

DOI:10.11918/202011011

高速列车过双线隧道气动效应及列车风特性

王磊^{1,2}, 骆建军^{1,2}, 李飞龙^{1,2}

(1. 城市地下工程教育部重点实验室(北京交通大学), 北京 100044;

2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘要: 为加深对隧道内气动效应和列车风特性的认识, 采用 RNG κ - ε 湍流模型模拟高速列车偏心通过隧道全过程, 应用滑移网格技术模拟列车高速运动, 对列车通过时隧道内的气动效应及列车风进行研究。通过将数值计算结果与现场试验结果进行对比, 验证了数值方法的准确性。研究表明: 隧道入口处气动压力变化规律与隧道内有很大差别; 列车两侧对称测点的最大正压值及峰-峰压力变化幅值分别相差 13.1% 和 7.3%, 近隧道侧列车风纵向速度分量与合速度最大值分别为远隧道侧的 2.1 倍和 1.9 倍, 列车偏心通过对列车周围气动压力影响不大, 而对列车风影响非常显著; 列车表面边界层对列车风纵向分量影响显著, 对横向速度分量和垂向速度分量几乎无影响; 隧道内列车后方产生交替出现的复杂尾涡结构, 与明线时差别很大; 隧道内列车风风速衰减较慢, 持续时间更久。

关键词: 高速列车; 双线隧道; 气动效应; 列车风; 流场特性; 数值模拟

中图分类号: U25; U266.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)09-0043-10

Aerodynamic effects and train wind characteristics of high-speed train passing through double-track tunnel

WANG Lei^{1,2}, LUO Jianjun^{1,2}, LI Feilong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China;

2. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment

(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: To further understand the aerodynamic effects and the characteristics of train wind, the RNG κ - ε model was used to simulate the overall process of a high-speed train passing through a tunnel asymmetrically. The movement of the train was simulated using the sliding mesh technique. The aerodynamic effects and the train wind characteristics were investigated, and the accuracy of the numerical method was verified by comparing the numerical results with the results of a full-scale experiment. Results show that there was a large difference of pressure transients between the entrance and inside of the tunnel. The maximum positive pressures and the peak-peak pressure transients amplitude differed by 13.1% and 7.3% at the symmetrical monitoring points on both sides of the train. The longitudinal velocity component and the maximum resultant velocity on the near-tunnel side were 2.1 and 1.9 times those of the far-tunnel side respectively. The train passing asymmetrically had no obvious effect on the aerodynamic pressure, but the impact on the train wind was significant. The boundary layer of the train had a significant effect on the longitudinal component of the train wind, while the effect on the lateral velocity component and the vertical velocity component was small. Complex wake vortex structures alternately appeared behind the tail, which was very different in the open air. The attenuation of the train wind velocity in the tunnel was slower, and the duration was longer.

Keywords: high-speed train; double-track tunnel; aerodynamic effect; train wind; flow field characteristic; numerical simulation

随着铁路运行速度不断提高, 高速列车气动效应日益显现^[1]。由于空气黏性作用列车运动时会产生列车风。列车风通常与高速气体流动和压力变化有关, 两者共同作用可能会对站台上乘客、路旁作

业人员安全带来威胁^[2-5], 也影响强侧风作用下列车的运行稳定性^[6]。文献[7-8]采用动模型试验、数值仿真等方法研究了列车驶过隧道时产生的压力波变化规律。文献[9-10]研究了隧道内气动载荷对动车组车体结构强度的影响。文献[11-12]研究了隧道截面变化对隧道出口微压力波和瞬变压力的影响规律。文献[13]研究了隧道截面减小对列车交会压力波的影响。目前, 关于隧道气动效应

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678036)

作者简介: 王磊(1987—), 男, 博士研究生;

骆建军(1971—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 骆建军, jluo@bjtu.edu.cn

研究主要集中在隧道内部为主,而入口作为列车明线-隧道的过渡部位,气动效应具有特殊性,关于隧道入口气动效应少有研究。

由于受隧道结构的空限制作用,列车在隧道内运动引起的列车风比在明线上运行时产生的列车风更加严重。20 世纪 60 年代,日本采用足尺试验方法对隧道内列车风进行了研究^[14-16]。由于现场试验实施难度大、成本高,室内试验和数值模拟方法得到广泛使用。文献[17]研究了封闭设施类型对气体流动和气动荷载的影响。文献[18-19]采用数值方法研究了隧道内列车风对人员、接触网安全性的影响。文献[20-21]深入研究了高速列车附属结构和轨道结构对列车风的影响。文献[22]根据流动特性将隧道内高速列车周围流场划分为 3 个不同的区域。目前关于高速列车通过时隧道内列车风的研究普遍较少^[23]。由于受到试验条件等多方面因素制约,研究对象普遍以短编组列车(两车或三车编组)为主。然而由文献[24-25]可知:列车风变化规律与列车长度有紧密联系。因此,为了能够真实、全面反映现实情况,亟需以真实长编组列车为研究对象分析列车通过时隧道内的列车风特性。此外,列车通过隧道时会产生强烈的活塞效应,引起隧道内压力场和速度场的显著变化,对在隧道内工作人员安全性和隧道附属设施正常使用带来严重威胁,所以深入研究列车通过时隧道内气动效应及列车风特性对保障人员安全和设备正常使用具有非常重要的现实意义。

本文基于有限体积法理论,采用数值模拟方法,基于 8 车编组高速动车组列车建立隧道-列车-空气三维数值计算模型,模拟列车以 400 km/h 的速度通过隧道全过程。分析列车在偏心通过情形下隧道内气动压力变化规律和列车风的分布特性,并在此基础上对比研究列车在隧道内和明线行驶时列车尾迹区的流场特性。

1 控制方程

列车运动形成的流场采用黏性、可压缩性、非定常的 Navier-Stokes 方程和 κ - ε 双方程湍流模型进行描述。控制方程表述如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

X 方向动量方程:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} u - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} u) = -\frac{\partial P_{\text{eff}}}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x}) \quad (2)$$

Y 方向动量方程:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} v - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} v) = -\frac{\partial P_{\text{eff}}}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y}) \quad (3)$$

Z 方向动量方程:

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} w - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} w) = -\frac{\partial P_{\text{eff}}}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z}) \quad (4)$$

湍流动能 κ 方程:

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \kappa - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\kappa}} \operatorname{grad} \kappa) = G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍流动能耗散率 ε 方程:

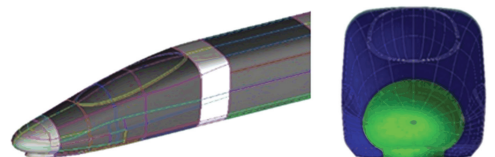
$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\varepsilon}} \operatorname{grad} \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (6)$$

