

风作用下凹型超高层建筑窗口羽流火焰 数值模拟分析

王 宇,邢 佳,周盈彤,刘铁林

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究在风作用下凹型超高层建筑窗口羽流火焰融合高度及窗口处火焰温度变化规律。方法 对无风、水平风向、竖直风向,风速为2 m/s、6 m/s条件下的凹型超高层建筑火灾模型采用火灾动态仿真模拟软件PyroSim进行数值模拟,分析窗口温度分布等温线及温度曲线,并引入危险温度540 ℃。结果 在不同风速条件下,连续纵向三窗口及四窗口燃烧,达到危险温度540 ℃时,在水平风向作用下,火焰融合高度降低了35.7%~66.2%、32.5%~63.8%。在竖向风向作用下,火焰融合高度分别升高了11.1%~34.3%、19.6%~42.8%。结论 在水平风向作用下,风速越大,窗口羽流火焰融合高度越低;在竖直风向作用下,风速越大,窗口火焰融合高度越高。

关键词 凹型超高层建筑;风向;风速;危险温度;火焰融合高度

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 Wind

WANG Yu, XING Jia, ZHOU Yingtong, LIU Tielin

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

Abstract: The purpose of this paper is to explore the flame fusion height of concave super high-rise building window and the variation law of the flame temperature distribution at the window under the action of wind are studied. The fire model of concave super high-rise building under the conditions of no wind, horizontal wind direction, vertical wind direction and wind speed of 2m/s and 6m/s is numerically simulated by PyroSim, the isotherm and curve of window temperature distribution are analyzed, and the dangerous temperature of 540 ℃ is introduced. Under the conditions of different wind speeds, continuous longitudinal combustion from three windows to four windows, when the dangerous temperature reaches 540 ℃, the flame fusion height decreases by 35.7%~66.2% and 32.5%~63.8% under the action of horizontal wind direction, the flame

收稿日期:2020-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(11672190);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,主要从事高层建筑抗火、结构抗震等方面研究。

fusion height increases by 11.1% ~ 34.3% and 19.6% ~ 42.8% under the action of vertical wind direction. Under the action of horizontal wind direction, the greater the wind speed, the lower the flame fusion height of window plume, under the action of vertical wind direction, the greater the wind speed, the higher the flame fusion height in the window.

Key words:concave super high-rise building; wind direction; wind speed; dangerous temperature; height of flame fusion

超高层建筑因纵向超高等特点,易受风作用影响,一旦发生火灾,火势将迅速蔓延^[1]。故对超高层建筑在风荷载作用下火灾蔓延特点及防控需重点研究。对于高层建筑火灾,国内外学者进行了大量研究工作^[2-6]。王宇等^[7]首次提出窗口羽流火焰融合高度,通过对无外保温材料高层建筑的数值模拟分析,给出防火阻隔区高度。对于超高层建筑火灾,I. Fletcher等^[8-10]通过实际超高层建筑火灾倒塌研究,基础性的分析了两种倒塌模式,并提出相关建议。朱杰等^[11-12]通过对超高层建筑竖井结构内部烟气流动影响因素的相关研究,发现了火源位置和温度分布关系,并给出其拟合函数。黄友钦^[13]对超高层建筑表面风压分布规律进行了研究。张昊^[14]研究了自然风压对超高层建筑火灾排烟的影响及正压排烟策略,发现室外正压力极值和负压力极值的大小与室外自然风速相关,极值位置易受建筑物几何形状的影响,并开创性的提出在设置合理的前提下,室外风可形成利于超高层建筑火灾防烟排烟的条件,给出正压建筑入风口设置在正压区有利于火灾防烟,建筑物负压区设置排烟口有利于火灾时排烟的建议。

