

文章编号:1671-1637(2012)04-0025-08

## 中国高速铁路隧道气动效应研究进展

马伟斌<sup>1</sup>, 张千里<sup>1</sup>, 刘艳青<sup>2</sup>

(1. 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 北京 100081)

**摘要:**论述了现场实车试验、数值仿真计算和室内模型试验等高速铁路隧道气动效应的研究方法,分析了隧道气动效应的影响因素,系统研究了动车组通过隧道及交会条件下车体内和隧道内瞬变压力与洞口微气压波随速度的变化规律、缓冲结构的设置条件、隧道附加阻力的计算方法、隧道内辅助设施所承受的气动荷载要求以及长大隧道远程测试控制技术和隧道内精确交会控制方法。研究表明:高速列车通过隧道引起的气动效应直接影响到列车运行的安全性、乘员舒适性以及隧道周边的环境,是高速铁路隧道设计中必须解决的关键技术问题;建议提出适合中国国情的隧道内复合型舒适度、微气压波标准,开展多孔吸能材料、洞口缓冲结构、减压竖井、横通道设计等减缓措施研究。

**关键词:**高速铁路隧道;气动效应;实车试验;数值计算;模型试验

**中图分类号:**U459.1

**文献标志码:**A

## Study evolvement of high-speed railway tunnel aerodynamic effect in China

MA Wei-bin<sup>1</sup>, ZHANG Qian-li<sup>1</sup>, LIU Yan-qing<sup>2</sup>

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. Beijing Engineering Consulting Co. Ltd. of CARS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The research methods of high-speed railway tunnel aerodynamic effect, such as field test, numerical simulation computation and indoor model test, were dissertated. The influence factors of tunnel aerodynamic effect were analyzed. The variation laws of transient pressures in train and tunnel and micro-pressure waves outside tunnel with different velocities, buffer structure setting conditions, the calculating method of additional air resistance in tunnel, the aerodynamic load requirements of tunnel subsidiary facilities, remote testing and control technology in large-scale tunnel, the accurate control method of train passing in tunnel were systematically studied when high-speed train set went through tunnel and rendezvoused in tunnel. Analysis result shows that the aerodynamic effect produced by high-speed train set through tunnel directly affects train security, passenger comfort and tunnel surrounding environment, it is the key technical problem that must be solved in the design of high-speed railway tunnel. Composite comfort and micro-pressure wave standards that are suitable for China are suggested, the researches on micro-pressure wave mitigative measures such as porous energy-absorbing materials, the buffer structure of tunnel hole, decompression shaft, cross-channel design should be carried out. 1 tab, 8 figs, 12 refs.

**Key words:** high-speed railway tunnel; aerodynamic effect; real train test; numerical

收稿日期:2012-02-12

基金项目:铁道部科技研究开发计划项目(Z2009-073,2012G013-D)

作者简介:马伟斌(1977-),男,山东无棣人,中国铁道科学研究院副研究员,工学博士,从事高速铁路隧道气动效应研究。

computation; model test

**Author resume:** MA Wei-bin (1977-), male, associate researcher, PhD, +86-10-51874379, dwangfei@163.com.

## 0 引 言

高速铁路是世界铁路客运发展的方向,随着列车运行速度的提高以及线路中隧道比例的增加,高速列车通过隧道引起的气动效应(压力波、空气阻力、列车风、微气压波等)将直接影响到列车运行的安全性、经济性、乘员舒适性以及隧道周边的环境等,是高速铁路隧道设计中必须解决的关键技术问题<sup>[1]</sup>。

自 20 世纪 60 年代日本新干线投入运行后,日本和欧洲一些国家相继围绕高速铁路隧道气动效应问题开展了一系列研究,其研究范围主要集中在压力波的变化梯度及乘客的舒适度、压力波和微压波的传播和形成机理及其计算方法、削减压缩波和微压波的各种方案以及相关试验方法等方面的研究。其中日本由于对列车空气动力影响行车安全问题估计不足,复线间距和隧道断面面积较小(可节约工程投资),导致只能从改善列车头型和密封性等角度进行大量研究,但隧道气动效应仍是影响日本铁路运行速度提高的主要问题,另外日本对洞口微压波的测试与研究相对较深入,而英法等国家由于隧道净空断面面积大于日本且大多采用有砟轨道,因此,对洞口微气压波的研究较少,相对来说对乘车舒适度以及海底隧道气动效应方面研究较多<sup>[2-4]</sup>。

