

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-360-05

列车通过铁路隧道时的数值模拟分析

崔景东

(无锡市轨道建设设计咨询有限公司 无锡 214000)

【摘要】 采用 Gambit 软件建立隧道列车模型, 并利用 Flunet17.0 软件设置了相应的活塞风二维动网格模型, 模拟了列车在不同车速下经过铁路隧道时, 隧道内部速度场和压力场的动态变化规律。研究结果表明: 随着列车经过隧道时速度的增大, 所产生的活塞风的风速也就越大; 当列车经过监测点的速度越大时, 活塞风的风速突降的程度也就越大; 列车头部达到隧道入口时, 车头处压力骤然增大, 列车周围气体压力波动剧烈; 列车尾部到达隧道入口时, 车尾处压力突然降低, 并出现负压。

【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 Train Passing Through Railway Tunnel

Cui Jingdong

(Wuxi Rail Construction Design Consulting Co., Ltd, Wuxi, 214000)

【Abstract】 This paper uses Gambit software to establish a tunnel train model, and uses Flunet17.0 software to set up the corresponding piston wind two-dimensional dynamic grid model, which simulates the dynamic changes of the speed field and pressure field inside the tunnel when the train passes through the railway tunnel at different speeds. law. The research results show that as the speed of the train passing through the tunnel increases, the wind speed of the piston wind generated increases; when the speed of the train passing the monitoring point increases, the wind speed of the piston wind decreases sharply; When the head of the train reaches the tunnel entrance, the pressure at the head of the train suddenly increases, and the gas pressure around the train fluctuates violently; when the tail of the train reaches the tunnel entrance, the pressure at the rear of the train drops suddenly and negative pressure appears.

【Keywords】 tunnel; piston wind effect; numerical simulation

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

收稿日期: 2020-08-12

0 引言

随着我国铁路隧道数量和长度的增加以及列车行驶速度的提高, 使得列车运行所产生活塞风的变化更加剧烈, 隧道内部流场更加复杂。活塞风会引起铁路隧道内部风速和风压突变, 对隧道内部固定设施以及日常维护人员的安全产生一定的影响。同时, 活塞风能够促进隧道空气流动, 对调节隧道内空气品质和温度有一定的积极作用, 也可以节约风机能耗。

目前, 对活塞风的研究主要包括以下几个方面^[1], 活塞风理论解析计算的研究^[2,3]、活塞风影响因素的研究^[4,5]以及活塞风对区间隧道影响的研究^[6,7]。关于活塞风的研究在公路隧道、地铁隧道等地下区间工程中研究较多, 专门针对铁路隧道列车活塞风的研究较少。本文以英国 Patchway 隧道作为物理模型, 用 Gambit 软件建立其全尺寸模型, 使用 Fluent17.0 软件设置了相应的活塞风二维动网格模型, 以模拟隧道内部速度场和压力场的变化规律。

1 活塞风的计算模型

1.1 数学模型

当列车在隧道中运行时, 会使得其内部流场发生复杂的变化。为合理简化计算模型, 做出如下假设: ①将隧道内低速风流视为不可压流动; ②隧道内部流体的流动状态为湍流; ③假定隧道内壁面绝热, 且流体具有同向性的紊流粘性, 同时满足 Boussinesq 假设; ④将列车在隧道内行驶时的状况简化为匀速运动。假定列车在隧道运行时所产生的流动为不可压缩流动, 所以本文的紊流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。故该流体的流动应该同时满足以下方程。

质量守恒方程

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

动量守恒方程

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

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

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

式中: u_i , u_j 为速度分量, m/s; x_i , x_j 为坐标分量, m; f_i 为质量力, m/s²; t 为时间, s; k 为紊流动能, m²/s²; γ 为系数 ν_t 为紊流粘性系数, $\nu_t = C_u k^2 / \varepsilon$, 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的紊动能产生项,

$$G_k = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]; \quad p_k \text{ 为修正时均压力, Pa; } \varepsilon \text{ 为紊流动能耗散率, m}^2/\text{s}^2; \text{ 对于其他参数的取值本文采用默认值, 即 } C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_u = 0.09.$$

力, Pa; ε 为紊流动能耗散率, m²/s²; 对于其他参数的取值本文采用默认值, 即 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_u = 0.09$ 。

