

火源热释放速率对中庭火灾自然排烟的影响分析

安 鲁¹, 冯 雷², 徐洪涛¹, 李起耘³, 陆延安³, 杨 茉¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 国核工程有限公司, 上海 200233;

3. 上海市浦东新区特种设备监督检验所, 上海 200136)

摘要: 利用计算流体动力学的方法,以连通地铁站和商业区的中庭为模型,研究了火源热释放速率对中庭火灾自然排烟策略的影响.火源热释放速率分别设为2,3,4 MW,模拟结果表明:中庭采用自然排烟策略,当室外环境温度低于5℃时,火源热释放速率由2 MW增大到4 MW的过程中,自然排烟策略失效;当室外环境温度高于25℃时,烟气可由中庭天窗稳定排出,且随着火源热释放速率的增大,自然排烟效果增强;随着室外温度的增加,中庭内外温差减小,火源热释放速率的变化对中庭自然排烟的影响减小.

关键词: 中庭; 数值模拟; 热释放速率; 自然排烟

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Impact of Fire Heat Release Rate on Natural Smoke Extraction in Atrium Fire

AN Lu¹, FENG Lei², XU Hongtao¹, LI Qiyun³, LU Yanan³, YANG Mo¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Nuclear Power Engineering Company, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Pudong

Institute of Special Equipment Inspection, Shanghai 200136, China)

Abstract: The model of an atrium, combining the subway station with commercial districts, was built and the CFD (computer fluid dynamics) technology was adopted to simulate the effects of heat release rate on the natural smoke extraction strategy when fire occurs in the atrium. The heat release rate was set to be 2, 3, 4 MW. The simulated results indicate that, the smoke extraction strategy fails with the increase of fire heat release rate from 2 MW to 4 MW when the outdoor temperature is lower than 5℃. When it exceeds 25℃, the smoke can be extracted and the effect is better with the increase of heat release rate. With the increase of outdoor temperature and the reduction of temperature difference between outdoor and indoor environment, the effect of heat release rate on the atrium natural smoke extraction decreases.

Keywords: atrium; numerical simulation; heat release rate; natural smoke extraction

收稿日期: 2014-11-10

基金项目: 上海市科委自然科学基金资助项目(12ZR1420900); 上海市教委科研创新项目(14ZZ134); 上海市质量监督局公益科研项目(2012-12, 2012-41)

第一作者: 安 鲁(1987-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 传热传质与数值模拟. E-mail: af2419@163.com

通信作者: 徐洪涛(1976-), 男, 副教授. 研究方向: 传热传质与数值模拟. E-mail: htxu@usst.edu.cn

随着经济的快速发展和生活水平的提高,现代建筑中出现了越来越多的中庭设计,其排烟系统主要是用来排出火灾发生时产生的大量烟气,提供一个可供逃生的维生环境.维生环境是指火灾发生后产生的烟气温度、一氧化碳浓度、能见度及热辐射量等需控制在一定的范围内^[1],以便确保建筑内人员能够安全逃生.

目前,中庭建筑的排烟系统多采用自然排烟.对于中庭排烟系统的设计,国内外的相关规范都对其进行了规定.国内的GB 50016—2013 建筑设计防火规范^[2]中规定自然排烟口的净面积应为中庭地面面积的5%.GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范^[3]中规定中庭防火分区面积应按上、下层连通的面积叠加计算.美国国家消防协会颁布的中庭烟气控制系统设计指南 NFPA 92B^[4]和英国建筑研究所(BRE)颁布的中庭建筑烟气控制设计方法^[5]均对中庭内的烟气控制方法和排烟策略进行了规定,为中庭建筑排烟系统的设计提供了参考依据.

近十年,国内外学者对中庭火灾进行了大量的研究工作.Chang 等^[6]模拟分析了建筑中庭内自然排烟、机械排烟和天花板结构对中庭火灾排烟的影响.Yi 等^[7]讨论了两层建筑的中庭火灾时不同补风位置对机械排烟效果的作用.Shi 等^[8]将某零售店中庭火灾的实验结果与几种计算流体力学模拟软件所得结果进行比较分析.Ji 等^[9]以一层空间与中庭相连为模型,比较了一层空间起火时中庭有、无通风口对烟气传播的影响.Li 等^[10]从机械排烟的补风量大小着手,研究了中庭火灾的烟气控制策略.Qin 等^[11]讨论了6个不同位置的天窗对建筑火灾内自然排烟的影响.徐洪涛等^[12-13]模拟分析了地铁站轨行区的烟气排放控制策略,同时也利用动网格法和动量源项法对隧道通风的活塞效应进行了研究.Gao 等^[14]模拟分析了地铁车站中庭的天窗尺寸对烟气的影响.朱常琳等^[15]对全尺寸地铁区间隧道利用联络通道排烟的效果进行了数值模拟,并对模拟结果进行了分析.陈阳寿^[16]研究了地铁列车火灾烟气流速与压力的变化规律.

