

# 地下超长区间隧道取消中间风井的 防排烟系统模式研究

鱼晟睿

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安, 710043)

**摘要:** 目前国内城市轨道交通工程中超长区间隧道的防排烟系统设计, 通常做法是设置中间风井, 将着火列车和非着火列车分隔在两个独立的通风、排烟区段, 以保证非着火列车乘客疏散不受到火灾列车的烟气影响。但中间风井的设置容易受到室外地面条件、区域管控、城市景观、工程投资等多方面因素制约, 在工程实施中存在困难。通过理论分析、数值模拟的研究方式, 从乘客疏散安全及人员逃生区空气洁净的理念出发, 通过对隧道内疏散平台采取防烟措施, 结合隧道内纵向排烟, 给出了一种新型超长区间防排烟系统模式, 从而取消了中间风井, 供其他工程参考。

**关键词:** 地铁; 超长区间; 中间风井; 防烟; 疏散

**中图分类号:** U121; U25

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)03-0379-07

## Study on the model of smoke prevention and exhaust system without intermediate wind well in the underground extra-long interval tunnel of urban rail transit

YU Shengrui

(China Railway First Survey & Design Institute Group, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The design of smoke prevention and exhaust system of extra-long interval tunnel of domestic urban rail transit projects is usually based on setting up an intermediate wind well to separate the train on fire from the train not on train in two separate ventilation and smoke extraction sections so as to ensure that the passengers in the not-on-fire train will not be affected by the smoke in their evacuation. However, the setting of the middle wind well is easily restricted by many factors, such as outdoor ground condition, regional control, urban landscape, project investment and so on, so it is difficult to implement in the project. Based on theoretical analysis and numerical simulation, this paper studies the new scheme of smoke prevention and exhaust system in the tunnel with the idea of ensuring the safety of passenger in evacuation and eliminating the intermediate wind well, and presents a new model of smoke prevention and exhaust system in the extra-long interval tunnel, which can be used for reference in other projects.

**Key words:** subway; extra-long section; intermediate wind well; smoke prevention; evacuation

近年来,随着城市轨道交通的快速发展,地下超长区间隧道越来越多<sup>[1]</sup>。地下超长区间隧道环境复杂、空间狭窄、人员疏散条件有限,一旦发生火灾,极易造成群死群伤的严重后果<sup>[2]</sup>。根据GB51298-2018《地铁设计防火标准》的要求,对于地下区间内存在两列或两列以上的列车滞留时,应使非着火列车处于无烟区,保护大多数乘客的疏散安全<sup>[3]</sup>。国内目前针对区间隧道的防排烟,主

要采用纵向排烟的系统形式,当遇到超长区间时,在区间的1/3~2/3范围内设置中间风井<sup>[4]</sup>,将着火列车和正常列车分隔在两个独立的通风、排烟区段,以保证正常列车乘客疏散不受到火灾列车的烟气影响,详见图1。

在实际工程中,中间风井往往面临室外条件、区域管控、城市景观、工程投资等诸多受制因素,存在无法设置的情况,例如区间隧道穿越密集城区、

收稿日期: 2020-08-06 修改稿日期: 2021-05-11

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018SF-393)

第一作者: 鱼晟睿(1990—),男,硕士生,工程师,主要从事城市轨道交通工程、地铁车站、铁路站房、民用建筑的通风空调、防排烟系统设计及研究工作。E-mail: 286777376@qq.com

机场管控区域、穿越山脉、下穿湖泊海洋等情况时,室外均已不具备设置风井条件,造成诸多工程难题。目前国内针对地下区间火灾工况下防排烟研究,大多是基于传统的纵向排烟系统形式<sup>[5-6]</sup>,而对其他防

排烟系统形式的研究少之又少。针对超长区间的通风与排烟系统形式研究,均是默认设置中间风井的前提下开展研究<sup>[7-8]</sup>,未曾考虑以取消中间风井为前期进行研究,对系统形式进行创新。

