

二维管道列车交会激波特性分析

伊严严 黄尊地* 周镇斌 陈传仰
(五邑大学轨道交通学院 广东 529020)

Analysis on Shock Wave Characteristics of Two-Dimensional Rendezvous Train in Tube

YI Yanyan, HUANG Zundi*, ZHOU Zhenbin, CHEN Chuanyang
(School of Rail Transportation, Wuyi University, Guangdong 529020, China)

Abstract The train running in the low vacuum tube can greatly reduce the resistance, but it also faces the problem of the shock wave effect. We establish a two-dimensional tube simulation model. The compressible unsteady SST $k-\omega$ turbulence model combined with sliding mesh technology was used to study the evolution of shock waves in the tube under different initial intersection distance, velocity and time. The results show that when the two trains are far away from each other, the congestion section in front of the train moves forward, and the congestion length increases linearly with time. When the normal shock waves disturb each other, the absolute value of drag/pressure increases sharply. When the two locomotives meet, the absolute value of resistance/pressure increases sharply again to the maximum value and decreases sharply to a relatively stable state with the operation of the train. During the intersection, the resistance/pressure decreases first and then increases along the tail direction. Shock wave and expansion wave cross each other in the rear area; the wave system is more complex, and the intensity of the shock wave reflection is weakened along the rear direction. With the increase of the intersection distance, the resistance/pressure of the train running in short and medium tunnels (<1500 m) changes dramatically. Long tunnel (>1500 m) resistance/pressure change amplitude is small. As the speed increases, the length of the congestion section in front of the train is shortened, the resistance/pressure absolute value increases, the length of the rear shock train increases, and the intensity decreases.

Keywords Tube train rendezvous, Congestion length, Aerodynamic drag, Shock wave characteristics

摘要 列车在低真空管道内运行可以极大的减少阻力,但同时面临激波效应等难题。建立二维管道仿真模型,采用可压缩非定常 SST $k-\omega$ 湍流模型并结合滑移网格技术,研究不同起始交会距离、速度、时间下管道内激波演变规律。结果表明:两车相距较远时,列车前方壅塞区段向前推进,壅塞长度随时间线性递增,正激波相互扰动时,阻力/压力绝对值激增;两头车交会时,阻力/压力绝对值再次激增达到最大值,随列车的运行又急剧下降到相对平稳状态,交会过程中阻力/压力沿车尾方向先降低后增大。车尾区域存在激波、膨胀波相互交叉干涉现象,波系较为复杂,沿车尾方向激波反射强度减弱。随交会距离的增加,列车行驶在短、中长隧道(<1500 m)阻力/压力变化剧烈,长隧道(>1500 m)阻力/压力变化幅值较小。随速度的增加,列车前方壅塞区段长度缩短,阻力/压力绝对值增大,车尾激波串长度增加,强度减弱。

关键词 管道列车交会 壅塞长度 气动阻力 激波特性

中图分类号:U171

文献标识码:A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202208024

低真空管道磁浮技术相对于铁路轮轨式运输
是一项革新性的技术,是一项巨大的系统工程,此

项技术可以极大的减少阻力,而空气动力学是目前
管道磁浮列车必须解决的关键问题之一^[1]。

收稿日期:2022-08-31

基金项目:江门市基础与应用基础研究重点项目(JZ202201);五邑大学港澳联合研发基金项目(2021WGAH15);广东省基础与应用基础研究基金联合基金—青年基金项目(2019A1515111052)

* 联系人: Tel: 13822412832; E-mail: wyuhzd@163.com

列车在管道内运行时存在一系列气动特性问题^[2], 目前国内外很多学者进行了大量的数值仿真计算。周晓等^[3-4]采用粘性流体 Navier-Stokes 方程和 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 研究不同阻塞比对管道的影响, 当列车以不同速度运行时管道车体受到的空气阻力, 其结果显示阻力随阻塞比的增大而增大, 阻塞比较小时, 对阻力的影响较小。刘元森^[5]采用二维、定常、可压缩湍流研究方法, 利用动网格方法将磁悬浮列车置于真空度管道中, 然后通过分段铺设在轨道下方的直线电机加速, 磁悬浮列车可以在数倍于飞机的速度运行。陈绪勇^[6]通过对不同头车、尾车的流线型设计, 研究不同真空度和不同阻塞比对磁悬浮列车空气阻力的影响规律。米百刚等^[7]基于动网格技术, 并且建立二维、可压缩、非定常的 Navier-Stokes 方程及 SST $k-\omega$ 湍流模型, 研究真空管道阻塞比和真空度与空气阻力的关系。

但与此同时面对气流阻塞效应, 激波效应等一系列新的瓶颈难题接踵而来, Kim 等^[8]基于 Navier-Stokes 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型, 研究明线磁悬浮列车不同速度阻力数据对比, 同时提出管道内产生激波的速度标准, 结果表明激波的临界速度仅是与阻塞比相关的函数, 管道压力的影响几乎为零。Kim 等^[9]建立二维模型, 基于非定常、可压缩的 Navier-Stokes 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型研究了管道内激波现象, 结果表明管道的直径和环境压力对激波影响较大, 管道的长度不影响激波。张晓涵等^[10]

建立二维亚音速真空管道列车数值模型, 结合重叠网格技术研究了真空管道列车运行前方的气动壅塞现象与尾部的激波现象。Zhou 等^[11-12]根据可压缩 Navier-Stokes 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型, 研究激波簇结构及管道内激波演变规律。Niu 等^[13-15]建立二维计算仿真模型, 受管道激波的影响对列车压力、流速和温度的变化进行研究, 并分析列车速度对激波强度及位置的影响。黄尊地等^[16]建立管道列车二维计算模型, 基于验证的网格和湍流模型开展超声速列车运行时管道激波特性分析, 探究了管道内激波反射特性, 运行时间和马赫数对管道列车头车正激波和车尾激波串的演变规律。

综上所述, 列车在管道内运行可以减少气动阻力, 但存在激波问题, 目前国内外很多学者已研究列车的激波演变规律, 但单管双线运输能力远远大于单线, 且关于双线还鲜有研究。因此本文建立二维管道列车交会数值仿真模型, 采用非定常 SST $k-\omega$ 湍流模型并结合滑移网格技术, 分析管道列车交会时激波演变特性。

1 计算模型

1.1 几何模型

选择磁浮列车 TR08, 采用 gambit 软件建立三维模型, 三维模型侧视图如 1 (a) 所示, 计算区域由两个涵盖列车的滑移区域(管道)和一个涵盖管道空间的固定区域(隧道)组成。

