

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230807001

单洞双线铁路隧道紧急救援站火灾烟气特性研究*

孙建春^{1,2}, 张敏¹, 向龙³, 杨轶清¹

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 四川省燃气安全与高效利用工程技术研究中心, 四川 成都 610500; 3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 以某典型高海拔单洞双线铁路隧道紧急救援站为依托, 通过FDS较系统地研究了不同排烟量和自然风情形下, 隧道内发生火灾时的烟气蔓延、温度及能见度分布规律, 得到了最佳机械排烟量推荐值, 并为人员逃生及烟气控制提供建议。研究表明: 当存在自然风时, 自然排烟时有部分烟气进入联络通道, 不利于人员逃生; 机械排烟时, 随着排烟量的增大, 烟气蔓延距离明显缩短, 但隧道拱顶温度降低幅度较小; 当排烟量取为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 无论是否存在自然风, 隧道特征高度处温度均低于 60°C , 能见度均大于 10 m , 且烟气主要集中在隧道顶部并与下层空气分界明显, 人员疏散可处于安全状态。人员逃生建议: 无自然风时, 人员从有联络排烟道一侧疏散通道或就近疏散通道逃生; 控烟策略: 建议引入适量的纵向机械送风, 方向从无联络排烟道一侧吹向有联络排烟道一侧, 有利于缩短烟气的流动长度, 为人员逃生创造更有利的条件, 考虑关闭离火源位置较远的排烟风机, 提高整个排烟系统的排烟效率。

关键词: 高海拔铁路隧道; 救援站; 隧道安全; 烟气特性; FDS

中图分类号: X951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1398-10

Study on Fire Smoke Characteristics of Emergency Rescue Station in Single-Hole, Double-Track Railway Tunnel

SUN Jianchun^{1,2}, ZHANG Min¹, XIANG Long³, YANG Keqing¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500; 2. Sichuan Engineering Technological Research Centre for Security and Efficient Utilisation of Fuel Gas, Chengdu 610500; 3. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041)

Abstract: Based on a typical high-altitude single-hole, double-track railway tunnel emergency rescue station, the smoke spread, temperature, and visibility distribution of fire in a tunnel under different smoke extraction volumes and natural wind conditions were systematically studied using FDS. The recommended value for the optimal mechanical smoke extraction volume was obtained, and suggestions for personnel escape and smoke control were provided. The results showed that when there was natural wind, some smoke entered the communication passage during natural smoke extraction, which was not conducive to personnel escape. During mechanical smoke extraction, as the smoke extraction volume increased, the smoke spread distance was significantly reduced, but the reduction in the tunnel vault temperature was limited. When the smoke extraction volume was set to $300 \text{ m}^3/\text{s}$, re-

* 收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-10-27

作者简介: 孙建春(1982—), 男, 讲师, 博士。主要从事隧道及地下空间通风、火灾安全研究。Email: jianchun@yeah.net

ardless of the presence of natural wind, the temperature at the characteristic height of the tunnel was below 60 °C, the visibility was greater than 10 meters, and the smoke was mainly concentrated at the top of the tunnel, with a clear boundary between it and the lower layer of air, making personnel evacuation possible in a safe condition. Suggestions for personnel escape: When there is no natural wind, personnel should escape through the passage with a communication smoke extraction duct or the nearest evacuation passage. Smoke control strategy: It is recommended to introduce an appropriate amount of longitudinal mechanical ventilation, blowing from the side without a smoke extraction duct to the side with one, which helps shorten the smoke spread length and creates more favorable conditions for personnel escape. Consider shutting down the smoke extraction fans located farther from the fire source to improve the efficiency of the entire smoke extraction system.

Keywords: high-altitude railway tunnel; rescue station; tunnel safety; smoke characteristics; FDS

0 引言

以我国正在修建的成兰铁路为例,该隧道从海拔 500 m 的成都平原上升至海拔 3 400 m 的西北高原,属双线电气化高速铁路,全线长大隧道数量众多^[1-2]。因铁路隧道火灾受隧道结构型式及高海拔环境的影响,一旦发生火灾,将难以及时救援和控制火情蔓延,人员逃生疏散困难^[3-5]。

当前国内外学者对高海拔公路隧道火灾的研究已有不少成果,高海拔铁路隧道的研究相对还不充分^[6-8]。同时,双洞单线铁路隧道的研究已有开展,但针对单洞双线隧道的研究相对较少,而关于单洞双线铁路隧道+两侧平导型救援站的相关研究则更少。如:2006年,D. H. Kim等^[9]建立 1:48 的双洞单线铁路隧道紧急救援站缩尺模型,开展了一系列火灾试验,主要验证隧道通风方案的合理性;2010年,李颖臻^[10]在临界 Froude 数假定基础上得到了计算紧急救援站横通道临界风速的 Froude 模型,通过量纲分析,提出了与横通道临界风速相关的主要准则;2012年,王庆生等^[11]按 1:1 尺寸建立了铁路隧道紧急救援站火灾安全实验平台,主要研究了细水雾灭火系统抑制车厢火灾的模拟实验,获取了温度、有毒有害气体浓度等重要参数;2019年,Y. Zhou等^[12]首次研究了双洞单线铁路隧道紧急救援站采取半横向通风模式时横向通道内的临界速度;马召辉^[13]利用 FDS 软件探究了 14 种高海拔紧急救援站发生火灾时的烟气蔓延规律和人员疏散安全性,并针对火灾的致灾因素和机理进行了研究;2020年,L. Tao等^[14]研究了双洞单线隧道紧急救援站横通道开启状态、纵向通风速度、排烟效率和火源位置对救援站温度分布和烟气控制的影响,提出了预测紧

