

文章编号: 1674—8247(2020)01—0047—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.01.010

保温套衬对季冻区隧道空气动力学的影响研究

刘龙卫¹ 侯占鳌¹ 崔光耀² 祁家所²

(1. 中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401123;
2. 北方工业大学, 北京 100144)

摘 要:本文基于有限体积法,采用流体动力学计算软件建立了隧道内高速列车通过的空气动力学模型,使用 CFD 滑移网格技术划分模型流场动网格,再使用流体动力学计算软件 FLUENT 进行数值分析,模拟列车通过隧道时的三维非定常可压缩流场,研究列车通过隧道时的衬砌空气动力学规律与隧道净空面积对衬砌空气动力学特性的影响。研究结果表明:(1)衬砌压力在列车车头到达时达到最大,车头经过后衬砌压力逐渐减弱;(2)增设保温套衬后,隧道净空面积由 72 m² 减少为 69 m²,隧道中部衬砌压力增加 2.93%,隧道进口衬砌压力增加 6.29%,隧道出口衬砌压力增加 3.22%;距隧道入口 100 m 后的衬砌压力变化最大值成收敛趋势,不再持续增长。

关键词:隧道;空气动力学;保温套衬;衬砌压力;净空面积

中图分类号:U451

文献标志码:A

Effect of Thermal Insulation Lining on Tunnel Aerodynamics in Seasonal Frozen Zone

LIU Longwei¹ HOU Zhan'ao¹ CUI Guangyao² QI Jiasuo²

(1. The First Construction Division Co., Ltd. of China Railway Tunnel Group, Chongqing 401123, China;
2. North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on the finite volume method, the fluid dynamics calculation software is adopted to establish the aerodynamic model of train passing through the tunnel, CFD sliding grid technique is used to divide the dynamic grid of model flow field, then the fluid dynamics calculation software FLUENT is used for numerical analysis to simulate the three-dimensional unsteady compressible flow field when the train passes through the tunnel, and to study the aerodynamic law of the lining and the influence of tunnel clearance area on the aerodynamic characteristics of the lining when the train passes through the tunnel. The results show that: (1) the tunnel lining pressure reaches the maximum when the locomotive arrives, and the tunnel lining pressure gradually decreases after the locomotive passes through; (2) after adding thermal insulation lining in the tunnel, the clearance area of the tunnel is decreased from 72 m² to 69 m², the lining pressure in the middle of the tunnel increases by 2.93%, the lining pressure increases by 6.29% at the tunnel entrance and by 3.22% at the tunnel exit, after 100 m from the tunnel entrance, the maximum value of lining pressure changes converges and does not continue to increase.

Key words: tunnel; aerodynamics; insulation sleeve lining; lining pressure; clearance area

收稿日期:2020-01-02

作者简介:刘龙卫(1980-),男,高级工程师。

基金项目:中国中铁股份有限公司 2019 年科技研究开发计划 A 类课题(2019-引导-28)

引文格式:刘龙卫,侯占鳌,崔光耀,等. 保温套衬对季冻区隧道空气动力学的影响研究[J]. 高速铁路技术,2020,11(1): 47-51.

LIU Longwei, HOU Zhan'ao, CUI Guangyao, et al. Effect of Thermal Insulation Lining on Tunnel Aerodynamics in Seasonal Frozen Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 47-51.

我国季节性冻土面积辽阔,占版图面积的53.5%,其中西北、华北、东北以及西南高海拔山区分布密集^[1]。近年来,我国交通基础设施持续、深入发展,季冻区铁路隧道大量涌现,运营期间冻害不断出现,其危害已严重影响铁路隧道的运营安全。

研究表明,聚氨酯-波纹钢板保温套衬对季冻区隧道保温效果明显^[2-3]。但隧道的净空面积会因保温套衬的增设相对减少,这将对隧道内列车高速通过时的空气动力学效应产生影响。目前国内外专家、学者主要对不同隧道长度、速度等级、缓冲结构等因素进行了大量研究^[4-11],但对于隧道不同净空面积的研究,特别是对隧道增设套衬对于衬砌空气动力学影响方面的研究较少。本文基于有限体积法,采用CFD流体动力学软件进行建模,后将模型导入Fluent进行计算并输出计算结果。建立列车在不同净空面积下以一定速度通过隧道的Fluent计算模型,使用滑移网格技术,模拟运动状态下,列车在隧道内穿行时的三维非定常可压缩理想空气流场,研究高速列车在隧道不同位置时,隧道衬砌空气动力学效应的变化规律。

