

真空管道车辆活塞风的气动特性与变化规律

杨易, 强光林[†], 彭旭

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:活塞风是真空管道运输内流场的主要气动特征,掌握活塞风的基本特征和变化规律,是合理有效控制管道流场的基础.文中采用计算流体力学方法,结合动网格技术,分析、探讨了活塞风的产生机理,气动特性和真空度、阻塞比、行车速度等作用条件对活塞风的影响.研究发现管道中的空气在车辆行驶过程中会被压缩、膨胀,产生压缩波和膨胀波并对车辆的行车阻力产生影响;通过不同真空度、阻塞比和行车速度的系列组合计算,发现车辆的行车阻力会随着阻塞比的增大、压强的上升、速度的提高而变大,当速度提高到一个阈值时,车辆行车阻力的上升开始变缓.

关键词:真空管道运输;活塞风;计算流体力学;机理

中图分类号:U171

文献标志码:A

Aerodynamic Characteristics and Change Rules of Vehicle Piston Wind in Evacuated Tube

YANG Yi, QIANG Guanglin[†], PENG Xu

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Piston wind is the main aerodynamic characteristics of the flow field in the evacuated tube, and thus grasping the basic characteristics and variation rules of the piston wind is the basis of a reasonable and effective control of the flow field of the tube. In this paper, the influences of piston air generation mechanism, aerodynamic characteristics and degrees of vacuum, blockage ratios, driving speeds and other conditions on the piston wind were analyzed and discussed by using the methods of computational fluid dynamics and dynamic meshing. This study finds that air in the pipeline is compressed and inflated during the running of the vehicle, producing compression and expansion waves and affecting the vehicle's driving resistance; Through a comprehensive analysis on a series of combined calculations for different degrees of vacuum, blockage ratios and driving speeds, it is found that the vehicle's driving resistance increases with the growth of the blocking ratio, pressure, and speed. Further, when the speed increases to a threshold, the increase of the vehicle's driving resistance begins to slow down.

Key words: evacuated tube transportation; piston wind; computational fluid dynamics, mechanism

* 收稿日期:2019-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375155), National Natural Science Foundation of China(51375155)

作者简介:杨易(1972—),男,湖南长沙人,湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail: 399835178@qq.com

空气阻力是限制地面高速交通运行速度的决定性制约因素^[1]。由于气动阻力与运行速度的二次方成正比^[2],在地表稠密大气层中运行的高速交通工具很难突破高速的极限及高速带来噪音的影响。真空管道高速交通系统将运动载体放在抽成低气压的密闭管道里运行,其所处的介质发生变化,由此可以实现跨音速运行。作为一种新型的交通运输模式,真空管道高速交通系统与现有交通模式相比,具有高速度、低能耗、环保性好、安全性能高等优点^[3],将来在交通运输事业发展中必将发挥巨大作用。

活塞风是真空管道内流场的主要特征,对管道内车辆绕流产生深刻的影响^[4]。掌握活塞风的基本特征和确定活塞风的变化规律,是合理有效控制管道流场的基础。国内外学者对隧道和地铁活塞风均做了相关研究工作,但是围绕真空管道交通系统活塞风的研究还缺乏针对性和系统性。本文基于计算流体力学方法,采用移动网格技术对真空管道活塞风的气动特性进行数值计算,研究不同真空度、阻塞比、行车速度等作用条件对活塞风的影响,为真空管道交通系统工程应用提供参考。

1 模型与方法

1.1 模型的建立与参数

本文真空管道车辆模型与设计参数来自美国SpaceX公司发布的Hyperloop白皮书,如图1所示,车辆的长度为30 m,高度为1.336 m,车头和车尾的长度由设计造型确定。为了在仿真计算过程中有效地减弱压力波的反射作用,管道的长度要足够长,车身后边界与真空管入口的距离为600 m,车身前边界到真空管出口的距离为1 470 m,圆形管道的总长为2 100 m,直径为2.3 m。管道内的压力变化为100 ~ 2 000 Pa。车辆从静止加速到140 m/s后保持匀速运行,再加速到240 m/s保持匀速运行,最后加速到340 m/s保持高速行驶。

