

引用本文

黄红亚,李涛,刘欣昊,等.隧-棚-隧结构下火灾烟气蔓延特性及排热效率研究[J].消防科学与技术,2026,45(8):49-56.

Huang Hongya, Li Tao, Liu Xinhao, et al. Study on fire-induced smoke spread characteristics and heat dissipation efficiency in tunnel-shed-tunnel structures[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(8): 49-56.

隧-棚-隧结构下火灾烟气蔓延特性及排热效率研究

黄红亚^{1,2}, 李涛¹, 刘欣昊³, 王尔御安³, 张玉春³

(1. 四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都 610044;

2. 四川沿江宜金高速公路有限公司, 四川 西昌 615099;

3. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为探究隧-棚-隧结构在火灾情况下烟气蔓延特性及棚洞结构的排热效率,本文开展了数值模拟研究,分析了棚洞结构的开口方式、开口率及棚洞长度等因素对烟气蔓延特性与排热效率的影响。研究表明,顶开棚洞结构与侧开棚洞结构在排热效率上存在明显差异。侧开棚洞结构下,开口率对排热效率的影响较小,排热效率最高仅为10%;随着棚洞长度的增加,其排烟效果有所增强,但顶棚下方烟气浓度依然较高。顶开棚洞结构下,开口率显著影响隧道群的排烟能力,排热效率最高可达85%;随着棚洞长度的增加,棚洞顶部的烟气浓度呈现下降趋势。本研究为控制隧道群火灾、降低灾害损失与严重程度提供科学依据,并为今后的隧道建设提供技术指导。

关键词:隧道火灾;隧-棚-隧结构;棚洞开口率;棚洞开口方式;烟气蔓延特性;排热效率

中图分类号:X932;TU998.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.08.0049.08

Study on fire-induced smoke spread characteristics and heat dissipation efficiency in tunnel-shed-tunnel structures

Huang Hongya^{1,2}, Li Tao¹, Liu Xinhao³, Wang Eryu'an³, Zhang Yuchun³

(1. Sichuan Expressway Construction & Development Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610044, China; 2. Sichuan Yanjiang Yijin Expressway Co., Ltd., Xichang Sichuan 615099, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: To investigate the smoke spread characteristics and the heat exhaust efficiency of shed tunnel structures under fire conditions in a tunnel-shed-tunnel configuration, this paper conducted numerical simulation studies. The effects of factors such as the opening mode, opening ratio, and shed length on smoke spread characteristics and heat exhaust efficiency were analyzed. The results show that there is a significant difference in heat exhaust efficiency between top-opening and side-opening shed structures. Under the side-opening shed structure, the opening ratio has a relatively small effect on heat exhaust efficiency, with the maximum efficiency reaching only 10%. As the shed length increases, the smoke exhaust performance improves, but the smoke concentration beneath the shed roof remains high. Under the top-opening shed structure, the opening ratio significantly affects the smoke exhaust capacity of the tunnel group, with heat exhaust efficiency reaching up to 85%. As the shed length increases, the smoke concentration at the top of the shed decreases. This study provides a scientific and rational basis for controlling tunnel group fires, reducing the loss and severity following such fires, and offers guidance for future tunnel construction.

Key words: tunnel fire; tunnel-shed-tunnel structure; shed tunnel opening ratio; shed tunnel opening configuration; smoke spread characteristics; heat dissipation efficiency

基金项目:四川省自然科学基金(2025ZNSFSC1363);国家消防救援局科技计划项目(2023XFCX16)

作者简介:黄红亚,四川高速公路建设开发集团有限公司,主要从事隧道工程方面研究,四川省成都市武侯区二环路西一段90号四川高速大厦,610044,1781751315@qq.com。

收稿日期:2025-04-16; **修回日期:**2025-12-15

随着西部大开发战略的深入实施,公路隧道网络持续向西部山区延伸。受该地区大量山地丘陵地貌的影响,隧道群结构得以大规模建设。在隧道工程建设过程中,棚洞结构因其良好的遮光效果与防落石功能而逐渐得到广泛应用,越来越多的隧道工程提出了架设棚洞的需求。然而,在隧-棚-隧结构中,棚洞的特殊结构形式可能导致火灾烟气由上游隧道蔓延至下游隧道,对人员安全构成严重威胁。

