

文章编号: 1674—8247(2021)02—0043—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.008

线间距对 400 km/h 高速列车隧道交会气动性能的影响

张雷^{1,2} 林晓龙³ 尹小放^{1,2} 杨明智^{1,2} 王田天^{1,2}

(1. 中南大学, 长沙 410075; 2. 轨道交通安全教育部重点实验室, 长沙 410075;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 高速列车以速度 400 km/h 运行时, 在隧道内交会产生的交会压力波幅值激增, 而线间距作为影响高速列车交会气动性能的关键参数之一, 对列车 400 km/h 运行时隧道内交会压力波的影响特性有待探明。本文采用计算流体力学数值仿真方法和网格滑移技术, 分别模拟了 5.0 m、5.2 m 和 5.4 m 线间距参数条件下高速列车隧道内交会气动特性, 对比分析了不同线间距条件下高速列车表面、隧道壁面压力极值及高速列车气动特性。研究结果表明: (1) 高速列车在 100 m² 隧道内交会时, 线间距对高速列车表面最大交会压力幅值的影响不明显, 不考虑鼻尖点, 3 种线间距对应的高速列车表面最大交会压力波幅值分别为 13 606 Pa、13 688 Pa 和 13 664 Pa, 已经超出高速列车结构承载极限 $\pm 6\ 000$ Pa 的要求; (2) 线间距对隧道壁面最大压力极值的影响不明显, 但线间距增加对高速列车交会侧向力及倾覆力矩的缓解效果明显。

关键词: 高速列车; 线间距; 交会压力波; 隧道; 压力幅值

中图分类号: U451⁺.3 **文献标志码:** A

43

Influence of Distance between Centers of Tracks on the Aerodynamic Performance of 400 km/h High-speed Trains Meeting in Tunnels

ZHANG Lei^{1,2} LIN Xiaolong³ YIN Xiaofang^{1,2} YANG Mingzhi^{1,2} WANG Tiantian^{1,2}

(1. Central South University, Changsha 410075, China;

2. Key Laboratory of Traffic Safety on Track Ministry of Education, Changsha 410075, China;

3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The amplitude of pressure wave generated by 400 km/h high speed trains meeting in tunnels increases sharply. The distance between centers of tracks is one of the key parameters affecting the aerodynamic performance of high speed trains passing each other, of which the influence characteristics on the meeting pressure wave of 400 km/h trains in tunnels remain to be proved. In this paper, the numerical simulation method of computational fluid mechanics and sliding mesh technology are applied to simulate the aerodynamic characteristics of high speed trains meeting in tunnels under the distance between centers of tracks of 5.0 m, 5.2 m and 5.4 m respectively. The extreme pressure on the surface of high speed trains and tunnel walls and the aerodynamic characteristics of high-speed trains under different distance between centers of tracks are compared and analyzed. The research results show that when high speed trains

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 张雷(1986-), 男, 副教授。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202061)

引文格式: 张雷, 林晓龙, 尹小放, 等. 线间距对 400 km/h 高速列车隧道交会气动性能的影响[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 43-49.

ZHANG Lei, LIN Xiaolong, YIN Xiaofang, et al. Influence of Distance between Centers of Tracks on the Aerodynamic Performance of 400 km/h High-speed Trains Meeting in Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 43-49.

meet in a 100 m² tunnel, the distance between centers of tracks brings no obvious influence on the amplitude of the maximum meeting pressure on the surface of high speed trains. Without considering the nose tip, the amplitude of the maximum meeting pressure on the surface of high speed trains corresponding to the three kinds of distance between centers of tracks is 13 606 Pa, 13 688 Pa and 13 664 Pa respectively, which exceed the structural bearing limit of $\pm 6\ 000$ Pa of high speed trains. The influence of distance between centers of tracks on the maximum pressure on the tunnel wall is not obvious, but the effect of increasing distance between centers of tracks on the release of lateral force and overturning moment of high speed trains passing each other is obvious.

