

# 公路隧道火灾时的人员逃生研究

夏永旭<sup>1</sup> 周勇狄<sup>1 2</sup> 王永东<sup>1</sup>

(1. 长安大学, 陕西西安 710064 2. 广西交通科学研究院, 广西南宁 530023)

摘要: 火灾是公路隧道最为严重的灾害之一。分析克拉尼提出的高温条件下人员逃生公式, 结合公路隧道火灾时的人员逃生情况, 对克拉尼公式进行修正。采用有限元数值模拟方法, 详细地研究典型隧道结构段在不同环境风速、不同火灾规模时隧道内的温度场; 以修正后的隧道火灾人员逃生公式为判别条件, 给出隧道内人员可能逃生的位置和消防救援的安全位置。所得结果对公路隧道灭火救灾预案的编制提供重要的技术支持。

关键词: 隧道火灾; 人员逃生; 判断条件; 消防救援; 安全位置

中图分类号: U458 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X(2009)08-0115-09

## A study of people escape in highway tunnel fires

Xia Yongxu<sup>1</sup> Zhou Yongdi<sup>1 2</sup> Wang Yongdong<sup>1</sup>

(1. Chang'an University Xi'an 710064, China

2. Research Institute of Highway Traffications of Guangxi Nanning 530023, China)

Abstract: Fire is definitely one of the most serious accidents that may occur in highway tunnels. The Crane's formula which is used for high temperature cases is analyzed and modified through combining actual fire conditions. Using the finite element method, the temperature field of a typical tunnel segment with different wind speeds and fire scales is studied. With the modified Crane's formula adopted as the criterion, the probable escape region and the safe region for fire control and rescue are calculated. These results may serve as technical support of countermeasure plans for fire control and rescue operations in highway tunnels.

Keywords: highway tunnel fire; people escape; criterion; fire control and rescue operation; safe location

E-mail: yongxuxj@126.com

## 引言

随着交通事业的发展、车流密度的增长和行车速度的提高, 装有各种可燃物质车辆通过隧道数量和频率的增长, 隧道火灾发生的概率呈上升趋势。据日本全国统计, 每年公路隧道发生火灾事故在 4000 ~ 5000 起, 居所有灾害事故之首。1999 年法国及意大利的勃朗峰隧道火灾、奥地利的陶恩隧道火灾以及 2001 年的瑞士圣哥答隧道火灾更是令世界震惊。公路隧道内一旦发生火灾, 往往造成灾难性事故, 损失惨重。因此, 有关公路隧道火灾与逃生研究已经成为长大隧道设计及运营管理亟需解决的关键问题之一。

## 1 隧道火灾时的逃生条件

### 1.1 克拉尼 (Crane) 公式

对于健康的着装成年男子, 克拉尼 (Crane) 推荐

了在高温环境中其极限忍受温度与时间的关系式为<sup>[1]</sup>

$$t = \frac{4.1 \times 10^8}{\left( \frac{T - B_1}{B_2} \right)^{3.61}} \quad (1)$$

式中:  $t$  为高温环境下的极限忍受时间 (min);  $T$  为空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $B_1$  为常数 (一般取 10);  $B_2$  为常数 (一般取 0)。此外, 该公式没有考虑空气湿度的影响, 当湿度增大时, 人的极限忍受时间降低。由于人耐高温环境的能力差异很大, 在应用该公式时, 应考虑一个安全系数, 安全系数可设为 0.8。此时, 式 (1) 可表示为:

$$t = \frac{3.22 \times 10^8}{T^{3.61}} \quad (2)$$

根据式 (2), 可得出人员忍受时间与温度的关系, 如图 1 所示。我们把图中的曲线称之为“死亡曲线”。从图可以看出, 如果隧道发生火灾时, 当隧道内某位置的温度场随时间变化值始终位于极限忍受温度曲线的下方, 那么该位置将是安全的, 当温度变化值位于曲线上方时, 为死亡区域。

资助项目: 交通部行业联合科技攻关项目 (20033531404)

作者简介: 夏永旭, 博士, 教授

收稿日期: 2008-03-19

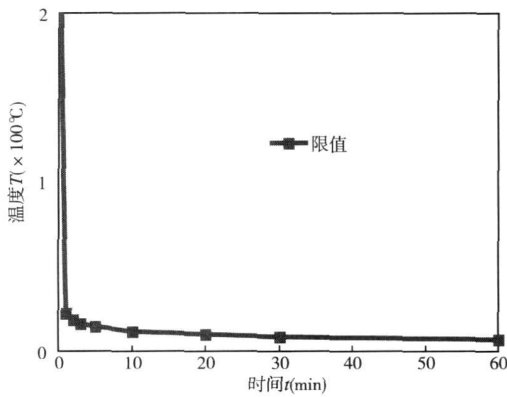


图 1 人员忍受时间与温度的关系图

Fig 1 Relationship between temperature and personnel endurance time

### 1.2 对克拉尼 (Craneey)公式的修正

仔细分析图 1 可以知道, 对于公路隧道火灾时人员逃生而言, 假设某一时刻某人所处地点的温度值落在死亡曲线上方, 但并不意味此人就不能生存。因为图 1 的极限忍受时间是指人在这种温度下能坚持的时间, 而隧道内人员在逃生过程中并没有一直都处在该温度之中。显然, 隧道内的温度曲线与死亡曲线的交点值不能作为隧道内人员能够安全逃生与否的临界值。

为了解决这个矛盾, 我们必须对式 (2) 进行修改。如果隧道的火灾发生在第  $t_0$  分钟 (取当天的 00:00:00 为 0 分钟), 取隧道内所有人员的逃生反应时间为 1 分钟, 假设  $t_0+1$  分钟后, 在隧道内的  $L_1$  处某人开始准备逃生到  $L_n$  处。而在根据公式 (2) 他在  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$  各处所能忍受的时间分别为  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 。如果我们每段的长度取的足够小, 再将此人逃生过程在不同位置所能忍受时间  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  的相邻两个时间段求和平均, 最后可以得到此人从  $L_1$  处通过  $L_2, L_3, \dots, L_{n-1}$ , 逃到  $L_n$  处平均的能够忍受时间为

$$t = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (t_i + t_{i+1}) \quad (3)$$

