

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.05.004

## 隧道纵坡对烟气逆流层长度的影响研究

张楚旋<sup>1</sup>, 易冬福<sup>2</sup>, 彭怀德<sup>1\*</sup>

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 娄底职业技术学院  
安全培训与技术服务中心, 湖南 娄底 417000)

**摘要:**基于纵坡坡度对隧道火灾烟气逆流层长度影响的重要性,本文以某实际隧道工程为研究对象,借助FDS5.0软件对不同坡度时该隧道火灾烟气逆流层长度进行数值模拟研究。从其他文献中总结出烟气逆流层长度随坡度和通风风速变化的规律。根据数值模拟数据分析拟合出新的坡度隧道临界风速的坡度修正公式,该公式完全满足关于逆流层长度受纵坡影响的规律,并较已知经验公式更好地与试验数据相符合,能更好地指导设计人员对隧道纵坡的选取。

**关键词:**隧道火灾;隧道坡度;数值模拟;经验公式;逆流层长度

**中图分类号:**X928.7;U459.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2019)05-0024-06

## Study of Influence on the Smoke Backflow Distances with Different Longitudinal Gradient in Tunnels

ZHANG Chuxuan<sup>1</sup>, YI Dongfu<sup>2</sup>, PENG Huaide<sup>1\*</sup>

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Safety Training & Technical Service Center, Loudi Vocational and Technical College, Loudi, Hunan 417000, China)

**Abstract:** Based on the importance of longitudinal slope gradient on length of smoke backflow distances in tunnel fire, one tunnel was taken as the research object in this paper. Through the software FDS5.0, the numerical analysis of smoke backflow distances, produced by fire hazard in tunnels with different slopes, was conducted. The variation laws of smoke backflow distances and ventilation speed were concluded by referring other references, after which a new slope correction formula of gradient tunnel with critical ventilation

收稿日期:2019-04-08

基金项目:湖南省教育厅一般项目(17C1375);湖南省核燃料循环技术与装备协同创新中心开放基金项目(2019KFQ02)

作者简介:张楚旋(1988-),女,讲师,博士,主要从事岩土工程灾害及控制方面的研究。E-mail:82332390@qq.com。

\*通信作者:彭怀德(1986-),男,讲师,博士,主要从事隧道检测及灾害控制方面的研究。E-mail:2388071376@qq.com

speed was obtained by numerical simulation and data analysis. It is revealed that the formula is in line with the law that the distance of backflow is affected by the longitudinal gradient. Further, compared with empirical formulas, it conforms to experimental data better. Therefore, this formula is capable of guidance in selecting longitudinal gradient of tunnels in design.

**key words:** tunnel fire; the tunnel slopes; numerical simulation; empirical formula; smoke backflow distances

## 0 引言

随着近几十年我国经济社会的飞速发展,西南山区在交通基础设施建设的投入逐年增加。山区修建公路与平原地区不一样,为了保证运输的经济效益,往往采用建设隧道、桥梁的形式来缩短公路运营里程,且能够提高行驶舒适性减少公路建设对环境的破坏。隧道建成之后,运营期间难免会发生意外引起火灾,如果控制不当,会对社会财产造成巨大的损失<sup>[1-2]</sup>。

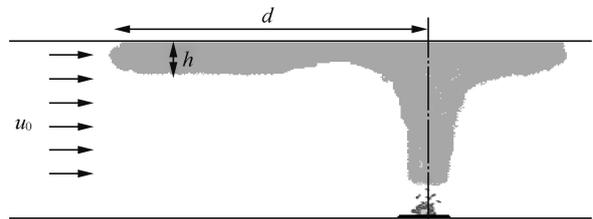
火灾发生时对人体影响最大的就是有毒烟气,如果是发生在长大隧道中,燃烧引起的烟气逆流现象更是直接影响着火地点上风向部位的安全。就隧道火灾而言,隧道火灾中烟气逆流层的长度及临界风速是当前研究人员关注的热点。国内外诸多科研人员对火羽流与纵向通风风流之间的相互作用对火灾临界风速的影响进行研究,分别从理论分析、软件模拟、实验室测试等方面计算临界风速的大小<sup>[3-5]</sup>。而在关于烟气逆流层长度方面的研究表明,火羽流与风流的作用只是对该长度有影响的一个方面,逆流烟气与风流之间的作用关系也会对烟气逆流层长度产生较大的影响。尽管国内外已经有很多学者对烟气逆流问题进行了探索,但在纵坡坡度对烟气逆流问题影响方面的研究很少,而这恰恰是在设计阶段就需要提前进行研究的一个问题<sup>[6-7]</sup>。

