

# 基于实时关键性指标验证的地铁站 火灾人员安全疏散研究

罗佳程 钱雪军

(同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

**摘 要** [目的]为更准确判断地铁站火灾人员能否安全疏散,及时发现并避免人员走进危险区域,为人员安全疏散提供有效措施建议。[方法]在综合分析可用安全疏散时间和必需安全疏散时间的基础上,提出基于实时关键性指标验证的人员安全疏散分析方法。以上海轨道交通 15 号线某地铁站为例,利用 PyroSim 火灾模拟仿真软件得到火灾模拟结果,确定地铁站各关键位置的可用安全疏散时间。同时,使用 Pathfinder 人员疏散仿真软件获取人员疏散结果,确定各关键位置的必需安全疏散时间。通过比较各关键位置的可用安全疏散时间和必需安全疏散时间,初步确定人员安全疏散情况。此外,通过测量选定人员在整个疏散过程中自身位置实时的温度、能见度和 FED(有效剂量分数)三个关键性指标,验证人员安全疏散情况。[结果及结论]结果表明:通过各关键位置必需安全疏散时间小于可用安全疏散时间的判定标准,可以确定人员安全疏散存在误差,基于实时关键性指标验证的方法可以使判断更为准确。该方法可以及时发现人员是否走进危险区域,并结合人员的整个疏散过程为地铁站火灾人员安全疏散提供指导性的措施建议。

**关键词** 地铁站火灾; 人员安全疏散; 关键性指标; PyroSim 仿真; Pathfinder 仿真

**中图分类号** U231.96

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.01.033

## Research on Personnel Excavation in Metro Station Fire Based on Real-time Key Indicator Validation

LUO Jiacheng, QIAN Xuejun

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] The objective is to accurately assess whether individuals can safely evacuate during a metro station fire, promptly identify and prevent people from entering hazardous areas, providing effective measures and suggestions for personnel safe evacuation. [Method] Building on a comprehensive analysis of ASET (available safe evacuation time) and RSET (required safe evacuation time), a method for analyzing personnel safe evacuation based on real-time key indicators is

proposed. Taking a metro station of Shanghai Rail Transit Line 15 as example, PyroSim fire simulation software is employed to obtain fire simulation results, determining the ASET at critical locations in the metro station. Simultaneously, Pathfinder personnel evacuation simulation software is used to obtain personnel evacuation results, determining the RSET at critical locations. By comparing the ASET and RSET at each critical location, the situation of personnel evacuation is preliminarily assessed. Additionally, by measuring three key indicators of real-time temperature, visibility and FED (fractional effective dose) at selected locations throughout the evacuation process, the safety of personnel evacuation is verified. [Result & Conclusion] By the criterion that RSET is less than ASET at critical locations, it can be determined that there is an error in personnel evacuation safety. The method based on real-time key indicator validation provides a more accurate judgment. This approach allows for timely identification of individuals entering hazardous areas, and takes into account the entire evacuation process, offering instructive measures and suggestions for personnel safe evacuation in metro station fire.

**Key words** metro station fire; personnel safe evacuation; key indicator; PyroSim simulation; Pathfinder simulation

随着计算机技术的发展和疏散模型研究的深入,应用火灾模拟软件和人员疏散仿真软件,对地铁站火灾人员疏散进行仿真能够快速获得比较好的仿真效果,对于地铁车站应急疏散和安全管理具有很好的指导性作用。文献[1]结合 PyroSim 仿真软件对站台火灾发展及影响因素进行研究。文献[2]利用 Pathfinder 软件对地铁车站不同条件下的人员疏散特点进行分析。文献[3]通过地铁站 Pathfinder 人员疏散仿真,得出总疏散时间受多种因素的影响。文献[4]建立了基于 FDS(火灾动态模拟器)和 Pathfinder 的地铁车站人员疏散模型,从人员逃生率和安全疏散可用时间利用率等方面进行分析。