不同火源种类在火灾中反映为热释放速率和火灾发展速度的不同,火源的热释放速率在不同室外温度下对中庭的自然排烟策略有明显影响,目前对于这方面的研究不是很多.本文基于地铁站与商业区综合一体化的发展趋势^[17],根据某建筑中庭的具体参数建立计算模型,模拟分析火源的不同热释放速率对中庭自然排烟的影响.

1 物理模型

中庭连接着地铁站和商业区.商业区每层高为4 m.中庭内部空间长51.2 m,宽30.6 m,高10 m.中庭顶部设有2个天窗,开口大小为4 m×4 m.商业区一二层连廊与中庭之间设有挡烟垂壁,挡烟垂壁距地面2.2 m.整个建筑的物理模型如图1所示.地铁站、中庭和商业区一体化的内部示意图如图2所示,位置为图1的AA'截面.中庭火源位置如图3所示.

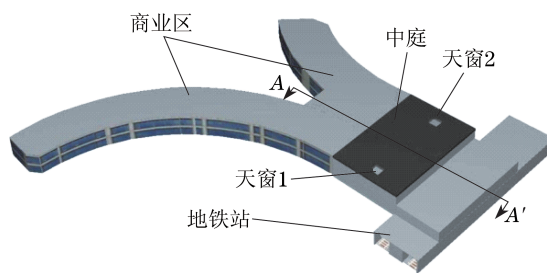


图1 地铁站、中庭和商业区一体化物理模型

Fig.1 Integrated physical model of the subway station, atrium and commercial district

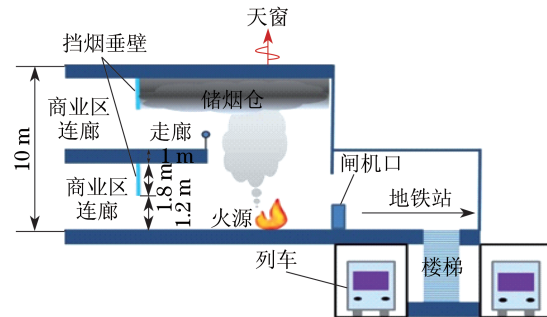


图2 地铁站、中庭和商业区一体化内部示意图

Fig.2 Internal schematic view of the subway station, atrium and commercial district

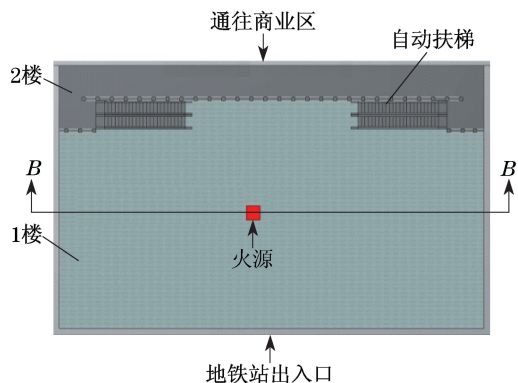


图3 中庭火源位置图

Fig.3 Location of the atrium fire

2 数学模型

2.1 控制方程

利用计算流体动力学软件 FDS (fire dynamics simulator) 进行火灾模拟分析, 控制方程描述可参考 FDS 技术手册^[18]. 火源热释放速率 (heat release rate) 体现了火灾强度随时间的变化速率, 决定着室内火灾的温度变化. 火源热释放速率为单位面积火源热释放速率与火源表面积的乘积.

$$Q = \phi \dot{m} \Delta H \quad (1)$$

式中: Q 为单位面积火源热释放速率, kW/m^2 ; ϕ 为不完全燃烧程度的燃烧因子, 一般为 $0.3 \sim 0.9$; $\dot{m}$ 为质量燃烧速率, kg/s ; ΔH 为可燃物的热值, MJ/kg .