根据《公路路线设计规范》,长度在100 m以上的隧道纵坡一般应大于0.3%且小于3%,特殊条件下最大纵坡也不宜大于4%<sup>[8]</sup>。隧道发生火灾时,不同的纵坡引起的浮力效应不一样。烟气的传播速度也与坡度大小及方向密切相关,燃烧产生的有毒有害气体浓度、引起的温度变化、能见度等也与坡度大小相关性较高,且呈现一定的规律性<sup>[9]</sup>。因此,在道路设计的前期工作时,对坡度与火灾烟气逆流层长度之间的关系进行研究非常重要,对减轻运营期事故损失和人员伤害极具意义。

## 1 烟气逆流层研究进展

### 1.1 烟气逆流原理

运营隧道一旦发生火灾,燃烧产生的烟气会在纵向风力作用下沿着特定方向蔓延,当火源功率及烟流温度达到稳定状态后,烟气层会呈现分层状态,学者们称之为烟气逆流现象,如图1所示。



$u_0$  为通风风速,  $h$  为烟气厚度,  $d$  为逆流层长度

图1 烟气逆流现象示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flue gas countercurrent phenomenon

大部分隧道采用的是自然通风,发生火灾的时候烟气在空气浮力作用下往隧道两侧蔓延,温度逐渐衰减直到纵向自然风作用力与烟气前锋的驱动力一样的情况下,烟气逆流前锋所处位置距火灾发生地点的距离就是“烟气逆流距离”<sup>[10]</sup>。该距离可通过以下公式计算得到:首先,根据烟气滞止处纵向风所产生的动压等于静压差,而静压差由周围空气与烟气前锋的密度差产生,故计算公式如式(1):

$$\Delta P_s = \Delta \rho g h \quad (1)$$

式中,  $\Delta P_s$  为静压差,  $\Delta \rho$  为周围空气与烟气前锋的密度差,  $g$  为重力加速度,  $h$  为烟气厚度。

纵向风所产生的动压为:

$$P_h = \frac{1}{2} \rho_0 u^2 \quad (2)$$

式中,  $P_h$  为纵向风动压,  $\rho_0$  为周围空气密度,  $u$  为纵向风速。

由于  $\Delta P_s$  与  $P_h$  相等,联立式(1)、(2)可得:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{u^2}{2gh} \quad (3)$$

假设火灾烟气为理想气体,则有:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T_0} \quad (4)$$

式中  $\Delta T$  为烟气相对于通风气流的温差,  $T_0$  为通风气流温度。

将式(4)代入式(3),得到:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{u^2}{2gh} \quad (5)$$

从式(5)可知,烟气逆流距离与多个因素有关,主要包括烟气前锋和周围空气温差、烟气层厚度、纵向风速等。其中环境温度、纵向风速可用仪器测定,预测烟气前锋在不同位置的烟气层厚度和温度就能计算烟气逆流距离。

## 1.2 逆流长度理论模型构建

### 1) 烟气层厚度模型

隧道火灾发展到一定程度,烟气会趋于稳定,烟气层分布类似于下图中的分层状态。烟气逆流前锋的厚度  $h$  计算经验公式为<sup>[11]</sup>:

$$h = 0.56 \left( \frac{\dot{m}}{B^2 r (r_0 - r)} \right)^{1/3} \quad (6)$$

式中  $\dot{m}$  为热烟气的质量流量,  $B$  为隧道直径,  $r_0$  为空气比重,  $r$  为热烟气比重。

一般来说,隧道火灾热烟气温度范围处于 50 ~ 1 000 °C,此时  $[r(r_0 - r)]^{1/3} = 0.5 \sim 0.7$ ,常取 0.56 简化公式(6)。

$$h = (\dot{m}/B^2)^{1/3} \quad (7)$$

其中  $\dot{m}$  为烟气羽流质量流量, Zukoski 根据隧道轴对称的特点提出隧道羽流质量流量预测经验公式<sup>[12]</sup>:

$$\dot{m} = 0.21 \left( \frac{\rho_0^2 g}{C_p T_0} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3} \quad (8)$$

