

# 考虑人员逃生公路隧道火灾控制风速研究\*

王星<sup>1</sup>, 师江涛<sup>1,2</sup>, 柴伦磊<sup>1</sup>, 韩兴博<sup>1</sup>, 胡强<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 甘肃省交通科学研究所有限公司, 兰州 730050)

**摘要:**公路隧道火灾人员逃生与控制风速关系密切。本研究基于 PHOENICS 软件, 建立了矩形、圆形及马蹄形断面下二、三及四车道 9 种计算模型, 选取了大客车 (20 MW) 及无载重货车 (30 MW) 2 种火源释放率, 选取了 2.0 m/s、2.5 m/s、3.0 m/s、3.5 m/s 及 4.0 m/s 的入口风速共计 40 种主要常见火灾工况, 考虑了纵向通风对人体极限温度承受值的影响, 采用了杨涛修正的动态火源释放率曲线及周勇狄修正的克拉尼公式, 选用了适当的人员逃生条件, 给出了每种工况 8 个特征时刻的 10 个特征点的温度值及曲线图, 给出了燃烧 5 min、12 min、30 min 后火源处的纵横断面温度云图及中轴面烟气云图, 给出了对应于火源燃烧位置上下游 8 个特征位置下人员逃生的忍受时间与逃离时间。研究得出: 在基于人员逃生条件下矩形断面隧道在火源释放率为 20 MW 时二车道控制风速为 3.0 m/s, 三、四车道均为 2.5 m/s; 30 MW 时二、三、四车道控制风速均为 3.5 m/s, 圆形与马蹄形断面隧道在火源释放率为 20 MW 时二、三、四车道控制风速均为 3.5 m/s, 30 MW 时二车道控制风速均为 4.0 m/s, 三、四车道均为 3.5 m/s。在火灾发生 1 min 后, 人员以 1 m/s 从火源上下游进行疏散均可安全逃生。

**关键词:**隧道火灾; 人员逃生; 控制风速; 火源释放率; PHOENICS

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0277-10

## Study on the Control of Ventilation Velocity of Fire in Highway Tunnel Based on the Safety Evacuation

Wang Xing<sup>1</sup>, Shi Jiangtao<sup>1,2</sup>, Chai Lunlei<sup>1</sup>, Han Xingbo<sup>1</sup>, Hu Qiang<sup>1</sup>

(1. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R. China; 2. Gansu Province Transportation Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, P.R. China)

**Abstract:** The safety evacuation of highway tunnel fire is closely related to the control of ventilation velocity. Based on the PHOENICS software, 9 kinds of calculation models of two, three and four lanes under rectangular, circular and horseshoe cross sections were established. 2 kinds of fire rate of bus (20 MW) and no-load truck (30 MW) were selected. The inlet wind speed of 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s and 4.0 m/s were considered, and 40 main common fire conditions were considered totally, taking into account the effects of longitudinal ventilation on temperature limit value of human body. Yangtao's revised dynamic HRR curve and ZhouYongdi's revised Krani formula were used, and appropriate personnel evacuation conditions were adopted. 10 characteristic temperature values and curves at 8 characteristic moments of each working condition were given. The temperature and smoke pattern of the vertical and horizontal cross-section of the fire at 5 min, 12 min and 30 min after combustion were given, and the tolerance time and the evacuation time of the safety evacuation were obtained under the 8 characteristic positions of the upstream and downstream of the fire burning position. The research results show that the control of ventilation velocity of the two-lane rectangular section tunnel is 3.0 m/s when the HRR is 20MW, 2.5 m/s for three

\* 收稿日期: 2018-08-12 (修改稿)

作者简介: 王星 (1989-), 男, 陕西华县人, 博士生, 主要从事隧道及地下工程等领域的科研工作。

E-mail: 1548622258@qq.com

and four lanes, and the velocities of the two-lane, three-lane, four-lane rectangular section tunnel are 3.5 m/s when the HRR is 30 MW; the control of ventilation velocity of the two-lane, three-lane, four-lane circular and horseshoe cross sections tunnel is 3.5 m/s when the HRR is 20 MW, 4.0 m/s for the two-lane and 3.5 m/s for the three and four lanes when the HRR is 30MW. After the fire occurred 1min, the personnel can be evacuated from the upstream and downstream of the fire source with the speed of 1m/s safely.