而其中的  $t_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$  仍然通过公式 (2) 计算。

### 1.3 隧道火灾时人员逃生的条件

根据 Shields 等试验得知<sup>[2]</sup>, 当隧道内发生火灾时, 75% 人员在听到火灾警报后的 15~40 s 才开始移动。另外, 人在隧道内的正常疏散速度为 1.5 m/s, 但在有烟气的环境下可能只有 1 m/s<sup>[3]</sup>。由于隧道火灾中的环境比一般建筑环境要恶劣, 本文取人员逃生反应时间为 60 s, 逃生速度为 1 m/s。

火灾时隧道内的高温对人体具有较强的危害性。人处在高温环境中, 先是口干舌燥、软弱无力、痛苦煎

熬, 同时思维活动受到强烈干扰、减慢, 进而眩晕、混乱, 直到昏迷休克猝然倒下。文献 [4-5] 曾给出了高温下人能够忍受的时间, 见表 1。这里我们根据式 (2) 可以得出人员忍受时间与温度的关系, 如表 2 所示。

表 1 高温下人能够忍受的时间

Table 1 Limit endurance time under different temperatures

温度 (°C)	极限忍受时间 (min)
120	15 00
140	5 00
170	1 00
300~400	片刻也不能停留

表 2 高温下人能够忍受的时间

Table 2 Limit endurance time under different temperatures

温度 (°C)	极限忍受时间 (min)
120	10 23
140	5 87
170	3 37
300	0 37

从表 1 和表 2 可见, 利用式 (2) 计算的结果除了在 140° 与试验值相近外, 其余还有一定的差别。但为了更符合隧道火灾的实际情况, 本文仍将式 (2)、式 (3)、图 1 和表 2 作为隧道火灾时人员逃生的判断条件。

## 2 隧道模型以及火灾规模

### 2.1 隧道几何模型

以某公路隧道为计算, 计算范围为一标准的两个逃生通道之间的长度 700 m, 隧道横断面高 7.25 m, 宽 10.98 m, 如图 2 所示。将火源中心所在断面取为直角坐标系中的  $z=0$  平面, 火区上游  $z=L_1=-200$  m 为计算通风入口, 火区下游  $z=L_2=500$  m 为出口边界, 入口边界条件为隧道环境风速, 出口边界条件为大气环境压力, 取为 0.0 Pa。

火源模型尺寸: 长  $\times$  宽  $\times$  高 = 4.6 m  $\times$  1.7 m  $\times$  1.5 m。

初始条件: 隧道内空气密度: 0.9 kg/m<sup>3</sup>[5]; 隧道内平均温度: 20°C; 壁面粗糙度: 0.022 m。

### 2.2 数值模拟的控制方程

数值模拟的物理模型采用目前公认最为合理、标准  $K-\epsilon$  模型, 其控制方程为

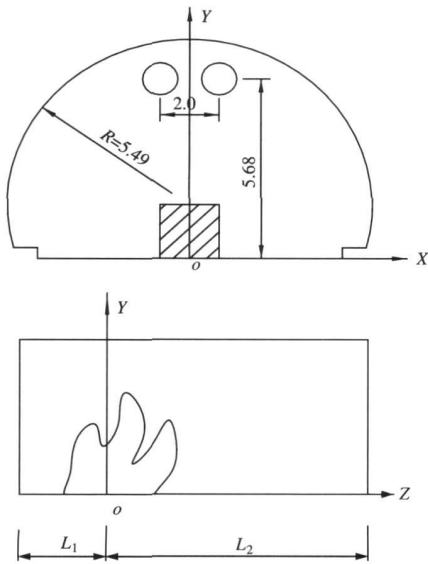


图 2 隧道横断面以及火源纵向布置图 (单位: m)  
Fig 2 Tunnel cross section and longitudinal profile of tunnel fire (unit: m)

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho u \frac{\partial K}{\partial x} + \rho v \frac{\partial K}{\partial y} + \rho w \frac{\partial K}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \epsilon + \\ &\mu \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ &\left. \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right] \quad (4) \\ \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K} \\ &+ C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{K} \\ &\left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ &\left. \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right] \quad (5) \end{aligned}$$

式中:  $u, v, w$  分别为流体的位移;  $K, \epsilon$  分别为湍流和耗散参数;  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  为紊流施密特 (Schmidt) 数, 分别取 1.0, 1.3;  $C_1, C_2$  为经验常数, 分别取 1.44, 1.92。

### 2.3 火灾规模

由于确定火灾规模时, 要考虑的因素很多, 而且大部分是非量化的, 因此要全面地考虑所有因素, 准确地预报或设定火灾规模是不容易的。目前国内外在研究公路隧道火灾时, 各种车辆燃烧的火灾大小均由赫塞尔登提供的表 3 和瑞士及挪威有关部门提供的表 4 为参考<sup>[6]</sup>。

表 3 赫塞尔登火灾规模

Table 3 Hidden's scale of fire hazard

火源	产生热量 (MW)	火灾规模
汽车 (小客车)	3	小型
货运汽车	10	中型
卡车或公共汽车	20	中型
泄漏汽油的油罐车	50~100	大型

表 4 不同车辆类型燃烧产生的热量

Table 4 Heat released by burning vehicles

车辆类型	最高温度 (°C)	最大热量释放率 (MW)
轿车	400~500	3~5
公共汽车或有轨车辆	700~800	15~20
大货车或油罐车	1000~1200	50~100
火车车厢	800~900	15~20

