

考虑人员伤亡的高校宿舍火灾风险评估方法研究^{*}

于洪霞^{1,2}, 张英华^{1,2}, 秦挺鑫³, 王晶晶⁴, 张益^{1,2}, 高玉坤^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 矿山避险技术研究中心, 北京 100083;

3. 中国标准化研究院, 北京 100191;

4. 北京城市系统工程研究中心, 北京 100044)

摘要:为提高高校宿舍楼火灾应急疏散效率,以某高校宿舍楼为例,建立可用疏散时间(ASET)概率密度函数的三角分布模型,并利用FDS软件进行火灾模拟,得到函数中各参数值;运用Pathfinder软件对人员疏散进行模拟,得到火灾未疏散人数与时间的函数;通过对上述2个函数的乘积进行积分,得到不同火灾场景下的伤亡人数。结果表明:影响火灾临界时间的主要因素是火灾能见度和烟气层温度;宿舍楼中部火灾发展速度快于两侧;人员性别、意识状态及火灾探测报警情况对疏散时间和效率影响程度不同。研究结果可为应急疏散及宿舍楼人员预期火灾风险评估提供依据。

关键词:高校宿舍火灾;FDS;Pathfinder;人员疏散;场景模拟;伤亡人数

中图分类号:X932 文献标志码:A 文章编号:1673-193X(2022)-01-0081-06

Study on fire risk assessment method of college dormitory considering personnel casualties

YU Hongxia^{1,2}, ZHANG Yinghua^{1,2}, QIN Tingxin³, WANG Jingjing⁴, ZHANG Yi^{1,2}, GAO Yukun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Mine Emergency Technology Research Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China;

4. Beijing Research Center of Urban System Engineering, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to improve the fire emergency evacuation efficiency of college dormitory buildings, taking a college dormitory building as an example, a triangulation distribution model of probability density function for the available safe evacuation time (ASET) was established, and the FDS software was used to simulate the fire of dormitory building, and the values of each parameter in the function were obtained. The Pathfinder software was used to simulate the personnel evacuation of the dormitory building, and the function of the number of personnel that were not evacuated and the time of fire was obtained. By integrating the product of the above two functions, the numbers of casualties under different fire scenes were obtained. The results showed that the main factors affecting the critical time of fire were the fire visibility and the temperature of smoke layer. The fire development speed in the middle of the dormitory building was faster than those on the two sides. The gender of personnel, the state of consciousness and the situation of fire detection and alarm had different degrees of influence on the evacuation time and efficiency. The results can provide basis for the emergency evacuation and the fire risk assessment of dormitory personnel.

Key words: college dormitory fire; FDS; Pathfinder; personnel evacuation; scene simulation; number of casualties

收稿日期: 2021-04-02

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0810600)

作者简介: 于洪霞, 硕士研究生, 主要研究方向为应急救援。

通信作者: 高玉坤, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为应急管理及实验室安全。

0 引言

随着社会发展,建筑物数量和人口密度不断增长,往往随之而来的是火灾风险不断增大,给人民生命和财产造成一定威胁。高校宿舍楼作为高校不可或缺的建筑,建立时间普遍较早,存在电气线路老化、部分消防设施缺失和消防通道狭窄等火灾安全隐患。同时,宿舍楼是学生学习生活的最主要场所,一旦发生火灾,火势增长速度较快,又因宿舍楼内学生数量较多,在进行火灾疏散时易发生拥挤,不仅影响疏散速度,还可能造成踩踏等二次事故。宿舍楼火灾发生可能性较高,且火灾发生后可能造成大量人员伤亡。因此,高校应该建立科学的宿舍楼火灾风险评价机制,以遏制火灾事故的发生,降低火灾事故损失。

部分学者针对火灾风险评估开展研究:范维澄^[1]采用火灾双重性理论构建火灾评估体系;易立新^[2]采用事故树分析法,结合随机过程的马尔科夫模型,建立火灾风险评价动态模型;杜红兵等^[3]采用模糊数学原理,借助系统工程的模糊综合评价法,对高层建筑的火灾风险进行评估。