式中: \mathbf{V} 为速度矢量; u 、 v 和 w 分别代表与各坐标方向对应的速度分量; ρ 为空气密度; μ_{eff} 和 P_{eff} 分别为有效黏性系数和有效压力,其值与 κ 和 ε 有关。上述方程包含 6 个未知量: u 、 v 、 w 、 P 、 κ 、 ε , 方程组封闭,可以进行数值求解。

2 计算模型

2.1 数值模型

本文采用缩比为 1:1 的 8 车编组高速动车组列车模型,与文献[24,26]相同。列车宽 $W = 3.38$ m、高 $H = 3.5$ m,车头流线段长度 $L_{\text{head}} = 12$ m,横截面积 $S_{\text{train}} = 11.2$ m²。图 1 所示为本文数值计算中采用的高速列车模型,将高速列车模型简化为光滑车体。采用中国高速铁路标准双线隧道,净空面积 $S_{\text{tunnel}} = 100$ m²,线路中心线距离为 5 m,阻塞比 $\beta = S_{\text{train}}/S_{\text{tunnel}} = 0.112$,车体底部与轨面距离为 0.2 m,如图 2 所示。以列车高度 H 为特征长度,列车通过隧道速度 $V_{\text{tr}} = 400$ km/h (111.11 m/s),数值计算中高速列车模型的 $Re = \rho v H / \mu = 2.6 \times 10^7$,其中 ρ 表示空气密度,这里取 1.225 kg/m³; v 代表来流速度,这里取列车运行速度 $V_{\text{tr}} = 111.11$ m/s; μ 是空气动力黏度,取值为 1.8×10^{-5} Pa·s。



(a) 流线型车头

(b) 车尾

图 1 高速列车模型

Fig.1 Model of high-speed train

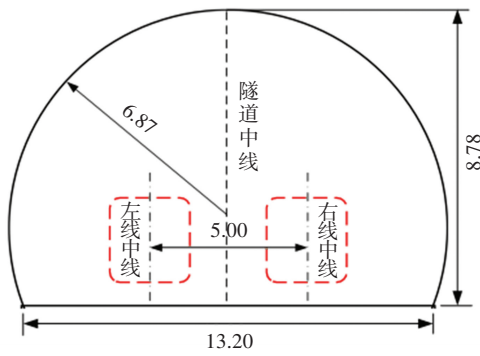


图2 隧道断面尺寸(m)

Fig.2 Dimensions of tunnel cross-section (m)

2.2 求解方法

高速列车通过隧道时产生的气体流动具有三维、可压缩、非定常特性^[27-28]。本文采用 RNG $\kappa - \varepsilon$ 双方程湍流模型模拟列车周围流场的湍流特性,该模型能够有效应用于高速铁路隧道气动效应的研究^[24,29]。

本文通过 ANSYS Fluent 流体仿真软件进行计算,采用有限体积法(finite volume method, FVM)对控制方程进行离散,压力场和速度场耦合问题选用 SIMPLE 算法,使用迭代法修正压力场。对流-扩散项离散采用二阶迎风格式,时间导数采用一阶隐式方法进行离散。物理分析步时间步长 $\Delta t = 0.0015\text{ s}$, 每个时间步迭代 40 次。

2.3 计算区域

图3为计算模型示意图,本文计算模型采用大地参考坐标系,坐标原点位于隧道入口、右线中心线与地表的交点处,其中 x 轴沿隧道纵向,横向和竖向分别为 y 轴和 z 轴。隧道入口端和出口端空气计算域尺寸分别为:长度 \times 宽度=400 m \times 200 m 和长度 \times 宽度=200 m \times 200 m,高度均为 50 m。本文将列车车头鼻尖到隧道入口及车尾鼻尖到入口端计算域边界面的初始距离均设为 100 m。隧道长度 $L_{\text{tunnel}} = 500\text{ m}$ 。车头驶入和驶离隧道的时刻分别为 0.96 s 和 5.46 s, 车尾完全驶入和驶离隧道的时刻分别为 2.79 s 和 7.29 s。

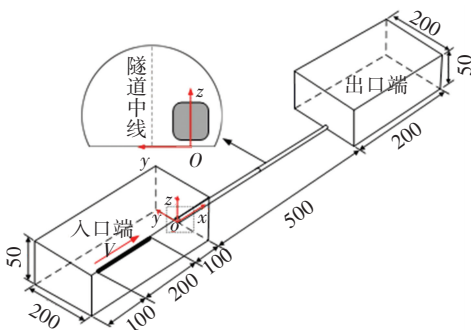
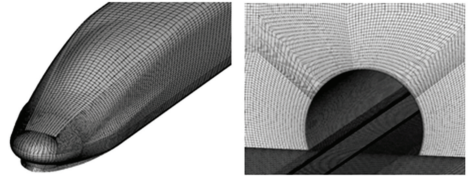


图3 数值计算模型(m)

Fig.3 Numerical calculation model (m)

采用结构化网格技术对模型计算域(包括高速列车和隧道)进行网格划分。为保证计算精度,用于计算的最小网格尺寸为 0.2 m。其中,在列车车头车尾截面形状变化明显位置进行网格加密处理。列车头部和隧道入口处网格见图4。



(a) 列车头部 (b) 隧道入口

图4 模型网格示意

Fig.4 Grid of the model

2.4 边界条件

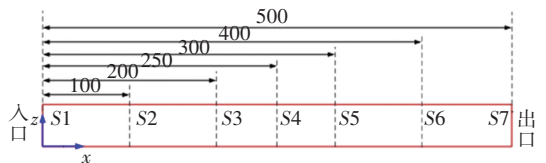
1) 隧道壁面、列车表面、地面及与隧道相邻的垂向界面均采用无滑移壁面(no-slip wall)边界条件,无壁面法向速度。其中,隧道和列车表面的粗糙度高度分别设置为 5 mm^[30]和 0.045 mm^[31]。

2) 隧道两端的空气域外边界采用压力远场(pressure far-field)边界条件,取值为一个标准大气压。

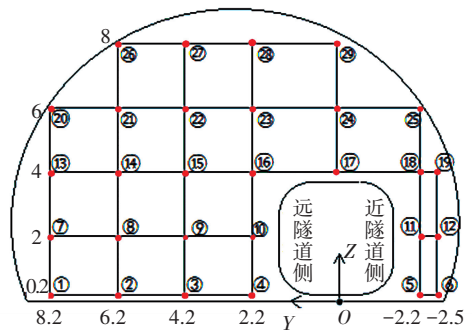
3) 为提高计算效率,降低计算成本,本文采用滑移网格技术模拟列车通过隧道过程。

2.5 测点布置

沿隧道纵向设置 7 个监测断面(S1 ~ S7), 断面位置如图 5(a)所示。每个隧道内横断面的测点布置情况见图 5(b)。需要指出的是,本文只选取部分测点进行研究,在后文分析中有明确说明。在这里,本文定义:靠近隧道壁面的列车侧面为近隧道侧,而靠近隧道中心线的列车侧面称远隧道侧。



