

基于超细水雾作用下的地铁站台空间火灾烟气温度特性

李安桂, 成劲光, 高 然

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过搭建超细水雾发生装置及地铁站台模型, 进行了超细水雾作用下的烟气温度特性试验研究。结果表明: 施加超细水雾后, 烟气温度纵向分布在靠近火源的区域迅速衰减, 之后温度基本不再变化, 且对烟气层高度几乎无影响。另外, 超细水雾可以迅速降低烟气温度, 降温效果与雾化量、驱动气流速度、施加超细水雾时间等因素有关, 雾化量、驱动气流速度增大温度降低, 燃烧初期施加超细水雾的效果较好。随火源与超细水雾入口之间的距离增加, 温度衰减趋势越迅速, 且超细水雾入口位置对阻隔烟气扩散有一定作用。

关键词: 超细水雾; 模型试验; 温度衰减; 烟气层高度; 降温效率

中图分类号: U231.96

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0426-06

The temperature characteristics of fire smoke in subway platform spacebased on ultrafine-water mist

LI Angui, CHENG Jinguang, GAO Ran

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Through the establishment of ultra-fine water mist generation system and subway platform model to carried out studies of smoke temperature under the effect of ultra-fine water mist. The results show that, the temperature of smoke is rapidly decay in the area near the fire source and then the temperature does not change obviously after applying the ultra-fine water mist and there is almost no effect on the height of the smoke layer. In addition, the ultra-fine water mist can rapidly reduce the temperature of the smoke, the cooling effect related to the atomization amount, the driving speed of the air flow, and the time applying ultra-fine water mist. The smoke temperature will decrease as the amount of atomization or the speed of the driving air flow increases and applying ultra-fine water mist in the combustion early stage shows the more effective cooling effect. The temperature decay more quickly with the increase of the distance between the fire source and the ultra-fine water mist inlet. Also, the ultra-fine water mist inlet position has a role in blocking the spread of smoke.

Key words: ultrafine-water mist; model test; temperature decay; smoke layer height; cooling efficiency

地铁作为城市人群出行的重要交通工具, 是城市发展程度的体现, 也是城市现代化进程的标志。然而其为人行的出行提供便利的同时也带来一系列严重的消防问题。过去几十年, 地铁火灾已成为重要的安全问题, 造成大量财产损失和人员伤亡^[1-4]。如 1995 年 10 月 28 日发生在阿塞拜疆首都巴库地铁站内的火灾, 造成至少 289 人死亡, 265 人受伤; 2003 年 2 月 18 日发生在韩国大邱市地铁一号线中央路车站的火灾共造成 198 人死亡, 146 人受伤, 289 人失踪等。地铁火灾事故中, 高温烟气及有毒气体是威胁乘客生命安全的直接因素^[5-6]。

和地上建筑有所不同, 地铁空间散热条件差

且环境较为封闭, 火灾发生时热量和烟气在其内部蔓延并大量积累, 极易导致人员烫伤和窒息^[7-8]。传统的防烟或排烟方式主要以通风策略对地铁空间进行烟气控制^[9-13]。随着科学技术的发展, 人们对地铁空间烟气控制提出更高的要求。研究表明, 超声波雾化技术可在液面产生粒径非常小的雾滴^[14]。粒径小于 10 μm 的水雾呈现出类似气体的扩散特性, 同时拥有巨大的灭火潜力。获得超细水雾的一种手段是将超声雾化器置于液面以下, 通过电子高频振荡, 可在液面形成超细水雾。由于超细水雾的粒径只有微米级别, 这不仅显著增大了其表面积和蒸发速率, 而且使得其扩散性能更加良好, 不少研究人员已对其抑制火源的特性

收稿日期: 2018-03-27

修改稿日期: 2019-04-25

基金项目: 陕西省科技创新重点项目(13115); 中国工程院咨询研究项目(2017-XZ-15-4)

第一作者: 李安桂(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑通风空调及建筑节能研究。E-mail: liag@xauat.edu.cn

进行了大量研究^[15-20]。然而,抑制火源的过程中同样存在烟气产生和扩散问题,超细水雾与火灾烟气之间的相互作用这类问题至今还不太清楚,这也驱使本文对其进行了相关的研究。

