

喷头位置对羽流火焰高度影响的数值模拟研究

王 宇,曲志鹏,张敬义

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究喷头位置对窗口羽流火焰高度的影响,揭示羽流火焰高度和喷头位置之间的变化规律,为高层建筑多火焰融合作用下的外部防控技术提供理论依据。
方法 采用火灾动态模拟软件 PyroSim 对房间不同位置放置喷头的火灾模型进行数值模拟,通过对所设置工况的模拟研究,分析窗口温度曲线及温度等温线,并引入危险温度 T 、 T_1 及 T_2 。
结果 喷头位置明显影响窗口羽流火焰高度,喷头分别放置在距窗口 2 m、3 m 处和距火源中心 2 m、3 m 处与放置在距窗口 1 m 处相比,窗口羽流火焰 T 的高度提高了 0.38 ~ 1 m, T_1 的高度提高了 0.2 ~ 0.38 m, T_2 的高度提高了 0.21 ~ 0.32 m。
结论 随着喷头位置距窗口和火源中心的距离增大,羽流火焰高度明显提高,但由于火源位置的随机性,实际安装中无法预知火源位置,故建议选择喷头位置距窗口 1 m 处,即易于安装,又能有效降低羽流火焰高度。

关键词 安全工程;羽流火焰;外部火蔓延;危险温度;喷头位置

中图分类号 X932

文献标志码 A

Numerical Simulation on the Influence of Nozzle Positionson on Height of Plume Flames

WANG Yu, QU Zhipeng, ZHANG Jingyi

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

Abstract: The influence of nozzle positions on the plume height of window feather was studied. The change rule between plume flame and nozzle position is clarified, which provides a theoretical basis for preventing and controlling fires spreading outside high-rise buildings. Pyrosim, a fire dynamic simulation software, is used to simulate the fire model of sprinklers placed in different positions in the room. Through the simulation of the set working conditions, the window temperature curve and temperature isotherm are analyzed, and the dangerous temperature T , T_1 and T_2 are introduced. The position of the nozzle obviously affects the height of the window plume flame. When the nozzle is placed at 1 m away from the window, the height of window plume flame increased T by 0.38 - 1 m, T_1 by 0.2 - 0.32 m, T_2 by 0.21 - 0.32 m, compared with the nozzles

收稿日期:2019-08-15

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,主要从事高层建筑抗火、结构抗震等方面研究。

placed at 2 m, 3 m from the window and 2 m, 3 m away from the window. As the distance between the nozzle position and the window and the center of the fire source increases, the height of the plume flame increases obviously. However, due to the randomness of the position of the fire source, it is impossible to predict the position of the fire source in the actual installation. Therefore, it is suggested to select the position of the nozzle 1 m away from the window, which is not only easy to install, but also plays a role in reducing the height of the plume flame.

Key words: safety engineering; plume flame; external fire spread; dangerous temperature; nozzle position

随着我国居民生活条件的不断提高,建筑的造型越来越新颖。玻璃因其透光轻便等优点大量应用于各种高层建筑中,然而玻璃门窗、幕墙的使用也增加了高层建筑火灾防控的难度,建筑物窗口玻璃在火灾中破裂而成为通风口,使得火势快速燃烧起来,从窗口喷出的火焰向建筑物的外墙开始蔓延,进一步扩大了火灾的程度,使其成为建筑防火设计中最薄弱环节之一^[1]。而水喷淋系统作为一种有效的消防保护设施,在火灾蔓延控制领域已经开始广泛应用^[2]。建筑物窗口玻璃遇热易破坏已经成为建筑防火设计中一个需要解决的问题^[3],所以研究喷头位置对高层外墙窗口羽流火焰融合高度的影响十分重要。

