

地铁隧道活塞风与站台屏蔽门流固耦合的数值研究

董勤之, 曹明扬, 吴爱中
(上海工程技术大学城市轨道交通学院)

摘要: 地铁是城市大运力交通的核心基础设施, 其安全稳定运行对乘客生命财产与交通秩序至关重要。站台屏蔽门在保证乘客安全和列车运行中发挥关键作用, 若屏蔽门在关门过程中出现异常, 易引发列车滞留并放大隧道活塞风作用, 形成“屏蔽门故障→列车滞留→活塞风加剧→更多故障”的恶性循环。本研究采用耦合的欧拉-拉格朗日方法, 利用欧拉域的体积百分数场刻画隧道内气体瞬态演化, 同时以拉格朗日单元描述门体, 直接获得流场与结构响应的时序分布。研究结果直观再现了门缝收缩期的射流、扩散、涡旋与压力集中, 并识别出局部高应力和面外鼓出变形, 为屏蔽门的密封、加固与驱动设计提供理论依据。

关键词: 隧道活塞风; 站台屏蔽门; 流-固耦合; 地铁

中图分类号: U231.4

Numerical Investigation on Fluid-Structure Interaction between Tunnel Piston Wind and Platform Screen Doors in Metro Systems

DONG Qinzhi, CAO Mingyang, WU Aizhong

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620)

Abstract: The subway system serves as the core infrastructure of urban mass transit, and its safe and stable operation is vital to both passenger safety and the orderly functioning of urban transportation. Platform screen doors (PSDs) play a crucial role in ensuring passenger safety and maintaining train operations. Malfunctions during the door-closing process can lead to train delays and amplify the tunnel piston wind effect, forming a detrimental cycle of “PSD malfunction, train detention, intensified piston wind, further failures.” In this study, a coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) approach is employed to analyze the transient fluid-structure interaction between tunnel airflow and the PSDs. The evolution of the transient airflow inside the tunnel is captured using the Eulerian domain’s volume fraction field, while the door structure is modeled with Lagrangian elements to directly obtain the time-dependent distributions of flow field and structural response. The results vividly reproduce the jetting, diffusion, vortex formation, and pressure concentration occurring during the door-gap contraction phase, and identify regions of localized stress concentration and out-of-plane deformation, providing theoretical guidance for the sealing, reinforcement, and drive design of platform screen doors.

Key words: Tunnel piston wind; Platform screen door; Fluid-structure interaction; Subway

0 引言

作为一种大运力公共交通方式, 地铁已成为维持城市正常运转的核心基础设施。地铁的安全高效运行直接关系到城市交通秩序和民生福祉, 因此地铁运营单位对地铁系统设备的可靠性提出了更高要求。站台屏蔽门作为隔离列车与乘客空间的关键设备, 不仅承担着保障乘

基金项目: 上海工程技术大学大学生创新训练项目(项目编号 cx2510015)

作者简介: 董勤之(2001-), 男, 主要研究方向: 轨道交通设备可靠性

通信联系人: 吴爱中(1981-), 男, 副教授, 硕导, 主要研究方向: 轨道交通设备可靠性. E-mail: azwu@sues.edu.cn

客安全、控制站内能耗的重要功能，而且在车站运行组织中发挥着联锁与互锁的关键作用。

45 如果站台屏蔽门出现异常，不仅会直接影响该门扇的正常使用，还可能通过屏蔽门与列车间的互锁逻辑，导致列车无法正常进站或出站，引发列车在隧道或站台的滞留，进而造成运行节律紊乱与列车聚集。在此情况下，后续列车产生的隧道活塞风难以及时消散，其瞬态正压和负压脉动持续作用于屏蔽门结构。尤其在关门过程中，随着门缝逐渐收缩，隧道气流的通道受限，风速与风压急剧升高，可能抵抗门机驱动力，进一步诱发关门故障，形成“屏蔽门故障→列车滞留→活塞风加剧→更多故障”的恶性循环，最终导致大范围列车延误与乘客滞留，严重时甚至威胁乘客安全并触发应急疏散。

50 截至目前，针对地铁隧道活塞风的研究已积累大量成果。譬如，在理论研究方面，有学者基于非恒定流动伯努利方程等理论，构建了活塞风的理论模型以揭示其基本特性[1-3]。在数值模拟方面，CFD 技术(计算流体力学)被广泛应用于隧道-车站系统的风压分析，有效模拟了列车运行过程中活塞风的流场演化规律[4-6]。在实验研究方面，一般是搭建缩尺试验台测试活塞风的风速与风压等关键参数[7-9]。

