

文章编号: 1674—8247(2021)05—0062—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.012

400 km/h 高速铁路隧道洞口微气压波特征 及其缓冲结构设计方法研究

胖涛¹ 杨伟超² 王田天² 罗禄森¹ 何洪²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中南大学, 长沙 410083)

摘要:隧道洞口微气压波与列车速度呈3~8次方的正比关系,并产生了显著的环境噪声,但国内外对400 km/h高速铁路隧道洞口微气压波特征及其缓冲结构设计的研究相对不足。针对这一问题,本文采用数值仿真和室内动模型试验相结合的方法,分析了400 km/h高速铁路隧道洞口的微气压波特征及其缓冲结构设计。结果表明:(1)隧道洞口微气压波峰值随列车速度的增大而急速增加,400 km/h速度下隧道洞口的微气压波峰值为350 km/h速度下的170%,远超规范允许值,且受隧道长度的影响规律与350 km/h速度存在一定差异;(2)对于400 km/h的高速铁路隧道,既有单一缓冲结构型式不能满足现有规范要求,采用等截面扩大+斜切+开孔的组合型缓冲结构可达到较好的效果。

关键词:400 km/h 高速铁路;微气压波;缓冲结构;动模型

中图分类号:U451+.3 **文献标志码:**A

62

Study on Characteristics of Micro-pressure Wave at Tunnel Portal of 400 km/h High-speed Railway and Design Method of Buffer Structure

PANG Tao¹ YANG Weichao² WANG Tiantian² LUO Lusen¹ HE Hong²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The micro-pressure wave at the tunnel portal is proportional to the train speed to the power of 3~8, which produces significant environmental noise. However, the research on the characteristics of the micro-pressure wave at the tunnel portals of 400 km/h high-speed railway and the design method of its buffer structure is relatively insufficient both in China and abroad. To solve this problem, the characteristics of the micro-pressure wave at the portals of a 400 km/h high-speed railway tunnel and the design method of its buffer structure are analyzed by means of numerical simulation and indoor dynamic model test. The results show that: (1) The peak value of micro-pressure wave at the tunnel portals increases rapidly with the increase of train speed, and the peak value of micro-pressure wave at the tunnel portals at 400 km/h is 170% of that at 350 km/h, far exceeding the allowable value of the specifications, and the law is different from that at 350 km/h due to the tunnel length. (2) For the 400 km/h high-speed railway tunnel, the existing single buffer structure can not meet the requirements of the existing specifications, and the combined buffer structure with equal cross-section expansion + oblique cutting + opening can achieve better results.

收稿日期:2021-03-01

作者简介:胖涛(1990-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202061)

引文格式:胖涛,杨伟超,王田天,等. 400 km/h 高速铁路隧道洞口微气压波特征及其缓冲结构设计方法研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):62-67.

PANG Tao, YANG Weichao, WANG Tiantian, et al. Study on Characteristics of Micro-pressure Wave at Tunnel Portal of 400 km/h High-speed Railway and Design Method of Buffer Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):62-67.

Key words: 400 km/h high-speed railway; micro-pressure wave; buffer structure; dynamic model

隧道洞口微气压波效应会对周边环境产生不良影响,严重时会造成隧道洞口附近玻璃等脆性构筑物破坏。自1964年日本东海新干线开通以来,国外学者对隧道洞口微气压波开展了大量研究,小沢^[1]等研究了压缩波在隧道内板式无砟轨道传播压力变形的问题,建立了压缩波从隧道入口传播到出口产生微气压波之间的关系;Mashimo S^[2]通过现场测试,对高速铁路隧道洞口微气压波的形成机制进行了深入分析,并指出隧道进口段形成的初始压缩波在出口端的辐射造成了洞口微气压波,且此微气压波的峰值与初始压缩波的变化速率直接相关。随着我国高速铁路的发展,国内学者针对350 km/h及以下速度的高速铁路隧道洞口缓冲结构进行了大量研究,宋军浩^[3]等采用动模型试验对隧道壁面压力波和出口微气压波展开研究,得到了车头形状和车速对微气压波的影响规律;吴剑^[4]等以隧道内的试验为根据,提出了考虑微气压波作用下的缓解率,并提出了对应的设计参数;Zhang^[5]指出帽檐斜切式缓冲结构是减缓微气压波最有效的形式;黄兆国^[6]研究了高速磁浮列车快速通过隧道时的气动特性,得到了阻塞比与微气压波的关系;陶伟明^[7]研究了不同形式缓冲结构对微气压波的减缓效果;舒信伟^[8]等对5种不同头型列车进行分析,得出增加流线型头部长度是减小气动阻力的有效途径,并可减缓洞口微气压波效应。

