

台阶开孔式组合型缓冲结构的气动效应分析

Analysis of Aerodynamic Effect of the Combined Cushion Structure with Step Openings

杨彬彬, 闫亚光

(河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038)

摘要: 随着高速列车速度的不断提升, 车-隧气动效应不断加剧, 微气压波问题也变得愈发严重, 单一类型的缓冲结构已无法满足设计要求, 因此提出一种组合型缓冲结构——台阶开孔式组合型缓冲结构, 基于三维、可压缩、非定常 N-S 方程, 运用数值模拟的方法, 从开孔距离、开孔率、开孔数量、列车速度四个方面进行研究, 对不同工况下的初始压缩波的波前特性进行分析。结果表明: 台阶开孔式组合型缓冲结构, 当开孔距离为 14 m、开孔率为 24%、开孔数量为单孔、列车速度为 300 km/h 时对压力梯度的缓解效果最好, 达到 57.2%。

关键词: 高速铁路; 台阶开孔式缓冲结构; 压力梯度; 数值模拟; 微气压波

中图分类号: U451+.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0123-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.023

YANG Binbin, YAN Yaguang

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: With the continuous increase in high-speed train velocities, the train-tunnel aerodynamic effects intensify, and the micro-pressure wave problem becomes increasingly severe. Single-type buffer structures can no longer meet design requirements. Therefore, a combined buffer structure—a stepped vent combined buffer structure—is proposed. Based on the three-dimensional, compressible, unsteady Navier-Stokes equations, numerical simulations were employed to investigate four key parameters: vent distance, ventilation rate, number of vents, and train speed. The waveform characteristics of the initial compression wave under varying working conditions were analyzed. The results show that for the stepped vent combined buffer structure, the optimal mitigation effect on pressure gradient (reaching 57.2%) is achieved under the following conditions: vent distance 14 m, ventilation rate 24%, number of vents is single vent, train speed 300 km/h.

Key words: high-speed railway; step opening buffer structure; pressure gradient; numerical simulation; micro-pressure wave

0 引言

隧道洞口的微压波随着高速列车速度的提升而变得愈发严重, 过大的微压波不仅会严重影响附近居民的生活环境, 还会对隧道洞口的建筑物造成损坏^[1]。相关研究表明^[2]: 单一类型缓冲结构对微气压波的缓解效果有限, 而台阶开孔式组合型缓冲结构能进一步缓解隧道内气动效应。

国内外学者提出了多种方法来缓解隧道内的气动效应, 缓解方法分为两大类: 一种为对列车参数

作者简介: 杨彬彬 (1997—), 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: 2023-06-06

道桥技术

进行优化,减小车隧之间的阻塞比^[2];另一种为在隧道洞口加设缓冲结构或者利用隧道内结构达到增加初始压缩波的波前厚度^[3]。近年来国内外学者针对隧道洞口缓冲结构对微压波的缓解效果进行了大量的研究,骆建军等^[4]运用数值模拟方法研究了横通道对隧道内压力梯度产生的影响,得出随着横通道面积的增大隧内最大压力梯度值逐渐减少;王英学等^[5]提出了一种经济、高效的间缝式开口缓冲结构,能进一步提高缓冲结构的降低效率;李文辉等^[6]把变截面隧道与典型缓冲结构对隧道气动效应的缓解效果作对比,得出变截面隧道的压力缓解效果优于典型缓冲结构,但是对微气压波的缓解效果弱于典型缓冲结构;闫亚光等^[7-8]基于气动声学原理对喇叭型缓冲结构的参数进行优化,使压力曲线成线性增长,进而大幅度降低压力梯度值,并对不同开孔参数的缓冲结构作对比得出最优开孔参数;马智豪等^[9]对扩大等截面斜切型缓冲结构的作用机理进行研究,得出当斜切角度为 10° 时,对压力梯度的缓解效果最好;张童童等^[10]提出了一种联通式内缓冲结构,解决了因地形原因无法在隧道洞口设置缓冲结构的问题;任文强^[11]对高铁隧道顶部开口缓解微气压波的规律进行分析,得出了单开口、双开口的最优参数;高利民等^[12]对间断型缓冲结构进行了研究,得出了最优的间断参数;那艳玲等^[13]研究不同中间风井位置和不同形式洞口缓冲结构对地铁隧道压力波的影响,得出不同列车参数中间风井的最优位置;张洁等^[14]研究渐变开孔率缓冲结构对高速磁悬浮出口微气压波的影响,得出随着渐变开孔-断面扩大型缓冲结构开孔率的增加,微气压波的缓解效果不断增强,当开孔率为27.5%时缓解效果最佳;王田天等^[15]对联通式缓冲结构进行研究,得出当联通式缓冲结构与断面扩大开孔型缓冲结构组合,可将隧道口微气压波幅值降低67.3%;Miyachi^[16]基于理论分析的研究方法,推导出考虑地形因素后的微压波预测公式。

