

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-496-07

# 重庆某地铁车站防灾系统全尺寸热烟测试分析

陈怡桦<sup>1</sup> 张悦<sup>2</sup> 杜灵<sup>3</sup> 王勇<sup>1</sup>

- (1. 重庆大学土木工程学院 重庆 400045;
2. 重庆市沙坪坝区消防救援支队 重庆 400045;
3. 重庆重大建设工程质量检测有限公司 重庆 400045)

**【摘要】** 为检验重庆市轨道交通防灾系统安全性,利用全尺寸热烟测试(Hot Smoke Test)的方法,在重庆某地下暗挖岛式地铁车站开展不同场景下试验。检测了地铁防灾系统的联动效果和综合安全性能,实验得到了烟气温度,CO<sub>2</sub>、CO浓度,烟气层高度等重要参数,分析了站台及站厅2种火灾场景下烟气的分布扩散情况。实验数据可供类似暗挖岛式地铁车站的防灾设计参考。

**【关键词】** 地铁车站; 防灾系统; 火灾; 热烟测试

中图分类号 TU831 文献标识码 A

## Analysis of Full-scale MHST on Disaster Prevention System of a Metro Station in Chongqing

Chen Yihua<sup>1</sup> Zhang Yue<sup>2</sup> Du Ling<sup>3</sup> Wang Yong<sup>1</sup>

- (1.School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045;
- 2.Shapingba Fire and Rescue Dettion of Chongqing, Chongqing, 400045;
- 3.Chongqing Major Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd, Chongqing, 400045 )

**【Abstract】** To test the safety of disaster prevention system of a metro station in Chongqing, the full-scale Hot Smoke Test method was used to carry out tests under different scenes at underground island metro station in a place of Chongqing. By the tests, the interconnection of the disaster prevention system and overall safety performance is examined. The data of smoke temperature, the concentration of CO<sub>2</sub> and CO are obtained by experiments. The distribution and diffusion of smoke under two fire scenes of the platform and the station hall were analyzed. The experimental data can be used as a reference for disaster prevention design of similar underground island metro station.

**【Keywords】** Subway station; Disaster prevention system; Fire; Hot smoke test

作者简介: 陈怡桦 (1996.6-), 男, 在读研究生, E-mail: 372816249@qq.com

通讯作者: 王勇 (1971.8-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cqwangyong@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-17

## 0 引言

随着地铁的高速发展,地铁防灾系统的安全性越来越受到重视。为了分析和评估地铁车站防灾系统的安全性能,国内学者及研究机构纷纷开展了各种研究。史聪灵,钟茂华,涂旭炜等人进行了模型试验以及数值模拟的研究<sup>[1-3]</sup>。中国安全生产科学研究院在北京,广州,深圳,成都,西安,哈尔滨

和郑州等城市对地铁的防灾系统进行了大量的全尺寸实验<sup>[4,5]</sup>。田向亮,钟茂华,陈俊洋等人对地铁十字换乘车站开展了火灾全尺寸实验<sup>[6,7]</sup>。龙增等人对含阶梯式地铁岛式车站开展了全尺寸实验<sup>[8]</sup>。相较于模型试验及数值模拟,地铁全尺寸实验更能获得有价值参考数据,且可反映地铁火灾实况。配合获得的地铁防灾系统联动测试数据,更能为地

铁防灾系统的安全性能做出分析与评估。目前国内所开展的全尺寸热烟试验, 主要研究分析实验的烟气温度、沉降高度等数据参数<sup>[1-8]</sup>。而实际发生火灾时影响人员疏散的危险因素还有 CO<sub>2</sub>、CO 浓度<sup>[4,9]</sup>, 而这方面实验分析还较少。

重庆市轨道交通运营里程 329 公里, 重庆市城市快速轨道交通第三期建设规划, 全是轨道交通通车车程将超过 500 公里<sup>[11]</sup>。为检验重庆市轨道交通防灾系统安全性, 相关单位在多条通车线路上进行了热烟试验, 获得了一定的数据。本文以重庆某地下暗挖岛式地铁车站站台、站厅开展的防灾系统为研究对象, 进行了热烟测试, 获得了烟气温度、CO<sub>2</sub>、CO 浓度、沉降高度等特征测试结果可为类似暗挖岛式地铁车站的防灾设计提供参考。