急救援站横通道内临界风速的半经验公式。

综上所述,铁路隧道火灾的研究成果主要集中在平原地区双洞单线铁路隧道,针对高海拔单洞双线铁路隧道+两侧平导型救援站的相关研究则更少,并且隧道内火灾发展可能受到高海拔环境和隧道结构型式的共同影响,目前未有研究同时考虑以上两点。因此,需要开展进一步研究。

基于此,本文以平均海拔为 3 000 m 的某典型单洞双线铁路隧道+两侧平导型救援站为对象进行研究,采用模拟软件 FDS(Fire Dynamics Simulator)进行了系统地仿真分析。假设列车位于隧道左线线路中心,列车中部着火,探究了不同排烟量和自然风速下,救援站内烟气蔓延规律、特征点温度及能见度分布规律,得到了最佳机械排烟量推荐值,为人员逃生及烟气控制提供建议。研究成果为高海拔单洞双线铁路隧道防灾救援站消防设计、疏散救援提供了重要的数据支持,研究具有重要的现实指导意义。

1 数值模拟

1.1 工程概况

依托的典型隧道工程位于四川省境内,全长 22.9 km,为双线合修铁路隧道。其中,防灾救援站位于隧道 4 号横洞工区,救援站长 550 m,最宽处 13 m,最高处 8.6 m。为便于人员疏散逃生,在隧道两侧均设置救援疏散平导,长度分别为 450、447 m,紧急救援站与左、右侧救援疏散平导分别按间距 50 m 设置疏散联络通道,共计 22 条,防护门尺寸为 3.4×2.1 m,人员通过右侧平导疏散时,通过 4#横洞进行逃生,从左侧平导疏散时,通过隧底疏散联络通道

进行逃生。救援站设置长为430 m的平行排烟道,设置了6处竖井,烟气通过竖井式联络通道、平行排烟道、联络排烟道抽排出事故隧道。本文全尺寸隧道三维模型如图1所示。

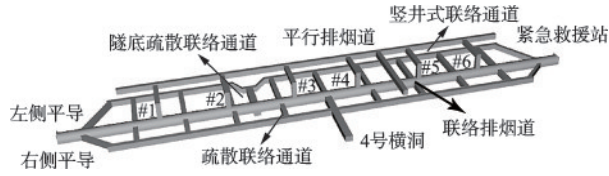


图1 隧道全尺寸三维模型示意

Fig.1 Full-size 3D model diagram of the tunnel

1.2 火源设置

本文采取的着火列车为和谐号CRH2型电力动车组,列车宽3.38 m,列车高3.7 m,车厢节数8节,总长200 m。根据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》^[15]中第3.0.12条规定:隧道设计火灾规模应按运行的列车类型确定,动车组采用15 MW,普通列车组采用20 MW,由于和谐号CRH2型列车属于动车组,因此火灾规模采取15 MW更合适,本研究考虑燃烧的最不利原则,采用短时间内快速燃烧的稳态火。列车位于隧道左线线路中心,列车中部着火,采用丙烷作为燃料,设定火源尺寸为3.38*12.5 m²,距离隧底1.5 m。

1.3 网格划分

通过FDS进行数值模拟时,网格尺寸被认为是确保模拟结果准确性和可靠性的一个关键参数,火源特征直径 D^* 与计算网格尺寸 δ_x 的合理比例在4~16之间^[16]。其中火源特征直径 D^* 由下式给出:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中, Q 为火灾热释放速率,kw; ρ_∞ 为环境空气密度,kg/m³; c_p 为环境空气比热容,kJ/(kg·K); T_∞ 为环境空气温度,K; g 为重力加速度,m/s²。

火灾特征直径的估算值为3.36 m,网格尺寸可取0.21~0.84 m。由于救援站模型体积较大,需要采用FDS中的多重网格进行计算,建立一个多重网格首先应符合相同大小的相交面积或是整数倍,并且为了使得模拟结果具有较高的精确性,网格尺寸取0.25 m。为了提高数值模拟的计算效率,调整除火源附近外的事故隧道网格尺寸取0.5 m,非着火隧道网格尺寸取1 m,网格总数约为297万。

1.4 工况设置

该防灾救援站平均海拔取3 000 m,大气压力设置为70 700 Pa,空气密度设置为0.841 kg/m³,环境温度设置为2 °C^[17]。列车模型采用的是“Feraloy”材料,隧道壁面采用的是“Concrete”材料。

