

# 400 km/h 及以上速度下列车通过隧道时 列车表面压力特征研究<sup>\*</sup>

户迎灿<sup>1</sup> 杜健<sup>1</sup> 蔡军爽<sup>1</sup> 胡冲<sup>2</sup> 陆意斌<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛;

2. 中南大学交通运输工程学院轨道交通安全教育重点实验室, 410075, 长沙)

**摘要** [目的] 为了保障 400 km/h 及以上速度列车穿越隧道时的行车安全, 提升乘客舒适性, 需采用数值模拟方法, 对列车通过隧道时的列车表面压力特征进行研究。[方法] 介绍了一维流动理论和广义黎曼变量特征线法, 通过动模型试验对其进行了验证。探究了不同列车运行速度、不同隧道长度对 8 辆编组列车通过隧道时的列车表面压力影响规律, 并分析了不同列车表面压力的分布特征。[结果及结论] 当列车运行速度为 400 km/h, 隧道长度为 0.7 km 时, 列车表面的最大正压值、最大压力幅值、最大负压值均达到峰值; 当隧道长度超过 0.7 km 后, 最大正压值基本不随隧道长度的增加而变化, 最大负压值和最大压力幅值均随着隧道长度的增大而逐渐减小。在不同列车运行速度下, 列车表面压力值均随列车运行速度的增加而逐渐增加。列车运行速度为 400 km/h 时的同一列车不同部位表面的最大正压值和最大压力幅值均表现为头车 > 中间车 > 尾车, 最大负压值则表现为头车 < 中间车 < 尾车。列车表面最大正压值、最大负压值和最大压力幅值在数值上均表现为随着测点距车头鼻尖的距离的增大而逐渐减小。

**关键词** 高速铁路; 列车; 隧道; 列车表面压力特征; 列车运行速度

**中图分类号** U451+.3

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2025.01.021

## Research on the Train Surface Pressure Characteristics in Passing through Tunnels at Speeds of 400 km/h and above

HU Yingcan<sup>1</sup>, DU Jian<sup>1</sup>, CAI Junshuang<sup>1</sup>, HU Chong<sup>2</sup>, LU Yibin<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China; 2. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education, School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China)

**Abstract** [Objective] In order to ensure the running safety

of trains with a speed of 400 km/h and above when passing through tunnels and improve the passenger ride comfort, it is necessary to adopt the numerical simulation method to study the characteristics of the pressure on the train body surface when passing through tunnels. [Method] The one-dimensional flow theory and the method of characteristic lines of generalized Riemann variables are introduced and verified through dynamic model tests. The influence patterns of different train running speeds and different tunnel lengths on the train body surface pressure when an 8-car marshalling train passes through the tunnel are explored, and the distribution characteristics of surface pressure on different vehicle bodies are analyzed. [Result & Conclusion] When the train running speed is 400 km/h and the tunnel length is 0.7 km, the maximum positive pressure value, the maximum pressure amplitude, and the maximum negative pressure value on the train surface all reach their peak values. When the tunnel length exceeds 0.7 km, the maximum positive pressure value basically does not change with the increase of tunnel length, while the maximum negative pressure value and the maximum pressure amplitude gradually decrease as the tunnel length increases. With different train running speeds, the pressure values on the train surface gradually increase with the increase of train running speed. For the same train running at a speed of 400 km/h, the different parts of the train in descending order of the maximum positive pressure value and the maximum pressure amplitude on their surfaces are the head car, the intermediate car, and the end car, while in ascending order of the maximum negative pressure are the head car, the intermediate car, the end car. Numerically, the maximum positive pressure value, the maximum negative pressure value, and the pressure amplitude on the train body surface all gradually decrease as the distance of the measuring points from the nose tip of the train head increases.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金面上项目(51905547&52078199); 中国国家铁路总公司科技研究开发计划课题(P2018J016); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200132)

**Key words** high speed railway; train; tunnel; train surface pressure characteristics; train running speed

高速铁路运行速度的不断提升,带来的空气动力学效应愈加显著<sup>[1-2]</sup>。当高速列车进入隧道时,由于前方空气受到列车和隧道壁面的强烈压缩,会在列车前方形成一个压缩波,在到达出口时一部分会以膨胀波的形式向入口反射回来,另一部分则以脉冲的形式从出口向外辐射为微气压波<sup>[3-4]</sup>。隧道内产生的压力波传播到列车后会引发旅客的耳感不适问题<sup>[5]</sup>。因此,有必要对列车通过隧道时的列车表面压力变化规律进行研究。