国内外学者对单一类型缓冲结构进行了大量积极探索,但对组合型缓冲结构研究较少,为了进一步缓解隧道入口微气压波的危害,提出了台阶开孔式组合型缓冲结构。基于FLUENT软件建立列车-隧道计算模型,验证模型的可行性后,对不同工况

的开孔参数进行分析,得出最优的设计参数。

1 数值模拟

1.1 模拟理论基础

当列车以不小于250 km/h的速度由明线驶入隧道中,气体与列车壁和隧道壁会产生摩擦和传热,因此隧道内流场假设为非稳态、黏性、可压缩流的三维流场,采用Navier-Stokes方程进行求解,控制方程描述如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} +$$

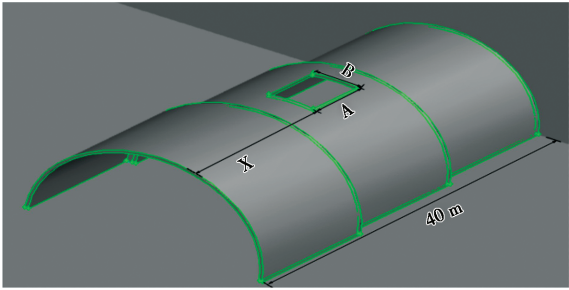
$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right]$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij} \right] \\ P = \rho R T \\ \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{cases} \quad (3)$$

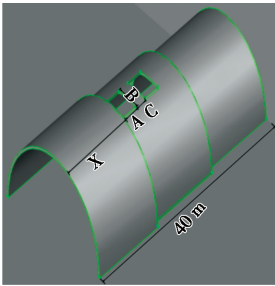
式中: ρ 为密度; u_i 为速度压力; x_i 为坐标分量; T 为温度; R 为气体常数; μ 为空气动力黏度; δ_{ij} 为克罗内克符号($i=j, \delta_{ij}=1; i \neq j, \delta_{ij}=0$); E 为气体定压比热比, $E=e+1/2 u_k$, u_k 为总能,常温下 $e=c_v T$, c_v 为定容比热; K 为热传导系数; P 为理想气体压力。

1.2 建立模型

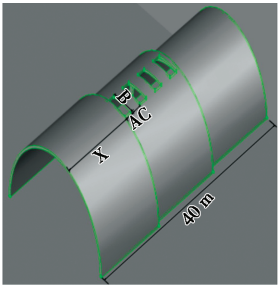
选取复兴号CR400-BF型列车为计算模型,车速为350 km/h,三车编组,总长74.6 m。隧道为标准双线隧道,隧道断面积为 100 m^2 ,隧道全长500 m,在隧道内设置5处测点,距离隧道入口分别为50 m (1[#])、100 m (2[#])、150 m (3[#])、250 m (4[#])、350 m (5[#])处的隧道顶部。台阶开孔式缓冲结构为40 m三阶等长,各阶断面积分别为170、145、120 m^2 ,开孔位置为顶部开孔,缓冲结构参数如图1和表1所示。



