

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-098-07

深埋岛式高铁车站站台 火灾烟气蔓延特性及防控研究

冉春雨¹ 任浩¹ 邓保顺¹ 付智杰¹ 谢永亮² 毕海权² 张晓林²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 高铁地下车站结构复杂、功能多样。其站台区域埋深较大,是长宽比较大的狭长受限空间,一旦发生火灾,危害巨大。统计表明,有毒有害的烟气是火灾中最主要的致死因素,而狭长受限空间的结构特点和通风条件决定,其火灾产生的烟气难以立即排出,因此,高铁地下车站站台火灾烟气的蔓延特性是值得关注的问题。其中,火灾烟气的蔓延规律与防控是与消防安全设计密切相关的科学问题。以某双岛六线式高铁地下车站为研究对象,围绕站台狭长空间火灾的通风排烟模式和排烟参数,开展三维数值研究。其中,主要分析火灾发展过程中的烟气温度、碳烟密度、扶梯通道风速等特征参数的分布情况。研究结果表明:站台火灾采取单独的站台排烟系统可以合理的排出烟气,若采取站台风机与隧道风机的合理匹配运行模式还可以使得扶梯通道稳定形成超过1.5m/s的下行风速。所提出的排烟模式和排烟参数适用于该类型车站的火灾防排烟设计。

【关键词】 高铁地下车站; 火灾; 烟气运动; 数值模拟; 通风排烟

中图分类号 V221.3 文献标识码 A

Smoke Movement and Control of Island High-speed Railway Underground Station Platform Fire

Ran Chunyu¹ Ren Hao¹ Deng Baoshun¹ Fu Zhijie¹ Xie Yongliang² Bi Haiquan² Zhang Xiaolin²

(1.China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710043;

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

【Abstract】 Complex structure and diverse functions are the characteristics of high-speed rail underground stations. The platform area is often located in deep underground. A fire that occurs in a confined space with a relatively large length and width can be defined as a passage fire. We dread to think what would happen if there really was a fire here. Statistics have shown that the toxic fire smoke is the most hazardous factor in a fire. Due to the characteristic of structure and that of ventilation condition. It is difficult to exhaust fire smoke out of a channel immediately. Therefore, the characteristics of smoke transport in a high-speed rail underground station platform should be concerned. The spread law and control of fire smoke are closely related to fire safety design. This paper takes an island-style underground station as the research object, and uses numerical simulation to study the smoke exhaust mode and exhaust parameters of the fire in the narrow space of the platform. It mainly analyzes the distribution of characteristic parameters such as smoke temperature, soot density, and wind speed of escalator passages during the development of a fire. The results show that the smoke exhaust of the platform fire needs to adopt the reasonable matching operation mode between the station and the tunnel fan to make the wind speed of the stairs reach the speed requirements of 1.5m/s, and that the proposed

作者简介: 冉春雨 (1977.02-), 男, 学士, 高级工程师, E-mail: 78140729@qq.com

通讯作者: 任浩 (1991.10-), 男, 硕士, 中级工程师, E-mail: 504339545@qq.com

收稿日期: 2021-12-31

smoke exhaust mode and parameters are applicable to the fire smoke prevention and exhaust design of this type of station.

【Keywords】 underground station of high speed railway; fire; smoke movement; CFD simulation; ventilation and smoke exhaust

0 引言

伴随经济的发展, 高速铁路成为新时代宠儿。高速铁路作为新兴的运输手段, 可以满足人们对交通工具快速便捷高效环保的要求。进入 21 世纪后, 国内高速铁路建设日新月异, 呈现井喷之势。然而, 随着城市轨道交通的迅速发展, 城市土地资源也越来越紧张, 因此为了节约用地, 我国新建的一批地下高铁车站, 如成都天府国际机场站、深圳福田站、北京京雄城际新机场站等, 均布置于地下空间。此外, 由于这类车站的功能主要是作为交通枢纽, 因此功能复杂的车站形式, 相互交叉的线路布置形式, 使得车站的埋深越来越大, 对火灾排烟设计安全性提出了更高的要求。因此, 开展有关高铁地下车站火灾烟气运动及防控方面的研究, 对提高高铁地下车站的消防设计水平和火灾应急处置能力有重要意义。

