

引用本文

侯春源,朱国庆,王雨,等.某大型TOD铁路工程高大空间烟控系统有效性研究[J].消防科学与技术,2026,45(5):45—51.

Hou Chunyuan, Zhu Guoqing, Wang Yu, et al. Research on the effectiveness of smoke control system in tall space of a large TOD railway project[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(5): 45—51.

某大型TOD铁路工程高大空间烟控系统有效性研究

侯春源^{1,2}, 朱国庆¹, 王雨^{3,4}, 耿伟超^{3,4}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221100;

2. 北京市规划和自然资源委员会, 北京 101100;

3. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013;

4. 建研防火科技有限公司, 北京 100013)

摘要:为研究铁路站房高大空间自然排烟下的烟气控制效果,以某大型TOD铁路站房候车厅为例,采用数值模拟和热烟试验的方法,对不同火灾规模下候车厅的烟气蔓延规律、空间温度场、能见度和一氧化碳体积分数等参数进行分析。结果表明:候车厅空间高大,储烟能力较强。在10 MW和8 MW的模拟火源下,候车厅烟气能够从自然排烟窗顺利排出室外,火灾烟气主要积聚于候车厅吊顶上方网架内,未出现显著沉降现象。人员疏散所需时间为432 s,疏散可用时间不低于1 200 s,人员可以安全疏散。在1.5 MW的试验火源下,烟气能够顺利上升至候车厅顶部,并联动打开全部自然排烟窗。由于候车厅空间高大,烟气填充时间较长,自然排烟窗联动打开需要14 min。候车厅空间温升与高度呈反比例曲线变化,不同高度处烟气温升均在15℃以上,未发生烟气层化现象。该候车厅烟控系统设计合理有效,研究成果能够为类似高大空间建筑的排烟设计提供理论依据和数据支撑。

关键词:铁路站房;候车厅;自然排烟;热烟试验;数值模拟

中图分类号:X932;TU998.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.05.0045.07

Research on the effectiveness of smoke control system in tall space of a large TOD railway project

Hou Chunyuan^{1,2}, Zhu Guoqing¹, Wang Yu^{3,4}, Geng Weichao^{3,4}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221100, China; 2. Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, Beijing 101100, China; 3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 4. CABR Fire Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the smoke control effect of natural smoke exhaust in the large space of railway station buildings, taking the waiting hall of a large TOD railway station building as an example, numerical simulation and hot smoke tests were conducted to analyze the smoke spread law, spatial temperature field, visibility and volume fraction of carbon monoxide in the waiting hall under different fire scales. The results show that the waiting hall has a large space and strong smoke storage capacity. Under the simulated fire sources of 10 MW and 8 MW, the smoke in the waiting hall can be smoothly discharged outdoors through the natural smoke exhaust windows, and the fire smoke mainly accumulates at the top of the waiting hall without significant settlement. The time required for personnel evacuation is 432 s, which is less than the 1 200 s of the fire danger approaching time, and personnel can evacuate safely. Under the test fire source of 1.5 MW, the smoke can smoothly rise to the top of the waiting hall and trigger the opening of all natural smoke exhaust windows. Due to the large space of

作者简介:侯春源,北京市规划和自然资源委员会消防设计审查处副处长,主要从事消防设计审查相关工作,北京市通州区副中心工程承安路一号北京市规划自然资源委,101100。

通信作者:王雨,建研防火科技有限公司,高级工程师,15901080525@163.com。

收稿日期:2025-03-28; **修回日期:**2025-06-09

the waiting hall, the smoke filling time is relatively long, and it takes 14 min for all natural smoke exhaust windows to open in linkage. The temperature rise in the waiting hall space is inversely proportional to the height, and the temperature rise of the smoke at different heights is all above 15 °C, and no smoke stratification phenomenon occurs. The smoke control system design of this waiting hall is reasonable and effective, and the research results can provide theoretical basis and data support for the smoke exhaust design of similar large space buildings.

Key words: railway station house; waiting hall; natural smoke exhaust; hot smoke test; numerical simulation

当前,随着土地集约化利用理念不断发展,铁路站房设计逐渐由单一站房模式向TOD综合交通枢纽模式发展^[1]。候车厅作为TOD综合交通枢纽模式铁路站房内部最集中的旅客候车区域,承担着为旅客提供候车、出行、到达和换乘等功能^[2],人员密度高、流动大,对建筑内部疏散出口不熟悉。并且候车厅空间高大,内部无法采用实体的防火、防烟分隔,发生火灾后烟气往往会不受限制地蔓延,一旦烟气控制系统失效,可能导致大量的人员受困,甚至发生伤亡。