中国从 20 世纪 90 年代开始高速铁路隧道空气动力学技术的研究。2008 年 11 月至 2009 年 4 月,中国铁道科学研究院结合合武铁路和石太铁路联调联试,开展了 200~250 km·h<sup>-1</sup> 车速下隧道气动效应的试验研究,是中国铁路首次进行较为系统的隧道气动效应试验研究,涉及不同列车通过隧道和隧道内交会的车内压力变化、车体承受气动荷载、瞬变压力、列车风、微气压波、辅助设施气动力、隧道附加阻力和货物列车运行安全等;2009 年 5 月至 2011 年 5 月,中国铁道科学研究院结合武广、郑西、沪宁与京沪高速铁路联调联试,系统地开展了 300~380 km·h<sup>-1</sup> 车速下隧道气动效应的试验研究,主要验证了动车组以 380 km·h<sup>-1</sup> 速度通过隧道和隧道内交会时列车运行安全性、乘坐舒适性以及车内压力的 3 s 变化量随隧道长度、隧道内位置和速度的变化规律,得到了 300~380 km·h<sup>-1</sup> 速度下隧道内瞬变压力、洞口微气压波和列车风随车速的变化规律和经验关系以及

微气压波随隧道长度的变化规律和不同速度下的关系曲线,指出存在一个导致微气压波显著增长的隧道长度范围,得到了不同车速下需要采取缓冲措施的隧道临界长度、特定车辆密封条件下隧道内与车内瞬变压力的相关关系及其随隧道长度的变化规律,提出了不同长度隧道内瞬变压力的临界限值,获得了隧道内辅助设施受到的气动力与列车速度的关系,得到了横通道防护门、水沟盖板升力及其他辅助设施受到的气动力<sup>[1]</sup>。

本文通过理论分析、数值仿真计算以及现场实车试验等方法,研究了高速动车组 380 km·h<sup>-1</sup> 速度通过及 350 km·h<sup>-1</sup> 速度交会条件下动车组车体内和隧道内瞬变压力的变化规律、洞口微气压波影响因素和变化规律、缓冲结构的设置条件、隧道附加阻力的试验方法和具体增量、隧道内辅助设施需要承受的气动荷载要求以及长大隧道远程监测控制技术。

## 1 隧道气动效应研究方法

### 1.1 数值仿真计算

目前国内外通常采用商业和自主开发的软件进行数值仿真计算,商业软件有 CFD、FLUENT、STARCD 等。在国外,英国、韩国等国家编制了一维和三维数值模拟程序,对高速列车通过隧道进行了数值仿真计算<sup>[5]</sup>。在国内,中南大学对列车空气阻力、表面压力分布及列车交会、列车过隧道和尾流等方面的动力学问题进行了研究<sup>[6-7]</sup>;西南交通大学采用一维可压流,编制了计算隧道内瞬变压力的一维数值模拟程序。

中国铁道科学研究院采用 CFX 进行仿真计算,CFX 采用了基于有限元的有限体积法,在保证有限体积法守恒特性的基础上,吸收了有限元的数值精确性。隧道与列车模型取实际尺寸的模型,见图 1<sup>[1,8]</sup>。

设置好速度边界、固定壁面边界、开放出口边界、连接边界,然后进行计算。图 2 为列车驶入隧道时隧道区域瞬变压力云图。

动车组通过隧道时瞬变压力实测与计算对比见图 3。由图 3 可知,计算波形与实测波形基本相同,测试数据与计算结果误差在 6% 以内,由此可知计算模型合理,能满足隧道内气动效应计算精度要求。

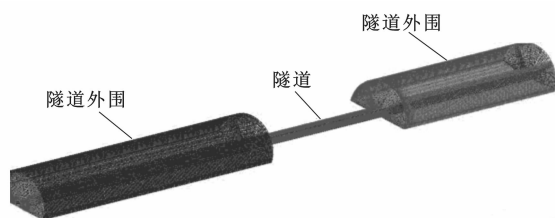


图1 隧道计算模型网格

Fig. 1 Mesh of tunnel calculating model

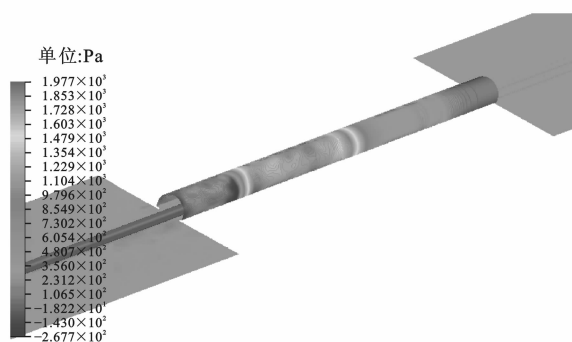


图2 列车驶入隧道瞬变压力

Fig. 2 Transient pressure when train enters tunnel

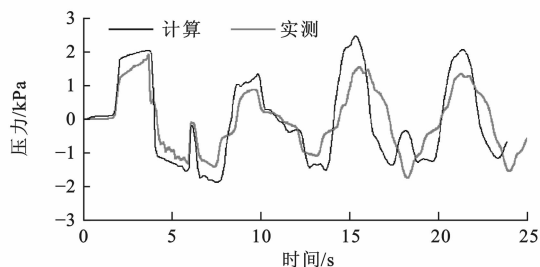


图3 瞬变压力对比

Fig. 3 Comparison of transient pressures

计算表明,隧道内各压力波的传递与叠加时刻与隧道长度、列车速度紧密相关。

## 1.2 现场实车试验

中国铁道科学研究院结合多条高速铁路的联调联试,进行了隧道气动效应现场实车试验。通过测试动车组高速通过隧道或隧道内交会时的瞬变压力、微气压波、列车风以及行车阻力的特性及变化规律,验证了数值模拟计算结果,得到了气动荷载交变作用对车体强度、车内舒适度、隧道内辅助设施以及周围环境的影响及规律,为系统开展高速铁路车隧耦合空气动力效应研究奠定基础。

