

地铁站台火灾烟气扩散模拟与分析*

陈柯成, 谢嘉斌, 姚清河
(中山大学航空航天大学, 广东 广州 510006)

摘要: 为探讨地铁站火灾烟气的扩散规律, 使用火灾动力学模拟软件 (FDS) 对广州大学城北站地铁站台进行了火灾烟气扩散规律研究。根据地铁站内的实测温度、风速等数据确定了数值模拟所需的边界条件, 运用湍流大涡模拟方法和信息传递接口 (MPI) 对地铁站台进行了实景模拟。结果表明: 当站台中央发生火灾时, 左侧烟气浓度比右侧高约 133%, 一氧化碳浓度比右侧高约 75%, 温度比右侧高约 41%; 相比之下, 站台右侧更适合人员逃生。

关键词: 站台火灾; 数值模拟; 逃生策略; 烟气扩散

中图分类号: TU98 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2019) 02-0015-08

CFD simulation and analysis of smoke dispersion in a subway fire

CHEN Kecheng, XIE Jiabin, YAO Qinghe

(School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To investigate the flow regularity of smoke in the subway station, Fire Dynamics Simulator is used to study the fire smoke spread in the Higher Education Mega Center North Station. The boundary conditions required for numerical simulation are determined based on the measured temperature and air velocity in the subway station. Large Eddy Simulation (LES) and Massive Passage Interface (MPI) are used to do realistic view simulation of the subway platform. As the result shows, when a fire breaks out in the middle of the platform, smoke concentration, CO concentration and temperature on the left part of the platform are about 133 percent, 75 percent and 41 percent respectively higher than those on the right part. Therefore, the right part of the platform is more secure for personnel evacuation.

Key words: subway platform fire; numerical simulation; evacuation strategy; smoke spread

随着计算流体力学 CFD (computational fluid dynamics) 技术的迅速发展, 许多工程领域以其作为评估与优化设计的手段。在隧道、地下铁路的通风工程中, CFD 就有许多卓有成效的应用实例^[1]。关于地铁站台火灾烟气扩散的研究, 国内外已经取得一系列的成果。在数值模拟研究方面, 李意^[2]采用火灾动力学模拟软件 FDS (fire dynamics simu-

lator) 对一般岛式地铁车站进行火灾模拟; 陈绍宽等^[3]使用 Pyrosim 仿真软件构建地铁车站站台火灾仿真模型, 分析了车站内火灾烟气的扩散规律; WANG Binbin^[4]分别运用 FLUENT 和 FDS 建立模型, 研究了天津下瓦房地铁站台的火灾烟气蔓延; Longhua HU 等^[5]利用 FDS 研究了都市峡谷模型的火灾烟气扩散, 确定了临界回流风速、放热率、峡

* 收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 大学生创新训练计划项目 (201701076); NSFC-广东联合基金 (第三期, NSFC2015_582) 超级计算科学应用研究

作者简介: 陈柯成 (1997 年生), 男; 研究方向: 计算流体力学; E-mail: chenkeh5@mail2.sysu.edu.cn

谢嘉斌 (1996 年生), 男; 研究方向: 计算流体力学; E-mail: xiejb6@mail2.sysu.edu.cn

(以上两位作者并列第一作者)