(a) 单开孔



(b) 双开孔



(c) 四开孔

图1 缓冲结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of hood

表1 台阶开孔式缓冲结构工况参数表

Table 1 Parameter table of step opening buffer structure

工况	开孔数量/个	开孔率/%	洞孔尺寸/(m×m)	开孔距离/m
G1	1	24	4×6	X=3、A=6、B=4
	1	24	4×6	X=7、A=6、B=4
	1	24	4×6	X=14、A=6、B=4
	1	24	4×6	X=20、A=6、B=4
G2	1	16	4×4	X=14、A=4、B=4
	1	24	4×6	X=14、A=6、B=4
	1	32	4×8	X=14、A=8、B=4
	1	40	4×10	X=14、A=10、B=4
G3	1	24	4×6	X=14、A=6、B=4
	2	24	4×3	X=14、A=3、B=4、C=2
	4	24	4×1.5	X=14、A=1.5、B=4、C=2

1.3 网格划分及边界条件

采用结构化网格和非结构化网格对计算模型进行划分，列车的头尾部由于结构复杂，采用非结构化网格划分，其余部分用结构化网格进行划分。模型中网格最小尺寸为0.05 m，时间步长设为0.005 s。

采用滑移网格技术进行数值模拟，列车与隧道之间的信息交换通过滑移交界面 interface 来完成。计算模型的边界条件分为两种类型：计算域顶面、侧面、远端界面设定为 Pressure - far - field 边界条件，计算域底面、隧道底面设置为 wall 边界条件。计算域尺寸为240 m×120 m×50 m，无缓冲结构计算域

和边界尺寸如图2所示。
气体介质为理想气体 ideal - gas，黏滞系数为 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ，导热系数为 $0.024 \text{ 2 W/(m} \cdot \text{K)}$ ，静压设置为标准大气压 101 325 Pa 。

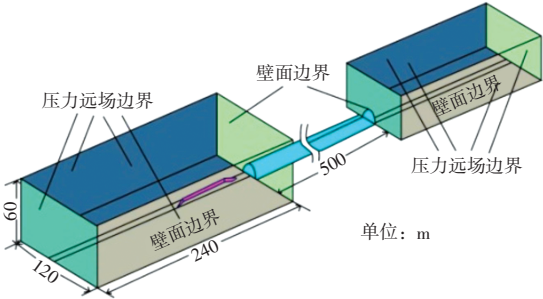


图2 无缓冲结构计算域示意图

Fig.2 Diagram of computation domain of unhood

1.4 模型验证

将本文数值模拟数据与中南大学模型试验数据进行对比，验证数值计算方法的可行性。模型试验采用两车编组，列车长2.92 m，速度为55.98 m/s，隧道断面积为 0.258 m^2 ，隧道长28 m，缩尺比例为1/17.6，测点距离隧道入口约14.2 m。图3为试验结果和本文计算值的比较。

数值模拟得出的计算初始压缩波曲线与验证模型的试验结果基本吻合，但两者的曲线存在细微的不同，是由模型试验环境和数值模拟环境的误差所引起的，但两者的最大差值在3%以内，不会对结果造成显著影响，验证了计算模型的可行性。

