

文章编号:1005-0523(2019)04-0024-08

350 km/h 高速列车过特长双线隧道时 表面压力分布数值模拟分析

谢红太^{1,2}

(1. 中设设计集团股份有限公司铁道规划设计研究院,江苏 南京 210014;2. 兰州交通大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:基于三维定常不可压的黏性流场 N-S 及方程湍流模型,利用有限体积数值模拟方法分析计算出某型时速 350 km/h 高速列车在明线及特长双线隧道内运行时的局部流场结构及压力波分布情况。研究发现:流场分布结构复杂且不规律,整体趋势上列车靠近隧道的一侧所受静压大于靠近中心线的一侧所受静压,同时迎风侧压力波动现象较为明显,且两侧所受静压沿列车长度方向逐渐减小;隧道方面:列车侧与无车侧内轮廓所受静压沿列车长度方向逐渐增大,然后于列车头部位置骤降并逐渐趋于平缓下降,到背风侧列车尾部位置突增达到一个极大值,然后逐渐下降并趋于稳定,列车侧内轮廓所受静压沿列车长度方向在靠近列车头车司机室部位,压力波动现象较为明显,且迎风侧压力波动现象较背风侧更为突出,无车侧基本无压力波动现象产生,轮廓静压分布沿着隧道底部逐渐向隧道顶部基本保持稳定。

关键词:车辆工程;空气动力学;双线隧道;高速列车;有限元分析

中图分类号:U270.11

文献标志码:A

近年来,随着高速动车组旅客列车的逐渐普及以及大幅提速,2017年9月我国首次在京沪线相继开行350 km/h“复兴号”高速动车组,并在此基础上做了大范围推广的战略性规划。随之而来的是由于高速列车与空气的相对复杂无规律的快速强烈运动,致使列车气动阻力问题越发突出,空气动力学性能恶化^[1-4]。在高速列车设计研发过程中如何使其具有优良的空气动力学性能显得愈来愈重要,尤其在适应空气运行环境较差的地段及应对突发恶劣天气变化能力的要求越来越高。比如当高速列车进入隧道时,会引起隧道内压力波动、微气压波和隧道内的空气阻力增大等空气动力学效应。压力波动会降低旅客舒适性、引起列车车身及零部件的疲劳问题;微气压波会引起爆破噪声并对出口附近的环境造成严重的危害;隧道内空气阻力的增大会引起列车能耗的增加,降低高速列车通过隧道时的最高速度,隧道内热量积聚和温差增大,损坏隧道结构及其内部辅助设施,影响列车运行的平稳性和安全性等。因此,对高速列车过隧道空气动力学性能深入研究有着重大意义^[5-8]。

20世纪90年代,我国相关学者开启了高速列车空气动力学方面研究,至今发展迅速并取得了一定的研究成果。其中王一伟等取得了明线运行、隧道内运行和横风条件下列车的非定常气动力和流场结构特性^[1],田红旗等研究了列车空气动力学性能、影响因素、影响规律及工程应用^[2]。本文重点针对350 km/h某型高速列车过特长双线隧道时的压力波问题进行数值模拟计算。

1 明线运行模拟计算

1.1 数学模型

数值计算方法就是离散化和代数分析方法,利用有限元的单元分析计算无限的不连续的工程问题,设定初始各量边界条件构造数学离散代数方程组并求解,得到可以近似代替原微分方程的离散解析解。

收稿日期:2018-12-26

作者简介:谢红太(1993—),男,助理工程师,硕士,研究方向为铁道规划及动车组行车安全设计。

列车空气动力学问题均可归结为流体运动问题,而任何一个流场流动问题均可用非稳态的 N-S 方程描述^[9-10]。

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量守恒方程} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\text{动能守恒方程} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = -\frac{\partial}{\partial x_i} (k + k_i) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

