

# 移动火源隧道火灾拱顶温度变化规律数值模拟

邓军<sup>1</sup>, 李士戎<sup>1,2</sup>

1. 西安科技大学能源学院西部矿井开采与灾害防治教育部重点实验室, 西安 710054
2. 阳泉市公安消防支队, 山西阳泉 045000

**摘要** 为研究动态火源对隧道拱顶温度场分布影响规律, 针对隧道中动态火源火灾, 在自然通风条件下, 静止、40 及 60km/h 等速度的 20MW 火源在隧道内穿行的火灾过程, 采用火灾动力学模拟器 (FDS) 进行火灾场景的模拟与计算。重点对火源在隧道行进过程中拱顶沿纵向温度分布、温度峰值变化规律及影响因素进行分析。研究结果表明, 通风是影响隧道火灾温度的主要因素, 移动火源在一定程度上打破了隧道内由于顶棚射流引起的热烟气与冷空气的动态循环机制, 活塞风尾段涡流会引起隧道流场变化, 一定程度阻碍了燃烧释放热量向火源行进逆向的扩散, 并将高温气流带向其运动方向。

**关键词** 移动火源; 隧道; 温度; 火灾动力学模拟器

**中图分类号** X928.7

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.11.004

## Numerical Simulation on the Ceiling Temperature Change Law of Tunnel with Moving Fire

DENG Jun<sup>1</sup>, LI Shirong<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of Ministry of Education, College of Energy Science & Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2. Yangquan Fire Bureau, Yangquan 045000, Shanxi Province, China

**Abstract** Aiming at the accidents caused by moving fire source, for analyzing the influence law of moving fire on ceiling temperature of tunnels, through Fire Dynamic Simulator (FDS), the processes that fired vehicle with 20MW Heat Release Rate (HRR) travels at the speed of 0km/h (static in tunnel), 40km/h, and 60km/h, respectively in tunnel with natural ventilation are simulated. The longitudinal temperature distribution, change law of peak temperature, and its influence factors when moving fire stops and becomes stable combustion in tunnel are specially analyzed. It indicates that ventilation is main influential factor to the temperature in tunnel fire. Moving fire causes air turbulence and breaks the circulation balance of hot smoke and cold fresh air caused by ceiling jet in tunnel, making tunnel fire process more complicated. On one hand, the airflow filed movement induced by piston wind wake of moving fire promotes mixture and combustion of fuel and air, on another hand, it blocks the spread of heat released in the direction opposite to fire movement in certain degree and also entrains high temperature airflow into its spread. The research provides guidance for the study on mechanism of tunnel fire with moving fire as well as relevant fire fighting and rescue technique.

**Keywords** moving fire; tunnel; temperature; fire dynamic simulator

### 0 引言

随着隧道交通流量逐步增加, 隧道火灾事故发生的数量和频率也相应增加<sup>[1]</sup>。在一些隧道火灾事故中, 驾驶员无意中驾驶着火机动车穿行于隧道<sup>[2]</sup>引发火灾严重威胁隧道内人员

生命安全。在隧道狭长空间内, 移动火源的动态特性较固定火源而言, 对火灾特性和烟气动态特征影响有所不同, 从而对隧道内火灾探测报警及临界风速等产生影响<sup>[3]</sup>。

目前隧道火灾研究方法主要有全尺寸实验, 比例尺寸实

收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2013-01-28

基金项目: 教育部创新团队项目 (IRT0856); 陕西省 13115 科技创新工程项目 (2010ZDGC-14)

作者简介: 邓军, 教授, 研究方向为安全技术及工程, 电子信箱: dengjun07@yahoo.cn

验和数值模拟仿真<sup>[4]</sup>。国内外关于隧道火灾的相关研究<sup>[5-9]</sup>主要集中在不同的典型位置固定火源条件下的隧道火灾及烟气发展特性的物理模型实验或数值模拟,有关动态火源的研究相对较少,其中韦良义等<sup>[3]</sup>对隧道火灾移动火源研究方法进行了分析,并通过小比例尺寸模型实验和计算机数值模拟<sup>[10]</sup>初步开展了相关研究,但针对真实隧道基于移动火源的拱顶温度模拟研究相对较少。本文采用火灾动力学模拟软件 FDS 5.3.3 进行隧道火灾场景模拟与计算,对某隧道中移动火源在隧道拱顶温度变化特征进行研究。

## 1 物理模型

### 1.1 隧道模型及通风

选取长 320m,内截面宽、高分别为 12.60、9.76m 的某在建高速公路穿山隧道为原型,建立长、宽、高分别为 320m×12m×10m 数值模型,见图 1。综合考虑计算精度、计算时间以及计算区域的设置对建筑开口处的烟气溢流以及补气情况和建筑内部的热流场的影响<sup>[11]</sup>,模型沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴向计算网格大小分别设为 0.22m×0.22m×0.23m,同时将开口处的计算区域向外延展 5m,隧道网格划分见图 2。