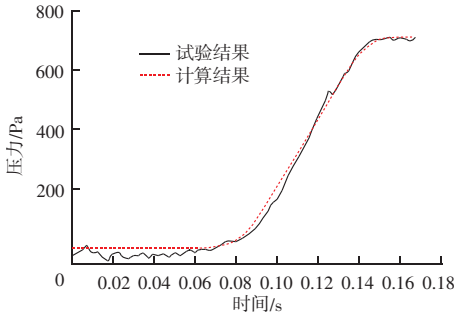


图3 试验结果和计算结果对比图

Fig.3 Comparison of test results and calculated results

2 结果与分析

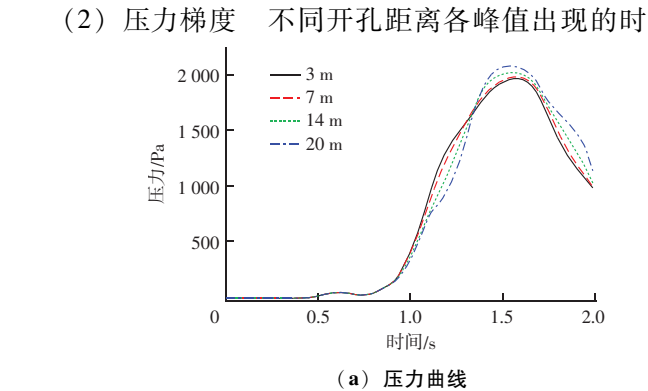
2.1 开孔距离

当列车速度为350 km/h，开孔率为24%，开孔数量为1，开孔距离分别取3、7、14、20 m时，分析开孔距离对隧道气动效应的影响。

道桥技术

由图 4 和表 2 计算结果可得：

(1) 初始压缩波 初始压缩波压力曲线的上升速率并非随着开孔距离的增加而不断降低。当开孔距离大于 14 m 时，随着开孔距离的增加，初始压缩波压力曲线的上升速率则不断增加；各测点压力最大值的变化趋势相同，当开孔距离小于 14 m 时，其开孔距离下的初始压缩波压力最大值均小于无缓冲结构对应的最大值。



间基本相同。当开孔距离从 3 m 增加到 20 m 时，列车驶入缓冲结构所产生的波峰值 A_1 不断降低， A_2 则不断增加。与开孔距离为 14 m 相比，当开孔距离为 3、7 m 时，50 m 测点处的压力梯度峰值分别增加了 23.7% 和 11.8%；当开孔距离为 20 m 时，50 m 测点处的压力梯度峰值增加了 34.1%；当开孔距离 14 m 时， A_1 、 A_2 波峰值基本相等，此时对压力梯度最大值的缓解效果最好，缓解率为 57.2%。

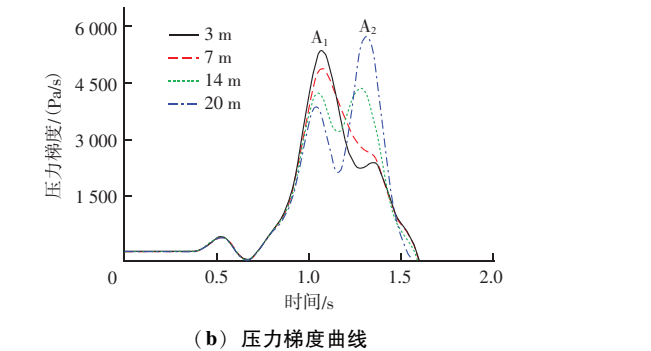


图 4 不同开孔距离下 100 m 测点处压力和压力梯度曲线
Fig. 4 Pressure and pressure gradient curves of measuring point 100 m at different opening distances

表 2 不同开孔距离下各测点的压力和压力梯度峰值

Table 2 The peak pressure and pressure gradient of each measuring point at different opening distance

开孔距离/m	压力/Pa					压力梯度/(Pa/s)				
	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m
3	1 962. 93	1 959. 83	1 946. 35	1 924. 98	1 863. 08	5 730. 46	5 344. 53	5 064. 04	4 684. 83	4 352. 37
7	1 982. 73	1 976. 72	1 966. 58	1 946. 06	1 876. 62	5 178. 90	4 873. 05	4 668. 34	4 389. 07	4 184. 40
14	2 021. 01	2 015. 45	2 006. 95	1 988. 29	1 930. 88	4 632. 04	4 309. 20	4 162. 52	3 930. 08	3 788. 28
20	2 070. 81	2 065. 42	2 057. 41	2 036. 71	1 977. 68	6 211. 37	5 736. 72	5 346. 88	4 771. 49	4 319. 93

2.2 开孔率

当列车速度为 350 km/h，开孔距离为 14 m，开孔数量为 1，开孔率 α 分别取 16%、24%、32% 和 40% 时，分析开孔率对隧道气动效应的影响。

