

# 带连廊高层建筑外墙火竖向蔓延数值模拟研究

王 宇,周盈彤,曲志鹏

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 探究火灾过程中带连廊高层建筑不同状态下外立面着火情况,揭示竖向连续多窗口羽流火焰与外保温材料的融合蔓延规律. 方法 利用火灾动态仿真模拟软件 PyroSim 建立 18 层足尺寸带连廊高层住宅楼火灾模型,改变连廊到外立面距离和竖向窗口数量,结合火灾蔓延时窗口竖向温度曲线及温度分布等温线,分析火灾发展过程中羽流火焰融合高度,引入危险温度  $T$ ,研究带连廊高层建筑在火灾场景下的火焰融合规律. 结果 达到危险温度  $T$  时,连廊距外立面 1.5 m、2 m、2.5 m 条件下竖向三窗口比竖向两窗口火焰融合高度提高 10.40%、13.91%、27.62%,竖向三窗口与竖向四窗口火焰融合高度基本相同. 竖向两窗口条件下,连廊距外立面 1.5 m、2 m、2.5 m 时火焰融合高度分别降低 8%、8.70%,竖向三窗口、竖向四窗口在连廊距外立面 1.5 m、2 m、2.5 m 时火焰融合高度基本相同. 结论 连廊对高层建筑外立面火焰蔓延的趋势有影响作用,建议将连廊距外立面 1.5 m、竖向三窗口火焰融合高度作为带连廊高层建筑外部阻隔区设置高度.

**关键词** 带连廊高层建筑;阻隔区设置;窗口喷火;火焰融合

中图分类号 TU54

文献标志码 A

## Numerical Simulation on Vertical Spread of Exterior Wall Fire in High-rise Building with Corridor

WANG Yu, ZHOU Yingtong, QU Zhipeng

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The purpose of this paper is to explore the fire of the facade of high-rise building with corridor under different conditions in the process of fire, and reveals the law of the fusion and spread of vertical continuous multi window plume flame and external insulation material. The fire model of 18 story high-rise residential building with corridor is established by using Pyrosim software. By changing the distance between corridor and facade and the number of vertical

收稿日期:2020-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(11676190);辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0299);沈阳市科技计划项目(19-109-4-19)

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

windows, the vertical temperature distribution and the vertical temperature distribution isotherm are obtained by combining the fire spread. The temperature and height of plume flame fusion in the process of fire development are analyzed in this paper, the concept of dangerous temperature  $T$  is introduced to study the flame fusion law of high-rise building with corridor in the fire scene. When the dangerous temperature  $T$  is reached, the vertical three-window flame height is increased by 10.40%, 13.91%, 27.62% than the vertical two-window under the conditions of 1.5 m, 2 m, and 2.5 m from the external facade. The flame fusion height of vertical three-window and vertical four-window is basically the same. Under the condition of two vertical windows, the flame fusion height is reduced by 8% and 8.70% when the corridor is 1.5 m, 2 m and 2.5 m away from the facade. The flame fusion height of vertical three-window and vertical four-window is essentially the same at 1.5 m, 2 m, 2.5 m from the facade. The results show that the corridor has an effect on the flame spreading tread of the high-rise building facade. The height of the external barrier area of high-rise building with corridor should be set in vertical three-window and connecting corridor 1.5 m away from the façade.

**Key words:** high rise building with corridor; barrier area setting; window fire; flame fusion

带连廊高层建筑含有连廊和侧墙,当发生火灾时,由于烟囱效应,会加快建筑外立面火灾蔓延速度,给生命和财产造成极大的危害<sup>[1-8]</sup>。因此,研究带连廊高层建筑在火灾环境下外墙火焰蔓延规律尤为关键。