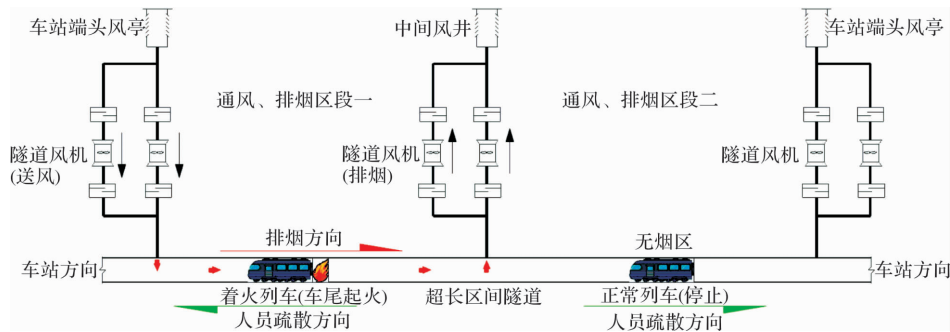


图1 超长区间设置中间风井的纵向排烟及人员疏散原理图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal smoke exhaust and passenger evacuation with intermediate wind well in extra-long interval tunnel

本文通过理论分析、数值模拟,基于保障人员疏散安全这一基本理念,在取消设置中间风井的情况下,通过优化超长区间隧道的防排烟系统形式,给出了一种乘客疏散安全保障方案,供其他工程参考。

## 1 理论分析及概念提出

### 1.1 火灾时乘客逃生区域分析

当地铁列车在区间隧道内发生火灾,或被着火车辆堵塞而停滞于区间内时,乘客从列车侧门

逃出至区间疏散平台上,根据预定的火灾疏散预案,乘客沿疏散平台逃离至最近的地铁车站,在此过程中,人员用于逃生的空间主要是疏散平台上,详见图2。

地下超长区间隧道设置中间风井的根本目的,是保障非着火车辆的人员安全疏散。若能采取措施,使疏散平台范围内空气清洁,隧道内烟气无法侵入疏散平台范围内,结合隧道内既有的纵向排烟系统,即使无法设置中间风井,也能够有效的保障非着火车辆的人员的疏散安全。

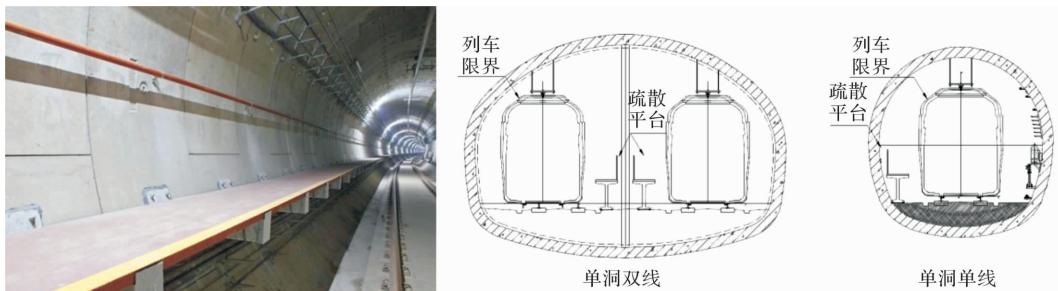


图2 区间隧道内疏散平台实景及示意图

Fig. 2 Scene and schematic diagram of evacuation platform in interval tunnel

### 1.2 火灾时乘客逃生路径分析及疏散区段划分

当地铁列车在区间隧道内发生火灾时,乘客疏散路径并非一直在着火的隧道内。城市轨道交通载客运营的地下区间之间均设有联络通道,且相邻两条联络通道之间的水平距离不大于 $600\text{ m}$ <sup>[3]</sup>。乘客在逃生过程中,在起火隧道中逃生至最近的联络通道,通过联络通道进入对侧的安全区间,免受火灾及烟气的影响,在通过对侧区间疏散至车站。