综上,我国火灾风险仍集中在定性和半定量分析。据文献统计,我国近年来核心期刊综述和定性分析占 37.8%,半定量占 61%,定量分析只占 1.2%^[4],但定性和半定量分析结论存在较大主观性,缺乏定量化数据支撑,导致结论不具有说服力。因此,本文通过构建建筑火灾伤亡人数函数模型,得到不同火灾场景下的伤亡人数,对火灾风险评估方法的进一步完善具有参考借鉴意义。

1 ASET 概率密度函数模型构建

1.1 ASET 的不确定性分析

ASET 的大小不仅由火灾位置、火灾增长模型和热释放速度等火灾因素决定,还受建筑内消防系统的影响。例如由于可燃物的不确定性,建筑内火灾增长系数是 1 个随对数正态分布的随机变量^[5]。此外,还有许多其他不确定因素,如烟雾报警器的报警时间、机械排烟风机的启动时间和喷淋系统的启动时间等,这些因素都可能影响建筑火灾临界时间。因此,可以通过概率分布描述 ASET 以表示其不确定性。

1.2 ASET 概率密度函数简化

从文献[6]得出 ASET 的概率密度函数呈正态分布,但正态分布的函数需要确定多种参数,要想通过拟合函数曲线得到函数表达式需经过大量计算或模拟。将 ASET 的概率密度函数简化为三角分布模型,可通过确定概率密度函数的最小值、最大值和最可能值建立 ASET 概率密度函数模型。ASET 三角分布的概率密度函

数如式(1)所示:

$$f_A(t) = \begin{cases} \frac{2(t-a)}{(b-a)(c-a)}, a \leq t \leq c \\ \frac{2(b-t)}{(b-a)(b-c)}, c \leq t \leq b \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为火灾发生时间, s ; a 为达到火灾临界状态的最短时间,即达到 ASET 的最短时间; s ; b 为达到 ASET 的最长时间; s ; c 为达到 ASET 时,可能性最大的时间, s 。

根据式(1)可得,ASET 概率密度函数的确定应获得在对应火灾场景下 ASET 的最小值 a 、最大值 b 及最可能值 c 。

2 宿舍楼火灾仿真模拟

2.1 宿舍楼描述及模型建立

某高校宿舍楼平面呈 L 型,东西长 72 m,南北长 92 m,走廊宽度 2.8 m。该宿舍楼共有 12 层,每层有 41 间宿舍,宿舍长宽高为 6 m × 3.5 m × 3.2 m,宿舍门的尺寸为 1 m × 2.1 m,宿舍楼平面示意如图 1 所示。 R 是宿舍楼每层的排烟前室; D 表示宿舍楼的防火门; S_1 、 S_2 和 S_3 分别代表宿舍楼内的 3 个防烟楼梯间; V_1 和 V_2 分别代表了宿舍楼每层的 2 个排烟口。宿舍楼每层布局基本相同,每层均为 1 个独立的防火分区,宿舍楼的防烟楼梯间内无可燃物,所以只对宿舍楼的某 1 层展开研究。

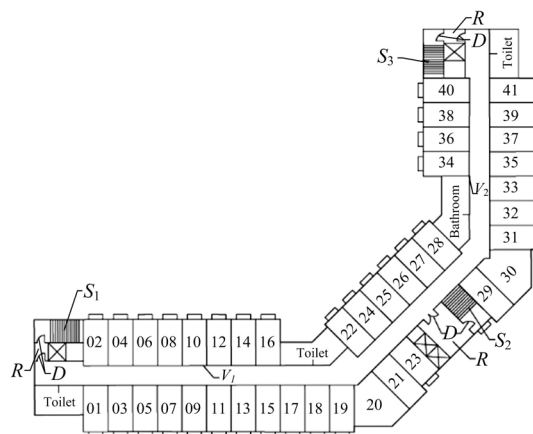


图 1 宿舍楼平面示意

Fig. 1 Schematic diagram of dormitory building plan

利用 FDS 前处理软件 PyroSim 2016 软件对宿舍楼层平面进行 3D 物理建模,进行网络和区域划分。计算空间均匀划分为 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m 的网格,共 127 680 个,宿舍楼层平面 PyroSim 模型如图 2 所示。

