

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-095-07

# 多点进出城市隧道火灾工况 射流风机通风排烟数值模拟研究

闫月辉<sup>1</sup> 王小萍<sup>2</sup> 方翔<sup>1</sup> 李绍华<sup>2</sup> 马宇龙<sup>1</sup> 匡鸥<sup>3</sup> 郝小礼<sup>3</sup>

(1. 中铁隧道局集团有限公司 广州 511458;

2. 广州市南沙新区明珠湾开发建设管理局 广州 511466;

3. 湖南科技大学 湘潭 411201)

**【摘要】** 多线交汇城市地下空间交通体系成为了经济发展的新助力, 其存在多进出口、气流组织复杂以及通风排烟网络组织难度大的特点。以广州市明珠湾首期隧道为研究背景, 采用 FLUENT 软件, 研究其在两个不同匝道开启阶段下, 防火排烟系统及人员逃生方案的可行性。针对射流风机, 采用 3D Fan 模型进行模拟。模拟结果表明: 对于阶段一发生火灾, 开启 ABC 路段上 10 台射流风机, 能够满足火灾期间排烟要求。对于阶段二, 当火灾发生在 Z-1 分区时, 开启 12 台射流风机, 能够基本满足火灾期间排烟临界风速要求。当火灾发生在 Z-2 分区时, 现有通风排烟设施和人员逃生方案存在一定的安全风险。并根据实际情况, 提出相应合理的建议, 为工程施工和后期运行提供参考。

**【关键词】** 城市隧道; 多点进出; 火灾; 通风排烟; 射流风机; 数值模拟

中图分类号 U458.1 文献标志码 A

## Numerical Simulation on Jet Fan Ventilation and

## Smoke Extraction in Urban Tunnel Fires with Multiple Access Points

Yan Yuehui<sup>1</sup> Wang Xiaoping<sup>2</sup> Fang Xiang<sup>1</sup> Li Shaohua<sup>2</sup> Ma Yulong<sup>1</sup> Kuang Ou<sup>3</sup> Hao Xiaoli<sup>3</sup>

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd, Guangzhou, 511458;

2. Guangzhou Nansha New Area Pearl Bay Development and Construction Authority, Guangzhou, 511466;

3. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201)

**【Abstract】** The multi-line interconnected urban underground transportation system has emerged as a new catalyst for economic development, characterized by multiple access points, complex airflow organization, and challenges in ventilation and smoke control network design. Using Guangzhou's Pearl Bay Phase I Tunnel as a case study, this research employs FLUENT software to evaluate the feasibility of fire smoke management systems and personnel evacuation plans under two distinct ramp-opening phases. For jet fans, the 3D Fan Model was implemented in simulations. Results indicate: For Phase I fire scenarios, activating 10 jet fans along section ABC meets smoke extraction requirements; In Phase II, when fire occurs in Zone Z-1, 12 jet fans can generally satisfy the critical velocity requirement for smoke control; For fires in Zone Z-2, existing ventilation facilities and evacuation plans present safety risks. Corresponding recommendations are proposed based on simulation results, providing valuable references for

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目 (2022JJ30251)

作者简介: 闫月辉 (1990.03), 男, 本科, 工程师, E-mail: y1576695221@163.com

通讯作者: 郝小礼 (1973.12), 男, 博士研究生, 教授, E-mail: haoxiaoli2002@aliyun.com

收稿日期: 2025-08-11

engineering implementation and operational management.

【Keywords】 Urban tunnel; Multiple access points; Fire; Ventilation and Smoke control; Jet fan; Numerical simulation

### 0 引言

近年来,为推动城市发展、减少居民出行成本,跨海、越江隧道建设工程越来越多<sup>[1,2]</sup>。这其中也不乏长距离、多出-入口城市隧道,这类隧道沿线匝道多,通风网络复杂,一旦发生火灾,通风排烟难度远高于一般隧道。对于长距离、多出-入口城市隧道,合理确定火灾后的逃生方案,优化排烟路径,制定设备开启方案,对减少火灾发生后的损失至关重要。因此,隧道开启运行前,需要做好相应的预案设计。而对于这些预案,很难通过实验对其进行验证,因此,通过模拟的方法,研究隧道防火排烟预案的可靠性,是一种可行的办法。

