

公路隧道断面横向双火源火灾烟气控制风速研究

高恒潮¹,陶家清¹,陈训^{2,3},王峰^{2,3}

(1.中国市政工程西南设计研究总院有限公司,四川成都 610081;2.西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室,四川成都 610031;3.西南交通大学土木工程学院,四川成都 610031)

摘要:为研究公路隧道断面双火源火灾的烟气控制方法,该文采用数值计算方法,对公路隧道断面双火源火灾控制风速、烟气回流长度及烟气温度进行深入分析。结果表明:双火源火灾场景下,由于火源的分散,临界风速主要由两火源控制,两火源功率相同或相近时,两火源之间有一定的叠加效应,临界风速受二者的共同影响;两火源功率不同时,临界风速主要取决于功率较大火源,功率较小火源作用不明显。双火源(5 MW+5 MW)火灾临界风速为2.5 m/s,双火源(20 MW+20 MW)火灾临界风速为3.3 m/s,较相同功率单火源火灾均有一定程度的增大;双火源(20 MW+5 MW)火灾临界风速为3.2 m/s,与单火源20 MW火灾一致。烟气温度与临界风速一样受两火源功率的影响。而烟气回流长度则由火灾规模控制,相同通风速度下,随着火灾规模增大,烟气回流长度随之增大,与两个火源功率无关。

关键词:公路隧道;双火源;临界风速;烟气温度;烟气回流长度;数值计算

中图分类号:U453.5

文献标志码:A

Smoke Control Wind Speed of Transversal Double-Source Fire in Road Tunnel Sections

GAO Hengchao¹, TAO Jiaqing¹, CHEN Xun^{2,3}, WANG Feng^{2,3}

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The numerical calculation method was adopted to conduct an in-depth analysis of the control wind speed, smoke back-layering length and smoke temperature of dual-source fire in road tunnel sections and thus study the smoke control method of dual-source fire in road tunnel sections. The results show that under the dual-source fire scenarios, due to the dispersion of fire sources, the critical wind speed is mainly controlled by two fire sources. When the power of the two fire sources is the same or similar, there is a certain superposition effect between the two fire sources, with the critical wind speed subject to the joint influence of the two. When the power of the two fire sources is different, the critical wind speed mainly depends on the fire source with larger power, and the role of the fire source with smaller power is not obvious. The critical wind speed of dual-source (5 MW+5 MW) fire is 2.5 m/s, and the critical wind speed of dual-source (20 MW+20 MW) fire is 3.3 m/s, increasing to a certain extent compared with the same power of the single fire source. In contrast, the critical wind speed of dual-source (20 MW+5 MW) fire is 3.2 m/s, which is the same as that of the single-source 20 MW fire. The smoke temperature is affected by the power of the two fire sources, as is the critical wind speed. The smoke back-layering length is controlled by the fire size, and at the same ventilation speed, the smoke back-layering length increases with the growing fire size, which is not related to the power of the two fire sources.

Keywords: road tunnel; dual-source; critical wind speed; smoke temperature; smoke back-layering length; numerical calculation

收稿日期:2024-07-21 修回日期:2025-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078429)

作者简介:高恒潮,男,硕士,高级工程师.E-mail:514153591@qq.com。

0 引言

公路隧道因其内部空间狭长且相对封闭的特点,在隧道内发生车辆碰撞、追尾等事故时,极易造成多辆车起火燃烧,引发隧道内多火源火灾,造成严重的人员伤亡和重大的经济损失。例如,2008年瑞士蒙布朗特隧道火灾中,大货车与巴士迎面相撞,造成39人死亡,多人受伤;2018年雪峰山隧道火灾,由于车辆追尾引燃易燃物品,造成1人烧伤,200多人被困等^[1]。这些事故给人们带来了惨痛的教训,也引发了设计和科研人员对隧道火灾安全问题的高度关注^[2-7]。与单火源火灾不同,多火源火灾烟气流动及控制具有显著的不确定性。而《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02—2014)^[8]并没有对隧道多火源火灾防灾通风控制做出相关说明,这给隧道设计和管理人员带来了极大的挑战。