2.2 参数设定

1) 火灾模型和火灾规模。火灾的发展是 1 个不断加速的过程,选择 t^2 火灾模型^[7];火灾增长系数的最小值、最大值和最可能值分别为 0.027、0.101、0.046 89 kW/

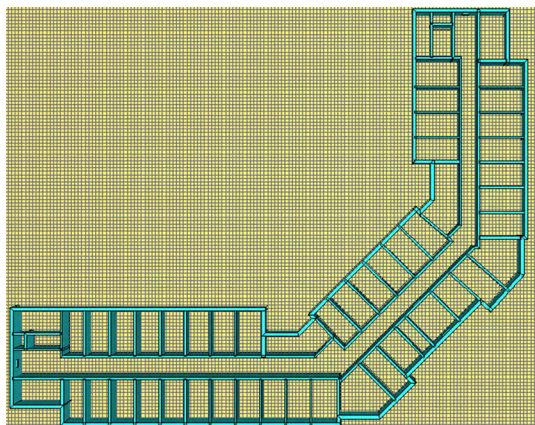


图2 宿舍楼层平面 PyroSim 模型

Fig.2 PyroSim model of dormitory building floor plan

$s^{2[8-9]}$;根据建筑火灾热释放速率标准^[10],模拟的最大热释放速率取 6 MW。

2)模拟时间。根据疏散模拟分析,宿舍楼内人员在 600 s 内一定能够完成每层的疏散,因此将火灾模拟时间设定为 600 s。

2.3 火灾场景设置

火源设定为位于西侧的 01 号房间和位于中部的 26 号房间,宿舍火灾原因设定为由于学生吸烟点燃床铺,点火源大小设定为直径为 10 mm 的粒子,温度为 350 ℃,点燃速度为立即点燃,床铺材料设定为布和聚氨酯。机械排烟系统分为正常和故障 2 种状态,分别设置火灾场景 1、2、3、4,见表 1。每种火灾场景需要在 3 种不同的火灾增长系数下进行模拟,一共需要 12 次火灾模拟。

表1 宿舍楼火灾场景设定

Table 1 Setting of fire scenes in dormitory building

房间号	机械排烟系统	场景编号
01	正常	1
	故障	2
26	正常	3
	故障	4

此外,模型中加入温度、CO 体积分数和能见度的切片,监测点设置在起火房间、走廊及楼梯间处,每个监测点布置高度为 1.7 m。走廊中心线水平方向共布置 9 个监测点,第 1 个监测点位置正对起火房间的门,由此沿着走廊方向每隔 2 个房间布置 1 个监测点。

2.4 火灾模拟结果分析

1)当火灾增长系数取最大值 0.101 kW/s²时,火灾场景 1 能见度临界时间为 283 s,温度临界时间为 352 s,CO 浓度在模拟 600 s 内未能达到临界值,ASET 取 3 个临界时间中的最小值,为 283 s。火灾增长系数取最小

值、最可能值及火灾场景 2、3、4 模拟结果均显示能见度临界时间相对最短,其次为温度,CO 浓度未达到临界值。由此可见,能见度对可用疏散时间的影响相对最大,温度影响次之,CO 浓度影响相对最小。

2)当火灾增长系数取最大值 0.101 kW/s²时,火灾场景 1 的能见度和温度的临界时间分别为 283,352 s,火灾场景 2 的值为 211,307 s,火灾场景 2 对应临界时间值均小于场景 1。且火灾发生后相同时间内,场景 2 的 CO 浓度要明显大于场景 1。同样,火灾场景 4 的能见度和温度的临界时间均小于场景 3,均说明宿舍楼机械排烟的开启,能有效增加影响疏散参数的临界时间,使 ASET 变大,有利于人员进行安全疏散。

