

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2018.01.019

双火源隧道火灾的临界风速变化规律研究^{*}

刘 琼, 郑 烽

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 使用 FDS 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, 重点研究了纵向风下游火源功率及火源间距对临界风速的影响, 并从烟气的能量转化过程分析了临界风速的变化原因。结果表明: 在上游火源功率及火源间距确定的条件下, 临界风速随下游火源功率增加的变化趋势近似呈线性增长; 当火源间距为 0 时, 临界风速均等同于与两个火源总功率相同的单火源情形; 对于功率确定的上游火源及下游火源, 临界风速随火源间距增加的变化趋势近似于二次方递减; 对于功率确定的上游火源, 每种功率的下游火源都存在一个对临界风速产生影响的“极限距离”, 且此距离随下游火源功率增加的变化趋势近似呈线性增长。多火源隧道火灾的临界风速相比单火源存在较大区别, 因此在隧道的通风设计中, 应充分考虑多火源的分布情况, 临界风速的计算也更加合理, 制定的火灾扑救及人员疏散方案也更加科学。

关键词: 隧道火灾; 临界风速; 双火源; 数值模拟

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2018)01-0137-07

Study on Variation Rules of Critical Ventilation Velocity for Double-source Tunnel Fires

LIU Qiong, ZHENG Feng

(School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper, the FDS simulation method is used to study the variation of critical ventilation velocity for double-source tunnel fires. The influence of HRR of downstream fire and the distance between the fires on critical ventilation velocity is mainly investigated. By analyzing the process of energy conversion, the reason for this changes is also investigated. The results show that under certain HRR of upstream fire and distance between the fires, the critical ventilation velocity increases approximately linearly with increasing HRR of downstream fire. For the case where the distance between the fires is zero, the critical ventilation velocity is identical to that for single fire with summed HRR. For a certain HRR of upstream and downstream fire, the decrease is quadratic in critical ventilation velocity with increasing distance of fires. For certain HRR of upstream fire, there is always a maximum distance that the critical ventilation distance was no longer influenced by the downstream fire, and the maximum distance increases linearly with increasing HRR of downstream fire. The critical ventilation velocity in double-source tunnel fires is largely different from single fire. Hence for the design of a ventilation system for tunnels, the critical ventilation velocity should be calculated more appropriately by considering the distribution of the fires, and the plan for fire controlling and evacuation work can be conducted more efficiently.

Keywords: tunnel fires; critical ventilation velocity; double-source fire; numerical simulation

* 收稿日期:2016-11-30; 修回日期:2017-02-16

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120162120013)资助

作者简介:刘 琼(1984-),男,讲师,博士。主要从事火灾科学方面的研究。Email:liuqiong@csu.edu.cn

引言

公路隧道由于其特殊的狭长型半封闭结构以及密集的车流,一旦发生火灾便会造成巨大的人员伤亡和财产损失,对社会的危害性极大^[1-3]。因此对公路隧道火灾发展的相关规律进行研究,对于隧道防火具有极为重要的意义。

