

地铁站厅至站台楼梯口风速对火灾烟气运动的影响

闫淑霞, 吴喜平

(同济大学机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 地铁车站站台发生火灾, 连接站厅与站台的楼梯口保持一定风速, 可阻挡烟气向站厅蔓延并为人员疏散提供诱导气流。为研究楼梯口风速对车站火灾烟气运动的影响, 试验对不同排烟模式下楼梯口风速进行测量, 建立数值计算模型进行模拟。结果表明: 火灾场景下楼梯口风速大于无火源场景下风速, 因此常规楼梯口风速校核设计方法由于没考虑真实火灾情况下各种因素的复杂作用, 需进一步改进; 楼梯口附近起火, 烟气易从挡烟垂壁溢出向站厅层蔓延, 站台火灾时站厅层为送风状态, 存在溢出烟气时站厅层烟浓度可增至大于站台层; 站台公共区着火, 增开隧道风机, 能够增加楼梯口风速, 但由于对流场的扰动, 破坏了烟气分层, 使烟气充填区域增大, 因此, 防排烟系统设计科学组织烟气流动、合理控制烟气运动路径与控制排烟量同等重要。

关键词: 火灾烟气控制; FDS; 楼梯口风速; 地铁车站

中图分类号: TU998.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)02-0105-05

Analysis of Fire Smoke Movement with Different Air Velocity at the Stair head to the Hall of a Metro Station

YAN Shu-xia, WU Xi-ping

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: When a fire happens at the subway platform, the downward ventilation at the staircase which connects the hall and platform can prevent smoke spreading into the hall and provides guiding air for evacuation people. To investigate the influence of the ventilation rate on the smoke movement, the air velocity at the staircase was measured under three ventilation modes. Numerical model was established to simulate the real fire scenario. It is shown that the downward air velocity under fire is greater than that without fire, and the traditional design procedure without considering complex factors interaction in real fire scenario should be improved; when fire is near the staircase, smoke easily spills from the smoke screen to the concourse. And smoke concentration of concourse is even higher than that of platform because the hall is under air supply mode; when the fire locates at the public area of the platform, turning on the tunnel fans can increase the downside flow at the staircase. However exceeding high flow can produce disturbance and destroy the smoke stratification, so more area will be filled with smoke. Therefore, reasonable smoke management scheme is as important as smoke exhausting system capability.

Key words: fire smoke control; FDS; air velocity at the stairhead; metro stations

《地铁设计规范》(GB 50157—2003)^[1] 19.1.39 条规定: 当车站站台发生火灾时, 应保证站厅到站台的楼梯和扶梯口处具有不小于 1.5 m/s 的向下气

流。在《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—95) 8.3.2^[2] 条和《建筑设计防火规范》(GB 50016—2006) 9.3.2^[3] 条有类似的规定: 防烟楼梯间门开启

收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 上海科委基金资助项目(07d212022)

作者简介: 闫淑霞(1979-), 女, 博士生, 主要从事地铁环境控制研究, (E-mail) 01luckyshuxia_yan@tongji.edu.cn。

时,通过门的风速不应小于 0.70 m/s。地铁规范正是借鉴于地面建筑相关规范,出发点是利用气流阻挡火灾烟气从站台向站厅蔓延,为人们安全疏散提供无烟通道。由于地铁车站作为地下建筑,不同于地面建筑的水平方向防烟,进行的是垂直方向防烟,而有效防烟的气流速度与烟气流动特性有关。因此,对向下气流防烟作用有效性进行研究,进而优化防排烟系统运行模式具有一定意义。

楼梯口风速对烟气控制效果的影响因素较复杂。顾正洪等^[4]通过计算机模拟研究得出楼梯口临界风速与火灾负荷和楼梯口宽度成正比,与楼梯口处挡烟垂壁高度成反比。阎丽萍和施明恒^[5]采用 CFD 方法,对采用不同楼梯结构的站台层烟气扩散进行数值模拟,比较楼梯结构对防排烟模式的影响。结果表明:挡烟垂壁和楼梯口向下气流使得火灾时防烟分区效果较为明显,对烟气在整个站台层内的扩散起到了很好的阻碍作用。针对增加楼梯口处风速的措施,罗艳萍等^[6]提出综合利用车站所安装的风机设备协助排烟的策略,不同排烟模式下烟雾弹对比试验表明采用系统综合协助排烟模式较仅靠车站公共区通风空调系统排烟,所需排烟时间短,可有效控制烟气蔓延。

