

文章编号: 1671-6612 (2019) 02-188-05

隧道内列车活塞风效应数值模拟分析

崔景东 李 炎 刘炎举 黄帅帅

(兰州交通大学环境与市政工程学院 兰州 730070)

【摘 要】 随着长及特长单线铁路隧道的大量修建,利用列车活塞风改善隧道内空气质量,降低隧道通风能耗已成为可能。采用数值模拟方法以英国 Patchway 隧道作为物理模型,利用 Flunet17.0 软件建立相应动网格模型。模拟计算获得的活塞风速平均值与实测值吻合度较好,表明该模拟方法准确性较高。在此基础上,改变行车速度,对隧道内列车活塞风效应做系列模拟计算。研究结果表明:以 patchway 隧道和列车数据为基本参数,列车行车速度每增加 5m/s,平均活塞风速约以 19.48% 递增,平均增压约以 50%左右递增,表明列车行车速度与活塞风速、风压存在正相关关系。该研究可为工程上列车活塞风效应估算提供借鉴。

【关键词】 隧道;活塞风效应;数值模拟

中图分类号 U459.1 文献标识码 A

Numerical Simulation Analysis of the Effect of Piston Wind on Train in Tunnel

Cui Jingdong Li Yan Liu Yanju Huang Shuaishuai

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070)

【Abstract】 With the extensive construction of long and long single-track railway tunnels, it has become possible to use piston winds to improve the air quality in tunnels and reduce the ventilation energy consumption of tunnels. This paper adopts the numerical simulation method to use the British patchway tunnel as the physical model, and uses Flunet17.0 software to establish the corresponding dynamic grid model. The simulation results show that the average value of the piston wind speed agrees well with the measured value, which indicates that the accuracy of the simulation method is higher. Based on this, change the speed of the train and do a series of simulation calculations on the effects of the piston wind on the tunnel. The research results show that with patchway tunnel and train data as the basic parameters, the average speed of the piston increases by approximately 19.48% for every 5 m/s of the speed of the train, and the average boost increases by approximately 50%, indicating that the train speed and the piston wind speed There is a positive correlation between wind pressure and wind pressure. The research in this paper can provide reference for estimating the piston wind effect of trains in engineering.

【Keywords】 tunnel; piston wind effect; numerical simulation

0 引言

列车在隧道内运行时引起活塞风属自然通风范畴。随着国内长及特长单线铁路隧道和城市地铁大量修建,合理利用活塞风改善隧道内空气质量,降低单线隧道通风能耗成为可能。

国内外学者对活塞风相关问题已有一定研究。

研究内容主要涉及两方面,一是列车在不同运行状态下(会车、驶向救援站等)活塞风变化情况^[1,2],二是不同行车速度下列车活塞风速及风压变化规律^[3-8]。研究方法主要是数值模拟法,本文也采用数值模拟方法研究隧道内列车活塞风效应,通过将模拟计算活塞风速平均值与实测值相对比,验证计

作者(通讯作者)简介:崔景东(1993.2-),男,硕士,E-mail: 1045263100@qq.com

收稿时期:2018-06-19

算方法正确性。在此基础上, 模拟不同列车速度在隧道内运行, 对活塞风速和风压变化规律。

1 数值模拟计算相关内容

1.1 数学模型

列车在隧道中运行时, 隧道内部流场会发生复杂变化。为方便计算, 本文对计算模型在满足条件基础上做合理简化^[9]: ①隧道内风流视为不可压流动; ②隧道内流体流动状态为湍流; ③假定隧道内壁面绝热, 且流体具有同向性紊流粘性, 满足 Boussinesq 假设; ④列车在隧道内部匀速行驶。因假定列车在隧道内运行时所产生流动为不可压缩流动, 所以本文紊流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。流动同时满足以下方程^[10]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{du_i}{dt} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u_i u_j \right) \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} p_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, u_i, u_j 为速度分量, m/s; x_i, x_j 为坐标分量, m; t_i 为质量力, m/s²; t 为时间, s; k 为紊流动能, m²/s²; r 为系数; ν_t 为紊流粘性系数, Pa·s; ν 为层流动力粘性系数, Pa·s; G_k 为平均速度梯度引起紊动能产生项,

$$G_k = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial u_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \right]; \quad p_k \text{ 为修正时均压}$$

力, Pa; ε 为紊流动能耗散率, m²/s²; 对于其他参数取值本文采用 Flunet17.0 软件中默认值, 即 $\sigma_\varepsilon=1.33, \sigma_k=1.0, C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_u=0.09$ 。

