

分岔隧道主线下游坡度对烟气回流长度的影响研究

罗成佳*, 廖梓富

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月9日; 录用日期: 2025年11月5日; 发布日期: 2025年11月14日

摘要

为探析分岔隧道内火灾烟气蔓延规律, 通过数值模拟研究了主线隧道下游坡度, 纵向通风速度与热释放速率对烟气逆流长度的影响。设置分岔隧道下游坡度为1%、3%、5%、7%, 火源热释放速率为2 MW、3 MW和5 MW。研究得出, 主线隧道下游坡度变化明显影响隧道内烟气流动, 随着下游坡度增加, 隧道内烟气回流长度逐渐变短。

关键词

分岔隧道, 烟气蔓延, 主线坡度, 烟囱效应

Effect of the Mainline Downstream Slope on Smoke Back-Layering Length in Bifurcated Tunnels

Chengjia Luo*, Zifu Liao

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

Received: October 9, 2025; accepted: November 5, 2025; published: November 14, 2025

Abstract

To elucidate the spread of fire-induced smoke in bifurcated tunnels, numerical simulations were performed to quantify the effects of the downstream slope of the mainline tunnel, the longitudinal ventilation velocity, and the heat release rate on the smoke back-layering length. The downstream slope was set to 1%, 3%, 5%, and 7%, and the heat release rate to 2 MW, 3 MW and 5 MW. The results

*通讯作者。

indicate that variations in the downstream slope significantly influence in-tunnel smoke flow; as the downstream slope increases, the smoke back-layering length progressively decreases.

Keywords

Bifurcated Tunnel, Smoke Movement, Mainline Slope, Stack Effect

Copyright © 2025 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

隧道作为现代交通基础设施的重要组成部分, 具有空间狭长封闭、通风受限等特点, 一旦发生火灾, 高温烟是导致人员伤亡的主要因素[1] [2]。为有效降低火灾烟气产生的危害, 隧道通常会设置通风系统阻止烟气向隧道上游区域蔓延, 为人员疏散与消防救援提供安全保障。而防止烟气发生回流的最小通风速度被定义为临界风速[3] [4]。当纵向通风速度低于该值时, 烟气回流长度是危及上游人员安全的重要因素。

既有的研究大多集中于单管水平隧道并探析纵向风速[5] [6]对烟气回流长度的影响。例如, Zhang [7]等通过数值模拟研究了自然通风条件下热释放速率、隧道坡度与隧道宽度对烟气回流长度的影响, 建立了考虑隧道坡度的烟气回流长度预测模型; Weng 等[8]利用 FDS 研究了坡度为-3%~3%时, 坡度对烟气回流长度和临界风速的影响, 并提出了含有坡度修正系数的预测模型; Kong 等[9]采用数值模拟的方法重点研究了火源位置的变化对隧道烟气回流长度的影响, 并建立了预测烟气回流长度的经验模型。当前研究主要是针对于单管倾斜隧道内的烟气蔓延特性, 然而, 但是在实际条件下, 分岔隧道与地面连接时通常会存在不同形式的坡度, 在这种情况下, 由纵坡形成烟囱效应会引发诱导风速并隧道内烟气输运规律造成影响[10]。

因此, 本文采用理论分析与数值模拟相结合的方式探析分岔隧道内坡度对烟气回流长度的影响, 明晰诱导气流耦合纵向风速对隧道上游烟气逆流行为的影响机制, 建立隧道上游烟气回流长度预测模型, 以为分岔隧道火灾通风控制策略的制定提供理论依据与技术支持。

2. 模型设置

在既有的研究中, FDS 能够准确模拟火灾烟气扩散, 已经广泛应用于隧道火灾研究[11]。分岔隧道模型如图 1 所示, 主线隧道分岔前后长度均为 93 m, 分岔区域长 14 m, 高度为 5 m, 宽 10 m, 匝道长、宽、高分别 80 m、7 m 与 5 m。设置主线隧道分岔后存在坡度, 由 1%至 7%内变化, 间隔为 2%。火源热释放速率(HRR)为 2 MW、3 MW、5 MW、纵向通风速度为 0.15 m/s、0.18 m/s、0.2 m/s、0.22 m/s、0.25 m/s。隧道入口指定为“OPEN”, 隧道的壁面材料设置为“CONCRETE”, 环境温度设置为 12°C, 热电偶布置在顶棚下方 0.1 m 处, 分岔区域纵向布置间距为 0.5 m, 其余区域布置间距为 1 m。

