

# 不同空气湿度条件下凹型超高层建筑窗口羽流火焰的数值模拟分析

王宇<sup>1</sup>, 邢佳<sup>1</sup>, 王子铭<sup>1</sup>, 佟舟<sup>2</sup>

(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系, 辽宁 沈阳 110167)

**摘要** 目的 探究凹型超高层建筑在不同空气湿度条件下对窗口羽流火焰发生融合高度的影响以及窗口温度分布规律。方法 对凹型超高层建筑火灾模型在空气湿度为20%、40%、80%条件下,采用火灾动态仿真模拟软件PyroSim进行数值模拟,通过对不同工况下窗口温度分布等温线及其温度曲线进行分析,并引入危险温度540℃、350℃。结果 在不同空气湿度条件下,连续纵向两窗口至四窗口燃烧,在达到危险温度540℃时,火焰融合高度升高了7.8~8.4m,连续纵向三窗口和四窗口燃烧比连续纵向两窗口燃烧火焰融合高度升高了3.7~4.7m及4.0~4.5m;在达到危险温度350℃时,连续纵向两窗口燃烧,火焰的高度升高了11.2~11.9m,连续纵向三窗口和四窗口燃烧比连续纵向两窗口燃烧火焰融合高度升高了5.0~5.9m及5.1~6.5m。结论 随着连续纵向窗口的增加,空气湿度对火焰融合高度的影响越来越大;空气湿度越小,火焰高度越高。

**关键词** 凹型超高层建筑;火焰融合高度;危险温度;外部火蔓延;空气湿度

中图分类号 TU391 文献标志码 A

## Numerical Simulation Analysis of Window Plume Flame of Concave Super High-rise Building under Different Air Humidity Conditions

WANG Yu<sup>1</sup>, XING Jia<sup>1</sup>, WANG Ziming<sup>1</sup>, TONG Zhou<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** This paper explores the influence of concave super high-rise building on the fusion height of window plume flame under different air humidity conditions and the distribution law of window temperature. In this paper, the fire model of concave super high-rise building is numerically simulated with PyroSim under the conditions of air humidity of 20%, 40% and 80%. By analyzing the isotherm of

收稿日期:2020-04-29

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)

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

window temperature distribution and its temperature curve under different working conditions, and introducing dangerous temperatures of 540 °C and 350 °C. Under different air humidity conditions, continuous longitudinal combustion from two windows to four windows, when the dangerous temperature reaches 540 °C, the flame fusion height increases by 7.8 ~ 8.4 m. Under different air humidity conditions, when the dangerous temperature reaches 540 °C, The flame fusion height of continuous longitudinal three-window and four-window combustion is 3.7 ~ 4.7 m and 4.0 ~ 4.5 m higher than that of continuous longitudinal two-window combustion. When the dangerous temperature reaches 350 °C, the flame height increases by 11.2 ~ 11.9 m after continuous longitudinal combustion in two windows. When the dangerous temperature reaches 350 °C, the flame fusion height of continuous longitudinal three-window and four-window combustion is 5.0 ~ 5.9 m and 5.1 ~ 6.5 m higher than that of continuous longitudinal two-window combustion. With the increase of continuous longitudinal window, the influence of air humidity on flame fusion height is increasing. The lower the air humidity, the higher the flame height.

**Key words:** concave super high-rise building; height of flame fusion; dangerous temperature; spread of external fire; air humidity

超高层建筑具有体量大,纵向超高等特点<sup>[1-3]</sup>,若发生火灾,安全救援工作难度将大大提高。故对于超高层建筑外部火蔓延的特点需重点关注<sup>[4-10]</sup>。目前针对高层建筑火灾,国内外学者进行了大量研究,吴海燕等<sup>[11]</sup>对超高层建筑火灾危险性 & 防火设计进行了研究分析;A. S. Usmani 等<sup>[12-14]</sup>对实际超高层建筑火灾的连续倒塌性能进行了分析;何勇军等<sup>[15]</sup>对超高层建筑内部火灾烟气流动做了相关研究,得出火源位置和温度分布关系以及拟合函数,并且竖井内的烟气运动和进气口以及侧向开口的状态、天井尺寸、火源位置功率等有关。