国内外对浅埋地铁火灾的研究较多^[1-4], 而对埋深较大地下车站火灾研究不够深入。钟茂华等^[5]研究了地铁岛式站台的列车火灾烟气蔓延问题; 史聪灵等^[6-8]分析了一种地面 1 层、地下 5 层的深埋岛式车站的烟气蔓延过程和排烟模式, 认为站厅到站台的楼扶梯开口处向下自然补风速度应达到 1.5m/s; 毛军等^[9]分析了分离式深埋地铁车站的火灾烟气运动及防控, 认为站台层火灾的排烟需采取车站与隧道风机的合理匹配运行模式; 高俊霞等^[10]研究了类似深埋车站的通风排烟设计问题, 楼扶梯开口处的风速设计值仍参照了普通地铁设计规范^[11]。可见, 既有工作主要是研究浅埋地铁或站厅与站台整体下沉的深埋地铁车站的火灾烟气问题, 对于站厅、站台分离, 通过长通道联接的深埋岛式地铁及高铁地下车站, 尚未开展有关火灾问题的深入研究。虽然地铁地下车站与高铁地下车站的结构上具有很强的相似性, 但后者的站台公共区域空间更高大更狭长, 出入口楼梯的爬升高度更大、联接站厅层与站台层的楼扶梯通道也 longer, 火灾烟气运动具有新的特点, 对于烟气控制问题急需做出相关验证, 为高铁相应规范的确立提供参考。

为此, 选择典型的深埋岛式高铁地下车站站点, 通过数值模拟, 研究站点内烟气蔓延规律; 给出站

点内烟气温度、碳烟密度、楼梯通道风速等特征参数的分布情况; 研究火灾时站点内有效的气流组织形式、车站通风空调系统及隧道排烟系统的运行模式; 研究指定的通风排烟设计条件下, 烟气是否可以得以有效控制, 以及车站的扶梯通道在火灾时是否保持正压性和有无烟气进入。

1 车站及站台情况

选取的高铁地下车站为地下两层的双岛六线式结构。地下一层为站厅层, 地下二层为站台层, 两层之间通过扶梯连接, 上行下行各 4 组。同时在站台两端均设有设备房和疏散楼梯间, 其中疏散楼梯间可以为人员紧急疏散提供通道。地下车站模型

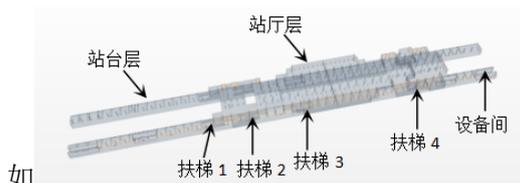


图 1 所示。

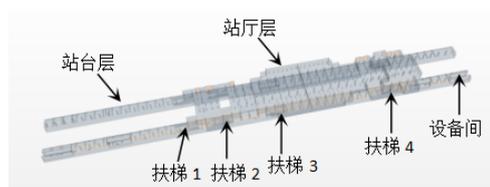


图 1 高铁地下车站模型图

Fig.1 Model of high-speed railway underground station

1.1 站台空间情况

车站站台公共区域狭长, 有效长度 450m, 宽度为 12.5m, 高度为 6.25m, 并在沿中心线纵向均匀设有 1200mm×1500mm 的立柱。站台与站厅之间通过 8 组扶梯连接, 其中与直达电梯相邻的 4 组扶梯开口连通部位的净空尺寸为 (长×宽) 10200mm×10200mm, 其他 4 组扶梯开口连通部位的净空尺寸为 13500mm×6800mm。

