

袁东升,卢晓通,钟福平.基于 FDS 的老旧商场火灾模拟及疏散方案[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4): 25-31. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.004

Yuan D S, Lu X T, Zhong F P. Fire Simulation and Evacuation Plan for Old Emporium Based on FDS [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35 (4): 25-31. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.004

基于 FDS 的老旧商场火灾模拟及疏散方案

袁东升*,卢晓通,钟福平

(河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454003)

摘要:老旧商场由于通风和消防设施不齐全,一旦发生火灾,会产生大量有毒有害气体,对人员的安全疏散造成严重影响.针对上述问题,以某老旧商场为例,研究在相对密闭且消防设施不完备的条件下发生火灾时,温度和烟尘的分布情况及烟囱效应和抽吸作用对烟尘分布的影响,并制定人员疏散方案.根据该商场的具体条件使用 FDS 软件建模,在商场内 6 个具有代表性的位置设置火源并设置 3 个出口.模拟各火源在火灾发生后 300 s 内的烟尘扩散速度、到达出口的时间,以及这 3 个出口处的温度随时间的变化规律.研究表明:1 楼楼梯间发生火灾对人员撤离的影响最大;火灾过程中,烟囱效应和抽吸作用对烟尘扩散的影响显著;制定合理的疏散方案可以更大程度地保障老旧商场人员的安全疏散,同时可以节约更多的人力物力.

关键词:商场;火灾;FDS 模拟;温度和烟尘分布;疏散方案

中图分类号:X932 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)04-0025-07

Fire Simulation and Evacuation Plan for Old Emporium Based on FDS

Yuan Dongsheng, Lu Xiaotong, Zhong Fuping

(College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In the old shopping malls, due to the incomplete ventilation and fire-fighting facilities, in the event of a fire, a large amount of toxic and harmful gases would be generated, which would seriously affect the safe evacuation of personnel. In view of the above problems, an old shopping mall was taken as an example to study the temperature and soot distribution in the case of fire in a relatively closed and incomplete fire-fighting facility, and the effect of the chimney effect and suction on the distribution of smoke and dust, and a personnel evacuation plan was formulated. According to the specific conditions of the mall, the FDS software was used to model the fire source and three outlets were set up in six representative locations in the mall. The diffusion velocity of smoke and the time of reaching the exit within 300 s after the fire were simulated, and the temperature variation of these three outlets with time was also simulated. The results showed that fires in the stairwells on the first floor have the greatest impact on evacuation. During the fire, the chimney effect and the suction effect have a significant effect on the soot diffusion. The establishment of a reasonable evacuation plan can ensure the safe evacuation of the old mall personnel, and at the same time save more manpower and material resources.

Keywords: emporium; fire; FDS simulation; distribution of temperature and smoke dust; evacuation plan

收稿日期:2019-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674103)

*通信作者,E-mail: yds1968819@hpu.edu.cn

商场人群密集,衣服、衣柜等可燃物多,一旦发生火灾,这些材料燃烧猛烈,还会产生大量的有毒气体,给疏散和扑救工作带来很大困难^[1].洛阳东都商厦12·25特大火灾事故就是一个惨痛的教训,由于该商场没有合理的疏散方案,事故共造成309人中毒窒息死亡,7人受伤,直接经济损失275万元^[2].因此,合理的疏散方案对保障人员生命健康安全具有重要的意义.