目前,国内对于高速铁路隧道洞口微气压波的研究主要是针对350 km/h及以下速度进行的,对400 km/h速度条件下隧道洞口微气压波特征及其合理缓冲结构型式等问题的研究相对较少。本文对400 km/h列车通过隧道时洞口的微气压波特征开展研究,并在此基础上提出合理的缓冲结构型式及其设计参数,相关研究成果可为新建400 km/h高速铁路或提速铁路隧道洞口缓冲结构的设计提供依据。

1 研究方法

本文基于FLUENT软件,采用三维可压缩动模型特征线数值方法,建立了隧道-列车-空气的气动仿真计算模型,分析400 km/h速度下的隧道洞口微气压波变化特征。同时,依据轨道交通安全教育部重点实验室的列车空气动力学效应动模型实验平台,开展400 km/h及以上速度下的高速铁路隧道空气动力学动模型实验,采用模型试验、现场测试和数值模拟相结合的方法验证数值计算结果的可靠性。

1.1 计算理论基础

高速列车突入隧道时,列车周边及隧道之间的流场为三维、粘性、可压缩、非稳态湍流流场。本文选用RNG $\kappa - \varepsilon$ 湍流模型。

湍流动能 k 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \quad (1)$$

湍流耗散率 ε 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu_l + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: ν ——空气运动粘度, $\nu = \mu/\rho$;

ν_l ——层流运动粘度;

ν_t ——湍流运动粘度;

C_1 、 C_2 、 σ_k 、 σ_ε ——经验常数,参考近几年已发表的文献,本文计算时取 $C_1 = 1.47$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.33$ 。

1.2 隧道及列车模型

为准确分析隧道洞口的微气压波变化特征,隧道和列车均以我国现行高速铁路的运行条件为基础进行实体建模,隧道选取100 m²和110 m²两种断面,其中,100 m²隧道断面严格按照现行350 km/h速度条件下双线隧道标准断面建模,110 m²隧道断面则在标准隧道断面的基础上,采用同比例放大的方法得到。由于隧道洞口微气压波峰值主要与初始压缩波的变化率有关,而初始压缩波的变化率则主要受隧道断面和列车车头长度影响,与列车编组数量的相关性并不显著。为提高计算效率,列车选取流线型较好的3节编组CRH380B型列车进行数值仿真,如图1所示。

1.3 计算网格模型及边界条件

模型采用结构化网格和非结构化网格进行划分,隧道及两端大气部分采用结构化网格,缓冲结构区域采用非结构化网格。网格区域分为静止网格区域和动网格区域,动网格区域包括列车及附近空气部分,运用铺层法实现列车与隧道之间的相对运动。

列车表面网格及动网格区域内部的网格均设置为Rigid,即这部分网格会整体向前移动,不会出现网格重建和网格尺寸变化的情况。动网格两端设置成Stationary,保证动网格部分不会运动到边界以外。动

