

文章编号:1004-5309(2023)-0107-09

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2023.02.05

# 城市“W”型中长距离沉管隧道火灾烟气运动规律研究

魏立新<sup>1</sup>,唐宏辉<sup>1</sup>,赵家明<sup>2</sup>,殷耀龙<sup>2</sup>,谢艺强<sup>1</sup>,徐志胜<sup>2\*</sup>

(1.广州市市政工程设计研究总院有限公司,广州,510000;

2.中南大学防灾科学与安全技术研究所,长沙,410075)

**摘要:**面对城市内河存有江中岛情况,过江隧道普遍采用“W”型的纵断面形式。揭示城市“W”型过江隧道火灾烟气运动规律具有重要意义。利用火灾动力学软件(FDS),采用数值模拟方法研究了交通正常、拥堵工况下城市“W”型中长距离沉管隧道火灾烟气蔓延范围和隧道顶部温度、流速分布规律。结果表明:交通正常时,临界风速可以较好控制城市“W”型隧道内不同区间发生火灾时的烟气;交通拥堵时,沙岛段发生火灾时危险性最高,1800 s时烟气还有继续蔓延的趋势。交通正常时隧道顶部最高温度均小于300℃;交通拥堵时,沙岛段隧道顶部最高温度约423℃,沉管段隧道顶部最高温度约387℃,出入口段隧道顶部最高温度约350℃~400℃。交通正常时,火源下游流速明显高于上游流速;交通拥堵时,火源处流速最大,随着距离增加,流速整体呈现衰减趋势,隧道顶部流速会随坡度变化波动。

**关键词:**隧道火灾;“W”型坡度隧道;数值模拟;烟气运动;烟气控制

**中图分类号:** X932;X913.4

**文献标识码:** A

## 0 引言

中国隧道建设里程和数量不断增加,截至2021年末,中国公路隧道23268处、24698.9 km,其中特长隧道1599处、7170.8 km,长隧道6211处、10844.3 km<sup>[1]</sup>。较2020年,长距离隧道增长670座,1211.1 km<sup>[2]</sup>。考虑工程造价需求,城市过江隧道会面临江心洲,一般选择经过江心洲的建造方法,这就形成了“W”型隧道纵断面。市政隧道、城市地下快速路隧道小于3 km一般采用纵向通风模式<sup>[3,4]</sup>。根据以往隧道火灾案例<sup>[5]</sup>,隧道火灾通风排烟技术十分重要,城市“W”型无风塔中长距离沉管隧道火灾烟气运动规律还有待进一步研究。

“W”型隧道由多个坡度组成,早期,学者们主要针对单坡度隧道研究,Atkinson等<sup>[6]</sup>通过模型试验

研究了下坡隧道的临界风速,提出了坡度在0°到10°之间时临界风速的坡度校正因子。Hu等<sup>[7]</sup>考虑了0°、3°、5°的坡度工况,通过模型试验提出了倾斜隧道顶棚最大温度和温度衰减预测模型。Chow等<sup>[8]</sup>通过模型试验研究了坡度为0°、3°、6°、9°隧道的烟气回流长度,提出了坡度隧道烟气回流长度预测模型。Ji等<sup>[9]</sup>通过数值模拟研究了倾斜隧道中火灾烟气的运动行为,重点研究了隧道中心线沿线的上游温度,结果表明:纵向中心线峰值温度出现在火源的下游区域,而不是火源的正上方。上游烟气层界面几乎平行于水平面,而下游烟气层界面平行于倾斜的隧道顶板。Du等<sup>[10]</sup>通过盐水试验和数值模拟方法,研究了倾斜隧道临界风速,结果发现:对于恒定的火灾对流热释放率,实现临界速度所需的驱动力随着火源和烟气出口之间的高度差而增加。驱

收稿日期:2022-10-08;修改日期:2023-01-12

基金项目:企业创新科研项目(2021-093-FK)

作者简介:魏立新(1966—),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为桥梁隧道与地下结构、流体动力学设计分析。

通讯作者:徐志胜,E-mail:zhshxu@csu.edu.cn

动力的变化主要是由于叠加效应,而不是临界速度的变化。Wan 等<sup>[11]</sup>通过数值模拟研究了倾斜竖井隧道的入口风速和火灾烟气回流长度,结果发现:增加坡度有助于减少吸穿,同时降低竖井内部区域的烟气温度;建立了烟气回流长度的经验模型,隧道入口风速随着隧道坡度和 HRR 的增加而增加,随着火源远离隧道下坡入口而降低。

在单一坡度的基础上,学者们还探讨了“V”型和“人”型等双坡度耦合情况的烟气蔓延情况。Fan 等<sup>[12]</sup>通过数值模拟研究了倾斜巷道的长度和角度变化对火灾烟气运动的影响,结果表明:增加倾斜巷道的宽度或角度都将有助于减少水平巷道中的回流长度,提出了无量纲数  $R_i$  来揭示倾斜巷道的长度和角度对火灾烟气运动的耦合影响;流入倾斜巷道的烟气质量流率随倾斜巷道垂直高度的增加呈指数增加。姜学鹏等<sup>[13]</sup>利用数值模拟方法,研究了“人”型坡度隧道火灾顶板下方烟气最高温度,结果表明:“人”型坡度隧道两端的烟气层始终与水平地面平行,建立了“人”型坡度隧道最大温度预测公式。在此基础上,姜学鹏等<sup>[14,15]</sup>针对“V”型坡度隧道的火灾最大温度和温度衰减,推导了无量纲火源位置与变坡点距离不同时的最大温升参数预测模型,结果表明:无量纲最大温升参数随无量纲火源位置的增大而增大。Xie 等<sup>[16]</sup>通过数值模拟方法研究了“V”型坡度隧道的烟气回流长度,研究变量包括不同坡度和热释放速率,结果表明:随着 V 形隧道两个角度之间正弦差的增大,无量纲烟气回流长度减小。提出了“V”型坡度隧道烟气回流长度的半经验公式。