黄家成等<sup>[3]</sup>通过数值模拟多匝道公路隧道烟气流动规律,发现分岔匝道处容易出现烟气“滞阻”现象。王艳等<sup>[4]</sup>对城市隧道进行通风数值模拟,发现风井位置对于通风网络的影响较大。姜学鹏等<sup>[5]</sup>研究了通风孔参数对于通风的影响,发现在匝道分岔点上方集中布置通风孔有助于通风排污。张键鸿<sup>[6]</sup>通过理论分析和数值模拟,研究了隧道阻力特性和通风排烟策略。王东伟等<sup>[7]</sup>利用 CFD 技术对水下多匝道隧道开展通风排烟特性研究,提出了临界风速限值和射流风机开启方案。李俊梅等<sup>[8]</sup>研究了火源位于合流分岔路段上游时的通风烟气控制策略,得到了最佳通风控制策略及送风参数。徐燃等<sup>[9]</sup>模拟研究了入口匝道火灾反向通风烟气控制模式下人员疏散的安全性问题,发现火源位置离匝道入口较远时,反向通风将影响匝道内人员安全疏散。兰佳忆<sup>[10]</sup>分析和模拟了复杂互通隧道的通风网络解算和通风阻力系数问题。姜学鹏等<sup>[11]</sup>提出匝道通风排烟设计方法,并模拟了两种防灾排烟方案的有效性。宋夕雨等<sup>[12]</sup>提出多匝道隧道排烟分区原则与方法,并证明了分区方法的有效性。宋思源等<sup>[13]</sup>利用 PyroSim 软件,模拟了海拔高度对烟气蔓延速度的影响规律。惠豫川<sup>[14]</sup>模拟研究了特长隧道在三通段附近风道开口形式和开口位置对隧道流场及风量分配效果的影响。

然而,目前的研究主要集中在单一火灾场景下,通风排烟效果评估和设备优化等方面,对于多出-入口城市隧道火灾场景下的通风排烟路径确

定、设备开启方案优化,以及对实际工况的模拟验证等综合性、系统性研究相对薄弱。针对复杂多变的实际火灾情况,如何实现通风排烟系统的高效协同运行,确保疏散路线上的烟气控制效果,仍是需要的关键问题。因此,本文以南沙明珠湾区跨江通道首期段为研究对象,采用数值模拟方法,对多点进出城市隧道防火排烟系统和人员逃生方案进行深入研究,为工程施工和后期运行提供参考。

### 1 工程背景

#### 1.1 项目简介

明珠湾区跨江通道北起慧谷环市大道,南接珠江东组团,全长 5.75km,主线道路等级为城市主干路。工程分期实施,其中,首期段实施江灵南路(灵山岛尖)~大元路(横沥岛尖)段,下穿上横沥水道,首期段全长 1.09km。首期段共设置 8 条匝道服务周边地块和沿线交通,其中 2 条匝道(H1、H2)与横沥岛地下环路相通,2 条横沥大道地面进出口匝道(ZD7、ZD8)为远期预留。隧道主线双向六车道(沉管段设置集散车道,拓宽为双向八车道),匝道为单向两车道。主线隧道设计速度 50km/h,匝道设计速度 30km/h。首期段具体位置如图 1 所示。

目前,工程正处于首期段建设过程,图 2 为施工现场照片。为了分析、预测首期段开通运行后,当火灾发生时,隧道通风系统能否满足救灾要求,根据工程设计图纸,采用 CFD 模拟软件,对火灾工况下的通风方案进行模拟分析,为工程建设和后期运行,提供建议和参考。



图 1 工程位置

Fig.1 Project location



图 2 现场施工照片

Fig.2 Construction site photos

1.2 隧道火灾通风排烟方案

隧道为双线单向交通隧道, 分为左、右两线, 左右两线在结构上基本对称, 为了节省计算资源和计算时间, 以左线为例, 进行模拟计算。1:1 建立左线隧道的三维数值计算模型, 如图 3 所示。为描述方便, 将首期段分为两个阶段。阶段一: 江灵南路入口至星灿路北侧出口路段实现通车 (图 3 中 ABC), 而地下环路匝道 H1 暂未开通 (图 3 中 BE 段)。阶段二: 地下环路匝道 H1 开通, 即图 3 中 ABC、ABE 路段均已经通车。首期段火灾分区如图 4 所示。

