

# 基于 FDS 的水喷淋系统对地铁站台火灾参数的影响研究

代长青<sup>1, 2</sup>, 袁 慧<sup>3</sup>, 王佳慧<sup>1</sup>

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 建筑健康监测与灾害预防技术国家地方联合工程实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽建筑大学 数理学院, 安徽 合肥 230601)

**摘 要:** 为了研究水喷淋系统和应急排烟系统对地铁站台火灾烟气特性的影响, 建立了地铁站台火灾数值模型, 应用 FDS 软件模拟计算了火源热释放速率为 3MW 时地铁站台火灾烟气温度、CO 浓度、烟气能见度等火灾烟气主要参数的变化。结果表明: 水喷淋系统可以降低地铁站台火灾烟气温度 10℃左右, 降低站台火灾 CO 浓度和提高烟气能见度的效果较差; 增大应急排烟速度可以有效降低站台火灾烟气温度和 CO 浓度, 提高烟气能见度。地铁消防自动喷水灭火系统设计和人员疏散方案设计可以考虑设置水喷淋系统与应急排烟系统, 降低火灾烟气对人员疏散的危害。

**关键词:** 水喷淋系统; 应急排烟系统; 站台火灾; 烟气参数; 数值模拟

中图分类号: X913.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)01-001-07

## Study on the Influence of Sprinkler System on Fire Parameters of Subway Platform Based on FDS

DAI Changqing<sup>1, 2</sup>, YUAN Hui<sup>3</sup>, WANG Jiahui<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2.National-local joint Engineering Laboratory of building health monitoring and disaster prevention technology, Hefei 230601, China;

3.School of Mathematics and Physics, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** A numerical model of subway platform fire is established to study the effects of sprinkler system and smoke extraction system on the smoke characteristics of subway platform fire. The FDS software is used to simulate and calculate the changes of main parameters of fire smoke, including smoke temperature, CO concentration and visibility, when the heat release rate of fire is 3MW. The results show that the sprinkler system can reduce the smoke temperature of subway platform fire by about 10 degrees, while its effect of reducing the CO concentration and improving the visibility is poor. The increase of the emergency smoke extraction speed can effectively reduce the smoke temperature and CO concentration and improve the visibility. The sprinkler system and emergency smoke exhaust system should be added in the subway fire-fighting system and evacuation scheme to reduce the harm caused by fire smoke.

**Keywords:** sprinkler system; emergency smoke extraction system; platform fire; smoke parameter; numerical simulation

消防水喷淋系统是一种应用十分广泛的固定消防灭火设施, 根据功能不同, 可以分为人工控制

和自动控制两种形式, 具有系统灭火控制面积大、出水量大等特点, 能够扑灭初期火灾, 抑制火势蔓

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学基金项目 (KJ2018JD01、KJ2021JD21); 安徽省科技厅自然科学基金项目 (2108085ME159); 安徽省中央引导地方科技发展专项项目 (2018080503B0020); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202010878003)

作者简介: 代长青 (1979-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事建筑结构火灾、人员疏散、应急救援等研究工作。

延和火场温度快速上升,因而在地铁站厅和站台层逐渐推广应用。国内外学者对地铁运营安全问题的研究主要集中在地铁火灾烟气控制方面<sup>[1-6]</sup>,部分学者对水喷淋系统的应用开展了研究。李贤斌<sup>[7]</sup>等对大型地下空间水喷淋流量变化对火灾的影响进行了数值模拟研究;孙磊<sup>[8]</sup>等开展了水喷淋系统和排烟系统对灭火救援的影响全尺寸商场模型实验研究;徐明俊<sup>[9]</sup>等对高大空间不同喷水强度时水喷淋系统进行了灭火试验;Sun Jiayun<sup>[10]</sup>等应用 CFD 软件对小尺度隧道火灾实验中喷水系统引起的流场变化进行了数值模拟计算研究;Dombrovsky<sup>[11]</sup>等对水喷淋灭火初期蒸发液滴的红外散射变化进行了研究;Wang Jie<sup>[12]</sup>等开展了纵向通风隧道火灾中喷水流速对顶板烟气温度分布的影响研究;张雷<sup>[13]</sup>等应用数值模拟方法探讨了水喷淋系统对地铁站台火灾烟气流动的影响。

通过对以上文献分析,国内外学者对水喷淋系统的研究内容主要针对水喷淋系统的应用性和对火灾烟气的影响,对水喷淋系统扑救地铁站厅和站台层火灾以及水喷淋系统对地铁火灾参数的影响研究较少。笔者以合肥某地铁站台为火灾模型,应用 FDS 软件对地铁站台火灾进行数值模拟计算,在火灾模拟中分别设置火场烟气温度、CO 浓度、烟气能见度等三个火灾烟气主要参数探测点,分析水喷淋系统与应急排烟系统协同作用对地铁站台火灾参数的影响。在数值模拟计算方面,FDS 软件能够对各种火灾场景进行数值模拟,计算结果可以作为消防设计理论依据<sup>[14]</sup>。

