

横通道对高速磁浮列车的车隧耦合气动效应影响<sup>\*</sup>盖杰<sup>1</sup> 余以正<sup>1</sup> 张雷<sup>2</sup> 尹小放<sup>2</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 中南大学交通运输工程学院, 410075, 长沙// 第一作者, 高级工程师)

**摘要** 高速磁浮列车通过隧道时会对车辆、隧道和环境等产生恶劣的空气动力学效应。通过数值模拟研究横通道断面大小、横通道位置和长度对 600 km/h 高速磁浮列车的车隧耦合气动效应的影响, 并通过动模型试验验证了数值模拟方法的可靠性。研究结果表明: 当圆拱形横通道宽度由 3.8 m 减至 2.9 m 时, 列车表面测点压力波幅值增加 8.8%, 隧道测点压力波幅值几乎无变化, 距离隧道出口 20 m 远处微气压波峰值增加 5.4%; 横通道位于隧道中间时, 列车表面测点压力波幅值最小, 横通道位置对隧道壁面压力波幅值无影响, 对微气压波影响也较小; 当横通道长度由 30 m 增至 50 m 时, 列车表面测点压力波幅值增加 11.8%, 横通道长度对隧道壁面压力波幅值和微气压波影响不大。

**关键词** 高速磁浮列车; 隧道; 横通道; 气动效应

**中图分类号** U270.1+1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.04.007

## Influence of Transverse Passage on Vehicle-tunnel Coupling Aerodynamic Effect for High-speed Maglev Train

GAI Jie, YU Yizheng, ZHANG Lei, YIN Xiaofang

**Abstract** When a high-speed maglev train passes through tunnels, the bad aerodynamic effect on vehicle, tunnel and environment will be induced. The influence of the size, position and length of transverse passage on vehicle-tunnel coupling aerodynamic effect of 600 km/h high-speed maglev train is studied by numerical simulation, and the reliability of numerical simulation method is verified by moving model test. Research results show that when the width of circular arch transverse passage decreases from 3.8 m to 2.9 m, the pressure wave amplitude at the measuring points on train surface increases by 8.8%, the pressure wave amplitude at the measuring points of tunnel wall has almost no change, and the peak value of the micro-pressure wave at 20 m from the tunnel exit increases by 5.4%. When the transverse passage is located in the middle of the tunnel, the pressure wave amplitude of the measuring

points on train surface is the smallest. The position of transverse passage has no impact on tunnel wall pressure wave amplitude and has little effect on the micro-pressure wave. As the length of transverse passage increases from 30 m to 50 m, the pressure wave amplitude of the measuring points on train surface increases by 11.8%, and the transverse passage length has little impact on tunnel wall pressure wave amplitude and micro-pressure wave.

**Key words** high-speed maglev train; tunnel; transverse passage; aerodynamic effect

**First-author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

在高速铁路建设中, 两条并行的单线隧道间通常要设置一些横通道, 其不仅可用于事故救援, 而且可以缓解压力波和微气压波带来的危害。文献[1-4]研究了横通道对压力波和空气阻力的影响。文献[5]研究了横通道位置和断面大小对 250 km/h 列车通过隧道引起的微压波的影响。文献[6]研究列车运行速度为 350 km/h 时横通道对隧道瞬变压力的缓解, 设置横通道可以使隧道壁面压力变化幅值降低 37% 左右, 同时可使车体表面测点的瞬变压力波幅值降低 30% 以上, 相同截面面积但不同形状横通道的缓解效果基本相同。文献[7]研究了横通道的截面积、长度以及个数等参数对 350 km/h 高速列车引起的气动效应的缓解作用。文献[8-9]研究了两条并联隧道横通道的间距、面积及位置变化, 以及斜交方式对隧道及横通道内压力变化的影响规律。文献[10]研究了横通道及平导对压力波传播特性的影响, 对横通道设置在不同位置时缓解微气压波的效果进行了比较。目前, 相关研究只针对时速 350 km 及以下的列车, 尚未有针对时速 600

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2016YFB1200602-06)

km 高速磁浮列车的相关研究。

时速 600 km 的高速磁浮列车运行速度更高,会对车辆、隧道和环境等产生更恶劣的空气动力学效应。本文研究横通道断面大小、长度和设置位置等因素对 600 km/h 高速磁浮列车的车隧耦合气动效应的影响,以期对相关项目的列车和隧道设计提供一定参考。