1 榆树川隧道工程概况

榆树川隧道处于布尔哈通河低山丘陵区,隧道最大埋深158 m,全长2 211 m,进口里程DK 237+624,出口里程DK 239+835。布尔哈通河低山丘陵区属于北亚温带湿润半湿润大陆性季风气候,最冷月的平均气温为-15.2℃,根据影响铁路工程的气候分区,布尔哈通河低山丘陵区为严寒地区。冬季酷寒漫长,夏季温暖短促,极端最低气温曾达-37.1℃,因此隧道设计需增设保温套衬。已知隧道掌子面未增设保温套衬时的内轮廓净空面积为72 m²,增设保温套衬后的隧道净空面积减少为69 m²,隧道掌子面设计如图1所示。

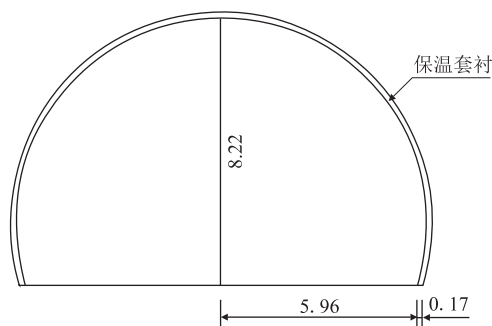


图1 掌子面设计图(m)

2 数值模拟模型建立

采用计算流体动力学软件CFD、FLUENT共同完

成此次模拟。由于CFD软件自带的滑移网格划分技术能够很好地模拟三维非定常可压缩流场,因此采用CFD进行模型全程的建立与网格划分。FLUENT通过有限体积算法,把整个流体计算模型进行区域分类,将区域模型划分为系列控制体积,然后对划分好的控制体积进行待解微分方程积分,最终解得一组积分后的离散方程。

列车穿行隧道的空气动力学计算过程属于大区域变形运动过程,CFD的滑移网格技术是针对大区域变形的网格划分技术,其流体网格根据隧道内列车位置的不断变化而作相应调整,要求每一个时间步均需向CFD计算提供计算信息。

本文将计算域分为隧道、空气、车体三部分。空气状态采用密度为1.185 kg/m³的可压缩空气。

2.1 计算模型

数值模拟列车高速通过隧道时的三维非定常可压缩理想空气流场,分别计算200 km/h列车通过增设保温套衬隧道(净空面积为69 m²)和未增设保温套衬隧道(内轮廓净空面积为72 m²)两个流场^[12]。受列车的复杂外形和FLAC3D计算条件的限制,在不影响模型计算精度的情况下,对列车模型作适当简化,隧道长取200 m,FLUENT列车隧道模型如图2所示。

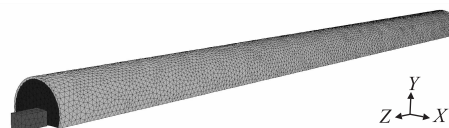


图2 fluent模型图

2.2 计算网格

由于客运专线列车高速通过隧道引起的流场变化属于三维非定常问题,模型网格技术采用分区对接网格。其中地面、衬砌、隧道采用六面体结构网格离散,列车采用四面体的非结构化网格进行划分。不断重划分共同滑移面之间网格,可将数据在各区域间完成交换。

2.3 边界条件设置

本文fluent模型设置出口、速度和固定壁面边界。具体设置如下:(1)速度边界根据不同的列车速度分别设置;(2)隧道内部气压与外部大气相通,出口边界设置压力出口边界;(3)轨道壁面、列车壁面、隧道壁面均设置为固定壁面,边界条件为无滑动位移,模型流体速度为0^[13]。

