

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-245-05

环境压力对隧道火灾 自然通风烟气特性的影响研究

马洋阳 袁中原

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 采用数值模拟的方法, 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。首先建立三维数值模型, 并采用试验数据进行验证, 然后用验证后的数值模型, 对环境压力分别为 60kPa、80kPa、100kPa 隧道火灾自然通风的烟气特性进行研究。研究表明, 随着环境压力的降低, 隧道顶壁下烟气温度上升、流速增大、浓度增加、能见度增加, 同时根据竖井后方烟气特性的变化规律可以得出, 随着环境压力的降低, 竖井的排烟效果逐渐变差。这意味着环境压力对隧道火灾自然排烟完全排烟的临界竖井高度也有影响。

【关键词】 高原隧道火灾; 自然通风; 烟气浓度; 能见度; 纵向温度分布; 烟气流速
中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Study on the Influence of Ambient Pressure on Natural Ventilation Smoke Characteristics of Tunnel Fire

Ma Yangyang Yuan Zhongyuan

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Numerical simulation is used to study the smoke characteristics of natural ventilation in tunnel fire under different environmental pressures. Firstly, the three dimensional numerical model is established and verified by the test data. Then, the verified numerical model is used to study the smoke characteristics of natural ventilation of tunnel fire under the ambient pressure of 60kPa, 80kPa and 100kPa respectively. The results show that with the decrease of environmental pressure, the smoke temperature rises, the flow rate increases, the concentration increases and the visibility increases. At the same time, according to the change law of smoke characteristics behind the shaft, it can be concluded that with the decrease of environmental pressure, the smoke exhaust effect of the shaft gradually deteriorates. This means that the environmental pressure also has an effect on the critical shaft height at which the tunnel fire natural smoke is completely vented.

【Keywords】 high altitude tunnel fire; natural ventilation; smoke density; visibility; longitudinal temperature distribution; smoke velocity

0 引言

随着城市隧道的建设, 关于城市隧道火灾安全问题的讨论也越来越多。当隧道发生火灾时, 可燃物燃烧产生的高温烟气在隧道内进行扩散对人员产生巨大的危害, 因此如何将隧道内的烟气快速排

出是火灾发生时的首要问题。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, 因此展开对高原隧道火灾的研究具有重要的意义。

目前, 高原地区隧道火灾的研究主要集中在环

作者简介: 马洋阳 (1996-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1416856766@qq.com.

通讯作者: 袁中原 (1983-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-02

境压力对热驱动烟气流动扩散特性、顶壁下烟气温度分布、烟气回流长度的影响。研究表明,环境压力会影响烟气运动特性和温度分布^[1]。纪杰^[2]采用数值模拟的方法研究了环境压力对隧道内烟气流动特性的影响,得出结论:在 HRR 一定的情况下,烟气质量流量随着环境压力的降低而减小,环境压力是影响空气卷吸、温度分布和烟气质量流量的重要因素,研究认为低气压隧道火灾的防排烟方法可能与常压隧道火灾的防排烟方法不同。Tang^[3]对隧道内两种环境压力(100kPa 和 64kPa)下的纵向烟气温度分布进行了研究,发现环境压力越低,烟气温度衰减越快。Ji 的研究表明^[4],在较低的环境压力下,由于热损失较小,纵向烟气温度会升高。He 的研究表明^[5]烟气温度是影响烟气流速最大的因素。Fan^[6]研究得出,在相同的 HRR 和通风速度下,由于空气密度减小导致纵向气流惯性力减弱,因此烟气逆流长度随环境压力的减小而增大。Zhang^[7]通过理论分析和数值模拟得出在高原地区