上述研究主要是针对超高层建筑安全疏散防火性能、结构抗火及影响内部火灾烟气流动因素,对于超高层建筑外部火蔓延进展情况鲜有研究,而研究室外空气湿度对超高层建筑外部火蔓延情况具有实际意义。基于此,笔者针对不同空气湿度条件下凹型超高层建筑窗口羽流火焰进行模拟研究,通过改变空气湿度,并引入危险温度 350 °C<sup>[17]</sup>(外保温材料点燃温度)和 540 °C<sup>[18]</sup>(火焰融合温度),研究不同工况下凹型超高层建筑窗口羽流火焰发生融合高度的影响以及窗口温度分布规律。研究表明连续纵向两窗口燃

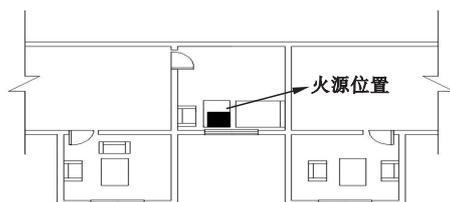
烧,空气湿度对火焰高度影响很小,但随着连续纵向窗口的增加,空气湿度对火焰融合高度影响越来越大。

## 1 数值模型

### 1.1 模型尺寸

计算模型为某一实际凹型超高层建筑,层高 3 m,模拟火灾发生位置设置在第 14 层,火源在长宽为 5.4 m × 4.5 m 的卧室内,窗口宽高为 2.4 m × 1.8 m。笔者将对在 3 种不同空气湿度(20%、40%、80%)条件下纵向连续四窗口、连续三窗口和连续两窗口羽流火焰进行数值模拟。

对于网格划分,PyroSim<sup>[19]</sup>采用的是快速傅里叶变换泊松求解器,经计算笔者采用的网格尺寸为 0.35 m × 0.35 m × 0.35 m。超高层建筑模型如图 1 所示。热力偶布置在每一楼层的窗户中心位置,设置 THCP01 ~ THCP34 共 34 个温度探测点(见图 1(b))。



(a)室内布置图

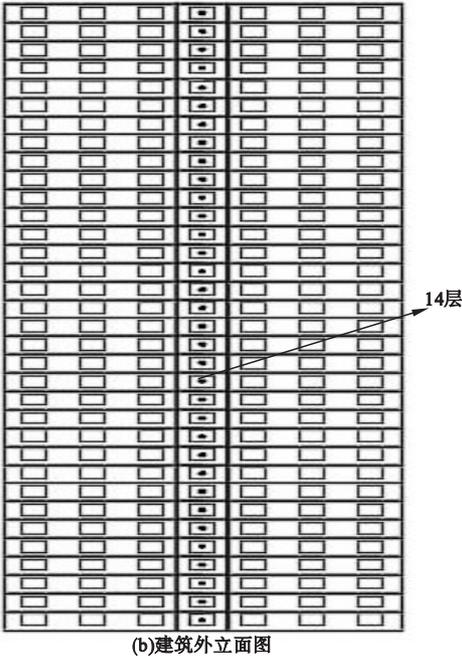


图1 超高层建筑模型

Fig. 1 Super high-level model

1.2 工况设置

当凹型超高层建筑发生火灾时,室外不同的自然环境因素,例如晴天或是雨天、降雨量的大小等都会导致室外空气湿度不同,进而影响可燃物的含水量,对火势的大小、蔓延程度有着较大影响<sup>[20]</sup>。风环境对超高层建筑火灾同样存在重要影响。笔者将空气湿度设置为20%、40%、80%,风速设置为2 m/s,工况情况见表1。

