

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-344-05

市域铁路列车高速越行时 入口段隧道和车站屏蔽门压力变化研究

朱淮东

(中铁上海设计院集团有限公司 上海 200070)

【摘要】 以市域铁路嘉闵线入口段隧道和迎宾三路站为例, 研究有无列车停靠车站时, 列车从隧道入口以 160km/h 速度突入隧道并越行通过车站时区间隧道和屏蔽门的压力变化。研究结果表明: 无列车停站时, 列车突入隧道入口段 U 型槽产生的初始压缩波传播到入口段隧道, 引起的最大正压可达 1215Pa; 由于车站左端活塞风井的泄压作用, 初始压缩波传到屏蔽门上最大正压仅 440Pa; 而列车通过右端活塞风井产生的压缩波传播到车站后的区间隧道时, 最大正压可达 1450Pa。有列车停站时, 车站前后区间隧道内压力波幅值几乎无变化, 但屏蔽门上压力略有上升, 压力波幅值增加在 10% 内。

【关键词】 市域铁路; 入口隧道; 列车越行; 压力变化; 屏蔽门

中图分类号 U25 文献标识码 A

Study on Pressure Change of Entrance Tunnel and Station Platform Screen Doors with Urban Railway Train Overtaking at a High Speed

Zhu Huaidong

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd, Shanghai, 200070)

【Abstract】 Taking the entrance tunnel and Yingbin 3rd Road station of urban railway Jiamin Line as an example, this paper studies the pressure change of the tunnel and platform screen door (PSD) when the train enters the tunnel at the speed of 160 km/h from the entrance and passes through the station. Results show that when there is no train stopping at the station, the initial compression wave generated by the train penetrating the U-shaped groove of the tunnel propagates to the entrance tunnel, the maximum positive pressure generated can reach 1215 Pa. Due to the pressure relief effect of the air shaft at the left end of the station, the maximum positive pressure transmitted by the initial compression wave to the PSD is only 440 Pa. When the compression wave generated by the air shaft at the right end propagates to the tunnel after the station, the maximum positive pressure can reach 1450 Pa. When there is a train stopping at the station, the pressure amplitude value in the tunnel before and after the station has almost no change. But the pressure of PSD increases slightly, the increase of the amplitude value is within 10%.

【Keywords】 Urban railway; Entrance tunnel; Train overtaking; Pressure change; Platform screen door

0 引言

随着新型城镇化的快速发展, 有快速方便、容量大优势的市域铁路成为一种新型客运轨道交通方式。城市圈不断高速发展, 地面用地紧张, 越来

越多的市域铁路往地下发展, 形成市域铁路隧道和地下车站。当列车在隧道内运行速度超过 100km/h 时, 高速运行的列车与空气间相互作用产生的气动效应会影响列车和隧道内设备安全^[1,2]。在现有市

域铁路设计中，部分地下车站存在列车高速越行，此时列车运行产生的瞬态压力波动还会对站台屏蔽门产生一定影响。

国内外很多学者对隧道压力波和站台屏蔽门压力进行了研究。有学者^[3-5]采用数值模拟和模型试验方法研究列车进入隧道时引起的压力波动。王学英等^[6]通过动模型实验，研究高速列车通过隧道时压力变化与列车速度和阻塞比的关系。赵晶^[7]研究了高速列车单车通过隧道时阻塞比、隧道横截面形状、缓冲结构和横通道对列车气动特性的影响。马福东等^[8]采用数值计算软件对某地下车站屏蔽门和安全门两种模式下站台的 最大风速 、 最大瞬变压力 、 压缩波峰值 等进行了计算分析。结果表明，列车高速过站时在屏蔽门上产生的气动压力最大达到 937Pa ，屏蔽门的存在会恶化车站越行线位置的气动效应。

本文采用三维 CFD 数值计算方法，以市域铁路嘉闵线的入口段隧道和迎宾三路站为例，考虑迎宾三路站无列车停靠和有列车停靠，研究列车从隧道 U 型槽敞口段以 160 km/h 速度突入隧道并越行车站时区间隧道和车站屏蔽门的压力变化规律，可为市域铁路入口段隧道内设备和越行车站屏蔽门的承压提供设计依据。

