

文章编号:1673-9469(2026)02-0045-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.006

挡板间断型缓冲结构对隧道气动效应的影响

闫亚光¹, 闫健¹, 王伟娟², 张磊¹, 解会兵³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063205;

3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为解决高速列车穿行隧道过程中带来的车隧气动效应问题, 提出一种新型挡板间断型缓冲结构。现阶段, 缓冲结构研究尚未针对缓冲节长度比以及挡板间断型缓冲结构相关内容展开。基于 κ - ε 两方程紊流模型, 利用 Ansys Fluent 软件提供的动网格技术, 模拟高速列车以 350 km/h 的速度穿行缓冲结构与隧道的全过程。通过优化设计缓冲结构间断距离 a 、各缓冲节长度 L_i 、截面积 A_i 以及节数 n 等变量, 设计出一种能有效减缓压力梯度峰值的挡板间断型缓冲结构。计算结果表明: 挡板间断型缓冲结构的间断距离 $a=0.50$ m、各缓冲节的长度比 $L_1:L_2:L_3=1:1:1$ 、截面积 $A_1=A_2=A_3=150$ m²、节数 $n=3$ 时的压力梯度减缓效果最好, 达到 44.04%。

关键词: 车隧气动效应; 挡板间断型缓冲结构; 高速列车; 压力梯度

中图分类号: U451⁺.3

文献标识码: A

Influence of Discontinuous Buffer Structure on Aerodynamic Effects of Tunnel

YAN Yaguang¹, YAN Jian¹, WANG Weijuan², ZHANG Lei¹, XIE Huibing³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063205, China;

3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To solve the aerodynamic effects of road tunnel caused by high-speed trains passing through tunnels, this paper proposes a new type of discontinuous buffer structure. In the current research on buffer structures, no research has been conducted on the length ratio of buffer sections and the discontinuous buffer structure. Based on the κ - ε two-equation turbulence model, the dynamic mesh technology provided by Ansys Fluent software is used to simulate the entire process of high-speed trains passing through buffer structures and tunnels at a speed of 350 km/h. By optimizing variables such as the discontinuity distance a of the buffer structure, the length L_i of each buffer section, the cross-sectional area A_i , and the number of buffer sections n , a discontinuous buffer structure that can effectively mitigate pressure gradient peaks is designed. The calculation results show that when these variables are set as $a=0.50$ m, $L_1:L_2:L_3=1:1:1$, $A_1=A_2=A_3=150$ m² and $n=3$, the pressure gradient reduction effect is the best, reaching 44.04%.

Key words: aerodynamic effects of road tunnel; discontinuous buffer structure; high-speed trains; pressure gradient

客运列车的运营速度和运营里程是反映一个国家交通现代化程度的重要标志。伴随高速铁路技术的不断提升与更迭, 列车空气阻力急剧增大、

能耗增加, 在高速列车交会行驶、穿越隧道等运营过程中, 会产生一系列列车空气动力问题, 如损害列车车体、影响旅客乘车体验、增加列车能耗等。

收稿日期: 2024-05-31 修回日期: 2024-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708020)

第一作者: 闫亚光(1978—), 男, 河北永年人, 博士, 副教授, 研究方向: 隧道空气动力学。

其中,车隧问题尤为突出。对此,国内外学者针对列车进入隧道时产生的隧道气动效应问题进行了系统的研究。王英学等^[1]对单间缝和双间缝缓冲结构的开口率进行优化分析,得出双间缝缓冲结构可以更好地降低压力梯度值的结论。闫亚光等^[2]通过研究多种气动声学理论,对喇叭型缓冲结构进行优化设计,得出压力梯度减缓率最优的结构形式。邓隆^[3]对不同断面扩大率的拱形缓冲结构进行分析,得出1.6倍扩大率时的压力梯度峰值减缓效果最优,且缓冲结构长度的改变对压力梯度峰值的影响较小。刘磊^[4]对不同形式的阶梯型缓冲结构隧道气动效应进行研究,得出缓冲效果随阶梯型缓冲结构长度、阶数以及入口截面面积的增大而提高的结论。张童童等^[5]对联通式内缓冲结构的各项结构形式进行优化设计,提出了一种最优结构形式。赵汗青^[6]对一类新型截断缓冲结构的缓冲罩长度与截断间距进行分析,得出改变两个无量纲的几何参数对压力梯度峰值变化规律的影响。Yamamoto^[7]通过一系列试验研究得出,隧道出口形成的压缩波压强梯度最大值同微压波强度成正比,提出压缩波压力分布函数。Howe^[8]给出隧道内最大压缩波压强梯度的经验公式,为后续隧道空气动力学的研究提供了一种便于计算的理论支撑。Ozawa等^[9]基于相似原理针对日本的Bingo隧道中狭缝型开口缓冲结构对微压波的影响进行分析,证实了缓冲结构减缓微压波的作用。Vardy^[10]首先对相关工况进行了数值模拟,得出沿着隧道均匀开口比在防护罩密集开口效果更好的结论。Yamamoto^[11]的研究指出,高速列车在经过缓冲结构逐渐驶入隧道过程中产生的微气压波最大值与隧道内初始压缩波压力梯度峰值成正比。