本研究列车停靠在左线,将右侧疏散通道防护门进行关闭,仅考虑救援站左侧区域,人们通过左侧疏散通道进行逃生。防护门处设置风速为2 m/s。隧道内自然风速设置为0、2、-2 m/s,自然风为正时,风向从事务隧道有联络排烟道一侧(右侧)吹向无联络排烟道一侧(左侧),自然风为负时,风向从事务隧道左侧吹向右侧。依据《建筑防烟排烟系统技术标准》^[18]确定合适范围的总排烟量,排烟风机设置在联络排烟道,烟气通过竖井式联络通道、平行排烟道、联络排烟道抽排出事故隧道。根据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》^[15]中第3.0.14条规定:隧道内紧急救援站的必需安全疏散时间不宜超过6 min,因此本文模拟时长为360 s,工况见表1。

表1 模拟工况

Table 1 Simulation of working conditions

工况	组别	火源位置	列车位置	自然风速/(m·s ⁻¹)	总排烟量/(m ³ ·s ⁻¹)
1					自然排烟
2-6	第一组		隧道	0	150、200、250、300、350
7			左线		自然排烟
8-11	第二组	中部	线路中心	2	250、300、350、400
12					自然排烟
13-16	第三组			-2	250、300、350、400

1.5 监测点及切片设置

本文主要研究事故隧道内空间的火灾烟气特性,隧道拱顶以及人员逃生路径中线特征高度处均设置“Thermocouple”以测量烟气温度变化,火源附近监测点间隔5 m布置,其余间隔10 m布置,共计132个。在人员逃生路径中线还设置了“Gas-phase Device”用于测量能见度,共计66个。同时也设置了温度、能见度切片。具体布置见图2。

1.6 数值模拟的可靠性验证

为验证采用FDS软件进行高海拔隧道火灾模拟的准确性和适用性,借鉴已有的缩尺试验数据,

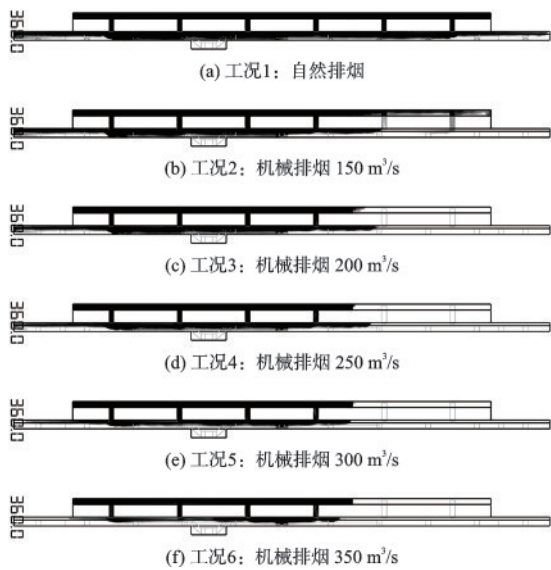


图5 不同排烟量下烟气蔓延规律示意(第一组工况)

Fig.5 Diagram of smoke spread pattern under different smoke extraction volumes (Group 1 working conditions)

层厚度明显减小,火灾烟气较好的集中在隧道顶部,且与下层空气分界明显。

为了更加清晰直观地表示事故隧道内烟气蔓延规律,绘制如图6所示的示意图,蓝色区域表示事故隧道左侧的烟气蔓延长度,黄色区域表示事故隧道右侧的烟气蔓延长度。如图6(a)所示,第一组工况时,火源位于列车中部,列车位于隧道左线线路

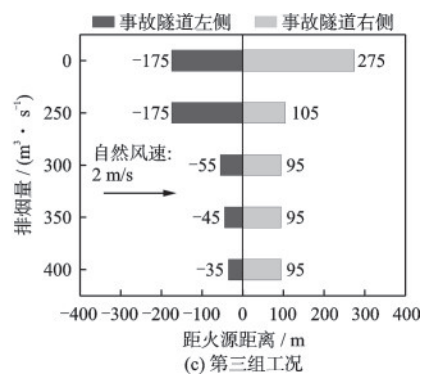
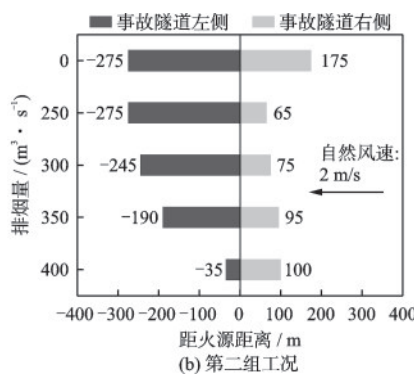
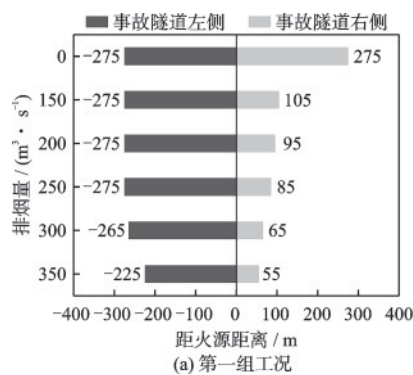


图6 事故隧道内烟气蔓延长度示意

Fig.6 Diagram of smoke spread length in the accident tunnel

2.2 隧道拱顶纵向温度分布规律

隧道拱顶最高温度作为隧道火灾的重要参数之一,当隧道火灾温度较高时,高温会导致混凝土发生爆裂,严重时造成衬砌结构沙化,降低其承载能力,影响其安全性能,一般以隧道拱顶温度超过 180 °C 作为临界判断值^[20]。本文取火灾稳定燃烧阶段,即