3)当火灾增长系数取最大值 0.101 kW/s²时,火灾场景 3 的能见度和温度的临界时间分别为 201,253 s,火灾场景 3 的对应临界时间值均小于场景 1。同样,火灾场景 4 的能见度和温度的临界时间均小于场景 2,均说明当宿舍楼层中部发生火灾时,火灾烟气蔓延速度比宿舍楼层两侧发生火灾时更快,所以可用疏散时间更短,不利于人员的安全疏散。

4)当火灾增长系数取最小值 0.027 kW/s²和最可能值 0.046 89 kW/s²时,上述结论均适用。

2.5 ASET 概率密度函数的确定

根据不同火灾场景下的 ASET 数值得到 ASET 概率密度分布函数参数,见表 2。

表2 ASET 概率密度分布函数参数

Table 2 Parameters of ASET probability density distribution function

火灾场景	ASET 最小值 <i>a</i>	ASET 最大值 <i>b</i>	ASET 最可能值 <i>c</i>
1	283	408	347
2	211	275	245
3	201	300	241
4	169	222	198

将 ASET 概率密度分布函数参数带入式(1),得到各个火灾场景 ASET 三角分布的概率密度函数。

3 宿舍楼人员疏散仿真模拟

3.1 疏散参数设置

1)火灾必须安全疏散时间 *RSET*。人员的必须疏散时间^[11]由火灾探测时间、报警时间、人员预运动时间和人员运动时间 4 部分组成。

参考相关文献,火灾探测报警系统正常时,火灾报警时间设置为 60 s;当火灾探测报警系统故障时,将人员发现火灾时间设置为 90 s;将人员发现火灾失败的火灾探测报警时间设置为 120 s^[12]。

根据文献[13]可知,当宿舍楼内人员处于清醒状态时,预运动平均时间设定为 60 s;人员处于睡眠状态时,预运动的平均时间设定为 120 s。

2) 疏散人数。对于不同时间,宿舍内的人员数量不同。根据实际调查,将上课时间段每个宿舍设定 2 人,午晚休及深夜睡觉时间每个宿舍设定为全员 5 人,每层共 41 间宿舍,分别为 82,205 人。

3) 疏散路线。由于该宿舍楼每年都会进行多次火灾疏散演练,外加宿舍内学生对宿舍建筑构造较为熟悉,设定火灾发生后,房间内学生会按最近疏散出口进行疏散,人员疏散至防烟楼梯间时,认为人员已疏散至安全区域,完成疏散。

4) 疏散速度。根据最大疏散速度实验测定,疏散模拟中男生的最大疏散速度设定为在 1.55 ~ 1.75 m/s 均匀分布,女生最大疏散速度设定为在 1.45 ~ 1.60 m/s

均匀分布。

5) 身高和最大肩宽设定。参考国家体育总局发布的《2014 年国民体质监测公报》的数据,疏散中 18 ~ 25 岁的男生和女生的平均身高设定为 171.9,159.9 cm。疏散模拟的最大肩宽参考文献[14]中对于男女青年的测量结果,男性最大肩宽取(47.66 ± 5) cm,女性最大肩宽取(42.356 ± 5) cm。

3.2 疏散场景设置

根据火灾发生时间段和火灾探测方式的区别,宿舍楼火灾疏散可分为 6 个疏散场景,见表 3。由于男生和女生身高和最大肩宽等参数不同,所以还需要针对不同性别进行疏散,共需要进行 12 次疏散模拟。

3.3 Pathfinder 疏散模型的建立

根据宿舍楼平面模型建立的宿舍楼 Pathfinder 疏散模型如图 3 所示。人员随机分布于宿舍房间中的各个

表 3 宿舍楼疏散场景
Table 3 Evacuation scenes of dormitory building

火灾发生时间段	火灾探测情况	人员状态	疏散场景
A—上课	1—火灾探测报警成功	清醒	A1
	2—人员发现火灾成功	清醒	A2
B—午/晚休	1—火灾探测报警成功	清醒	B1
	2—人员发现火灾成功	清醒	B2
C—深夜睡觉	1—火灾探测报警成功	睡眠	C1
	3—人员发现火灾失败	睡眠	C3