目前,国内外学者对高速铁路-隧道耦合的气动效应问题开展了大量研究。文献[6]对列车通过带有无开孔缓冲结构的隧道时产生的压缩波进行了理论和试验研究。文献[7]使用计算流体力学三维数值分析方法研究了列车车头形状及其速度对列车通过隧道时压力波动的影响。文献[8]通过三维数值模拟,对高速列车在部分缩小断面隧道中交会时的压力波动进行了研究,发现隧道内部缩小的断面对压力瞬变有缓解作用。文献[9]通过动模型试验与数值模拟结合的方法研究了列车通过局部高温隧道时的气动效应,发现隧道口的局部高温能降低隧道内的瞬变压力。文献[10]采用数值模拟的方法研究了高速磁浮列车通过不同间距隧道群时的列车表面压力特性,并与通过短隧道和长隧道时的压力波特性进行了对比分析。文献[11]基于动模型试验对高速列车通过非圆形衬砌隧道时的初始压缩波进行了研究,发现初始压缩波的幅值与衬砌的安装位置密切相关。文献[12]采用一维的方法对列车以 200 km/h 以下的速度通过隧道时的压力波动进行了探究。

随着旅客出行的需求增大,列车运行速度越来越高。我国目前正在研发设计速度 400 km/h 的高速列车,设计速度的提高会对列车气动效应产生较大的影响。尤其是设计速度 400 km/h 条件下的列车-隧道气动效应逐渐引起人们的关注。文献[13]基于列车明线交会和隧道内交会时所受的风压以及车辆动力学性能的影响规律,对更高列车运行速度下铁路的合理线间距进行了研究。文献[14]对 400 km/h 运行速度下列车编组长度对高速列车隧道交会压力波的影响进行了数值研究。文献[15]利用三维数值仿真研究了隧道局部扩大段参数对

列车通过隧道时的气动效应影响。文献[16]对运行速度 400 km/h 的高速列车通过隧道时的压力波进行了数值模拟研究,发现列车表面和隧道壁面压力幅值比运行速度 300 km/h 时均有显著提升。文献[17]采用数值模拟方法研究了磁浮列车在明线上以 430 km/h 会车时产生的压力波效应问题。文献[18]结合成渝中线高速铁路,分析了列车运行速度在 400 km/h 及以上条件下隧道内部压力和列车表面压力的变化特征。文献[19]利用数值仿真和动模型试验相结合的方法研究了扩大斜切式缓冲结构对运行速度 400 km/h 铁路隧道口微气压波的影响,并提出了适用于长度 5 km 以下隧道的缓冲结构。

上述对于运行速度 400 km/h 及以上高速列车隧道空气动力效应的研究,较少涉及到列车表面压力的变化特征。因此,本文针对不同隧道长度、列车不同部位和不同列车运行速度等级等 3 个参数,采用一维流动模型和广义黎曼变量特征线法,对列车表面压力特征进行了研究。

## 1 计算模型

### 1.1 控制方程

本文选用 8 辆编组列车(长 208.9 m)通过标准双线隧道为研究对象,由于空气的可压缩性及其流动中存在摩擦传热等因素,产生的空气流实际上是三维可压缩非定常不等熵的湍流。当隧道长度远大于隧道横断面的水力直径,列车长度也远大于列车横断面与隧道横断面之间的环形横截面的水力直径时,压力波在隧道长度和列车长度方向上的传播时间就会远大于在隧道横断面上的传播时间<sup>[20]</sup>,因此可采用一维可压缩非定常不等熵流动模型。其守恒的控制方程定义如下<sup>[21]</sup>:

$$\left\{\begin{array}{l} \text{连续性方程 } \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1) \\ \text{动量方程 } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \quad (2) \\ \text{能量方程 } \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = \\ \rho(k-1)(uG + q - w) \quad (3) \end{array}\right.$$

式中:

$u$ 、 $a$ ——空气流速、声速;  
 $x$ ——隧道长度;  
 $t$ ——时间;

$\rho, k$ ——空气密度和比热容;

$p$ ——压力;

$q$ ——非定常流动的传热项;

$w$ ——列车对空气所做的功;

$G$ ——摩擦力。

对于不含列车的隧道空间:

$$G = \frac{1}{2} \frac{S_{TU}}{F_{TU}} f_{TU} u |u| \quad (4)$$

对于列车与隧道之间的环形空间:

$$G = \frac{1}{2} \frac{S_{TU}}{F_{AN}} f_{TU} u |u| + \frac{1}{2} \frac{S_{TR}}{F_{AN}} f_{TR} (u - v) |u - v| \quad (5)$$