2.4 测点布置

沿隧道入口每隔50 m设置1个监测断面,共设置3个(分别为隧道进口、隧道中部、隧道出口)监测断

面,监测点的断面布置如图 3 所示,断面监测点布置如图 4 所示。

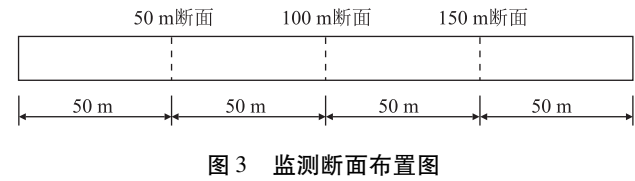


图 3 监测断面布置图

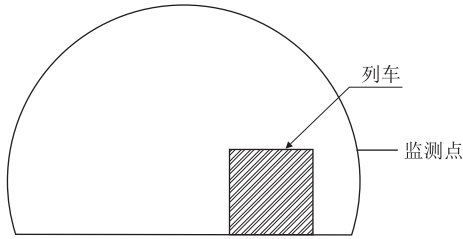


图 4 监测点布置图

3 计算结果分析

列车分别在未增设保温套衬隧道(内轮廓净空面积为 72 m²)与增设保温套衬隧道(净空面积为 69 m²)运行 0~1.08 s 的隧道衬砌压力如图 5~图 12 所示。

