

文章编号:1671-1556(2020)04-0195-06

# 基于 Pyrosim 和 Pathfinder 的高校学生宿舍火灾 人员疏散安全性模拟分析

邹馨捷, 萨木哈尔·波拉提, 郝明, 庞奇志

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 高校学生宿舍是人群密集的场所, 存在较多的火灾安全隐患, 因此对高校学生宿舍进行有针对性的火灾人员疏散安全性分析十分必要。以某高校学生宿舍楼为研究对象, 运用 Pyrosim 软件建立火灾扩散模型, 模拟分析了高校学生宿舍楼在自动喷淋灭火系统是否失效和着火房间窗户是否关闭等情况下发生火灾时, 着火楼层安全出口处烟气能见度、顶棚温度和烟气层高度的变化规律, 并结合 Pathfinder 软件模拟计算出人员疏散到安全地带的时间和整栋楼全部人员完全疏散所需安全疏散时间, 综合利用人员疏散可用安全疏散时间和人员疏散所需安全疏散时间对人员疏散安全性进行分析。结果表明: 高校学生宿舍楼消防设施是否有效和着火房间窗户是否关闭对人员疏散安全性的影响较大, 并提出了消防安全管理措施, 以为高校学生宿舍消防安全管理提供依据。

**关键词:** 高校学生宿舍; Pyrosim 火灾模拟; Pathfinder 人员疏散模拟; 安全性分析

中图分类号: X932

文献标识码: A

DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.04.026

## Personnel Evacuation Safety Simulation Analysis of College Student Dormitory Fire Based on Pyrosim and Pathfinder

ZOU Xinjie, Samuhaer · BOLATI, HAO Ming, PANG Qizhi

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** College student dormitories which are crowded have fire safety potential hazard. It is necessary to analyze the personnel evacuation safety for college student dormitories on fire. Taking a college student dormitory building as the research object, using the Pyrosim to build the fire diffusion model, this paper simulates the variation of smoke visibility, ceiling temperature and smoke layer height at the exit of the fire floor when the dormitory building is on fire in the case of whether automatic spray extinguishing system fails and whether the windows of the burning room are closed. Combined with the movement time of evacuation to safety zone simulated by Pathfinder, the paper calculates the safe evacuation time required by all the people in dormitory fire, and carries out safety analysis on the personnel evacuation by comprehensive comparison between the available safety evacuation time and the required safety evacuation time. The results show that whether the fire control facilities are effective and whether the windows of the burning room are closed have a great impact on the safety of personnel evacuation. The paper proposes improvement measures for fire safety management. The study may provide basis for the fire safety management of college student dormitories.

**Key words:** college student dormitory; Pyrosim fire simulation; Pathfinder evacuation simulation; safety analysis

已有调查结果显示, 大学生在宿舍中存在诸多不安全行为, 如在床上吸烟、使用违章电器、夏季点蚊香、冬季使用电热毯以及在宿舍煮火锅等, 这些行为

都会增加高校学生宿舍火灾事故的发生率<sup>[1]</sup>。例如: 2019 年 5 月 20 日, 某大学 B 区宿舍一寝室发生火灾, 由于宿舍内无学生, 幸无人员伤亡, 造成此次事故的

收稿日期: 2020-04-03 修回日期: 2020-07-10

作者简介: 邹馨捷(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为工程项目风险管理。E-mail: 421704850@qq.com

原因是学生在宿舍使用大功率电器;2019 年 9 月 10 日,某师范学院学生宿舍由于学生使用大功率电器导致宿舍起火,寝室内被烟雾完全笼罩,大量浓烟向外扩散,室内床上有明火,所幸无人员被困。高校学生宿舍是学生生活的主要场所,一旦发生火灾事故,轻则会造成人员恐慌,重则会造成严重的经济损失和人员伤亡,因此对高校学生宿舍火灾人员疏散安全性进行数值模拟研究是十分有必要的,这对做好高校学生宿舍安全消防工作具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

由于建筑物发生火灾的原因与过程比较复杂,人员疏散会受到较多因素的影响,采用传统的实验方法对其进行研究会耗时耗力且花费较大,难以获得有应用价值的成果<sup>[3]</sup>。而运用 Pyrosim 和 Pathfinder 的数值模拟研究方法,可以有效地减少研究时间和费用,并能够实现更为直观的火灾现场人员疏散过程模拟。为此,本文以某高校学生宿舍楼为研究对象,运用 Pyrosim 和 Pathfinder 软件对该高校学生宿舍楼发生火灾时火灾扩散过程和人员疏散安全性进行了数值模拟分析,以为高校学生宿舍消防安全管理提供依据。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 某高校学生宿舍楼概况