55 现有研究仍存在不足之处。譬如，尽管部分研究已涉及活塞风对屏蔽门的作用机制，但在关门过程中的瞬态响应、复杂工况的流固耦合机理等方面仍缺乏深入探讨。现有研究大多采用单向耦合或简化边界条件[10-11]，难以同时捕捉流场在门缝收缩过程中的快速演化，以及门体在动态风载与摩擦变化下的瞬态结构响应。目前，针对关门过程中门缝收缩伴随的瞬态流场与结构耦合行为的研究仍相对匮乏。

60 事实上，深入研究隧道活塞风与屏蔽门在关门过程中的交互影响机理，不仅具有重要的理论价值，同时也具备显著的工程意义。本文建立同步分析活塞风瞬态流动与结构动力学响应的耦合分析框架，为高密度运营条件下地铁系统的整体可靠性提供理论分析工具。

1 地铁隧道活塞风问题

1.1 隧道活塞风的成因

65 地铁隧道活塞风是地铁在隧道空间内运行所诱发的气流现象，是流体力学中的“活塞效应”在地下交通环境里的典型表现。其形成机制可归结为列车运动与隧道空间约束的协同作用：由于隧道壁面具有封闭性，空气的侧向与竖向绕流受到限制，列车在隧道中行驶时宛如一个移动的活塞，会对隧道内的空气产生双向扰动。具体地，如图 1 所示，在列车行进过程中，列车车头会持续对前方空气施加压缩作用，形成高于大气压的正压区域；与此同时，列车车尾由于空气随列车向前移动抽离形成局部低压区域，产生抽吸效应。这种正负压差破坏了隧道内空气的初始静力平衡状态，促使空气从高压区域沿着隧道向低压区域定向流动，从而形成了被称作“活塞风”的持续气流。

75 地铁隧道活塞风的形成与演化受多重因素影响。首先，阻塞比(即列车横截面积与隧道横截面积之比)的影响较为显著[12-13]：阻塞比越大，列车对隧道内空气的挤压与抽吸效应越强烈，进而活塞风速越大。其次，运动的列车是活塞风强度的驱动因素。列车运行速度与

活塞风速线性相关，车速越高，车头正压与车尾负压的差值越明显；而且，列车变速运行会引发压力波叠加，进一步加剧风速波动。同时，列车长度主要影响活塞风的持续时长，车长越长，排开的空气体积越大，作用时间也越长。另外，列车行车对数越多，活塞风的作用频率和叠加效应越强，特别是双列车交会时，正负压区叠加会致使流场紊乱，甚至出现风速反向的现象。最后，地下隧道的长度、截面形状和弯道情况也会显著影响隧道活塞风的流体力学特性[14-15]。

80

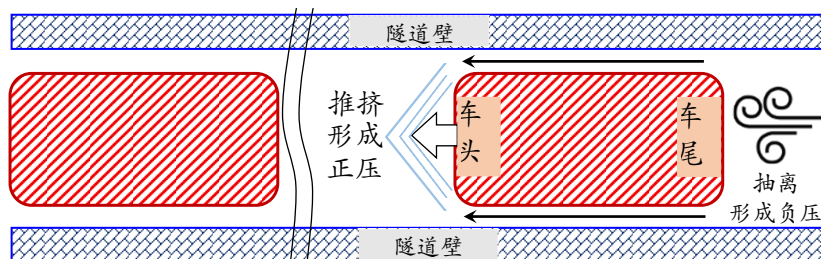


图 1 隧道活塞风形成原因的示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the formation mechanism of tunnel piston wind

85

1.2 地铁站台屏蔽门

屏蔽门是 20 世纪 80 年代发展起来的一种站台设备，它通常设置于地铁或轻轨的站台边缘，从而将列车与站台候车厅隔离开来。在列车到达和出发时，轨道交通屏蔽门自动开启和关闭，旨在为乘客营造一个安全舒适的候车环境。

