

文章编号: 1001-4632 (2026) 02-0147-15

引用格式: 魏康, 梅元贵, 王梓贤, 等. 地形对时速 400 km 高速铁路隧道洞口微气压波辐射特征的影响[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(2): 147-161.

Citation: WEI Kang, MEI Yuangui, WANG Zixian, et al. Influence of Terrain on Radiation Characteristics of Micro-Pressure Waves at Tunnel Entrance for 400 km · h⁻¹ High-Speed Railway [J]. China Railway Science, 2026, 47 (2): 147-161.

地形对时速 400 km 高速铁路隧道洞口微气压波辐射特征的影响

魏康, 梅元贵, 王梓贤, 胡啸

(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 730070)

摘要: 针对时速 400 km 高速铁路隧道洞口微气压波危害加剧的工程问题, 为探明实际地形与缓冲结构耦合作用下的微气压波辐射特征, 采用三维非定常可压缩流动的 Navier-Stokes (纳维-斯托克斯) 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型, 以隧道断面当量直径 D (10 m) 为特征尺度, 系统研究隧道出口简单平地与半壑半堤实际地形在有缓冲结构工况下的微气压波峰值、波形、衰减规律及空间指向性等辐射特征。结果表明: 缓冲结构通过侧开孔提前辐射微气压波, 有效降低了隧道洞口轴向 (隧道线路正前方, 方位角 $\theta=0^\circ$) 的微气压波强度; 缓冲结构在 $2D$ 处可有效降低峰值并改变其波形, 但在 $8D$ 处则引起峰值增大, 且对展向方向 (如 $\theta=+45^\circ, +90^\circ$) 的微气压波具有增强作用; 地形变化对隧道轴向微气压波影响相对较弱, 但显著影响两侧区域: 路堑处 ($\theta>0^\circ$) 微气压波峰值大于简单平地, 路堤处 ($\theta<0^\circ$) 峰值最低, 路堑斜坡对堑顶以下位置微气压波产生聚集效应, 而路堤则使传播路径分散, 导致峰值降低; 微气压波沿隧道轴向的衰减程度最小, 且随方位角 θ 增大衰减显著加快, 相同方位角下路堑处的衰减程度大于路堤; 微气压波的指向性受缓冲结构和实际地形的显著影响, 当传播距离达到 $5D$ 时, 缓冲结构影响可忽略, 此时地形主导指向性, 即简单平地呈现轴向指向性, 半壑半堤地形则因路堑聚集与路堤分散效应而呈现 $[0^\circ, +45^\circ]$ 区间指向性。研究结果可为时速 400 km 高速铁路隧道洞口缓冲结构优化设计及洞口区域的地形处理提供理论依据。

关键词: 时速 400 km; 高速铁路隧道洞口; 微气压波; 半壑半堤实际地形; 缓冲结构; 三维非定常可压缩流动模型

中图分类号: U451.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.02.13

随着高速列车不断提速, 空气动力学效应更为显著^[1]。与时速 350 km 高速铁路比较, 时速 400 km 高速列车运行时引起的隧道洞口微气压波现象更为剧烈, 危害更加严重^[2-3]。微气压波是高速铁路运营中有严重环境危害的空气动力学现象, 其形成过程由列车进入隧道产生初始压缩波、压缩波以声速向隧道出口传播、压缩波通过出口向外辐射较少能量的压力脉冲波、压力脉冲波传播至“感受者”4 个过程构成^[4]。微气压波的本质是低频振动和高频噪声。其中低频脉冲波 (频率 <20 Hz) 易引起

隧道洞口附近建筑物门窗振动^[5-6], 高频脉冲波 (频率 >20 Hz) 形成人耳可听到的“轰鸣声”, 即音爆现象, 在隧道出口处易造成环境噪声污染^[7-8]。中国铁道科学研究院集团有限公司开展了长度分别为 1.8, 9.0 和 14.0 km 的板式轨道隧道动车试验, 试验列车速度为 250, 280 和 300 km · h⁻¹^[9-10], 试验结果表明未发生音爆时环境噪声峰值在 50 dB 左右, 发生音爆后环境噪声会迅速增大, 14.0 km 长隧道洞口外 20 m 处的噪声峰值最大, 达到 89.16 dB, 比环境噪声增大约 40 dB^[9]; 当列车速度达到

收稿日期: 2025-11-19; 修订日期: 2026-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2603400)

第一作者: 魏康 (1995—), 男, 甘肃宁县人, 博士研究生。E-mail: yaoluo0414@163.com

通讯作者: 梅元贵 (1964—), 男, 河南荥阳人, 教授, 博士。E-mail: meiyuangui@163.com

300 km·h⁻¹时,隧道洞口微气压波峰值为150 Pa,此时在隧道洞口监测到明显的音爆现象^[10]。因此,揭示隧道出口外地形地貌与缓冲结构对微气压波辐射特征的耦合作用机制,不仅是时速400 km高速铁路隧道空气动力学重要的科学技术研究问题,更是实现降噪和环境友好型高速铁路建设的重大工程需求。

模拟微气压波的一种方法是将微气压波视为一种声波,利用声学理论进行分析。Yamamoto^[11]基于线性声学理论,对传播至隧道出口端的压缩波与微气压波之间的关系进行了初步研究,在隧道出口定义空间立体角,并给出了微气压波强度的理论计算式,因其形式简单、计算高效,该模型已被广泛应用。随后Ozawa^[6]在新干线上做了大量的实车试验,分析了微气压波的波形和频谱特征,指出当距离隧道出口20 m处的微气压波幅值约为100 Pa或更高时,会出现强烈音爆现象,并采用理论模型探讨了微气压波与压缩波波形之间的关系;并在1997年依据线性声学理论的无限大障板圆形活塞辐射原理,对远场高频低频的压力进行近似处理,得出了更为精确的隧道微气压波计算方法^[12]。后来, Kim等^[13]、Gerbig等^[14]和Hieke等^[15]均采用基于声学理论的上述计算模型模拟微气压波辐射,并对模型试验与实车试验的测试结果进行对比分析。2014年, Miyachi等^[16]通过模型试验研究了隧道出口地形(无限平地、单侧开挖、双侧开挖及高架桥地形)对微气压波的影响,研究表明地形显著改变了微气压波的空间分布和峰值;同时基于试验结果,对常用的立体角模型进行了修正,改进后的模型显著提升了复杂实际地形条件下的微气压波预测精度,弥补了原模型适用于地形影响相对较小的局限性。为更精准预测微气压波并推动未来高速铁路提速,需要建立一种考虑隧道洞口地形特征的声学模型,于是在2017年, Miyachi^[17]通过对比有限差分法(Finite Difference Method, FDM)得到的数值计算结果与试验结果,探讨了线性声学理论的适用性,并基于线性声学理论构建了微气压波声学模型,该模型通过格林函数(Green's Function)表征地形效应;研究表明,立体角模型只有在测点到隧道洞口的距离大于50 m的情况下才更吻合试验值,改进的声学模型预测结果与数值计算结果和试验结果均吻合良好。之后, Miyachi^[18]通过数值模拟和理论分析,对路堑地形工况下隧道洞口辐射的圆柱形微气压波展开系统探究,最终给出

了路堑洞口微气压波强度的近似计算式。根据声学理论,结合传播至隧道出口的压缩波强度及隧道等参数,利用计算式可直接获取隧道洞口特定测点处的微气压波峰值。该方法快速高效,计算资源需求低,非常适合参数化研究和工程初步设计,但是由于微气压波在隧道出口附近存在非线性区^[19],且其非线性随着高速列车速度的增大而增强,使用声学理论预测非线性区域内特定点处的压力将导致距离隧道出口近场区域测点处的微气压波预测值与实测值偏差较大,同时忽略了缓冲结构和隧道洞口复杂地形对微气压波辐射特征的影响。

模拟微气压波的另一种方法是采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)进行分析,得到微气压波的辐射特征。Wang等^[20]采用二维轴对称隧道模型,假定微气压波呈球面传播,基于柱坐标系探讨了隧道出口结构对微气压波辐射的影响,研究表明隧道出口微气压波的强度取决于初始压缩波的压力幅值和梯度,缓冲结构开孔的最优面积同时取决于缓冲结构的长度及其横截面积。王田天等^[21]基于三维可压缩非定常流动模型,探讨了不同隧道长度下隧道出口20和50 m处的微气压波变化特征,并基于控制标准给出了适用于时速400 km高速铁路的缓冲结构型式。Kim等^[22]采用模型试验和基于二维轴对称欧拉方程的非定常可压缩流动模型,分析了不同弱激波马赫数与隧道洞口外挡板参数对微气压波辐射的耦合作用,研究发现挡板直径小于隧道直径的3倍时,挡板才会对微气压波强度产生影响。在预测微气压波时,气动声学理论仅适用于测点距离隧道洞口大于隧道直径4倍以上情况。Zhang等^[23]采用二维轴对称隧道模型,研究了近场区域、远场区域以及特定半径不同角度位置的微气压波分布特征,并将模拟计算结果与理论计算结果进行了对比,发现微气压波以半椭圆形形态向下游传播,在近场区域微气压波会急剧衰减,在远场区域呈线性衰减趋势。韩嘉强等^[24]通过数值仿真发现,列车由350 km·h⁻¹提速至400 km·h⁻¹后,压缩波压力梯度峰值最大超200 kPa·s⁻¹,直接导致洞口微气压波幅值显著增大,其幅值还与隧道长度、缓冲结构和地形等有关。王辰等^[25]采用三维CFD数值仿真方法探讨了缓冲结构对微气压波辐射的影响,并基于Yamamoto微气压波理论公式分析了不同缓冲结构的立体角对微气压波缓解率的影响。王凯文等^[8]基于二维轴对称非定常可压缩流动的纳维-斯托克斯方程(N-