## 1 车站和实验系统设备

### 1.1 车站概况

车站总建筑面积 20380.33m<sup>2</sup>, 车站外包总高度 21.15m, 顶板覆土厚度 55m, 站台长度 203.64m, 宽 25m, 高 5.7m; 站厅长度 203.64m, 高 9.4m。地下 2 层 (局部 3 层), 地下一层为站厅层, 地下一层小里程端设站厅层上夹层, 地下二层为站台层即降压变电所, 属于轨道交通地下暗挖式车站。主要功能平面图如图 2 和图 3 所示。

### 1.2 车站防灾系统

本站站台站厅公共区为一个防火分区, 站厅层右侧设备管理区为一个防火分区, 站台层右侧设备区为一个防火分区。站台层扶梯开口四周设从结构板底下垂至吊顶面一下 0.5m 的挡烟垂壁。站厅公共区和站台公共区分别为一个防烟分区, 面积为 1567m<sup>2</sup> 和 1086m<sup>2</sup>。

该工程主要系统包括 FAS 系统、BAS 系统综合监控、系统、通风排烟系统、疏散指示系统、闸机 (AFC)、屏蔽门、PIS 系统、应急照明、供电切非等。工程主要防灾系统功能描述为: ① 当有一个感烟探测器或感温探测器报警后, 火灾自动报警联动控制器接收到第一个报警信号, 当火灾自动报警联动控制器接收到第二个报警信号后, 火灾自动报警 (FAS) 系统直接启动专用消防设备如消防排烟风机、防烟和防火阀等 (站厅层); 对于站台层, 同时启动兼用风机, 即轨行区排热 (OTE) 风机和风机房内隧道 (TVF) 风机。同时由火灾自动

报警系统自动下达火灾模式控制指令给环境与设备监控系统 (BAS 系统) 和综合监控系统 (ISCS), 环境与设备监控系统自动进入模式控制程序, 并将火灾模式指令执行信息反馈给综合监控系统。② 供电切非、警铃、电梯、消防泵、门禁系统、防火卷帘门等由 FAS 系统直接联动。③ 平时用于送、排风的通风系统与暖通空调系统共用设备 (隧道通风空调系统、车站通风空调系统、风阀、照明系统、自动扶梯等), 由 BAS 控制。④ 综合监控系统集成电力监控系统 (PSCADA)、环境与设备监控系统 (BAS)、站台门系统 (PSD), 互联广播 (PA)、闭路电视监控系统 (CCTV)、门禁系统 (ACS)、乘客信息显示系统 (PIS)、自动售检票系统 (AFC)、火灾自动报警系统 (FAS)、时钟系统 (CLK)、列车监视系统 (ATS)、集中告警系统 (ALM) 等由综合监控系统联动或提示紧急后备操作盘 (IBP) 手动操作。

### 1.3 测试系统

全尺寸火灾实验系统主要包括火源系统、测量系统。火源系统用于产生预设火灾功率的热烟气, 包括燃烧器、烟气发生器和烟气发生箱和保护装置, 主体结构如图 1 所示。燃烧器包括由钢板焊接形成、根据预设火灾功率改变数量组合及摆放方式的燃烧油盘组成。油盘尺寸为 0.841m (内部长) × 0.595m (内部宽) × 0.13m (内部高), 油盘钢板焊接而成, 在燃烧油盘短边的外部盘壁用 0.1m 直径的钢焊接两个把手<sup>[13]</sup>。该火源功率如表 1 所示。

