

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-711-07

地铁轨行区迂回隧道对火灾通风排烟的影响研究

高 伟¹ 王方敏¹ 祁式展² 余 涛²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 杭州 311122;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 部分地铁车站由于空间受限只能将活塞风井设置在车站轨行区内, 并采用迂回隧道将风井与轨行区外侧正线隧道相连, 迂回隧道对火灾工况通风排烟的影响不明。建立了包含车站迂回隧道的区间隧道列车火灾数值计算模型, 对采用纵向通风排烟时, 有无迂回隧道作用下的区间隧道火灾烟气分布特性进行模拟分析。结果表明: 采用火灾区间两端风井的两送两排模式可有效排除火灾烟气, 在火源上游区间均无烟气蔓延; 风井移到轨行区后, 火源下游区间隧道顶部烟气温度在相同时间时会比常规风井设置工况高, 且 240s 时有部分隧道段超过 180℃; 设置迂回隧道后人员高度处烟气温度较无迂回隧道温度略有下降, 对轨行区段的人员疏散更有利; 三个工况均在 120s 后火源下游隧道内疏散平台上的能见度低于 10m。

【关键词】 地铁轨行区; 迂回隧道; 列车火灾; 通风排烟

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Study on the Influence of By-pass Tunnel in the Subway Track Area on Ventilation under the Fire Condition

Gao Wei¹ Wang Fangmin¹ Qi Shizhan² Yu Tao²

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, 311122;

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

【Abstract】 Due to space limitations, some subway stations can only install the piston air shaft within the station's track area, and use the by-pass tunnel to connect the air shaft with the main tunnel outside the track area. The impact of by-pass tunnel on ventilation and smoke exhaust during fire conditions is unclear. This paper establishes a numerical calculation model for train fire in the section tunnel including the station and the by-pass tunnel, and simulates and analyzes the smoke distribution characteristics of section tunnel fire with and without the by-pas tunnel, when the longitudinal ventilation and smoke exhaust are used. The results show that using the two supply and two exhaust mode of air shafts at both ends of the fire zone can effectively eliminate fire smoke, and there is no smoke spread in the upstream section of the fire source. After the air shaft is moved to the track area, the smoke temperature at the top of the tunnel downstream of the fire source will be higher than that of the conventional air shaft setting at the same time, and the smoke temperature in some tunnel sections will exceed 180℃ at 240 seconds. With the by-pass tunnel, the temperature of the smoke at the height of the personnel is slightly lower than those without the by-pass tunnel, which is more beneficial for personnel evacuation in the track section. The visibility on the evacuation platform in the downstream tunnel of the fire source is less than 10 m after 120 seconds for three cases.

【Keywords】 Subway track area; By-pass tunnel; Train fire; Ventilation and smoke exhaust

作者简介: 高 伟 (1985-), 男, 高级工程师, E-mail: gao_w@hdec.com

通讯作者: 余 涛 (1987-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-07-04

0 引言

地铁列车在隧道中发生火灾会形成浓烟和热气浪，产生大量的有毒气体且难以自然排除，不利于人员疏散。因此，需要通过机械排烟营造更好的逃生环境，目前地铁区间隧道火灾大多采用纵向通风排烟的方式^[1]。冯炼等^[2]利用 SES 软件对某线路区间隧道内发生列车火灾进行模拟，发现火灾区间隧道的风速与风井位置、通风策略等密切相关。柳毅^[3]运用 FDS 软件，对地铁区间隧道不同通风模式的排烟效果和特点进行了对比。姜学鹏等^[4]论证了地下通道设置通风竖井的必要性。谢宣等^[5]根据实际中间风井尺寸建立了火灾数值计算模型，对不同竖井排风量的隧道火灾通风排烟进行了研究，得出当隧道内存在两列列车时，中间风井能很好地往隧道内组织气流。梁园^[6]采用 CFD 方法模拟了开启不同竖井的送排风方式、纵向送风速度相结合的状况，得出它们对隧道行车道内速度场、温度场的影响。

