

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-819-06

侧向排烟方式下隧道宽度对烟气特性的影响

曾清琬¹ 毕海权¹ 苟红松² 王菁¹ 刘方吉¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

【摘要】 基于 FDS 数值模拟方法, 构建采用侧向排烟方式下, 断面为不同宽度的公路隧道数值计算模型。研究不同隧道宽度下各行车道上方拱顶处、人员高度处烟气温度分布及排烟口处的排烟效率, 以期为人员疏散及实际工程的通风排烟体系设计提供参考依据。研究表明: 增加隧道宽度有利于降低拱顶及人员高度处烟气温度, 但是会导致侧向排烟效率下降, 特别在隧道车道数增加为 4 车道及以上时, 排烟效率的衰减率也逐渐增大; 在隧道横向方向上, 火源处拱顶烟气温度分布呈非对称分布, 侧向排烟影响范围有限, 对各行车道作用效果不同; 对于人员疏散来说, 在烟气与冷空气卷吸严重的排烟口附近及隧道纵向方向上烟气蔓延的最远端, 危险性较高。

【关键词】 侧向排烟; 隧道宽度; 烟气特性; 公路隧道; 数值模拟

中图分类号 U292.91+4/U453.4 文献标识码 A

Influence of Tunnel Width on Smoke Characteristics in the Lateral Smoke Exhaust Mode

Zeng Qingxun¹ Bi Haiquan¹ Gou Hongsong² Wang Jing¹ Liu Fangji¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Based on the FDS numerical simulation method, a numerical calculation model for highway tunnels with different widths of cross-sections under the lateral smoke exhaust mode is constructed. In order to provide a reference for the design of ventilation and smoke exhaust system for personnel evacuation and actual engineering, this article studies the smoke temperature distribution beneath the vault above each lane and at the personnel height under different tunnel widths, also study the smoke exhaust efficiency at the smoke outlet. The research results show that increasing the width of tunnel is beneficial to reduce the smoke temperature beneath the vault and at the personnel height, but it will result in a decrease in the efficiency of lateral smoke exhaust. Especially when the number of tunnel lanes is increased to 4 lanes or more, the attenuation rate of the smoke exhaust efficiency is also gradually increased. In the transverse direction of the tunnel, the smoke temperature distribution beneath the vault at the fire source is asymmetrical, and the lateral smoke exhaust has a limited range, which has different effects on each traffic lane. For the evacuation of people, near the exhaust port and the farthest end of the smoke spread in the longitudinal direction of the tunnel have severe air entrainment, the risk is higher.

【Keywords】 lateral smoke exhaust; tunnel width; smoke characteristics; highway tunnels; numerical simulation

作者简介: 曾清琬 (1996.1-), 女, 硕士, E-mail: 420316926@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2020-12-21

0 引言

中国公路网不断向崇山峻岭、离岸深水区延伸,

公路隧道总量和建设规模持续增大。近 40 年来, 中国公路隧道由单洞 2 车道逐步向双洞 4 车道、6

车道、8 车道隧道发展^[1]。随着所建隧道的长度及宽度日趋增大，隧道内发生火灾时的危害也随之增大。隧道内通风排烟系统多采用自然排烟^[2]、纵向通风排烟^[3]及顶部排烟^[4]方式。但侧向排烟方式具有节省隧道净高、降低造价等优点，因此这一排烟方式在高度方向受限制、两孔一管廊隧道中被广泛应用^[5]。

热烟气的浮力效应为垂直向上^[6]，顶部设置排烟口有利于烟气的排出，而当排烟口位于隧道侧壁面时，排烟口开口方向与烟气浮力方向不同，在侧向排烟方式下隧道内的烟气特性将不同于以往研究。目前关于侧向排烟的研究主要是基于单洞 3 车道隧道，研究排烟量^[7]、排烟口设置^[8]、纵向风速^[9]等影响因素的最佳设置以及其对人员疏散安全的影响，而对采用侧向排烟系统的隧道在断面宽度改变后的烟气特性方面研究不足。

本文通过数值模拟研究隧道断面为不同宽度时，各行车道处拱顶处、人员高度处烟气温度的分布规律以及侧向排烟口的排烟效率，研究结果以期为火灾探测、消防救援、隧道结构设计等提供参考。

