

地铁联络线火灾蔓延规律的研究

王元裕¹, 郭 稳², 陈 昊¹

¹中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州

²徐州地铁运营有限公司安全技术部, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年5月22日; 录用日期: 2025年7月10日; 发布日期: 2025年7月22日

摘 要

伴随城市地铁网络的拓展, 跨线运营安全成为重要课题。研究选取某站地铁1、3号线联络线为研究对象, 针对联络线火灾控制与人员疏散难题, 设置两种火灾工况, 模拟联络线与1号线正线分岔点处列车火灾场景下不同排烟方式对能见度、温度分布及CO浓度的影响。工况2 (往1号线排烟) 相较于工况1 (往3号线排烟) 各节车厢及车厢附近区域达到危险状态的时间延迟, 更有利于人员疏散。该研究成果为优化地铁联络线火灾防控措施及后续的跨线运行提供了理论支撑。

关键词

地铁联络线, 跨线运营, 排烟工况, 火灾蔓延规律, 人员疏散

Research on the Fire Spread Law of Subway Connection Lines

Yuanyu Wang¹, Wen Guo², Hao Chen¹

¹School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²Department of the Safety Technology, Xuzhou Metro Operation Co., Ltd., Xuzhou Jiangsu

Received: May 22nd, 2025; accepted: Jul. 10th, 2025; published: Jul. 22nd, 2025

Abstract

With the expansion of urban subway networks, the safety of cross-line operations has become an important issue. This study selects the connecting line between Metro Line 1 and Line 3 at a certain station as the research object. Aiming at the challenges of fire control and personnel evacuation in the connecting line, two fire scenarios are set up to simulate the effects of different smoke exhaust modes on visibility, temperature distribution, and CO concentration in the fire scene of a train at the branching point between the connecting line and the main line of Line 1. Compared with Scenario 1 (smoke exhaust towards Line 3), Scenario 2 (smoke exhaust towards Line 1) delays the time for each carriage

文章引用: 王元裕, 郭稳, 陈昊. 地铁联络线火灾蔓延规律的研究[J]. 交通技术, 2025, 14(4): 424-436.

DOI: 10.12677/ojtt.2025.144043

and the area near the carriage to reach a dangerous state, which is more conducive to personnel evacuation. The research results provide a theoretical support for optimizing fire prevention and control measures for subway connecting lines and subsequent cross-line operations.

Keywords

Metro Connecting Line, Cross-Line Operation, Smoke Extraction Scenario, Fire Spread Pattern, Personnel Evacuation

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

随着我国城市化推进和人口激增,城市交通压力剧增,地铁凭借高效大运量的优势广泛发展。但单一线路运营难以提高整体运营效率。因此,地铁网络化成为必然趋势,其中联络线是成网关键。联络线在火灾控制与人员疏散上更为复杂,集中体现在火灾发展迅猛、烟气蔓延难控、疏散救援困难三方面[1][2]。

在分岔隧道火灾特点上,众多学者开展了丰富探索。在温度方面,刘畅等[3]利用全尺寸模型剖析分岔隧道火源下的温度、烟气分布特征;Lu 等人[4]搭建缩尺模型探究自然与纵向通风时,火源位置对分岔隧道温度影响;Huang 等[5]研究岔路隧道分叉角度与顶棚温度关系;李涛等人[6]搭建 1:10 的缩尺寸实验平台研究纵向通风和空气幕协调作用下城市分岔隧道沿程温度和最高温度的变化规律。在通风控制与排烟方面:赵建龙[7]搭建了 1:20 分岔隧道实验台研究城市地下道路分岔隧道中阻塞效应对烟气控制的影响。李雯[2]借助 CFD 数值模拟软件研究不同火源位置、功率以及分叉角度对于地铁 Y 型隧道烟气的影响,在最不利条件下加入纵向通风,提出合理的通风建议保障人员疏散的安全。黄家成、姚勇征、徐顺福[8]-[10]借助 FDS 数值模拟软件分别研究多匝道公路隧道、T 型公路隧道、“日”字型 UTLT 隧道在不同纵向通风风速下烟气的蔓延规律,并提出了相应的通风策略。

综上所述,国内外专家学者对于地铁隧道的火灾与人员疏散的研究取得了丰硕的成果,但仍存在一些不足:(1) 目前研究主要针对于单一线路的隧道,对于含联络线的地铁隧道的研究偏少,研究主要集中于城市道路分岔隧道;(2) 尽管目前我国地铁隧道大多采取纵向通风模式,国内外有关学者对地铁正线隧道自然通风和机械通风已有诸多成果,但联络线与正线协同通风的优化策略尚不完善。在通风方面只关注隧道整体的变化,却忽略了研究列车车厢内部情况,在此方面还需进行完善。

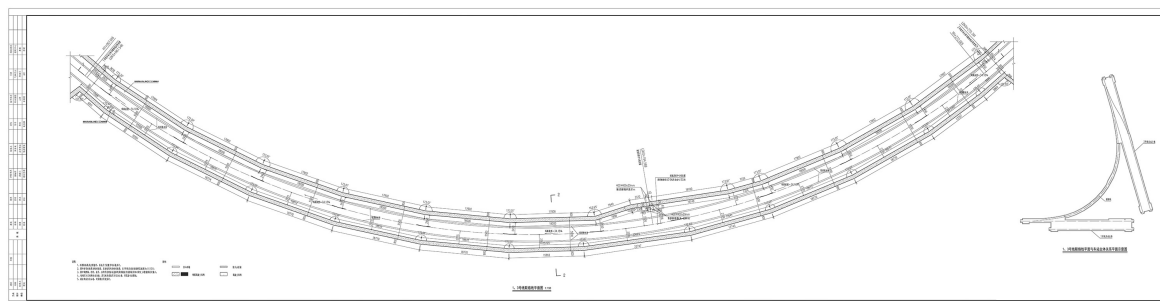


Figure 1. The size of the connecting line

图 1. 联络线尺寸

对此,本文以某站为地铁 1、3 号线换乘站为例,其两线站台层由长度为 205 m、坡度为 34.18%、曲率半径为 150 m 的联络线相连。联络线内距 3 号线叉心 150 m 处侧墙设有两台风速为 39.4 m/s 双向射流风机。联络线的尺寸如图 1 所示。1 号线车站两端(区域 1 和区域 5)及 3 号线车站两端(区域 16 和区域 21)(区域划分见图 5)各配备两台排烟量为 60 m³/s 的隧道风机。