中心,事故隧道自然风速 0 m/s,防护门处通风速度 2 m/s。图 6(b)、(c)分别对应第二、三组工况。

由图 6 可知:自然排烟时,当隧道内无自然风时,烟气将充满整个事故隧道,当隧道内有自然风时,烟气仅充满隧道一侧;机械排烟时,随着机械排烟量的增加,第一组工况烟气蔓延长度示意图与烟气蔓延规律示意图变化规律一致,第二组工况事故隧道右侧区域内烟气蔓延距离略微增加,当机械排烟量 $\geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,事故隧道左侧区域内烟气蔓延距离开始缩短,第三组工况事故隧道右侧区域内烟气立即控制在竖井 5 的位置,并且随着排烟量的增大,事故隧道右侧区域内烟气蔓延距离不再缩短,当机械排烟量 $\geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,事故隧道左侧区域内烟气蔓延距离开始缩短。

以上规律对比可知,无论隧道内是否存在自然风,当机械排烟量 $\geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,事故隧道左侧区域烟气蔓延距离才开始缩短,由此可知事故隧道右侧区域烟气控制比左侧区域较容易;并且当自然风由左侧吹向右侧时,随着排烟量的增加,事故隧道内烟气流动长度快速缩短,由此可知当自然风由左侧吹向右侧时,烟气更容易被控制在一定范围。因此建议引入适量的纵向机械送风,方向从无联络排烟道一侧吹向有联络排烟道一侧,有利于缩短烟气的流动长度,为人员逃生创造更有利的条件。

时间为 350~360 s 的范围内的平均值,如图 7 所示。

(1) 隧道内无自然风

由图 7(a)可知,对第一组工况,当隧道火灾发生一定时间后,隧道内的温度分布达到稳定状态,最高温出现在火源正上方隧道拱顶位置。自然排烟时,隧道拱顶最高温为 210 °C,致灾范围大致为 -5~5 m;机械排烟时,随着排烟量的增加,隧道拱

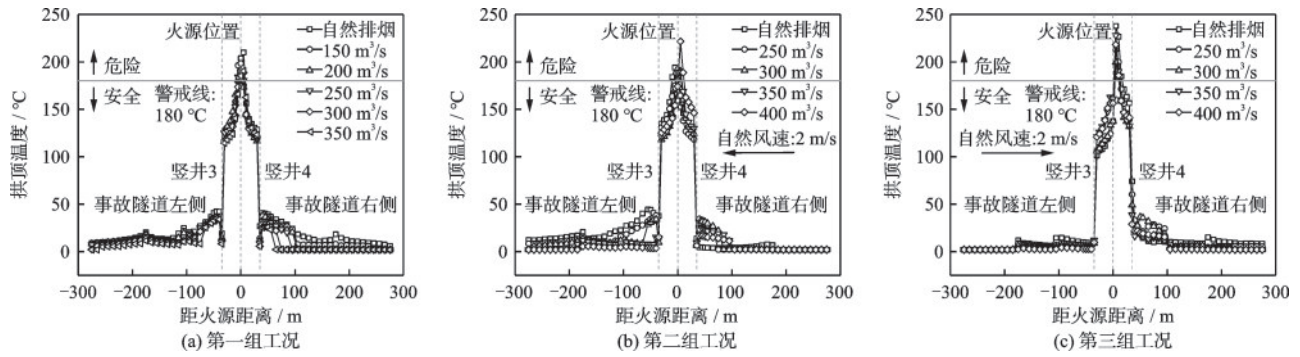


图7 隧道拱顶纵向温度分布规律

Fig.7 Longitudinal temperature distribution of tunnel vault

顶最高温呈现略微升高的变化规律,当排烟量为 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,拱顶最高温为 $180 \text{ }^\circ\text{C}$,当排烟量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,拱顶最高温为 $185 \text{ }^\circ\text{C}$,当排烟量为 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,拱顶最高温为 $190 \text{ }^\circ\text{C}$,此后随着排烟量的增加,拱顶最高温基本不再变化;并且随着排烟量的增加,火灾对隧道拱顶温度的影响范围缩短,当机械排烟量为 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,相比于自然排烟,事故隧道右侧温升范围缩短 75% 。

(2)隧道内自然风速 2 m/s

由图 7(b)可知,相较于第一组工况,隧道拱顶温度变化受排烟量影响更为明显。自然排烟时,拱顶最高温为 $194 \text{ }^\circ\text{C}$,距离火源相同位置,隧道下游的温度要略微高于上游温度,这是由于隧道内的烟气受到风的作用,大量的烟气聚集在下游,导致下游温度更高;机械排烟时,随着排烟量的增加,隧道拱顶最高温呈现轻微的不规则波动,事故隧道左侧区域内隧道拱顶温度明显降低且温升范围缩短,相比于自然排烟,温升范围缩短 33% ,事故隧道右侧区域内温度降低,但温升范围伸长,相比于自然排烟,温升范围伸长 200% 。