1 数值计算模型及参数设置

1.1 控制方程

火灾的发生、发展为非稳态、非定常变化的复杂的三维过程，但是流体的流动都遵循质量、动量、能量及组分守恒等基本定律，在 FDS 中的基本控制方程如下^[10]：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \tau_{ij} \quad (2)$$

组分守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} Y_i = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + m_i''' \quad (3)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} h_s = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot \rho h_{s,i} D_i \nabla Y_i \quad (4)$$

气体状态方程：

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{M}} \quad (5)$$

式中， ρ 为密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； \mathbf{u} 为速度矢量， m/s ； p 为环境压力， Pa ； \mathbf{g} 为重力加速度 m/s^2 ； \mathbf{f} 为除去重力的外力， N ； τ_{ij} 为粘性应力张量； m_i''' 为单位体积内第 i 种组分的质量生成率， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； D_i 为 i 组分质量扩散系数， m^2/s ； Y_i 为 i 组分体积分数； \mathbf{q}_r 辐射热通量向量， W/m^2 ； h_s 为显焓， J/kg ； T 为热力学温度， K ； k 为导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。 R 为气体常数， $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； \bar{M} 为气体混合物的分子量， kg/mol 。

1.2 数值模型

本文根据某隧道实际尺寸建立计算模型，为了保证在模拟中隧道内气流能达到充分的发展，建立的隧道长度为 600m，模拟时间设置为 500s。隧道出入口设置为 Open 边界，排烟道两端开口设置为 Exhaust 边界，环境温度设置为 20°C。隧道壁面材料为混凝土，该材料导热系数为 1.8W/(m·K)，比热为 1.04kJ/(kg·K)。以隧道正中位置为中心，在两侧对称位置各布置两个排烟口，排烟口尺寸为 3m×2m，排烟口间距为 60m，排烟口底部距行车道的垂直高度为 4.6m。隧道模型示意图（以单洞 4 车道隧道为例）如图 1 所示。

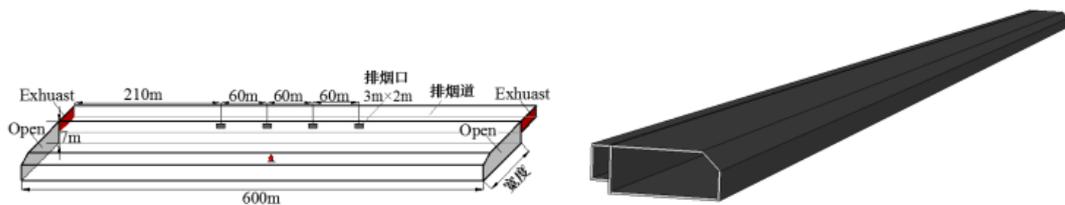


图 1 隧道模型示意图（以单洞 4 车道隧道为例）

Fig.1 Schematic diagram of the tunnel model (a single-hole four-lane tunnel as an example)

1.3 网格尺寸

在进行数值计算时，合理的网格尺寸设置可以在保证计算精度的同时节约计算时间。前人研究指

出，通过 1/4 到 1/16 倍的火源特征直径 D^* 来确定着火点附近的网格尺寸可以与试验结果很好的吻合^[11]，并且相关研究表明，火源区、浮力羽流区、烟气层

区对于网格密度的敏感程度依次递减, 加密火源区的网格可以在控制计算时间的同时有效提高计算精度^[12]。火源特征直径 D^* 由公式 (6) 计算得出:

$$D^* = \left[\frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right]^{2/5} \quad (6)$$

式中, D^* 为火源特征直径, m; Q 为总热释放速率, kW; ρ_∞ 为环境空气密度, 此处取 1.204kg/m^3 ; C_p 为环境空气比热, 此处取 $1.005\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$; T_∞ 为环境空气温度, K。

计算出火源功率 30MW 所对应的火源特征直径为 3.7m。考虑到火源附近温度梯度较大, 本文中火源附近纵向 50m 区域内采用 0.2m 的网格进行加密, 沿隧道纵向其他区域的网格尺寸为 0.4m。