S方程)和SST $k-\omega$ 湍流模型,得到不同速度下微气压波辐射特征,利用快速傅里叶变换(FFT)分析了隧道洞口外微气压波频谱特征,并依据微气压波控制标准评估了距离隧道各测点处的声压级,文中指出微气压波首先以半椭球形状向外辐射,随后逐渐转变为半球形并向下游传播,轴向微气压波的强度最大,在 $450\sim 700\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度范围内,微气压波的声压级超过115 dB,甚至达到135 dB,会产生明显的音爆现象。上野陽亮等^[26]采用三维可压缩流动的N-S方程和Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型,评估了隧道出口无缓冲结构下的桥梁及房屋对微气压波辐射强度影响,发现地形和建筑物的存在会影响微气压波的辐射,因此模拟实际环境中微气压波的辐射特征是非常有必要的。杨伟超等^[27]建立了隧道-U型槽-列车-空气气动仿真计算模型,分析了隧道洞口U型槽宽度和坡度对微气压波的影响规律,揭示U型槽作用下微气压波传播的流场机制,并提出了考虑隧道出口U型槽结构的微气压波空间立体角计算式。王辰^[28]采用雷诺时均(RANS)方法和SST $k-\omega$ 湍流模型,研究时速350 km列车运行条件下4种隧道出口连接段地貌(仰坡、路堤、路堑和桥梁)的空间立体角变化对微气压波传播的影响,发现隧道出口连接段对微气压波幅值影响明显,空间立体角反映了微气压波幅值的变化趋势。

综上所述,目前对隧道微气压波的研究已取得了显著进展,但现有研究多数仍依赖于二维轴对称或高度简化的地形模型。这类模型在揭示基础物理

机制方面具有一定价值,却难以反映真实工程环境中地形地貌的复杂性和不对称性。实际地形会通过地势起伏改变微气压波的辐射路径、强度分布及衰减规律,同时,目前的研究还缺乏隧道缓冲结构与实际地形耦合作用下对微气压波辐射直接影响的分析。

本文在时速400 km条件下,耦合某在建高速铁路隧道出口段的实际工程地形与缓冲结构,基于三维非定常可压缩流动的Navier-Stokes方程和SST $k-\omega$ 湍流模型,揭示了半堑半堤复杂地形工况对微气压波辐射特征的影响。研究结果可为高速铁路隧道出口缓冲结构的优化设计、隧道洞口区域的地形处理和微气压波控制标准的制定提供重要的理论依据。

1 模型和方法

1.1 计算模型

以时速400 km高速列车头型和国内时速350 km铁路隧道断面参数为背景,以文献[29-31]获取的初始压缩波波型作为三维非定常可压缩流动模型的入口边界条件。列车宽度为3.36 m、高度3.85 m、流线型长度为14 m,列车速度为 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。列车由头车、中间车和尾车组成,各车厢之间采用风挡连接。建立的高速列车气动几何模型如图1所示。为准确模拟高速列车周围流场,列车模型尽可能再现真实、复杂的原始车体结构,包括风挡、转向架舱、转向架等结构部件。

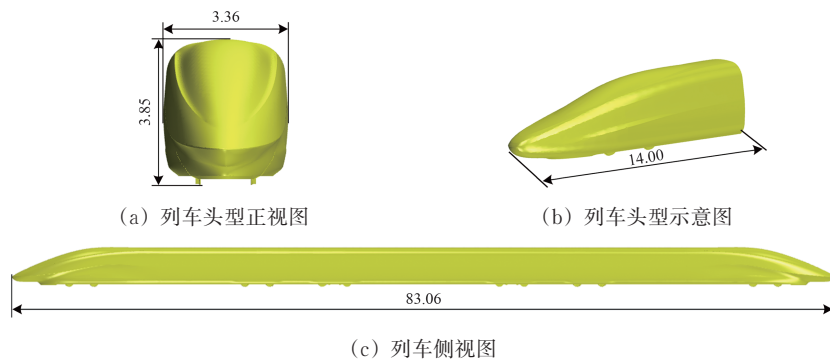


图1 高速列车气动几何模型(单位:m)

双线隧道轮廓和端墙式扩大缓冲结构示意图如图2所示。该缓冲结构为端墙式扩大缓冲结构,全长44.0 m,顶部高15.2 m,底端两侧设有人行道。在缓冲结构两侧各设置3个开孔,孔高3.7 m、宽3.0 m,开孔的间隔为5.2 m。该隧道为双线隧道,

净空面积为 100 m^2 ,线间距为5.0 m,断面当量直径 D 为10 m。

隧道出口外地形为简单平地,其有缓冲结构和无缓冲结构计算域示意图如图3所示。图中:以缓冲结构出口断面的路面中心作为笛卡尔坐标系的原

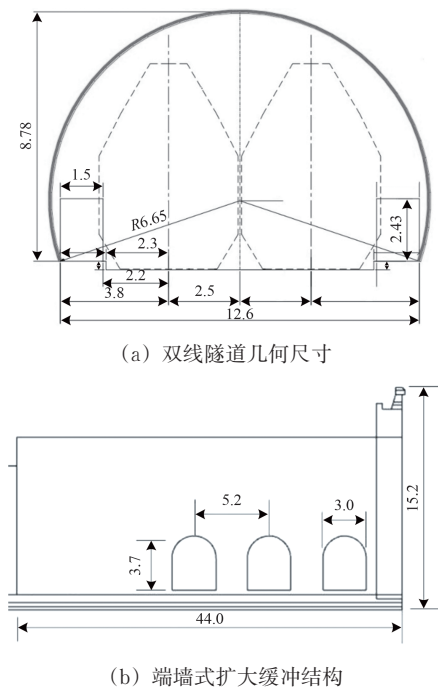


图2 双线隧道轮廓和端墙式扩大缓冲结构示意图 (单位: m)

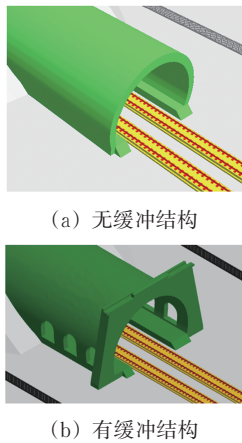


图3 简单平地有无缓冲结构计算域示意图

点, x 轴正方向为列车驶出隧道方向, 也是压缩波在隧道内的传播方向, y 轴正方向垂直于 x 轴指向

隧道左侧, z 轴正方向则垂直路面向上。

实际地形计算域和边界条件示意图如图4所示。该实际地形以路堑和路堤的形式向前延伸, 沿隧道轴向左侧高于路面, 右侧低于路面。

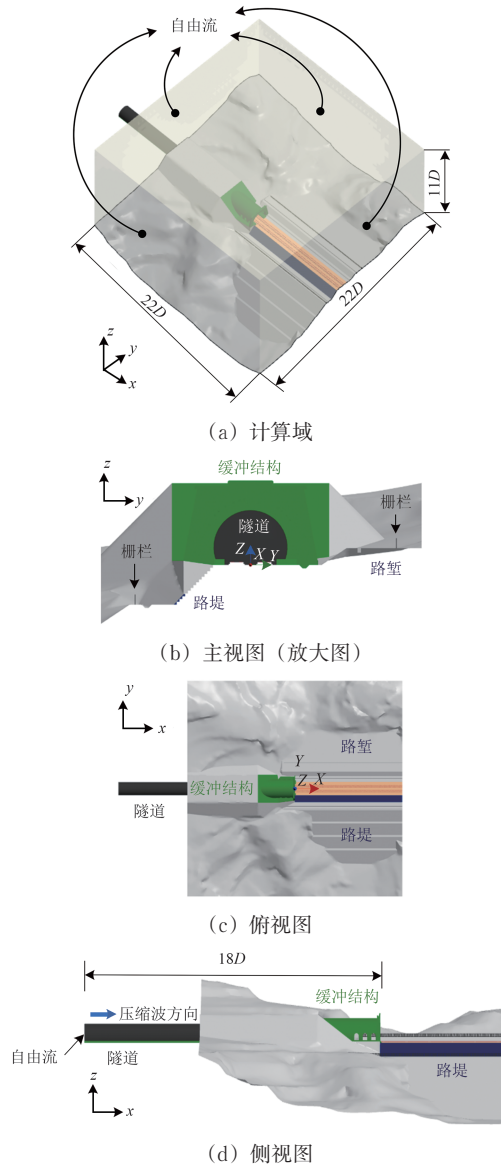


图4 实际地形计算域和边界条件示意图

简单平地与实际地形仅是洞外地形不同。隧道外计算域沿 x 方向长度为 $22D$, y 方向宽度为 $22D$, z 方向从轨面起高 $11D$ 。从入口边界到隧道出口或缓冲结构出口共长 $18D$, 确保压缩波波形能不受干扰地完整输入。线路模型考虑轨道。

计算域四壁及顶部采用自由流边界, 其余边界均采用无滑移壁面。计算域内空气视为理想气体。计算初始条件按照标准大气压取值, 大气压 $p_0=101\ 325\ \text{Pa}$, 空气密度 $\rho=1.225\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 静态温度 $T=288\ \text{K}$, 声速 $c_0=340\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