通信作者: 姚清河 (1980 年生), 男; 研究方向: 计算流体力学; E-mail: yaoqhe@mail.sysu.edu.cn

谷高度及纵横比的全局无量纲关系。在实验研究方面,纪杰^[6]通过小尺寸地铁模型,研究了站台端部与中部起火时不同位置的排烟口开启造成的卷吸效应对机械排烟效果的影响;王太晟等^[7]搭建地铁站台缩尺模型试验台,测出了烟气在典型位置处的流速分布与变化;Giachetti等^[8]利用基于 Froude 数相似的小尺寸模型,对地铁车站烟气蔓延进行了研究。在屏蔽门对站台烟气扩散的影响方面, Jae Seong Roh 等^[9]利用 FDS 模拟地铁列车火灾烟气在站台的扩散过程,以及疏散时屏蔽门与检票口对乘客生命安全的影响;李建等^[10]研究了火灾时 4 种屏蔽门开启模式下地下岛式站台的排烟效果;丁伟等^[11]针对某地铁站台,模拟分析了不同端门开闭模式下的特征参数,并对屏蔽门火灾模式进行了验证;何开远等^[12]采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对设有屏蔽门系统的岛侧混合地铁站台的不同火灾场景进行了研究。在通风系统的影响方面,史聪灵等^[13]利用数值模拟分析了地铁深埋岛式站台火灾,探讨了站点内有效的气流组织形式;Na Luo 等^[14]在比例为 1:50 的地铁车站实体模型上进行了实验,并用 FDS 进行了等比例模型的数值模拟,研究了不同的通风方式对火灾烟气的影响;Won-Hee Park 等^[15]利用 FDS 对地铁站机械排烟情况下的烟气蔓延过程进行了模拟,并判定了最佳的机械排烟方案;Dong-Ho Rie 等^[16]利用 FDS 进行数值模拟,并结合比例模型实验,得出了最佳的火灾应急排烟方式;徐硕等^[17]选用北方某地区岛式地铁站台,讨论了在站台一端起火的情况下自然排烟、机械排烟、排烟加送风时的人员安全。

地铁站台内的流场分布因地铁站的形式不同差异较大^[18-19]。且,当前国内外地铁站台的火灾烟

气扩散研究仍存在以下不足:首先,对侧式地铁站台的相关研究较少;其次,只有少数研究利用实测数据对比并校正仿真模型,验证模型的可靠性。本文所选地铁站是广州地铁 4 号线的一座地铁站,位于广州大学城综合商业北区,学生群体为主要乘客,因经验不足以及烟气对人员疏散心理的特殊影响^[20],其逃生策略的制定有其必要性和针对性^[21]。同时,2016 年广州地铁 4 号线日均客流量高达 32.02 万人次^[22]。在客流量如此大的地铁站内,若缺乏科学有效的应急措施,一旦突发火灾,站内人员的生命财产安全将受到极大的威胁,因此该地铁站的火灾安全问题应当受到社会的高度重视。

1 研究方法

1.1 研究流程

研究对象为大学城北站地铁站中通往金洲方向的站台,命名为站台 A。地铁站内分为站台层和站厅层,每个站台有两组扶梯与站厅层连通,竖直电梯贯穿站台层与站厅层。如图 1 所示,地铁站的总高为 9.85 m,长为 87.6 m,宽为 24.2 m。站台 A 的通风系统如图 2 所示,站台 B 的通风系统与之相同,站厅通风系统如图 3 所示。文中设定,0-60 s 通风系统为正常通风工况,即站厅、站台的通风口均为送风模式,对未发生火灾时的流场进行模拟;60 s 时,火源出现并增长;120 s 时通风系统转换为火灾工况,即站厅的通风口送风量增大,站台的通风口转换为机械排风模式,同时开启机械排风口,持续到仿真结束。此外,地铁站台与隧道之间设置了全高屏蔽门。发生火灾之后,屏蔽门关闭密实,地铁车辆不停留于此站台。

