

高速列车动态气密性和客室压力舒适性研究

谢振华, 梅元贵

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年1月21日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

高速列车在隧道中行驶时, 隧道压力波会通过车体缝隙和空调系统进、排风口传递到车内, 造成车内压力变化, 引起乘客耳部压力舒适性问题。客室内压力波动程度与多种原因有关, 而车体气密缝隙是影响车内压力变化的主要因素。因此在高速列车设计中, 对车体气密性有明确的静态试验指标要求。本文介绍了整车气密性试验的基本方案和理论公式, 推导了由动态气密性计算车内压力的简化公式, 并结合主动式压力保护方式下一维仿真数值计算方法得到了不同工况下的动态时间常数, 研究了隧道长度和列车速度对单列车通过隧道时动态气密性和客室压力舒适性的影响。该研究进一步为高速列车气密性设计和舒适分析提供了理论分析依据和数据支持。

关键词

高速列车, 动态气密性, 压力舒适性, 隧道

Research on Dynamic Air Tightness and Cabin Pressure Comfort of High-Speed Trains

Zhenhua Xie, Yuanguai Mei

College of Electromechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: January 21, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

When the high-speed train is driving in the tunnel, the tunnel pressure wave will be transmitted to the car through the gaps in the car body and the air inlet and exhaust outlets of the air conditioning system, causing pressure changes in the car and causing problems in the comfort of passengers' ears. The degree of pressure fluctuation in the cabin is related to a variety of reasons, and the airtight gap

in the car body is the main factor affecting the pressure change in the car. Therefore, in the design of high-speed trains, there are clear static test index requirements for the air tightness of the car body. In this paper, the basic scheme and theoretical formula of the vehicle air tightness test are introduced, the simplified formula for calculating the internal pressure from the dynamic air tightness is derived, and the dynamic time constant value under different working conditions is obtained by combining the next-dimensional simulation numerical calculation method of active pressure protection, and the effects of tunnel length and train speed on the dynamic air tightness and cabin pressure comfort of a single train passing through the tunnel are studied. This study further provides theoretical analysis and data support for the air tightness design and comfort analysis of high-speed trains.

Keywords

High Speed Train, Dynamic Airtightness, Pressure Comfort, Tunnel

Copyright © 2026 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

高速列车在进入隧道时会产生隧道压力波, 隧道压力波沿隧道方向传播并在隧道出口发生反射造成隧道内压力剧烈变化。当隧道压力波作用于列车时, 会造成车内压力变化, 车内稳定的压力环境被破坏, 导致乘客耳鸣、耳胀等耳感舒适性问题[1][2]。车体气密缝隙是影响列车车内压力变化的主要因素, 尤其是在通风系统压力保护阀门开度较低时[3]。在国内外高速列车车体设计中, 多通过单节车厢的静态密封试验来对车体密封性能进行评价, 通过列车实际行驶时车内压力变化率和不同时间间隔变化量来对客室压力舒适进行评价。

王建宇等[4]以车体气密性的时间常数模型说明了静态密封试验的测试原理, 并通过遂渝线试验段实车测试的车内外压力分析了动车组的动态时间常数。Sima 等[5]对 CRH380D 通过杭州 - 宁波试验区段的车内外压力数据分析, 计算得到了车内动态时间常数和等效泄漏面积。Liu 等[6]通过现场测量列车通过隧道时的车内外压力变化, 计算分析了动态时间常数随隧道长度、列车速度和车厢位置的变化规律。Somaschini 等[7]通过采集包含单列车以不同速度通过隧道和两列车隧道中交会的实车试验数据, 分析了车内压力变化的变化规律, 给出了车内外压力和车体气密性能的简化关系。马瑶等[8]采集了 CRH5A 型列车通过京沈客专沈阳 - 朝阳区段时的车内外压力数据, 并结合所提出的动态气密指数分析方法计算了列车通过实际隧道时的动态时间常数, 发现动态时间常数未因所通过隧道长度的不同而有较大的离散特征。杜兆波和董晓[9]介绍了列车动态时间常数和车内外压力的函数关系, 对比了不同国家的客室压力舒适度评价标准, 提出了基于时间常数的整车及部件的气密性控制方案, 并通过对实测列车通过隧道时车内外压力数据的分析, 验证了整车密封性能和各个部件密封性能关系的计算模型。

