

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-398-06

# 连续隧道洞口间烟气扩散特性研究

邱浩<sup>1</sup> 曾仕豪<sup>2</sup> 袁中原<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司 成都 610056)

**【摘要】** 当上下游隧道的洞口间距较短时, 上游隧道的火灾烟气可能扩散至下游隧道, 对下游隧道造成影响。采用 CFD 数值模拟方法建立连续隧道模型, 对不同纵向风速、不同火源位置、不同热释放率、不同洞口间距以及不同横向风速下的烟气窜流情况进行模拟分析。结果表明: (1) 上游隧道纵向风速的增大将导致烟气往下游隧道方向水平扩散的距离增大, 因此, 烟气的窜流量增大; (2) 火源距离上游隧道出口越远, 热释放率越小, 上游隧道出口处烟气温度就越低, 烟气的水平惯性力上升, 更容易窜流至下游隧道; (3) 烟气窜流随着洞口间距的增大而不断减弱, 当洞口间距足够大时, 不会出现烟气窜流的现象; (4) 当存在横向风时, 洞口间烟气的流动轨迹会发生偏移, 并且烟气窜流会随横向风速的增大而减弱。

**【关键词】** 连续隧道; 火灾烟气; 数值模拟; 烟气窜流

中图分类号 U459.2 文献标识码 A

## Study on Smoke Diffusion Characteristics between Continuous Tunnel Portals

Qiu Hao<sup>1</sup> Zeng Shihao<sup>2</sup> Yuan Zhongyuan<sup>1</sup>

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

2. The IT Electronics Eleventh Design & Research Institute Scientific and Technological Engineering Co., Ltd, Chengdu, 610056)

**【Abstract】** When the distance between the openings of the upstream and downstream tunnels is short, the fire smoke from the upstream tunnel may spread to the downstream tunnel, which will affect the downstream tunnel. In this study, the CFD numerical simulation method is used to establish a continuous tunnel model to simulate and analyze the flue gas channeling under different longitudinal wind speeds, different fire source locations, different heat release rates, different hole spacing and different transverse wind speeds. The results show that: (1) the increase of the longitudinal wind speed in the upstream tunnel will lead to the increase of the horizontal diffusion distance of the flue gas in the downstream direction of the tunnel, so the flue gas channeling flow will increase; (2) The farther the fire source is from the upstream tunnel exit, the smaller the heat release rate, the lower the flue gas temperature at the upstream tunnel exit, the higher the horizontal inertia force of the flue gas, and the easier it is to flow to the downstream tunnel; (3) The flue gas channeling decreases with the increase of the hole spacing. When the hole spacing is large enough, the phenomenon of flue gas channeling will not occur; (4) When there is transverse wind, the flow path of flue gas between openings will shift, and the flue gas crossflow will weaken with the increase of transverse wind speed.

**【Keywords】** continuous tunnel; fire smoke; numerical simulation; flue gas channeling

## 0 引言

随着我国经济的迅速发展, 公路和隧道建设也

进入了快速发展阶段<sup>[1]</sup>。由于隧道空间相对封闭, 一旦发生火灾对于隧道运营和人员安全将造成极

作者简介: 邱浩 (1997.02-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: qiuha020220@163.com

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-21

大威胁。目前公路隧道通风已经有多种系统<sup>[2]</sup>, 其中纵向式通风对整个火灾区域的烟雾控制能力较好, 且建设成本低, 控制方便<sup>[3]</sup>, 是隧道通风的重要方式<sup>[4]</sup>, 大部分隧道多采用纵向通风<sup>[5]</sup>。

在公路路段上可能出现两座或两座以上纵向间隔距离较短的隧道, 被称作连续毗邻隧道<sup>[6]</sup>, 下文简称连续隧道。对于洞口间距较短的连续隧道, 当上游隧道发生火灾时, 烟气在纵向通风风速的作用下可能窜流至下游隧道, 对下游隧道造成影响。

大部分学者的研究都重点关注连续隧道的污染物窜流, 彭建康<sup>[7]</sup>等人研究了连续隧道出口污染物扩散对下游隧道的影响。张脩<sup>[8]</sup>等人研究了白家山毗邻隧道无风和有风时的污染物扩散情况。章立峰<sup>[9]</sup>等人研究了山谷风速和风向等不同因素对连续隧道污染物窜流量的影响。也有少数学者针对连续隧道烟气窜流做过研究, 董启伟和李俊梅<sup>[10]</sup>等人运用理论分析和数值模拟的方法研究了连续隧道发生火灾时的安全间距, 为连续隧道的间距设计提供了参考。王强<sup>[11]</sup>等人利用缩尺实验研究了连续隧道发生火灾时的三种烟气窜流模式, 提出了临界窜流风速公式模型。

