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. doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2022.02.028.]

高层住宅建筑火灾应急疏散模拟与策略研究*

刘朝峰[1]，许 强[1]，齐 钦[2]，贾战超[3]，郭小东[4]，王 玲[1]，刘晓然[5]

(1. 河北工业大学 土木与交通学院，天津 300401；2. 天津市政工程设计研究总院有限公司，天津 300132；
3. 天津市交通运输基础设施养护集团有限公司，天津 300040；4. 北京工业大学 抗震减灾研究所，
北京 100124；5. 北京建筑大学 理学院，北京 102616)

摘 要：为探索高层住宅建筑火灾疏散安全性及提升其疏散效率的策略，将某一栋 26 层装配式住宅为研究对象，采用 Revit 建立其物理实体模型，结合火灾模拟软件(Pyrosim)和疏散仿真软件(Pathfinder)对高层住宅建筑火灾疏散进行数值模拟，研究不同工况下火灾烟气蔓延特性对安全疏散的影响，并探讨电梯协同楼梯疏散策略的可行性与科学性。结果表明：考虑火灾烟气蔓延影响下，晚上高层住宅内人员将在 8 min 完成疏散，超过了安全疏散允许时间 6 min；电梯协同楼梯疏散时，电梯的最佳停靠层为 23 层，使用电梯人员比例最佳为 80%，疏散总时间约为 6 min，相较于仅使用楼梯疏散时，疏散效率提升了约 15%，表明电梯协同疏散效果提升显著，可为高层住宅应急疏散提供理论参考。

关键词：火灾蔓延；安全疏散；Pyrosim 模拟，；Pathfinder 仿真；疏散策略

中图分类号：U998.1；X913；X4；X915.5 **文献标志码**：A **文章编号**：1000 - 811X(2022)02 - 0174 - 08

doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2022.02.028

近年我国高层建筑火灾频发，据近 10 年的数据统计我国一共发生过 3.1 万起高层建筑火灾，死亡人数 474 人，直接经济损失 15.6 亿元。其中住宅火灾造成的直接财产损失达 7.5 亿元，占损失总额的 20.1%。由于当代经济社会的不断进步，城市化进程的不断推进，大量人口涌进城市与城市土地资源的有限性使得高层住宅在近年的城市建设中占据较高的比例。与此同时，由于高层建筑自身垂直距离大、楼层层数多、功能全、布局复杂、电器设备与管道众多且人员复杂等特点，当建筑物内部发生火灾时易造成严重的经济损失和人员伤亡。发生火灾后，人员在恐慌、趋光、从众、冲动等心理特征下，难以冷静应对形势并做出逃离决策。因此，优化高层住宅安全疏散具有重要意义。

为了了解高层住宅建筑的火灾发展规律和事故发生后的人员疏散组织，一些学者在高层住宅建筑火灾蔓延机理与应急疏散方面展开研究。ZHAO[1]以某高层建筑为研究对象，利用 FDS 软件对楼梯间火灾进行数值仿真研究，分析底部开口气流速度等信息。HADJISOPHO[2]在分析的过程中，基于 CFD 技术来实现对烟气规律的分析，从而为排烟与疏散等实现一定的数据指导。李伟[3]等基于 BIM 和 Pyrosim 软件对高层建筑进行火灾仿真模拟，并提出消防安全管理建议。任程远[4]对一高层酒店式公寓进行火灾模拟，重点研究天井对火灾烟气蔓延的影响。李建霖等[5]运用火灾模拟软件 FDS 和人员疏散仿真软件 Pathfinder 对某高层住宅内人员遇火灾时的安全疏散进行研究，模拟多种人员疏散情况并提出安全疏散措施及方案。BUKOWSKI[6]等研究发现，对于大多数建筑，疏散时使用常规电梯，可以有效缩短人员疏散时间。RONCHI[7]等也得出采用电梯、楼梯耦合电梯、转换楼层和天桥组合使用的策略疏散效率最高，但其有效性取决于向被疏散人员提供的信息。DING[8]等将基于计算机模拟的楼梯疏散和电梯辅助疏散策略进行对比。宋英华[9]等基于 Pathfinder 研究电梯总数及电梯数量对电梯最佳停靠层的影响，提出顶层优先和分段顶层优先两种电梯协同疏散策略，并对策略进行优化分析，模拟结果表明使用电梯协同疏散可有效提高疏散效率，减少疏散时间。俞苗[10]以一超高层建筑为对象，研究电梯辅助系统不同疏散模式的可行性，针对模拟结果提出提高安全性的建议。综上所述，以上研

* 收稿日期：2021 - 08 - 15 修回日期：2021 - 09 - 29
基金项目：中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019EEEVL0501)；国家自然科学基金项目(51908025)；河北省自然科学基金项目(E2019202470)；天津市科技计划项目(19YFZCSN01200)；河北省重点研发计划项目(20375506D)
第一作者简介：刘朝峰(1984 -)，男，汉族，河北晋州人，博士，副教授，主要从事城市与基础设施防灾减灾方面研究.
E - mail：liucf8403@ hebut.edu.cn
通讯作者：齐钦(1982 -)，男，汉族，河北唐山人，学士，高级工程师，主要从事道路及建筑优化设计方面研究.
E - mail：85728130@qq.com

