

主线坡度对分岔隧道火灾烟气蔓延的影响

刘 茜, 汪 彬

重庆科技大学安全工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月10日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月24日

摘 要

为探明主线坡度对分岔隧道内的烟气蔓延规律的影响, 采用FDS模拟主线正负坡度变化分岔隧道内的火灾烟气蔓延行为, 考虑主线坡度为 -7° 、 -5° 、 -3° 、 0° 、 3° 、 5° 、 7° , 火源功率为5 MW、10 MW和20 MW, 揭示主线坡度影响分岔隧道内烟气蔓延的作用机制。研究得出, 分岔隧道主线坡度为正坡度时, 隧道内形成正烟囱效应, 随着坡度增加, 上游和匝道烟气回流长度变短, 在坡度为 7° 时上游隧道内无烟气流出, 坡度越大越有利于隧道内排烟; 分岔隧道主线坡度为负坡度时, 隧道内形成负烟囱效应, 隧道下游烟气回流长度变长, 坡度越大越不利于隧道排烟。

关键词

逆流长度, 主线坡度, 分岔隧道, 温度分布

Effect of Main Line Slope on Smoke Spread in Bifurcated Tunnel Fires

Qian Liu, Bin Wang

School of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 10th, 2024; accepted: Mar. 31st, 2024; published: Apr. 24th, 2024

Abstract

In order to explore the influence of the slope of the main line on the smoke spreading pattern in bifurcated tunnels, FDS was used to simulate the fire smoke spreading behavior in bifurcated tunnels with positive and negative slope changes of the main line, considering that the main line slopes were -7° and -5° , -3° , 0° , 3° , 5° , 7° , and the fire source power is 5 MW, 10 MW and 20 MW, revealing the mechanism by which the slope of the main line affects the spread of smoke in bifurcated tunnels. The study shows that when the slope of the main line of the bifurcated tunnel is a positive slope, a positive chimney effect is formed in the tunnel. As the slope increases, the length

of the smoke backflow in the upstream and ramps becomes shorter. When the slope is 7° , there is no smoke flowing out of the upstream tunnel. The greater the slope, the more conducive to smoke exhaust in the tunnel; When the slope of the main line of the bifurcated tunnel is a negative slope, a negative chimney effect is formed in the tunnel, and the smoke return length downstream of the tunnel becomes longer. The greater the slope, the less conducive to tunnel smoke exhaust.

Keywords

Counterflow Length, Main Line Slope, Bifurcated Tunnel, Temperature

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的快速发展和城市化进程加快,城市基础设施建设规模逐年增大,截至2021年底,我国公路隧道有23,268处、2469.89万延米[1]。为满足我国交通的需求,隧道结构越发复杂,其内部往往存在一个或多个分岔,发生火灾后隧道内部烟气流动的规律与单管隧道有很大区别。相比传统的单管隧道,分岔结构的存在使得气流分流比发生变化,分岔节点区域局部阻力不同,空气卷吸规律复杂,因此隧道通风排烟、人员疏散以及灭火救援面临更多挑战[2]。

火灾烟气在分岔隧道内蔓延时,卷吸多路径空气,受分岔节点局部阻力影响,需要比单洞隧道更大的临界风速值和初始动量来控制烟气[3]。目前学者对卜型[4][5]、Y型[6]和T[7]型分岔隧道开展控制烟气逆流的临界风速研究,提出了影响临界风速的不同因素,建立了相关的临界风速表达式。Jiao [8]在匝道通风的分岔隧道内开展火灾实验,提出分流系数,建立了不同火源位置下临界风速的预测模型。目前研究主要针对水平分岔隧道,然而由于地理条件及城市地下道路需要连接地面道路,通常隧道主路会存在不同坡度,倾斜分岔隧道内控制烟气逆流的研究较少,缺乏对此类复杂隧道火灾机理的认识。

因此,本研究通过数值模拟开展主线不同坡度分岔隧道火灾烟气蔓延特性研究,分析分岔隧道主线上坡及下坡不同坡度的烟气蔓延行为,揭示主线坡度对分岔隧道内烟气流动的作用机制,指导分岔隧道防排烟设计,为防治此类隧道火灾提供参考。

