



隧道长度对高速列车交会压力波的影响研究

王一伟^{①*}, 杨国伟^②, 黄晨光^①, 王伟^③

① 中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100190;

③ 中国科学院力学研究所, 北京 100190

* E-mail: wangyw@imech.ac.cn

收稿日期: 2010-12-23; 接受日期: 2011-06-29

国家科技支撑计划(批准号: 2009BAG12A03)和国家重点基础研究发展计划(“973”)(批准号: 2011CB71100)资助项目

摘要 高速列车隧道交会空气压力波的幅值对于车体结构及气密强度设计有非常重要的意义. 我国的工程条件下需要对该工况对应的最不利隧道长度以及隧道长度对列车表面压力变化幅度的影响进行估计. 本文通过理论分析研究了隧道压力波的形成和峰值影响因素, 推导了压力极值对应的最不利隧道长度关于列车长度、运行马赫数的表达式. 同时研究了隧道长度对最大负压值变化趋势的影响, 并得出了负压极值快速变化所对应的临界长度区间. 随后建立了二维的隧道交会数值模拟方法, 并对典型工况下不同长度隧道内的列车交会进行了计算, 其结果很好的验证了理论分析的预测表达式, 证明前述表达式能够有效地应用于实际工程设计当中.

关键词

隧道交会
空气压力波
隧道长度
数值模拟

1 引言

当今, 高速列车的速度可与轻型飞机巡航速度和喷气式飞机的起飞速度相当, 与其相关的空气动力学问题不容忽视^[1-3]. 除了明线常规运行工况, 还要面临明线交会、隧道行车和交会等一系列特殊工况. 在这些工况中, 列车的气动性能较之明线状态有明显改变, 受力情况显著恶化. 特别是两列车在隧道内交会时, 各自的头尾都会在进入隧道时形成压力波, 再加上两车交会时引发的交会压力波干扰, 各种波在隧道内不断的传播反射并相互叠加, 形成复杂而又强烈的压力波动.

因此对于列车的车体设计, 获得隧道运行、交会工况下车体表面的压力变化幅值非常重要. 从我国高速铁路发展的实际情况来看, 隧道的截面积、头型线间距已经基本确定, 而隧道长度分布在 100 米甚至

十几公里的一个较大范围内^[4], 列车在不同长度隧道内运行时压力波变化会有较大差别, 列车进行车体设计时, 难以对线路中所有隧道均进行分析. 因此在我国现有线路条件下, 寻找最不利隧道长度与列车长度、速度等变量的关系, 并研究隧道长度对交会压力波的影响, 能够为列车设计提供较为统一的设计标准, 对于列车运行安全评估、车体设计等都有非常重要的意义. 但由于实际关注问题的差异, 国外学者对于此方面研究较少, 国内田红旗^[5]、梅元贵^[6]等学者在各自专著中给出了定性的结论, 王建宇等人^[7]研究分析了压力波传播、反射和叠加过滤, 并提出了单线隧道相应于压力变化不同情况的“最不利隧道长度”的计算图表及公式. 因此从目前来看, 国内对于隧道交会条件下的最不利长度研究还亟待进行.

另一方面, 对于隧道空气动力学的研究主要可以采用理论分析、实车试验^[3, 8]、动模型试验^[9, 10]以

及数值计算等方法. 数值计算方法相比试验成本低, 开发周期短, 通过更改参数设置, 很容易对多种工况进行研究, 能够对工程设计起到强有力的支撑作用. 根据研究目的和所解决问题的不同, 可将模型简化为一维可压缩非定常流动, 或者采用二、三维可压缩非定常湍流流动模型进行模拟. 目前, 特征线法是采用一维模型分析隧道空气动力学问题的主流方法之一^[6, 11], 它将复杂的偏微分方程简化为双曲型方程进行求解, 计算工作量很小. 在求解列车在隧道内运行、隧道交会、隧道内辅助坑道效应等问题时得到了广泛的应用, 是一种准确、经济、合理的办法. 随着计算机性能和计算技术的发展, 计算量非常大的二维甚至三维模型也逐渐得到应用^[12-15]. 通过求解列车通过隧道以及隧道内交会的流场, 可以得到列车附近的流动细节, 包括列车断面方向空间流动以及列车局部结构的受力状况, 这些更加详细的结果在进行列车局部强度设计时能起到非常重要的作用. 除此之外, 还有一些其他方法可以用于本问题的求解, 包括利用基于声学理论的方法来分析缓冲结构的效果等^[16, 17].

基于以上综述, 本文将首先从理论分析角度研究隧道长度对压力波的影响, 推导最不利隧道长度、临界长度区间与列车长度、车速等的关系. 为了对该关系式进行验证, 将建立二维简化的计算方法用以进行不同隧道长度条件下的隧道交会模拟, 将取得的结果进行分析并与理论分析结果进行对比, 以最

终确定隧道长度影响及上述表达式.