某高校一栋男生宿舍楼共有 6 层,每层楼有 18 间房间,整栋楼共有 108 间房间,每间房间面积是 24.68 m<sup>2</sup>,每层楼楼高为 3.6 m,总建筑面积为 4 231.32 m<sup>2</sup>;每间房间可住 4 人,每层楼有 2 个安全出口,楼梯宽度为 1.3 m。该宿舍楼由于修建时间早、投入使用时间较长,大多数建筑设施已非常陈旧,而且宿舍楼内无排烟系统、火灾报警装置以及自动喷淋灭火系统。某高校学生宿舍楼层平面图见图 1。

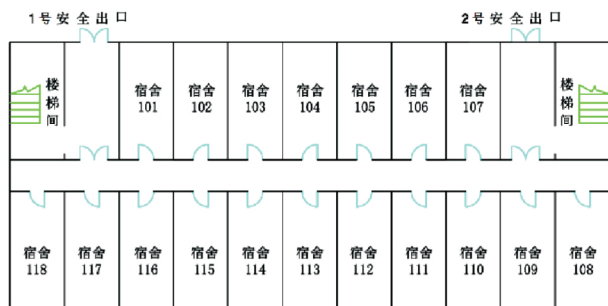


图 1 某高校学生宿舍楼层平面图

Fig. 1 Floor plan of a college student dormitory building

### 1.2 火灾场景设置

学生宿舍内部易燃物较多,如被褥、窗帘等,未

熄灭的烟头或蚊香极易点燃被褥而发生火灾;而在楼道中学生极易堆放各种杂物,学生途径楼道将未熄灭的烟头扔进杂物堆极易点燃杂物,发生火灾。

每间宿舍的布局及布置的可燃物几乎相同,被褥和窗帘的材质是纯棉纤维,墙壁的材质是石膏板,地板的材质是瓷砖,参考王志刚等的实验测定结果<sup>[4]</sup>,设置火灾类型为快速火,热释放速率为 1 000 kW/m<sup>2</sup>,火灾增长类型设定为快速 t<sup>2</sup> 增长型,并设置该栋宿舍楼的模拟网格大小为 0.5 m×0.5 m×0.5 m,网格个数为 126 720 个。本次模拟设置 4 种火灾场景,将火源分别设置在 1F 楼道中部、1F 中部宿舍内部、5F 中部宿舍内部、3F 左边宿舍内部,火源高度均设置为 1 m,并结合该宿舍楼的实际,考虑最不利的情况,同时参考《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017),将自动喷淋灭火系统有效情况下的火灾规模设置为 1.5 MW,自动喷淋灭火系统失效情况下的火灾规模设置为 3 MW。

4 种火灾场景下分别在距离着火楼层地面以上 1.8 m 设置监测截面,监测烟气能见度,并在着火楼层两个安全出口距离地面 3.4 m 处设置监测点,监测顶棚温度和烟气层高度。假设所有火灾场景下防火门属于失效状态,并将火灾模拟时间设置为 1 200 s。具体火灾场景设置见表 1。

表 1 某高校学生宿舍楼火灾场景设置

Table 1 Fire condition setting of a college student dormitory building

火灾场景	火源位置	火灾类型	火灾规模/MW	自动喷淋灭火系统	防火门状态	着火房间窗户状态
A1	1F 楼道中部	快速火	3	失效	失效	打开
A2	1F 中部宿舍内部	快速火	1.5	有效	失效	打开
B1	5F 中部宿舍内部	快速火	3	失效	失效	打开
B2	3F 左侧宿舍内部	快速火	3	失效	失效	关闭

## 2 基于 Pyrosim 的火灾扩散过程模拟分析

本文利用上述建立的数值模型,并运用 Pyrosim 软件建立了某高校学生宿舍楼在不同火灾场景下的火灾扩散模型,模拟了着火楼层安全出口处烟气能见度、顶棚温度和烟气层高随时间的变化过程,以为进一步分析人员疏散安全性提供基础数据。

### 2.1 着火层烟气能见度分析

参考《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017),并根据学生对自己的宿舍楼十分熟悉,本次模拟中设置火灾时该宿舍楼着火层安全出口处允许的最小烟气能见度为 5 m<sup>[5]</sup>。图 2 为不同

