

跨坐式单轨大坡度隧道大功率火灾排烟方案研究

唐海峰

(中铁四院集团西南勘察设计有限公司, 650220, 昆明)

摘要 [目的] 跨坐式单轨隧道因火灾功率增大, 坡度增陡, 导致火灾临界风速增大, 排烟设备配置增加, 需对跨坐式单轨大坡度隧道和大功率火灾下的排烟方案进行研究。

[方法] 建立 1:20 缩尺模型试验平台, 计算不同火源热释放率和不同坡度下的隧道临界风速。采用 SES (地铁环境模拟) 软件建立跨坐式单轨隧道火灾一维数值计算模型, 计算不同坡度隧道所需排烟设备配置。[结果及结论] 根据模型试验得到跨坐式单轨隧道在 20 MW 大功率火灾下的临界风速值: 坡度为 -6%、-3%、0%、3%、6% 时, 对应火灾临界风速分别为 3.55 m/s、3.33 m/s、2.91 m/s、2.57 m/s、2.46 m/s; 车站隧道风机配置风量与坡度呈线性相关: 坡度为 0% 时, 单台隧道风机风量约 75 m³/s; 坡度为 -6% 时, 单台隧道风机风量约 110 m³/s; 坡度为 6% 时, 单台隧道风机风量约 46 m³/s。针对洞口隧道, 洞口处射流风机配置可通过车站隧道风机结合隧道坡度反算得到; 针对大坡度隧道、大功率火灾, 向上坡和向下坡排烟时对应的设备配置差异较大, 提出优先选用向上坡排烟的方案, 以减少设备投资。

关键词 跨坐式单轨; 大坡度隧道; 大功率火灾排烟

中图分类号 U231.96; U232

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.01.056

of smoke exhausting equipment required by tunnels with different slopes. [Result & Conclusion] The critical wind speed values in the straddle monorail tunnel under a high-power fire of 20 MW is obtained through a model test. When the slopes are -6%, -3%, 0%, 3%, and 6%, corresponding critical wind speeds of the fire are 3.55 m/s, 3.33 m/s, 2.91 m/s, 2.57 m/s, and 2.46 m/s respectively. The configured air volume of the station tunnel fans is linearly related to the slope: when the slope is 0%, -6%, 6%, the corresponding air volume of a single tunnel fan is approximately 75 m³/s, 110 m³/s, 46 m³/s respectively. Regarding the entrance tunnel, the configuration of the jet fans at the portal can be calculated inversely with the station tunnel fans and the tunnel slope. For large slope tunnels in high-power fire conditions, the equipment configuration with uphill smoke exhausting differs significantly from that with downhill. Therefore, the uphill smoke exhausting scheme is proposed with priority to reduce equipment investment.

Key words straddle monorail tunnel; large-slope tunnel; high-power fire smoke exhausting

Research on High Power Fire Smoke Exhausting Scheme for Straddle Monorail Tunnel with Large Slope

TANG Haifeng

(China Railway Siyuan Group Southwest Survey and Design Co., Ltd., 650220, Kunming, China)

Abstract [Objective] The increase of fire power and slope steepness in straddle monorail tunnel will lead to the rise of critical wind speed for fire and the addition of smoke exhausting equipment configuration. Therefore, it is necessary to conduct research on the smoke exhausting scheme for the straddle monorail tunnel in the condition of large slope and high power fire. [Method] A 1:20 scale model test platform is established to calculate the critical wind speed in tunnels under varying heat release rates of fire sources and different slopes. The SES (subway environment simulation) software is used to establish a numerical calculation model with one-dimension for the straddle monorail tunnel fire to calculate the configuration

跨坐式单轨列车车轮采用橡胶轮胎, 橡胶轮胎燃烧具有高热值、发烟量大等特点^[1]。跨坐式单轨列车火灾热释放率可达 20 MW, 约为地铁 B 型车 (5 MW) 的 4 倍, A 型车 (7 MW) 的 3 倍。跨坐式单轨列车爬坡能力强, 隧道坡度可达 6.0%, 远高于地铁隧道的 3.5%。

地铁隧道火灾主要采用纵向排烟形式, 烟气通过下风侧排出, 人员沿着上风向进行疏散。文献[2-3]通过缩尺试验, 得到半圆形和方形隧道临界风速与隧道坡度基本呈线性关系。

