

# 竖井型长大城市隧道火灾通风的数值模拟

施孝增<sup>1</sup>, 吴家正<sup>2</sup>

1. 上海市市政设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092
2. 同济大学机械工程学院, 上海 200092

**摘要** 随着城市建设发展,竖井型隧道越来越多地应用于城市交通隧道中。采用稳态与非稳态方法对火灾工况下竖井型隧道的气流场进行了数值模拟,分析了竖井型自然通风口对高温烟气扩散的影响。研究认为,竖井自然通风口引入隧道外冷空气,显著降低火源端部温度,可在一定程度上减少高温烟气对火源处隧道顶板的破坏。通过竖井引入新风,显著降低火源附近的有毒气体浓度,改善了火灾救援条件。火灾产生的有毒烟气由隧道洞口集中排放转变为竖井自然通风口分散排放,这对制定火灾救援、人员疏散方案有重要的指导作用。本隧道所设置的竖井自然通风口方案可满足火灾情况下人员逃生要求。

**关键词** 竖井自然通风口;火灾通风;数值模拟

**中图分类号** U453.5

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.25.011

## Numerical Simulation of Fire Ventilation in City Tunnels with Vertical Shafts

SHI Xiaozeng<sup>1</sup>, WU Jiazheng<sup>2</sup>

1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China
2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract** With the development of urban construction, tunnels with vertical shafts have been increasingly used in urban traffic tunnels. In this paper, steady and unsteady methods are used to simulate the airflow field of vertical-shaft type tunnels under fire conditions. The effect of vertical shaft natural ventilation opening on high temperature gas diffusion is analyzed. It is found that natural ventilation of vertical shafts introduces cold air outside the tunnel, significantly lowering the fire source temperature, to some degree reducing the damage of high temperature smoke and gases to the tunnel roof at the fire source. The introduction of fresh air also significantly lowers the concentration of toxic gases near the fire source, improving the rescue condition. The centralized discharge of toxic smoke and gases at the opening of tunnel terminal is changed to decentralized discharge at the natural ventilation opening of vertical shafts, which provides important guide for fire rescue and evacuation planning. The natural ventilation plan could meet the demand of fire escape.

**Keywords** natural ventilation opening of vertical shaft; fire ventilation; numerical simulation

随着国民经济的快速发展,城市隧道不断向大而长的方向发展,长三角地区在近10年修建了数十条长度超过2 km的大型城市隧道,上海还将建成长度约为18 km的超长大城市地下隧道<sup>[1]</sup>。与此同时,隧道内火灾事故发生的危险性也

日益上升,尤其是竖井型长大隧道,火灾工况下,受隧道内外热压、风压的作用,空气流动状况复杂,因此了解火灾在竖井型长大隧道内的发展和烟雾的流动特点对隧道设计人员极为重要。茅斯丰等<sup>[2]</sup>对南京城东隧道进行了火灾1:10比例火

收稿日期:2014-05-26;修回日期:2014-07-03

基金项目:上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”社会发展领域项目(12231201001)

作者简介:施孝增,工程师,研究方向为隧道通风与火灾,电子信箱:s-x-z@126.com

引用格式:施孝增,吴家正.竖井型长大城市隧道火灾通风的数值模拟[J].科技导报,2014,32(25):63-69.

灾实验研究,分析了烟气温度、CO浓度分布变化规律和烟气运动规律。龚延风等<sup>[3]</sup>对全长约1770 m的隧道进行了全尺寸实体试验,得到了温度随时间、火源距离等的变化数据。火灾实验可以获取相应数据,但费用高昂。随着计算技术的进步,采用数值模拟对隧道火灾进行预估的方法应用日趋广泛。李婷婷等<sup>[4]</sup>基于秦岭终南山特长公路隧道,利用数值模拟方法对长大隧道内火灾燃烧特性和气体散布规律进行了研究,并对应不同火灾情况对通风措施和横向通道疏散方法进行了优化。朱培根等<sup>[5]</sup>通过建立竖井型城市隧道火灾CFD模型,得出了火灾工况下隧道内烟气在自然排烟模式下的流动规律。

本研究选取杭州彩虹快速路工程滨江段隧道为模拟对象,建立简化三维模型,采用稳态与非稳态方法对隧道内火灾特性进行数值模拟,分析竖井对烟气控制的影响,获得火灾随时间的发展变化规律,以对竖井型长大隧道内的火灾特性有更为直观的认识。

## 1 数值模拟方法与计算模型

基于杭州彩虹快速路工程滨江段隧道,建立隧道火灾的简化三维模型,并作如下假设:

- 1) 流体是不可压缩的。在隧道通风中,由于通风压力在常压范围内,隧道内的温度和压力变化不大,流体体积的变化对计算精度的影响较小,因此忽略流体体积变化。
- 2) 在火灾工况情况下,火源前面的车辆沿车行方向驶出隧道,火源后面的车辆停止,车内人员下车疏散,隧道交通风效应不显著,因此忽略交通风效应。
- 3) 忽略隧道拐弯以及一些结构细部的影响,简化隧道模型<sup>[6]</sup>。
- 4) 忽略特大货车外表结构细部的影响,简化火车车辆模型。

### 1.1 数值模拟方法

用商业流体力学软件Fluent对隧道火灾三维模型内的烟雾流动和温度传递进行数值模拟,基于雷诺平均(RANS)的CFD模拟在研究绕流和压力分布时已有不少成功的算例<sup>[7]</sup>。

标准k-ε模型的工程应用得到了大量实践检验,精度可靠,且相对于大涡模拟等模型,其计算量也小很多。

标准k-ε模型的控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中,ρ为密度,t为时间,vec{u}为速度矢量,Γ\_φ为变量φ的扩散系数,S\_φ为变量φ的源项。当φ取不同值时,式(1)可分别表示质量守恒、动量守恒、能量守恒方程,具体可参见文献[8]。

为了求解质量和动量守恒微分方程组,采用有限容积法对这些控制方程在微小单元上积分离散。压力项与速度项耦合利用SIMPLE算法。对流项的离散采用二阶迎风差分格式,扩散项的离散具有二阶精度。各变量的松弛因子介于0.8~1.0,压力和速度的松弛因子的和为1.0。

火灾工况下隧道内烟气浓度分布模拟中,Fluent软件通过第i种物质的对流扩散方程计算每种物质的质量分数Y\_i,组分输运守恒方程的通用形式为

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2)$$

式中,ρ为物质i的密度,R\_i为化学反应的净生成速率,S\_i为离散相及用户定义的源项所导致的额外速率,J\_i为物质i的扩散通量,由浓度梯度产生,当缺省时,可表示为

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (3)$$

式中,D\_{i,m}为混合物中第i种物质的扩散系数。

本文采用DO模型作为辐射计算模型。

### 1.2 计算模型

杭州彩虹快速路工程滨江段隧道长度为2940 m,双向六车道,采用全射流纵向通风系统,本文以北线为研究对象,北线共设置14组射流风机:SL-B-1~14,3台1组,总共42台,如图1隧道通风系统布置图所示。北线隧道设置19处竖井型自然通风口,由东至西分别为out-1~19,竖井型自然通风口按竖井的有效开口面积占开口隧道段的隧道垂直投影面积的比例为2%设置,竖井自然通风口的净宽度占隧道内净宽度的比例不大于20%,且紧贴隧道内侧横断面边缘布置。

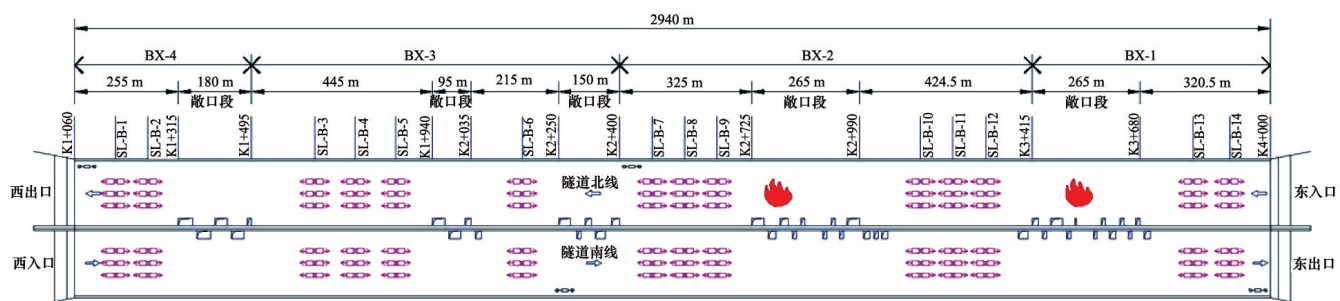


图1 隧道通风系统布置

Fig. 1 Layout of tunnel ventilation system

如图1所示,当隧道BX-1段发生火灾时,开启射流风机SL-B-10~14;当隧道BX-2段发生火灾时,开启射流风机SL-B-6~14;当隧道BX-3段发生火灾时,开启射流风机SL-B-1~9;当隧道BX-4段发生火灾时,开启射流风机SL-B-1~5。此外,隧道进口50 m内发生火灾且无后续车辆时,射流风机组SL-B-13、14可逆转向洞外排烟。

