

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.028

明洞式隧道洞门开口率优化

牛纪强^{1,2}, 梁习锋^{1,2}, 周 丹^{1,2}, 刘堂红^{1,2}

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 轨道交通安全教育部重点实验室(中南大学), 长沙 410075)

摘 要: 为获得等截面开口型缓冲结构相对最优开口率, 基于三维非定常可压缩雷诺时均 $N-S$ 方程和标准 $\kappa-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 采用滑移网格方法, 对 3 车编组的高速列车分别以 250、300、350 km/h 速度通过开口率在 20%~84% 之间的等截面开口型缓冲结构进行模拟, 并对隧道内初始压缩波和隧道出口气压爆波进行研究. 结果表明: 数值计算结果与动模型试验相比, 波形吻合度较好, 幅值偏差均不超过 6%; 开口对初始压缩波幅值起到增大作用, 并随开口增大而先增大后减小, 在开口率为 60% 时达到最大; 初始压缩波压力梯度受开口影响显著, 随着开口率增大而减小, 且在开口率为 40% 以后变化不大, 气压爆波随开口率变化规律与初始压缩波压力梯度基本一致.

关键词: 隧道工程; 缓冲结构; 开口率; 高速列车; 初始压缩波; 气压爆波

中图分类号: U451.3; U292.914 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)03-0175-06

Optimization on the opening rate of the open-cut tunnel portal

NIU Jiqiang^{1,2}, LIANG Xifeng^{1,2}, ZHOU Dan^{1,2}, LIU Tanghong^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Key Laboratory of Traffic Safety on Track (Central South University), Ministry of Education, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to obtain the relative optimal opening rate of the open-cut tunnel portal, the three-carriage high-speed train running through the hood with different opening ratios (20%–84%) at different speeds (250, 300 and 350 km/h) was modeled by using sliding mesh method, and the three-dimensional unsteady compressible Reynolds-averaged $N-S$ equation and standard $\kappa-\varepsilon$ equation turbulence formula were employed in this numerical model. Then the initial compression wave and micro pressure wave were simulated and analyzed. The results indicate that the numerical results show a well agreement with the dynamic model test, and the deviation between them is no more than 6%. The amplitude of initial compression wave increases when the hood with holes, and it increases at first stage and then decreases with the increasing of opening ratios, and reaches the maximum value when the opening ratios is 60%. The pressure gradient of initial compression wave is significantly affected by the opening rate. It decreases with increasing of the opening rate, and the amplitude shows a small change when opening rate is greater than 40%. Similarly, the effects of opening rate micro pressure wave show the same rules as the pressure gradient.

Keywords: tunnel engineering; hood; opening rate; high-speed train; initial compression wave; micro pressure wave

随着高速铁路的快速发展和高速列车运行速度的不断提高, 列车/隧道耦合空气动力学效应日益突出. 列车高速进入隧道产生的瞬变压力波在隧道内传播, 到隧道出口处时, 会产生强烈的爆破声, 即气压爆波. 隧道内传播的交变压力波作用在车体上, 会引起车体结构疲劳, 而传播至车内会直接影响旅客乘车舒适度; 气压爆波会破坏隧道出口的环境, 使

隧道出口附近的居民受到噪声干扰、建筑物受到冲击^[1-4]. 1975 年, 日本山阳新干线试运行, 首次发现隧道气压爆波对周围环境造成影响的现象, 并对其进行了研究^[5]. 随着中国既有线的不断提速以及高速铁路的快速、大规模修建, 导致大量隧道工程不断出现. 隧道气压爆波危害逐渐增大. 文献^[6]基于一维、可压缩、非定常、不等熵流动理论与广义黎曼变量特征线法, 研究了开孔缓冲结构不同参数对初始压缩波强度和压力梯度的影响, 揭示了开孔缓冲结构的空气动力学特征, 对探讨减缓洞口气压爆波提供了一种分析方法, 但是此方法是建立在隧道内空气流通截面是时间和流动距离的二元函数假设的基础上, 且是基于一维、可压缩、非定常、不等熵流动理论与广义黎曼变量特征线法, 其局限性较大, 准确