网格尺寸分析

为验证模拟数据的可靠性, 开展网格的无关性检验。根据 FDS 验证指南及技术说明的建议[12], 火源特征直径与网格尺寸的比值应控制在 4~16。热释放速率为 5 MW 条件下, 计算得出网格尺寸应该在 0.1~0.5 范围内。不同网格尺寸下纵向温度分布如图 2 所示。可以观察到, 随着网格尺寸的减小, 数值模拟结果的差异越来越小, 而 0.15 m 与 0.2 m 网格尺寸下模拟结果差距较小, 因此采用 0.2 m 的网格进行

模拟。图3展示了与前人的实验工况进行了对比[13], 发现对比结果较为吻合。

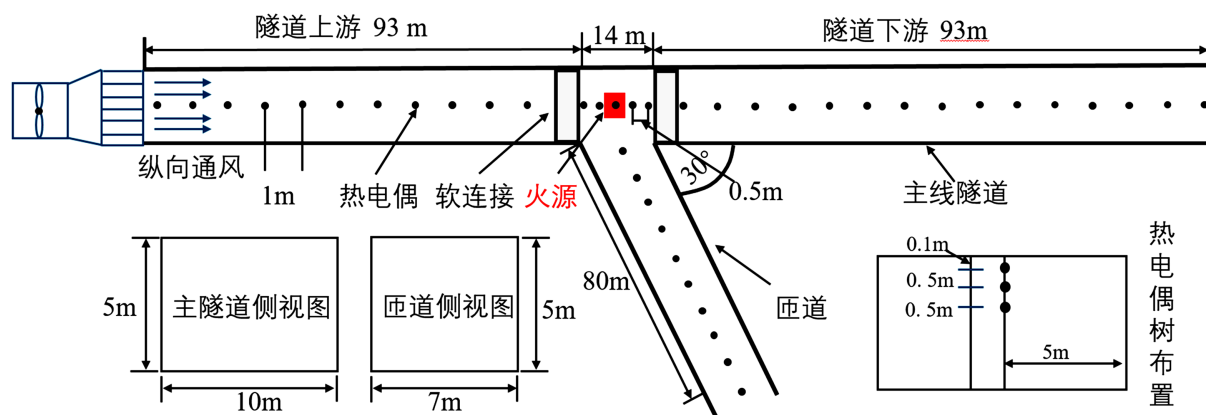


Figure 1. Branch tunnel model

图1. 分岔隧道模型

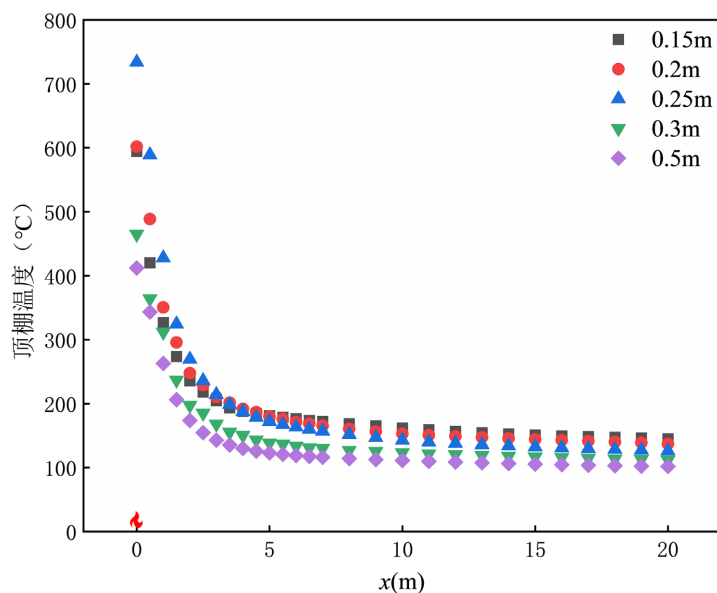


Figure 2. Mesh size analysis

图2. 网格尺寸分析

3. 结果与分析

3.1. 烟气回流长度变化规律

在隧道火灾中, 烟气的蔓延行为直接决定了火灾对人员疏散、安全救援和结构防护的威胁程度。其中, 烟气回流长度是指高温烟气沿隧道顶棚向隧道一侧逆风扩散时, 烟气前锋与火源之间的距离。该长度反映了在浮力驱动与纵向通风之间的相互作用下, 烟气沿顶棚逆向传播的最大距离。获取烟气回流长度的方法通常有两种, 一种是通过设置激光片光源, 增强烟气层的可视性, 结合高清摄像设备对烟气运动过程进行实时记录, 从而直观判断烟气前锋位置, 进而获取逆流长度; 另一种方式是通过获得热电偶的温度变化获得, 即以顶棚温度相对于环境温度升高达到某一临界值(5°C)的位置作为判定依据。