式中:

$v$ ——列车运行速度;

$S_{TU}$ ——隧道横断面的周长;

$S_{TR}$ ——列车横断面的周长;

$F_{TU}$ ——无列车的隧道空间横断面面积;

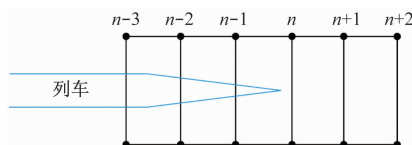
$F_{AN}$ ——含列车的隧道环状空间横断面面积;

$f_{TU} f_{TR}$ ——隧道和列车壁面摩擦因数。

$p, q$  和  $G$  的具体计算方法见文献[22]。

## 1.2 网格与边界条件

本文所编程序采用1套网格系统,以大地为参考坐标系,取隧道入口为坐标原点。列车通过隧道时,空气流动随时间连续发生变化,使列车-隧道流场空间划分为列车前方的隧道空间、列车后方的隧道空间及列车与隧道组成的环状空间三个部分<sup>[23]</sup>。列车的运动以及流场空间的不断变化,使整个流场中出现多种类型的网格,流场中同一位置的网格也会随时间而不断改变<sup>[23]</sup>。网格系统如图1所示。



注: $n$ 为任意一个网格节点。

图1 网格系统

Fig.1 Mesh system

网格系统可以划分为如下网格形式<sup>[23]</sup>:

1) 完整网格:即为列车前方或列车后方隧道空间的网格,如 $(n+1, n+2)$ 组成的网格。

2) 不完整网格:即包含列车的隧道空间,其不是单一形式的环形空间,而是由多种形式共同组成的网格。其中:若该网格处环形空间只由车身或车

头(尾)环状空间组成,则称为单一型网格,如 $(n-2, n-1)$ 或 $(n-3, n-2)$ 组成的网格;否则称为复合型网格,如 $(n-1, n)$ 组成的网格。

网格具体处理方法参见文献[23]。

采用一维模型和广义黎曼变量特征线法计算列车通过隧道所引起的气动效应问题时,边界条件有隧道口的边界条件与车头和车尾运动端的边界条件<sup>[24]</sup>;对于隧道入口,在列车进入隧道的过程中,空气从隧道流出;对于隧道出口,空气均流出隧道<sup>[22]</sup>。另外,依据一维准稳定的可压缩流动模型建立的边界条件,在列车头尾处及隧道洞口处的三维流动效应和分离流动效应需采用压力损失系数表示<sup>[22-25]</sup>。边界条件的具体处理见文献[22, 24]。

## 1.3 数值计算过程

广义黎曼变量特征线方法是求解双曲型偏微分方程的基本方法,目前也是计算压缩波在隧道内传播常用的方法,原因为在求解双曲型偏微分方程时,能将偏微分转化为简单的常微分方程进行求解,从而降低了原问题的复杂程度。特征线方程用来构成网格并确定平面中网格点的位置,而特征方程用来计算网格点上的物理流动参数。利用引进的特征方向,将偏微分方程归结为常微分方程的特征关系式的求解方法即特征线法,可将此问题处理解决,这是特征线理论的核心内容和实质<sup>[23]</sup>。控制隧道压力波的式(1)一式(3)构成了一阶拟线性双曲形偏微分方程组,故可用广义黎曼变量特征线法进行求解<sup>[24]</sup>。采用此方法时,需将式(1)一式(3)转化为量纲一的压力、空气流速和密度表示的特征方程<sup>[22]</sup>。为了方便计算,将该特征方程转换为由量纲一的广义黎曼变量和量纲一的空气质点熵值的量表示的方程,利用广义黎曼变量特征线法求解该特征方程<sup>[21-22]</sup>。具体详见文献[24],此处不再赘述。

## 1.4 工况设置

本文选用的计算模型如图2所示,列车为CR400-AF动车组,隧道为标准100 m<sup>2</sup>的双线隧道。计算程序内输入的具体参数如下:

1) 列车参数。8辆编组,长度为208.9 m,采用线性头型,车头和车尾压力损失系数分别为0.015和0.019,列车壁面摩擦系数为0.004<sup>[26]</sup>。