收稿日期: 2015-09-01
基金项目: 高铁联合基金(U1134203, U1334205); 国家自然科学基金(51575538); 湖南省自然科学基金(14JJ3028); 湖南省研究生科研创新项目(CX2015B046); 中南大学教师研究基金(2013JSJJ014)
作者简介: 牛纪强(1988—), 男, 博士研究生;
梁习锋(1963—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 梁习锋, gsxlf@163.com

度不高;文献[7]对高速列车突入隧道与缓冲结构时进行了数值模拟,且数值算法经过试验验证,确定了喇叭形缓冲结构侧面开口的最佳开口率为 0.2,具有一定参考价值.文献[8]还利用高速列车空气动力学模型试验对高速列车在进入带有缓冲结构隧道过程中瞬变压力传播机理进行研究,但主要是针对无开口缓冲结构提出了隧道内最大压力和最大压力梯度变化规律计算公式.文献[9]通过对缓冲结构形状以及各种参数计算结果进行定性与定量对比,得知具有开孔的缓冲结构也可较大幅度降低隧道出口附近气压爆波强度,但是需要综合比较才能选取最佳结构参数.文献[10]利用高速列车模型实验系统,对列车进入隧道所形成的压缩波、气压爆波进行了测试分析,对不同长度喇叭型缓冲结构削减气压爆波效果进行了比较,得到了有关气压爆波产生、传播以及缓冲结构缓冲对降低气压爆波效果的规律.文献[11]基于动网格技术采用三维数值模拟方法,研究了 100 m^2 隧道斜切式洞门顶部开口面积大小对压力峰值、压力梯度降低效果的影响,得到了不同车速下的开口率建议值,其数值算法缺少验证,且开口率局限在 20%~30%.文献[12]基于经典的线性基尔霍夫声学理论,通过求解气体动力学瞬态准一维方程得到初始压缩波源数据,并进行了相关研究.文献[13]通过研究不同横截面积的缓冲结构和隧道与缓冲结构连接处的过渡形式对压力梯度及其形状的影响,算法未经验证,且优化形状较复杂,有较大施工难度.文献[14]在数值模拟与实验结果有很好吻合度的基础上,研究了列车横截面与长度和通风井大小对隧道内压力波的影响.文献[15]基于三维可压缩欧拉方程,采用有限元法,对四种形式的隧道洞门形式对压缩波前的影响进行了研究,给出了不同类型缓冲结构的减缓效果对比.文献[16~18]根据列车马赫数确定缓冲结构开口的分布,用格林函数控制开口尺寸的方法,使压力波前呈线性增长,来降低隧道出口气压爆波,并对初始压缩波形进行了分析比较,但其推荐的尺寸可能会过小,还需要进行缩比模型试验进行修正.

由于隧道出口地形复杂,在隧道口设置缓冲结构时需考虑到工程实际的施工难度和可行性问题,需根据实际情况选择合适类型的缓冲结构,而对于明洞式缓冲结构开口率对初始压缩波及其压力梯度和气压爆波影响方面的研究涉及较少,而随着高速列车速度的不断提高,隧道出口气压爆波造成的危害日益显著.因此,本文主要研究列车分别以 250、300、350 km/h 速度通过有效净空面积为 100 m^2 单洞双线无砟隧道时,缓冲结构开口率对隧道出口气

压爆波和隧道内初始压缩波及其压力梯度的影响.

1 数学模型

高速列车以不低于 250 km/h 的车速通过隧道时,列车周围流场处于强非定常、湍流状态,列车马赫数虽然小于 0.3,但是隧道内空气会受到隧道壁面的限制而无法自由流动,并受到车体挤压,此时需要考虑空气的压缩性;考虑到列车与隧道间的空气受到摩擦和传热等影响,气流为不等熵流动.因此,采用非定常、粘性、可压缩流的 $N-S$ 方程来求解列车过隧道的流场, $\kappa-\varepsilon$ 两方程湍流模型在模拟列车过隧道具有广泛应用^[19-21],而标准 $\kappa-\varepsilon$ 两方程湍流模型在模拟气压爆波方面得到了良好的结果^[22-23].本文亦采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 两方程湍流模型来模拟列车过隧道的气动特性.