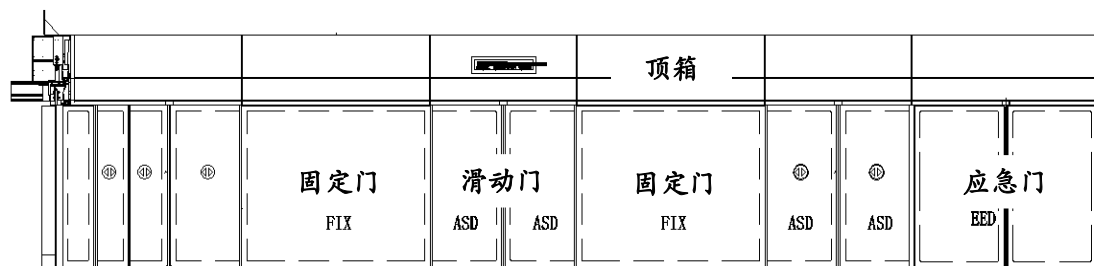


图 1 屏蔽门结构简图

Fig. 2 Structural composition of the platform screen door

90

站台屏蔽门主要分为全高屏蔽门和半高安全门两种。对于地下车站而言，全高屏蔽门又被称为地铁屏蔽门。地铁屏蔽门由一系列封闭式玻璃隔墙和活动门组成，其主要功能包括安全隔离、减少空调系统能耗和环境保护(防尘减噪)。地铁车站每侧站台的屏蔽门主要包含滑动门、固定门和应急门，如图 2 所示。其中，固定门安装于站台侧的非门位处，不可开启，本质上为玻璃幕墙，其主要功能为隔离保护。应急门数量少，其功能为紧急疏散通道，平时闭锁，应急时可快速开启。

95

100

滑动门又称为活动门，通常由铝合金骨架及钢化玻璃组成，通过电机驱动同步带传动实现双扇门平移开合。滑动门的性能尤其重要，其主要功能包括：自动或手动开启、自动或手动关闭锁紧、防夹检测、位移/速度反馈与故障报警等。滑动门的结构设计除了考虑门体强度和气密性能外，还需关注门机及皮带的驱动力，导轨与导靴间的摩擦磨损性能等等。在控制

方面,滑动门与列车信号和站台监控系统关联,既要保证快速可靠的循环动作,也需满足应
105 急解锁与手动开启要求。

1.3 地铁高密度运行易导致屏蔽门故障

在特大型城市的上下班高峰时段,列车运行的时间间隔相当短,隧道内的列车数量(运行
密度)显著增加,因此隧道活塞风压增大,于是作用在屏蔽门上的面压增大,气动力脉动
110 增加。对滑动门而言,这些风压会把门扇更紧地压向导轨和密封条,增大摩擦阻力和导向件
受力,从而使门在启动或滑动过程中卡滞,甚至出现少数滑动门开关门不到位的情况。

同时,地铁运行高峰期间站台乘客流量极大,大量乘客聚集在滑动门门口、推挤或倚靠
门体,会给门扇施加额外的静态或动态外载荷。由于屏蔽门的门控系统具有防夹功能(通过
力矩/位移检测及反向控制):当检测到异常阻力时系统会停止或反向开门。这项措施能够保
障安全,但也带来关门延迟或重复开闭的现象。另外,屏蔽门与列车门通常采用联锁控制逻辑,
115 屏蔽门未完全闭锁,列车不得发车。因而一次关门故障可使该列车延时发车,若后续列
车按原间隔运行则可能在区间滞留。隧道内同时存在多辆列车时,活塞风效应叠加,风压波
动加剧;反过来又加重屏蔽门的受力和卡阻故障概率,形成正反馈的恶性循环。

2 隧道活塞风的分析方法与模型

在计算流体力学中,耦合的欧拉-拉格朗日(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)方法是一
120 种将固定空间网格(欧拉描述)与随物料运动网格(拉格朗日描述)耦合起来解决流动-固体大
变形问题的数值技术[16-17]。其基本思想是:将发生大形变、流动或破碎的物质放在欧拉域
中,用固定背景单元通过体积分数或相场追踪材料分布和演化;把需要精确记录应力、应变
和接触的固体结构用拉格朗日单元表示,网格随材料一起运动[18-19]。欧拉单元与拉格朗日
125 单元通过耦合算法交换速度、力和质量信息,从而实现流体侵入、冲击、溅落、淹没等复杂
的流固相互作用[20-21]。

CEL 方法的主要优点是能自然处理极大变形和材料断裂而不产生拉格朗日网格严重畸
变,便于在单一环境内完成流固耦合问题建模,尤其适合多相混合、溅射、液体冲击等工程
场景的分析。随着计算力学的深入发展及广泛应用,目前 CEL 方法在 ABAQUS 中已经变成
130 一项成熟且功能强大的工具。在本文,我们尝试用 CEL 方法解决隧道活塞风与地铁屏蔽门
的流固耦合问题。