针对隧道内火灾烟气的蔓延特性,国内学者开展了大量试验研究。胡隆华^[1]测量了隧道火灾烟气温度场及不同纵向通风风速下烟气层蔓延的热物理特性,在此基础上建立了烟气层温度纵向衰减的预测模型。王彦富等^[2]获得了隧道火灾自然通风模式下烟气的纵向温度变化数据及蔓延规律。Yan Z G等^[3]研究了高海拔隧道条件下的热释放速率、纵向与垂直温度分布以及烟气的传播与分层现象。陈龙飞^[4]通过缩尺寸模拟试验,建立了顶棚集中排烟作用下隧道火灾烟气蔓延距离的预测模型。易欣等^[5]搭建1:10小尺寸隧道模型,揭示了隧道顶棚下方最高温度与火源功率之间的关系。Hu L H等^[6]采用大涡模拟方法模拟了长通道内火灾引发的烟气蔓延特征及一氧化碳运动特性。

针对隧道群中纵向相邻隧道的火灾问题,赵尊信等^[7-8]通过小尺寸试验研究了相邻隧道发生火灾后的烟气窜流特性,并利用FDS模拟分析了不同纵向风速及不同毗邻隧道间距对公路隧道群火灾烟气污染物窜流变化的影响。田伟等^[9]建立了流体力学模型,分析了特长隧道群中毗邻隧道的火灾烟气窜流规律。徐湃等^[10]运用Fluent研究了短距离公路隧道之间的窜流现象。杨玉容^[11]针对隧道洞口结构因素对废气窜流程度的影响进行了数值分析,研究了平行隧道之间的烟气窜流现象。邱浩^[12]研究了连续隧道火灾烟气扩散的基本特点与影响因素,建立了相应的数值计算模型。曹峰等^[13]采用数值模拟方法,研究了特长公路隧道群火灾烟气特性及通风方式,分析了全纵向排烟及分段式排烟下的烟雾运动规律。然而,上述研究仅关注相邻隧道之间的烟气污染物窜流,未考虑棚洞结构对其的影响,针对棚洞这一特殊结构的研究仍较少。2022年,刘健等^[14]结合数值模拟对洞口回流率进行了计算,揭示了棚洞对隧道内气流组织的影响。

综上,现有关于隧道烟气扩散及排热效率的理论研究在隧-棚-隧结构下存在明显局限,目前尚未有学者针对该结构的防火排烟问题开展专门研究。为降低隧-棚-隧结构下火灾发生后的损失与严重程度,并为后续火灾防治措施提供有效指导,本文采用数值模拟方法,利用FDS软件对全尺寸隧-棚-隧结构中的火灾发生过程进行模拟,研究该结构下火灾烟

气的蔓延特性及排热效率。

1 数值模拟

1.1 模型设置

本文以G4216线屏山至金阳段沿江高速隧道群为研究对象,该隧道群断面宽度为11.0 m,高度为6.9 m。模拟过程中,上游隧道长度设置为250 m,下游隧道长度设置为100 m。棚洞区长度参考沿江高速隧道群中部分隧道间距,设定为30、60、90 m。棚洞开口方式采用侧部开口与顶部开口2种形式。图1展示了本文对棚洞结构开口率的设计方案:对于侧开棚洞结构,通过改变侧部开口高度调节开口率;对于顶开棚洞结构,则通过改变开口的截面积调节开口率。开口率的具体计算方法见式(1)。

$$A_r = \frac{S_0}{S_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_r 为开口率; S_0 为棚洞开口部分面积之和, m^2 ; S_t 为顶开、侧开棚洞的顶部、侧部各自的可开口区域投影面积, m^2 。

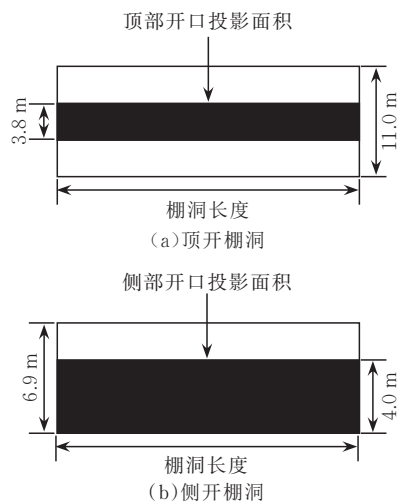


图1 顶开与侧开棚洞开口区域投影面积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of projection area for openings in top-open and side-open shed tunnels