表1 不同空气湿度时工况

Table 1 Working conditions at different air humidity

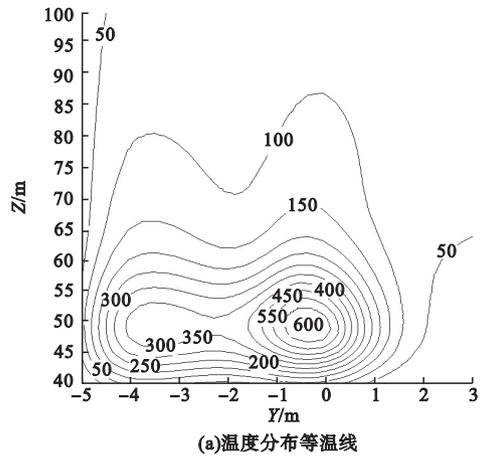
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	窗口数量/个	空气湿度/%
2	2	20
		40
		80
	3	20
		40
		80
4	4	20
		40
		80

1.3 火源热释放速率

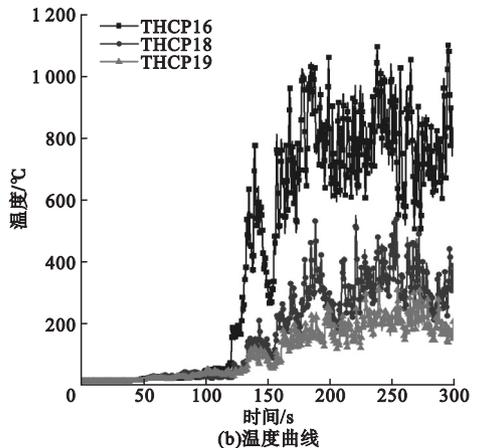
根据《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB51251—2017),燃烧模型选择非稳态  $t^2$  模型<sup>[21]</sup>,查得客房卧室火灾热释放率为6 MW,经计算火荷载密度值为0.28 MW/m<sup>2</sup>,燃烧过程为超快速火,当达到最大热释放率6 MW时,时间为179 s。

2 模拟结果与分析

图2~图10中 THCP16~THCP25 分别表示在第16层至第25层凹槽内窗口中心处温度探测点。火焰融合高度为火焰总高度减去火源位置高度。所有图(a)中横坐标 Y 表示超高层建筑横向宽度,纵坐标 Z 表示超高层建筑的竖向高度;图(b)中横坐标表示燃烧时间,纵坐标表示窗口温度。



(a)温度分布等温线



(b)温度曲线

图2 空气湿度20%下连续纵向两窗口

Fig. 2 Continuous vertical two windows at 20% air humidity

### 2.1 空气湿度为 20%

室外风速为 2 m/s、空气湿度 20% 条件下,连续竖向两窗口、三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图 2~图 4 所示。

从图 2 可以看出,纵向连续两窗口条件

下,当危险温度达到 540 °C 时,火焰总高度为 53.38 m,火焰融合高度为 8.38 m;当危险温度达到 350 °C,火焰总高度为 56.82 m,火焰融合高度为 11.82 m。

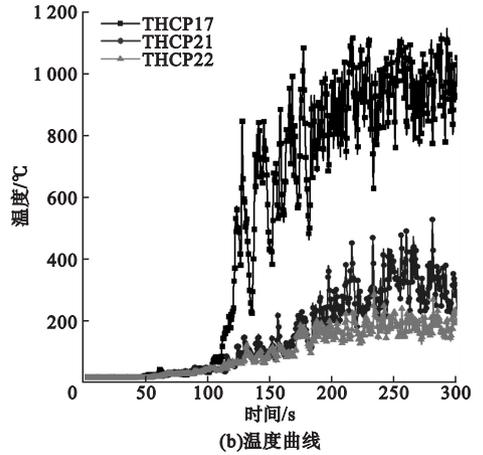
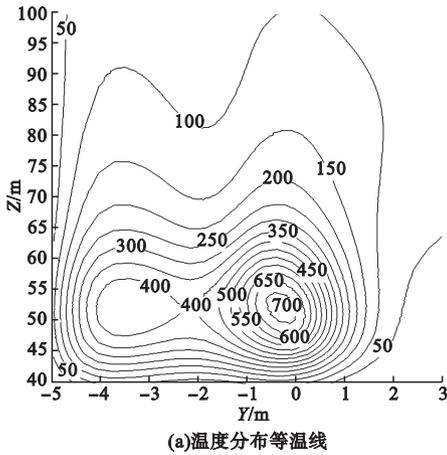


