

刘剑锋,游波,周超,等.建筑火灾与人员安全疏散模拟[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):9-17. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.002

LIU J F, YOU B, ZHOU C, et al. Simulation Research on Building Fire and Evacuation [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(4):9-17. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.002

# 建筑火灾与人员安全疏散模拟

刘剑锋<sup>1</sup>,游波<sup>1,2\*</sup>,周超<sup>3</sup>,鲁义<sup>1</sup>,毛聪<sup>1</sup>,饶玲瑜<sup>1</sup>,张梦迪<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;  
3.五凌电力有限公司新能源分公司,湖南 长沙 410004)

**摘要:**以某高校教学楼作为研究对象,应用 Pyrosim 软件建立建筑物火灾扩散模型,分析温度、CO 含量和能见度对人员安全疏散的影响,以烟气含量到达临界值的时间来确定人员的可用安全疏散时间,同时结合 Pathfinder 软件建立人员疏散模型,模拟得出人员必需的安全疏散时间.结果表明:温度、CO 含量、能见度是影响人员疏散的重要因素;1~4 楼内人员的可用安全疏散时间为 120 s,必需安全疏散时间为 84 s,5~8 楼内人员的可用安全疏散时间为 110 s,必需安全疏散时间为 144.3 s.模拟结果反映出人员的安全疏散还存在危险性,为了减小其危险性提出了对应的消防建议措施.

**关键词:**建筑火灾;Pyrosim 模拟;Pathfinder 模拟;安全疏散

**中图分类号:**X928.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0009-09

## Simulation Research on Building Fire and Evacuation

LIU Jianfeng<sup>1</sup>, YOU Bo<sup>1,2</sup>, ZHOU Chao<sup>3</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, MAO Cong<sup>1</sup>, RAO Lingyu<sup>1</sup>, ZHANG Mengdi<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Key Lab of Coal Safety Mining Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. New Energy Branch of Wuling Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** Taking a university teaching building as a research object, and using Pyrosim software to build a building fire diffusion model, this paper analyzes the impact of temperature, CO concentration and visibility on the safe evacuation of personnel, and uses the smoke concentration when it reaches the critical value to determine the available safe evacuation time for personnel. At the same time, an evacuation model is established with Pathfinder software to simulate the necessary safe evacuation time for personnel. Results show that temperature, CO concentration, and visibility are the important factors affecting evacuation of personnel. The available safe evacuation time for personnel on 1<sup>st</sup> ~ 4<sup>th</sup> floor is 120 s, and the required safe evacuation time is 84 s; the available safe evacuation time for personnel on 5<sup>th</sup> ~ 8<sup>th</sup> floor is 110 s, which requires the safe evacuation time is 144.3 s. The simulation results show that the safety evacuation of personnel is still dangerous. In order to reduce the risk, corresponding fire protection measures are put forward.

**Keywords:** building fire; Pyrosim simulation; Pathfinder simulation; safe evacuation

随着经济的蓬勃发展,全国的建筑火灾预防与监控面临着更大的挑战<sup>[1-3]</sup>.近年来,建筑火灾时有发生

收稿日期:2020-09-21

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点资助项目(18A183);湖南省研究生科研创新资助项目(CX20200988);2020年湖南省大学生创新训练计划资助项目(S202010534004)

\*通信作者,E-mail: 494907336@qq.com

生,国内火灾形势依然十分严峻<sup>[4-6]</sup>.高校教学楼由于人员集中、内部空间大且木质材料和电气设备较多,一旦发生火灾就会造成很大的危害<sup>[7-9]</sup>.因此,对火灾中的人员疏散进行深入研究有利于降低火灾带来的不良影响<sup>[10-12]</sup>.

火灾事故的特殊性使得在事故现场进行研究存在很多限制.近年来,许多学者通过软件进行火灾场景模拟和数值分析,对火灾过程进行了深入的研究.王炜罡等<sup>[13]</sup>通过 FDS 软件从 CO 含量分布图、能见度分布图和烟气分布图总结出高层居民楼发生火灾时环境参数的变化规律;张琳<sup>[14]</sup>基于 GIS 制图技术和三维建模技术提出一种针对火灾环境的三维建模方法,并研究了火灾场景数值仿真模型和最短路径算法;张璐等<sup>[15]</sup>使用 Pyrosim 软件进行火灾模拟分析,得到烟气聚集情况、烟气蔓延路径和目标物在发生火灾后的温度变化曲线.

上述研究方法均未对人员的安全疏散方面进行研究,存在一定的不足之处.因此,以高校教学楼为研究对象,运用 Pyrosim 软件建立火灾扩散模型<sup>[16-18]</sup>,结合 Pathfinder 软件建立模型模拟安全疏散<sup>[19-21]</sup>并进行数据分析,为高校教学楼的消防安全管理提供参考,具有一定的借鉴意义<sup>[22-24]</sup>.