本文设定的固定火源功率为30 MW。参考白赞等^[15]的研究成果,所有工况下火源位置均设置在上游隧道的中心处,火源尺寸为1 m×2 m。对于顶开棚洞,开口方式a采用每个开口为2.0 m×2.0 m的正方形,通过增加开口数量增大开口率;开口方式b采用每个开口为3.5 m×4.5 m的矩形,通过增大单个开口的面积增大开口率。监测点位布置于隧道顶棚下方0.2 m处,从上游隧道入口开始,每隔1.0 m布置一个测点,直至下游隧道出口。同时,在棚洞段的入口和出口处分别设置监测切片,用于监测上游隧道出口及下游隧道入口处的温度与风速。具体模型设置如图2~图5所示。

烟气从侧部排烟口排出。由于纵向风速较大,热烟气沿隧道群纵向的惯性力大于其自身的热浮力,导致热烟气不断向下游隧道蔓延。当热烟气进入下游隧道时,烟气层界面高度与侧部开口的最高高度基本齐平,烟气层界面较低,表明侧开棚洞对处于隧道底部的热烟气具有一定的排烟作用,但效果不显著,隧道顶棚附近仍有大量热烟气聚集。

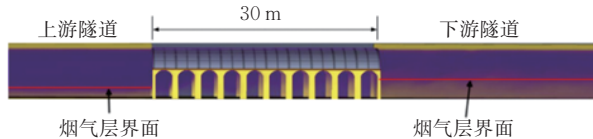


图6 侧开棚洞排烟效果图

Fig. 6 Smoke extraction efficiency in side-open shed tunnels

隧道内顶棚下方的纵向温度分布特性能够反映隧道火灾的危险程度。本文重点分析烟气离开上游隧道进入棚洞后,棚洞内部顶棚下方的纵向温度分布规律及衰减特性。图7(a)中, T 表示隧道群顶棚下方的温度, L_i 表示距离火源的位置。棚洞起始处的顶棚下方温度基本相同,而在棚洞终点处,顶棚下方温度存在明显差异。其中,侧部开口高度为4 m时顶棚下方温度最低,3 m高度时次之,2 m高度时顶棚下方温度最高。3种侧部开口高度下,棚洞尽头的顶棚下方温度差异逐渐减小。烟气进入棚洞后的5~20 m范围内,顶棚下方温度迅速下降,之后降幅趋缓。其原因在于:烟气流入棚洞后,在纵向风作用下,大量烟气从第一个侧部开口排出,后续开口仅排出少量烟气;在热浮力作用下,大量烟气仍聚集于顶棚下方。因此,对棚洞采用侧部开口,尤其是当开口位置较低时,其排烟效果较差。

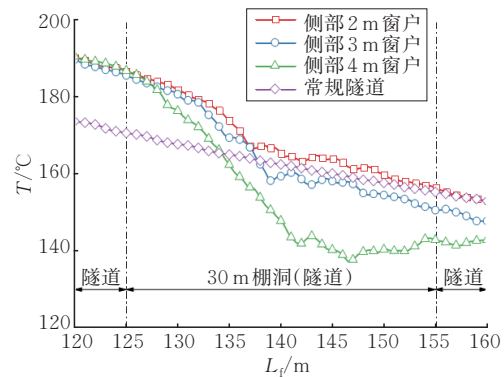
由图7(b)可知,对棚洞顶部进行开口后,顶部开口位置附近的顶棚下方温度发生骤降。开口率越大,温度降低幅度也越大。在棚洞后半段的开口位置附近,顶棚下方温度的降幅逐渐减小,且随着棚洞长度的增加,后半段的温度衰减速率与常规隧道逐渐接近。在开口方式a下,当开口率为5.5%和11.0%时,棚洞入口与出口处的顶棚温度温差较小,与较大开口率的顶开棚洞相比,排热效果不够明显。而当开口率 $\geq 16.5\%$ 时,棚洞出入口附近的顶棚下方温度差异显著,棚洞出口处的顶棚下方温度均已降至较低水平。