位置中,结合实际情况选择 Steering 模式^[15]进行人员疏散模拟。

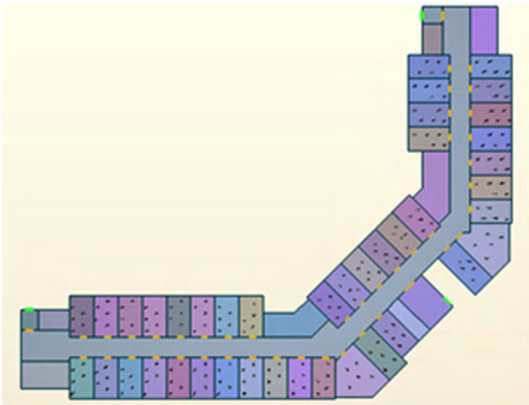


图 3 宿舍楼 Pathfinder 疏散模型
Fig.3 Pathfinder evacuation model of dormitory building

3.4 疏散模拟结果与分析

由模拟可得各个疏散场景下男生和女生所用疏散时间及由未疏散人数与时间曲线的线性拟合函数,见

表 4。

1)结果显示,在 A1 场景下,男生在 127 s 内完成全部 82 人的疏散,女生需要 130 s 完成所有人的疏散,且男生的未疏散人数与时间曲线的线性拟合函数的斜率为 -1.982 1,女生的线性拟合函数的斜率为 -1.852 2,男生的拟合函数斜率略大于女生。同样,其他 5 个场景均符合上述规律,说明男生的疏散时间稍短于女生,疏散效率要略高于女生。

2)在 A2 场景下,宿舍楼内 82 名男生全部疏散用时为 161 s,82 名女生全部疏散用时 164 s,对比 A1 和 A2 场景下对应人员疏散时间和线性拟合函数斜率可知,A1 场景下人员疏散时间更短且疏散效率更高,对比 B1 和 B2 场景的数据均符合上述规律。因此,在相同条件下,火灾探测报警成功比人员发现火灾成功的必需安全疏散时间更短,疏散效率更高。

3)通过将疏散场景 A1 和 B1,以及场景 A2 和 B2 进行对比,场景 B1 和 B2 男生、女生的疏散时间均大于场景 A1 和 A2,但场景 B1 和 B2 男生、女生未疏散人数与时间曲线的线性拟合函数的斜率均大于场景 A1 和 A2。

表4 宿舍楼疏散时间及拟合函数

Table 4 Evacuation time of dormitory building and fitting functions

疏散场景	男生		女生	
	疏散时间/s	拟合函数	疏散时间/s	拟合函数
A1	127	$h = -1.982\ 1t + 246.29$	130	$h = -1.852\ 2t + 234.63$
A2	161	$h = -1.700\ 6t + 268.09$	164	$h = -1.684\ 4t + 268.11$
B1	165	$h = -2.705\ 6t + 430.81$	169	$h = -2.656\ 2t + 427.13$
B2	195	$h = -2.884\ 5t + 541.48$	201	$h = -2.577\ 2t + 495.2$
C1	286	$h = -1.345\ t + 364.2$	292	$h = -1.302\ 3t + 357.92$
C3	409	$h = -1.341\ 5t + 525.46$	414	$h = -1.287\ 5t + 509.86$