大量的现场观察和试验表明, 隧道火灾可分为初期、发展、稳定、衰减 4 个阶段<sup>[7]</sup>。图 3 给出了不同车辆类型在隧道火灾时的最高温度随时间的变化的统计曲线, 图 4 给出了目前通用的不同隧道温度火灾标准曲线<sup>[5]</sup>。

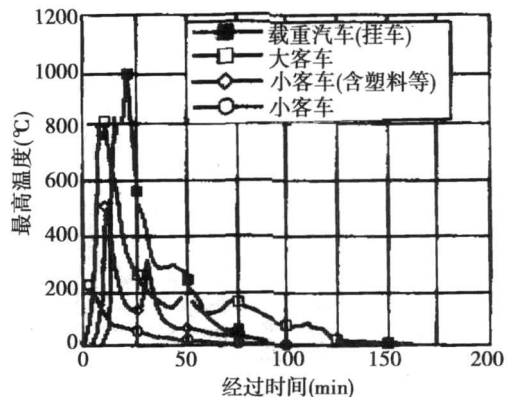


图 3 不同车辆类型的火灾温度-时间曲线

Fig.3 Temperature-time curves of different types of vehicles in fire hazard

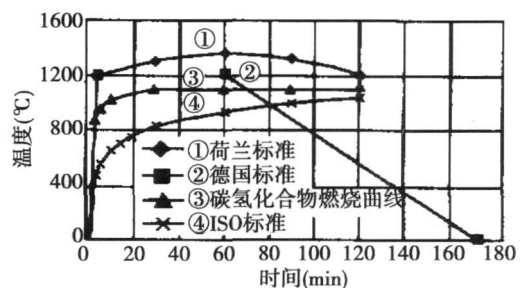


图 4 公路隧道火灾温度标准曲线

Fig.4 Temperature-time curves for standard highway tunnel fire hazard

根据表 2 表 3 以及图 3 图 4 结合公路隧道的情况, 本文分别模拟一辆小轿车着火 (5MW)、一辆大卡车和两辆相撞起火 (10MW)、三辆大卡车相撞发生火灾 (30MW), 火灾燃烧时间维持 60min 隧道入口风速分别取为 1m/s、2m/s、3m/s、4m/s、5m/s 出口相对压力为 0Pa。

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 一辆小轿车燃烧 (热释放率为 5MW)

本文的数值模拟采用 CFD-Phoenix 软件<sup>[8-9]</sup>。通过大量的数值模拟计算, 可得出一辆小轿车着火时, 隧道内不同位置、不同时刻的温度场。将模拟的结果与图 1 结合, 就可以得到一辆小轿车着火时, 隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度的关系, 如图 5~图 9 所示。

仔细分析图 5~图 9 我们可以得到不同隧道风速情况下, 隧道内人员得安全逃生和救援位置。表 5 给出了在火灾发生 1min 后, 火源上、下游有可能逃生的区域, 而火灾下游人员能够安全逃离的距离见表 6 其中黑体数字表示可以逃到下一个逃生通道的人群。表 7 是不同风速下隧道内的消防救援安全位置和安全时间。表中 3min 和 5min 分别表示火灾发生后的时间, 忍受时间表示消防人员在该救援位置能够持续的时间。

#### 3.2 一辆大卡车着火 (热释放率为 10MW)

类似地可以得出一辆大卡车着火时, 隧道内流场

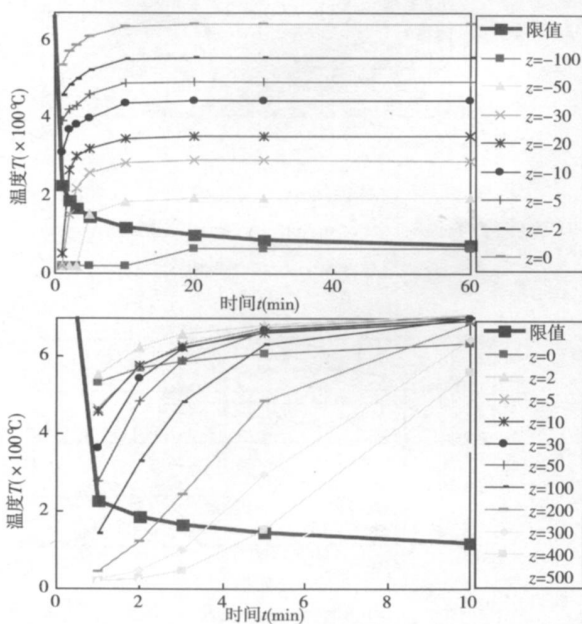


图 5  $v = 1\text{m/s}$  隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
Fig. 5 Relationship between tunnel temperature and personnel

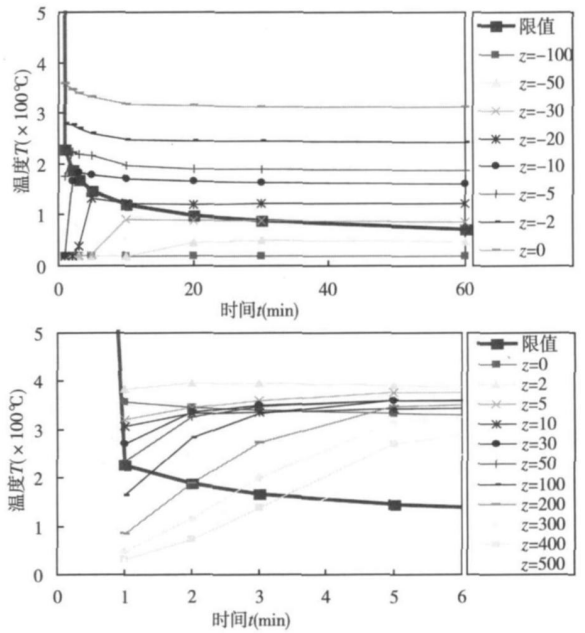


图 6  $v = 2\text{m/s}$  隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
Fig. 6 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v = 2\text{m/s}$