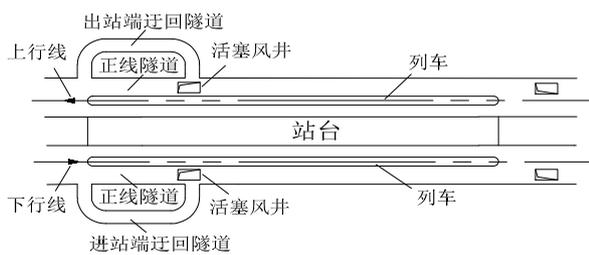


图 1 地铁车站轨行区迂回隧道示意图

Fig.1 Schematic diagram of by-pass tunnels in the track area of subway station

目前，国内的区间隧道火灾研究多数针对轨行区外侧布置活塞风井的常规隧道结构。对于部分因周围空间限制而无法将活塞风井设置在轨行区外侧的地铁车站，可将活塞风井设置在轨行区内，并在活塞风井下设置迂回隧道将风井与轨行区外正线隧道相连，如图 1 所示。迂回隧道的存在会影响

隧道阻力，并且改变隧道内的风量分配，可能降低送排风机的效率，使火灾烟气不能及时排出，导致原有通风策略无法满足设计要求。因此，本文进一步开展火灾工况下迂回隧道对通风排烟效果的影响研究。

本文基于某典型地铁线路，其中部车站隧道采用迂回隧道结构，采用三维数值模拟方法，研究火灾工况下着火区间隧道的烟气蔓延特性，并分析了迂回隧道在火灾情形下对隧道通风排烟的影响，为此类工程提供设计参考。

1 数值计算模型

1.1 线路和迂回隧道概况

本文以位于成都的某典型地铁线路为例，开展迂回隧道对火灾通风排烟效果的影响研究。该线路各车站站台有效长度为 186m，轨行区断面积均为 31m²，区间隧道断面积为 40.6m²。车站两端采用双活塞风井模式，活塞风井长度为 40m，活塞风井横截面积为 21m²。轨行区设有风量为 80m³/s 的轨道排热系统，仅在远期运行时开启。位于最中部的车站左端因受空间限制采用迂回隧道结构，该迂回隧道长度为 18.1m，断面积为 20.3m²，迂回隧道与正线隧道面积比为 0.65。该线路列车采用 A8 型车，车长 186m，断面积为 11.4m²。

1.2 数值计算模型

本文采用 STAR-CCM+三维数值模拟软件，建立了该线路 1 站 2 区间的隧道火灾模型，包含有迂回隧道的车站和站前中间风井及中间风井两侧区间。为研究火灾工况下迂回隧道对隧道通风效果的影响，设置了三种工况进行比较分析，如图 2 所示。工况 1 是活塞风井设置在轨行区外的基准工况，工况 2 是直接将活塞风井设置在轨行区内的对比工况，工况 3 是将活塞风井设置在轨行区内并增设迂回隧道的对比工况。



(a) 工况 1-轨行区外设置活塞风井

(b) 工况 2-轨行区内设置活塞风井



图 2 三种工况的隧道模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of tunnel models of three cases

列车模型如图 3 所示, 考虑第 5 节车厢内发生火灾。



图 3 列车模型

Fig.3 Train model

1.3 火源参数及边界条件

我国《地铁设计规范》对于地铁火灾的热释放速率为 5MW, 并且规定人员的逃生时间为 6min。《地铁设计防火标准》(GB51298-2018) 规定: “国内地铁列车的设计火灾规模通常取用 7.5~10.5MW”。本文数值模拟计算将火源热释放速率设置为 10.5MW, 火源设置在列车车厢内, 并模拟开门疏散和车窗打开。

边界条件中, 环境温度为 20.0℃, 隧道壁面材料为混凝土, 列车表面为绝热条件, 隧道入口和出口设置为大气压力边界, 竖井为速度入口。

1.4 网格尺寸

为准确模拟隧道火灾并减少计算时间, 必须选择合理的网格尺寸。合理的网格尺寸与火源特征直径 D^* 有关, 火源特征直径 D^* 的计算公式为:

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

式中, Q 为火灾热释放率, kW; D^* 为火灾特征直径, m; ρ_0 表示环境密度, kg/m^3 ; T_0 表示环境温度, K; c_p 为定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; g 为重力加速度, m^2/s 。