Nam SW [10][11]通过采集实车车内压力变化数据, 计算了列车通过隧道时的动态气密性指标, 并介绍了不同车内压力舒适度评价标准。Schwanitz 等[12]通过问卷调查采集数据, 研究了列车客室内部气压变化与人体听觉舒适度的关系。唐闻天和王丽丽[13]总结了国内外快速地铁列车的车内压力舒适性评价标准, 分析了阻塞比、列车速度和气密性对车内压力的影响。孙玉昆和陈垒[14]通过对西成线运营动车组进行实车跟踪测试, 分析了被动式压力保护系统下的车内压力数据, 对压力保护系统控制逻辑进行了调整优化。UIC 660-2002 [15]中要求车内压力变化量每 1s 小于 500 Pa、每 3s 小于 800 Pa、每 10s 小于 1000

Pa、每 60 s 小于 2000 Pa。我国 GB/T 33193.1-2016 [16]《铁道车辆空调 第一部分: 舒适度参数》也做出了相同的要求。

综上所述, 列车气密性能的时间常数模型具有更直观的物理意义, 而目前缺乏动车组通过隧道时的动态时间常数的规律分析, 有必要通过一维模型计算对高速列车车体动态气密性能进行数值仿真试验研究。

2. 研究方法和验证

本章介绍车内压力计算所采用的动态时间常数模型, 对列车气密实验条件下的静态时间常数和通过隧道时的动态时间常数进行对比, 并对所采用的车内压力计算方法进行验证。

2.1. 静态试验方案

国内外对于高速列车的整车气密性试验的方案基本相同。将单节列车运送至测试场所后, 安装用于车内充气 and 抽真空的试验设备, 并布置传感器, 封堵车厢前后端及其他所有设备安装孔洞, 关闭门窗及空调设备新风口和废排风口。之后向车内充气或抽真空使车内外压差达到一定值, 通常为 ± 4 kPa, 并保持压差稳定。最后中断充气或抽真空, 记录车内外压差由 4 kPa 降至 1 kPa 的时间。通常测试得到的压差随时间变化曲线为如图 1 所示。

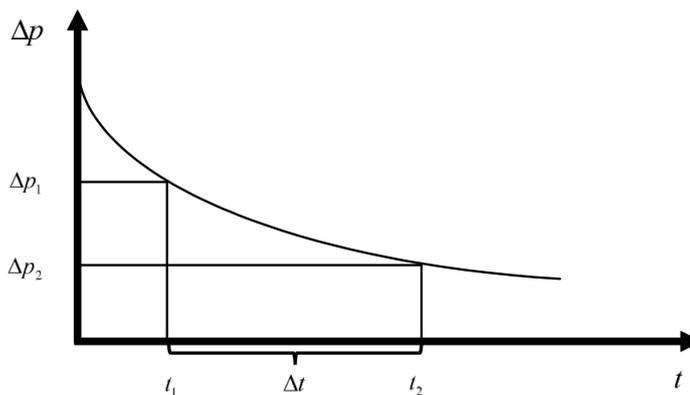


Figure 1. Static sealing test pressure difference variation curve
图 1. 静态密封试验压差变化曲线

图中 Δp_1 表示所记录的 t_1 时刻车内外压差值, Δp_2 表示所记录的 t_2 时刻车内外压差值, 通过车内外压差变化所需要的时间来评价列车气密性能。我国铁道行业标准 TB/T 3250-2010 [17]《动车组密封设计及试验规范》要求测试测内外压差由 4 kPa 降至 1 kPa 的时间, 对于速度等级 200 km/h 至 250 km/h 的降压时间不低于 40 s, 对于速度等级 250 km/h 至 350 km/h 的降压时间不低于 50 s。

欧标 EN14067-5 [18]给出了静态时间常数的计算公式:

$$\tau_{\text{stat}} = \frac{t_2 - t_1}{(1 + k_r) \ln(\Delta p_1 / \Delta p_2)} \quad (1)$$

式中 k_r 是车体形变因子, 用于衡量车体在有内外压差变化时的变形程度。 $k_r = 0$ 表示车体是刚体, 在压力作用时不发生形变。 τ_{stat} 为静态时间常数值。

2.2. 动态气密性模型

受隧道压力波的影响, 列车通过隧道时车外压力并不是单向或平缓的压力变化, 而是会经历复杂的

压力波动, 因此车体的密封性能也在不断变化。若不考虑车体形变, 则可以通过式(1)在两个相邻的时间点上进行时间常数计算。假定在一个极小的时间间隔 Δt 内进行计算, 并有 p_e , 则 $\Delta p_1 = p_e - p_i(t_{n-1})$, $\Delta p_2 = p_e - p_i(t_n)$ 。将式(1)转化为

$$\tau_{\text{dyn}} = \frac{\Delta t}{\ln \left[\frac{p_e - p_i(t_{n-1})}{p_e - p_i(t_n)} \right]} \quad (2)$$