式中  $\dot{Q}_c$  为对流热量,即对流所占火源总热释放速率的部分,一般取  $0.7\dot{Q}$ ,  $\dot{Q}$  为火源总热释放速率,  $z$  为可燃物边缘到计算点的距离。

在环境条件温度为 22 °C,气压为  $10^5$  Pa 的情况下,式(8)可简化为:

$$\dot{m} = 0.076 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (9)$$

式(9)代入式(7)可得烟气层厚度表达式为:

$$h = \left( \frac{0.076 \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3}}{B^2} \right)^{1/3} \quad (10)$$

### 2) 隧道拱顶最高温度模型

国内外科研人员意识到研究拱顶烟气温度及

其纵向衰减规律对隧道火灾控制及救援的重要性, Kurioka 等<sup>[13]</sup>人采用不同尺寸模型研究了纵向风速对隧道火灾情况下近火源区域特征的影响,得到可用于预测拱顶最高温度的经验公式:

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_a} = \gamma \left( \frac{Q'^{2/3}}{F_r^{1/3}} \right)^\varepsilon \quad (11)$$

无量纲火源热释放速率  $Q'$  定义为:

$$Q' = Q / (\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} H_d^{5/2})$$

$F_r$  定义为:

$$F_r = u^2 / (g H_d)$$

式中  $Q$ ,  $\rho_0$ ,  $T_0$ ,  $u$  和  $H_d$  分别为热释放速率、周围空气密度、周围空气温度、纵向通风风速和火源面至拱顶距离。常数  $\gamma$  和  $\varepsilon$  可由下式确定:

当  $Q'^{2/3} / F_r^{1/3} < 1.35$  时,  $\gamma = 1.77$ ,  $\varepsilon = 1.2$ ;

当  $Q'^{2/3} / F_r^{1/3} \geq 1.35$  时,  $\gamma = 2.54$ ,  $\varepsilon = 0$ 。

### 3) 温度衰减模型

胡隆华在全尺寸隧道火灾试验中不但验证了 Kurioka 氏拱顶最高温度经验公式,还对烟气逆流前锋和周围温度之间的无量纲温升与火源距离的相互关系进行了总结,认为着火点下游  $x$  m 处烟流温度计算如下<sup>[14]</sup>:

$$T_x = T_0 + \Delta T_{\max} \exp\left(-\frac{kCx}{mc_p}\right) \quad (12)$$

式中:  $\Delta T_{\max}$  为着火点的最大温升,  $T_0$  为通风气流温度,  $T_x$  为离着火点  $x$  m 处的烟流温度,  $\dot{m}$  为热烟气的质量流量,  $C$  为隧道周长,  $C_p$  为定压比热容,  $k$  为隧道对流换热系数(一般取值 22 ~ 30.6,本次研究根据经验取中间值 26.3)。

由式(11)与式(12)可得烟气逆流层长度计算公式:

$$x = \frac{mc_p \ln\left(\frac{2gh\Delta T_{\max}}{T_0 u_0^2}\right)}{kC} \quad (13)$$

式(13)中代入烟气层厚度、Zukoski 烟气质量流量预测经验公式得烟气逆流层长度计算经验公式:

$$x = 0.063 \frac{Q^{1/3} H_d^{5/3} c_p \ln 0.637 \frac{g H_d^{5/9} Q^{1/9} \Delta T_{\max}}{B^{2/3} T_0 u_0^2}}{kC} \quad (14)$$

但是,以上计算公式中并未涉及坡度变化对烟气逆流层长度的影响。因此,本文在前人研究的基础上,进行了缩小尺寸模型试验研究,对隧道纵坡坡度修正系数进行拟合,探索一定尺寸条件下纵坡坡度对隧道烟气逆流层长度的影响。

