

高铁隧道间断型缓冲结构的气动效应分析

Analysis of Aerodynamic Effects of Intermittent Buffer Structures in High-speed Railway Tunnels

高利民, 闫亚光, 杨彬彬, 邵健恒, 任远

(河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056000)

摘要: 随着高速铁路的快速发展, 列车突入隧道所引发的气动效应问题愈发严重, 在既有线路的提速改造中, 为降低隧道出口微气压波的危害, 提出一种新型隧道缓冲结构——间断型缓冲结构。基于三维、可压缩、非定常 N-S 方程, 利用滑移网格技术及数值模拟的方法, 对高速列车进入隧道全过程的气动效应进行模拟, 分析初始压缩波的特性, 从节数、节长、节间距、断面面积的 4 个方面进行研究, 对比不同工况下的减缓效果, 优化其设计参数。结果表明: 间断型缓冲结构可以有效地降低初始压缩波压力梯度的最大峰值, 减缓压力曲线上升的速度, 但对压力最大值无明显影响; 当间断型缓冲结构节数为 3 节、断面面积为 150 m²、节长为 11 m、节间距为 0.5 m 时, 降低效果最好, 达到 54.38%。

关键词: 高铁隧道; 缓冲结构; 压缩波; 压力梯度

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 05-0097-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.018

GAO Limin, YAN Yaguang, YANG Binbin, SHAO Jianheng, REN Yuan

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract: With the rapid development of high-speed railway, the problem of aerodynamic effect caused by train breaking into the tunnel is becoming more and more serious, in order to reduce the harm of micro-pressure wave at the exit of the tunnel in the speed improvement of the existing line, a new tunnel buffer structure, intermittent buffer structure, is proposed. Based on the three-dimensional, compressible and unsteady N-S equations, the aerodynamic effect of the whole process of high-speed train entering the tunnel was simulated by using slip grid technology and numerical simulation, and the characteristics of the initial compression wave were analyzed. The results show that the discontinuous buffer structure can effectively reduce the maximum peak value of the initial compression wave pressure gradient and slow down the rising speed of the pressure curve, but has no obvious effect on the maximum pressure. When the number of intermittent buffer structures is 3 sections, the cross-sectional area is 150 m², the length of a single section is 11 m, and the discontinuity distance is 0.5 m, the reduction effect is the best, reaching 54.38%.

Keywords: high-speed rail tunnel; buffer structure; compression waves; pressure gradient

0 引言

当高铁驶入隧道时, 由于隧道壁面和列车车身的限制, 列车前方空气不能及时排开^[1], 从而使一部分空气沿着隧道壁面和列车壁面之间的路径向后运动, 形成绕流“列车风”, 另一部分空气在列车的推动下, 以压缩波的形式向隧道出口处传播^[2], 压

作者简介: 高利民 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 隧道空气动力学。

通信作者: 闫亚光 (1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 隧道空气动力学。

收稿日期: 2023-05-24

道桥技术

缩波传至洞口处时,一部分沿原路径以微气压波的形式向隧道出口外传播,伴随强烈的爆炸声,影响周围环境和建筑物;另一部分转化为膨胀波向隧道入口方向反射^[3],不断发生压缩波、膨胀波的转化叠加,使隧道内气动效应更加复杂。