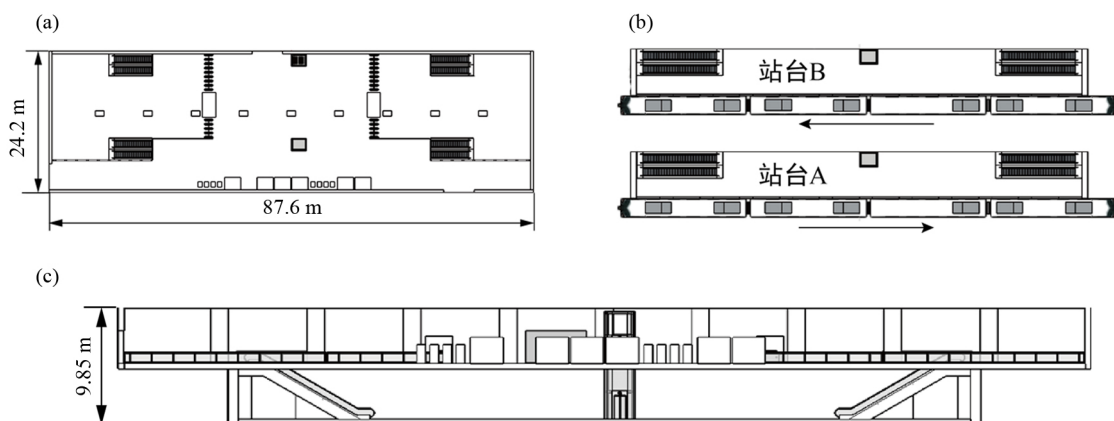


图 1 地铁站布局

Fig. 1 Layout of the station

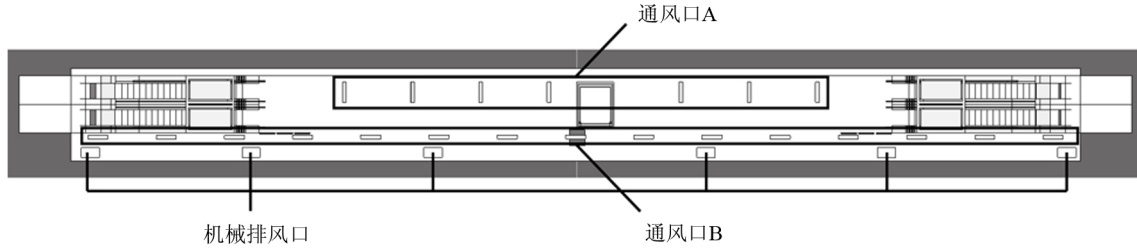


图 2 站台通风系统

Fig. 2 Ventilation systems in the platform

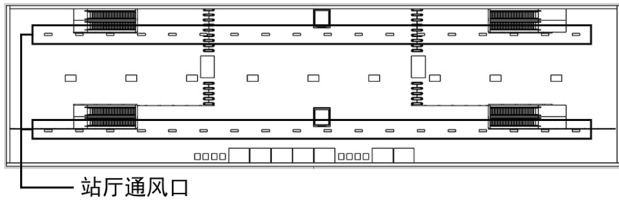


图 3 站厅通风系统

Fig. 3 Ventilation systems in the hall

1.2 数值模型

本文使用火灾动力学模拟软件 (FDS), 软件建立于大涡模拟理论之上, 基于有限体积法, 设定了流体模型、燃烧模型和辐射模型^[23]。与基于 $k-\epsilon$ 模型的湍流统计平均模拟相比, 大涡模拟具有精度高、可反映瞬态湍流特性等优点^[24]。其基本思想是, 将湍流瞬时运动通过一种滤波方法分成大尺度运动和小尺度运动, 大尺度方程由微分方程直接求解, 小尺度模型的影响通过次网格模型模拟^[25]。有限体积法兼顾了有限单元法和有限差分法的优点, 其基本思路为: 将计算区域分成一系列不重复的控制体积, 使得任一网格点周围存在一个控制体积, 将微分方程对每一控制体积积分, 然后对积分式离散化处理, 导出离散化方程^[26]。在本研究中, FDS 仿真程序通过 MPI 在 Linux 集群上运行。该集群由 16 个节点组成, 每个节点有 2 个四核处理器。基于 Linux 环境下的 MPI 并行计算有准确、可靠、高效的优点^[27]。

根据实际测量的地铁站尺寸, 使用 AutoCAD 绘制地铁站的二维平面图, 在此基础上使用 SketchUP 建立地铁站的三维模型。划分所使用的网格单元类型为平行六面体单元。整个地铁站被划分为站厅层、站台 A (金洲方向)、站台 B (黄村方向) 三个区域。由于主要研究对象为站台 A, 故此处的网格分辨率高于其他两处。

在运算过程中, 增加网格数和节点数, 每次迭代所需时间增加, 总运算时间增加, 计算精度也随

之提高。在综合比较计算精度、计算时间、设备要求等因素之后, 本文采用网格总数为 2 214 096, 具体网格划分如表 1 和图 4 所示。

表 1 网格划分详情

Table 1 Mesh information

区域	网格数
站厅	747 600
站台 A	1 286 400
站台 B	180 096
总计	2 214 096

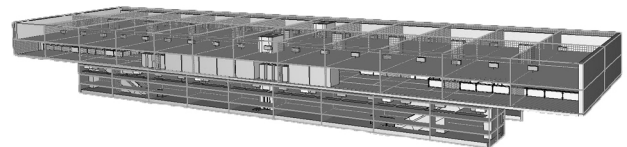


图 4 网格划分示意

Fig. 4 Mesh generation schematic

火源的燃烧材料设定为尼龙。火源单位面积的热释放速率为 $1\ 500\ \text{kW}/\text{m}^2$, 面积大小为 $1\ \text{m}^2$ 。在初始增长阶段为 t^2 快速增长火, 满足: $Q = at^2$, a 为火源增长系数。在起火 150 s 后, 火源的热释放速率即达到设定值 ($1\ 500\ \text{kW}$), 此后一直维持不变直到仿真结束。根据地铁站的客观情况, 设定火源的位置为站台的正中央, 正常通风情况下, 在该位置产生的烟气更容易扩散到整个站台^[28]。