为更好地解决车隧气动效应问题引发的一系列问题,本文提出一种新型缓冲结构——挡板间断型缓冲结构。这种结构将缓冲结构整体分割为若干独立单元,这些独立单元称作缓冲节;每个缓冲节之间存在的间断距离可使缓冲结构内部高速气流外泄,促使压力梯度峰值降低。在现阶段研究中,尚未涉及缓冲节长度变化对缓冲效果的影响研究。目前,间断型缓冲结构的研究存在空缺,工程应用亟待相关数据支撑。与现阶段投入工程应用中的缓冲结构相比,挡板间断型缓冲结构受施工场地制约较小,可实现装配式施工,也能避免落石危害,保证列车行车安全,更具经济性与实用

性。选取距离山体壁面150m的隧道内中心顶点为测点,以测点处压力梯度减缓效果为研究对象,利用数值模拟技术对挡板间断型缓冲结构的间断距离、缓冲节的长度、截面积、节数进行分析;对比各类工况得出的压力梯度减缓效果,得出最优减缓效果下的挡板间断型缓冲结构,为实际工程应用提供参考。

1 理论基础

1.1 流体控制方程

计算域内的介质设置为理想气体,遵循气体状态方程。隧道空气黏性效应采用稳定流动摩擦系数表示。流体的流动规律遵循质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律。流体控制方程以这三大定律为依据构建。

(1)连续性方程:

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

(2)动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (2)$$

(3)能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho UT) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad}T\right) + S_T \quad (3)$$

(4)理想气体状态方程:

$$P = \rho RT \quad (4)$$

式中: u_i 和 u_j 为 u 、 v 、 w 三个坐标方向的速度分量, m/s ; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; x_i 和 x_j 为 x 、 y 、 z 的坐标分量, m ; τ_{ij} 为应力分量, Pa ; F_i 为微元体中的体力, N/m^3 ; P 为压力, Pa ; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; k 为流体传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_T 为黏性耗散项, W/m^3 ; R 为摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ^[11]。

1.2 动网格技术

利用Ansys Fluent软件所提供的动网格层铺法技术,对列车经挡板间断型缓冲结构驶入隧道时的相关工况展开模拟。通过编译UDF(User Defined Functions)来实现列车的运行模拟,各区域之间通过交接面进行数据传递。

1.3 紊流模型

当列车高速驶入隧道时,车体表面与隧道壁之间的紊流现象变得愈发复杂,该流动属于高雷诺数紊流流场的范畴。因此,本文选取两方程模型中的Realizable κ - ϵ 模型作为计算所用的紊流模型。

1.4 挡板间断型缓冲结构的作用机理

挡板间断型缓冲结构由若干个独立的缓冲节组成。在每个靠近隧道一侧的缓冲节上,设置有下边缘与隧道内轮廓平齐的挡板。该挡板从地面开始环绕并连接整个缓冲节内壁,且与缓冲节内壁呈 90°夹角;而缓冲结构的间断处设置在挡板与下一个缓冲节之间,如图 1 所示。

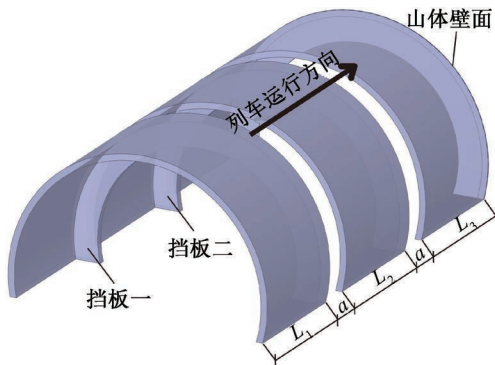


图 1 挡板间断型缓冲结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of discontinuous buffer structure

列车高速驶入隧道的过程中,部分初始压缩波在缓冲结构与隧道壁面间发生重叠和干扰,进而产生一系列的压缩波与膨胀波。初始压缩波传递至隧道入口时,一部分波会以低频脉冲波的形式从隧道出口辐射而出,形成微气压波,也称作诱发波;另一部分则会在隧道出口处反射回隧道内部,形成膨胀波。该膨胀波会与隧道内部的压缩波相互反射、叠加,在此过程中,列车周围的气体流动状态受到隧道与列车壁面之间摩擦、传热等因素的影响,变得更加剧烈,其所携带的能量也在各类波的叠加与干扰中逐步衰竭。

挡板的存在增大了流体从间断处流出的距离;根据伯努利原理,在缓冲结构内外压强差的作用下,缓冲结构内侧的流体在间断处的流速加快,扩散量增大。高速气流在挡板内侧产生的涡流与挡板对初始压缩波能量的反射作用相结合,共同削弱了传递至隧道内的初始压缩波能量;而间断处能够使初始压缩波的能量外泄与反射,进一步提高缓冲结构的减缓效果。基于上述机理,对挡板间断型缓冲结构进行优化分析,得出缓冲效果最优的结构形式。

列车穿行缓冲结构时的空气流动属于不等熵流动。由于缓冲结构与隧道中一系列波的干扰与叠加作用,隧道内空气流动形态复杂多变。迹线图可以很好地反映流体质点在空间中的运动轨迹。借助 Ansys Fluent 软件提供的一种无量纲粒

子编号形式,记录区域内粒子运动和受力的过程。图 2(a)—(d)是以距离隧道地面 1.00 m 处的剖面为观测面,记录分析列车车头分别到达无缓冲结构时的山体壁面处和有缓冲结构时的第一、二个挡板处以及山体壁面处的迹线图。此时,挡板间断型缓冲结构的结构形式为间断距离 $a=0.50\text{ m}$ 、缓冲节长度比为 1/1、各缓冲节截面积均为 150 m^2 、节数 $n=3$ 。

