

文章编号:1001-7372(2008)06-0083-07

# 公路隧道火灾消防救援安全研究

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

(1. 长安大学 隧道工程安全研究所, 陕西 西安 710064;

2. 广西交通科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:**将隧道温度场随时间的变化和人员的逃生速度引入到传统克拉尼公式中,给出了一个基于温度变化的修正的隧道火灾人员逃生判别公式。采用数值模拟方法,详细研究了典型隧道结构在不同隧道风速( $v=1, 2, 3, 4, 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )下不同火灾规模时隧道内的温度场,以修改后的克拉尼公式为公路隧道火灾时的安全逃生判别条件,给出了不同隧道风速、不同火灾规模时的消防救援的安全位置。结果表明:为了防止高温回流对消防救援的影响,在消防救援时,隧道内的环境风速应不小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**关键词:**隧道工程;隧道火灾;数值模拟;安全位置;消防救援

**中图分类号:**U458 **文献标志码:**A

## Research on Safety of Fire Rescue in Highway Tunnel

ZHOU Yong-di<sup>1,2</sup>, XIA Yong-xu<sup>1</sup>, WANG Yong-dong<sup>1</sup>

(1. Institute of Tunnel Engineering Safety, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Guangxi Traffic Science Institute, Nanning 530023, Guangxi, China)

**Abstract:** The changing temperatures and escaping speed of people were introduced in traditional Crane formula, the criterion formulae of escape based on the changing temperatures on highway tunnel fire were given. The temperature fields of the typical tunnel under different wind speeds and scales of fire were studied in detail by the numerical simulation method. Using modified Crane formula as the criterion of escape on highway tunnel fire, the safe locations for fire rescue under different wind speeds and scales of fire were determined. Results show that in order to avoid the influence of high temperature circumfluence on fire rescue, circumstance wind speed in tunnel should not be less than  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Key words:** tunnel engineering; tunnel fire; numerical simulation; safe location; rescue

## 0 引言

在目前的公路隧道火灾逃生救援研究中,有关隧道火灾过程中人员的逃生大都是以隧道内的绝对温度或者升温率作为判别条件。然而,在隧道发生火灾时,隧道内任意一处的温度都随着时间发生变

化,同时,隧道内的人员也一直在移动。因此,用绝对温度和升温率作为人员逃生判别条件很不恰当。本文中拟将时间变化和人员逃生速度引入到传统的克拉尼公式中,通过对某典型公路隧道火灾温度场的分析,以修正的火灾逃生公式为判别条件,研究火灾时消防救援的安全位置。

收稿日期:2008-02-07

基金项目:交通部行业联合科技攻关项目(20033531404)

作者简介:周勇狄(1980-),男,广西桂平人,长安大学工学硕士,E-mail:yongxuxia@126.com。



# 1 隧道火灾时的逃生条件

## 1.1 克拉尼公式

对于健康的着装成年男子,克拉尼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>

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

式中: $t$ 为高温环境下的极限忍受时间; $T$ 为空气温度; $B_1$ 、 $B_2$ 均为常数,一般取 $B_1 = 1.0$ , $B_2 = 0$ 。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。因为水蒸气是燃烧产物之一,火灾烟气的湿度较大是必然的。由于人与人之间耐高温环境的能力差异很大,在应用该公式时,应考虑一定的安全系数,如取安全系数为0.8,此时,式(1)可表示为

$$t = \frac{3.28 \times 10^8}{T^{3.61}} \quad (2)$$

根据式(2),可以得出人员忍受时间与温度的关系,如图1所示。从图1可以看出:如果发生火灾,隧道内某位置的温度随时间变化的值位于图1中曲线的下方,也就是各个时刻的温度均小于极限忍受温度时,那么该位置将是安全的,救援人员可以在该位置进行救援工作。因此,把图1中的曲线称之为“死亡曲线”,即曲线下方为存活区域,曲线上方为死亡区域。

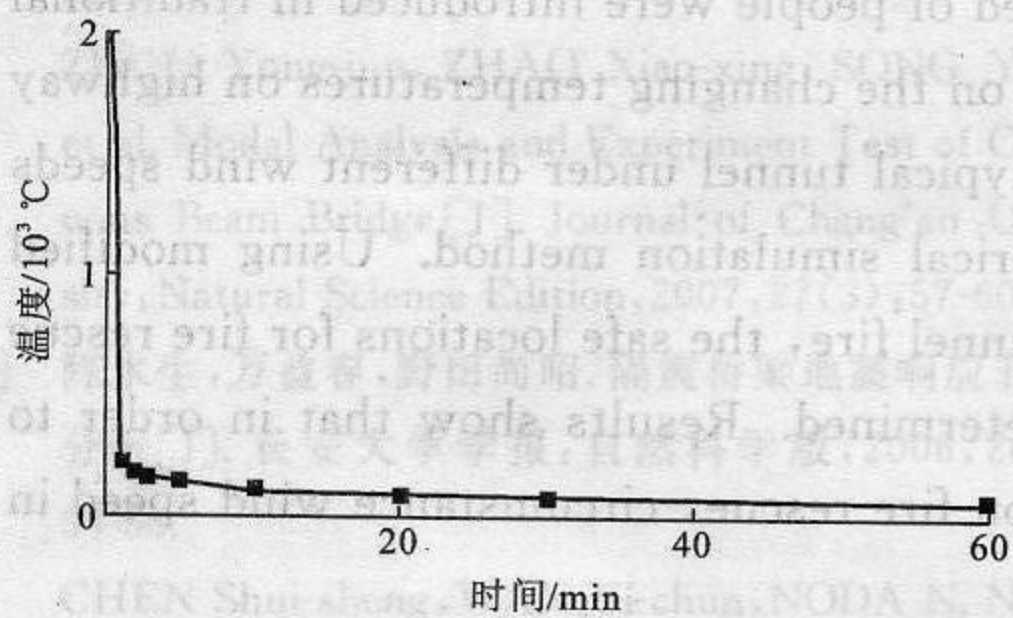


图1 人员忍受时间与温度的关系

Fig. 1 Relation Between Endurance Time of Person and Temperature

## 1.2 对克拉尼公式的修正

分析图1可以看出,对于公路隧道火灾时的人员逃生而言,假设某一时刻某人所处地点的温度值即使落在死亡曲线上方,也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下。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,必须对式(2)进行修正<sup>[2]</sup>。如果隧道的火灾发生在第*i*分钟(取当天00:00:00为0 min),在此时刻之后的火灾发展过程中,隧道内各处的温度均随着时间发生变化。如果取隧道内所有人员的逃生反应时间为1 min,假设*i*+1 min后,在隧道内的 $L_1$ 处某人开始准备逃生到 $L_n$ 处。根据式(2),他在 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 各处的温度环境下所能忍受的时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,如果将每段的长度取得足够小,再将此人逃生过程在不同位置所能忍受的时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的相邻2个时间段求和平均,那么最后可以得到此人从 $L_1$ 处通过 $L_2, L_3, \dots, L_{n-1}$ ,逃到 $L_n$ 处平均能够忍受的时间为

$$\bar{t} = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{l=1}^{n-1} (t_l + t_{l+1}) \quad (3)$$

式(3)中 $t_l (l=1, 2, \dots, n)$ 仍然通过式(2)计算。

## 1.3 火灾时人员逃生条件

火灾时,隧道内空气具有较高的温度,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,进而眩晕心乱,直到昏迷休克猝然倒下。文献[3]中曾给出了高温下人能够忍受的时间,见表1。本文中笔者根据式(2),可以得出人员忍受时间与温度的关系,如表2所示。

表1 高温下人的极限忍受时间1

Tab. 1 Limit-endurance Time 1 Under Different High Temperatures

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

表2 高温下人的极限忍受时间2

Tab. 2 Limit-endurance Time 2 Under Different High Temperatures

温度/°C	极限忍受时间/min
120	10.23
140	5.87
170	3.37
300	0.37

从逃生角度看,根据 Shields 等的试验得知,75%的人员在听到火灾警报后的15~40 s才开始移动<sup>[4]</sup>。另外,人在隧道内的正常疏散速度为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但在有烟气的情况下,疏散速度可能只有 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[5]</sup>。由于隧道火灾中的环境比一般建筑环境要恶劣,本文中取人员的逃生反应时间为60 s,逃



生速度为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从表 1、2 可见,利用式(2)计算的结果除了在  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  时与试验值相近外,其余还有一定的差别。但为了更符合隧道火灾的实际情况。本文中仍将式(2)、(3)及图 1 和表 2 作为隧道火灾时人员逃生的判断条件。

## 2 隧道几何模型及火灾规模

### 2.1 隧道几何模型

以某公路隧道为例进行计算,取标准的 2 个逃生通道之间的长度  $700 \text{ m}$  为计算范围,隧道横断面高  $7.25 \text{ m}$ ,宽  $10.98 \text{ m}$ ,如图 2 所示。设定火源中心所在断面为直角坐标系中的  $z=0$  平面,取火区上游为  $z$  轴负方向, $z=L_1=-200 \text{ m}$  处为计算通风入口,沿  $z$  轴正方向,火区下游  $z=L_2=500 \text{ m}$  处为出口边界。