随着高铁速度不断的提升,隧道微气压波问题也愈发严重,经研究发现,隧道微气压波与初始压缩波压力梯度最大峰值成正比^[4]。减缓微气压波的危害,主要从降低初始压缩波的压力梯度入手,其主要措施有:在隧道入口处增设外部缓冲结构,在隧道内增设内部缓冲、横通道、竖井,采用阻力更小的流线型车头等^[5]。众多学者为减小隧道微气压波危害进行了大量的研究,Yamamoto^[6]总结了预测微气压波峰值的经验公式;Ozawa等^[7-8]更深入地探究了压缩波在隧道内的传播原理,得出线性声学理论,使得隧道微气压波辐射过程得到更准确的描述;Howe^[9-10]根据列车进入隧道及在隧道中运行时压缩波压力值与时间的关系曲线,得出列车穿过隧道时最大压力梯度的计算公式;骆建军等^[11]探究了隧道内横通道对微气压波的缓解效果;闫亚光等^[12]探究了10多种缓冲结构形式,最终得出缓冲结构对降低压缩波峰值作用很小,但对降低压力梯度有显著的效果,且开2孔、长20m的缓冲结构降低效果最好;张童童^[13]提出一种高铁隧道内阶梯型缓冲结构,在隧道外部地形限制较大的山区可以进行设置,降低效果可达到24.66%;王英学等^[14]提出了间缝式开口型缓冲结构,并对其形式及参数进行了优化,得出双间缝式缓冲结构降低效果最好,达到45%。

综上所述,国内外对减缓隧道微气压波设施的研究较多,但兼顾安装效率的研究较少。为高效地解决高速列车过隧道产生的气动效应问题,加快既有线路的提速升级,提出间断性缓冲结构。基于数值模拟理论,对不同参数(节数、节长、节间距、断面面积)的初始压缩波特性的分析,得到间断性缓冲结构的最优结构形式,为解决隧道气动效应问题提供新思路。

1 数值模拟计算理论及控制方程

数值模拟时,将高速列车与隧道形成的流场假设为三维、黏性、可压缩的湍流流场,并采用 Navier-

Stokes 方程对其进行求解,流场控制方程如下:

(1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho V) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\begin{cases} \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V v_x - \operatorname{grad} v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div} \mu \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V v_y - \operatorname{grad} v_y) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div} \mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V v_z - \operatorname{grad} v_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div} \mu \frac{\partial v}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \operatorname{div} \left[\rho V T - \left(\frac{\mu}{p_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \operatorname{grad} T \right] = \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad (3)$$

(4) κ 方程

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\rho V \kappa - \frac{\mu}{\sigma_\kappa} \operatorname{grad} \kappa \right) = G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

(5) ε 方程

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\rho V \varepsilon - \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad} \varepsilon \right) = \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

(6) 状态方程

$$P = \rho R T \quad (6)$$

式中: ρ 、 v 、 p 分别为气体的密度、流动的速度、压力; v_x 、 v_y 、 v_z 气流在 x 、 y 、 z 坐标轴方向的速度分量; T 为温度; k 为紊流动能; ε 为紊流动能耗散率; G 为耗散函数; μ 为黏度系数; μ_t 为紊流黏度; P_r 为气体定压比热比; σ_t 为紊流普朗特数; σ_κ 和 σ_ε 为经验常数; C_1 和 C_2 为经验常数。

2 模型及网格划分

2.1 车-隧模型的建立

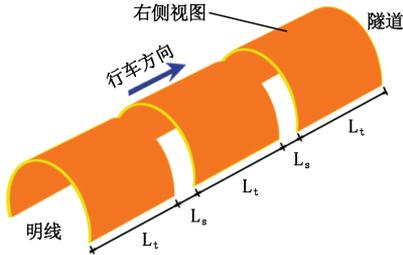
列车模型的外部构造及尺寸主要参照复兴号 CR400-BF,列车最外侧宽3.36 m,总高度4.05 m,车体总长74.6 m,列车由头车、中车、尾车三部分组成。模型忽略列车的细部构造,如转向架、受电弓等,运动起点设在列车头部距离隧道入口60 m处,列车模型如图1所示。