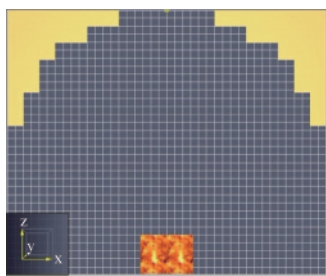


图 1 隧道模型截面

Fig. 1 Cross-section of tunnel

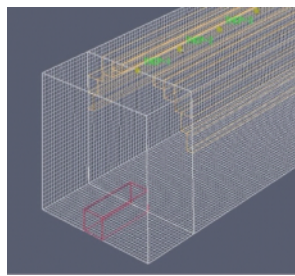


图 2 计算区域网格划分

Fig. 2 Grid partition of calculation zone

根据规范,本隧道不需机械通风,因此计算工况设定仅考虑自然通风,据工程现场数据设置,隧道内自然通风速率和初始温度分别为 2.7m/s, 10℃。并规定隧道内自然通风速度  $U$  与火源行驶同向和反向时分别为+和-。本文侧重移动火源对隧道内温度场的影响研究,因此,为简化计算隧道壁面,未考虑热交换效应,但是从隧道内部整体结构角度出发分析各处温度差异和变化规律仍然是较为合理的。

### 1.2 移动火源设置

本文模拟机动车静止在隧道中某处着火以及着火机动车在隧道行驶一段时间停止后继续燃烧的火灾场景。根据实际隧道行车限速 40~60km/h (约 10~15m/s),分别设置火源在距隧道入口 100m 处静止燃烧( $V=0$ m/s),以及火源分别以  $V=10$ m/s 和  $V=15$ m/s 从入口沿隧道地面中轴行至隧道内 100m 处停止后继续燃烧的 3 种状态。

火灾模拟中可燃物的热释放速率(HRR)的设定直接关

系到模拟的准确性<sup>[12]</sup>。参照 McGrattan 等<sup>[13]</sup>提供的近似衡量指标,选取发生几率较大的中等火灾规模 20MW。以长、宽、高为 5m×2m×1.5m 的矩形模块模拟火车几何构造,除底面外的 5 个表面均设定 0.65MW/m<sup>2</sup> 热释放速率。在隧道通风为 0m/s 的条件下,3 种火源分别在初始状态、运动 10s 以及运动 7s 左右处于隧道稳定位置并在短时间(1~2s)内 HRR 急剧增加,达到 35MW 左右峰值之后 2~3s 以 20MW 进行稳定燃烧。

### 1.3 温度测点布置

在隧道火灾稳定燃烧点前、后 100m 范围内 ( $y$  为 0~200m)的隧道拱顶沿火源移动方向设置温度测点  $T_1$ ~ $T_{13}$  共 13 个。因为火源稳定燃烧点附近两侧温度梯度较大,所以温度测点在其附近以 10m 间隔布置,远离该点以 20m 间隔布置。各点位置名称和位置见表 1。

表 1 数值模型温度测点位置分布

Table 1 Temperature detector location distribution in numerical model

温度测点名称	位置/m
$T_1$	0
$T_2$	20
$T_3$	40
$T_4$	60
$T_5$	80
$T_6$	90
$T_7$	100
$T_8$	110
$T_9$	120
$T_{10}$	130
$T_{11}$	150
$T_{12}$	170
$T_{13}$	190

## 2 数学模型

对隧道内流动着的流体取平行六面体微团,对其应用牛顿第二定律,沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴简化后的运动微分方程组<sup>[14]</sup>为

$$\begin{cases}
 f_x + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = \frac{dw_x}{dt} \\
 f_y + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) = \frac{dw_y}{dt} \\
 f_z + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) = \frac{dw_z}{dt}
 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $f_x$ 、 $f_y$  和  $f_z$  分别代表作用于流体微团上的单位质量流体上的质量力在 3 个坐标轴方向的分量。根据广义牛顿内摩擦定律,将切向应力和法向应力关系式带入公式(1),再根据不可压缩流体的连续方程,消除方程组中零项后,得到不可压缩黏性流体微分方程——Navier-Stokes 方程(N-S 方程):

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dv_y}{dt} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dv_z}{dt} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

N-S 方程建立了流体粒子动量的改变率和作用在流体内部压力的变化、耗散黏滞力以及引力之间的关系<sup>[15]</sup>。FDS 通过数值求解受火灾浮力驱动的低马赫数流动的 N-S 方程<sup>[13,16]</sup>，重点计算火灾中的烟气和热传递过程。