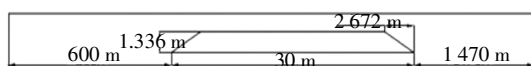


图1 真空管道车辆模型

Fig.1 Vacuum pipeline vehicle model

1.2 基本假设

1) 根据车辆的设计速度,管道中流场的雷诺数大于 10^5 ,因此认为流体是湍流^[5]。文中流场仿真使用

$k-\omega$ SST 湍流模型。

2) 当马赫数(Ma) > 0.3 时,管道内的流体一般假定为可压缩的^[6]。文中车辆行驶的速度大于 $0.3 Ma$,因此认为管道中流体是可压缩的。

3) 管道内的温度为293 K,并保持恒定。

4) 选择车辆最大纵截面作为计算平面^[7],并且假定车身完全光滑,没有间隙或表面缺陷。

5) 由于Hyperloop管道车辆采用气悬浮或磁悬浮形式,机械摩擦可以忽略不计,因此文中仅考虑气动阻力^[8]。

1.3 计算网格与条件设置

1.3.1 动网格技术

为了模拟车辆在管道内的真实运动情况,使计算得到的结果能够准确地反映物理现象,本文使用了动网格技术^[9]。由于计算网格为三角形网格,采用扩散光顺与局部重构相结合的方法。

1.3.2 网格的划分

由于管道的直径很小,故车身外表面附近的网格尺寸也很小,但车辆运动速度很快,车身边界会进行大尺度运动。为避免网格的畸变率过大,出现负体积,通常采用的方法是将时间步长设置得很小,但会导致计算效率低下,耗费计算资源与时间^[10]。为解决这一问题,本文采用了域盒动网格策略,如图2和图3所示,在车身周围建立一个封闭的矩形边界域盒,对域盒内外的区域分别进行网格划分。在计算时,域盒内部的网格随着车身一起运动,因此域盒内部的网格不再进行重构,只有域盒外部的网格发生更新与变形。这样就避免了小尺寸网格更新给计算带来的限制。



图2 真空管道车辆网格模型

Fig.2 Vacuum pipeline vehicle grid model

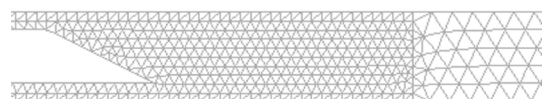


图3 域盒边界处网格

Fig.3 Domain box boundary grid

1.3.3 边界条件设置

管道入口的边界条件设置为“压力入口”,管道出口的边界条件设置为“压力出口”。管道车辆表面和管道内壁设定为固定的无滑移界面。

2 活塞风的运动规律与气动特性

2.1 活塞风的形成

在管道中运行的车辆，可看作是做纵向运动的具有一定长度和阻塞比的活塞.在运行的过程中，车身与周围空气通过复杂的运动和力的作用关系，完成了两者之间的能量转换.空气获得能量的表现即为车辆的增压效应，在车辆的增压效应下，管道中会形成纵向气流，即活塞风.对管道中活塞风的研究，便于对车辆在管道中的运行情况有更深入的了解.

2.2 活塞风的运动规律

为了观察车身周围活塞风的运动情况，在管道车头的前上方设立固定测点，测点位置如图4所示.在管道气压为1000 Pa时，让车辆从静止加速到140 m/s.从图5可以看到测点处的气流运动方向的波动.波动原因是车辆在管道里起动车加速时，车身和管道壁面限制了空气的纵向流动和上下流动，从而使车头前方的空气受到压缩而随车辆向前移动，气流运动方向是向前的.当车辆运行到测点正下方时，由于车辆头部空气的挤压，上方的空气被挤进车身与管道之间的环隙，克服车身与管道壁面的摩擦阻力向后运动，此时测点处的气流是向后运动的.当车辆运行到测点前方时，在车尾部会形成负压区域，测点气流方向会随着车辆运动从后向到前向转变.

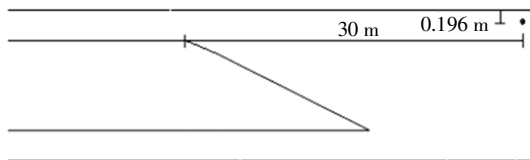


图4 测点位置
Fig.4 Measuring point position

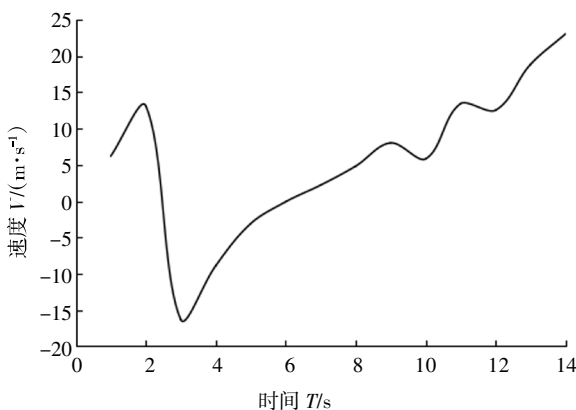


图5 测点处气流沿出口方向的速度
Fig.5 Velocity of the airflow in the direction of the outlet

图6显示了测点处气流在管道横向的运动情况.从图中可以看到，速度只有一处沿管道横向的波动，其余时刻速度几乎接近于0.这是因为在3 s左右，测点位于车头正上方，测点处空气受到车头和车辆前部空气的共同挤压，向上运动.