目前,常见的烟气控制系统有自然排烟和机械排烟,自然排烟不需要外部动力且结构简单,因此在这类建筑中被优先采用^[3],但自然排烟效果受建筑空间形式、排烟窗开启位置和面积、火灾荷载等因素影响较大^[4]。丁丹等^[5]基于商铺火灾试验对重庆东站候车厅自然排烟进行了研究,认为顶窗排烟效率要远高于高侧窗。高俊华^[6]采用数值模拟分析了候车厅分别采用自然排烟和机械排烟时的效果,认为二者排烟效果基本相同。李娜^[7]针对某候车厅改造工程,利用数值模拟研究了候车厅火灾烟气运动规律,验证了人员疏散的安全性。高辉^[8]采用理论公式计算了天津西站候车厅采用自然排烟时所需排烟量,认为候车厅具有良好的蓄烟空间,不会影响人员疏散。

以上研究大都采用数值模拟方法对候车厅火灾烟气进行验证,而鲜有采用实体热烟试验的方法对候车厅烟气流动规律进行分析的研究。

同时,现行国家标准GB 51251—2017《建筑防烟排烟系统技术标准》^[9]的烟气控制理念主要是通过划分防烟分区将烟气控制在防烟分区内,进而通过自然或机械方式排出室外。但对于大型TOD铁路站房的候车厅来说,其面积往往在几万平方米以上,空间高度超过20 m,内部无法设置实体的防火、防烟分隔设施,因此火灾烟气并不会局限在单一防烟分区内。此外,由于候车厅空间高大,火灾的燃烧属于燃料控制型,烟气在上升过程中会卷吸大量冷空气,造成热烟气温度降低,当空间高度超过烟气层上升最大高度或空间顶部存在热空气屏隔层时,容易出现“烟气层化”现象^[10]。因此,传统的烟控系统设计理念对于大型TOD铁路站房候车厅这类高大空间并不完全适用,目前国内该类型候车厅大多采用特殊消防设计理念

进行烟控系统设计。

本文以某大型TOD铁路站房候车厅高大空间为例,首先对其烟控系统设计进行分析,同时开展数值模拟和实体热烟试验分析,得到该候车厅高大空间内火灾下的烟气蔓延情况,以及温度场分布、能见度和CO体积分数分布等数据,验证该候车厅高大空间火灾工况下自然排烟系统的烟气控制能力及人员疏散的安全性。

1 烟控系统设计方案

1.1 建筑概况

该站房属于特大型TOD铁路工程,为线上式站房,建筑高度为49.975 m,地下2层,地上6层,远期高峰小时发送量为12 480人,最高聚集人数为6 000人。图1和图2分别为高架候车厅和高架夹层平面图。高架候车厅地面标高为24.100 m,高架夹层地面标高为31.100 m,其中高架候车厅东西面宽为233 m,南北进深为302 m,空间净高约为20 m(高架候车厅地面至吊顶高度),建筑面积达到63 874 m²。高架候车厅连同高架夹层采用一体大空间设计,整体划分为一个扩大防火分区。

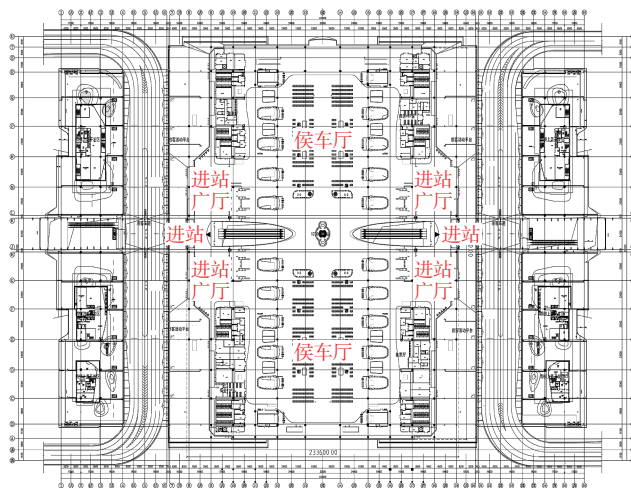


图1 高架候车厅平面图(24.100 m)

Fig. 1 Plan of the elevated waiting hall (24.100 m)