近年来,国内外部分学者对高层建筑窗户的防火性能进行了研究,J. Kelly^[4]研究了玻璃在火灾中的破裂温度,实验测量到的温差为 90 °C. F. W. Manzello^[5]通过实验研究了实际火灾发生场景下玻璃遇热发生破坏的情况,测得 6.35 mm 钢化玻璃发生破裂时的热通量为 50 kW/m²。游宇航等^[6]使用 FDS 对一安装水喷淋的实体房间进行分析计算,结果表明,自动喷水灭火系统降低了室内温度,但增加了烟雾的溢出。赵恒泽^[7]采用足尺实验模型,通过测量热流强度和有毒气体浓度等参数,得到不同引燃位置对火蔓延速度的影响及水喷淋系统对火灾的抑制作用。

现有的研究仅针对水喷淋系统对烟气流动和外墙保温材料燃烧等进行了初步探讨,缺乏理论依据和现场实验数据。基于此,笔者采用数值模拟的方法对具有自动喷淋系统的

高层建筑进行研究,通过改变喷头在室内的位置,分析热电偶的温度数据,探讨不同喷头位置对窗口羽流火焰高度的影响。

1 数值模型

1.1 计算模型

计算模型为 10 层普通高层居民楼,建筑层高为 3.0 m,窗槛墙高度为 0.9 m,火灾发生的房间长宽为 3.3 m × 3.9 m。笔者建立了具有自动喷淋系统的建筑火灾模型,喷水强度设置为 6 L/(min · m²)。喷头位置分别设置为距窗口 1 m、2 m、3 m,火源中心处和距火源中心 2 m、3 m 等六种工况作为对单窗口羽流火焰高度的影响参数。

1.2 网格划分

在火灾动力学有限元模拟软件 PyroSim 中,模拟计算方式需要根据模型划分的网格来判定,如果设置的网格大小越精确,那么所得到的模拟结果就越符合真实情况,并且得到计算结果越精确^[8]。K. McGrattan 等^[9]研究发现,PyroSim 高温模拟网格尺寸大小的划分方式与火源的特征直径 D^* 的大小相关。如果所设置的网格尺寸小于 $0.1D^*$ 时,那么软件可以更精确地表示火灾温度分布的情况,从而使模拟得到的结果更准确。因此经过计算,笔者将模型网格尺寸设置为 0.25 m × 0.25 m × 0.25 m,能够满足对于计算结果的精确性要求。并在窗口同侧网格边界处设置通风孔,保证模拟场景与实际火灾场景一致。

计算模型如图 1 所示,其中 SPRK、

SPRK1、SPRK2 为距窗口 1 m、2 m、3 m 处的喷头,SPRK3、SPRK4、SPRK5 为在火源中心和距火源中心 2 m、3 m 处的喷头。

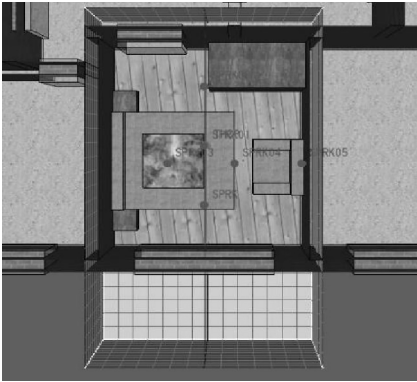


图 1 计算模型
Fig. 1 Computational model

表 1 民用建筑和工业厂房的系统设计参数

Table 1 System design parameters for civil and industrial plants

火灾危险等级	级别	最大净空高度/m	喷水强度/($\text{min} \cdot \text{m}^{-2}$)	作用面积/ m^2
轻危险级	—	≤ 8	4	160
中危险级	I 级	≤ 8	6	160
	II 级	≤ 8	8	160
严重危险级	I 级	≤ 8	12	260
	II 级	≤ 8	16	260

2 模拟结果分析

当建筑模型建立完成之后,在每层窗口的中心位置设置温度探测点,用来得到各窗口的温度数据,进而探测各窗口温度的分布情况. 根据已有研究与实际保温材料、窗户参数相结合,将 $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_1 = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $T_2 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时火焰融合的高度作为火焰危险温度的极限高度^[14-20]. 其中, T 为窗口喷出火焰开始融合的判断温度, T_1 为外保温材料点燃的温度, T_2 为玻璃受高温破碎时的温度. 窗口火焰的温度分布从下到上,因此危险温度的高度是通过 T_1 和 T_2 的范围与窗口温度曲线和温度分布等温线数据相结合来确定的.