2.2 棚洞的排热效率

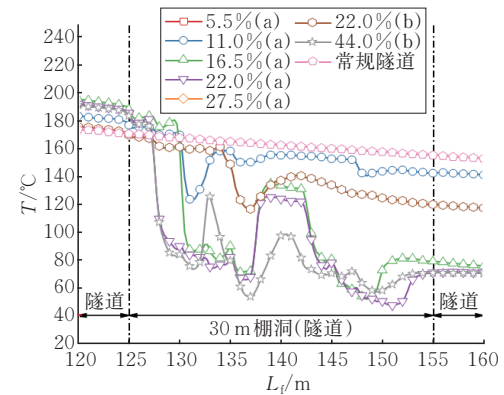
由于棚洞开口不同于竖井或机械排烟口,不具备明确的排烟速率等参数,因此本节参考机械排烟中排热效率的定义,通过计算棚洞出入口截面的热量获得排热效率,并将其作为衡量不同棚洞结构排热能力的标准。首先,需要分析各棚洞结构下隧道出入口处的温差情况,温差计算公式见式(3)。

$$\Delta T = T_{\text{up}} - T_{\text{down}} \quad (3)$$

式中: ΔT 为棚洞出入口处的温差,K; T_{up} 为上游隧道出口处的顶棚温度,K; T_{down} 为下游隧道入口处的顶棚温度,K。



(a) 30 m 侧开棚洞结构顶棚下方纵向温度分布



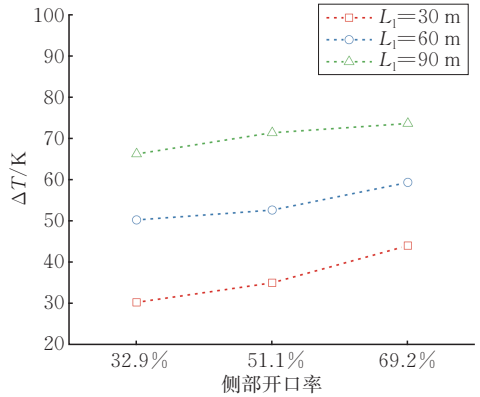
(b) 30 m 顶开棚洞结构顶棚下方纵向温度分布

图7 棚洞结构下温度衰减图

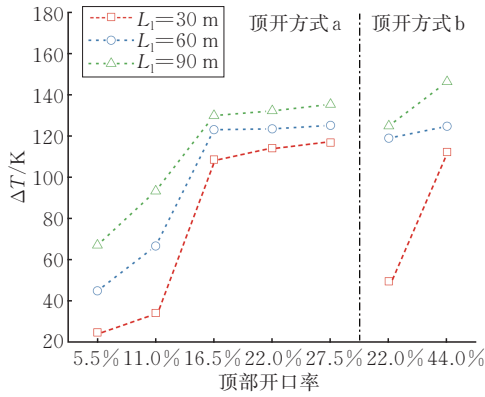
Fig. 7 Temperature decay diagram under shed tunnel structure

图8(a)展示了不同棚洞长度下侧开棚洞进出口处的顶棚下方温差情况, ΔT 表示棚洞出入口处的温差, L_i 表示棚洞长度。随着棚洞长度的增大以及侧部开口面积的增加,棚洞进出口位置的温差均不断增大。相比之下,棚洞长度的变化对进出口温差的影响更为显著,而侧部开口面积对温差的影响较小;并且随着棚洞长度的增加,不同侧部开口面积对进出口温差的影响逐渐减弱。

图8(b)展示了不同棚洞长度下顶开棚洞进出口温差。在顶部开口方式a下,随着开口率的增大,棚洞进出口温差增大。当开口率为16.5%~22.0%时,各棚洞长度下的3种开口率所对应的进出口温差相近;而当开口率为5.5%和11.0%时,温差较小,说明开口率较小时,顶棚下方的热烟气难以有效排出。在顶部开口方式b下,随着开口率的增大,棚洞进出口温差增大。当棚洞长度为30 m、开口率为22.0%时,温差较小,且与相同开口率(22.0%)下开口方式a的棚洞相比差异较大,表明在棚洞长度较短的情况下,开口方式a对顶棚下方区域的排热效果更优。



(a)不同长度侧开棚洞进出口位置顶棚下方温差



(b)不同长度顶开棚洞进出口位置顶棚下方温差

图 8 棚洞结构进出口温差

Fig. 8 Temperature difference between inlet and outlet in shed tunnel structure

火灾发生后,常采用竖井排烟、机械排烟等方式排出热烟气。排烟效率可表征流经排烟口前后烟气的变化情况,根据不同排烟方式,其计算方法也有所不同。本文并未采用传统意义上的排烟设施,而是利用棚洞自身结构排出热烟气与热量,因此将烟气进入棚洞与离开棚洞时的热量比值定义为排热效率,具体计算公式见式(4)^[17]。

$$E = 1 - \frac{Q_{\text{down}}}{Q_{\text{up}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: E 为排热效率; Q_{down} 为下游隧道入口处的热量, J/s ; Q_{up} 为上游隧道出口处的热量, J/s 。

