

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-539-07

成都快线列车 越行过站站台门气动压力实车测试研究

常新亮¹ 曾 臻^{2,4} 毕海权³ 肖益民⁴ 翁庙成⁴

(1. 成都轨道交通集团有限责任公司 成都 610000;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610000;

3. 西南交通大学 成都 610031; 4. 重庆大学 成都 400000)

【摘要】 随着轨道交通运行速度的不断提高以及隧道内多车追踪的出现, 屏蔽门上的压力荷载对线路运营安全具有重要意义。以成都轨道交通 18 号线为研究对象, 采用实车测试的方法对过站站台屏蔽门的气动压力进行了研究, 分析了列车运行速度、行车间隔、风井风阀开闭情况对站台屏蔽门气动压力的影响。结果表明: 屏蔽门的峰值正压出现在列车车头到达屏蔽门时, 而屏蔽门的峰值负压出现在列车车尾到达屏蔽门时, 且屏蔽门的峰值压力随着列车过站速度的增大而增大。此外不同行车间隔对屏蔽门压力极值影响较小。研究为屏蔽门系统结构强度设计提供了参考。

【关键词】 轨道交通; 站台门; 压力波; 实车测试

中图分类号 TU96+2 文献标识码 A

Field Measurements of Aerodynamic Pressures on Platform Screen Doors at the Overtaking Station of Chengdu Rail Transit

Chang Xinliang¹ Zeng Zhen^{2,4} Bi Haiquan³ Xiao Yimin⁴ Weng Miao Cheng⁴

(1. Chengdu rail transit Group Co., Chengdu, 610000; 2. China Railway Eryuan Engineering Group. Co, Chengdu, 610000;

3. Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031; 4. Chongqing University, Chongqing, 400000)

【Abstract】 With the increasing speed of rail transit and the emergence of multi-vehicle tracking in tunnels, the pressure load on platform screen doors (PSDs) is of great significance to the safety of line operation. In this study, Chengdu Rail Transit Line 18 was taken as the research object, and the aerodynamic pressure of the PSD passing through the station was studied by the method of field measurements. The effects of train running speed, running interval, and the opening and closing of air shaft dampers on the aerodynamic pressure of the PSD are analyzed. The results demonstrate that the peak positive and peak negative pressures on the PSD are caused by the head and tail of the train passing through the PSD, respectively. And the peak pressure of the PSD increases with the speed of the train passing through the station. In addition, different driving intervals have little influence on the extreme value of the aerodynamic pressure of the PSD. The research provides a reference for the structural strength design of the PSD system.

【Keywords】 rail transit; platform screen door; pressure wave; field measurements

0 引言

城市轨道交通快线作为城市交通线网体系中

的重要组成部分, 以服务城市交通运输为主要任务, 意在实现城市各核心区域之间的快速连接。区

作者简介: 常新亮 (1980.10-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: 29986815@qq.com

通讯作者: 曾 臻 (1980.09-), 男, 在读博士研究生, 正高级工程师, E-mail: 28323442@qq.com

收稿日期: 2022-08-30

间长、速度快、快慢车混合运行以及开行对数高等特点决定了其与传统地铁、国铁及城际铁路均有所不同。目前,国内已开通运营最高运行速度达 120km/h 的城市轨道交通快线有广州地铁 3 号线、上海地铁 16 号线、深圳地铁 11 号线、东莞地铁 2 号线等;规划和在建最高运行速度达 140km/h 的城市轨道交通快线有成都地铁 17 号线、成都地铁 18 号线、台州市地铁 S1 线等。此外,已开工建设的北京新机场线以及成都地铁 19 号线的最高运行速度将达到 160km/h。

