文章编号: 1671-6612 (2020) 02-273-06

# 火源横向位置对隧道烟气分布的影响

王 文1 孙三祥2 石彬彬3

(1. 陕西铁路工程职业技术学院 渭南 714000;2. 兰州交通大学环境与市政工程学院 兰州 730070

兰州交通大学环境与市政工程学院 兰州 730070;

3. 甘肃林业职业技术学院 天水 741020)

【摘 要】 依托工程实际,采用数值模拟方法研究隧道火源位于不同车道时,隧道临界风速、温度、烟雾分 布扩散规律。结果表明:纵向通风速度不大于临界通风速度时,火源下游段隧道棚顶温度呈 e 函 数下降,当通风速度大于临界通风速度时,该规律不再适用。火源位于侧壁面时,由于隧道侧壁 面的限制作用,其近火源区烟气运移呈"之"字形向隧道出口处蔓延,隧道棚顶不同纵向温度线 呈滚动式交替变化。

【关键词】 数值模拟;临界风速;烟雾分布;滚动式

中图分类号 U445 文献标识码 A

# The Influence of the Transverse Position of the Fire Source on the Smoke Distribution in the Tunnel

Wang Wen<sup>1</sup> Sun Sanxiang<sup>2</sup> Shi Binbin<sup>3</sup>

(1.Shaanxi Railway Institute, Weinan, 714000;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070;

3. Gansu Forestry Polytechnic, Tianshui, 741020)

**(Abstract)** Based on the engineering practice, the numerical simulation method is used to study tunnel critical wind speed, the distribution and diffusion law of temperature and smoke, when the tunnel fire source is located in different lanes. The results show that when the longitudinal ventilation speed is not greater than the critical ventilation speed, the tunnel roof temperature in the downstream section of the fire source decreases as an e-function. When the ventilation speed is greater than the critical ventilation speed, the rule is no longer applicable. When the fire source is located on the side wall, due to the restriction of the side wall of the tunnel, the flue gas migration near the fire source area spreads to the exit of the tunnel in a zigzag shape, and the different longitudinal temperature lines on the roof of the tunnel change alternately in a rolling manner.

**(Keywords)** numerical simulation; critical wind speed; smoke distribution; rolling manner

# 0 引言

隧道火灾烟气运移研究过程中,主要考虑烟气 一维纵向运移,对隧道火源附近烟气震荡研究较 少。实际公路隧道大都为多车道隧道,车辆一旦在 隧道内发生火灾事故,由于火源所处车道的不同, 隧道内烟气及温度扩散过程也存在较大差异。

Colomba Di Blasi 等<sup>[1]</sup>研究了火焰形状、大小和位置的变化对临界速度的影响。Soufien Gannouni 等<sup>[2]</sup>模拟研究了车辆障碍物堵塞的隧道内的火灾热浮力流分层问题。Roh J S 等<sup>[3]</sup>采用弗劳

基金项目: 甘肃省重点研发计划(17YF1GA010)

作者简介: 王 文(1990-), 男, 硕士研究生, 助教, 主要从事隧道火灾、隧道通风领域研究, E-mail: 1205901714@qq.com 通讯作者: 孙三祥(1965-), 男, 教授, E-mail: sunsanxiang@mail.lzjtu.cn 收稿日期: 2019-12-12

德标度法进行了 1/20 缩尺实验,研究了纵向通风 速度对隧道火灾燃烧速率的影响及烟气运动规律。 Sina S 等<sup>[4,5]</sup>采用缩尺隧道模型试验结合 FDS 数值 模拟的方法,分析了隧道火灾燃烧速率、放热速率 和烟气反分层等因素对隧道火灾燃烧速率、放热速 率和烟气反分层等因素对隧道火灾燃烧速率、放热速 率和烟气反分层的影响。Baochao Xie 等<sup>[6]</sup>采用火 灾动力学模拟软件 FDS 模拟分析了隧道火灾中竖 井横截面积和长宽比(长宽比)对自然排烟的影响。 覃日富<sup>[7]</sup>基于 FDS 数值模拟方法,分析了螺旋隧道 中烟浮升力、离心力和浮力之间的关系以及影响范 围,总结了螺旋隧道的火灾烟气蔓延特性。黄家成 等<sup>[8]</sup>采用 FDS 数值模拟软件,对多匝道公路隧道的 烟气流动规律进行模拟,分析坡度、弯曲度、匝道 对烟气蔓延的影响。