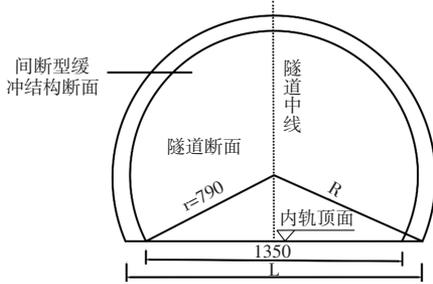
图1 列车模型外观右立面图

Fig. 1 Right elevation view of the exterior of the train model

隧道的类型选为断面积 100 m^2 、长度 1000 m 的双线隧道，压力监测点设在隧道壁面内侧最高点，距隧道入口 60 m 处。间断型缓冲结构为常规的隧道外部缓冲结构，缓冲结构与隧道居中对齐，设置如图 2 所示。



(a) 外观布置图



(b) 横断面图

图2 结构设置图

Fig. 2 Layout of intermittent buffer structure

2.2 定义边界条件及划分网格

计算域模型尺寸为 $250 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ ，隧道表面、计算域近端、计算域底面设置为壁面边界 (wall)，计算域侧面、远端及顶面设置为压力远场边界 (Pressure-far-field)，列车与隧道、缓冲结构需进行相对滑移实现信息交换，接触面设置为滑移界面 (interface)。用非结构化网格划分车头、车尾，结构化网格划分车身，在间断型缓冲结构间断处、接口处、测点处及出入口处都采用更小尺寸的网格进行加密，计算域及边界定义如图 3 所示。

2.3 数值计算方法验证

为验证数值模拟计算所得结果的正确性，将数值模拟的计算结果用文献 [15] 中模型试验数据印证，为保证模型试验与数值计算所用模型参数无偏

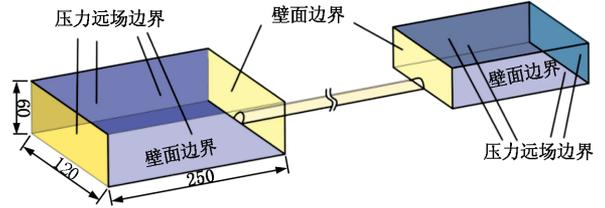


图3 计算域及边界定义图

Fig. 3 Calculation domain and boundary definition

差，将数值计算模型参数修改为模型试验参数。模型试验具体参数如下：模型缩小比例为 $1:17.6$ ，列车总长 2.92 m ，车速 55.98 m/s ，隧道总长 28 m ，隧道断面积为 0.258 m^2 ，测点布置在距隧道入口 14.2 m 处。

由图 4 可知，数值模拟所得压力最大值与模型试验相近，两者之间存在的微小差异主要是模拟环境有差异导致的，但对数值模拟结果无影响。经过验证数值模拟计算得到的数据与模型试验的数据极为接近。因此，采用数值模拟方法得出的隧道初始压缩波的数据，可以较为准确地反映列车突入隧道时压缩波的传播规律。

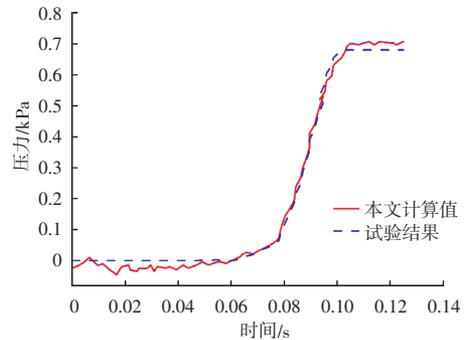


图4 数值模拟与文献

Fig. 4 Numerical simulation and literature

3 数值模拟结果及数据分析

通过控制缓冲结构单一参数的变化，对比隧道初始压缩波的压力最大值和压力梯度最大值，分析间断型缓冲对隧道气动效应的减缓效果，得出间断型缓冲结构最优的设计参数。选取 13 种工况，研究间断型缓冲结构的节数 n 、节长 L_1 、节间距 L_2 、断面面积 S_d 等参数对缓解效果的影响。

3.1 缓冲结构节数变化对隧道气动效应的影响

取断面面积为 150 m^2 的间断型缓冲结构为研究对象，节长 $L_1 = 10 \text{ m}$ ，节间距 $L_2 = 1 \text{ m}$ ，工况 1、2、