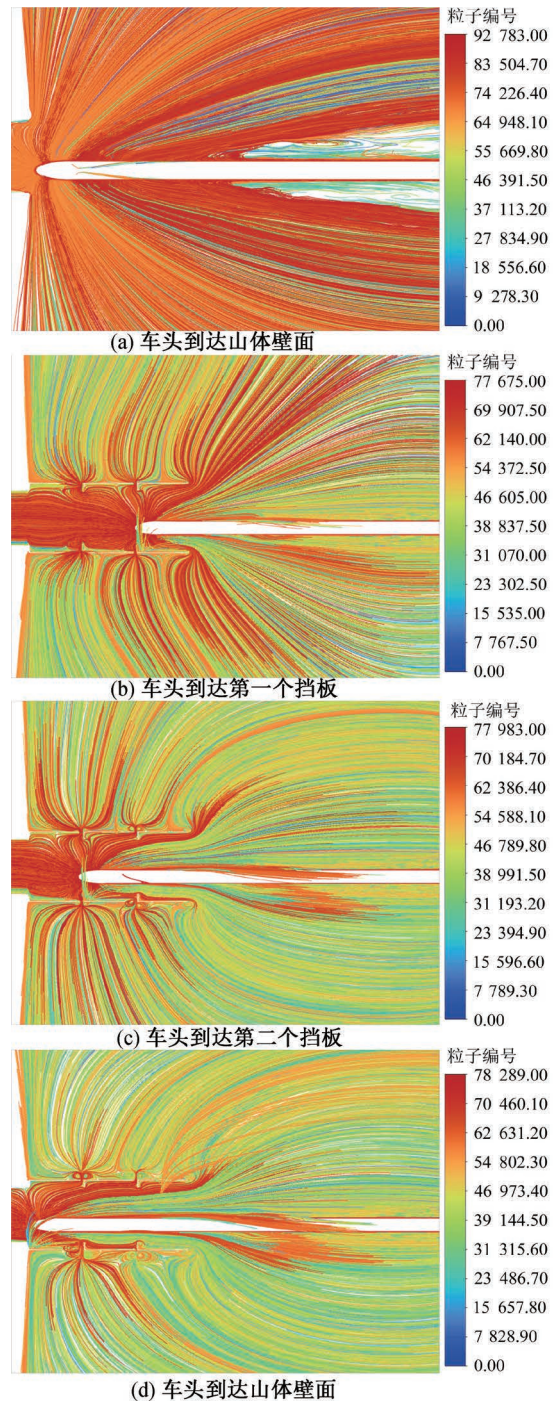


图 2 车头到达不同位置时的迹线图

Fig. 2 Trace diagrams of the locomotive when it reaches different positions

由图2可知,由于缓冲结构的存在,列车对山体壁面区域内所形成的流体压缩作用减弱。列车车头到达第一个挡板处的瞬间,从间断处喷射而出的高速气流带走了部分压缩波能量;在挡板处形成的反射波与压缩波相互干扰、重叠,降低了传递至隧道中压缩波的能量。挡板的阻挡作用将大量高能气流经缓冲结构入口处反射出去,减少了进入隧道内的高能气体。当车头到达第二个挡板以及山体壁面处时,仍有大量高能气体从间断处泄出;此后,间断处内外两侧涡流数量逐渐增多,作用面积逐渐增大,膨胀波的作用强度被抑制,隧道内瞬变压力减小。

2 数值模拟与网格划分

2.1 数值模型

在数值模拟计算中,隧道内轮廓采用单心圆形式,其水力半径为6.87 m,隧道总长为1 000 m,线间距为5 m,横截面面积为100 m²,阻塞比为0.136。缓冲结构总长30 m。图3为复兴号CR400AF动车组列车的简化模型,该列车模型采用四车编组的形式,由头车、尾车以及中间车构成^[5],车体尺寸按实际列车尺寸绘制,总尺寸为104.00 m(长)×3.36 m(宽)×4.05 m(高),列车运行速度为350 km/h。

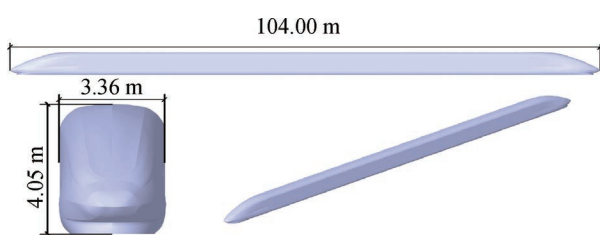


图3 列车模型示意图

Fig. 3 Train model diagram

计算域模型及其边界条件设置如图4所示,计算域尺寸为340 m(长)×120 m(宽)×60 m(高),列车车头距隧道入口处100 m。该设置符合相关铁路规范要求^[12],以便行驶在计算域中的列车尾迹区与回流区内尾涡和湍流更完整的形成与扩散,使仿真数据更接近实际情况。计算域的两侧面、出入口面设置为压力远场边界,边界马赫数均编译为0;所有地面、山体壁面、列车表面、隧道和缓冲结构壁面设置为墙体边界。

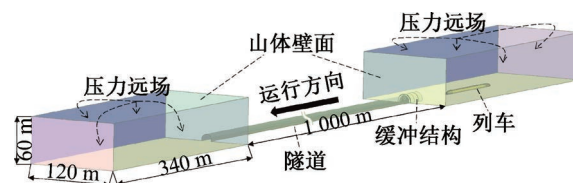


图4 计算域模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of computational domain model

