

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-422-05

# 超长公路隧道火灾纵向排烟特性研究

陈现立

(中信建设有限责任公司 北京 100027)

**【摘要】** 由于隧道狭长和相对封闭的特点, 一旦发生火灾将严重危及生命安全。大量研究表明, 公路隧道纵向通风排烟技术成熟、工程建设经济。本研究采用 CFD 数值模拟方法建立了超长隧道火灾计算模型, 对长度大于 5km 的超长隧道火灾全纵向排烟特性进行模拟分析。结果表明, 当火源位于距隧道出口 5km 以及距隧道出口 5.7km 处时, 在 3.5m/s 的纵向通风风速下, 隧道内温度、CO 浓度均能满足隧道火灾安全控制标准。因此, 超长隧道火灾全纵向排烟方案具有可行性。

**【关键词】** 超长隧道; 隧道火灾; 数值模拟; 纵向排烟

中图分类号 U459.2 文献标识码 A

## Research on Longitudinal Smoke Exhaust Technology for Super-Long Highway Tunnel Fire

Chen Xianli

(CITIC CONSTRUCTION Co., Ltd, Beijing, 100027)

**【Abstract】** Due to the narrow and relatively closed characteristics of the tunnel, once a fire occurs, it will seriously endanger life. A large number of studies have shown that the longitudinal ventilation and smoke exhaust technology of highway tunnels is mature and the engineering construction is economical. In this study, the CFD numerical simulation method was used to establish a fire calculation model for super-long tunnels, and to simulate and analyze the full longitudinal smoke exhaust characteristics of super-long tunnel fires with a length greater than 5km. The results show that when the fire source is located 5km away from the tunnel exit and 5.7km away from the tunnel exit, under the longitudinal ventilation speed of 3.5m/s, the temperature and CO concentration in the tunnel can meet the tunnel fire safety control standards. Therefore, the full longitudinal smoke exhaust scheme for super-long tunnel fires is feasible.

**【Keywords】** super-long tunnel; tunnel fire; numerical simulation; longitudinal smoke exhaust

作者(通讯作者)简介: 陈现立(1975-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: chenxl16@construction.com

收稿日期: 2022-03-26

## 0 引言

近年来, 随着我国交通强国和西部大开发战略的进一步实施, 在我国西部地区, 修建了越来越多的长度大于 5km 的超长公路隧道。由于隧道狭长和相对封闭的特点, 一旦发生火灾将严重危及人员生命安全。因此, 当隧道内发生火灾时, 如何有效的控制烟气是超长隧道建设和运营当中一个极为重要的问题。

纵向排烟一般是利用安装在隧道顶部的射流风机产生足够大的风速, 将火灾产生的烟气吹向火

灾下游, 从而保证火灾上游是无烟环境, 保障人员安全疏散。国内外大量学者对纵向通风进行了深入、细致的研究, 主要集中在临界风速<sup>[1-10]</sup>、烟气回流长度<sup>[1,2,5,7,8,11]</sup>和烟气温度分布<sup>[12-15]</sup>等方面。临界风速指的是烟气不会蔓延到着火点上游的最小通风速度。在超长公路隧道火灾全射流纵向通风方面, 曹正卯<sup>[16,17]</sup>依托羊鹿山隧道开展全射流纵向排烟现场实体火灾试验, 研究 6km 长公路隧道全射流纵向排烟的可行性与有效性, 研究表明, 在保证人员安全的情况下, 采用全射流纵向排烟是可行的。

总的来说, 纵向排烟技术已经很成熟。

本文采用 STAR CCM+ 软件对长度大于 5km 的超长隧道火灾进行数值模拟, 主要考虑隧道内温度以及烟气中有毒气体浓度的变化, 安全控制标准为顶棚下方温度不高于 180°C, 人员高度处一氧化碳浓度不高于 1150ppm。

## 1 数值计算模型

### 1.1 几何模型

本文将隧道做一定简化, 断面尺寸如图 1 所示, 隧道高 7.1m, 宽 10.5m, 全长 5.8km, 为了研究超长隧道火灾安全纵向排烟方案的可行性, 火源分别位于距离隧道出口 5km 以及距离隧道出口 5.7km 处, 建立几何模型如图 2 所示。