1.2 物理模型

英国 patchway 隧道有实测数据, 故本文模拟计算物理模型根据 patchway 隧道建立。英国 patchway 隧道和列车基本参数见表 1^[11]。为简化计算, 使用 Gambit6.3.26 软件建立二维纵截面模型时, 将隧道和列车均简化为矩形。列车由洞外驶入洞内, 隧道内部监测点距隧道入口 150m。

表 1 Patchway 隧道和列车基本参数

Table 1 Basic parameters of the Patchway tunnel and train

隧道参数				列车参数				阻塞比 α
隧道长度	隧道截面	隧道当量	隧道高度	列车长度	列车截面	列车速度	列车高度	
l/m	积 A_t/m^2	直径 d_e/m	h_t/m	l_0/m	积 A_0/m^2	$V_0/(m \cdot s^{-1})$	h_0/m	
1140	22.61	4.97	6.5	196.6	9.11	35.00	3.2	0.4029

1.3 网格划分及动网格设定

模型计算区域划分见图 1。图 1 中包含 7 个计算区域, 各区域名称见表 2。

根据各区域流动特点, 分别做网格划分。区域 6 流场变化剧烈, 该部分网格节点数量多; 区域 4 和区域 7 靠近列车部分网格较密, 远离列车部分较稀; 区域 2 和区域 5, 采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型中默认壁面函数法, 靠近隧道壁面粘性底层厚度不超

过第一个网格宽度^[3]; 区域 1 和区域 3 对模拟计算结果影响不大, 这两部分网格稀疏。

图 1 中动网格区域 4, 6, 7 与静止网格区域 2, 5 之间通过滑移网格交界面进行连接; 列车和区域 6 为刚体运动, 具体运动方式通过 UDF 进行编译, 将速度值赋给列车壁边和区域 6 前后两条边; 区域 4 和区域 7 中空气随列车运动而运动, 故属于变形运动。

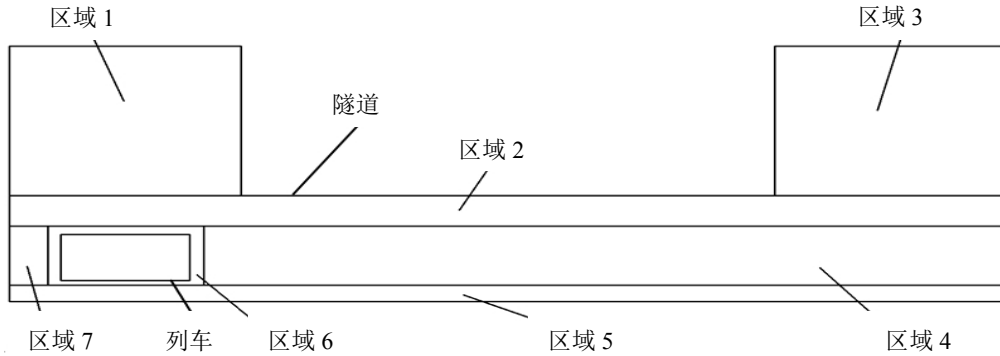


图 1 模型计算域划分图

Fig.1 Partition of model calculation domain

表 2 各区域名称

Table 2 Names of each area

区域	区域名称
1	左侧远场区域
2	隧道上方附近区域
3	右侧远场区域
4	列车前运动区域
5	隧道下方附近区域
6	列车周围区域
7	列车后运动区域

如图 1 所示，物理模型取 Patchway 隧道相同边界条件，区域 1 和区域 3 分别采用压力进口边界和压力出口边界；区域 4，6，7 和区域 2，5 之间采用滑移网格交界面，以模拟列车运动状况；列车壁边设为 wall 边界，取列车速度；隧道壁边设为 wall 边界；其余边界采用默认 wall 边界。

