

不同结构因子下带连廊高层建筑外墙火 竖向蔓延数值模拟

王宇¹,王馨瑶¹,齐琳²,马福生³,汤维维⁴

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳城市建设学院土木工程学院,辽宁 沈阳 110167;
3. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168; 4. 辽宁筑程特种工程有限公司,辽宁 沈阳 110046)

摘要 目的 研究带连廊高层建筑发生火灾时火焰蔓延的变化规律,为该类建筑的防火设计提供参考。方法 应用火灾数值模拟软件FDS建立一个33层带连廊建筑模型,分别改变结构因子、窗口数量两种因素进行模拟,分析该模型在不同条件下的温度分布等温线和温度曲线。结果 结构因子为0.4、0.8、1.2,窗口数量为二、三、四时,达到危险温度540℃,火焰融合高度随结构因子和窗口数量增加而上升;随着结构因子的增加,火焰融合高度提高了0.25~12.5 m;随着窗口数量的增加,火焰融合高度上升了0.9~6.37 m;结论 带连廊高层建筑外墙火焰蔓延高度受结构因子和窗口数量影响;随着窗口数量增加,结构因子对火焰融合高度影响越大,结构因子越大,火焰融合高度越高;建议带连廊高层建筑连廊部分结构因子小于0.8,并选用结构因子为0.8时的火焰融合高度作为外部蔓延防火阻隔区高度。

关键词 带连廊高层建筑;结构因子;火焰融合;数值模拟

中图分类号 TU352.5

文献标志码 A

引用格式:王宇,王馨瑶,齐琳,等. 不同结构因子下带连廊高层建筑外墙火竖向蔓延数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):293-301. (WANG Yu, WANG Xinyao, QI Lin, et al. Numerical simulation of vertical fire spreading on the exterior wall of high-rise buildings with corridors of different structural factors[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(2):293-301.)

Numerical Simulation of Vertical Fire Spreading on the Exterior Wall of High-Rise Buildings with Corridors of Different Structural Factors

WANG Yu¹, WANG Xinyao¹, QI Lin², MA Fusheng³, TANG Weiwei⁴

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167; 3. School of Architecture and Urbanplanning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 4. Liaoning Zhucheng Special Engineering Co. Ltd., Shenyang, China, 110046)

收稿日期:2022-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52078309);辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0560)

作者简介:王宇(1977—),男,副教授,主要从事高层建筑抗火、结构抗震等方面研究。

Abstract: To study the variation law of flame propagation in the event of fire in high-rise buildings with corridors, and to provide reference for the fire protection design of such buildings. A 33-storey building model with corridor was established by using the fire numerical simulation software FDS, and the structural factors and the number of windows were changed to simulate the two factors, and the temperature distribution isotherm and temperature curve of the model under different conditions were analyzed. When the structural factors were 0.4, 0.8 and 1.2, and the number of windows was two, three and four, the dangerous temperature of 540 °C was reached, and the flame fusion height increased with the increase of the structural factors and the number of windows. With the increase of structural factors, the flame fusion height increased by 0.25 ~ 12.5 m; With the increase of the number of windows, the flame fusion height increased by 0.9 ~ 6.37 m; The flame propagation height of the exterior wall of high-rise buildings with corridors is affected by structural factors and the number of windows. As the number of windows increases, the greater the influence of structural factors on the flame fusion height, the larger the structural factor, the higher the flame fusion height. It is recommended that the structural factor of the corridor part of the high-rise building with corridor is less than 0.8, and the flame fusion height when the structural factor is 0.8 is selected as the height of the external spread fire barrier.

Key words: high-rise buildings with corridors; structure factors; flame fusion; numerical simulation

带连廊高层建筑是一种典型的高层建筑,当内面墙宽度发生变化时,建筑连廊部分的结构因子^[1]发生变化,建筑外墙火焰受烟窗效应的影响,其蔓延速度会随之变化,对生命和财产构成严重威胁^[2-9]。现有消防措施对带连廊建筑结构已经不能完全适用,因此,对带连廊高层建筑外部火蔓延的研究显得尤为重要。

针对高层建筑火灾问题,国内外学者做了大量研究:G. M. F. Jeffs 等^[10]通过试验探究了室内着火引起的窗口溢流火焰对室外保温材料的影响规律,结果表明,火源功率大小、建筑结构形式和通风情况都会直接影响火蔓延程度。K. Himoto 等^[11]通过试验研究了建筑外立面设计对火灾发展的影响,结果表明,建筑外立面设计在满足一定的宽度与深度下才能阻止火焰蔓延。闫维纲等^[12]根据凹槽式建筑中保温隔热材料聚氨酯的纵向火焰蔓延规律,对其蔓延机制进行了分析和归纳;结果表明,火蔓延速度随U型结构进深的增加而增大。张玉涛等^[13]利用FDS软件针对高层建筑火灾烟气蔓延情况进行模拟,研究了四种不同截面尺寸对竖井烟气蔓

