

文章编号: 1674—8247(2021)02—0096—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.017

## 400 km/h + 高速铁路隧道内气动效应及净空断面积分析

罗禄森<sup>1</sup> 王田天<sup>2</sup> 杨伟超<sup>2</sup> 刘金松<sup>1</sup> 何 洪<sup>2</sup>

(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:**隧道气动效应一直是影响高速铁路发展的关键问题之一,近年来国内外对于速度400 km/h及以上的高速铁路隧道气动效应研究较少。本文在总结既有高速铁路隧道大量气动效应研究的基础上,重点结合拟建的成渝中线高速铁路,分析速度400 km/h + 条件下隧道内压力和车体压力的变化特征,得到隧道内衬砌和附属设施的静压验算控制标准参考值,同时,基于我国既有高速铁路列车的长期动态气密性指标,结合我国现行的高速列车车厢内压力舒适度控制标准,探讨了不同速度条件下隧道内净空断面积。研究结果表明:(1)当列车分别以速度400 km/h、450 km/h和500 km/h在内净空断面积100 m<sup>2</sup>双线隧道内运行时,作用于隧道衬砌及附属设施静压变化幅度的验算标准分别不应小于17.5 kPa、23.2 kPa和29.7 kPa;(2)车厢内压力变化率主要是受车体压力变化幅度和车体表面负压控制,前后方司机室和1号、8号车厢内的气压舒适性相对更差;(3)在车速一定的条件下,隧道断面面积与车辆的密封性能存在负相关性,减小隧道断面需要提高车辆的气密性;(4)对于长期动态气密性指标满足12 s的8节标准编组高速列车,当列车速度为400 km/h时,采用100 m<sup>2</sup>的隧道断面面积是可行的;(5)当列车速度为450 km/h + 时,隧道的断面面积需大于120 m<sup>2</sup>。

**关键词:**400 km/h + 高速铁路;隧道气动效应;乘坐舒适性;气密性指标;隧道断面积

**中图分类号:**      **文献标志码:**A

96

## Analysis of Aerodynamic Effect and Clearance Sectional Area in Tunnels of 400 km/h + High-speed Railway

LUO Lusen<sup>1</sup> WANG Tiantian<sup>2</sup> YANG Weichao<sup>2</sup> LIU jinsong<sup>1</sup> HE Hong<sup>2</sup>

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

2. Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The aerodynamic effect of tunnels has always been one of the key issues affecting the development of high-speed railway. In recent years, few studies have focused on the aerodynamics of high-speed (400 km/h or higher) tunnels at home and abroad. Based on massive studies on the aerodynamics of existing high-speed railway tunnels in China, we analyzed the characteristics of intra-tunnel pressure and vehicle-body pressure changes at 400 km/h + speed by studying the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway under construction, and obtained the reference values of static pressure checking control standard for lining and ancillary facilities in the tunnel. Moreover, based on the long-term dynamic air tightness index of existing high-speed trains in China, and in view of the prevailing pressure comfort control standard in cars of high-speed trains in China, we discussed the clearance sectional area in tunnels at different

收稿日期:2021-03-01

作者简介:罗禄森(1982-),男,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发展计划项目(KSNQ202061)

引文格式:罗禄森,王田天,杨伟超,等. 400 km/h + 高速铁路隧道内气动效应及净空断面积分析[J]. 高速铁路技术,2021,12(2):96-101.