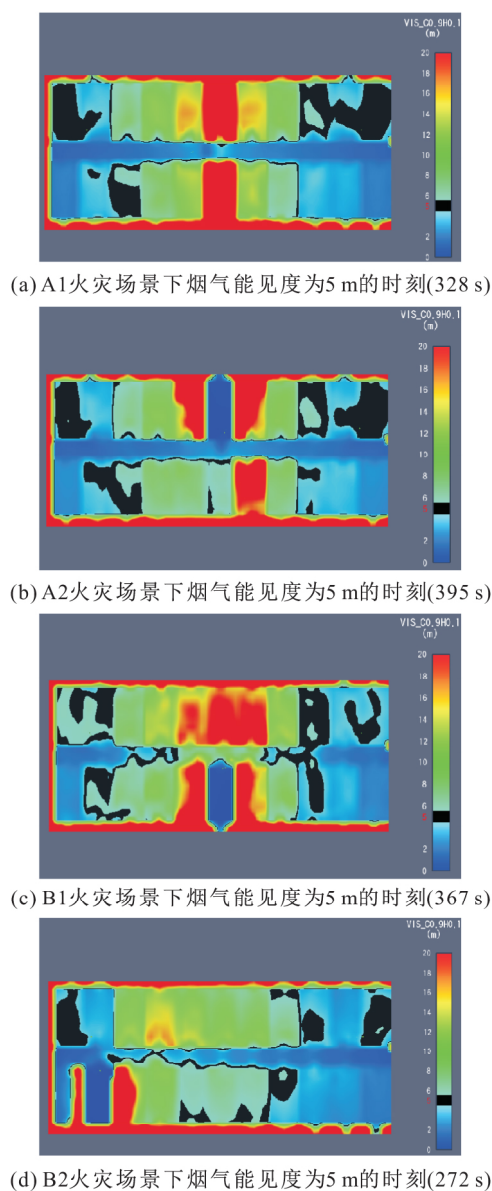


图2 不同火灾场景下某高校学生宿舍着火层两个安全出口处烟气能见度分布云图

Fig. 2 Cloud map of the smoke visibility at the two exits on the fire floor of a college student dormitory building under different fire conditions

火灾场景下,某高校学生宿舍着火层两个安全出口处烟气能见度分布云图。

由图2可见,A1、A2、B1和B2火灾场景下该宿舍着火层两个安全出口处烟气能见度分别在火灾发生328 s、395 s、367 s和272 s时下降至5 m,此时人员的安全疏散受阻。

根据模拟结果可知,当A2火灾场景中的自动喷淋灭火系统有效且着火房间所有窗户打开时,可以有效地减缓着火层安全出口处烟气能见度降低的速率<sup>[6]</sup>。

## 2.2 着火层顶棚温度分析

图3为不同火灾场景下,某高校学生宿舍着火层

1号和2号安全出口处顶棚温度随时间的变化曲线。

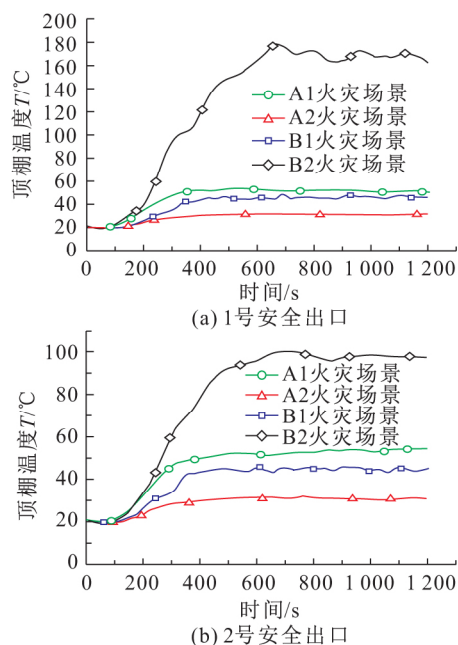


图3 不同火灾场景下某高校学生宿舍着火层两个安全出口处顶棚温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Change curves of the ceiling temperature at the two exits on the fire floor of a college student dormitory building under different fire conditions

