

文章编号: 1002-0268 (2010) 01-0089-06

公路隧道火灾烟气特性数值模拟分析

易赛莉

(上海应用技术学院, 上海 200235)

摘要: 本文针对典型的隧道类型, 基于计算流体动力学模型, 通过数值模拟试验和理论分析, 对隧道火灾的发生、发展状况以及烟气的扩散和运动规律进行了研究, 分析了不同风速和火灾规模状况下的烟气层的运动状态, 空间温度场的分布和变化规律以及火灾对人员疏散安全的影响等问题。同时, 研究了风速、火源功率以及截面形状等关键参数对火灾烟气及温度变化的影响。研究表明, 纵向通风速度对沿隧道长度方向的烟气层高度的分布有着很大的影响, 圆形截面可以储存更多的烟气并能有效降低隧道底层的温度。该结论可为我国公路隧道防火措施的制定提供有益的参考。

关键词: 隧道工程; 烟气特性; 计算流体动力学; 临界风速; 火灾规模

中图分类号: U458.1

文献标识码: A

Analysis on Characteristics of Fire Smoke in Highway Tunnel by CFD Simulation

YI Sailing

(Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China)

Abstract: Based on the computational fluid dynamics (CFD) simulation model, the regularity of fire spread and smoke movement occurred in typical tunnel was studied by numerical simulation experiments and theory analysis. The regular pattern of smoke movement and the distribution pattern of spatial temperature field under different wind speeds and scales of fire as well as the fire influence on the personnel evacuation were investigated in detail. The influence of key parameters, including wind speed, fire source power and tunnel cross-sectional shape, on temperature distribution and smoke movement were discussed. The result shows that (1) the longitudinal ventilation speed affects the smoke layer height distribution along the tunnel significantly; (2) the circular cross-section can store more fume and reduce the temperature of tunnel bottom. The conclusion could be referred as the basis for tunnel fire protection engineering in highway tunnel.

Key words: tunnel engineering; smoke characteristics; CFD; critical wind speed; fire scale

0 概述

随着经济与社会的发展, 隧道已成为交通运输网络中一个重要组成部分。截至 2006 年, 我国公路隧道总数已达 3 788 座, 总长已超过 184.18 万 m, 3 000 m 以上的特长公路隧道已超过 49 座。由于公路隧道结构特殊和设施复杂, 一旦发生火灾, 将严重威胁人们的生命和财产安全^[1]。以往的研究表明隧道火灾具有燃烧状况复杂, 火势蔓延快, 热烟不易排除, 热量

集中, 散热缓慢、气流温度升高快等特点。加之隧道内部狭长、两侧封闭的独特结构, 人员疏散及火灾扑救困难, 所造成的经济、人员生命损失也就十分惨重^[2]。1999 年 3 月 24 日发生在法国和意大利之间的勃朗峰 (Mont Blanc) 隧道火灾, 造成 39 人死亡, 36 辆汽车被毁^[1]; 2001 年 10 月 24 日, 瑞士圣哥达隧道由于辆货车相撞发生大火, 烧毁车辆多达 40 辆, 死伤 140 多人, 隧道圆拱顶部严重塌陷, 隧道被迫关闭数月。

收稿日期: 2009-04-12

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目资助 (J51502)

作者简介: 易赛莉 (1976-), 女, 江西宜春人, 博士后, 副教授, 从事环境系统与公共安全领域的研究工作. (sjy02@mails.tsinghua.edu.cn)

近年来,研究人员在实际隧道或实验室条件下进行了相关的火灾试验研究^[3-4],并取得大量的研究成果。但随着计算机技术和数值计算方法的发展,数值模拟方法成为研究火灾问题的一个有效途径。其中 CFD 模拟技术在火灾安全设计中发挥着越来越重要的作用,它揭示了各个物理量在全场的分布情况,并且给出了火灾烟气蔓延的详细过程,因此受到越来越多火灾安全设计者的青睐^[5-6]。