式中 τ_{dyn} 是动态时间常数值, p_e 是两相邻时刻的车外压力, p_i 是车内压力。

通过函数变换变形为

$$\frac{p_e - p_i(t_{n-1})}{p_e - p_i} = e^{\frac{\Delta t}{\tau_{\text{dyn}}}} \quad (3)$$

提取 p_i 有

$$p_i = p_e(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{dyn}}}}) + p_i(t_{n-1})e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{dyn}}}} \quad (4)$$

由于车外压力采样时间 Δt 足够小时, $e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{dyn}}}} \approx \frac{1}{1 + \Delta t / \tau_{\text{dyn}}}$, 整理得到

$$p_i = \frac{p_i(t_{n-1}) + p_e \cdot \Delta t / \tau_{\text{dyn}}}{1 + \Delta t / \tau_{\text{dyn}}} \quad (5)$$

通过式(5)以车外压力数据和假设的动态时间常数值计算车内压力, 将解算结果与实际车内压力曲线对比是否吻合来判断动态时间常数值是否正确。

2.3. 计算方法验证

利用一维数值计算[19]得到主动式压力保护方式下单列车以 350 km/h 速度通过 2000 m 隧道时的车内外压力变化, 并利用动态时间常数模型计算车内压力。图 2 给出了一维数值仿真的车外压力和两种计算方法得到的车内压力时间里程曲线。两种车内压力计算方法差值绝对值为 29.1 Pa, 计算结果吻合程度较好。

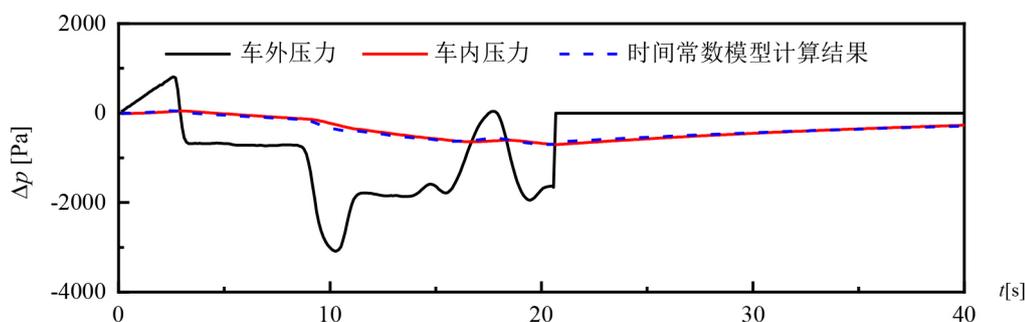


Figure 2. Calculation results of internal and external pressure on high-speed trains passing through tunnels
图 2. 高速列车通过隧道时车内外压力计算结果

3. 计算结果分析

3.1. 隧道长度的影响

本节通过一维数值仿真方法得到列车以 350 km/h 速度通过长度 500 m、1500 m、3000 m 和 6000 m

平直隧道时的车内外压力数据, 并分别计算了列车不同动态时间常数下通过隧道时的车内压力。图 3 为高速列车通过隧道时头车车外压力的时间历程曲线, 图 4 为车内压力的时间历程曲线, 时间轴进行了无量纲处理。分析车外压力变化规律可以看出, 在隧道压力波的影响下, 中长和长隧道的车外压力变化趋势基本一致, 而短隧道由于压力波较短时间传播到隧道洞口并发生反射, 车外压力变化趋势有差异。不同隧道长度下的车外最大正压值基本相同, 这与列车进入隧道过程中形成的压力波有关。而车外最大负压值则随隧道长度增加逐渐减小, 列车通过 6000 m 隧道时的车外最大负压值最小。

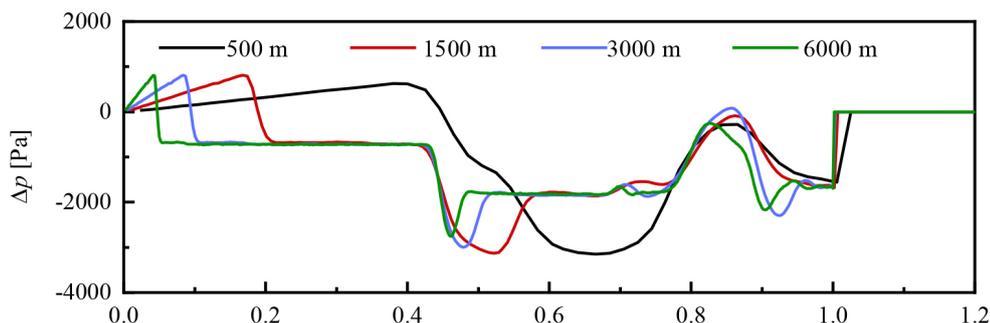


Figure 3. The external pressure changes of high-speed trains passing through different tunnel lengths
图 3. 高速列车通过不同隧道长度车外压力变化