关于制定合理疏散方案的研究从20世纪80年代就已经开始,主要以实体试验为主,但因试验需要大量的经费及操作过程中会造成环境污染等问题,自20世纪90年代后主要采用的研究方法为计算机仿真模拟^[3],可有效地避免实体试验的缺点.日本横滨国立大学的Manabu Tsukahara等^[4]创新性地采用FDS软件对大邱地铁站进行了全尺寸数值模拟研究,分析了楼梯口的火灾烟气分布和烟气温度的情况,并提出了地铁火灾发生时的一种新的人员安全疏散方案;邢志祥等^[5]分析了不同楼层起火对人员疏散的影响,得出起火楼层越低,对人员疏散产生的影响越大,后果越严重;韩朱旻等^[6]结合FDS模拟,提出一种实时的人员伤害定量评估方法,为制定人员疏散方案提供重要参考依据;罗振敏等^[7]通过FDS模拟隧道在不同着火点发生火灾时,3种不同通风风速对人员疏散的影响,并制定了合理的疏散方案;马子超等^[8]研究了中庭岛式商场火灾的烟气流动,并依据不同火灾场景的模拟结果制定了合理的疏散方案.以上研究成果提供了火灾模拟分析的理论和方法,并在模拟的火灾场景中进行了应用.

本论文采用混合分数燃烧模型^[9]、大涡湍流模型LES(large eddy simulation)^[10]和使用FDS 5软件进行模拟,并通过热释放率来描述火场的大小^[11-12].对在相同燃烧条件下的6个不同位置火源点着火后的烟尘流动和温度变化进行了模拟,并着重分析了烟尘和温度受到烟筒效应和抽吸作用后的变化.通过对各个人员疏散出口处的温度变化情况和健康的成年人体所能承受的极限高温条件进行分析比较,并根据其结果来制定科学合理高效的疏散方案.

1 建立模型

1.1 几何模型

以某旧式商场为原型建立几何模型.商场主体为5楼,1楼为仓库、总控室和大厅,2楼、3楼、4楼为商家店铺,5楼为美食广场.整个模型长34 m,宽14.8 m,高17 m,墙厚为0.2 m.商场各楼层的平面图和商场剖面图、侧视图如图1~图5所示.

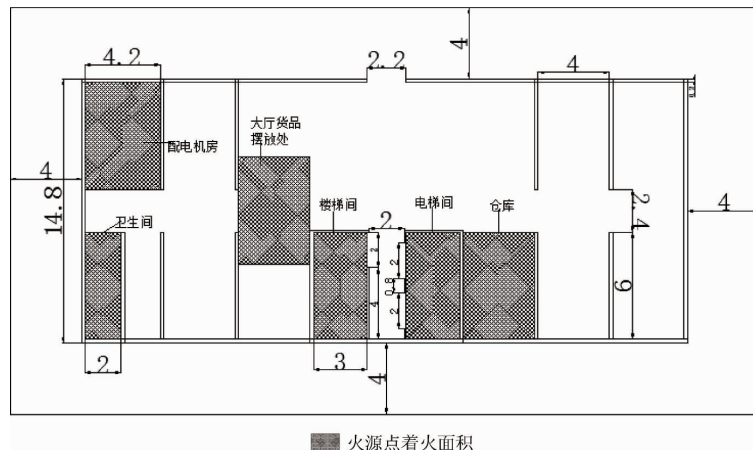


图1 商场1楼(单位:m)

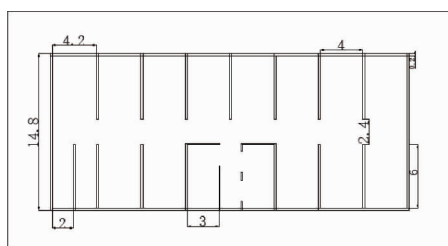


图2 商场2楼、3楼、4楼(单位:m)

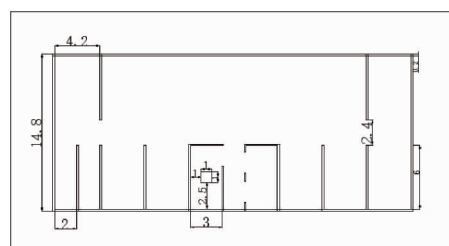


图3 商场5楼(单位:m)