2) 隧道参数。净空断面面积100 m<sup>2</sup>,净空断面周长37.63 m,隧道壁面沿程摩擦因数0.018,隧道

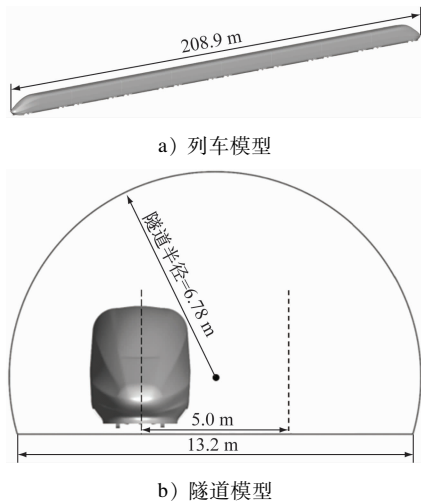


图 2 计算模型

Fig. 2 Computational model

洞口压力损失系数 0.5<sup>[23]</sup>。

本文以不同的隧道长度、不同的列车运行速度和列车表面不同位置等 3 个参数为对象,研究列车表面压力变化特征。以隧道长度为变量的工况设置 9 组,以列车运行速度为变量的工况设置 3 组,以距车头鼻尖距离为变量的工况设置 14 组。具体工况设置分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1 不同隧道长度的工况设置

Tab. 1 Working condition settings for different tunnel lengths

| 工况 | 列车运行速度/(km/h) | 隧道长度/km |
|----|---------------|---------|
| 1  | 400           | 0.5     |
| 2  | 400           | 0.7     |
| 3  | 400           | 1.0     |
| 4  | 400           | 1.5     |
| 5  | 400           | 2.0     |
| 6  | 400           | 3.0     |
| 7  | 400           | 4.0     |
| 8  | 400           | 5.0     |
| 9  | 400           | 6.0     |

表 2 不同列车运行速度的工况设置

Tab. 2 Working condition settings for different train speeds in the tunnel

| 工况 | 隧道长度/km | 列车运行速度/(km/h) |
|----|---------|---------------|
| 1  | 0.7     | 350           |
| 2  | 0.7     | 400           |
| 3  | 0.7     | 450           |

表 3 不同距车头鼻尖距离的工况设置

Tab. 3 Working condition settings for different distances from the train nose tip

| 工况 | 列车运行速度/(km/h) | 隧道长度/km | 距车头鼻尖距离/m |
|----|---------------|---------|-----------|
| 1  | 400           | 0.7     | 3         |
| 2  | 400           | 0.7     | 10        |
| 3  | 400           | 0.7     | 15        |
| 4  | 400           | 0.7     | 20        |
| 5  | 400           | 0.7     | 37        |
| 6  | 400           | 0.7     | 62        |
| 7  | 400           | 0.7     | 87        |
| 8  | 400           | 0.7     | 112       |
| 9  | 400           | 0.7     | 137       |
| 10 | 400           | 0.7     | 162       |
| 11 | 400           | 0.7     | 187       |
| 12 | 400           | 0.7     | 190       |
| 13 | 400           | 0.7     | 195       |
| 14 | 400           | 0.7     | 200       |

## 2 计算方法验证

本文采用日本国营铁路铁道技术研究所的动模型试验<sup>[27]</sup>结果与本文方法计算得到的压力波数据进行对比。图 3 为列车运行速度为 413 km/h 时距隧道入口 2 m 处的计算结果与文献[27]中动模型试验结果对比。由图 3 可见,两者规律一致,吻合较好,列车表面最大压力幅值的误差仅为 2.3%,证明了本文数学模型和计算方法的准确性和可靠性。

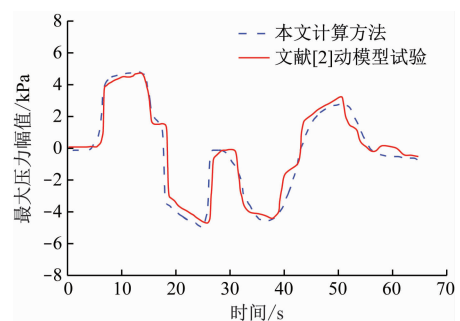


图 3 列车表面最大压力幅值时程曲线

Fig. 3 Time history curve of the maximum pressure amplitude on the train body surface

