

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-679-05

地铁正线隧道分岔段火灾烟气通风控制研究

范登鑫¹ 何磊² 雷波¹ 邓保顺² 郭永桢²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043)

【摘要】 分析了列车火灾发生在正线隧道分岔段的烟气控制方法,建立了典型地铁正线隧道分岔段模型,采用FDS软件进行数值计算,分别得到向正线隧道上、下游两种排烟方式下将烟气蔓延控制在临界状态所需的正线与联络线隧道通风风速。

【关键词】 地铁; 隧道分岔段; 火灾烟气控制; 临界风速

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Study of Smoke Control in the Bifurcation Section of the Main Tunnel

Fan Dengxin¹ He Lei² Lei Bo¹ Deng Baoshun² Guo Yongzhen²

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

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710043)

【Abstract】 This paper analyzes the method to control smoke spread when train fire occurs in the bifurcation section of the main tunnel, and establishes the model of typical subway tunnel, then uses FDS calculating to obtain the velocity of the main tunnel and the connecting tunnel which are required to control smoke spread in critical state when the smoke is discharged to the upstream and the downstream of the main tunnel respectively.

【Keywords】 Subway; Bifurcation section of tunnel; Fire smoke control; Critical velocity

0 引言

随着轨道交通的发展,地铁线路逐渐增多并连线成网,线网中隧道结构、连接形式的多样化和复杂化给隧道火灾烟气控制带来了新的问题。当线路相互连通后,隧道内列车发生火灾,开启隧道通风系统进行通风排烟时,一方面要求发生火灾的正线隧道进行通风控制烟气逆流,另一方面又不允许烟气通过联络线隧道蔓延到未发生火灾的线路。正线隧道与联络线隧道的结合部位是线路间火灾烟气产生相互影响的关键位置,本文称之为“正线隧道分岔段”,该位置发生火灾时的烟气控制需要特别关注。

隧道纵向通风烟气控制方法的基础是临界风速理论。Thomas^[1]认为驱动热烟向前的浮力与流动阻力相等时,烟气便停止向前,并提出了临界风速的预测模型。Oka和Atkinson^[2]研究了不同燃烧位置及燃烧器阻塞对临界风速的影响。Wu和Bakar^[3]选用隧道水力直径作为特征尺寸,进一步优化了临界风速计算公式。李颖臻^[4]从临界Froude数理论出发建立了计算联络通道临界风速的模型。姜学鹏^[5]根据 π 定理和相似理论,对影响横通道临界风速的相关因素进行了量纲分析。Chang Liu^[6]研究了联络线隧道坡度及正线隧道通风风速对联络线隧道烟气逆流长度的影响,并建立了地铁联络线隧道临界

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2018SF-393)

作者简介: 范登鑫 (1995.11-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 751474073@qq.com

通讯作者: 何磊 (1987.08-), 男, 博士, 高级工程师, E-mail: swjtuhl822@126.com

收稿日期: 2021-03-18

风速预测模型。上述研究工作都是针对火灾发生在正线隧道或联络隧道，目前尚未见到有关列车火灾发生在正线隧道分岔段的烟气通风控制研究。

本文研究列车火灾发生在地铁正线隧道分岔段的烟气通风控制方法，采用火灾动力学软件 FDS (Fire Dynamic Simulation) 建立典型地铁隧道三维模型，计算得到将烟气扩散控制在临界状态下正线隧道与联络线隧道所提供的通风风速。

1 分岔段烟气控制方法

自然通风下，火灾发生在正线隧道分岔段时，在浮升力的作用下烟气将分别向正线隧道上、下游及联络线隧道蔓延一定距离，如图 1 所示。为了给人员提供安全的疏散通道，需要采取通风措施对烟气蔓延的状态进行控制。

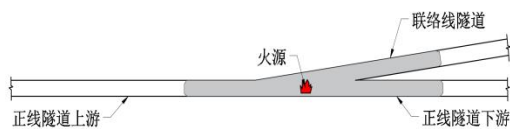
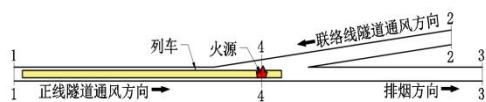