2. 模型建立

本文研究方法采用火灾动力学软件FDS (Fire Dynamics Simulator)开展数值模拟,运用大涡模型(LES)计算,大涡模拟中使用了亚网格模型对湍流脉动和浮力动荡进行处理,大涡模型采用受浮力驱动低马赫数($Ma < 0.3$)流动的Navie-Stokes方程求解,遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒,其默认的湍流模型是Deardoriff模型,具体见文献[9]。

2.1. 物理模型

卜型分岔隧道如图1,隧道总长为609 m,高为7.1 m,分岔前主隧道长为375 m,宽为13.5 m,分岔后主隧道长为234 m,宽为9.75 m,匝道长188 m,宽7.5 m,分岔后主隧道与匝道的分岔角度为 5° 。隧道墙壁采用钢筋混凝土墙,其材料组成为:0.7混凝土和0.3钢筋。环境温度为 20°C ,大气压为标准大气压101,325 Pa,重力加速度为 9.8 m/s^2 。火源设置在分岔隧道分岔处,设定物体表面着火,火源表面尺

寸为 2 m (长) × 1 m (宽)。

在 FDS 模拟中网格尺寸是影响计算精度和运算时间的重要指标[10], 网格精度越小, 模拟结果越精确, 但模拟计算时间也越长。前人[11]已验证网格尺寸为 0.15 倍火源特征直径可以得到准确结果, 本研究按照此方式用最小火源热释放速率确定网格尺寸为 0.3 m, 为保证运算精度和充分利用运算资源分区设置网格尺寸, 因此火源两侧远火源区网格尺寸为 0.6 m。

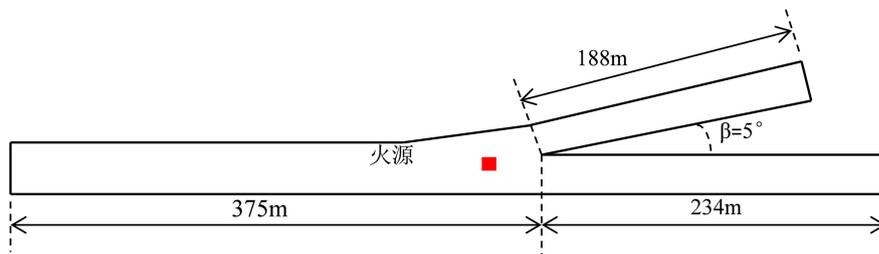


Figure 1. B-type bifurcated tunnel
图 1. 卜型分岔隧道

2.2. 工况设置

根据《道路隧道设计规范》中的设计要求, 可知不同的车型着火时的热释放速率不同, 小轿车火灾热释放速率为 3~5 MW, 货车的热释放速率为 10~15 MW, 长途汽车、公共汽车火灾热释放速率为 20~30 MW, 本文中设置火源热释放速率为 5 MW、10 MW 和 20 MW。根据《城市地下道路工程设计规范》中关于坡度的规定, 选取主隧道坡度为 -7°、-5°、-3°、0°、3°、5°、7°。

3. 结果讨论

3.1. 烟气逆流行为

平坡时, 热浮力作用下不断卷吸隧道周围空气形成火羽流, 烟气上升受到隧道顶棚的影响, 开始向沿着隧道顶棚向四周蔓延, 烟气蔓延至隧道侧壁后, 烟气被隧道侧壁影响变为沿隧道方向的纵向一维运动。而分岔前主线存在坡度时, 烟气向从隧道两端的三个出口排出后, 烟气会回流, 是由于隧道坡度引起的烟囱效应所导致。如图 2 为 HRR = 20 MW 条件下, 分岔前主线不同坡度的烟气蔓延情况。