1.2 物理模型

由于实际的隧道和列车几何形状特别复杂, 为

方便二维模拟计算将其简化。结合本文的主要研究对象为列车在不同速度下经过隧道时其内部流场的变化特性, 故将隧道跟列车模型均简化为矩形。考虑到计算成本, 将隧道设为长度为 1140m, 高度为 6.5m, 列车设为长度为 200m, 高度为 3.2m, 列车距离隧道入口 35m 处。

1.3 网格划分

本文模型的计算区域划分见图 1。在图 1 中区域 1 和区域 3 为包含了远场边界在内的隧道外的大部分计算区域, 区域 2 为隧道周围壁面的附近区域, 区域 4 和区域 7 为随列车运动的区域, 区域 5 为隧道底部的附近区域, 区域 6 为列车周围壁面的较小区域。根据各自区域的流场特性, 分别进行相应的网格划分。区域 6 为列车周围区域, 由于该区域流场的特性变化剧烈, 因此该区域网格节点数量多。区域 4 和区域 7 为随列车前后运动的区域, 因此这两部分的网格需划分得密。对于区域 2 和区域 5 的隧道附近区域, 本文采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型中默认的壁面函数法, 其靠近隧道壁面附近的粘性底层厚度不超过第一个网格宽度^[8]。区域 1 和区域 3 两部分为远场边界, 对模拟计算结果影响不大, 故网格划分得稀疏。

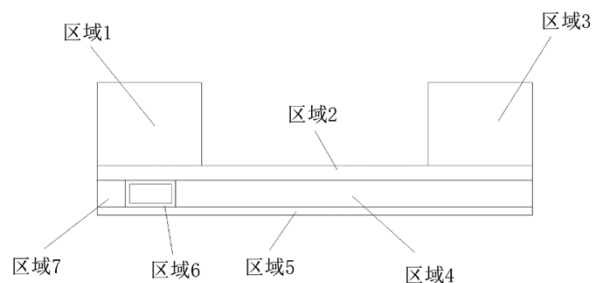


图 1 模型计算域的划分图

Fig.1 Partition of model calculation domain

1.4 边界条件

如图 1 所示, 设定区域 1 (左侧) 采用压力进口边界和区域 2 (右侧) 采用压力出口边界, 区域 4,6,7 的边界跟区域 2,5 边界采用滑移网格界面, 以模拟列车运动的状况。列车的四条边设为 wall 边界, 并且其速度取列车运动的速度值。隧道上下两条边设为 wall 边界, 其表面当量粗糙高度取 5mm, 壁面摩擦系数取 0.02^[8], 其余边界采用默认的 wall 边界。

1.5 动网格的设定

考虑到本文主要研究列车在隧道中运行时所引起的其内部流场随时间的改变问题，因此使用 Fluent17.0 软件设立动网格的模型。列车周围区域 6 和前后区域 4,7 为运动列车区域，与静止区域 2,5 之间通过滑移网格交界面进行连接。列车和其周围区域为刚体运动，其具体运动的方式通过 UDF 进行编译：将速度值赋给列车四周和区域 6 前后两条边。列车前后流场区域 4,7 的空气随列车的运动而运动，故属于变形运动。