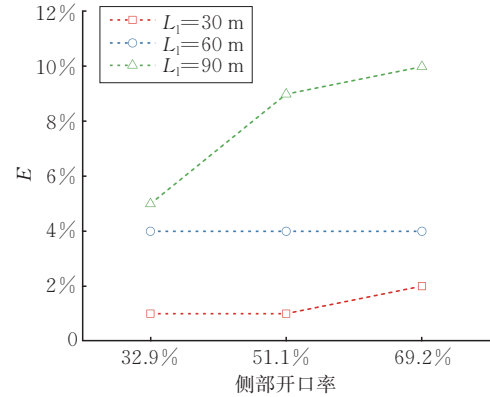
Q_{down} 与 Q_{up} 的计算公式见式(5)和式(6)。

$$Q_{\text{down}} = c_p m_{\text{down}} \Delta T_{\text{down}} = c_p \rho_{\text{down}} u_{\text{down}} A \Delta T_{\text{down}} \quad (5)$$

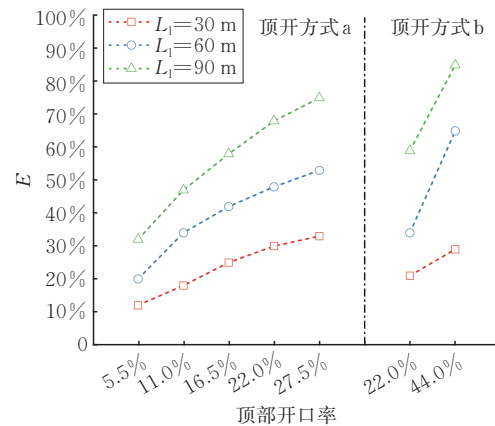
$$Q_{\text{up}} = c_p m_{\text{up}} \Delta T_{\text{up}} = c_p \rho_{\text{up}} u_{\text{up}} A \Delta T_{\text{up}} \quad (6)$$

式中: c_p 为烟气的定压比热容, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$; ρ_{down} 、 ρ_{up} 分别为下游入口处、上游出口处烟气的密度, kg/m^3 ; u_{down} 、 u_{up} 分别为下游入口处、上游出口处烟气的平均流速, m/s ; A 为隧道出入口的截面积, m^2 ; ΔT_{down} 、 ΔT_{up} 分别为下游隧道入口处、上游隧道出口处烟气的平均温度与环境温度的差值, K ; m_{down} 、 m_{up} 分别为下游入口处、上游出口处烟气的平均质量流量, kg/s 。

利用设置在上下游隧道出入口处的流速与温度切片,可获得上下游隧道出入口处的烟气平均流速与平均温度,进而计算棚洞的排热效率。由图9(a)可知,在棚洞长度较短时,侧开棚洞的排热效果较差,排热效率接近于0,表明此时棚洞对隧道群通风排烟几乎没有影响。随着棚洞长度的增加,侧开棚洞的排热效率略有提高;在90 m棚洞长度下,侧部开口高度为4 m的棚洞排热效率仅达到约10%,整体排热效果仍不理想。由图9(b)可知,随着开口率与棚洞长度的不断增加,顶开棚洞的排热效率持续升高。在3种棚洞长度下,排热效率随开口率增加的幅度基本相似,表明顶部开口数量越多,顶开棚洞的排热效果越好。在顶部开口方式b下,排热效率随开口率的变化规律与开口方式a基本相同。在相同开口率(22%)下,开口方式a的排热效果更优,增加单个开口的截面积对棚洞排热能力的提升较小。当开口率为44%时,顶开棚洞在90 m棚洞长度下的排热效率达到85%,表明上游隧道流出的烟气大部分可通过棚洞顶部开口排出,仅少部分进入下游隧道。