隧道的坡度如表1所示。在选择火源位置时,综合考虑了自然通风口位置、隧道坡度、横通道位置等的影响,尽可能选择火灾发生的不利位置进行仿真模拟计算。分析认为,桩号K3+530和K2+788两处为火灾发生的相对不利位置,其中K3+530为火灾发生的最不利位置,该火源位置处于隧道BX-1段,火灾发生30 s后开启射流风机SL-B-10~14。本文以桩号K3+530处发生火灾为研究工况,采用稳态与非稳态方法对隧道内火灾特性进行数值模拟。

表1 隧道坡度  
Table 1 Tunnel slope

里程桩号	坡度/%
K1+060.000 ~ K1+141.986	-3.87
K1+141.986 ~ K1+367.486	0.30
K1+367.486 ~ K1+579.034	-2.20
K1+579.034 ~ K1+791.486	2.00
K1+791.486 ~ K2+287.986	-0.30
K2+287.986 ~ K2+882.986	0.30
K2+882.986 ~ K3+864.807	-0.30
K3+864.807 ~ K4+000.000	3.84

考虑坡度对火灾烟气扩散的影响,在几何模型中包含了隧道各个路段的坡度信息,隧道北线数值计算模型如图2所示。竖井型自然通风口与火灾源数值计算模型见图3。

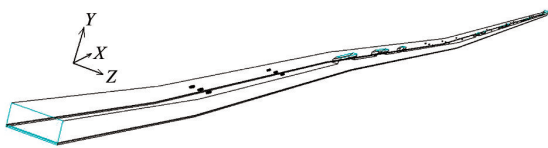


图2 隧道北线数值计算模型

Fig. 2 Numerical model of north line of the tunnel

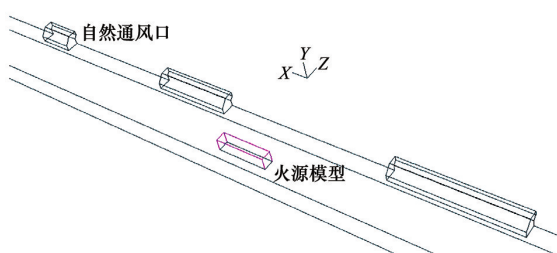


图3 竖井型自然通风口与火灾源数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model of shaft type natural ventilation and fire source

计算模型网格划分采用六面体与四面体的混合网格体系。对于形状规则的区域,采用六面体网格,对于形状较为复杂的区域,采用四面体网格。经过网格独立性分析,总网格数取284884。

隧道衬砌壁的壁面粗糙系数取0.01 m,考虑壁面的一维热传导作用,传热范围认为到达厚度0.5 m处。厚度0.5 m处,保持恒温17°C。空气的比热容和导热系数不考虑随温度的变化而变化,取为常数。数值模拟中,射流风机型号为Φ630,空气密度为1.22 kg/m<sup>3</sup>,通风空气温度为27°C,重力加速度为9.8 m/s<sup>2</sup>,外界空气压力为1.013×10<sup>5</sup> Pa,混凝土导热系数为1.209 W/(m·K),混凝土比热容为1100 J/(kg·K),空气导热系数为0.0242 W/(m·K),空气比热容为1006.43 J/(kg·K)。

VHS模型是火灾燃烧模型中最为简单的一种,通常将火源简化为具有固定尺寸的体积热源。VHS模型简单易行,能简化计算过程,减少计算量,基本满足稳态工况下火灾危险分析的要求<sup>[9]</sup>。对于火灾非稳态工况数值模拟,采用UDF编写火源模型,采用快速t2火来模拟火灾发生初期的增长趋势,能比较好地反应油类或针织类物品开始燃烧阶段的规律。数值模拟中车辆类型为大型客车,火源尺寸为12.5 m×2.5 m×3 m(长×宽×高),火灾规模为30 MW,火灾成长系数为0.1878,烟气生成速率为60 kg/s,烟气中CO比例为2%。

数值计算是在有限区域内进行的,因此在区域的边界上需要给定边界条件。本文的计算边界类型及条件为:

- 1) 隧道底部和上部设为壁面边界,并根据实际的粗糙度给定相应的壁面函数中的参数<sup>[10]</sup>。
- 2) 隧道出入口设为压力出口边界条件。
- 3) 隧道顶部自然通风口设为压力出口边界条件。
- 4) 射流风机的出口端设为等速边界条件,速度值为39.4 m/s。
- 5) 射流风机进口设为经过数值模拟验证的流量边界条件<sup>[11]</sup>,其数值为12.3 m<sup>3</sup>/s。
- 6) 风机壁面、隧道内壁为固体边界条件。