现有地铁隧道火灾研究, 主要针对常规制式地铁。跨坐式单轨隧道火灾功率增大 (20 MW), 坡度增陡 (6%), 导致火灾临界风速增大, 排烟设备配置增加。本文采用模型试验与 SES (地铁环境模拟) 软件, 研究跨坐式单轨大坡度隧道大功率火灾的排烟设备配置及排烟方案。

1 跨坐式单轨隧道火灾模型的建立

1.1 模型试验

根据相似准则,建立 1:20 缩尺模型试验平台(见图 1)。该模型试验平台简述如下:

1) 模型试验隧道长 20 m,其截面上部为直径 0.32 m 的半圆,下部为宽 0.32 m、高 0.13 m 的长方形。

2) 将丙烷气罐连接至燃烧器,丙烷流量 1.98

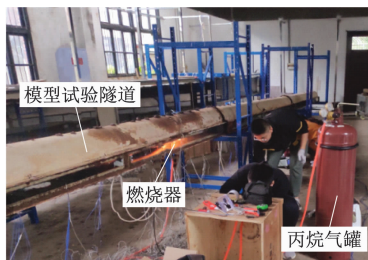
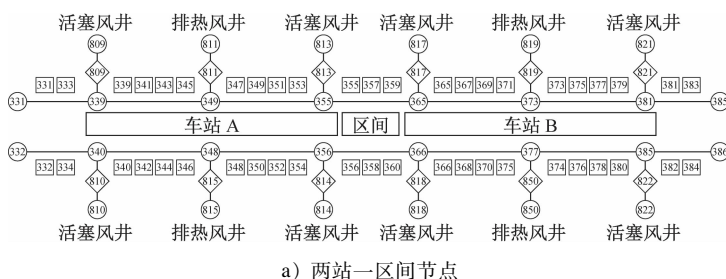
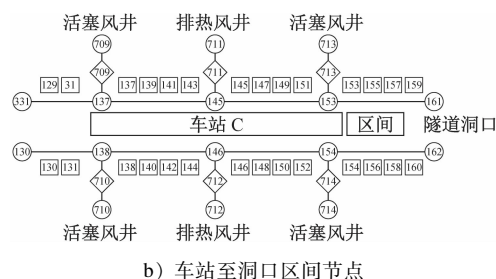


图 1 1:20 缩尺模型试验平台

Fig. 1 1:20 scale model test platform



a) 两站一区间节点



b) 车站至洞口区间节点

注:图中数字代表节点编号。

图 2 跨坐式单轨隧道火灾一维数值计算节点

Fig. 2 One dimensional numerical calculation nodes of straddle monorail tunnel fire

2 隧道临界风速分析

表 1 为模型试验所得的不同火源热释放率和不同坡度下的隧道临界风速。定义隧道坡度为正值时为向上坡排烟。由表 1 可见:

1) 隧道坡度为 0% 时,热释放率为 11.2 kW 的火源相比 2.8 kW 的火源,临界风速增大 0.78 m/s。

2) 隧道坡度为 -6% 且热释放率为 11.2 kW,相比隧道坡度为 -3% 且热释放率为 2.8 kW,临界风速增大 1.15 m/s。可见,跨坐式单轨隧道火灾临界风速更大,因此将常规地铁隧道火灾临界风速直接套用在跨坐式单轨上是不合理的。

3) 热释放率为 11.2 kW,隧道坡度由 6% 变化至 -6%,临界风速增大 1.09 m/s。热释放率为 2.8

L/min、7.90 L/min 分别对应模型试验中的热释放率 2.8 kW、11.2 kW,对应全尺寸隧道中的热释放率 5 MW、20 MW。

3) 热释放率为 11.2 kW 的火源,隧道坡度分别为 6%、3%、0%、-3%、-6%;热释放率为 2.8 kW 的火源,隧道坡度分别为 3%、0%、-3%。

4) 采用热电偶进行隧道温度数据采集。

5) 隧道纵向风速由变频风机提供。火源两侧 2.5 m 处各设置 1 个风速测点,采用风速仪进行测试。

1.2 隧道火灾一维数值计算模型

采用 SES 软件建立跨坐式单轨隧道火灾一维数值计算模型。隧道长度为 400 m,坡度为 0~6%,隧道截面积为 23.5 m²。列车长度为 74.2 m,火源热释放率为 20 MW。车站两端活塞风井内各设 2 台隧道风机,上、下行隧道洞口内各设 4 台射流风机。建立两站一区间与车站至洞口区间节点图,见图 2。

kW,隧道坡度由 3% 变化至 -3%,临界风速仅增大 0.28 m/s。可见,跨坐式单轨隧道火灾临界风速受坡度影响更为明显。

表 1 不同火源热释放率和不同坡度下的隧道临界风速

Tab. 1 Critical wind speeds of the tunnel with different heat release rates of fire sources and different slopes