前人研究了单一坡度和双坡耦合的“V”型、“人”型坡,但实际工程往往比较复杂,城市“W”型隧道火灾烟气运动规律需进一步研究。研究结果对城市中长距离水下隧道工程应用起到科学支撑作用,可为城市中长距离水下隧道排烟系统方案设计提供参考。

## 1 数值模拟

以广州市某珠江隧道为工程依托,工程为城市主干路,双向六车道标准,过江区段采用沉管隧道,应用 FDS 6.7.4 进行隧道右线火灾模拟,隧道长 2 214 m,宽 12.9 m,高 6.6 m,环境温度为 293 K,初始压力为 0.1 MPa。隧道主线纵向总体设计呈“W”型,最大纵坡为 5%,包含了 11 个小坡度段。

具体隧道横断面及纵断面如图 1 所示。由于小坡度段较多,本文应用 FDS 软件中分解重力加速度的方法模拟“W”型隧道。

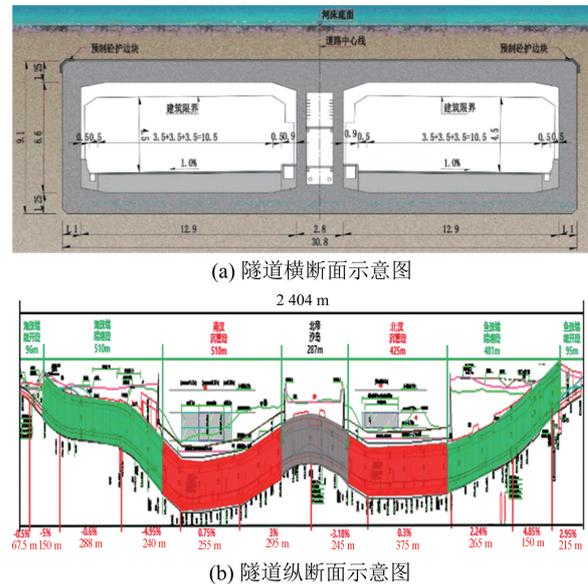


图 1 隧道横断面和纵断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel cross section and longitudinal section

根据隧道通行车辆种类及比例,并调研了中国《城市地下道路工程设计规范》(CJJ 221-2015)<sup>[4]</sup>、中国上海《道路隧道设计标准》(DGTJ 08-2033-2017)<sup>[17]</sup>等规范,综合确定隧道最不利火灾场景为 1 辆公交车发生火灾,火灾热释放速率为 20 MW,采用  $t^2$  火灾增长模型。

$$Q = \alpha t^2$$

火灾增长方式为  $t^2$  快速火,  $\alpha = 0.1876 \text{ kW/s}^2$ 。热释放速率在 326.5 s 达到最大值后保持该规模恒定不变,忽略火灾衰退阶段。经 NIST 试验验证,当网格尺寸  $d$  取值介于  $[D^*/16, D^*/4]$  之间时模拟结果与试验结果非常吻合<sup>[18]</sup>。其中  $D^*$  为火灾的特征直径,通常表示为:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

式中:  $D^*$  为火灾特征直径;  $Q$  为火灾热释放速率 (kW);  $\rho_{\infty}$  为环境空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ), 此处取  $1.204 \text{ kg/m}^3$ ;  $c_p$  为环境空气比热 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ), 此处取  $1.005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_{\infty}$  为环境空气温度 (K), 此处为 293 K;  $g$  为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ ), 此处取  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。为使得计算更快,计算结果更好,本文采取分解重力

加速度的方法等效替代隧道各区段坡度。

通过计算可知  $D^* = 3.18$ ,故在本项目利用 FDS 进行数值模拟计算时,网格大小介于  $0.20\text{ m} \sim 0.79\text{ m}$  之间时,数值模拟计算的结果与真实情况接近,可靠性较高,考虑到计算机能力和时间等因素,本模型隧道的网格大小取  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。模拟时长为  $1\ 800\text{ s}$ 。取稳定段温度和风速数据的平均值进行相应的数据分析。

本文选取隧道入口段、两边水下段、岛上段和出口段 5 个区段进行研究。由于城市隧道会有交通拥堵风险,本文考虑 2 种交通模式,一种是交通正常情况,火源下游车辆可以正常驶离隧道,管养部门可以立即开启射流风机进行纵向通风,通过预模拟和理论计算确定本工程临界风速为  $3.00\text{ m/s}$ ,如表 1 所示。

表 1 隧道各区段临界风速推荐表

Table 1 Recommended critical wind speed table for each section of tunnel

编号	坡度 (%)	临界风速计算值		
		PIARC	浙交院与中南大学合作公式	NFPA
V1、V2	-0.6	3.28	3.71	3.33
V3、V4	-4.95	3.63	4.24	3.99
V5、V6	3.00	2.91	3.26	3.26
V7、V8	-3.18	3.50	4.03	3.26
V9、V10	4.85	2.78	3.03	3.26

