

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-355-06

纵向风下隧道顶部和侧向排烟特性对比研究

周伟军¹ 徐梦一² 袁中原²

(1. 北京市建筑设计研究院有限公司成都分公司 成都 610096;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 建立全尺寸隧道火灾三维数值计算模型, 通过设置不同的火源位置、风口尺寸、排烟量、火源功率, 在纵向风速为临界风速时, 对隧道内顶部和侧向机械排烟系统烟气分布特性进行对比分析。研究发现, 两种排烟方式的顶壁烟气特性在火源段内无明显区别, 而在非火源段内, 侧向机械排烟的温度和 CO 浓度要明显高于顶部机械排烟; 对于非火源段内的竖向分布和人员高度处的横向分布, 顶壁排烟系统的整体温度和 CO 浓度都比侧壁排烟低, 排烟效果好。

【关键词】 隧道火灾; 纵向通风; 不同风口位置; 烟气特性

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Comparison of Smoke Characteristics of Top and Lateral Mechanical Exhaust in Longitudinal Ventilation Tunnel

Zhou Weijun¹ Xu Mengyi² Yuan Zhongyuan²

(1. Beijing institute of architectural design Chengdu branch, Chengdu, 610096;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Establish a three-dimensional numerical calculation model for a full-scale tunnel fire, and compare and analyze the smoke distribution characteristics of the top and lateral mechanical smoke exhaust systems in the tunnel by setting different fire source positions, air outlet sizes, smoke exhaust volumes, and fire source powers, with the longitudinal wind speed being the critical wind speed. Research has found that there is no significant difference in the top wall smoke characteristics between the two smoke exhaust methods in the fire source section, while in the non-fire source section, the temperature and CO concentration of lateral mechanical smoke exhaust are significantly higher than those of top mechanical smoke exhaust; For the vertical distribution within the non fire source section and the horizontal distribution at the height of personnel, the overall temperature and CO concentration of the top wall smoke exhaust system are lower than those of the side wall smoke exhaust, and the smoke exhaust effect is good.

【Keywords】 tunnel fire; longitudinal ventilation; different tuyere positions; smoke characteristics

0 引言

隧道因其特殊的管状封闭结构, 在发生火灾时常伴随着高温、能见度低、排烟困难, 会造成逃生疏散困难, 隧道结构严重破坏等后果^[1]。通过设计一个合理的排烟系统, 能够及时有效地降低烟气温度并控制烟气蔓延及沉降, 对于减轻人员伤亡和财

产损失尤为重要。

前人关于隧道顶棚排烟系统的研究主要集中在其排烟效果和吸穿现象。Ingason H 等^[2]发现如果从两侧提供足够的新风, 限制火源和排烟口或两个排烟口之间的区域, 就可以建立起有效的排烟系统。Ji 等^[3]进行了一组燃烧实验, 揭示了排烟口高

作者(通讯作者)简介: 周伟军(1981.3-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: zhouwj@biadcd.com

收稿日期: 2023-04-19

度和排风速度对机械排烟效率的影响, 结果表明, 较高的排烟口或较小的排烟速度, 排烟效率更高, 并使用弗劳德数预测了吸穿现象的发生。He L 等^[4]研究了机械排烟口附近的卷吸现象, 结果表明, 随着火源功率和排烟速度的增加, 卷吸的空气量增加。Tang 等^[5,6]通过进行小尺寸试验, 发现火源和顶棚排烟口的相对方向对烟锋流速有较大影响。王明年等人^[7]进行了 1:4.8 的小尺寸试验, 同时用 FDS 建立了全尺寸的数值模拟, 研究了不同的排烟策略 (改变纵向风速和排烟风速) 对纵向通风和竖井通风的耦合系统的影响。

近年来, 侧向机械排烟系统 (在隧道侧壁设置排烟口) 在隧道中得到了较多的采用。Xu 等^[8]使用数值模拟研究了隧道侧向机械排烟系统。提出了排热系数的预测模型, 并对吸穿现象进行了定性分析。袁园^[9]和张甫仁^[10]等人利用 FDS 数值模拟研究方法研究了排烟口参数、排烟风量以及纵向通风风速对公路隧道侧向集中排烟系统的影响, 发现系统的排烟效率随排烟风量的增加呈现先增后减的变化趋势, 并针对简化公路隧道模型得到了较为合理的排烟控制策略。姜学鹏^[11]等人利用数值模拟初步分析了隧道侧部单点集中排烟模式下的烟气逆流行为进行研究, 探讨了火源功率、纵向风速、排烟量以及排烟口与火源相对位置对烟气逆流长度的影响。

