

# 高速铁路隧道出口微气压波噪声和缓解措施

蒋存德, 胡 啸, 梅元贵

兰州交通大学甘肃省轨道交通力学应用工程实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年2月3日; 发布日期: 2026年3月2日

## 摘 要

高速列车通过隧道过程中, 压缩波传播到隧道出口向外辐射微气压波, 可能产生音爆问题, 对线路附近居民产生惊吓。随着列车不断提速, 微气压波问题不可忽视。本文通过三维数值模拟方法, 研究时速400公里隧道出口微气压波噪声和缓解措施。研究表明: 出口无缓冲结构且地形为平地时, 时速400公里隧道出口微气压波近似以球面波向外辐射, 压力幅值随着距离增加近似成指数衰减。气流与隧道壁面相互作用, 在隧道出口附近形成涡旋结构。压缩波经过短隧道无形变传播后直接在出口辐射的微气压波噪声声压级随着频率的增大逐渐衰减, 低频成分噪声远场传播近似呈规则球形, 随着频率的增加, 声压级等值面变得杂乱, 高频噪声远场传播特征呈现散射状。隧道出口微气压波噪声强度随着传播距离的增加逐渐衰减。隧道入口设置缓冲结构, 不改变出口噪声空间传播特征, 仅改变噪声强度, 微气压波声压级在全频段均显著降低, 声压级峰值减小22 dB, 缓解率为16.3%。研究结果为评估和减缓高速铁路隧道微气压波问题提供理论依据。

## 关键词

高速铁路, 隧道微气压波, 噪声, 缓冲结构, 400 km/h

# High-Speed Railway Tunnel Micro-Pressure Wave Noise and Mitigation

Cunde Jiang, Xiao Hu, Yuanguai Mei

Gansu Province Engineering Laboratory of Rail Transit Mechanics Application, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: January 22, 2026; accepted: February 3, 2026; published: March 2, 2026

## Abstract

During the passage of a high-speed train through a tunnel, the compression wave propagates to the tunnel exit and radiates outward as micro-pressure waves, which may cause sonic boom issues,

startling residents near the railway line. As train speeds continue to increase, the problem of micro-pressure waves cannot be ignored. This study employs a three-dimensional numerical simulation method to investigate the micro-pressure wave issue at the tunnel exit under 400 km/h conditions and explores mitigation measures. The research shows that for a tunnel without a buffer structure and with flat terrain at the exit, the micro-pressure waves at the tunnel exit under 400 km/h conditions radiate outward approximately as spherical waves, with the pressure amplitude decaying approximately exponentially with increasing distance. The interaction between the airflow and the tunnel wall forms vortex structures near the tunnel exit. The sound pressure level of the micro-pressure wave noise, radiated directly at the exit after the compression wave propagates through a short tunnel without significant deformation, gradually attenuates as the frequency increases. The far-field propagation of low-frequency noise components is approximately spherical and regular, but as the frequency increases, the sound pressure level contours become disordered, and the far-field propagation characteristics of high-frequency noise exhibit a scattered pattern. The intensity of the micro-pressure wave noise at the tunnel exit gradually attenuates with increasing propagation distance. Installing a hood at the tunnel entrance does not alter the spatial propagation characteristics of the exit noise but only reduces its intensity. The sound pressure level of the micro-pressure wave is significantly reduced across the entire frequency band, with a peak reduction of 22 dB, representing a mitigation rate of 16.3%. The research results provide a theoretical basis for evaluating and mitigating micro-pressure wave issues in high-speed railway tunnels.

## Keywords

High-Speed Railway, Tunnel Micro-Pressure Wave, Noise, Hood, 400 km/h

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

当列车驶入隧道时,产生压缩波沿着隧道传播,在隧道出口向外辐射低频声波,即微气压波[1]。研究表明,短隧道的出口微气压波压力幅值与列车进入隧道速度的三次方成正比[2],当高速列车以 400 km/h 驶入隧道时,出口微气压波问题不容忽视。因此研究 400 km/h 高速铁路隧道微气压波问题对推动我国铁路隧道建设具有重要意义。