2.2 计算网格说明及计算验证

在网格划分过程中,使用Pointwise软件对车体网格进行加密,加密后最大网格尺寸为250 mm。T-Rex技术可以高效生成混合网格,如图5所示,计算域中最大网格尺寸为1 000 mm。为了更精准地捕捉近壁面气体的流动情况,车身与隧道内壁采用T-Rex技术设置10层流动边界层网格,拉伸比设置为1.2。车体表面和隧道壁面的第一层边界层网格高度分别为 3.60×10^{-4} m与 4.50×10^{-4} m。

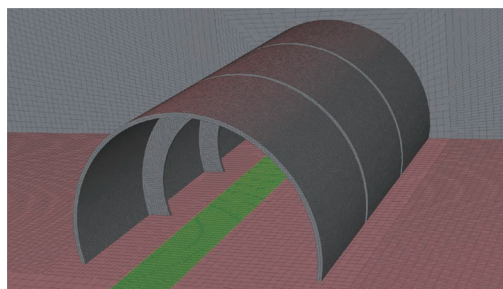


图5 网格划分示意图

Fig. 5 Grid division diagram

为验证Pointwise软件中T-Rex网格划分技术所得计算模型的准确度,本文依据中南大学建立的线性缩尺比例为1/17.6的模型试验参数,建立了数值仿真计算模型^[13];本研究设置与模型试验相同的变量,将仿真模拟所得压力时程曲线数据与模型试验所得数据进行对比,对比曲线如图6所示。

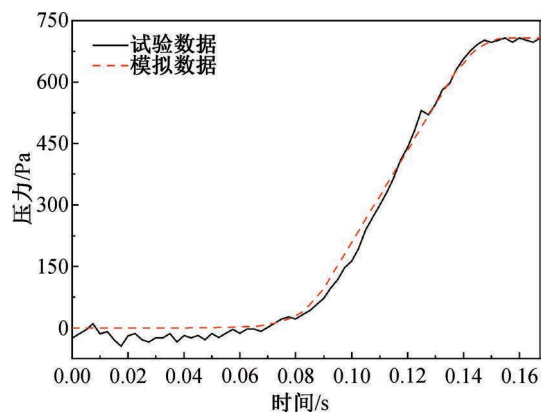


图6 试验数据与模拟数据对比图

Fig. 6 Chart of comparison between experimental data and simulation data

由图 6 可见,数值仿真模拟结果与试验数据之间的最大误差约为 3%,该误差主要由计算域内介质以及模型中各类材料壁面摩擦系数差异造成的。总体而言,数值模拟的计算结果准确度较高。

3 计算结果分析

3.1 缓冲结构间断距离影响分析

为探究缓冲结构间断距离对初始压缩波的影响,设置 6 种间断距离 a 分别为 0.00、0.25、0.50、1.00、1.25 m 的缓冲结构,缓冲结构总长恒定在 30 m,各缓冲节截面均设置为 150 m^2 ,节数 $n=3$,各缓冲节之间的长度均等分配;记录列车穿行缓冲结构及隧道的过程中测点处的压力梯度曲线,并分别与无缓冲结构的压力梯度曲线做对比,对比结果如图 7 所示。

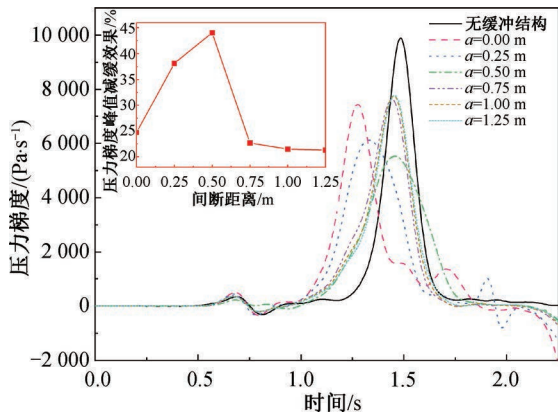


图 7 不同间断距离的压力梯度曲线

Fig. 7 Pressure gradient curves with different discontinuity distances

由图 7 可知,当间断距离 $a=0.00 \text{ m}$ 时,初始压缩波受到缓冲结构中挡板的作用,将初始压缩波上升段分为列车突入缓冲结构与突入隧道两个阶段,使其变化趋势减缓,压力梯度峰值降低为 7445.20 Pa/s 。因缓冲结构内部无间断,压缩波在挡板处仅被反射与扰乱,使其无法从缓冲结构内部耗散,因此缓冲效果受限。与无缓冲结构时的 9889.22 Pa/s 相比,仅降低了 2444.02 Pa/s 。

当 $a=0.50 \text{ m}$ 时,缓冲结构与隧道之间截面面积发生突变,使压缩波在缓冲结构中反射频率增大,造成测点处压力波动加剧。当列车到达间断处时,压缩波的一部分能量会被挡板反射到缓冲结构入口处;另一部分能量在间断处被反射,同时,通过间断处传播至明线区域内,起到泄压作用。其余部分的能量则继续沿隧道向前传播,导致隧道内压力上升^[14]。测点处压力梯度峰值也达

到 5533.70 Pa/s ,产生了 44.04% 的减缓效果。在 $a=0.75 \text{ m}$ 之后,压力梯度峰值呈小幅上升趋势;随着间断距离 a 的增大,单个缓冲节长度减小,压缩波在缓冲结构中的作用强度降低,因摩擦造成的能量损耗大幅减少,进而导致缓冲结构的作用效果减弱。