近年来国内外部分学者对高层建筑纵向火灾蔓延进行研究:J. H. Sun 等<sup>[9]</sup>从火灾动力学角度出发开展实验研究,揭示了高层建筑火灾中的火焰传播特点;段海娟等<sup>[10]</sup>运用火灾动力学软件 FDS 对在建的高层住宅楼外部火灾进行模拟研究,得到高层建筑外墙保温层发生火灾时的蔓延特点;闫维纲等<sup>[11-12]</sup>研究了聚氨酯保温材料在凹槽式建筑结构下纵向火蔓延的规律,并对凹槽式高层建筑外立面纵向火灾蔓延机理进行研究总结;王宇等<sup>[13]</sup>使用 Pyrosim 软件,分别对无侧墙口字型建筑及有侧墙凹字形建筑进行火灾模拟研究,分析出火焰融合后危险温度的高度,从而计算出防火阻隔区的高度。上述工作研究了高层建筑外墙火焰蔓延的基本规律,但对大尺寸带连廊高层建筑的火灾蔓延鲜有涉及,故研究带连廊高层建筑在火灾环境下多窗口羽流火焰的融合高度及变化规律具有一定意义。

基于此,笔者运用有限元分析软件

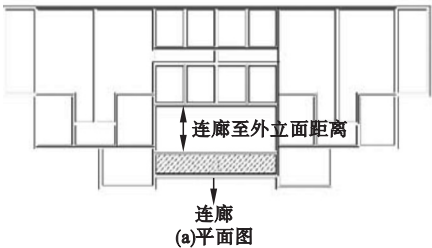
Pyrosim 建立高层住宅楼模型,通过改变连廊到外立面距离、竖向窗口数量得出火灾蔓延时竖向温度分布情况,并引入危险温度  $T$ ,分析带连廊高层建筑外墙火蔓延的行为规律,为工程应用中高层建筑阻隔区的设立提供参考。

# 1 数值模拟

## 1.1 建筑模型

### (1)模型尺寸

对国内常见带有连廊的高层实体建筑进行分析研究,建筑模型采用 18 层实体住宅楼。总高为 54 m,层高为 3.0 m,侧墙长度固定为 4.6 m,墙体厚度为 0.2 m,楼板厚度为 0.1 m,满足规范要求。连廊至外立面距离  $l$  设置为 1.5 m、2 m、2.5 m。房间开间尺寸为 3 m,进深尺寸为 3.6 m。窗口尺寸为高 1.4 m,宽 1.5 m,满足《建筑门窗洞口尺寸系列》(GB/T 5824—2008)要求。建筑模型如图 1 所示。



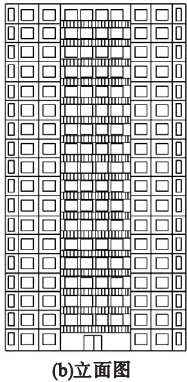


图1 连廊建筑模型

Fig. 1 The corridor building

(2)窗口设置

研究带连廊高层建筑多窗口火焰蔓延,模型设置为实际建筑尺寸,工况竖向两窗口、竖向三窗口、竖向四窗口窗口设置按实际情况选取,如图2所示。

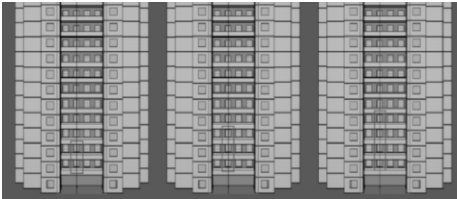


图2 窗口设置

Fig. 2 Window settings

(3)热电偶位置

火源设置在房间内,切片位置在网格竖向高度 $H_y=5.3\text{ m}$ 位置上,位于窗口的中心,高度54 m,如图3所示。火灾模型建立完成,在建筑外立面的每个窗户上的相同位置都设置热电偶检测点,来对温度进行测量。

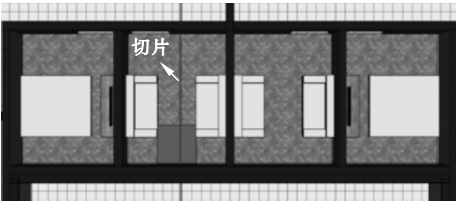


图3 切片位置

Fig. 3 Slice location

1.2 网格划分

根据网格尺寸与火灾的火源特征直径的公式计算<sup>[14-16]</sup>,笔者设置的建筑火灾模型网

格长宽高为 $0.25\text{ m}\times0.25\text{ m}\times0.25\text{ m}$ ,满足数值模拟研究所需的精度要求。同时为节约计算资源,在不影响建筑火灾模拟结果的前提下,仅对建筑火灾所在房间及其上层楼层房间进行网格划分。