(a) 监测断面位置示意



(b) 隧道横断面测点布置

图5 监测断面及测点布置(m)

Fig.5 Layout of monitor sections and measurement points (m)

3 计算验证

3.1 网格无关性检验

为检验网格精度对计算结果的影响,本文设置 3 套不同网格数量的计算模型:粗网格模型(1 200 万单元)、中网格模型(1 500 万单元)和细网格模型(1 700 万单元)。气动压力常采用压力系数 C_p 表示,数学表达式为 $C_p = 2P/(\rho V_{tr}^2)$,其中 P 为隧道内测点的气动压力值, ρ 为空气密度, V_{tr} 表示列车通过隧道时的运行速度。

图 6 为隧道中部断面上 8 号测点的气动压力系数曲线。对比可知,中网格模型与细网格模型的压力系数曲线差别不大,一致性良好,而它们与粗网格模型压力系数曲线存在显著不同。因此本文采用细网格模型网格进行计算分析。

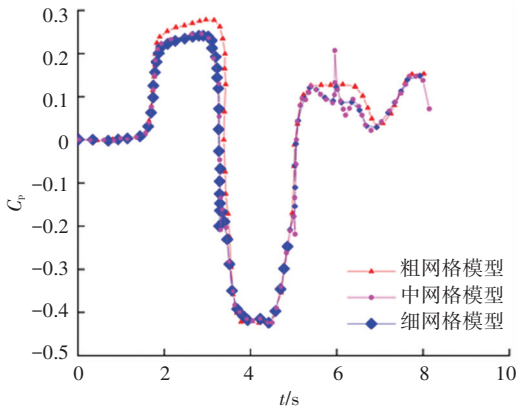


图 6 隧道中部测点 8 压力系数曲线

Fig.6 C_p of measurement point 8 at middle of tunnel

3.2 计算方法验证

为验证本文计算方法的可靠性,将数值计算结果与京广高铁某隧道现场实测结果进行对比。该隧道为单洞双线型式的标准高铁隧道,隧道断面尺寸见图 2。隧道长度为 2 908 m,横截面面积为 100 m^2 ,线间距为 5 m。为保证数值模拟与现场实测的一致性,数值模拟中采用缩比为 1 : 1 的 8 车编组 CRH380A 高速列车,列车通过隧道的速度为 350 km/h,隧道长度取为 2 900 m。

气动压力测点设置在距隧道入口 230 m、隧道壁面 1.0 m 和轨面上方 1.5 m 处,图 7 为现场实测与数值计算压力系数对比曲线。经过对比可以发现,现场实测气动压力系数变化趋势与数值计算基本一致,吻合良好。压力系数最大值和最小值分别相差 12.2% 和 8.6%,均能够满足工程允许误差。因此可以认为本文采用的数值模拟计算方法和计算结果是合理可靠的。

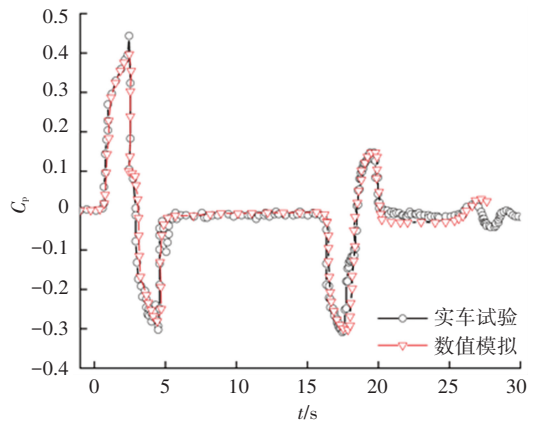


图 7 现场实测与数值计算对比

Fig.7 Comparison of field measurements and calculation results

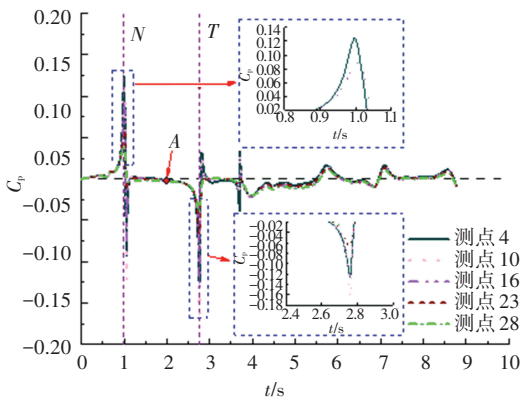
4 压力场与速度场分析

4.1 气动压力

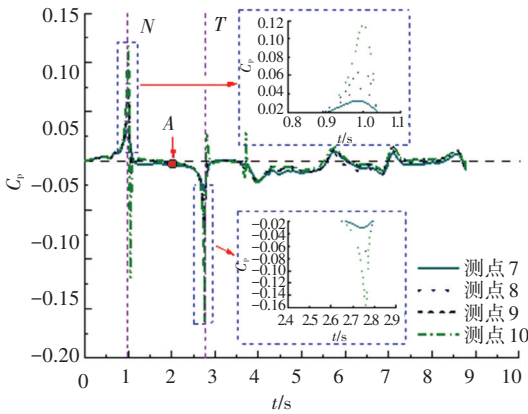
4.1.1 入口处气动压力

列车通过隧道洞口时会产生显著的气动效应^[32]。因此,研究隧道入口处的气动效应对高铁隧道设计具有重要研究意义。图 8 为隧道入口处测点气动压力曲线, N 、 T 分别对应车头、车尾通过测点时刻。由图可知,在列车驶入隧道前,入口处气动压力受到干扰作用而开始增大。当列车车头通过时,气动压力迅速增大随后急剧减小。由正压力峰值到负压力峰值所用时间极短,仅为 0.1 s,压力梯度较大,表明车头经过时会产生强烈的拉力-压力作用,容易出现隧道入口处的设备产生疲劳损坏、人员站立不稳等问题。车头通过后气体压力迅速增大恢复到零值左右,随着车身不断驶入,从第 6 节车厢(对应图 8 中点 A 开始,测点压力值开始负向增加,这是因为列车不断驶入隧道,活塞效应增强,引起入口处气流速度不断增大,压力值降低。当车尾通过时,压力达到负压力峰值,随后气压值迅速增大至正值。列车完全驶入隧道后,测点处压力系数逐渐恢复至列车驶入前的初始状态。由于列车驶入隧道产生的压缩波和膨胀波相互作用,导致测点处气动压力不断波动,但是与初始压力波相比,波动幅度很小。

当车头经过时正压力峰值最大,车尾经过时负压力峰值绝对值最大,且后者绝对值大于前者。随着测点到列车表面、地表距离增大,气动压力峰值逐渐降低。综上,当列车车头、车尾驶过时会导致气动压力剧烈变化,而列车中部车身驶过阶段,压力变化较为平缓。因此当列车首尾两端通过时容易引起安全事故。