## 2 烟气逆流层数值模拟

### 2.1 隧道模型简介

FDS (fire dynamics simulator) 模拟软件是一款基于大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 的三维计算流体动力学软件 (computational fluid dynamics, CFD), 常用于模拟火灾湍流流动过程, 经过大量试验的验证可用于火灾科学领域<sup>[15]</sup>。本次研究借助该软件, 以国内某隧道为原型进行模拟, 选择的隧道模型尺寸与实际隧道尺寸比例约为 1:9, 模型与实体隧道横断面尺寸对比如表 1 所示。

表 1 横截面尺寸对比表

横截面尺寸	截面内径	内轨顶面至顶部高度	当量直径
实体隧道	9.80	8.6	8.35
模型隧道	1.1	0.97	0.93

### 2.2 温度采集系统

在隧道拱顶下每间隔 1 m 处布置 1 个热电偶, 用于监测纵向气温分布情况及火灾烟气沿纵坡蔓延情况; 行车道方向间隔 5 m 布置一个测温截面, 每个截面布置 6~9 个热电偶不等, 用于监测温度在隧道断面上的变化情况, 隧道模型主视图及电偶布置示意图如图 2 所示。

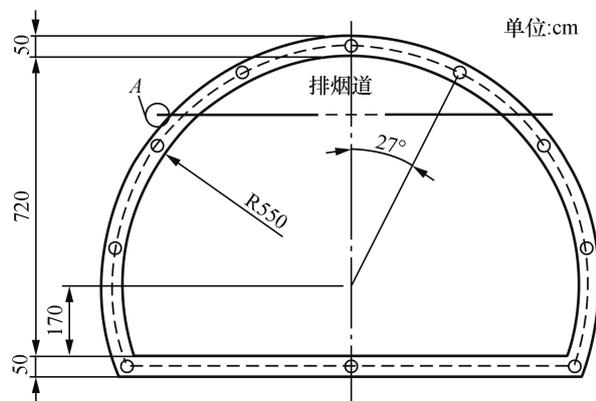


图 2 隧道模型主视图

Fig. 2 Front view of the tunnel model

### 2.3 模拟工况设定

本次模拟主要为了研究不同通风速率下烟气逆流层长度与隧道坡度的关系, 模拟设定工况根据公路路线设计规范取坡度为 3% 以内。以坡度

为 -3% 为例, 模拟序号 SN01 至 SN04 分别表示坡度  $i = -3%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况, 如表 2 所示。模拟序号 SN05 至 SN08 分别表示坡度  $i = -2%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况; 模拟序号 SN09 至 SN12 分别表示坡度  $i = -1%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况; 模拟序号 SN13 至 SN16 分别表示坡度  $i = 0%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况; 模拟序号 SN17 至 SN20 分别表示坡度  $i = 1%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况; 模拟序号 SN21 至 SN24 分别表示坡度  $i = 2%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况; 模拟序号 SN25 至 SN28 分别表示坡度  $i = 3%$  情况下, 纵向通风速率 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 的工况, 受限于文章篇幅不一列出。

表 2 模拟工况表

模拟序号	火源功率 /MW	坡度 $i$	纵向通风速率 / (m · s <sup>-1</sup> )
SN01	15	-3%	1
SN02	15	-3%	2
SN03	15	-3%	3
SN04	15	-3%	4

注: 表中坡度定义为上坡为+, 下坡为-。

### 2.4 试验结果及分析

根据间距为 1 m 的热电偶对温度的监测, 将最远那个采集到温升的热电偶与着火点的距离认定为烟气逆流距离。软件模拟所得各工况逆流层长度如图 3 所示, 实验测得逆流层长度如图 4 所示。

从图 3, 图 4 对比可看出: 纵向通风速率较小且不变的情况下, 坡度增加 ( $i$  从 -3% → +3%) 则烟气逆流层长度会渐渐减小。纵向通风速率的增加会削弱坡度对烟气回流的影响, 坡度不变的情况下, 纵向通风速率增加烟气逆流长度呈线性下降, 当风速达到 4 m/s 时, 纵坡对着火点上游回流现象几乎没有影响, 烟气层只沿着下风向流动。

