

公路隧道纵向通风对火灾烟气分层影响研究^{*}

刘帅, 陈建忠, 王芳其

(招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:纵向通风目前是我国长隧道使用最多的通风排烟方式。通过1:10隧道模型火灾排烟试验,利用激光片光观测火灾烟气分层结构,分析了纵向通风对火灾烟气分层结构的影响;通过数值模拟,研究了隧道采用纵向通风排烟的效果。结果表明:在无风情况下,火灾初期烟气能够较好地维持在隧道顶部,与空气分层界限明显;开启纵向排烟后,能够有效抑制火灾烟气向火源上游蔓延,但烟气分层结构遭到破坏并随着风速增加逐渐消失,火源下游区域能见度下降;纵向排烟风速维持在临界风速及以下,可降低纵向风对烟气分层的影响。

关键词:隧道火灾、纵向通风、烟气分层、排烟效果

中图分类号:U458.1

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1419-05

Influences Study of Longitudinal Ventilation on Smoke Stratification in Tunnel Fires

Liu Shuai, Chen Jianzhong, Wang Fangqi

(China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co. Ltd.,
Chongqing 400067, P.R.China)

Abstract: Currently longitudinal ventilation is used in most of long tunnels of our country. Experiments were conducted in a 1:10 scale model tunnel. Smoke stratification pattern was measured by laser sheet, and the influence of longitudinal ventilation to smoke stratification was analyzed. Smoke exhaust effect of longitudinal ventilation in tunnels was study by numerical simulation. The results show that an upper buoyant smoke layer is formed with a cold smoke-free layer below under the condition of no wind. The smoke stratification was destroyed and prevented from spreading upstream as smoke-exhaust fans started, while the visibility of downstream area of fire source was reduced. The influence of longitudinal ventilation to smoke stratification can be reduced, while the velocity of longitudinal smoke-exhaust kept at or below the critical velocity.

Keywords: tunnel fire; longitudinal ventilation; smoke stratification; smoke-exhaust effect

0 引言

隧道凭借其穿山越岭、缩短路线里程、克服高程障碍等优势在公路建造中大量运用。公路隧道在给交通运输带来便利的同时,也因其特殊的近似

密闭的狭长结构给消防安全带来了严峻的考验。尤其是火灾产生浓烟对人员疏散和救援带来巨大的威胁^[1-2]。为了保障隧道人员疏散安全,为外部力量展开救援赢得时间,长度在1 km以上的隧道通常安装有机机械通风排烟系统。目前隧道内主要

^{*} 收稿日期:2018-04-14(修改稿)

作者简介:刘帅(1985-),男,重庆人,硕士,高级工程师,主要从事隧道防灾减灾研究及设计。

E-mail:liushuai@cmhk.com

基金项目:重庆市杰出青年项目(cstc2014jcyj30001);交通运输部建设科技项目(2015318740210);西藏自治区自然科学基金(2016XZ01G31)

采用的通风方式主要有以下3种:全纵向通风、全横向通风和半横向通风^[3]。全横向通风和半横向通风多用于水下隧道,而占我国隧道数量绝大部分的山岭隧道通常采用全纵向通风或纵向送排式通风方式^[4]。采用纵向通风方式的隧道在发生火灾时,即把隧道当作排烟通道,沿隧道纵向将火灾烟气排出。这在一定程度上将侵占人员疏散空间,对人员疏散安全构成威胁^[5-10]。因此,有必要对隧道纵向排烟的效果展开研究,为制定隧道纵向排烟方案提供指导。

本文通过1:10通风模型试验和全尺寸数值模拟,分析火灾烟气在隧道内自由蔓延规律,研究了纵向风对火灾烟气分层和排烟效果的影响。

1 隧道纵向风对火灾烟气分层结构的影响

1.1 试验模型

试验模型隧道全长55 m,如图1所示。试验隧道壁采用亚克力材料拼装而成。由于亚克力在高温下会变形熔化(正常使用温度不能超过85℃),因此试验模拟火源选取温度较低的烟源—熏香(烟气最高温度为40℃~50℃),模拟火源位置位于模型隧道中部。纵向送风风机为离心风机,布置于试验隧道一端。