目前隧道内对集中排烟系统相关研究的重点大部分都在顶棚集中排烟, 而若隧道地铁等建筑无法在顶棚安装排烟管道, 便可使用侧向排烟系统。对于纵向风下的机械排烟, 风口位置的不同对隧道火灾烟气特性分布有很大的不同, 然而, 大多学者仅研究一种通风系统, 关于纵向风和顶部或侧向排烟耦合系统的研究以及排烟效果的对比研究较少。本文采用火灾数值模拟软件 FDS 对纵向风下两种排烟系统的烟气分布特性进行了研究。

1 数值模拟

本文选取某山岭隧道建立几何模型, 如图 1 所示, 隧道断面上部取半径 6m 的半圆, 下部取高为 1.4m 矩形, 隧道宽 12m, 高 7.4m, 模拟隧道的入口至火源段与风口至出口段的长度不变, 距离和为 500m, 火源与风口的间距变化。将火源设置在隧道纵向中轴线上, 火源与排烟风口的相对位置如图

2 所示, 其中 A 位置距隧道入口 250m, B 位置距排烟风口处 500m, C 位置距排烟风口处 1000m。

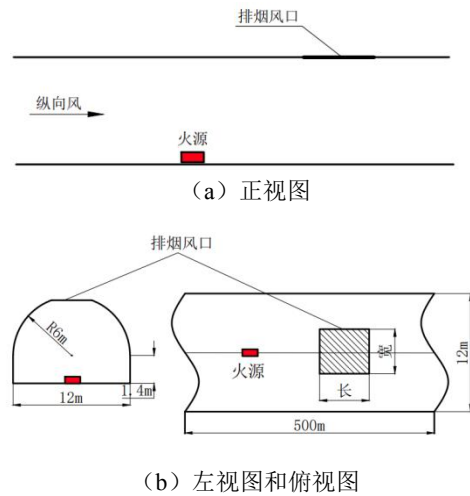


图 1 顶部机械排烟系统示意图

Fig.1 The picture of the top mechanical smoke exhaust system

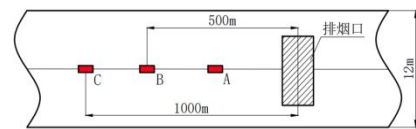
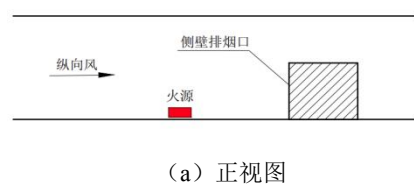


图 2 火源位置示意图

Fig.2 The picture of fire source position

两种机械排烟系统的排烟口形状和大小完全一致, 宽为 5m, 其内边缘距隧道入口 320m, 宽为 5m, 设置了五种不同的风口长度: 1m、5m、7m、10m、15m。顶部机械排烟系统风口设置如图 1 所示, 排烟口位于隧道顶棚中轴线上; 侧向排烟系统的设置如图 3 所示, 排烟口位于隧道侧壁, 其下边缘与隧道底部平齐。两种机械排烟系统的排烟量均设置在 60-180m³/s 之间。在隧道纵向中轴线上设置了纵向温度测点和 CO 浓度测点及其切片, 间隔为 10m; 分别在排烟口前 30m、10m、5m 和排烟口后 5m、10m、20m 处设置了竖向和横向的温度测点和 CO 浓度测点; 在排烟口与隧道交界面处设置速度测点, 用于监测排烟变化情况, 有关测点设置如图 4 所示。