为了抑制烟气逆流,需要较大的临界风速。

以上研究对于了解和掌握高海拔隧道在顶部无竖井或存在纵向通风情况下的烟气特性具有非常重要的价值,但目前对于高海拔隧道火灾自然通风烟气特性的研究还比较少,例如环境压力对隧道火灾自然通风烟气温度、烟气流速、烟气浓度、能见度的影响研究,因此本文采用数值模拟的方法研究环境压力对隧道火灾自然通风烟气特性的影响。

1 数值模型

本文采用数值模拟的方法,对不同环境压力下隧道火灾的烟气特性进行研究。

1.1 数值模型建立

1.1.1 模型参数及测点布置

(1) 模型及参数

数值模型隧道长 130m, 宽和高均为 5m, 两自然通风竖井的间距为 60m, 隧道参数与数值模型如图 1 和图 2 所示。

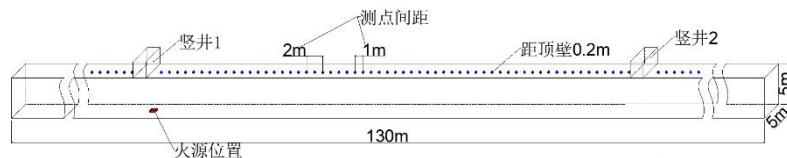


图1 隧道参数

Fig.1 Tunnel Parameters

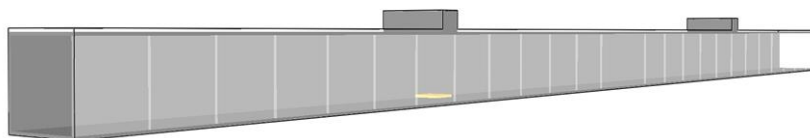


图2 隧道数值模型

Fig.2 Tunnel Numerical Model

(2) 测点布置

温度测点沿隧道纵向中心线布置,距离隧道顶壁 0.2m, 间距为 1m, 烟气流速测点布置与烟气温度测点布置在火源段(两竖井内边距之间的区域)相同,如图 1 所示。顶壁下烟气浓度和能见度测点沿隧道纵向中心线布置,距离隧道顶壁 0.2m, 间距为 2m, 如图 1 所示。在人员高度处(2m)也进行了能见度的测点布置,测点距离隧道顶壁 3m, 其他与顶壁下能见度的测点布置相同。

1.1.2 火源设置

本文采用稳态火源,火源热释放率为 3MW,

燃料为正庚烷。根据 FDS 用户指导手册中的推荐值^[8],正庚烷燃烧产生的 CO 的系数为 0.01;产烟系数为 0.008。火源位置如图 1 所示,火源左侧外边缘位于竖井内边缘正下方(最不利火源位置^[9])。

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,厚度为 0.5m 其中导热系数取为 1.28W/(m·K),密度取为 2200kg/m³,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

本文研究对象为高原隧道火灾自然通风的烟气特性, 因此隧道竖井顶部和隧道两端开口皆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:

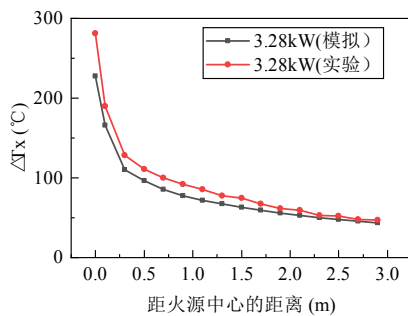
$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中, D^* 为火源特征直径; Q 为火灾热释放率, kW。

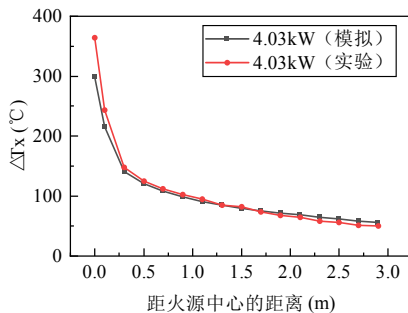
FDS 用户手册推荐的网格尺寸为 $0.06D^* \sim 0.25D^*$ 之间, 而以往的研究表明^[10]: 网格尺寸为 $0.1D^*$ 时, 可以较好地兼顾计算的准确性和计算时长, 因此本文网格尺寸取为 $0.1D^*$, 具体为 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 。