(a) 垂向测点



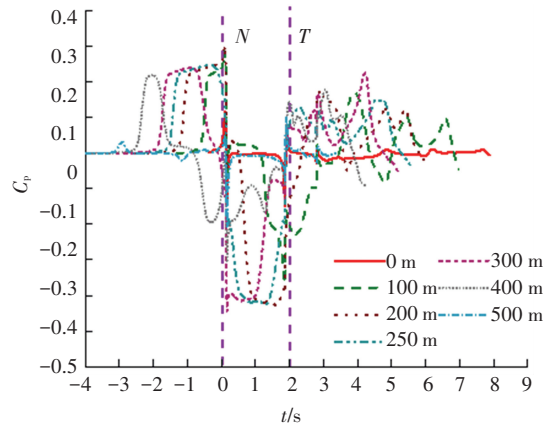
(b) 横向测点

图8 隧道入口处测点压力系数曲线

Fig.8 C_p of measurement points at tunnel entrance

4.1.2 隧道内气动压力

由于测点距离列车越近,气动压力值越大,故选择测点10、11分析隧道入口和隧道内部气动压力变化规律的差异。测点10、11关于列车中线对称,高度为2 m,距列车侧面为0.5 m。图9为测点10、11在不同位置的气动压力系数曲线,可知,测点瞬变压力变化规律相似,但是压力幅值不同。



(b) 测点11

图9 距离隧道入口不同时测点10、11压力系数曲线

Fig.9 C_p of measurement points 10 and 11 at different distances from the entrance of tunnel

4.1.3 偏心效应对压力的影响

图10为测点10、11沿隧道纵向压力系数的变化曲线。由图可知,在隧道中部正负压力最大值基本保持稳定,隧道洞口附近测点的正负压力系数均急剧降低。正压力系数最大值出现在距离入口200 m处,而不是隧道中部,在距出口200 m处负压值最大。

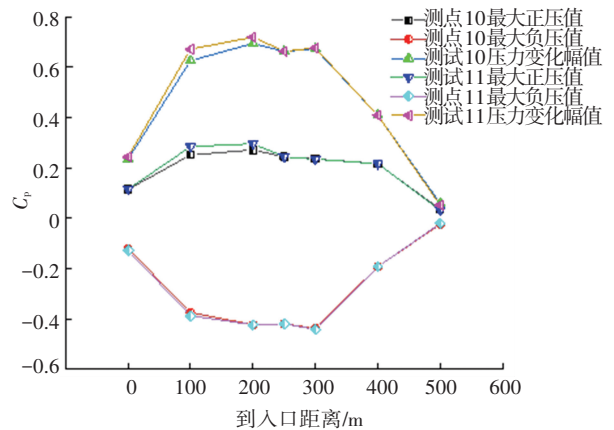
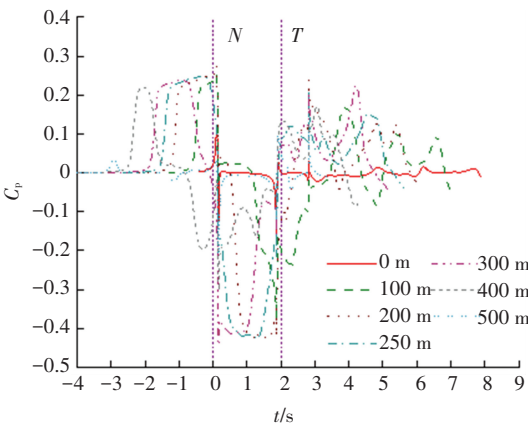


图10 沿隧道纵向测点压力系数

Fig.10 C_p of measurement points along the longitudinal direction of the tunnel

受隧道洞口效应影响,测点10、11在入口处正负压力最大值基本相同。随着到入口距离增加,测点11最大正压值增加速度较快。在隧道内100 m处测点10、11正压力系数最大值分别为0.25和0.28,相差12%。随后,两测点之间的差异逐渐减小,自隧道中部起两测点变化规律基本保持一致。与正压力系数不同,在隧道全长范围内测点10、11负压力系数最大值差别均很小。因此,压力系数变化幅值规律与正压力系数最大值相同。由上可知,



(a) 测点10

偏心通过对列车附近气体压力的影响不太显著。

4.2 列车风

4.2.1 列车风变化规律

将列车风合速度 U 沿 x, y, z 坐标轴进行分解即可得到纵向分量 u 、横向分量 v 和垂向分量 w 。为便于分析,按 $U(u, v, w)/V_u$ (列车速度) 进行无量纲化处理,横坐标零点对应车头鼻尖通过隧道入口时刻。图 11 为隧道中部,远隧道侧到地表 2 m 时不同水平距离测点的列车风曲线。由图 11(a)可知,当车头到达测点之前,在距离车头鼻尖约 1 倍列车长度时 u 开始增大。当车头通过时 u 达到峰值,气体向隧道出口方向流动。需要注意的是,虽然各测点到列车侧面水平距离不同,但在车头到达前,各测

点 u 变化曲线相同,表明车头前方压缩波具有显著的一维特性。当车头通过后, u 迅速反向增大,流向迅速改变,与列车运动方向相反。在列车车身通过测点期间,测点 7~9 的 u 曲线重合且数值较大,而测点 10 的 u 远小于前 3 个点,这是因为隧道内列车表面边界层厚度沿列车长度方向不断增加^[33],测点 10 距列车侧面仅为 0.5 m,受边界层影响更加显著,导致气体反向流动现象相对较弱。在车尾通过测点之前, u 迅速正向增大,当车尾完全通过测点时各测点 u 急剧增大,流向再次改变与列车前进方向一致。此外,各测点纵向列车风最大值 u_{max} 均出现在尾迹区,并且测点 10 最大值为车速的 0.11 倍,显著大于其他测点,具体原因将在 5.1 节进行解释。