本文考虑一种典型的岛式站台及其可能出现的隧道活塞风工况,如图 3 所示。该站台左
侧存在临时停靠的列车,而右侧列车进站将引起显著的活塞风效应。为了简化分析模型,对
地铁列车和隧道部件做刚性假设,并假定隧道和车辆之间没有缝隙。为了减少模型的计算规
模,我们减少隧道长度,选取一节车厢及其对应的部分屏蔽门(含 6 个固定门和 5 个滑动门)
135 进行有限元建模,如图 4(a)所示。数值模型中,空气采用理想气体近似,设置密度、状态方
程及粘性参数;而屏蔽门结构材料按铝合金和玻璃材料参数输入。

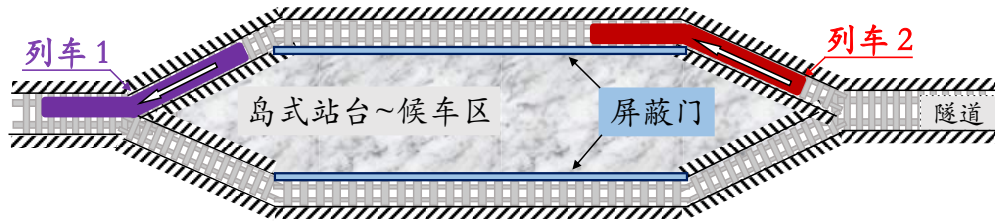


图3 地铁车站岛式站示意图

Fig. 3 Schematic diagram of an island-type subway station

140

为了同时获得隧道内瞬态气动场与屏蔽门结构响应，本文在 ABAQUS 中采用耦合的欧拉-拉格朗日方法建立流固耦合模型。如图 4 (b)所示，本文模型的构成与分区为：隧道与站台内部的空气域定义为欧拉域(采用 EC3D8R 单元)，将固定门和滑动门定义为拉格朗日实体单元(C3D8R 单元)。模型中的欧拉域尺寸选取足够大可以减少边界反射误差，为了分析门缝处高梯度压力场，欧拉域包含大约 110 万个欧拉单元，尤其在屏蔽门及门缝邻域采用加密网格，如图 4(c)所示。