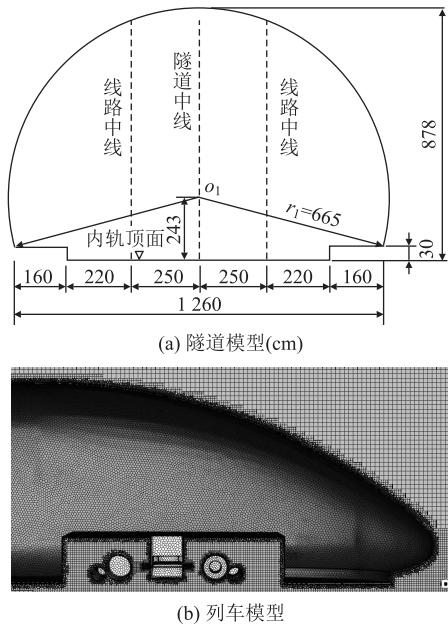


图 1 计算几何模型图

网格与静网格部分通过 Interface 进行信息交换。两端大气设置成压力出口边界条件,地面、缓冲结构表面及隧道壁面为壁面。

1.4 数值仿真可靠性验证

为验证本文数值仿真结果的准确性,将计算结果与中南大学高速列车动模型试验结果进行对比,洞口外 20 m 处的对比结果如表 1 所示。

表 1 计算结果与试验结果对比表

方法	微气压波峰值 /Pa		
	无缓冲结构	等环扩大 + 斜切	帽檐 + 斜切
数值计算	82	73	63
动模型试验	79	70	61
误差率/%	3.80	4.29	3.28

从表 1 可以看出,数值仿真结果的误差率不超过 4.5%,且多工况的计算结果与试验结果均保持了很好的一致性,说明本文采用的数值仿真方法是正确的,模型的参数选取是合理的,仿真结果可靠。

2 400 km/h 速度下洞口微气压波特征及其影响因素

以 400 km/h 速度的 3 节编组 CHR380B 列车在长 1 000 m、断面面积为 100 m² 的高速铁路隧道中运行为例,分析微气压波的变化特征。

2.1 洞口外微气压波峰值衰减规律

隧道出口外不同位置的微气压波变化时程曲线如图 2 所示,该计算工况下微气压波峰值随洞口外距离的衰减规律如图 3 所示。

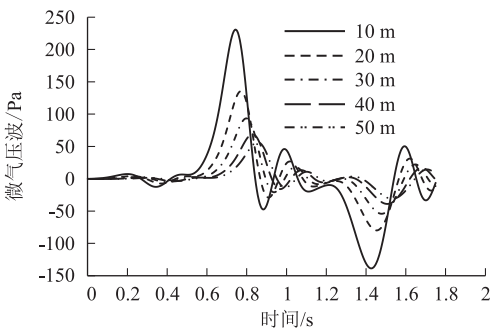


图 2 隧道洞口微气压波时程曲线图

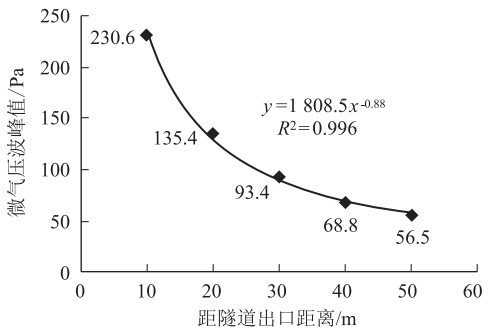


图 3 微气压波峰值随洞口外距离的衰减规律图

从图 2、图 3 可以看出:

(1) 高速铁路隧道洞口微气压波随洞内压缩波的传播而不断变化,其中,压缩波使微气压波出现正峰值,膨胀波使洞口微气压波出现负峰值,而最大峰值则是由车头进入隧道进口时形成的初始压缩波引起。

(2) 洞口微气压波峰值随距洞门出口距离的增大而迅速衰减,距出口 10 m、20 m、30 m、40 m 和 50 m 的微气压波峰值分别为 230.6 Pa、135.4 Pa、93.4 Pa、68.8 Pa 和 56.5 Pa,微气压波峰值与距离的对应关系近似为 $y = 1\,808.8x^{-0.88}$ 。洞口微气压波不满足规范距洞口 20 m 和 50 m 处的微气压波分别小于 50 Pa 和 20 Pa 的要求。