综上所述, 有关连续隧道烟气窜流问题的研究还较少, 已有的研究也未具体分析烟气窜流的特性和影响因素。本文主要通过 STAR-CCM+数值模拟的方法研究连续隧道洞口间烟气扩散的特性。

## 1 数值计算模型

### 1.1 模型建立

本文依据某连续隧道的结构建立连续隧道火灾三维数值计算模型, 隧道断面由矩形和半圆组成, 矩形长 12m、宽 1.4m, 半圆半径为 6m, 如图

1 所示。为考虑流动的充分发展, 上游隧道长度及洞口间距根据模拟工况设定, 下游隧道长度为 120m, 计算域取洞口两侧和上方 60m, 忽略山谷部分, 建立的三维模型如图 2 所示。

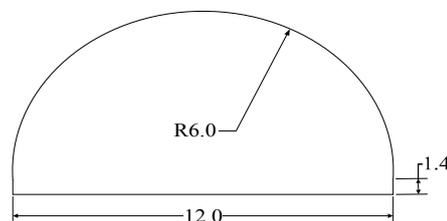


图 1 隧道截面尺寸

Fig.1 Tunnel section size

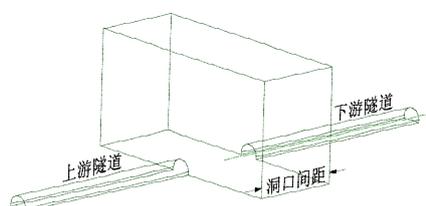


图 2 连续隧道模型

Fig.2 Continuous tunnel model

火源热释放速率采用  $t^2$  模型, 如下所示:

$$Q = \alpha t^2 \tag{1}$$

式中,  $Q$  为火灾热释放速率;  $t$  为时间;  $\alpha$  为火灾增长系数。

参照 NFPA, 公路火灾一般为超快速火灾类型, 因此, 将  $\alpha$  取作 0.1876, 火源尺寸取为  $4\text{m} \times 2\text{m} \times 1.5\text{m}$ , 热释放率和火源位置根据工况设定。通过文献<sup>[12]</sup>计算可知, 5MW、20MW 和 50MW 下的临界风速分别为 2.2m/s、3.5m/s 和 3.7m/s。

本文设定的模拟计算工况如表 1 所示。

表 1 模拟工况表

Table 1 Simulation condition table

工况编号	上游隧道长度/m	火源距离上游隧道出口/m	热释放率/MW	纵向风速/m·s <sup>-1</sup>	洞口间距/m
Z1	120	60	5	2.2	50
Z2	120	60	5	3.7	50
Z3	120	60	20	3.5	50
Z4	120	60	20	3.5	100
Z5	120	60	20	3.5	150
Z6	120	60	20	3.7	50
Z7	120	60	50	3.7	50

续表 1 模拟工况表

工况编号	上游隧道长度/m	火源距离上游隧道出口/m	热释放率/MW	纵向风速/m·s <sup>-1</sup>	洞口间距/m
Z8	700	600	20	3.5	50
Z9	1500	1400	20	3.5	50
Z10	5100	5000	20	3.5	50

### 1.2 网格划分

本文采用 STAR-CCM+ 进行数值模拟，其具有强大的网格划分功能，提供了多面体、切割体和棱柱层等网格生成器，本文采用多面体和棱柱层网格生成器。为了兼顾计算时间和精度，本文采用 0.1D\* 的网格尺寸进行网格划分，网格划分结果如图 3 所示。

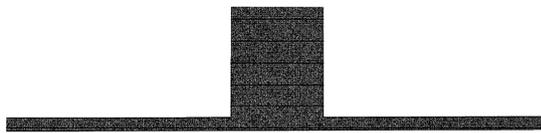


图 3 网格划分结果

Fig.3 Meshing Results

### 1.3 边界条件

隧道壁面、山体壁面以及地面均设置为壁面边界，初始环境温度为 20℃，上游隧道进口设置为速度边界，保持设定的纵向通风风速不变，下游隧道出口以及与大气相接触表面均设置为压力出口边界。当研究横向风时根据需要将对应界面设置为速度进口边界。

