

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-246-07

# 随机疏散模式下隧道火灾特性及防灾通风研究

林燕枝<sup>1</sup> 苏江川<sup>1</sup> 刘墨云<sup>2</sup> 魏珍珍<sup>2</sup> 赖永玖<sup>2</sup> 余龙星<sup>3</sup> 毕海权<sup>4</sup>

(1.福州地铁集团有限公司 福州 350005;

2.福州轨道交通设计院有限公司 福州 350004;

3.福州大学安全科学与工程系 福州 350108;

4.西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 为研究随机疏散模式下市域铁路长大隧道的火灾安全特性,针对 140km/h 时速运营隧道,建立了基于 STAR-CCM+ 的火灾与通风数值模型,重点分析了车辆随机停放位置与横通道开启策略的耦合影响。结果表明:纵向通风与横通道协同作用是调控烟气扩散的关键;火源下游开启 2~3 个横通道可形成有效的散热路径,延长人员安全疏散时间;然而,上游横通道开启过多会削弱主通道风速。基于此,提出了适用于 140km/h 市域铁路隧道的优化防灾通风策略。

**【关键词】** 市域铁路; 防灾通风; 人员安全疏散; 数值模拟

中图分类号 TU298.4 文献标志码 A

## Study on Fire Characteristics and Ventilation under Random Evacuation Mode

Lin Yanzhi<sup>1</sup> Su Jiangchuan<sup>1</sup> Liu Moyun<sup>2</sup> Wei Zhenzhen<sup>2</sup> Lai Yongjiu<sup>2</sup> Yu Longxing<sup>3</sup> Bi Haiquan<sup>4</sup>

(1.Fuzhou Metro Group Co., Ltd, Fuzhou, 350005;

2.Fuzhou Rail Transit Design Institute Co., Ltd, Fuzhou, 350004;

3.Department of Safety Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, 350108;

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

**【Abstract】** To investigate the fire safety characteristics of long suburban railway tunnels under random evacuation modes, this study establishes a fire and ventilation numerical model based on STAR-CCM+ for tunnels operating at 140 km/h, focusing on analyzing the coupled effects of random vehicle parking positions and cross passage opening strategies. The results indicate that the synergistic effect of longitudinal ventilation and cross passages is crucial for regulating smoke diffusion; opening 2~3 cross passages downstream of the fire source can form effective heat dissipation paths and extend the available safe egress time (ASET) for personnel; however, opening an excessive number of cross passages upstream will weaken the wind speed in the main tunnel. Based on these findings, this study proposes an optimized fire protection and ventilation strategy suitable for 140 km/h suburban railway tunnels.

**【Keywords】** Urban railway; Ventilation for disaster prevention; Safe evacuation of personnel; Numerical simulation

## 0 引言

随着城市快速发展,市域铁路成为缓解交通压

力的重要方式,然而,市域铁路的快速发展对隧道运营安全提出了更高要求,其中火灾安全是重中之

作者简介:林燕枝(1977-),男,本科,高级工程师, E-mail: linyanzhi@fzmtr.com

通讯作者:毕海权(1974-),男,博士,教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期:2025-08-15

重。在防灾疏散策略上, 行业规范存在显著差异: 传统铁路隧道普遍采用定点疏散模式, 要求着火列车驶往预定救援站; 而地铁系统则允许在无法运行时就地疏散, 实质上包含了随机疏散模式<sup>[1]</sup>。随着兼具两者特征的市域铁路大量兴建, 采用何种疏散模式已成为关乎生命安全与工程经济性的关键争议。

尽管隧道火灾研究已较为丰富, 如横通道设计<sup>[2,3]</sup>、烟气控制<sup>[4]</sup>及人员疏散<sup>[5-13]</sup>等, 但现有成果多基于理想化的固定场景, 未能充分反映随机疏散模式下的核心特征—即车辆火灾位置的随机性。这一随机性会根本性地改变火源与横通道等关键设施的相对位置, 从而显著影响烟气蔓延规律与温度场分布, 导致现有基于确定性条件的结论与实际疏散环境存在偏差<sup>[14]</sup>。因此, 针对随机疏散模式下的火灾特性进行系统性研究, 是弥补当前研究空白、支撑市域铁路科学防灾的迫切需求。