1.2 候车厅烟控系统设计

该候车厅空间高、面积大,内部无法设置实体的防火防烟分隔措施,现行规范对此类空间烟控系统设计并不完全适用,特殊消防设计针对该空间烟控系统

的设计方案如下。

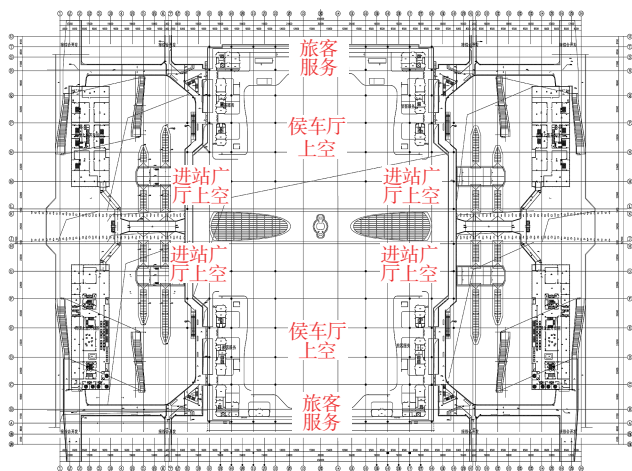
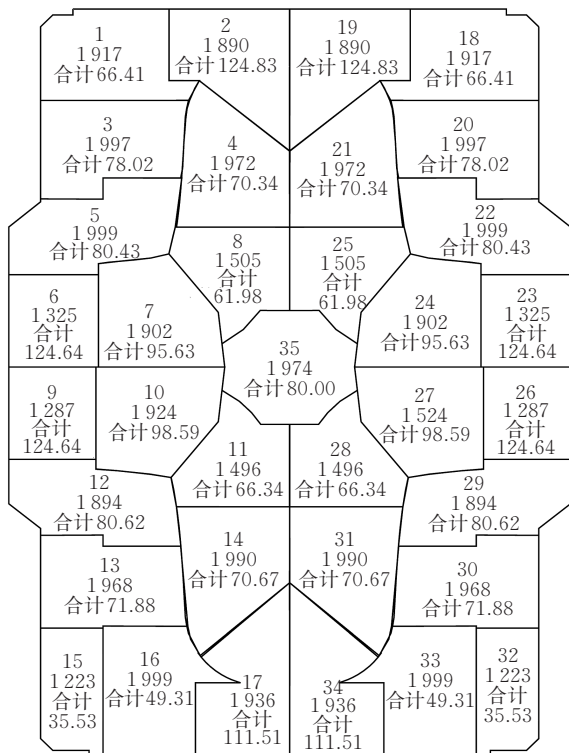


图2 高架夹层平面图(31.100 m)

Fig. 2 Mezzanine floor plan (31.100 m)

1)排烟及补风方式。高架候车厅及高架夹层公共区作为一体空间,采用自然排烟方式,利用高架候车厅疏散外门自然补风,自然补风风速不大于3 m/s。

2)防烟分区划分。高架候车厅及高架夹层一体大空间采用镂空率大于25%吊顶,空间净高度约为20 m,按不大于2 000 m²划分防烟分区,防烟分区之间不设置挡烟垂壁,总共划分为35个防烟分区,防烟分区划分见图3。



注:1~35为35个防烟分区序号;“合计”后的数字为高侧窗和顶窗排烟窗有效开启面积之和。单位m²

图3 防烟分区划分图

Fig. 3 Layout of smoke control zones

3)排烟量计算。根据GB 51251—2017第4.6.3条,空间净高大于6 m时,每个防烟分区排烟量根据场所内的火灾功率及表格的规定分别计算,取大值。

按照GB 51251—2017表4.6.3的要求进行计算,候车厅空间净高约为20 m,采用自动消防炮灭火系统,单个防烟分区排烟量按照其他公共建筑无喷淋进行设计,计算排烟量为21.1×10⁴ m³/h,换算成自然排烟窗有效开启面积为58 m²。

按照实际火灾规模利用轴对称羽流公式进行计算,火灾规模按其他公共场所无喷淋取为8 MW,着火点位于高架层(24.100 m),最高有人地面为高架夹层(31.100 m),根据式(1)计算得到高架夹层上方最小清晰高度为2.9 m,即燃料面到烟气层底部高度为9.9 m。根据式(2)得到单个防烟分区计算排烟量为64.24 m³/s,换算成单个防烟分区自然排烟窗有效开启面积为64 m²。详见表1。

$$H_q = 1.6 + 0.1 H' \quad (1)$$

式中: H_q 为最小清晰高度,m; H' 对于单层空间,取排烟空间的建筑净高度,m; H' 对于多层空间,取最高疏散楼层的层高,m。

$$V = M_p T / \rho_0 T_0 \quad (2)$$

式中: V 为排烟量,m³/s; M_p 为烟羽流质量流量,kg/s; ρ_0 为环境温度下的气体密度,通常为1.2 kg/m³; T_0 为环境的绝对温度,通常为293.15 K; T 为烟层的平均绝对温度,K。

表1 根据火灾规模计算自然排烟窗有效开启面积

Table 1 Calculating the effective open area of the natural exhaust window according to the fire scale

参数	高架候车厅/高架夹层一体空间防烟分区
空间净高度/m	约20.0
最高有人标高/m	31.100
着火点标高/m	24.100
最小清晰高度/m	2.9
燃料面到烟气层底部高度/m	9.9
火灾规模/MW	8.0
平均每个防烟控制分区计算排烟量/m ³ /s	64.24
平均每个防烟控制分区自然排烟窗有效开启面积/m ²	63.6