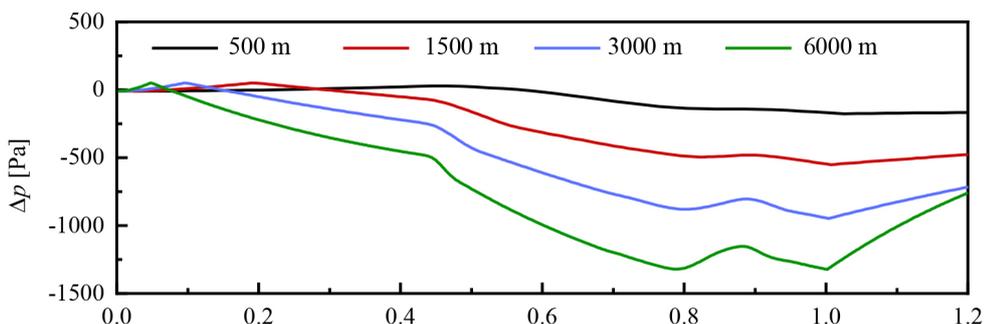


Figure 4. The inside pressure changes of high-speed trains passing through different tunnel lengths
图 4. 高速列车通过不同隧道长度车内压力变化

图 5~8 为列车通过不同长度隧道时一维仿真计算的车内压力与不同动态时间常数下计算的车内外压力时间历程曲线, 图中 Δp_e 是车外压力, Δp_i 是车内压力, 时间轴进行了无量纲处理。通过比较由动态时间常数计算得到车内压力曲线与一维仿真车内压力曲线的吻合程度可以确定列车通过隧道时的动态时间常数。

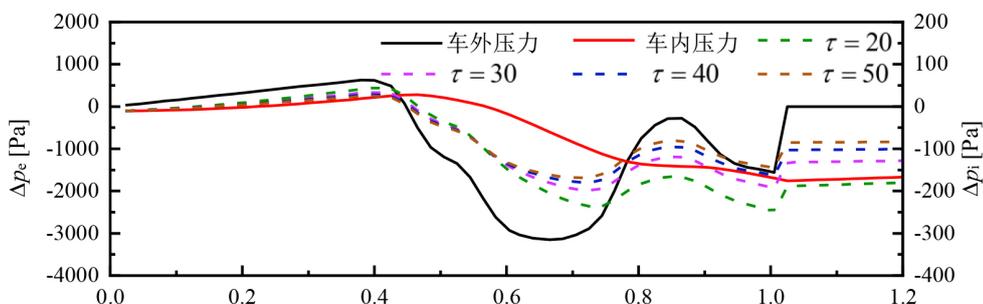


Figure 5. High-speed train passing through 500 m tunnel with different airtightness calculation results
图 5. 高速列车通过 500 m 隧道不同气密性计算结果

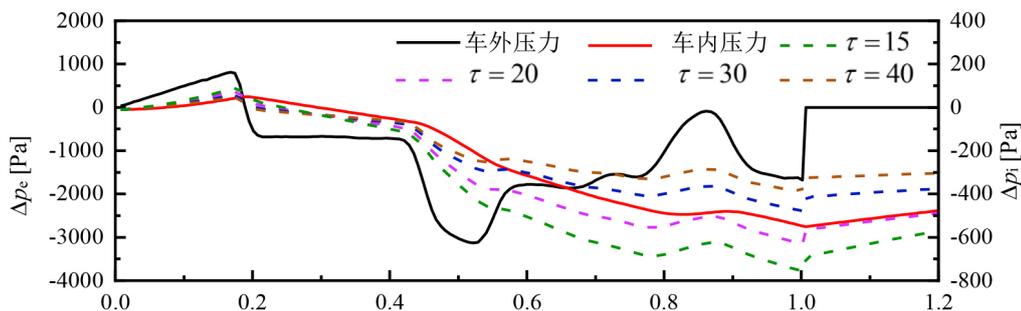


Figure 6. High-speed train passing through 1500 m tunnel with different airtightness calculation results
图 6. 高速列车通过 1500 m 隧道不同气密性计算结果