2 理论分析

高速列车进入隧道时类似于活塞进入汽缸的情况, 空气流动由于隧道壁面的限制而被阻滞. 车头进入时会产生压缩波, 车尾进入隧道时会产生膨胀波, 压力波传播的过程中隧道内空气压力随之发生变化, 并且在隧道两端多次反射和传递, 使得隧道内及车身表面产生复杂的压力变化. 如果隧道具有临界长度且两列车同时进入隧道, 将发生压力波显著叠加的不利情况, 该情况下的最不利载荷可以用来考虑车体在特殊条件下的结构强度及气密强度设计边界.

2.1 影响因素

隧道交会过程中, 影响列车表面压力变化的因素主要有: 1) 列车头部进入隧道的初始压缩波及其在隧道口反射形成的膨胀波(如图 1(a)和(c)); 2) 列车车尾进入隧道时产生的初始膨胀波及其反射形成的压缩波(如图 1(b)); 3) 两列车交会时引起的相互表面压力变化, 由于单列车隧道中行驶时车身表面主要为负压, 因此交会时表面压力主要呈下降趋势(如图 1(d)).

2.2 最不利长度

由于压力波以音速传播, 在长隧道中来回运行及反射的周期较长, 过程之中能量会有所衰减; 短隧道中压力波的能量损失比较小, 压力波动过程更剧

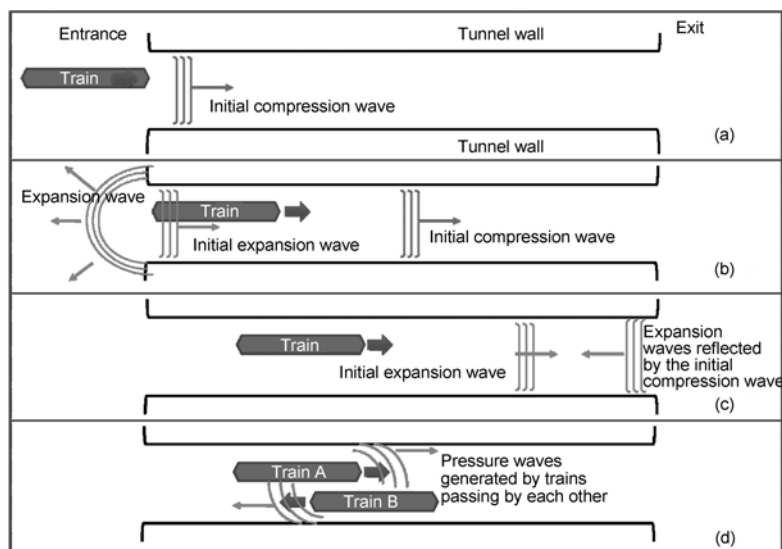


图1 列车隧道交会影响因素示意图

烈; 但当隧道长度过短时, 列车头尾产生的压力波不会充分叠加, 压力的波动程度则会大大缓解. 因此对于列车压力最小值, 如果列车 A 车头初始压缩波到对面隧道口反射成为的膨胀波, 刚好与对面列车 B 车尾初始膨胀波叠加形成更强的膨胀波, 同时作用在交会的两列车上, 即前述的三个因素同时作用, 此时列车表面压力最小, 即可求出压力最小值对应的最不利长度. 考虑两等长列车等速同时进入隧道的简单情况, 可得

$$\frac{L_t}{c} = \frac{L_v}{v}, \quad (1)$$

其中 L_t 为最不利隧道长度, c 为声速, L_v 为列车长度, v 为列车运行速度.

考虑无量纲化的列车长度, 可得

$$\frac{L_t}{L_v} = \frac{1}{M}, \quad (2)$$

其中 $M=v/c$, 即列车运行马赫数. 因此简单情况下, 最不利隧道长度可表达为列车长度与马赫数的简单关系式.

此外, 对于列车表面压力最大值, 由于压缩波带来的压力上升是逐渐增加的, 能使初始压缩波作用最充分的长度即为压力最大值对应的最不利长度. 因此如果当列车 A 产生的压缩波通过整个隧道时, 列车 B 产生的膨胀波刚好形成, 此时压缩波既可作用充分(如图 2). 如果隧道更短则压缩波未作用充分, 达不到压力最高值; 如果隧道更长, 则压缩波在更长隧道中会有所衰减, 因此压力也会略有下降. 从以上分析可以推出, 最大压力对应的最不利长度仍然满

足因素 1) 和 2) 叠加, 即同样能够推出公式(2).

综上所述, 在两等长等速列车同时进入隧道的情况下, 最大和最小压力对应的最不利长度为同一值, 即满足公式(2).

2.3 临界长度

除了最不利长度之外, 由于隧道交会过程中通常负压起主导作用, 因此应对车尾膨胀波和列车交会两因素的影响另外重点进行分析, 首先考虑当列车车尾膨胀波到达本车车头时, 本车车尾与隧道入口距离 x 满足

$$\frac{x+L_v}{c} = \frac{x}{v} \Rightarrow x = \frac{ML_v}{1-M}. \quad (3)$$

对于 2.1 节中的因素 2) 和 3) 的相互作用, 有如下几个典型长度情况:

如当本列车尾膨胀波到达车头时, 车头恰好驶出隧道(如图 3(a)), 此时有

$$L_{t1} = L_v + x \Rightarrow \frac{L_{t1}}{L_v} = \frac{1}{1-M}. \quad (4)$$

隧道长度小于此长度的条件下, 由于列车车体已局部驶出隧道, 列车尾膨胀波将不能充分作用在本车车体.

