

不同速度等级列车对长大隧道初始压缩波传播特性影响初探

张 昭*, 侯文斌

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年10月8日; 录用日期: 2024年10月18日; 发布日期: 2024年12月10日

摘 要

文章基于三维仿真软件, 采用某在研列车头型(鼻长15 m)三编组列车及隧道净空面积为 100 m^2 的10 km长大隧道计算模型, 对列车速度等级分别为350 km/h、400 km/h和450 km/h高速铁路隧道初始压缩波传播过程进行CFD数值模拟。研究表明, 350 km/h和400 km/h速度等级下压缩波在传播过程中发生波前变形且出现波动的局部峰值, 压力波动稳定后其幅值由于摩擦效应随传播距离增大而减小, 呈现“激化”特征, 未出现“衰减”。其次, 450 km/h速度等级下压缩波最大压力梯度值呈现先增大后减小的趋势, 即该速度等级下压缩波已呈现出先“激化”后“衰减”的特征, 其最大“激化”距离出现在7 km左右, 即5 km和9 km之间。最后, 随着列车速度等级的提高, 隧道内同一测点的压力梯度最大值均不同程度地增大; 较350 km/h速度等级而言, 400 km/h及450 km/h速度等级列车在长大隧道初始压缩波传播过程中压力梯度增大趋势逐渐增大, 并在7 km左右增大趋势逐渐减小, 这可能与各速度等级对应的最大“激化”距离范围内压力梯度的主导因素由非线性效应逐渐向摩擦效应倾斜有关。研究结果可为初始压缩波的传播及其畸变规律提供一定参考。

关键词

三维仿真, 初始压缩波传播, 不同速度等级, 长大隧道

Preliminary Study on the Influence of Trains with Different Speed Classes on the Propagation Characteristics of Initial Compression Waves in Long Tunnels

Zhao Zhang*, Wenbin Hou

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

*通讯作者。

文章引用: 张昭, 侯文斌. 不同速度等级列车对长大隧道初始压缩波传播特性影响初探[J]. 力学研究, 2024, 13(4): 167-178. DOI: 10.12677/ijm.2024.134017

Abstract

Based on the 3D simulation software, this paper adopts the calculation model of a 10 km long tunnel with a train head type (nose length 15 m) and a tunnel headroom area of 100 m². The initial compression wave propagation process of high-speed railway tunnels with train speed classes of 350 km/h, 400 km/h, and 450 km/h was simulated by CFD. The results show that the compression waves at 350 km/h and 400 km/h velocity classes have wave-front deformation during the propagation process. After the pressure fluctuation is stabilized, the amplitude of the compression waves decreases with the increase of the propagation distance due to the friction effect, and the local peak value of the fluctuation appears, showing the feature of “intensification”, and there is no “attenuation”. Secondly, the maximum pressure gradient value of the compression wave at the speed level of 450 km/h presents a trend of first increasing and then decreasing. That is, the compression wave at this speed level has shown the characteristics of first “intensification” and then “attenuation”, and its maximum “intensification” distance is about 7 km, that is, between 5 km and 9 km. Finally, with the increase of train speed grade, the maximum pressure gradient of the same measuring point in the tunnel increases to different degrees. Compared with the speed class of 350 km/h, the pressure gradient of 400 km/h and 450 km/h trains gradually increases during the initial compression wave propagation in the long tunnel, and the increasing trend gradually decreases around 7 km. This may be related to the gradual change from a nonlinear effect to a frictional effect of the dominant factor of pressure gradient in the range of maximum “intensification” distance corresponding to each velocity class. The results can provide some reference for the propagation and distortion of the initial compression wave.

Keywords

3D Simulation, Initial Compression Wave Propagation, Different Speed Classes, Long Tunnels

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在高速列车驶入隧道时,对隧道内的空气进行挤压,使得一部分空气通过列车与隧道间的环状空间向外逸出,大部分空气受到列车挤压向前流动,形成初始压缩波。在隧道入口附近的初始压缩波生成之后,压缩波将会沿列车运行方向在隧道内向前传播。高速列车隧道内压缩波在传播过程中会受到气体本身性质、隧道壁面和轨面条件等多种因素的共同影响,使其传播速度并非定值,近似等于当地声速。由于传播过程中传播速度的不同,压缩波波前会产生一定的变形,即波前压力梯度最大值会随着传播距离的变化而变化。按照传统的认识,由于摩擦效应,压缩波传播过程中其幅值和波前压力梯度最大值都应该逐渐减小,但实测结果表明,当隧道足够长时,波前压力梯度最大值会出现先逐渐增大然后再减小的现象,有些学者将其称作隧道内压缩波传播过程中的非线性效应[1]-[5]。

非线性效应导致的惯性变陡倾向于增加梯度,这是因为波的前面通过静止的空气传播,而波的后面通过与波移动方向相同的空气传播(后面的波的速度相对于波前面的速度更大,压力波的后面完全赶上了前面,压力波就会变陡)。在板式轨道隧道中,“激化”作用占主导地位,图1表示板式轨道中的压力梯

度“激化”现象。当列车速度增加,或阻塞比增加时,坡度会变陡。虽然初始压缩波的梯度随列车速度的三次方成正比,但经过波的“激化”作用后,隧道出口的梯度变化甚至大于列车速度的三次方。

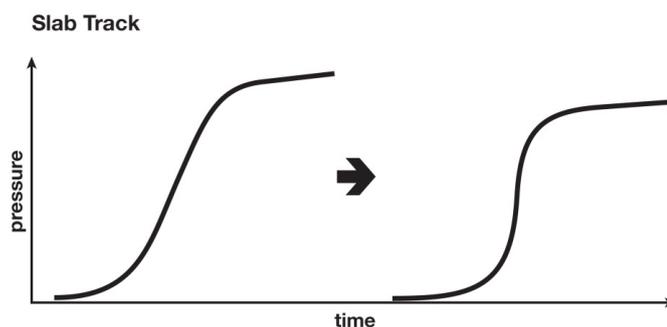


Figure 1. The pressure gradient increases gradually during the propagation
图 1. 压力梯度在传播过程中逐渐增大