在对高速列车进行 CFD 数值模拟分析计算时采用三维定常不可压黏性流场,其中外流场的湍流运动采用 $k-\varepsilon$ 湍流方程模型^[11],即湍动能方程和湍动能耗散方程,如式(4)~式(5)所示。

$$\text{湍动能方程} \quad \rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{湍动能耗散方程} \quad \rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{\varepsilon 3} G_b) - G_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式(1)~式(6)中: ρ 为流体的密度; p 为静压力; τ_{ij} 为应力矢量; ρg_i 为*i*方向的重力分量; $\mu = \mu_t + \mu_l$ 为有效粘性系数; $F_i = \rho f_i$ 为由于阻力和能源而引起的其他能源项; h 为焓; T 为温度; k 为分子传导率; k_i 为由于紊流传导而引起的传导率; S_h 为定义的任何体积热源; u_i, u_j 为流体沿*i, j*方向的速度分量; x_i, x_j 为横坐标; $C_\mu, C_1, C_2, C_3, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为系数,取值同参考文献[12]; G_k 为由浮力产生的湍流动能; G_b 为由层流速度梯度而产生的湍流动能; k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率;*i, j*为哑标。

1.2 计算模型

本文利用 SolidWorks Flow Simulation 作为计算流体动力学分析工具,分别对某型高速列车明线上及过隧道运行时压力波特性做数值模拟计算。在具有先进混合建模技术及复杂曲面设计技术的三维设计软件 CATIA 中,根据头车设计技术参数等相关技术尺寸,完成某型高速列车的头车流线型曲面建模设计。将于 CATIA 软件中创建的高速列车头车模型导入到 SolidWorks 软件中,为了能够较为准确直观地模拟高速列车在明线及双线隧道中的运行情况,在此所用列车流体动力学计算几何模型均采用 3 辆编组的形式^[13-14],即头车、中间车和尾车连挂,模拟计算时简化风挡连接处,直接实体相接,如图 1 所示。

同时外流场采用如图 2 所示的空壳薄壁长方体模型,定义某型高速列车几何模型全长为 L ,取外流场计算模型的长宽高分别为 $4L, 2L, 1L$,其中列车位于该长方体流场中部,列车底部具体流场下部设为 0.5 m ,列车头部距来流入口面 $1L$ 处,尾部距出口面 $2L$ 处。采用全局网格与局部网格相匹配的模式进行该几何模型的网格划分处理,局部细化网格为列车及周围 10 m 范围内。



图1 高速列车几何模型

Fig.1 High-speed train geometry model

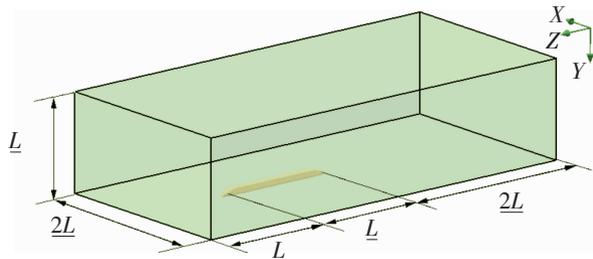


图2 外流场模型设计及计算域

Fig.2 External flow field model design and computational domain

1.3 计算分析

将该建立的高速列车及模拟外流场空壳薄壁长方体模型进行纵向对称面重合装配及相关约束,并转换到 SolidWorks Flow Simulation 计算流体动力学分析工具环境中。以垂直于外流场入口平面的速度 $v_c=350$ km/h 作为来流速度模拟列车在无风环境下运行情况,如图3及图4所示为某型高速列车车身表面压力及外围速度迹线。

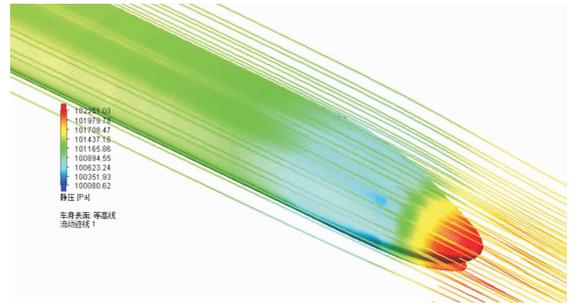
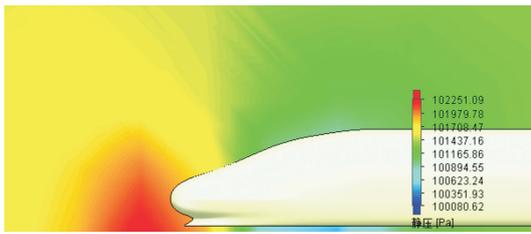


图3 车身压力及外围速度迹线

Fig.3 Train body pressure and peripheral speed trace



(a)



(b)