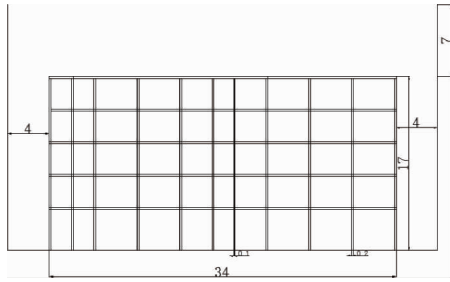


图4 商场剖面图(单位:m)

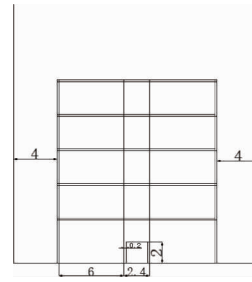


图5 商场侧视图(单位:m)

1.2 网格划分及边界条件

整个模型为长 \times 宽 \times 高 = 42.0 m \times 22.8 m \times 19.0 m.对整个商场模型进行网格划分时,应该综合考虑整个商场不同火源点的着火情况及烟尘扩散的不确定性,并考虑计算结果精度和计算机性能的限制.

在整个模型中将建筑和外围空气的网格均划分为 0.420 m \times 0.456 m \times 0.190 m 的大小,从而实现模拟计算能得到最优解的目的.在模拟中,商场和大气之间是相互贯通的且通风系统欠缺,没有设置机械通风,商场内外不存在压力和温度差,因此,商场内外气压强和温度均分别为 101.325 kPa, 20 $^{\circ}$ C.由于商场比较老旧,条件限制,并没有设置防火卷帘、消防喷头等消防设施.

1.3 火灾场景的设计

商场模型如图6所示.根据对火灾案例的统计分析,选取变电机房、仓库、厕所、大厅、电梯间和楼梯间这6处较常发生火灾的点作为模拟场景.着火点分别为厕所 2 m \times 6 m(火源点1),变电机房 4.2 m \times 6.0 m(火源点2),仓库 4 m \times 6 m(火源点5),大厅 4 m \times 6 m(火源点3,如图7),电梯间和楼梯间都是 3 m \times 6 m(火源点4和火源点6),各个火源位置如图8所示.设定火源为稳定庚烷火,热释放率 5 000 kW.试验模拟火灾发生后 100 s 内,3 个出入口处温度变化剧烈,100 s 后波动开始变缓,并于 300 s 前趋于稳定.因此,本文将 0~300 s 设定为研究的着火时间.

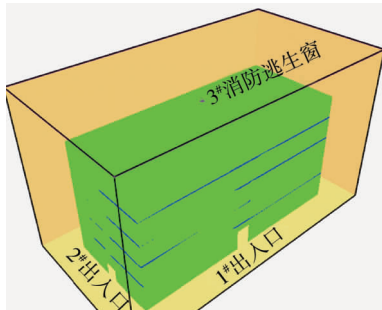


图6 商场模型

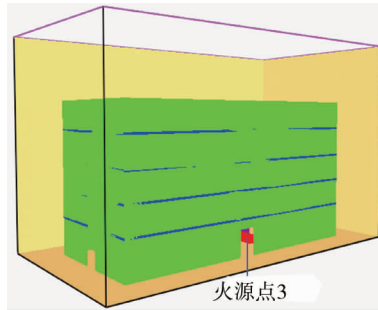


图7 火源点3

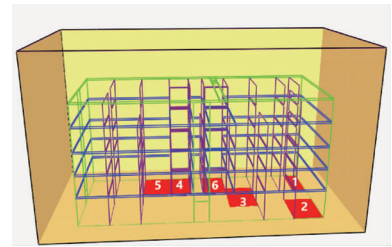


图8 各个火源位置

2 商场火灾模拟结果及分析

如果火灾在商场营业时发生,其内部有大量人员,必须立刻有序进行逃生.在商场总体结构中,只有 1 $^{\#}$ 出入口,2 $^{\#}$ 出入口消防疏散通道和 3 $^{\#}$ 消防逃生窗可供人员进行疏散.1 $^{\#}$ 出入口在建筑的前端,2 $^{\#}$ 出入口在建筑的左部,3 $^{\#}$ 消防逃生窗在建筑顶部,出入口的位置信息详见图6.6 个不同火源点的位置信息详见图8.观察火源点着火后 300 s 内烟尘抵达 3 个出入口处的时间和这 3 个出入口处的温度变化情况.