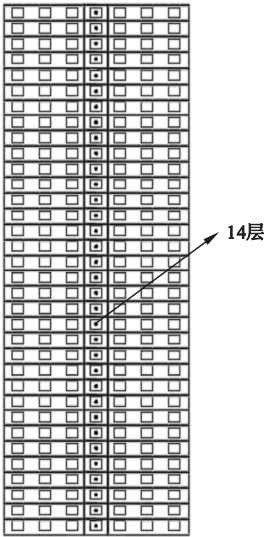
以上研究主要针对超高层建筑火灾安全疏散及内部烟气流动特性,并未对风荷载作用下超高层建筑外部火蔓延进行研究。基于此,笔者针对风作用下凹型超高层建筑窗口羽流火焰进行了模拟研究,通过改变风速、风向,研究不同工况下凹型超高层建筑窗口羽流火焰发生融合高度的影响以及窗口温度分布规律,并引入危险温度 540℃(火焰融合温度),其中火焰融合包括窗口与窗口及窗口

与保温材料(外保温材料点燃温度 350℃)之间的融合。研究表明,水平风向作用下,风对火纵向蔓延有抑制作用;竖直风向作用下,风对火纵向蔓延有促进作用;并给出不同风速下多窗口纵向火蔓延时,火焰融合高度的极限值,为超高层建筑火灾外部蔓延防火阻隔区设置提供参考依据。

1 数值模型

1.1 计算模型

笔者以沈阳某一超高层住宅楼为简化模型(见图1),共34层,总高度102 m,层高3 m,窗口宽高为2.4 m×1.8 m。火灾位置设置在第14层,房间长宽为5.4 m×4.5 m。网格^[15]尺寸为0.35 m×0.35 m×0.35 m。热电偶(THCP)布置在每一层窗户中心位置,共34个温度探测点,获得窗口温度曲线数据;在窗口横向中心位置布置切片,获得温度分布等温线数据。



(a)建筑外立面图

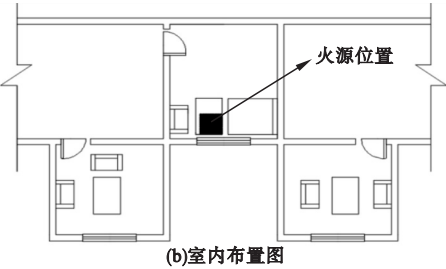


图 1 超高层模型

Fig. 1 Super high-level model

1.2 工况设置

文中设置水平向左和竖直向上两种风向,0 m/s、2 m/s、6 m/s 三种风速。根据《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB51251—2017)^[16],客房卧室火灾热释放率为 6 MW,故火荷载密度为 0.28 MW/m²,当达到 6MW 热释放率时,所用时间为 179 s。为研究火焰融合高度,设置竖向连续三窗口及四窗口,工况设置见表 1。

表 1 不同风向风速时工况

Table 1 Working conditions at different wind direction and wind speed

火荷载密度/ (MW·m ⁻²)	风向	风速/(m·s ⁻¹)
0.28	水平方向	0
		2
		6
	竖直方向	0
		2
		6

2 模拟结果

图 2~图 11 中 THCP17~THCP29 表示第 17 层至第 29 层窗口温度探测点。所有温度分布等温线图的横坐标 Y 表示超高层建筑横向宽度,纵坐标 Z 表示超高层建筑竖向高度,所有温度曲线图的横坐标表示燃烧时间,纵坐标表示窗口温度。火焰融合高度为火焰总高度减去火源位置处高度。