综合以上两种方法计算取大值,平均每个防烟分区自然排烟窗有效开启面积不低于63.6 m²。考虑到候车厅防火分区扩大,为了火灾时更快速地将烟气排出室外,考虑1.2倍安全系数,将平均每个防烟分区自然排烟窗有效开启面积提高至76.32 m²。目前排烟窗总有效开启面积为2 625.96 m²,平均每个防烟分区自然排烟窗有效开启面积为77.23 m²,满足设计要求。

4)排烟窗设置。高架候车厅在建筑4个立面及

屋顶设置了自然排烟窗,为了便于烟气顺利排出室外,高侧窗采用下悬外开方式,开启角度为 60° 。自然排烟窗设置在储烟仓内,排烟窗下沿距离高架候车厅地面高度为15 m,在站房外墙和屋面均匀布置。

2 烟控系统有效性数值模拟分析

2.1 模型建立及工况设定

为了在特殊消防设计阶段对上述烟控系统设计方案的有效性进行分析,本节采用PyroSim软件建立候车厅全尺寸模型,对候车厅不同火灾规模下的烟气控制效果进行分析研究。候车厅主要供旅客休息、乘车,内部设置一定数量的旅客配套设施。根据对候车厅火灾危险源辨识,商铺和软席座椅是候车厅内最主要的火灾危险源。因此,本文设定商铺和软席座椅两种火灾工况,商铺火灾规模为10 MW,软席座椅火灾为8 MW^[11]。候车厅全尺寸模型及火源位置见图4(为便于看清候车厅内部结构,隐藏了站房屋顶),模拟工况见表2。

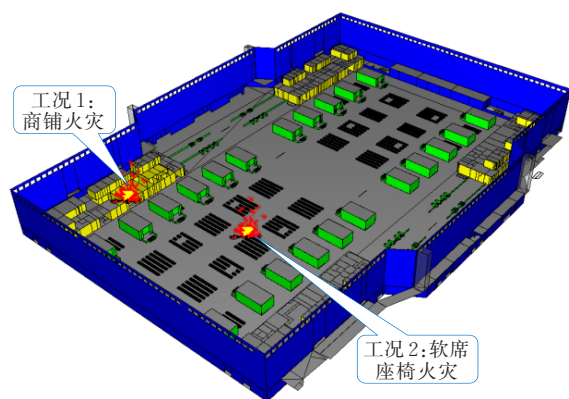


图4 候车厅PyroSim模型

Fig. 4 The PyroSim model of the waiting hall

表2 模拟工况表

Table 2 Simulated working conditions

工况	火源位置	火灾规模/MW	排烟方式
1	候车厅商铺火灾	10	商铺机械排烟失效,利用大空间自然排烟
2	候车厅软席座椅火灾	8	大空间自然排烟

2.2 网格敏感性分析

FDS用户手册建议通过 D^*/δ_x 确定网格尺寸,其中 D^* 为火源特征直径, δ_x 为网格尺寸。当 D^*/δ_x 在4~16时计算结果较为准确^[12]。本文火源功率最大为10 MW,计算得出 $0.15 < \delta_x < 0.6$ 。考虑到候车厅体量巨大,综合考虑计算精度和时间成本,网格采用局部加密方式,将火源附近网格尺寸加密为0.5 m,其他区域网格尺寸设为1.0 m。

2.3 模拟结果与分析

2.3.1 烟气蔓延规律

图5为工况1不同时刻烟气纵向流动规律。从图

5中可知,当工况1候车厅商铺发生火灾后,烟气首先在商铺内填充,随后从商铺门洞溢出至候车厅大空间。约168 s时,烟气上升至候车厅顶部,随后以火源点为中心,以顶棚射流方式向四周蔓延。至245 s左右,烟气到达西侧立面并有少量烟气从西侧立面排烟窗排出室外。至623 s,烟气到达东侧立面,并从东侧立面排烟窗和屋顶排烟窗排出室外,稳定烟气层逐步形成。至1 200 s,由于大部分烟气从东、西立面排烟窗及屋顶排烟窗排出室外,因此烟气层未出现显著的沉降,热烟气层主要积聚在候车厅大空间顶部。

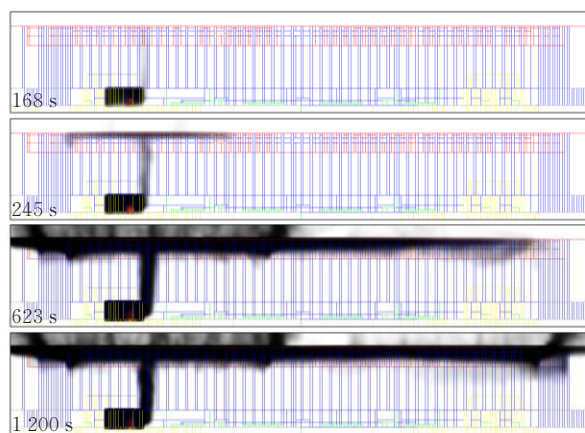


图5 工况1典型时刻烟气蔓延情况

Fig. 5 Smoke spread at typical moment of working condition 1

图6为工况2不同时刻烟气纵向流动规律。从图6中可知,与工况1商铺火灾不同,当工况2候车厅软席座椅发生火灾后,烟气以轴对称羽流方式在热浮力作用下上升,约78 s时,烟气上升至候车厅顶部,烟气触顶时间较商铺火灾缩短了87 s。随后,烟气以顶棚射流方式向周围蔓延,并从顶部排烟窗排出室外;至265 s左右,烟气到达东侧立面并从东侧立面排烟窗排出室外;至600 s,稳定烟气层逐步形成;至1 200 s,大部分烟气从排烟窗排出室外,除烟气前锋有所下降外,主要烟气层仍然积聚在候车厅顶部。