由图3可见,A2火灾场景下该宿舍着火层两个安全出口处顶棚温度及其增长速度皆低于A1、B1和B2火灾场景;B1火灾场景下该宿舍着火层两个安全出口处顶棚温度及其增长速度都低于A1火灾场景,这主要是因为A1火灾场景下,楼道发生火灾时障碍物较少,温度上升速度较快,到达安全出口时热量损失较少;B2火灾场景下,火源靠近1号安全出口,导致1号安全出口处温度高于2号安全出口处温度,由于该宿舍着火层安全出口及着火房间的窗户处于关闭状态,两个安全出口处温度上升较快,热量损失少。

由图3还可知,A1、A2、B1三种火灾场景下该宿舍着火层安全出口处顶棚温度从火灾开始到结束都未达到60℃,人员的安全疏散不受影响;而在B2火灾场景下该宿舍着火层1号安全出口处顶棚温度在火灾发生220 s时达到60℃,而2号安全出口处顶棚温度在火灾发生300 s时达到60℃,此时人员无法安全疏散。

## 2.3 着火层烟气层高度分析

烟气层高度、温度和有害气体浓度是影响人员安全疏散的重要因素,其中影响最大的是烟气层高度<sup>[7]</sup>。当烟气层高度低于2.5 m时,将严重影响人

员的安全疏散;当烟气层高度低于 1.5 m 时,人员无法安全疏散<sup>[8]</sup>。图 4 为不同火灾场景下,某高校学生宿舍楼着火层 1 号和 2 号安全出口处烟气层高度随时间的变化曲线。

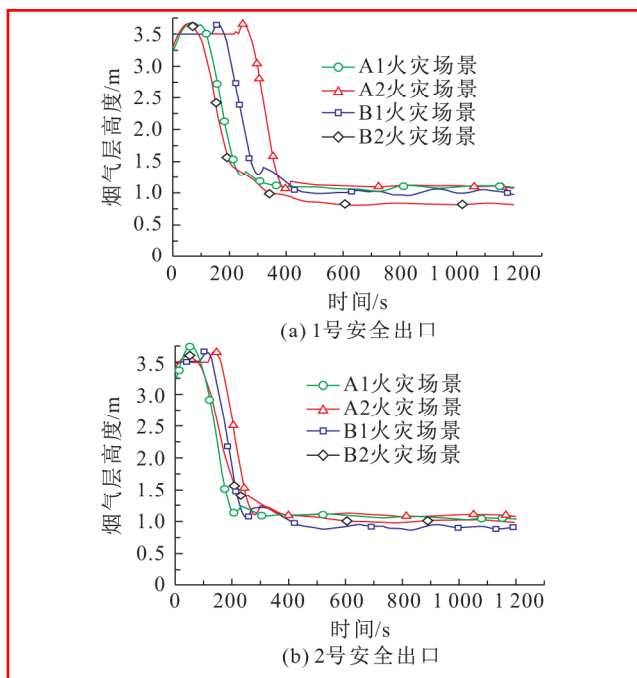


图 4 不同火灾场景下某高校学生宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度随时间的变化曲线

Fig. 4 Change curves of the height of smoke layer at the two exits on the fire floor of a college student dormitory building under different fire conditions with time

由图 4(a)可见, A1 火灾场景下,当火灾发生 210 s 时该宿舍楼着火层 1 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长烟气层高度逐渐下降至 1 m 并最终趋于稳定; A2 火灾场景下,当火灾发生 360 s 时该宿舍楼着火层 1 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长烟气层高度降至 1 m 并趋于稳定; B1 火灾场景下,当火灾发生 260 s 时该宿舍楼着火层 1 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长逐渐下降至 0.8 m 并最终趋于稳定; B2 火灾场景下,当火灾发生 190 s 时该宿舍楼着火层 1 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长逐渐下降至 0.75 m 并最终趋于稳定。由图 4(b)可见, A1 火灾场景下,当火灾发生 190 s 时该宿舍楼着火层 2 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长烟气层高度下降至 1 m 左右并最终趋于稳定; A2 火灾场景下,当火灾发生 250 s 时该宿舍楼着火层 2 号安全出口处烟气层高

度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长烟气层高度逐渐下降至 1 m 并最终趋于稳定; B1 火灾场景下,当火灾发生 220 s 时该宿舍楼着火层 2 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长逐渐下降至 0.8 m 并最终趋于稳定; B2 火灾场景下,当火灾发生 200 s 时着火层 2 号安全出口处烟气层高度开始低于 1.5 m,且随着时间的延长烟气层高度逐渐下降至 0.75 m 并最终趋于稳定。