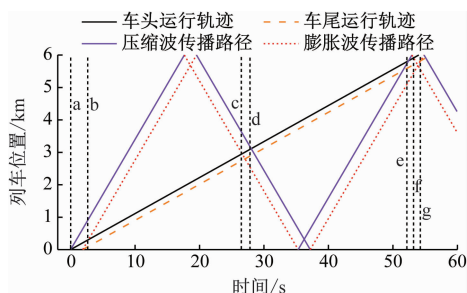
## 3 计算结果与分析

### 3.1 压力波形成机理

列车以 400 km/h 通过长 6 km 的双线隧道时,列车的运行轨迹和压力波在隧道内的反射叠加如



图4所示。图5为头车表面压力时程曲线。车头鼻尖进入隧道,空气受到隧道和列车的束缚挤压产生了压缩波;车尾驶入隧道,因隧道空间突然增大形成负压,产生了膨胀波。压缩波和膨胀波在隧道内以当地的声速向隧道出口传播,在经过测点时,分别



注:a—g为列车表面测点;图5等同。

图4 列车运行轨迹和压力波反射叠加图

Fig. 4 Superimposed diagram of train running trajectories and pressure wave reflections

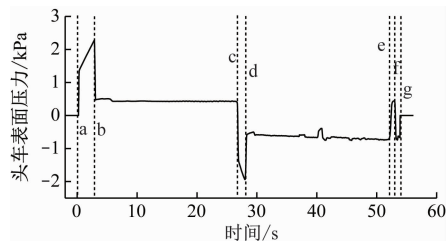


图5 头车表面压力时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of the pressure on the head car

引起压力上升和下降;传播到隧道出口后,大部分压缩波和膨胀波分别反射转化成膨胀波和压缩波向隧道入口传播,一直循环往复的压力波在隧道内叠加形成了隧道内复杂的压力波动。

### 3.2 隧道长度对列车表面压力的影响

列车以 400 km/h 通过不同长度的隧道(净空面积 100 m<sup>2</sup>)时,头车、中间车、尾车表面最大的正压值、负压值和压力幅值的变化规律如图6所示。

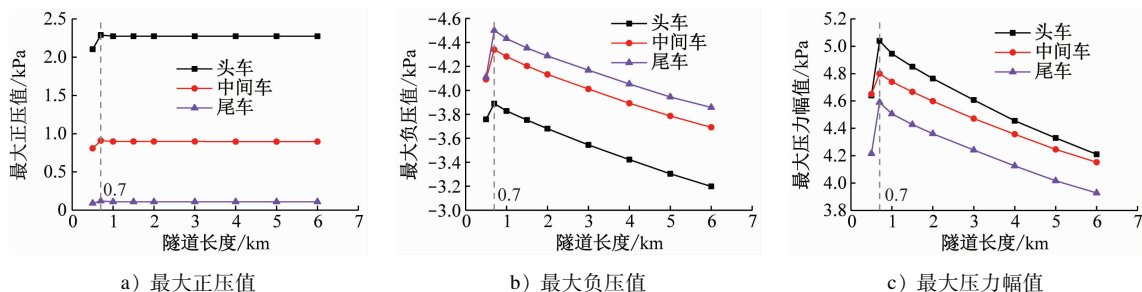


图6 不同隧道长度下列车表面压力变化曲线

Fig. 6 Curves of train surface pressure changes under different tunnel lengths

由图6可知:同一列列车不同部位的最大正压值和最大压力幅值差异明显,但在数值上表现出相同的规律,即头车>中间车>尾车;最大负压值表现为头车<中间车<尾车。具体地,最大正压和最大负压的绝对值和最大压力幅值均在隧道长 0.7 km 时出现最大值,这是因为 0.7 km 位于单车通过隧道的最不利隧道长度(0.67 km)附近,压力波的叠加最剧烈。由图6 a)可知:针对最大正压值,隧道长度超过 0.7 km 后基本不再变化,究其原因因为图5中列车表面最大正压值是由压缩波第一次经过列车表面测点 a 引起的压力上升,显然此过程(压缩波到达列车表面)时间短暂,所以压缩波在隧道内传播的距离较短,由摩擦引起的能量损耗基本可以忽略,因此在隧道长度超过 0.7 km 后,列车表面不同部位的最大正压值基本不变。由图6 b)可知:最