1975 年在日本山阳新干线上首次发现了隧道音爆问题[2],这对线路附近居民生活带来了困扰。2005 年,德国在长 7260 m 的 Euerwang 隧道出口观测到严重的音爆问题[3]。我国在武广高铁和贵广高铁提速试验期间均发现了隧道音爆问题,研究发现隧道音爆主要发生在长度大于 5 km 的长大隧道,音爆发生时,隧道出口能监测到明显的爆破轰鸣声,声压级较环境噪声瞬间增大 45 dB(A) [4]。韩嘉强等[5]在我国某高速铁路隧道线路上开展了实车试验,研究表明:300 km/h 速度等级下,隧道内压缩波最大压力梯度达到了 120 kPa/s,此时在隧道出口 20 m 处监测到明显的音爆噪声。日本首次发现隧道音爆后,Ozawa[1]于 1979 年基于线性声学理论,将隧道简化为无限大挡板开孔模型,并提出了微气压波计算方法,可以快速估算隧道出口微气压波压力幅值。2016 年,Miyachi [6]建立了一种更为精确的声学模型,能够同时考虑二阶声源和隧道地形的影响,并采用模型试验验证了该声学模型的合理性。Luo 等[7]采用三维数值模拟,基于大涡湍流模拟方法和 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H)方程计算时速 160 公里地铁通过短隧道的微气压波噪声特征,研究表明:隧道出口微气压波声源由偶极子和四极子组成并以偶极子能量为主,噪声能量主要集中在 20 Hz 以内。

本文以某型高速列车通过净空面积  $100\text{ m}^2$  的短隧道产生的微气压波为研究对象, 采用改进的延迟分离涡模拟(IDDES)和 FW-H 方程对隧道出口微气压波辐射和噪声传播问题进行研究, 并探究入口缓冲结构对隧道出口微气压波噪声的缓解效果, 为我国高速铁路隧道建设提供理论依据。

## 2. 计算模型与数值仿真方法

### 2.1. 计算区域和网格划分

图 1 展示了本文采用的计算区域和边界条件。如图所示: 计算模型采用双线隧道, 净空面积为  $100\text{ m}^2$ , 线间距  $5\text{ m}$ 。微气压波辐射分为流场计算和声学计算两部分。流场计算模型的隧道入口采用滞止入口边界条件, 地面、隧道壁面均设置为固定无滑移壁面边界条件, 其他远场边界设置为自由流边界条件。声学计算区域以半径  $20\text{ m}$  的四分之一球面作为噪声辐射面, 设置为自动匹配层边界, 地面和隧道壁面设置为全反射边界, 为了防止噪声向隧道内传播, 将隧道截面设置为全吸收边界。

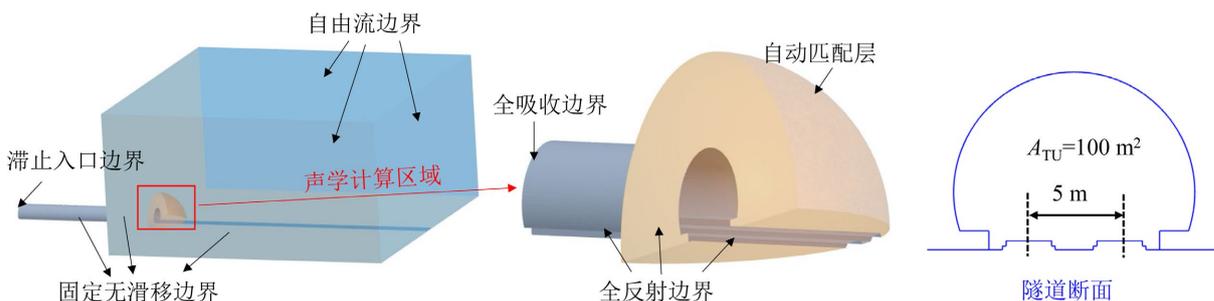


Figure 1. Computational domain and boundary conditions

图 1. 计算区域和边界条件

本文微气压波辐射模型滞止入口边界输入的压缩波均采用三维数值模拟得到[8]。图 2 展示了某型高速列车以  $400\text{ km/h}$  速度通过入口无缓冲结构隧道产生的压缩波。由图 2 可知: 在列车进入隧道过程中, 隧道内空气受到压缩, 形成一系列压缩波向隧道出口传播, 在隧道内  $5D$  ( $D$  为隧道当量直径)和  $7D$  位置压缩波已经完全形成, 压缩波压力梯度基本一致, 文中均采用隧道内  $7D$  位置的压缩波数据。