现有研究在判断人员能否安全疏散时基本是通过比较各关键位置可用安全疏散时间 (ASET) 和必需安全疏散时间 (RSET) 来确定的。由于目前的人员疏散仿真软件, 如 Pathfinder 中人员的移动和决策是不能随着火灾过程中的温度和 CO 体积分数等关键数据动态变化的<sup>[5]</sup>, 所以其规划出的路线可能会引导人员走进危险区域。为更准确判断地铁站火灾人员能否安全疏散, 及时发现并避免人员走进危险区域, 本文在综合分析可用安全疏散时间和必需安全疏散时间的基础上, 通过将火灾模拟输出结果加入到人员疏散仿真中, 测量选定人员在整个疏散过程中自身位置实时的温度、能见度和有效剂量分数 (fractional effective dose, FED) 3 个关键性指标, 并基于此对人员安全疏散提供指导性的建议。

## 1 关键性指标与研究方法

### 1.1 关键性指标

1) 温度。当地铁站发生火灾时, 过高的温度会灼伤人体表面皮肤, 高温气体的吸入也会导致人体不适, 严重时甚至会威胁人员生命安全。

2) 能见度。火灾产生的烟气具有遮光性, 烟气扩散, 能见度的降低会直接导致疏散阻碍的增加, 威胁人员的安全疏散。

3) FED。火灾产生的烟气中存在多种毒害气体, 吸收过量会导致人员中毒。FED 是一种常用的衡量人体吸收毒害气体程度的指标<sup>[6]</sup>, 可用  $I_{\text{FED}}$  表示, 有:

$$I_{\text{FED}} = I_{\text{FED}_{\text{CO}}} H_{\text{CO}_2} + I_{\text{FED}_{\text{O}_2}} \quad (1)$$

式中:

$I_{\text{FED}}$ ——有害气体的有效剂量分数;

$I_{\text{FED}_{\text{CO}}}$ ——CO 的有效剂量分数;

$H_{\text{CO}_2}$ ——CO<sub>2</sub> 引起过度换气的倍增因子;

$I_{\text{FED}_{\text{O}_2}}$ ——O<sub>2</sub> 的有效剂量分数。

$$I_{\text{FED}_{\text{CO}}} = 3.317 \times 10^{-5} C_{\text{CO}}^{1.036} A t_e / D \quad (2)$$

式中:

$C_{\text{CO}}$ ——CO 的体积分数;

$A$ ——乘客每分钟呼吸的空气量, 在轻活动水平 (步行逃生) 下取 25 L/min;

$t_e$ ——暴露时间, 单位 min;

$D$ ——碳氧血红蛋白百分比, 在轻活动水平下取 30%。

$$H_{\text{CO}_2} = \frac{\exp(0.1903 C_{\text{CO}_2} + 2.0004)}{7.1} \quad (3)$$

式中:

$C_{\text{CO}_2}$ ——CO<sub>2</sub> 的体积分数。

$C_{\text{CO}_2}$  高于 5% 时, CO<sub>2</sub> 没有毒性作用, 但会刺激呼吸, 从而增加 CO 的吸收速率。

$$I_{\text{FED}_{\text{O}_2}} = \frac{t_e}{\exp[8.13 - 0.54(20.9 - C_{\text{O}_2})]} \quad (4)$$

式中:

$C_{\text{O}_2}$ ——O<sub>2</sub> 的体积分数。

当 O<sub>2</sub> 体积分数高于阈值时, 低缺氧不会导致  $I_{\text{FED}}$  的累积, 据此, 默认只有当 O<sub>2</sub> 体积分数小于 19.5% 时, 才会控制  $I_{\text{FED}_{\text{O}_2}}$  项对于  $I_{\text{FED}}$  累积的贡献。

FED 在人员穿越燃烧建筑物的过程中会持续积累, 若 FED 大于 0.1 则说明烟气影响人员疏散, 若 FED 大于 0.8 则说明人员面临严重伤亡威胁。

参照文献[6]的人体耐受极限相关指标, 以及 NFPA 130—2020 *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems* 的要求, 人员关键性指标的约束条件可归结为 3 点: ①温度不超过 60 °C; ②能见度不低于 10 m; ③FED 不超过 0.8。