### 1.2.1 高速铁路隧道气动效应测试系统

中国铁道科学研究院创造性地建立了高速铁路隧道空气动力学测试系统,解决了长大隧道全长范围内空气动力学测试难点,实现车上下与隧道各个测点同步、无线、远程测试技术的突破,其采用了自行研发的无线远程控制与集中监控技术,试验测

试系统主要由传感器、IMC集成测控数采系统、无线远程监控系统、无线远程数据传输系统和接收终端等部分组成,见图4。

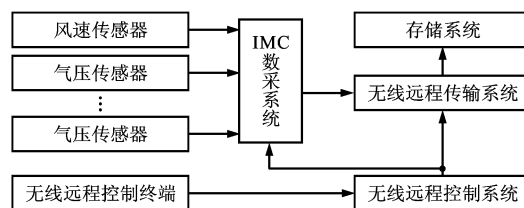


图4 测试系统

Fig. 4 Test system

长大隧道内无 GSMR、GPS 信号,地形与环境等条件恶劣,要求同步测试时间精确,测试难度较大。基于先进的数据采集技术、无线传输技术、远程控制技术以及线号同步技术,中国铁道科学研究院自主研制成功高速铁路隧道气动效应集成测控系统。该系统采用全功能的数采模块,可满足数据采集多路信号全面监测的需要,并可分散可集中,系统组合灵活多变,在分布式系统中,可将多台数采仪置于铁路线路不同位置,满足多点采集的需要,同时接入多种信号,也可将多台数采仪分开使用,同时拥有多套独立的通用信号数采系统,满足多个测量任务的需要。系统大幅度减少了信号长距离传输以及外来干扰产生的影响,通过无线网络通讯突破距离、地形等空间条件的限制,为特殊应用环境下的测量工作提供便利。不同系统间可实现同步连接,保证所有数采仪的所有通道实时同步,同步精度达到 ns 级。此外,系统有较好地适应高低温、高湿、强振动和冲击等恶劣环境的能力,可广泛用于无信号的野外无线采集、传输及控制中。为获得长大隧道内瞬变压力随长度方向变化规律,本文在武广线大瑶山 1 号隧道(10 081 m)内分别距洞口 230、700、800、1 000、3 000、5 000、7 500、9 850 m 布置了 8 个断面,成功实现了数据同步采集、传输与远程监控。

### 1.2.2 动车组隧道内高速交会试验

通过现场试验,本文提出了基于标尺试验与交会时间差计算的高速动车组交会试验方法,成功进行了高速铁路动车组  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  隧道内交会试验,并在京沪线成功实现了动车组  $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  隧道中点位置交会试验,交会误差小于 50 m。

### 1.2.3 惰行试验方法

在理论分析的基础上,本文提出采用在隧道内进行惰行试验时的“特定有限区间”采样方法。试验数据的采样选择列车进入隧道后的一个特定区间,

使得  $V_0 \approx V_{st} \approx V_{en}$ ,  $V_0$  为进洞速度,  $V_{st}$  为采样起点车速,  $V_{en}$  为采样终点车速。忽略机械阻力在隧道和明线的差别, 可得检验式为

$$F_t - F_0 = D_t - D_0$$

式中:  $F_t$  为隧道内运行总阻力, 由“特定有限区间”惰行试验得出;  $F_0$  为明线运行总阻力;  $D_t$  为隧道内运行空气阻力, 由非恒定流模型计算得出;  $D_0$  为明线运行空气阻力, 由计算得出。通过非恒定流模型得到长度 10.8 km 隧道在相应位置附加阻力计算值同试验值基本一致。

### 1.3 室内模型试验

模型试验主要有浅水槽和发射式列车模型两种。水槽法是根据流体力学的性质, 采用相同马赫数的流体来模拟空气, 通过改变浅水波的传播速度, 模型以较低的列车速度得到与实际运行列车相同的马赫数, 从而达到模拟实际运行高速列车的目的<sup>[9]</sup>。发射式列车模型可模拟高速列车进出隧道的运行状态, 以便测定不同工况下的压力波动、低频噪音及其他空气动力学现象。进行模型试验时, 根据相似原理来确定模拟系统, 主要是马赫数和雷诺数, 增加了测试数据的可比性和使用性, 模型列车与实际列车速度相同时可保证马赫数相同。

