

文章编号:1671-6833(2017)01-0027-05

火源横向位置对隧道火灾烟气分岔流动影响

钟 委^{1,2}, 端木维可¹, 李华琳¹, 梁天水¹

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

摘 要: 当发生隧道火灾时, 纵向通风方式常被用于人员疏散和排烟, 而纵向风速较大时, 烟气将发生分岔流动, 导致烟气层整体性被破坏, 对人员疏散造成威胁. 火源横向位置对隧道火灾烟气流动有显著影响, 通过数值模拟对不同火源横向位置时烟气分岔流动特性进行了研究. 结果表明, 随着火源向侧壁靠近, 烟气由对称型分岔流动转变为不对称分岔流动. 当火灾发生在侧壁附近时, 烟气转变为“S”型流动. 随着火源与侧壁间距的减小, 分岔流动临界风速呈指数型增加.

关键词: 隧道火灾; 数值模拟; 分岔流动; 横向位置; 临界风速

中图分类号: U458.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.023

0 引言

随着城市化进程的加快, 各大城市面临着日益严重的交通压力. 为了缓解交通压力, 城市隧道得到快速发展. 隧道是一个狭长受限空间, 一旦发生火灾将给人们的生命及财产带来较大损失. 例如 2003 年韩国大邱地铁隧道火灾造成 198 人死亡^[1]; 2014 年晋济高速山西晋城段岩后隧道事故, 造成 40 人死亡^[2]. 统计结果表明, 火灾中超过 85% 的人员伤亡都是由烟气造成的^[3]. 发生火灾时, 纵向通风技术被广泛应用于人员撤离和隧道排烟^[4]. 临界风速是纵向通风系统的一个重要参数, 当纵向风速大于临界风速时, 可以保证隧道内不存在烟气逆流, 为人员撤离创造清洁安全的上游环境^[5].

但纵向风速并非越大越好. 较大的纵向风速会产生较大的水平惯性力, 对火源下游烟气层稳定性造成影响. Vauquelin 等^[6]指出当使用纵向风控制烟气逆流时, 应注意保持烟气层稳定性. Richardson 数表示密度分布的稳定作用同因速度剪切引起的失稳作用的比值, 阳东等^[7]通过小尺寸试验发现, 当 Richardson 数小于 0.3 时, 烟气分层现象将被破坏. 李开源等^[8]发现, 较大风速下烟气层将无法保持其整体性, 而是形成分岔的烟

气流沿着隧道侧壁流动, 并将此现象定义为烟气分岔流动, 如图 1 所示, 但他并未进一步分析该现象产生的原因. 文献[9]采用数值模拟对分岔现象机理进行了研究, 指出纵向风将加剧烟气与空气之间的掺混, 造成顶棚射流撞击侧壁后反向流动的驱动力减弱, 从而破坏了烟气层的形成过程, 导致了分岔流动现象的产生. 文献[10]和文献[11]发现烟气分岔流动区域上方的隧道竖井无法有效排烟. 因此在隧道防排烟设计中应当避免分岔流动的形成, 或者防止排烟口位于分岔流动区域内.

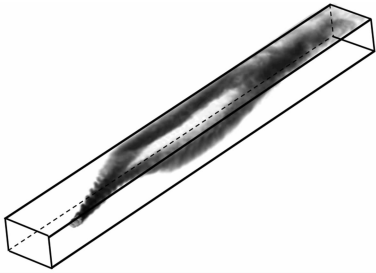


图 1 纵向风作用下烟气分岔流动现象

Fig.1 Phenomenon of smoke bifurcation flow

前人的研究大多假设火灾发生在隧道中部, 但对于实际而言, 隧道火灾的发生位置并不固定. 当这些非隧道中心火灾一旦发生, 火羽流对空气

收稿日期:2015-12-30; 修订日期:2016-02-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404215); 国家博士后基金特别资助项目(2015T80781); 建筑安全与环境国家重点实验室开放课题(BSBE2015-02)

作者简介:钟委(1978—), 男, 重庆江津人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事地下建筑火灾防治及化工安全技术研究, E-mail: Zhongwei@zzu.edu.cn.