Key words: high-speed train; distance between centers of tracks; meeting pressure wave; tunnel; pressure amplitude

高速列车隧道交会诱发的强瞬态冲击压力不仅可传至车内,导致车内产生影响乘坐舒适度的压力变化,还易导致高速列车及隧道表面结构、隧道内附属设施结构的疲劳损伤问题。当列车交会时速提升至400 km/h时,列车表面测点压力极值激增,现有《时速350公里中国标准动车组暂行技术条件》^[1]对列车表面承载压力限值($\pm 6\ 000$ Pa)的规定还能否满足400 km/h列车交会气动安全性的需求有待探讨。既有研究成果表明^[2-3],增大线间距后,列车明线交会压力波幅值会明显降低,但线间距变化对于400 km/h列车隧道交会气动性能的影响规律与明线情况是否相同或类似也有待进一步探讨。

魏洋波等人分析了300 km/h隧道等速交会时,线间距对交会压力波首波演化过程和幅值的影响规律;Chu C R等人^[4]采用滑移网格技术得到了列车隧道交会压力波幅值与列车车速、隧道内交会位置等参数的关联关系;梅元贵、孙海福、李红梅等人^[5-7]分别采用数值模拟方法研究了高速列车和城际列车隧道内交会时的空气动力学性能,分析了两种类型列车的交会压力波特性;付连著等人^[8]提出了不同交会车速条件下合适的线间距参数;Fujii等人^[9]分析了交会压力波及气动力的变化规律,强调了小线间距条件下强瞬态交会压力波对列车运行安全性的影响;Hwang等人^[10]分析了线间距、阻塞比、车速、列车流线型长度等参数对高速列车交会压力波的影响规律。

综上所述,既有对高速列车隧道交会空气动力学性能的研究主要集中在350 km/h以下工况,当列车车速提升至400 km/h时,线间距对高速列车隧道内交会压力波的影响规律亟待探明。针对上述问题,本文采用数值仿真计算方法,探索了高速列车400 km/h隧道交会时,5.0 m、5.2 m和5.4 m线间距对列车和隧道壁面测点交会压力波、列车气动力变化的影响规律。

1 数值仿真计算

本文采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)方法模拟线间距参数对列车隧道交会气动特性的影响机制,利用流体力学湍流模型求解流场流动方程组,描述列车周围流场关键信息。列车突入隧道瞬间,受隧道空间的限制,列车前方气流被快速压缩,形成强压缩波,尾车突入隧道后,形成强膨胀波,压缩波和膨胀波在隧道内传播并相互干涉,形成强瞬态压力变化。因此,在列车隧道交会计算工况中,必须考虑空气介质的可压缩性,即采用可压缩流的基本控制方程模拟并获得列车隧道交会流场信息。

1.1 数值仿真模型

高速列车模型采用8车编组形式,长210 m,车高4.0 m,宽3.15 m。研究高速列车隧道内交会时的车/隧耦合特性,需建立隧道模型,本文采用的隧道模型断面面积为100 m²,隧道长度按标准EN 14067^[11]中的双线最不利隧道长度公式计算得出:

$$L_{tu,crit} \approx \frac{c}{2} \left(\frac{L_{tr,1}}{v_{tr,1}} + \frac{L_{tr,2}}{v_{tr,2}} \right) \quad (1)$$

式中: L_{tr} ——动车组设定长度;

V_{tr} ——动车组设定时速;

C ——声速。

计算工况为同车等速交会,因此式(1)可简化为:

$$L_{tu,crit} \approx c \frac{L_{tr}}{v_{tr}} \quad (2)$$

计算车速 v_{tr} 取111.11 m/s,动车组设定长度 L_{tr} 取210 m,声速 c 取340 m/s,计算得到最不利隧道长度为643 m。

1.2 边界条件设置

隧道交会计算模型如图1所示。数值仿真采用滑移网格技术,整个计算区域划分为3个模块,分别为模拟隧道进出口及隧道空间的静止区域和包含两列交会列车的滑移模块。静止区域和滑移模块的边界条件设置如图2所示。