本文旨在聚焦随机疏散模式, 针对 140 公里时速市域铁路隧道, 通过数值模拟方法, 研究车辆随机停靠位置对火灾发展及烟气运动的影响机制, 为该模式下防灾通风策略的优化提供理论依据。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

隧道火灾模拟中, 流体流动可视为可压缩湍流, 采用  $k-\varepsilon$  湍流模型描述湍流特性, 通用控制方

程如式 (1) 所示。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为时间变量, s;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\phi$  为通用标量;  $U$  为流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\Gamma$  为有效扩散系数;  $S$  表示源项。

### 1.2 输运方程

在本研究中, 计算域中存在空气组分与碳烟的混合和输运。瞬态求解污染物组分输运方程如式 (2) 所示。

$$\frac{\partial(\rho Y_s)}{\partial\tau} + \text{div}(\rho U Y_s) = \text{div}[D_s \text{grad}(\rho Y_s)] + S_s \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为时间变量, s;  $Y_s$  为污染物传播组分  $S$  的体积浓度, ppm;  $\rho$  为传播组分  $S$  的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $U$  为传播组分  $S$  的流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D_s$  为污染物传播组分  $S$  的扩散系数;  $S_s$  组分  $S$  的源项, 由燃烧反应生成速率决定,  $\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

## 2 计算模型

### 2.1 数值模型

以国内某市域铁路隧道为工程背景。按实际尺寸构建计算模型, 如图 1 (a) 所示, 隧道断面为内径 6.8m 的盾构隧洞, 拱顶到隧道底面的高度为 6.2m, 横通道间距为 200m, 横通道尺寸为 2.2m×2m (宽×高)。计算模型全长 1300m。该线铁路列车采用四节编组, 车长 95.8m, 车宽 3.09m, 最大高度 3.54m, 图 1 (b) 为列车模型。

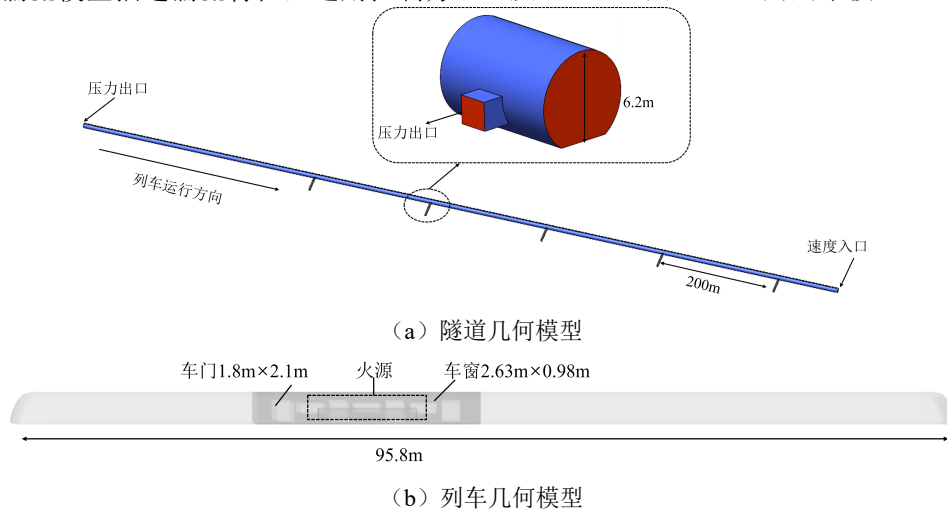


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

该线列车运行时速为 140km/h。考虑列车随机停放场景, 设定列车起火后以  $-2\text{m}/\text{s}^2$  的加速度减速

停车，最终停靠于位置 1 与位置 2，具体停车位置如图 2 所示。位置 1 火源位于上游横通道较多的区域，模拟上游具备较充分疏散条件的相对有利场景；位置 2 火源位于隧道中部，模拟火源上下游横