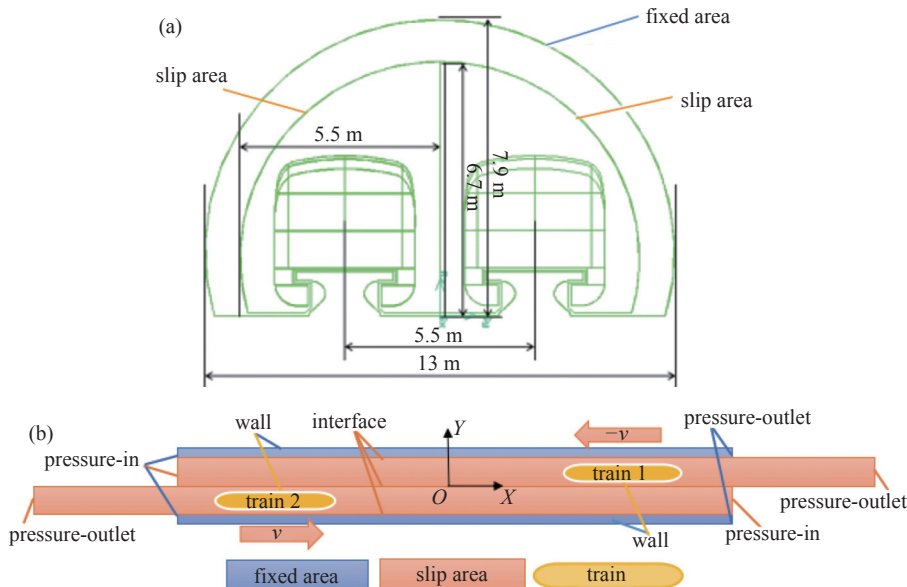


图1 几何模型图。(a)三维模型侧视图及尺寸,(b)二维平面图

Fig. 1 Geometric model diagram. (a) Side view and dimensions of 3D model, (b) two-dimensional planar plan

磁浮列车长度 79.5 m, 宽度 3.7 m, 高 4 m, 两车线间距 5.5 m, 固定区域最大宽度 13 m, 单个滑移区域最大宽度 5.5 m。水平投影方法得到整个二维平面数值计算仿真模型如 1 (b) 所示, 两车起始交会距离为 x m, 列车尾部距离固定区域端口 300 m, 两列车在隧道中央处等速交会。

1.2 数值模型

建立二维计算模型进行流场仿真, 鉴于流场仿真来流速度较高, 空气压缩效应较为明显, 因此采用理想气体。采用隐式密度求解器, 选择 AUSM+ 格式处理对流通量, 可以准确捕捉激波不连续性^[17], 动量、湍动能、比耗散率均采用二阶迎风离散格式。

计算区域边界条件设置如 1 (b) 所示, 固定区域与滑移区域重叠壁面设置为交换面 interface, 无重叠壁面、列车表面设置为固定壁面 wall, 计算区域入口端为压力入口, 出口端为压力出口; 涵盖车 1 区域定义为右滑移区域, 涵盖车 2 区域定义为左滑移区域, 右滑移区域运行速度为 $-v$, 左滑移区域速度为 v , 环境气压为 1 atm, 初始温度为 288.15 K。

2 网格独立性研究

本文采用非结构化与结构化混合网格对计算区域进行网格剖分, 并对流动复杂区域进行网格加密, 加密长度为 300 m, 尺寸为 8 mm, 为防止网格尺寸对数值仿真的影响, 本文建立起始交会距离 500 m, 分析粗中细三种不同的网格尺寸对管道压力、列车阻力的影响。

设置棱柱层厚度为 20 mm, 列车表面为 14 层棱柱层网格, 拉伸比为 1.2, 背景域网格基础尺寸分别为 100、80、60 mm, 最小尺寸分别为 40、30、20 mm, 列车基础尺寸为 8 mm, 最小尺寸分别为 7、5、3 mm, 网格数量大约分别为 180 万、250 万、330 万。

两车以速度 1000 km/h 在隧道中央处等速交会, 环境压力 $p=1$ atm, 初始温度为 288.15 K, 管道内 $y=0$ 处压力系数曲线如图 2 (a) 所示, $t=0.8$ s 时, 列车前方正激波前锋相互干涉, 压力系数激增, 列车运行一段时间后, 当两车间距大于 100 m 时, 压力存在波动, 当两车间距小于 100 m 时误差较小。

选取车 1 的平均阻力进行分析, 如图 2 (b) 所示, 头车误差相对中间车和尾车误差略大, 以车 1 头车平均阻力为例, 粗网格与细网格误差为 3.58%, 中网格与细网格误差为 1.79%, 由图可知平均阻力均满

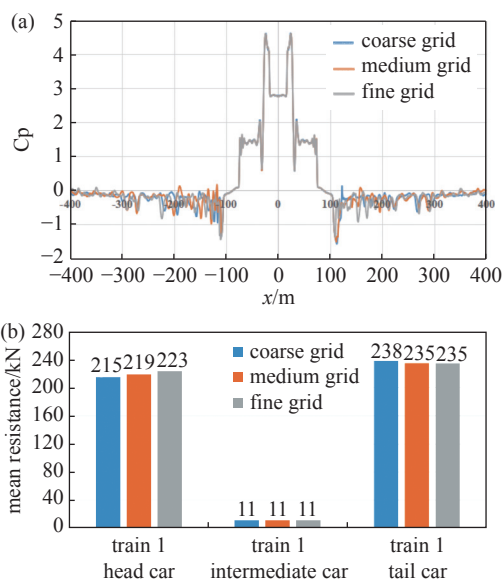


图2 不同网格尺寸。(a) $t=0.8$ s 压力系数曲线, (b) 车 1 平均阻力

Fig. 2 Different grid sizes. (a) $t=0.8$ s pressure coefficient curve, (b) average resistance of train 1

足误差范围要求, 本文选取中等网格。

3 仿真计算结果

气体在较长的管道中传播, 气流受到管道壁面的约束, 堆积到列车前方形成高压区, 因气体的可压缩性, 管道内气体长时间被压缩, 造成壅塞现象, 形成正激波。在车肩车尾处, 横断面相对增大, 导致流速急剧增大而压力急剧减小, 形成膨胀波。