另一种是交通拥堵情况,火源下游车辆无法或立即驶离隧道,隧道管养部门可先不开启射流风机,让烟气自由稳定蔓延。共设置 10 种工况,如表 2 所示。

本文直接采用目测法观察隧道内烟气蔓延趋势,在隧道顶板下设置温度、流速测点,测点距离顶板  $0.5\text{ m}$ 。从火源附近  $\pm 350\text{ m}$  范围内,测点间距为  $2\text{ m}$ ;从火源附近  $\pm 350\text{ m}$  到  $\pm 700\text{ m}$  范围内,测点间距为  $5\text{ m}$ ;从火源附近  $\pm 700\text{ m}$  到隧道洞口,测点间距为  $10\text{ m}$ 。

## 2 结果对比与分析

### 2.1 隧道内烟气蔓延趋势

图 2 为交通正常时烟气蔓延趋势图,在临界风

表 2 模拟工况设置

Table 2 Setting of simulated scenarios

编号	坡度 (%)	火源所处位置	交通状况	
			交通正常/交通堵塞	
V1、V2	-0.60	南岸岸上段(距隧道口 211 m)		
V3、V4	-4.95	南部沉管段(距隧道口 590 m)		
V5、V6	3.00	沙岛段(距隧道口 1 140 m)	$3.00\text{ m/s}$ (临界风速)	自然通风
V7、V8	-3.18	北部沉管段(距隧道口 1 385 m)		
V9、V10	4.85	北岸岸上段(距隧道口 2 105 m)		