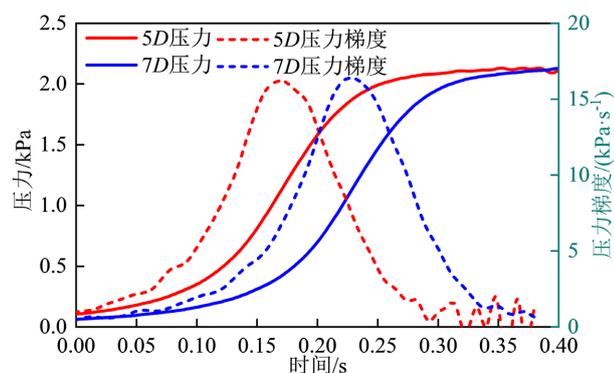


Figure 2. Compression wave generated by a train with a specific nose shape passing through a tunnel without hood

图 2. 某头型列车通过无缓冲结构隧道产生的压缩波

图 3 展示了微气压波辐射模型网格划分策略。如图 3 所示: 为了保证流场数据和声学网格之间的映射, 隧道出口声学区域采用四面体网格, 其他区域采用切割体网格, 在隧道出口附近设置三层球形加密块, 网格尺寸从  $0.2\text{ m}$  过渡到  $0.8\text{ m}$ , 并在隧道壁面设置 20 层棱柱层网格, 拉伸比 1.2, 确保壁面  $y^+$  小于 1。

本文关注 200 Hz 以内的微气压波噪声，因此声学有限元网格根据每波长点数准则(PPW)确定为 0.25 m。

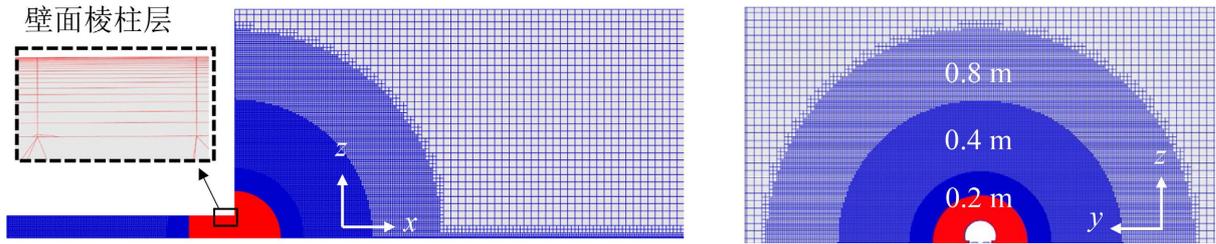


Figure 3. Mesh details of the computational model  
图 3. 计算模型网格划分

## 2.2. 数值模拟方法及验证

本文采用压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE)求解速度场和压力场，湍流模型采用基于 SST  $k-\omega$  的延迟分离涡(IDDES)模型，对流通量项采用二阶迎风/有界离散化中心差分混合方法，混合系数为 0.15，即 15%的二阶迎风插值和 85%的有界中心差分，时间步长为 0.001 s，内迭代 20 次，根据奈奎斯特准则，最大可求解频率为 500 Hz。将隧道出口流场数据映射到声学有限元网格后，采用有限元方法求解 FW-H 方程，从而获得隧道出口微气压波噪声特征。

为了验证本文数值求解方法的可行性，将数值仿真结果与 Miyachi 等[9]的动模型试验进行对比，图 4 展示了动模型试验装置和测点布置。表 1 展示了数值仿真验证结果。由表 1 可知：数值仿真与动模型试验相对误差最大为 -6.14%，出现在方位角为 135°位置，其余测点相对误差均在 2%以内。