如当本列车尾膨胀波到达车头时, 车头刚好与对面来车尾部平行(如图 3(b)), 此时有

$$L_{t2} = L_v + 2x \Rightarrow \frac{L_{t2}}{L_v} = \frac{1+M}{1-M}. \quad (5)$$

隧道长度小于此长度的条件下, 尾膨胀波则不能与列车交会两个因素充分叠加.

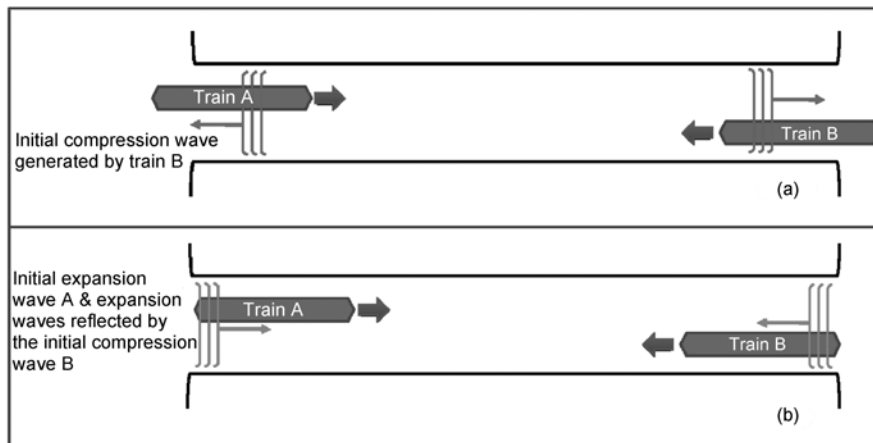


图 2 最不利长度条件下压力波叠加示意

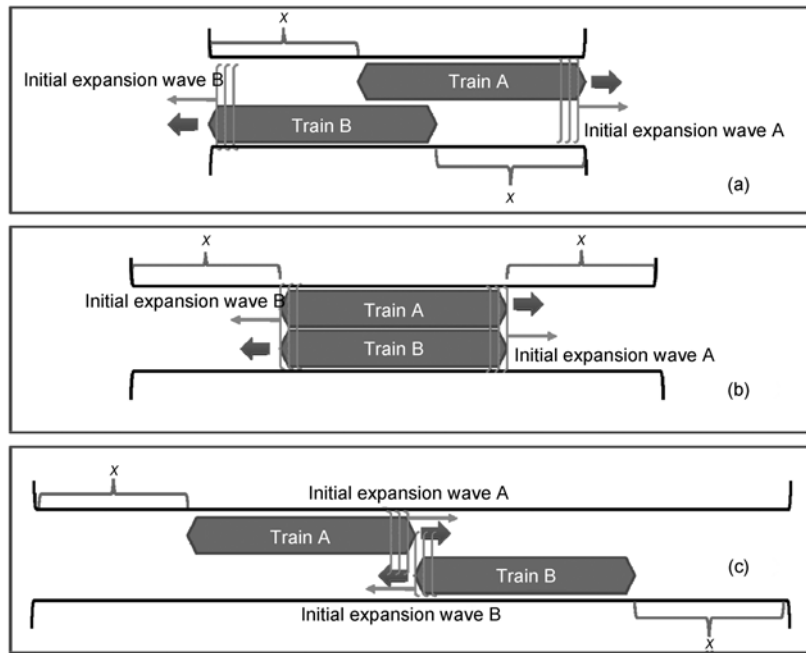


图 3 典型临界长度条件下压力波发展示意

c) 如当本列车车尾膨胀波到达车头时, 两列车车头刚好相遇(如图 3(c)), 此时有

$$L_{t3} = 2L_v + 2x \Rightarrow \frac{L_{t3}}{L_v} = \frac{2}{1-M}. \quad (6)$$

大于此长度, 列车交会时, 尾膨胀波已充分作用.

因此, 隧道长度小于公式(3)或(4)时, 压力波造成的列车表面压力下降不严重; 当隧道长度大于公式(6)对应长度时, 隧道交会处于较不利情况, 需充分重视; 公式(3)~(6)对应区间即为列车交会压力最小值的临界区间.

综上所述, 考虑与我国列车运行最接近的情况, 两列 16 列编组(约 400 m 长)的列车同时以 300 km/h 相向进入隧道, 最不列隧道长度为 1632 m, 公式(4)与公式(6)之间对应的临界区间为 529~1060 m, 此结果将在后面两节予以证明.