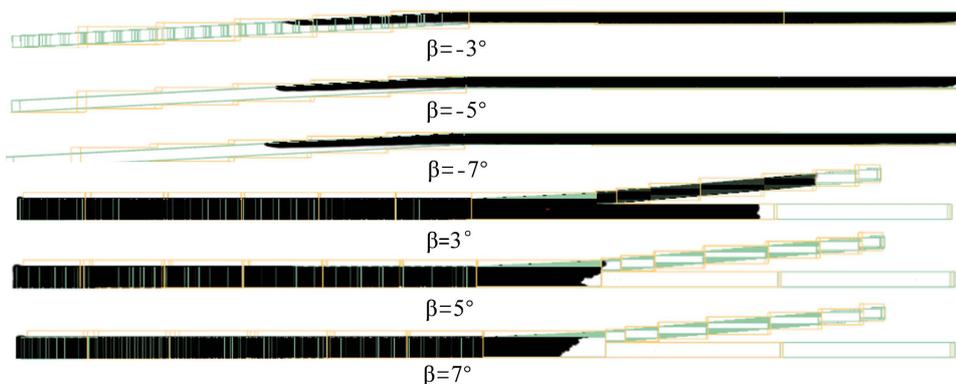


Figure 2. Flue gas counterflow length at different slopes (HRR = 5 MW)
图 2. 不同坡度烟气逆流长度(HRR = 5 MW)

烟囱效应的产生是在坡度隧道内外的压力差引起的, 根据伯努利定理, 隧道内外的压差表达式可以

表示为:

$$\Delta p_{a,b} = gh(\rho_a - \rho_b) \quad (1)$$

式中 $\Delta p_{a,b}$ 为隧道内外压差; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; h 为高度, m ; ρ_a 为隧道外空气密度, kg/m^3 ; ρ_b 为隧道内密度, kg/m^3 。

将空气和隧道内烟气看作为理想气体, 带入理想气体状态方程 $\rho = P/RT$ 可将上述方程转化为:

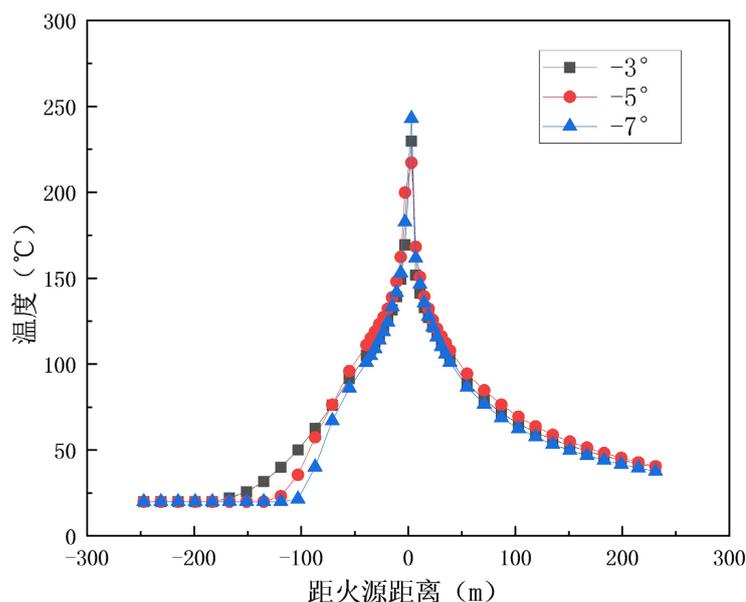
$$\Delta p_{a,b} = g \frac{p}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b} \right) \quad (2)$$

式中 p 为大气压强, 101.325 KPa ; R 为气体常数, $287.14 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{k})$; T_a 、 T_b 分别为隧道外热力学温度、隧道内烟气热力学温度, K 。