### 1.2 研究方法

基于地铁站火灾人员疏散相关的研究成果, 采用 PyroSim 和 Pathfinder 仿真软件对地铁站火灾与人员疏散进行仿真, 并将火灾模拟结果与人员疏散仿真相结合进行分析, 具体的研究思路如图 1 所示。

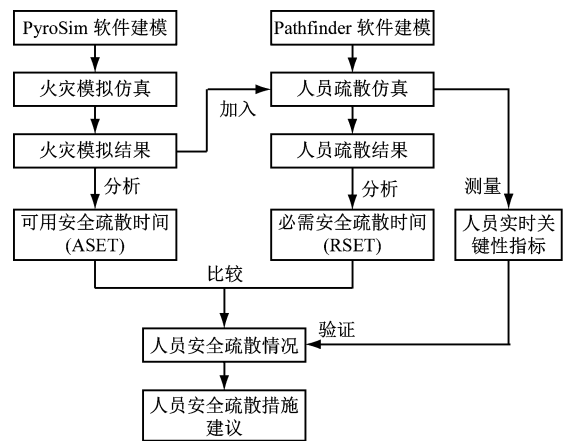


图1 地铁站火灾人员安全疏散研究思路

Fig. 1 Research idea for personnel safe evacuation in metro station fire

## 2 地铁站建模与火灾模拟仿真分析

### 2.1 地铁站建模

采用 PyroSim 火灾模拟仿真软件对上海轨道交通 15 号线某站进行建模。该地铁站为双层岛式地

铁站。站台层公共区面积约为 1 620.0 m<sup>2</sup>,有效长度为 135.0 m,宽度为 12.0 m,共设置 3 组楼梯扶梯和 1 部无障碍电梯。站厅层公共区面积约为 1 995.3 m<sup>2</sup>,有效长度为 101.8 m,宽度为 19.6 m,设有 4 个对外出口。建立该站的 PyroSim 仿真模型如图 2 所示。

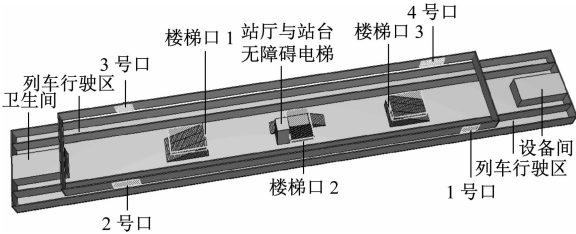


图 2 某站的 PyroSim 仿真模型

Fig. 2 PyroSim simulation model of the metro station

乘客行李及衣物的主要化学成分通常为聚氨酯,易引起火灾。因此,在 PyroSim 仿真模型中,将乘客行李及衣物的燃烧反应设定为聚氨酯燃烧<sup>[7]</sup>。此外,火灾增长类型设定为快速  $t^2$  增长型<sup>[8]</sup>,火灾发展系数为 0.046 9 kW/s<sup>2</sup>。根据 GB 50157—2013

《地铁设计规范》,火灾模拟运行时间设定为 360 s。在各关键位置即楼梯口和出口距离地面上方 1.6 m 处分别设置温度、CO 体积分数和能见度检测器。为模拟较不利的火灾工况,火源热释放速率设置为 1 250 kW/m<sup>2</sup>;火源大小为 2 m×2 m;火源位置设置在站台层楼梯 1 入口处。

2.2 火灾模拟仿真分析

在火灾模拟仿真分析中,采用温度、CO 体积分数和能见度作为火灾到达危险状态的判据,三者达到安全阈值的用时最小值即为安全疏散可用时间。根据 NFPA 130—2020 *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*,火灾模拟仿真设定:①距地面高度  $h = 1.6$  m 处温度不超过 60 °C;②  $h = 1.6$  m 处 CO 体积分数不超过  $500 \times 10^{-6}$ ;③  $h = 1.6$  m 处能见度不低于 10 m。