**Keywords:** tunnel fire; personnel evacuation; control of ventilation velocity; HRR; PHOENICS

## 0 引言

人员逃生与公路隧道火灾温度场、烟气场及控制风速<sup>[1-4]</sup>关系密切。目前,国内长安大学公路隧道安全研究所结合隧道火灾后的温度场、烟雾场、有害气体等诸多因素对人员逃生做了一系列的试验、公式推导、计算及数值模拟分析。周勇狄<sup>[5]</sup>在其硕士论文中模拟了火灾后长隧道的温度场分布,研究了在隧道火灾高温下人员逃生情况。赵峰<sup>[6]</sup>在其博士论文中构建了新的人员逃生疏散模型,并提出采用 Crane 高温气体及 Puser 窒息气体模型联合作为人员逃生条件。卫巍<sup>[7]</sup>着重研究了火灾烟雾场中人员逃生情况。要忠茹<sup>[8]</sup>考虑了烟雾与温度对人体等效伤害原则,研究了在火灾烟雾与温度共同作用下的人员逃生情况。王东<sup>[9]</sup>依托厦门翔安海底隧道给出在 20 MW 火灾规模下纵向控制风速应不小于 3 m/s,而在 30 MW 下应不小于 4 m/s。吕勇<sup>[10]</sup>结合蒙特卡洛方法,对火灾下人员逃生不确定性问题进行了研究分析。汪文兵<sup>[11]</sup>结合高温及 CO 二者影响给出了一种新的人员逃生依据,并给出了在隧道不同特征位置处人员疏散风险及时间。1991 年, Fletcher 等<sup>[12]</sup>基于 CFD 软件模拟,分析了纵向通风条件下的火灾发展情况及蔓延趋势,同时研究出火灾温度场分布。2000 年, Wu 等<sup>[13]</sup>基于不同工况模型试验,得出临界风速正比于火源释放率的 1/3 次方,并给出了预测公式。2003 年, Jojo 等<sup>[14]</sup>采用 Phoenix 软件,比较研究了不同形式下通风排烟效果。

目前,国内外诸多学者结合试验及数值模拟在隧道火灾及其温度场、烟雾场及临界风速方面研究成果较多、意义重大,但仍存在不足与疑问:一是并未将人员逃生与隧道火灾研究进行有机结合,火灾下人员逃生研究较为薄弱;二是较少学者考虑了在不同断面形式、不同车道数量、不同断面面积、不同

火灾释放率以及不同入口风速共计 40 种主要常见工况下的隧道火灾及人员逃生情况;三是现有研究大多采用固定或未修正的火源热释放率值及未修正的克拉尼公式,从而影响到火灾人员逃生研究结果;四是《公路隧道通风设计细则》(JTG/TD 70/2-02-2014)中规定,在火源释放率为 20 MW 时控制风速范围为 2.0 m/s~3.0 m/s,30 MW 时为 3.0 m/s~4.0 m/s,此时加入人员逃生条件在不同火灾工况下控制风速到底该取多少<sup>[15]</sup>?

带着以上问题及疑问,本研究拟构建矩形、圆形及马蹄形断面下二、三及四车道 9 种计算模型,选取大客车(20MW)及无载重货车(30MW)2 种火源释放率,将选取 2.0 m/s、2.5 m/s、3.0 m/s、3.5 m/s 及 4.0 m/s 的入口风速共计 40 种主要常见火灾工况,采用 PHOENICS 软件进行数值模拟<sup>[16]</sup>,望能对以上不足及问题进行有效研究。

## 1 火源热释放率及人员逃生条件

### 1.1 火源热释放率

火源热释放率对公路隧道火灾控制风速计算起着控制性的作用,国内外学者针对火灾发生后的发展、稳定及衰减三阶段给出了线性、平方以及指数三种经典火源释放率模型。本研究采用长安大学杨涛<sup>[17]</sup>提出的结合 Ingason.H 热释放率数学模型并基于火源热释放误差最小原理所给出的修正热释放率公式及曲线。图 1、式(1)为大客车(20 MW)火源热释放率曲线及分段函数表达式,图 2、式(2)为无载重货车(30 MW)火源热释放率曲线及分段函数表达式。

$$Q = \begin{cases} f_1(t) = 0.47t^2 & (t \leq 6.5 \text{ min}) \\ f_2(t) = 20 & (6.5 \leq t \leq 13.5 \text{ min}) \\ f_3(t) = 20e^{[-0.04 \times (t-13.5)]} & (13.5 \leq t \leq 120 \text{ min}) \end{cases} \quad (1)$$

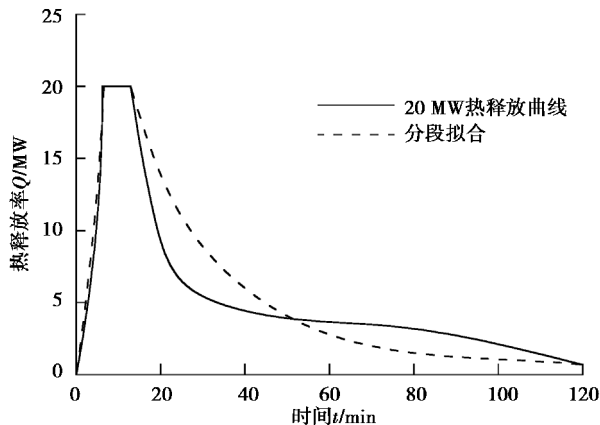


图1 20 MW 火源热释放率曲线

Fig. 1 HRR curves of 20 MW fire source

$$Q = \begin{cases} f_1(t) = 0.71t^2 & (t \leq 6.5 \text{ min}) \\ f_2(t) = 30 & (6.5 \leq t \leq 13.5 \text{ min}) \\ f_3(t) = 30e^{[-0.04 \times (t-13.5)]} & (13.5 \leq t \leq 120 \text{ min}) \end{cases} \quad (2)$$