LUO Lusen, WANG Tiantian, YANG Weichao, et al. Analysis of Aerodynamic Effect and Clearance Sectional Area in Tunnels of 400 km/h + High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 96-101.

speeds. The study results indicate that: (1) When a train runs in a double-track tunnel with a clearance sectional area of  $100 \text{ m}^2$  at 400 km/h, 450 km/h, and 500 km/h, the checking standard for the static pressure variation acting on the tunnel lining and ancillary facilities shall not be less than 17.5 kPa, 23.2 kPa, and 29.7 kPa respectively. (2) The pressure change rate in a car mainly depends on the pressure variation of the car body and the negative pressure on the car-body surface, and the pressure comfort in the front and rear cabs, as well as in No. 1 and No. 8 cars, is worse. (3) Given a constant speed, the tunnel's sectional area is negatively correlated with the vehicle's sealing performance, and the air tightness of the vehicle needs to be improved if the tunnel's sectional area is reduced. (4) It is feasible to adopt the  $100 \text{ m}^2$  sectional area for the 8-car standard marshaled high-speed trains with its long-term dynamic air tightness reaching 12 s at 400 km/h. (5) When a train reaches 450 km/h + , the tunnel's sectional area must be larger than  $120 \text{ m}^2$ .

**Key words:** 400 km/h + high-speed railway; tunnel aerodynamic effect; ride comfort; air tightness index; sectional area of tunnel

隧道气动效应一直是影响高速铁路发展的关键问题之一,随着列车速度的提高,隧道气动效应更加显著,对隧道衬砌、洞内附属设施<sup>[1]</sup>、车辆密封性能等提出了严峻挑战。目前,国内外专家学者对高速铁路隧道气动效应开展了大量研究,尤其是速度 400 km/h + 条件下隧道气动效应逐渐引起人们的关注。Ravn s<sup>[2]</sup>等人利用一维可压缩流动模型数值方法研究了慕尼黑速度 350 km/h 的机场磁浮线中隧道压力波效应。Huang S<sup>[3]</sup>等人采用 CFD 软件研究了速度 400 km/h 的磁浮列车在会车过程中压力波及其效应问题。Fujii K<sup>[4]</sup>等人对两列车在隧道中相会和列车进入隧道时引起的三维流动,采用求解欧拉方程或 N-S 方程进行了模拟。张志超<sup>[5]</sup>采用一维流动模型特征线法,论证了列车通过隧道产生的压力波幅值与列车速度平方成正比的使用范围。任魁山<sup>[6]</sup>采用有限体积元的方法,数值模拟研究了磁浮列车进入隧道引起的空气流动和初始压缩波的问题。李新<sup>[7]</sup>设计了一个隧道压力波模拟系统,在 AMESim 中建立了隧道压力波模拟系统的物理模型,在 Simulink 中搭建迭代学习控制算法。王磊<sup>[8]</sup>等人采用数值方法完成了 CRH380A 高速列车进隧道的过程模拟,得出初始压缩波引起压力增长的结论。向新桃<sup>[9]</sup>基于 CFD 软件设计了高速列车隧道气动效应的数值计算平台,可以很好的对瞬变压力问题进行研究。

从当前的研究情况来看,铁路隧道气动效应的研究大部分基于一维进行,部分三维的研究主要集中在理论分析,且主要针对 350 km/h 以下的速度,而针对速度 400 km/h 及其以上速度的隧道气动效应研究相对较少。本文结合拟建的成渝中线高速铁路,重点分析速度 400 km/h + 条件下隧道内压力和车体压力的变化特征,同时结合我国高速铁路的相关控制标准,对

隧道内衬砌和附属设施的静压验算控制标准及其车辆气密性指标等进行分析,为成渝中线高速铁路的设计提供依据。

## 1 研究方法

本文基于 FLUENT 软件、三维可压缩动模型特征线数值方法,建立隧道-列车-空气的气动仿真计算模型,分析速度 400 km/h + 下隧道内内压力和车体压力的变化特征。同时,借助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,开展速度 400 km/h + 条件下高速铁路隧道空气动力学动模型实验,采用模型试验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 数值仿真

当高速列车的速度达到 400 ~ 600 km/h 时,其对应的马赫数 (Ma) 约为 0.326 ~ 0.409,属于典型的中亚音速流,本文基于三维非定常可压缩粘性流进行分析。

#### (1) 控制方程

中亚音速流控制方程包括,质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律以及附加湍流输运方程,其积分形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} W d\Omega + \int_S \vec{F} n ds = \frac{1}{Re} \int_S \vec{F} n ds \quad (1)$$

