

# 基于车外压力波动400 km/h高速铁路最不利 交会位置和最不利隧道长度

张泽东

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年2月14日; 录用日期: 2025年2月27日; 发布日期: 2025年3月25日

## 摘 要

随着高速铁路运行速度提升至400 km/h, 列车在隧道内交会引发的车外压力波动对车体结构安全、隧道稳定性及乘客舒适性产生显著影响。本文基于一维流动模型特征线法, 系统研究了两列车在不同隧道长度、交会位置及运行速度下的车外压力波动特性, 旨在确定最不利交会位置与最不利隧道长度, 为高速铁路设计与运营提供理论支撑。研究通过建立连续性方程、动量方程及能量方程, 构建了一维可压缩非定常流动模型, 并利用日本模型试验数据验证了计算方法的准确性。针对两列车等速交会过程, 将其划分为驶入隧道、中央交会、驶向出口及驶出隧道四个阶段, 分析了不同交会位置(中央交会、洞口交会、三分之一交会及四分之一交会)对车外压力峰峰值的影响。结果表明: 中央交会时车外压力波动最为剧烈, 最大正压值、最大负压值与压力峰峰值均达到峰值, 例如在400 km/h速度下, 856 m隧道内头车压力峰峰值达12.88 kPa, 显著高于其他交会位置, 故中央交会被确定为最不利交会位置。进一步探究隧道长度的影响发现, 压力波动强度随隧道长度呈现非线性变化。在400 km/h速度下, 571 m隧道内头车最大负压值达-10.32 kPa, 压力峰峰值为13.66 kPa, 较其他长度隧道分别提升2.28%~7.05%与3.45%~16.88%, 表明571 m为最不利隧道长度。此外, 速度对压力波动具有显著放大效应: 450 km/h速度下, 头车最大压力峰峰值达17.90 kPa, 较300 km/h工况增长152.3%, 且负压峰值出现时刻随速度增加提前。研究还揭示了车外压力动态演变规律: 列车驶入隧道时压力线性上升, 车尾完全进入后压力短暂降低, 而对向列车进入引发的压缩波导致压力二次激增。两列车交会期间, 压力波动幅值较单车工况更为剧烈, 且尾车压力波动幅值低于头车与中间车。本文通过多参数耦合分析, 明确了中央交会与571 m隧道为车外压力最不利工况, 揭示了速度-隧道长度-交会位置的协同影响机制, 可为400 km/h高速铁路隧道断面优化、车体强度设计及运营安全评估提供理论依据。

## 关键词

时速400公里, 一维流动模型特征线法, 两列车交会, 车外压力波动, 最不利隧道长度

## The Most Unfavorable Intersection Position and the Most Unfavorable Tunnel of the 400 km/h High-Speed Railway Based on External Pressure Fluctuation

## Zedong Zhang

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 14<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 27<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 25<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

As the running speed of high-speed railway increases to 400 km/h, the external pressure fluctuation caused by trains crossing in the tunnel has a significant impact on the safety of vehicle structure, tunnel stability and passenger comfort. Based on the characteristic line method of one-dimensional flow model, the fluctuation characteristics of the external pressure of two trains under different tunnel lengths, intersection positions and running speeds are systematically studied in this paper, aiming to determine the most unfavorable intersection position and tunnel length, and provide theoretical support for the design and operation of high-speed railway. By establishing continuity equation, momentum equation and energy equation, a one-dimensional compressible unsteady flow model is constructed, and the accuracy of the calculation method is verified by the test data of the Japanese model. The equal-speed intersection process of two trains was divided into four stages: entering tunnel, central intersection, exit and exit tunnel. The influence of different intersection positions (central intersection, entrance intersection, third intersection and quarter intersection) on the peak value of external pressure was analyzed. The results show that the external pressure fluctuation is the most severe at the central intersection, and the maximum positive pressure, maximum negative pressure and pressure peak value all reach the peak value. For example, at the speed of 400 km/h, the peak value of the pressure of the head car in the 856 m tunnel reaches 12.88 kPa, which is significantly higher than other intersection positions, so the Central intersection is determined as the most unfavorable intersection position. Further exploring the influence of tunnel length, it is found that the pressure fluctuation intensity changes nonlinear with tunnel length. At a speed of 400 km/h, the maximum negative pressure of the head car in the 571 m tunnel reaches -10.32 kPa and the peak pressure is 13.66 kPa, which is 2.28%~7.05% and 3.45%~16.88% higher than that of other tunnels, respectively, indicating that 571 m is the most unfavorable tunnel length. In addition, speed has a significant amplification effect on pressure fluctuation: at 450 km/h, the maximum pressure peak value of the head car reaches 17.90 kPa, an increase of 152.3% compared with 300 km/h, and the peak time of negative pressure is advanced with the increase of speed. The study also reveals the dynamic evolution law of the external pressure: the pressure rises linearly when the train enters the tunnel, the pressure decreases briefly after the train fully enters the tunnel, and the compression wave caused by the train entering the opposite direction leads to a secondary surge of pressure. The pressure fluctuation amplitude of the two trains is more severe than that of the single train, and the pressure fluctuation amplitude of the rear car is lower than that of the head car and the middle car. Through multi-parameter coupling analysis, this paper identifies the Central Rendezvous and 571 m tunnel as the most unfavorable conditions of external vehicle pressure, and reveals the synergistic influence mechanism of speed-tunnel length and rendezvous position, which can provide theoretical basis for section optimization, vehicle body strength design and operation safety evaluation of 400 km/h high-speed railway tunnel.

## Keywords

400 km/h, One-Dimensional Flow Model Characteristic Line Method, Two Trains Meeting, Outside Pressure Fluctuation, The Most Unfavorable Tunnel Length

Copyright © 2025 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

高速列车进入隧道时,由于受限空间内空气流动的瞬时压缩效应,会引发显著的气动压力波动现象。这种压力瞬变不仅会对车体结构和隧道衬砌产生周期性气动载荷,导致材料疲劳损伤和服役寿命缩短,还可能诱发车厢内乘客出现耳部不适等生理反应[1][2]。

当前研究高速列车车内外压力波动特性的方法主要有实车试验、动模型试验和数值模拟[3]。实车试验作为最直接的观测方式,能够精准获取特定工况下的隧道空气动力学参数,同时为数值模型的验证提供基准数据。在动车组隧道气动效应研究领域,科研人员已开展了大量实证研究,为列车设计和运营维护建立了时速 250 km/h 至 350 km/h 等级铁路的隧道压力波控制标准[4]-[6]。相关成果表明,列车运行速度、隧道阻塞率、地下结构长度、编组长度及会车工况等参数是影响压力波强度的关键控制因素[7]-[9]。

数值仿真技术方面,目前主要采用三维 CFD 模拟和一维特征线法两类方法。前者能够精确捕捉列车头尾流场结构和局部气动载荷分布,但受限于计算资源,通常仅适用于千米级短隧道的仿真分析;后者凭借计算效率优势,可快速完成多参数组合的隧道压力波特征规律研究,为车体强度校核、舒适性优化及隧道断面选型提供技术支撑[10][11]。王志钧团队[12]通过现场试验系统分析了 350 km/h 动车组在典型线路上穿越隧道时的压力场演变特征。

在实验模拟技术领域,缩尺动模型试验虽能再现列车运行中的空气动力学现象,但受制于几何相似、运动相似与动力相似的多重约束,难以实现完全物理模拟。值得关注的是,中国科学院力学研究所成功构建了 1:8 比例的高速列车动态模拟平台,并通过实验验证了其有效性[13]。