本文计算采用商用软件 Fluent,其中速度和压力的耦合方式采用 SIMPLEC 算法,对流项的离散采用具有二阶精度的 QUICK 格式,扩散项的离散采用二阶精度的中心差分格式,考虑到气压爆波和初始压缩波压力梯度对时间较为敏感,时间项离散采用二阶隐式格式.

2 计算模型及区域

2.1 计算模型

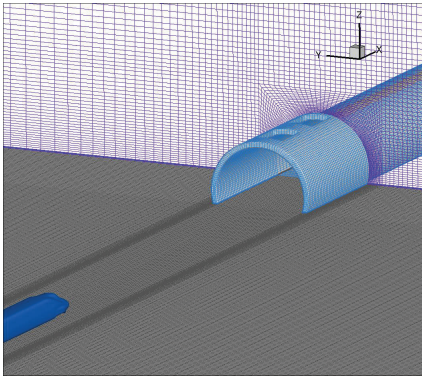
本文计算模型采用 3 车编组高速列车,定义 H 为车高,列车总长 $20.65H$,头、中、尾车分别长 $6.88H$ 、 $6.6H$ 和 $6.88H$,如图 1 所示.根据文献[24]中的规定,对车体表面进行了必要且合理的简化,考虑到本文研究对象为列车进入缓冲结构产生的压缩波以及其通过隧道传播至隧道出口处形成的气压爆波.因此,列车表面采用三角形网格离散,在靠近列车附近区域采用四面体网格划分,其他区域采用结构网格划分.为了能够准确捕捉列车突入隧道缓冲结构时在隧道内产生的压力变化,在车身表面附近和隧道入口处进行了加密处理,考虑到远离列车、隧道及缓冲结构处的网格对隧道内压力波的产生和传播影响很小,故网格较为稀疏.与动模型试验结果对比后,确定此次数值计算中车体表面最小网格为 0.01 m,隧道入口缓冲结构处最小网格为 0.05 m,列车运行方向缓冲结构附近处相邻网格间距为 0.1 m,隧道上网格间距为 0.5 m.空间体网格约 700 万左右.采用双时间步长控制时间推进,物理步长在 $[0.1\text{ ms}, 0.15\text{ ms}]$,步内迭代 50 次.

本文模拟的列车速度分别为 250、300、350 km/h,隧道为有效净空面积为 100 m^2 、线间距为 5 m 的单洞双线隧道,长 1 km,且不考虑隧道长度对于压缩

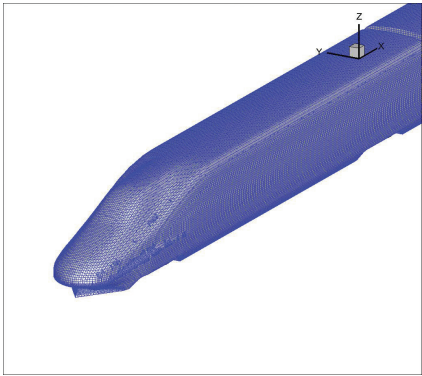
波的非线性效应. 根据文献[25]中建议对缓冲结构开口面积为隧道断面有效面积的 0.2~0.3 倍,为了寻找相对最优开口率,本文明洞式(等截面)缓冲结构开口率设置在 20%~84%之间. 开口 Y 方向(垂直于列车运行方向)宽度为 4 m 不变,只改变 X 方向(列车运行方向)长度. 定义开口率为开口面积与隧道有效净空积之比. 图 2 为隧道高速列车和缓冲结构及附近表面网格图.