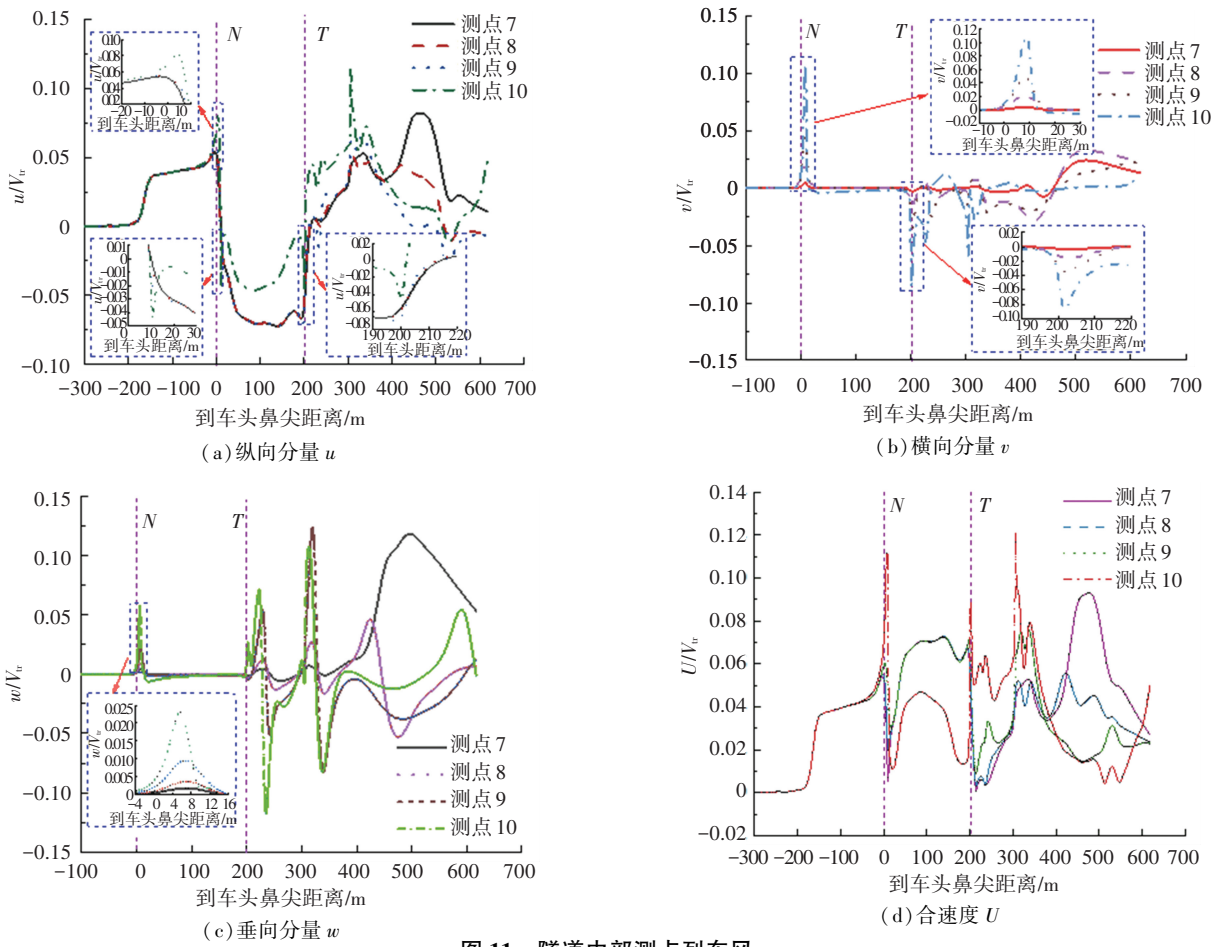


图 11 隧道中部测点列车风

Fig.11 Velocities of train wind at middle of tunnel

图 12 为高度为 1.0 m 时水平面上列车周围纵向列车风分布云图。由图可知,在车头、列车表面及车尾附近存在很大的速度梯度,并且沿列车车身风速等值线基本上为平直线,表明列车-隧道形成的环状空间 u 基本处于稳定状态,并且近隧道侧 u 较大。此外,距列车表面很近范围内气流方向与列车前进方向相同,距离稍远处气流流向隧道入口方向。

同,在车头到达前及车身通过阶段 v 和 w 基本保持为零。当车头通过时, v 和 w 迅速增大,流向分别为水平向外和垂直道床向上。当车尾通过测点时, v 与 w 再次发生突变,但是流动方向不同: v 气体流动指向列车,而 w 流向仍然垂直道床向上。分析表明:列车驶入隧道产生的压力波和列车表面的边界层对 v 与 w 基本没有影响,只有车头、车尾经过时才会发生突变,这是因为车头、车尾经过引起测点阻塞

由图 11(b)~11(c)分析可知,与 u 变化规律不

比发生突变。需要注意的是, v 在车头通过时达到最大, 而测点 8~10 最大值 w 出现在车尾后方 100 m

左右。由于测点 7 到列车表面距离最远, u 、 v 及 w 最大值出现位置距离车尾鼻尖最远。

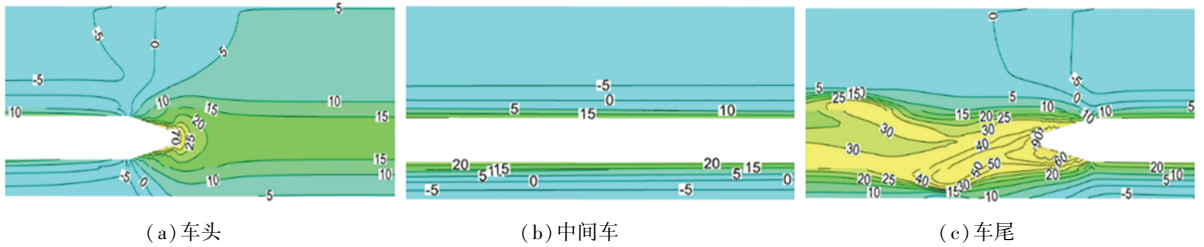


图 12 列车不同位置纵向速度云图 (m/s)

Fig.12 Distributions of longitudinal velocities at different train positions(m/s)

对图 11(d) 进行分析, 在车头达到前及列车通过阶段, 合速度 U 与 u 的幅值及变化规律基本一致, 而在车头、车尾通过及尾迹区内, 由于受 v 和 w 突变影响较大, 合速度 U 与 u 有一定差别, 但相差不大, 以测点 10 为例进行分析, $U_{max} = 0.12V_{tr}$, $u_{max} = 0.11V_{tr}$, 两者仅相差 $0.01V_{tr} = 1 \text{ m/s}$ 。

4.2.2 偏心效应对列车风的影响

为分析列车偏心通过对列车周围列车风的影响, 以测点 10、11 为研究对象进行分析。图 13 为测点 10、11 纵向速度分量 u 和合速度 U 对比曲线。分析可知, 从车头鼻尖后方 68 m (图 13 中 B 点, 第 3 节车厢) 开始, 两测点之间的 u 及 U 差异开始显现, 并且 u 随着到车头鼻尖距离增加而增大。在列车尾

迹区, 测点 11 的 u 、 U 最大值分别为 $0.231V_{tr}$ 和 $0.235V_{tr}$, 测点 10 的 u 、 U 最大值分别为 $0.11V_{tr}$ 和 $0.12V_{tr}$, 前者分别是后者的 2.1 倍和 1.9 倍。表明列车偏心通过时, 近隧道侧列车风远大于远隧道侧列车风。