图4 纵向对称面上压力分布

Fig.4 Pressure distribution on the longitudinal symmetry plane

外流场纵向中间对称面上高速列车外围静压分布如图4所示,列车运行时,由于车头司机室部位受到空气正向挤压,前部鼻尖处达到最大 $P_{\max 0}=102.25$ kPa,与流场初始给定标准大气压相比 $P_{\max 0}>1$ atm,周围流场呈正压状态,同时周围空气流速迅速增加,沿着两侧及车顶上侧逐渐减小达到一个最小值 $P_{\min 0}=100.08$ kPa, $P_{\min 0}<1$ atm,周围流场呈负压状态。其中纵向对称面外流场与列车上表面接触线上静压在列车前后相对坐标位置上分布如图5所示。

通常对流动流场引入一个无量纲的参数压力系数做进一步研究,对于列车表面上任一点的压力系数 $C_p^{[9]}$ 可表示如下

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho_\infty V_\infty^2} \quad (7)$$

式中: p 为所求压力点处的静压,Pa; ρ_∞ 为标准大气压下空气密度,kg/m³; p_∞ 为远离列车的无扰动外流场独立静压即此处标准气压,Pa; V_∞ 为空气流过列车的速度,m/s。

列车表面静压分布沿轴线方向呈现正、负压力波动,变化较大,列车前缘鼻部是滞止点,此处压力达到最大,相应压力系数最大,沿列车表面,速度逐渐增加,在压区速度达到最大值,在列车中部表面上压力和速度都比较平稳,在列车尾部,由于列车的行驶而产生负压区。其分布规律主要表现为:①头车正对来流方向的鼻尖部位为正压区;②从鼻尖向上及向左右两侧,正压逐渐变为负压,车头与车身曲线过渡连接处负压达到最大,外围空气流速达到最大,即图3中蓝色带状区域。

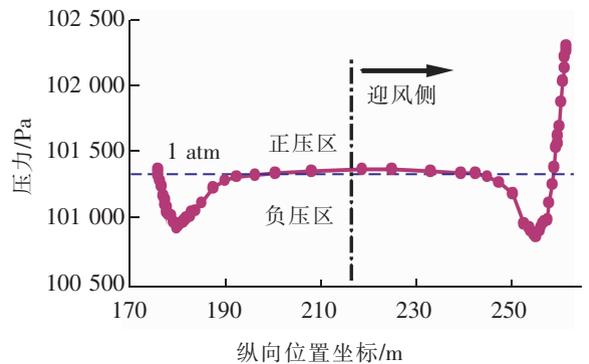


图5 纵向对称面上部流固接触线静压

Fig.5 Static pressure of fluid-solid contact line on the upper Longitudinal symmetry surface

2 过隧道运行模拟计算

2.1 计算模型

本文主要针对 350 km/h 某型高速列车在通过特长隧道时的压力波问题做进一步说明和分析,其中特长隧道主要选取国内目前空气动力学性能研究不太明朗的标准时速 300,350 km 高速列车双线隧道为对象。参照 TB10621-2014 及京沪高速铁路设计规定^[15-17],我国时速 300,350 km 高速列车双线隧道内轮廓分别如图 6 所示,并根据相关技术参数创建外流场计算模型,流体数学模型及计算方法和某型高速列车几何模型均采用前文明线上的运行参数。

2.2 计算分析

取某型高速列车运行速度 $v_c=350$ km/h,分别针对隧道及列车各量参数值,设定好边界条件(主要包括外流场入口流速、出口压力)及目标(主要包括入口压力、出口体积流量),在标准大气压强下,进行数值模拟计算^[18]。列车头车表面压力分布及速度迹线如图 7 所示。图中将列车前进方向一侧称迎风侧,另一侧称背风侧。