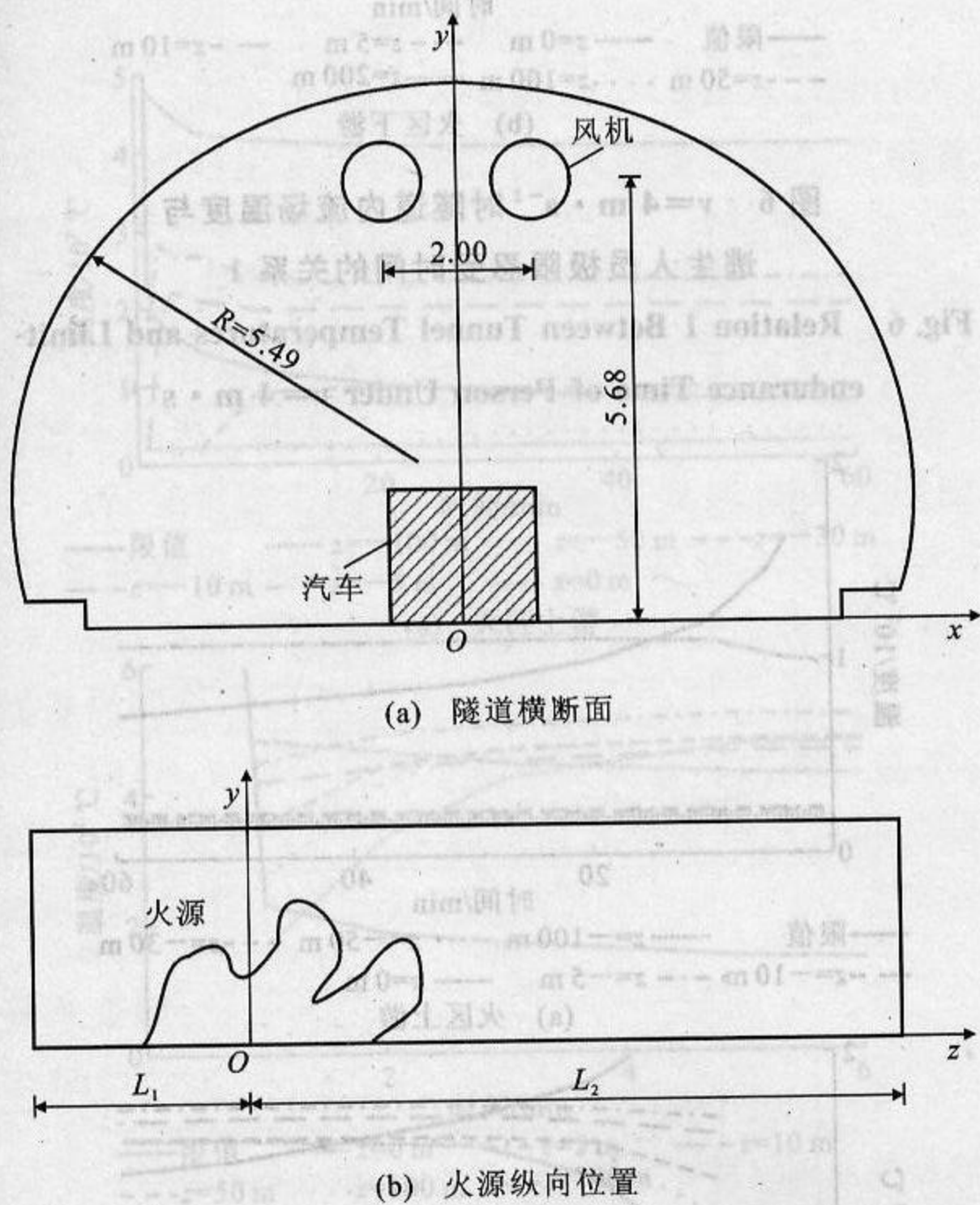


图 2 隧道横断面以及火源纵向位置(单位:m)  
Fig. 2 Cross-section of Tunnel and Longitudinal Position of Tunnel Fire (Unit:m)

火源模型尺寸为长  $4.6 \text{ m}$ ,宽  $1.7 \text{ m}$ ,高  $1.5 \text{ m}$ 。初始条件:隧道内空气密度为  $0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;隧道内平均温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;壁面粗糙度为  $0.022 \text{ m}$ 。

### 2.2 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,因此要想全面考虑所有因素,准确地预报或设定火灾规模是不容易的。目前各国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规模和瑞士及挪威有关部门提供的规模为参考<sup>[6]</sup>。

据此,本文中分别模拟 1 辆小轿车着火、1 辆大卡车着火和 2 辆或 3 辆大卡车相撞起火的情况<sup>[7]</sup>,燃烧时间维持  $60 \text{ min}$ ,隧道入口风速  $v$  分别为  $1, 2, 3, 4, 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出口相对压力为  $0 \text{ Pa}$ 。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 1 辆小轿车着火的情况(热释放率为 $5 \text{ MW}$ )

本文的数值模拟计算程序为通用大型 CFD 软件<sup>[8-9]</sup>,理论基础为  $k-\epsilon$  双参数模型<sup>[10-11]</sup>。通过大量的数值模拟计算(参见文献[2]),得出 1 辆小轿车着火时,隧道内不同位置、不同时刻的温度场和风速场。将数值模拟的结果与图 1 结合,就可以得到 1 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 3~7 所示。图 3~7 中的温度为隧道断面中心高于地面  $1.8 \text{ m}$  处的值。

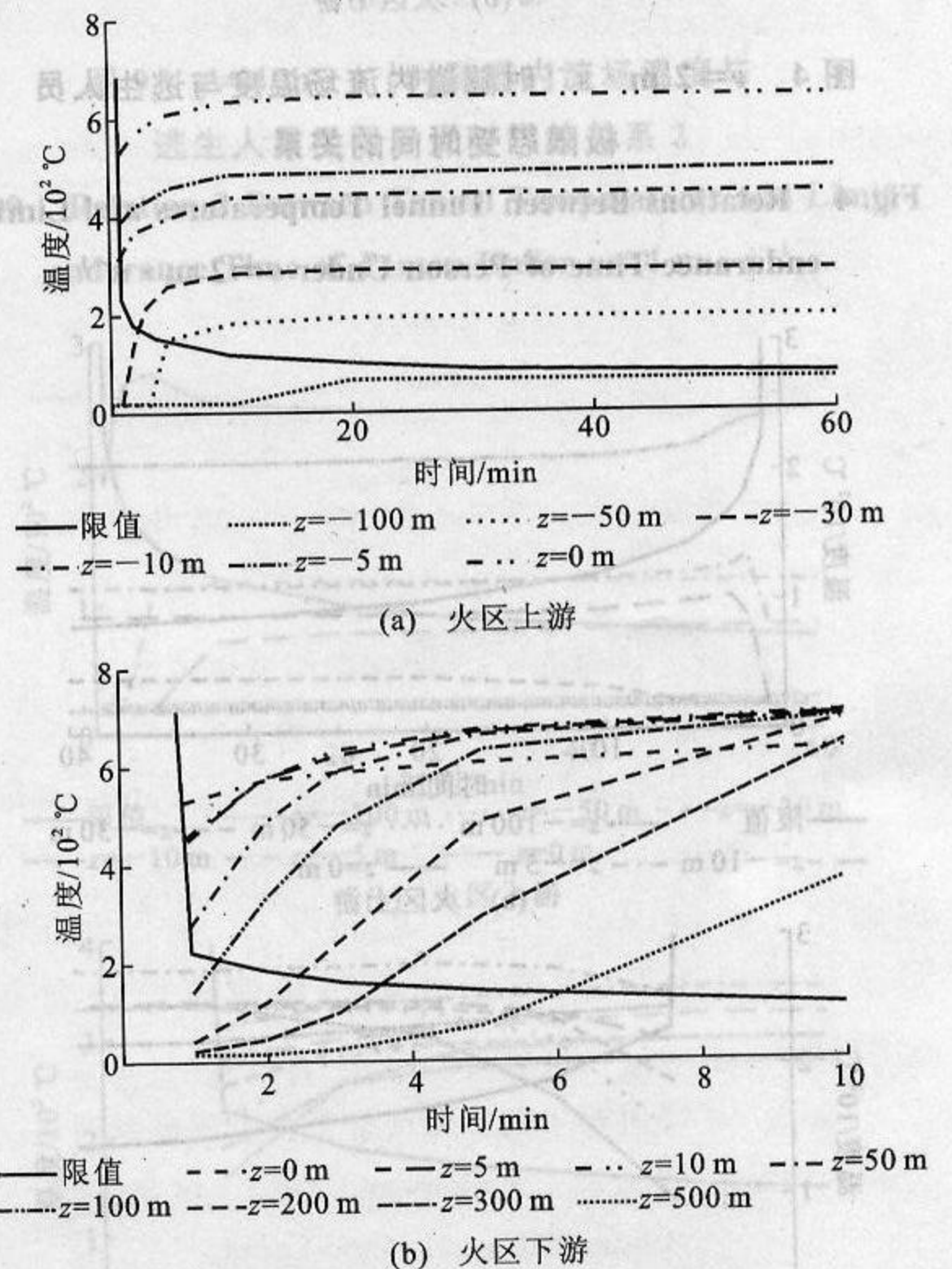


图 3  $v=1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系

Fig. 3 Relations Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

分析图 3~7,可以得到不同隧道风速下,隧道内的消防救援安全位置和持续安全时间,见表 3。表 3 中情况 1 和情况 2 分别表示火灾发生后  $3 \text{ min}$  和  $5 \text{ min}$  时,忍受时间表示消防人员在该救援位置能