2.1 风速 0 m/s

室外风速为 0 m/s 时,连续竖向三窗口及四窗口的温度分布等温线和温度曲线如图 2 和图 3 所示。

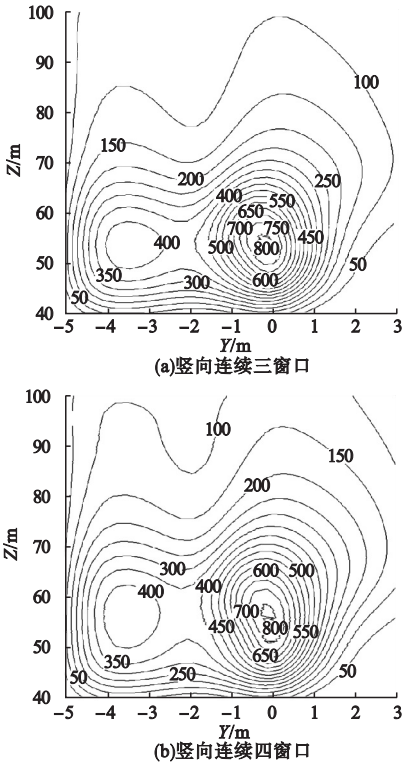


图 2 风速 0 m/s 时温度分布等温线

Fig. 2 Temperature distribution isotherm at 0 m/s wind speed

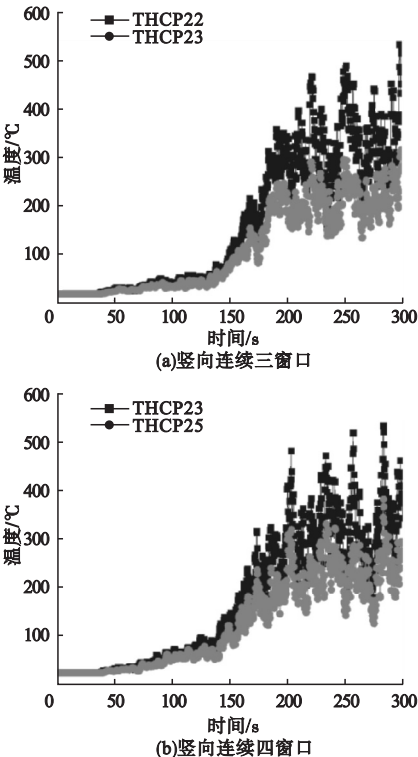


图 3 风速 0 m/s 时温度曲线

Fig. 3 Temperature curves at 0 m/s wind speed

由图2可知,在无风条件下,达到危险温度540℃时^[17-19],竖向连续三窗口的火焰高度为63.96 m,竖向连续四窗口的火焰高度为67.08 m。达到350℃时^[20-22],竖向连续三窗口的火焰高度为68.16 m,竖向连续四窗口的火焰高度为72.46 m。

根据图2和图3可以看出,在无风条件下,当危险温度达到540℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为15.96 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为16.08 m。当温度达到350℃时,竖向连续三窗口的火焰融合高度为20.16 m,竖向连续四窗口的火焰融合高度为21.46 m。

2.2 风速 2 m/s

2.2.1 水平风向作用

室外风速为2 m/s时,水平风向作用下,连续竖向三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图4和图5所示。

