

# 高速磁浮列车过隧道诱导的隧道出口列车风研究

成炯豪<sup>1,2</sup>, 郭易<sup>1,\*</sup>, 郭迪龙<sup>1</sup>, 纪占玲<sup>1</sup>, 毛军<sup>3</sup>, 刘雯<sup>4</sup>

1. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049

3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044 4. 中车工业研究院有限公司, 北京 100070

**摘要:** 高速磁浮列车进入隧道时, 产生的压缩波会在隧道出口诱导气流形成伴随速度。以高速磁浮列车为研究对象, 采用三维、可压缩、非定常的计算方法对不同列车运行速度和隧道阻塞比下列车通过隧道的过程进行了计算, 分析了隧道出口附近压缩波诱导的列车风特性, 给出了列车运行速度和隧道阻塞比对列车风速度的影响规律。结果表明: 隧道出口内, 压缩波诱导形成的列车风速度变化趋势与峰值在纵向(列车运行方向)上基本保持不变; 隧道出口外, 列车风峰值速度在纵向 25 m 范围内逐渐降低, 在横向(垂直于列车运行方向)5 m 范围内基本保持不变; 随着列车运行速度和隧道阻塞比增大, 隧道出口内外的列车风峰值速度均明显增大, 列车运行速度 600 km/h、隧道阻塞比 17.04% 时, 隧道出口外轨道中心线上纵向 5 m 处列车风峰值速度高达 56 m/s。本文结论可为铁路隧道列车风防护及高速磁浮列车安全运行提供参考。

**关键词:** 磁浮列车; 隧道效应; 压缩波; 列车风

中图分类号: O355; U237 文献标识码: A

## Slipstream at the tunnel exit induced by a high-speed maglev train passing through a tunnel

CHENG Jionghao<sup>1,2</sup>, GUO Yi<sup>1,\*</sup>, GUO Dilong<sup>1</sup>, JI Zhanling<sup>1</sup>, MAO Jun<sup>3</sup>, LIU Wen<sup>4</sup>

1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems,

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

4. CRRC Industrial Academy Co. Ltd., Beijing 100070, China

**Abstract:** When the high-speed maglev train enters a tunnel, a compression wave generated by it will induce the air flow at the exit of the tunnel to form an adjoint velocity. The three-dimensional, compressible, unsteady calculation method is used to simulate the process of the high-speed maglev train passing through a tunnel with different blocking ratios under different speeds. The features of the slipstream around the tunnel exit induced by the compression wave are analyzed, and the influence of the train speed and blocking ratio on the slipstream is ascertained. The results show that at the tunnel exit, the trend and the peak speeds of the slipstream induced by the compression wave have no apparent change in the direction of the train's movement; the peak wind speed of the measuring point outside the tunnel exit gradually decreases in the longitudinal range of 25 m, and basically remains unchanged in the transverse range of 5 m. With the vehicle speed and blocking ratio increasing, the peak wind speeds inside and outside the outlet are raised obviously. When the train speed is 600 km/h and the blocking ratio is 17.04%, the maximum wind speed at 5 m outside the tunnel is up to 56 m/s. This

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2022-12-02; 录用日期: 2022-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(52172336)

\* 通信作者 E-mail: guoyi0536@163.com

引用格式: 成炯豪, 郭易, 郭迪龙, 等. 高速磁浮列车过隧道诱导的隧道出口列车风研究 [J]. 实验流体力学, 2023, 37(1): 53-63.

CHENG J H, GUO Y, GUO D L, et al. Slipstream at the tunnel exit induced by a high-speed maglev train passing through a tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(1): 53-63.

conclusion is helpful to strengthen people's understanding about the harm of the slipstream induced by a train passing through a tunnel, and to provide references for protection against the slipstream in the railway tunnel and the safe operation of maglev train in the future.

**Keywords:** maglev train; tunnel effect; compression wave; slipstream

## 0 引言

截至 2021 年底,我国铁路运营里程已经突破  $1.5 \times 10^4$  km(其中高速铁路超过  $4 \times 10^4$  km),且穿越山区的线路占比较高。列车在山区运行时,受限于牵引力及最大坡度要求,常需以穿隧方式克服高程障碍。列车高速进入隧道时,会产生以当地声速向隧道出口传播的压缩波<sup>[1]</sup>。列车速度低于当地声速时,压缩波先于列车到达隧道出口形成列车风。强烈的列车风会对隧道内外的铁路附属设施产生不利影响,并对轨旁工作人员安全构成威胁<sup>[2-5]</sup>。

磁浮轨道交通由于具有速域宽、爬坡强、噪声低、环保节能等方面的优势,在轨道交通中脱颖而出<sup>[6]</sup>,受到世界各国的广泛关注。我国在实现中低速磁浮列车量产的基础上,启动了 200~600 km/h 高速磁浮列车研制项目<sup>[7]</sup>。高速磁浮列车速度更快,压缩波强度更大,在隧道出口诱导的气流突变更加显著。为在我国铁路线路多隧条件下实现高速磁浮列车的安全运营,需要对高速磁浮列车通过隧道时诱导的列车风特性进行深入研究。

日本新干线投入运营后,国内外研究者对高速列车隧道气动效应开展了一系列研究<sup>[8]</sup>。在理论研究方面,李炎等<sup>[9]</sup>探讨了列车长度、隧道长度、阻塞比等因素对活塞风的影响,提出了活塞风压力和活塞风速度的计算方法;Howe 等<sup>[10]</sup>基于相似理论试验研究了隧道内压缩波对隧道出口微气压波的影响规律,提出了列车进入隧道产生的压缩波的解析模型;顾红生等<sup>[11]</sup>从空气动力学基本方程出发,推导了按非定常流计算活塞风速度的理论公式,分析得出了影响隧道内活塞风速度的主要因素为列车速度和隧道截面积。这些理论结果大多是在早期有限的计算机技术条件下根据一维简化模型推导得出,可以为列车风研究提供理论指导,但列车在隧道内的实际气动效应是复杂的三维瞬态流动,对于列车通过隧道全过程的多维模拟,理论研究存在较大困难<sup>[12]</sup>。

在实车实验方面,Sakuma 等<sup>[13]</sup>基于实车实验研究了隧道内列车风;刘峰等<sup>[14]</sup>测试了高速动车组穿越双线隧道引发的隧道壁面气动压力,分析了列车通过和驶出阶段不同位置测点的压力峰值;方雨菲

等<sup>[15]</sup>基于现场测试分析了不同因素对隧道附属设施表面气动荷载、振动加速度和列车风速度的影响,给出了隧道内气动荷载分布规律;刘堂红等<sup>[16]</sup>对隧道中列车诱导的列车风进行了现场测量,发现列车风速度与列车运行速度呈线性关系。

