

文章编号:1671-6833(2013)04-0005-05

# 高速铁路双线隧道列车风特性与人员安全性分析

费瑞振<sup>1</sup>, 彭立敏<sup>1,2</sup>, 施成华<sup>1,2</sup>, 杨伟超<sup>1,2</sup>, 雷明锋<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 根据三维不可压缩 Navier-Stokes 方程和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型, 以我国高速铁路普遍采用的 100 m<sup>2</sup> 双线隧道为研究对象, 对高速列车在隧道内运行时列车风的变化规律和分布特征进行了深入研究, 计算隧道内两侧疏散通道上不同位置在列车运行过程中的最大风速, 进一步分析在列车风作用下人员的安全性. 研究表明: 列车风是随时间和空间而变的复杂三维流动, 人员应避免在危险时段活动, 单车正常运行和存在列车事故时列车风均有可能对人员造成安全威胁, 需采取相关措施避免事故发生.

**关键词:** 列车风特性; 人员安全性; 高速铁路; 双线隧道; 数值模拟

**中图分类号:** U458.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.002

## 0 引言

列车高速运行时, 由于车身摩擦阻力和空气黏性作用, 车身周围一定距离内会形成高速流动的列车风. 维修工作者在隧道内进行作业时, 一般会对两条线路同时检修, 活动范围较大; 高速列车因供电故障停运在隧道内时, 车厢内闷热缺氧, 需打开车门进行通风, 此时部分乘客可能离开车厢进入隧道. 无论是一线检修、一线行车(“单车正常运行”)情况, 还是一线停运、一线行车(“存在列车事故”)情况, 行车线路上高速列车引发的列车风必将对隧道内的维修工作者或待疏散乘客造成极大的安全威胁.

国内外学者采用现场实测、模型试验、理论研究和数值模拟等方法对列车风进行了研究<sup>[1-2]</sup>; 但是针对高速铁路双线隧道列车风特性与人员安全性的研究很少.

## 1 计算理论与方法

### 1.1 控制方程

笔者采用三维不可压缩 Navier-Stokes 方程和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型. 当列车的车速  $v_r \leq 360$  km/h 时, 相应的马赫数不大于 0.3, 属于亚音速流, 可

以用三维黏性非定常流动进行处理. 列车流场的雷诺数  $Re$  一般大于  $10^6$ , 可作为湍流流动进行处理<sup>[3]</sup>. 设  $\phi$  为流场某一参数, 则对于任一控制容积  $V$ , 流场控制方程可写成如下形式.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S [\rho \phi U - \Gamma_\phi \text{grad} \phi] dS = \int_V S_\phi dV. \quad (1)$$

当  $\phi = 1, U, e, k, \varepsilon$  时, 方程(1)分别表示连续方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和湍动能耗散率  $\varepsilon$  方程;  $\Gamma_\phi$  和  $S_\phi$  分别为广义扩散系数及广义源项;  $\rho$  为空气密度.

方程(1)没有封闭, 因此引入理想气体的热力学方程和完全气体状态方程:

$$\begin{cases} \rho E = P/(\gamma - 1) + \rho(u^2 + v^2 + w^2)/2; \\ \rho H = \rho E + p; \\ p = \rho RT. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E$  为气体单位质量的总能量;  $P$  为气体压力;  $\gamma$  为气体的绝热指数;  $u, v, w$  为气体在  $x, y$  和  $z$  方向的速度分量;  $R$  为气体常数;  $T$  为空气热力学温度.

### 1.2 计算模型

以我国高速铁路普遍采用的 300 ~ 350 km/h 双线隧道为研究对象, 建立三维仿真模型. 隧道断

收稿日期: 2013-03-27; 修订日期: 2013-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51008310); 国家自然科学基金高铁联合基金资助项目(U1134208)

通信作者: 彭立敏(1956-), 男, 湖南澧县人, 中南大学教授, 博士, 主要从事隧道与地下工程领域的教学与科研工作, E-mail: lmpeng@mail.csu.edu.cn.

面形状如图 1 所示,其横截面积为  $100\text{ m}^2$ . 当隧道的长度为  $1\ 360\text{ m}$  左右时,瞬变压力及列车风会对隧道产生最不利影响<sup>[4]</sup>,故建模时隧道长度取为  $1\ 360\text{ m}$ ,隧道洞口外大气长度取为  $200\text{ m}$ ,大气范围为 3 倍隧道的横截面积. 列车设置为 3 节车厢编组,长度为  $60\text{ m}$ ,车型为 CHR3,列车的基本参数如表 1 所示,建模时保持列车的流线特征,如图 2 所示. 隧道和外部大气为固定部分,列车和周围空气为滑动部分.