1.5 其他相关参数设定

实际隧道和列车壁面并不是光滑，在 Fluent17.0 软件中应进行相应设定，相关参数具体取值参照英国 patchway 隧道和列车，见表 3。

1.4 边界条件

表 3 Patchway 隧道和列车表面参数

Table 3 Patchway tunnel and train surface parameters

隧道参数		列车参数
隧道壁面摩擦系数 λ	隧道表面当量粗糙高度 k_{st}/mm	列车表面当量粗糙高度 k_{s0}/mm
0.02	5.00	9.20

2 模拟结果分析

列车从距离隧道入口 35m 处出发，监测点设于距隧道入口 150m，列车分别以 25m/s、30m/s 和

35m/s 在隧道内运行。

2.1 活塞风模型计算验证

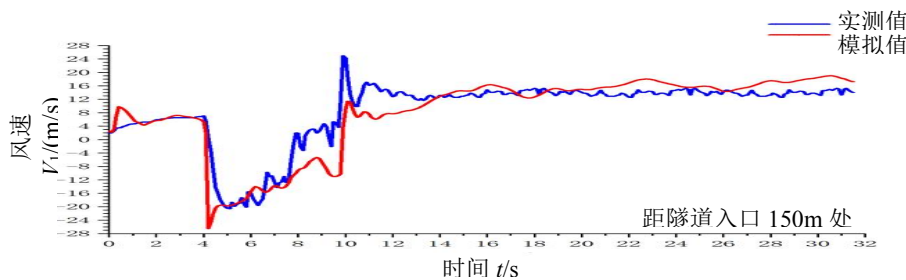


图 2 列车活塞风速模拟平均值与实测平均值

Fig.2 Simulated mean and measured average value of train piston speed

本次模拟计算列车行车速度为 35m/s, 与实际车速相同。列车活塞风速模拟平均值与实测平均值, 在图 2 所示。

由图 2 中得出:

(1) 模拟列车活塞风平均值与实测值吻合度较好, 说明本文模拟计算方法正确计算结果可靠度高;

(2) 列车车尾经过测点后活塞风速趋于稳定;

(3) 根据列车运行时间, 可以将活塞风速变化状况分为三个阶段: 车头未过测点阶段 ($t=0\sim 4.0s$)、车身经过测点阶段 ($t=4.0\sim 9.9s$)、车尾过测点后阶段 ($t=9.9\sim 31.5s$)。

将每个阶段活塞风平均值与实测值做对比, 结果见表 4。

表 4 各阶段模拟与实测活塞风平均值相对差

Table 4 Relative difference between simulated and measured piston wind averages at each stage

阶段	名称	列车车速 $V_0/(m\cdot s^{-1})$	实测平均值 $V_1/(m\cdot s^{-1})$	相对差/%
一	车头未过测点阶段	6.17	5.39	-14.47
二	车身经过测点阶段	-12.02	-8.73	37.68
三	车尾过测点后阶段	17.15	15.80	-8.50

表 4 中结果表明:

(1) 第三阶段吻合度最好, 这个阶段也是隧道中利用活塞风通风主要阶段, 此处也再次证明本文模拟计算可靠性;

(2) 第一、二阶段属活塞风发展阶段, 未达到稳定, 波动性较大(因测点距隧道入口 150m 处),

故相对差较大。

2.2 活塞风速变化规律

列车分别以 25m/s、30m/s 和 35m/s 在隧道中运行, 模拟计算得到平均活塞风速随时间变化情况见图 3。

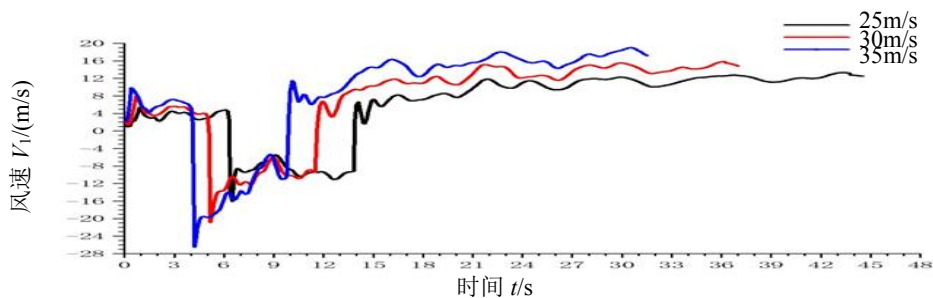


图 3 平均活塞风速随时间变化曲线

Fig.3 Average piston speed change over time

因本文主要研究第三阶段, 即车尾过测点后阶段 (活塞风稳定阶段), 将该阶段活塞风平均值列

入表 5 中。

表 5 不同车速活塞风速平均值对比

Table 5 Comparison of average piston speeds at different speeds

列车车速 $V_0/(m\cdot s^{-1})$	活塞风速平均值 $V_1/(m\cdot s^{-1})$	V_1/V_0 (%)
25	12.34	49.36
30	14.98	49.93
35	17.15	49.00

由图 3 及表 5 可以得出:

(1) 列车在不同速度下运行时, 平均活塞风速随时间变化曲线趋势完全相同;

(2) 随着列车行车速度提高, 平均活塞风速也随之增大;