当隧道内纵向通风较小时,燃烧过程中出现烟气流与风流分层流动,在隧道拱顶附近的烟气流逆风流方向流动的现象,被称为“烟气回流”^[4-5],这对消防人员扑救火灾和人员疏散都极为不利^[6-7]。目前在实际隧道消防设计中,主要采用纵向通风的方法对火灾中的烟气回流进行控制。过小的纵向风速无法抑制“烟气回流”,而过大的纵向风速则会破坏烟气层的稳定性^[4],因此不产生“烟气回流”的最小纵向风速即“临界风速”这一重要参数进行探讨,一直是学者在隧道消防设计研究中最为重视的课题之一。P. Thomas^[8]、A. Heselden^[9]、Y. Oka 等^[10]、徐志胜等^[11]均基于理论分析及模型试验提出了不同的临界风速计算公式;G. T. Atkinson 等^[12]、徐琳^[13]研究了不同隧道坡度对于临界风速的影响;Y. Wu 等^[14]、周孝清等^[15]、S. R. Lee 等^[16]则研究了不同隧道截面形状对临界风速的影响。然而在以往的研究中,绝大多数学者考虑的均是单火源燃烧的火灾场景。在现实的隧道火灾中,由于汽车连续相撞等原因很容易形成多点着火的现象,故对多火源隧道火灾的相关规律进行研究,同样具有重大的现实意义。目前对于多火源隧道火灾中的临界风速问题,仅有 K. C. Tsai 等^[17]进行过少量双火源模型试验,并与单火源场景的临界风速进行对比,缺少对多火源场景下临界风速变化规律的深入研究。因此,本文采用 FDS 数值模拟方法,利用大涡模拟技术对不同功率及不同火源间距下的双火源隧道火灾临界风速变化规律进行定量研究,对隧道防火具有指导意义。

1 理论基础

临界风速是指抑制烟气回流的最小纵向通风速率。在双火源隧道火灾中,纵向通风速率与烟气回流长度的关系如图 1 所示。

J. Vantelon 等^[18]对烟气回流长度与纵向通风速率的关系进行了研究,并提出一个简单的计算公式预测烟气回流长度,见下式:

$$\frac{L_b}{R} \propto \left(\frac{gQ}{c_p \rho_0 T_0 u^3 R} \right)^{0.3} \quad (1)$$

式中, L_b 为烟气回流长度,m; g 为重力加速度, m/s^2 ; Q 为火源的热释放速率,MW; c_p 为空气的定压比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; ρ_0 为空气的密度, kg/m^3 ; T_0 为环境温度,K; u 为纵向风速, m/s ; R 为隧道半径,m;正比例系数需要靠实验来确定。

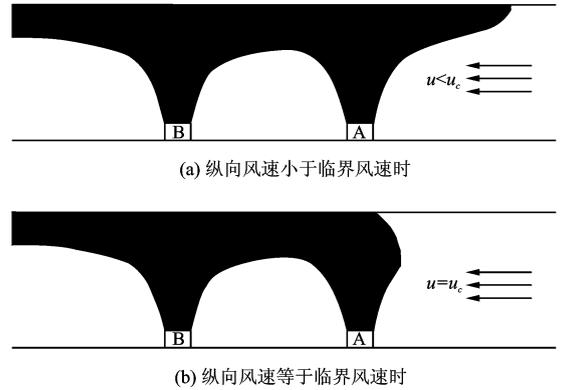


图 1 烟气回流示意

Fig. 1 Schematic view for smoke back-flow

结合式(1)和文献[19-20],可知在数值模拟中可以利用烟气回流长度与纵向风速自然对数的近似线性关系外推出临界风速。

Y. Wu 等^[14]通过在 Oka 的公式中引入水力直径的概念消除隧道高度对于计算结果的影响,提出了无量纲临界风速计算公式,见下式:

$$u_c^* = 0.40 \cdot [0.20]^{-\frac{1}{3}} \cdot [Q^*]^{\frac{1}{3}}, Q^* \leq 0.20 \quad (2)$$

$$u_c^* = 0.40, Q^* \geq 0.20 \quad (3)$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 T_0 c_p g^{\frac{1}{2}} \bar{H}^{\frac{5}{2}}} \quad (4)$$

$$u_c^* = \frac{u_c}{\sqrt{g \bar{H}}} \quad (5)$$

$$\bar{H} = 4S/P \quad (6)$$

式中, Q^* 为无量纲热释放速率; \bar{H} 为隧道水力直径; S 为隧道横截面积, m^2 ; P 为隧道湿周,m。

通过式(2)~式(6)可以估算双火源工况中临界风速的大概范围,对于本文的 FDS 模拟中合理的纵向风速设置具有指导意义。

2 模拟参数设置

2.1 隧道模型

本文基于 Tsai 的小型试验建立一个简化的隧

道模型,如图 2 所示。隧道模型总长度为 40 m,约为一条实际公路隧道的 1/10。横截面为 6 m×6 m 的矩形。隧道两端分别开口,一侧为进风面,另一侧为自然开口,壁面设置为常用的工程材料混凝土。

