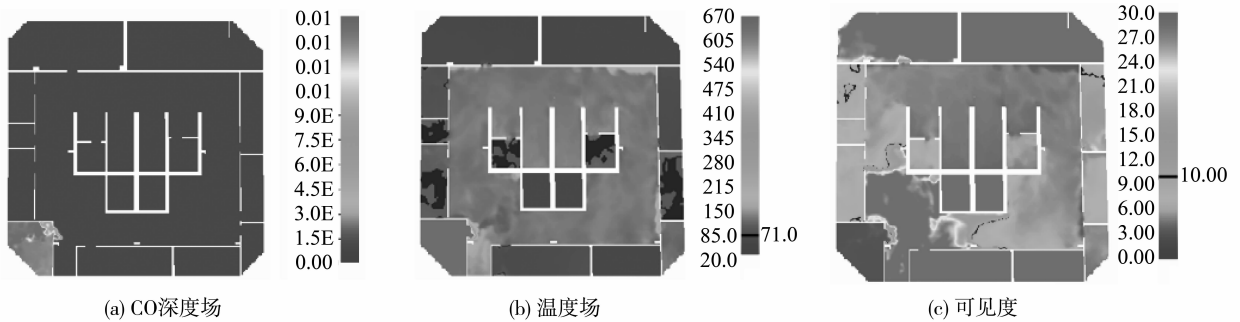


图 4 $T=180.0$ s 时, $Z=2.0$ m 处的 CO 浓度、温度和可见度

Fig. 4 (a) CO concentration field, (b) Temperature field and (c) Visibility at $Z=2.0$ m when $T=180.0$ s

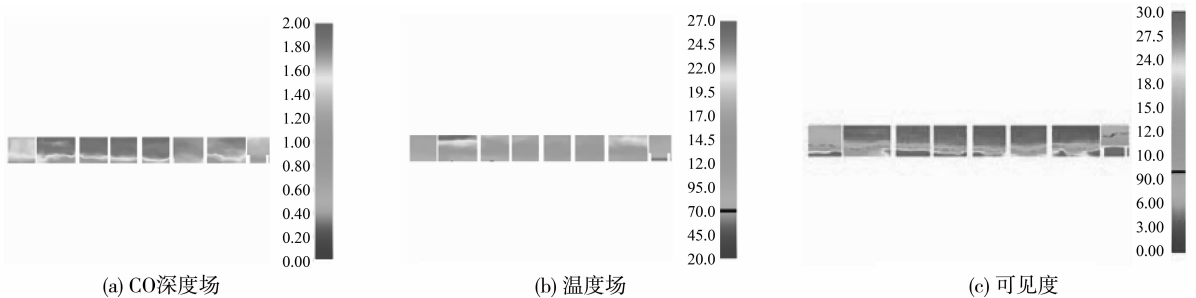


图 5 $T=300.0$ s 时, $Y=26.0$ m 处的 CO 浓度、温度和可见度

Fig. 5 (a) CO concentration field, (b) Temperature field and (c) Visibility at $Y=26.0$ m when $T=300.0$ s

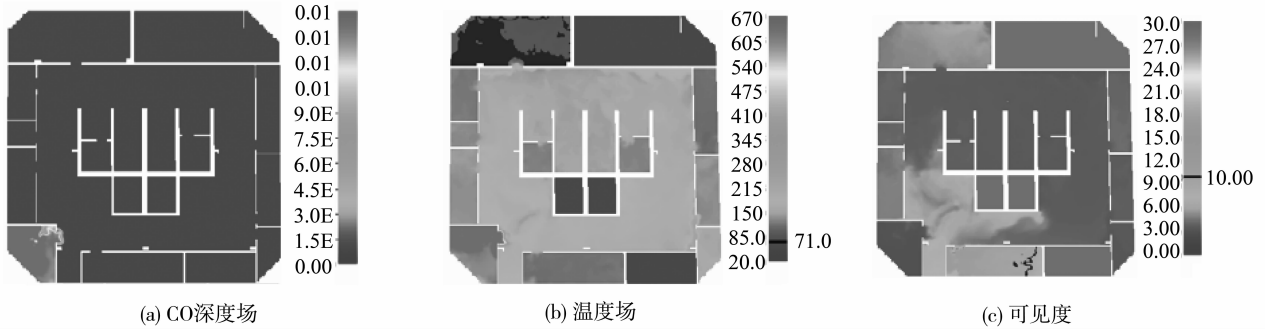


图 6 $T=300.0$ s 时, $Z=2.0$ m 处的 CO 浓度、温度和可见度

Fig. 6 (a) CO concentration field, (b) Temperature field and (c) Visibility at $Z=2.0$ m when $T=300.0$ s