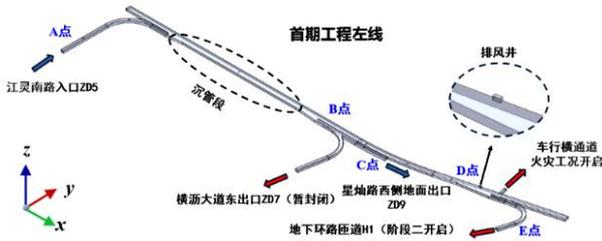


图 3 隧道通风数值计算模型

Fig.3 Tunnel ventilation numerical model

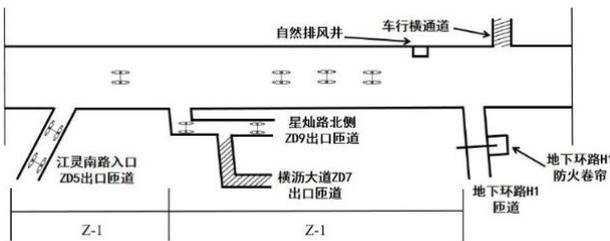


图 4 首期段隧道左线火灾分区示意图

Fig.4 Diagram of fire zoning for the left line of the first phase tunnel

根据《城市地下道路工程设计规范》(CJJ 221-2015), 纵向通风隧道断面风速最小不应低于 2.5m/s。根据本项目设计, 按照可能发生火灾的热释放率及通风排烟方式, 确定火灾工况下的临界风速不低于 3m/s。

根据隧道通风设计图纸, 在 ZD5 匝道上安装

了 2 组 (4 台) 射流风机, 在沉管段安装了 1 组 (2 台) 射流风机, 在 ZD9 匝道上安装了 2 组 (4 台) 射流风机, 在 BD 段主线隧道安装了 3 组 (6 台) 射流风机, 所有射流风机型号相同。因此, 在阶段一, 可开启的射流风机数量为 10 台, 在阶段二, 可开启的射流风机数量为 12 台。

两个火灾分区开启风机方案具体如表 1 所示。在两个火灾分区方案中, 江灵南路入口均作为新风入口, 因此 ZD5 匝道上的一组射流风机均开启。沉管段仅有一组射流风机, 起到新风接力作用, 需开启。而两个阶段的区别就在于排烟通道的不同, Z-1 利用星灿路匝道进行排烟, 因此开启 ZD9 匝道上 SL-ZD9-01~02 两组射流风机。Z-2 利用自然排风井进行排烟, 因此开启 BD 路段上 SL-Z-S03~05 三组射流风机。

在通风排烟方案的基础上, 开展全尺寸隧道数值模拟火灾工况研究, 验证设计方案的可行性, 并提出合理的运行建议。研究关键之处在于开展射流风机模拟, 只有确保模拟中射流风机运行参数与实际工程参数相符, 才能保证隧道火灾通风排烟计算结果的可靠性。

表 1 火灾工况隧道射流风机开启方案

Table 1 Scheme for opening jet fan in tunnel under fire conditions

火灾分区	开启射流风机编号
Z-1	SL-ZD5-01~02、SL-Z-S02、SL-ZD9-01~02 (共 5 组 10 台)
Z-2	SL-ZD5-01~02、SL-Z-S02~05 (共 6 组 12 台)

2 数值模拟方法

本文利用流体仿真软件 Fluent 进行模拟。首先, 针对隧道左线, 根据工程设计参数 1:1 建立其三维计算模型。隧道模型长度为 1090m, 匝道面积为 40m<sup>2</sup>, 隧道主线面积除沉管段为 82.5m<sup>2</sup>, 其余均为 60m<sup>2</sup>。隧道车行横通道面积为 22.5m<sup>2</sup>, 自然排风口面积为 15m<sup>2</sup>。其次, 根据不同阶段、不同位置的火灾特点, 对模型边界条件进行调整。