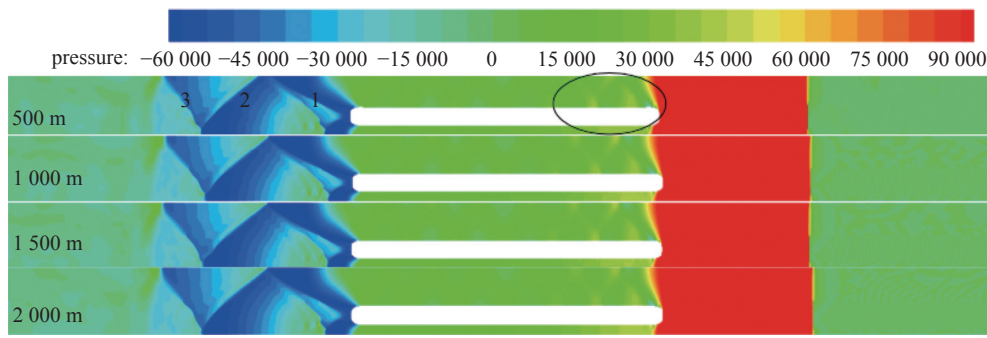
分别对列车前方区域和尾流区域的流动特点进行描述, 管道内气压 $p=1$ atm, 初始温度 $T=288.15$ K。起始交会距离为 500、1000、1500 和 2000 m, 管道列车运行速度等级包括 1000、1100、1200、1500 和 1750 km/h, 设起始交会距离为 x , 两车运行后相距为 x_1 。分析两列车在隧道中央处等速交会时激波特性及列车气动阻力演变规律。

3.1 列车交会激波特性分析

3.1.1 起始交会距离影响分析

两车均以 1500 km/h 速度运行, 以车 2 为例, 当起始交会距离为 500 m~2000 m 时, 对运行时间 $t=0.4$ s 管道内列车激波演变规律进行分析。

如图 3 所示, 车 2 前方正激波还未相互影响, 当 $x=500$ m 时, 车肩处横断面相对增大, 压力急剧下降, 由于管道壁面的约束, 车身与管道壁面产生激波反射现象, 但反射强度较弱, 列车尾部受膨胀波

图3 $t=0.4$ s 压力云图Fig. 3 Pressure cloud map of $t=0.4$ s

影响,车尾产生激波 1,激波 1 与管道壁面反射生成激波 2,激波 2 再次射生成激波 3,形成激波串现象,激波串强度沿车尾方向逐渐减弱。

当起始交会距离 x 为 1000、1500 和 2000 m 时,列车前方壅塞长度、车身激波与管道壁面反射现象、车尾激波串演变规律及管道内压力变化与 $x=500$ m 基本一致。结果表明,管道列车以相同速

度交会时,当两车相距较远,即列车前方正激波还未相互交叉干涉时,管道列车运行相同时间,起始交会距离 x 对激波演变特性影响较小(可以忽略)。

随运行时间的推移,两车交会间距相对减小,分析两车以车速 1500 km/h 从不同起始交会距离 x 运行到相同位置 x_1 ,如图 4 (a)(b)(c) 所示,分别为交会前、中、后三个时间段内管道激波演变规律。

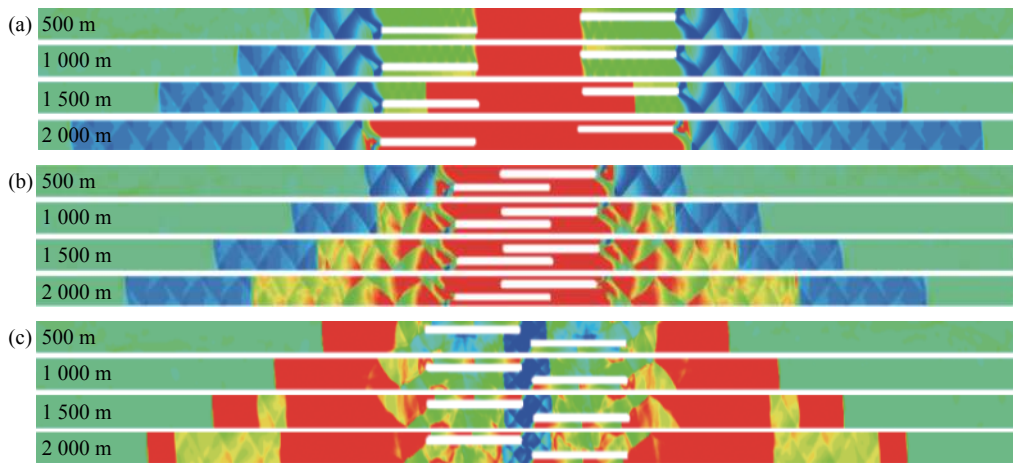


图4 不同起始交会距离激波变化规律。(a)交会前,(b)交会中,(c)交会后

Fig. 4 Variation law of shock waves with different initial intersection distances. (a) Before the rendezvous, (b) during the rendezvous, (c) after the rendezvous

由 4 (a) 可知,两车交会前,当 $x=500$ m,正激波前锋延伸到头车,车尾激波与管道多次反射形成激波串,沿车尾方向激波串强度减弱;随着 x 的增加, $x=1000$ m 时,列车尾部激波串长度增加; $x=1500$ m 时,正激波前锋从头车延伸到中间车,列车尾部激波串再次增加; $x=2000$ m 时,正激波前锋延伸到车尾,车尾出现激波-膨胀波相互干涉,由于两车相距一定的距离,列车尾部以膨胀波为主,车尾部激波串长度再次增加,沿车尾方向激波强度减弱。

两车身交会时,如图 4(b) 所示, $x=500$ m 时,车

1 尾部膨胀波和车 2 头部压缩波相互影响,正激波延伸到车尾,正激波和车尾膨胀波相结合与管道壁面反射形成激波-膨胀波,列车尾部受膨胀波影响,正激波消失后,继续产生激波串。随 x 的增加,激波演变规律相似,激波-膨胀波长度增加,管道内波系复杂,沿车尾方向,复杂波强度逐渐减弱至负压,并又以激波形式与管道壁面多次反射形成激波串。

如图 4 (c) 所示,当两车交会完成时,截面积增大,车尾受膨胀波影响,压力降低,列车尾部呈现激波串,沿两车运行方向,压力有所回升。随交会距

离 x 的增加, 壅塞长度增加, 车身激波-膨胀波反射现象明显, 压力增大, 车尾激波串强度减弱。

3.1.2 运行时间影响分析

两车均以 1500 km/h 速度运行, 起始交会距离为 2000 m, 列车前方正激波长度为 d , 当两车间距较远时, 两车流场相互影响较小(可以忽略)。以车 2

为例, 分析 $t=0.9$ s 至 $t=1.7$ s 管道内激波演变规律如图 5 所示。

当 $t=0.9$ s 时, 列车前方正激波长度 $d=87.3$ m, 正激波长度随时间线性增加, $t=1.7$ s 时, $d=164.9$ m。以图 5 不同时间节点正激波长度得以推出 $d=97t$, 运行时间每增加 0.1 s, 则正激波长度增加大约 9.7 m。