坡度/%	不同火源热释放率下的隧道临界风速/(m/s)	
	11.2 kW	2.8 kW
6	2.46	
3	2.57	2.12
0	2.91	2.13
-3	3.33	2.40
-6	3.55	

3 排烟设备配置及排烟方案

3.1 排烟设备配置计算

基于 SES 软件建立一维数值计算模型,模拟时开启相应车站隧道风机及洞口射流风机,在隧道内形成纵向气流。当气流速度达到表 1 的临界风速值时,得到的风机最小风量即为所求设备配置。

3.1.1 两站一区间

火灾发生时,开启着火区间一端车站 2 台隧道风机送风,同时开启着火区间另一端车站 2 台隧道风机排风。通过计算得到单台隧道风机风量与坡度的关系,见表 2。排烟方向为 A 站至 B 站,其中坡度为正值表示 A 站至 B 站为上坡。坡度为 0% 时,车站需配置的单台隧道风机风量约为 $75 \text{ m}^3/\text{s}$;坡度为 -6%,即向下坡排烟时,单台风机风量约 $110 \text{ m}^3/\text{s}$;坡度为 6% 时,单台风机风量约 $46 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可见,车站隧道风机配置风量与坡度呈线性相关。

表 2 两站一区间隧道风机风量

Tab.2 Air volume of the fans for the section tunnel between two stations

坡度/%	单台隧道风机风量/ (m^3/s)
-6	110
-3	95
0	75
3	62
6	46

3.1.2 车站至洞口区间

火灾时开启着火区间一端车站 2 台隧道风机送风/排风,同时开启区间另一端隧道洞口处的 4 台射流风机排风/送风。隧道洞口处共设 4 台射流风机,其中 2 台为 1 组,2 组间距为 120 m。选用两种型号射流风机进行对比计算: $\phi 900 \text{ mm}$ 风机单台风量为 $19 \text{ m}^3/\text{s}$, $\phi 1\,000 \text{ mm}$ 风机单台风量为 $26 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算得到 C 站需配置的单台隧道风机风量与坡度的关系,见表 3。其中坡度为正值表示 C 站至洞口为上坡。由表 3 可见:车站至洞口区间类似于两站一区间,当向下坡排烟变化至向上坡排烟时,车站隧道风机所需风量逐渐减小。

另外,随着洞口射流风机风量增大,车站隧道风机所需风量减小,说明车站隧道风机与洞口射流风机风量呈此消彼长关系。

综上,两站一区间仅涉及车站隧道风机,因此

可直接通过表 2 确定车站隧道风机选型。而对于车站至洞口区间,涉及车站隧道风机与洞口射流风机,建议先根据两站一区间确定车站隧道风机选型,再通过表 3,结合坡度反算洞口射流风机选型。

表 3 车站至洞口区间隧道风机风量

Tab.3 Air volume of the fans in the tunnel section between station and tunnel portal

射流风机型号	坡度/%	单台隧道风机风量/ (m^3/s)	
		C 站→洞口	洞口→C 站
$\phi 900 \text{ mm}$, 风量 $19 \text{ m}^3/\text{s}$	-6	122	0
	-3	107	30
	0	80	69
	3	40	87
	6	0	107
$\phi 1\,000 \text{ mm}$, 风量 $26 \text{ m}^3/\text{s}$	-6	105	0
	-3	90	15
	0	68	55
	3	30	82
	6	0	97

3.2 排烟方案研究

3.2.1 根据着火位置排烟

根据常规地铁隧道火灾纵向排烟原则,即排烟方向一般取决于列车着火位置。车头着火时,排烟方向从车尾指向车头;车尾着火时,排烟方向从车头指向车尾。

由于列车着火位置的不确定性,有坡隧道内既存在向上坡排烟,也存在向下坡排烟的情况。如表 2 和表 3 所示,向下坡排烟时需配置的风机风量远大于向上坡排烟,因此风机选型始终取决于向下坡排烟。