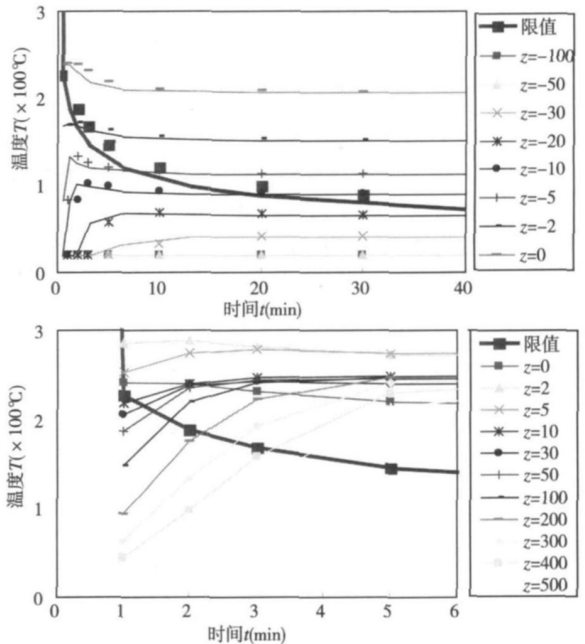


图 7  $v = 3\text{m/s}$  隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
Fig. 7 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v = 3\text{m/s}$

温度与逃生人员极限忍受温度关系图, 如图 10~图 14 所示。表 8 给出了在不同隧道环境风速下, 火灾发生 1min 后, 火源上、下游有可能逃生的区域, 而火灾下游人员能够安全逃离的距离见表 9 其中黑体数字表示可以逃到下一个逃生通道人群。表 10 是不同风速下隧道内的消防救援安全位置和安全时间, 表中 3min 和 5min 分别表示火灾发生后的时间, 忍受时间表示消防人员在该救援位置能够持续的时间。

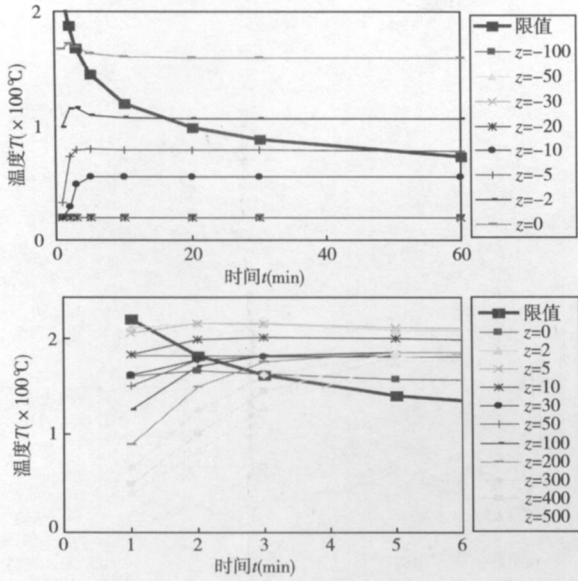


图 8  $v=4\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

Fig. 8 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v=4\text{m/s}$

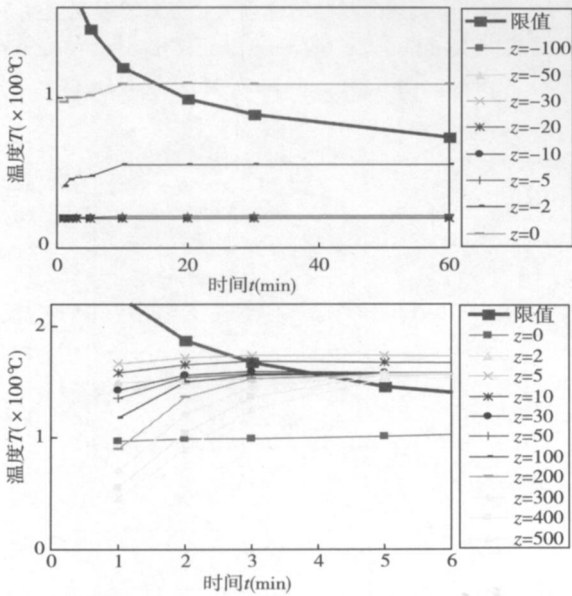


图 9  $v=5\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

Fig. 9 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v=5\text{m/s}$

表 5 火灾发生 1m 后上、下游有可能逃生的区域

Table 5 Probable escape regions upstream and downstream of fire at 1m (m)

位置 (m)	风速 (m/s)				
	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$
上游	$< -10$	$< -2$	$< 0$	$< 0$	$< 0$
下游	$> 50$	$> 50$	$> 10$	$> 0$	$> 0$

表 6 1m 后火灾下游人员可以逃离的距离

Table 6 Distances probably covered by personnel downstream of fire at 1m (m)

开始逃生位置 (m)	风速 (m/s)				
	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$
$Z=2$				$< 200$	$< 300$
$Z=5$			$< 100$	$< 200$	$< 300$
$Z=10$			$< 100$	$< 200$	$< 300$
$Z=30$			$< 100$	$< 200$	$< 300$
$Z=50$	$< 100$	$< 100$	$< 200$	$< 300$	$< 400$
$Z=100$	$> 500$	$< 200$	$< 300$	$< 400$	$< 500$
$Z=200$	$> 500$	$> 500$	$> 500$	$> 500$	$> 500$