145

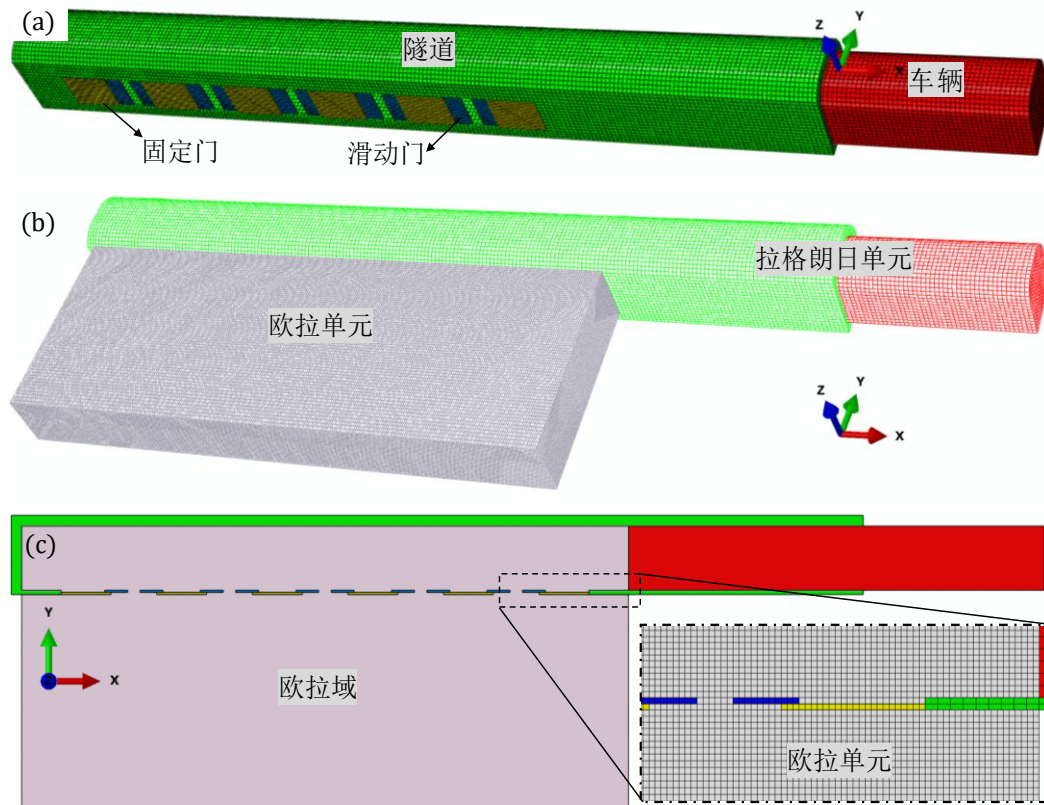


图4 简化模型及有限元网格：(a)隧道、车辆及屏蔽门有限元网格，(b)欧拉单元和拉格朗日单元的设置，(c)剖面图显示欧拉域局部细化网格

150

Fig. 4 Configuration and finite element model: (a) of the tunnel, train, and platform screen doors; (b) Configuration of Eulerian and Lagrangian elements; (c) Cross-sectional view

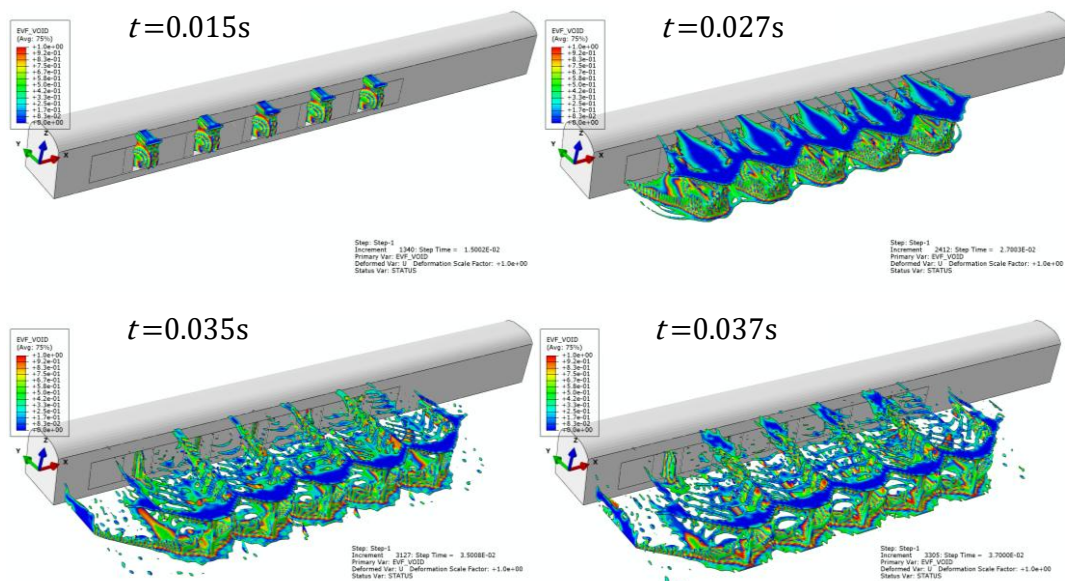
在边界条件及载荷方面，隧道内空气受隧道壁、车头表面和固定门的边界约束，在站台内候客区，气流受天花板和地面的边界约束，但欧拉域设置了站台区域内的远场开口和压力出口。在固体部件的边界条件及载荷施加方面，将固定门边框的节点设置固定边界条件，而

155

160 滑动门的边框可以沿着 x 方向平移运动。为了模拟滑动门的关门过程，设置参考点绑定滑动门边框节点的方式，实现 5 个滑动门的左边门扇沿 x 方向平动，而 5 个滑动门的右边门扇沿 $-x$ 方向平动。列车运动是产生活塞效应的必要条件，我们设定列车运行速度为 18km/h，列车刚性运动挤压隧道内空气，形成空气流动。本文模型忽略空气与所有固体表面的切向摩擦作用，只考虑气体和固体表面的法向接触。但对于滑动门边框的底面而言，除了考虑法向接触以外，模型还考虑滑动门底部边框与其接触的隧道面存在摩擦作用。

3 结果与讨论

165 本文采用显示动力学算法，分析隧道气流通过门缝时的瞬态流动行为，研究流固耦合作用导致的屏蔽门的应力与变形情况。图 5 给出了隧道活塞风作用下，地铁屏蔽门在关闭过程中气流通过门缝外泄的瞬态演化过程。图中以场变量 EVF （体积百分数）表示欧拉域中流体的分布状态。红色区域（ EVF 接近 1）代表流体体积分数较高，即主要的空气区域；而蓝色区域（ EVF 接近 0）则对应流体稀薄或空域。图中采用视图剖切可视化功能去除了部分欧拉域，使得气流运动形态更为直观地显现。



170 图 5 滑动门关闭过程中气流通过门缝外泄的瞬态演化过程

Fig. 5 The evolution of airflow leakage through door gaps during the closing process.