3 数值模拟方法

针对上述问题, 本文将利用 CFD 方法进行结果验证. 由于三维验证工作的计算量非常巨大, 因此建立简化的二维隧道会车计算方法, 对不同隧道长度条件下等速会车进行计算, 以验证第二节中的结果. 考虑到隧道长度影响的控制因素是初始压缩波和膨

胀波, 因此二维的数值模拟能够对其进行描述. 另一方面会车效应主要源于车头和车尾在水平剖面中的压力分布, 因此在列车头型长度和线间距接近的情况下, 用二维方法近似进行描述也是能够适用的.

3.1 主控方程

对高速列车进行数值模拟采用的可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}). \end{aligned} \quad (8)$$

对最后一项中的 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, 需要采用一定的湍流模式与流场平均量联系起来, 将方程组封闭. 根据 Boussinesq 假设有

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij}. \quad (9)$$

基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 令 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, C_μ 为常数 0.0845, 增加的湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon, \quad (11)$$

其中 α_k , α_ε 是 k , ε 的有效湍流 Prandtl 常数的倒数,

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad (12)$$

其中 $\eta \equiv S_k / \varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$. 湍流粘性系数满足:

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon} \mu} \right) = 1.72 \frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{v}^3 - 1 - C_v}} d\tilde{v}, \quad (13)$$

其中 $\tilde{v} = \mu_{\text{eff}} / \mu$, $C_v \approx 100$.

另外从试验中得来的, 包括空气、水的基本湍流情况下的模型常数为

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68. \quad (14)$$

3.2 求解方式及计算条件

对于上述主控方程, 采用有限体积法进行求解. 由于要考虑两列车的相对运动, 因而计算网格采用多块划分的办法, 每列车周围建立一个长方形空间生成网格, 再建立明线外空间或者隧道空间网格. 利用滑移网格来实现不同块之间的相对运动, 同时利用层状网格方法维持网格大区域的不变性^[18]. 整个区域总网格和车头附近局部网格见图 4 和 5. 由于隧道

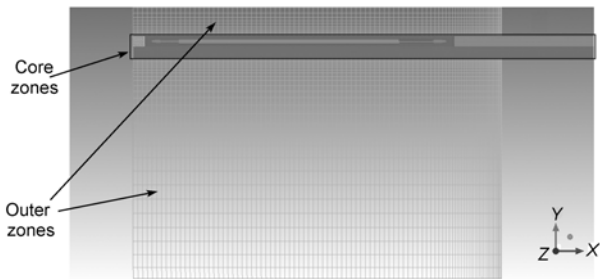


图 4 区域总网格

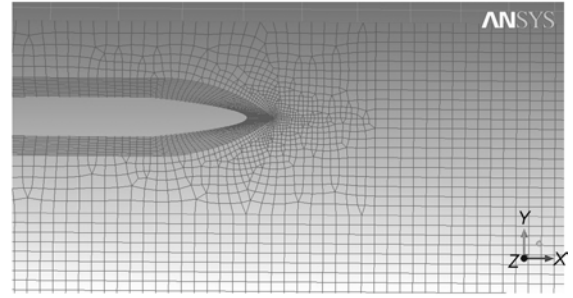


图 5 车头附近网格

外空间网格相对核心区网格可以相对滑动, 因此很容易通过移动外围网格建立起不同隧道长度的计算模型, 用以后期的计算比较.

会车计算采用地面不动, 两列车以真实速度相对运行的方式设定计算条件. 计算时列车设为滑移壁面, 以车速 300 km/h 相向运行并同时进入隧道; 地面及隧道壁面为固定无滑移壁面; 远场给定压力为一个大气压. 计算时在头车、中间车厢、尾车车体处分别取测点记录该点压力变化, 同时每时刻搜索该时刻头车、中间车厢(除头、尾车外的中间十四节车厢统称为中间车厢)和尾车的最大压力和最小压力值, 分别记录.

4 数值模拟结果

4.1 结果对比验证

以前述数值模拟方法计算典型隧道长度(2000 m)结果, 图 6 为列车进入隧道时产生压缩波情况, 图 7 为两列车交会时空间流场压力下降情况. 得到的头尾车典型测点随时间变化曲线如图 8, 为了对结果进行验证, 利用在线的 Thermo-tun 软件计算了类似工况的头尾车测点压力曲线如图 9, 典型的三维计算结果如图 10. 三者对比, 压力变化规律基本相符: 起始阶段, 压力最大值发生在头车, 而尾车未出现压力升高; 膨胀波作用下头车测点压力最小值低于尾车测点; 第二次膨胀波作用时尾车仍出现较低压力, 而头车压力降低相对不明显.

由于车头形状、阻塞比等参数和测点位置在计算中都不能做到完全相同, 因此得到的幅值略有差别, 但对于隧道长度带来的规律性变化没有影响, 因此该结果也说明了二维方法用于验证前述理论推导结果是可行的.