2.1 模拟火灾烟尘流动的结果及分析

6 个不同火源点着火的模拟结果可采用 Smokeview^[13] 分别进行观察分析,得出各个情况下烟尘抵达 3 个出入口的时间,详见表 1.在火灾发生过程中,与外界相连的各个出入口的烟筒效应形成时间详见表 2.

该商场共有 5 楼,位于 1 楼的火源点着火时,一旦与顶楼的消防逃生窗形成烟筒,将会极大地阻碍 2 楼及以上人员通过楼梯进行安全疏散.从表 1 和表 2 可知:当火源点 6 着火时,烟尘最早到达消防逃生窗 3,烟筒效应形成最早,最不利于人员逃生.火源点 6 着火后 111 s,建筑内烟尘分布如图 9 所示.火源点 1 着火时烟筒效应建立时间最晚,高层人员有更多的时间通过楼梯进行逃生,故最安全,如图 10 所示.

表1 烟尘到达各出口的时间

各火源点着火场景	火源点 1	火源点 2	火源点 3	火源点 4	火源点 5	火源点 6
烟尘到达出入口 1 时间	8~300	4~300	3~300	6~300	4~300	5~300
烟尘到达出入口 2 时间	17~300	4~300	7~300	12~300	3~300	13~300
烟尘到达逃生窗 3 时间	35~300	29~300	15~300	5~300	16~300	4~300

注:8~300 为烟尘到达时刻为 8 s,8~300 s 内一直有烟尘通过

表2 烟筒效应形成的时间

各火源点着火场景	火源点 1	火源点 2	火源点 3	火源点 4	火源点 5	火源点 6
电梯间烟筒效应建立时间	43	24	13	0	14	4
楼梯间烟筒效应建立时间	30	23	15	4	12	0