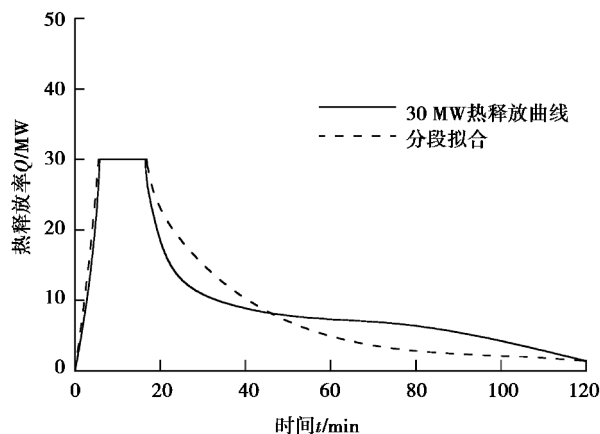


图2 30 MW 火源热释放率曲线

Fig. 2 HRR Curve of 30 MW fire source

当火源释放率为 20 MW、30 MW 时,其具体的火灾发展过程如下表 1。

表1 火源热释放率发展过程

Table 1 Development process of HRR

热释放率/MW	增长/min	持续/min	下降/min	累计/min	火荷载/GJ
20	6.5	7	106.5	120	42.96
30	6.5	7	106.5	120	65.99

## 1.2 公路隧道火灾高温条件下人员逃生条件

### 1.2.1 纵向通风对人体高温承受极限的影响

本研究基于(纵向通风风速-火源相对距离-极限承受温度)三者的关系<sup>[18]</sup>(如图 3)来确定某一

工况下逃生人员的极限忍受温度。研究表明:在通风条件下人体所能承受的极限温度值会随着风速的提高而升高。已有研究得出,在纵向风速为 24 m/s 的条件下,人体所承受的极限荷载为 300 ℃,但在无纵向通风时该值为 100 ℃。

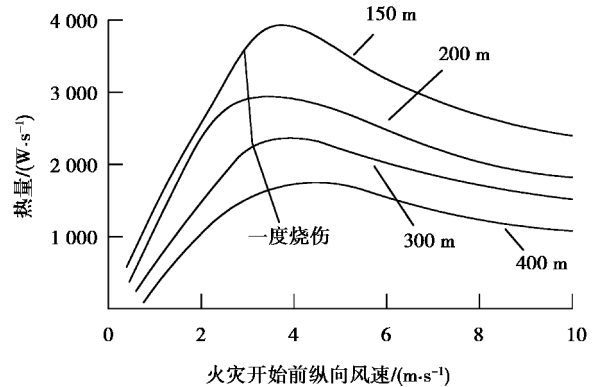


图3 热量—纵向风速—相对位置关系曲线图

Fig. 3 Relationship curves of heat-longitudinal wind speed-relative position

### 1.2.2 确定人体高温忍受时间公式

控制风速需考虑其采用后对火灾温度场的有效抑制作用。长安大学周勇狄硕士论文研究中在克拉尼给出的高温环境中健康着装成年男子的极限承受时间关系式基础上考虑空气湿度的影响,对公式做出了修正得出克拉尼修正公式<sup>[5]</sup>,修正后曲线如图 4 所示。本研究采用该公式确定火灾高温及纵向通风条件下人员忍受时间。

$$t = \frac{3.28 \times 10^8}{T^{3.61}} \quad (3)$$

式中: $T$ 为环境温度,℃; $t$ 为高温下人体极限承受时间。

然而人员在逃生过程中距离火源位置是不断变化的,长安大学王永东<sup>[19]</sup>在其博士论文中给出了动态逃生人员高温忍受时间。

$$\bar{t} = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (t_i + t_{i+1}) \quad (4)$$

通过式(4)可算出从  $i$  分钟开始,人员从  $L_i$  逃至  $L_n$  处的平均忍受时间,式中  $t$  仍采用式(3)进行计算。

### 1.2.3 人员逃生条件

本研究选取在火灾发生 1 min 后,人员以 1 m/s 进行疏散。如果在这过程中,人员对高温的忍受时间大于逃生时间,则认为在高温条件下人员可以安全逃生,否则不能安全逃生。