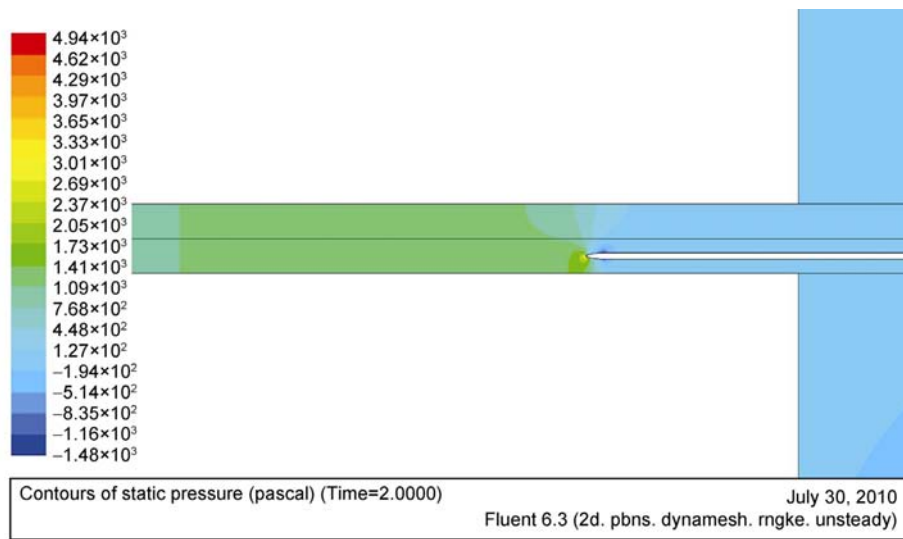


图 6 列车初入隧道时压力场

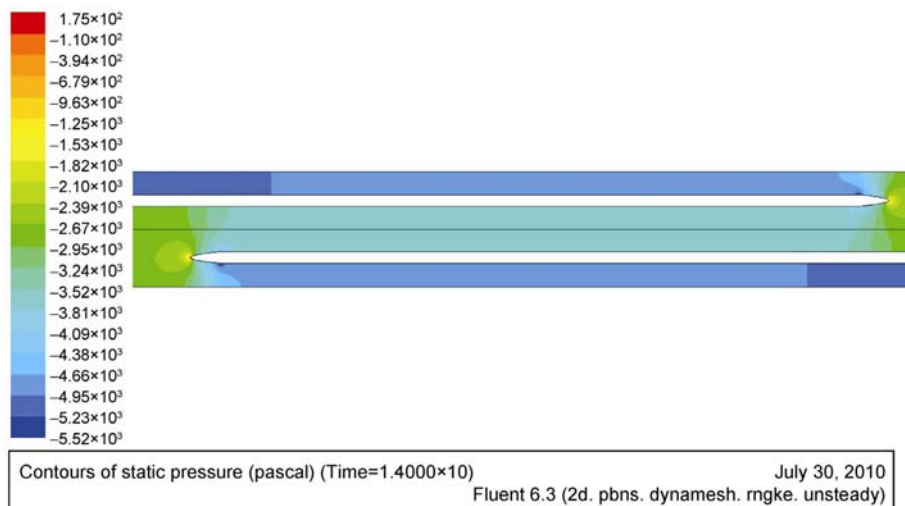


图 7 列车隧道交会时压力场

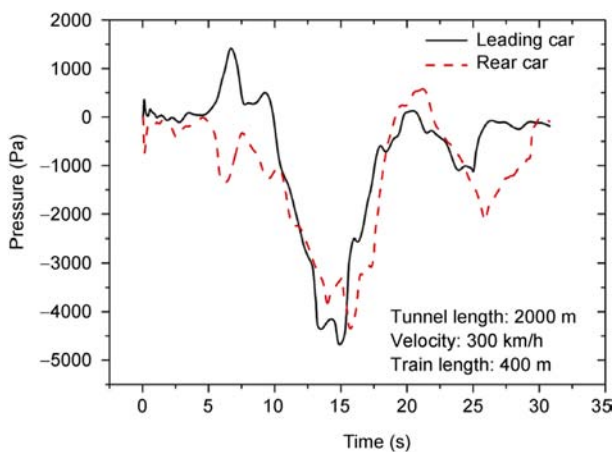


图 8 二维计算 2000 m 会车典型点压力曲线

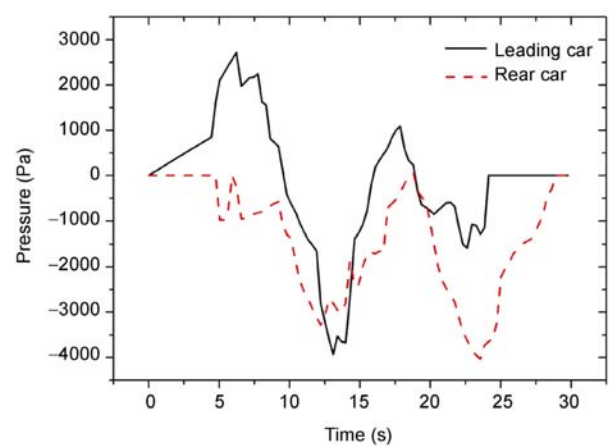


图 9 一维计算 2000 m 会车典型点压力曲线

4.2 不同隧道长度结果对比

利用上述方法开展了从 500~2000 m 不同隧道长度的会车计算, 能够得到一组不同位置表面压力最大最小值随时间变化的曲线. 例如 600~800 m 的头车压力最小值曲线如图 11, 中间车厢压力最小值曲线如图 12.

