

高层住宅排烟管道尺寸的优化设计

张若楠, 余跃进, 许建

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 在主烟道截面面积不变的前提下, 改变烟道的几何尺寸, 采用数值模拟的方法对主烟道内烟气的温度场和速度场进行研究. 对比分析了不同几何尺寸主烟道出口截面的平均速度、平均温度、最高温度. 结果表明, 烟道的排烟效率随着边界系数的改变而改变. 当 k 增至最大值为1.73时, 烟道的排烟效果最好.

[关键词] 排烟效率, 热压, 几何尺寸, Fluent 模拟

[中图分类号] TU223 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)03-0043-05

Optimal Design of the Flue Size Based on Fluent

Zhang Ruonan, Yu Yuejin, Xu Jian

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The temperature field and velocity field of the flue collector are researched by the method of numerical simulation, under the condition that the area of the flue collector is same while the geometry size of the flue is changing. The average velocity, average temperature and the highest temperature should be analyzed in different conditions. The results indicate that the variation characteristics of the smoke extraction efficiency with the changes of coefficient k . Especially when k arrive the maximize, the smoke extraction efficiency works best.

Key words: smoke extraction efficiency, heat pressing, geometrical dimensions, Fluent simulation

由于我国国土资源与人口的矛盾日益突出, 高层住宅成为民用建筑发展的必然趋势. 各住户采用排油烟机将油烟混合气排至集中排风竖井, 经自然通风或机械通风的方式将油烟排放到屋顶释放. 排风竖井作为排除油烟的主要通道, 对保障高层建筑室内空气品质至关重要. 研究表明, 对于26层以下的高层住房, 主烟道可采用热压无能耗的自然排烟方式排烟, 与机械排烟相比表现出良好的节能优势和环保效应^[1].

B50368—2005《住宅建筑规范》规定, 当采用竖向通风道时, 应采取防止支管回流和竖井泄漏的措施, 可设置变压板、止回阀、导流装置等^[2-4]. 但对于主烟道的尺寸, 大部分是直接根据国家标准图集^[5]上的形式进行选取, 形式单一, 缺乏灵活性. 本文研究了在保持主烟道截面积一定, 即确保主烟道内单位时间内通风量相等, 以及占用建筑体积比一定的情况下, 适当改变烟道几何尺寸对提高整个高层建筑排烟系统的效率的影响.

本文应用CFD模拟软件对不同几何尺寸的烟道内烟气流动、温度衰减进行了数值模拟, 分析了在其他条件一定时, 主烟道出口截面的平均速度、平均温度、最高温度和温度分布情况.

1 热压排烟

自然通风方式是以风压和热压为动力进行室内通风. 如图1所示, 热压存在于室内外温度有差异的建筑空间内. 建筑外维护结构上有2个不在同一高度上的窗口 a 、 b , 两者的高度差为 h , 设窗口外的静压分别为 P_a 、 P_b , 窗口的静压分别为 P'_a 、 P'_b , 室内外的温度和密度分别为 t_n 、 ρ_n ; t_w 、 ρ_w . 窗口 a 、 b 的内外压差为 ΔP_a 、 ΔP_b , 则

$$\Delta P_b = P'_b - P_a = (P'_a - gh\rho_n) - (P_a - gh\rho_w) = (P'_a - P_a) + gh(\rho_w - \rho_n) = \Delta P_a + gh(\rho_w - \rho_n). \quad (1)$$

对于高层建筑而言, 在烟囱高度一定的前提下, 增加烟道内外温度差是强化热压排烟的有效手段. 在

主烟道气流和支烟道烟气进口温度一定的条件下,减小高温烟气在烟道升腾过程中的衰减作用,即提高主烟道的排烟温度,对提高烟道的排烟效果具有实际意义。

为确保厨房内有良好的通风性,从厨房排至主烟道的烟气能及时地排至室外,避免发生烟气排气不畅、滞留倒灌等现象,需要给出在单位时间内通过主烟道的设计风量,即在烟道内烟气流速一定的前提下,确保主烟道的横截面为一定值。