由于地铁列车在地下空间内运行,具有阻塞比(列车断面积/隧道断面积)大、发车密度高、车辆气密性差等特点,当列车运行速度超过 100km/h 时,许多在低速时可以忽略的问题,在高速时就变得非常明显^[1,2]。高速运行的地铁列车与隧道内空气相互作用产生的气动效应(包括隧道压力波^[3-5]、列车内外压力变化^[6-8]、列车气动阻力^[9]、列车风以及气动噪声等)成为高速地铁建设时必须面临和解决的难题。上述空气动力学效应对高速地铁列车运行的安全性、旅客乘坐的舒适性以及隧道周围环境、车站环境、隧道内设备和结构的稳定性均有非常不利的影响。对于地铁车站屏蔽门系统,其主要作用是为了保证乘客安全和维护车站风环境,当列车高速运行产生的强烈列车风反复作用在屏蔽门以及线路周边设备上时,会对屏蔽门等设备产生疲劳载荷,压力过高时会对屏蔽门的结构造成破坏,从而影响设备的安装强度。同时,当隧道内存在多车追踪时,由于后车运行产生的压力波传播到轨行区,可能会阻碍屏蔽门系统的正常开启,对车站乘客正常上下车产生影响。例如广州地铁 3 号线曾发生站台屏蔽门玻璃爆裂、联络区间的防火门因交变风压的影响而被破坏^[10]。

为了分析列车通过车站时对站台屏蔽门的影响, Kim^[11]测试了首尔地铁 2 号线列车以不同运行方向、不同速度通过地下站台时,站台屏蔽门表面的风压大小。Yuan 等人^[12]使用滑移网格技术,对一列 8 节编组城际列车全速通过地下车站的空气动力学性能进行了数值模拟,研究了车厢与屏蔽门之间的间隙对列车气动性能的影响,发现列车通过屏蔽门时的最大侧向力与轿厢和屏蔽门之间的间隙存在线性关系。Zeng 等人^[13]通过移动模型试验,

研究了单车不停车通过车站和双车追逐两种典型情况下对车站屏蔽门瞬态压力的影响,发现在双车追逐情况下,即使第一列进站列车远离车站,其压力波也会对屏蔽门造成很大压力,这可能是屏蔽门在高峰时段无法正常打开的原因。袁誉钊等人^[14]通过构建两车、两车站、三区间隧道的地铁隧道模型,使用滑移网格技术仿真模拟了列车在隧道运行时引起的活塞风速度与压力大小,并通过屏蔽门静力学分析,研究隧道活塞风对地铁屏蔽门所受风压的影响。罗燕萍等人^[15]采用 SES 软件模拟分析了地铁列车高密度运行时,单活塞和双活塞工况下隧道内的风压对屏蔽门的影响,其研究表明活塞风井数量和位置对隧道内压力影响较大。段忠辉^[10]采用数值模拟的方法研究了车站两端通风竖井和车站屏蔽门对隧道内气动效应的影响规律,并通过动模型试验进行验证,得出了合理竖井面积与高度。李学伟^[16]对列车通过北京新机场地下车站过程中的气动效应进行了数值模拟分析,研究了单车工况和双车不同位置交会时地下车站屏蔽门所受气动荷载情况。马福东等人^[17]采用数据值计算软件,针对京张高铁新八达岭隧道及地下车站的设计方案,对地下车站屏蔽门和安全门两种模式下站台的最高风速、最大瞬变压力、压缩波峰值、人行通道最高风速等空气动力学效应进行了计算分析。然而,当前关于车站两端风井对屏蔽门气动压力的影响研究存在不足。因此,有必要研究列车高速通过车站时,车站两端风井开闭情况对屏蔽门表面的气动压力的影响,以指导屏蔽门的强度设计和车站轨道区的结构设计。

由于现行《地铁设计规范》(GB 50157-2013)和城市轨道交通快线系统相关的规范包括:《城际铁路设计规范》(TB 10623-2014)、《市域铁路设计规范》(T/CRS C0101-2017)、《市域快速轨道交通设计规范》(T/CCES 2-2017)等关于压力波的相关内容仅适用于最高运行速度不超过 100km/h 的轨道线路,而城市快速轨道交通列车运行速度过高,其气动效应及出现的空气动力学问题也不尽相同,因此当前规范并不能完全指导高速地铁列车的设计。本研究以成都地铁 18 号线一、二期的一个过站站台为研究对象,列车最高通过速度达到 100km/h。采用实验测试的方法研究了列车高速越过后站站

台时屏蔽门表面的气动压力, 分析了列车运行速度、行车间隔、风井风阀开闭情况对站台屏蔽门气动压力的影响。

1 实车测试

由于目前国内尚无 160km/h 越行过站的先例, 也无可参考的相关标准, 因此本次选择在成都轨道交通 18 号线一个越行车站上进行地铁列车高速越行过站时站台屏蔽门风压测试。