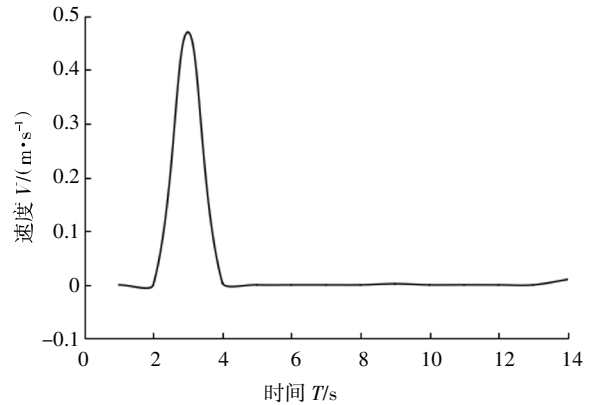


图6 测点处气流的横向速度
Fig.6 Lateral velocity of the airflow

图7测点处的压力图也能从压力的角度印证上述结论.从图7中可以看到，测点处的压力一开始是大于1000 Pa的，这说明测点处的空气一开始的确受到了挤压.随着车辆的运行，测点进入环隙，空气变得稀薄，压力快速降低，当测点进入车尾后，空气从环隙喷射进入车尾后方空间，压力继续下降，受到车尾膨胀波的影响而有所上升.

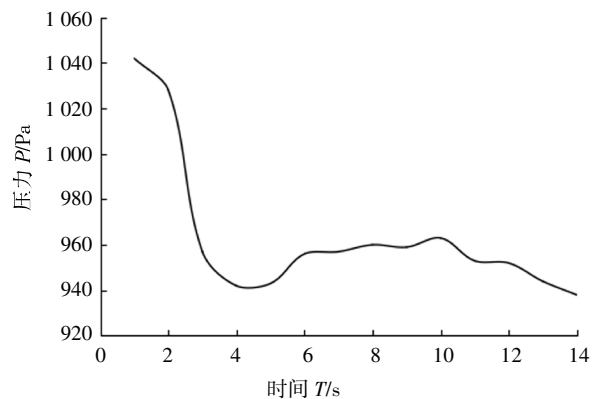


图7 测点处的压力
Fig.7 Pressure at the measuring point

2.3 活塞风的气动特性

2.3.1 压缩波与膨胀波

当管道车辆运动时，如同一个活塞在打气筒中运动一样，活塞前方空气被压缩，后方空气膨胀，会在车头和车尾分别形成压缩波和膨胀波.它们会沿车辆运行方向传播，但管道是无限长的，两个方向上的波都不会发生反射.图8说明了随着车辆的运动，车辆前后分别形成压缩波和膨胀波的情况.图9所示

