

文章编号:1671-1637(2026)07-0001-14

集中式气室对高速铁路隧道内压缩波演化的影响

刘峰^{*1}, 马健斌¹, 张扬泰¹, 卫梦杰¹, 陈大伟^{2,3}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 山西太原 030024; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东青岛 266111; 3. 高速磁浮运载技术全国重点实验室, 山东青岛 266111)

摘要:为研究集中式气室对高速铁路隧道中初始压缩波传播时压力梯度的调控机理,分析气室储气效应与连接处几何特征对压缩波传播特性的影响规律,基于无黏、可压缩、二维轴对称模型开展了隧道-气室耦合动态相互作用数值计算研究,提出了储气效应与阻尼特性协同作用的压力调控理论;基于流动相似准则开展了可调节式高压脉冲发生装置的缩比模型试验,通过数值仿真结果与模型试验结果的对比,验证了所采用的计算方法能够准确模拟初始压缩波经过气室时的动态响应特征;深入解析了气室关键尺寸参数对其储气能力与连接口阻尼特性的影响规律,探究了气室与隧道间由压差驱动的流量响应机制;通过对比不同的气室尺寸和连接处尺寸,进一步研究了气室结构对于初始波前压力梯度的缓解规律;分析了初始压缩波长度和幅值等波前参数对气室缓解效果的影响。研究表明:集中式气室的压力梯度缓解机理源于其能够在初始压缩波经过时吸收气体,而连接处尺寸是调控隧道进入气室的空气流量响应速度和阻尼特性的关键因素;当连接处尺寸为 $0.40R$ 且气室尺寸为 R 时,气室将表现为高流量且伴随适度回流特征,对应约40%的最优缓解率;改变初始压缩波幅值并不影响气室的缓解率,而压缩波长度与缓解率呈强负相关,波长缩短时气室缓解率显著提升,波长恒定时缓解率保持稳定。

关键词:轨道交通;缓冲气室;数值模拟;压力梯度;缩比模型试验;微气压波

中图分类号:U451.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.012

Influence of a centralized air chamber on the evolution of compression waves in high-speed railway tunnels

LIU Feng^{*1}, MA Jian-bin¹, ZHANG Yang-tai¹, WEI Meng-jie¹, CHEN Da-wei^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China; 3. State Key Laboratory of High-speed Maglev Transportation Technology, Qingdao 266111, Shandong, China)

Abstract: To investigate the regulation mechanism of pressure gradients during the propagation of initial compression waves in high-speed railway tunnels by centralized air chambers, and to analyze the influence laws of the air storage effect of the air chamber and the geometric characteristics of the connection on the propagation characteristics of compression waves, numerical calculation studies on

出版历程:2025-04-10 收稿,2025-06-07 修回,2025-08-22 录用

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52002265);山西省基础研究计划项目(202403021221051);高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金项目(SKLM-SFCF-2023-006);中国博士后科学基金项目(2022M712930);山西省省筹资金资助回国留学人员科研项目(2023-056)

***作者简介:**刘峰(1986-),男,山西吕梁人,副教授,工学博士,E-mail:lf198187@163.com。

引用格式:刘峰,马健斌,张扬泰,等.集中式气室对高速铁路隧道内压缩波演化的影响[J].交通运输工程学报,2026,26(7):1-14.

Citation: LIU Feng, MA Jian-bin, ZHANG Yang-tai, et al. Influence of a centralized air chamber on the evolution of compression waves in high-speed railway tunnels[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(7): 1-14.

the tunnel-chamber coupled dynamic interaction were carried out based on an inviscid, compressible, and two-dimensional axisymmetric model, and a pressure regulation theory involving the synergistic effect of the air storage effect and damping characteristics was proposed. Based on the flow similarity criterion, scaled model tests of an adjustable high-pressure pulse generator were conducted. By comparing the numerical simulation results with the model test results, it was verified that the adopted calculation method could accurately simulate the dynamic response characteristics of the initial compression wave passing through the air chamber. The influence laws of key dimensional parameters of the air chamber on its air storage capacity and the damping characteristics of the connection were deeply analyzed, and the flow response mechanism driven by the pressure difference between the air chamber and the tunnel was explored. By comparing different air chamber sizes and connection sizes, the relief laws of the air chamber structure on the pressure gradient of the initial wavefront were further studied. The influences of wavefront parameters, such as the length and amplitude of the initial compression wave, on the relief effect of the air chamber were analyzed. Research results indicate that the pressure gradient relief mechanism of the centralized air chamber stems from its ability to absorb air when the initial compression wave passes through, and the connection size is a key factor in regulating the air flow response speed from the tunnel into the air chamber and the damping characteristics. When the connection size is $0.40R$, and the air chamber size is R , the air chamber exhibits characteristics of high flow accompanied by moderate reflux, corresponding to an optimal relief rate of about 40%. Changing the amplitude of the initial compression wave does not affect the relief rate of the air chamber, while the length of the compression wave is strongly negatively correlated with the relief rate. When the wavelength is shortened, the relief rate of the air chamber significantly increases, and when the wavelength is constant, the relief rate remains stable.