## 1 地铁站台物理模型建立

### 1.1 地铁站台物理模型

本文以合肥地铁某站台为研究对象,该地铁站为岛式地下二层结构,站台层长、宽、高分别为 120.0 m、10.0 m、5.0 m,站厅层长、宽、高分别为 120.0 m、24.0 m、5.0 m。站厅层与站台层连通设有 2 部自动扶梯和 1 部步行梯连通,站厅层设置三个出入口,地铁车站物理模型如图 1 所示。

### 1.2 地铁站台应急排烟系统

地铁站台层发生火灾时,站厅层启动送风系统,站台层关闭送风系统,启动排风系统。根据《地铁设计规范》(GB50157-2018)规定,地铁站台排

烟量应按照建筑面积  $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$  计算,地铁站台层建筑面积为  $1200 \text{ m}^2$ ,地铁站台层设置排烟口 10 个,排烟口尺寸为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。为研究不同排烟风速时的火灾烟气参数变化情况,排烟口风速设定为  $10 \text{ m/s}$  与  $20 \text{ m/s}$  两种工况,排烟口均匀布置在站台顶部,排烟量均满足规范要求。

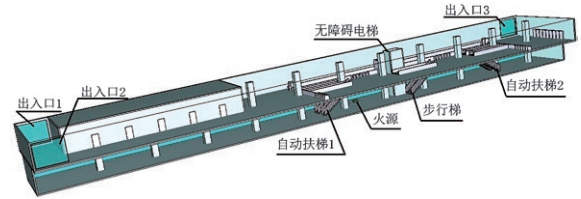


图 1 地铁车站物理模型

### 1.3 地铁站台水喷淋系统

根据《自动喷水灭火系统设计规范》(GB50084-2017),地铁车站火灾危险等级按照中危险级 I 级设置水喷淋系统,系统喷水强度为  $6 \text{ L/min}$ ,作用面积为  $160 \text{ m}^2$ 。水喷淋系统的喷头采用直立型洒水喷头,喷头流量系数  $K$  为 80,保护面积为  $12.5 \text{ m}^2$ ,喷头启动温度为  $57 \text{ }^\circ\text{C}$ ,水喷淋系统的初始开启时间设置为  $60 \text{ s}$ 。

## 2 地铁站台数值模型

### 2.1 数值模型基本方程

FDS 火灾动力学软件采用大涡数值模拟 (large eddy simulation, LES),根据质量守恒、动量守恒和能量守恒,对火灾烟气流动的主要物理量  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、烟气温度  $T$ 、烟气压力  $p$  和烟气密度  $\rho$ ,建立了质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、组分方程和状态方程,通过联立求解,最终得到计算区域火灾烟气的温度、密度、速度与压力,其基本方程<sup>[15]</sup>如下:

$$\text{质量守恒方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_i \nabla) u_i \right] + \nabla p = \rho g_i + F_i + \nabla \tau_{ij} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \rho h u = \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \nabla \rho - \nabla q_r + \nabla k \nabla T + \sum_i \nabla h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad (3)$$

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho Y_i u_i) = \nabla(\rho D_i Y_i) + m_i'' \quad (4)$$

状态方程:

$$p = \rho TR \sum \frac{Y_i}{M_i} \quad (5)$$

式中: $\rho$  为气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u_i$  为  $i$  方向上的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $p$  为静压力,  $\text{Pa}$ ;  $\rho g_i$  为  $i$  方向上的所受的体积力,  $\text{N}$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $F_i$  为由热源引起的源项;  $\tau_{ij}$  为应力张量值,  $\text{N}$ ;  $h$  为焓,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $K$  为热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $q_r$  为体积热释放率,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $Y_i$  为第  $i$  种组分的质量分数;  $D_i$  为扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $m_i''$  为单位体积内第  $i$  种组分的质量生成率;  $R$  为气体摩尔常数,  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $M_i$  为第  $i$  种组成成分的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{mol}$ 。

## 2.2 火源及初始条件设定

在地铁站台中部  $x=67 \text{ m}$  处设置一个行李箱火源, 火源尺寸为  $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 站台初始环境温度设为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 火源最大热释放速率  $Q$  为  $3 \text{ MW}$ , HRRPUA 设置为  $2000 \text{ kW}/\text{m}^2$ 。火源初始增长阶段选择  $t^2$  火源, 设置火灾为快速型, 火灾增长系数  $\alpha=0.04689$ 。根据  $t^2$  火灾模型, 由  $Q=0.04689 t^2$ , 计算可得在火灾发生后大约  $252.9 \text{ s}$  时刻火源热释放速率达到最大值。在模型中设置了火场烟气温度、CO 浓度、烟气能见度等火灾烟气主要特征参数探测点, 按照人体特征尺寸, 测点高度均设为  $1.6 \text{ m}$ , 如图 2 所示。为获得水喷淋系统与应急排烟系统协同作用对地铁站台火灾参数的影响, 数值模型模拟工况设置三个工况, 如表 1 所示。