1.3 边界设定

由于缺少地铁站内空调通风系统的工况数据, 本文采用试设与修正的方法来确定模拟所需的边界条件和通风工况。环境温度为 $26\ ^\circ\text{C}$, 站厅层的送风温度为 $25\ ^\circ\text{C}$, 站台层的送风温度为 $24\ ^\circ\text{C}$ 。所有地铁站内的固体即墙壁等表面设定为光滑并绝热。气压压强大小维持在一个大气压不变。通风系统风

速设定如表 2 所示。

2 结果分析

仿真总时间设定为 360 s。初始时间步长的大小由参数 DT 指定。该参数一般自动设置为网格单元格的尺寸除以流体的特征速度。DT 的默认值为

$$\frac{5(\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{gH}} \quad (1)$$

表 2 不同场景下通风系统风速设定¹⁾

Table 2 Velocity setting of vents in different scenes

场景	站厅通风口	站台 A		
		通风口 A	通风口 B	机械排风口
正常	+ 0.8 m/s	+ 2 m/s	+ 0.8 m/s	/
火灾	+ 3.2 m/s	- 5.6 m/s	- 5.6 m/s	- 5.6 m/s

1) “+”表示送风，“-”表示排风。

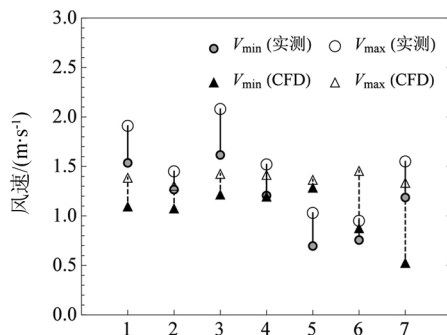


图 5 通风口 A 实测与 CFD 模拟风速对比

Fig. 5 Comparison of vent A's velocities based on measurement and CFD simulation

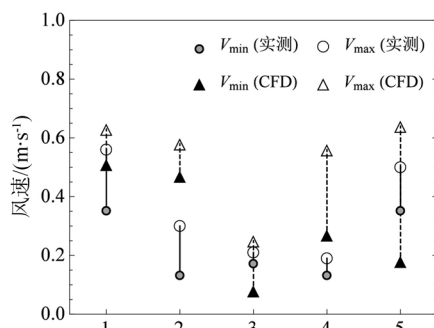


图 6 通风口 B 实测与 CFD 模拟风速对比

Fig. 6 Comparison of vent B's velocities based on measurement and CFD simulation

这里, δx 、 δy 、 δz 都是最小网格单元格的尺寸, H 是计算域的高度, g 是重力加速度。

2.1 模型验证与并行扩展性分析

对地铁站正常通风状态下的流场进行 CFD 模拟, 并与实测的风速、温度数据进行比较, 如图 5-7 所示。在图中可以看出, 仿真模拟与实际测量的数据图像总趋势一致, 但仍存在一定的差异。这些差异主要源于测量仪器的误差和人流的影响。

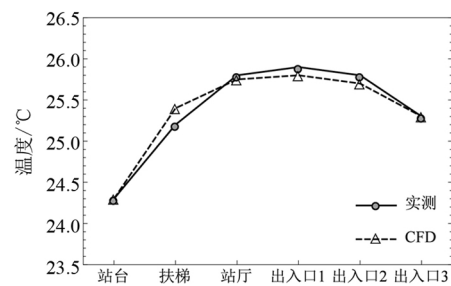


图 7 站内实测与 CFD 模拟温度对比

Fig. 7 Comparison of measured temperature and CFD simulated temperature

强扩展性分析如图 8 所示, 我们可以从中看出总计算用时和主要子程序用时随 MPI 进程数的变化规律。在理想情况下, CPU 时间应该与进程数成反比。也就是说, 图中的相对执行时间的变化应与黑虚线一致, 但实际上存在或多或少的偏离。其中, 代表通信开销的曲线趋势存在明显的不一致。必须指出的是, 因为实际情况下与理想情况下的加速比曲线并不能很好地拟合 (如 9 所示), 本文在 FDS 的并行加速优化上仍有提升的空间。