### 1.4 可靠性验证

为了验证数值计算方法的准确性，本文搭建了 1:20 的缩尺连续隧道模型进行实验验证。实验的上下游隧道尺寸一致，分别为 2.5m×0.25m×0.25m，热电偶布置如图 4 所示，火源燃烧所用燃料为甲烷，环境温度为 30℃。选取火源位于距隧道进口 0.65m 处，热释放率为 2.54KW，临界风速为 0.53m/s，洞口间距为 0.3m 的工况，对比温度分布如图 5 和图 6 所示，由图可知模拟结果与实验结果的误差很小。因此，本文采用 STAR-CCM+ 进行模拟计算研究可行。

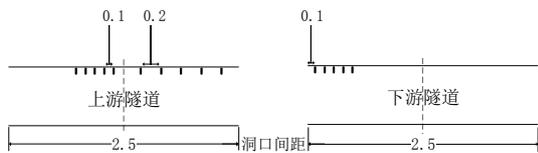


图 4 测点布置 (单位: m)

Fig.4 Measuring point layout (unit: m)

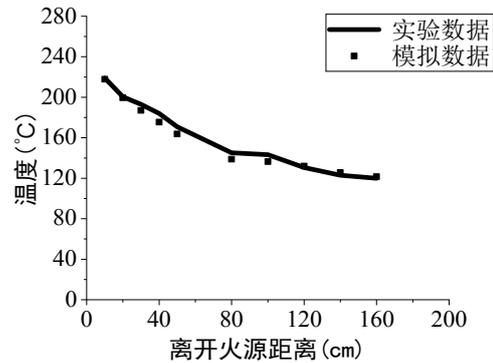


图 5 纵向温度分布 (上游隧道)

Fig.5 Longitudinal temperature distribution (upstream tunnel)

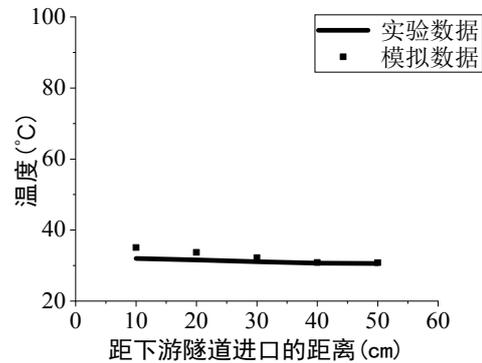


图 6 纵向温度分布 (下游隧道)

Fig.6 Longitudinal temperature distribution (downstream tunnel)

## 2 结果与讨论

### 2.1 纵向风速对烟气窜流的影响

根据隧道温度场稳定前后的状态，隧道火灾发展可分为火灾初始阶段和火灾稳定阶段<sup>[10]</sup>。

不同纵向风速下的计算工况为 Z1 和 Z2。火灾发生至 120s 时的烟气浓度如图 7 所示，从图中可以看出，由于火灾初始阶段的烟气温度较低，上游隧道出口处烟气在水平惯性力的作用下均会窜流至下游隧道，并且窜流量会随着纵向风速的增大而增大。

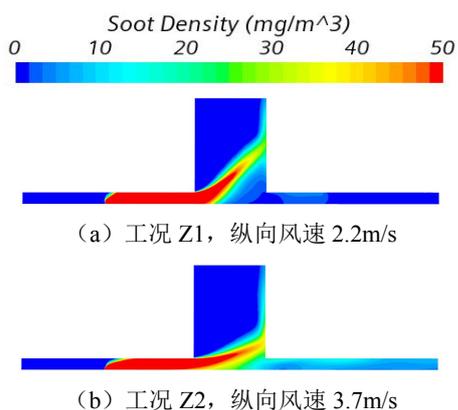


图 7 不同纵向风速下火灾初始阶段的烟气扩散情况

Fig.7 Smoke diffusion at the initial stage of fire under different longitudinal wind speeds

火灾温度场稳定后的烟气浓度如图 8 所示, 从图中可以看出, 由于温度场稳定后的烟气温度较高, 即使纵向风速达到 3.7m/s, 烟气在热浮力的作用下仍然不会窜流至下游隧道, 而是浮升至大气环境。并且随着纵向风速的增大, 烟气往下游隧道方向水平扩散的距离也会增大。