1.6 求解方法

本文使用基于压力的分离式求解器，速度设为绝对速度，选用标准的 $k-\epsilon$ 双方程的湍流模型，压力和速度的耦合问题采用 SIMPLE 算法。

2 模拟结果分析

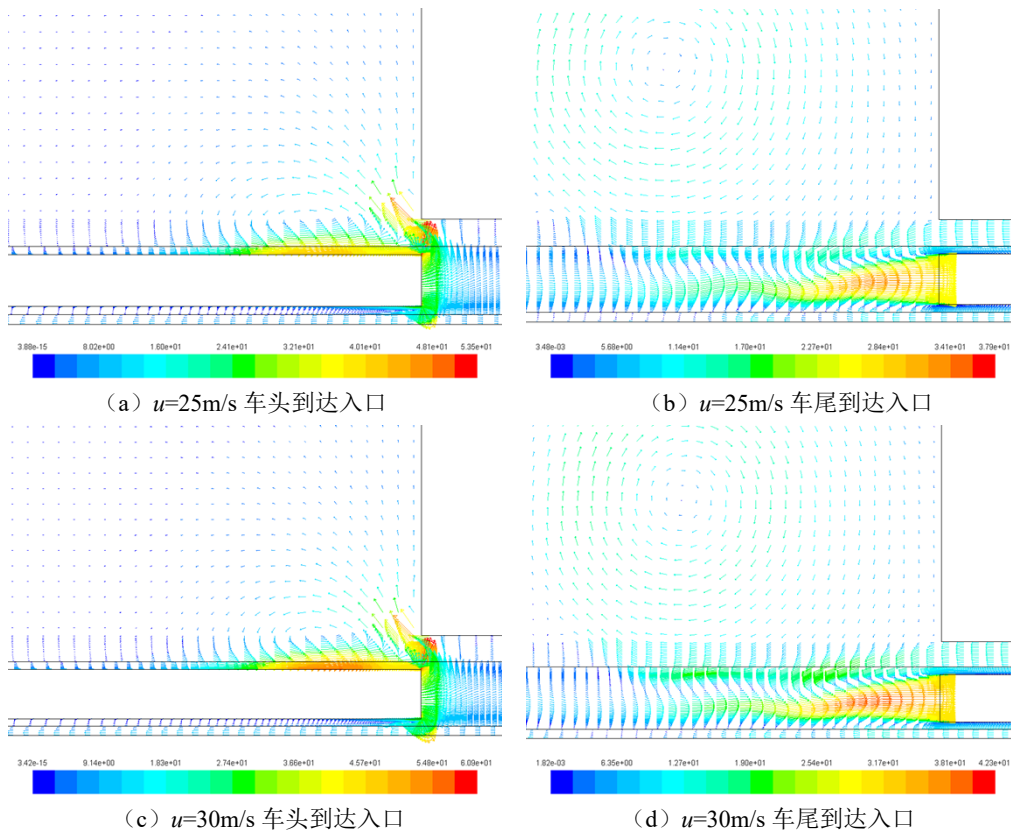
本文分析列车以不同的速度在隧道内行驶时，对隧道内部速度场和压力场的分布情况的影响。因此，模拟状况设定为在不改变其他条件的状况下，列车由距离隧道入口 35m 处出发，其速度 u 分别以 25, 30 和 35m/s 在隧道内部运行。

2.1 活塞风风速的分布

列车以不同的速度到达隧道入口时，其车头和车尾产生的活塞风的速度矢量分布如图 2 所示。

从图 2 中可以看出：（1）当列车车头到达隧道入口时，车头前方的空气由于受到挤压，产生很大的扰动。一部分空气沿着隧道方向开始向隧道出口流动，另一部分空气因隧道内部气流速度小于列车速度，单位时间内从隧道入口进入的空气量小于列车单位时间进入隧道所排开的空气量。因此，这部分空气以与列车相反的方向从列车与隧道之间的环状空间被排出。当列车尾部到达隧道入口时，列车车尾所排开的空间呈真空状态，在其尾部涡流区的真空抽吸作用下，隧道进口处的空气又以与列车相同的方向沿隧道进入洞内。并且列车以较大速度进入隧道内部时，隧道入口上方的空气因受到山体等障碍物的阻挡，也会产生一定的速度漩涡。（2）尽管列车以不同速度进入隧道时，其车头跟车尾所产生的活塞效应的变化趋势是相似的。

随着列车的运行速度增大时，车头前方的空气和隧道上方的空气所受的干扰程度也越剧烈，所产生的活塞风风速也越大。



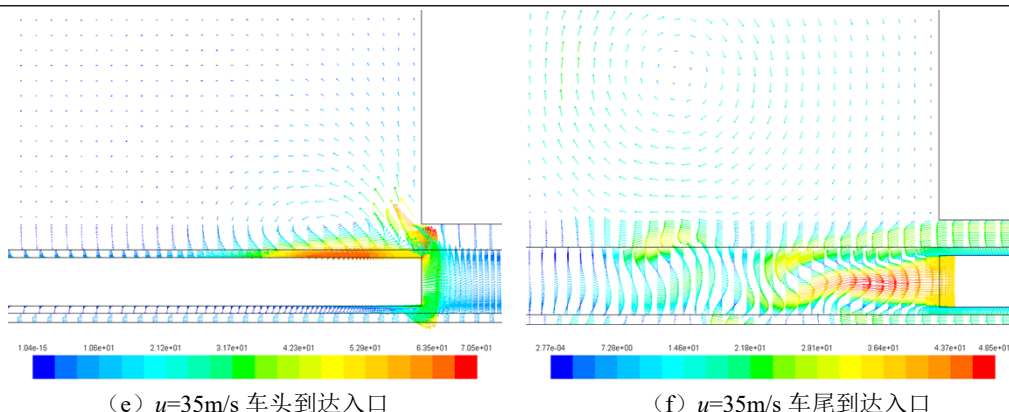


图 2 列车车头、车尾分别到达隧道入口处时活塞风速度矢量图

Fig.2 Piston wind speed vector diagram when the front and rear of the train arrive at the tunnel entrance respectively

