

列车运行参数和迂回隧道参数对地铁车站轨行区迂回隧道通风效果的影响规律

高伟¹ 王方敏¹ 田婷婷² 余涛²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 311122, 杭州; 2. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都)

摘要 [目的] 受空间限制, 部分地铁车站活塞风井设置在车站轨行区内, 并采用迂回隧道将风井与轨行区外侧正线隧道相连。有必要研究列车运行参数和迂回隧道参数对迂回隧道通风效果的影响规律。[方法] 建立了包含迂回隧道的某线路一维隧道通风网络模型, 模拟分析了不同行车对数、行车速度和迂回隧道长度下迂回隧道的通风效果。[结果及结论] 当有迂回隧道时, 行车对数和列车速度的增加均能有效提高隧道活塞风量。迂回隧道位于进站端时, 隧道活塞风量最大变化值随行车对数和列车速度分别增加 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$; 迂回隧道位于出站端时, 隧道活塞风量最大变化值随行车对数和列车速度分别增加 $11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $16.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 说明迂回隧道位于出站端时隧道活塞风量受影响更大。迂回隧道位于出站端时, 隧道空气温度下降更显著, 随行车对数和列车速度增加, 隧道空气最高温降值分别增加 1.6°C 和 3.5°C 。迂回隧道长度的变化对隧道风量和空气温度变化影响不大, 迂回隧道长度为 18 m 时隧道热环境最优。

关键词 地铁车站; 隧道通风; 迂回隧道; 通风效果

中图分类号 U231.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.020

Influence Laws of Train Operation Parameters and Bypass Tunnel Parameters on Bypass Tunnel Ventilation Effect in Subway Station Track Zone

GAO Wei¹, WANG Fangmin¹, TIAN Tingting², YU Tao²

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., 311122, Hangzhou, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Due to space constraints, some subway station piston ventilation shafts are set up in the station track zones, and a bypass tunnel is used for connecting the ventilation shaft to the main line tunnel outside the track zone. It is necessary to study the influence laws of train operation parameters and bypass tunnel parameters on the ventilation effect

of the bypass tunnel. [Method] A one-dimensional tunnel ventilation network model of a certain line with bypass tunnel is established, and the ventilation effect of the bypass tunnel under different train pair numbers, train velocities and bypass tunnel lengths is simulated and analyzed. [Result & Conclusion] When there is a bypass tunnel, the increase in train pair numbers and train speed can both effectively improve the tunnel piston air volume. When the bypass tunnel is located at the train entrance end, the maximum change value of the tunnel piston air volume increases by $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ and $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$ respectively with the increase of train pair numbers and train speed. When the bypass tunnel is located at the exit end, the maximum change value of the tunnel piston air volume increases with train pair numbers and train speed by $11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ and $16.7 \text{ m}^3/\text{s}$ respectively, indicating that tunnel piston air volume is more affected in the latter case. When the bypass tunnel is located at the exit end, the tunnel air temperature drops more significantly, and the maximum temperature drop of the tunnel air increases by 1.6°C and 3.5°C , respectively, with the increase in train pair numbers and train speed. Changes in bypass tunnel lengths have little effect on the changes in tunnel air volume and air temperature, and the tunnel thermal environment reaches best with a bypass tunnel length of 18 m .

Key words subway station; tunnel ventilation; bypass tunnel; ventilation effect

地铁隧道内列车的行驶会带动周围气流向前流动, 形成活塞风^[1]。在“双碳”目标背景下, 合理高效地利用列车产生的活塞风可以优化通风模式和隧道热环境^[2]。活塞风的大小受控于隧道参数、活塞风井、轨排系统、行车组织等因素^[3-7]。文献[8]利用 SES 软件分析相关因素对于地铁区间隧道活塞风的影响; 文献[9-10]研究了列车停车位置、轨排系统和发车间隔等因素对隧道活塞风和温度分布的影响。目前, 我国的相关研究大多针对轨行区外侧布置活塞风井的常规隧道结构。