(3)隧道内自然风速 -2 m/s

由图 7(c)可知,对比第一、二组工况,第三组工

况隧道拱顶温度受排烟量影响最小。自然排烟时,拱顶最高温为 $237 \text{ }^\circ\text{C}$,仅火源附近受火灾影响,其余位置基本无影响;机械排烟时,随着排烟量的增加,隧道拱顶最高温呈现轻微的不规则波动,事故隧道右侧区域拱顶温度略有变化。

对比可知,三组工况的隧道拱顶温度变化规律与烟气扩散规律所得结论一致,当火源设置于竖井 3、4 之间时,机械排烟量变化对于隧道拱顶温度影响较小。第一、二组工况中,竖井 3 和竖井 4 位置隧道拱顶温度出现骤减,可能出现吸穿现象,该现象发生的原因主要是竖井下方烟气层厚度很薄,导致烟气层下方的冷空气被抽吸出去^[21]。

2.3 特征高度处温度分布规律

隧道火灾发生时,隧道特征高度处空间温度变化也很值得研究,对人员疏散逃生可用时间具有重要影响。根据《铁路隧道防灾疏散救援工作设计规范》^[15]规定隧道内特征高度 2.0 m 处,温度不超过 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。模拟结果取火灾稳定燃烧阶段,即时间为 $350\sim 360 \text{ s}$ 的范围内的平均值。如图 8 所示。

由图 8(c)可知,第三组工况事故隧道右侧特征高度处温度受排烟量影响更明显,特征高度处温度

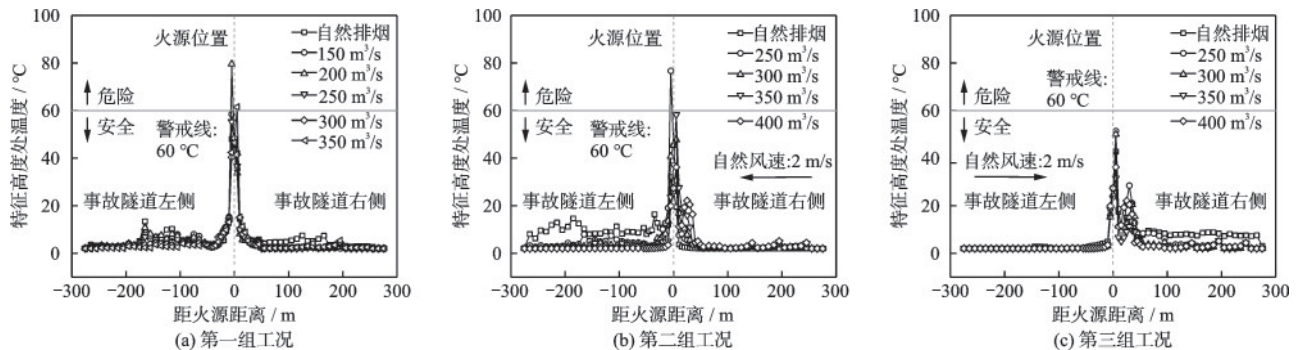


图8 特征高度处温度分布规律

Fig.8 Temperature distribution at characteristic heights

出现两个峰值,可能是由于自然风和竖井排烟的共同作用。无论排烟量为多少,特征高度处最高温均低于 60°C ,人员疏散处于安全状态。

对比可知,第一、二组工况除火源附近,其他位置特征高度处温度均低于 60°C 以下,人员疏散处于安全状态,第三组工况事故隧道任何位置均满足疏散逃生要求。无自然风时,仅火源附近特征高度处温度发生明显变化,有自然风时,事故隧道下游特征高度处温度发生明显变化,上游温度变化不明显。

2.4 特征高度处能见度分布规律

根据现行规范规定,在可用安全疏散时间内,隧道内特征高度 2.0 m 处能见度应不小于 10 m ^[15]。提取自然排烟、排烟量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 以及特征高度处温度超标时的工况,不同时刻($0、10、30、50、100、200、300、360\text{ s}$)特征高度处能见度分布。见图9。

图9(a)~(d)为隧道内无自然风情况,自然排烟时,火灾发生 200 s 时事故隧道左侧区域特征高度处能见度低于 10 m ,人员疏散处于危险状态;特征高度处温度超标工况:当机械排烟量为 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 时,火灾发生 360 s 时能见度最低值为 3.5 m ,当机械排烟量为 $350\text{ m}^3/\text{s}$ 时,火灾发生 10 s 时能见度最低值为 4.5 m ,人员疏散处于危险状态;当机械排烟量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,火灾发生 50 s 时能见度最低值为 12.6 m ,可视度降低位置主要集中在火源附近及事故隧道左侧区域,此时无论什么时刻人员疏散均处于安全状态。

图9(e)、(f)、(g)为隧道内自然风速 $+2\text{ m/s}$ 情况,自然排烟时,火灾发生 200 s 时事故隧道左侧区域特征高度处能见度低于 10 m ,人员疏散处于危险状态;特征高度处温度超标工况:当机械排烟量为 $250\text{ m}^3/\text{s}$ 时,火灾发生 200 s 时能见度最低值为 2 m ,人员疏散处于危险状态;当机械排烟量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$