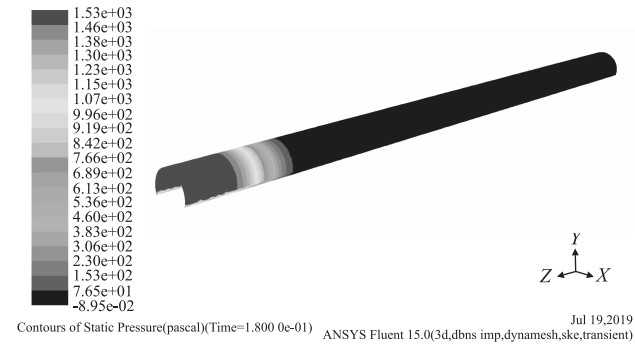


图 5 0 s 未增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

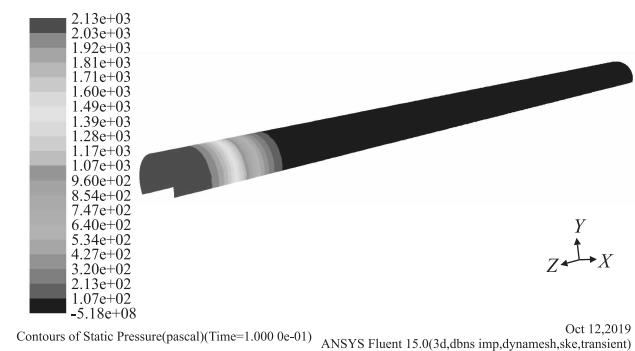


图 6 0 s 增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

由图 5~图 12 可知,隧道衬砌所受压力的最大值部位随列车的运行一同移动。在列车行驶到同一位置

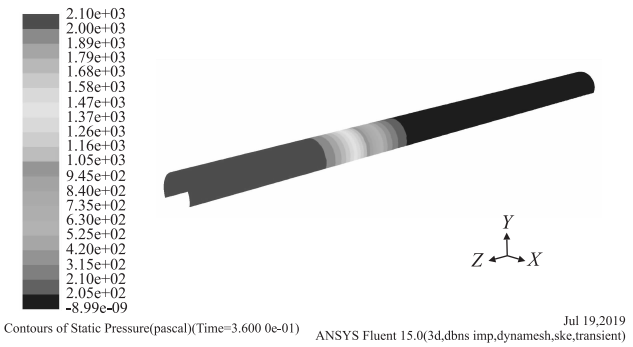


图 7 0.36 s 未增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

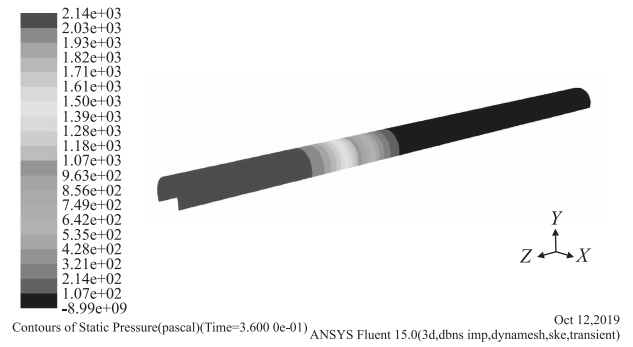


图 8 0.36 s 增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

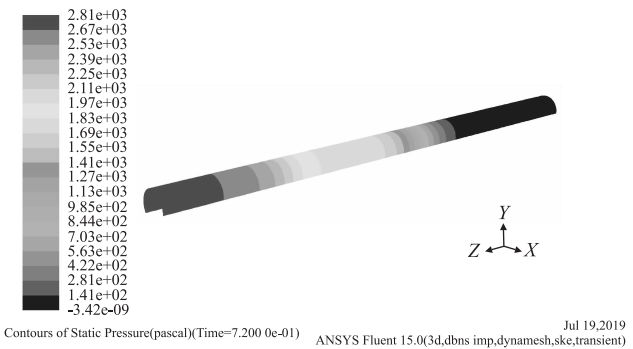


图 9 0.72 s 未增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

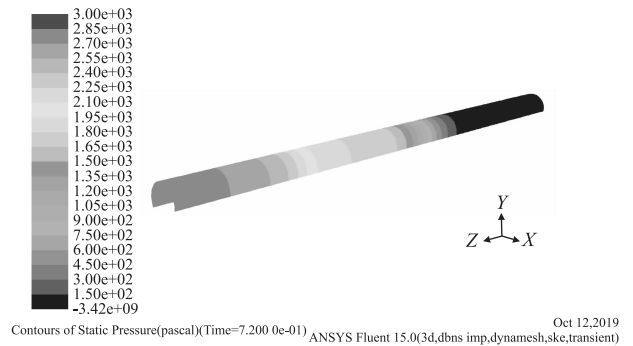


图 10 0.72 s 增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

时,增设保温套衬隧道的衬砌压力均大于未增设保温套衬隧道的衬砌压力。

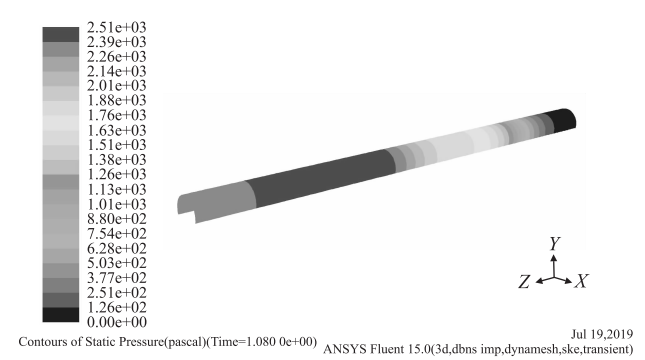


图 11 1.08 s 未增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

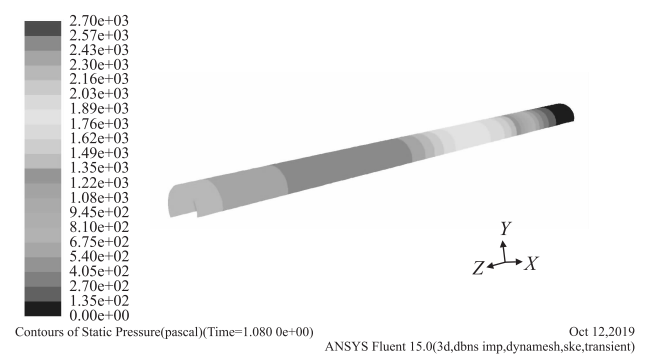


图 12 1.08 s 增设保温套衬隧道衬砌压力云图(Pa)

当列车全程通过时,未增设保温套衬隧道(内轮廓净空面积为 72 m²)与增设保温套衬隧道(净空面积为 69 m²)衬砌在隧道进口、隧道中部、隧道出口处的压力变化如表 1、表 2 所示。

表 1 未增设保温套衬隧道衬砌压力表

时段	衬砌压力/Pa		
	进口	中部	出口
0s	0	0	0
0.72s	57.9	21.3	0
1.44s	54.1	61.2	54.0
2.16s	53.0	200.3	223.1
2.88s	51.2	68.4	231.3
3.6s	48.7	52.6	64.7

表 2 增设保温套衬隧道衬砌压力表

时段	衬砌压力/Pa		
	进口	中部	出口
0s	0	0	0
0.72s	59.6	22.1	0
1.44s	55.0	62.0	54.3
2.16s	53.6	208.2	226.8
2.88s	51.5	68.9	235.6
3.6s	48.9	52.6	64.8