将不同隧道长度的压力最大最小值画在同一曲线上, 如图 13~17, 由于尾车受初始压缩波影响强烈, 因此几乎不出现正压最大值, 因此未完全做出.

以代表性最强的中间车厢压力最小值为例(如图 13), 最不利隧道长度出现在 1600 m 左右, 与前文估计的 1632 m 符合. 而图 14~17 中最高压力和最低压力极值也几乎都出现在 1600 m 附近, 说明数值模拟较好的验证前文中理论分析最不利长度结果.

对于图 13 和 15 中压力极小值曲线, 数值在 500~

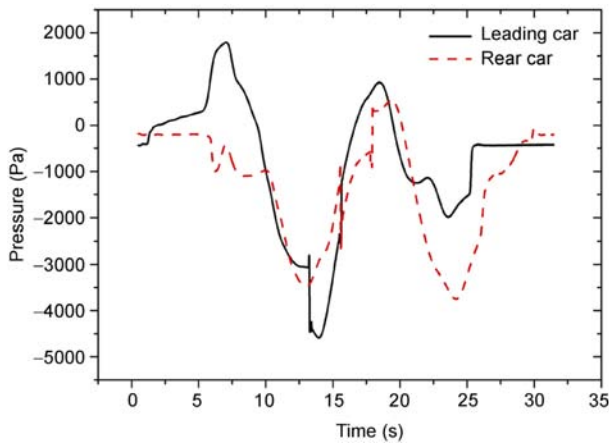


图 10 三维计算 2000 m 会车典型点压力曲线

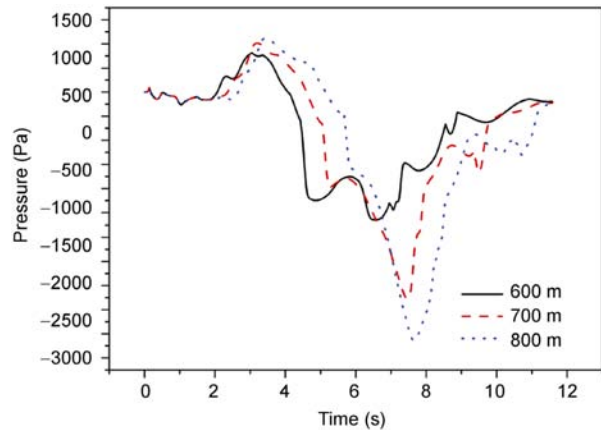


图 11 头车最小值曲线

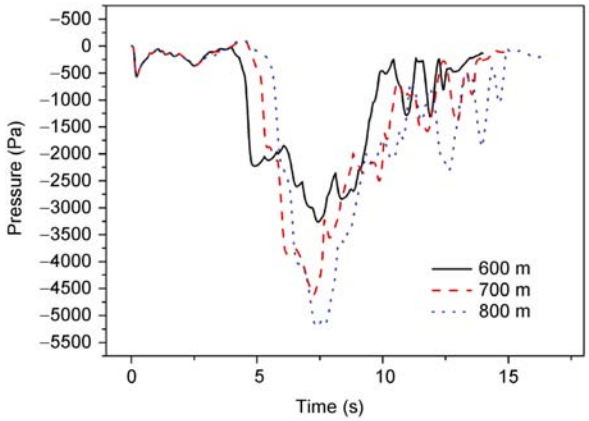


图 12 中间车厢最小值曲线

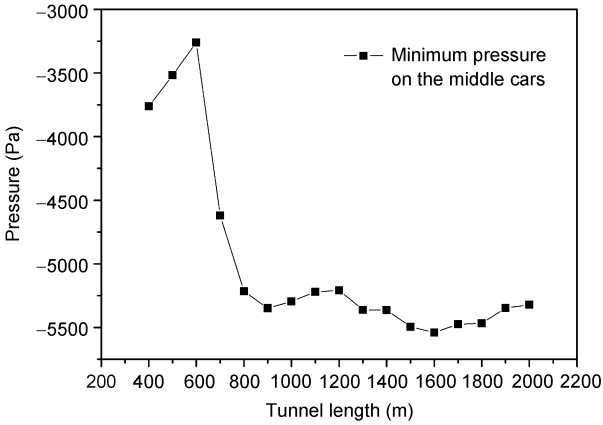


图 13 不同隧道长度对应中间车厢压力最小值

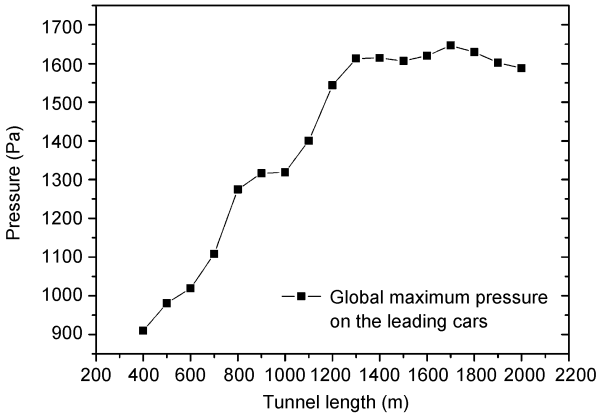


图 14 不同隧道长度对应头车压力最大值

1000 m 之间变化迅速(不同长度的压力波形如图 11 和 12), 也与理论分析中 529~1060 m 之间为临界长度这一结论符合.

