

山区高速列车通过大坡度长大隧道 车外压力波动影响

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17日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年3月26日

摘要

随着我国西部山区高速铁路的快速发展, 复杂地理环境下高速列车通过大坡度、高海拔特长隧道引发的车外压力波动问题日益凸显。此类压力波动不仅影响乘客舒适性, 还可能危及车体结构安全与列车运行效率。既有研究多聚焦于平原地区标准隧道工况, 对高海拔、大坡度与特长隧道耦合作用下的压力波动特性, 尤其是双列车交会时的动态交互机制研究尚存不足。本文以时速400 km/h高速列车为研究对象, 基于一维特征线法构建车外压力计算模型, 系统分析海拔、坡度及隧道长度对两列车交会压力波动的影响规律, 并揭示最不利隧道长度的确定机制。结果表明: 随着坡度增大, 车外压力波动幅值显著增强。短隧道中压力波动呈现剧烈瞬态特征; 长隧道中压力波动趋于稳态, 但负压值随隧道延长持续累积。通过线性拟合发现, 车外压力峰峰值与坡度呈正相关, 与海拔呈负相关, 并建立多参数耦合公式, 为工程设计提供量化依据。研究成果揭示了复杂线形隧道内压力波动的生成与演化机制, 提出了最不利隧道长度的判定标准, 可为山区高铁隧道断面选型、车体气密性优化及运营安全评估提供理论支撑。

关键词

时速400公里, 两列车交会, 车外压力波动, 长大坡度, 高海拔

The High-Speed Train in Mountain Area Is Affected by the Fluctuation of the Outside Pressure of the Vehicle through the Long Tunnel with Large Slope

Zedong Zhang

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Mar. 26th, 2025

Abstract

With the rapid development of high-speed railway in western mountainous areas of China, the problem of external pressure fluctuation caused by high-speed train passing through large slope and high altitude long tunnel in complex geographical environment has become increasingly prominent. This kind of pressure fluctuation not only affects the passenger comfort, but also endangers the safety of the train structure and the efficiency of the train operation. Most of the existing studies focus on the standard tunnel working conditions in plain area, but there are still insufficient studies on the pressure fluctuation characteristics under the coupling effect of high altitude, large slope and long tunnel, especially on the dynamic interaction mechanism of double-train intersection. In this paper, a calculation model of the external pressure of a 400 km/h high-speed train is established based on one-dimensional characteristic line method, and the influence of altitude, slope and tunnel length on the pressure fluctuation of the two trains is systematically analyzed, and the mechanism of determining the most unfavorable tunnel length is revealed. The results show that the fluctuation amplitude of outside pressure increases significantly with the increase of slope. The pressure fluctuation in the short tunnel presents a sharp transient characteristic. In the long tunnel, the pressure fluctuation tends to steady state, but the negative pressure accumulates continuously with the extension of the tunnel. Through linear fitting, it is found that the peak value of external pressure is positively correlated with slope and negatively correlated with altitude. A multi-parameter coupling formula is established to provide quantitative basis for engineering design. The research results reveal the generation and evolution mechanism of pressure fluctuation in complex linear tunnels, and propose the criterion for determining the most unfavorable tunnel length, which can provide theoretical support for section selection, vehicle body air tightness optimization and operation safety evaluation of high-speed railway tunnels in mountainous areas.

Keywords

400 km/h, Two Trains Coming Together, Fluctuating Outside Pressure, Long Slope, High Altitude

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

高速列车通过隧道引发的内外压力波动效应是轨道交通空气动力学研究的核心问题之一，其直接影响乘客舒适性、车体结构安全及列车运行能耗。现有研究多聚焦于平原地区标准隧道工况，针对高海拔山区复杂线形(大坡度、特长隧道)环境下，尤其是两列车交会工况的车外压力波动特性研究尚存不足，而此类问题在我国西部山区高速铁路建设中尤为突出。

近年来，国内外学者通过实车试验、模型试验及数值模拟等手段，在隧道压力波生成机制与影响因素方面取得了显著进展[1]。早期研究以日本[2]及欧美学者[3]-[6]的实车测试为主，揭示了压力波传播的基本规律；我国自20世纪90年代起，铁科院、西南交大等单位在秦沈、大西等高铁线开展了系列实车试验[7]，为后续研究积累了宝贵数据。值得注意的是，既有试验受线路条件限制，难以系统研究海拔梯度与坡度耦合作用下的压力波演化规律。

数值模拟技术因其经济性和灵活性，逐渐成为该领域的重要研究手段。当前主流方法包括三维CFD仿真与一维特征线法：前者虽能精细捕捉局部流场特征[8]，但计算资源消耗巨大，难以应用于长大隧道

全工况分析；后者基于一维可压缩非定常流动模型，在计算效率与多参数耦合分析方面优势显著[9][10]。例如，万有财等[11]通过一维模拟发现隧道坡度与车外压力峰峰值呈正相关；张亮等[12]进一步揭示了高原环境下压力最值与隧道长度的近似线性关系。然而，既有研究多局限于单列车工况，对双列车在复杂线形隧道内交会的压力动态交互机制尚未深入探讨。