表 1 燃料量和模拟火源功率

Table 1 Fuel quantity and simulated fire power

油盆数量 (个)	燃料总量 (L)	近似热量输出 (kW/m <sup>2</sup> )	近似火灾功率 (kW)
4	16X4	751	1500

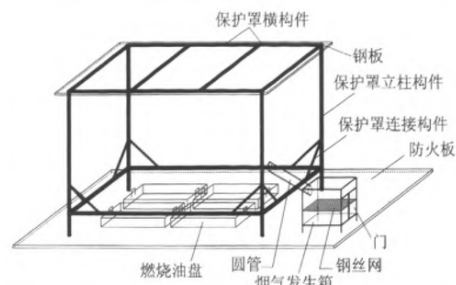


图 1 火源系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of fire source system

测量系统用于获得现场热烟测试的指标参数，主要测量单元包括温度测量单元、气体浓度测量单元、气流速度测量单元、图像信息采集和显示单元、

热像测量单元、烟层高度指示单元。所用测试仪器如表 2 所示。

表 2 测试仪器

Table 2 Test instruments

所需测量参数	测量仪器	备注
温度	安捷伦 34410A 巡检仪 热电偶线	精度为 0.1℃
CO 浓度	KANE950CO 一氧化碳测试仪器 科尔诺 GT903-CO 一氧化碳测试仪器	精度 0.1ppm
热烟图像采集	FLIR-T420 热成像仪	火焰及顶棚烟气温度
风速	万象风速仪 WFWZY-1 优利德 UT360 数字式风速仪	测量楼梯下行风速、计算排烟量。精度分别为 0.1m/s 和 1m/s
烟气沉降高度	标尺	精度 1mm

1.4 测点布置

热烟测试的目的是对车站各系统进行安全性评价。因此，火源布置在站厅和站台的最不利位置，该点对人员的疏散最为不利，对站内人员的危险威胁最大。站厅站台层的火源布置点位置如图 2 所示。通过布置在人员疏散的通道以及排烟口处的测试点获得的测试数据，以便获得相关危险性指标的分布。

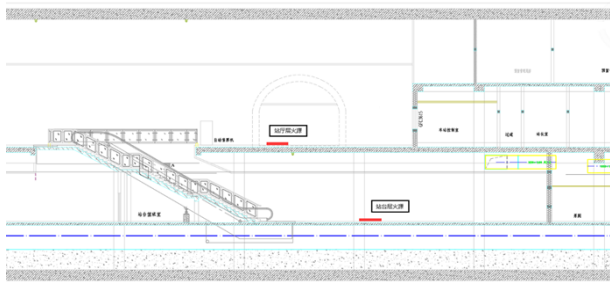


图 2 火源位置剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of fire source location section

1.4.1 站台测点布置

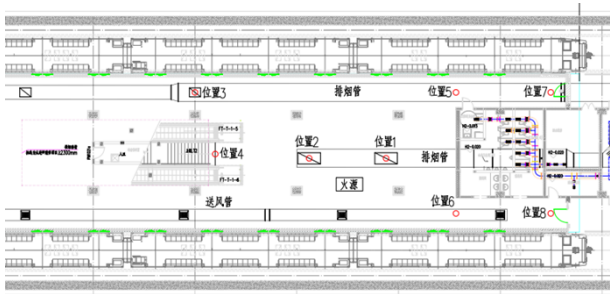


图 3 站台测点布置图 (圆圈处为测点)

Fig.3 Arrangement of measuring points on the platform (the circle is the measuring point)

测点位置说明：测点位置 1、2 为排烟风管排烟口处；测点位置 3 为 OTS 风机控制的排烟口处；测点位置 5 与 6 为端头屏蔽门通道处；测点位置 7 与 8 为端头屏蔽门处。

1.4.2 站厅测点布置

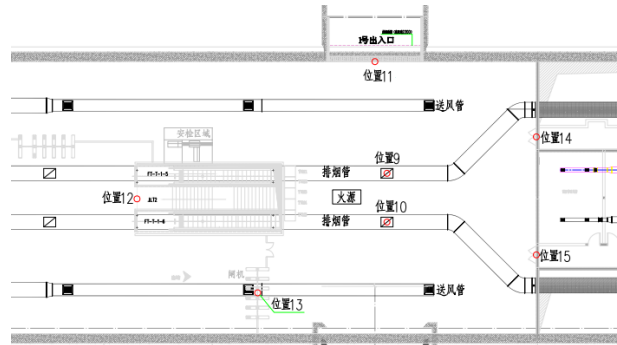


图 4 站厅测点布置图 (圆圈处为测点)