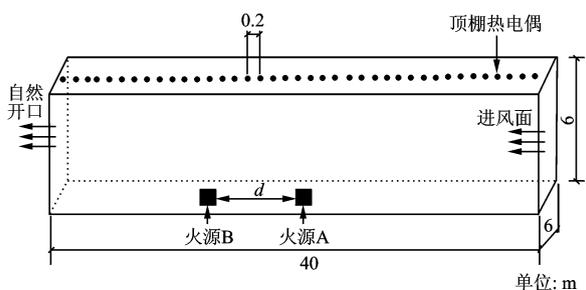


图 2 隧道模型
Fig. 2 Tunnel model

2.2 火源功率及位置

在单火源的隧道火灾中,火源功率是临界风速的主要决定因素。本文研究的是双火源的隧道火灾,故需要从功率和相对位置两方面分别对火源进行设置。

根据文献[12,21-22]中的数据可以获得不同类型车辆燃烧的功率推荐值,见表 1。

表 1 车辆火灾功率推荐值

Table 1 Suggested heat release rate of vehicle

车辆类型	文献[12]	文献[21]	单位:MW
			文献[22]
1 辆小汽车	2.5		3~5
1 辆大客车	5	5~10	10~15
2~3 辆小汽车	8		
2~4 辆小汽车		10~20	
厢式货车	15		20~30
公共汽车	10	20~30	20
大货车	20~30	70~200	30~100
油罐车	30~250	200~300	

根据前人对临界风速随火源功率的分段变化规律的解释可知^[14],当火源功率足够大时,火焰会直接接触隧道棚顶,此时烟气回流的驱动力由射流火焰控制,临界风速与火源功率无关。因此讨论双火源隧道火灾的临界风速变化规律需要结合隧道模型的实际情况选择合适的中小规模火源。本文结合表 1 中车辆火灾功率推荐值及数值模拟的可行性,选择的火源功率范围在 2~14 MW 之间。综合考虑隧道内汽车火灾起火快、燃烧猛的特点,火源燃料设

置为庚烷,使用 t^2 快速火模型,火源增长系数为 0.1876。

为探究临界风速随火源间距的变化趋势,本文中确定上风向火源 A 作为固定火源,下游火源 B 作为移动火源,通过改变火源 B 与火源 A 的间距 d 观察临界风速的变化规律,如图 2 所示。

2.3 温度测点

根据上文可知,使用烟气逆流长度与纵向风速的自然对数的近似线性关系可外推出不同工况所对应的临界风速,因此需要对不同纵向通风所对应的烟气回流长度进行测量。本文中高出环境温度 10 °C 作为是否存在烟气的标准,对隧道顶棚下方的温度分布进行判断,从而间接获得不同工况中的烟气回流长度。热电偶的分布情况如图 2 所示,其位于隧道顶棚中心线上,间距为 0.2 m,共 200 个。

2.4 网格设置

合理的网格尺寸对于模拟结果的准确性非常重要。K. McGrattan 等^[23]指出,在使用 FDS 进行的火灾模拟中,火源特征直径 D^* 与计算网格尺寸 δx 的合理比例在 4~16 之间,其中火源特征直径 D^* 由式(7)给出。张会冰^[24]则进一步通过大量的 FDS 模拟与模型试验所获得的数据对比,指出网格尺寸宜取 $0.1D^*$ 或 $0.2D^*$ 。

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (7)$$

本文结合式(7)计算及网格敏感性测试,尺寸选用 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,总数为 180000 个。 $D^*/\delta x$ 在 6~14 之间,在合理范围之内。