## 1 火灾烟气与温度对人员安全疏散的影响

火灾烟气在很大程度上影响着火灾中人员的生理状况,它对人体来说是有害的,火灾烟气中的部分气体甚至对人体有着致命性伤害,这些气体消耗损害人体机能,使人们不能够获得足够的逃生时间.在能见度不足的空间中,人们也难以分辨正确的逃生出口方向,这对于救援来说也异常困难,救援队员由于无法确认房间内的着火情况和人员伤亡状况,不利于人员疏散和抢险救援.烟气各成分对人体的影响情况如表 1~表 3<sup>[25]</sup>所示.

人在高温下的耐受时间也是有限的.在热辐射强度小于  $2.5 \text{ kW/m}^2$  时,人的耐受时间大于  $3\ 000 \text{ s}$ ;在热辐射强度等于  $2.5 \text{ kW/m}^2$  时,人的耐受时间为  $30 \text{ s}$ ;在热辐射强度为  $10 \text{ kW/m}^2$  时,人的耐受时间为  $4 \text{ s}$ .温度为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  时,人的忍受时间极限为  $2 \text{ min}$ ;温度为  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  时,人的忍受时间极限为  $5 \text{ min}$ ;温度为  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  时,人的忍受时间极限为  $10 \text{ min}$ .

表 1 空气中  $\text{O}_2$  含量与人体状况的关系

$\text{O}_2$ 含量/%	对人体的影响
20	无影响
16~12	呼吸、脉搏增加
12~9	人体的肌肉活动能力下降
9~6	呕吐、神志不清
6	窒息、呼吸停止

表 2 空气中 CO 含量与人体状况的关系

CO 含量/%	对人体的影响
0.01	影响不大
0.05	1 h 内对人体影响不大
0.1	1 h 后头痛、呕吐,2.2~3.5 h 后眩晕
0.5	头晕、头痛、呕吐,可能死亡
1.0	失去知觉,1~2 min 即可能死亡

表 3 空气中  $\text{CO}_2$  含量与人体状况的关系

$\text{CO}_2$ 含量/ $0.001\%$	对人体的影响
350~450	和室外环境无差别
450~1 000	能够顺畅呼吸
1 000~2 000	空气混浊导致嗜睡
2 000~5 000	想要睡觉、无法集中注意力、心跳开始加速
>5 000	可能导致严重缺氧、昏迷、死亡

## 2 Pyrosim 火灾模拟分析

### 2.1 Pyrosim 火灾模拟参数的设定及模型的建立

热释放速率(HRR)是火灾燃烧过程的重要参数,通过了解热释放速率可以确定火灾的危险程度,以及火灾发展过程中的基本参数.不同功能建筑的燃烧增长速率和热释放速率如表 4<sup>[26]</sup>所示,不同材料在发

生火灾时所表现出的火灾增长类型如表5<sup>[26]</sup>所示.

表4 不同功能建筑的燃烧增长速率

建筑以及场所	燃烧增长速率	热释放速率最大值/(kW/m <sup>2</sup> )
民居	中速	250
图书馆	快速	500
办公室	中速	250
学校教室	中速	250

表5 不同材料形成的火灾增长类型

火灾场景	速度类型
立体纸盒与塑料盒	高
办公桌隔板	中
办公室用品	中
地板装饰物	低

以某高校教学楼为研究对象,该教学楼共8层,每层分布有教室与办公室,中间设置有中部楼梯,每层两侧设有安全通道,通风环境一般.根据测量,教学楼整体最外侧长×宽×高为68.0 m×20.2 m×40.0 m,对该模型进行简化,建立长×宽×高为69 m×21 m×40 m的网格,最小网格为1 m×1 m×1 m的立方体,网格总数为57 960,简化模型如图1所示.所有墙体、地板表面均设置为厚0.2 m的混凝土材料,楼梯设置为不燃材料,课桌、座椅和讲台表面等设置为黄松木材料.为研究低楼层与高楼层在不同燃烧状态下的情况,分别选择在1楼和5楼设置火源,且考虑1楼和5楼在同时着火的情况下,分析最优的疏散时间和条件.此外,在楼道内靠近着火房间设置CO含量探测器,检测含量变化,并在楼道设置能见度探测器,探测随着时间的变化,火灾燃烧的烟雾给人员疏散带来的影响.

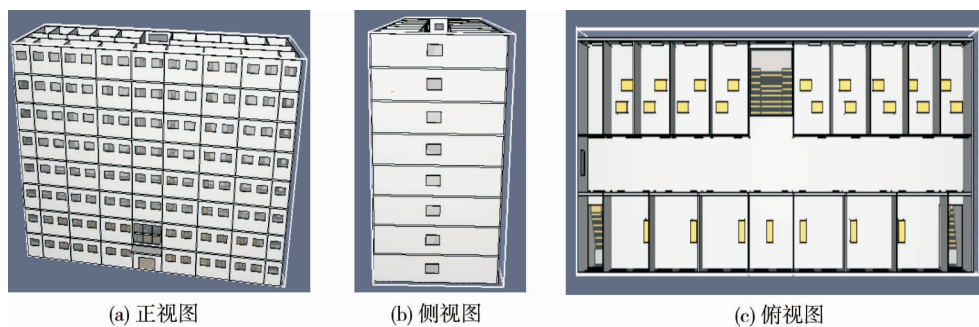


图1 教学楼简化模型

通过切片设置可以更为直观地显示烟气含量、温度、CO含量、能见度的变化,考虑设定火灾场景中的重点区域,设定着火房间纵向垂直切片 $X=9$  m和楼道内横向垂直切片 $Y=8.5$  m,设定楼道内横向垂直切片 $Y=10$  m,设置着火楼层的水平垂直切片 $Z=1.6$  m和 $Z=21.6$  m,以及横向垂直切片 $Y=10$  m.某高校教学楼的切片模型如图2所示,通过数据分析,可得出不同平面中的烟气含量、温度、CO含量、能见度随时间的变化情况.