由图 5 和表 3 计算结果可得：

(1) 初始压缩波 初始压缩波压力曲线的上升速率在 1.19 s 前，随着开孔距离的增加而不断降低；

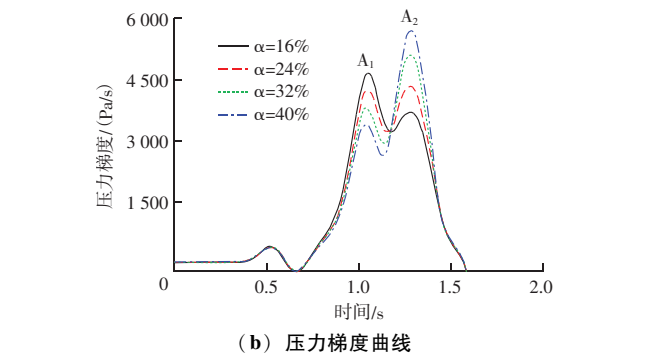
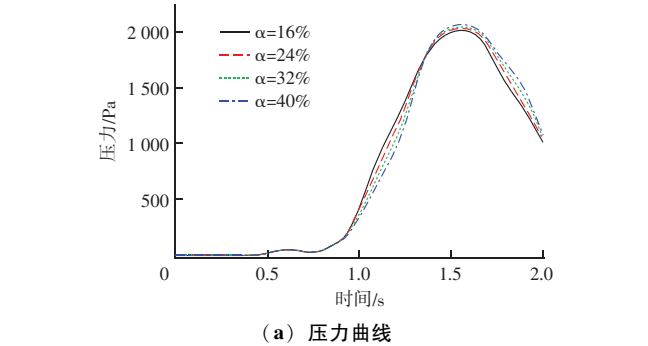


图 5 不同开孔率下 100 m 测点处压力和压力梯度曲线
Fig. 5 Pressure and pressure gradient curves of measuring point 100 m at different opening rate

在 1.19 s 后，随着开孔距离的增加，初始压缩波压力曲线的上升速率则不断增加，压力峰值也不断升高。各测点压力最大值的变化趋势相同，当开孔率小于 32% 时，初始压缩波压力最大值均小于无缓冲结构对应的最大值。

(2) 压力梯度 不同开孔率下的峰值出现的时间基本一致。当开孔率 α 从 16% 增大到 40% 时, 波峰值 A_1 不断减小, A_2 波峰值则不断增大, 但 A_2 波峰值的增长率大于 A_1 波峰值的降低率; 当开孔率 α 为 24% 时, A_2 波峰值和 A_1 波峰值基本相同; 当开孔率

大于 24% 时, 随着开孔率的增加, 初始压缩波的最大压力梯度值也不断增加。相比于开孔率为 24%, 当开孔率为 32% 和 40% 时, 350 m 测点处的压力梯度峰值分别增加了 9.6% 和 18.1%, 因此开孔率为 24% 时, 对压力梯度的缓解效果最优。

表 3 不同开孔率下各测点的压力和压力梯度峰值

Table 3 The peak pressure and pressure gradient of each measuring point under different opening rate

开孔率/%	压力/Pa					压力梯度/(Pa/s)				
	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m
16	2 000.47	1 994.75	1 986.34	1 967.36	1 909.02	5 072.66	4 647.68	4 367.19	4 037.50	3 968.38
24	2 021.01	2 015.45	2 006.95	1 988.29	1 930.88	4 632.04	4 309.20	4 162.52	3 930.08	3 788.28
32	2 040.26	2 034.76	2 026.44	2 007.89	1 951.54	5 466.88	5 093.75	4 825.41	4 448.44	4 150.37
40	2 052.19	2 046.92	2 038.56	2 020.40	1 964.98	6 147.27	5 698.05	5 357.45	4 863.29	4 474.59

2.3 开孔数量

当列车速度为 350 km/h, 开孔距离为 14 m, 开孔率 $\alpha=24\%$, 开孔位置为顶部开孔, 开孔数量分别取 1、2、4 孔时, 分析开孔数量对隧道气动效应的影响。

由图 6 和表 4 计算结果可得:

(1) 初始压缩波 初始压缩波压力的上升速率随着开孔数量的增加而不断增加, 压力峰值也不断升高。当开孔数量为 4 孔时, 初始压缩波压力最大值略大于无缓冲结构对应的压力最大值, 但是相差较小。各测点的压力最大值变化趋势相同, 说明开孔数量对初始压缩波压力影响不大。