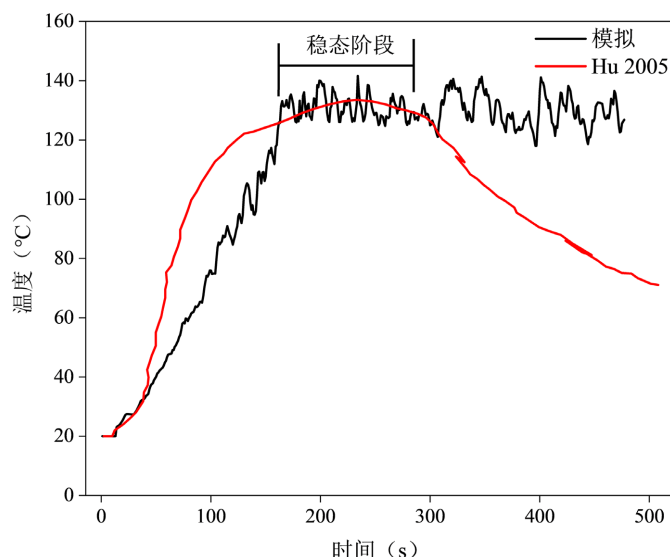


Figure 3. Comparison with previous experimental conditions
图 3. 与前人实验工况对比

图 2 给出了在不同工况下的烟气回流长度。可以发现, 在纵向通风条件下, 烟气在蔓延过程中会受到纵向风速的反向剪切力与摩擦阻力, 削弱了由热浮力驱动所产生的烟气动量, 导致逆流的烟气被限制在一定范围内。当热释放速率与主线下游坡度固定时, 烟气逆流长度随纵向风速的增加而减小。以热释放速率 5 MW, 主线隧道下游坡度为 0%~0% 为例, 纵向通风速度为 1.5 m/s 时, 其烟气逆流长度约为 68 m, 纵向风速增加至 2.5 m/s 时, 烟气逆流长度骤减至 4.5 m。这主要是因为热释放速率恒定时, 其产生的热浮力也保持不变。而随着纵向风速增加, 会导致烟气逆流过程中所受到的剪切力与阻力增大。因此随着纵向通风速度的增加, 烟气逆流长度越短。由此可见, 隧道内的纵向风速是影响烟气回流长度的关键因素之一。当纵向风速固定不变时($V=0.15$ m/s), 随着热释放速率由 2 MW 分别增加至 3 MW 和 5 MW, 此时的烟气逆流长度分别为 21 m、32 m 和 68 m。这是因为热释放速率增加, 使更多烟气汇聚于顶棚下方, 进一步加剧了烟气与环境之间的密度差, 进而增强了烟气前锋与环境之间的静压力, 导致烟气蔓延至隧道更远处[14]。这就意味着需要更大的风速才能控制烟气回流长度。从图 4 可以发现, 热释放速率与纵向风速固定时, 烟气逆流长度会随着主线隧道下游坡度的增加而减小。以热释放速率 5 MW, 风速 0.15 m/s 为例, 主线隧道上游坡度固定为 0%, 下游坡度由 0% 逐渐增加至 7% 时, 在上游区域的烟气逆流长度分别为 68 m、64 m、53 m、44 m 和 38 m。这主要是因为隧道下游坡度增加, 主线上游区域处于水平状态, 下游区域会与上游区域产生高差。该纵向高差增强了隧道内部的烟囱效应, 促使外部冷空气自上游入口处被吸入, 从而加剧了隧道内的纵向气流运动, 导致烟气回流长度随坡度增加而减小。

图 5 展示了自然通风条件下隧道内纵向速度分布。图中“-”代表风速方向由隧道下游方向流向隧道上游, “+”则代表风速方向由隧道上游方向流向隧道下游。以热释放速率 5 MW 为例, 可以观察到, 在无坡度条件下隧道中, 顶棚下方两侧的烟气流速几乎相同, 且烟气层下方的空气补入速度也十分接近。但是, 随着隧道下游坡度的逐渐增加, 从隧道上游入口进入的诱导风速也逐渐增加, 由 0.5 m/s 逐渐增加至 1.2 m/s。因此, 随着隧道下游坡度的逐渐增加, 达到临界风速所需的纵向通风速度更小。

表 1 展示了 3 种热释放速率(2 MW、3 MW、5 MW)与主线坡度对隧道下游烟气体积流量的影响。从表中可以观察到, 随着热释放速率由 2 MW 增大至 5 MW 时, 隧道下游出口处的烟气体积流量都在逐渐上升。而在同一热释放速率条件下, 随着隧道下游坡度的逐渐增加, 导致烟囱效应增强, 其烟气的体积流量也逐

