

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-535-04

# 环境压力对竖井型隧道 火灾自然通风烟气特性的影响研究

赵 刚

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043)

**【摘 要】** 采用三维数值计算方法, 建立竖井型隧道火灾自然通风排烟的数值计算模型, 研究了不同环境压力下隧道火灾自然通风的烟气特性, 讨论了隧道顶壁烟气温度的分布, 以及完全排烟时的竖井临界高度。结果表明: 在相同的火源热释放率下, 隧道顶壁烟气温度和浓度随环境压力的降低而升高; 环境压力对竖井的烟囱效应有双重作用, 但总体而言, 当环境压力升高时, 其对竖井烟囱效应的加强作用大于减弱作用, 导致完全排烟的临界竖井高度随环境压力的升高而降低。

**【关键词】** 隧道火灾; 环境压力; 自然通风; 临界竖井高度

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Study on the Influence of Environmental Pressure on the Characteristics of Natural Ventilation Smoke in Vertical Tunnel Fires Ventilation

Zhao Gang

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Xi'an, 710043)

**【Abstract】** Using a three-dimensional numerical calculation method, a numerical calculation model for natural ventilation and smoke exhaust in a vertical shaft tunnel fire was established. The smoke characteristics of natural ventilation in tunnel fires under different environmental pressures were studied, and the distribution of smoke temperature on the top wall of the tunnel was discussed, as well as the critical height of the vertical shaft during complete smoke exhaust. The results show that under the same heat release rate of the fire source, the smoke temperature of the tunnel and concentration increase with the decrease of environmental pressure; The environmental pressure has a dual effect on the Stack effect of the shaft, but in general, when the environmental pressure rises, its strengthening effect on the Stack effect of the shaft is greater than the weakening effect, leading to the reduction of the critical height of the shaft for complete smoke exhaust with the increase of the environmental pressure.

**【Keywords】** Tunnel fire; Environmental pressure; Natural ventilation; Critical shaft height

## 0 引言

隧道发生火灾时产生的高温烟气会危害隧道内的人员逃生, 以往对于隧道排烟问题的研究主要聚焦在平原地区, 而对于高原地区隧道排烟问题的研究还比较少, 因此, 开展高原隧道火灾排烟问题的研究具有重要的意义。

目前, 隧道火灾竖井排烟的研究主要集中在平

原地区, Wang<sup>[1]</sup>采用全尺寸实验的方法研究了自然通风条件下的隧道火灾特性, 并将试验结果与数值模拟结果进行了比较。研究发现, 大部分烟气直接从开口排出。Kashef<sup>[2]</sup>和 Yuan<sup>[3]</sup>采用模型试验的方法研究了竖井间距和尺寸对顶板温度分布、烟气扩散距离和排烟效率的影响, 并建立了理论预测模型。Guo<sup>[4]</sup>在一系列模型试验的基础上, 分析了火

源强度、竖井高度和竖井间距对烟气逆流长度的影响,结果表明,烟气逆流长度随竖井高度的增加而减小,随竖井间距的增加而增大。陈滔<sup>[5]</sup>进行了1/20的模型实验,对火源处于最不利火源位置时完全排烟的临界竖井长度进行了研究。Ji<sup>[6]</sup>进行了缩尺试验研究隧道火灾烟气在竖井中的运动规律,探讨了边界层分离现象。Zhang<sup>[7]</sup>对烟气层吸穿现象发生的临界竖井高度进行了研究,并提出了理论模型。Fan<sup>[8]</sup>采用数值模拟研究了竖井布置对自然通风排烟性能的影响。郭庆华<sup>[9]</sup>等人通过数值模拟软件FDS,研究了隧道火灾竖井自然通风火源和竖井之间的距离对隧道内烟气流动特性的影响。