比较在不同火灾场景下该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度随时间的变化曲线可以看出, A1、B1 和 B2 火灾场景是自动喷淋灭火系统失效时发生火灾,导致 A1、B1 和 B2 火灾场景下该宿舍楼着火层安全出口处烟气层高度开始下降时间早于 A2 火灾场景;而 A1 火灾场景是楼道中部发生火灾,阻碍物较少,烟气可以快速蔓延至疏散楼梯处,导致 A1 火灾场景下该宿舍楼着火层安全出口处烟气层高度下降时间早于 B1 火灾场景; B2 火灾场景是着火房间窗户关闭,火灾发生时热量损失少,蔓延速度快,导致 B2 火灾场景下着火层安全出口处烟气层高度下降时间早于 A1 和 B1 火灾场景。

### 3 基于 Pathfinder 的人员疏散安全性分析

建筑物发生火灾后,人员所需安全疏散时间(Required Safety Egress Time, RSET)和人员可用安全疏散时间(Available Safety Egress Time, ASET)这两个时间参数决定人员是否能够安全疏散<sup>[9]</sup>。当  $RSET < ASET$  时,表示建筑物内的人员能够安全疏散;反之,则表示建筑物内的人员不能安全疏散,说明建筑物的疏散设计未达到安全设计的要求<sup>[1]</sup>。

#### 3.1 不同火灾场景下人员疏散可用安全疏散时间的确定

(1) A1 火灾场景下人员可用安全疏散时间确定:分析 A1 火灾场景下火灾扩散过程的模拟结果发现,在整个火灾发展过程中,该宿舍楼着火层安全出口处顶棚温度都未达到 60℃;当火灾发生 328 s 时,该宿舍楼着火层安全出口处烟气能见度已降到 5 m;当火灾发生 210 s 时,该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度已经低于 1.5 m,此时人员无法安全疏散。综合考虑,在 A1 火灾场景下,整栋楼的人员必须在发生火灾后的 210 s 内完全疏散。

(2) A2 火灾场景下人员可用安全疏散时间确定:分析 A2 火灾场景下火灾扩散过程的模拟结果发现,当火灾发生 395 s 时,该宿舍楼着火层两个安



全出口处烟气能见度都低于 5 m;当火灾发生 360 s 时,该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度降至 1.5 m;在整个火灾发生过程中,该宿舍楼着火层安全出口处顶棚温度都未达到 60℃。综合考虑,在 A2 火灾场景下,整栋楼的人员必须在发生火灾后的 360 s 内完全疏散。

(3) 场景 B1 下人员可用安全疏散时间确定: B1 火灾场景是在 5 楼中部宿舍内部发生火灾,分析 B1 火灾场景下火灾扩散过程的模拟结果发现,在火灾发展的整个过程中,烟气和温度都是向上蔓延,该宿舍楼着火层安全出口处顶棚温度都未达到 60℃;该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气能见度在火灾发生 367 s 时均降至 5 m;当火灾发生 260 s 时,该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度下降至 1.5 m。综合考虑,在 B1 火灾场景下,整栋楼的人员必须在发生火灾后的 260 s 内完全疏散。

(4) B2 火灾场景下人员可用安全疏散时间确定:分析 B2 火灾场景下火灾扩散过程的模拟结果发现,当火灾发生 272 s 时,该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气能见度均低于 5 m;当火灾发生 300 s 时,该宿舍楼着火层两个安全出口处顶棚温度开始高于 60℃;而当火灾发生 200 s 时,该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度均低于 1.5 m。综合考虑,在 B2 火灾场景下,整栋楼的人员必须在发生火灾后该宿舍楼 200 s 内完全疏散。

### 3.2 人员疏散所需安全疏散时间的确定

假设从发生火灾到室内人员察觉的时间为  $t_1$  (s),人员疏散准备的时间为  $t_2$  (s),人员疏散到安全地带的时间为  $t_3$  (s)<sup>[2]</sup>,则有下列关系:

$$RSET = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

本文利用 Pathfinder 软件建立了该高校学生宿舍楼人员疏散模型。Pathfinder 软件中默认的人员疏散路径为最短疏散路径,即认为人员将按照最短疏散路径疏散至安全出口,但是在实际疏散过程中,人员采取的疏散路径可能与模型中默认的疏散路径不一致,故在分析人员所需安全疏散时间时需要考虑安全系数<sup>[10]</sup>。本文参考《防火工程手册》的推荐,将安全系数设定为 1.1<sup>[11]</sup>。