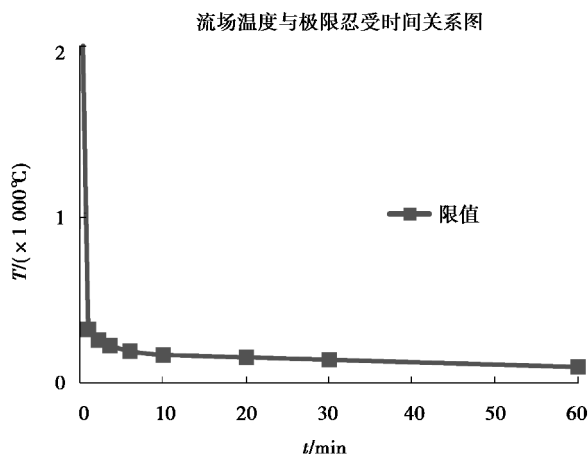


图 4 修正后的克拉尼曲线

Fig. 4 Modified Krani curve

## 2 构建有限元计算模型

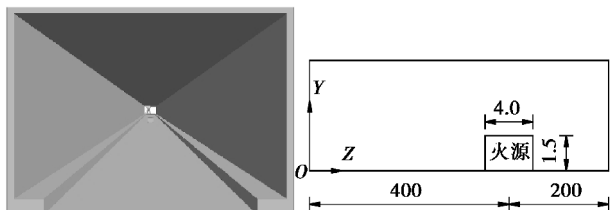
### 2.1 计算模型

本研究 9 种模型选取长度均为  $L=600$  m,  $Z=0$  m 为隧道入口,  $Z=600$  m 为隧道出口, 火源发生于  $Z=400$  m 处, 进行火灾发生后一定入口风速下温度场、烟雾场及人员逃生时间的研究。其中:

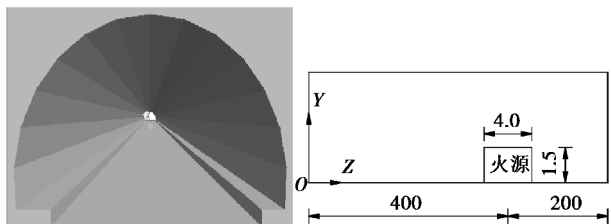
(1) 矩形断面 2、3、4 车道模型的单元数及断面积依次为: 24 960 个,  $7.5$  m $\times$  $11.25$  m; 31 200 个,  $7.5$  m $\times$  $15.25$  m; 41 600 个,  $7.5$  m $\times$  $19$  m, 如图 5(a)。

(2) 圆形断面 2、3、4 车道模型的单元数及断面积依次为: 24 960 个,  $7.425$  m $\times$  $11.65$  m; 37 440 个,  $8.7$  m $\times$  $15$  m; 57 200 个,  $10.476$  m $\times$  $18.675$  m, 如图 5(b)。

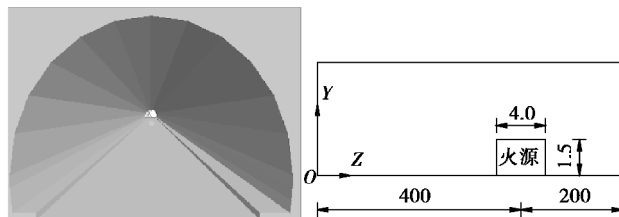
(3) 马蹄形断面 2、3、4 车道模型的单元数及断面积依次为: 21 840 个,  $6.3$  m $\times$  $11.6$  m; 37 440 个,  $8.6$  m $\times$  $15$  m; 57 200 个,  $10.4$  m $\times$  $18.6$  m, 如图 5(c)。



(a) 矩形断面



(b) 圆形断面



(c) 马蹄形断面

图 5 各断面二车道计算模型

Fig. 5 Calculation models of two lanes for each section

### 2.2 计算参数

本研究采用计算参数如下: 选取火源尺寸为立方体块  $4$  m $\times$  $1.5$  m $\times$  $1.7$  m, 火灾发生在  $Z=400$  m 处。隧道壁面确定为固体壁面边界且其粗糙系数为  $0.02$ 。隧道内部的空气参数为: 空气温度为  $20$  °C (即  $T(k)=293.15$ ), 空气密度为  $0.9$  kg/m $^3$ , 运动粘滞系数取  $1.544 \times 10^{-5}$ , 浮升加速度为  $9.8$  m/s $^2$ , 比热系数为  $1005$ , 热膨胀系数为  $0.00341$ , 火源燃烧  $30$  min。

### 2.3 基本假设及边界条件

隧道通风中假设内部空气流动具有 3 个特点: 稳定流、连续介质、不可压缩性。边界条件中设定出口条件不影响计算, 入口条件中考虑入口边界温度、入口速度、紊流动能及动能耗散率 4 个因素, 壁面为固体壁面边界且壁面速度为  $0$ 。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 典型工况计算结果与分析