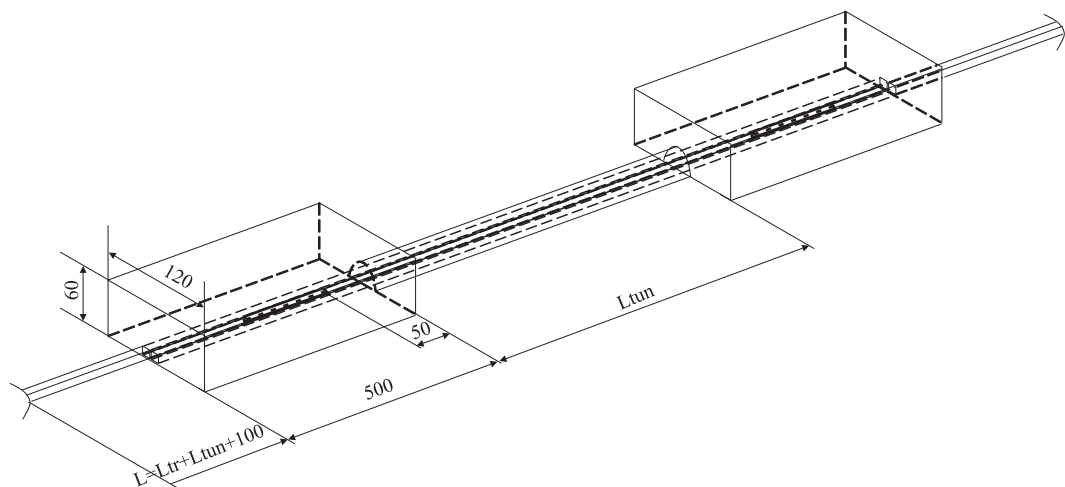


图1 高速列车隧道交会计算区域图(m)

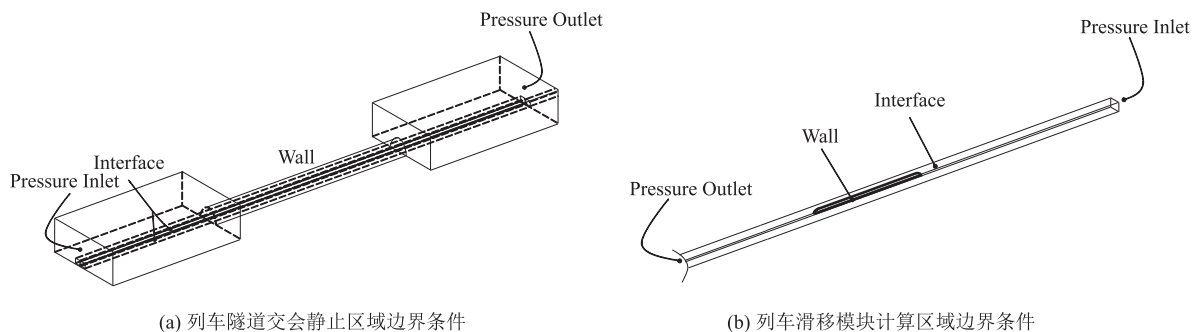


图2 高速列车隧道交会计算区域边界条件图

静止区域前端定义为“Pressure-Inlet”压力进口边界条件,静止区域后端定义为“Pressure-Outlet”压力出口边界条件,给定静压为0,静止区域两侧、上顶面及地面均定义固定壁面边界条件“Wall”,与运动区域即滑移模块接触面定义为“Interface”交换面,进行两侧流场数据的信息交换。两个滑块边界定义相同。车体表面定义固定壁面边界条件“Wall”,滑块前进方向前端面定义为“Pressure-Inlet”压力进口边界条件,对应出口定义为“Pressure-Outlet”压力出口边界条件,给定静压为0,与静止区域对应面定义成“Interface”交换面。

1.3 测点布设

高速列车表面测点布置情况如图3所示,中间车测点位置相同,因此仅展示中间车1测点的布设情况,头车和尾车各布设11个测点,中间车各布设6个测点,全车共计58个测点。隧道壁面测点布设情况如图4所示。

1.4 列车气动力

为便于对比分析高速列车隧道交会时的气动力特

性,参照欧标 EN 14067,将各气动力转化为气动力系数。阻力系数为:

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (3)$$

侧向力系数为:

$$c_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (4)$$

倾覆力矩系数为:

$$m_x = \frac{M_x}{\frac{1}{2}\rho V^2 S l} \quad (5)$$

式中: c_x 、 c_y ——沿 x 和 y 方向的气动力系数;

F_x 和 F_y ——沿 x 和 y 方向的气动力,即阻力和侧向力;

m_x ——绕 x 轴方向的气动力矩系数;

M_x ——绕 x 轴方向的气动力矩,即倾覆力矩;

ρ ——空气密度,取 1.225 kg/m^3 ;

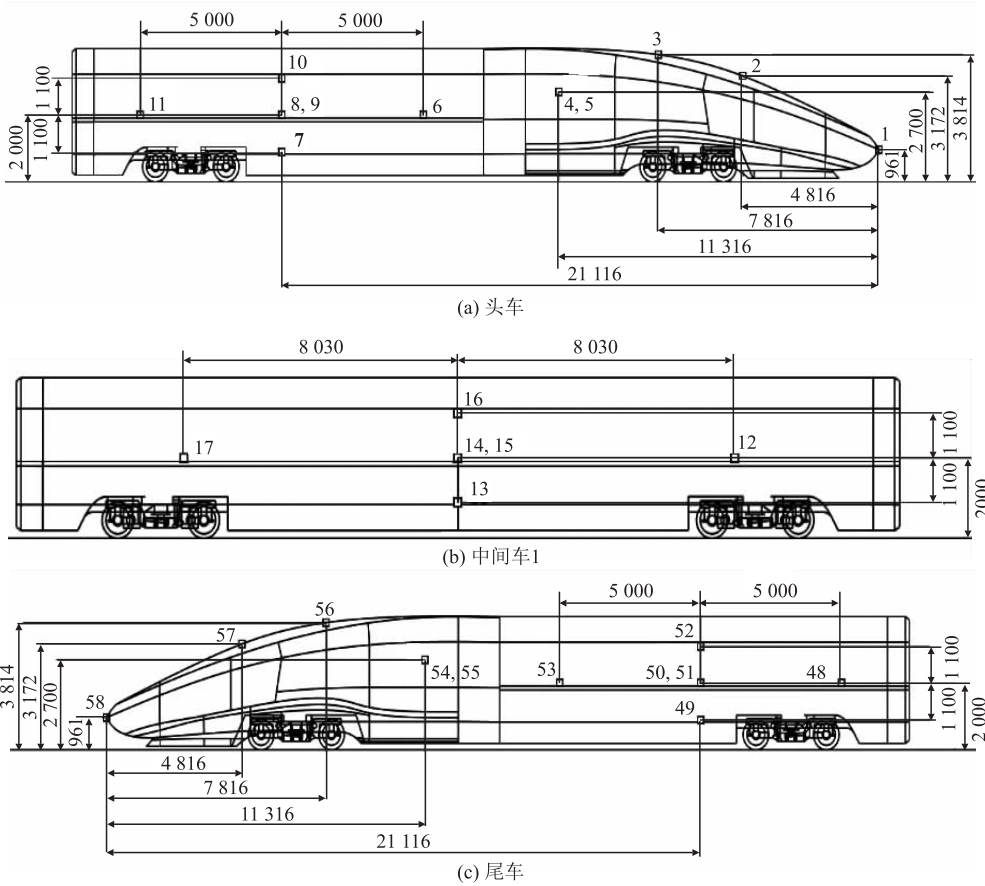


图 3 车身表面测点布置图 (mm)

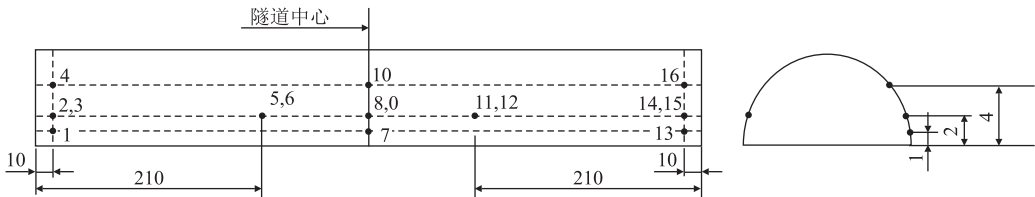


图 4 隧道壁面测点布置图 (mm)