水槽法试验装置简单, 易操作, 但测试数据及试验效果不理想。发射式列车模型试验装置相对复

杂, 但测试数据相对可靠。

## 2 隧道气动效应影响因素及涉及的科学问题

### 2.1 影响因素分析

高速动车组通过隧道时, 隧道气动效应的影响因素主要从 3 个方面考虑: 列车方面, 列车的运行速度、横截面积、车头和车尾形状、编组长度及车辆的气密性等; 隧道方面, 隧道有效净空面积、隧道断面形状、隧道长度、复线间距、隧道坡度、线路曲线半径、隧道壁面粗糙度及辅助结构物形式(隧道口缓冲结构、通风通道、隔墙、道床类型)等; 其他方面, 如列车在复线隧道中交会及相对运行列车各自进入隧道口的时间差等。多种因素交织在一起, 使隧道气动效应的研究远比明线空气动力问题复杂。

### 2.2 涉及的科学问题

列车高速运行条件下, 进出隧道的瞬间以及在隧道中会车和运行过程中, 列车气动效应较低速时剧烈得多, 会带来新的空气动力学和环境学问题。如列车在进入隧道时会引起车内的压力波动, 给乘客的听觉造成不适; 隧道出口处会形成微气压波, 产生爆炸声和门窗的震动等不良效果, 影响周围的环境。高速铁路隧道气动效应主要涉及的科学问题见表 1。表 1 中,  $p_{\max}$ 、 $p_{\min}$  为正负峰值;  $P_{\max}$  为洞口微气压波。

表 1 高速铁路隧道空气动力学效应涉及的科学问题

Tab. 1 Scientific issues involved in aerodynamic effect of high-speed railway tunnel

项目	特征值	意义	阈值	研究方法
瞬变压力	车内气压变化	特定时间内的气压单调变化	乘车舒适性	3 s 瞬变压力变化率为 1.25 kPa
	隧道内压力	$p_{\max}$ 、 $p_{\min}$	衬砌和设施气动荷载	
	车内外压差	密封性有关	车辆结构气动荷载	4 000, 6 000 Pa
微气压波		$P_{\max}$	隧道洞口环境	洞口外 20 m 时 $P_{\max} \leq 50$ Pa, 有建筑物时 $P_{\max} \leq 20$ Pa
行车阻力	平均阻力 $T_t$	隧道空气阻力与明线空气阻力之比	牵引计算	
	阻力过程	空气阻力最大值	限坡	
隧道内活塞风		最大风速	隧道内人员与设施安全性	14 m · s <sup>-1</sup>
附属设施气动		$p_{\max}$ 、 $p_{\min}$		《高速铁路设计规范(试行)》(TB 10621—2009)

## 3 理论研究成果

中国铁道科学研究院通过合武、石太、武广、郑西等高速铁路隧道气动效应的研究, 在列车内外瞬变压力、隧道内瞬变压力与洞口微气压波关系以及实现隧道内精确交会控制方法等方面取得重大进展。

### 3.1 动车组车外最大负压出现位置及其与隧道长度的关系

本文根据动车组通过隧道时车外压力波动及叠加原理, 提出动车组以速度  $v$  通过隧道的过程中, 列车表面与车头纵向距离为  $x$  的任意一点在隧道内出现最大负压位置  $s$  以及动车组车外最大负压与隧

道长度关系的理论计算式为

$$\begin{aligned} & \text{当 } l_{tu} \geq \frac{2cx + c^2 l_{tr}/v - cl_{tr}}{4v} \text{ 时} \\ & s = \frac{v}{c+v} \left( 2l_{tu} + x + \frac{c}{v} l_{tr} \right) + x \\ & \text{当 } l_{tu} < \frac{2cx + c^2 l_{tr}/v - cl_{tr}}{4v} \text{ 时} \\ & s = \frac{v}{c-v} (2l_{tu} - x) + x \\ & L_{crtu} = \frac{(1+M)l_{tr}}{4M^2} \end{aligned}$$

式中:  $L_{crtu}$  为车外最大负压临界隧道长度;  $l_{tu}$  为隧道长度;  $l_{tr}$  为列车长度;  $c$  为当地声速;  $M$  为马赫数。

通过现场实测数据的验证分析,指导动车组采取保护机制以保证动车组风冷设备以及需要风冷的设备的正常运行。车外最大负压临界隧道长度与车速关系见图5。

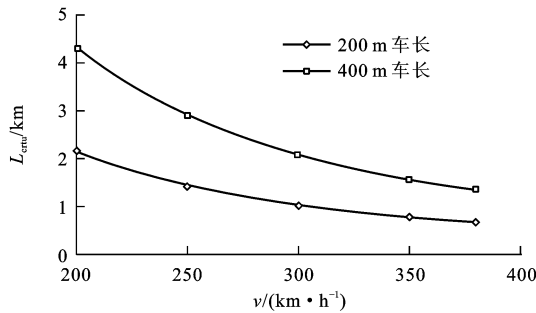


图5  $L_{crtu}$ 与 $v$ 关系

Fig. 5 Relationship between  $L_{crtu}$  and  $v$

### 3.2 隧道内瞬变压力与洞口微气压波的关系

通过现场海量数据的统计与归一化分析,本文提出了隧道内瞬变压力( $P$ )与洞口微气压波( $P_{EX}$ )关系的理论式为

$$\begin{aligned} P_{EX} &= aP^b \\ a &= -0.9963 \ln(L) + 9.1699 \\ b &= 1.5475 e^{0.0002L} \end{aligned}$$