(a) 正视图

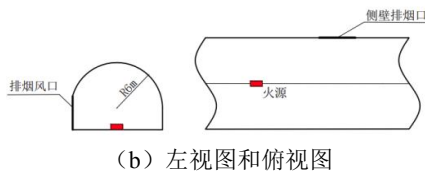


图 3 侧向机械排烟系统示意图

Fig.3 The picture of lateral mechanical smoke exhaust system

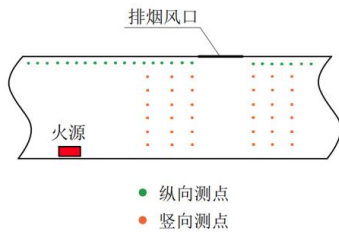


图 4 测点位置分布示意图

Fig.4 Location distribution map of measuring points

本文选取 5MW、10MW、30MW 三种火源热释放率进行数值模拟研究,总模拟时间为 600s。隧道壁面的材料设置为“concrete”,厚度为 0.5m,环境初始温度设置为 25℃。本文研究的是纵向风下的隧道火灾排烟,在隧道入口与隧道交界面处设置“supply”,向隧道内送风,风速设为临界风速(回流长度为 0),经过多次模拟试算,得到的不同工况下的临界风速如表 1 所示;在隧道出口与计算区域边界处设置为开口条件。隧道火灾数值模型如图 5 所示。

表 1 不同工况下的临界风速结果

Table 1 Critical wind speed results under different operating conditions

序号	火源热释放率/MW	火源位置	纵向风速/m·s ⁻¹
1	5	A/B/C	2.70
2	10	A/B/C	3.26
3	30	A/B/C	4.10

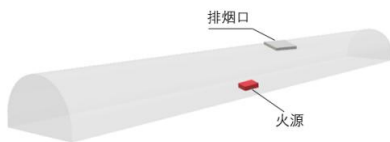


图 5 数值模型示意图

Fig.5 The picture of the numerical model

本文开展了 1:10 缩尺模型隧道试验,选取火源热释放率为 5.68kW,火源位于隧道纵向中心位置,排烟口尺寸为长 0.1m,宽 0.5m,纵向风速为 0.62m/s,排烟量为 180m³/h,环境温度为 35℃

的典型试验工况验证了本文数值模型的准确性,如图 6 所示,数值模拟计算结果与试验结果基本吻合,可用于模拟计算隧道火灾。

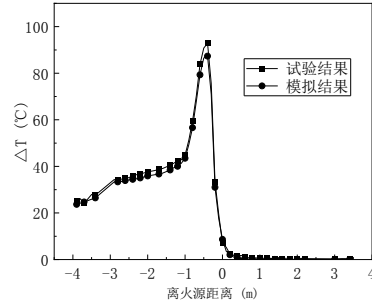


图 6 数值模拟验证结果

Fig.6 The result of the numerical simulation verification

为了便于分析和说明,定义火源到风口之间的区域为火源段,风口到隧道出口的区域为非火源段。本节使用的纵向风速均为临界风速。

2 烟气特性

2.1 烟气纵向分布规律

图 7 (a) 为火源功率为 10MW,火源位于 A 位置,两种风口位置的纵向温度分布规律。在火源段时,顶部排烟和侧壁排烟的顶部烟气温度分布几乎没有区别,而排烟口后方的纵向温度要高于风口在侧壁时的温度。这说明在火源段高温烟气不会卷吸来自排烟口后方的补风气流,补风气流一部分经过排烟口直接排出,一部分与扩散到排烟口后方的热烟气混合从出口排出。

而在非火源段,顶部排烟系统风口处的顶壁烟气温度有明显突变,温度明显低于火源段,而侧壁排烟系统风口处的温度没有明显突变,风口外的温度梯度与火源段接近,温度随着离火源距离的增加而减小。这是由于两种排烟方式的烟气吸入方式差别较大。一方面,侧风口上边缘低于隧道顶壁,通过侧壁排烟口排出的烟气主要来自排烟口上方和正前方的烟气层,排烟需要克服的浮力较大,因此排出的气体中烟气占比较少;另一方面,由于侧向排烟口更接近烟气层与空气边界,烟气层的不稳定加剧了空气的卷吸,使得通过排烟口排出的混合气体含有大量空气,仍有大量高温烟气越过排烟口向后扩散,非火源段的温度未得到有效降低。而顶部排烟口排出的烟气主要来自风口正下方的烟气层,排出的气体中的烟气含量高,越过排烟口的烟气少,顶壁温度得到有效降低。