2.3.2 人员疏散安全性分析

确保火灾情况下人员能够安全疏散是衡量烟气控制效果的重要指标。对于候车厅大空间,一般采用空间内烟气温度、能见度和一氧化碳体积分数3个重要参数来判断人员能否安全疏散。3个指标具体判定原则见表3^[13]。

图7和图8为两个工况1 200 s时过火源横截面的温度、能见度和CO体积分数分布情况。从图中可知,发生火灾时,工况1除商铺及其商铺上空外、工况2除火源附近及其上空外,候车厅其他区域温度均小于 60°C ,能见度均大于10 m,一氧化碳体积分数均小于 500×10^{-6} 。因此,工况1和工况2人员疏散可用时

间不低于1 200 s。而根据疏散模拟结果,候车厅人员全部疏散至安全区域所需要的时间为432 s。因此,两种工况下候车厅的烟气控制系统均能保证候车厅的人员安全疏散。

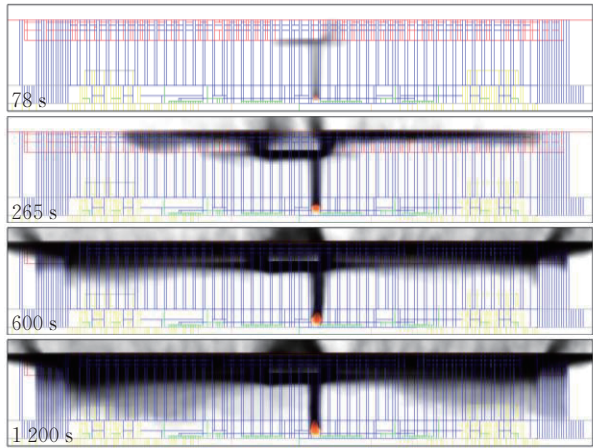


图6 工况2典型时刻烟气蔓延情况

Fig. 6 Smoke spread at typical moment of working condition 2

表3 人员生命安全评估准则

Table 3 Personnel life safety evaluation criteria

判定指标	人体可耐受的极限
温度/℃	<60
能见度/m	>10
CO体积分数	$<500\times10^{-6}$

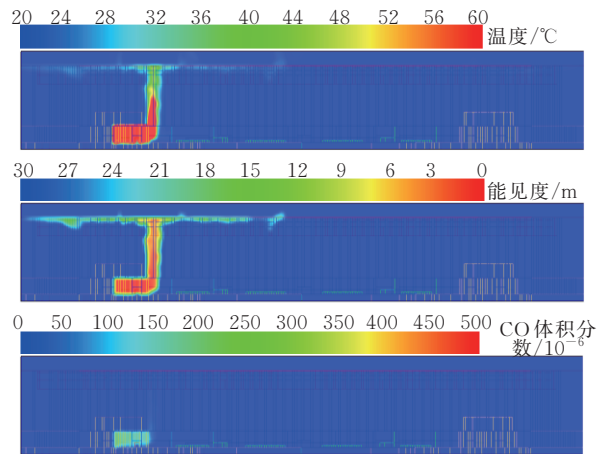


图7 工况1过火源横截面温度、能见度及CO体积分数分布

Fig. 7 Distribution of temperature, visibility, and CO volume fraction on the cross-section through the fire in working condition 1

3 烟控系统有效性热烟验证试验

3.1 火源设置

虽然数值模拟能够有效地模拟火灾中的热传递和烟气扩散过程,但由于无法完全复刻建筑的边界条件等参数,其模拟结果存在一定的局限性。因此,在该项目竣工验收之前,在候车厅内开展了实体热烟试

验,以进一步验证该候车厅高大空间烟控系统的有效性。根据对候车厅火灾危险性的分析,并结合现场试验条件和试验实施的可操作性,火源位置设置于高架候车厅中部偏东南位置,如图9所示。综合考虑候车厅的使用功能、建筑结构及试验现场条件,在确保试验现场顶棚下的烟气最高温度不会破坏顶棚和试验现场周围其他空间的原则下,选择较大的火灾规模。根据XF/T 999—2012《防排烟系统性能现场验证方法 热烟试验法》^[14],计算得到高架候车厅一体空间试验火灾规模为1.5 MW,计算过程见表4。