175 从时序上看，当列车运行时间 $t=0.015s$ 时，隧道内的高压气团受列车推进所致的活塞效应影响，经由门缝向站台一侧挤出。此时的流动呈现出典型的剪切射流结构，流束集中且速度梯度显著。 $t=0.027s$ 时，气流量明显增加，射流前缘卷吸周围空气并产生涡旋结构，表现为门缝外侧蓝绿相间的复杂涡流区。随着时间推进至 $t=0.035s$ ，门缝流场进一步发展，剪切层的不稳定性导致小尺度湍涡增强，流体在屏蔽门前形成多股相互干扰的射流，部分气流沿地面和屏蔽门表面滑行，形成局部回流区。 $t=0.037s$ 时，门缝流动趋于紊乱，气体动量耗散增加，涡结构破碎并扩散至站台区域，表明活塞风的能量通过湍流耗散的形式逐渐衰减。这

180 一过程揭示了活塞风与屏蔽门之间的强烈流固耦合效应：门缝闭合的瞬态几何变化显著影响
 气流的流动通道和压力分布；反过来，气流的局部高压与高速射流又可能对门体结构施加附
 加载荷，影响其关门平稳性与可靠性。

185 图 6 显示了隧道活塞风作用下，地铁屏蔽门在关闭阶段所受到的瞬态气动力载荷及其引
 起的结构应力响应。本研究采用 ABAQUS 中的 CEL 方法能够同时捕捉欧拉域内气体的流
 动特征与拉格朗日固体的应力演化，从而反映出典型的流固相互作用效应。图中以 Mises 应
 力为主要场变量，描述屏蔽门在不同时间时刻的应力分布与演变。结果表明，在列车运行初
 期 $t=0.005\text{ s}$ 时，气流通过门缝形成局部高压区。此时的应力主要集中在门缝边缘及门板与
 190 导轨的连接部位，表现出应力集中现象。这一阶段气流动能较小，主要由压力梯度驱动，结
 构响应呈现线性特征。随着时间推进至 $t=0.007\text{ s}$ 和 $t=0.011\text{ s}$ ，列车推动的活塞风效应逐渐增
 强，隧道气体被迫经由门缝高速挤出，形成强烈的剪切射流。该气流在门缝边缘产生显著的
 脉动压力与剪切作用，导致门板中部和支撑区域的应力分布趋于复杂，部分区域出现明显
 的高应力带，表明结构开始受到非线性气动力激励。当时间发展到 $t=0.013\text{ s}$ 时，气流流量和速
 度进一步增加，活塞效应引起的压力波与门缝射流叠加，导致门前后存在较大的压力差。门
 缝附近的结构受到周期性气动力冲击，形成动态应力集中区。由于气流在门缝附近的紊流特
 195 征增强，流场的不稳定性也进一步加剧了结构局部应力的波动。

