

高速列车通过连通开孔隧道的气动特性数值仿真研究^{*}

高 畅¹ 李 田² 张继业²

(1. 四川省轨道交通投资有限责任公司, 610031, 成都; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为了减缓高速列车通过隧道引起的压力波动, 研究了联络通道对高速列车通过隧道时压力波特性的影响。建立了3节编组高速列车数值仿真计算模型, 基于三维非定常可压缩 Navier-Stokes 方程, 以及 $k-\varepsilon$ 方程湍流模型和滑移网格技术, 数值模拟了高速列车通过联络通道时隧道的气动特性, 研究了设置联络通道对隧道压力波的影响及不同的通道间距对隧道压力波动的影响。研究结果表明: 与无联络通道隧道相比, 列车通过连通开孔隧道的气动特性得到明显改善; 通道对初始压力上升、下降的抑制效果更为明显, 对膨胀波的抑制作用更为突出。联络通道的设置使隧道压力波的波形呈现局部锯齿状。

关键词 高速列车; 联络通道; 气动特性; 长大隧道

中图分类号 U451⁺.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.005

Numerical Simulation of Aerodynamic Characteristics of High-speed Train Passing through Tunnel with Perforations

GAO Chang, LI Tian, ZHANG Jiye

Abstract In order to slow down the pressure fluctuation caused by high-speed train passing through tunnel, the influence of the connected aisle on the pressure wave characteristics of high-speed train passing through tunnel is studied. A numerical simulation model for three-section formation high-speed train is established. Based on three-dimensional, unsteady, compressible Navier-Stokes equation and $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model and slip grid technology, the aerodynamic characteristics of high-speed train passing through tunnel with connected aisle are numerically simulated. Research results show that compared to tunnel without connected aisle, the aerodynamic characteristics of train passing through tunnel with connected aisle is evidently improved; tunnel with connected aisle shows more visible effect on the suppression of initial pressure

rise and fall, and the suppression of the expansion wave is more prominent; setting connected aisle makes the pressure wave waveform partially jagged.

Key words high-speed train; connected aisle; aerodynamic characteristics; long tunnel

First-author's address Sichuan Railway Transportation Investment Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

列车进入隧道产生的压力波影响列车运行的安全性和乘客乘坐的舒适性^[1-2]。文献[3-4]通过声学模拟和模型试验确定了初始压缩波幅值与列车速度的二次方、阻塞比成正比;文献[5-7]认为减小阻塞比是缓解压力波幅值的有效途径,由此,隧道缓冲结构应运而生;文献[8]通过设置竖井来进一步减缓隧道内的压力波动,通过数值模拟探究了竖井对压力波的影响;文献[9-10]采用一维可压缩非定常不等熵流动模型以及广义黎曼变量特征线法,模拟了列车通过内置开孔隔墙的压力波特性。联络通道为隧道的辅助坑道。本文研究了联络通道对列车气动性能的影响,为优化隧道内列车的气动特性提供思路。

1 数值仿真模型

1.1 几何模型

设置有联络通道的隧道通常称为连通开孔隧道。联络通道的设置为2条隧道内的空气提供了流动通道。高速列车模型采用“头车+中间车+尾车”的3节编组方式,忽略车体外部某些复杂的细部结构,如门把手、风挡、受电弓等。列车底板距地面为0.376 m。列车以350 km/h通过隧道时的计算区域如图1 a)所示,2个隧道的截面形状为半圆

^{*} 国家自然科学基金项目(51605397);四川省科技计划项目(2019YJ0227);牵引动力国家重点实验室自主课题(2019TPL_T02)

形,横截面积均为 100 m^2 ;如图 1 b)所示,联络通道的横截面为矩形,长宽比($a:b$)为 $1.2:1.0$ 。为了研究列车在隧道中运行的空气动力学特性,2 条隧道长度均采用“最不利长度”来模拟压力波对列车最剧烈的作用^[11],如图 1 c)所示,2 个隧道的中心距离 L 为 20 m 。