1 数值计算方法

1.1 数值计算模型建立

嘉闵线采用 8 节编组的市域动车组，列车总长度 200m 。本研究重点关注隧道内压力变化，参考文献^[9,10]，忽略列车转向架、受电弓和设备舱对气流流动的影响，对列车外形进行简化，建立的列车数值计算模型如图 1 所示。

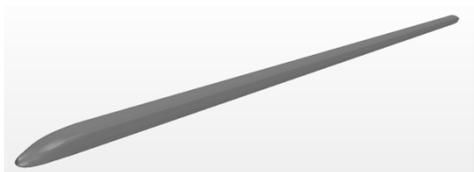


图 1 列车数值模型

Fig.1 Numerical model of the Train

市域铁路嘉闵线在通过市区时列车进入隧道运行，列车高速突入入口段隧道，在隧道内产生压力波动，并往前传播。当列车越行通过入口段附近的迎宾三路站，还会引起车站屏蔽门压力变化。当

有列车在迎宾三路停靠时，车站轨行区断面净空面积减小，加剧屏蔽门上压力波动。因此，本研究考虑有列车和无列车停靠迎宾三路站两种工况。

基于嘉闵线入口段隧道和迎宾三路站结构尺寸建立模型，整个计算模型长度为 2289m ，如图 2 所示。入口附近 U 型槽敞口段长 320m ，入口至迎宾三路站区间隧道长 1138m ，车站长 531m 。列车通常是经过一定坡度的 U 型槽进入隧道，本研究简化将 U 型槽隧道水平处理。



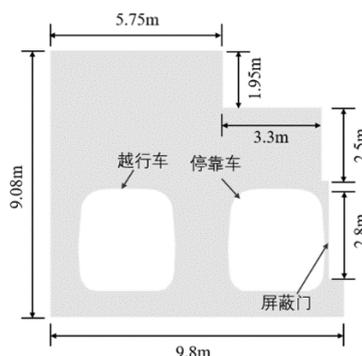
图 2 模型计算范围

Fig.2 Computational range of the model

建立的车站和隧道数值计算模型如图 3 所示。其中，区间隧道直径为 7.8m ，对应的净空面积为 43m^2 ，阻塞比为 0.26 ，车站轨行区净空面积为 76m^2 ，车站屏蔽门距越行线中心线的距离为 6.75m ，竖井面积为 25m^2 。为了使流场充分发展，避免气流绕流影响，需要扩大 U 型槽外部的空气计算域^[11]，尺寸为 $320\text{m} \times 40\text{m} \times 65\text{m}$ 。



(a) 车站及隧道模型



(b) 车站断面示意图（有车停靠）

图 3 车站及隧道数值计算模型

Fig.3 Numerical model of station and tunnel

1.2 网格划分和参数设置

本研究采用 STAR-CCM+ 软件建模并计算，列车运行的模拟采用重叠动网格技术，采用六面体网格对上述计算域进行网格划分。车身表面网格大小

为 0.125m，表面设置 4 层棱柱层网格，棱柱层内以拉升比 1.2 逐层增长，并对列车周围网格加密，车身附近区域、轨行区及列车穿行的隧道区域的网格大小为 0.25m，其余区域网格大小为 0.5m，总网格数为 792 万，列车表面和车身周围网格划分如图 4 所示。对列车通过隧道时车外复杂的流动区域进行分区，包含整个隧道流动空间的背景区域以及运动列车周围的重叠区域。重叠区域跟随列车进行运动，流场信息提供插值在重叠区边界进行匹配和耦合。

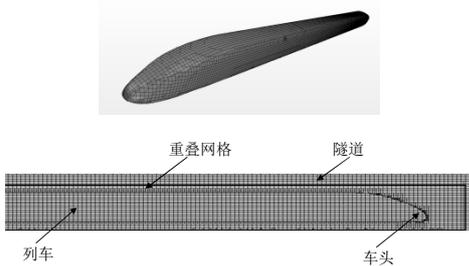


图 4 列车表面及周围网格

Fig.4 Mesh of train surface and surrounding zone

对计算边界条件的处理，隧道入口附近的计算域以及竖井出口均为压力出口边界，隧道出口为压力远场边界，列车表面和隧道壁面为无滑移边界。

隧道内列车运行产生的空气流动属于典型的三维、粘性、可压缩、非定常的湍流流动。本研究采用 RANS 方法和 k-ε 湍流模型对隧道内的空气流动进行求解。

1.3 压力测点布置

为监测列车在隧道中运行、车站越行、遇隧道突扩或突缩面时造成的压力波动，在各隧道段分别取一些测点、同时在每个突扩突缩面的前后各 5m 处取 2 个测点。区间隧道段部分测点布置如图 5 所示。