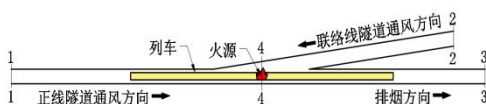
图 1 自然通风下火灾烟气蔓延图

Fig.1 Smoke spread under natural ventilation

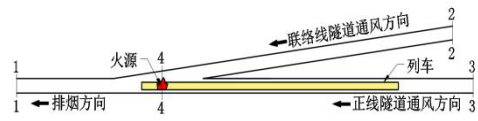
地铁区间隧道烟气控制通常采用纵向通风的方式。为控制火灾烟气蔓延状态，正线和联络线隧道都需要进行纵向通风。根据列车着火部位的不同，存在向正线隧道下游排烟和向正线隧道上游排烟两种情况，正线隧道分岔段烟气控制方法如图 2 所示。列车从正线隧道上游向正线隧道下游行驶，列车前部着火时，向正线隧道下游排烟，如图 2(a)；列车中部着火时，可以向正线隧道上游排烟或者向正线隧道下游排烟，如图 2 (b)；列车尾部着火时，向正线隧道上游排烟，如图 2 (c)。



(a) 列车前部着火



(b) 列车中部着火



(c) 列车尾部着火

图 2 烟气控制方法示意图

Fig.2 Method to control smoke spread

1.1 向正线隧道下游排烟

向正线隧道下游排烟时，在正线隧道上游与联络线隧道通风气流共同作用下，控制烟气向正线隧道上游及联络线隧道蔓延。正线隧道分岔段应保证无烟气逆流，而联络线隧道的烟气控制，根据人员疏散的不同要求，可能有烟气不流入联络线及烟气不流入另一条非火灾线路两种临界控制状态。正线隧道上游通风风速较小时，烟气将逆风流动，当烟气前锋的驱动力与正线隧道通风气流作用力相等时，烟气前锋不再向前运动，该位置与火源的距离称为“正线隧道烟气逆流长度”；联络线隧道通风风速较小时，烟气逆流流入联络线隧道，当烟气前锋的驱动力与联络线隧道通风作用力相等时，烟气前锋不再向前运动，该位置与联络线隧道入口的距离称为“联络线隧道烟气逆流长度”。

正线隧道断面积与正线隧道分岔段断面积不相同，如果已知正线隧道的临界风速，可以通过公式 (1) 计算火灾断面临界风速：

$$V_{4c} A_4 = V_{1c} A_1 \tag{1}$$

式中， V_{4c} 表示火灾断面临界风速，m/s； A_4 表示火灾断面空气流通面积， m^2 ； V_{1c} 表示正线隧道上游临界风速，m/s； A_1 表示正线隧道上游断面积， m^2 。

在正线隧道无烟气逆流的条件下，采用数值计算方法，分别计算得到烟气不流入联络线和不流入另一条非火灾线路两种临界控制状态下联络线隧道所需提供的最小通风风速。

1.2 向正线隧道上游排烟

向正线隧道上游排烟时，正线隧道下游与联络线隧道通风气流在分岔段汇合后，形成的合流用于控制烟气在分岔段的蔓延。只要分岔段无烟气逆流，烟气就不会流入到联络线隧道，因此，向正线隧道上游排烟时，只存在一种烟气临界控制状态，即正线隧道无烟气逆流。

正线隧道分岔段无烟气逆流时，根据质量守恒关系得到：

$$V_2 A_2 + V_3 A_3 = V_{4c} A_4 \tag{2}$$

式中, V_2 表示联络线隧道通风风速, m/s; A_2 表示联络线隧道断面积, m^2 ; V_3 表示正线隧道下游通风风速, m/s; A_3 表示正线隧道下游断面积, m^2 。

