

# 400 km/h高速铁路隧道初始压缩波产生机理研究

孙琦\*, 张昭

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年4月30日; 录用日期: 2024年5月9日; 发布日期: 2024年6月26日

## 摘要

本文基于三维仿真软件, 采用CR450动车组头型及隧道的气动模型, 对列车进入无缓冲结构隧道和京沪线某隧道缓冲结构的湍流流场进行数值模拟。列车以时速400公里驶入隧道, 车前大部分空气受到挤压沿列车行进方向传播进入隧道, 部分空气通过环状空间或缓冲结构开孔处逸出隧道。当列车鼻尖抵达隧道入口, 初始压缩波开始形成, 随着列车头部曲线段进入隧道, 压缩波压力急剧增大。当列车曲线段完全进入隧道时, 车前压力增加变得平缓, 此时初始压缩波完全形成。在列车前方15 m的范围内, 压缩波受到列车近场压力的影响, 呈现明显的三维特征。当压缩波传播至列车前方15 m的范围外, 列车近场压力的作用几乎消失, 压缩波呈现明显的一维特性, 此时已从三维波演化为一维波。初始压缩波的压力梯度存在先增大后减小, 呈现明显的单峰性。缓冲结构可以降低初始压缩波在形成过程中的压力增长速度, 但对压力幅值的降低效果还与头型等其他因素有关。

## 关键词

时速400公里, 初始压缩波, CFD, 隧道, 缓冲结构

# Study on Initial Compression Wave Generation Mechanism in 400 km/h High-Speed Railway Tunnel

Qi Sun\*, Zhao Zhang

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 9<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 26<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

## Abstract

This paper is based on three-dimensional simulation software, using the aerodynamic model of CR450 locomotive head and tunnel to numerically simulate the turbulent flow field of a train entering a tunnel without hood and a tunnel buffer structure on the Beijing-Shanghai line. The train enters the tunnel at a speed of 400 km/h. Most of the air in front of the train is squeezed and propagates into the tunnel along the train's travelling direction, and part of the air escapes out of the tunnel through the annular space or the opening of the hood. When the nose of the train arrives at the entrance of the tunnel, the initial compression wave starts to form, and as the curved section of the train's head enters the tunnel, the pressure of the compression wave increases dramatically. When the curved section of the train completely enters the tunnel, the pressure increase in front of the train becomes flat, at which time the initial compression wave is completely formed. In the range of 15 m in front of the train, the compression wave is affected by the near-field pressure of the train, showing obvious three-dimensional characteristics. When the compression wave propagates beyond the range of 15 m in front of the train, the effect of the train near-field pressure almost disappears, and the compression wave shows obvious one-dimensional characteristics, at this time, it has evolved from a three-dimensional wave to a one-dimensional wave. The pressure gradient of the initial compression wave increases first and then decreases, showing obvious single-peak characteristics. The hood can reduce the pressure growth rate of the initial compression wave in the formation process, but the reduction effect on the pressure amplitude is also related to other factors such as the head shape.

## Keywords

400 km/h, Initial Compression Wave, CFD, Tunnel, Hood

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在高速列车驶入隧道时,对隧道内的空气进行挤压。使得一部分空气通过列车与隧道间的环状空间向外逸出,大部分空气受到列车挤压向前流动,形成初始压缩波。初始压缩波沿着隧道向前传播,传播到隧道出口端向外辐射,形成微气压波。使洞口附近的建筑物门窗振动,发出声响,当微气压波足够大时,还会产生音爆等噪声危害,对附近的居民及动物产生影响[1]。

微气压波的峰值主要与初始压缩波的压力梯度成正比,初始压缩波的压力梯度与列车行驶速度的三次方成正比,因此,降低初始压缩波的压力梯度,成为减缓微气压波强度的主要措施[2]。影响初始压缩波的主要因素有列车头型的空气动力学性能、列车速度、阻塞比、隧道洞口形状、是否设置缓冲结构等[3]。为降低隧道内初始压缩波的压力梯度,国内外在通过缓冲结构降低隧道内初始压缩波的压力梯度方面进行了大量研究。