V ——动车组运行速度 (m/s);
 S ——参考面积,取 11.9 m^2 ;
 L ——特征长度,取 4.0 m 。

2 数值计算方法

2.1 控制方程

采用雷诺应力模型和涡粘性模型中的双方程模型模拟高速列车隧道交会气动特性,并适当增加网格尺度降低网格规模,不仅能有效模拟高速列车周围湍流流动,还可节省计算资源,在动车组周围空气场流动的湍流数值模拟中应用广泛。因此本文采用双方程湍流模型模拟列车周围流场特性。基于有限体积法,利用 SIMPLE 算法实现压力-速度耦合,对流项采用一

阶迎风格式,时间步长设置为 0.008 。

2.2 算法验证

采用中南大学动模型试验数据与数值仿真计算结果对比的方式来验证数值仿真方法的可靠性。验证工况为高速列车以 400 km/h 在 5.0 m 线间距隧道内交会,列车采用 3 车编组形式。因动模型比例为 $1:20$,为便于数值仿真与动模型试验结果的对比,将试验数据中的时间数值乘以 20 ,实现两者时间轴的统一。车体表面 7 号测点和隧道壁面 5 号测点的结果对比分别如图 5 和图 6 所示。

图 5、图 6 结果表明,采用本文数值仿真计算方法获得的高速列车隧道交会压力波时程曲线与动模型测试数据基本一致,压力极值相差在 5% 以内,因此,本

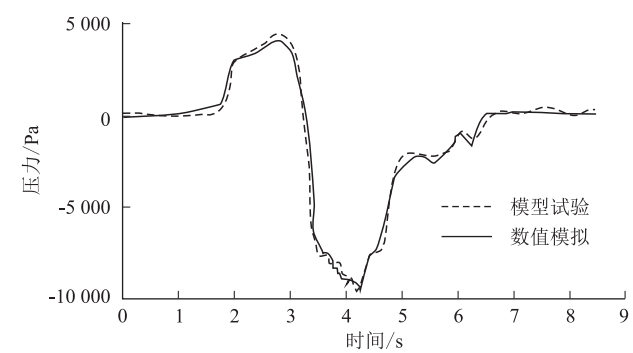


图5 车体表面7号测点数值仿真与动模型试验结果对比图

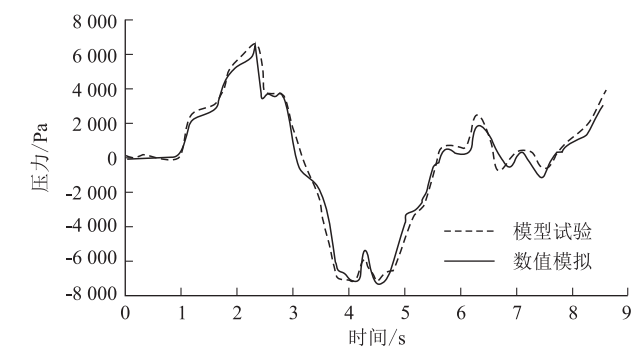


图6 车体表面8号测点数值仿真与动模型试验结果对比图

文采用的数值模拟方法可用于研究不同线间距对高速列车隧道交会压力波的影响。

3 不同线间距对动车组隧道交会气动性能的影响

3.1 车体表面压力变化

车体表面各测点的交会压力极值(不考虑头尾车的鼻尖测点)如表1所示。不同线间距条件下,高速列车隧道交会时,车体表面7号测点压力变化的时程曲线如图7所示。

受隧道空间的限制,高速列车隧道内交会时,车体表面压力变化较明线交会更为剧烈。由表1和图9可知,列车隧道内交会时,线间距对车体表面压力的变化几乎没有影响,这是因为高速列车隧道内运行时,决定

表1 车体表面最大压力极值表(Pa)			
线间距	MAX P_m	MIN P_m	MAX ΔP
5.0 m	5 088	-10 013	13 606
5.2 m	5 085	-10 064	13 688
5.4 m	5 091	-9 933	13 664