目前,国内外关于公路隧道火灾烟气控制的研究主要集中在临界风速上。1968年,Thomas^[9]提出临界风速的概念,并建立临界风速计算模型;Li等^[10-11]通过模型试验和理论分析,提出无量纲临界风速计算模型,并探讨了隧道横截面对隧道火灾烟气控制临界速度的影响;戴开来等^[12]和王峰等^[13]通过数值计算方法,对曲线隧道内火灾烟气流动特性和临界风速控制开展深入的研究和分析;王峰等^[14]通过数值计算和模型试验方法,研究了不同海拔、不同火灾热释放率下隧道火灾烟气控制临界风速,并基于量纲分析建立了双车道高海拔隧道火灾烟气控制临界风速的计算方法;刘明^[15]采用数值计算的方法,研究了弧形公路隧道弧度对临界风速变化的影响;徐琳等^[16]利用CFD软件研究了环境温度、火灾热释放、断面形状对临界风速的影响,并建立了以断面水力高度为特征尺寸的临界风速与火灾热释放率之间的关系;梁华刚等^[17]通过数值模拟研究了阻塞情况下公路隧道火灾纵向通风临界风速变化;刘琼等^[18]采用数值模拟的方法研究了双火源隧道火灾的临界风速变化规律,进一步分析了火源功率、火源间距对临界风速的影响;徐程钢等^[19]通过模型试验与数值计算方法对纵向通风下公路隧道双火源火灾烟气扩散开展探究,分析了双火源火灾临界风速变化规律以及纵向双火源功率、火源间距对临界风速的影响;余明高等^[20]采用FDS数值计算软件进一步分析了两火源上下风流位置关系对临界风速的影响规律。

从以上研究成果可以看出,现阶段针对公路隧

道火灾烟气控制风速的研究主要考虑单火源燃烧的火场景,对于公路隧道双火源火灾临界风速变化规律仅作了部分研究,且主要针对纵向双火源火灾,而断面横向双火源火灾烟气控制临界风速与之明显不同,目前针对这部分的研究还极其缺乏。因此,本文将采用FDS数值计算软件,对公路隧道内断面横向双火源火灾烟气控制风速、烟气回流长度及烟气温度进行深入研究和分析。

1 计算方法

1.1 计算模型及火源布置

隧道火灾引起的热烟羽流动和空气动态流动几乎都是湍流流动,在模拟此类湍流问题时,FDS软件主要采用大涡模拟方法。大涡模拟不仅精度较高,而且形式简单,能对多种流动做出合理的预测。此外,FDS软件火灾模拟功能丰富,在隧道火灾研究领域应用广泛,其计算结果与真实试验结果吻合较好。因此,本文采用FDS软件中大涡模拟进行数值模拟研究。

其基本控制方程包括质量守恒方程、组分传输方程、动量守恒方程以及能量守恒方程。具体方程分别如式(1)~(4)所示^[21]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

组分传输方程:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i^m \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H - \bar{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \right) \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho c_p T} \left(\nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + \nabla \cdot \sum_i \int c_{p,i} dt \rho D_i \nabla Y_i - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \dot{q}^m \right) + \left(\frac{1}{\rho c_p T} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{d p_0}{dt} \quad (4)$$

式中: ρ 为组分的密度; t 为时间; \mathbf{u} 为速度矢量; Y_i 为组分的体积分; D_i 为组分的扩散系数; \dot{m}_i^m 为质量源项; $\boldsymbol{\omega}$ 为涡矢量; H 为总压与密度之比; \bar{p} 为压力扰动; ρ_0 为环境空气密度; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; \mathbf{f}_b 为外力(包含重力)矢量; $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ 为黏性力张量; c_p 为定压比热; T

为温度; $c_{p,i}$ 为*i*组分定压比热; q_r 为辐射热通量矢量; q''' 为热量源项; p_0 为环境压力。

计算模型为某典型双车道隧道,断面宽9.60 m,高7.05 m,模型长度150.00 m。隧道计算模型如图1所示。

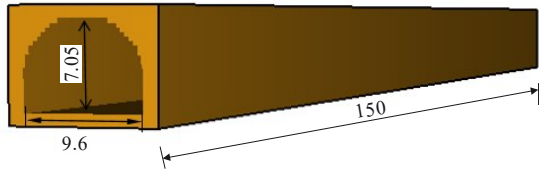


图1 数值计算模型(单位:m)

Figure 1 Numerical calculation model (unit: m)

计算采用汽油燃烧模拟实际车辆燃烧,参考文献[22],设定了3种火灾场景:①一辆小型汽车火灾,规模为5 MW;②一辆大型客车火灾,规模20 MW;③二者组合下的双火源火灾。火源均布置于车道中心,距离隧道出口42 m。火源面积设置为:20 MW:2 m×6 m,高度1 m;5 MW:1.5 m×4.0 m,高度0.5 m。双火源布置方式如图2所示。