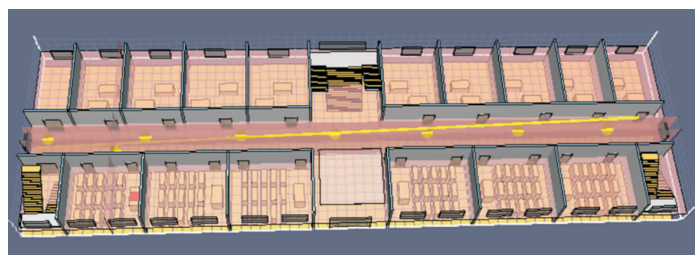


图2 教学楼切片模型

## 2.2 模拟过程分析

### 2.2.1 烟气蔓延分析

烟气的蔓延情况如图3所示.由图3可知:当1楼和5楼教室内的课桌着火之后,着火点产生的烟气迅速扩散;15 s时,烟气充斥整个教室,并有部分烟气从前后门和窗户向周围空间扩散;80 s时,烟气通过教室左侧向左侧楼梯扩散,并且通过走廊蔓延至中部楼梯;130 s时,烟气贯穿走廊和两侧楼梯,向各个教室扩散,1楼的烟气逐渐向2楼扩散,烟气从左侧楼梯向上蔓延.如遇此情形火灾,处于各个楼层的人员需从建筑物内撤离,5~8楼的人员应在130 s之前从右侧疏散楼梯向下撤离,考虑到此情形为最不利的情况,如果发生其他火灾也应在此之前进行安全疏散,以确保人员安全.

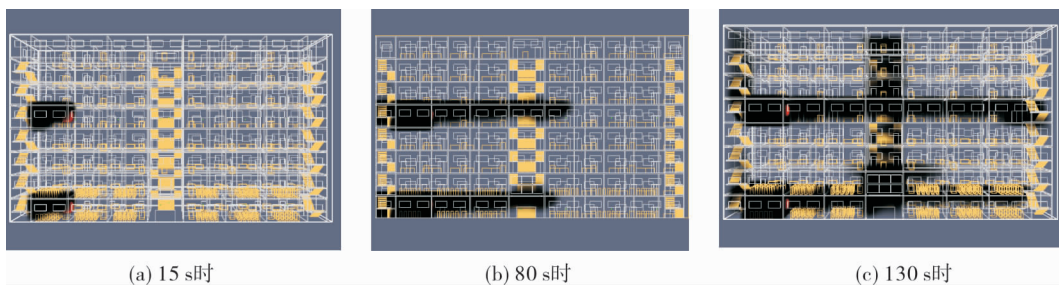


图3 烟气蔓延情况

### 2.2.2 温度场分析

120 s时温度场的变化情况如图4所示.由图4可知:120 s时,1楼着火房间内的温度已经远超过人体的耐受温度,并且烟气向走廊蔓延,走廊的温度也即将达到临界值.这时人员应当远离着火房间与周围的区域,选择逃生方向时,应当避开着火区域与高温区域.同时,在烟气从着火房间向走廊蔓延扩散的过程中,走廊上层的温度逐渐升高,在走廊位置水平扩散,着火房间附近走廊内的温度以着火房间为中心不断升高.120 s时,对教学楼进行整体观察,烟气已经逐渐蔓延到右侧安全通道附近,从中部楼梯一直到安全通道走廊右侧,其温度明显低于走廊左侧,说明烟气在蔓延的过程中,由于中部楼梯空间较大,烟气向上垂直扩散,烟气分散到上层空间,温度较走廊左侧要低很多,此时在着火房间同一层的人员可以选择中部楼梯与右侧安全通道2个方向逃生.

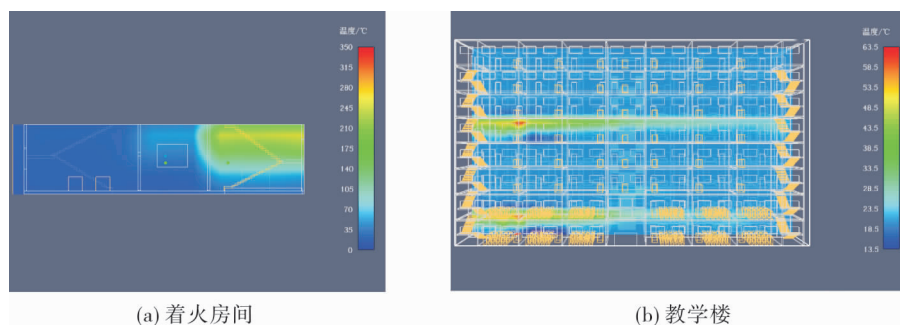


图4 120 s时温度场变化情况

### 2.2.3 CO含量分析

CO含量是影响人员安全疏散的重要因素之一,为了研究模拟CO含量的变化,在两侧楼梯与中部楼梯设置检测点,分别分析着火房间所在的1楼和5楼的走廊内CO含量的变化情况.