列车表面压力变化的关键因素为列车车速、车隧阻塞比和压力波系的传播过程,本试验车速为400 km/h,隧道长度为643 m,且阻塞比不变,故线间距改变仅造成两车间距的变化,对列车表面测点压力极值变化的影响可忽略。从图7可以看出,线间距不同时,相同测点压力变化时程曲线的变化趋势和数值却几乎完全一致,由此可推断,改变线间距的方式难以缓解高速列车隧道内交会时引发的交会压力波大小。

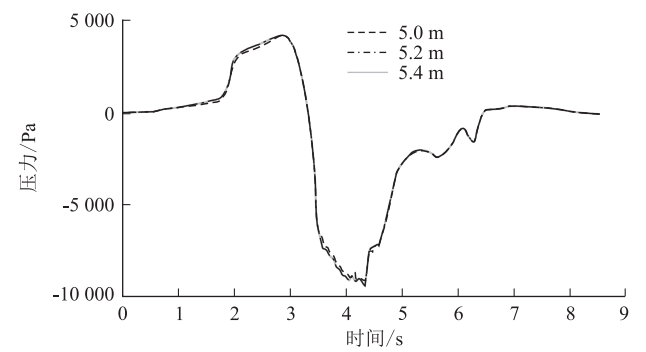


图7 不同线间距条件下列车表面7号测点压力时程曲线图

表1数据表明,隧道长643 m、列车以400 km/h的车速在隧道中部等速交会时,列车表面测点最大压力幅值可达13 688 Pa,由文献[1]可知,其最大压力幅值不满足相关规定,易导致车体结构疲劳损伤或破坏等,需从高速列车外形及隧道断面或隧道附属设施气动参数着手优化,对车/隧耦合气动特性进行有效缓解,方能满足现有高速铁路隧道断面下400 km/h列车交会的需求。

3.2 列车气动力

高速列车隧道交会过程中,列车整车所受气动力系数如表2所示。

表2 整车气动力系数表									
力/力矩	5.0 m			5.2 m			5.4 m		
	MAX	MIN	Δ	MAX	MIN	Δ	MAX	MIN	Δ
C_x	1.861 2	0.134 4	1.726 8	1.867 4	0.127 9	1.739 5	1.865 6	0.111	1.754 6
C_y	0.438 4	-0.622	1.060 5	0.415 2	-0.622 2	1.017 4	0.405 8	-0.573 8	0.979 6
M_x	0.327	-0.208 8	0.535 7	0.323 5	-0.194 4	0.517 9	0.290 2	-0.195 7	0.485 8

高速列车在隧道内运行时,受隧道壁面对流场流动的限制作用,车/车之间形成的流场结构与车/隧之

间形成的流场结构强度基本相同,两侧压力场处于较为平衡的状态,从而导致列车隧道内运行时,其侧向力

数值基本维持在特定的数值,不会产生较大变化。由此可推断,高速列车隧道内交会时,整车气动力的变化主要是由列车高速突入隧道和冲出隧道引起的。在这两个过程中,列车整车气动阻力、气动侧向力和倾覆力矩发生较为剧烈的变化。表2数据表明,列车交会时,气动阻力不随线间距的增加而产生较大变化,但气动侧向力及倾覆力矩随线间距的增加而明显减小。其中,侧向力系数最大值由0.438 4减小至0.408 5,减小了约6.82%;倾覆力矩系数最大值由0.327减小至0.290 2,降低约11.25%。