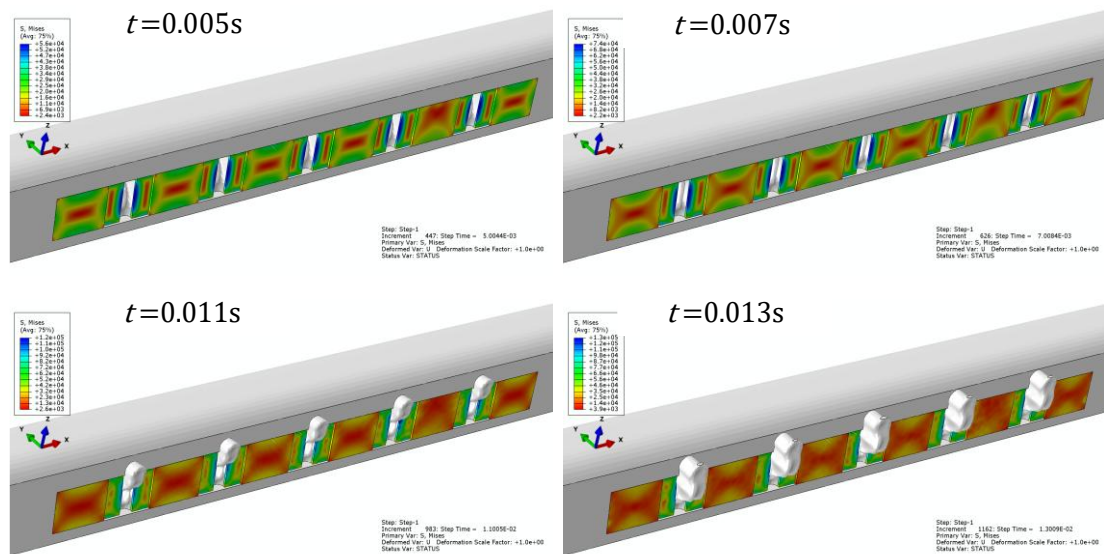


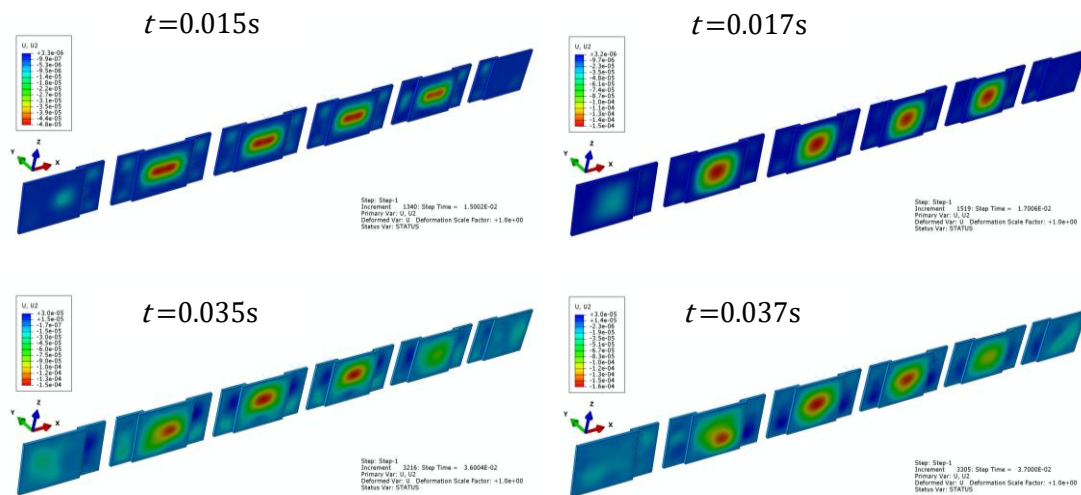
图 6 屏蔽门受风压作用产生的等效应力

Fig. 6 The equivalent stress on the platform screen door induced by wind pressure

200 图 7 给出了隧道内气流从收缩的滑动门门缝中挤出时屏蔽门的变形云图，该图反映了隧
 道活塞风作用下，地铁屏蔽门在关门过程中受到瞬态气动力加载后产生的结构变形响应。图
 中云图所示场变量为沿 y 负方向的位移，代表结构在受风压作用后向站台侧鼓出的变形程
 度。在 $t=0.015\text{ s}$ 时，气流刚开始从门缝中挤出，压力分布尚不均匀，结构变形主要集中在固
 定门中部区域。至 $t=0.017\text{ s}$ 时，活塞风压力迅速增大并在门面上形成稳定的高压区，导致固

205 定门产生明显的面外鼓出变形。随着时间推进至 $t=0.035s$ 和 $t=0.037s$ ，气流的非定常性和湍流特征增强，使得门体表面压力分布出现局部波动，固定门和滑动门的变形均呈现出非对称性和时变性。从力学机制上看，这种变形特征源于气流的非线性压力响应和局部涡旋引起的动态载荷变化。固定门因约束条件较强、整体刚度较大，其变形以整体弯曲为主；而滑动门受气流瞬态冲击的影响更显局部化。这一结果揭示了活塞风作用下屏蔽门在关门过程中存在

210 显著的流固耦合效应，对门体的刚度设计、抗变形能力和密封性能提出了更高要求。综上所述，本文针对隧道风与屏蔽门的流固耦合作用进行了分析，提供了有价值的定性证据。但必须指出，高精度的流固耦合计算对计算资源要求较高，本研究为了减少计算时间，对几何与边界的描述较为理想化，其中隧道截面、列车外廓、门缝细部（如密封条、导轨、铰接等）未充分体现，可能导致局部流场与接触行为的偏差。



215 图7 屏蔽门受风压作用产生的变形

Fig. 7 The deformation of the platform screen door induced by wind pressure

4 结论

220 本研究基于 ABAQUS 的 CEL 方法对隧道活塞风作用下屏蔽门关门过程的流固耦合响应进行了数值模拟与分析。在单一软件环境下以欧拉单元描述流体、以拉格朗日单元描述固体，成功实现了活塞风与屏蔽门之间的直接耦合求解，分析流程具有良好的可重复性与工程适用性。