获取的初始压缩波波形如图 5 所示。定义无量纲时间 t^* 如式 (1) 所示。通过大气压进行无量纲化得到无量纲压力 p^* 如式 (2) 所示。

$$t^* = \frac{tc_0}{D} \tag{1}$$

$$p^* = \frac{p}{p_0} \times 10^4 \tag{2}$$

式中： t 为实际物理时间； p 为微气压波的实际压力。

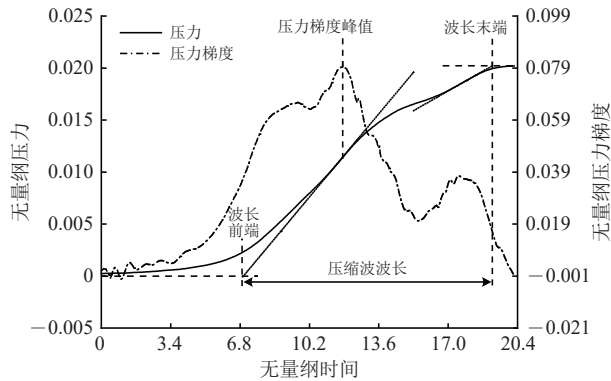


图 5 初始压缩波波形

考虑到该初始压缩波波形存在 2 个上升阶段，分别为 t^* 在 0~14 s 和 14~20 s 范围内，以第 1 阶段压力梯度峰值为斜率的切线与 $p^*=0$ 所处直线交点为该初始压缩波波前，以第 2 阶段压力梯度峰值为斜率的切线与 $p^*=p_{max}$ (p_{max} 为初始压缩波峰值) 所处直线交点为该初始压缩波波尾。从波前到波尾为整个压缩波波长，而第 1 阶段压力梯度峰值也是 2 个阶段中的最大值，因此将其定义为初始压缩波的压力梯度峰值。

隧道出口外测点布置示意图如图 6 所示。定义隧道洞口处为圆心，沿隧道轴向方向为方位角 $\theta=0^\circ$ ，沿逆时针方向为 θ 增加方向。 $\theta>0^\circ$ 处的地形为路堑。路堑顶高 0.34D，未高过整个隧道洞口。 $\theta<0^\circ$ 处的地形为路堤，路堤斜坡向下延伸距离超

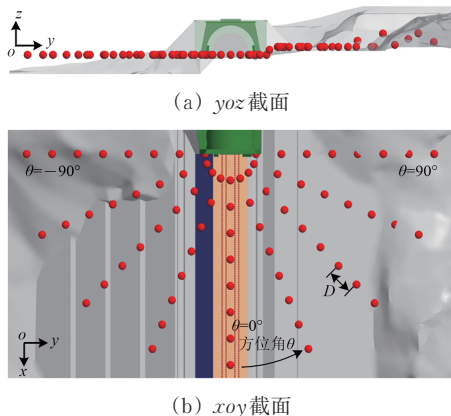


图 6 测点布置示意图

过 D 。每间隔 22.5° 布置一列 θ 测点，每列测点间距为 D 。测点距轨面高度 1.5 m，路堑顶处测点距地面高度 1.5 m。

1.2 网格划分

实际地形计算域内 Trim 网格和棱柱层网格划分如图 7 所示。图 7 (a) 为缓冲结构出口处 yoz 截面网格，图 7 (b) 为缓冲结构及隧道 xoz 截面网格，图 7 (c) 为缓冲结构及隧道 xoy 截面网格，图 7 (d) 为隧道内棱柱层网格。整个计算域采用 Trim 网格，以球心为原点，分别设置半径为 $2D$ ， $5D$ 和 $10D$ 的球形区域。3 个区域网格尺寸依次为 $0.03125D$ ， $0.125D$ 和 $0.500D$ 。在钢轨附近和隧道区域的网格尺寸分别 $0.03125D$ 和 $0.125D$ 。为捕捉压缩波在隧道壁面附近引起的流动，在壁面设置棱柱层。棱柱层第 1 层网格厚度 $y^+=1.0$ ，网格高 $3.24 \times 10^{-5}D$ ，边界拉伸 16 层网格。

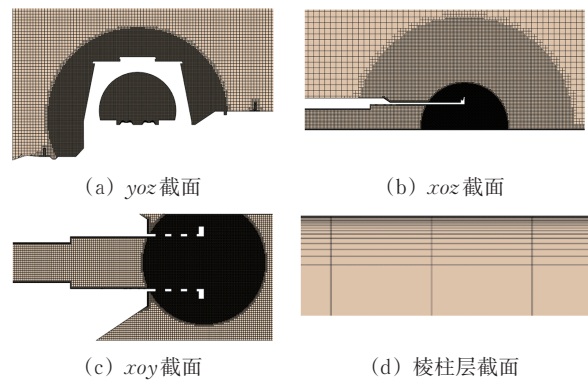


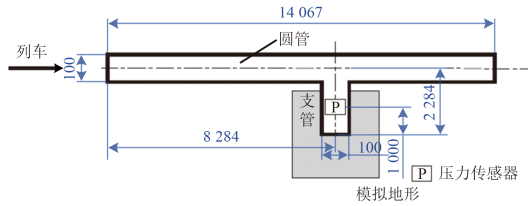
图 7 实际地形计算域内 Trim 网格和棱柱层网格

1.3 数值模拟方法

采用三维非定常可压缩流动的 Navier-Stokes 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟隧道内压缩波向外辐射微气压波和微气压波传播过程。时间项离散采用隐式二阶向后差分，对流项离散采用混合 MUSCL 三阶和中心差分，梯度模型限制器采用 MinMod 法。时间步长 $\Delta t=1 \times 10^{-3}$ s。

为验证数值计算方法的合理性，选取日本学者 Miyachi 等 [16] 已发表的缩尺比为 1:130 模型试验数据进行对比验证。该试验装置采用了长 14 067 mm 的圆管模拟隧道，椭圆形旋成体的列车模型以时速 250 km 驶入圆管，产生的初始压缩波沿圆管传播，其中一部分压缩波沿长 2 284 mm 的支管向外传播，在距该支管口 1 000 mm 处设置压力传感器进行检测。支管口外设置了不同地形并记录相关测点数据。为尽量减小描点误差，选择数据点清晰且不重叠的高 79 mm 桥梁模型 157 mm 处测点数据

进行验证。该试验采用的压力传感器型号为XCS-190-5-G，属于小型高灵敏度压阻式压力传感器，测量范围为0~35 kPa，固有频率为150 kHz，能够捕捉快速变化的动态压力信号，工作温度范围为-55~175℃，适应极端环境测试需求，体积小、质量轻（仅4 g），易于安装在狭小空间，减少对流体流动的干扰。缩尺模型试验装置示意图和本文验证用的出口地形^[16]如图8所示。



(a) 试验装置示意图



(b) 本文验证地形

图8 缩尺模型实验装置示意图和本文验证地形（单位：mm）

缩尺模型试验验证结果见表1。表中：缩尺模型试验数据来源于文献^[16]中图9(a)黑色圆点的实测数据；相对误差以缩尺模型试验数值为基准。由表1可知：最大误差发生在圆管洞口后方，可能是由于圆管外和桥梁的支架等障碍物的具体位置和长度宽度未在文中详细说明，模型设置难以完全复现试验装置所导致；其余测点误差均小于2%，这一结果证实了本文采用的数值方法和设置网格的合理性。

表1 缩尺模型试验验证结果

测点位置	测点压力/Pa		相对误差/%
	缩尺模型试验	本文数值计算	
桥面	27.70	27.91	0.76
地面0°	26.19	26.19	0.00
地面45°	25.43	25.52	0.35
地面90°	23.28	23.16	-0.52
地面135°	21.16	19.86	-6.14

2 计算结果与分析

2.1 微气压波辐射和分布特征

提取隧道出口外简单平地无缓冲结构、简单平地有缓冲结构和半塹半堤实际地形洞口有缓冲结构3种工况下不同时刻的压力分布特征进行分析。

$t^* = 0$ 时刻压缩波波前抵达隧道洞口并开始向外辐射，该时刻3种工况下微气压波压力空间分布特征如图9所示。从图9可以看出： $t^* = 0$ 时刻，简单平地无缓冲结构的隧道内压缩波逐渐由平面波转为沿传播方向凸起的三维波，洞口外在 $x > 0$ ， $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内辐射的微气压波呈球形，在 $x < 0$ 的范围内，微气压波辐射较弱；有缓冲结构的微气压波仍近似呈现球形，球心移动至缓冲结构内，这是因为缓冲结构侧开孔使得压缩波提前向外辐射微气压波，并降低了隧道洞口轴向微气压波强度。

$t^* = 5.0$ 时刻压缩波压力梯度峰值抵达洞口，该时刻3种工况下的微气压波压力空间分布特征如图10所示。从图10可以看出： $t^* = 5.0$ 时刻，简单平地无缓冲结构工况下隧道洞口微气压波仍基本呈球形辐射；简单平地有缓冲结构和半塹半堤实际地