2.2 车速对微气压波的影响

列车速度是影响洞口微气压波的主要因素,本文对不同速度条件下隧道洞口 20 m 处微气压波峰值的变化进行对比。350 km/h 和 400 km/h 速度下洞口 20 m 处微气压波时程曲线如图 4 所示,车速与微气压波峰值之间的拟合曲线如图 5 所示,350 km/h 和 400 km/h 速度下隧道洞口微气压波峰值如表 2 所示。

表 2 隧道洞口微气压波峰值对比表

车速 v (km/h)	微气压波 p /pa				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
350	132.2	79.0	56.6	42.8	37.7
400	230.6	135.4	93.4	68.8	56.5
比值	1.74	1.71	1.65	1.61	1.50

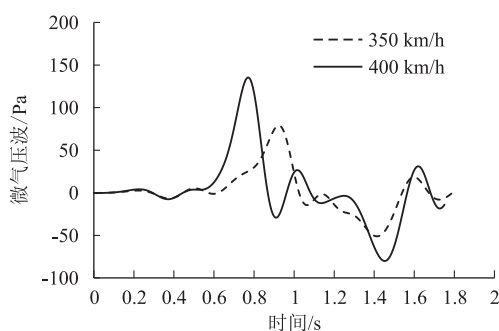


图4 隧道洞口微气压波时程曲线图

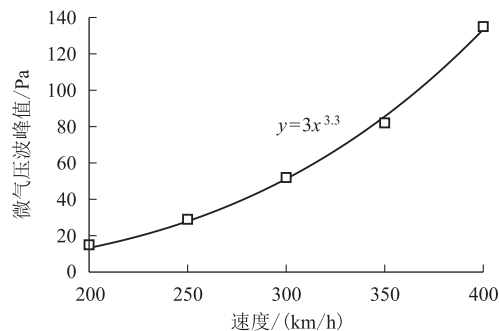


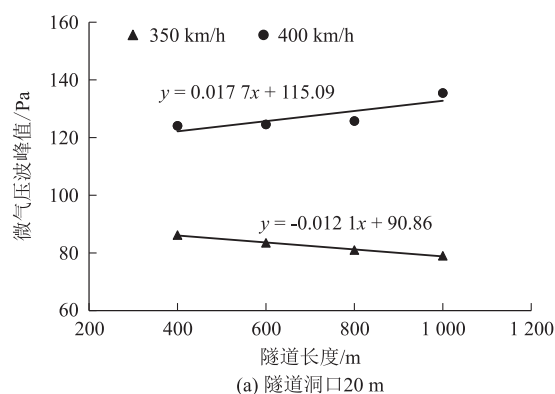
图5 列车速度与微气压波峰值之间的关系图

从图4、图5可以看出,受初始压缩波的影响,350 km/h和400 km/h速度下隧道洞口微气压波均表现出压力突增、突降现象,且变化规律基本一致。当列车速度低于300 km/h时,隧道洞口20 m处的微气压波峰值均低于50 Pa,满足规范要求。当列车速度为300 km/h和350 km/h时,微气压波峰值分别达到52 Pa和79 Pa,均超过规范值,车速与微气压波峰值之间呈现超3次方($y=3x^{3.3}$)的正比关系,即当列车速度由350 km/h提升至400 km/h时,洞口微气压波峰

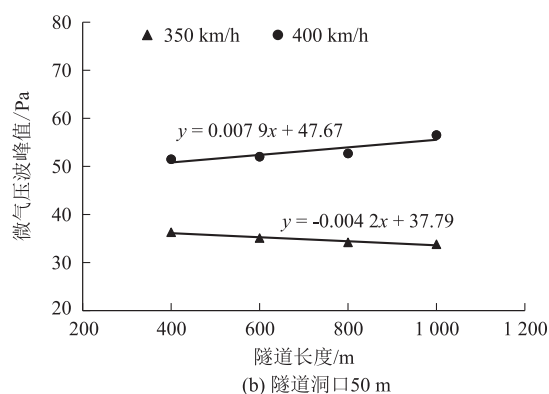
值会出现大幅增加,洞口20 m处的微气压波峰值将由超出规范值约30 Pa增加到85.4 Pa,即超标率由58%增大到171%。洞口50 m处微气压波峰值由超出规范值约17.7 Pa增加到36.5 Pa,即超标率由89%增大到183%。