2. 模拟准备工作

2.1. 模型的建立

BIM 建模是基于建筑信息模型(BIM)技术,通过专业软件(如 Revit、Navisworks 等)构建三维数字化建筑模型的过程。它将建筑的几何形状、材料属性、设备参数等信息集成到模型中,不仅直观呈现建筑外观和内部结构,还能模拟施工流程、检测设计碰撞,为建筑全生命周期(设计、施工、运营)提供数据支撑,实现高效协同管理。根据上述数据,对该站联络线进行建模,建立好的模型如图 2 所示。

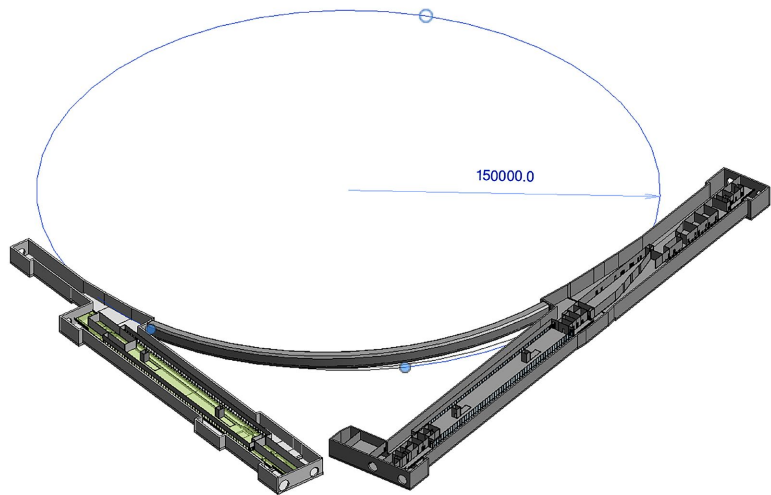


Figure 2. BIM model of the connection line
图 2. 联络线 BIM 模型

最后,将建立好的模型转成 IFC 格式,导入后续的火灾模拟软件,为后续的火灾模拟做准备。

2.2. 火灾模拟软件介绍

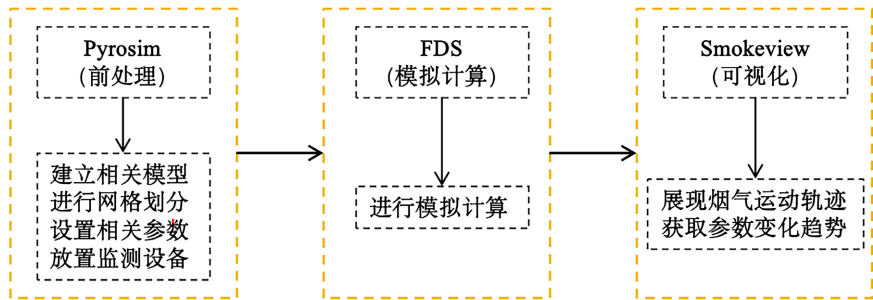


Figure 3. The relationship among Pyrosim, FDS, and Smokeview
图 3. Pyrosim, FDS 和 Smokeview 三者关系

Fire Dynamics Simulator (FDS)是由美国国家标准于技术研究院开发的一款用于模拟火灾动力学模拟

软件, Pyrosim 基于 FDS 开发, 以图形用户界面简化操作, 通过可视化操作将参数转化为 FDS 可识别文件, 模拟运算仍由 FDS 完成。Smokeview 作为 FDS 结果可视化工具, 能直观呈现火灾模拟数据, 助力分析火灾规律。三者关系如图 3 所示。

2.3. 网格的划分

在 FDS 火灾模拟中, 网格划分是影响模拟精度的核心技术。作为计算基础, 其不仅是几何分割, 更需兼顾物理现象尺度(如火源附近温度场、能见度变化需精细网格捕捉)与计算资源限制(过密导致耗时、过疏引发失真)。合理的网格尺寸需平衡精度、效率与物理特征。依据 FDS 手册, 其与火源特征直径直接相关, 计算公式如下所示:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中:

- D^* - 火源特征直径, m;
- Q - 火源最大热释放速率, 取 5 KW;
- ρ_0 - 环境空气密度, 取 1.2 kg/m³;
- C_p - 空气比热容, 取 1.014 KJ/Kg·K;
- T_0 - 环境温度, 取 293 K;
- g - 重力加速度, 取 9.8 m/s²。

根据 FDS 用户指导手册, 网格的尺寸划分大小 δx 可以使用 $D^*/\delta x$ 来进行评估, 并建议 $D^*/\delta x$ 的值在 4~16 之间。大量的研究表明, 一般选取 δx 的值在 $0.1D^*$ 和 $0.3D^*$ 之间时, 能够精确的模拟出实际情况。考虑到网格尺寸对火源附近的传热传质影响较大, 对远离火源区域的影响较小[11]。因此本文火源及其 50 米处附近的网格尺寸取 $0.1D^*$, 即: $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 其他区域的网格的尺寸取 $0.25D^*$, 即 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。这样在保障模拟结果可靠性的同时, 有效减少了计算耗时。

2.4. 火源类型的选取

火灾增长模型是描述火灾发展过程的核心工具, 国内外研究主要采用稳态与非稳态燃烧模型。稳态模型假设热释放速率恒定, 因忽略瞬态动态因素, 在复杂场景中应用受限。实际火灾(如区间火灾)属非稳态燃烧, 历经阴燃、增长、稳定、衰减阶段, 其热释放速率分为平方、线性、指数增长型。目前区间隧道火灾模拟多采用平方增长型[12]。计算公式如下所示:

$$Q = \alpha(t - t_0)^2 \quad (2)$$

式中:

- Q - 火源热释放速率, KW;
- α - 火灾增长系数;
- t - 点燃后的燃烧时间;
- t_0 - 有效点燃时间。

一般在火灾场景火源热释放速率的设计中, 不考虑火灾的阴燃阶段。对此, 可将公式(3)改写为:

$$Q = \alpha t^2 \quad (3)$$

热释放速率(HRR)是火灾研究的关键参数, 反映可燃物单位时间放热量, 直接影响火灾发展、蔓延、

温度分布及热辐射强度，体现燃烧反应剧烈程度。目前，国内外通过全尺寸燃烧实验、局部实验、材料统计及数值模拟等方法获取车厢热释放速率，研究结果多集中在 5 MW~10 MW。

