DOI: 10.3901/JME.2020.12.196

山区高速列车车体动态气密性阈值特征的数值模拟研究*

梅元贵¹ 马瑶¹ 王雷²

(1. 兰州交通大学甘肃省轨道交通力学应用工程实验室 兰州 730070;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062)

摘要: 由于高速列车通过隧道时产生较大压力波动, 传入车内引起司乘人员出现耳感不适等问题, 使得列车采用气密性车体技术和压力保护装置技术。气密性车体的应用对高速列车的制造和运营成本产生了较大影响, 在满足车内压力舒适性标准前提下合理制定车体气密性指标是上述重要手段之一。针对我国山区高速铁路隧道长度特点, 基于我国研制的时速 350 km 标准动车组和国内隧道断面面积特点, 在应用一维可压缩不等熵非定常流动模型的广义黎曼变量特征线方法获得大量工况列车通过隧道时的车内外压力波动特征前提下, 归纳不同时间间隔标准下的编组长度、速度、隧道长度、时间常数对车内压力变化量的最大值影响规律, 将车-隧系统进行耦合分析, 提出针对不同时间间隔标准下密封列车车内压力的最不利隧道长度。依据中国、德国、UIC、ERRI 不同标准的阈值要求计算列车时间常数, 拟合出时间常数阈值随隧道长度增加的变化曲线, 总结对比四种不同标准下时间常数阈值的理论数学关系式。

关键词: 山区高速铁路; 高速列车; 隧道; 压力波; 车体气密阈值; 舒适性标准

中图分类号: TG156

Numerical Simulation Study on Dynamic Air-tightness Thresholds Characteristics of High-speed Train Body in Mountain Area High Speed Railway

MEI Yuanguai¹ MA Yao¹ WANG Lei²

(1. Gansu Province Engineering Laboratory of Rail Transit Mechanics Application Engineering,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070;

2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062)

Abstract: Due to the large pressure fluctuations caused by the high-speed train passing through the tunnel, the transient pressure changes transmit from the exterior to interior caused the problem of uncomfortable feelings of the passengers, which makes high-speed trains use airtight body and pressure protection technology. It has significant to design the airtightness threshold under the premise of pressure comfort criteria of the train. Aiming at the characteristics of high-speed railway tunnel lengths in mountainous areas of China, a large number of working conditions when the train pass through the tunnel are obtained under the premise of the method of generalized Riemann variables characteristics of one-dimensional, compressible, non-constant and unsteady flow model, and the effects of train-length, speed, tunnel length and tightness coefficient are summarized. The coupling analysis of the train-tunnel system is carried out and the most unfavorable tunnel length of internal pressure are proposed for different time interval criterial. According to the threshold requirements of different criteria of China, Germany, UIC and ERRI, the train air-tightness threshold is calculated, and the curve of the time constant threshold increasing with the tunnel length is fitted. The theoretical mathematical relationships between the air tightness threshold under four different standards are summarized and compared.

Key words: mountain high-speed railway; high speed train; tunnel; pressure wave; air tightness threshold; comfort criteria

0 前言

截止 2018 年底, 中国已投入运营的高速铁路总长

2.9 万 km, 其中铁路隧道 15 117 座, 总长 16 331 km。仅长度不小于 10 km 的特长隧道就有 50 座, 累计长度约 640 km^[1]。“隧线比高、特长隧道众多”是我国山区高速铁路的典型特点。高速列车通过隧道时诱发的压力波传递至车内也将影响司乘人员的耳感舒适性。采用气密性车体很大程度上可以保证列

* 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB1200506)。20191105 收到初稿, 20200305 收到修改稿

车通过隧道时司乘人员的耳感舒适性, 采用气密性车体的同时会对列车制造和运营成本存在较大影响。基于列车通过隧道诱发压力波的实际特征和车内压力舒适性标准, 研究不同隧道特征和速度等级下的车体气密性阈值要求, 在对保证列车设计、实际运营和舒适性评估方面具有重要意义, 需深入研究。

国外学者 RAGHUNATHAN 等^[2]和国内学者田红旗^[3]对列车通过隧道所产生的压力波研究成果做以综述。王建宇等^[4]和王一伟等^[5]重点研究了隧道长度对压力波的影响规律。马伟斌等^[6]和 LIU 等^[7]对车内压力进行实车试验, 分别揭示了车内压力 3 s 变化极值随隧道长度、车型和车速的变化规律、提出长时间间隔内较大的压力波动值是评价列车通过长大隧道时耳感不适问题的一个主要参数。目前用于降低列车通过隧道时压力波动对司乘人员耳感舒适性的影响的方法主要有两种: 一种是增加隧道断面面积, 另一种是提高车体气密性能和加装压力保护装置。邓杰等^[8]以京沪线为背景进行了隧道净空面积的适应性研究。曹艳华等^[9]介绍了列车空调系统的压力保护装置用来控制车内压力波动的重要性。另外, 国内外诸多学者也通过数值模拟的方式对隧道压力波和车内瞬变压力进行相关研究^[10-14]。