1楼检测点CO含量的变化曲线如图5所示.由图5可知:50 s时,左侧楼梯的CO含量开始增长,之后在一定范围内波动,直到470 s达到最大值,考虑CO对人体安全的影响,50 s内人员应从左侧楼梯向下疏散;100 s时,中部楼梯的CO含量开始呈缓慢增长的趋势,且在很小的范围内上下波动,此处上下通风性能好,CO含量保持在较低水平,在CO含量达到危及人体健康之前,人员可选择从中部楼梯向下进行疏

散;在 125 s 时,右侧楼梯的 CO 含量出现明显的增长,一直到 250 s 时出现强烈增长,300 s 时达到最大值,这时的 CO 含量会危及人体安全,需要避开这部分区域进行疏散,在此之前人员可从右侧楼梯进行紧急疏散.

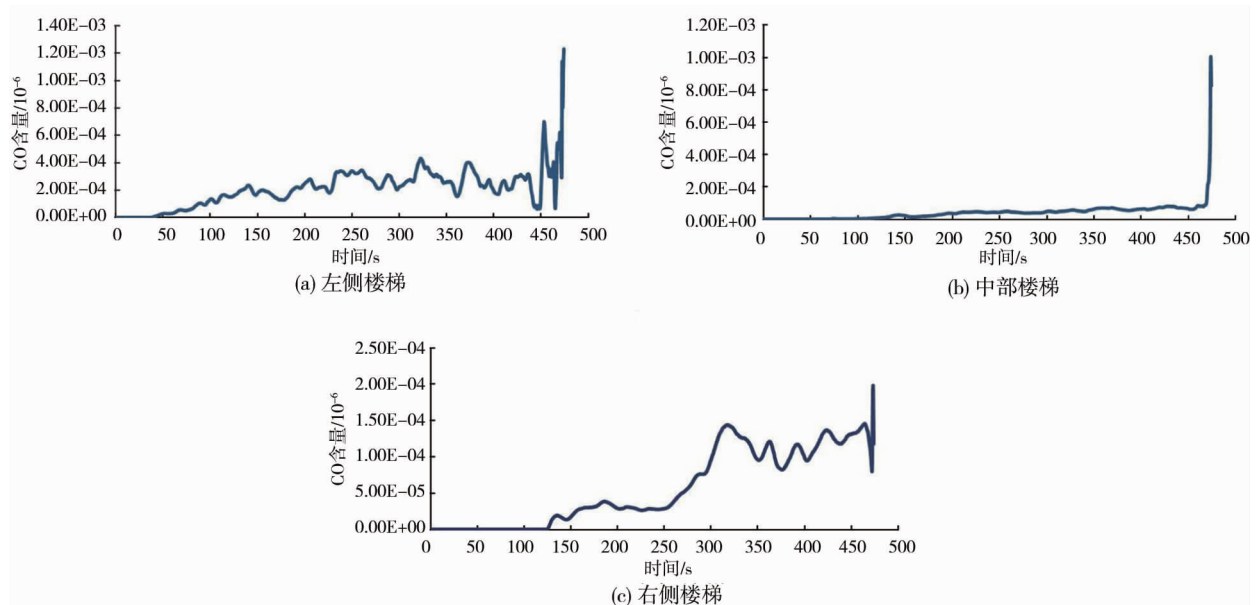


图 5 1 楼检测点 CO 含量变化曲线

5 楼检测点 CO 含量的变化曲线如图 6 所示.由图 6 可知:35 s 时左侧楼梯的 CO 含量开始逐渐增长,之后维持在一定的范围内上下波动,CO 气体向周围空间扩散,并向上层楼层蔓延,35 s 内房间内的人员需撤离;125 s 时,中部楼梯的 CO 含量开始上升,在此之前 5~8 楼的人员可从中部楼梯进行疏散;115 s 时,右侧楼梯处的 CO 含量开始出现增长,在此之前人员可从右侧楼梯进行疏散.