说明当火灾探测方式相同时,宿舍楼内人员越多,所有人员的必须安全疏散时间越长;上课期间由于宿舍楼内人员较少,对疏散路径和门的利用效率低于休息期间。

4)将疏散场景 B1、B2、C1 和 C3 进行对比,在疏散人数相同的情况下,由于疏散发生时间段不同,人员预运动时间区别较大。对比疏散场景 B1 和 C1,2 个疏散场景除人员预运动时间外其余条件基本相同,由于人员清醒时预运动时间较少,所以能较快进行疏散,因此疏散场景 B1 的疏散时间短小于 C1,疏散效率明显大于 C1。同样,对比疏散人数相同的疏散场景 B1、B2、C1 和 C3,场景 B1 和 B2 的疏散效率均大于场景 C1 和 C3,说明人员清醒时的疏散效率大于睡眠时的疏散效率。

4 宿舍楼人员预期火灾风险评估

4.1 建筑火灾伤亡人数函数模型构建

假定火灾发生前,建筑内总人数为 n ,对于火灾发生后的任意时间 t ,未疏散的人数如式(2)所示:

$$h(t) = n \cdot \int_t^{\infty} f_E(t) dt \quad (2)$$

式中: $h(t)$ 为火灾发生后时间为 t 时未进行疏散的人数,人; t 为火灾发生时间,s; n 为建筑内的总人数,人; $f_E(t)$ 为建筑内个体疏散时间的概率密度函数。

ASET的大小取决于火灾发展的速度和烟气的流动速度,火灾发生后仍然留在建筑物中的人数可能受火灾发展状况的影响,然而 ASET 在某时间 t 的发生概率几乎不依赖于在同一时间仍然留在建筑物中的人数。因此,假设上述因素对于简单计算是相互独立的,对于任意时间 t ,火灾伤亡人数如式(3)所示:

$$c(t) = h(t)f_A(t)dt = [n \cdot \int_t^{\infty} f_E(t)dt] \cdot f_A(t)dt \quad (3)$$

式中: $c(t)$ 为火灾发生后时间为 t 时,火灾中的人员伤亡数量,人; $f_A(t)$ 为 ASET 的概率密度函数。

所以当火灾发生后,火灾造成的伤亡总人数如式(4)所示:

$$C = \int_0^{\infty} c(t) dt = \int_0^{\infty} [h(t)f_A(t)] dt \quad (4)$$

式中: C 为火灾发生后火灾中人员伤亡总数,人。

由式(4)可知,通过对可用疏散时间概率密度函数 $f_A(t)$ 和火灾未疏散人数与时间函数 $h(t)$ 的乘积进行积分,即可获得不同火灾场景下的伤亡人数。

4.2 宿舍楼人员预期火灾风险评估

将人员疏散模拟结果和火灾模拟结果相联系,将模拟结果的参数代入式(4),可得宿舍楼火灾不同场景下的伤亡人数,见表5。

对于不同火灾场景的伤亡人数,火灾场景4的伤亡人数相对最多,男女生伤亡人数分别为305,310人;其次为火灾场景2,男女生伤亡人数分别为220,224人;再者为火灾场景3,男女生伤亡人数分别为23,27人;火灾场景1的伤亡人数相对最少,男女生伤亡人数小于0.01,所以未纳入统计。从火灾伤亡人数来看,火灾场景2和4的伤亡人数高达200人以上,因此,当前宿舍楼无法满足火灾安全的需求。

5 结论

1)火灾模拟得出,发生火灾后,影响 ASET 的主要因素是火灾烟气能见度,次要影响因素是烟气层温度,CO 浓度对 ASET 的影响相对最小。对于平面呈 L 型的宿舍楼,当宿舍楼中部发生火灾后,烟气蔓延速度要快于宿舍楼两侧,可用疏散时间更短。

2)使用 Pathfinder 模拟软件对宿舍楼火灾疏散进行模拟,得到宿舍楼火灾发生后未疏散人数与时间的函数,将该函数与 ASET 的概率密度函数相乘,并对时间进行积分,可获得不同火灾场景下的伤亡人数,从而对宿舍人员火灾风险进行定量化评估,该方法可用于高校宿舍火灾的风险评估。