当分岔前主线隧道为负坡度时, 烟气从分岔后主线隧道和匝道出口排至外界, 分岔前主线隧道无烟气流出。随着坡度的增加, 分岔前主线隧道中的烟气逆流长度越来越短, 是由于分岔前主线隧道中倾斜的隧道顶棚阻挡了烟气的蔓延, 坡度增大, 隧道顶棚与烟气接触的截面积越大, 烟气受到的沿程阻力越大。由上式可知, 隧道长度不变, 随着隧道高差增大, 出口和平坡的压差增大, 烟气向出口的浮力作用也增强, 与顶棚的阻力共同作用下促使烟气向分岔后主线隧道和匝道出口流出。分岔前主线隧道为较小的负坡度时, 主线隧道内危险性更大, 在排烟设计中应重视主线隧道的通风。

当分岔前主线分岔隧道为正坡度时, 烟气从分岔前主线隧道出口流出, 分岔后主线隧道和匝道出口无烟气流出。当坡度为 3° 时, 分岔后主线隧道内的烟气回流长度比匝道内短, 随着坡度的增加, 分岔后主线隧道内的烟气回流长度与匝道内的差距逐渐增大。分岔后主线隧道烟气回流更短, 是由于分岔后主线隧道受烟囱效应影响大, 而匝道与分岔后主线隧道存在夹角, 分岔结构的局部阻力减弱匝道受到的烟囱效应作用力, 匝道内热浮力远大于烟囱效应抽吸力, 因此匝道内烟气向出口蔓延距离更长, 即烟气逆流长度更长。

3.2. 主线隧道顶棚温度



(a) 负坡度

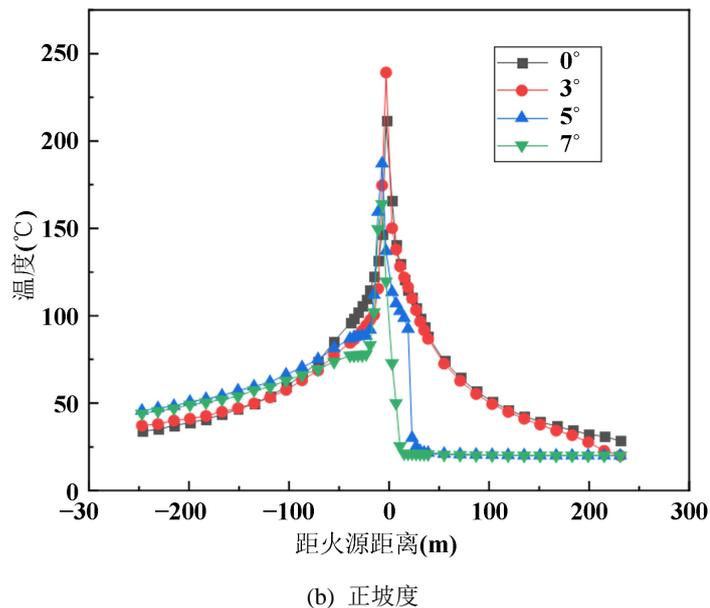


Figure 3. Maximum temperature of the ceiling in the bifurcated tunnel at different slopes
图 3. 不同坡度下分岔隧道内顶棚最高温度

图 3(a)为火源功率 10 MW 时, 负坡度主线隧道顶棚温度变化曲线, 图中左侧趋于水平的曲线表示隧道内无烟气, 距火源 100 m 位置处左侧温度普遍低于右侧温度, 这是由于分岔前主线隧道烟气回流长度短。左侧曲线中坡度越小, 距离火源 100 m 远处的温度更高, 且趋于环境温度的位置距离火源越远。

图 3(b)为火源功率 10 MW 时, 正坡度主线隧道顶棚温度变化曲线, 由火源左侧温度顶棚温度变化曲线可知, 在火源左侧且距火源 100 m 之后的位置, 5°和 7°的隧道顶棚温度变化曲线几乎重合, 且大于同一位置下坡度为 0°和 3°的顶棚温度。火源右侧的顶棚温度变化曲线中趋于水平的部分, 即为隧道内没有烟气的部分, 可见坡度越大, 烟气向隧道下游蔓延距离越短, 此原因为坡度越大, 隧道坡度产生的烟囱效应越强, 隧道内卷吸的空气就越多, 使得烟气向下游蔓延距离变短。坡度增大之后, 不同坡度下温度最高的探测点距火源距离有所增大, 且坡度对顶棚最高温度造成影响, 随着坡度不断升高, 隧道顶棚最高温度呈先升高后降低的形势。