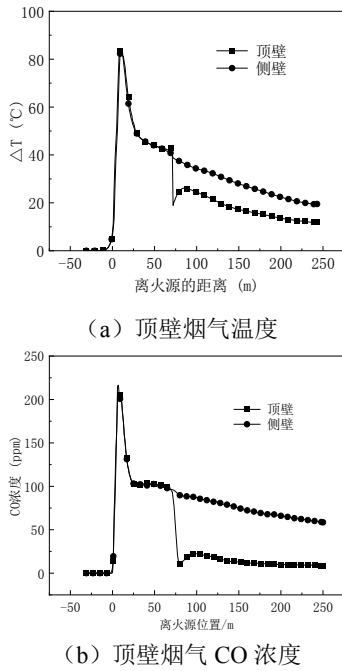


图 7 隧道顶壁烟气特性分布

Fig.7 The smoke characteristics distribution of tunnel beneath ceiling

图 7 (b) 为火源功率为 5MW，不同风口位置对 CO 浓度纵向分布的影响。从图中可以看出，两种风口位置对火源段的 CO 浓度纵向分布几乎没有影响，火源附近的浓度衰减较快，在离开火源一段距离后，顶壁纵向 CO 浓度分布衰减变慢。这是因为火源附近顶壁的烟气扩散为三维扩散流动，而随着离火源距离变远，由于侧壁的限制，烟气变为沿隧道纵向的一维扩散运动。在非火源段，顶部排烟在风口处 CO 浓度骤减，而侧向排烟的浓度变化很小，整体 CO 浓度高于顶部排烟。

由以上分析可知，两种排烟方式的顶壁烟气特性在火源段内无明显区别，而在非火源段内差别较大，下面着重分析非火源段内顶壁风口和侧壁风口的竖向和横向烟气特性分布规律。

2.2 烟气竖向分布规律

图 8 分别为火源功率为 10MW，两种风口位置在风口后的烟气温度和 CO 浓度竖向分布规律。侧壁机械排烟系统顶壁附近的烟气温度最高且变化缓慢，在离顶壁一定距离之后，竖向测点温度大幅降低；顶壁排烟系统的整体竖向温度比侧壁排烟低。这说明不同风口位置会对非火源段的烟气竖向温度分布有影响。由于排烟风口会带走部分来自火源段的高温烟气，使绕过风口的烟气量大幅减少，

再加上侧风口上边缘比顶壁低，风口吸入的烟气含量低，越过排烟口到下游的高温烟气自然就多，此时的排烟口无法有效降低风口后方的竖向温度。

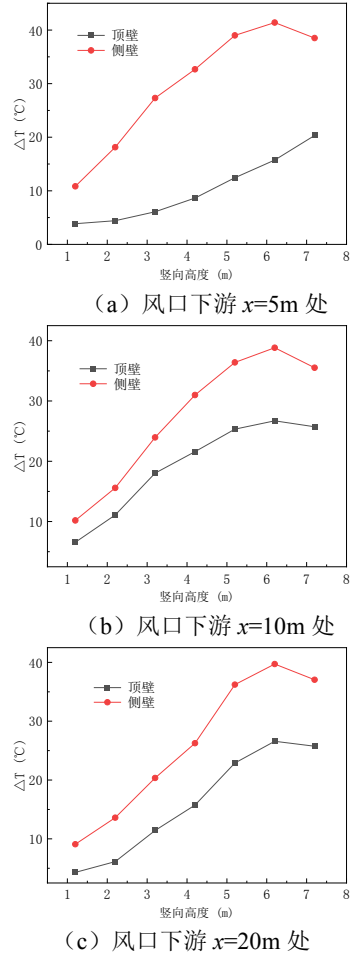
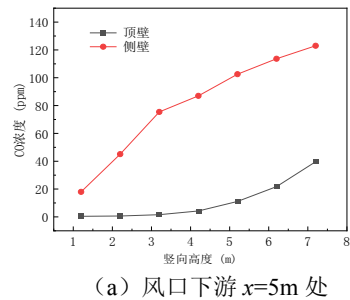
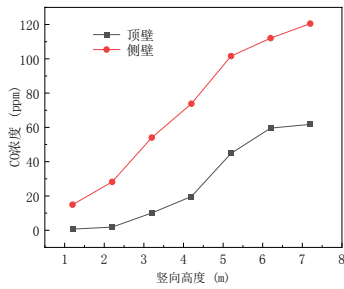