1.2 车站通风排烟系统

车站通风排烟开口位置如

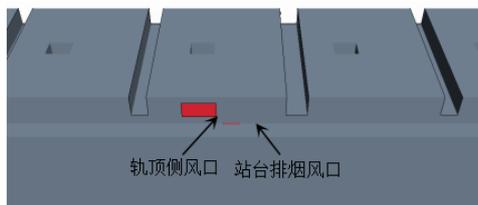


图2所示。

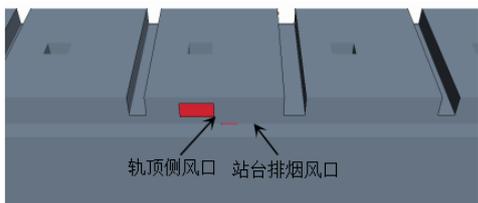


图2 站台公共区排烟模型图

Fig.2 Smoke exhaust model drawing of platform public area

车站站台为完全对称的两部分，排烟系统也完全对称，每一部分沿中心线分为两个防烟分区，每个防烟分区长225m。其中每个防烟分区均沿站台纵向均匀设置排烟管道，排烟风量总计约为178200m³/h，此外，当站台排烟系统开启的同时，站厅区域会开启送风系统，通过站台与站厅连接扶梯通道为站台补风。

车站隧道通风系统采用的轨顶排风系统，在轨顶风道布置侧开口，装有电动风阀，可以辅助站台排烟，共配有4台TEF风机，每台风量为100m³/s。

1.3 站台火灾运行方式

当站台发生火灾时，利用站台排烟系统进行排烟，站厅补风系统进行补风；也可站台与轨顶排烟系统匹配运行。

2 数值模拟设定

2.1 模拟场景及工况

首先，根据消防系统设计的需要，确定站台火灾的场景与模拟工况。考虑站台火灾最易发生在乘客等候区，选取不利于排烟的端部火源位置；发生火灾多为行李火灾，因而确定火灾功率为1.5MW。计算和分析多个火灾工况，其中的2个典型工况如表1所示，分别代表了2种不同的排烟模式。

表1 数值模拟的场景和工况

Table 1 Numerical simulation scenario

工况	排烟模式
----	------

1	①开启站台排烟风机 ②站厅补风风机
2	①开启站台排烟风机 ②站厅补风风机； ③开启轨顶风机，通过轨顶侧排烟口辅助排烟

2.2 研究方法

通过数值计算的方法，对地下车站站台的火灾发展、烟气扩散、排烟、送风、阻烟效果进行研究和分析。采用的计算机模拟方案如下：

(1) 场模拟计算

使用三维数值软件STAR-CCM+中烟火向导板块，采用场模拟计算的方法对整个站点内的火灾烟气蔓延与控制情况进行数值模拟。

通过对几何空间进行网格划分，同时设置计算模型和边界条件，如燃烧反应模型、火源功率与火灾增长系数、燃烧时间、边界热交换属性、通风口大小与流量等参数，进而计算整个空间区域的温度、碳烟密度、楼梯间风速等火灾特征参数的详细分布。

(2) 空间网格划分

为了保证网格的精确解析，在流动和热交换迅速的区域采用局部网格加密，对着火区域、烟气层覆盖区域、其余站台区域、站厅区域等分别设置网格解析大小，如此可有效地减少计算时间消耗。计算模拟思想如图3所示。

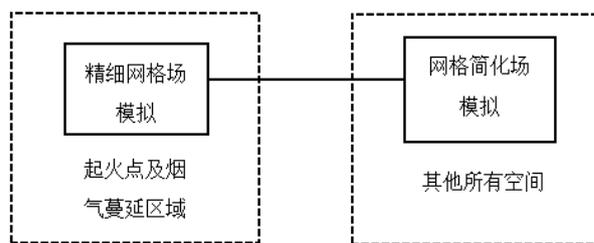


图3 深埋高铁车站火灾的模拟计算方案

Fig.3 Calculation scheme of fire in deep buried high-speed rail station

火灾被分为3大区域，即起火点、烟气蔓延区域及其他所有空间。分别对这3个区域内的物理条件进行同步模拟，给出车站空间的火灾发展和烟气蔓延的总趋势。为确保火灾模拟的准确性，应在火源附近使用较小的网格尺寸。在这项研究中，使用了切割体网格，火源附近及烟气流动区域采用0.2m的网格大小，其余区域采用0.4m，燃烧火源截面的网格如图4所示。整个数值模型包括大约600万个网