究多数关注火灾应急疏散某一方面的研究，缺乏综合考虑火灾蔓延与应急疏散策略的优化研究。因此，本文使用计算机模拟软件探索高层住宅建筑在不同火灾工况下疏散安全性，探讨使用电梯协同楼梯疏散对疏散效率的影响。首先根据图纸建立 Revit 物理实体模型，再将 Revit 模型导入火灾模拟软件(Pyrosim)获取不同火灾工况下的可用安全疏散时间，同样将 Revit 模型导入疏散仿真软件(Pathfinder)进行人员疏散模拟获取所需安全疏散时间，依据模拟得到的数据判定疏散的安全性，最后利用 Pathfinder 探索顶层优先策略对疏散效率的影响，寻找电梯最佳停靠层与最佳使用电梯人员比例。

1　高层住宅建筑火灾疏散建模方法

1.1　建筑 BIM 模型建立

以某 26 层装配式高层住宅楼为研究对象，建筑平面为对称布置(图 1)，建筑层高 3 m，每层 4 户；每层楼有两个安全出口，分别包括 1 部消防电梯，1 部客用电梯，1 个疏散楼梯，且楼梯段净宽度为 1.5 m。根据建筑施工图采用 Revit 翻模建立高层建筑的 BIM 模型(图 2)。

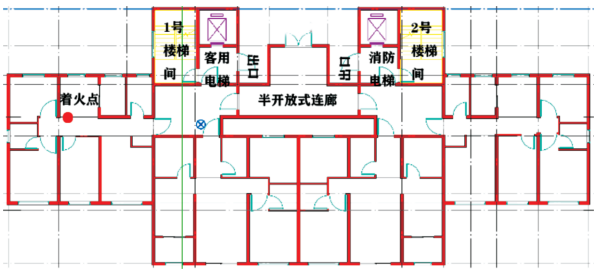


图 1　建筑平面布局图

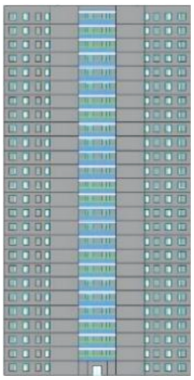


图 2　建筑 BIM 模型

1.2　火灾仿真模型构建

火灾烟气蔓延数值模拟采用 Pyrosim 建模仿真来实现，即将高层建筑的 BIM 模型导入 Pyrosim 软件中，并设置火灾情景和相关模拟边界、参数。网格划分考虑计算耗时与精度的要求当网格尺寸 d 在 $0.1D \sim 0.2D$ 之间时，可以有效减小模拟误差，则火灾蔓延直径 D 需满足式(1)，计算精度和稳定性要求满足式(2)。由于该高层住宅的建筑形态为长方体，建模时用了长方体形式的网格。最终确定网格尺寸为长 × 宽 × 高 = 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m，总计共 682 240 个网格。

$$D = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_P T_0 \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}}。\tag{1}$$

式中：D 为火灾蔓延直径；Q 为热释放速率(kW)；ρ_0 为空气密度 (kg/m^3)；T_0 为环境温度；c_P 为空气比热容(KJ/(kg · k))；g 表示重力加速度(m/s^2)。

$$\delta_x = \sqrt[3]{x \times y \times z}。\tag{2}$$

式中：δ_x 为网格尺寸；x，y，z 分别为单位网格 X，Y，Z 坐标轴尺寸。

住宅建筑内存有大量衣物、纺织及塑料制品，发生火灾时热释放速率符合 GUNNAR[11] 提出的火灾前期 αt^2 增长规律。因此，依据最不利原则设置火灾增长类型为快速火，火灾增长系数 α 取 0.046 89，燃烧反应为聚氨酯燃烧反应，模拟最大热释放速率 1 000 kW/m^2，着火面积为 1 m^2；设定墙体表面、地板、楼板为不可燃烧的惰性材料。为了获取火场温度、一氧化碳浓度(CO)、能见度等数据，在每一楼层都设置数值监测切片、感温电偶、感烟电偶(图 3)。

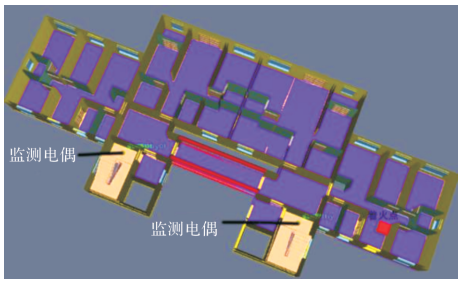


图 3　各楼层内火源点及监测点示意图

考虑计算耗时与烟气蔓延速度，仿真模拟时间为 600 s。高层建筑在燃烧过程中伴有浓烈黑烟，这些黑烟中含有大量固体颗粒，漂浮在空气中形成烟气层，影响人员疏散，烟气层高度满足式(3)，人员平均高度 H_p 取 1.6 m，经计算烟气层高度保守取 2 m。因此，数值监测切片、感烟电偶、感温电偶设置在各楼层平面 2 m 处。

$$H_s \geqslant H_c = H_p + 0.1H_b。\tag{3}$$

式中：H_s 为清晰高度(m)；H_c 为危险临界高度(m)；H_p 为人员平均高度(m)；H_b 为建筑内部高度(m)。

1.3　人员疏散模型构建

在人员疏散模型构建中首先创建各楼层平面，再根据 Revit 模型中楼梯、电梯及门的属性在 Pathfinder 相应位置处添加这些构件，之后隐藏导入图像并仅保留各楼层平面布局，形成高层住宅建筑的初始疏散模型。在初始模型中设置人员属性、数量、位置以及电梯载客量、初始停靠层、加速度和最大速度等参数，构建高层建筑火灾人员应