1.3 火源热释放速率

采用固定高层建筑室内开间面积和火源热释放速率的方式,用来代表火灾的火灾荷载密度。建筑火灾模型参考《建筑防烟排系统技术标准》(GB51251—2017)中的建议,设置火源热释放速率为6 MW,设置模型中的燃烧反应类型为聚氨酯燃烧反应。依据火灾实际的发展蔓延过程,在窗口同侧网格边界位置处设置通风口。

根据文献[17]的研究与实际保温材料、窗户参数相结合,笔者选取 $T=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为危险温度。 $T$ 为窗口玻璃受高温破碎的最低温度。窗口羽流火焰的温度是从低到高呈阶梯状分布的,可以根据危险温度 $T=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 得到此时火焰融合的高度。

2 模拟结果分析

为了研究带连廊高层建筑纵向多窗口蔓延火焰的融合规律,通过PyroSim软件仿真的方式对火灾发生过程中的重要参数进行数值模拟分析,当连廊距离发生改变时,拟合高层建筑竖向两窗口、竖向三窗口、竖向四窗口的窗口羽流火焰融合升温曲线和等温线,得出竖向多窗口羽流火焰的融合规律及融合高度,为高层建筑阻隔区的设立提供理论基础。

2.1 连廊距离外立面1.5 m

当连廊距离外立面1.5 m时,不同竖向窗口温度分布曲线如图4、图5、图6所示。其中, $H_z, H_x$ 分别为Z方向,X方向的高度。由图可知,连廊1.5 m时,竖向两窗口条件下,达到危险温度 $T$ 时火焰融合高度为12.5 m;竖向三窗口条件下,达到危险温度 $T$ 时火焰融合高度为13.8 m;竖向四窗口条件下,达到危险温度 $T$ 时火焰融合高度为14 m。

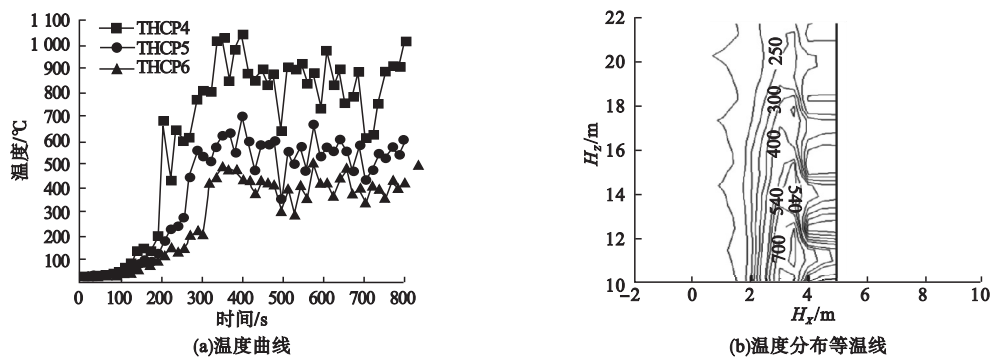


图 4 竖向两窗口温度图( $l=1.5\text{ m}$ )

Fig. 4 Temperature diagram of vertical two windows ( $l=1.5\text{ m}$ )

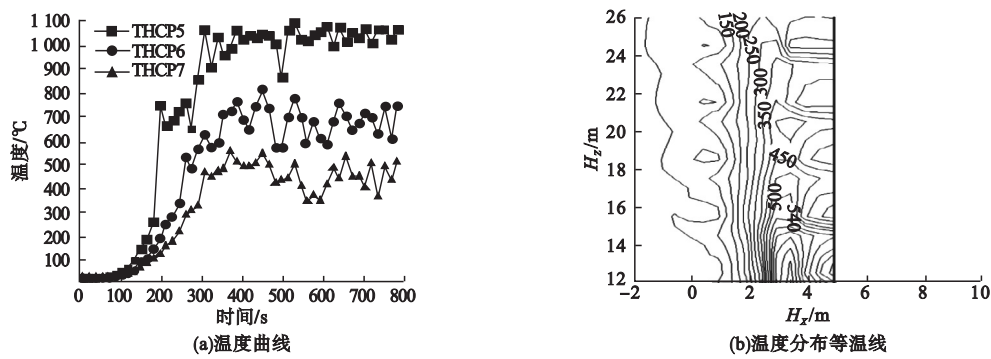


图 5 竖向三窗口温度图( $l=1.5\text{ m}$ )