的卷吸过程,以及撞击顶棚后烟气的流动情况均与火灾发生在隧道中心时不同.文献[12]和文献[13]等通过小尺寸试验分别研究了火源横向位置对顶棚下烟气最高温度和抑制烟气逆流临界风速的影响,结果表明,烟气撞击区最高温度与抑制烟气逆流临界风速随火源向侧壁靠近均呈指数型增加.

由于隧道内起火位置的不同对火灾发展有较大影响,笔者利用数值模拟方法,对不同火源横向位置隧道火灾烟气分岔流动流场以及温度分布进行了讨论,并建立了不同火源横向位置分岔流动临界风速预测模型.

1 数值模拟

随着计算机能力的显著提高,CFD 模拟在过去数十年得到了快速的发展,并被广泛应用于研究隧道防火安全设计.笔者选用的是 FDS(fire dynamics simulator)场模拟软件,采用的是 5.5.3 版本.FDS 是由美国国家标准技术局(NIST)开发的一种场模拟软件,由于其准确、方便、费用较省等优点,已得到国际间的广泛认可,并被大量应用于火灾动力学模拟.

模拟所建物理模型长 200 m、宽 10 m、高 5 m,模型图如图 2 所示.纵向风通风口设置在模型左侧开口处,出口位于右侧开口处.火源为长度 1 m 的方形油盘,距纵向风入口水平距离 50 m,燃料为煤油.前期研究结果表明,纵向风速越大,分岔流动现象就越明显.为了研究不同火源横向位置对烟气分岔流动现象的影响,将热释放速率设置为 3 MW,纵向风速设为 4 m/s,对火源中心到侧壁距离 D 分别为 0.5、1、2、3、4 和 5 m 时的烟气流动进行分析.另外,对 3 种火源热释放速率(3、4、5 MW)下不同火源横向位置烟气分岔临界风速进行测量,模拟工况如表 1 所示.环境温度设定为 20 ℃,模拟时间为 100 s.

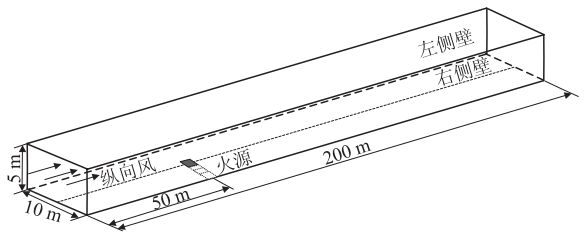


图 2 CFD 模型图
Fig.2 A schematic diagram of CFD modeling

表 1 数值模拟工况表
Tab.1 Summary of the CFD tests

模拟 工况	火源热释放 速率/MW	纵向风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	火源中心距左侧壁距离/m									
			0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1	3	4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
	4	—	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
	5	—	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

在 FDS 数值模拟中,网格尺寸是一个需要考虑的关键因素.前期工作对网格独立性进行了研究,选取 0.1~0.4 m 之间的 6 个不同网格尺寸对本文场景下隧道中部顶棚纵向温度进行了比较,比较结果如图 3 所示.从图中可以看出,随着网格密度的增大,温度曲线逐渐趋于一致.同时可以发现 0.167、0.125 和 0.100 m 的温度曲线仅有轻微的不同,也就是说,当网格尺寸小于 0.167 m 时,计算精度并没有得到明显的改善,但是要消耗更多的计算时间.因此一个混合网格系统在本文中被使用.如图 4 所示,从火源上游距火源中心 5 m 处至下游距火源中心 35 m 处网格尺寸设置为 0.083 m,其余地方网格尺寸为 0.167 m.