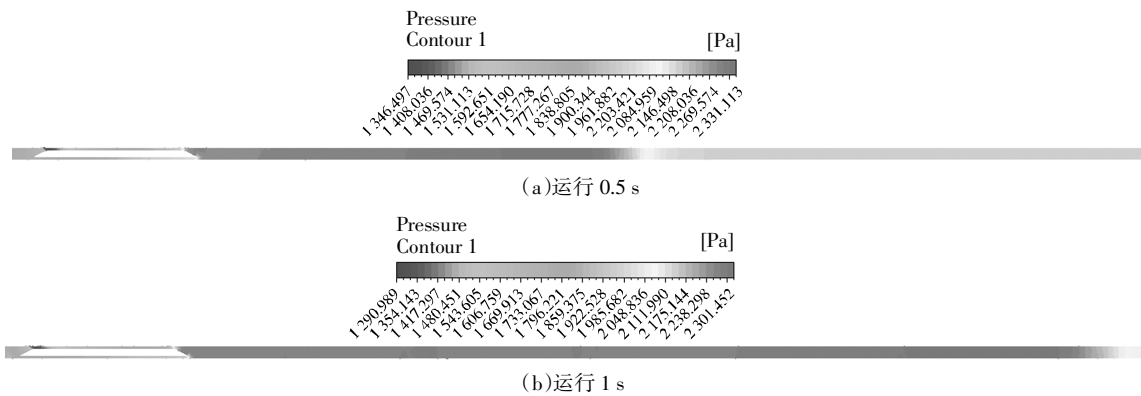


图 8 车头前方压力分布
Fig.8 Pressure in front of the head

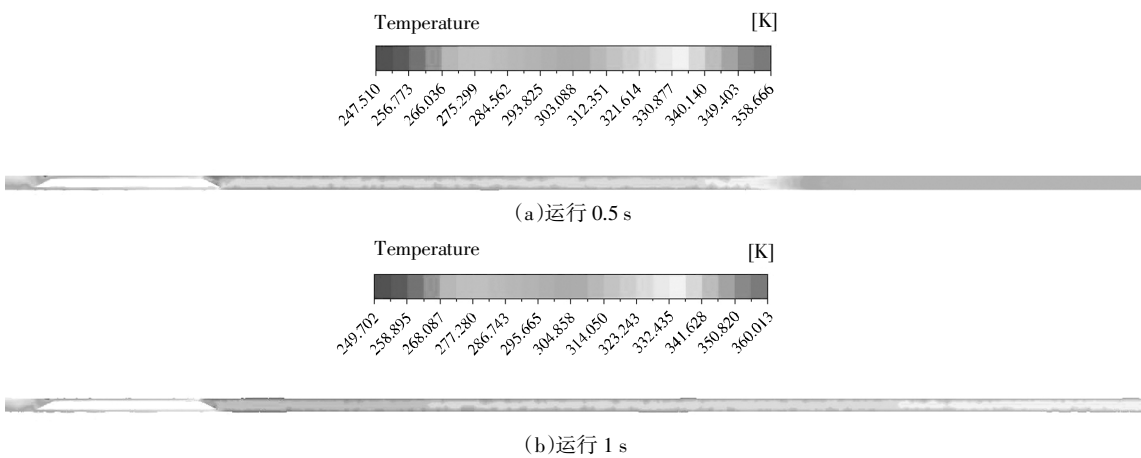


图 9 列车周围温度分布

Fig.9 Temperature distribution around the train

为车辆在运行了 0.5 s、1 s 时,管道内的空气温度分布图.从图中可以看出,随着压缩波不断向前传播,空气温度也逐渐升高,最高温度达到 360 K.由于温度升高,流场内的音速 u 也会增加,音速随温度增加的公式为:

$$u = 331 + (0.60 \times T) \quad (1)$$

将压缩波所处流场温度代入音速公式,可知压缩波传播速度大约为 371 m/s.

为了观察启动时车尾膨胀波对车辆气动阻力的影响,图 10 对膨胀波传播与车辆气动阻力的变化进行了对比.车辆启动后向后传播的膨胀波在管道入口处产生了反射,在与车辆相遇后对气动阻力造成了影响,在 5.5 s 时,后方反射回来的压缩波与车尾相遇,使车尾的正阻力降低.虽然有空气从车头通过环隙来到了车尾,但是由于管道直径小导致环隙也很小,车头产生的压缩波对车尾影响不大,车尾产生的膨胀波对车头施加的影响也很小,故在图 9 和图 10 中,省略了车尾产生的膨胀波向车头传播与车头产生的压缩波向车尾传播的曲线.

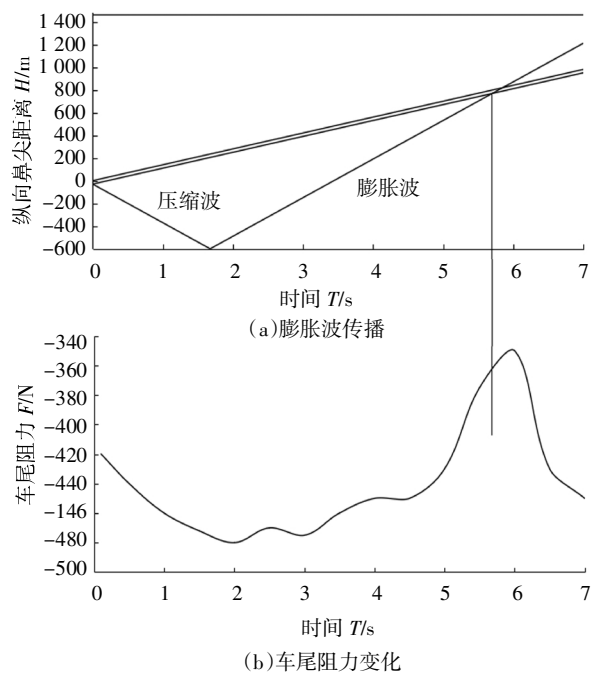


图 10 车尾膨胀波对真空管道阻力的影响

Fig.10 Effect of rear swell wave on vacuum pipe resistance

2.3.2 环隙流场的空气流动

除了车身前后的压缩波与膨胀波,环隙空间的气流流动情况也与车辆的气动特性紧密相关^[1].环隙的气流流动受到运动的车辆壁面、静止的管道壁面和车身前后压差的共同影响.图 11 为速度达到 240 m/s 时,在车辆正上方位置选取一系列测点,测量测点处的速度大小得到的环隙流场的速度分布情况.从图 11 中可以看到,由于车辆的高速运动,离运动的车辆壁面较近的测点速度都较高,越靠近静止的管道壁面,速度越低,而在静止的管道壁面附近的测点速度为负值,这说明部分空气从车辆前方通过环隙被挤压进车辆后方.环隙空间的气流速度分布受到很多因素的影响,在下节会作进一步的分析.