1995年,小泽智等人[4]对隧道内传播的压力进行分析,研究隧道内压缩波传播时的激化和衰减,通过压力梯度等数据与隧道洞口20 m处微气压波的实测数据,对隧道洞口的微气压波的幅值进行研究。1997年,奥地利学者 Sockel [5]通过数值仿真,对管内不同的开腔结构压力变化进行分析,并在2002年[6]使用计算流体力学的方法进行验证;2009年德国学者 M hieke [7]对长7700 m的 Euerwang 隧道内初始

压缩波传播过程进行了测量, 并研究了隧道入口设置不同缓冲结构对初始压缩波压力梯度的影响; 2013 年法国学者 Uystepuyst [8]通过 CFD 软件对不同参数缓冲结构的减缓效果进行了模拟, 提出等截面的缓冲结构是最有效的形状; 2024 年日本学者斋藤聪[9]提出了两段式阶梯状的缓冲结构, 既可以降低隧道内初始压缩波的压力梯度又可以缓解隧道洞口微气压波的危害。

国内兰州交通大学梅元贵等人[10] [11]研究了隧道洞口初始压缩波的空间分布特性和传播特性, 发现初始压缩波在传播过程中会由三维波演化为一维波及缓冲结构对初始压缩波的影响。2016 年王宏林、Vardy 等人[12]研究了通过在隧道洞口出口区域开孔来降低隧道内初始压缩波的压力梯度的方法。2019 年中南大学 Li [13]基于 CFD 软件, 分析了扩大等截面型缓冲结构长度对压缩波影响及其机理。2024 年中南大学蒯童童等人研究了鲨鱼腮形缓冲结构, 并研究了鲨鱼腮形缓冲结构对微气压波的减缓效果[14]。本文研究了初始压缩波的产生机理及隧道洞口设置缓冲结构对初始压缩波的影响, 研究结果可为隧道缓冲结构的设计提供技术参考。

## 2. 计算模型与计算方法

本文采用 CFD 软件对列车进入隧道时产生初始压缩波的过程进行仿真分析, 对隧道初始压缩波的形成过程、三维波变为一维平面波过程、基本波形特征和有无缓冲结构对初始压缩波的影响特征进行探究。

### 2.1. 几何模型与计算域

图 1 为隧道断面与测点布置, 隧道断面采用国内时速 350 公里平直双线隧道断面, 缓冲结构取京沪线某缓冲结构, 隧道当量直径  $D$  为 10.64 m, 净空面积  $100.00 \text{ m}^2$ , 线间距 5.00 m。图 1 为隧道断面尺寸与测点布置。测点布置选择了从隧道入口到隧道内每隔 10.64 m 设置一个平面, 距离地面高 1.80 m 处设置 1、2、3 三个测点, 在 1.80 m 水平线与隧道中线  $45^\circ$  的壁面上设置测点 4、5, 在隧道顶部设置测点 6。

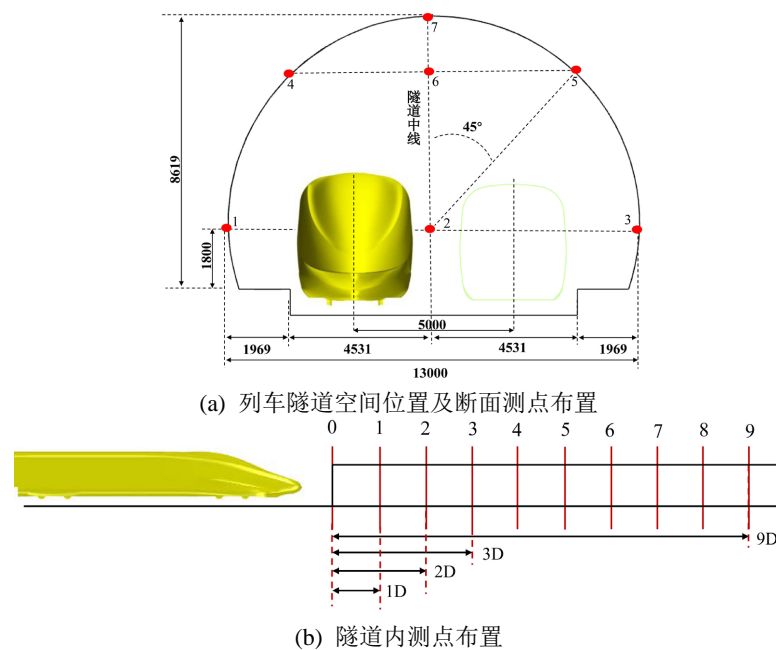


Figure 1. Tunnel model section parameters and measurement point arrangement  
图 1. 隧道模型断面参数及测点布置