急疏散模型。

2 楼层火灾及烟气蔓延仿真与分析

2.1 温度模拟分析

根据已有研究[12]，人在65℃的空气中无法呼吸，因此确定65℃为作为楼层火灾危险临界温度。图4为着火楼层高度2 m处温度随时间变化分布情况。图5为楼梯间高度2 m处感温电偶监测的温度曲线。根据数值模拟可知，着火房间在50 s达到了65℃的温度限值，1号楼梯间在580 s时达到最高温度值，即55℃；2号楼梯间在600 s模拟时长内始终低于26℃。1号和2号楼梯作为主要疏散通道，在600 s模拟时长内温度一直低于危险临界温度。

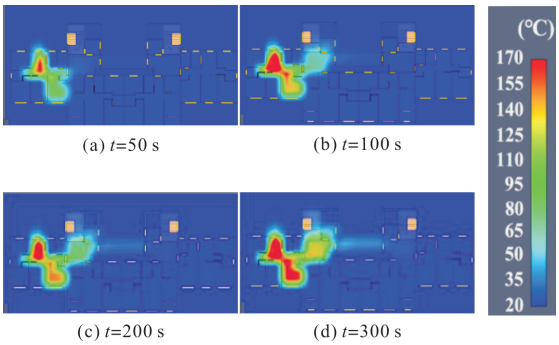


图4 着火楼层高度2 m处不同时刻温度切片图

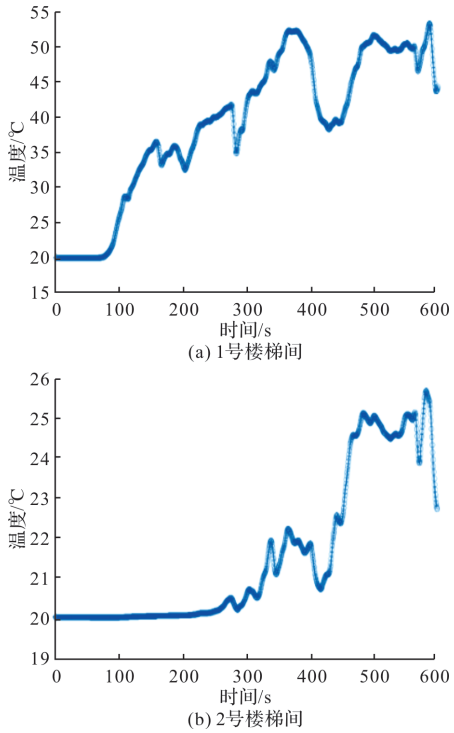


图5 着火楼层楼梯间高度2 m处时间－温度曲线

2.2 CO浓度分析

根据相关研究[13]，选取500 ppm作为CO浓度临界危险值。图6为着火楼层高度2 m处CO浓度在不同时刻下的分布情况。图7为楼梯间高度2 m处CO感烟电偶监测曲线。从模拟结果可知，着火房间在50 s内CO浓度达到临界危险值；1号楼梯内CO浓度在370 s之前，一直处于增长状态，达到最大值为250 ppm，在370 s后CO浓度呈现波谷，并逐渐趋于相对平稳的状态；2号楼梯间距离着火点相对较远，在300 s之前CO浓度增长缓慢，之后呈现波浪式快速增长趋势，在570 s左右达到最大值250 ppm。1号和2号楼梯间在烟气模拟时长内一直低于CO浓度临界危险值。

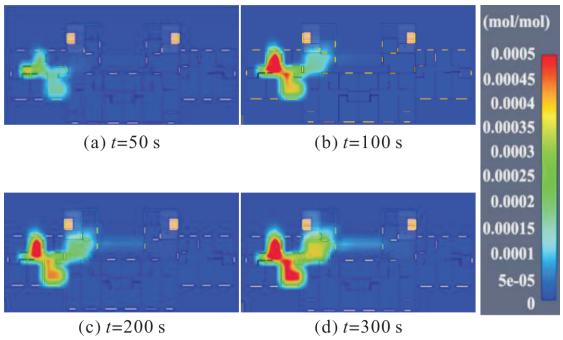


图6 着火楼层高度2 m处不同时刻CO浓度切片图

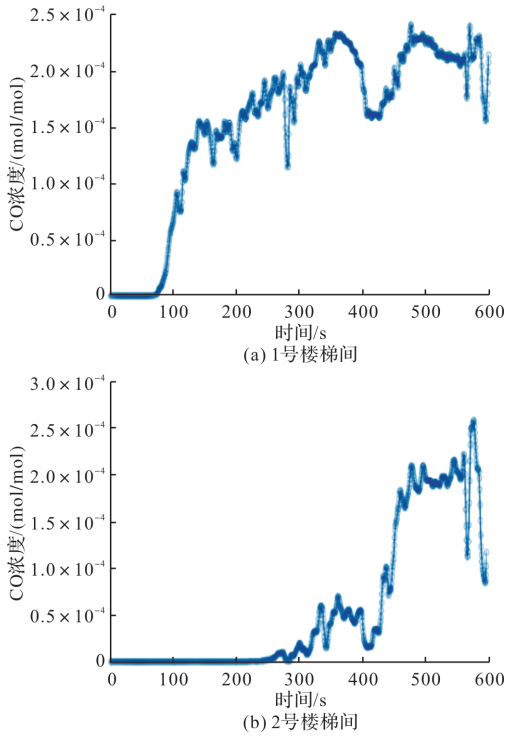


图7 着火楼层楼梯间高度2 m处时间－CO浓度曲线

2.3 能见度分析

对于小空间区域，火灾中允许的最小能见度为5 m[14]。但考虑到居民对住宅内部空间的熟悉程度，最小能见度可以进一步减小，因此，确定能见度临界限值为4 m。图8为着火楼层高度2 m处能见度在不同时刻下的分布情况，图9为着火楼层高度2 m处能见度感烟电偶监测值变化曲线。根据数值模拟