目前,认为隧道内压缩波波前发生非线性变形是因为压缩波在传播过程中不仅会受到摩擦耗散的作用,还会受到压缩波传播惯性的作用。其中,体现压缩波能量大小的传播惯性会使得波前压力梯度最大值有增大的趋势,而气体与轨面和隧道壁面等的摩擦耗散会使得波前压力梯度最大值有减小的趋势。当压缩波的传播惯性作用大于摩擦效应等的耗散作用时,压缩波波前压力梯度最大值会逐渐增大,即压缩波波前在传播过程中会越来越陡;而当压缩波的传播惯性作用小于摩擦效应等的耗散作用时,压缩波波前压力梯度最大值在传播过程中逐渐减小,即压缩波波前在传播过程中越来越缓;另外,当压缩波传播惯性与摩擦耗散之间处于平衡时,压缩波波前在传播过程中基本保持不变,但这个状态十分短暂。

近年来,国内外学者对初始压缩波的传播过程及其畸变规律做了一定研究。

1998年,福田傑等[6]采用现场实测和数值分析相结合的方法,研究了压缩波在隧道传播过程中的畸变。在新干线(无碴)轨道隧道中进行了现场测量。利用逆风 TVD 格式对一维可压缩流进行了数值分析。它考虑了定常和非定常壁面摩擦以及对隧道壁面的传热。结果表明,数值分析结果与现场实测结果吻合较好。2016年, Miyachi 等[7]在新干线长板状轨道隧道的入口进行了实地测量,通过对不同列车和带缓冲结构隧道的现场测量,明确了传播特性与初始压缩波形的相关性。结果表明,具有“较浅波谷”的压力梯度波形的压缩波更容易变陡。在此基础上,建立了与实测结果相对应的压缩波畸变数学模型。

2020年,宫本雅章等[8]为研究隧道结构的疲劳,在隧道内压力时间变化的计算上应用了特征线法的一维数值分析,并与山梨实验线的计测数据进行了比较验证。此外,还对运营线中设想的复杂列车运行实施了一维数值分析。以隧道内压力变动为基础,计算出作用于隧道壁面应力变化。波在传播过程中通过粘性耗散衰减,惯性力非线性地使波“变陡”。由于声速随空气温度的变化而变化,声波特性也随之改变。2023年, Iyer 等[9]采用特征线法(MOC)求解具有定常和非定常摩擦系数的欧拉方程。研究结果表明,随着列车速度的增加,隧道的压力波衰减呈减小趋势,梯度呈增大趋势,且说明了隧道内压力梯度处于最高点的“激化”距离。在特定的空气温度($T = 323 \text{ K}$)下,这一临界隧道长度大约是隧道水力直径(300 km/h)的 65 倍,温度降低 70 K (253 K),临界隧道长度减少 15%。同样,列车速度越快(500 km/h),临界长度就会下降 40%。

国内科研人员也对隧道内压缩波传播过程做了大量研究。2007年,刘洪涛等[10]依据一维可压缩非定常不等熵流动理论以及黎曼变量特征线方法在控制方程中计入瞬态摩擦项及传热项,对不同长度无碴隧道内压缩波波前变形进行数值模拟。与国外现场试验比较验证表明本文计算方法和程序是正确的;在长隧道计算工况下隧道长度对出口处压缩波的压力梯度影响明显,为进一步研究微气压波强度提供依据。

2015年, 王宏林等[11]基于一维平面波特性推导了压缩波传播的压力梯度理论公式, 分析了传播距离、初始压缩波峰值以及初始压缩波波前长度等因素对隧道不同位置处压缩波压力波梯度的影响。研究表明, 压缩波压力梯度随着传播距离的增加而增大, 当传播距离小于临界长度时, 理论公式和数值计算结果的相对误差小于6%, 数值计算结果与文献报道的实测结果吻合良好。

2018年, 刘金通等[12]对高速铁路长隧道内压缩波传播过程中波前变形规律和隧道出口外微气压波声学特性两部分内容展开计算分析。在进行隧道内压缩波传播规律计算分析时, 基于三维、非稳态、可压缩流体流动控制方程, 并结合 $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型, 运用有限体积法求解隧道内流体流动控制方程, 计算了压缩波的传播及变形过程; 分析了压缩波波前压力梯度最大值的变化规律; 计算了压缩波波前压力梯度最大值在隧道出口的衰减变化过程。

由此可见, 国内外学者虽然对初始压缩波传播机制有了一定研究进展, 但基于三维数值仿真的有关长大隧道初始压缩波传播过程的研究还少有研究。本文采用隧道净空面积为 100 m^2 、列车速度等级分别为 300 km/h 、 350 km/h 、 400 km/h 的计算模型, 探究不同速度等级列车对长大隧道初始压缩波传播特性影响, 研究结果可为初始压缩波的传播及其畸变规律提供一定参考。

2. 计算模型与计算方法

本文计算方法与传统CFD模拟列车驶入隧道产生的初始压缩波方法有所不同。通常情况下人们采用动网格技术以实现列车运动的模拟, 从而监测到高速列车突入隧道产生的初始压缩波压力变化。然而, 当初始压缩波传播至隧道7倍当量直径距离(后文简称为 $7D$)后会由很强的三维特性转化为一维平面波[1], 且压缩波以当地声速向前传播, 远远大于列车运行速度, 故在本文中, 不再考虑列车运动模型, 仅将列车进入隧道后已完全形成一维平面波的初始压缩波波形“赋值”输入至压缩波传播模型的入口边界作为初始条件, 从而使其在隧道内以当地声速传播。经验证, 此计算方法是可行的, 且大大降低了初始压缩波传播模型计算的时间与成本。