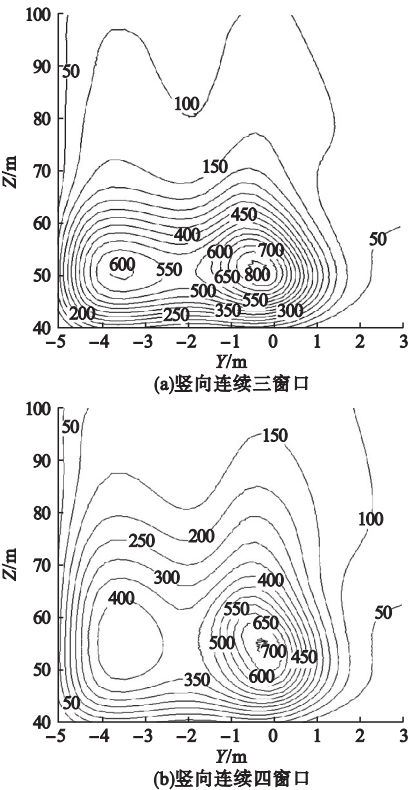


图4 风速2 m/s时温度分布等温线

Fig. 4 Temperature distribution isothermat 2 m/s wind speed

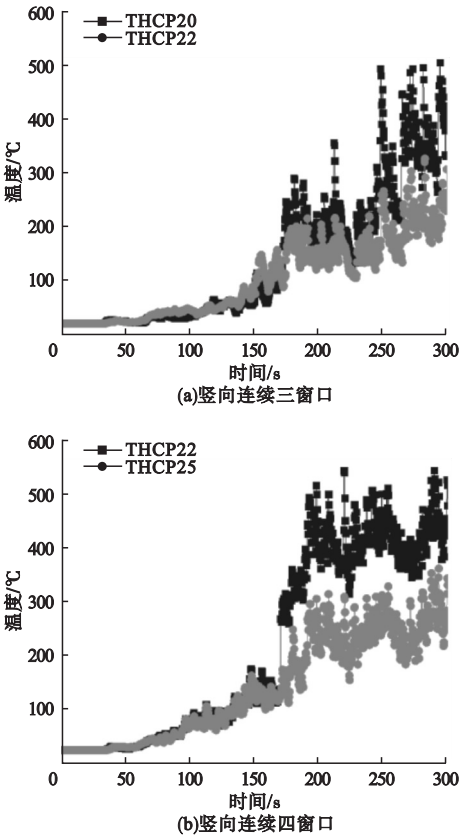


图5 风速2 m/s时温度曲线

Fig. 5 Temperature curves at 2 m/s wind speed

由图4可知,水平风向作用,风速为2 m/s条件下,达到危险温度540℃时,竖向连续三窗口的火焰高度为59.76 m;竖向连续四窗口的火焰高度为63.14 m。达到温度350℃时,竖向连续三窗口的火焰高度为64.74 m,竖向连续四窗口的火焰高度为70.30 m。

根据图4和图5可以看出,在水平风向作用,风速为2 m/s的情况下,当危险温度达到540℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为11.76 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为12.14 m。当温度达到350℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为16.74 m;竖向连续四窗口处的火焰融合高度为21.30 m。

2.2.2 竖直风向作用

室外风速为2 m/s时,竖直风向作用下,连续竖向三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图6和图7所示。

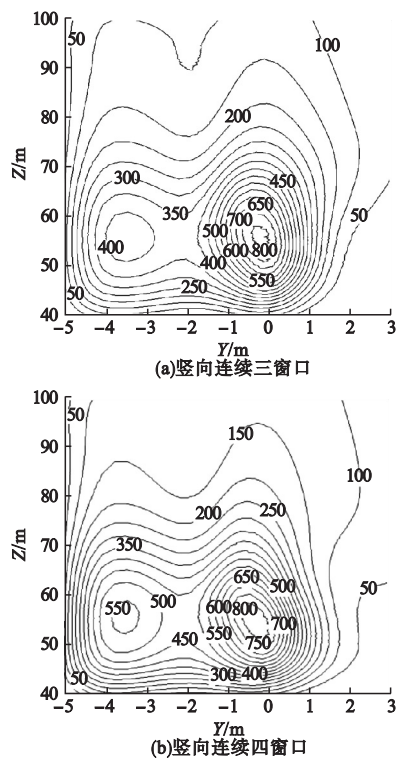


图 6 风速 2 m/s 时温度分布等温线

Fig. 6 Temperature distribution isothermat 2 m/s

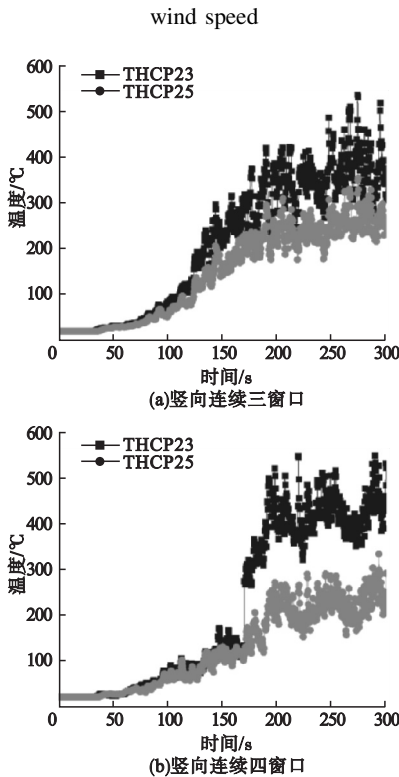


图 7 风速 2 m/s 时温度曲线

Fig. 7 Temperature curves at 2 m/s wind speed

由图 6 可知,在竖直风向作用,风速为 2 m/s 条件下,达到危险温度 540 °C 时,竖向连续三窗口的火焰高度为 68.90 m,竖向连续四窗口的火焰高度为 68.96 m。达到温度 350 °C 时,竖向连续三窗口的火焰高度为 73.58 m;竖向连续四窗口的火焰高度为 73.66 m。