基于人员逃生公路隧道火灾控制风速研究项目中, 建立了矩形、圆形及马蹄形断面下二、三及四车道 9 种计算模型, 选取了大客车 ( $20$  MW) 及无载重货车 ( $30$  MW) 两种火源释放率, 选取了  $2.0$  m/s、 $2.5$  m/s、 $3.0$  m/s、 $3.5$  m/s 及  $4.0$  m/s 的入口风速共计 40 种火灾工况。由于篇幅限制及实验的重复性, 此处仅取一典型工况进行计算结果与分析, 其余工况采用表格进行统计分析。

典型工况介绍: 本研究模拟火源燃烧  $30$  min, 矩形断面 2 车道, 火源释放率采用大客车燃烧 ( $20$  MW), 热释放率损失量为  $30\%$ <sup>[5]</sup>, 入口风速为  $2$  m/s, 出口风压为  $0.0$  Pa。

#### 3.1.1 计算结果

在每种工况中均选取了火源燃烧了  $t=1$  min、 $2$  min、 $3$  min、 $5$  min、 $10$  min、 $12$  min、 $20$  min、 $30$  min

下的  $z=350\text{ m}$ 、 $370\text{ m}$ 、 $390\text{ m}$ 、 $400\text{ m}$ 、 $410\text{ m}$ 、 $430\text{ m}$ 、 $450\text{ m}$ 、 $480\text{ m}$ 、 $530\text{ m}$ 、 $580\text{ m}$  处共 80 个特征温度值,其曲线如图 6。火源处燃烧 5 min、12 min、30 min 的中轴面的温度云图如图 7。火源处燃烧 5 min、12 min、30 min 的中轴面的烟雾云图如图 8。火源处燃烧 5 min、12 min、30 min 的横断面温度云图如图 9。

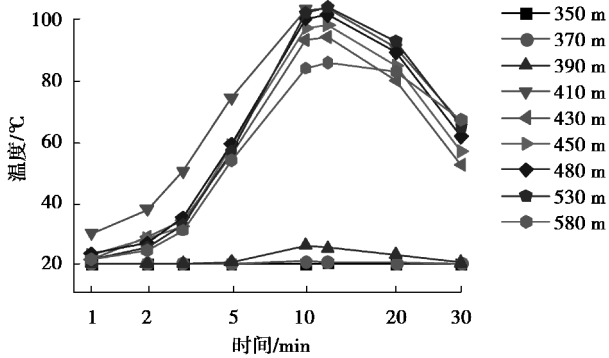


图 6 矩形断面特征位置温度曲线图

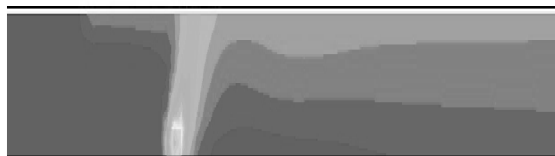
Fig. 6 Temperature profile of the rectangular section characteristic positions



(a)  $t=5\text{ min}$



(b)  $t=12\text{ min}$



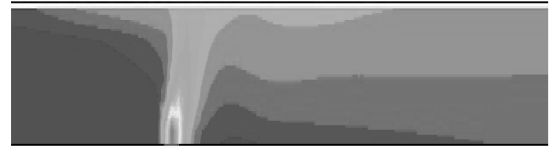
(c)  $t=30\text{ min}$

图 7 5 min、12 min、30 min 矩形断面中轴面处温度场

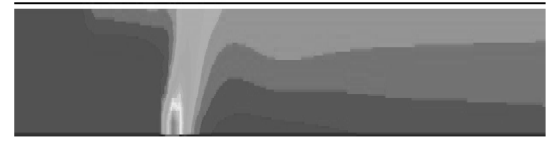
Fig. 7 5 min, 12 min, 30 min temperature field in the rectangular section axial plane