2.3 隧道长度对微气压波的影响

除了列车速度,隧道长度对微气压波也有一定程度的影响,350 km/h和400 km/h两种速度条件下不同长度隧道洞口微气压波峰值对比如图6所示。



(a) 隧道洞口20 m



(b) 隧道洞口50 m

图6 不同隧道长度下隧道洞口微气压波峰值图

从图6可以看出:

(1)当列车速度为350 km/h时,隧道洞口微气压波峰值随隧道长度的增大而减小,二者呈负线性相关关系,隧道洞口20 m处和50 m微气压波峰值与隧道长度的拟合方程分别近似为 $y = -0.012 1x + 90.86$ 和 $0.004 2x + 37.79$,这一规律与参考文献[9]是一致的。

(2)相反地,当列车速度为400 km/h时,隧道洞口微气压波峰值随隧道长度的增大而增大,二者呈正线性相关关系,隧道洞口20 m处和50 m微气压波峰值与隧道长度的拟合方程分别近似为 $y = 0.017 7x + 115.09$ 和 $0.007 9x + 47.65$ 。

发生上述现象的原因可能在于:当列车速度由350 km/h提高到400 km/h时,对应的Ma由0.285提高到0.327,而根据空气动力学的基本分析理论,对于

Ma > 0.3的中亚音速流动,空气压缩热将逐渐显现,因此,针对400 km/h+速度条件下的隧道洞口微气压波有必要继续进行深入研究。

3 400 km/h速度下洞口缓冲结构设计

已有研究表明,洞口微气压波峰值与初始压缩波的变化梯度呈现5~8次方关系^[10],而消减初始压缩波的方法包括改善车头流线型(主要是提高高细比)、降低列车速度、增大隧道断面和在洞口加设缓冲结构等,本文主要结合增大隧道断面和增设缓冲结构两种方法进行分析。

3.1 增大隧道断面

列车以400 km/h速度通过100 m²和110 m²两种隧道断面的微气压波峰值对比如图7所示。

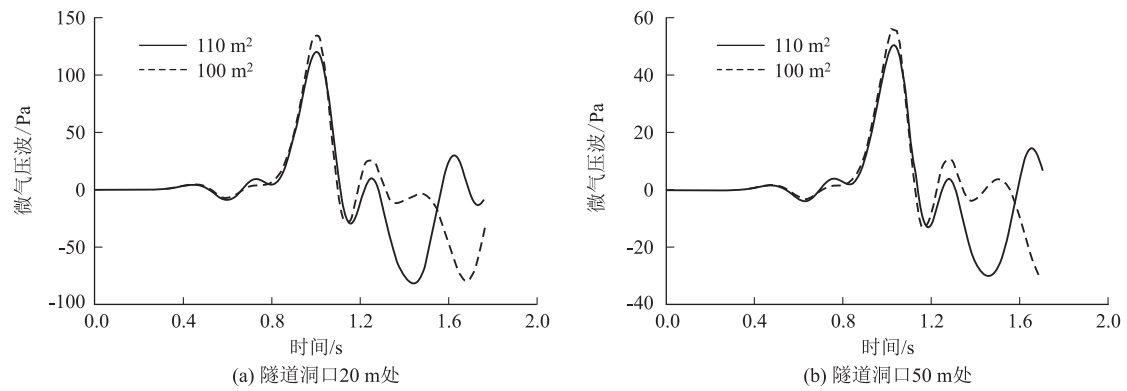


图7 100 m²和110 m²隧道断面洞口微气压波时程曲线图

从图7可以看出,对于400 km/h的高速铁路隧道,当隧道断面由100 m²增大到110 m²时,洞口外20 m处微气压波峰值将由135.4 Pa降低到120.1 Pa,即由规范允许值的271%降低到240%,降低效果有限。同时,隧道断面面积增大必将引起线路建造成本及技术难度大幅的增加,因此,通过在洞口加设缓冲结构来降低微气压波峰值的方法更为适宜。

