

DOI: 10.3901/JME.2015.14.100

单列高速列车通过特长隧道时耳感不适问题研究*

梅元贵 张成玉 周朝晖 贾永兴 吴明
(兰州交通大学机电工程学院 兰州 730070)

摘要: 高速列车通过隧道时产生的压力瞬变会引发车内压力波动, 对司乘人员的耳感舒适性有重要影响。影响压力瞬变的主要因素有列车速度、阻塞比和隧道长度。特长隧道和中长隧道两种条件下的压力瞬变和车内压力波动的特性是不同的。为考察我国采用单一时间间隔内最大压力变化量研判司乘人员耳感舒适性的适用性, 有必要研究高速列车通过特长隧道时车内压力波动特点。基于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法和我国隧道断面参数特点, 研究单车通过简单结构特长复线隧道内时的压力波特性, 归纳隧道长度、列车速度和气密指数对车内压力变化的影响特性, 分析隧道长度下不同时间间隔的最大压力变化量的最大值变化趋势, 获得特长隧道下车内压力变化规律及特殊性问题。参照欧洲压力舒适性标准, 分析耳感不适问题的特征, 得出在特长隧道条件下采用多时间间隔压力变化阈值评价耳感舒适性问题的必要性。

关键词: 高速列车; 特长隧道; 压力波; 耳感不适; 一维流动模型; 特征线法

中图分类号: U238; V211

Research on the Aural Discomfort When a Single Train Passes through a Super Long Tunnel

MEI Yuangui ZHANG Chengyu ZHOU Chaohui JIA Yongxing WU Ming
(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

Abstract: Pressure transient is generated when a high-speed train passes through a tunnel, while the pressure inside the coaches will also fluctuate. It is one of the main factors affect the aural discomfort of passengers. The train speed, blockage ratio, and the length of the tunnel also affect the pressure transient inside and outside the coaches. The characteristics of pressure fluctuation in super long tunnels are different from that in middle-length tunnels. The applicability of the criterion in which the maximum pressure change in a single time interval is used to evaluating the aural discomfort in China is investigated. And it's necessary to study the characteristics of pressure fluctuation. Based on one-dimensional, compressible, non-homentropic and unsteady flow model and the method of characteristics of generalized Riemann variables, characteristics of pressure fluctuation in a plain tunnel are studied. The effects of tunnel length, train speed and pressure tightness coefficient on the pressure fluctuation inside the coaches are studied. After analyzing the variation of the maximum value of maximum pressure change during different time intervals, the particularity of pressure fluctuation inside the coaches when the train passes through the super long tunnel is obtained. Based on the pressure comfort criterion in European, the characteristic of aural discomfort are summered. And the conclusion is that it's necessary to estimate the aural discomfort through the pressure changes in different time intervals in super long tunnels.

Key words: high-speed train; super long tunnel; pressure wave; aural discomfort; one-dimensional flow model; method of characteristics

0 前言

高速列车通过隧道时产生压力瞬变, 带来司乘

人员耳感不适问题。在高速铁路的发展过程中, 隧道压力波是重要的列车空气动力学问题, 研究成果为隧道和列车设计提供了重要的参考依据^[1]。RAGHUNATHAN 等^[2]介绍了国外有关高速列车隧道压力波的一维流动模型特征线计算方法及与实车试验验证结果。余南阳等^[3]采用一维流动模型特征

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2011CB711101)。20140724 收到初稿, 20150106 收到修改稿

线数值分析方法, 围绕我国京沪高速铁路隧道长度研究了列车速度、阻塞比、中长隧道长度对车内外压力波的影响特点。王建宇等^[4]结合我国当时客运专线发展的特点和遂渝线实车试验结果, 提出了耳感不适压力标准建议阈值。邓杰等^[5]根据国内和 UIC 压力舒适标准, 进行了京沪高速铁路隧道有效断面适应性的研究。梅元贵等^[6]系统总结了隧道压力波一维流动模型特征线计算方法和国内外铁路车辆耳感不适标准阈值。数值模拟隧道压力波的流动模型还有三维非定常可压缩湍流模型^[7-9], 但由于该类模型要求网格数量较多, 对计算资源要求较高, 目前仅适用于中长隧道长度范围, 且用于多参数研究成本较高。近年来, 我国也取得了一批有价值的高速铁路隧道空气动力学实车试验研究成果^[10-11]。其中, 马伟斌等^[11]在试验中发现: 高速列车通过特长隧道时, 车内气压 3 s 变化值虽然小于舒适度标准的要求, 但乘客仍有耳感不舒适感, 建议参考国外多时间间隔的压力舒适度标准, 确定适合国内国情的压力舒适性标准。在国外, 德国铁路公司提出了更高列车速度和长隧道下满足耳感不适的压力标准, 并进行了相关舒适性研究^[12]。而我国在这方面研究得较少, 还没有见到相关理论研究的公开报道。本文采用一维可压缩非定常不等熵流动模型特征线的计算方法^[6], 结合我国隧道断面参数, 在洞内未设置斜井、救援通道等辅助坑道下, 研究单车通过复线特长隧道下的压力波动特性, 分析隧道长度、列车速度和气密指数对车内压力的影响特性, 参考国外多时间间隔的压力舒适度标准, 得出特长隧道下耳感不适问题的特征, 期望本文的研究为今后我国特长隧道的耳感不适的研究提供有价值的技术参考。