延的影响并分析中性面以上的温度、CO 体积和能见度;结果表明,中性面以上的楼层受到其影响远大于中性面以下。王自衡^[14]对不同类型建筑外立面的起火原因及外墙火蔓延的过程进行分析,通过FDS软件进行数值模拟,给出了火焰的蔓延方式并提出了一种可以有效降低火势蔓延的建筑设计方法。潘晓菲^[15]利用FDS软件针对外墙没有保温材料的凹型高层建筑进行模拟,研究了不同环境因素下凹型建筑火蔓延速度的规律;结果表明,氧气浓度、结构因子和环境压力越大,火焰蔓延的速度越快;王宇等^[16]利用FDS软件针对不同状态下带连廊高层建筑外墙火蔓延情况进行模拟,研究了连廊与外墙距离不同对外立面火蔓延的影响并分析了火蔓延的高度;结果表明,高层建筑外立面火焰蔓延趋势受连廊影响,连廊和外立面的距离为1.5 m时火焰融合高度最大。

上述研究主要分析了不同环境因素和结构因素对火焰蔓延的影响,但未研究带连廊高层建筑中连廊部分的结构因子对火灾蔓延影响,故研究不同结构因子时带连廊高层建筑多窗口羽流火焰的融合高度及变化规律具

有一定研究意义。基于此,笔者以带连廊高层建筑作为研究对象,将 540 ℃作为危险温度^[17],在 5.4 m/s 的基准风速下,通过改变连廊部分结构因子和窗口数量两种因素进行模拟,分析该因素对多窗口火焰融合高度的影响,来揭示多窗口火焰融合规律。

1 数值模拟

1.1 计算模型

以沈阳市某带连廊高层建筑作为计算模型。该建筑共 33 层,总高度为 99 m,层高 3 m,房间长×宽为 3.3 m×3.6 m,侧墙长度

固定为 8.1 m,连廊与外墙之间的距离为 1.5 m。采用固定火源面,火源位置在第 6 层凹槽内面墙区域,热释放速率为 6 MW,燃烧过程为超快速火,窗口宽×高为 1.8 m×1.5 m^[18]。

对于网格划分,PyroSim 采用的网格尺寸为 0.350 m×0.360 m×0.375 m,单元个数为 136 000,可燃物类型为聚氨酯,在每层窗口中心处布置热电偶 THCP01~THCP33 共 33 处,建筑模型如图 1(a)、(b)、(c)所示,火源位置及可燃物分布情况如图 1(d)所示。

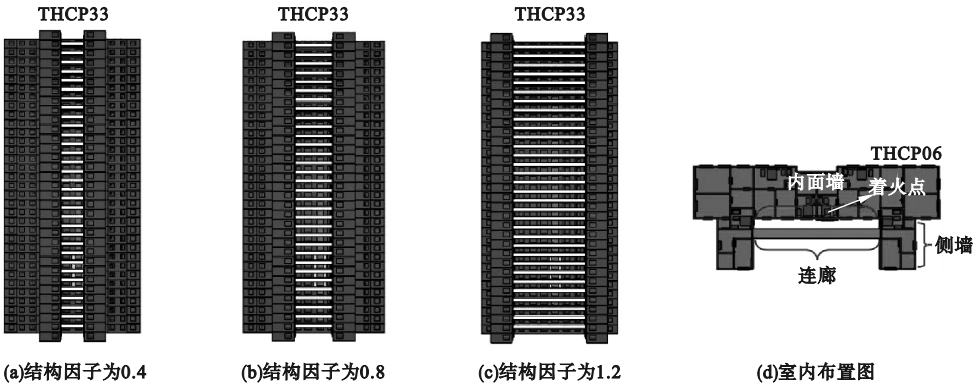


图1 建筑模型立面图

Fig. 1 The elevation drawing of building model

1.2 结构因子

定义连廊部分侧墙与内面墙长度之比为结构因子,即侧墙与内面墙长之比(见图 1(d))。连廊部分侧墙长度为 8.1 m,参考实际建筑尺寸,内面墙宽度选取 6 m、10 m 和 20 m,结构因子分别取 0.4、0.8 和 1.2^[18]。