结果可知，着火区域在很短时间内能见度已经降到临界值4 m以下；1号楼梯间距离着火点较近，能见度下较为降迅速，在89 s时下降到临界值4 m；2号楼梯间从247 s附近能见度开始下降，在341 s左右能见度稳定在4 m之上。1号和2号楼梯在仿真模拟时长内均高于能见度临界限值。

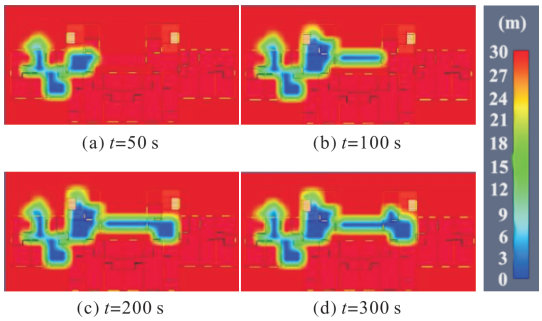


图8　着火楼层高度2 m处不同时刻能见度切片图

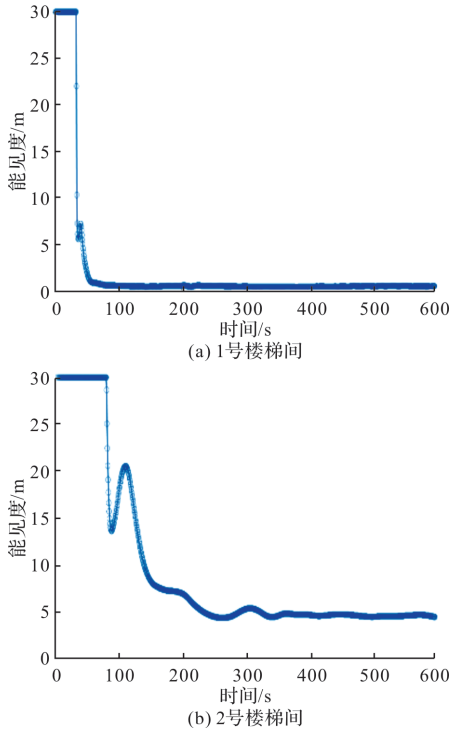


图9　着火楼层楼梯间高度2 m处能见度变化曲线

3　室内火灾人员疏散仿真与分析

3.1　疏散参数及场景设置

在Pathfinder中设置相关参数如下：疏散场景时间选取白天和夜晚两种；白天每户疏散人员以1人计，整栋住宅建筑的疏散总人数为104人；夜晚每户疏散人员以3人计，疏散总人数为312人；本文将疏散人群分为儿童、成年女性、成年男性、老人四类(表1)。考虑到1号和2号楼梯间达到各项临界危险值的时间不同，因此设置考虑两种疏散路径：人员可自由选择疏散楼梯逃离火场；由于1号楼梯间能见度在89 s下降到临界危险值之下，所以89 s之前1号楼梯可作为疏散通道，89 s之后仅2号楼梯可作为疏散通道。结合白天和晚上两种疏散场景，共计设计了4中火灾应急疏散工况(表2)。

表1　人员属性

人员类型	白天(夜晚)人员占比/%	速度/(m/s)	肩宽/cm
成年男性	25(40)	1.55	58
成年女性	25(40)	1.35	52
儿童	25(10)	0.75	45
老人	25(10)	1.10	54

表2　四种疏散场景

工况名称	描述
工况1	(白天)人员可以自由选择疏散楼梯进行疏散
工况2	(白天)人员89 s前人员可以自由选择楼梯进行疏散，89 s后仅2号楼梯作为疏散通道
工况3	(夜晚)人员可以自由选择疏散楼梯进行疏散
工况4	(夜晚)人员89 s前人员可以自由选择楼梯进行疏散，89 s后仅2号楼梯作为疏散通道

3.2　楼梯疏散安全性分析

建筑物发生火灾后，是否可以安全的将人员撤离到安全区域取决于人员所需安全疏散时间(*RSET*)和人员可用安全疏散时间(*ASET*)。当*RSET* < *ASET*时，表示人员可以安全疏散；反之，则表示建筑物内部的人员不能安全疏散，所需安全疏散时间由式(4)确定[15]。

$$REST = T_d + T_{pre} + T_t。\tag{4}$$

式中：T_d为火灾探测警报时间(s)；T_{pre}为人员反应动作时间(s)；T_t为人员疏散的运动时间(s)。

火灾模拟结果表明，着火点区域在20 s能见度达到临界危险值，1号楼梯在89 s能见度达到临界危险值，由于建筑存在半开放式连廊使得2号楼梯在600 s的仿真时长内一直处于安全状态，整栋建筑的可用安全疏散时间取2号楼梯间到达临界危险值的时间。设定烟雾传感器报警时间(T_d)为20 s，待疏散人员在收到报警时间后反应时间(T_{pre})为40 s，则设定总延迟时间为60 s，模拟仿真疏散过程，结果见表3所示。四种疏散工况的人员疏散运动时间见图10，疏散安全性判读见表4。