数值模拟软件使用手册指出, 网格尺寸在 0.06~0.25 D^* 之间时, 数值模拟计算结果较好。研究^[7]表明, 网格尺寸在 0.1~0.12 D^* 之间, 火源附近加密一倍时, 数值计算结果与全尺寸火灾试验结果吻合得很好。针对本文隧道模型, 列车火灾发生在区间隧道中部区域。按公式 (1) 计算得到不同火源热释放速率下对应的火源特征直径 D^* 为 2.5m, 为了保证计算准确度和减少计算量, 本文采用 0.1 $D^*=0.25\text{m}$ 的网格尺寸, 火源附近加密一倍,

如图 4 所示。工况 1、2、3 的网格总数分别为 347 万、328 万和 438 万。



图 4 火源处网格加密情况

Fig.4 Grid refinement at the fire source

1.4 区间隧道火灾工况

为了探究火灾区间隧道火灾情况下, 迂回隧道对隧道火灾通风排烟的影响, 对三种不同情况在距离迂回隧道最近的区间隧道发生火灾进行了计算, 讨论设置迂回隧道后火灾区间隧道、迂回隧道及其对应正线隧道的烟气蔓延情况。三个工况均考虑发生车头火灾, 采用顺行车方向的“两送两排”排烟模式, 中间风井 2 台 TVF 风机开启、总送风量为 220 m^3/s , 车站左端竖井 2 台 TVF 风机开启、总排烟量为 220 m^3/s 。由于车站左端活塞风井排风, 此时烟气会经过迂回隧道, 需要重点考虑迂回隧道及其对应的正线隧道内的烟气蔓延情况。

1.5 火灾烟气控制指标

火灾中影响人员逃生的烟气参数主要有烟气温度、烟气辐射量、能见度、烟气 CO 浓度^[8]。为保证人员安全疏散, 应使火源上游区间隧道内无烟气逆流的现象; 当无法阻止烟气逆流时, 需将人员逃生环境中危害人员安全的烟气参数控制在一定范围。以 NFPA130 和 PIARC 中火灾烟气参数控制标准为参照, 并考虑安全余量, 本文取 6min 的逃生时间内距离火源 30m 外的火源上下游隧道烟气参数的极限值如下:

- (1) 隧道内烟气最高温度不超过 180℃;
- (2) 人员高度处的最高烟气温度不超过 70℃;
- (3) 人员高度处的烟气能见度不小于 10m。

2 结果分析

2.1 不同时刻隧道内烟气分布

对三种工况下的区间隧道列车火灾进行模拟, 以工况 1 的烟气蔓延情况为例进行分析, 如图 5 所

示。在中间风井送风、车站左端风井排烟的纵向排烟模式下，着火车厢左端区间隧道内无烟气蔓延。

随着时间的变化，着火车厢右端烟气沿区间隧道纵向蔓延至车站左端风井。

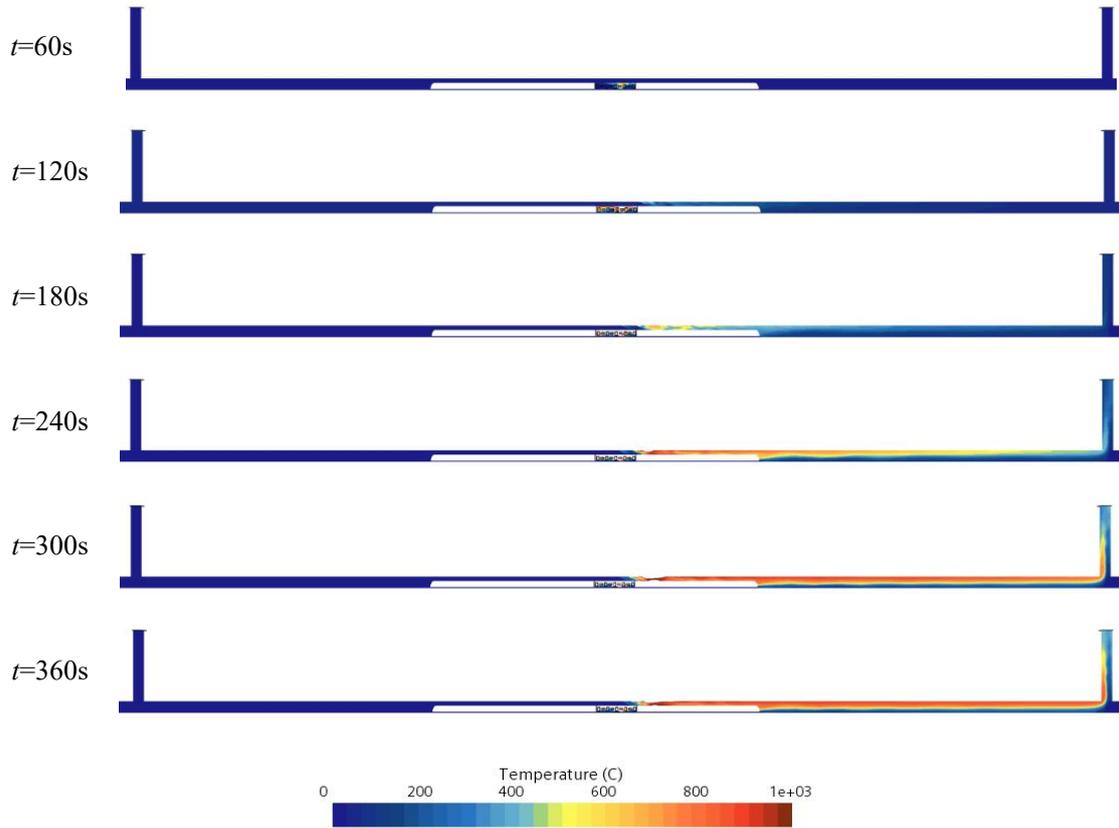
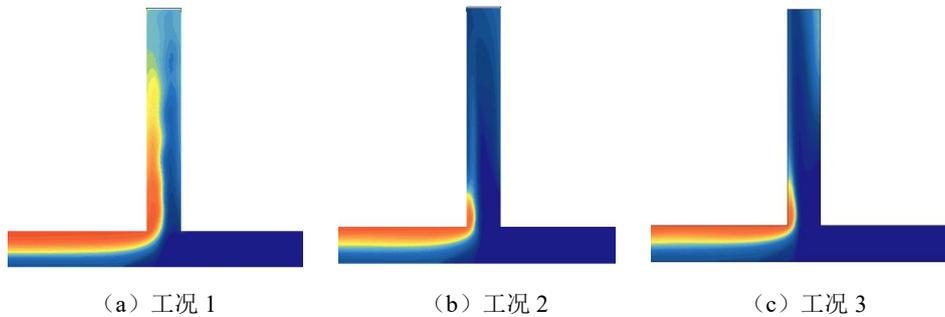


图 5 工况 1 纵向排烟时的烟气分布

Fig.5 Smoke distribution during longitudinal smoke exhaust for Case 1

图 6 所示为三种工况下车站左端风井附近的烟气分布云图，在纵向排烟模式下，着火车厢右端烟气沿区间隧道纵向蔓延至车站左端风井后均能被直接排出，采用两送两排的排烟模式能将烟气有效控制着火区内。工况 1 的烟气没有进一步蔓延到车站轨行区隧道内，工况 2 和 3 由于风井移到

轨行区内，烟气会蔓延至轨行区内经风井排除，同时也有部分烟气流入迂回隧道内再经风井排出。工况 2、3 烟气到达风井的时间和路程更长，故风井内烟气温度比工况 1 低一些。工况 3 虽然有迂回隧道分流烟气，但在风井处的烟气温度与工况 2 差异不大。



(a) 工况 1

(b) 工况 2

(c) 工况 3

图 6 车站左端风井附近烟气分布

Fig.6 Smoke distribution near the left ventilation shaft of the station

2.2 隧道顶部烟气温度

图 7 所示为站前区间隧道车头火灾采用纵向通风方式时的隧道顶部烟气温度分布, 火源上方隧道顶部烟气温度最高。由于纵向通风作用, 三个工况火源上游区间内无烟气回流, 逃生人员相对安全, 向下游蔓延的烟气会被后侧排烟口排走, 说明两送两排的排烟模式是可行的。火源下游 30m 外的隧道顶部烟气温度随时间变化有差异, 工况 1 在

240s 前火源下游 30m 外的隧道顶部烟气温度均未超过 180℃; 工况 2 在 180s 前火源下游 30m 外的隧道顶部烟气温度均未超过 180℃, 在 240s 时有部分隧道段超过 180℃, 不满足热辐射控制标准, 高温烟气的热辐射将对下游逃生人员产生威胁; 工况 3 与工况 2 的规律相似。可以发现, 风井移到轨行区内后, 火源下游区间隧道顶部烟气温度在相同时间时会略高。