(2) 压力梯度 压力梯度出现了明显的两个波峰值 A_1 、 A_2 , 不同开孔数量下, 各峰值出现的时间大致相同。当开孔数量从 1 孔增加到 4 孔时, A_1 波峰值不断减小, A_2 波峰值则不断增大, 但 A_2 波峰值的增长率大于 A_1 波峰值的降低率; 当开孔数量为 1 孔时, A_1 波峰值和 A_2 波峰值基本相同。相比于开孔数量为 1 孔时, 当开孔数量为 2 孔或者 4 孔时, 150 m 测点处的压力梯度峰值分别增加 7.9% 和 20.6%, 因

此开孔数量为单孔时, 压力梯度的缓解效果最好。

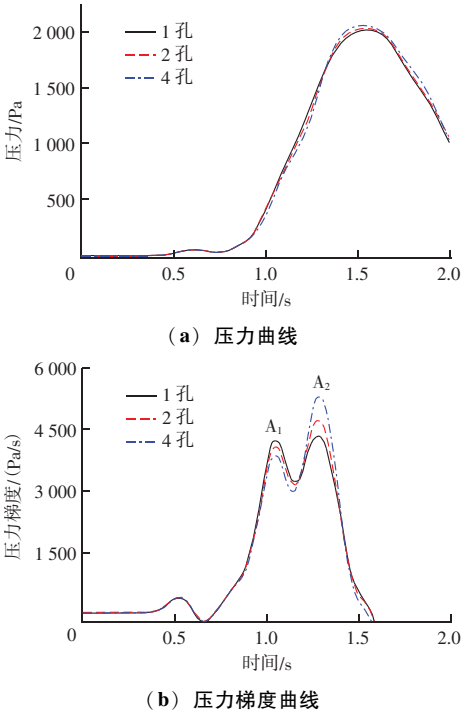


图 6 不同开孔数量下 100 m 测点处压力和压力梯度曲线
Fig. 6 Pressure and pressure gradient curves of measuring point 100 m under different number of openings

表 4 不同开孔数量下各测点的压力和压力梯度峰值

Table 4 The peak pressure and pressure gradient of each measuring point under different number of holes

开孔数量 /(个)	压力/Pa					压力梯度/(Pa/s)				
	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m
1	2 021.01	2 015.45	2 006.95	1 988.29	1 930.88	4 632.04	4 309.20	4 162.52	3 930.08	3 788.28
2	2 036.09	2 031.55	2 023.88	2 005.72	1 949.42	5 005.86	4 717.97	4 498.46	4 198.83	3 973.83
4	2 057.74	2 053.95	2 047.72	2 030.48	1 975.78	5 671.49	5 309.38	5 019.17	4 604.69	4 287.87

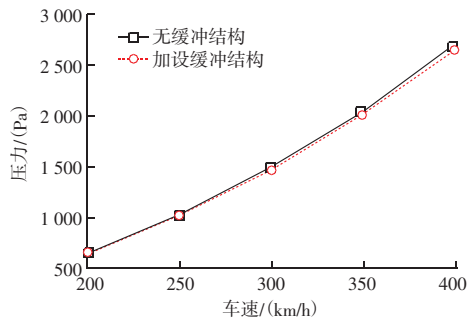
2.4 列车速度

开孔距离为 14 m, 开孔率为 24%, 开孔数量为 1, 列车速度分别取 200、250、300、350 和 400 km/h 时, 分析列车速度对隧道气动效应的影响。

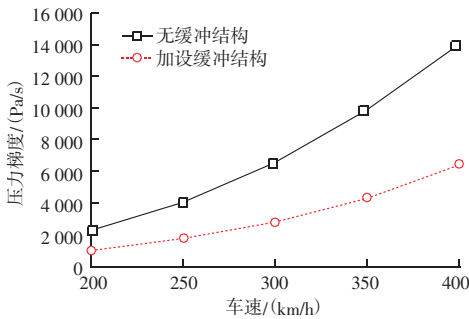
由图 7 和表 5 计算结果可得:

(1) 初始压缩波 各测点的初始压缩波压力最大值变化趋势基本相同, 压力的上升速率随着车速的提升而不断增加, 压力峰值不断升高。当车速为

道桥技术



(a) 压力曲线



(b) 压力梯度曲线

图7 不同车速下100 m测点压力和压力梯度曲线
Fig.7 Pressure and pressure gradient curves of measuring point 100 m at different speed