2.2 模拟计算结果分析

2.2.1 烟气场 如图 10 所示, 未起火时, 站台内可见度高, 无烟气分布。起火后, 烟气迅速从火源处向竖直方向发散, 当烟气到达站台内侧天棚后, 开始沿天棚水平方向扩散, 当触碰到墙壁, 烟气开始积累, 形成烟气层, 并逐渐下降, 站台左侧区域烟气层低, 几乎不可见, 右侧相比左侧可见度更

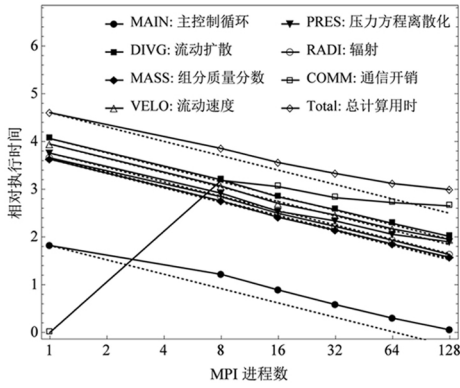


图 8 强扩展性分析
Fig. 8 scalability analysis

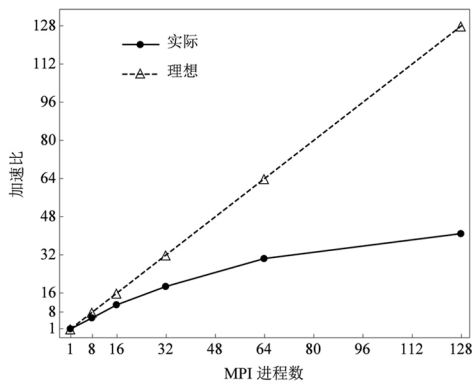


图 9 加速比
Fig. 9 Speedup of parallel program

高。根据火灾仿真结果, 得到表 3 所示数据。

表 3 站台两侧计算结果

Table 3 Simulation results on both sides of the platform

	烟气浓度	CO 浓度	温度
	kg/kg × 10 ⁻⁴	kg/kg × 10 ⁻⁴	℃
左侧站台	1.75	0.70	57.6
右侧站台	0.75	0.40	40.8

2.2.2 速度场 如图 11 所示, 在 0-60 s 内, 站台正常通风, 站台内风速较为平均, 通风口下方与扶梯口上半部分的风速稍高。起火后, 站台天棚处的风速最先发生明显变化。在 180 s 时, 站台内平均风速大小接近最高状态, 此后站台内风速分布

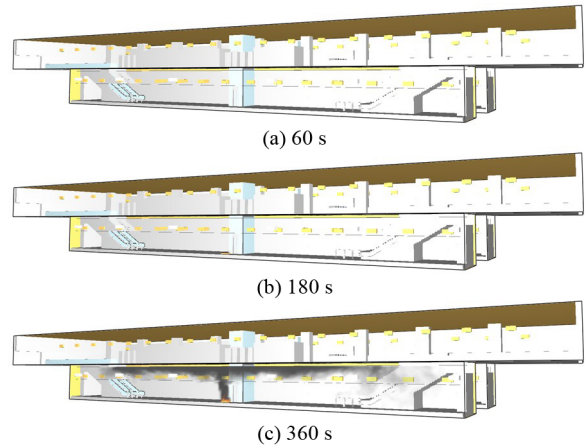


图 10 不同时刻的烟气蔓延
Fig. 10 Smoke distribution

无明显变化。左右站台的速度场分布大致对称, 站厅层受影响不大, 层内风速没有较大改变, 且风速改变主要集中于扶梯口的附近区域。如图 12 所示, 由于机械排风系统的启动, 站台内形成负压, 使得扶梯处气流由站厅流向站台, 流速均在 1.5 m/s 以上, 符合现行地铁设计规范要求^[20]。