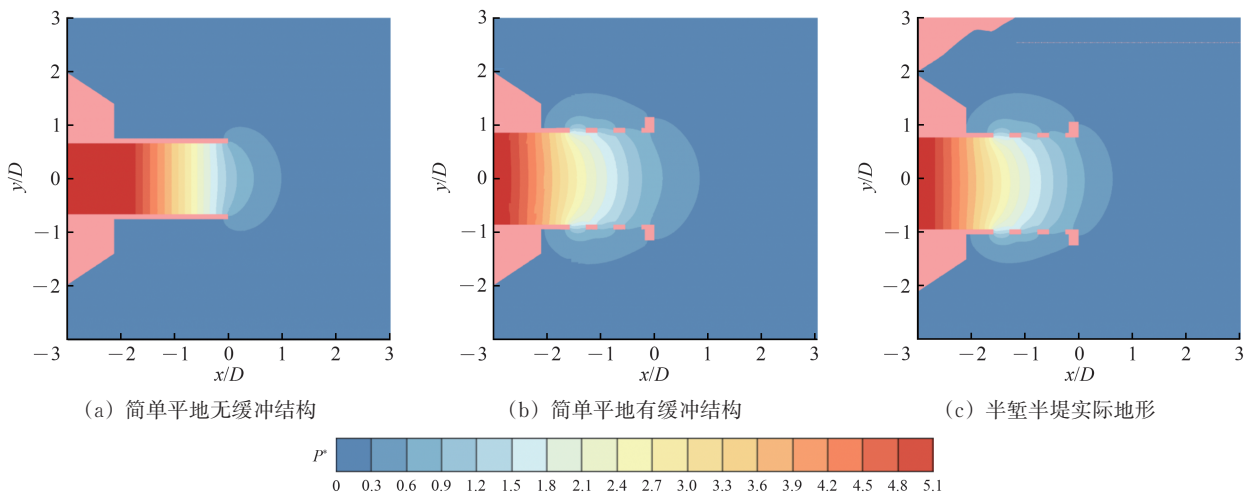


图9 $t^* = 0$ 时刻3种工况下微气压波压力空间分布特征

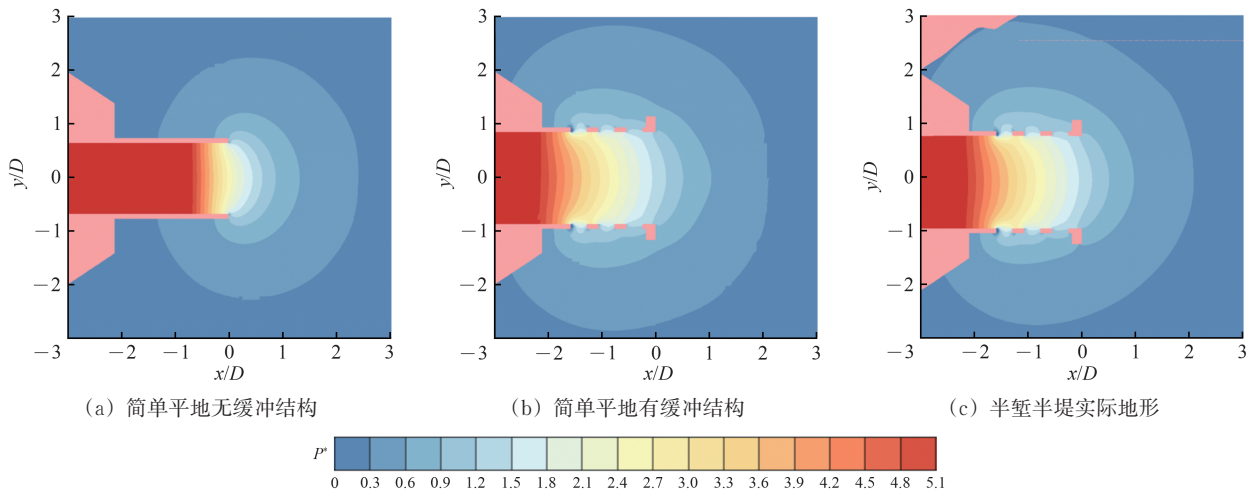


图 10 $t^*=5.0$ 时刻 3 种工况下微气压波压力空间分布特征

形工况下微气压波在 y 方向上传播距离比简单平地无缓冲结构工况下的更远，这是因为缓冲结构侧开孔会提前辐射微气压波，增加了微气压波的传播距离。

$t^* = 13.0$ 时刻压缩波波尾抵达洞口，该时刻 3 种工况下的微气压波压力空间分布特征如图 11 所示。从图 11 可以看出： $t^* = 13.0$ 时刻，经过隧道洞口反射形成的膨胀波逐渐向隧道内传播，洞口处压力降至大气压水平，此时洞外微气压波在 $x/D \in [0, 4] \cup [5.5, 8.5]$ 呈现 2 个黄色的高压区（靠近洞口的高压区命名为区域 1，远离洞口的高压区命名为区域 2），这是因为微气压波波形存在 2 个高峰，区域 1 和区域 2 是微气压波波形在空间上的体现；区域 1 仍基本呈现以洞口为中心的环状，简单平地有缓冲结构比简单平地无缓冲结构工况下的区域 1 微气压波强度更弱；选取区域 2 最大 y 值和最小 y 值 2 条边的中点并与洞口中央相连，连线关于轴线对称，连线夹角在简单平地无缓冲结构工况下小于 90° ，而在简单平地有缓冲结构和半塹半堤实际地形工况下约等于 90° 。

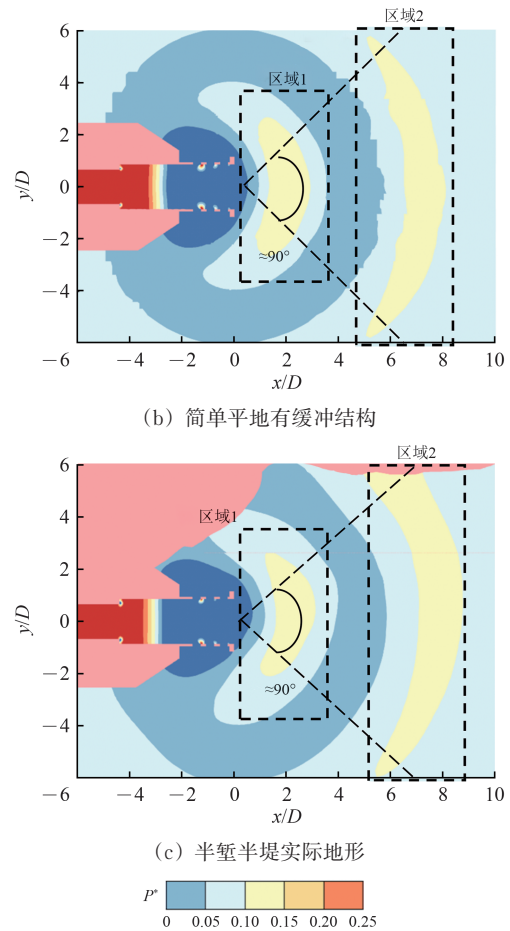
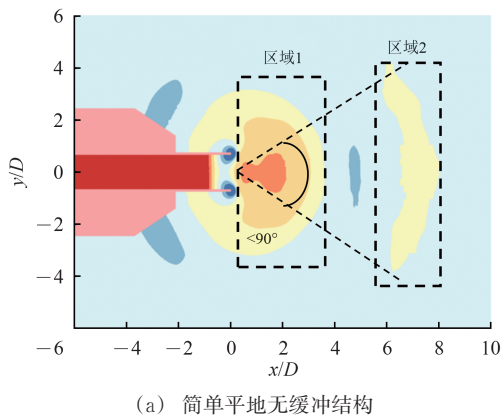


图 11 $t^*=13.0$ 时刻 3 种工况下微气压波压力空间分布特征



$t^* = 14.0$ 时刻 3 种工况下隧道洞口外微气压波压力空间分布特征如图 12 所示。从图 12 可以看出：3 种工况下相较于图 11，区域 1 范围增大但压力减小，区域 2 的范围与压力均减小，连线夹角也明显小于 90° ；半塹半堤实际地形工况下区域 2 与洞口的连线不再对称，除区域 2 外，在靠近路塹侧

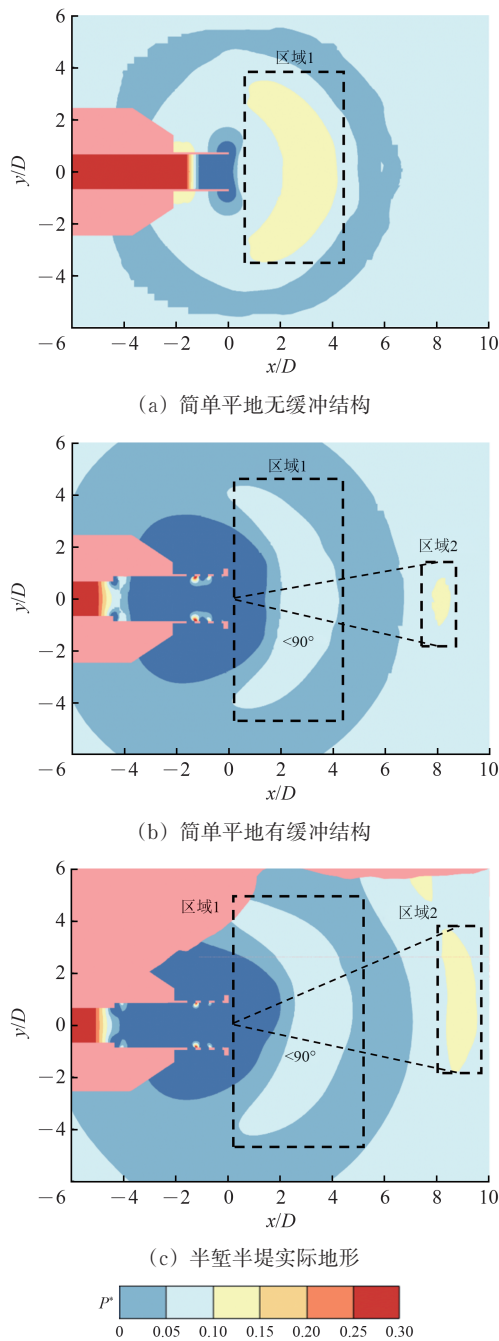


图12 $t^*=14.0$ 时刻3种工况下隧道洞口外微气压波压力空间分布特征

区域存在小部分黄色高压区，这是因为路堑斜坡阻碍微气压波扩散至堑顶，并使微气压波聚集在坡脚；微气压波辐射存在指向性并且指向性在一定程度上还受到缓冲结构和隧道出口地形的影响。

