

地铁车站列车火灾烟气蔓延规律模拟分析*

赵兰英 曹 鸽

(商丘工学院土木工程学院, 476100, 商丘//第一作者, 讲师)

摘 要 设定列车停在站台停车范围内时列车中部车厢发生火灾,根据郑州市地铁1号线隧道及部分典型站台的建筑设计建立物理模型,采用数值模拟软件 STAR-CCM+,运用CFD(计算流体力学)场模拟的方法,采用燃烧模型的火源设置方法,在一定工况下对列车火灾进行数值模拟分析,对火灾时的烟气温度场、速度场和CO浓度场进行深入研究。研究结果可为列车在地铁车站发生火灾时的人员安全逃生提供理论依据。

关键词 地铁车站; 列车火灾; 烟气流动; 数值模拟

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.015

Simulation Analysis of the Smoke Flow Regularity in Train Fire at Metro Station

ZHAO Lanying, CAO Ge

Abstract Providing a train fire happens in the middle carriage when the train stops at the platform, a physical model is established according to the architectural design of Zhengzhou metro Line 1 tunnel and some typical platforms. Then, the CFD (computational fluid dynamics) field simulation method, software STAR CCM+, and a fire source setting of combustion model are adopted to carry out the numerical simulation of train fire under certain working conditions, the characteristics of smoke flow temperature field, velocity field and CO concentration field are studied, which may provide the theoretical background for passenger evacuation in train fire.

Key words metro station; train fire; smoke flow; numerical simulation

Author's address Civil Engineering Institute, Shangqiu College of Technology, 476100, Shangqiu, China

地铁车站人员密集,且环境较封闭。一旦发生火灾,烟气及热量难以迅速排出,因此地铁车站一旦发生火灾就会造成较大的人员伤亡及惨重的经济损失。研究表明,燃烧产生的烟气和有毒气体扩散方向同人员逃生方向一致,如烟气不能及时排

除,烟气浓度过大就会造成人员伤亡。因此地铁火灾中的烟气控制很重要^[1]。本文通过对地铁列车关键部位的火灾烟气扩散过程进行数值模拟,根据火源燃烧过程中烟气横向和竖向扩散的温度云图、烟气浓度云图及相关分布曲线,总结火源燃烧过程中烟气蔓延规律,并据此提出人员安全疏散的有效措施,为火灾中的人员安全逃生提供理论依据。

1 研究方法及火灾场景设计

1.1 研究方法

目前,地铁火灾烟气扩散规律的研究方法有数值模拟、缩尺模型试验、现场试验等。由于列车火灾和车站火灾无法进行现场试验,所以目前关于地铁列车火灾及车站火灾的研究主要以数值模拟为主。文献[2-3]对装备有屏蔽门系统的地铁车站内发生列车火灾时的烟气流动情况进行了CFD(计算流体动力学)数值模拟研究,验证了发生火灾时车站紧急通风系统对烟气流动和温度的控制能力,并讨论了屏蔽门系统在不同的火灾状况下所起的作用。文献[4-5]利用FDS软件进行模拟计算,发现混合通风模式能比传统的机械通风模式更有效地抑制火灾烟气扩散。文献[6]设计特定情况下的地铁火灾场景,利用FDS软件模拟得出了只有机械送排风和挡烟设施配合使用才可以有效地控制烟气和温度的研究结论。文献[7]基于典型换乘站,按照火灾常发生点建立物理模型,研究了在一定通风工况下换乘站烟气流动特点,并指出特定火灾下的安全逃生路径。上述研究仅将火源设置为具有一定体积的、稳定不变的热源,并未模拟出火源的具体燃烧过程。而实际的火灾燃烧会受到燃烧材料、环境温度、通风情况等诸多因素的影响,而且在火灾发展的不同阶段,其热释放率有不同的规律。这就在一定程度上限制了对火灾时烟气浓度场及不

* 河南省高等学校重点科研项目(18A410002)