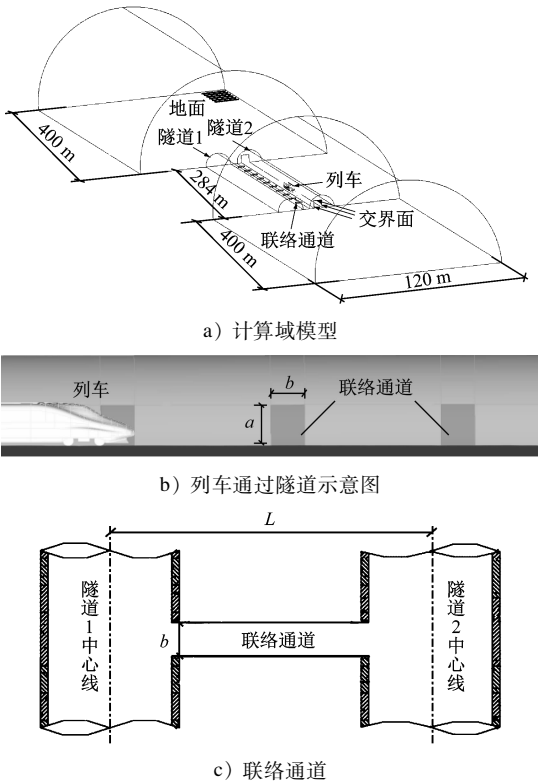
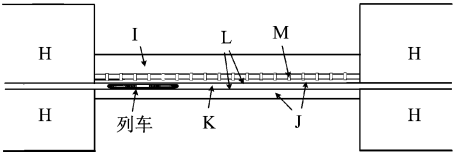


图 1 列车通过连通开孔隧道示意图

1.2 计算模型及网格划分

本文采用基于有限体积法的商业软件 Fluent 对高速列车的压力波进行分析。数值模拟采用三维非定常可压缩 Navier-Stoke 方程,考虑了空气的可压缩性,采用滑移网格来模拟列车通过连通开孔隧道的整个过程。如图 2 所示,将整个流场区域划分为固定区域和移动区域,其中:固定部分包括隧道区域、联络通道区域和隧道外部流场区域;移动区域为列车周围区域。移动区域的滑移速度等于列车运行速度。固定区域与移动区域通过交界面进行数据传递。表 1 为 CFD(计算流体动力学)的高阶差分格式。

本文采用 ICM-CFD 软件进行网格划分。为保证计算精度,列车车体周围采用四面体网格,车体壁面设有边界层,其他部分划分为六面网格。如表 2 所示,为验证网格精度对计算结果的影响,划分



注:H——隧道外固定区域;I——隧道 1 固定区域;J——隧道 2 固定区域;K——隧道 2 移动区域;L——交界面;M——联络通道固定区域。

图 2 计算区域的划分

表 1 CFD 模拟所采用的高阶差分格式

项目	参数设置
求解过程	非定常
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$ (重整化群 $k-\varepsilon$)
求解器	Pressure Based(压力基)
压力-速度耦合	SIMPLEC(压力修正算法)
压力离散	Standard(标准格式)
动量离散	Second Order Upwind(二阶迎风格式)
湍动能离散	Second Order Upwind(二阶迎风格式)
湍流耗散率离散	Second Order Upwind(二阶迎风格式)

了 5 套不同尺寸的网格分别进行数值计算,用以对比头车车窗处压力峰值的变化。从表 2 可以看出:与第 1 套网格下头车车窗处压力峰值相比,第 2 套网格的压力峰值小 28.0 Pa ,第 3 套网格的压力峰值小 21.7 Pa 。随着网格的逐渐加密,第 3、4、5 套网格下头车车窗处的压力峰值变化很小,可见第 3 套网格已满足网格的独立性要求。因此,本文采用第 3 套网格进行数值模拟,图 3 给出了局部网格示意图。