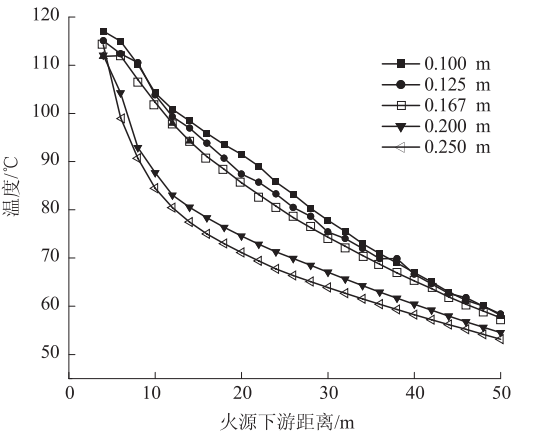


图 3 隧道中部顶棚纵向温度分布
Fig.3 Longitudinal temperature distribution
in the middle of tunnel

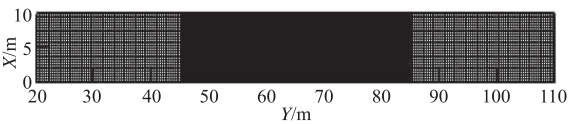


图 4 网格划分示意图

Fig. 4 Meshes assigned for numerical simulation

2 结果与讨论

2.1 不同火源横向位置分岔流动

2.1.1 烟气分布

图 5 展示了纵向风速 4 m/s 下,3 MW 火灾不同火源横向位置隧道火灾烟气分布.随着火源远离隧道中部,烟气分岔流动由对称逐渐转变为不对称流动形式.当火源靠近左侧壁时,此时烟气呈“S”型流动,如图 5 (e) 和 5 (f) 所示.当火源紧贴侧壁时,根据“镜像效应”^[14],此时烟气流动与火源位于中部时隧道单侧烟气流动现象相似.

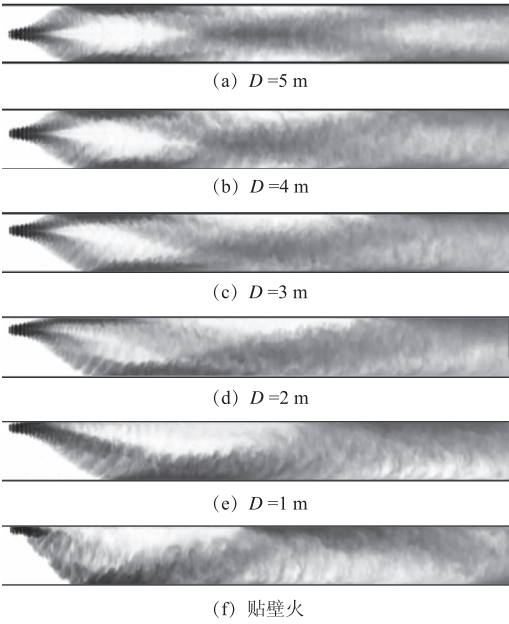


图 5 不同火源横向位置烟气流动

Fig. 5 Smoke propagation at different transverse fire location

2.1.2 流场结构

图 6 给出了不同火源横向位置顶棚下方速度流场结构.随着火源向侧壁靠近,火源与两侧壁间横向距离不再相等,径向蔓延的烟气无法同时在两侧壁处发生反向流动,这造成烟气汇聚区逐渐转向右侧壁.当火源位于左侧壁附近时,如图 6 (f) 和 6 (e) 所示,烟气羽流撞击顶棚后几乎所有烟气均径向流动至右侧,沿侧壁流动并逐渐反向流动至左侧壁.火灾烟气在两侧壁间交替发生反

向流动,导致“S”型的烟气流动现象出现.