3 模拟结果分析

3.1 下游火源功率对临界风速的影响

由表 2 可知,相比于隧道中仅存在单火源(功率 4 MW),当下游火源功率分别为 2 MW($d \leq 4 \text{ m}$), 4 MW($d \leq 5 \text{ m}$), 6 MW($d \leq 6 \text{ m}$), 8 MW($d \leq 7 \text{ m}$), 10 MW($d \leq 8 \text{ m}$)时的临界风速显然更大。这说明火源间距在一定范围内时,临界风速会受下游火源的影响。根据临界风速的定义,这种变化反映了下游火源对上游火源的烟气回流产生的促进作用。

表 2 不同工况下的临界风速

Table 2 Critical ventilation velocity under different conditions

单位:m/s

火源功率/MW		火源间距 d/m										
Q_A	Q_B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	—	1.93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	2.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	2.28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	2.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	—	2.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	2.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	2	2.13	2.12	2.10	2.08	2.00	1.93	1.93	—	—	—	—
4	4	2.28	2.26	2.25	2.24	2.15	2.05	1.93	1.93	—	—	—
4	6	2.38	2.36	2.35	2.32	2.19	2.13	1.99	1.93	1.93	—	—
4	8	2.60	2.60	2.55	2.52	2.44	2.30	2.22	2.00	1.93	1.93	—
4	10	2.77	2.76	2.71	2.65	2.57	2.48	2.31	2.18	2.00	1.93	1.93

为进一步探究这种促进作用的强弱与下游火源功率之间的关系,选取 $d=0,1,2,3,4$ m 时不同下游火源功率所对应的临界风速进行比较,如图 3 所示。

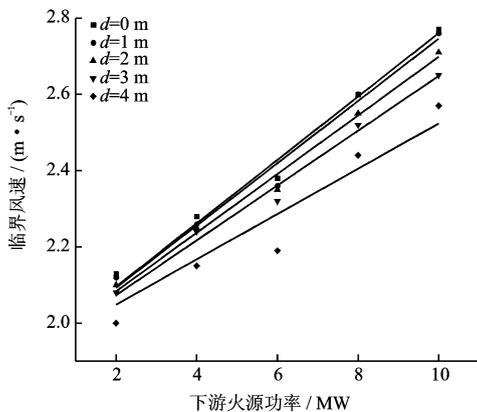


图 3 临界风速与下游火源功率变化关系

Fig. 3 Curves of critical ventilation velocity versus HRR of downstream fire source

由图 3 可以看出,对于图中选取的 5 种火源间距,临界风速均随下游火源功率的增大而增大。这说明在火源间距相同时,下游火源功率越大,则其对上游火源烟气回流的促进作用越强。

对图 3 中临界风速随下游火源功率的变化趋势进行线性拟合,可以得到相应的回归方程。当火源间距为 0 时,拟合方程为: $y=0.0830x+1.93$ ($R^2=0.985$)。当火源间距为 1 m 时,拟合方程为: $y=0.0816x+1.93$ ($R^2=0.982$)。当火源间距为 2 m 时,拟合方程为: $y=0.0768x+1.93$ ($R^2=0.990$)。当火源间距为 3 m 时,拟合方程为: $y=0.0718x+1.93$ ($R^2=0.988$)。当火源间距为 4 m 时,拟合方

程为: $y=0.0594x+1.93$ ($R^2=0.928$)。

拟合方程的相关系数均较高,说明对于任意火源间距,临界风速随下游火源功率的变化趋势都接近于线性变化。根据上述拟合方程同样可以发现,它们在 y 轴上的截距均为 1.93 m/s,与单火源功率为 4 MW 时的临界风速相同。且对于任意火源间距,下游火源功率越小,则临界风速越接近于仅存在上游火源时的情况,即下游火源对上游火源烟气回流的促进作用越不明显。