通道数量均等的场景。通过控制两位置开启的横通道总数，可有效剥离通道数量影响，从而聚焦横通道相对于火源的位置及其分流作用对烟气运动与人员疏散的关键影响。

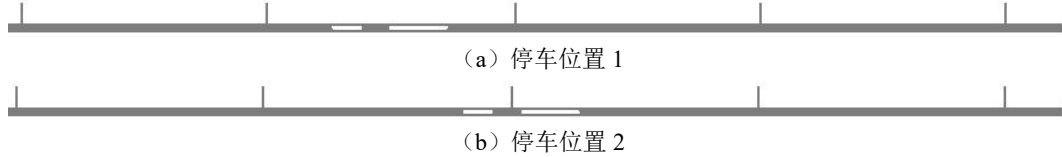


图 2 停车位置

Fig.2 Parking position

2.2 火源及边界条件设置

采用 15 MW 的中速火作为火源，着火位置位于列车中部，火灾发生时中部车门窗打开，中部车通向两端的通道关闭。隧道两端分别设置为压力出口与速度入口，中部车门窗设置为内部交界面。列车减速停车后横通道开启，停车前 5 个横通道口设为 wall 边界，停车后设为压力出口。为研究随机疏散模式下不同停车位置与纵向风速对隧道火灾特性的影响，设计 8 组计算工况，如表 1 所示。

表 1 计算工况

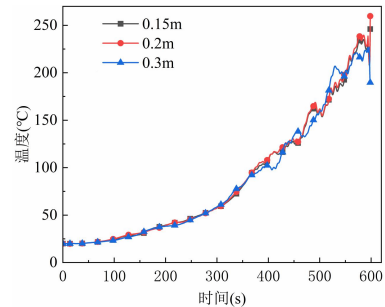
Table 1 Computational condition

工况	停车位置	纵向风速 (m/s)
1	1	0
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	2	0
6	2	1
7	2	2
8	2	3

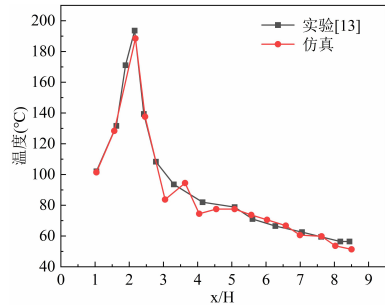
2.3 网格划分

采用 STAR-CCM+进行结构化网格划分，为验证网格独立性，分别采用 0.15m、0.20m、0.30m 三种网格尺寸，对应体网格数量约 1300 万、607 万、480 万。以火源下游 30m 人员特征高度处温度为检

验指标，计算结果表明，当网格数量从 607 万增至 1300 万时，温度计算值无显著差异，故选取 0.20m 网格尺寸以平衡计算效率与精度。图 3 (b) 将该网格尺寸下的仿真结果与 Liu 等<sup>[15]</sup>的实验数据对比，两者吻合良好，验证了数值方法的可靠性。图 4 为本文网格局部划分。



(a) 网格对比



(b) 准确性验证

图 3 计算结果对比

Fig.3 Comparison of calculation results



图 4 网格划分

Fig.4 Grid generation

2.4 人员安全判据

根据美国有轨列车及铁路客运体系标准 NFPA130<sup>[16]</sup>，本文设定接触温度的安全标准为：人员特征高度处接触温度应低于 70℃。NFPA130<sup>[16]</sup>

及我国《地铁设计规范》<sup>[17]</sup>规定火灾时逃生环境内的烟气能见度不得低于 10m。本文因此设定人员疏散路径上能见度低于 10m 时则达到影响人员安全疏散的危险标准。