半堑半堤实际地形工况下微气压波不同时刻压力等值面如图13所示。图中：蓝色为20 Pa等值面；红色为50 Pa等值面； t_1 为隧道轴向 D 位置处微气压波达到峰值的时刻，定义微气压波以音速传播 $1D$ 距离的时间为 Δt 。

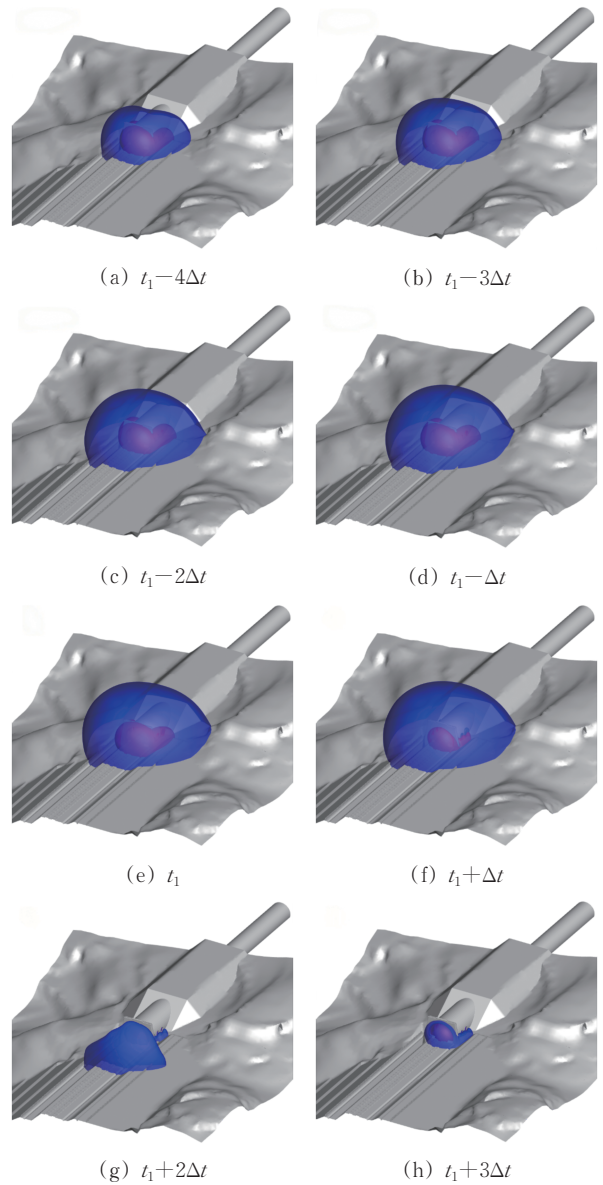


图13 不同时刻微气压波压力等值面

从图13可以看出： $t_1-4\Delta t$ 至 $t_1-\Delta t$ 时段，隧道洞外微气压波尚未达到峰值，将该时段定义为微气压波增长阶段； t_1 至 $t_1+3\Delta t$ 时段，隧道洞外微气压波达到峰值并开始衰减，将该时段定义为微气压波衰减阶段；在增长阶段，20和50 Pa等值面同步向外扩大，但受地形的影响，辐射形态呈现明显的非对称性；在衰减阶段，等值面明显收缩，在 $t_1+2\Delta t$ 时刻缓冲结构前方的压力偏大，缓冲结构出口两侧的压力偏小，此时微气压波辐射呈现出明显的方向性，最终在 $t_1+3\Delta t$ 时刻，仅在隧道洞口附近残留小范围的压力区。

2.2 缓冲结构对微气压波辐射的影响

简单平地上、无缓冲结构工况下沿隧道轴向 $2D$ 、 $5D$ 和 $8D$ 位置处微气压波时程曲线如图14所示。

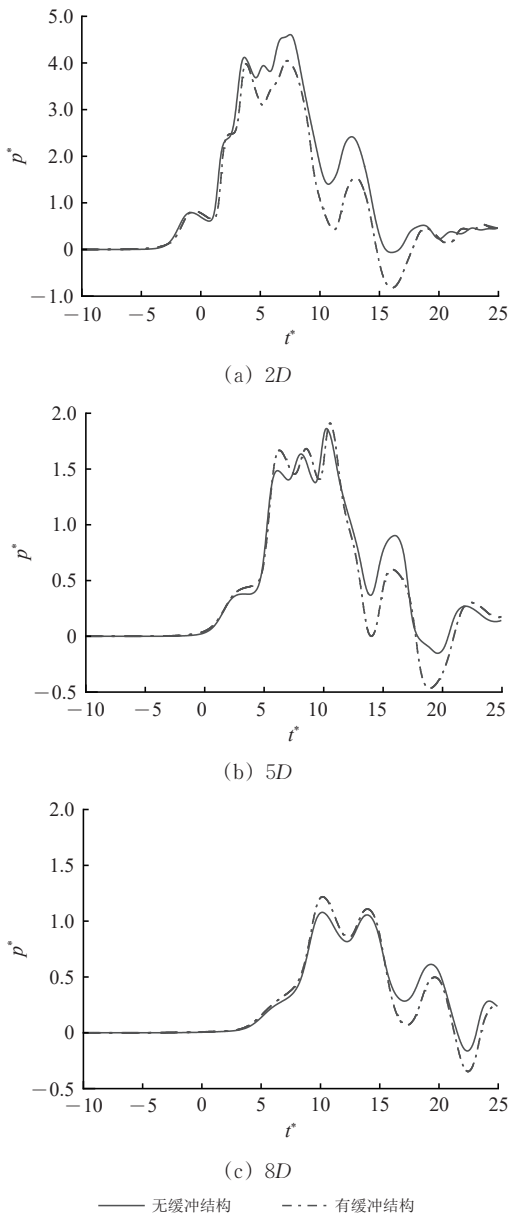


图 14 简单平地有无缓冲结构工况下不同位置处轴向微气压波时程曲线

从图 14 可以看出以下结论。

(1) 在微气压波的上升阶段，有、无缓冲结构工况下的时程曲线基本重合；而在下降阶段，有缓冲结构的曲线明显低于无缓冲结构工况。该结果表明，缓冲结构对微气压波初始上升阶段影响较小，但会加剧微气压波的衰减，使压力更快恢复至大气压水平。

(2) 在 2D 位置处，有缓冲结构的微气压波峰值比无缓冲结构工况降低了 12.3%，且波峰附近波形存在明显差异；在 5D 处，2 种工况下的波峰值较为接近；而在 8D 处，有缓冲结构时的波峰反而比无缓冲结构工况增大了 11.4%。上述现象表

明，该缓冲结构在近场（如 2D 处）可有效降低微气压波峰值并改变其波形，但在远场（如 8D 处）则会引起峰值增大。

在 5D 位置处 θ 为 $+45^\circ$ 和 $+90^\circ$ 方向上的微气压波时程曲线如图 15 所示。由于简单平地下微气压波辐射具有对称性，图中仅展示一侧。

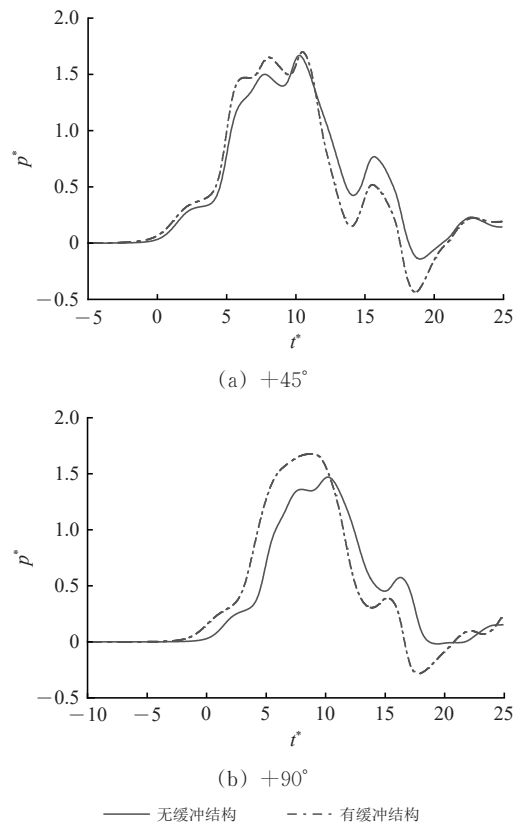


图 15 简单平地有无缓冲结构工况下 5D 处不同方向上微气压波时程曲线

从图 15 可以看出：在方位角为 $+45^\circ$ 和 $+90^\circ$ 处，设置缓冲结构后微气压波峰值比无缓冲结构工况分别增大了 4.2% 和 17.7%。该结果表明，此类缓冲结构对隧道展向方向上的微气压波具有增强作用。这是由于缓冲结构两侧设有向展向打开的侧开孔，压缩波经侧开孔向外辐射微气压波，导致该方向上的幅值增大。

2.3 隧道出口地形对微气压波辐射的影响

简单平地有缓冲结构和半壑半堤实际地形工况下的隧道洞口沿轴向 2D, 5D 和 8D 位置处微气压波的时程曲线如图 16 所示。从图 16 可以看出：在不同地形工况下，轴向各测点的微气压波时程曲线整体趋势较为接近，差异主要体现在波峰附近；在 8D 位置处峰值差异最为显著，半壑半堤实际地形工况下的微气压波峰值比简单平地工况降低了