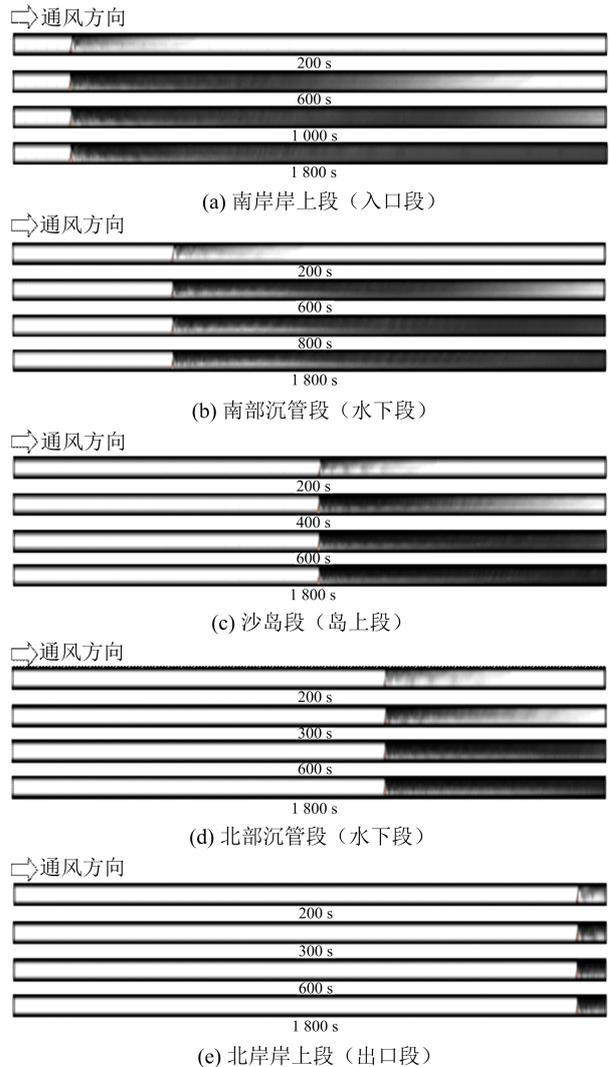


图 2 交通正常时烟气蔓延趋势图

Fig. 2 Trend chart of smoke spread when traffic is normal

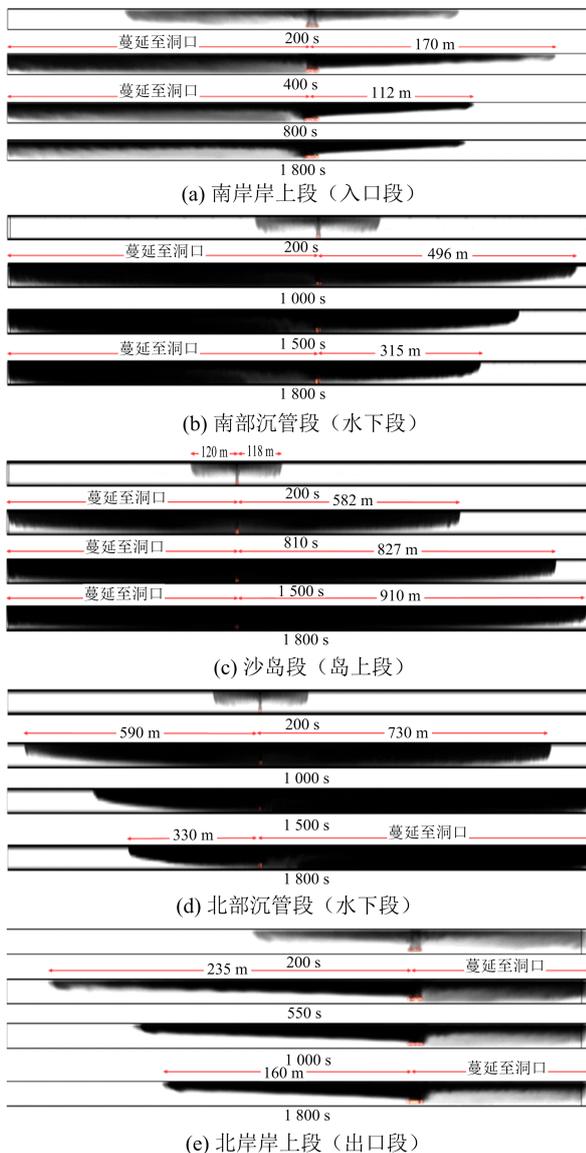


图 3 交通拥堵时烟气蔓延趋势图

Fig. 3 Trend diagram of smoke spread during traffic congestion

速工况下,从火灾发生 200 s 到火灾发生 1 800 s 时间内,烟气被吹往下游,火源上方均未出现烟气回流,烟气得到了良好的控制,同时发现,随着时间增长,火源下游烟气含量越来越多。

图 3 为交通拥堵时烟气蔓延趋势图。如图 3 (a)所示,当火源位于南岸岸上段时,火源上下游均为负坡度,烟气向上游蔓延至洞口,向下游先蔓延一段距离,最远处达到 170 m,随后该距离渐渐变短,在 800 s 时达到稳定,稳定在 112 m 左右。如图 3 (b)所示,当火源位于南部沉管段时,火源上游为负坡度,下游为正坡度,烟气向上游蔓延至洞口,向下

游先蔓延一段距离,最远处达到 496 m 左右,随后该距离渐渐变短,在 1 800 s 时仍有缩短的趋势,此时的距离为 315 m 左右。如图 3(c)所示,当火源位于沙岛段时,火源上游为正坡度,下游为负坡度,烟气向两侧缓慢蔓延,1 800 s 时仍有向两侧蔓延的趋势,其中向上游蔓延的速度小于向下游蔓延的速度。如图 3(d)所示,当火源位于北部沉管段时,火源上游为负坡度,下游为正坡度,烟气向下游蔓延至洞口,向上游先蔓延一段距离,最远处达 590 m 左右,最后该距离渐渐变短,在 1 800 s 时仍有变短的趋势,此时的距离为 330 m 左右。如图 3(e)所示,当火源位于北岸岸上段时,火源上下游均为正坡度,烟气向下游蔓延至洞口,向上游先蔓延一段距离,最远处达到 235 m,随后该距离渐渐变短,在 1 800 s 时达到稳定,稳定在 160 m 左右。隧道自身坡度对于隧道烟气的蔓延有很显著的影响,隧道坡度产生的烟囱效应使得隧道上下游烟气呈现明显的非对称性分布。

## 2.2 隧道顶部温度分布规律

图 4 为交通正常时隧道顶部温度分布规律,由于纵向风将烟气吹往火源下游,因此火源上游的温度未发生明显变化。当隧道内不同区段发生火灾时,火源下游温度均出现先急剧上升随后缓慢下降的趋势。图 4 中出现了两个峰值,第一个峰值在火源处,温度在 200 °C~250 °C 范围内波动,第二个峰值出现在火源下游 50 m 左右的位置,温度在 100 °C~150 °C 范围内波动。隧道顶部最高温度均小于 300 °C。

图 5 为交通拥堵时隧道顶部温度分布图。如图 5(a)所示,当火源位于南岸岸上段时,隧道顶部的最高温度约为 318 °C。稳定后的隧道顶部温度在火源上游沿隧道纵向逐渐衰减,在洞口处衰减为 100 °C 左右;在火源下游 100 m 左右处衰减为环境温度。如图 5(b)所示,当火源位于南部沉管段时,隧道顶部的最高温度约为 404 °C。稳定后的隧道顶部温度在火源上游沿隧道纵向逐渐衰减,在洞口处衰减为 50 °C 左右;在火源下游 345 m 左右处衰减为环境温度。如图 5(c)所示,当火源位于沙岛段时,隧道顶部的最高温度约为 423 °C。稳定后的隧道顶部温度在火源上游沿隧道纵向逐渐衰减,在距火源 590 m 左右处衰减为环境温度。在火源下游 800 m 左右处衰减为环境温度。如图 5(d)所示,当火源位于北