因此,可将超长区间隧道按照联络通道的设置情况,将疏散平台划分为多个疏散区段( $\leq 600\text{ m}$ ),

每个区段设置独立的防排烟模式,详见图3。当列车起火停滞在区间内时,对应开启列车所在区段的防排烟措施,保护乘客疏散至对侧安全区间后,即视为抵达安全区域。

### 1.3 区间疏散平台空气洁净及防烟保障措施分析

保障局部空间的空气洁净与防烟效果,采用正压送风是最为有效的手段。对于地下超长的区间隧道,若能对疏散平台进行正压送风,在人员逃生区域内形成局部正压,避免火灾烟气侵入,保障逃生区空气洁净,则无论是否设置中间风井,列车是否处在无烟区域,均可达到人员安全疏散

的目的。

区间内疏散平台设置加压送风系统，在无法设置地面风井的前提条件下，最大的问题在于新风来源。拟结合每个联络通道设置加压送风系统，

从安全区间(对侧隧道)内取风，加压送至火灾区间内疏散平台范围内，来保障疏散平台局部的空气清洁和防烟效果，其原理详见图4：

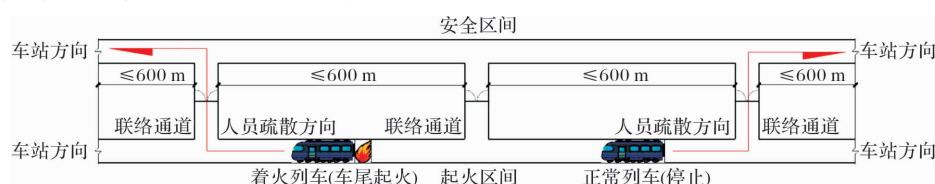


图3 火灾时乘客疏散路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of passenger evacuation route during fire

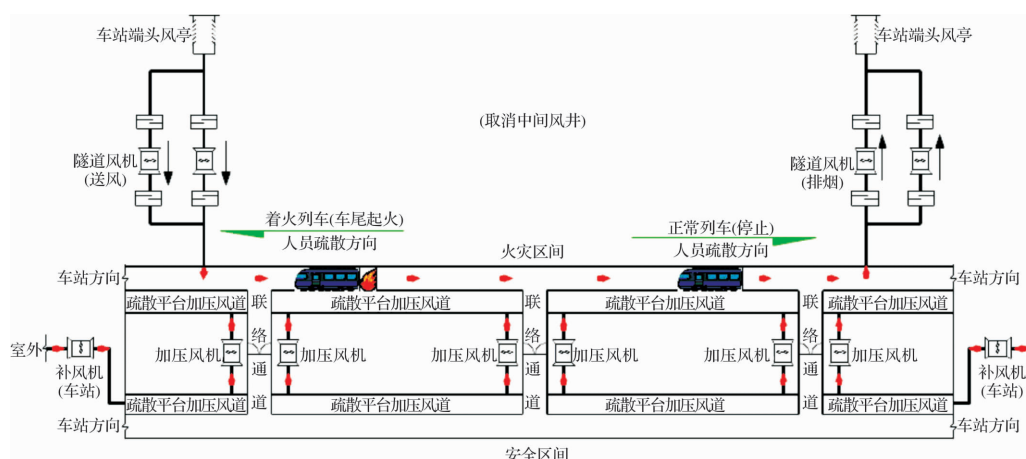


图4 纵向排烟结合疏散平台加压送风系统原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of longitudinal smoke exhaust system combined with pressurized air supply system for evacuation platform

该方案的特点在于，原纵向排烟的系统形式不变，取消中间风井后，由超长区间两端车站端头的隧道风机进行纵向排烟。并根据信号系统给出的着火列车、堵塞列车的停车位置，对应开启两个疏散区段( $\leq 600$  m)的加压送风系统，保证列车上乘客安全疏散至对侧安全区间。联络通道处的加压送风加压送风机，通过风管连接两个隧道的加压风道及风口，加压送风机选用可逆风机，根据着火列车位置，切换加压送风方向，始终自安全区间取风，火灾区间送风。