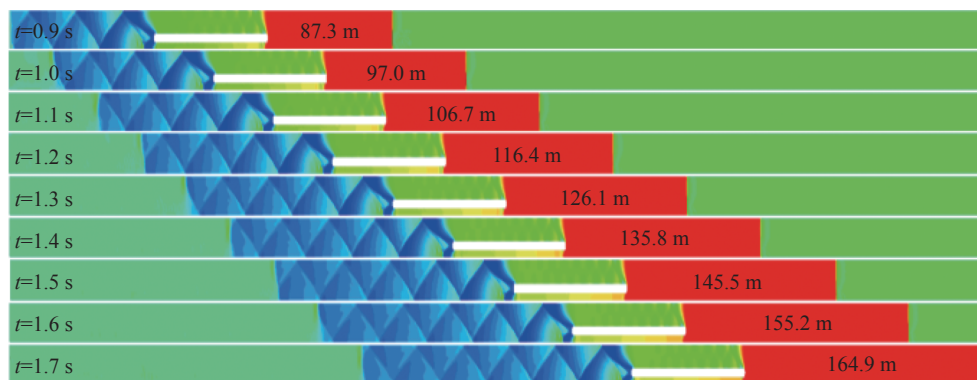


图5 $t=0.9$ s 至 $t=1.7$ s 激波演变特性

Fig. 5 Evolution characteristics of shock wave from $t=0.9$ s to $t=1.7$ s

当两车相距较远时, 列车前方正激波未相互干涉, 不同时间节点管道激波演变过程相似, 壅塞长度随运行时间呈线性递增关系。随运行时间的推移, 车身附近压力增加, 车身与管道壁面多次激波反射, 但激波反射强度较弱, 沿管道列车车尾方向, 激波串反射长度增加, 反射强度逐渐减弱。

两车交会管道激波特性如图 6 所示, 其图中曲线为两车交会中间管道 $y=0$ 处的压力变化规律。分析 $t=2.40$ s 至 $t=2.50$ s 不同时刻管道列车交会时激波演变规律, 列车前后激波相互交叉干涉, 同时壅塞范围被车尾膨胀波及激波分成若干小的范围, 波系较为复杂, 且正激波前锋已完全包围交会列车。

由图 6 可知, 当 $t=2.40$ s 时, 以车 2 为例, 如浅蓝色曲线所示, 两车鼻尖点 1 处压力激增, 达到 3002 KPa, 列车尾部有少量膨胀波出现, 激波-膨胀波相互干涉, 沿车 2 尾部方向与管道壁面进行多次反射, 沿车尾方向强度减弱, 管道内压力降低; $t=2.46$ s 时, 列车尾部 2 处出现较短的壅塞区段, 如黄色曲线所示, 管道内压力增大。

反射, 沿车尾方向强度减弱, 管道内压力降低; $t=2.46$ s 时, 列车尾部 2 处出现较短的壅塞区段, 如黄色曲线所示, 管道内压力增大。

随运行时间的增加, 车 2 头车逐渐远离, 车 1 头车逐渐靠近, 压缩波的存在导致管道内压力增大,

车 2 尾部壅塞区段增加。整个过程如压力曲线所示, 远离管道列车区域压力降低, 如红色圆圈区域所示, 列车尾部呈现激波反射现象, 激波强度逐渐减弱。

选取整个交会时间区段, 分析两车交会前、交会中、交会后整个过程管道激波特性, 如图 7 所示, 以黑色虚线右侧车 1 为例展开研究。

整个交会过程随运行时间的推移, 列车前方正激波从头车延伸到列车尾部, 由于车尾横截面积相对增大导致压力急剧降低, 列车尾部生成的膨胀波与管道壁面多次发生反射, 最终呈现大量的激波串。

列车运行到 $t=2.20$ s 时, 正激波前锋延伸到车头, 车肩处横断面增大, 压力降低, 车身与管道壁面发生激波反射现象, 强度较弱, 列车尾部激波串与管道壁面进行多次反射直到 a_1 位置, 之后压力又有所回升; $t=2.25$ s 时, 正激波前锋已延伸到中间车, 列车尾部激波串达到 a_2 处, 激波串相对前 0.05 s 长度缩短; $t=2.30$ s 时, 正激波前锋延伸到车尾, 正激波前锋已完全包围列车, 列车尾部出现较短的激波与膨胀波相互干涉区段, 如 d_1 处所示, 由于车 1 尾部主要存在膨胀波, b_1 处激波与管道壁面发生激波反射直到 a_3 处。

$t=2.35$ s 至 $t=2.45$ s 时, 激波演变规律与之前时刻基本一致, 列车前后激波相互交叉干涉, 同时壅

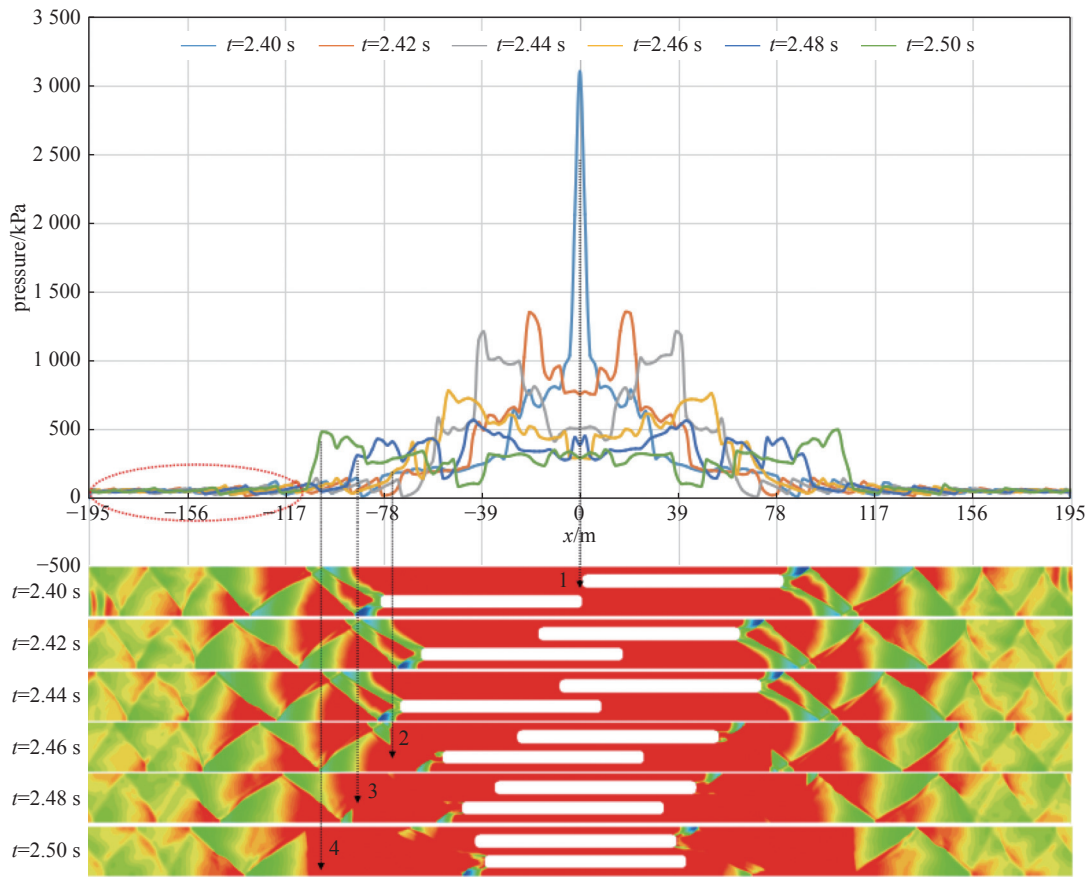
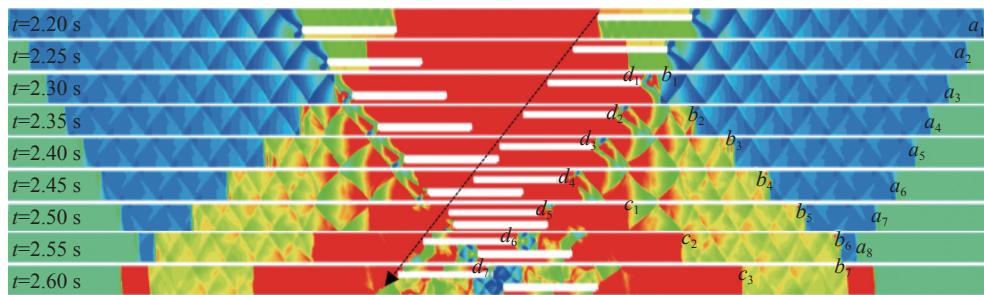
图6 $t=2.40\text{ s}$ 至 $t=2.50\text{ s}$ 激波演变特性Fig. 6 Shock wave evolution characteristics from $t=2.40\text{ s}$ to $t=2.50\text{ s}$ 

