

公路隧道火灾排烟风口设计参数优化研究*

夏永旭¹, 李峰^{1,2}, 姚毅¹

(1. 长安大学隧道工程安全研究所, 西安 710064 2. 新疆交通规划勘察设计研究院, 乌鲁木齐 830006)

摘要: 针对近年来我国隧道工程界出现的关于在长大公路隧道纵向式通风系统中运用排烟风道的争议, 本文首先介绍了排烟风道在国内外公路隧道通风工程领域中的应用现状及其发展趋势, 继而进一步对涉及到公路隧道火灾排烟风道设计中重要的影响因素进行了探讨。最后, 以公路隧道发生火灾的规模、排烟量、临界风速以及救援逃生时间为控制条件, 采用有限元数值模拟方法, 系统地研究了公路隧道排烟风道排烟口的设置间距、开口个数等参数及其对排烟效果的影响。研究结果认为文中给出的具有C型规格及设置的排烟口可以用于公路隧道纵向式通风排烟风道设计中。

关键词: 有限元; 排烟风道; 排烟效果; 排烟风口; 设计参数

中图分类号: U458.1 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2013)03-0669-06

Study on the Optimization of Smoke Outlets' Layout in Road Tunnel Design

Xia Yongxu¹, Li Feng^{1,2}, Yao Yi¹

(1. The Safety Research Center of Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute, Urumqi 830006, China)

Abstract: For the controversy comes out in recent years about the use of smoke exhaust channel in long highway tunnel at first, this paper introduces the current application situation and the trend of smoke exhaust channel in the field of road tunnel ventilation then the important factors involved in the design of road tunnel smoke exhaust channel are further explored. Finally in the light of the heat release rate, the amount of smoke, the critical wind velocity as well as the rescue and escape time, the finite element numerical simulation method is used to systematically study the reasonable layout of smoke outlets' vertical spacing, opening number and the smoke exhaust effect. It is concluded that the opening specification type C referred in this paper can be used in road tunnel longitudinal ventilation system design.

Keywords: the finite element; smoke exhaust channel; smoke exhaust effect; smoke outlet; design parameter

1 引言

在隧道发生火灾时, 如何将火灾产生的烟气迅速有效地排除, 避免其在行车道内蔓延沉降以改善隧道内火场环境, 是隧道防灾救灾的关键。目前, 国内外公路隧道的排烟模式分为纵向排烟模式和集中排烟模式, 二者最根本区别在于是否设置专

用排烟风道。

设置有专门排烟风道的隧道, 在欧美国家随处可见, 如瑞士 Chienberg 隧道和 LopperN 8 隧道、斯洛伐克 Branisko 隧道、荷兰 Rheinufer 隧道等。在我国, 一些重要性及安全等级较高的水底隧道和市政隧道也设置了排烟风道, 如上海崇明越江隧道、武汉长江水底隧道以及香港的鹰巢隧道和沙田顶

* 收稿日期: 2012-12-20(修改稿)

作者简介: 夏永旭, 男, 陕西武功人, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: yongxuxia@126.com

通讯作者: 李峰(1983-), 陕西西安人, 博士生, 主要研究方向隧道工程。E-mail: 599184225@qq.com

隧道等。近年来,在山岭公路隧道纵向通风设计中,也有设置排烟风道的趋势,如浙江台缙高速公路苍岭隧道、诸永高速公路括苍山隧道、双峰山岭隧道等。但是,对于纵向通风系统中专用排烟风道排烟口的设置问题,其研究尚显不足。本文拟在公路隧道纵向通风系统的基础上,以火灾规模及排烟速率为限制条件,采用数值模拟方法,研究含有设置不同间距和数量排风口风道在火场中的功效,以期为公路隧道火灾排烟风道设计提供技术支持。