Fig.4 Arrangement of measuring points in station Hall (the circle is the measuring point)

测点位置说明：测点位置 9、10 为排烟风管排烟口处；测点位置 11 为疏散通道处；测点位置 12 为站厅、站台楼梯处；测点位置 14 与 15 为设备区门处。

2 实验结果与分析

2.1 站厅温度分布分析

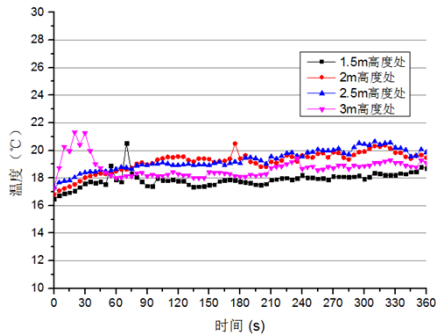
2.1.1 温度测试数据

由于在地铁站进行 7.5MW 火灾功率的全尺寸热烟试验比较危险且难以控制，所以本次实验的火源功率设为 1.5MW。为了得到预期 7.5MW 功率下

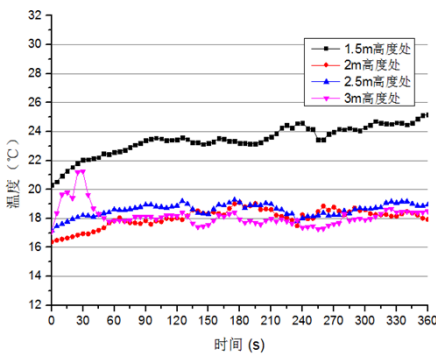
的温度, 根据公式 (1) 比例关系以及 1.5MW 实验工况下的温升, 从而计算出预期烟气温升。

$$\frac{\Delta T_g}{T_0} = C \left[ \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 A_0 \sqrt{gH}} \right]^{\frac{2}{3}} \left( \frac{h A_T}{\rho_0 c_p T_0 A_0 \sqrt{gH}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

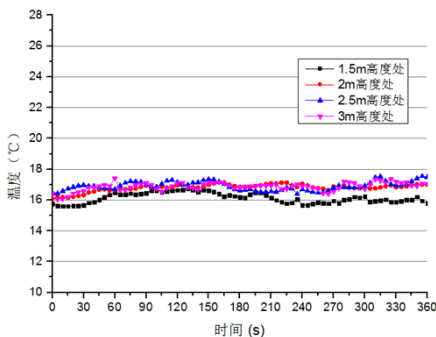
其中,  $T_g$ 、 $T_0$  为烟气层温度和环境空气温度,  $A_T$  为顶棚和侧壁总面积 (扣除通风面积),  $A_0$  为通风口面积,  $\rho_0$  为空气密度,  $H$  为顶棚高度,  $g$  为加速度。  $Q$  为火灾功率,  $c_p$  为空气比热,  $C$  为常数。若其他参数不变的情况下, 可以得出烟气温升  $\Delta T_g$  与火灾功率  $Q^{\frac{2}{3}}$  成正比。