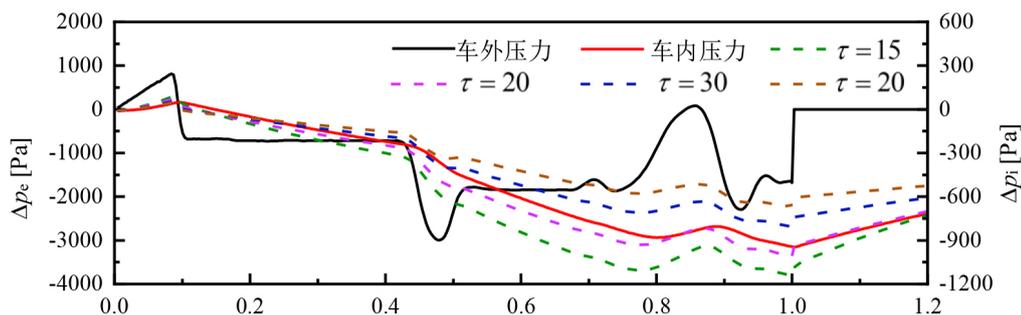


Figure 7. High-speed train passing through 3000 m tunnel with different airtightness calculation results
图 7. 高速列车通过 3000 m 隧道不同气密性计算结果

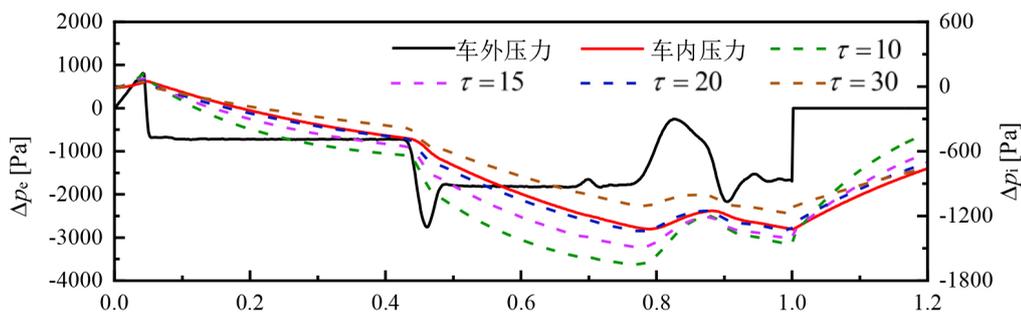


Figure 8. High-speed train passing through 6000 m tunnel with different airtightness calculation results
图 8. 高速列车通过 6000 m 隧道不同气密性计算结果

对比图中车内压力曲线可知, 动车组以 350 km/h 速度分别通过 500 m、1500 m、3000 m 和 6000 m 隧道时, 动态气密性分别为 30 s、20 s、20 s、20 s。分析高速列车以 350 km/h 速度过中长隧道和长隧道隧道时的车内压力曲线, 动态气密性随隧道长度增大而略有增大, 但由于车内外力变化趋势基本一致, 动态气密性值没有明显差异。而通过短隧道时由于车外压力波动时间较短, 车内压力波动较小, 动态时间常数值较大。

统计一维仿真计算的单列车以 350 km/h 速度通过长度 500 m、1500 m、3000 m 和 6000 m 平直隧道时的车内压力不同时间间隔变化量最大值如表 1 所示。分析统计的列车通过不同长度隧道时的车内压力变化量最值可以发现, 列车在通过 500 m 隧道时, 车外压力变化更为剧烈, 引起的车内压力瞬时波动更大, 车内压力每 1 s 变化量最值较大。而在通过长隧道与特长隧道时, 由于列车通过隧道所需时间显著增加, 车内压力有更长的持续下降时间, 车内压力每 60 s 变化量最值在通过 6 km 隧道时取到。车内压力每 1 s、每 3 s、每 10 s 和每 60 s 变化量均满足标准 GB/T 33193.1-2016 要求。

Table 1. Comfort index of pressure in the car when a single train passes through tunnels of different lengths
表 1. 单列车通过不同长度隧道时头车内压力舒适性指标

隧道长度	$\Delta p/1s$ [Pa]	$\Delta p/3s$ [Pa]	$\Delta p/10s$ [Pa]	$\Delta p/60s$ [Pa]
0.5 km	114.7	203.8	203.8	203.8
1.5 km	113.2	276.6	543.2	599.8
3 km	103.6	247.8	598.3	996.4
6 km	83.3	207.6	508.3	1372.1

对比所计算的动态气密性值和压力舒适性指标值可以发现, 列车通过长隧道时车内压力每 1 s、每 3 s 和每 10 s 压力变化量最大值随动态气密性的增加有所减小, 而每 60 s 的压力变化量最大值由于反映车内长时间的的压力变化, 仍是通过 6 km 隧道时压力变化量最大值最大。