利气体(如 CO 气体)浓度的研究。

本文在数值模拟过程中采用了燃烧模型的火源设置方法,深入进行火灾时的烟气温度场、速度场和 CO 浓度场的研究,为火灾时人员安全逃生提供理论参考。本文采用 STAR-CCM + 软件进行 CFD 数值模拟^[8],通过对燃烧模型、火源功率与燃烧时间、通风口大小及流量等几何参数和燃烧过程数值的设置,模拟得到火灾烟气在空间上的发展变化云图及数据,进而总结烟气扩散规律^[9-10]。

1.2 列车火灾场景及模型

与列车运行相关的设备系统均位于列车底部,只有空调及照明系统位于顶部,所以一般列车火灾起火位置主要位于列车底部^[11]。根据郑州市地铁列车运行可行性研究报告的相关数据,列车发生火灾时每节车厢的燃烧能量为 5 MW,列车火灾蔓延按烧毁 1.5 节/h 车厢计算,得到的列车火灾的功率约为 7.5 MW/h,起火 1 h 后的火灾范围约为 35 m 长。火场温度在起火后约 10 min 达到峰值。

假设列车在车站停靠时起火,并按列车中部位置处发生火灾的最不利情况进行模拟计算^[12]。列车车厢底部起火点功率为 7.5 MW,开启轨顶排烟机(单侧排烟量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$),开启区间隧道排烟机(排烟量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$),并关闭站厅层排风管和站台板下通风道。建立的模型网格局部加密,网格数约为 6.9×10^5 个。物理模型及网格划分如图 1 所示。

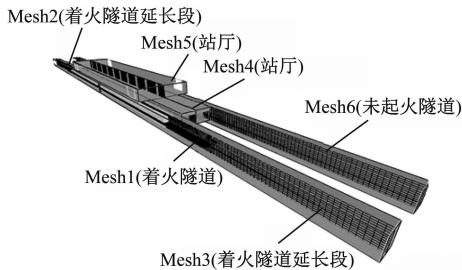


图 1 空间模型及网格划分图

2 模拟结果分析

2.1 隧道内的火灾增长及烟气蔓延

列车起火后,隧道内烟气运动的模拟结果见图 2,隧道内温度分布的模拟结果见图 3,CO 分布模拟结果见图 4。

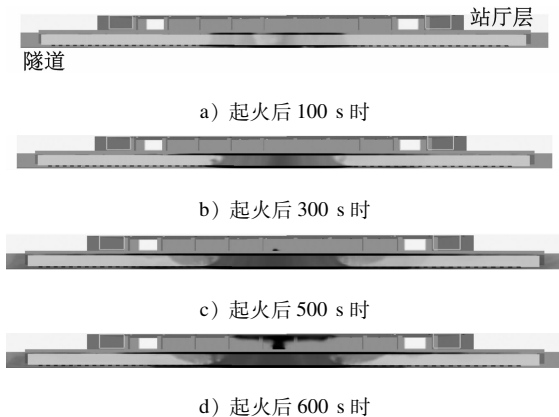


图 2 隧道内烟气运动情况模拟结果

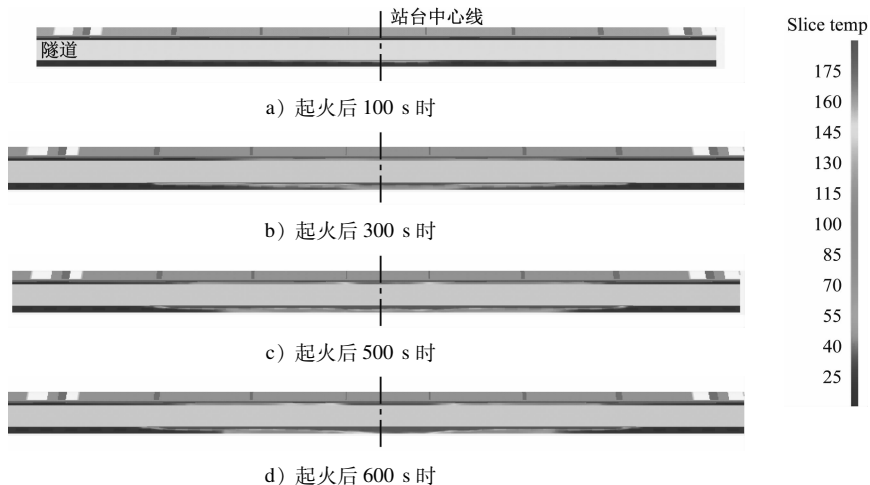


图 3 隧道内温度分布模拟结果

从图 2 可以看出,隧道内着火区域内的烟气逐渐上升,并逐渐向两侧扩散。随着火源功率不断增加,着火区域的温度逐渐升高。在热气压力作用下,隧道内的烟气扩散到站台区域。在通风排烟工况下,烟气被轨顶排烟风口及时排除。从烟气运动