Fig. 5 Temperature diagram of vertical three windows ( $l=1.5\text{ m}$ )

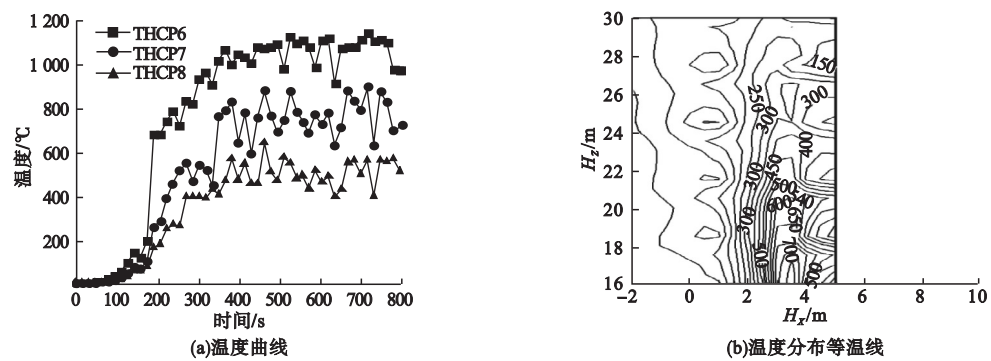


图 6 竖向四窗口温度图( $l=1.5\text{ m}$ )

Fig. 6 Temperature diagram of vertical four windows ( $l=1.5\text{ m}$ )

分析可得,危险温度为 $T$ 时,竖向三窗口比竖向两窗口火焰融合高度提高10.40%,竖向四窗口比竖向三窗口火焰融合高度提高1.45%.

2.2 连廊距离外立面2 m

当连廊距离外立面2 m时,不同竖向窗

口温度分布曲线如图7、图8、图9所示.由图可知,连廊2 m时,竖向两窗口条件下,达到危险温度 $T$ 时火焰融合高度为11.5 m;竖向三窗口条件下,达到危险温度 $T$ 时火焰融合高度为13.1 m;竖向四窗口条件下,达到危险温度 $T$ 时火焰融合高度为13.6 m.

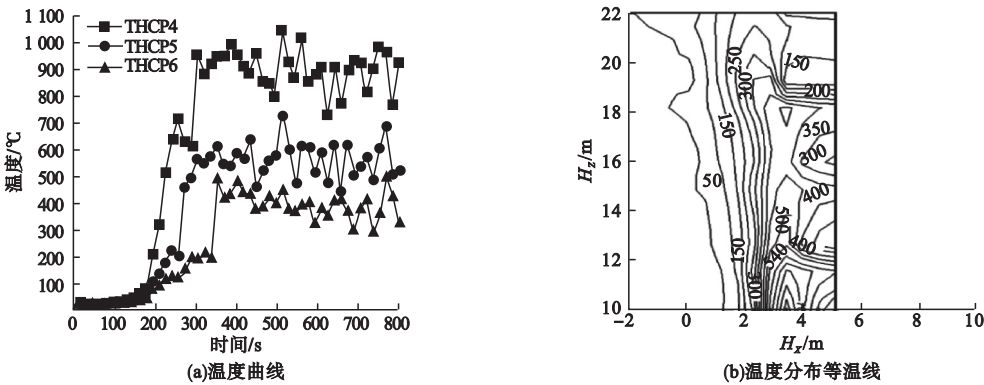


图7 竖向两窗口温度图( $l=2\text{ m}$ )

Fig. 7 Temperature diagram of vertical two window ( $l=2\text{ m}$ )