图1 试验模型照片

Fig. 1 Test tunnel

试验中利用激光片光源辅助烟气流动观察。激光片光源型号为EP532-200,波长532 nm,管芯功率200 mW,图2给出了激光片光的布置示意图,片光沿模型隧道纵向发射,摄像机布置于模型隧道侧,垂直于隧道纵向拍摄,记录火灾烟气运动情况。

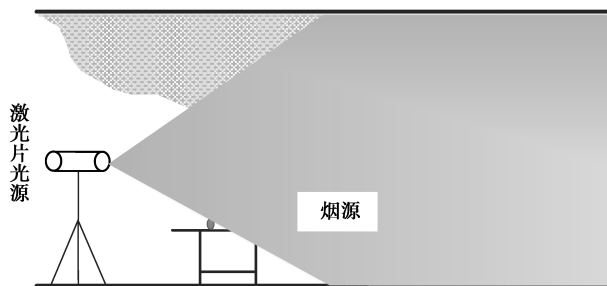


图2 烟气流场结构观察示意图

Fig. 2 Schematic of smoke layer observation with laser sheet

1.2 试验内容

在1:10试验模型隧道内,开展隧道火灾模拟试验,对火灾烟气在隧道内自由蔓延情况及纵向风对烟气流场结构的影响进行了研究,主要试验内容如下:

- (1) 无机械排烟时,烟气自由蔓延情况;
- (2) 纵向通风对火灾烟气流场结构的影响。

1.3 结果与分析

1.3.1 无机械送风情况下火灾烟气在隧道内的分布特征

通过试验观察发现,在无风情况下发生火灾时,火灾产生的烟气受热浮力驱动向上运动,到达隧道顶部后撞击顶棚然后向隧道两端蔓延,如图3所示。火灾烟气继续向隧道两端蔓延,火灾热烟气密度小于空气,热烟气浮于隧道顶部形成明显分层;同时随着热烟气向两端蔓延,不断与隧道壁热交换,烟气温度的逐渐降低,密度逐渐增加,火灾烟气高度逐渐下降,烟气厚度逐渐增加,如图4所示。即距离火源位置越远,烟气层高度越低,现场人员越危险。

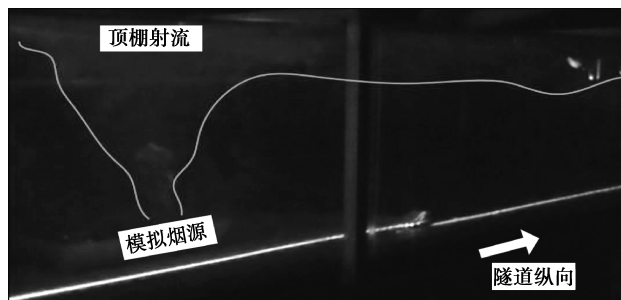


图3 火源上方顶棚射流纵向截面图

Fig. 3 Longitudinal section of smoke layer upon the fire source

1.3.2 通风对隧道内烟气分层结构的影响

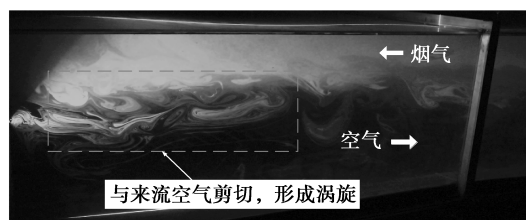
试验发现,火灾烟气在无机械送风情况下,可在隧道顶部维持良好分层,但在纵向通风情况下,烟气分层结构会遭到破坏。图5给出了不同风速