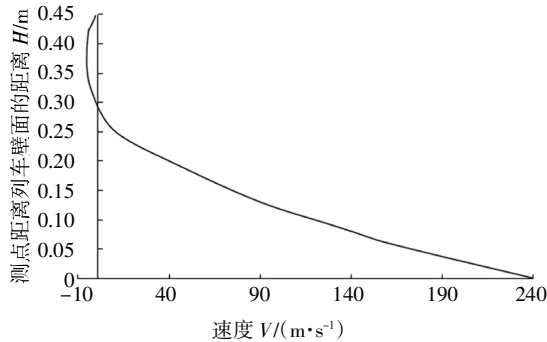


图 11 环隙流场的速度分布情况
Fig.11 Velocity distribution of annular flow field

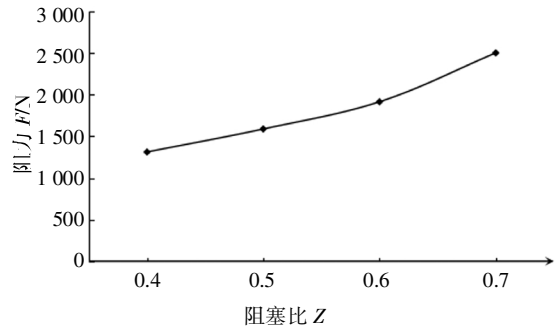
3 活塞风的变化规律

3.1 不同阻塞比下活塞风的变化规律

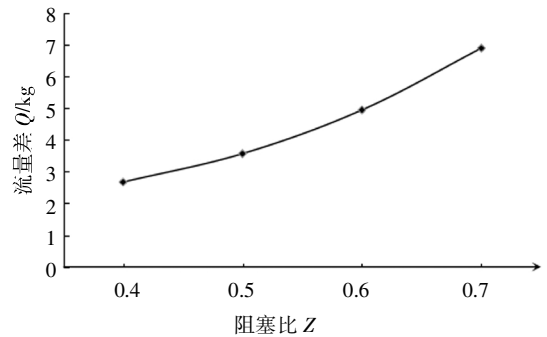
当真空管道内压强为 1 000 Pa, 车辆以 240 m/s 的速度运行时,分析列车在管道直径分别为 1.91 m、2.23 m、2.67 m、3.34 m, 即阻塞比 Z 分别为 0.7、0.6、0.5、0.4 时管道活塞风的变化规律.

图 12 为管道内压强和车辆运行速度一定时,不同阻塞比情况下的车辆气动阻力数值图.从图 12(a) 中可以发现,随着阻塞比的增大,车辆的气动阻力呈上升趋势.对比图 12(b),发现不同阻塞比时的车头车尾流量差曲线有相似的上升趋势,阻塞比增大,车辆车头车尾的流量差也增大.这是因为当车辆与管道的阻塞比增大时,能通过环隙的空气变少,导致前后截面的空气流量差增大,且车辆阻塞比越大,差值越大.而流量差越大,说明堵塞在车头前方的空气越多,车尾部分的空气并没有随阻塞比的增大而有多少增加,导致车头车尾的压差越大,压差阻力也越大.图 13 是在不同阻塞比的管道中车辆速度达到

240 m/s 时,环隙流场的速度分布情况.从图 13 中可以看到,随着阻塞比的增大,往车辆后方运动的测点越来越少,测点的运动速度也更低,这进一步验证了前述结论.



(a)不同阻塞比时的阻力



(b)不同阻塞比时的车头车尾流量差

图 12 不同阻塞比时流量差与阻力对比

Fig.12 Comparison of flow difference and resistance under different blocking ratio

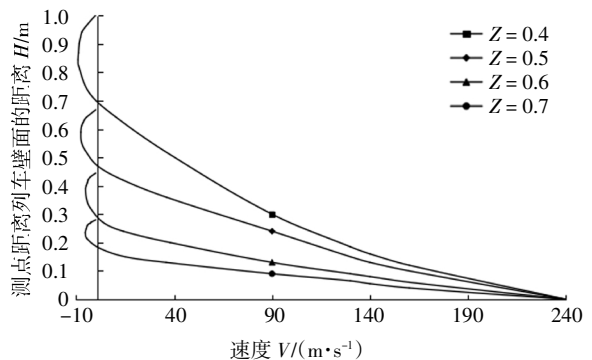


图 13 不同阻塞比环隙流场的速度分布情况

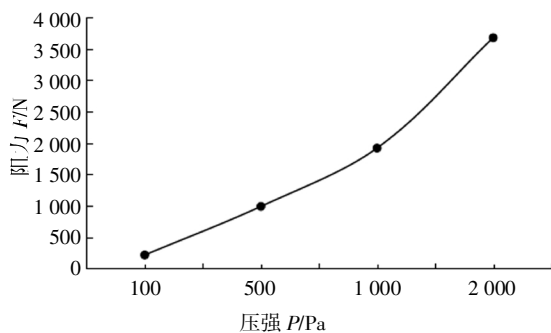
Fig.13 Velocity distribution of different blocking ratio annular flow field