1.3 通风条件

依据沈阳天气情况,室外基准风速设置为 5.4 m/s(三级风),根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[19],采用指数率公式对不同高度的风速进行计算^[20]:

$$v_h = v_0 (h/H_0)^n. \tag{1}$$

式中: v_h 为高度 h 处的风速; v_0 为基准高度 H_0 处的风速,世界气象组织规定基准高度 $H_0 = 15\text{ m}$; n 为风廓线指数,与地面粗糙度有关,对于城市中心区一般取 0.22。

6~33 层风速为 5.4~8.18 m/s,各层风速变化如图 2 所示。

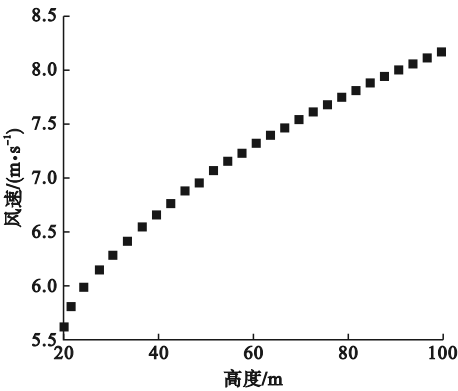


图2 6~33 层风速变化

Fig. 2 The wind speed variation at layers between 6~33

1.4 危险温度

定义危险温度为 540 ℃^[17],达到该温度

时,火焰将发生融合;火焰外轮廓线采用危险温度 540 ℃ 的等温面,用以确定其火焰高度和火焰融合高度。

1.5 火源热释放速率(HRR)

根据《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB51251—2017)^[21],起火房间的火灾热释放速率为 6 MW,火灾荷载密度为 0.51 MW/m²,选取非稳态 *t*² 模型计算,选用超快速火进行模拟燃烧,火灾的热释放速率到达 6 MW 时,所用的时长为 179 s。

2 模拟结果分析

为了探讨带连廊高层建筑的纵向多窗口火焰蔓延融合规律,将火灾过程中的重要数

据利用 FDS 软件进行数值模拟,得到了在结构因子变化情况下,连续二、三、四窗口的火焰温度曲线图和温度等温线分布图,通过分析得到了纵向多窗口羽流火焰融合规律及火焰融合高度,为建立带连廊高层建筑阻隔区提供了一定的理论基础。

2.1 结构因子为 0.4

图 3、图 4、图 5 分别为室外基准风速为 5.4 m/s,结构因子为 0.4 时,带连廊高层建筑竖直方向连续二窗口到连续四窗口的温度曲线图和温度等温线分布图,其中,Z 为沿 z 轴方向带连廊高层建筑高度,X 为沿 x 轴方向带连廊高层建筑宽度。

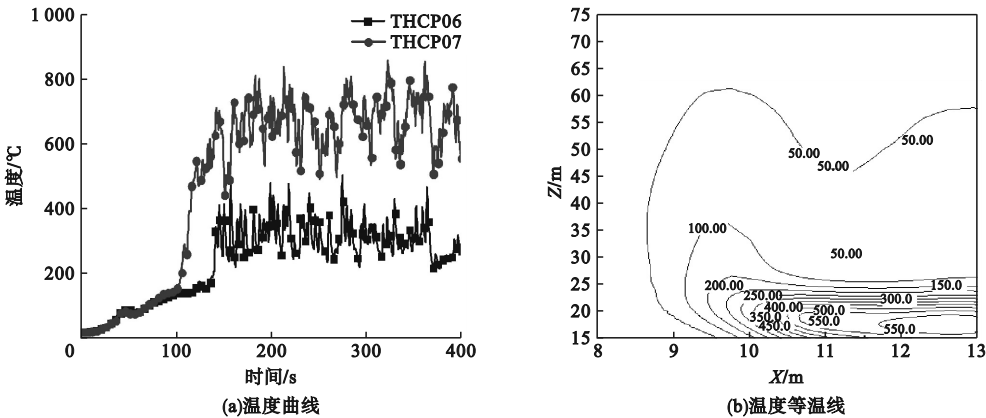


图 3 结构因子为 0.4 时,纵向两窗口温度分布图

Fig. 3 The temperature distribution profiles of two windows in the longitudinal direction with structure factor of 0.4