公式 (2) 表明, 在已知火灾断面临界风速 V_{4c} 和正线隧道下游通风风速 V_3 后, 可计算出需要的联络线隧道通风风速 V_2 。

2 CFD 模拟

2.1 数值模型及相关参数

以某一典型地铁隧道为模型, 其正线隧道直径 5.5m, 隧道断面积 $21.3m^2$, 周长 16.8m; 联络线隧道 4.5m (宽) \times 4.6m (高), 隧道断面积 $20.7m^2$, 周长 18.2m, 联络线隧道长度为 320m, 联络线坡度 4%; 正线隧道模拟总长为 275m, 隧道模型如图 3 所示。

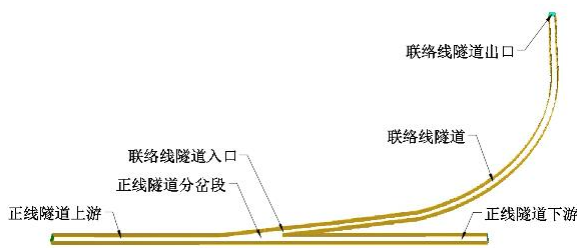


图 3 隧道物理模型

Fig.3 Physical model of tunnel

列车为 B 型列车, 尺寸为 19m (长) \times 2.8m (宽) \times 3.8m (高), 6 辆 B 型车为一个编组。

列车火灾发生在正线隧道分岔段中间, 火灾断面空气流通面积为 $23m^2$, 火灾热释放速率为 7.5MW。

环境温度为 $26.7^\circ C$, 土壤层温度为 $15^\circ C$; 隧道壁面材料为混凝土, 列车表面为绝热条件; 正线隧道通风入口与联络线隧道通风入口设置为速度边界, 正线隧道通风出口设置为大气压力边界。

2.2 网格尺寸

数值模拟中网格尺寸越小, 计算结果越精准, 但耗时长。为准确模拟隧道火灾并节约机时, 必须选择合理的网格尺寸, 其与火源特征直径 D^* 有关, 计算公式如下:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3)$$

式中, Q 为火灾热释放率, kW; D^* 为火灾特征直径, m; ρ_0 表示环境密度, kg/m^3 ; T_0 表示

环境温度, K; c_p 为定压比热, $kJ/(kg \cdot K)$; g 为重力加速度, m^2/s 。

FDS 软件使用手册指出, 网格尺寸在 $0.06 \sim 0.25D^*$ 之间时数值模拟计算结果较好。胡隆华 [7] 研究表明, 网格尺寸在 $0.1 \sim 0.12D^*$ 之间, 火源附近网格加密一倍时, 数值模拟结果与全尺寸火灾试验结果能很好地吻合。

本文隧道模型在自然通风下不同网格尺寸的正线隧道顶部烟气纵向温度分布如图 4 所示, 当网格尺寸为 $0.075D^*$ 和 $0.1D^*$ 时, 隧道顶部烟气纵向温度差别较小。为了保证计算准确度和减少计算量, 本文采用 $0.1D^*$ 网格, 网格尺寸为 0.2m, 网格总数为 287 万。

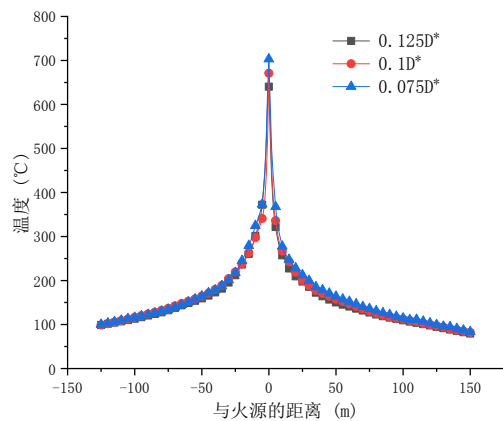


图 4 正线隧道顶部烟气纵向温度分布

Fig.4 Longitudinal temperature distribution of smoke below the top of main tunnel