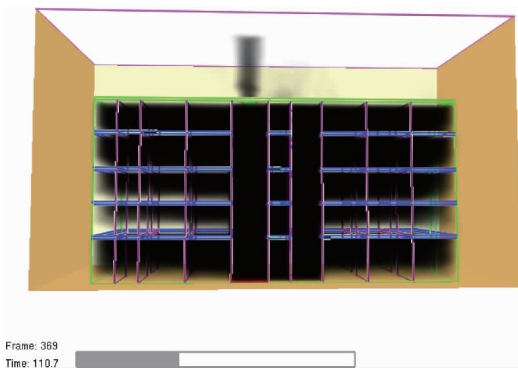


图9 火源点 6 着火后 111 s,建筑内烟尘分布

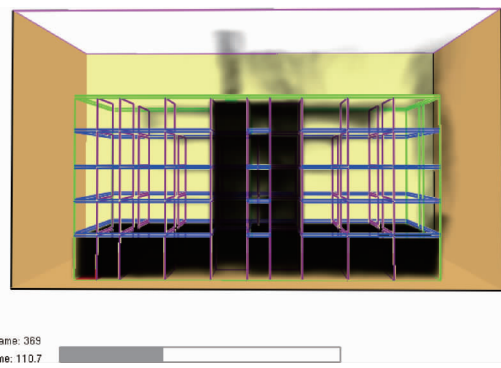


图10 火源点 1 着火后 111 s,建筑内烟尘分布

由表 1 可知:由于老旧商场在设计上存在缺陷,出入口较少,所以一旦发生火灾就会对商场内人员的安全产生严重威胁.随着烟气的蔓延,1[#]出入口、2[#]出入口的温度出现了短暂下降,这种现象是由于烟筒效应造成的,在火源点 2 和火源点 5 处时很明显.由于在商场顶部有 3[#]消防逃生窗,形成烟筒效应对烟尘具有抽吸作用,减轻了楼层中的烟气弥散.因为大气压力的存在,火灾刚发生时,若形成烟筒则需要克服大气压力,流动的烟尘因受到大气的阻力而向四周扩散,致使烟尘沿商场水平方向迅速弥散,所以在火灾发生初期的一段时间里 1 楼烟气较浓郁,且能迅速到达 1[#]出入口和 2[#]出入口.但当烟筒效应形成后,商场内部的热气流从烟筒中流入大气,烟筒形成的阻力减小,这时烟尘在水平方向的弥散速度减小,如图 11 所示.火源点 2 着火时,第 270 s 时 1[#]出入口的出烟量要小于第 227 s 时 1[#]出入口的出烟量.火源点 4、火源点 6 着火时,商场 1 楼和 5 楼最先出现大量的烟气弥漫,对顶楼人员的疏散产生较大影响,而且从 2 楼~5 楼的烟气浓度逐渐增大,如图 12 所示.

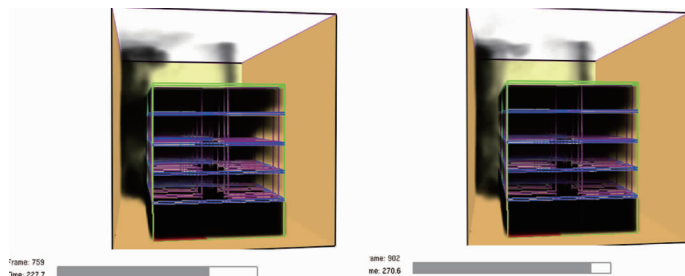


图11 火源点 2 着火后 227 s 和 270 s 时 1[#]出入口的烟气对比

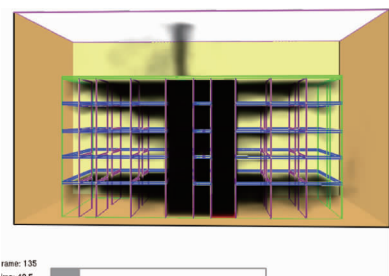


图12 火源点 4 着火后 40 s 的烟尘分布

2.2 温度变化模拟结果及分析

一旦商场内开始着火,人员需马上从 3 个出口中选择最近且安全的出口进行逃生.但由于位于不同位置的火源点着火时烟尘的分布及温度变化情况也会不同,合适的逃生路径会发生相应的改变.如果选择的逃生路径不合理,则会因为疏散路途中的烟尘浓度和温度超过人体所能承受的极限,造成伤亡.应结合火源位置和烟尘温度的变化选择合适的路径.模拟中检测了 1 楼 2 个出入口距地面约 1.5 m^[14]和楼顶消防

逃生窗在6个火源点发生火灾后300s内的温度变化情况,各出入口处温度变化分别如图13~图18所示。监测点的温度采用临界火场温度来确定,因为在模拟中火灾辐射和烟尘温度数据是无法直观观测得出。由Carnee对穿着常服的健康成年男性高温耐受的实验结果^[14]和日本《避难设计》^[15]可以确定空气温度 T 与临界忍受时间 S (人在一定温度下能忍受的时间)的关系: $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $S>60\text{ min}$; $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $S=60\text{ min}$; $T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $S=15\text{ min}$; $T=200\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $S=5\text{ min}$ 。根据以上对应关系,可指导人员进行安全撤离。