3.2. 列车速度的影响

图 9 为高速列车分别以 250 km/h、300 km/h 和 350 km/h 速度通过长 1500 m 的平直隧道时车外压力变化的时间历程曲线, 图 10 为车内压力变化的时间历程曲线, 时间轴进行了无量纲处理。分析车外压力变化规律可以看出, 高速列车通过隧道所需时间不同, 车外压力变化情况也不同。随着列车行驶速度的增加, 车外最大正压值和最大负压值都有不同程度的增大, 以 350 km/h 速度通过隧道时的车外最大负压值为-3132.9 Pa。车内压力与车外压力变化趋势一致, 随列车行驶速度的增加车内压力最大负压值也增大。

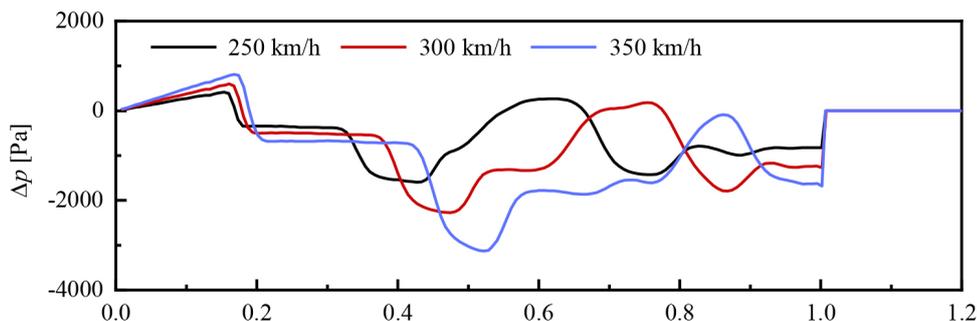


Figure 9. Pressure changes outside the train as it passes through a 1500 m tunnel at different speeds
图 9. 高速列车不同速度通过 1500 m 隧道车外压力变化

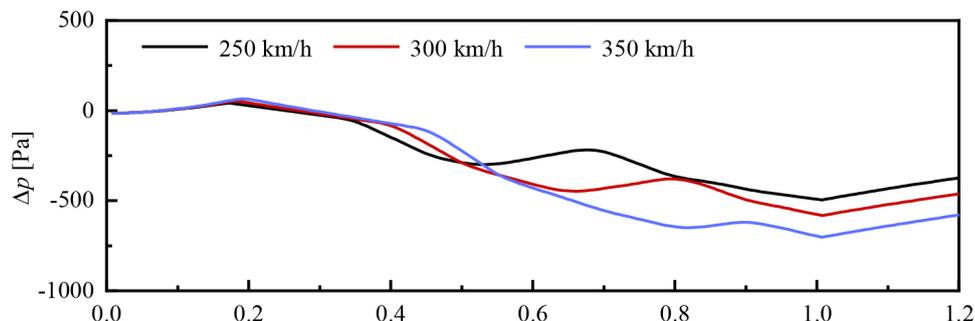


Figure 10. Pressure changes in the train car as the high-speed train passes through a 1500 m tunnel at different speeds

图 10. 高速列车不同速度通过 1500 m 隧道车内压力变化

图 11~13 为高速列车以不同行驶速度通过长 1500 m 的平直隧道时, 一维仿真计算的车内外压力与不

同动态时间常数下计算的车内压力时间历程曲线, 图中 Δp_e 是车外压力, Δp_i 是车内压力, 时间轴进行了无量纲处理。

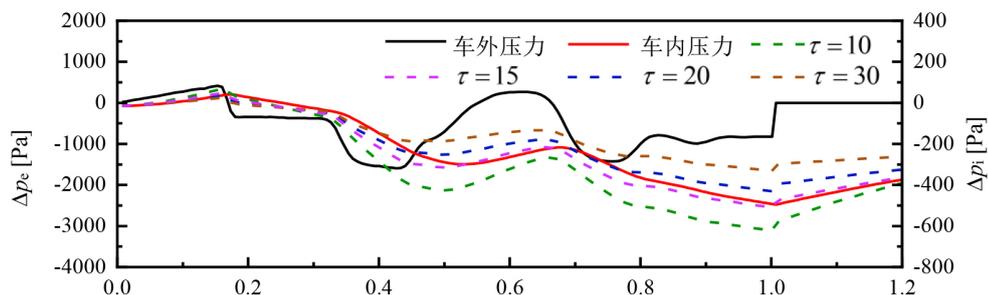


Figure 11. Calculation results of different air tightness of high-speed trains passing through tunnels at a speed of 250 km/h