式中: $\Omega$ ——任意控制体;

$S$ ——控制体边界;

$\vec{n}$ —— $S$  上微元  $ds$  的外法向单位向量,  $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ ;

$Re$ ——雷诺数;

$W$ ——守恒变量;

$\vec{F}$ ——对流项;

$\vec{F}_v$ ——源项。

(2)隧道及列车模型

列车模型参照我国复兴号 CRH380B 的形状,长度按照标准 8 编组(约 208 m)考虑;根据前期调研成果,拟定隧道断面主要考虑内净空断面积为 100 m<sup>2</sup>、110 m<sup>2</sup> 和 120 m<sup>2</sup> 3 种断面型式。

(3)列车/隧道相对运动型实现方法

采用滑移网格法与动网格法中的动态铺层技术相结合的方法实现列车运动,即将整体网格计算区域划分为动网格区域和静止网格区域,动网格区域采用铺层法实现列车的运动,通过建立 Interface 对实现与静止网格区域之间的数据传递。由于列车附近的小尺寸网格不需要变化重组,而是随列车整体向前移动,因此大大提高了计算效率。

(4)计算域离散化及边界条件

综合考虑现有的计算设备条件等情况,将列车壁面的附面层网格层数设置为 6 层,由外及里逐级加密,其中第一层网格厚度仅为 0.01 m。对于体现网格质量的主要指标,Angle 最小值为 6.6°,其中大部分网格大于 18°,Determinant 2×2×2 最小值为 0.25,均满足要求。隧道壁面、隧道外的地面以及车体表面均设置成固定的 Wall 边界,外部区域设置为 Pressure-far-field 边界,隧道洞口设置为 Pressure-outlet。

(5)计算工况

本次研究速度梯度按速度 400 km/h、450 km/h、500 km/h 共 3 个梯度进行研究。

考虑隧道内列车交会时为洞内气动效应的最显著的情况,结合文献[10]中隧道长度最不利长度的计算

公式,8 车编组高速列车在隧道内等速交会对应的最不利隧道长度为:

$$L_{critical} = L_{tr}/M_{tr}, M_{tr} < \frac{1}{3}$$

$$L_{critical} = 2L_{tr}/(1 - M_{tr}), M_{tr} \geq \frac{1}{3}$$

其中,8 车编组高速列车长度  $L_{tr}$  为 208 m,列车运行速度为 400 km/h、450 km/h 和 500 km/h 对应的马赫数  $M_{tr}$  为 0.327、0.368 和 0.408,求出最不利长度  $L_{critical}$  分别为 636 m、658 m 和 703 m,具体如表 1 所示。

表 1 400 km/h + 高速列车隧道内交会时气动性能计算工况表

交会速度 /(km/h)	列车编组 /车	最不利隧道长度 /m	隧道断面积 /m <sup>2</sup>
400	8 编组(约 208 m)	636	100、110、120
450	8 编组(约 208 m)	658	100、110、120
500	8 编组(约 208 m)	703	100、110、120

1.2 室内动模型仿真试验

(1)试验模型参数

室内动模型试验的缩比为 1:20,列车模型为 3 车编组的高速列车动车组,外形与数值仿真计算选用的模型一致。隧道模型选用内净空面积为 100 m<sup>2</sup> 的双线隧道,隧道全长为 287 m(实际无缩比尺寸)。

(2)测点布置

动模型试验测点主要布置于隧道壁面和动车组模型上。隧道壁面上共布置有 8 个测点,具体布置如图 1 所示。动车组模型测点布置 27 个测点。本次试验采用 Honeywell DC030NDC4 压力传感器记录高速列车通过隧道时压力随时间的变化。