表 2 网格独立性检验对比表

网格序号	网格数量/万个	边界层层数/层	第 1 层高度/mm	增长比率	头车车窗处压力峰值/Pa
1	2 740	8	0.1	1.2	2 826.8
2	3 153	8	0.1	1.2	2 798.8
3	3 512	10	0.1	1.2	2 805.1
4	3 647	12	0.1	1.2	2 801.8
5	3 708	14	0.1	1.2	2 806.8

注:增长比率为边界层网格厚度的增长速度。

2 控制方程

高速列车进入隧道时,隧道内的流场考虑为三维黏性非定常的湍流流场。列车以 350 km/h 的速度在隧道内运行时,隧道内的空气被压缩,因此列

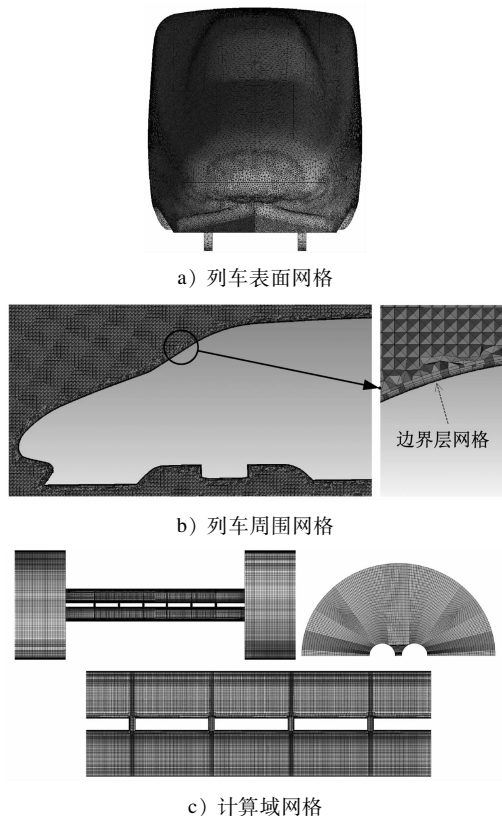


图3 计算模型的局部网格截图

车附近的流场可视为压缩流场,湍流模型可采用 $k-\varepsilon$ 标准模型,其控制方程为^[12]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}[\rho(u - u_i)\varphi] = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + S \quad (1)$$

$$u = [u \quad v \quad \omega] \quad (2)$$

$$u_i = [u_i \quad 0 \quad 0] \quad (3)$$

式中:

t ——时间;

ρ ——空气密度;

Γ ——广义扩散系数;

u ——流场速度矢量;

u_i ——网格移动速度矢量;

φ ——流场通量;

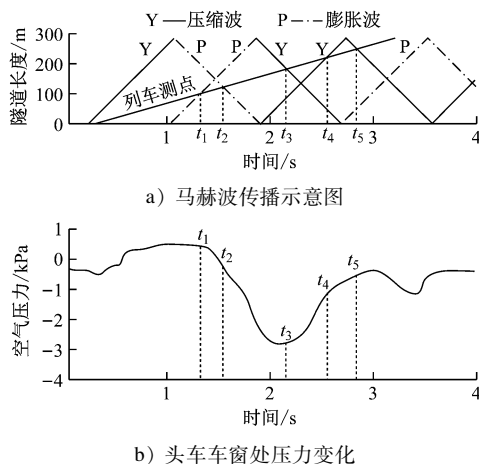
S ——广义源项。

3 联络通道对隧道压力波的影响

列车高速驶入隧道,引起隧道内空气剧烈扰动,形成压力波。本文基于滑移网格数值模拟的研究方法,研究设置联络通道对列车进入隧道产生压力波的影响,并通过控制变量分别探究了列车行驶速度、通道面积、通道间距对压力波的影响。

3.1 设置联络通道对隧道压力波的影响

本文将列车进入未设置联络通道隧道的压力波作为参照,与列车进入连通开孔隧道的压力波形作对比,进而探究连通开孔隧道内压力波的传播规律。图4为列车以350 km/h速度进入未设有通道隧道的压力波形,测点位置位于列车头车车窗处。图4 a)为马赫波在隧道内的传播示意图,图4 b)是头车车窗处外表面压力随时间的变化情况。