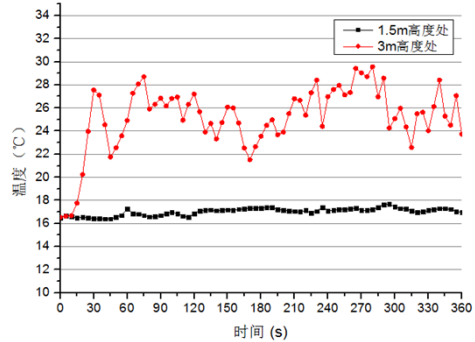
(a) 位置 9 不同高度处温度随时间的变化



(b) 位置 10 不同高度处温度随时间的变化



(c) 位置 13 不同高度处温度随时间的变化



(d) 位置 14 不同高度处温度随时间的变化

图 5 站厅层不同位置温度分布图

Fig.5 Temperature distribution at different locations in the station hall

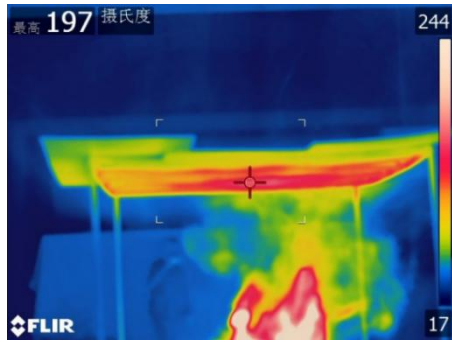
从图 5 可以看出, 不同位置处的温度有不同程度的温升 (室内初始温度为 15~16°C)。温度变化代表烟气的扩散范围和影响。从竖向的温度看, 烟气随时间推移, 烟气逐步扩散到顶部。从图 5 (a) 可以看出, 疏散通道处 0~30s 内烟气层达到最高, 30s 后开始温度下降, 说明该处存在负压。从图 5 (b) 可以看出, 该处温度温升较高, 此处为排烟量较大的排烟口, 说明排烟系统有效。而图 5 (d) 位置的烟气温度的最高, 说明烟气迅速扩散到该处, 且存在贴附现象, 说明有稳定的烟气流动, 而此处无任何排烟口, 说明此处存在一定的封堵问题。从图 5 (c) 可以看出, 闸机的温度变化相对较小, 而此处为人员疏散的主要通道, 对人员的疏散安全影响较小。

根据图 5 中的实验最大温升, 由公式 (1) 算得预期 7.5MW 火源功率下的最大温升为 41°C, 最高温度为 57°C。由于各位置烟气温度均未超过 60°C, 总体的烟气扩散在 6min 的时间内均没有下降到人员疏散高度, 对人员安全威胁较小。

### 2.1.2 热成像测试数据

在疏散时间内的相对温度分布如图 6 所示。热成像仪相对固体表面而言, 气体温度分布存在一定偏差, 但仍能够较好的反映火灾过程中的热烟温度分布。通过温度的分布, 可以较好的与温度测定进行对应分析, 从而为人员的疏散提供依据。

从图 6 的热成像分析看, 火源功率在 110s 时达到峰值, 与实际火灾发展的规律一致。疏散口的温升小, 与温度巡检仪测得数据一致, 烟气在疏散时间内均没有下降到人员疏散区, 能够保证人员的疏散。



(a) 10s-火源



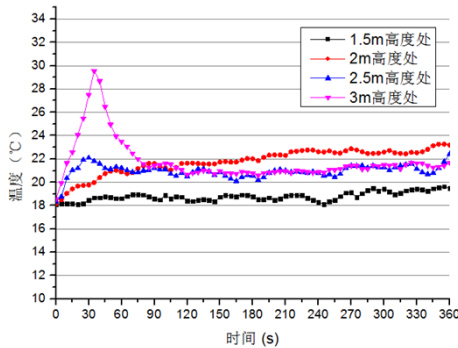
(b) 290s-疏散口

图6 站厅层不同位置热成像图

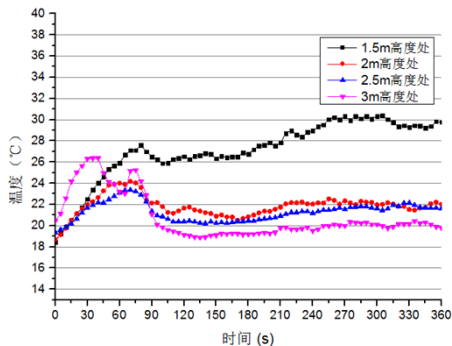
Fig.6 Thermal imaging of different positions in the station hall