3.2 不同真空度下活塞风的变化规律

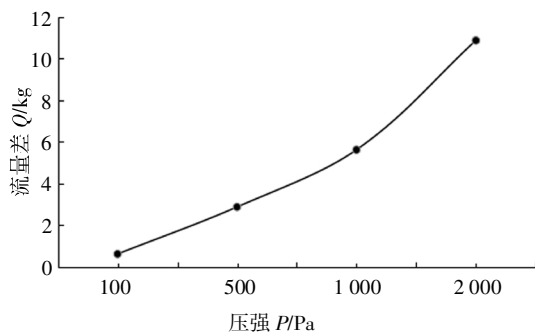
当真空管道的阻塞比为 0.6, 车辆以 240 m/s 的速度运行时,分析车辆在不同管道压强分别为 100 Pa、500 Pa、1 000 Pa、2 000 Pa 时管道活塞风的变化规律.

图 14 为管道的阻塞比和车辆运行速度一定时,在不同的管道压强下,车辆受到的气动阻力数值图.

由图 14(a)可看到,在同一速度下,当管道内气压增大时,车辆受到的气动阻力上升,且管道内气压越高,气动阻力上升越显著.而从图 14(b)中可发现在不同管道压强情况下,车头车尾流量差变化有相似的规律,在同一速度下,当管道内气压增大时,通过车辆前后截面的气流量差也增大,且管道内气压越高,差值越大.两图对比,曲线基本吻合,这是因为当管道内压强升高时,通过车辆前后截面处的气流流量差越大,说明堵塞在车头前方的空气越多,而车尾处的空气密度却没有发生很大变化,因此车头车尾的压差越大,压差阻力也越大.



(a)不同管道压强时的阻力



(b)不同管道压强时的车头车尾流量差

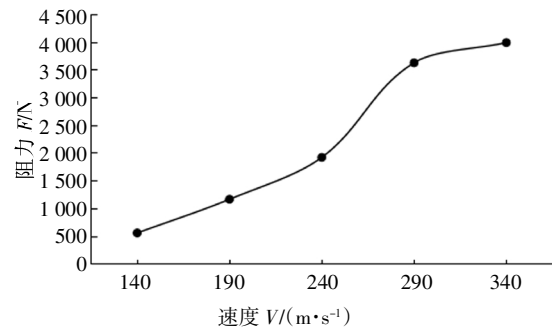
图 14 不同压强下流量差与阻力对比

Fig.14 Comparison of flow difference and resistance under different pressures

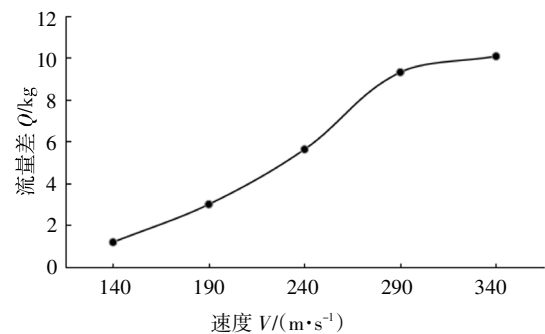
3.3 不同车速下活塞风的变化规律

根据 Hyperloop 白皮书要求,本文设定车辆通过 3 次加速,即从静止分别加速到 140 m/s、240 m/s 最后达到 340 m/s 的匀速运行状态.在管道阻塞比为 0.6,管道压强为 1 000 Pa 时,从图 15(a)可以看到,气动阻力随车速增加而提高,但当速度到达 340 m/s 左右时,阻力上升趋于平缓.对比图 15(b),可发现:在同一真空度下,当车速增大时,通过车辆前后截面的空气流量差增大,但当速度达到 340 m/s 左右时,车头前后的流量差基本不再变化.这是因为当车辆在管道中高速运动时,存在一个最小的车辆截面积

与管道截面积比,如果超过这个比例,管道会被堵住,如同日常生活中见到的针管一样.因此管道车辆运行速度超过一定阈值,由于车辆头部对空气的压缩作用,前方的空气密度增加,车头的空气不能有效流动到车辆尾部,大量的空气微团淤塞在车辆前方,气动阻力急剧上升,导致 Kantrowitz 极限现象的出现.但当车辆速度继续增加时,相当于加大车辆驱动力,迫使前方堵塞气体从车辆与管道之间流到车辆