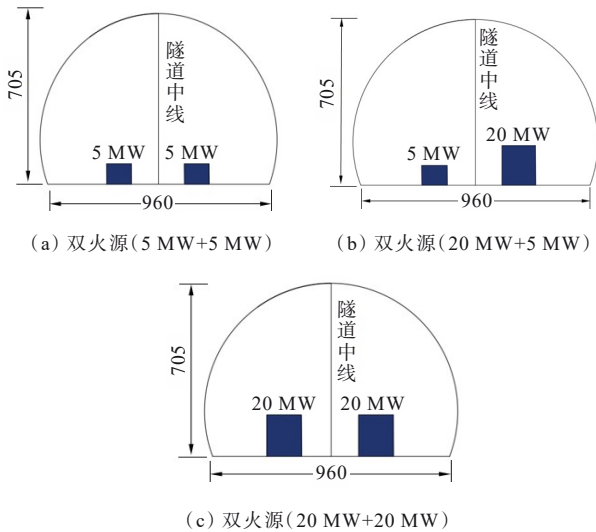


图2 双火源布置示意图(单位:cm)

Figure 2 Dual-source arrangement (unit: cm)

1.2 计算网格及边界条件

网格划分的精度直接影响火灾计算的准确性。考虑火源附近流场及温度场变化较为剧烈,本研究在火源附近对网格进行加密。当火源的特征直径 D^* 与计算网格尺寸 δ_x 的比值为4~16时,网格间的独立性较好。基于此,选取了5种网格尺寸进行计算分析,如表1所示。计算结果如图3所示。

由图3计算结果可知,随着网格的加密,模拟计

表1 网格工况设置

Table 1 Setting of grid working conditions

工况	加密区网格尺寸/m	与 D^* 关系	火源功率/MW
1	0.167	$0.091D^*$	5
2	0.200	$0.109D^*$	5
3	0.250	$0.137D^*$	5
4	0.300	$0.164D^*$	5
5	0.400	$0.218D^*$	5

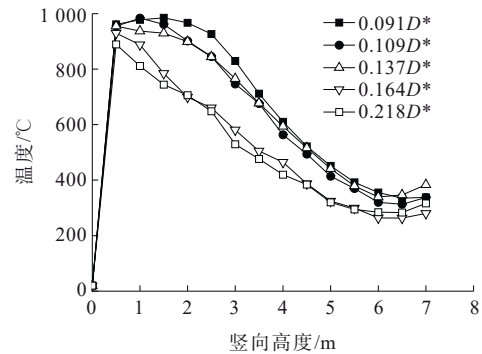


图3 网格计算结果

Figure 3 Grid calculation results

算结果越来越接近,当加密区网格尺寸为 $0.109D^*$ 时,计算结果与 $0.091D^*$ 时的偏差已经很小。综合考虑精度与计算机效率,加密区网格尺寸设置为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 。网格示意图如图4所示。

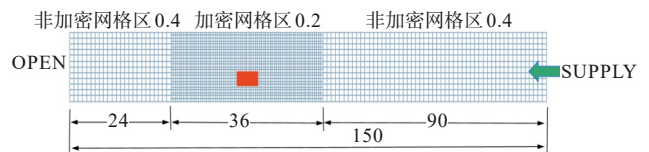


图4 网格示意图(单位:m)

Figure 4 Schematic diagram of the grids (unit: m)

计算采用混合分数燃烧模型。隧道上游入口边界采用“SUPPLY”边界,下游出口采用“OPEN”边界。隧道衬砌材料选定为混凝土,混凝土层设置为导热模型,导热系数为 $1.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,密度为 $2\,150\text{ kg}/\text{m}^3$,定压比热为 $0.88\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。环境温度设置为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,压强设置为 $1.013 \times 10^5\text{ Pa}$ 。隧道壁面速度分量均采用无滑移边界条件。

1.3 模型验证

为验证本文数值计算模型的准确性和可靠性,本文选取李颖臻^[23]的模型试验工况进行对比验证,计算模型几何尺寸与边界条件与李颖臻^[23]的试验模型设置一致。火源中心处数值计算竖向温度分布与试验结果对比如图5所示。从图5可以看出:数值计

算结果与模型试验结果吻合良好。这表明采用此数值方法开展双车道隧道双火源火灾研究是合理和准确的。

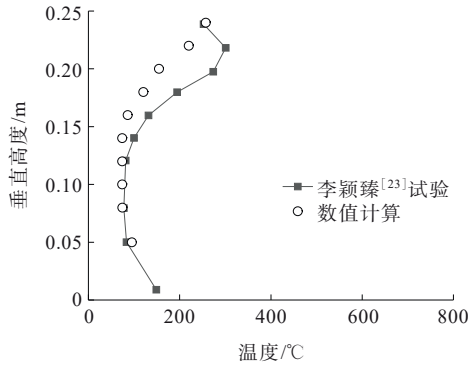


图5 数值计算与李颖臻^[23]试验结果对比图

Figure 5 Comparison between numerical calculations and test results of Li Yingzhen^[23]