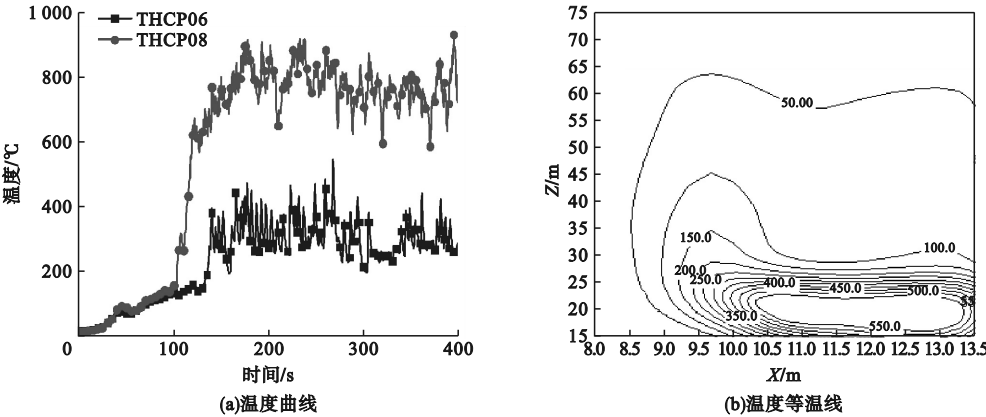


图 4 结构因子为 0.4 时,纵向三窗口温度分布图

Fig. 4 The temperature distribution profiles of three windows in the longitudinal direction with structure factor of 0.4

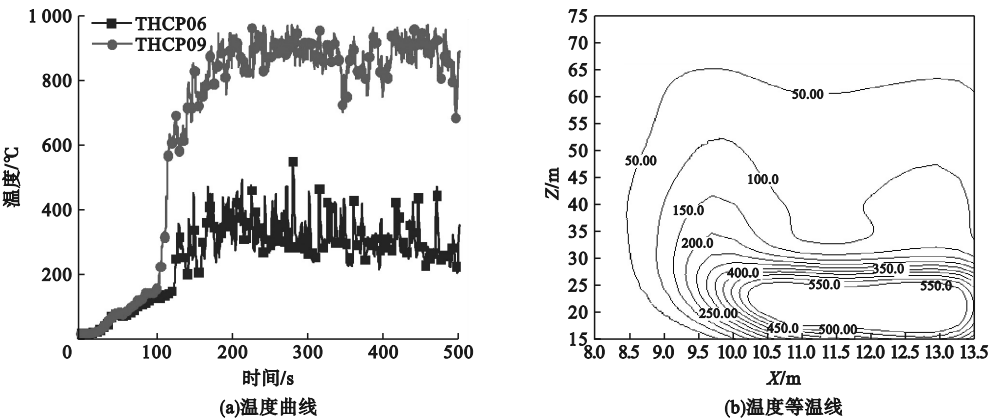


图5 结构因子为0.4时,纵向四窗口温度分布图

Fig. 5 The temperature distribution profiles of four windows in the longitudinal direction with structure factor of 0.4

由图可知,随着窗口数量增加,温度曲线中火焰最高温度从 800 ℃ 上升到 1 000 ℃,窗口温度最高的测点分别为 THCP07、THCP08 和 THCP09,说明最危险的楼层为 7 层、8 层和 9 层。达到 540 ℃ 时,纵向连续二、三、四窗口燃烧情况下,火焰高度分别是 21 m、24 m、27 m。分析数据可知,同时燃烧达到危险温度 540 ℃ 时,两窗口、三窗口、四

窗口火焰融合高度分别为 3 m、4.5 m、6 m。

2.2 结构因子为 0.8

图 6、图 7、图 8 分别为室外基准风速为 5.4 m/s,结构因子为 0.8 时,带连廊高层建筑竖直方向连续二、三、四窗口的温度曲线图和温度等温线分布图,其中,Z 为沿 z 轴方向带连廊高层建筑高度,X 为沿 x 轴方向带连廊高层建筑宽度。

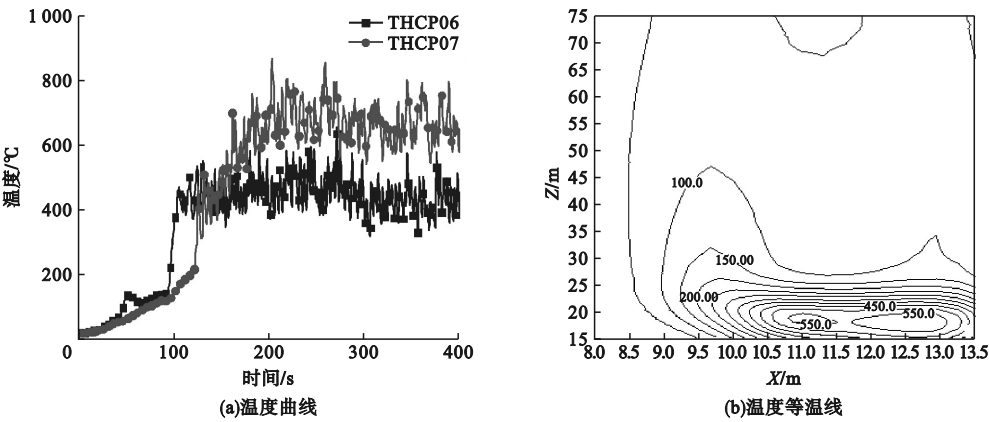


图6 结构因子为0.8时,纵向两窗口温度分布图

Fig. 6 The temperature distribution profiles of two windows in the longitudinal direction with structure factor of 0.8