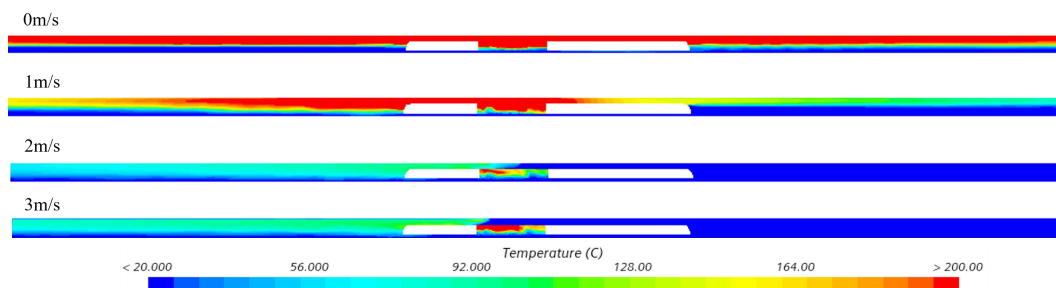
### 3 计算结果

#### 3.1 隧道内温度分布

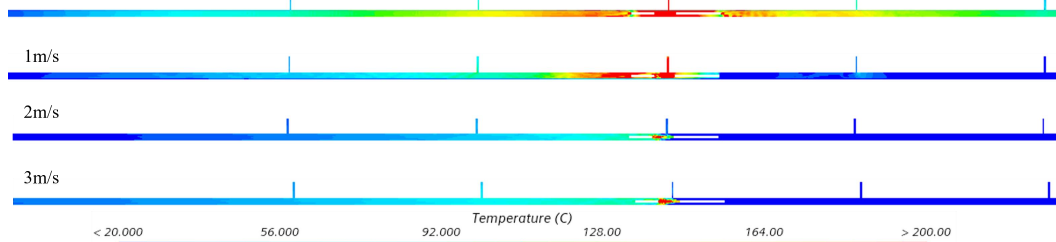
图 5 与图 6 分别呈现了不同停车位置及纵向通风速度条件下的隧道纵向截面与特征高度截面温度云图。当纵向风速为 2m/s 且横通道关闭时, 轴向气流产生的动量优势有效抑制烟气回流, 风速提供的气流动量克服了火源热浮力引发的逆向流动趋势, 促使高温烟气定向输运至下游区域, 保障上

游温度维持在 70℃ 安全阈值以下。

横通道开启后, 隧道主通道与横通道形成并联流动路径, 导致主通道纵向风速衰减: 上游横通道开启数量过多时, 主通道风速不足, 烟气回流现象加剧, 需将纵向风速提升至 3m/s 以上以重建动量优势; 下游横通道开启时, 气流分流与纵向风速协同作用形成“烟囱效应”, 加速高温烟气排出, 显著降低下游区域温度。