地铁站台一般位于地铁空间的底层,人员密集且疏散困难,因此研究站台空间的烟气特性具有重要意义。本文通过构建超细水雾发生装置以及地铁站台模型,采用试验手段对超细水雾作用下地铁站台空间烟气温度特性进行了相关研究。这为保障逃生人员不被烟气烫伤提供了一定参考价值。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置主要由三部分组成:超细水雾发生系统、地铁站台模型及数据采集系统。超细水雾发生系统主要由雾化池、超声雾化器、动力输送系统、溢流管等组成,见图1。其基本工作过程是超声雾化器高频振荡在液面产生超细水雾,水雾在风机气流的驱动下进入站台模型。为满足试验需求,每个雾化器可独立控制,风机风速可调。

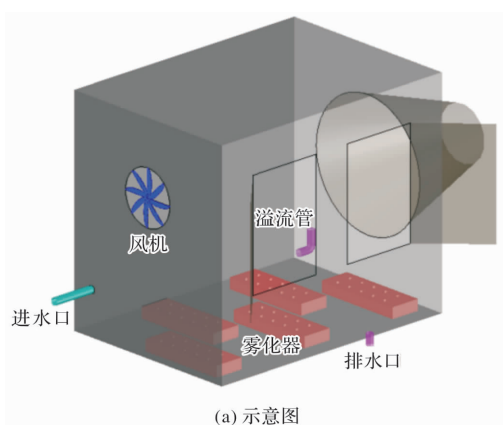
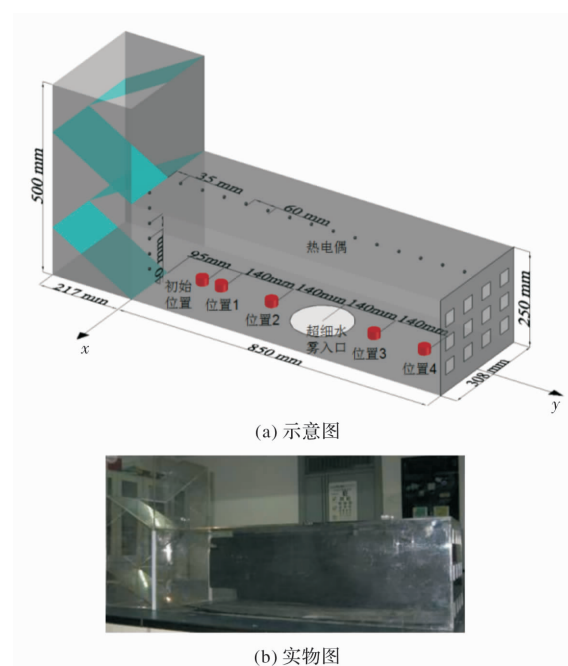


图1 超细水雾发生系统

Fig. 1 Ultra-fine water mist generating system

模型选取体积较小,防火性能要求较高的地铁站台及与之相连的楼梯井,在试验过程中为了便

于观察烟气扩散状况,试验模型使用防火玻璃制作,见图2。模型由尺寸为217 mm(长)×308 mm(宽)×500 mm(高)的楼梯井及尺寸为850 mm(长)×308 mm(宽)×250 mm(高)的地铁站台两部分组成。为了使模型具有通用性的同时能够反映问题的本质,将楼梯简化成倾斜挡板,并在车站廊道一侧开挖了12个尺寸为35 mm(长)×35 mm(宽)的孔洞,超细水雾入口为直径 Φ 等于150 mm圆形入口,设置在模型底部中心位置。由于超细水雾具有类似于气体的相关特性^[17],故可通过长度为800 mm的风管将超细水雾发生系统与模型连接以输送超细水雾。火源初始中心位置设置在站台纵向中轴线上,距离楼梯口95 mm处。试验中火源采用直径为30 mm的圆形油盘,燃料选用95#汽油。