图 8 风口后的温度竖向分布

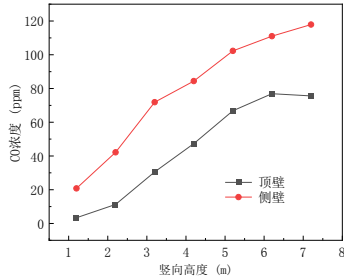
Fig.8 Vertical distribution of the temperature behind the tuyere

图 9 为两种风口位置在风口后的烟气 CO 浓度随竖向高度变化的分布规律。与上述温度竖向分布整体趋势相类似，侧壁机械排烟系统顶壁附近的烟气温度最高，在离顶壁一定距离之后，竖向测点温度大幅降低，但整体温度与风口前相比变化很小；顶壁排烟系统的整体竖向温度比侧壁排烟系统低。





(b) 风口下游 x=10m 处



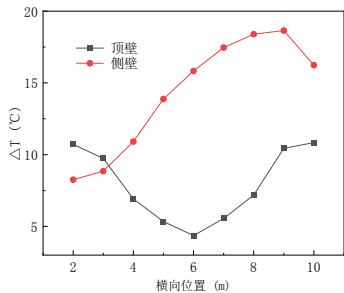
(c) 风口下游 x=20m 处

图 9 风口后的 CO 浓度竖向分布

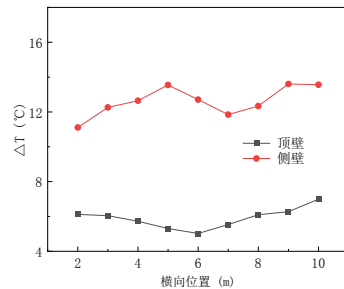
Fig.9 Vertical distribution of the CO concentration behind the tuyere

2.3 人员高度处横向分布规律

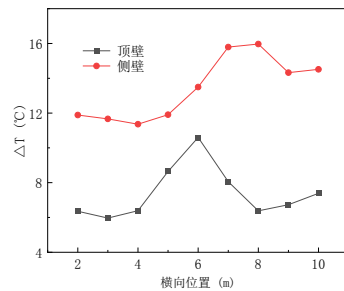
图 10 为火源功率为 5MW 时, 两种风口位置在风口后的烟气横向温度分布规律。可以看出, 风口后顶壁排烟方式的温度整体比侧壁排烟的温度低, 烟气在顶壁风口附近时的温度趋势呈中间低, 两边高, 而离风口一定距离后的烟气横向温度分布开始和火源段内的横向温度分布趋势相同; 在侧风口附近的烟气温度分布趋势为靠近风口一侧的温度较高, 远离风口侧的温度较低。这是因为烟气扩散到风口附近时受到排烟作用的影响, 顶壁风口下方的烟气最先被抽吸到风口中, 部分烟气越过排烟口继续向下游扩散, 此时隧道中心线附近的烟气较为稀薄, 温度低于隧道侧壁附近的烟气温度; 侧边排烟时的部分烟气虽越过排烟口, 但仍受排烟惯性力影响, 贴附于风口附近一侧壁面向下游蔓延, 造成了位于风口附近一侧的烟气横向温度较高, 远侧壁面附近的烟气温度低。