注: t_1 ——隧道内马赫波在车窗测点位置的第1次叠加的时间;
 t_2 ——隧道内马赫波在车窗测点位置的第2次叠加的时间;
 t_3 ——隧道内马赫波在车窗测点位置的第3次叠加的时间;
 t_4 ——隧道内马赫波在车窗测点位置的第4次叠加的时间;
 t_5 ——隧道内马赫波在车窗测点位置的第5次叠加的时间。

图4 列车高速通过未设联络通道隧道的压力变化过程

如图4所示,列车高速通过未设联络通道隧道的压力变化过程如下:

1) 当列车头部进入隧道时产生压缩波,该初始压缩波以声速向前传播,此时测点处的空气压力上升;当列车尾部进入隧道时产生膨胀波,该初始膨胀波以声速向前追赶列车,在 t_1 时刻初始膨胀波到达测点位置,此时测点处的空气压力开始下降。

2) 压缩波传到隧道出口后一部分以膨胀波的形式反射回来,另一部分则以微气压波的形式释放至隧道外。在 t_2 时刻膨胀波回传到测点窗位置,迫使测点处的空气压力持续下降。

3) t_3 时刻由初始膨胀波在隧道出口转化而成的压缩波传到测点处,压力开始上升。

4) t_4 时刻由膨胀波转化而成的压缩波到达测点位置,压力继续上升。

5) 压缩波到达出口处转化为膨胀波, t_5 时刻传到测点位置时,此时压力波开始慢慢下降,直到列车驶出洞口,压力开始上升至列车在隧道外大气环

境的稳定值。

3.2 联络通道面积对隧道压力波的影响

列车以 350 km/h 速度驶入双洞隧道,联络通道的横截面面积为 3.14 m^2 ,联络通道均匀设置,通道间距为 25 m。图 5 a) 是靠近通道侧头车车窗处(测点 1)的压力变化情况;图 5 b) 是远离通道侧头车车

窗处(测点 2)的压力变化情况;图 5 c) 靠近通道侧中间车车窗处(测点 3)的压力变化情况;图 5 d) 靠近通道侧尾车车窗处(测点 4)的压力变化情况;图 5 e) 距隧道入口 50 m 处、远离通道侧的隧道内壁处(测点 5)的压力变化情况。