图4 隧道火灾烟气竖向分层

Fig. 4 Smoke layer stratification in vertical direction

时纵向风对烟气分层结构的影响情况。如图5(a)所示,当纵向风速为0.3 m/s,尤其烟气蔓延方向与空气流动方向相反时,下层空气与上层烟气在分界处发生剪切,形成大量涡旋,下层空气被卷吸进入上层烟气,使得烟气层厚度增加;当纵向风速进一步增加,涡旋结构开始破碎(如图5(b)),火灾烟气逐步向下层空气扩散;当纵向风速增加至1.5 m/s,剪切程度加强,上层烟气与下层空气明显界限消失,分层结构破坏(如图5(c))。



(a) 0.3 m/s



(b) 0.8 m/s



(c) 1.5 m/s

图5 通风对烟气分层结构的影响

Fig. 5 Influence of ventilation on smoke layer stratification

在采用全射流纵向通风的隧道内,发生火灾时通常的排烟方案是开启火源上游风机,使其达到临界风速,控制火灾烟气向火源上游逆流。本试验对临界风速的排烟效果进行了观察。试验发现,上游提供纵向临界风速可抑制火灾烟气向前扩散,但同时也对火灾烟气的分层结构造成一定影响;如前所述,纵向风的剪切作用,大量空气被卷吸进入上层

烟气,使得烟气层厚度增加,尤其在烟气前锋迎风面处,此种现象更为明显,如图6所示。因此,在隧道内发生火灾时,着火点附近人员未完全疏散时,不宜立即开启排烟风机。



图6 纵向通风抑制火灾烟气逆流

Fig. 6 Effect of longitudinal ventilation on smoke backflow

2 隧道纵向排烟效果数值模拟研究

2.1 数值计算模型

利用美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的火灾动力学模拟软件FDS建立全长1 000 m的模拟隧道计算模型,火源位于隧道正中。以火源中心为原点,向右为正方向, $-100 \leq x \leq 100$ 范围内,网格大小为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$, $-500 \leq x < 100$ 和 $100 < x \leq 500$ 范围内,网格大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,模型共计1 075 200个网格。

2.2 火灾场景设计

在公路隧道内可能发生的火灾类型主要为车辆及车载货物火灾。在模拟计算中,火源选择 t^2 快速增长火模拟车辆燃油火灾,峰值功率为20 MW。发生火灾位置为隧道中央,图7给出火灾热释放速率时间增长曲线。模拟计算对比分析2个工况:①烟气自然蔓延;②火灾发生后120 s开启排烟风机烟气的运动情况。

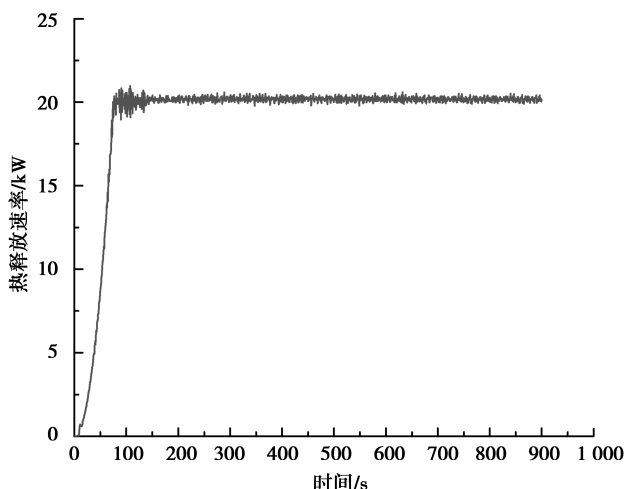


图7 模拟火灾热释放速率曲线

Fig. 7 Heat release rate of fire simulation

2.3 结果与分析

图8给出了隧道发生20 MW火灾时烟气的自由蔓延情况。从模拟结果看,火灾发生后,烟气自由向隧道两端对称扩散,约450 s时烟气前锋达到模拟隧道出口(离火源位置500 m)。