1 研究方法

1.1 计算模型和方法

高速列车通过隧道引起的空气流动是三维可压缩非定常湍流流动。车头、车尾处存在不同程度的边界层分离流动。在现有计算设备条件下, 进行列车过特长隧道全过程的三维流动计算几乎是不可能的。对于特长隧道而言, 隧道长度远大于隧道断面水力直径。因此, 列车过隧道所引起的三维流动可简化为一维可压缩非定常流动, 车头、车尾处的三维不定常湍流流动采用压力损失系数来近似处理。考虑到隧道内空气与列车壁和隧道壁之间存在摩擦和传热, 本文采用一维可压缩不等熵非定常流动模型^[6]。描述流动的基本方程具体如下。

连续性方程

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

动量方程

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

能量方程

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

式中, u 为隧道内空气流速; p 为隧道内空气压力; 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 为空气与列车壁的摩擦功; t 为时间。上述方程为一阶拟线性偏微分方程组。在量纲一时间与距离的 $X-Z$ 图上形成正交网格, 且离散特征方程。按广义黎曼变量特征线方法求解特征方程, 具体过程可参见文献[6]。

在本文计算车内压力中, 假设车体为刚性, 且忽略空调系统进排风的影响, 则车内压力计算公式为

$$p_i = p_o \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right)$$

式中, p_i 为车内当前时刻和前一时刻的压差; p_o 为车外与车内的压差; t 为时间; τ 为表示车辆气密性能的时间常数——气密指数值, 单位为 s。

1.2 计算参数

本文的基本参数选取如下: 高速列车编组为 16 节, 车体截面积为 12.3 m^2 , 截面周长为 13.4 m , 车体气密指数为 15 s , 典型速度为 350 km/h ; 列车壁面摩擦因数为 0.0028 , 车头、车尾压力损失系数分别为 0.0051 、 0.0200 ; 隧道截面面积为 100 m^2 , 隧道壁面摩擦因数为 0.005 。

2 特长隧道内车内外压力变化特性

2.1 不同长度隧道内车内外压力波特性

这里, 以列车速度 350 km/h , 长度 2 km 和 18 km 隧道为例, 分析列车通过两种长度隧道时头车车内外压力波动特性。图 1 表示了两种长度隧道中列车头尾端运行轨迹、压力波传播轨迹和时间归一化的头车车外压力时间历程曲线(即时间采用量纲一时间 $t' = \frac{t}{L_{TU}} a_0$, L_{TU} 为隧道长度), 由图 1 可知以下几点。

(1) 列车在这两种长度隧道内运行时, 车外最大正值出现的时刻相同。头车车外最大正值均

由尾车进入隧道后产生的膨胀波传播至车头 ($\frac{a_0 L_{TR}}{v_{TR}(a_0 - v_{TR})}$ 时刻) 引起的, 即二者出现的实际时间相等, 与隧道长度无关。式中, L_{TR} 为列车长度, v_{TR} 为列车速度, a_0 为当地气体未干扰时的声速。