1.4 火源参数

在同一时间, 考虑隧道内只发生一次火灾, 并且发生火灾的位置均位于隧道正中位置。火源功率为 30MW, 尺寸为 $8\text{m}\times 2.4\text{m}$, 使用软件自带的甲烷燃烧反应进行隧道火灾模拟。由于本文主要研究火灾发展到最大并达到稳定时隧道内的烟气特性, 所以采用恒定火源。

1.5 烟气特性参数监测

在隧道中, 拱顶及人员高度处的温度分布、排烟口处的排烟效率反映了排烟系统的排烟效果、系统性能, 关乎发生火灾时人员的安全疏散。因此, 本文对这些关键参数进行研究, 以分析在不同断面

宽度的隧道中采用侧向排烟时, 隧道内的烟气特性。温度测点在拱顶下方以及人员高度处沿隧道纵向布置, 在隧道横向方向上, 温度测点布置在第一行车道的内边沿以及各个行车道的正中位置。对于排烟效率, 本文选取 CO_2 作为参考依据, 计算 CO_2 的生成量和测定排烟口处的 CO_2 排出量, 以此得到排烟口的排烟效率。各个排烟孔的排烟效率为单位时间内该排烟孔的烟气排出量占火源产生烟气总量的百分比, 排烟系统总排烟效率为单位时间内所有排烟孔的烟气排出量占火源产生烟气总量的百分比, 即所有排烟孔排烟效率之和。

$$\eta = \frac{m_e}{m_p} \times 100\% = \sum \eta_i = \frac{\sum m_{ei}}{m_p} \times 100\% \quad (7)$$

式中: η 为排烟效率, %; m_e 为排烟孔的烟气排出量, kg/s ; m_{ei} 为第 i 个排烟孔的烟气排出量, kg/s ; m_p 为烟气产生量, kg/s 。

通过计算得到 30MW 火灾在单位时间甲烷燃烧热值为 52043.68kJ/kg , 对应的 CO_2 生成量为 1.56kg/s 。

1.6 计算工况

为研究不同隧道宽度采用侧向排烟时隧道内的烟气特性, 对单洞 2 车道、3 车道、4 车道、5 车道、6 车道隧道进行了计算模型建立。模型隧道宽度分别 10.5m、14.4m、17m、23.1m 和 28m, 高度均为 7m, 如图 2 所示。

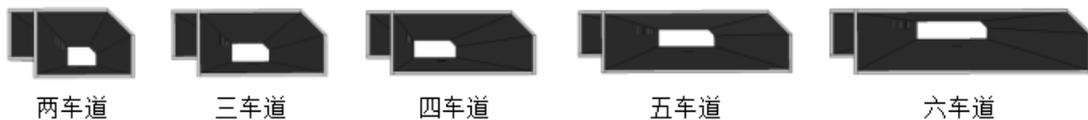


图 2 不同隧道宽度数值计算模型横截面

Fig.2 Cross-sections of numerical calculation models for different tunnel widths

如表 1 所示为不同隧道宽度数值模拟工况设置。

表 1 不同隧道宽度数值计算工况

Table 1 Numerical calculation conditions of different tunnel widths

工况	隧道宽度 (m)	单洞车道数	隧道高度 (m)
1	10.5	2 车道	7
2	14.4	3 车道	
3	17	4 车道	
4	23.1	5 车道	
5	28	6 车道	

2 计算结果与分析

2.1 拱顶烟气温度分布

如图 3 所示为不同隧道宽度下各行车道上方拱顶烟气温度对比。从图中可以看出, 同一侧向排烟量下, 隧道越宽, 同一行车道上方的拱顶烟气温度越低。特别是在两个排烟口之间, 温差明显, 在 $y=60\text{m}$ 处, 单洞 2 车道隧道与 6 车道隧道拱顶烟气温度相差 50°C 左右。当烟气经过第二个排烟口后, 温差减小, 在 $y=120\text{m}$ 处, 温差降至 20°C 左右。行车道 1 边沿 ($x=1\text{m}$) 及行车道 1 ($x=2.8\text{m}$) 离排烟口较近, 两个排烟口附近发生了温度的陡降