依据美国消防协会 NFPA204M 《Standerd of Smoke and Heat Venting》， t^2 火灾分为慢速、中等、快速和超快速火，对应增长系数分别为 0.0029、0.0117、0.0469 和 0.1876。 t^2 火灾增长系数因可燃材料而异，不同类型火灾发展过程对应的增长系数如表 1 所示。

Table 1. Materials and growth coefficients corresponding to different fire types

表 1. 不同火灾类型对应的材料及增长系数

火灾类型	材料类型	火灾增长系数 α
慢速	铺地材料、木板或木板制成的家具	0.0029
中速	办公设备、商店柜台、不含棉的聚酯床垫	0.0117
快速	堆积的木板、塑料泡沫、被褥、装满邮件的邮袋	0.0469
超快速	油池火、非阻燃泡沫材料、快速燃烧的软包家具、质地较轻的家具	0.1876

现阶段地铁为防范突发事件导致大面积人员伤亡，列车制造采用高强度抗烧玻璃钢、铝合金等新型难燃、不燃材料，座位亦使用玻璃钢材质，此类材料可有效降低火灾燃烧规模与增长速率。本文结合实际设定火源功率为 5 MW、火灾增长系数为 0.0469，热释放速率随时间变化如图 4 所示。

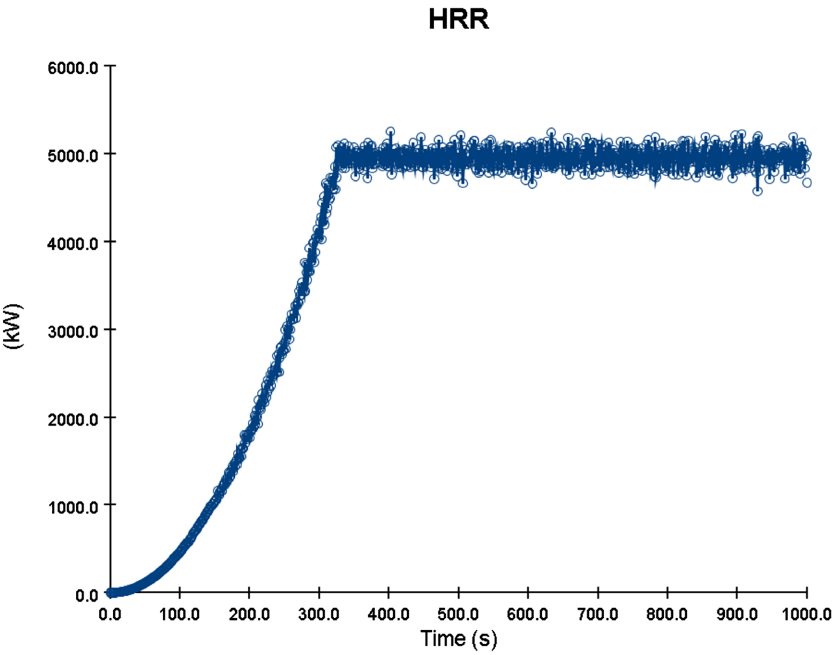


Figure 4. Heat release rate of the fire source

图 4. 火源热释放速率

2.5. 区域划分及疏散评价指标

在区域划分上，联络线隧道内以每节车厢长度 20 m 为间隔、车站轨行区以 50 m 为间隔划分监测区域，如图 5 所示。根据全国人口普查数据，我国城市成年男性平均身高为 172.55 cm，女性为 161.02 cm。考虑到不同年龄段人群特征及地铁火灾逃生时的弯腰姿势，人眼特征高度需相应下调。因此，本次模拟中在各区域道床、列车及疏散平台中心点人眼特征高度 1.5 米处分别布置温度、CO 浓度及能见度传感

器。其安全阈值为温度不得高于 66℃、CO 浓度不得高于 500 ppm 且能见度不得低于 10 m [13]。

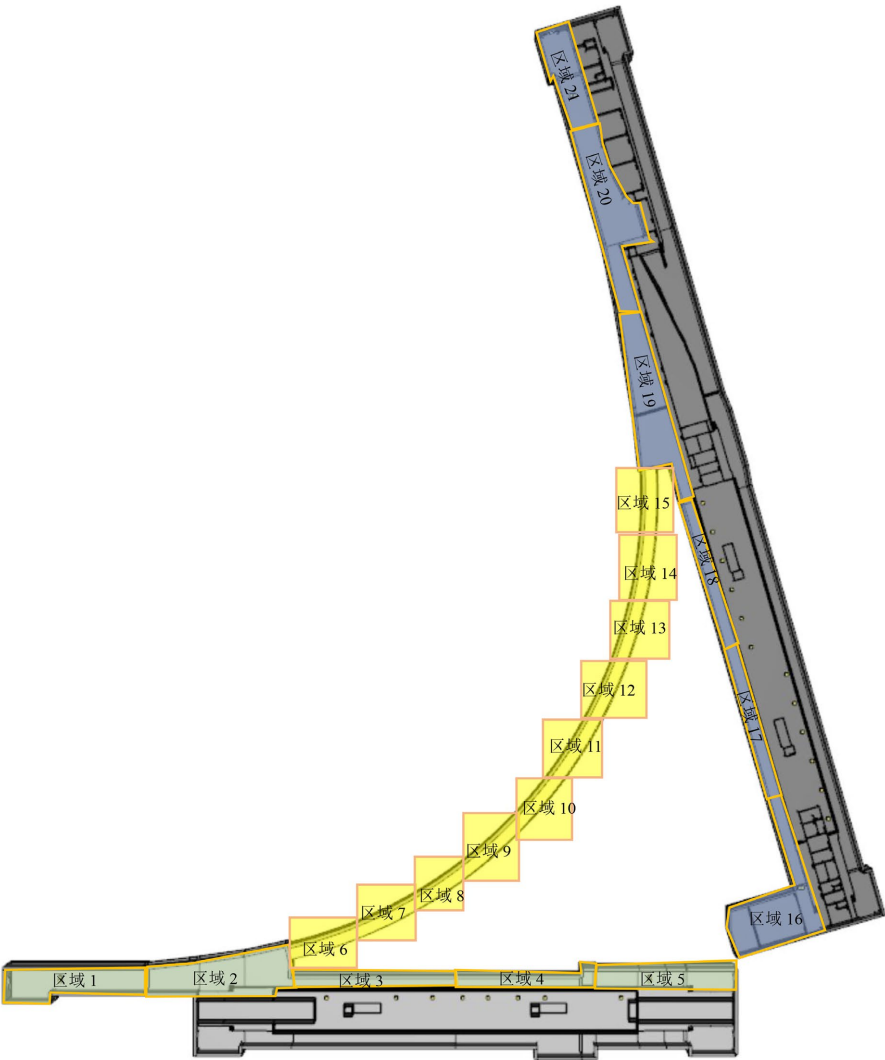


Figure 5. Regional division
图 5. 区域划分

2.6. 工况设置

Table 2. Scenario setup
表 2. 工况设置

工况	排烟方式	火灾位置	列车前进方向	风机开启时间
工况 1	1 号线车站送风、3 号线车站排烟	停靠在联络线与 1 号线正线分岔点处，火源位于 3、4 节车厢贯通道内故障部位	从 3 号线车站开往 1 号线车站	60 s
工况 2	1 号线车站排烟、3 号线车站送风			