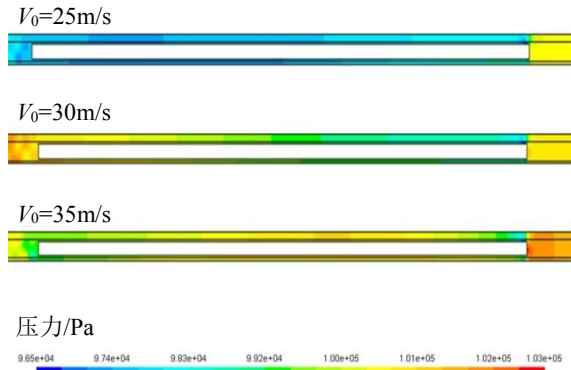
(3) 以表 1 和表 3 数据为基本参数, 模拟计算得到平均活塞风速存在于列车速度如表 5 中所表达百分比关系, 取平均值, V_1/V_0 约为 49.43%;

(4) 以表 1 和表 3 数据为基本参数, V_0 每增加 5m/s, 模拟计算得到平均活塞风速约以 19.48%

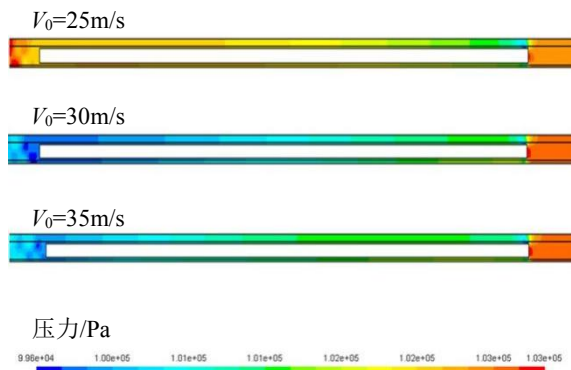
(以 $V_0=25\text{m/s}$ 时 V_1 为基准) 递增。

2.3 活塞风压变化规律

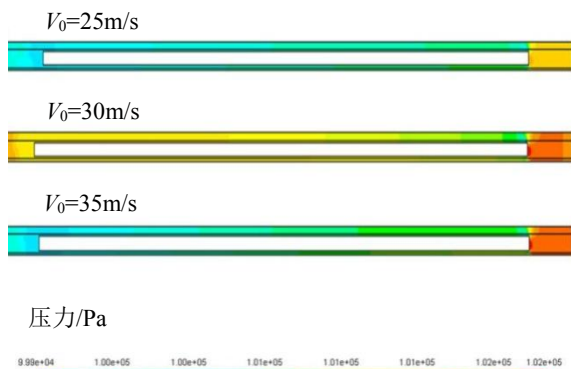
活塞风压是活塞风压源, 其大小决定活塞风速大小。为保证风压稳定性, 本文选取了列车车头到达隧道内部 250m、500m、750m 和 1000m 处模拟结果, 研究活塞风压变化规律。隧道内不同位置处压力云图见图 4。



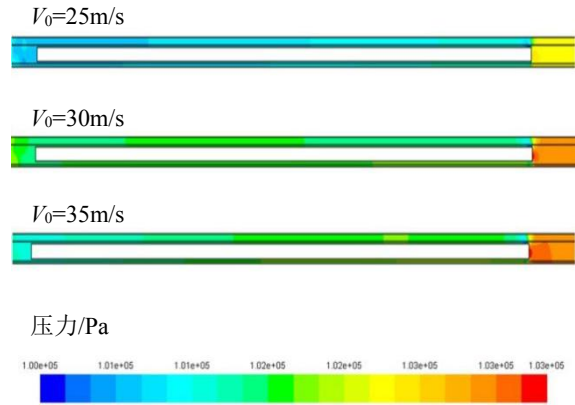
(a) 250m 处压力云图



(b) 500m 处压力云图



(c) 750m 处压力云图



(d) 1000m 处压力云图

图 4 隧道内不同位置处压力云图

Fig.4 Pressure clouds at different locations in the tunnel

活塞风压, 即活塞风增压, 一般由隧道内车头和车尾压力绝对值叠加得到(车头为正压, 车尾为负压)。不同车速条件下活塞风增压平均值见表 6。

表 6 不同车速条件下活塞风增压平均值

Table 6 The mean value of piston pressure boost under different vehicle speed conditions

$V_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	到达隧道内部距离	活塞风增压平均值
	/m	/kPa
25	250	3.1
	500	1.7
	750	2.3
	1000	2.5
30	250	4.1
	500	2.4
	750	3.3
	1000	3.4
35	250	6.1
	500	3.5
	750	5.0
	1000	4.9

由图 4 和表 6 可以得出:

- (1) 不同行车速度下, 活塞风压变化规律相似;
- (2) 不同行车速度下, 活塞风压在 250m 处增压较大, 这表明距隧道入口越近, 活塞风增压受其他条件(如隧道入口压力波)影响较大; 距隧道入口越远, 活塞风增压逐渐趋于稳定;
- (3) 总体来说, 表 6 中不同列车速度下活塞

(下转第 202 页)