由于学生对宿舍楼十分熟悉,并且该宿舍楼的结构比较简单,因此在确定人员察觉到火灾发生的时间和疏散准备的时间时,将人员察觉到火灾发生的时间设定为 30 s,即  $t_1 = 30$  s;由于学生宿舍楼的人员居住集中,一旦发现火灾,人员会迅速做出反应,故设定人员疏散准备的时间设定为 30 s,即  $t_2 = 30$  s<sup>[12]</sup>。基于 Pathfinder 软件建立的某高校学生宿

舍楼人员疏散模型见图 5。根据 Pathfinder 软件的参数设置,本次人员疏散模拟采用的疏散速度符合正态分布<sup>[13]</sup>,人员平均疏散速度为 1.19 m/s,肩宽为 45.58 cm,考虑火灾发生时所有学生都在宿舍楼,疏散人数为 432 人,人员随机分布在各个宿舍、楼道、楼梯间,人员从宿舍楼的两个安全出口进行疏散<sup>[14]</sup>。Pathfinder 模拟计算出人员疏散到安全地带的时间为 258.5 s,即  $t_3 = 258.5$  s,计算出整栋楼全部人员完全疏散所需安全疏散时间为

$$RSET = 30 \text{ s} + 30 \text{ s} + 258.5 \text{ s} \times 1.1 = 344.35 \text{ s}$$

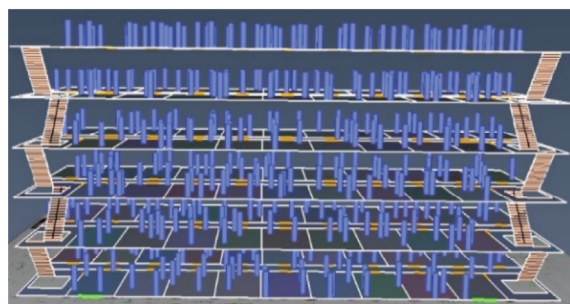


图5 基于 Pathfinder 软件的某高校学生宿舍楼人员疏散模型

Fig. 5 Personnel evacuation model for a college student dormitory based on Pathfinder software

### 3.3 人员疏散安全性分析

在对该学生宿舍楼人员进行安全疏散时要考虑整栋楼人员完全疏散所需的时间。通过对 4 种火灾场景下该宿舍楼人员疏散可用安全疏散时间 (ASET) 和人员所需安全疏散时间 (RSET) 的模拟,可得到不同火灾场景下人员疏散安全性模拟结果的比较见表 2。

表2 不同火灾场景下人员疏散安全性模拟结果的比较

Table 2 Comparison of simulation results of personnel

evacuation safety under different fire conditions

火灾场景	Pathfinder 模型模拟的疏散时间 $t_3$ /s	RSET/s	ASET/s	安全性
A1			210	危险
A2	258.5	344.35	360	安全
B1			260	危险
B2			200	危险

由表 2 可知,在 A1 火灾场景下人员疏散可用安全疏散时间只有 210 s,在 A2 火灾场景下人员疏散可用安全疏散时间为 360 s,在 B1 火灾场景下人员疏散可用安全疏散时间为 260 s,在 B2 火灾场景下人员疏散可用安全疏散时间为 200 s,而该宿舍楼全部人员完全疏散所需安全疏散时间为 344.35 s;在 A1 火灾场景下,210 s 时该宿舍楼着火层两个安

全出口处烟气层高度低于 1.5 m, 导致人员安全疏散十分困难, 此时部分人员处于危险状态; 在 A2 火灾场景下, 360 s 时该宿舍楼着火层两个安全出口烟气层高度完全低于 1.5 m, 此时人员已安全疏散完全; 在 B1 火灾场景下, 该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气能见度低于 5 m 需要 367 s, 但是该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度在 260 s 时完全低于 1.5 m, 因此人员在 260 s 时还未完全疏散至安全地带就已经处于危险状态; 在 B2 火灾场景下, 火灾发生 200 s 时该宿舍楼着火层两个安全出口处烟气层高度已下降至 1.5 m, 此时人员还未完全疏散就已经处于危险状态。