表3　可用安全时间

监测位置	临界值时间/s			ASET/s
	烟气温度	CO浓度	能见度	
着火点	50	50	20	20
1号楼梯	—	—	89	89
2号楼梯	—	—	—	—

表4　安全性判定表

工况类型	疏散时间/s	*ASET*/s	*REST*/s	安全性
1	254	—	314	安全
2	266	—	326	安全
3	303	—	363	安全
4	412	—	472	安全

分析可知：白天高层住宅内所有人员完成疏散所需时间为 326 s；夜晚高层住宅内所有人员完成疏散所需时间为 472 s；2 号楼梯间在火灾仿真过程中各项数值均为达到临界危险值，晚间高层住宅内所有人员在 8 min 内完成疏散。高层建筑安全疏散允许时间可按 5 ~ 7 min 考虑，这里取 6 min，则晚上高层住宅内人员在安全疏散允许时间限值内不能够完全疏散。

为分析疏散过程中人员及空间特性，以标高 1.5 m 休息平台通往标高 0.0 m 地面楼梯梯段为对象。图 11、图 12 和图 13 分别为工况 1、工况 3、工况 4 下楼梯段的人员疏散动态曲线图。

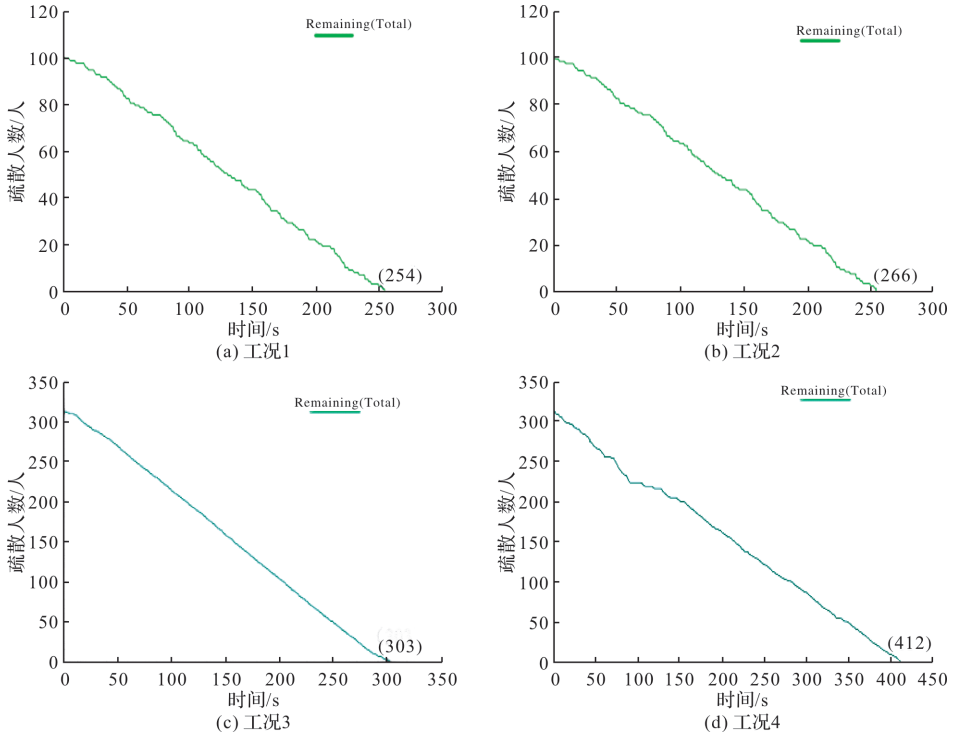


图 10 疏散人数—时间变化曲线图

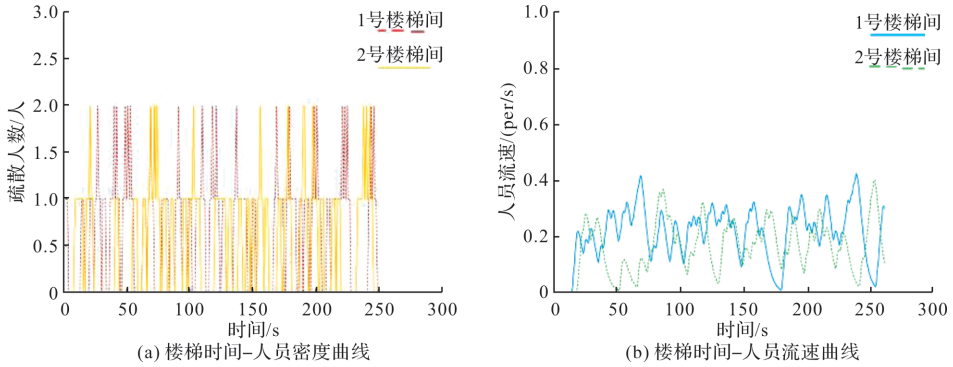


图 11 工况 1 的楼梯段人员密度与流速曲线图

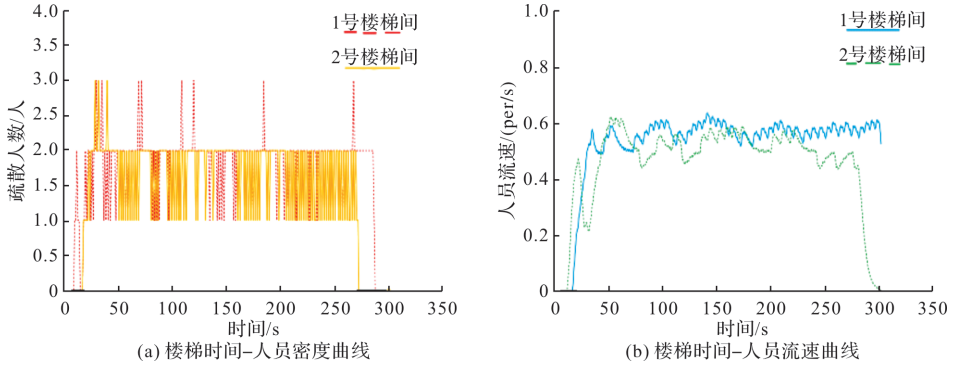
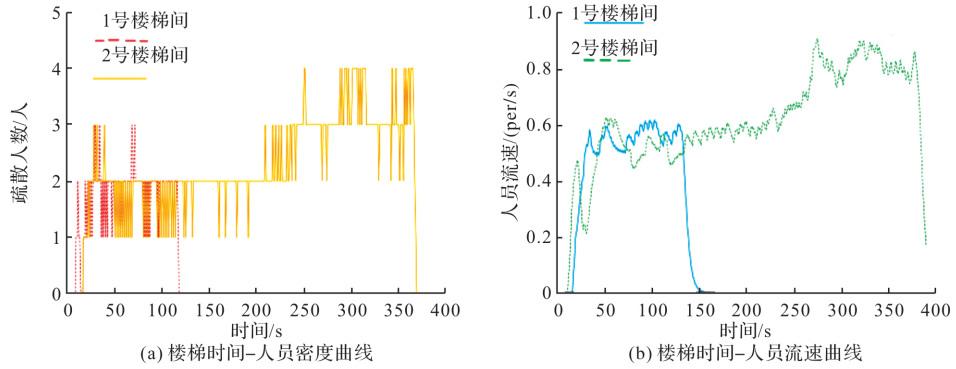
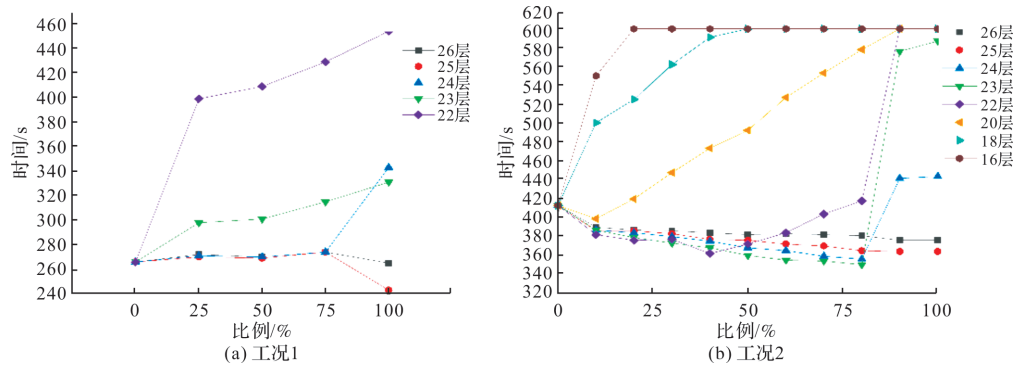


图 12 工况 3 的楼梯段人员密度与流速曲线图



(a) 楼梯时间–人员密度曲线　　(b) 楼梯时间–人员流速曲线

图 13　工况 4 的楼梯段人员密度与流速曲线图



(a) 工况1　　(b) 工况2

图 14　疏散时间与使用比例关系图

