

# 隧道火灾烟气发展的模拟计算研究

李元洲<sup>1</sup>, 霍然<sup>1</sup>, 易亮<sup>1</sup>, 史聪灵<sup>1</sup>, 周允基<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026;

2. 香港理工大学屋宇设备工程系, 香港)

**[摘要]** 分析了隧道火灾的特点, 运用区域模拟和场模拟的方法, 通过一假定的隧道火灾算例, 分析了几种不同情况下隧道火灾的烟气发展情况。讨论了烟气温度、高度的变化情况, 得到了不同区段火和烟气对人构成威胁和对隧道结构造成破坏的情况, 最后对隧道火灾的防治提出了一些建议。

**[关键词]** 隧道火灾; 区域模拟; 场模拟; 烟气发展

**[中图分类号]** TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)02-0067-06

## 1 引言

隧道是铁路、公路交通运输的重要设施之一, 是铁路公路运输的咽喉。随着我国交通运输事业的发展, 隧道建设将获得快速增长, 而且各种观光和海底交通隧道也越来越多。隧道为交通和旅游带来了方便, 但由于隧道内部狭窄, 加之其两侧封闭的独特结构, 车辆及车上人员疏散困难, 一旦发生火灾, 涉及范围往往很大, 所造成的经济、人员伤亡也就十分惨重。近30年来, 世界各地发生的隧道火灾屡见不鲜<sup>[1,2]</sup>, 如1993年6月12日发生在我国的西延线蔺家川隧道火灾, 造成8人死亡, 10人受伤, 直接经济损失561万元, 中断运行579.3h的重大损失; 2000年11月11日, 奥地利发生的火车隧道火灾造成了155人死亡, 18人受伤的惨剧。从火灾的案例和隧道本身的结构可以看出隧道火灾具有以下一些特点: 火源较难发现, 燃烧状况复杂; 空气流动畅通, 火势蔓延快; 烟气难以排出, 易在隧道内积累; 通道狭长, 能见度低, 人员疏散困难; 火灾扑救困难, 一般采用封洞窒息法; 火灾造成的损失大。

接连发生的隧道火灾已引起了研究人员的注

意, 并进行了一些试验和模拟计算的研究<sup>[3-5]</sup>。研究隧道火灾发生、发展规律, 以便加强隧道的防火安全设计是十分重要的。在当前的消防设计规范中有关隧道的火灾安全设计的参数、消防设施的配置等方面的问题还没有现成的条文可循, 大多采用专家论证等形式来进行设计。目前, 针对这些特殊建筑的防火安全设计, 普遍采用性能化方法。性能化消防设计是国际消防界的一个热点, 它是根据建筑的具体情况, 提出防火安全目标, 然后根据模拟计算结果确定具体要采取的防火措施和建筑要达到的性能目标, 最后对设计进行安全评估, 判断其是否达到了安全要求。在这一过程中, 模拟计算是其中的一个重要环节, 有了模拟计算结果才能有针对性地提出防火要求。在很多隧道的火灾安全设计中, 都需要利用计算机模拟来预测隧道内可能的火灾发展情况, 以设计相应的防治方案。

## 2 模拟计算

区域模拟是以受限空间中的火灾过程为研究对象的一种半物理模型<sup>[6,7]</sup>。目前应用最广的是双区模型, 即根据室内火灾烟气的气体分层现象, 把整个空间分成热烟气层和冷空气层两部分, 每层内的

**[收稿日期]** 2003-06-09

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(50376061); 国家重点基础研究专项经费资助项目(2001CB409604)

**[作者简介]** 李元洲(1973-), 男, 山东胶南市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室讲师, 博士

状态参数均匀分布。冷热气层之间的质量交换仅通过羽流进行,在2层的界面上忽略扩散和掺混。由于计算的是某区域的状态参数在某个时间的平均值,因此区域模型不能得到某一具体位置的火灾发展的详细情况,但它计算简单,工程应用方便,在实际分析中得到了广泛的应用。有时隧道太长,空间太大,如只把它划分成两层得到整个隧道的火灾烟气的平均状态,其精度得不到保证,特别是起火区域会存在很大的误差。因此在隧道较长时,对于区域模拟,可将整个隧道划分为若干小的区段,每个区段相当于一个房间,在区段结合部按照房间的大开口处理,这样就可利用多室的火灾发展程序 CFAST<sup>[8]</sup>进行模拟计算<sup>[9]</sup>。