图 5 隧道压力测点示意图

Fig.5 Schematic diagram of pressure measuring points in the tunnel

为了分析屏蔽门上压力波动，根据车站实际设

计，在 22 扇屏蔽门上监测每扇门上的最大压力值，屏蔽门具体位置如图 6 所示。

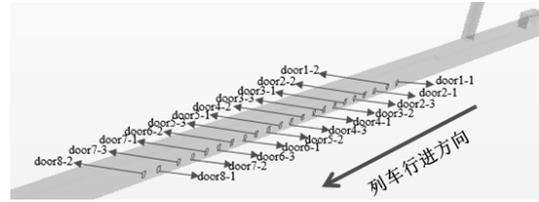


图 6 站台屏蔽门分布图

Fig.6 Distribution of platform screen door

2 无车停靠时列车越行过站的压力变化

本文首先模拟列车以 160km/h 速度匀速从入口段 U 型槽外进入隧道，并越行通过无车停靠的迎宾三路站的过程中隧道内压力变化。

2.1 车站前、后区间隧道的压力变化

无列车停靠时，迎宾三路站前的入口区间隧道不同位置处的压力变化如图 7 所示。

由图 7 可见，在 2s 开始列车通过入口处的 U 型槽进入峒口，产生初始压缩波。初始压缩波依次到达隧道内各处测点，且由于摩擦效应，峰值越来越小，215m 测点处正压最大，最大压力值为 1215Pa。由于入口附近隧道断面是渐变的，断面积较大，产生的初始压缩波幅值并不高，且在传播过程中由于隧道断面突变处的影响，初始压缩波有波动。

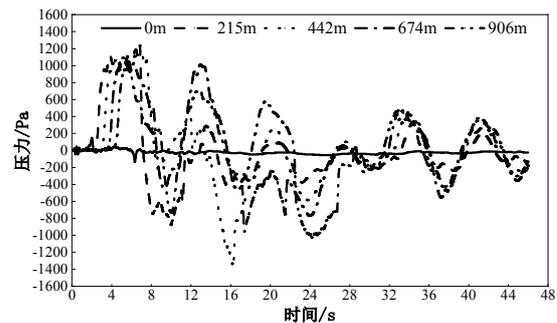


图 7 无车停靠时入口区间隧道内的压力变化

Fig.7 Pressure change in the entrance section tunnel without train stop

当车尾经过 442m 测点时，测点压力迅速下降，与膨胀波叠加后造成该测点处的最大负压 -1390Pa。当车尾离开测点后，压力迅速回升。其他测点的变化类似。当车尾经过站前区间隧道后，各测点压力变化慢慢减小，但仍然受到隧道内压缩波和膨胀波的作用而有所波动。

迎宾三路站后区间隧道不同位置处的压力变化如图 8 所示。由于车站左右两个活塞风井的泄压作用，初始压缩波通过风井到达右侧区间内测点后，峰值显著下降，最大值仅 360Pa。图中可以发现 40s 后又出现了一次压缩波峰值，该压缩波是由列车通过车站右端活塞风井时断面突变而产生的，峰值最大达到 1450Pa。由此可见，并不是隧道入口处初始压缩波传播至各测点形成最大压力变化，列车通过风井时产生的压缩波也可在测点处引起较大的压力波动。