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 移动火源进入隧道初期纵向温度场分布

选取隧道无风时 ( $U=0\text{m/s}$ )，研究各工况火源在稳定位置

燃烧 10s 时隧道内  $100^\circ\text{C}$  等值线和气流速度场，对移动火源进入隧道初期时对拱顶纵向温度分布影响进行分析。本文主要针对隧道内移动火源对于周围环境的影响，故所涉及的温度分析主要针对隧道中火源附近的环境温度。

#### 3.1.1 火源燃烧 10s 时隧道内 $100^\circ\text{C}$ 等值线

由于火源处于稳定位置后 HRR 才逐渐趋稳，所以选择各工况下火源处于稳定位置后 10s 时的温度场中  $100^\circ\text{C}$  的等值线 (图 3 中黑色线条) 位置，以考查各种工况火源稳定燃烧 10s 后的温度场分布，如图 3 所示。

由图 3 可以看出，火源稳定后其上方温度最高，高温热烟气在浮力作用下上升至拱顶，因顶棚射流作用向隧道两端蔓延，在 10s 时  $100^\circ\text{C}$  热烟气蔓延至火源两侧约 30m 外。

对比 3 条等值线位置，静止火源的等值线位置在火源两

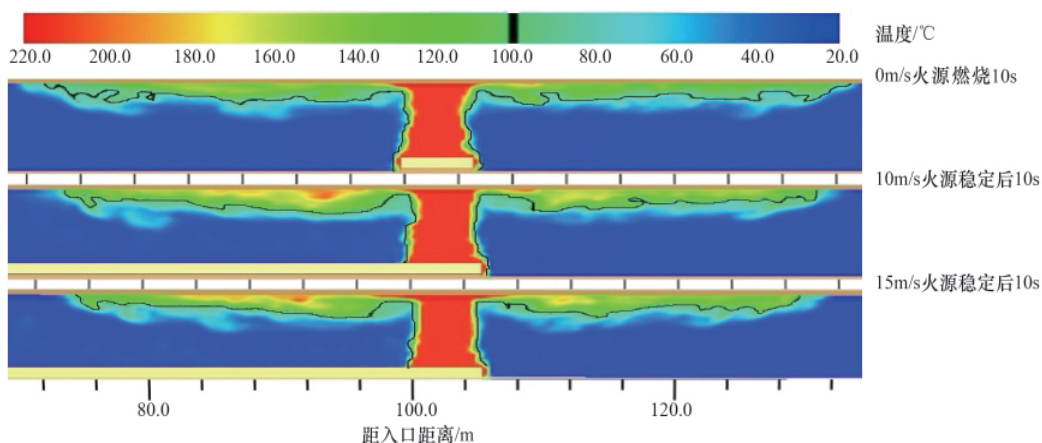


图 3  $U=0\text{m/s}$  时火源在 100m 处稳定燃烧 10s 时  $100^\circ\text{C}$  等值线位置

Fig. 3 Locations of  $100^\circ\text{C}$ -isoline at 100m after 10s stable fire combustion when  $U=0\text{m/s}$

侧蔓延均远于运动火源 10m 左右，且  $V=10\text{m/s}$  时等值线较  $V=15\text{m/s}$  的等值线更加远离火源。这是由于火源运动打破了顶棚射流形成冷热气流交换平衡，同时火源的移动造成隧道内气流湍动，一定程度上影响了火源热量向远离火源两侧的扩散，造成动态火源燃烧不如静态火源燃烧充分，且火源移

动速度越快，空气湍动越大，热量扩散相对越弱，所以高温扩散更慢。

#### 3.1.2 火源燃烧 10s 时隧道内气流速度场

3 种工况下火源稳定后燃烧 10s 时的气流速度场分布见图 4。

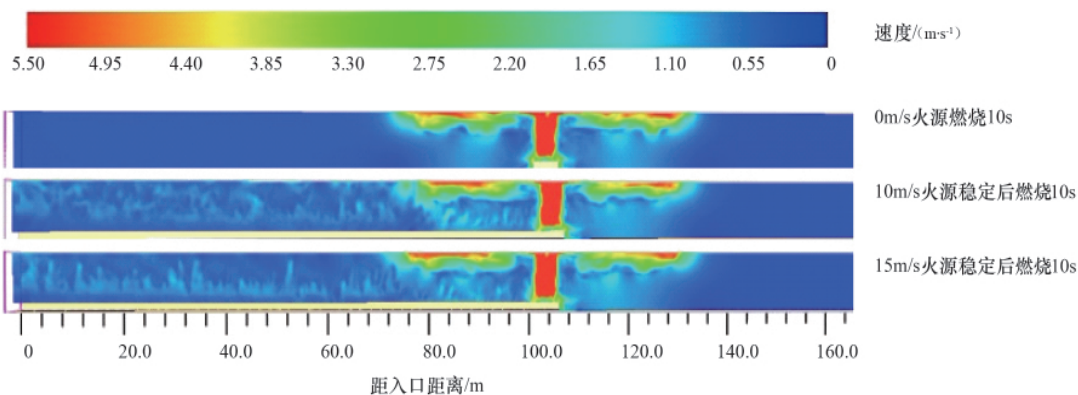


图 4  $U=0\text{m/s}$  时火源在 100m 处稳定燃烧 10s 时气流速度场

Fig. 4 Airflow velocity fields at 100m after 10s stable fire combustion when  $U=0\text{m/s}$