CFAST是目前国际上较为成熟的用于模拟单室和多室火灾烟气发展的工程工具之一。前人的研究表明,在工程模拟计算所需要的精度内,CFAST的多室火灾模型对预测多室火灾的发展过程与全尺寸实验的结果比较一致。文中多单元区域模拟方法是通过 CFAST4.1 软件包中的多室火灾烟气发展模型来初步实现的。

图1为 CFAST 多室火灾烟气发展模拟的简图。在 CFAST 的多室火灾模拟中,相邻房间竖直开口的水平流动描述如下:

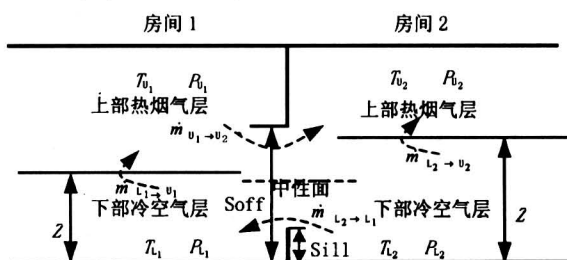


图1 CFAST 多室烟气运动模型简图

Fig.1 Schematic of multi-room fire model of CFAST

根据流动的伯努利方程,对竖直开口处的热烟气流动,有

$$\frac{P_{U_1}}{\rho} + \frac{V_{U_1}^2}{2} = \frac{P_{U_2}}{\rho} + \frac{V_{U_1 \rightarrow U_2}^2}{2} \quad (1)$$

各个房间内部的热烟气流速可近似为0,即上式中的  $V_{U_1}$  等于0,对于任意无穷小高度,则有

$$V_{U_1 \rightarrow U_2} = C \left( \frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中,常数  $C$  为流通系数,  $\rho$  为流出烟气的密度,  $\Delta P$  为竖直开口任意无穷小高度两侧烟气的平均压

差。

在 CFAST4.1 中,并没有将开口高度分隔为很多的无穷小高度之和,而是根据开口上下缘、中性面和烟气层的位置将之划分为若干个有限高度之和,对于每一个有限高度两侧烟气的流动,是通过下面的式子进行计算的:

$$\dot{m}_{i-o} = \frac{1}{3} C(8\rho) A_h \left[ \frac{|P_t| + \sqrt{|P_t \cdot P_b|} + |P_b|}{\sqrt{|P_t|} + \sqrt{P_b}} \right] \quad (3)$$

式中,  $A_h$  为任意有限高度所占有的竖直开口面积,  $P_t$  和  $P_b$  则分别为该有限高度上缘和下缘处的压力差。将所划分的各有限高度两侧的烟气流量相加,可得到总的通过该开口的烟气流量。

场模拟又称计算流体力学模型(CFD),它主要利用质量守恒方程、动量方程和能量方程,将空间划分为一系列网格,在每个网格内求解方程,得到速度、温度、烟气各组份浓度等火灾参数在空间的分布及随时间的变化。场模型能较准确地分析空间各处的火灾状态及随时间的变化。但其控制方程复杂,网格划分细密,需要较高的计算机要求和大量的计算时间,有时在工程上并不很实用。作者主要采用美国 NIST 开发的 FDS (Fire Dynamics Simulator) 程序<sup>[10]</sup>进行模拟计算。FDS 是主要针对火灾驱动下的流体流动进行计算模拟。它主要有2部分,第一部分主要采用大涡模拟(LES)方法数值求解了低速的、热驱动下流动的 Navier-Stokes 方程,重点在于火灾中的烟气和热量的传输计算。大涡模拟方法主要描述了气体燃料和燃烧产物与周围空气的湍流混合,其基本思想是混合产生的烟气涡旋足够大,可以对流体动力学方程给出足够精确的计算结果。第二部分称为 Smokeview,主要是用来显示计算结果的绘图程序。

### 3 算例设计

现假定隧道为一长方体的公路隧道,长为200 m,宽8 m,高5 m,顶部和墙面都用混凝土材料砌成。对于区域模拟来说,把隧道分成21段,最外边2段长为5 m,其它19段长为10 m,最中间一段命名为 sec.0,其左侧各段依次命名为 sec.-1 至 sec.-10 段,其右侧各段依次命名为 sec.1 至 sec.10,如图2所示。这样每一段相当于一个两边完全敞开的  $10 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的房间。当隧道内发生火灾时,火源位置离出口越远,越不易被发现,