以上研究对于了解和掌握隧道火灾竖井排烟具有重要的意义,但目前对于高海拔地区隧道火灾竖井自然通风的烟气特性研究较少。为了掌握高海拔地区隧道火灾竖井自然通风的烟气特性,本文采用数值模拟的方法研究环境压力对隧道火灾竖井自然通风的隧道烟气温度分布及完全排烟临界竖井高度进行研究。

## 1 数值模型

### 1.1 数值模型建立

#### 1.1.1 模型参数

##### (1) 模型及参数

数值模型隧道长130m,宽和高均为5m,两自然通风竖井间距为60m,竖井尺寸宽度为5m、长度为0.16m,隧道及竖井参数与数值模型如图1和图2所示。

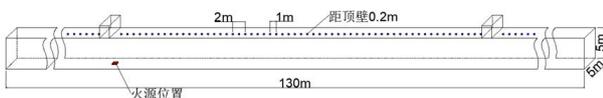


图1 隧道参数

Fig.1 Tunnel Parameters

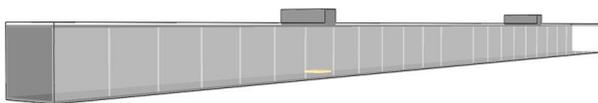


图2 隧道数值模型

Fig.2 Tunnel Numerical Model

##### (2) 测点布置

隧道内的温度、浓度测点沿隧道纵向中心线布置,如图1所示,距离隧道顶壁0.2m,间距为1m。

### 1.1.2 火源设置

本文采用稳态火源,火源热释放率为5MW,燃料为正庚烷。火源燃烧产生的CO的系数为0.01,产烟系数为0.008<sup>[10]</sup>。如图1所示,火源左侧外边缘位于竖井内边缘正下方,为自然通风的最不利火源位置<sup>[5]</sup>。

### 1.1.3 边界条件

#### (1) 壁面边界

隧道壁面的材料为钢筋混凝土,具体参数如下:厚度为0.5m;其中导热系数取为1.28W/(m·K);密度取为2200kg/m<sup>3</sup>;比热取为0.88kJ/(kg·K)。

钢筋混凝土的外侧为土壤层,土壤层设置为恒温条件。

#### (2) 进出口边界

本文研究对象为隧道火灾竖井自然通风,因此,隧道竖井顶部和隧道两端开口设置为实际的外界环境压力。

## 1.2 网格划分

隧道火灾三维数值模型通常采用火源特征直径来确定网格尺寸,火源特征直径的定义为:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中,  $D^*$ 为火源特征直径;  $Q$ 为火灾热释放率, kW。

FDS手册推荐的网格尺寸为0.06 $D^*$ ~0.25 $D^*$ 之间,而以往的研究表明,网格尺寸为0.1 $D^*$ 时,可以较好地兼顾计算的准确性和计算时长,因此本文网格尺寸取为0.1 $D^*$ ,具体为0.1m×0.1m×0.1m。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纵向烟气温度分布

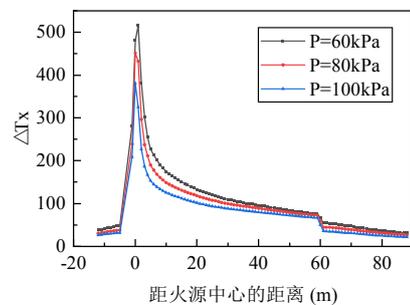


图3 隧道火灾的烟气纵向温度分布

Fig.3 Longitudinal temperature distribution of smoke in tunnel fire under different environmental pressures

如图 3 所示，火源热释放率为 5MW 时，不同环境压力情况下，隧道火灾自然通风时隧道顶壁纵向烟气温度分布。从图可以看出，烟气随纵向距离的增大而逐渐减小，且在排烟孔口处出现突然下降的情况，这是由于排烟孔口排烟引起的。当环境压力降低时，隧道纵向温度分布呈现同步上升的趋势，这是因为，当环境压力降低时，空气较为稀薄，热容降低，在相同的火源热释放率下，烟气温度更高。该现象也意味着，当火灾热释放率不变时，环境压力越低，烟气逃生环境越危险。