云图上可以看出,烟气运动并没有明显变化。烟气主要是通过轨顶排烟风口排除的,而区间隧道通风机的排烟效果不明显。这是由于区间隧道风机的通风主要是从区间内补充,在隧道两端较大的向内空气流速作用下,形成了空气“短路”。

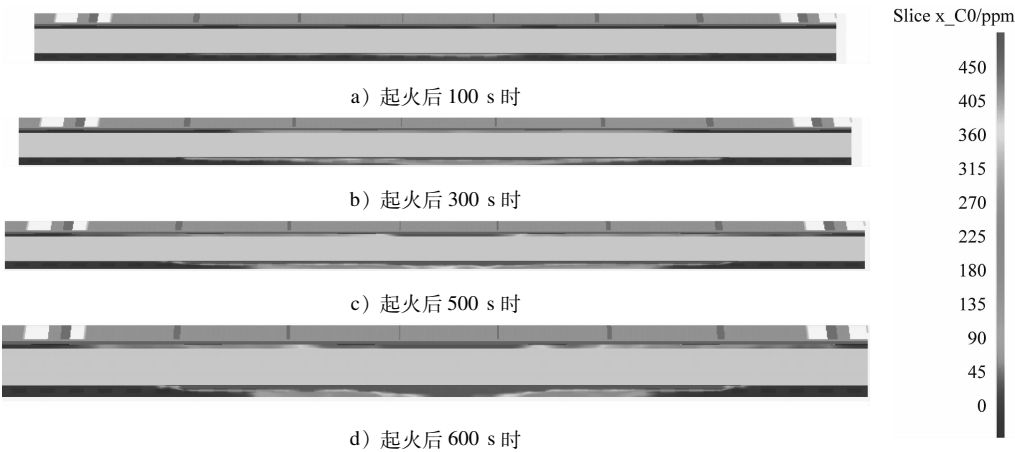


图 4 隧道内 CO 分布的模拟结果

从图 3~4 可以看出,烟气温度和浓度最先在着火区域升高。随着燃烧时间的增加,在热压作用下,烟气上升,但烟气高温和高浓度出现在顶棚排烟口附近;在火源功率达到峰值时(起火后 600 s 时),隧道内着火车厢区域的顶棚烟气层温度可以达到 170 ℃,CO 质量浓度为 $550 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$,隧道内其他区域的温度和 CO 浓度都逐渐降低。

2.2 烟气向车站站台及站厅的蔓延

列车发生火灾时,在烟气向车站站台及站厅蔓延过程中,车站中心截面的烟气温度变化云图见图 5,车站中心截面的 CO 质量浓度变化见图 6,车站中心截面的烟气运动情况见图 7,车站站台层的烟气蔓延情况见图 8。