通过火灾模拟仿真得到,各关键位置的关键性指标时程曲线如图 3 所示。按各关键性指标的阈值,进一步分析得到可用安全疏散时间如表 1 所示。

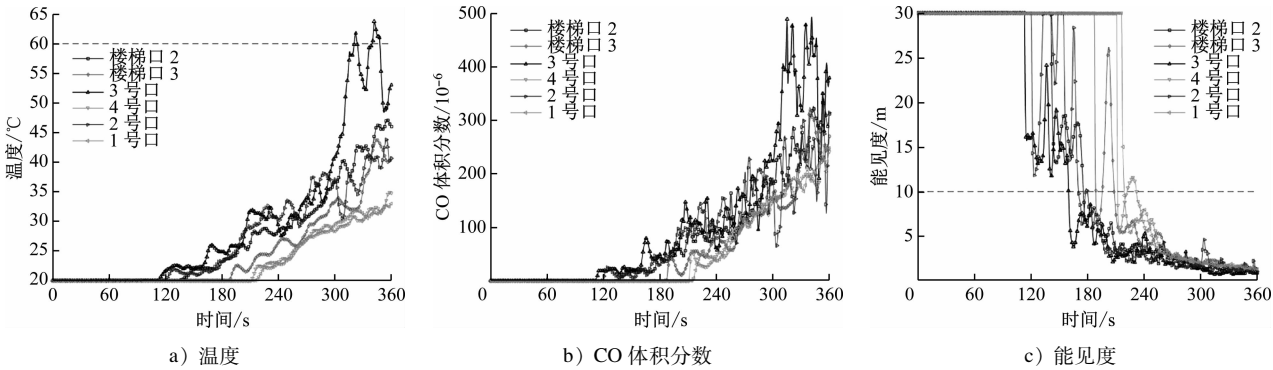


图 3 各关键位置的关键性指标时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of key indicators at each critical location

表 1 按关键性指标阈值计算得到的 ASET  
Tab.1 ASET obtained by key indicator threshold calculation

各关键位置	按不同指标阈值算得的 ASET/s			
	温度	CO 体积分数	能见度	综合
楼梯口 1				
楼梯口 2	360	360	176	176
楼梯口 3	360	360	189	189
1 号口	360	360	219	219
2 号口	360	360	172	172
3 号口	320	360	160	160
4 号口	360	360	212	212

3 人员疏散仿真建模与分析

3.1 人员疏散仿真的建模

在 PyroSim 仿真模型的基础上,采用 Pathfinder 软件构建 Pathfinder 仿真模型,进行人员疏散仿真。站台层两侧的楼梯组均由 2 部有效宽度为 1.0 m 的自动扶梯和 1 部有效宽度为 1.8 m 的 T 型楼梯组成。T 型楼梯位于站台中部,其下梯段有效宽度为 2.4 m,上梯段有效宽度为 4.6 m。与 4 个出入口对应设置了 4 个闸机组,每个闸机组均有 6 条闸机通道,闸机机箱宽度为 0.18 m,闸机通道宽度为 0.52 m。地铁站 Pathfinder 仿真模型如图 4 所示。

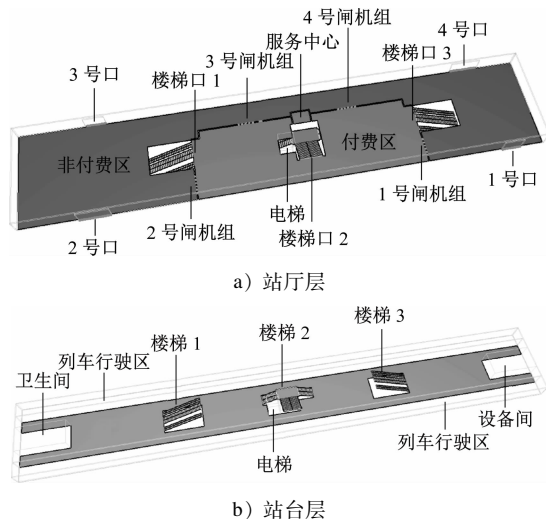


图4 某站的Pathfinder仿真模型

Fig. 4 Pathfinder simulation model of the metro station

高峰时期的客运量预测为13 581人次/h,高峰时期列车的发车间隔一般为220 s,即每列列车到站时的乘客数量约为830人。综合考虑部分乘客等待、逗留等情况,本次人员疏散仿真的疏散人数按每列车到站的乘客数量乘以1.5倍综合系数来计算,即可估算高峰时期该站内需疏散人数为1 245人。仿真中的人员特征参数设定如表2所示。