200 km/h时,初始压缩波压力最大值略高于无缓冲结构,但相差不大,其余车速下初始压缩波压力最

表5 不同车速下各测点的压力和压力梯度峰值

Table 5 The peak pressure and pressure gradient of each measuring point at different speed

车速 /(km/h)	压力/Pa					压力梯度/(Pa/s)				
	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m	50 m	100 m	150 m	250 m	350 m
200	660.93	658.32	651.80	637.80	617.63	1 013.67	959.38	914.46	810.55	751.56
250	1 027.22	1 022.85	1 018.63	997.77	924.48	1 862.10	1 740.62	1 651.95	1 527.74	1 442.19
300	1 477.42	1 471.61	1 467.38	1 451.23	1 391.70	3 005.47	2 821.89	2 696.11	2 531.24	2 347.66
350	2 021.01	2 015.45	2 006.95	1 988.29	1 930.88	4 632.04	4 309.20	4 162.52	3 930.08	3 788.28
400	2 660.62	2 656.33	2 644.10	2 614.88	2 559.57	6 837.90	6 337.35	6 152.38	5 985.55	5 964.06

3 结论

为解决车-隧气动效应,提出了组合型缓冲结构—台阶开孔式组合型缓冲结构,采用数值模拟方法对不同工况的初始压缩波的波前特性进行分析,得到以下主要结论:

(1) 随着缓冲结构开孔距离的增加,缓冲结构对压力梯度的减缓效果并非随着开孔距离的增加而增加,而是当开孔距离为14 m时,波峰值基本相同,此时对压力梯度的减缓效果最好。

(2) 随着缓冲结构开孔率的增加,A₁波峰值逐渐减小,A₂波峰值逐渐增大;当开孔率α为24%时,缓解

大值均小于同等速度驶入无缓冲结构时压力最大值。

(2) 压力梯度 不同车速下各测点处压力梯度值变化规律基本一致。随着车速的不断提升,无缓冲结构工况下和加设缓冲结构工况下的初始压缩波压力梯度最大值都逐渐增大。不同车速下缓冲结构对初始压缩波最大压力梯度值的缓解效果,各不相同。在100 m测点处,当车速为200 km/h时,初始压缩波最大压力梯度值缓解率为56.60%;当车速为250 km/h时,初始压缩波最大压力梯度值缓解率为57.06%;当车速为300 km/h时,初始压缩波最大压力梯度值缓解率为57.2%;当车速为350 km/h时,初始压缩波最大压力梯度值缓解率为56.64%;当车速为400 km/h时,初始压缩波最大压力梯度值缓解率为54.8%。车速从200 km/h增加到300 km/h时,台阶开孔式缓冲结构的缓解效果随着车速的增加而提高,当车速从300 km/h增加到400 km/h时,台阶开孔式缓冲结构的缓解效果随着车速的增加而降低。但是效果均在54.8%~57.2%之间,说明台阶开孔式缓冲结构可以有效地缓解气动效应。

效果最好,此时对压力梯度的减缓效果达到了57.2%。

(3) 在单开孔工况下,各峰值出现的时间大致相同。随着开孔数量的增加,A₁波峰值不断减小,A₂波峰值则不断增大,但A₂波峰值的增长率大于A₁波峰值的降低率,相比于开孔数量为1孔时,当开孔数量为2孔或者4孔时,150 m的压力梯度峰值分别增加7.9%和20.6%,因此当开孔数量为单孔时,对压力梯度最大值的缓解效果最好。

(4) 不同车速下台阶开孔式缓冲结构的缓解效果各不相同,当车速从200 km/h增加到300 km/h时,台阶开孔式缓冲结构的缓解效果随着车速的增加而提高,当车速从300 km/h增加到400 km/h时,