在实际的火灾模拟中采用赫斯凯斯^[19]提出的二次方火灾热释放速率模型

$$Q = \alpha (t - t_0)^2 \quad (2)$$

式中: α 为火灾增长系数, kW/s^2 ; t 为起火后的时间; t_0 为开始有效燃烧所需的时间.

在火灾中, 燃烧产生的高温烟气上升的过程产生的浮升力

$$F = \beta g \Delta t \quad (3)$$

式中: β 为膨胀系数, K^{-1} ; g 为重力加速度, m/s^2 ; Δt 为流体内部温差, $^{\circ}\text{C}$.

2.2 火灾模拟参数设定

模拟的火源热释放速率分别为 $2, 3, 4 \text{ MW}$, 火灾增长类型采用快速火模型, α 取 0.047 ^[4]. 图4为

不同火源热释放速率随时间变化的特征曲线. τ 为时间, H 为火源热释放速率. 墙面为钢筋混凝土结构, 密度为 $2\,200 \text{ kg}/\text{m}^3$, 热传导率为 $1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容为 $0.88 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 模拟中初始的中庭环境温度设为 25°C . 每个模型的模拟时间设为 350 s .

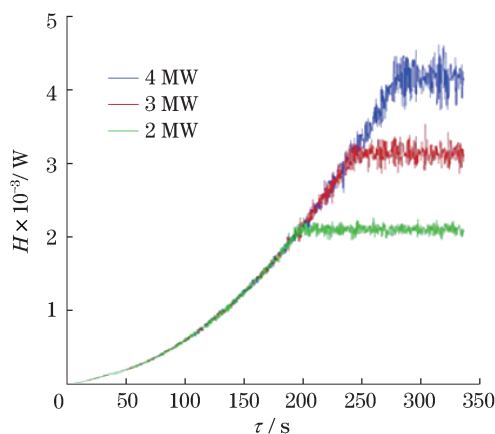


图4 不同火源热释放速率示意图

Fig.4 Schematic of different fire heat release rates

2.3 网格无关性验证

现主要对4套网格 $0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$, $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 和 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 进行分析比较. 在网格验证中, 设定的室外温度为 25°C , 火源热释放速率为 4 MW . 图5为 100 s 时 BB' 截面 (图3所示) 的速度矢量图. 由图5可知, 网格(c)和网格(d)模拟所得的涡旋比较一致, 网格(a)和网格(b)的结果与网格(c)和(d)的结果相差较大. 从节省计算时间和确保模拟

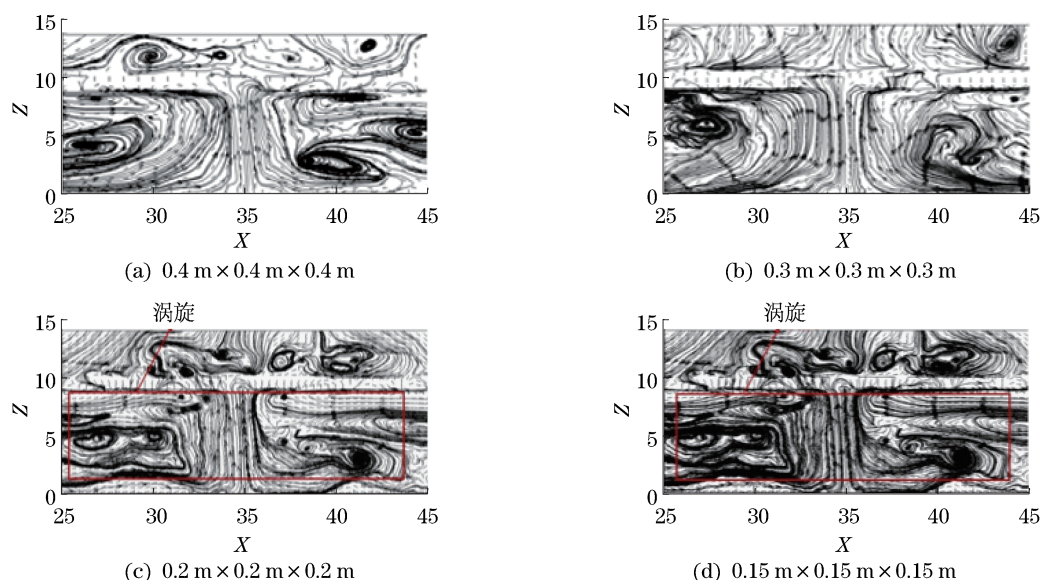


图5 100 s 时的速度矢量图

Fig.5 Velocity vector diagram at 100 s

准确性的角度出发,本文选取网格(c): $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 进行模拟计算.