2.1. 计算模型建立

2.1.1. 计算域及边界条件

采用CFD工具模拟计算隧道内压缩波传播和洞口微气压波时, 所建立的计算域及边界条件示意图如图2所示, 隧道入口边界条件设置为总压, 远场边界条件设置为自由流, 隧道壁面和出口相邻面设置为无滑移固定壁面, 温度为 288 K , 参考压力 $101,325\text{ Pa}$ 。

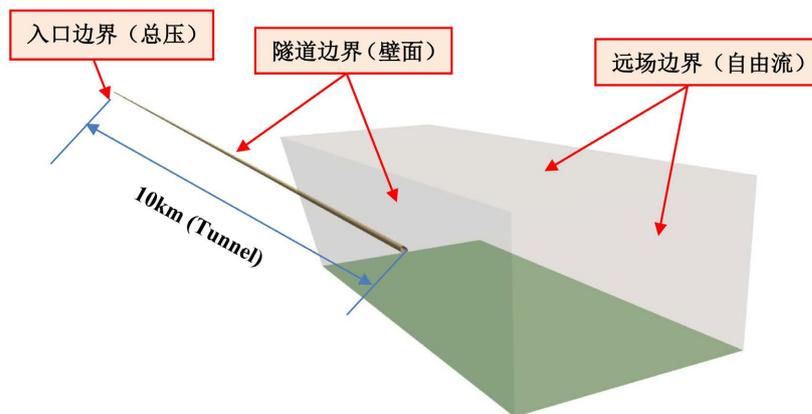


Figure 2. Calculation domain and boundary condition diagram

图2. 计算域及边界条件示意图

图 3 表示隧道计算模型示意图, 由图可见隧道模型为简化模型, 并未考虑轨道的影响。图 4 表示隧道出口形状, 因考虑某实际地形, 斜坡面设置为 45° 。

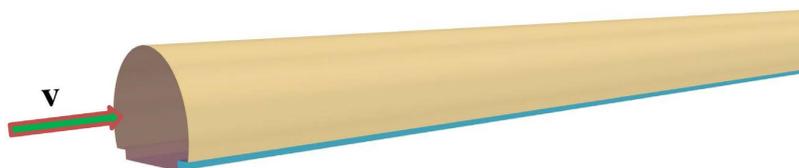


Figure 3. Schematic diagram of tunnel calculation model

图 3. 隧道计算模型示意图

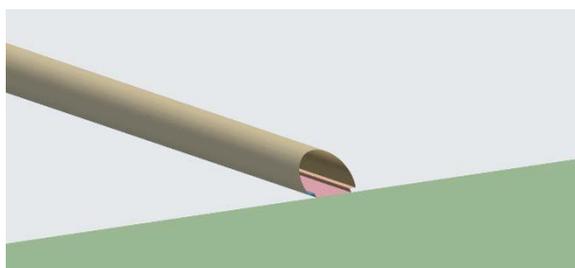


Figure 4. Tunnel exit shape diagram (adjacent slope 45°)

图 4. 隧道出口形状示意图(相邻斜坡面 45°)

2.1.2. 网格划分及测点布置

体网格选用切割体网格生成器进行划分, 生成均匀网格, 且最小网格单元为 0.4 m , 隧道壁面未生成棱柱层网格。图 5 为隧道模型网格划分示意图。

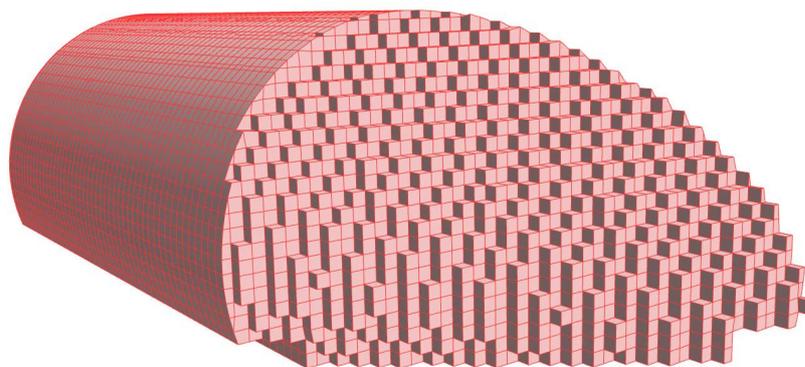


Figure 5. Tunnel model grid division diagram

图 5. 隧道模型网格划分示意图

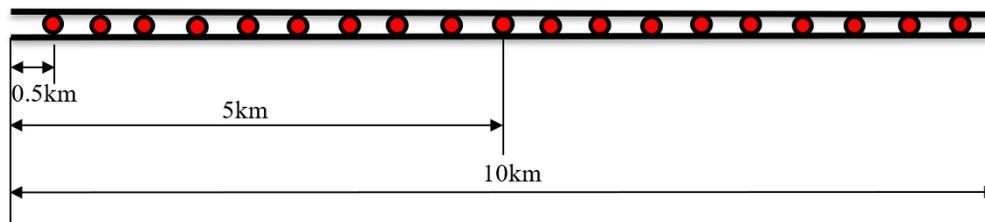


Figure 6. Tunnel wall pressure measurement point distribution

图 6. 隧道壁面压力测点分布

图 6 表示为研究压缩波波形成演变规律所选取的隧道壁面压力测点分布示意图。隧道长度为 10 km, 每间隔 500 m 布置一个测点。

2.2. 计算方法

列车通过隧道引起的空气流动是三维可压缩非定常不等熵湍流流动。采用 RANS 湍流模型, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 壁面采用低 y^+ 壁面处理, 时间采用二阶离散, 对流项采用混合二阶迎风/有界中心法离散, 扩散项采用中心差分格式离散。可压缩流体的基本控制方程为:

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度, \mathbf{V} 为流场中速度矢量, ∇ 为哈密顿算子。

2) 动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = \nabla \cdot \mathbf{P} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

式中, \otimes 为克罗内克积, ρ 为空气密度, \mathbf{V} 为流场中速度矢量, ∇ 为哈密顿算子, \mathbf{f}_b 为作用于连续体上的单位体积的质量力(如重力和离心力)的合力, \mathbf{P} 为应力张量。

3) 能量方程:

$$\rho T \frac{DS}{Dt} = \text{div}(k \text{grad} T) + \varphi \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度, T 为流场温度, k 为导热系数, φ 为耗散功。

由于初始压缩波传播至隧道 7D 距离后会由很强的三维特性转化为一维平面波, 且压缩波以当地声速向前传播, 远远大于列车运行速度, 故本文不再考虑列车运动模型, 仅将列车进入隧道后已完全形成一维平面波的初始压缩波波形“赋值”输入至压缩波传播模型的入口边界作为初始条件, 从而使其在隧道内以当地声速传播。经验证, 此计算方法是可行的, 且大大降低了初始压缩波传播模型计算的时间与成本。

首先根据传统方法对考虑列车的运动模型进行计算, 可知距隧道入口 7D 和 45D 处测点的初始压缩波波形。将 7D 处测点的压缩波波形“赋值”到建立好的压缩波传播模型的计算域入口边界上(入口边界条件设置为总压), 使其在隧道内以当地声速传播, 采用非定常隐式求解器对其进行数值模拟。

由于高速列车的速度约为 0.32 Ma (Ma 为马赫数), 在列车速度为 400 km/h、空气密度为 1.177 kg/m³、空气粘度为 1.855E-5 kg/m/s 的条件下, 结合隧道内的压缩效应, 气流被认为是可压缩的。因此, 采用 SST $k-\omega$ 模型求解初始压缩波波前在隧道内的传播, 这是一种结合了标准 $k-\omega$ 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型特点的混合模型, 适用于计算强剪切和大雷诺数的复杂流场。

为了较精确地模拟初始压缩波在隧道内的传播过程, 需要精细的网格分辨率。因此, 本文时间推进法采用高精度的时空离散化方案, 即二阶精度的高斯-塞德尔(LU-SGS)迭代法, 这种隐式推进方法减少了通过双时间步迭代法的离散误差, 从而提高了模型的稳定性和效率。在空间离散化方案中的对流项采用混合二阶迎风/有界中心法, 每个时间步内包含 10 个内部迭代。采用基于最小二乘单元的梯度插值方法, 结合最小模梯度限制器进行梯度插值, 提高插值的精度和稳定性。对内表面进行扩散通量校正, 得到梯度的二阶表达式。采用半隐式的 SIMPLE 方法求解控制方程中速度与压力的耦合问题。为了保证计算的稳定性和收敛性, 在模拟中将库朗数保持在 1 以下, 因此时间步长设置为 0.0045 s, 时间离散格式为二阶。

2.3. 方法验证

为验证本文数值计算方法的合理性和计算精度, 采用日本动模型的结果进行验证[13]。如图 7 所示, 日本动模型头型为实体型抛物线楔形形状, 缩尺比例为 1:30, 全尺寸模型中列车流线型鼻长为 6 m, 列车宽度和高度均为 3 m, 列车运行速度为 360 km/h。



Figure 7. Train geometry and dimensions in Japanese dynamic models

图 7. 日本动模型中列车几何和尺寸

图 8 展示了隧道断面分布以及测点布置, 隧道模型为无缓冲结构方形断面隧道, 隧道宽度为 11 m, 高度为 7.5 m, 列车与隧道壁之间的距离为 1.5 m。距离隧道入口 38 m 处布置测点 P1, 用来监控初始压缩波。在隧道洞口侧向 50 m 处布置测点 P2, 用来监控隧道进口波。列车在隧道内的运动是通过重叠网格方法实现。

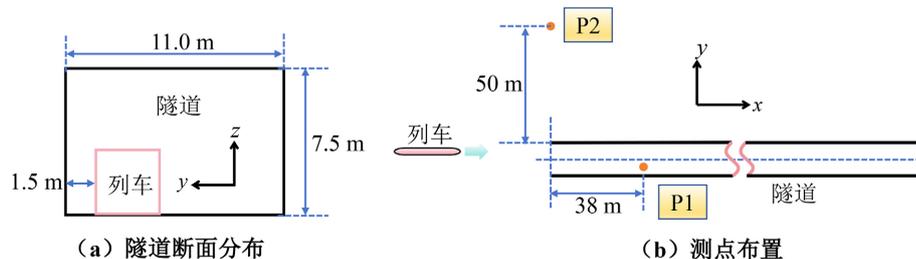


Figure 8. Tunnel section distribution and measuring point arrangement in Japanese dynamic model