此外，针对安全区间内形成的负压状态，除通过车站出入口通道、风亭进行自然补风外，可结合区间实际情况，在每个车站端部设置补风机，对区间隧道进行补风，避免造成长时间空气负压状态影响加压送风效果。

#### 1.4 疏散平台加压送风系统风量及风口设置

利用疏散平台顶部空间，设置加压送风道，风道底部距离疏散平台保证2 m净高<sup>[3]</sup>，疏散平台的疏散宽度不小于684 mm<sup>[9]</sup>，以满足人员安全疏散，详见图5。加压送风口的尺寸及间隔，需满足亚音速等温自由射流关系式<sup>[10]</sup>，风口射流范围覆

盖整个疏散平台。经计算，加压送风口的净宽不小于180 mm，风口可间隔设置，当风口长度与两风口间隔长度之比不小于1:2时，且风口间隔距离不超过1.2 m时，即可满足射流范围覆盖整个疏散平台。因此，拟设置200 mm×500 mm单层百叶风口，沿隧道方向每隔1 m设置一处。

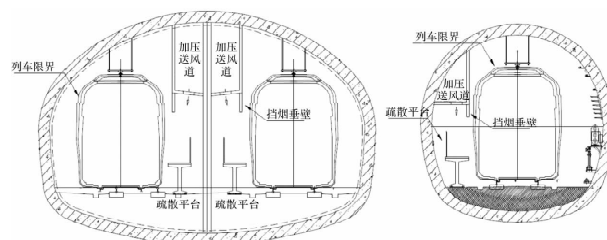


图5 疏散平台加压送风风道、风口、挡烟垂壁设置剖面示意图

Fig. 5 Section of pressurized air supply duct, vents and ceiling screen of evacuation platform

为避免加压送风口射流扰动并卷吸轨行区的烟气，对疏散平台区域空气洁净造成影响，在加压送风道边缘设置挡烟垂壁，尺寸按照500 mm<sup>[3]</sup>考虑。加压送风口的出口风速，参考地铁车站楼梯口部的抑烟气流速度，按照不小于1.5 m/s<sup>[3]</sup>

取值。

综上,以每两个联络通道间的疏散区段( $\leq 600$  m)设置一个独立的加压送风系统计算,按照每隔 1 m 布置一处加压送风口( $200\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ ),每个系统的加压送风量约为  $60\text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 2 三维数值模拟

### 2.1 三维模型的建立

为验证取消中间风井后,上文提到的防排烟方案的效果,以典型的单洞单线隧道为例进行建模研究,模型详见图 6。模型中隧道断面按照暗挖马蹄形设置,断面面积为  $28\text{ m}^2$ ,在疏散平台上侧设置约  $3\text{ m}^2$  的加压送风道,风道上每隔 1 m 设置 1 处  $200\text{ mm}\times 500\text{ mm}$  风口,疏散平台按照 850 mm 宽度建模。

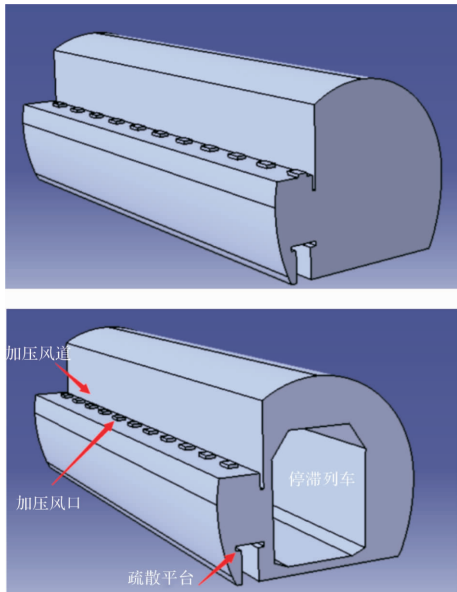


图 6 地下区间隧道疏散平台加压送风模型  
(剖切面节选有车停靠段和无车停靠段)