不同国家组织和机构对不同时间间隔内车内压力变化量要求标准不一致。UIC CODE 779-11^[15]欧洲铁路联盟标准详细介绍了日本、英国、意大利和欧洲铁路研究所(ERRI)等国家和机构舒适性标准的要求。BERLITZ 等^[16]提出经过对乘客的舒适性调查已经将德国标准补充为高速、小断面、长大隧道条件下的 500 Pa/1 s, 800 Pa/3 s, 1 000 Pa/10 s、1 500 Pa/30 s 和 2 000 Pa/全程。目前我国用于判定车内司乘人员舒适性的主要标准值之一为 800 Pa/3 s^[17]。史宪明等^[18]以车内每 3 s 的压力舒适性标准对密封列车瞬变压力的超标隧道长度进行研究。标准 TB/T3250-2010《动车组密封设计及试验规范》^[19]中将静态时间常数 τ_{stat} 定义为列车门窗关闭及空调设备对外的新风口, 废排风口关闭情况下车内外压力差由 4 kPa 降至 1 kPa 的降压时间, 时速 250~350 km/h 的列车要求降压时间不低于 50 s。何德华^[20]提出相较于国外压力舒适性准则, 国内车内压力舒适性标准存在过于严格或不够严密的问题。欧洲高铁实测试验研究中, 给出了列车线路实际运行时的时间常数动态气密性是静态时间常数的 1/3~1/2, 由于该值与实际线路参数密切相关, 还不能直接采用和推广。通过求解不同工况条件下车内外压力, 依据适用于高速铁路的耳感舒适性标准预估列车通过隧道时的动态气密时间常数阈值, 该研究方法目

前国内外还未见公开报道。

本文重点研究单列车通过和隧道内交会条件下不同编组长度、列车速度、隧道长度对车内压力变化量的最大值的影响规律, 提出不同时间间隔标准下密封列车车内压力对应的最不利隧道长度。同时依据四种国内外高速列车车内压力耳感舒适性标准研究不同隧道长度下列车动态气密时间常数阈值, 所拟合的理论关系式可以成为对比国内外相关标准的重要参考依据。期待计算结果为高速列车在长大隧道和特长隧道条件下运行时所需设计的气密性能指标提供重要技术参考。

1 研究方法

1.1 车外压力

高速列车通过隧道时产生非定常三维紊态流动, 当隧道长度远大于隧道断面的水力直径时, 隧道断面和环状空间上某一断点处各点压力可以视为近似相等, 将隧道中的三维运动简化为一维可压缩非定常流动。本文采用一维可压缩不等熵非定常流动模型计算, 应用一维特征线方法求解方程组, 具体方法参见文献[21]。其中描述流动的控制方程如下

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = (\kappa - 1) \rho (q - \xi + uG) \quad (3)$$

式中, u 为空气流速; p 为空气压力; κ 为空气比热比; ρ 为空气密度; a 为空气声速; F 为空气流动横截面面积; G 为空气与壁面的摩擦项; q 为空气与壁面的传热项; ξ 为空气与列车车壁的摩擦功; t 为时间。

1.2 车辆气密性能及车内压力

用于评价车辆气密性能的方法主要有两种, 即时间常数法和等效泄漏面积法。在车辆静态气密性能试验测试中, 确定时间常数的试验过程为切断单节整车进排风口和通过台与外界的通气途径, 而后用压缩空气将车内压力升高至某一较高压力 p_{max} , 停止充气后测量车内压力从 p_{max} 降低至某一较低压力 p_{min} 的时间 t , 该漏气时间即为静态时间常数。动态时间常数 τ_{dyn} 定义为线路实际运行情形下列车气密性。其定义式表示如下^[15, 22]

$$\tau_{\text{dyn}} = -\frac{\Delta p(t)}{dp_{\text{int}}/dt} \quad (4)$$

计算车内压力过程中, 上述定义假设车辆采用了压力截止阀保护装置, 略去车辆进排风口的影响。将气密指数定义式变换为表述列车内外压力值的波动关系式

$$\frac{dp_{\text{int}}}{dt} + \frac{1}{\tau_{\text{dyn}}} p_{\text{int}} = \frac{1}{\tau_{\text{dyn}}} p_{\text{ext}} \quad (5)$$