图 1 高速列车模型
Fig.1 High-speed train model



(a)隧道洞门



(b)高速列车

图 2 缓冲结构及高速列车网格

Fig.2 Grid on the tunnel portal and high speed train

2.2 计算区域

为模拟高速列车通过缓冲结构进入隧道时,产生的初始压缩波沿隧道方向传播过程. 本文采用滑移网格方法,更真实、直接的模拟高速列车在线路上运行过程. 为保证流场的充分发展,避免边界条件对流场结构的影响,隧道前后计算域 X 方向长度为 $81H$, Y 方向宽度为 $38H$, Z 方向高度为 $19H$,列车头部距隧道入口为 $20H$, H 为车高. 高速列车过隧道计算区域如图 3 所示.

2.3 边界条件

给定高速列车运动边界条件,其速度为: X 方向

速度分量为列车运行速度 v , Y 、 Z 方向速度分量等于 0. 计算流域边界设置如图 3 所示,隧道出口流域两侧面、顶面及远处端面均为基于黎曼不变量无反射的远场边界条件,隧道及流域地面给定无滑移边界条件. 壁面区域流场采用标准壁面函数控制求解.

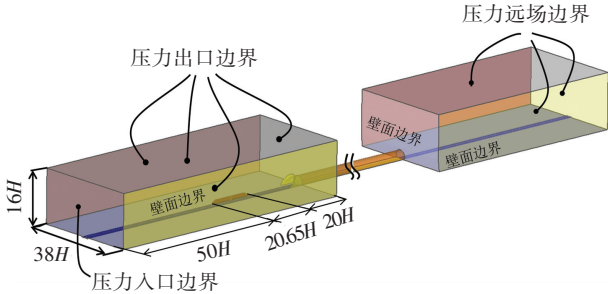


图 3 计算区域
Fig.3 Computational domain

3 算法验证

为验证本文所采用计算方法的正确性,提高计算结果的可信度. 在中南大学列车空气动力特性动模型试验系统上进行试验. 该试验系统是基于流动相似原理,将高速列车、隧道和线路等制作成缩比模型,通过弹射系统使高速列车缩比模型在缩比线路上无动力高速运行,可模拟高速列车交会,与地面、周围环境的相对运动,真实再现高速列车过隧道等三维非定常可压缩流动过程,并获得高速运行中的列车空气动力特性.

试验中采用的列车模型与数值计算中一致,为进行动模型试验,对列车模型进行了 1 : 20 缩比制作. 模型列车试验速度为 300 km/h. 隧道模型长 50 m(可模拟实际长为 1 km,有效净空面积 100 m²的单洞双线隧道),高速列车/隧道试验模型如图 4 所示.



图 4 高速列车/隧道模型

Fig.4 The model of high-speed train and tunnel

数值计算与模型试验对比中,主要关注初始压缩波和隧道出口气压爆波,而初始压缩波为取距模型隧道入口 20 m 处测点监测所得,气压爆波为距模型隧道出口洞门 1 m 处测点监测所得,来研究隧道内初始压缩波和气压爆波的影响. 图 5 为隧道内压力测点和隧道出口气压爆波测点布置图.

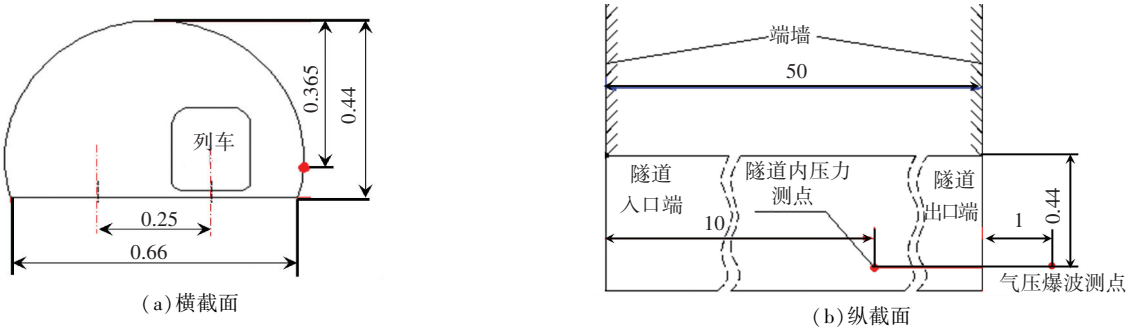


图 5 隧道测点布点图(m)