由此可见,国内外学者虽然对车外压力研究取得了大量进展,但对车外压力的最不利交会位置和最不利隧道领域却少有探究,本文研究了两列车交会下的车外压力最不利交会位置和最不利隧道长度,研究结果可为车外压力的影响机理提供一定参考。

## 2. 计算模型与计算方法

### 2.1. 车外压力计算模型

因为列车通过隧道,周围空气流动受限,类似于管道流动,且隧道直径远小于长度,列车也类似如此,基于这一特点,可将列车过隧道引发的空气流动看为一维流动。一般而言,采用三维流动模型模拟列车通过隧道过程的空气动力学效应,仅限于特定的计算工况。从目前所公开发表的研究成果看,由于受到计算设备的限制,还没有见到用于单列列车通过长大隧道全过程的紊流流动的模拟。与一维可压缩非定常流动模型相比,三维流动模型的灵活性较差,不宜用于多方案多工况的比较研究。

利用质量守恒、动量定理和能量守恒定理,可以建立描述控制体内流体流动的基本方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = (\kappa - 1) \rho (q - \zeta + uG) \quad (3)$$

式中,  $u$  为隧道内空气流速  $\text{m/s}$ ;  $P$  为隧道内空气压力  $\text{kPa}$ ;  $k$  为空气比热比;  $\rho$  为空气密度  $\text{kg/m}^3$ ;  $a$  为空气声速  $\text{m/s}$ ;  $F$  为空气流道横截面面积  $\text{m}^2$ ;  $G$  为空气与壁面的摩擦项;  $q$  为空气与壁面的传热项;  $\xi$  为空气与高速列车壁的摩擦功;  $t$  为时间  $\text{s}$ 。

## 2.2. 计算流程

两列车隧道中央等速交会时也为 4 个阶段, 如图 1 所示给出了两列车隧道中央等速交会时 4 个阶段列车在隧道内位置示意图, 假设列车 1 为观测列车, 列车 2 为对向列车。

- (1) 阶段 1: 列车 1 和列车 2 驶入隧道过程, 初始时刻至列车车尾端部驶至隧道入口端;
- (2) 阶段 2: 列车 1 和列车 2 车头端部在隧道中央处相遇至两列车车尾端部驶离的整个交会过程;
- (3) 阶段 3: 列车 1 和列车 2 交会完成后沿各自行驶方向驶向隧道出口端;
- (4) 阶段 4: 列车 1 列车 2 驶出隧道过程, 车头端部在隧道出口端至车尾端部驶离隧道出口端。

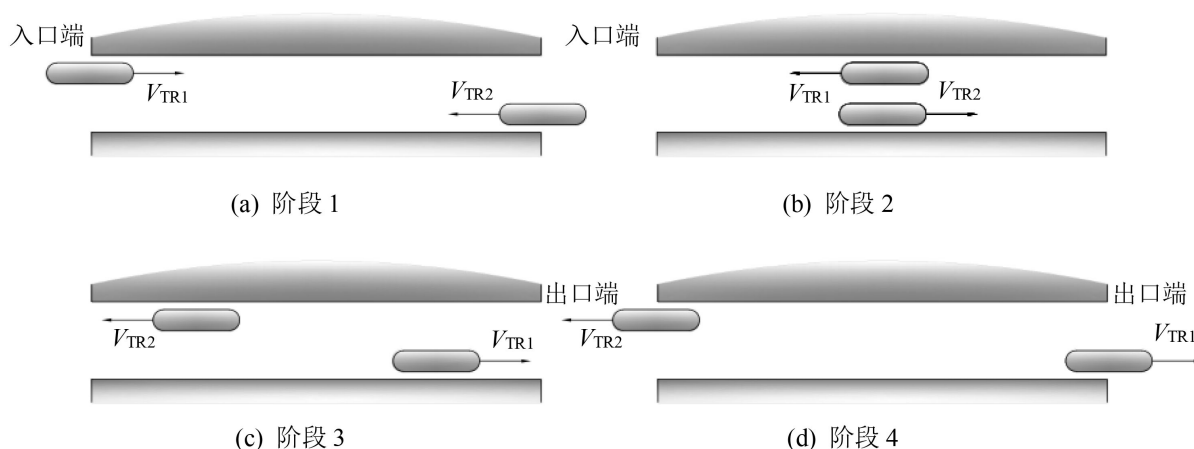


Figure 1. The different stages of the whole process of the two train tunnel center equal speed intersection

图 1. 两列车隧道中央等速交会全过程时不同阶段示意图

## 2.3. 方法验证

利用日本模型试验数据图 2 来验证文中计算车外压力方法的合理性和程序的准确性。图 2 给出了日本模型试验以  $413 \text{ km/h}$  速度得到的车外压力与本报告一维程序计算得到的车外压力变化曲线对比。

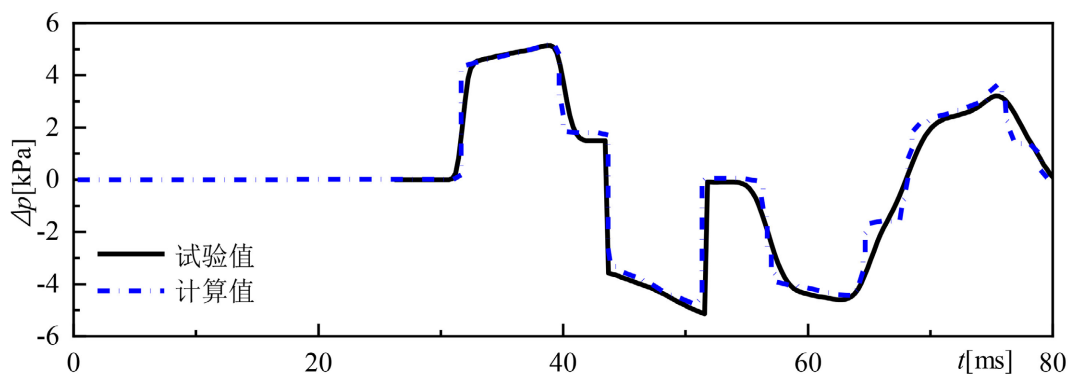


Figure 2. Comparison of the time history curve of external pressure change of a single train passing through the tunnel at a speed of  $413 \text{ km/h}$