表 1 CRH3 列车基本参数  
Tab.1 Train CHR3 parameters

列车类型	断面/ $\text{m}^2$	长度/ $\text{m}$	宽度/ $\text{m}$	高度/ $\text{m}$
CRH3	11.7	60	3.38	3.7

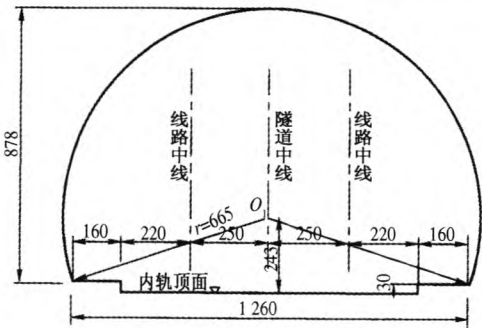


图 1 300 ~ 350 km/h 双线隧道  
Fig.1 Duble-line tunnel for 300 ~ 350 km/h

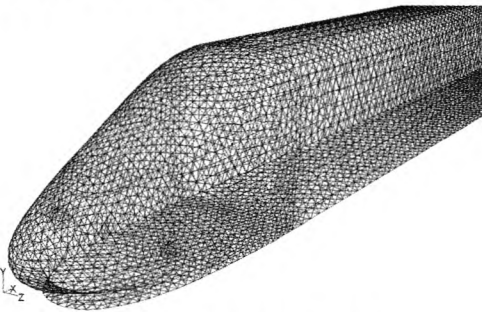


图 2 CRH3 型列车网格图  
Fig.2 Grid of Train CHR3

1.3 边界条件

隧道侧壁及列车表面为固定墙边界,空气在

墙边界的法向速度  $u_n$  和法向压力梯度  $\partial p/\partial n$  为 0,壁面处为无涡流,根据粗糙管壁模型试验确定隧道壁面粗糙度. 隧道与外部大气接触面为压力出口边界,即压力等于初始大气压,压力波在该边界处根据黎曼不变量原理进行反射和扩散. 流出边界流体的切向速度和熵由边界内流场插值确定,流入边界流体的切向速度和熵按自由流场确定. 对列车进入隧道前的流场进行稳定流计算,收敛后流场作为非定常流场的初始条件,列车与隧道的相对运动采用滑移网格技术处理<sup>[5]</sup>.

2 列车风的时程变化规律

高速铁路双线隧道内左右两侧各设一条疏散通道,如图 1 所示,其宽度为  $1.6\text{ m}$ ;疏散通道内边缘到两条线路中线的距离分别为  $2.2\text{ m}$  和  $7.2\text{ m}$ ;当运行列车为 CRH3 时,疏散通道内边缘到列车外壁的距离分别为  $0.51\text{ m}$  和  $5.51\text{ m}$ . 列车以一定速度经过双线隧道时,距列车较近的疏散通道称为“近列车疏散通道”,距列车较远的疏散通道称为“远列车疏散通道”. 为研究列车运行过程中隧道内列车风的时程变化规律,以时速  $300\text{ km}$  为例进行分析.

2.1 单车正常运行时列车风时程变化规律

在隧道内距入口  $400\text{ m}$  的断面设置测点,分别位于近列车疏散通道中线和远列车疏散通道中线上,高于轨面  $1.5\text{ m}$ ,得到正常情况下列车风速度的时程变化曲线,如图 3 所示.

根据图 3 分析可知:①车头经过测点时,纵向列车风风速增大至一个极大值,之后迅速减小;车身经过测点时,风速基本保持不变;车尾经过测点时,风速迅速增大并且后方出现活塞风. ②车头和车尾经过测点时,横向列车风均突然增大,风向分别为远离车头和指向车尾;车身经过测点时,横向列车风基本为零.