Fig.5 Layout of measuring point on the tunnel (m)

图 6 为高速列车模型以 300 km/h 车速通过隧道时,相应测点所得初始压缩波压力 p_{in} 及其压力梯度 dp_{in}/dt 的动模型试验与数值模拟计算结果对比. 从图 6 可知,初始压缩波的计算波形与试验所得数据的波形吻合度高,但是在初始压缩波的峰值区

域差异较大,这是由于数值计算中对于列车、隧道间空气的摩擦模拟不准确造成的,但是这不影响对气压爆波起主要评价作用的初始压缩波波前压力梯度. 初始压缩波波前压力梯度幅值偏差均不超过 6%,满足工程应用要求.

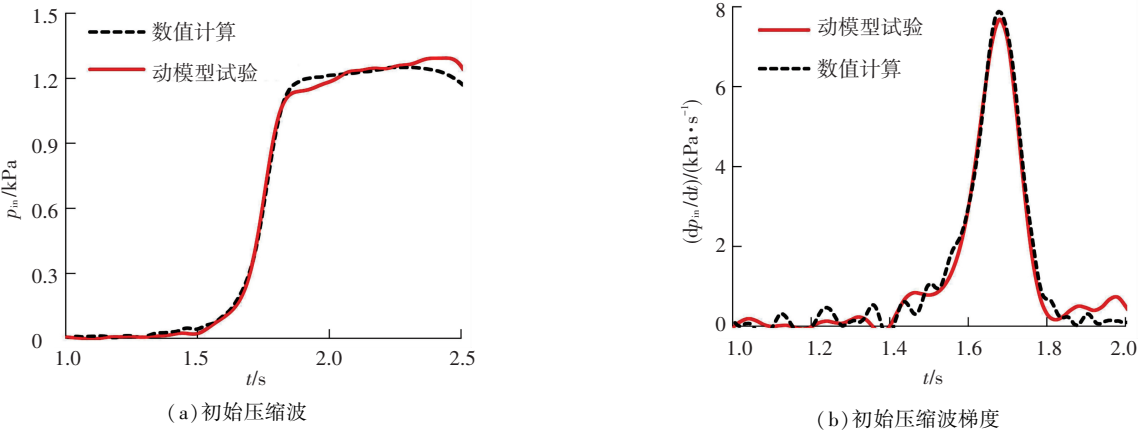


图 6 数值计算与动模型试验结果对比

Fig.6 Results comparison between numerical simulation and dynamic model test

4 计算结果及分析

图 7 为单列高速列车通过隧道时,隧道壁面压力变化典型波形. 对隧道出口气压爆波起主要作用的是隧道内初始压缩波,初始压缩波峰值增大主要是由于车体表面摩擦效应引起 Δp_{fr} 增大造成的,初始压缩波压力梯度增大主要是列车头部进入缓冲结构和隧道时导致图 7 中列车头部进入隧道时产生的压力变化 Δp_N 增大的缘故;从图 6 中单列高速列车过隧道的压力变化曲线也可反映出这一点,由于列车编组短,效果不显著.

4.1 开口率对初始压缩波影响

图 8 为高速列车以不同车速通过不同开口率明洞型缓冲结构时,测点监测得到的初始压缩波幅值随开口率变化曲线. 从图 8 中可知,不同速度等级下,初始压缩波幅值随开口率变化规律一致,均随着开口率增大而先增大后减小,在开口率为 60% 附近出现拐点.