2.3 数值方法验证

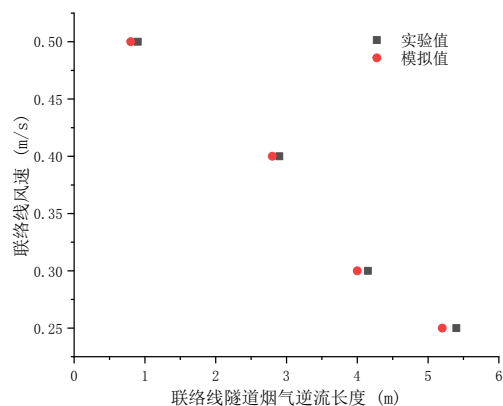


图 5 模拟值与实验值对比图

Fig.5 Comparison of simulated value and experimental value

为验证数值模拟方法的准确性,对某小尺寸分岔隧道实验^[6]中的 Test2~5 工况进行数值模拟。模拟值与实验值的差别如图 5 所示,模拟值与实验值对照情况较好,说明采用 FDS 软件可以很好地模拟隧道火灾烟气逆流长度与隧道纵向通风风速的关系。

3 计算结果及分析

3.1 向正线隧道下游排烟

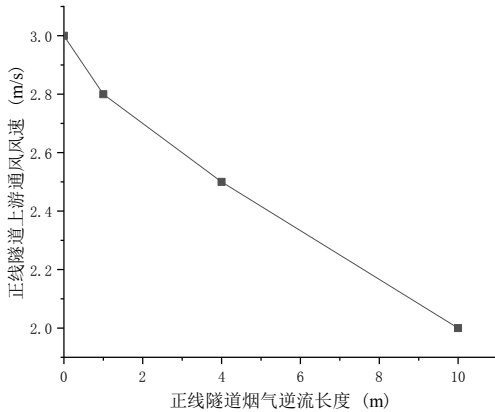


图 6 正线隧道烟气逆流长度

Fig.6 Back-layering length in main tunnel

计算得到正线隧道上游通风风速与正线隧道烟气逆流长度的关系如图 6 所示。正线隧道烟气逆流长度为 0 时,正线隧道上游临界风速 V_{lc} 为 3.0m/s,按公式(1)计算得到火灾断面临界风速 V_{4c} 为 2.7m/s。

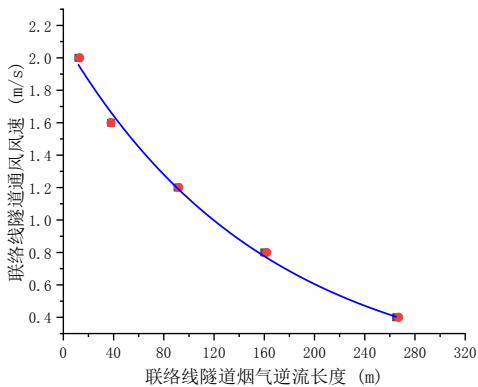


图 7 联络线隧道烟气逆流长度

Fig.7 Back-layering length in connecting tunnel

在正线隧道上游临界风速 3.0m/s 下,改变联络线隧道通风风速,计算得到列车前部、中部着火时联络线隧道通风风速与联络线隧道烟气逆流长度的关系基本相同,拟合得到联络线隧道通风风速

与联络线隧道烟气逆流长度的关系曲线如图 7 所示,将曲线外推,分别得到联络线隧道烟气逆流长度为 0 时,联络线隧道通风风速为 2.1m/s;联络线隧道烟气逆流长度为 320m 时,联络线隧道通风风速为 0.3m/s。

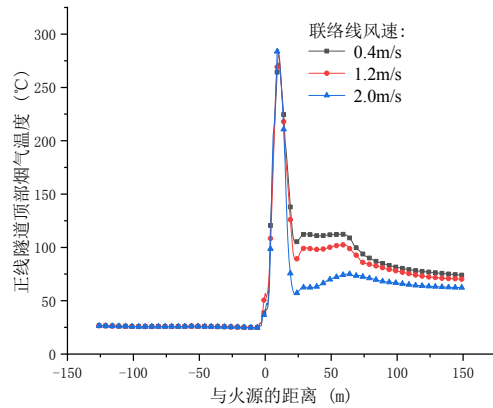


图 8 正线隧道顶部烟气温度

Fig.8 Smoke temperature below the top of main tunnel

以列车中部火灾为例,在不同联络线隧道通风风速下,正线隧道顶部烟气温度如图 8 所示,可以看到,增大联络线隧道通风风速对火源及火源下游的正线隧道顶部烟气温度影响较大,而对火源上游的正线隧道顶部烟气温度分布基本无影响,因此可以不考虑联络线隧道纵向通风的变化对正线隧道烟气逆流的影响。