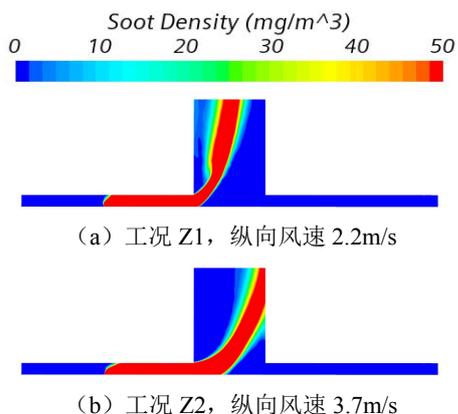


图 8 不同纵向风速下温度场稳定后的烟气扩散情况

Fig.8 Smoke diffusion after temperature field stabilization under different longitudinal wind speeds

## 2.2 火源位置对烟气窜流的影响

不同火源位置下的计算工况为 Z3、Z8、Z9 和 Z10。火灾初始阶段的烟气浓度如图 9 所示, 从图中可以看出, 由于火灾初始阶段的烟气温度较低, 上游隧道烟气在较强的水平惯性力作用下会窜流至下游隧道, 并且窜流量会随火源距上游隧道出口距离的增大而增大。这是因为火源距离上游隧道出口越远, 上游隧道出口处烟气温度就越低, 烟气向下游水平扩散获得的惯性力就越大, 窜流增强。

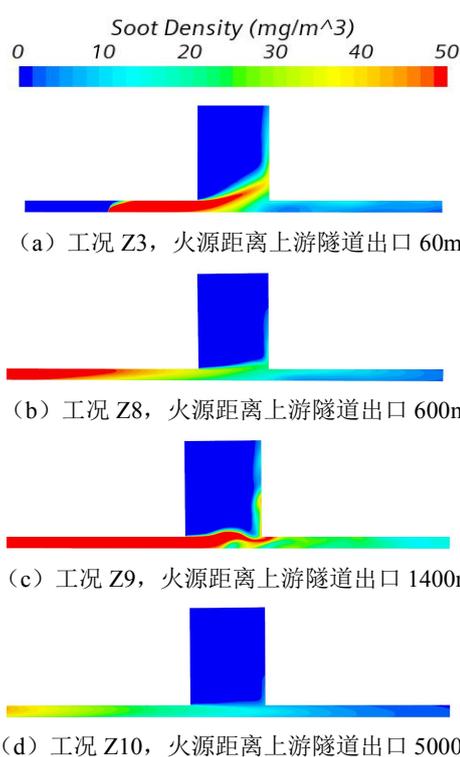
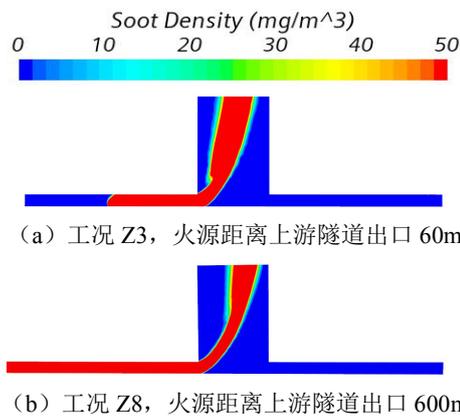


图 9 不同火源位置下火灾初始阶段的烟气扩散情况

Fig.9 Smoke diffusion at the initial stage of fire under different fire source locations

火灾温度场稳定后的烟气浓度如图 10 所示, 从图中可以看出, 由于火灾的充分燃烧, 温度场稳定后的烟气温度大幅升高, 热浮力对烟气流动的作用明显增强, 因此, 火源距离上游隧道出口 60m~1400m 工况下的洞口间烟气均直接浮升至大气环境, 不会窜流至下游隧道。当这个距离达到 5000m 时, 由于烟气从火源处蔓延到出口处已经进行了比较充分的换热降温, 导致出口处烟气与环境的温差很小, 此时较大的水平惯性力会推动大量烟气窜流至下游隧道。



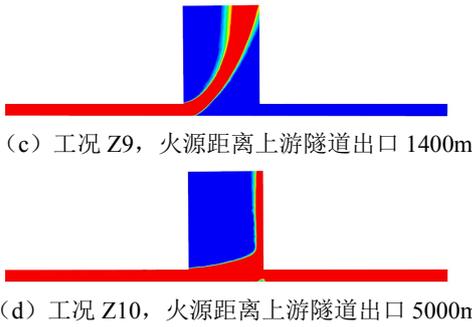


图 10 不同火源位置下温度场稳定后的烟气扩散情况

Fig.10 Smoke diffusion after temperature field is stabilized at different fire source locations