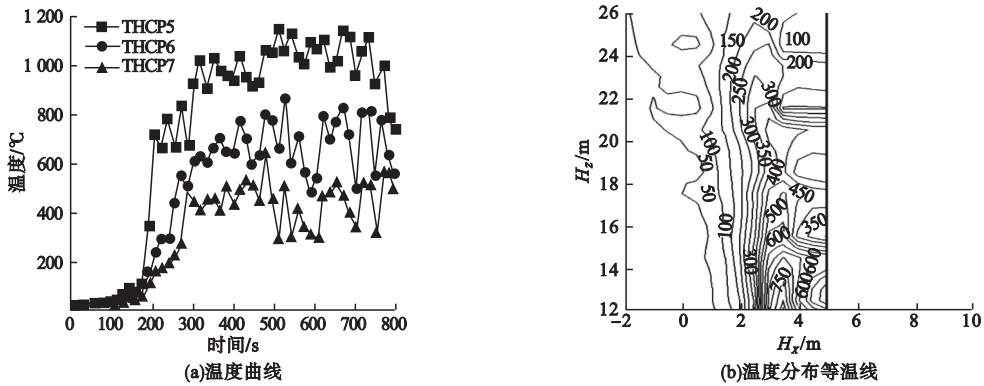


图8 竖向三窗口温度图( $l=2\text{ m}$ )

Fig. 8 Temperature diagram of vertical three windows ( $l=2\text{ m}$ )

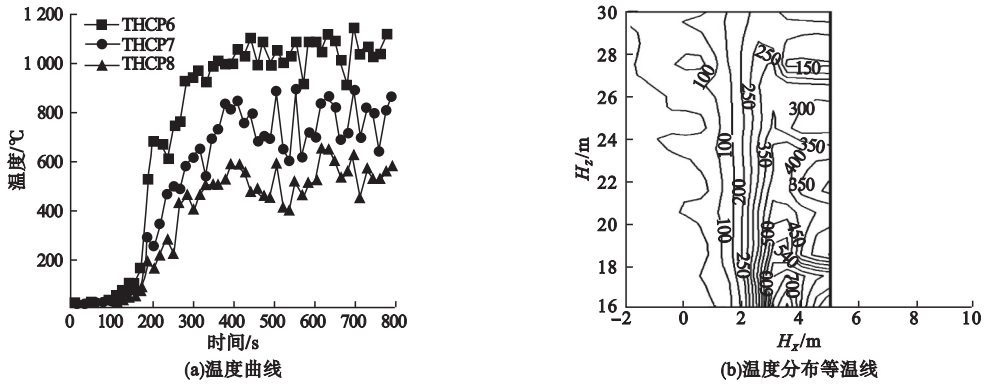


图9 竖向四窗口温度图( $l=2\text{ m}$ )

Fig. 9 Temperature diagram of vertical four windows ( $l=2\text{ m}$ )

由图可知,危险温度为  $T$  时,竖向三窗口比竖向两窗口火焰融合高度提高 13.91%,竖向四窗口比竖向三窗口火焰融合高度提高 3.82%。

2.3 连廊距离外立面 2.5 m

当连廊距离外立面 2.5 m 时,不同竖向

窗口温度分布曲线如图 10、图 11、图 12 所示。由图可知,连廊距 2.5 m 时,竖向两窗口条件下,达到危险温度  $T$  时火焰融合高度为 10.5 m;竖向三窗口条件下,达到危险温度  $T$  时火焰融合高度为 13.4 m;竖向四窗口条件下,达到危险温度  $T$  时火焰融合高度为 13.2 m。



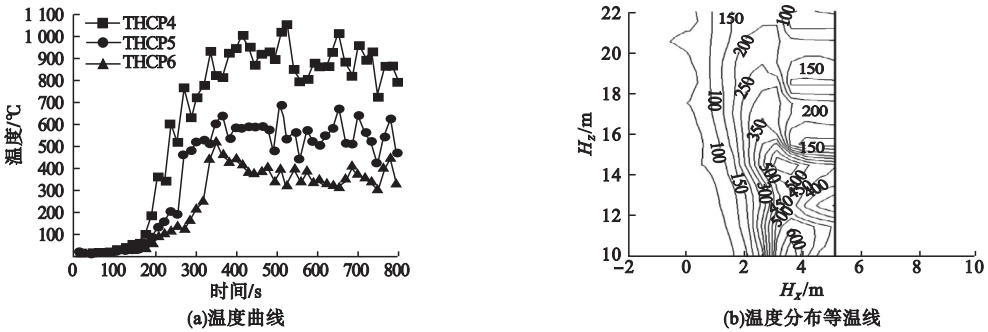


图 10 竖向两窗口温度图( $l=2.5\text{ m}$ )