依托某多车道城市隧道工程实际,建立隧道火 灾数值模拟分析模型。以恒定热释放率、发烟率为 模拟条件,研究火源布置于不同车道式、不同通风 速度状况下的隧道纵向温度分布及烟气扩散运移 规律。研究主要集中于对近火源区域烟气震荡规律 的分析,可为隧道火灾通风、扑救及人员疏散提供 建议。

# 1 模型建立

# 1.1 物理模型

依托于某城市隧道工程实际,建立三维隧道模型。原隧道采用通风孔将隧道划分为7段不同的通风区段,为方便研究、减少运算量,只对其中一段隧道内的火灾烟雾、温度分布扩散做研究分析。起火点隧道纵向位置中部,横向布置有靠近隧道壁和靠近隧道中线两种布置方式,火源简化为4m×2m×1.5m的矩形障碍物,上表面为火源热释放面。三维模型如图1所示。



 1.2 数学模型 在隧道通风问题的研究中,所涉及到的流动方 式类似于管内湍流流动,其流动方式较为复杂,要 准确进行隧道火灾通风模拟首先要选择恰当的湍 流模型。研究选用基于大涡模拟(LES)的火灾模 拟软件 FDS 对隧道火灾进行数值模拟计算。

在大涡模拟中, *N-S* 方程中的瞬时因变量分解 为大涡成分 $\phi(\vec{x},t)$ 和小涡成分 $\phi'(\vec{x},t)$ 两部分的 叠加:

$$\phi(\vec{x},t) = \overline{\phi}(\vec{x},t) + \phi'(\vec{x},t) \tag{1}$$

其连续方程、动量方程及能量方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho \overline{u}_{i}\right)}{\partial x_{i}} = 0$$
<sup>(2)</sup>

$$\frac{\partial \left(\rho \overline{u}_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho \overline{u}_{i} \overline{u}_{j}\right)}{\partial x_{j}} = \frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\overline{\tau}_{ij} + \tau_{ij}'\right) + F_{i}$$

$$(3)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_j}{\partial x_j} + S_i$$
(4)

式中, $\rho$ 为气体密度;u为滤波后的速度矢量; g为重力加速度; $F_i$ 为外部力; $\overline{\tau}_{ij}$ 为亚格子应力 (SGS); $\overline{h}$ 为显焓;p为压力;k为导热系数; $\overline{T}$ 为温度; $S_i$ 为耗散函数。

1.3 网格设置

在采用火灾动力学软件 FDS 模拟的过程中, 网格尺寸的大小是影响计算结果精度的一个重要因素。*D\*/δx*标准广泛的被用来估算网格尺寸结果, 其中网格尺寸*δx*和火源特征长度 *D*\*可由式(5)估算:

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

式中, $D^*$ 为火源特征直径;Q火源热释放率, kW; $\rho_{\infty}$ 为环境空气密度,取1.204kg/m<sup>3</sup>; $c_p$ 为环 境空气比热容,取1.005kJ/(kg·K);T为环境空气 温度,取293K;g为重力加速度,取9.81m/s<sup>2</sup>。

McGrattan 等<sup>[9]</sup>推荐,当 *D*\*/*δx* 在 4~16 的范围 内取值时可确保计算的精确度,即该模型中网格大 小介于 0.16~0.67m 之间。为确保计算精度、缩短 数值时间、提升运算效率,在火源远场区域可以采 用较大的网格尺寸,对火源附近部分进行加密,火 源上下游 10m 范围内加密网格尺寸为 0.125m,隧 道其他区段为非加密部分,网格尺寸为 0.25m。有 文献研究表明,近火源区域网格尺寸小于 0.13m,远火源区域不大于 0.4m 时,在 FDS 隧道火灾模拟中能够获得较好的模拟计算值<sup>[10]</sup>。

1.4 边界条件

数值计算中,相关参数设定如下:

环境初始温度取 20℃,环境初始相对湿度设 为 40%;环境大气压力取 101.3kPa;隧道壁面设为 绝热、无滑移壁面;隧道出口设置为开口(open), 入口设置为速度入口。车体上表面为热释放面,火 源功率分别设为 5MW、10MW、20MW 的稳态火 源;火灾模拟运行时间设为 120s。

模拟工况设置如表1所示。

表 1 5MW 火源模拟工况

Table 1The simulation condition of 5MW fire source

火源位置	通风速度/m·s <sup>-1</sup>			
	0	1	2	3
侧壁	case1	case2	case3	case4
中线	case5	case6	case7	case8

# 2 模拟验证

Lee 等<sup>[11]</sup>利用小尺寸实验(见图 2)研究了隧 道纵向通风条件下火灾烟气温度沿隧道纵向方向 的衰减特性,其结果可用于本文数值模型验证。数 值模型中隧道几何尺度及物理参量与实验条件相 同。



#### 图 2 实验模型示意图

# Fig.2 Experimental model diagram

隧道模型长度为10.4m,断面面积为 0.4m×0.4m,壁面为1cm厚的石膏板,其导热系数 为0.16W/(m·K),密度为90kg/m<sup>3</sup>,比热为 900J/(kg·K)。距火源中心点1~6m内每隔1m布置 温度测点,热电偶设置在距隧道顶棚0.02m处。油 盘尺寸0.08m×0.08m,放置在距隧道入口3m处, 热释放率2.47kW。隧道两端为开口条件,初始温 度环境为20℃。

图 3 为模拟值与 Lee 等的实验数据及文献[12]





Fig.3 Comparison of simulated and experimental results

本文模拟结果与文献模拟结果吻合较好;实验 中温度沿程衰减较快,其原因可能由于火源燃烧不 稳定造成。但与模拟结果比较,温差在10℃以内, 可认为本文采用的模拟模型及方法可用于隧道火 灾烟气模拟。

分别在隧道横向位置 X=3、9、13.5m 布置温 度探测器,用以监测隧道顶部温度在不同位置的纵 向分布。从火源上部开始,向隧道两端对称布置, 间隔为 1m,测点距隧道顶距离为 0.2m。布置测点 如图 4 所示。



Fig.4 Monitoring point setting

# 3 模拟结果分析

为研究隧道烟气锋面的运移扩散规律,以火源 功率 Q=5MW 为例,分析不同通风速度下,火源靠 近隧道侧壁面位置时,隧道顶面烟气锋面分布规 律,结果如图 5 所示。





由图 5 可以看出,当通风速度为 v=2m/s 时, 隧道逆流烟气前沿呈不对称分布,隧道中部烟气前 沿偏后,火源侧略低于远火源侧壁面处。当通风速 度 v=3m/s 时,烟气上游锋面呈阶梯状分布,且在 火源侧约 20m 的区域烟雾变薄。主要是由于烟气 冲击隧道顶棚,以火源点为中心向周边扩散,当遇 到隧道壁面阻碍时会在冲击隧道侧壁,侧壁处压力 上升,使烟气点呈现出图(a)的分布规律。但当 通风速度较大时,冲击所形成的压力作用减弱,隧 道烟气呈图(b)的分布规律。

以火源功率 Q=5MW、通风速度 v=1m/s 工况 下烟雾运移扩散为例,分析隧道顶面烟气锋面在运 移过程中的变化规律,如图 6 所示。



Fig.6 Smoke distribution in tunnel at different time

由图 6 可以看出,当火源靠近隧道侧壁面布 置,在通风速度小于临界通风速度的情况下,烟气 向上游逆流过程中,其烟气峰面呈"之"字形交替 运移。且随着烟气前锋面距火源位置的增大,其烟 气锋面交替幅值逐渐减小。