2.3 热释放率对烟气窜流的影响

不同热释放率下的计算工况为 Z2、Z6 和 Z7。火灾发生至 120s 时的烟气浓度如图 11 所示，从图中可以看出，由于火灾初始阶段的烟气温度较低，上游隧道烟气在水平惯性力的作用下会扩散至下游隧道。

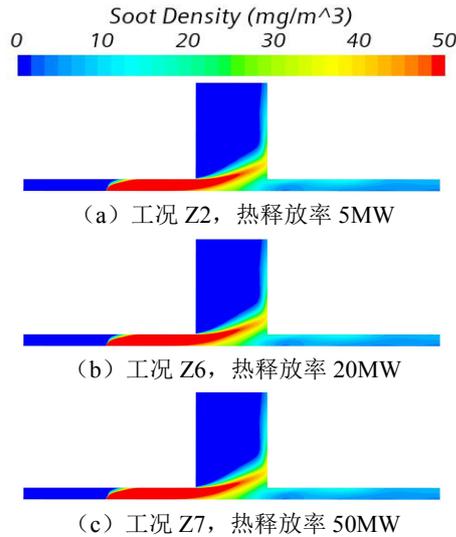


图 11 不同热释放率下火灾初始阶段的烟气扩散情况

Fig.11 Smoke diffusion at the initial stage of fire under different heat release rates

火灾温度场稳定后的烟气浓度如图 12 所示，由于热释放率的增大会使烟气温度升高，浮升力增强，从图中可以看出，烟气向下游蔓延的距离随热释放率的增大而缩短。

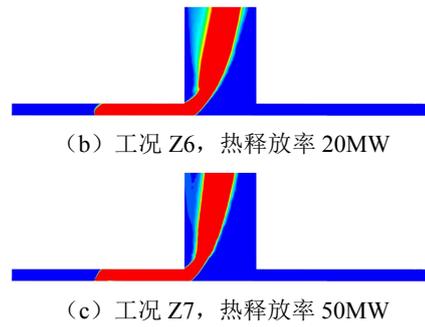
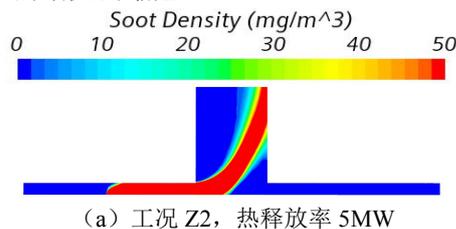


图 12 不同热释放率下温度场稳定后的烟气扩散情况

Fig.12 Smoke diffusion after temperature field stabilization under different heat release rates

2.4 洞口间距对烟气窜流的影响

不同洞口间距下的计算工况为 Z3、Z4 和 Z5。火灾初始阶段的烟气浓度如图 13 所示，由图分析可知，随着洞口间距增大，烟气扩散的区域范围变大，烟气与周围环境中洁净空气不断混合，被更加充分的稀释，窜流减弱。

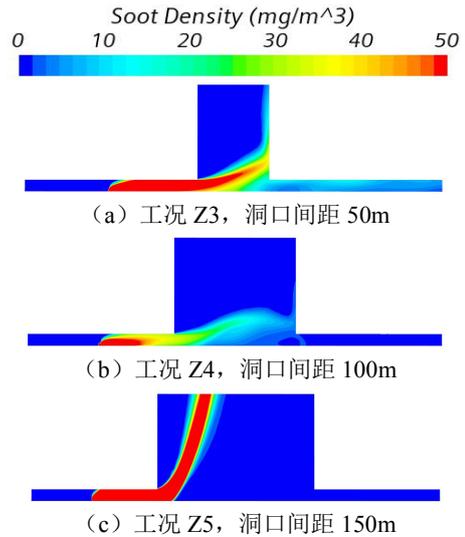
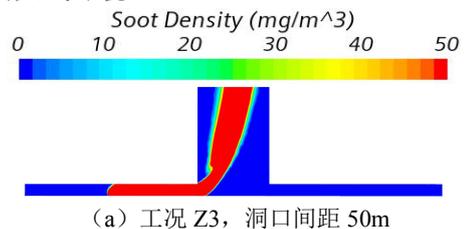