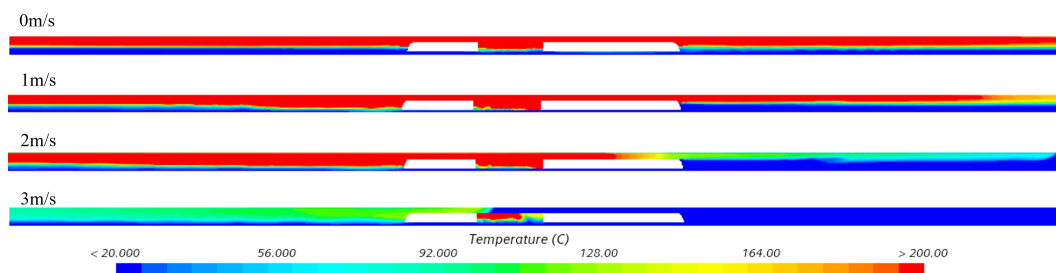
(a) 纵向温度云图



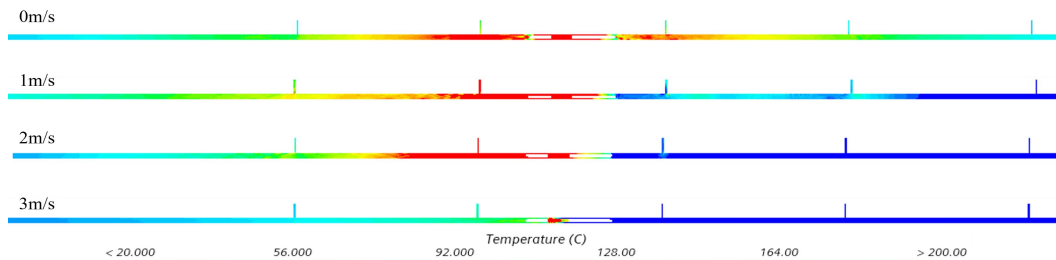
(b) 特征高度处温度云图

图 5 停车位置 1 温度(°C)分布

Fig.5 Parking position 1 temperature (°C) distribution



(a) 纵向温度云图



(b) 特征高度处温度云图

图 6 停车位置 2 温度(°C)分布

Fig.6 Parking position 2 temperature (°C) distribution

### 3.2 火源 30m 外接触温度

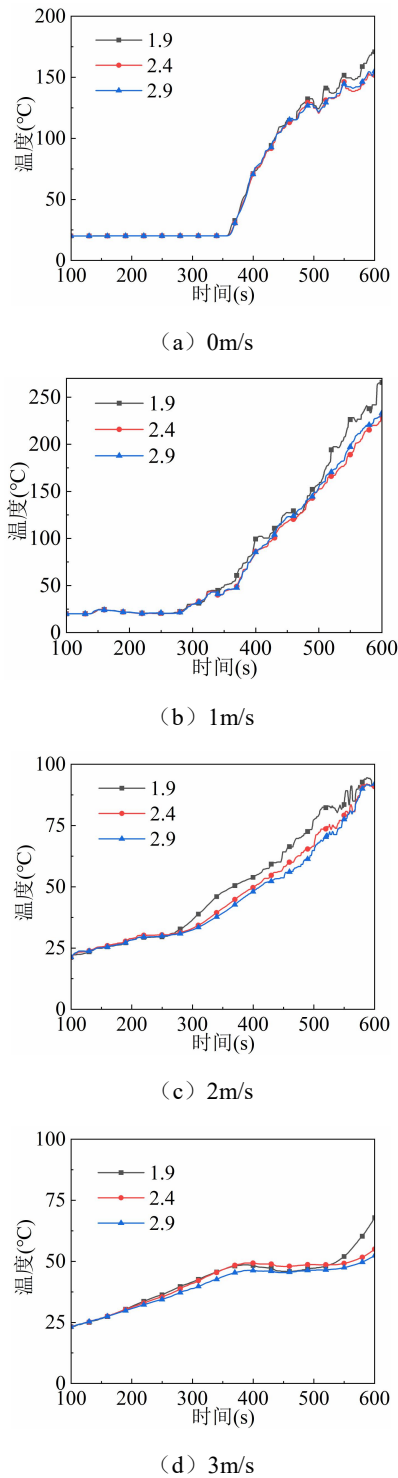


图 7 停车位置 1 温度(°C)分布

Fig.7 Parking position 1 temperature (°C) distribution

图 7 为停车位置 1 在不同纵向通风速度下,火源下游 30m 特征高度处的温度分布曲线(1.9、2.4、2.9 分别表示隧道宽度方向距火源 1.9m、2.4m、

2.9m)。纵向风速从 0m/s 增至 3m/s 时,火源下游 30m 处温度超过 70°C 的时间从 400s 延长至 600s (位置 1 工况),这是由于风速提高增强了对流传热系数,加快热量向远处输运,延缓了局部温度上升速率。但需注意,风速增加也会使烟气层更快地向下游蔓延,缩短能见度安全时间。