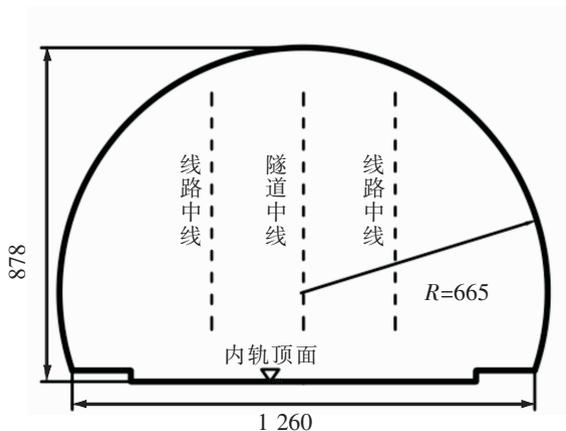
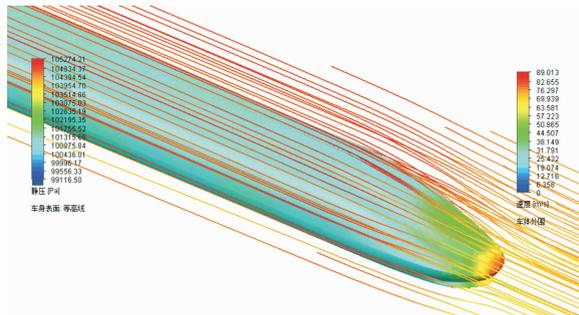
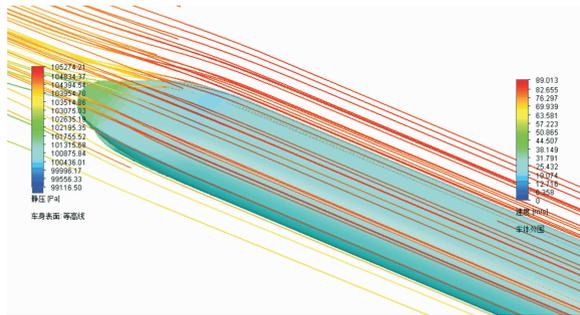


图 6 时速 300,350 km 双线隧道内轮廓(单位:cm)
Fig.6 Inner contour of 300,350 km double-line tunnel (unit: cm)



(a) 迎风侧



(b) 背风侧

图 7 车身压力及外围速度迹线

Fig.7 Train body pressure and peripheral speed trace

从图 7 中可以看出某型高速列车在双线隧道内运行时,列车整体前后正压区与负压区分布类似于在明线上高速运行的情况,即于列车头部鼻尖处由于空气受到迅速压缩,周围出现第一正压区,于滞止点处存在 $P_{max1}=105.27$ kPa,列车尾部鼻尖处出现第二正压区;迎风侧与背风侧列车司机室与车厢连接处出现带状负压区,如图 7 中蓝色区域所示。提取纵向对称面外流场与列车上表面接触线上静压在列车前后相对坐标位置上分布如图 8 所示。

对比图 5 所示的某型高速列车在无风明线上运行时的纵向对称面上部流固接触线静压分布,发现当高速列车以同样的时速在隧道内运行

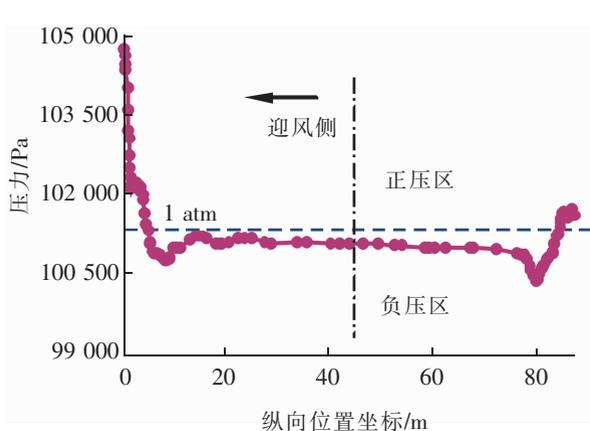


图 8 纵向对称面上部流固接触线静压
Fig.8 Static pressure of fluid-solid contact line on the upper Longitudinal symmetry surface

时,列车车体表面的压力骤降,同时大部分部位处于 1 atm 以下的负压状态。同时分别对称提取列车两侧(最靠近隧道壁面一侧称为隧道壁侧,最靠近隧道中心一侧称为隧道中心侧)车体中部的一条流固接触线为研究对象,计算其静压在列车长度方向上分布如图 9 所示。

计算分析发现所提取的列车两侧代表线上静压分布主要有以下表现规律:①从列车迎风侧附近开始,沿着列车长度方向两侧所受静压逐渐呈下降趋势,背风侧附近静压降到最小;②隧道壁侧和隧道中心线侧静压分布曲线前端的突增及后端的骤降为列车司机室与车厢连接处的负压带所引起;③整体趋势上列车隧道壁侧的所受静压大于隧道中心侧所受静压;④列车在隧道内运行时迎风侧左右两侧静压波动(或相对压差)大于背风侧左右两侧,即迎风侧左右两侧出现危害性更大的压力波动,背风侧左右两侧静压变化较为平缓;⑤列车在隧道内运行时左右两侧均处于负压状态。