Keywords: rail transit; buffer chamber; numerical simulation; pressure gradient; scaled model test; micro-pressure wave

Publication history: Received 2025-04-10; Received in revised form 2025-06-07; Accepted 2025-08-22

Funding: National Natural Science Foundation of China for Young Scientists Project (52002265); Fundamental Research Program of Shanxi Province (202403021221051); Open Foundation of State Key Laboratory of High-speed Maglev Transportation Technology (SKLM-SFCF-2023-006); China Postdoctoral Science Foundation (2022M712930); Shanxi Scholarship Council of China (2023-056)

* **Corresponding author:** LIU Feng, associate professor, PhD, E-mail: lf198187@163.com.

0 引 言

高速列车凭借其安全、快速、舒适和环保等优势,已成为现代交通基础设施的重要组成部分^[1]。中国高速铁路运营里程已突破4万km,位居世界首位^[2]。随着列车速度提升,空气动力学问题日益突出。列车高速进入隧道时,车头挤压空气产生压缩波,以声速向前传播^[3]。该压缩波到达隧道出口产生微气压波强度过大时,会引发音爆现象,导致隧道出口建筑物振动甚至结构破坏,并对周边环境造成不利影响^[4-5]。研究表明,微气压波的强度与压缩波

到达出口时的最大压力梯度成正比,降低该梯度可有效减小微气压波的危害。

优化列车头部形状增加流线型长度和隧道入口设置缓冲结构均可在压缩波形成阶段降低初始压力梯度,进而有效改善微气压波强度。蔺童童等^[6]研究了流线型头部拱形结构参数对列车/隧道耦合气动特性的影响,发现将头车由单拱增至三拱后可降低隧道内初始压缩波压力梯度。宋军浩等^[7]通过高速列车动模型试验研究发现列车头部的鼻尖越长,隧道内压力变化幅度和出口微气压波的强度就越小。隧道入口缓冲结构能够有效降低压缩波压力幅

值和压力梯度的原因已经通过数值仿真和实车试验得到了分析验证。针对不同类型的洞口缓冲结构,姚拴宝等^[8]对线性喇叭型缓冲结构进行参数化设计,判断出不同参数对微气压波的敏感度,同时基于气动声学理论,优化了喇叭型隧道入口缓冲结构的参数,使得压力曲线局部呈现线性上升趋势,以有效缓解出口处的微气压波。孙浩程等^[9]采用控制容积法分析了出口开口式缓冲结构的关键影响参数,同时基于大涡模拟湍流模型和动网格技术建立三维数值仿真模型,对关键参数的正确性做出了验证。钟登朝等^[10]基于重叠网格法和有限体积法,研究了开孔型缓冲结构对磁浮列车入隧产生初始压缩波的减缓作用。王英学等^[11]通过数值模拟和试验验证,证实间缝式开口缓冲结构能更经济高效地降低隧道压力梯度,并提出基于单位长度和总缓解率的优化设计方法。

随着列车运行速度的提高,隧道中压缩波呈现出高幅值、大梯度的特点,由于波前自身惯性,仅依靠隧道洞口的缓冲结构并不能有效降低^[12]。在隧道内部的缓冲结构研究中,张洁等^[13]研究了隧道内部空腔结构对初始压缩波传播特性的影响规律以及对隧道瞬变压力和微气压波的缓解效果。宋军浩等^[14]提出的谐振腔结构可以通过耗散压缩波能量进而缓解隧道出口的微气压波。王田天等^[15]研究了修建隧道时遗留的平行导坑与横通道组成的联通式缓冲结构对隧道微气压波的缓解作用,发现该结构能够在不增加施工成本的基础上有效缓解微气压波。