图 8. 日本动模型中隧道断面分布以及测点布置

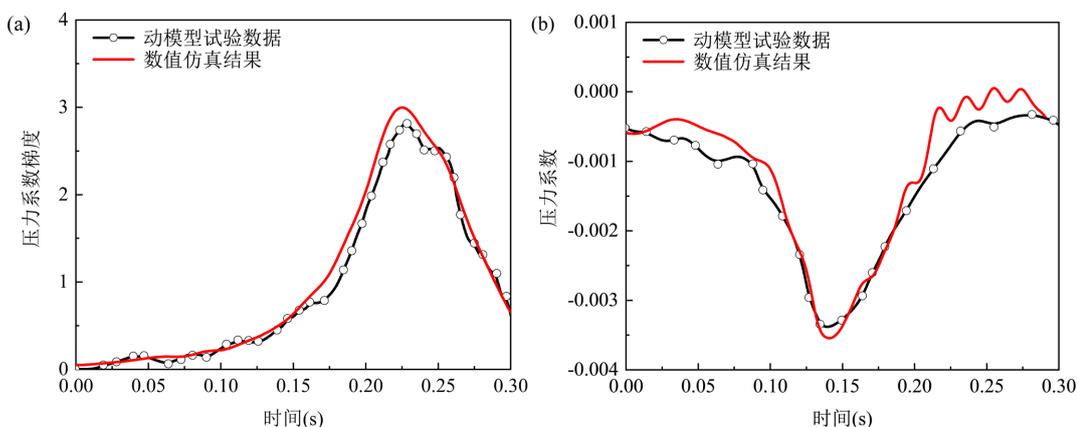


Figure 9. Comparison of numerical simulation results with Japanese dynamic model test data

图 9. 数值仿真结果与日本动模型试验数据的对比

图 9 对比了数值计算结果与动模型试验数据, 由图可知: P1 点初始压缩波压力梯度峰值出现在 0.224

s, 两者的初始压缩波压力梯度峰值误差为 5.79%; P2 点压力峰值误差为 1.78%。数值计算结果与动模型试验结果吻合度较好, 验证了网格划分方法和数值计算方法的正确性与合理性。

同时, 为验证不考虑列车运动模型而仅将初始压缩波波形“赋值”输入至压缩波传播模型的入口边界作为初始条件的方法是可行的, 本文还将传统方法中考虑列车运动所得的 45D 测点波形与本文计算方案的 45D 测点压缩波波形进行比较, 比较结果如图 10 所示。

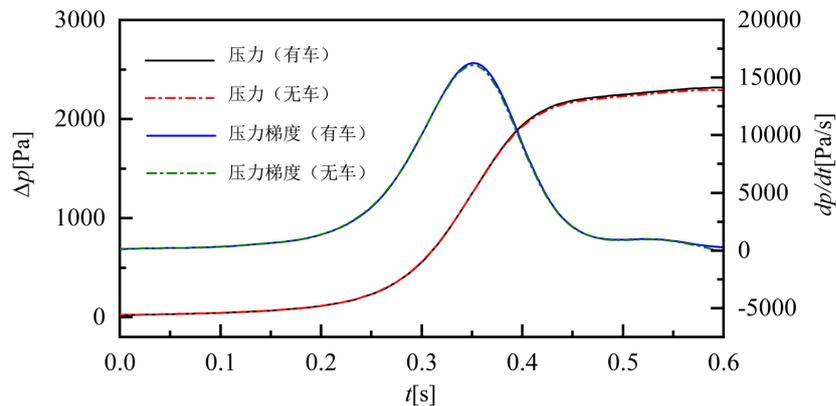


Figure 10. Pressure and pressure gradient-time history curves at 45D measuring points with and without train motion

图 10. 考虑列车运动与不考虑列车运动的 45D 测点压力及压力梯度 - 时间历程曲线

由图可知, 考虑列车运动时, 45D 测点的初始压缩波压力梯度最大值为 16257 Pa/s; 利用本文计算方案, 不考虑列车运动时, 45D 测点的初始压缩波压力梯度最大值 16074 Pa/s。两者相差 183 Pa/s, 误差为 1.1%。由于微气压波幅值与传播至隧道末端的压缩波最大压力梯度值成正比, 故只考虑波前的传播变形, 即初始压缩波的最大压力梯度值, 只关注压力梯度最大值的吻合度是合理的。基于两种方法的结果对比及长大隧道初始压缩波传播的模拟计算成本考虑, 本文不考虑列车运动的方案是可行的, 且大大降低了初始压缩波传播模型计算的时间与成本。

3. 计算结果分析

本节讨论高速列车在不同速度下对应产生压缩波的传播特征。选用某在研列车头型(鼻长 15 m)列车作为计算模型(3 编组), 隧道模型长度选择特长隧道 10 km, 列车速度分别为 350 km/h、400 km/h 和 450 km/h, 分析各速度等级列车初始压缩波传播特性。

高速列车以 3 种不同速度分别驶入无缓冲结构隧道时产生不同波形的初始压缩波, 压缩波沿隧道向洞口处传播[14]。压缩波在隧道内传播过程中会发生一定程度的波前变形, 这导致压缩波波前的最大压力梯度值不断增大, 这一现象称为压缩波传播的“激化”现象, 同时, 层流到湍流的转捩对流场和压力波的影响将导致部分压力波形出现局部峰值[15]; 当压缩波传播一定距离后, 由于隧道壁面摩擦效应等因素的影响, 压缩波波前的最大压力梯度值又会不断减小, 这一现象称为压缩波传播的“衰减”现象。本文重点研究不同速度下压缩波传播的“激化”、“衰减”特征, 观察压缩波传播的最大“激化”距离[16]。

3.1. 350 km/h 列车初始压缩波传播特性分析

图 11 及图 12 分别表示 350 km/h 速度下在 10 km 长度的隧道内传播至 1 km、3 km、5 km、7 km 和 9 km 测点时的压力变化曲线和压力梯度变化曲线。由图 11 可知, 压缩波在传播过程中发生波前变形, 压力波动稳定后其幅值由于摩擦效应随传播距离增大而减小[14], 其波动的局部峰值可能是由于边界层