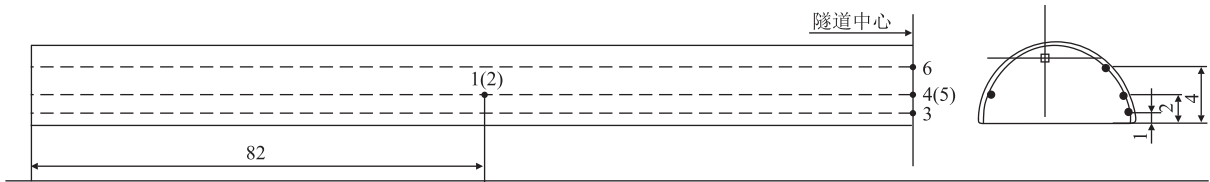


图 1 隧道壁面测分布图(m)

1.3 车厢内压力计算方法

列车高速通过隧道的过程中会造成隧道内部和车体外表面压力反复变化,而车外压力通过车门、车窗、卫生间和通风系统向车厢内部传递,进一步影响车厢内乘客的气压舒适性。本文采用准稳态亚音速细孔流的方法计算车厢内外压力的变化,其计算公式如下:

$$\delta m_i = \mu_s \frac{\delta S_i p_o}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_i}{p_o} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_i}{p_o} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right]}$$

(4)

式中: $\mu_s$ ——流量系数;

$p_o$ ——气流出口处的空气压力(Pa);

$p_i$ ——气流进口处的空气压力(Pa);

$R$ ——空气的气体常数;

$k$ ——空气的绝热指数;

$T$ ——空气温度(℃)。

2 数值计算结果可靠性验证

为验证数值仿真计算理论及方法的可靠性,开展隧道内净空断面积 100 m<sup>2</sup>、速度 400 km/h 交会情况下的数值仿真与动模型试验结果对比分析,如表 2 所示。

表 2 测点压力峰峰值结果对比表

测点 编号	车上测点压力峰峰值对比			隧道测点压力峰峰值对比		
	数值仿真 /Pa	动模试验 /Pa	误差 /%	数值仿真 /Pa	动模试验 /Pa	误差 /%
1	15 069	14 255	5.7	9 065	8 456	7.2
2	12 127	11 754	3.2	8 345	8 162	2.2
3	11 676	11 129	4.9	13 240	13 550	-2.3
4	11 984	11 401	5.1	13 233	13 649	-3.0
5	11 532	11 173	3.2	13 272	13 562	-2.1
6	11 745	11 400	3.0	13 227	13 523	-2.2
7	11 611	11 403	1.8	8 332	8 190	1.7
8	11 576	11 305	2.4	9 186	8 642	6.3

从表 2 可以看出,数值仿真计算测点压力峰峰值与动模型试验对应测点压力峰峰值对比,车上测点的

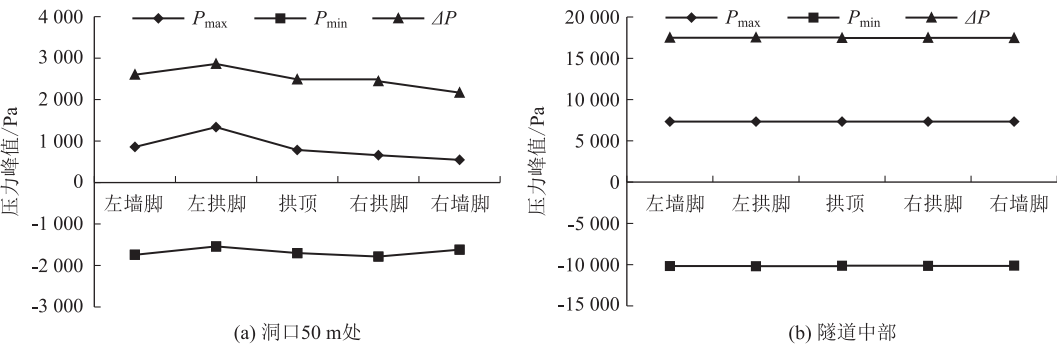


图 2 隧道内压力环向分布特征图

由图 2 可以看出:

(1)隧道洞口段压力分布并不均匀,表现出非常显著隧道内压力的空间上三维分布特征,其中左侧正压峰值比拱顶和右侧更为显著,而右侧负压峰值更为显著,其主要原因在列车运行中心与隧道中心并不重合;而对于隧道中部的压力分布而言,作用于衬砌的气动荷载峰值逐渐表现为空间上一维分布特征,即环向上压力不再表现出显著差异分布。

(2)尽管隧道洞口压力分布不均匀,但整体压力相对较小,隧道中部压力远大于隧道洞口段,因此,对于作用于隧道衬砌及其附属设施的静压验算荷载,以

表 3 400 km/h + 速度下隧道内静压荷载的验算参考值表(Pa)

设计时速 /km	100 m <sup>2</sup>			110 m <sup>2</sup>			120 m <sup>2</sup>		
	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$\Delta P$	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$\Delta P$	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$\Delta P$
400	7 334	-10 116	17 450	6 393	-9 089	15 482	5 656	-8 236	13 891
450	9 829	-13 280	23 109	8 562	-11 930	20 492	7 560	-10 794	18 354
500	12 666	-16 976	29 642	11 034	-15 026	26 060	9 826	-13 495	23 321

(1)随着列车速度的提高,隧道内的各项压力峰值快速增加,二者表现出近似弱平方的正比相关性。以内净空断面面积 100 m<sup>2</sup> 的双线隧道为例,当列车分别以 400 km/h、450 km/h 和 500 km/h 运行时,作用于隧道衬砌及附属设施静压变化幅度的验算荷载分别不应小于 17.5 kPa、23.2 kPa 和 29.7 kPa。

最大误差为 5.7%,隧道上测点的最大误差为 7.2%,从而证明本研究选用的数值仿真方法是正确的、模型的参数是合理的。

3 仿真计算结果及分析

3.1 隧道内压力纵向分布特征

根据列车以速度 400 km/h 通过内净空断面面积为 100 m<sup>2</sup> 双线隧道的计算结果,对距离洞口(50 m 处)和隧道中部(318 m 处)两个断面作用于隧道壁面压力的环向分布进行对比,隧道内压力环向分布特征如图 2 所示。

隧道中部的压力为选取标准更为合理。

3.2 400 km/h + 速度高速铁路隧道内静压荷载的验算参考值

隧道内压力峰值与列车速度和隧道断面面积密切相关,以隧道纵向长度 1/2 处的边墙处压力为基准,提出不同速度、不同隧道断面面积条件下的正压力峰值、负压峰值和压力变化幅度,并以此作为不同速度、不同断面条件下隧道的衬砌及其附属设施的静压(最大正压、最大负压和最大压力幅度)荷载验算参考值,如表 3 所示。

由表 3 可以看出:

(2)随着隧道内净空断面积的增加,隧道内的各项压力峰值均有一定程度的降低,二者表现出近似线性的负相关性。以速度 400 km/h 为例,当隧道内净空断面面积分别为 100 m<sup>2</sup>、110 m<sup>2</sup> 和 120 m<sup>2</sup> 时,作用于隧道衬砌及附属设施静压变化幅度的验算荷载分别不应小于 17.5 kPa、15.5 kPa 和 13.9 kPa。

3.3 车体压力分布特征及其对车厢内气压变化率相关性分析

隧道内压力波直接作用于车体外表面,造成车体表面压力快速波动,车体表面压力的交替变化通过车窗及空调口等缝隙向车厢内部传播,进而影响车厢内气压的变化。同时,车厢内乘客的气压舒适性还与压力峰值、变化速率和持续时间等诸多因素有关。目前,

我国以动车组在隧道内交会时,车内瞬变压力变化率1 250 Pa/3 s作为现行高速列车车厢内的压力舒适度控制标准<sup>[11]</sup>。因此,根据列车以速度400 km/h通过隧道内净空断面积为100 m<sup>2</sup>的双线隧道计算结果,分析8节标准编组条件下车体压力分布特征及其对车厢内气压舒适性的影响,结果如表4所示。