### 2.2 隧道烟气浓度

隧道浓度分布规律如图 4 所示。从图中可以看出，隧道烟气浓度随火源中心的距离先快速降低，而后变化平缓，并在排烟孔口处急剧下降。这是因为在火源附近烟气为径向扩散，烟气浓度快速下降，之后随蔓延距离的增加，烟气转化为沿隧道的纵向一维扩散，根据隧道烟气动力学理论，此时烟气的一维蔓延会逐渐卷吸隧道内的新鲜空气，但卷吸量较小，因此，烟气浓度在该阶段呈现缓慢减小的趋势。当烟气达到排烟孔口时，由于排烟孔口的排烟作用，烟气浓度急剧降低。

图 4 显示出，当环境压力降低时，隧道内烟气浓度呈上升趋势，这主要是因为环境压力降低时空气密度减小，单位体积的空气容烟能力下降，导致隧道烟气浓度随着环境压力的降低而增大。

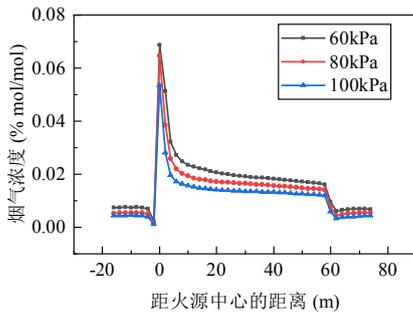


图 4 隧道烟气浓度分布

Fig.4 Concentration distribution of smoke in tunnel fire under different environmental pressures

### 2.3 临界竖井高度

竖井型隧道火灾自然通风情况下，当烟气扩散到竖井下方时，在烟囱效应的作用下，烟气从竖井内排出。当竖井高度足够高时能够使烟气完全从竖井内排出，如图 5 所示。而竖井高度不足时，仅能排出一部的烟气，另一部分烟气绕过竖井继续蔓

延，如图 6 所示。为了兼顾土建成本和火灾安全，完全排烟的最小竖井高度被定义为临界竖井高度，本文采用数值模拟的方法研究环境压力对其的影响。



图 5 全尺寸数值模型完全排烟时的烟气形态

Fig.5 Smoke morphology of full-size numerical model with complete exhaust



图 6 全尺寸数值模型不完全排烟时的烟气形态

Fig.6 Smoke morphology in incomplete exhaust of full-size numerical model

完全排烟的竖井高度随环境压力的变化规律如图 7 所示。当环境压力降低时完全排烟的临界竖井高度逐渐升高，该现象可以通过分析竖井的烟囱效应来解释，理论上烟囱效应越强，完全排烟所需的临界竖井高度越小。

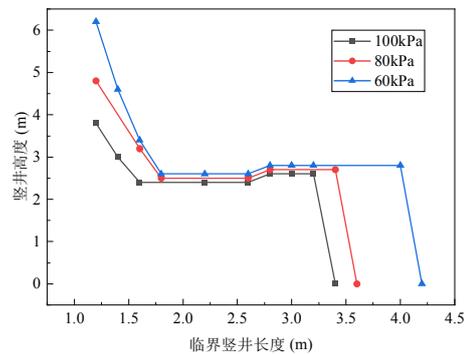


图 7 完全排烟的临界竖井高度随环境压力的变化规律

Fig.7 Variation law of critical shaft height with ambient pressure for complete smoke exhaust

根据伯努利定理，竖井内的烟囱效应形成的排烟浮升力  $\Delta p$  可以表示为：

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_0 v^2 = gh(\rho_0 - \rho_c) \quad (2)$$