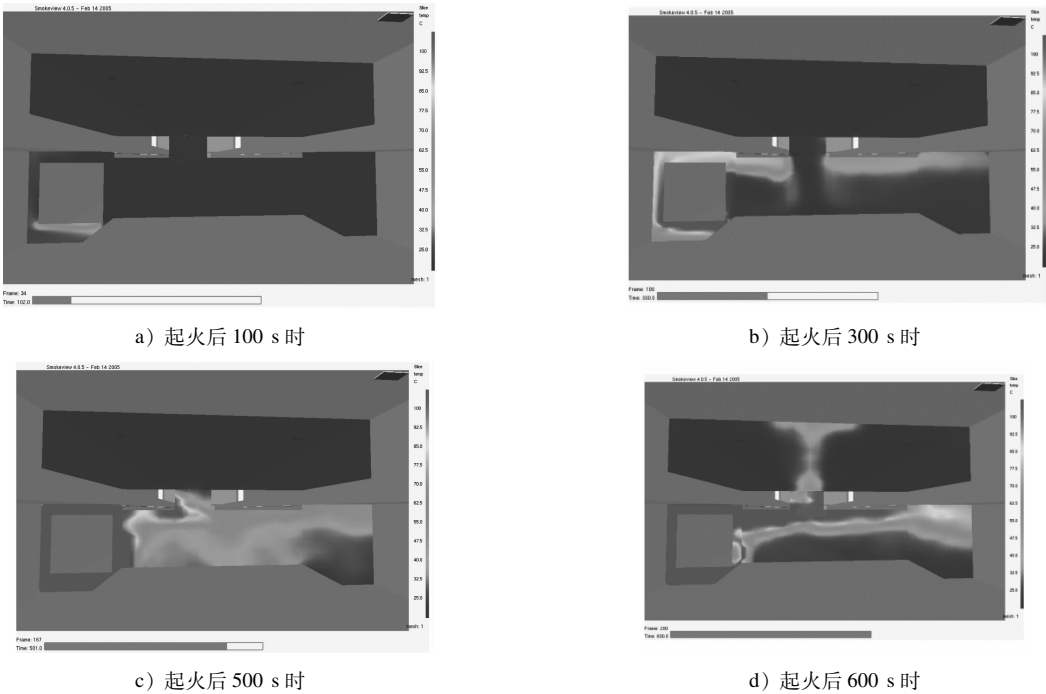
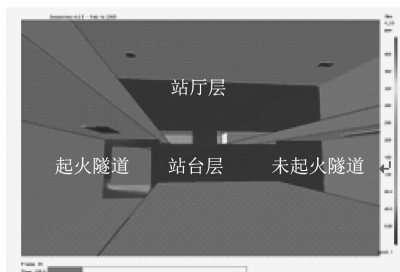


图 5 车站中心截面烟气温度变化云图

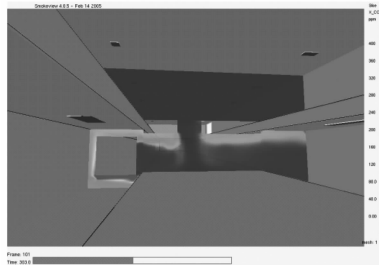
由图 5~6 可知,该隧道内的烟气温度和烟气浓度均沿隧道壁周围扩散而升高。由该火灾工况下烟气温度及浓度云图可以看出,由于轨顶及隧道通风排烟口不能及时排除烟气,再加上地铁车站的敞式通风排烟系统设计,在起火后大约 150 s 时,烟气