图 2. 单列车以速度  $413 \text{ km/h}$  通过隧道车外压力变化时间历程曲线对比

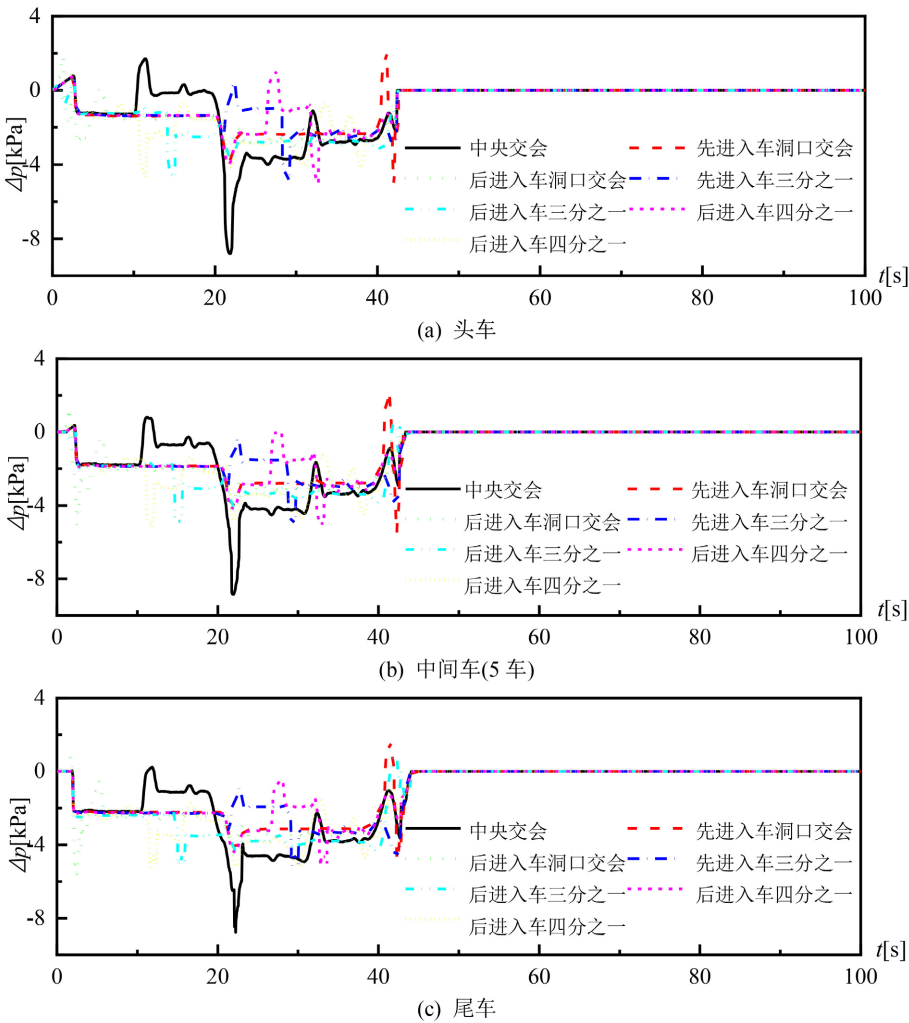
## 2.4. 计算参数

本文考虑两列车在隧道内交会，研究的隧道长度具体为：250 m、300 m、400 m、500 m、850 m、1500 m、2000 m、2700 m、2812 m、3500 m、4700 m、5600 m、6500 m、7100 m、8100 m、9200 m、12,000 m、13,000 m、14,000 m、15,000 m、16,000 m、27,885 m 及速度分别为 300 km/h、350 km/h、400 km/h 和 450 km/h 时基于 EN14067-5 中车外气动载荷的最不利隧道长度分别为 1087 m、825 m、652 m 和 531 m。

## 3. 计算结果分析

### 3.1. 不同交会位置对车外压力的影响特性

图 3 和图 4 表示两列车以 400 km/h 速度在 4700 m 和 8100 m 隧道内不同位置处交会时，两列车在隧道内的车外压力变化时间历程曲线。表 1 和表 2 给出了两列车分别以 400 km/h 和 450 km/h 速度在 856 m、2812 m、4700 m 和 8100 m 隧道内不同位置处交会的车外压力的最大正负压值和最大压力峰峰值随隧道交会位置的变化统计表。由图 3 和图 4 和表 1 和表 2 可知：



**Figure 3.** The time history curve of the external pressure change of two trains intersecting at different positions in the 4700 m tunnel at a speed of 400 km/h

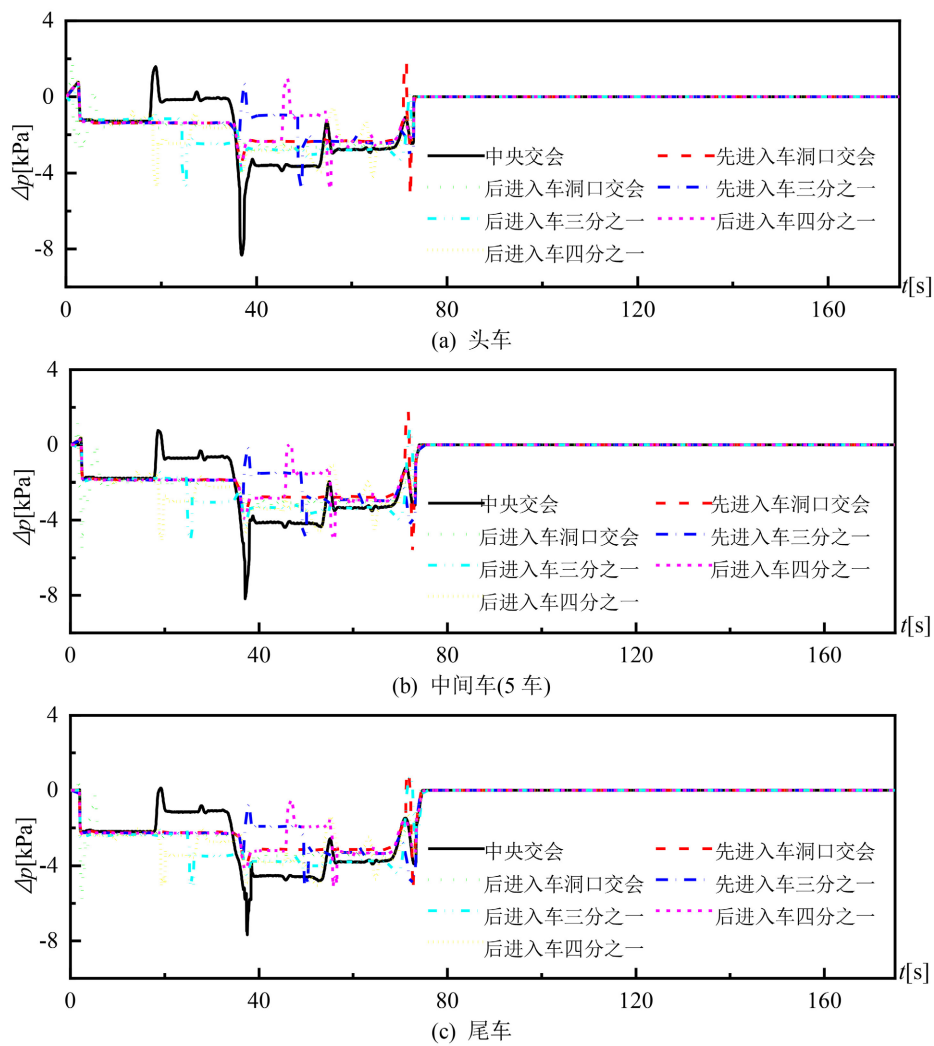
**图 3.** 两列车以 400 km/h 速度在 4700 m 隧道内不同位置处交会车外压力变化时间历程曲线