## 2.2 站台温度分布分析

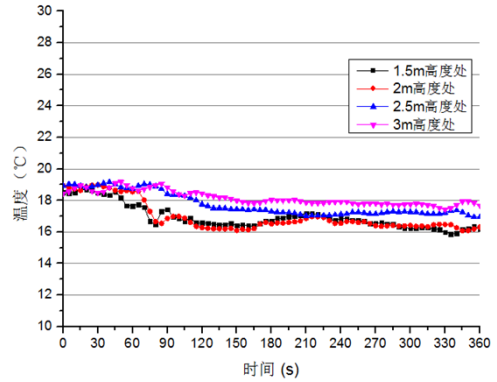
### 2.2.1 温度测试数据



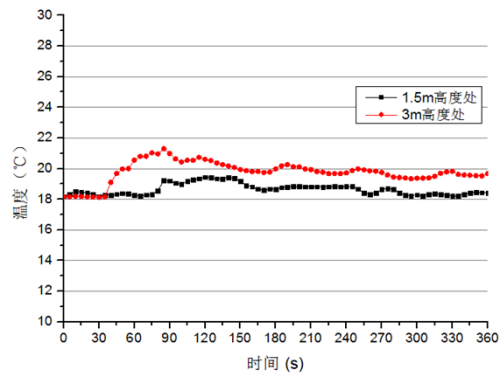
(a) 位置 1 不同高度处温度随时间的变化



(b) 位置 2 不同高度处温度随时间的变化



(c) 位置 4 不同高度处温度随时间的变化



(d) 位置 8 不同高度处温度随时间的变化

图7 站台层不同位置温度分布图

Fig.7 Temperature distribution at different locations on the platform

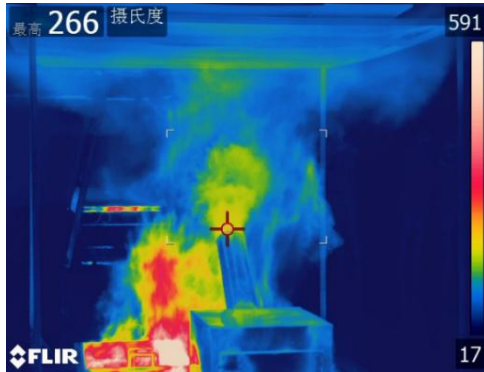
从图 7 (a) 与 7 (b) 看出, 两个位置的排烟口温度分布不同, 说明其排烟量不同 (与烟气量的测试结果一致)。而且, 图 7 (b) 出现了逆温现象。通过风管布置可以看出, 位置 10 的排烟口位置处于送风口附近。当排烟系统启动后, 送风系统开始联动补风, 而补风贴附吊顶与烟气混合, 导致排烟口处温度下降。图 7 (c) 所示为楼梯疏散口, 出现了正常的温度分层现象, 但是温升不明显, 说明该处疏散口相对安全。从图 7 (d) 可以看出, 该处有较大的温升, 说明为烟气的主要流动方向。而该处为端部屏蔽门通风道处, 火灾时端部屏蔽门打开, 隧道风机启动, 该通道成为主要的烟气流动通道。

根据图 7 中的实验最大温升, 由公式 (1) 算得到预期 7.5MW 火源功率下的最大温升为 35°C, 最高温度为 53°C。由于各位置预期烟气温度均未超过 60°C, 故有利于火灾工况下人员的安全疏散。