张剑高[14]针对 113 起地铁隧道火灾事故进行统计分析，得出着火点位置位于车厢外部的站隧道火灾总体 60.18%，其中车厢外部中车底火灾发生次数最多，占车厢外部火灾事故的 63.23%。对此，本文将火源的位置分别设置为地铁列车 3、4 节车厢中部底板处。根据该市地铁列车火灾应急预案的处置流程

程, 当列车发生火灾后无法形行驶时, 司机汇报给应急处置人员到隧道风机及车站站台层风机启动时间为 60 s。具体工况设置如表 2 所示。

3. 模拟结果

3.1. 工况 1 与工况 2 能见度对比

(1) 工况 1 下, $T=100\text{ s}$ 时, 烟气未蔓延至联络线, 主要集中在第四节和第五节车厢, 第六节车厢无明显影响;

(2) 射流风机开启后, $T=200\text{ s}$ 时, 少量烟气从车厢蔓延至联络线, 隧道内能见度基本不受影响, 仍维持基本可视情况, 而车厢内充满大量烟气;

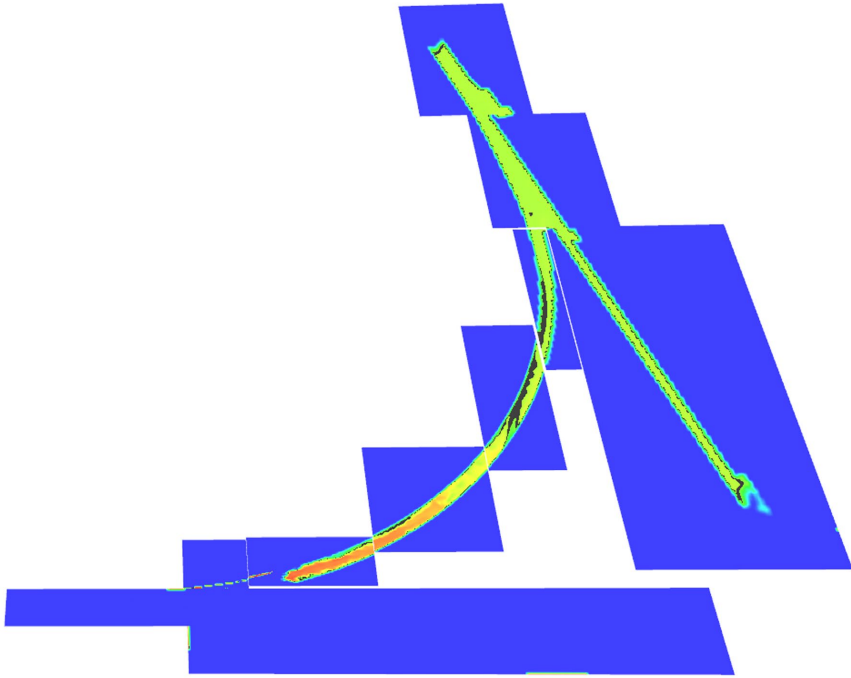
(3) 随着火源热释放率的增加及烟气与壁面进行热交换导致浮力驱动效应减速, $T=300\text{ s}$ 时, 区域 9 出现烟气沉降, 联络线入口(区域 20)有渗透现象, 烟气前锋向区域 21 处风机蔓延;

(4) $T=400\text{ s}$ 时, 联络线充满大量烟雾, 联络线内区域 6~15 人眼特征高度处能见度低于 10 m, 3 号线车站轨行区区域 19 达到人体耐受能见度临界值, 由于风机的开启, 区域 20~21 能见度较高, 但烟气前锋开始向区域 21 蔓延;

(5) $T=500\text{ s}$ 时, 3 号线车站轨行区所有区域均处于危险状态, 如图 6 所示。



(a) 能见度标尺



(b) 能见度切片

Figure 6. Visibility slices under scenario 1 in a stable combustion state
图 6. 燃烧稳定状态下工况 1 能见度切片