实车实验大多针对车速较低的传统轮轨列车,实施难度大、成本高,因此,数值模拟在高速列车气动效应研究中得到了广泛应用。梅元贵<sup>[17]</sup>采用数值方法分析了高速铁路隧道压力波的传播特性;牛纪强<sup>[18]</sup>对不同编组长度的列车以不同速度通过隧道和隧道内交会进行了分析研究,发现列车尾流引起的列车风速度最高,编组长度对列车风影响显著;王磊等<sup>[19-20]</sup>采用数值方法模拟了 CRH380A 高速列车通过双线隧道的全过程,研究了双线隧道内的列车风分布及流场特性;朴荣焕等<sup>[21]</sup>对地铁车辆通过隧道的动态过程进行了数值模拟,研究结果表明隧道内活塞风主要为纵向流,距离车身越远,活塞风峰值速度越低;管鸿浩等<sup>[22]</sup>对单列列车通过双线隧道引起的列车风分布规律进行了研究,结果表明:由于列车与隧道壁之间空隙不均匀,导致列车两侧列车风峰值速度出现于不同时刻。在上述研究中,国内外研究者对临近列车车身的流动多有关注,而对压缩波诱导的隧道出口列车风关注较少。

本文通过与动模型实验的对比,验证了隧道出口列车风数值计算结果的准确性。以高速磁浮列车作为研究对象,采用数值方法研究了列车运行速度、隧道阻塞比对隧道出口列车风的影响规律。

## 1 计算方法与模型

### 1.1 计算方法

使用 Simcenter STAR-CCM+对磁浮列车通过隧道的过程进行计算。对三维、可压缩、非定常 N-S 方程进行求解:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_i \rho \left( e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) + u_i p \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} u_i \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

$$e = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{1}{2}(u_i^2 + u_j^2 + u_k^2) \quad (4)$$

为使方程封闭，还需补充完全气体状态方程：

$$p = \rho RT \quad (5)$$

式中： $\rho$ 、 $p$ 、 $t$  分别为密度、压力和时间； $x$ 、 $u$  分别为坐标和速度，下标  $i$ 、 $j$ 、 $k$  表示 3 个方向的分量； $e$  为单位质量气体的内能， $\delta_{ij}$  为克罗内克符号， $\mu$  为黏性系数， $k$  为热传导系数， $T$  为温度， $\gamma$  为比热比， $R$  为气体常数。采用 SST  $k-\omega$  湍流模型，方程中对流项的离散采用 Roe 格式，黏性项的离散采用二阶中心差分方法，时间上采用二阶隐式方法进行积分，时间离散采用带伪时间步的 LU-SGS 方法。

以重叠网格作非定常计算，若 1 个时间步内列车运动距离与重叠区域背景网格尺寸相差过大，计算不收敛。1:8 缩比模型计算时间步长取  $6 \times 10^{-4}$  s，实车模型计算时间步长取  $2 \times 10^{-3}$  s，1 个时间步内列车运行距离不超过 2 个重叠区域背景网格，内迭代步数均为 5，满足内迭代残差下降一个量级。

目前，近壁湍流处理有两种方法：直接求解到壁面和采用壁面函数。本文计算模型为 1:1 真实外形磁浮列车，其外部流动为复杂三维流动，总网格量相当大。为控制网格数量，本文参考相关文献的处理方法<sup>[23-24]</sup>，采用标准壁面函数对近壁湍流进行处理。

### 1.2 计算工况

列车运行速度是影响压缩波强度的重要因素。本文以高速磁浮列车为研究对象，列车运行速度为 400、500 和 600 km/h。当隧道截面积、列车运行速度和列车长度确定后，最不利隧道长度随列车运行速度增大而减小，当列车运行速度为 400 km/h 时，最不利隧道长度约为 404 m<sup>[25]</sup>。此外，本文研究重点为列车进入隧道后的压缩波在隧道出口引起的列车风，压缩波以当地声速传播，若隧道长度过短，将难以区分列车附近活塞风引起的风速和压缩波诱导形成的风速。综合以上两点考虑，将隧道长度设定为 500 m，以满足避开最不利隧道长度以及压缩波迟于列车到达隧道出口 1 s 以上的条件。

隧道阻塞比也是影响压缩波强度的主要因素之一。由于目前尚无高速磁浮列车工程化线路，本文

采用文献 [26] 中的单线隧道模型(隧道出口无缓冲结构，隧道截面积为 70 m<sup>2</sup>)，经等比例放大得到隧道截面积为 90 和 110 m<sup>2</sup> 的单线隧道，对隧道阻塞比与压缩波诱导隧道出口列车风的关系进行了研究。

### 1.3 模型与计算域

基于磁浮列车实车模型(图 1)进行数值计算。全车长 130.7 m(含车间间隙)，高约 4.2 m，宽约 3.7 m；共 5 节车厢，头(尾)车长约 28.08 m，中间车单节长约 24.52 m。计算域包括隧道及其两端外场，两端外场尺寸相同。隧道和计算域参数如图 2 所示。

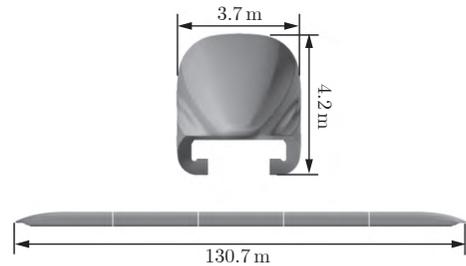
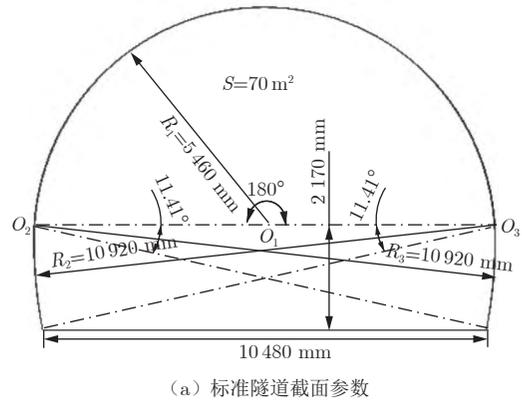
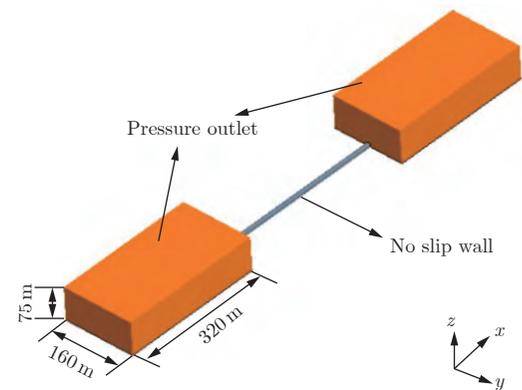


图 1 磁浮列车模型  
Fig. 1 Maglev train model



(a) 标准隧道截面参数



(b) 计算域参数

图 2 隧道和计算域参数示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the tunnel and the computational domain