表 7 不同风速下的安全救援位置以及安全时间

Table 7 Safe locations and time intervals for rescue under different wind speeds

对应项目	风速 (m/s)					
	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$	
上游安全位置以及安全时间 $3\text{m}$ 时	救援位置 $z(\text{m})$	-30	-10	-5	-5	-2
	忍受时间 (m) 时	1.1	2.17	8.45	45.13	$> 60$
下游安全逃生位置 $5\text{m}$ 时	安全位置 $z(\text{m})$	-50	-20	-10	-5	-2
	忍受时间 (m) 时	4.38	7.2	20.03	45.29	$> 60$
绝对安全位置 $z(\text{m})$	-100	-50	-20	-10	-2	
下游安全逃生位置 $z(\text{m})$	100	200	200	200	200	

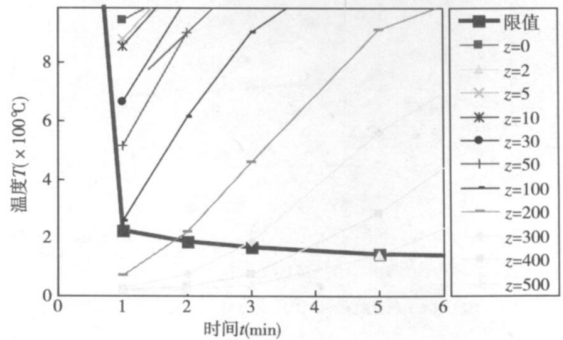
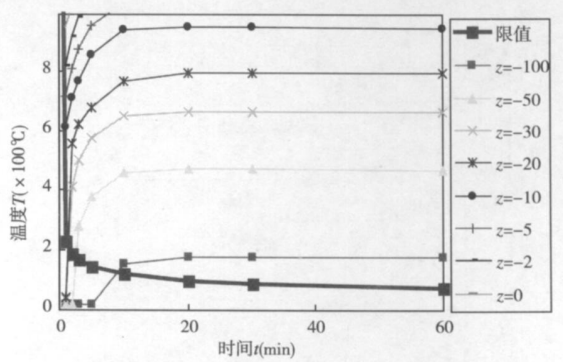


图 10  $v=1\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

Fig. 10 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v=1\text{m/s}$

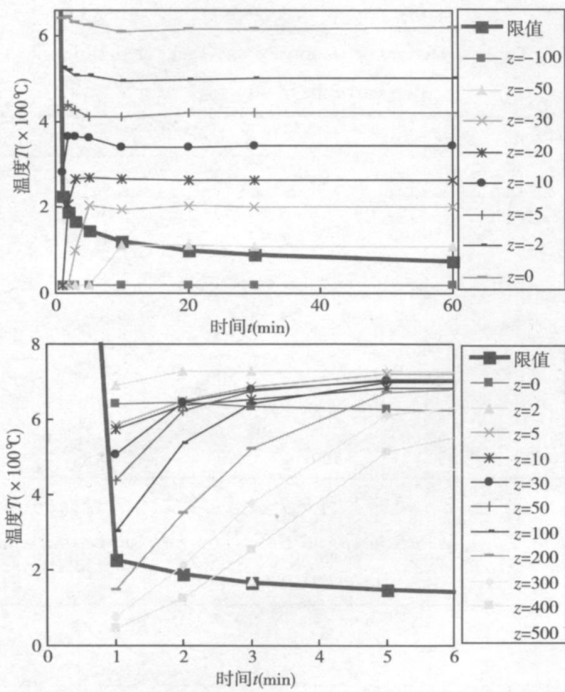


图 11  $v = 2\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
 Fig. 11 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v = 2\text{m/s}$

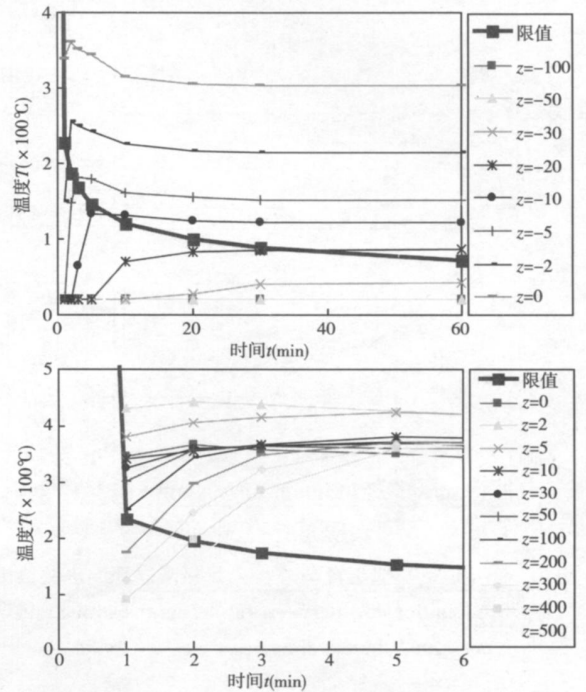


图 13  $v = 4\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
 Fig. 13 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v = 4\text{m/s}$

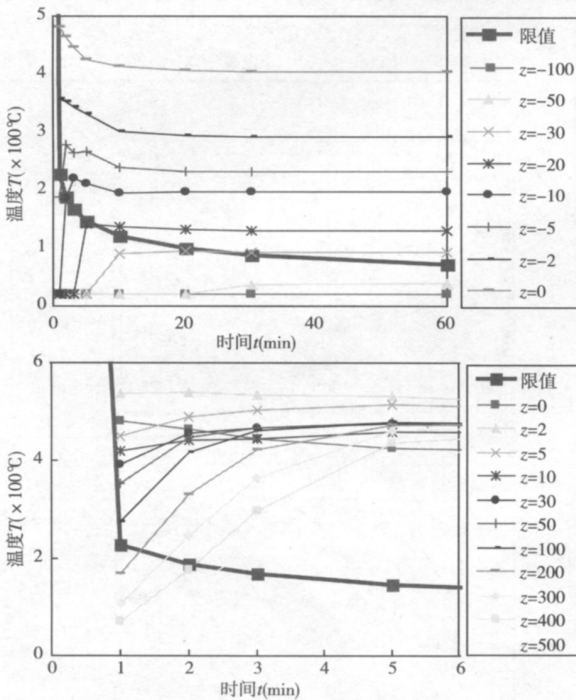


图 12  $v = 3\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
 Fig. 12 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v = 3\text{m/s}$