渐增加。以热释放速率 2 MW 为例, 隧道下游坡度由 1% 增加至 7% 时, 烟气体积流量增加了约 1.2 倍。

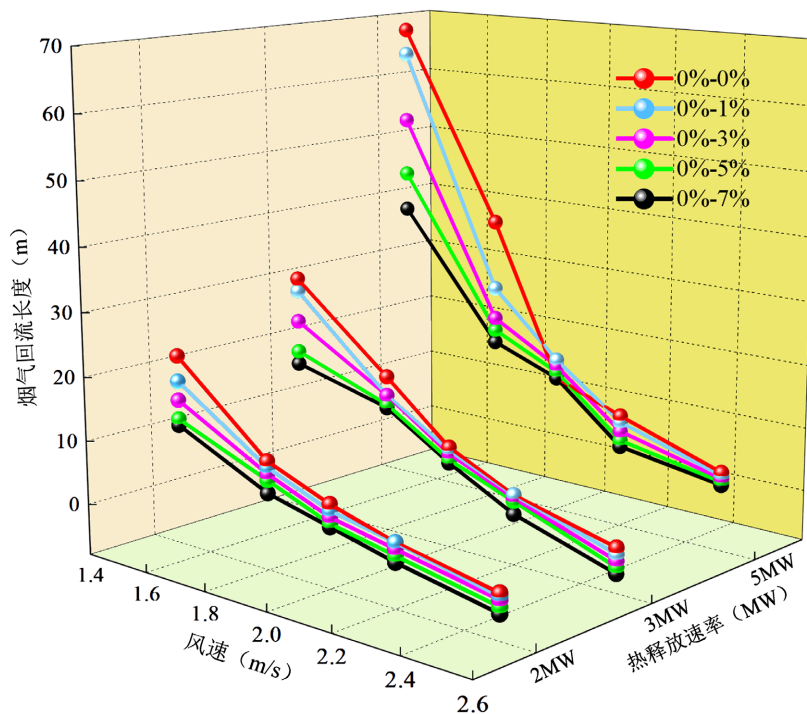


Figure 4. Smoke back-layering length under different conditions

图 4. 不同工况下烟气回流长度

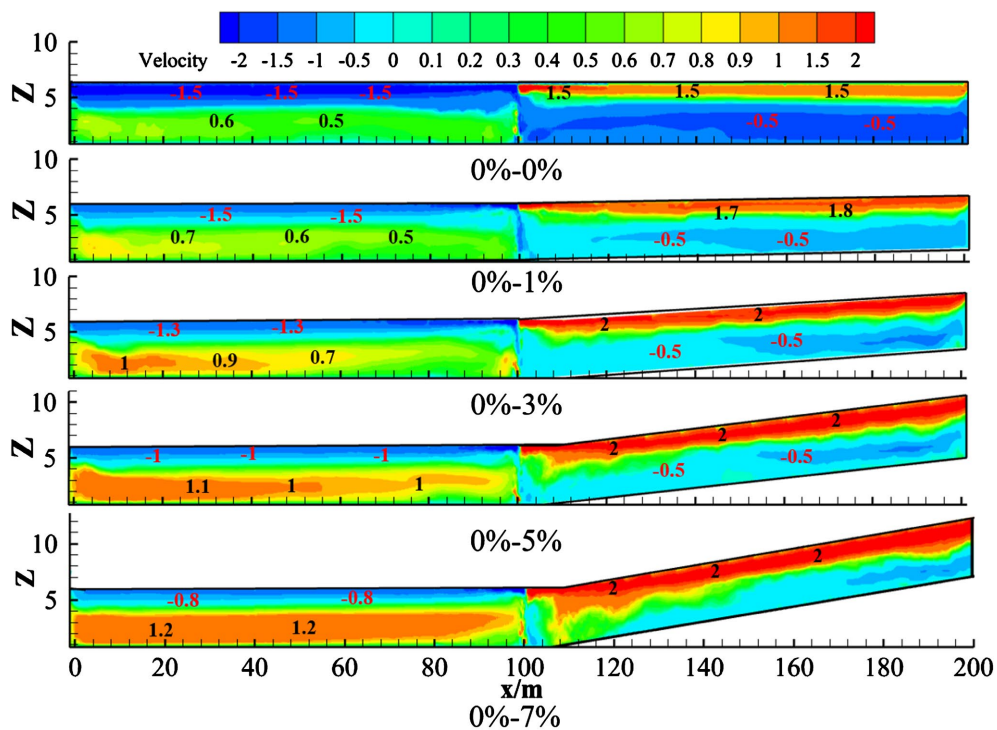


Figure 5. Velocity distribution in the main tunnel

图 5. 主线隧道内速度分布

Table 1. Volumetric smoke flow rate downstream of the tunnel
表 1. 隧道下游烟气体积流量

序号	热释放速率(MW)	隧道上游 - 下游坡度(%)	隧道下游烟气体积流量(m ³ /s)
1~3	2、3、5	0~1	16.38、18.15、22.99
3~6	2、3、5	0~3	23.78、25.83、32.20
7~9	2、3、5	0~5	32.16、35.2、43.31
10~12	2、3、5	0~7	36.60、39.19、47.98