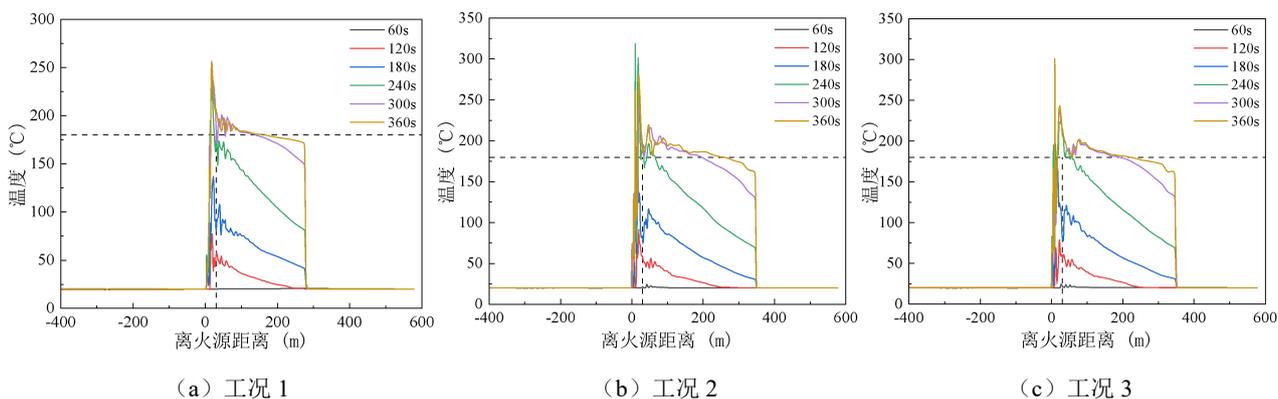


图 7 隧道顶部烟气温度分布

Fig.7 Smoke temperature distribution at the top of the tunnel

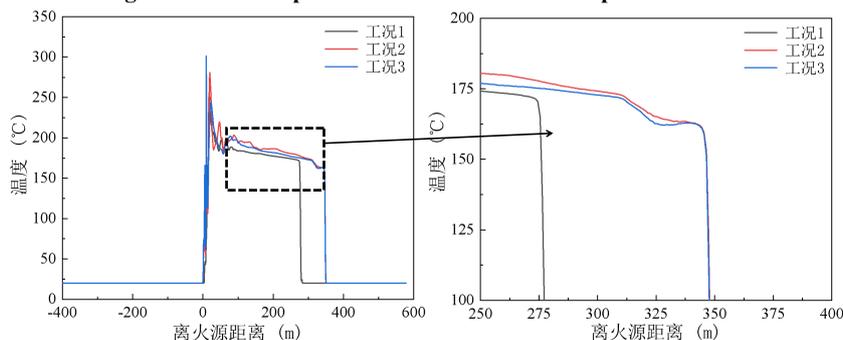


图 8 隧道顶部烟气温度对比

Fig.8 Comparison of smoke temperature at the top of the tunnel

为进一步分析 3 个工况烟气蔓延规律的差异, 图 8 给出了火灾发展到 360s 时三个工况隧道顶部烟气温度。工况 1 的烟气蔓延距离短, 阻力小, 烟气更易排除, 沿程温度更低些。工况 2 隧道顶部温度略微上升, 工况 3 较工况 2 无迂回隧道时温度略有下降, 更有利, 主要是由于迂回隧道减小了通风阻力。

回流, 温度为送风温度, 上游逃生相对安全。工况 1 中 180s 前隧道下游疏散平台 1.7m 处的烟气温度均未超过 70℃, 符合安全疏散标准。但随着时间的推移, 烟气会逐渐下沉, 180s 后火源下游 30m 外的烟气温度将逐渐超过安全疏散标准规定的 70℃, 无法满足人员逃生需求。工况 2 也是在 180s 后火源下游 30m 外烟气温度将逐渐超过 70℃, 但超过的范围要比工况 1 大, 如在 240s 的烟气分布。工况 3 同样在 240s 后火源下游 30m 外的烟气温度逐渐超过 70℃。