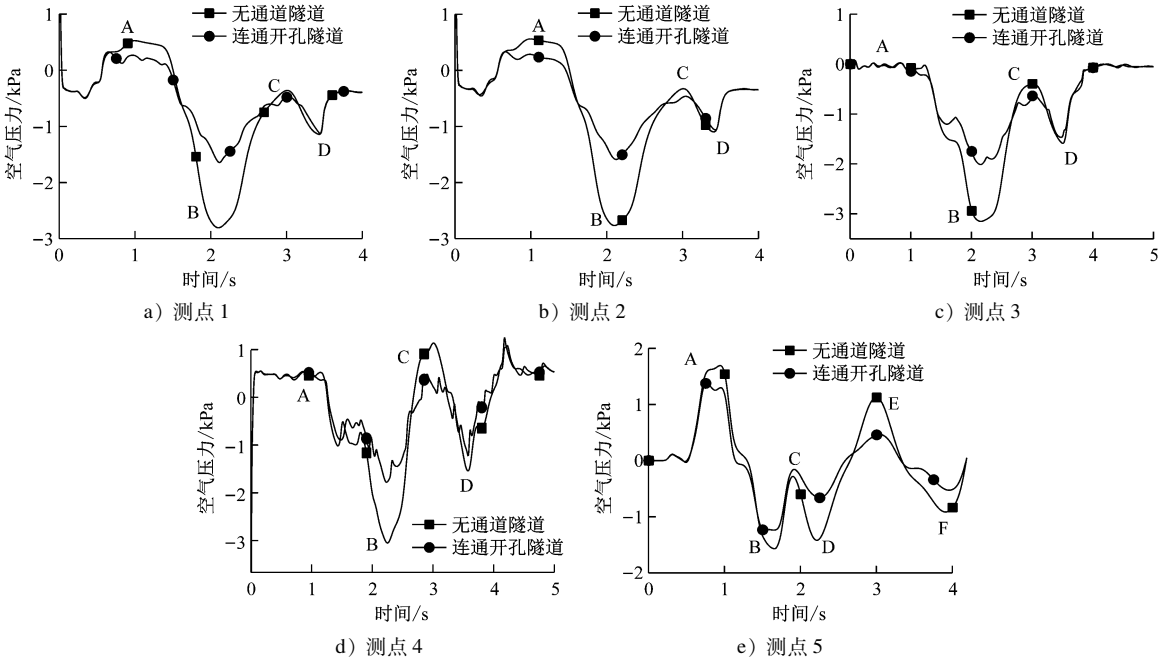


图 5 有无联络通道隧道下列车高速通过时各测点的压力变化对比

A、B、C、D、E、F 标记的是波形的波峰位置或波谷位置。为了更准确地描述压力幅值的变化,本文定义了相对压差的概念。相对压差是指某 1 处的压力幅值与前 1 个最近的波峰值或波谷值的差值的绝对值。如 B 处的相对压差,是指 B 处压力值与前 1 个最近的波峰 A 处压力值的差值的绝对值。表 3 为各测点在无联络通道隧道、连通开孔隧道两种情况下相对压差值及减缓率的对比情况。

联络通道的设置对压力波幅值的减缓有显著的作用。列车在隧道中行驶时,将隧道分为高压区和低压区。如图 6 所示,列车高速进入隧道后,由于隧道内空间狭小,在车头附近形成高压区,在车尾附近形成低压区,引起空气的剧烈波动。从侧面的联络通道看,在高压区附近,一部分气流被“挤”到隧道 1 的空间内,从而起到了“泄压”的作用;在低压区附近,隧道 1 内的空气被“吸”入隧道 2 内,从而起到了“充压”的作用;从车体测点(测点 1~4)看,压力波的波峰、波谷均有不同程度的回落,其中波谷的回落幅度大于波峰的回落幅度,这说明联络

通道的设置对膨胀波的效用更为突出。从隧道测点(测点 5)看,压力波的传播越往后,其回落幅度越大,这是因为通道的设置加剧了对压力波能量的耗散。

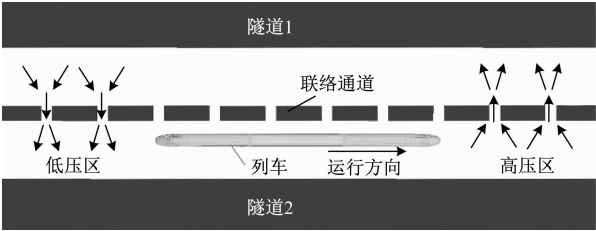


图 6 隧道内空气流动示意图

3.3 通道间距对隧道压力波的影响

模拟设置条件如下:列车以 350 km/h 速度驶入联络通道隧道;联络通道横截面面积为 10 m^2 ;通道间距分别为 15 m、25 m、35 m。在不同通道间距下测点 1 和测点 5 的压力变化如图 7 所示。

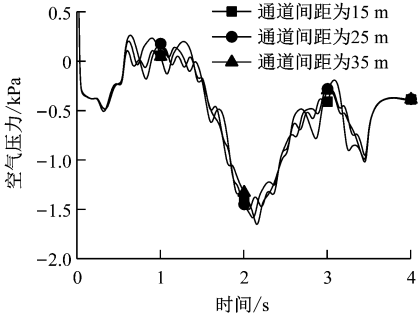
从图 7 可以看出,不同通道间距对隧道内的压力波幅值影响较小,这是因为选取的通道间距在 15~35 m 范围内,相比于声速的数量级,通道间距的