## 1 数值模拟方法及试验验证

### 1.1 数值模拟方法

本文采用 FLUENT 软件对高速磁浮列车通过隧道时复杂的空气流场进行模拟计算。控制方程采用三维、非定常、可压缩流对应的连续性方程, Navier-Stokes 方程, 能量方程和理想气体状态方程。湍流模型选取工程上应用较广的  $\kappa\text{-}\varepsilon$  模型。

计算采用 3 车编组常导磁浮列车模型, 车长约为 80 m, 车辆横断面面积约为  $12\text{ m}^2$ , 设计运行速度为 600 km/h。本文使用的基准计算模型见图 1。横通道连接两截面相同的单洞隧道(隧道截面积均为  $100\text{ m}^2$ , 隧道长度为 600 m)。2 条单洞隧道之间的横通道长度为 30 m。横通道形状为圆拱形, 上部是半圆形, 下部是正方形, 横通道宽度  $D$  为 3.8 m。

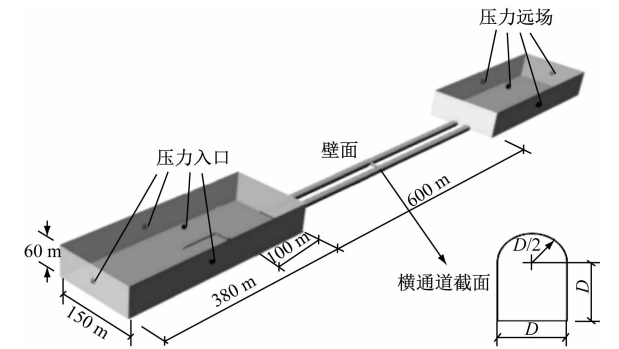


图 1 计算模型、边界条件和横通道截面图  
Fig. 1 Calculation model, boundary conditions and transverse passage section

采用滑移网格法来模拟列车与地面、列车与隧道之间的相对运动。计算区域尺寸和计算边界条件见图 1, 图 1 中未标记的其余边界均为固定壁面。运动区域两端面分别为压力进口和出口边界条件。基于高速列车空气动力学数值计算方法研究<sup>[11-12]</sup>。列车表面网格尺寸为 50 mm(见图 2)。边界层采用 18 层网格, 第一层网格厚度为 1 mm, 列车附近体网格最大尺寸约为 20 mm, 体网格总数约为 1.4 亿个。

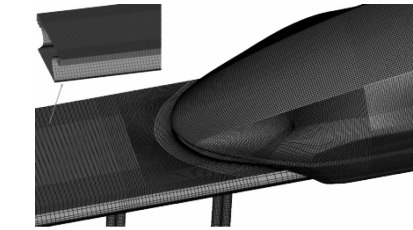


图 2 列车和轨道局部面网格  
Fig. 2 Local surface grids of train and track

为研究横通道对列车、隧道和环境的影响, 本研究在列车表面布置 22 个测点, 在隧道表面布置 28 个测点, 并在距隧道出口 20 m、距离地面 1.5 m 高度处布置 1 个微气压波监测测点。

### 1.2 试验验证

为验证数值模拟方法的可靠性, 本研究利用中南大学 600 km/h 等级高速列车气动性能试验装置开展了动模型试验。横通道的试验模型如图 3 所示。按实际比例计算, 横通道距隧道入口 300 m, 且横通道宽  $D=2.9\text{ m}$ 。数值模拟计算结果与动模型试验结果对比如表 1 所示。

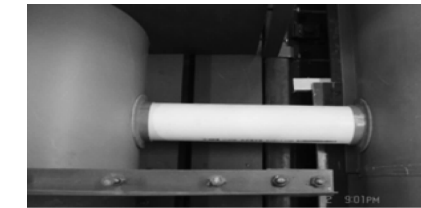


图 3 横通道试验模型图  
Fig. 3 Test model of transverse passage

由表 1 可见, 动模型试验与仿真计算结果相对误差在 5% 以内, 说明数值模拟方法可有效模拟横通道对高速磁浮列车的车隧耦合气动效应。

表 1 动模型试验与数值模拟的压力结果对比  
Tab. 1 Comparison of pressure results between moving model test and numerical simulation

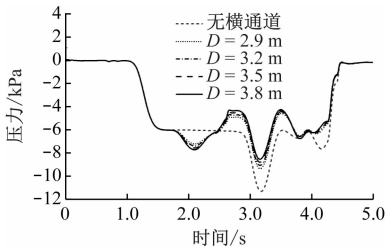
变量	动模型试验 结果/Pa	数值计算 结果/Pa	相对误差/%
列车表面压力波幅值	4 793	4 656	2.86
隧道壁面压力波幅值	6 075	5 929	2.40
距隧道口 20 m 处的 微气压波峰值	598	587	1.84