(见图 a、b)，这是由于排烟口不断抽吸走高温烟气。单洞 2 车道、3 车道隧道在第二个排烟口 (y=90m) 处温度陡降较其余工况更为明显，并且在单洞 2 车道隧道中，烟气在经过第二个排烟口后，温度回升，呈现出 v 型温度曲线。

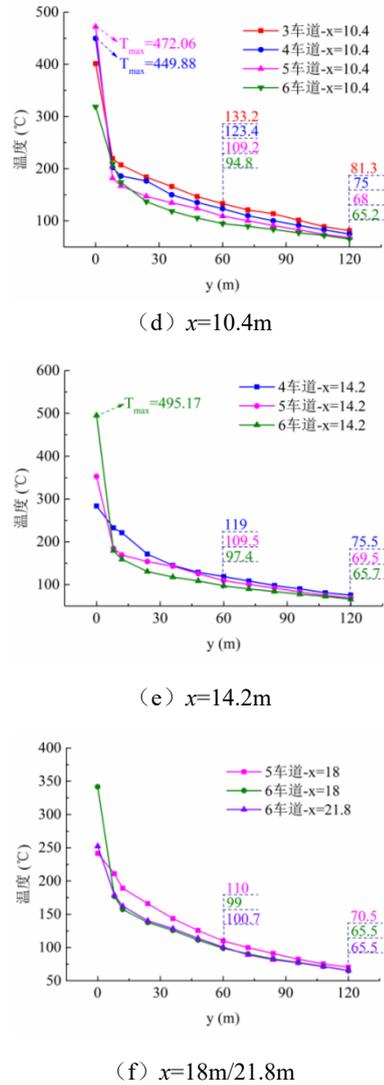
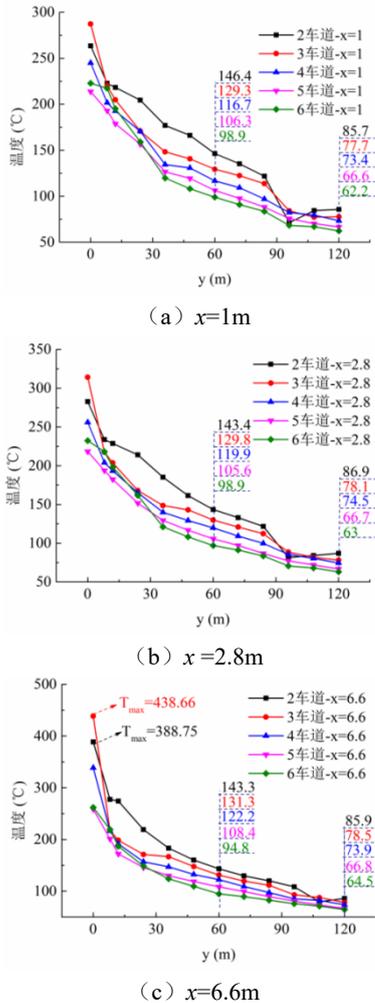


图 3 各行车道上方拱顶烟气温度纵向分布

Fig.3 Longitudinal distribution of flue gas temperature on the vault above each carriageway

表 2 火源处横向方向上拱顶烟气温度

Table 2 The vault smoke temperature in the transverse direction at the fire source

车道数	温度 (°C)					
	L_3	L_2	L_1	R_1	R_2	R_3
2 车道			282.66		388.75	
3 车道			314.21		401.47	
4 车道	排烟道位置	255.98	338.62	火源 放置位置	449.88	283.69
5 车道		218.45	258.49		352.50	241.46
6 车道		232.27	262.08		318.81	495.17

如表 2 所示为拱顶烟气温度在火源所在位置处横向方向上的分布情况，表中 L 与 R 分别代表在火源左侧及右侧各行车道上方的温度测点，其中

火源左侧 (L) 为排烟道与火源之间的横向位置。下标代表了与火源横向距离，下标越大，离火源横向距离越远，以 4 车道隧道为例， L_1 、 L_2 及 R_1 、 R_2