Fig. 6 Pressurized air supply model of underground interval tunnel evacuation platform  
(parking section with train and parking section without train)

为更加贴近实际情况,建立了长区间且有列车停靠的模型。地铁列车根据车体宽度及列车长度分为 A、B、C、L 四种类型,其中 6 节编组的 B

型车应用范围最广,数量最多。因此列车车体按照 B 型车尺寸,简化为截面为  $11.2\text{ m}^2$  的多边形体进行建模;加压送风道与轨道相邻处,设置 500 mm 长的挡烟垂壁。

为了更好的描述火灾工况下区间隧道气流组织的流动状态,需要选择合理的湍流模型。目前国内针对地下区间隧道火灾时的数值模拟,多采用湍流粘性系数模型进行计算<sup>[7]</sup>,本文综合考虑烟气产生的浮升力影响,采用浮力可修正的 K- $\epsilon$  模型,来计算地铁火灾情况下气流组织流动特性。

### 2.2 边界条件的设置

区间隧道两端各设置两台隧道风机(TVF 风机),共 4 台隧道风机,每台风机风量按照  $60\text{ m}^3/\text{s}$ ,风机全压按照 1 000 Pa;区间隧道长度按照一个独立疏散区段建模,即两个联络通道间的最大距离 600 m,详见图 7;加压送风系统设置在两端联络通道处,各设置 1 台加压送风机,每台风量按照  $30\text{ m}^3/\text{s}$ ,风机全压按照 500 Pa,模型尺寸及系统参数详见表 1。

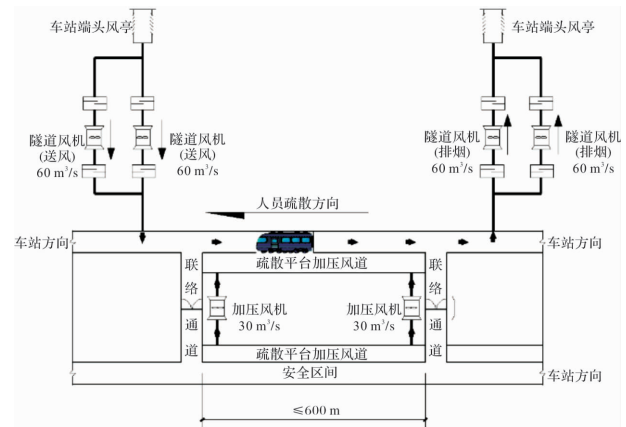


图 7 数值模拟系统设置情况

Fig. 7 Setting situation of numerical simulation system

数值模拟共设置 3 种方案,第一种方案为正常开启区间隧道纵向排烟,第二种方案为同时开启加压送风及纵向通风,第三种方案为仅开启加压送风。通过三种方案来对比不同防排烟方案的效果,具体边界条件详见表 2。

表 1 纵向通风及加压送风系统参数情况

Tab. 1 Parameters of longitudinal ventilation and pressurized air supply system

模拟隧道段长度/m	车辆长度/m	隧道通风风机设置/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	加压风机设置/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	火源热释放率/MW
600(两个联络通道间长度)	118(6B 列车长度)	60(4 台,每端两台)	30(每个防烟区段两台)	7.5 <sup>[3]</sup>



表 2 方案 1、2、3 边界条件设置情况  
Tab. 2 Boundary conditions of scheme 1, 2, 3

方案号	模拟方案	隧道通风断面 1	隧道通风断面 2	加压送风	其他
方案一	隧道纵向排烟	120 m <sup>3</sup> /s	−120 m <sup>3</sup> /s	关闭	按墙体考虑
方案二	隧道纵向排烟+加压送风	120 m <sup>3</sup> /s	−120 m <sup>3</sup> /s	60 m <sup>3</sup> /s	按墙体考虑
方案三	加压送风	自由出流	自由出流	60 m <sup>3</sup> /s	按墙体考虑

2.3 模拟结果分析

分别按照有车停靠区域和无车停靠区域进行数值模拟，对方案三仅设置加压送风系统时，按照无车停靠的最不利工况进行数值模拟，模拟结果详见图 8~图 14。

(1) 方案一(仅隧道纵向排烟)