## 2 车隧耦合气动效应影响分析

### 2.1 $D$ 对车隧耦合气动效应影响分析

为研究圆拱形横通道截面尺寸对车辆、隧道和

环境的影响,利用基准隧道模型,分别对无横通道,以及  $D$  为 2.9 m、3.2 m、3.5 m 和 3.8 m 时的车隧耦合气动效应进行计算。图 4 为  $D$  不同时列车表面测点压力变化曲线。列车表面和隧道壁面的测点压力波幅值及距隧道出口 20 m 处微气压波峰值的计算结果见表 2。表中所列结果均是所有监测点中的最大值,下同。



注:压力以车体表面法向向内为正,向外为负。

图 4  $D$  不同时的列车表面测点压力变化曲线

Fig. 4 Change curve of measuring points pressure on train surface with different  $D$

表 2  $D$  不同时的压力波幅值和微气压波峰值

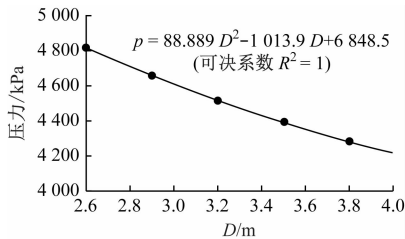
Tab.2 Pressure wave amplitude and peak value of micro-pressure wave with different  $D$  单位:Pa

横通道情况	列车表面压力波幅值	隧道壁面压力波幅值	微气压波峰值
无横通道	5 662	8 566	638
$D=2.9$ m	4 656	5 929	587
$D=3.2$ m	4 515	5 928	577
$D=3.5$ m	4 388	5 931	568
$D=3.8$ m	4 280	5 929	557

相比无横通道隧道, $D=3.8$  m 的横通道使列车表面和隧道壁面测点最大压力波幅值分别降低了 24.4% 和 30.8%,说明横通道能显著缓解列车通过隧道引起的空气压力变化。随着  $D$  的减小,列车表面测点压力波幅值增加,但隧道测点压力波幅值几乎无变化。当  $D$  由 3.8 m 减小至 2.9 m 时,列车表面测点压力波幅值增加 8.8%。列车表面压力波幅值同  $D$  的关系拟合曲线见图 5。图 5 中拟合关系近似为二次多项式,可见对于参数确定的隧道,存在一个合适的  $D$  使得横通道的缓解效果最佳。计算可得,当  $D=5.7$  m 时,列车表面测点压力波幅值降到最小,为 3 957 Pa。

当隧道无横通道时,距离隧道出口 20 m 处微气压波峰值为 638 Pa。设置  $D=3.8$  m 的横通道可使微气压波峰值降低 12.7%。可见,横通道的建立可

大幅降低微气压波峰值。图 6 为  $D$  不同时距隧道出口 20 m 处隧道壁面测点压力变化曲线。从图 6 可见:随  $D$  的减小,微气压波峰值增加; $D$  由 3.8 m 减小至 2.9 m 时,距离隧道出口 20 m 处隧道壁面微气压波峰值增加了 5.4%。



注: $p$ —列车表面压力。

图 5 列车表面压力波幅值- $D$  的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of train surface pressure wave amplitude and  $D$

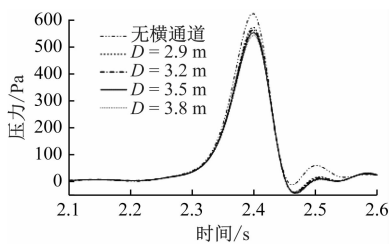


图 6 距隧道出口 20 m 处隧道壁面测点压力变化曲线

Fig. 6 Change curve of measuring point pressure on tunnel wall 20 m from tunnel exit

## 2.2 横通道位置对车隧耦合气动效应影响分析

为研究横通道位置对车辆、隧道和环境的影响,在基准隧道模型下分别计算分析横通道距隧道入口距离  $d$  为 200 m、300 m 和 400 m 时的车隧耦合气动效应。图 7 是  $d$  不同时列车表面测点压力变化曲线。列车表面和隧道壁面的压力波幅值及微气压波峰值的计算结果见表 3。

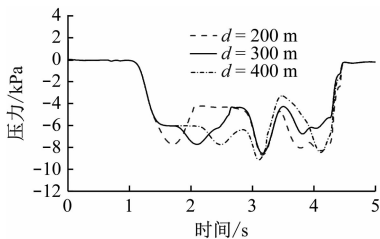


图 7  $d$  不同时的列车表面测点压力变化曲线

Fig. 7 Change curve of measuring points pressure on train surface with different  $d$