1 数学模型

火灾时期,隧道内高温烟流流动可以视为一个非定常的三维流体流动及传热传质过程。高温烟流的流动应遵循以物质守恒、能量守恒及动量平衡等基本定律出发而建立起来的化学流体力学基本方程组,即:连续性方程、动量方程、能量方程和组分方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial(V_i)}{\partial t} + \frac{\partial(V_i V_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right] + s_s F_{st} \tag{2}$$

式中, $i = 1, 2, 3$ 。

组分质量守恒方程:

$$\frac{\partial(Y_s)}{\partial t} + \frac{\partial(V_j Y_s)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(s_s \frac{\partial(Y_s)}{\partial x_j} \right) - w_s \tag{3}$$

能量方程可以表示成内能变化形式、焓变化形式和温度变化形式。在经典燃烧理论中,通常使用表达成温度变化形式的能量方程,取如下形式:

$$c_p \frac{DT}{dt} - \frac{D}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_{ir}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(s_s D \frac{\partial Y_s}{\partial x_j} \right) + s_s c_s dT + s_s F_{st} V_{st} \tag{4}$$

以上方程构成了描述隧道火灾烟流的基本方程组。此外,浮力效应是隧道火灾与露天火灾的显著区别。在着火隧道区段的上部,由于热烟气上升而形成一定厚度的热烟气流层,并随烟气的不断产生而迅速膨胀,向两侧扩充,同时下部冷空气流向火源,此时火场两侧形成对称的循环风流。图 1(a) 表示了隧道内无纵向风流的情况。当有纵向通风时,火点两侧的烟气流不对称,如纵向风速 v 较小,不足以克服反向的上层热烟气流时将产生回流现象,即火源上部的烟气会逆着风向流动,见图 1(b)。这对于防止火灾烟气蔓延(炽热烟气将点燃火源上风方向停车辆)和保护消防队员的安全是很不利的。因此,为防止火灾烟气逆流,隧道纵向通风风速应大于临界风速,见图 1(c)^[7-8]。

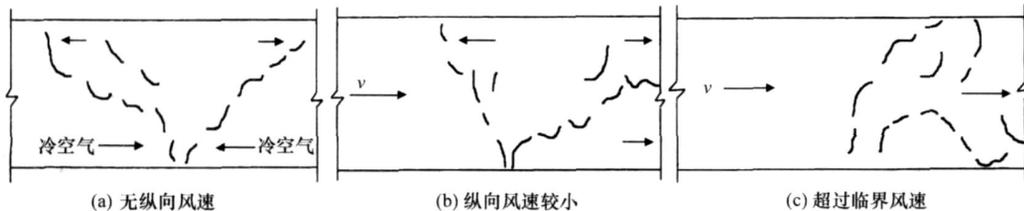


图 1 不同风速下隧道火灾烟气流动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of smoke flow of tunnel fire with different wind speeds

2 数值试验设计

近年来采用计算机数值模拟来研究隧道火灾已成为一个重要技术手段^[9]。本文采用 CFD 技术进行隧道火灾的数值模拟试验,研究风速、火源功率和截面形状对隧道火灾烟气运动及温度分布特性的影响。试验设计工况如表 1 所示。

表 1 试验工况表

Tab. 1 Parameters of experiment

截面形状	风速/(m s ⁻¹)	火源功率/MW
方形	0.5 1.5 2.5 3.0 3.5	3 20
圆形	0.5 1.5 2.5 3.0 3.5	3 20

选取在隧道的 200 m 的区间作为模拟空间。方形截面长 200 m、宽 4 m、高 5 m; 圆形截面长 200 m、直径 10 m。整个计算空间划分为 3 个计算网格空间,由于火源区是进行燃烧化学反应、传热、传质最为复杂的区域,在该子计算空间进行网格加密,根据有关网格系统精度及其影响研究,火源区的网格尺寸约为 0.2 × 0.2 m,无火源的两个子计算空间划分为 0.5 × 0.5 m 的计算单元。针对国内外隧道内的燃烧研究结果,可燃物多为纤维类物质(如木质板材、化纤织物、纸张、高分子聚合物座椅、门窗、车厢厢体材料等),本研究采用同样的分子式来描述这些材料的燃烧特性。火源强度则根据国内外不同车辆的火灾热释