对于部分因周围空间限制而无法将活塞风井设置在轨行区外侧的地铁车站,可将活塞风井设置在轨行区内,并在活塞风井下设置迂回隧道将风井与轨行区外正线隧道相连,如图 1 所示。迂回隧道的设置会改变隧道活塞风,最终影响隧道通风效果,且通风效果与列车运行参数和线路隧道参数紧密相关。迂回隧道为一种新型车站隧道结构,不一定完全适用传统车站隧道结构的研究结果。对此,本文基于某含迂回隧道结构的典型地铁线路(以下简称“典型线路”),采用一维数值模拟方法,研究行车对数、列车速度及迂回隧道长度等因素对迂回隧道通风效果的影响规律,以期为此类工程设计提供参考。

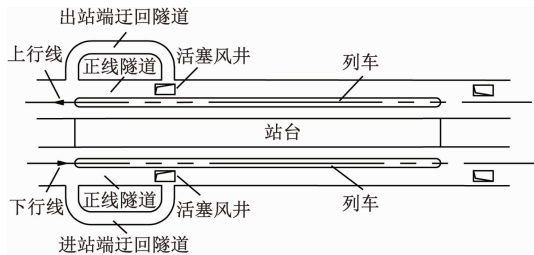


图 1 地铁车站轨行区迂回隧道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bypass tunnels in subway station track zone

1 建立计算模型

1.1 线路和迂回隧道概况

典型线路含 11 座车站(S1—S11)及 12 个区间隧道(Q1—Q12)。所有车站两端均采用双活塞风井,并在轨行区设有风量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 的轨道排热系统,且该轨道排热系统仅在运营远期最不利时开启。位于最中部的车站受空间限制采用迂回隧道结构,且上下行线迂回隧道位置不同。隧道具体参数如表 1 所示。

表 1 隧道具体参数

Tab. 1 Specific tunnel parameters

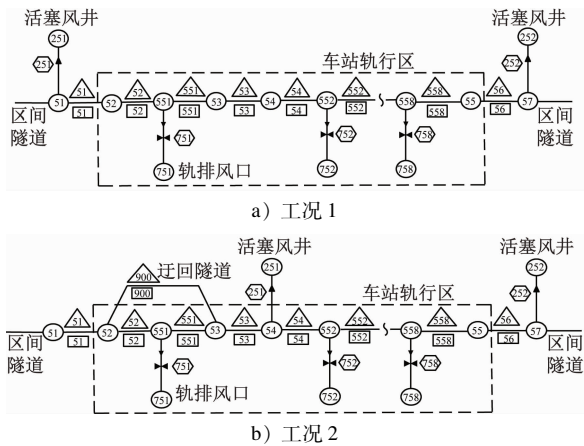
名称	长度/m	面积/ m^2
轨行区隧道	186.0	31.0
区间隧道	1 000.0	40.6
活塞风井	40.0	21.0
迂回隧道	18.1	20.3

列车采用 8 节编组地铁 A 型车。列车长 186 m,车体标准断面积为 11.4 m^2 ,列车停站时间为 30 s。

1.2 数值计算模型

本文采用一维数值模拟方法,建立了该线路 11 站 12 区间的一维通风网络模型。各车站进出站端活塞风井代号为 #1 到 #22。文献[11]已对 SES 地铁环控模拟软件模拟该类地铁线路活塞风的准确性进行了验证,结果表明一维数值模拟方法能准确模拟活塞风井设置在轨行区内并增设迂回隧道工况的空气流动。

为了研究不同行车组织和迂回隧道结构对隧道风量和温度变化的影响,本文设置两种工况进行比较分析:工况 1 为活塞风井设置在轨行区外的基准工况,工况 2 为将活塞风井设置在轨行区内并增设迂回隧道的对比工况,其中迂回隧道位于进站端时行车方向往右,位于出站端时行车方向往左。不同工况下迂回隧道所在车站的一维通风网络模型如图 2 所示。



注:⑤1—编号为 51 的隧道节点;△51—编号为 51 的隧道段;□51—编号为 51 的隧道子段;⑤251—编号为 251 的风井节点;⑤251—编号为 251 的风井段;余类同。

图 2 不同工况下迂回隧道所在车站的一维通风网络模型

Fig. 2 One-dimensional ventilation network model of the station with bypass tunnel under different working conditions