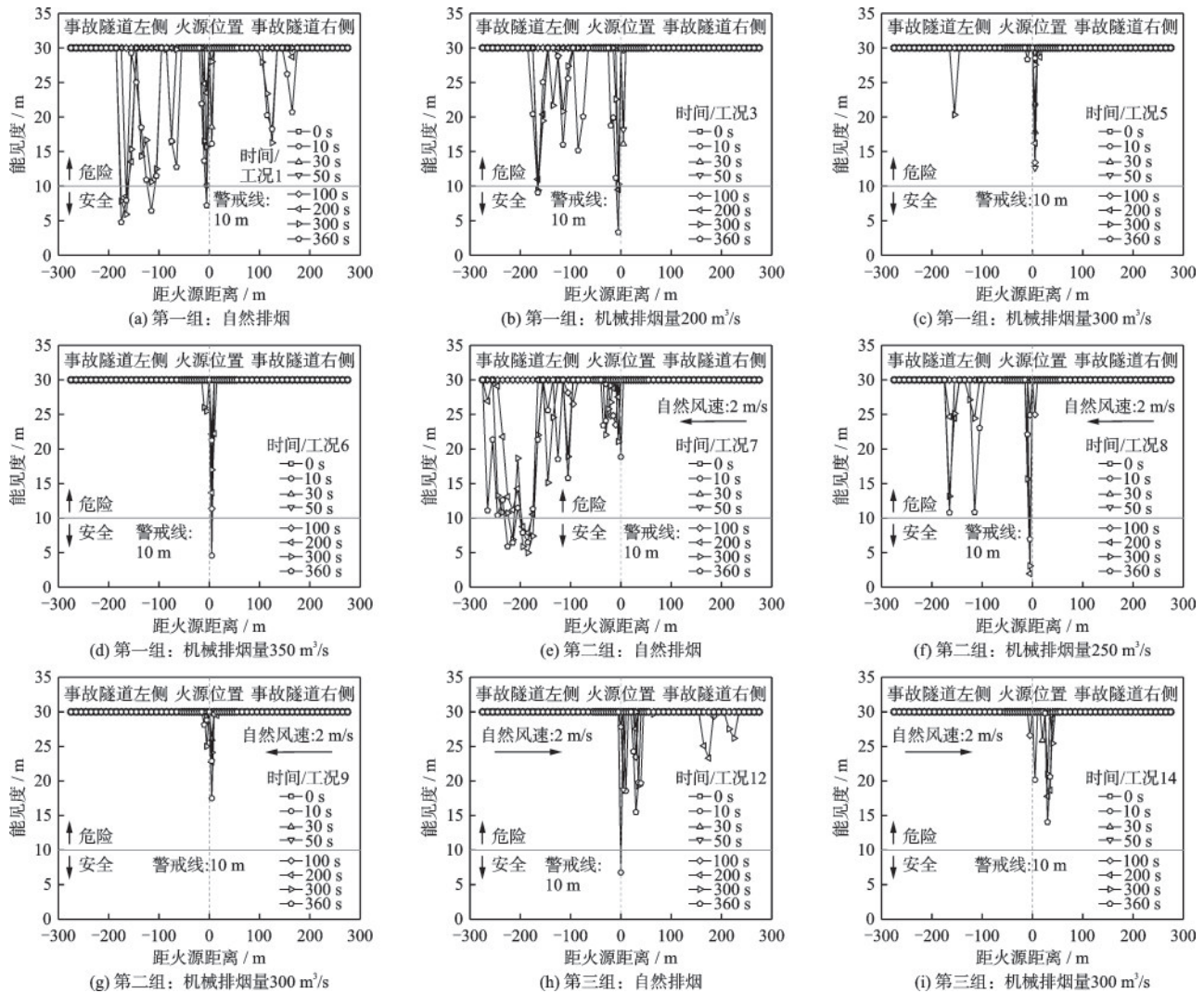


图9 特征高度处能见度分布规律

Fig.9 Visibility distribution at characteristic heights

时,能见度最低值为 17.5 m,可视度降低位置主要集中在火源附近,此时无论什么时刻人员疏散均处于安全状态。

图 9(h)、(i)为隧道内自然风速为 -2 m/s 情况,自然排烟时,火灾发生 10 s 时火源附近能见度低于 10 m,人员疏散处于危险状态;当机械排烟量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,能见度最低值为 14 m,可视度降低位置主要集中在火源附近及竖井 4 位置,此时无论什么时刻人员疏散均处于安全状态。