表2 Pathfinder仿真模型中的人员特征参数

Tab. 2 Personnel characteristic parameters in Pathfinder simulation model

人员类别	肩宽/m	步速/(m/s)	人数占比/%
少年	0.32	1.35	17
青年男性	0.40	1.55	19
青年女性	0.37	1.50	18
中年男性	0.41	1.52	21
中年女性	0.38	1.40	17
老人	0.39	1.10	8

### 3.2 人员疏散仿真的分析

人员疏散仿真分析采用最后一名人员离开疏散区域所用的时间作为各关键位置的必需安全疏散时间。人员安全疏散成功的判定标准指人员在各关键疏散位置火灾到达危险状态前从该区域全部撤离,即必需安全疏散时间小于可用安全疏散时间。在此基础上,通过测量在整个人员疏散过程中人员位置实时的温度、能见度和FED三个关键性指标来验证各火灾工况下人员安全疏散情况,并基于此对人员安全疏散提出指导性的建议。

由于火源位置在站台层楼梯1入口处,故在人

员疏散仿真中设置楼梯1状态为不可通行,其他楼梯状态为正常通行。通过人员疏散仿真,得到楼梯口2、楼梯口3、1号口、2号口、3号口和4号口的必需安全疏散时间分别为139 s、137 s、172 s、172 s、37 s、172 s,均不超过各关键位置的可用安全疏散时间,由此初步判断人员可以安全疏散。

为更准确判断人员能否安全疏散,本研究选择疏散时间相对最长,且最后一名从各出口逃生的人员为对象,测量其所在位置的关键性指标。由于3号口的必需安全疏散时间仅为37 s,故可认为从3号口疏散的人员在整个疏散过程中是安全的。通过人员疏散仿真结果可知,从1号口、2号口及4号口疏散的最后一名人员分别是22号人员、956号人员及720号人员,其疏散用时均为172 s。仿真计算这3名人员所在位置的关键性指标时程曲线,如图5所示。

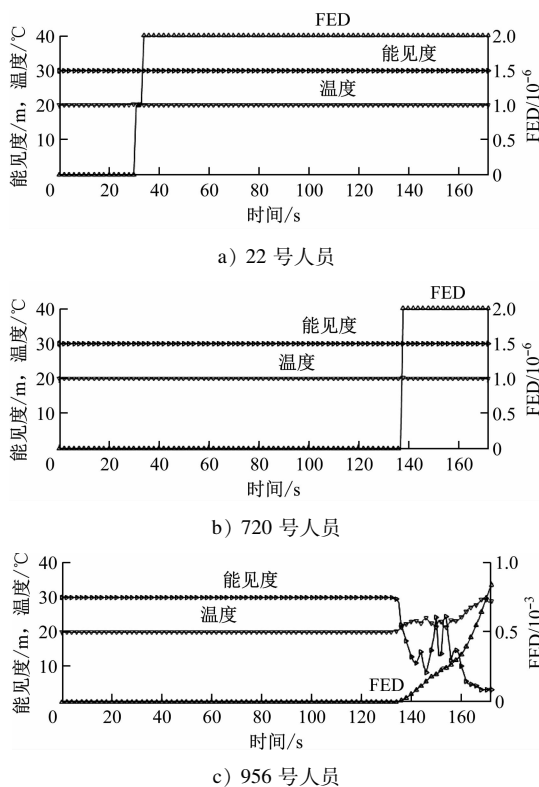


图5 关键性指标时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of key indicators

由图5可知,在整个疏散过程中,22号和720号人员位置处温度基本保持为20℃(室温),能见度保持为30 m,FED远小于0.8。由此可判断,在整个疏散过程中22号人员和720号人员都是十分安全的。



由图 5 还可看出:在起火后疏散时间  $t = 132$  s 后,956 号人员所处位置的温度和 FED 均开始上升,能见度开始迅速下降;最高温度升至  $30^{\circ}\text{C}$  左右,FED 最终为  $8.4 \times 10^{-4}$ ,均未达到危险值;能见度波动较大。在  $t = 146$  s 时,能见度降至  $8.5$  m 左右,且此次能见度低于临界值( $10.0$  m)的时长约为  $1$  s;之后,能见度回升至  $10.0$  m 以上;疏散时间达  $161$  s 后,能见度再次降至  $10.0$  m 以下,并持续到  $172$  s 疏散完成后。