由表4可以看出:

表4 车体表面的压力分布及其对应车厢内压力变化率表

位置	头车司机室	1号车厢	2号车厢	3号车厢	4号车厢	5号车厢	6号车厢	7号车厢	8号车厢	尾车司机室
$P_{\max}/\text{Pa}$	5 819	4 340	3 794	3 463	3 180	3 042	2 532	1 692	1 294	1 584
$P_{\min}/\text{Pa}$	-8 791	-10 003	-10 222	-10 284	-10 187	-10 317	-10 181	-10 418	-10 333	-9 965
$\Delta P/\text{Pa}$	14 609	14 343	14 015	13 747	13 367	13 359	12 713	12 110	11 627	11 548
$\text{Pa}/3\text{ s}$	1 703	1 643	1 662	1 634	1 632	1 650	1 675	1 692	1 732	1 706

注:车厢内压力变化率取动态气密性指数为8 s时计算所得

(1)车体表面压力在纵向上分布并不均匀,其中车头位置正压峰值和压力变化幅度均比较显著,同时二者沿着车头到车尾的方向逐渐降低,第8节车厢及车尾的正压峰值和压力变化幅度均相对较小;与之相反,车头处的负压峰值相对较小,并沿着车头到车尾的方向逐渐升高,第8节车厢附近的负压峰值达到最高。

(2)车厢内的压力变化率(3 s)峰值列车前、后方均比较大,而中间车(3号、4号车厢)相对较小,这说明车厢内压力变化率主要是由车体表面负压(如8号车厢和尾车司机室)和车体压力变化幅度(如头车司机室)控制。

3.4 隧道断面面积及车厢密封指标之间的相关性分析

车厢内的气压舒适性主要受车体表面压力峰值和车辆的气密性性能两个方面的因素的影响,而车体表面压力峰值与隧道断面面积和列车速度密切相关。因此,在列车的运行速度一定的条件下,提高车厢气密性指标和增大隧道断面是改善车厢内气压舒适性的主要措施。

以速度400 km/h为例,分析隧道断面面积及车厢密封指标之间的相关性,如表5所示。

表5 400 km/h速度下各车厢内的气压变化率表

隧道断面 气密性指数	100 m <sup>2</sup>			110 m <sup>2</sup>			120 m <sup>2</sup>		
	8 s	10 s	12 s	8 s	10 s	12 s	8 s	10 s	12 s
Pa/3s	头车	1 703	1 395	1 181	1 537	1 262	1 069	1 403	1 154 978
	1号	1 643	1 346	1 138	1 463	1 199	1 015	1 318	1 081 915
	2号	1 662	1 361	1 154	1 488	1 218	1 030	1 340	1 097 929
	3号	1 634	1 337	1 131	1 463	1 197	1 012	1 323	1 082 916
	4号	1 632	1 332	1 125	1 461	1 193	1 008	1 325	1 082 914
	5号	1 650	1 348	1 138	1 479	1 208	1 021	1 341	1 096 926
	6号	1 675	1 370	1 158	1 494	1 221	1 032	1 362	1 113 942
	7号	1 692	1 386	1 173	1 508	1 234	1 044	1 370	1 122 949
	8号	1 732	1 422	1 206	1 549	1 272	1 079	1 400	1 150 975
	尾车	1 706	1 403	1191	1 529	1 258	1 068	1 387	1 141 969

由表5可以看出:

(1)当车辆气密性一定时,随着隧道断面面积的增加车厢内的压力变化率显著减小,以8 s气密性条件下的头车司机室为例,当隧道断面面积由100 m<sup>2</sup>逐渐增大至110 m<sup>2</sup>、120 m<sup>2</sup>时,车厢内的压力变化率则可以由1 703 Pa/3 s分别降低到1 537 Pa/3 s和1 403 Pa/3 s。同样,当隧道断面一定时,车厢内气压变化率随着车辆密封指数的提高而降低,以隧道断面面积为100 m<sup>2</sup>条件下尾车为例,车辆密封指数由8 s提高至10 s、12 s时,车厢内的压力变化率则由1 706 Pa/3 s分别降低到1 403 Pa/3 s和1 191 Pa/3 s。