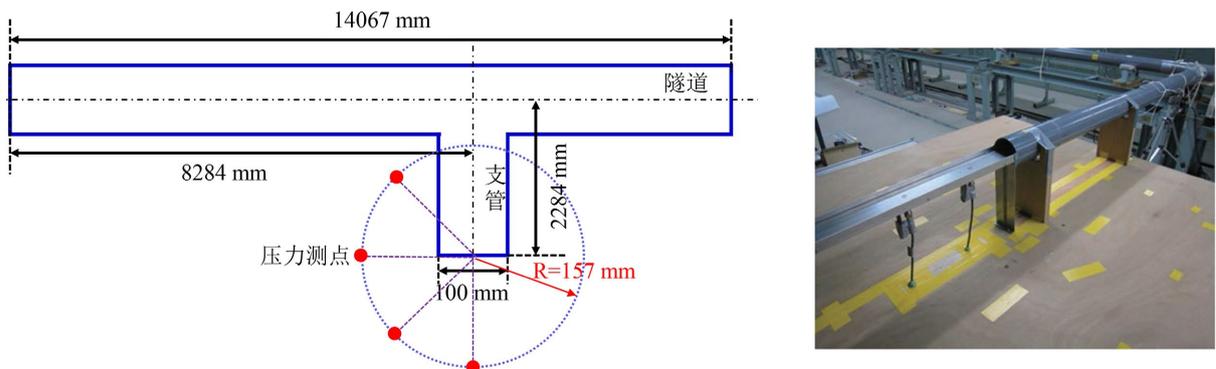


Figure 4. Schematic of the moving model test rig and the arrangement of measurement points  
图 4. 动模型试验装置和测点布置示意图

Table 1. Validation results with the moving model test  
表 1. 动模型试验验证结果

测点位置	0°	45°	90°	135°
相对误差/%	0.91	1.06	0.47	-6.14

## 3. 计算结果分析

### 3.1. 微气压波压力辐射特征

图 5 展示了隧道出口无缓冲结构且地形为平地的微气压波压力云图。如图 5 所示：压缩波传播到隧

道出口向外辐射微气压波，微气压波近似以球面波向外辐射，且在隧道出口出现一圈涡旋结构。微气压波传播过程中空间分布特征保持不变。图6展示了沿线路方向隧道出口微气压波压力峰值。由图6可知：沿着线路方向，隧道出口微气压波峰值随着距离的增加近似成指数衰减。

图7展示了与图5同一时刻下，隧道出口半径20 m，距地面高度1.5 m处的微气压波压力幅值。由图7可知：隧道出口无缓冲结构且出口地形为平地时，在距离隧道出口相同半径位置处，微气压波压力幅值基本相等，压力分布近似呈圆形，没有明显的指向性。

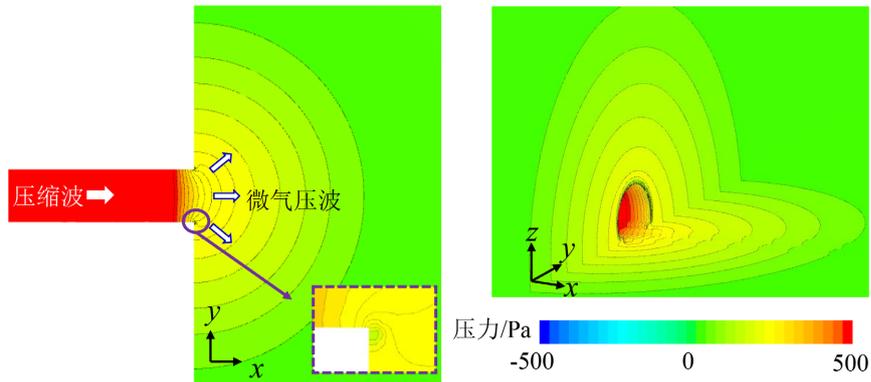


Figure 5. Pressure contour of the micro-pressure wave radiation at the tunnel exit  
图5. 隧道出口微气压波压力辐射云图

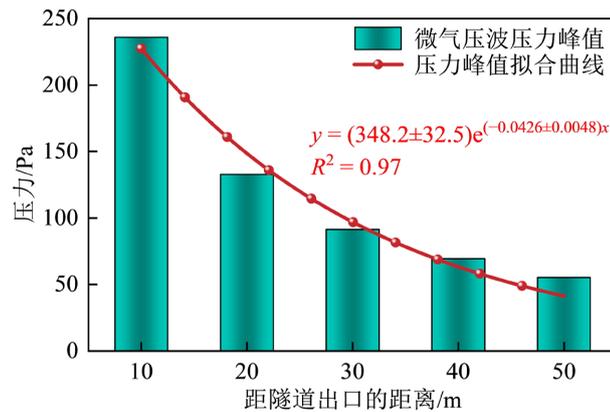


Figure 6. Attenuation of the peak micro-pressure wave at the tunnel exit with distance along the track  
图6. 沿线路方向隧道出口微气压波峰值沿距离衰减