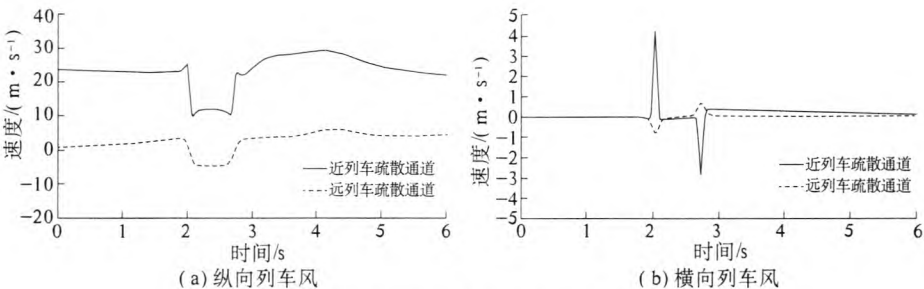


图 3 正常情况下列车风速度的时程变化曲线  
Fig.3 Time-history curves of train wind speed in normal situation

2.2 存在列车事故时列车风时程变化规律

假设事故列车停运在隧道内距入口 20 ~ 80 m 的位置,测点位于距隧道入口 50 m 的近列车疏

散通道中线上,高于轨面 1.5 m. 对比两种情况下的列车风速度,如图 4 所示.

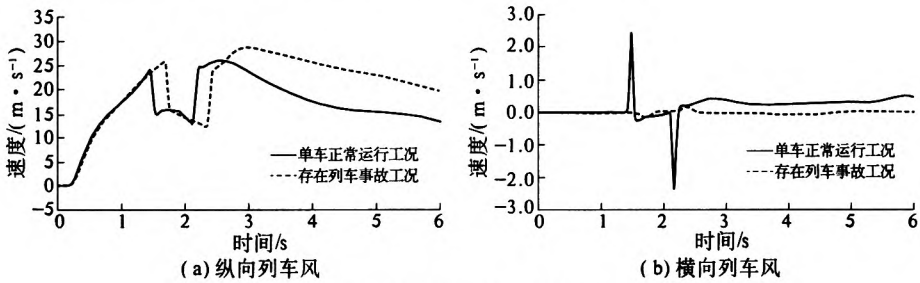


图 4 两种情况下列车风速度的对比  
Fig. 4 Comparison of train wind speed in two situations

根据图 4 分析可知:(1)两种工况下列车风的纵向和横向时程变化规律基本一致.(2)由于事故列车占据测点横断面空间,存在列车事故工况下纵向列车风峰值大于单车正常运行工况,横向列车风峰值小于单车正常运行工况.

3 列车风的空间分布特征

为研究列车运行过程中隧道内列车风的空间分布特征,以时速 300 km 为例进行分析.

3.1 单车正常运行时列车风空间分布特征

列车向右行驶,正向沿正轴,列车运行至隧道中部(车头距洞口 700 m)时,轨顶上方 1.5 m 处水平面纵向列车风分布特征如图 5 所示.

根据图 5 分析可知:①列车头部纵向列车风速度梯度变化大,沿纵向分布范围短,风向与列车运行方向相同.②近列车侧环隙流速比远列车侧大,近列车侧风向和远列车侧风向分别与列车运行方向一致和相反.③列车尾部后方纵向列车风速度梯度变化小,沿纵向分布范围长,风向与列车运行方向相同.

当列车运行至隧道中部时,分析三个典型断面横向列车风的分布特征,如图 6 所示.

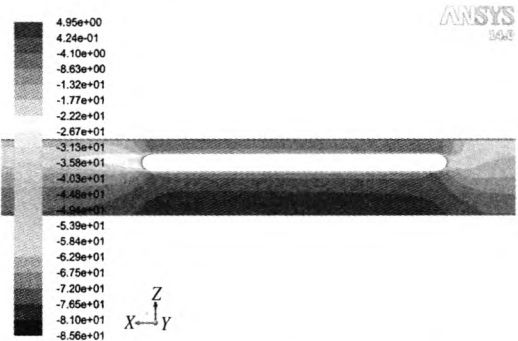


图 5 正常情况时纵向列车风分布云图  
Fig. 5 Longitudinal train wind contour in normal situation

根据图 6 分析可知:①由于流线型车头的排挤作用,车头正压区空气朝左右两侧横向流动,车头两侧环列车壁处横向列车风速度最大,沿列车壁外法向逐渐减小.②车尾两侧空气朝尾部负压区流动,车尾两侧环列车壁处横向列车风速度最大,沿列车壁外法向逐渐减小.

3.2 存在列车事故时列车风空间分布特征

假设事故列车停运在隧道内距入口 20 ~ 80 m 的位置,另一列车自左向右行驶,正向沿正轴,当另一列车在经过事故列车时,轨顶上方 1.5 m 处水平面纵向列车风分布特征如图 7 所示.