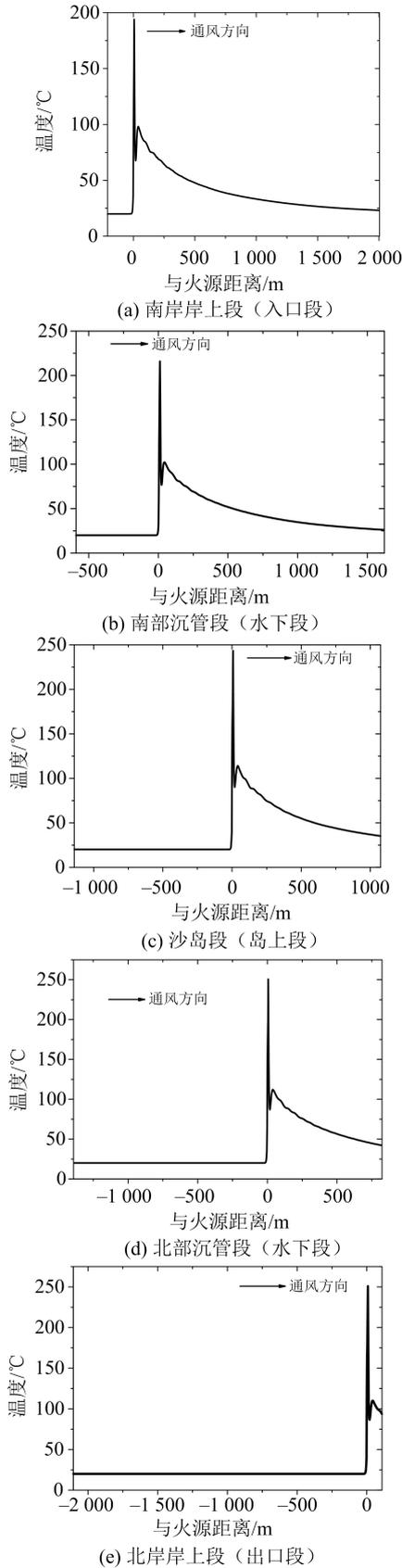


图 4 交通正常时隧道顶部温度分布规律  
 Fig. 4 Temperature distribution at the top of the tunnel when traffic is normal

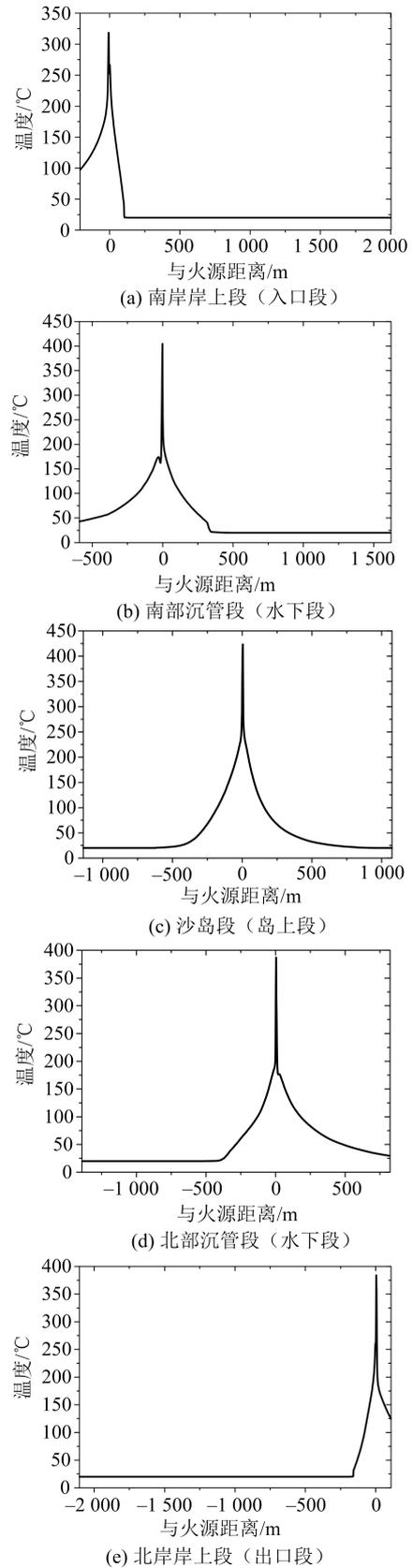


图 5 交通拥堵时隧道顶部温度分布规律  
 Fig. 5 Temperature distribution at the top of the tunnel during traffic congestion

部沉管段时,隧道顶部的最高温度约为  $387\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。稳定后的隧道顶部温度在火源上游沿隧道纵向逐渐衰减,在距火源  $400\text{ m}$  左右处衰减为环境温度。在火源下游洞口处衰减为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。如图 5(e)所示,当火源位于北岸岸上段时,隧道顶部的最高温度约为  $384\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。稳定后的隧道顶部温度在火源上游沿隧道纵向逐渐衰减,在距火源  $160\text{ m}$  左右处衰减为环境温度,在火源下游洞口处衰减为  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。

### 2.3 隧道顶部流速分布规律

图 6 为无火源,强制通风时隧道顶部风速分布图,从图 6 中可以得到风速呈现先下降后平稳的趋势,平稳段的风速为  $2.60\text{ m/s}\sim 2.70\text{ m/s}$  之间进行波动。

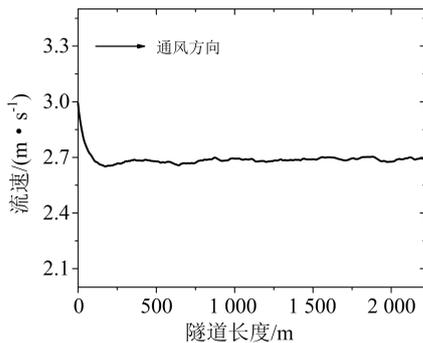


图 6 无火源、强制通风时的隧道顶部风速分布图

Fig. 6 Wind velocity distribution diagram of tunnel roof with no fire source and forced ventilation