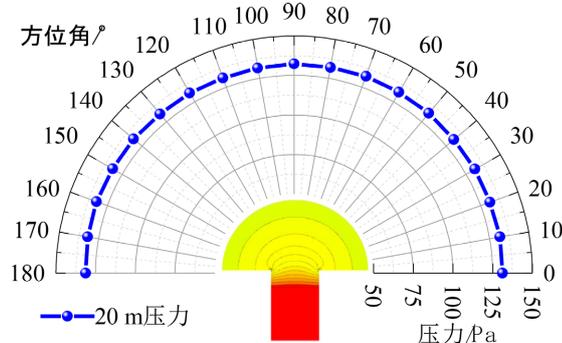


Figure 7. Pressure distribution of the micro-pressure wave at a radial distance of 20 m from the tunnel exit  
图7. 隧道出口半径20m位置微气压波压力分布

### 3.2. 洞口噪声传播特性

图 8 展示了隧道出口无缓冲结构且出口地形为平地的微气压波噪声声压级曲线。由图 8 可知：隧道出口微气压波噪声声压级随着频率的增加逐渐衰减，微气压波主频大约为 4 Hz。隧道出口微气压波噪声能量主要集中在小于 20 Hz 的次声波频段，较少能量处于人耳可听频段。随着传播距离的增加，隧道出口微气压波噪声声压级幅值逐渐减小。

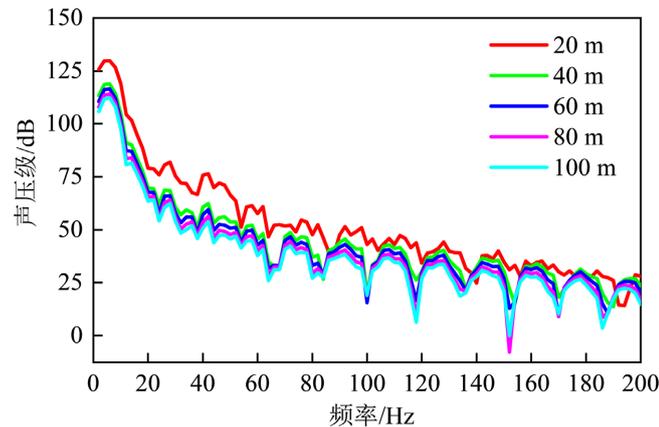


Figure 8. Sound pressure level curves of micro-pressure wave noise at the tunnel exit for different distances  
图 8. 不同距离处隧道出口微气压波噪声声压级曲线

图 9 展示了不同频率下隧道出口微气压波噪声声压级云图。由图 9 可知：在 40 Hz 以内隧道出口微气压波噪声具有较好的衍射性，此时声压级呈现规则对称分布，且在  $f=4$  Hz 时，微气压波噪声近似以球形传播，与微气压波压力辐射特征一致，随着噪声频率的增加，微气压波噪声衍射性变弱，反射性增强，此时隧道出口微气压波噪声声压级等值线变得杂乱，逐渐呈现散射状分布。

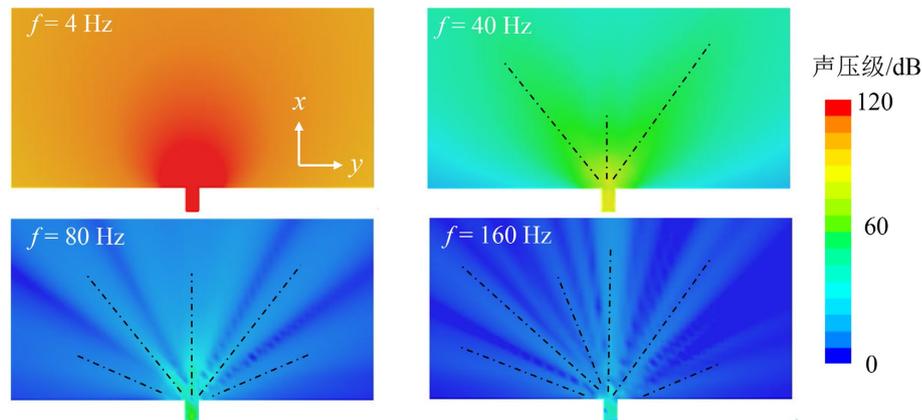
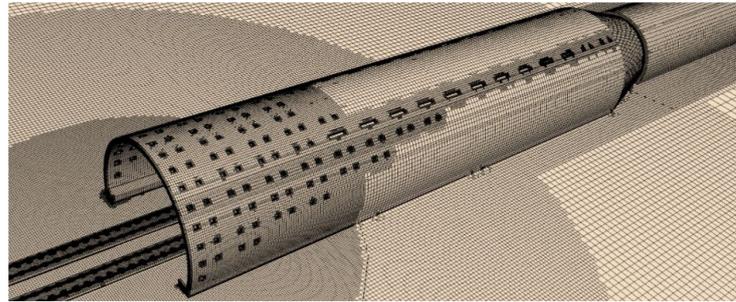