3.2 火源间距对临界风速的影响

由表 2 同样可以发现,对于任意功率的下游火源,临界风速会随火源间距的变化而变化。当火源间距 $d=0$ m,上游火源功率为 4 MW,下游火源功率为 2、4、6、8、10 MW 时的临界风速分别与单火源功率 6、8、10、12、14 MW 时相同。说明当 2 个火源靠在一起时的临界风速等同于它们总功率相同的单火源情形,也反映出此时两者烟气回流的运动情况类似。

当火源间距大于 0 时,临界风速随火源间距的变化趋势如图 4 所示。从图中可以看出,对于任意功率的下游火源,临界风速均随火源间距增大而逐渐减小,并最终趋向于一个定值。

对图 4 中临界风速随火源间距的变化趋势进行二次拟合,可以得到相应的回归方程。当下游火源功率为 2 MW 时的拟合方程为: $y=2.13-0.00802x^2$ ($R^2=0.983$)。当下游火源功率为 4 MW 时的拟合方程为: $y=2.29-0.00964x^2$ ($R^2=0.974$)。当下游火源功率为 6 MW 时的拟合方程为: $y=2.38-0.00976x^2$

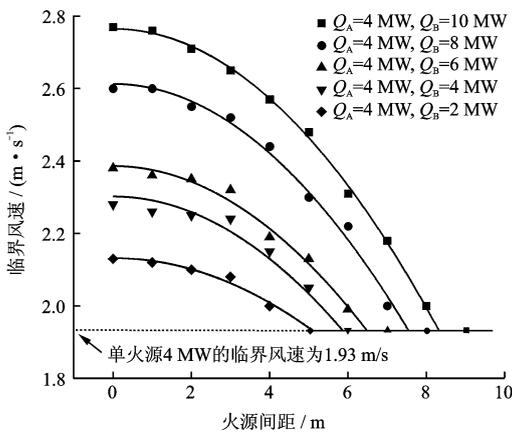


图4 临界风速与火源间距变化关系

Fig. 4 Curves of critical ventilation velocity versus distance between fire sources

($R^2=0.976$)。当下游火源功率为 8 MW 时的拟合方程为： $y=2.60-0.0111x^2$ ($R^2=0.985$)。当下游火源功率为 10 MW 时的拟合方程为： $y=2.75-0.0110x^2$ ($R^2=0.986$)。

拟合方程的相关系数均较高,说明对于任意功率的下游火源,临界风速随火源间距的变化趋势近似于二次方递减。根据图 4 及上述拟合方程可知,火源间距越大,则临界风速的下降趋势越明显。这是因为在火源间距较小时,2 个火源发生了不同程度的火焰融合^[25],此时烟气回流的驱动力来源近似于与它们总功率相同的单一火源,故临界风速接近于间距为 0 时的情况。而随着火源间距的增加,2 个火源的火焰完全分开,临界风速的下降趋势则更加明显。

由表 2 可知,当上游火源功率 $Q_A=4$ MW,火源间距 $d \geq 5$ m ($Q_B=2$ MW), $d \geq 6$ m ($Q_B=4$ MW), $d \geq 7$ m ($Q_B=6$ MW), $d \geq 8$ m ($Q_B=8$ MW), $d \geq 9$ m ($Q_B=10$ MW) 时的临界风速均为 1.93 m/s,与单火源功率 4 MW 时相同。这说明对于功率一定的上游火源,每种功率的下游火源对上游火源烟气回流的促进作用都存在一个极限火源间距。在本文中,这个火源间距被定义为“极限距离” d_m ,通过上述拟合方程可以求得对于上游火源功率为 4 MW,下游火源功率为 2 MW 的极限距离为 4.99 m,4 MW 的极限距离为 6.11 m,6 MW 的极限距离为 6.79 m,8 MW 的极限距离为 7.77 m,10 MW 的极限距离为 8.63 m。极限距离随下游火源功率的变化趋势如图 5 所示。