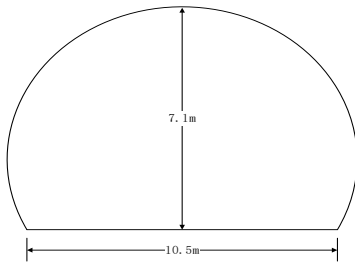


图 1 隧道截面尺寸

Fig.1 Tunnel section size

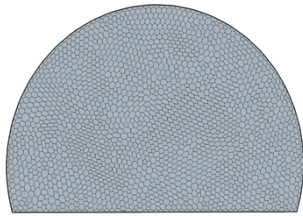


图 2 超长隧道模型

Fig.2 Model of super-long tunnel

### 1.2 计算方法

采用 STAR-CCM+ 内嵌火灾模块进行数值模拟分析, 基本控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、组分守恒方程和理想气体状态方程, 燃烧模型采用体积热源模型。

#### (1) 连续性方程

根据质量守恒定律, 控制体内流体质量的增加量应该等于其流入的质量和流出的质量的差值, 由此可得出质量守恒方程为:

$$\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中,  $t$  为时间,  $\rho$  为流体密度,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  为速度矢量,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量。

#### (2) 动量守恒方程

$$\begin{aligned} x、y、z \text{ 三个方向的动量守恒方程分别表示为} \\ \partial(\rho u) / \partial t + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \\ \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u) - \partial p / \partial x + S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \partial(\rho v) / \partial t + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \\ \text{div}(\mu \cdot \text{grad} v) - \partial p / \partial y + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \partial(\rho w) / \partial t + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \\ \text{div}(\mu \cdot \text{grad} w) - \partial p / \partial z + S_w \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为动力粘度系数,  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  为广义源项,  $p$  为流体微元上的压力。

#### (3) 能量守恒方程

$$\begin{aligned} \partial(\rho T) / \partial t + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \\ \text{div}((k / C_p) \cdot \text{grad} T) + S_T \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $T$  为温度,  $k$  为流体传热系数,  $C_p$  为流体比热容,  $S_T$  为流体内热源及由于粘性作用流体机械能转化为热能的部分。

#### (4) 组分守恒方程

$$\begin{aligned} \partial(\rho Y_i) / \partial t + \text{div}(\rho \mathbf{u} Y_i) = \\ \text{div}(\Gamma_i \cdot \text{grad} \rho Y_i) + S_i \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $Y_i$  为组分  $i$  的体积浓度,  $\rho Y_i$  为组分  $i$  的质量浓度,  $\Gamma_i$  为组分  $i$  的扩散系数,  $S_i$  为组分  $i$  的生成率。

#### (5) 理想气体状态方程

$$P = \rho R T \quad (7)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $R$  为摩尔气体常数,  $T$  为温度,  $P$  为气体压力。

### 1.3 火源设定

火源热释放速率变化规律可用时间的二次方程来描述,  $t^2$  模型如下:

$$Q = \alpha t^2 \quad (8)$$

式中,  $Q$  为火灾热释放速率;  $t$  为时间;  $\alpha$  为火灾增长系数。

参照 NFPA 超快速火灾类型将火灾增长系数  $\alpha$  取为 0.1876, 火源热释放率为 30MW, 火源尺寸

为 12.5m×2.4m×2.7m。

### 1.4 网格划分

STAR-CCM+具有强大的网格划分功能，其提供了多面体、切割体和棱柱层等网格生成器，多面体网格有许多相邻单元，能准确预测流场运动，计算精度也较高，考虑到还需要捕捉边界层运动，本文采用多面体和棱柱层网格生成器。由于 STAR-CCM+软件与 FDS 设置存在一定差异，同时为了提高计算精度，靠近火源区域网格尺寸在 0.05D\*~0.06D\* 之间，其他区域网格尺寸在 0.1D\*~0.12D\*之间。

