

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-313-07

地铁站台火灾工况下不同 排烟方案的排烟效果数值模拟研究

周仁敬 王培海 王 龙

(成都市市政工程设计研究院有限公司 成都 610000)

【摘 要】 为研究地下车站全封闭岛式站台火灾时的排烟效果,以成都市某地铁车站为研究对象,利用 FDS (火灾数值模拟) 软件内的 LES (大涡模拟) 对开启屏蔽门首尾滑动门、独立设置辅助排烟风管、轨顶风道侧排风口、复合式屏蔽门四种排烟工况下的站台火灾场景进行数值模拟。结果表明:针对地下车站全封闭岛式站台公共区火灾,采用复合式屏蔽门的排烟模式,可快速排除站台层烟气,有效的改善站台层发生火灾时的逃生环境,为人员疏散提供更多的时间。

【关键词】 全封闭; 屏蔽门; 轨顶风道; 侧排风口; 复合式屏蔽门

中图分类号 X913.4/U231.96/TU834.1 文献标志码 A

Numerical Simulation Research on Smoke Exhaust Effect of Different Smoke Exhaust Schemes under Fire Condition of Subway Station Platform

Zhou Renjing Wang Peihai Wang Long

(Chengdu Municipal Engineering Design And Research Institute, Chengdu, 610000)

【Abstract】 To study the smoke-exhaust effect of the fire of the fully enclosed island platform of the underground station, by utilizing the software LES (Large Eddy Simulation) of FDS (Fire Numerical Simulation), the fire scene of the platform of a subway station in Chengdu was numerically simulated under the four smoke-exhaust conditions: opening the sliding doors at the front and rear of the platform screen door, setting up independent and auxiliary smoke-exhaust-ducts, installing exhaust vents on the rail-overhead-duct and the composite screen door. Based on the simulation results, the indices of temperature, mass concentration of CO, visibility, and other indicators at both the overall and local escape points within the platform are emphatically studied and analyzed. It is found that: the smoke exhaust mode of composite screen doors can quickly remove smoke from the platform, effectively improve the escape environment when a fire occurs on the platform and provide more time for personnel evacuation in a fully enclosed island platforms of the underground stations.

【Keywords】 Fully enclosed screen door; Rail top air duct; Side air outlet; Composite screen door

0 引言

地铁因具有运客量大、速度快、低能耗、低污染、低噪音、准点率高、安全性高等优点而成为城市客流输送的主要交通工具,也迅速成为各大城市缓解城市交通拥挤的有效措施^[1,2]。但由于地铁一

般深处地下,客流量密集,空间狭小且相对封闭,一旦发生火灾事故,则会产生大量有毒有害气体,这是导致人员伤亡的最主要原因之一。通过众多的地铁火灾事故研究表明,70%以上的人员由于吸入过多烟气及有毒物质昏迷后导致死亡,因此研究地

作者简介: 周仁敬 (1993-), 男, 本科, 中级工程师, 从事地铁通风空调设计, E-mail: 540507465@qq.com

通讯作者: 王培海 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, 从事地铁通风空调设计, E-mail: 15985769@qq.com

收稿日期: 2023-10-16

铁车站火灾工况下的排烟方案尤为重要。

许多学者对于地铁火灾排烟方案进行了大量的研究，毛婷和朱常琳通过数值模拟研究了地铁站台火灾不同排烟模式下排烟效果^[3]；张培红和张帅等人通过CFD软件，对比分析了屏蔽门对岛式站台隧道火灾烟气扩散的影响^[4]；李建和史聪灵等人通过FDS软件研究了地下岛式地铁站台火灾时全封闭屏蔽门开启模式^[5]；罗艳萍和李志生等人采用实测和数值模拟的方法分析了地铁站台发生火灾时屏蔽门的最佳开启方案^[6]等，站台发生火灾时上述研究均以开启屏蔽门作为新的排烟口，既不能满足《建筑防烟排烟系统技术标准》^[11]关于排烟口设置的相关规定，也难以避免火灾时开启屏蔽门可能带来的诸多二次安全隐患。陈瑶通过CFD模拟研究了复合式屏蔽门地铁车站自然通风的特性^[7]；陈青云和朱咏辉分析了地铁复合式屏蔽门系统的火灾特性^[8]，上述两项研究均未涉及站台火灾工况下利用轨顶风道侧排风口和复合式屏蔽门排烟的数值模拟分析。本文利用FDS（火灾数值模拟）软件内的LES（大涡模拟）方法对不同工况下的站台火灾场景进行数值模拟，采用开启屏蔽门首尾滑动门、独立设置辅助排烟风管、轨顶风道侧排风口、复合式屏蔽门等排烟方式，重点研究站台内整体和局部逃生点的温度、CO质量浓度、能见度指标等，以分析各种排烟方案的排烟效果，得出最佳的排烟模式，为以后的地铁消防安全研究提供参考。