列车模型采用国内某在研 CR450 动车组。图 2 为列车气动几何模型及计算模型, 由头车、中间车、

尾车组成的三编组列车模型, 各车厢之间由风挡连接。为准确模拟出列车进入隧道时的流场, 列车模型尽可能的保留了风挡、转向架舱、转向架等结构。列车模型长 83.04 m、宽 3.36 m、高 3.85 m, 列车鼻尖长 15.00 m。

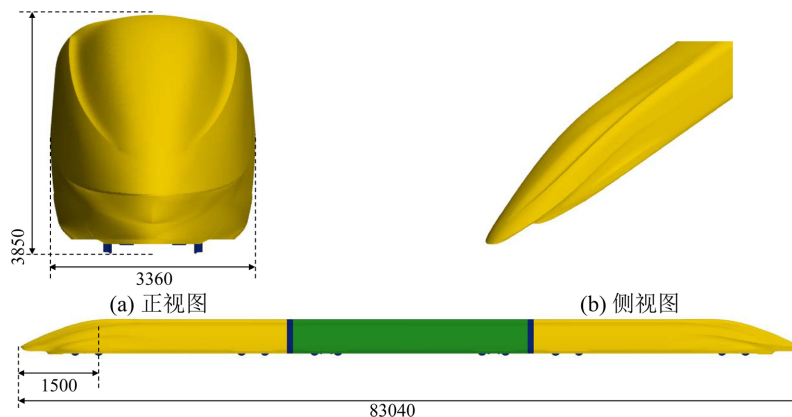


Figure 2. CR450 train set aerodynamic geometry model and calculation model grouping  
图 2. CR450 动车组气动几何模型及计算模型编组

图 3 为计算区域的示意图, 各边界如图中所标识, 流场的参考压力和温度按照海平面国际标准大气 (ISA) 给定, 远场压力取 101,325 Pa, 参考温度取 288 K。隧道入口处远场空间区域沿 x 方向(列车行驶方向)长度为 603.00 m, 沿 y 方向(列车宽度方向)宽度为 300.00 m, 沿 z 方向(列车高度方向)高度为 200.00 m。沿 x 轴方向将计算区域尺寸划分为车后空间长度 280.00 m、列车长度 83.04 m、光滑启动距离 140.00 m、匀速至缓冲结构或隧道洞口长度 100.00 m、隧道长度 500.00 m。