Fig. 10 Temperature diagram of vertical two windows ( $l=2.5\text{ m}$ )

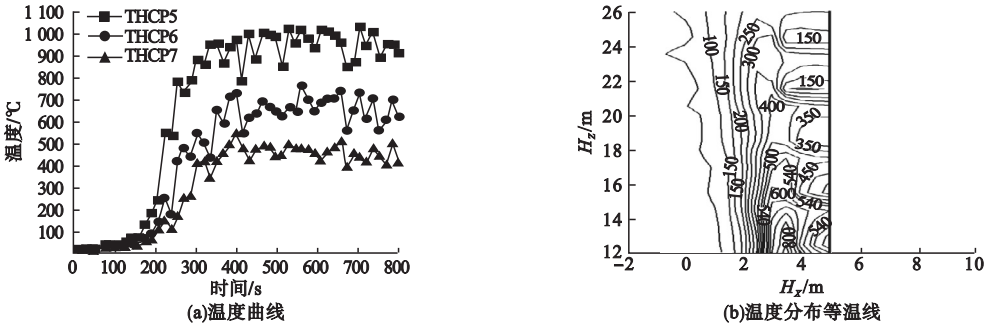


图 11 竖向三窗口温度图( $l=2.5\text{ m}$ )

Fig. 11 Temperature diagram of vertical three windows ( $l=2.5\text{ m}$ )

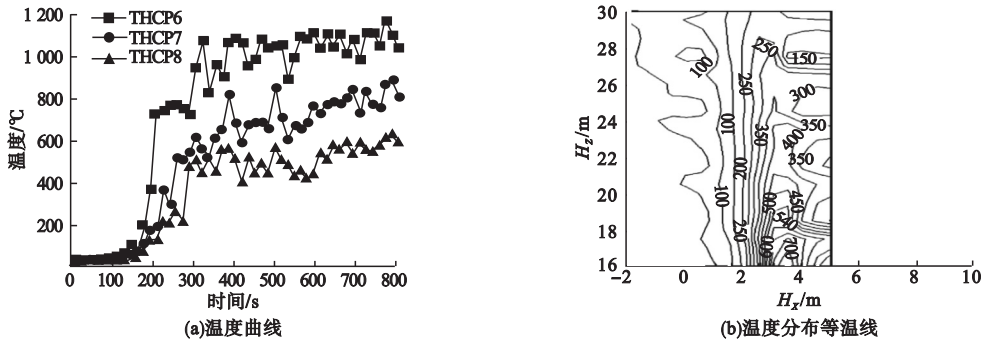


图 12 竖向四窗口温度图( $l=2.5\text{ m}$ )

Fig. 12 Temperature diagram of vertical four windows ( $l=2.5\text{ m}$ )

分析可得,危险温度为 $T$ 时,竖向三窗口比竖向两窗口火焰融合高度提高 27.62%,竖向四窗口与竖向三窗口火焰融合高度基本相同。

表 1 给出在不同连廊距离下不同窗口火焰融合危险温度达到 $T$ 时的高度。竖向两窗口条件下,连廊距离外立面 2 m 比连廊距离外立面 1.5 m 时火焰融合高度降低 8%;连廊距离外立面 2.5 m 比连廊距离外立面 2 m 时火焰融合高度降低 8.70%。竖向三窗口、竖向四窗口在连廊距离外立面 1.5 m、2 m、2.5 m 时火焰融合高度基本相同。

表 1 危险温度为 $T$ 时火焰融合的高度

连廊至外立面距离/m	竖向两窗口火焰融合高度/m	竖向三窗口火焰融合高度/m	竖向四窗口火焰融合高度/m
1.5	12.5	13.8	14.0
2.0	11.5	13.1	13.6
2.5	10.5	13.4	13.2