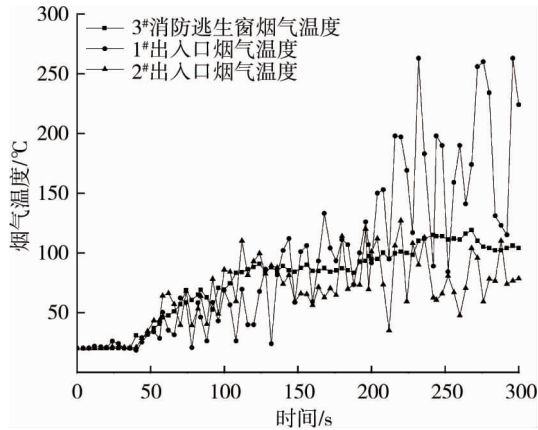


图13 火源点1着火后各出口温度变化

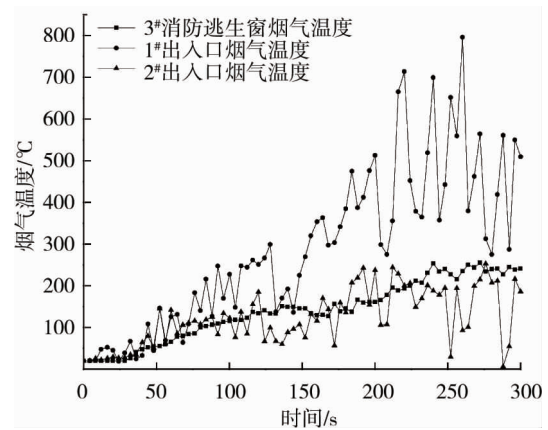


图14 火源点2着火后各出口温度变化

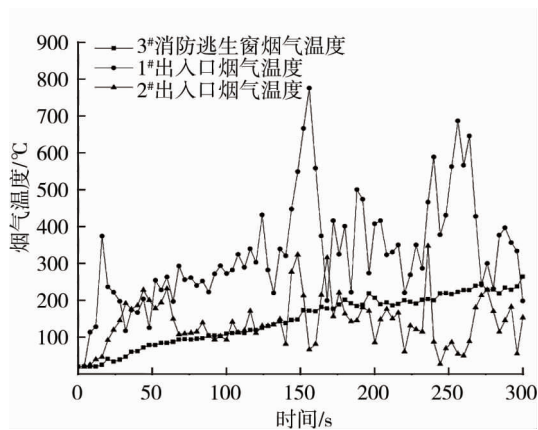


图15 火源点3着火后各出口温度变化

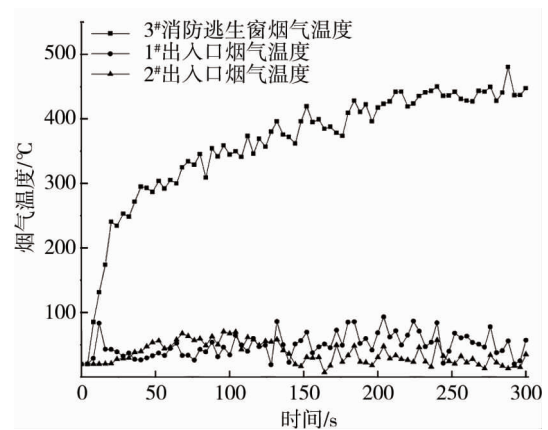


图16 火源点4着火后各出口温度变化

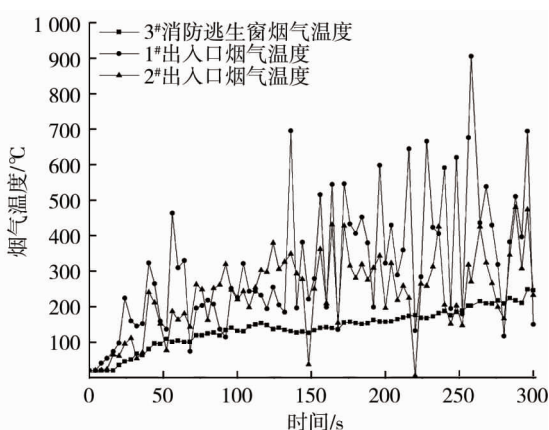


图17 火源点5着火后各出口温度变化

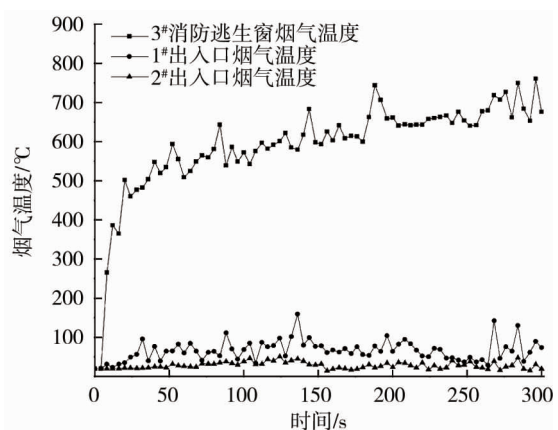


图18 火源点6着火后各出口温度变化

3 疏散方案制定

从图13~图18可知:发生火灾后,在较短时间内温度急剧升高,然后达到一定温度后温度虽仍有波动,但总体趋势缓慢升高。可依据空气温度与临界忍受时间的对应关系、图13~图18的温度变化曲线及人

员所在位置,综合商场实际情况,整理各出入口允许逃生的时间,数据如表3所示。

表3 各个出入口允许逃生时间

各火源点着火场景	火源点1	火源点2	火源点3	火源点4	火源点5	火源点6
出入口1允许逃生时间	0~210	0~30	×	0~300	10~30	0~300
出入口2允许逃生时间	0~300	0~300	60~130	0~300	0~30	0~300
逃生窗3允许逃生时间	0~30	0~30	0~60	×	0~30	×

注:0~30为火灾发生后该出口0~30s可以逃生;×为任何时候都不可逃生