图 14 为列车完全驶入隧道, 车头距出口 140 m 时车尾后方不同距离列车风速度云图。由图可知, 车尾通过产生的尾流对近隧道一侧的列车风影响更显著, 表明列车侧面与隧道壁面之间的空间大小对列车风有严重影响, 与文献[22]研究结论一致。由图 14(d) 可知, 列车近隧道侧隧道壁面附近的列车风速 U 在 20 m/s 左右, 远超过路旁作业人员 14 m/s 允许列车风风速的规定^[34]。

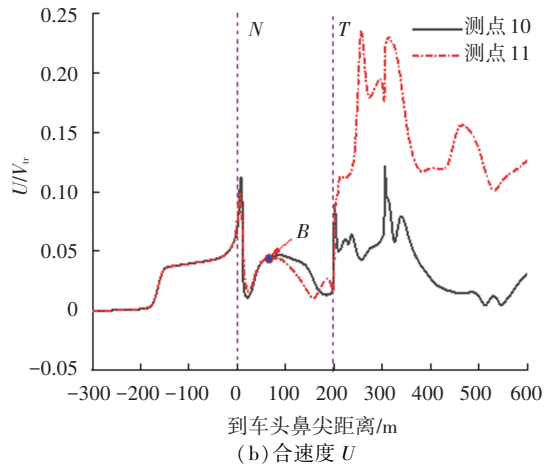
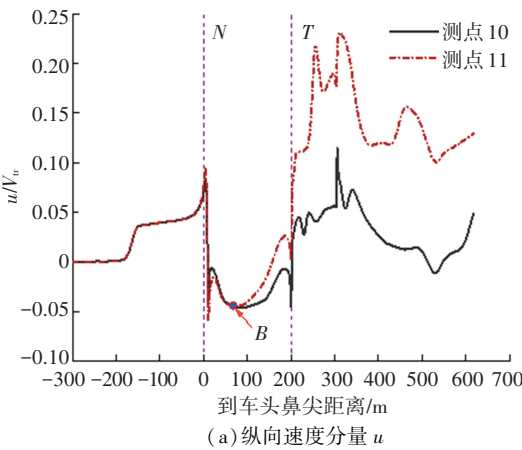


图 13 测点列车风速度对比

Fig.13 Comparison of train wind velocities

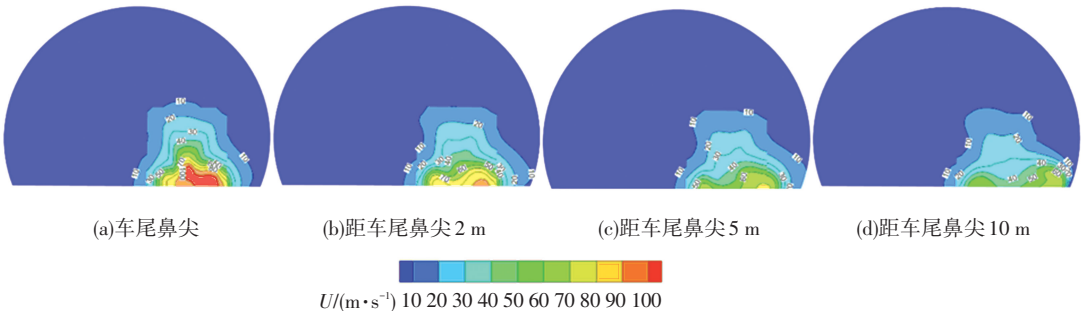


图 14 近尾迹区列车风合速度云图

Fig.14 Train wind resultant velocity distributions in near wake region

5 流场分布

5.1 隧道内尾迹区流场分布

为保证列车尾迹区内流动结构得到充分发展,以车尾驶入隧道 300 m 时进行分析。图 15 所示为到车尾鼻尖不同距离横断面流线分布。由图可知,尾迹区流动结构表现出明显的非定常特性,随时间和空间变化。在车尾鼻尖处,流动结构在列车表面发生脱落,见图 15(a)。随着到车尾鼻尖距离增加,列车右侧首先形成大尺度尾涡结构,与此同时,左侧涡旋尺寸也在不断增大,见图 15(b)~15(f)。由于列车偏心通过隧道导致列车两侧空间流场分布不对

称,列车右侧空间狭窄,限制涡旋结构在水平方向的发展,只能沿隧道壁面向上扩散,而列车左侧空间较大,流动结构可以沿水平、竖向自由扩散。可以看出列车左侧涡核沿水平向外方向发展,且尺寸增大,高度降低,最后消散,见图 15(g)~15(i)。由图可知,到列车表面距离越近,气流受尾涡结构影响越大,从而导致气流速度越大,这就解释了 4.2.1 节中测点 10 纵向速度分量峰值最大的原因。随着到车尾鼻尖距离增大,列车两侧尾涡结构交替出现,列车左侧涡沿水平方向扩散,而列车右侧涡结构沿垂向扩散,见图 15(j)~15(l)。