由表 1 可知,当列车接近某一位置衬砌时,该位置衬砌压力达到最大值,由表 2 可知,隧道净空面积减小后,隧道衬砌压力明显增大。

未增设保温套衬隧道(内轮廓净空面积为 72 m²)与增设保温套衬隧道(净空面积为 69 m²)衬砌的压力变化如图 13 ~ 图 15 所示。

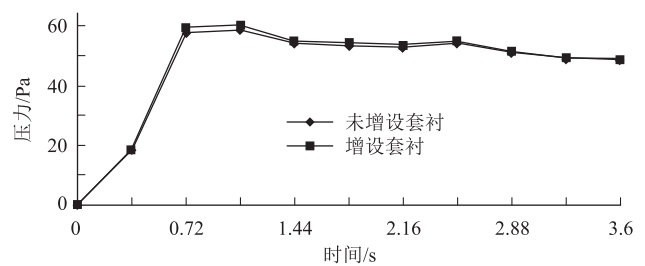


图 13 隧道进口衬砌压力变化图

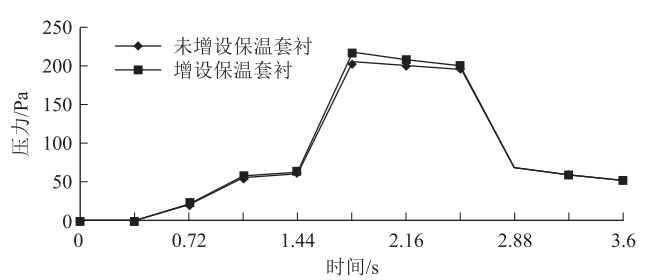


图 14 隧道中部衬砌压力变化图

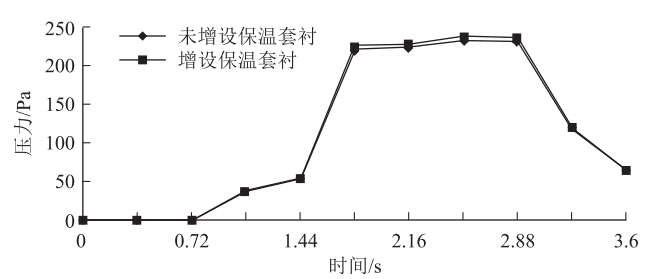


图 15 隧道出口衬砌压力变化图

由图 13 ~ 图 15 可知,在车头到达时,隧道衬砌内壁压力变化达到最大,无论是否增设套衬,隧道衬砌内壁在车头到达时的压力变化均达到最大。隧道增设保温套衬后,由于净空面积的减小,衬砌空气动力学影响增加,在车头到达时,隧道进口衬砌压力变化较未增设保温套衬增加 2.93%,中部衬砌压力变化较未增设保温套衬增加 6.29%,出口衬砌压力变化较未增设保温套衬增加 3.22%。

不同净空面积隧道不同位置的衬砌压力变化最大值如图 16 所示。

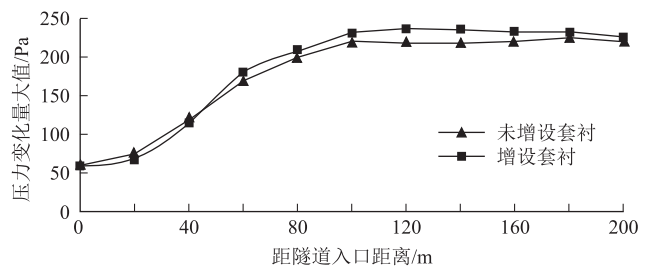


图 16 隧道衬砌压力变化最大值图

由图16可知,隧道衬砌所受压力变化最大值均出现在隧道中部以后,隧道中部以后的压力变化最大值成收敛趋势,隧道进口至中部的压力变化最大值相对较小,成线性增长趋势。

4 结论

(1)隧道衬砌内空气动力学影响在列车车头到达时达到最大,车头经过后空气动力学影响逐渐减弱。

(2)当隧道净空面积由 72 m^2 减少为 69 m^2 时,空气动力学影响受净空面积的减少而增大,隧道进口衬砌压力变化增加 2.93% ,中部衬砌压力变化增加 6.29% ,出口衬砌压力变化增加 3.22% 。

(3)季冻区隧道增设保温套衬后,隧道空气动力学影响增大,空气动力学影响最大处出现在隧道中部以后。

(4)列车运行穿过隧道中部后,隧道衬砌压力变化最大值成收敛趋势,之后不再增长。

参考文献:

- [1] 高焱,耿纪莹,贾超,等.寒区隧道温度场变化规律及空气幕保温效果[J].西南交通大学学报,2019,54(5):1047-1054.
GAO Yan, GENG Jiying, JIA Chao, et al. Research on Temperature Field Distribution and Air Curtain Insulation Effect of Tunnel in Cold Region [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 1047-1054.
- [2] 汤贵海,伍毅敏,张镇国,等.寒区隧道层间聚氨酯保温板的冻融特性试验[J].西安科技大学学报,2018,38(2):323-329.
TANG Guihai, WU Yimin, ZHANG Zhenguo, et al. Performance of Interlayer Polyurethane Insulation under Freeze-thaw Cycles for Tunnel in Cold Region [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 323-329.
- [3] 李俊儒,王李斌,王雪来,等.季冻区既有隧道保温钢波纹板套衬保温效果分析[J].高速铁路技术,2019,10(6):45-48.
LI Junru, WANG Libin, WANG Xuelai, et al. Analysis of Thermal Insulation Effect of Corrugated Steel Plate Liner in Existing Tunnels in Seasonal Frozen Area [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 45-48.
- [4] 王瑞丽.高速列车驶入隧道气动效应数值模拟研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.
WANG Ruili. Numerical Study on Aerodynamic Effect of High Speed Train Entering Tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2015.
- [5] 陈鹏飞.地铁隧道空气动力学特性及最大运行速度研究[D].北京:北京交通大学,2016.
CHEN Pengfei. Research on Aerodynamic Characteristics of Subway

Tunnels and Its Maximum Train Running Speed [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

- [6] 万晓燕,吴剑.时速200km动车组通过隧道时空气动力学效应现场试验与研究[J].现代隧道技术,2006,43(1):43-48.
WAN Xiaoyan, WU Jian. In-situ Test and Study on the Aerodynamic Effect of the Rolling Stock Passing through Tunnels with a Speed of 200 km/h [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(1): 43-48.
- [7] 韩锬,田红旗.客运专线隧道空气动力学实车测试技术的研究与应用[J].中南大学学报(自然科学版),2007,38(2):326-332.
HAN Kun, TIAN Hongqi. Research and Application of Testing Technology of Aerodynamics at Train-tunnel Entry on Special Passenger Railway Lines [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 38(2): 326-332.
- [8] 毛军,薛琳,谭忠盛.新型高速列车隧道空气动力学模型实验系统[J].北方交通大学学报,2003,27(4):6-10.
MAO Jun, XUE Lin, TAN Zhongsheng. A New Type of Model Experimental System of Aerodynamics Effects Caused by High-Speed Trains Passing through Tunnel [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(4): 6-10.
- [9] 赵军,梅元贵.英法海底隧道空气动力学效应的数值模拟方法介绍[J].隧道建设,2007,27(S2):70-75.
ZHAO Jun, MEI Yuangui. Research on Numerical Simulation of Aerodynamics Effect in English Channel Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2007, 27(S2): 70-75.
- [10] 雷文杰.高速铁路隧道微压波缓冲结构专利分析[J].城市建设理论研究(电子版),2018,8(15):203.
LEI Wenjie. Patent Analysis of Micro Pressure Wave Buffering Structure of High-speed Railway Tunnel [J]. Urban Construction Theory Research (Electronic Edition), 2018, 8(15): 203.
- [11] 赵文成,高波,郑长青,等.铁路隧道缓冲结构空气动力学特性的试验研究[J].实验流体力学,2005,19(2):55-59.
ZHAO Wencheng, GAO Bo, ZHENG Changqing, et al. Investigation of Aerodynamic Characteristics of Tunnel Portals in High-speed Railway [J]. Experimental fluid mechanics, 2005, 19(2): 55-59.
- [12] 伊兴芳,曾青,马志富,等.基于空气动力学的客货共线铁路隧道内轮廓面积优化探讨[J].铁道建筑技术,2018,35(7):1-3.
YI Xingfang, ZENG Qing, MA Zhifu, et al. Discussion on Optimization of Inner Contour Area of Mixed Passenger and Freight Railway Tunnel Based on Aerodynamics [J]. Railway Construction Technology, 2018, 35(7): 1-3.
- [13] 李红梅,刘磊,白鑫,等.套衬对隧道空气动力学效应的影响研究[J].铁道建筑,2015,55(12):66-69.
LI Hongmei, LIU Lei, BAI Xin, et al. Research on Influence of Added Lining on Aerodynamics Effect in Tunnel [J]. Railway Engineering, 2015, 55(12): 66-69.

(编辑:车晓娟 苏玲梅)