4.3 最不利长度下压力场演化分析

在 1600 m 最不利隧道长度下, 列车头车一测点压力曲线如图 18 所示, 对于典型时刻有如下分析(压力场云图见图 19, 标号与图 18 对应):

- 1) 列车头部已进入隧道, 产生初始压缩波, 但还未传至对边列车头部, 因此测点压力接近水平;
- 2) 对面来车初始压缩波传播至本车头部, 测点压力开始升高;
- 3) 对面来车的初始压缩波在本侧隧道口反射形成膨胀波, 与本车尾车膨胀波叠加, 接近传播至本车头部, 测点压力处于极大值;
- 4) 膨胀波前沿传播过测点, 压力迅速下降;
- 5) 两车发生交会, 压力进一步下降至极小值;
- 6) 两车离开, 同时原膨胀波反射回形成压缩波导致测点压力开始迅速上升;

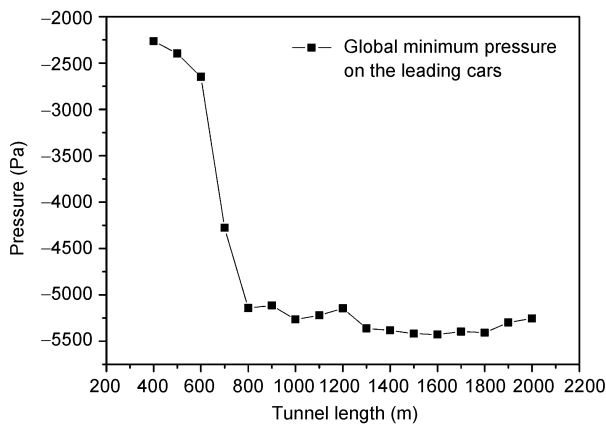


图 15 不同隧道长度对应头车压力最小值

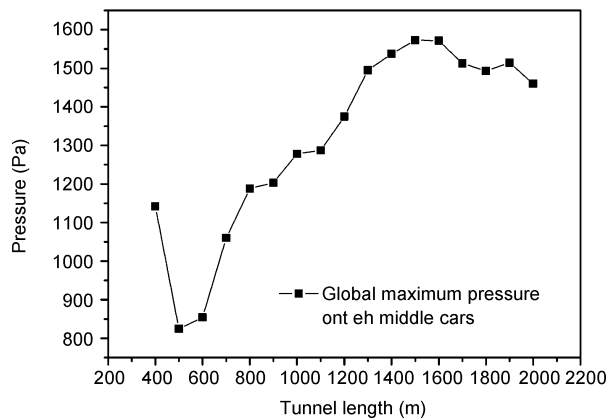


图 16 隧道长度对应中间车厢压力最大值

7) 两车完全离开, 压缩波传播过测点, 形成一个相对较小的峰值。

随后由于初始压力波已经耗散削弱, 因此列车表面压力变化趋于平缓。曲线峰、谷值对应时间差与压力波在整条隧道内传播时间(约 4.7 s)接近, 这也反映了压力波的传播和反射在列车隧道交会压力变化中是起主导作用的。