### 1.4 网格与边界条件

使用重叠网格方法进行计算。该方法适用于模

拟对象存在边界运动的情况,可以真实模拟列车与隧道之间的相对运动。网格模型包括背景网格和部件网格:背景网格是整个计算域网格,部件网格为车身附近的一部分流体空间网格。如图3所示:红色虚线框为背景网格的加密区域,网格尺寸为0.250 m;蓝色虚线框为车身网格与背景网格的重叠区域,网格尺寸为0.125 m。部件网格与背景网格之间重叠4~5层网格,确保流场数据交换足够准确,网格总数约为1500万。

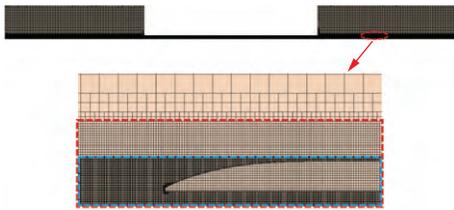


图3 计算域网格  
Fig. 3 Computational grid

边界条件包括压力出口和无滑移壁面,隧道壁面及计算域地面设置为无滑移壁面条件,其他计算域边界设置为压力出口条件。包含列车的overset区域设置为运动条件,通过给定该区域的速度实现列车的运动。

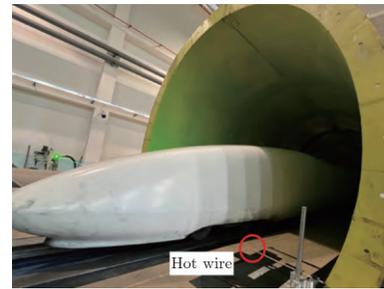
## 2 算例验证

### 2.1 算法验证

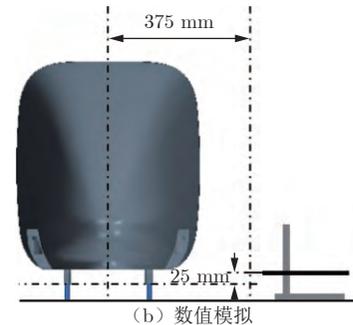
动模型实验是目前列车风测试最为有效的手段<sup>[1, 26]</sup>,可通过实验结果验证数值方法的准确性。本文将1:8缩比列车模型数值模拟结果与动模型实验结果进行了对比。缩比列车模型数值模拟所用体网格尺寸为实车模型体网格尺寸的1/8,采用第1节介绍的计算方法。标准列车模型(全长10.084 m)设计引入了VMF参数化方法,通过控制头型长度、排障器外形、驾驶室前挡玻璃外形、头型纵剖面型线等生成头车模型,能够反映高速列车外形且可重复实现。隧道由横截面积 $S=70\text{ m}^2$ 的单线隧道等比例缩小得到,长度为60 m。

动模型实验在中国科学院力学研究所的高速列车双向动模型平台上进行。以固定于隧道出口平面处的一维热线风速仪测量风速,如图4所示。热线风速仪与轨道中心线的距离以及与轨道顶面的高度差遵照TSI和EN-14067<sup>[25]</sup>的标准:距离轨道中心线375 mm,高于轨道顶面25 mm(对应实车距轨道中心线3.0 m,高于轨道顶面0.2 m)。隧道置于动模型平台测试段内,列车在平台测试段范围内以近似匀

速的状态滑行。数值模拟中,在与动模型实验相同的位置布置测点测量风速。



(a) 动模型实验



(b) 数值模拟

图4 热线风速仪安装位置

Fig. 4 Installation position of the hot wire anemometer

要获得列车某一运行速度下隧道出口的列车风特征,需对该速度下多次列车风测试结果取系综平均值,获得系综平均曲线,并基于系综平均曲线研究该速度下的隧道出口列车风特征。图5给出了列车速度200 km/h时的动模型实验数据(黑色虚线表示头车到达隧道入口,红色虚线表示头车到达隧道出口)。可以看到,在头车到达隧道出口前,单次试验和系综平均的列车风速度曲线基本重合,说明压缩波诱导的气流流场稳定,实验可重复性较高。需要说明的是:在滑行过程中,列车受到轨道摩擦阻力和气动阻力,作加速度很小的减速运动,实验用时约

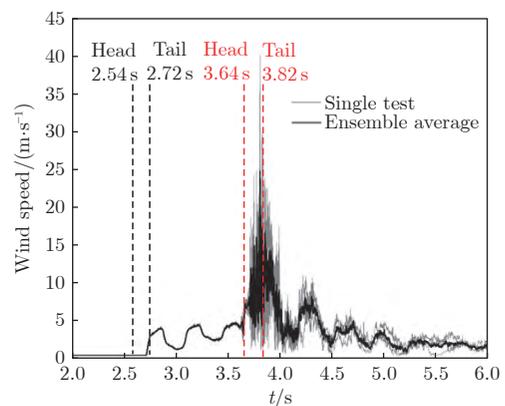
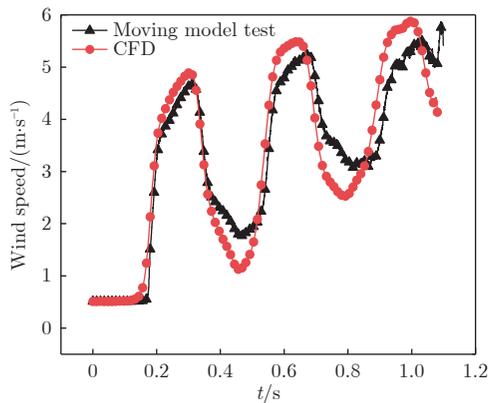


图5 隧道出口列车风速度

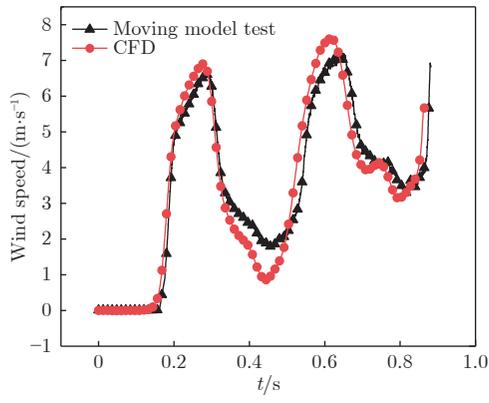
Fig. 5 Wind speed at the tunnel exit

1.10 s, 而理论上匀速通过隧道所需时间约为 1.08 s。

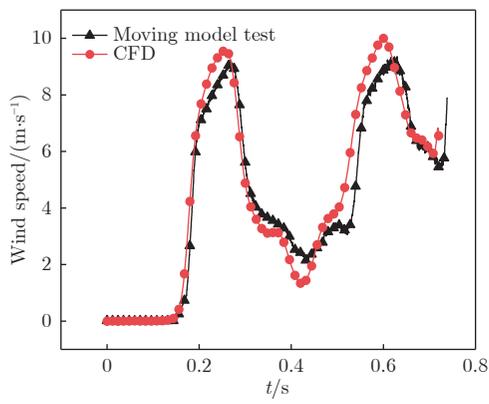
对比了动模型实验和数值模拟的结果(列车运行速度为 200、250 和 300 km/h)。头车到达隧道出口时的测点列车风速度由车身绕流形成, 风速变化剧烈, 且本文重点关注头车未到达隧道出口时由压缩波诱导的隧道出口风速, 故仅选取头车到达隧道入口至头车到达隧道出口这一时间段内的列车风速度曲线进行对比, 如图 6 所示。图 6 中的实验结果和数值模拟结果吻合较好。需要说明的是: 动模型实验