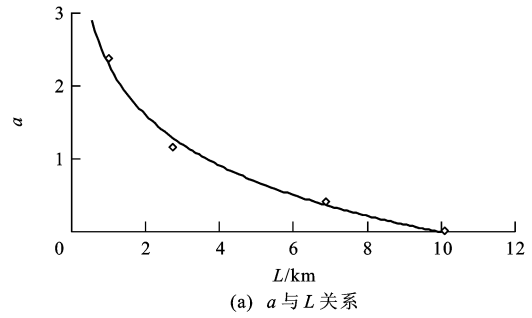
式中:  $L$  为隧道长度;  $a, b$  为相关参数,  $a$  与  $L$  成对数关系,  $b$  与  $L$  成指数关系。车速高于  $310 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,  $a, b$  与  $L$  关系见图6。

### 3.3 车内和隧道内瞬变压力3 s变化极值比例因子与隧道长度的关系

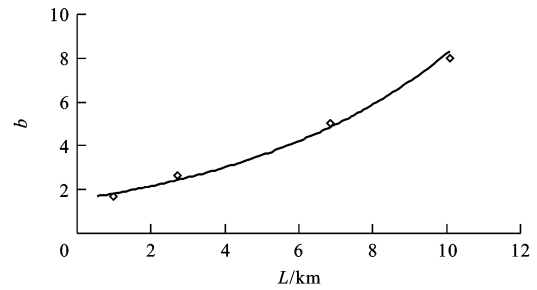
通过统计分析隧道内瞬变压力与车内压力变化,本文提出了特定密封条件下,车内和隧道内瞬变压力3 s变化极值比例因子( $k$ )与隧道长度( $L$ )理论式为

$$k = 0.0392 \ln(L) - 0.0623$$

并推出了长度分别为0.5、1.0、2.0、4.0、10.0 km



(a)  $a$ 与 $L$ 关系



(b)  $b$ 与 $L$ 关系

图6  $a, b$ 与 $L$ 的关系

Fig. 6 Relationship among  $a, b$  and  $L$

的隧道,车内舒适度评价指标(压力3 s变化极值小于1.25 kPa)对应的隧道内瞬变压力3 s变化极值的临界限值分别为6.8、5.9、5.3、4.8、4.2 kPa。

### 3.4 动车组隧道内交会试验理论计算方法

通过理论计算与分析,本文提出了动车组隧道内交会理论计算方法,为实现隧道内精确交会试验提供了理论基础。通过标尺试验精确记录动车组A与B加速至  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,下行线动车组里程  $K_{XA350}$ 、 $K_{XB350}$  及相应时间  $T_{XA350}$ 、 $T_{XB350}$ ,列车速度达到  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  后,恒速运行,记录动车组通过交会点  $K_J$  的时刻  $T_{XAJ}$ 、 $T_{XBJ}$ 。然后动车组A与B同向分别经下行线、上行线行驶,加速至  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。精确记录动车组A与B加速至  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,上行线动车组里程  $K_{SA350}$ 、 $K_{SB350}$  及相应的时间  $T_{SA350}$ 、 $T_{SB350}$ ,列车速度达到  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  后,恒速运行,记录动车组通过交会点  $K_J$  的时刻  $T_{SAJ}$ 、 $T_{SBJ}$ 。动车组A与B上下行方向运行交会时间差分别为

$$\begin{aligned} \Delta T_{A350} &= T_{XA350} + \frac{3600(K_J - K_{XA350})}{350} - \\ & T_{SB350} + \frac{3600(K_{SB350} - K_J)}{350} \\ \Delta T_{B350} &= T_{XB350} + \frac{3600(K_J - K_{XB350})}{350} - \\ & T_{SA350} + \frac{3600(K_{SA350} - K_J)}{350} \end{aligned}$$

交会位置产生偏差,调整时间为

$$\Delta T_{TZ} = 3.6(L_{PJ}/v_A + L_{PJ}/v_B)$$

式中:  $\Delta T_{TZ}$  为调整时间;  $L_{PJ}$  为偏差距离;  $v_A$  为动车组 A 的速度;  $v_B$  为动车组 B 的速度。

### 3.5 车外压力变化最大幅值的隧道临界交会理论

根据低速空气动力学中马赫波的传播规律和叠加原理, 本文提出了隧道内交会工况下车外气压变化最大幅值的临界交会快速算法, 即

$$\Delta t = \frac{l_{crtu}}{c} - \frac{l_{trA}}{v_A}$$

$$l_{crtu} = \frac{c}{2} \left( \frac{l_{trA}}{v_A} + \frac{l_{trB}}{v_B} \right)$$