道桥技术

3 分别对应缓冲结构的节数为 2、3、4 节。为探究间断型缓冲结构的节数变化对隧道气动效应的影响,将列车在不同节数工况下产生的压力及压力梯度曲线,与无缓冲结构对比,如图 5 所示。

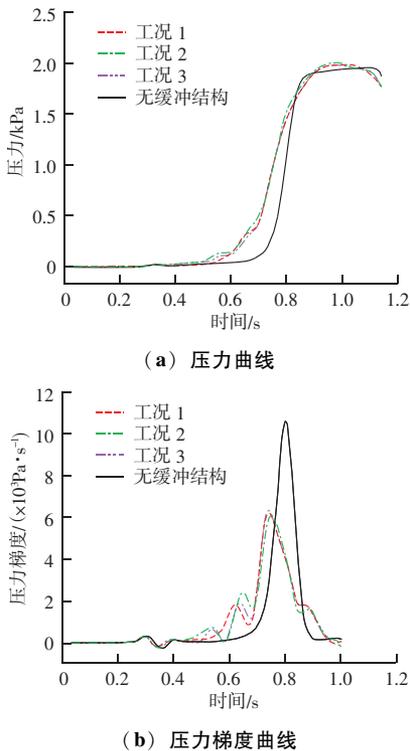


图 5 节数变化压力及压力梯度曲线对比

Fig. 5 Comparison of section number variation pressure and pressure gradient curve

由图 5 (a) 可知,与无缓冲结构相比,加设间断型缓冲结构的压力曲线上升缓慢,曲线出现明显拐点,压力上升速度明显减小,但对初始压缩波最大压力值无明显影响。随着缓冲结构节数的改变,压力曲线最大压力值无明显变化,但曲线整体陡峭程度随节数发生显著变化,具体表现为 3 节间断型缓冲结构压力曲线上升最缓慢,2、4 节上升较快且相差不大。由图 5 (b) 可知,与无缓冲结构相比,加设间断型缓冲结构,压力梯度曲线由单一峰值转变为多峰共存,较明显的降低了压力梯度的最大值,使隧道气动效应得到有效缓解。随着缓冲结构节数的改变,压力梯度曲线发生较为明显的变化,其中 3 节间断型缓冲的降低效果最好,达到 41.87%,2 节间断型缓冲结构的降低效果次之,达到 41.35%,4 节间断型缓冲结构降低效果最差,达到 40.10%。综上所述,3 节为间断型缓冲结构的最优节数。

3.2 缓冲结构节长变化对隧道气动效应的影响

取 3 节间断型缓冲结构为研究对象,断面面积 $S_d = 150 \text{ m}^2$,节间距 $L_s = 1 \text{ m}$,工况 4、5、2、6、7、8 分别为节长 L_l 取 8、9、10、11、12、13 m。为探究间断型缓冲结构节长变化对隧道气动效应的影响,将列车在不同节长工况下产生的压力及压力梯度曲线,与无缓冲结构对比,如图 6 所示。