根据图 6 和图 7 可以看出,在竖直风向作用,风速为 2 m/s 的情况下,当危险温度达到 540 °C 时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为 17.96 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为 20.90 m。当温度达到 350 °C 时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为 22.66 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为 25.58 m。

2.3 风速 6 m/s

2.3.1 水平风向作用

室外风速为 6 m/s 时,水平风向作用下,连续竖向三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图 8 和图 9 所示。

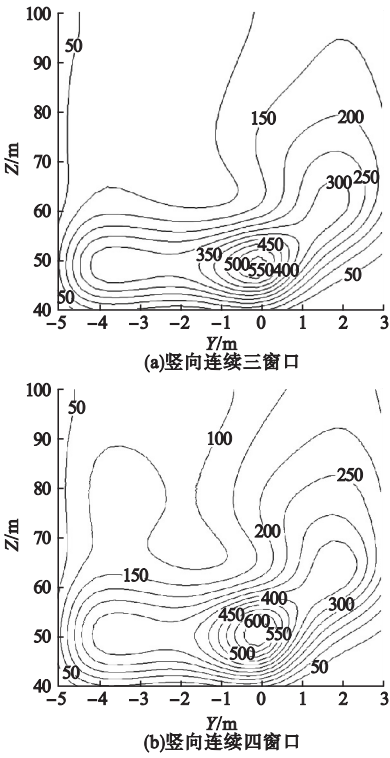


图 8 风速 6 m/s 时温度分布等温线

Fig. 8 Temperature distribution isothermat 6 m/s wind speed

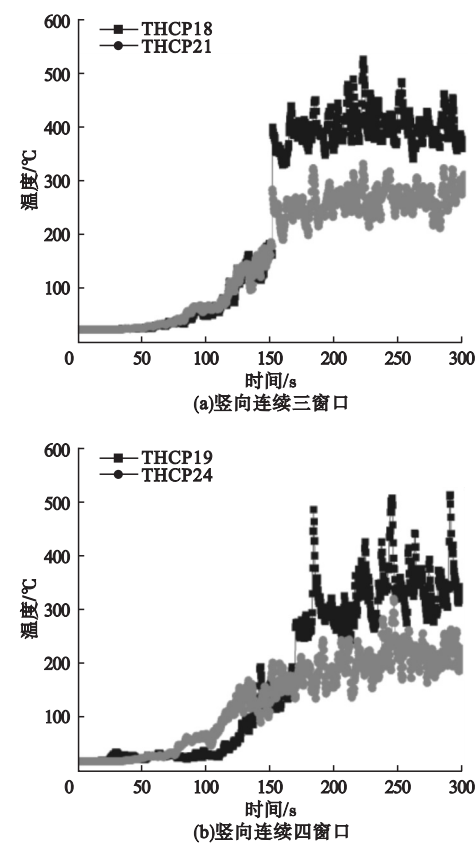


图9 风速6 m/s时温度曲线

Fig. 9 Temperature curves at 6 m/s wind speed

由图8可知,在水平风向作用,风速为6 m/s条件下,达到危险温度540℃时,竖向连续三窗口的火焰高度为59.76 m,竖向连续四窗口的火焰高度为63.14 m。达到温度350℃时,竖向连续三窗口的火焰高度为64.74 m,竖向连续四窗口的火焰高度为70.30 m。

根据图8和图9可以看出,在水平风向作用,风速为6 m/s的情况下,当危险温度达到540℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为5.40 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为5.82 m。当温度达到350℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为14.76 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为19.96 m。