1.1 试验场地

越行站站台门的压力变化受列车高速突入隧

道、列车通过中间风井产生的二次压力波传播以及列车高速越行过站时绕流作用的影响, 因此测试站最好选取列车从地面突入地下后的第一个站。考虑到实际情况的限制, 只能以测试列车高速越行过站时列车绕流产生的压力变化为目的来选择测试车站, 最终确定成都轨道交通 18 号线兴隆站作为本次站台门压力的测试站, 如图 1 所示。兴隆站是位于成都轨道交通 18 号线西博城站和天府新站之间的一个站台, 其中西博城站是兴隆站紧邻的上行线站台, 兴隆站站台两端分别设置有西兴风井和兴天风井。

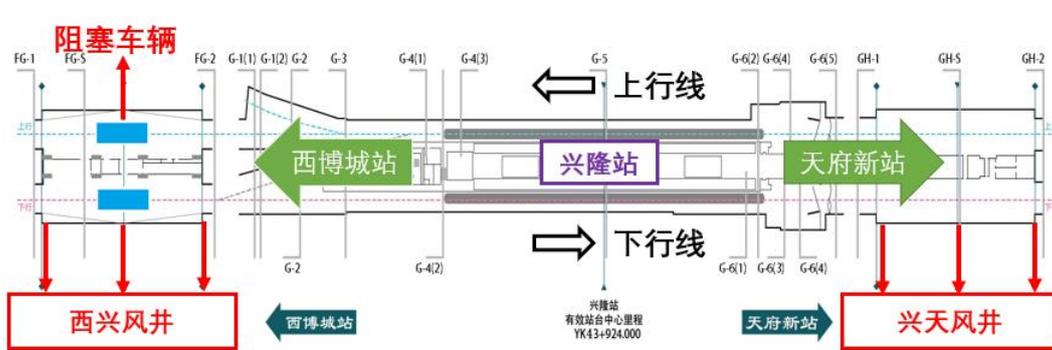


图 1 兴隆站示意图

Fig.1 Schematic diagram of Xinglong Station

1.2 试验设备

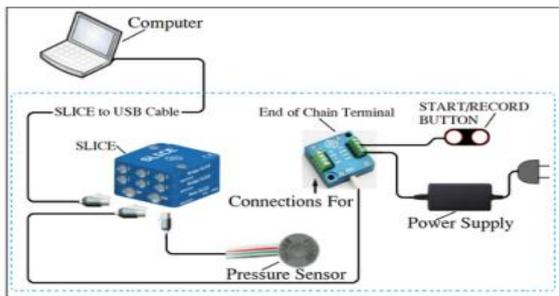


图 2 压力传感器和数据采集系统

Fig.2 Pressure sensor and data-acquisition system

本测试选用的是美国 Endevco 压阻式绝压型压力传感器 8515C-15。这是一种耐用坚固的微型高灵敏度压阻式压力传感器, 量程规格为 103.42kPa。其表面安装厚度仅为 0.76mm, 直径为 6.3mm, 如图 2 所示。该传感器满量程输出为 200mV, 最大采样率可达 120kS/s, 具有很高的过载能力及频率响应性, 对基底应变和温度变化不敏

感, 本研究中采用的采样频率为 2000S/s。

数据采集系统采用的是美国 DTS 的 SLICE。SLICE 是一种超小体积模块化数据采集系统, 包含微处理器、存储器和控制电路。在试验过程中, 切片数据采集系统与计算机相连, 计算机实时采集并存储 PSDs 表面的气动压力数据。在实验过程中, 压力传感器可以将隧道中的压力信号转换为电压信号, 然后通过数据采集系统将电压信号转换为压力信号输出。

1.3 测点布置

图 4 所示为兴隆站屏蔽门压力测点布置示意图, 列车从合江车辆段发车经天府新站开往西博城站, 列车采用 8 车编组, 站台屏蔽门区域的有效长度约为 200m。本次测试在兴隆站共布置了 16 个压力测点, 其中在站端布置两个测点 (测点 1 和测点 16), 其余 14 个测点分别布置于每节车厢对应的屏蔽门中心位置。