1.3 模型验证

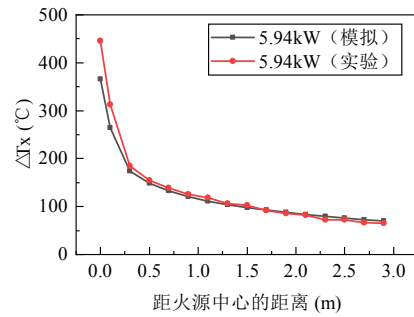
为验证数值计算方法的准确性, 本文开展了 1:10 的模型试验, 并将数值计算结果与试验结果进行了对比, 如图 3 所示 (模型试验中火源为庚烷, 火灾热释放率为 3.28kW、4.03kW、5.94kW, 竖井长度为 0.16m, 竖井与隧道等宽宽度为 0.5m, 竖井间距为 6m, 环境温度为 25℃, 环境压力为 66.2kPa)。



(a) 火源功率为 3.28kW 温度对比



(b) 火源功率为 4.03kW 温度对比



(c) 火源功率为 5.94kW 温度对比

图 3 试验与模拟纵向温度对比

Fig.3 Experimental and Simulated Longitudinal Temperature comparison

从图 3 可以看出, 除火源正上方和距火源中心 0.1m 的热电偶相差较大外, 其余位置处的误差均在 15% 以内, 表明本文的数值模型能够较好的模拟隧道火灾自然通风。

2 结果分析

2.1 烟气温度

隧道火灾顶壁下烟气纵向温度分布变化规律如图 4 所示。

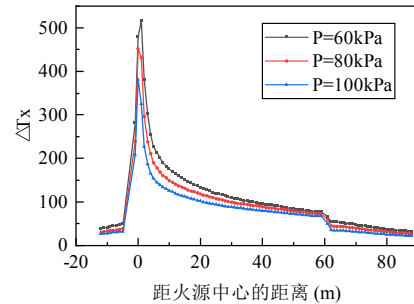


图 4 不同环境压力下隧道顶壁烟气纵向温度分布

Fig.4 Smoke Longitudinal Temperature Distribution of Tunnel Roof Wall under different Ambient Pressures

当隧道内发生火灾时, 火源不断卷吸周围的新鲜空气, 形成火羽流^[11]。

由理想气体状态方程:

$$PV = nRT \quad (2)$$

式中, P 为气体压强, Pa; V 为气体体积, m^3 ; n 为气体的物质的量, mol; T 为体系温度, K; R 为理想气体常数, $\text{J/mol} \cdot \text{K}$ 。

可得:

$$\rho = PM / nRT \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; M 为摩尔质量, g/mol 。

由式 (3) 可知随着环境压力的降低空气密度逐渐减小。

由比热容公式

$$Q = cm\Delta T \quad (4)$$

$$\rho = m / V \quad (5)$$

可得:

$$Q = c_p \rho V \Delta T \quad (6)$$

式中, Q 为吸收的热量, kg/m^3 ; c_p 为定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

由式 (6) 和隧道发生火灾时火羽流的形成过程, 可知当 Q 不变 ρ 减小时 ΔT 增大, 因此当环境压力降低时, 隧道顶壁下的烟气温度升高。

2.2 烟气流速

隧道顶壁下火灾纵向烟气流速分布变化规律如图 5 所示。

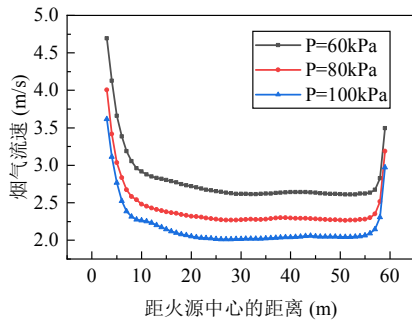


图 5 不同环境压力下隧道顶壁纵向烟气流速分布

Fig.5 Distribution of Smoke Velocity in Tunnel Roof Wall under different Ambient Pressures