## 2 计算结果分析

为便于数值模型坡度的设置,几何模型中以桩号K1+315为起始原点,因此数值模拟中隧道的起点桩号K1+060对应模拟结果X轴的负值:-255 m。CFD数值模拟结果的分析有助于对火灾稳态与非稳态燃烧工况下隧道内气流场以及CO浓度场分布规律的理解。

### 2.1 稳态数值模拟

#### 2.1.1 流场模拟结果分析

隧道火灾工况自然通风口净流量分布如图4所示,图中负值表示竖井自然通风口净气流方向由隧道内流向隧道外,正值表示竖井自然通风口净气流方向由外向内。

由图4可以看出,沿着隧道车行方向,自然通风口的净空气流有进有出。热烟气受火源周边气流的扩散与运动影响显著,下面对火源两侧的竖井自然通风口的气流运动进行着

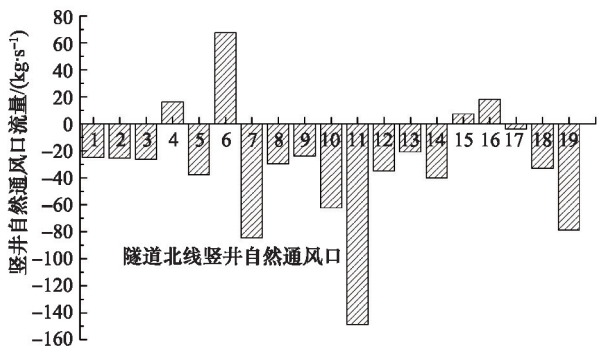


图4 火灾工况竖井自然通风口净流量分布

Fig. 4 Net flow distribution of natural ventilation shaft under fire condition

重分析。在射流风机纵向气流作用下竖井自然通风口 out-1~3 的净出风量有增加的趋势,但趋势不明显。在自然通风口 out-4 处,通风口进风量开始大于出风量,根据模拟结果可知,流量净值为 16.1 kg/s。这是由于火源位置处于竖井自然通风口 out-4 附近,自然通风口处气流运动相对强烈。

在火焰热驱动、隧道纵向气流的作用下, out-4 处出现了较大的负压,隧道内外的压差使得大量外界气流进入隧道, out-4 速度分布如图 5、图 6 所示。

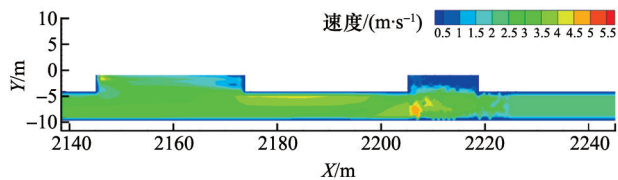


图5 自然通风口中心纵断面速度分布(云图)(K3+455~K3+555)

Fig. 5 Velocity distribution of longitudinal section of natural vents (image) (K3+455-K3+555)

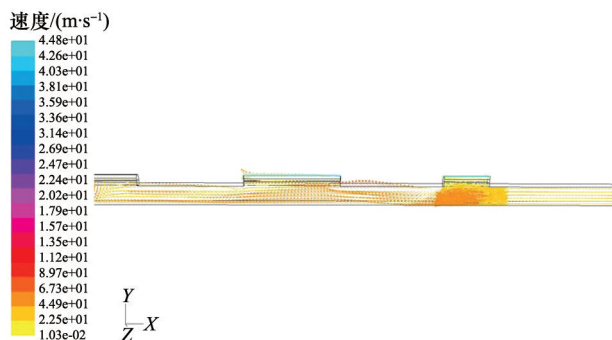


图6 自然通风口中心纵断面速度分布(矢量图)(K3+455~K3+555)

Fig. 6 Velocity distribution of longitudinal section of natural vents (vectograph) (K3+455-K3+555)

由于火源受到纵向强制气流的压迫,同时受热烟气的浮升力作用,气流以 3~4 m/s 的速度斜向竖井自然通风口 out-5 流动,从图 5 可以看出,竖井自然通风口虽有气流从隧道外流入,但是由于隧道内的气流流动相对剧烈,使得竖井自然通风口 out-5 的气流净流出隧道,流量净值接近 40 kg/s。竖井自然通风口 out-6 处于射流风机组 SL-B-12 的吸入端,如图 1 隧道通风系统布置图,因此,在射流风机的卷吸作用下,隧道内外静压差增大,气流从隧道外沿竖井自然通风口 out-6 进入隧道。如图 1 所示,自然通风口 out-7 位于射流风机组 SL-B-10~12 的射流端,隧道气流活塞作用相对显著,因此气流通过自然通风口 out-7~9 流出隧道。