### 2.5 烟气逆流层长度理论模型验证

根据模拟设定工况, 对公式 (14) 中零坡状态下烟气逆流层长度计算经验公式取环境温度为 20 °C, 隧道当量直径  $B$  为 8.35 m, 隧道周长  $C$  为

31.57 m,定压比热容  $c_p$  为 1 004 J/(kg · K)。但是,该经验公式中未考虑坡度变化对隧道拱顶最高温度的影响,在非零坡状态下经验公式所得拱顶最高温度值与实际值会出现较大不符。故本次研究假定烟气逆流层长度为  $x' = k_g x$ ,根据模拟数据分别对不同纵向通风风速下各坡度  $x'/x$  进行做图,结合模拟数据对原烟气逆流层长度计算经验公式进行坡度修正,修正后的逆流层长度如图 5 所示。

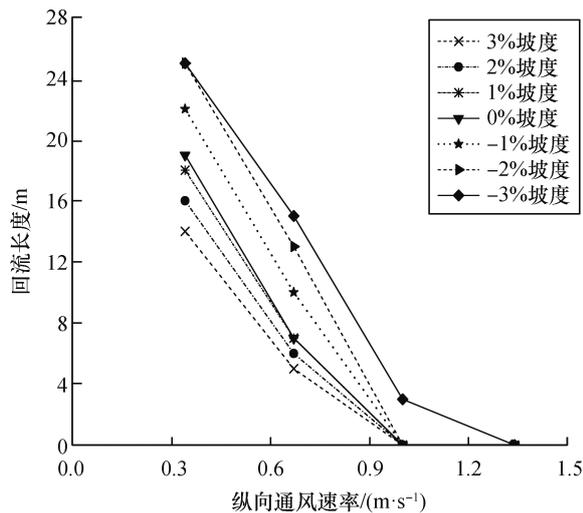


图 3 模拟逆流层长度

Fig. 3 Smoke backflow distances in the experiment

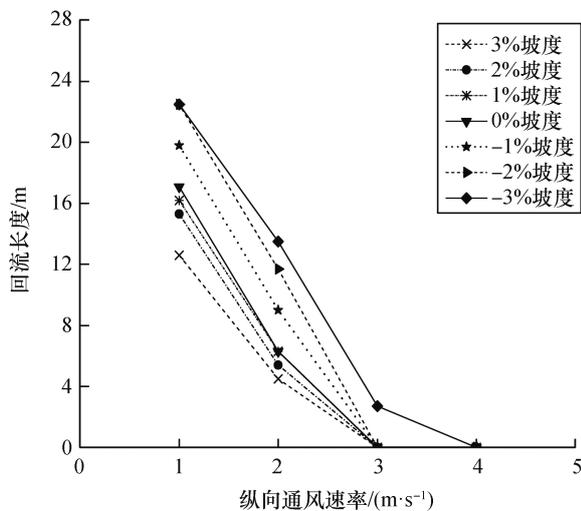


图 4 实际逆流层长度

Fig. 4 Actual value of smoke backflow distances

由图 5 可以看出不同纵向风速下,坡度隧道和零坡隧道烟气逆流层长度的比值与纵坡大小的关系。根据以上模拟结果可拟合出坡度隧道临界风速的坡度修正公式为  $k_g = 1.219 + 0.113i$ , ( $i$  为