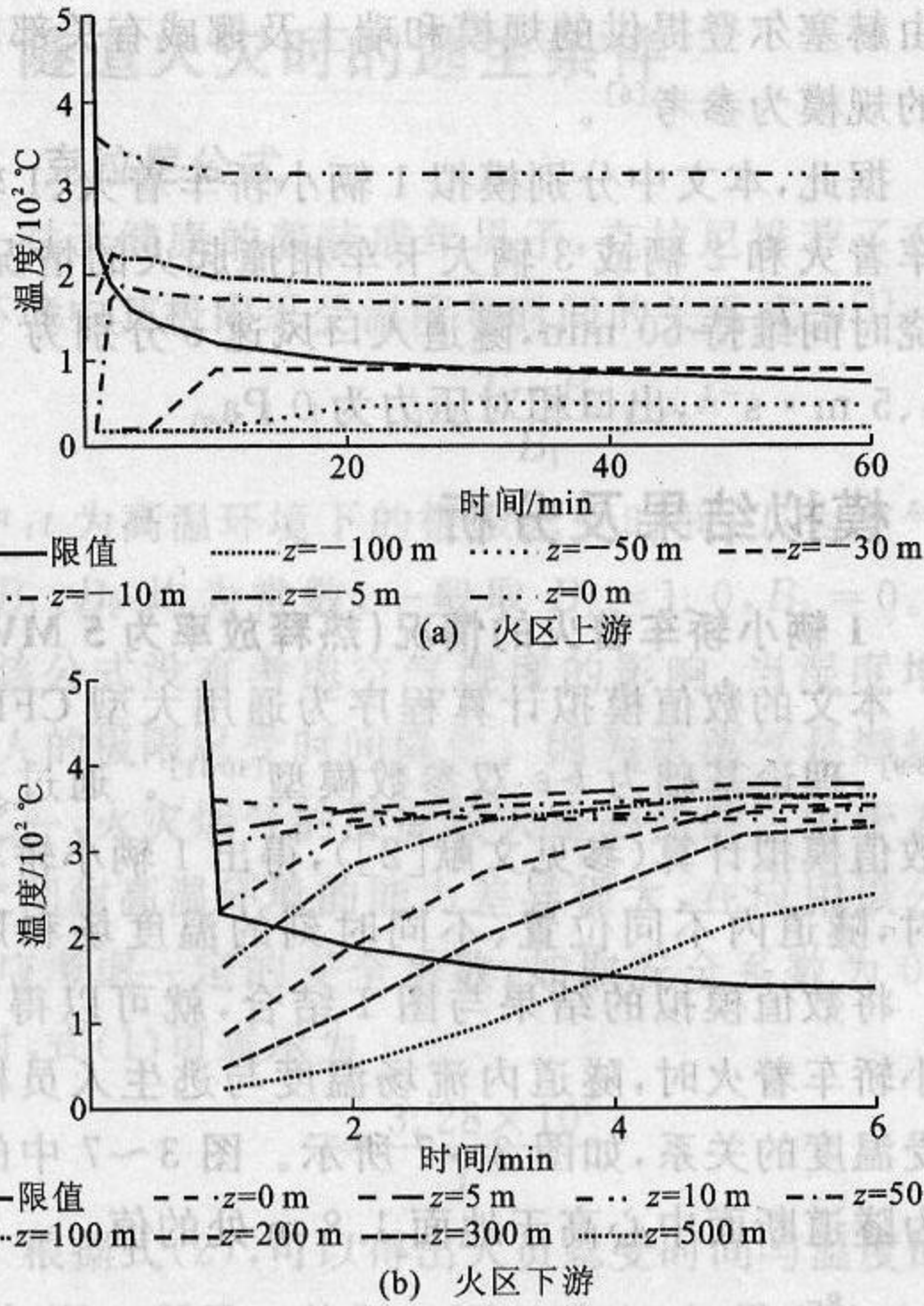


图4  $v=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系

Fig. 4 Relations Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

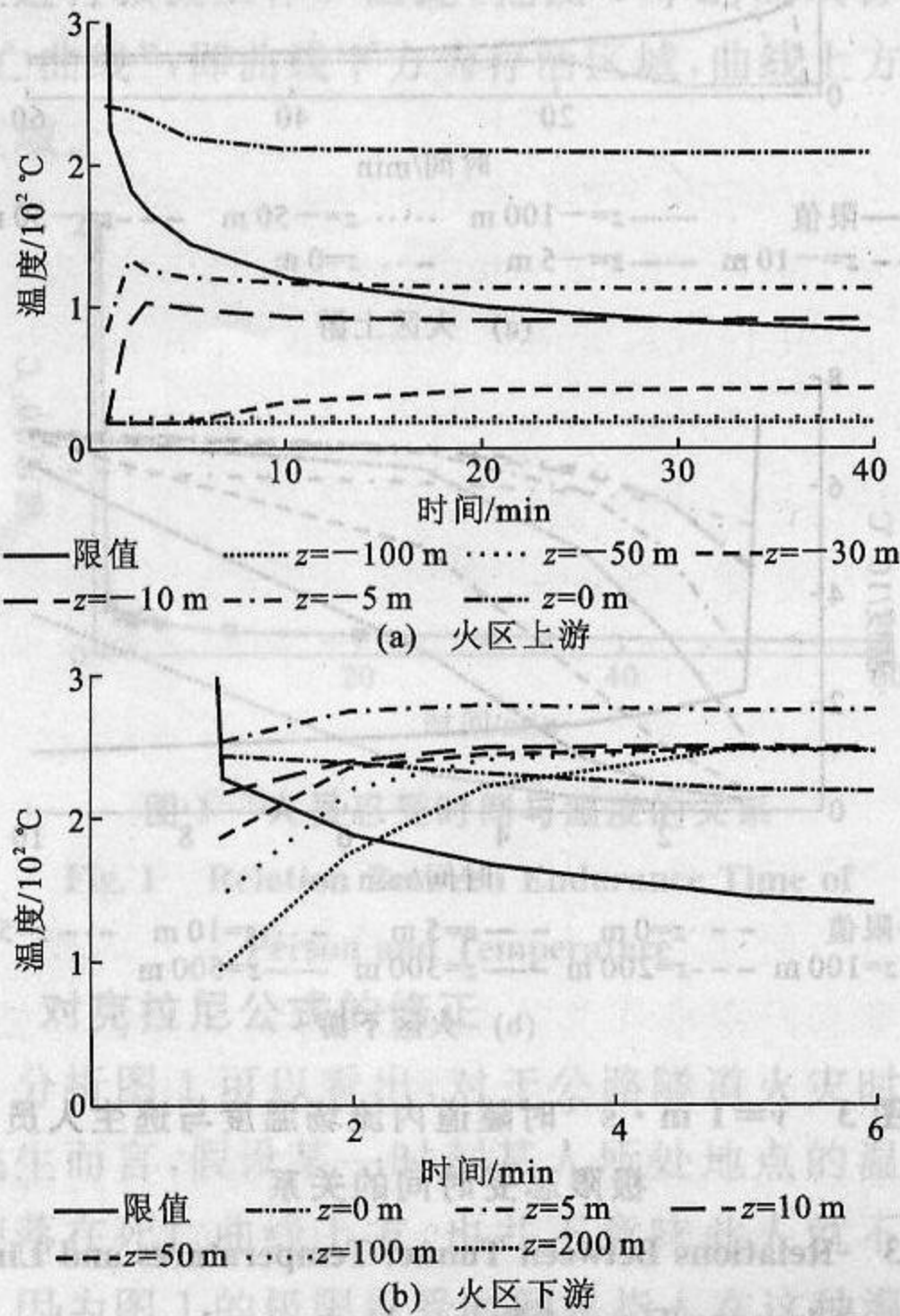


图5  $v=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系 1

Fig. 5 Relation 1 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

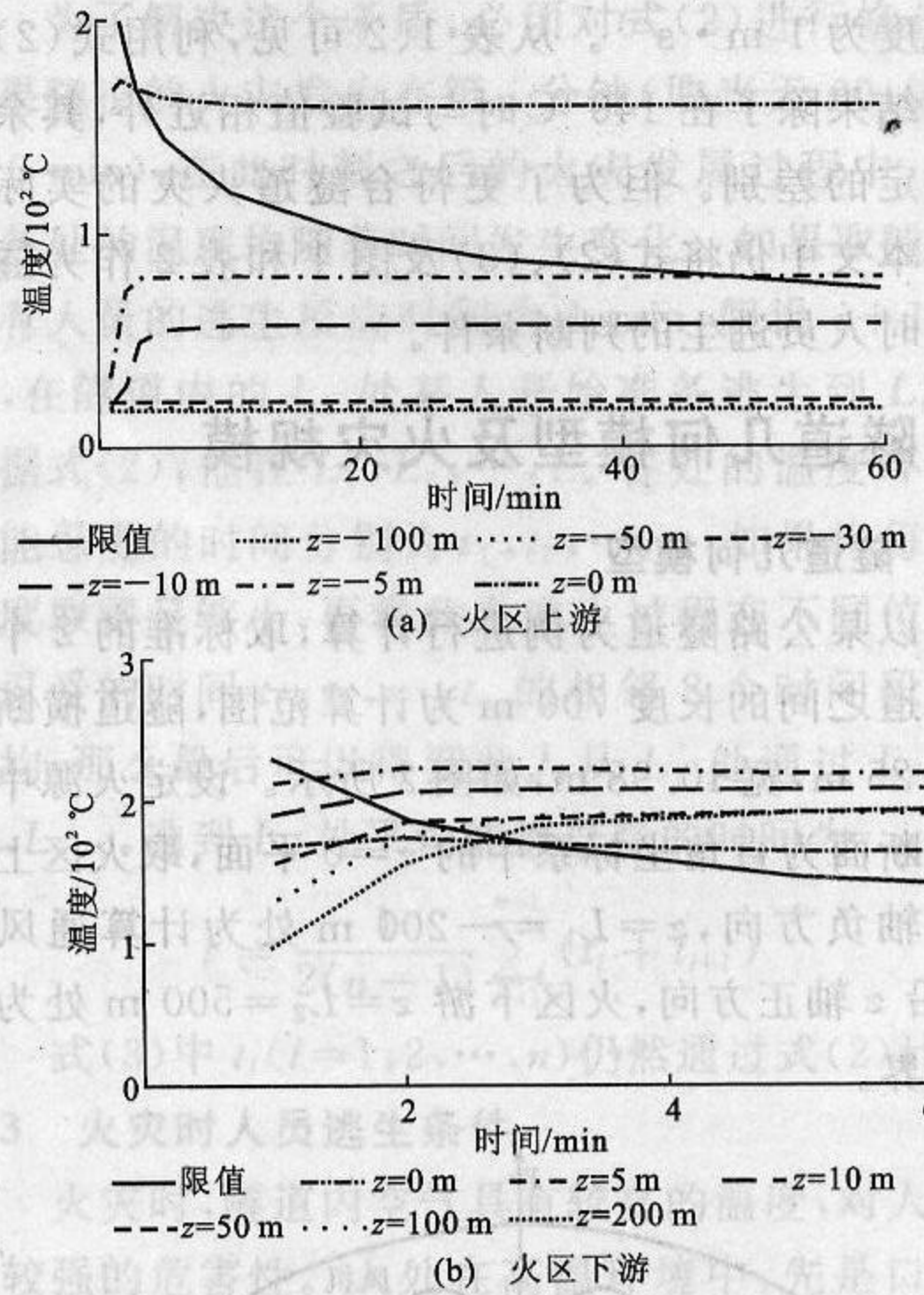


图6  $v=4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系 1

Fig. 6 Relation 1 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

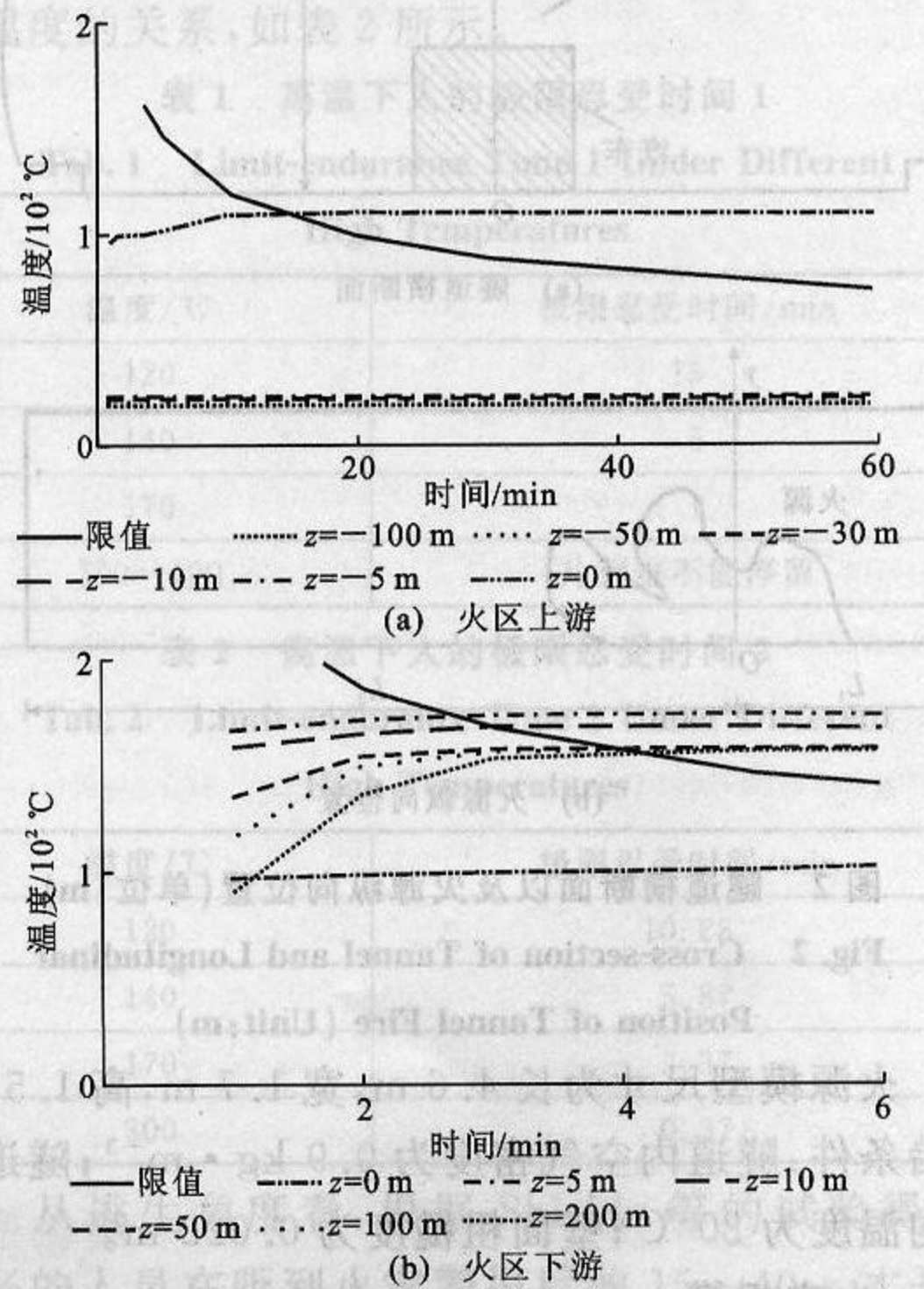


图7  $v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系 1

Fig. 7 Relation 1 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



表3 不同风速下的安全救援位置及安全时间 1

Tab.3 Rescue Locations and Time 1 of Safety Under Different Wind Speeds

风速/(m·s <sup>-1</sup> )		1	2	3	4	5
救援位置/m	情况 1	-30	-10	-5	-5	-2
	情况 2	-50	-20	-10	-5	-2
忍受时间/min	情况 1	1.10	2.17	8.45	45.13	>60.00
	情况 2	4.38	7.20	20.03	45.29	>60.00
绝对安全位置/m		-100	-50	-20	-10	-2

够持续工作的时间,后文同。

### 3.2 1 辆大卡车着火的情况(热释放率为 10 MW)

类似地可以得出 1 辆大卡车着火时,隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度的关系,如图 8~10 所示(限于篇幅,仅给出了  $v=3,4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况)。表 4 为在不同隧道环境风速下,隧道内的消防救援安全位置和安全时间。