2 隧道火灾排烟设计影响因素

火灾条件下隧道排烟设计需考虑的主要影响因素有:火灾规模、临界风速、人员逃生时间及排烟速率等。因此,在研究排烟风口设置前,必须先对隧道火灾排烟影响因素进行探究。

2.1 火灾规模

对于公路隧道火灾规模即热释放率(HRR),国内外曾有不是的研究成果,本文采用法国(CETU 2003a)^[1]针对不同火灾场景给出的线性变化火灾热释放模型。表1给出了具体的热释放率和火灾参数,图1是热释放率曲线,最大热释放率为30 MW(有载重货物)。

表1 法国对于不同火灾场景热释放率的规定(CETU 2003a)^[1]

Table 1 Heat release rate of different fire environment of France (CETU 2003a)^[1]

热释放率 (MW)	增长时间 (min)	持续时间 (min)	下降时间 (min)	火荷载 (GJ)
8	5	25	20	18
15	5	60	15	63
30(无载重货物)	5	0	45	50
30(有载重货物)	10	50	30	125
100	10	60	20	450
200	10	60	30	960

2.2 临界风速

在发生火灾情况下,为避免烟雾产生回流现象的隧道内最小风速称为“临界风速”。已有的研究一般认为纵向通风系统中隧道的临界风速值不小于2.5 m/s。但是,文献[2]通过对30 MW(有载重货物)的火灾规模,以保证隧道火源上游完全没有热辐射回流为控制条件,研究结果认为临界风速应不小于3.1 m/s。故而本文取隧道临界风速为3.1 m/s。

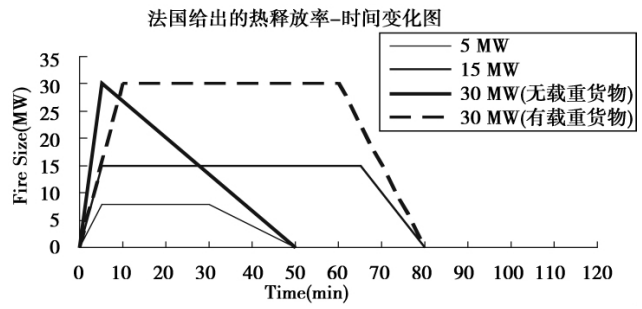


图1 法国对于不同火灾场景热释放率曲线(CETU 2003a)^[1]

Fig. 1 Heat release rate curve of different fire environment of France (CETU 2003a)^[1]

2.3 人员逃生时间

隧道火灾发生时人员逃生的最不利情况为,火灾发生在隧道中部一个通道口位置,此时人员只能撤离至隧道下一通道口寻求生机。考虑到长大隧道内人行通道的设置间距^[3](一般取250 m)、逃生速度(根据T. J. Shields等试验得知,人在隧道内的正常疏散速度为1.5 m/s,由于在隧道火灾中的环境比一般建筑要恶劣,人员在有烟气的情况下可能的疏散速度只有1 m/s左右^[4])加之75%人员在听到火灾警报后的15~40 s才开始移动^[5]。因此火灾初期6分钟将视为逃生的“黄金时间”^[6]。综上所述,本文重点研究排烟区间250 m范围内人眼的特征高度1.8 m处(通常人眼的特征高度在1.2~1.8 m左右,按保守考虑,设定特征高度取6 min内的火场环境变化情况。

2.4 排烟速率

表2 法国通风设计规定^[7]

Table 1 Ventilation requirements for French tunnel^[7]

隧道类型	车辆类型	火灾规模 (MW)	烟雾释放率 (m ³ /s)	最小风速 (m/s)
净高 < 2 m	2~3 辆小轿车	8	—	2
2 m < 净高 < 3.5 m	一辆小货车	15	—	2.5
净高 > 3.5 m				
无危险品	重型卡车	30	80	3
装载危险品	油罐车	200	> 300	4

当隧道发生火灾时,会产生大量的烟气,而烟气流量的大小与火灾的规模成正比,如表2^[7]。按照30 MW的火灾规模,对应的烟雾量初始体积为80 m³/s。根据理想气体状态方程 $R = PV/T$,该规模火灾发生时温度引起的烟气体积膨胀率约为2.25倍,则对应30 MW火灾排烟量至少为 $80 \text{ m}^3/\text{s} \times 2.25 = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,才能保证单位时间内烟气产生量与排烟量平衡。根据排烟量及隧道断面形状尺