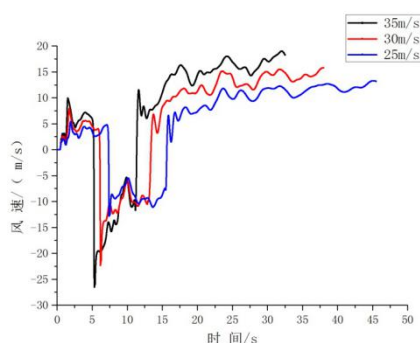


图 3 不同车速过测点时纵向活塞风风速变化时程曲线

Fig.3 Longitudinal piston wind speed variation time history curve when different vehicle speeds pass the measuring point

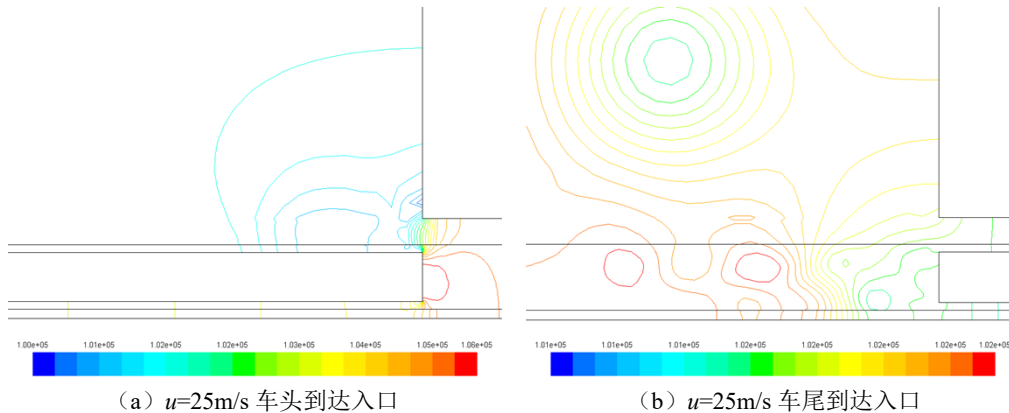
在距离隧道入口 150m 处布置监测点，通过模拟列车在不同速度下的运行过程，得到列车过监测点的纵向活塞风速变化过程曲线，在图 3 中所示。从图中可以看出，当列车以 25m/s 运行时，在 $t=0.4s$ 时，测点处的空气速度仍然为零，表明列车

所产生的空气扰动还未转播到测点。在 $t=0.4\sim 7.07s$ 时间段内，测点风速为正向并以起伏的趋势逐渐增大。当 $t=7.4s$ 时（即列车头部通过测点时），测点风速转向并急剧减小到最小值 $-12.8m/s$ 。在列车车身通过测点的时间段内，测点流速方向与列车行驶方向相反，测点流速值有所回升但变化过程较为起伏。当 $t=15.4s$ 时（列车尾部通过测点时），测点风速再次转向并迅速增大；测点风速值为正向以起伏的方式逐渐增大之后在均值 $11.48m/s$ 上下波动。

从图 3 中还可以得出列车虽然以不同的速度运行时，但在测点处所监测活塞风的变化趋势是相同的。随着列车车速的提高，所产生的活塞风风速也就越大，因此列车的速度对活塞风的影响有着较大的作用。