(1) 工况 2 与工况 1 一样, $T=100\text{ s}$ 时, 此时刚开始燃烧, 并没有产生大量烟气, 烟气主要分布在第

三节车厢内，并没有对人员造成威胁。

(2) 在隧道风机的作用下， $T = 200\text{ s}$ 时，少量烟气开始从车厢蔓延出；

(3) $T = 300\text{ s}$ 时，1 车站轨行区的区域 1 和区域 2 人眼特征高度处已经开始逐渐接近能见度临界值。

(4) $T = 400\text{ s}$ 时，受到隧道风机排烟量的限制，区域 1 和区域 2 人眼特征高度处能见度远低于 10 m ，如图 7 所示。

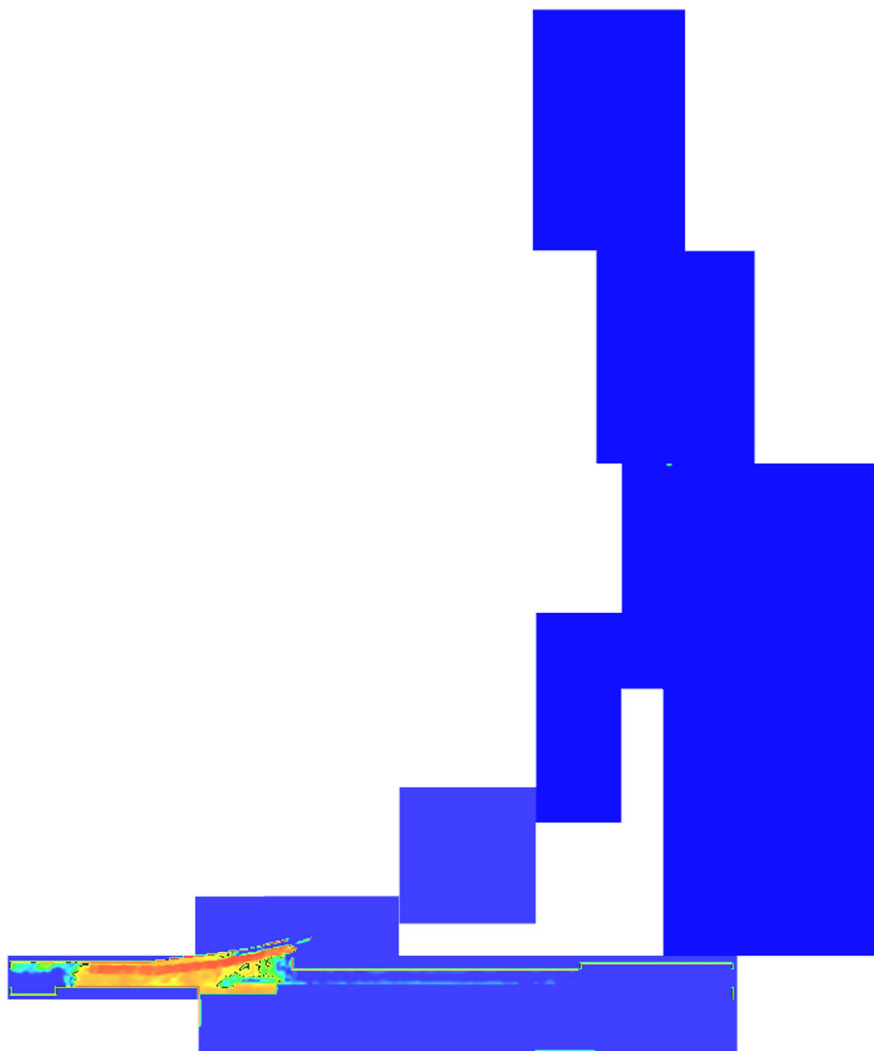


Figure 7. Visibility slices under scenario 2 in a stable combustion state
图 7. 燃烧稳定状态下工况 2 能见度切片

与工况 1 相比，在射流风机、区域 1 号隧道风机驱动力及联络线方向烟气蔓延惯性力的耦合作用下，工况 2 下大部分烟气于区域 1 处排出隧道，第一节与第二节车厢能见度达临界状态的时间显著滞后于工况 1 的第五节与第六节车厢。从能见度切片中可用看出：1 号线车站轨行区区域 3~5 虽稍微烟气扩散现象，但影响并不大，能见度始终仍保持在 20 m 以上，未突破人员安全疏散的能见度阈值。而工况 1 中，3 号线车站轨行区在 $T = 500\text{ s}$ 时能见度均低于 10 m 。这是因为随着燃烧不断进行，联络线内充满了大量烟气，在射流风机的作用下大量涌向 3 车站轨行区。受到惯性的作用，烟气先朝风机所在的区域 21 处开始蔓延，但由于位于区域 21 处的风机离分岔口较远，单靠区域 21 一端的隧道风机不能够完全将烟气排

出隧道, 导致烟气不断朝区域 16 处风机所在位置蔓延。同样由于位于区域 16 处风机距离分岔口较远, 导致在工况 5 情况下 3 号线车站轨行区能见度低于人体耐受临界值。

3.2. 工况 1 与工况 2 温度对比

如图 8 所示, 高温核心区(区域 6~9)呈现显著空间异质性, 随着与火源的增加及烟气与壁面热交换作用增强, 联络线内的温度呈梯度下降衰减特征, 3 号线车站轨行区温度逐渐趋于环境温度。进一步分析区域 6~8 内第四至第六节车厢 1.5 m 高度处温度, 如图 9 所示: 火源稳定阶段, 第四、五节车厢温度相近且略高于第六节, 导致前两者乘客需在 200 s 内撤离, 而第六节疏散时间窗口可延至 300 s。

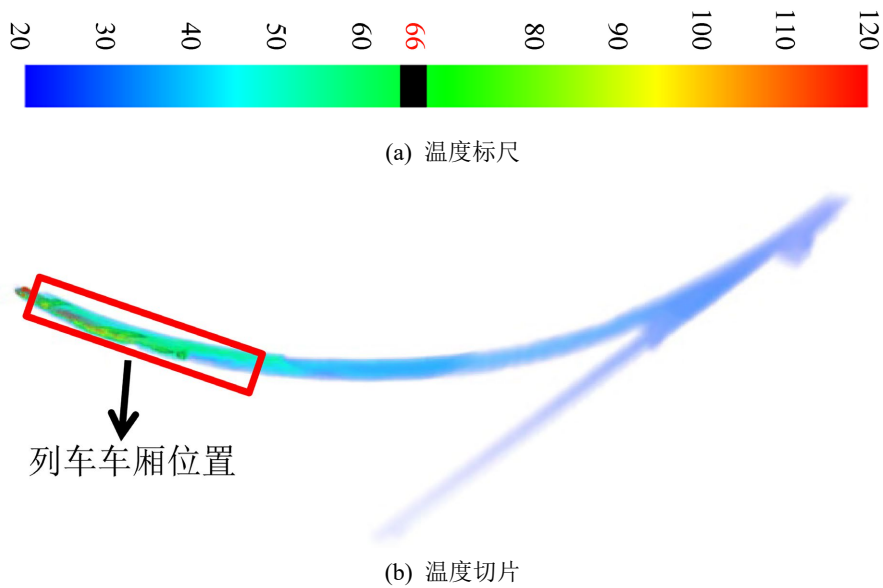


Figure 8. Temperature slices under scenario 1 in a stable combustion state
图 8. 燃烧稳定状态下工况 1 温度切片