通过图 8、9 可以看出，在仅开启隧道纵向排烟的情况下，隧道内形成纵向气流速度，无论是否有列车停靠，疏散平台处均处于临界负压状态，此种方案虽然能沿纵向有效控制烟气方向，但不能防止烟气进入疏散平台，无法保障人员在疏散时不受烟气影响。

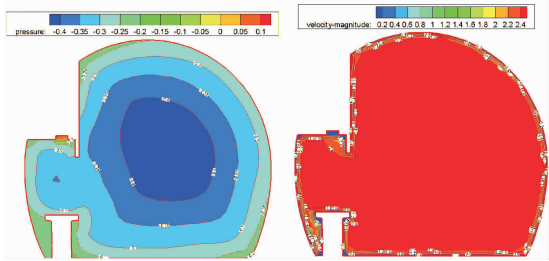


图 8 方案一无车停靠下隧道横断面气流速度、风压云图  
Fig. 8 Air velocity and air pressure nephogram of tunnel cross section with no train parking in scheme 1

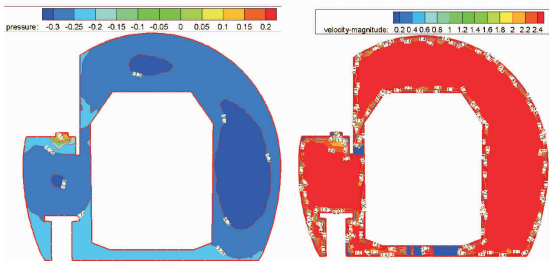


图 9 方案一有车停靠下隧道横断面气流速度、风压云图  
Fig. 9 Air velocity and air pressure nephogram of tunnel cross section with train parking in scheme 1

(2) 方案二(隧道纵向排烟+加压送风)

在开启隧道纵向排烟及疏散平台加压送风的情况下，通过图 10 可以看出，当隧道内没有列车停靠的区域，在纵向排烟及加压送风的共同作用，使疏散平台形成了 2~5 Pa 的局部正压的状态，以及 1.5~2 m/s 的向下气流，有效抑制烟气进入疏散平台<sup>[11]</sup>，形成一个相对清洁的逃生区域。

如图 11 所示，当隧道内有列车停靠时，由于

列车车体存在，使隧道空气流动截面急剧缩小，疏散平台靠近列车一侧受纵向气流影响，局部正压只有 1~3 Pa，加压送风出口气流也因纵向气流干扰，贴向隧道壁面一侧，但仍比方案一防烟效果更优。

从图 12 疏散平台的纵剖面可以看出，在加压风口作用下，在疏散平台形成一个连续不断的正压区域，新风气流自上而下，并向沿隧道整体排烟方向倾斜。

综上，认为在开启隧道纵向排烟及疏散平台加压送风的情况下，既能满足隧道排烟要求，也能够避免人员呼吸区受到烟气侵扰，保障人员的疏散安全。

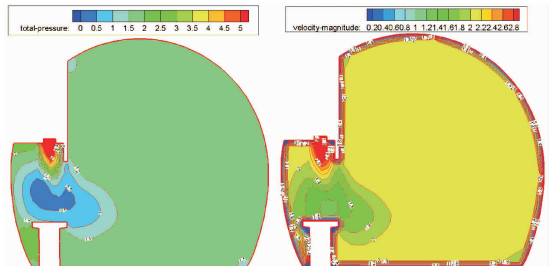


图 10 方案二无车停靠下隧道横断面气流速度、风压云图  
Fig. 10 Air velocity and air pressure nephogram of tunnel cross section with no train parking in scheme 2