(a)3种棚洞长度下不同侧开棚洞的排热率



(b)3种棚洞长度下不同顶开棚洞的排热率

图 9 不同棚洞结构的排热率

Fig. 9 Heat dissipation rate of different shed tunnel structures

根据图9中不同棚洞结构下的排热效率,对棚洞长度 L_1 分别进行无量纲化处理,发现侧开与顶开棚洞的排热效率 E 与棚洞长度 L_1 之间存在线性关系,且斜率 k 随棚洞的开口位置及开口率的不同而变化,如式(7)所示。

$$E = k \frac{L_1}{L_{\max}} \quad (7)$$

式中: E 为排热效率; k 随着棚洞类型与开口率而发生变化; L_1 为棚洞长度, m ; $L_{\max}$ 为最大棚洞长度,取90 m。

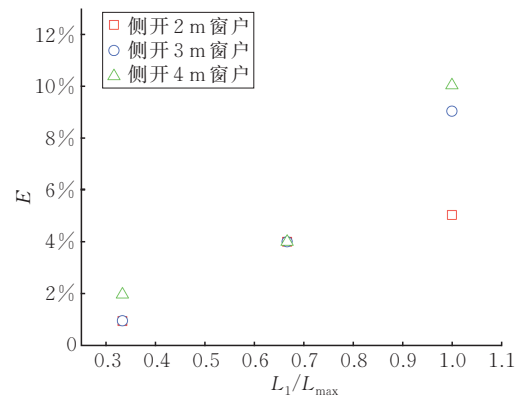
由图10(a)可知,侧开棚洞的排热效果较差,其排热效率与开口率及棚洞长度之间存在一定的线性关系。排热效率随棚洞长度的增加而提高,但在较大开口率下,侧开棚洞的排热能力仍较弱。图10(b)展示了3种棚洞长度下7种顶开棚洞的排热效率与无量纲化棚洞长度的分布情况。对数据点进行线性拟合后发现,顶开棚洞的无量纲排热效率与无量纲棚洞长度之间的线性拟合效果较好。在棚洞长度相同时,随着开口率的增大,斜率 k 值逐渐减小;在开口率相同时,随着棚洞长度的增大,所有顶开棚洞的排烟能力均有不同程度的增强。

上述研究表明,无论是侧开棚洞还是顶开棚洞,其排热效率均受开口率、棚洞长度及隧道高度的共同影响,且无量纲排热效率与无量纲棚洞长度之间存在线性关系,该线性关系在顶开棚洞中更为显著。因此,在设计棚洞结构时,应根据棚洞长度合理布置开口,以有效调控棚洞的排热能力。

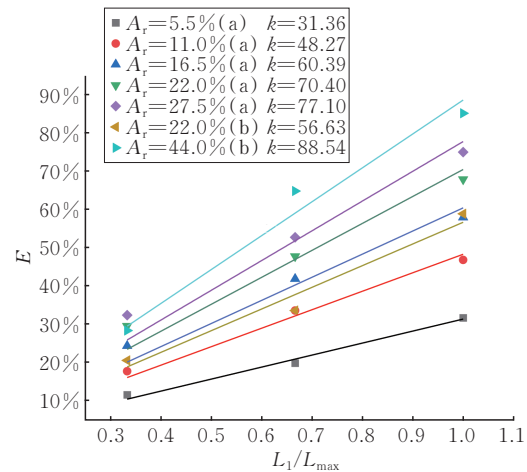
2.3 侧开棚洞的烟气层厚度

当烟气层界面高度下降至人体高度附近时,将对隧道内的人员生命安全构成严重威胁。由于侧开棚洞的排热效率较低,有必要对其烟气层厚度进行分析。目前,隧道内烟气层高度的计算方法较多,包括视觉观察法、 N 百分比法、积分比法、浮力频率法及能见度突变法等。其中, N 百分比法基于竖向温度分布确定烟气层界面高度,但受 N 取值影响较大;积分比法利用已知函数(通常为玻尔兹曼函数)在有限区间内的均匀性,从数学角度将该区间划分为2个函数值变化缓慢的子区间,通过处理试验中采集的竖向温度数据,计算得到分界面,进而得出烟气层高度;浮力频率法则充分利用热烟气的密度变化特性,热烟气在热浮力作用下上升,而冷空气在隧道下部向火源方向流动,从而形成密度分层,可根据密度变化情况判断烟气层的分层状况^[18]。