图8 隧道火灾烟气自由蔓延情况

Fig. 8 Result of smoke free spread of tunnel fire

为研究火灾烟气的沉降特性,模拟过程中在距路面1.8 m(约为成年人身高)高处设置监测面,监测该面上能见度变化情况。图9给出了隧道发生20 MW火灾时,在火灾烟气自由蔓延的情况下,1.8 m高截面能见度分布情况。从图中看出,随着火灾发展,隧道内能见度情况越来越恶劣。285 s时,在距火源100~300 m处开始出现能见度低于10 m的区域;约400 s之后,出现大面积能见度低于10 m的区域,隧道内滞留人员无法正常疏散,生命安全受到严重威胁。

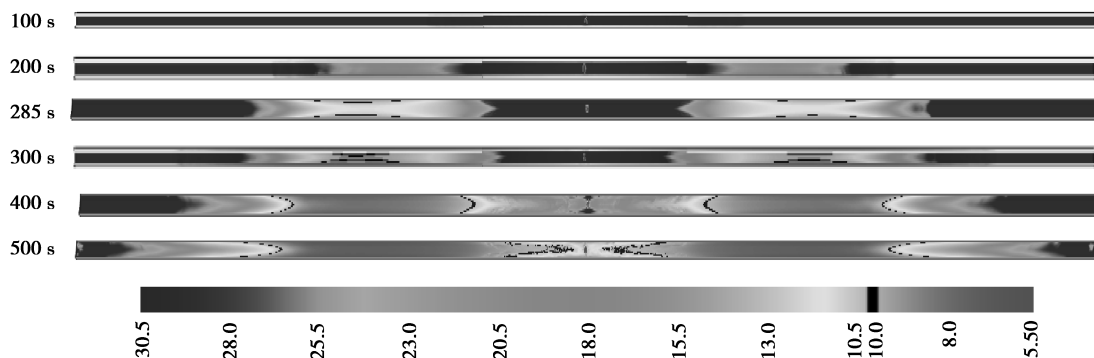


图9 火灾烟气自由蔓延时隧道1.8 m高处能见度情况

Fig. 9 Visibility distribution of free spread smoke of tunnel fire at 1.8 m height

图10、11给出了隧道纵向通风排烟效果的模拟计算结果,排烟风机开启时间为发生火灾后120 s,纵向排烟风速为3.0 m/s。结果发现,火灾发生后烟气先向隧道两端扩散,开启排烟风机后火灾烟气被吹向火源下游,并被有效抑制在着火点下游。从能见度分布情况看,900 s内火源下游能见度均未低于10 m。但对比200 s时烟气自由蔓延和纵向排烟两种工况的隧道能见度发现,烟气自由蔓延时火源下游能见度情况优于开启纵向排烟时