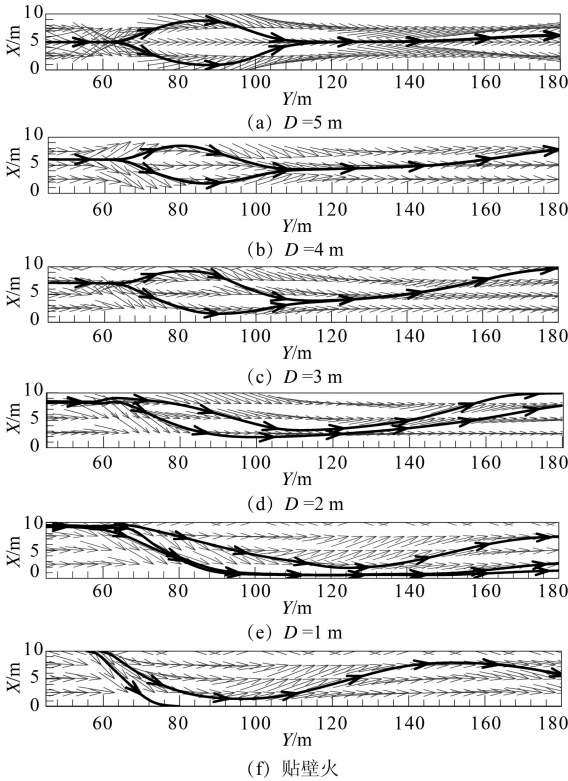


图 6 不同火源横向位置的
隧道顶棚下方截面速度矢量图

Fig. 6 Velocity vectors of horizontal cross-section below the ceiling with different transverse fire location

2.1.3 温度分布

4 m/s 时 3 MW 火灾顶棚下方 0.167 m 烟气温度分布如图 7 所示.随着火源与侧壁间距离减小,如图 7 (a) ~ 7 (d) 所示,烟气分岔流间的低温区发生偏转,烟气汇聚流与近火源一侧侧壁间形成明显低温区.当火源与侧壁距离小于 1 m 时,如图 7 (e) 和 7 (f) 所示,由于烟气的“S”流动,低温区将在两侧壁处交替出现,且此时低温区的范围要比火源位于隧道中部时大得多.

2.2 不同火源横向位置烟气分岔流动临界风速

图 8 展示了 3 MW 火灾火源位于隧道中部时,2.0 m/s 和 2.5 m/s 风速下中截面温度分布.前期工作发现隧道火灾烟气分岔流动判据为撞击区上游没有回流烟气存在.火源中心所在横向位置的中截面切片温度分布被用来判断分岔流动是否发生.该场景下,当纵向风速达到 2.5 m/s 时,与 2.0 m/s 风速下相比较,此时 22 ℃ 等温线基本保持竖直,撞击区上游恰好没有右凸的温度线,这表明烟气没有出现在撞击区上游,由此可见该场景分岔流动临界风速为 2.5 m/s.

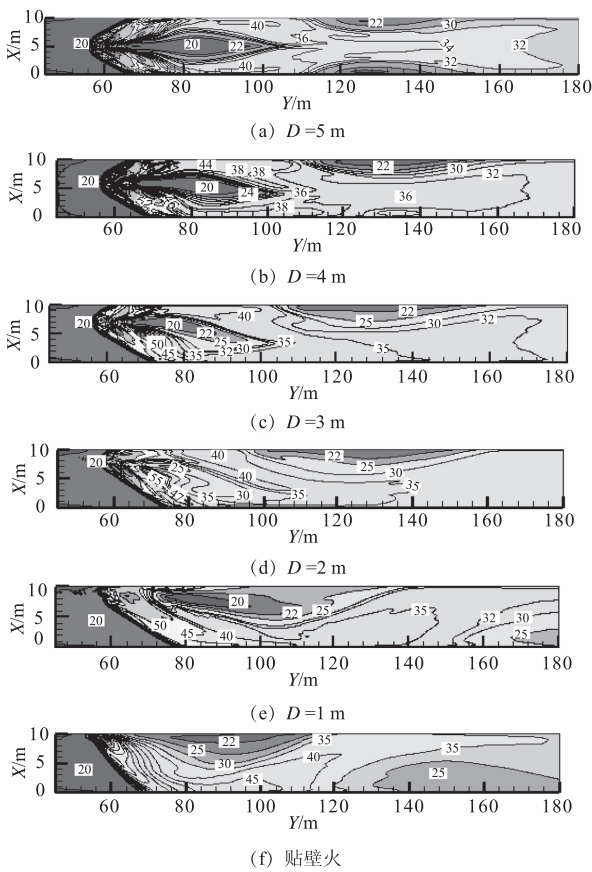


图 7 顶棚烟气纵向温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of horizontal cross-section