图 3 空气湿度 20% 下连续纵向三窗口

Fig. 3 Continuous vertical three windows at 20% air humidity

从图 3 可以看出,纵向连续三窗口条件下,当危险温度达到 540 °C 时,火焰总高度为 60.32 m,火焰融合高度为 12.36 m;当危险

温度达到 350 °C 时,火焰总高度为 65.64 m,火焰融合高度为 17.64 m。

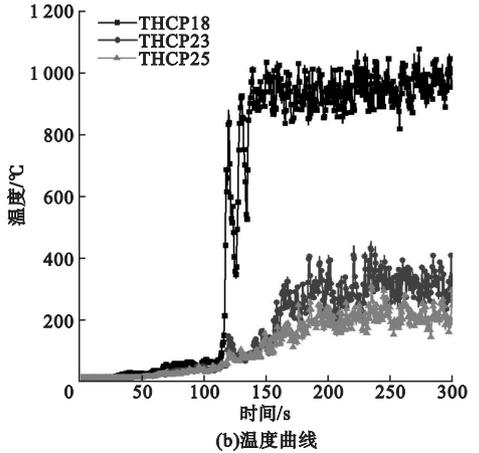
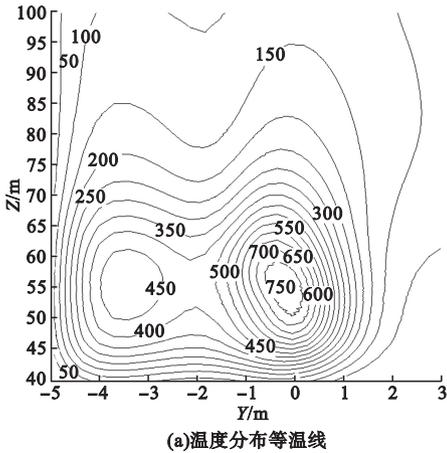


图 4 空气湿度 20% 下连续纵向四窗口

Fig. 4 Continuous vertical four windows at 20% air humidity

从图 4 可以看出,纵向连续四窗口条件下,当危险温度达到 540 °C 时,火焰总高度为 66.70 m,火焰融合高度为 15.70 m;当危险温度达到 350 °C 时,火焰总高度为 73.76 m,火焰融合高度为 22.76 m。

### 2.2 空气湿度为 40%

室外风速为 2 m/s、空气湿度 40% 条件下,连续竖向两窗口、三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图 5~图 7 所示。

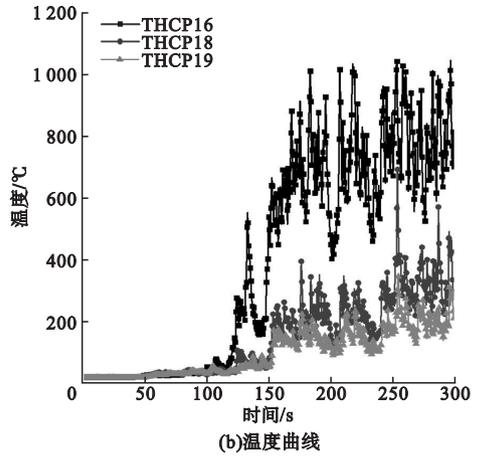
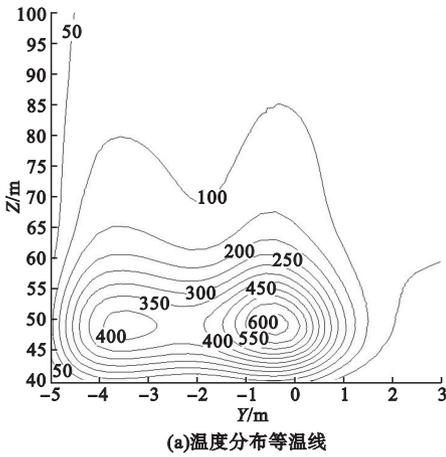