的情况。这正是由于纵向风对火灾烟气分层结构的破坏而造成的。因此,发生火灾时,不宜立即开启纵向排烟风机,同时应引导下游车辆快速驶出隧道。



图10 发生火灾120 s后开启排烟风机隧道内烟气运动情况

Fig. 10 Smoke movement after open the exhaust fan at 120 s

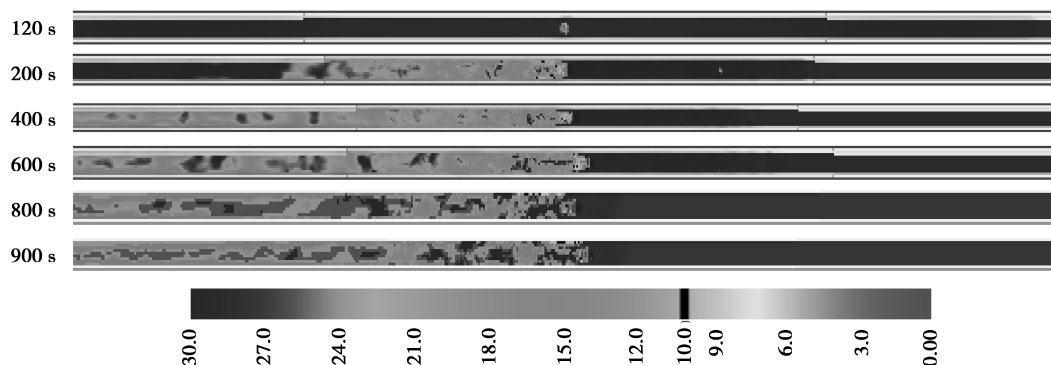


图11 发生火灾后120 s开启排烟风机隧道1.8 m高处能见度分布情况

Fig. 11 Visibility distribution after open the exhaust fan at 1.8 m height

3 结论

通过1:10物理模型试验和数值模拟,对隧道火灾烟气自由蔓延特征,纵向排烟对火灾烟气运动的影响进行了研究,研究结果表明:

(1)在无风影响情况下,火灾初期,烟气能够较好地维持在隧道顶部,自由向火源两侧蔓延,火灾烟气与下层空气分层界限明显。

(2)隧道纵向通风对火灾烟气分层有较大影响。纵向风使得烟气与空气分层处出现大量涡旋,随着纵向风速增加,涡旋结构遭到破坏,最终烟气分层消失。

(3)采用临界风速进行纵向排烟时,能够抑制火灾烟气向火源上游扩散,但下游烟气分层结构明显遭到破坏。虽然能见度并未低于10 m,但纵向排烟仍加速了下游区域能见度恶化。

(3)鉴于纵向风对烟气分层的影响,建议采用纵向通风的隧道发生火灾时,在着火初期不开启排烟风机,待人员撤离危险区域后开启风机排烟。

参考文献(References)

- [1] Kurioka H, Oka Y, Satoh H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4):319-340.
- [2] 沈奕, 闫治国, 朱合华. 大断面道路隧道火灾初期规律足尺试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 1080-1087. (Shen Yi, Yan Zhiguo, Zhu Hehua. Full-scale experimental research on the development of the initial stage of fire in a large cross-section road tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 1080-1087. (in Chinese))
- [3] Oka Y, Atkinson G T. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4): 305-322.
- [4] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(4): 363-390.
- [5] 胡隆华, 霍然, 王浩波, 等. 公路隧道内火灾烟气温度及层化高度分布特征试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6):79-82. (Hu Longhua, Huo Ran, Wang Haobo, et al. Experiment of fire smoke temperature and layer stratification height distribution characteristic along highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6):79-82. (in Chinese))
- [6] 蒋亚强, 霍然, 胡隆华, 等. 通道火灾时横向排烟对烟气层化特性的影响研究[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 250-256. (Jiang Yaqiang, Huo Ran, Hu Longhua, et al. Influence of transverse extraction rates on smoke stratification characteristics in channel fires [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 250-256. (in Chinese))
- [7] 阳东, 胡隆华, 霍然, 等. 纵向风对通道火灾烟气竖向分层特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(3):252-256. (Yang Dong, Hu Longhua, Huo Ran, et al. Effects of longitudinal air flow on smoke stratification in channel fire[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(3):252-256. (in Chinese))
- [8] 曾艳华, 胡百万, 黎旭, 等. 大纵坡双向行车公路隧道火灾控制风速研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 959-964. (Zeng Yanhua, Hu Baiwan, Li Xu, et al. Study on wind flow velocity under fire control in two-direction road tunnel with large longitudinal slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 959-964. (in Chinese))
- [9] 王晓波. 长大隧道火灾安全疏散研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1364-1370. (Wang Xiaobo. Research on safe evacuation in large and long tunnel during Fire[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1364-1370. (in Chinese))
- [10] 彭伟, 霍然, 胡隆华, 等. 隧道火灾全尺寸试验研究[J]. 火灾科学, 2006, 15(4):213-218. (Peng Wei, Huo Ran, Hu Longhua, et al. Full scale experiments on fire smoke movements in tunnels [J]. Fire Science, 2006, 15(4):213-218. (in Chinese))