(a)  $t=5\text{ min}$



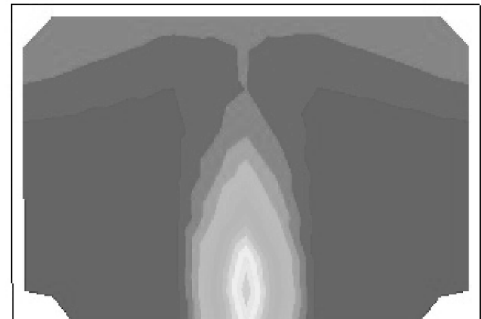
(b)  $t=12\text{ min}$



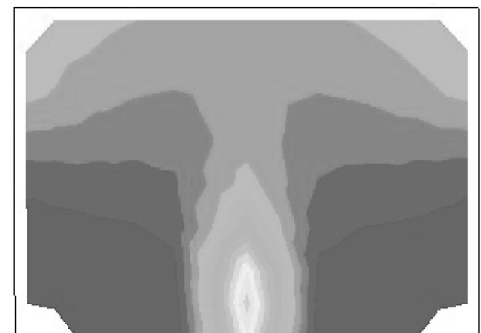
(c)  $t=30\text{ min}$

图 8 5 min、12 min、30 min 矩形断面中轴面处烟雾场

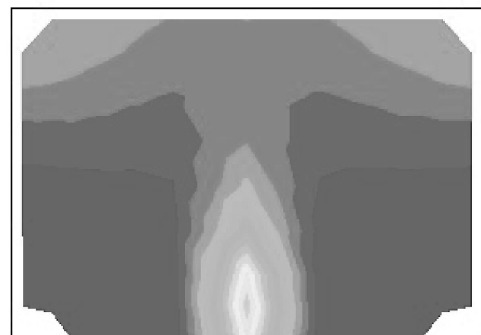
Fig. 8 5 min, 12 min, 30 min smoke field in the rectangular section axial plane



(a)  $t=5\text{ min}$



(b)  $t=12\text{ min}$



(c)  $t=30\text{ min}$

图 9 5 min、12 min、30 min 矩形断面火源处横断面温度场

Fig. 9 5 min, 12 min, 30 min temperature field in the rectangular section fire source cross-section



通过之前给出的高温人员忍受时间及火灾下人员逃生情况,计算得出在火源上下游对应位置  $z=10\text{ m}$ 、 $30\text{ m}$ 、 $50\text{ m}$ 、 $80\text{ m}$  共 8 个特征位置处的人员忍受时间  $t_A$  及逃生时间  $t_E$  (其量纲为 min),如表 2。

表 2 矩形断面各特征位置人员高温忍受与逃生时间

Table 2 Tolerance and evacuation time of high temperature of the rectangular section characteristic locations

对应位置 $z/\text{m}$		10	30	50	80	
下游	0-z	$t_{\text{A}}$	299.9	592.7	758	813.6
		$t_{\text{E}}$	0.17	0.5	0.84	1.67
上游	0-z	$t_{\text{A}}$	3171.3	2720.7	1819.3	3 171.3
		$t_{\text{E}}$	0.17	0.5	0.84	1.67

3.1.2 结果分析

(1)由火灾中轴面温度场图 7 可知:纵向通风风速为  $2\text{ m/s}$  对于火源上游温度场的抑制起到了作用。但是在火灾的整个过程中,火源上游均有温

度场回流,因此  $2\text{ m/s}$  并不能有效控制火灾温度场。

(2)由火灾中轴面烟雾场图 8 可知:在火灾发展的初期, $2\text{ m/s}$  可以将较小的烟雾进行完全抑制,但随着火势的发展上游会产生烟雾回流,因而  $2\text{ m/s}$ 也不能有效控制火灾烟雾场。

(3)由选取的 10 个特征位置处的 8 个时刻温度值曲线图及火源处横断面温度场图 9 可得出:各特征位置的温度变化仍然经历了发展(约  $10\text{ min}$ )、稳定(约  $2\text{ min}$ )、下降(约  $18\text{ min}$ )三个阶段,与火源热释放过程类似。在火源发展、稳定、下降的各个过程中,火源上部均存在高温场,火源处温度上升最快,在  $10\text{ min}$  时达到  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4)基于之前的高温人体平均忍受时间及给出的人员逃生条件,计算得出在火源上下游  $10\text{ m}$ 、 $30\text{ m}$ 、 $50\text{ m}$ 、 $80\text{ m}$  处人员的忍受及逃生时间如表 2。由表 2 可知,在每个位置处忍受时间均远大于逃生时间,因而无论人员从火源上游还是下游均可安全逃离。

表 3 各工况计算结果统计表

Table 3 The calculation results TAB of each working condition

工况 序号	断面 形式	车 道	火灾 规模 /MW	入口 风速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	火源处 10 min 温度值/ $^{\circ}\text{C}$	距火源 10 m 处逃生与 忍受时间/min			高温下 是否能安 全逃生	烟雾是 否回流	温度是 否回流	是否为控 制风速
						位置	$t_A$	$t_E$				
1				2.0	380.0	上游	3 171.3					
						下游	299.9			是	是	否
2	矩 形	2	20	3.0	392.3	上游	3 333.4	0.17	是	否	否	是
						下游	296.9					
3				2.5	378.7	上游	3 324.2					
						下游	438.4			是	是	否
4				3.0	491.3	上游	3 310.9					
						下游	240.3			是	是	否
5	矩 形	2	30	4.0	401.4	上游	3 322.1	0.17	是	否	否	否
						下游	117.7					
6				3.5	514.1	上游	3 315.5					
						下游	162.6			否	否	是