根据有关试验证明,烟气沿楼梯、竖向管井的垂直扩散速度为 3~4 m/s^[7],防止烟气向上蔓延的理论风速比规范要求的 1.5 m/s 高,文献^[8]指出当车站站台着火时,站厅流向站台的气流速度应大于 3 m/s^[8]。过强的气流是否会造成烟气分层的破坏需要研究论证,同时由于烟气运动的复杂性,楼梯口结构、形式、建筑几何尺寸对烟气的蔓延都有一定影响,从而楼梯口所需的向下气流速度有差异。本文主要通过现场实测,分析影响楼梯口风速的因素,采用 FDS^[9-11]火灾模拟软件,研究不同楼梯口风速下的烟气运动规律,确定地铁车站站台层发生火灾时合理的防排烟系统运行模式。

1 楼梯口风速现场测试

1.1 试验设计

楼梯口风速一方面与参与运行的风机容量有关,另一方面与屏蔽门开启和防排烟系统运行模式有关。出于正常通风,事故/火灾通风等功能的需要,地铁车站设置通风及排烟系统,以上海轨道交通一号线某车站为例,主要设备参数如表 1 所示。

表 1 车站防排烟系统主要设备参数表

	组合式空调箱	回排风机	区间事故风机	隧道排热风机
风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	22.5	20	60	40
数量	2	2	4	2

地铁车站站台公共区发生火灾时,站台排烟,站厅送风,可选择的运行方式如表 2 所示:

表 2 车站防排烟系统运行模式

运行模式	组合式空调箱	回排风机	隧道排热风机	区间隧道风机	屏蔽门	风机送风理论总量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	风机排风理论总量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
模式 1	开	开	关	关	关	45	40
模式 2	开	开	开	关	开	45	120
模式 3	开	开	开	开	开	45	360

其中,模式 1 是设计模式,模式 2、模式 3 是可采取的增大排烟量的运行模式。很明显运行模式的不同将影响到站厅到站台楼梯口风速的大小。试验在表 2 中的 3 种模式下,采用 SQF 多点数字热线风速仪每 10 s 记录 1 次站厅至站台向下气流风速值,测点布置如图 1 所示。

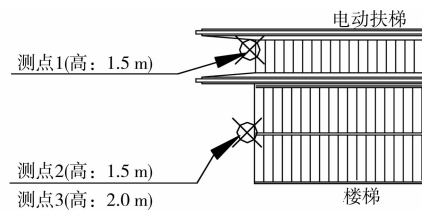


图 1 风速测点平面布置图

1.2 试验结果

模式 1、模式 2 顺序运行,楼梯口风速测量结果如图 2 所示。首先运行模式 1,只开启公共区相关设备,站厅至站台楼梯口处平均风速 0.25 m/s,加开站台隧道上排热风机,站厅至站台楼梯口处平均风速达到 0.73 m/s。模式 1、2 只开启了站台一端的相关设备,开启两端设备风速理论上是图中值的 2 倍。因此站台公共区着火,只开启站台排风和站厅送风无法满足地铁规范要求的不小于 1.5 m/s 风速的要求,开启站台上排热风机可以使风速增加,接近规范要求值。

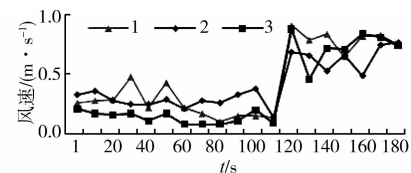


图 2 模式 1、模式 2 楼梯口风速测量值

图 3 是运行模式 3 的测量结果,车站两端设备均运行。从风机启动开始记录风速值,风机启动 50 s 后风速增加到稳定值,站厅至站台风速的稳定平均值为 1.76 m/s。1 点即楼梯边缘测点的风速低于楼梯中心测点 2、3 中的较大值。模式 3 风速最大值 2.5 m/s,满足规范要求。