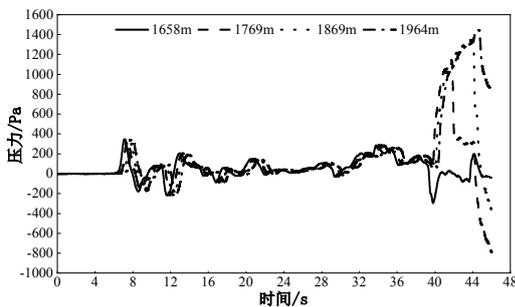


图 8 无车停靠时车站后区间隧道的压力变化

Fig.8 Pressure change of section tunnel after the station without train stop

2.2 车站屏蔽门的压力变化

无列车停靠时，车站屏蔽门的最大压力变化如图 9 所示。图中 door1-1 是指车站进站端所对应的第一扇屏蔽门。

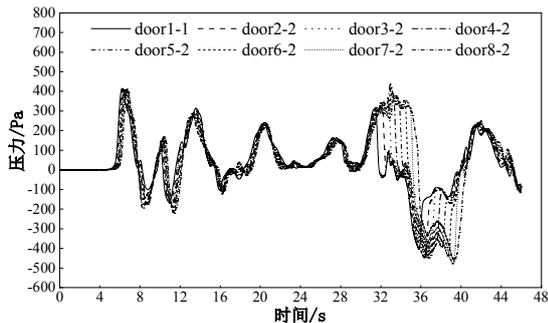


图 9 无车停靠时不同屏蔽门的最大压力变化

Fig.9 Maximum pressure change of different screen doors without train stop

由图 9 可见，由于左端活塞风井的泄压，初始压缩波传到车站屏蔽门后的幅值并不大，最大正压仅 415Pa。而且该压缩波传播至屏蔽门时，与右端风井反射回来的膨胀波有叠加，峰值出现的时间较短。由于各扇屏蔽门间距并不大，两端的端门最大间距在 200m 内，各个点在 30s 前的压力变化基本

是一致的。30s 开始，列车通过车站左端风井并在风井面积突变处产生新的压缩波。该压缩波依次经过屏蔽门上测点，而车同时也会经过测点，造成正压的压缩波和列车通过时的车身负压的叠加，使各扇屏蔽门上压力变化不同。屏蔽门左端的测点距离风井较近，叠加作用使得屏蔽门上最大正压并不高，而右端的屏蔽门距离远，叠加作用弱。压缩波传播到出站端屏蔽门上最大值可达 440Pa。车尾通过测点时产生负压，最大值为-470Pa。

3 有车停靠时列车越行过站的压力变化

当有车停靠在车站时，车站轨行区隧道断面面积减小，且有断面突变，造成的压力波动更大。进一步分析列车进入隧道并越行通过有车停靠的迎宾三路站的过程中隧道内压力变化。

3.1 车站前、后区间隧道的压力变化

有列车停靠时，迎宾三路站前入口区间隧道不同位置处压力变化如图 10 所示。同样在 2s 开始列车通过入口处 U 型槽进入峒口产生初始压缩波。初始压缩波依次到达隧道内各处测点，215m 测点处正压最大，为 1215Pa，与无车停靠工况一致。即有无列车停靠对站前入口区间隧道内压力变化规律与幅值几乎没有影响。当车尾经过 442m 测点时，测点压力瞬间迅速下降，该测点 442m 处的最大负压为-1350Pa，比无车停靠工况稍小，说明有车时该点反射回来的膨胀波要小一些。

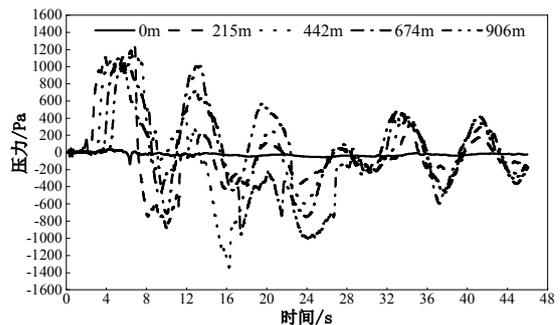


图 10 有车停靠时入口区间隧道内的压力变化

Fig.10 Pressure change in the entrance section tunnel with train stop

由图 11 可见，初始压缩波通过风井到达车站右侧区间内的测点后，峰值最大值仅为 335Pa，比无车停靠工况稍小，主要是由于有列车停靠时，对波的传播有一定阻碍作用。40s 的压缩波峰值最大达到 1450Pa，与无车停靠工况一致，说明列车经