放速率给定，分别取 3 MW、20 MW。毒害性烟气均考虑折合成一氧化碳浓度，取燃烧产物的 75% 为一氧化碳。为了便于模拟计算，数值模型做如下假设：(1) 气体为不可压缩性流体，火灾产生的烟流视为多组分的理想气体，火灾烟流在流动过程中不再发生化学反应，风流和烟流遵循理想气体状态方程；(2) 隧道内采用自然通风的形式，无机械排烟系统；(3) 在模拟燃烧热、烟气的扩散传播过程中，不考虑燃烧后消防系统的作用。

数值模拟采用 FDS 软件。FDS 是美国国家技术标准局 (NIST: National Institute of Standards and Technology) 建筑火灾实验室 (Building and Fire Research Laboratory) 开发的场模拟软件。该软件较为精确和成熟，并得到大量试验验证，在火灾安全工程领域应用广泛。

3 模拟结果及分析

3.1 风速对于方形隧道烟气的影响分析

隧道的烟气运动受众多因素的影响，其中，风速和火源功率是两个最为主要的因素。隧道的通风设计是隧道设计中的关键步骤，因此，本文首先研究了风速对火灾烟气运动和温度分布的影响。

图 2 显示了在不同风速情况下某时刻方形截面隧道火势及烟气的运动形态。在风速较小时火势和烟气的运动在火源上下游基本是对称的，并且火源上游有明显的回流现象，且烟气填充速度较快。随着风速增大火势及烟气蔓延明显偏向火源下游，但在火源上游仍有较明显的烟气回流现象，只是回流烟气的填充速度变慢了。在 3.0 m/s 和 3.5 m/s 的风速情况下，火势与烟气明显倾向火源下游，并且火源上游已无明显的烟气回流现象，火源下游可见烟气的分层现象。由此可以看出，方形隧道的临界风速为 3.0 m/s 左右。

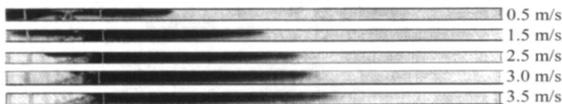


图 2 不同风速情况下隧道烟气运动状态

Fig. 2 The smoke flow distribution with different wind speeds in tunnel

此外，通风对于抑制温度向火区上游的传播是相当有效的。图 3 显示了在不同风速情况下某时刻方形截面隧道内纵向温度分布状态。不通风时，燃烧点上游 2 m 处拱顶温度为 550 ~ 600 °C，6 m 处为 400 ~ 450 °C；通风以后，燃烧点上游 6 m 处温度几乎没有变

化，而 2 m 处的温度则明显下降，约为 100 °C。

在同一通风风速下，火区下游的烟流由于在扩散过程中，不断与冷空气和隧道壁进行热交换，温度逐渐降低，且随着离火区距离的增加，温度下降的梯度逐渐减小。不同通风风速下，风速越大，火焰向下游倾斜越大，烟气被冷却的效果越好。

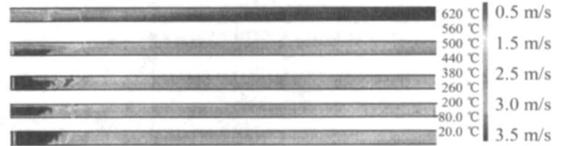


图 3 不同风速情况下隧道纵向温度分布状态

Fig. 3 The temperature distribution with different wind speeds along the tunnel length

图 4 为临界风速情况下，隧道顶部温度及烟气能见度在各个时刻沿隧道纵向的分布曲线。根据曲线可知，隧道顶部温度和能见度峰值受风速影响出现在距火源下风侧 5 m 左右的位置。在同一时刻，火灾温度随距离的增大而减小，到达一定的距离以后，不同时刻的温度曲线趋于平缓，逐渐降为常温。随着时间的变化，隧道顶部温度以及烟气能见度在各个点位置上的变化不大。