图5 空气湿度40%下连续纵向两窗口

Fig. 5 Continuous vertical two windows at 40% air humidity

从图5可以看出,纵向连续两窗口条件下,当危险温度达到540℃时,火焰总高度为53.18 m,火焰融合高度为8.18 m;当危险温

度达到350℃时,火焰总高度为56.54 m,火焰融合高度为11.54 m。

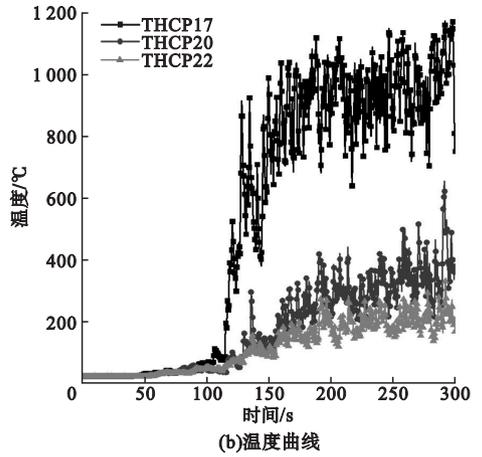
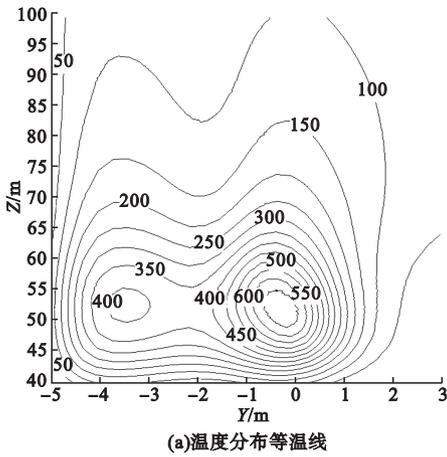
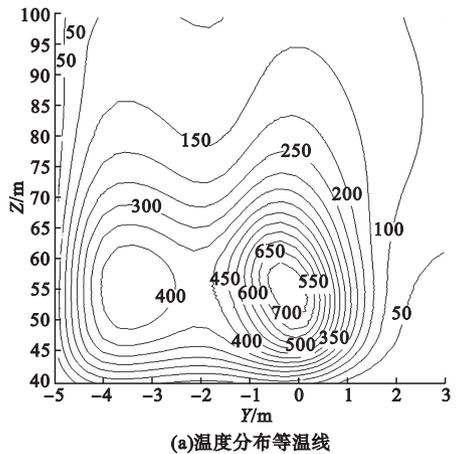


图6 空气湿度40%下连续纵向三窗口

Fig. 6 Continuous vertical three windows at 40% air humidity

从图6可以看出,纵向连续三窗口条件下,当危险温度达到540℃时,火焰总高度为59.88 m,火焰融合高度为11.88 m;当危险温度达到350℃时,火焰总高度为64.92 m,火焰融合高度为16.92 m。

从图7可以看出,纵向连续四窗口条件下,当危险温度达到540℃时,火焰总高度为66.18 m,火焰融合高度为15.18 m;当危险温度达到350℃时,火焰总高度为72.84m,火焰融合高度为21.84 m。



(a)温度分布等温线

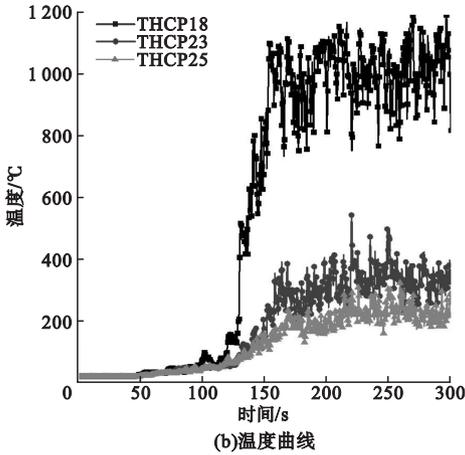


图7 空气湿度40%下连续纵向四窗口  
 Fig.7 Continuous vertical four windows at 40% air humidity

### 2.3 空气湿度为80%

室外风速为2 m/s、空气湿度80%条件下,连续竖向两窗口、三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图8~图10所示。

