

公路隧道火灾通风计算的改进*

夏永旭¹, 邓念兵^{1,2}, 王永东¹

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 西安 710064; 2. 宁波市规划局北仑分局, 浙江 宁波 315800)

摘要: 现有的公路隧道火灾通风计算方法, 是按正常运营通风设计的风机配置, 考虑火灾发生后一定数量风机的损坏, 计算火灾情况下能够提供的隧道内风速, 用该风速和阻止烟流逆流的临界风速比较来验算火灾时期通风的安全性。但在公路隧道的火灾过程中, 火灾烟流阻力确实存在, 且对隧道火灾时的烟气流动影响较大。本文将烟流阻力引进传统的公路隧道通风计算中, 给出了公路隧道火灾通风时的改进计算公式。通过算例, 证明了改进的计算方法更符合隧道火灾时实际概况, 为隧道火灾时的通风控制提供了科学依据。

关键词: 公路隧道; 火灾; 通风; 烟流阻力; 计算方法

中图分类号: U458.1 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2014)04-0937-06

Amelioration of Calculation Method for Ventilation of Highway Tunnel during the Fire

Xia Yongxu¹, Deng Nianbing^{1,2}, Wang Yongdong¹

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Beilun City Planning Bureau of Ningbo, Ningbo, Zhejiang 315800, China)

Abstract: The current calculation method for ventilation of highway tunnel during fire has a consideration that with installation of fans for normal operation some fans would be damaged on fire, the wind speed during the fire by other fans working normally in tunnel was compared with critical wind speed, which was enable to prevent the up-stream flow of the smoke thus to check the security by ventilation during the fire. There is existed smoke resistance on fire and it has an effect on smoke flowing in tunnel. In this paper, the ameliorative calculation method is put forward for ventilation in highway tunnel during fire with considering the smoke resistance. It has been proved by examples that the ameliorative calculational method accords well with the factual situation of fire in tunnel. And it provides scientific basis of ventilation control on fire in tunnel.

Keywords: highway tunnel; fire; ventilation; smoke resistance; calculation method

1 引言

长大公路隧道的火灾是一种不可避免的低概率事件, 但是其危害和损失不可忽视。因此, 在公路隧道的通风设计中, 必须重视火灾时的通风计算。现有的公路隧道火灾通风计算, 通常是按正常

运营通风设计的风机配置, 考虑火灾发生后一定数量风机的损坏, 计算火灾情况下能够提供的隧道内风速, 用该风速和美国矿业局的阻止烟流逆流的临界风速^[1]比较来验算火灾时期通风的安全性。我国的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)^[2]更是依此规定“采用纵向通风的隧道, 隧

* 收稿日期: 2014-03-25 (修改稿)

作者简介: 夏永旭 (1954-) 男, 陕西武功人, 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。

E-mail: yongxuxia@126.com

道内换气风速不应低于 2.5 m/s”。最近几年来,也有不少学者采用不同的方法研究了公路隧道火灾时控制烟雾回流^[3-7],文献 [8]通过对 30 MW 隧道温度对人体伤害程度的研究,指出公路隧道内的临界风速应不低于 3.0 m/s。但是,在传统的公路隧道火灾通风一元流计算过程中,没有考虑火灾发生后的烟流阻力(包括节流效应阻力、摩擦阻力和浮力效应阻力)。然而,火灾过程中的烟流阻力是确实存在的,计算中必须予以考虑。本文给出考虑烟流阻力的公路隧道火灾通风改进计算公式,并通过算例验证其适用性。

2 隧道火灾烟流阻力

2.1 节流效应烟流阻力

在隧道火灾过程中,由于火焰的存在减小了火区段隧道的有效过流断面面积,在火区形成了一个局部阻力,这个局部阻力就像一个节流阀,作用于流过火区的烟流。这种由于燃烧火焰阻碍烟流在隧道中流动,以及由于风流(或烟流)体积流量变化而产生的阻碍(或推动)风流流动的现象,称为火灾烟流的节流效应。由节流效应产生的阻力,称为节流效应烟流阻力。通过分析火区烟流的动量变化和能量变化,可给出节流效应烟流阻力的计算公式^[9]:

$$h_j = \frac{1}{2} \rho_1 [v_1^2 (\varphi_y^2 / M_k - 1) + gh_m \cdot \cos\beta (1 - M_k)] \quad (1)$$

式中: h_j 为节流效应烟流阻力(Pa); ρ_1 为烟流污染区入风端火灾后烟流平均密度(kg/m^3); φ_y 为烟流质量增加率; v_1 为火灾时污染区入风端风速(m/s); M_k 为火灾燃烧生成物的相对变化量; g 为重力加速度(N/kg); h_m 为隧道路面至拱顶高度(m); β 为隧道的纵坡倾角($^\circ$)。

从式(1)可以看到,节流效应烟流阻力由两部分构成:第一部分为 $\frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \times (\varphi_y^2 / M_k - 1)$,它是由于烟流的温度变化和质量流量变化引起的,形式与节流阀的局部阻力计算式相同。该部分是火焰对烟流的节流效应,即火焰占用了过流断面,使过流断面减小,烟流阻力增大。其大小与燃烧状态有关,与隧道形状无关。第二部分为 $\frac{1}{2} \rho_1 g h_m \times \cos\beta (1 - M_k)$,它是由于烟流流动过程中的温度变化引起的。该部分说明:由于隧道本身有一定的高

度,当烟流密度变化时,断面内的流束受力不均,使烟流受力。它是火灾烟流的湍流节流效应,其大小与隧道特性、燃烧状态和烟流流动状态等有关。

2.2 烟流摩擦阻力

从物理学我们知道,由于风流与隧道壁面的摩擦,在靠近壁面的流体中形成边界层,引起内、外摩擦,造成风流流动过程中的动量损失。由于流体与隧道壁面的摩擦(称为外摩擦)和流体内部的湍流微团相互摩擦(称为内摩擦)产生的阻力,称为摩擦阻力。烟流摩擦阻力与密度成正比,与烟流速度的平方成正比。其计算公式为^[9]:

$$h_f = h_a \left(\frac{\rho_1}{\rho_a} \right) \left(\frac{v_1}{v_a} \right)^2 \left\{ \frac{A_k}{T_1} + \frac{(T_1 - A_k) [1 - \exp(1 - B_k L)]}{B_k L} \right\} \quad (2)$$

式中: h_f 为烟流摩擦阻力(Pa); h_a 为火灾前的风流摩擦阻力; ρ_a 为火灾前的风流密度(kg/m^3); v_a 为火灾前的风速(m/s); A_k 为沿程烟流温度计算式系数, $A_k = T_0$; T_1 为烟流污染区入风端火灾后烟流平均温度(K); B_k 为沿程烟流温度计算式系数, $B_k = \frac{a_b U}{mc_p}$ 可取 $0.01 (\text{m}^{-1})$; L 为隧道长度(m)。

2.3 浮力效应烟流阻力

在烟流流动过程中,由于烟流与隧道壁面间进行热交换,其温度下降,密度增大,使得隧道入风端的烟流密度与排风端的烟流密度出现明显的差异。当隧道的入风端标高不同于回排端标高时,形成推动或阻碍烟流流动的作用力,这种由于隧道沿程烟流密度与标高不同,使烟流本身产生的推动或阻止其流动的作用,称为火灾烟流的浮力效应。由浮力效应引起的作用于烟流的附加力,称为火灾烟流的浮力效应阻力或火风压。其计算公式为^[9]:

$$h_b = \frac{\rho_0 g L_r \sin\beta}{2} \left(M_k - \frac{2\rho_a}{\rho_0} + 1 \right) \quad (3)$$

式中: h_b 为浮力效应烟流阻力(Pa); ρ_0 为火区入风端烟流密度(kg/m^3); L_r 为火区长度(m)。

由于火灾时期烟流的节流效应、摩擦阻力及浮力效应的作用,使相同段隧道火灾前的风流阻力和火灾时期的烟流阻力不相等。

3 控制火灾烟流逆流层条件

在风速较低而燃烧强度较大的水平隧道火灾实验中,燃烧过程中出现在隧道同一断面上,形成下部为新鲜风流向火区方向流动,上部为烟流逆流

流方向流动的现象,这种现象称为火灾烟流逆流层现象。烟流逆流层的形成过程十分复杂,形成烟流逆流层的必要条件有两个:一是足够大的燃烧强度,即足够高的燃烧烟流最高温度和足够多的火灾生成气体量;二是足够小的隧道风速。在隧道内的风速等于零时,燃烧烟流密度小于风流密度,当燃烧条件足够大时,就会形成烟流逆流层。在强制通风的隧道,能否形成火灾烟流逆流层与风速和燃烧强度有关。

由烟流逆流层的形成过程可知,当单位体积的烟流动量大于隧道风流边界层单位体积的风流动量时,可形成烟流逆流层。由此给出烟流逆流层形成条件的判别式^[9]:

$$v < \frac{3f_3}{5} \sqrt{\frac{\left[\left(\frac{T_n}{T_0} - 1\right)gh_m + \frac{2\varphi_n u_0^2}{1 + \varphi_n}\right]}{\left[\left(1 - \sqrt{\frac{u}{36f}}\right)^2 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)\right]}} \quad (4)$$

式中: v 为隧道平均风速 (m/s); f_3 为转换系数,表示烟流最大垂直速度与水平逆流速度之比; T_n 为烟流最高温度; T_0 为烟流污染区入风端火灾前烟流平均温度 (K); φ_n 为混合比; u_0 为燃烧生成气体脱离可燃物表面的速度 (m/s); μ 为隧道摩擦系数; f 为实验常数,取值范围为:0.004 0 ~ 0.004 6,平均值为 0.004 3。

在现在的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)^[2]所规定的“采用纵向通风的隧道,隧道内换气风速不应低于 2.5m/s”,就是针对公路隧道发生火灾时,为了控制火灾烟雾的逆流层提出的隧道临界风速,而这个临界风速的计算,来源于美国矿业局防止烟雾回流的公式^[1]

$$V_c = K_g K \left[\frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A T_f} \right]^{1/3} \quad (5)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty C_p V_c} + T_\infty \quad (6)$$

式中: V_c 为临界速度 (m/s); g 为重力加速度 (m/s²); H 为隧道高度 (m); Q 为火源热释放率 (w); ρ_∞ 为周围空气密度 (kg/m³); C_p 为在恒压下的空气比热 (J/K_g·°K); A 为隧道净横断面面积 (m²); T_f 为热气体温度 (°K); $K = 0.61$ (无量纲); K_g 为坡度修正系数 (无量纲); T_∞ 为环境温度 (°K)。

通过试算比较,公式(4)的控制烟雾逆流层的计算结果,比比传统的美国矿业局给出的公式(5)、(6)偏小。

4 公路隧道火灾通风计算公式的改进^[10]

公路隧道火灾的燃烧过程是一非稳定过程,隧道风流为可压缩流体。因此,描述其流动过程的由连续方程、动量方程、能量方程及气体状态方程组成的方程组为瞬态方程。隧道火灾瞬态方程组求解非常困难,为了便于求解,我们引进假定:①隧道内的风流不可压缩;②隧道火源为点火源;③由于火灾前后,流入隧道内气体的体积流量不变,使用火灾烟流摩擦阻力公式计算的烟流摩擦阻力小于同样风速下火灾前风流的摩擦阻力。故为安全起见,火灾时期的烟流摩擦阻力仍然采用火灾前隧道内摩擦阻力计算公式计算。

4.1 全射流纵向通风计算公式的改进

全射流通风方式是纵向式通风的一种,它是利用射流风机所产生的高速气流推动前方空气流动,同时在风机后方形形成一个负压区,带动后方空气流入,从而在隧道内风机的前后一定范围内使空气沿隧道轴向定向流动,将污染物排出洞外。其通风模式如图 1 所示。

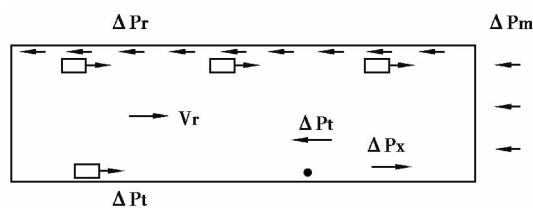


图 1 全射流火灾通风模式图

Fig. 1 Schematic drawing of whole jet ventilation during fire

根据能量方程,隧道内压力平衡此时应满足:

$$\Delta P_r + \Delta P_m + \Delta P_{\text{节}} = \Delta P_{\text{火}} + \Delta P_t + n \Delta P_j \quad (7)$$

式中: ΔP_m 为自然风阻力 (Pa); ΔP_t 为交通通风力 (Pa),仅考虑从进口到火区段的车辆,并取行车速度为零,其值为负; ΔP_r 为通风阻抗力 (Pa); ΔP_j 为射流风机升压力 (Pa); $\Delta P_{\text{火}}$ 为火风压 (Pa),在上行隧道中取正值,下行隧道中取负值; $\Delta P_{\text{节}}$ 为烟流节流阻力 (Pa); V_r 为临界风速 (m/s); n 为射流风机台数 (台)。而式中火风压:

$$\Delta P_{\text{火}} = \frac{\rho_1 T_1 \sin \beta}{A_k B_k} \times \ln \left[\frac{A_k + (T_1 - A_k) \cdot \exp(-B_k L)}{T_1 \cdot \exp(-B_k L)} \right] - \rho_a g L \sin \beta \quad (8)$$

节流阻力

$$\Delta P_{\text{节}} = \frac{1}{2}\rho \left[v_1^2 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) + gh_m \cdot \cos\beta \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \right] \quad (9)$$

式中： ρ 为火灾前空气平均密度 (kg/m^3)。

式(7)中的自然风阻力、沿程阻力和交通风压力与文献^[2]完全一样。很显然，与文献^[2]相比，本文的计算式(7)中增加了火风压 $\Delta P_{\text{火}}$ 和节流阻力 $\Delta P_{\text{节}}$ 。

相应的射流风机台数计算公式变为：

$$n = \frac{\Delta P_r + \Delta P_m + \Delta P_{\text{节}} - \Delta P_{\text{火}} - \Delta P_t}{\Delta P_j} \quad (10)$$

3.2 竖井送排式通风

竖井送排式通风压力模式如图2所示。根据能量方程，隧道内压力平衡此时应满足

$$\sum \Delta P_b + \sum \Delta P_e + \Delta P_m + \Delta P_t - \Delta P_r + \Delta P_{\text{火}} - \Delta P_{\text{节}} + \sum n_j \Delta P_j = 0 \quad (11)$$

式中： $\sum \Delta P_b$ 为排风竖井底的阻力和； $\sum \Delta P_e$ 为送风竖井底的阻力和；其余如前所述。

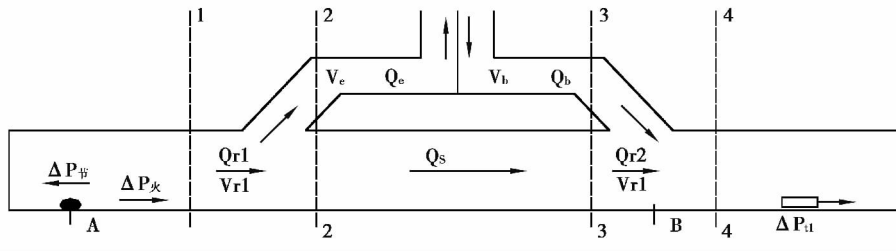


图2 竖井送排式通风模式图
Fig. 2 Schematic drawing of shaft ventilation

4 计算算例

4.1 全射流通风火灾计算

某一隧道全长 3 103 m，隧道纵坡 -1.27%，隧道断面积 51.7 m²，断面当量直径 7.32 m，设计交通量 1 001 辆/h，行车速度 40 km/h。假设隧道中有一辆大型货车着火，其热量释放率为 50 MW，假定火灾点位置距离隧道进口长度与隧道全长的比值为 α 。则按照前述公式(9)计算得到节流阻力 $\Delta P_{\text{节}} = 46.346P_a$ ；而火风压 $\Delta P_{\text{火}}$ 及根据公式(7)可以计算出不同火灾位置时的射流风机数如表1。取最大数 28 台，比传统的算法^[4] 44 台少 16 台。图3、图4 分别给出节流阻力和火风压与火灾温度之间的关系。

表1 不同 α 时的火风压 $\Delta P_{\text{火}}$ (Pa) 和射流风机数 n
Table 1 The number of jet fans and fire pressure $\Delta P_{\text{火}}$ (Pa) at different α

α	0.1	0.2	0.3	0.4
$\Delta P_{\text{火}}$	22.023 3	22.023 3	22.023 3	22.023 3
n	25	25	26	26
c	0.6	0.7	0.8	0.9
	22.023 3	22.023 1	22.018 8	21.922 5
	27	27	28	28

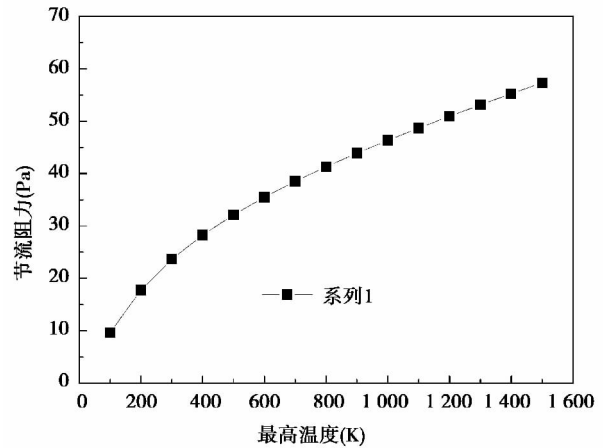


图3 节流阻力与最高温度的关系
Fig. 3 The relationship between throttle resistance and highest temperature

4.2 竖井送排式分段纵向通风火灾计算

某特长隧道全长 5 235 m，采用单竖井分段纵向通风(I段 $L_1 = 3 340$ m，II段 $L_2 = 1 895$ m)。隧道断面积 66.425 m²，断面当量直径 7.98 m²，设计车速 80 km/h；竖井长 240 m，送风面积 7.09 m²，排风面积 11.07 m²。假设隧道内有一辆大型货车着火，其热量释放率为 50 MW。计算得出隧道II段的节流阻力，射流风机计算结果如表2，比传统的计算少 3 台，节流阻力、火风压与隧道温度的关系

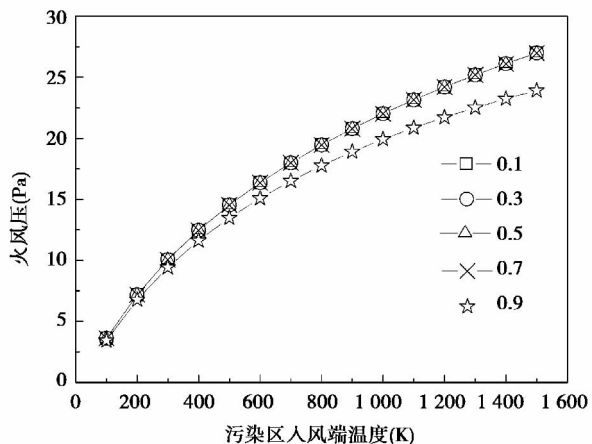


图 4 火风压与距离和温度的关系

Fig. 4 The relationship between fire pressure with distance and temperature

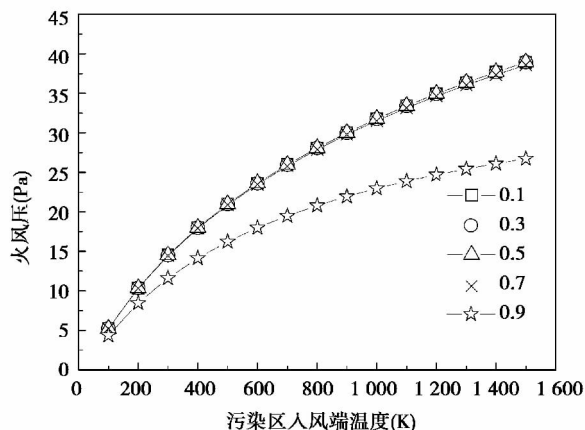


图 6 主隧道火风压与距离、温度的关系

Fig. 6 The relationship between main tunnel fire pressure, with distance and temperature

如图 5、6 所示。

表 2 不同 α 时的射流风机数

Table 2 The number of jet fans at different α

α	0.1	0.2	0.3	0.4
n_1	5	5	5	5
n_2	4	4	4	4
0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
5	5	5	5	5
4	4	4	4	4

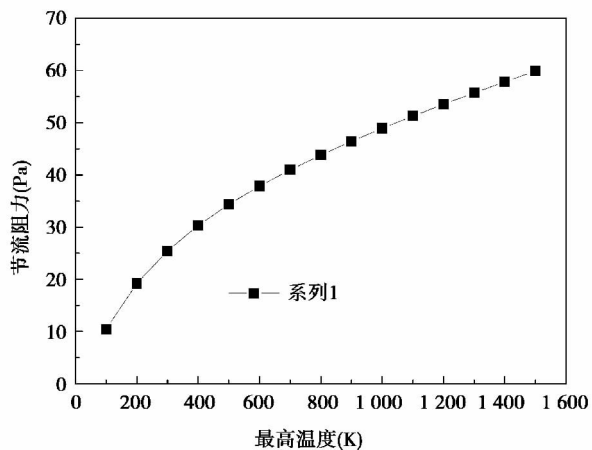


图 5 节流阻力与最高温度的关系

Fig. 5 The relationship between throttle resistance and the highest temperature

从上式两例的计算结果可以看到:

(1) 随着火灾温度的增加,节流阻力和火风压也明显增大;

(2) 计及火风压和节流阻力后,射流风机的数目可以减少。说明按照传统通风计算的射流风机

数,如果在火灾时有部分射流风机烧毁(不少于最小要求),仍然可以保障排烟;

(3) 采用竖井通风,如果火源点离竖井底很近,其火风压甚至可以远远大于隧道内形成临界风速需要的升压力,即无需开动轴流风机,就可以自动排烟。

5 结 语

(1) 公路隧道火灾时的通风计算,必须计及火风压和节流阻力;

(2) 改进后的隧道公路隧道火灾计算公式,为火灾时的通风控制和灭火排烟提供了更为科学的技术支持;

(3) 对于横向、半横向以及混合式通风,可以同样推导出计及火风压和节流阻力的火灾通风计算公式。

参考文献 (References)

[1] 叶欢(译). 公路隧道防火通风设计 [J]. 隧道译丛, 1994 (2): 12-17. (Ye Huan (translator). Tunnel ventilation design for fire safety [J]. Chinese Journal of Tunnel Translations, 1994 (2): 12-17. (in Chinese))

[2] 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, 2000. (The industry standard 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, 2004. (in Chinese))

[3] 李峰. 公路隧道通风弯曲线道及火灾排风口优化研究 [D]. 西安: 长安大学长安大学, 2009. (Li Feng.

- Study on the optimization of bending-duct in road tunnel and smoke outlet's layout in fire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [4] 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. Study on long road tunnel fire numerical simulation and escape [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [5] 袁建平, 方正, 程彩霞, 等. 隧道火灾时拱顶最高烟气温度的实验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (5): 1 094-1 097. (Yuan Jianping, Fang Zheng, Cheng Caixia, et al. Experiment research on the maximum smoke temperature around the vault of a tunnel on fire [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6 (5): 1 094-1 097. (in Chinese))
- [6] 方银钢, 朱合华, 闫治国. 上海长江隧道火灾疏散救援措施研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2010 6 (2): 418-422. (Fang Yingang, Zhu Hehua, Yan Zhiguo. Research of evacuation and rescue measures in Shanghai Yangtze river tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6 (2): 418-422. (in Chinese))
- [7] 石平, 夏永旭. 公路隧道送排风短道流场数值分析及优化研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009 5 (2): 402-405. (Shi Ping, Xia Yongxu. Numerical analysis and optimization research of short duct flow field of outlet and inlet in highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5 (2): 402-405. (in Chinese))
- [8] 夏永旭, 周勇狄, 王永东. 公路隧道火灾时的人员逃生研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (8): 115-123. (Xia Yongxu, Zhou Yongdi, Wang Yongdong. A study of people escape in highway tunnel fires [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (8): 115-123. (in Chinese))
- [9] 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. (Zhang Xing kai. Principle and application of underground engineering fire [M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 1997. (in Chinese))
- [10] 邓念兵. 长大公路隧道防火救灾对策研究 [D]. 西安: 长安大学, 2003. (Deng Nianbing. Counter measures of fireproofing and rescue for long highway tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese))

(上接第 919 页)

- [13] 马巍, 余邵水, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土区冷却路基技术现场实测效果监测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (3): 563-571. (Ma Wei, Yu Shaoshui, Wu Qingbai, et al. Study on in-situ monitoring technology of cooling roadbed in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3): 563-571. (in Chinese))
- [14] 潘卫东, 连逢愈, 邓宏艳, 等. 寒区工程中热棒技术的应用原理和前景 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (增 2): 2 673-2 676. (Pan Weidong, Lian Fenyu, Deng Hongyan, et al. Application principle and prospect of thermal-probe technique in cold region engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Supp. 2): 2 673-2 676. (in Chinese))
- [15] 李永强, 韩龙武, 崔珑, 等. 热棒在青藏高原风火山地区的实测效果分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (增 2): 2 669-2 672. (Li Yongqiang, Han Longwu, Cui Long, et al. Analysis on measurement result of probes in Fenghuoshan area of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (supp. 2): 2 669-2 672. (in Chinese))
- [16] Cheng Guodong, Sun Zhizhong, Niu Fujun. Application of roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet railway engineering [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53:241-258.
- [17] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Construction on permafrost foundations: Lessons learned from the Qinghai-Tibet Railroad [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59:3-41.
- [18] 王铁行, 窦明建, 胡长顺. 多年冻土地区路基临界高度研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36 (4): 94-98. (Wang Tiehang, Dou Mingjian, Hu Changshun. Study on critical thickness of subgrade in permafrost area [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36 (4): 94-98. (in Chinese))
- [19] Zhang Mingyi, Zhang Jianming, Lai Yuanming. Numerical analysis for critical height of railway embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41:111-120.