2 模拟研究

2.1 物理模型

以南京某20层居民楼为例,取其中一层为研究对象,建立物理模型,如图2(a)所示。烟道尺寸为400 m×400 m,层高3 m,排油烟机入口距楼层底面高1.6 m,排油烟机管道半径为0.75 m。定义主烟道出口边界纵壁面宽为 a ,横壁面宽为 b ,定义边界系数 k 为纵向壁面宽与横向壁面宽之比:

$$k = a/b.$$

为保证单位时间内通过主烟道的风量一定,本文是以保持主烟道截面积恒定为前提,通过改变主烟道长宽比例,分别模拟不同情况下主烟道出口截面的温度和速度分布。讨论当 $k = 0.58 \sim 1.73$ 时,即烟道壁宽 a 的边界值为3 m至5.2 m、烟道壁宽 b 的边界值为5.2 m至3 m变换时,以0.2 m为增长步长,分别对该尺寸下烟道内温度场和速度场进行对比分析,并对该烟道模型用gambit进行网格划分,如图2(b)所示。

假设燃烧后的混合气体为不可压缩气体^[6],燃烧温度为200℃^[7]。排油烟机在抽吸过程中会吸入大量的空气,使得吸入排油烟机内混合气体的温度急速下降,本文取排油烟机进口烟气的温度为40℃。根据常压下气体混合物粘度和密度的计算公式可得:混合烟气粘度和密度 $24.49 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 0.751 kg/m^3 ;而在相同条件下的空气粘度和密度分别为 $25.82 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 0.746 kg/m^3 。混合烟气的物理性质与相同条件下空气的物理性质相似,在模拟过程中可将混合烟气近似视为空气。

2.2 数学方程

主烟道内,烟气的空气流动充分发展,具有典型的湍流特性,故本文在模拟中采用标准 $k-\varepsilon$ 方程模型。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \beta \varepsilon \right], \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \times \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{q}{C_p}, \quad (5)$$

式中, u_i 、 u_j 为三维速度,m/s; x_i 、 x_j 为三维坐标; k 为湍流脉动动能,kJ; ε 为湍流脉动动能耗散率; T 为室内空气温度,K; μ 为层流动力粘度,N/(m²·s); μ_t 为湍流动力粘性系数,N/(m²·s); p 为空气压力,Pa; ρ 为空气密度,kg/m³; C_p 为定压比热容,J/(kg·K); q 为热流密度,m²/s; β 为流体体积膨胀系数; c 为烟气浓度,

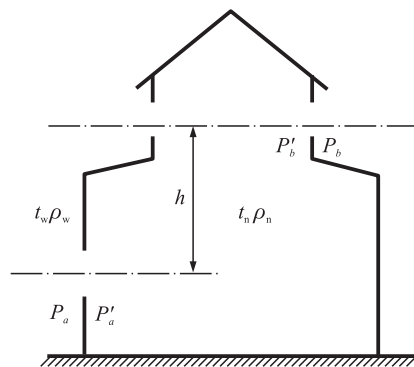


图1 热压作用原理图

Fig.1 The principle diagram of heat pressing

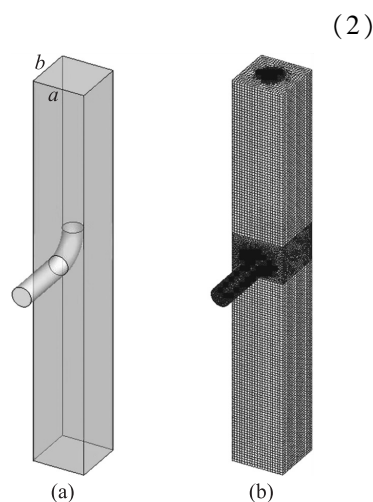


图2 烟道物理模型(a)和网格划分图(b)

Fig.2 The physical model (a) and the mesh (b) of flue collector

mg/m^3 ; F_c 为烟气发生率; c_c 为常数; Pr 为普朗特数。

2.3 定解条件

烟气依靠排油烟机提供的压力排至主烟道内,排风压力为 200 Pa ^[8]。主烟道的流速过大不仅会减弱支烟道的引射作用,同时也会造成主烟道内的噪音过大。因此一般建议主烟道的流速要小于 10 m/s ^[9],本文取主烟道流速为 8 m/s 。目前,高层住宅内公共烟道均采用玻纤网增强水泥混凝土管道,绝对粗糙度为 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 。