3.2 缓冲节长度关系影响分析

3.2.1 缓冲节长度比逐渐增大影响分析

为更严谨地研究缓冲节长度变化对隧道内压力梯度峰值减缓效果。沿列车运行方向,使 3 个缓冲节长度依次递增,设置了 6 种缓冲节长度比,分别为 3/2、2/1、5/2、3/1、7/2、4/1,间断距离 $a=0.50 \text{ m}$,各缓冲节截面为 150 m^2 的缓冲结构,结构参数如表 1 所示,压力梯度曲线如图 8 所示。

表 1 不同缓冲节的相关结构参数

Tab. 1 Related structural parameters of different buffer sections

长度比	$L_1 : L_2 : L_3$	各缓冲节实际长度/m
1/1	1.00 : 1.00 : 1.00	9.667;9.667;9.667
3/2	1.00 : 1.50 : 2.25	6.105;9.158;13.737
2/1	1.00 : 2.00 : 4.00	4.143;8.286;16.571
5/2	1.00 : 2.50 : 6.25	2.974;7.436;18.590
3/1	1.00 : 3.00 : 9.00	2.231;6.692;20.077
7/2	1.00 : 3.50 : 12.25	1.731;6.060;21.209
4/1	1.00 : 4.00 : 16.00	1.381;5.524;22.095

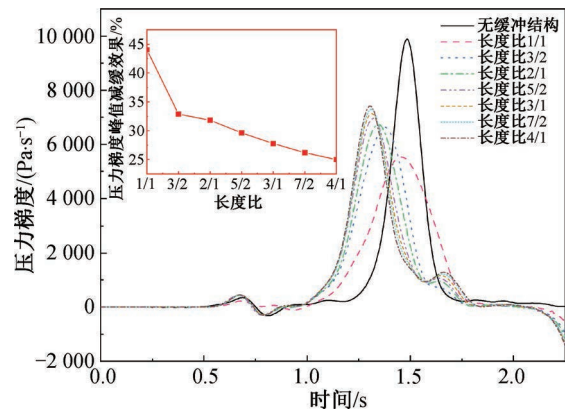


图 8 不同长度比增大的压力梯度曲线

Fig. 8 Pressure gradient curves with increasing length ratio

由图 8 可知,随着各缓冲节长度比增大,压力梯度上升段出现的时刻逐渐提前,其峰值由长度比为 3/2 时的 6636.83 Pa/s 逐渐增大至长度比为 4/1 时的 7417.49 Pa/s 。 $L_1、L_2$ 长度在缓冲结构总长中所占比例减小,压缩波和膨胀波受挡板干扰与叠加的时间间隔减小,导致空气压力变化加剧,表现出较为强烈的瞬态性。由于马赫波的叠加,

随着长度比增加,间断处的减缓效果逐渐减弱并趋于稳定。这体现在缓冲节长度比分别为 2/1、5/2、3/1、7/2、4/1, $t = 1.640、1.645、1.655、1.660、1.660$ s 时出现峰值为 956.87、1 072.09、1 166.17、1 221.98、1 286.36 Pa/s 的明显波动现象,而长度比为 1/1 和 3/2 时,该时段内未出现波动。波动出现时间延后与峰值增大导致初始压缩波幅值变大,长度比变化越大此类现象越明显。

3.2.2 缓冲节长度比逐渐减小影响分析

为更好地研究缓冲节长度的影响,沿列车运行方向设置 6 种缓冲节长度逐渐减小的对比工况;将表 1 中各工况的 L_1 与 L_3 缓冲节长度互换,形成 6 种缓冲节长度比分别为 2/3、1/2、2/5、1/3、2/7、1/4 的缓冲结构。压力梯度曲线如图 9 所示。

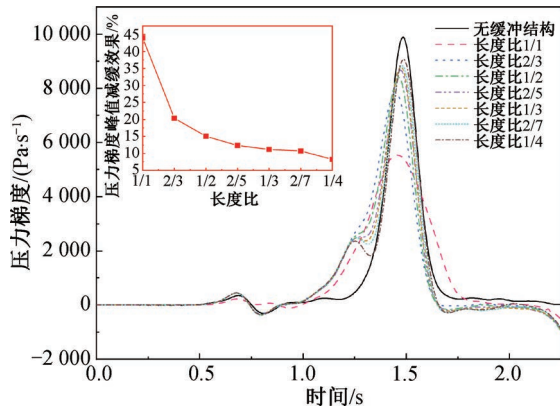


图 9 不同长度比减小的压力梯度曲线

Fig. 9 Pressure gradient curves with reducing length ratio

由图 9 可见,当缓冲节长度比逐渐减小时, L_1 对应的缓冲节长度逐渐增长, $L_2、L_3$ 对应的缓冲节中的挡板与山体壁面之间形成的空腔逐渐减小,列车行驶至该区域时,压缩波之间的干扰与重叠频率增大,进而导致测点处的压力梯度峰值逐渐增大。长度比由 2/3 变化为 1/4 时,压力梯度峰值从 7 875.29 Pa/s 增大到 9 074.47 Pa/s。在 $t = 1.25$ s 左右,开始衍生出新的波峰,其波长随着缓冲节长度比的减小而增加,峰值减小。这体现出随着缓冲节长度比的减小,缓冲结构内部压缩波与膨胀波的波动现象愈演愈烈,间断处的射流速度变小^[15]。新波峰的出现使初始压缩波整体的压力梯度曲线逐渐变陡,峰值变大,从而导致压力梯度减缓效果变弱。