本文以时速 400 km/h 高速列车为研究对象，基于一维特征线法构建车外压力计算模型，系统分析高海拔、大坡度及隧道耦合作用下两列车交会的压力波动特性，重点揭示最不利隧道长度的确定规律。研究成果可为山区高速铁路隧道断面选型、车体气密性优化及运营安全评估提供理论支撑。

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：

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

式中， u 为隧道内空气流速 m/s； P 为隧道内空气压力 kPa； k 为空气比热比； ρ 为空气密度 kg/m³； a 为空气声速 m/s； F 为空气流道横截面面积 m²； G 为空气与壁面的摩擦项； q 为空气与壁面的传热项； ξ 为空气与高速列车壁的摩擦功； t 为时间 s。

2.2. 方法验证

利用日本模型试验数据图 1 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 1 给出了日本模型试验以 413 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。

2.3. 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。隧道坡度为：10‰、15‰、20‰、25‰ 和 30‰。隧道海拔为：500 m、800 m、1000 m、1200 m、1600 m 和 2100 m。

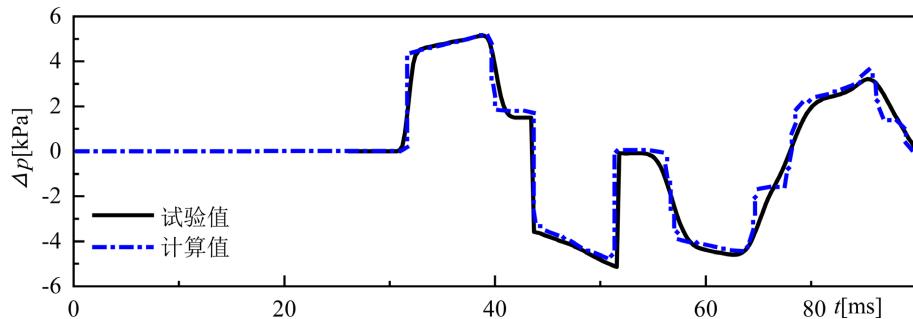


Figure 1. Comparison of the time history curve of external pressure change of a single train passing through the tunnel at a speed of 413 km/h

图 1. 单列车以速度 413 km/h 通过隧道车外压力变化时间历程曲线对比

3. 计算结果分析

3.1. 坡度对两列车在不同长度隧道中央交会的影响特性

本小节在隧道为 1600 m 海拔高度的情况下，研究隧道入口坡度分别为 10‰、15‰、20‰、25‰ 和 30‰ 上坡时，两列车隧道中央等速交会时车外压力波影响特性。图 2 表示了两列车以速度 400 km/h

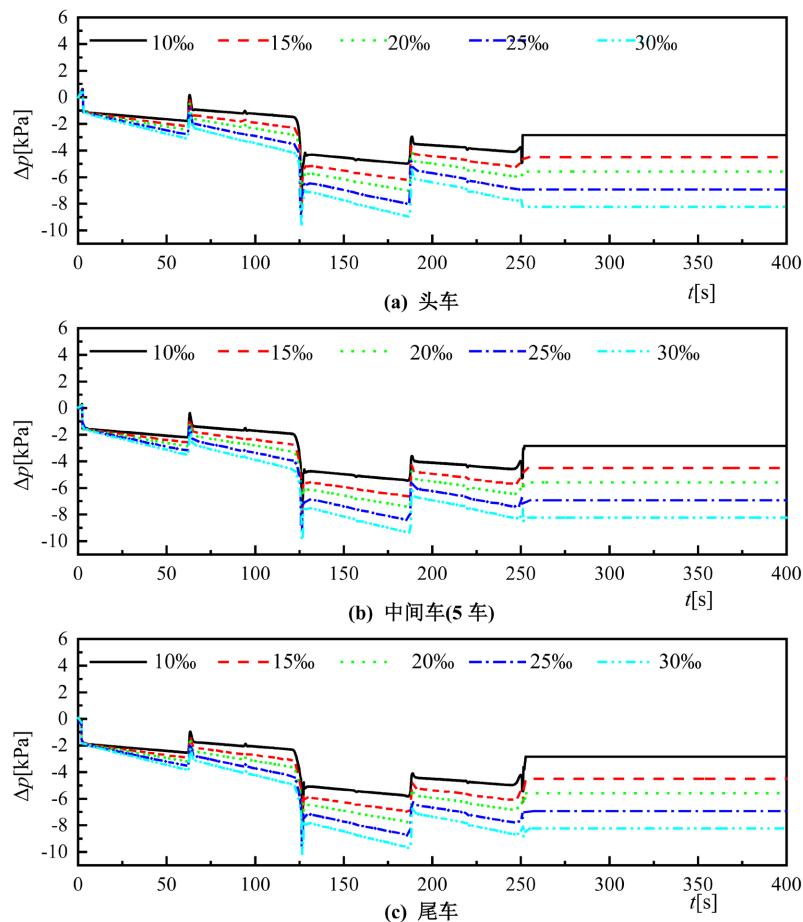


Figure 2. The time history curve of the external pressure of the two trains intersected centrally at different slopes of 27,885m at 400 km/h