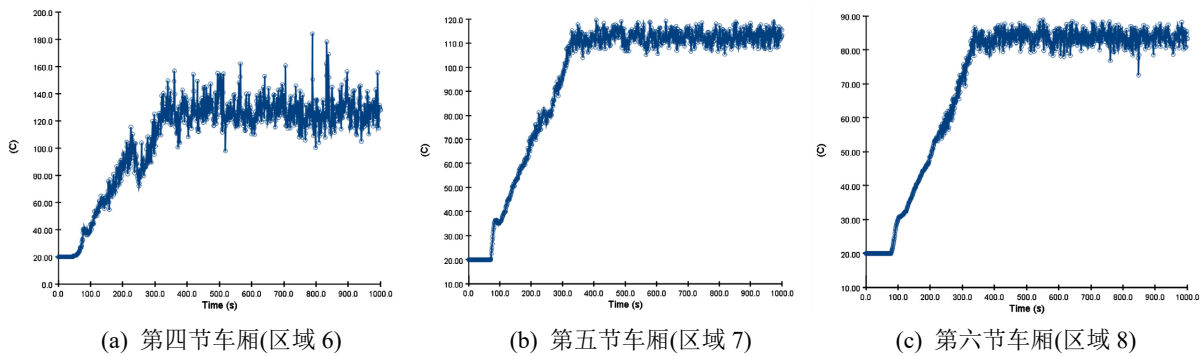


Figure 9. Temperature at the characteristic height of human eyes in the 4th, 5th, and 6th carriages (regions 6~8) under scenario 1
图 9. 工况 1 第四、五、六节车厢(区域 6~8)人眼特征高度处温度

如图 10 所示, 侧向疏散平台 1.5 m 高度温度达临界值时间较对应车厢延迟。在机械通风系统的强制对流效应与烟气的浮力效应共同作用下, 相较于第四节车厢对应的侧向疏散平台, 第五和第六节车厢对应的侧向疏散平台形成局部的烟气聚集区, 因此温度上较第四节侧向疏散平台有所提高。区域 9 虽存在热分层, 但侧向疏散平台人眼特征高度处最高温度稳定于 45℃安全阈值内, 不影响人员疏散。

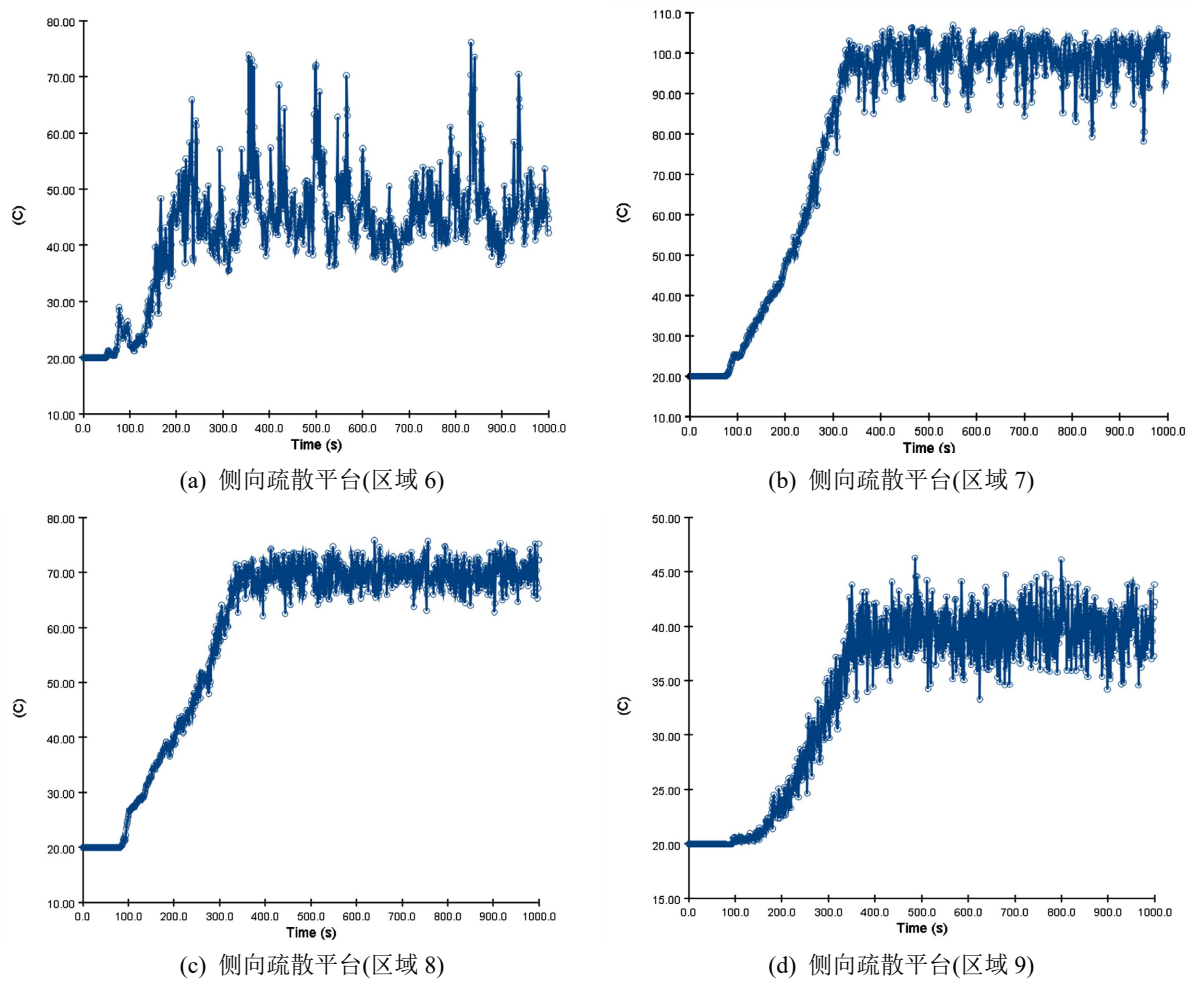


Figure 10. Temperature at the characteristic height of personnel on the lateral evacuation platform (regions 6~9) under scenario 1

图 10. 工况 1 侧向疏散平台(区域 6~9)人员特征高度处温度

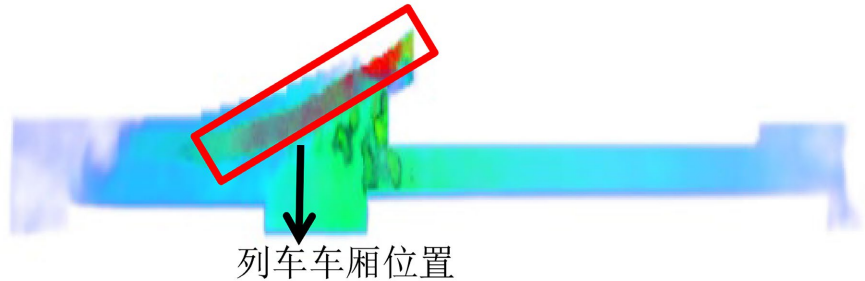


Figure 11. Temperature slices under scenario 2 in a stable combustion state

图 11. 燃烧稳定状态下工况 2 温度切片

如图 11 所示, 1 号线轨行区 1~2 区域为高温核心区。通过温度测点数据进一步分析区域 1~2 处温度的变化情况, 如图 12 所示: 工况 2 中, 燃烧稳定状态下, 位于分岔口的第三节车厢温度显著高于工况 1 的第四节车厢。这是由于在分岔处特殊结构增强空气流动形成涡流, 促进新鲜空气向火源区域输