位置示意图如图 4 所示。由表 2 可知, 随着横向位置远离火源, 拱顶烟气温度逐渐降低。由于左侧测点离排烟道更近, 受侧向排烟作用更显著, 温度下降程度较右侧更大, 火源处的拱顶烟气温度横向分布呈“左低右高”的非对称分布形态。

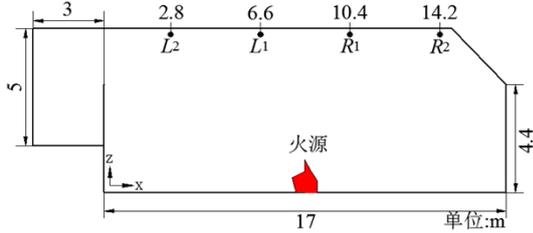
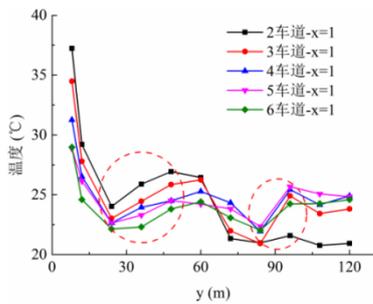


图 4 L_1 、 L_2 及 R_1 、 R_2 位置示意

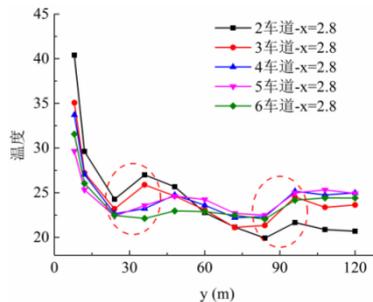
Fig.4 Location of L_1 , L_2 , R_1 , R_2

2.2 人员高度处烟气温度分布

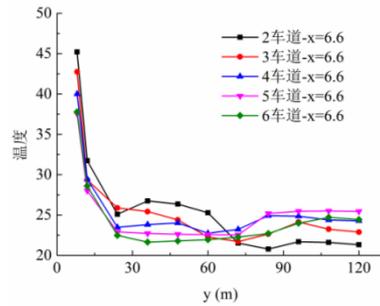
如图 5 所示为人员高度处温度纵向分布, 从图中可以看出, 在两个排烟口之间, 人员高度处温度随着隧道宽度的增加而降低, 在经过第二个排烟口后, 规律相反。由于排烟口附近的抽吸力扰动了烟气分层, 加强了卷吸, 以及在隧道纵向方向上烟气蔓延的最远端, 上层烟气与下层冷空气运动方向相反, 剪切力导致卷吸剧烈, 使人员高度处温度在这两个位置有较明显的增幅, 对于人员疏散而言, 危险性较高。



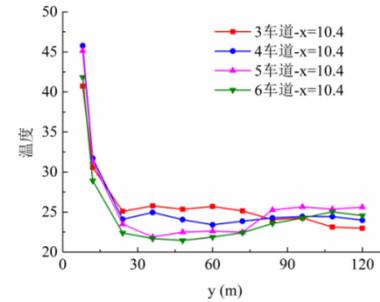
(a) $x=1m$



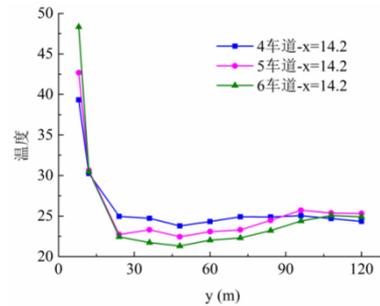
(b) $x=2.8m$



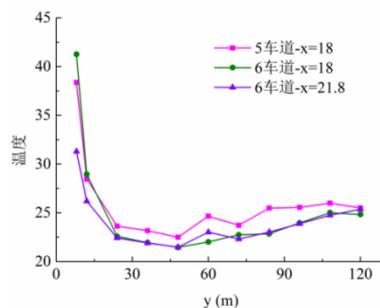
(c) $x=6.6m$



(d) $x=10.4m$



(e) $x=14.2m$



(f) $x=18m/21.8m$

图 5 人员高度处温度纵向分布

Fig.5 Longitudinal distribution of temperature at personnel height

2.3 排烟效率

如图 6 所示为不同宽度隧道采用侧向排烟方式时的排烟效率。从图 6 中可以看出, 在该排烟方

式下,排烟效率随着隧道宽度增加而降低。从单洞 2 车道隧道至 6 车道隧道,排烟效率从 89.2% 减小为 61.7%,降低了 31%。从 2 车道隧道至 3 车道隧道及从 3 车道隧道至 4 车道隧道,排烟效率的衰减率均为 8%,在此之后,衰减率随着隧道宽度的增加而增加。