(a) 示意图



(b) 实物图

图2 地铁站台模型

Fig. 2 Subway platform model

试验采用热电偶进行烟气温度测量,在模型内布置了一系列K型热电偶温度测点。为研究烟气温度的纵向分布特性,在地铁站台顶部纵向中轴线距离顶棚5 mm处水平布置14个均匀分布的热电偶测点,用来测量顶棚下方最大烟气温度,其间隔为60 mm。火灾逃生过程中,楼梯口是人员疏散的重要通道,为研究楼梯口处垂直方向烟气温度梯度分布,在楼梯口处布置6个竖向的热电偶测点,其间隔均匀且都为40 mm,最高点距离顶棚5 mm。热电偶布置见图2(a),所有热电偶都与2701Ethernet Multimeter / Data Acquisition System型数据采集仪连接,采样时间间隔为1 s。

1.2 试验过程及工况

试验中对不同雾化量、驱动气流速度、自由燃烧时间以及不同火源位置等情形分别进行研究, 试验工况可参照表 1. 数据采集系统记录 30 s 时开始点火, 点火 30 s 后施加超细水雾, 即试验中火源至少有 30 s 的自由燃烧时间(其中工况 11~14 施加超细水雾时间以表 1 为准).

表 1 试验工况表

Tab. 1 Test condition table

工况	雾化量 /ml · min ⁻¹	驱动气流速 度/m · s ⁻¹	自由燃烧 时间/s	火源位置
1	—	—	—	初始位置
2	15	1.0	30	初始位置
3	30	1.0	30	初始位置
4	45	1.0	30	初始位置
5	60	1.0	30	初始位置
6	75	1.0	30	初始位置
7	75	0.6	30	初始位置
8	75	0.8	30	初始位置
9	75	1.2	30	初始位置
10	75	1.4	30	初始位置
11	75	1.0	60	初始位置
12	75	1.0	90	初始位置
13	75	1.0	120	初始位置
14	75	1.0	150	初始位置
15	75	1.0	30	位置 1
16	75	1.0	30	位置 2
17	75	1.0	30	位置 3
18	75	1.0	30	位置 4

2 结果与讨论

2.1 超细水雾作用下烟气温度分布特征

超细水雾在火灾空间扩散过程中势必受热而迅速蒸发, 蒸发过程吸热造成环境温度降低, 图 3 (a)为工况 1 和工况 4 顶棚下最高烟气温度纵向分布, 其中 ΔT 为测点温度相对于环境温度的升高. 可以看出, 自由燃烧和施加超细水雾两种工况在距火源无量纲水平距离小于 0.2 时都呈现出迅速衰减趋势, 不一样的是两者衰减快慢不同, 自由燃烧表现出更快的衰减趋势; 而当无量纲距离大于 0.2 时差异主要体现在: 自由燃烧工况随水平距离的增加顶棚下烟气温度仍然缓慢衰减, 而施加超细水雾的结果使得温度随距离的增加不再衰减.

施加超细水雾不仅降低了顶棚下烟气温度而且改变了温度衰减趋势, 说明超细水雾对顶棚下烟气温度分布具有一定影响作用.