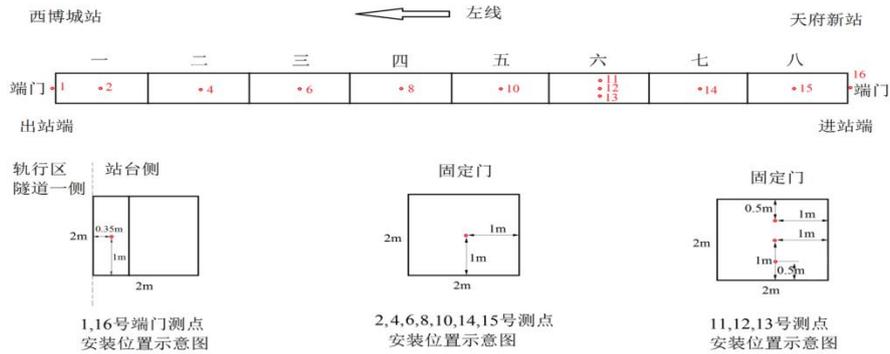


图 3 压力传感器安装位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the installation position of the pressure sensor

1.4 测试工况

工况测试具体要求：静止两车分别阻塞在西兴风井处上行和下行线上，后两列车在三岔站~西博城站区间上行线内间隔 2.5min/4min 追踪运行，具体阻塞如图 1 所示。试验共测试 5 种工况，工况设

置如表 1 所示，其中，工况 1 的列车牵引运行如图 4 所示，工况 2、3、4、5 的列车牵引运行情况和工况 1 的主要区别是列车进入兴隆站的过站速度是 100km/h。

表 1 各工况风阀状态

Table 1 Status of the air valve in each working condition

编号	进洞速度 km/h	过站速度 km/h	风阀状态（开启/关闭）						兴隆站 过站速度 km/h
			天府新站 活塞风阀	兴天风井 活塞风阀	兴隆站进站 端活塞风阀	兴隆站出站 端活塞风阀	兴隆站迂 回道风 阀	西兴风 井活塞 风阀	
1	140	100	关闭	关闭	关闭	关闭	关闭	关闭	80
2	140	100	关闭	关闭	关闭	关闭	关闭	关闭	100
3	140	100	关闭	关闭	开启	关闭	关闭	关闭	100
4	140	100	开启	开启	开启	开启	关闭	开启	100
5	140	100	开启	开启	开启	开启	关闭	开启	100