Figure 9. Sound pressure level contours of micro-pressure wave noise at the tunnel exit for different frequencies  
图 9. 不同频率下隧道出口微气压波噪声声压级云图

### 3.3. 降噪措施

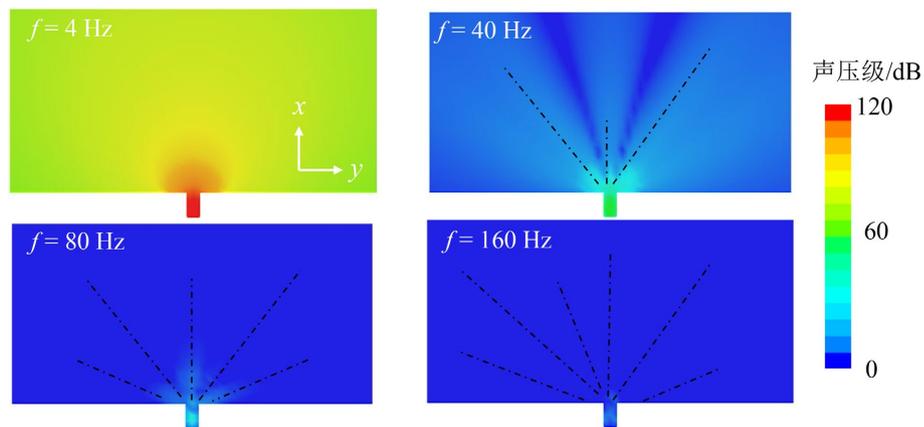
为了改善隧道微气压问题，常采用在隧道入口增设缓冲结构，本文对比隧道入口设置全长 80 m 的扩大截面非均匀开孔缓冲结构[10]与无缓冲结构工况下的隧道出口微气压波噪声，分析入口缓冲结构对微气压波的缓解效果，图 10 展示了隧道入口缓冲结构。



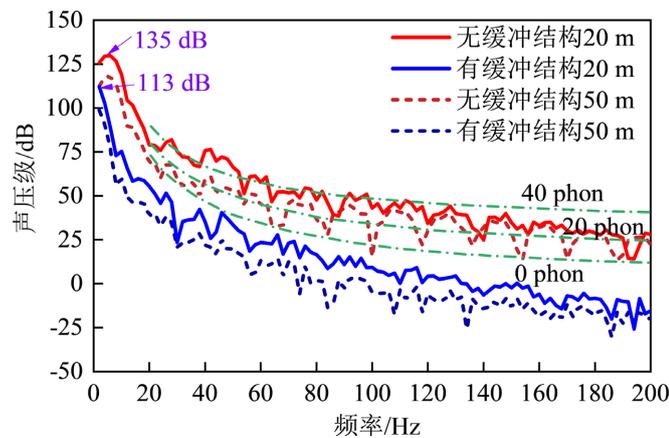
**Figure 10.** Schematic of the tunnel entrance buffer structure  
**图 10.** 隧道入口缓冲结构示意图

图 11 展示了入口设置缓冲结构后的出口微气压波噪声声压级云图。由图 11 可知：在入口设置缓冲结构后，隧道出口微气压波噪声声压级分布与无缓冲结构工况相似，噪声传播指向性一致，均在 4 Hz 呈现球形传播特征。设置入口缓冲结构后，隧道出口微气压波噪声声压级在各频率均明显小于无缓冲结构工况。

图 12 分别展示了入口有无缓冲结构工况对应的隧道出口微气压波噪声。由图 12 可知：在入口设置缓冲



**Figure 11.** Sound pressure level contours of micro-pressure wave noise at the tunnel exit after entrance hood installation  
**图 11.** 入口设置缓冲结构后隧道出口微气压波噪声声压级云图



**Figure 12.** Micro-pressure wave noise radiated at the exit from compression waves propagating through tunnels with or without an entrance hood