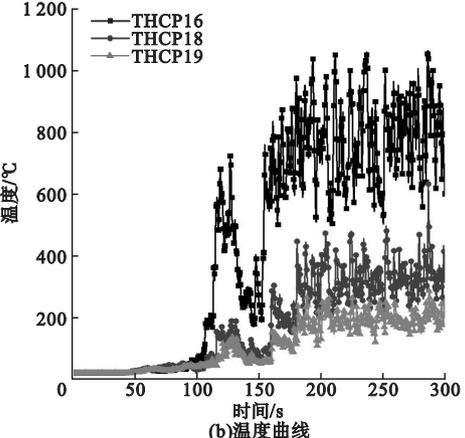
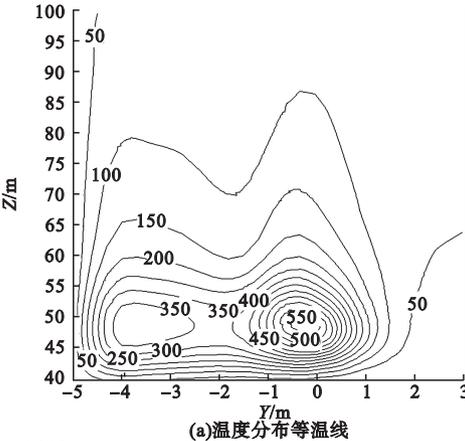


图8 空气湿度80%下连续纵向两窗口  
 Fig.8 Continuous vertical two windows at 80% air humidity

从图8可以看出,纵向连续两窗口条件下,当危险温度达到540℃时,火焰总高度为52.88 m,火焰融合高度为7.88 m;当危险温度达到350℃时,火焰总高度为56.28 m,火焰融合高度为11.28 m。

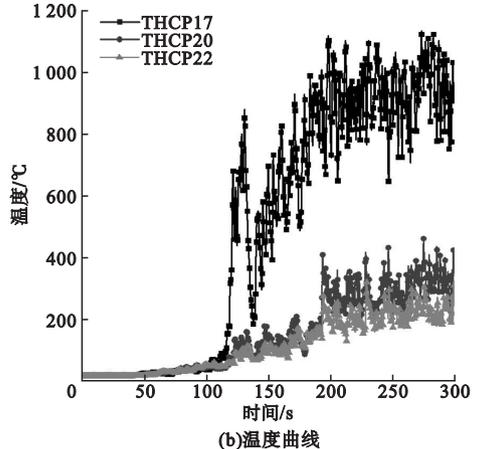
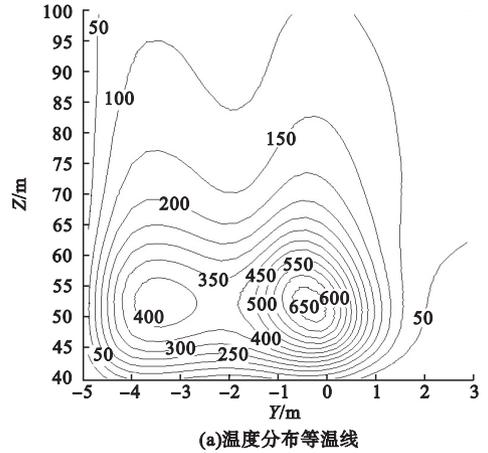


图9 空气湿度80%下连续纵向三窗口  
 Fig.9 Continuous vertical three windows at 80% air humidity

从图9可以看出,纵向连续三窗口条件下,当危险温度达到540℃时,火焰总高度为59.52 m,火焰融合高度为11.52 m;当危险温度达到350℃时,火焰总高度为64.28 m,火焰融合高度为16.28 m。