3) 对于不同火灾场景的伤亡人数,火灾场景 2 和 4 的伤亡人数高达 200 人以上,主要是由于机械排烟系统

表 5 宿舍楼火灾风险伤亡人数
Table 5 Numbers of casualties in fire risk of dormitory building

火灾场景	出现伤亡的疏散场景	出现伤亡时间段/s		伤亡人数 C/人	
		男生	女生	男生	女生
场景 2:01 房间火灾且机械排烟故障	C1	211 ~ 286	211 ~ 292	23	26
	C3	211 ~ 405	211 ~ 414	197	198
场景 2 合计				220	224
场景 3:26 房间火灾且机械排烟启动	C1	201 ~ 286	201 ~ 292	23	27
	B2	169 ~ 195	169 ~ 201	3	6
场景 4:26 房间火灾且机械排烟故障	C1	169 ~ 286	169 ~ 292	98	100
	C3	169 ~ 405	169 ~ 414	204	204
场景 4 合计				305	310

故障导致。经上述方法评估,该宿舍楼无法满足火灾安全性需求,消防安全管理水平有待提高。

参考文献

- [1] 范维澄. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1995.
- [2] 易立新. 城市火灾风险评价的指标体系设计[J]. 灾害学, 2000(4):91-95.
YI Lixin. Design of index system for urban fire risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2000(4):91-95.
- [3] 杜红兵, 周心权, 张敬宗. 高层建筑火灾风险的模糊综合评价[J]. 中国矿业大学学报, 2002(3):29-32.
DU Hongbing, ZHOU Xinquan, ZHANG Jingzong. Fuzzy comprehensive evaluation of fire risk of high-rise buildings [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002(3):29-32.
- [4] 尤明伟, 吴国华. 改进层次分析法在建筑火灾风险评估中的应用[J]. 中国建材科技, 2014, 23(4):154-155.
YOU Mingwei, WU Guohua. Application of improved analytic hierarchy process in building fire risk assessment [J]. China Building Materials Science and Technology, 2014, 23(4):154-155.
- [5] TONG R, WANG B, LI J, et al. A risk-based approach for crowd evacuation performance evaluation under metro fire[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2015, 9(2):75-95.
- [6] 汪金辉. 建筑火灾环境下人员安全疏散不确定性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.
- [7] NFPA. Standard for Smoke and Heat Venting: NFPA 204—2002 [S]. USA: NFPA, 2002.
- [8] HOLBORN P G, NOLAN P F, GOLT J. An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations[J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(6):481-524.
- [9] 陈立林, 罗恩民, 刘冠华, 等. 典型地铁站火灾人员疏散模拟与评估[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(4):123-128.
CHEN Lilin, LUO Enmin, LIU Guanhua, et al. Simulation and evaluation of fire evacuation in typical subway station [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(4):123-128.
- [10] 刘晗, 赵修茗, 赵鑫, 等. 基于五元联系数的古建筑火灾风险评估[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(6):901-909.
LIU Han, ZHAO Xiuming, ZHAO Xin, et al. Fire risk assessment of ancient architecture based on five-yuan linkage number[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(6):901-909.
- [11] 李琰, 张燕. 连体宿舍楼火灾模拟与安全疏散研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1):163-168.
LI Yan, ZHANG Yan. Study on fire simulation and safety evacuation of connected dormitory building [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1):163-168.
- [12] 王丽, 曾坚, 任常兴. 基于 FDS + EVAC 的某高校学生宿舍楼火灾疏散能力研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1):136-142.
WANG Li, ZENG Jian, REN Changxing. A study on fire evacuation capability of student dormitory building based on FDS + EVAC [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1):136-142.
- [13] LOVREGGIO R, RONCHI E, NILSSON D. A model of the decision-making process during pre-evacuation [J]. Fire Safety Journal, 2015, 78:168-179.
- [14] 冯洋洋. 大型商业综合体火灾人员疏散研究[D]. 西安:西安科技大学, 2015.
- [15] LI Z, TANG M, LIANG D, et al. Numerical simulation of evacuation in a subway station[J]. Procedia Engineering, 2016, 135:616-621.

(责任编辑:张伟丽)