从 CO 浓度、温度和可见度分析, 可以得到疏散楼梯处和房间处的危险来临时刻, 如表 2 所示。设, 发现火灾的时刻为 t_b , 火灾对人开始构成危险的时刻为 t_h , 人员可用安全疏散时间 $ASET = t_h - t_b$ ^[16-17]。九层人员可用安全疏散时间为 76 s。

表 2 疏散楼梯和房间处危险来临时刻

Table 2 Danger time at staircases and rooms

| | 温度达到 70 °C 的时间/s | CO 体积分数达到 0.2% 的时间/s | 能见度达到 10 m 的时间/s | 危险来临 时间/s |
|-----------------|---------------------|-------------------------|---------------------|--------------|
| $Z=2$ m 水平场 | 135 | >300 | 150 | 135 |
| $Y=26$ m 出口处 | 136 | >300 | 150 | 136 |
| 点 P3 | 137 | >300 | 124 | 124 |



图 7 $T=98.0$ s 时, 三楼楼梯的拥塞情况

Fig. 7 Congestion on the third floor of the stairs when $T=98.0$ s

3.2 人员疏散行为

Pathfinder 模型包括 SFPE 模式和指导模式。按 1-9 层的满员人数进行没有疏散电梯和有疏散电梯情况下的逃生模拟。图 7 显示出没有疏散电梯, 且火灾发生 98 s 时 3 层及以下各层楼梯的疏散情境。此阶段, 楼梯处出现了明显的拥塞情况, 其通行能力在较长时间内一直处于满荷载状态。而且, 在不使用疏散电梯的情况下, 2 000 人的全部从大楼疏散需要 960 s。50 s 时, 3 楼楼梯最先开始发生拥塞, 随后各层楼开始接连发生拥塞, 100 s 时楼梯全部拥塞。前 100 s 内, 平均疏散速率 4.9 人/s。100 s 之后, 平均疏散速率降为 2.34 人/s。这是因为, 在疏散的开始阶段人员之间的距离较大, 有利于提高疏散速度。

设定两部疏散电梯只停火灾区域所在层和邻近的下一层, 在使用电梯的情况下, 人员疏散情况如图 8-9 所示。使用电梯后人员从大楼全部撤出的时间下降到了 746 s。对比两种情况下的疏散可知: 50 s 后, 后者的疏散速率明显比前者快。且后

者的疏散速率以 50 s 为一周期发生一次波动。这是因为尽管疏散楼梯在 50 s 时开始发生拥堵, 100 s 左右全部拥堵, 但并不影响使用电梯人员的疏散, 且电梯往返周期大约为 50 s。

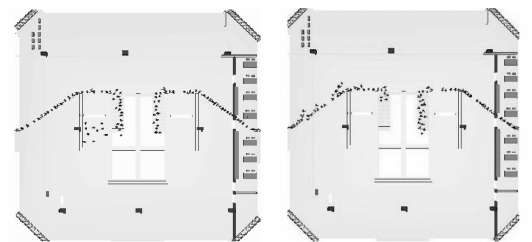


图 8 $T=60.0$ s 时, 首层的人员疏散情况

Fig. 8 Evacuation of the first floor staff when $T=60.0$ s

使用疏散电梯和未使用疏散电梯时建筑内滞留人数与时间的变化关系图如图 10 所示。图中, 疏散过程明显分为开始阶段和中间过程两个阶段。高层建筑中起决定性作用的是第二个阶段。在中间过程阶段, 适当地进行诱导, 避免人员拥堵或再次选择移动空间大而背离出口方向移动, 有利于提高疏散速度和人员的逃生。