3 模拟结果分析

模拟的室外温度分别为 $35, 30, 25, 20, 15, 10, 5, 0, -5, -10\text{ }^{\circ}\text{C}$,火源热释放速率分别为 $2, 3, 4\text{ MW}$.火源热释放速率为 4 MW 时,其完全燃烧的时间为 292 s , 350 s 时火源热释放速率达到最大值.因此,本文模拟时间长度设为 350 s .现从气体流量、温度场等方面分析烟气在中庭内以及在顶部开口处的流动状况,以便评估中庭火灾自然排烟策略的效果.

图6为通过某一天窗的烟气体积净流量的变化曲线.在火灾发展初期的 206 s 内,同一室外温度下,不同的火源热释放速率的气体质量流量变化是基本相同的.

如图6(a)和图6(b)所示,当室外温度为 $-10, -5, 0, 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着火灾的发展,即使热释放量在增大,依旧有大量的室外冷空气在热压的作用下进入到室内,通过天窗的气体体积净流量为负值.室外温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且火源热释放速率为 4 MW 时, 350 s 内通过天窗的烟气体积净流量仍然为负值,所以,自然排烟策略在 350 s 内基本失效.当室外温度为 $10, 15, 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,火源充分发展之后,气体体积流量变为正值,自然排烟策略开始有效.室外温度越高,气体体积流量变为正值越快,烟气能够越快地从天窗排出.室外温度在 $25, 30, 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,烟气可以顺利地从天窗排出,随着热释放量的增加,气体流量也随之增加,如图6(c)所示.这说明,在室外温度较高时,热释放速率越大,烟气越容易克服阻力从中庭天窗排出.

室外温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 350 s 时AA'截面在不同火源热释放速率下的温度场如图7所示.

随着火源热释放速率的增大,中庭内的烟气的温度升高.由浮升力式(3)可知,温差越大,烟气的浮升力也越大.火灾充分发展以后,随着火源热释放速率从 2 MW 增大到 4 MW ,中庭内外温差增大,烟气的浮升力增大,通过天窗气体体积净流量增大,且气体体积净流量的增长速率也明显增大,即室外温度较低时,火源热释放速率越大,自然排烟效果越好.

室外温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 350 s 时AA'截面在不同火源热释放速率下的温度场如图8所示.由图8可知,室外温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的中庭内外平均温差小于室外温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的中庭内外平均温差.结合图