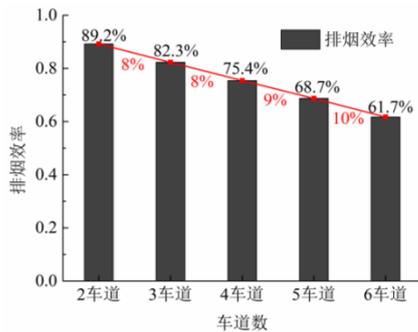


图 6 排烟效率

Fig.6 Smoke exhaust efficiency

3 结论

本文采用数值计算方法对采用侧向排烟系统的不同宽度隧道内的烟气特性进行了数值模拟研究,分析各行车道上方拱顶处、人员高度处的温度分布及排烟口处排烟效率,主要结论如下:

(1) 增加隧道宽度有利于降低拱顶烟气温度、人员高度处温度。但是增加隧道宽度也导致侧向排烟效率下降,特别当隧道行车道增加至 4 车道及以上时,排烟效率的衰减率也逐渐增大。

(2) 侧向排烟系统使火源处横向方向上拱顶温度呈非对称分布。朝向排烟道方向的拱顶温度较远离排烟道方向更低。距离排烟风机较近的排烟口抽吸力较强,在经过该排烟口后,不同隧道断面宽度下,同一行车道上方拱顶烟气温度之间的温差减弱。对于人员疏散安全来说,在烟气与冷空气卷吸严重的排烟口附近及隧道纵向方向上烟气蔓延的最远端,温度存在较明显的增幅,危险性较大。

参考文献:

- [1] 蒋树屏,林志,王少飞.2018 年中国公路隧道发展[J].隧道建设(中英文),2019,39(7):1217-1220.
- [2] Yang Zhou, Fei Chen, Jian Chen, et al. Influence of

multisource fire on temperature distribution and natural smoke exhaust effect in urban tunnels with a shaft[J]. Fire and Materials, 2020,44(5):607-608.

- [3] Min Peng, Shaogang Zhang, Hui Yang, et al. Experimental study on confinement velocity in tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2020, 201.
- [4] Lu He, Zhisheng Xu, Hongguang Chen, et al. Analysis of entrainment phenomenon near mechanical exhaust vent and a prediction model for smoke temperature in tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2018,80.
- [5] 蒋树屏,田堃,徐湃.沉管隧道火灾温度场分布规律研究——以港珠澳大桥沉管隧道为例[J].隧道建设(中英文),2018,38(5):719-729.
- [6] J Ji, Z H Gao, C G Fan, et al. Large Eddy Simulation of stack effect on natural smoke exhausting effect in urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013,66:531-542.
- [7] 周家才,盛萍,周明明.排烟口间距对双层隧道侧向排烟效果的影响研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(7):254-256.
- [8] 姜学鹏,吴锦东,王宝伟.侧部集中排烟隧道排烟量优化研究[J].工业安全与环保,2018,44(11):6-9,100.
- [9] 李钰,蔡世杰,朱凯强.隧道侧壁排烟烟气特征的数值模拟[J].大连交通大学学报,2016,37(3):68-72.
- [10] Kevin McGrattan. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide [M]. NIST Special Publication, 2007.
- [11] Shengzhong Zhao, Fang Liu, Fei Wang, et al. A numerical study on smoke movement in a metro tunnel with a non-axisymmetric cross-section[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2018,73:187-202.
- [12] 祝实,霍然,胡隆华,等.网格划分及开口处计算区域延展对 FDS 模拟结果的影响[J].安全与环境学报,2008,(4):131-135.