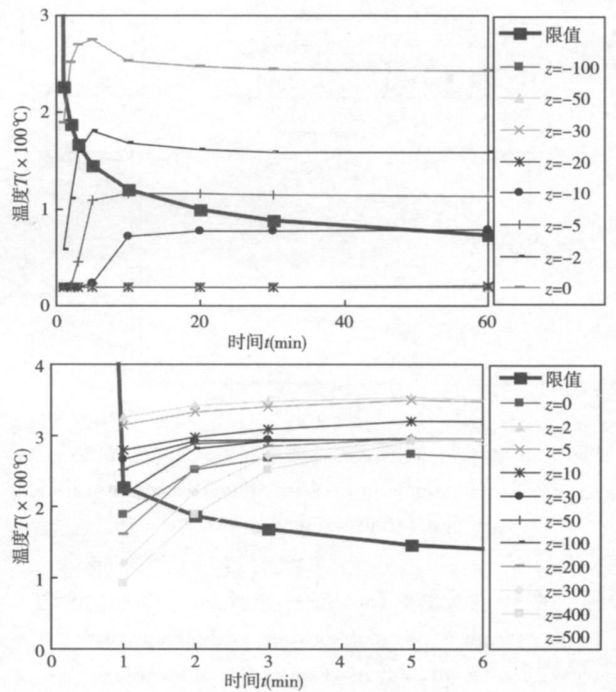


图 14  $v = 5\text{m/s}$ , 隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
 Fig. 14 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v = 5\text{m/s}$

表 8 火灾发生 1m 后上、下游有可能逃生的区域

Table 8 Probable escape regions upstream and downstream of fire at 1m in (m)

位置 (m)	风速 (m/s)				
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
上游	< -10	< -10	< -2	< 0	< 0
下游	> 100	> 100	> 100	> 100	> 50

表 9 1m 后火灾下游人员可以逃离的距离

Table 9 Distances probably covered by personnel lower downstream of fire (m)

开始逃生位置 (m)	风速 (m/s)				
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
Z=50					< 100
Z=100	< 200	< 200	< 200	< 200	< 200
Z=200	> 500	< 400	< 400	< 400	< 300
Z=300	> 500	> 500	> 500	> 500	> 500

表 10 不同风速下的安全救援位置以及安全时间

Table 10 Safe locations and time intervals for rescue under different wind speeds

对应项目	风速 (m/s)					
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5	
上游安全位置以及安全时间	救援位置 (m)	-50	-30	-20	-10	-5
	忍受时间 (min)	0.46	20.87	5.47	91.53	313.17
下游安全逃生位置	救援位置 (m)	-100	-50	-30	-20	-5
	忍受时间 (min)	8.91	18.1	26.39	72.01	14.03
绝对安全位置 z	< -100	-100	-50	-30	-20	
下游安全逃生位置 (m)	200	300	300	300	300	

3.3 二辆或者三辆大卡车相撞 (热释放率为 30MW)

同样可得出二辆或者三辆大卡车相撞着火时,隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度关系,如图 15~图 19 所示。表 11 给出了在不同隧道环境风速下,火灾发生 1m 后,火源上、下游有可能逃生的区域,而火灾下游人员能够安全逃离的距离见表 12 其中黑体数字表示可以逃到下一个逃生通道人群。表 13 是不同风速下隧道内的消防救援安全位置和安全时间,表中 3m 和 5m 分别表示火灾发生后的时间,忍受时间表示消防人员在该救援位置能够持续的时间。

表 11 火灾发生 1m 后上、下游有可能逃生的区域

Table 11 Probable escape regions upstream and downstream of fire at 1m in (m)

位置 (m)	风速 (m/s)				
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
上游	< -30	< -20	< -10	< -5	< -10
下游	> 100	> 200	> 300	> 300	> 400

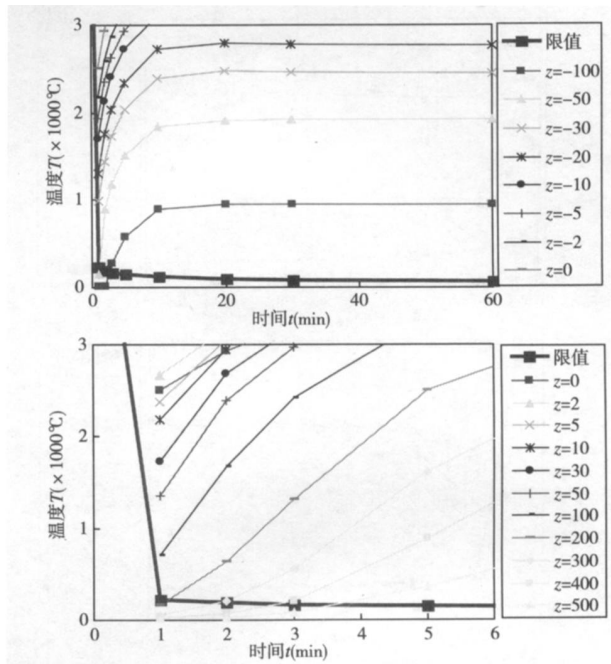


图 15 v=1m/s,隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
Fig. 15 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time, v=1m/s