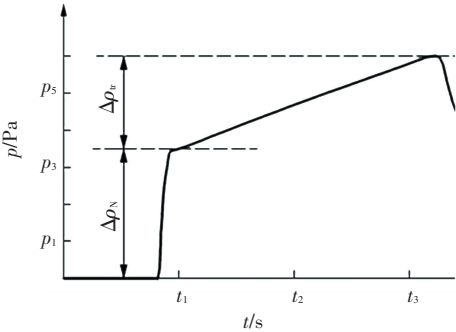


图 7 列车通过隧道壁面压力变化典型波形

Fig.7 Typical waveforms caused by the train passing through the tunnel

图 9 为初始压缩波幅值增大率随开口率变化曲线. 由图 9 可知,不同速度等级下,初始压缩波幅值均在开口率为 60% 时增幅达到最大,车速为 250 km/h 时,增幅达 6.4%;车速为 300 km/h 时,增幅达 5.2%;车速为 350 km/h 时,增幅达 5.1%. 因此,可知明洞型缓冲结构开口对降低初始压缩波幅值没有效果,反而导致初始压缩波幅值略微增大. 从图 9 中还可

以看出,随着车速的增大,初始压缩波幅值增幅降低,即开口对初始压缩波幅值增大贡献减小。

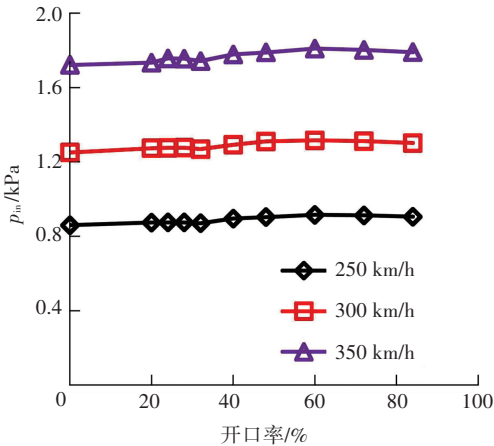


图 8 初始压缩波随开口率变化

Fig.8 Variation of initial compression wave with opening rate

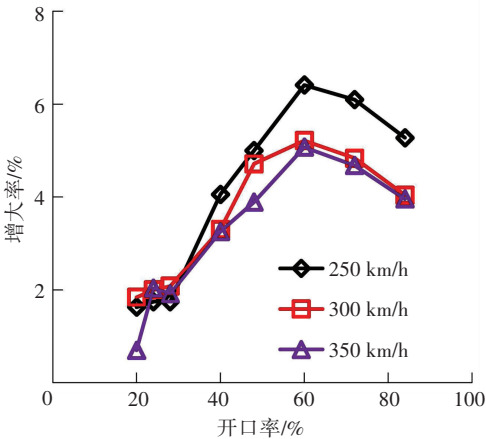


图 9 初始压缩波增大率随开口率变化

Fig.9 Variation of the increasing rate of the initial compression wave with the opening rate

图 10 为对应图 9 的初始压缩波压力梯度。从图中可知,不同速度下,随开口率增大,初始压缩波压力梯度先减小后增大。开口率 40% 以上,初始压缩波压力梯度变化不显著。

图 11 为初始压缩波压力梯度减低率随开口率变化曲线。由图 11 可知,车速为 250、300 km/h 时,初始压缩波压力梯度降低率在开口率为 48% 时降幅达到最大,分别为 48.3% 和 41.3%;车速为 350 km/h 时,在开口率为 40% 时降幅达到最大,为 42.1%。开口率大于 60% 后,压力梯度降低率基本在 40% 左右。

4.2 开口率对气压爆波影响

图 12 为隧道出口处气压爆波 p_m 随开口率变化曲线。从图 12 中可知,缓冲结构开口对降低气压爆波有显著效果。气压爆波强度与压缩波到达隧道内初始压缩波压力梯度大致呈正比。不同速度等级下,气压爆波随开口率变化与初始压缩波压力梯度变化规律一致。在开口率大于 40% 以后,随着开口