表1 火灾模式下各工况下设备开启数量

Table 1 The number of equipment opened under each working condition in the fire mode						
工况设置	屏蔽门开启/扇	站台排烟风机（SEF）/台	隧道风机（TVF）/台	排热风机（UOF）/台	轨顶侧排风口/个	站台公共区火灾工况补风
工况一	4	2	4	2	0	出入口自然补风
工况二	0	2	0	2	0	出入口自然补风
工况三	0	2	4	2	8	出入口自然补风
工况四	0	2	4	2	8	出入口自然补风

工况1：开启屏蔽门系统两侧首尾滑动门（每侧2扇，共计4扇），同时启动车站两端隧道风机、排热风机进行辅助排烟。

工况2：站台两端独立设置辅助排烟风管，风管两端分别接至排热风道和站台公共区，站台公共区设排烟口，站台火灾工况下，烟气通过辅助排烟

1 建立模型及设定模拟工况

1.1 地铁车站基本参数

本站为成都市轨道交通某线标准地下两层岛式车站，地下一层为站厅层，地下二层为站台层。车站有效站台长度为118m，标准段宽20.9m，站厅层为6.7m，站台层为4.85m，站台两侧为隧道，隧道上方设有轨顶风道。站台设有2组扶梯、1组楼梯通向站厅层。站厅通过4个出入口通向地面层。车站每端设置两台隧道风机（TVF）和一台排热风机（UOF），每台隧道风机运行时的流量为60m³/s，共计4台。每台排热风机运行时流量为30m³/s，共计2台。站厅与站台共用2套排烟风机（SEF），每台排烟风机的排烟量为30m³/s。

1.2 火源设定

由于地铁车站站台层公共区内装修材料仅有少量的难燃物，其余均为不燃物，引发火灾的物品多为乘客所带随身物品，故火源功率一般设置为2.5MW^[9]，考虑最不利的情况，将火源设置在车站中间部位，面积为2m×2m。火源热释放速率参考公式： $Q = \alpha t^2$ ， α 表示火源热释放速率的增长系数，参考NFPA^[10]按照超快速增长火灾考虑， α 取0.04689kW/s²。经计算可知火源约在230s达到峰值后保持稳定燃烧。

1.3 工况设定

根据本文研究目标，共设置4种站台层公共区火灾排烟工况，且各工况在发生火灾时设备控制模式如表1所示。

管排至排热风道，由排热风机排至室外。

工况3：利用车站两端的排热风机，通过轨顶排热风道设置的侧排风口排除站台公共区烟气，侧排风口带可控风阀，风口尺寸为2000mm×800mm，每侧4个，共计8个。同时开启车站两端隧道风机，通过隧道风机的抽排作用，减少隧道内的气体通过

轨顶排热风口进入轨顶排热风道,在排热风机及隧道风机的共同作用下,实现对站台公共区火灾时的协同排烟(需关闭站台层屏蔽门),如图1所示。

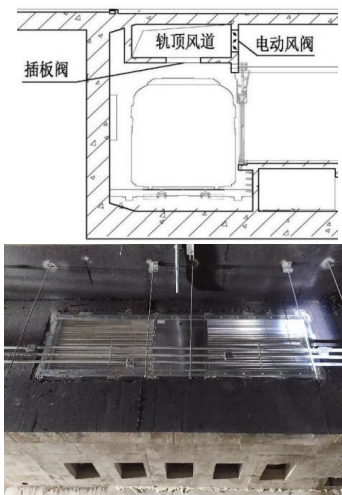


图1 轨顶风道侧排风口剖面图及工程实例

Fig.1 Sectional view and engineering example of the exhaust outlet on the side of the air duct on the top of the rail