图11分别采用积分比法和浮力频率法计算了棚洞内部部分位置的烟气层厚度, L_s 代表烟气层厚度, L_i 表示距离火源位置。



(a)不同棚洞长度下侧开棚洞的排热率



(b)不同棚洞长度下顶开棚洞的排热率

图10 无量纲化后的棚洞排热效率

Fig. 10 Non-dimensional heat dissipation efficiency of shed tunnels

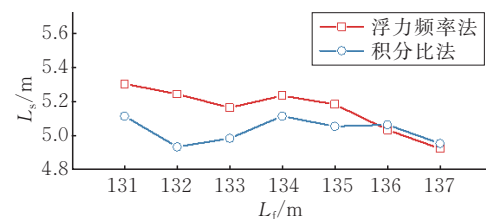


图11 2种计算烟气层厚度方法的差异情况

Fig. 11 Comparison of two methods for calculating smoke layer thickness

由图11可知,浮力频率法与积分比法计算得到的烟气层厚度存在一定差异,其中浮力频率法的计算结果偏大。然而,2种方法所获得的烟气层厚度随距火源距离增加的变化趋势基本一致。本文主要采用积分比法计算隧道群内沿程的烟气层厚度分布。图12展示了30 m侧开棚洞隧道群在棚洞区域附近的烟气层厚度情况。结果表明,热烟气进入棚洞后,3种不同开口大小的侧开棚洞的烟气层厚度均显著减小。在开口较小的侧开棚洞中,开口排烟能力有限,热烟气在流入棚洞并向下游隧道运动的过程中,烟气层厚度先减小至最小值,随后有所升高。其原

因在于,纵向风作用下,大量烟气持续从上游隧道排出,而棚洞的排烟能力有限,导致棚洞后半段烟气层厚度增大。烟气层厚度的最小值出现在棚洞中段,且开口越大,该最小值对应的距火源位置越远。最终,下游隧道入口附近的烟气层厚度小于上游隧道出口处的厚度。

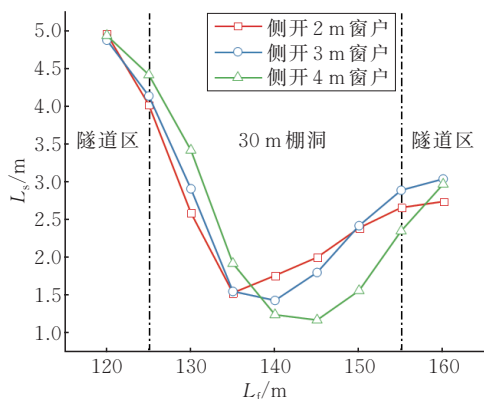


图12 30 m侧开棚洞隧道群沿程烟气层厚度分布

Fig. 12 Longitudinal distribution of smoke layer thickness in the 30-meter side-open shed tunnel group

根据Chen T等^[19]、Yi L等^[20]的研究,外界峡谷风会对隧道内流场产生一定影响。由于棚洞段存在开口区域,外界环境风将对棚洞段内的流场环境造成更大的影响。本文重点研究顶开与侧开棚洞结构对隧道群火灾烟气蔓延特性及排热效率的影响,后续将开展环境风作用下隧-棚-隧结构火灾烟气蔓延特性与排热效率的相关研究。

3 结 论

本研究聚焦于隧-棚-隧结构下隧道火灾的烟气蔓延特性以及棚洞结构对火灾排热的影响,深入分析了不同开口方式与开口率下棚洞结构对烟气层厚度、温度衰减及排热效率的影响,结论如下。

1)棚洞长度、开口率及开口位置均对排烟能力产生不同程度的影响。对于侧开棚洞,仅前端可排出侧部开口高度以下的烟气,整体排烟能力较弱,大量热烟气仍滞留于顶棚区域,造成顶棚下方烟气浓度较高。而顶部开口则表现出更优的排烟能力,不仅能更充分地稀释顶棚附近的烟气,还能部分排出流经顶部开口的烟气。

2)在不同棚洞长度下,侧开棚洞的排热效率最高仅为10%,而顶开棚洞的排热效率最高可达85%。顶开棚洞的无量纲排热效率与无量纲棚洞长度之间存在线性函数关系,其斜率随开口率的增大而逐渐减小。

3)对于侧开棚洞,设计时应尽可能增大侧部开口面积。对于顶部开口棚洞,在开口分布均匀的前提下,增大开口率与开口截面积可有效提升排烟与排热

能力,更有利于隧道群火灾的通风排烟。

参考文献:

- [1] 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 L H. Studies on thermal physics of smoke movement in tunnel fires[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [2] 王彦富, 蒋军成, 龚延风, 等. 全尺寸隧道火灾实验研究与烟气逆流距离的理论预测[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(8): 37-41.
Wang Y F, Jiang J C, Gong Y F, et al. Test research of full-scale tunnel fire and theoretical prediction on the distance of smoke regressing[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(8): 37-41.
- [3] Yan Z G, Guo Q H, Zhu H H. Full-scale experiments on fire characteristics of road tunnel at high altitude[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 134-146.
- [4] 陈龙飞. 纵向通风与顶棚集中排烟作用下隧道火灾顶棚射流行为特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
Chen L F. Studies on tunnel fire ceiling jet characteristic with longitudinal ventilation and ceiling smoke extraction[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [5] 易欣, 范晶, 马砺, 等. 纵向通风对地铁区间隧道火灾温度特性影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3163-3170.
Yi X, Fan J, Ma L, et al. Effect of longitudinal ventilation on temperature characteristics in metro tunnel under fire[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 3163-3170.
- [6] Hu L H, Fong N K, Yang L Z, et al. Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured data[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1/2): 293-298.
- [7] Zhao Z X, Tang F, Wang Q, et al. Experimental study on the characteristics of fire smoke longitudinal crossflow in adjacent tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 114: 103992.
- [8] 赵尊信, 唐飞, 朱元涛. 毗邻隧道群火灾烟气污染物窜流特征研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(11): 3009-3015.
Zhao Z X, Tang F, Zhu Y T. Study on the characteristics of smoke crossflow of the tunnel group in tunnel fire[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(11): 3009-3015.
- [9] 田伟, 郑晓卿, 刘佳, 等. 特长隧道群污染物窜流规律及新型通风方式研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 629-634.
Tian W, Zheng X Q, Liu J, et al. Study on the rule of pollutant dispersion and new ventilation mode in super-long tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 629-634.
- [10] 徐湃, 蒋树屏, 张连贺, 等. 短距离连续公路隧道窜流污染研究[J]. 公路, 2014, 59(1): 223-227.
Xu P, Jiang S P, Zhang L H, et al. Research on crossflow pollution in short distance and continuous road tunnels[J]. Highway, 2014, 59(1): 223-227.

- [11] 杨玉容. 公路隧道洞口废气扩散形态与窜流影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
Yang Y R. Study on diffusing shape and channeling problem of exhaust gas for highway tunnel portal[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [12] 邱浩. 连续隧道火灾烟气扩散特性及控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
Qiu H. Study on smoke diffusion characteristics and control methods in continuous tunnel fires[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [13] 曹峰, 王海林, 刘羿辰, 等. 特长公路隧道群火灾烟气特性及通风方式研究[J]. 公路交通技术, 2024, 40(4): 84-93, 102.
Cao F, Wang H L, Liu Y C, et al. Study on fire smoke characteristics and ventilation mode of extra-long highway tunnel group [J]. Technology of Highway and Transport, 2024, 40(4): 84-93, 102.
- [14] 刘健, 刘凯凯, 刘俊, 等. 某高速公路隧道遮光棚对气流组织的影响分析[J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41(4): 85-88.
Liu J, Liu K K, Liu J, et al. Influence analysis on the shading shed of a highway tunnel[J]. Building Energy & Environment, 2022, 41(4): 85-88.
- [15] 白赞, 张先富, 严晓楠, 等. 高海拔双向行车公路隧道火灾控烟风速研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 269-276.
Bai Y, Zhang X F, Yan X N, et al. Study on controlling velocity under fire in two-direction road tunnel with high altitude[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1): 269-276.
- [16] Li Y Z, Lei B, Ingason H. Study of critical velocity and backlay-
ering length in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Fire Safety
Journal, 2010, 45(6/7/8): 361-370.
- [17] He L, Xu Z S, Chen H G, et al. Analysis of entrainment phe-
nomenon near mechanical exhaust vent and a prediction model for
smoke temperature in tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground
Space Technology, 2018, 80: 143-150.
- [18] 杨小龙, 张玉春, 高云骥, 等. 公路隧道火灾烟气层高度判定方
法[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4): 147-153.
Yang X L, Zhang Y C, Gao Y J, et al. Determination method of
smoke layer height in road tunnel fire[J]. China Safety Science
Journal, 2020, 30(4): 147-153.
- [19] Chen T, Li Y Z, Luan D A, et al. Study of flow characteristics
in tunnels induced by canyon wind[J]. Journal of Wind Engineer-
ing and Industrial Aerodynamics, 2020, 202: 104236.
- [20] Yi L, Luan D A, Yang L L, et al. Flow field and fire characteris-
tics inside a tunnel under the influence of canyon cross wind[J].
Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 105:
103575.

(责任编辑:李艳娜)