2.2.3 温度场 如图 13 所示, 在 0-60 s 内, 站台内温度未发生明显变化。起火后, 温度的明显变化出现在站台的内侧天棚附近。在 180 s 时, 总体温度变化程度较之前加大, 且变化区域沿天棚水平方向扩大。240 s 后, 站台内的温度分布未有明显变化。达到危险温度的区域局限于起火点附近及其上方天花板。站台左侧温度相对右侧更高, 但仍在危险温度以下, 可以逃生。站厅层的温度几乎没有受到影响。

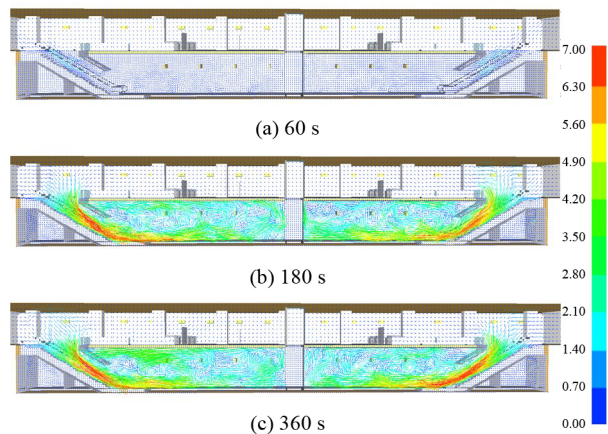


图 11 不同时刻的速度场
Fig. 11 Velocity fields at different times

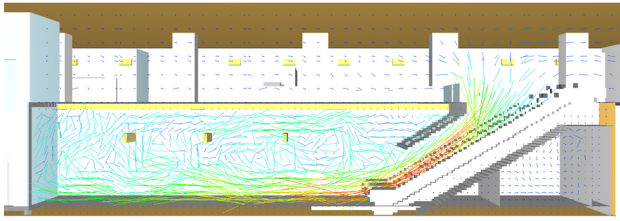


图 12 扶梯处速度场 (360 s)

Fig. 12 Velocity distribution at the escalator (360 s)

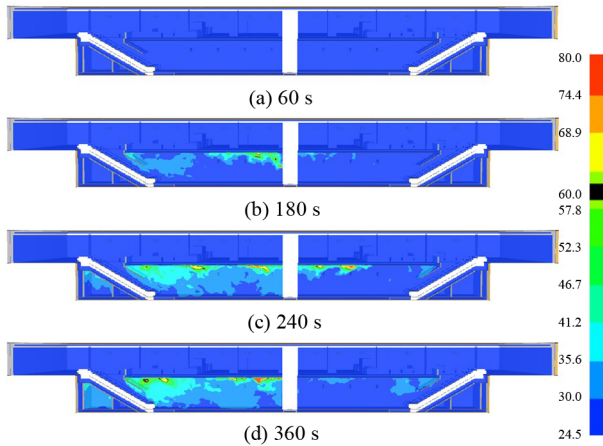


图 13 不同时刻的温度场

Fig. 13 Temperature fields at different times

2.2.4 CO 浓度场 如图 14 所示, 在 0 - 60 s 内, 站台内的空气组成及浓度都未发生改变。起火后, 站台上内侧天棚附近 CO 浓度增加迅速。在 180 s 时, CO 浓度较之前显然加大, 且 CO 沿天棚水平方向扩散。在 240 s 时, 站台内的 CO 浓度达到接近最高水平, 此后 CO 浓度虽然有所减少, 但仍维持较高水平。站台左侧相对右侧浓度高, 但仍在安全范围内, 可以逃生。而在站厅层的气体组成几乎未受影响。