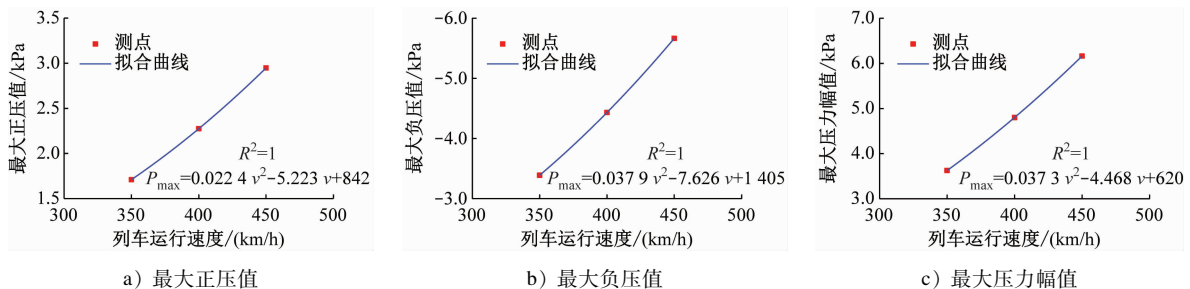
大负压值在隧道长度超过 0.7 km 后随着隧道长度的增加持续减小,究其原因为图5中列车表面的最大负压值是由膨胀波两次经过列车表面所致,第一次压力下降为在测点 b 遇到车尾进入隧道产生的膨胀波,第二次压力下降为在测点 c 遇到车头产生的压缩波传播到隧道口反射回来的膨胀波,显然压力波在隧道内传播的时间大大增加,传播的距离也同样增加,尤其是第二个反射的膨胀波,传播距离大于隧道长度,由于摩擦导致的压力波的损失大大增加,且摩擦损耗随着隧道长度的增加而不断增加,所以隧道长度大于 0.7 km 后,随着隧道长度的增加列车表面的最大负压值越来越小。针对最大压力幅值,其为正压与负压的绝对值之和,且根据以上讨论可知,最大正压值基本不随隧道长度变化,最大压力幅值表现为与最大负压值相同的变化规律,

如图 6 c) 所示。

### 3.3 列车运行速度对其表面压力的影响

选取列车以 350 ~ 450 km/h 通过长度为 0.7 km 的标准双线隧道为计算基础条件, 研究列车表

面压力随列车运行速度的变化规律。列车表面最大的正压值、负压值和压力幅值随列车运行速度的变化曲线如图 7 所示。



注:  $P_{\max}$  为最大的正压值、负压值及压力幅值;  $R^2$  为决定系数。

图 7 不同列车运行速度下列车表面压力变化曲线

Fig. 7 Curves of train surface pressure changes with different train speeds

为更直观地反映列车表面压力与列车运行速度的关系, 将不同速度等级下的列车表面最大正压值、最大负压值和最大压力幅值按二次多项式形式进行拟合, 拟合曲线如图 7 所示。多项式的一般表达式为式(6)。针对不同压力对象的拟合参数取值如表 4 所示。

$$P_{\max} = Av^2 + Bv + C \quad (6)$$

式中:

$A$ 、 $B$ 、 $C$ ——拟合函数系数。

表 4 拟合参数取值

Tab. 4 Fitting parameters

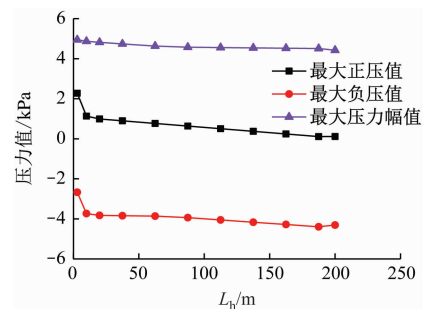
| 项目     | $A$     | $B$    | $C$   | $R^2$ |
|--------|---------|--------|-------|-------|
| 最大正压值  | 0.022 4 | -5.223 | 842   | 1     |
| 最大负压值  | 0.037 9 | -7.626 | 1 405 | 1     |
| 最大压力幅值 | 0.037 3 | -4.468 | 620   | 1     |

由表 4 可以看出: 在单车通过隧道的条件下, 列车表面压力与列车运行速度的拟合曲线决定系数  $R^2$  基本近似为 1, 拟合曲线上各测点的误差较小。由此可见, 列车表面最大正压值、最大负压值和最大压力幅值与列车运行速度的关系可以用二次多项式来描述。

### 3.4 列车表面不同位置的压力变化

以列车采用 400 km/h 的速度通过长 0.7 km 的双线隧道为对象, 研究列车表面不同部位的压力变化。图 8 为距车头鼻尖点不同距离位置的最大正压值、最大负压值和最大压力幅值。