层开始扩散到站台区域,在起火后 200 s 左右,烟气扩散到对面未着火隧道;但在通排风系统作用下,扩散到未着火隧道的烟气温度及浓度均较低,并未影响到运行安全。

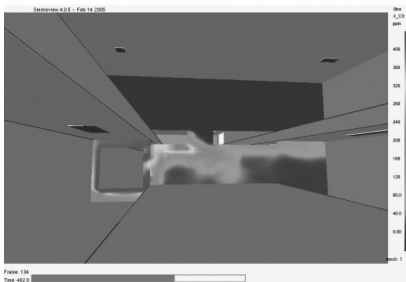
由图 7~8 可以看出,当列车在站台中心位置处



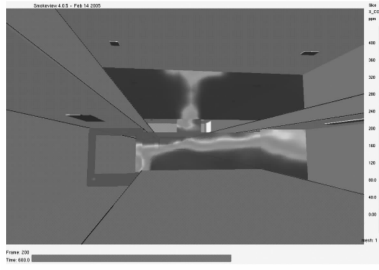
a) 起火后 100 s 时



b) 起火后 300 s 时

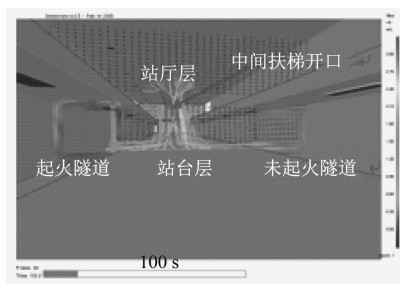


c) 起火后 500 s 时

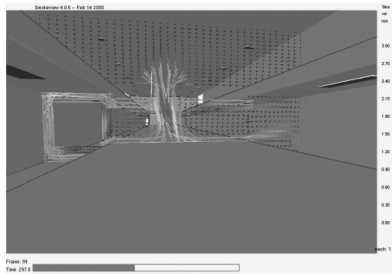


d) 起火后 600 s 时

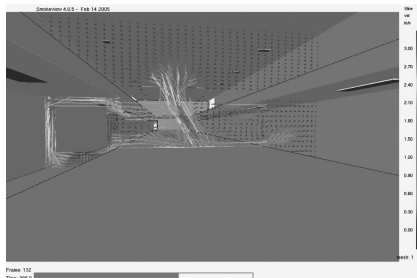
图6 车站中心截面烟气 CO 的质量浓度变化



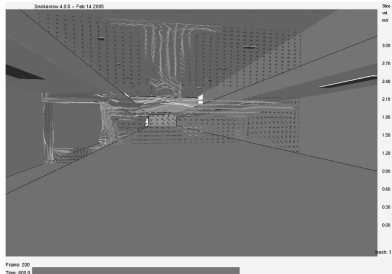
a) 起火后 100 s 时



b) 起火后 300 s 时



c) 起火后 500 s 时



d) 起火后 600 s 时

图7 车站中心截面烟气运动情况

发生起火时,火灾烟气基本以顺时针方向围绕火灾车厢流动。在隧道通排风机正常运行下,大部分烟气主要由轨顶排风口排出,还有一部分沿隧道向两侧蔓延。随着火源功率的不断增加,烟气不能及时被轨顶排烟排出。当烟气扩散到站台顶棚高度后,将向站台区域蔓延。

2.3 站台到站厅的烟气蔓延

列车在站台中心位置处起火后,烟气从站台层

沿楼梯及扶梯开口处蔓延到站厅。相应区域的烟气蔓延速度模拟结果见图9,烟气温度场分布见图10。

由图9可见,列车发生火灾后,在通风工况下,烟气逐渐向扶梯开口流动,但并未流入站台前的楼梯开口。烟气在扶梯开口处的流速约为 3 m/s 。当烟气进入站台后,中间楼梯开口处烟气的向下蔓延速度将逐渐减小。在起火后 $500 \sim 600 \text{ s}$ 时,烟