由图 4 可见,由于热释放速率相同,火源稳定后的 3 种火源上方拱顶附近在浮力羽流和顶棚射流作用下,产生的气流速度场蔓延情况大体相似。但是,移动火源经过 100m 隧道中,在火源静止后 10s 时仍然存在明显气流湍动,这是由于活塞风尾段涡流<sup>[7]</sup>引起的沿途空气湍动在一定程度上阻碍了热量向隧道出口方向的扩散,从而可以合理解释 3.1.1 中温度场中等值线的分布特征。

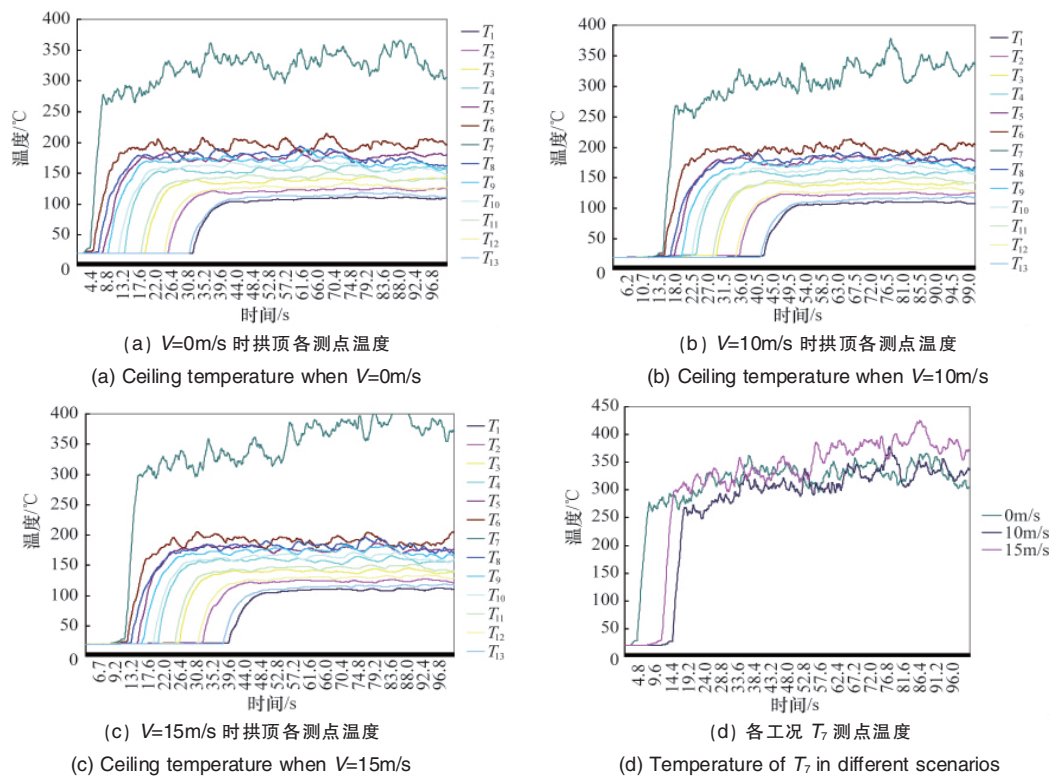


图 5  $U=0\text{m/s}$  时隧道拱顶各测点温度及各工况峰值温度

Fig. 5 Ceiling temperature curves with different scenarios and the peak values with different fire scenarios when  $U=0\text{m/s}$

由图 5(a)、(b)、(c)可见,各测点温度均从某一时刻开始先后迅速升高,然后随着燃烧的稳定最终趋于稳定。对于  $V=10\text{m/s}$  和  $V=15\text{m/s}$  两种火源,测点升温先后约开始于 12s 和 9s,火源静止 1~2s 后迅速升温。这是由速度差异造成火源运动至稳定点时间不同引起的。此后,由于 HRR 相同,所以各点升温速率基本相同。