率继续增大,气压爆波降低率变化不大。

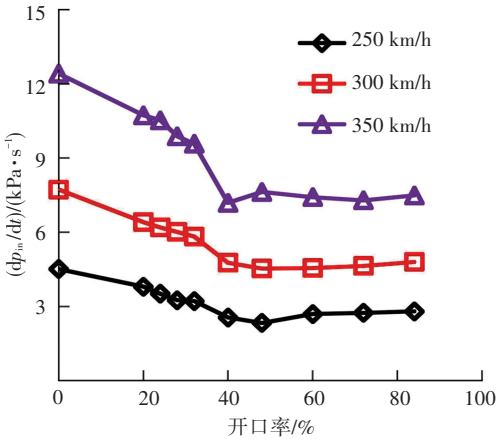


图 10 压力梯度随开口率变化

Fig.10 Variation of the pressure gradient with the opening rate

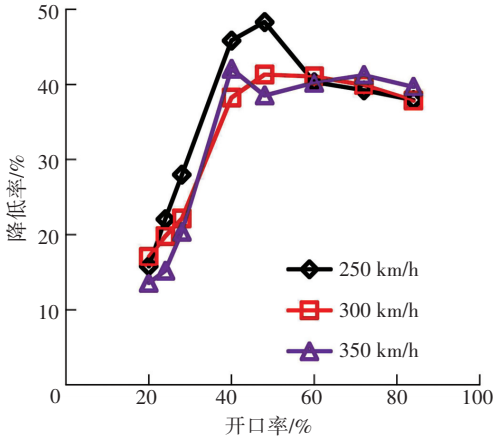


图 11 压力梯度降低率随开口率变化

Fig.11 Variation of the decreasing rate of the pressure gradient with the opening rate

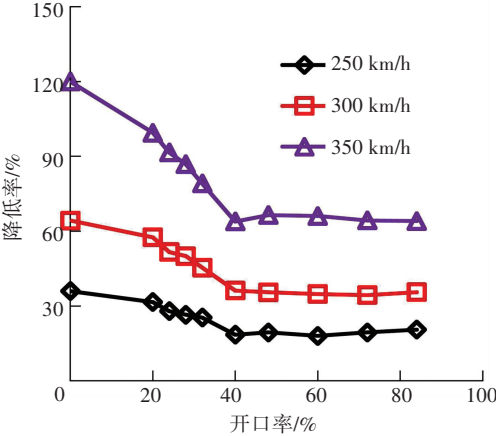


图 12 气压爆波随开口率变化

Fig.12 Variation of the micro pressure wave with the opening rate

图 13 为气压爆波降低率随开口率变化曲线。由图 13 可知,车速为 250 km/h 时,气压爆波在开口率为 60% 时降幅达到最大,为 48.5%;车速为 300 km/h 时,气压爆波在开口率为 72% 时降幅达到最大,为 46.9%;车速为 350 km/h 时,在开口率为 40% 时降幅达到最大,为 46.8%。

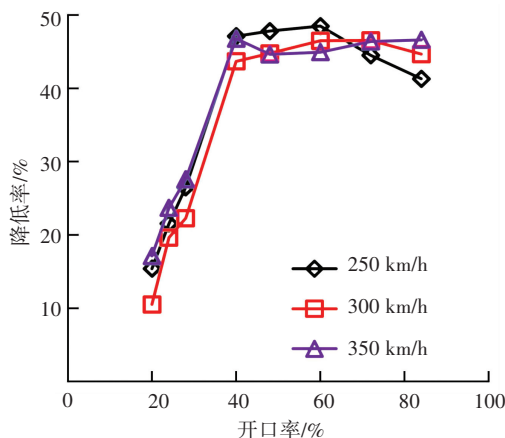


图 13 气压爆波降低率随开口率变化

Fig.13 Variation of the decreasing rate of the micro pressure wave with the opening rate

结合图 10~13 可以得知,初始压缩波压力梯度随开口率变化与气压爆波随开口率变化规律及变化率基本一致。因此,隧道内初始压缩波的压力梯度可以有效的反映隧道出口处气压爆波。

5 结 论

1)缓冲结构开口导致初始压缩波增大,大致随开口率增大而略微增大后又减小;不同速度等级下,初始压缩波幅值均在开口率为 60%时增幅达到最大,增幅在 6%左右。

2)开口对降低初始压缩波压力梯度影响显著,随开口率增大,压力梯度的降低率先增大后减小;车速为 250、300 km/h,开口率为 48%时,最优;车速为 350 km/h 时,开口率为 40%时最优。