3.3 隧道壁面压力分布

高速列车隧道交会诱发的压力波系在隧道内传播会导致隧道壁面产生剧烈的交变压力波动,隧道壁面5号测点压力变化时程曲线如图8所示。

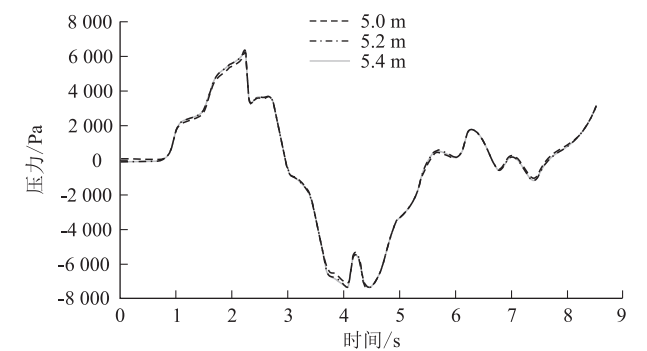


图8 隧道表面5号测点压力时程曲线图

高速列车从隧道两侧同时突入隧道,距离5号测点较近列车引起的压缩波先抵达测点所在位置,导致测点压力快速上升,随后另一侧列车突入隧道引起的压缩波也抵达5号测点所在位置,从而导致测点压力进一步上升直至最大值(图8中的第一个压力峰值)。两列车车尾突入隧道引起的膨胀波先后抵达5号测点所在位置,导致测点压力持续减小。当距离5号测点较近的列车头车运行至5号测点所在位置时,测点周围流场受列车头车的活塞运动效应而快速移开,流场偏移造成5号测点压力快速降低至最小值,头车越过5号测点后,周围的气流开始快速补充至5号测点所在位置,测点压力开始快速上升,然而此时,另一侧的高速列车抵达5号测点所在位置,再次导致5号测点压力降低至最小值,图8中压力最小值位置出现一次压力上升就是该原因引起的。

高速列车隧道内交会时隧道壁面各测点压力极值如表3所示,计算工况为列车400 km/h于100 m²的隧道内交会,线间距分别为5.0 m、5.2 m和5.4 m。

表3 隧道表面最大压力极值比较表(Pa)

线间距	MAXP _M	MINP _m	MAXΔP
5.0 m	7 004	-9 578	16 582
5.2 m	7 007	-9 717	16 725
5.4 m	7 013	-9 714	16 727

由表3可知,不同线间距条件下,隧道表面测点压力最大值约为7 000 Pa,最小值相差仅为1.5%,峰峰值最大值相差仅为0.9%,由此可见,线间距变化对隧道壁面压力极值的影响基本可忽略,其原因在于本次研究中,影响隧道壁面压力极值变化的关键因素为车隧阻塞比数值,而线间距不影响阻塞比的大小,因此隧道壁面压力极值不随线间距的变化而变化。

4 结论

为探索400 km/h高速列车在隧道内交会时,线间距大小对列车表面压力极值、列车气动力极值和隧道壁面压力极值的影响规律,本文采用数值仿真方法模拟了高速列车于5.0 m、5.2 m和5.4 m线路上交会时的气动特性,得出主要结论如下:

(1) 最不利隧道长度643 m条件下,列车以400 km/h的车速在隧道中部等速交会时,列车表面测点最大压力幅值可达13 688 Pa,无法满足《时速350公里中国标准动车组暂行技术条件》关于车体承受极限载荷±6 000 Pa的规定,但线间距对列车表面压力极值几乎没有影响。

(2) 最不利隧道长度643 m条件下,气动侧向力及倾覆力矩随线间距的增加而明显减小,其中侧向力系数最大值由0.438 4减小至0.408 5,减小了约6.82%;倾覆力矩系数最大值由0.327减小至0.290 2,降低约11.25%。

(3) 列车隧道内交会时,隧道表面测点压力最大值约为7 000 Pa,最小值相差仅为1.5%,峰峰值最大值相差仅为0.9%,即线间距变化对隧道壁面压力极值的影响基本可以忽略。

参考文献:

[1] TJ/CL 342-2014 时速350公里中国标准动车组暂行技术条件[S].
TJ/CL 342-2014 China Standardized High-speed Train 350 km/h Provisional Specifications [S].
[2] 梁习锋,田红旗. 200km/h 动车组交会空气压力波试验[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2002, 33(6): 621-624.
LIANG Xifeng, TIAN Hongqi. Test Research on Crossing Air Pressure Pulse of 200 km/h Electric Multiple Unit[J]. Journal of