由图可知,随着窗口数量增加,温度曲线中火焰最高温度从 800 ℃ 上升到 1 000 ℃,窗口温度最高的测点分别为 THCP07、THCP08 和 THCP09,说明最危险的楼层为 7

层、8 层和 9 层。达到 540 ℃ 时,纵向连续二、三、四窗口燃烧情况下,火焰高度分别是 21.85 m、24.25 m、27.25 m。分析数据可知,燃烧达到危险温度 540 ℃ 时,两窗口、三

窗口四窗口的火焰融合高度分别为 3.85 m、4.75 m、6.25 m。

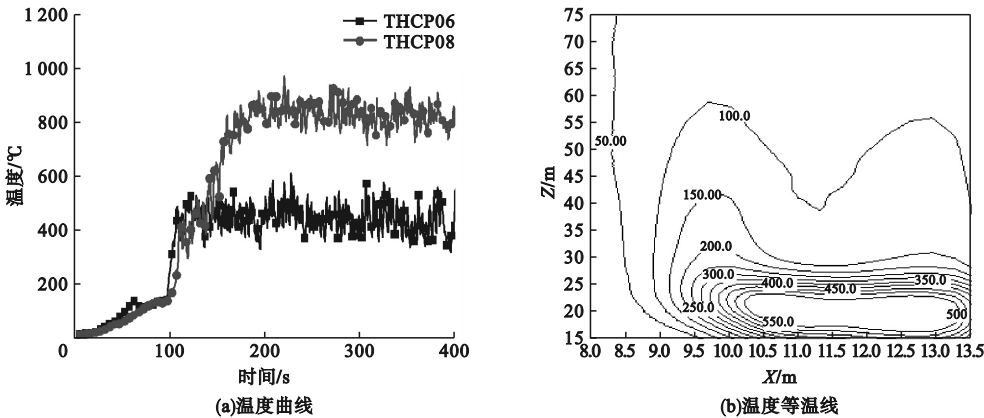


图 7 结构因子为 0.8 时,纵向三窗口温度分布图

Fig. 7 The temperature distribution profiles of three windows in the longitudinal direction with structure factor of 0.8

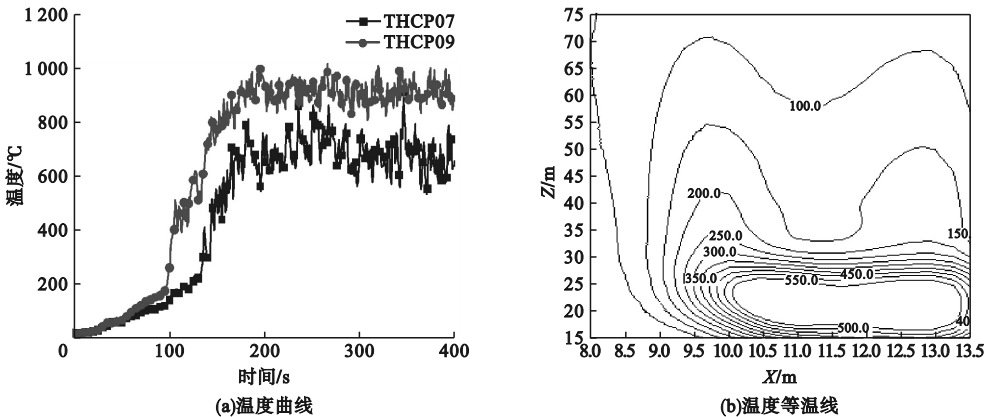


图 8 结构因子为 0.8 时,纵向四窗口温度分布图

Fig. 8 The temperature distribution profiles of four windows in the longitudinal direction with structure factor of 0.8

2.3 结构因子为 1.2

图 9、图 10、图 11 为室外基准风速为 5.4 m/s,结构因子为 1.2 时,带连廊高层建筑竖直方向连续二、三、四窗口的温度曲线图和温度等温线分布图,其中,Z 为沿 z 轴方向带连廊高层建筑高度,X 为沿 x 轴方向带连廊高层建筑宽度。