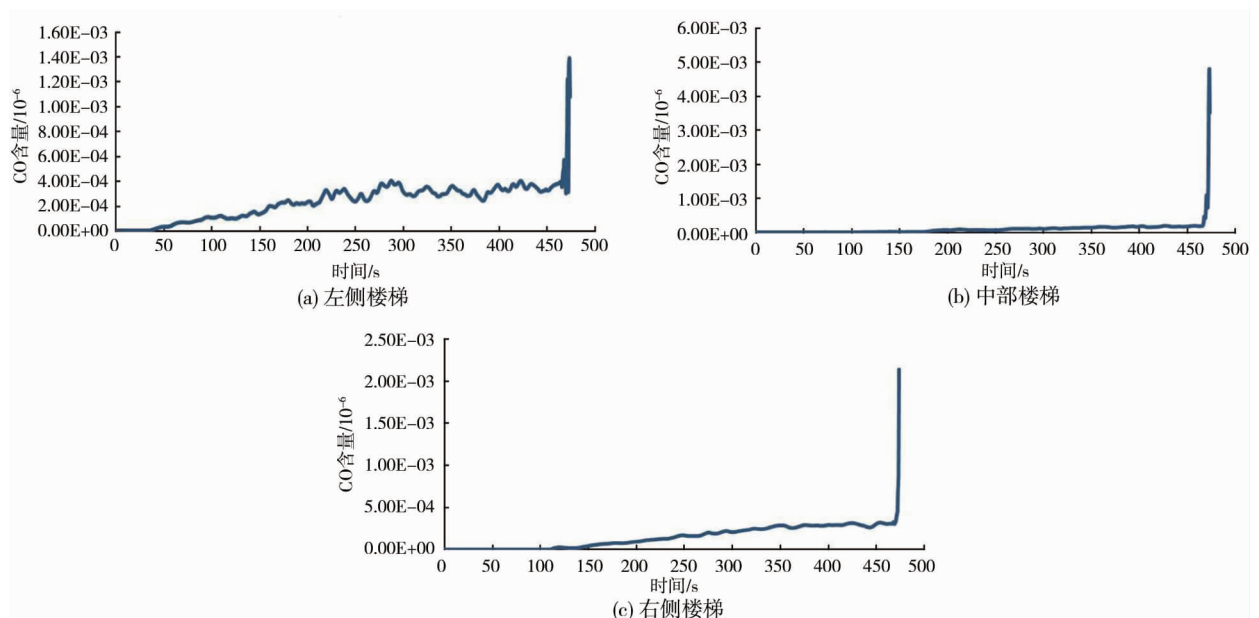


图 6 5 楼检测点 CO 含量变化曲线

#### 2.2.4 能见度分析

在发生火灾时,烟气在建筑物内蔓延,烟气的含量也在不断增加,随着环境能见度的降低,这时就需要对逃生路线进行准确的选择,逃离到适当的逃生出口.烟气层的能见度一般指人能够看清物体的最远距离,可接受能见度的参考值约为 13 m,同时空间大小也会对能见度临界值有影响,小空间的能见度临界值

为 5 m,大空间的能见度临界值为 10 m.

图 7 为教学楼 1 楼高度为 1.8 m 水平方向的能见度切片视图.由图 7 可知:60 s 时,1 楼着火房间内的能见度已低于 13 m,走廊左侧的能见度也降至 13 m 以下;120 s 时,左侧楼梯的能见度也逐渐下降至能见度临界值以下,其余区域的能见度还在临界值之上,人员可以进行安全疏散;180 s 时,中部楼梯处也充满烟气,由能见度数值可知此时不利于人员疏散,人员应从右侧安全出口进行疏散;400 s 时,1 楼的空间充满烟气,能见度降为最低值,此时很难对人员进行安全疏散.