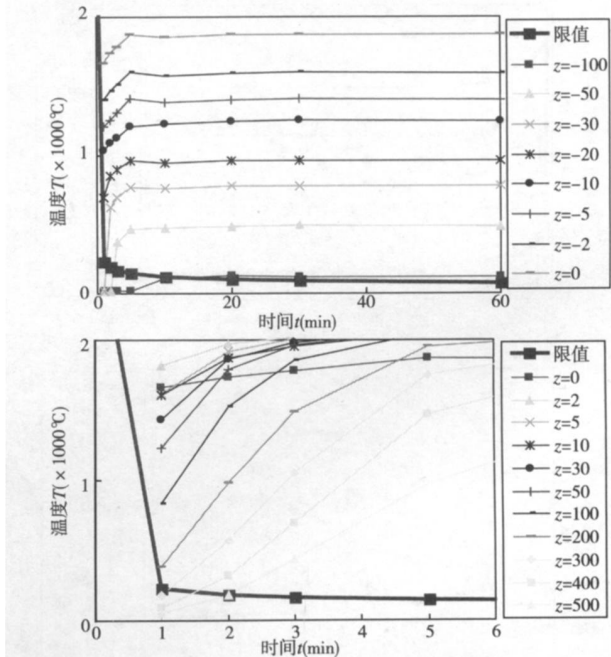


图 16 v=2m/s,隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图  
Fig. 16 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time, v=2m/s

表 12 1m 后火灾下游人员可以逃离的距离

Table 12 Distances probably covered by personnel downstream of fire at 1m in (m)

开始逃生位置 (m)	风速 (m/s)				
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
Z=50	< 200				
Z=100	< 400	< 300			
Z=200	> 500	< 400	< 400	< 400	
Z=300	> 500	> 500	< 500	< 500	< 500

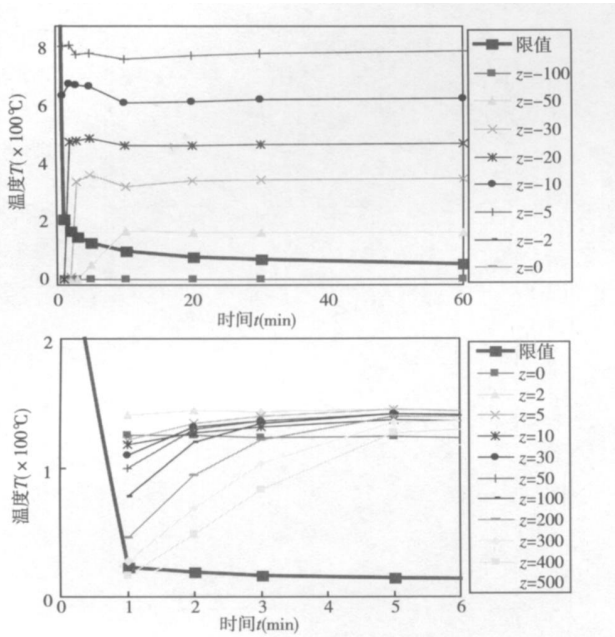


图 17  $v=3\text{m/s}$ ,隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

Fig.17 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v=3\text{m/s}$

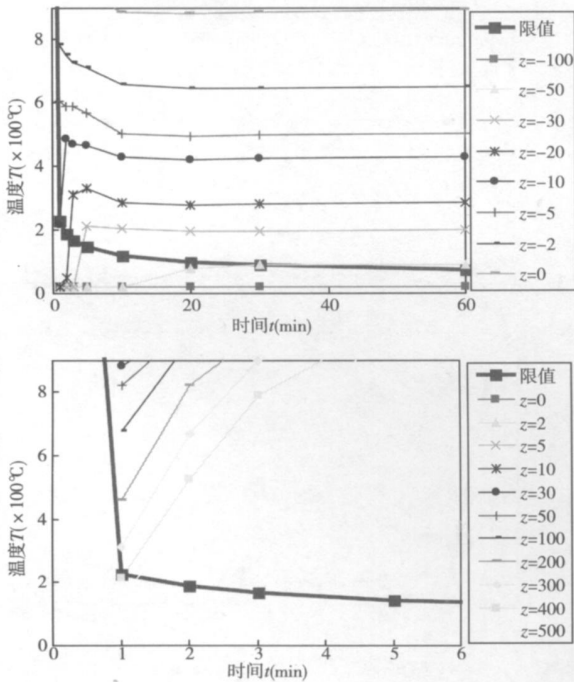


图 18  $v=4\text{m/s}$ ,隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

Fig.18 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time,  $v=4\text{m/s}$

### 3.4 隧道风速和火灾规模对逃生和救援的影响

对比上述三种火灾规模的数值模拟结果,我们可以看到:

(1)火灾上游人员的可能逃生位置,随着风速的增大距火源越近,随着火灾规模增大距离火源越来越远,见表 14

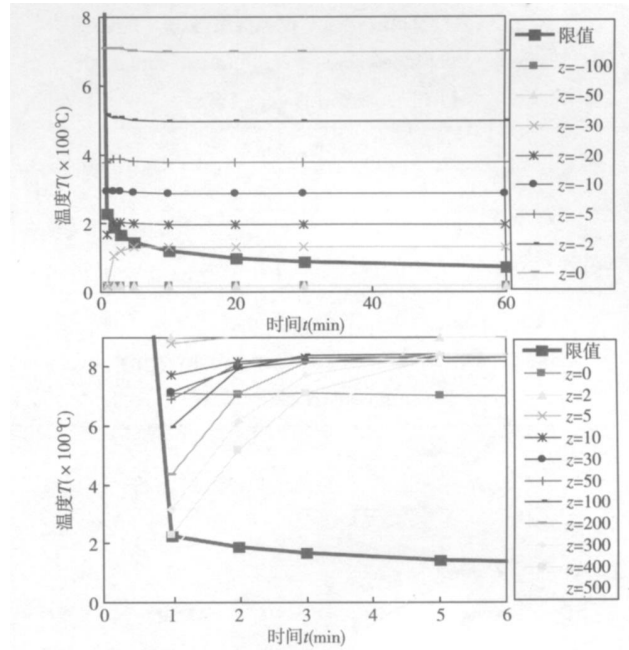


图 19  $v=5\text{m/s}$ ,隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

Fig.19 Relationship between tunnel temperature and personnel limit-endurance time  $v=5\text{m/s}$