图 2. 两列车以 400 km/h 在隧道 27,885 m 不同坡度下中央交会车外压力时间历程曲线

在不同坡度的 27,885 m 隧道中央等速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 m^2 。由图 2 可知:

- 1) 两列车在隧道入口坡度为 10‰、15‰、20‰、25‰ 和 30‰ 隧道中央等速交会时车外压力变化规律基本一致, 但由于列车为上坡状态, 随着海拔高度的增加, 大气压力逐渐下降, 导致隧道入口坡度越大, 车外压力下降幅度越大, 即变化率越大, 列车驶出隧道后车外压力稳定值下降。
- 2) 通过不同坡度的隧道时头尾车和中间车车外压力随着坡度的增大而增大。

图 3 给出了两列车以 400 km/h 速度在不同坡度下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。表 1 表示两列车以 400 km/h 速度在不同坡度下不同长度隧道中央交会时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统计表。由图 3 和表 1 可知:

- 1) 对于不同坡度来说, 随着隧道长度的增大, 头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, 尾车车外最大正压值曲线呈下降趋势; 当坡度为 10‰ 时, 头尾车和中间车车外最大负压值呈上升趋势, 当坡度为 15‰ 和 20‰ 时, 头尾车和中间车车外最大负压值曲线先升高后下降, 在隧道长度 27,885 m 时开始下降; 当坡度为 25‰ 和 30‰ 时, 头尾车和中间车车外最大负压值曲线先升高后下降, 在隧道长度 1500 m 时开始下降; 对于不同坡度, 头车和中间车车外最大压力峰峰值先上升后下降, 再上升, 尾车车外最大压力峰峰值曲线先下降后上升, 隧道长度 27,885 m 时, 尾车车外最大压力峰峰值达到最大。
- 2) 不同坡度下, 列车车外最大正压值出现在 642 m 隧道内, 车外最大负压值出现在 500 m 隧道内, 车外最大压力峰峰值出现在 571 m 隧道内。
- 3) 随着坡度的增加, 同一隧道头尾车和中间车车外压力最大负压值和最大压力峰峰值随坡度的增大而增大。

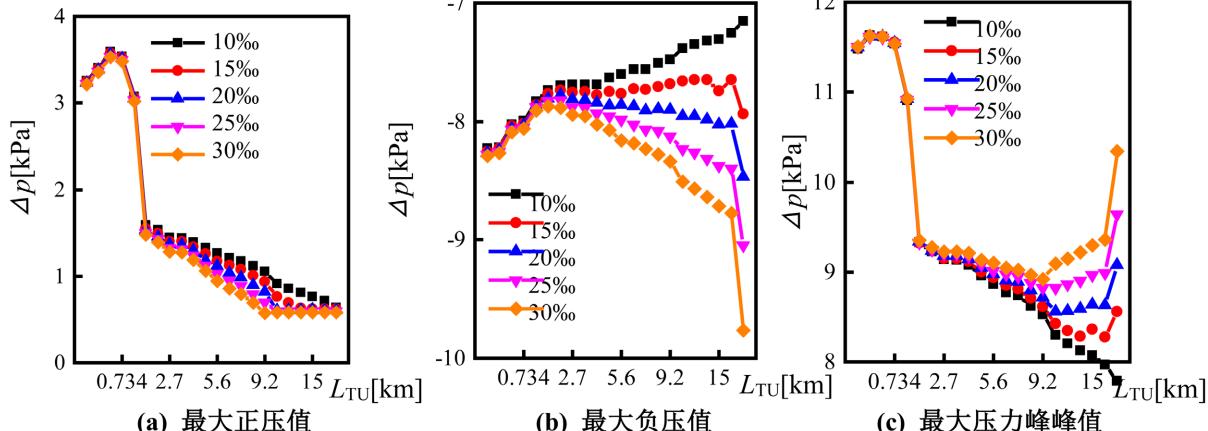


Figure 3. The maximum external pressure curve of two trains at 400 km/h in a tunnel of different slope and length
图 3. 两列车以 400 km/h 在不同坡度不同长度隧道中央交会时头车车外压力最值曲线

Table 1. Maximum external pressure (kPa) of two trains running at the central intersection of tunnels of different incline and length at 400 km/h

表 1. 两列车以 400 km/h 在不同坡度不同长度隧道中央交会头车车外压力最值统计(kPa)