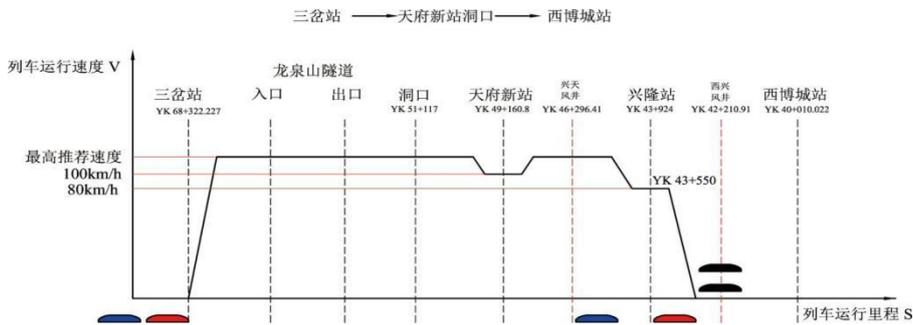


图 4 列车牵引运行图

Fig.4 train traction operation diagram

1.5 试验重复性分析

为了消除测试过程中的系统误差（包括仪器误差、人员误差和环境误差等），试验过程中对每种

工况都进行了多次测试。以工况 1 为例，进行两次重复性测试，测试结果分布如图 5 所示，可以看出重复性测试的结果基本一致。

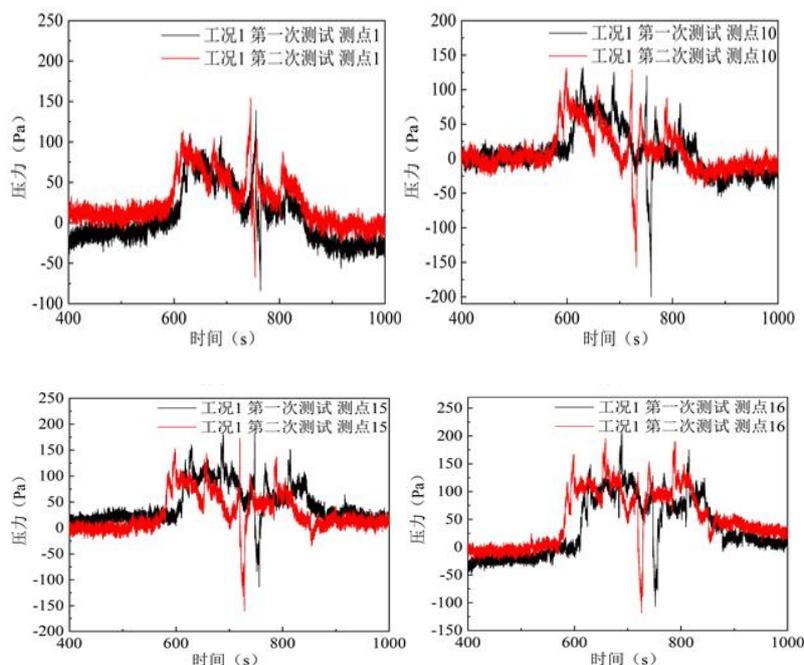


图 5 工况 1 重复性测试结果

Fig.5 Repeatability test results of working condition 1

2 测试结果分析

2.1 屏蔽门气动压力形成机理

以工况 2 和工况 4 为例对屏蔽门气动压力的形成机理进行分析。图 6 (a) 所示为工况 2 中测点 14 的压力变化曲线, 图 6 (b) 所示为工况 4 中测点 14 的压力变化曲线。从图 6 (b) 中可以看到, 在 644s 时有一个值为 162Pa 的压力峰值。根据列

车运行速度及线路长度分析可知, 此峰值压力是列车通过兴天中间风井时产生的压力波传播到屏蔽门压力测点处形成的。从图 6 (b) 中还可以看出, 在 704s 和 711s 时分别有一个峰值正压和一个峰值负压, 根据列车进站时间分析此时的峰值压力是列车过站产生的。

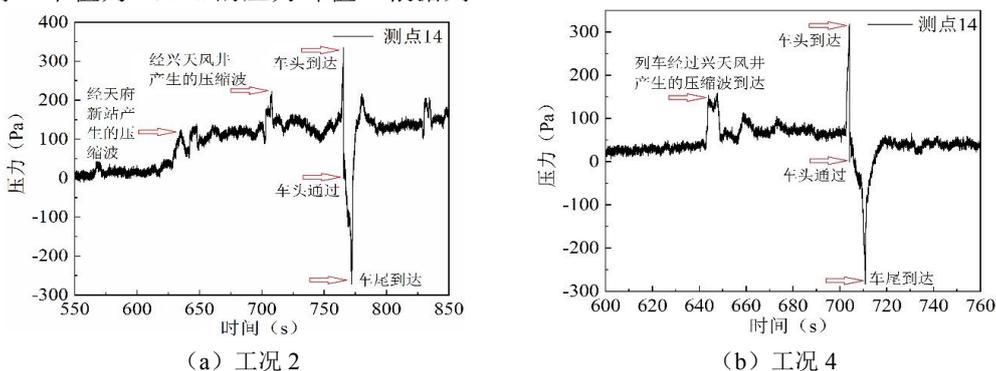


图 6 测点 14 的压力变化曲线

Fig.6 Pressure variation curve of measuring point 14

图 7 为工况 4 时列车在隧道内运行时车头及车尾的压力分布云图。从图 7 中可以看到列车在隧道内运行时, 车头处为正压区, 车头与车顶连接处气流发生分离, 即车头顶部区域为负压, 因此当车头

到达屏蔽门时屏蔽门出现峰值正压, 而当车头最大断面处负压区到达屏蔽门时, 屏蔽门出现峰值负压, 其压力变化时间约为车头长度与列车运行速度之比。而当车尾负压区经过屏蔽门时, 屏蔽门出现