3)隧道出口气压爆波变化规律同初始压缩波梯度一致。开口率在 40%以上,隧道出口气压爆波降低效果不显著。车速为 250、300、350 km/h 时,开口率分别在 60%、72%和 40%时气压爆波降幅达到最大。

4)所确定的相对较优的开口率对于其他类型的缓冲结构适应性有待研究,没有考虑开口形状和位置的影响,这将是下一步研究的内容。

参考文献

- [1] 刘堂红,田红旗,梁习锋.缓冲结构对隧道口微气压波的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1306-1311.
LIU Tanghong, TIAN Hongqi, LIANG Xifeng. Influence of hood on micro-pressure wave [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(5): 1306-1311.
- [2] MARC B, BRUNO A, TADASHI K. Blind hood effects on the compression wave generated by a train entering a tunnel [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25 (6): 397-407.
- [3] RAGHUNATHAN S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed train railway train [J]. Progress in Aerospace Sciences,

2002, 38(6): 469-514.

- [4] AOKI T. Passive alleviation of micro-pressure waves from tunnel portals [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 220(5): 921-940.
- [5] 小澤智.トンネル内の圧力波の変形とトンネル出口微気圧波[J].日本流体力学会誌「ながれ」,1995,14(3):191-197.
- [6] 梅元贵,周朝晖,许建林,等.开孔缓冲结构条件下的隧道单车压力波特征数值分析[J].铁道学报,2005,27(4):85-89.
MEI Yuangui, ZHOU Chaozhui, XU Jianlin, et al. Numerical study on pressure waves produced by a high-speed train through a tunnel with perforated hoods [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(4): 85-89.
- [7] 骆建军,高波,王英学.高速列车突入隧道与缓冲结构时的数值模拟[J].空气动力学学报,2003,21(1):376-381.
LUO Jianjun, GAO Bo, WANG Yingxue. Numerical study on tunnel-hood when high-speed train passing a tunnel [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 21 (1): 376-381.
- [8] 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.
LUO Jianjun, JI Haidong. Study on changes of pressure waves induced by a high-speed train entering into a tunnel with hood [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(9): 114-118.
- [9] 耿烽,张倩,梅元贵.缓冲结构减缓高速铁路隧道出口微压波数值比较[J].交通运输工程学报,2006,6(3):18-22.
GENG Feng, ZHANG Qian, MEI Yuangui. Numerical value comparison of micro-pressure wave in reduction by using hoods at high-speed railway tunnel exit [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6 (3): 18-22.
- [10] 王英学,高波,郑长青,等.高速列车进入隧道产生的气压爆波实验研究[J].实验流体力学,2006,20(1):5-8.
WANG Yingxue, GAO Bo, ZHENG Changqing, et al. Micro-compression wave model experiment on the high-speed train entering tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20 (1): 5-8.
- [11] 贺旭洲,王英学,付业凡,等.斜切式洞门缓冲结构开口率的优化分析[J].空气动力学学报,2012,40(2):202-205.
HE Xuzhou, WANG Yingxue, FU Yefan, et al. Bamboo-truncating portal hood optimization of aperture ratio analysis [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 40(2): 202-205.
- [12] BARON A, MOLteni P, VIGEVANO L. High-speed trains: prediction of micro-pressure wave radiation from tunnel portals [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 296(1): 59-72.
- [13] MURRAY P R, HOWE M. S. Influence of hood geometry on the compression wave generated by a high-speed train [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(14): 2915-2927.
- [14] PIERRE R, ARTURO B, PAOLO M. Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(8): 781-808.
- [15] MOK J K, YOO J. Numerical study on high speed train and tunnel hood interaction [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 17-29.
- [16] HOWE M S. On the design of a tunnel-entrance hood with multiple windows [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(1): 233-248.
- [17] HOWE M S, COX E A. Reflection and transmission of a compression wave at a tunnel portal [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(8): 1043-1056.

(下转第 188 页)