

列车在城际铁路地下段越行过站时的屏蔽门 气动压力变化规律

高伟¹ 林剑洋¹ 雷波² 王宏林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//第一作者, 高级工程师)

摘要 以福州至长乐机场城际铁路盖山路站为例,研究了列车从 U 型槽敞口段的洞口以 100 km/h 速度进入隧道后,以 100 km/h 的速度越行过站时屏蔽门的瞬态压力变化规律。研究表明:屏蔽门最大正压出现在列车车头经过屏蔽门时,最大负压出现在列车车尾经过屏蔽门时;列车经过屏蔽门产生的最大正压基本上沿进站端至出站端方向逐渐降低,最大负压的变化规律不明显;屏蔽门的最大正压为 346 Pa,最大负压为 -365 Pa;车头和车尾经过时,屏蔽门的压力非均匀分布,而车身经过时,屏蔽门的压力呈均匀分布。

关键词 城际铁路; 越行车站; 屏蔽门; 气动压力

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.012

Platform Screen Door Pneumatic Pressure Change Law of Train Passing Overtaking Station of Intercity Railway Underground Section

GAO Wei, LIN Jianyang, LEI Bo, WANG Honglin

Abstract Taking the Gaishan Road Station of Fuzhou-Changle Airport Intercity Railway as example, during the train entering the tunnel from the opening of U-shaped cutting at speed of 100 km/h, the transient pressure change law of platform screen doors when the train passing overtaking station is researched. Research results show that the maximum positive pressure of the screen door appears as the front of the train passes them, and the maximum negative pressure appears as the rear of the train passes them. The maximum positive pressure generated by the train passing through the screen door gradually decreases from the entry side to the exit side. However, the change law of the maximum negative pressure is not obvious. The maximum positive pressure of the screen door is 346 Pa, and the maximum negative pressure is -365 Pa. In addition, when the train front and rear pass, the pressure on the screen door is unevenly distributed, while when the train body passes, the pressure on the screen door is evenly distributed.

Key words intercity railway; overtaking station; platform screen door; pneumatic pressure

First-author's address Power China Huadong Engineering Corporation Limited, 311122, Hangzhou, China

列车在城际铁路地下段运行,当列车运行速度超过 100 km/h 时,列车高速运行产生的气动效应会影响列车运行安全^[1-2]。现有城际铁路设计中,很多车站存在快车高速越行过站的工况,其站台屏蔽门所承压力是越行车站设计的关键参数。屏蔽门的压力变化受两个因素影响:① 列车高速进入隧道形成的压力波传播到越行车站;② 列车过站时带动列车周围空气随之运动,进而产生强烈的瞬态压力脉动作用于屏蔽门上^[3]。

隧道净空面积、区间隧道内设备和站台屏蔽门承压等参数,以及压力波减缓措施的设置均取决于城际铁路隧道空气动力学效应。目前,针对城际铁路空气动力学效应的研究多集中在隧道净空面积。文献[4]提出了不同列车密封指数下隧道净空面积的建议值。此外,学者们还研究了不同因素对地铁隧道压力波的影响。文献[5]研究结果表明,不同列车密封指数下,列车由明线驶入隧道时车内压力变化均大于列车站间运行时车内压力变化。不同列车运行速度的研究表明,地铁列车通过隧道时,车体表面压力峰峰值、3 s 内车内压力波动最大值、隧道内附属物压力峰峰值与列车速度的平方近似成线性关系^[6]。隧道内断面变化,以及竖井及横通道的设置对隧道内压力波影响较大,合理设置相关结构参数可较好地缓解隧道压力波^[7-8]。

本文采用三维 CFD(计算流体动力学)数值计算方法,以福州至长乐机场城际铁路中盖山路站(越行车站)为例,研究了列车从 U 型槽敞口段的洞口以 100 km/h 速度进入隧道,并以 100 km/h 的速

度越行过站时屏蔽门的瞬态压力变化,可为城际铁路地下越行站屏蔽门的承压设计提供依据。

1 数值仿真计算方法

1.1 建立数值计算模型

图1为列车数值计算模型。模型采用6节编组A型列车,包含头车、尾车和4节中间车,列车总长度为140.00 m。参照文献[7-8],本文对列车模型的外形进行了简化,忽略转向架、受电弓和设备舱的影响。区间隧道的直径 D 为7.50 m,对应的净空面积为 40.60 m^2 ,阻塞比为0.23。