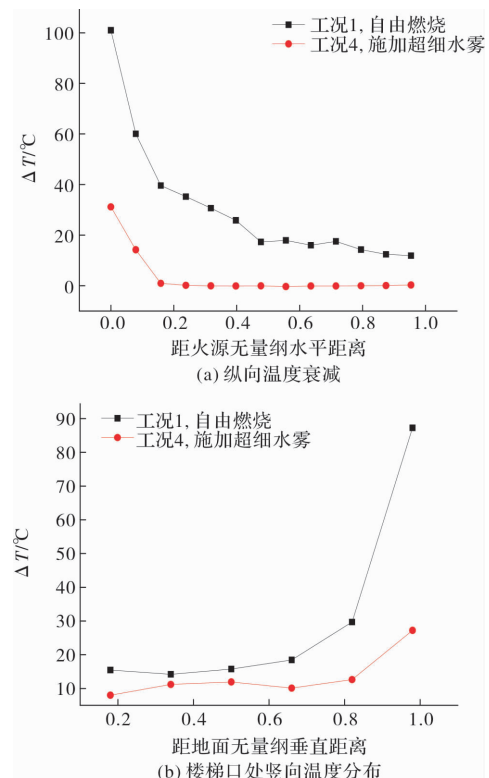


图 3 超细水雾作用下温度分布

Fig. 3 Temperature distribution under ultra-fine water mist

烟气在扩散过程中不断席卷周围环境空气, 造成烟气层质量增加、高度下降, 烟气下沉现象对逃生人员安全构成威胁, 当烟气层下降到人员高度时, 不仅容易造成逃生人员中毒和窒息, 而且高温烟气还会导致人员灼烧. 竖向烟气温度主要体现在烟气层高度上, 烟气层内的温度远高于烟气层外温度, 烟气温度在竖直方向存在明显的温度梯度. 图 3(b)为工况 1 和工况 4 楼梯口处的竖向烟气温度分布, 研究楼梯口处的竖向烟气温度分布为避免逃生人员被高温烟气烫伤具有一定价值意义. 从图中可以看出: (1) 工况 3 较工况 1 相应各处的温度普遍降低, 这种降温效果对位于高处的 V_1 和 V_2 测点尤为明显; (2) 两种工况测点 $V_4 \sim V_5$ 的温度差别较小且不存在明显的温度梯度, 说明烟气层未下降到此高度范围内, 施加超细水雾对烟气层高度无显著影响.

2.2 超细水雾对烟气温度的影响

图 4 给出了其他试验条件相同的条件下, 雾化量在 15~75 ml/min 范围内的顶棚下烟气温度纵向分布及楼梯口处竖向温度分布.

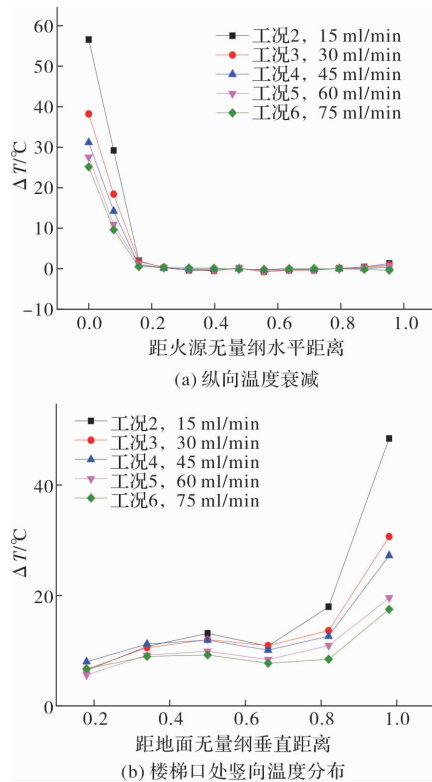


图4 雾化量对烟气温度的影响

Fig. 4 Effect of atomization amount on smoke temperature

从图4(a)可以看出,当距火源无量纲水平距离小于0.2时,雾化量大小对此部分区域温度有明显影响,雾化量越大相应各处的温度越低.雾化量从15 ml/min增至75 ml/min过程中火源正上方烟气温度下降约55%.当无量纲距离大于0.2时,雾化量大小对温度影响不大,不同雾化量作用下温度差别甚微.图4(b)所示为楼梯口处的竖向烟气温度分布,可以看出两点:(1)雾化量增大可降低 V_1 、 V_2 两处温度;(2) $V_3 \sim V_4$ 在不同工况温度分布类似.导致上述现象的原因可能是:雾化量大小实际反映了超细水雾的浓度,无论是纵向近火源区域还是楼梯口较高位置都属于烟气高温区,雾滴在这些区域蒸发剧烈,雾化量越大单位时间单位体积越多雾滴受热蒸发,因此降温作用越明显.而其他区域只需低浓度水雾即可达到降温效果,因此增大雾化量对高温区外降温效果无明显影响.

图5所示为其他试验条件相同的条件下,驱动气流速度分别为0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s、1.2 m/s和1.4 m/s作用下的温度分布.