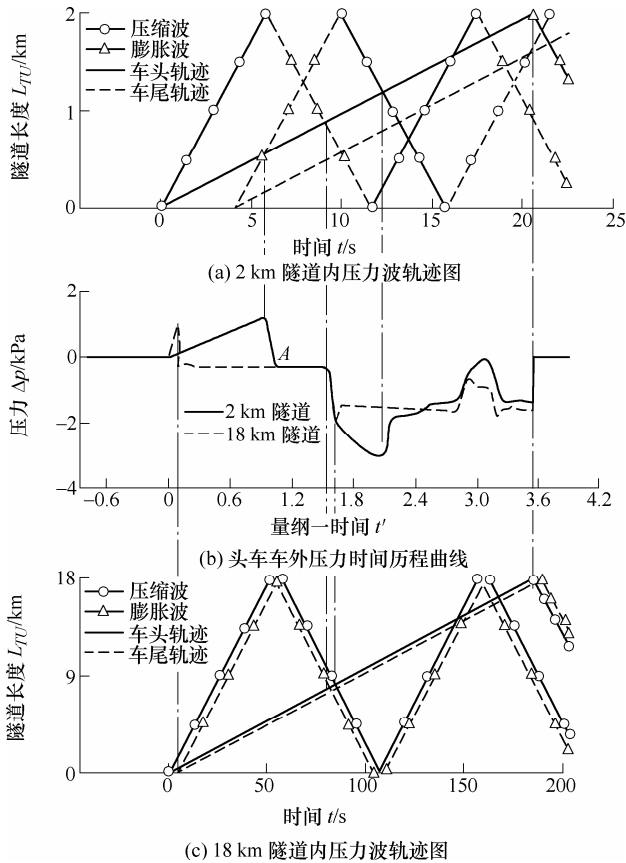


图 1 不同长度隧道内车外压力的时间历程曲线

尾车进入隧道后产生的膨胀波并在出口处形成压缩波并反射回隧道内, 当该压缩波传播至头车时产生了车外最大负压值 ($\frac{2L_{TU}v_{TR} - L_{TR}a_0}{v_{TR}(a_0 + v_{TR})}$ 时刻), 即隧道越长出现车外最大负压值的实际时间越晚。

(2) 在车尾进入隧道产生膨胀波反射到头车决定最大正压值条件下, 对于不同隧道长度, 头车车外最大正压值基本相等; 头车车外负压值是由初始压缩波在隧道出口反射回的膨胀波来决定的, 而压缩波和膨胀波沿隧道传播时受到隧道壁面摩擦作用发生能量衰减, 从而使得隧道越长头车车外最大负压值的绝对值越小。

(3) 列车在 18 km 特长隧道中运行时, 车外压力会在很长一段时间内维持在 -0.277 kPa 或 -1.556 kPa 左右, 约占运行总时间的 70%, 而 2 km 隧道内相应的稳定值在 -0.240 kPa 左右, 约占列车在隧道内运行总时间的 10%。可见, 特长隧道内的压力相对稳定的时间远大于较短隧道。

(4) 列车车外压力由相对稳定到发生突降(即图 1A 点)的量纲一时间相同, 即为列车在隧道内运行总时间的 $2v_{TR}/(a_0 + v_{TR})$ 倍。

图 2 表示了气密指数为 15 s 的列车以 350 km/h 速度通过三种长度隧道时头车车内压力时间历程曲线。由图 2 可知以下几点。

(1) 列车通过特长隧道时, 车内最大正压值出现在列车进入初期, 车内最大负压值基本出现在列车隧道内运行后期, 且运行过程中车内绝大部分时间处于负压状态。18 km 隧道内最大负压值为 -1.576 kPa , 10 km 隧道内最大负压值为 -1.362 kPa , 而 2 km 隧道内为 -0.738 kPa , 前两者分别为后者的 1.846 倍和 2.14 倍。特长隧道内车内最大负压值远大于较短隧道, 这与车外压力波动相反。原因在于: 特长隧道的压力波变化之间的稳定时间期较长, 使得车内有足够的时间对外部压力波动做出响应, 在较短隧道中的“动态”密封效果比特长隧道好, 从而导致特长隧道内车外压力波动虽小但车内压力波动反而比较短隧道车内压力要大^[4]。

(2) 在列车驶出隧道后(此处量纲一时间为 3.53), 车内压力不是迅速恢复到正常压力水平, 而是在一个时间段内逐渐地上升。列车头车驶出 18 km 隧道后, 车内压力恢复至大气压力附近的时间 (109.753 s) 约为隧道内运行总时间的 0.59 倍, 对于 10 km 隧道, 车内压力恢复至大气压力附近时间 (108.425 s) 约为隧道内运行总时间的 1.05 倍。而对于 2 km 隧道内恢复时间 (99.075 s) 则为总时间的 4.82 倍。可见, 在三种长度隧道下, 压力实际恢复时间相差不大。

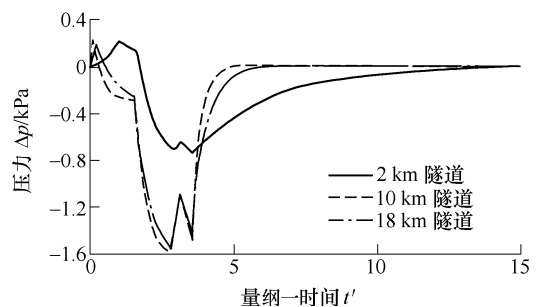


图 2 不同长度隧道中车内压力时间历程曲线

2.2 隧道长度的影响特性

图 3 表示了隧道长度对尾车车内每 1 s、3 s、10 s、30 s 和通过隧道全过程的 5 种不同时间间隔内最大压力变化量最大值的影响。图 3 中研究的隧道长度分别为 0.5 km、1.0 km、1.5 km、2.0 km、3.0 km、4.0 km、5.0 km、6.0 km、7.0 km、8.0 km、9.0 km、10.0 km、12.0 km、16.0 km 和 18.0 km。本文