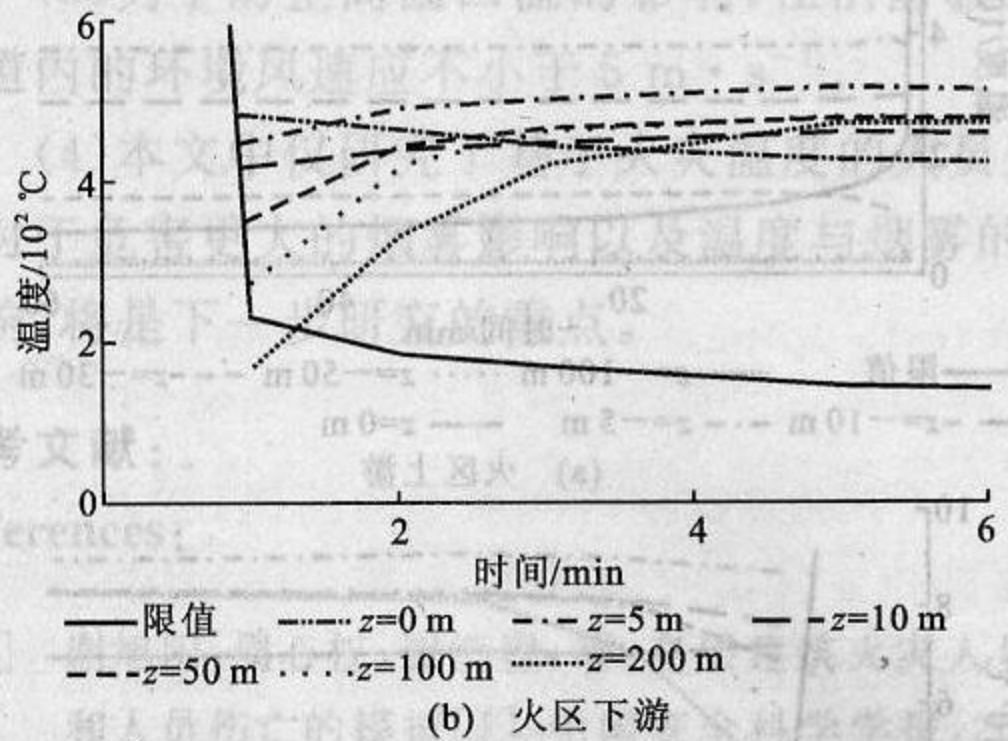
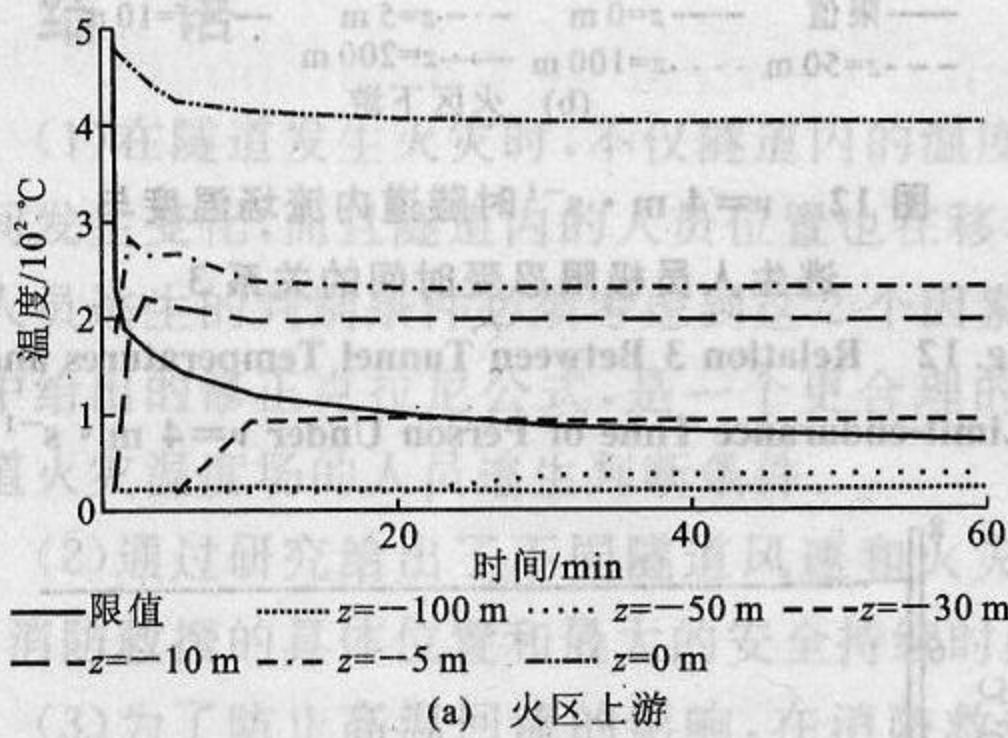


图 8  $v=3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系 2

Fig.8 Relation 2 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

### 3.3 2 辆或 3 辆大卡车相撞的情况(热释放率为 30 MW)

同样可得出 2 辆或者 3 辆大卡车相撞着火时(对《公路隧道通风照明规范》建议的 20 MW 热释放效率的情况可类似处理),隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度的关系如图 11~13 所示(限于篇幅,

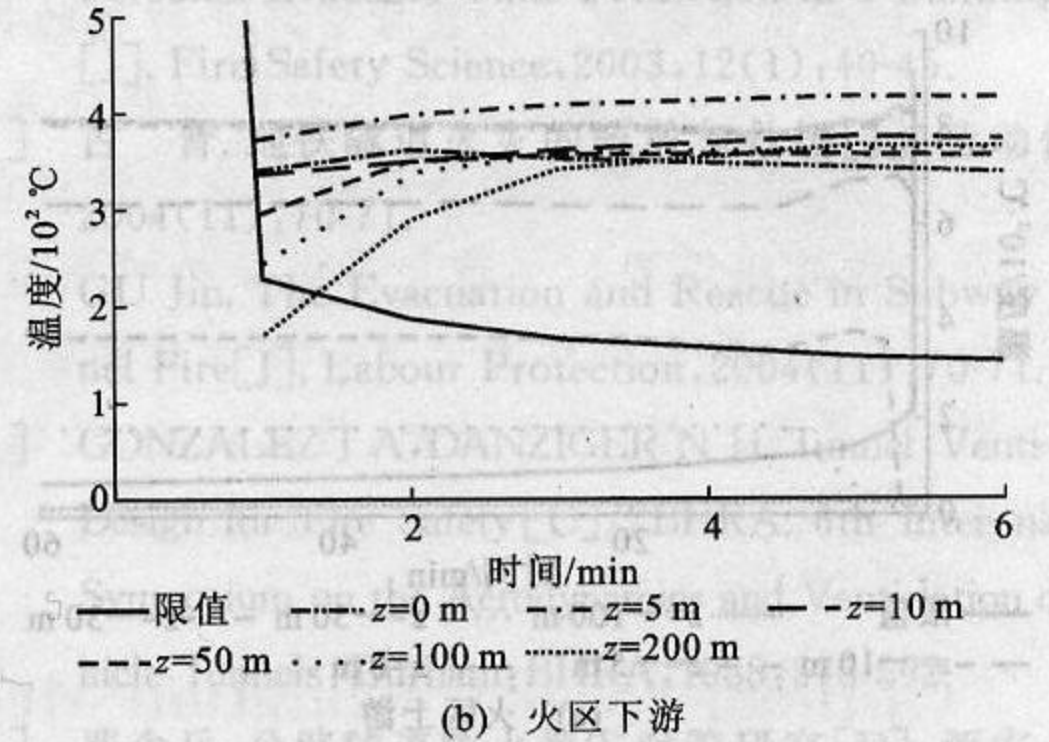
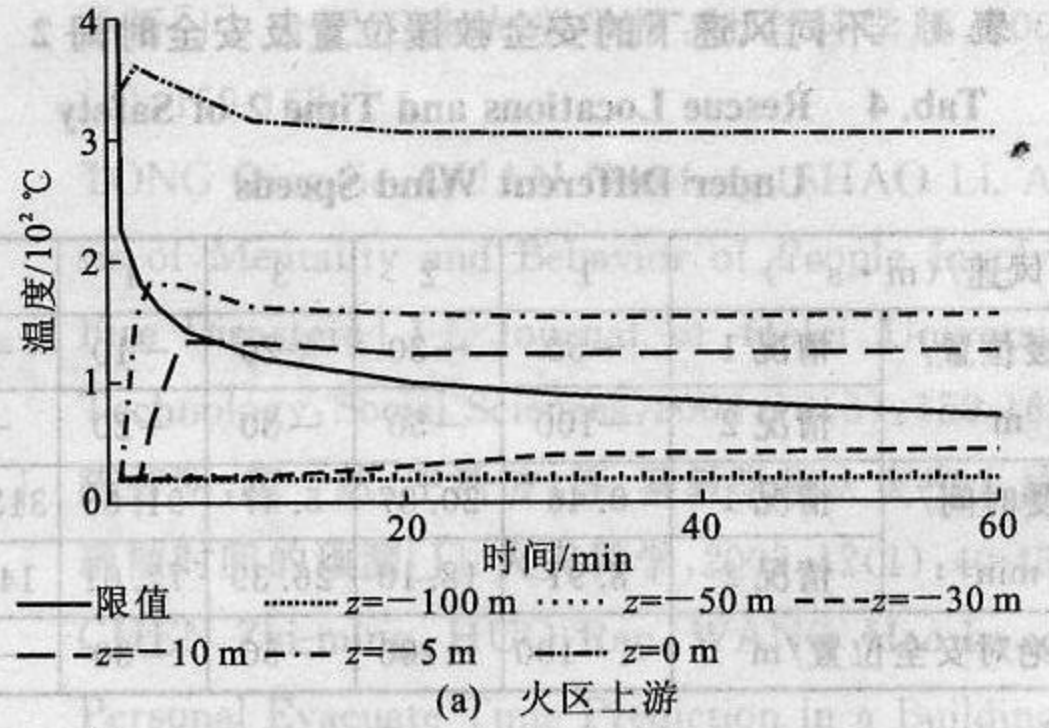