1.4 计算工况

为分析双车道隧道双火源火灾临界风速、烟气回流长度以及烟气温度的变化规律,本文建立了长度为150 m的双车道隧道计算模型,计算工况如表2所示。

表2 计算工况设置

Table 2 Setting of calculation working conditions

工况	火灾规模和火源数量	通风速度/($m \cdot s^{-1}$)
1	单火源 5 MW	0、2.0、2.1、2.2
2	单火源 20 MW	0、3.0、3.1、3.2
3	双火源 (5 MW+5 MW)	0、2.3、2.4、2.5
4	双火源 (20 MW+5 MW)	0、3.0、3.1、3.2
5	双火源 (20 MW+20 MW)	0、3.1、3.2、3.3

2 计算结果与分析

2.1 双火源火灾临界风速变化规律分析

不同纵向通风速度下,双火源火灾烟气蔓延图如图6所示。由图6(a)可知:对于双火源(5 MW+5 MW)火灾,当纵向通风速度为2.3 m/s时,火灾烟气出现回流现象,并向隧道上下游扩散;提高纵向通风速度到2.4 m/s时,烟气回流长度缩短,但回流现象依然存在;进一步将通风速度提高到2.5 m/s,此时回流现象消失,纵向通风成功抑制了烟气向隧道上游扩散。由此可知,5 MW 规模火灾下,烟气控制临界风速为2.5 m/s。同理,由图6(b)、6(c)可知,双火源(20 MW+5 MW)和(20 MW+20 MW)火灾临界风速分别为3.2 m/s、3.3 m/s。

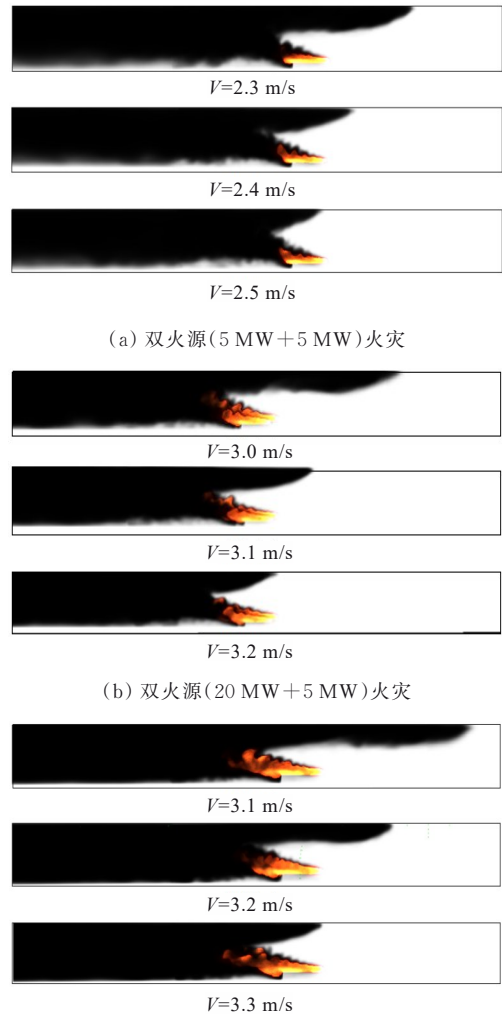


图6 双火源火灾烟气蔓延图

Figure 6 Smoke spreading of dual-source fire

图7为各单火源与多火源火灾临界风速计算结果。

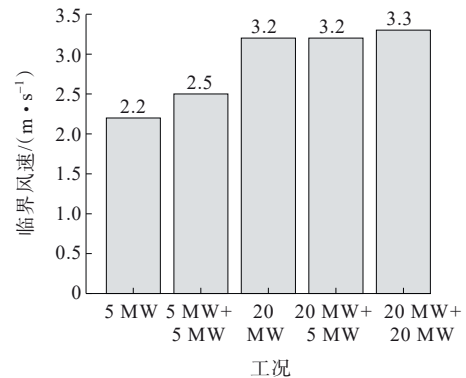


图7 临界风速计算结果

Figure 7 Calculation results of critical wind speed

从图7可知:

- (1) 单火源 5 MW 火灾临界风速为 2.2 m/s, 20

MW火灾临界风速为3.2 m/s,临界风速随着火灾规模的增大而增加。

(2) 双火源(5 MW+5 MW)火灾临界风速为2.5 m/s,相较单火源5 MW火灾临界风速提高了13.6%。这表明,随着相同功率火源数量增加,临界风速增大。

(3) 双火源火灾(20 MW+5 MW)临界风速为3.2 m/s,与单火源20 MW火灾相比,临界风速没有发生变化。

(4) 双火源(20 MW+20 MW)临界风速为3.3 m/s,相较单火源20 MW火灾与双火源(20 MW+5 MW)均增大了3.1%。可以发现,此时功率较大的20 MW火源对烟气控制临界风速起主要控制作用,而5 MW火源的影响较小。同时,双火源火灾场景下,尽管火灾规模增大,所需控制临界风速相较火灾规模增大并不显著。