图 5 显示出, 隧道火源段烟气纵向流速随着距火源中心距离的增加先急剧下降而后趋于平稳, 最后在竖井处急剧上升。这主要是因为, 烟气在火源附近时为径向扩散转向一维扩散阶段^[12,13], 因此烟气流速随着距火源中心距离的增加而急剧下降。在烟气进入一维扩散段后, 因为烟气与隧道顶壁的粘性力使得烟气在流动过程中流速缓慢减小。但当烟气流动到距竖井较近时烟气流速突然增大, 这主要是因为竖井对于烟气的抽吸作用, 会使得靠近竖井的烟气流速增大。

从图 5 还可以看出, 在火源段的烟气流速随着环境压力的降低而逐渐增大, 这主要是因为随着环境压力的降低, 火源正上方的烟气温度升高, 羽流对于隧道顶壁的冲击作用增强造成烟气在火源上方的烟气流速增加, 进而其他点的烟气流速也随之增加。

2.3 烟气浓度

隧道顶壁下纵向烟气浓度分布变化规律如图 6 所示。

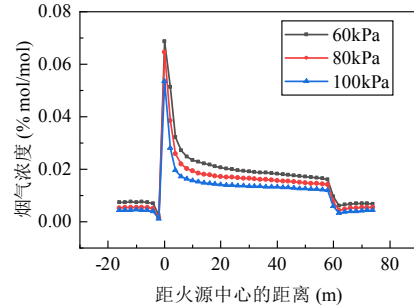


图 6 不同环境压力下隧道顶壁纵向烟气浓度分布

Fig.6 Longitudinal Smoke Density Distribution of Tunnel Roof Wall under different Ambient Pressures

图 6 显示出, 隧道火灾火源段的烟气浓度在火源中心处最大, 随着距火源中心距离的增加烟气浓度先急剧减小到一定值之后开始缓慢减小。这主要是因为, 在距火源中心距离较近时烟气处于径向扩散转向一维扩散阶段, 因此烟气浓度急剧下降。在烟气进入一维扩散段之后, 烟气在纵向流动过程中会逐渐卷吸少量隧道下部的空气, 因此烟气浓度会随着距火源中心距离的增加而缓慢减小。当烟气经过竖井时一部分烟气会从竖井排出, 因此烟气浓度在经过竖井后突然下降。

图 7 烟气浓度的计算公式为:

$$\eta = n_y / n_z \quad (7)$$

式中, η 为体积分数; n_y 为烟气物质的量, mol; n_z 为总物质的量, mol。

由式 (7) 可得:

$$\eta = \frac{n_y}{n_y + m_k M_k} \quad (8)$$

式中, M_k 为空气的摩尔质量, g/mol ; m_k 为空气的质量, mol。

如图 6 所示, 当环境压力降低时, 隧道火灾烟气纵向浓度分布的变化规律与纵向温度分布变化规律基本相同, 由式 (8) 可得当环境压力降低时单位体积的空气质量减小 m_k 减小, 进入空气中的烟气摩尔质量为定值, 烟气的体积分数增大, 因此随着环境压力的降低烟气浓度逐渐增大。

2.4 烟气能见度

隧道顶壁下烟气纵向能见度分布变化规律如

图 7 所示。

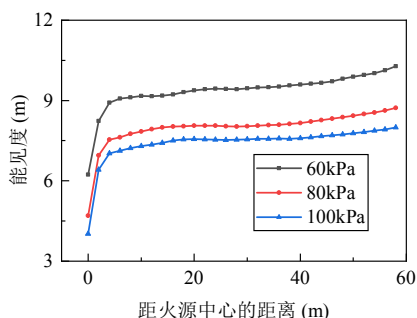


图 7 不同环境压力隧道顶壁纵向烟气能见度分布

Fig.7 Longitudinal Smoke Visibility Distribution of Tunnel Roof Wall under different Ambient Pressures