纵坡,上坡为+,下坡为-),推导出烟气逆流层长度修正公式为  $x' = (1.219 + 0.113i)x$ 。

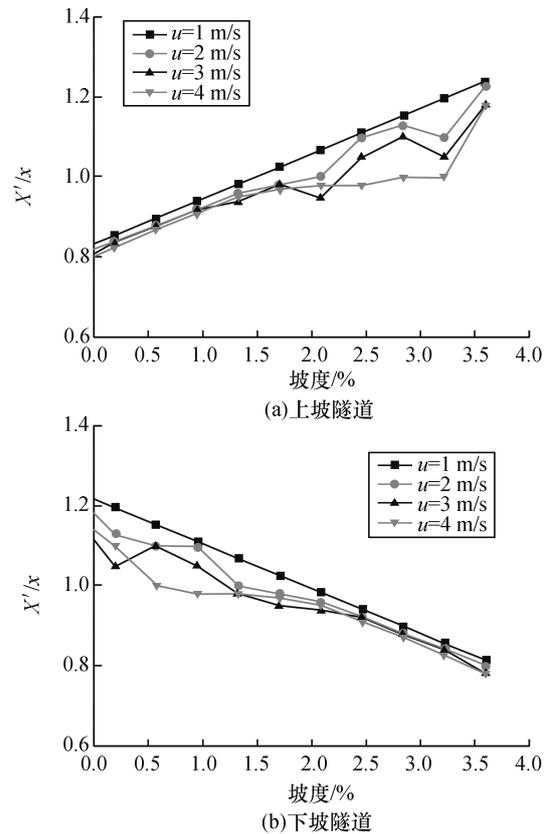


图 5 修正后的逆流层长度

Fig. 5 Smoke backflow distances of after modification

### 3 结论

本研究通过 FDS5.0 对不同坡度隧道的临界风速进行模拟,研究了坡度对隧道火灾烟气逆流层长度的影响,得出的主要结论如下:

1) 由模拟结果数据分析可知,纵向通风速率不变情况下,随着坡度的增大烟气逆流层长度逐渐减小;纵坡不变情况下,随着纵向通风速率的增加回流长度近似线性地下降;当风速达到 4 m/s 时,火区上游均未发生回流现象,烟气层只向火灾下风向流动;

2) 在前人研究基础上提出了烟气逆流层长度的坡度修正公式,研究结论对指导设计人员在隧道纵坡的选取及隧道通风设计有实际意义,但是尚缺少实际火灾数据佐证;

3) 本次模拟尚未考虑列车行驶对烟气的影响,有待更进一步地完善相关的研究。

## 参考文献:

- [1] KHATTRI S K. From small-scale tunnel fire simulations to predicting fire dynamics in realistic tunnels[J]. *Tunnelling & underground space technology*, 2017, 61(3): 198-204.
- [2] TIAN X, ZHONG M, SHI C, et al. Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends[J]. *Applied thermal engineering*, 2017, 116(1): 233-243.
- [3] LI M X, ZHANG Z J, MILKE J, et al. Experimental research on the smoke control system in a complex road tunnel fire [J]. *Procedia engineering*, 2018, 211(2): 379-387.
- [4] 徐志胜, 赵红莉, 李洪, 等. 水平隧道火灾临界风速的理论模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(3): 1138-1143.
- [5] WANG J H, NIE Q M, FANG Z, et al. CFD simulations of the interaction of the water mist zone and tunnel fire smoke in reduced-scale experiments[J]. *Procedia engineering*, 2018, 211(2): 726-735.
- [6] 任炳旭, 魏作安, 杨永浩. 设排烟道隧道的烟气逆流长度与临界风速研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(增刊1): 387-392.
- [7] WANG H Y. Prediction of soot and carbon monoxide production in a ventilated tunnel fire by using a computer simulation[J]. *Fire safety journal*, 2009, 44(3): 394-406.
- [8] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路路线设计规范: JTG D20-2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017: 36-41.
- [9] 王明年, 杨其新, 袁雪勘, 等. 公路隧道火灾情况下风压场变化的模型试验研究[J]. *公路交通科技*, 2004, 21(3): 60-63.
- [10] 朱凯, 程旭东, 张少刚, 等. 阻塞条件下地铁隧道坡度对烟气逆流长度影响研究[J]. *火灾科学*, 2017, 26(3): 157-167.
- [11] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995: 157-168.
- [12] ZUKOSKI E E, KUBOTA T, CETEGEN B. Entrainment in fire plumes [J]. *Fire safety journal*, 1981, 3(3): 107-121.
- [13] KURIOKA H, OKA Y, SATOH H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels [J]. *Fire safety journal*, 2003, 38(4): 319-340.
- [14] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学: 2006: 56-71.
- [15] YU L X, BEJI T, MARAGKOS G, et al. Assessment of numerical simulation capabilities of the fire dynamics simulator (FDS 6) for planar air curtain flows[J]. *Fire technology*, 2018, 54(3): 583-612.

(责任编辑:周泉)