综上所述,向正线隧道下游排烟时,正线隧道上游通风风速为 3m/s,正线隧道无烟气逆流;联络线隧道通风风速 2.1m/s,联络线无烟气流入;联络线隧道通风风速为 0.3m/s,烟气不会流入另一条非火灾线路。

3.2 向正线隧道上游排烟

《地铁设计防火标准》^[8]中要求区间隧道纵向通风风速不小于 2.0m/s,因此,向正线隧道上游排烟时,正线隧道下游通风风速设为 2.0m/s,由公式(2)计算出对应的联络线隧道通风风速为 1.0m/s。在正线隧道下游通风风速 2.0m/s、联络线隧道通风风速 1.0m/s 协同通风控制下,列车中部、尾部火灾的烟气蔓延如图 9 所示,结果表明,此通风条件下正线隧道无烟气逆流。当正线隧道、联络线隧道通风风速都按规范要求的最小通风风速 2.0m/s 设计时,显然,此通风条件下正线隧道也无烟气逆流产生。

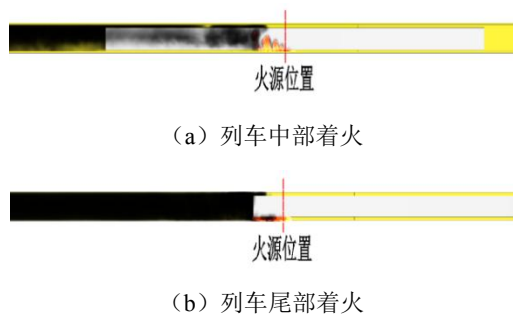


图9 烟气蔓延正视图

Fig.9 Front view of smoke spread

与向正线隧道下游排烟相比, 列车火灾向正线隧道上游排烟时提供较小的正线隧道和联络线隧道通风风速就能使正线隧道无烟气逆流、联络线隧道无烟气流入。

4 结论

本文分析了正线隧道分岔段的火灾烟气控制方法, 并对某一典型地铁隧道的分岔段火灾烟气控制进行了数值计算, 得到以下结论:

(1) 向正线隧道下游排烟时, 正线隧道上游通风风速为 3.0m/s, 正线隧道无烟气逆流; 联络线隧道通风风速 2.1m/s, 联络线无烟气流入; 联络线隧道通风风速为 0.3m/s, 烟气不流入另一条非火灾线路。

(2) 向正线隧道上游排烟时, 在正线隧道下游通风风速 2.0m/s、联络线隧道通风风速 1.0m/s

的通风条件下正线隧道无烟气逆流、联络线隧道无烟气流入。

参考文献:

- [1] Thomas PH. The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against Air Flow[J]. Fire Research Technical Paper, 1968,7(1):1-8.
- [2] Oka Y, Atkinson GT. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires[J]. Fire Safety Journal, 1995,25(4):305-322.
- [3] Wu Y, Bakar M. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems—a Study of the Critical Velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000,35(4): 363-390.
- [4] 李颖臻,雷波.隧道间联络通道临界风速模型[J].铁道学报,2008,143(3):87-90.
- [5] 姜学鹏,张剑高,何超,等.铁路隧道横通道临界风速研究[J].中国铁道科学,2017,38(4):55-61.
- [6] Chang L, Maohua Z, Shenyou S, et al. Experimental and Numerical Study on Critical Ventilation Velocity for Confining Fire Smoke in Metro Connected Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,97(C).
- [7] 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.
- [8] GB 51298-2018,地铁设计防火标准[S].北京:中国计划出版社,2018.