5 结论

鉴于我国铁路的实际情况, 隧道长度为列车隧道交会压力波分析中的最不确定因素, 且对压力波幅值影响较大。

本文首先通过对列车隧道会车的影响因素进行理论分析, 推导出了最高压力与最低压力对应的最

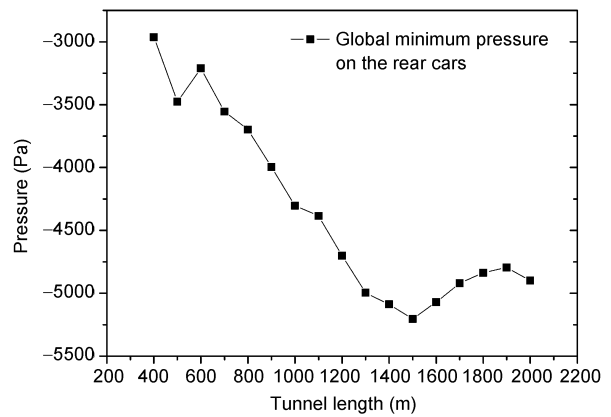


图 17 隧道长度对应尾车压力最小值

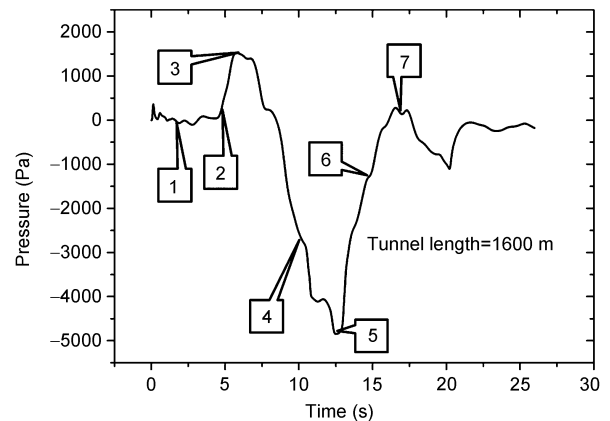


图 18 隧道交会列车头车测点压力变化曲线 (隧道长度 1600 m)

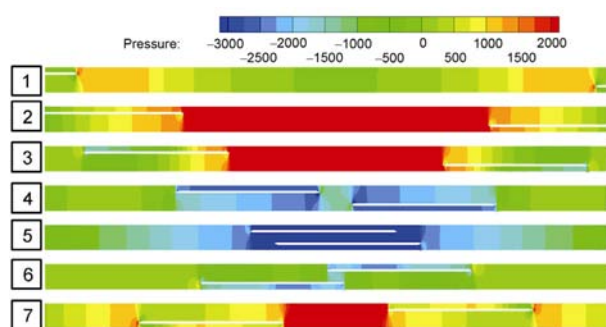


图 19 隧道交会不同时刻压力场云图(隧道长度 1600 m)

不利长度统一表达式, 即简单条件下最不利隧道长度仅与车长和马赫数相关, 两列车同时进入隧道的情况下压力最大最小值对应最不利隧道长度均约为 1632 m.

同时也推导出了列车压力最小值变化较快的临界区间对于常见的 16 辆编组 300 km/h 等速会车, 最小值临界区间为 525~1060 m, 当隧道长度大于 1060 m 时, 压力波会引起较严重的负压, 需在设计中加以注意.

之后, 通过建立的二维动网格隧道交会模拟方法, 开展了不同隧道长度下的会车计算, 不同位置的压力极值对应的最不利长度均为 1600 m 附近, 同时压力最小值在 500~1000 m 变化迅速, 因而很好的验证了前述理论分析的结果.

由于本文给出的表达式形式简单且为无量纲公式, 因此便于应用到隧道设计以及动模型试验工况设计等方面. 此外, 如对公式进一步推广, 较容易得到两车延迟会车条件下的结果, 且最不利隧道长度下的压力极值应与本文给出数值接近.

参考文献

- 钱立新. 世界高速铁路技术. 北京: 中国铁道出版社, 2002
- Schetz J A. Aerodynamics of high-speed trains. *Annu Rev Fluid Mech*, 2001, 33: 371-414
- Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Prog Aerosp Sci*, 2002, 38: 469-514
- 铁道部第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范. 北京: 中国铁道出版社, 2005
- 田红旗. 列车空气动力学. 北京: 中国铁道出版社, 2007
- 梅元贵, 周朝晖, 许建林. 高速铁路隧道空气动力学. 北京: 科学出版社, 2009. 206-208
- 王建宇, 万晓燕, 吴剑. 隧道长度对瞬变压力的影响. *现代隧道技术*, 2008, 45(6): 1-4
- 万晓燕, 吴剑. 时速 200 km 动车组通过隧道时空气动力学效应现场试验与研究. *现代隧道技术*, 2006, 43(1): 43-48
- Baker C J, Dalley S, Johnson J, et al. The slipstream and wake of a high-speed train. *Proc Instn Mech Engrs Part F*, 2001, 215: 83-99
- 赵文成, 高波, 王英学, 等. 高速列车通过隧道时压力波动过程的模型试验. *现代隧道技术*, 2004, 41(6): 16-19
- Thermo Tun-Software. <http://www.thermotun.com/index.htm>
- Ricco P, Baron A, Molteni P. Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel. *J Wind Eng Ind Aerod*, 2007, 95: 781-808
- Chen R L, Zeng Q Y, Zhong X G, et al. Numerical study on the restriction speed of train passing curved rail in cross wind. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52(7): 2037-2047
- Sun Z X, Song J J, An Y R. Optimization of the head shape of the Crh3 high speed train. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53(12): 3356-3364
- 王一伟, 王洋, 安亦然, 等. 基于 LBM 方法的高速列车空气动力学计算. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(11): 1795-1805
- Howe M S. On the infrasound generated when a train enters a tunnel. *J Fluid Struct*, 2003, 17: 629-642
- 赵宇, 高波, 张兆杰. 隧道压力波的三维数值模拟. *路基工程*, 2007, 4: 12-14
- Fluent Inc. FLUENT 6.3 User's Guide. <http://www.fluent.com>