从计算结果可知:横通道位于隧道中间( $d=300$  m)时,列车表面测点压力波幅值最小,为 4 280

Pa,横通道布置在其他位置均会不同程度地增加列车表面压力波幅值;横通道位置对隧道壁面测点压力波幅值无影响; $d$ 由200 m增至400 m时,距隧道出口20 m处微气压波峰值仅增加2.5%,可见横通道位置对微气压波峰值影响不大。

表3  $d$  不同时的压力波幅值和微气压波峰值  
Tab.3 Pressure wave amplitude and peak value of micro-pressure wave with different  $d$  单位:Pa

$d$ /m	列车表面 压力波幅值	隧道壁面 压力波幅值	微气压 波峰值
200	4 408	5 928	550
300	4 280	5 929	557
400	4 610	5 928	564

2.3 横通道长度对车隧耦合气动效应影响分析

为研究横通道长度(即两隧道之间线间距) $l$ 对车辆、隧道和环境的影响,在基准隧道模型下分别计算分析 $l$ 为30 m、40 m和50 m时的车隧耦合气动效应。图8为 $l$ 不同时的列车表面测点压力变化曲线。列车表面和隧道壁面压力波幅值及微气压波峰值的计算结果见表4。

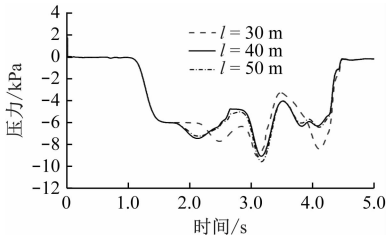


图8  $l$ 不同时的列车表面测点压力变化曲线  
Fig.8 Change curve of measuring points pressure on train surface with different  $l$

表4  $l$ 不同时的测点压力波幅值和微气压波峰值  
Tab.4 Pressure wave amplitude and peak value of micro-pressure wave with different  $l$  单位:Pa

$l$ /m	列车表面 压力波幅值	隧道壁面 压力波幅值	微气压 波峰值
30	4 280	5 929	557
40	4 534	5 925	568
50	4 783	5 920	568

计算结果表明, $l$ 由30 m增至50 m,列车表面测点压力波幅值增加11.8%。这说明随着 $l$ 的增加,列车表面测点压力波幅值增大,不利于减小车体表面气动载荷。 $l$ 由30 m增至50 m,隧道壁面最大压力波幅值减小仅0.2%,距隧道出口20 m处微

气压波峰值仅增加约2%。可见,对于600 km/h高速磁浮列车, $l$ 的增加对隧道壁面压力波和隧道口微气压波影响不大。

3 结语

对于600 km/h高速磁浮列车,在2条断面为100 m<sup>2</sup>、长度为600 m单线隧道之间,横通道特征对列车和隧道壁面压力波及隧道出口微气压波的影响如下:

1) 在隧道中间增加 $D=3.8$  m、 $l=30$  m的圆拱型横通道,可使列车表面和隧道表面压力波幅值分别降低24.4%和30.8%,使得距隧道出口20 m处微气压波峰值降低12.7%。

2) 圆拱形横通道 $D$ 由3.8 m减至2.9 m时,列车表面测点压力波幅值增加8.8%,隧道测点压力波幅值几乎无变化,距离隧道出口20 m处微气压波峰值增加5.4%。通过拟合关系计算得到, $D=5.7$  m时的列车表面压力波幅值最小。

3) 横通道位于隧道中间( $d=300$  m)时,列车表面测点压力波幅值最小。横通道位置对隧道壁面压力波幅值无影响,对微气压波影响也较小。

4) 当 $l$ 由30 m增至50 m时,列车表面测点压力波幅值增加11.8%,隧道壁面压力波幅值和微气压波峰值所受影响不大。

参考文献

[1] BARROWS T M. Wave reflections from slotted tunnel portals [J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 50(4): 571.  
[2] VARDY A E. Unsteady airflows in rapid transit systems: part 1 [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1980, 194(1): 341.  
[3] VARDY A E. Unsteady airflows in rapid transit systems: part 2 [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1980, 194(1): 349.  
[4] BARON A, MOSSI M, SIBILLA S. The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(5): 365.  
[5] 岳楹沁, 高波. 横通道对隧道出口微气压波影响的数值模拟研究[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5): 20.  
YUE Yingqin, GAO Bo. Study of the influence over cross passage on high-speed railway tunnel exit micro-pressure wave[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(5): 20.  
[6] 李志伟, 梁习锋, 张键. 横通道对缓解隧道瞬变压力的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(4): 37.