寸,设计排烟风道断面面积如果取为 12 m^2 ,则风道内风速应不小于 15 m/s 。按照此排烟速率要求,如果设每一排烟孔面积为 $S_p(\text{m}^2)$,则且排烟孔的数量 n 应该为

$$n = 180/S_p$$

如图所示 2。

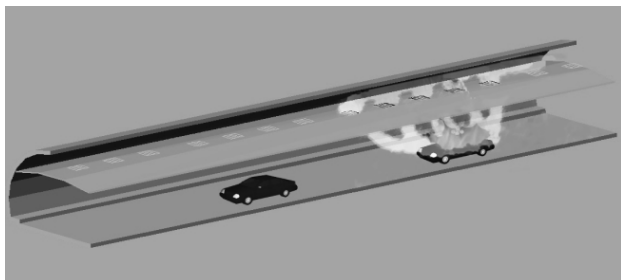


图 2 火灾排烟风道图示

Fig. 2 Icon of smoke exhaust channel

3 排烟口设计参数优化研究

3.1 研究方法及模型

目前,国内外针对隧道火灾烟雾排放问题的研究主要采用理论分析、模型试验、数值模拟三种方法。由于问题的复杂性,通常很难采用解析方法进行求解,而模型试验研究费用较为昂贵。随着计算机技术的发展,采用有限元技术对大规模复杂的流体动力学问题进行数值模拟研究的到广泛应用。

本文所采用有限元模型中单元规模及物理参数选取,均按照相关文献实体试验结果进行了拟合验证^{[8][9]}。模型几何尺寸(如图 3、4)及空气物理参数设定如下:

火源模型尺寸:长×宽×高 = $4.6 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$;

隧道模型尺寸:上游 $L_1 = 300 \text{ m}$,下游 $L_2 = 300 \text{ m}$;

排烟口开启长度: 250 m 范围内;

隧道内空气密度: 0.9 kg/m^3 ;

隧道内平均温度: $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

壁面粗糙度: 0.022 m ;

3.2 工况模拟及结果分析

由于烟雾浓度分布和温度分布相似^[10],本文拟对比在最不利情况下, HRR 为 30 MW 火灾发生后随着隧道内风速调整至临界风速过程中立即开启下游 250 m 排烟区间内排烟口 6 min 后该区间内的温度场分布情况。为了研究不同排烟风口的面积和间距排烟效果,本文设计了 A、B、C、D、E、F 六种排烟口规格如表 3,其排烟量均为 $180 \text{ m}^3/\text{s}$,通过对比隧道内的温度降低程度,筛选具有最好排

烟效果的风口规格^[2]。类似地分别计算该规格排烟风道对 5 MW 、 20 MW 的排烟效果及火场环境的改善状况。

此外,考虑到隧道内部每个通道出口处不总对应一个排烟口,建模时火源正上方不设排烟口,而是在火源正上方下游间隔半个开口间距起设置排烟口。参照相关规范文献及各方面因素,最后得到模型实际排烟距离及排烟风道排烟口规格列表如下^{[3][11]}:

表 3 排烟风道各排烟矩形开口规格

Table 3 Rectangular openings specifications of smoke exhaust channel

规格	实际排烟距离 (m)	开口间距 (m)	开口个数 (个)	开口面积 (m^2)
A	247.5	5	50	0.36
B	245.0	10	25	0.72
C	247.5	15	17	1.06
D	250.0	20	13	1.38
E	237.5	25	10	1.80
F	240.0	30	8	2.25

注:排烟口排烟风速均为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,开口形状均为正方形。

3.2.1 5 MW 、 20 MW 、 30 MW 在临界风速条件下下游温度分布

首先采用有限元数值模拟方法,模拟在 3.1 m/s 临界风速条件下,不同火灾规模在隧道内不设排烟风道时火源下游 250 m 区域内人眼的特征高度处 6 min 时的温度统计值,如表 4。