根据以上分析,在双火源火灾场景下,由于火源分散,临界风速与两火源的功率有关。两火源功率相同或相近时,临界风速由二者共同控制,并随着火灾规模增大临界风速随之增大;两火源功率不同时,临界风速主要由功率较大的火源控制,功率较小火源无明显影响。

2.2 双火源火灾烟气回流长度分析

根据前述分析,双火源火灾场景下火灾临界风速主要受两个火源功率控制。本节将进一步研究双火源对烟气扩散和回流长度的影响。纵向通风情况下,当出现烟气回流时,烟气回流区域拱顶温度将显著升高,而烟气未扩散区域拱顶温度保持环境温度不变。拱顶纵向温度突变点即为烟气回流前端位置,其与火源中心的距离即为烟气的流场长度。

图8给出了双火源火灾场景下不同纵向通风速度下烟气拱顶温度纵向分布曲线。从图8可以看出:

(1) 双火源5 MW+5 MW火灾场景下,纵向通风速度为2.3 m/s时,火源上游12 m处烟气温度已达54.9℃,并且随着距离火源距离的减小,烟气温度不断升高,说明此时烟气已经扩散至该区域,因此,此时烟气回流长度为12 m。当纵向通风速度提高到2.4 m/s时,火源上游3 m处温度明显升高,此时烟气回流长度为3 m。纵向通风风速为2.5 m/s时,火源上游并未出现温度升高的情况,即火源上游并未受到高温烟气影响,此时烟气不会向火源上游扩散,回流长度为0。

(2) 双火源(20 MW+5 MW)火灾场景下,纵向通风速度为3.0 m/s时,烟气回流长度最长,为18 m;当纵向通风速度达到3.1 m/s时,烟气回流长度为6 m;进一步提高纵向通风速度到3.2 m/s时,烟气不再向上游回流。

(3) 双火源(20 MW+20 MW)火灾场景下,纵向通风速度为3.1 m/s时,烟气回流长度达到21 m;纵向通风速度为3.2 m/s时,烟气回流长度为12 m;当纵向通风速度达到3.3 m/s时,烟气回流现象消失。

各工况烟气回流长度计算结果如表3所示,不同工况下烟气回流长度随纵向通风速度的变化曲线如图9所示。

从图9可以看出:

(1) 各火灾场景下,烟气回流长度均随通风速度的增大而减小。

(2) 相同通风速度下,随着火源数量的增加,火灾规模的增大,双火源火灾烟气回流长度也随之增大。例如,当纵向通风速度为3.0 m/s时,双火源(20 MW+5 MW)火灾烟气回流长度为18 m,相比单火源20 MW火灾增大了9 m;当纵向通风速度为3.1 m/s时,双火源(20 MW+20 MW)火灾烟气回流长度为21 m,相比单火源20 MW火灾增大了18 m,相较双火源(20 MW+5 MW)火灾增大15 m。由此可见,双火源火灾场景下,烟气回流长度主要由火灾规模控制,与两火源功率无明显关联。

2.3 双火源火灾拱顶烟气最高温度

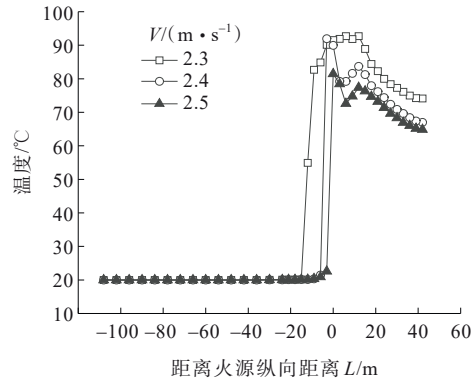
为了解双火源火灾对隧道烟气最高温度的影响,图10给出了纵向通风速度为0时,火源中心断面温度分布云图。

由图10可知:

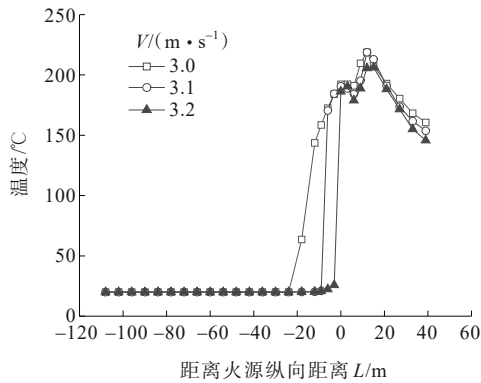
(1) 单火源20 MW火灾高温烟气向上扩散率先达到车道中心上方拱顶,而后沿着拱顶向另一侧扩散,断面烟气温度表现为火源所在侧温度较高而另一侧温度较低,呈现出明显不对称性。