图7 交会全过程激波演变特性

Fig. 7 Shock wave evolution characteristics in the whole process of rendezvous

塞区段被车尾膨胀波及激波分成若干小的范围,波系较为复杂,车尾激波-膨胀波相互干涉反射长度增加,激波串长度缩短; $t=2.50\text{ s}$ 时,车1车尾与车2头车刚完成交会,车2列车前方开始出现壅塞区段,从 d_5 处到 c_1 处为壅塞区段, c_1 到 b_5 呈现激波-膨胀波与管道壁面多次反射, b_5 到 a_7 由于膨胀波的存在,又出现激波反射; $t=2.55\text{ s}$ 时,两车车身压力降低,车2前方壅塞长度较前 0.05 s 增加, b_6 到 a_8 处的激波串长度逐渐缩短,两车尾部出现激波,强度增加,列车车身与管道壁面之间进行多次激波-膨胀波反

射; $t=2.60\text{ s}$ 时,两车完成交会,与前 0.05 s 相比,列车前方壅塞区段长度增加,车身激波-膨胀波反射现象明显,两车尾部因膨胀波导致管道压力急剧降低,车尾出现激波反射现象。

3.1.3 管道列车速度影响分析

选取起始交会距离 2000 m ,列车运行相同时间 1.4 s ,如图8所示,此时两车相距较远,两车流场相互影响较小(可以忽略)。以车2为例,随运行速度的增加,管道内压力整体增大,头车正激波壅塞长度缩短,车身逐渐呈现激波反射现象,沿车尾方向,

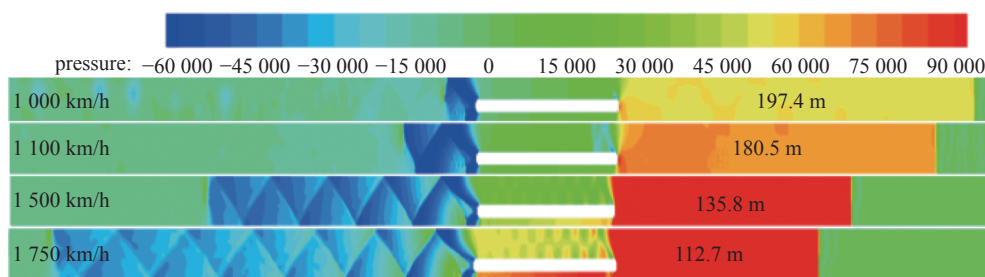


图8 不同速度运行管道激波特性

Fig. 8 Shock characteristics of tubes running at different speeds

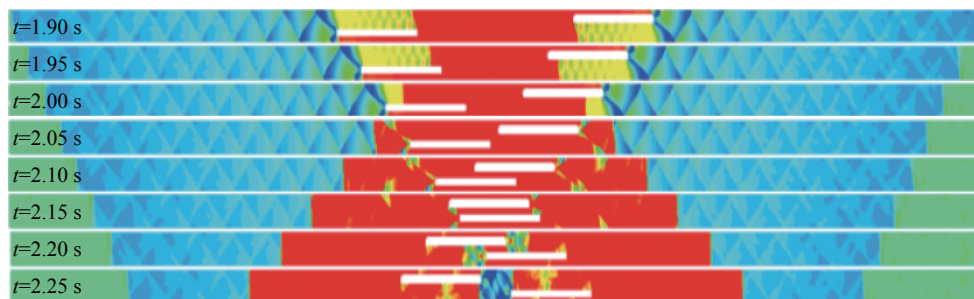
激波串长度增加, 激波强度减弱。

由图8可知, 两车均以 1000 km/h 速度运行时, 列车前方壅塞长度为 197.4 m, 车尾存在较短的激波现象; 当两车以 1100 km/h 运行时, 头车壅塞长度缩短到 180.5 m, 管道内压力增大, 车尾激波串长度增加; 当车速为 1500 km/h 时, 壅塞长度为 135.8 m, 与 1000 km/h 和 1100 km/h 相比, 车尾激波串长度明显增加, 激波强度减弱; 车速达到 1750 km/h 时, 壅塞长度为 112.7 m, 车身出现明显的激波反射现象, 车

尾激波串再次增加, 激波强度减弱。

研究表明当两车相距较远时, 随速度的提高, 列车前方壅塞长度缩短, 管道内压力增大, 车尾激波串长度增加, 激波反射强度减弱。

选取起始交会距离 2000 m, 两车均以 1750 km/h 运行, 在隧道中央处等速交会, 与 3.1.2 节图7管道列车运行速度 1500 km/h 相比, 如图9所示, 分析 $t=1.90$ s 至 $t=2.25$ s 各时间节点管道内激波演变规律。

图9 $t=1.90$ s 至 $t=2.25$ s 管道激波演变特性Fig. 9 Evolution characteristics of tube shock wave from $t=1.90$ s to $t=2.25$ s