结合图 7 火源中心横断面温度分布、图 8 隧道中心纵断面温度分布进行分析。由图 7 可以看到,隧道内火灾发展进入稳定发展阶段,火源处的最高温度约为 620°C。火焰在热浮升力作用下,逐渐向隧道空间扩散,受卷吸作用,由竖井自然通风口进入隧道的冷空气与火源产生的热空气大量混合,火焰外围的温度显著降低,靠近隧道顶部结构板的温度不超过或者略微超过 100°C,可见,竖井自然通风口对火焰端部的降温作用是显著的。根据图 8 显示的温度分布云图,在隧道纵向气流的作用下,火焰沿气流方向迅速延伸,在人员疏散的方向,即逆向纵向气流方向,基本没有火焰。

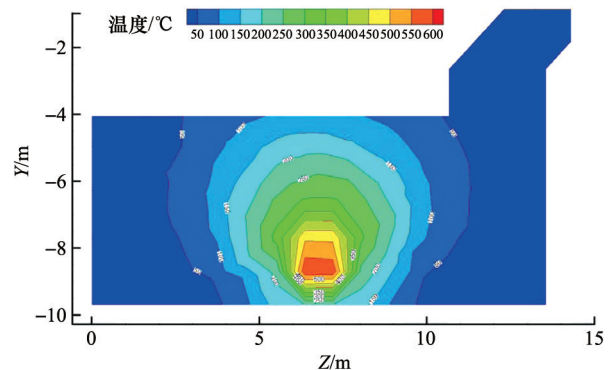


图7 火源中心横断面温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of cross section at the fire center

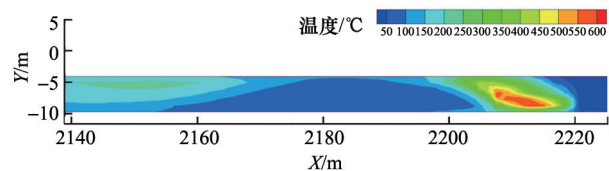


图8 隧道中心纵断面温度分布(K3+455~K3+535)

Fig. 8 Temperature distribution of central longitudinal section of the tunnel (K3+455-K3+535)

### 2.1.2 CO 模拟结果分析

火灾工况下,隧道竖井自然通风口的 CO 平均浓度分布如图 9 所示。

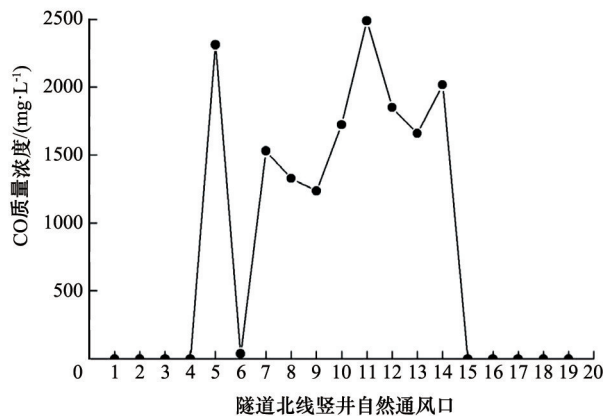


图9 火灾工况竖井自然通风口CO浓度分布

Fig. 9 CO concentration distribution of natural ventilation shaft under fire condition

从图9可以看出,竖井自然通风口 out-1~4的CO浓度几乎为0,火源位置处于竖井自然通风口 out-4附近,火源产生的CO受到了纵向强制风流的抑制作用,热烟气流在此处被迫流向下流,且以较快速度蔓延。由于以大于临界风速通风,通风量充足,烟气全部流向下流,火区上游完全无烟,没有出现回流现象。图9中的out-5,其CO浓度出现陡增,达到近3.7 mg/L,这是由于火源烟气受浮升力作用,以及通风气流影响,热烟气流斜向上直冲隧道顶板,并从竖井自然通风口 out-5排出隧道。对于out-6,在射流风机进口气流卷吸作用下,大量隧道外新鲜空气通过竖井 out-6进入隧道,使得该竖井处的CO浓度迅速降低。从图9中竖井 out-15~19可以看出,火灾工况下,由于竖井自然通风口的设置,使得火源产生的CO尚未到达隧道洞口,就被通过竖井进入隧道的新鲜空气稀释至安全浓度范围,这一结论对制定火灾救援、人员疏散方案有重要的指导作用。竖井自然通风口的设置改变了以往火灾工况下隧道内CO浓度沿射流方向累积的规律,火灾产生的有毒气体由隧道洞口集中排放转变为竖井自然通风口分散排放。