格。

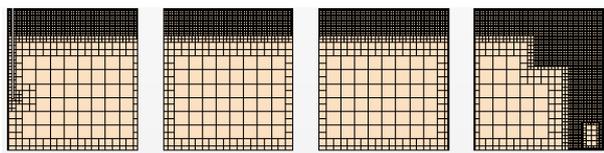


图4 火源附近网格场景

Fig.4 Grid around the fire

(3) 设定站台危险高度

当实际的烟气层高度 h 大于危险高度时, 则认为安全的^[12-14], 即

$$h \geq H_s \quad (1)$$

其中, H_s 可按以下公式计算:

$$H_s = 1.6 + 0.1H \quad (2)$$

式中: H_s 为危险高度, m; H 为排烟空间的建筑高度, m。

因此, 算例中确定的站台危险高度: $H_s=2.0\text{m}$ 。

(4) 参数设计

场模拟的计算条件和初始参数设置如下:

①火灾形势: 站台火灾;

②稳定火源功率: 1.5MW;

③火灾增长系数: 0.4689kW/s^2 ;

④初始条件: 环境温度为 20°C , 站台内各处压力为大气压, 风速均为 0, 考虑重力对流场的影响;

⑤边界条件: 逃生出口设为压力出口边界, 相对大气压强为 0; 排烟口及送风口为速度边界; 壁面为绝热壁面, 辐射系数为 0.85;

⑥计算时间: 6min。

3 结果分析

3.1 采用单独的站台排烟系统时的站台火灾场景

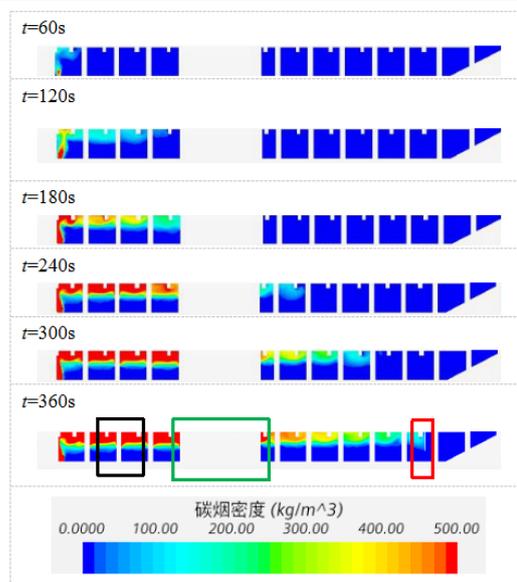


图5 站台中心纵向截面碳烟密度变化

Fig.5 Change of soot density in longitudinal section of platform center

站台端部发生火灾开启单独的站台排烟系统即工况 1 的烟气纵向蔓延云图如

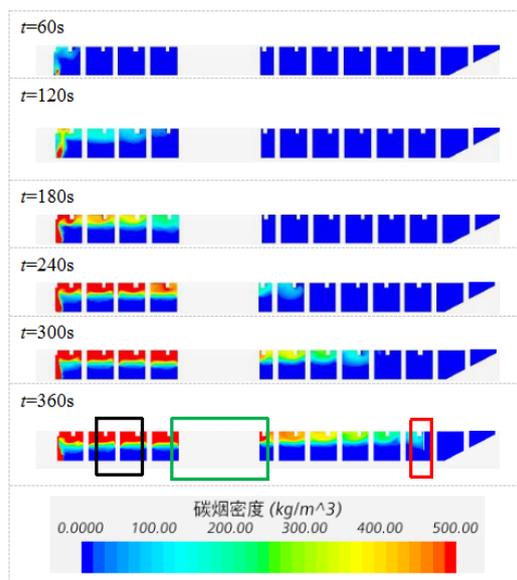


图5所示。火灾发生至60s时, 站台顶棚已有明显的烟气聚集, 随着火灾的进一步发展, 热烟气沿着站台狭长空间纵向流动, 顶棚烟气进一步积聚并产生明显分层。梁左侧框内、柱子左侧框内、配电所中间框内以及扶梯处挡烟垂壁右侧框内可以阻挡烟气的流动, 可见在火灾发生360s内, 烟气缓慢蔓延至第一个扶梯挡烟垂壁的左侧, 烟气的单向流动长度为103m, 烟气层高度略高于挡烟垂壁下沿

的标高3m，烟气层厚度约为5.2m。由于形成的烟气层高度明显高于2m，即除火源位置外，整个站台层人高2m平面处并没有沉降烟气，且并无烟气流入扶梯通道，站台区域继续维持良好的无烟环境，因为在既有的排烟系统作用下，可以为人员疏散提供很好的无烟环境。