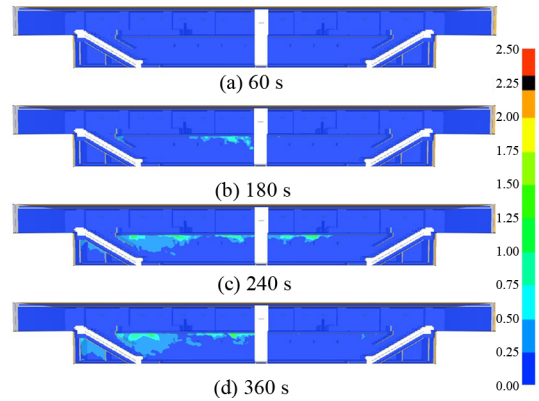


图 14 不同时刻的 CO 浓度场

Fig. 14 CO concentration fields at different times

3 结 论

经过实测数据验证, 我们证明了 CFD 模型的有效性和合理性。在火灾过程中, 烟气上升至天棚并沿着天棚扩散, 当烟气与墙壁相接触碰撞时, 发生回流现象。站台内的机械排烟导致站台形成负压区, 从而形成由站厅流向站台的新风气流, 阻止烟气扩散至站厅, 并促进烟气回流。站台左右两侧的 CO 浓度、温度均有较大差别, 主要是因为竖直电梯并不在地铁站的中心位置, 而是偏向右侧, 导致在竖直电梯附近, 右侧流速大于左侧, 一定程度上阻止了高温气体和烟气向右扩散。

在发生火灾之后, 随着时间的增长, 站台环境不适于人们停留, 须尽快逃离。随着高度的增加, 烟气的浓度随之增加, 与此同时, 能见度逐渐减小, 人们安全逃生的可能性降低。高浓度的 CO 主要集中于站台的上层空间, 距离火源较远区域的 CO 浓度对于人们逃生来说是安全的。左侧烟气浓度比右侧高约 133%, 一氧化碳浓度比右侧高约 75%, 温度比右侧高约 41%, 可得出站台右侧更适于逃生, 选择左侧逃生存在风险。建议设置其他的备用逃生通道。

参考文献:

- [1] WU Y, BAKAR M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity [J]. *Fire Safety Journal*, 2000, 35(4): 363–390.
- [2] 李意. 地铁车站站台火灾性能指标的数值模拟与分析 [J]. *交通与运输 (学术版)*, 2015(2): 126–129.
- [3] 陈绍宽, 狄月, 史荣丹, 等. 地铁车站站台火灾影响分析与人员疏散研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017(1): 241–248.
- LI Y. Numerical simulation and analysis of the subway station platform fire performance [J]. *Traffic & Transportation*, 2015(2): 126–129.

- CHEN S K , DI Y , SHI R D , et al. Simulation and analysis on impacts and evacuation during the process of fire on metro platforms [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* , 2017(1) : 241 - 248.
- [4] BINBIN W. Comparative research on FLUENT and FDS' s numerical simulation of smoke spread in subway platform fire [J]. *Procedia Engineering* , 2011 , 26: 1065 - 1075.
- [5] HU L , ZHANG X , ZHU W , et al. A global relation of fire smoke re-circulation behaviour in urban street canyons [J]. *Statyba* , 2015 , 21(4) : 459 - 469.
- [6] 纪杰. 地铁站火灾烟气流动及通风控制模式研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- JI J. Studies on smoke movement and ventilation control mode in subway station fire [D]. Hefei: University of Science and Technology of China , 2008.
- [7] 王太晟, 王雪颖, 林晓巍, 等. 地铁站台火灾烟气扩散的盐水模型试验研究 [J]. *城市轨道交通研究* , 2015(7) : 90 - 94 + 98.
- WANG T S , WANG X Y , LIN X W , et al. Test of salt-water in subway fire smoke diffusion [J]. *Urban Mass Transit* , 2015(7) : 90 - 94 + 98.
- [8] GIACHETTI B , COUTON D , PLOURDE F. Smoke spreading analyses in a subway fire scale model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research* , 2017 , 70: 233 - 239.
- [9] ROH J S , HONG S R , PARK W H , et al. CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research* , 2009 , 24(4) : 447 - 453.
- [10] 李建, 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* , 2016 , 11: 114 - 119.
- LI J , SHI C L , CHEN C K , et al. Study on switch modes of fully enclosed platform screen doors during fire in underground railway island - type platform [J]. *Journal of Safety Science and Technology* , 2016 , 11: 114 - 119.
- [11] 丁伟, 史聪灵, 钟茂华, 等. 地铁车站站台火灾时端门开启模式研究 [J]. *安全与环境学报* , 2016(3) : 75 - 79.
- DING W , SHI C L , ZHONG M H , et al. Platform screen doors (PSD) model and its implied relation to the subway station fire [J]. *Journal of Safety and Environment* , 2016(3) : 75 - 79.
- [12] 何开远, 樊洪明, 赵耀华, 等. 岛侧地铁站台火灾烟气运动的数值模拟 [J]. *工程热物理学报* , 2010(2) : 317 - 320.
- HE K Y , FAN H M , ZHAO Y H , et al. Numerical simulation on smoke flow in subway with island-platform and side-platform [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* , 2010(2) : 317 - 320.
- [13] 史聪灵, 钟茂华, 涂旭炜, 等. 深埋岛式地铁车站站台火灾时烟气蔓延数值分析 [J]. *中国安全科学学报* , 2006(3) : 17 - 22 + 148.
- SHI C L , ZHONG M H , TU X W , et al. Simulation of smoke movement and ventilation in fire at island - platform of deep buried metro station [J]. *China Safety Science Journal* , 2006(3) : 17 - 22 + 148.
- [14] LUO N , LI A , GAO R , et al. Performance of smoke elimination and confinement with modified hybrid ventilation for subway station [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research* , 2014 , 43: 140 - 147.
- [15] PARK W H , KIM D H , CHANG H C. Numerical predictions of smoke movement in a subway station under ventilation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* , 2006 , 21: 3 - 4.
- [16] RIE D H , HWANG M W , KIM S J , et al. A study of optimal vent mode for the smoke control of subway station fire [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research* , 2005 , 21(3) : 300 - 301.
- [17] 徐硕, 王娜, 于晓丹. 地铁站台一端起火时通风模式数值分析 [J]. *地下空间与工程学报* , 2016(S1) : 413 - 419.
- XU S , WANG N , YU X D. Numerical analysis of ventilation mode when one end of subway platform on fire [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* , 2016(S1) : 413 - 419.
- [18] 赵薇. 北京西站地铁站人员疏散及烟气模拟研究 [D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2011.
- ZHAO W. Study on evacuation and smoke simulation of Beijing west railway station [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business , 2011.
- [19] 卢斯佳. 广州某地铁站火灾人员安全疏散研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- LU S J. A Research on safety evacuation for a subway station in Guangzhou [D]. Guangzhou: South China University of Technology , 2016.