2.3.2 竖直风向作用

室外风速为2 m/s时,竖直风向作用下,连续竖向三窗口及四窗口的温度等温线和温度曲线如图10和图11所示。

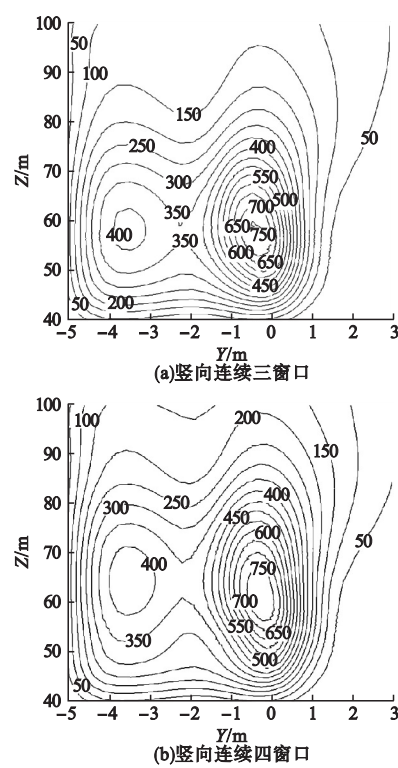


图10 风速6 m/s时温度分布等温线
Fig. 10 Temperature distribution isothermat 6 m/s wind speed

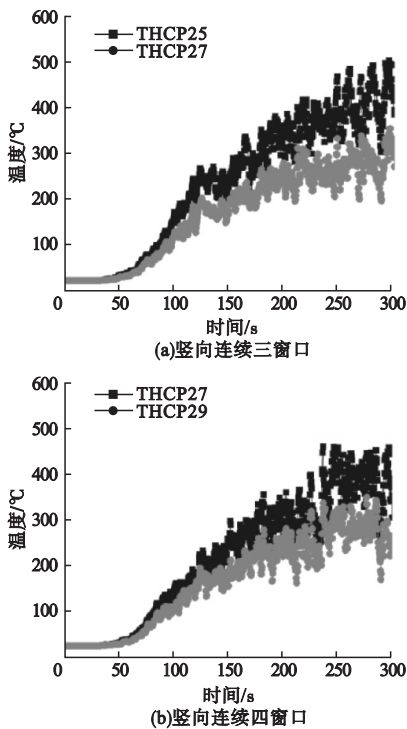


图11 风速6 m/s时温度曲线
Fig. 11 Temperature curves at 6 m/s wind speed

由图10可知,在竖直风向作用,风速为6 m/s条件下,达到危险温度540℃时,竖向连续三窗口的火焰高度为72.30 m,竖向连续四窗口的火焰高度为79.12 m。达到温度350℃时,竖向连续三窗口的火焰高度为78.62 m,竖向连续四窗口的火焰高度为85.92 m。

根据图10和图11可以看出,在竖直风向作用,风速为6 m/s的情况下,当危险温度达到540℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为24.30 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为28.12 m。当温度达到350℃时,竖向连续三窗口处的火焰融合高度为30.62 m,竖向连续四窗口处的火焰融合高度为34.92 m。

2.4 结果分析

(1)在水平风向作用下,连续竖向三窗口及四窗口,达到危险温度540℃时,风速2 m/s比风速0 m/s火焰融合高度下降了4.3 m、3.94 m;风速6 m/s比风速0 m/s火焰融合高度下降了10.56 m、10.26 m。

(2)在竖直风向作用下,连续竖向三窗口及四窗口,达到危险温度540℃时,风速2 m/s比风速0 m/s火焰融合高度升高了4.94 m、1.88 m;风速6 m/s比风速0 m/s火焰融合高度升高了8.34 m、12.04 m。

(3)连续竖向三窗口及四窗口,水平风向作用下,风速2 m/s比风速0 m/s时的火焰融合高度分别降低了35.7%、32.5%;风速6 m/s比风速0 m/s的火焰融合高度分别降低了66.2%、63.8%。在竖直风向作用下,风速为2 m/s比风速0 m/s的火焰融合高度分别提高了11.1%、19.6%;风速6 m/s比风速0 m/s的火焰融合高度分别提高了34.3%、42.8%。