### 1.5 初始条件及边界条件

隧道壁面无滑移，初始环境温度为 20℃，隧道进口为速度边界，保持 3.5m/s 纵向通风风速不变，隧道出口为压力出口边界。

### 1.6 可靠性验证

通过文献[9]中的模型实验进行隧道火灾数值计算方法的验证，按照实验模型进行建模，并将模拟结果与实验结果进行对比，图 3 给出了模型实验与数值模拟回流长度-风速曲线的比较图，其中，L 为烟气回流长度，V 为纵向通风速度，通过拟合曲线得到实验与数值计算的临界风速分别为 0.54m/s 和 0.59m/s，模拟值与实验值误差在 10%以内。

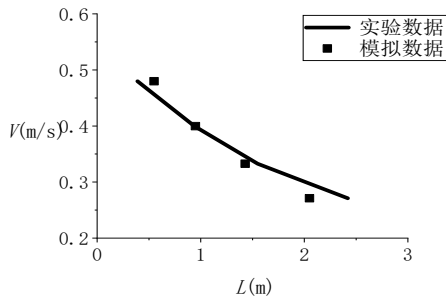


图 3 回流长度-速度曲线结果对比

Fig.3 Comparison of reflux length-velocity curve results

另外还通过文献[18]中的隧道火灾模型实验进行了验证。模型隧道缩尺比为 1:20，尺寸为 10.4m×0.4m×0.4m。火源位于距隧道左端出口 3m 处，为边长 0.12m 的正方形油池，热释放率为 5.63kW，燃料为乙醇，环境温度为 20℃，热电偶以 1m 的间隔安装在隧道拱顶下 0.02m 处。按照实验模型进行建模，并将实验与模拟结果进行对比，图 4 给出了模型实验与数值模拟纵向温度分布的比较图，可见模拟值与实验值误差较小，因此，采用 STAR-

CCM+进行隧道火灾数值计算研究可行。

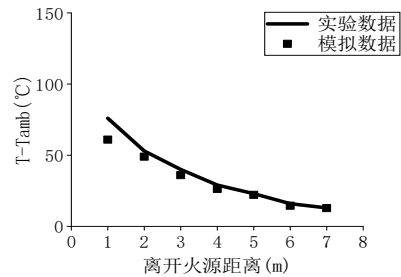


图 4 温度分布对比

Fig.4 Temperature distribution comparison

## 2 计算结果分析

### 2.1 火源距离隧道出口 5km

隧道顶壁下方温度分布如图 5 所示，从图中得出，在临界风速的纵向通风作用下，该隧道顶壁下方温度均小于 180℃，满足火灾安全控制标准。在临界风速的作用下，火灾烟气仅影响到隧道下游，温度在距离火源 30m 处达到最大值，30m 之后温度沿隧道长度呈指数下降趋势。从图 6 可以看出人员高度处温度在火源处最高。