如图 10 所示为某型高速列车头车司机室与车厢连接处的横断面上,此连接界面上易形成大负压带且很难避免,是车辆头车外噪声及车内压力环境恶化的主要原因。迎风侧头身连接处横截面上双线隧道内,表现为列车所在一侧隧道内压力整体上略小于无列车一侧压力,背风侧头身连接处横截面上双线隧道内整个界面上压力趋于稳定,呈负压状态,同时迎风侧与背风侧列车外围附近负压范围内压力值基本保持恒定,没有大的波动和变化。

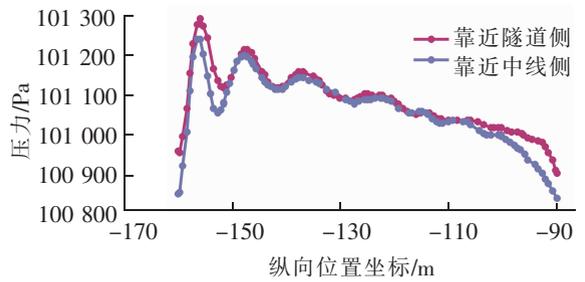
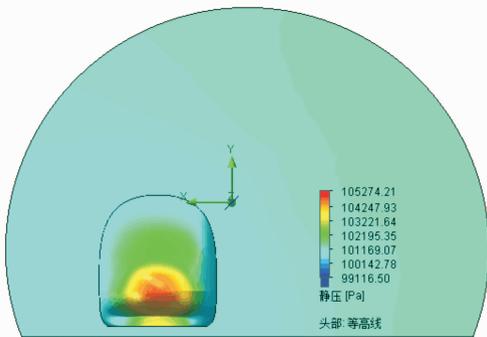
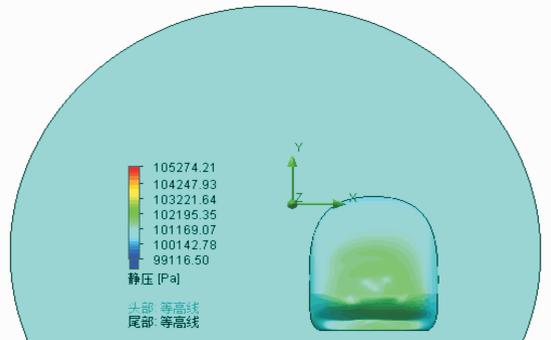


图 9 车体对称两侧测试线静压分布

Fig.9 Static pressure distribution of test line on both sides of train body



(a) 迎风侧



(b) 背风侧

图 10 头身连接处截面静压分布

Fig.10 Static pressure distribution of the joint between the front of the train and the body

计算模型及隧道内轮廓静压分布情况如图 11 所示。

取列车纵向对称面内长 1.5L(L 为 3 辆编组的某型高速列车几何模型全长)的隧道段内轮廓表面作为研究对象,对其由于列车高速运动引起的静压进行计算分析,分布如图 12 所示,其中左轴坐标表示该测试隧道段内轮廓横截面弧(除隧道底面)从无车侧到列车侧的长度均匀标记点,分别记作(0,1,2,⋯,10),右轴表示该测试隧道段在纵向的相对位置坐标。