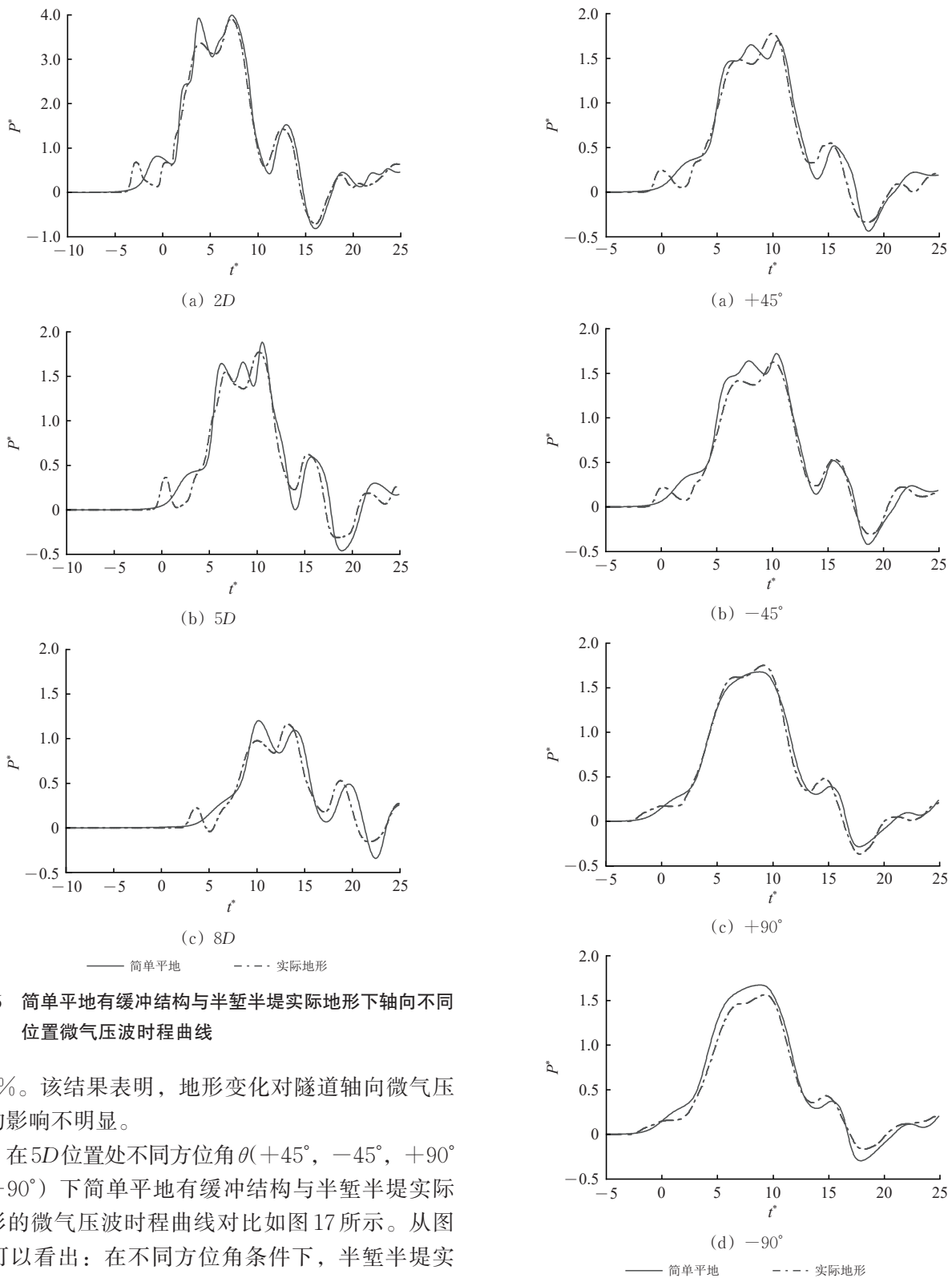


图16 简单平地有缓冲结构与半壑半堤实际地形下轴向不同位置微气压波时程曲线

3.3%。该结果表明，地形变化对隧道轴向微气压波的影响不明显。

在5D位置处不同方位角 θ (+45°, -45°, +90°和-90°)下简单平地有缓冲结构与半壑半堤实际地形的微气压波时程曲线对比如图17所示。从图17可以看出：在不同方位角条件下，半壑半堤实际地形与简单平地工况下的微气压波时程曲线表现出一定差异；在+45°和+90°方位角处，半壑半堤实际地形工况下的微气压波峰值比简单平地工况分别增大了3.0%和3.7%；在-45°和-90°方位角处，半壑半堤实际地形峰值比简单平地降低了7.2%和8.4%；总体上，当方位角为正值时，半

图17 简单平地有缓冲结构与半壑半堤实际地形下5D处不同方向微气压波时程曲线

壑半堤实际地形中的微气压波峰值均大于简单平地工况，而当方位角为负值时，半壑半堤实际地形中的峰值则普遍较低。这一结果表明，微气压波受地

形影响的程度随方位角的增加而增大。

路堑顶高于平地，其斜坡结构约束了微气压波的传播空间，导致微气压波更易聚集于坡脚区域，难以向上传播至堑顶，因此路堑对堑顶以下位置的微气压波具有聚集效应。相反，路堤坡脚低于平地，扩大了微气压波的传播空间，使微气压波传播路径更为分散，从而促进了微气压波峰值的降低。

2.4 微气压波压力峰值衰减特征

在简单平地设置缓冲结构和实际地形工况下，方位角分别为 0° ， $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 时微气压波在 $D\sim 8D$ 范围内的衰减曲线如图 18 所示。图中： p^* 为拟合函数 ($p^*=a(x/D)^{-n}$ ，其中 a 为比例常数， n 为衰减系数)； x/D 为无量纲传播距离，曲线衰减系数越大，表明衰减速率越快。从图 18 可以看出：微气压波

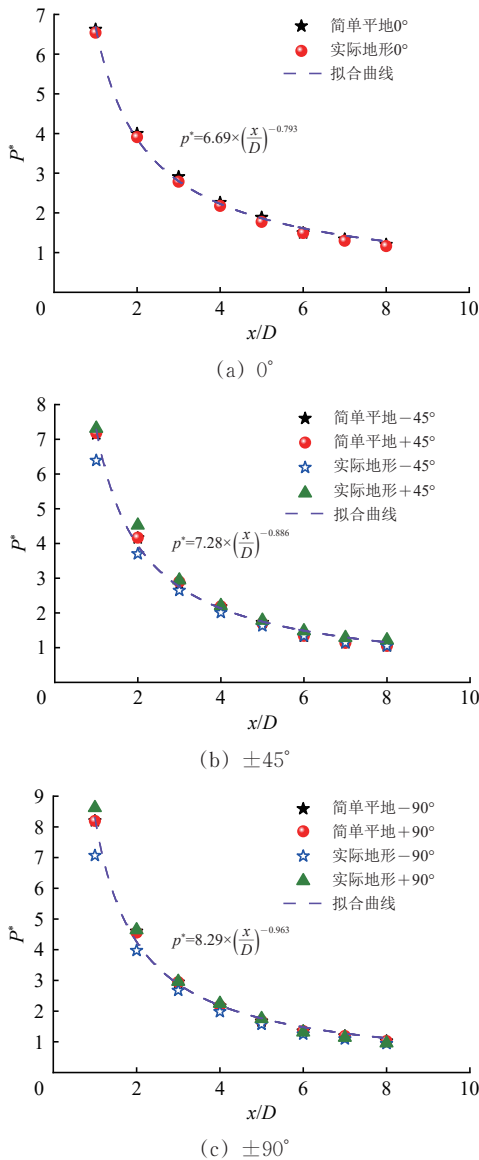


图 18 有缓冲结构简单平地与半堑半堤实际地形在不同方向微气压波随距离的衰减特性

在轴线方向 (0°) 的衰减系数最小为 0.793，且随着方位角的增大，衰减速率逐渐增加；在不同地形条件下，轴向的微气压波峰值衰减曲线始终较为接近，而在 $\pm 45^\circ$ 与 $\pm 90^\circ$ 方位角上，距洞口 $5D$ 范围内，微气压波峰值表现为路堑处最大，简单平地次之，路堤处最小，超过 $5D$ 后，实际地形中不同方位角下的微气压波虽呈现不同变化趋势，但仍始终围绕简单平地衰减曲线波动；在 45° 方位角上，实际地形下的微气压波峰值衰减最慢，当方位角为 90° 时，实际地形下的微气压波峰值衰减最快，因此路堑地形在一定临界角度范围内能缓解衰减，但超过该临界角度后反而会加剧衰减。从总体上看，隧道洞口外地形特征对轴向上微气压波峰值的衰减影响较弱，但对轴向两侧区域的衰减具有显著影响。

半堑半堤实际地形条件下，不同方位角上微气压波峰值随辐射距离变化的衰减拟合曲线如图 19 所示。从图 19 可以看出：隧道轴向 (0°) 在 D 处的微气压波峰值接近各方位角拟合直线中的最小值，而在 $8D$ 处则表现为最大值，该分布特征表明，方位角为 0° 时微气压波的衰减性最弱。在实际地形中，微气压波的衰减程度随方位角的不同而存在显著差异，其中隧道轴向 (0°) 的衰减系数为 0.808，衰减程度最小； -45° 和 $+45^\circ$ 方位角的衰减系数分别为 0.847 和 0.857，衰减程度次之； -90° 和 $+90^\circ$ 方位角的衰减系数分别为 0.926 和 0.994，衰减程度最大；相同方位角下，路堑处的衰减程度大于路堤。