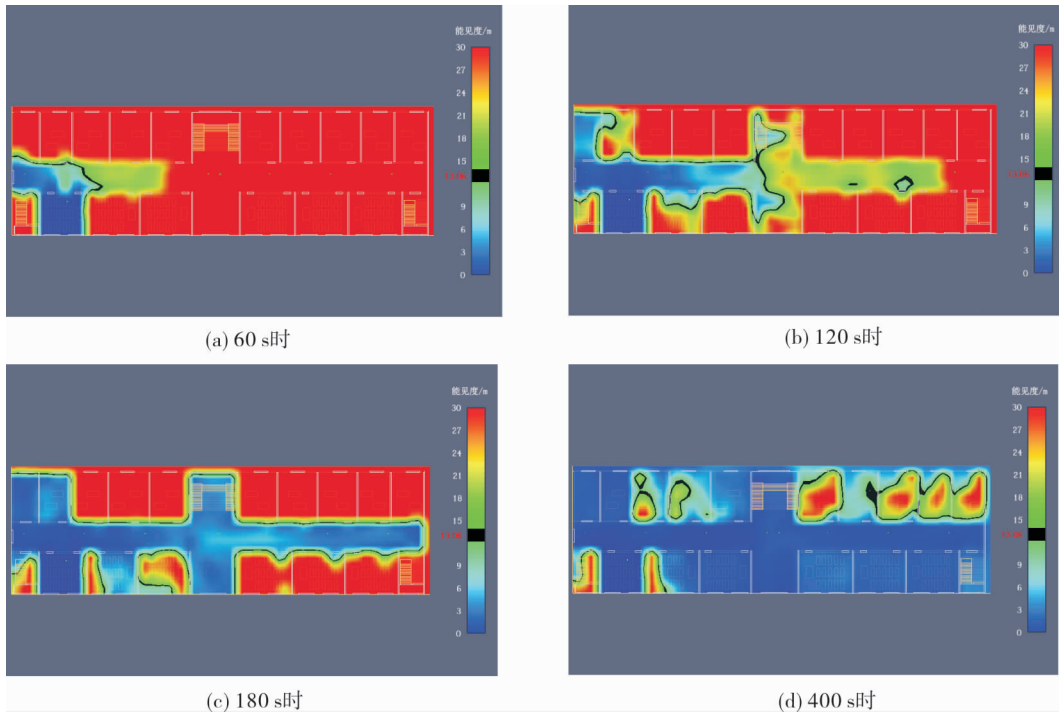


图 7 1 楼能见度情况

图 8 为教学楼 5 楼的能见度水平切片图.由图 8 可知:90 s 时,5 楼左侧楼梯的能见度数值低于临界值,此时 5 楼及以上的人员应从中部楼梯和右侧安全通道向下疏散;120 s 时,走廊左侧和右侧部分的能见度也降低至 13 m 以下,5 楼以上楼层的人员应通过中部楼梯及时撤离;200 s 时,此楼层的走廊及楼梯区域的能见度全部小于 13 m,人员很难安全疏散.

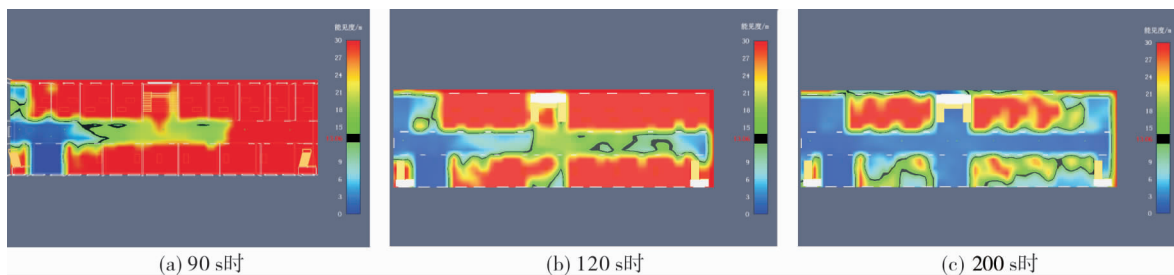


图 8 5 楼能见度情况

图 9 为整个教学楼能见度数值显示情况.由图 9 可知:60 s 时,烟气沿着走廊向右侧蔓延,5 楼烟气的蔓延速度相较于 1 楼要快一些,根据此时的能见度情况,人员应该有序从中部楼梯以及右侧安全出口进行疏散;120 s 时,烟雾已经充斥整个走廊,中部楼梯的能见度也逐渐下降,不利于安全疏散,应从右侧楼梯进行撤离;180 s 时,此时的能见度严重影响撤离,为安全疏散带来困难;450 s 时,烟气充斥整栋教学楼.