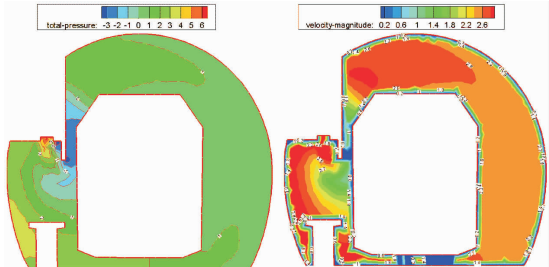


图 11 方案二有车停靠下隧道横断面气流速度、风压云图  
Fig. 11 Air velocity and air pressure nephogram of tunnel cross section with train parking in scheme 2

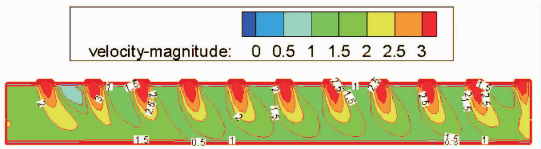


图 12 方案二疏散平台纵断面气流速度云图(节选)  
Fig. 12 Air velocity nephogram of vertical section of evacuation platform(excerpt) in scheme 2

### (3)方案三(仅疏散平台开启加压送风)

方案三相比于方案二,在疏散平台形成的正压范围更大且更稳定,可形成 $3\sim 8\text{ Pa}$ 的局部正压,洁净空气从疏散平台自内而外进行射流扩散,气流速度超过 $1.5\text{ m/s}$ ,可有效阻绝烟气侵入<sup>[11]</sup>,详见图13.从疏散平台纵剖面来看,由于不受纵向排烟气流干扰,疏散平台的加压送风气流组织也更加均匀,详见图14,理论上局部防烟效果强于方案一及方案二.但考虑到地铁列车发生火灾,火源强度大,烟气扩散快,若仅采取防烟措施而不排除烟气,烟气在隧道内迅速聚集,亦不利于人员逃生,因此本方案不推荐.

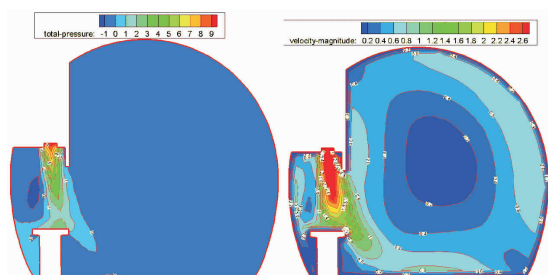


图13 方案三无车停靠下隧道断面气流速度、风压云图

Fig. 13 Air velocity and air pressure nephogram of tunnel cross section with no train parking in scheme 3

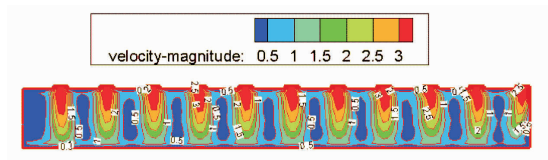


图14 方案三疏散平台纵断面气流速度云图(节选)

Fig. 14 Air velocity nephogram of vertical section of evacuation platform (excerpt) in scheme 3

## 3 结论

本文通过理论分析,在地下超长区间隧道取消设置中间风井的情况下,给出了一种新型防排烟系统模式,并通过数值模拟验证了其防排烟效果.结论如下:

(1)本文通过对地下区间火灾时乘客逃生区域及路径的分析研究,提出了在人员逃生的重点区域——疏散平台采取防烟措施的理念,同时以不超过 $600\text{ m}$ 间距的联络通道划分超长区间隧道,形成多个独立的防烟系统,根据列车停滞位置执行不同的防烟模式.利用疏散平台防烟结合隧道纵向排烟的方案,在超长区间无法设置中间风井的情况下,给出了一种新的解决思路.

(2)本文提出的方案二,纵向排烟结合疏散平台加压送风的系统形式,在 $6\text{B}$ 编组列车的隧道条

件下,设置了系统风量为 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 的纵向通风系统以及系统风量为 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 的加压送风系统.经数值模拟验证,能够在超长区间不设置中间风井的情况下,在疏散平台形成 $2\sim 5\text{ Pa}$ 正压的清洁逃生区域,以及 $1.5\sim 2\text{ m/s}$ 的向下气流,满足隧道内人员疏散和排烟需求,保障乘客安全.