续表3

工况 序号	断面 形式	车道	火灾 规模 /MW	入口 风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	火源处 10 min 温度值/℃	距火源 10 m 处逃生与 忍受时间/min			高温下 是否能安 全逃生	烟雾是 否回流	温度是 否回流	是否为控 制风速
						位置	t <sub>A</sub>	t <sub>E</sub>				
7				2.0	233.5	上游	3 375.2			是	是	否
						下游	115.6					
8	矩 形	3	20	3.0	399.8	上游	3 332.7	0.17	是	否	否	否
						下游	303.2					
9				2.5	389.0	上游	3 326.7			否	否	是
						下游	453.2					
10				3.0	504.4	上游	3 326.7			是	是	否
						下游	453.2					
11	矩 形	3	30	4.0	509.7	上游	3 321.5	0.17	是	否	否	否
						下游	121.6					
12				3.5	518.1	上游	3 321.5			否	否	是
						下游	121.6					
13	矩 形	4	20	2.0	398.8	上游	3 316.9			是	是	否
						下游	666.9					
14				2.5	401.5	上游	3 332.2	0.17	是	否	否	是
						下游	307.7					
15	矩 形	4	30	3.0	514.3	上游	3 310.7			是	是	否
						下游	254.3					
16				3.5	519.2	上游	3 315.0	0.17	是	否	否	是
						下游	171.2					
17	圆 形	2	20	3.0	384.5	上游	3 354.5			是	是	否
						下游	308.9					
18				3.5	390.8	上游	3 375.2	0.17	是	否	否	是
						下游	152.8					
19	圆 形	2	30	3.5	508.2	上游	3 325.2			是	是	否
						下游	86.4					
20				4.0	511.1	上游	3 334.4	0.17	是	否	否	是
						下游	74.3					

续表3

工况 序号	断面 形式	车 道	火灾 规模 /MW	入口 风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	火源处 10 min 温度值/℃	距火源 10 m 处逃生与 忍受时间/min			高温下 是否能安 全逃生	烟雾是 否回流	温度是 否回流	是否为控 制风速
						位置	t <sub>A</sub>	t <sub>E</sub>				
21	圆 形	3	20	3.0	303.7	上游	3 356.3	0.17	是	是	是	否
						下游	334.2					
22						上游	3 326.1					
						下游	96.2					
23	圆 形	3	30	3.0	390.1	上游	3 316.1	0.17	是	是	是	否
						下游	122.3					
24						上游	3 326.1					
						下游	91.5					
25	圆 形	4	20	3.0	395.7	上游	3 349.4	0.17	是	是	是	否
						下游	179.3					
26						上游	3 369.0					
						下游	150.1					
27	圆 形	4	30	3.0	511.5	上游	3 309.2	0.17	是	是	是	否
						下游	284.6					
28						上游	3 324.3					
						下游	92.0					
29	马 蹄 形	2	20	3.0	389.9	上游	3 325.8	0.17	是	是	是	否
						下游	199.7					
30						上游	3 366.4					
						下游	219.0					
31	马 蹄 形	2	30	3.5	509.3	上游	3 326.1	0.17	是	是	是	否
						下游	87.9					
32						上游	3 342.8					
						下游	137.2					
33	马 蹄 形	3	20	3.0	393.9	上游	3 354.9	0.17	是	是	是	否
						下游	187.6					
34						上游	3 371.8					
						下游	151.8					



续表3

工况 序号	断面 形式	车 道	火灾 规模 /MW	入口 风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	火源处 10 min 温度值/℃	距火源 10 m 处逃生与 忍受时间/min			高温下 是否能安 全逃生	烟雾是 否回流	温度是 否回流	是否为控 制风速							
						位置	<i>t</i> <sub>A</sub>	<i>t</i> <sub>E</sub>											
35	马 蹄 形	3	30	3.0	498.8	上游	3 318.6	0.17	是	是	是	否							
						下游	127.0												
36						马 蹄 形	3			30	3.5	513.7	上游	3 325.9	0.17	是	否	否	是
													下游	92.1					
37	马 蹄 形	4	20	3.0	395.8			上游	3 349.4				0.17	是			是	是	否
								下游	179.3										
38						马 蹄 形	4	20	3.5	396.4	上游	3 369.4			0.17	是	否	否	是
											下游	151.0							
39	马 蹄 形	4	30	3.0	367.4						上游	3 317.5	0.17	是			是	是	否
											下游	93.3							
40						马 蹄 形	4	30	3.5	519.5	上游	3 324.6			0.17	是	否	否	是
											下游	92.7							

4 结论

(1) 基于人员安全逃生条件,在公路隧道发生火灾后,矩形断面隧道在火源释放率为 20 MW 时二车道纵向控制风速为 3.0 m/s,三、四车道均为 2.5 m/s;30 MW 时二、三、四车道控制风速均为 3.5 m/s。圆形与马蹄形断面隧道在火源释放率为 20 MW 时,二、三、四车道纵向控制风速均为 3.5 m/s,30 MW 时二车道控制风速均为 4.0 m/s,三、四车道均为 3.5 m/s。