表 4 各规模火灾 6 min 内隧道中温度变化情况统计

Table 4 Statistics of temperature variation in tunnel with different HRR in 6 min

火灾规模(MW)	5	20	30
最高温度($^\circ\text{C}$)	175.5	323.7	386.5
火源点到下游 250 m 处 温度($^\circ\text{C}$)	132.3	278.0 ~ 379.3	~ 28.5 38.9 67.5
火源下游 250 m 处温度($^\circ\text{C}$)	28.5	38.9	67.5

3.2.2 六种规格排烟风道在 30 MW 火灾条件下的温度场

为了对比表 3 中六种排烟风道的排烟效果,仍然考虑以 30 MW 为例,采用数值模拟分析不同风道规格的温度场。火灾发生 6 min 时的温度统计值如表 5。

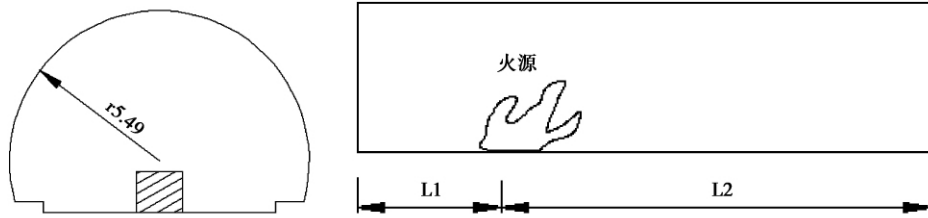


图3 隧道横断面以及火源纵向布置图(单位:m)

Fig. 3 Cross section of tunnel and vertical layout of fire (unit: m)

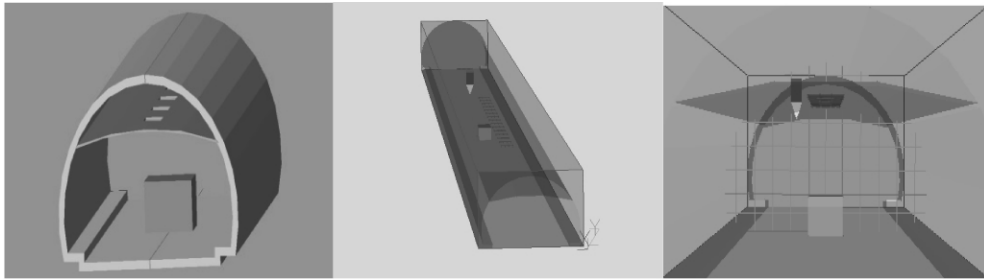


图4 隧道排烟风道几何及三维有限元模型

Fig. 4 The geometry mode of tunnel smoke exhaust channel and three-dimensional finite element model

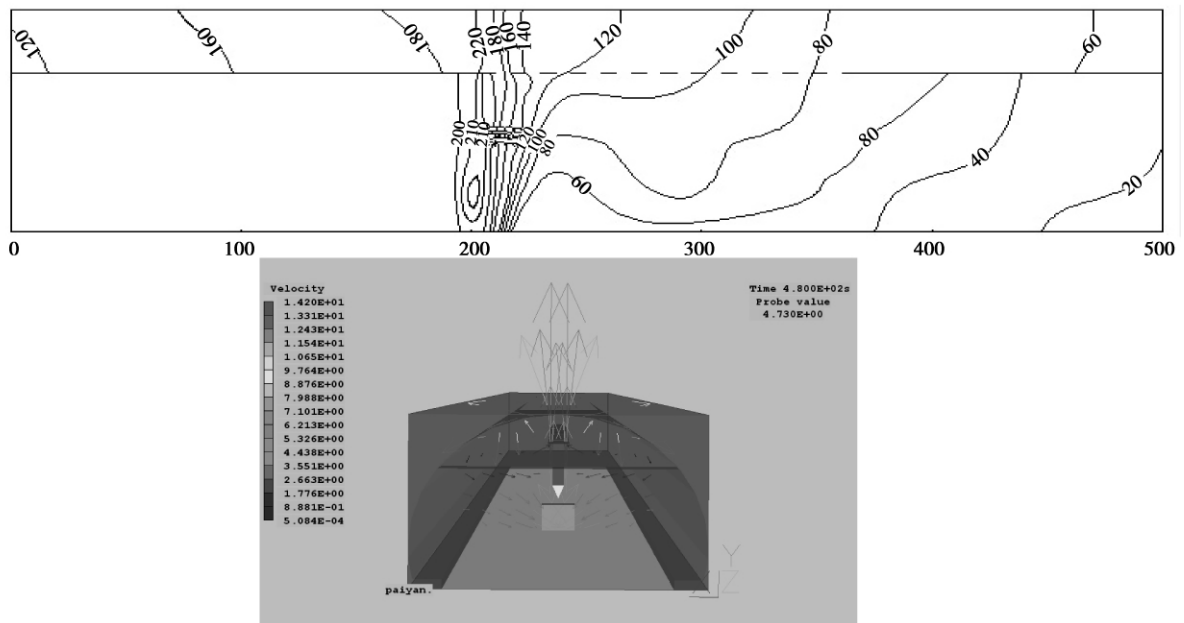


图5 含C规格排烟风道30 MW火灾6 min下游温度分布等值线及流场矢量图

Fig. 5 Temperature contour and flow field vector downstream of tunnel smoke exhaust channel with opening specification C when time is 6 min and HRR is 30 MW

表5 30 MW火灾6 min时六种规格排烟风道降温效果统计

Table 5 Statistics of cooling effect for tunnels with 6 types of opening specifications in 6 min (HRR = 30 MW)

风道规格	无排烟风道	A	B	C	D	E	F
最高温度(℃)	386.5	372.3	289.7	210.4	297.9	312.3	357.2
火源点到下游 250 m处温度(℃)	359.3 ~	325.8 ~	235.6 ~	161.1 ~	224.6 ~	274.8 ~	304.1 ~
火源下游250 m 处温度(℃)	67.5	57.5	38.5	31.2	52.7	55.8	59.1

对比模拟结果可以看到:

(1) 在排烟总量一定的条件下,排烟风道排烟口布置过密或者过疏均对排烟均不利;

(2) 排烟口布置过密(如 A),虽然火灾发生后能够密集的对烟气蔓延路径上烟气进行排除,但是单个排烟口排烟风量过小,在烟气初期蔓延区内不能快速排烟,反而打乱了烟气的成层分布;

(3) 排烟口布置过于稀疏(如 D~F),烟气到达排烟口时虽然能够提供较强的排烟量,但却剧烈扰动了烟气成层分布且扰动后的烟气距下一排烟口距离较远;

(4) 对于排烟效果较好的 B、C 而言,B 的经济性欠佳且排烟效能稍逊与 C。

3.2.3 C 规格排烟风道在 5 MW、20 MW 火灾条件下下游温度计算

以上研究结果表明,C 规格排烟口的排烟风道能显著改善隧道发生火灾后 6 min 内火场环境,

其降温效果在六种类型规格排烟风道中最佳。下文将研究该规格排烟风道分别对于 5 MW、20 MW 火灾的降温效果。

3.2.4 C 规格排烟口在 5 MW 规模火灾条件下表现

(1) 由于排烟口所产生的烟囱效应,火源点温度会迅速升高其后随着隧道内流场调整烟羽流逐渐变恢复正常,下游各点受到火源温度场升温 and 排烟口降温交替影响,温度随时间变化具有一定程度的波动;

(2) 火源处在 6 min 所得温度最大值为 122.4 °C 较未设置风道条件下最高温度 175.5 °C 下降了 53.1 °C,下游各观测点温度保持在 22.1 ~ 100.5 °C 之间;

(3) 对于 5 MW 火源产生的火灾建议开启火源附近下游少量排烟口,以免打乱成层分布,这样更有利于灭火救援。

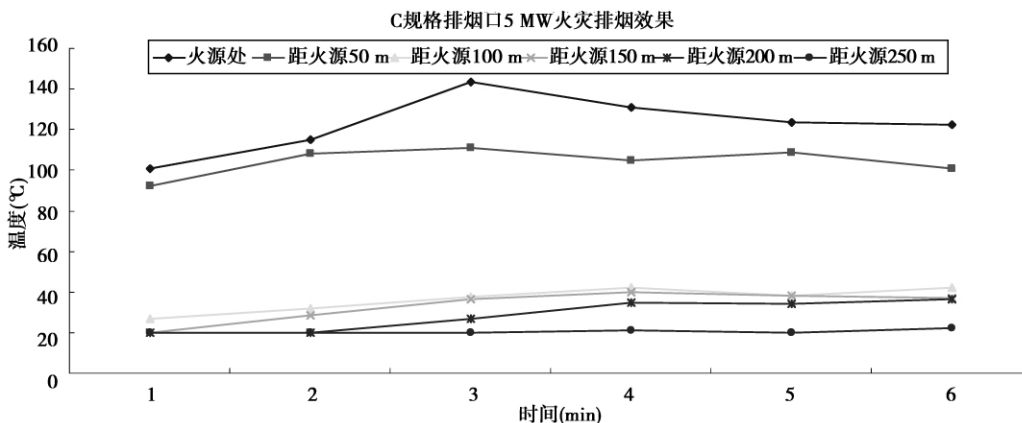


图 6 C 规格排烟风道 5 MW 火灾下游温度分布

Fig. 6 The distribution of temperature with time downstream when HRR = 5 MW for opening specification C

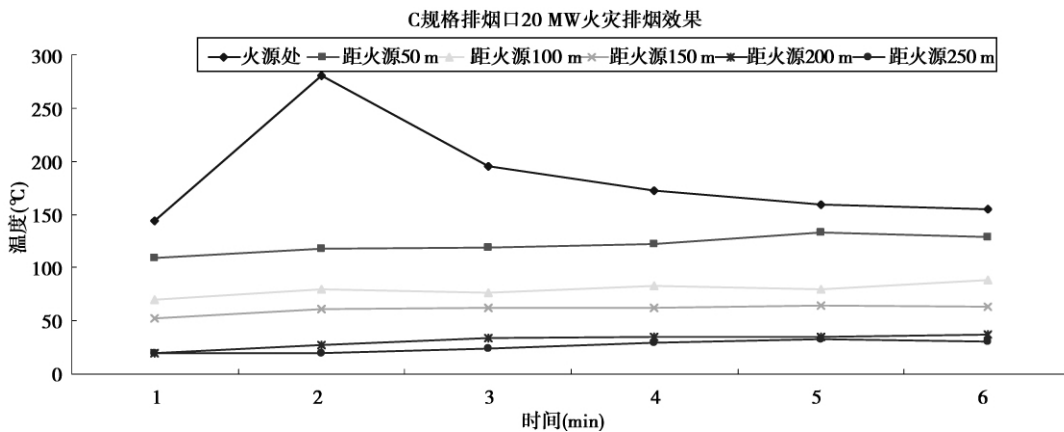


图 7 含 C 规格排烟风道 20 MW 火灾下游温度分布

Fig. 7 The distribution of temperature with time downstream when HRR = 20 MW for opening specification C

3.2.5 C 规格排烟口在 20 MW 规模火灾条件下表现

(1) 由于排烟口所产生的烟囱效应,火源点温度会迅速升高其后随着隧道内风流调整烟羽流逐渐恢复正常,下游各点温度随时间变化不大;

(2) 火源处在 6 min 内所得温度最大值为 155.3 °C 较未设置风道条件下最高温度 323.7 °C 下降了 168.4 °C,下游各点温度保持在 30.2 ~ 128.4 °C 之间;

(3) 对于 20 MW 火源产生的火灾,C 规格排烟风道对其控制作用较好。

4 结 语

(1) 在排烟总量一定的条件下,排烟风道排烟口布置过密或者过疏均对排烟不利。

(2) 通过对 20 MW、30 MW 的火灾释放率模拟分析,C 规格的排烟效果最好。因此建议公路隧道的排烟口设计可选取 C 规格;

(3) 本文的研究结果对于设置排烟风道的隧道纵向式通风系统设计具有参考价值。

参考文献(References)

- [1] Allen R (2003). Tunnel operations [J]. Tunnel Management International, Vol. 6, No. 4.
- [2] 李峰. 公路隧道通风弯曲风道及火灾排烟风口优化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009. (Li Feng. Study on the optimization of bending-duct in road tunnel and Smoke outlets' layout in fire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风照明设计规范 (JTJ 026.1—1999) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel (JTJ 026.1—1999) [S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 古晋. 地铁隧道火灾的疏散与救援 [J]. 劳动保护, 2004 (11): 37-39. (Gu Jin. Subway tunnel fire evacuation and rescue [J]. Labor Protection, 2004 (11): 37-39. (in Chinese))
- [5] 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 Mingzhi, Huo Ran, Wang Haobo, et al. Safe evacuation time forecast in a classroom building fire [J]. Fire Safety Science 2003, 12(1): 40-45. (in Chinese))
- [6] 王亚琼. 单洞对向交通公路隧道火灾安全对策研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009. (Wang Yaqiong. Countermeasures to single hole to the traffic road tunnel fire safety [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [7] Inter-Ministry Circularn 2000-63 of 25 August 2000 concerning safety in the tunnels of the national highways network. Ministry of the Interior/Ministry of the Establishment [J]. Transport and Housing, France.
- [8] Chow, W. K. On smoke control for tunnels by longitudinal ventilation [J]. Tunneling and Underground Space Technology Volume: 13, Issue: 3, July 9, 1998: 271-275.
- [9] 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. (Zhong Yongdi. Study on highway tunnel fire numerical simulation and evacuation [D]. Xi'an: Chang'an University Master's thesis, 2006. (in Chinese))
- [10] 张进华, 杨高尚, 彭立敏, 等. 隧道火灾烟气流动的数值模拟 [J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 4-8. (Zhang Jinhua, Yong Gaoshang, Peng Limin, et al. Numerical simulation for smoke flow of the tunnel fire [J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 4-8. (in Chinese))
- [11] 黄洪宇. 防排烟系统设计及施工中常见问题 [J]. 安装, 2007 (8): 41-42. (Huang Hongyu. Common problems in the design and construction of the smoke control system [J]. An Zhuang, 2007 (8): 41-42. (in Chinese))
- [12] Vachon, M. Grippay, J, Rebuffat, D. "CFD modelling of parameters for the fire source in a road tunnel". the 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003: 645-656.
- [13] Oud, Ir H. J. C. Safety measures reduce risk in Dutch road tunnels [J]. Tunnels and Tunnelling, Vol 20, No6, Jun, 1988: 64-66.
- [14] Alfred Haack. The concept of fire security in traffic tunnel [J]. 2001' Sino-Swiss highway tunnel technology exchange, 2001.
- [15] 杨卫东. 公路隧道防火安全 [J]. 消防技术与产品信息, 2001 (9): 44-46. (Yang Weidong. Fire security in road tunnel [J]. Fire technology and product information 2001 (9): 44-46. (in Chinese))
- [16] 长安大学. 长大公路隧道运营管理及防灾救灾研究 [R]. 2006. (Chang An University. Study on long highway tunnel management and disaster prevention and relief [R]. 2006. (in Chinese))
- [17] 赵峰, 夏永旭. 公路隧道通风设计软件的编制及特点 [J]. 现代隧道技术, 2003, 40(2): 46-50. (Zhao Feng, Xia Yongxu. The design and trait of road tunnel ventilation software [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(2): 40-45. (in Chinese))

(下转第 679 页)

的重大举措。

参考文献(References)