转换引起的, 其中波动下降部分是由层流区向转换区转换所引起, 而波动上升部分是由转换区向湍流区转换所引起。由图 12 可知, 压缩波最大压力梯度值随传播距离增大而不断增大, 在 1 km 处为 11151 Pa/s, 3 km 处为 14991 Pa/s, 在 5 km 处为 18883 Pa/s, 7 km 处为 22582 Pa/s, 9 km 处为 25680 Pa/s。与 1 km 处最大压力梯度值比较, 3 km 处增大 34.3%, 5 km 处增大 69.3%, 7 km 处增大 102.5%, 9 km 处增大 130.3%。

根据上述分析, 在 350 km/h 速度下的 10 km 隧道压缩波传播过程仅呈现出“激化”特征, 未出现“衰减”。

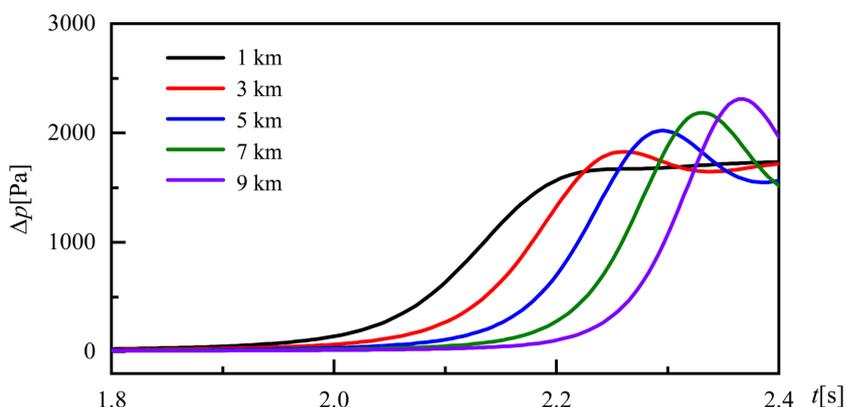


Figure 11. Comparison of pressure curves at each measuring point in the tunnel at 350 km/h

图 11. 350 km/h 速度下隧道内各测点压力曲线对比

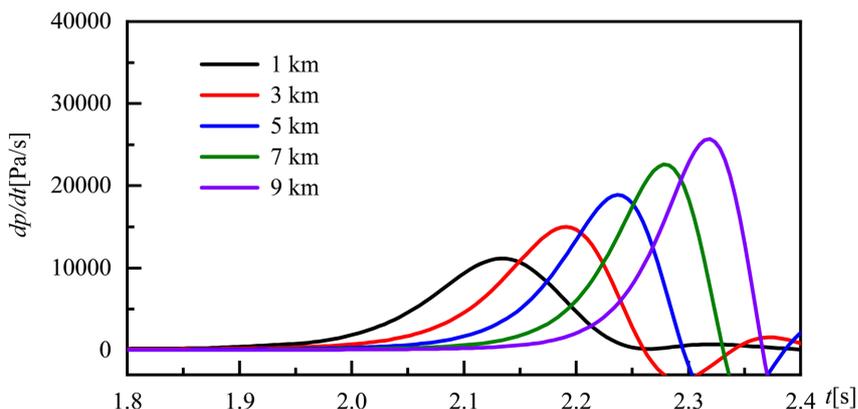


Figure 12. Comparison of pressure gradient curves at each measuring point in the tunnel at 350 km/h

图 12. 350 km/h 速度下隧道内各测点压力梯度曲线对比

3.2. 400 km/h 列车初始压缩波传播特性分析

图 13 及图 14 分别表示 400 km/h 速度下隧道内各测点的压力变化曲线和压力梯度变化曲线。由图 13 可知, 压缩波在传播过程中发生波前变形, 压力波动稳定后其幅值由于摩擦效应随传播距离增大而减小; 由图 14 可知, 隧道内各测点压力波形的峰值不断升高, 对应的压力梯度最大值也不断升高, 即压缩波传播的“激化”现象, 这是由于压缩波在隧道内传播时的波前变形所导致的(波形“变陡”)[15]。分析压力波形, 可知距离隧道入口 1 km 测点的压力梯度最大值为 13566 Pa/s, 距离隧道入口 3 km 测点的压力梯度最大值为 21846 Pa/s, 距离隧道入口 5 km 测点的压力梯度最大值为 31393 Pa/s, 距离隧道入口 7 km 测点的压力梯度最大值为 39456 Pa/s, 距离隧道入口 9 km 测点的压力梯度最大值为 44448 Pa/s。

与 1 km 处测点的压力梯度最大值作对比, 3 km 处测点的压力梯度最大值大于其 61.03%, 5 km 处测

点的压力梯度最大值大于其 131.4%，7 km 处测点的压力梯度最大值大于其 190.8%，9 km 处测点的压力梯度最大值大于其 227.6%。

根据上述分析，在 400 km/h 速度下的 10 km 隧道压缩波传播过程仍然仅呈现出“激化”特征，未出现“衰减”。

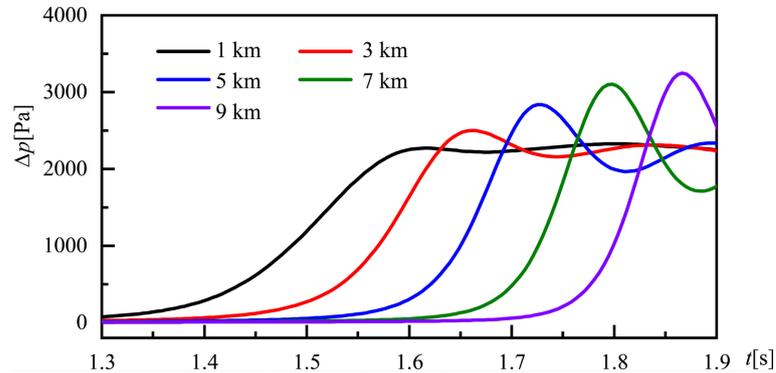


Figure 13. Comparison of pressure curves at each measuring point in the tunnel at 400 km/h
图 13. 400 km/h 速度下隧道内各测点压力曲线对比