**Table 1.** Statistics of the maximum external pressure of two trains crossing at different positions in the tunnel at a speed of 400 km/h (unit: kPa)**表 1.** 两列车以 400 km/h 速度在隧道内不同位置处交会车外压力最值统计(单位: kPa)

| 序号 | 交会位置   | 隧道长度(m) | 车厢  | 先进入列车车外最大正压值 | 先进入列车车外最大负压值 | 先进入列车车外最大压力峰值 | 后进入列车车外最大正压值 | 后进入列车车外最大负压值 | 后进入列车车外最大压力峰值 |
|----|--------|---------|-----|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| 1  | 中央交会   | 856     | 头车  | 3.65         | -9.23        | 12.88         | 3.65         | -9.23        | 12.88         |
|    |        |         | 中间车 | 2.52         | -9.44        | 11.95         | 2.52         | -9.44        | 11.95         |
|    |        |         | 尾车  | 0.61         | -9.64        | 10.25         | 0.61         | -9.64        | 10.25         |
|    |        | 2812    | 头车  | 1.79         | -8.97        | 10.76         | 1.79         | -8.97        | 10.76         |
|    |        |         | 中间车 | 0.84         | -9.08        | 9.92          | 0.84         | -9.08        | 9.92          |
|    |        |         | 尾车  | 0.30         | -9.33        | 9.64          | 0.30         | -9.33        | 9.64          |
|    |        | 4700    | 头车  | 1.71         | -8.80        | 10.52         | 1.71         | -8.80        | 10.52         |
|    |        |         | 中间车 | 0.81         | -8.85        | 9.66          | 0.81         | -8.85        | 9.66          |
|    |        |         | 尾车  | 0.23         | -8.78        | 9.01          | 0.23         | -8.78        | 9.01          |
|    |        | 8100    | 头车  | 1.58         | -8.32        | 9.90          | 1.58         | -8.32        | 9.90          |
|    |        |         | 中间车 | 0.77         | -8.19        | 8.96          | 0.77         | -8.19        | 8.96          |
|    |        |         | 尾车  | 0.12         | -7.67        | 7.79          | 0.12         | -7.67        | 7.79          |
| 2  | 洞口交会   | 856     | 头车  | 1.33         | -5.06        | 6.39          | 2.28         | -5.43        | 7.71          |
|    |        |         | 中间车 | 0.93         | -4.48        | 5.42          | 0.99         | -5.19        | 6.18          |
|    |        |         | 尾车  | 0.94         | -4.76        | 5.71          | 0.54         | -5.09        | 5.63          |
|    |        | 2812    | 头车  | 1.14         | -4.82        | 5.96          | 2.12         | -4.19        | 6.31          |
|    |        |         | 中间车 | 1.49         | -4.74        | 6.23          | 1.13         | -4.53        | 5.66          |
|    |        |         | 尾车  | 1.32         | -4.52        | 5.85          | 0.70         | -4.93        | 5.63          |
|    |        | 4700    | 头车  | 2.06         | -5.06        | 7.12          | 1.87         | -3.59        | 5.46          |
|    |        |         | 中间车 | 2.21         | -5.48        | 7.70          | 1.30         | -5.05        | 6.36          |
|    |        |         | 尾车  | 1.65         | -4.85        | 6.50          | 0.85         | -5.65        | 6.50          |
|    |        | 8100    | 头车  | 1.83         | -5.20        | 7.03          | 1.83         | -3.17        | 5.00          |
|    |        |         | 中间车 | 1.79         | -5.75        | 7.54          | 1.15         | -5.52        | 6.67          |
|    |        |         | 尾车  | 0.97         | -5.29        | 6.25          | 0.64         | -5.88        | 6.52          |
| 3  | 三分之一交会 | 856     | 头车  | 0.74         | -5.16        | 5.90          | 0.77         | -4.91        | 5.68          |
|    |        |         | 中间车 | 0.35         | -5.22        | 5.56          | 0.82         | -5.29        | 6.11          |
|    |        |         | 尾车  | 0.05         | -5.18        | 5.23          | 0.76         | -5.44        | 6.20          |
|    |        | 2812    | 头车  | 0.78         | -4.91        | 5.69          | 0.54         | -4.72        | 5.26          |
|    |        |         | 中间车 | 0.36         | -5.03        | 5.39          | 0.63         | -5.14        | 5.77          |
|    |        |         | 尾车  | 0.04         | -5.14        | 5.19          | 0.97         | -5.15        | 6.11          |
|    |        | 4700    | 头车  | 0.78         | -4.89        | 5.67          | 0.63         | -4.72        | 5.35          |
|    |        |         | 中间车 | 0.36         | -4.98        | 5.34          | 0.48         | -5.07        | 5.56          |
|    |        |         | 尾车  | 0.04         | -5.14        | 5.19          | 0.85         | -5.12        | 5.97          |
|    |        | 8100    | 头车  | 0.78         | -4.84        | 5.62          | 0.79         | -4.69        | 5.48          |
|    |        |         | 中间车 | 0.36         | -4.94        | 5.30          | 0.82         | -5.03        | 5.85          |
|    |        |         | 尾车  | 0.03         | -5.12        | 5.15          | 0.77         | -5.07        | 5.84          |

续表

|   |        |      |     |      |       |      |      |       |      |
|---|--------|------|-----|------|-------|------|------|-------|------|
| 4 | 四分之一交会 | 856  | 头车  | 0.78 | -5.17 | 5.95 | 0.83 | -4.90 | 5.73 |
|   |        |      | 中间车 | 0.36 | -5.23 | 5.59 | 1.03 | -5.27 | 6.29 |
|   |        |      | 尾车  | 0.05 | -5.13 | 5.18 | 0.90 | -5.44 | 6.34 |
|   |        | 2812 | 头车  | 1.05 | -4.99 | 6.04 | 0.92 | -4.60 | 5.52 |
|   |        |      | 中间车 | 0.36 | -5.12 | 5.48 | 0.95 | -5.21 | 6.16 |
|   |        |      | 尾车  | 0.03 | -5.15 | 5.18 | 0.40 | -5.28 | 5.68 |
|   |        | 4700 | 头车  | 1.03 | -4.96 | 5.99 | 0.92 | -4.70 | 5.62 |
|   |        |      | 中间车 | 0.36 | -5.07 | 5.43 | 0.44 | -5.16 | 5.60 |
|   |        |      | 尾车  | 0.05 | -5.17 | 5.22 | 0.03 | -5.22 | 5.25 |
|   |        | 8100 | 头车  | 0.97 | -4.87 | 5.84 | 0.92 | -4.72 | 5.64 |
|   |        |      | 中间车 | 0.36 | -4.95 | 5.31 | 0.44 | -5.05 | 5.49 |
|   |        |      | 尾车  | 0.03 | -5.14 | 5.17 | 0.03 | -5.10 | 5.14 |



**Figure 4.** The time history curve of the external pressure change of two trains at different positions in the 8100 m tunnel at a speed of 400 km/h

**图 4.** 两列车以 400 km/h 速度在 8100 m 隧道内不同位置处交会车外压力变化时间历程曲线

**Table 2.** Statistics of the maximum external pressure of two trains crossing at different positions in the tunnel at 450 km/h (unit: kPa)**表 2.** 两列车以 450 km/h 速度在隧道内不同位置处交会车外压力最值统计(单位: kPa)