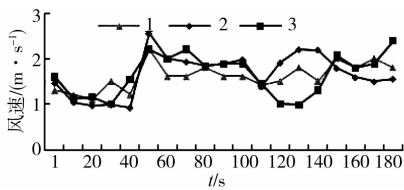


图3 模式3楼梯口风速测量值

1.3 实测值不等于设计值的原因分析

运行模式1,风速不能达到设计要求。主要原因有:设计条件与实际存在差异^[12],设计中主要是用楼扶梯开口面积的总和去除站台层的排烟量进行校核,但各楼梯开口面积不一致,因此风速不一致;车站两端由于管道特性的问题,可造成风量分配不均匀,进而造成楼扶梯口气流分布不均匀,小的一端可能造成风速低于规范值;屏蔽门的泄漏量不容忽视;地铁车站空间结构复杂,地铁出入口、活塞风井等的影响并未在设计中考虑。

因此,针对本测试车站,目前通常的单参数设计方法,不能保证在实际工程中达到规范要求值,必要时对设计系统进行数值模拟,可一定程度上反映站内流场情况。

2 数值模型建立

2.1 FDS模型介绍

FDS是模拟火灾湍流流动过程的三维计算流体力学软件。采用大涡模拟(LES)数值方法求解受火灾浮力驱动的低马赫数流动的N-S方程,重点计算火灾中的烟气和热传递过程,燃烧模型采用混合百分比模型^[9]。

2.2 几何模型

根据测试车站及目前地铁站现状,模型计算几何尺寸确定为180 m×20 m×10 m,共有3个出入口,车站分站台、站厅2层,岛式站台。站台通往站厅的楼梯共4个,沿长度方向依次编号,楼梯口尺寸3.2 m×4.4 m。原点设在站台平面中心处。模型及坐标系统如图4所示。

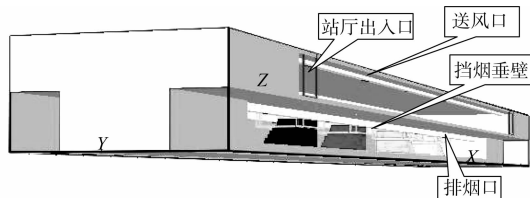


图4 车站几何模型图

2.3 边界条件及参数设置

2.3.1 边界条件 站厅层出入口、隧道口取压力出口边界条件,初始为1个大气压,车站初始温度25℃。

2.3.2 火源参数 站台区域火灾固定荷载包括装

饰材料、顶棚可燃材料等;动荷载包括人员携带的行李等,由于站台一般有候车人员,发生着火现象会较快发现,电气火灾在一定条件下的快速蔓延和人为纵火形成的高强度火源。而随着人们对火灾防范的重视,日常维护管理的提高,电气火灾发生的几率可以随之降低,人为纵火成为相对不容易防范危险源。本文研究将火灾场景设置为由于人为纵火泼洒汽油造成火灾。史聪灵等对泼洒燃料总量为5 kg汽油的故意纵火的火灾功率等进行分析结果为^[13]:汽油密度0.722 kg/L,5 kg汽油体积大约为6.9 L,假设汽油瞬间全部倒出,其在地面上的浸铺厚度为3 mm,地板浸铺直径为1.7 m,火灾形成的稳定热释放速率大约为1.4 MW。其他相关文献^[4,14-15]认为车站公共区火灾规模不超过2 MW。

数值模拟稳定热释放率参数取2 MW。结合FDS软件燃烧模型设置特点^[9],火源区域为2 m×1.5 m,单位面积热释放速率为667 kW/m²。

2.3.3 排烟系统参数 排烟系统以中轴线x轴划分为2个独立系统,单个系统送/排风管以y轴为对称轴分为2支,单根风管布置24个风口。模拟时考虑到管道水力特性等因素引起的送/排风不均匀性及节省计算存储量,将单根风管上风口抽象为3个风口,风口风速及尺寸如表3所示。系统运行模式如表2中所示,其中由于目前车站是否安装屏蔽门并不统一,同时为清晰对比3种模式排烟效果,车站模型选择为无屏蔽门形式。