可以看出, 当主线隧道为正坡度时, 与负坡度的同一坡度相比, 其温度衰减速率更大, 烟气回流长度更短, 大坡度时这种差距越大。是由于主线隧道为正坡度时, 匝道和分岔后主线隧道内的烟气受烟囱效应作用力的同时卷吸匝道和分岔后主线隧道 2 个出口处的新鲜空气。而负坡度时, 分岔前主线隧道受烟囱效应作用力和卷吸分岔前主线隧道 1 个出口处的新鲜空气。因此主线隧道为正坡度时, 匝道能够促进烟气快速回流, 为分岔后主线隧道提供有利的逃生条件, 在进行隧道防排烟设计时可以考虑在匝道设置通风系统。

3.3. 纵向温度分布

图 4 为 20 MW 时分岔隧道扩展段不同坡度下的纵向温度分布。主线隧道为正坡度时, 竖直向上蔓延的羽流区向分岔前主线隧道出口倾斜, 并且随着坡度的增加, 竖直向上的羽流区倾斜角度更大。同时火源左侧的高温区域逐渐变短, 右侧的温升区也随之变短, 其变化比左侧更剧烈。随着坡度的增加, 分岔前主线隧道内的烟气层厚度逐渐增加, 对分岔前主线隧道内人员安全的威胁更大。当隧道坡度为 7°时, 分岔后主线隧道内已经没有明显的温升变化了, 烟气前锋停在火源上方, 说明此坡度下分岔后主线隧道

内无烟气回流, 人们应尽快朝分岔后主线分岔隧道出口方向逃生。主线隧道为负坡度时, 竖直向上蔓延的羽流区向分岔后主线隧道出口倾斜, 但随着坡度的增加, 其倾斜角度轻微减小, 纵向高温区域变长。坡度越大, 竖直向上蔓延的羽流区域越大, 这说明主线隧道为负坡度时, 坡度越大越不利于控制烟气, 烟囱效应越强越抑制烟气回流。

主线隧道为正坡度时, 分岔后主线隧道和匝道出口只有流向火源方向的速度, 没有流向出口的速度, 说明该侧有新鲜空气流入并无热烟气流。烟气顶部流向分岔后主线方向, 热烟气与冷空气交界处却流向火源方向, 交界面卷吸形成涡旋结构。而分岔前主线出口只有向外流动的速度, 没有向内卷吸空气的速度, 说明烟囱效应导致该侧气流无反向气流, 有利于隧道内排烟。主线隧道为负坡度时, 分岔后主线隧道和匝道机有流向火源方向的速度也有流向出口的速度, 分岔前主线出口既有向外流动的速度也有向内卷吸空气的速度, 烟囱效应促进烟气向分岔前主线出口外流动, 抑制向内卷吸空气的速度, 不利于排烟, 相比平坡隧道, 需要更大的临界风速来控制烟气。