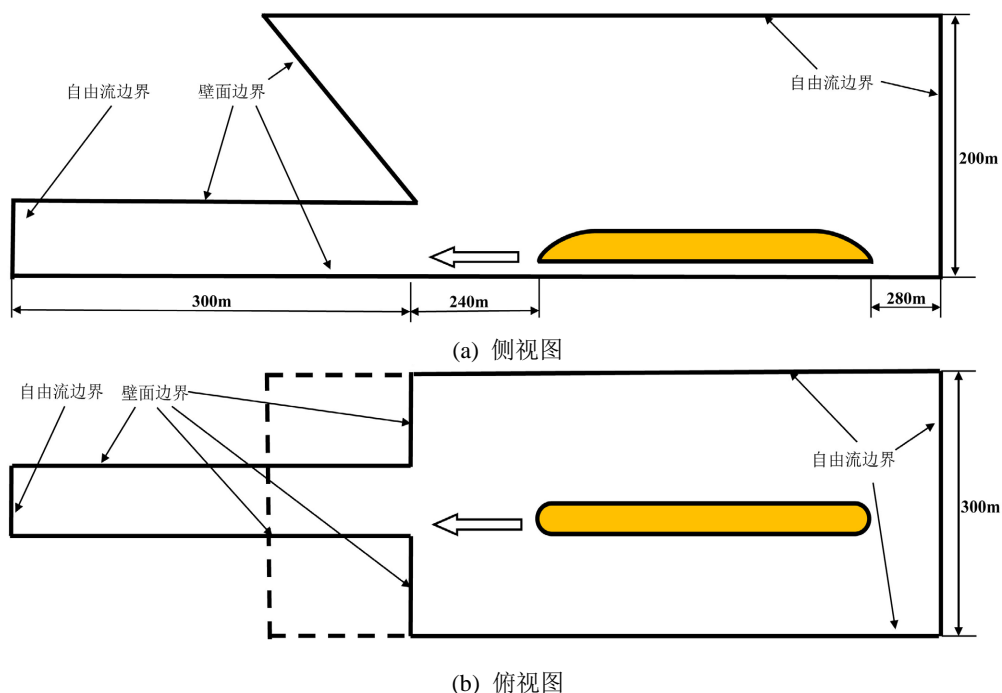


Figure 3. Schematic of the calculation area  
图 3. 计算区域示意图

## 2.2. 计算方法

列车通过隧道引起的空气流动是三维可压缩非定常不等熵湍流流动。采用 Rans 湍流模型, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 壁面采用低  $y+$  壁面处理, 时间采用二阶离散, 对流项采用二阶逆风格式离散, 扩散项采用中心差分格式离散。可压缩流体的基本控制方程为:

(1) 连续性方程:

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

式中,  $\rho$  为空气密度,  $\mathbf{V}$  为流场中速度矢量,  $\nabla$  为哈密顿算子。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = \nabla \cdot \mathbf{P} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

式中,  $\otimes$  为克罗内克积,  $\rho$  为空气密度,  $\mathbf{V}$  为流场中速度矢量,  $\nabla$  为哈密顿算子,  $\mathbf{f}_b$  为作用于连续体上的单位体积的质量力(如重力和离心力)的合力,  $\mathbf{P}$  为应力张量。

(3) 能量方程:

$$\rho T \frac{DS}{Dt} = \text{div}(k \text{grad} T) + \varphi \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为空气密度,  $T$  为流场温度,  $k$  为导热系数,  $\varphi$  为耗散功。

## 2.3. 方法验证

为验证本文数值计算方法的合理性和计算精度, 采用日本动模型实验的结果进行验证[15]。实验模型与实际比例为 1:30。通过一个发射系统对列车进行加速, 发射系统由一个气管和一个 10 m 的加速管构成, 通过气罐中排出的气体推动列车模型。随后经过 35 m 的测试段, 完成列车通过隧道的过程。在距离隧道入口 38 m 处布置 P1 测点。

本文的计算基于 STAR CCM+ 软件采用 Trim 网格, 为了更精确的捕捉近壁面的流场数据, 在隧道壁面拉伸 Prism 网格 5 层, 第一层网格厚度为 1.4 mm, 总厚度为 27.5 mm; 在车体表面拉伸了 5 层 Prism 网格 5 层, 第一层网格厚度为 1.08 mm, 总厚度为 17.6 mm。列车附近的网格如图 4 所示。