由模拟结果可知，工况 1 在整个疏散过程中 1 号和 2 楼梯间人员密度为 0 ~ 2.0 occs/m^2，表示该梯段人员密度较小，人员疏散通畅；1 号楼梯间在 18 s 之前人员流速一直处于增长状态，达到 0.21 per/s，18 s 之后人员速率呈现波谷状态，在 240 s 达到最大值 0.43 per/s；2 号楼梯间在 25 s 之前人员流速一直处于增长状态，达到 0.28 per/s，25 s 之后人员速率呈现波谷状态，在 254 s 达到最大值 0.40 per/s。工况 3，1 号和 2 号楼梯间在疏散过程中人员密度为 1.0 ~ 2.0 occs/m^2，短时间内为 2.0 ~ 3.0 occs/m^2，表示该梯段人员密度较小，人员疏散通畅；1 号楼梯间在 34 s 之前人员流速一直处于增长状态，达到 0.57 per/s，34 s 之后人员速率呈现波谷状态，在 141 s 达到最大值 0.63 per/s；2 号楼梯间在 21 s 之前人员流速一直处于增长状态，达到 0.40 per/s，21 s 之后人员速率呈现波谷状态，在 51 s 达到最大值 0.62 per/s，275 s 后人员速率开始快速下降。工况 4，1 号楼梯间楼梯梯段在 27 ~ 35 s 时长内人员密度为 2.0 ~ 3.0 occs/m^2，表示该梯段人员密度较大，已经发生拥堵且局部拥堵较严重；其他时间段人员密度为 1.0 ~ 2.0 occs/m^2，表示该梯段人员密度较小，人员疏散通畅；2 号楼梯间楼梯梯段在 207 s 之前人员密度为 1.0 ~ 2.0 occs/m^2，表示该梯段人员密度较小，人员疏散通畅；211 ~ 367 s 人员密度为 2.0 ~ 4.0 occs/m^2 表示该梯段人员密度较大，已经发生拥堵且局部拥堵较严重。1 号楼梯间楼梯梯段在34 s之前人员速率一直处于增长状态，达到 0.58 per/s，34 s之后人员速率呈现波谷状态，在 99 s 达到最大值 0.61 per/s，130 s 后人员速率开始快速下降；2 号楼梯间楼梯梯段在 50 s 前处于增长状态，达到 0.61 per/s，50 s 之后人员速率呈现波谷状态，在 276 s 达到最大值 0.9 per/s，379 s 后人员速率快速下降。