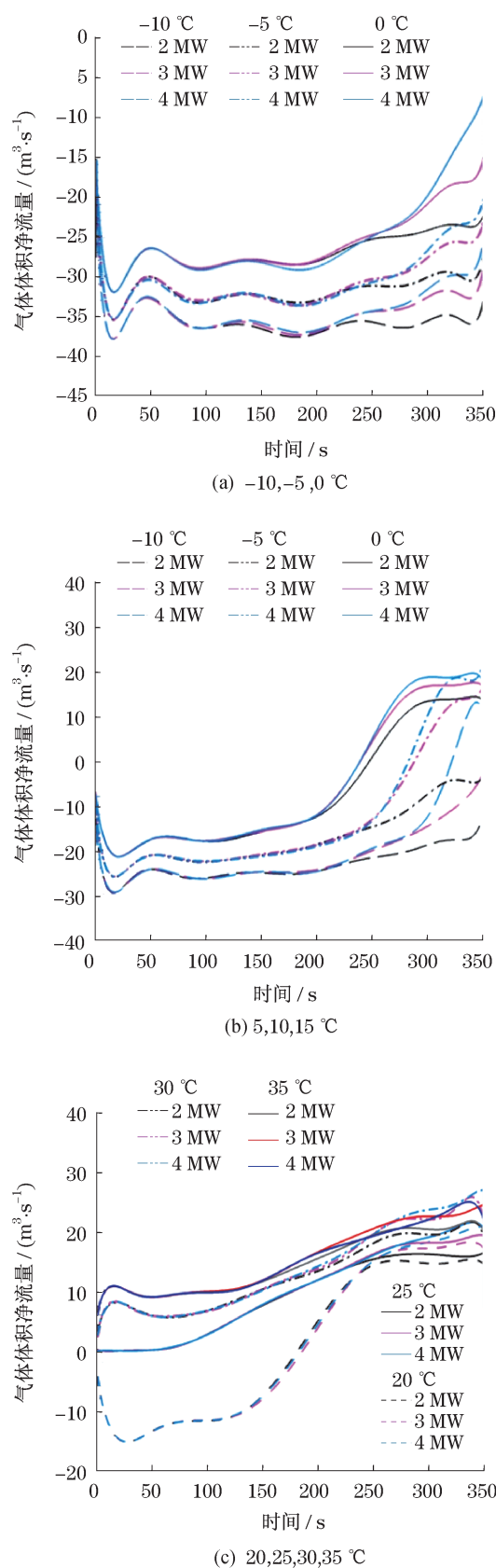


图6 通过某一天窗的气体体积净流量的变化
Fig.6 Change of gas flows through certain skylight

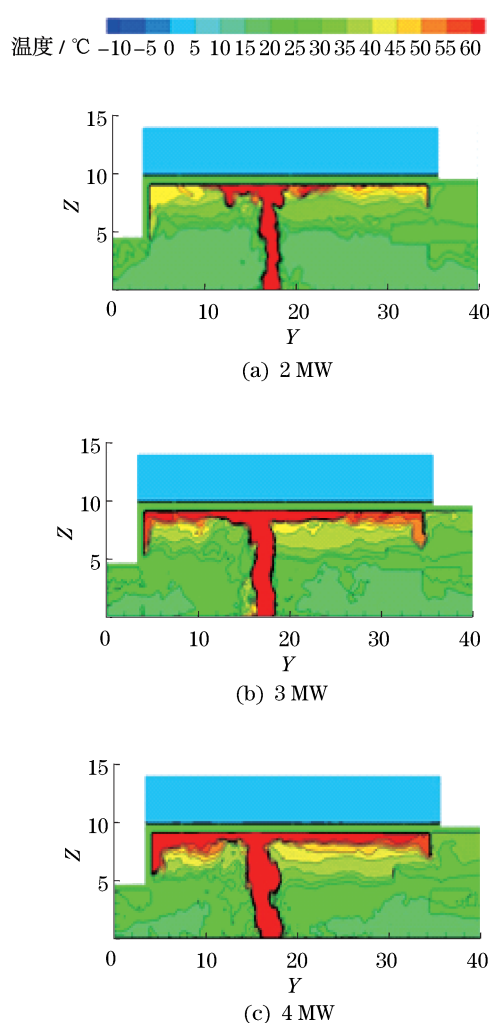


图7 室外温度为0 °C下350 s时AA'截面的温度场

Fig.7 Outdoor temperature distribution on the AA' section at 350 s, 0 °C

6(c),当室外温度为25 °C时,火灾充分发展以后,随着火源热释放速率的增大,通过天窗的气体体积净流量增大.但由于中庭内外平均温差较小,气体体积流量的增长速率较小,即室外温度较高时,火源热释放速率的增大对自然排烟的效果影响较小.

4 结 论

a. 当室内温度为25 °C,室外环境温度低于5 °C时,中庭采用的自然排烟策略失效.当室外环境温度高于25 °C时,烟气可由中庭天窗稳定排出,自然排烟策略有效.