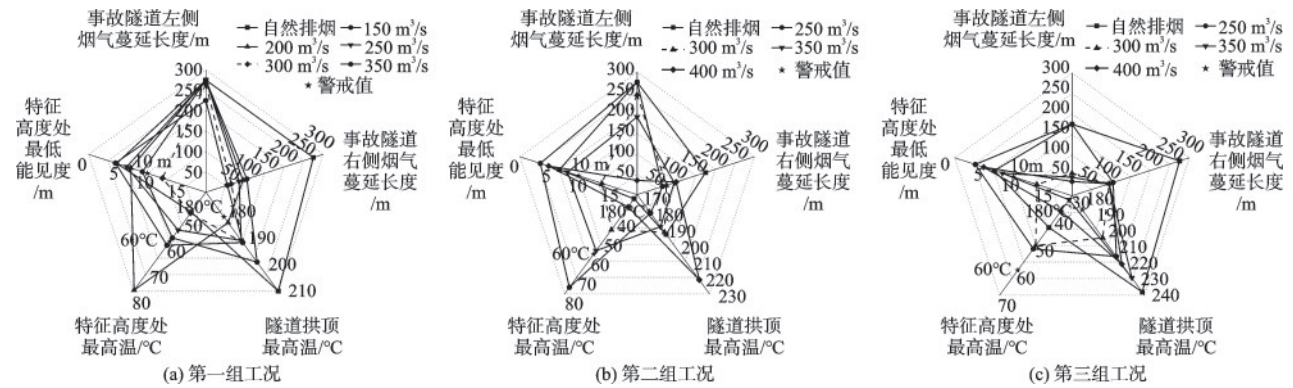


图 10 三组工况致灾因素分析

Fig.10 Analysis of disaster-causing factors in three groups of working conditions

结果显示:第一组工况,有且仅当机械排烟量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,特征高度处最高温、最低能见度均未达到致灾警戒值,此时人员疏散处于安全状态,隧道拱顶最高温为 $190\text{ }^\circ\text{C}$,比警戒值温度高一点,但致灾范围仅火源附近 5 m,对隧道衬砌结构影响不大,并且事故隧道内烟气蔓延长度大幅度缩短,此时无论是对人员逃生还是烟气控制均较好,因此第一组工况最佳机械排烟量推荐值为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 。同上,对第二、三组工况致灾因素进行相似分析,得到第二、三组工况的最佳机械排烟量推荐值均为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.6 人员逃生建议及控烟策略

(1) 人员逃生建议

从特征高度处温度、能见度分布规律可知:第一组工况隧道内无自然风时,无论排烟量为多少,特征高度处温度、能见度仅火源附近及事故隧道右侧发生变化,其余位置无明显变化,因此建议人员从事故隧道有联络排烟道一侧疏散通道或就近疏散通道进行逃生,即从编号为 4-11 的疏散通道内进行逃生;第二、三组工况隧道内存在自然风时,无论排烟量为多少,特征高度处温度、能见度仅火源附

2.5 最佳机械排烟量推荐值

分析在数值模拟的时间段内,事故隧道内各个监测点的数据监测情况,并提取每个致灾因素在其最不利状态下的数据,如图 10 所示。首先考虑对人员逃生影响最重要的因素—特征高度处最高温、最低能见度,其次考虑对隧道衬砌结构存在影响的因素—隧道拱顶最高温,综合确定最佳机械排烟量推荐值。

近和火源下游发生变化,其余位置无明显变化,第二组工况建议人员从编号为 4-11 的疏散通道内进行逃生,第三组工况建议人员从编号为 1-8 的疏散通道内进行逃生。

(2) 控烟策略

从烟气扩散规律可知:当自然风从无联络排烟道一侧吹向有联络排烟道一侧时,烟气更容易被控制在一定范围,并且此时在事故隧道内任何位置特征高度处温度均低于 $60\text{ }^\circ\text{C}$,因此建议引入适量的纵向机械送风,方向从无联络排烟道一侧吹向有联络排烟道一侧,有利于缩短烟气的流动长度,为人员逃生创造更有利的条件;且远离火源的竖井排烟效率较低,甚至出现了烟气自竖井式联络烟道下沉至事故隧道的情形,因此可以考虑关闭离火源位置较远的排烟风机,以提高整个排烟系统的排烟效率。

3 结 论

本研究依托某典型隧道救援站,较系统地研究了高海拔单洞双线铁路隧道的火灾烟气特性,得到了排烟量及自然风对烟气蔓延的变化规律、以及各特征点温度变化与能见度分布规律,所得结论如下:

(1) 当隧道自然排烟且无自然通风时,无烟气扩散至疏散联络通道内;而有自然通风时,有部分烟气进入疏散联络通道内,此时不利于人员逃生。

(2) 从烟气蔓延规律可知,事故隧道有联络排烟道一侧烟气控制比无联络排烟道一侧较容易,当自然风由左侧吹向右侧时,烟气更容易被控制在一定范围,当机械排烟量 $\geq 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,事故隧道内左侧区域烟气蔓延距离开始缩短,事故隧道内烟气层厚度明显减小,火灾烟气较好的集中在隧道顶部,且与下层空气分界明显。

(3) 从隧道拱顶温度分布规律可知,将火源设置在竖井3、4之间时,机械排烟量对于隧道拱顶温度影响较小;由特征高度处温度分布可知,当机械排烟量为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,三组工况事故隧道任何位置特征高度处温度均低于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(4) 从能见度变化规律可知,自然排烟时,第一、二组工况可视度降低位置主要集中在火源附近及事故隧道左侧区域,第三组工况主要集中在火源附近及事故隧道右侧;当机械排烟量为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,三组工况任意时刻特征高度处能见度均大于 10 m 。

(5) 最佳机械排烟量推荐值,三组工况均采用机械排烟量为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最为合适;结合研究的隧道模型和相关条件,提出了定制化人员逃生建议,无自然风时,建议人员选择从有联络排烟道一侧疏散通道或就近疏散通道进行逃生,即从编号为4-11的疏散通道内进行逃生,当自然风速为 2 m/s 时,同样建议人员从编号为4-11的疏散通道内进行逃生,然而当自然风速为 -2 m/s 时,我们建议人员从编号为1-8的疏散通道内进行逃生;控烟策略,建议引入适量的纵向机械送风,方向从无联络排烟道一侧吹向有联络排烟道一侧,且考虑关闭离火源位置较远的排烟风机,以提高整个排烟系统的排烟效率。