- [20] 北京市规划委员会. 地铁设计规范 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Municipal Bureau of Urban Planning. Code for Metro Design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [21] TIMO K, SIMO H. Fire dynamics simulator with evacuation: FDS + Evac. Technical reference and user's guide [EB/OL]. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2009 [2018 - 09 - 23]. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2009/W119.pdf>.
- [22] 广州地铁. 广州地铁企业年报 [M/OL]. 广州: 广州地铁集团有限公司, 2017 [2018 - 09 - 23]. <http://www.gzmtr.com/ygwm/gsgk/qynb/>.
Guangzhou Metro. Guangzhou metro annual report [M/OL]. Guangzhou: Guangzhou Metro Group Co. Ltd, 2017 [2018 - 09 - 23]. <http://www.gzmtr.com/ygwm/gsgk/qynb/>.
- [23] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99 - 164.
- [24] 袁书生, 张健. 地下商场内火灾烟气运动及控制的大涡模拟 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(1): 61 - 69.
YUAN S S, ZHANG J. Large eddy simulations of fire smoke flow and control in an underground shopping mall [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(1): 61 - 69.
- [25] 李炎锋, 朱滨, 孙旋, 等. 利用大涡模拟研究地铁区间火灾的烟气扩散 [J]. 北京工业大学学报, 2007, 10: 1060 - 1065.
LI Y F, ZHU B, SUN X, et al. Study of fire smoke diffusion in subway tunnel by large eddy simulation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 10: 1060 - 1065.
- [26] 王月红. 移动坐标下采空区自然发火的有限体积法模拟研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.
WANG Y H. Study on simulation of spontaneous combustion in goaf on the moving coordinate with finite volume method [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.
- [27] 李宁, 罗纪生. 基于 MPI 的不可压缩 N - S 方程并行计算方法的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(9): 8 - 10.
LI N, LUO J S. Research on parallel computing algorithm of incompressible N - S equation based on MPI [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(9): 8 - 10.
- [28] 杨昀, 曹丽英. 地铁火灾场景设计探讨 [J]. 自然灾害学报, 2006(4): 121 - 125.
YANG Y, CAO L Y. Preparatory study on scenario design for subway fire [J]. Journal of Natural Disasters, 2006(4): 121 - 125.