根据， $\rho = PM / RT$  上式可写为：

$$\Delta p = Pgh \left( \frac{M_0}{RT_0} - \frac{M_c}{RT_c} \right) \quad (3)$$

式中： $v$  为比容， $m^3/s$ ； $P$  为大气压力，Pa； $M$  为摩尔质量， $g/mol$ ； $g$  为重力加速度， $m/s^2$ ； $h$  为竖井高度， $m$ ； $R$  为理想气体常数， $J/(mol \cdot K)$ ； $T$

为温度, K; 下标 0 代表环境参数; 下标  $c$  代表烟气参数。

由式 (3) 可知, 除受高度的影响外, 竖井的烟囱效应还受到环境压力、竖井内的烟气温度影响, 环境压力和竖井内烟气温度的升高均会导致烟囱效应的加强。

而从 2.1 节的烟气温度分布的分析可知, 烟气温度随环境压力的升高而降低, 结合公式 (3) 的分析可知, 环境压力对烟囱效应具有双重作用: (1) 环境压力的升高本身会导致竖井烟囱效应的加强;

(2) 环境压力升高又导致烟气温度降低, 会减弱竖井烟囱效应。从图 6 可以判断, 环境压力升高对烟囱效应的加强作用大于减弱作用, 导致临界竖井高度随环境压力的升高而降低。环境压力对烟囱效应的减弱作用较小可以通过烟气温度的变化来解释, 图 3 显示出在排烟孔口处烟气的温度较低, 且不同环境压力下的烟气温度在此处差异较小, 即其引起的烟囱效应差异较小。

### 3 结论

本文采用三维数值模拟的方法, 对不同环境压力下隧道火灾自然通风的烟气特性进行研究, 得到以下结论:

(1) 随着环境压力的降低, 隧道火灾顶壁下烟气温度上升, 这是由于环境压力的降低导致空气较为稀薄, 热容较低, 导致相同热量下的温度升高较大。

(2) 随着环境压力的降低, 隧道火灾烟气浓度上升, 这是因为环境压力降低时空气密度减小, 容烟能力下降, 导致相同烟气生成量下的浓度升高较大。

(3) 完全排烟的临界竖井高度随环境压力的降低而升高, 这一现象可以通过竖井的烟囱效应来解释。理论推导显示, 环境压力对竖井的烟囱效应具有双重作用, 但环境压力升高对烟囱效应的加强作用大于减弱作用。

### 参考文献:

- [1] Wang Y, Jiang J, Zhu D. Diesel oil pool fire characteristic under natural ventilation conditions in tunnels with roof openings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,166(1):469-477.
- [2] Kashef A, Yuan Z, Bo L. Ceiling temperature distribution and smoke diffusion in tunnel fires with natural ventilation[J]. *Fire Safety Journal*, 2013,62(pt.C): 249-255.
- [3] Yuan Z, Lei B, Kashef A. Experimental and theoretical study for tunnel fires with natural ventilation[J]. *Fire Technology*, 2015,51:691-706.
- [4] Qga B, Hza B, Zya B, et al. Experimental studies on the gas temperature and smoke back-layering length of fires in a shallow urban road tunnel with large cross-sectional vertical shafts - ScienceDirect[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019,83:565-576.
- [5] 陈滔. 地铁隧道火灾自然通风烟气特性及临界竖井尺寸研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [6] J Ji, ZH Gao, CG Fan, et al. A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road tunnel fires [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012,55(21-22):6032-6041.
- [7] Zhang S, He K, Yao Y, et al. Investigation on the critical shaft height of plug-holing in the natural ventilated tunnel fire[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018,132:517-533.
- [8] Fan C G, Ji J, Wang W, et al. Effects of vertical shaft arrangement on natural ventilation performance during tunnel fires[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014,73(6):158-169.
- [9] 郭庆华, 史建峰, 闫治国, 等. 火源-竖井间距对自然通风隧道火灾烟气流动特征的影响[J]. *消防科学与技术*, 2021,40(12):1739-1743.
- [10] McGrattan K. *Fire Dynamics Simulator (version 6.7)-User Guide*. Maryland NIST, 2022.