

# 地铁列车运行速度对客室内火灾烟气扩散的影响<sup>\*</sup>

毛 军<sup>1</sup> 王少华<sup>2</sup> 郝艳红<sup>1</sup> 胡嘉伟<sup>1</sup> 王 丹<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑与工程学院, 100044, 北京; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 100082, 北京;

3. 北京市地铁运营有限公司, 100044, 北京//第一作者, 教授)

**摘 要** 地铁列车在隧道内运行若遇客室着火, 一般继续运行到前方车站进行救援, 此时客室内的烟气扩散危及乘客生命安全。以客室内乘客行李着火的场景为例, 通过对客室内的温度场和烟气流动进行数值模拟, 分析了列车运行速度对客室内烟气扩散过程的影响。结果表明: 火灾发生后, 客室内的温度和烟气浓度沿纵向均呈不对称形式的增长, 后方区域的温度和烟气浓度均高于前方区域的; 列车运行速度越高, 单位时间内通过客室顶部风口排出客室的烟气越多; 后方区域人眼高度位置处的温度和烟气浓度均随列车运行速度呈二次曲线关系减小。

**关键词** 地铁列车; 客室火灾; 运动火源; 温度分布; 烟气  
**中图分类号** U298.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.039

## Influence of Metro Train Running Speed on Fire Smoke Diffusion in Passenger Compartment

MAO Jun, WANG Shaohua, XI Yanhong, HU Jia-wei, WANG Dan

**Abstract** When a fire starts in passenger compartment as metro train passing tunnel, the general solution is to continue operation until the next station for rescue, however the fire smoke diffusion in compartment endangers passengers. Taking the scenario of passenger luggage in compartment catching fire as an example, the influence of train speed on the diffusion process of smoke in compartment is analyzed by numerical simulation of the temperature field and smoke flow in the compartment. The results show that after the fire has started, the temperature and smoke concentration in the compartment increase in an asymmetric way along the longitudinal direction, and the temperature and smoke concentration in the rear area are higher than those in the front area. The higher the operating speed of the train, the more smoke is discharged through the air outlet on top of the compartment per unit time. The temperature and smoke concentration at the height of human eyes in

the rear area decrease with the speed of vehicle in a quadratic curve.

**Key words** metro train; compartment fire; moving fire source; temperature distribution; smoke flow

**First-author's address** School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

地铁地下空间相对封闭, 一旦发生火灾, 人员疏散困难, 极易造成人员伤亡<sup>[1-2]</sup>。为此, 国内外对地铁发生火灾后的烟气扩散、人员疏散和应急救援问题进行了诸多研究<sup>[3-6]</sup>。其中, 地铁隧道中的列车火灾及其应急救援是一类较为复杂的情况, 相关研究十分有限。文献[7]提出了隧道运动火源的计算方法, 建立了火灾热释放速率与列车运行速度的关系模型; 文献[8]使用 STAR-CD 软件对列车顶部着火的火灾烟气特性进行了数值模拟计算, 分析了列车运行速度与烟气流动特征、温度分布特性的关系。但上述研究均假定车体着火, 未考虑客室内部着火的情况, 而客室着火会直接危及乘客的生命安全。因此, 针对火灾发生在客室内部、列车继续运动的场景, 分析不同车速对列车内部火灾烟气扩散的影响, 揭示其规律十分必要。

## 1 地铁隧道模型与车辆模型

以北京地铁 B 型车在某区间隧道内运动的情形为例建立计算模型, 如图 1 所示。

地铁隧道的长度为 1 200 m, 内部净空高度为 5.2 m, 圆弧直径为 6 m, 底面宽度为 4.2 m。车辆的外形尺寸为 19 m(长)×2.8 m(宽)×3.5 m(高)。客室顶部安装有通风排烟装置, 可将其排风口简化为如图 2 面积相等的集中式排风口。客室内部净空高度为 2.1 m, 烟气在车顶下方的净空间内流动。假

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2016YFC0802206); 国家自然科学基金项目(51578061); 中央高校基本科研业务费项目(2019JBM087)