3.2. 烟气回流长度预测模型

通过上述分析可知, 影响主线隧道内烟气回流长度的关键因素主要包括热释放速率 Q , 纵向通风速度 v , 重力加速度 g , 空气密度 ρ_0 , 空气比热容 c_p , 环境温度 T_0 , 隧道上游坡度 α_u , 隧道下游坡度 α_d 等参数, 所有物理量的因次形式如表 2 所示。无量纲烟气回流长度可以表示为式(1):

$$T_{max} = f(L, Q, V, g, \rho_0, c_p, T_0, H, \alpha_u, \alpha_d) \quad (1)$$

Table 2. Dimensional table of physical quantities
表 2. 物理量因次表

序号	物理参数	符号	因次形式
1	烟气回流长度	L	L
2	纵向通风速度	v	LT^{-1}
3	热释放速率	Q	ML^2T^{-3}
4	隧道上游坡度	α_u	-
5	隧道下游坡度	α_d	-
6	隧道高度	H	L
7	重力加速度	g	LT^{-2}
8	空气密度	ρ_0	ML^{-3}
9	环境温度	T_0	Θ
10	空气比热容	c_p	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$

分别取[M]、[L]、[T]、[Θ]为四个基本量, 以 ρ_0 、 T_0 、 g 、 H 为基本物理量, 利用无量纲定理, 得到如下无量纲关系式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_L = L\rho_0^{a_1}g^{b_1}H^{c_1}T_0^{d_1} = L[ML^{-3}]^{a_1}[LT^{-2}]^{b_1}[L]^{c_1}[\Theta]^{d_1} \\ \Pi_v = v\rho_0^{a_2}g^{b_2}H^{c_2}T_0^{d_2} = [LT^{-1}][ML^{-3}]^{a_2}[LT^{-2}]^{b_2}[L]^{c_2}[\Theta]^{d_2} \\ \Pi_Q = Q\rho_0^{a_3}g^{b_3}H^{c_3}T_0^{d_3} = [ML^2T^{-3}][ML^{-3}]^{a_3}[LT^{-2}]^{b_3}[L]^{c_3}[\Theta]^{d_3} \\ \Pi_{c_p} = c_p\rho_0^{a_4}g^{b_4}H^{c_4}T_0^{d_4} = [L^2T^{-2}\Theta^{-1}][ML^{-3}]^{a_4}[LT^{-2}]^{b_4}[L]^{c_4}[\Theta]^{d_4} \\ \Pi_{a_u} = a_u = a_u[ML^{-3}]^{a_5}[LT^{-2}]^{b_5}[L]^{c_5}[\Theta]^{d_5} \\ \Pi_{a_d} = a_d = a_d[ML^{-3}]^{a_6}[LT^{-2}]^{b_6}[L]^{c_6}[\Theta]^{d_6} \end{array} \right. \quad (2)$$

经过计算可以得出:

$$\Pi_1 = \frac{L}{H}, \quad \Pi_2 = \frac{V}{\sqrt{gH}}, \quad \Pi_Q = \frac{Q}{\rho_0 g^{3/2} H^{7/2}}, \quad \Pi_{cp} = \frac{c_p T_0}{gH}, \quad \Pi_5 = \alpha_u, \quad \Pi_6 = \alpha_d \quad (3)$$

$$f\left(\frac{L}{H}, \frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{Q}{\rho_0 g^{3/2} H^{7/2}}, \frac{c_p T_0}{gH}, \alpha_u, \alpha_d\right) = 0 \quad (4)$$

进一步简化可以得到:

$$\frac{L}{H} = f\left(\frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{Q}{c_p T_0 \rho_0 g^{5/2} H^{5/2}}, \alpha_u, \alpha_d\right) \quad (5)$$

在前人的研究中, Thomas [15]对纵向通风条件下水平隧道火灾烟气逆流长度进行了理论分析, 提出了无量纲形式的烟气逆流长度预测模型:

$$L_b^* = \frac{L_b}{H} = f\left(\frac{gQ}{\rho_\infty T_\infty c_p V^3 H}\right) \quad (6)$$