台阶开孔式缓冲结构的缓解效果随着车速的增加而降低。

参 考 文 献

- [1] 高波, 王英学. 高速铁路隧道设计 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [2] 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.
- [3] 蒯童童, 杨明智, 张雷, 等. 高速磁浮列车流线型头部拱形结构对列车与隧道耦合气动特性的影响 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (9): 2515–2523.
- [4] 骆建军, 吴尽, 陈鹏飞. 高速铁路并联隧道横通道对隧道内压力变化的影响 [J]. 北京交通大学学报, 2015, 39 (1): 8–13.
- [5] 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.
- [6] 李文辉, 刘堂红, 周苗苗, 等. 变截面隧道与典型缓冲结构气动效应缓解效果对比分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (5): 1572–1581.
- [7] 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.
- [8] 闫亚光, 杨庆山, 骆建军. 基于气动声学理论的喇叭型隧道缓冲

结构优化 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51 (5): 832–839.

- [9] 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.
- [10] 张童童, 闫亚光, 康天龙, 等. 联通式内缓冲结构对隧道气动效应减缓效果 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (7): 2893–2900.
- [11] 任文强. 高铁隧道顶部开口缓冲结构微压波缓解规律分析及参数设计研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [12] 高利民, 闫亚光, 杨彬彬, 等. 高铁隧道间断型缓冲结构的气动效应分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 97–102.
- [13] 那艳玲, 牟野, 叶天震, 等. 高速地铁隧道洞口及风井对压力波的影响研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41 (4): 90–95, 101.
- [14] 张洁, 郭秉筠, 王崑宇, 等. 缓冲结构渐变开孔率对高速磁浮隧道出口微气压波影响 [J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1–11 [2025–04–18].
- [15] 王田天, 冯朝阳, 陆意斌, 等. 400 km/h 高铁隧道联通式缓冲结构对微气压波的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (4): 1618–1630.
- [16] MIYACHI T. Acoustic model of micro-pressure wave emission from a high-speed train tunnel [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 391: 127–152.

(上接第 28 页)

期增幅趋于平缓; 不同水胶比、同一硅灰掺量下, 水胶比为 0.60 的试验组在相同试验龄期内的干燥收缩率均高于水胶比为 0.45 的试验组, 硅灰掺量为 20% 时, 在 90 d 干燥收缩率较基准组分别可增加 25.1% 和 29.5%。

参 考 文 献

- [1] 邢又家. 低温环境下桥梁结构高性能混凝土耐久性研究 [J]. 江西建材, 2022 (4): 25–27.
- [2] 王钦. 掺硅粉与粉煤灰水下不分散混凝土试验研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52 (4): 30–32.
- [3] 陈勇. 粉煤灰及硅灰对再生粗骨料混凝土抗冲磨性能的影响研究 [J]. 江西建材, 2024 (3): 12–13.
- [4] 夏中升, 沙建芳, 郭飞, 等. 硅灰掺量及特性对极低水胶比体系水化产物及微结构影响 [J]. 混凝土, 2023 (12): 102–107.
- [5] 幸超群, 邓怡帆, 俊俊伟, 等. 硅灰-粉煤灰复合矿物掺合料对混凝土性能的影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2022 (9): 049.
- [6] 谢群, 李海波, 王火明, 等. 矿物掺合料对水泥砂浆性能的影响 [J]. 中外公路, 2021, 41 (3): 291–294.
- [7] 卢玲霞. 矿物掺合料对高强机制砂混凝土早期收缩开裂性能的

影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 17–21, 30.

- [8] TAO L, CHENG H, QIANG S. Early-age hydration reaction and strength formation mechanism of solid waste silica fume modified concrete [J]. Molecules, 2021, 26 (18): 1–16.
- [9] 苏胜威. 抽水蓄能电站高性能抗裂面板混凝土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 102–107.
- [10] 彭忠伟. 不同硅灰掺量对桥面板蒸养混凝土强度影响试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 48–53.
- [11] 方小利, 刘立明, 严继康, 等. 微硅粉掺量对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2021 (7): 62–65.
- [12] SINGNIAO P. Effect of silica fume and limestone powder on mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 897 (1): 1–5.
- [13] RAKESH C, RAJESH G. Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume [J]. Structures, 2021, 33: 971–985.
- [14] 黄正峰, 欧忠文, 罗伟, 等. 硅灰和减缩剂对混凝土自收缩和孔隙的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022 (9): 3077–3083.