送,提升燃烧效率并加剧热量释放;同时,分岔处空间扩张致使高温烟气滞留,热量持续积聚,使第三节车厢温度达 300℃。而靠近隧道风机的第一、二节车厢,在隧道风机的作用下,温度分别稳定在 70℃ 和 120℃。

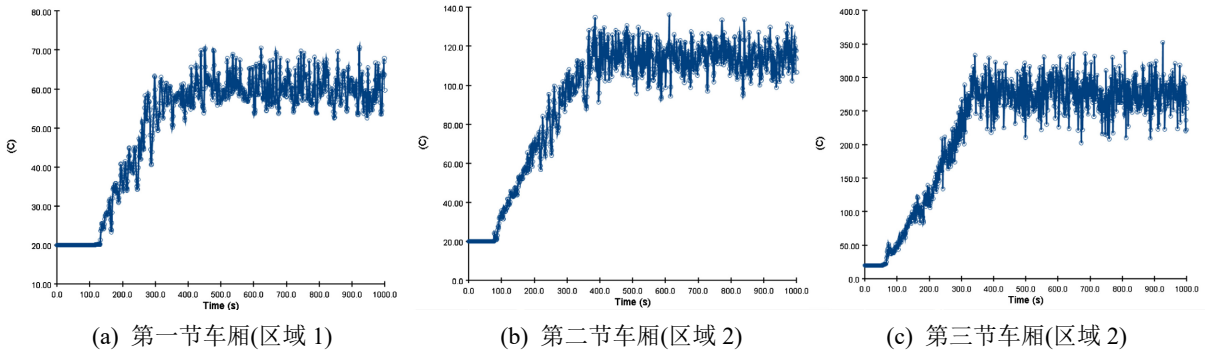


Figure 12. Temperature at the characteristic height of human eyes in the 4th, 5th, and 6th carriages (regions 1~2) under scenario 2

图 12. 工况 2 第四、五、六节车厢(区域 1~2)人眼特征高度处温度

如图 13 所示,在燃烧趋于稳定状态下,1 号线车站轨行区区域 2 的人眼特征高度处温度始终稳定在 40℃~50℃ 区间,并不对对人员的疏散造成威胁。由于区域 1 配置隧道风机,工况 2 情况下区域 1 和区域 2 温度场受强制对流效应影响显著,监测时段内温度比工况 1 整体上呈现叫周期性较大波动特征,表现为典型机械通风扰动下的动态热环境。

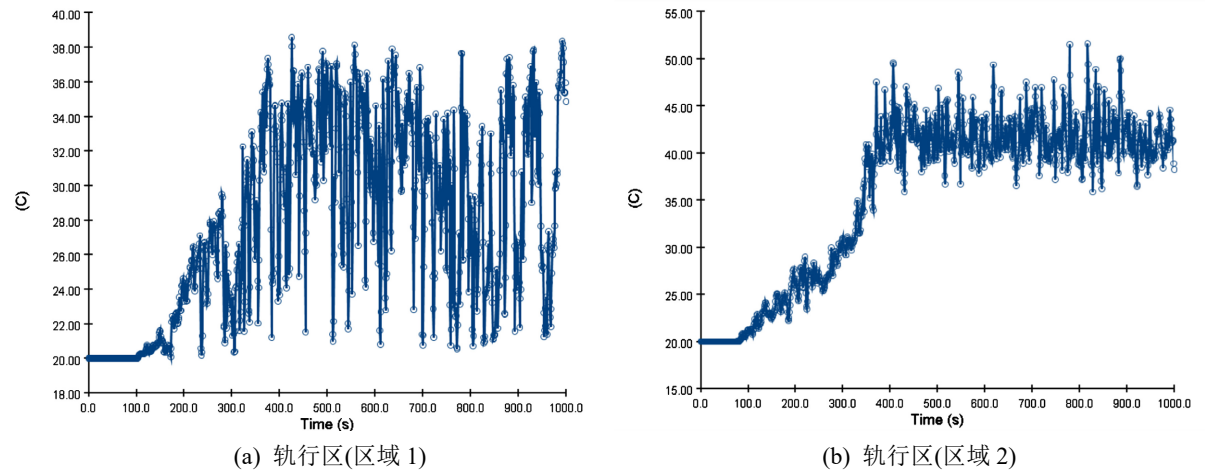
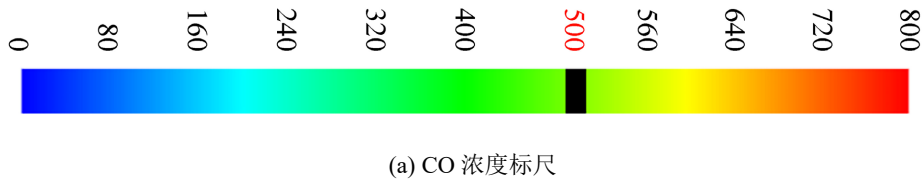


Figure 13. Temperature at the characteristic height of human eyes in track areas of regions 1 and 2 under scenario 2