3.2 增设洞口缓冲结构

对于350 km/h的高速铁路隧道,主要洞口缓冲结构型式主要有喇叭型、等截面扩大、明洞斜切和洞周开孔等。考虑到400 km/h速度下高速隧道洞口微气压波值远超规范和350 km/h速度下的相应值,对各种缓冲结构及其组合方式的缓冲效果进行对比分析。以断面面积100 m²、长度1 000 m的隧道为例,分析缓冲结构及其组合方式下洞口微气压波峰值的缓冲效果,结果如表3所示。

从表3可以看出,对于400 km/h的高速铁路隧道,采用单一的缓冲结构无法将洞口微气压波峰值降

低到规范允许值以下,采用等截面扩大+斜切+开孔的组合型缓冲结构则可取得较好的降压效果。因此,建议400 km/h速度高速铁路隧道洞口采用等截面扩大+斜切+开孔的组合型缓冲结构。

表3 不同洞口结构组合型式的缓冲效果对比表

缓冲结构组合方案	微气压波峰值/Pa		缓解率/%	
	20 m	50 m	20 m	50 m
①无缓冲结构	135	56.5	0	0
②等截面扩大 ($S_H/S_T=1.55$)	63	26.4	0.53	0.53
③等截面扩大+斜切 ($\beta=30^\circ$)	58.9	24.8	0.56	0.56
④等截面扩大+斜切+开孔 (2@6 m×4 m)	48.7	20.4	0.63	0.63

3.3 缓冲结构形式及其设计参数分析

鉴于隧道洞口微气压波峰值与隧道长度存在一定相关性,以等截面扩大+斜切+开孔的组合型缓冲结构为基础,分析隧道长度400~6 000 m范围内缓冲结构的设计参数,结果如表4所示。

表4 不同隧道长度条件下洞口缓冲设计参数建议值表

隧道长度/m	缓冲结构参数					洞口外20 m微气压波/Pa
	扩大段面积/m ²	扩大段长度/m	斜切角/斜切段长度(°/m)	泄压孔面积/m ²	总长度/m	
400	155	53.2	30(30)	2×4×6	74.5	49.3
600	155	53.2	30(30)	2×4×6	74.5	46.3
1 000	155	45.7	30(30)	2×4×6	67	45.2
2 000	200	43.9	30(30)	2×4×6	67	41.3
3 000	200	43.9	30(30)	2×4×6	67	46.1
4 000	200	43.9	30(30)	2×4×6	67	45.3

4 结论及建议

本文采用室内动模型试验和数值计算相结合的方法,研究了400 km/h速度条件下高速铁路隧道洞口的微气压波特征,并基于国内外主要缓冲结构型式,对

400 km/h速度条件下高速铁路隧道洞口的缓冲结构型式及其设计参数进行了量化分析,得到以下主要结论:

(1)隧道洞口微气压波峰值随列车速度的增大而急速增加,二者呈现超3次方($y=3x^{3.3}$)的正比关系,

400 km/h 速度下隧道洞口微气压波峰值为 350 km/h 速度下的 1.61 ~ 1.74 倍,且均远超规范要求。

(2)400 km/h 速度下,洞口微气压波随隧道长度的增加而线性增加;350 km/h 速度下,洞口微气压波随隧道长度的增加而线性降低。

(3)对于 400 km/h 的高速铁路隧道,单纯增大隧道断面或加设单一缓冲结构均不能满足现有规范要求,采用等截面扩大 + 斜切 + 开孔的组合型缓冲结构可将洞口微气压波降低到规范允许值以内。

(4)对于 400 km/h 的高速铁路隧道,隧道洞口微气压波峰值与隧道长度存在一定的相关性,应根据隧道长度对缓冲结构设计参数进行针对性优化分析。

本文主要是基于室内动模型试验和数值仿真两种研究方法进行的研究,最终实施效果应根据实测结果进一步验证。此外,对于更高速度下隧道洞口的结构型式及其微气压波特征,有必要结合空气动力学中等亚音速流的基础分析理论进行深入研究。