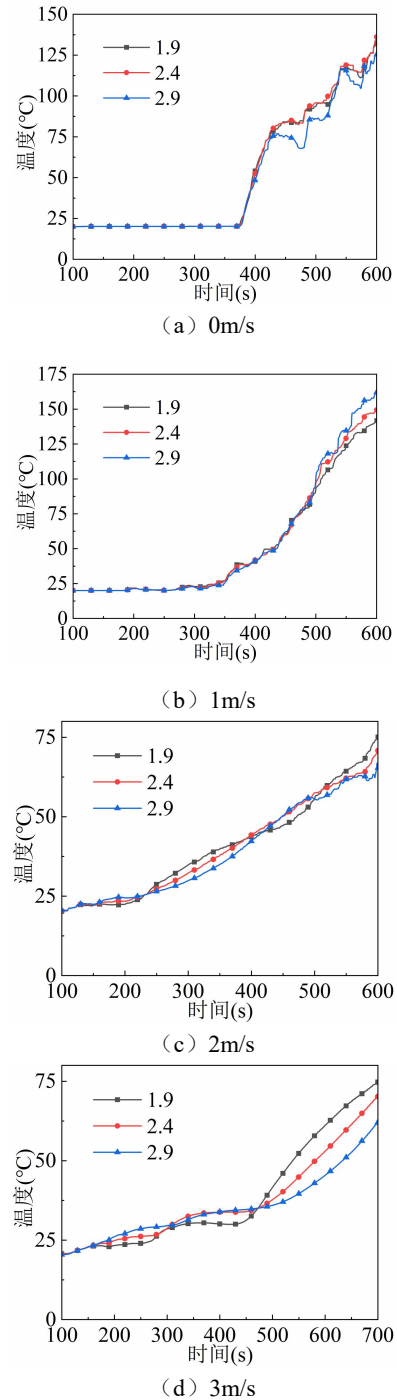


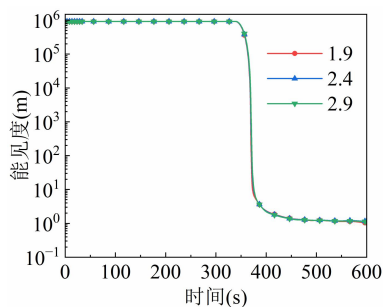
图 8 停车位置 2 温度(°C)分布

Fig.8 Parking position 2 temperature (°C) distribution

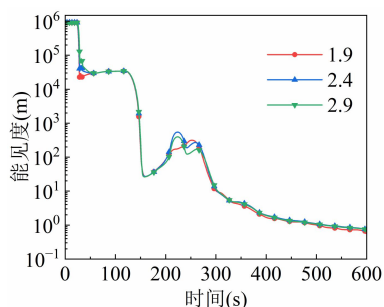
图 8 为停车位置 2 的温度分布曲线。不同风速下, 下游 30m 处达到危险的时间分别为: 420s、435s、580s、680s。对比可知, 当列车停放在靠近下游横通道的位置 2 时, 下游横通道的“热出口”作用更显著, 高温烟气通过横通道排出, 使特征高度处温度达到危险值的时间延长(如纵向风速 3m/s 时, 位置 2 的温度危险时间比位置 1 延长 80s), 体现了流动路径对热传导的调控作用。

### 3.3 火源 30m 外能见度

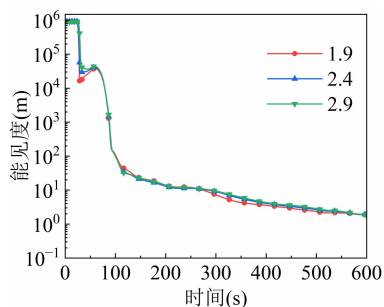
图 9 为停车位置 1 在不同纵向风速下, 火源下游 30m 特征高度处的能见度分布曲线。风速较低时, 烟气以浮力驱动的自然对流为主, 扩散较慢, 能见度高于 10m 的时间较长; 风速提高至 2~3m/s 时, 强制对流占主导, 烟气被快速向下游推送, 导致火源下游 30m 处能见度更快下降, 这是高风速下烟气颗粒纵向输运速度超过横向扩散速度的“烟羽流”蔓延现象所致。



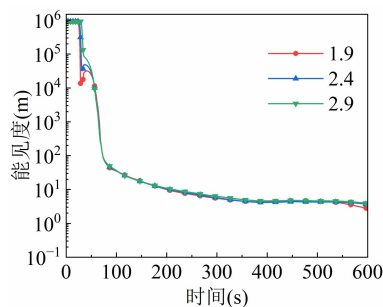
(a) 0m/s



(b) 1m/s



(c) 2m/s

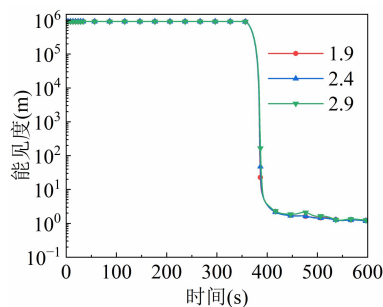


(d) 3m/s

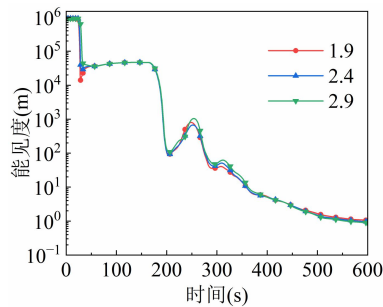
图 9 停车位置 1 能见度 (m) 分布

Fig.9 Parking position 1 visibility (m) distribution

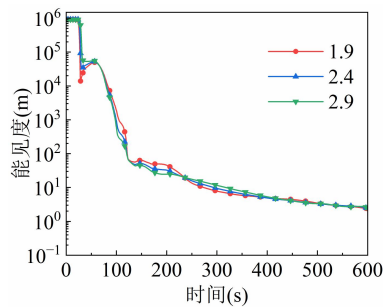
图 10 为停车位置 2 的能见度分布曲线。横通道开启后, 隧道内流场由单一轴向流动变为复杂三维湍流, 涡流区的存在增强了烟气颗粒的横向扩散。例如, 位置 2 工况中, 下游横通道开启使烟气在横通道入口附近形成湍流混合, 导致特征高度处能见度临界时间比位置 1 延长约 40~140s (纵向风速 3m/s 时), 表明流动结构改变可调控烟气颗粒输运路径。