式(5)两边同时积分, 初始值 $p_{\text{int}} = p_{\text{int}}(0)$, 且车外压力 p_{ext} 为短时间内常数值。得到 $t=0$ 时刻车内压力计算公式

$$p_{\text{int}}(t) = p_{\text{int}}(0) \cdot \exp(-t/\tau_{\text{dyn}}) + p_{\text{ext}} \cdot (1 - \exp(-t/\tau_{\text{dyn}})) \quad (6)$$

若已知 $t=t_1$ 时刻车外压力, 则程序迭代计算 $t=t_2$ 时车内压力公式为

$$p_{\text{int}}(t_2) = p_{\text{ext}}(t_2) - (p_{\text{ext}}(t_1) - p_{\text{int}}(t_1)) \cdot \exp(-(t_2 - t_1)/\tau_{\text{dyn}}) \quad (7)$$

整理得

$$p_{\text{int}}(t_2) = p_{\text{int}}(t_1) \cdot \exp(-(t_2 - t_1)/\tau_{\text{dyn}}) + p_{\text{ext}} \cdot (1 - \exp(-(t_2 - t_1)/\tau_{\text{dyn}})) \quad (8)$$

1.3 车内外压力关系及舒适性标准

探究列车气密性能过程中, 需要将车内外压力关联考虑, 先假设列车为完全密封状态时通过隧道, 可以通过第 1.1 节车外压力计算公式计算得到各节车测点处车外压力波动历程特征。继而假设列车为气密性车体, 设定时间常数预先值可以通过第 1.2 节车内压力计算公式得到该气密条件下车内压力波动历程特征, 同时可依照所需要判定的时间间隔条件输出不同时间间隔内车内压力变化量, 此压力变化量对应等于该时间间隔内的车内压力变化极值。在伴随列车通过隧道过程中, 不同时间间隔内车内压力变化量会随时间历程出现最大值, 称为不同时间间隔内车内压力变化量的最大值, 该值可以作为探究不同因素对车体气密性能的影响特性的重要指标。

除设定时间常数预先值, 探讨车内压力变化量的最大值及其影响因素的规律外, 基于不同时间间隔车内压力标准要求计算满足气密车体的时间常数阈值同样尤为重要。图 1 所示为计算时间常数阈值的算法流程图, 不同时间间隔内车内压力变化量与标准下要求的数值大小关系成为本文阈值确定的主要判据条件, 如果车内压力变化量等于标准界定的值, 则将该气密值定义为阈值, 反之, 重新假设气密值计算车内压力, 直到满足判据要求 N 秒车内压力变化量刚好等于对应标准阈值时输出时间常数结果并终止计算。

图 1 计算时间常数阈值算法流程图

表 1 所示为目前不同国家和组织机构中标准间隔时间内车内压力变化量阈值要求。本文以表中四个不同标准展开对车体气密时间常数阈值的研究。

表 1 多时间间隔压力舒适性标准

时间间隔/s	UIC/kPa	ERRI/kPa	德国/kPa	中国/kPa
1	≤0.5	1.0	≤0.5	—
3	≤0.8	—	≤0.8	≤0.8
4	—	1.6	—	—
10	≤1.0	2.0	≤1.0	—
30	—	—	≤1.5	—
60	≤2.0	—	—	—
Total	—	—	≤2.0	—

2 计算结果分析

2.1 隧道和列车参数

以时速 350 km 中国标准动车组断面和隧道净空面积值为基本计算参数, 考虑单列车通过和隧道内等速交会两种运行条件, 假设隧道为简单结构等截面型式, 隧道平直无坡度变化、且无竖井、横通道和辅助坑道等。表 2 给出了隧道和动车组计算参数。

2.2 隧道长度与车内外压力波的关系

图 2 表示速度为 350 km/h 的 8 编组单列车通过和隧道内等速交会两种情况下列车通过 2 km 隧道时头车车内外压力波特性, 其中单列车通过隧道的净空面积为 70 m², 等速交会隧道的净空面积为 100 m²。车体动态时间常数为 20 s。以单列车通过 2 km、10 km、20 km 隧道和隧道内等速交会六种情况为例, 分析隧道长度对车内外压力变化的影响。

表 2 隧道和动车组计算参数

	隧道参数	动车组参数
隧道长度/km	0.8/1.0/1.6/2.0/3.2/3.6/ 4.0/6.0/8.0/9.2/10.0/ 12.0/14.0/16.0/18.0/20.0	—
截面面积/m ²	70(单线)/100(双线)	12.096
湿周周长/m	20.66/35.45	13.16
列车编组	—	8/16
速度(km·h ⁻¹)	—	250/300/350/380/400
时间常数/s	—	0.5/2.0/4.0/6.0/10.0/12.0/ 14.0/15.0/18.0/20.0/25.0/ 28.0/30.0/55.0
计算时间间隔/s	—	1/3/4/10/30/60/全过程