峰值负压。

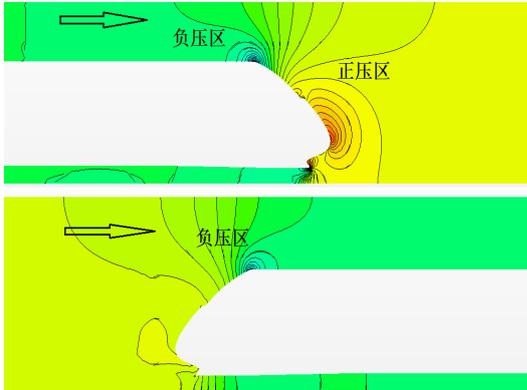


图 7 工况 4 列车车头车尾压力分布云图

Fig.7 Working condition 4 Train head and tail pressure distribution cloud diagram

2.2 列车过站速度对屏蔽门压力的影响

图 8 所示为兴隆站中列车以不同速度通过轨行区时的屏蔽门压力峰值，对比工况为兴隆站运行工况 1 和工况 2。从图 8 中可以看出，屏蔽门的峰值压力随着过站速度的增大而增大。当列车的过站速度为 100km/h 时，距进站端 62.5m 处的正压峰值最大，约为 358Pa，距进站端 12.5m 的负压峰值最大，约为 -393Pa。当列车的过站速度为 80km/h 时，距进站端 62.5m 处的正压峰值最大，约为 255Pa，距进站端 12.5m 的负压峰值最大，约为 -201Pa。

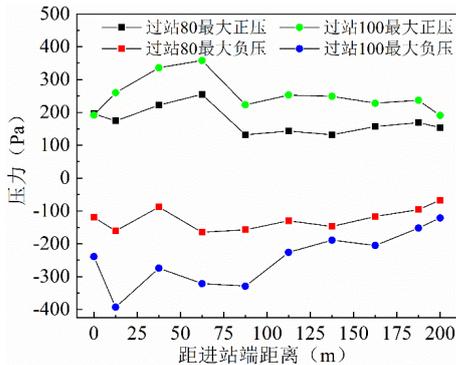


图 8 不同过站速度下的屏蔽门压力峰值

Fig.8 The peak pressure of the screen door under different passing speeds

2.3 兴隆站进站端活塞风阀对屏蔽门压力的影响

在地铁隧道中，为减缓压力波、活塞风对站台及相关设施设备产生的影响以及满足隧道内通风需求，通常会在站台两端设置活塞风井。本节对兴隆站进站端活塞风阀关闭和开启对屏蔽门气动压力的影响进行了分析，对比工况为兴隆站运行工况

2 和工况 3，其他风阀均处于关闭状态。图 9 为兴隆站进站端活塞风阀开启和关闭时站台门压力峰值。由图可知，进站端风阀打开的正压极值大于进站端风阀关闭，而负压极值的变化趋势刚好相反。

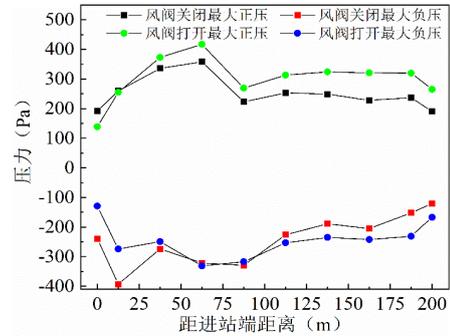


图 9 兴隆站进站端活塞风阀对列车过站时的峰值压力的影响

Fig.9 Influence of the piston damper at the entry end of Xinglong Station on the peak pressure of the train passing through the station

2.4 行车间隔对屏蔽门压力的影响

本节分析了不同行车间隔对屏蔽门气动压力的影响。图 10 所示为行车间隔分别为 2.5min 和 4min 下列车过站时的峰值压力，对比工况为兴隆站运行工况 4 和工况 5。从图 10 中可以看出，2.5min 和 4min 行车间隔下的屏蔽门峰值压力基本一致，说明上述行车间隔对屏蔽门峰值压力影响较小。

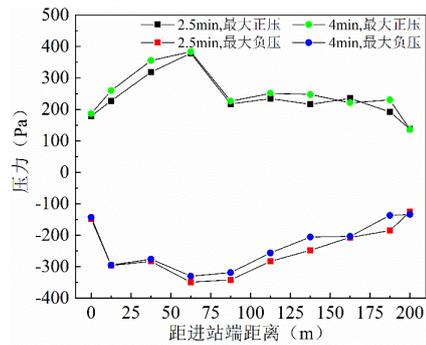


图 10 行车间隔对列车过站时的峰值压力的影响

Fig.10 Influence of travel interval on peak pressure of train passing through station