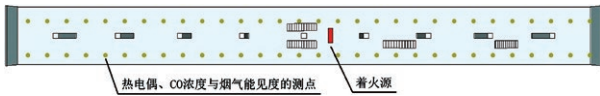


图 2 地铁站台火灾参数测点布置图

表 1 数值模拟工况设计

工况	应急排烟速度 (m/s)	水喷淋系统
工况 1	10	关闭
工况 2	20	关闭
工况 3	10	开启

## 2.3 火源及初始条件设定

为保证数值模拟计算结果的准确性, 数值模型网格尺寸划分需要一定的精密性, 美国国家标

准研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology) 经实验验证, 当数值模型中的网格尺寸与火源特征直径  $D^*$  的关系为  $0.06 D^* - 0.25 D^*$  时, 数值模拟计算结果能够保证计算结果的准确性。火源特征直径  $D^*$  通常表示为:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (6)$$

式中:  $D^*$  为火源特征直径,  $\text{m}$ ;  $Q$  为火源热释放速率,  $\text{kW}$ ;  $\rho_0$  为环境空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 一般取  $1.204 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为环境空气比热,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , 一般取  $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T_0$  为环境空气温度,  $\text{K}$ , 一般取  $293 \text{ K}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ , 一般取  $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。本文数值模型的火源功率为  $3.0 \text{ MW}$ , 火源特征直径计算结果为  $1.49 \text{ m}$ , 因此, 本文数值模型网格尺寸设置为  $0.25 \text{ m}$ , 满足数值模拟计算准确性要求。

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 人员安全疏散的判据指标

本文数值模拟计算结果主要分析地铁站台火灾烟气温度、站台 CO 浓度、站台烟气能见度等火灾烟气主要特征参数的变化情况, 并根据国内建筑防火性能化设计与安全评估广泛采用的人员安全疏散判据指标<sup>[16]</sup>(见表 2) 和美国消防协会 NFPA502 给出的人员安全疏散的耐受极限<sup>[17]</sup>(见表 3) 分析火灾烟气主要特征参数对地铁站台人员安全疏散及逃生的影响。

表 2 人员安全疏散判据指标

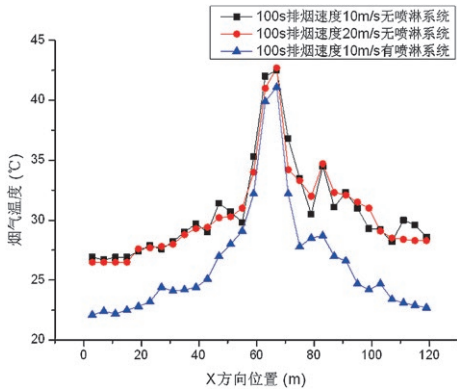
项目	安全疏散判据指标
烟气中疏散的温度	热烟气层降低到 $2 \text{ m}$ 以下时, $30 \text{ min}$ 内的临界温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$
光学密度 (能见度)	当烟气层高度低于 $2 \text{ m}$ 时, 大空间能见度不小于 $10 \text{ m}$ , 小空间能见度不小于 $5 \text{ m}$
烟气毒性	CO 气体临界浓度达到 $25\%$ ( $2500 \text{ ppm}$ )

表 3 狭长空间火灾人员疏散的耐受极限

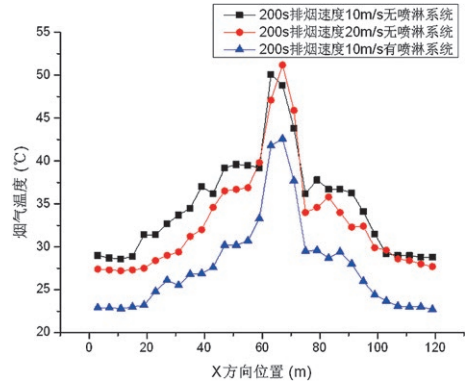
项目	人员疏散耐受极限
空气温度	短时间最高耐受温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 耐受平均温度为 $49 \text{ }^\circ\text{C}$
CO 气体	短时间最高浓度为 $2000 \text{ ppm}$ , $6 \text{ min}$ 内平均浓度为 $1500 \text{ ppm}$ , $15 \text{ min}$ 内平均浓度为 $800 \text{ ppm}$ , 超出时间的平均浓度为 $50 \text{ ppm}$
能见度	$80 \text{ lx}$ 亮度的疏散标识分辨距离为 $30 \text{ m}$ , 门和墙的分辨距离为 $10 \text{ m}$