图 13 不同洞口间距下火灾初始阶段的烟气扩散情况

Fig.13 Smoke diffusion at the initial stage of fire under different hole spacing

火灾温度场稳定后的烟气浓度如图 14 所示，从图中可以看出，由于温度场稳定后的烟气温度升高，上游隧道出口处的烟气在热浮力的作用下会直接流向大气环境。



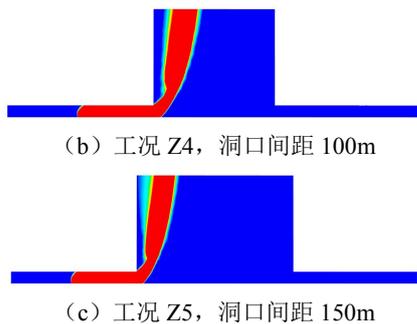


图 14 不同洞口间距下温度场稳定后的烟气扩散情况

Fig.14 Smoke diffusion after temperature field is stabilized under different hole spacing

### 2.5 横向风对烟气窜流的影响

在工况 Z8 模型的一侧边界设置不同风速大小的横向风, 进行数值模拟研究横向风的影响。火灾初始阶段的烟气浓度如图 15 所示, 由图可知, 存在横向风时, 洞口间烟气的流动轨迹会发生偏移, 并且随着横向风速增大, 烟气与下游隧道洞口的距离会增大, 窜流减弱。

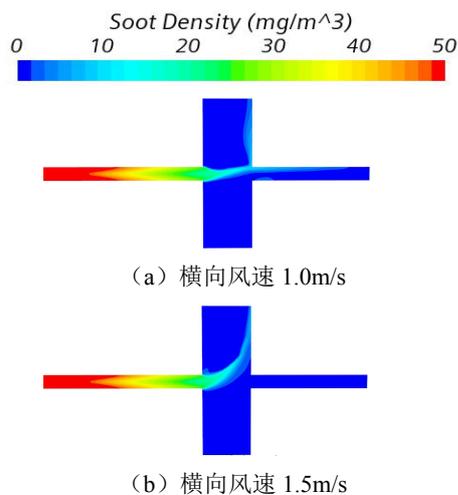


图 15 不同横向风速下火灾初始阶段的烟气扩散情况

Fig.15 Smoke diffusion at the initial stage of fire under different transverse wind speeds

## 3 结论

本文采用三维数值计算方法, 研究了连续隧道火灾的洞口间烟气扩散特性, 得到如下结论:

(1) 上游隧道纵向风速的增大将导致烟气往下游隧道方向水平扩散的距离增大, 因此, 烟气的窜流量增大。

(2) 火源距离上游隧道出口越远, 热释放率

越小, 上游隧道出口处烟气温度的越低, 烟气的水平惯性力上升, 更容易窜流至下游隧道。

(3) 烟气窜流随着洞口间距的增大而不断减弱, 当洞口间距足够大时, 不会出现烟气窜流的现象。

(4) 当存在横向风时, 洞口间烟气的流动轨迹会发生偏移, 并且烟气窜流会随横向风速的增大而减弱。

### 参考文献:

- [1] 2019 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2020, (6): 86-91.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
- [3] Li J S M, Chow W K. Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems[J]. Tunnelling and underground space technology, 2003, 18(5): 435-452.
- [4] 梁华刚, 谢冰雪, 庞丽琴. 车辆阻塞效应下公路隧道火灾临界风速[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11): 1515-1518.
- [5] 张光鹏. 公路隧道双向换气式纵向通风研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] 王少飞. 公路隧道分类及公路隧道群概念探讨[J]. 公路隧道, 2009, (2): 10-14.
- [7] 彭建康, 曾艳华, 何川. 连续毗邻隧道出口污染物的扩散影响研究[C]. 2006 年公路隧道运营管理与安全国际学术会议, 2006.
- [8] 张翥, 杨洁, 韩星. 白家山毗邻隧道间二次污染的数值模拟研究[J]. 公路, 2014, 59(11): 221-226.
- [9] 章立峰, 彭加强, 闫自海, 等. 短距离连续隧道洞口交叉污染数值模拟研究[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(12): 160-165.
- [10] 董启伟, 李俊梅, 李炎锋, 等. 基于烟气蔓延的相邻隧道纵向间距确定[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(7): 932-935.
- [11] Zhao Zunxin, Tang Fei, Wang Qiang, et al. Experimental study on the characteristics of fire smoke longitudinal crossflow in adjacent tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 114.
- [12] 李颖臻. 含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.