2 各因素的影响

采用单因素分析法,分别改变行车对数、列车速度及迂回隧道长度等因素的参数取值,分析增设迂回隧道时相应因素对隧道通风效果的影响。

2.1 行车对数的影响

考虑不同运营时期,选取行车对数为 15 对/h、20 对/h、25 对/h、30 对/h 的 4 种条件进行计算。

2.1.1 隧道风量

将 Δ_{Ls12} 定义为工况 2 与工况 1 的全线隧道活塞

风量之差, $\Delta_{Ls12, \max}$ 为全线风量变化最大值。

据通风特性研究可知, 当迂回隧道位于进站端时, $\Delta_{Ls12, \max}$ 为负值, 出现在迂回隧道对应的正线隧道内, 是迂回隧道的分流作用所致。当迂回隧道位于出站端时, $\Delta_{Ls12, \max}$ 为正值, 出现在迂回隧道与正线合流后的隧道段内, 是出站端风井进风导致。

$\Delta_{Ls12, \max}$ 随行车对数变化的关系曲线如图 3 所示。两种情况下 $\Delta_{Ls12, \max}$ 都随行车对数增加而增大。迂回隧道位于进站端时, $\Delta_{Ls12, \max}$ 从 $40.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 到 $45.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 增加了 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$; 迂回隧道位于出站端时, $\Delta_{Ls12, \max}$ 从 $26.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 到 $38.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 增加了 $11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。行车对数增加会增强风井的换气, 隧道活塞风量会变大。

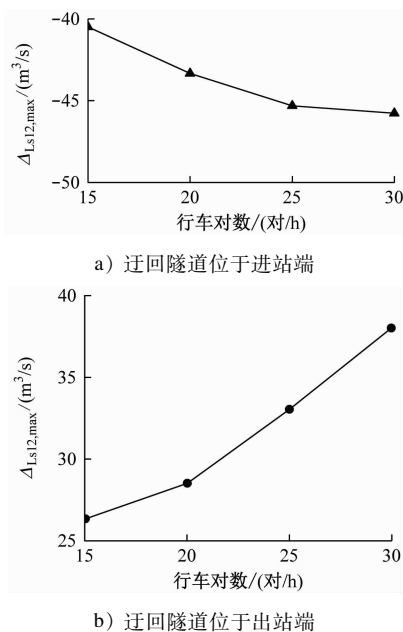


图 3 $\Delta_{Ls12, \max}$ 随行车对数变化的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of $\Delta_{Ls12, \max}$ change with train pair numbers

2.1.2 隧道空气温度

将 Δ_{Ts12} 定义为工况 2 与工况 1 的全线隧道空气温度之差, $\Delta_{Ts12, \max}$ 为全线温度变化最大值。

据热环境特性研究可知, 当迂回隧道位于进站端时, $\Delta_{Ts12, \max}$ 为正值, 表示温升, 出现在迂回隧道对应的正线隧道内, 在迂回隧道的分流作用下隧道风量降低, 故隧道空气温度升高。当迂回隧道位于出站端时, $\Delta_{Ts12, \max}$ 为负值, 表示温降, 出现在迂回隧道与正线合流后的隧道内, 由于出站端风井进风更多, 故温度下降。

$\Delta_{Ts12, \max}$ 随行车对数的变化如图 4 所示。当迂

回隧道位于进站端时, $\Delta_{Ts12, \max}$ 从 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 增至 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 温升增加了 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。经分析, 随行车对数增加, 列车散发在隧道里的热量增加, 故隧道空气温度升高。当迂回隧道位于出站端时, $\Delta_{Ts12, \max}$ 从 $-0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 降到 $-1.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 温降增加了 $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。经分析, 行车对数越多, 通过活塞风井与外界的换气就越多, 就更有利于降低迂回隧道合流后的隧道空气温度。