(a)不同速度下的阻力



(b)不同速度下的车头车尾流速差

图 15 不同速度下流量差与阻力对比

Fig.15 Comparison of flow difference and resistance under different speeds

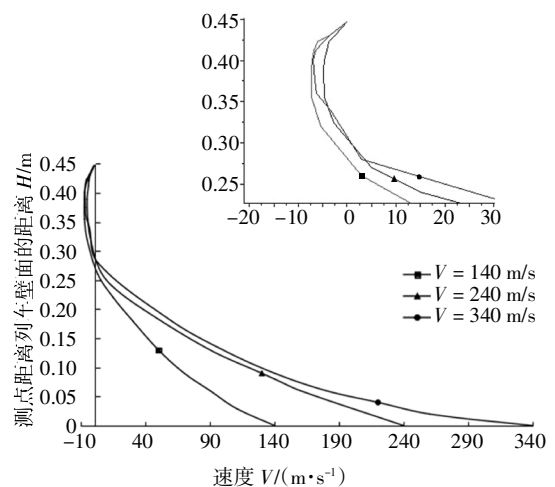


图 16 不同速度时环隙流场的速度分布情况

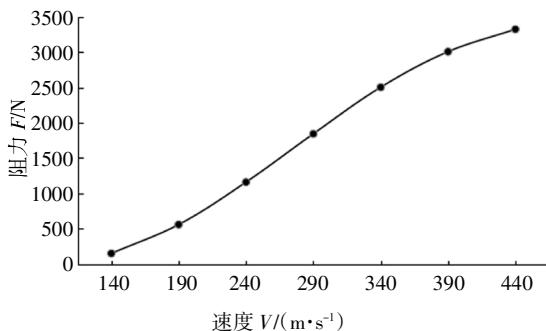
Fig.16 Velocity distribution of annular flow field at different speeds

后部,导致车身后后的流量差没有再随速度的提高而上升,甚至有所减小,因此车头车尾的压差不再上升,阻力基本不变.图16是在车速分别达到140 m/s、240 m/s、340 m/s时,环隙流场的速度分布情况.从图中可以看到,车辆在140 m/s时,环隙流向车尾的气流最多,340 m/s与240 m/s时流向车尾气流速度相差不大.

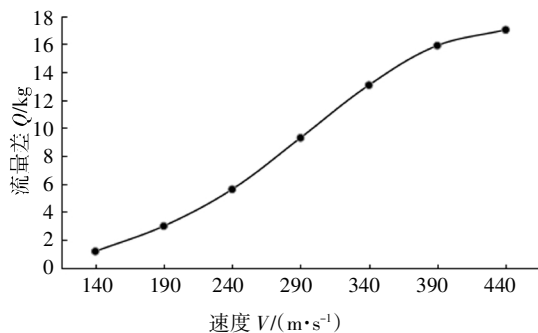
4 三维模型仿真分析

为了进一步了解真空管道车辆活塞风的气动特性,本文采用2016年Hyperloop全球管道车辆设计大赛美国德州农工大学参赛的三维车体模型进行分析,对比不同速度下车辆运行时受到的气动阻力与活塞风运动情况.

在管道阻塞比一定,真空管道压强为1 000 Pa,车辆在速度达到140 m/s、240 m/s与340 m/s时车身受到的阻力如图17所示.在三维仿真中,当速度上升到340 m/s时,车辆气动阻力和车头车尾流量差的上升并没有放缓,而当列车速度上升到440 m/s左右时,车辆气动阻力和前后流量差值上升才开始变缓,



(a)不同速度下的阻力



(b)不同速度下的车头车尾流量差

图17 流量差与阻力对比

Fig.17 Flow difference and resistance

这是因为三维模型的车身造型具有减阻效果,使车辆的气动阻力整体下降,车头附近的空气能够更流畅地来到车尾附近,阻塞在车头前方的空气变少.图18为阻塞比一定,管道压强为100 Pa时,车辆车身周围的空气压力云图,从图18中看到,随着速度的提升,车头部分压力峰值增大,但随着速度的提升,峰值增大的幅度变小.

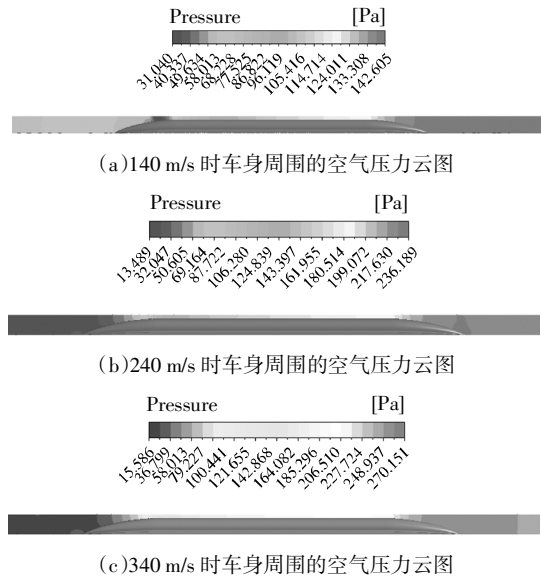


图18 车辆车身周围的空气压力云图

Fig.18 Pressure contour of vehicle

5 结论

本文通过计算仿真对Hyperloop系统中的管道车辆的活塞风的气动特性与变化规律进行了分析,得出以下结论:

- 1)车辆在管道中运行时会产生压缩波与膨胀波,它们的传播会影响管道的纵向流场.
- 2)环隙空间的气流运动情况与车辆的气动阻力相互影响,且气流流速与车辆速度、阻塞比等因素有关.
- 3)真空管道交通系统基本参数(真空度、运行速度、阻塞比)对车辆气动阻力影响较大,在选取参数时还必须综合考虑系统安全运营、旅客舒适度、运行速率、建设成本和运营成本等诸多因素.
- 4)随着车速的提高,车头前方淤塞的空气增多,车辆的气动阻力有一个显著上升的过程.但随着驱动力的增加,车辆挤压效应使得车辆的气动阻力上升趋势变缓.

Hyperloop 白皮书中所提出的加装车载抽吸系统设想,本文未加以讨论.可以预见,车载抽吸系统必然对管道活塞风的气动特性和变化规律产生巨大影响.今后将对相关方面进行深入的研究.

参考文献

- [1] 米百刚,詹浩,朱军.基于动网格的真空管道高速车辆阻力计算方法研究[J].真空科学与技术学报,2013,33(9):877—881.
MI B G,ZHAN H,ZHU J. Simulation of aerodynamic drag of high-speed train in evacuated tube transportation [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(9): 877—881. (In Chinese)
- [2] 董婷婷.高速车辆隧道气动性能分析[D].成都:西南交通大学机械工程学院,2013:1—5.
DONG T T. Study on aerodynamic performance of high-speed trains in the tunnel [D]. Chengdu:School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2013:1—5. (In Chinese)
- [3] 金茂菁,黄玲.超高速真空管道交通技术发展现状与趋势[J].科技中国,2017(11):1—3.
JING M J,HUANG L. Development status and trends of super high speed vacuum pipeline traffic technology [J]. Science and Technology in China,2017(11):1—3. (In Chinese)
- [4] 贾文广,董晨光,周艳.基于阻塞比的真空管道交通系统热压耦合研究[J].工程热物理学报,2013,34(9):1745—1748.
JIA W G,DONG C G,ZHOU Y. Study on thermal-pressure coupling effect in the evacuated tube transportation system on blocking ratio [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013,34(9):1745—1748. (In Chinese)
- [5] 李炎,周鸣镝,孙三祥,等.隧道活塞风模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(1):145—149.
LI Y,ZHOU M D,SUN S X, *et al.* Model test study on piston wind of tunnels [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2015,12(1):145—149. (In Chinese)
- [6] 陈绪勇.真空管道磁悬浮车辆空气动力学问题仿真分析[D].成都:西南交通大学机械工程学院,2013:13—17.
CHEN X Y. Aerodynamic simulation analysis of evacuated tube maglev trains [D]. Chengdu:School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University,2013:13—17. (In Chinese)
- [7] 刘元森.真空管道磁悬浮车辆空气阻力仿真及其救援研究[D].成都:西南交通大学机械工程学院,2013:22—26.
LIU Y S. Numerical simulation on the aerodynamic drag and research rescue system of maglev train of evacuated tube transportation system [D]. Chengdu:School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University,2013:22—26. (In Chinese)
- [8] 贾文广.真空管道交通系统热动力学特性研究[D].青岛:青岛科技大学机电工程学院,2013:26—33.
JIA W G. The characteristic investigation of evacuated tube transport system on thermodynamics [D]. Qingdao: College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology,2013:26—33. (In Chinese)
- [9] 段瑞响.真空管道交通系统热压耦合的气动特性研究[D].青岛:青岛科技大学机电工程学院,2014:25—34.
DUAN R X. Research on thermal-pressure coupling effect aerodynamic characteristic in the evacuated tube transport system [D]. Qingdao: College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology,2014:25—34. (In Chinese)
- [10] KIM T K,KIM K H,KWON H B. Aerodynamic characteristics of a tube train [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2011,99(12):1187—1196.
- [11] 汤兆平,杨建国,吴松棋.真空管道运输系统的参数化概念设计[J].制造业自动化,2013,35(7):118—121.
TANG Z P, YANG J G,WU S Q. Parametric conceptual design of evacuated tube transportation [J]. Manufacturing Automation, 2013,35(7):118—121. (In Chinese)