式中:  $\Delta t$  为两动车组进出隧道时差;  $l_{trA}$  为动车组 A 车长;  $l_{trB}$  为对面来动车组 B 车长;  $l_{crtu}$  为临界交会隧道长度。

通过车外气压变化最大幅值临界交会理论的研究, 可为动车组车体强度和密封性能优化设计以及线路与隧道结构优化设计、隧道内附属设施的布置方面提供理论支撑。

## 4 试验研究成果

### 4.1 隧道内与车内瞬变压力

通过现场实车试验研究, 揭示了动车组 300~350 km·h<sup>-1</sup> 高速通过隧道和在隧道内交会时隧道内与车内压力(3 s 变化极值)随隧道长度、车型和车速变化规律, 具体如下。

(1) 不同动车组通过不同长度隧道时, 隧道内瞬变压力 3 s 变化极值基本与车速平方成正比。动车组通过不同断面积的隧道时瞬变压力值不同, 但其随车速变化及叠加规律一致。

(2) 车长、头型与断面积相接近动车组进入隧道产生的压力波动基本一致。车体长度不同的动车组进入隧道产生的气压增加和尾波发生时间各有差异, 导致隧道内瞬变压力测试数据与叠加规律不同。

(3) 隧道长度不同时, 造成的气压增加和尾波发生的时间各有差异, 导致隧道内瞬变压力叠加规律不同, 从而引起瞬变压力值不同。不同速度级时, 隧道内瞬变压力(3 s 变化极值)在隧道长度接近 1 km 时有极值点, 但随着隧道长度的进一步增加, 隧道内瞬变压力(3 s 变化极值)变化不大, 基本趋于稳定。

(4) 当动车组在隧道内同一位置附近交会时, 隧道内瞬变压力 3 s 极值和峰峰值随车速的增大而增大。当动车组在隧道内交会时, 由于两列动车组进入隧道的时间不同, 产生气压波的时间存在差异, 导致隧道内瞬变压力叠加规律不同。

(5) 获得了动车组以 300~350 km·h<sup>-1</sup> 在隧道内运行及交会时动车组车内外空气压力变化规律和变化范围, 以及隧道气动效应对动车组动力学性能的影响程度, 为高速铁路隧道设计和确定动车组隧道内最高通过速度提供了参考。

(6) 当动车组通过短隧道时, 对车内压力变化的影响较小, 而对隧道本身及其辅助设施的影响则不容忽视; 对于长隧道, 因列车在隧道中的时间较长, 隧道内相对较小的瞬变压力变化就会引起车内压力的变化, 因此, 长隧道应更关注车内压力的变化情况, 短隧道应更关注隧道内压力的变化和这种变化对隧道本身及其辅助设施的影响。

### 4.2 洞口微气压波

通过现场实车试验研究, 得出了高速铁路隧道洞口微气压波不同速度下的关系曲线, 揭示了 300~350 km·h<sup>-1</sup> 速度下洞口微气压波随隧道长度变化规律, 提出了需要采取减缓措施的临界隧道长度<sup>[10]</sup>。

#### 4.2.1 洞口微气压波规律

合武、石太高速铁路隧道气动效应测试数据表明, 列车 250 km·h<sup>-1</sup> 及以下速度通过隧道时, 洞口微气压波基本与车速的 3 次方成正比。本文测试结果表明, 当动车组高速通过隧道时, 洞口微气压波具有与低速时不同的规律, 即当动车组通过隧道时, 洞口 20 m 处微气压波值基本与车速的 3~5 次方成正比; 当速度在 310 km·h<sup>-1</sup> 以上, 隧道长度超过 3 km 时, 微气压波增长显著, 与车速的 6~15 次方成正比, 不同长度隧道微气压波与速度关系见图 7。

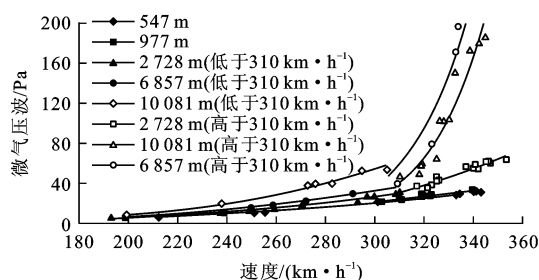


图 7 微气压波与速度关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between velocities and micro-pressure waves

#### 4.2.2 洞口微气压波与隧道长度的关系

对于有砟轨道, 较短隧道(小于 1 km)的微气压波受隧道长度影响不显著, 较长隧道的微气压波最大值随隧道长度的增大而减小; 对于无砟轨道, 隧道洞口微气压波随隧道长度的增大而增大, 当隧道长度达到 4 km 时增大明显, 在 7 km 左右达到最大值, 其后随长度增大逐渐减小。

在洞口空间立体角为  $3\pi/2$ , 隧道断面积为  $100 \text{ m}^2$ , 阻塞比为 0.11 的情况下, 当动车组分别以  $350, 380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  通过时, 洞口外 20 m 处微气压波值小于 50 Pa (标准限值) 的隧道临界长度分别为 1.6、1.0 km, 见图 8。