本模拟计算中的关键为射流风机参数设置。火灾发生后, 排烟的主要动力来源为射流风机。根据现有研究, 3D Fan 在模拟射流风机时具备一定优越性, 计算所得结果与实验数据误差较小。因此, 将隧道模型中 16 台射流风机流域设置成 3D Fan

Zone, 并对其所需参数进行设置, 具体参数如表 2 所示。射流风机压力跃升值厂家未能提供, 通过数值模拟, 设置不同风压跃升, 当得到的风机流量达到其额定流量时, 确定为风机压力跃升值。

表 2 3D Fan 边界条件参数

Table 2 3D Fan boundary condition parameters

轮毂直径/m	叶顶直径/m	叶轮宽度/m	风机转速/(rad/s)	压力跃升/Pa	额定流量/m <sup>3</sup>
0.3	0.71	0.12	303.5	待确定	14.6

在进行压力跃升数值模拟试验之前, 应该进行网格无关性分析, 降低模型网格质量对计算结果的影响, 提高模拟结果的可靠性。由于隧道模型计算域庞大, 增加边界层将导致网格数量剧增, 对计算机性能的要求极高, 因此未进行边界层的划分, 仅针对射流风机以及隧道分、合流鼻端附近区域开展网格局部加密。图 5 给出了射流风机压力跃升为 46Pa 时不同网格数量下 3 处射流风机出口风速计算结果, 选取的 3 处射流风机分别位于江灵南路匝道(ZD5)、隧道主线沉管段以及星灿路匝道(ZD7)。由图 5 可知, 当网格数量从 1086 万增加至 6700 万, 3 处风机出口风速以及结果变化率随网格数量的增加而降低。而出口风速最高为 ZD7 内风机, ZD5 次之, 沉管内风机出口风速最小, 这与隧道断面大小以及结构相关。沉管段为主线隧道, 断面最大, 因此断面风速最小, 从而影响射流风机提升能力, 而 ZD5 与 ZD7 匝道断面一致, 但 ZD5 为大曲率隧道走向, 因此 ZD5 内射流风机提升能力稍弱于 ZD7。当网格数超过 4250 万后, 计算结果随网格数的变化率均低于 1%, 因此选用 4250 万网格开展后续数值计算。

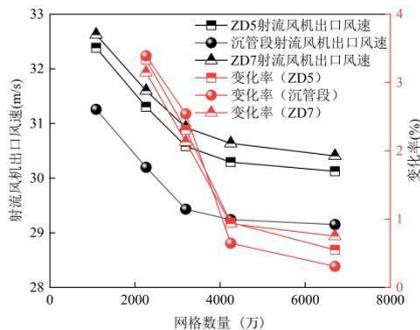


图 5 网格无关性验证

Fig.5 Grid independence verification

模型网格可靠性验证后, 针对 5 种不同风机压力跃升值进行数值模拟, 并统计风机出口风速, 结

果如图 6 所示。通过图 6 的曲线可知, 风机风量随着压力跃升的增大而提高, 当压力跃升为 75Pa 时, 风机出口风速为 37m/s, 非常接近风机额定流量下的风速值 (36.8m/s), 因此设定射流风机 3D Fan 模型中压力跃升参数为 75Pa。

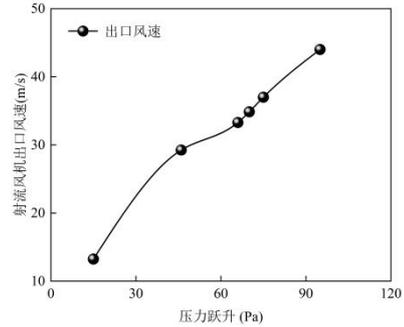


图 6 不同压力跃升下射流风机出口风

Fig.6 Outlet velocity of jet fan under different pressure jumps

确定好边界条件后, 选用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型计算, 流动介质为空气, 密度  $\rho=1.225\text{m}^3/\text{kg}$ , 动力粘度系数  $\mu=1.7894\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。壁面为无滑移边界条件, 对流项与扩散项为二阶迎风格式, 各项残差收敛条件为  $10^{-4}$ , 同时监测风机入口与出口风速变化, 当曲线趋于稳定则认定计算收敛。