(a) 200 km/h



(b) 250 km/h



(c) 300 km/h

图 6 不同列车运行速度下的动模型实验和数值模拟测点风速对比

Fig. 6 Comparison of wind speed at the measuring point between moving model test and numerical simulation

平台轨道下方及隧道接缝处存在缝隙, 隧道密封性比理想条件差; 数值模拟则是完全密封的理想条件, 故两者隧道内压缩波和膨胀波的强度略有差异, 在风速曲线的波峰和波谷处, 实验结果与数值模拟结果存在一定误差。

## 2.2 网格无关性验证

为验证计算结果与网格尺寸的无关性, 对磁浮列车实车模型进行了网格无关性计算。设计了 3 种加密区体网格尺寸进行计算和对比: 在粗网格方案中, 加密区体网格尺寸为 0.500 m, 总量为 700 万; 在中网格方案中, 加密区体网格尺寸为 0.250 m, 总量为 1500 万; 在细网格方案中, 加密区体网格尺寸为 0.125 m, 总量为 2300 万。

在隧道长度 500 m、列车运行速度 400 km/h 工况下, 对比 3 种网格方案下计算得到的隧道出口风速, 如图 7 所示: 中网格和细网格方案风速曲线的峰值和变化趋势基本一致, 而粗网格方案的结果与其他两种方案存在一定偏差。为保证计算精度、节约计算资源, 选择加密区体网格尺寸为 0.250 m 的中网格方案进行后续计算。

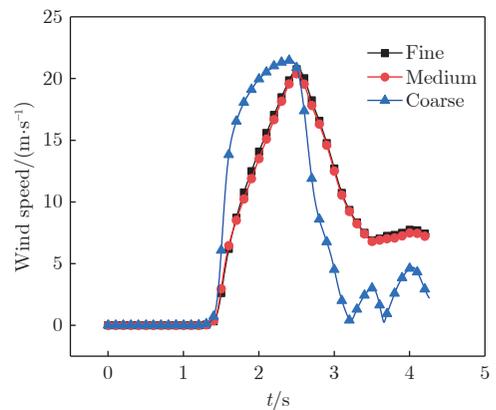


图 7 不同网格尺寸下的隧道出口风速

Fig. 7 Comparison of wind speed under different grid resolution conditions

## 3 结果分析

列车运行速度、隧道阻塞比对压缩波强度的影响较大。本文设计了 400、500 和 600 km/h 等 3 个速度以及 70、90 和 110 m<sup>2</sup> 等 3 种隧道截面积。首先对隧道出口附近压缩波诱导列车风的空间特性进行分析, 然后探讨列车运行速度和隧道阻塞比对压缩波诱导隧道出口列车风的影响。本节所涉及的速度均为空间 3 个方向的合速度。

### 3.1 压缩波诱导隧道出口列车风特性

以列车运行速度 400 km/h、隧道长度 500 m、

隧道截面积  $70 \text{ m}^2$  为例,对隧道出口列车风特性进行分析。图8上图为隧道内的压缩波和膨胀波传播图,图8下图为隧道出口平面距离轨道中心线  $3 \text{ m}$ 、高度  $1.5 \text{ m}$  处( $z=1.5 \text{ m}$ )测点的风速曲线。

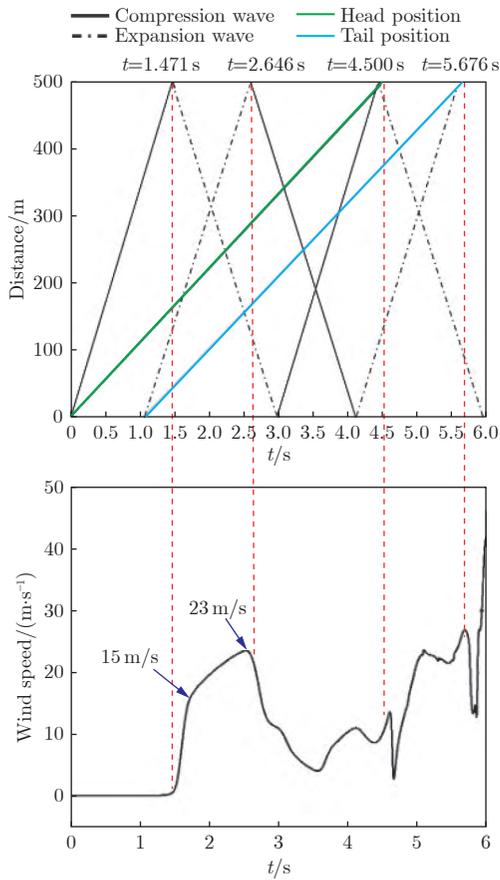


图8 隧道内马赫波传播图及隧道出口测点风速

Fig. 8 Mach wave propagation in the tunnel and wind speed of the measuring point at the tunnel exit

头车鼻锥到达隧道入口时( $t=0 \text{ s}$ ),初始压缩波形成,并以当地声速向隧道出口传播; $t=1.176 \text{ s}$ 时,尾车鼻锥到达隧道入口,产生膨胀波,并以当地声速向隧道出口传播;初始压缩波和膨胀波分别于 $t=1.471 \text{ s}$ 和 $t=2.646 \text{ s}$ 到达隧道出口测点位置。从图8可以看出:当初始压缩波到达测点位置,测点风速突然快速增大至  $15 \text{ m/s}$ ,这是由头车进入隧道后的初始压缩波所导致;随着车身驶入隧道的长度增加,测点风速在列车车身波作用下缓慢增大至峰值  $23 \text{ m/s}$ (相当于9级大风);当初始膨胀波到达测点位置,测点风速开始大幅下降; $t=4.500 \text{ s}$ 时,头车鼻锥到达隧道出口,测点风速(主要由车身绕流导致)突然波动后逐渐增大; $t=5.676 \text{ s}$ 时,尾车鼻锥到达出口,测点风速在列车尾流影响下先减小后增大。