### 3 计算结果分析

#### 3.1 客室内外温度及烟气的时变规律

列车在隧道内运行时,客室内部的烟气扩散过程随时间发生变化。图 5 为工况 3 下不同燃烧时间  $t$  隧道纵向中心截面的温度和烟气浓度分布情况。

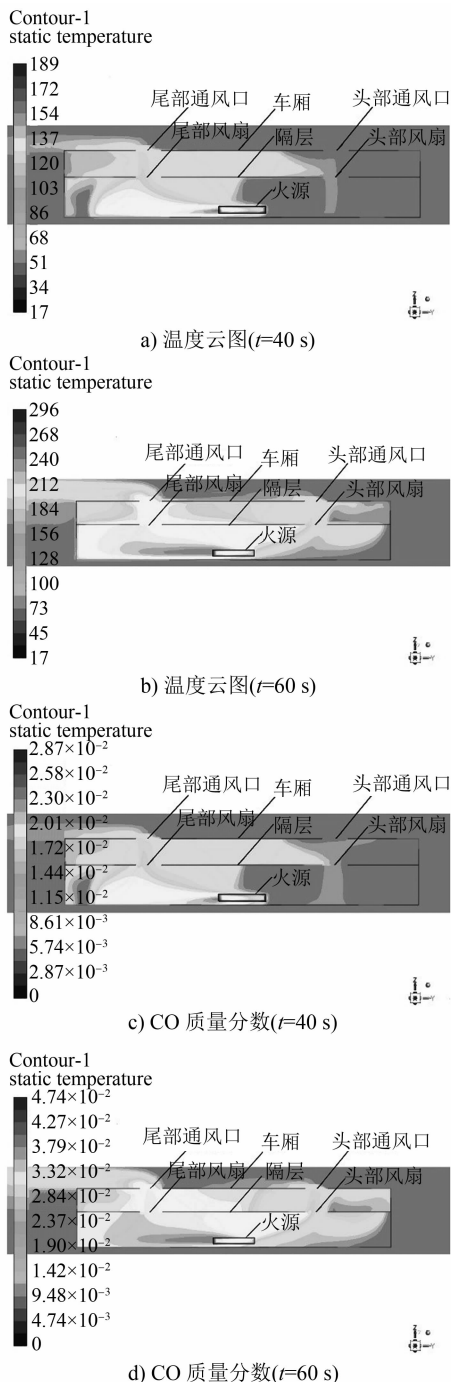


图 5 工况 3 下不同燃烧时间隧道纵向中心截面的温度和 CO 质量分数分布

由图 5 可知,随着时间的增加,客室内的温度不断升上,烟气在客室内逐步扩散,高温区域从客室中部不断向客室两端扩展,且浓度也越来越高。同时,客室内的烟气因受到惯性作用,会产生与列车运动方向相反的相对运动。因此,客室内的高温、高浓度区域向客室后部明显偏移,客室后半部分的温度和烟气浓度均明显高于客室的前半部分。 $t=40$  s 时,客室内的最高温度约为  $100$  °C;  $t=60$  s 时,客室内的最高温度达到  $296$  °C;而 CO 质量分数分别达到  $2.87\%$  和  $4.74\%$ 。

为了进一步分析客室内烟气的温度和浓度的变化规律,考虑人员视线高度<sup>[7-8]</sup>,在客室内高  $1.7$  m 的水平面以及过客室中心的纵向截面上设置 32 个数据采集点,以获取不同位置温度和烟气浓度的分布情况,结果如图 6 所示。

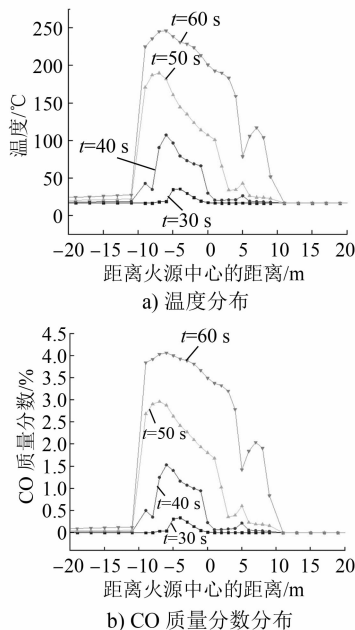


图 6 车辆客室内  $1.7$  m 高处的温度和 CO 质量分数分布情况

由图 6 a) 可知,随着燃烧时间的增加,火源四周的升温区域越来越大,客室内部的温度也不断升高。 $t=40$  s 时,火源两侧的最高温度不超过  $50$  °C;而  $t=60$  s 时,大部分区域的温度已经超过  $175$  °C。客室内前半部分区域的温度并没有明显的增长,而客室后半部分区域内的温度随时间增加而明显增大。