**图 12.** 入口有无缓冲结构隧道压缩波传播至出口辐射的微气压波噪声

结构后, 隧道出口 20 m 和 50 m 处的微气压波噪声声压级均明显小于无缓冲结构工况; 在隧道出口 20 m 处, 设置缓冲结构后微气压波噪声声压级峰值降低 16.3%; 无缓冲结构工况的 20 m 处隧道出口微气压波噪声在响度级在 40 phon 附近, 此时人耳能听到微弱的声音; 入口有缓冲结构工况的微气压波噪声响度级小于 0 phon(听阈), 即该噪声不会被人耳感知。入口设置缓冲结构可以有效缓解出口微气压波噪声。

#### 4. 结论

本文采用三维数值模拟方法, 结合计算流体力学(CFD)和计算声学方法(CAA), 对时速 400 公里高速铁路隧道出口微气压波问题进行研究, 探究隧道出口微气压波辐射特征和声学传播特性, 并分析入口增设缓冲结构对出口微气压波噪声的改善效果。

1) 隧道出口无缓冲结构且出口地形为平地时, 隧道出口微气压波压力近似以球面波向外辐射, 无明显指向性, 最大压力幅值随着传播距离的增加呈指数衰减。

2) 隧道出口无缓冲结构且出口地形为平地时, 出口微气压波噪声声压级随着频率的增加逐渐衰减, 空间辐射特征随着频率的增加从球形分布逐渐演变为散射状, 声压级幅值随着传播距离的增加逐渐减小。

3) 入口设置缓冲结构后, 隧道出口微气压波噪声声压级在全频段均显著小于无缓冲结构工况, 距离隧道出口 20 m 处微气压波声压级峰值减小 22 dB, 缓解率为 16.3%。

4) 入口设置缓冲结构可以有效改善人耳对微气压波噪声的主观感受。入口无缓冲结构工况在隧道出口 20 m 处的微气压波噪声响度级约为 40 phon, 人耳可以听到微弱的噪声, 入口设置缓冲结构后, 隧道出口同一位置的微气压波噪声响度级小于 0 phon(听阈), 不会被人耳直接感知。

#### 基金项目

甘肃省青年科技基金(25JRRA964)。

#### 参考文献

- [1] Ozawa, S. (1979) Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit. Japanese National Railways, Tokyo.
- [2] Sturt, R., Lynch, P., Burns, R., *et al.* (2022) Aerodynamic Assessment and Mitigation-Design Considerations for High-Speed Rail. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington.
- [3] Degen, K.G., Geribig, C. and Onnich, H. (2008) Acoustic Assessment of Micro-Pressure Waves Radiating from Tunnel Exits of dB High-Speed Lines. In: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Springer, 48-55.
- [4] 董武, 马伟斌, 韩嘉强. 高速铁路长大隧道音爆现象及缓解措施分析[J]. 铁路技术创新, 2024(6): 1-9.
- [5] 韩嘉强, 马伟斌, 刘艳青, 等. 不同长度高速铁路隧道压缩波激化过程及音爆现象[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(5): 184-192.
- [6] Miyachi, T. (2017) Acoustic Model of Micro-Pressure Wave Emission from a High-Speed Train Tunnel. *Journal of Sound and Vibration*, **391**, 127-152. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.09.031>
- [7] Luo, W.F., Wang, H.L., Wu, Y.D., *et al.* (2024) Numerical Studies on the Radiation of Micro-Pressure Wave Noise at the Tunnel Exits. *Physics of Fluids*, **36**, Article 097154. <https://doi.org/10.1063/5.0222329>
- [8] Mei, Y.G., Wang, Z.X., Sun, Q., *et al.* (2024) The Characteristics of the Spatial and Temporal Distribution of the Initial Compression Wave Induced by a 400 km/h High-Speed Train Entering a Tunnel. *Applied Sciences*, **14**, Article 7208. <https://doi.org/10.3390/app14167208>
- [9] Miyachi, T. and Fukuda, T. (2014) Experimental Investigation of the Effects of Topography around the Tunnel Portal on Micro-Pressure Waves. *Quarterly Report of RTRI*, **55**, 235-240. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.55.235>
- [10] Wei, K., Mei, Y.G., Sun, Q., *et al.* (2024) Propagation Characteristics of Initial Compression Wave Induced by 400 km/h High-Speed Trains Passing through Very Long Tunnels. *Applied Sciences*, **14**, Article 5946. <https://doi.org/10.3390/app14135946>