3 模拟结果与分析

3.1 出口截面的平均温度与平均速度变化

根据上述模型,在控制其他实际换热条件一致的前提下,分别模拟了在不同边界尺寸下的主烟道出口截面烟气的平均温度和平均速度,如图3所示。由图3可知,随着边界系数的增加,主烟道出口截面的平均温度和平均速度均先减小后增大,呈凹函数的变化特性。

当 $k=0.58$, 烟道壁 $a=0.3 \text{ m}$ 、 $b=0.52 \text{ m}$ 时,出口截面平均温度和平均速度均较大,分别为 302.06 K 、 8.77 m/s 。随着 k 逐渐增加,出口截面的平均温度和平均速度均急速下降。当 $k=1.1$ 时,烟道壁 $a=0.42 \text{ m}$ 、 $b=0.38 \text{ m}$,出口截面的平均温度和平均速度均较小,分别为 301.9 K 、 8.55 m/s 。当 k 进一步增大时,出口截面的平均温度和平均速度却呈增长趋势。当 k 增长为 1.73 , 烟道壁 $a=0.52 \text{ m}$ 、 $b=0.3 \text{ m}$ 时,平均温度和平均速度分别达到 301.97 K 、 8.75 m/s 。综上所述,当 $k=0.58 \sim 1.1$ 时,平均温度和平均速度的变化率分别为 0.048% 、 2.6% ; 而 $k=1.1 \sim 1.73$ 时,平均温度和平均速度的变化率分别为 0.020% 、 2.3% 。

高层住宅内竖井排烟,是高温烟气在有限空间内热扩散,热气流受烟道壁面空间的限制不能自由扩散,热边界层也逐渐增厚。当烟道间距较小时,烟气主要以导热换热方式进行热扩散;当间距较大时,则主要以对流换热方式进行热扩散。因此,当 k 发生改变时,即烟道边界 a 或 b 尺寸减小时,烟气以导热换热方式进行热扩散的比重逐渐增大,与周围低温空气之间的换热效率逐渐降低,烟气的最高温度逐渐增加,烟气在出口截面的平均温度也逐渐增大。烟气升腾过程中随着平均温度的增加,烟气的升力也会随之增大,使得气流获得的流速也会增加,即单位时间内排放的烟气量也会增加,从而提高了烟道的排烟效果。

3.2 出口截面的温度分布

图4给出了6种不同边界系数下主烟道出口截面的温度分布图。当 $k < 1$ 时,烟道内高温气体集中在烟道中心,如图4(a)、(b)所示。(a)中 $k=0.58$, 即烟道壁 $a=0.3 \text{ m}$ 、 $b=0.52 \text{ m}$, 此时整个烟道截面内烟道边界与烟道中心的温度梯度较大,而烟道边界与大气的温度梯度则近似为零,高温气体在烟道出口截面处的扩散率较小。随着 k 的逐渐增加,即壁 a 的尺寸逐渐增大,高温烟气在烟道内的分布情况没有较大的变化,如(b)所示。当 $k=1$ 时,即壁 $a=0.4 \text{ m}$ 、 $b=0.4 \text{ m}$, 如图4(c)所示,此时烟道中心部分与边界的温度梯度明显较小。因此,在等出口截面面积条件下, $k=1$ 时高温烟气在烟道出口截面的扩散率较 $k < 1$ 时有显著的增加。