| 序号 | 交会位置   | 隧道长度(m) | 车厢  | 先进入列车车外最大正压值 | 先进入列车车外最大负压值 | 先进入列车车外最大压力峰峰值 | 后进入列车车外最大正压值 | 后进入列车车外最大负压值 | 后进入列车车外最大压力峰峰值 |
|----|--------|---------|-----|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| 1  | 中央交会   | 856     | 头车  | 4.64         | -11.28       | 15.92          | 4.64         | -11.28       | 15.92          |
|    |        |         | 中间车 | 2.32         | -12.04       | 14.36          | 2.32         | -12.04       | 14.36          |
|    |        |         | 尾车  | 3.11         | -12.16       | 15.27          | 3.11         | -12.16       | 15.27          |
|    |        | 2812    | 头车  | 2.26         | -7.13        | 9.39           | 2.26         | -7.13        | 9.39           |
|    |        |         | 中间车 | 1.07         | -9.29        | 10.36          | 1.07         | -9.29        | 10.36          |
|    |        |         | 尾车  | 0.17         | -10.21       | 10.38          | 0.17         | -10.21       | 10.38          |
|    |        | 4700    | 头车  | 2.13         | -6.35        | 8.48           | 2.13         | -6.35        | 8.48           |
|    |        |         | 中间车 | 1.06         | -7.21        | 8.28           | 1.06         | -7.21        | 8.28           |
|    |        |         | 尾车  | 0.06         | -8.49        | 8.55           | 0.06         | -8.49        | 8.55           |
|    |        | 8100    | 头车  | 1.91         | -5.94        | 7.85           | 1.91         | -5.94        | 7.85           |
|    |        |         | 中间车 | 0.96         | -6.73        | 7.69           | 0.96         | -6.73        | 7.69           |
|    |        |         | 尾车  | 0.06         | -7.40        | 7.45           | 0.06         | -7.40        | 7.45           |
| 2  | 洞口交会   | 856     | 头车  | 1.68         | -7.32        | 9.00           | 2.01         | -5.57        | 7.58           |
|    |        |         | 中间车 | 1.63         | -7.99        | 9.63           | 1.59         | -7.98        | 9.58           |
|    |        |         | 尾车  | 1.36         | -6.50        | 7.86           | 2.41         | -7.91        | 10.33          |
|    |        | 2812    | 头车  | 1.11         | -6.75        | 7.86           | 2.07         | -5.99        | 8.06           |
|    |        |         | 中间车 | 0.80         | -7.47        | 8.28           | 1.95         | -6.97        | 8.91           |
|    |        |         | 尾车  | 0.11         | -7.57        | 7.68           | 2.21         | -7.82        | 10.02          |
|    |        | 4700    | 头车  | 1.06         | -7.01        | 8.07           | 3.39         | -6.28        | 9.67           |
|    |        |         | 中间车 | 0.60         | -7.64        | 8.24           | 3.23         | -7.84        | 11.06          |
|    |        |         | 尾车  | 0.04         | -6.87        | 6.90           | 2.21         | -7.74        | 9.95           |
|    |        | 8100    | 头车  | 1.03         | -6.81        | 7.84           | 1.33         | -5.08        | 6.40           |
|    |        |         | 中间车 | 0.73         | -7.70        | 8.44           | 1.23         | -7.20        | 8.43           |
|    |        |         | 尾车  | 0.11         | -7.73        | 7.84           | 0.96         | -7.88        | 8.84           |
| 3  | 三分之一交会 | 856     | 头车  | 0.95         | -7.31        | 8.26           | 1.27         | -7.46        | 8.73           |
|    |        |         | 中间车 | 0.44         | -7.44        | 7.88           | 3.56         | -7.02        | 10.58          |
|    |        |         | 尾车  | 0.04         | -7.34        | 7.38           | 3.82         | -7.51        | 11.33          |
|    |        | 2812    | 头车  | 1.49         | -6.50        | 7.99           | 2.78         | -6.19        | 8.97           |
|    |        |         | 中间车 | 0.75         | -6.80        | 7.55           | 1.25         | -6.94        | 8.19           |
|    |        |         | 尾车  | 0.04         | -7.27        | 7.31           | 1.57         | -7.10        | 8.68           |
|    |        | 4700    | 头车  | 1.92         | -6.45        | 8.37           | 3.59         | -6.18        | 9.77           |
|    |        |         | 中间车 | 1.14         | -6.74        | 7.87           | 1.25         | -7.00        | 8.26           |
|    |        |         | 尾车  | 0.04         | -7.22        | 7.26           | 1.23         | -7.24        | 8.47           |
|    |        | 8100    | 头车  | 2.44         | -6.36        | 8.80           | 4.25         | -6.27        | 10.52          |
|    |        |         | 中间车 | 1.30         | -6.71        | 8.02           | 3.24         | -6.89        | 10.13          |
|    |        |         | 尾车  | 0.28         | -7.19        | 7.46           | 0.39         | -7.31        | 7.70           |

续表

|   |        |      |     |      |       |      |      |       |      |
|---|--------|------|-----|------|-------|------|------|-------|------|
| 4 | 四分之一交会 | 856  | 头车  | 1.18 | -6.99 | 8.17 | 1.29 | -5.47 | 6.76 |
|   |        |      | 中间车 | 0.90 | -7.88 | 8.78 | 1.65 | -7.82 | 9.47 |
|   |        |      | 尾车  | 1.34 | -7.07 | 8.41 | 0.33 | -7.86 | 8.19 |
|   |        | 2812 | 头车  | 1.53 | -6.25 | 7.78 | 1.43 | -6.93 | 8.36 |
|   |        |      | 中间车 | 0.47 | -6.43 | 6.90 | 1.08 | -8.29 | 9.37 |
|   |        |      | 尾车  | 0.04 | -7.18 | 7.22 | 0.04 | -9.04 | 9.08 |
|   |        | 4700 | 头车  | 1.42 | -6.43 | 7.85 | 1.22 | -6.19 | 7.41 |
|   |        |      | 中间车 | 0.47 | -6.74 | 7.20 | 0.58 | -7.08 | 7.66 |
|   |        |      | 尾车  | 0.05 | -7.25 | 7.30 | 0.07 | -7.88 | 7.95 |
|   |        | 8100 | 头车  | 0.78 | -4.84 | 5.61 | 0.79 | -4.69 | 5.48 |
|   |        |      | 中间车 | 0.36 | -4.93 | 5.29 | 0.83 | -5.03 | 5.86 |
|   |        |      | 尾车  | 0.03 | -5.12 | 5.15 | 0.77 | -5.07 | 5.85 |

其中，不同交会位置分别是中央交会、洞口交会、三分之一交会和四分之一交会；对于隧道内等速中央交会，两列车车外压力变化相同。

- (1) 对于不同交会位置而言，后进入列车车外最大正负压值和最大压力峰峰值基本大于先进入列车。
- (2) 对于不同速度来说，不同交会位置下车外压力的最大正负压值和最大压力峰峰值出现在中央交会处，故基于车外压力最值最不利交会位置为中央交会。

3.2. 隧道长度对车外压力的影响特性

图 5 表示 400 km/h 两列车在不同长度隧道中央交会时列车的头尾车和中间车车外压力的时间历程变化曲线。由图 5 可知：

(1) 列车驶入隧道过程中，头车和中间车车外观测点的压力呈线性增加，当列车全长进入隧道的瞬间，车外压力降低，当对向列车驶入隧道压力波传至观测列车时会使压力再次上升，且幅值比之前更大，尾车驶入隧道后车外压力降低，当对向列车驶入隧道压力波传至观测列车时会使压力上升，上升幅值比头车小，当列车驶出隧道后车外压力恢复至大气压水平。