2.5 不同工况压力峰值对比

本节中对兴隆站不同运行工况的测试结果进行了比较，图 11 所示为工况 1~工况 5 的对比结果。从图 11 中可以看到，当过站速度相同时，兴隆站各工况下的屏蔽门压力峰值差异较小，其中工况 3 的正压峰值最大，为 417Pa，工况 2 的负压峰值最

大为 -393Pa 。工况 1 最大正压最大负压均较小, 可以得出过站速度是造成兴隆站屏蔽门气动压力差异较大的主要原因。

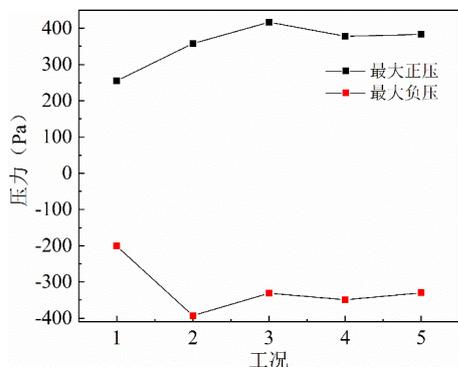


图 11 不同运行工况的压力峰值对比结果

Fig.11 Comparison results of pressure peaks under different operating conditions

3 结论

本文依托成都地铁 18 号线三岔站至西博城站上行线路列车高速越行兴隆站时, 对不同列车运行工况和不同风阀开闭情况下站台屏蔽门风压进行现场测试, 研究了列车过站速度、列车行车间隔和进站端活塞风井的风阀开启情况对屏蔽门气动压力的影响, 可以得到如下结论:

(1) 当两辆列车从明线高速突入隧道, 并且前方存在阻塞车时, 两车追踪运行且过站速度为 80km/h 时屏蔽门的最大正压为 255Pa , 最大负压为 -201Pa ; 两车追踪运行且过站速度为 100km/h 时屏蔽门的最大正压为 417Pa , 最大负压为 -393Pa 。

(2) 列车高速越行通过兴天中间风井时会产生二次压缩波并传播到车站轨行区。

(3) 屏蔽门的峰值压力出现在列车车头到达屏蔽门时, 而屏蔽门的峰值负压出现在列车车尾到达屏蔽门时。

(4) 屏蔽门的峰值压力随着列车过站速度的增大而增大。

(5) 不同行车间隔对屏蔽门压力极值影响较小。

参考文献:

[1] RAGHUNATHAN R S, KIM H-D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. Progress in Aerospace Science, 2002,38(6-7):469-514.

[2] NIU J, SUI Y, YU Q, et al. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research [J]. Energy and Built Environment, 2020,1(4):351-75.

[3] KIM J Y, KIM K Y. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007,22(2):166-72.

[4] KIM J-Y, KIM K-Y. Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009,97(5-6):174-9.

[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, 2016,53(4):22-8.

[6] XIONG X, ZHU L, ZHANG J, et al. Field measurements of the interior and exterior aerodynamic pressure induced by a metro train passing through a tunnel [J]. Sustainable Cities and Society, 2020,53.

[7] 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, 2016,46(5):1-6,16.

[8] NIU J, ZHOU D, LIANG X, et al. Numerical study on the aerodynamic pressure of a metro train running between two adjacent platforms [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017,65:187-99.

[9] YANG X, SHOU A, ZHANG R, et al. Numerical study on transient aerodynamic behaviors in a subway tunnel caused by a metro train running between adjacent platforms [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,117.

[10] 段忠辉. 高速地铁隧道空气动力学特性及控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

[11] KIM J-Y. Field Experiment of Train-Induced Wind Pressure on Platform Screen Door at Subway Station [J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2012,18(4):309-316.

[12] YUAN H, ZHOU D, MENG S. Study of the unsteady aerodynamic performance of an inter-city train passing through a station in a tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,86:1-9.

[13] ZENG L, WANG H, LI L, et al. Experimental study of train-induced pressure acting on the platform screen doors in subway station [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,117. (下转第 555 页)