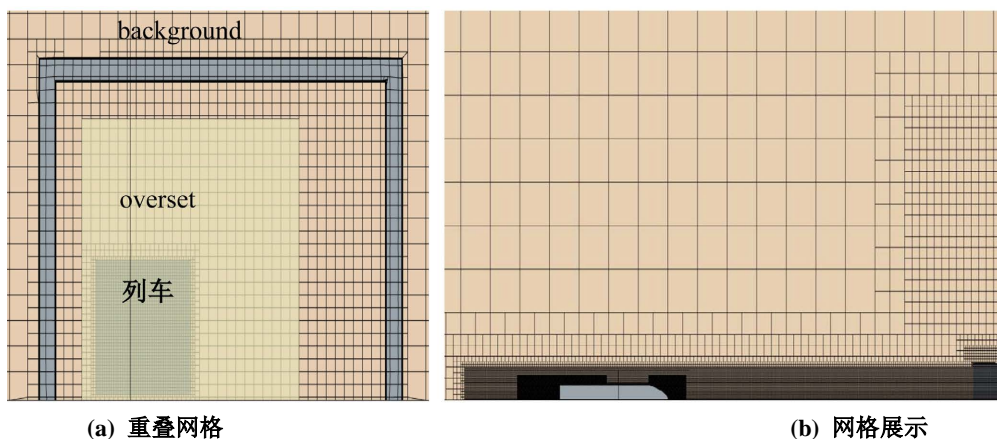


Figure 4. Overset mesh and body mesh display  
图 4. 重叠网格及体网格展示

模型采用 SST k- $\Omega$  湍流模型进行计算, 采用了 overset 技术实现列车进入隧道的过程仿真。图 5 为数值计算结果与动模型试验结果的对比。可知初始压缩波压力梯度峰值出现在 0.28 s, 与试验结果误差为 1.34%, 数值计算结果与动模型试验结果吻合度较好, 验证了网格划分方法和数值计算方法的正确性与合理性。

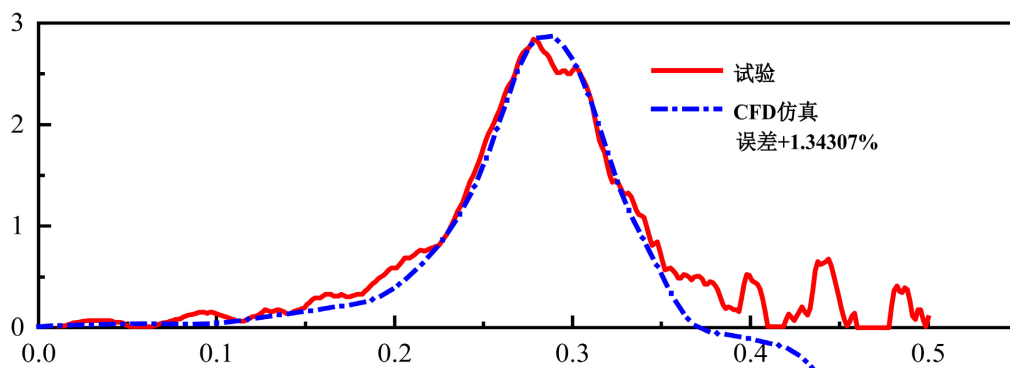


Figure 5. Comparison of calculated results with test results

图 5. 计算结果与试验结果的对比

### 3. 计算结果分析

#### 3.1. 无缓冲结构初始压缩波基本特征

图 6 表示列车进入无缓冲结构隧道时, 距隧道入口 7D 截面上测点 1、测点 3、测点 7 压力时间历程变化曲线。图中  $t = 0$  s 时刻表示列车车头鼻尖到隧道进口端, 此时产生初始压缩波, 初始压缩波传播到该截面的时间为  $t = 0.21$  s。列车在  $t = 0.65$  s 时到达距隧道入口 7D 截面。

由图 6 可以看出, 初始压缩波压力是持续增大, 且压力梯度先增大后减小, 呈现明显的单峰性。在约 0.59 s 的时刻, 由于列车从测点 1 旁经过, 引起了压力剧烈变化, 使测点 1 的压力曲线开始明显陡于测点 3, 测点 6。说明在列车周围的压力变化要更剧烈, 这与图 7 中隧道近车侧壁面等压线密集的情况相吻合。