人员越难以疏散，因此火灾发生在隧道的中央对于人员的安全疏散来说是最危险的。作者考虑火源设在隧道最中间位置时的火灾发展情况。公路隧道中的火灾大多数为油类火灾，如油罐车的爆炸，汽车油箱的着火等。对于公路隧道的火灾设计，世界公路协会推荐了一些不同情况下的公路隧道火灾的火源设计，火源功率从 4 MW（客车）到 100 MW（汽油油罐）<sup>[11,12]</sup>。作者设计火源功率时，考虑的是一辆油罐车起火，油罐面积为 4 m×5 m，取单位面积火源功率为 1 MW/m<sup>2</sup>，则总的火源功率为 20 MW。由于油燃烧很快，在此假定火源为定常火源。

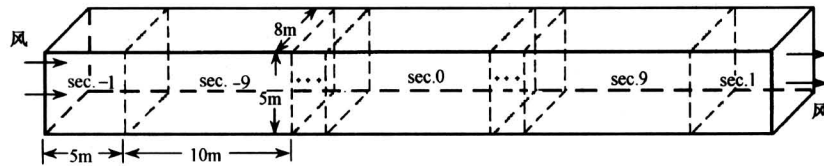


图 2 区域模拟计算时的隧道分段设计

Fig.2 The multi-section design in zone model simulation

### 4 计算结果与讨论

图 3 为 CFAST 计算得到的无风时烟气层高度随时间的变化情况。由于火源位于隧道的中央，烟气向两边的发展是完全一样的，因此图中只给出了火源一侧的烟气层高度变化图。图 4 为有风时计算得到的不同区段的烟气层高度随时间的变化结果。从两个图中可以看出，有风和无风时得到的结果没有太大的差别。有风时，上风段的烟气层高度要稍

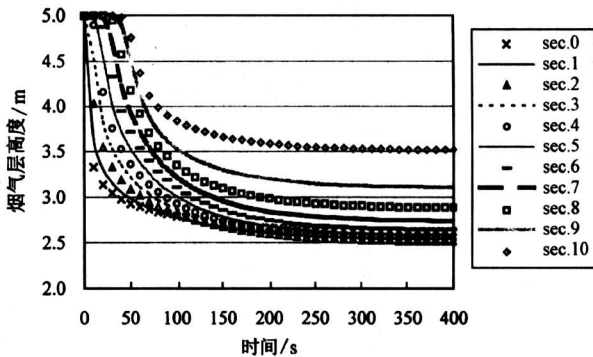


图 3 无风时各区段的烟气层高度随时间的发展情况

Fig.3 The development of smoke layer calculated by zone model without wind

通常情况下，由于车辆的运行和环境风的影响，在隧道内会存在一定的气体流动，这会对烟气的发展产生一定的影响。为了比较风的影响，设计了 2 种环境条件：一是没有风时火灾烟气在隧道内的发展；二是有一单向的风从隧道的一端吹入，风速为 1 m/s。隧道温度为 20 ℃。在区域模拟中，在隧道的 -10 段设一从外界向隧道内吹入的风，在 sec.10 设一从隧道内向外界吹的风。在场模拟中，风速是以定流量形式设置的，即在隧道的一端按照风速和隧道的截面积得到流量，然后按此流量来设计风从上风口进入隧道。

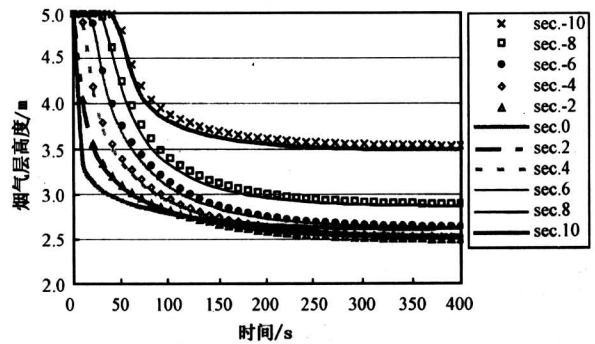


图 4 有风时不同区段的烟气层高度随时间的发展情况

Fig.4 The development of smoke layer calculated by zone model with wind

高于下风段的烟气层高度，说明风对烟气层的蔓延起到了一定的抑制作用，但这种作用并不明显。在整个过程中，烟气层的高度在 2.5 m 以上，整个烟气扩散到出口处的时间约为 50 s，烟气的蔓延速度约为 2 m/s。起火段烟气层高度在起火后 40 s 左右时降到 3 m 以下，300 s 左右降到 2.7 m。离火源 20 m 处，烟气层高度在 60 s 左右降到 3 m 以下，300 s 时降到 2.5 m。离火源 60 m 处（sec.6 和 sec.-6 段）的烟气层在 120 s 左右降到 3 m，300 s 左右降到 2.7 m，而在最远端 2 个区段的烟