位于隧道入口内 100m 处拱顶的  $T_7$  测点因为距离火源最近,温度升高开始时间最早,到达峰值速率最快,且比同工况下其他各测点温度峰值更高。如图 5(d),当  $V=15\text{m/s}$  时, $T_7$  峰值比其余两组高出约  $100^\circ\text{C}$ ,这是由于前期火源较快的运动产生较大空气湍动,促进了可燃物与空气混合,使燃烧更充分,从而增加了热量释放。但除  $T_7$  测点外,各组实验中其他测点温度稳定后,峰值均接近同一水平。火源两侧 10m 处的温度降低梯度较明显,而更远处由于远离火源,温度降低梯度不明显。

### 3.2.2 隧道内风速 $U=+2.7\text{m/s}$ 时

如图 6(a)、(b)、(c)所示,各火源条件下各测点温度总体

### 3.2 移动火源对隧道纵向拱顶温度峰值分布的影响

针对隧道内自然通风速度  $U=0,+2.7$  和  $-2.7\text{m/s}$  时各火源条件下隧道拱顶纵向各测点温度随时间变化以及最高测点温度随时间的变化情况展开分析。

#### 3.2.1 隧道内风速 $U=0\text{m/s}$ 时

隧道内风速为  $0\text{m/s}$  时,不同火源条件下的隧道拱顶纵向各测点温度变化与最高温度测点  $T_7$  温度变化如图 5 所示。

水平均有所下降,且各点间峰值差值较  $U=0\text{m/s}$  时  $T_7$  与其余测点的温差有明显减小,沿纵向温度降低梯度明显减小。

由图 6(b)、(c)可知,火源正上方(距隧道入口 100m 处)及其下方 10m 处(距隧道入口 110m 处)测点  $T_7$  和  $T_8$  温度先升至极值后又略有降低,而后趋于稳定。这是由于燃烧释放热量随风流向隧道出口方向流动,同时火源运动过程中燃料汽化后不断和新鲜空气混合、燃烧并产生较多能量。之后火源在  $T_7$  测点下方稳定燃烧并且火焰随风流偏向  $T_8$ ,之前火源运动过程中产生的热量也随自然风流以及行车后方活塞效应尾流段的剧烈涡流运动被带入此区域,两部分能量叠加便产生温度极值。当火源稳定燃烧一段时间后,此前产生的高温气体随自然风流流散,并在顶棚射流作用下向隧道两端蔓延。此外,由于隧道狭长,新鲜空气补给燃烧区域较慢,所以后期温度有所降低。

由图 6(d)可见,对比  $V=10\text{m/s}$  与  $V=15\text{m/s}$  两曲线,由于  $10\text{m/s}$  比  $15\text{m/s}$  的相对慢的运动过程中空气湍动较小,活塞风流效应较弱,产生热量更容易随通风流向隧道出口,导致热