2.2 压力的分布

列车以不同的速度到达隧道入口时，在其车头和车尾所产生的压力等值线如图 4 所示。



(a) $u=25m/s$ 车头到达入口

(b) $u=25m/s$ 车尾到达入口

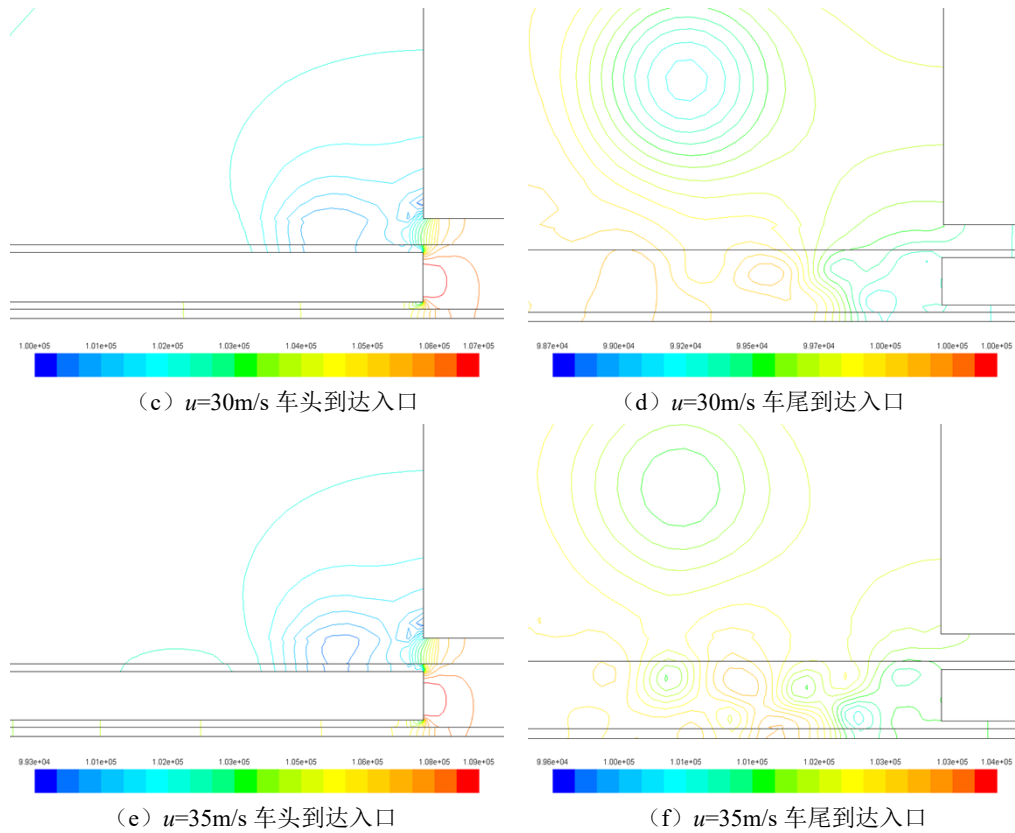


图 4 列车车头、车尾分别到达隧道入口处时压力等值线图

Fig.4 Pressure contour map when the front and rear of the train arrive at the tunnel entrance respectively

从图 4 中可知: 列车头部以较快速度到达隧道入口时, 由于列车周围空间迅速较小和隧道壁面的阻碍, 致使列车前方空气压强突增, 在隧道入口处形成了压缩波, 以声速向隧道出口传播^[10]。列车与隧道壁面之间的环状空间内的空气以及隧道上方的空气也因列车突入, 使其压强也出现剧烈变化, 不同位置处的等压线值相差较大。当列车尾部进入隧道入口时, 由于原来列车车体占据的空间因车尾突然进入隧道被空了出来, 导致隧道口与列车车体之间环状空间的被挤压的空气得以释放, 造成此处的空气压力突然减低出现负压。同时, 在隧道出口处形成了膨胀波, 它同时也以声速超过列车向着隧道出口传播。列车以不同的运行速度进入隧道入口时, 其车头与车尾所产生的压力突变的状况是类似的。随着隧道列车车速的提高时, 车头、车尾在隧道入口处所产生的压力波动也越剧烈。

3 结论

本文通过使用 Fluent17.0 软件中的动网格模型, 模拟了列车在不同车速下通过铁路隧道时, 隧道内部

所产生的活塞风和压力的变化, 现得结论如下:

(1) 列车以不同的速度经过隧道时, 在其内部所产生的活塞风效应的变化规律是相似的。随着列车运行速度的增大, 所产生的活塞风的风速也就越大。

(2) 列车经过隧道内部的某一监测点时, 活塞风的风速会产生突降。当列车经过监测点的速度越大时, 活塞风的风速突降的程度也就越大。

(3) 列车头部达到隧道入口时, 车头处压力骤然增大, 列车周围气体压力波动剧烈; 列车尾部到达隧道入口时, 车尾处压力突然降低, 并出现负压。随着隧道列车车速的提高时, 车头、车尾在隧道入口处所产生的压力波动也越剧烈。

参考文献:

[1] 王丽慧. 地铁活塞风与地铁环控节能[D]. 上海: 同济大学, 2007.
 [2] 于连广, 吴喜平, 彭博等. 隧道列车活塞风解析方法新探[J]. 制冷空调与电力机械, 2010, 31(1): 9-14.