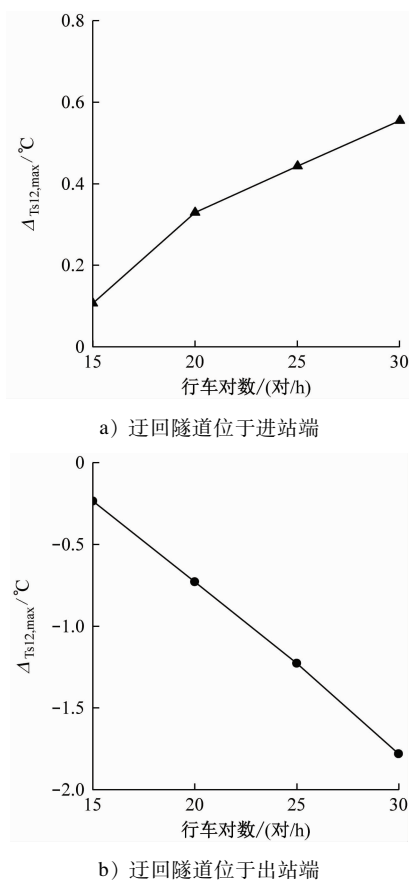


图 4 $\Delta_{Ts12, \max}$ 随行车对数变化的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of $\Delta_{Ts12, \max}$ change with train pair numbers

2.2 车速的影响

地铁列车最高运行速度一般为 $80 \sim 160 \text{ km/h}$ 。对此, 选择车速分别为 80 km/h 、 90 km/h 、 100 km/h 、 110 km/h 、 120 km/h 、 140 km/h 、 160 km/h 等 7 种情况进行计算。

2.2.1 隧道风量

$\Delta_{Ls12, \max}$ 随车速的变化如图 5 所示。两种情况下 $\Delta_{Ls12, \max}$ 都随车速的增加而增大。当迂回隧道位于进站端时, $\Delta_{Ls12, \max}$ 从 $41.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 增至 $46.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 增加了 $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 是因为车速增大使活塞风增加。当迂回隧道位于出站端时, $\Delta_{Ls12, \max}$ 从 $43.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 增

至 $59.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 增加了 $16.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 车速增大使活塞风井的内外压差变大, 活塞风井进风量增大。迂回隧道位于出站端的 $\Delta_{\text{Ls12,max}}$ 更大。

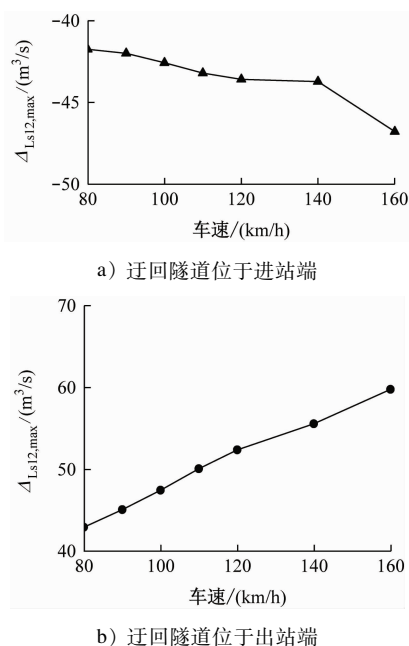


图5 $\Delta_{\text{Ls12,max}}$ 随车速变化的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of $\Delta_{\text{Ls12,max}}$ change with train speed

2.2.2 隧道空气温度

$\Delta_{\text{Tsl2,max}}$ 随车速变化的关系曲线如图6所示。当迂回隧道位于进站端时, $\Delta_{\text{Tsl2,max}}$ 从 0.3°C 增至 0.8°C , 温升增加了 0.5°C , 车速增大使制动散热增大, 且活塞风量降低, 从而导致温度升高。当迂回隧道位于出站端时, $\Delta_{\text{Tsl2,max}}$ 从 -1.1°C 降至 -4.6°C , 温降增加了 3.5°C , 因为车速越大, 从出站端风井进入的冷风越多, 故降温效果更明显。

2.3 迂回隧道长度的影响

迂回隧道长度一般不会超过车站长度的一半。迂回隧道长度 l 分别取 5 m 、 10 m 、 15 m 、 18 m 、 20 m 、 25 m 、 40 m 、 60 m 、 80 m 进行计算, 并以无迂回隧道(工况1)作为对比基准进行分析。

2.3.1 隧道风量

将 Δ_L 定义为不同 l 时, 工况2与工况1的全线隧道活塞风量之差, Δ_L 沿程变化如图7所示。图7仅列出有较大变化的隧道段。当 l 从 5 m 增至 80 m 时, 迂回隧道对隧道活塞风量的影响范围都是包括S6站在内的前后两个区间隧道和车站隧道, 且 l 越长, Δ_L 越大。