为更好地对比列车通过不同长度隧道时车内外压力波形特征, 将时间变量进行无量纲化处理, 即量纲-

时间 $t' = \frac{t}{L_{tu}} a_0$, 式中, a_0 为声速, L_{tu} 为隧道长度。

图中“C”表示压缩波, “E”表示膨胀波, “N”表示车头, “T”表示车尾, 对向两列车车头和车尾的运行轨迹分别用 N_A 、 N_B 和 T_A 、 T_B 来表示, 将头车鼻尖到达隧道入口端时刻定义为 0 时刻。由图 2 可知下列关系。

(1) 单列车通过隧道时, 车外最大正值出现的时刻对应于尾车进入隧道后产生的膨胀波传递至车头时, 此时 $t = \frac{a_0 L_{tr}}{V_{tr}(a_0 - V_{tr})}$ 。最大负值出现的时刻对应于尾车产生的膨胀波传递至隧道洞口反射回来的压缩波与头车相遇时, 此时 $t = \frac{2L_{tu}V_{tr} - L_{tr}a_0}{V_{tr}(a_0 - V_{tr})}$ 。

(2) 隧道中央等速交会情况下, 双向驶入隧道的两列车引起的压缩波膨胀波相互叠加, 影响车外压力分布, 使得车外压力波动更为剧烈和复杂。以其中一列车为观察车, 列车驶入隧道后遇到对向列车车头驶入隧道口诱发的压缩波 E_{AT1} 后压力上升, 该压缩波经洞口反射为膨胀波 E_{BN1} 再次与列车头车相遇, 此时取得车外压力最大正值, 对应时刻 $t = \frac{L_{tu}}{a_0 - V_{tr}}$ 。隧道内两列车头车相错时刻 $t = \frac{L_{tu}}{2V_{tr}}$, 此时车外压力急剧下降并达到最大负值。头车与对向列车尾车相错时刻 $t = \frac{(V_{tr} - 1)L_{tr} + L_{tu}}{2V_{tr}}$, 此时压力开始上升。

(3) 对比通过不同长度隧道车内外压力发现, 相同的时间常数下, 随着隧道长度增加, 车外压力波动对车内压力波动的影响更大, 以单列车为例, 通过 2 km 隧道时车外压力峰峰值约为 5.91 kPa, 车内压力峰峰值只有 1.56 kPa, 同时刻车内外压差最大值为 4.14 kPa; 通过 20 km 特长隧道时车外压力峰峰值约为 4.1 kPa, 车内压力峰峰值已经达到 2.5 kPa, 同时刻车内外压差最大值为 1.9 kPa。列车在通过中长隧道时, 车内压力受车外压力的影响并不明显, 但列车在通过长大和特长隧道时, 车内压力与车外压力二者变化趋势越加接近, 证明高速列车在通过长大隧道时将对列车气密性能提出更高要求。

车内压力峰峰值只有 1.56 kPa, 同时刻车内外压差最大值为 4.14 kPa; 通过 20 km 特长隧道时车外压力峰峰值约为 4.1 kPa, 车内压力峰峰值已经达到 2.5 kPa, 同时刻车内外压差最大值为 1.9 kPa。列车在通过中长隧道时, 车内压力受车外压力的影响并不明显, 但列车在通过长大和特长隧道时, 车内压力与车外压力二者变化趋势越加接近, 证明高速列车在通过长大隧道时将对列车气密性能提出更高要求。

(a) 单列车运行轨变图和波反射图

(b) 交会列车运行轨变图和波反射图

(c) 单列车通过头车车内外压力波动时间历程

(d) 隧道中央交会头车车内外压力波动时间历程

图 2 不同隧道长度车内外压力波动时间历程曲线

2.3 速度影响特性

不同时间间隔内车内压力变化量是判定高速列车司乘人员舒适性的重要依据。以头车为例, 图 3

表示了不同速度等级下单列车通过2 km隧道每3 s车内压力变化量的历程曲线,隧道净空面积为70 m²。箭头所示为车内每3 s压力变化量随时间历程取到的最大值,可以看出,随着列车速度增加,单位时间间隔内车内压力变化量的最大值逐渐增大。

图3 每3 s车内压力变化量时间历程曲线

以头车为例,图4表示了单列车以5种速度通过隧道时车内压力变化量的最大值随速度的变化规律,同时对比2种编组条件,分析发现:①随着列车速度增加,不同时间间隔内车内压力变化量的最大值线性增大,增幅规律如表3所示;②该条件下,

图4 速度对车内压力变化量的最大值影响规律

每1 s、3 s、10 s内16编组列车车内压力变化量的最大值高于8编组列车,每30 s、60 s内和通过隧道全过程车内压力变化量的最大值规律相反,说明编组长度同样是影响车内压力变化量的最大值因素之一。