### 3 结果分析

#### 3.1 阶段一火灾工况通风排烟模拟结果

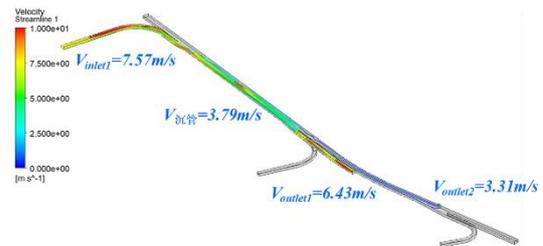


图 7 阶段一火灾工况模拟结果

Fig.7 Simulation results of first stage fire condition

图 7 给出了阶段一发生火灾时的通风排烟计算结果。从图 7 可以看出, 开启 10 台射流风机后, A 点到 C 点路线上所有路段的风速均高于火灾临界风速 3m/s, 匝道 ZD5 风速更是达到了 7.57m/s, 沉管段风速也达到了 3.79m/s, 满足 Z-1 火灾分区内发生火灾时的排烟要求。

在火灾发生情景下, 烟气于 B 点呈现分岔流动态势, 其中, 主流烟气由 B 点向 C 点方向迁移, 并经星灿路北侧地面出口排出。与此同时, 少量烟

气经由 D 点自然通风口排出。进一步计算可知, 由 C 点排出的烟气流量为  $255.3\text{m}^3/\text{s}$ , 而经 D 点排出的烟气量为  $45.9\text{m}^3/\text{s}$ , D 点排烟量仅占总排烟量的约 1/6。大量烟气经星灿路北侧地面出口排出的原因主要在于 D 点自然通风口排烟面积相对狭小, 致使流动阻力较大。进一步分析表明, B 点至 D 点路段的风速仅为  $0.76\text{m/s}$ , 远低于要求的临界排烟风速 ( $3\text{m/s}$ )。因此, 火灾发生时, 难以保证进入 BD 路段的烟气能及时、有效地排出, 存在烟气堆积的安全隐患。此外, 在正常运营阶段, 尤其是阶段一时期, 地下环路匝道 H1 尚处于封闭状态, 且车行横通道位于火灾点下游, 其通行功能亦受到限制。因此, 在此阶段, 逃生车辆应避免驶入 BD 路段。所以, 阶段一期间发生火灾后的人员与车辆疏散策略应遵循以下原则: 火灾点上游的司乘人员应迅速弃车逃生, 可通过 ZD5 匝道或火灾点上游人行横通道逃离火灾隧道。火灾点下游的司乘人员则应驾车经由 ZD9 匝道口逃离火灾隧道, 而非依照设计中经 ZD9 匝道或 H1 匝道或车行横通道驾车逃离火灾隧道的方式进行疏散。因为, 当车辆进入 BD 路段后, 将面临较大的安全风险, 而且一旦开启车行横通道, 烟气有可能侵入右线隧道, 进而引发右线隧道的危险发生。鉴于此, 建议在阶段二开通之前, 在 B 点岔道口对 BD 段实施封堵措施, 以防止车辆和人员误入 BD 路段, 特别是在火灾发生时, 该封堵措施对于保障人员和车辆的安全疏散具有重要意义。

### 3.2 阶段二火灾工况通风排烟模拟结果

根据首期段火灾分区, 对于阶段二, 火灾可能发生在 Z-1 分区, 也可能发生在 Z-2 分区。下面, 针对不同分区发生火灾时, 研究其逃生路线和相应的排烟通风。当火灾发生在 Z-1 分区时, 其情况与阶段一发生火灾时基本相似。这时, 正确的人员和车辆疏散方式应为: 火灾点上游司乘人员弃车逃生, 从 ZD5 匝道或者火灾点上游人行横通道逃离火灾隧道。火灾点至 B 点的下游司乘人员驾车逃生, 尽量从 ZD9 匝道口驾车逃离火灾隧道, 已经进入 B 点至 D 点路段的车辆, 应尽快从 H1 匝道驶入地下环路, 并且在烟气扩散至 H1 匝道前, 关闭 H1 匝道上的防火卷帘, 避免烟气进入地下环路。在防火卷帘关闭后, 仍未逃脱的车辆, 需要弃车从就近的人行横通道逃生。这种情况下, 应该开启 A