式(5) (6)中 L_b 为烟气回流长度, m; H 为隧道高度, m, V 为纵向通风速度, m/s。

在 Thomas 研究的基础上, Vantelon [16]等(1991)进行了小尺寸模型试验, 发现无量纲烟气回流长度可以用修正的 Ri 数的 0.3 次方表示:

$$L_b^* = \frac{L_b}{H} = f\left(\frac{gQ}{\rho_\infty T_\infty c_p V^3 H}\right)^{0.3} = Ri^{0.3} \quad (7)$$

Li [6]等通过小尺寸实验, 研究了水平隧道火灾中烟气回流长度与纵向速度之间的关系, 并提出了相应的预测公式:

$$L_b^* = \begin{cases} 18.5 \ln(0.81 Q^{*1/3} / V^*), & Q^* \leq 0.15 \\ 18.5 \ln(0.43 Q^{*1/3} / V^*), & Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (8)$$

Kong [9]等针对自然通风条件下具有纵坡的单管倾斜隧道火灾烟气回流行为开展研究, 基于数值模拟结果建立了考虑诱导风速的无量纲回流长度预测模型, 并提出如下关系式:

$$L_b^* = 3.65 \ln \left(\frac{gQ}{\rho_\infty T_\infty c_p \left(0.14 \frac{L_{down} \theta}{\sqrt{1+\theta^2}} + 0.1526 \right)^3 H} \right) + 0.91 \quad (9)$$

基于上文的 Π 定理推导与既有研究, 可知无量纲烟气回流长度 L^* 与 $\ln(Q^*/V^{*3})$ 呈线性关系。因此, 本文采用式(10)对分岔隧道的烟气回流长度进行计算:

$$L^* = a \ln \left(\frac{Q^*}{V^{*3}} \right) + b \quad (10)$$

式中 a 和 b 是待定系数, 与分岔隧道主线坡度有关, 需根据模数值模拟的数据确定。

将烟气回流长度的无量纲值与无量纲热释放速率、无量纲风速以及主线隧道下游坡度的关系进行拟合合并表示为图 6。可以发现, 无量纲烟气回流长度随 $\ln(Q^*/V^{*3})$ 增大而线性增加, 但是对于不同隧道坡度