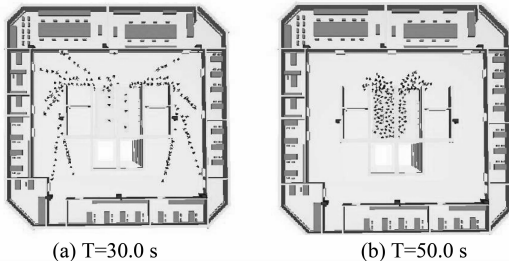


图 9 第九层的人员疏散情况

Fig. 9 Evacuation of the ninth floor staff when

(a) $T=30.0$ s and (b) $T=50.0$ s

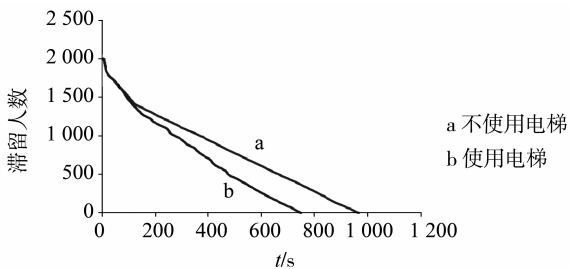


图 10 使用电梯疏散前、后滞留人数对比图

Fig. 10 Stranded number contrast of whether to use the elevator

4 结 论

FDS 可以直接导入 Pathfinder 人员模拟器。在实例中, 通过 FDS 模拟高层建筑火灾, 并结合 Pathfinder 进行人员疏散模拟, 能根据实际情况找出最佳疏散时间。从而可以较为科学地模拟建筑火灾中的人员疏散问题。通过研究, 我们还发现:

1) 本例中, 仅通过疏散楼梯来进行人员疏散是不切实际的, 极易造成意外事故。考虑电梯作为狭小空间, 在人员进出的过程中, 高温有毒的烟气很有可能通过缝隙蔓延进电梯内, 对里面的人员造成伤害。消防疏散电梯应仅停避险层、底楼或临近火灾区域的楼层。

2) 高层建筑中, 在人员可用的安全疏散时间内, 对人员逃生起决定作用的是中间过程阶段。在中间过程阶段, 人员的移动速度会因路径选择难度的加大而变得缓慢, 若适当地进行诱导, 或增加分流设施避免人员拥堵, 将有利于提高疏散速度。

参考文献:

- [1] 黄莺. 公共建筑火灾风险评估及安全管理方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.
- [2] 吕记清, 齐鸿彬. 高层民用建筑设计的几个消防问题[J]. 中山大学学报论丛, 2001, 21(5): 147-149.
- [3] 蒲云. 建筑性能化防火设计及场模拟软件的适用性研究[D]. 天津:天津理工大学, 2007.
- [4] 胡洋. 多功能高层建筑火灾烟流运动特性预测研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [5] 杨师. 公共娱乐场所火灾隐患特点及对策[J]. 科技创新导报, 2007, 35: 71-71.
- [6] 黄泽鹏. 论高校建筑室内装修工程消防安全管理[J]. 中山大学学报论丛, 2007, 27(6): 226-228.
- [7] GWYNNE S, GALEA E R, LAWRENCE P J, et al. Validation of the building EXODUS model[J]. J Application of Fire Science, 1998, 7: 235-266.
- [8] 方正, 卢兆明. 建筑物避难疏散的网格模型[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(4): 10-11.
- [9] 崔喜红, 李强, 陈晋, 等. 大型公共场所人员疏散模型研究—考虑个体特性和从众行为[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 133-144.
- [10] OWEN M, GALEA E R, LAWRENCE P J. The exodus evacuation model applied to building evacuation scenarios[J]. J of Fire Protection Engr, 1996, 8(2): 65-86.
- [11] 胡清梅, 方卫宁, 李广燕, 等. 地铁站出口布局对人群疏散性能的影响[J]. 铁道学报, 2009, 31(3): 111-115.
- [12] 徐艳秋. 基于 Pathfinder 和 FDS 的火场下人员疏散研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(2): 50-54.
- [13] 中华人民共和国公安部. GB 50045-95 高层民用建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2001.
- [14] 金润国. FDS 与 Pathfinder 在建筑火灾与人员疏散中的应用[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(8): 44-50.
- [15] 要忠茹. 地铁隧道火灾烟气扩散的数值模拟研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
- [16] 倪士勇, 宋文华. 临街 L 型商场建筑防火性能化设计初探[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 126-131.
- [17] Fire Code Reform Centre. ISBN 0733704549 Fire Engineering Guidelines[S]. Australia Sydney NSW, 1996.