### 3.2 站台火灾烟气温度分析

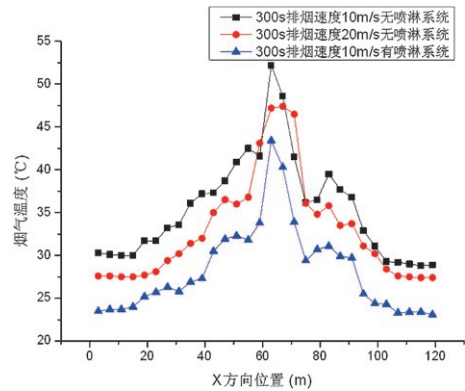
为研究不同工况下站台火灾烟气温度的变化情况,在地铁站台  $z=1.6\text{ m}$ 、 $y=3\text{ m}$  沿站台长度  $x$  方向间隔  $4\text{ m}$  均匀布置了 30 个烟气温度探测点,地铁站台初始环境温度为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,站台不同测点烟气温度变化如图 3 所示。由图 3(a) —图 3(f) 可知,由于着火源设置在站台中部,三种工况下站台烟气测点温度均呈现中部高、两端较低的变化规律,在同一时刻工况 1、2、3 的烟气测点温度有较大变化。100 s 时,工况 1 与工况 2 的烟气测点温度大小与变化规律基本一致,最高温度达到  $42.7\text{ }^\circ\text{C}$ ,说明排烟口排烟速度对初起火灾空气温度影响较小;工况 3 的烟气测点温度明显低于工况 1、2 的温度,这是由于开启水喷淋系统对初起火灾温度影响较大,可有效降低火场温度。随着火灾的发展,三种工况下同一时刻和同一测点的烟气温度呈现中部温度差异较小、两端温度差异较大的特点。站台中部区域烟气测点温度工况 1 的最大值为  $52.4\text{ }^\circ\text{C}$ 、工况 2 的最大值为  $49.2\text{ }^\circ\text{C}$ 、工况 3 的最大值为  $43.4\text{ }^\circ\text{C}$ ;站台两端区域烟气测点温度工况 1 的最大值为  $30.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、工况 2 的最大值为  $27.7\text{ }^\circ\text{C}$ 、工况 3 的最大值为  $24.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。上述结果表明,三种工况下的地铁站台烟气温度均没有达到人员疏散的耐受极限空气温度  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ,不会造成人员伤害。增大排烟口的排烟速度和开启水喷淋系统均可以有效降低站台烟气测点温度,其中开启水喷淋系统和应急排烟是降低站台烟气温度最有效措施,在同一时刻和同一测点最大可以降低站台烟气温度达  $10\text{ }^\circ\text{C}$  左右。