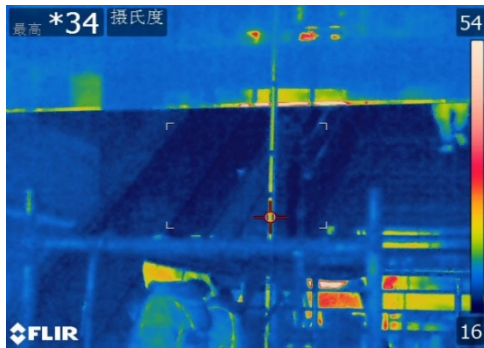
### 2.2.2 热成像仪测试数据



图 8 (a)、(b) 显示火灾扩散以及不同位置点的温度分布情况。



(a) 30s-火源温度



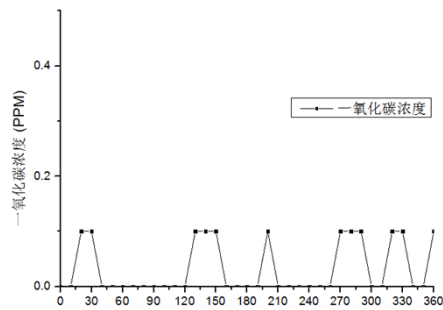
(b) 390s-扶梯出口

图 8 站厅层不同位置热成像图

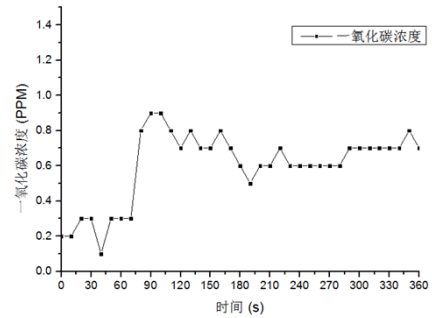
Fig.8 Thermal imaging of different positions in the station hall

从图 8 (a) 可以看出, 0~30s 内火源温度上升极快。从图 8 (b) 可以看出, 扶梯出口处, 没有出现烟气层下降情况, 温升不显著, 人员疏散安全。

### 2.3 站厅 CO 浓度分布分析



(a) 位置 12 处一氧化碳浓度随时间的变化



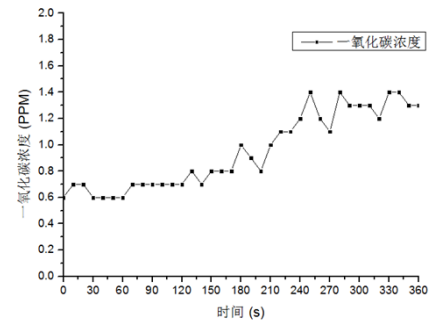
(b) 位置 13 处一氧化碳浓度随时间的变化

图 9 站厅层不同位置一氧化碳浓度分布图

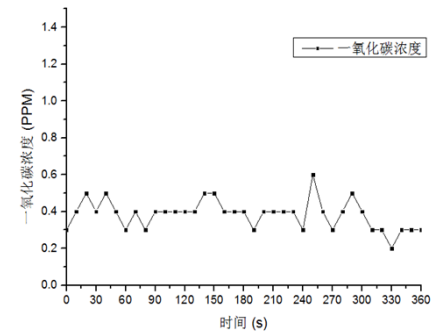
Fig.9 Carbon monoxide concentration distribution at different locations on the station floor

从图 9 (a) 可以看出, 该处为疏散楼梯处的一氧化碳分布出现 0~0.1PPM 的区间跳跃变化。说明该处的一氧化碳分布不明显, 即该位置相对安全。而图 9 (b) 的位置为壁面处, 火灾烟气贴附扩散到该处。当热烟层降到 2m 以下时, 对于大空间其能见度临界指标为 10m, 在可接受的能见度范围内, 毒性都很低, 不会对人造成影响, 且 1.5m 高人呼吸区总体的 CO 体积分数在 35ppm 以内, 此浓度范围对人体影响极小<sup>[4]</sup>, 因此对人员安全疏散影响较小。

### 2.4 站台 CO 浓度分布分析



(a) 位置 3 处一氧化碳浓度随时间的变化



(b) 位置 5 处一氧化碳浓度随时间的变化

图 10 站台层不同位置一氧化碳浓度分布图

Fig.10 Carbon monoxide concentration distribution at different locations on the platform floor

从图 10 (a) 可以看出, 该处的一氧化碳分布处于上升趋势, 该位置处为排烟口处。图 10 (b) 为屏蔽门通道处一氧化碳的分布, 浓度变化恒定。同站厅的 CO 浓度分析, 站台总体的 CO 浓度在 35ppm 安全范围内<sup>[14]</sup>, 对人员疏散毫无影响。