3.3 缓冲结构截面积影响分析

3.3.1 等截面影响分析

为探讨 3 个缓冲节之间等截面设置时的减缓

效果,将缓冲结构中靠近山体壁面一侧的缓冲节截面积命名为 A_3 ,临近的 2 个缓冲节截面积依次命名为 $A_2、A_1$;设置 10 种等截面缓冲结构,截面积 $A_1 = A_2 = A_3 = 110 \sim 200 \text{ m}^2$ (步长 10 m^2),间断距离 $a = 0.50 \text{ m}$,缓冲节长度比 1/1。压力梯度曲线如图 10 所示。

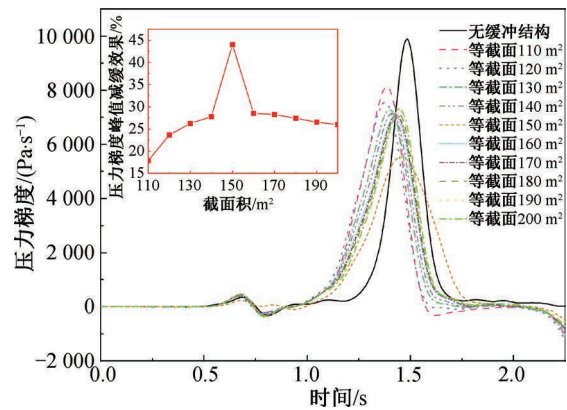


图 10 不同等截面的压力梯度曲线

Fig. 10 Pressure gradient curves with different equal cross-sections

由图 10 可知,挡板间断型缓冲结构中各缓冲节等截面设置过小时,缓冲结构与隧道之间形成的面积差对压缩波的反射能力较差,导致压缩波在传播过程中的能量损耗偏小,缓冲结构整体的减缓效果不明显。 $A_1 = A_2 = A_3 = 110 \text{ m}^2$ 时的压力梯度峰值高达 8 119.98 Pa/s,减缓效果为 17.89%。由于挡板下边缘与隧道内轮廓平齐,随着各缓冲节截面积增大,挡板间形成的空腔体积逐渐增大,压缩波通过缓冲结构时,在空腔内形成的能量损耗增多^[16]。当各缓冲节截面积为 150 m^2 时,挡板之间空腔的体积与气体从间断处外溢的路径长度达到较优的组合形态;在 $t = 0.50 \sim 1.00$ s 时段内,压力梯度的波动幅度减弱,在 $t = 1.00 \sim 1.75$ s 时段内,压力梯度曲线的变化速率降低。这一现象表明,初始压缩波在挡板间的反射作用以及间断处对气体的外溢效率都得到显著增强;等截面设置为 150 m^2 时,缓冲结构达到 44.04% 的最优减缓效果。在挡板间断型缓冲结构中,各缓冲节等截面设置过大也不利于压力梯度峰值的降低,当缓冲结构各缓冲节截面积满足 $160 \text{ m}^2 \leq A_1 = A_2 = A_3 \leq 200 \text{ m}^2$ 时,其截面积每增加 10 m^2 ,缓冲效果的降低幅度仅为 0.87%。随着间断出口处与地面的垂直距离不断变大,缓冲结构内部气体所受阻力增大,溢出量减少,导致缓冲结构整体的压力梯度减

缓效果降低,但降低幅度较小^[17]。当 $A_1=A_2=A_3=200\text{ m}^2$ 时,压力梯度峰值为 $7\,316.43\text{ Pa/s}$,其减缓效果为 26.02% 。

3.3.2 变截面影响分析

为了缓冲节截面作进一步研究,设置 A_1 、 A_2 、 A_3 依次递增 10 m^2 。其中 A_1 取值区间为 $130\sim 200\text{ m}^2$,步长 10 m^2 ;将上述8种缓冲结构分别命名为变截面I($A_1=130\text{ m}^2$ 、 $A_2=120\text{ m}^2$ 、 $A_3=110\text{ m}^2$)至变截面VIII($A_1=200\text{ m}^2$ 、 $A_2=190\text{ m}^2$ 、 $A_3=180\text{ m}^2$)。间断距离 $a=0.50\text{ m}$,缓冲节长度比 $1/1$ 。压力梯度曲线如图11所示。