225 通过欧拉体积百分数等场变量的可视化，本研究具象化地再现了门缝喷射、射流展延及涡旋演化的宏观几何形态，并同时获得了门体的应力与位移分布，便于识别压力集中区与变形敏感区，为屏蔽门的密封、加固与驱动提供了直观的理论依据和设计参考。

本研究在方法实现与现象描述上具有优势，为理解隧道活塞风对屏蔽门的影响提供了有价值的定性证据；但若用于精细工程评价，还需进一步改进模型、细化网格，并结合实验或现场测量对数值结果进行验证，以保证预测精度与工程可靠性。

230 [参考文献] (References)

- [1] 袁誉钊,贺德强,陈彦君,等. 基于两车模型的地铁隧道活塞风对屏蔽门影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 227-234.
- [2] Tang, Ming-zan, et al. "Vibration characteristics of outer windshield structures of high-speed trains based on fluid-structure interactions." *Nonlinear Dynamics* 111.3 (2023): 2111-2132.
- 235 [3] 刘纪伦,孟鑫,兰慧峰,等. 地铁隧道运动列车的活塞风特性研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(03): 27-34.
- [4] Zeng, Lingwei, et al. "Numerical Study of Train-induced Pressure on Platform Screen Doors of a Subway Station." *Urban Rail Transit* 9.2 (2023): 179-192.
- [5] 李佳乐. 地铁列车过站气动效应对屏蔽门结构疲劳影响研究[D]. 中南大学, 2023.
- [6] 武世强,那艳玲,刘云,等. 活塞风道有效通风数值模拟研究[J]. 暖通空调, 2024, 54(S2): 442-446.
- 240 [7] 齐江浩,赵蕾,王君,等. 地铁隧道活塞风实测及特征分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 740-747.
- [8] Nietiedt, Simon, et al. "A wind tunnel setup for fluid-structure interaction measurements using optical methods." *Sensors* 22.13 (2022): 5014.
- [9] Meng, Shuang, et al. "Aerodynamic and dynamic response of platform screen doors to high-speed trains passing through underground stations without deceleration: A field study." *Building and Environment* (2025): 113094.
- 245 [10] 安伟光,孔维浩,广大庆,等. 地铁隧道活塞风演化规律及其对通风安全的影响[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(05): 84-92.
- [11] 袁誉钊. 多车模式下地铁隧道活塞风对站台屏蔽门故障影响研究[D]. 广西大学, 2020.
- [12] 赵刚. 高速地铁气动荷载对屏蔽门的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(6): 76-84.
- [13] 罗燕萍,李林林,饶美婉. 高密度行车时隧道风压对屏蔽门开关的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(4): 42-46.
- 250 [14] 杨鑫泽. 广州地区地铁车站隧道活塞风的应用研究[D]. 广州大学, 2019.
- [15] 胡颖. 地铁列车全自动驾驶模式下隧道活塞风对屏蔽门关门故障影响的研究[D]. 广西大学, 2018.
- [16] Tatnell, Luke, Ashley P. Dyson, and Ali Tolooiyan. "Coupled Eulerian-Lagrangian simulation of a modified direct shear apparatus for the measurement of residual shear strengths." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 13.5 (2021): 1113-1123.
- 255 [17] Mishra, Sunita, et al. "Physio-mechanical characterization of limestone and dolomite for its application in blast analysis of tunnels." *Journal of Engineering Mechanics* 148.5 (2022): 04022019.
- [18] Edirisinghe, Dylan S., Edmond Tobin, and Ashish Vashishtha. "CFD analysis of droplet impact pressure for prediction of rain erosion of wind turbine blades." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2875. No. 1. IOP Publishing, 2024.
- 260 [19] Jin, Zijian, Hui Fang, and Yong Liu. "Numerical investigation on hydro-elastoplastic responses of floating laminated structures under wave action." *Marine Structures* 104 (2025): 103884.
- [20] Aamir, Mohd, Mehtab Alam, and S. M. Anas. "Effect of blast location and explosive mass on the dynamic behavior of a bowstring steel highway girder bridge subjected to air-blast." *Materials Today: Proceedings* 87 (2023): 20-29.
- 265 [21] Shariq, Mohd, et al. "Performance enhancement of square reinforced concrete column carrying axial compression by (1) C-frip wrapping, and (2) steel angle system under air-blast loading." *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering* 11.2 (2022): 99-119.