选择隧道长度的原则是隧道长度大于列车长度, 且满足列车车尾进入隧道产生的膨胀波先于隧道出口产生的初始膨胀波达到列车周围。表 1 给出了 350 km/h 车速下尾车车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值的具体数值。此处列车车体气密指数为 15 s。由图 3 可知以下几点。

(1) 对于 10 km 以下的中长及长隧道而言, 除全过程内外, 其余时间间隔内车内最大压力变化量的最大值都是随着隧道长度的增大先明显下降后小

幅度的上升。

(2) 对于 10 km 以上特长隧道, 车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值均随隧道长度的增大而增大, 且变化幅度小于中长隧道。故本文以 18 km 隧道为研究对象。

(3) 对于同一长度隧道内且时间间隔小于列车通过隧道所需时间的情形下, 随着时间间隔增大, 车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值增大。

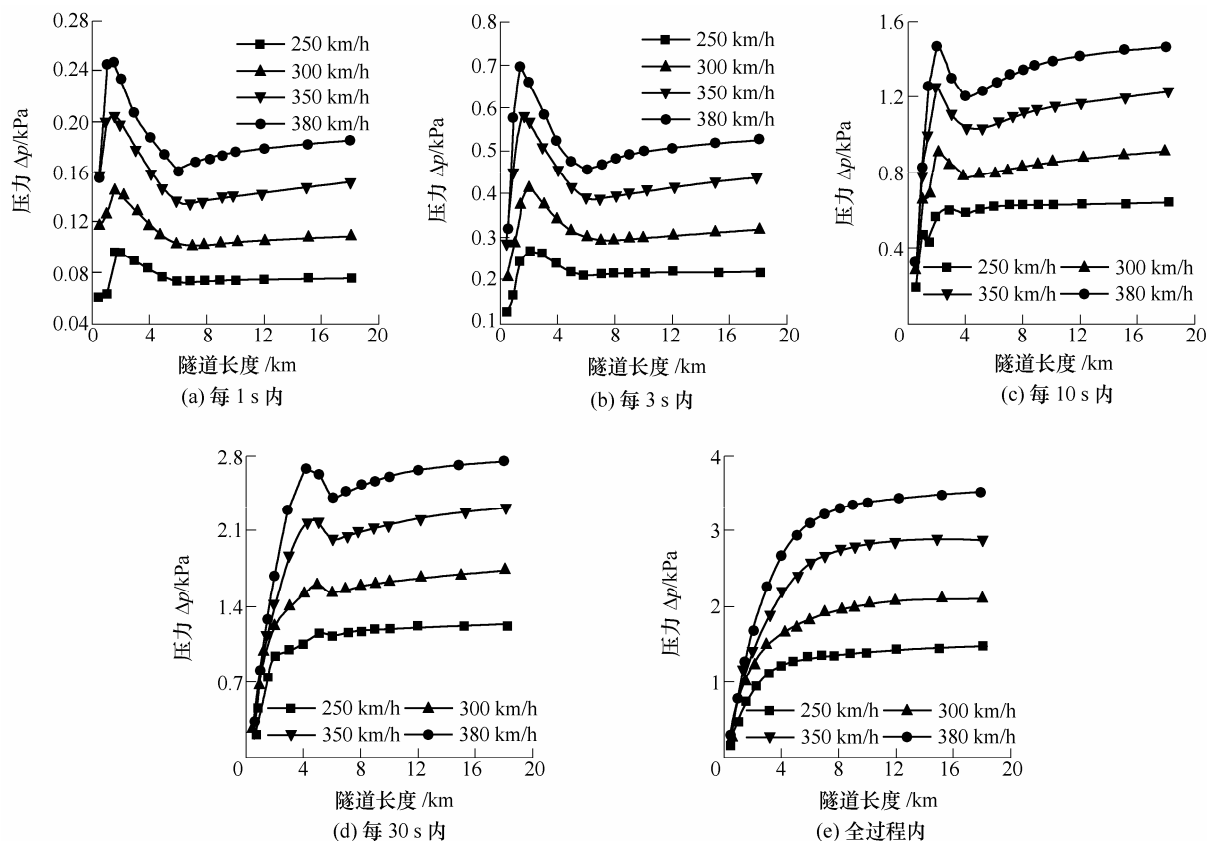


图 3 隧道长度对车内不同时间间隔内最大压力变化量最大值的影响

表 1 车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值 kPa

隧道长度/ km	时间间隔/s				
	1	3	10	30	全过程
0.5	0.158	0.285	0.294	0.294	0.294
1.0	0.202	0.449	0.771	0.771	0.771
1.5	0.206	0.585	1.001	1.129	1.129
2.0	0.197	0.569	1.270	1.420	1.420
3.0	0.176	0.503	1.114	1.861	1.861
4.0	0.160	0.454	1.024	2.186	2.186
5.0	0.148	0.416	1.024	2.206	2.415