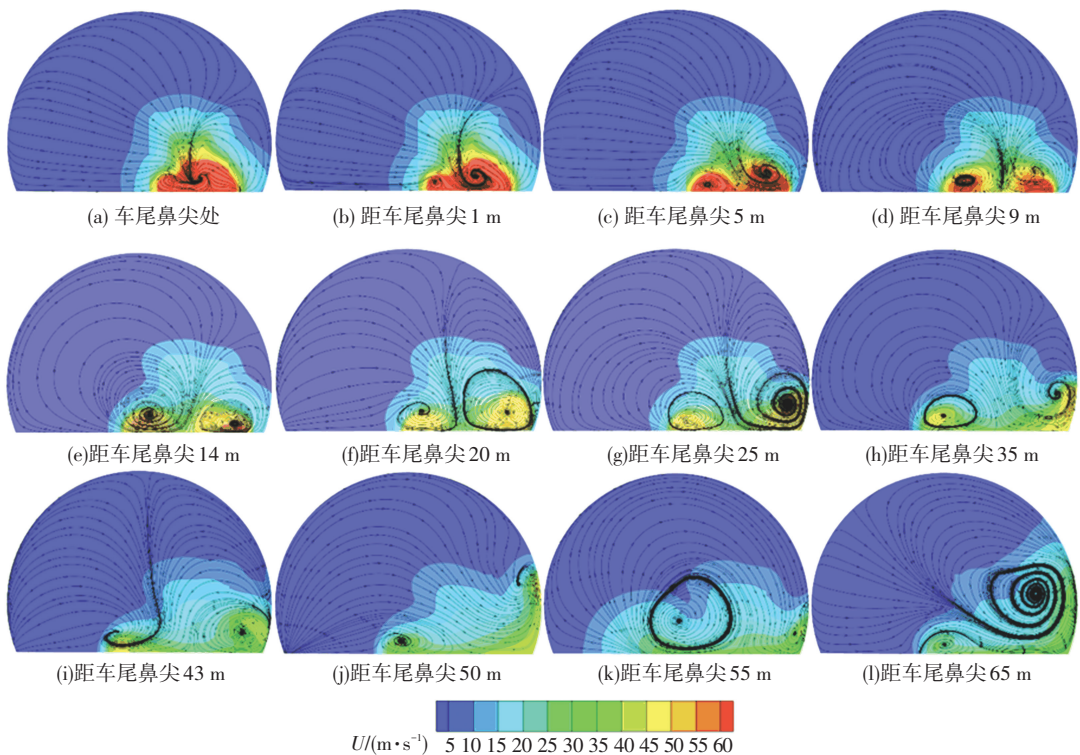


图 15 隧道内尾迹区流场分布

Fig.15 Flow field distributions of the wake in tunnel

5.2 明线尾迹区流场分布

为分析列车在明线与隧道内行驶时尾迹区流场结构的差别,以 $t = 1.75$ s 时车尾鼻尖距离入口 118 m 为研究对象。图 16 为列车明线运行时尾迹区的流场分布图。通过分析,在车尾后方同样存在一对旋转方向相反的尾涡结构,但涡旋结构关于列车中心线对称,且涡旋结构同时产生、发展。随着到车尾鼻尖距离增加,列车两侧尾涡结构尺寸不断增大,且沿水平方向向外侧扩散。与图 15 进行对比,列车偏心通过隧道尾迹区流场分布与明线时流场分布存在显著差别。

5.3 偏心效应对流场分布的影响

图 17 为 $z = 1.0$ m 时列车在隧道、明线运动时尾迹区合速度云图。由图 17(a)可知当列车在露天

行驶时流场分布对称,并且尾迹区长度很大。由图 17(b)可知,当列车在隧道内偏心行驶时,尾迹区流场分布明显不对称,流动结构向近隧道侧偏移,表明列车偏心通过隧道时形成非对称分布的尾涡结构,会产生作用在车身上的气动力和气动力矩,列车产生剧烈地大幅度横向振动,严重影响乘客舒适度,这种现象已被文献[15, 35]所证实。此外,无论列车在明线还是隧道内行驶,列车风速均随着到车尾鼻尖距离增大而显著减小。沿线路中线方向,在距离车尾鼻尖 50 m 处设置速度测点,如图 17 中 A、B 两点。其中 $U_A = 17.6$ m/s, $U_B = 21.1$ m/s,说明隧道内列车风速度衰减较慢,即列车通过后隧道内气体流动持续时间更久。

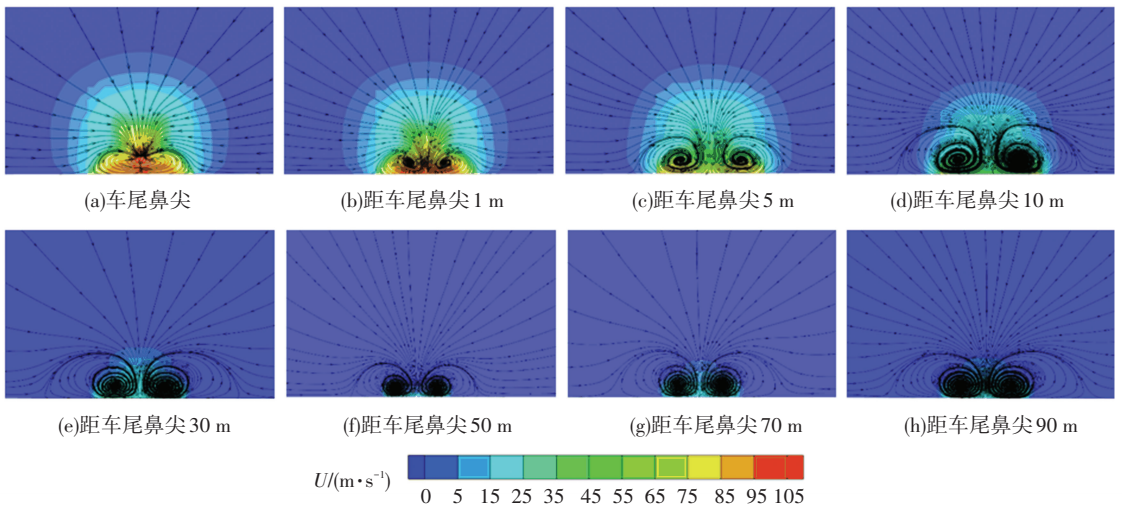


图 16 明线列车尾迹区流场分布

Fig.16 Flow field distributions of the wake in open air

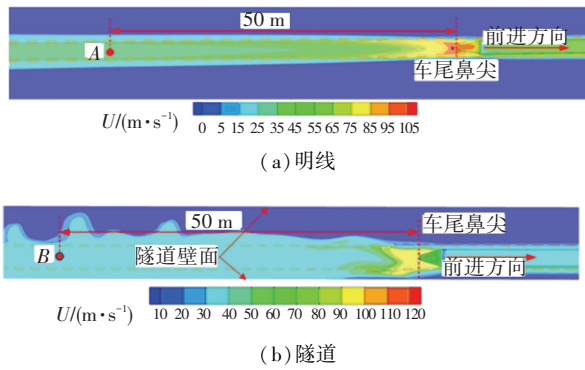


图 17 尾迹区流场演化

Fig.17 Evolutions of flow field in wake region

6 结 论

1) 列车由露天驶入隧道时存在非常显著的洞口效应;气动正负压最大值分别出现在距离入口、出口 200 m 处,出现位置与列车编组长度有关;列车两侧对称测点的最大正压力及压力变化幅值分别相差 13.1%和 7.3%,表明列车偏心通过对列车两侧气动压力影响不显著。

2) 各列车风分量在列车通过隧道过程中的变化规律不同;列车通过阶段列车风纵向分量 u 变化较大,而列车风横向 v 、垂向分量 w 仅在车头、车尾经过时发生突变,表明列车表面边界层对列车风横向 v 和垂向分量 w 几乎无影响,而对列车风纵向分量 u 影响非常显著;在列车中线对称的测点中,近隧道侧列车风纵向分量 u 及合速度 U 最大值分别是远隧道侧的 2.1 倍和 1.9 倍,表明列车偏心通过对隧道内列车风影响非常显著。

3) 高速列车在隧道内与明线行驶时,尾迹区流动结构演化规律不同;隧道内列车尾迹区存在一对交替出现的尾涡结构,引起列车出现大幅度横向振

动,而列车在明线行驶时尾迹区尾涡结构对称分布,同时产生、发展及脱落,且尾涡结构尺度随着到车尾距离增加而增大。

4) 列车尾部流动结构向近隧道侧偏移,造成近隧道侧气流速度比远隧道侧大。隧道内列车风速度衰减速度较慢,持续时间比明线时更久。

参 考 文 献

[1] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 469

[2] POPE C W. Effective management of risk from slipstream effects at trackside and platforms; T425 Report [R]. London: Rail Safety and Standards Board, 2007