表3 风口风速表

风机	单风口尺寸/ (m×m)	风口1/ (m·s ⁻¹)	风口2/ (m·s ⁻¹)	风口3/ (m·s ⁻¹)	总风量/ (m ³ ·s ⁻¹)
站厅送风	2.5×0.5	3.2	3	2.8	45
站台排风	2.5×0.5	2.9	2.7	2.6	41
隧道上排风	2.5×0.5	5.6	5.4	5.2	81
事故风机排风	5×5	2.4			240

3 计算结果及分析

3.1 站内风速分布

分别对站内发生火灾和正常情况进数值计算,无火源楼梯口风速随时间的变化情况如图5所示。3种模式下楼梯口风速与1.2节实测结果比较,总体变化趋势吻合,实测风速平均值与相应数值计算得到的风速值对比结果如表4所示,二者偏差在25%范围内,因此,采用FDS在上述设定条件下可以较好的反映车站气流场的真实情况。有火源楼梯口风速随时间的变化情况如图6所示。从图5、图6可以得出如下结论:

1)同种运行模式下有无火源的风速对比可得出,3种运行模式下,有火源时的风速均大于无火源的风速。这是由于火灾形成的热羽流对周围空气的

卷吸作用,以及站内温度、压力等参数变化的综合作用,使站内流场发生复杂变化,楼梯口风速也随之改变,而常规设计采用楼梯开口面积的总和去除站台的排烟量进行校核计算,没有考虑火源对站内流场的影响,因此需要进一步改进。

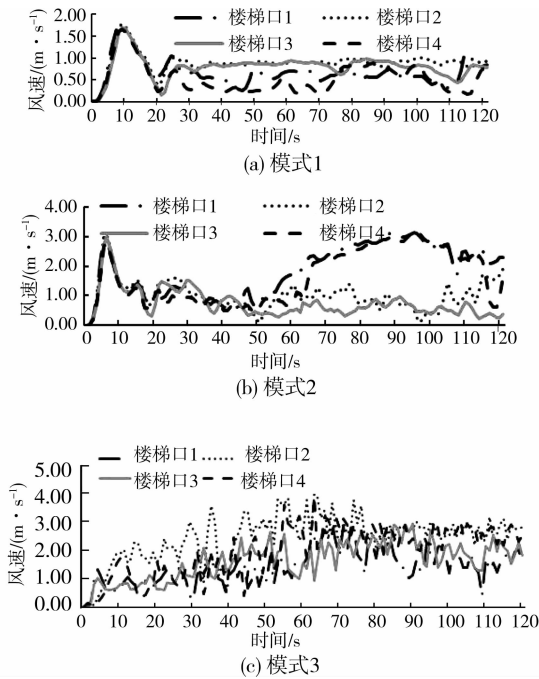


图 5 无火源楼梯口速度分布图

表 4 实测风速值与模拟值对比表

	测量值/($m \cdot s^{-1}$)	模拟值/($m \cdot s^{-1}$)	偏差/%
模式 1	0.50	0.58	16
模式 2	1.46	1.69	15
模式 3	1.76	2.12	21

2)同一种运行模式下,车站内不同位置的楼梯口风速存在差异。这主要是受火源距离,楼梯口与防排烟风口距离、车站出入口位置等影响。从图 4 可以看出在有火源的 3 种运行模式下,近火源楼梯口的风速小于远离火源楼梯口风速。有火源 3 种模式各楼梯口风速差别明显;无火源时排风强度最大的模式 3,各楼梯口风速差异减小。这可能是由于模式 3 下各楼梯口风速差值占风速绝对值比例较小造成的。