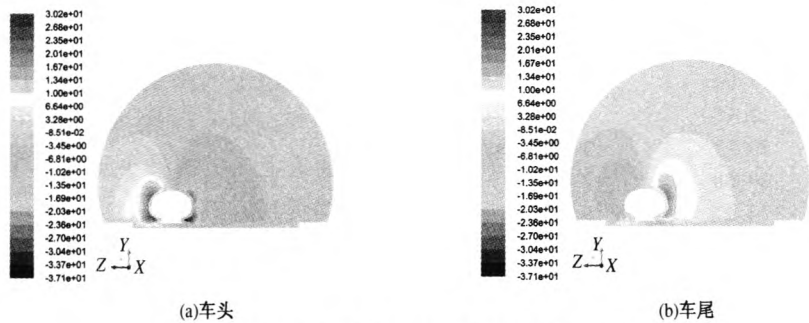


图 6 正常情况时横向列车风分布云图  
Fig. 6 Transverse train wind contours in normal situation

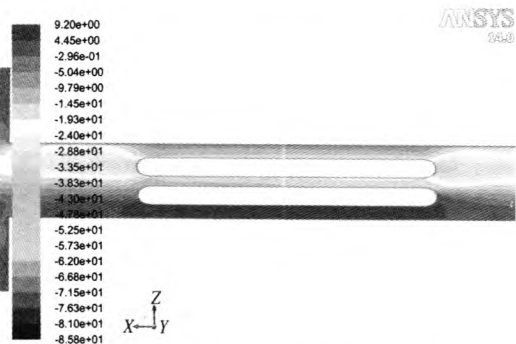


图 7 列车事故时纵向列车风分布云图

Fig.7 Longitudinal train wind contour in accident situation

根据图 7 分析可知:(1)与单车正常运行工况相比,运行列车头部和尾部纵向列车风的风速变大,梯度变小,沿纵向分布范围变长,尾流横向偏移变小;(2)事故列车造成运行列车环隙空间纵向列车风速度变大;(3)与单车正常运行工况相比,纵向列车风对人员的不利影响范围变大,不利影响时间变长。

4 列车风作用下人员安全性研究

高速铁路隧道列车风会对人员产生冲击力,这种力沿纵向和横向迅速变化,疏散通道中线上的人员距列车边缘仅 1 m 左右,极易在列车风作用下倾倒。

4.1 不同车速下人体承受气动力的计算

4.1.1 疏散通道列车风峰值研究

为了解列车运行过程中两条疏散通道上不同位置的最大风速,在两侧疏散通道的不同位置设置测点,四行测点由下至上分别距内轨顶面 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 m;并且沿隧道纵向每隔 50 m 布置一组横断面测点,统计出 100 m<sup>2</sup> 双线隧道疏散通道上列车风的峰值,如表 2 所示。

表 2 疏散通道上列车风峰值统计表  
Tab.2 Maximum train wind speeds on evacuation passageways

列车速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	状况	近车侧风速/ (m · s <sup>-1</sup> )	远车侧风 速/(m · s <sup>-1</sup> )
120	正常	11.99	3.39
	事故	12.15	3.88
200	正常	20.27	7.85
	事故	20.68	8.23
250	正常	24.17	9.36
	事故	24.75	9.81
300	正常	30.06	11.75
	事故	30.10	11.91
350	正常	35.77	15.88
	事故	35.81	16.26

4.1.2 人体承受气动力计算方法

人体姿势多样,与线路呈不同角度,若仔细对人体进行模拟,将使模型过大,影响计算精度,故并未将人体模型建出,可以根据疏散通道内列车风的速度来计算人体承受气动力的大小。

人体承受气动作用力大小按照下式计算。

$$F = p_w \cdot A_p = \frac{1}{2} \rho v_w^2 A_p.$$
 (3)

式中: $p_w$  为列车风压强; $A_p$  为人体承压面积,取值为 1.02 m<sup>2</sup>;  $\rho$  为空气密度,取值为 1.225 kg/m<sup>3</sup>;  $v_w$  为列车风风速。

4.1.3 人员承受气动力峰值研究

根据计算方法,得出 100 m<sup>2</sup> 双线隧道疏散通道上人体承受气动力峰值,如表 3 所示。

表 3 疏散通道上人体承受气动力峰值统计表  
Tab.3 Maximum air forces on people on evacuation passageways