(2) 两列车在不同长度隧道内中央交会时，头尾车和中间车车外压力变化规律基本相同。

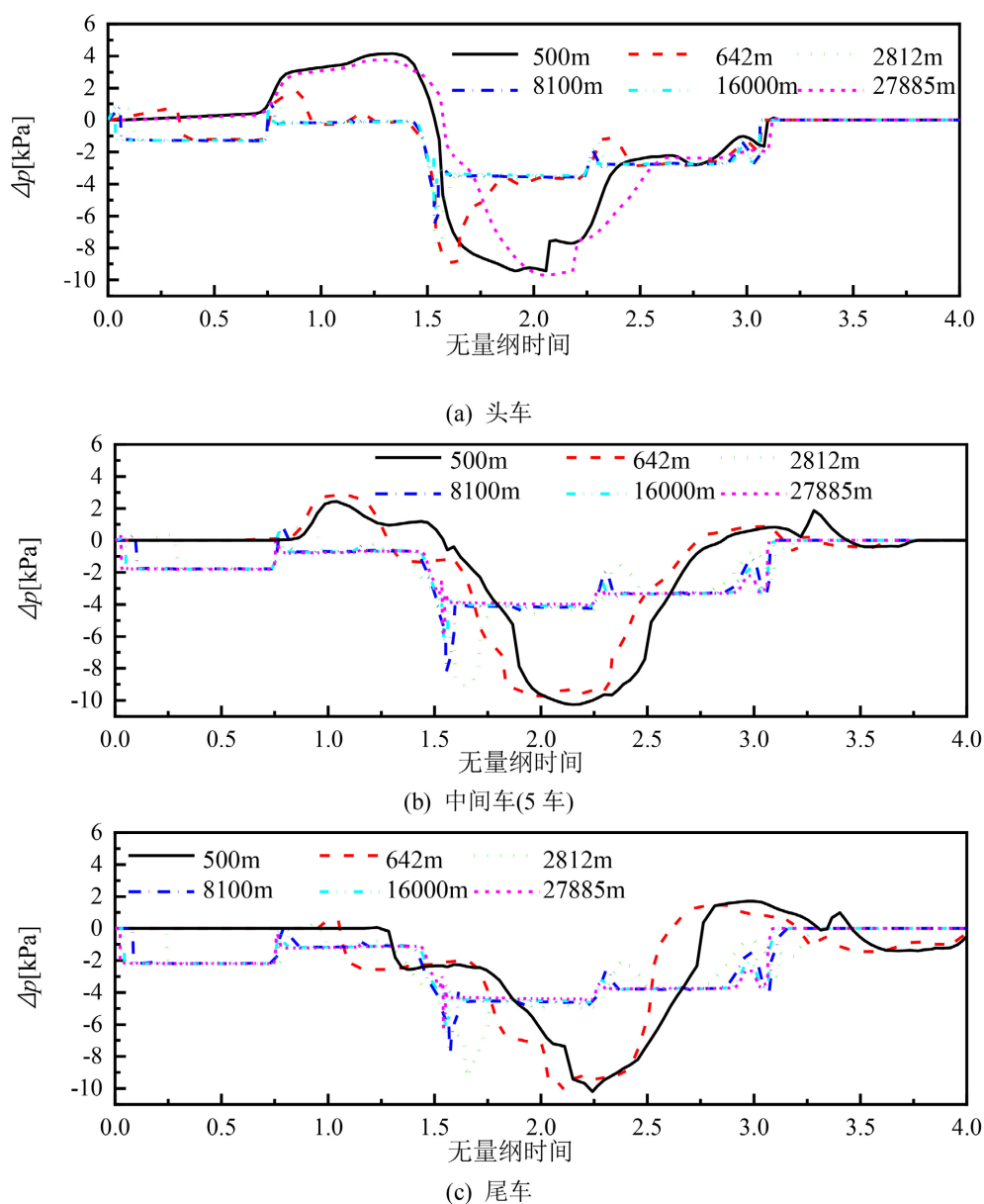
图 6~8 给出了两列车以不同速度在不同长度隧道中央交会列车的车外压力最大正负压值和最大压力峰峰值随隧道长度的变化曲线。由图 6~8 可知：

(5) 对于不同速度来说，随着隧道长度的增大，头尾车和中间车车外最大正压值曲线先上升后下降，最后趋于平稳；当速度为 300 km/h 和 350 km/h 时，头尾车和中间车车外最大负压值先下降后上升，最后趋于平稳，速度为 400 km/h 和 450 km/h 时，头尾车和中间车车外最大负压值曲线呈上升趋势；当速度为 300 km/h 和 350 km/h 时，头尾车和中间车车外最大压力峰峰值先上升后下降，最后趋于平稳，速度为 400 km/h 和 450 km/h 时，头尾车和中间车车外最大压力峰峰值曲线呈下降趋势。

(6) 速度 300 km/h 时，列车车外最大正压值和最大压力峰峰值出现在 856 m 隧道内，具体值分别为：1.92 kPa 和 7.08 kPa，车外最大负压值出现在 734 m 隧道内，具体值分别为：-5.20 kPa；速度 350 km/h 时，列车车外最大正压值和最大压力峰峰值出现在 734 m 隧道内，具体值分别为：2.88 kPa 和 10.02 kPa，

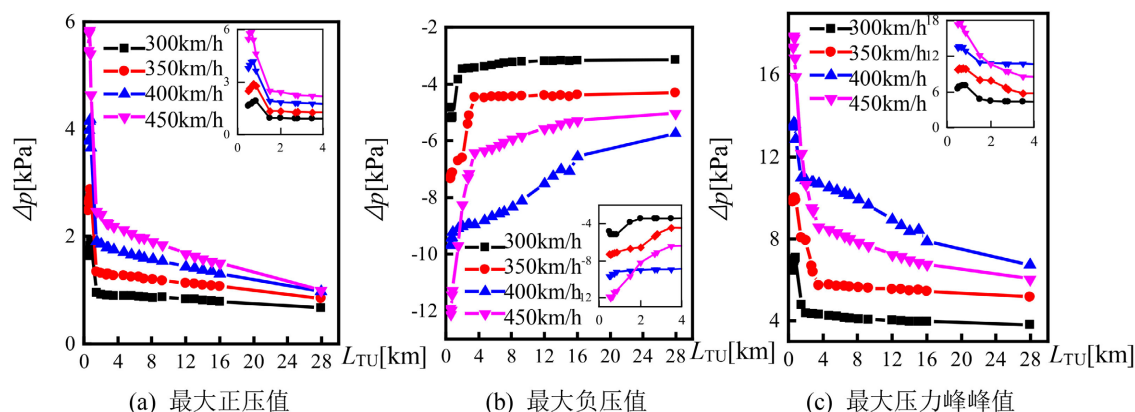
车外最大负压值出现在 571 m 隧道内, 具体值分别为:  $-7.43$  kPa; 速度  $400$  km/h 时, 列车车外最大正压值出现在 642 m 隧道内, 具体值为:  $4.15$  kPa, 车外最大负压值和最大压力峰峰值出现在 571 m 隧道内, 具体值分别为:  $-10.32$  kPa 和  $13.66$  kPa; 速度  $450$  km/h 时, 列车车外最大正压值出现在 642 m 隧道内, 具体值为:  $5.85$  kPa, 车外最大负压值出现在 500 m 隧道内, 具体值为:  $-13.62$  kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 571 m 隧道内, 具体值为:  $17.90$  kPa。

(7) 综上所述, 基于车外压力最不利隧道长度出现在 571 m 隧道左右。以尾车为例, 相比于隧道长度 642 m、734 m、856 m, 车外压力最大负压值和最大压力峰峰值在隧道长度 571 m 处分别增大 2.28%、5.20%、7.05% 和 3.45%、11.03%、16.88%。