气层高度始终保持在 3 m 以上。从图中还可以看出,在起火 200 s 以后,起火区段的烟气层高度并不是最低的,离它最近的几个区段的烟气层高度都要稍低于起火段的烟气层高度。这是因为在起火段温度较高,烟气不容易沉降下来,而在靠近出口处,烟气直接流到外界,也难以积累,因此离火源较近区域的烟气层最低。

图 5、图 6 分别为 CFAST 计算得到的无风和有风时隧道内不同区段的烟气温度随时间的变化情况

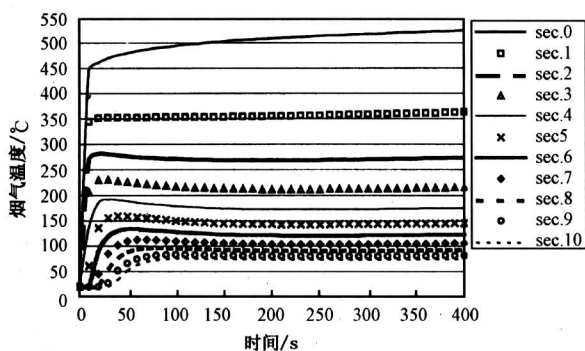


图 5 无风时不同区段的烟气层温度随时间的变化情况

Fig.5 The smoke temperature variation calculated by zone model without wind

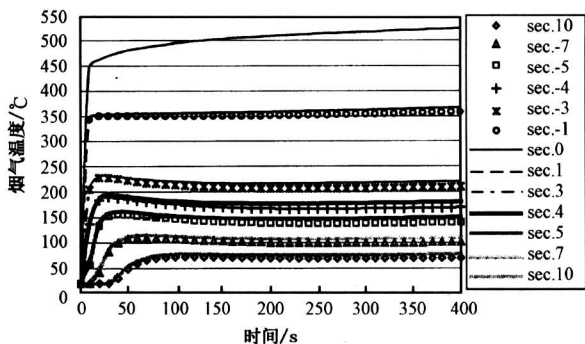


图 6 有风时不同区段的烟气层温度随时间的变化情况

Fig.6 The smoke temperature variation calculated by zone model with wind

况。可以看到,起火段温度最高,达到 500 °C 左右,这一温度已对隧道结构构成危害<sup>[13]</sup>。而离其最近的两侧 2 个区段的温度则降到 350 °C 左右,出口段的温度在 75 °C 左右,随着距离的增加,烟气的温度逐渐下降。起火段在 10 s 的时间内就升到了 450 °C,出口处的温度在 50 s 时有显著增加,

也说明烟气在 50 s 时已到达隧道出口处。而当烟气层温度达到 180 °C 时,对人的安全构成了危险<sup>[14]</sup>。从图中可以看出,离火源 40 m 以内的区域的烟气温度达到了 180 °C 以上,这一区段的人员是最危险的。另外,风的设置对烟气层温度的影响也比较小,距离火源相同距离处,上风段的温度稍低于下风段的温度。