图 7 为交通正常时隧道顶部流速分布规律。如图 7(a)所示,当火源位于南岸岸上段时,火源上游的顶部流速沿隧道纵向不断衰减,随后在火源处骤然升高,达到第一个峰值,最高流速为  $4.26\text{ m/s}$  左右;火源下游的流速骤然下降,随后缓慢升高,在距火源  $636\text{ m}$  左右达到第二个峰值,为  $3.58\text{ m/s}$  左右,接着沿隧道纵向缓慢衰减,洞口处的流速衰减为  $3.00\text{ m/s}$  左右。如图 7(b)所示,当火源位于南部沉管段时,火源上游的顶部流速沿隧道纵向不断衰减,随后在距隧道入口  $450\text{ m}$  左右处有上升的趋势,随后在火源处骤然升高,达到第一个峰值,最高流速为  $5.17\text{ m/s}$  左右;火源下游的流速骤然下降,随后缓慢升高,在距火源  $400\text{ m}$  左右达到第二个峰值,为  $4.10\text{ m/s}$  左右,接着沿隧道纵向缓慢衰减,洞口处的流速衰减为  $3.10\text{ m/s}$  左右。如图 7(c)所示,当火源位于沙岛段时,火源上游的顶部流速沿隧道纵向不断衰减,随后在距隧道入口  $500\text{ m}$  左右处

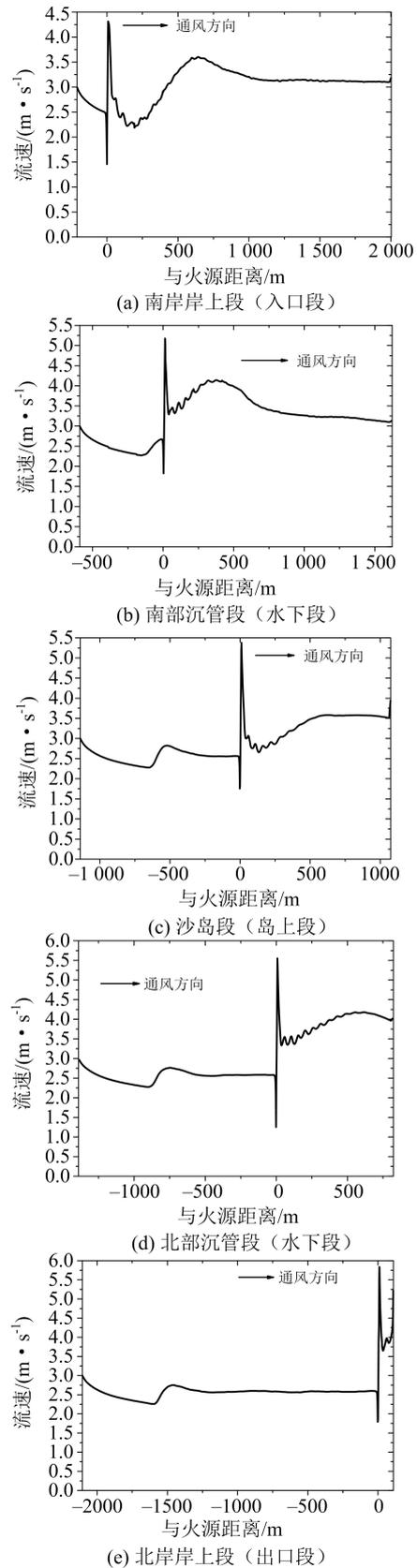


图 7 交通正常时隧道顶部流速分布规律

Fig. 7 Velocity distribution at the top of the tunnel when traffic is normal

有上升的趋势,随即稳定在  $2.60 \text{ m/s} \sim 2.70 \text{ m/s}$  之间,火源处流速骤然升高,达到第一个峰值,最高流速为  $5.37 \text{ m/s}$  左右;火源下游的流速骤然下降,随后缓慢升高,在距火源  $600 \text{ m}$  左右达到第二个峰值,为  $3.57 \text{ m/s}$  左右,接着沿隧道纵向缓慢衰减,洞口处的流速衰减为  $3.50 \text{ m/s}$  左右。如图 7(d)所示,当火源位于北岸沉管段时,火源上游的顶部流速沿隧道纵向不断衰减,随后在距隧道入口  $500 \text{ m}$  左右处有上升的趋势,随即保持在  $2.56 \text{ m/s}$  左右,火源处流速骤然升高,达到第一个峰值,最高流速为  $5.50 \text{ m/s}$  左右;火源下游的流速骤然下降,随后缓慢升高,在距火源  $600 \text{ m}$  左右达到第二个峰值,为  $4.16 \text{ m/s}$  左右,接着沿隧道纵向缓慢衰减,洞口处的流速衰减为  $4.00 \text{ m/s}$  左右。如图 7(e)所示,当火源位于北岸岸上段时,火源上游的顶部流速沿隧道纵向不断衰减,随后在距隧道入口  $500 \text{ m}$  左右处有上升的趋势,随即保持在  $2.56 \text{ m/s}$  左右,火源处流速骤然升高,达到第一个峰值,最高流速为  $5.83 \text{ m/s}$  左右;火源下游的流速骤然下降,为  $3.88 \text{ m/s}$  左右,洞口处的流速波动较大。