表3 有无联络通道隧道下各波峰/波谷处的
相对压差及减缓率

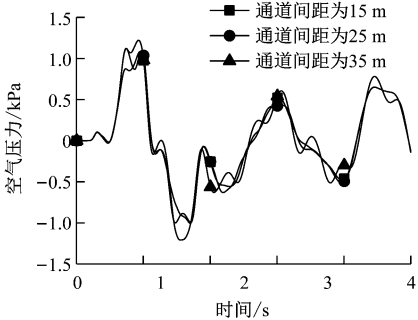
测点	波峰/波谷 位置	相对压差/kPa		减缓率/ %
		无联络通道隧道	连通开孔隧道	
1	A	898	700	22
	B	3 327	1 971	41
	C	2 441	1 168	52
	D	774	655	15
2	A	888	660	26
	B	3 324	1 917	42
	C	2 438	1 124	54
	D	766	600	22
3	A	0	0	0
	B	3 166	2 028	36
	C	2 755	1 394	49
	D	1 192	847	29
4	A	0	0	0
	B	2 672	1 720	36
	C	3 132	1 685	46
	D	1 999	1 277	36
5	A	1 694	1 369	19
	B	3 265	2 621	20
	C	1 289	1 095	15
	D	1 135	507	55
	E	2 542	1 130	56
	F	2 038	991	51

注:减缓率为该测点无通道隧道的相对压差减去连通开孔隧道的相对压差得到的差值,再除以无通道隧道的相对压差的百分比。

变化对隧道内的压力波幅值影响较小。图8是测点1处用马赫波来解释联络通道内压力波的传播规律。与不设联络通道隧道的压力波波形(见图4)相比,设有联络通道的波形呈现出局部范围的锯齿状,锯齿状的波形主要出现在靠近通道侧的测点1上,隧道壁面测点5的波形并未出现锯齿的状况。锯齿状波形意味着隧道局部范围发生了压力波动,该波动是由设置了联络通道导致的。当压缩波达到联络通道的连通开口处时,一部分压缩波会继续沿着隧道向前传播,另一小部分也以压缩波的形式在通道内以声速传播;到达通道出口时,一部分压缩波以微气压波的形式经由通道出口在另一隧道内排出,另一部分压缩波转化为膨胀波反射回来,沿着通道以声速向通道入口传播,以此往复。隧道内的联络通道越多,波形的锯齿就越多,锯齿的幅



a) 测点1



b) 测点5

图7 不同通道间距下测点1和测点5的压力变化

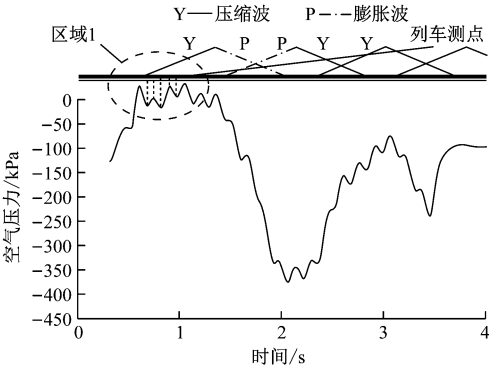


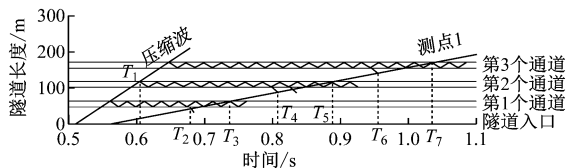
图8 测点1的压力波形及马赫波传播示意图

值也相对较小。

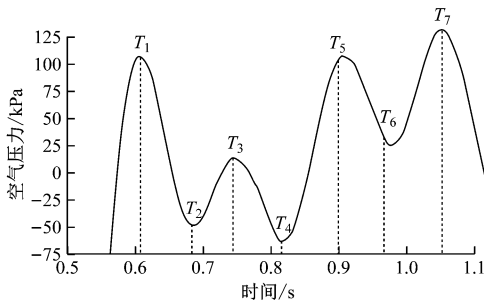
对图8区域1处锯齿状的压力变化情况进行详细分析,如图9所示:列车高速驶入隧道,车头附近原本静止的空气被压缩,压力开始上升。但是由于此时联络通道起到1个泄压的作用,当压力波传到第2个通道时(时刻 T_1),测点1处的压力开始下降;如上文所述,当压力波传到通道位置时,压力波在通道内会以压缩波或膨胀波的形式来回传播,测点1处出现了如图9所示的锯齿折线。因为测点1位于列车车体表面,与联络通道入口有一定距离,所以图中折线会有延长线。