图 7、图 8 分别为无风和有风时场模拟计算得到隧道内的温度分布情况。从图 7 中的温度发展可以看出,无风时,烟气前锋在 40 s 时到达了离火源大约 80 m 的位置,而在 60 s 时已到达了隧道的出口,这和区域模拟中得到的烟气层的发展速度是一致的。而在有风时,火源的位置发生明显的偏移,上风段和下风段的烟气层发展也产生显著的变化。下风段的烟气蔓延明显加快,而上风段的烟气发展则受到抑制。40 s 时下风段的烟气已到达隧道出口处,而上风段的烟气才发展到离火源 40 m 左右的位置,60 s 时发展到 60 m 的位置。也就是说此时下风段烟气的发展速度大约为 3 m/s,而上风段的烟气发展速度大约为 1 m/s。这和区域模拟的结果相差比较大,也说明场模拟能够更好地考虑风的影响。另外,图 7、图 8 中的烟气温度分布表明,整个烟气层的温度并不是一致的,而是有明显的分层现象。隧道顶部 (4.5~5 m) 的烟气温度较高,在 4.5 m 左右烟气的温度最高,然后随着高度的下降,烟气的温度也逐渐下降,烟气层的上部和下部温度可相差 200 多 °C。无风时,火源上方的温度也可达到 500 °C 左右,离火源 10 m 处,烟气的温度也在 350 °C 左右,而出口处顶部的烟气温度在 100 °C 以上。有风时,烟气的最高温度也在 450~500 °C 之间,但最高温度不在火源位置的正上方,而是下风处距火源几米远的位置。在离开火源相同的距离时,上风段的温度要比下风段的温度低得多。距离火源 10 m 的上风处的顶部温度只有 240 °C 左右,而下风处的顶部温度在 450 °C 左右。50 m 处的上风段的顶部温度为 130 °C 左右,而下风段的顶部温度为 200 °C 左右。这说明上风段的烟气受风的影响,温度大大降低。从图 8 可以看出,没风时,在同一距离处,除火源位置外,其它各段的温度基本都在 2.5 m 以上时才有显著增加,2.5 m 以下保持在初始温度 20 °C,这说明场模拟得到的烟气层也都保持在 2.5 m 以上。有风时下风段 1.5 m 高的位置处温度已达到 50 °C,烟气可以下

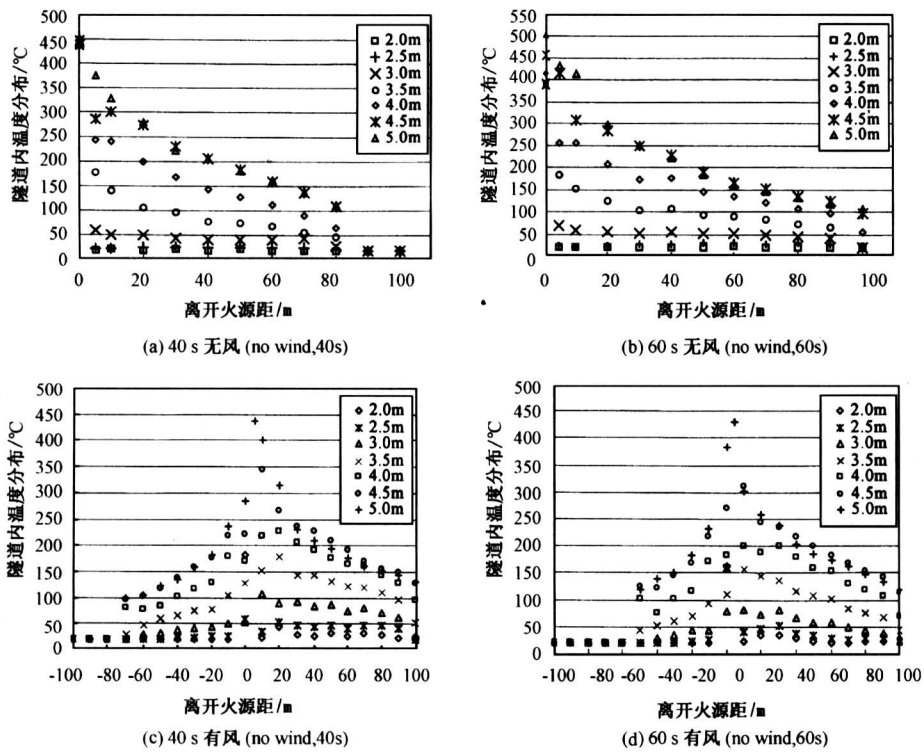


图 7 无风和有风情况下隧道内不同距离处的温度分布

Fig.7 The smoke temperature distribution with the distance from fire

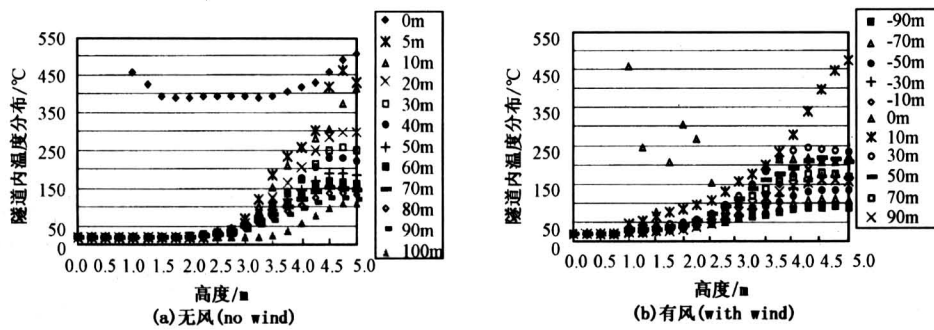


图 8 无风和有风时不同位置处的温度随高度的变化

Fig.8 The temperature variation with height and distance

降到 2 m 以下的高度，说明由于风的存在，使烟气和空气的混合加剧了，导致烟气层的高度下降，但同时也可以看到，烟气的温度也相应下降了。除火源附近外，其它各处的温度最高 250 ℃ 左右，比无风时低了 50℃。