从图5(a)可以看出,工况6~10顶棚下烟气温度纵向衰减趋势存在类似之处,但又各自不同.类似之处在于,各种工况其温度随着与火源之间的水平距离增加而衰减,当距离大于一定值时,

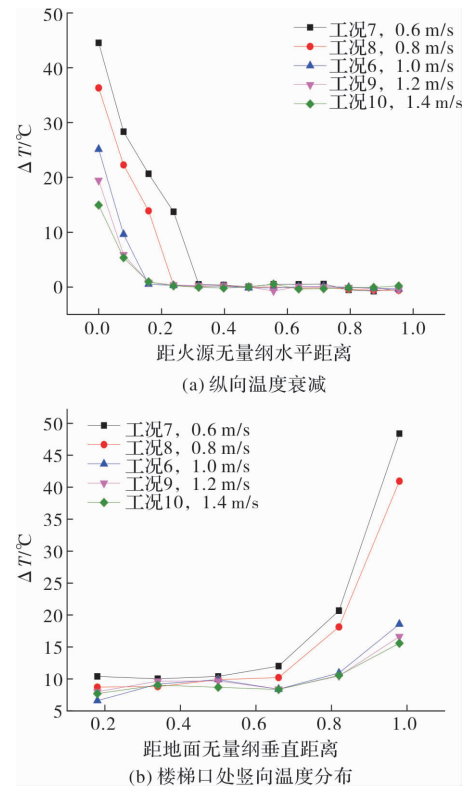


图5 不同驱动气流速度下温度分布

Fig. 5 Temperature distribution at different drive air speeds

顶棚下温度便不再衰减,呈现稳定分布趋势.差别之处体现在改变驱动气流速度,此距离也相应改变.例如,当驱动气流速度为0.6 m/s时,无量纲水平距离增加到0.3之后温度便不再衰减;而当驱动气流速度大于1.0 m/s时,无量纲水平距离大于0.2时温度便不再衰减.图5(b)反映了驱动气流速度对楼梯口处竖向烟气温度的影响,显然驱动气流速度越大最高烟气温度越低,当气流速度大于1 m/s时,最高烟气温度降低趋势已经变得微乎其微,工况9和10的最高烟气温度相差不超过1℃.

实际上,烟气在站台空间扩散过程中温度始终随时间发生变化以及波动,图6清楚地反映了烟气温度发展过程,其中每条曲线分别代表施加超细水雾过程中 V_1 测点温度随时间的变化情况.可以看出,工况1火源自由燃烧,从30 s点火以后温度迅速升高,约到90 s左右烟气温度达到最大值,之后一段时间烟气温度处于稳定阶段,到240 s左右燃料逐渐耗尽温度下降.另外,工况6及工况11~14的温度变化过程表明,在施加超细水雾之前火源自由燃烧,各工况温度相差不大;施加超细水雾后温度骤然降低,这种降温效果是十分迅速的,从施加时刻开始到温度降低只需十几秒的

时间,说明超细水雾可以高效、迅速降低烟气温度。

图7给出了烟气发展不同时刻施加超细水雾之后顶棚下纵向烟气温度分布。对比其中5种工况可以发现,工况6的温度相对于其他工况较低,说明在燃烧初期施加超细水雾的效果最好。随着自由燃烧时间的增加(从30 s增加到150 s),无量纲距离小于0.2范围内的温度衰减趋势加快且火源正上方烟气温度升高。当自由燃烧时间大于120 s之后,温度分布趋于稳定,工况13和工况14呈现出相似的温度衰减趋势且最高烟气温度差别甚微。