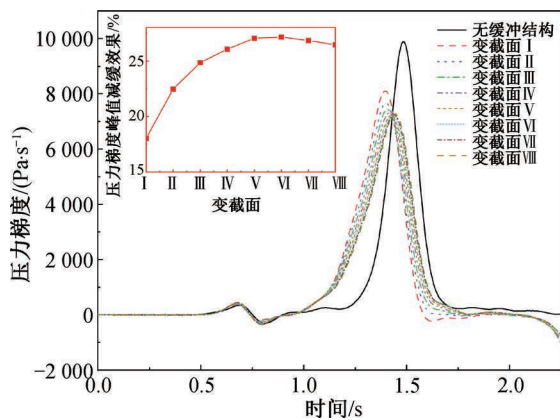


图11 不同变截面的压力梯度曲线

Fig. 11 Pressure gradient curves with different varying cross-sections

当缓冲结构中的缓冲节截面发生改变时,压缩波在缓冲结构内的反射现象变得更加明显。压缩波传播至挡板处反射到缓冲结构入口,再由缓冲结构入口反射回缓冲结构内,如此往复使隧道内的压力变化情况更加复杂。由图11可知,设置缓冲结构时压力梯度上升段均提前出现,即列车前端流体受到压缩的时间提前。各缓冲结构截面变化率相同,使得压力梯度曲线的变化率较为接近;随着缓冲结构各截面之间生成的空腔区域增大,初始压缩波中的部分能量被逐级消耗,达到缓解初始压缩波的作用^[18]。在变截面I中,由于 A_3 对应的截面积较小,挡板的阻挡作用较弱,更多的压缩波被传递至隧道内部,其减缓效果仅为 18.00% 。在变截面I与变截面VI之间,由于缓冲结构中各缓冲节的截面积增大,导致缓冲结构内部体积增大;列车通过此类缓冲结构时,部分高速气流被分流,一部分进入挡板之间的空腔处,经间断处排出;一部分被挡板阻挡反射,通过缓冲结构入口端排出;挡板间空腔体

积增加,使得缓冲结构整体对压力梯度值的缓解能力逐渐增强^[16]。变截面VI时的缓冲结构所达到的压力梯度峰值为 $7\,204.31\text{ Pa/s}$,减缓效果为 27.15% 。随着各缓冲节的截面积在变截面VI后进一步增加,经缓冲结构间断处排出等量气体所需时间变长,堆积在缓冲结构内还未及时排出的气体会阻碍后续压缩波与膨胀波的溢出,使隧道内反射现象增强。多重因素共同导致隧道内压力梯度值出现小幅上升,使缓冲结构整体的减缓效果减弱。

3.4 缓冲结构节数影响分析

选取上述分析中减缓效果最优的挡板间断型缓冲结构参数: $a=0.50\text{ m}$ 、缓冲节截面积等截面 150 m^2 、缓冲节长度比 $1/1$;设置5种缓冲节节数 $n=2,3,4,5,6$ 的缓冲结构,以此来探讨缓冲结构节数变化对测点处压力梯度峰值缓冲效果的影响。

由图12可知,当缓冲结构节数 $n=2$ 时,压力梯度曲线中上升段出现的时间提前,初始压缩波在 $t=1.270\text{ s}$ 前出现两段斜率不同的上升段,第一段是由车头突入缓冲结构入口时引起的,第二段是由车头突入隧道入口引起的。到达第一节缓冲节中的初始压缩波受到挡板反射,在改变初始压缩波波形的同时,较长的缓冲节将部分压缩波产生的压力梯度消耗,其压力梯度峰值为 $5\,633.51\text{ Pa/s}$,达到 43.03% 的减缓效果。在 $t=1.270\sim 1.375\text{ s}$ 时段内,压力梯度($\partial P/\partial t$)呈线性变化,其变化规律可表述为 $\partial P/\partial t=7\,913.968\,01t-5\,313.520\,89$,相关系数 $R^2=0.998\,66$ 。在此时段内,传递至隧道出口处的压缩波以膨胀波的形式向测点处反射传播,并与新到达测点处的压缩波叠加,导致此时段内的压力梯度呈线性变化,且变化率减小,并逐渐达到峰值。当 $n=3$ 时,缓冲结构达到最优减缓效果,即 44.04% 。随着缓冲结构节数持续增加,压力梯度上升段出现的时间逐渐接近无缓冲结构的情况,压力梯度峰值也逐步增大;节数增加后,单个缓冲节长度减小,列车在经过缓冲结构时压缩波受到挡板的反射次数增多,间断处压缩波能量的反射与溢出增多^[19];当节数 $n=6$ 时,压力梯度峰值为 $9\,146.32\text{ Pa/s}$,减缓效果仅为 7.51% 。在多种因素的共同影响下,缓冲结构中能量经多次反射进入隧道内部,间断处的射流量逐渐达到极值,使缓冲结构的减缓效果明显下滑。

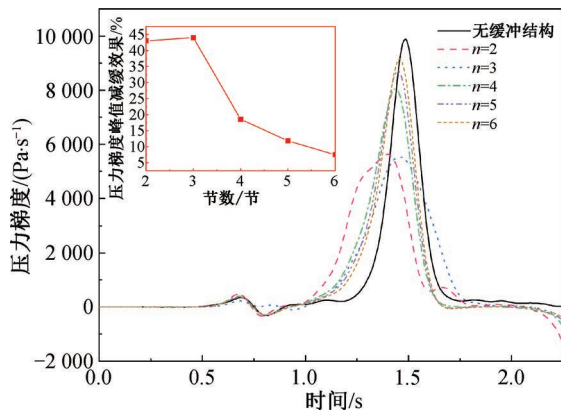


图 12 不同节数的压力梯度曲线

Fig. 12 Pressure gradient curves with different numbers of buffer sections

4 结论

基于 Ansys Fluent 软件提供的三维数值仿真技术,通过优化挡板间断型缓冲结构的间断距离 a 、缓冲节长度 L_i 、截面积 A_i 、节数 n ,对测点处的压力梯度变化进行分析,得出如下结论:

1) 挡板缓冲结构的间断距离需控制在一定范围内,随着 a 的增大,缓冲结构对压缩波的能量消耗减少,初始压缩波的减缓效果降低;间断距离过近则不利于气流的外溢与压缩波的反射传播;当间断距离 $a=0.50$ m 时,减缓效果最优。