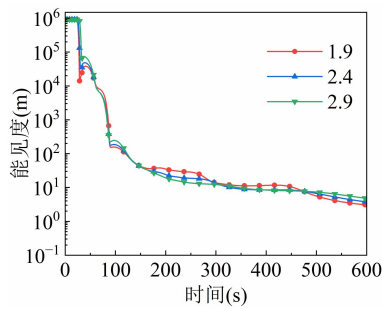
(a) 0m/s



(b) 1m/s



(c) 2m/s



(d) 3m/s

图 10 停车位置 2 能见(m)度分布

Fig.10 Parking position 2 visibility (m) distribution

### 3.4 人员安全性判断

表 2 汇总了不同停车位置与纵向风速下,特征高度处温度及能见度达到危险阈值的时间。纵向风速通过调控热输运速率影响温度临界时间,但需注意风速与横通道开启的协同效应。下游横通道开启可通过“散热通道”效应延长热危险时间,而上游横通道开启过多则可能因风速削弱缩短该时间。

在高速工况下,烟气沿隧道轴向快速流动形成“能见度梯度”,下游区域能见度下降更快;而横通道分流可打破这一梯度,通过引导部分烟气向横通道排出,延缓下游能见度恶化(如位置 2 工况 3m/s 时,能见度临界时间比位置 1 延长 140s)。

表 2 火灾时不同停车位置人员疏散安全时间

Table 2 Safety evacuation time for personnel at different parking positions during fire

停车位 置	纵向风速 (m/s)	温度危险临界 时间	能见度临界危险 时间
位置 1	0	400	370
	1	380	300
	2	475	220
	3	600	200
位置 2	0	420	380
	1	435	330
	2	580	310
	3	680	340

## 4 结论

本研究针对 140 公里时速市域铁路长大隧道,构建 STAR-CCM+火灾与通风数值模型,系统分析随机疏散模式下的火灾特性及防灾通风策略,可得出以下结论:

(1) 纵向通风与横通道的协同本质是对流体动量及热量传输的调控。当纵向风速为 2m/s 且横通道关闭时,轴向气流可抑制烟气回流;横通道开启会削弱主通道风速,需提高风速维持动量平衡;下游横通道开启可加速热量排出,降低下游温度。

(2) 车辆随机停放导致火源与横通道相对位置变化,影响烟气扩散阻力。火源下游开启 2~3 个横通道时,可延长安全时间 50~180s;纵向风速提升虽能延缓温度上升,但会加速烟气纵向输运,导致能见度快速下降,需平衡风速与横通道开启数量。

(3) 当上游横通道开启数量超过 3 个时,需将纵向风速提升至 3m/s 以上以抑制烟气回流;下游横通道开启数量宜控制在 2~3 个,以兼顾热量排出效率与流动稳定性。对于 140km/h 时速市域铁路隧道,建议采用“纵向风速 2~3m/s、下游 2 个横通道开启”的组合策略,既可通过强制对流控制上游温度,又能利用横通道分流延缓下游能见度恶化,为人员疏散争取时间窗口。

### 参考文献:

- [1] 黎旭,汪辉武,唐思聪.铁路隧道内旅客列车火灾事故随机疏散有关问题研究[J/OL].铁道标准设计,1-8[2026-03-26]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202407100002>.
- [2] 张念.海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性与安全疏散研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [3] 向月.公路隧道疏散横通道人员通过能力研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [4] 戎贤,许家杰,张新宇,等.特长公路隧道火灾烟气沉降特性对人员疏散影响的研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(2):128-135.
- [5] 李盎,毕海权,秦萍,等.基于移动载荷引燃的高速列车火灾人员安全疏散研究[J].制冷与空调,2019,33(3):337-342.
- [6] 王松,王子云,梁园,等.某公路隧道火灾烟气流动和人员疏散模拟分析[J].制冷与空调,2015,29(4):374-379.
- [7] 章庭瑞,李维,闫治国.长大公路隧道纵向排烟与人员疏散特性研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):651-661.
- [8] 屈建荣.单洞双向交通公路隧道火灾人员疏散救援研究[D].西安:长安大学,2015.

(下转第 283 页)