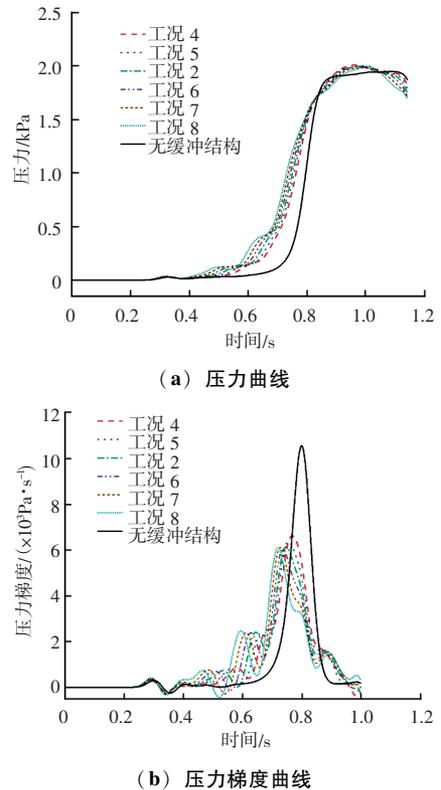


图 6 节长变化压力及压力梯度曲线对比

Fig. 6 Comparison of pitch length change pressure and pressure gradient curve

由图 6 (a) 可知,与无缓冲结构相比,加设间断型缓冲结构,压力曲线上升缓慢,坡度较缓,曲线整体呈现分段上升的趋势,初始压缩波压力最大值有略微的提升,但变化不明显。随着节长的增大,压力曲线变得愈加平缓,上升愈加缓慢,当节长 11 m 时,继续增大节长,压力曲线波形相似,但压力曲线反而陡峭。由图 6 (b) 可知,与无缓冲结构相比,加设间断型缓冲结构,压力梯度曲线由单一峰值转变为多峰值共存,且加设缓冲结构较明显地降低了压力梯度的最大值,使隧道气动效应得到有效缓解。随着节长的增大,多峰值共存现象愈加明显,当节长为 11 m 时,各小峰峰值达到最大,与之

对应的最大压力梯度峰值降到最低, 继续增大节长, 初始压缩波压力梯度最大值反而增大。综上所述, 节长 11 m 是间断型缓冲结构的最优节长, 对压力梯度最大值的降低效果最好, 达到 42.89%。

3.3 缓冲结构节间距变化对隧道气动效应的影响

取 3 节间断型缓冲结构为研究对象, 断面面积为 $S_d = 150 \text{ m}^2$, 节长 $L_l = 11 \text{ m}$, 工况 9、10、11、6 分别为节间距 L_s 取 0.25、0.5、0.75、1 m。为探究节间距变化对隧道气动效应的影响, 将列车在不同节间距工况下产生的压力及压力梯度曲线, 与无缓冲结构对比, 如图 7 所示。

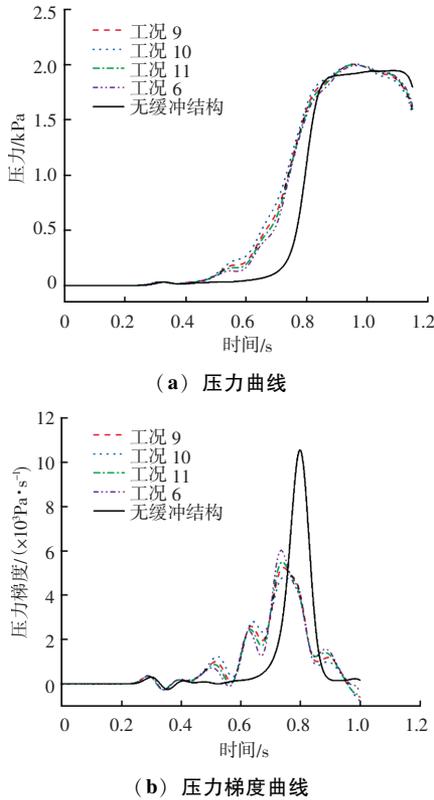


图 7 节间距变化压力及压力梯度曲线对比
Fig. 7 Comparison of pressure and pressure gradient curves with changes in inter nodal spacing

由图 7 (a) 可知, 与无缓冲结构相比, 加设间断型缓冲结构, 压力曲线上升缓慢, 坡度较缓, 曲线整体呈现分段上升, 出现多处拐点, 初始压缩波压力最大值有略微的提升, 但变化不明显。随着节间距的改变, 压力曲线坡度随之改变, 列车车头在穿越间断处时, 伴随着能量波叠加转化及压力的释放, 在压力曲线会呈现不同程度的拐点。由图 7 (a) 可以看出, 在节间距为 0.5 m 时, 压力曲线坡度最