分析表3的数据并对表1和表2可知:虽然火源点5着火后,1[#]出入口和2[#]出入口允许逃生的时间相比火源点6短,但由于火源点6着火后会瞬间在楼梯间形成烟筒效应,导致高层人员无法通过楼梯疏散,3[#]消防逃生窗也因温度过高无法疏散,故火源点6着火后疏散难度最大。

总结以上数据可以制定如下的应急疏散方案,以更好地指导人员疏散:

1)火源点1着火时,在火灾发生30s内可经任意一逃生口进行逃生;在30~200s不应从3[#]消防逃生窗逃生,3楼~5楼可经由楼梯先下到1楼,然后经1[#]出入口或2[#]出入口逃生。

2)火源点2着火时,在前30s内可从1[#]出入口、2[#]出入口和3[#]消防逃生窗进行逃生;在30s以后,3[#]消防逃生窗由于烟气浓度过高,可能会导致人员中毒,不适宜逃生;在60s以后不应从1[#]出入口逃生,故最好的逃生路径为2[#]出入口。

3)火源点3着火时,不能从1[#]出入口进行逃生,应先从2[#]出入口和3[#]消防逃生窗逃生;在60s后3[#]消防逃生窗不应再进行逃生;在60~130s内2[#]出入口处温度下降较多,可在此时紧急撤离一部分人。

4)火源点4着火时,不应从3[#]消防逃生窗逃生,可先经楼梯进入下层,从1楼1[#]出入口、2[#]出入口逃生,在下楼时尽量压低身体或匍匐前进,并用湿布捂住口鼻。

5)火源点5着火时,1楼人员应尽快从1[#]出入口、2[#]出入口进行逃生,此时4楼、5楼的人员可先从商场顶部3[#]消防逃生窗逃生。

6)火源点6着火时,不应从3[#]消防逃生窗逃生,由于火源在楼梯间,因此,1楼人员应尽快从1[#]出入口、2[#]出入口逃生,5楼人员应尽量往下层撤离,同时尽量压低身体或匍匐前进,用湿布捂住口鼻。

以上6种疏散方案中,人员在撤离时,需按照疏散指示,尽量压低身体或者匍匐前进,并用湿毛巾捂住口鼻,有序撤离。若商场上层人员来不及撤离至1楼,则应尽量逃离到就近厕所处,用水打湿衣服,蹲在或趴在地上等待救援。