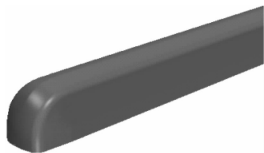


图1 列车数值计算模型

Fig. 1 Train numerical calculation model

列车由地上高架线经过U型槽敞口段,高速进入地下区间隧道,越行通过地下盖山路站后,继续

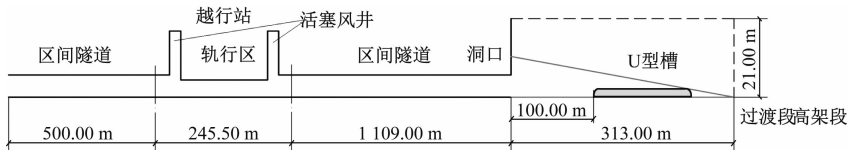


图3 数值模型计算域

Fig. 3 Computational domain of numerical model

1.2 数值仿真计算

本文采用STAR-CCM+软件的重叠动网格技术来模拟列车的运行。将列车周围区域设为重叠区域,其他区域为背景区域。背景区域和重叠区域将各自独立地生成网格。模型通过重叠网格的移动来模拟列车的运行。数值仿真计算模型体的网格划分采用六面体网格。为了降低网格尺寸对计算结果的影响,本研究对比了列车周围不同网格尺寸下屏蔽门的压力。基于计算结果,确定列车周围、车站及列车运行线路上的网格尺寸为0.2 m,其余区域网格尺寸为0.4 m。整个计算模型的网格总数为1 200万个。

U型槽外部计算域四周为压力出口边界,隧道出口为压力远场边界,列车表面、隧道壁面以及地面均为无滑移边界。列车运行在隧道内产生的空气流动属于典型的三维、粘性、可压缩、非定常、湍流流动。本文采用RANS(雷诺平均)方法,选用

在隧道内运行。本文基于隧道和车站的实际结构及尺寸建立了几何模型,如图2所示。



图2 车站及隧道的数值计算模型

Fig. 2 Train and tunnel numerical calculation model

图2中,敞口段前U型槽的长度为313.00 m,越行站至敞口段洞口间区间隧道的长度为1 109.00 m,车站的长度为245.50 m。由于列车从U型槽洞口高速进入隧道,考虑到计算流场的充分发展及气流的绕流影响,故U型槽外部计算域尺寸选为 $313.00\text{ m} \times 48.00\text{ m} \times 21.00\text{ m}$ 。

整个计算模型的长度为2 167.50 m,如图3所示。列车运行速度为100 km/h,盖山路站屏蔽门距线路中心线的距离为1.68 m。

$k-\varepsilon$ 湍流模型求解列车在复杂地铁线路中运行引起的空气流动。

1.3 数值仿真计算方法的准确性验证

本文采用隧道压力波模型试验来验证数值仿真计算方法的准确性。在模型试验中,隧道总长度为30.4 m,沿隧道长度方向均匀布置了6个测试断面。数值仿真计算模型的参数与模型试验参数一致:列车长度为1.4 m,截面积为 0.019 m^2 ,阻塞比为0.271,测点1距隧道入口5.7 m。当列车运行速度为80 km/h时,测点1处压力变化曲线如图4所示。由图4可见:数值仿真计算结果与模型试验结果吻合良好,测点处压力波的变化规律基本一致;对于初始压缩波的正压幅值,数值仿真计算结果为460 Pa,模型试验结果为433 Pa,二者最大误差仅为6.2%。由此可见,数值仿真计算方法能准确地模拟隧道压力波。

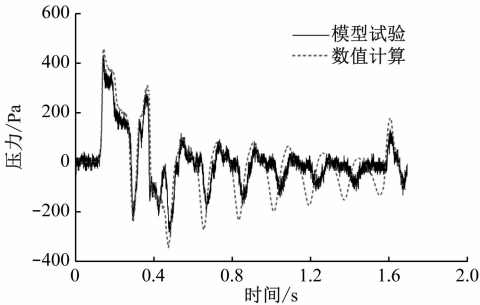


图4 测点1处的压力变化曲线

Fig.4 Pressure change curve at measuring point 1

2 列车越行过站时屏蔽门的压力变化规律

数值仿真模拟列车以 100 km/h 速度从敞口段进入隧道,以 100 km/h 匀速运行并越行过站的过程,计算列车越行过站时屏蔽门的压力变化,如图 5 所示。经分析,列车越行过站时,屏蔽门处的压力变化主要由“列车绕流”引起:车头鼻尖前空气受到压缩形成正压;随着空气绕流车头,气体流速逐渐升高,压力逐渐降低;直到绕流气体接近车头横截面最大位置时,流速达到最大值,压力降至最低。可见,当列车车头通过屏蔽门时,绕流空气在屏蔽门表面形成了一个正负压力波动。相应地,车后隧道空间内的空气流向列车尾部,当车尾通过屏蔽门时,空气流在屏蔽门表面形成负压。