图 11. 动车组以 250 km/h 速度通过隧道不同气密性计算结果

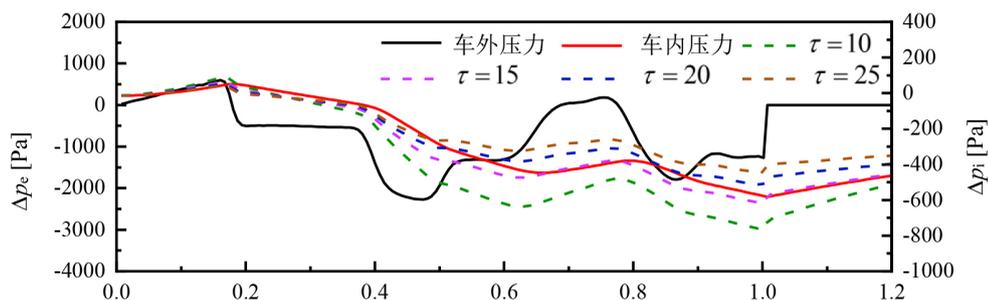


Figure 12. Calculation results of different air tightness of high-speed trains passing through tunnels at a speed of 300 km/h

图 12. 动车组以 300 km/h 速度通过隧道不同气密性计算结果

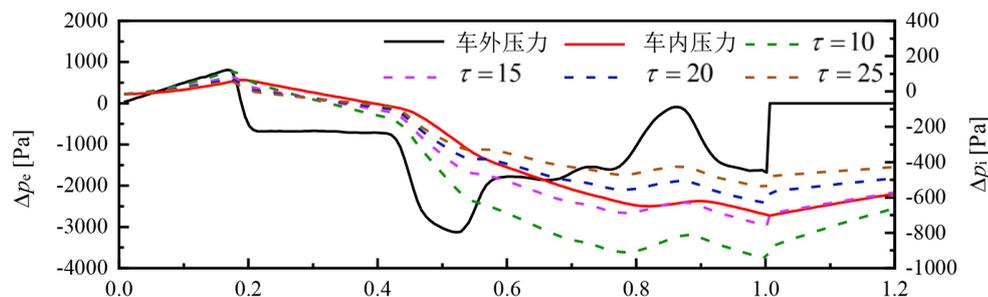


Figure 13. Calculation results of different air tightness of high-speed trains passing through tunnels at a speed of 350 km/h

图 13. 动车组以 350 km/h 速度通过隧道不同气密性计算结果

由图分析可知, 高速列车以 250、300 和 350 km/h 的速度通过长 1500 m 隧道时, 动态气密性均为 15 s 左右, 且随高速列车行驶速度增加而略有增大。分析车外压力变化可以看到, 列车以不同速度通过时车外压力变化趋势基本一致, 而列车以更高速度行驶时缩短了隧道压力波作用于列车表面的时间, 虽然车外最大负值增大, 但列车经历的车外负压波动时间更短, 这使得列车表现出更好的动态气密性。

统计一维仿真计算的高速列车分别以 250 km/h、300 km/h 和 350 km/h 速度通过长 1500 m 的平直隧道时的车内压力不同时间间隔变化量最大值如表 2 所示。分析列车以不同速度通过隧道时的车内压力变化量可以发现, 不同时间间隔车内压力变化量最值随着列车行驶速度的提升都有不同程度的增大, 这与

列车行驶速度提高带来更剧烈的车外压力变化有关。车内压力每 1 s、每 3 s、每 10 s 和每 60 s 变化量均满足标准 GB/T 33193.1-2016 要求。

Table 2. The comfort index of the pressure in the train when a single train passes through the tunnel at different speeds
表 2. 单列车不同速度通过隧道时车内压力舒适性指标

列车速度	$\Delta p/1s$ [Pa]	$\Delta p/3s$ [Pa]	$\Delta p/10s$ [Pa]	$\Delta p/60s$ [Pa]
250 km/h	73.6	217.1	340.4	536.5
300 km/h	117.7	289.3	499.7	634.1
350km/h	155.7	372.3	714.2	767.6

对比所计算的动态气密性值和压力舒适性指标值可以发现, 列车行驶速度提高后动态气密性值和车内压力不同时间间隔变化量最值均增大, 但列车速度增加后动态气密性值增加难以抵消车外压力波动更加剧烈带来的影响, 车内压力不同时间间隔变化量变大。