工况4: 利用复合式屏蔽门系统排除站台公共区烟气。在传统屏蔽门或滑动门上部设置带可控风阀及通风口,风口两端分别直通车站隧道区域和站台公共区,其中风阀及风口大小2000mm×800mm,每侧4个,共计8个,开启车站两端的隧道风机,同时利用车站两端排热风机,通过排热风机和隧道风机共同的抽排作用实现对站台公共区火灾时的协同排烟(关闭站台层屏蔽门),如图2所示。

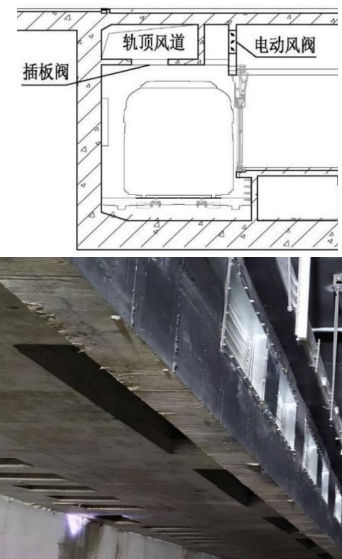


图2 复合式屏蔽门系统剖面图及工程实例

Fig.2 Sectional view and engineering example of composite screen door system

1.4 测点设置

根据GB 51251-2017《建筑防烟排烟系统技术标准》^[1]计算可知站台公共区在火灾时的最小清晰高度为2.1m。故在数值模拟时选择2.1m为站台危险高度,在危险高度内需测量站台烟气温度、CO浓度质量浓度、能见度等参数。由于楼梯口是人员疏散的重要通道,故选取扶梯测点A作为研究对象,测量扶梯A处的温度、CO质量浓度、能见度等参数,测点设置如图3所示。

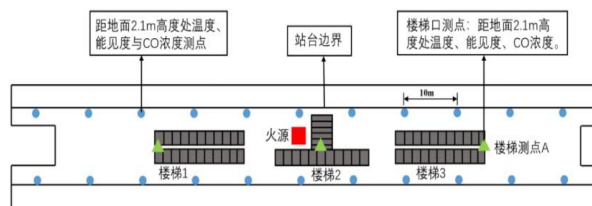


图3 地铁站台火灾测点布置

Fig.3 Fire measurement point layout of subway platform

1.5 网格划分

在利用FDS进行数值模拟的过程中,网格划分越精密,数值模拟得到的结果越精确。根据FDS指导手册确定网格划分的公式为:

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

其中, D^* 为火源特征直径, m; Q 为火源热释放速率, kW; ρ 为空气密度, 1.2kg/m^3 ; C_p 为空气比热容, $1.014\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为环境温度, 293K ; g 为重力加速度, 9.8m/s^2 。根据公式(1),当火源热释放速率为2.5MW时,计算可得火源特征直径为1.38m。据FDS指导手册建议将网格大小设置为 $0.1D^*$,故网格尺寸取值为0.138m。

2 模拟结果及分析

2.1 温度、CO质量浓度、能见度切片图分析

选取上述4种工况360s时站台层2.1m处温度、CO质量浓度、能见度切片图如图4、5、6所示。对比图4的温度切片、图5的CO质量浓度和图6的能见度切片可以看出,工况二对火源附近的温度、CO质量浓度、能见度略优于工况一,工况三与工况四对温度、CO质量浓度、能见度的控制效果接近。从整体比较,工况三与工况四对火源附近的温度、CO质量浓度、能见度的控制效果明显优于工况一与工况二,而工况一的控制效果最差。