3.2.2 优先向上坡排烟

对于大坡度隧道,如表 2 和表 3 所示,向上坡排烟时车站需配置的隧道风机风量远小于向下坡排烟,因此创新性提出优先向上坡排烟的方案。

以两站一区间为例,根据着火位置排烟与优先向上坡排烟两种方案下,车站隧道风机配置风量对比如图 3 所示。根据着火位置排烟方案下,车站隧道风机风量与坡度的绝对值呈线性正相关。而优先向上坡排烟方案下,车站隧道风机风量与坡度的绝对值呈线性负相关,特别是坡度为 6% 时,单台隧道风机风量仅需 $46 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(下转第 308 页)

- ban Rapid Rail Transit, 2019, 32(4): 68.
- [5] SU S, WANG X, CAO Y, et al. An energy-efficient train operation approach by integrating the metro timetabling and eco-driving [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4252.
- [6] 付义龙, 荆敏, 沈景炎. 轨道交通列车节能运行组织措施探讨[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 36.
- FU Yilong, JING Min, SHEN Jingyan. Energy-saving operation and organization measures of rail transit trains[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(1): 36.
- [7] 高豪, 张亚东, 郭进, 等. 基于动态规划的列车节能操纵优化方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 76.
- GAO Hao, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Optimization of energy-efficient train operation based on dynamic programming approach[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 76.
- [8] 汤旻安, 王茜茜. 基于黄金比例遗传算法的动车组列车节能优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 16.

- TANG Min'an, WANG Qianqian. Research on energy-saving optimization of EMU trains based on golden ratio genetic algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 16.
- [9] 张惠茹, 贾利民, 王莉, 等. 面向列车节能控制的时刻表优化[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 8.
- ZHANG Huiru, JIA Limin, WANG Li, et al. Study of timetable optimization based on train energy saving control[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 8.
- [10] HOWLETT P. The optimal control of a train[J]. Annals of Operations Research, 2000, 98(1/2/3/4): 65.

· 收稿日期:2022-09-13 修回日期:2022-11-05 出版日期:2025-01-10
Received:2022-09-13 Revised:2022-11-05 Published:2025-01-10
· 通信作者:潘洋,工程师,798125501@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 303 页)

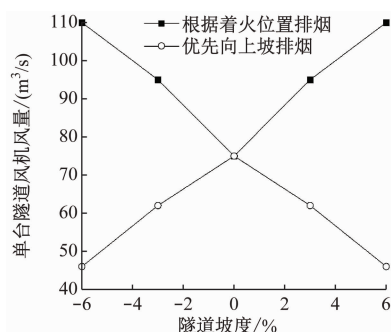


图3 两站一区间下隧道风机配置风量对比

Fig.3 Comparison of the fan configured air volumes in the tunnel section between two stations

4 结论

1) 隧道坡度为6%、热释放率为20 MW的火源相比坡度为3%、热释放率为5 MW的火源,临界风速从2.4 m/s增大至3.55 m/s,说明跨坐式单轨隧道火灾临界风速远高于常规地铁。

2) 火源热释放率为20 MW,坡度从6%变化至-6%,临界风速从2.46 m/s增大至3.55 m/s,说明跨坐式单轨隧道火灾临界风速受坡度影响尤为明显,因此设备配置计算应重点考虑坡度影响。

3) 对于两站一区间隧道,车站隧道风机配置风量与坡度呈线性相关。坡度为0%时,隧道风机单台风量约75 m³/s;坡度为-6%,隧道风机单台风量约110 m³/s;坡度为6%时,隧道风机单台风量约

46 m³/s。对于车站至洞口区间隧道,洞口射流风机可通过车站隧道风机结合坡度反算得到。

4) 常规地铁隧道火灾根据着火位置排烟,车站隧道风机风量与坡度的绝对值呈线性正相关。针对跨坐式单轨隧道火灾,创新性提出优先向上坡排烟的方案,此时隧道风机风量与坡度的绝对值呈线性负相关,特别是对于大坡度隧道,极大地减少了设备投资。

参考文献

- [1] 张铁英. 单轨列车的区间火灾救援与消防对策[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(10): 25.
- ZHANG Tiejing. Rescue and protection solutions for monorail line section fire[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(10): 25.
- [2] YI L, XU Q, XU Z, et al. An experimental study on critical velocity in sloping tunnel with longitudinal ventilation under fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43: 198.
- [3] LI J, LI Y F, CHENG C H, et al. A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 262.

· 收稿日期:2022-09-19 修回日期:2022-11-01 出版日期:2025-01-10
Received:2022-09-19 Revised:2022-11-01 Published:2025-01-10
· 通信作者:唐海峰,工程师,tahfeng@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license