结合图10火源中心横断面CO浓度分布、图11隧道中心纵断面CO浓度分布进行分析。由图10可知,随着着火车辆的燃烧,大量释放CO有毒气体,火源处CO质量浓度的最大值超过23 mg/L。CO气体在火焰热驱动力作用下,不断向隧道顶板发展,同时,在隧道空间冷空气的混合作用下,浓度不断降低,在火源中心横断面上呈现显著的分层现象。从图11可知,热烟气流从火源发生处向上扩散,在火源上方,受到了纵向强制风流的抑制作用,热烟气流在此处被迫流向下流,且以较快的速度向下流蔓延。由于以临界风速通风,其通风的风量充足,烟气全部流向下流,火区上游完全无烟,即没有出现回流现象。

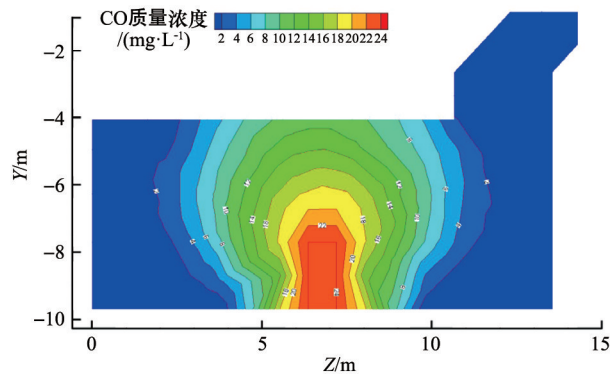


图10 火源中心横断面CO质量浓度分布

Fig. 10 CO concentration distribution of cross sectional at the fire center

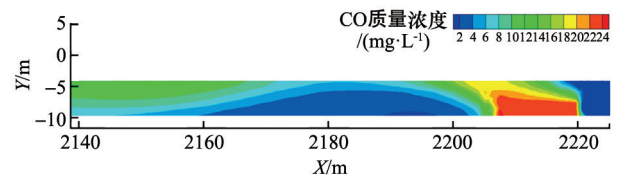


图11 隧道中心纵断面CO质量浓度分布(K3+475~K3+545)

Fig. 11 CO concentration distribution of central longitudinal section of the tunnel (K3+475-K3+545)

## 2.2 非稳态数值模拟

### 2.2.1 流场模拟结果分析

选取隧道典型断面、典型时刻进行非稳态火灾工况下烟气温度分布的分析。火灾发生1 min末、3 min末、5 min末、7 min末、9 min末隧道中心纵断面温度分布如图12所示。

火灾发生初期,火焰在隧道纵向气流的作用下,向火灾下游扩散。由于火源释放的热量较小,因此,隧道内温升不显著,温度在100℃以下,如图12(a)所示。火灾发展到第3 min末,随着火源释热量的增加,隧道内空气温度逐渐升高,同时,在纵向气流的带动下,热空气向火灾下游扩散的距离超过100 m,而且在距离火源处50 m的位置出现了一个热空气的“低温区”,该区域随着火灾的发展逐渐减小,如图12(c)所示。当火灾发展到第9 min末,火焰达到充分发展阶段,火灾下游充满热空气。从图12可知,在火灾下游的隧道段内,隧道内热气流呈波浪式分布,即在距离火源40~60 m范围内,空气温度较低,而且该热气流的“低温区”范围较大。随着沿火源下游方向距离的增加,热气流“低温区”范围减小,仅在隧道空间下部区域气流温度较低,如图12(e)所示。从图12可知,隧道内热气流在纵向气流的作用下,均未出现回流现象。因此,在隧道出现火灾时,隧道内人员可逆向车行方向逃生,不会受到高温火焰的影响。