(2) 对于公路隧道火灾规模为 20 MW 及 30 MW 的工况下,在火灾发生 1 min 后人员以 1 m/s 进行疏散,无论从上游或是从下游均可以安全逃生,且高温条件下人员逃生时间较充分。

(3) 由各工况下不同时间各特征点的温度值统计汇总可得出:在火灾发展过程中,不同特征点位置处温度场的变化与火源发展过程类似仍然满足发展、稳定以及衰减三个过程阶段,而且随着与火源距离不断增大,温度场呈现出衰减趋势。由于纵向通风导致下游温度高于上游,且在下游距离火源 100 m 处温度会出现升高现象。

(4) 对于同火灾规模当矩形断面积小于圆形及马蹄形断面工况,计算所得的控制风速却比后者小,因而可得出隧道断面形式对火灾控制风速有着非常重要的影响。故可得出:在同条件下,矩形断面形式隧道或将更有利于火灾控制、人员逃生和救援。

(5) 本研究考虑了纵向通风对人体极限温度承受值的影响,并基于修正后的动态火源释放率曲线及克拉尼曲线考虑多种工况所得结果对《公路隧道通风设计细则》(JTG/TD 70/2-02—2014)及王东的研究成果进行了对比验证与细化补充,使得基于人员逃生条件下的控制风速值更加准确,火灾救援得到有效保障,同时节约很多资源。

参考文献 (References)

[1] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35 (4): 363-390.

[2] Lee S R, Ryou H S. A numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio[J]. Building and Environment,

- 2006, 41(6): 719-725.
- [3] 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 中南大学. 狮子洋水下隧道综合防灾与运营管理技术研究[R]. 2009.(China Railway Siyuan Survey and Design Group, Central South University. Comprehensive disaster prevention and operation management technology of Shiziyang underwater tunnel[R]. 2009.(in Chinese))
- [4] 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 Nianhao. Study on variation law of the critical velocity in two-lane highway tunnel fire[D]. Changsha: Central South University, 2012.(in Chinese))
- [5] 周永狄. 长大公路隧道火灾数值模拟及逃生研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.(Zhou Yongdi. Study on the numerical simulation and safety evacuation in long highway tunnel fire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.(in Chinese))
- [6] 赵峰. 公路隧道运营风险评估及火灾逃生研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.(Zhao Feng. Study on operating risk assessment and fire evacuation for road tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.(in Chinese))
- [7] 卫巍. 长大公路隧道火灾烟气数值模拟及逃生研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.(Wei wei. Study on the numerical simulation and safety evacuation in long highway tunnel fire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.(in Chinese))
- [8] 要忠茹. 地铁站台及区间火灾数值模拟及逃生研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.(Yao Zhongru. Study on the numerical simulation and safety evacuation in subway station and tunnel fire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.(in Chinese))
- [9] 王东. 基于温度和CO影响下的公路隧道火灾人员逃生研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.(Wang Dong. Study on the fire safety evacuation considering the temperature and carbon monoxide of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.(in Chinese))
- [10] 吕勇. 公路隧道火灾人员逃生不确定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.(Lü Yong. Study on the uncertainty of fire personnel escape of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.(in Chinese))
- [11] 汪文兵. 公路隧道火灾人员逃生及安全疏散设施研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.(Wang Wenbing. Study on the fire safety evacuation and evacuation facilities of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.(in Chinese))
- [12] Apte V B, Green A R, AnKent J H. Pool fire plume flow in a large-scale wind tunnel[A] // Proceedings of the 3rd symposium(Int.) on fire safety science. Elsevier [C]. London, 1991: 425-434.
- [13] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(4): 363-390.
- [14] Jojo S M, Chow W K. Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(5): 435-452.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道通风设计细则(JTG/TD70/2-02-2014)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.(Ministry of Transport of the People's Republic. Guidelines for design of ventilation of highway tunnel (JTG/TD70/2-02-2014) [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.(in Chinese))
- [16] 师江涛. 基于人员逃生公路隧道火灾控制风速研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.(Shi Jiangtao. Study on the control of ventilation velocity of fire in highway tunnel based on the safety evacuation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.(in Chinese))
- [17] 杨涛. 公路隧道火灾热释放率及通风方式研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.(Yang Tao. Study on the fire heat release rate and ventilate of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.(in Chinese))
- [18] Alfred H. 交通隧道中的火灾安全概念[A] // 中瑞公路隧道技术交流[C]. 2001: 45-48.(Alfred H. Fire safety concept in traffic tunnel[A] // Sino-Swiss Road Tunnel Technical Exchange [C]. 2001: 45-48.(in Chinese))
- [19] 王永东. 公路隧道运营安全技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.(Wang Yongdong. Study on operating safety technology of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.(in Chinese))