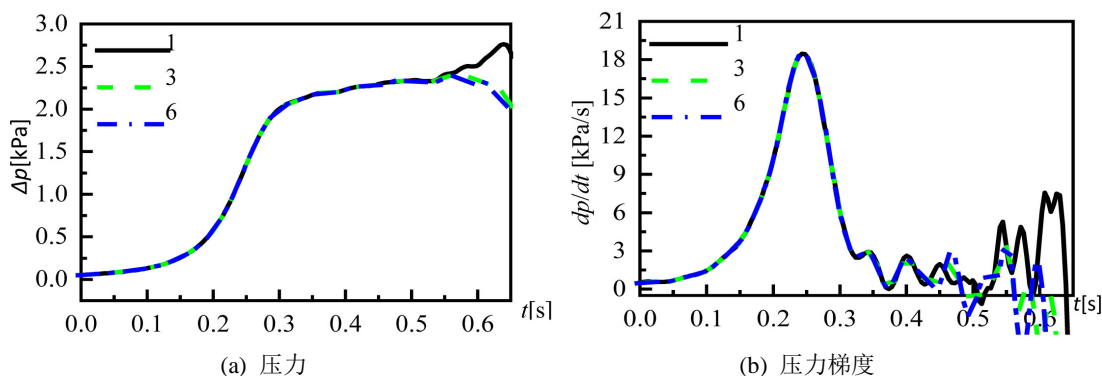


Figure 6. Pressure and pressure gradient time histories at tunnel inlet points

图 6. 隧道距入口测点压力及压力梯度时间历程曲线

图 7 为隧道洞口无缓冲结构列车进入隧道时的压力分布情况, 当  $t = -0.0675$  s 时刻, 列车还未进入隧道, 但是由于列车对鼻尖前方的空气进行挤压, 部分空气进入隧道内, 造成了隧道内的压力开始上升。



列车近隧道壁面的压力大于另一侧的压力, 所以在图中靠近列车一侧与远离列车一侧的压力不同, 形成了图中的“斜切式”形状的等压线。在  $t = 0 \text{ s}$  时刻, 列车鼻尖到达隧道入口处, 由于列车对隧道前方的空气进行挤压, 使得隧道内的压力继续升高。此刻隧道壁面的压力仍是靠近车的一侧压力更大, 初始压缩波正在形成。  $T = 0.0675 \text{ s}$  时刻列车驶入隧道  $0.5L_{\text{nose}}$  距离, 列车前方的空气受到挤压, 压力还在持续增大。从隧道的洞口到列车前方靠近列车隧道壁面的压力开始了由负压到正压的压力变化, 在洞口处出现负压是因为列车前方的空气受到列车鼻尖的挤压, 造成部分流体从列车车头向四周排开, 流体从列车与隧道间的环状空间流出。在列车前方处, 隧道壁面的压力开始由低正压转换为高正压。在列车前方一段距离的壁面处, 隧道壁面上的等压线开始从“斜切式”转变成“正切式”的形状。

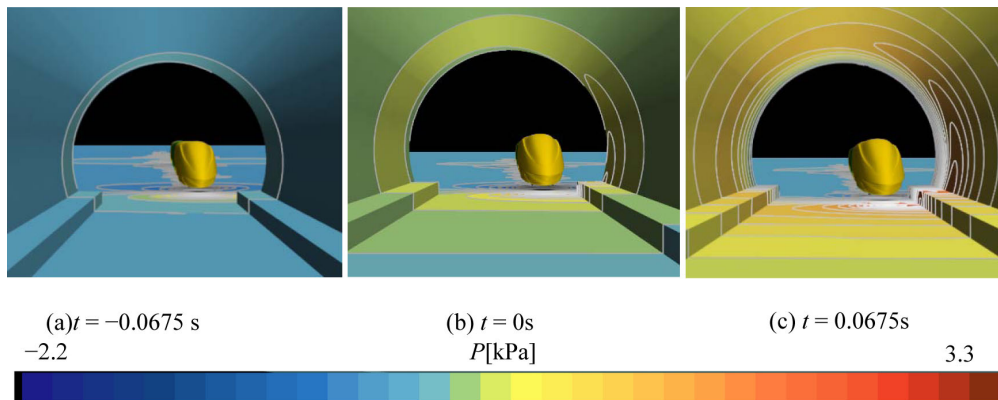


Figure 7. Pressure distribution near train and tunnel inlets  
图 7. 列车及隧道进口附近压力分布