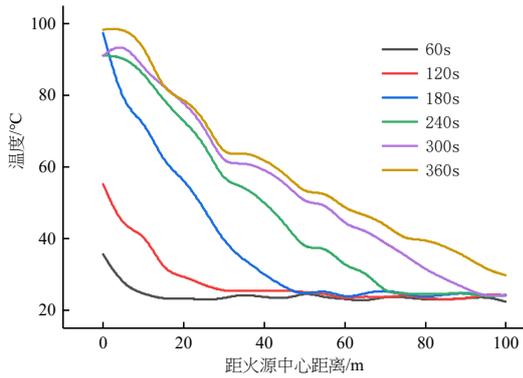


图6 逃生路线上顶棚温度变化

Fig.6 Ceiling temperature change on escape route

站台逃生路线上顶棚温度变化如图6所示。PIARC指出，人员在几分钟内能够忍受的辐射热量极限为2~2.5kW/m²。当辐射热量为2.5kW/m²时，6m高、8m宽的隧道对应烟气温度为180℃，这与此站台狭长结构十分相似，因而也可以借此指标作为参考。由图可见，相同时间下的顶棚温度随距火源中心距离的增加而降低，相同位置的顶棚温度随火灾发展时间明显升高，同时各位置温度在火灾发生240s后趋于稳定，由图可见站台距火源30m外各位置的顶棚温度的最高值为67℃左右，远小于PIARC指出的180℃。在既有的排烟系统作用下，火灾发生240s以后，顶棚温度趋于稳定，热量得到有效排出，辐射热量控制在人体可接受范围内。

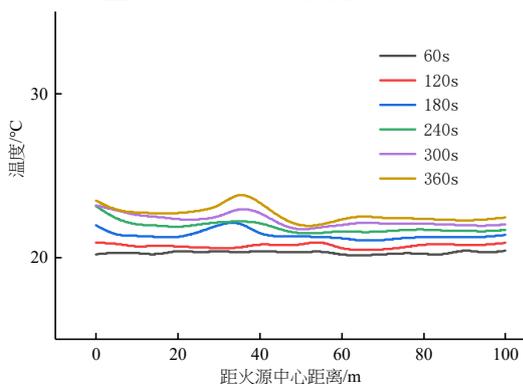


图7 逃生路线上高2m处温度变化

Fig.7 Temperature change at height 2m on the escape route

站台逃生路线上高2m平面处温度变化如图所示。随着火灾的发展，高2m平面处的温度有极小幅度升高，但稳定在25℃以下，这符合地面2m高度处的温度不得超过60℃的要求^[15]。

站台-站厅扶梯通道风速变化图如图8所示。1号扶梯口最大下行风速1.17m/s、最小下行风速0.8m/s，平均下行风速0.96m/s；2号扶梯口最大下行风速1m/s、最小下行风速0.39m/s，平均下行风速0.8m/s；3号扶梯口最大下行风速1.64m/s、最小下行风速1.48m/s，平均下行风速1.54m/s。1、2号楼梯间平均风速未达到规范要求的1.5m/s，3号楼梯间平均风速达到了规范要求的1.5m/s。由

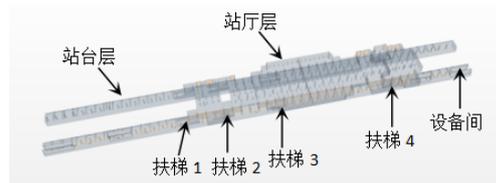


图1模型图可知，这是由于楼梯1与楼梯2均是朝向左侧，且两楼梯之间的空间较小，站厅左侧被排走的烟气和空气所形成的负压同时影响楼梯1、2的风速；此外由于高铁车站的空间很大，站厅向站台送风气流沿程衰减，导致风速较小。