序号	隧道长度(m)	坡度‰	最大正压值	最大负压值	最大压力峰峰值
1	500	10	3.26	-8.23	11.48
		15	3.25	-8.25	11.50
		20	3.23	-8.26	11.50

续表

		25	3.22	-8.28	11.50
		30	3.21	-8.29	11.50
		10	3.40	-8.22	11.63
		15	3.39	-8.23	11.62
2	571	20	3.38	-8.24	11.62
		25	3.37	-8.25	11.62
		30	3.35	-8.27	11.62
		10	3.59	-8.02	11.62
		15	3.58	-8.04	11.62
3	642	20	3.56	-8.06	11.62
		25	3.54	-8.07	11.61
		30	3.53	-8.09	11.61
		10	3.54	-8.00	11.54
		15	3.53	-8.02	11.55
4	734	20	3.51	-8.03	11.54
		25	3.50	-8.05	11.54
		30	3.48	-8.06	11.54
		10	3.07	-7.83	10.90
		15	3.06	-7.86	10.92
5	856	20	3.05	-7.88	10.93
		25	3.04	-7.88	10.91
		30	3.02	-7.91	10.93
		10	1.59	-7.74	9.33
		15	1.55	-7.77	9.32
6	1500	20	1.53	-7.81	9.34
		25	1.50	-7.83	9.33
		30	1.48	-7.87	9.35
		10	1.53	-7.70	9.23
		15	1.49	-7.74	9.23
7	2000	20	1.46	-7.78	9.24
		25	1.43	-7.82	9.25
		30	1.39	-7.88	9.28
		10	1.45	-7.69	9.14
		15	1.40	-7.75	9.15
8	2700	20	1.37	-7.81	9.18
		25	1.33	-7.88	9.20
		30	1.28	-7.94	9.23

续表

		10	1.44	-7.69	9.13
		15	1.40	-7.75	9.15
9	2812	20	1.36	-7.82	9.18
		25	1.32	-7.89	9.20
		30	1.27	-7.95	9.23
		10	1.39	-7.69	9.08
10	3500	15	1.34	-7.78	9.12
		20	1.30	-7.85	9.14
		25	1.24	-7.93	9.18
		30	1.18	-8.03	9.21
11	4700	10	1.33	-7.63	8.96
		15	1.26	-7.75	9.00
		20	1.18	-7.87	9.05
		25	1.13	-7.96	9.08
12	5600	30	1.06	-8.07	9.13
		10	1.26	-7.60	8.87
		15	1.17	-7.76	8.94
		20	1.11	-7.86	8.97
13	6500	25	1.03	-7.98	9.01
		30	0.94	-8.16	9.10
		10	1.21	-7.56	8.77
		15	1.12	-7.73	8.85
14	7100	20	1.03	-7.87	8.91
		25	0.95	-8.03	8.98
		30	0.86	-8.19	9.05
		10	1.17	-7.56	8.74
15	8100	15	1.08	-7.73	8.81
		20	0.98	-7.91	8.89
		25	0.89	-8.07	8.95
		30	0.79	-8.23	9.02
16	9200	10	1.11	-7.51	8.62
		15	1.01	-7.71	8.71
		20	0.90	-7.90	8.79
		25	0.80	-8.08	8.88
		30	0.69	-8.28	8.97
		10	1.05	-7.48	8.53

续表

		15	0.94	-7.68	8.62
		20	0.82	-7.90	8.72
		25	0.70	-8.13	8.82
		30	0.58	-8.34	8.92
17	12,000	10	0.91	-7.38	8.30
		15	0.76	-7.66	8.42
		20	0.61	-7.95	8.56
		25	0.59	-8.23	8.83
		30	0.58	-8.51	9.09
18	13,000	10	0.86	-7.35	8.21
		15	0.69	-7.65	8.34
		20	0.61	-7.96	8.57
		25	0.60	-8.26	8.86
		30	0.58	-8.57	9.15
19	14,000	10	0.81	-7.32	8.13
		15	0.63	-7.65	8.28
		20	0.61	-7.98	8.59
		25	0.59	-8.31	8.91
		30	0.58	-8.64	9.22
20	15,000	10	0.76	-7.31	8.07
		15	0.62	-7.74	8.36
		20	0.61	-8.03	8.64
		25	0.59	-8.37	8.97
		30	0.58	-8.72	9.30
21	16,000	10	0.71	-7.26	7.97
		15	0.62	-7.65	8.27
		20	0.61	-8.02	8.63
		25	0.59	-8.39	8.99
		30	0.58	-8.77	9.36
22	27,885	10	0.63	-7.15	7.79
		15	0.62	-7.94	8.56
		20	0.61	-8.47	9.07
		25	0.60	-9.05	9.64
		30	0.58	-9.77	10.34

3.2. 海拔对两列车在不同长度隧道中央交会的影响特性

本小节在隧道为 25‰坡度的情况下，研究隧道入口海拔高度分别为 500 m、800 m、1000 m、1200 m、

1600 m 和 2100 m 时，两列车隧道中央等速交会时车外压力波影响特性。

图 4 表示了两列车以速度 400 km/h 在不同海拔的 27,885 m 隧道中央等速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 m²。由图 4 可知：