956 号人员在不同  $t$  下的周围环境及能见度模拟情况截图如图 6 所示。由图 6 a) 可见, $t = 146$  s 时,956 号人员位于 2 号闸机组前的位置。此时,能见度第一次降到  $10.0$  m 以下,这是因为烟气从站台层楼梯 1 入口处的火源位置沿着楼梯 1 向站厅层蔓延。尽管这次能见度低于  $10.0$  m 的状况只持续了  $1$  s 左右,但周围烟气已经积聚。



图 6 956 号人员在不同  $t$  下的周围环境及能见度模拟情况截图

Fig. 6 Simulation screenshots of surrounding environment and visibility of personnel No. 956 under different values of  $t$

由图 6 b) 可知, $t = 161$  s 时,956 号人员位于 2 号闸机组与 2 号口之间。此时能见度已经到达临界值( $10.0$  m)。由仿真结果可知,其能见度在之后的疏散过程中会越来越低。这表明从 2 号口疏散的部分人员在整个疏散过程中并不是完全安全的,会存在能见度过低的危险情况。

### 3.3 人员安全疏散措施建议

1) 由火灾模拟与关键性指标时程曲线可知,能见度的下降对于人员安全疏散速度的影响最大。因此,应在楼梯口、出口及关键路段增设应急照明灯具和安全疏散标志,确保人员在能见度较低的情况下仍能找到逃生方向。

2) 在  $t = 146$  s 时,956 号人员往 2 号闸机组逃生过程中出现了短暂的能见度过低情况;在  $t = 161$  s 之后,2 号闸机通向 2 号口的通道能见度低于临界值( $10.0$  m),不能再安全疏散人员。因此,在起火  $146$  s 之后,应安排专业人员通过广播或其他方式来引导滞后的需疏散人员前往 1 号口和 4 号口疏散。

3) 分析人员疏散全过程可以发现:火灾发生之初,火势发展较为缓慢,故站台层人员都能基本不受影响地到达楼梯入口处;当疏散人数过多时,往往会在楼梯口堵塞很久,影响人员疏散效率。因此,可在火灾发生时设置自动扶梯向上运行,并在楼梯口处增设引导人员有序引流,以提高人员疏散效率。

## 4 结语

本文采用 PyroSim 软件和 Pathfinder 仿真软件建立了上海轨道交通 15 号线某地铁站火灾人员疏散模型。通过模型仿真计算得到,地铁站各关键位置必需安全疏散时间均不超过可用安全疏散时间,由此初步判断站内人员均能安全疏散。

通过对选定人员实时关键性指标的测量和分析发现,从 2 号口疏散的部分人员在整个疏散过程中并不是完全安全的,会存在能见度过低的危险情况。基于该结果并结合人员的整个疏散过程,对地铁站火灾人员安全疏散提出了指导性的措施建议。

## 参考文献

- [1] 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, 17 (1): 241.

(下转第 195 页)