(2)高速列车的气密性与车辆加工精度、密封措施、密封材料老化和线路的平顺性等多个因素有关,根据调研,目前我国既有高速铁路的长期动态气密性指标( $\tau_d$ )可以达到12 s。因此,通过以上结果的综合分析,可以认为,对于速度400 km/h条件下的8节标准编组高速列车,以当前的车辆动态气密性指标来看,隧道内净空断面面积采用100 m<sup>2</sup>是可行的。

3.5 400 km/h + 速度下隧道内净空断面面积分析

下面以 $\tau_d=12\text{ s}$ 车辆的气密性指标为基础,进一步对450 km/h和500 km/h条件下隧道断面面积控制标准进行讨论,计算结果如表6所示。

由表6可以看出:

当车辆的气密性指标不超过12 s时,列车以450 km/h速度通过断面面积为100 m<sup>2</sup>和110 m<sup>2</sup>隧道时,所有司机室和各节车厢内的3 s压力变化率均会超过1 250 Pa;当隧道断面增大到120 m<sup>2</sup>时,头车至3号车厢可以满足规范要求,而4号车厢至尾车司机室的气压变化率超过1 250 Pa。同时,列车以500 km/h速度通过断面面积为100 m<sup>2</sup>、110 m<sup>2</sup>、120 m<sup>2</sup>隧道时,

表6 450 km/h 和 500 km/h 速度下隧道断面面积对车厢内压力变化率的影响表

列车时速 /km	450			500		
	隧道断面	100 m <sup>2</sup>	110 m <sup>2</sup>	120 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	110 m <sup>2</sup> 120 m <sup>2</sup>
Pa/3s	头车	1 428	1 303	1 198	1 596	1 459 1 347
	1 号	1 423	1 275	1 153	1 599	1 437 1 303
	2 号	1 519	1 359	1 226	1 750	1 568 1 421
	3 号	1 546	1 377	1 242	1 850	1 650 1 488
	4 号	1 560	1 389	1 254	1 940	1 726 1 555
	5 号	1 568	1 396	1 261	2 010	1 793 1 619
	6 号	1 571	1 402	1 266	2 074	1 848 1 668
	7 号	1 567	1 397	1 263	2 108	1 874 1 689
	8 号	1 610	1 436	1 299	2 153	1 911 1 728
	尾车	1 586	1 421	1 288	2 109	1 880 1 699

注:车厢内压力变化率取动态气密性指数为 12 s 时计算所得

各节车厢内的 3 s 压力变化率均会超过 1 250 Pa。

综上所述,对于运行速度 450 km/h 及以上条件下的 8 节标准编组高速列车,当车辆的气密性指标为 12 s 时,按当前车厢内的压力舒适度控制标准,隧道的合理断面面积需大于 120 m<sup>2</sup>。

4 结论及建议

本文以拟建的成渝中线高速铁路为依托,研究了速度 400 km/h + 条件下隧道内压力和车厢内外压力的变化特征,并根据当前的车厢门压力舒适度控制标准对不同速度条件下的隧道内净空断面面积进行了分析,得出以下主要结论:

(1)随着列车速度的提高,隧道内的各项压力峰值快速增加,当列车分别以速度 400 km/h、450 km/h 和 500 km/h 在内净空断面积为 100 m<sup>2</sup> 的双线隧道内运行时,作用于隧道衬砌及附属设施的静压验算荷载值分别不应小于 17.5 kPa、23.2 kPa 和 29.7 kPa。