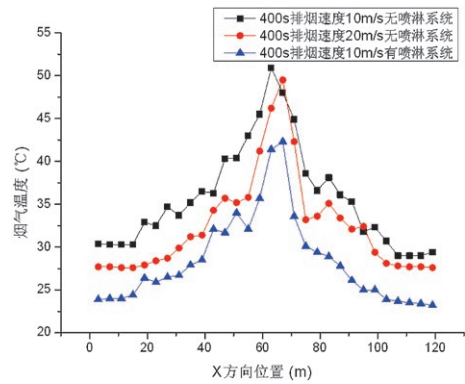
(a)  $t=100\text{ s}$



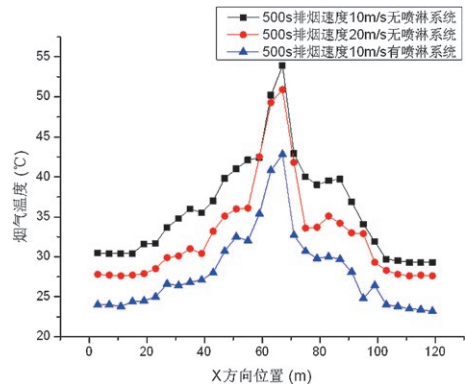
(b)  $t=200\text{ s}$



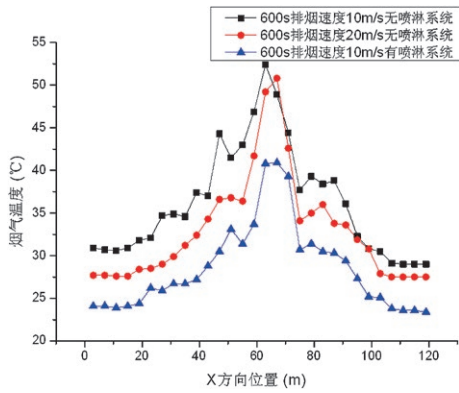
(c)  $t=300\text{ s}$



(d)  $t=400\text{ s}$



(e)  $t=500\text{ s}$

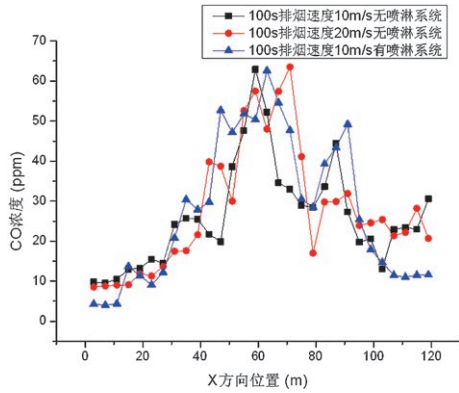


(f)  $t=600\text{ s}$

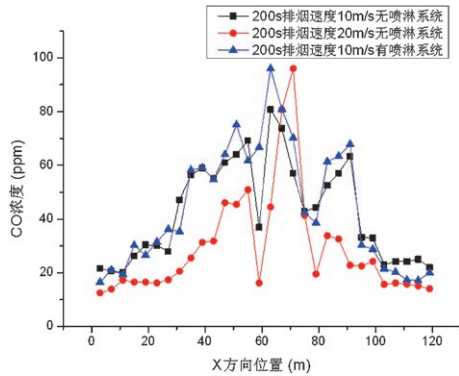
图 3 站台不同测点烟气温度

### 3.3 站台火灾烟气 CO 浓度分析

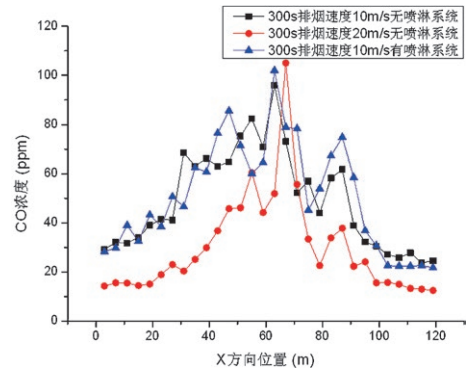
为研究不同工况下站台火灾烟气 CO 浓度的变化情况,在地铁站台  $z=1.6\text{ m}$ 、 $y=3\text{ m}$  沿站台长度  $x$  方向间隔  $4\text{ m}$  均匀布置了 30 个 CO 浓度探测点,站台不同测点 CO 浓度变化如图 4 所示。