当列车运行到 $t=1.90$ s 至 $t=2.00$ s 时, 车身激波反射现象比较明显, 正激波逐渐向车尾方向延伸; $t=2.05$ s 至 $t=2.25$ s 管道列车前方正激波壅塞区段增加, 激波串长度缩短。

研究表明, 当管道列车运行速度过高, 会导致正激波占比较大, 管道内压力明显增大, 激波前锋包围列车现象明显, 车身与管道壁面进行多次激波反射现象, 车尾呈现较短的激波-膨胀波相互交叉干涉现象。

3.2 列车气动阻力影响分析

3.2.1 起始交会距离影响分析

两列车均以 1000 km/h 在隧道中央处交会, 分析不同起始交会距离对管道列车气动阻力的影响。如图 10 (a)-(d) 分别为不同起始交会距离 500、1000、

1500 和 2000 m 状态下的列车气动阻力分布。

如图 10 (a) 所示, 以车 1 为例, 起始交会距离 $x=500$ m 时, $t=0.55$ s 之前列车各部位处于相对平稳阶段, 头车平均阻力为 449 kN; $t=0.55$ s 至 $t=0.6$ s 之间, 两车运行间距相对减小, 列车前方正激波已相互交叉干涉, 车 1 头车平均阻力为 2740 kN, 比两车激波相互干涉前激增 83.6%; $t=0.6$ s 时, 两车间距已接近 0 m, 此时车 1 头车阻力激增到最大值 7590 kN, 阻力再次激增 63.9%; 当 $t=0.78$ s, 两车基本完成交会, 两车头车阻力逐渐恢复到相对平稳状态, 与头车相比, 中间车和尾车每个时间节点阻力变化相对较小。

由图 10(a)-(d) 可知, 以头车为例, 两车相距较远时, 正激波相互干涉前, 起始交会距离对阻力影响较小。两车正激波前锋相互干涉(未交会时), 车

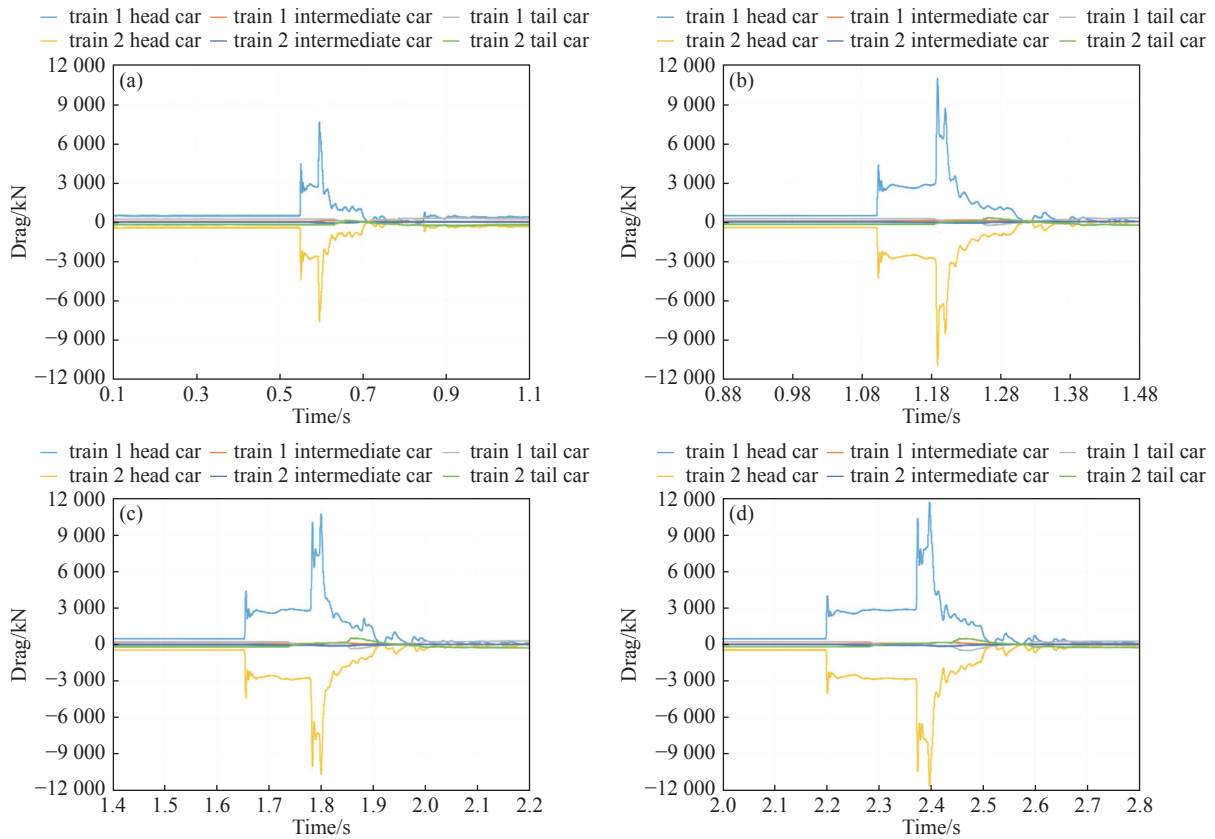


图10 不同起始交会距离气动阻力分布。(a) 500 m, (b) 1000 m, (b) 1500 m, (d) 2000 m

Fig. 10 Aerodynamic drag distribution at different initial intersection distances. (a) 500 m, (b) 1000 m, (b) 1500 m, (d) 2000 m

1 头车阻力急剧增大, 车 2 头车阻力急剧降低, 起始交会距离越长, 两车正激波相互干涉时间越长, 头车阻力绝对值增大。随列车的运行, 两车间距相对减小, 当两车准备交会时, 头车阻力绝对值再次激增; 当两车车尾分离较远时, 两车激波相互影响较小, 列车阻力恢复到单车运行状态, 整个交会过程中间车和尾车阻力值受起始距离影响较小。

当两车相距较远时, 起始交会距离对管道列车气动阻力影响较小(可以忽略), 两车在管道内运行一段时间后, 两车间隔距离较近, 两车正激波前锋相互交叉干涉时, 起始交会距离会对气动阻力产生影响。管道列车速度过高时, 列车气动阻力会急剧增加, 但固定区域隧道过短会对列车最大阻力有所抑制, 即当起始交会距离为 500 m、1000 m 时会低估最大阻力, 因此起始交会距离选择大于 1500 m 较为合适。

通过以上分析, 结果表明列车行驶在短、中长隧道($x < 1500$ m)阻力/压力最大绝对值变化剧烈, 长隧道($x > 1500$ m)阻力/压力最大绝对值变化幅值较小。两车交会完成后, 由于两车车尾膨胀波相互干