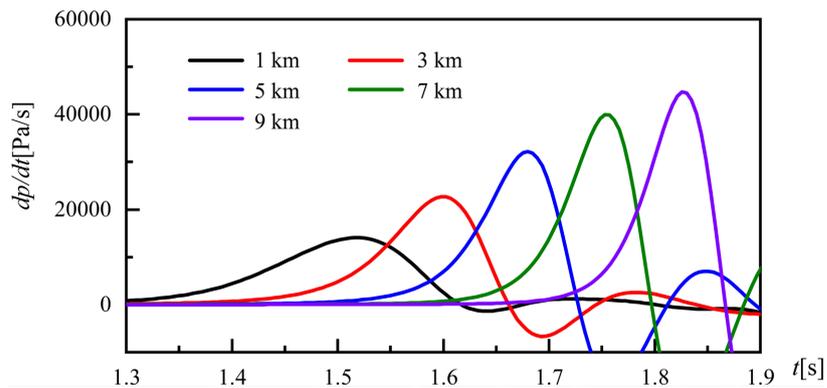


Figure 14. Comparison of pressure gradient curves at each measuring point in the tunnel at 400 km/h
图 14. 400 km/h 速度下隧道内各测点压力梯度曲线对比

3.3. 450 km/h 列车初始压缩波传播特性分析

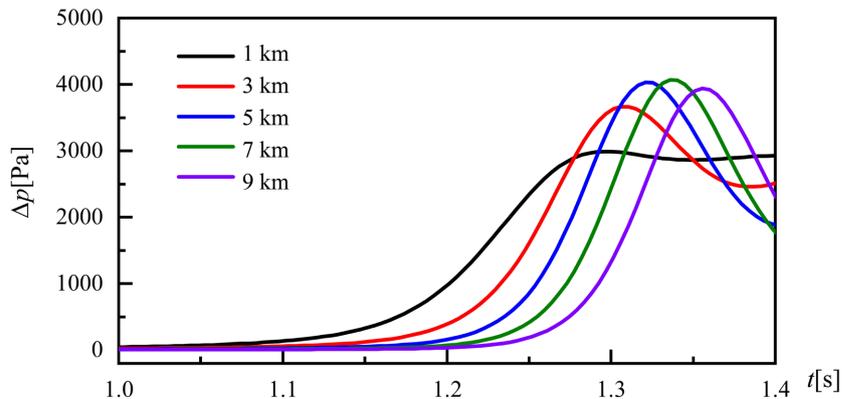


Figure 15. Comparison of pressure curves at each measuring point in the tunnel at 450 km/h
图 15. 450 km/h 速度下隧道内各测点压力曲线对比

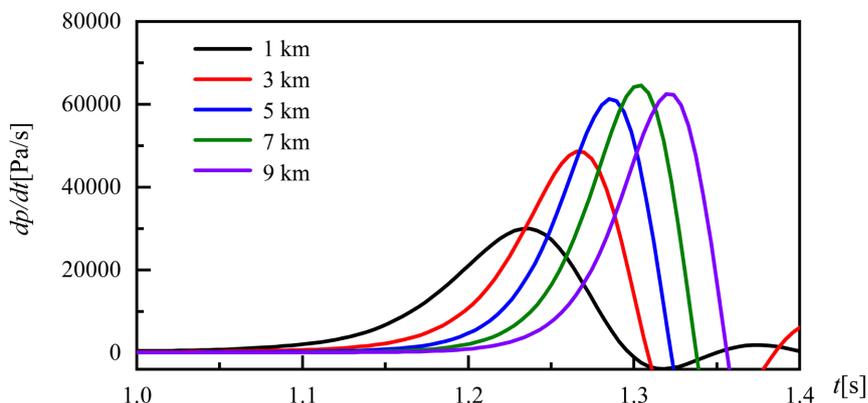


Figure 16. Comparison of pressure gradient curves at each measuring point in the tunnel at 450 km/h
图 16. 450 km/h 速度下隧道内各测点压力梯度曲线对比

图 15 及图 16 分别表示 400 km/h 速度下隧道内各测点的压力变化曲线和压力梯度变化曲线。由图 15 可知, 压缩波在传播过程中同样发生波前变形; 由图 16 可知, 压缩波最大压力梯度值呈现先增大后减小的趋势, 在 1 km 处为 29915 Pa/s, 3 km 处为 48301 Pa/s, 在 5 km 处为 61245 Pa/s, 7 km 处为 64564 Pa/s, 9 km 处为 62424 Pa/s。与 1 km 处最大压力梯度值比较, 3 km 处增大 38.1%, 5 km 处增大 104.7%, 7 km 处增大 115.8%, 9 km 处增大 108.6%。

根据上述分析, 在 450 km/h 速度下的 10 km 隧道压缩波传播过程呈现出先“激化”后“衰减”的特征。位于 7 km 前的各测点最大压力梯度值不断增大, 7 km 后开始减小, 由此可以判断出 450 km/h 速度下压缩波最大“激化”距离出现在 7 km 左右, 即 5 km 和 9 km 之间。

3.4. 不同速度等级列车对长大隧道初始压缩波传播特性影响

以 350 km/h 列车通过长大隧道时各测点的压力梯度最大值为参考, 分析其他速度等级列车初始压缩波传播特性。表 1 表示不同速度下隧道内各测点压力梯度最大值及增长率统计情况。

Table 1. Statistics of the maximum pressure gradient and growth rate of each measuring point in the tunnel at different speeds
表 1. 不同速度下隧道内各测点压力梯度最大值及增长率统计情况