需要指出的是:初始压缩波诱导形成隧道出口列车风时,列车头车距离出口尚远,这意味着在高速

磁浮列车通过隧道过程中,不仅需要关注列车临近时的气流流动,还需要高度关注列车距离很远时由压缩波诱导形成的隧道出口列车风;尤其是当隧道较长时,压缩波诱导形成隧道出口列车风达到峰值与列车到达隧道出口的时间差更大,更需提前预警。下文对头车到达隧道入口至头车到达出口这一时间段内的隧道出口列车风特性进行研究。

在隧道出口附近布置测点,监测列车通过隧道过程中列车风速度的空间分布。首先,对隧道出口不同方位的风速分布进行研究,测点1~5位于隧道出口平面,坐标如图9(a)所示;其次,对列车风速度的纵向( $x$ 方向,列车运行方向为正)和横向( $y$ 方向,垂直于列车运行方向)空间分布进行研究,测点位置如图9(b)所示(纵向范围从隧道出口内  $25 \text{ m}$ 至隧道出口外  $25 \text{ m}$ ,相邻测点间隔  $5 \text{ m}$ ;横向范围从轨道中心线至距轨道中心线  $5 \text{ m}$ 处)。目前尚无相关标准依据设定测点高度,各测点高度暂设定为  $1.5 \text{ m}$ ,对应列车底板高度。

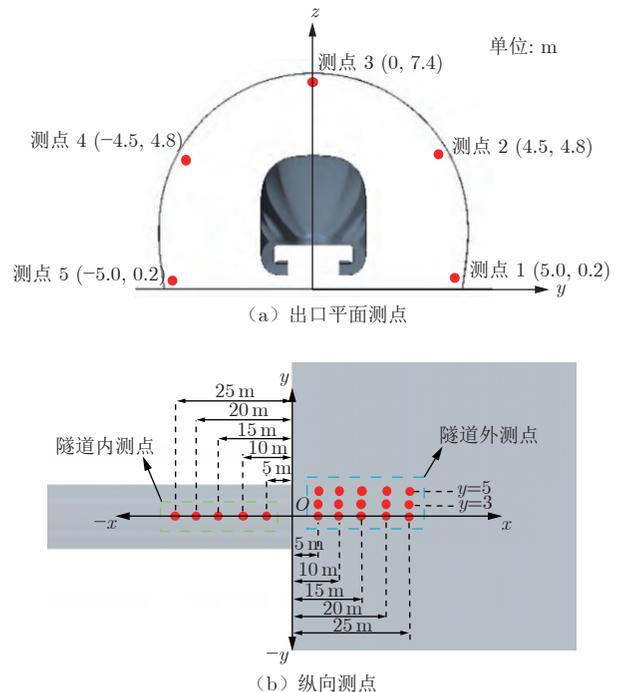


图9 测点分布

Fig. 9 Distribution of the measurement points

头车到达测点1~5所在的出口平面( $t=4.5 \text{ s}$ )之前,各测点由压缩波诱导的风速变化趋势与幅值基本相同,如图10所示。这是由于压缩波在隧道内以近似一维波阵面的方式传播,隧道内同一垂直截面上不同方位的压缩波强度几乎相同,隧道出口不同方位由压缩波诱导的列车风速度无明显差异。

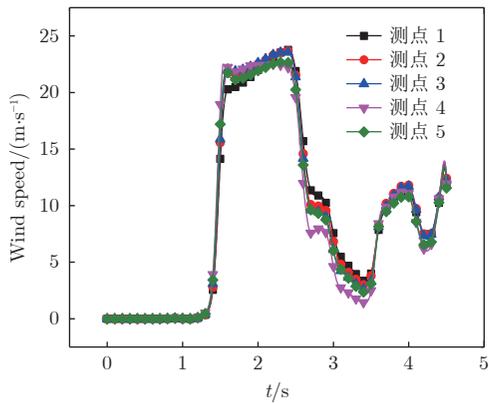
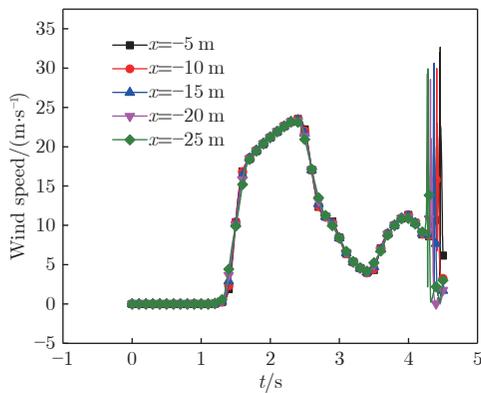
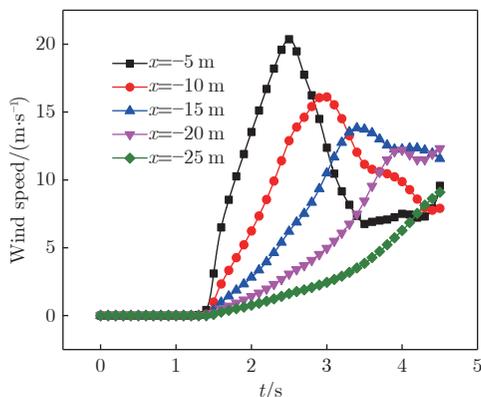


图 10 测点 1~5 风速  
Fig. 10 Wind speed of the Measuring point 1~5

图 11 为轨道中心线( $y=0$ )上测点风速随时间的变化曲线。可以看到：头车到达隧道出口之前，隧道内各测点风速无明显差异；在隧道出口外，压缩波向四周扩散，强度降低，随着隧道外测点与出口距离的增大，由压缩波诱导形成的列车风速度增幅及峰值均逐渐降低，隧道出口外 5 m 处的列车风峰值速度约为 20 m/s，25 m 处则已降至 9 m/s。对比隧道内外测点风速曲线的形状，可以看到，隧道内测点风速呈“两段式”增长：车头进入隧道产生的初始压缩波



(a) 隧道内测点风速

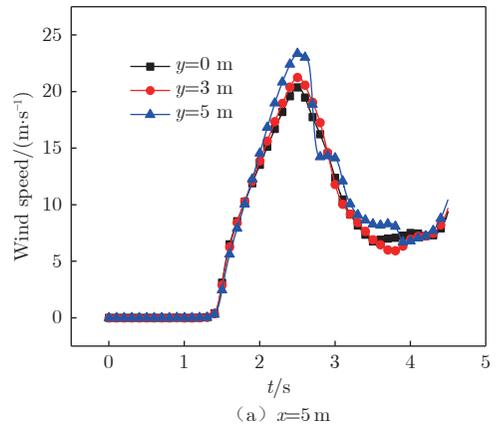


(b) 隧道外测点风速

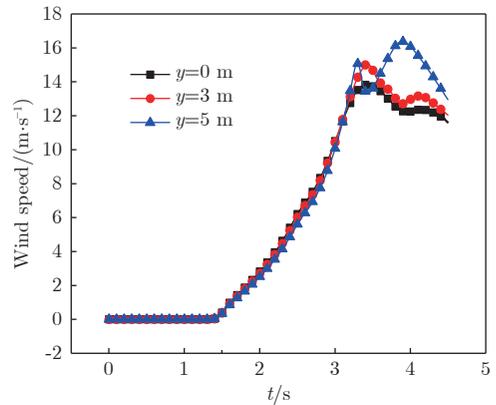
图 11 轨道中心线上测点风速  
Fig. 11 Wind speed at the measuring points of track center line