2.1 喷头距窗口 1 m 时羽流火焰

计算得出具有自动喷水装置的单窗口羽

1.3 火源热释放速率

根据文献 [10-11], 热释放速率选为 6 MW,燃烧模型使用非稳态 T2 模型. 参考美国消防协会 NFPA 的排烟、热排放标准^[12], 笔者选择快速火模拟火灾的实际发展过程.

1.4 自动喷淋系统喷水强度

根据高层建筑物的使用功能、室内物品的可燃程度等因素可以确定出火灾现场的火灾危险等级,并通过《自动喷水灭火系统设计规范》中的规定^[13], 文中的火灾模拟场景属于中危险级 I 级,故喷淋的喷水强度设置为 $6\text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$. 民用建筑和工业厂房的系统设计参数见表 1.

流火焰窗口温度曲线如图 2(a) 所示,窗口羽流火焰的竖向温度分布等温线如图 2(b) 所示. 图 2(a) 中的横、纵坐标分别表示火灾发生时间和窗口温度,THCP、THCP01 分别代表设置在第 1、第 2 层窗口的热电偶. 图 2(b) 中的纵坐标 Z 代表建筑的高度,横坐标 X 代表建筑网格 Y 轴的长度,等高线为温度等温线.

通过对喷头距窗口 1 m 的火灾模型计算所得数据可以得出:单窗口 T 的高度达到 1.24 m, T_1 的高度达到 1.62 m, T_2 的高度达到 2.27 m.

2.2 喷头距窗口 2 m 时羽流火焰

通过模拟计算得出喷头距窗口 2 m 处的窗口温度曲线和温度分布等温线如图 3 所示.