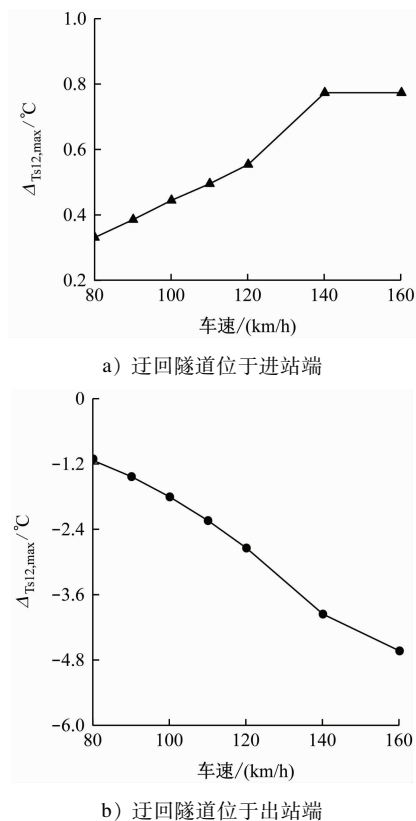


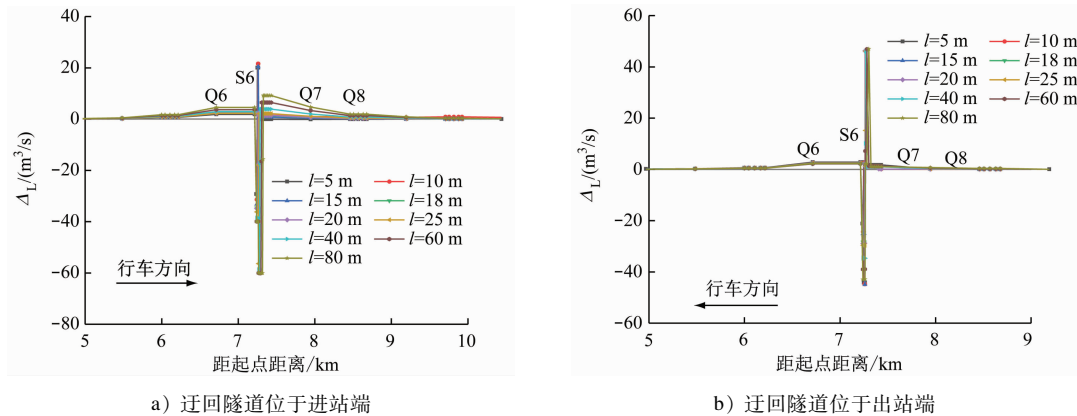
图6 $\Delta_{\text{Tsl2,max}}$ 随车速变化的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of $\Delta_{\text{Tsl2,max}}$ change with train speed

2.3.2 隧道空气温度

将 Δ_T 定义为不同 l 时工况2与工况1的全线隧道空气温度之差, Δ_T 沿程变化如图8所示。图8仅列出有较大变化的隧道段。当迂回隧道位于进站端时, 迂回隧道所对应的轨行区隧道空气温升幅值从 0 增加到 1.1°C 。因迂回隧道越长, 分流作用更明显, 流经该隧道段的风量减小, 导致隧道空气温度上升更明显。S6站内其余轨行区隧道空气温度由于#11风井的进风和轨排风机的排风作用而减小, 列车停站时车头端轨行区隧道空气温度变化最明显, 全线 Δ_T 最大值从 -0.1°C 增加到 -0.8°C 。

当迂回隧道位于出站端时, l 低于 15 m , 全线 Δ_T 最大处位于最接近11#风井的后方隧道内。经分析, 工况2与工况1受11#风井进风位置的影响导致隧道空气温度相差较大, 全线 Δ_T 最大值基本稳定在 $+1.7^\circ\text{C}$ 。S6站11#风井前方隧道空气由于11#风井的进风作用而降温, 迂回隧道合流后的区间隧道温降最大, 随着 l 从 5 m 增至 20 m , 全线 Δ_T 最大值基本稳定在 -0.2°C , 从迂回隧道流出的、未经列车散热量加热的空气对此段隧道进行了降温。当 l