(2) 双火源(20 MW+5 MW)火灾场景下,两火源处高温烟气向上扩散至拱顶,而后分别向隧道另一侧扩散。由于两火源功率不同,断面烟气温度表现为20 MW功率火源所在侧较高,5 MW功率火源一侧较低,断面温度不均匀性相较于单火源火灾有所减弱,但烟气最高温度与单火源20 MW火灾相比则无明显变化。

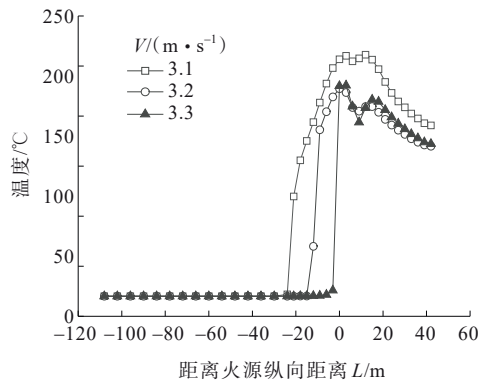
(3) 双火源(20 MW+20 MW)火灾断面烟气温度分布对称性较好,二者共同作用下,可以明显观察



(a) 双火源 5 MW+5 MW 火灾



(b) 双火源 20 MW+5 MW 火灾



(c) 双火源 (20 MW+20 MW) 火灾

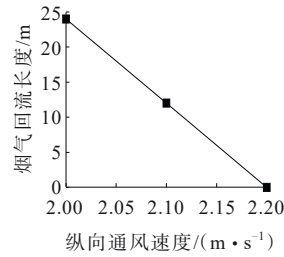
图 8 火灾拱顶烟气纵向温度分布曲线

Figure 8 Longitudinal temperature distribution of smoke in fire vaults

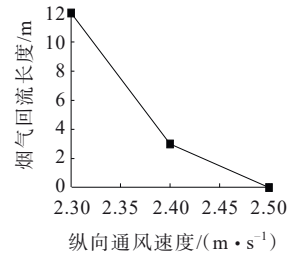
表 3 烟气回流长度计算结果

Table 3 Calculation results of smoke back-layering length

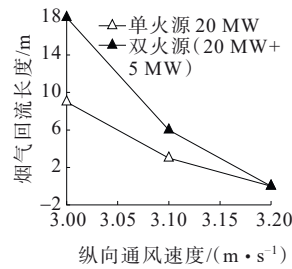
工况	火灾规模和火源数量	通风速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	回流长 度/m
1	单火源 5 MW	2.0, 2.1, 2.2	24, 12, 0
2	单火源 20 MW	3.0, 3.1, 3.2	9, 3, 0
3	双火源 (5 MW+5 MW)	2.3, 2.4, 2.5	12, 3, 0
4	双火源 (20 MW+5 MW)	3.0, 3.1, 3.2	18, 6, 0
5	双火源 (20 MW+20 MW)	3.1, 3.2, 3.3	21, 12, 0



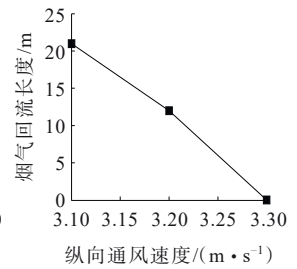
(a) 单火源 5 MW 火灾



(b) 双火源 5 MW+5 MW 火灾



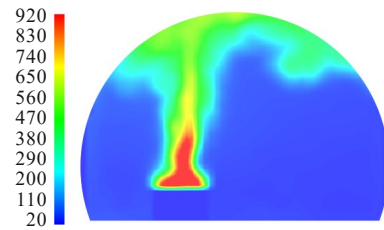
(c) 单火源 20 MW 火灾与双火源 20 MW+5 MW 火灾



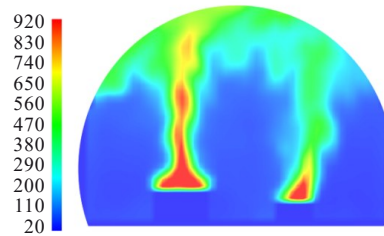
(d) 双火源 20 MW+20 MW 火灾

图 9 烟气回流长度随纵向通风速度变化曲线

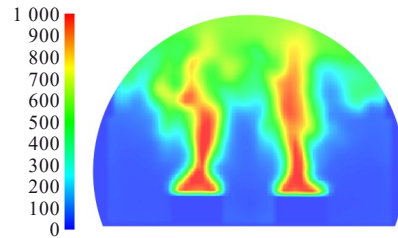
Figure 9 Variation of smoke back-layering length with longitudinal ventilation speed



(a) 单火源 20 MW 火灾



(b) 双火源 (20 MW+5 MW) 火灾



(c) 双火源 (20 MW+20 MW) 火灾

图 10 火灾断面温度分布云图(单位: °C)