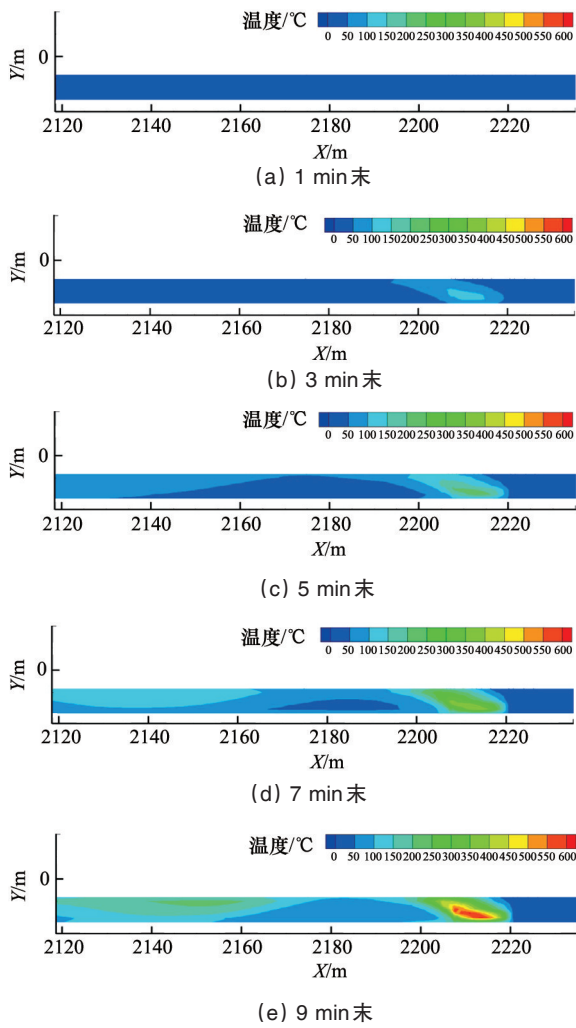


图12 火灾发生后隧道中心纵断面温度分布 (K3+435~K3+550)

Fig. 12 Temperature distribution of central longitudinal section of the tunnel under fire condition (K3+435-K3+550)

### 2.2.2 CO模拟结果分析

选取隧道典型断面、典型时刻进行非稳态火灾工况下烟气运动的分析。火灾发生1 min末、3 min末、5 min末、7 min末、9 min末隧道中心纵断面CO浓度分布如图13所示。

从图13可知,热烟气从火源发生处向上扩散,在火源上方受到纵向强制风流的抑制作用,热烟气流在此处被迫流向下游,且以较快的速度向下游蔓延。由于以临界风速通风,其通风风量充足,烟气流向下游,即没有出现回流现象。

由图13还可看出,在火灾发展初期,热气流紧贴拱顶蔓延,并不断被卷吸到隧道上部的烟气中,而下部出现了烟气分层现象,被卷吸的烟气形成旋涡,旋涡逐渐向前推进。烟雾空气分层和烟雾缓慢扩散的特性,使得隧道下部的烟雾浓度较低,但随着时间的增加,热烟气沿隧道纵向范围逐渐扩大。

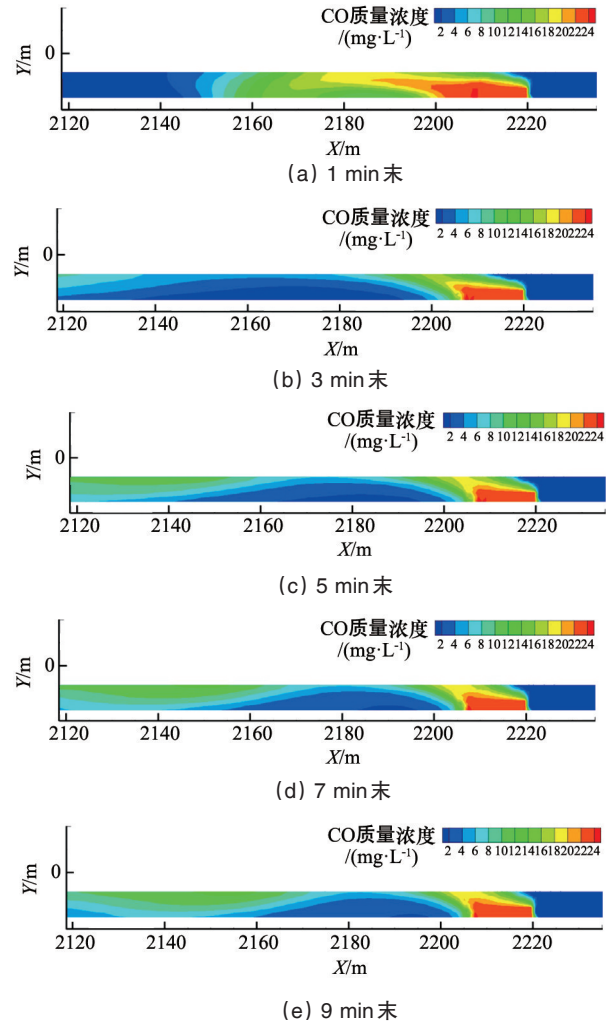


图13 火灾发生后隧道中心纵断面CO质量浓度分布 (K3+435~K3+550)

Fig. 13 CO concentration distribution of central longitudinal section of the tunnel under fire condition (K3+435-K3+550)

当火灾发展到第3 min时,其烟雾的纵向分布如图13(b)所示。纵向气流并未破坏火源下游烟气的分层效果,在隧道下游烟雾与空气的分层效果仍然明显,特别是火源下游60 m以内的地方,高温烟气在纵向风速的驱动下,在火源下游附近呈现一种规则的分层现象,即温度和烟雾浓度分布出现了高低交替现象。这是由于隧道内气流被加热而密度发生变化,在重力场作用下诱发对流,从而形成了主要由浮升力和纵向强制通风作用下的烟流流动。从烟雾的浓度分布看,烟气主要为纵向运动,温度和烟雾浓度沿火源下游方向逐渐降低。因此,在隧道出现火灾时,隧道内人员可逆向车行方向逃生,不会受到CO气体的影响。