### 3 结 论

(1)随着连廊至外立面距离增大,竖向两窗口、竖向三窗口、竖向四窗口危险温度为 $T$ 时的火焰融合高度有下降趋势,说明连廊对高层建筑外立面火焰蔓延趋势有影响。

(2)危险温度为 $T$ 时,竖向四窗口与竖向三窗口的火焰融合高度相差较小,应考虑竖向三窗口的火焰融合高度作为带连廊高层建筑外立面火灾蔓延防控措施的理論依据。

(3)带连廊高层建筑外立面火灾蔓延阻隔的措施,需要综合考虑连廊至外立面距离、竖向窗口数量等因素的影响,结合所有影响因素条件可得带连廊高层建筑外立面火灾蔓延的危险温度的火焰融合高度为13.8 m。

### 参考文献

- [1] 傅智敏.我国火灾统计数据[J].安全与环境学报,2014,14(6):341-345.  
(FU Zhimin. Analysis on the fire data in China [J]. Journal of safety and environment, 2014, 14(6):341-345.)
- [2] 卓萍,王国辉,杜霞,等.我国建筑外保温系统发展动态及趋势[J].消防科学与技术,2011,30(1):8-11.  
(ZHUO Ping, WANG Guohui, DU Xia, et al. The development of building external insulation systems in China [J]. Fire science and technology, 2011, 30(1):8-11.)
- [3] 全贵来.高层建筑典型功能区火灾危险性的数值模拟计算分析[J].火灾科学,2011,25(4):57-60.  
(TONG Guilai. Numerical simulation technology analysis of fire hazard in typical functional areas of high-rise buildings [J]. Fire science, 2011, 25(4):57-60.)
- [4] 孙进磊.外墙外保温技术的发展及应用研究[D].天津:天津大学,2008.  
(SUN Jinlei. The development and application research of exterior insulation technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.)
- [5] 苏朗.高层建筑窗口喷出火焰竖向蔓延的抑制研究[D].大连:大连理工大学,2010.  
(SU Lang. Study on the inhibition of vertical spread flame ejected from window of high-rise building [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.)
- [6] AWAD A S, CALAY R K, BADRAN O O, et al. An experimental study of stratified flow in enclosures[J]. Applied thermal engineering, 2008, 28(17/18):2150-2158.
- [7] HIMOTO K, TSUCHIHASHI T, TANAKA Y, et al. Modeling thermal behaviors of window

flame ejected from a fire compartment[J]. Fire safety journal, 2009, 44(2):230-240.

- [8] 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.
- [9] SUN J H, HU L H, ZHANG Y. A review on research of fire dynamics in high-rise buildings [J]. Theoretical and applied mechanics letters, 2013, 4:1-13.
- [10] 段海娟,赵永峰,赵金城,等.高层住宅楼外墙保温系统火灾蔓延的数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2015,35(1):24-27.  
(DUAN Haijuan, ZHAO Yongfeng, ZHAO Jincheng, et al. Numerical simulation of external wall insulation system fire in high-rise residential building [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2015, 35(1):24-27.)
- [11] 李建涛,闫维纲,朱红亚,等.高层建筑外立面U型结构火灾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 buildings with U-shaped outside-facade structure [J]. Fire safety science, 2012, 21(4):174-180.)
- [12] 李建涛,闫维纲,朱红亚,等.高层建筑外立面U型结构火灾蔓延的实验研究[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-facade structure [J]. Fire safety science, 2012, 21(4):167-173.)
- [13] 王宇,李世鹏,杨舜博.侧墙结构多窗口羽流火焰的数值模拟分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(3):449-455.  
(WANG Yu, LI Shipeng, YANG Shunbo. Numerical simulation on the windows plume flame in side wall structure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(3):449-455.)
- [14] LEE Y P. Heat fluxes and flame heights on external facades from enclosure fires [D]. Ulster; University of Ulster, 2006.
- [15] American Nuclear Society Specification. Standard for smoke and heat venting: NFPA 204 [S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2012.
- [16] DELICHATSIOS M A, LEE Y P, TOFILO P. A new correlation for gas temperature inside a burning enclosure [J]. Fire safety journal, 2009, 44(8):1003-1009.
- [17] 王宇,张敬义,李世鹏.侧墙建筑羽流火焰高度计算公式及其影响因素研究[J].安全与环境学报,2018,18(5):1799-1804.  
(WANG Yu, ZHANG Jingyi, LI Shipeng. Numerical simulation for the vertical multi-windows plume flame merging in the side-wall structure [J]. Journal of safety and environment, 2018, 18(5):1799-1804.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)