图 7 显示出,隧道火灾烟气能见度在火源正上方最低,随着距火源中心距离的增加,顶壁下烟气的能见度先快速上升到一定值之后开始缓慢增加,这主要是因为距火源距离较近时烟气处于径向扩散转向一维扩散阶段,因此烟气能见度快速上升。在烟气进入一维扩散段后,烟气在纵向流动过程中会逐渐卷吸少量隧道下部的空气,因此隧道顶壁下烟气的能见度在一维扩散段会随着距火源中心距离的增加而缓慢增加。

如图 7 所示当环境压力降低时火源段的烟气能见度上升,这主要是因为环境压力降低时空气密度减小,相同烟气生成量进入到空气中时所占空气的比重增加,烟气浓度增大,但烟气与空气的整体密度减小,因此顶壁下烟气的能见度随着环境压力的降低而逐渐增大。

由于距离火源中心 30m 外人员高度处的能见度在不同环境压力下都为 30m,这表明烟气并没有沉降到人员高度处,因此本文只展示了顶壁下的烟气能见度随环境压力的变化情况。

2.5 竖井排烟

根据图 4、图 6 竖井后方的烟气特性随环境压力的变化规律可以得出,当环境压力降低时竖井后方的烟气温度逐渐升高、烟气浓度逐渐增大,并根据图 5 可知,当环境压力降低时烟气流速逐渐增大。因此竖井的排烟效果会随着环境压力的降低而逐渐变差。这意味着环境压力对隧道火灾自然通风完全排烟的临界竖井高度也有影响。

3 结论

环境压力的变化对隧道火灾自然通风的烟气

特性有很大的影响,因此本文采用数值模拟软件对不同环境压力下的隧道火灾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顶壁下的烟气温度和浓度逐渐增大。竖井后方的烟气温度和浓度也随环境压力的降低而逐渐增大。

(2) 隧道火源段烟气流速和能见度速随着环境压力的降低而逐渐增大。

(3) 竖井的排烟效果随着环境压力的降低而逐渐减弱。

参考文献:

- [1] ZG Yan, QH Guo, HH Zhu. Full-scale experiments on fire characteristics of road tunnel at high altitude[J]. Tunn Undergr Space Tech., 2017,(66):134-146.
- [2] Jie Ji, Fangyi Guo, Zihe Gao, et al. Effects of ambient pressure on transport characteristics of thermal-driven smoke flow in a tunnel[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018,(125):210-217.
- [3] F Tang, LH Hu, LZ Yang, et al. Longitudinal distributions of CO concentration and temperature in buoyant tunnel fire smoke flow in a reduced pressure atmosphere with lower air entrainment at high altitude[J]. Int.J. Heat Mass Transf., 2014,(75):130-134.
- [4] J Ji, F Guo, Z Gao, et al. Numerical investigation on the effect of ambient pressure on smoke movement and temperature distribution in tunnel fires[J]. Appl. Therm. Eng., 2017,(118):663-669.
- [5] He Lu, Xu Zhisheng, Chen Hongguang, et al. Analysis of entrainment phenomenon near mechanical exhaust vent and a prediction model for smoke temperature in tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,(80):143-150.
- [6] Fan Wu, Ru Zhou, Gansu Shen, et al. Effects of ambient pressure on smoke back-layering in subway tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,(79):134-142.
- [7] Zhang S, Wang J, He K, et al. Study on the smoke back - layering and critical ventilation in the road tunnel fire at high altitude[J]. Fire and Materials, 2019,43(4): 422-429.

(下转第 311 页)