(a) 风口下游 x=5m 处



(b) 风口下游 x=10m 处

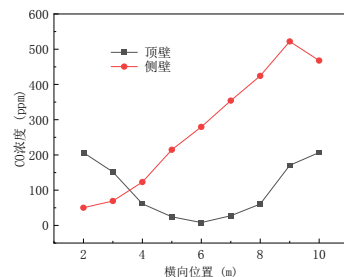


(c) 风口下游 x=20m 处

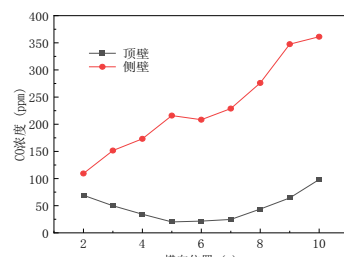
图 10 风口后的横向温度分布

Fig.10 Transverse temperature distribution behind the tuyere

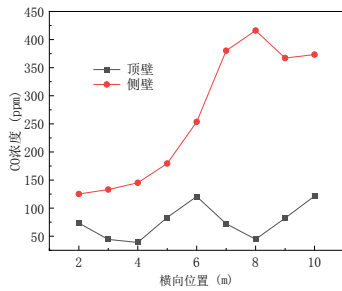
图 11 分别为火源功率为 30MW 时, 两种排烟方式在风口后的 CO 浓度横向分布。可以看出, 风口后的 CO 浓度横向分布与温度横向分布规律类似, 顶部排烟方式的 CO 浓度整体比侧边排烟的低, CO 浓度在顶壁风口附近位置时的趋势呈中间低, 两边高, 而离风口一定距离后的烟气 CO 浓度开始和火源段内的分布趋势相同; 在侧风口附近的烟气 CO 浓度横向分布趋势为靠近风口一侧的 CO 浓度较高, 远离风口侧的 CO 浓度较低。



(a) 风口下游 x=5m 处



(b) 风口下游 x=10m 处



(c) 风口下游 $x=20m$ 处

图 11 风口后的横向 CO 浓度分布

Fig.11 Transverse CO concentration distribution behind the tuyere

3 结论

(1) 侧向排烟方式与顶部排烟方式的烟气特性规律在火源段内几乎无差别,而在非火源段,由于两种排烟口位置的烟气吸入方式差别较大,在临界风速的作用下,顶部风口排烟时的烟气温度分布和 CO 浓度分布要低于侧向排烟口排烟。

(2) 对于非火源段内的竖向分布,侧壁机械排烟系统顶壁附近的烟气值(温度和 CO 浓度)最高,在离顶壁一定距离之后,烟气值大幅降低,顶壁排烟系统的整体竖向温度比侧壁排烟低。

(3) 在非火源段,顶壁排烟方式的烟气温度和 CO 浓度整体比侧壁排烟方式的低,烟气在顶壁风口附近时的烟气特性趋势呈中间低,两边高,而离风口一定距离后的烟气横向分布开始和火源段内的横向分布趋势相同;在侧风口附近的烟气分布趋势为靠近风口一侧较高,远离风口侧较低。

参考文献:

[1] Ji J, Tan T, Gao Z, et al. Numerical Investigation on the Influence of Length-Width Ratio of Fire Source on the Smoke Movement and Temperature Distribution in Tunnel Fires[J]. Fire technology, 2019,55(3):963-979.

[2] Ingason H, Zhen Y. Model scale tunnel fire tests with point extraction ventilation[J]. Journal of Fire Protection

Engineering, 2011,21(1):5-36.

[3] Ji J, Li K Y, Zhong W, et al. Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,177(1-3):209-215.

[4] HE L, XU Z S, CHEN H G, et al. Analysis of entrainment phenomenon near mechanical exhaust vent and a prediction model for smoke temperature in tunnel fire[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018,80: 143-150.

[5] Tang F, Mei F, Li L, et al. Ceiling smoke front velocity in a tunnel with central mechanical exhaust system: Comparison of model predictions with measurements[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,127:689-695.

[6] Tang F, He Q, Mei F, et al. Effect of ceiling centralized mechanical smoke exhaust on the critical velocity that inhibits the reverse flow of thermal plume in a longitudinal ventilated tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,82:191-198.

[7] Wang M, Guo X, Yu L, et al. Experimental and numerical studies on the smoke extraction strategies by longitudinal ventilation with shafts during tunnel fire[J]. Tunnelling and underground space technology, 2021, 116.

[8] XU Z S, LIU Q, HE L, et al. Study on the heat exhaust coefficient and smoke flow characteristics under lateral smoke exhaust in tunnel fires[J]. Fire and Materials, 2019,43(7):1-12.

[9] 袁园.公路隧道侧向集中排烟系统排烟效果研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[10] 张甫仁,林爱桢,袁园.基于FDS的某公路隧道侧向集中排烟系统研究[J].公路,2018,63(12):307-311.

[11] 姜学鹏,乔意峰,何振华.公路隧道侧部单点排烟模式下烟气逆流研究[J].安全与环境学报,2018,18(6):2177-2182.