会导致隧道出口风速骤增；随着车身继续驶入隧道，风速缓慢增加至峰值。而隧道外测点风速在初始压缩波到达后，风速的增长趋势未有明显分段，以几乎不变的增幅增大至峰值。

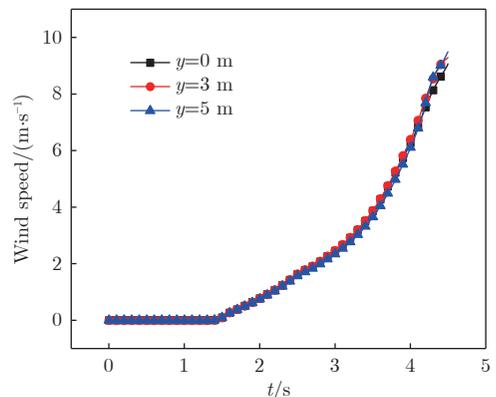
对隧道出口外横向范围内的测点风速进行对比。如图 12 所示，从出口外  $x=5、15$  和  $25$  m 的测点风速可以看到，在  $y < 5$  m 范围内，风速变化趋势与峰值相差较小。这一结果表明，列车高速通过隧道时，在距离轨道中心线 5 m 的横向范围内，压缩波诱导的隧道出口列车风速度基本保持不变。



(a)  $x=5$  m



(b)  $x=15$  m



(c)  $x=25$  m

图 12 不同  $y$  坐标下的列车风速度对比  
Fig. 12 Comparison of wind speed at different  $y$

图 13 为不同时刻隧道出口附近的速度云图 ( $z=1.5\text{ m}$ )。  $t=1.5\text{ s}$  时, 压缩波到达隧道出口, 隧道内风速增至  $7\text{ m/s}$ , 此时出口外受压缩波影响的范围较小。随着压缩波不断诱导气流向出口外扩散,  $t=2.0\text{ s}$  时, 隧道内风速增大至约  $20\text{ m/s}$ , 隧道外受压缩波影响的范围在横向上扩大至轨道中心线两侧  $10\text{ m}$  处, 纵向上扩大至出口外  $6\text{ m}$ 。  $t=2.5\text{ s}$  时, 隧

道内测点风速达到峰值  $23\text{ m/s}$ , 出口外受压缩波影响的范围在横向上无明显变化, 在纵向上则扩大至  $13\text{ m}$ 。从压缩波到达出口至出口风速达到峰值这一时间段内, 压缩波在隧道外仅对出口局部区域气流产生影响。这是由于压缩波在隧道出口外以微气压波形式向四周扩散, 强度迅速降低, 由于不再受限于隧道壁, 一段距离后气流速度迅速降低。

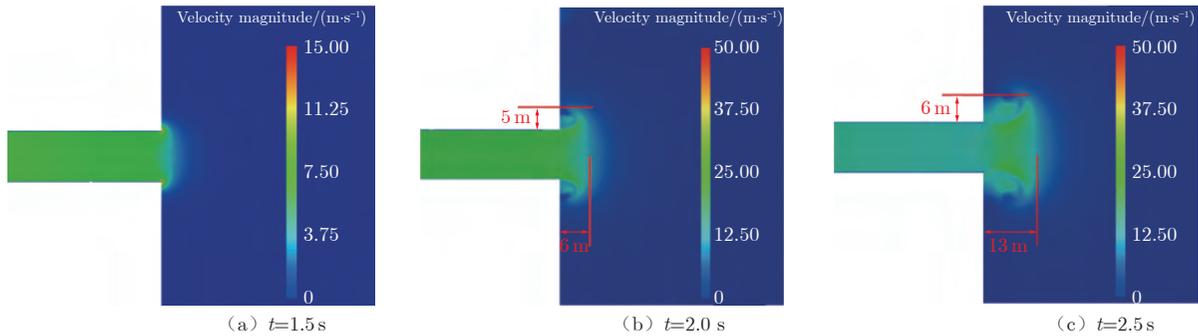


图 13 不同时刻隧道出口的速度云图  
Fig. 13 Velocity contours at different times near the tunnel exit

### 3.2 车速对压缩波诱导隧道出口列车风的影响

由前文分析可知, 隧道内不同位置的压缩波强度相同。以隧道出口内  $5\text{ m}$  处 ( $x=-5\text{ m}$ ) 轨道中心线上的测点为例, 对不同列车运行速度下隧道内压缩波诱导的列车风进行分析 (隧道截面积为  $70\text{ m}^2$ , 阻塞比为  $17.04\%$ )。图 14 为头车到达隧道入口至头车到达隧道出口这一时间段内的风速曲线。

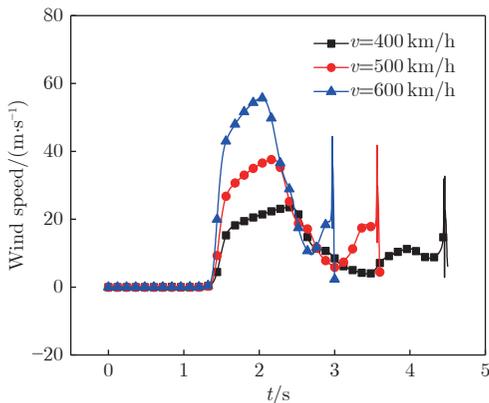


图 14 隧道出口内测点风速  
Fig. 14 Wind speed at the measurement points in the tunnel

从图 14 可以看到, 3 个速度下的风速曲线变化趋势基本一致。  $t=1.47\text{ s}$  时, 初始压缩波达到测点位置, 测点风速突然急剧增大。车速  $400\text{ km/h}$  时, 压缩波诱导的列车风峰值速度为  $23\text{ m/s}$ , 相当于 9 级大风; 车速增至  $600\text{ km/h}$  时, 列车风峰值速度高达  $56\text{ m/s}$ , 相当于 3 级飓风; 车速由  $400\text{ km/h}$  增至