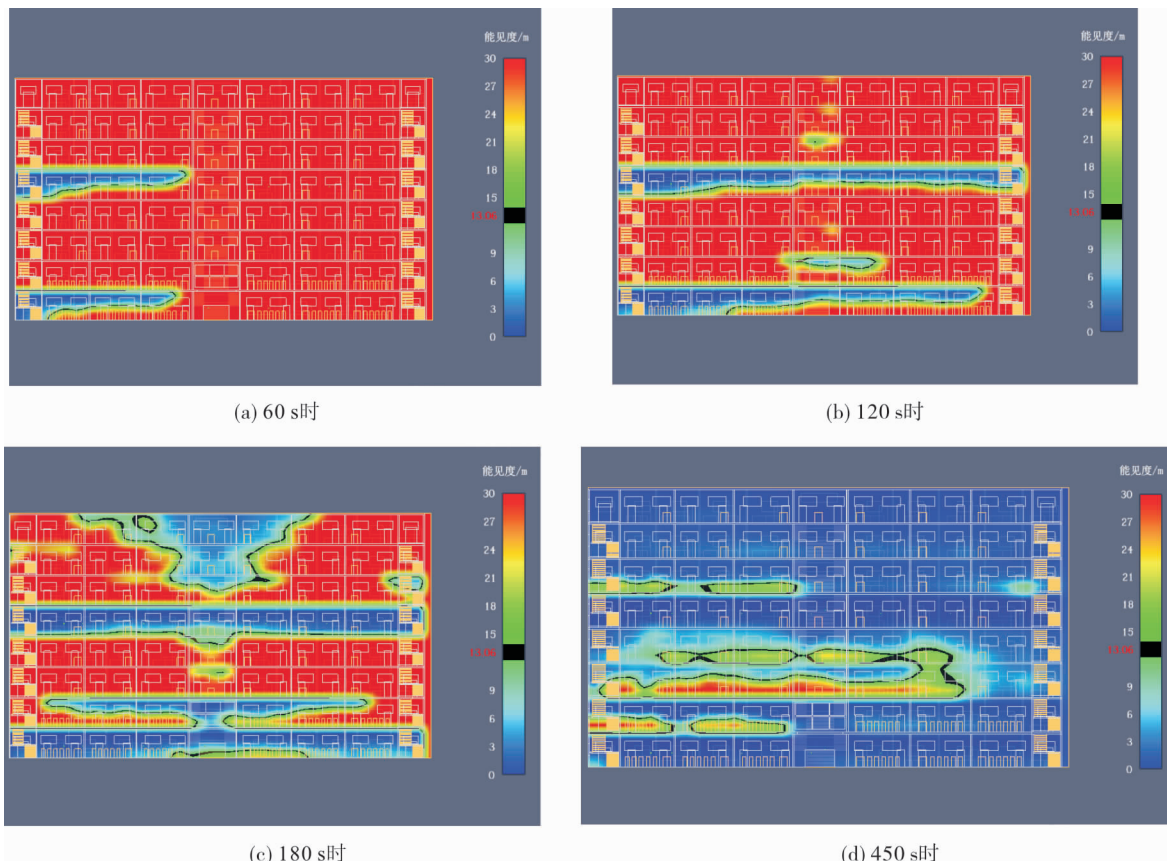


图 9 教学楼能见度情况

### 3 Pathfinder 疏散模拟分析

#### 3.1 Pathfinder 原理介绍

Pathfinder 是美国 Thunderhead Engineering 公司开发的模拟人员通过出口进行运动的模拟软件。Pathfinder 可在 2D 平面内设置人员可活动的区域、楼梯与安全通道、人员类型分布,还能设置人员的身高、肩宽和行动速度,通过三维空间层面的视图,对建筑物内部人员疏散的过程进行展示,每个人的运动都被计算在结果之内,然后得出每个个体匹配的参数.通过动态形式观察人员的疏散过程,得出人员从建筑物中撤离所需的时间.

#### 3.2 Pathfinder 参数设定及模型的建立

在采用 Pathfinder 建立模型时,首先进行参数的设定,部分数据采取软件默认的参数,通过对具体情况的考虑,设置以下人员参数:运动模式为 steering 模式;数量 368 个;肩宽 40.58 cm,身高 1.6~1.8 m;疏散速度 1.19 m/s.所建立的疏散模型如图 10 所示.

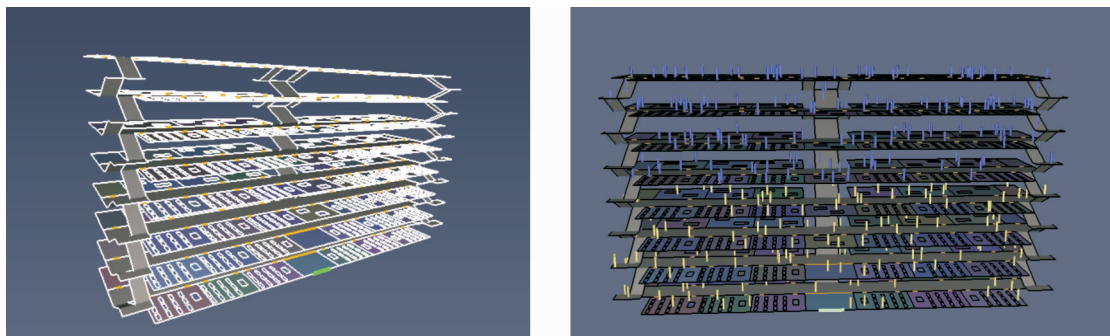


图 10 教学楼疏散模型

### 3.3 安全性判定

考虑不同楼层对人员疏散效率的影响,研究时分别将1~4楼和5~8楼的人员进行区分,在人群设置较为密集的情况下,讨论教学楼发生火灾后,位于低楼层与高楼层人员的安全疏散时间.模型模拟分析结果如图11所示.由图11可知:1~4楼人员的安全疏散时间为84 s,5~8楼人员的安全疏散时间为144.3 s,同时整栋教学楼的人员全部从建筑内疏散至安全区域.

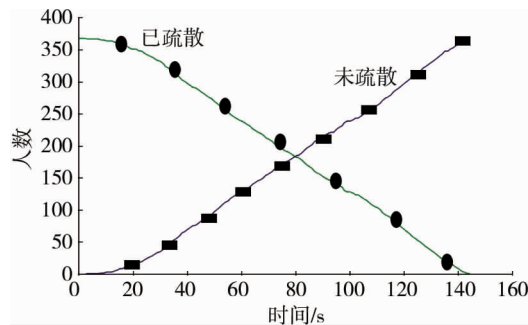


图11 已疏散人数和未疏散人数变化曲线

## 4 模拟结果对比分析及消防建议措施

### 4.1 结果对比分析

通过 Pyrosim 火灾模拟研究可以得知:高温、CO 含量、能见度是影响人员安全疏散的重要因素.由可用安全疏散时间的定义可得出:火灾中烟气达到能见度临界值的时间即为可用安全疏散时间,即1~4楼的人员向外疏散的时间临界值为120 s,5~8楼的人员向外疏散的时间临界值为110 s.同时,由 Pathfinder 疏散模拟数据结果可知:1~4楼的人员的必需安全疏散时间为84 s,5~8楼的人员的必需安全疏散时间为144.3 s.结合2组数据进行比较得出:1~4楼可用安全疏散时间大于必需安全疏散时间;5~8楼可用安全疏散时间小于必需安全疏散时间.由数据比较结果可知:该教学楼在人员疏散方面还存在一定危险性.