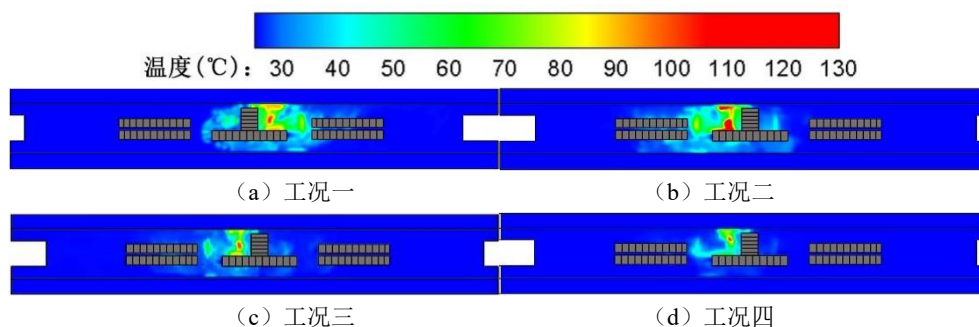


图4 站台层 2.1m 烟气温度分布切片图

Fig.4 A slice diagram of the flue gas temperature distribution at 2.1m at the platform level

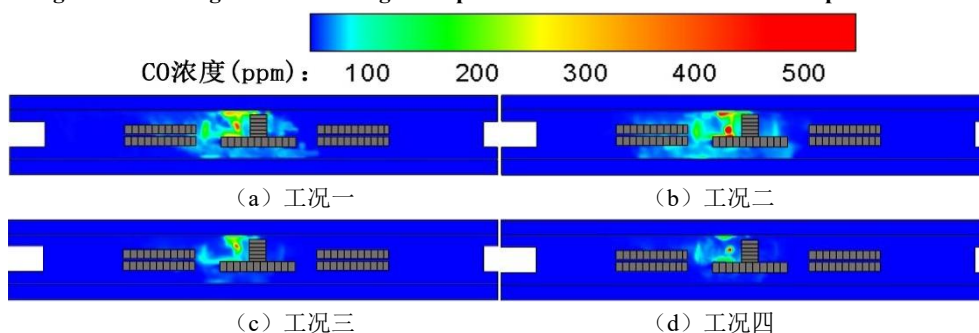


图5 站台层 2.1m CO 质量浓度分布切片图

Fig.5 Sections of 2.1m CO mass concentration distribution at the platform level

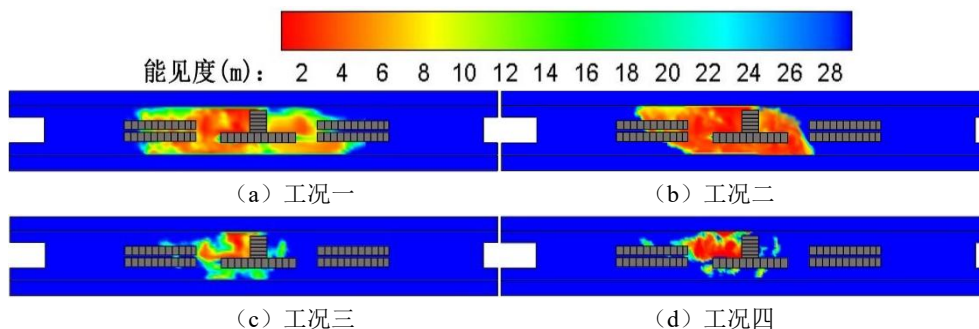


图6 站台层 2.1m 能见度分布切片图

Fig.6 2.1m visibility distribution slice map at the platform level

2.2 温度、CO质量浓度、能见度数据分析

为了可以定量、全面的反应整个站台层的烟气蔓延情况,选取站台层2.1m危险高度内左右两端测点的温度、CO质量浓度、能见度的平均值随火灾时间的变化规律进行研究。

2.2.1 人眼特征高度处温度分布

由图7、图8可知,四种工况的温度变化趋势很相似,由站台两边到中间逐渐升高,且最高温度均出现在火源位置。其中无论是在360s还是600s时,工况一的温度最高,均高于其它三种工况,工况四的温度最低,对2.1m危险高度内火灾烟气的温度控制效果最好。其中在火灾初期,工况一中产生烟气