图 8 为交通拥堵时隧道顶部流速分布规律。如图 8(a)所示,当火源位于南岸岸上段时,火源处的最大流速为  $5.88 \text{ m/s}$  左右。由于火源距隧道入口比较近,火源上游的流速波动较大;火源下游的流速急剧衰减为  $0.30 \text{ m/s}$  后又急剧上升至  $0.89 \text{ m/s}$  左右。如图 8(b)所示,当火源位于南部沉管段时,火源处的最大流速为  $4.97 \text{ m/s}$  左右。火源上游的流速先急剧下降,随后逐渐上升,在距火源  $250 \text{ m}$  左右的位置达到  $4.60 \text{ m/s}$  左右,然后逐渐衰减,在距火源  $25 \text{ m}$  的位置衰减至  $2.50 \text{ m/s}$  左右;火源下游流速先急剧下降,随后逐渐上升,在距火源  $50 \text{ m}$  左右的位置达到  $3.25 \text{ m/s}$  左右,然后逐渐衰减,在距火源  $320 \text{ m}$  的位置衰减至  $0.50 \text{ m/s}$  左右,随后又急剧上升至  $1.00 \text{ m/s}$  左右。如图 8(c)所示,当火源位于沙岛段时,火源处的最大流速为  $4.52 \text{ m/s}$  左右。火源上游的流速先急剧下降,后下降速度趋缓,在距火源  $610 \text{ m}$  左右处衰减至  $0.10 \text{ m/s}$ ;火源下游流速先急剧下降,随后逐渐上升,在距火源  $350 \text{ m}$  左右的位置达到  $2.00 \text{ m/s}$  左右,然后逐渐衰减,在距火源  $1000 \text{ m}$  的位置衰减至  $0.25 \text{ m/s}$  左右。如图 8(d)所示,当火源位于北部沉管段时,火源处的最大流速为  $5.10 \text{ m/s}$  左右。火源上游的流速先急剧下降,随后逐渐上升,在距火源  $80 \text{ m}$  左右的位置

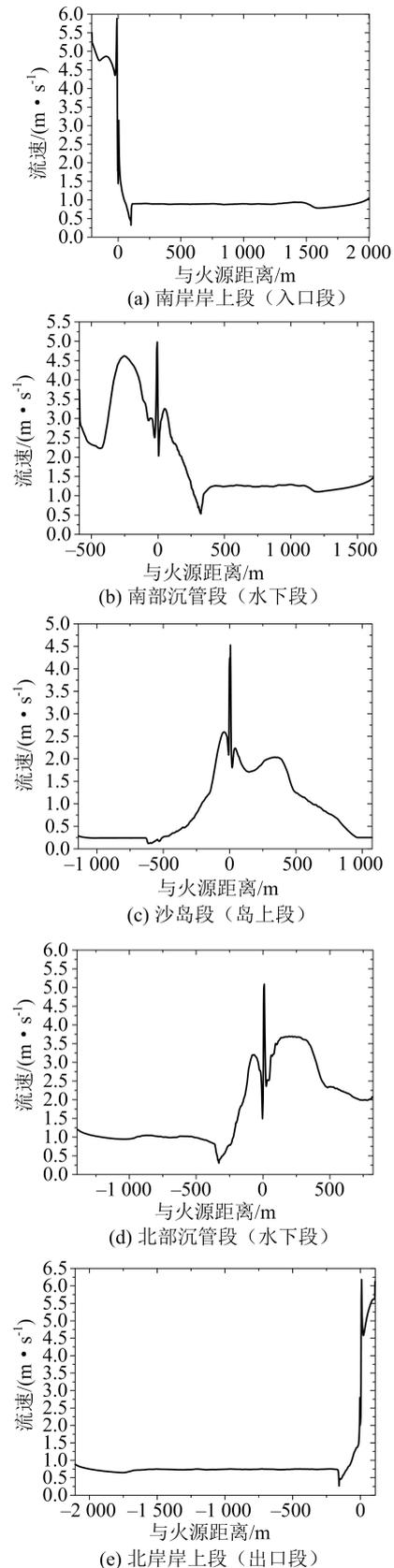


图 8 交通拥堵时隧道顶部流速分布规律  
Fig. 8 Velocity distribution at the top of the tunnel during traffic congestion

达到 3.20 m/s 左右,然后逐渐衰减,在距火源 500 m 的位置衰减至 0.88 m/s 左右;火源下游流速先急剧下降,随后逐渐上升,在距火源 130 m 左右的位置达到 3.70 m/s 左右,然后逐渐衰减至 2.00 m/s 左右。如图 8(e)所示,当火源位于北岸岸上段时,火源处的最大流速为 6.17 m/s 左右。火源上游的流速急剧衰减至 0.80 m/s 左右;由于火源距隧道入口比较近,火源下游的流速波动较大。

### 3 结论

通过数值模拟,分析了城市“W”型无风塔中长距离沉管隧道发生火灾时,隧道内烟气蔓延趋势、顶部温度和流速分布规律,主要得出以下结论:

(1)交通正常时,临界风速可以良好控制城市“W”型隧道内不同区间发生火灾的烟气。交通拥堵时,沙岛段发生火灾时最危险,1 800 s 时烟气还有继续蔓延的趋势。岸上段和沉管段发生火灾后,近洞口方向,烟气会蔓延出洞口;远洞口方向,烟气蔓延一段距离后会逐渐变短。