表 13 不同风速下的安全救援位置以及安全时间

Table 13 Safe locations and time intervals of rescue under different wind speeds

对应项目	风速 (m/s)					
	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$	
上游安全位置以及安全时间	救援位置 $z(\text{m})$	-100	-50	-50	-30	-30
	忍受时间 (min)	0.47	0.16	8.99	3.31	9.87
下游安全逃生位置	救援位置 $z(\text{m})$	-100	-50	-50	-30	-30
	忍受时间 (min)	12.81	6.99	59.09	7.04	7.04
绝对安全位置 $z$	$<-100$	$<-100$	$-100$	$-100$	$-50$	
下游安全逃生位置 $z(\text{m})$	100	300	400	$>400$	$>400$	

(2)火灾下游可能逃生位置,随着风速和火灾规模增大距火源越远,见表 15.但事实上,当隧道火灾发生后,由于隧道内温度和烟雾的向下扩展速度远远小于汽车的速度,所以火灾下游的人员都能很快逃离危险区;

(3)消防安全救援的具体位置,随着风速的增大距离火源越来越远,随着火灾规模的增大距离火源越来越远,见表 16.

表 14 火源上游有可能逃生区域随热释放率以及入口风速的变化

Table 14 Probable escape regions upstream of fire under different heat release rates and wind speeds (m)

热释放率 (MW)	风速 (m/s)				
	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$
5	$<-10$	$<-2$	$<0$	$<0$	$<0$
10	$<-10$	$<-10$	$<-2$	$<0$	$<0$
30	$<-30$	$<-20$	$<-10$	$<-5$	$<-10$



表 15 火源下游安全逃生区域随热释放率以及入口风速的变化  
Table 15 Probable escape regions downstream of fire under different heat release rates and wind speeds (m)

热释放率 (MW)	风速 (m/s)				
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
5	100	200	200	200	200
10	200	300	300	300	300
30	100	300	400	> 400	> 400

表 16 消防安全救援位置随热释放率以及入口风速的变化  
Table 16 Safe locations for rescue under different heat release rates and wind speeds (m)

热释放率 (MW)	风速 (m/s)				
	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
5	-100	-50	-20	-10	-2
10	< -100	-100	-50	-30	-20
30	< -100	< -100	-100	-100	-50

#### 4 结 语

(1) 深入研究了隧道内人员在高温下的逃生过程, 修正了传统的克拉尼公式, 给出了一个更合理的隧道火灾人员逃生判断条件;

(2) 以修正的克拉尼公式为基础, 采用有限元数值模拟方法, 详细地研究了不同隧道风速、不同火灾规模时隧道内人员的安全逃生区域和消防救援的安全位置。研究结果表明:

1) 为了保证火源上游的人员逃生, 应该尽可能加大隧道内的环境风速;

2) 火灾的消防救援位置必须在火源上游进行, 并且应该尽可能加大隧道内的环境风速;

3) 虽然隧道内的风速对于火源下游的人员逃生不利, 但由于隧道内温度和烟雾的扩展速度远远小于汽车的速度, 所以火灾下游的人员都能很快逃离危险区。

#### 参 考 文 献

[1] 谢旭阳, 周心权, 谢续程, 等. 高层建筑火灾人员疏散和

人员伤亡的模拟[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(3): 15-18 (Xie Xu yang, Zhou Xinquan, Xie Xu cheng et al. Simulation of personnel evacuation and casualty in high-rise building fire[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(3): 15-18 (in Chinese))

[2] 陈智明, 霍然, 王浩波, 等. 某教学楼火灾中人员安全疏散时间的预测[J]. 火灾科学, 2003, 12(1): 40-45 (Chen Zhiming, Huo Ran, Wang Haobo et al. Personal evacuation time prediction in a building fire[J]. Fire Safety Science, 2003, 12(1): 40-45 (in Chinese))

[3] 古晋. 地铁隧道火灾的疏散与救援[J]. 劳动保护, 2004 (11): 70-71 (Gu Jin. The evacuation and rescue in subway tunnel fire[J]. Labour Protection, 2004 (11): 70-71 (in Chinese))

[4] 童庆杰, 权高峰, 邵力. 火灾事故中人的心理及行为分析[J]. 合肥工业大学学报: 社会科学版, 2004, 18(3): 159-162 (Tong Qingjie, Quan Gao feng, Shao Li. Analysis of mentality and behavior of people involved in fire disasters[J]. Journal of Hefei University of Technology: Social Science, 2004, 18(3): 159-162 (in Chinese))

[5] 周勇狄. 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. The numerical simulation of long highway tunnel fire and the evacuation study[D]. Xi'an Chang'an University, 2006 (in Chinese))

[6] Gonzalez JA, Danziger NH. Tunnel ventilation design for fire safety[C] //6th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, England, BHRA, 1988, 575-592

[7] 邓念兵. 公路隧道防火救灾对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2003 (Deng Nianbing. The countermeasures to the highway tunnel fire and the evacuation[D]. Xi'an Chang'an University, 2003 (in Chinese))

[8] Vignes J, Grubis S. Validation of Phoenics 3.5 for modelling tunnel ventilation systems under fire conditions[C] //10th International PHOENICS Conference, Melbourne, Australia, 2004

[9] Wang Q, Ma K, Lundqvist M. CFD applications of PHOENICS on building environment and fire safety design[C] //10th International PHOENICS Conference, Melbourne, Australia, 2004

夏永旭 (1954-), 男, 博士, 教授。主要从事隧道工程安全、公路隧道通风与防火救灾研究。

周勇狄 (1980-), 男, 硕士, 工程师。主要从事公路隧道工程安全研究。

王永东 (1974-), 男, 博士, 副教授。主要从事公路隧道通风与防灾减灾研究。