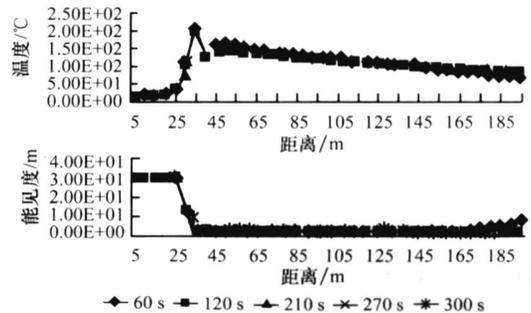


图 4 临界风速下顶部温度及能见度变化曲线

Fig. 4 The curves of temperature and visibility of tunnel roof with critical wind speed

由于火灾燃烧时所产生的大量有毒有害气体会影响火灾扑救以及人员的安全疏散，因此，本文还考察了人体特征高度 1.8 m 处的温度、烟气浓度以及 CO 的浓度分布情况 (如图 5 所示)。从图中可以看出，在人体特征高度处的温度以及烟气变化趋势与隧道顶部基本一致，但温度较低，能见度也较隧道顶部为高；但能见度受火源热效应和风速影响，在 25 ~ 35 m 处有升高，随后开始缓慢降低。CO 浓度峰值出现在 30 m 处，后又急剧下降并稳定在一个较高的值附近。

从试验结果还可以看出，风速过大时，火焰发生

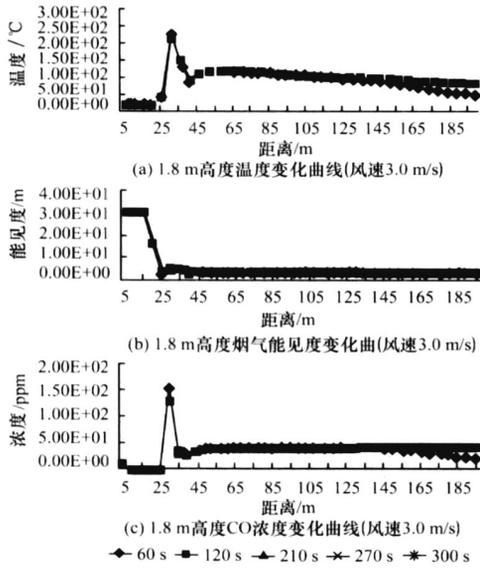


图 5 人体特征高度火灾特性变化曲线

Fig. 5 The curves of temperature, visibility and CO concentration at the characteristic body height

严重倾斜，羽流到达隧道顶部之前的所要经过的路程更长，火羽流在这一过程中更多地卷吸周围的环境空气而使其自身温度降低，到达隧道顶部的烟气温度较低，无法达到缆式线型感温报警系统的动作温度，从而造成漏报，失去灭火的最佳时机。因此，在设定临界风速时，也应考虑火灾报警的需要。

3.2 火源功率对于隧道内温度、烟气的的影响分析

火源功率是影响隧道内火灾烟气及温度分布的另一个主要原因，火源功率不同，隧道内相应的温度场分布和烟气运动状态都会发生极大的变化，因此本文针对火源功率进行了专门的研究。试验选取了 3 MW 和 20 MW 为火源功率，分别对应于小车燃烧和油罐车燃烧的热释放功率。

从图 6 中可看出火灾规模越大，高温火灾气体扩散距离越远，火灾规模越小，高温火灾气体扩散距离越近。图 7~图 8 展示了 1.8 m 人体特征高度处温度和能见度在不同位置处随时间的变化曲线。从图中可以看出，火源功率为 3 MW 时，从火源位置下风侧 10 m 处开始，1.8 m 高度处能见度随时间在前 30 s 内急剧下降，而后在较低值处趋于稳定；火源功率为 20 MW 时，从火源正上方位置能见度开始有所下降，随后在火源位置下风侧能见度急剧下降后在较低值处处于稳定状态；因此，火源功率越大，发烟量越大，随风速传播也越快，导致火源下风侧近火源处烟气的能见度普遍较低。

从以上分析结果可以看到，由于燃烧引起的冷热

空气对流和隧道壁面对于流经其中的高温火烟的冷却作用，纵向温度场的分布规律为：随着远离火源点，



图 6 不同火源功率下隧道温度分布 (风速 3.0 m/s)