(2)交通正常时,顶部温度分布会出现两个峰值,第一个峰值在火源处,温度在 200 °C~250 °C 范围内波动,第二个峰值出现在火源下游 50 m 左右的位置,温度在 100 °C~150 °C 范围内波动。隧道顶部最高温度均小于 300 °C。交通拥堵时,沙岛段火灾时隧道顶部最高温度约 450 °C,沉管段火灾时隧道顶部最高温度约 423 °C,出入口段火灾时隧道顶部最高温度约 350 °C~400 °C。

(3)交通正常时,火源下游流速明显高于上游流速。交通拥堵时,火源处流速最大,随着距离增加,流速整体呈现衰减趋势,隧道顶部流速会随坡度变化波动。

(4)本文主要针对水下“W”型隧道工程火灾通风排烟进行数值模拟研究,研究了不同火源位置在不同交通状况下的烟气运动规律,后续将针对隧道不同“W”型工况展开研究,以期对类似工程火灾排烟设计及防灾救援方案提供良好的理论依据和技术参考。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2022-05-25)[2022-10-08]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524\\_3656659.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html).
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2021-05-19)[2022-10-08]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202105/t20210517\\_3593412.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202105/t20210517_3593412.html).
- [3] GB 50016-2014, 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [4] CJJ 221-2015, 城市地下道路工程设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [5] Weng M C, Lu X L, Liu F, Shi X P, Yu L X. Prediction of backlayering length and critical velocity in metro tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 64-72.
- [6] Arkinson G T, Wu Y. Smoke control in sloping tunnels[J]. Fire Safety Journal, 1996, 27(4): 335-341.
- [7] Hu L H, Chen L F, Wu L, Li Y F, Zhang J Y, Meng N. An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a sloping tunnel fire[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1-2): 246-254.
- [8] Chow W K, Gao Y, Zhao J H, Dang J F, Chow C L, Miao L. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2015, 75: 14-22.
- [9] Ji J, Wan H X, Li K Y, Han J Y, Sun J H. A numerical study on upstream maximum temperature in inclined urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88: 516-526.
- [10] Du T, Yang D, Ding Y. Driving force for preventing smoke backlayering in downhill tunnel fires using forced longitudinal ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 76-82.
- [11] Wan H X, Gao Z H, Han J Y, Ji J, Ye M J, Zhang Y M. A numerical study on smoke back-layering length and inlet air velocity of fires in an inclined tunnel under natural ventilation with a vertical shaft[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 138: 293-303.
- [12] Fan C G, Li X Y, Mu Y, Guo F Y, Ji J. Smoke movement characteristics under stack effect in a mine laneway fire[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 70-79.
- [13] 姜学鹏, 廖湘娟, 何振华. 人字坡山岭隧道火灾顶板下方烟气最高温度的研究[J]. 安全与环境学报, 2018,

- 18(3): 925-929.
- [14] 姜学鹏, 谢智云, 于思维, 廖湘娟. 水下 V 形坡隧道烟气温度纵向衰减研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 70-76.
- [15] 姜学鹏, 于思维, 金俊. 城市 V 形坡隧道火灾最高温度数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 672-678.
- [16] Xie E, Zhao W D, Xu Z S, Zhang X C, Xu W K, Wang T X, He L. A numerical study on smoke back-layering length in V-shaped tunnels under natural ventilation[J]. Fire and Materials, 2022, 46(8): 1208-1221.
- [17] DG/TJ 08-2033-2017, 道路隧道设计标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
- [18] 季经纬, 李福清, 卢文, 蔡伟明. 倾斜导烟板对隧道机械排烟效果影响研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(6): 777-782.

## Study on the movement law of fire smoke in urban W-shaped medium and long-distance immersed tunnel

WEI Lixin<sup>1</sup>, TANG Honghui<sup>1</sup>, ZHAO Jiaming<sup>2</sup>,  
YIN Yaolong<sup>2</sup>, XIE Yiqiang<sup>1</sup>, XU Zhisheng<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Company Limited, Guangzhou 510000, China;

2. Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** When urban rivers contain islands, W-shaped longitudinal sections are commonly used for tunnels that cross the river. It is crucial to investigate the smoke movement and temperature and velocity distribution at the top of the tunnel in case of an urban W type river crossing tunnel fire. This paper uses Fire Dynamics Software (FDS) and numerical simulation methods to study the spread trend of fire smoke and the temperature and velocity distribution at the top of the tunnel in the urban W-shaped medium and long-distance immersed tunnel under normal traffic and congestion conditions. The results indicate that, during normal traffic, the critical wind speed can effectively control smoke from fire in different sections of the urban W-shaped tunnel. However, during congestion, the Shadao section poses the greatest danger in the event of a fire, and the smoke continues to spread for up to 1 800 seconds. When traffic is normal, the maximum temperature at the top of the tunnel is below 300 °C. However, during congestion, the maximum temperature at the top of the tunnel in the Shadao section reaches approximately 423 °C, while in the immersed section, it reaches approximately 387 °C, and at the entrance and exit, it ranges between 350 °C to 400 °C. During normal traffic, the downstream velocity of the fire source is significantly higher than the upstream velocity. However, during congestion, the velocity of the fire source is at its peak. As the distance increases, the overall velocity decreases, and the velocity at the top of the tunnel fluctuates with the slope. These findings are significant for better understanding fire behavior in urban W-shaped tunnels and for developing effective fire prevention and control strategies.

**Keywords:** Tunnel fire; W-slope tunnel; Numerical simulation; Smoke movement; Smoke control