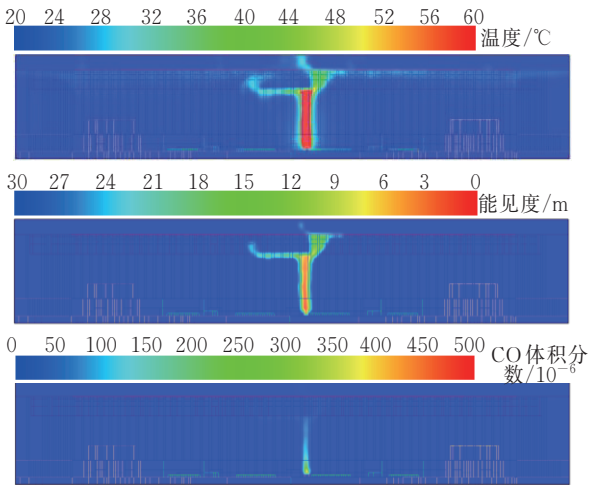


图8 工况2过火源横截面温度、能见度及CO体积分数分布

Fig. 8 Distribution of temperature, visibility, and CO volume fraction on the cross-section through the fire in working condition 2

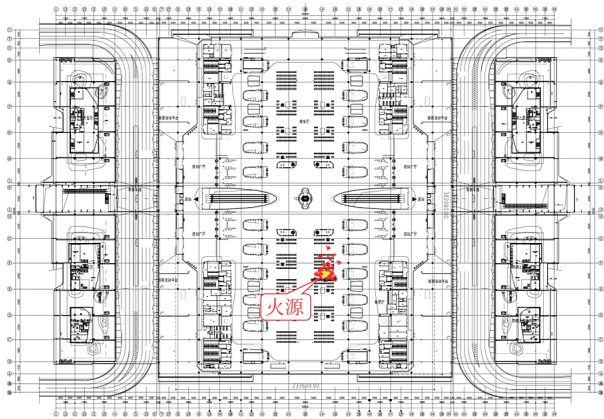


图9 高架候车厅热烟试验火源位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of fire location for hot smoke test

表4 候车厅热烟试验火灾类型和规模设定

Table 4 Setting of fire type and size in hot smoke test

类别	参数
烟气层底部距最高有人地面高度/m	2.9
烟层底部与烟羽流分界处温度/℃	270
燃烧盘组合	4×A1
火源热释放速率/MW	1.5

火源装置主要包括承水盘、燃料盘、发烟装置和隔热装置。本次试验火源选择的燃烧盘规格为 $4\times A1$,燃料为95%的乙醇,稳定燃烧功率为1 500 kW,火源装置布置如图10所示^[15]。采用2个发烟炉,示踪烟气连续注入热烟羽流,注入的烟量可以保证示踪烟气完整演示乙醇燃烧产生的热烟层。

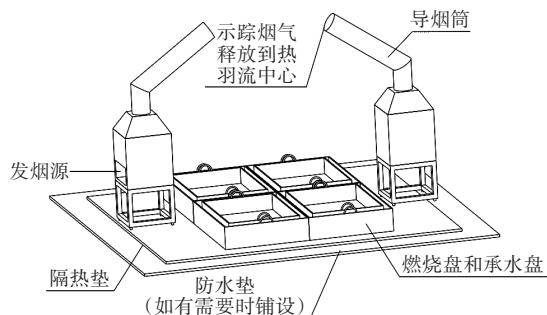


图10 热烟试验装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of hot smoke test device

3.2 测试参数

试验过程中点火同时发烟,火源所在防烟分区内任意两处红外对射感烟火灾探测器报警后,联动开启候车厅全部顶部和侧墙自然排烟窗,同时联动开启自然补风外门进行自然补风。红外对射感烟火灾探测器设置在吊顶下方,探测器光束轴线至吊顶的垂直距离约为0.4 m。在消防控制室记录火灾探测器的报警时间、排烟系统联动开启等情况。

为了观察烟气蔓延情况,试验中采用摄像机观察并记录烟气蔓延特征现象,高架候车厅及高架夹层一体空间共设置5台摄像机,分别位于高架候车厅、高架夹层及检修马道层(设置于检修马道层的为5号摄像机,位于火源正上方)。摄像机位置见图11。

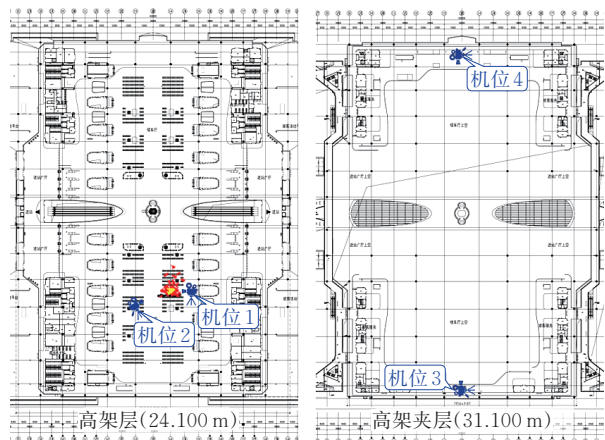


图11 摄像机位布置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of camera position layout