表3 车内压力变化量的最大值随速度增幅关系

Δt	8 编组	16 编组
1 s	$\Delta P = 0.0009v_{tr} - 0.143$	$\Delta P = 0.001v_{tr} - 0.1528$
3 s	$\Delta P = 0.0019v_{tr} - 0.2304$	$\Delta P = 0.0024v_{tr} - 0.3116$
10 s	$\Delta P = 0.0055v_{tr} - 0.8997$	$\Delta P = 0.0064v_{tr} - 1.0265$
30 s	$\Delta P = 0.0078v_{tr} - 1.208$	$\Delta P = 0.0062v_{tr} - 0.7159$
60 s	$\Delta P = 0.0066v_{tr} - 0.7691$	$\Delta P = 0.0062v_{tr} - 0.7159$
Total	$\Delta P = 0.0066v_{tr} - 0.7702$	$\Delta P = 0.0062v_{tr} - 0.7159$

2.4 隧道长度影响特性

限于篇幅,以头车为例,图5和图6分别表示8编组列车以4种速度通过16种长度隧道时单列车通过和隧道中央等速交会两种情形下每3 s、10 s和通过隧道全过程的车内压力变化量的最大值变化规律,其中单列车通过隧道的净空面积为70 m²,等速交会的隧道净空面积为100 m²。具体隧道长度见表2。同时反映出中、德、欧洲等不同标准的突出特点。由图分析发现下列特点。

(1) 每间隔时间内压力变化量的最大值随着速度的增加而增大。不同速度相同每时间间隔内压力变化量的最大值随隧道长度增加所呈现的变化规律基本相同。

(2) 不同时间间隔内车内压力变化量的最大值随隧道长度的增加所呈现的变化规律不同。4种速度的列车通过隧道时每3 s内压力变化量的最大值随隧道长度增加总是在2 km处取到最大值,说明每3 s内车内压力变化量的最大值标准对2 km隧道的要求最为严格,2 km可以认为是车内压力在每3 s内标准下的最不利隧道长度,且与列车行驶速度无关。同理,每10 s内压力变化量的最大值随隧道长度增加总是在4 km处取到最大值,4 km可以认为是车内压力在每10 s内标准下的最不利隧道长度。表4统计了所有典型时间间隔内车内压力变化量的最大值所对应的最不利隧道长度,由表看出该最不利隧道长度随选取标准中的时间间隔的增大而增大。

(3) 通过隧道全过程内压力变化量的最大值随隧道长度增加而持续变大,隧道全长可以认为是车内压力通过隧道全过程标准下的最不利隧道长度。对于长大隧道来说,通过隧道全过程内车内压力变化量最大值比较大,该压力变化标准最为严格。

(a) 每3 s内

(b) 每10 s内

(c) 通过隧道全程

图5 单列车通过不同长度隧道时车内
压力变化量的最大值变化规律

(4) 对比单列车通过和隧道中央等速交会两种情况发现,不同时间间隔内交会情形的车内压力变化量变化幅度更大,但变化趋势基本一致。不同时间间隔内出现车内压力变化量的最大值所处的隧道长度位置基本相同,即单列车通过和隧道中央交会情形二者针对车内压力变化量具有相同的最不利隧道长度。

(a) 每3 s内

(b) 每10 s内

(c) 通过隧道全程

图6 隧道内交会不同长度隧道时车内
压力变化量的最大值变化规律

表4 间隔时间内车内压力对应最不利隧道长度

间隔时间 Δt	隧道长度 L_{tu}
1 s	0.4 km
3 s	2.0 km
10 s	4.0 km
30 s	5.0 km
60 s	8.0 km
Total	隧道全长

2.5 时间常数气密值的影响特性

图7和图8分别表示了8编组列车以4种速度通过20 km隧道时,选取14种时间常数条件下单列车通过和隧道中央等速交会两种情形下不同时间间隔内头车车内压力变化量的最大值变化规律。其中单列车通过隧道的净空面积为 70 m^2 ,等速交会的隧道净空面积为 100 m^2 ,具体时间常数取值见表2。由图分析发现如下情况。

图7 单列车通过情形时间常数对不同时间间隔内车内压力变化量的最大值影响规律

图8 隧道内交会情形时间常数对不同时间间隔内车内压力变化量的最大值影响规律

(1) 随着时间常数的增加,每间隔时间内车内压力变化量的最大值逐渐减小。不同速度下车内压力变化量的最大值变化趋势总体相同,列车交会情形下速度为 400 km/h 时对气密性要求较高。