当 $k > 1$ 时,烟道内的高温气体逐渐向烟道边界移动,则部分高温烟气分布在主烟道的烟道壁上,如图4(d)、(e)、(f)所示。图(d)中烟道壁 $a=0.47 \text{ m}$ 、 $b=0.34 \text{ m}$, 此时烟气高温部分向烟道边界 a_1 移动,但烟气中的最高温度部分仍未达到边界。出口截面上温度分布不均,边界 a_1 与大气的温度梯度较大,而边界 a 、 b 、 b_1 与大气的温度梯度几乎为零,此时出口截面的高温烟气扩散率较图(c)显著减少。当壁 a 的尺寸进一步增加,如图(e)所示,此时壁 $a=0.5 \text{ m}$ 、壁 $b=0.32 \text{ m}$, 烟道内的高温烟气部分刚好达到边界 a_1 , 壁 a_1 与大气温度梯度达到最大值,且高温烟气扩散率较(e)略有增加。而随着壁 a 尺寸进一步增加,当达到本文模拟实例的最大值时,即壁 $a=0.52 \text{ m}$ 、壁 $b=0.3 \text{ m}$, 如图(f)所示。烟气内的高温部分继续向边界 a_1 移

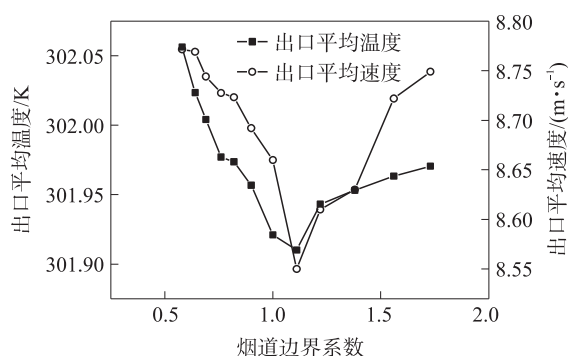


图3 烟道出口界面平均温度和平均速度随边界系数的变化曲线

Fig.3 Variation of average velocity and average temperature along the border coefficient of outlet section

动,即大部分的高温烟气未能达到烟道出口截面上,而是偏移至烟道内壁上,此时出口截面的高温烟气扩散率最小.