拟合函数存在较大差异, 表 3 给出了不同主线隧道下游坡度对应的系数。

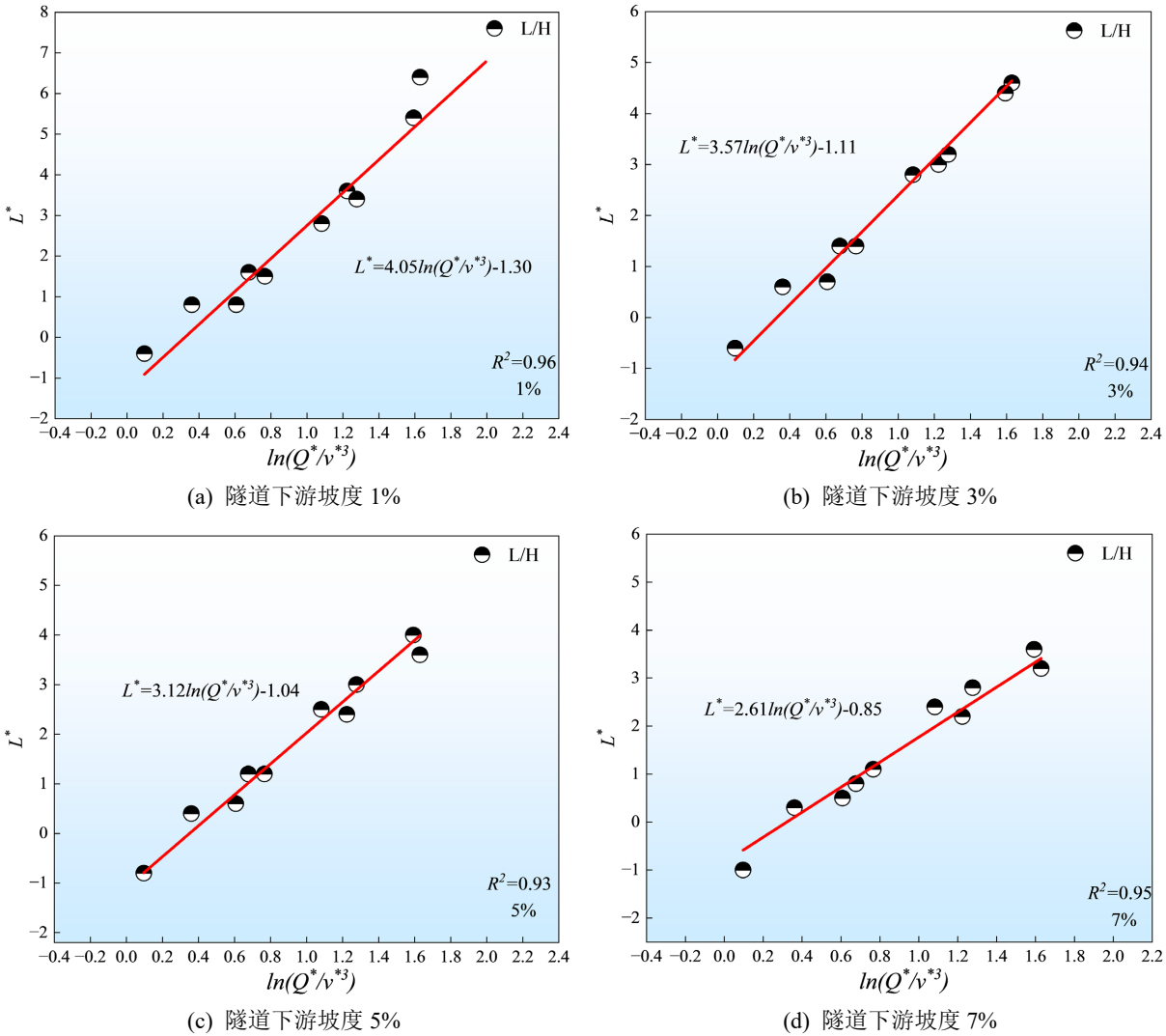


Figure 6. Nondimensional smoke back-layering length under different mainline slopes

图 6. 同主线坡度下无量纲烟气逆流长度

Table 3. Mainline slope coefficients a and b

表 3. 主线坡度系数 a 和 b

主线隧道下游坡度	a	b	R^2
1	4.05	-1.30	0.96
3	3.57	-1.11	0.94
5	3.12	-1.04	0.93
7	2.61	-0.85	0.95

R^2 值通常用于检测拟合效果, 其越接近 1 说明拟合效果越好, 根据表 3 可以看出拟合结果 R^2 值都在 0.90 以上, 由此说明实验数据拟合效果较合理。如图 7 所示, 系数 a , b 与主线隧道下游坡度呈一元二次

函数关系, 系数 a 随主线隧道下游坡度增加而上升, 系数 b 随主线隧道下游坡度增加而降低, 将系数 a , b 与主线隧道下游坡度进行拟合, 得出系数 a , b 的表达式:

$$\begin{cases} a = -0.26\beta + 4.43 \\ b = 0.08\beta - 1.41 \end{cases} \quad (11)$$

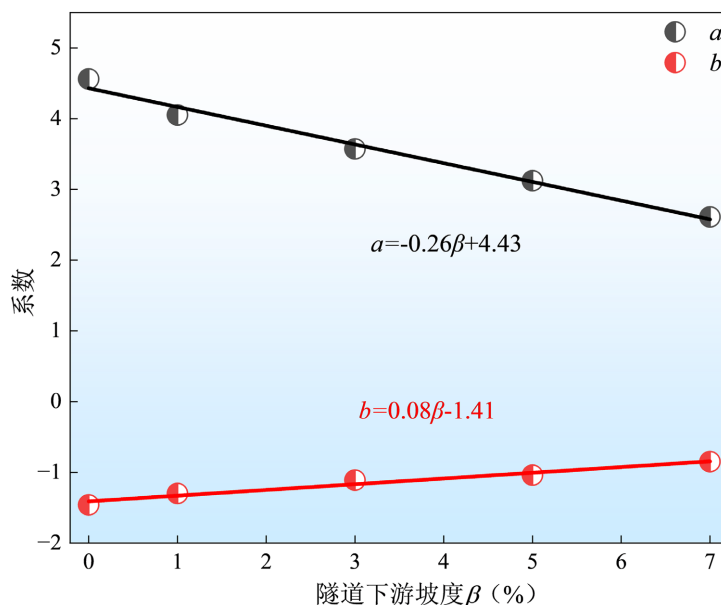


Figure 7. Relationship between coefficients a and b and the downstream tunnel slope β of the mainline tunnel
图 7. 系数 a , b 与主线隧道下游坡度 β 之间的关系

综上所述, 分岔隧道下游坡度改变时, 不同热释放速率与纵向通风条件下的无量纲烟气回流长度的计算公式如式(12)所示。本公式适用于分岔隧道下游坡度为 0%~7% 工况, 热释放速率为 2 MW~5 MW, 超出上述范围的情形未考虑。

$$\frac{L}{H} = (4.43 - 0.26\beta) \ln \left(\frac{Q^*}{V^{*3}} \right) + (0.08\beta - 1.41) \quad (12)$$