(2) 对于密封车辆,以 350 km/h 的速度,时间常数为 20 s 的单列车通过净空面积为 70 m^2 的隧道为例,每 3 s 内车内压力变化量的最大值为 0.35 kPa ,每 10 s 内压力变化量的最大值为 0.6 kPa ,通过隧道全过程内压力变化量的最大值为 2.5 kPa 。可以看出

列车在通过长大隧道时车内压力变化量的最大值随选取标准中计算间隔时间的增加而增大。

(3) 对应表 1 中多时间间隔条件车内压力舒适性标准,图 7、图 8 中横线表示车内压力变化量的最高限值,而气密时间常数随车内压力而变化的曲线与横线交点处对应的横坐标值可以用来初步判定该标准下的时间常数阈值。以每 3 s 内标准图 7a 为例,四种速度从小到大对应下的时间常数阈值分别为 3 s、5 s、10 s、12.5 s。时间常数阈值的大小随速度的增加而增大。对比每 3 s、10 s、通过隧道全过程内三种时间间隔内的时间常数阈值发现,列车在通过长大隧道时,时间常数阈值随选取标准中计算间隔时间的增加而增大,图 8c 表示了通过隧道全过程这一时间间隔标准要求下 35 s 的时间常数已经不能够满足时速 350 km/h 和 400 km/h 高速运行列车的时间常数阈值需求。

(4) 对比单列车通过和隧道中央交会两种情况,交会情形车内压力变化量的变化幅度比单列车通过情形大。例如,单列车以 400 km/h 通过 20 km 隧道每 3 s 内车内压力最大值为 0.45 kPa,而当列车以同样速度在相同长度隧道内交会时,每 3 s 内车内

压力变化量的最大值为 0.65 kPa。此外,二者压力变化最值随时间常数增加的变化趋势大体一致,但交会情形下列车速度在 250~350 km/h 时每 3 s、10 s 内压力变化最值极为接近,400 km/h 时却出现比较明显区别,这也对应结论(1)中交会情况下对 400 km 速度等级将会对列车提出更高气密性要求。

2.6 时间常数气密阈值分布特性

图 9 表示时间常数为 20 s 的列车以 350 km/h 的速度单列车通过和隧道内交会两种情形下列车通过 2 km、8 km、20 km 的隧道过程中头车每 3 s、10 s 内和通过全过程压力变化量的最大值时间历程曲线。其中,8 编组单列车通过隧道的净空面积为 70 m²,等速交会的隧道净空面积为 100 m²。由图 9 可知:① 图中横线表示不同标准下不同时间间隔内车内压力变化量的舒适性标准阈值要求,当车内压力变化量的最大值满足该阈值要求时对应的列车时间常数即为该条件下的时间常数阈值;② 无论单列车通过还是隧道内交会情形,车内每 3 s 内压力变化量的最大值远小于标准阈值要求;每 10 s 内压力变化量较接近阈值;通过隧道全过程的部分隧道压力变化量的最大值已经超过阈值,这显示出列车在

图 9 单列车通过与隧道内交会情形车内最大压力变化量的最大值时间历程曲线

通过长大隧道,尤其是特长隧道时不同时间间隔标准对车内压力变化量的最大值要求的严格程度不同,基于不同时间间隔标准阈值要求下的时间常数数值也不同。③ 对比单列车通过和隧道中央等速交会两种情形,二者历程曲线和出现车内压力变化量最大值所对应的时间的趋势基本相同。

为了进一步描述出以隧道长度为变量所引起的短、中、长、特长隧道不同条件下时间常数与不同时间间隔标准之间的对应关系,基于不同国家和组织范围不同时间间隔内车内压力变化量阈值准许标准,分别计算每1 s、3 s、4 s、10 s、30 s、60 s内及通过隧道全过程的时间常数阈值。计算工况涵盖8编组单列车通过和隧道内交会两种情况以350 km/h和400 km/h两种速度通过不同长度隧道时的车内外压力波动,其中单列车通过隧道的净空面积为70 m²,等速交会的隧道净空面积为100 m²。所选隧道长度参见表2,计算基于车内压力变化量的阈值要求下的时间常数。图10所示的散点图每个点对应一种工况和标准下的时间常数阈值,该图能够清晰表示出不同标准所对应的时间常数阈值分布特性。同时结合中、德、国际铁路联盟(UIC)、欧洲铁路研究所(ERRI)的标