3)模式 3 楼梯口风速变化幅度最大,不均性最差。有火源时运行模式 2,近火源楼梯口风速较低,其他 3 个楼梯口风速较一致。

4)3 种运行模式下楼梯口风速总体趋势符合理论状态,风速从大到小依次为模式 3、模式 2、模式 1。

因此,从风速大小角度讲,第 3 种模式最优。从均匀性比较,第 2 种模式较好。楼梯口风速是多因

素共同作用的产物,受到火源大小,楼梯口位置,站内防排烟系统布置性能等影响,对于楼梯口风速的校核不能单纯从无火源状态下的风速进行评价,而应当考虑到真实的火灾场景影响。

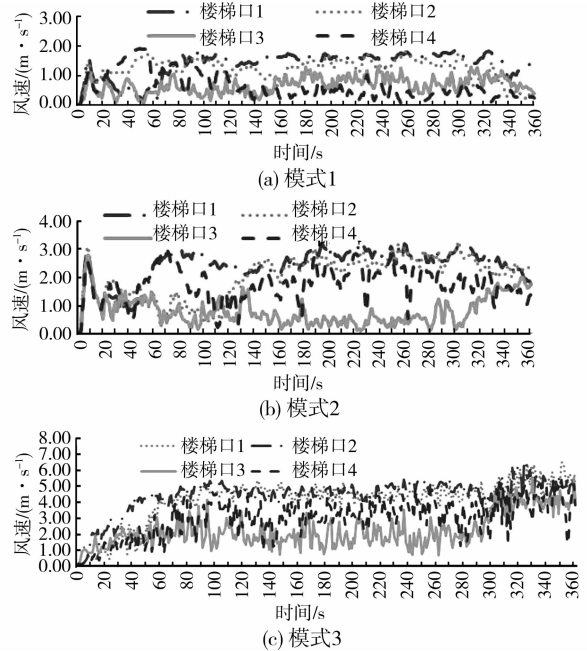


图 6 有火源楼梯口速度分布图

3.2 站内烟气流动

地铁车站中央纵断面($y=0$),火灾初期 $t=100$ s 和结束阶段 $t=295$ s 时的烟气分布如图 7、图 8 所示。

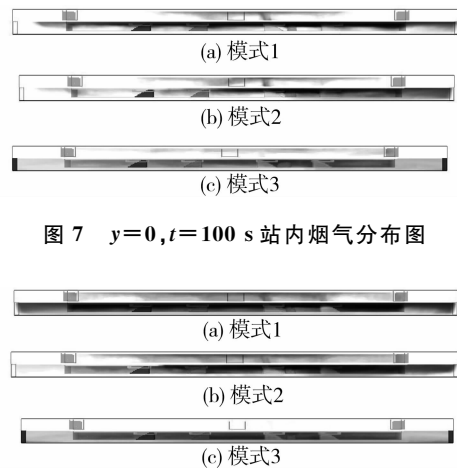


图 7 $y=0, t=100$ s 站内烟气分布图

图 8 $y=0, t=295$ s 站内烟气分布图

由图 7 可以看出火灾初期,在 3 种运行模式下均存在烟气通过火源近处楼梯向站厅扩散的情况。这是由于火灾初期,烟气蔓延已达到一定速度,但是楼梯口还未产生足够向下气流。由现场实测也可以看到风机 50 s 后才达到运行稳定,再考虑到发生火灾的响应时间等因素,发生在站台楼梯口附近的火

灾烟气存在向站厅蔓延的可能性。3种运行模式比较,由于模式3楼梯口风速大,抑制烟气向站厅蔓延的效果最好,模式1最差。因此增大楼梯口风速能阻止烟气向站厅蔓延。

由图7和图8对比发现,运行模式1,火灾初期烟气层界面较明显,且未沉降到人活动区域,利于人员疏散。但是如果火没有被及时扑灭,烟气蔓延至车站端部回流并不断聚集,则排烟容量小将对人员疏散造成威胁;模式3站内烟气分布空间更广,隧道内排烟量大,使站内烟气扩散度大,但站厅层烟气少。由图7可以看到,火还没熄灭,站厅层已经没有烟气,这一方面是因为站台排烟量大,另一方面楼梯口的风速也有效地抑制了烟气向站厅层蔓延。