图 9  $v=4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系 2

Fig.9 Relation 2 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

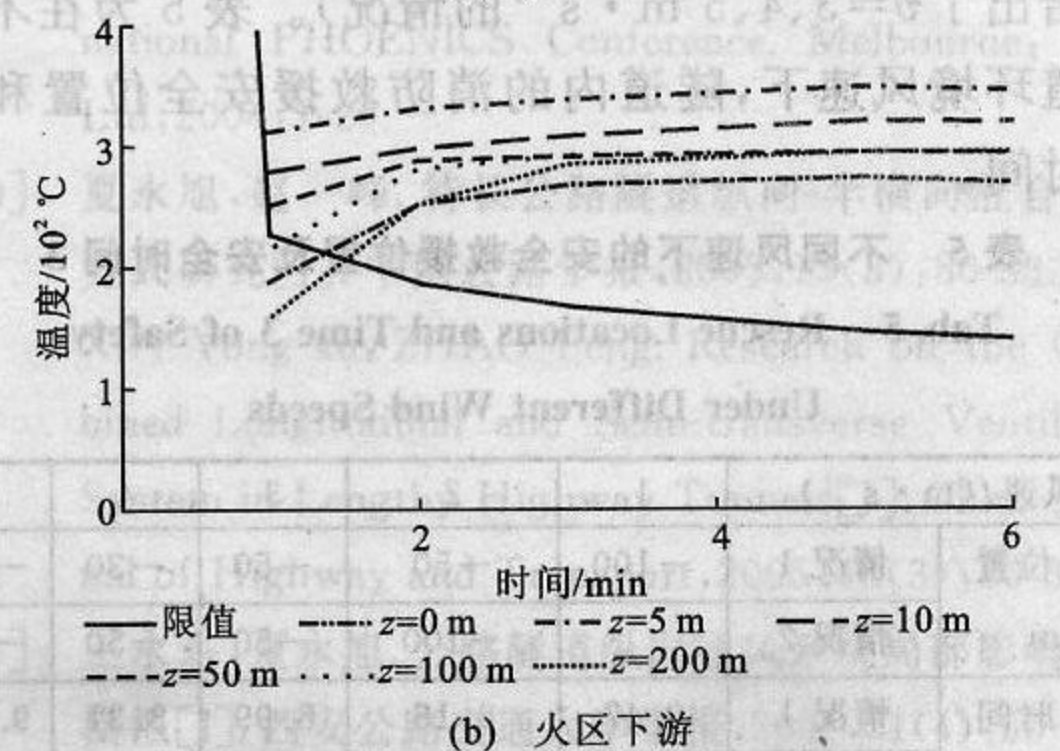
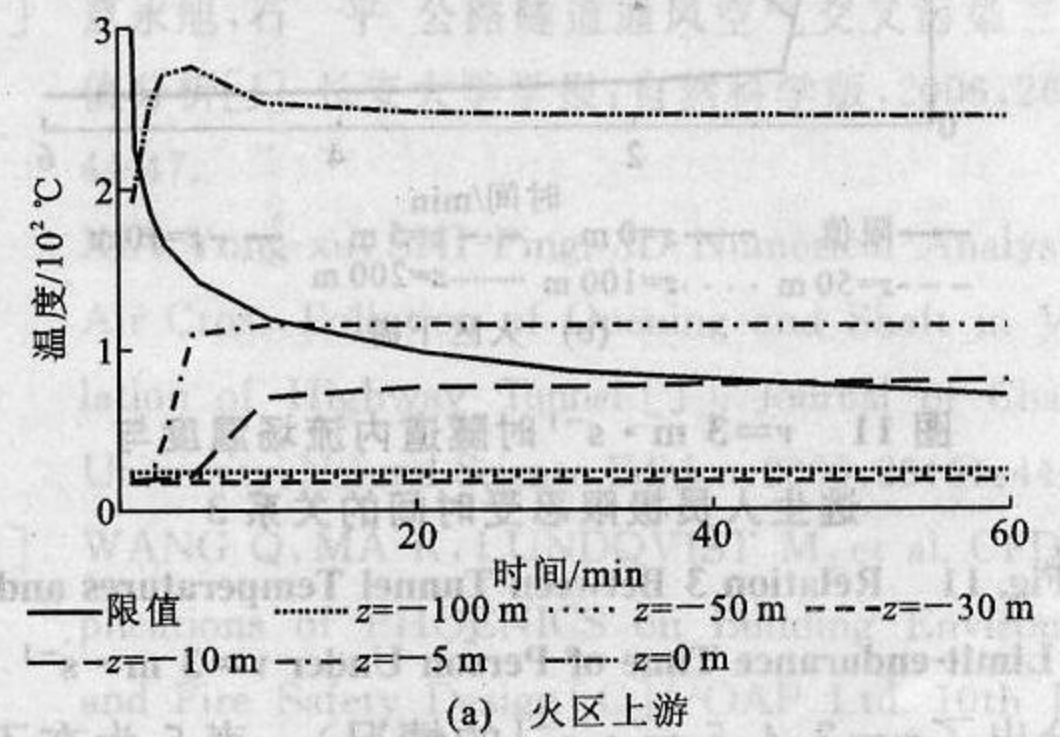


图 10  $v=5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系 2

Fig.10 Relation 2 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under  $v=5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



表4 不同风速下的安全救援位置及安全时间2

Tab. 4 Rescue Locations and Time 2 of Safety Under Different Wind Speeds

风速/(m·s <sup>-1</sup> )		1	2	3	4	5
救援位置/ m	情况1	-50	-30	-20	-10	-5
	情况2	-100	-50	-30	-20	-5
忍受时间/ min	情况1	0.46	20.87	5.47	91.53	313.17
	情况2	8.91	18.10	26.39	72.01	14.03
绝对安全位置/m		<-100	-100	-50	-30	-20