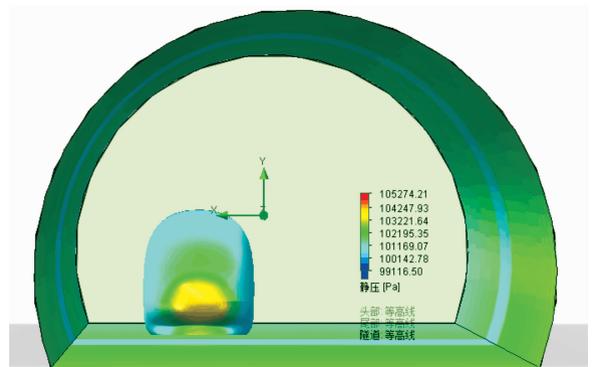


图 11 列车-隧道模型静压分布

Fig.11 Static pressure distribution of train-tunnel model

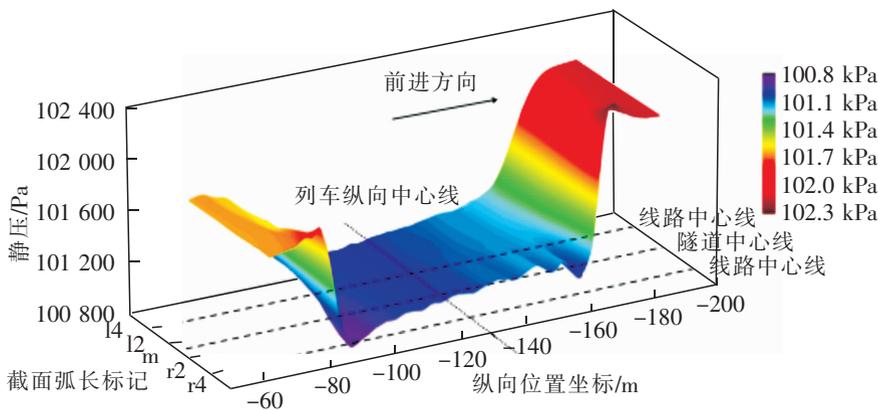


图 12 隧道内轮廓表面静压分布

Fig.12 Static pressure distribution on the contour surface of the tunnel

为了更为直观清晰的反映某型高速列车以时速 350 km 通过特长双线隧道时周围空气动力学效应及压力波趋势,如图 13 所示分别于列车所处隧道段内轮廓周围左右两侧均匀提取出 9 条静压测试线,(分别为列车侧:l1,l2,l3,l4;无车侧:r1,r2,r3,r4;中部:m),该 9 条测试线沿列车长度方向均匀平行等长,分别关于列车纵向横向对称面对称布置,测试长度取 1.5L(L 为 3 辆编组的某型高速列车几何模型全长)。

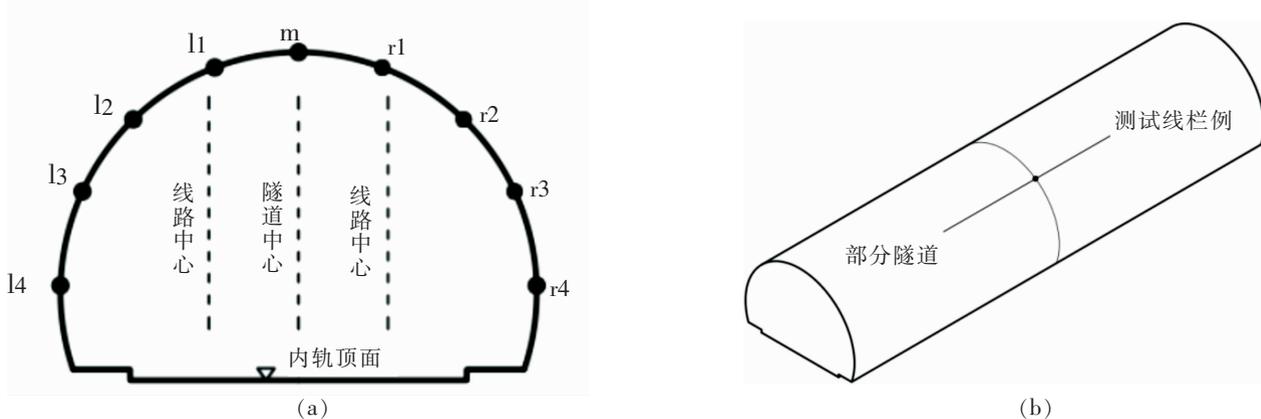


图 13 测试线分布及提取

Fig.13 Test line distribution and extraction

如图 14 所示为列车侧 (l1,l2,l3,l4)4 条测试线和中 1 条测试线 m 的静压分布情况,图 15 所示为无车侧 (r1,r2,r3,r4)4 条测试线和中 1 条测试线 m 的静压分布情况。清晰图示了列车周围隧道 1.5L 长度范围内内轮廓表面所受静压情况,有如下分布规律:① 列车侧与无车侧测试线前端迎风侧和后端背风侧所受静压基本维持稳定且相同,同时前端迎风侧静压大于后端背风侧所受静压;② 列车侧内轮廓所受静压沿列车长度方向逐渐增大到一个最大值,然后于列车头部位置骤降并逐渐趋于平缓下降趋势,到背风侧列车尾部位置突增达到一个极大值,然后逐渐