为更好的分析烟气运移过程,将其震荡过程以 平面示意图方式展示,如图7所示。



图 7 烟气横向震荡平面示意图



结合图 5、6的分析,由烟流运移平面示意图 7 可看出,火源置于隧道中线位置时,烟气撞击侧 壁产生的烟流 A,由于左右两侧壁对称,其产生的 动能冲击会相互抵消,不会对烟气纵向主流产生大 的影响。而当火源置于隧道一侧壁时,烟气横向运 移冲击隧道壁面,部分能量损失,但仍有大部分能 量重新参与另侧壁面,使烟流 A 在隧道两侧壁面 间震荡衰减。震荡烟流 A 会对纵向流烟 B 气产生 冲击扰动,降低纵向烟流 B 的动能,同时烟气层紊 乱增强。随着烟气纵向运移,其震荡烟流 A 震荡 频率逐渐降低,最终于主流烟气 B 运移方向一致。

震荡会导致烟气动能减小,烟气能量耗散增 大,紊乱增强,烟气纵向主流运移速度下降。主要 起影响作用的是阻尼震荡的一次波。在近火源区域 由于火源烟气浮升力大,其冲击隧道顶棚及侧壁时 产生的冲击力也比较大。烟气撞击隧道顶棚和隧道 侧壁面时所产生的震荡作用比较明显。

对火源功率 Q=5MW 工况,隧道顶部不同位置的温度进行监测,并对监测数据进行数据分析,不同通风情况下隧道顶部温度分布曲线,如图 8 所示。





图 8 隧道温度分布



通风速度为 ν=0m/s 的工况下,隧道两端温度 呈对称分布。火源正上方隧道顶部温度最大,随着 火源温度监测线向远离火源侧横向移动,纵向测线 温度峰值呈规律性减小,且衰减值ΔT逐渐减小。 通风速度为 1m/s 工况下,远火源侧温度峰值点纵 向偏移量要大于火源上方温度峰值点纵向偏移量, 且纵向偏移量ΔS呈规律性减小。通风速度为 2m/s 工况下,各监测线温度峰值点纵向偏移量趋于一 致。隧道纵向通风风速越大,隧道近火源侧烟气震 荡现象越明显。通风速度为 3m/s 工况下,近火源 区温度呈线性下降。火源峰值越大,其下降速率越 快,温度衰减速率(ΔT/Δt)值越大。隧道火源下游段 烟气温度波动极为明显,且随着距火源横向位置偏 移量的增大,其波动值逐渐减弱。

由图 8 可以看出,对于隧道不同断面的温度监测值,火源上方隧道顶温度值最大,随着监测点距离火源纵向位置的增大,在近火源区域,其隧道顶部纵向温度越小,但在远火源区域,隧道顶部纵向温度值要偏大。三条监测线温度分布在距火源一定长度距离内呈滚动式交替上升,在一定距离后各测点温度逐步趋于一致。火源布置在隧道侧壁面附近时,由于热烟浮升力和隧道通风风速的共同作用,下游段烟气会呈 S 型螺旋式震荡,使其温度在短距离内较高。但随着隧道距离的增大,其温度分布会逐渐趋于一致。

为分析通风速度对隧道顶部温度纵向分布的

影响,选取火源正上方的隧道顶部纵向分布曲线, 如图9所示。





Fig.9 Temperature distribution at different ventilation

#### speeds

由图9可以看出,随着隧道通风风速的不断增 大,隧道棚底温度峰值总体呈下降趋势。通风速度 小于 1m/s 时, 隧道纵向温度分布曲线值极为接近。 通风风速 v=1m/s 时的温度峰值略小于通风风速 v=0m/s时的温度峰值,且火源上游段棚底纵向温 度偏小,火源下游段棚底纵向温度偏大。在通风速 度 v=1~2m/s 区间内,隧道顶部温度纵向分布出现 了极大的突变,温度峰值从280℃突将至160℃, 温降约80℃,且温度峰值点出现了较大距离的向 火源下游的偏移。通风速度 v=2m/s 工况下,隧道 火源上游段温度都为环境温度(20℃),下游段温 度与通风速度 v=1m/s 工况下的曲线基本一致,表 明隧道内烟气回流在该通风速度下被很好的抑制, 且烟气分层未被破坏。在通风速度 v=3m/s 工况下, 隧道顶部温度峰值进一步降低,峰值点位置进一步 向下游端偏移,且下游段温度值低于 v=2m/s 工况 下的温度分布值。其下游段温度分布曲线也出现了 较大的震荡,表明该通风速度下隧道内火源下游段 纵向烟气分层被破坏。