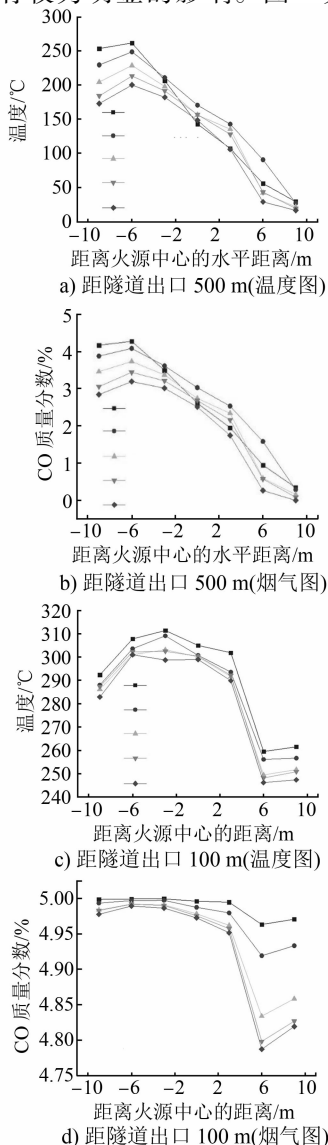
由图 6 b) 可知,火源附近的烟气分布大致和温度相同。随着时间的增加,烟气的扩散范围不断增大,浓度逐步升高。 $t=40$  s 时,火源两侧的 CO 质量分数不超过  $0.5\%$ ;  $t=60$  s 时,客室内  $1.7$  m 高度位置处的

CO 质量分数超过 3.5%。同时,客室内前半部分区域的 CO 质量分数并没有明显的增长,而客室内后半部分区域内 CO 质量分数随着时间的增加而增长。

需要指出的是,客室外的车体前方和后方区域的温度和烟气浓度分布有所不同。其原因是:列车在隧道中运行时的活塞风效应使列车与隧道之间的环形空间内产生从车头指向车尾的气流,并在车顶附近产生负压,从而使车内偏向尾部区域的烟气通过客室尾部的排风口流向隧道内,形成车内烟气向隧道内的扩散情形;而客室前方不存在烟气扩散情况。

### 3.2 列车运行速度对温度场和烟气浓度的影响

列车的运行速度对客室内的烟气温度分布和烟气流动都有较为明显的影响。图 7 为不同工况



注: — 工况 1; — 工况 2; — 工况 3; — 工况 4; — 工况 5

图 7 不同工况下列车距离隧道出口不同距离时客室内测点温度和烟气分布情况

下,列车头部距离隧道出口 500 m 和 100 m 处时,客室内温度和 CO 质量分数的分布情况。

由图 7 可知,随着列车运行速度的增加,客室内各点的温度和烟气浓度呈下降趋势。火源两侧纵向的温度和烟气浓度呈不对称分布,客室尾部区域的温度和烟气浓度总体上均远大于前部区域的。各点的温度和烟气浓度亦随列车运行速度的增加而降低。同时,随着列车至隧道出口的距离不断减小,列车活塞风效应逐步减弱,客室内前部区域(例如火源右侧 6 m 处之后)的烟气温度和烟气浓度有所回升。

事实上,可建立客室内温度与列车运行速度之间的定量关系。在客室内火源左侧即后部区域选取 2 个监测点,分析其温度随列车运行速度的变化情况,发现可用二次函数表示二者之间的关系。图 8 为二者的拟合曲线,拟合关系式为:

$$T_1 = 0.0091v^2 - 1.64158v + 340.17049 \quad (1)$$

$$T_2 = 0.01919v^2 - 2.80327v + 349.3463 \quad (2)$$

式中:

$T_1, T_2$ ——分别为测点 1 和测点 2 处的温度;

$v$ ——列车运行速度。

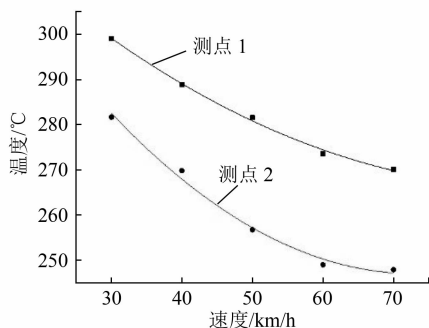


图 8 测点温度随速度变化拟合曲线

由图 8 可见,当列车运行速度从 30 km/h 增加到 70 km/h 时,烟气温度随列车运行速度的增高而降低,且呈二次函数关系。出现上述变化趋势的主要原因是:客室顶部排风口的风速及排烟速率随着时间的增加而增加。图 9 为列车运行速度为 50 km/h 时,排风风速及排烟速率随时间变化的过程。因此,列车运行速度越高,客室内同一位置截面以及相同位置测点的温度和烟气浓度就越低。主要原因是:其一,列车运行速度越高,车顶风口附近的风速就越大,单位时间内通过风口排出的烟气就越多;其二,尽管列车运行速度不同,但火源的热释放速率均在列车行至隧道中间位置时达到稳定,即此