4. 结语

本文通过数值模拟研究了分岔隧道内的火灾烟气蔓延规律, 分析了主线隧道下游坡度、热释放速率与纵向风速对烟气回流长度的影响, 研究得出: 分岔隧道内纵向通风速度与烟气回流长度呈反比, 随着纵向风速的增加, 烟气回流长度逐渐降低。主线隧道下游坡度增加, 会导致烟气在主线隧道上游的回流距离变短。在风速固定条件下, 烟气回流长度与热释放速率呈正比。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目 YKJCX2420704。

参考文献

- [1] Liu, C., Zhong, M., Shi, C., Zhang, P. and Tian, X. (2017) Temperature Profile of Fire-Induced Smoke in Node Area of a Full-Scale Mine Shaft Tunnel under Natural Ventilation. *Applied Thermal Engineering*, **110**, 382-389.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.147>

- [2] Lu, X., Weng, M., Liu, F., Wang, F., Han, J. and Chipok Cheung, S. (2022) Effect of Bifurcation Angle and Fire Location on Smoke Temperature Profile in Longitudinal Ventilated Bifurcated Tunnel Fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **127**, Article ID: 104610. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104610>
- [3] Zhu, Y., Tang, F., Chen, L., Wang, Q. and Xu, X. (2020) Effect of Lateral Concentrated Smoke Extraction on the Smoke Back-Layering Length and Critical Velocity in a Longitudinal Ventilation Tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **207**, Article ID: 104403. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104403>
- [4] Tang, F., Deng, L., Meng, N., McNamee, M., Van Hees, P. and Hu, L. (2020) Critical Longitudinal Ventilation Velocity for Smoke Control in a Tunnel Induced by Two Nearby Fires of Various Distances: Experiments and a Revisited Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **105**, Article ID: 103559. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103559>
- [5] Wu, Y. and Bakar, M.Z.A. (2000) Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems—A Study of the Critical Velocity. *Fire Safety Journal*, **35**, 363-390. [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(00\)00031-x](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(00)00031-x)
- [6] Li, Y.Z., Lei, B. and Ingason, H. (2010) Study of Critical Velocity and Backlayering Length in Longitudinally Ventilated Tunnel Fires. *Fire Safety Journal*, **45**, 361-370. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.07.003>
- [7] Zhang, X., Lin, Y., Shi, C. and Zhang, J. (2021) Numerical Simulation on the Maximum Temperature and Smoke Back-Layering Length in a Tilted Tunnel under Natural Ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **107**, Article ID: 103661. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103661>
- [8] Weng, M., Lu, X., Liu, F. and Du, C. (2016) Study on the Critical Velocity in a Sloping Tunnel Fire under Longitudinal Ventilation. *Applied Thermal Engineering*, **94**, 422-434. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.059>
- [9] Kong, J., Xu, Z., You, W., Wang, B., Liang, Y. and Chen, T. (2021) Study of Smoke Back-Layering Length with Different Longitudinal Fire Locations in Inclined Tunnels under Natural Ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **107**, Article ID: 103663. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103663>
- [10] Gao, Z., Li, L., Sun, C., Zhong, W. and Yan, C. (2022) Effect of Longitudinal Slope on the Smoke Propagation and Ceiling Temperature Characterization in Sloping Tunnel Fires under Natural Ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **123**, Article ID: 104396. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104396>
- [11] Lu, X.L., Weng, M.C., Liu, F., *et al.* (2024) Study on Smoke Sealing Effectiveness of the Air Curtain in Exit Bifurcated Tunnel Fires. *Case Studies in Thermal Engineering*, **63**, Article ID: 105380.
- [12] McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C. and Overholt, K. (2018) Fire Dynamics Simulator User's Guide. National Institute of Standards and Technology.
- [13] Hu, L.H., Huo, R., Li, Y.Z., Wang, H.B. and Chow, W.K. (2005) Full-Scale Burning Tests on Studying Smoke Temperature and Velocity along a Corridor. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.007>
- [14] 李智胜. 城市道路分岔隧道典型火灾场景火焰行为及烟气输运特性[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [15] Thomas, P.H. (1958) The Movement of Buoyant Fluid against a Stream and the Venting of Underground Fires. *Fire Safety Science*, **351**, 1-9.
- [16] Vantelon, J., Guelzim, A., Quach, D., Son, D., Gabay, D. and Dallest, D. (1991) Investigation of Fire-Induced Smoke Movement in Tunnels and Stations: An Application to the Paris Metro. *Fire Safety Science*, **3**, 907-918. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.3-907>