6.0	0.137	0.384	1.064	1.999	2.555
7.0	0.136	0.389	1.093	2.055	2.656
8.0	0.139	0.396	1.113	2.094	2.724
9.0	0.141	0.403	1.131	2.127	2.774
10.0	0.143	0.409	1.148	2.142	2.807
12.0	0.145	0.415	1.167	2.195	2.849
15.0	0.149	0.425	1.196	2.251	2.876
18.0	0.152	0.434	1.221	2.299	2.885

综上, 与中长隧道相比, 高速列车在特长隧道中运行时车内不同时间间隔内最大压力变化量明显不同, 这同样显示出研究特长隧道的必要性。

2.3 车厢内压力变化沿车长的分布特性

图 4 表示了速度为 350 km/h 的列车通过 18 km 隧道时, 整列列车不同车厢内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值分布特性。由图 4 可知: 列车通过 18 km 隧道时, 从头车至尾车车内最大压力变化量的最大值均逐渐增大, 但是每 1 s 内和每 3 s 内最大压力变化量的最大值增幅不大, 每 10 s 内、每 30 s 内和全过程内不同车厢之间的差异较大, 其头尾车之间的分别相差 40.88%、44.15%和 37.86%。所以, 本文选取尾车作为研究对象。

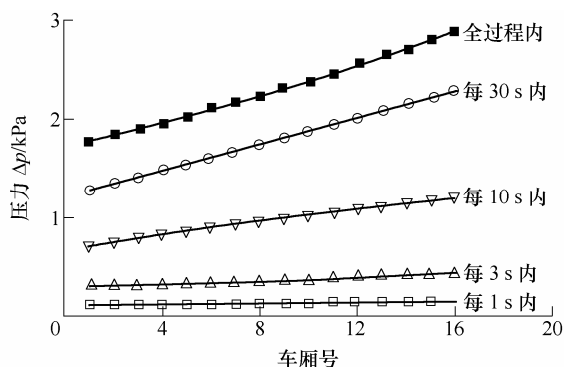


图 4 车内最大压力变化量最大值不同车厢的分布规律

2.4 气密指数的影响特性

图 5 表示了列车以不同速度通过 18 km 特长隧道时, 气密指数 τ 对尾车车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值影响。气密指数分别取 0.5 s、2.0 s、4.0 s、6.0 s、10.0 s、12.0 s 和 15.0 s 和 20.0 s。