准对相关散点进行拟合,拟合关系可用以判断不同标准下时间常数阈值随隧道长度增加所呈现的数值变化规律。

由图10可以看出,① 图中四条趋势线由上至下分别代表德国、UIC、中国、ERRI标准下的时间常数阈值随隧道长度增加的变化关系,表5给出了各标准下时间常数阈值关系式及拟合因子 R^2 。从总体趋势上看,德国标准与UIC标准比较接近,二者都随隧道长度增加而增大,但德国标准下的时间常数阈值相较UIC标准更大。中国标准与ERRI标准比较接近,二者随隧道长度增加都呈现先上升后缓慢下降的趋势;② 列车在通过2 km以内的隧道时,四种标准下得到的时间常数阈值差别不大,以德国标准为例,所需的时间常数不超过26 s。列车在通过2 km以上隧道时,中国标准与ERRI标准下时间常数阈值开始缓慢下降,所需要的时间常数依然不超过该标准对应各自标准中2 km处的气密指数阈值25 s和16 s,而德国与UIC标准下的时间常数阈值则取决于隧道长度,隧道长度越长,气密时间常数阈值越大。这也从一个方面验证了高速列车在通过长大隧道时将对列车气密性能提出更高要求的正确性。

图10 不同标准下时间常数分布特性及对应趋势关系

表5 不同标准下气密指数阈值拟合关系式

	拟合关系式	拟合因子 R^2
德国	$\Delta p = 0.24 L_{tu}^{0.61}$	0.99
UIC	$\Delta p = 0.85 L_{tu}^{0.45}$	0.99
中国	$\Delta p = \begin{cases} 22.83 + 35.89 \left(\exp\left(-\frac{1589.71}{1296.21}\right) - \exp\left(-\frac{L_{tu}}{1296.21}\right) \right) & L_{tu} \leq 1589.71 \\ 12.01 + 10.82 \exp\left(-\frac{(L_{tu} - 1589.71)}{16258.88}\right) & L_{tu} \geq 1589.71 \end{cases}$	$R_1^2 = 0.99$ $R_2^2 = 1$ $R_3^2 = 0.98$
ERRI	$\Delta p = \begin{cases} 17.32 + 15.5 \left(\exp\left(-\frac{11214.57}{812.81}\right) - \exp\left(-\frac{L_{tu}}{812.81}\right) \right) & L_{tu} \leq 11214.57 \\ 13.76 + 3.56 \exp\left(-\frac{(L_{tu} - 11214.57)}{9004.17}\right) & L_{tu} \geq 11214.57 \end{cases}$	$R_1^2 = 0.76$ $R_2^2 = 0.82$ $R_3^2 = 0.99$

3 结论

(1) 对比列车通过中长、长、特长隧道时的车内外压力时间历程曲线,随着隧道长度增加,相同时间常数气密指数下,车外压力波动逐渐减小,车内压力波动逐渐增大,同时刻车内外压差逐渐减小。列车在通过长大隧道时,车内压力与车外压力二者变化趋势越加接近,对列车气密性能提出了更高要求。

(2) 列车通过隧道过程中,随着列车速度增加,不同时间间隔内车内压力变化量的最大值接近线性增大。

(3) 单列车通过和隧道内交会两种情况下,随着隧道长度增加,不同时间间隔内车内压力变化量的最大值趋势规律不同,出现峰值处对应的隧道长度为车内对应该时间间隔标准下的最不利隧道长度,表4中所统计的最不利隧道长度随选取时间间隔的增加而增大,依据国内现有800 Pa/3 s的要求,针对舒适性的最不利隧道长度为2 km。

(4) 不同时间间隔标准对车内压力变化量的最大值要求的严格程度不同,对于长大隧道,标准选取时间间隔越长,要求的时间常数阈值越大,对气密性要求越高。

(5) 针对通过求解不同工况条件下车内外压力波动及不同时间间隔内车内压力变化量的最大值,较为系统提出了依据不同长度隧道时所需达到的时间常数气密阈值范围。

(6) 拟合各国各组织标准下的时间常数气密阈值随隧道长度增加的变化曲线,四种标准对于列车通过长大和特长隧道时气密时间常数阈值要求的严格程度不同,列车在通过20 km以上隧道时,德国标准要求其动态气密阈值在110 s以上,UIC标准要求75 s以上,目前我国所应用标准和ERRI标准要求要求在17 s以上,其严格程度依顺序排列:德国标准>UIC标准>中国标准>ERRI标准。

参 考 文 献

- [1] 赵勇,田四明.截至2018年底中国铁路隧道情况统计[J].隧道建设,2019,39(2):323-335.
ZHAO Yong, TIAN Siming. Statistics on china railway tunnels by the end of 2018[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 323-335.
- [2] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. Progress in

Aerospace Sciences, 2002, 38: 469-514.