### 2.5 烟气层下降情况

烟气层下降对人员的疏散不利。在火灾过程中, 主要观察主要的人员疏散区的烟气下降情况。当烟气下降到 1.8 米处, 处于人员的疏散空间内, 该高度设定为不利高度。

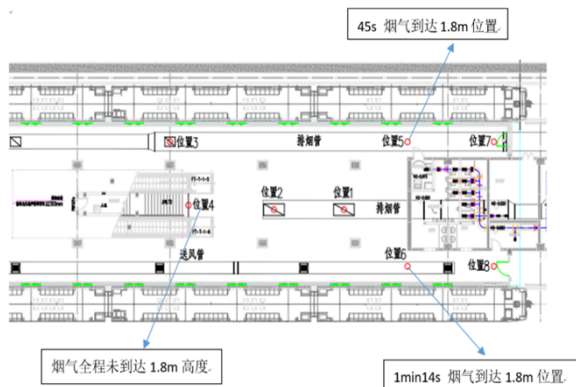


图 11 站台层烟气下降情况

Fig.11 Smoke drop of platform floor

从图 11 可以看出, 站台的主要疏散楼梯口处, 烟气层没有下降, 说明该处处于安全地带, 有利人员的疏散。其他位置达到疏散空间的位置均为屏蔽门通道处。

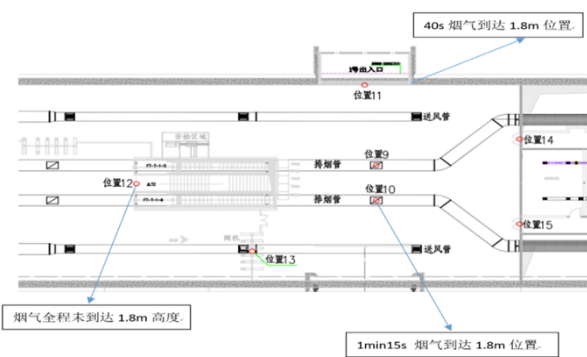


图 12 站厅层烟气下降情况

Fig.12 Smoke drop in the concourse of station

从图 12 可以看出, 站厅的主要疏散楼梯口处 (位置 12), 烟气层没有下降, 说明该处处于安全地带, 有利人员的疏散。但疏散通道处 (位置 11) 烟气层下降, 说明该处的风幕机没有起到阻隔作用, 或未在相应时间启动。位置 10 处的排烟口的排烟

量过小, 因此造成仅 1 分 15 秒烟气就达到 1.8m 高处。结果可为设备系统的复检提供依据。

### 2.6 FAS 与 BAS 动作情况

站台及站厅火灾检测表明, FAS 系统中涉及的烟感、切非、应急照明、门禁、闸机、声光报警、专用排烟机、强切、电梯, 以及 BAS 系统涉及的 OTE 风机、TVF 风机、广播系统均能正常启动。

### 2.7 排烟系统及楼梯开口速度

#### 2.7.1 排烟系统风量

根据测试的数据与消防检测第三方单位的检测数据进行了对比, 两者一致。总的排烟量达到要求。

#### 2.7.2 楼梯开口流速

站厅层火灾期间, 楼梯开口流速测定为 2.5m/s, 大于《地铁设计规范》规定的 1.5m/s 的要求<sup>[15]</sup>, 实测数据满足规范要求。

## 3 结论

本文针对重庆某地下暗挖岛式地铁车站开展了全尺寸火灾烟气实验, 获得了各系统在火灾状况下的动态测试数据。主要结论如下:

(1) 对地铁车站开展全尺寸火灾烟气实验是必要的, 获得的测试数据可为该地铁防灾系统的安全性能进行整体性安全评价。

(2) 通过热烟实验的数据分析结果, 可以为设计、施工存在的问题提供整改依据。

(3) 不同的车站, 由于工程系统设计不同, 其热烟测试的结果不同。因此, 类似地下暗挖岛式地铁车站出现的普适性问题尚待收集相关数据进行对比分析。

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 钟茂华, 史聪灵, 涂旭炜, 等. 深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究(1)——实验设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, (1):5-11.

[3] 史聪灵, 钟茂华, 涂旭炜, 等. 深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究(3)——站台火灾[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, (2):14-18.