$600\text{ km/h}$ , 列车风速度增大了约  $140\%$ 。

图 15 为不同车速下隧道出口外轨道中心线上各测点由压缩波诱导的列车风峰值速度对比。可以看到, 在隧道出口外  $5\text{ m}$  处 ( $x=5\text{ m}$ ), 由压缩波诱导的列车风速度与隧道内的速度大小相近。在隧道出口外纵向  $25\text{ m}$  的范围内, 压缩波诱导的列车风速度在不同车速下的降低幅度不同: 车速  $400\text{ km/h}$  时, 列车风峰值速度由  $20\text{ m/s}$  降至  $9\text{ m/s}$ , 降低约  $55.00\%$ ; 车速  $500\text{ km/h}$  时, 峰值速度由  $35\text{ m/s}$  降至  $26\text{ m/s}$ , 降低约  $25.71\%$ ; 车速  $600\text{ km/h}$  时, 峰值速度由  $56\text{ m/s}$  降至  $47\text{ m/s}$ , 降低约  $16.07\%$ 。随着车速增大, 风速降低幅度逐渐减小。这就意味着, 磁浮列车

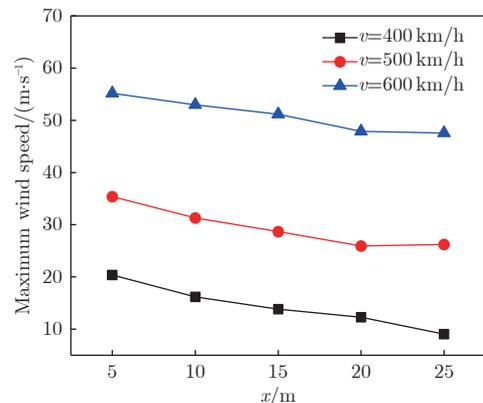


图 15 隧道出口外测点列车风峰值速度  
Fig. 15 Maximum wind speed at the measurement points outside the tunnel

高速通过隧道时，隧道出口外的纵向危险范围会随着车速增大而大幅增大。

### 3.3 隧道阻塞比对压缩波诱导隧道出口列车风的影响

隧道阻塞比也是影响隧道内压缩波强度的重要因素之一。在隧道截面积为 70、90 和 110 m<sup>2</sup> 的工况下进行了计算(列车运行速度为 600 km/h, 列车截面积约为 11.93 m<sup>2</sup>), 3 种工况对应的隧道阻塞比分别为 17.04%、13.26% 和 10.82%。以隧道出口内 5 m 处( $x=-5$  m)的测点为例, 对隧道内的列车风速度随阻塞比的变化进行分析, 如图 16 所示。 $t=1.47$  s 时, 初始压缩波到达隧道出口,  $t=3.0$  s 时, 列车头车到达隧道出口。从这一时间段内测点风速的峰值可以看出: 在不同阻塞比下, 由压缩波诱导的列车风峰值速度不同, 随着阻塞比增大, 测点峰值速度增大, 阻塞比增大 6.22%, 峰值速度由 33 m/s 升至 56 m/s, 增幅高达 67%。

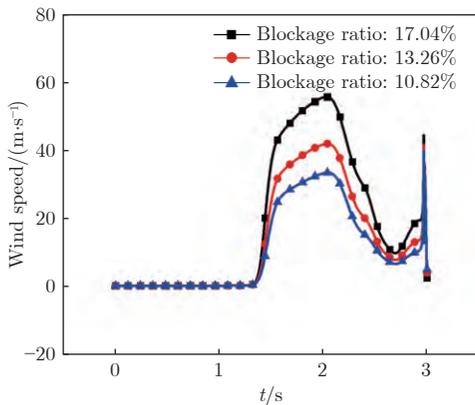


图 16 隧道出口内测点风速

Fig. 16 Wind speed at the measurement points in the tunnel

对比不同阻塞比下、隧道出口外轨道中心线上各测点由压缩波诱导的列车风峰值速度, 如图 17 所示。可以看到, 在纵向 25 m 范围内, 随着测点位置逐渐远离隧道出口, 压缩波诱导的列车风峰值速度逐渐降低, 阻塞比越低, 峰值速度降幅越大: 阻塞比为 17.04% 时, 峰值速度由 56 m/s 降至 47 m/s, 降低约 16.07%; 阻塞比为 13.26% 时, 峰值速度由 37 m/s 降至 15 m/s, 降低约 59.46%; 阻塞比为 10.82% 时, 峰值速度由 28 m/s 降至 7 m/s, 降低约 75.00%。值得注意的是: 阻塞比为 17.04% 时, 隧道出口外 25 m 处测点由压缩波诱导的列车风峰值速度高达 40 m/s, 相当于 13 级大风, 对轨道附近作业人员和附属设施存在巨大威胁。

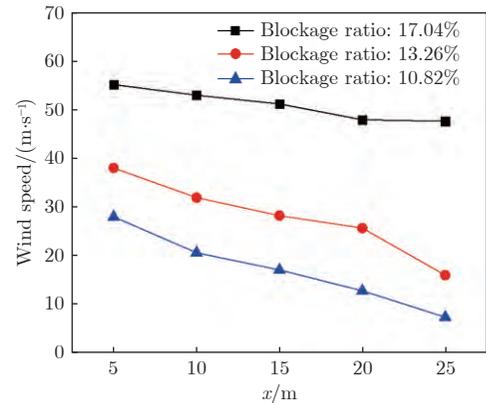


图 17 隧道出口外测点列车风峰值速度

Fig. 17 Maximum wind speed at the measurement points outside the tunnel

## 4 结 论

本文针对高速磁浮列车通过隧道过程中由压缩波诱导的隧道出口列车风开展研究, 得到以下结论:

1) 在列车到达隧道出口之前, 压缩波会在隧道出口诱导形成强烈的列车风。初始压缩波到达隧道出口时, 列车风速度突然开始增大, 初始膨胀波到达隧道出口时, 风速达到峰值并开始下降。

2) 在隧道内的不同位置, 压缩波诱导的列车风速度随时间的变化趋势与幅值基本一致。在隧道出口外纵向 25 m 范围内, 距隧道出口越远, 由压缩波诱导的列车风峰值速度越低, 在横向 5 m 范围内则基本保持不变。

3) 随着列车运行速度增大, 隧道出口处由压缩波诱导的列车风峰值速度明显增大。在阻塞比为 17.04% 工况下, 当车速由 400 km/h 增至 600 km/h, 隧道内列车风峰值速度由 23 m/s 增至 56 m/s, 隧道外纵向 25 m 处峰值速度由 9 m/s 增至 47 m/s; 随着车速增大, 隧道外纵向 25m 范围内峰值速度的降幅逐渐减小。

4) 随着阻塞比增大, 隧道出口处由压缩波诱导的列车风峰值速度明显增大。在车速 600 km/h 工况下, 当阻塞比由 10.82% 增至 17.04%, 隧道内列车风峰值速度由 33 m/s 增至 56 m/s, 隧道外纵向 25 m 处峰值速度由 7 m/s 增至 47 m/s; 随着阻塞比增大, 隧道外纵向 25 m 范围内峰值速度降幅逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] 任魁山, 李奎, 蒋尧, 等. 中速磁浮列车双线隧道初始压缩波特征的数值模拟研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 51-55.  
REN K S, LI K, JIANG Y, et al. Numerical simulation of