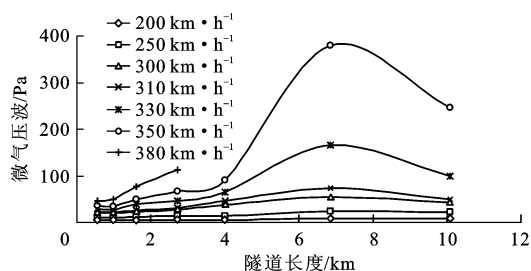


图8 隧道长度与洞口微气压波关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between tunnel lengths and micro-pressure waves

#### 4.2.3 缓冲结构与辅助坑道对洞口微气压波的减缓作用

通过测试有无缓冲结构的隧道洞口微气压波值, 并按同一空间立体角进行换算, 分析了缓冲结构对洞口微气压波的减缓作用。根据微气压波与隧道长度的关系, 无缓冲结构条件下,  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度时, 1.7 km 隧道对应的洞口微气压波值大于 53.1 Pa, 而有缓冲结构的相近长度隧道洞口微气压波实测值为 15.3 Pa, 换算同一空间立体角后为 25.5 Pa, 隧道缓冲结构对洞口微气压波削减幅度约为 52%。

通过测试辅助坑道开启与关闭时洞口微气压波值, 分析了辅助坑道对洞口微气压波的消减作用。实测辅助坑道开启时长度为 6.8 km 与 10.8 km 隧道分别削减了约 54%、26%。微气压波激化作用越大的隧道, 辅助坑道对微气压波的消减作用越明显。辅助坑道对隧道洞口微气压波有显著消减作用。

#### 4.3 隧道内活塞风与附属设施气动力

目前, 国内外学者对高速铁路隧道空气动力对隧道内附属设施的疲劳耐久性和安全性所产生的不利影响尚没有进行深入研究, 各国高速铁路规范中关于附属设施的设计也没有全面和系统地考虑隧道空气动力特性的影响。随着列车运行速度的提高, 高速列车进入隧道后的活塞风与反复冲击力对隧道附属设施的影响将会加剧, 并主要取决于列车行驶速度、离列车侧面的距离以及列车的外形等, 该作用力较大时可能危及到附属设施的安全。

本文采用现场试验的方法, 对不同动车组、不同运行速度下单列通过隧道、在隧道内交会以及重联过隧道时隧道内活塞风与附属设施受到的气动力进

行了测量, 分析了列车运行速度、列车外形、运行工况、附属设施位置等对附属设施气动力的影响规律, 并对横通道、水沟盖板、下锚坠砣、照明灯具、指示灯等附属设施在  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度等级下的安全性进行了评价, 这对高速铁路隧道内附属设施的设计和评价方法的制定具有重要的指导意义。

多条高铁线路测试数据表明, 动车组在  $300 \sim 380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度单列与交会通过隧道时, 隧道内活塞风风速超过  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。动车组单列或重联通过隧道时, 隧道内活塞风风速与列车运行速度成线性关系。同等速度下, 重联动车组通过隧道时的列车风风速比单列动车组大, 即列车编组越长, 列车风风速越大。

单列动车组通过隧道时, 附属设施受到的气动力近似与车速的平方成正比, 交会时隧道内附属设施受到的气动力比单列通过时大 5%~10%, 动车组重联时隧道内附属设施受到的气动力比单列通过时大 20%~25%。

#### 4.4 隧道附加阻力

与明线情况不同, 隧道空气阻力的边界条件为有限空间, 增加了一处摩擦界面, 导致隧道空气阻力问题较复杂。隧道空气附加阻力主要包含压差阻力与摩擦阻力, 其与隧道断面面积、长度、表面摩擦系数、隧道内风速和列车车速、外形、长度、表面摩擦系数、阻力系数以及在隧道内的位置等因素有关<sup>[11]</sup>。

隧道附加阻力的绝对值随着车速的增大而增大, 随着隧道断面面积的增大而减小; 隧道附加阻力与明线总阻力的比值随着隧道断面面积的增大而减小, 但车速变化对其影响不大, 隧道附加阻力与明线总阻力的比值主要由隧道断面面积控制。

动车组分别以  $300, 350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度通过长度为 2.7 km 隧道时, 惰行试验和数值计算分析得到隧道附加阻力分别为 4.99、7.95 kN, 隧道总阻力比明线增加 9%、11%, 总阻力  $D_1$  为

$$D_1 = 0.55 + 0.0045v + 0.000143v^2$$

通过长度为 10.8 km 隧道时, 惰行试验和数值计算分析得到隧道附加阻力分别为 8.71、10.24 kN, 隧道总阻力比明线总阻力均约增加 15%, 总阻力  $D_2$  为

$$D_2 = 0.55 + 0.0045v + 0.00015v^2$$

## 5 结 语

经过多年的努力, 中国高速铁路隧道气动效应研究取得了一系列世界领先的创新科研成果, 丰富

和发展了中国高速铁路机车车辆及隧道的设计理论和方法,对确定动车组隧道内最高交会速度具有重要的参考意义与指导作用,对相关学科的发展起到了积极的促进作用。针对中国高速铁路隧道气动效应研究中存在的问题,本文提出如下建议<sup>[12]</sup>。