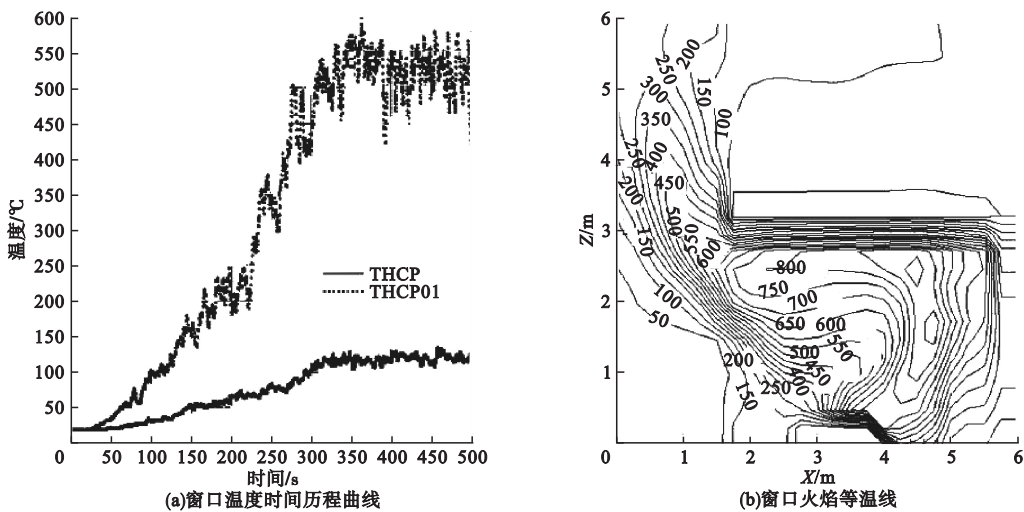


图2 喷头距窗口1 m

Fig. 2 The nozzle is 1 m away from the window

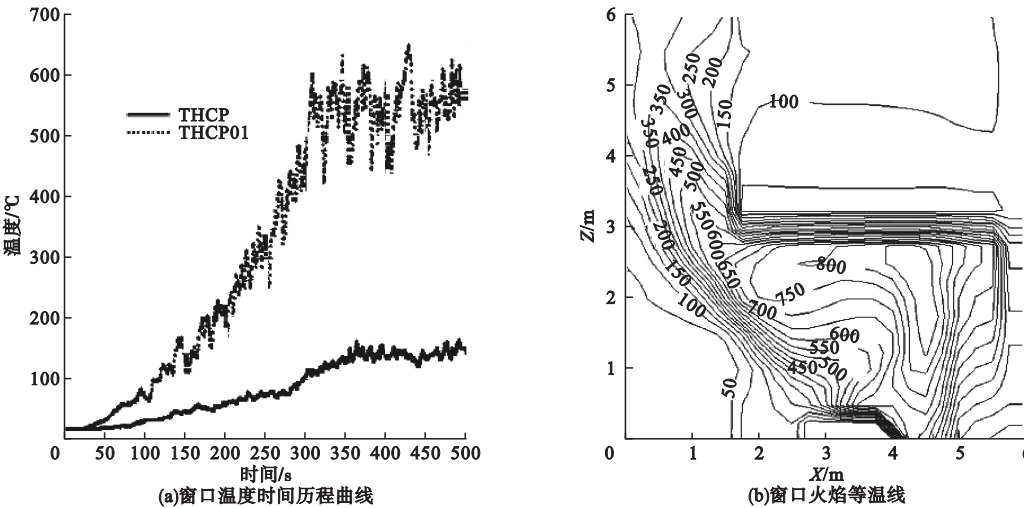


图3 喷头距窗口2 m

Fig. 3 The nozzle is 2 m away from the window

分析图3可以得出:

(1)单窗口 T 的高度达到1.65 m, T_1 的高度达到1.82 m, T_2 的高度达到2.48 m.

(2)与喷头距窗口1 m相比较,单窗口 T 的高度提高了0.4 m, T_1 的高度提高了0.2 m, T_2 的高度提高了0.21 m.

2.3 喷头距窗口3 m时羽流火焰

通过模拟计算得出喷头距窗口3 m处的窗口温度曲线和温度分布等温线如图4所示.

分析图4可以得出:

- (1)单窗口 T 的高度达到2.25 m, T_1 的高度达到1.91 m, T_2 的高度达到2.59 m.
- (2)与喷头距窗口1 m相比较,单窗口 T 的高度提高了1 m, T_1 的高度提高了0.29 m, T_2 的高度提高了0.32 m.

2.4 喷头在火源中心时羽流火焰

通过模拟计算得出喷头在火源中心处的窗口温度曲线和温度分布等温线如图5所示.

分析图5可以得出:

- (1)单窗口 T 的高度达到1.23 m, T_1 的

高度达到 1.48 m, T_2 的高度达到 2.14 m.

(2)与喷头距窗口 1 m 相比较,单窗口 T

的高度降低了 0.01 m, T_1 的高度降低了 0.14 m, T_2 的高度降低了 0.13 m.

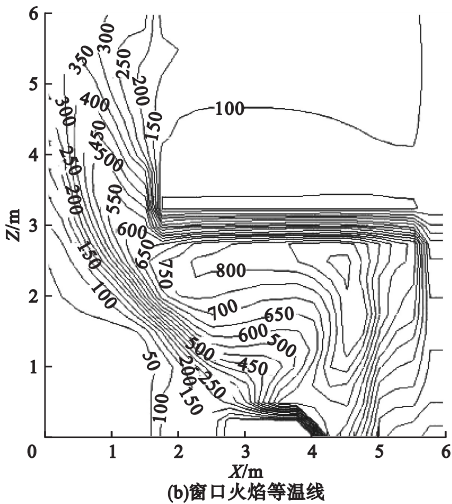
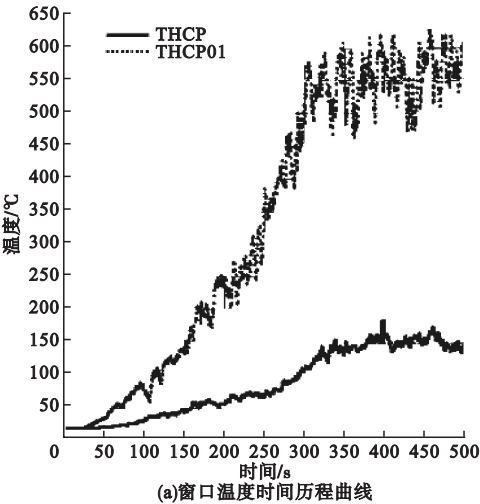