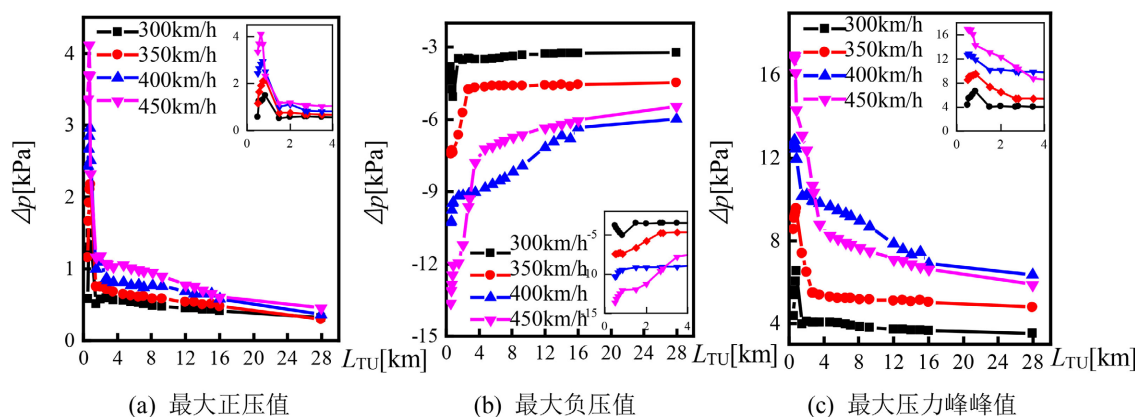
**Figure 5.** Time history curve of external pressure change of two trains at  $400$  km/h in the central intersection of tunnels of different lengths

**图 5.** 两列车以  $400$  km/h 速度在不同长度隧道中央交会时列车车外压力变化时间历程曲线



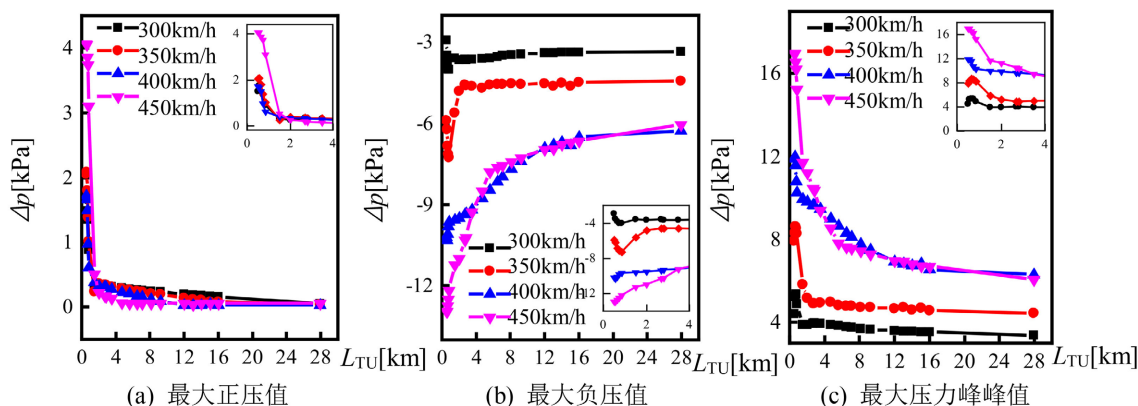
**Figure 6.** The curve of the maximum external pressure of the head car when two trains cross the central tunnel of different length at different speeds

**图 6.** 两列车以不同速度在不同长度隧道中央交会时头车车外压力最大值曲线



**Figure 7.** The maximum external pressure curve of two trains at different speeds in tunnels of different lengths

**图 7.** 两列车以不同速度在不同长度隧道中央交会时中间车车外压力最大值曲线



**Figure 8.** The curve of the maximum external pressure of the rear car when two trains cross the central tunnel of different length at different speeds

**图 8.** 两列车以不同速度在不同长度隧道中央交会时尾车车外压力最大值曲线

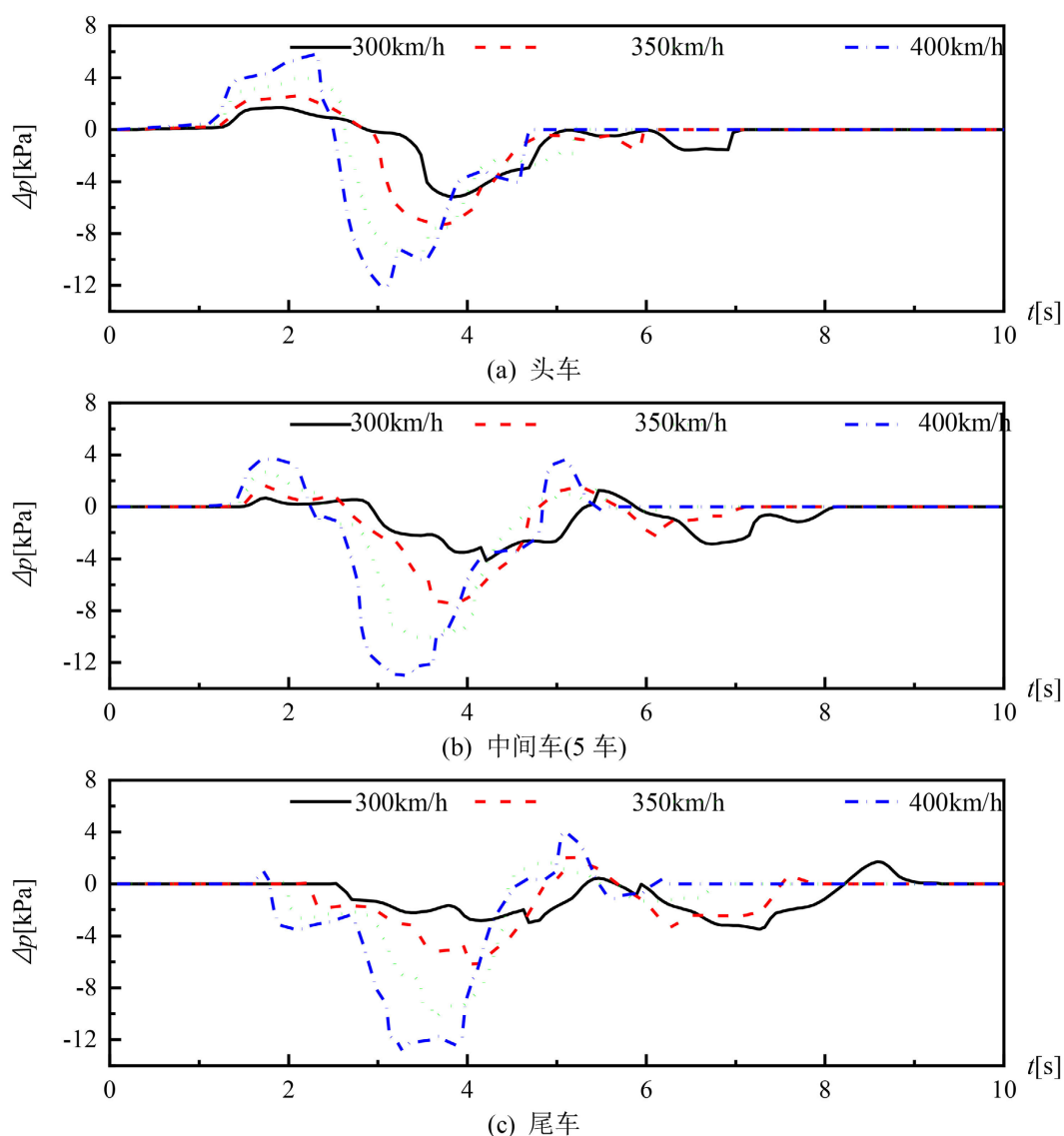
### 3.3. 速度对车外压力的影响特性

图 9 表示两列车以不同速度在 571 m 隧道内中央交会时，车外压力变化时间历程曲线。其中，隧道

净空面积为  $100 \text{ m}^2$ ，速度分别为  $300 \text{ km/h}$ 、 $350 \text{ km/h}$ 、 $400 \text{ km/h}$  和  $450 \text{ km/h}$ ， $571 \text{ m}$  为本文得出最不利隧道长度。由图 9 可知：

(1) 两列车交会前后期间，列车车外压力波动可表述为单车压力波，其特性是压缩波、膨胀波传播至车外观测点时形成较大压力波动，对向列车进入隧道后，特别是在列车交会前后，车外测点的压力变化比单列车通过隧道时更加剧烈，对向列车进入隧道时产生的压缩波传播至车外观测点时使得观测点的压力急剧上升。随对向列车进入隧道的长度逐渐增加，压力也在逐渐增加。

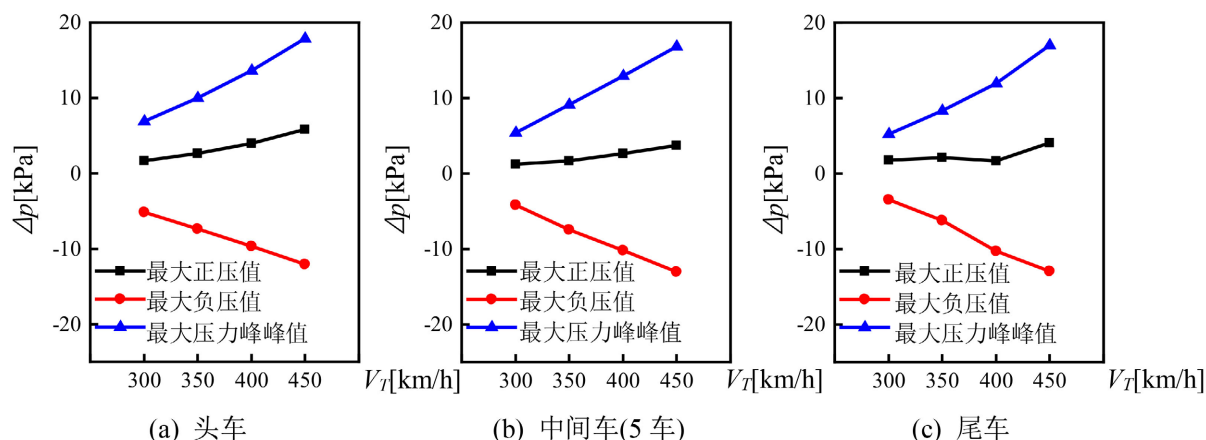
(2) 当列车以不同速度通过隧道时，车外压力变化规律基本一致，且速度越快车外压力最大正压值、最大负压值和最大压力峰值越大，同时最大负压值出现的时刻也越早。



**Figure 9.** Time history curve of external pressure change of two trains at different speeds in the tunnel

**图 9.** 两列车以不同速度隧道内中央交会车外压力变化时间历程曲线

图 10 给出了两列车以不同速度在  $571 \text{ m}$  隧道中央交会列车的车外压力最大正负压值和最大压力峰值随隧道长度的变化曲线。由图 10 可知：



**Figure 10.** The maximum external pressure curve of two trains crossing the tunnel at different speeds

**图 10.** 两列车以不同速度隧道内中央交会车外压力峰值曲线

(1) 两列车以速度 400 km/h 在隧道内中央交会时, 头车车外压力最大正压值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 136.09%和 52.29%, 比速度为 450 km/h 减小了 45.36%; 头车车外压力最大负压值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 87.04%和 31.74%, 比速度为 450 km/h 减小了 25.23%; 头车车外压力最大压力峰峰值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 99.13%和 37.15%, 比速度为 450 km/h 减小了 31.03%。

(2) 中间车车外压力最大正压值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 111.90%和 60.84%, 比速度为 450 km/h 减小了 38.58%; 中间车车外压力最大负压值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 146.62%和 37.42%, 比速度为 450 km/h 减小了 28.11%; 中间车车外压力最大压力峰峰值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 138.52%和 41.69%, 比速度为 450 km/h 减小了 30.36%。

(3) 尾车车外压力最大正压值比速度为 300 km/h、350 km/h 和 450 km/h 分别减小了 4.22%、25.30%和 144.58%; 尾车车外压力最大负压值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 194.86%和 65.65%, 比速度为 450 km/h 减小了 25.29%; 尾车车外压力最大压力峰峰值比速度为 300 km/h 和 350 km/h 分别增大了 129.50%和 44.16%, 比速度为 450 km/h 减小了 41.82%。

#### 4. 结论

本文研究了基于一维流动模型特征线法, 采用隧道净空面积为 100 m<sup>2</sup>、列车速度为 300 km/h、350 km/h、400 km/h 和 450 km/h, 分析了两列车在不同长度隧道、速度和交会位置下的车外压力变化特征, 具体结论如下:

(1) 两列车在隧道中央交会时, 车外压力的最大正负压值和最大压力峰峰值达到最大, 表明中央交会是最不利的交会位置。

(2) 基于车外压力的最不利隧道长度出现在 571 m 左右。相比于其他隧道长度, 车外压力在 571 m 隧道内的最大负压值和最大压力峰峰值显著增大。

(3) 随着列车速度的增加, 车外压力的最大正压值、最大负压值和最大压力峰峰值均显著增大, 且最大负压值出现的时刻提前。

(4) 列车驶入隧道时, 车外压力呈线性增加, 列车全长进入隧道后压力降低, 对向列车进入隧道时压力再次上升, 且幅值更大。列车驶出隧道后, 车外压力恢复至大气压水平。

## 参考文献

- [1] 小沉智. ト>ネ 儿出口微氮压波の研究[Z]. 铁道技術研究報告, 1979.
- [2] Gawthorpe, R. (2000) Pressure Effects in Railway Tunnels. *Rail International*, No. 4, 31.
- [3] Niu, J., Sui, Y., Yu, Q., Cao, X. and Yuan, Y. (2020) Aerodynamics of Railway Train/Tunnel System: A Review of Recent Research. *Energy and Built Environment*, **1**, 351-375. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.03.003>
- [4] UIC 660 (2002) Measures to Ensure the Technical Compatibility of High-Speed Trains.
- [5] UIC 779-II (2005) Determination of Railway Tunnel Cross-Sectional Areas on the Basis of Aerodynamic Considerations.
- [6] EN14067-5 (2006) Railway Applications-Aerodynamics-Part 5: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels.
- [7] 舒信伟, 谷传纲, 梁习锋, 等. 高速磁浮列车气动阻力性能数值模拟与参数化评估[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 6-10.
- [8] 马伟斌, 张千里, 刘艳青. 中国高速铁路隧道气动效应研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(4): 25-32.
- [9] 山本彬也. 列車とトンネルの空気力学[Z]. 鉄道技術研究報告, 1983.
- [10] Mei, Y. (2013) A Generalized Numerical Simulation Method for Pressure Waves Generated by High-Speed Trains Passing through Tunnels. *Advances in Structural Engineering*, **16**, 1427-1436. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.8.1427>
- [11] 刘长青, 王雷. 400 km/h 跨国互联互通高速动车组[J]. 机车电传动, 2020(2): 1-6.
- [12] 王志钧, 李艳, 魏康, 等. 400 km/h 动车组车体压力载荷隧道参数影响特征研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(5): 46-51+67.
- [13] Yang, Q., Song, J. and Yang, G. (2016) A Moving Model Rig with a Scale Ratio of 1/8 for High Speed Train Aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **152**, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.002>