对图 5 中极限距离随下游火源功率的变化趋势

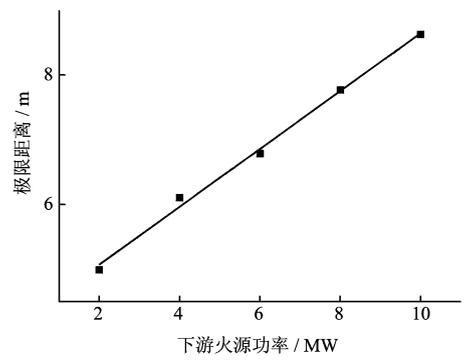


图5 极限距离与下游火源功率变化关系

Fig. 5 Curves of extreme distance versus HRR of downstream fire source

进行线性拟合,得到拟合方程为： $y=0.447x+4.18$ ($R^2=0.994$)。拟合方程的相关系数较高,说明当上游火源功率一定的情况下,极限距离随下游火源功率的变化趋势近似呈线性递增关系。

3.3 烟气回流的能量转化过程分析

烟气微团在火焰的强烈湍流作用下与纵向风流产生混合,并向上加速运动。图 6 中, z 为隧道高度方向的坐标; h_m 为火源面到隧道顶棚的距离,m; v_0 为烟气微团离开火源面时的速度,m/s; v_{max} 为烟气微团的最大垂直速度,m/s。

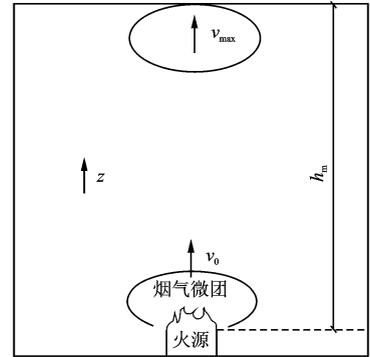


图6 烟气微团的垂直运动

Fig. 6 Vertical movement of smoke micro-groups

假设燃烧和风流状态稳定,烟气微团的密度始终保持不变,则烟气微团在隧道棚顶处获得最大动能为:

$$E_{\max} = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 \cdot v_{\max}^2 \quad (8)$$

式中, E_{\max} 为烟气微团的最大动能,J; ρ_0 为烟气微团的平均密度, kg/m^3 ; V_0 为单位体积, m^3 。

当烟气微团撞击隧道棚顶后,其动能主要转化为三部分:

$$E_{\max} = E_1 + E_2 + Q \quad (9)$$

式中, E_1 为向纵向风上游运动的烟气微团动能, J; E_2 为向纵向风下游运动的烟气微团动能, J; Q 为摩擦作用产生的内能, J。

式(9)中, E_1 即回流中烟气微团的初始动能。在双火源火灾中,纵向风上游火源 A 和下游火源 B 均满足上述的能量转化过程。随着烟气的不断运动,下游火源的烟气回流会对上游火源的烟气回流产生影响,如图 7 所示。图 7 中, $E_{1(B)}$ 为下游火源产生的回流中烟气微团的初始动能, J; x_B 为其向上游运动的距离, m; $f_B(x_B)$ 为其在运动过程所受阻力, N; $E'_{1(B)}$ 为其运动到上游火源烟气与隧道顶棚撞击处的动能, J; $E_{1(A)}$ 为上游火源产生的回流中烟气微团的初始动能, J; $E_{1(N)}$ 为两股烟气碰撞后产生新的烟气微团的动能, J; x_N 为其向上游运动的距离, m; $f_N(x_N)$ 为新的烟气微团在向上游运动过程中所受阻力, N。