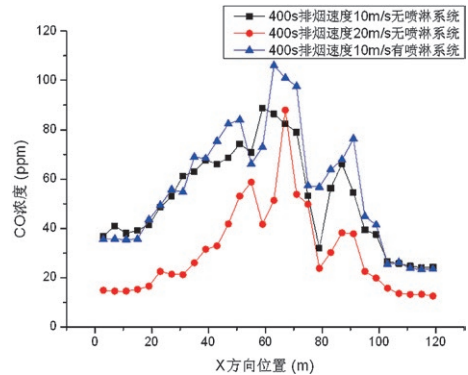
(a)  $t=100\text{ s}$



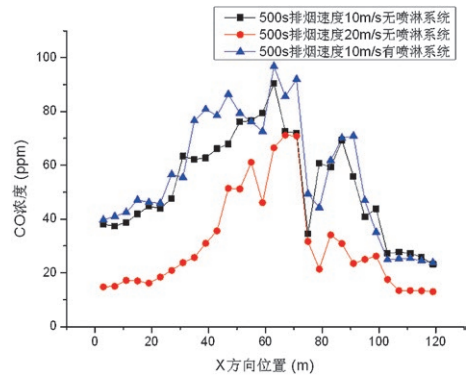
(b)  $t=200\text{ s}$



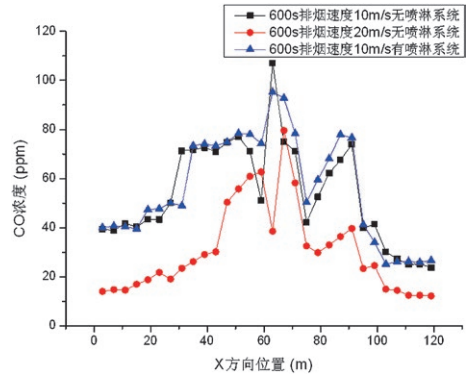
(c)  $t=300\text{ s}$



(d)  $t=400\text{ s}$



(e)  $t=500\text{ s}$



(f)  $t=600\text{ s}$

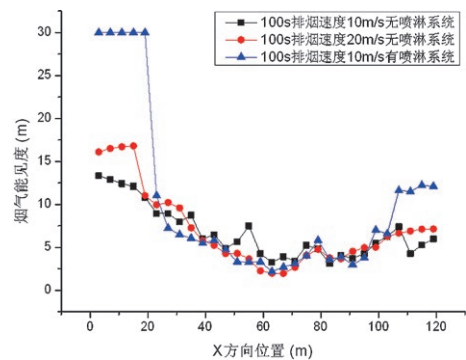
图 4 站台不同测点 CO 浓度

由图 4(a) —图 4(f) 可知, 工况 1、2、3 的火灾烟气 CO 浓度变化规律基本一致。由于站台中部区域距离着火源较近, 三种工况下站台火灾烟气 CO 浓度在站台中部区域较高, 在站台两端区域较低。工况 1 与工况 3 的火灾烟气 CO 浓度大小差异不大, 说明地铁站台火灾时开启与关闭消防水喷淋系统对火灾烟气 CO 浓度的影响不大。为了研究工况 1、2、3 的火灾烟气 CO 浓度对人员逃生的影响, 选择人员逃生出口  $x=87\text{ m}$  的 CO 浓度数据为比较值, 工况 2 与工况 1、3 的火灾烟气 CO 浓度大小在 100 s 时差异不大, 200 s 以后差异变大, 500 s 时工况 1、2、3 的火灾烟气 CO 浓度分别是 69 ppm、31 ppm、70 ppm。工况 2 比工况 1、3 的火灾烟气 CO 浓度减少一半, 说明增大应急排烟速度能够有效降低火灾烟气 CO 浓度。在整个火灾发展过程中, 工况 1、2、3 的火灾烟气 CO 浓度的最大值是 107 ppm, 可见在短时间内三种工况下的火灾烟气 CO 浓度均没有达到人员疏散的 CO 浓度耐受极限。

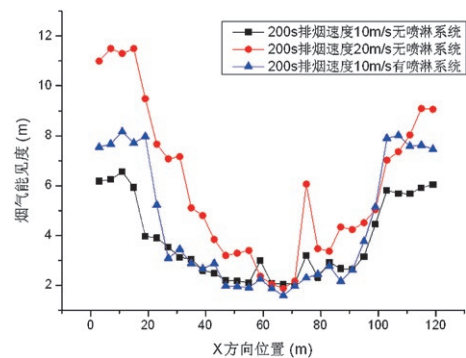
### 3.4 站台火灾烟气能见度分析

为研究不同工况下站台火灾烟气能见度对人员疏散的影响, 在地铁站台  $z=1.6\text{ m}$ 、 $y=3\text{ m}$  沿站台长度  $x$  方向间隔 4 m 均匀布置了 30 个烟气能见度传感器探测点, 烟气能见度变化如图 5 所示。由图 5(a) —图 5(f) 可知, 站台中部区域距离着火源较近, 烟气浓度较高, 三个工况下的烟气能见度均较小; 站台两端区域远离着火源, 烟气浓度较低, 三个工况下的烟气能见度均较大。300 s 以内, 工况 1 在站台两端区域的烟气能见度比工况 3 的烟气能见度小, 且随着火灾的发展, 烟气能见度的差异越来越小, 在站台中部区域接近着火源位置的烟气能见度差异不大, 工况 1 的烟气能见度比工况 3 的烟气能见度略大; 300 s 以后, 在站台两端区域, 工况 1 的烟气能见度比工况 3 的烟气能见度略小, 在站台中部区域, 工况 1 的烟气能见度比工况 3 的烟气能见度略大, 说明开启水喷淋系统不能提高站台火灾烟气能见度。100 s 时, 在站台全部区域工况 2 的烟气能见度介于工况 1 与工况 3 的烟气能见度之间; 200 s 以后, 随着火灾的发展, 站台烟气浓度增大, 工况 2 的烟气能见度均较大于工况 1、3 的烟气能见度, 说明提高应急排烟速度能够有效提高站

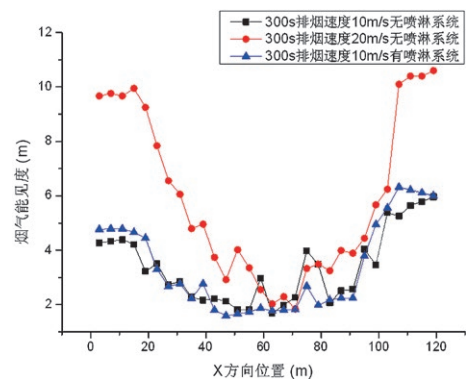
台火灾烟气能见度。根据人员安全疏散判据指标, 人员在站台区域疏散临界指标选择 5 m, 200 s 以内, 三个工况在站台端部区域的烟气能见度均大于 5 m, 在站台中部区域的烟气能见度均小于 5 m; 200 s 以后, 工况 1、3 在站台端部区域的烟气能见度略大于 5 m, 在站台中部区域的烟气能见度小于 5 m。工况 2 在站台端部区域的烟气能见度大于 5 m, 在站台中部区域的烟气能见度小于 5 m。可见, 200 s 以内远离着火源的站台端部区域的烟气能见度较大, 有利于人员疏散和逃生。