过右端活塞风井产生的压缩波在车站后区间隧道的传播与是否有列车停靠无关。

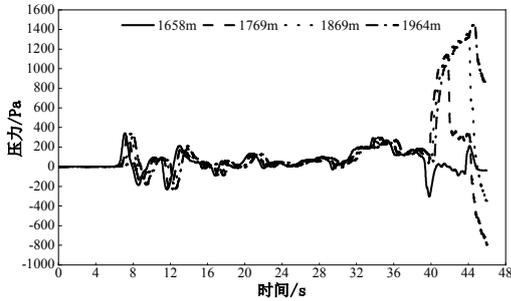


图 11 有车停靠时车站后区间隧道的压力变化

Fig.11 Pressure change of section tunnel behind the station with train stop

3.2 车站屏蔽门的压力变化

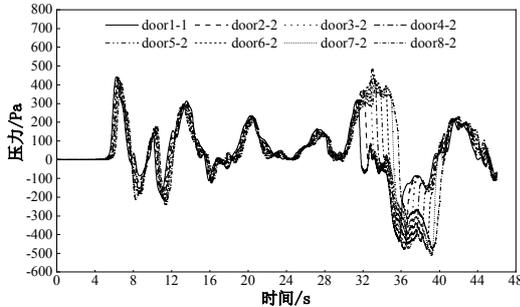


图 12 有车停靠时不同屏蔽门上的最大压力变化

Fig.12 Maximum pressure change of different screen doors with train stop

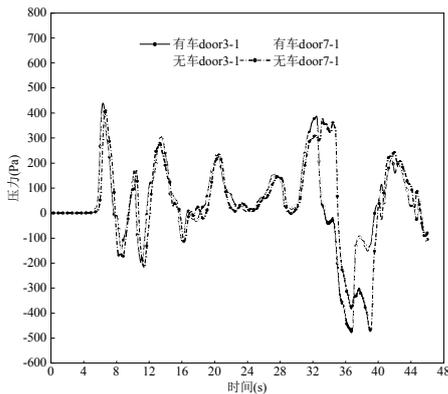


图 13 有无列车停靠时屏蔽门压力变化对比图

Fig.13 Comparison of screen doors pressure changes with and without train stop

图 12、图 13 可见，由于活塞风井的泄压，初始压缩波传到车站屏蔽门后最大正压仅为 440Pa，比无车停靠时要大 25Pa。说明有车停靠时屏蔽门承压会增加，但增加值不到 10%。各个点在 30s 前

的压力变化基本一致。30s 开始，列车通过左端活塞风井产生的压缩波依次经过屏蔽门上测点。压缩波传播到屏蔽门上最大值可达 486Pa，比无车停靠时大 46Pa，约增加 10%。车尾通过测点时产生负压，最大值为-509Pa，比无车停靠工况大 39Pa，增加不到 10%。

4 结论

本文研究了市域铁路地下车站有无列车停靠工况下，高速列车突入隧道并越行过站时区间隧道和屏蔽门的压力变化，得到以下结论：

(1) 列车突入产生的初始压缩波传播到入口区间隧道时，最大正压可达 1215Pa；列车通过右端风井产生的压缩波传播到车站后的区间隧道时，引起的最大正压可达 1490Pa；列车经过屏蔽门时，屏蔽门上最大正负压为 486Pa-509Pa。

(2) 有无列车停靠对车站前的区间隧道内压力波幅值几乎没有影响，同时列车经过右端活塞风井产生的压缩波在车站后区间隧道的传播也不受列车停靠影响。

(3) 由于有车停靠时车站隧道净空面积减小，增加了阻力，使屏蔽门压力略有增加，压缩波传播到屏蔽门上最大值可达 486Pa，比无车停靠时大 46Pa，车尾通过测点时产生负压，最大值为-509Pa，比无车停靠工况大 39Pa，但压力波幅值增加在 10% 以内。

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,2018,21(7):54-57.
- [2] 李国庆.城市轨道交通通风空调新技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [3] DOI T, OGAWA T, MASUBUCHI T, et al. Development of an experimental facility for measuring pressure waves generated by high-speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010,98(1): 55-61.
- [4] UYSTEPRUYST D, WILLIAM-LOUIS M, CREUSE E, et al. Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels[J]. Computers & Fluids, 2011,47(1):165-177.

(下转第 386 页)