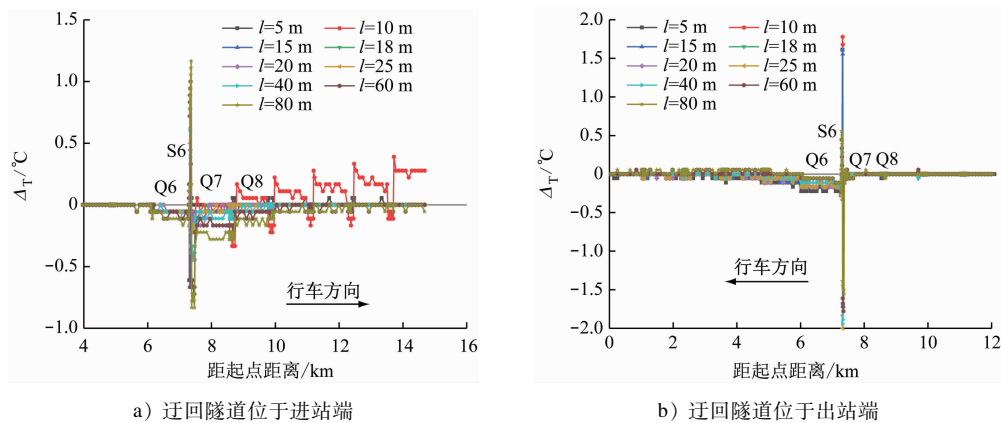


a) 迂回隧道位于进站端

b) 迂回隧道位于出站端

图 7 不同迂回隧道长度下隧道活塞风量变化

Fig. 7 Tunnel piston air volume changes with different bypass tunnel lengths



a) 迂回隧道位于进站端

b) 迂回隧道位于出站端

图 8 不同迂回隧道长度下隧道空气温度变化

Fig. 8 Tunnel air temperature changes with different bypass tunnel lengths

大于 20 m 时,迂回隧道对应的轨行区隧道内同时存在温升和温降最大值,同样是由于工况 2 与工况 1 的 11[#]风井进风位置不同导致。当 l 从 25 m 增至 80 m 时,全线 ΔT 最大值从 0.1 °C 增加到 0.6 °C,因为当 l 增加时,其所对应正线隧道风量减小段也变长,导致此段隧道温升逐渐变大。

3 结语

地铁车站由于空间受限设置的迂回隧道对地铁隧道通风效果产生一定影响。本文采用数值模拟方法,研究了设置迂回隧道下隧道风量与隧道空气温度随着行车对数、列车速度及迂回隧道长度的变化规律。

1) 增设迂回隧道后隧道活塞风量变化最大值与行车对数呈正相关。当迂回隧道位于进站端和出站端时,隧道风量最大变化值分别增加了 5.2 m³/s 和 11.8 m³/s。当迂回隧道位于出站端时,迂回隧道的温降作用随着行车对数的增加变化最大,隧道空气最大温降值增加了 1.6 °C。

2) 增设迂回隧道后风量变化最大值与列车速度呈正相关。当迂回隧道位于进站端和出站端时,隧道风量最大变化值分别增加了 5.1 m³/s 和 16.7 m³/s。当活塞风井位于出站端时,迂回隧道的温降作用随着列车速度的增加变化最大,隧道空气最大温降值增加了 3.5 °C。

3) 迂回隧道长度的变化对隧道温度变化的影响较为复杂,不呈现一定的规律性,当迂回隧道长度为 18 m 时的隧道热环境最优。

参考文献

- [1] 李国栋. 活塞风作用下超长公路隧道火灾烟气蔓延特性研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 624.
LI Guodong. Study on smoke spread characteristics of super-long highway tunnel under piston wind[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(5): 624.
- [2] 田卫明, 翁其能, 张建伟, 等. 地铁隧道活塞风成风影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(1): 41.
TIAN Weiming, WENG Qineng, ZHANG Jianwei, et al. Analy-