(1) 两列车在隧道中央等速交会时车外压力波动频率比单列车通过隧道时剧烈，在不同海拔下 27,885 m 隧道中央等速交会时，车外压力变化规律基本一致，此规律与单列车相同，头尾车和中间车车外压力波动较小。

(2) 两列车通过不同海拔的隧道时头尾车和中间车车外压力随着海拔的升高而减小，且随着海拔的增加车外压力波动幅值逐渐减小，这是因为海拔越高，空气密度越低，压力下降，直至列车驶出隧道车外压力恢复至大气压水平。

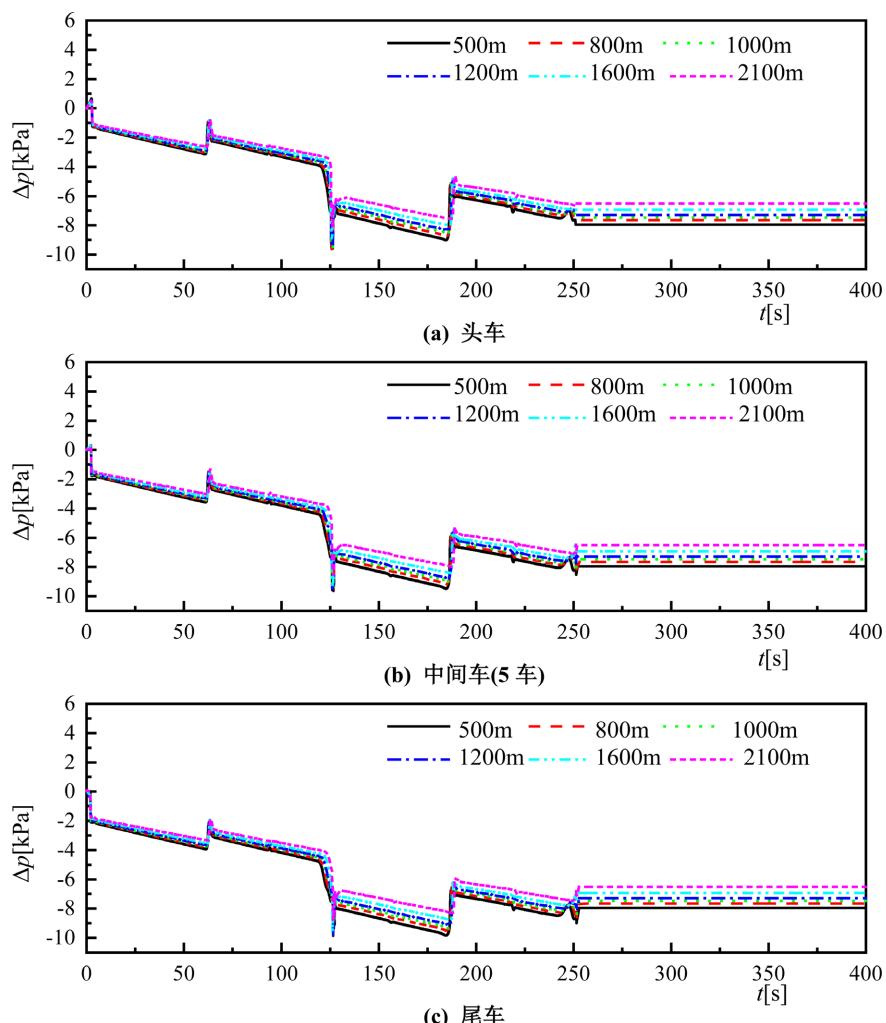


Figure 4. The time history curve of the external pressure of the two trains crossing the tunnel at different altitudes of 27,885m at 400 km/h

图 4. 两列车以 400 km/h 在隧道 27,885 m 不同海拔下中央交会车外压力时间历程曲线

图 5 给出了两列车以 400 km/h 速度在不同海拔下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。表 2 表示两列车以 400 km/h 速度在不同海拔下不同长度隧道中央交会时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统计表。由图 5 和表 2 可知：

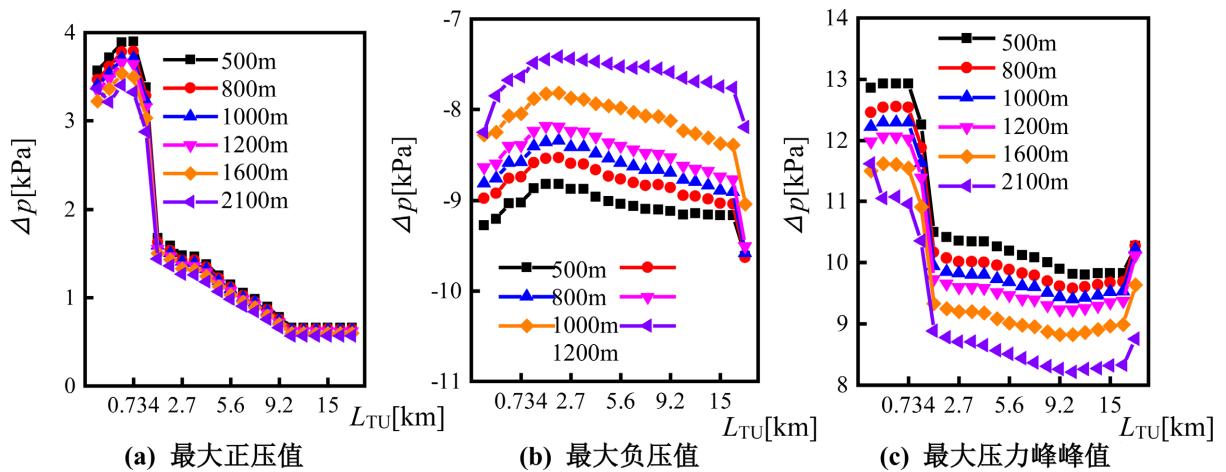


Figure 5. The maximum external pressure curve of the two trains at 400 km/h in the tunnel of different altitudes and different lengths

图 5. 两列车以 400 km/h 在不同海拔不同长度隧道中央交会时头车车外压力最值曲线

Table 2. Maximum external pressure (kPa) of two trains at 400 km/h in tunnels of different altitudes and different lengths
表 2. 两列车以 400 km/h 在不同海拔不同长度隧道中央交会时头车车外压力最值统计(kPa)

序号	隧道长度(m)	海拔(m)	最大正压值	最大负压值	最大压力峰峰值
1	500	500	3.57	-9.28	12.85
		800	3.47	-8.98	12.45
		1000	3.40	-8.82	12.22
		1200	3.35	-8.63	11.98
		1600	3.22	-8.28	11.50
		2100	3.37	-8.25	11.62
2	571	500	3.71	-9.21	12.92
		800	3.62	-8.93	12.54
		1000	3.54	-8.76	12.29
		1200	3.48	-8.59	12.07
		1600	3.37	-8.25	11.62
		2100	3.21	-7.85	11.06
3	642	500	3.89	-9.04	12.93
		800	3.78	-8.76	12.55
		1000	3.71	-8.59	12.30
		1200	3.66	-8.40	12.06
		1600	3.54	-8.07	11.61
		2100	3.40	-7.68	11.08
4	734	500	3.90	-9.03	12.92
		800	3.79	-8.74	12.53
		1000	3.71	-8.58	12.29

续表

		1200	3.64	-8.39	12.03
		1600	3.50	-8.05	11.54
		2100	3.32	-7.63	10.96
		500	3.38	-8.87	12.25
		800	3.29	-8.58	11.87
5	856	1000	3.22	-8.41	11.62
		1200	3.16	-8.23	11.39
		1600	3.04	-7.88	10.91
		2100	2.88	-7.48	10.36
		500	1.67	-8.83	10.50
		800	1.62	-8.54	10.17
6	1500	1000	1.59	-8.36	9.94
		1200	1.55	-8.18	9.73
		1600	1.50	-7.83	9.33
		2100	1.44	-7.45	8.89
		500	1.59	-8.83	10.41
		800	1.54	-8.53	10.07
7	2000	1000	1.50	-8.35	9.85
		1200	1.47	-8.19	9.66
		1600	1.43	-7.82	9.25
		2100	1.36	-7.42	8.78
		500	1.47	-8.88	10.36
		800	1.43	-8.59	10.02
8	2700	1000	1.41	-8.42	9.82
		1200	1.37	-8.24	9.60
		1600	1.33	-7.88	9.20
		2100	1.26	-7.44	8.70
		500	1.46	-8.88	10.34
		800	1.42	-8.60	10.02
9	2812	1000	1.39	-8.41	9.80
		1200	1.36	-8.24	9.60
		1600	1.32	-7.89	9.20
		2100	1.26	-7.45	8.71
		500	1.38	-8.96	10.34
10	3500	800	1.34	-8.67	10.01
		1000	1.32	-8.48	9.80

续表

		1200	1.29	-8.30	9.59
		1600	1.24	-7.93	9.18
		2100	1.18	-7.47	8.65
11	4700	500	1.25	-9.01	10.26
		800	1.22	-8.74	9.95
		1000	1.19	-8.54	9.73
		1200	1.16	-8.36	9.52
		1600	1.13	-7.96	9.08
		2100	1.07	-7.49	8.56
12	5600	500	1.15	-9.04	10.19
		800	1.11	-8.77	9.88
		1000	1.09	-8.59	9.68
		1200	1.07	-8.40	9.48
		1600	1.03	-7.98	9.01
		2100	0.98	-7.53	8.51
13	6500	500	1.05	-9.07	10.12
		800	1.02	-8.81	9.82
		1000	1.00	-8.62	9.62
		1200	0.98	-8.43	9.42
		1600	0.95	-8.03	8.98
		2100	0.90	-7.54	8.44
14	7100	500	0.99	-9.10	10.09
		800	0.95	-8.84	9.79
		1000	0.94	-8.67	9.61
		1200	0.92	-8.48	9.40
		1600	0.89	-8.07	8.95
		2100	0.84	-7.53	8.37
15	8100	500	0.90	-9.10	10.00
		800	0.86	-8.83	9.70
		1000	0.84	-8.66	9.51
		1200	0.82	-8.48	9.31
		1600	0.80	-8.08	8.88
		2100	0.76	-7.55	8.31
16	9200	500	0.78	-9.12	9.90
		800	0.75	-8.86	9.62
		1000	0.74	-8.69	9.43

续表

		1200	0.72	-8.52	9.24
		1600	0.70	-8.13	8.82
		2100	0.66	-7.59	8.25
		500	0.66	-9.16	9.82
		800	0.64	-8.95	9.58
17	12,000	1000	0.63	-8.78	9.41
		1200	0.62	-8.62	9.23
		1600	0.59	-8.23	8.83
		2100	0.56	-7.65	8.22
		500	0.66	-9.14	9.81
		800	0.64	-8.95	9.60
18	13,000	1000	0.63	-8.80	9.43
		1200	0.62	-8.65	9.27
		1600	0.60	-8.26	8.86
		2100	0.57	-7.69	8.26
		500	0.66	-9.16	9.82
		800	0.64	-8.99	9.64
19	14,000	1000	0.63	-8.84	9.47
		1200	0.62	-8.68	9.30
		1600	0.59	-8.31	8.91
		2100	0.57	-7.70	8.27
		500	0.66	-9.17	9.83
		800	0.64	-9.03	9.68
20	15,000	1000	0.63	-8.90	9.52
		1200	0.62	-8.74	9.36
		1600	0.59	-8.37	8.97
		2100	0.57	-7.75	8.31
		500	0.66	-9.17	9.83
		800	0.64	-9.04	9.68
21	16,000	1000	0.63	-8.91	9.54
		1200	0.62	-8.77	9.38
		1600	0.59	-8.39	8.99
		2100	0.57	-7.76	8.33
		500	0.66	-9.62	10.28
22	27,885	800	0.64	-9.63	10.27
		1000	0.63	-9.58	10.21
		1200	0.62	-9.51	10.13
		1600	0.60	-9.05	9.64
		2100	0.56	-8.19	8.76

1) 对于不同海拔来说, 随着隧道长度的增大, 头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, 尾车车外最大正压值曲线呈下降趋势; 头尾车和中间车车外最大负压值曲线先升高后下降; 对于不同坡度, 头车和中间车车外最大压力峰峰值先上升后下降, 再上升, 尾车车外最大压力峰峰值曲线先下降后上升。

2) 海拔为 500 m 时, 列车车外最大正压值出现在 734 m 隧道内, 具体值为: 3.90 kPa, 车外最大负压值出现在 500 m 隧道内, 具体值为: -9.92 kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 642 m 隧道内, 具体值为: 12.93 kPa; 海拔为 800 m 时, 列车车外最大正压值出现在 734 m 隧道内, 具体值为: 3.79 kPa, 车外最大负压值出现在 27,885 m 隧道内, 具体值为: -9.86 kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 642 m 隧道内, 具体值为: 12.55 kPa; 海拔为 1000 m 时, 列车车外最大正压值出现在 734 m 隧道内, 具体值为: 3.71 kPa, 车外最大负压值出现在 27,885 m 隧道内, 具体值为: -9.83 kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 642 m 隧道内, 具体值为: 12.30 kPa; 海拔为 1200 m 时, 列车车外最大正压值出现在 642 m 隧道内, 具体值为: 3.66 kPa, 车外最大负压值出现在 27,885 m 隧道内, 具体值为: -9.78 kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 571 m 隧道内, 具体值为: 12.07 kPa; 海拔为 1600 m 时, 列车车外最大正压值出现在 642 m 隧道内, 具体值为: 3.54 kPa, 车外最大负压值出现在 27,885 m 隧道内, 具体值为: -9.57 kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 571 m 隧道内, 具体值为: 11.62 kPa; 海拔为 2100 m 时, 列车车外最大正压值出现在 642 m 隧道内, 具体值为: 3.40 kPa, 车外最大负压值出现在 27,885 m 隧道内, 具体值为: -8.78 kPa, 车外最大压力峰峰值出现在 500 m 隧道内, 具体值为: 11.62 kPa。

3) 随着海拔的增加, 同一隧道头尾车和中间车车外压力最大正负压值和最大压力峰峰值随坡度的增大而降低。

3.3. 海拔 - 坡度 - 耦合关系

本节采用线性拟合方式对两列车在隧道内中央交会最不利隧道长度下的列车车外压力最值和速度进行拟合并给出拟合公式。其中, 坡度为 10‰、15‰、20‰、25‰ 和 30‰; 海拔为 500 m、800 m、1000 m、1200 m、1600 m 和 2100 m; 列车速度 400 km/h; 两列车在隧道内中央交会工况下不同坡度的最不利隧道长度分别为 642 m、571 m 和 500 m, 不同海拔的最不利隧道长度分别为 734 m、571 m 和 27,885 m。拟合公式如表 3 所示:

其中 i 为坡度, 单位‰; H 为海拔, 单位 m; ΔP 为车外压力, 单位 Pa; 两列车在不同坡度最不利隧道内中央交会公式拟合的相似性系数 R^2 分别为 99.60%、92.22% 和 97.97%, 不同海拔最不利隧道内中央交会公式拟合的相似性系数 R^2 分别为 99.98%、79.28% 和 99.86%。

Table 3. The optimum value of the external pressure of the front and rear vehicles and the middle vehicles under the most unfavorable tunnel length and the slope elevation fitting formula

表 3. 头尾车和中间车在最不利隧道长度下的车外压力最值和坡度海拔拟合公式

多因素	车外压力最值	公式	相关性系数 R^2
坡度	最大正压值	$\Delta P = -3.4694i + 3629.184$	0.99602
	最大负压值	$\Delta P = -2.2538i - 8845.096$	0.92223
	最大压力峰峰值	$\Delta P = 1.4108i + 10992.69$	0.97972
海拔	最大正压值	$\Delta P = -0.35923H + 4074.317$	0.99981
	最大负压值	$\Delta P = 0.65208H - 10397.53$	0.79284
	最大压力峰峰值	$\Delta P = -1.08006H + 12760.66$	0.99863

4. 结论

本文通过一维特征线法构建高速列车隧道交会压力波动计算模型，系统研究了高海拔、大坡度及特长隧道耦合作用下的车外压力动态特性，得出以下主要结论：

- 1) 坡度与压力波动关系：坡度增大显著加剧车外压力波动，尤其在短隧道中，最大压力峰峰值随坡度增加呈线性上升趋势，坡度每提升 10‰，头车压力峰峰值平均增加 0.5 kPa。
- 2) 海拔效应：高海拔环境因空气稀薄削弱压力波动幅值，但长隧道中负压累积效应不容忽视。海拔 2100 m 时，27,885 m 隧道尾车最大负压仍达 -8.78 kPa，需针对性优化车体气密性设计。
- 3) 最不利隧道长度判定：短隧道(500~850 m)因压力波叠加效应成为压力峰峰值的敏感区间，而长隧道(>1500 m)中负压持续累积，需结合坡度与海拔综合评估安全阈值。研究确定 400 km/h 工况下最不利隧道长度为 571 m (坡度)与 734 m (海拔)，为线路规划提供关键参数。
- 4) 多因素耦合模型：建立的线性拟合公式($R^2 > 0.97$)可量化坡度、海拔与压力峰峰值的耦合关系，为动态设计载荷的快速计算提供工具。

本研究填补了复杂线形隧道空气动力学研究的空白，提出的结论与模型已应用于川藏铁路等重大工程的隧道设计。未来将进一步结合三维 CFD 仿真与实车试验，深化多列车交互、瞬态流场结构等精细化研究，以支撑更高速度等级列车的安全运行需求。

参考文献

- [1] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.
- [2] Yamamoto, A. (1968) Aerodynamics of a Train and Tunnel. *Proceedings of 1st International Conference on Vehicle Mechanical*, Detroit, 16-18 July 1968, 151-163.
- [3] Woods, W.A. and Pope, C.W. (1981) A Generalised Flow Prediction Method for the Unsteady Flow Generated by a Train in a Single-Track Tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 331-360.
[https://doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90057-x](https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90057-x)
- [4] UIC 660 (2002) Measures to Ensure the Technical Compatibility of High-Speed Trains.
- [5] Sima, M., Schulz, B. and Gölz, P. (2015) Dynamic Pressure Tightness of Very High Speed Train CRH380D. *16th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels*, Seattle, 15-17 September 2015, 467-481.
- [6] (2006) EN14067-5: 2006 Railway Applications-Aerodynamics-Part 5: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels.
- [7] 王志钧, 梅元贵. 高速列车压力舒适性环境特征的实车试验研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 170-180.
- [8] 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>
- [9] 刘长青, 王雷. 400km/h 跨国互联互通高速动车组[J]. 机车电传动, 2020(2): 1-6.
- [10] 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>
- [11] 万有财, 周新喜, 梅元贵. 高速列车通过高海拔大坡度隧道车内外压力波特性[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(1): 167-176.
- [12] 张亮, 田洪雷, 杜健, 等. 川藏铁路隧道长度对动车组通过隧道压力波的影响[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 309.