点到 C 点通路上的所有射流风机, 在火灾点至 C 点的路段, 产生较高的风流速度, 及时将烟气通过 ZD9 匝道口排出地面。而 B 点至 D 点路段的 6 台风机不应开启, 不可使 BD 路段烟气扩散太快, 大量烟气进入 BD 段, 甚至进入地下环路。

对于火灾发生在 Z-1 分区的情况, 由于火灾点至 H1 匝道口较远 (大于  $500\text{m}$ ), 烟气扩散距离较长, 给进入 BD 段的车辆从 H1 匝道逃生留有时间, 因此是基本可行的, 但需要消防控制系统, 适时关闭 H1 匝道的防火卷帘。

当火灾发生在 Z-2 分区时, 即火灾发生 BD 路段, 这是最不利的一种情况。设计图纸建议的人员和车辆疏散方式为: “火源点上游司乘人员弃车逃生, 从上游人行横通道或入口匝道逃离火灾隧道。火源点下游司乘人员驾车逃生, 从 H1 匝道或车行横通道 2 驾车驶离火灾隧道”。对于火灾上游司乘人员, 应该分两种情况, 对于在 AB 路段的上游司乘人员, 应驾车从 ZD9 匝道逃生, 在 B 点至火灾点路段的上游司乘人员, 应从上游人行横通道或 ZD9 出口匝道逃离火灾隧道。而对于火灾点下游司乘人员, 设计给出的逃生方案是: 从 H1 匝道或车行横通道 2 驾车驶离火灾隧道。研究认为这种方案存在一定缺陷。由于 BD 段距离较短, 火灾发生后, 烟气会迅速蔓延开来, 这时, 如果 H1 匝道上的防火卷帘不立即关闭, 或者车行横通道的防火门不关闭, 大量的烟气会流入地下环路, 或者右线隧道。为了说明这一点, 模拟了两种情况。一是 H1 匝道上的防火卷帘关闭, 但车行横通道防火门打开。二是 H1 匝道上的防火卷帘和车行横通道防火门均打开。

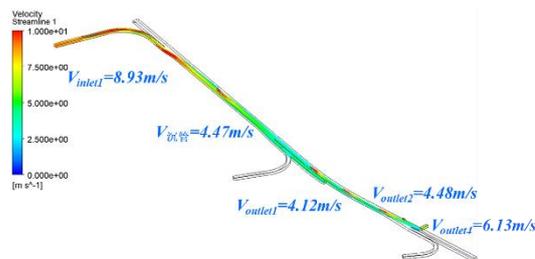


图 8 阶段二火灾工况下开启车行横通道、关闭 H1 匝道上防火卷帘时的模拟结果

Fig.8 Simulation results of opening the transverse passage of the vehicle and closing the fireproof roller shutter on the H1 ramp under the second stage fire condition

图 8 所呈现的是第一种情况下的模拟结果。在此情境下, 关闭 H1 匝道的防火卷帘门、开启车行横通道防火门, 并启动 ABD 路段上全部 12 台射流风机, 经模拟计算, 沉管段断面风速可达 4.47m/s, BD 路段断面风速为 3.19m/s, 均满足排烟所需的最低风速要求。然而, 深入分析图 8 的模拟结果可以发现, 此方案将致使大量烟气涌入右线隧道, 进而对右线隧道的正常运行构成潜在的安全威胁。

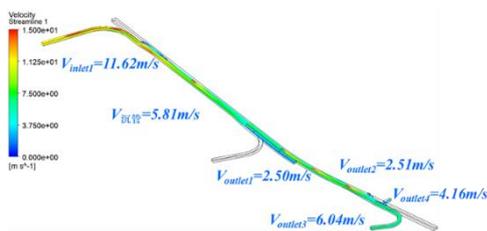


图 9 阶段二火灾工况下开启车行横通道、打开 H1 匝道上防火卷帘时的模拟结果

**Fig.9 Numerical simulation results of opening the transverse passage of the vehicle and opening the fireproof roller shutter on the H1 ramp under the second stage fire condition**