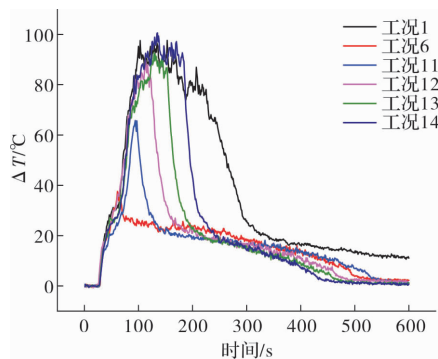


图6 施加超细水雾过程温度变化

Fig. 6 Temperature change during application of ultra-fine water mist

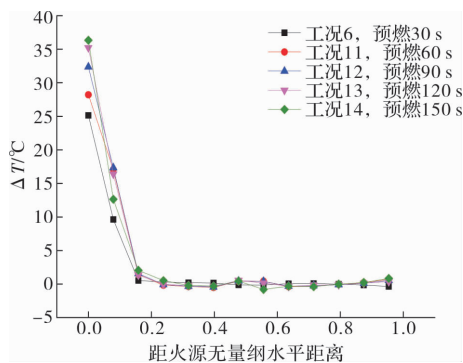


图7 自由燃烧时间对纵向温度衰减的影响

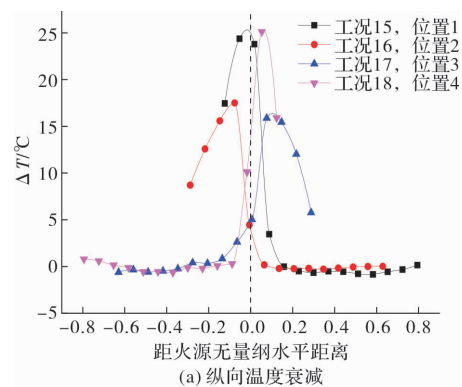
Fig. 7 Effect of free burning time on longitudinal temperature decay

2.3 火源位置对烟气温度的影响

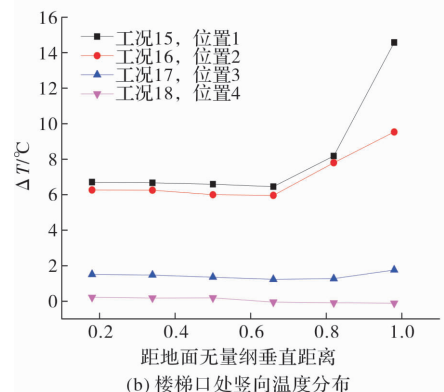
火源位置一方面体现了实际火灾场景中随处可能发生燃烧,不同燃烧位置导致烟气扩散过程也不尽相同;另一方面也反映了火源与超细水雾入口之间的相对位置对降温效果的影响。本文开展了4组不同火源位置(见图2(a))情形下烟气温度特性的研究。以超细水雾入口为界,根据火源与楼梯口之间的位置关系,将这4种情形分为两类:(1)火源位于超细水雾入口左侧(工况15、16),即火源和楼梯口在超细水雾入口的同一侧;(2)火源和楼梯口位于超细水雾入口的不同侧(工

况18、19),即超细水雾入口在火源和楼梯口之间的位置。

以站台纵向中心线为y轴,原点位于地铁站台与楼梯井的结合处建立坐标系,如图2(a)所示。其中,无量纲水平距离为负数表示沿着y轴负方向。图8(a)所示为火源中心位置分别位于y轴145 mm、285 mm、565 mm和705 mm位置的顶棚下烟气温度纵向分布特征。从图中可以看出,火源位置改变对烟气温度分布产生影响,显然,各种工况温度都呈现出衰减趋势,但是衰减趋势并不相同,工况15和18曲线较为陡峭,温度衰减迅速,且其温度最大值均高于工况16和19。



(a) 纵向温度衰减



(b) 楼梯口处竖向温度分布

图8 火源位置对烟气温度影响

Fig. 8 The influence of the location of the fire source on the temperature of the smoke

图8(b)所示为工况15~18楼梯口位置竖向烟气温度分布。可以看出,火源位置属于第一类情况时的烟气温度均高于第二类位置的烟气温度,这是由于第二类位置火源和楼梯口之间隔着超细水雾入口,超细水雾对烟气扩散造成一定阻挡作用,因此温度降低。

4 结论

本文采用试验方法研究了超细水雾对地铁站台烟气温度的影响,得出以下结论:

(1) 超细水雾作用的顶棚下烟气温度纵向分布

大致可分为两段:一般以无量纲水平距离 0.2 为界,当无量纲距离小于 0.2 时温度迅速衰减,当其大于 0.2 时温度基本保持不变。

(2) 超细水雾能够迅速降低烟气温度,降温效果与雾化量、驱动气流速度、施加超细水雾时间等因素有关。雾化量和驱动气流速度增大的过程温度降低,燃烧初期施加超细水雾的效果最好。