- Central South University of Technology (Natural Science), 2002, 33(6): 621–624.
- [3] 魏洋波, 梁习锋. 线间距对交会压力波的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2525–2531.
- WEI Yangbo, LIANG Xifeng. Influence of Line Spacing on the Intersection Pressure Wave [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12): 2525–2531.
- [4] CHU C R, CHIEN S Y, WANG C Y, et al. Numerical Simulation of Two Trains Intersecting in a Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 161–174.
- [5] 梅元贵, 孙建成, 许建林, 等. 高速列车隧道交会压力波特性[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(5): 34–43.
- MEI Yuangui, SUN Jiancheng, XU Jianlin, et al. Crossing Pressure Wave Characteristics of High-speed Trains in Tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(5): 34–43.
- [6] 孙海富, 王秀丽. 城际铁路线间距标准研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(5): 53–56.
- SUN Haifu, WANG Xiuli. Study on Standard for Distance between Centers of Tracks of Intercity Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(5): 53–56.
- [7] 李红梅. 基于空气动力学的城际铁路线间距研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(10): 101–104.
- LI Hongmei. Research on Distance between Tracks for Intercity Railway Based on Aerodynamics [J]. Railway Engineering, 2016, 56(10): 101–104.
- [8] 付连著, 李红艳, 孙加林, 等. 基于动力学性能的更高速度铁路合理线间距研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(12): 101–104.
- FU Lianzhu, LI Hongyan, SUN Jialin, et al. Research on Reasonable Distance between Centers of Tracks for Higher Speed Railway Based on Dynamic Performance[J]. Railway Engineering, 2020, 60(12): 101–104.
- [9] FUJII K, OGAWA T. Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each Other[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(8): 897–908.
- [10] HWANG J, YOON T S, LEE D H, et al. Numerical Study of Unsteady Flowfield around High Speed Trains Passing by Each Other [J]. JSME International Journal Series B, 2001, 44(3): 451–464.
- [11] BS EN 14067–5 2006 Railway Applications-aerodynamics. Part 5: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels [S].

(上接第38页)

- [4] 罗强. 高速铁路路桥过渡段动力学特性分析及工程试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- LUO Qiang. Dynamic Performance Analyses and Experiment Study on Bridge/Approach Embankment of High-speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [5] 列车与线路研究所. 两桥(隧)之间短路基动力学仿真分析[R]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- Institute of train and line. Dynamic Simulation Analysis of Short Subgrade between Two Bridges/Tunnels [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [6] Wang H, Markine V. Dynamic Behaviour of the Track in Transitions Zones Considering the Differential Settlement [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 438: 114863.
- [7] 陈虎, 罗强, 张良, 等. 高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道路桥过渡段振动特性测试分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1): 81–88.
- CHEN Hu, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Test Analysis of Vibration Characteristics of High-speed Railway on CRTS II Slab Ballastless Track Bridge-Subgrade Transition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1): 81–88.
- [8] 刘亭, 苏谦, 赵文辉, 等. 板式无砟轨道路基翻浆整治效果研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12): 88–95.
- LIU Ting, SU Qian, ZHAO Wenhui, et al. Study on Injection-repaired and Reinforcement Effects of Subgrade Frost Boiling under Ballastless Track [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(12): 88–95.
- [9] 刘钢, 罗强, 张良, 等. 列车荷载作用下无砟轨道路基动应力特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 86–93.
- LIU Gang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis on the Dynamic Stress Characteristics of the Unballasted Track Subgrade under Train Loading [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9): 86–93.
- [10] TB 10621–2014 高速铁路设计规范[S].
- TB 10621–2014 Code for Design of High Speed Railway [S].
- [11] TB 10001–2016 铁路路基设计规范[S].
- TB 10001–2016 Code for Design of Railway Earth Structure [S].
- [12] 张千里, 韩自力, 吕宾林. 高速铁路路基基床结构分析及设计方法[J]. 中国铁道科学, 2005(6): 55–59.
- ZHANG Qianli, Han Zili, LV Binlin. Structural Analysis and Design Method for Subgrade Bed of High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2005(6): 55–59.
- [13] TB 10761–2013 高速铁路工程动态验收技术规范[S].
- TB 10761–2013 Technical Regulations for Dynamic Acceptance for High-speed Railways Construction [S].