缓, 曲线上升最慢。由图 7 (b) 可知, 与无缓冲结构相比, 加设间断型缓冲结构, 压力梯度曲线由单一峰值转变为多峰值共存, 且较明显的降低了压力梯度的最大值, 使隧道气动效应得到有效缓解。改变缓冲结构的节间距, 同时改变了隧道间断处压力的释放效率以及隧道内复杂的能量波反射、转换过程, 当节间距为 0.5 m 时, 此时压力的释放效率及能量波的转换达到最佳, 对压力梯度的降低效果最好, 形成的多峰现象最明显。综上所述, 节间距 0.5 m 是间断型缓冲结构的最优节间距, 对压力梯度最大值的降低效果达到 54.38%。

3.4 缓冲结构断面面积变化对隧道气动效应的影响

取 3 节间断型缓冲结构为研究对象, 节长 $L_l = 11 \text{ m}$, 节间距 $L_s = 0.5 \text{ m}$, 工况 12、13、10 分别为断面面积 S_d 取 110、130、150 m^2 。为探究断面面积变化对隧道气动效应的影响, 将列车在不同断面面积工况下产生的压力及压力梯度曲线, 与无缓冲结构对比, 如图 8 所示。

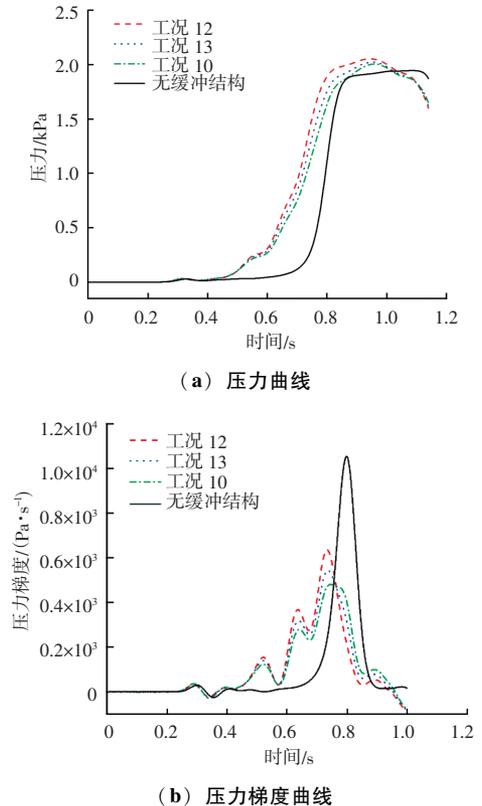


图 8 断面面积变化压力及压力梯度曲线对比
Fig. 8 Comparison of pressure and pressure gradient curves with changes in cross-sectional area

道桥技术

由图 8 (a) 可知, 与无缓冲结构相比, 加设间断型缓冲结构, 压力曲线上升缓慢, 坡度较缓, 达到压力最大值时间较长, 观察压力曲线波形可知, 曲线整体呈现分段上升, 出现多处拐点, 初始压缩波压力最大值有略微的提升, 但变化不明显。随着断面面积的增大, 压力曲线愈加平缓, 但对初始压缩波的压力最大值无显著影响。由图 8 (b) 可知, 与无缓冲结构相比, 加设间断型缓冲结构, 压力梯度曲线由单一峰值转变为多峰值共存, 列车车头穿越缓冲结构入口及间断处时, 减缓了压力上升速率, 压力梯度曲线产生新的峰值, 较明显的降低了压力梯度的最大值, 使隧道气动效应得到有效缓解。随着断面面积的增大, 压力梯度的最大值逐渐减小, 因此, 断面面积 110 m^2 时对压力梯度最大值的降低效果最差, 仅达到 39.70%, 断面面积 150 m^2 时对压力梯度最大值的降低效果最好, 达到 54.38%。综上所述, 工况 10 对应参数为间断型缓冲结构的最优参数。