- [2] 王旭东, 李涛, 郭京波. 地铁隧道管片破损原因分析及加固技术[J]. 工程质量, 2016, 34(11): 52.  
WANG Xudong, LI Tao, GUO Jingbo. Damage reason analysis and reinforced technology for subway tunnel segment[J]. Construction Quality, 2016, 34(11): 52.
- [3] 罗昭明, 董志超. 地铁盾构隧道管片破损修复技术研究[J]. 人民长江, 2015, 46(24): 59.  
LUO Zhaoming, DONG Zhichao. Research on repairing technique of broken shield segment in metro tunnel excavation[J]. Yangtze River, 2015, 46(24): 59.
- [4] 康元锋. 地铁盾构隧道衬砌管片损伤修复关键技术研究[J]. 交通世界, 2019(8): 96.  
KANG Yuanfeng. Study on key technologies of repairing segment damage of metro shield tunnel lining[J]. Transpo World, 2019(8): 96.
- [5] LIU T J, CHEN S W, LIN P Q, et al. Failure mechanism and strengthening effect of shield tunnel lining reinforced by steel plates with corbels[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(4): 1603.
- [6] 徐延召. 武汉地铁四号线越江盾构隧道修复施工技术[J]. 土工基础, 2016, 30(1): 28.  
XU Yanzhao. River crossing shielded tunnel remediation techniques for Wuhan Metro No. 4 Line[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(1): 28.
- [7] 潘军. 芳纶纤维布加固地铁盾构隧道承载性能数值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
PAN Jun. Numerical study on bearing behavior of metro shield tunnel reinforced by AFRP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [8] 刁述红, 王凤民, 田斌, 等. 地铁预制混凝土衬砌管片损伤修复关键技术[J]. 山西建筑, 2019, 45(22): 149.  
DIAO Shuhong, WANG Fengmin, TIAN Bin, et al. The key technology for damage repair of reinforced concrete segments of subway[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(22): 149.
- [9] 花楠, 翟志国, 刘柳. 邻近高压电力铁塔盾构隧道被击穿管片修复施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 466.  
HUA Nan, ZHAI Zhiguo, LIU Liu. Construction technology for repairing damaged segment of shield tunnel adjacent to high-voltage power tower[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 466.
- [10] 戴志仁, 王泽宇, 王俊, 等. 城市地铁隧道击穿安全影响分析及其应对措施[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(12): 95.  
DAI Zhiren, WANG Zeyu, WANG Jun, et al. Analysis of breakdown safety influence of urban subway tunnel and its countermeasures[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(12): 95.
- 收稿日期:2023-03-10 修回日期:2023-04-04 出版日期:2024-01-10  
Received:2023-03-10 Revised:2023-04-04 Published:2024-01-10  
· 第一作者:连逢逾,高级工程师,87430094@qq.com  
通信作者:廖林川,硕士研究生,1833249109@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第189页)

- CHEN Shaokuan, DI Yue, SHI Rongdan, 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, 17(1): 241.
- [2] 杨晖, 董冰艳, 张思健. 某地铁站火灾安全疏散仿真研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 368.  
YANG Hui, DONG Bingyan, ZHANG Sijian. Simulation on fire evacuation in a subway station[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(3): 368.
- [3] CHEN Y, WANG C, HUI Y J B, et al. Emergency evacuation simulation at starting connection of cross-sea bridge: case study on Haicang Avenue Subway Station in Xiamen Rail Transit Line[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101163.
- [4] 张立茂, 吴贤国, 李博文, 等. 基于火灾模拟器和 Pathfinder 的地铁车站人员疏散[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 203.  
ZHANG Limao, WU Xianguo, LI Bowen, et al. Fire evacuation of subway station based on fire dynamics simulator and pathfinder[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 203.
- [5] 黄昕, 靳健, 林作忠, 等. 基于 A\* 算法的深部地下空间火灾疏散路径动态规划[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7): 702.  
HUANG Xin, JIN Jian, LIN Zuozhong, et al. Dynamic evacuation path planning for fire disaster of deep underground space based on A\* algorithm[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7): 702.
- [6] HURLEY M J. SFPE Handbook of fire protection engineering[M]. 5th ed. New York: Springer, 2016.
- [7] 陈和燕, 池秀文, 嵇舒翰, 等. 地铁站聚氨酯与聚氯乙烯火灾特性及人员安全疏散研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 103.  
CHEN Heyan, CHI Xiuwen, JI Shuhan, et al. Study on metro station polyurethane and PVC fire characteristics and personnel safe evacuation[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 103.
- [8] 王志刚, 倪照鹏, 王宗存, 等. 设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊1): 50.  
WANG Zhigang, NI Zhaopeng, WANG Zongcun, et al. Determination of heat release rate curve when designing fire[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(S1): 50.
- 收稿日期:2022-09-20 修回日期:2022-10-18 出版日期:2024-01-10  
Received:2022-09-20 Revised:2022-10-18 Published:2024-01-10  
通信作者:罗佳程,硕士研究生,Luojc98@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license