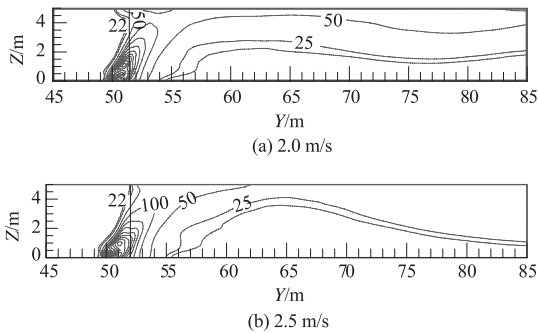


图 8 隧道中部纵向截面温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of the vertical section in the middle of tunnel

为了便于比较不同火源功率的数据,引入无量纲分岔流动临界风速 v'_{BD}/v'_{BC} . v'_{BD} 为不同火源横向位置无量纲分岔流动临界风速; v'_{BC} 为中部火源无量纲分岔流动临界风速. 其中

$$v' = \frac{v}{\sqrt{gH}}, \tag{1}$$

$$\overline{H} = 4S/P, \tag{2}$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; \overline{H} 为水力直径, m ; S 为隧道横截面积, m^2 ; P 为隧道横截面周长, m .

同时引入无量纲火源距离 $D/(w/2)$, 其中 D 代表火源中心距侧壁的距离, w 代表隧道宽度.

烟气分岔流动临界风速随火源横向位置变化规律如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 当火源距离隧道侧壁较远时, 分岔流动临界风速与火源位于隧道中部时差异不大, 而当火源位于侧壁附近时, 由于受到侧壁限制, 烟气羽流卷吸量减小, 此时羽流撞击顶棚时有更大的温度和速度, 分岔流动临界风速增幅较大. 随着火源与侧壁距离逐渐减小, 无量纲风速的比值与无量纲火源距离满足指数增长规律.

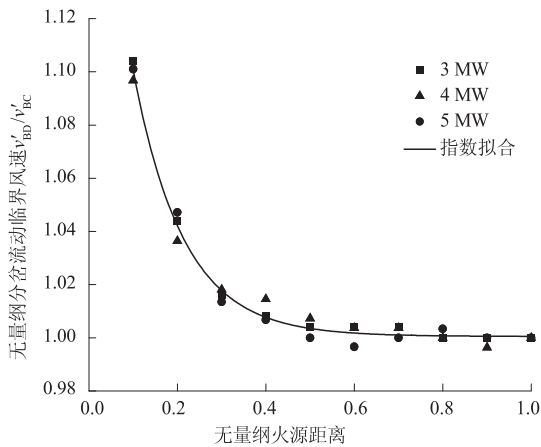


图 9 不同火源横向位置分岔流动临界风速
Fig. 9 The dimensionless critical velocity of smoke bifurcation flow at different transverse fire locations

相关系数假设符合:

$$\frac{v'_{BD}}{v'_{BC}} = ae^{b \cdot D/(w/2)} + c, \tag{3}$$

式中: a 、 b 、 c 是常量.

根据实验结果, 公式 (3) 可表示为:

$$\frac{v'_{BD}}{v'_{BC}} = 0.24087e^{-8.78378 \cdot D/(w/2)} + 1.00052. \tag{4}$$

3 结论

笔者通过数值模拟研究了不同火源横向位置对烟气分岔流动现象的影响. 结果表明, 随着火源向侧壁逐渐靠近, 烟气流动由对称分岔流动转变为不对称分岔流动, 当火灾发生在侧壁附近时, 烟气呈“S”型流动.