由图 8 可知: 列车表面最大正压值和最大负压



注:  $L_h$  为压力测点距车头鼻尖点的距离。

图 8 列车表面不同位置压力变化曲线

Fig. 8 Curves of pressure changes at different positions on the train surface

值表现的规律相同, 随着  $L_h$  的增大而逐渐减小。根据第 3.1 节压力波的叠加原理可知, 最大正压值由压缩波经过测点引起, 最大负压值由膨胀波两次经过测点引起, 而对于远离车头鼻尖的测点而言, 压力波在隧道内的传播距离较长, 从而导致摩擦损耗增大, 压力逐渐减小; 压力幅值也随着  $L_h$  的增大而逐渐减小, 因压力幅值为最大正压值与最大负压值的差值, 故压力幅值的变化规律由最大正压值和最大负压值的变化演化而来。

## 4 结论

1) 在本文的计算工况下, 当列车运行速度为 400 km/h, 隧道长度为 0.7 km (接近最不利隧道长度) 时, 列车表面的最大正压值和最大压力幅值均达到峰值, 且最大负压的绝对值也达到峰值; 当隧道长度超过 0.7 km 后, 最大正压值基本不随隧道长度的增加而变化, 最大负压值和最大压力幅值均随

着隧道长度的增大而逐渐减小。

2) 在不同列车运行速度下,列车表面最大正压和最大负压的绝对值以及最大压力幅值都随列车运行速度的增加而逐渐增加,且都近似与列车运行速度呈二次多项式关系。

3) 列车运行速度为 400 km/h 的同一列车不同部位表面的最大正压值和最大压力幅值均表现为头车 > 中间车 > 尾车,最大负压值则表现为头车 < 中间车 < 尾车。