### 3 结论

采用稳态与非稳态方法对杭州彩虹快速路工程滨江段隧道内火灾特性进行细致的数值模拟,分析了竖井自然通风

口对火灾工况下隧道内气流速度、温度、CO 浓度分布的影响。

1) 竖井自然通风口引入隧道外冷空气,与火灾高温气流混合,显著降低火源端部温度,可在一定程度上减少高温烟气对火源处隧道顶板的破坏。

2) 火灾产生的有毒烟气由隧道洞口集中排放转变为竖井自然通风口分散排放,在隧道靠近洞口位置 CO 浓度降低到安全范围内,这对制定火灾救援、人员疏散方案有重要的指导作用。通过竖井引入新风,显著降低了火源附近的有毒气体浓度,改善了火灾救援条件。

3) 火灾工况下,火源产生的高温有毒烟气在纵向强制气流作用下,未发生回流,隧道司乘人员可逆向车行方向逃生。本隧道所设置的竖井自然通风口方案可满足火灾情况下人员逃生要求。

#### 参考文献 (References)

- [1] 王雅君. 东西向北横快速通道实质性启动[EB/OL]. [2013-02-23]. <http://www.shbiz.com.cn>.  
Wang Yajun. Things start substantive northward cross channel[EB/OL]. [2013-02-23]. <http://www.shbiz.com.cn>.
- [2] 茅新丰, 黄玉良, 朱培根, 等. 火灾工况下城市隧道自然通风模型实验[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(4): 357-362.  
Mao Jinfeng, Huang Yuliang, Zhu Peigen, et al. Experiment of city tunnel model with natural ventilation in case of fire[J]. Journal of PLA University: Science and Technology Edition, 2008, 9(4): 357-362.
- [3] 王彦富, 龚延风, 蒋军成, 等. 半敞开式隧道火灾试验[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(3): 248-254.  
Wang Yanfu, Gong Yanfeng, Jiang Juncheng, et al. Fire test of tunnel with openings on roof[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Science and Technology Edition, 2008, 9(3): 248-254.

- [4] 李婷婷, 唐娴. 长大隧道内火灾烟雾运动和温度分布数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(12): 66-69.  
Li Tingting, Tang Xian. Numerical simulation of smoke movement and temperature distribution in a tunnel fire[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(12): 66-69.
- [5] 涂江峰, 朱培根, 田义龙, 等. 竖井型城市隧道火灾烟气流动模拟分析[J]. 洁净与空调技术, 2012(3): 1-3, 13.  
Tu Jiangfeng, Zhu Peigen, Tian Yilong, et al. Simulation and analysis of the fire smoke in city tunnel with vertical well[J]. Clean and Air Conditioning Technology, 2012(3): 1-3, 13.
- [6] 李小江. 城市隧道纵向射流通风技术的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
Li Xiaojang. Application research of city tunnel longitudinal jet ventilation technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [7] Schetz J A. 高速列车空气动力学[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 404-423.  
Schetz J A. Aerodynamic characteristics of high-speed trains[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(3): 404-423.
- [8] 施孝增. 气溶胶颗粒物在典型送风方式下的扩散特性与分布规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.  
Shi Xiaozeng. Diffusion and distribution of aerosol particles in typical air supply mode[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [9] 冯炼, 王泽宇. 带竖井长大公路隧道火灾通风的 CFD 分析[J]. 公路, 2007(4): 193-196.  
Feng Lian, Wang Zeyu. CFD analysis of fire ventilation in long highway tunnel with shaft[J]. Highway, 2007(4): 193-196.
- [10] Hermann S. Boundary layer theory[M]. New York: New York McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [11] 张林. 公路隧道射流通风数值模拟与风机安装参数优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.  
Zhang Lin. Parameter optimization of highway tunnel jet fan installation numerical simulation and wind machine[J]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.

(责任编辑 吴晓丽)

#### ·学术动态·



### 中国科协将举办长三角地区生态建设调研及研讨会

中国科协第八届常委会决策咨询专门委员会拟举办长三角地区生态建设调研及研讨会,组织专家围绕长三角地区水污染综合防治等生态建设问题进行深入调研,形成高质量对策建议。

主题:长三角地区水污染综合防治等生态建设问题。

议题:长三角地区水污染现状、重点问题及成因;水污染对生物、环境、经济发展、民生等方面的影响;科学解决长三角地区水污染问题、加强生态建设的对策。

时间:2014年9月26—28日。

地点:上海科学会堂。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/15860854.html>。