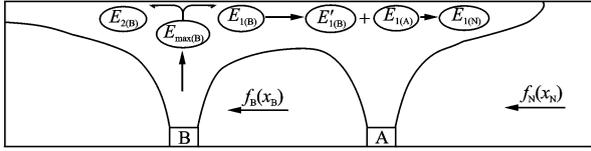


图 7 烟气微团的纵向运动

Fig. 7 Horizontal movement of smoke micro-groups

下游火源的烟气回流在向上游运动的过程中,受到 $f_B(x_B)$ (包括烟流与隧道顶棚和风流之间的摩擦力、烟气微团内部的摩擦力和通风静压力等)的作用。当其运动到上游火源烟气与隧道顶棚撞击处时,其能量转化过程满足:

$$E'_{1(B)} = E_{1(B)} - \int_0^d f_B(x_B) \quad (10)$$

两股烟气碰撞后产生新的烟气微团,忽略碰撞过程中的内能损耗,新的烟气微团动能为:

$$E_{1(N)} = E'_{1(B)} + E_{1(A)} \quad (11)$$

当通风速度为临界风速时,烟气回流前锋与风流分界面处单位体积内的烟气动能与风流相等,此时烟流受到的通风静压力与烟气回流的驱动力处于动平衡状态,即:

$$E_{1(N)} = E_w \quad (12)$$

式中, $E_w = \frac{1}{2} \rho_w V_0 \cdot u_c^2$, 其中 ρ_w 为风流的平均密度

($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), u_c 为临界风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

将式(10)和式(11)代入到式(12)中可以获得临界状态下的能量转化关系式:

$$\frac{1}{2} \rho_w V_0 \cdot u_c = E_{1(B)} - \int_0^d f_B(x_B) + E_{1(A)} \quad (13)$$

因此,双火源隧道火灾的临界风速为:

$$u_c = \frac{2(E_{1(B)} - \int_0^d f_B(x_B) + E_{1(A)})}{\rho_w V_0} \quad (14)$$

由式(14)可知,当火源间距 d 和上游火源功率 Q_A 一定时,临界风速 u_c 值随下游火源功率的增大而增大;当上下游火源率 Q_A 和 Q_B 一定时,临界风速 u_c 随火源间距 d 的增大而减小;当火源间距为极限距离 d_m 时, $E'_{1(B)}$ 趋近于 0, 式(14)变为:

$$u_c = \frac{2E_{1(A)}}{\rho_w V_0} \quad (15)$$

此时临界风速仅由上游火源 A 决定;当上游火源功率 Q_A 一定时, Q_B 越大则 $E_{1(B)}$ 越大,故满足 $E'_{1(B)} = 0$ 的 d 也越大,即对应的极限距离 d_m 也越大。

4 结 论

本文针对隧道火灾中同时存在 2 个火源的情况,利用 FDS 数值模拟得到了不同情形下的临界风速。重点考察了纵向风下游火源功率及火源间距对临界风速的影响,并从烟气的能量转化过程对临界风速的变化进行了分析。主要结论如下:

(1)在同样的火源间距下,临界风速均随下游火源功率的增大而增大,且它们近似成线性递增关系。说明下游火源功率越大,其对于上游火源烟气回流的促进作用越强。

(2)当火源间距为 0 时,临界风速等同于与两个火源总功率相同的单火源情形。说明两个火源挨在一起时,烟气回流的运动情况与它们总功率相同的单火源类似。

(3)对于任意功率的下游火源,临界风速均随火源间距的增大而逐渐减小,且它们近似呈二次方递减关系。说明火源间距越小,下游火源对上游火源烟气回流的促进作用越强。

(4)任意功率的下游火源对上游火源的烟气回流均存在着一个最大影响距离,本文中定义为“极限距离”。极限距离随下火源功率的增大而增大,且近似呈线性关系。

参考文献:

- [1] 康晓龙,王 伟,赵耀华,等.公路隧道火灾事故调研与对策分析[J].中国安全科学学报,2007,17(5):110-116,176.
Kang X L, Wang W, Zhao Y H, et al. Investigation of road tunnel fire and study on countermeasures[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(5): 110-116, 176. (in Chinese)
- [2] 曾 磊,王少飞,林 志,等.公路隧道火灾事故调查分析[J].现代隧道技术,2012,49(3):41-48.
Zeng L, Wang Sh F, Lin Zh, et al. Investigation and analysis of road tunnel fire[J]. Modern Tunnel Technology, 2012, 49(3): 41-48. (in Chinese)
- [3] 王少飞,林 志,余 顺.公路隧道火灾事故特性及危害[J].消防科学与技术,2011,30(4):337-340.
Wang Sh F, Lin Zh, Yu Sh. Characteristics and hazards of highway tunnel fire[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(4): 337-340. (in Chinese)
- [4] 张兴凯.地下工程火灾原理及应用[M].北京:首都经济贸易大学出版社,1997:166.
Zhang X K. Fire principles and their application in underground engineering[M]. Beijing: Capital University of Economics & Business Press, 1997: 166. (in Chinese)
- [5] 周 庆,倪天晓,彭锦志.隧道火灾烟气回流与临界风速模型试验[J].消防科学与技术,2011,30(7):580-583.
Zhou Q, Ni T X, Peng J Zh. Test of back-layer and critical ventilation velocity model in tunnel fire[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(7): 580-583. (in Chinese)
- [6] 李思成,王 伟,赵耀华.几个典型隧道火灾问题研究进展[J].建筑科学,2014,30(10):94-105.
Li S Ch, Wang W, Zhao Y H. Research development about several typical tunnel fire problems[J]. Building Science, 2014, 30(10): 94-105. (in Chinese)
- [7] 于年灏.双车道公路隧道火灾临界风速变化规律研究[D].长沙:中南大学,2012.
Yu N H. Study on variation law of the critical velocity in two-lane highway tunnel fire[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [8] Thomas P. The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires[R]. Watford: Fire Research Station, 1958.
- [9] Heselden A. Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels[M]. Cambridge, UK: Building Research Establishment, Fire Research Station, 1976: 34-35.
- [10] Oka Y, Atkinson G T. Control of smoke flow in tunnel fires [J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4): 305-322.
- [11] 徐志胜,赵红莉,李 洪,等.水平隧道火灾临界风速的理论模型[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(3):1138-1143.
Xu Zh Sh, Zhao H L, Li H, et al. Theoretical model of critical wind velocity in horizontal tunnel fires [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2013, 44(3): 1138-1143. (in Chinese)
- [12] Atkinson G T, Wu Y. Smoke control in sloping tunnels [J]. Fire Safety Journal, 1996, 27(4): 335-341.
- [13] 徐 琳.长大公路隧道火灾热烟气控制理论分析与实验研究[D].上海:同济大学,2007.
Xu L. Theoretical analysis and experimental study on smoke control in long highway tunnels[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [14] Wu Y, Baker M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation system—a study of the critical velocity [J]. Fire Safety Journal, 2000, 4(35): 363-390.
- [15] 周孝清,赵相相,丁云飞,等.火灾时隧道截面形状对临界风速和烟气分布影响的数值研究[J].广州大学学报(自然科学版),2006,5(2):54-58.
Zhou X Q, Zhao X X, Ding Y F, et al. Numerical studies on the critical velocity and smoke distribution affected by tunnel cross section geometry in tunnel fire [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2006, 5(2): 54-58. (in Chinese)
- [16] Lee S R, Ryou H S. An experimental study of the effect of the aspect ratio on the critical velocity in longitudinal ventilation tunnel fires[J]. Journal of Fire Science, 2005, 2(23): 119-138.
- [17] Tsai K C, Chen H H, Lee S K. Critical ventilation velocity for double-source tunnel fires [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(10): 650-660.
- [18] Vantelon J, Guelzim A, Quach D, et al. Investigation of fire induced smoke movement in tunnels and stations: an application to the Paris Metro [M]. Edinburgh, UK: International Association for Fire Safety Science, 1991: 907-918.