一部分通过车站公共区排烟管道排出,另一部分受到热浮力的作用,产生火羽流和顶棚射流,使大量的烟气积聚在站台顶部导致其携带的热量不易散失而使站台内各测点温度均高于其他三种工况,只有少部分烟气通过站台屏蔽门辅助排出。而工况二、工况三、工况四中的烟气除了通过站台顶部排烟管道排出,还分别受到站台两端的集中排烟管、站台顶部轨顶风道侧排风口、复合式屏蔽门抽排,使得烟气能快速的排出室外,所以温度均低于工况一,但工况二中由于新增的排烟口主要集中布置在左右两端,故工况二中靠近火源位置,温度远远高于工况三和工况四。

2.2.2 人眼特征高度处CO浓度分布

如图7、图8所示,从整体来看,四种工况的CO质量浓度最高点均出现在站台中部火源附近,且四种工况的CO浓度的变化趋势基本一致。在360s时,工况三、工况四对CO质量浓度的控制效果要优于工况一和工况二,在600s时,工况四对CO质量浓度的控制效果最好。其中工况一无论是360s还是600s,对2.1m危险高度内火灾CO质量浓度的控制效果最差。由于工况一只有一套公共区排烟管道,排烟口数目较少,间距过大,使得排烟口不能及时排除烟气,大部分未排出的烟气聚集在站台顶部,导致站台内各测点CO质量浓度高于其他三种工况。工况二中由于在站台左右两端各新增了一支

排烟管,且排烟口集中布置在左右两端,所以工况二中靠近两端的CO质量浓度略低于其他三种工况,但在中间火源位置,却导致大量的CO聚集,浓度远高于工况三和工况四。工况三与工况四通过排热风机与隧道风机的共同作用,实现对站台公共区火灾时的协同排烟,对2.1m危险高度内火灾CO质量浓度的控制效果优于工况一与工况二。

2.2.3 人眼特征高度处能见度分布

如图7、图8所示,在360s时,上述四种工况能见度均大于10m,符合火灾时安全疏散要求,但在600s时,只有工况一在火源附近能见度低于10m,不符合火灾时安全疏散要求,而其他三种工况能见度均在10m以上,符合火灾时安全疏散要求。

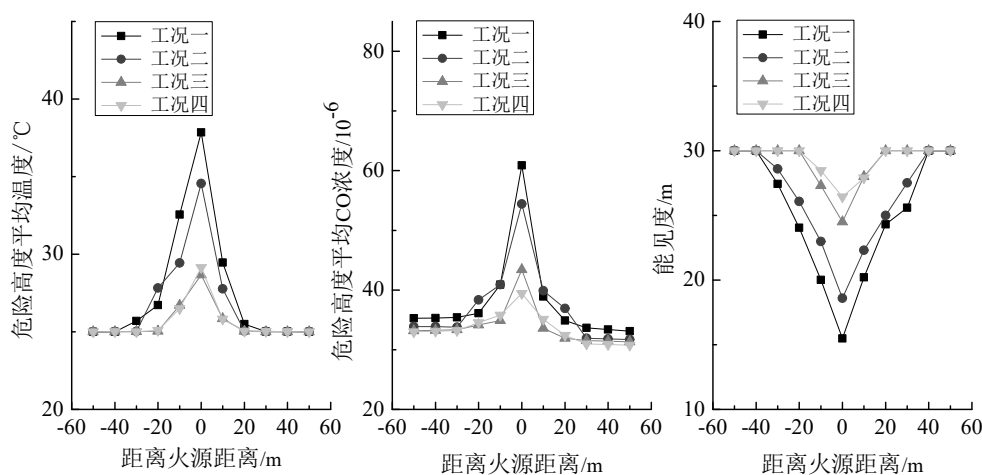


图7 各工况在360s时对站台危险高度处烟气的影响

Fig.7 The influence of various working conditions on the smoke at the dangerous height of the platform at 360s