列车速度	隧道内各测点压力梯度最大值及增长率[Pa/s]				
	1 km	3 km	5 km	7 km	9 km
350 km/h	11,151 (/)	14,991 (/)	18,883 (/)	22,582(/)	25,680 (/)
400 km/h	18,575 (66.58%)	27,255 (81.81%)	35,714 (89.13%)	41,585 (84.15%)	44,365 (72.76%)
450 km/h	29,915 (168.27%)	48,301 (222.20%)	61,245 (224.34%)	64,564 (185.91%)	62,424 (143.08%)

由表可知, 随着列车速度等级的提高, 隧道内同一测点的压力梯度最大值均不同程度地增大。较 350 km/h 速度等级而言, 400 km/h 速度等级列车在长大隧道初始压缩波传播过程中压力梯度增大程度逐渐增大, 并在 7 km 左右增大趋势逐渐减小, 这可能与最大“激化”距离范围内压力梯度的主导因素由非线性效应逐渐转为摩擦效应有关; 同理, 450 km/h 速度等级列车在长大隧道初始压缩波传播过程中压力梯度增大程度同样逐渐增大, 并在 7 km 左右增大趋势逐渐减小。

4. 结论

本文基于三维仿真软件, 采用某在研列车头型(鼻长 15 m)三编组列车、隧道净空面积为 100 m² 的 10

km 长大隧道计算模型, 对列车速度分别为 350 km/h、400 km/h 和 450 km/h 高速铁路隧道初始压缩波传播过程进行 CFD 数值模拟, 研究分析了该头型下的高速列车以不同速度等级突入隧道时对应产生的不同初始压缩波在长大隧道内的传播特性。

1) 350 km/h 和 400 km/h 速度等级下压缩波在传播过程中发生波前变形, 压力波动稳定后其幅值由于摩擦效应随传播距离增大而减小, 且出现波动的局部峰值, 呈现“激化”特征, 未出现“衰减”。

2) 450 km/h 速度等级下压缩波最大压力梯度值呈现先增大后减小的趋势, 即在该速度等级下压缩波已呈现出先“激化”后“衰减”的特征, 其最大“激化”距离出现在 7 km 左右, 即 5 km 和 9 km 之间。

3) 随着列车速度等级的提高, 隧道内同一测点的压力梯度最大值均不同程度地增大。较 350 km/h 速度等级而言, 400 km/h 及 450 km/h 速度等级列车在长大隧道初始压缩波传播过程中压力梯度增大程度逐渐增大, 并在 7 km 左右增大趋势逐渐减小, 这可能与各速度等级对应的最大“激化”距离范围内压力梯度的主导因素由非线性效应逐渐转为摩擦效应有关。

参考文献

- [1] 梅元贵, 等. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 小澤智. トンネル内の圧力波の変形とトンネル出口微気圧波[J]. 日本流体力学会誌「ながれ」, 1995, 14(3): 191-197.
- [3] Ehrendorfer, K. and Sockel, H. (1997) The Influence of Measures Near the Portal of Railway Tunnels on the Sonic Boom. BHR Group Conference Series Publication, 863-876.
- [4] Ehrendorfer, K., Reiterer, M. and Sockel, H. (2002) Numerical Investigation of the Micro Pressure Wave. In: Schulte-Werning, B., Grégoire, R., Malfatti, A. and Matschke, G., Eds., *TRANSAERO—A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation*, Springer, 321-341. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45854-8_26
- [5] Lin, T., Yang, M., Zhang, L., Wang, T. and Zhong, S. (2024) Influence of Bionics Shark Gills Tunnel Portal on the Micro-Pressure Wave at the Tunnel Exit. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **144**, Article 105542. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105542>
- [6] 福田傑, 飯田雅宣, 前田達夫, 等. 高速鉄道のスラブ軌道トンネル内を伝ばする圧縮波の解析: (第 1 報, 現地測定と一次元数値解析) [J]. 日本機械学会論文集 B 編, 1998, 64(621): 1391-1397.
- [7] Miyachi, T., Saito, S., Fukuda, T., Sakuma, Y., Ozawa, S., Arai, T., *et al.* (2015) Propagation Characteristics of Tunnel Compression Waves with Multiple Peaks in the Waveform of the Pressure Gradient: Part 1: Field Measurements and Mathematical Model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **230**, 1297-1308. <https://doi.org/10.1177/0954409715593305>
- [8] 宮本雅章, 有田貴司, 大森洋志, 等. 超高速鉄道トンネル内に発生する圧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.
- [9] Iyer, R.S., Kim, D.H. and Kim, H.D. (2023) Effect of Ambient Air Temperature on the Compression Wave Propagating along a Railway Tunnel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **16**, 905-919.
- [10] 刘洪涛, 梅元贵, 刘坤. 高速铁路隧道长度对压缩波波前变形的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(3): 6-10.
- [11] 王宏林, 雷波, 毕海权. 压缩波惯性作用对其波形演变的影响[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 118-123.
- [12] 刘金通. 高铁隧道内压缩波传播规律及微气压波声学特性初步分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [13] Doi, T., Ogawa, T., Masubuchi, T. and Kaku, J. (2010) Development of an Experimental Facility for Measuring Pressure Waves Generated by High-Speed Trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98**, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.09.002>
- [14] Degen, K.G., Gerbig, C. and Onnich, H. (2007) Acoustic Assessment of Micro-Pressure Waves Radiating from Tunnel Exits of DB High-Speed Lines. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Munich, 4-8 September 2007, 48-55. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74893-9_7
- [15] Saito, S. (2024) Alleviation of Micro-Pressure Waves Radiated from Tunnel Hoods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **147**, Article 105703. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105703>
- [16] 猪頭宏平. 長距離管内を伝播する弱い圧力波の波形の違いによる伝播特性への影響[D]: [硕士学位论文]. 福岡: 九州大学, 2018.