(1)实测表明,动车组通过有些长大隧道尤其是隧道群时,车内气压 3 s 变化值虽然小于舒适度标准的要求,但是车上乘员反映有耳鸣与不舒适感,因此,建议参考欧洲铁路联盟、德国、荷兰等复合型舒适度标准,提出适合中国国情的隧道内复合型耳膜舒适度标准,即分别对车内 5、10、30、50 s 内的气压变化提出控制标准。

(2)日本、德国、中国等均制定了微气压波控制标准,目前中国隧道洞口微气压波执行的标准是参照日本标准制定的,由于国情不同,建(构)筑物的要求也不同,需要针对中国的实际情况制定适合本地特点的微气压波标准。

(3)高速铁路特殊隧道结构尤其是特长水下隧道结构设计时,应充分考虑缓冲结构、横通道、减压竖井、联络通道、中隔墙以及洞口空间立体角等空气动力学因素的影响,结合仿真计算确定合理的隧道净空断面尺寸与减压结构设计方案。

(4)针对动车组通过隧道时存在的耳膜不适,微气压波超标等问题,鉴于隧道结构已经成型,应开展多孔吸能材料以及洞口缓冲结构设计等衰减压力波传播能量的措施研究,从而达到提高乘车舒适性与减小微气压波的目的。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [1] 中国铁道科学研究院. 京沪高速铁路综合试验研究分报告之八——高速铁路气动效应试验研究[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2011.  
China Academy of Railway Sciences. Study on comprehensive test study on Beijing-Shanghai High-speed Railway, report 8—experimental research on the aerodynamics effect on high-speed railway [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2011. (in Chinese)
- [2] BELLENOUE M, MORINIERE V, KAGEYAMA T. Experiment 3-D simulation of the compression wave, due to train-tunnel entry [J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16(5): 581-595.
- [3] KWON H B, JANG K H, KIM Y S, et al. Nose shape optimization of high-speed train for minimization of tunnel sonic boom [J]. JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2001, 44(3): 890-899.
- [4] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.  
TIAN Hong-qi. Study evolvement of train aerodynamics in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9. (in Chinese)
- [5] SHIN C H, PARK W G. Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel [J]. Mechanics Research Communications, 2003, 30(4): 287-296.
- [6] 田红旗, 梁习锋, 许平. 列车空气动力学性能研究及外形、结构设计方法[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(5): 138-141.  
TIAN Hong-qi, LIANG Xi-feng, XU Ping. Research on the aerodynamic performance of train and its configuration and structure design method [J]. China Railway Science, 2002, 23(5): 138-141. (in Chinese)
- [7] 余南阳, 梅元贵. 高速铁路隧道压力波动主要影响参数研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 67-69.  
YU Nan-yang, MEI Yuan-gui. Study on main parameters effecting pressure transients while train passing through tunnel [J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 67-69. (in Chinese)
- [8] 武青海. 列车空气动力学数值仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(4): 132-135.  
WU Qing-hai. A study on numerical simulation of train aerodynamics [J]. China Railway Science, 2002, 23(4): 132-135. (in Chinese)
- [9] 高品贤, 余南阳, 雷波. 隧道空气压力波浅水槽拖动模型试验的实时检测[J]. 铁道学报, 2000, 22(3): 43-46.  
GAO Pin-xian, YU Nan-yang, LEI Bo. Real-time test on air pressure wave in tunnel by shallow water-table modeling experiment [J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(3): 43-46. (in Chinese)
- [10] 李新霞, 宋雷鸣, 张新华. 微气压波的产生机理与防治措施[J]. 噪声与振动控制, 2006, 26(4): 70-72.  
LI Xin-xia, SONG Lei-ming, ZHANG Xin-hua. The generation theory and control of the micro-pressure wave [J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(4): 70-72. (in Chinese)
- [11] 王英学, 高波. 高速列车进出隧道空气动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 83-88.  
WANG Ying-xue, GAO Bo. New development of the aerodynamics of high-speed trains passing in and out tunnels [J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 83-88. (in Chinese)
- [12] 中铁西南科学研究院有限公司. 客运专线隧道空气动力学及合理断面形式研究分析报告之 2——列车内、外的空气压力传递[R]. 成都: 中铁西南科学研究院有限公司, 2007.  
China Southwest Research Institute of China Railway Engineering Company Limited. Study on determination of high speed railway tunnel cross section on the basis of aerodynamic considerations, report 2—penetrability of air pressure into sealed train [R]. Chengdu: China Southwest Research Institute of China Railway Engineering Company Limited, 2007. (in Chinese)