### 5 结论

利用多单元的区域模拟方法和场模型对隧道内火灾烟气的发展进行了模拟研究，结果表明，对于区域模拟和场模拟来说，在无风的条件下，两者得

到的结果比较一致，区域模型对风的反应并不敏感，而场模拟时风对整个烟气的发展具有较大的影响。

烟气在隧道内的发展速度很快，在算例中无风时烟气的扩散速度约为 2 m/s，当有 1 m/s 的风吹向隧道时，下风段烟气的速度增加到 3 m/s，而上风段的速度减为 1 m/s。也就是说，有风时，下风段的烟气扩散速度为无风时的速度加上风速，而上风段的扩散速度为无风时的速度减去风速。另外由于风的存在，使隧道内的换热加快，烟气的温度降

低。因此,在发生火灾以后,对于相同的疏散距离,人员应向上风段疏散。

隧道内的烟气层高度一般保持在 2.5 m 以上,烟气温度是对人员和结构安全威胁最大的因素。离火源 40 m 以内距离的烟气温度在 180 ℃ 以上,对人员安全构成威胁。隧道的最高温度出现在离隧道顶部 0.5~1 m 的位置处。

#### 参考文献

- [1] 杜建科. 铁路隧道的消防安全分析 [J]. 安全, 1998, 19 (6): 1~3
- [2] 戴国平. 英法海峡隧道火灾事故剖析及其启示 [J]. 铁道建筑, 2001, (3): 6~9
- [3] 曾巧玲, 赵城刚, 梅志荣. 隧道火灾温度场数值模拟和试验研究 [J]. 铁道学报, 1997, 19 (3): 92~98
- [4] Karpov A V, Makarov D V, et al. Fire in tunnels: three - dimensional numerical simulation and comparison with the experiment [A]. Proceedings of the 4th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology [C]. Tokyo: Waseda University, 2000. 565~576
- [5] Vauquelin O, Mégret O. Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37 (5): 525~533
- [6] 范维澄, 王清安, 张人杰, 等. 火灾科学导论 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1993
- [7] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995
- [8] Jones W W, Forney G P, Peacock R D, et al. A Technical Reference for CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire and Smoke Transport [Z]. Technical Note 1431, NIST, 2000
- [9] 胡隆华, 霍然, 李元洲, 等. 大尺度空间中烟气运动工程分析的多单元区域模拟方法 [J]. 中国工程科学, 2003, 5 (8): 59~63
- [10] McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 3) - Technical Reference Guide [Z]. NISTIR 6783, NIST, 2002
- [11] Mégret O, Vauquelin O. A model to evaluate tunnel fire characteristics [J]. Fire Safety Journal, 2000, 34 (4): 391~401
- [12] Lacroix D. The new PIARC report on fire and smoke control in road tunnels [A]. Third International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels [C], Nice, France, 1998. 185~197
- [13] 彭立敏, 刘小兵, 王薇, 等. 隧道衬砌的火灾损伤程度试验与检测方法研究 [J]. 实验力学, 1999, 14 (3): 395~401
- [14] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999

## The Zone and Numerical Simulation on the Tunnel Fire

Li Yuanzhou<sup>1</sup>, Huo Ran<sup>1</sup>, Yi Liang<sup>1</sup>, Shi Congling<sup>1</sup>, Chow Wanki<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

[Abstract] With the development of transportation, the road and railway tunnels are more and more in the world. But great loss due to the tunnel fires happened in recent years shows that the tunnel fire safety is a problem. Realizing the characteristics of tunnel fires is very important for the tunnel fire protection. In this paper, given a tunnel, the smoke development in different situations was simulated using zone model (CFAST) with the multi-cell concept and field model (FDS). The smoke temperature distribution and smoke layer interface height were discussed. And the comparisons between these two models were made. The harm of fire and smoke to people and tunnel lining at different position was also discussed.

[Key words] tunnel fire; zone model; field model; smoke development