- sis of piston wind impact factor in tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(1): 41.
- [3] 赵小龙, 陈长坤, 陈杰, 等. 阻塞比对地铁隧道烟气流速及温度分布的影响分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(2): 177.
- ZHAO Xiaolong, CHEN Changkun, CHEN Jie, et al. Analysis on the influence of blocking ratio on smoke flow speed and temperature distribution of subway tunnel [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(2): 177.
- [4] 郝娜. 地铁隧道通风系统活塞风井布置探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8): 141.
- HAO Na. Comparative analysis about the arrangement of piston air shaft in subway [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(8): 141.
- [5] 王峰, 雷波. 地铁隧道通风系统节能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 172.
- WANG Feng, LEI Bo. Energy-saving research on ventilation system of tunnel in subway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 172.
- [6] 王春旺, 李晓峰. 轨排风机排热效果实测研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 119.
- WANG Chunwang, LI Xiaofeng. Experimental study on the heat extraction effect of tunnel exhaust fans [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 119.
- [7] 朱培根, 韦炜致, 孔维同. 列车运行速度对安全门地铁站台热环境的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(11): 47.
- ZHU Peigen, WEI Weizhi, KONG Weitong. Research on thermal environment of metro station with safety gate by train traction [J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(11): 47.
- [8] 彭博, 吴喜平, 郑懿. 采用屏蔽门系统的地铁区间活塞风效应分析[J]. 城市公用事业, 2010(1): 13.
- PENG Bo, WU Xiping, ZHENG Yi. Analysis of effect of piston-wind of metro running tunnel by platform screen door system [J]. Public Utilities, 2010(1): 13.
- [9] 王丽慧, 施逸, 宋洁, 等. 地铁活塞风井及迂回风道速度场特性研究[J]. 流体机械, 2010, 38(3): 22.
- WANG Lihui, SHI Kui, SONG Jie, et al. Speed fields characteristics research on the piston air shaft and the bypass duct in subway [J]. Fluid Machinery, 2010, 38(3): 22.
- [10] 唐莎, 雷波. 屏蔽门系统地铁隧道空气温度分布特性研究[J]. 制冷与空调(四川), 2018, 32(1): 82.
- TANG Sha, LEI Bo. Study on the air temperature distribution in the underground tunnels of the metro with platform screen doors system [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2018, 32(1): 82.
- [11] 田婷婷, 高伟, 王方敏, 等. 地铁轨行区迂回隧道对通风和热环境的影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 183.
- TIAN Tingting, GAO Wei, Wang Fangmin, et al. Study on the influence of by-pass tunnel in subway track area on ventilation and thermal environment [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 183.
- 收稿日期:2023-02-23 修回日期:2023-04-03 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-23 Revised:2023-04-03 Published:2025-04-10
• 通信作者:高伟,高级工程师,350733487@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 103 页)

参考文献

- [1] 兰亚京, 郑猛, 申伟铭. 北京区域快线互联互通规划研究[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(6): 60.
- LAN Yajing, ZHENG Meng, SHEN Weiming. Study on the interconnectivity of Beijing regional express railway at the planning stage [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 60.
- [2] 李中浩. 城市轨道交通 CBTC 互联互通发展趋势及建议[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 12.
- LI Zhonghao. Development trend of urban rail transit CBTC interconnection/intercommunication and some suggestions [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 12.
- [3] 陈琦, 张冲, 陈静梅. 城市轨道交通 CBTC 信号系统互联互通接口与调试[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(4): 117.
- CHEN Qi, ZHANG Chong, CHEN Jingmei. Interconnection interface and debugging of a CBTC signal system for urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(4): 117.
- [4] 王冬海, 黄柒光. 列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊 2): 102.
- WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 102.
- [5] 刘国帅. 郑州地铁 CBTC 互联互通研究[J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2020, 32(1): 9.
- LIU Guoshuai. Research on the CBTC interconnection of Zhengzhou metro [J]. Journal of Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, 2020, 32(1): 9.
- [6] 赵川宇, 张荣华. 基于列车灵活编组的车载 PIS 重联网络技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(10): 18.
- ZHAO Chuanyu, ZHANG Ronghua. Research on interconnection network technology of on-board PIS system based on flexible train formation [J]. Modern Urban Transit, 2022(10): 18.
- 收稿日期:2023-03-27 修回日期:2024-10-24 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-27 Revised:2024-10-24 Published:2025-04-10
• 通信作者:宋占勋,高级工程师,songzhanxun@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