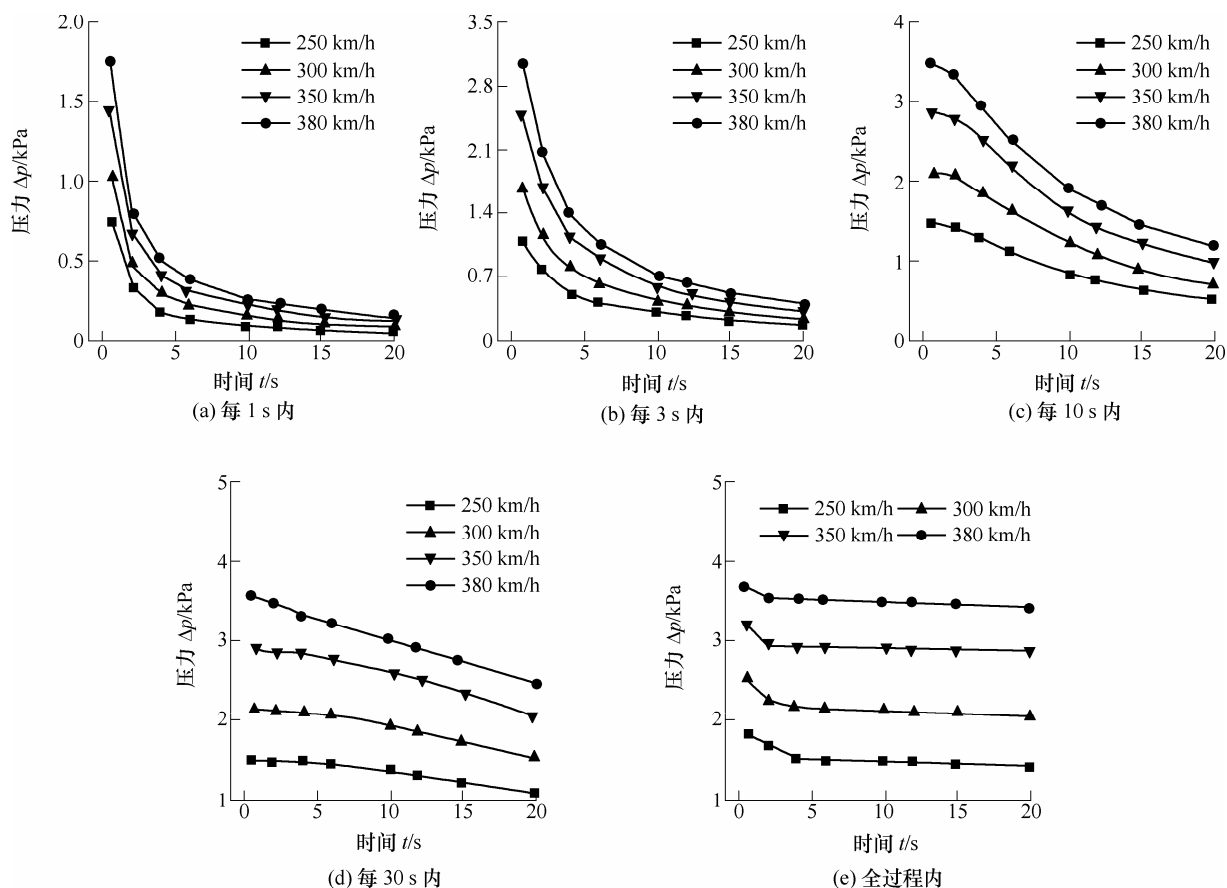


图 5 车内不同时间间隔内最大压力变化量最大值的影响

2.5 速度的影响特性

图 6 表示了列车通过 18 km 隧道时, 速度对尾车车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值影响。由图 6 可知以下几点。

(1) 随列车速度增大, 车内一定时间间隔内最大压力变化量的最大值均增大。

(2) 时间间隔越大, 速度的影响特性越明显。

由图 5 可知以下几点。

(1) 在较短时间间隔内(每 1 s 内、每 3 s 内), 非密封车辆车内的压力变化量的最大值比密封车辆车要剧烈得多, 随时间间隔的增大, 这种趋势逐渐减弱。

(2) 对密封车辆而言, 随着气密指数的提高, 不同时间间隔内最大压力变化量的最大值减小, 但当气密指数大于 10 s, 其变化速度变小。

(3) 随时间间隔越大, 气密指数的影响越明显。但是对于全过程中最大压力变化量的最大值而言, 气密指数的影响较小。气密指数在 6 s 以上时, 尾车车内全过程中最大压力变化量的最大值基本不受气密指数的影响。

目前高速列车均采用密封车体, 故下文取气密指数 6~20 s 为研究对象。

随时间间隔增大, 不同速度下车内最大压力变化量的实际差值逐渐增大。

(3) 图 6 中水平虚线为德国的多时间间隔的压力舒适度标准值。从本文算例看, 当气密指数在 6~20 s 的列车通过特长隧道时, 若要求车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值均符合德国舒适性标准, 列车速度不宜超过 250 km/h。