图 9 展示了第二种情况的模拟结果。在此方案下, 开启 H1 匝道的防火卷帘门和车行横通道的防火门, 并启动全部 12 台射流风机, 隧道内整体通风量出现了显著提升。经分析, 入口流量由第一种情况下的 355.2m<sup>3</sup>/s 提高至 461.9m<sup>3</sup>/s, 沉管段风速达到 5.81m/s, 而 BD 路段风速更高达 6.00m/s, 均满足排烟所需的最低风速要求。

然而, 深入分析图 9 的模拟结果可以发现, 此方案下, 大量烟气涌入地下环路, 同时右线隧道出现较多烟气侵入。这将对地下环路和右线隧道的正常运行产生潜在安全威胁, 具体表现为: 地下环路内烟气积聚风险增加, 以及右线隧道内能见度降低、空气质量恶化等问题, 进而可能影响车辆的正常通行和人员的生命安全。因此, 应充分考虑此类风险, 采取相应的防范措施, 以确保隧道及地下环路在火灾情况下的安全性和可靠性。

模拟结果表明, 上述两种逃生方案下, 火灾发生后均会对右线隧道或地下环路的正常运行带来不同程度的安全风险, 说明现有通风排烟方案存在较大的安全风险, 无法充分保障隧道及相关区域的火灾安全性。

进一步, 通过模拟分析关闭 H1 匝道的防火

卷帘门及车行横通道防火门的情景, 旨在探究单纯依靠自然通风口进行排烟的效果, 结果如图 10 所示。从图 10 可知, 在关闭车行横通道和 H1 匝道防火卷帘门的条件下, 烟气难以有效经由自然通风口排出。原因在于通风口处流动阻力较大, 限制了射流风机所能提供的通风流量。经计算, 此时 12 台射流风机运行时, BD 路段断面风速仅为 1.48m/s, 远低于隧道火灾排烟要求的最低风速。这表明, 仅依靠自然通风口排烟的方式, 在火灾场景下无法为 BD 路段提供足够的通风支持, 难以实现有效的烟气排出, 无法满足隧道火灾排烟的设计要求, 存在较大的安全隐患。

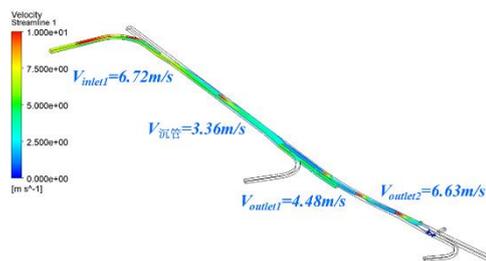


图 10 阶段二火灾工况下关闭车行横通道和 H1 匝道上防火卷帘时的模拟结果

**Fig.10 Numerical simulation results of closing the fire-resistant rolling shutters on the transverse passage and H1 ramp during stage two fire conditions**

综上所述, 对阶段二, 当火灾发生于 Z-1 分区时, 现有通风排烟系统基本能够满足设计要求, 确保烟气有效排出与人员安全疏散。然而, 若火灾发生在 Z-2 分区时, 基于现场实际结构条件及设备设置情况, 现有通风排烟方案存在不合理之处, 需要有改进措施, 以提升隧道运行的可靠性与安全性。

#### 4 结论

本文以南沙明珠湾区跨江隧道(首期段)为工程背景, 结合工程设计与隧道火灾工况射流风机通风排烟模拟计算机结果, 分析了多点进出城市隧道通风排烟难点, 并根据隧道通风排烟设计原理, 进行了火灾工况下通风模拟计算, 对比设计方案与模拟通风排烟效果, 主要有以下结论与建议:

(1) 对于阶段一发生火灾, 开启 ABC 路段上 10 台射流风机, 能够满足火灾期间排烟风速要求。建议在阶段一开通运行后至阶段二开通之前, 在 B 点岔道口对 BD 段进行封堵, 避免车辆和人员误入