从图10可以看出,纵向连续四窗口条件下,当危险温度达到540℃时,火焰总高度为65.64 m,火焰融合高度为14.64 m;当危险温度达到350℃时,火焰总高度为71.62 m,火焰融合高度为20.62 m。

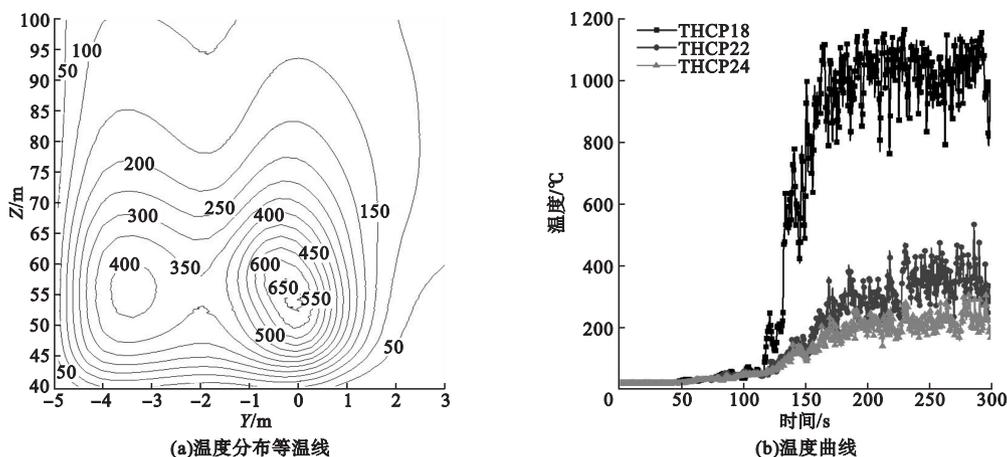


图 10 空气湿度 80% 下连续纵向四窗口

Fig. 10 Continuous vertical four windows at 80% air humidity

## 2.4 结果分析

(1)通过模拟对比分析可知,连续纵向三窗口比连续纵向两窗口燃烧在达到危险温度 540 °C 时,火焰融合高度升高了 3.7 ~ 4.7 m,在达到危险温度 350 °C 时,火焰的高度升高了 5.0 ~ 5.9 m;连续纵向四窗口比连续纵向三窗口燃烧在达到危险温度 540 °C 时,火焰融合高度升高了 0.36 ~ 0.52 m,在达到危险温度 350 °C 时,火焰的高度升高了 0.40 ~ 0.61 m。

(2)连续纵向两窗口、三窗口、四窗口燃烧,在达到危险温度 540 °C 时,空气湿度 20% 条件下比空气湿度 40% 条件下的火焰融合高度分别增长了 0.2 m、0.48 m、0.52 m;空气湿度 40% 条件下比空气湿度 80% 条件下的火焰融合高度分别增长了 0.3 m、0.36 m、0.54 m。在达到危险温度 350 °C 时,空气湿度 20% 条件下比空气湿度 40% 条件下的火焰融合高度分别增长了 0.28 m、0.72 m、0.92 m;空气湿度 40% 条件下比空气湿度 80% 条件下的火焰融合高度分别增长了 0.26 m、0.64 m、1.22 m。

## 3 结论

(1)连续纵向两窗口燃烧,空气湿度对火焰高度影响很小,但随着连续纵向窗口的

增加,空气湿度对其影响越来越大。

(2)随着空气湿度的减小,火势增大,当达到危险温度时,火焰融合高度增高。

(3)纵向连续四窗口火焰融合高度的增长幅度比纵向连续三窗口火焰融合高度的增长幅度小。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB50016—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire prevention in building design: GB50016—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.)
- [2] 刘方. 中庭火灾烟气流动与烟气控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002. (LIU Fang. Studies on smoke movement and smoke management in atrium fire [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.)
- [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 safety science, 2011, 25 (4): 57—60.)
- [4] 孟庆漩. 开孔工况下外墙保温材料竖向燃烧特性实验研究 [D]. 南京: 中国矿业大学, 2019. (MENG Qingxuan. Experimental study on vertical combustion characteristics of external wall insulation materials under open-hole condition [D]. Nanjing: China University of Mining and Technology, 2019.)
- [5] WEINSCHENK C G. Experimental and computational characterization of strong vent flow enclosure fires [D]. Austin: The

- University of Texas at Austin,2011.
- [6] CHOW W K. Numerical Studies on recent large high-rise building fire[J]. ASCE journal of architectural engineering, 1998, 4(2): 65-74.
- [7] 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.
- [8] 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.)
- [9] 李德成,周天念,陈钦佩,等. 高层住宅楼小天井与外廊结构的消防问题研究[J]. 火灾科学,2015,24(4):209-220.  
(LI Decheng, ZHOU Tiannian, CHEN Qinpei, et al. Study on fire protection of small courtyard and exterior corridor structure in high-rise residential buildings [J]. Fire safety science, 2015, 24(4): 209-220.)
- [10] 曹雷波,柳正茂,张加伍. 世贸大厦的火灾教训与超高层建筑的防火设计[J]. 山东建材,2003,6(24):45-47.  
(CAO Leibo, LIU Zhengmao, ZHANG Jiawu. Fire lessons of world trade center and fire protection design of super high-rise buildings [J]. Shandong building materials, 2003, 6(24): 45-47.)
- [11] 吴海燕. 内天井式高层住宅建筑的火灾危险性分析及其防火对策[J]. 建筑理论与设计,2012(4):54-55.  
(WU Haiyan. Fire risk analysis and fire prevention measures for high-rise residential buildings with inner courtyard [J]. Architectural theory and design, 2012(4): 54-55.)
- [12] USMANI A S, CHUNG Y C, TORERO J L. How did the WTC towers collapse: a new theory[J]. Fire safety journal, 2003, 38(6): 501-533.
- [13] FLETCHER I. Tall concrete buildings subjected to vertically moving fires: a case study approach[D]. Edinburgh: The University of Edinburgh School of Engineering, 2009.
- [14] LANGE D, RBEN C, USMANI A. Tall building collapse mechanisms initiated by fire mechanisms and design methodology [J]. Engineering structures, 2012, 36(2): 90-103.
- [15] 何勇军. 高层建筑火灾烟气流动规律分析及烟气控制措施[J]. 山西建筑, 2019, 45(3): 233-234.  
(HE Yongjun. Analysis of smoke flow law in high-rise building fires and smoke control measures [J]. Shanxi architecture, 2019, 45(3): 233-234.)
- [16] 徐蕴颖,姚斌,杨盼盼,等. 超高“Z型”中庭高度对自然排烟特性影响的数值模拟研究[J]. 火灾科学, 2015, 24(2): 88-95.  
(XU Yunying, YAO Bin, YANG Panpan, et al. Numerical simulation study on influence of ultra-high "Z" atrium height on natural smoke extraction characteristics [J]. Fire safety science, 2015, 24(2): 88-95.)
- [17] 罗圣峰. 挤塑聚苯乙烯泡沫板向下火蔓延过程中火焰前锋熔融层演化特性[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.  
(LUO Shengfeng. Dynamic characteristic of melting layer in flame front during downward flame spread of xps foam [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.)
- [18] THOMAS P H, LAW M. The projection of flames from buildings on fire [J]. Fire prevention science and technology, 1972(10): 19-26.
- [19] 周庆. 网格划分对FDS火灾模拟结果的影响分析[J]. 安全科学技术, 2011, 8(增刊): 8-11.  
(ZHOU Qing. Analysis of the influence of grid division on FDS fire simulation results [J]. Safety science and technology, 2011, 8(S): 8-11.)
- [20] 王宇,梁云峰,李世鹏. 多窗口羽流火焰高度计算公式及其影响因素[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 75-81.  
(WANG Yu, LIANG Yunfeng, LI Shipeng. The practical formulas and influence factors for the height of the windows plume flame [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(1): 75-81.)
- [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:杨永生 英文审校:刘永军)