对比工况 1 与 4 的模拟结果，两种工况中楼梯梯段均未出现疏散拥堵现象，疏散人数较多是工况 4 比工况 1 疏散时间多出 37 s 的主要原因。对比工况 3 与 4 的模拟结果，由于工况 4 考虑 89 s 后着火层 1 号楼梯间不再允许人员通过，使得 1 号楼梯间楼梯梯段在 115 s 人员密度降到 0 occs/m^2，在 158 s 人员速率降到 0 per/s，2 号楼梯间在 211 s 后较长一段时间内人员密度较大，疏散较拥堵，疏散时间比工况 3 多 109 s。

3.3　电梯协同楼梯疏散分析

本文采用电梯顶层优先疏散策略[9]辅助楼梯进行疏散。顶层优先疏散策略是将高层建筑某一楼层及以上楼层采用电梯疏散，设此楼层为 F，所有电梯首先停靠顶层并疏散顶层全部人员，然后再依次停靠次顶层、次次顶层直至第 F 层的全部人员疏散完毕。该策略的重点是寻找电梯的最佳停靠楼层以及使用电梯的人员比例。考虑我国规范不允许使用电梯进行人员疏散，因此仅使用远离着火点的消防电梯进行人员疏散。电梯最开始位于 1 层，疏散开始时首先到达最高层 N 层，之后再从一层依次到达 $N-1$ 层，$N-2$ 层，…，直到模拟选定的最低楼层。依次模拟每层作为电梯停靠层所需的疏散时间，从而获得疏散时间最短的电梯最优停靠层。在确定最优停靠层后，模拟每层乘坐电梯进行疏散的人员比例，从而确定使用电梯进行疏散的最优比例，同样分两种情况：

白天上班上学人员较多，所需疏散的人员较少；夜晚人员多下班放学，所需疏散人员较多。疏散场景见表5。电梯尺寸为2.7 m×2.4 m，最大载客量14人，加速度1.4 m/s^2，最大速度3.0 m/s，开关门总时间7 s，开/关门延迟时间5 s/5 s。

表5 两种电梯辅助疏散场景

工况名称	模拟时间	分别使用电梯的人员比例/%
电梯协同疏散工况1	白天	0、25、50、75、100
电梯协同疏散工况2	夜晚	0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100

电梯协同楼梯疏散时，存在电梯最佳停靠楼层与使用电梯的最佳比例。当电梯停靠层与使用电梯人员比例逼近最佳时，整栋建筑人员疏散总时间将减小到最短，反之将逐渐增加。不同情景下人员疏散的数值模拟结果如图14。

高层住宅建筑在白天进行疏散时，电梯的最佳停靠层为24层，使用电梯人员比例最佳为100%，电梯协同楼梯疏散的总时间为243 s，即约4 min；相较于仅使用楼梯进行疏散总时间缩短23 s，疏散效率提升了约10%。在晚上进行疏散时，电梯的最佳停靠层为23层，使用电梯人员比例最佳为80%，电梯协同楼梯疏散的总时间为359 s，即约6 min；相较于仅使用楼梯进行疏散总时间缩短63 s，疏散效率提升了约15%，说明电梯协同疏散不仅能够缩短疏散时间，还可以根据实际情况科学调整电梯疏散资源分配。

4 结论

(1)联合BIM、Pyrosim和Pathfinder软件构建了高层住宅建筑火灾应急疏散仿真模型，模拟不同疏散情景中人员应急疏散过程及特征，量化分析了烟气蔓延影响的楼梯疏散安全性，提出了电梯协同楼梯疏散的优化策略。

(2)建筑内烟气蔓延表明着火点附近区域的温度、CO浓度、能见度均很快达到临界危险值；1号楼梯间临近着火点，在89 s时能见度下降到临界危险值(4 m)，但由于建筑采用半开放连廊，2号楼梯间的各项监测值均未达到临界危险值。在白天情景下，建筑内人员全部疏散需要326 s，能在安全疏散允许时间限值内完成疏散；在夜间情景下，建筑内人员全部疏散需要472 s，不能在安全疏散允许时间限值内完成疏散。

(3)合理安排电梯协同楼梯疏散策略，能够有效提高人员疏散效率。以夜间疏散情景为例，，电梯的最佳停靠层为23层，使用电梯人员比例最佳为80%，电梯协同楼梯疏散的总时间为359 s，即约6 min；相较于仅使用楼梯进行疏散总时间缩短了63 s，疏散效率提升了约15%，使得住宅内人员在安全疏散允许时间限值内能够完成疏散。

参考文献：

[1] 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.

[2] GEORGE Hadjisophocleous, YOON J. Ko. Using a CFD simulation in designing a smoke management system in a building[J]. Winter simulation, 2006: 2071 – 2076.

[3] 李伟，钱周，孟作才. 基于模拟仿真技术的高层建筑消防安全管理研究[J]. 建筑安全，2020，35(12)：75 – 80.

[4] 任程远. 高层酒店式公寓火灾人员安全疏散研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.

[5] 李建霖，傅丽碧，施永乾. 高层住宅安全疏散设计与优化[J]. 福州大学学报(自然科版)，2021，49 (1)：115 – 120.