(2)车厢内压力变化率主要是受车体压力变化幅度和车体表面负压控制,前方车体(如头车司机室和 1 号车厢)压力变化幅度较大,其车厢气压舒适性相对较差;而后方车体(如尾车司机室和 8 号车厢)车体表面负压显著,其车厢内气压舒适性也相对较差。

(3)当列车车速一定的条件下,隧道断面面积与车辆的密封性能存在负相关性,减小隧道断面需要提高车辆的气密性。

(4)对于长期动态气密性指标满足 12 s 的 8 节标准编组高速列车而言,当列车速度为 400 km/h 时,采用 100 m<sup>2</sup> 的隧道断面面积是可行的;当列车度速为 450 km/h 及以上速度时,隧道的断面面积需大于 120 m<sup>2</sup>。同时,建议研制 450 km/h 以上速度气密性更高的新型列车。

以上研究是在理论分析和数值仿真的基础上进行的,实际隧道气动效应影响非常复杂,涉及到隧道长

度、列车编组、运行状态(单/会车)、线间距和运行速度等众多因素的影响,因此有待进一步深入分析。同时,对于速度 400 km/h + 的高速铁路,其  $M_a$  已经超过 0.3,进入到中亚音速流范围,现有的理论分析方法有待于结合现场测试结果进行对比验证。

参考文献:

[1] 宫本 雅章 et al. 超高速鉄道トンネル内に発生する压力変動履歴の再現と覆工構造の疲労に関する検討[J]. 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 2020, 76(1): 94 – 109.

[2] RAVN S, REINKE P. Tunnel Aerodynamics of the Magnetic Levitation High-speed Link in Munich (MAGLEV)-consequences for Pressure Comfort, Micro Pressure Waves, Traction Power and Pressure Loads [J]. Tunnel Management International Journal, 2006, 9(1): 1 – 10.

[3] HUANG Sha, LI Zhiwei, YANG Mingzhi. Aerodynamics of High-speed Maglev Trains Passing each other in Open Air [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 188: 151 – 160.

[4] FUJII K, OGAWA T. Aerodynamics of High-speed Trains Passing by Each Other [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(8): 897 – 908.

[5] 张志超, 杜健, 赵汗冰, 等. 高速磁浮单线隧道车体压力载荷特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 21 – 30.

ZHANG Zhichao, DU Jian, ZHAO Hanbing, et al. Pressure Load Characteristics of High-speed Maglev Single-track Tunnels [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 21 – 30.

[6] 任魁山, 李奎, 蒋尧, 等. 中速磁浮列车双线隧道初始压缩波特征的数值模拟研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 51 – 55.

REN Kuishan, LI Kui, JIANG Yao, et al. Numerical Simulation of Initial Compression Wave Characteristics in Double Track Tunnel of Medium Speed Maglev Train [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(6): 51 – 55.

[7] 李新. 动车组隧道压力波模拟系统设计与控制算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

LI Xin. Design of Simulation System for EMU Tunnel Pressure Wave and Research on Control Algorithms [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[8] 王磊, 骆建军, 高立平, 等. 时速 350 km 高速列车进隧道过程中瞬变压力变化规律研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 252 – 257.

WANG Lei, LUO Jianjun, GAO Liping, et al. The Law of Transient Pressure in the Process of 350 km/h High-speed Train Entering a Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 252 – 257.

[9] 向新桃. 高速铁路隧道压力波数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

XIANG Xintao. Numerical Investigations on the Pressurewaves Generated by a High-speed Trainpassing through a Tunnel [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.

[10] 韩运动, 姚松, 陈大伟, 等. 基于实车试验的高速列车隧道压力波影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1404 – 1412.

HAN Yundong, YAO Song, CHEN Dawei, et al. Influential Factors of Tunnel Pressure Wave on High-speed Train by Real Vehicle Test [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1404 – 1412.

[11] 铁建设(2007)88 号, 铁路隧道设计施工有关标准补充规定[S]. TIE Jian She [2017] No. 88, Supplementary Provisions on Relevant Standards for Design and Construction of Railway Tunnels[S].