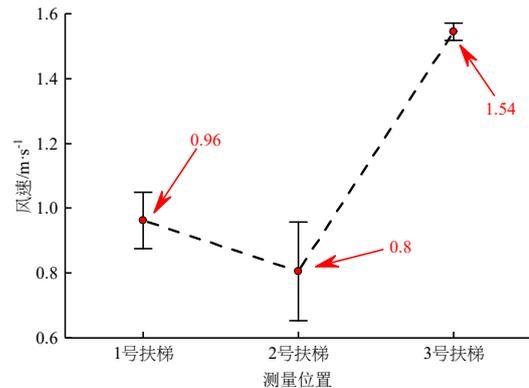


图8 扶梯通道的风速变化

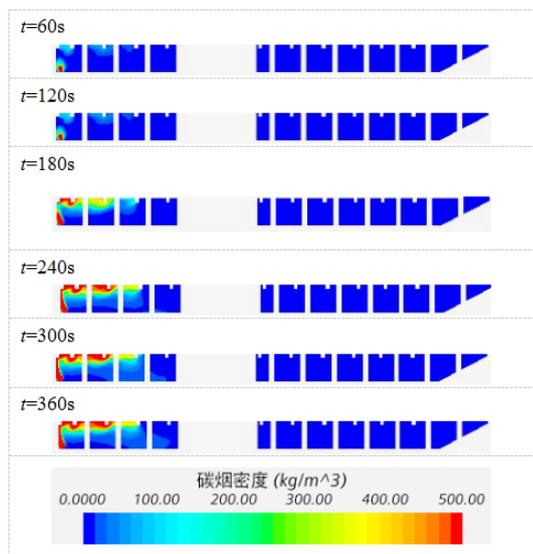
Fig.8 Change of wind speed in escalator passage

总而言之，站台端部发生火灾，采用独立的站台排烟系统，虽然烟气层厚度高达5.3m，但由于高铁地下车站的庞大空间，烟气层高度仍有3m，使得烟气仍然可以得到有效的控制，为人员疏散创造安全的环境。

3.2 采用站台风机与轨顶风机匹配运行时的站台火灾场景

站台端部发生火灾开启轨顶排烟风机辅助排

烟即工况 2 的烟气纵向蔓延云图如



图所示。与工况1不同的是, 工况2前120s由于TEF风机通过轨顶侧风道产生的强烈气流对烟气流动的具有进一步扰动作用, 排出烟气的速度更快, 但这也严重干扰了烟气层的形成, 使得烟气层高度很低, 直到180s才有明显的分层。可见在火灾发生360s内, 烟气缓慢流动, 烟气的单向流动长度约为22.5m, 但烟气层高度很低。其中火灾发展的240s~360s内可见, 靠近火源处的人高2m平面有烟气沉降。由于火源位置为站台端部, 火灾发生至240s时, 烟气流动长度仅有20m, 此时人员已逃离出此区域, 因为在既有的排烟系统作用下, 可以为人员疏散提供很好的无烟环境。

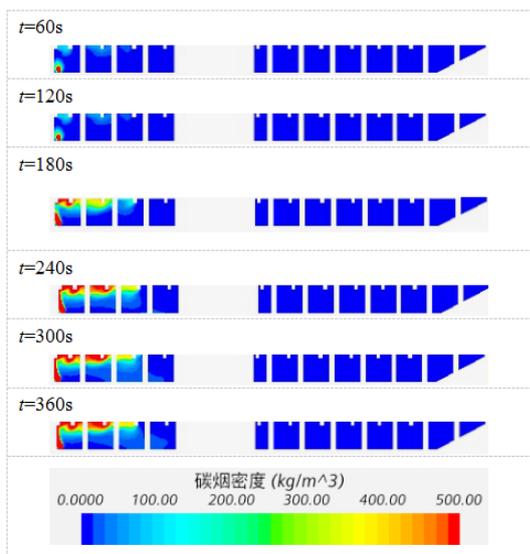


图9 站台中心纵向截面碳烟密度变化

Fig.9 Change of soot density in longitudinal section of platform center

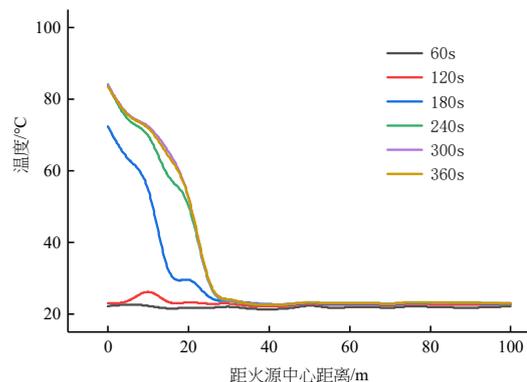


图10 逃生路线上顶棚温度变化

Fig.10 Ceiling temperature change on escape route

站台逃生路线上顶棚温度变化如图所示。距火源距离26m内, 相同时间下的顶棚温度随距火源中心距离的增加急剧降低, 相同位置的顶棚温度随火灾发展时间明显升高, 在距离火源26m处的顶棚温度维持在正常环境温度, 或者说顶棚热烟气并未蔓延至距火源26m之外的区域。在轨顶风机的辅助排烟作用下, 热量可以得到更有效的排出, 辐射热量不会对人体产生影响。

站台逃生路线上高2m平面处温度变化如图11所示。在火灾发生的360s内, 高2m平面处的温度稳定在25°C以下, 这依然很好的满足地面2m高度处的温度不得超过60°C的要求^[15]。

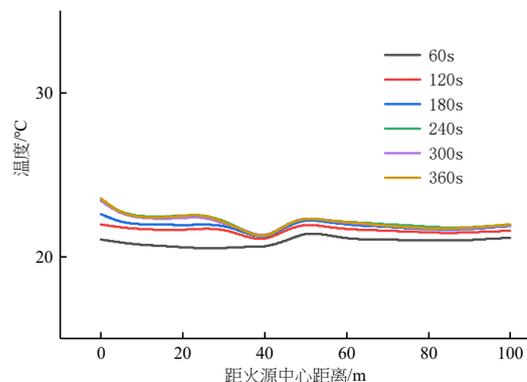


图11 逃生路线上高2m处的温度变化

Fig.11 Temperature change at height 2m on the escape route

站台-站厅扶梯通道风速变化图如图4所示。1号扶梯口最大下行风速2.1m/s、最小下行风速1.93m/s, 平均下行风速2.02m/s; 2号扶梯口最大下

行风速2.38m/s、最小下行风速2.26m/s，平均下行风速2.33m/s；3号扶梯口最大下行风速2.75m/s、最小下行风速2.64m/s，平均下行风速2.65m/s。1、2、3号楼梯间平均风速均达到规范要求的1.5m/s。

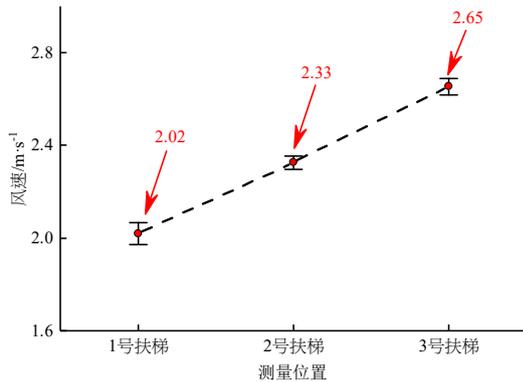


图4 扶梯通道风速变化

Fig.12 Change of wind speed in escalator passage

结合烟气蔓延情况可见，由于扶梯附近的挡烟垂壁对烟气有效的阻隔，加上扶梯间稳定的下行风速作用，并无烟气进入扶梯通道，更无烟气进入站厅区域，可以保证站厅公共区处于无烟环境之中。

总而言之，站台端部发生火灾，采用站台风机与轨顶风机匹配运行时，强烈的气流扰动严重干扰了烟气层的形成的同时，将烟气控制在360s内仅流动23m。此外，站台与站厅之间形成了更大的压力差，使连接两者的扶梯通道形成的下行风速也超过了1.5m/s。

4 结论

(1) 高铁地下车站站台区域空间虽然狭长受限，但由于层高更高，空间更大，有了更大的储烟空间，使得烟气层高度相对较高，烟气更难蔓延至2m平面，配合相应的排烟系统，有利于人员疏散。

(2) 当站台端部乘客等候区发生火灾时，地下高铁站虽然深埋较大，排烟阻力比大部分地铁站大，采用车站的独立排烟系统，若每台排烟风机的风量达到178200m³/h，仍可以满足人员疏散的要求。与车站的独立排烟系统相比，采用站台与轨顶排烟系统匹配运行，如若每台TEF风量达到360000m³/h，可以更加有效限制烟气的流动的同时，弥补扶梯1与2风速不足1.5m/s的缺陷，创造更安全的人员疏散环境。

(3) 排烟模式应采用：站台火灾时，关闭站

厅排烟系统，开启站台排烟系统对站台进行控制，同时开启轨顶排烟风机，打开轨顶风道侧风阀，对站台进行辅助排烟。

参考文献:

- [1] Meng Na, Hu Longhua, Wu Long, et al. Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station[J]. TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, 2014,40(Feb.):151-159.
- [2] YF Li, J Bian, JM Li. Research on Smoke Flow in a Tunnel Fire of Subway System[J]. Procedia Engineering, 2014,71:390-396.
- [3] J Ji, W Zhong, KY Li, et al. A simplified calculation method on maximum smoke temperature under the ceiling in subway station fires[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2011,26(3):490-496.
- [4] Harish R, Venkatasubbaiah K. Effects of buoyancy induced roof ventilation systems for smoke removal in tunnel fires[J]. TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, 2014,42(May):195-205.
- [5] 钟茂华,史聪灵,邓云峰.地铁浅埋岛式站台列车火灾烟气蔓延的数值模拟研究[J].中国安全科学学报,2005,15(11):10-15.
- [6] 钟茂华,史聪灵,涂旭炜,等.深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究(1)——实验设计[J].中国安全生产科学技术,2006,2(1):3-9.
- [7] 史聪灵,钟茂华,涂旭炜,等.深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究(2)——列车火灾[J].中国安全生产科学技术,2006,2(2):14-18.
- [8] 史聪灵,钟茂华,涂旭炜,等.深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究(3)——站台火灾[J].中国安全生产科学技术,2006,2(3):33-38.
- [9] 毛军,郗艳红,胡家鹏,等.分离式深埋地铁车站的火灾烟气运动及防控[J].中国安全科学学报,2019,29(6):76-82.
- [10] 高俊霞,史聪灵,钟茂华.深埋地铁防排烟设计研究[J].中国安全生产科学技术,2006,2(6):39-44.
- [11] GB 50157-2003,地铁设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [12] 范维澄,孙金华,陆守香,等.火灾风险评估方法学[M].北

- 京:科学出版社,2004.
- [13] 广州市地下铁道总公司, 广州市地下铁道设计研究院. 广州地铁二号线设计总结[M].北京:科学出版社,2005.
- [14] Zhong Maohua, Zhang Xingkai, Liu Tiemin, et al. Safety evaluation of engineering and construction projects in China[J]. JOURNAL OF LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES, 2003,16(3):201-207.
- [15] 陈银, 蒋勇, 潘龙苇, 等. 基于 EDC 模型的含 HCN 火灾烟气数值模拟及毒性评价[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2):117-123.

(上接第 72 页)

- [7] Shahzad Muhammad Wakil, Lin Jie, Xu Ben Bin, et al. A spatiotemporal indirect evaporative cooler enabled by transiently interceding water mist[J]. Energy, 2021,217.
- [8] 褚俊杰, 黄翔, 孙铁柱, 等. 露点间接蒸发冷却器湿通道侧材料亲水性研究[J].棉纺织技术,2018,46(1):40-44.
- [9] 樊丽娟, 黄翔. 多孔陶瓷立管式间接蒸发冷却器的设计与性能分析[J].流体机械,2019,47(7):85-88.
- [10] 王扬卫, 于晓东, 王富耻, 等. 界面反应对铝熔体与 Si₃N₄ 多孔陶瓷界面的润湿作用[J].稀有金属材料与工程, 2007(S1):727-730.
- [11] 徐红鸯, 方健. 空调换热器亲水铝箔亲水性的测试及控制[J].制冷,2003,(2):4-7.
- [12] 施来顺, 曹晓新. 等离子体改性聚合物表面动力学的动态接触角法研究[J]. 山东工业大学学报,2000,(2):121-126.
- [13] 张建可. 树脂基碳纤维复合材料的热物理性能之一——导热系数[J].中国空间科学技术,1987,(3):55-60.
- [14] John R Watt, Will K BROWN. EVAPORATIVE AIR CONDITIONING HANDBOOK (Third Edition) [M]. Springer.