图4 喷头距窗口 3 m

Fig. 4 The nozzle is 3 m away from the window

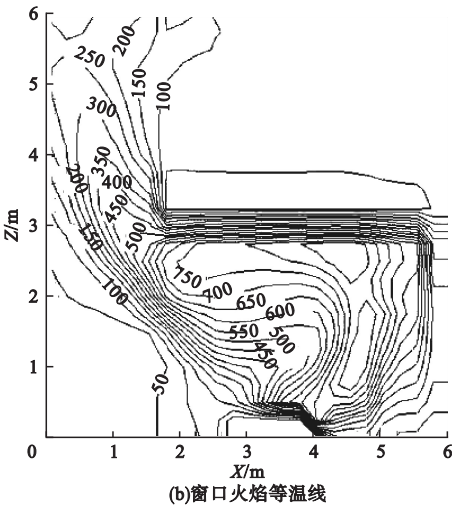
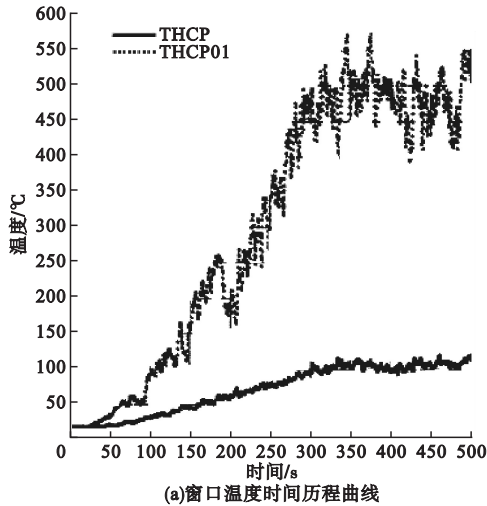


图5 喷头位于火源中心

Fig. 5 The nozzle is located in the center of the fire

2.5 喷头距火源中心 1 m 时羽流火焰

通过模拟计算得出喷头距火源中心 1 m 处的窗口温度曲线和温度分布等温线如图 6 所示.

分析图 6 可以得出:

(1)单窗口 T 的高度达到 1.62 m, T_1 的高度达到 1.88 m, T_2 的高度达到 2.5 m.

(2)与喷头距窗口 1 m 相比较,单窗口 T 的高度提高了 0.38 m, T_1 的高度提高了 0.26 m, T_2 的高度提高了 0.23 m.

2.6 喷头距火源中心 2 m 时羽流火焰

通过模拟计算,喷头距火源 2 m 处的窗口温度曲线和温度分布等温线如图 7 所示.

分析图 7 可以得出:

(1)单窗口 T 的高度达到 2.29 m, T_1 的高度达到 2.0 m, T_2 的高度达到 2.58 m.

(2)与喷头距窗口 1 m 相比较,单窗口 T 的高度提高了 1.05 m, T_1 的高度提高了 0.31 m, T_2 的高度提高了 0.34 m.

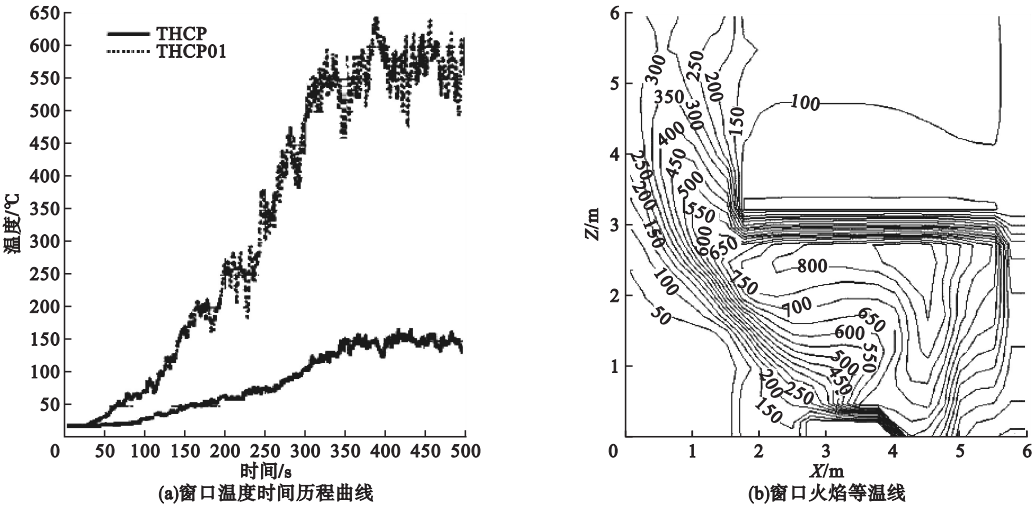


图 6 喷头距火源中心 1 m

Fig. 6 The nozzle is 1 m away from the center of the fire

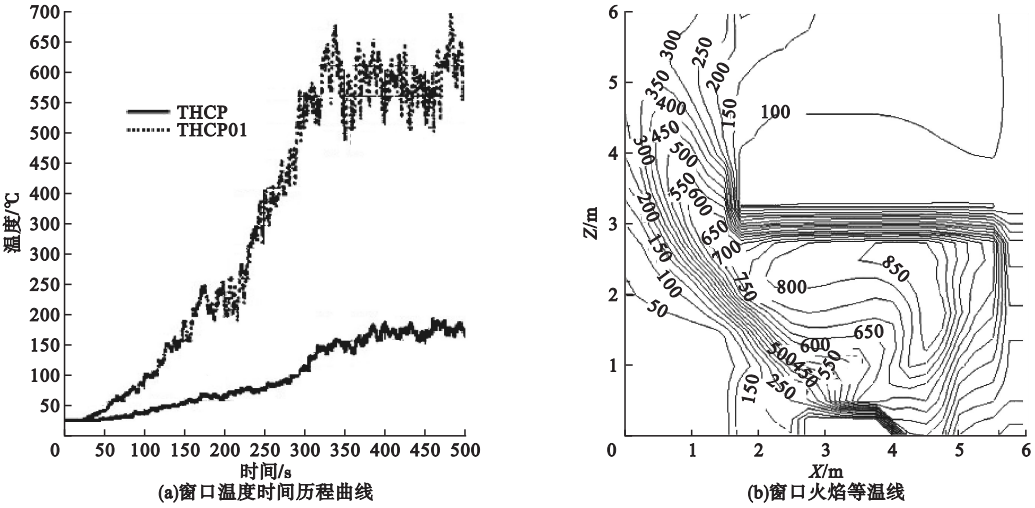


图 7 喷头距火源中心 2 m

Fig. 7 The nozzle is 2 m away from the center of the fire

3 结 论

(1)自动喷淋系统的喷头位置能明显影响窗口羽流火焰高度,与在火源中心处相比,喷头位置距窗口 1 m、2 m、3 m 和距火源中心 1 m、2 m 处,单窗口危险温度 T 的高度提高了 0.01 ~ 1.06 m,危险温度 T_1 的高度提高了 0.14 ~ 0.52 m,危险温度 T_2 的高度提高了 0.13 ~ 0.44 m.

(2)随着喷头位置距窗口和火源中心的距离增大,羽流火焰高度明显提高,但由于火源位置的随机性,实际安装中无法预知火源

位置,故建议选择喷头放置在距窗口 1 m 处,即便于安装,又能有效降低羽流火焰高度,起到抑制高层建筑外墙火迅速蔓延的作用.

参考文献

[1] 陈吴东,王青松,孙金华.火灾环境下玻璃首次破裂时间的模拟预测[J].工程力学,2017,34;210-213.
(CHEN Haodong, WANG Qingsong, SUN Jinhua. Mocking prediction of first cracking time of glass in fire environment [J]. Journal of engineering mechanics, 2017, 34; 210-213.)

[2] 杨培培.喷淋对建筑火灾流场影响的数值模拟研究[D].淮南:安徽理工大学,2013.
(YANG Peipei. Spray on the fire field of numerical simulation [D]. Huainan: Anhui

- University of Science and Technology,2013.)
- [3] HASSANISK S, SHIEDST J, SILCOCKG W. Thermal fracture of window glazing: performance of glazing in fire [J]. Journal of applied fire science,1994,4(4):249-263.
- [4] KELLYM J, ROBY R J, BEYLERC L. Experimental investigation of glass breakage in compartment fires [J]. Journal of fire protection engineering,1991,3(1):25-34.
- [5] MANZELLO F W. Window breakage induced by exterior fires [M]. United States: [s. n.], 1998.
- [6] 游宇航,李元洲,霍然,等.水喷淋控制下小室火灾的数值模拟研究[J].消防科学与技术,2006,25(5):613-617.
(YOU Yuhang, LI Yuanzhou, HUO Ran, et al. Numerical simulation of chamber fire control under water spray [J]. Journal of fire science and technology,2006,25(5):613-617.)
- [7] ZHAO H Z, ZHAO L M, WEN J, et al. Experimental study on vertical RPU fire suppression performance using water spray [J]. Experimental thermal and fluid science, 2015,64:108-113.
- [8] 王宇,张敬义,李世鹏.自动喷淋系统对羽流火焰高度影响的数值模拟研究[J].沈阳建筑大学(自然科学版),2019,35(4):621-627.
(WANG Yu, ZHANG Jingyi, LI Shipeng. Numerical simulation of height influence of automatic sprinkler system on plume flame [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2019,35(4):621-627.)
- [9] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R, et al. Fire dynamics simulator, user's guide [M]. Washington: Nist Special Publication,2013.
- [10] 公安部上海消防科学研究所,上海市消防局.建筑防排烟技术规程:DGJ08—88—2006 [S].上海:上海市建设和交通委员会,2006.
(Shanghai Fire Science Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai Fire Department. Technical Specification for building smoke control: GDJ08—88—2006 [S]. Shanghai: Shanghai Construction and Transportation Committee,2006.)
- [11] HESKESTAD G. Engineering relations for fire plumes [J]. Fire safety journal,1984,7(1):25-32.
- [12] American Nuclear Society Specification. Standard for Smoke and Heat Venting: NFPA 204 [S]. Quincy: National Fire Protection Association,2012.
- [13] 中华人民共和国公安部.自动喷水灭火系统设计规范:GB50084—2017 [S].北京:中国计划出版社,2017.
(Code for design of sprinkler system design: GB50084—2017 [S]. Beijing: China Planning Press,2017.)
- [14] 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.
- [15] NAM S. Numerical simulation of the penetration capability of sprinkler sprays [J]. Fire safety journal,2009,5(32):307-329.
- [16] KARPOVA I, GALAT A, NOVOZHIL V, et al. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles [J]. Fire science and technology,2010,29(4):259-282.
- [17] LEE Y P. Heat fluxes and flame heights on external facades from enclosure fires [D]. London: University of Ulster,2006.
- [18] NOVOZHILOV V, HARVIE D J E, KENT J H, et al. A computational fluid dynamics study of wood fire extinguishment by water sprinkler [J]. Fire safety journal, 1997, 29 (4) : 259-282.
- [19] 李世鹏.高层建筑纵向多窗口羽流火焰融合的数值模拟研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2018.
(LI Shipeng. Numerical simulation for the vertical multi-windows plume flame merging in the high-rise buildings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2018.)
- [20] 张俊伟.基于FDS的纵向多窗口火焰蔓延模型研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2015.
(ZHANG Junwei. Research on vertical multi-window flame propagation model based on FDS [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2015.)
- [21] ZHAN C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. Nonlinear dynamic behavior of Simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading [J]. Engineering structures,2019,181:124-142.
- [22] SUN Li, CHEN Chen, SUN Qianqian. Experiment and finite element analyses on the corrosion of underground pipelines [J]. Science China,2015,58(6):1015-1020.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)