(a)  $t=100\text{ s}$



(b)  $t=200\text{ s}$



(c)  $t=300\text{ s}$

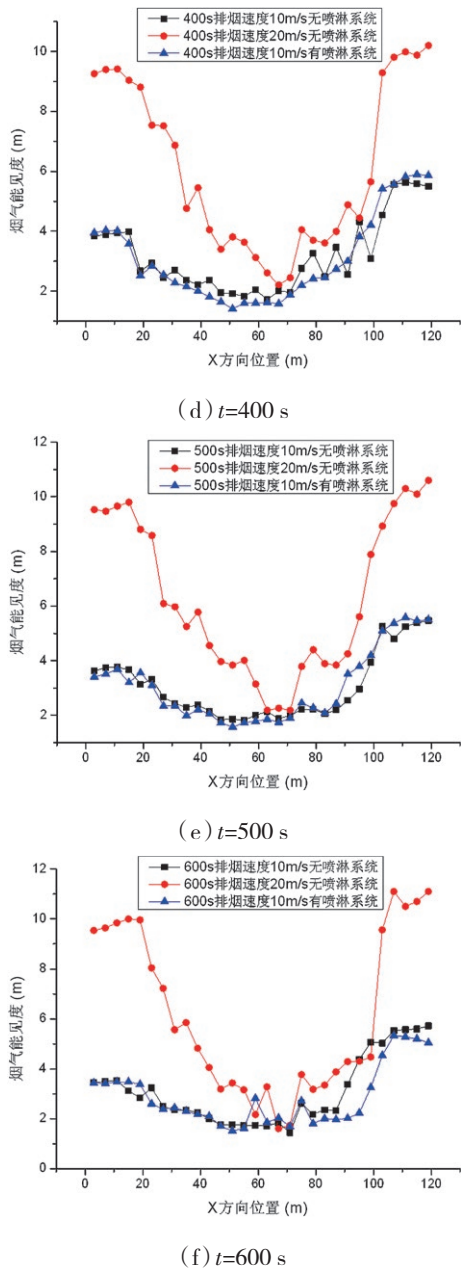


图 5 站台不同测点烟气能见度

## 4 结论

(1) 三种工况下站台火灾烟气温度均没有达到人员疏散耐受极限温度。降低站台火灾烟气温度有效性对比结果:排烟速度 10 m/s 且开启水喷淋系统 > 排烟速度 20 m/s 且关闭水喷淋系统 > 排烟速度 10 m/s 且关闭水喷淋系统,同一时刻同一测点开启水喷淋系统比其他两种工况最大可降低火灾烟气温度 10℃左右,开启水喷淋系统可有效降低站台火灾烟气温度。

(2) 三种工况下 500 s 时人员逃生出口  $x=87\text{ m}$  的 CO 浓度情况:排烟速度 20 m/s 且关闭水喷淋系统为 31 ppm;排烟速度 10 m/s 且开启水喷淋系统为 70 ppm;排烟速度 10 m/s 且关闭水喷淋系统为 69 ppm。降低站台火灾烟气 CO 浓度有效性对比结果:增大应急排烟速度可以有效降低站台火灾烟气 CO 浓度,开启水喷淋系统不能有效降低站台火灾烟气 CO 浓度。

(3) 三种工况下提高站台烟气能见度有效性对比结果:增大应急排烟速度对提高烟气能见度效果最好,开启水喷淋系统不能有效提高烟气能见度。200 s 以后,排烟速度 20 m/s 且关闭水喷淋系统时,在人员逃生出口区域烟气能见度大于人员疏散耐受极限 5 m,不会对人员疏散产生危害;其他两种工况的烟气能见度均小于人员疏散耐受极限 5 m,会对人员疏散产生危害。