### 3.2. 洞口设置缓冲结构初始压缩波基本特征

图 8 为隧道洞口设置京沪线某缓冲结构列车进入隧道时的压力分布情况, 当  $t = -0.0675 \text{ s}$  时, 列车鼻尖距缓冲结构入口  $0.5L_{\text{nose}}$ , 列车周围压力场变化逐渐剧烈, 鼻尖前为正压区, 鼻尖后为负压区; 当  $t = 0 \text{ s}$  时, 列车鼻尖到达缓冲结构洞口, 隧道内空气已经开始压缩; 当  $t = 0.0675 \text{ s}$  时, 列车已进入缓冲结构  $0.5L_{\text{nose}}$ 。列车车头对缓冲结构中流场的挤压作用, 已经有部分气流从缓冲结构中排出。对比图 7 中  $15 \text{ m}$  头型列车进入无缓冲结构隧道时压力云图可以看出缓冲结构起到了减缓列车进入缓冲结构压缩周围气流的作用, 缓冲结构内压力值明显小于无缓冲结构隧道内压力。

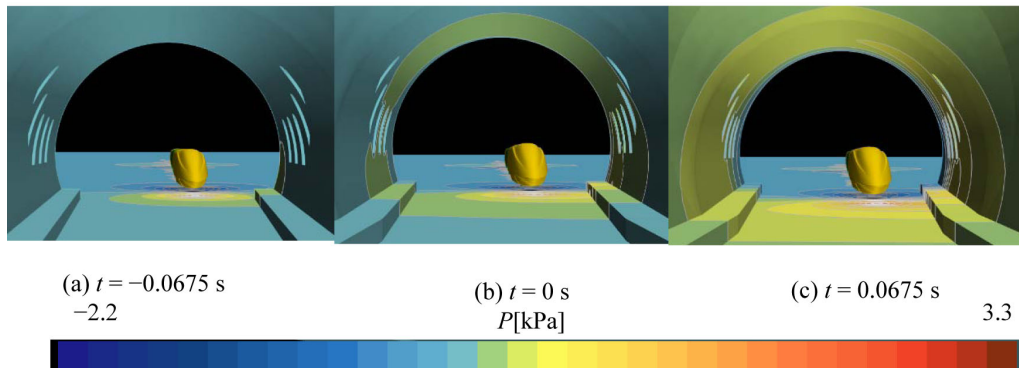


Figure 8. Pressure distribution in the vicinity of trains and hoods  
图 8. 列车及缓冲结构附近压力分布

### 3.3. 洞口设有无缓冲结构对比

图 9 表示有无缓冲结构距隧道入口 7D 截面上的测点 7 的压力时间历程曲线对比, 以更清楚展示西渴马 1 号缓冲结构对初始压缩波的影响。定义列车车头鼻尖到有缓冲结构隧道的缓冲结构进口端时刻为红色线的零时刻, 定义列车车头鼻尖到无缓冲结构隧道进口端的时刻为黑色线的零时刻。

由图 9 可知, 有缓冲结构时测点处的压力缓慢上升, 最终达到峰值; 无缓冲结构检测点处的压力分为两个阶段上升, 先急剧增加, 再缓慢上升达到峰值; 有缓冲结构压力梯度峰值大幅降低, 幅值降低了 5.937 kPa/s, 降低率为 32.10%, 且峰值出现时间也更晚。

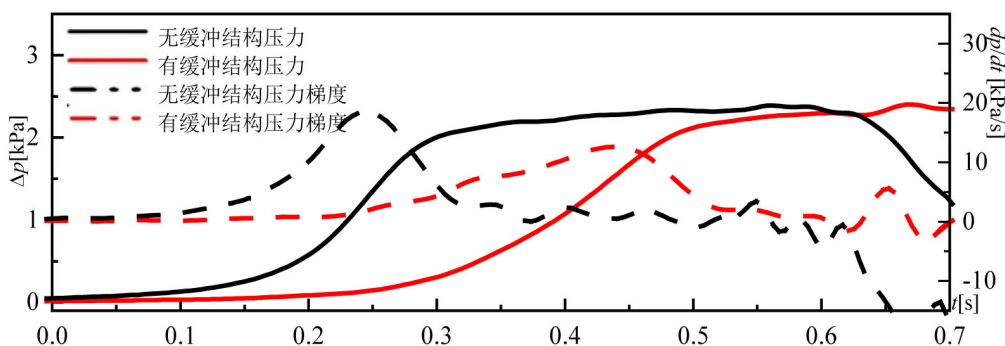


Figure 9. Pressure and pressure gradient time histories at tunnel portal measurement points