为了分析空间温度场分布情况,在火源正上方布置一串热电偶树,共20个热电偶,最下方热电偶距高

架候车厅地面为2.5 m,最上方热电偶距高架候车厅吊顶0.5 m。距高架候车厅地面4.5 m以下热电偶间隔0.5 m设置,大于4.5 m时热电偶间隔1 m设置。

3.3 结果分析

3.3.1 烟气蔓延情况

图12为现场火源布置及典型时刻烟气蔓延情况。由图12可知,工作人员点火同时投掷烟饼,30 s后烟气从发烟装置开始冒出,并在热浮力作用下上升;60 s时烟气上升至吊顶;70 s时有少量烟气越过吊顶蔓延至吊顶上方网架内;180 s时,烟气在吊顶网架内大量聚集;307 s后,烟气在吊顶内开始向四周大量蔓延;600 s后,烟气在吊顶内发生显著的沉降现象;707 s时,高架夹层顶棚首个红外对射感烟火灾探测器报警;840 s时,高架夹层顶棚第二个红外对射感烟火灾探测器报警,触发消防联动;845 s高架候车厅内自然排烟窗、火灾警报、应急广播及应急照明和疏散指示系统联动启动;990 s后,火势开始衰减;1 080 s后,烟气沉降至检修马道;1 264 s,火源熄灭,试验结束。从以上分析可知,由于高架候车厅空间高大,烟气始终聚集在顶部,在试验时间段内未观测到候车厅内出现显著的烟气沉降现象。

此外由上述分析可知,直到火灾发生后845 s(约14 min),高架候车厅内自然排烟窗才联动打开。分析其原因,主要是火灾发生后烟气在热浮力作用下上升,首先穿越吊顶在吊顶上方的网架空间内积聚、蔓延和填充,由于候车厅面宽巨大,且吊顶上方的网架空间平均高度在4 m左右,因此烟气在吊顶上方的网架空间内填充了相当长时间。随着烟气不断填充,烟气层高度逐渐下降,直到烟气层高度沉降到吊顶下方的红外对射感烟火灾探测器探测高度范围时,才触发火灾自动报警系统报警,由此导致联动启动自然排烟窗的时间较晚。

3.3.2 火源上方空间温度场分析

试验开始之前对候车厅内初始环境温度进行测量,环境温度为30.2℃。图13为火源正上方不同高度处烟气层温度随时间变化规律。由图13可知,距离火源越近,测点温度变化幅度越大,温升越快;距离火源越远,测点温度变化幅度越小,温升越慢。点火后,随着火灾的发展,各测点处的温度迅速升高,大约300 s时,温度达到本次试验的峰值,其中在近火源距地面2.5 m高度处最高温度达到294℃,在远火源距地面19.5 m高度处的最高温度约为46℃。在300~930 s,燃料继续保持充分燃烧,各个测点温度相对较高。当时间大于930 s后,火灾处于衰减阶段,并且随着卷吸的冷空气越来越多,各测点温度开始下降,逐渐接近环境温度。

为了进一步分析高架候车厅空间温度随高度变

化的规律,将图13中各测点在整个试验阶段内的烟气层最高温度与环境温度之差绘制成图14。由图14可知,当空间高度在2.5~12.5 m时,烟气层温升随距离火源高度的增大而迅速减小,且呈非线性变化。空间高度为2.5 m时,烟气层温升最大为263℃;当空间

高度大于12.5 m后,烟气层温升变化幅度不大,基本保持在约17℃。对图14中数据用反比例曲线进行拟合,结果相关系数在0.99以上,表明拟合曲线与数据点相关性很强,图中数据点均匀分布在曲线周围,说明烟气层温升与高度基本呈反比例函数曲线分布。