- [3] 田红旗.中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J].中国工程科学,2015,17(4):30-41.
TIAN Hongqi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(4): 30-41.
- [4] 王建宇,万晓燕,吴剑.隧道长度对瞬变压力的影响[J].现代隧道技术,2008,45(6):1-4.
WANG Jianyu, WAN Xiaoyan, WU Jian. Influence of tunnel length upon air pressure fluctuation in high speed railway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(6): 1-4.
- [5] 王一伟,杨国伟,黄晨光,等.隧道长度对高速列车交会压力波的影响研究[J].中国科学,2012,42(1):82-90.
WANG Yiwei, YANG Guowei, HUANG Chenguang, et al. Influence of tunnel length on the pressure wave generated by high-speed trains passing each other[J]. Science China Technology Science, 2012, 42(1): 82-90.
- [6] 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 involvement of high-speed railway tunnel aerodynamic effect in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 25-32.
- [7] LIU Tanghong, CHEN Xiaodong, LI Wenhui, et al. Field study on the interior pressure variation in high-speed trains passing through tunnels of different lengths[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2017(169): 54-66.
- [8] 邓杰,余南阳,赵海恒.京沪高速铁路隧道有效断面适应性研究[J].铁道工程学报,2010,138(3):66-70.
DENG Jie, YU Nanyang, ZHAO Haiheng. Study on the adaptability of effective cross-section area of the tunnel of Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 138(3): 66-70.
- [9] 曹艳华,李瑞淳.高速动车组空调系统压力保护装置[J].国外铁道车辆,2010,47(6):16-21.
CAO Yanhua, LI Ruichun. The pressure protection device in air-conditioning system for high speed multiple units[J]. Foreign Roiling Stock, 2010, 47(6): 16-21.
- [10] 朱一妃.高速列车车内压力波动特性研究[D].北京:北京交通大学,2017.
ZHU Yifei. Study on pressure fluctuations charateristics in high-speed train carriages[D]. Beijing: Beijing Jiaotong

- University, 2017.
- [11] NIU Jiqing, ZHOU Dan, LIN Feng, et al. Effect of train length on fluctuating aerodynamic pressure wave in tunnels and method for determining the amplitude of pressure wave on trains[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018(80): 277-289.
- [12] 梅元贵, 张成玉, 周朝辉, 等. 单列高速列车通过特长隧道时耳感不适问题研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 100-107.
- MEI Yuanguai, ZHANG Chengyu, ZHOU Chaohui, et al. Experimental research on simulation of interior pressure of train passing through tunnel at high speed[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 100-107.
- [13] 王前选, 梁习峰, 任鑫. 列车高速通过隧道时车内压力波模拟试验研究[J]. *中南大学学报*, 2014, 45(5): 1699-1704.
- WANG Qianxuan, LIANG Xifeng, REN Xin. Experimental research on simulation of interior pressure of train passing through tunnel at high speed[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 45(5): 1699-1704.
- [14] 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.
- [15] International Union of Railways. Determination of railway tunnel cross-sectional area on the basis of aerodynamic considerations: UIC779-11[S]. Paris: International Union of Railways, 2005.
- [16] BERLITZ T, WORMSTALL-REITSCHUSTER H J, TIEKLES T, et al. Pressure comfort-meeting future demands for high speed trains[C]// WCCR2003 World Congress on Railway Research, September 28-October 1, 2003, Edinburgh, Scotland, 2003: 493-503.
- [17] 中华人民共和国铁道部. 铁建设[2007]88号 铁路隧道设计施工有关标准补充规定[Z]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2007.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. Tiejian [2007] No. 88 Supplementary Provisions on Design and Construction of Railway Tunnels[Z]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2007.
- [18] 史宪明, 万晓燕, 吴剑, 等. 密封列车瞬变压力超标隧道长度区间研究[J]. *铁道建筑*, 2017(4): 56-59.
- SHI Xianming, WAN Xiaoyan, WU Jian, et al. Research on tunnel length ranges with over-standard transient pressure of sealed trains[J]. *Railway Engineering*, 2017(4): 56-59.
- [19] 中华人民共和国铁道部. TB/T3250-2010, 动车组密封设计及试验规范[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2011.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB/T3250-2010, Specifications of sealing design and test for powered car train-set[S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2011.
- [20] 何德华. 高速列车车内压力舒适度标准的研究[J]. *铁道机车车辆*, 2016, 36(3): 1-6.
- HE Dehua. The study of pressure comfort criterion for high-speed train[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2016, 36(3): 1-6.
- [21] 梅元贵, 周朝晖, 许建林. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- MEI Yuanguai, ZHOU Chaohui, XU Jianlin. Aerodynamics of high-speed railway tunnel[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [22] GLOCKLE H, PFRETZSCHNER P, Deutsche FR Germany. High Speed tests with ICE/V passing through tunnels and the effect of sealed coaches on passenger comfort[C]// 6th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Durham, England: 1988: 23-44.
- 作者简介: 梅元贵, 男, 1963 年出生, 工学博士, 教授。主要研究方向为高速列车空气动力学。
E-mail: meiyuanguai@163.com