Fig. 6 The temperature distribution with different fire powers along the tunnel length

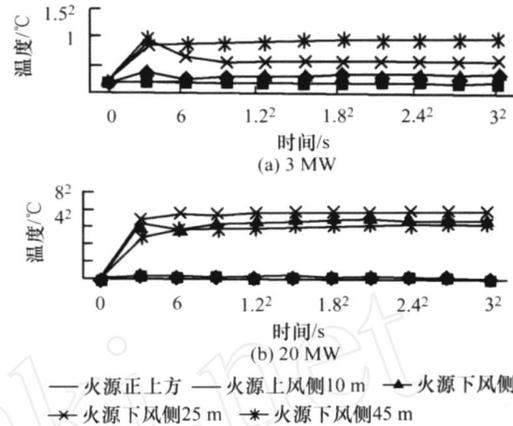


图 7 隧道顶部温度随时间变化的曲线

Fig. 7 The temperature-time curve of tunnel roof

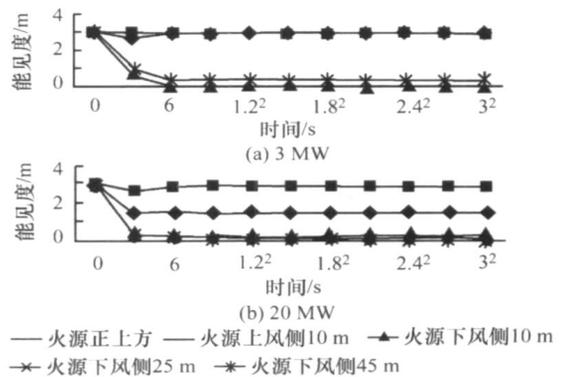


图 8 人体特征高度火灾能见度变化曲线

Fig. 8 The visibility-time curves at the characteristic body height with different fire powers

温度降低，且下降的梯度逐渐减小。通风风速和火灾规模对温度场的纵向分布有很大影响。随着通风风速的增大，火区附近的温度下降，而沿程温度上升。因此，发生火灾时，既要保证一定的风速避免烟气回流，又应控制隧道内的纵向风速不宜过高，控制洞内温度上升的速度，减缓高温烟气向下游的传播，同时，位于下风口的人员和车辆应尽量利用车辆逃生，以加快撤离速度，而随着火灾规模的增大，温度场纵向影响范围扩大。

3.3 截面形状对于隧道火灾的影响

隧道截面形式对火灾烟气温度的分布规律有着重要影响，本文采用数值模拟分析方法研究了方形和圆形两种典型隧道断面形式的火灾烟气、温度的分布特征。分析时固定火源功率为 2 MW。

从图 9 中可得知矩形隧道的烟气随时间的沉降速度非常快。相对矩形隧道而言，圆形隧道在各时间段的烟气沉降速度比较慢，说明圆形隧道有很好的蓄烟功能。此外，圆形隧道断面对应的临界风速大，矩形隧道则较小。图 10 为火源下游 5 m 和 65 m 处隧道内横截面温度的分布情况。由图中可以看出，风速作用下由于火焰被吹倾斜，火区下游附近一段距离内断面底部受火焰的烧烤，温度急剧上升，断面温度横向分布呈底部高、拱顶最低的规律。在矩形隧道中，此处温度分布成“8”字形，即有两个上下两个高温中心，且温度都较高通常在 300 左右，而圆形隧道则存在一个温度中心且温度较低。随着远离火区，由于高温烟气逐渐上升，断面温度的横向分布变为顶部最高、底部最低的规律，且随着距离的增加，横断面上温度的分布渐趋均匀。矩形隧道横断面上的温度梯度较小，底部温度仍然处于较高水平，而圆形隧道则存在较大的温度梯度变化，不但温度峰值较矩形隧道低不少，而且底部温度较低。



图 9 不同隧道截面类型火灾烟气分布状态
Fig. 9 The smoke flow distributions with different cross-section shapes