3 结论

(1)风速为0~6 m/s的水平风向作用下,风速越大,火焰融合高度越低。

(2)风速为0~6 m/s的竖直风向作用下,风速越大,火焰融合高度越高。

(3)风向不同,对火势影响效果不同,水平风向作用下,风对火纵向蔓延有着抑制作用;竖直风向作用下,风对火纵向蔓延有促进作用。

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] 张羽杨,舒舜,郑源. 风作用下高层住宅火灾正压送风排烟数值模拟[J]. 消防科学与技术,2019,38(10):1401-1405.
(ZHANG Yuyang, SHU Shun, ZHENG Yuan. Numerical simulation of positive pressure ventilation tactics for high-rise residential building fires under wind-driven conditions[J]. Fire science and technology, 2019, 38(10):1401-1405.)
- [4] 解北京,杨宇,李琪. 凹廊式高层建筑火灾烟气蔓延数值模拟分析[J]. 消防科学与技术,2019,38(1):82-85.
(JIE Beijing, YANG Yu, LI Qi. Numerical simulation analysis on fire smoke spread in high-rise buildings with corridor structure[J]. Fire science and technology, 2019, 38(1):82-85.)
- [5] 李龙. 高层建筑窗口喷火竖向蔓延的控制研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2014.
(LI Long. The control measure of vertical fire spread through high-rise building window plume[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University,2014.)
- [6] JO J H, LIM J H, SONG S Y. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings[J]. Building & environment,2007,42(1):263-277.
- [7] 王宇,李世鹏,张敬义. 侧墙结构纵向多窗口羽流火焰融合的数值模拟[J]. 安全与环境学报,2018,18(2):532-536.
(WANG Yu, LI Shipengi, ZHANG Jingyi. Numerical simulation for the vertical multi-

- windows plume flame merging in the side-wall structure [J]. Journal of safety and environment, 2018, 18(2): 532–536.)
- [8] FLETCHER I. Tall concrete buildings subjected to vertically moving fires: a case study approach[D]. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2009.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 朱杰, 霍然, 付永胜. 超高层建筑火灾防排烟研究[J]. 消防科学与技术, 2007, 42(1): 54–57.
(ZHU JIE, HUO Ran, FU Yongsheng. Study on fire control and smoke extraction of super high-rise buildings [J]. Fire science and technology, 2007, 42(1): 54–57.)
- [12] 徐蕴颖, 姚斌, 杨盼盼. 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. Numerical simulation study on influence of ultra-high “Z” atrium height on natural smoke extraction characteristics [J]. Fire science, 2015, 24(2): 88–95.)
- [13] 黄友钦. 300 m超高层建筑表面风压的数值模拟[J]. 长沙理工大学学报, 2013, 24(2): 37–42.
(HUANG Youqin. Numerical simulation of wind pressure on the surface of 300 m super high-rise building [J]. Journal of Changsha university of technology, 2013, 24(2): 37–42.)
- [14] 张昊, 陈健, 王会娟. 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. Effect of exterior natural wind pressure on fire extraction of super high-rise buildings [J]. Fire science and technology, 2018, 37(2): 180–184.)
- [15] 周庆. 网格划分对 FDS 火灾模拟结果的影响分析[J]. 安全, 2011, 32(8): 8–11.
(ZHOU Qing. Analysis of the influence of grid division on FDS fire simulation results [J]. Safety and security, 2011, 32(8): 8–11.)
- [16] 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.)
- [17] THOMAS P H, LAW M. The projection of flames from buildings on fire [J]. Fire prevention science and technology, 1972(10): 19–26.
- [18] SEIGEL L G. The projection of flames from burning buildings [J]. Fire technology, 1969, 5(1): 43–51.
- [19] OLESZKIEWICZ I. Heat transfer from a window plume to a building facade [J]. Collected papers in heat transfer, 1989(5): 75–86.
- [20] 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: 中国科技大学, 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.)
- [21] 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): 449–445.)
- [22] 张培红, 韩超, 唐兴. 细水雾对不同开口受限空间火灾的抑制作用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 555–561.
(ZHANG Peihong, HAN Chao, TANG Xing. Suppression effect of water mist of fire in confined spaces with different vent areas [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(3): 555–561.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)