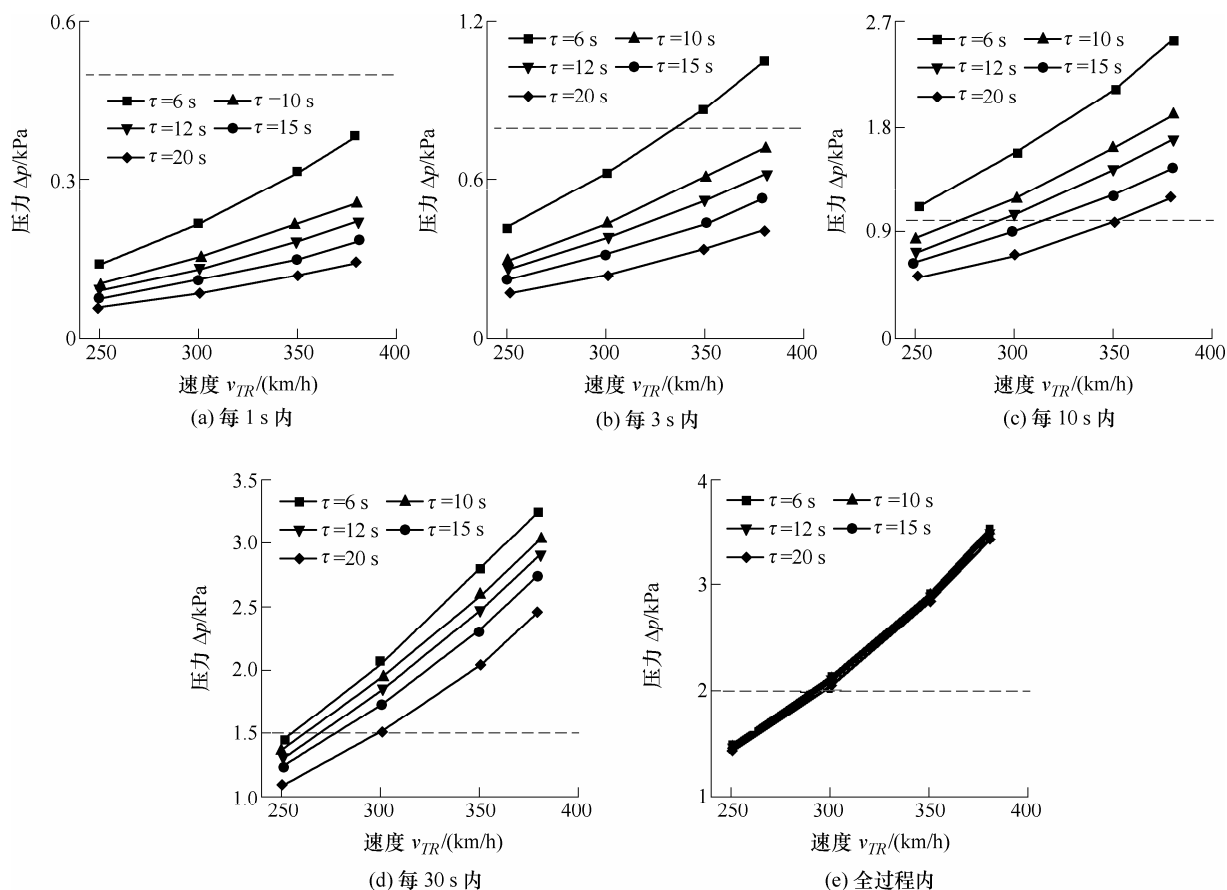


图 6 速度对车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值的影响

3 车内耳感不适性指标值变化特性

表 2 给出了德国铁路公司 (Deutsche Bundesbahn Aktiengesellschaft, DBAG) 和欧洲铁路技术研究所 (European Rail Research Institute, ERRI) 的司乘人员耳感不适标准, 即在不同时间内允许的最大压力变化值。

表 2 欧洲司乘人耳感不适标准

时间间隔/s	国家或组织规定的压力阈值/kPa	
	DBAG	ERRI
1	0.5	1.0
3	0.8	—
4	—	1.6
10	1.0	2.0
30	1.5	—
全过程	2.0	—

图 7、图 8 分别表示了气密指数为 15 s 的列车以 350 km/h 速度通过三种长度隧道时, 尾车车内不同时间间隔内的最大压力变化量的最大值与欧洲铁路技术研究所和德国铁路公司的压力阈值标准的比较。由图 7 和图 8 以及图 3 可知以下几点。

(1) 特长隧道内车内每 1 s、每 4 s、每 10 s、每

30 s 内和全过程内最大压力变化量的最大值均随隧道长度增大而增大, 这显示出特长隧道内司乘人员耳感不适性问题和中长隧道内是不同的。

(2) 与欧洲铁路技术研究所的司乘人员耳感不适标准相比, 三种长度隧道内车内每 1 s、4 s 和每 10 s 内最大压力变化量的最大值均满足其耳感不适性标准。

(3) 与德国铁路公司的司乘人员耳感不适标准相比, 在较短的时间间隔内(每 1 s、每 3 s 内), 车内最大压力变化量的最大值满足舒适度标准。在较长的时间间隔内, 车内每 10 s 内最大压力变化量的最大值已经超过舒适度标准。特长隧道车内每 30 s 内和全过程内最大压力变化量的最大值均超出舒适度标准, 其中 18 km 隧道分别超过各自舒适度阈值的 34.75% 和 30.66%, 且特长隧道内的最大压力变化量也远大于中长隧道。

综上, 长时间间隔内车内最大压力变化量的最大值已经超出阈值限制。可见由于列车通过特长隧道的时间较长, 故较长时间间隔内车内最大压力变化量是必须重视的问题, 所以国内目前采用的车内每 3 s 内的最大压力变化量的最大值, 进行列车通过特长隧道的舒适性的判断已经不再适用, 还需要考察较长时间间隔内的压力变化特性。