b. 当室外温度低于25 °C时,火源热释放速率对自然排烟效果的影响较大.当室外温度高于25 °C,火源热释放速率对自然排烟效果的影响减

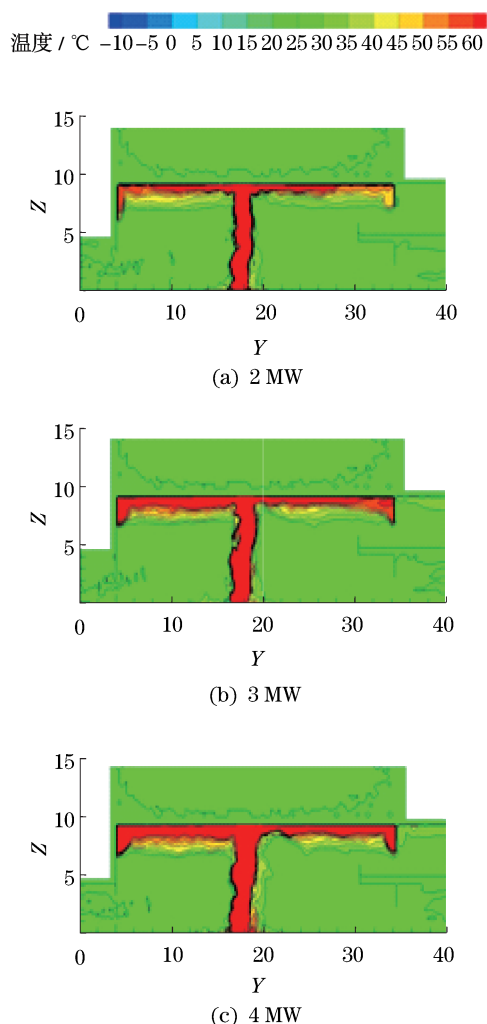


图8 室外温度为25 °C下350 s时AA'截面的温度场

Fig.8 Outdoor temperature distribution on the AA' section at 350 s, 25 °C

小.随着室外温度的增加,中庭内外的温差减小,火源热释放速率的变化对中庭自然排烟的影响减小.

c. 当室外温度较高时,随着火源热释放速率的增大,天窗能够排出的烟气增多,排烟效果增强.

火源热释放速率对中庭火灾的自然排烟策略有较大的影响.在利用火灾工程方法进行消防设计的时候,需要充分考虑到环境温度不同情况下火源的热释放速率对火灾排烟系统的影响,确保中庭自然排烟策略能够满足设计要求.

参考文献:

- [1] National Fire Protection Association. NFPA 502, Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways[S]. New York: New York and New Jersey Port Authority Press, 2014.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50016—2013,

- 建筑设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [3] 中华人民共和国公安部消防局. GB 50045—1995, 高层民用建筑设计防火规范(2005年版)[S].北京:中国计划出版社,2005.
- [4] National Fire Protection Association. NFPA 92B, Guide for smoke management systems in malls, atria, and large areas[S]. New York: New York and New Jersey port authority press, 2009.
- [5] Hansell G O. Design approaches for smoke control in atrium building; building research establishment report BR 258[M]. England: IHS BRE Press, 2010.
- [6] Chang C H, Banks D, Meroney R N. Computational fluid dynamics simulation of the progress of fire smoke in large space building atria[J]. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2003, 6(3): 151–157.
- [7] Yi L, Chow W K, Li Y Z, et al. A simple two-layer zone model on mechanical exhaust in an atrium[J]. Building and environment, 2005, 40(7): 869–880.
- [8] Shi C L, Lu W Z, Chow W K, et al. An investigation on spill plume development and natural filling in large full-scale atrium under retail shop fire [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(3/4): 513–529.
- [9] Ji Y, Cook M J, Hanby V. CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium[J]. Building and Environment, 2007, 42(3): 1158–1172.
- [10] Li S C, Chen Y, Chen X, et al. Engineering numerical simulation on the amount of make-up air for mechanical smoke exhaust in atrium [J]. Procedia Engineering, 2011, 11: 379–384.
- [11] Qin T X, Guo Y C, Chan C K, et al. Numerical simulation of the spread of smoke in an atrium under fire scenario[J]. Building and Environment, 2009, 44(1): 56–65.
- [12] 徐洪涛, 刘坤鹏, 杨茉, 等. 地铁站轨行区烟控策略研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(6): 577–580.
- [13] 徐洪涛, 邵斌, 李贝贝, 等. 隧道通风活塞效应数值模拟方法研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(1): 53–59.
- [14] Gao R, Li A, Hao X, et al. Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway station[J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 280–289.
- [15] National Fire Protection Association. NFPA 204, Standard for smoke and heat venting[S]. New York: New York and New Jersey Port Authority Press, 2009.
- [16] 陈阳寿. 地铁列车火灾烟气运动规律探讨[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(1): 36–40.
- [17] Bi X L, Wu G Y, Zhang H. Integrated design of the underground commercial space: a case study of the central area in lanzhou city[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295: 2587–2591.
- [18] Mcgrattan K, Hostikka S, McDermott R, et al. Fire dynamics simulator technical reference guide [R]. Maryland: U. S. Department of Commerce, 2013.
- [19] National Fire Protection Association. NFPA 204, Standard for smoke and heat venting[S]. New York: New York and New Jersey Port Authority Press, 2009.

(编辑: 石 璞)