- initial compression wave characteristics in double track tunnel of medium speed maglev train[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2020(6): 51–55.  
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2020.06.011
- [2] BELL J R, BURTON D, THOMPSON M C, et al. A wind-tunnel methodology for assessing the slipstream of high-speed trains[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 166: 1–19.  
doi: 10.1016/j.jweia.2017.03.012
- [3] POPE C W. Effective management of risk from slipstream effects at trackside and platforms[R]. Rail Safety and Standards Board-T425 Report, 2007.
- [4] 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): 177–193.  
doi: 10.1243/09544097JRR133
- [5] FLYNN D, HEMIDA H, BAKER C, et al. 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: 14–28.  
doi: 10.1016/j.jweia.2016.07.001
- [6] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(1): 177–198.  
XIONG J Y, DENG Z G. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(1): 177–198.  
doi: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.008
- [7] 林一平. 我国磁浮列车研制取得重大进展[J]. *交通与运输*, 2017, 33(3): 50–53.  
doi: 10.3969/j.issn.1671-3400.2017.03.020
- [8] 董婷婷. 高速列车隧道气动性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
DONG T T. Study on aerodynamic performance of high-speed trains in the tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.  
doi: 10.7666/d.Y2575369
- [9] 李炎, 高孟理, 周鸣镝, 等. 铁路隧道列车活塞风的理论研究与计算方法的探讨[J]. *铁道学报*, 2010, 32(6): 140–145.  
LI Y, GAO M L, ZHOU M D, et al. Theoretical study and calculation method of train piston wind in railway tunnels[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(6): 140–145.  
doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2010.06.023
- [10] HOWE M S. Review of the theory of the compression wave generated when a high-speed train enters a tunnel[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 1999, 213(2): 89–104.  
doi: 10.1243/0954409991531056
- [11] 顾红生, 赵毅山. 磁悬浮列车在隧道内影响活塞风速的因素[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(3): 324–328.  
GU H S, ZHAO Y S. Effects on piston wind velocity of maglev in tunnel[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2003, 31(3): 324–328.  
doi: 10.3321/j.issn:0253-374X.2003.03.016
- [12] 余南阳. 高速铁路隧道压力波数值模拟和模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.  
YU N Y. A study on numerical simulation and model experiment of the pressure waves of the high-speed trains through tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [13] 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 (boundary problem, technical session)[J]. *The Proceedings of International Symposium on Seed-Up and Service Technology for Railway and Maglev Systems:STECH*, 2009, 2009: 360769–1.  
doi: 10.1299/jsmestech.2009.\_360769-1\_
- [14] 刘峰, 姚松, 刘堂红, 等. 高速铁路隧道壁面气动压力实车试验分析[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2016, 50(10): 2018–2024.  
LIU F, YAO S, LIU T H, et al. Analysis on aerodynamic pressure of tunnel wall of high-speed railways by full-scale train test[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2016, 50(10): 2018–2024.  
doi: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.10.024
- [15] 方雨菲, 马伟斌, 程爱君, 等. 隧道附属设施气动效应分析[J]. *铁道建筑*, 2022, 62(4): 102–106.  
FANG Y F, MA W B, CHENG A J, et al. Analysis on aerodynamic effect of tunnel auxiliary facilities[J]. *Railway Engineering*, 2022, 62(4): 102–106.  
doi: 10.3969/j.issn.1003-1995.2022.04.25
- [16] 刘堂红, 田红旗, 金学松. 隧道空气动力学实车试验研究[J]. *空气动力学学报*, 2008, 26(1): 42–46.  
LIU T H, TIAN H Q, JIN X S. Experimental study of full-scale train on aerodynamics in tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(1): 42–46.  
doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2008.01.008
- [17] 梅元贵. 高速铁路隧道压力波数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1997.  
MEI Y G. Numerical simulation of pressure wave in high-speed railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1997.
- [18] 牛纪强. 高速列车通过隧道时产生的列车风研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(6): 1268–1276.  
NIU J Q. Research on gusts caused by high-speed trains passing through tunnel[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(6): 1268–1276.  
doi: 10.3969/j.issn.1672-7029.2015.06.002
- [19] 王磊, 骆建军, 李飞龙. 高速列车过双线隧道气动效应及列车风特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(9): 43–52.  
WANG L, LUO J J, LI F L. Aerodynamic effects and train wind characteristics of high-speed train passing through double-track tunnel[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(9): 43–52.  
doi: 10.11918/202011011
- [20] 王磊, 骆建军, 李飞龙, 等. 高速铁路双线隧道内列车风分布及流场特性[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2021, 52(4): 1346–1357.  
WANG L, LUO J J, LI F L, et al. Train-induced wind distribution and flow field characteristics in high-speed railway double-track tunnel[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2021, 52(4): 1346–1357.  
doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.04.031
- [21] 朴荣焕, 张继业, 李田. 时速100公里级地铁车辆通过隧道时引起

- 的活塞风仿真研究[J]. 机械, 2021, 48(11): 41-48.  
PIAO R H, ZHANG J Y, LI T. Simulation study on piston wind caused by 100 km/h metro vehicles passing through tunnels[J]. Machinery, 2021, 48(11): 41-48.  
doi: 10.3969/j.issn.1006-0316.2021.11.006
- [22] 管鸿浩, 龚彦峰, 踪敬良, 等. 高速列车单列通过时双线隧道内列车风分布规律研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 83-89.  
GUAN H H, GONG Y F, ZONG J L, et al. Study on the slipstream distribution by a single train running through a double-track tunnel[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(6): 83-89.  
doi: 10.13238/j.issn.1004-2954.202105160002
- [23] YAO S B, SUN Z X, GUO D L, et al. Numerical study on wake characteristics of high-speed trains[J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 29(6): 811-822.  
doi: 10.1007/s10409-013-0077-3
- [24] 柳润东, 毛军, 郝艳红. 高速铁路风障在横风与列车风耦合作用下的气动特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 153-159,166.  
LIU R D, MAO J, XI Y H. Aerodynamic load features of windbreaks of high speed railway under coupled action of cross wind and high speed train wind[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3): 153-159,166.  
doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.03.025
- [25] European Committee for Standardization. BS EN 14067-5: 2006+A1: 2010 Railway applications - Aerodynamics - Part 5: Requirements and test procedures for aerodynamics in tunnels[S]. Brussels: CEN, 2010.
- [26] BELL J R, BURTON D, THOMPSON M C, et al. Moving model analysis of the slipstream and wake of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 127-137.  
doi: 10.1016/j.jweia.2014.09.007

### 作者简介:



成炯豪(1995—),男,山西晋城人,博士研究生。研究方向:高速列车空气动力学,高速列车多体动力学。通信地址:北京市海淀区北四环西路15号中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室(100190)。  
E-mail: chengjionghao@imech.ac.cn

(编辑:孙春晖)