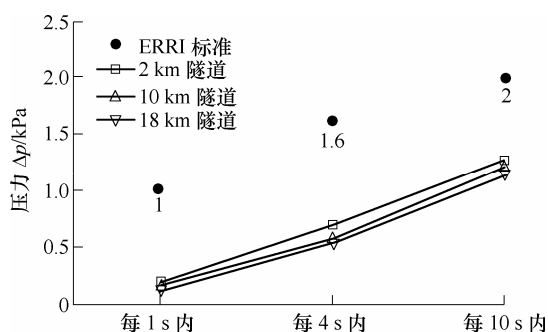


图 7 车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值比较
(与 ERRI 比较)

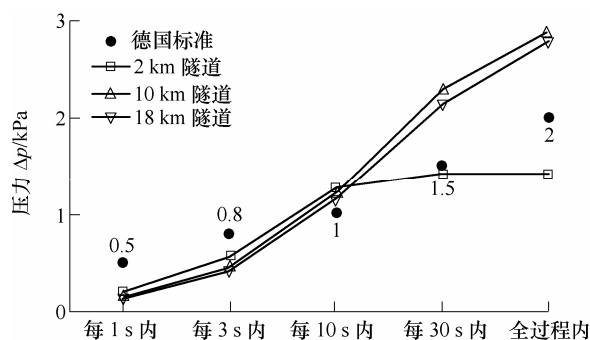


图 8 车内不同时间间隔内最大压力变化量的最大值比较
(与 DBAG 比较)

4 结 论

(1) 高速列车在特长隧道内运行时车内外最大正值基本没有变化,但是最大负压值差异较大,其车外压力具有相当长的“稳定期”,并且存在一个共同的“压力突变点”。

(2) 对于 1 s、3 s 和 10 s 的较短时间间隔而言,列车通过特长隧道时的车内最大压力变化量受隧道长度影响较小。而对于 30 s 和列车通过隧道全过程的时间间隔而言,车内的压力变化量随隧道长度的增大而增大,但隧道越长这种增幅越小。

(3) 提高车体气密指数可以降低车内不同时间间隔内的最大压力变化量的最大值,且时间间隔越大气密指数影响效果越明显。但是对于气密指数在 6 s 以上时,列车通过隧道全过程的最大压力变化量的最大值基本相等。

(4) 列车在特长隧道内运行时间较长,仅采用每 3 s 内最大压力变化量单一阈值判断压力舒适性是有局限性的,应采用包括较长时间间隔的多时间间隔标准进行评判。

参 考 文 献

- [1] GAWTHORPE R G. Pressure effects in railway tunnels[J]. Rail International, 2000, 4: 10-18.
- [2] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOBUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38: 469-514.
- [3] 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 Nanyang, MEI Yuanguai. Study on main parameters effecting pressure transients while train passing through tunnel[J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 67-69.
- [4] 王建宇,万晓燕,吴剑. 高速铁路隧道内瞬变气压和乘车舒适度准则[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(2): 1-5.
WANG Jianyu, WAN Xiaoyan, WU Jian. Air pressure transient in high speed railway tunnels and passenger comfort criteria[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(2): 1-5.
- [5] 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): 67-70.
- [6] 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.
- [7] 李人宪,赵晶,刘杰,等. 高速列车会车压力波对侧窗的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 87-92.
LI Renxian, ZHAO Jing, LIU Jie, et al. Influence of air pressure pulse on side windows of high-speed trains passing each other[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 87-92.
- [8] 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: 技术科学, 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.
- [9] 李人宪,关永久. 高速列车隧道会车压力波动问题[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 127-134.
LI Renxian, GUAN Yongjiu. Investigation of air pressure pulse when two high-speed trains passing by each other in tunnel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 127-134.
- [10] 刘堂红,田红旗. 不同外形列车过隧道实车试验的比较

分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 51-55.

LIU Tanghong, TIAN Hongqi. Comparison analysis of the full scale train tests for trains with different shapes passing tunnel[J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 51-55.

- [11] 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 evolvement of high-speed railway tunnel aerodynamic effect in China[J]. Journal of Traffic and Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 25-32.

- [12] BERLITZ T, WORMSTALL-REITSCHUSTER H J, TIEKLES T, et al. Pressure comfort meeting future demands for high speed trains[C]//World Congress on Railway Research, September 28-October 1, 2003,

Edinburgh, Scotland UK, 2003: 493-503.

作者简介: 梅元贵, 男, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高速列车空气动力学。

E-mail: meiyuangui@163.com

张成玉, 男, 1990 年出生。主要研究方向为高速列车空气动力学。

E-mail: zhangchengyu6318@163.com

周朝晖, 男, 1977 年出生, 副教授。主要研究方向为高速列车空气动力学。

E-mail: zhouch@mail.lzjtu.cn

贾永兴, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高速列车空气动力学。

E-mail: jiayongxing2004@163.com

吴明, 男, 1987 年出生。主要研究方向为高速列车空气动力学。

E-mail: wuming2650@yahoo.com.cn