4. 结论

本论文介绍了高速列车气密性静态实验方案, 推导了由动态气密性计算车内压力公式, 借助一维数值计算方法计算了高速列车不同工况下的动态时间常数值, 分析了隧道长度和列车速度对动态气密性的影响规律。通过对计算结果的初步分析, 得到以下结论:

1) 高速列车单列车通过不同长度的平直隧道时, 随隧道长度的增加, 车外压力波动程度逐渐减小, 车外最大负压值逐渐减小, 这与隧道压力波在隧道内传播和反射的规律有关, 而车内最大负压值则随着通过隧道所需时间的增加逐渐增大。当高速列车行驶速度提升时, 由于车外压力波动大幅增加, 车内外压力最大负压值都有不同程度的增大。

2) 高速列车以 350 km/h 的速度通过不同长度隧道时, 在中长隧道和长隧道动态气密性并未出现较大变化, 且随着隧道长度的增加而略有增大。列车以不同行驶速度通过长 1500 m 的隧道时, 动态气密性也随着列车行驶速度的增加而增大。高速列车通过隧道时的动态时间常数与车外压力波动幅度和持续时间密切相关, 车外压力波动幅度越小, 持续时间越短, 列车动态气密性越好, 动态时间常数值越大。

3) 高速列车通过不同长度隧道时, 车内压力每 1 s 和每 3 s 变化量最值在通过短隧道, 车外压力短时波动较大时取到, 而每 10 s 和每 60 s 变化量反映了车内更长时间的持续压力变化, 在通过长隧道时压力变化量最值更大。

参考文献

- [1] 梅元贵, 周朝晖, 许建林. 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] Chen, C., He, Z., Feng, Y. and Yang, L. (2022) Semi-Empirical Model of Internal Pressure for a High-Speed Train under the Excitation of Tunnel Pressure Waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **236**, 803-815. <https://doi.org/10.1177/09544097211042721>
- [4] 王建宇, 吴剑, 万晓燕. 车辆的密封性及瞬变压力向列车内传递规律[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(3): 12-16.
- [5] Sima, M., Schulz, B. and Glz, P. (2015) Dynamic Pressure Tightness of Very High Speed Train CRH380D. *16th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels*, Seattle, 19 March 2015, 467-481.
- [6] Liu, T.H., Chen, M.Y. and Chen, X.D. (2019) Field Test Measurement of the Dynamic Tightness Performance of High-Speed Trains and Study on Its Influencing Factors. *Measurement*, **138**, 602-613. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.051>
- [7] Somaschini, C., Argentini, T., Brambilla, E., Rocchi, D., Schito, P. and Tomasini, G. (2020) Full-Scale Experimental

- Investigation of the Interaction between Trains and Tunnels. *Applied Sciences*, **10**, Article 7189. <https://doi.org/10.3390/app10207189>
- [8] 马瑶, 余以正, 夏春晶,等. 250 km/h 动车组气动载荷及动态气密特征的实车试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(5): 1889-1899.
- [9] 杜兆波, 董晓. 轨道车辆气密性和舒适性指标研究及控制措施[J]. 智慧轨道交通, 2025, 62(5): 44-50.
- [10] Nam, S.W. (2004) A Study on the Characteristics of Internal and External Pressure Variation for KTX. X. *Railway Journal*, **7**, 111-116.
- [11] Nam, S.W. (2016) A Study on Estimation of Air Tightness for Train. *Journal of the Korean society for railway*, **19**, 576-584. <https://doi.org/10.7782/jksr.2016.19.5.576>
- [12] Schwanitz, S., Wittkowski, M., Rolny, V., Samel, C. and Basner, M. (2013) Continuous Assessments of Pressure Comfort on a Train—A Field-Laboratory Comparison. *Applied Ergonomics*, **44**, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.04.004>
- [13] 唐闻天, 王丽丽. 基于乘客舒适性的快速地铁车辆气动设计参数研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(2): 34-38.
- [14] 孙玉昆, 陈垒. 高速动车组被动式压力保护系统舒适性测试与优化[J]. 铁道车辆, 2023, 61(4): 33-37+72.
- [15] UIC CODE 660 (2002) Measures to Ensure the Technical Compatibility of High-Speed Trains.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 33193.1-2016 铁道车辆空调 第一部分舒适度参数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [17] 中华人民共和国铁道部. TB 3250-2010 动车组密封设计及试验规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [18] DIN EN 14067-5 (2018) Railway Applications—Aerodynamics Part 5: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels.
- [19] 王志均. 高速列车车内压力计算方法及川藏铁路动车组拟用压力保护技术比较研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.