(3)仅以人员逃生区的防烟效果来讲,方案三仅开启加压送风系统的情况下,相比于方案一、二,人员逃生区的局部正压效果最佳.但地铁列车发生火灾火源强度大,烟气扩散迅速,不采取排烟措施不利于人员逃生,因此方案三不推荐.

(4)本文给出的防排烟系统方案,仅适用于常规地下暗挖隧道.当地下隧道施工工法变换,或根据行车需求设置单渡线、交叉渡线时,本文提出的解决方案存在一定的局限性,仍待进一步研究.

## 参考文献 References

- [1] 刘华永. 超长区间隧道中间风井设置研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(2): 225-227.  
LIU Huayong. The study of intermediate wind well in the underground extra-long interval tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology), 2018, 14(2): 225-227.
- [2] 孙虹. 地铁区间火灾工况下疏散指示联动方案的对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 175-179.  
SUN Hong. Comparative analysis of evacuation instruction linkage scheme under fire condition in metro intercal [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(1): 175-179.
- [3] 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 公安部天津消防研究所. 地铁设计防火标准: GB 51298-2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.  
Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design & Research Institute, Tianjin Fire Research Institute of M. E. M. Standard for protection design of metro: GB51298-2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [4] 北京城建设计研究总院有限责任公司, 中国地铁工程咨询有限责任公司. 地铁设计规范: GB 50157-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 121.  
Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., China Metro Engineering Consulting Co., Ltd.. Code for design of metro: GB50157-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [5] 侯立勋, 谢恩, 陶浩文, 等. Y字型隧道纵向通风排烟临界风速研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(12): 1671-1675.  
HOU lixun, XIE En, TAO haowen, et al. Study on

- the critical velocity of smoke exhaust in a Y-shaped tunnel fire[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(12):1671-1675.
- [6] 钟委, 刘欣, 高子鹤. 纵向通风对隧道火灾特性及竖井自然排烟效果的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(6):46-52.
- ZHONG Wei, LIU Xin, GAO Zhihe. Experimental investigation on the influence of longitudinal ventilation tunnel fire characteristics and natural smoke exhaust by shaft[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(6):46-52.
- [7] 谢宣. 地铁深埋长隧道火灾通风数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- XIE Xuan. Numerical simulation study on fire ventilation of subway and deeply buried long tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [8] 夏继豪. 某地铁跨海超长区间隧道通风排烟方案研究[A]. 中国勘察设计协会建筑环境与能源应用分会铁道与城市轨道交通委员会. 2016年全国铁道与城轨暖通学术年会文集[C]//中国勘察设计协会建筑环境与能源应用分会铁道与城市轨道交通委员会:《暖通空调》杂志社, 2016:6.
- XIA Jihao. Study on the ventilation and smoke exhaust scheme of a metro cross-sea super long section tunnel [A]. China engineering & consulting association building environment and energy application and institute of rail transit. 2016 National railway and urban rail HVAC academic conference proceedings [C]//Railway and urban rail transit committee, building environment and energy application branch of china survey and design association:《Journal of HV&AC》, 2016:6.
- [9] 李艳, 叶新, 徐银光, 等. 中低速磁浮交通系统疏散平台疏散能力研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(8):81-85.
- LI Yan, YE Xin, XU Yinguang, et al. Research on the evacuation capacity of evacuation platform of min-low speed maglev transportation system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(8):81-85.
- [10] 赵荣义, 范养存, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- ZHAO Rongyi, FAN Yangcun, XUE Dianhua, et al. Air conditioning[M]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co. Ltd., 2009.
- [11] 马砺, 刘顺, 李超华, 等. 巷道火灾密闭过程中烟气温度及流动特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(2):46-52.
- MA Li, LIU Shun, LI Chaohua, et al. Study on temperature and flow characteristics of smoke during sealing process of roadway fire[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(2):46-52.

(编辑 吴海西 沈 波)