2) 挡板间断型缓冲结构中,缓冲节长度比沿列车运行方向增大时的缓冲效果优于长度比减小时;且两者的长度比在接近 1/1 时,减缓效果更好,更有利于消耗隧道内压缩波能量。

3) 在挡板间断型缓冲结构中,各缓冲节截面积沿列车运行方向递减 10 m^2 的变截面设置,并不能达到很好的减缓效果;各截面等截面设置时的压力梯度减缓效果总体优于变截面设置。最优截面积形式为 $A_1=A_2=A_3=150\text{ m}^2$ 。

4) 挡板间断型缓冲结构在总长 30 m、间断距离 $a=0.50$ m、缓冲节等截面积 150 m^2 的条件下,节数 $n=2$ 与 $n=3$ 时的缓冲效果相近,均在 44%。随着节数的持续增多,压力梯度减缓效果大幅降低,节数 $n=3$ 时的缓冲结构减缓效果最优,达到 44.04%。与 $n=3$ 相比, $n=2$ 时的缓冲结构可节省约 6.85% 的建筑材料,更具经济性与实用性。

5) 作为缓冲结构的一种形式,挡板间断型缓冲结构稳定性较好,可实现装配式施工,并具有良好的防落石能力,降低压力梯度峰值效果显著,更具经济性。

参考文献:

- [1] 王英学,常乔磊,任文强,等. 无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.
WANG Y X, CHANG Q L, REN W Q, et al. Seam opening tunnel buffer structure aerodynamic characteristic research[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2018,15(1):17-23.
- [2] 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.
YAN Y G, YANG Q S, LUO J J. Optimizing flared hood of tunnel based on aeroacoustics[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2016,51(5):832-839.
- [3] 邓隆. 高速铁路隧道洞口异型缓冲结构气动参数分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.
DENG L. Aerodynamic parameters analysis of special-shaped buffer structure at the entrance of high-speed railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [4] 刘磊. 阶梯型缓冲结构对隧道气动效应影响的研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
LIU L. Studying on the influence of the stepwise hood for the aerodynamic effect of tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2018.
- [5] 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.
ZHANG T T, YAN Y G, KANG T L, et al. Mitigation effect of connecting inner buffer structure on tunnel aerodynamic effect[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(7):2893-2900.
- [6] 赵汗青. 高速列车穿越隧道时压缩波压强梯度的影响因素及缓冲结构分析[D]. 上海:上海交通大学,2011.
ZHAO H Q. Analysis of the influence factor on compression wave by a high-speed train entering a tunnel and corresponding buffer structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2011.
- [7] YAMAMOTO A. Micro-pressure wave radiated from tunnel exit[M]. Japan: Preprint of Spring Meeting of Physical Society of Japan,1977.
- [8] HOWE M S. Mach number dependence of the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel[J]. Journal of Sound and Vibration,1998,212(1):23-36.
- [9] OZAWA S, UCHIDA T, MAEDA T R. Reduction of micro-pressure wave radiated from tunnel exit by hood at tunnel entrance[J]. Quarterly Report of Railway Techni-

- cal Research Institute, 1978, 19(2): 77-83.
- [10] VARDY A E. Ventilated approach regions for railway tunnels [J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1975, 101(4): 609-619.
- [11] YAMAMOTO A. Aerodynamics of train in tunnel [M]. Japan: Proc. Lecture Meeting of the RTRI, 1975.
- [12] 国家铁路局. 铁路应用空气动力学 第4部分: 列车空气动力学性能数值仿真规范: TB/T 3503.4—2018 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018: 11.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Aerodynamics. Part 4: requirements for train aerodynamic simulation: TB/T 3503.4—2018 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018: 11.
- [13] 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.
LUO J J, MA W B. Analysis of aerodynamic effect of buffer structure in long tunnel of high speed railway [J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 48-55.
- [14] 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.
LI W H, LIU T H, ZHOU M M, et al. Comparative analysis on aerodynamic mitigation effects between tunnels with variable cross-section and typical tunnel hoods [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1572-1581.
- [15] 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.
SUN H C, WANG Y X, GU L Q, et al. Study on the effect of buffer structure opening rate on micro-pressure wave at the exit and entrance of 400 km/h high-speed railway tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(2): 433-443.
- [16] 崔耀月, 闫亚光, 解会兵. 高铁运行经过地下站台的气动风场研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2023, 40(2): 84-90+112.
CUI Y Y, YAN Y G, XIE H B. Study on aerodynamic wind field of high speed railway running through underground platform [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 84-90+112.
- [17] 赵恒泽, 张红梅, 冯静霞, 等. 挡烟设施对地铁隧道火灾烟气温度的控制 [J]. 华北理工大学学报 (自然科学版), 2021, 43(2): 81-85+95.
ZHAO H Z, ZHANG H M, FENG J X, et al. Control of fire smoke temperature in subway tunnel by smoke shielding facilities [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(2): 81-85+95.
- [18] 张洁, 王雨舸, 韩帅, 等. 空腔结构对高速磁浮隧道压力波的影响研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1555-1564.
ZHANG J, WANG Y G, HAN S, et al. Influence of cavity structure on pressure waves in a high-speed maglev tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1555-1564.
- [19] 张童童. 高铁隧道内阶梯型缓冲结构的气动效应分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
ZHANG T T. Analysis of aerodynamic effects of the inter-stepwise buffer structure in high-speed railway tunnel [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.

(责任编辑 周雪梅)