图 9. 隧道入口测点压力及压力梯度时间历程曲线

## 4. 结论

本论文介绍采用 CR450 动车组及隧道气动模型, 对列车进入无缓冲结构隧道和京沪线某隧道缓冲结构的湍流流场进行数值计算。

(1) 通过与国外的动模型实验进行仿真验证, 说明了本文网格划分方法和数值计算方法的正确性与合理性。

(2) 隧道洞口附近及列车端附近压力呈现出三维特征, 隧道近列车壁面的压缩波幅值要大于隧道远列车壁面和隧道顶部的压缩波幅值; 在距隧道入口约 15.0 m 处, 各测点数据一致, 此时三维初始压缩波变为一维平面波, 为后期研究方法的选择提供初步基础。

(3) 通过研究隧道洞口有无缓冲结构对列车进入隧道时产生的初始压缩波减缓效应, 在隧道进口设置京沪线某缓冲结构, 该型缓冲结构可减缓初始压缩波的压力梯度幅值, 并且改变了初始压缩波压力梯度曲线形状。相比于无缓冲结构的初始压缩波压力梯度, 该缓冲结构缓解初始压缩波的压力梯度, 使其幅值降低了 5.937 kPa/s, 最大压力梯度降低率为 32.10%, 为研究不同列车外形对隧道进口初始压缩波的影响规律提供基础。然而, 由于该缓冲结构对压力梯度的降低率较低, 应对其进行改进或布置新型缓冲结构。

## 参考文献

- [1] 梅元贵, 等. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [3] Derkowski, P., Clark, S., Sturt, R., et al. (2015) High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report.
- [4] 小澤智. トンネル内の圧力波の変形とトンネル出口微気圧波[J]. 日本流体力学会誌「ながれ」, 1995, 14(3): 191-197.



- 
- [5] Ehrendorfer, K. and Sockel, H. (1997) The Influence of Measures near the Portal of railway Tunnels on the Sonic Boom. In: *BHR Group Conference Series Publication*, Mechanical Engineering Publications Limited, Vol. 27, 863-876.
- [6] Ehrendorfer, K., Reiterer, M. and Sockel, H. (2002) Numerical Investigation of the Micro Pressure Wave. In: *TRANSAERO-A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation*, Springer, 321-341.
- [7] Degen, K.G., Gerbig, C. and Onnich, H. (2008) Acoustic Assessment of Micro-Pressure Waves Radiating from Tunnel Exits of DB High-Speed Lines. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise*, Munich, 4-8 September 2007, 48-55.
- [8] Uystepuyst, D., William-Louis, M. and Monnoyer, F. (2013) 3D Numerical Design of Tunnel Hood. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.08.008>
- [9] Saito, S. (2024) Alleviation of Micro-Pressure Waves Radiated from Tunnel Hoods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **147**, Article ID: 105703. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105703>
- [10] 王维洲, 钟登朝, 胖涛, 等. 400 km/h 高速铁路隧道洞口等截面无开孔扩大型缓冲结构气动效应分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(5): 57-61.
- [11] 刘希贤, 郭安宁, 梅元贵, 等. 高速铁路复线隧道内压力波特性的数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 20-27.
- [12] Wang, H., Vardy, A.E. and Pokrajac, D. (2016) Perforated Tunnel Exit Regions and Micro-Pressure Waves: Geometrical Influence. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Engineering and Computational Mechanics*, **169**, 70-85. <https://doi.org/10.1680/jenm.15.00026>
- [13] Li, W., Liu, T., Huo, X., Chen, Z., Guo, Z. and Li, L. (2019) Influence of the Enlarged Portal Length on Pressure Waves in Railway Tunnels with Cross-Section Expansion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **190**, 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.031>
- [14] Lin, T., Yang, M., Zhang, L., Wang, T. and Zhong, S. (2024) Influence of Bionics Shark Gills Tunnel Portal on the Micro-Pressure Wave at the Tunnel Exit. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **144**, Article ID: 105542. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105542>
- [15] Doi, T., Ogawa, T., Masubuchi, T. and Kaku, J. (2010) Development of an Experimental Facility for Measuring Pressure Waves Generated by High-Speed Trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98**, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.09.002>