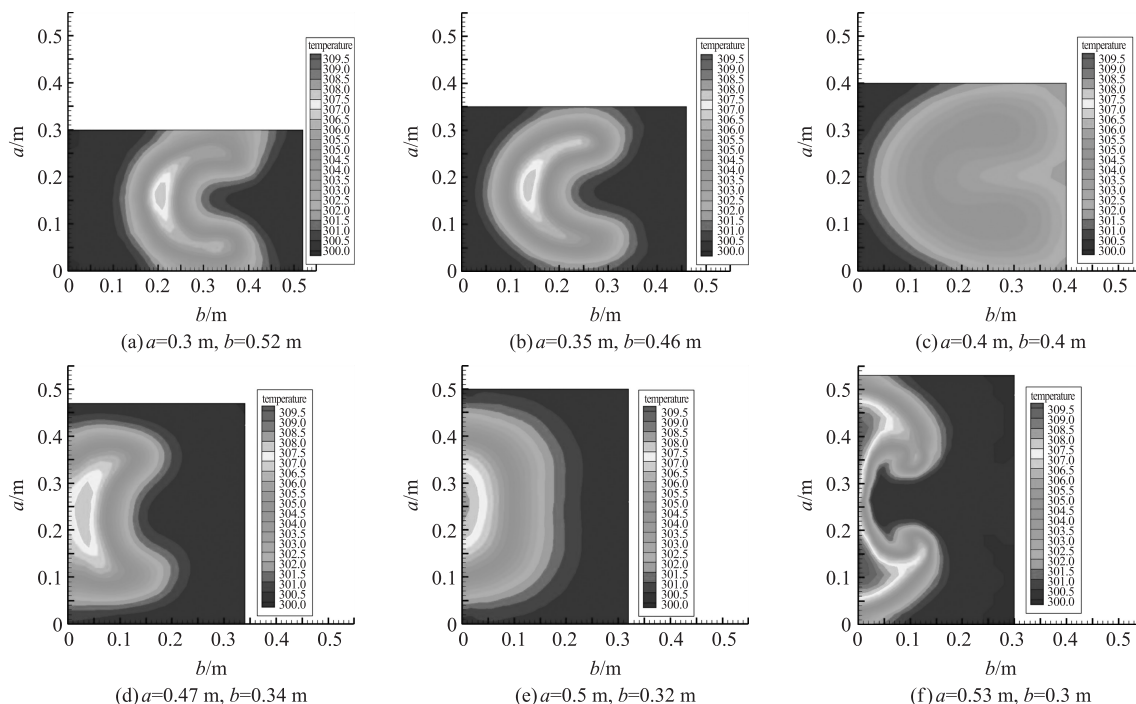


图 4 6 种尺寸下主烟道出口截面温度分布图

Fig. 4 Temperature field distribution of outlet section in six conditions

3.3 出口截面最高温度

图 5 给出了主烟道的出口截面的最高温度随边界系数变化的曲线图. 当 $k < 1$ 时, 出口截面的烟道的最高温度始终保持在 307.5 K. 当 k 趋近于 1, 即出口界面趋近于正方形时, 该界面上的最高温度急速下降为 304.2 K. 进一步增加烟道壁 a 的尺寸, 此时出口界面的最高温度又急剧增加, 即当 $k > 1$ 时, 出口边界的最高温度会随着 a 值增加而不断地升高. 在本文模拟实例中, 当 a 达到最大值为 0.52 m 时, 此时出口边界的温度最高可达到 309.5 K.

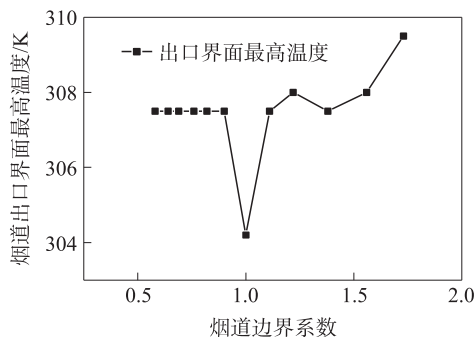


图 5 主烟道出口截面最高温度随边界系数的变化曲线

Fig. 5 Variation of highest temperature along the border coefficient of outlet section

4 几何尺寸对热压排烟的影响

根据上述分析可知, $k \leq 1$ 时烟气高温部分集中在烟道出口截面的中心, 边界部分的烟气温度近似等于大气温度. 烟道在热压作用下进行排烟, 烟道中心的高温气体要与烟道边界附近的低温气体进行热交换, 才能进一步地与大气产生温度差而产生烟囱效应. 即当 $k < 1$ 时, 烟道内的高温气体的热量会有部分散失, 使得产生热压效应时的温度差显著下降. 但由于 $k < 1$ 时烟气的最高温度较 $k = 1$ 时高, 进行热扩散后边界温度也会比 $k = 1$ 时高, 即推进热压排风的烟道内外温度差比 $k = 1$ 时高. 且 $k < 1$ 时烟气在出口截面的平均速度也较 $k = 1$ 时有所增加, 即单位时间内烟气的质量流量较大, 进一步提高了烟气的排放效率. 因此, 在 $k < 1$ 时的烟道排烟效果比 $k = 1$ 时的烟道排烟效果略好.

$k > 1$ 时的烟气高温部分逐渐向烟道边界 a_1 移动, 该边界的烟气与大气之间的温度梯度达到最大, 在该边界上的热压作用下排烟效果最为显著. 此时出口边界上的剩余三边界温度近似于大气温度, 无明显的热压效应. 但随着高温烟气向四周进行热扩散, 烟气高温区域内的温度逐渐衰减, 即边界 a_1 附近的烟气温度会下降, 而边界 a, b, b_1 附近的烟气温度逐渐升高. 此时高温区 (边界 a_1) 的排烟效果将逐渐降低, 但低

温区(边界 a 、 b 、 b_1)的排烟效果逐渐升高,此时整个烟道内的总排烟效果始终保持在较高水平.且随着壁 a 尺寸的不断增大,烟道边界上的高温烟气的温度也逐渐升高,从而排烟效率也会逐渐升高.同时,出口截面的烟气流速随着壁 a 尺寸的增大而逐渐增大,进一步加强烟道的排烟效果.综上所述,边界 a 尺寸大于边界 b 尺寸时,烟道的排烟效率显著提高.

改变烟道的几何尺寸,不仅能显著降低高温烟气在烟道内的衰减,而且也能增大烟气流速,从而提高烟道的排烟效率.当 $k>1$ 时,对烟道的排烟效果提高最为显著;当 $k<1$ 时对烟道的排烟效果其次;当 $k=1$ 时,烟道的排烟效果最差.