列车速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	状况	近车侧受 力/N	安全性	远车侧 受力/N	安全性
120	正常	89.81	安全	7.18	安全
	事故	92.23	安全	9.41	安全
200	正常	256.69	危险	38.50	安全
	事故	267.18	危险	42.32	安全
250	正常	364.97	危险	54.73	安全
	事故	382.70	危险	60.12	安全
300	正常	564.53	危险	86.25	安全
	事故	566.03	危险	88.62	安全
350	正常	799.36	危险	157.55	危险
	事故	801.15	危险	165.18	危险

4.2 隧道内人员安全性分析

德国和法国通过水槽试验、现场实测等方法,提出了 100 N 的气动力控制标准<sup>[6]</sup>。我国尚无此类标准,笔者参照德国和法国的控制标准。

两种列车运行状态下:车速为 120 km/h 时,两条疏散通道上人员的最大受力为 92.23 N,人员安全性均可以得到保障;车速为 200 km/h, 250 km/h 和 300 km/h 时,近列车疏散通道上人员的最小受力为 256.69 N,人员安全性受到威胁,远列车疏散通道上人员的最大受力为 88.62 N,人员安全性可以得到保障;车速为 350 km/h 时,两条疏散通道上人员的最小受力为 157.55 N,人员安全性均受到威胁。

5 结论

(1)列车风在列车车头和车尾经过时,风速增大,为危险时刻。在车身经过时,风速基本不变。

纵向列车风风向始终沿列车前进方向,横向列车风在列车车头和车尾经过时,风向分别沿列车壁外法向和内法向.存在列车事故时,列车风的时程变化规律基本不变,纵向和横向列车风峰值分别变大和变小.

(2)列车车头和车尾环列车壁处横向列车风速最大,沿列车壁外法向逐渐减小.存在列车事故时,列车风的空间分布特点基本不变,纵向列车风的不利影响范围和时间分别变大和变长.

(3)检修工作者应在天窗期进入隧道工作,隧道一线检修、一线行车的情况下,列车必须限速120 km/h通过隧道;运行列车经过检修区域前,检修工作者必须躲避在远列车疏散通道上.

(4)高速铁路双线隧道存在列车停运事故时,事故线路严禁列车运行,相邻线路列车必须限速120 km/h通过隧道.事故列车中乘客应躲在车内,等待救援列车将事故列车拖出隧道.

### 参考文献:

- [1] 杨伟超,彭立敏,施成华,等.地铁活塞风作用下屏蔽门的气动特性分析[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(2):121-123.
- [2] 肖京平,黄志祥,陈立.高速列车空气动力学研究技术综述[J].力学与实践,2013,35(2):3-10.
- [3] 武青海,周虹伟,朱勇更.高速列车湍流场数值仿真计算探讨[J].铁道学报,2002,24(3):99-103.
- [4] 杨伟超,彭立敏,施成华.隧道竖井对车体压力的作用机理及影响因素分析[J].中国铁道科学,2009,30(3):68-72.
- [5] 骆建军,高波,王英学,等.高速列车穿越带有竖井的隧道三维数值模拟[J].西南交通大学学报,2004,39(4):442-446.
- [6] 徐鹤寿,何德昭,王厚雄.准高速列车侧向人员安全距离的研究[J].中国铁道科学,1996,17(1):21-31.

## Characteristics of Train Wind and Analyses of Personnel Security in High-Speed Railway Double-Line Tunnel

FEI Rui-zhen<sup>1</sup>, PENG Li-min<sup>1,2</sup>, SHI Cheng-hua<sup>1,2</sup>, YANG Wei-chao<sup>1,2</sup>, LEI Ming-feng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Center South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory of High Speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China)

**Abstract:** According to the three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations and the standard turbulence model, the 100 double-line tunnel cross-section which is generally used in high-speed railway of China is studied, this paper has made a thorough study on the variation rules and distribution characteristics of train wind, and has calculated the maximum wind speed at different positions on the two evacuation passageways, at the same time the influence that train wind on personnel safety is further discussed. The results show that: Train wind is complex three-dimensional flow which is changed with time and space, person should avoid activities at dangerous time, personnel safety may be threatened by train wind on two train driving conditions: one is that a single train runs through tunnel normally while the other is that another train runs beside a train parked in the tunnel. Corresponding measures should be taken to avoid accidents.

**Key words:** characteristics of the train wind; personnel security; high-speed railway; double-line tunnel; numerical simulation