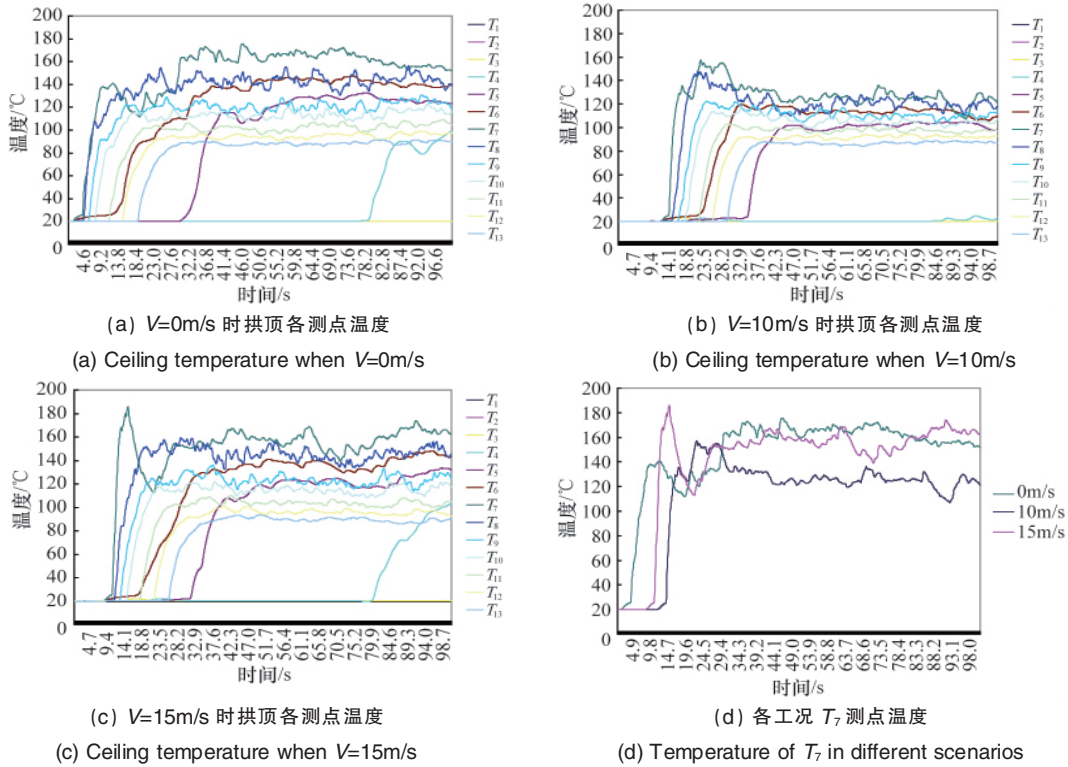


图 6  $U=+2.7\text{m/s}$  时隧道拱顶各测点温度及各工况峰值温度

Fig. 6 Ceiling temperature curves with different scenarios and the peak values with different fire scenarios when  $U=+2.7\text{m/s}$

量不能良好积聚,所以前者温度下降后稳定于较低水平。而  $15\text{m/s}$  火源更快地接近  $100\text{m}$  处的稳定位置,所以热量随风流耗散较小,所以温度稳定后更加接近于无风条件下的该值。

### 3.2.3 隧道内风速 $U=-2.7\text{m/s}$ 时

如图 7(a)、(b)、(c)所示,各火源条件下各测点温度总体

水平均有下降,燃烧稳定后拱顶纵向各测点间温度差较无通风时明显减小。 $V=10\text{m/s}$  和  $V=15\text{m/s}$  时,稳定火源下方  $10\text{m}$  处  $T_6$  测点温度达到峰值后开始呈下降趋势,最终趋于稳定。其原因与 3.2.2 中规律相似。

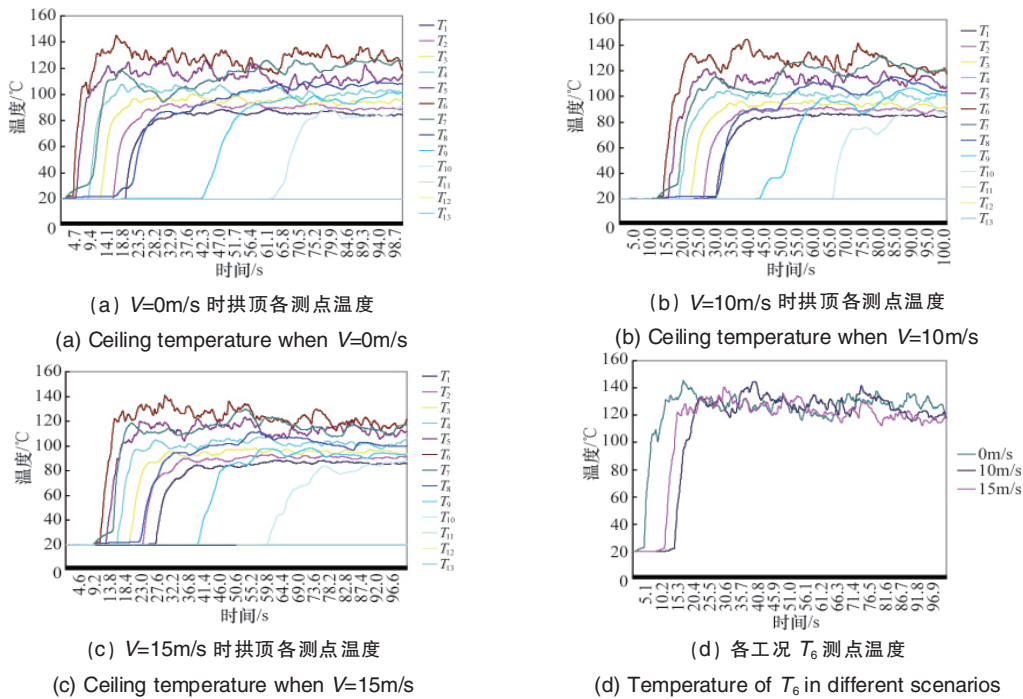


图 7  $U=-2.7\text{m/s}$  时隧道拱顶各测点温度及各工况峰值温度

Fig. 7 Ceiling temperature curves with different scenarios and peak values with different fire scenarios when  $U=-2.7\text{m/s}$

由图 7(d)可知,  $V=15\text{m/s}$  时,  $T_0$  测点温度下降较快, 且稳定燃烧时温度值较低。较另外两种通风条件,  $U=-2.7\text{m/s}$  时沿隧道纵向各测点温度差值随时间增加较小。火源在逆风前进过程中,  $15\text{m/s}$  的较快速率相当于增加了火源周围的气流速度, 同时火源移动与通风相对运动产生周围空气湍动及隧道内活塞效应加强, 使得燃烧产生的热量随通风耗散更多, 所以, 火源稳定燃烧后各点温度稳定于较低水平。