图 13. 工况 2 区域 1、2 轨行区人眼特征高度处温度

3.3. 工况 1 与工况 2 CO 浓度对比



(a) CO 浓度标尺

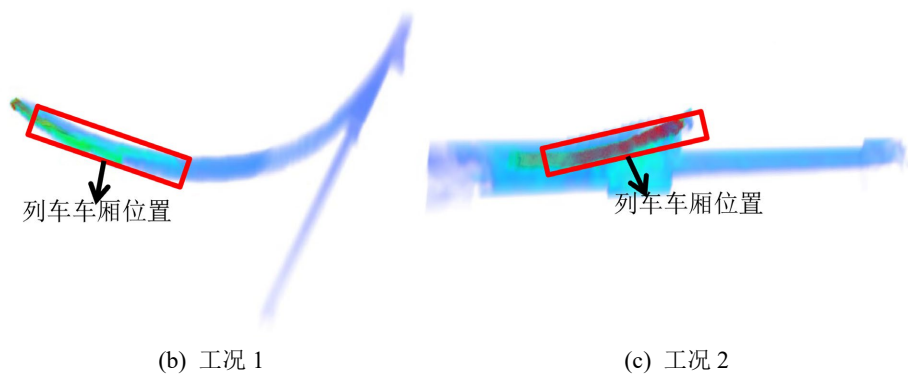


Figure 14. CO concentration slices at the characteristic height of human eyes for Scenario 1 and Scenario 2 under stable combustion conditions
图 14. 燃烧稳定下工况 1 和工况 2 人眼特征高度处 CO 浓度切片

如图 14 所示，工况 1 中，只有第一节车厢人眼特征高度 CO 浓度达临界值，其余区域未达人体耐受值。与工况 1 不同，工况 2 下，第一、二、三节车厢下 CO 浓度和温度及能见度一样均超临界值但区域 1~5 轨行区的 CO 浓度未达临界值。这是因为一方面分岔点复杂结构引发气流紊乱，CO 难以扩散；另一方面排烟风机负压在分岔区形成复杂压力场，车厢周边负压弱，导致 CO 积聚难排。

3.4. 疏散时间对比

通过对能见度、温度和 CO 浓度测点的数据进行比较，得出工况 1 和工况 2 烟气蔓延各区域达到危险状态时间，如表 3、表 4 所示。除位于排烟方向下的第一节车厢临界时间受温度和能见度影响较大，其余区域达到危险临界时间主要受能见度影响，各区域下 CO 浓度达临界值，均滞后于能见度与温度。相较于工况 1，工况 2 各节车厢及车厢附件区域达到危险状态时间稍慢与工况 2，更有利于人员的疏散。

Table 3. Smoke spread areas and the time for each area to reach a dangerous state under scenario 1
表 3. 工况 1 烟气蔓延区域及各区域达到危险状态时间

区域	6 (第四节车厢)	6 (侧向疏散平台)	7 (第五节车厢)	7 (侧向疏散平台)	8 (第六节车厢)	8 (侧向疏散平台)	9 (侧向疏散平台)	10 (侧向疏散平台)
达到危险时间	125 s	185 s	147 s	165 s	170 s	195 s	317 s	275 s
区域	11 (侧向疏散平台)	12 (侧向疏散平台)	13 (侧向疏散平台)	14 (侧向疏散平台)	15 (侧向疏散平台)	16 (3 号线轨行区)	17 (3 号线轨行区)	18 (3 号线轨行区)
达到危险时间	310 s	330 s	350 s	364 s	380 s	535 s	490 s	467 s
区域	19 (3 号线轨行区)	20 (3 号线轨行区)	21 (3 号线轨行区)					
达到危险时间	400 s	432 s	483 s					

Table 4. Smoke spread areas and the time for each area to reach a dangerous state under scenario 2
表 4. 工况 2 烟气蔓延区域及各区域达到危险状态时间

区域	1 (第一节车厢)	1 (1 号线轨行区)	2 (第二节车厢)	2 (第三节车厢)	2 (1 号线轨行区)	3 (1 号线轨行区)	4 (1 号线轨行区)	5 (1 号线轨行区)
达到危险时间	200 s	310 s	175 s	128 s	337 s	-	-	-

4. 结论

(1) 排烟工况显著影响烟气蔓延态势：工况 1 时，烟气迅速蔓延至 3 号线车站轨行区，500 s 时该区域能见度均低于 10 m，严重威胁人员安全；工况 2 下，1 号线车站轨行区部分区域(3~5 区域)在 500 s 前能见度受影响较小，且大部分烟气能在区域 1 被排出，整体上更有利于人员疏散。

(2) 温度分布呈现不同特征：工况 1 中高温核心区(区域 6~9)存在明显空间异质性，不同车厢及疏散平台温度变化不同，影响人员疏散时间；工况 2 下，分岔处第三节车厢因特殊结构温度高达 300℃，靠近风机的第一、二节车厢温度受风机作用分别稳定在 70℃和 120℃，且工况 2 部分区域温度受机械通风扰动呈现周期性波动。

(3) CO 浓度积聚情况不同：工况 1 仅第一节车厢 CO 浓度达到人体耐受临界值；工况 2 下第一、二、三节车厢 CO 浓度均超临界值，但区域 1~5 轨行区未达到，主要因分岔点复杂结构导致气流紊乱，以及排烟风机负压使车厢周边 CO 积聚。

(4) 工况 2 在人员疏散上更具优势：综合对比，工况 2 在人员疏散方面较工况 1 有明显优势。

参考文献

- [1] 雷鹏. 分岔隧道火灾烟气输运规律及纵向通风控制研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [2] 李雯. Y 型地铁隧道烟气流动特性与温度分布规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
- [3] 刘畅, 钟茂华, 林鹏, 等. 水利水电工程分岔型隧道全尺寸火灾实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 1-12.
- [4] 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 104610. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104610>
- [5] Huang, Y., Li, Y., Li, J., Li, J., Wu, K., Zhu, K., et al. (2019) Experimental Investigation on Maximum Gas Temperature beneath the Ceiling in a Branched Tunnel Fire. *International Journal of Thermal Sciences*, **145**, Article 105997. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.105997>
- [6] 李涛, 杨云萍, 米春, 等. 基于纵向通风与空气幕协同作用下的分岔隧道最高温度[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(1): 103-110.
- [7] 赵建龙. 城市地下分岔隧道内火源位置及阻塞物对烟气蔓延规律和控制影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2023.
- [8] 黄家成, 王东伟, 陈涛, 等. 多匝道公路隧道烟气控制方案研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(8): 1061-1065.
- [9] 姚勇征, 宋恪斌, 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.
- [10] 徐福顺. 不同通风不同火源位置条件下“日”字型地下交通联系隧道烟气控制模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.
- [11] 孙安实. 地铁区间隧道列车火灾人员逃生及联络通道设置参数研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [12] 汪志雷, 华敏, 徐大用, 等. 地铁隧道火灾人员疏散模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(6): 645-648.
- [13] 尹渊. 地铁换乘站火灾模拟与应急疏散研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2024.
- [14] 张剑高. 铁路隧道火灾临界风速研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.