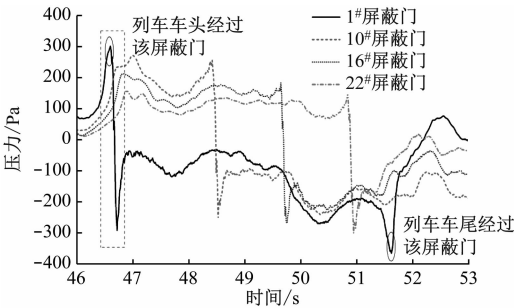


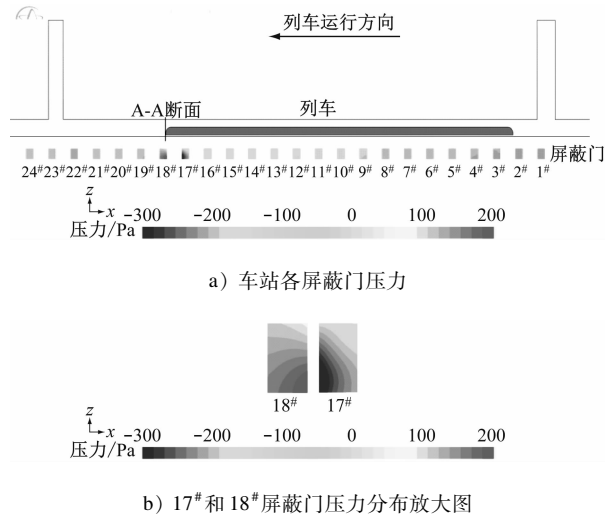
图5 不同屏蔽门的压力变化曲线

Fig.5 Pressure change curve of different screen doors

从图 5 可以看出:屏蔽门最大正压出现在列车车头经过屏蔽门时,最大负压出现在列车车尾经过屏蔽门时;每个屏蔽门上的压力曲线的变化规律基本上是一致的。从不同编号的屏蔽门的压力变化曲线可以看出,车站进站端屏蔽门所受的压力略大于出站端站台门所受的压力。由图 5 车头经过 1# 屏蔽门时的压力变化可见,由于列车车头鼻尖的长度非常短,故车头鼻尖经过屏蔽门时,压力产生了较大的突变。以 1# 屏蔽门为例,瞬态压力变化速度

为 4 935 Pa/s。

图 6 为列车过站时某一时刻的屏蔽门压力云图。由图 6 可见:车头前屏蔽门(18# ~ 24# 屏蔽门)的压力为正压,车头前方的 19# ~ 24# 屏蔽门上的压力基本为均匀分布;车头已经过的屏蔽门(1# ~ 17# 屏蔽门)压力为负压,1# ~ 16# 屏蔽门的压力基本均匀分布;列车车头附近的 18# 和 17# 屏蔽门上的压力呈非均匀分布。其中,18# 屏蔽门位于列车鼻尖的前端,该屏蔽门压力为正压,屏蔽门下方且靠近列车一侧所受压力较大。由于列车最大横截面已经经过 17# 屏蔽门,因此该屏蔽门呈负压,且屏蔽门下方靠近列车横截面突变处一侧所受压力较大。



b) 17# 和 18# 屏蔽门压力分布放大图

图6 列车过站时屏蔽门压力云图

列车过站时轨行区截面压力云图如图 7 a) 所示。车头前方区域的压力为正压,车身和车尾后区域为负压。出站端活塞风井内为正压,进站端活塞风井内为负压。

车头鼻尖前方处横断面(A-A 断面)的压力云图如图 7 b) 所示。在车头鼻尖横断面上,列车所在区域的压力最大;沿列车至屏蔽门方向,距列车的距离越大,压力值越小;其他远离列车方向的压力变化规律是一致的。

图 8 为越行站不同屏蔽门的压力极值变化。由图 8 可见,列车经过屏蔽门产生的最大正压基本均沿进站端至出站端方向逐渐降低,最大负压的变化规律不明显。进站端 1# 屏蔽门表面的负压最大,约为 -365 Pa,2# 屏蔽门表面的正压最大,约为 346 Pa。