### 3.2.4 隧道内通风对各工况拱顶温度分布的影响

在隧道内自然通风速度  $U$  分别为  $0$ 、 $+2.7$  和  $-2.7\text{m/s}$  时, 各火源条件下隧道拱顶最高温度点温度峰值分别保持在  $350^\circ\text{C}$ 、 $160^\circ\text{C}$  和  $140^\circ\text{C}$  水平。说明隧道内通风对隧道内发生火

灾时温度影响较大, 通风带走了燃烧释放的热量, 使得隧道内温度降低较多。

通风速率相同时, 火源稳定燃烧后, 通风与火源运动反向时比二者同向时的拱顶温度值低约  $20^\circ\text{C}$ 。这是由于通风与火源运动相反, 相当于增加了火源周围的风流速率, 从而使热量耗散更快而不易在隧道空间积聚, 所以温度较低。

### 3.3 移动火源对烟气分布及流动的影响

在无通风影响的情况下分析火源移动对隧道烟气的影响, 选取当  $U=0\text{m/s}$ , 车速分别为  $0$ 、 $10$  和  $15\text{m/s}$  时, 3 种火灾场景下车辆在  $100\text{m}$  处稳定燃烧  $10\text{s}$  时的烟气分布进行研究, 如图 8 所示。

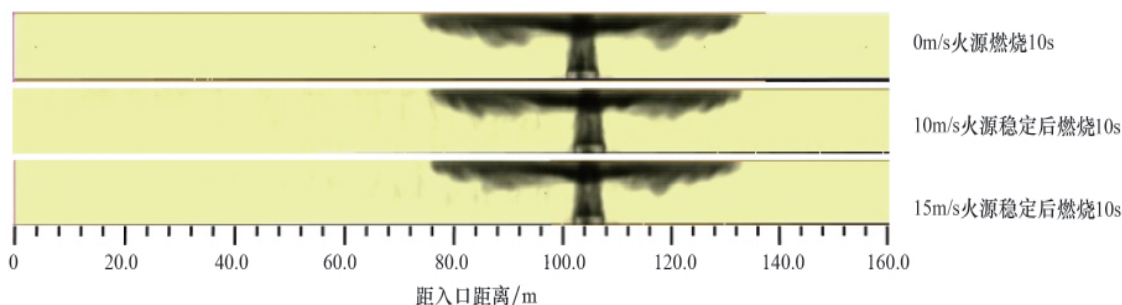


图 8  $U=0\text{m/s}$  时 3 种火源在  $100\text{m}$  处稳定燃烧  $10\text{s}$  时的烟气分布

Fig. 8 Smoke distribution for three-typed fire sources at  $100\text{m}$  after  $10\text{s}$  stable fire combustion when  $U=0\text{m/s}$

隧道内无风状态下, 移动火源在行进过程中将火灾烟气沿途释放到隧道空间。图 8 中各工况下火源在  $100\text{m}$  处稳定燃烧  $10\text{s}$  时释放出烟气的扩散状态, 在模拟过程中体现的火源移动情况对烟气蔓延和扩散的影响比较微弱说明, 较顶棚射流热驱动作用而言, 通风仍是隧道火灾烟气蔓延的主要影响因素。在未来的工作中将针对不同的通风条件对移动火源烟气扩散的影响进行详细分析。

## 4 结论

通过火灾动力学模拟软件 FDS, 依照某在建隧道尺寸建立数值模型, 模拟在不同自然通风条件下,  $20\text{MW}$  热释放速率的着火机动车在隧道中静止燃烧和以  $10$ 、 $15\text{m/s}$  的速率运动的火灾场景。通过分析移动火源进入隧道初期以及燃烧稳定后阶段沿拱顶纵向温度分布和烟气场变化, 在本火灾场景设置下得到如下结论。

(1) 火源进入隧道初期, 由于运动引起气流湍动和活塞风流尾段涡流打破了顶棚射流引起的热烟气和冷空气的稳定循环, 在促进燃料与空气混合的同时也一定程度上阻碍了释放的热量向火源行进逆向扩散, 并将高温气流带向火源运动方向, 使隧道火灾过程变得更加复杂。

(2) 当通风方向与火源运动方向相同时, 火源运动促进空气与燃料混合燃烧的效应更强, 快速移动火源的拱顶温度峰值高于慢速移动火源; 而当通风方向与火源运动方向相反时, 火源运动造成的湍流和活塞效应促进热量耗散效应更