- [1] 张洋. 城市化进程中生态问题的初探[J]. 资源环境与发展, 2008, (3): 46-48. (Zhang Yang. Study of ecological problems in urbanization [J]. Resources, Environment and Development, 2008, (3): 46-48. (in Chinese))
- [2] 钱七虎. 建设特大城市地下快速路和地下物流系统[J]. 科技导报, 2004, (4): 3-6. (Qian Qihu. Construction of underground expressway and establishment of underground logistics system in megacities [J]. Science & Technology Review, 2004, (4): 3-6. (in Chinese))
- [3] 史小丽, 王选仓, 贾奇英. 公路隧道内交通噪声预测[J]. 公路交通科技, 2010, 27(2): 150-151. (Shi Xiaoli, Wang Xuancang, Jia Qiyang. Traffic noise prediction inside highway tunnels [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(2): 150-151. (in Chinese))
- [4] 商艳. 城市中的生态人居环境[J]. 科技创新导报, 2008, (13): 114-115. (Shang Yan. Urban eco-living environment [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, (13): 114-115. (in Chinese))
- [5] 毛锋. 生态城市的基本环境与规划原理和方法[J]. 中国人口资源与环境, 2008, 18(1): 155-159. (Mao Feng. Basic environment and planning principles and methods of eco-city [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(1): 155-159. (in Chinese))
- [6] 李启彬. 公路隧道环境影响评价中存在的问题与对策[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(1): 8-10. (Li Qibin. Problems of environmental impact assessment of highway tunnels and countermeasures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(1): 8-10. (in Chinese))
- [7] 赵占厂. 试论超长公路隧道建设中的几个关键技术问题[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(3): 7-11. (Zhao Zhanchang. Discussion on several key techniques for super long highway tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(3): 7-11. (in Chinese))
- [8] 王玉梅, 李世泰. 渤海海峡跨海通道建设环境影响研究[J]. 中国人口资源与环境, 2007, 17(5): 91-94. (Wang Yumei, Li Shitai. Preliminary study on environmental impact assessment of the significant strategy project of the cross sea passage on Bohai Sea Strait [J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(5): 91-94. (in Chinese))
- [9] 任毅, 胡壮志, 杨幸. 公路隧道工程中的环保问题及对策[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 365-373. (Ren Yi, Hu Zhuangzhi, Yang Xing. Environmental problem and countermeasure in road tunnel engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 365-373. (in Chinese))
- [10] 黄伦海, 蒋树屏, 张军. 公路隧道洞口环保型设计施工现状及展望[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 455-459. (Huang Lunhai, Jiang Shuping, Zhang Jun. Current status and prospect of environmental design and construction of road tunnel entrance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(3): 455-459. (in Chinese))
- [11] 牛景轶, 金祖权. 海底隧道工程对海洋环境的污染方式、特点及防治[J]. 青岛农业大学学报, 2009, 21(4): 50-55. (Niu Jingyi, Jin Zuquan. Ways, characteristics and prevention of pollutions from cross harbour tunnels to marine environment [J]. Journal of Qingdao Agricultural University, 2009, 21(4): 50-55. (in Chinese))
- [12] 边归国. 台湾海峡隧道的环境问题及应对措施[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(5): 18-22. (Bian Guiguo. Environmental problems and their countermeasures for the Taiwan Strait Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(5): 18-22. (in Chinese))
- [18] 曹振. 长大公路隧道分段纵向通风火灾排烟研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. (Cao Zhen. Study on segmenting lengthways plus regional exhausting fume passageway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese))
- [19] 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. The study on the heat release rate and ventilization mode of tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [20] 涂耘, 陈建忠. 控制火灾和烟雾的通风与防灾能力思考[A]//2006年公路隧道运营管理与安全论文集[C], 2006: 152-158. (Tu Yun, Chen Jianzhong. The ventilization of fire and smoke control and the consideration of disaster prevention capabilities [A]//2006 highway tunnel management and Security Collection [C], 2006: 152-158. (in Chinese))

(上接第674页)