模式2、模式3由于增开隧道内风机能使站内烟气更快被排除,但同时也形成了对烟气分层的破坏。

4 结 论

现场测试发现站厅至站台楼梯口风速不能满足设计要求。针对此问题分析了楼梯口风速的影响因素,建立模型,模拟研究不同风速下站内烟气的排除情况。结果表明通过采用增开隧道风机,可以实现设计要求。从而为以后的设计提供可行建议。

增大地铁站站厅至站台楼梯口风速可以起到控制地铁站台火灾烟气向站厅蔓延的作用。但单纯为增大楼梯口风速,而采取模式2、模式3,有可能破坏站内烟气分层,干扰烟气流动,同时室外新风的增加可能使燃烧更剧烈。因此在防排烟工程中对火灾烟气的组织,比单纯的数量指标更重要。

考虑影响楼梯口风速的各种因素,在设计阶段可对计算所确定的防排烟系统通过数值模拟进行进一步校核,降低在地铁站这种复杂结构中采用单参数设计的不合理性。

参考文献:

- [1] GB 50157—2003 地铁设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [2] GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2005.
- [3] GB50016—2006 建筑设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2006.
- [4] 顾正洪,程远平,倪照鹏. 地铁车站火灾时事故通风量的研究[J]. 消防科学与技术,2005,24(3):298-300.
GU ZHENG-HONG, CHENG YUAN-PING, NI ZHAO-PENG. Study on ventilation volume in subway station fire[J]. Fire Science and Technology,2005, 24(3): 298-300.
- [5] 阎丽萍,施明恒. 地铁站台层楼梯结构对不同排烟模式下排烟效率的影响研究[J]. 建筑科学,2009,25(11):

126-131.

YAN LI-PING, SHI MING-HENG. Research on smoke exhausting efficiency in different smoke control model of different stair structures in subway station fire [J]. Building Science, 2009, 25(11): 126-131.

- [6] 罗燕萍,王迪军,李梅玲. 地铁车站防排烟系统[J]. 制冷空调与电力机械,2004,(03):41-44.
LUO YAN-PING, WANG DI-JUN, LI MEI-LING. Smoke exhaust system of underground rail station [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery,2004,25(3): 41-44.
- [7] 钱以明. 高层建筑空调与节能[M]. 上海:同济大学出版社,1990.
- [8] 张庆贺,朱合华,庄容,等. 地铁与轻轨[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2006.
- [9] National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland. Fire dynamics simulator, technical reference guide(5th ed). NIST Special Publication 1018-5(Four volume set) [S], Gaithersburg:NZST, 2007.
- [10] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, FLOYD J. Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide [S]. NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2007.
- [11] Forney G P. Smokeview (Version 5), A tool for visualizing fire dynamics simulation data, Volume: user's guide NIST Special Publication 1017-1 [S]. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [12] 孙路. 带屏蔽门的地铁站通风兼排烟系统问题探讨[J]. 铁道标准设计,2006(7):95-96
SUN LU. Exploration for the ventilation and smoke-releasing system in subway terminals with shielding door [J]. Railway Standard Design, 2006(7): 95-96
- [13] 史聪灵,钟茂华,罗燕萍,等. 地铁车厢汽油火灾的模拟计算与分析[J]. 中国安全科学学报. 2006,16(10):32-36.
SHI CONG-LING, ZHONG MAO-HUA, LUO YAN-PING, et al. Simulating calculation and analysis of gasoline arson fires in metro compartment [J]. China Safety Science Journal, 2006,16(10):32-36.
- [14] 钟委,霍然,王浩波. 地铁火灾场景设计的初步研究[J]. 安全与环境学报,2006,6(3):32-34.
ZHONG WEI, HUO RAN, WANG HAO BO. Preliminary study on fire scenario's design of subway fires [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(3):32-34.
- [15] 胡维颀. 地铁车站火灾工况气流组织研究[J]. 地下工程与隧道,2008,(1):43-45.
HU WEI-XIE. A study on air flow organization under fire scenario in metro station [J]. Underground Engineering and Tunnels,2008,(1):43-45.