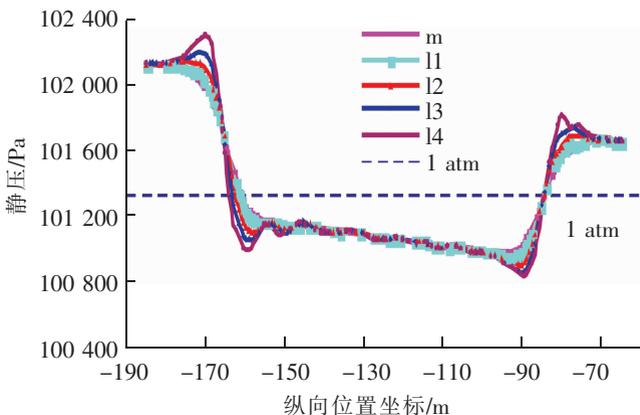


图 14 列车侧测试线静压分布

Fig.14 Static pressure distribution of the test line on the side of the train

下降并趋于稳定;③无车侧隧道内轮廓静压整体变化趋势类似于列车侧内轮廓静压,因为该侧空气流动范围较为开阔,故不存在明显的压力变化和局部最大静压问题,走向趋于平缓;④列车侧内轮廓所受静压沿列车长度方向在靠近列车头车司机室部位,压力波动较为明显,且迎风侧压力波动现象较背风侧更为明显,无车侧基本无压力波动现象产生;⑤列车侧隧道内轮廓静压分布沿着隧道底部逐渐向隧道顶部压力波动趋势逐渐减小,无车侧隧道内轮廓静压分布沿着隧道底部逐渐向隧道顶部基本保持稳定。