当火源距离隧道侧壁较远时, 分岔流动临界风速与火源位于隧道中部时差异不大, 而当火源位于侧壁附近时, 临界风速增长的更快. 并且随着火源向侧壁靠近, 分岔流动临界风速呈较好的指数型增加规律.

当隧道火灾发生的位置不同时, 烟气分岔流

动现象也将不同,这将导致隧道内烟气流动,温度分布以及分岔流动临界风速的差异,在隧道排烟设计以及火灾救援的时候应将这种差异考虑在内。

参考文献:

- [1] JEON G, HONG W. Characteristic features of the behavior and perception of evacuees from the Daegu subway fire and safety measures in an underground fire [J]. *Journal of Asian architecture and building engineering*, 2009, 8(2): 415 – 422.
- [2] 邢小崇. 晋济高速“3·1”特别重大责任事故原因调查 [J]. *消防科学与技术*, 2014, 33(8): 969 – 971.
- [3] JI J, LI M, LI Y, et al. Transport characteristics of thermal plume driven by turbulent mixing in stairwell [J]. *International journal of thermal sciences*, 2015, 89: 264 – 271.
- [4] BRAHIM K, MOURAD B, AFIF E C, et al. Control of smoke flow in a tunnel [J]. *Journal of applied fluid mechanics*, 2013, 6(1): 49 – 60.
- [5] VAUQUELIN O, WU Y. Influence of tunnel width on longitudinal smoke control [J]. *Fire safety journal*, 2006, 41(6): 420 – 426.
- [6] VAUQUELIN O, TELLE D. Definition and experimental evaluation of the smoke “confinement velocity” in tunnel fires [J]. *Fire safety journal*, 2005, 40(4): 320 – 330.
- [7] YANG D, HU L H, HUO R, et al. Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel [J]. *Applied thermal engineering*, 2010, 30(8): 872 – 878.
- [8] 李开源, 霍然, 刘洋. 隧道火灾纵向通风下羽流触顶区温度变化研究 [J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(3): 38 – 41.
- [9] ZHONG W, LV J J, LI Z Z, et al. A study of bifurcation flow of fire smoke in tunnel with longitudinal ventilation [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2013, 67: 829 – 835.
- [10] ZHONG W, FAN C G, JI J, et al. Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2013, 57(2): 671 – 678.
- [11] FAN C G, JI J, WANG W, et al. Effects of vertical shaft arrangement on natural ventilation performance during tunnel fires [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2014, 73(6): 158 – 169.
- [12] JI J, ZHONG W, LI K Y, et al. A simplified calculation method on maximum smoke temperature under the ceiling in subway station fires [J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2011, 26(3): 490 – 496.
- [13] ZHONG W, LI Z Z, WANG T, et al. Experimental study on the influence of different transverse fire locations on the critical longitudinal ventilation velocity in tunnel fires [J]. *Fire technology*, 2015, 51(5): 1217 – 1230.
- [14] HU L H, PENG W, HUO R. Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel [J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 150(1): 68 – 75.

Numerical Investigation into the Influence of Different Transverse Fire Locations on Smoke Bifurcation Flow in Tunnel Fire

ZHONG Wei^{1,2}, DUANMU Weike¹, LI Hualin¹, LIANG Tianshui¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

Abstract: When a fire occurred in tunnel, the longitudinal ventilation was used for personnel evacuation and smoke extraction. The stratification of smoke layer would be destroyed under high ventilation velocity, and would lead to smoke bifurcation flow, which was harmful to evacuation. The numerical simulations were conducted to investigate the influence of transverse fire locations on smoke bifurcation flow. The phenomena of smoke bifurcation flow with different transverse fire locations were studied. The results showed that the bifurcation flow was symmetric when fire located in the central line of tunnel; and a S-shaped flow occurred in a near wall fire situation. The critical velocity of smoke bifurcation flow increased exponentially when fire source moved to the sidewall.

Key words: tunnel fire; numerical simulation; bifurcation flow; transverse fire locations; critical velocity