参考文献:

- [1] 小沉智. ト>ネ儿出口微氮压波の研究[J]. 铁道技术研究报告, 1979.
- [2] MASHIMO S, NAKATSU E, AOKI T, et al. Entry Compression Wave Generated by a High-speed Train Entering a Tunnel[J]. TransActions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 1995, 61(590): 3720-3727.
- [3] 宋军浩, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 高速列车隧道通过中的气动效应动模型实验研究[J]. 实验流体力学, 2017, 31(5): 39-45.
SONG Junhao, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Experimental Investigation on the Aerodynamics of Tunnel-Passing for High Speed Train with a Moving Model Rig[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(5): 39-45.
- [4] 吴剑, 史宪明, 万晓燕. 时速 300 ~ 350 km 高速铁路双线隧道微气压波激化作用及缓解措施研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 209-214.
WU Jian, SHI Xianming, WAN Xiaoyan. Study on Intensification and Mitigation Methods of Micro Pressure Wave of Double Track Tunnel in 300 to 350 km/h High Speed Railway[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 209-214.
- [5] ZHANG Lei, THUROW K, STOLL N, et al. Influence of the Geometry of Equal-Transect Oblique Tunnel Portal on Compression Wave and Micro-Pressure Wave Generated by High-speed Trains Entering Tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 178: 1-17.
- [6] 黄兆国. 超高速磁浮列车空气动力学问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
HUANG Zhaoguo. Study on Aerodynamics of Super High Speed Maglev Train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] 陶伟明. 高速铁路隧道洞口微气压波减缓措施效果研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(8): 65-70.
TAO Weiming. Research on the Alleviation Effects of Micro Pressure Wave Countermeasures at the High Speed Railway Tunnel Portal[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(8): 65-70.
- [8] 舒信伟, 谷传纲, 梁习锋, 等. 高速磁浮列车气动阻力性能数值模拟与参数化评估[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 6-10.
SHU Xinwei, GU Chuangang, LIANG Xifeng, et al. Numerical Simulation and Parameterized Investigation of Aerodynamic Drag Performances of High-speed Maglev Trains[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 6-10.
- [9] 马伟斌, 张千里, 刘艳青. 中国高速铁路隧道气动效应研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(4): 25-32.
MA Weibin, ZHANG Qianli, LIU Yanqing. Study Evolvment of High-speed Railway Tunnel Aerodynamic Effect in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 25-32.
- [10] 山本彬也. 列車とトンネルの空気力学[J]. 鉄道技術研究报告, 1983.
Pressure Waves Generated by High-speed Trains Passing through Tunnels[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(8): 1427-1436.
- [12] 刘长青, 王雷. 400 km/h 跨国互联互通高速动车组[J]. 机车电传动, 2020(2): 1-6.
LIU Changqing, WANG Lei. 400 km/h Transnational Interconnection High-speed EMU[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2): 1-6.
- [13] 徐银光, 李艳. 成渝中线 400 km/h 轮轨动车组技术指标研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 7-11.
XU Yinguang, LI Yan. Research on Technical Indexes of 400 km/h Wheel-Rail EMU for Chengdu-Chongqing Middle Line[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 7-11.

(上接第 51 页)

- [9] 赵有明, 马伟斌, 程爱君. 高速铁路隧道气动效应[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
ZHAO Youming, MA Weibin, CHENG Aijun. High-speed Railway Tunnel Aerodynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [10] 中车青岛四方机车车辆股份有限公司. 中国标准动车组长大隧道压力波特牲研究[R]. 青岛: 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 2015.
CRRC QINGDAO SIFANG Co., Ltd. Study on The Characteristics of Pressure Waves Induced by China Standard EMU in a Long Tunnel [R]. Qingdao: CRRC QINGDAO SIFANG Co., Ltd., 2015.
- [11] MEI Yuangui. A Generalized Numerical Simulation Method for