Figure 10 Cloud map of temperature distribution in fire sections (unit: °C)

到,烟气温度相较单火源 20 MW 火灾、双火源 (20 MW+5 MW) 火灾明显升高。

图 11 进一步给出了不同火灾场景下纵向通风速度为 0 和达到临界风速时隧道中心拱顶烟气最高温度 T_{\max} 计算结果。

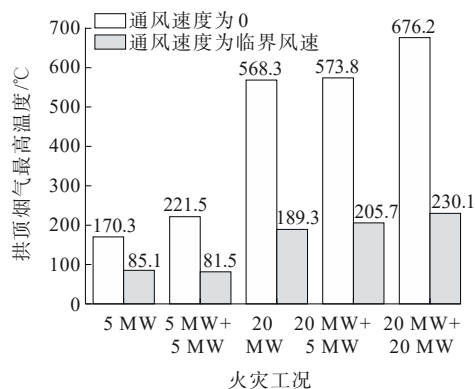


图 11 拱顶烟气最高温度

Figure 11 Maximum smoke temperature at vault

从图 11 可以看出:

(1) 通风速度为 0 时,双火源 (5 MW+5 MW) 火灾断面中心拱顶最高温度为 221.5 °C,功率相同单火源 5 MW 火灾最高温度仅为 170.3 °C、同比增大 30.1%。此时拱顶烟气温度来源于两个火源的共同贡献。

(2) 双火源 (20 MW+5 MW) 火灾烟气最高温度为 573.8 °C,相较单火源 20 MW 火灾无明显变化,仅增大 0.95%。双火源 (20 MW+20 MW) 火灾烟气最高温度为 676.2 °C,相较单火源 20 MW 火灾增大 19%,相较双火源 (20 MW+5 MW) 火灾增大 17.8%。这说明了双火源 (20 MW+5 MW) 火灾场景下,隧道烟气温度主要由功率较大的 20 MW 火源控制,5 MW 功率火源则没有明显作用。

由此可知,与火灾临界风速一致,双火源火灾场景下,火灾烟气温度与两火源功率相关,当两火源功率不同时,烟气温度主要取决于功率较大火源,功率较小火源贡献较小;当两火源功率相同或相近时,烟气温度由它们共同控制。

同时,纵向通风对隧道拱顶烟气温度有着显著影响,会导致拱顶烟气最高温度降低,如双火源 (20 MW+5 MW) 火灾通风速度 3.2 m/s 时,拱顶最高温度为 205.7 °C,相比通风速度为 0 时降低 64.2%。

3 结论

本文采用数值计算的方法,对公路隧道双火源火灾烟气控制风速、烟气回流长度以及烟气温度进

行了深入研究,主要结论如下:

(1) 隧道内发生双火源火灾时,临界风速主要取决于功率最大火源;当两火源功率相同或相近时,所需临界风速由二者共同控制。单火源 5 MW 火灾和 20 MW 火灾临界风速分别为 2.2 m/s、3.2 m/s;双火源 (5 MW+5 MW) 火灾临界风速为 2.5 m/s,相较单火源 5 MW 火灾增大了 13.6%;双火源 (20 MW+5 MW) 火灾临界风速为 3.2 m/s,与单火源 20 MW 火灾一致,而为避免双火源 (20 MW+20 MW) 火灾烟气回流,临界风速需控制为 3.3 m/s,相较单火源 20 MW 火灾增大了 3.1%。因此,在隧道防灾通风设计中,建议考虑双火源火灾工况,合理设计控制风速。

(2) 随着纵向通风速度的提高,烟气回流长度随之降低;相同通风速度下,随着火灾规模的增大,烟气回流长度增大。这表明,烟气回流长度主要由火灾规模控制。

(3) 双火源火灾场景下,由于火源分散,烟气温度主要由功率较大的火源控制,因此,呈现与临界风速一致的变化规律。

参考文献:

References:

- [1] 王磊.山岭公路隧道横向双火源火灾燃烧特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
WANG Lei. Study on combustion characteristics of transverse double fire sources in mountain highway tunnel [D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2023.
- [2] 王蕾,夏永旭,姚毅,等.基于FDS的公路隧道大型客车火灾数值模拟及分析[J].公路工程,2020,45(6):231-237.
WANG Lei,XIA Yongxu,YAO Yi,et al.Numerical simulation and analysis of bus fire in highway tunnel based on FDS[J].Highway Engineering,2020,45(6):231-237.
- [3] 方勇刚,王文星,郑国平.公路特长隧道互补式通风模式的火灾安全性研究[J].公路工程,2019,44(4):18-21,53.
FANG Yonggang,WANG Wenxing,ZHENG Guoping. Study on road tunnel safety in case of fire with complementary ventilation mode[J].Highway Engineering, 2019,44(4):18-21,53.
- [4] 杨涛,曾岳凯,李培军,等.不同纵坡隧道自然排烟竖井合理参数研究[J].中外公路,2025,45(3):191-198
YANG Tao,ZENG Yuekai,LI Peijun,et al. Study on reasonable parameters of natural smoke extraction shafts in tunnels with different longitudinal slopes[J].Journal of China & Foreign Highway,2025,45(3):191-198.
- [5] 乔建刚,尹朋招,李志刚,等.公路隧道温拌阻燃沥青路面阻燃效果仿真研究[J].中外公路,2023,43(1):168-172.
QIAO Jiangan,YIN Pengzhao,LI Zhigang,et al. Simulation study on flame retardant effect of warm-mixed