4 结论

1)通过分析可以发现,发生火灾时最不利于人员疏散的情况是位于商场1楼的楼梯间,这种情况下烟尘会经过烟筒效应被吸入上层,阻断楼上人员向1楼1[#]出入口、2[#]出入口撤离,而且3[#]消防逃生窗也因温度过高不能撤离人员。

2)着火的火源点位置不同时,老旧商场内烟尘弥散的情况和各出入口的温度变化情况不同。火源点距出口较远,各出口的温度变化和烟尘对人员疏散的影响较小;火源点距出入口越近,空气流动更加剧烈,出入口的温度和烟尘在瞬间就开始剧烈上升,且起伏波动很大,火源点与3[#]消防逃生窗建立烟筒效应越快,越不利于高层人员逃生。

3)随着时间的推移,各出入口温度监测点处涌出的烟尘浓度有高低波动,这是由于烟筒效应和抽吸作用的耦合对烟尘扩散的影响。抽吸作用一方面使烟尘的扩散范围变小,另一方面促使烟气扩散到商场的另外几楼,它对建筑内部的烟尘分布有重要的影响。

4)依据模拟所得的不同火源点着火时商场内部烟尘流动和温度的变化情况,并结合日本《避难设计》确定的温度与临界时间的对应关系及商场的实际情况,制定不同条件下能保障商场内人员安全疏散的最佳方案。通过与现行方案进行对比,可以评价商场现行的疏散方案是否合理,并对其进行改进,可节约更多

的人力物力.

5)以上结论既可为老旧商场发生火灾危险时的人员疏散提供理论方案,尽可能地避免人员伤亡,并在一定程度上为后期科学合理地布置消防措施以防止老旧商场内的火灾烟气蔓延提供依据,节约了老旧商场消防改造的人力物力和资金投入.

参考文献:

- [1] 王辉东.某宾馆火灾烟气扩散及疏散模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(12):61-66.
- [2] 李鸣轩.基于AHP-TOPSIS法的大型商业综合体消防韧性评估[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [3] 邢志祥,张莹,钱辉,等.地铁车站火灾和人员疏散仿真模拟技术发展的新思路[J].安全与环境工程,2018,25(3):130-135.
- [4] Tsukahara M, Koshiha Y, Ohtani H. Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using Fire Dynamics Simulator[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2011, 26(4): 573-581.
- [5] 邢志祥,唐永,高文莉.高层住宅建筑火灾人员疏散仿真研究[J].中国安全生产科学技术,2012,8(6):29-33.
- [6] 韩朱昀,翁文国,黄全义.城市高层建筑火灾人员伤亡实时定量评估[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(12):1720-1725.
- [7] 罗振敏,郝强强,程方明,等.地铁隧道火灾模拟及人员疏散研究[J].消防科学与技术,2019,38(3):363-367.
- [8] 马子超,肖泽南,陈静,等.中庭岛式商场火灾烟气及人员疏散研究[J].消防科学与技术,2019,38(1):86-89.
- [9] 胡勇,蒋勇,邱榕,等.流扩散火焰中对基于混合分数的湍流燃烧模型的数值研究[J].燃烧科学与技术,2011,17(2):147-154.
- [10] 刘阳,许春晓,周力行,等.气固流动大涡模拟和两相湍流模型的评价[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(2):297-300.
- [11] Kang N, Qin Y P, Han X, et al. Experimental study on heat release rate measurement in tunnel fires[J]. Fire and Materials, 2019, 43(4): 381-392.
- [12] Peacock R D, Davis S, Babrauskas V. Data for room fire model comparisons[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1991, 96(4): 411-462.
- [13] Forney G P, Mcgrattan K B. User's guide for smoke-view version 4—a tool for visualizing fire dynamics simulation data[R]. Gaithersburg: NIST Special Publication, 2006.
- [14] 李引擎.建筑防火工程[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [15] 崔铁军,马云东.基于FDS的施工地铁车站火灾模拟及疏散方案[J].自然灾害学报,2013,22(6):178-184.