涉, 列车阻力绝对值急剧下降至相对平稳状态, 但阻力变化幅值存在波动。

3.2.2 管道列车速度影响分析

取起始交会距离 2000 m, 如图 11(a)-(d) 分别为 1000、1100、1500 和 1750 km/h 速度下列车气动阻力分布。由图 11 可知, 不同速度下列车气动阻力变化规律基本一致。当两列车均以 1000 km/h 在隧道中央处等速交会, 由图 11(a) 可知, $t=2.95$ s 时, 两车正激波前锋相互干涉, 车 1 头车出现激增又急剧下降到相对稳定状态, 阻力大约为 700 kN; $t=3.46$ s 时两车相对间隔距离较小, 阻力再次激增, 正激波包围两车; 当两车运行到 $t=3.6$ s 时车 1 头部阻力激增到最大值 2766 kN, 随着时间的推移, 两车交会阻力急剧下降之后又恢复到相对平稳状态。

如图 11 (b) 所示, 两车均以 1100 km/h 运行, 正激波前锋相互干涉, 阻力值达到 1000 kN 左右; 当两车运行到 $t=3.26$ s 时, 车 1 头部阻力激增到约 4119 kN, 与 1000 km/h 相比, 阻力绝对值增加。由图 11 (c) 可知, 两车 1500 km/h 运行时, 两车交会前正激波前锋相互影响区段阻力激增到 3000 kN 左

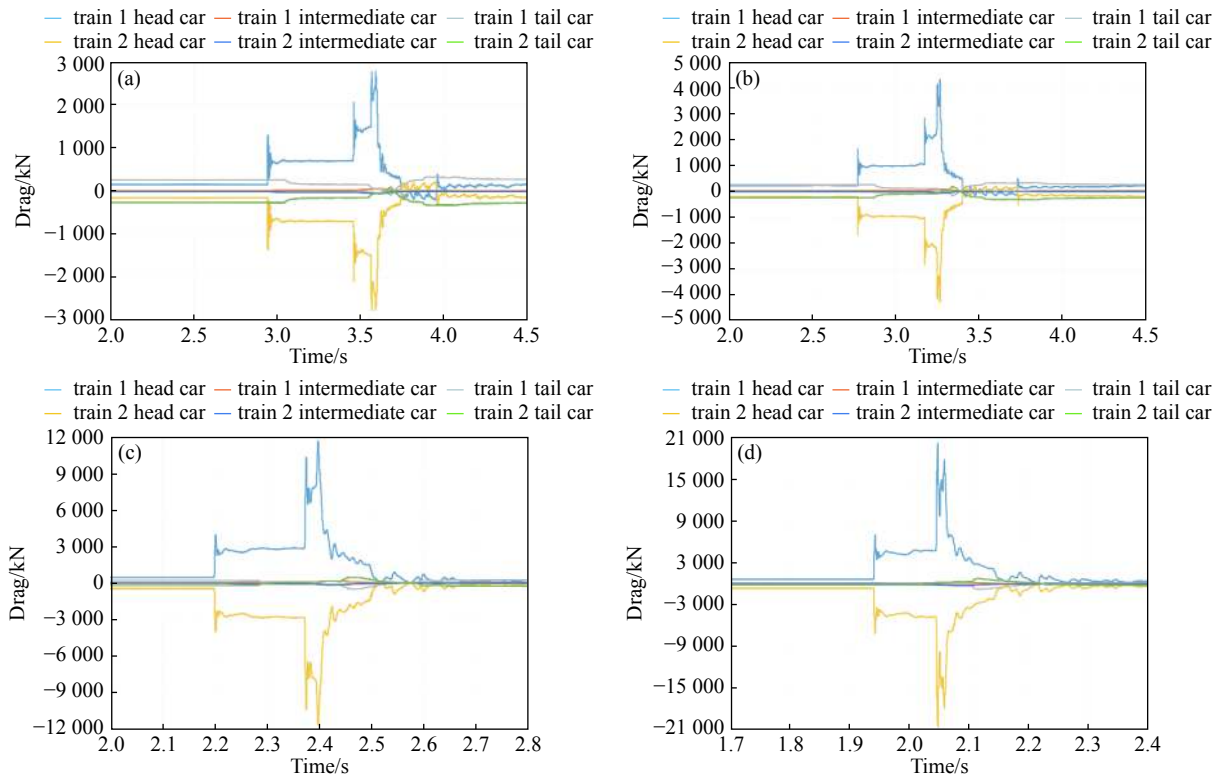


图11 不同列车速度气动阻力分布。(a) 1000 km/h, (b) 1100 km/h, (c) 1500 km/h, (d) 1750 km/h

Fig. 11 Aerodynamic drag distribution of trains at different speeds. (a) 1000 km/h, (b) 1100 km/h, (c) 1500 km/h, (d) 1750 km/h

右; $t=2.4$ s 时车 1 阻力再次激增到 11668 kN。

两车均以 1750 km/h 运行时, 由图 11 (d) 可知, 列车正激波前锋处于相互交叉干涉阶段, 阻力激增到大约 4800 kN; $t=2.05$ s 时车 1 阻力再次激增到 20170 kN。以上分析可推断, 列车运行速度对列车阻力影响较为明显, 随列车速度的提高, 其阻力绝对值增大。

管道列车以 1000 km/h 速度运行, 如图 12 (a) 所示, 分析起始交会距离对列车气动阻力的影响, 起始交会距离 $x=500$ m 时, 最大阻力达到 1480 kN; 当 x 增加到 1000 m 时, 最大阻力达到 2380 kN, 比 500 m 增加 37.82%; 当 $x=1500$ m 时, 列车最大阻力

值达到 2689 kN, 比 $x=1000$ m 增加 11.49%; 起始交会距离 x 达到 2000 m 时, 最大阻力达到 2766 kN, 比 $x=1500$ m 增加 2.78%。仿真结果表明列车行驶在短、中长隧道内 ($x < 1500$ m) 最大阻力变化剧烈, 长隧道内 ($x > 1500$ m) 最大阻力变化幅值较小。

由图 11 可知速度对列车阻力影响较为明显, 其不同速度最大阻力变化曲线如图 12 (b) 所示, 当两车均已 1000 km/h 运行时, 列车最大阻力达到 2766 kN; 当以 1100 km/h 运行时, 列车最大阻力达到 4315 kN, 较 1000 km/h 增加 35.89%; 当 1200 km/h 运行时最大阻力达到 6038 kN, 较 1100 km/h 增加 28.53%; 当管道列车运行速度为 2000 km/h, 最大阻