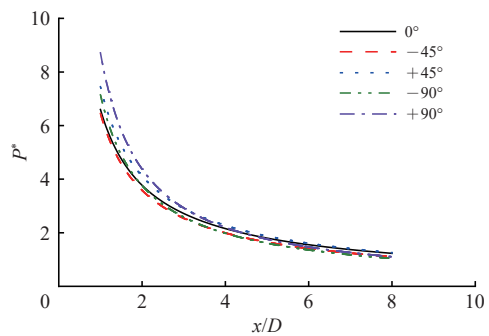


图 19 半堑半堤实际地形下不同方向角的微气压波随传播距离的衰减特征

2.5 微气压波指向性特征

微气压波向隧道出口外辐射时，其强度在空间不同方位角上呈现出非均匀分布特性，即在相同传播距离 (如 $2D$ 或 $5D$) 条件下，微气压波峰值在不同方位角上呈现显著差异，强度更集中的方位角范围即为微气压波的指向性。这一特征本质上反映了

地形和缓冲结构等因素对微气压波辐射路径的影响特征。

简单平地有缓冲结构与半堑半堤实际地形工况下,半径为 $2D$ 和 $5D$ 处的微气压波峰值随方位角 θ 的变化情况如图20所示。

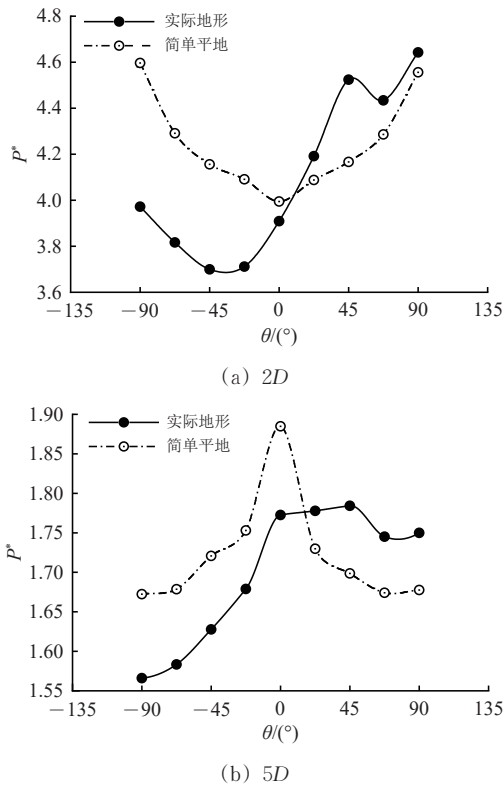


图20 不同传播距离、不同方位角下微气压波的指向性特征

从图20可以看出以下结论。

(1) 在 $2D$ 范围内,简单平地工况下微气压波峰值随 θ 增大呈现出先减小后增大的趋势,并在 $\theta=0^\circ$ 时达到极小值,该现象可归因于缓冲结构侧开孔对微气压波辐射的影响;在传播距离 $5D$ 处,微气压波峰值在 $\theta=0^\circ$ 时达到最大值,随着方位角向 $\pm 90^\circ$ 增大,峰值逐渐降低,呈现“轴向峰值最高、两侧对称衰减”的分布特征,强度集中于 $\theta=0^\circ$ (隧道轴向),因此定义为“轴向指向性”;简单平地无地形约束,微气压波辐射仅受缓冲结构影响($5D$ 处已微弱),强度自然沿隧道轴向(压缩波传播主方向)集中,呈现轴向指向性。

(2) 在 $2D$ 范围内,实际地形工况下路堑部分的微气压波峰值高于简单平地,而路堤一侧则低于简单平地。微气压波从 $\theta=-45^\circ$ 起随方位角增加而逐渐增大,但在 $\theta\in[+45^\circ, +67.5^\circ]$ 区间内出现短暂下降后再次上升;当 θ 从 $+45^\circ$ 增大至 $+67.5^\circ$ 时,地形由路堑坡脚抬升至堑顶,高程的增加抑制

了微气压波越过斜坡向堑顶传播,反而促使能量聚集于坡脚,从而导致 $\theta=+67.5^\circ$ 处的微气压波降低;在传播距离 $5D$ 处,微气压波峰值在 $\theta\in[0^\circ, +45^\circ]$ 区间内维持最大值,而当 $\theta>+45^\circ$ 时,峰值骤降, $\theta<0^\circ$ (路堤侧)时,峰值普遍较低; $\theta\in[0^\circ, +45^\circ]$ 区间内峰值显著高于其他区间,且区间内峰值波动小,因此定义为“ $[0^\circ, +45^\circ]$ 区间指向性”;路堑侧($\theta>0^\circ$)的斜坡结构约束了微气压波向上传播,使强度聚集于坡脚至 $\theta=+45^\circ$ 区间;而路堤侧($\theta<0^\circ$)地形开阔,能量快速扩散导致峰值降低,两者共同作用使指向性主方向偏离纯轴向,集中于 $[0^\circ, +45^\circ]$ 区间。

(3) 在 $2D$ 范围内,缓冲结构侧开孔提前辐射微气压波,使简单平地工况下 $\theta=0^\circ$ 出现峰值极小值,微气压波峰值表现为“两侧高、轴向低”,这是缓冲结构与辐射近场非线性效应的叠加结果;在传播距离 $5D$ 处,缓冲结构影响可忽略,地形主导指向性—简单平地无约束,呈现轴向指向性;半堑半堤地形的路堑聚集效应与路堤扩散效应稳定,呈现 $[0^\circ, +45^\circ]$ 区间指向性。

3 结 论

(1) 隧道洞口外地形和洞口缓冲结构均会影响微气压波的辐射特征。缓冲结构通过从侧开孔提前辐射微气压波从而减弱隧道轴向微气压波的辐射强度。半堑半堤实际地形主要通过地势高低影响隧道轴向两侧微气压波的传播规律。

(2) 缓冲结构对微气压波初始上升阶段影响较小,但会加剧微气压波的衰减。缓冲结构在近场可有效降低微气压波峰值并改变其波形,但在远处则会引起峰值增大且对展向方向的微气压波具有增强作用。

(3) 地形变化对隧道轴向微气压波的影响不明显。路堑处的微气压波峰值大于简单平地工况,路堤处的峰值则普遍较低;路堑对堑顶以下位置的微气压波具有聚集效应,路堤使微气压波传播路径更为分散,从而促进了微气压波峰值的降低。

(4) 微气压波在轴向(0°)上的衰减速率最小,且随着方位角的增大,衰减速率逐渐增加。微气压波峰值表现为路堑处最大,简单平地处次之,路堤处最小;微气压波的衰减规律受到地形的影响,但仍然保持反比衰减的特性。隧道轴向(0°)

的衰减最小, $\pm 45^\circ$ 方位角次之, $\pm 90^\circ$ 方位角的衰减最大。在相同的方位角下, 路堑处的衰减程度大于路堤。

(5) 微气压波的指向性明显受到缓冲结构和隧道洞口外地形的影响, 这种影响程度随传播距离的

增加而减弱。当传播距离达到 $5D$ 时, 缓冲结构的影响可以忽略不计, 地形影响也明显减弱。简单平地工况下, 微气压波具有明显的轴向指向性, 在半堑半堤实际地形工况下微气压波在 $\theta \in [0^\circ, +45^\circ]$ 区间内呈现明显的指向性。

参 考 文 献

- [1] 王辰, 马伟斌, 韩嘉强, 等. 基于实车测试的不同列车速度下隧道气动效应及变化规律[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(6): 158-167.
(WANG Chen, MA Weibin, HAN Jiaqiang, et al. Tunnel Aerodynamic Effect and Variation Law under Different Train Speeds Based on Field Experiments [J]. China Railway Science, 2024, 45 (6): 158-167. in Chinese)
- [2] NIU J Q, SUI Y, YU Q J, et al. Aerodynamics of Railway Train/Tunnel System: a Review of Recent Research [J]. Energy and Built Environment, 2020, 1 (4): 351-375.
- [3] WANG Y, MA W B, HAN J Q, et al. Field Test and Numerical Investigation of Tunnel Aerodynamic Effect Induced by High-Speed Trains Running at Higher Speeds [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (14): 8197.
- [4] STURT R, LYNCH P, BURNS R, et al. Aerodynamic Assessment and Mitigation - Design Considerations for High-Speed Rail [R]. Washington, D.C.: USA, 2022: 221-222.
- [5] AOKI T, VARDY A E, BROWN J M B. Passive Alleviation of Micro-Pressure Waves from Tunnel Portals [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 220 (5): 921-940.
- [6] OZAWA S. Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit [R]. Tokyo: Japanese National Railways, 1979: 21-87.
- [7] TEBBUTT J A, VAHDATI M, CAROLAN D, et al. Numerical Investigation on an Array of Helmholtz Resonators for the Reduction of Micro-Pressure Waves in Modern and Future High-Speed Rail Tunnel Systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 400: 606-625.
- [8] WANG K W, XIONG X H, WEN C Y, et al. Formation and Propagation Characteristics of a Weak Shock Wave in Maglev Tube [J]. Physics of Fluids, 2024, 36 (3): 036120.
- [9] 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.
(HAN Jiaqiang, MA Weibin, LIU Yanqing, et al. Compression Wave Intensification Process and Sonic Boom Phenomenon of High-Speed Railway Tunnel with Different Lengths [J]. China Railway Science, 2025, 46 (5): 184-192. in Chinese)
- [10] 韩嘉强, 马伟斌, 程爱君, 等. 高速铁路长大隧道音爆现象及斜井辅助泄压缓解效果研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(3): 87-96.
(HAN Jiaqiang, MA Weibin, CHENG Aijun, et al. Research on Sonic Boom in Long Tunnels of High-Speed Railways and Alleviation Effect of Auxiliary Relief through Inclined Shaft [J]. China Railway Science, 2024, 45 (3): 87-96. in Chinese)
- [11] YAMAMOTO A. Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit [J]. The Physical Society of Japan, 1977, 4: 137.
- [12] OZAWA S, MURATA K, MAEDA T. Effect of Ballasted Track on Distortion of Pressure Wave in Tunnel and Emission of Micro-Pressure Wave [C]// International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy. Bury St. Edmunds: Mechanical Engineering Publications, 1997, 27: 935-950.
- [13] LEE S I, KIM D H, ROHIT I S, et al. Effect of High-Speed Railway Tunnel Exit Topography on the Emission Characteristics of Micro-Pressure Wave [J]. Journal of The Korean Society for Urban Railway, 2019, 7 (3): 445-454.
- [14] GERBIG C, HIEKE M. Micro-Pressure Wave Emissions from German High-Speed Railway Tunnels - an Approved Method for Prediction and Acoustic Assessment [M]. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 571-578.
- [15] HIEKE M, GERBIG C, DIEPEN J V, et al. Field Measurements of Micro-Pressure Wave Mitigations of German New High-Speed Line Erfurt-Halleipzig [C]// Proceedings of the 11th World Congress Railway Research, Milan, Italy.

- Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2016.
- [16] MIYACHI T, FUKUDA T. Experimental Investigation of the Effects of Topography around the Tunnel Portal on Micro-Pressure Waves [J]. Quarterly Report of RTRI, 2014, 55 (4): 235-240.
- [17] MIYACHI T. Acoustic Model of Micro-Pressure Wave Emission from a High-Speed Train Tunnel [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 391 (1): 127-152.
- [18] MIYACHI T. Cylindrical Micro-Pressure Wave Radiation from Tunnel Portals in Deep Cuttings [J]. Physics of Fluids, 2024, 36 (10): 106124.
- [19] 杨志刚, 谭晓明, 梁习锋, 等. 基于高阶谱差分的CAA模型预测高速列车过隧微气压波[J]. 铁道学报, 2014, 36(7): 85-89.
(YANG Zhigang, TAN Xiaoming, LIANG Xifeng, et al. Prediction of Micro-Pressure Wave with the CAA Model Based on High Order Spectral Difference [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36 (7): 85-89. in Chinese)
- [20] WANG H L, VARDY A E, POKRAJAC D. Perforated Tunnel Exit Regions and Micro-Pressure Waves: Geometrical Influence [J]. Engineering and Computational Mechanics, 2016, 169 (2): 70-85.
- [21] 王田天, 胡冲, 龚彦峰, 等. 扩大斜切式缓冲结构对时速400 km铁路隧道口微气压波缓解研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 151-161.
(WANG Tiantian, HU Chong, GONG Yanfeng, et al. Mitigation of Micro-Pressure Wave at 400 km/h Railway Tunnel Exit by Oblique Enlarged Tunnel-Hood [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39 (5): 151-161. in Chinese)
- [22] KIM H D, SETOGUCHI T. Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226 (5): 1011-1028.
- [23] ZHANG G, KIM T H, KIM D H, et al. Prediction of Micro-Pressure Waves Generated at the Exit of a Model Train Tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 183: 127-139.
- [24] 韩嘉强, 马伟斌, 田经纬, 等. 400 km/h既有高铁隧道空气动力学特性及其适应性分析[J]. 中国铁路, 2025(6): 78-86.
(HAN Jiaqiang, MA Weibin, TIAN Jingwei, et al. Analysis on Aerodynamic Characteristics and Adaptability of Existing 400 km/h HSR Tunnels [J]. China Railway, 2025 (6): 78-86. in Chinese)
- [25] 王辰, 马伟斌, 刘艳青, 等. 时速400 km高速铁路隧道洞口等截面缓冲结构型式及参数[J]. 隧道建设: 中英文, 2025, 45(9): 1649-1663.
(WANG Chen, MA Weibin, LIU Yanqing, et al. Types and Parameters of Equal Section Buffer Structures at Entrance of High-Speed Railway Tunnels with 400 km/h Speed [J]. Tunnel Construction, 2025, 45 (9): 1649-1663. in Chinese)
- [26] 上野陽亮, 田島厚志, 佐々木隆. 地形と家屋を考慮した在来線特急および高速鉄道車両のトンネル微気圧波解析[C]//第33回数值流体力学シンポジウム講演論文集. 東京: JSFM, 2019: 1-7.
(UENO Yohryu, TAJIMA Atsushi, SASAKI Takashi. Analysis of Tunnel Micro-Pressure Waves for Regular and High-Speed Railway Vehicles Considering Topography and Buildings [C]// Proceedings of the 33rd Symposium on Computational Fluid Dynamics. Tokyo, Japan. Tokyo: JSFM, 2019: 1-7. in Japanese)
- [27] 杨伟超, 王蔚雯, 李国志, 等. 时速400 km高铁隧道洞口U型槽对微气压波的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(7): 2872-2885.
(YANG Weichao, WANG Weiwen, LI Guozhi, et al. Impact of U-Shaped Grooves at Entrance of High-Speed Train Tunnels on Micro-Pressure Waves at Speed of 400 km/h [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22 (7): 2872-2885. in Chinese)
- [28] 王辰. 高速铁路隧道空气压力波传播特性及微气压波缓解措施研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
(WANG Chen. Research on the Propagation Characteristics of Air Pressure Waves and Mitigation Measures for Micro Pressure Waves in High-Speed Railway Tunnels [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2023. in Chinese)
- [29] MEI Y G, WANG Z X, SUN Q, et al. 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 [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (16): 7208.
- [30] 王梓贤. 时速400公里高速铁路隧道出口微气压波传播特征[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2025.
(WANG Zixian. Propagation Characteristics of Micro-Pressure Waves at the Exit of 400 km/h High-Speed Railway Tunnels [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2025. in Chinese)
- [31] 梅元贵, 胡啸, 魏康, 等. 时速400公里高速铁路隧道洞口微气压波形成机制和控制标准[R]. 兰州: 兰州交通大学, 2024: 1-194.

(MEI Yuangui, HU Xiao, WEI Kang, et al. Formation Mechanism and Control Standards of Micro-Pressure Waves at Tunnel Portals of 400 km/h High-Speed Railways [R]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024: 1-194. in Chinese)

Influence of Terrain on Radiation Characteristics of Micro-Pressure Waves at Tunnel Entrance for 400 km · h⁻¹ High-Speed Railway

WEI Kang, MEI Yuangui, WANG Zixian, HU Xiao

(Gansu Province Engineering Laboratory of Rail Transit Mechanics Application, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: To address the engineering problem of aggravated micro-pressure wave hazards at the portal of a 400 km · h⁻¹ high-speed railway tunnel, this study investigates the radiation characteristics of micro-pressure waves under the coupled effects of actual terrain and buffer structures. Based on the three-dimensional unsteady compressible Navier-Stokes equations and the SST $k-\omega$ turbulence model, and using the tunnel equivalent diameter D (10 m) as the characteristic scale, the study systematically examines the radiation characteristics, including peak wave pressure, waveform, attenuation laws, and spatial directivity, of micro-pressure waves under conditions with and without buffer structures at the tunnel exit; it also studies simple flat terrain and semi-cut-semi-fill actual terrain. The results show that the buffer structure pre-radiates micro-pressure waves through side openings, effectively reducing the intensity of micro-pressure waves in the axial direction (directly in front of the tunnel alignment, azimuth $\theta=0^\circ$) at the tunnel portal. The buffer structure effectively reduces the peak value and alters the waveform at $2D$, but causes an increase in peak value at $8D$, and also enhances micro-pressure waves in lateral directions (e.g., $\theta=+45^\circ$, $+90^\circ$). Terrain variation has a relatively weak influence on micro-pressure waves in the tunnel axis direction but significantly affects the areas on both sides: the peak micro-pressure wave at the cut ($\theta>0^\circ$) is greater than that on simple flat terrain, while the peak at the fill ($\theta<0^\circ$) is the lowest. The cut slope has a concentrating effect on micro-pressure waves in the area below the cut top, whereas the fill terrain disperses the propagation paths, leading to lower peak values. The attenuation rate of micro-pressure waves is smallest along the tunnel axis and accelerates significantly as the azimuth angle θ increases; for the same azimuth angle, the attenuation at the cut is greater than that at the fill. The directivity of micro-pressure waves is significantly influenced by the buffer structure and actual terrain. When the propagation distance reaches $5D$, the influence of the buffer structure becomes negligible, and terrain dominates the directivity - simple flat terrain exhibits axial directivity, while the semi-cut-semi-fill terrain shows directivity in the $[0^\circ, +45^\circ]$ interval due to the concentrating effect of the cut and the dispersing effect of the fill. The research results provide an important theoretical basis for optimizing and design of buffer structures and terrain treatment at the portals of 400 km/h high-speed railway tunnels.

Key words: 400 km · h⁻¹; High-speed railway tunnel portal; Micro-pressure wave; Semi-cut-semi-fill actual terrain; Buffer structure; Three-dimensional unsteady compressible flow model

(责任编辑 张 琪)