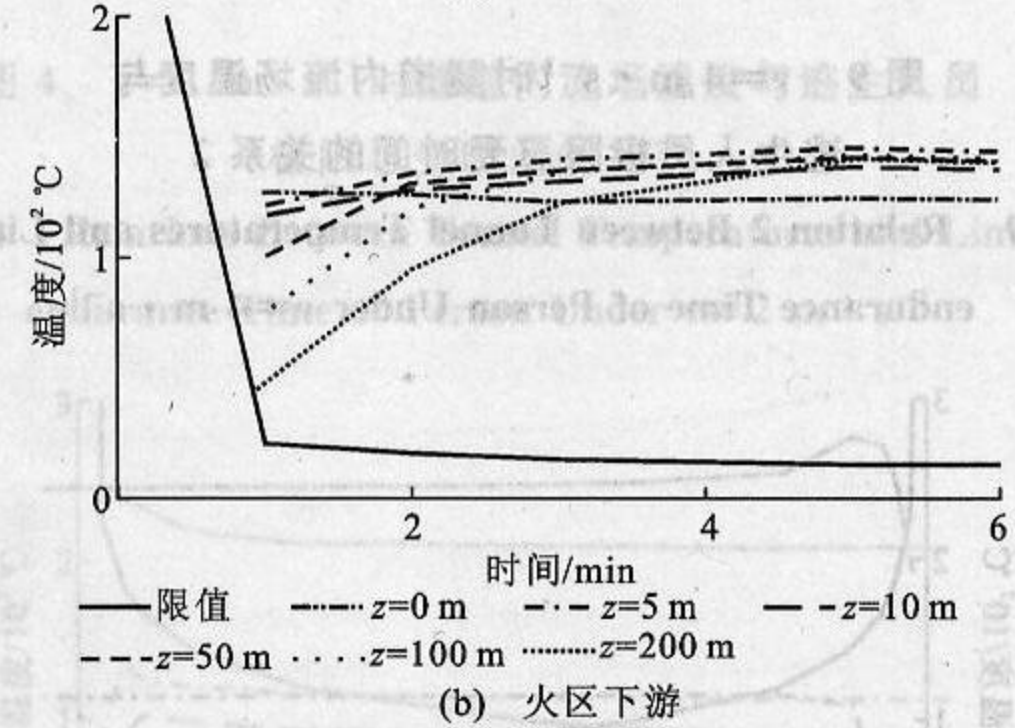
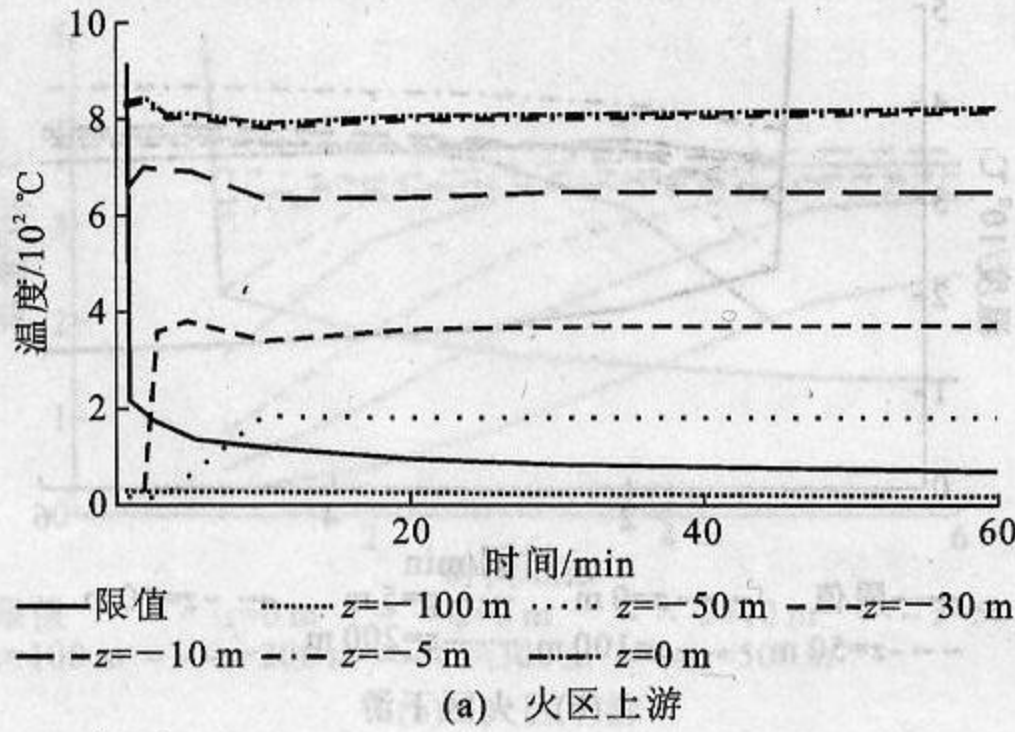


图11 v=3 m·s<sup>-1</sup>时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系3

Fig. 11 Relation 3 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under v=3 m·s<sup>-1</sup>

仅给出了v=3、4、5 m·s<sup>-1</sup>的情况)。表5为在不同隧道环境风速下,隧道内的消防救援安全位置和安全时间。

表5 不同风速下的安全救援位置及安全时间3

Tab. 5 Rescue Locations and Time 3 of Safety Under Different Wind Speeds

风速/(m·s <sup>-1</sup> )		1	2	3	4	5
救援位置/ m	情况1	-100	-50	-50	-30	-30
	情况2		-100	-50	-50	-30
忍受时间/ min	情况1	0.47	0.16	8.99	3.31	9.87
	情况2		12.81	6.99	59.09	7.04
绝对安全位置/m		<-100	<-100	-100	-100	-50

3.4 隧道风速和火灾规模对救援的影响

对比上述3种火灾规模的数值模拟结果,可以

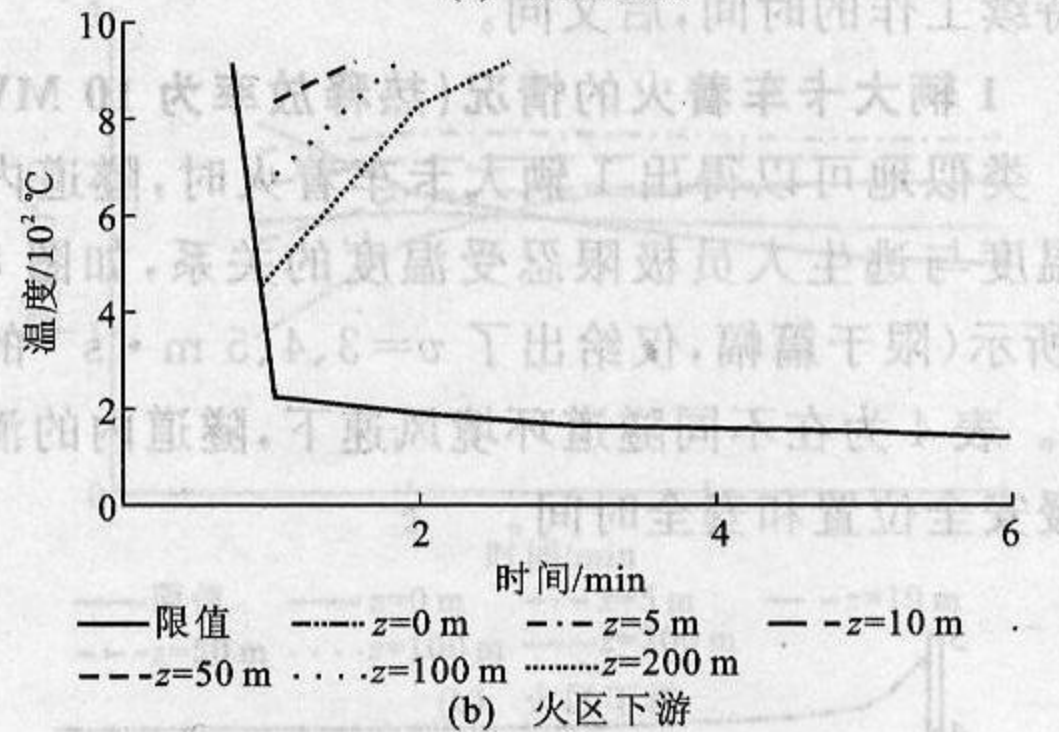
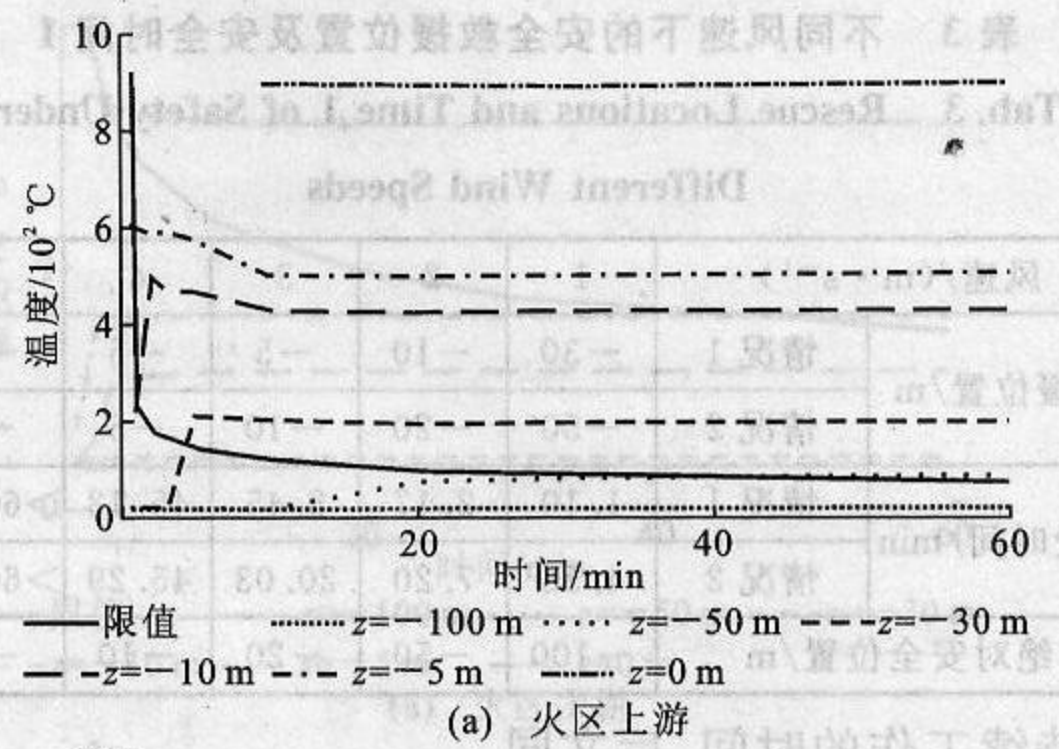


图12 v=4 m·s<sup>-1</sup>时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系3

Fig. 12 Relation 3 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under v=4 m·s<sup>-1</sup>