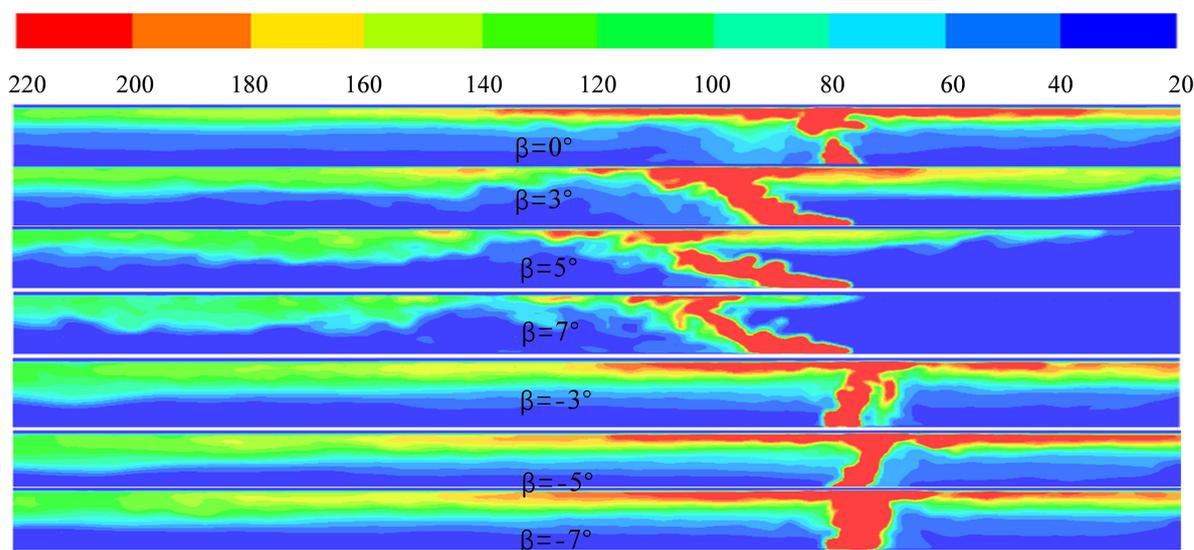


Figure 4. Longitudinal temperature distribution of bifurcated tunnels under different slopes

图 4. 不同坡度下分岔隧道纵向温度分布

4. 结论

本文通过 FDS 模拟主线不同坡度分岔隧道火灾, 分析主线坡度对烟气回流长度与隧道内温度分布的影响, 结论得出:

1) 主线为正坡度时, 随着坡度的增加, 烟气在分岔后主线隧道和匝道的回流长度变短, 竖直向上蔓延羽流区向分岔前主线隧道倾斜角度增大, 隧道上游温度普遍高于下游温度, 正烟囱效应有利于隧道内排烟。

2) 主线为负坡度时, 随着坡度的增加, 烟气在分岔前主线隧道的回流长度变长, 竖直向上蔓延羽流区向分岔后主线隧道倾斜角度减小, 负烟囱效应抑制隧道内排烟。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(项目批准号: YKJCX2220703)、重庆科技大学研究生创新计划项目(项目批准号: YKJCX2220702)。

参考文献

- [1] 殷岳, 梅深. 交通运输部发布《2021年交通运输行业发展统计公报》[J]. 水道港口, 2022, 43(3): 346.
- [2] 姚勇征, 宋格斌, 史聪灵, 等. 纵向通风下 T 型分岔隧道火灾烟气蔓延特性[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 115-120.
- [3] 李智胜, 蒋浩锴, 高云骥, 等. 分岔隧道火灾烟气流动特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 118-122.
- [4] 宋英华, 夏小雨, 雷鹏, 等. 纵向通风下 T 型分岔隧道火灾烟气流动特性的数值模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(12): 46-51.
- [5] 胡孙琪, 陈卫平, 陈屹东, 等. 含渐缩段 T 形分岔合流隧道火灾临界风速研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(8): 1041-1045.
- [6] 姜学鹏, 何超, 郭辉. Y 型合流分岔隧道临界风速计算模型[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 210-216.
- [7] 雷鹏, 陈长坤, 赵冬月. 纵向通风下分岔隧道火灾烟气蔓延特性及控制实验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 2117-2124.
- [8] Jiao, W.B., Chen, C.K., Lei, P., *et al.* (2024) Experimental Study on the Effects of Branch Tunnel Ventilation on the Smoke Movement and Temperature Characteristics in Bifurcated Tunnel Fires. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, **144**, Article ID: 105529. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105529>
- [9] McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., *et al.* (2019) Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [10] Yao, Y.Z., Li, Y.Z., Ingason, H., *et al.* (2019) Numerical Study on Overall Smoke Control Using Naturally Ventilated Shafts during Fires in a Road Tunnel. *International Journal of Thermal Sciences*, **140**, 491-504. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.016>
- [11] 黄有波. 城市地下分岔隧道火灾烟气蔓延特性与烟气控制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2020.