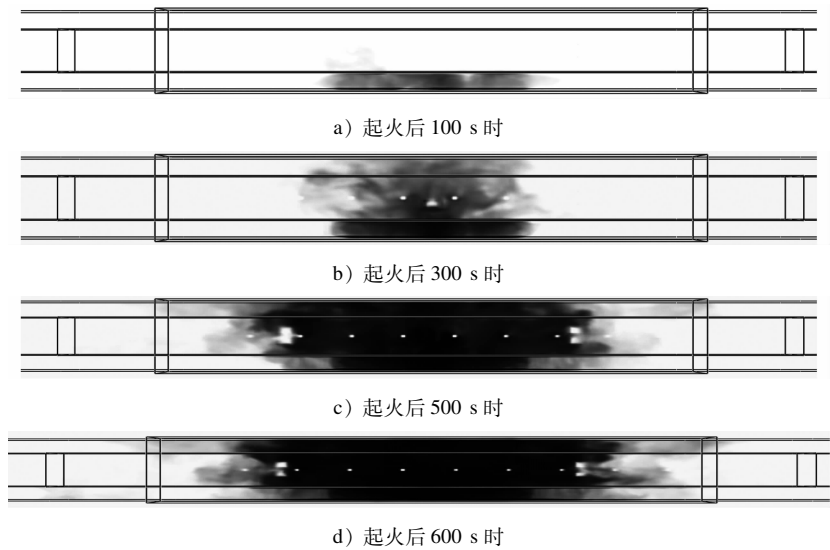


图 8 车站站台层的烟气蔓延情况

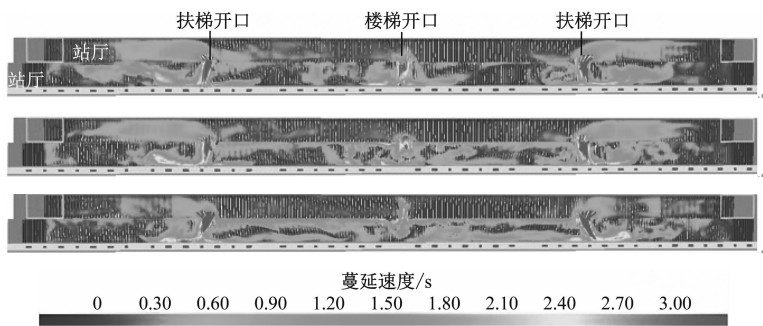


图 9 站台 - 站厅扶梯和楼梯开口截面速度场

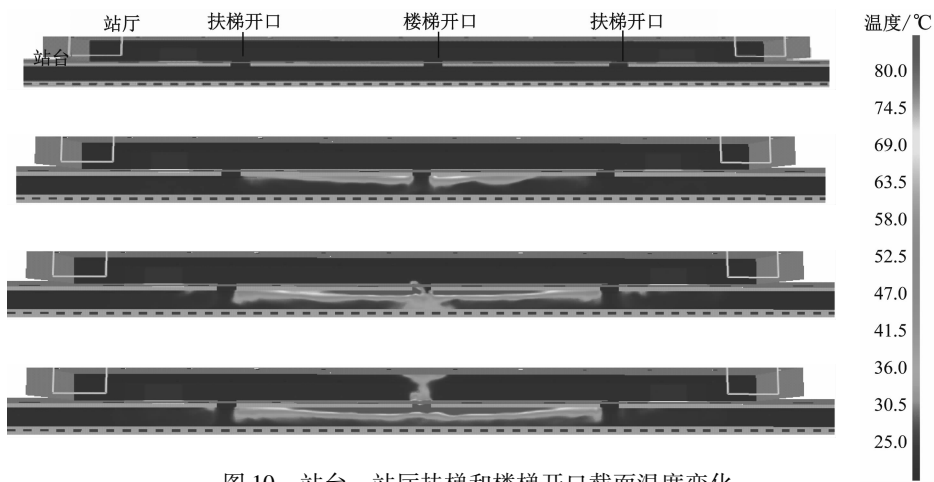


图 10 站台 - 站厅扶梯和楼梯开口截面温度变化

气蔓延速度将减少为 0,且烟气流动方向将发生改变。

由图 10 可见,烟气在列车起火后 300 s 时已经蔓延入站台。在站台通风工况下,烟气逐渐流向站台两端,当起火后 600 s 时,站台中间区域的烟气有明显的分层,且烟气层温度不高。在火源燃烧到功

率最大时(起火后 500 ~ 600 s 时),有少量烟气通过中间扶梯开口处向上层蔓延,说明中间楼梯开口处的向下风压已不能克服烟气的热压。蔓延至站厅层的烟气温度和浓度都很低,不会对人员造成伤害。但此时中间楼梯已经被烟气笼罩,人员疏散将受到影响。

3 结 语

通过对一定通风工况下列车火灾烟气的蔓延过程进行数值模拟,分析了烟气在隧道内、隧道向站台与站厅,以及站台向站厅的蔓延模式,分析了烟气蔓延速度场、温度场、CO 浓度场分布情况,总结了在火灾工况下烟气运行规律。分析结果为:

(1) 在火灾工况下,现有排烟量的设计合理。在列车起火后 300 s 时,烟气并未蔓延出车站区域,满足人员安全疏散的时间要求。在火源燃烧到最大功率时(起火后 600 s 时),烟气也未蔓延出车站区域,说明本通排风系统设置能给人员疏散提供更长的安全疏散时间,满足疏散要求。但区间隧道风机对车站列车火灾的排烟作用不明显。

(2) 列车发生火灾时,烟气层有明显的分层作用,且沿着隧道边缘和站台墙体边缘沉降,故人员逃生时应沿着隧道或站台中部压低身位沿下风向逃离。

(3) 当列车火灾产生的烟气蔓延至站台及站厅时,如果机械通风不足或无挡烟装置,楼梯口逃生路径就难以保证人员疏散的安全。

(4) 列车火灾烟气蔓延至站厅层的温度和浓度都很低,不会对人员造成伤害,但起火后 600 s 时,站台通向站厅的中间楼梯已被烟气笼罩,人员疏散将受到影响。

参考文献

- [1] 陈阳寿. 地铁列车火灾烟气运动规律探讨[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(1): 36.
- [2] CHEN F, GUO S C, CHUAY H Y, et al. Smoke control of fires in subway stations[J]. Theoretical and Computational Flu-

id Dynamics. 2003(16): 349.