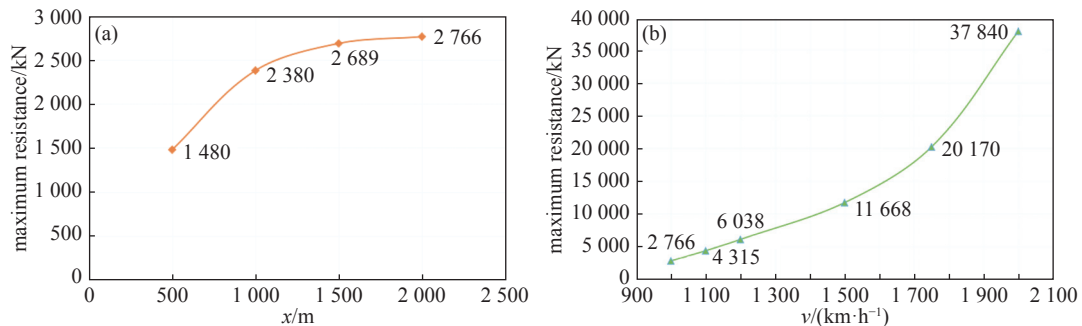


图12 最大气动阻力分布。(a) 不同起始交会距离, (b) 不同运行速度

Fig. 12 Maximum aerodynamic resistance distribution. (a) Different initial rendezvous distances, (b) different running speeds

力达到 37840 KN。结果表明与起始交会距离相比, 列车运行速度对阻力影响较大, 随速度的提高, 列车最大阻力持续增大。

4 结论

建立二维管道列车交会数值仿真模型, 详细分析了不同交会距离、时间和速度下管道列车交会前、中、后激波演变特性及对列车阻力的影响, 根据流场仿真结果, 得出以下结论:

(1) 交会前, 两车正激波前锋未相互交叉干涉, 壅塞长度随运行时间线性递增, 管道内压力影响较小; 交会中, 管道内压力整体增大, 列车周围存在激波-膨胀波干涉现象; 交会完成, 列车周围压力较低, 沿列车运行方向压力回升, 逐渐恢复单车运行状态。

(2) 随起始交会距离 x 的增加, 阻力/压力绝对值增大, 头车壅塞长度和车尾激波串长度增加。但起始交会距离过小会抑制列车最大阻力/压力, 当列车行驶在短、中长隧道($x < 1500$ m)阻力/压力变化剧烈, 长隧道($x > 1500$ m)阻力/压力变化幅值相对较小。

(3) 列车运行速度对列车阻力影响较大, 随速度的提高, 阻力/压力绝对值增大, 列车前方壅塞区段缩短, 沿车尾方向, 列车尾部激波串长度增加, 激波反射强度减弱。

(4) 本文研究了管道环境压力 $p=1$ atm, 线间距 5.5 m 时二维管道列车交会激波特性, 下一步将研究三维管道列车在不同真空度、线间距交会时激波演变特性。

参 考 文 献

- [1] Shen Z Y. Thoughts on the development of vacuum pipeline high-speed traffic in China[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2005, 40(2): 133-137 (沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. *西南交通大学学报*, 2005, 40(2): 133-137(in chinese))
- [2] Choi J K, Kim K H. Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2014, 41: 62-73
- [3] Zhou X, Zhang D Y, Zhang Y P. Numerical study on the influence of blockage ratio on train air resistance in vacuum pipeline[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2008, 26(6): 535-538 (周晓, 张殿业, 张耀平. 真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2008, 26(6): 535-538(in chinese))
- [4] 周晓. 真空管道运输高速列车空气阻力数值仿真[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2008 (Zhou X. Numerical simulation of air resistance of high speed train in vacuum pipeline transportation [D]. Chengdu: Master's Thesis of Southwest Jiaotong University, 2008(in chinese))
- [5] 刘元森. 真空管道磁悬浮列车空气阻力仿真及其救援研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2010 (Liu Y S. Air resistance simulation and rescue research of vacuum tube maglev train [D]. Chengdu: Master Dissertation of Southwest Jiaotong University, 2010(in chinese))
- [6] 陈绪勇. 真空管道磁悬浮列车空气动力学问题仿真分析[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2010 (Chen X Y. Simulation and analysis of aerodynamic problems of vacuum tube maglev train [D]. Chengdu: Master's Thesis of Southwest Jiaotong University, 2010(in chinese))
- [7] Mi B G, Zhan H, Zhu J. Research on resistance calculation method of high-speed train in vacuum pipeline based on dynamic mesh[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(9): 877-882 (米百刚, 詹浩, 朱军. 基于动网格的真空管道高速列车阻力计算方法研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(9): 877-882(in chinese))
- [8] Kim T K, Kim K H, Kwon H B. Aerodynamic characteristics of a tube train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99: 1187-1196
- [9] Kim D W, Kim T H, Kim H D. A study on characteristics of shock train inside a shock tube[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2017, 7: 366-371
- [10] Zhang X H, Li T, Zhang J Y, et al. Aerodynamic congestion and shock wave phenomenon of subsonic vacuum pipeline train[J]. *chinese journal of mechanical engineering*, 2021, 57(4): 182-190 (张晓涵, 李田, 张继业, 等. 亚音速真空管道列车气动壅塞及激波现象[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(4): 182-190(in chinese))
- [11] Zhou P, Li T, Zhang J Y, et al. Study on shock cluster structure of vacuum pipeline super train[J]. *chinese journal of mechanical engineering*, 2020, 56(2): 86-97 (周鹏, 李田, 张继业, 等. 真空管道超级列车激波簇结构研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(2): 86-97(in chinese))
- [12] Zhou P, Zhang J Y, Li T, et al. Numerical study on wave phenomena produced by the super high-speed evacuated tube maglev train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 190: 61-70

- [13] Niu J Q, Sui Y, Yu Q J, et al. Numerical study on the impact of Mach number on the coupling effect of aerodynamic heating and aerodynamic pressure caused by a tube train[J]. [Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics](#), 2019, 190: 100–111
- [14] Niu J Q, Sui Y, Yu Q J, et al. Effect of acceleration and deceleration of a capsule train running at transonic speed on the flow and heat transfer in the tube[J]. [Aerospace Science and Technology](#), 2020, 105: 1–12
- [15] Sui Y, Niu J Q, Ricco P, et al. Impact of vacuum degree on the aerodynamics of a high-speed train capsule running in a tube[J]. [International Journal of Heat and Fluid Flow](#), 2021, 88: 1–14
- [16] Huang Z D, Yi Y Y, Chang N. Analysis of shock wave characteristics of pipeline train in supersonic operation[J]. [Vacuum](#), 2022, 59(5): 55–62 (黄尊地, 伊严严, 常宁. 超声速运行时管道列车激波特性分析[J]. [真空](#), 2022, 59(5): 55–62(in chinese))
- [17] Zhou P, Zhang J Y. Aerothermal mechanisms induced by the super high-speed evacuated tube maglev train[J]. [Vacuum](#), 2020, 173: 109142