[3] STERLING M, BAKER C J, JORDAN S C, et al. A study of the slipstreams of high-speed passenger trains and freight trains [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222(2): 177. DOI: 10.1243/09544097JRR133

[4] BAKER C. The flow around high speed trains [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6/7): 277. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.11.002

[5] FLYNN D, HEMIDA H, BAKER C. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 156: 14. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.07.001

[6] SAMANE F. Aerodynamic of the trains in tunnels [D]. Birmingham: University of Birmingham, 2014

[7] 骆建军,高波,王英学,等. 高速列车通过隧道时压力变化的数值模拟 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24(4): 82
LUO Jianjun, GAO Bo, WANG Yingxue, et al. Numerical study on the pressure change when high-speed train passing through a tunnel [J]. China Railway Science, 2003, 24(4): 82

[8] 骆建军,高波,王梦恕. 高速列车突入隧道时的三维非定常流的数值模拟 [J]. 中国铁道科学, 2005, 26(1): 16
LUO Jianjun, GAO Bo, WANG Mengshu. Numerical simulation on an unsteady three-dimension flow produced by high-speed train pass-

- ing into a tunnel[J]. *China Railway Science*, 2005, 26(1): 16
- [9] 陈厚焜, 张岩, 何德华, 等. 时速 350 km 高速铁路隧道气动效应基本规律试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(1): 55
CHEN Houchang, ZHANG Yan, HE Dehua, et al. Experimental study on the basic laws of the aerodynamic effect of 350 km/h high-speed railway tunnel[J]. *China Railway Science*, 2014, 35(1): 55
- [10] LIU T, CHEN Z, CHEN X, et al. Transient loads and their influence on the dynamic responses of trains in a tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 121. DOI: 10.1016/j.tust.2017.04.009
- [11] LIU F, YAO S, ZHANG J, et al. Effect of increased linings on micro-pressure waves in a high-speed railway tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 52: 62. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.020
- [12] WANG T, WU F, YANG M, et al. Reduction of pressure transients of high-speed train passing through a tunnel by cross-section increase [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 183: 235. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.001
- [13] LU Y, WANG T, YANG M, et al. The influence of reduced cross-section on pressure transients from high-speed trains intersecting in a tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 201: 104161. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104161
- [14] SUZUKI M, IDO A, SAKUMA Y, et al. Full-scale measurement and numerical simulation of flow around high-speed train in tunnel [J]. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2008, 1(3): 281. DOI: 10.1299/jmtl.1.281
- [15] SAKUMA Y, SUZUKI M, IDO A, et al. Measurement of air velocity and pressure distributions around high-speed trains on board and on the ground[J]. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2010, 3(1): 110. DOI: 10.1299/jmtl.3.110
- [16] SUZUKI M, SAKUMA Y. Pressure fluctuation characteristics of narrow gauge train running through tunnel[J]. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2010, 3(3): 469. DOI: 10.1299/jmtl.3.469
- [17] GILBERT T, BAKER C J, QUINN A. Gusts caused by high-speed trains in confined spaces and tunnels[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 121: 39. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.07.015
- [18] 施成华, 杨伟超, 彭立敏, 等. 高速铁路隧道空气动力效应对水沟盖板稳定性的影响研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(1): 103
SHI Chenghua, YANG Weichao, PENG Limin, et al. Study on aerodynamic influence on stability of ditch covers in high-speed railway tunnels[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(1): 103
- [19] 费瑞振, 彭立敏, 杨伟超, 等. 高速铁路隧道空气动力效应对人员安全的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(7): 79
FEI Zhenrui, PENG Limin, YANG Weichao, et al. Study on aerodynamic force effect on personnel safety in high-speed railway tunnel[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(7): 79
- [20] GUO D, SHANG K, ZHANG Y, et al. Influences of affiliated components and train length on the train wind[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, 32(2): 191. DOI: 10.1007/s10409-015-0553-z
- [21] WANG S, BURTON D, HERBST A H, et al. The impact of rails on high-speed train slipstream and wake[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 198: 104114. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104114
- [22] FU M, LI P, LIANG X. Numerical analysis of the slipstream development around a high-speed train in a double-track tunnel[J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e175044. DOI: 10.1371/journal.pone.0175044
- [23] NIU J, SUI Y, YU Q, et al. Aerodynamics of railway train/tunnel system: a review of recent research[J]. *Energy and Built Environment*, 2020, 1(4): 351. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.03.003
- [24] LI W, LIU T, CHEN Z, et al. Comparative study on the unsteady slipstream induced by a single train and two trains passing each other in a tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 198: 104095. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104095
- [25] JIANG Z, LIU T, CHEN X, et al. Numerical prediction of the slipstream caused by the trains with different marshalling forms entering a tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 189: 276. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.002
- [26] LI X, CHEN G, ZHOU D, et al. Impact of different nose lengths on flow-field structure around a high-speed train[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(21): 4573. DOI: 10.3390/app9214573
- [27] 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 & Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(5): 365. DOI: 10.1016/S0167-6105(00)00071-4
- [28] ZHANG L, LIU H, STOLL N, et al. Influence of tunnel aerodynamic effects by slope of equal-transect ring oblique tunnel portal [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 169: 106. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.07.011
- [29] YANG W, DENG E, LEI M, et al. Flow structure and aerodynamic behavior evolution during train entering tunnel with entrance in crosswind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 229. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.018
- [30] 李炎. 铁路隧道列车活塞风特性分析及理论研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2010
LI Yan. Characteristic and theoretical study of train piston wind in railway tunnels[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2010
- [31] 郝艳红, 毛军, 李明高, 等. 高速列车侧风效应的数值模拟[J]. *北京交通大学学报*, 2010, 34(1): 14
XI Yanhong, MAO Jun, LI Mingao, et al. Numerical study on the crosswind effects of high-speed train[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 34(1): 14
- [32] 龚彦峰, 肖明清. 我国高速铁路隧道技术要点与有关建议[J]. *铁道工程学报*, 2014, 31(12): 67
GONG Yanfeng, XIAO Mingqing. Technical points and proposals for tunnels of high-speed railway in China[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2014, 31(12): 67
- [33] GUO Z, LIU T, CHEN Z, et al. Comparative numerical analysis of the slipstream caused by single and double unit trains[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 172: 395. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.11.022
- [34] 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(1): 1
TIAN Hongqi. Study evolution of train aerodynamics in China[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006(1): 1
- [35] SUZUKI M, NAKADA K, IDO A. Countermeasures for reducing unsteady aerodynamic force acting on high-speed train in tunnel by use of modifications of train shapes[J]. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2009, 2(1): 1. DOI: 10.1299/jmtl.2.1