5 结语

在烟道等截面面积的条件下,随着 k 值的增加,烟道出口截面烟气的最高温度、平均温度和平均速度均先减小后增加,呈凹函数的变化特性.与 $k>1$ 相比,当 $k<1$ 时最高温度的变化率较小,而平均温度和平均速度的变化率均较大.

与 $k\leq 1$ 时相比, $k>1$ 的最大温度梯度(烟道内边界处烟气的最高温度与室外空气温度差)较大,即促进烟道进行热压排烟的压力差较大.当高温气体从边界一侧热扩散到整个出口截面时,烟道内进行排烟的有效面积弥补了高温边界处温度衰减所造成的损失,从而使 $k>1$ 时的烟道排烟效率始终保持在较高水平.

改变烟道的几何尺寸,均能从增大温度梯度和烟气流速两方面来提高热压作用下的排烟效率.当 $k>1$ 时,烟道的排烟效果最好;当 $k<1$ 时,烟道的排烟效果次之;当 $k=1$ 时,烟道的排烟效率最差.

[参考文献](References)

- [1] 王健敏,刘江涛.住宅厨房利用热压集中排烟模式初探[J].建筑热能通风空调,2005,24(1):76-78.
Wang Jianmin, Liu Jiangtao. The research on an new heat pressure smoke exhausting system for residential kitchen[J]. Building Energy & Environment, 2005, 24(1): 76-78. (in Chinese)
- [2] 陈丽萍,龚延风,国君杰,等.住宅厨房集中排烟系统的理论计算[J].暖通空调,2002,32(4):107-109.
Chen Liping, Gong Yanfeng, Guo Junjie, et al. Calculation of central exhaust system of residential kitchens[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2002, 32(4): 107-109. (in Chinese)
- [3] 辛月琪,徐文华,郝宁克.厨房集中排烟道用止逆阀性能的实验研究[J].制冷空调与电力机械,2005,26(1):21-24.
Xin Yueqi, Xu Wenhua, Hao Ningke. Experiment in vestigation on the performance of check valves used in exhaust svstem for kitchen[J]. Construction Machinery for Hydraulic Engineering & Power Station, 2005, 26(1): 21-24. (in Chinese)
- [4] 谭小平,靳瑞冬. GBF 烟道系统在高层住宅厨房中的应用[J].暖通空调,2006,36(4):103-105.
Tan Xiaoping, Jin Ruidong. Application of GBF flue system to kitchens in high-rise residence[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2006, 36(4): 103-105. (in Chinese)
- [5] 中国建筑标准设计研究院.国家建筑标准设计图集 07J916-1 住宅排气道(-)[S].北京:中国计划出版社,2007.
China Institute of Building Standard Design and Research. National Building Standard Design Drawings 07J916-1 Residential Exhaust Duct[S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)
- [6] Ellegård A. Tears while cooking: an indicator of indoor air pollution and related health effects in developing countries[J]. Environmental Research, 1997, 75(1): 12-22.
- [7] 樊越胜,邵治民.住宅厨房变压式排气系统的数值模拟[J].建筑科学,2011,27(2):102-106.
Fan Yuesheng, Shao Zhimin. Numerical simulation on variable pressure exhaust system of residential kitchens[J]. Building Science, 2011, 27(2): 102-106. (in Chinese)
- [8] 于利刚,张燕,王杰光.多层住宅厨房排烟道内烟气流场仿真研究[J].湖南工程学院学报:自然科学版,2010(2):91-94.
Yu Ligang, Zhang Yan, Wang Jieguang. The numerical simulation of smoke liquid-field in flue of multilayer residential kitchen[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering: Natural Science Edition, 2010(2): 91-94. (in Chinese)
- [9] 高明侠.高层住宅厨房公共排烟道不均匀开启率对烟道内烟气流场的影响[D].西安:西安建筑科技大学环境与市政工程学院,2012.
Gao Mingxia. Effect of gas flow by range hoods in random opening in the residential kitchen public exhaust flue in high-rise building[D]. Xi'an: School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]