(3) 火源位置改变对顶棚下纵向烟气温度衰减趋势有影响:随火源与超细水雾入口之间距离增大,曲线变的陡峭,温度衰减趋势也越快。同时,超细水雾入口对烟气扩散具有一定阻隔作用。

参考文献 References

- [1] ZHAO D, JIANG J, ZHOU R, et al. Numerical study on the optimisation of smoke ventilation mode for interchange subway station fire[J]. International Journal of Ventilation, 2016, 15(1):79-93.
- [2] MENG N, WANG Q, LIU Z, et al. Smoke flow temperature beneath tunnel ceiling for train fire at subway station: reduced-scale experiments and correlations [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 995-1003.
- [3] TSUKAHARA M, KOSHIBA Y, OHTANI H. Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using fire dynamics simulator[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2011, 26(4): 573-581.
- [4] ZHONG W, TU R, YANG J P, et al. A study of the fire smoke propagation in subway station under the effect of piston wind [J]. Statyba, 2015, 21(4): 514-523.
- [5] WU F, JIANG J, ZHOU R, et al. A new natural ventilation method for fire-induced smoke control in a common subway station[J]. International Journal of Ventilation, 2017:1-18.
- [6] LUO N, LI A, GAO R, et al. Smoke confinement utilizing the usme ventilation mode for subway station fire [J]. Safety Science, 2014, 70:202-210.
- [7] 杨林. 浅析地铁火灾安全疏散[J]. 消防科学与技术, 2013(10):1115-1118.
YANG Lin. Analysis on the safe evacuation of subway fires[J]. Fire Science and Technology, 2013(10): 1115- 1118.
- [8] 丁杰. 地铁火灾特点及预防措施探讨[J]. 科技信息, 2011(1):35-36.
DING Jie. Discussion on the characteristics and preventive measures of subway fire[J]. Scientific Information, 2011(1):35-36.
- [9] RIE D H, HWANG M W, KIM S J, et al. A study of optimal vent mode for the smoke control of subway station fire [J]. Tunneling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2006, 21(3):300-301.
- [10] GAO R, LI A, HAO X, et al. Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway station [J]. Energy & Buildings, 2012, 45 (2):280-289.
- [11] GAO R, LI A, HAO X, et al. Prediction of the spread of smoke in a huge transit terminal subway station under six different fire scenarios [J]. Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2012, 31(5):128-138.
- [12] LUO N, LI A, GAO R, et al. An experiment and simulation of smoke confinement utilizing an air curtain [J]. Safety Science, 2013, 59:10-18.
- [13] MENG N, HU L, WU L, et al. Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station[J]. Tunneling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 40(1):151-159.
- [14] WOOD R W, LOOMIS A L. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1927, 4(22):417-436.
- [15] ADIGA K C, HATCHER R F. Ultra fine water mist application in aircraft hidden fires [C]// 14th Annual Int Halon Options Technical Working Conf (HOT-WC). Albuquerque, New Mexico:BFRL Pub., 2004: 125-137.
- [16] NDUBIZU CC, ANANTH R, ROUSON D, et al. Mechanism of suppression and extinguishment of communication cable fire by ultra fine water mist in cross-flow [R]. Naval Research Lab Washington DC:Chemistry Div, 2006.
- [17] ADIGA K C, Jr R F H, SHEINSON R S, et al. A Computational and experimental study of ultra fine water mist as a total flooding agent [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(2):150-160.
- [18] CHEN L Y, ZONG R W, SONG-YANG L I, et al. Experimental study on restraining flashover by ultra-fine water mist in confined space [J]. Journal of University of Science & Technology of China, 2009, 39 (7) :777 - 782.
- [19] LIANG T S, YU J J, LU G P, et al. A Numerical Study of the fire-extinguishing performance of ultrafine water mist in small scale tunnel space [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 444-445:1555-1558.
- [20] ZHU D M, LIU J Y, YU Y, et al. Experimental study on total flooding extinguishing test by new ultra-fine water mist fire extinguisher extinguishing combustion of paper [C]//2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China:IEEE, 2014: 252-255.

(编辑 吴海西 沈 波)