4 结论

通过数值模拟计算, 在隧道入口加设不同参数的间断型缓冲结构, 对时速 350 km 的高速列车过隧道时产生的初始压缩波的压力及压力梯度进行分析, 得到以下结论:

(1) 节数及节长变化, 对压力梯度最大值的减缓效果影响较大, 3 节最好、2 节次之、4 节最差; 随着节长的增大, 对压力梯度最大值的降低效果呈现先增大后减小的趋势, 节长 11 m 时, 降低效果最好。

(2) 随着节间距的减小, 对压力梯度最大值的降低效果呈现先增大后减小的趋势, 节间距 0.5 m 时, 降低效果最好; 断面面积对隧道气动效应具有较为明显的影响, 随着断面面积的增大, 对压力梯度最大值的降低效果愈好, 且断面面积为 150 m^2 时降低效果最好。

(3) 设置间断型缓冲结构, 可以有效降低压力梯度最大值, 减缓隧道气动效应的影响, 但对降低压力最大值无明显作用。当间断型缓冲结构节数为 3 节、断面面积为 150 m^2 、节长为 11 m、节间距为 0.5 m 时, 对压力梯度最大值的降低效果最好, 达到 54.38%。

参 考 文 献

- [1] 侯文斌, 马瑶, 谢新雨, 等. 不同车高时速 400 公里高速列车对隧道初始压缩波的影响特征 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46 (5): 20-26.
- [2] 孙浩程, 王英学, 古理全, 等. 400 km/h 高铁隧道出入口缓冲结构开口率对微压波影响研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21 (2): 433-443.
- [3] 王雨舸. 层级缓冲结构对磁浮列车过隧道时压力波特性的影响研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [4] 马智豪, 景雪蕾, 杜迎春, 等. 高速磁浮隧道扩大等截面斜切型缓冲结构减缓初始压缩波机理研究 [J]. 实验流体力学, 2023, 37 (1): 100-112.
- [5] 杨伟超, 李国志, 何洪, 等. 400 km/h 高铁隧道组合型式缓冲结构泄压孔优化 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (10): 3648-3661.
- [6] YAMAMOTO A, Aerodynamics of a train and tunnel [C] // Proceedings of the First International Conference on Vehicular Mechanics, Detroit. 1968; 151-163.
- [7] OZAWA S, MURATA K, MAEDA T. Effect of ballasted track on distortion of pressure wave in tunnel and emission of micro-pressure wave [C] // BHR Group Conference Series Publication. mechanical engineering publications limited, 1997, 27; 935-950.
- [8] OZAWA S. Countermeasures to reduce micro-pressure waves radiating from exits of shinkansen tunnels, studies of micro-pressure wave radiated from a tunnel exit [C] // Proc. 7th int. symp. on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels. 1991, 253-266.
- [9] HOWE M S, IIDA M, MAEDA T, et al. Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood [J]. Journal of sound and vibration, 2006, 297 (1-2): 267-292.
- [10] HOWE M S. Prolongation of the rise time of the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel [J]. Proceedings of the royal society of london. series A; Mathematical, physical and engineering sciences, 1999, 455 (1983): 863-878.
- [11] 骆建军, 姬海东. 高速列车进入有缓冲结构隧道的压力变化研究 [J]. 铁道学报, 2011, 33 (9): 114-118.
- [12] 闫亚光, 杨庆山, 骆建军. 缓冲结构对隧道气动效应减缓效果 [J]. 北京交通大学学报, 2013, 37 (4): 7-12.
- [13] 张童童, 闫亚光, 赵志超, 等. 高铁隧道内阶梯型缓冲结构气动效应分析 [J]. 太原理工大学学报, 2022, 53 (4): 779-785.
- [14] 王英学, 常乔磊, 任文强, 等. 间缝式开口隧道缓冲结构气动特性分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (1): 17-23.
- [15] 骆建军, 马伟斌. 高速铁路长隧道内缓冲结构的气动效应分析 [J]. 中国铁道科学, 2016, 37 (2): 48-55.