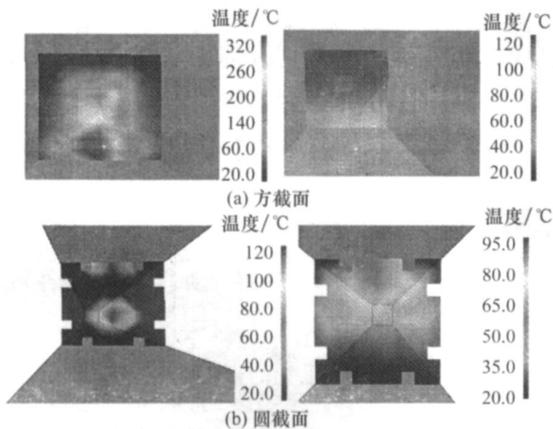


图 10 不同截面隧道的横截面温度状态
Fig. 10 The temperature distributions with different cross-section shapes

图 11 为一入高处能见度和 CO 浓度，在各个时刻距离火源不同位置处的分布情况。从图中可以看

出，在相同工况下，圆形隧道的能见度较矩形隧道高，CO 浓度远低于矩形隧道。在圆形隧道内，火灾温度探测元件应安装在路面以上 4 m 左右的位置为宜，以便快速监测到火灾。本文从理论研究的角度选取圆形和矩形两个极端情况进行分析，实际应用当中，公路隧道的断面形式多为上拱下方形，具有圆形截面类似的蓄烟能力以及底部温度低的优点。因此，在防火措施上应采取较大的临界风速，此外防火涂料的分级选择以及探测及灭火设施的安装也可参照圆形截面的温度分布特征。

- (1) 通风风速、火灾规模对隧道内温度分布及温度场的扩散范围具有明显的影响。
- (2) 隧道内纵向温度分布规律是，火区温度最高，随着远离火区温度逐渐降低。同等条件下，随着风速的增大，火区温度下降，而沿程温度上升，温度纵向分布曲线变的平缓。

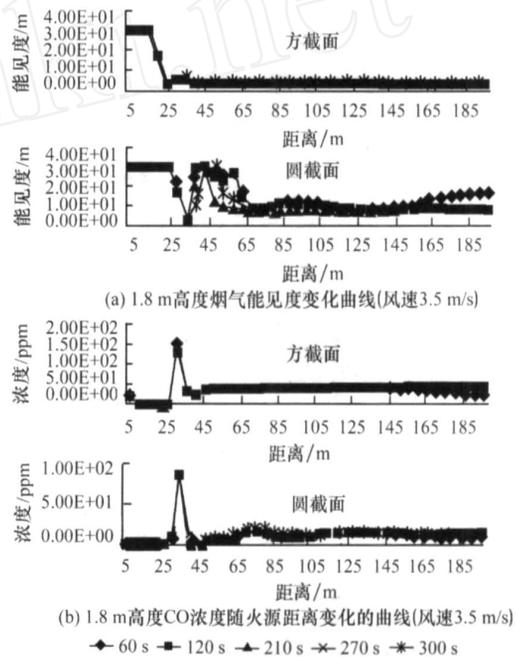


图 11 不同截面隧道人特征高度处火灾特性变化曲线

Fig. 11 The curves of visibility and CO concentration at the characteristic body height with different cross-section shapes

4 结论

(3) 同等规模下，风速越小，温度扩散长度越短，温度的变化梯度越大；风速越大，温度扩散长度越长，但温度的变化梯度越小。同等风速下，火灾规模越大，温度的扩散长度越长，火灾规模越小，温度

的扩散长度越短。

参考文献:

References:

- [1] 彭伟, 霍然, 李元洲, 等. 二郎山公路隧道火灾排烟及人车疏散应急方案研究 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7 (5): 113 - 116.
PENG Wei, HUO Ran, LI Yuanzhou, et al. On Scheme of Smoking Control and Evacuation for Extremely Long Highway Tunnels [J]. Journal of Safety and Environment. 2007, 7 (5): 113 - 116.
- [2] 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, 30 (1): 4 - 8.
ZHANG Jinhua, YANG Gaoshang, PENG Limin, et al. Numerical Simulation for Smoke Flow of the Tunnel Fire [J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 30 (1): 4 - 8.
- [3] KARPOV A V, MAKAROV D V, et al. Fire in Tunnels: 3D Numerical Simulation and Comparison with the Experiment [C] // Proceedings of the 4th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. Tokyo: Waseda University, 2000: 565 - 576.
- [4] 王彦富, 蒋军成, 龚延风, 等. 全尺寸隧道火灾试验研究与烟气逆流距离的理论预测 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17 (8): 37 - 41.
WANG Yanfu, JIANG Juncheng, GONG Yanfeng, et al. Test Research of Full - scale Tunnel Fire and Theoretical Prediction on the Distance of Smoke Regressing [J]. China Safety Science Journal, 2007, 17 (8): 37 - 41.
- [5] SINCLAIR R. CFD Simulation in Atrium Smoke Management System Design [J]. ASHARE Transactions, 2001, 107: 1 - 8.
- [6] 舒宁, 徐建闽, 钟汉枢, 等. 计算流体力学在纵向式公路隧道火灾通风中的仿真 [J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16 (4): 511 - 516.
SHU Ning, XU Jianmin, ZHONG Hanshu, et al. The Simulation of Ventilation in Longitudinal Road Tunnel in Fire by Using Computational Fluid Dynamics [J]. Journal of Hydrodynamics, 2001, 16 (4): 511 - 516.
- [7] 卢平, 丛北华, 廖光焯, 等. 纵向通风水平隧道火灾烟气流动特性研究 [J]. 中国工程科学, 2004, 6 (10): 59 - 64.
LU Ping, CONG Beihua, LIAO Guangxuan, et al. Study of Fire Smoke Flow Characteristics of Horizontal Tunnel Using Longitudinal Ventilation [J]. Engineering Sciences, 2004, 6 (10): 59 - 64.
- [8] 洪丽娟, 刘传聚. 隧道火灾研究现状综述 [J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 (1): 149 - 155.
HONG Lijuan, LIU Chuanju. Review of Research on Tunnel Fire Safety [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 (1): 149 - 155.
- [9] 王婉娣, 冯炼. 公路隧道火灾三维数值模拟 [J]. 制冷与空调, 2004 (1): 20 - 23.
WANG Wandi, FENG Lian. Three - Dimensional Numeric Simulation of Highway Tunnel Fire [J]. Refrigeration and Air - conditioning, 2004 (1): 20 - 23.
- [10] 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 Journey, 2000, 35 (4): 363 - 390.
- [11] LEE C K, CHAIKEN R F, SINGER J M. Interaction between Duct Fires and Ventilation Flow: An Experimental Study [J]. Combust Science and Technology, 1979, 20 (1/2): 59 - 72.
- [12] COLELLA F, REIN G, BORCHIELLINI R, et al. Calculation and Design of Tunnel Ventilation Systems using a Two-scale Modelling Approach [J]. Building and Environment, 2009, 44 (12): 2357 - 2367.

《公路交通科技》杂志进入全国科技期刊综合排名 100 强

日前, 科技部中国科技信息研究所公布了《2009 版中国科技期刊引证报告 (核心版)》, 根据该报告的统计, 《公路交通科技》杂志全国期刊综合排名位列第 81 位, 首次进入全国百强行列。

由科技部中国科技信息研究所每年发布的《中国科技期刊引证报告 (核心版)》是目前国内对期刊评价的最权威报告之一, 主要通过对科技期刊上一年度的影响因子、被引频次等 19 个定量指标的分析, 最终得出该期刊的综合排名。2008 年, 《公路交通科技》杂志总被引频次为 1753 次, 影响因子为 0.747, 分别位居交通运输工程类期刊第 1 名和第 3 名, 较去年有了较大幅度的提高。在 1868 种中国科技期刊综合评价总分排名中, 《公路交通科技》名列第 81 名。另外, 在该报告首次公布的权威因子的评价中, 本刊得到了 470.08 的高分, 同样位居全国百强的行列。

同时, 《公路交通科技》2005 年第 22 卷第 7 期《预应力混凝土梁开裂后的受力性能分析》(作者张峰、叶见曙) 再次获评“2008 年度中国百篇最具影响国内论文”, 其被引频次高达 38 次。