## 4 消防安全管理措施

利用 Pyrosim 和 Pathfinder 软件分别模拟了某高校学生宿舍楼火灾扩散和人员疏散过程, 对比分析其模拟结果发现: 目前该宿舍楼的消防设施不完备或过于老旧, 导致该宿舍楼发生火灾时火灾蔓延速度较快<sup>[15]</sup>, 特别是楼道发生火灾时短时间内烟气能见度均低于 5 m, 着火层安全出口处烟气层高度低于 1.5 m, 导致人员在疏散过程中不具备充足的时间, 在实际疏散过程中会造成生命和财产损失<sup>[16]</sup>。因此, 针对老旧学生宿舍楼可以采取以下的消防安全管理措施。

(1) 学校应组织专业人员在宿舍楼内部安装消防设施, 消防设施包括自动喷淋灭火系统、排烟系统、灭火器等, 并定期组织专业人员对其进行维护与更新。

(2) 通过分析发现宿舍楼楼道着火造成的后果更加严重, 故学校应禁止学生在楼道堆放可燃物并定期派人清扫楼道的垃圾, 并将楼道中的垃圾桶放置在消防设施附近, 尽可能避免楼道发生火灾。

(3) 学校应减小老旧宿舍的人员居住密度, 将原来的 4 人间宿舍尽量安排为 2 人间宿舍, 这样在发生火灾时有助于提高人员疏散速度, 减少疏散时间。宿舍楼内部的窗户在有人时须长期敞开。

(4) 学校应定期组织专业人员对学生进行消防知识和消防技能培训, 提高学生的消防意识和火灾自救能力。

## 5 结 语

本文利用 Pyrosim 软件模拟分析了高校学生宿舍楼在自动喷淋灭火系统是否有效和着火房间窗户是否关闭等情况下发生火灾时, 着火层安全出口处烟气能

见度、烟气层高度和顶棚温度的变化规律, 并结合 Pathfinder 软件模拟计算出人员疏散所需安全疏散时间, 结果表明自动喷淋灭火系统的有效性和着火房间窗户的敞开性对火灾中人员疏散安全性的影响较大。

高校学生宿舍是人群密集的场所, 也是安全隐患较多的场所, 因此对高校学生宿舍进行有针对性的火灾人员疏散安全性分析是十分有必要的。可为高校采取消防安全管理措施提供参考。

### 参考文献:

- [1] 龙新峰, 张雪琴, 楼波. 基于 Pyrosim 的宿舍楼火灾模拟分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1348-1353.
- [2] 李琳, 程远平, 吴蕾, 等. 高校学生宿舍消防安全疏散[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(2): 122-125.
- [3] 毛龙, 乐增, 金润国. 高校宿舍火灾数值模拟与分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(4): 418-423.
- [4] 王志刚, 倪照鹏, 王宗存, 等. 设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊): 50-54.
- [5] 李藻. 关于对巨幕类影厅火灾烟气运动及人员疏散研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [6] 杨培培, 石必明, 穆朝民, 等. 喷淋对宿舍火灾特性影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(5): 25-28.
- [7] Ryder N L, Schemel C F, Jankiewicz S P. Near and far field contamination modeling in a large scale enclosure: Fire dynamics simulator comparisons with measured observations[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 130(1/2): 182-186.
- [8] 戴彪. 基于高校宿舍区域突发事件人员疏散的仿真与方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [9] 何少康. 基于 FDS+EVAC 的人员疏散模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [10] 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.
- [11] 陈立林, 罗恩民, 刘冠华, 等. 典型地铁车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.
- [12] 丁厚成, 朱庆松, 郭双林, 等. 地铁区间隧道火灾烟气流动特性对人员疏散影响的数值模拟[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(2): 162-168.
- [13] Still G K. Review of pedestrian and evacuation simulations[J]. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2007, 3(3/4): 376-388.
- [14] Lee J, Lee M, Jun C. Fire evacuation simulation considering the movement of pedestrian according to fire spread[C]// *ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. [S. l.]: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, XLII-4/W9, 273-281.
- [15] 李建沛. 基于 FDS 的高校火灾模拟及控制对策[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2017, 35(4): 13-15, 20.
- [16] Kobes M, Helsloot I, de Vries B, et al. Way finding during fire evacuation: an analysis of unannounced fire drills in a hotel at night[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(3): 537-548.

通讯作者: 庞奇志(1966—), 女, 博士, 副教授, 主要从事工程项目风险管理方面的研究。E-mail: 644959413@qq.com