- flame retardant pavement in highway tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1):168-172.
- [6] 张奥宇, 邓敏, 胡彦杰. 双洞盾构隧道横通道与滑梯组合疏散合理间距研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5):209-213.
ZHANG Aoyu, DENG Min, HU Yanjie. Reasonable space combination evacuation of contact channel and evacuation slide for two-hole shield tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5):209-213.
- [7] 杨健. 公路隧道典型事故特征分析及预防控制技术研究[D]. 福州:福州大学, 2017.
YANG Jian. Characteristic analysis of typical accidents in highway tunnels and research on prevention and control technology[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [8] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道通风设计细则: JTG/T D70/2-02—2014[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.
China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd.. Guidelines for design of ventilation of highway tunnels: JTG/T D70/2-02—2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [9] THOMAS P H. The movement of smoke in horizontal passages against an air flow[J]. Fire Safety Science, Routledge, 1968, 723:1-1.
- [10] LI Y Z, LEI B, INGASON H. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(6/7/8):361-370.
- [11] LI Y Z, INGASON H. Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 2017, 91:303-311.
- [12] 戴开来, 王峰. 曲线型公路隧道防灾通风设计问题探讨[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(2):76-83
DAI Kailai, WANG Feng. Discussion on disaster prevention ventilation design for a curved road tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(2):76-83.
- [13] 王峰, 董国海, 王明年. 曲线隧道火灾烟气控制临界风速的研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5):84-89.
WANG Feng, DONG Guohai, WANG Mingnian. On the critical air velocity for fire smoke control in a curved tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5):84-89.
- [14] 王峰, 张路华, 袁松, 等. 高海拔公路隧道火灾烟气控制临界风速研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5):153-160.
WANG Feng, ZHANG Luhua, YUAN Song, et al. Critical velocity of fire smoke control in high-altitude highway tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5):153-160.
- [15] 刘明. 弧形公路隧道临界风速数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(12):1706-1707.
LIU Ming. Numerical simulation of critical wind velocity of arced tunnel[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(12):1706-1707.
- [16] 徐琳, 张旭. 水平隧道火灾通风纵向控制风速的合理确定[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2):92-96.
XU Lin, ZHANG Xu. Rational determination of longitudinal control wind velocity for fire ventilation of horizontal tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2):92-96.
- [17] 梁华刚, 谢冰雪, 庞丽琴. 车辆阻塞效应下公路隧道火灾临界风速[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11):1515-1518.
LIANG Huagang, XIE Bingxue, PANG Liqin. Critical ventilation velocity of highway tunnel fires under vehicle blockage[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(11):1515-1518.
- [18] 刘琼, 郑峰. 双火源隧道火灾的临界风速变化规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(1):137-143, 152.
LIU Qiong, ZHENG Feng. Study on variation rules of critical ventilation velocity for double-source tunnel fires[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1):137-143, 152.
- [19] 徐程钢, 邱进伟, 吕逸飞, 等. 纵向通风下公路隧道双火源火灾烟气扩散研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(12):1669-1673.
XU Chenggang, QIU Jinwei, LYU Yifei, et al. Study on smoke dispersion pattern of dual-fire source fire in highway tunnel under longitudinal ventilation[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(12):1669-1673.
- [20] 余明高, 苏冠锋, 陈静. 双火源对隧道火灾临界风速影响的数值研究[J]. 火灾科学, 2017, 26(1):20-28.
YU Minggao, SU Guanfeng, CHEN Jing. Numerical studies on the effect of double fire sources upon critical ventilation velocity in tunnel fires[J]. Fire Safety Science, 2017, 26(1):20-28.
- [21] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOT R, et al. Fire dynamics simulator, technical reference guide, Volume 1: Mathematical model[Z]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, Sixth Edition, 2013.
- [22] KASHEF A. Fire and smoke control in road tunnels: A case study[J]. ASHRAE Transactions, 2008(2):283-292.
- [23] 李颖臻. 含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
LI Yingzhen. Study on fire characteristics and smoke control of extra-long tunnel with rescue station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.