由图可知,随着窗口数量增加,温度曲线中火焰最高温度从 850 ℃ 上升到 1 000 ℃,窗口温度最高的测点分别为 THCP06、THCP07 和 THCP09,说明最危险的楼层为 6

层、7 层和 9 层。达到 540 ℃ 时,纵向连续二、三、四窗口燃烧情况下,火焰高度分别是 24.76 m、31.88 m、39.75 m。分析数据可知,燃烧达到危险温度 540 ℃ 时,连续两窗口、三窗口、四窗口的火焰融合高度分别为 6.76 m、12.38 m、18.75 m。

2.4 结果分析

在改变结构因子的条件下,当窗口数量发生变化时,达到危险温度 540 ℃ 时的火焰融合高度如表 1 所示。

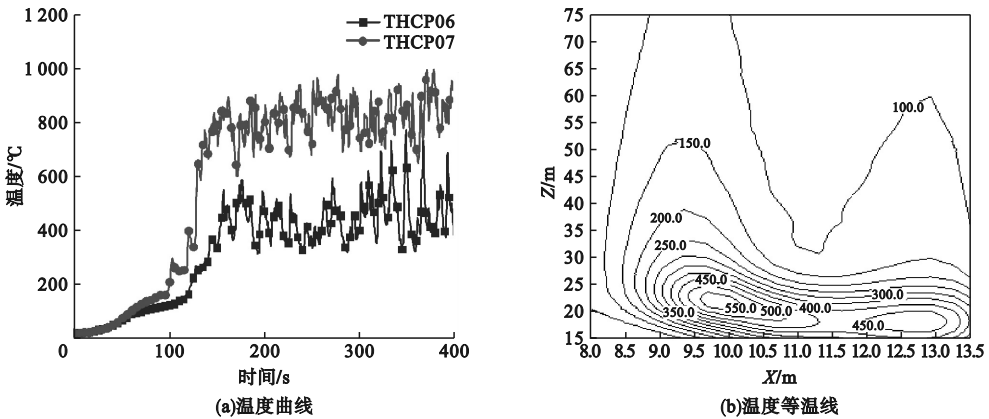


图 9 结构因子为 1.2 时,纵向两窗口温度分布图

Fig. 9 The temperature distribution profiles of two windows in the longitudinal direction with structure factor of 1.2

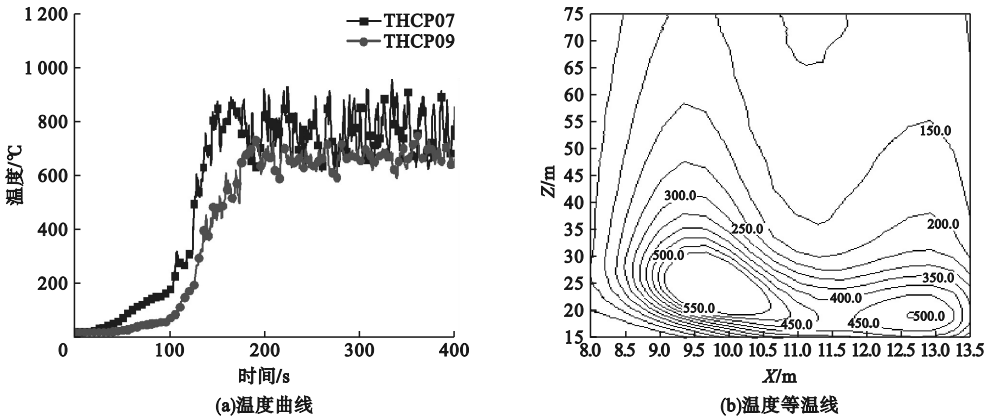


图 10 结构因子为 1.2 时,纵向三窗口温度分布图

Fig. 10 The temperature distribution profiles of three windows in the longitudinal direction with structure factor of 1.2