为了更为直观清晰的解释该现象,计算隧道内轮廓测试线 l4 和 r4 上静压分布情况,如图 16 所示。基本变化规律符合上文所述。

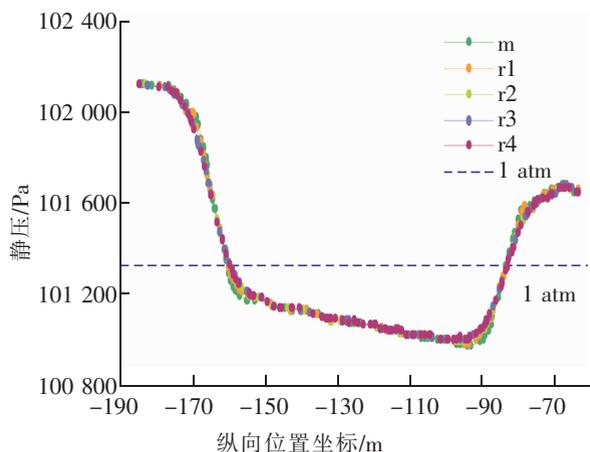


图 15 无车侧测试线静压分布

Fig.15 Static pressure distribution on the car-free side test line

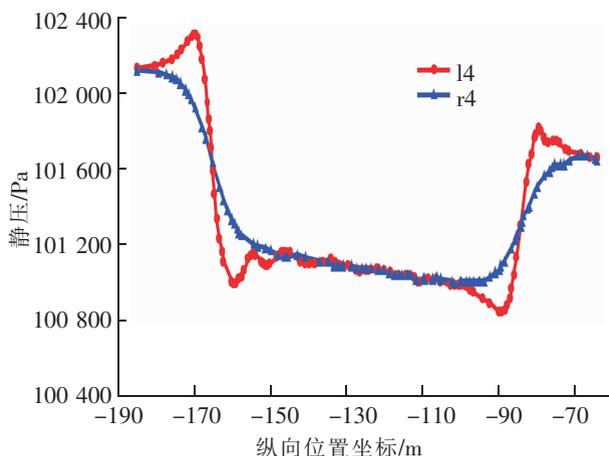


图 16 隧道内轮廓测试线 l4 和 r4 上静压分布

Fig.16 Static pressure distribution on the inner contour test lines l4 and r4

3 结语

350 km/h 高速列车在特长双线隧道内运行时,列车方面:整体趋势上列车靠近隧道的一侧所受静压大于靠近中心线的一侧所受静压,同时迎风侧压力波动现象较为明显,且两侧所受静压沿列车长度方向逐渐减小;隧道方面:列车侧内轮廓所受静压沿列车长度方向逐渐增大,然后于列车头部位置骤降并逐渐趋于平缓下降,到背风侧列车尾部位置突增达到一个极大值,然后逐渐下降并趋于稳定,无车侧隧道内轮廓静压整体变化趋势类似于列车侧内轮廓静压,列车侧内轮廓所受静压沿列车长度方向在靠近列车头车司机室部位,压力波动较为明显,且迎风侧压力波动现象较背风侧更为明显,无车侧基本无压力波动现象产生,轮廓静压分布沿着隧道底部逐渐向隧道顶部基本保持稳定。本文从计算流体动力学数值模拟的角度对高速列车过双线隧道压力状态及流场结构进行了分析说明,后期可从数值模拟结果反向出发,对列车过隧道时的流场结构及压力波问题进行全面完善的数学解释和进一步理论研究。

参考文献:

- [1] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等. 高速列车的关键力学问题[J]. 力学进展,2015,45(1):217-460.
- [2] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报,2006,6(1):1-9.
- [3] ANDERSSON E, H GGSTR M J, SIMA M, et al. Assessment of train-overturning risk due to strong cross-wind[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(3): 213-223.
- [4] DIEDRICHS B, SIMA M, ORELLANO A, et al. Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(2): 205-225.
- [5] 何华,田红旗,熊小慧,等. 横风作用下敞车的气动性能研究[J]. 中国铁道科学,2006,27(3):73-78.
- [6] 周丹,田红旗,鲁寨军. 大风对路堤上运行的客运列车气动性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2007,7(4):6-9.
- [7] BETTLE J, HOLLOWAY A G L, VENART J E S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(5): 573-592.

- [8] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1/2): 209–218.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 24–50.
- [10] 谢红太. 动车组轴盘温度场及应力场数值模拟分析[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(1): 116–122.
- [11] 祝志文, 陈伟芳, 陈政清. 横风中双层客车车辆的风荷载研究[J]. *国防科技大学学报*, 2001, 23(5): 117–121.
- [12] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow structure around trains under side wind conditions: numerical study[J]. *Computers and Fluids*, 2000, 29(2): 179–195.
- [13] 周丹, 田红旗, 鲁寨军. 大风对路堤上运行的客运列车气动性能的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(4): 6–9.
- [14] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow structure around trains under side wind conditions: numerical study[J]. *Computers and Fluids*, 2000, 29(2): 179–195.
- [15] 国家铁路局. TB10621–2014 高速铁路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁建设[2004]157号 京沪高速铁路设计暂行规定(上册). [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [17] 李伦贵. 高速列车隧道缓冲结构实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003: 2–9.
- [18] 谢红太. 高速列车过特长双线隧道时列车及隧道表面所受静压的数值模拟分析方法: 201810572539.2[P], 2018: 11–6.

Numerical Simulation Analysis of Surface Pressure Distribution of 350 km/h High Speed Train Passing Through Extra Long Double Tunnel

Xie Hongtai^{1,2}

(1. Railway Planning and Design Institute, China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the three-dimensional constant incompressible viscous flow field NS and the equation turbulence model, the finite-volume numerical simulation method was used to analyze and calculate the local flow field structure and pressure wave distribution of a 350 km/h high-speed train operating on the long-haul lines and extra long double-track railway tunnels. The study finds that the distribution structure of the air flow field is complex and irregular. As for the train, the static pressure on the side of the train approaching the tunnel is greater than the static pressure on the side near the tunnel center line and the pressure fluctuation on the side of the front windward side. The phenomenon is more obvious, and the static pressure on both sides gradually decreases along the length of the train; As for the tunnel, the static pressure on the side of the tunnel with the train running and on the side without the train gradually increases along the length of the train, then it drops at the head of the train and gradually descends at the rear of the lee side train. The sudden increase reaches a maximum value, then gradually decreases and tends to be stable. The static pressure on the inner profile of the train is located near the driver's cab of the train head along the length of the train. The phenomenon of pressure fluctuation is obvious, and the pressure fluctuation on the windward side is more obvious. The leeward side is more prominent, and there is almost no pressure fluctuation in the no-vehicle side, and the profile static pressure distribution is gradually stable along the bottom of the tunnel toward the top of the tunnel.

Key words: vehicle engineering; aerodynamics; double-track railway tunnel; express train; finite element analysis