[6] RICHARD W, BUKOWSKI. Addressing the needs of people using elevators for emergency evacuation[J]. Fire Technology, 2012, 48(1): 127 – 136.

[7] RONCHI E, NILSSON D. Modelling total evacu – ation strategies for high – rise buildings[J]. Building Simulation, 2014, 7(1): 73 – 87.

[8] DING Y C, WENG F L. A comparative study of evacuation strategies for high – rise building viaco – mbination of stair and elevator based on computersimulation[J]. Int. J. of Emergency Management, 2016, 12(1): 41 – 54.

[9] 宋英华，余武静，吕伟. 高层公寓式住宅建筑电梯协同楼梯疏散策略研究[J]. 中国安全生产科学技术，2020，16(6)：116 – 121.

[10] 俞苗. 某超高层建筑电梯辅助疏散系统疏散模式研究[J]. 消防科学与技术，2018，37(5)：615 – 617.

[11] GUNNAR H, Michael A. The initial convective f – low in fire [J]. Elsevier, 1989, 15(6): 471 – 475.

[12] 许镇，唐方勤，任爱珠. 建筑火灾烟气危害评价模型及应用[J]. 消防科学与技术，2010，29(8)：651 – 655.

[13] 黎强，刘清辉，张慧，等. 火灾烟气中有毒气体的体积分数分布与危害[J]. 自然灾害学报，2003(3)：69 – 74.

[14] 邹馨捷，萨木哈尔·波拉提，郝明，等. 基 Pyrosim 和 Pathfinder 的高校学生宿舍火灾人员疏散安全性模拟分析[J]. 安全与环境工程，2020，27(4)：195 – 200.

[15] 刘斐. 基于 BIM 技术的大型商场疏散通道优化研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2020.

Study on Simulation and Strategy of Fire Emergency Evacuation in High – rise Residential Buildings

LIU Chaofeng[1], XU Qiang[1], QI Qin[2], JIA Zhanchao[3], GUO Xiaodong[4], WANG Ling[1], LIU Xiaoran[5]

(1. *School of Civil and Trangsportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*;

2. *Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin* 300132, *China*;

3. *Tianjin Transportation Infrastructure Maintenance Group Co., Ltd, Tianjin* 300040, *China*;

4. *Institute of Eeathquake Resistances and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*;

5. *College of Sciences, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing* 102616, *China*)

Abstract: In order to explore the fire evacuation safety of high – rise residential buildings and the strategies to improve their evacuation efficiency, a 26 – story prefabricated house is taken as the object of study, using Revit to establish its physical entity model, numerical simulation of fire evacuation in high – rise residential buildings is carried out by combining fire simulation software (Pyrosim) and evacuation simulation software (Pathfinder). This paper studies the influence of fire smoke spread characteristics on safe evacuation under different working conditions, and discusses the feasibility and scientific nature of elevator cooperative staircase evacuation strategy. The results show that: considering the influence of fire smoke spread, in the evening, people in high – rise buildings will be evacuated at 8min, exceeded the allowable time for safe evacuation, 6min; When the elevator cooperates with the stairs to evacuate, the best parking floor for elevators is 23 floors, the best proportion of people using elevators is 80%, the total evacuation time is about 6min. compared to using only the stairs to evacuate, the efficiency of evacuation has been improved by about 15%.

Key words: fire spread; safe evacuation; Pyrosim simulation; Pathfinder simulation; evacuation strategy

(上接第 173 页)

[8] 陈鹏，张继权，张立峰，等. 城市自然灾害应急救助能力评价指标体系与概念模型研究[J]. 农业灾害研究，2015，5(9)：102 – 107.

[9] 吕显智，葛巍巍，王永西，等. 公安消防部队应急救援能力评价方法研究[J]. 中国安全生产科学技术，2012，8(2)：23 – 25.

[10] 史圆圆. 应急专题地图的快速制图研究[D]. 西安：长安大学，2017.

[11] 刘凡. 专题地图制图技术中统计数据可视化问题的研究[D]. 武汉：武汉大学，2018.

[12] 邹逸江，孔家辉，斯港杰. 综合应急救援能力描述理论架构及提升内容研究[J]. 灾害学，2021，36(2)：145 – 150.

Result Evaluation and Expression of Thematic Statistical Map on Ability Promotion in Comprehensive Emergency Rescue

ZOU Yijiang[1,2], KONG Jiahui[1,2] and SI Gangjie[1,2]

(1. *Department of Geography and Spatial Information Techniques*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *China*;
2. "*Belt and Road*" *Research Institute*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *China*)

Abstract: Faced to disaster relief of natural disasters, accident disaster, public health disasters and social security disasters, faced to rescue area of provinciallevel, sub provincial level, regional level, district(county)level, street(town)level, community(village)level, faced to whole process, sub process and sub process item for all life cycle(preparation, response, disposal, security and rehabilitationin comprehensive emergency rescue), research of evaluation and visualization on ability promotion are realized. First, express and calculation mode of evaluation index system on ability promotionfor whole process, sub process and sub process item in comprehensive emergency rescue for all life cycleare innovated in order to carry outevaluation of ability promotion; Second, Expression of thematic statistical map on ability promotionfor whole process, sub process and sub process item in comprehensive emergency rescue for all life cycleis innovated in order to understandspatial distribution and differentiation of evaluation result on ability promotion in comprehensive emergency rescue.

Key words: comprehensive emergency rescue; all life cycle; ability promotion; evaluation; thematic statistical map