当列车的测点到达第1个通道时(时刻 T_2),通道内的膨胀波在通道入口处转化为压缩波,传到测点1处后压力开始上升;由于通道较短,压力波以声

速传播,相比车速较快,因此列车还是在第1个通道附近再次遇到2个周期后转化而成的膨胀波,此时(时刻 T_3)测点1处的压力开始下降。接着列车来到第2个、第3个通道后都有同样的传播规律。



a) 马赫波传播示意图



b) 压力波形图

注: T_1 ——隧道内马赫波到达第2个联络通道的时间; T_2 ——第1个通道内的马赫波在测点1处第1次叠加的时间; T_3 ——第1通道内的马赫波在测点1处第2次叠加的时间; T_4 ——第2个通道内的马赫波在测点1处第1次叠加的时间; T_5 ——第2个通道内的马赫波在测点1处第2次叠加的时间; T_6 ——第3个通道内的马赫波在测点1处第1次叠加的时间; T_7 ——第3个通道内的马赫波在测点1处第2次叠加的时间。

图9 区域1的压力波形及马赫波传播示意图

4 结论

1) 联络通道的设置对隧道压力波幅值的减缓有显著作用。从车体测点上看,压力波的波峰、波谷均有不同程度的回落,其中波谷的回落幅度更大。这说明了通道的设置对膨胀波的效用要更为突出;从隧道测点上看,压力波的传播越往后,其回落幅度越大,这是因为通道的设置加剧了对压力波能量的耗散。

2) 通道间距对压力波幅值影响较小。通道的设置在降低压力波幅值的同时,会使压力波波形出

现锯齿状的小波浪。通道间距越小,锯齿数量越多,锯齿的幅值也越小。

3) 高速列车通过隧道时,设置联络通道可以较好地缓解隧道内空气压力的剧烈波动。合理增加联络通道的数量,有利于提升列车的运行速度以及乘客的乘坐舒适度。

参考文献

- [1] 胡丽君. 高速列车隧道压力舒适度及安全性研究[J]. 建筑热能通风空调,2016(2):44.
- [2] 林凤,陈春俊. 车内压力波动对旅客舒适度影响的研究[J]. 中国测试,2014(2):125.
- [3] HOWE M S, LIDA M, MAEDA T, et al. Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood[J]. Journal of Sound and Vibration,2008,297(1):267.
- [4] HOWE M S. Pressure transients generated when high-speed trains pass in a tunnel[J]. Journal of Applied Mathematics,2000,65:315.
- [5] 张桂扬,王世清,马志富,等. 高速铁路隧道缓冲结构设计方法研究[J]. 铁道工程学报,2016(10):83.
- [6] HOWE M S. Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal[J]. Journal of Fluid and Mechanics,2000,425:111.
- [7] 张雷,杨明智,张辉,等. 高速铁路隧道洞门对隧道空气动力学效应的影响[J]. 铁道学报,2013(11):92.
- [8] 刘佩斯. 竖井对高速铁路隧道气动效应的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.
- [9] LEENDERTSE W L, BURGER H. Travelling at 300 km/hour under the "Green Heart" of holland-a tunneling challenge[J]. Tunneling & Underground Space Technology,1999,14(2):211.
- [10] 梅元贵,贾永兴. 单列高速列车通过内置开孔隔墙隧道时的压力波数值分析[J]. 铁道学报,2013(2):211.
- [11] 王建宇,万晓燕,吴剑. 隧道长度对瞬变压力的影响[J]. 现代隧道技术,2008(6):1.
- [12] LI T, ZHANG J Y, ZHANG W H. An improved algorithm for fluid-structure interaction of high-speed trains under crosswind[J]. Journal of Modern Transportation,2011,9(2):75.

(收稿日期:2019-07-09)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704