4) 最大正压值、最大负压值和最大压力幅值在数值上均表现为随着  $L_n$  的增大而逐渐减小。

## 参考文献

- [1] TIAN H Q. Review of research on high-speed railway aerodynamics in China[J]. Transportation Safety and Environment, 2019, 1(1): 1.
- [2] BAKER C. The flow around high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6/7): 277.
- [3] MIYACHI T. Non-linear acoustic analysis of the pressure rise of the compression wave generated by a train entering a tunnel[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 458: 365.
- [4] 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.  
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.
- [5] 张运良, 张志成, 杨伟超, 等. 高速列车隧道等速交会条件下人体舒适度分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 26.  
ZHANG Yunliang, ZHANG Zhicheng, YANG Weichao, et al. The human comfort degree analysis of high speed trains intersection at the same speed in the tunnel[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(2): 26.
- [6] HOWE M, IIDA M, FUKUDA T. Influence of an unvented tunnel entrance hood on the compression wave generated by a high-speed train[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17(6): 833.
- [7] MIYACHI T, IIDA M, FUKUDA T, et al. Nondimensional maximum pressure gradient of tunnel compression waves generated by offset running axisymmetric trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 157: 23.
- [8] LU Y B, WANG T T, YANG M Z, et al. The influence of reduced cross-section on pressure transients from high-speed trains intersecting in a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 201: 104161.
- [9] WANG J Y, WANG T T, YANG M Z, et al. Effect of localized high temperature on the aerodynamic performance of a high-speed train passing through a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 208: 104444.
- [10] 黄莎, 李志伟, 杨明智, 等. 高速磁浮列车通过隧道群时的压力波特性和[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1770.  
HUANG Sha, LI Zhiwei, YANG Mingzhi, et al. Pressure wave characteristics of high-speed maglev train passing through tunnel groups[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1770.
- [11] WANG T T, HAN X B, ZHANG L, et al. Effect of non-circular tunnel linings on pressure transients induced by high-speed train passes through a tunnel based on moving model test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 214: 104649.
- [12] 余南阳. 时速 160 km、200 km 列车通过隧道时产生的压力波研究[J]. 铁道建筑, 2003, 43(12): 29.  
YU Nanyang. Study on air pressure wave induced by train passing through tunnel with speeds of 160 km/h and 200 km/h[J]. Railway Engineering, 2003, 43(12): 29.
- [13] 付连著, 李红艳, 孙加林, 等. 基于动力学性能的更高速度铁路合理线间距研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(12): 101.  
FU Lianzhu, LI Hongyan, SUN Jialin, et al. Research on reasonable distance between centers of tracks for higher speed railway based on dynamic performance[J]. Railway Engineering, 2020, 60(12): 101.
- [14] 钟沙, 钱博森, 杨明智, 等. 400 km/h 速度下编组长度对高速列车隧道交会压力波的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 1978.  
ZHONG Sha, QIAN Bosen, YANG Mingzhi, et al. The influence of formation length on pressure wave characteristics of high-speed train pass by each other in tunnel with 400 km/h[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 1978.
- [15] WANG T T, LEE C H, YANG M Z. Influence of enlarged section parameters on pressure transients of high-speed train passing through a tunnel[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(11): 2831.
- [16] 魏雨生, 刘峰, 张翠平, 等. 高速列车以 400 km/h 通过隧道时气动效应的数值模拟与分析[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 652.  
WEI Yusheng, LIU Feng, ZHANG Cuiping, et al. Numerical simulation and analysis on aerodynamic effects of high-speed train passing through tunnels with 400 km/h[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(6): 652.
- [17] HUANG S, LI Z W, YANG M Z. Aerodynamics of high-speed maglev trains passing each other in open air[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 188: 151.
- [18] 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面积分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 96.  
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.
- [19] 王田天, 胡冲, 龚彦峰, 等. 扩大斜切式缓冲结构对时速 400 km 铁路隧道口微气压波缓解研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 151.
- WANG Tiantian, HU Chong, GONG Yanfeng, et al. Mitigation of micro-pressure wave at 400 km/h railway tunnel exit by oblique enlarged tunnel-hood[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(5): 151.
- [20] 徐银光, 王志钧, 魏康, 等. 400 km/h 动车组车体压力载荷列车参数影响特征研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 62.
- XU Yinguang, WANG Zhijun, WEI Kang, et al. Influence characteristics of train parameters on 400 km/h emu carbody pressure load[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 62.
- [21] 毕海权, 雷波, 巩云. 高速地铁隧道压力波研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 36.
- BI Haiquan, LEI Bo, GONG Yun. Study on pressure wave in high-speed underground railway tunnels[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(5): 36.
- [22] 吴明. 基于一维流动模型的高速列车隧道压缩波特特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- WU Ming. Numerical study on the characteristics of compression waves produced by high-speed trains in tunnel based on one-dimensional flow model[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [23] 梅元贵, 贾永兴. 单列高速列车通过内置开孔隔墙隧道时的压力波数值分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 95.
- MEI Yuanguai, JIA Yongxing. Numerical investigation on pressure waves produced by a high-speed train passing through a tunnel with perforated wall[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 95.
- [24] 霍卿. 高海拔特长隧道气动载荷特性分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
- HUO Qing. Analysis of the characteristics of aerodynamic Loads in extra-long tunnels in high altitude region [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011.
- [25] WOODS W A, POPE C W. A generalised flow prediction method for the unsteady flow generated by a train in a single-track tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 7(3): 331.
- [26] 郭瑞. 高速列车通过隧道时洞内压力载荷特征及最不利隧道长度特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- GUO Rui. Characteristics of pressure load in tunnel when high-speed train passes through tunnel study on the most unfavorable characteristics of tunnel length [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [27] SAITO S, IIDA M, KAJIYAMA H. Development and verification of numerical simulation of pressure changes in underground high-speed railways[J]. RTRI Report, 2006, 20(1): 29.
- 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2022-11-17 出版日期:2025-01-10  
Received:2022-09-02 Revised:2022-11-17 Published:2025-01-10
- 第一作者:户迎灿,高级工程师,huyingcan@cqsf.com  
通信作者:胡冲,博士研究生,chonghuq@csu.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- ~~~~~
- (上接第 116 页)
- [3] 温朋哲, 耿浩, 高士杰. 地铁 9 号曲尖轨道岔区建筑限界加宽量计算[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(3): 92.
- WEN Pengzhe, GENG Hao, GAO Shijie. Calculation of widening of structure gauge in No.9 curved switch turnout zone[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(3): 92.
- [4] 汪博. 缩短大间距交叉渡线全长的研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(5): 137.
- WANG Bo. The research of shortening the length of the crossing line with large spacing [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(5): 137.
- [5] 郭福强, 叶霞飞. 城市轨道交通站台宽度计算方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(8): 108.
- GUO Fuqiang, YE Xiafei. Study on the calculation method of urban rail transit platform width[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(8): 108.
- [6] NIAZKAR M, ZAKWAN M. Application of MGPP, ANN, MHBMO, GRG, and linear regression for developing daily sediment rating curves [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1.
- 收稿日期:2023-12-06 修回日期:2024-01-31 出版日期:2025-01-10  
Received:2023-12-06 Revised:2024-01-31 Published:2025-01-10
- 通信作者:甘元佳,工程师,gan.yuanjia@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn