

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-235-05

地铁轨行区双向排烟方式数值模拟研究

冷小秋 雷波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 针对轨行区列车火灾的烟气控制问题,提出了一种利用隧道风机进行双向排烟的方式。根据典型屏蔽门制式地铁车站结构建立无轨顶风道的车站三维模型,采用数值模拟方法对该排烟方式下的烟气扩散规律进行研究,分析了不同排烟量下站台人员高度处烟气温度、CO浓度以及能见度的分布情况,给出了不同车站隧道横截面积下满足人员安全疏散条件时的隧道口最小排烟量。

【关键词】 地铁;轨行区列车火灾;双向排烟;数值模拟

中图分类号 U231+.96 文献标识码 A

Numerical Analysis on Bilateral Smoke Exhaust in Metro Track Area

LengXiaoqiu Lei Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Aiming at the problem of smoke control, a bilateral smoke exhaust method for tunnel ventilation fan is proposed. Establish the three-dimensional model of the metro station with no OTE system according to the structure of typical underground railway station with PSD. Study the smoke diffusion law by means of numerical simulation method, analysis the distribution of temperature, CO concentration and visibility at the height of the people at different tunnel outlets, give the design minimum smoke emission of the tunnel opening to meet the safety evacuation conditions of different station tunnels.

【Keywords】 subway; train fire in metro track; a bilateral smoke extraction mode; numerical simulation

0 引言

国内屏蔽门制式地铁站普遍采用轨顶风道进行通风排烟,在工程实施过程中,轨顶风道存在着建设工期长、施工难度大以及安全性等问题,从节能、经济和缩短工期角度出发,研究轨行区(车站隧道)通风及防排烟对地铁工程建设具有重要意义。

目前对于取消地铁轨顶风道的研究相对较少。华正博、曹建等人分别采用一维和三维数值计算方法对成都、哈尔滨地铁站无轨顶风道时通风排热效果进行研究,结果表明采用活塞风井或机械通风方式足以达到理想的排热效果^[1,2]。事实上,深圳、西安、重庆、成都等城市部门相继意识到轨道排风

系统的能耗问题,将轨道排风系统长期停运^[3],国内已运营的轨道交通状况表明在空调季关闭轨顶排热风机也能满足隧道内的温度要求^[4-6];对于无轨顶风道时的排烟问题,朱跃采用数值模拟方法对成都某地铁站无轨顶风道时轨行区列车火灾排烟进行模拟研究,将轨行区纳入站台排烟系统中,采用隧道和站台联合排烟模式,提出加密站台火灾区的排烟量为最有效的排烟模式,当站台排烟量设置为 $35\text{m}^3/\text{s}$ 且对中部排烟口加密处理后在较小的隧道口排风量下即可满足站台疏散环境的要求^[7]。

本文针对轨行区列车火灾的烟气控制问题,提出了一种利用隧道风机进行双向排烟的方式。根据典型制式地铁车站的一般结构,建立了无轨顶风道

作者简介:冷小秋(1993.09-),女,在读硕士研究生, E-mail: lengxq2019@163.com。

通信作者:雷波(1961.05-),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: leibo@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2019-03-26

车站的简化三维模型,火灾发生时开启隧道风机双向排烟,并关闭离火源最近三扇屏蔽门。利用数值模拟方法对该排烟方式下烟气蔓延规律进行了研究,分析了不同隧道口排烟量下站台人员高度处烟气温度、CO 浓度以及能见度的分布情况,根据人员疏散安全性标准给出了不同轨行区断面下的隧道口设计最小排烟量。

1 计算模型与方法

1.1 模型建立

本文采用三维火灾数值模拟软件 FDS(Fire Dynamic Simulator)进行计算,根据国内既有工程建立简化车站模型,模型如图 2 所示。研究对象为典型地下二层侧式车站,地下一层为站厅层,地下二层由轨道两侧站台公共区、轨行区以及两端设备管理用房组成,站台通过两部扶梯与站厅连接,楼梯开口部位设有挡烟垂壁,下缘延伸至吊顶 500mm。站台中间设置单洞双线隧道,两条隧道中间有隔墙隔开,原有的轨顶风道被取消后轨行区断面增大,上部烟气容纳高度增加 1m 左右,图 1 为简化车站中部剖面图。隧道通风排烟系统直接对起火隧道进行排烟和气流组织,未起火隧道不受烟气影响。



图 1 侧式车站中部剖面图

Fig.1 Central section of side station chart

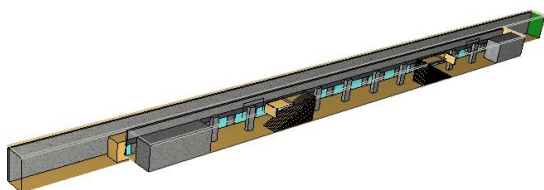


图 2 车站物理模型

Fig.2 Physical station model

为了简化计算,本文只选取车站着火侧进行模拟研究,并对模型作以下基本假设:

(1) 车站隧道横截面积一致,不考虑隧道内的坡度与弯曲。

(2) 列车采用地铁 B 型车,列车长 117.6m,列车断面积 10.64m²,断面周长 13.2m。

(3) 站台、站厅以及管理用房等简化为长方体。

1.2 模拟参数设置

(1) 火源设定

根据以往火灾事故案例分析;人为纵火和列车电气设备故障造成电气短路火灾发生概率较高,火灾发生主要集中在地铁车厢和地铁站台。本文考虑停靠站台列车发生火灾,定义火源为面火源,最大火灾强度为 7.5MW,火灾功率曲线按超快速火考虑,200s 达到火源峰值。

(2) 网格划分

FDS 用户手册中采用 D^*/δ_x 表征模拟计算精度程度, D^* 表示火源特征直径,其计算公式^[8]:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} T_{\infty} C_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \tag{1}$$

式中: Q 为火源功率, kW; ρ_{∞} 为空气密度, kg/m³; C_{∞} 为空气比热容, kJ·kg⁻¹K⁻¹; T_{∞} 为环境温度, K; g 为重力加速度, m/s²。

文献[9]中总结了不同建筑结构数值模拟的参数设置, D^*/δ_x (网格尺寸) 推荐取值 4~16 之间, 7.5MW 火源功率相应的 δ_x 取值范围在 0.13~0.53m。参照 Weng 对网格精度验证计算的结果, 远离火源的区域网格尺寸一般设为火源区域的 2 倍^[10], 计算中将近火源隧道区域网格尺寸设置为 0.2m, 对站台与车体之间间隙进行加密, 站台和站厅区域网格尺寸设为火源区域的 2 倍。

(3) 边界条件

站厅层有四个出入口, 设置为自由边界, 车站隧道端口设置为流量出口(排烟量)。环境与土壤层取恒温 25℃, 隧道站台主体结构均采用混凝土材料。根据《地铁设计规范》的规定, 当地下车站发生火灾时, 应保证站厅到站台楼梯口处具有不小于 1.5m/s 的向下气流^[11]。

2 评价标准及模拟工况

2.1 人员安全性标准

当列车发生火灾时,烟气是造成人员伤亡的主要因素,主要表现为烟气的热作用和毒性,影响人员的安全疏散主要因素有:烟气的温度、CO浓度、人员可见度。国内外对于地铁火灾人员安全性已有相关规定,本文参考NFPA 130、PIARC、《地铁设计防火标准》等^[12,13],制定疏散时间6min内人员生命安全评估准则如下:(1)火源距离30m外疏散通道人员高度处的最高温度不超过60℃;(2)人员高度处CO浓度不超过1150ppm;(3)逃生通道内安全高度以上最高温度不超过180℃;(4)人员高度处的烟气能见度不低于10m。

2.2 模拟工况

随着地铁运营速度的提高,空气流动受隧道及车体的限制以及空气的压缩性,导致隧道内空气压力剧烈变化,由此引发一系列问题,工程上往往采取加大隧道横截面积来减小隧道压力波。以往地铁列车速度多为60~100km/h,隧道空气动力学效应不明显,综合国内车站建筑限界,取消轨顶风道后轨行区矩形断面设置为3.65×5.6m(A断面),当列车运行速度达到120km/h时,轨行区断面为4m×6m(B断面),当列车速度达到140km/h时,轨行区断面为4.6m×6.6m(C断面)。本文针对以上三种轨行区断面进行模拟计算,由模拟结果可知火灾发生后屏蔽门全开时,烟气主要通过火源附近屏蔽门进入站台,此时两端隧道口必要排烟量大于60m³/s,因此本文考虑火灾发生后关闭离火源最近的三扇屏蔽门,其余屏蔽门打开,单侧隧道口排烟量设置范围为20~40m³/s。

3 计算结果及分析

3.1 最不利着火位置

轨行区防排烟系统需实现各火灾工况下烟气的有效控制,为人员提供安全的疏散条件。列车火灾一般有三种情况:(1)列车车厢内饰、乘客行李发生火灾;(2)列车顶部的电气设备发生火灾;(3)列车底部构件发生火灾。本文对以上三种情况进行模拟,通过计算结果对比确定最不利火灾位置。在相同的火灾规模和烟气控制策略下,各火灾工况下烟气分布情况如图3所示。

由图3可见不同着火位置下烟气的控制效果

不同。列车外部、车厢端部火灾时产生烟气基本被控制在轨行区范围,疏散时间内无烟气扩散至站台,而车厢中部发生火灾时,产生烟气填充了整个车厢和轨行区,同时有较多烟气蔓延至站台中部区域,烟控效果较差,不利于人员的安全疏散;从火灾发生位置来讲,火源位于列车外部时,车厢内无烟气填充,车内人员可就近疏散至站台;火源位于车厢端部时,烟气集中在着火端,乘客可从未着火侧进行疏散,疏散通道较为安全;当火源位于车厢中部时,车厢内浓烟给人员逃生造成一定的影响,乘客需从火源两侧进行逃离,所需安全疏散时间较长。综上所述,列车车厢中部为最不利火灾位置,下文均采用此着火位置进行模拟计算。

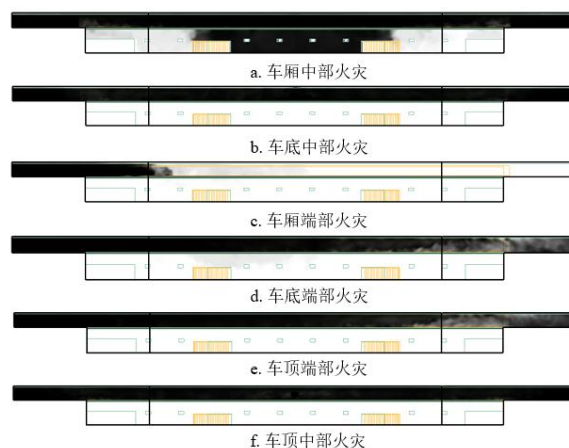


图3 不同火灾工况下烟气分布范围

Fig.3 Smoke distribution range under different fire conditions

3.2 烟气扩散过程

为了分析列车火灾烟气扩散的一般规律,选取A断面进行分析,当车站隧道口排烟量为20m³/s时计算得到火灾发生360s内烟气分布和温度分布如图4~图6所示。

图4中火灾发生初期烟气生成量较少,在热压作用下烟气上升至车厢和车站隧道顶部并形成顶棚射流向两端缓慢扩散,随着火源功率加大,烟气产生量逐渐增加,扩散速度加快,火源附近关闭的屏蔽门阻碍了烟气快速进入站台,至90s时车厢内烟气蔓延至火源两侧开启的屏蔽门处,部分烟气通过屏蔽门开始涌入站台,车厢内烟气蔓延速度减慢;至180s时轨行区内烟气已扩散至隧道两端,进入站台区的烟气覆盖了整个中部区域,有少量烟气由于负压的作用被抽入轨行区,此时站台烟气浓

度较小；200s 时火源燃烧达到稳定，烟气产生量大大增加，站台内烟气浓度逐渐升高；至 360s 时站台烟气呈现明显的分区分布，中部区域烟气浓度较大，在楼梯口向下气流和土建结构的阻挡作用下无烟气蔓延至站台两端和站厅层。

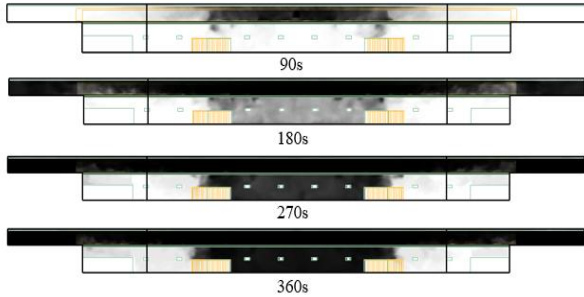


图 4 360s 内烟气分布情况

Fig.4 Smoke distribution of platform in 360s

图 5 为站台区域 Y=-2m 截面温度分布情况。从图中可以看出 120s 时烟气从火源两侧开启屏蔽门涌入站台，在热压作用下迅速上升至近顶棚区域并逐渐向中部扩散；180s 时高温烟气贴附顶棚占据了整个站台中部，顶部形成明显的温度分层，此时烟气层均保持在 2m 以上区域，温度最高达到 40℃ 左右；270s 时火源功率已经到达最大值，顶部温度层厚度增加，从两侧蔓延至站台中间的热烟气层首先下降至人员高度，温度最高达 55℃；360s 时烟气层下降至安全高度以下，站台中部区域温度进一步升高，对人员逃生造成一定的影响。

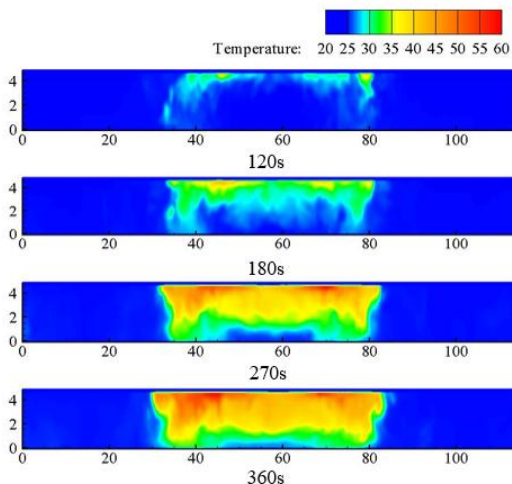


图 5 360s 内站台 Y=-2 截面纵向温度分布

Fig.5 Longitudinal temperature distribution of Y=-2 section in platform in 360s

图 6 给出了 360s 内站台顶棚温度分布情况。

从图 6 中可见各时刻顶棚温度分布情况较为类似，站台中部顶棚温度随时间呈 M 型变化，由于烟气蔓延过程中不断卷吸周围冷空气，两侧进烟屏蔽门附近顶部温度最高，中间温度相对较低，360s 内顶棚温度最高不超过 60℃，远远小于安全标准 180℃，不会对人员造成辐射灼伤。

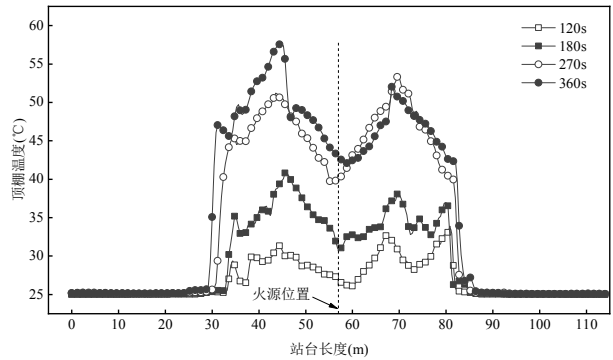


图 6 站台顶棚温度分布

Fig.6 Roof temperature distribution of platform

3.3 人员安全性分析

为了便于各参数的对比分析，不同通风条件下站台测点设置位置均相同，360s 时站台区域 Y=-2.4m 截面上 1.8m 高度处各烟气参数分布情况如图 7~图 9 所示。

由图 7 和图 8 可见，在隧道风机双向排烟方式下站台两端无烟气蔓延，温度均保持在 25℃ 左右，中部区域人员高度处温度和 CO 浓度较高。随着隧道口排烟量的增加，隧道内负压增大使得进入站台烟气量减少，站台中部温度、CO 浓度均有所减小。两楼梯附近温度高于站台中部温度，当隧道口排烟量为 20~24m³/s 时，人员高度处温度最高不超过 45℃，CO 浓度变化规律与温度相似，最高达 60ppm；当隧道口排烟量增加至 26~30m³/s 时，站台中部人员高度处温度在 30℃ 左右波动，CO 浓度低于 20ppm，各隧道口排烟量下人员高度处温度和 CO 浓度均处于安全范围内。

图 9 中随着隧道口排烟量的加大，站台中部下降至安全高度处的烟气量越少，烟气流动较不稳定，能见度波动幅度大。当隧道口排烟量为 26~30m³/s 时站台区域能见度基本保持 10m 以上，当隧道口排烟量为 20~24m³/s 时站台中部区域能见度均低于 10m，会对疏散人群造成一定的影响。从以上分析可知，火源功率一定时能见度成为人员安全疏散的关键性因素，当隧道口排烟量增加至

26m³/s时,站台各参数均满足人员安全疏散条件, A断面轨行区隧道口最小排烟量为26m³/s。

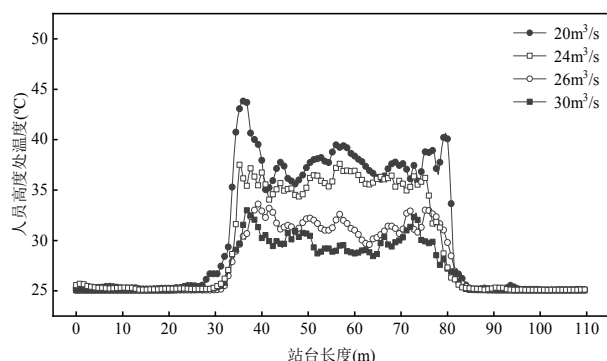


图7 A断面下站台人员高度处温度分布

Fig.7 Distribution of temperature at personnel height in platform of section A

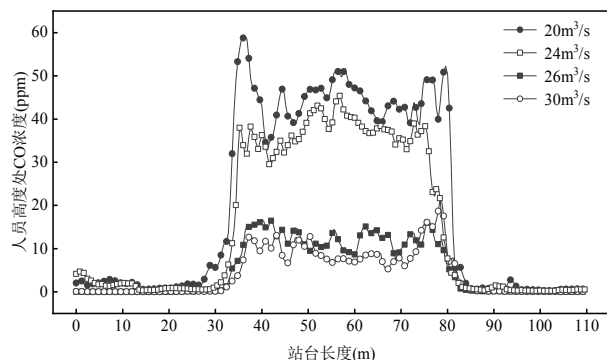


图8 A断面下站台人员高度处CO浓度分布

Fig.8 Distribution of CO concentration at personnel height in platform of section A

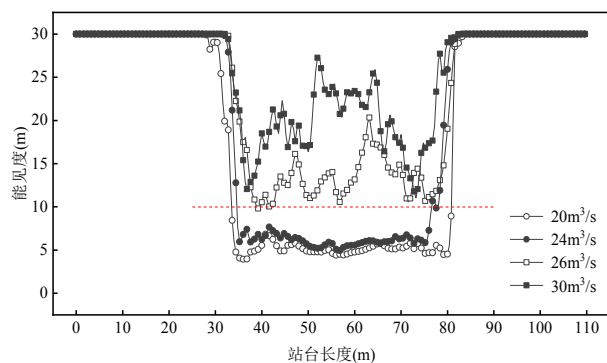


图9 A断面下站台人员高度处能见度分布

Fig.9 Distribution of visibility at personnel height in platform of section A

3.4 无轨顶风道排烟设计建议

前文选取A断面进行结果分析,计算结果表明列车发生火灾时采用隧道风机双向排烟是可行的。根据模拟结果得到不同轨行区断面所对应的隧

道口最小排烟量如表1所示。

表1 不同轨行区断面下隧道口最小排烟量

Table 1 Minimum smoke output at tunnel entrance under different track sections

断面	隧道口最小排烟量	楼梯口向下平均风速	满足楼梯口风速要求的隧道口最小排烟量
A	26m ³ /s	1.46m/s	
B	23m ³ /s	1.3m/s	28m ³ /s
C	20m ³ /s	1.05m/s	

从上表可以看出,不同轨行区断面下较小隧道口排烟量即可达到人员安全疏散要求,为了满足《地铁防火设计规范》中的楼梯口向下风速要求,三种断面下的隧道口最小排烟量均为28m³/s。为了获得隧道口必要排烟量,可以选取合适的隧道风机,也可以考虑开启与火灾站台相邻车站的隧道风机进行辅助排烟。

4 结论

(1) 针对无轨顶风道时轨行区列车火灾,采用隧道风机双向排烟方式,并同时关闭离火源最近三扇屏蔽门,当两端隧道口排烟量达到一定值时,可以有效地控制轨行区和站台烟气的扩散。

(2) 为满足人员疏散安全性要求,不同轨行区断面对应的隧道口最小排烟量范围为20m³/s~26m³/s;在保证楼梯口1.5m/s的向下风速的条件下,B型列车火灾时三种轨行区断面单侧隧道口排烟量不宜小于28m³/s。

参考文献:

- [1] 华正博.屏蔽门制式地铁轨行区通风模式研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [2] 曹建.严寒地区屏蔽门制式地铁轨行区通风模式研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [3] 刘伊江.地铁列车段隧道(半)横向通风系统方案溯源及适用性研究[J].暖通空调,2017,47(1):28-34.
- [4] 胡浩明,赵蕾,李德辉,等.地铁运营初期关闭OTE/UPE风机运行的可行性探讨[J].铁道标准设计,2015,59(1):122-126.
- [5] 赵蕾,王君,胡浩明,等.基于实测的西安地铁二号线活塞风特性分析[C].铁路暖通年会论文集,2014:273-291.

(下转第244页)