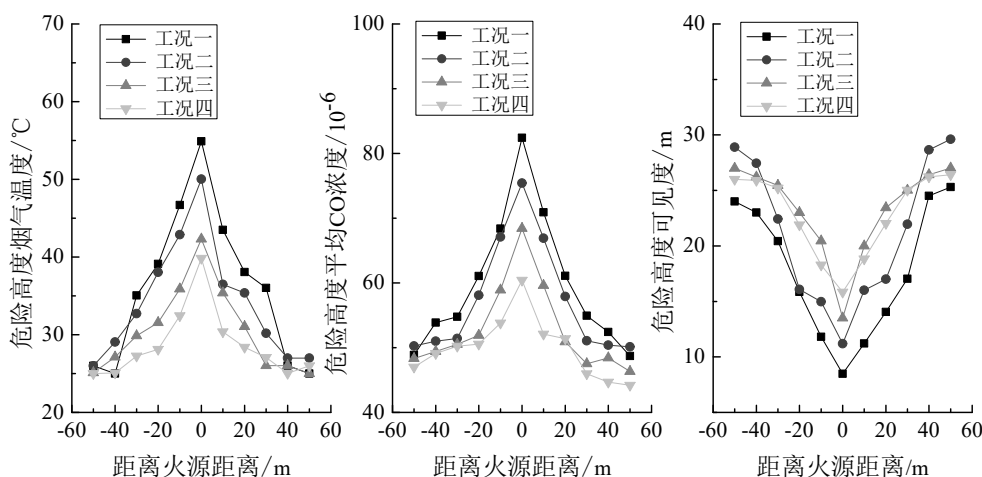


图8 各工况在600s时对站台危险高度处烟气的影响

Fig.8 The influence of various working conditions on the smoke at the dangerous height of the platform at 600s

2.2.4 楼扶梯开口处温度、CO质量浓度、能见度数据分析

由于逃生通道有限,人员疏散时必定会造成阻塞,因此楼扶梯开口处的烟气是影响人员疏散的重要因素,故选择楼梯测点A作为研究对象。图9是不同工况下,楼梯测点A入口位置(站台到站厅)

危险高度处的温度、CO质量浓度和能见度随时间变化情况。如图9所示,随着火势的发展,大部分时刻工况一的危险高度处的烟气温度、CO质量浓度都最高、能见度最低,而工况四总的排烟效果都是最优的。故在实际工程应用中不建议采用工况一的模式。

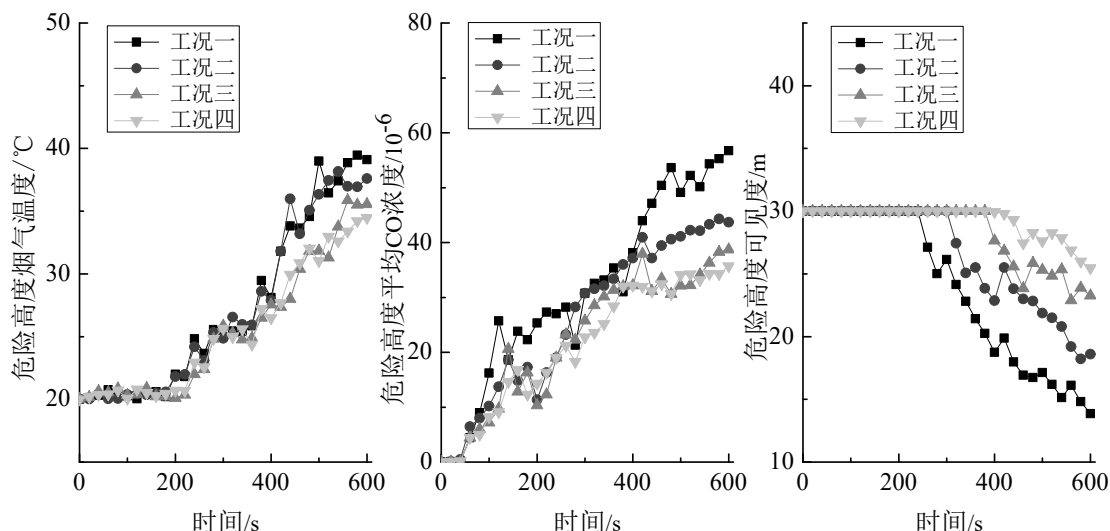


图9 楼梯测点A在各工况下温度、CO质量浓度、能见度随时间变化规律

Fig.9 Temperature, CO mass concentration, and visibility of stair measuring point A change with time under various working conditions