BD 路段, 尤其是在火灾发生时, 司乘人员心理紧张, 容易出差错。

(2) 对于阶段二, 当火灾发生在 Z-1 分区时, 开启 12 台射流风机, 能够基本满足火灾期间排烟风速要求。但当火灾发生在 Z-2 分区时, 现有通风排烟设施存在一定的安全风险。

(3) 自然排风井面积较小, 阻力大, 应加大自然排风井的面积, 确保在关闭地下环路防火卷帘和车行横通道时, 自然排风井排出的烟气流量能够保证 BD 段隧道风速高于火灾临界风速要求。

### 参考文献:

- [1] Cui Y, Liu J, Han X, et al. Full-scale experimental study on suppressing lithium-ion battery pack fires from electric vehicles[J]. *Fire safety journal*, 2022,129: 103562.
- [2] Huang M Q, Ninić J, Zhang Q B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108:103677.
- [3] 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.
- [4] 王艳,王子云,唐上明,等.多匝道公路隧道通风系统模拟研究[J].*地下空间与工程学报*,2012,8(3):630-636.
- [5] 姜学鹏,余璨,毛杨苏宜.多匝道城市公路隧道通风孔布置研究[J].*隧道建设*,2017,37(5):560-564.
- [6] 张键鸿.城市复杂隧道通风阻力特性与排烟策略研究[D].武汉:武汉科技大学,2023.
- [7] 王东伟,戴新,李国江.南昌红谷水下互通立交隧道通风排烟组织研究[J].*隧道建设(中英文)*,2018,38(6): 992-999.
- [8] 李俊梅,尹晨晨,赵宇航,等.城市地下道路合流分岔路段烟气控制策略的优化研究[J].*中国安全生产科学技术*,2016,12(6):163-168.
- [9] 徐燃,赵家明,王强华,等.城市快速通道入口匝道火灾反向通风烟气控制研究[J].*消防科学与技术*,2020, 39(4):478-482.
- [10] 兰佳忆.城市隧道复杂段通风阻力系数与通风网络解算研究[D].成都:西南交通大学,2023.
- [11] 姜学鹏,张键鸿,陈玉远.复杂地下空间交通体系连接匝道烟气控制方案研究[J].*火灾科学*,2023,32(1):26-32.
- [12] 宋夕雨,阳东,陈建忠.多匝道隧道纵向排烟分区划分与风机匹配计算[J].*中国安全科学学报*,2020,30(5):136-142.
- [13] 宋思源,袁中原.不同海拔高度下隧道内救援站火灾烟气特性研究[J].*制冷与空调*,2025,39(3):308-317.
- [14] 惠豫川.某特长铁路隧道通风计算及模拟研究[J].*制冷与空调*,2025,39(3):397-405.
- [15] 曹雄智.高海拔铁路隧道紧急救援站人员疏散特征及 RSET 计算模型研究[D].成都:四川农业大学,2022.
- [16] 庄炜茜.特长铁路隧道救援站纵向排烟模式下烟气蔓延模拟分析[J].*制冷与空调*,2015,29(2):221-228.
- [17] 李修柏.特长高速铁路隧道火灾人员疏散研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [18] 张华锦,毕海权.非着火车厢空调运行对火灾时人员疏散影响研究[J].*制冷与空调*,2024,38(5):621-628.
- [19] Thunderhead Engineering. *Pathfinder User Manual* [EB/OL]. <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-user-manual-2024-2.pdf>.
- [20] 张睿,马瑜,赵冰茹,等.京沪线高铁与民航旅客出行选择行为研究[J].*交通运输系统工程与信息*,2016,16(1): 223-228.
- [21] 陶俊臣,马新露,钱行.基于微观行为分析的城市轨道交通车站内行人步行速度影响分析[J].*现代城市轨道交通*,2024,(8):111-115.
- [22] 杨静,饶海洋,张红亮,等.基于紧密社会关系的地铁规律结伴乘客出行模式研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2024,43(12):1-7.
- [23] HALL E T. *The Hidden Dimension*[M]. New York: Anchor Books, 1988.

### (上接第 88 页)