### 参考文献:

- [1] 丁厚成,戚文竟,朱志伟,等. 地铁车厢内部火灾烟气流动规律的数值模拟研究[J]. 安全与环境工程,2017,24(4):123-128.
- [2] 毛军,郗艳红,胡家鹏,等. 分离式深埋地铁车站的火灾烟气运动及防控[J]. 中国安全科学学报,2019,29(6):76-82.
- [3] 杜学胜,常绪华. 不同通风方式下地铁区间隧道火灾烟气特性分析[J]. 科学技术与工程,2018,18(23):348-352.
- [4] 田向亮,钟茂华,陈俊洋,等. 地铁十字换乘车站全尺寸实验研究: I. 站厅火灾[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(3):11-18.
- [5] 钟茂华,陈俊洋,陈嘉诚,等. 地铁十字换乘车站全尺寸实验研究: II. 站台火灾[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(5):42-48.
- [6] Giachetti B, Couton D, Plourde F. Smoke spreading analyses in a subway fire scale model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70:233-239.
- [7] 李贤斌,濮凡,高郭平,等. 大型地下空间水喷淋流量变化火灾模拟[J]. 消防科学与技术,2019,38(10):1428-1431.
- [8] 孙磊,孙楠楠,徐晖,等. 水喷淋系统和排烟系统对灭火救援的影响[J]. 消防科学与技术,2018,37(6):782-785.
- [9] 徐明俊,陆守香. 高大空间水喷淋灭火试验[J]. 船海工程,2017,46(3):94-97.

(下转第 33 页)

- 建设,2020,38(6):83-91.
- [6] 陈铭,李汉川.基于空间句法的南屏村失落空间探寻[J].中国园林,2018,34(8):68-73.
- [7] 官卫华.基于句法分析的农村公共服务设施配置方法——以南京为例[J].城市规划,2015,39(12):80-90.
- [8] 陶伟,陈红叶,林杰勇.句法视角下广州传统村落空间形态及认知研究[J].地理学报,2013,68(2):209-218.
- [9] 刘一曼,李伯华,周鑫,等.基于空间句法的传统村落空间形态与优化研究——以张谷英村为例[J].资源开发与市场,2017,33(11):1289-1294.
- [10] 韩承志,钱双宝.基于空间句法的传统村落街巷空间形态分析——以桂林市褚村为例[J].住宅科技,2020,40(6):63-66.
- [11] 陈哲,程世丹.传统村落公共空间形态句法研究——以江西金溪县竹桥村为例[J].华中建筑,2020,38(8):62-65.
- [12] 韩洁,游玉峰,王量量,等.基于空间句法的闽南侨乡防御性空间研究——以泉州晋江檀林古村为例[J].新建筑,2020(2):143-147.
- [13] 陶伟,林可枫,古恒宇,等.句法视角下广州市沙湾古镇空间形态的时空演化[J].热带地理,2020,40(6):970-980.
- [14] 胡燕,陈晟,曹玮,等.传统村落的概念和文化内涵[J].城市发展研究,2014,21(1):10-13.
- [15] 姚志琳.村落透视——江南村落空间形态构成浅析[J].建筑师,2005(3):48-55.
- [16] 李伯华,尹莎,刘沛林,等.湖南省传统村落空间分布特征及影响因素分析[J].经济地理,2015,35(2):189-194.
- [17] 陈驰,李伯华,袁佳利,等.基于空间句法的传统村落空间形态认知——以杭州市芹川村为例[J].经济地理,2018,38(10):234-240.
- [18] 张愚,王建国.再论“空间句法”[J].建筑师,2004(3):33-44.
- [19] 陈健坤,王天为,梁振宇.基于空间分析的传统村落商业布局与优化策略研究——以安徽省查济村为例[J].建筑与文化,2018(8):165-167.
- [20] 何卓书,许欢,黄俊浩.基于空间句法的历史街区商业空间分布研究——以广州长寿路站周边街区为例[J].南方建筑,2016(5):84-89.
- [21] 陈丹丹.基于空间句法的古村落空间形态研究——以祁门县渚口村为例[J].城市发展研究,2017,24(8):29-34.
- [22] 石磊,许修凡,柳思勉,等.基于空间句法的侗族传统村落空间形态研究——以通道县张里村为例[J].中外建筑,2020(3):113-115.

(上接第 7 页)

- [10] Sun J Y, Fang Z, Beji T, et al. Interpretation of flow fields induced by water spray systems in reduced-scale tunnel fire experiments by means of CFD simulations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 94-102.
- [11] Dombrovsky L A, Dembele S, Wen J X. An infrared scattering by evaporating droplets at the initial stage of a pool fire suppression by water sprays[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 91: 55-62.
- [12] Wang J, Xie Z C, Lu K H, et al. Water spray flow rate effect on smoke temperature distribution under the ceiling in tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 190-196.
- [13] 张雷,唐智,方正,等.喷淋作用下地铁站台烟气流动模拟研究[J].消防科学与技术,2020,39(3):293-296.
- [14] 代长青,袁慧.基于FDS的高层住宅建筑火灾数值模拟分析[J].安徽建筑大学学报,2017,25(4):14-18.
- [15] McGrattan K B, McDermott R, Weinschenk C, et al. Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: [R]. National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [16] 中华人民共和国公安部消防局.中国消防手册.第3卷[M].上海:上海科学技术出版社,2006.
- [17] Estes K A, Mudawar I. Correlation of sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(16):2985-2996.