- [3] 杨英霞,陈超等. 全高安全门地铁车站火灾时烟气流动特性的模型实验[J]. 天津大学学报(自然科学版), 2010, 43(12): 1060.
- [4] GAO R, LI A G, HAO X P, et al. Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway station[J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 280.
- [5] 高海林. 屏蔽门对地铁火灾烟气流动的影响分析[J]. 消防科学与技术, 2011, (3): 214.
- [6] 张茜,曹建华,王文倩. 典型地铁火灾场景中烟气蔓延与控制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(7): 20.
- [7] 赵兰英,王圣翔. 地铁换乘站火灾烟气蔓延数值模拟与分析[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(4): 373.
- [8] NA M, LONG H, LI Z, 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]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014(40): 151.
- [9] 王庆生,刘炳海,王文伟,等. 细水雾灭火系统扑救铁路隧道救援站内客车火灾的全尺寸试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 158.
- [10] ZHU W, ZHOU X F. Simulation on evacuation from the subway under fire smoke[J]. Safety Science Advance, 2014(1): 166.
- [11] LI L X, ZHAO L Y. Numerical simulation for smoke flow of the underground railway tunnel fire[C]// International Conference on Civil. Nanjing: Transportation and Environmental Engineering, 2011.
- [12] 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.
- [13] 杜子学,杨绪杰. 单轨车辆舒适性与运行平稳性仿真和试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014(5): 37.
- [14] 王庆生,刘炳海,王文伟,等. 铁路隧道救援站火灾模拟实验平台设计及细水雾系统抑制车厢火灾的模拟实验研究[J]. 火灾科学, 2012, 21(1): 6.

(收稿日期:2018-01-11)

上海市城市轨道交通第三期建设规划(2018—2023 年)获批

近日国家发展改革委正式批复同意上海市城市轨道交通第三期建设规划,建设 19 号线、20 号线一期、21 号线一期、23 号线一期、13 号线西延伸线、1 号线西延伸线及机场联络线、嘉闵线、崇明线等 9 个项目,规划期为 2018—2023 年,总长度 286.1 km。项目建成后,形成 27 条线路、1 154 km 的轨道交通网络(含市域铁路 342 km):19 号线工程自虹建路站至宝杨路站,线路长 44.5 km,设站 32 座,投资 605.24 亿元,项目建设工期为 6 年;20 号线一期工程自金昌路站至共青森林公园站,线路长 19.8 km,设站 16 座,投资 393.54 亿元,项目建设工期为 6 年。21 号线一期工程自川沙路站至东靖路站,线路长 28.0 km,设站 16 座,投资 369.56 亿元,项目建设工期为 6 年。23 号线一期工程自闵行开发区站至上海体育场站,线路长 28.0 km,设站 22 座,投资 337.29 亿元,项目建设工期为 6 年。13 号线西延伸工程自诸光路站至金运路站,线路长 9.8 km,设站 5 座,投资 126.29 亿元,项目建设工期为 5 年。1 号线西延伸工程自莘庄站向西延伸 1 站,实现与嘉闵线换乘,线路长 1.2 km,设站 1 座,投资 35.75 亿元,项目建设工期为 4 年。机场联络线工程自虹桥枢纽至上海东站,线路长 68.6 km,设站 9 座,投资 480.54 亿元,项目建设工期为 6 年。嘉闵线工程自嘉定北站至莘庄北站,线路长 41.6 km,设站 15 座,投资 371.01 亿元,项目建设工期为 6 年。崇明线工程自金吉路站至裕安路站,线路长 44.6 km,设站 8 座,投资 264.26 亿元,项目建设工期为 5 年。

(摘自 2018 年 12 月 21 日中新网“上海新闻”,记者 王子涛报道)