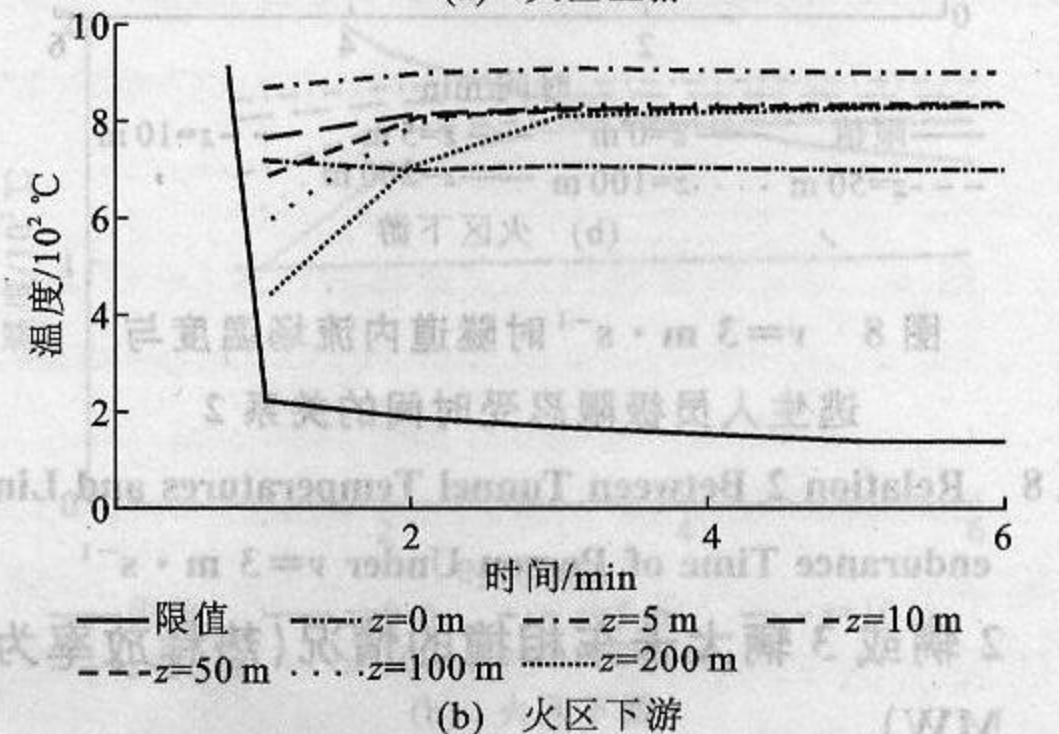
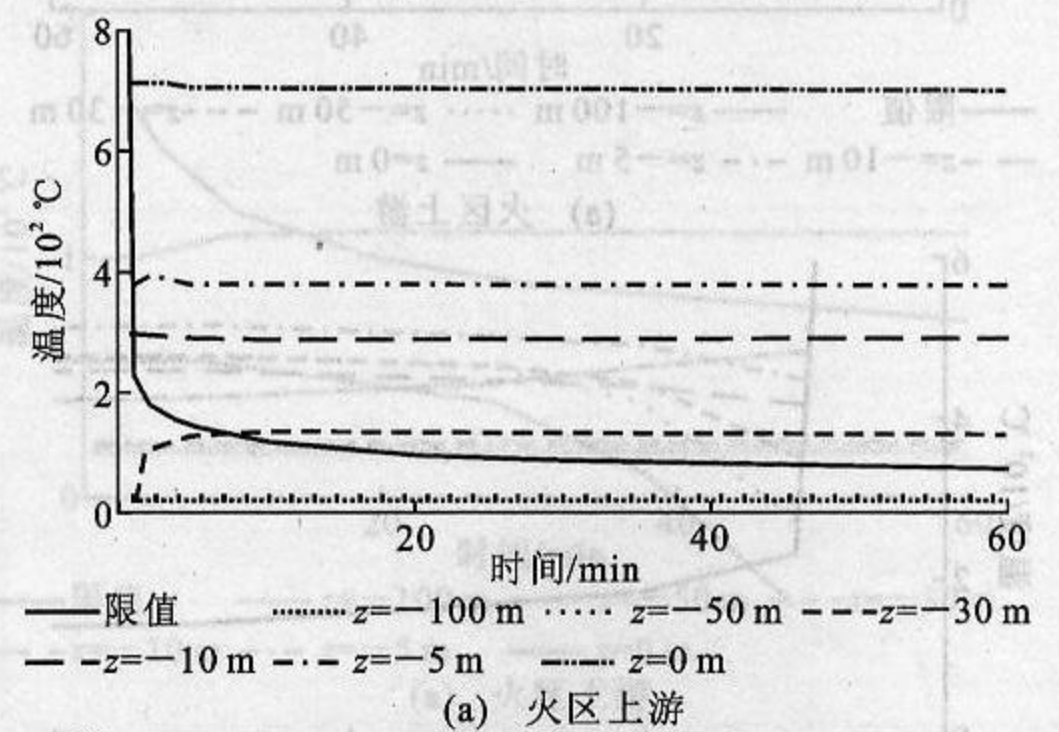


图13 v=5 m·s<sup>-1</sup>时隧道内流场温度与逃生人员极限忍受时间的关系3

Fig. 13 Relation 3 Between Tunnel Temperatures and Limit-endurance Time of Person Under v=5 m·s<sup>-1</sup>



看到:

(1)隧道发生火灾后,消防救援的位置必须在火源的上游,而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近,随着火灾规模的增大距离火源越来越远,具体建议位置见表 6。

表 6 消防安全救援位置随热释放率以及入口风速的变化

Tab. 6 Variations of Rescue Locations of Safety vs Heat Release Rates and Entrance Wind Speeds

热释放率/ MW	不同风速( $m \cdot s^{-1}$ )下的救援位置/m				
	1	2	3	4	5
5	-100	-50	-20	-10	-2
10	<-100	-100	-50	-30	-20
30	<-100	<-100	-100	-100	-50

(2)为了防止高温对消防救援的影响,隧道内的环境风速应该不小于  $5 m \cdot s^{-1}$ 。

### 4 结 语

(1)在隧道发生火灾时,不仅隧道内的温度随着时间发生变化,而且隧道内的人员位置也在移动,因此人员逃生的判别条件必须考虑到这 2 个因素。本文中给出的修正克拉尼公式,是一个更合理的基于隧道火灾温度场的人员逃生判断条件。

(2)通过研究给出了不同隧道风速和火灾规模时,消防救援的具体位置和最大的安全持续时间。

(3)为了防止高温回流的影响,在消防救援时,隧道内的环境风速应不小于  $5 m \cdot s^{-1}$ 。

(4)本文中仅研究了基于火灾温度的人员逃生,而对于危害更大的烟雾影响以及温度与烟雾的共同影响,将是下一步研究的重点。

### 参考文献:

#### References:

[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 Xin-quan, XIE Xu-cheng, et al. Simulation of Personnel Evacuation and Casualty in High-rise Building Fire[J]. Journal of China Safety Science, 2002, 12(3): 15-18.

[2] 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 Yong-di. The Numerical Simulation of Long Highway Tunnel Fire and the Evacuation Study[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.

[3] 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 Qing-jie, QUAN Gao-feng, SHAO Li. Analysis of Mentality and Behavior of People Involved in Fire Disasters [J]. Journal of Hefei University of Technology: Social Sciences, 2004, 18(3): 159-162.

[4] 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 Zhi-ming, HUO Ran, WANG Hao-bo, et al. Personal Evacuate Time Prediction in a Building Fire [J]. Fire Safety Science, 2003, 12(1): 40-45.

[5] 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.

[6] GONZALEZ J A, DANZIGER N H. Tunnel Ventilation Design for Fire Safety [C]//BHRA. 6th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Durham: 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 Nian-bing. The Countermeasures to the Highway Tunnel Fire and the Evacuation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.

[8] 夏永旭,石平. 公路隧道通风空气交叉污染三维数值分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(6): 44-47.

XIA Yong-xu, SHI Ping. 3D Numerical Analysis on Air Cross Pollution of Opening and Shaft in Ventilation of Highway Tunnel [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 44-47.

[9] WANG Q, MA K, LUNDQVIST M, et al. CFD Applications of PHOENICS on Building Environment and Fire Safety Design [C]//OAP Ltd. 10th International PHOENICS Conference. Melbourne: OAP Ltd, 2004: 1-20.

[10] 夏永旭,赵峰. 特长公路隧道纵向-半横向混合通风方式研究[J]. 中国公路学报,2005,18(3):80-83.

XIA Yong-xu, ZHAO Feng. Research on the Combined Longitudinal and Semi-transverse Ventilation System in Lengthy Highway Tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 80-83.

[11] 王永东,夏永旭. 公路隧道纵向通风系统局部影响数值模拟[J]. 西安公路交通大学学报,2001,21(4):50-54.

WANG Yong-dong, XIA Yong-xu. Parts Effect Numerical Simulation of Longitudinal Ventilation System of Highway Tunnel [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(4): 50-54.