2.3 楼梯口新风风速及各工况排烟模式下气流流量数据分析

在安全逃生时间内,监测人员逃生时的楼梯1、楼梯2、楼梯3的新风风速。在每个楼梯口处各布置5个监测点,取360s时的模拟值并求其平均值。则各楼梯口的新风风速平均值如表2所示。由表2可知,站台火灾模式下,四种工况楼梯口处的新风风速均大于1.5m/s,符合《地铁设计规范》^[12]中楼梯

口应具有向下不小于1.5m/s的风速要求。

在站台火灾模式下,计算可得上述4种火灾排烟工况实际排烟量远远大于站台公共区的计算排烟量,符合《地铁设计防火标准》^[13]规范中排烟量的要求。其中工况四的站台公共区实际排烟量最大,故在实际工程应用中,在车站条件下,建议采用工况四的排烟模式,可实现地铁站台层火灾工况下的最优排烟效果。

表2 站台排烟模式下各工况气流流量统计表

Table 2 Statistics table of air flow under various working conditions in station smoke exhaust mode

工况设置	楼扶梯实际风速 (m/s)			站台公共区实际排烟量 (m ³ /s)	站台公共区计算排烟量 (m ³ /s)
	楼梯1 (m/s)	楼梯2 (m/s)	楼梯3 (m/s)		
工况一	1.74	1.54	1.85	105.96	22.5
工况二	2.09	1.63	2.18	120.00	22.5
工况三	1.93	1.82	2.03	122.57	22.5
工况四	2.05	1.91	2.15	130.60	22.5

3 结论

通过对不同排烟工况的模拟结果进行对比分析,得出以下结论:

- (1) 上述四种不同的排烟工况下,在360s的安全疏散时间内均能够满足乘客安全疏散的要求。
- (2) 综合对比四种工况,无论是整个站台层

全部测点还是局部逃生点,工况一的排烟效果均最差,从而使站台在2.1m危险高度内烟气CO质量浓度过大、温度过高、能见度过低,建议在实际工程中避免使用此模式。

(3)从整体上分析,对比工况三与工况四,当站台层发生火灾时,两者的排烟效果相差并不明显,皆可快速辅助站台层排出烟气,有效的改善站台层发生火灾时的逃生环境,为人员疏散提供更多的时间,可在后续地铁车站设计中推广运用并不断完善。

(4)从局部分析,在车站条件允许下,优先选用工况四的排烟模式(即复合式屏蔽门系统),可实现地铁站台层火灾工况下的排烟效果最优,故在后续地铁车站设计中将作为优先推荐方案。

参考文献:

- [1] 陈青云,朱咏辉.地铁复合式屏蔽门系统火灾特性分析[J].都市轨道交通,2021,34(1):63-67.
- [2] 沈建明.枢纽闲置铁路发挥城市轨道交通功能研究[J].铁道标准设计,2012,(1):10-11.
- [3] 杨舟.我国市域轨道交通发展策略研究[J].铁道标准设计,2013,(5):27-28.
- [4] 毛婷,朱常琳.地铁站台火灾不同排烟模式下排烟效果的数值模拟研究[J].铁道标准设计,2016,(1):122-127.
- [5] 张培红,张帅,于谨.屏蔽门对岛式站台隧道火灾烟气扩散的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(5):794-797.
- [6] 李健史,聪灵,陈长坤,等.地下岛式地铁站台火灾时全封闭屏蔽门开启模式研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1):175-180.
- [7] 罗燕萍,李志生,韩瑶.地铁站台火灾屏蔽门开启方案实验与数值模拟对比研究[J].暖通空调,2014,44(6):124-129.
- [8] 陈瑶.复合式屏蔽门地铁车站自然通风特性研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [9] 陈青云,朱咏辉.地铁复合式屏蔽门系统火灾特性分析[J].都市轨道交通,2021,34(1):63-67.
- [10] Council of Standards Australia. Smoke management systems – hot smoke test: AS 4391 [S]. Australian Standards, 1999.
- [11] NFPA 204M. Standard of Smoke and Heat Venting[S]. USA:National Fire Protection Association, 2002.
- [12] GB 51251-2017,建筑防烟排烟系统技术标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [13] GB 50157-2013,地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [14] GB 51298-2018,地铁设计防火标准[S].北京:中国计划出版社,2018.