2.3 人员高度处烟气温度

图 9 所示为站前区间隧道车头火灾纵向排烟工况下疏散平台 1.7m 高处的温度分布。同样, 由于纵向通风作用, 三个工况火源上游区间内无烟气

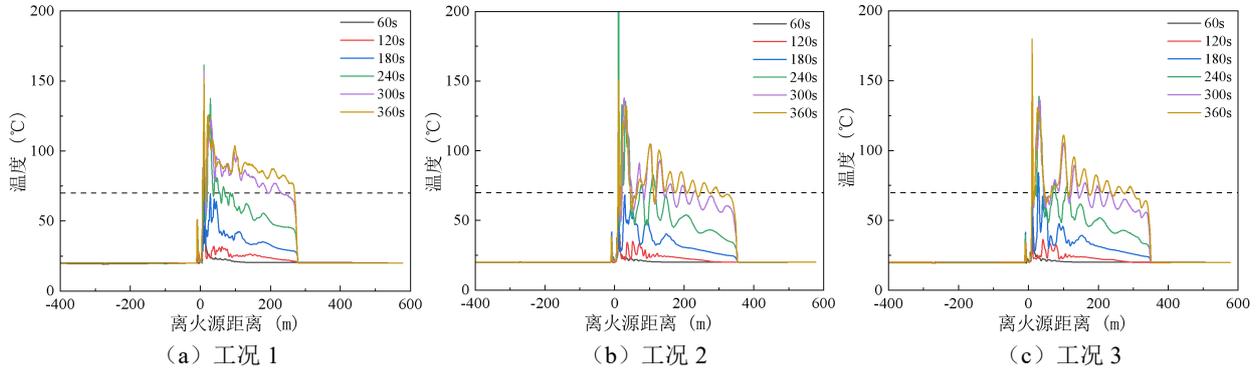


图 9 疏散平台 1.7m 高的烟气温度分布

Fig.9 Smoke temperature distribution of evacuation platform at a height of 1.7m

图 10 所示为火灾发展到 360s 时三个工况人员高度处烟气温度对比分析。由图可见，轨行区内部设置活塞风井，人员高度处温度波动较大。工况 3 设置迂回隧道后较工况 2 无迂回隧道温度略有下

降，特别是在迂回隧道段，由于迂回隧道的分流作用导致主隧道段内的烟气温度明显降低，对人员疏散更有利。

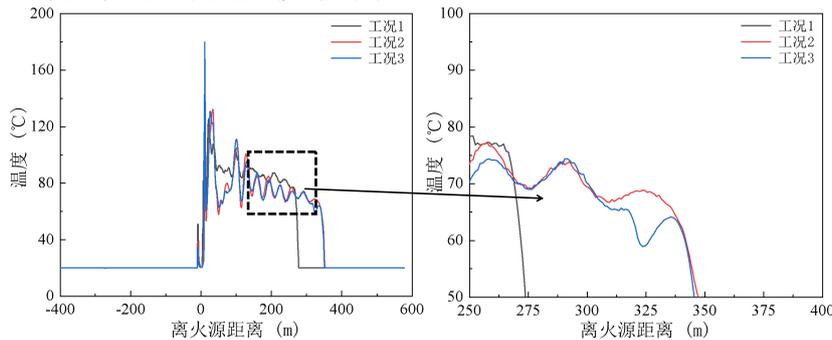


图 10 疏散平台 1.7m 高的烟气温度对比

Fig.10 Comparison of smoke temperature at the height of 1.7m on the evacuation platform

2.4 人员高度处烟气能见度

图 11 所示为区间隧道车头火灾纵向排烟情况下疏散平台 1.7m 高处的能见度分布。三个工况都是在 120s 后火源下游隧道内疏散平台上的能见度

低于 10m，将对人员安全疏散造成影响。在 180s 时，工况 1 距火源 220m 范围内的能见度低于 10m，而工况 2 和 3 仅在 200m 内的能见度低于 10m，工况 2 和 3 的能见度结果差异不大。