时在单位时间产生的热量和烟气质量是相同的。因此,列车运行速度越大,到达隧道同一位置截面的时间就越短,产生的热量和烟气质量就越少。

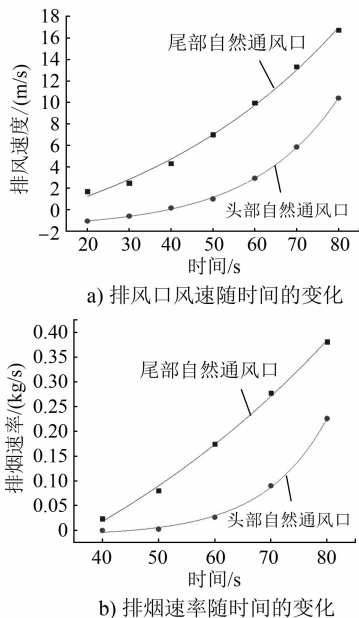


图9 列车运行速度为 50 km/h 时客室排风风速与排烟速率的时变规律

## 4 结论

1) 列车在地铁隧道中运行中客室内部发生火灾后,客室内的温度和烟气浓度均呈非均匀分布,后半部分区域的温度和烟气浓度总体上远大于前半部分区域的;客室外前方区域的温度和烟气浓度并没有明显的增长,而客室外后方区域内的则随着时间的增加而增长。

2) 列车活塞风效应对客室内烟气温度和烟气浓度有较大影响。随着列车至隧道出口距离的减少,活塞风效应的逐渐减弱使得客室内前部区域的烟气温度和烟气浓度有所回升。

3) 客室顶部自然通风口的风速以及烟气排出速率随列车运行速度的增大而增大,客室内各点的温度和烟气浓度随列车运行速度的增加呈二次曲线关系减小。

本文研究结果对客室内烟气监测传感器和报警装置的设置、车载排烟口的设计以及车内人员的疏散方向选择均具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 黄槐荣. 地铁火灾中车站区烟气扩散及人员疏散的模拟研究[D]. 北京:北京工业大学,2007.
- [2] 郭光玲,戴国平,马世杰,等. 地铁火灾研究[J]. 都市轨道交通,2004(增刊1): 68.
- [3] RAN G, ANGUI L, YING Z, et al. How domes improve fire safety in subway stations[J]. Safety Science, 2015, 80: 94-104.
- [4] MANABU T, YUSUKE K, HIDEO O. Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using Fire Dynamics Simulator[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2011, 26(4): 573-581.
- [5] ROH J S, RYOU H S, PARK W H, et al. CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 447-453.
- [6] 吕华,汪莉,毛军. 地铁车站火灾烟气的蔓延与控制[J]. 工程建设与设计, 2007(1): 34.
- [7] XI Y H, MAO J. Safe velocity of on-fire train running in the tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 210-223.
- [8] 李湘蕾. 地铁列车运动体火灾特性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [9] 游宇航,李元洲,王浩波,等. 机械排烟控制小室火灾烟气的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2007(3): 259.
- [10] 姚小林,陈俊敏. 旅客行李对高速客车车厢火源热释放速率的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014(2): 51.
- [11] 石明杨,任刚,崔兴华,等. 公路隧道火灾非稳态规律的模拟研究[J]. 四川建筑, 2014(4): 251.

(收稿日期:2019-10-16)

## 我国综合立体交通网日益完善 高铁对百万以上人口城市的覆盖率超过了 95%

目前,我国综合立体交通网日益完善。六轴、七廊、八通道的国家综合立体交通网的主骨架空间已初步形成,高铁对百万以上人口城市的覆盖率超过了 95%,高速公路对 20 万以上人口城市覆盖率超过了 98%,民用运输机场覆盖了 92% 以上的地级市。到 2020 年底,新能源公交车达到 46.6 万辆,占城市公交车总量的 66.2%。交通运输部部长李小鹏表示:货运结构不断优化,新业态新模式加速发展,网络预约出租汽车覆盖了我 300 多个城市,日均完成订单量 2 000 万单。我国实现了具备条件的乡镇和建制村通硬化路、通客车和通邮。贫困地区行路难的问题得到历史性解决。同时,科技创新能力大幅提升。港珠澳大桥、京张铁路、北京大兴国际机场、上海洋山港自动化码头等一大批重点工程相继投入使用。

(摘自 2021 年 8 月 25 日央广“新闻和报纸摘要”,记者张棉棉报道)