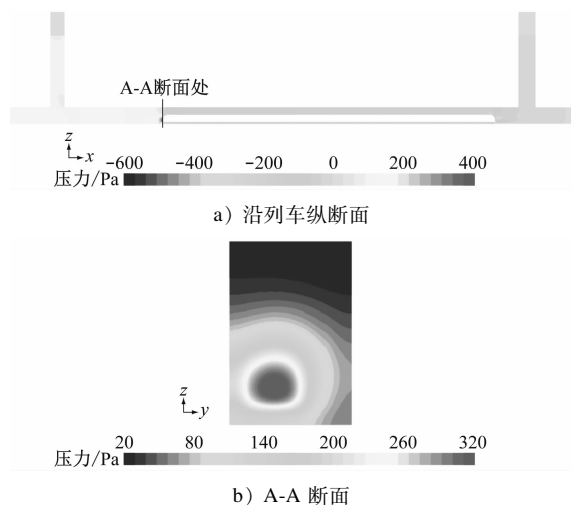


图7 列车过站时轨行区截面压力云图

Fig.7 Pressure contour of track area cross-section as train passing overtaking station

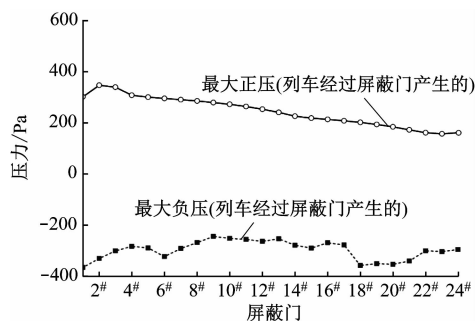


图8 越行站屏蔽门的压力极值

Fig.8 Pressure extreme values at the screen doors of overtaking station

3 结论

1) 列车越行过站时屏蔽门处的压力变化主要由“列车绕流”引起。

2) 屏蔽门最大正压出现在列车车头经过屏蔽门时,而最大负压出现在列车车尾经过屏蔽门时。

3) 列车经过屏蔽门产生的最大正压基本上均沿进站端至出站端方向逐渐降低,最大负压的变化规律不明显。

4) 进站端1[#]屏蔽门表面的负压最大,约为-365 Pa,2号屏蔽门表面的正压最大,约为346 Pa。

参考文献

[1] 杨宁. 地铁快线隧道内空气压力波控制技术方案与效果[J].

城市轨道交通研究, 2018(7):54.

YANG Ning. Technology scheme and effect of air pressure wave control within high-speed subway tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2018(7):54.

[2] 陈波, 胡文伟. 东莞轨道交通2号线空气动力学及运行舒适度的研究与实践[J]. 都市快轨交通, 2018(3):68.

CHEN Bo, HU Wenwei. Research and practice of aerodynamics and operating comfort in Dongguan Rail Transit Line 2[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018(3):68.

[3] ZHOU Y, WANG H, BI H, et al. Experimental and numerical study of aerodynamic pressures on platform screen doors at the overtaking station of a high-speed subway[J]. Building and Environment, 2021, 191: 107582.

[4] 冉腾飞, 梁习锋, 熊小慧. 140 km/h 高速地铁隧道净空断面面积研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019(10):2603.

RAN Tengfei, LIANG Xifeng, XIONG Xiaohui. Study on sectional area of high-speed subway tunnel with speed of 140 km/h[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019(10):2603.

[5] 骆建军. 高速地铁隧道内扩大段和通风竖井对压力波的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2016(4):2.

LUO Jianjun. The Influences of enlarged sections and ventilation shafts on pressure waves in high-speed metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016(4):2.

[6] 周朝晖. 复杂结构铁路隧道压力波效应数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.

ZHOU Chaohui. Numerical study on pressure waves produced by trains in complex tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.

[7] 徐世南, 张继业, 熊骏, 等. 地铁列车通过隧道时的气动性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016(9):99.

XU Shinan, ZHANG Jiye, XIONG Jun, et al. Aerodynamic performance of metro vehicle passing through tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2016(9):99.

[8] 刘俊, 车轮飞. 高速模式下地铁隧道空气动力学效应断面优化分析[J]. 暖通空调, 2016(6):1.

LIU Jun, CHE Lunfei. Optimization of aerodynamic effect section of underground railway tunnel in high-speed modes[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016(6):1.

[9] 王彦琛. 时速140km 地铁线路主要技术标准探讨[J]. 铁道标准设计, 2016(7):67.

WANG Yanchen. An approach to 140 km/h metro line technical standard[J]. Railway Standard Design, 2016(7):67.

(收稿日期: 2021-02-02)