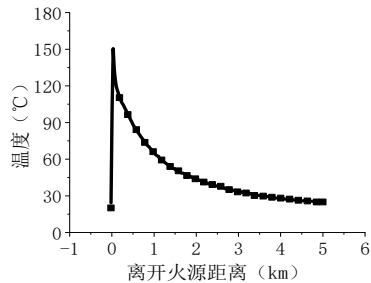


图 5 隧道内顶壁下方温度变化

Fig.5 Temperature change under the top wall of the tunnel

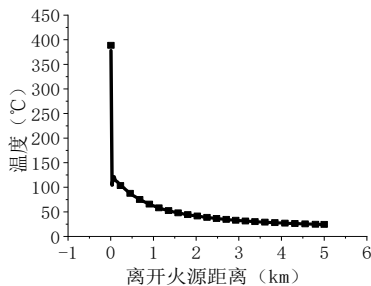


图 6 隧道内人员高度处温度变化

Fig.6 Temperature change at the height of people in the tunnel

图 7 为隧道人员高度处 CO 分布计算结果，在 3.5m/s 的纵向通风风速下，隧道火灾充分燃烧，隧道内人员高度处的 CO 浓度低于火灾安全控制标

准, 仅在火源处人员高度处 CO 浓度略高。

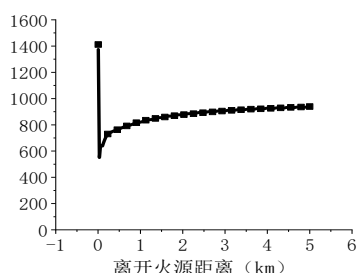


图 7 隧道内人员高度处 CO 浓度分布

Fig.7 CO concentration distribution at the height of people in the tunnel

### 2.2 火源距离隧道出口 5.7km

隧道顶壁下方温度分布如图 8 所示, 从图中得出, 在临界风速的纵向通风作用下, 该隧道顶壁下方温度均小于 180℃, 满足火灾安全控制标准。在临界风速的作用下, 火灾烟气仅影响到隧道下游, 温度在距离火源 15m 处达到最大值, 15m 之后温度沿隧道长度呈指数下降趋势。从图 9 可以看出人员高度处温度在火源处最高。

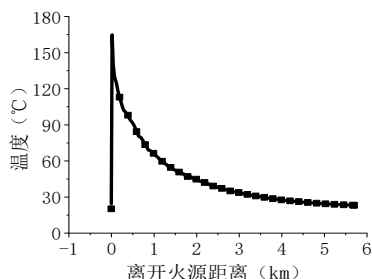


图 8 隧道内顶壁下方温度变化

Fig.8 Temperature change under the top wall of the tunnel

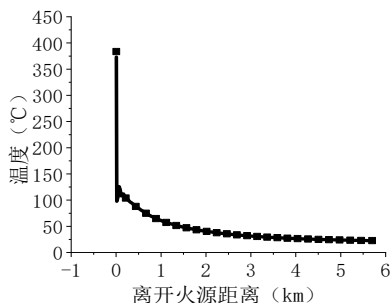


图 9 隧道内人员高度处温度变化

Fig.9 Temperature change at the height of people in the tunnel

图 10 为隧道人员高度处一氧化碳分布的计算结果, 在 3.5m/s 的纵向通风风速下, 隧道火灾充分燃烧, 隧道内人员高度处的 CO 浓度低于火灾安

全控制标准, 仅在火源处人员高度处 CO 浓度略高。

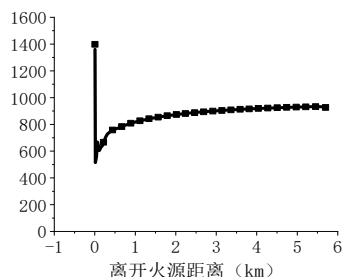


图 10 隧道内人员高度处 CO 浓度分布

Fig.10 CO concentration distribution at the height of people in the tunnel

### 2.3 参数对比

火源距离隧道出口 5km 和火源距离隧道出口 5.7km 模型计算结果对比如图 11-13 所示, 由图可以看出隧道内温度等参数变化基本一致。

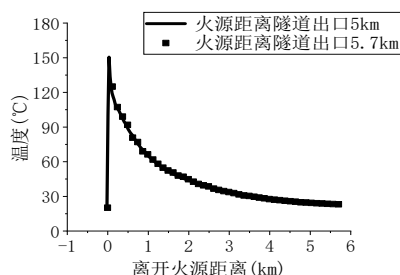


图 11 隧道内顶壁下方温度变化对比

Fig.11 Comparison of temperature changes under the inner roof wall of the tunnel

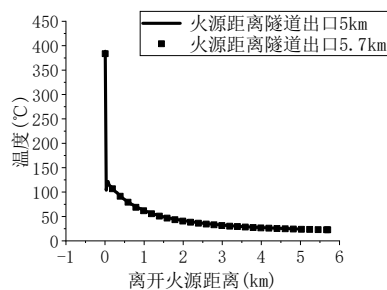


图 12 隧道内人员高度处温度变化对比

Fig.12 Comparison of temperature changes at the height of people in the tunnel

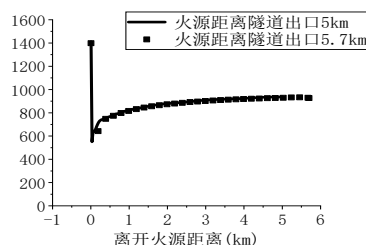


图 13 隧道内人员高度处 CO 浓度分布对比

Fig.13 Comparison of CO concentration distribution at

### the height of people in the tunnel

## 3 结论

本文采用 Star-CCM+ 软件建立三维数值计算模型,研究了超长隧道火灾全纵向排烟特性,得到如下结论:

(1) 当火源位于距离隧道出口 5km 处时,在 3.5m/s 的纵向通风风速下,隧道内温度和 CO 浓度分布均能满足隧道火灾安全控制标准。

(2) 当火源位于距离隧道出口 5.7km 处时,在 3.5m/s 的纵向通风风速下,隧道内温度和 CO 浓度分布均能满足隧道火灾安全控制标准。

(3) 在 3.5m/s 的纵向通风风速条件下,火源距离隧道出口 5km 和火源距离隧道出口 5.7km 模型计算结果参数变化基本一致,这意味着超长隧道火灾可以采用全纵向通风排烟方案。

本文的研究,可以为超长隧道火灾采用全纵向通风排烟方案提供依据,为了进一步确定隧道火灾全纵向通风的适用性,需要通过研究确定全纵向通风方案时的隧道长度限制。

### 参考文献:

- [1] Thomas PH. The movement of buoyant fluid against a stream and venting of underground fires[J]. Fire Research Note, No.351, Fire Research Station, Watford, UK,1958.
- [2] Thomas PH. The movement of smoke in horizontal passages against an air flow[J]. Fire Research Note, No.723, Fire Research Station, Watford, UK, 1968.
- [3] Oka Y, Atkinson GT. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 1995,25:305-22.
- [4] Wu Y, Bakar MZA. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000,35(4):363-390.
- [5] Li YZ, Lei B, Ingason H. Study of critical velocity and back layering length in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 2010,45:361-370.
- [6] Atkinson GT, Wu Y. Smoke control in sloping tunnels[J]. Fire Safety Journal, 1996,27:335-41.
- [7] Zhu K, Shi L, Yao Y, et al. Smoke Movement in a Sloping Subway Tunnel Under Longitudinal Ventilation with Blockage[J]. Fire Technology, 2017,53(6):1985-2006.
- [8] Chow WK, Gao Y, Zhao J H, et al. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2015,75:14-22.
- [9] 李颖臻. 含救援站超长隧道火灾特性及烟气控制研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [10] Zhou YL, Bi HQ, Wang HL, et al. Critical velocity in the transverse passages of a railway tunnel rescue station with semi-transverse ventilation[J]. Tunnel. Undergr. Space Technol, 2019,92.
- [11] Zhang SG, Shi L, Li XB, et al. Critical ventilation velocity under the blockage of different metro train in a long metro tunnel[J]. Fire and Materials, 2020,44(4), 497-505.
- [12] Kurioka H, Oka Y, Satoh H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2003,38:319-340.
- [13] Li YZ, Lei B, Ingason H. The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow be-neath the ceiling in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 2011,46:204-210.
- [14] 易亮,杨洋,徐志胜.纵向通风公路隧道火灾拱顶烟气最高温度试验研究[J].燃烧科学与技术,2011,(2):109-114.
- [15] Zhao S Z, Liu F, Wang F, et al. 2018.Experimental studies on fire-induced temperature distribution below ceiling in a longitudinal ventilated metro tunnel[J]. Tunnel. Undergr. Space Technol, 2018,72:281-293.
- [16] 曹正卯,张琦,陈建忠.公路隧道超长距离纵向排烟试验研究[J].消防科学与技术,2020,(4):471-474.
- [17] 曹正卯,张琦,陈建忠.6km 长公路隧道全射流纵向排烟现场实体火灾试验研究[J]. 隧道建设,2019,(A01):94-100.
- [18] Sung Ryong Lee, Hong Sun Ryou. A numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio[J]. Building and Environment, 2006,41(6):719-725.