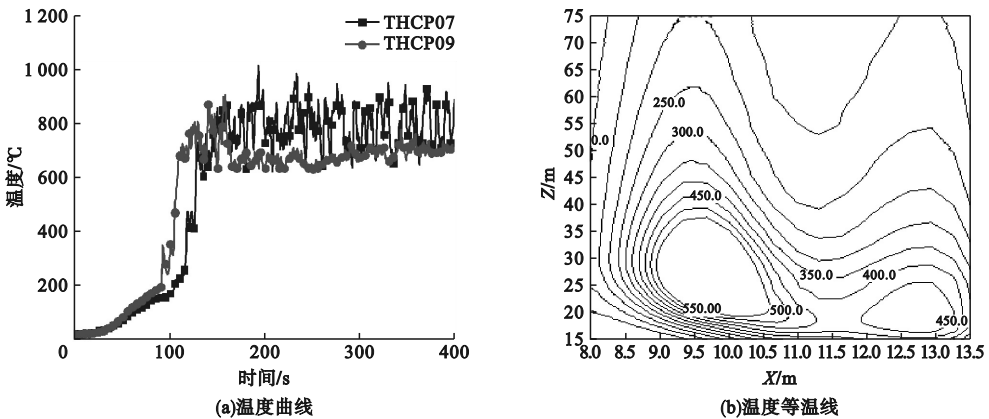


图 11 结构因子为 1.2 时,纵向四窗口温度分布图

Fig. 11 The temperature distribution profiles of four windows in the longitudinal direction with structure factor of 1.2

表1 达到危险温度为540℃时火焰融合的高度

Table 1 The heights of flame fusion at 540℃ with different structure factor m

结构因子	竖向两窗口火焰融合高度	竖向三窗口火焰融合高度	竖向四窗口火焰融合高度
0.4	3.00	4.50	6.00
0.8	3.85	4.75	6.25
1.2	6.76	12.38	18.75

由表1可知,火焰融合高度随着结构因子增大而增大,当结构因子由0.4增加到0.8时,火焰融合高度增长幅度较小;结构因子由0.8增大到1.2时,火焰融合高度增长幅度较大,说明结构因子为1.2时对带连廊高层建筑的火焰融合高度影响较大。分析原因因为该高层建筑的三面墙与连廊已形成完整中空结构见图1(d),由于凹槽与连廊的存在,使得火焰不能从两侧和前方卷吸空气,为了满足燃烧要求,火焰需要从凹槽与连廊形成的中空结构下方卷吸更多空气,空气将沿着中空结构产生一个向上气流,当内面墙宽度减小时,从凹槽与连廊形成的中空结构下方卷吸空气速度明显增强,进而使烟囱效应充分而引起的火焰加速蔓延。考虑消防因素,不建议采用结构因子为1.2的带连廊高层建筑。

由于结构因子为0.4的高层建筑连廊长度较长,考虑造价因素,故选用连廊部分结构因子为0.8的高层建筑火焰融合高度作为建筑外部蔓延防火阻隔区高度。经过计算,带连廊高层建筑结构因子为0.8,纵向连续燃烧五窗口、六窗口、七窗口、八窗口、九窗口在达到540℃时的火焰融合高度分别为8.25 m、12.75 m、14.63 m、15.75 m、16.23 m。

通过分析,表2中纵向连续燃烧十窗口火焰融合高度只比九窗口对应高度提升了0.22 m,仅增长1.3%,且增长幅度趋于稳定,稳定在16.45 m。外部蔓延防火阻隔区高度可设置为17 m。

表2 结构因子为0.8时火焰融合高度增长幅度

Table 2 The height amplification of flame fusion with structural factor of 0.8

窗口数量	火焰融合高度/m	增长高度/m	增长百分比/%
二	3.85	—	—
三	4.75	0.90	18.9
四	6.25	1.50	24.0
五	8.25	2.00	24.2
六	12.75	4.50	35.3
七	14.63	1.88	12.8
八	15.75	1.13	7.1
九	16.23	0.48	2.9
十	16.45	0.22	1.3

3 结 论

(1)带连廊高层建筑外墙火焰蔓延高度受结构因子和窗口数量影响,随着窗口数量增加,结构因子对火焰融合高度影响越大,结构因子越大,火焰融合高度越高。

(2)基准风速为5.4 m/s时,随着窗口数量增大,对比结构因子为0.4、0.8、1.2时的带连廊高层建筑火焰融合高度的变化,可得出:结构因子为0.4、0.8时对高层建筑外立面火焰融合高度变化影响较小,结构因子为1.2时对高层建筑外立面火焰融合高度变化影响较大;考虑消防安全与工程造价,建议选用结构因子小于0.8的带连廊高层建筑。

(3)当九窗口连续燃烧时,火焰融合高度增长幅度趋于稳定,稳定在16.23 m,外部蔓延防火阻隔区可设置为17 m。

参考文献

[1] 李建涛,闫维纲,朱红亚,等.高层建筑外立面U型结构火蔓延的实验研究[J].火灾科学,2012,21(4):167-173.
(LI Jiantao, YAN Weigang, ZHU Hongya, et al. Experimental study on the fire spread in high-rise buildings with U-shaped outside-façade structure [J]. Fire safety science, 2012, 21(4):167-173.)