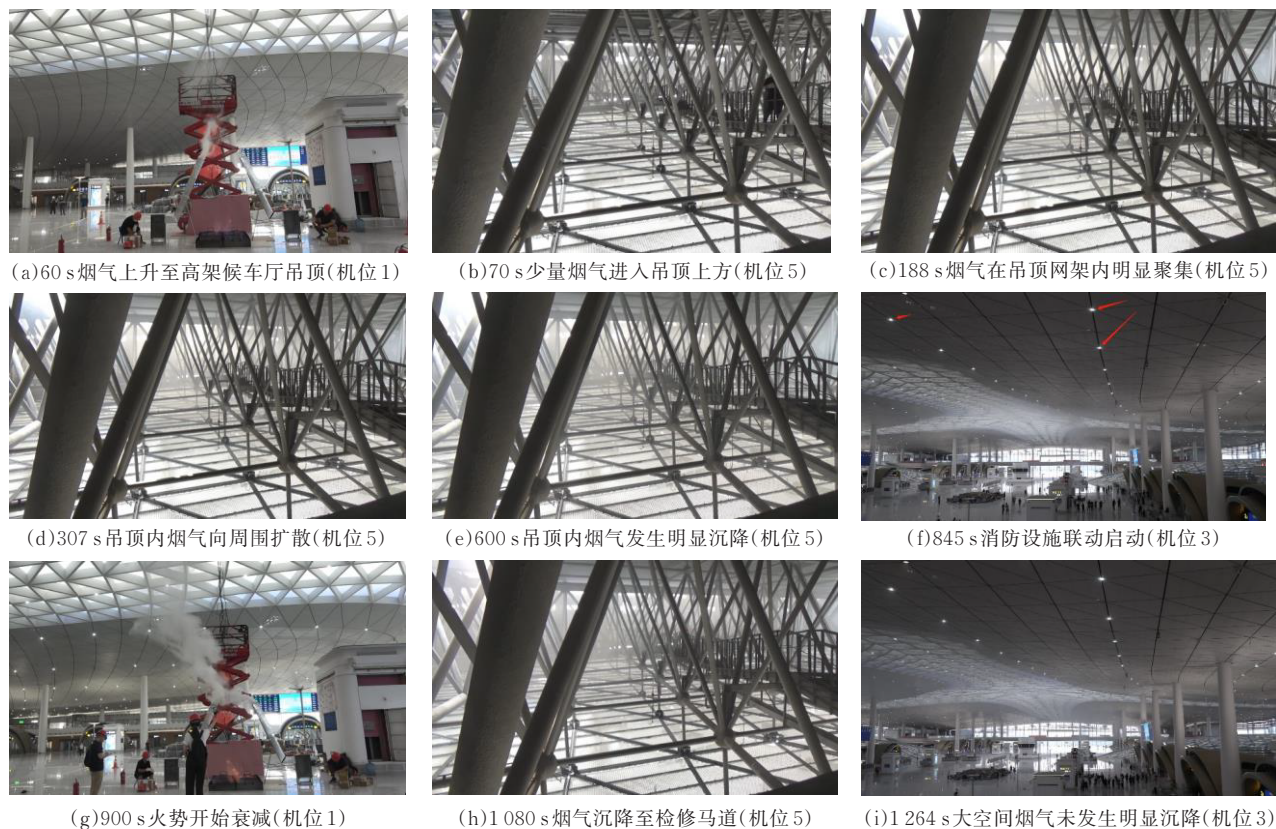


图12 典型时刻烟气蔓延情况

Fig. 12 Smoke spread at typical time

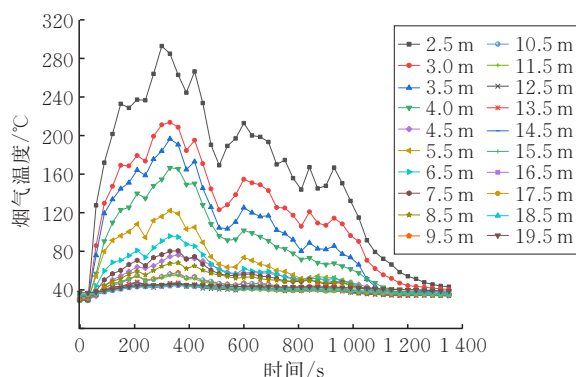


图13 火源正上方不同高度烟气层温度变化规律

Fig. 13 Temperature changes of smoke layers at different heights directly above the fire

此外,从1.2节可知,目前高侧窗自然排烟口下沿距高架候车厅地面高度为15 m,由图14可知其对应烟气层温升为18.3℃,大于GB 51251—2017第4.6.8条规定的烟气层温升不低于15℃的要求。因此,候车厅排烟窗的设置位置能够保证烟气顺利排出室外,确保高架候车厅自然排烟的有效性。

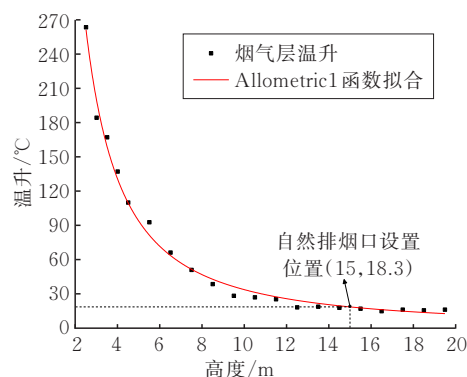


图14 烟气层温升随空间高度变化规律

Fig. 14 Variation law of flue gas layer temperature rise with space height

4 结论

1) 铁路工程候车厅空间高大,形成巨大的储烟空间,发生火灾后烟气主要积聚于候车厅顶部,能够为候车厅人员提供较长的安全疏散时间。

(下转第58页)