### 4.2 消防建议措施

教学楼除安装基本的灭火器外还应安装其他消防设施,如自动灭火系统、排烟系统等,并组织专人定期维护检修;其次,应安装应急照明灯,增设疏散指示设施,且可通过广播等设施指导人员进行疏散;最后,定期组织学生进行消防知识的学习以及消防演练,掌握基本消防技能,提高自救能力.

## 5 结论

1) 高温、CO 含量、能见度是影响人员安全疏散的重要因素,对烟气蔓延过程的研究有利于更好地设计和优化人员疏散.

2) 1~4楼内人员的可用安全疏散时间为120 s,必需安全疏散时间为84 s;5~8楼内人员的可用安全疏散时间为110 s,必需安全疏散时间为144.3 s,该教学楼在人员安全疏散方面还存在危险性.

3) 今后的研究方向建议通过模拟手段,分析如何延长高楼层人员向外疏散的时间临界值,以及环境因素之间的共同作用对安全疏散的影响.

### 参考文献:

- [1] Xie H, Hu W, Jin L Z. Simulation Training Module Design of Building fire [J]. Procedia Engineering, 2018, 211: 1131-1140.
- [2] Shi J, Dao J, Jiang L, et al. Research on IFC- and FDS-Based Information Sharing for Building Fire Safety Analysis [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(2): 1-18.
- [3] Kim H K, Choi D C, Kim I T, et al. A Study on the Fire Evacuation Assessment Considering Occupied Environment Variation



- in Existing Buildings[J]. Fire Science and Engineering, 2016, 30(6):105-110.
- [4] 张爱然,毕竟松,崔怡琳,等.基于 Pyrosim 模拟的高校宿舍火灾分析[J].山西大同大学学报(自然科学版),2019,35(6):63-67.
- [5] 益朋,钟兴润,李华,等.基于模拟疏散的连体型宿舍楼预先分区引导疏散策略研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(6):127-133.
- [6] 苗慧燕.高校火灾特点及扑救措施[J].安全,2018,39(4):58-60.
- [7] 潘晓菲,吕品.凹型建筑外立面火灾烟气蔓延特性研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):45-51.
- [8] 余明高,郑凯,郑立刚.高校教学楼走廊火灾烟气风险分析研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2012,31(3):249-252.
- [9] 郭阿敏,谷瑞玲.综合性图书馆火灾烟气模拟与人员疏散研究[J].消防科学与技术,2020,39(6):778-782.
- [10] 郭阿敏.多层建筑火灾中烟气蔓延规律及对人员疏散影响研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [11] 胡洁,方书昊,张飞超,等.高校公寓火灾烟气蔓延规律模拟与应用[J].消防科学与技术,2018,37(3):319-321.
- [12] 吴水根,游育林.基于 BIM 与 Pathfinder 的高层住宅应急疏散模拟研究[J].结构工程师,2017,33(4):83-89.
- [13] 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.
- [14] 张琳.基于火灾场景仿真的室内外应急疏散模型[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [15] 张璐,李艳丽,刘文华.基于 PyroSim 的核电厂多隔间火灾情景详细火灾模拟分析[J].给水排水,2018,54(s1):126-131.
- [16] 杨雨亭.基于 PyroSim 和 Pathfinder 的商业综合体火灾与安全疏散模拟仿真研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [17] 李驰原.基于 PyroSim 模拟的大跨度、大空间仓库火灾扑救技战术研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2018,40(1):5-8.
- [18] 杨海明,赵道亮,孙康娴,等.基于 MassMotion 及 PyroSim 的高层宿舍火灾模拟研究[J].消防科学与技术,2020,39(1):52-55.
- [19] 李杰,陈伟炯.Pathfinder 安全疏散应用研究综述[J].消防科学与技术,2019,38(10):1381-1384.
- [20] 李莹莹,卢丽丽.基于 pathfinder 的宿舍楼紧急疏散优化[J].科技风,2019(22):212.
- [21] 赵锐,孟祥雨,闵雪峰,等.基于 Pathfinder 的化工企业人员应急疏散模拟[J].科学技术与工程,2019,19(28):417-422.
- [22] 宋洋,凌竹.民用机场航站楼火灾应急疏散研究[J].消防科学与技术,2016,35(10):1384-1387.
- [23] 李德成.高层住宅建筑竖井内火灾烟气蔓延规律研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
- [24] 王黎斌,周俊坚,舒立琼.基于 FLUENT 的电梯井火灾烟气蔓延模拟分析[J].中国特种设备安全,2018,34(8):21-24.
- [25] 苗香溢.可燃气体火灾成灾机制与危险性控制技术研究[D].天津:天津理工大学,2008.
- [26] 柴盼.高层建筑火灾场景设置研究[D].重庆:重庆大学,2014.