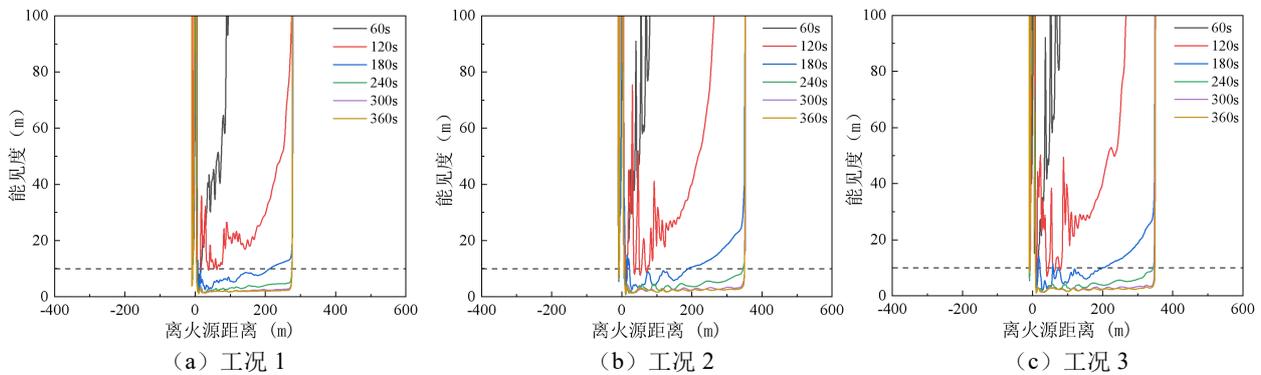


图 11 疏散平台 1.7m 高的能见度分布

Fig.10 Visibility distribution of evacuation platform at a height of 1.7m

3 结论

地铁轨行区迂回隧道的增设, 对区间隧道火灾通风排烟的影响不明。本文采用数值模拟方法计算分析了某含迂回隧道的区间隧道列车火灾三种工况下的通风排烟效果, 得到火灾工况下迂回隧道对通风排烟的影响, 结论如下:

(1) 采用火灾区间两端风井的两送两排模式可有效排除火灾烟气, 三个工况在火源上游区间均无烟气蔓延, 在一定纵向排烟风速下, 迂回隧道的存在对火源上游区间烟气蔓延无影响。

(2) 风井移到轨行区后, 由于烟气蔓延距离和阻力增加, 火源下游区间隧道顶部烟气温度在相同时间时会比常规风井设置工况高, 且 240s 时有部分隧道段超过 180℃。由于迂回隧道的分流作用, 设置迂回隧道后轨行区人员高度处烟气温度较无迂回隧道温度略有下降, 对轨行区段的人员疏散更有利。

(3) 三个工况均在 120s 后火源下游隧道内疏散平台 1.7m 高处的能见度低于 10m, 迂回隧道对能见度影响不大。

参考文献:

- [1] 范毅腾. 地铁长区间隧道火灾双点排烟的烟气特性及临界排烟量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
 - [2] 冯炼, 刘应清. 地铁火灾烟气控制的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2002, 22(1): 61-64, 95.
 - [3] 柳毅. 隧道火灾场景的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
 - [4] 姜学鹏, 庄炜茜, 赵红莉, 等. 通风竖井在地下联系通道通风系统中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(A6): 1227-1231.
 - [5] 谢宣, 冯炼, 张鲲, 等. 地铁深埋长隧道设置中间风井方式下火灾防排烟数值模拟研究[J]. 制冷与空调, 2013, 27(2): 126-129.
 - [6] 梁园. 组合通风方式越江隧道火灾的数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
 - [7] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
 - [8] 袁中原. 顶部开孔的地铁隧道火灾烟气扩散特性及控制方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
-
- (上接第 710 页)
- [19] Fanti G R, Romo D A, Almeida R D, et al. Influence of flank clearance on the performance of a scroll expander prototype [J]. Energy, 2020, 193: 116823.
 - [20] Cavazzini G, Giacomel F, Ardizzon G, et al. CFD-based optimization of scroll compressor design and uncertainty quantification of the performance under geometrical variations [J]. Energy, 2020, 209: 118382.
 - [21] 王建吉, 刘涛, 胡天林. 变截面无油涡旋压缩机轴向间隙泄漏模型的研究[J]. 流体机械, 2020, 48(9): 12-43.
 - [22] 王建吉, 刘涛. 无油涡旋压缩机涡旋齿齿顶密封结构的研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(5): 144-152.
 - [23] 王训杰, 薛丽. 径向间隙对涡旋压缩机性能的影响[J]. 机电工程, 2022, 39(5): 688-693.