强, 使快速移动火源的拱顶温度峰值低于慢速移动火源。

(3) 火灾强度相同时, 在火源稳定燃烧后, 隧道通风状况对拱顶纵向各点温度影响较大, 而火源的移动对烟气扩散的影响相对通风而言较弱。

### 参考文献 (References)

- [1] Beard A N. Fire safety in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 276-278.
- [2] 康晓龙, 王伟, 赵耀华, 等. 公路隧道火灾事故调研与对策分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 110-116.  
Kang Xiaolong, Wang Wei, Zhao Yaohua, et al. China Safety Science Journal, 2007, 17(5): 110-116.
- [3] 韦良义, 梁平. 隧道火灾中移动火源研究方法分析[J]. 科技创新导报, 2009(1): 79-82.  
Wei Liangyi, Liang Ping. Science and Technology Innovation Herald, 2009(1): 79-82.
- [4] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.  
Hu Longhua. Studies on thermal physics of smoke movement in tunnel fires[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [5] Kim E, Woycheese J P, Dembsy N A. Fire dynamics simulator (Version 4.0) simulation for tunnel fire scenarios with forced, transient, longitudinal ventilation flows[J]. Fire Technology, 2008(44): 137-166.
- [6] Abanto J, Reggio M, Barrero D, et al. Prediction of fire and smoke propagation in an underwater tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 22(1): 90-95.
- [7] Vauquelin O, Megret O. Smoke extraction experiments in case of fire in a

- tunnel[J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(5): 525-533.
- [8] 郭春, 王明年, 周仁强. 公路隧道火灾中火区节流效应理论及试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(2): 258-261.  
Guo Chun, Wang Mingnian, Zhou Renqiang. Sichuan Building Science, 2009, 35(2): 258-261.
- [9] 张靖岩, 王婉娣, 彭伟, 等. 纵向风速对隧道内烟气发展影响的实验研究[J]. 中国安全产科学技术, 2010, 16(1): 17-20.  
Zhang Jingyan, Wang Wandi, Peng Wei, et al. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 16(1): 17-20.
- [10] 韦良义. 公路隧道火灾的模型实验及 CFD 模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
Wei Liangyi. Model experimental and CFD simulation research on road tunnel fire[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [11] 祝实, 霍然, 胡隆华, 等. 网格划分及开口处计算区域延展对 FDS 模拟结果的影响[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(4): 131-135.  
Zhu Shi, Huo Ran, Hu Longhua, et al. Journal of Safety and Environment, 2008,8(4):131-135.
- [12] Ingason H. Design fire curves for tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 259-265.
- [13] McGrattan K, Hamins A. Numerical simulation of the howard street tunnel fire[J]. Fire Technology, 2006, 42(4): 273-281.
- [14] 孙文策. 工程流体力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2002.  
Sun Wence. Engineering fluid dynamic[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2002.
- [15] Darrigol O. Between Hydrodynamics and elasticity theory: The first five births of the navier-stokes equation [J]. Archive for History of Exact Sciences, 2002, 56(2): 95-150.
- [16] 王婉娣. 长大公路隧道火灾通风三维数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004: 50-51.  
Wang Wandi. Three dimensional numerical simulation study on fire ventilation in long highway tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004: 50-51.
- [17] 于连广, 吴喜平, 彭博, 等. 隧道列车活塞风解析方法新探[J]. 制冷空调与电力机械, 2010, 31(1): 9-14.  
Yu Lianguang, Wu Xiping, Peng Bo, et al. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2010, 31(1): 9-14.

(责任编辑 吴晓丽, 许冰)

· 学术动态 ·



## 欢迎申报“中国科协三峡科技出版资助计划”

为促进科技工作者学术成长,推动学科发展,繁荣科技出版,中国科学技术协会、中国长江三峡集团公司联合设立中国科协三峡科技出版资助计划,资助自然科学和技术科学领域的科技著作出版。

资助的科技著作须满足如下条件之一:① 基础研究科技著作:研究成果在理论上重大发现,或在方法上有重要突破,或在实验上有重要创新;② 应用基础研究科技著作:研究成果具有独到见解或构成新颖体系,在生产技术领域应用有重大前景;③ 技术开发改造和产品研发科技著作:从事技术开发、改造和产品研发的成果已得到实际应用,并取得重大经济效益;④ 综合性科技著作:对开拓新领域、促进科技创新发展有重要意义,有重要积累价值或有传播价值。

资助的科技著作版面字数原则上不得超过 30 万字,且内容遵守《中华人民共和国著作权法》及相关法律法规。同等条件下,优先资助 45 岁以下的青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士论文获得者;优先资助科技工作者出版首部科技著作。

译著、论文集等汇编作品、再版作品、教科书、工具书暂不列入出版资助计划资助范围。

联系人:郭秋霞,高立波,赵晖

电话:010-62103166,62103126

电子邮箱:kxsxcb@cast.org.cn

地址:100081 北京市海淀区中关村南大街 16 号:中国科学技术出版社 710 房间“出版资助计划”办公室

详情见:<http://www.cspbooks.com.cn/chubanzizhu/index.html>