参考文献:

- [1] 田四明,王伟,杨昌宇,等.中国铁路隧道40年发展与展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(11):1903-1930.
Tian S M, Wang W, Yang C Y, et al. Development and prospect of railway tunnels in china in recent 40 years [J]. Construction Tunnel, 2021, 41(11): 1903-1930. (in Chinese)
- [2] 王若晨,朱勇,邸成,等.成兰铁路云屯堡隧道紧急救援站设计优化研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(7):1029-1034.

Wang R C, Zhu Y, Di C, et al. Study on optimization of emergency rescue station of yuntunbao tunnel on chengdu-lanzhou railway [J]. Tunnel Construction, 2020,40(7):1029-1034. (in Chinese)

- [3] 徐志胜,孔杰,游温娇,等.单洞双线铁路隧道火灾人员疏散安全性分析[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1):181-186.
Xu Z S, Kong J, You W J, et al. Analysis on safety of personnel evacuation in fire of single-hole double-line railway tunnel [J]. Journal of Safety Science and Technology 2019, 15(1):181-186. (in Chinese)
- [4] 郭志杰,张奥宇,鲁水涛,等.高海拔隧道防烟策略及疏散通道间距探讨[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1671-1678.
Guo Z J, Zhang A Y, Lu S T, et al. Discussion on the smoke prevention strategy of high-altitude tunnel and the evacuation channel spacing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1671-1678. (in Chinese)
- [5] Yang Y, Long Z, Cheng H, et al. Experimental and numerical study of smoke temperature distribution characteristics in a sloped tunnel [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 73:103091.
- [6] 刘琼,郑烽.双火源隧道火灾的临界风速变化规律研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):137-143.
Liu Q, Zheng F. Study on variation rules of critical ventilation velocity for double-source tunnel fires [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1):137-143. (in Chinese)
- [7] 王峰,黄玉冰,朱磊,等.超高海拔隧道火灾燃烧与烟气温度现场模型试验研究[J].土木工程学报,2020,53(3):114-120.
Wang F, Huang Y B, Zhu L, et al. Field model experimental study on fire combustion and smoke temperature in very-high-altitude tunnels [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 114-120. (in Chinese)
- [8] 黄玉冰.超高海拔公路隧道火灾烟气特性与人员疏散技术研究[D].成都:西南交通大学,2021.
Huang Y B. Study of smoke characteristics and safe evacuation of road tunnels in extra-high altitude area. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [9] Kim D H, Park W H. Experiment by using reduced scale models for the fire safety of a rescue station in very long rail tunnel in Korea [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3):303.
- [10] 李颖臻.含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究

- [D].成都:西南交通大学,2010.
- Li Y Z. Study of fire characteristics and smoke control in super long tunnels with rescue stations[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [11] 王庆生,刘炳海,王文伟,等.细水雾灭火系统扑救铁路隧道救援站内客车火灾的全尺寸试验研究[J].安全与环境学报,2012,12(3):158-163.
- Wang Q S, Liu B H, Wang W W, et al. Full-scale experimental rescue study on the water-mist railway tunnel-fire fighting system[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(3): 158-163.(in Chinese)
- [12] Zhou Y, Bi H, Wang H, et al. Critical velocity in the transverse passages of a railway tunnel rescue station with semi-transverse ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103064.1-103064.11.
- [13] 马召辉.高海拔特长铁路隧道烟气蔓延规律与控制方法研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2020.
- Ma Z H. Study on the law and control method of smoke spread in high altitude and extra long railway tunnel [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.(in Chinese)
- [14] Tao L, Zhang Y, Hou K, et al. Experimental study on temperature distribution and smoke control in emergency rescue stations of a slope railway tunnel with semi-transverse ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106(9):103616.
- [15] 铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范:TB 10020—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [16] 蒋琪.单洞双向公路隧道火灾通风排烟控制研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- Jiang Q. Study on fire ventilation and smoke control of single-hole bidirectional highway tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.(in Chinese)
- [17] Liu B, Mao J, Xi Y, et al. Effects of altitude on smoke movement velocity and longitudinal temperature distribution in tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112(4):103850.
- [18] 建筑防烟排烟系统技术标准:GB 51251—2017[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [19] 王峰,张路华,袁松,等.高海拔公路隧道火灾烟气控制临界风速研究[J].中国公路学报,2022,35(5):153-160.
- Wang F, Zhang L H, Yuan S, et al. Critical velocity of fire smoke control in high-altitude highway tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5): 153-160.(in Chinese)
- [20] Hua N, Tessari A, Khorasani N E. Characterizing damage to a concrete liner during a tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109: 103761.
- [21] Yan G F, Wang M N, Yu L, et al. Effects of ambient pressure on smoke movement patterns in vertical shafts in tunnel fires with natural ventilation systems[J]. Building Simulation, 2020, 13(4):931-941.

(本文编辑:苏泽云)