[2] BIAO Z, HIDEKI Y, TAKAFUMI N, et al. Upward fire spread rate over real-scale EPS ETICS façades [J]. Fire technology, 2021, 57(4):2007-2024.

[3] JO J H, LIM J H, SONG S Y, et al. Characteristics of pressure distribution and

- solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings [J]. Building and environment, 2007, 42(1): 263–277.
- [4] MAMMOSER I J H, BATTAGLIA F. A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires [J]. Fire safety journal, 2004, 39(4): 277–296.
- [5] OHMIYA Y, TANAKA T, WAKAMATSU T. A room fire model for predicting fire spread by external flames [J]. Fire science and technology, 1998, 18(1): 11–21.
- [6] NILANJAN C. Influence of thermal expansion on fluid dynamics of turbulent premixed combustion and its modelling implications [J]. Flow, turbulence and combustion, 2021, 106(3): 753–848.
- [7] 陈含芳. 城市综合体火灾风险分析与应急疏散路径研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020. (CHEN Hanfang. Fire risk analysis and emergency evacuation path of urban complex [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.)
- [8] 张无敌, 陈一洲, 李琪. 城市大型公共建筑火灾风险因素影响程度及可能性分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4): 1434–1439. (ZHANG Wudi, CHEN Yizhou, LI Qi. Analysis of degree of influence and risk possibility of fire risk factors in large-scale public buildings in cities [J]. Journal of safety and environment, 2021, 21(4): 1434–1439.)
- [9] 张轩语. 地下商业街火灾风险影响因素研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. (ZHANG Xuanyu. Study on fire risk influencing factors of underground commercial street [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.)
- [10] JEFFS G M F, KLINGELHOFER H G, PRAGER F H, et al. Fire-performance of a ventilated facade insulated with a B2-classified rigid polyurethane foam [J]. Fire and materials, 1986, 10(2): 79–89.
- [11] HIMOTO K, TSUCHIHASHI T, TANAKA Y, et al. Modeling the trajectory of window flames with regard to flow attachment to the adjacent wall [J]. Fire safety journal, 2009, 44(2): 250–258.
- [12] 李建涛, 闫维纲, 朱红亚, 等. 高层建筑外立面U型结构火蔓延特性数值模拟研究[J]. 火灾科学, 2012, 21(4): 174–180. (LI Jiantao, YAN Weigang, ZHU Hongya, et al. Numerical simulation on the fire spread in high-rise building with U-shaped outside-facades structure [J]. Fire safety science, 2012, 21(4): 174–180.)
- [13] 张玉涛, 车博, 张玉杰. 烟囱效应作用下火灾烟气蔓延规律模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(3): 740–748. (ZHANG Yutao, CHE Bo, ZHANG Yujie. Simulation study on the law of fire smoke propagation under the stack effect [J]. Journal of safety and environment, 2023, 23(3): 740–748.)
- [14] 王自衡, 王立雄, 郭娟利. 基于建筑设计的居住建筑外立面火灾蔓延研究[J]. 建筑与文化, 2015(6): 139–140. (WANG Ziheng, WANG Lixiong, GUO Juanli. Research residential building facade fire spreading by architectural design [J]. Architecture and culture, 2015(6): 139–140.)
- [15] 潘晓菲. 凹型建筑外立面火灾蔓延特性数值模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019. (PAN Xiaofei. Study on numerical simulation study on fire spread characteristics of façade in high-rise building [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.)
- [16] 王宇, 周盈彤, 曲志鹏. 带连廊高层建筑外墙火竖向蔓延数值模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(6): 1020–1026. (WANG Yu, ZHOU Yingtong, QU Zhipeng. Numerical simulation on vertical spread of exterior wall fire in high-rise buildings with corridor [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(6): 1020–1026.)
- [17] SEIGEL L G. The projection of flames from burning buildings [J]. Fire technology, 1969, 5(1): 43–51.
- [18] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范: GB50016—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Code for fire protection of building design: GB50016—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for loads in building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.)
- [20] 张昊, 陈健, 王会娟, 等. 自然风压对超高层建筑火灾排烟的影响模拟[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(2): 180–184. (ZHANG Hao, CHEN Jian, WANG Huijuan, et al. Simulation of the influence of natural wind pressure on fire smoke exhaust of super high-rise buildings [J]. Fire science and technology, 2018, 37(2): 180–184.)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑防排烟系统技术标准: GB51251—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for smoke control and exhaust system in buildings: GB51251—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)