隧道通风风速对火源下游段的温度分布有极 大的影响,为研究风速与纵向温度衰减趋势之间的 规律,根据模拟数据对火源下游不同通风工况下, 隧道顶部纵向温度分布做拟合分析(图10),拟合 结果如表2所示。

表 2 拟合参数 Table 2 Fitting parameter

Table 2 Fitting parameter						
通风速度/m·s-1	а	b	С	拟合优度 R <sup>2</sup>		
0	10.37839	-0.12861	7.00212e-3	0.98578		
1	10.27231	-0.12582	6.99432e-3	0.98545		
2	7.55059	-0.05696	2.55391e-3	0.98834		



Fig.10 Curve fitting

由图 10 可以看出,通风速度不大于临界通风 风速(v=2m/s)时,火源下游段隧道顶部温度纵向 衰减趋势符合 e 指数函数分布,拟合通式 *T=exp(a+bx+cx*<sup>2</sup>),拟合优度大于 0.9,拟合参数见 表 2。当通风速度大于临界通风风速时,火源下游 段隧道顶部纵向温度出现较大的震荡,其衰减不再 符合 e 指数函数分布,而是呈阻尼振荡规律变化。

# 4 结论

研究基于火灾动力学模拟软件 FDS,对不同火 源位置、不同通风速度情况下,隧道内烟气、温度 的分布规律做分析研究,主要结论有:

(1)火源靠近侧壁布置时,火源纵向蔓延时 隧道烟气前锋面呈"之"字形交错向前蔓延,且交 替变化幅值随距火源距离的增长而逐渐减弱。

(2)当通风风速不高于临界风速时,火源下游段纵向温度呈 e 函数规律变化。当通风速度大于临界风速时,火源下游段温度呈阻尼振荡状波动, e 函数规律不再适用。

(3)火源位置靠近隧道壁面时,近火源区域烟气层震荡较火源置于隧道中线时的烟气波动大,烟气分层更易被破坏。

(4)隧道烟气层达到稳定状态时,隧道横截 面上烟气呈拱形分布,愈靠近隧道侧壁,烟气层越 低。建议在可能情况下尽量选择靠近隧道中线的车 道进行人员疏散。

### 参考文献:

- Colomba Di Blasi. Influences of sample thickness on the early transient stages of concurrent flame spread and solid burning[J]. Fire Safety Journal, 1995,25:287-304.
- [2] Soufien Gannouni, Jamil Zinoubi, Rejeb Ben Maad. Numerical study on the thermal buoyant flow stratification in tunnel fires with longitudinal imposed airflow: Effect of an upstream blockage[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019,136:230-242.
- [3] Roh J S, Yang S S, Ryou H S, et al. An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires—heptane pool fire case[J]. Building & Environment, 2008,43(7):1225-1231.
- [4] Sina S, Ahmet Y. An analysis of tunnel fire characteristics under the effects of vehicular blockage and tunnel inclination[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,79:274-285.
- [5] 刘帅,陈建忠,王芳其.公路隧道纵向通风对火灾烟气分 层影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5): 1419-1423.
- [6] Baochao X, Yaxiong H, He H, et al. Numerical study of natural ventilation in urban shallow tunnels: Impact of shaft cross section[J]. Sustainable Cities and Society, 2018,42:521-537.
- [7] 覃日富.螺旋隧道火灾烟气蔓延特性研究[D].广州:华南 理工大学,2018.
- [8] 黄家成,王东伟,陈涛,等.多匝道公路隧道烟气控制方案 研究[J].消防科学与技术,2018,37(8):1061-1065.
- [9] Mcgrattan K, Hamins A. Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire[J]. Fire Technology, 2006,42(4):273-281.
- [10] Ji J, Fan C G, Gao Z H, et al. Effects of vertical shaft geometry on natural ventilation in urban road tunnel fires[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2014,20(4):466-476.
- [11] Lee S R, Hong S R. A numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio[J]. Building and Environment, 2006,41(6):719-725.
- [12] 吴世先,杨会,朱辉.隧道风对隧道火灾烟气扩散的影响 研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(4):801-810.