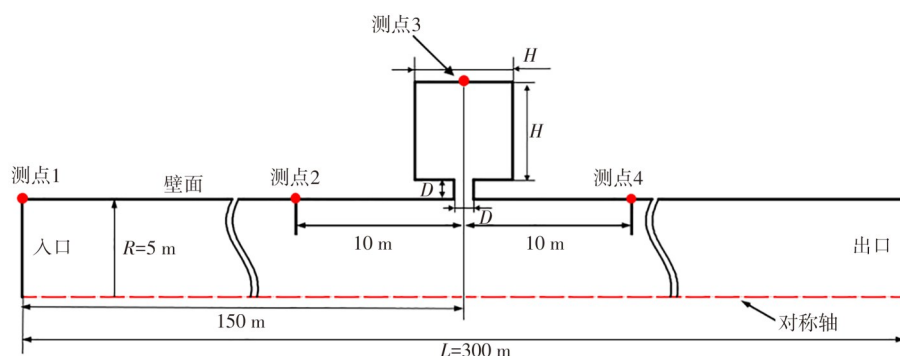
在既有研究基础上,为进一步优化对微气压波

的缓解效果,道砟碎石以其独特的孔隙结构和能量耗散特性受到关注,Liu等^[16]借鉴道砟的储气原理提出了气室阵列的方法,采用特征线法研究了分散式气室阵列参数对初始压缩波的影响。雷海洋等^[17]考虑压缩波惯性效应和壁面摩擦效应后研究了气室阵列对于初始压缩波压力梯度的缓解效果。在气室阵列的宏观缓解特性得到初步认知的前提下,考虑到集总参数法低维度简化的不足,Zhang等^[18]采用二维轴对称模型分析了隧道内部集中式气室及附近流动的三维效应,然而现有研究对气室关键尺寸参数、初始压缩波特征与压力梯度缓解效果之间的定量关系尚未完全阐明,亟需进一步深入研究。因此,本文以微气压波幅值与隧道内压缩波压力梯度的相关理论为基础,采用轴对称模型对集中式气室的初始压缩波压力梯度缓解率进行数值模拟研究,并结合缩比模型试验对数值计算结果和气室缓解规律进行验证,以期揭示集中式气室结构参数对压力梯度缓解效果的作用机制。

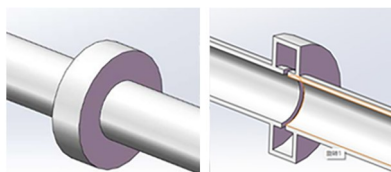
1 数值方法

1.1 计算模型及边界条件

本文采用的二维轴对称模型如图1(a)所示,图1(b)为三维示意图,其不仅能够捕捉到压缩波传播到气室入口附近时的主要流动特征,还可以近似地模拟初始压缩波在气室附近的径向传播。同时二维轴对称模型能够捕捉到流场的一部分三维流动细节,且相较于三维模型其耗费的计算资源更少,Zhang等^[18-22]已在研究时采用。考虑到隧道内波前



(a) 二维轴对称模型



(b) 三维示意图

图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

演化过程在较短距离内主要由惯性作用主导,且波前的上升时间通常很短,湍流和热传递产生的影响较小,因此本文采用无黏流动模型。计算模型中隧道半径 $R=5\text{ m}$,长度 $L=300\text{ m}$,气室布置在距离隧道入口 150 m 处,气室与其连接处的断面均采用正方形,尺寸分别为 H 与 D 。

隧道模型左端设置为压力入口,右端设置为压力出口,下侧虚线设置为对称轴,其余为壁面。输入的S形波如图2所示,由于S形波的压力和压力梯度均连续变化,因此相较于斜波可以在数值方法求解时避免出现波动振荡,同时S形波与实测波形相似,且相较于实测波形具有可以量化的幅值 P_{MAX} 和波长 l_w ,便于控制波形参数而分析气室对不同压缩波的作用效果。

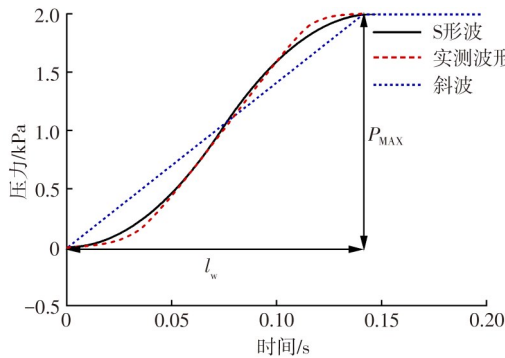


图2 不同波形对比

Fig. 2 Comparison of different waveforms

1.2 网格划分及求解设置

考虑到结构网格具有较好的正交性和纵横比,利于产生更准确的模拟结果,因此采用结构网格划分计算模型,在远离气室的隧道上游和下游由于压缩波三维效应不明显,因此可以采用较大尺寸的网格,而连接处流动复杂多变,需对网格进行加密,兼顾提高网格质量和节约计算资源,将隧道及气室中的最大网格尺寸设置为连接处网格尺寸的2倍,最大网格与最小网格在连接处附近尺寸平滑过渡,局部区域网格划分结果如图3所示。使用ANSYS Fluent对初始压缩波在安装有大气室的隧道模型中传播过程进行数值模拟求解,采用可压缩的理想气体模型,开启能量方程,空间离散采用Third-order-muscl,时间离散采用Second-order-implicit,根据试算结果进行调整,同时满足捕捉压力波动态特征的时间分辨率要求,最终确定库朗数设置为50,时间步长设置为 $4.0 \times 10^{-4}\text{ s}$,在保证计算收敛的同时提高了收敛速度,最大迭代次数为150,设置残差为 1.0×10^{-3} ,确保每次迭代后结果收敛^[18]。

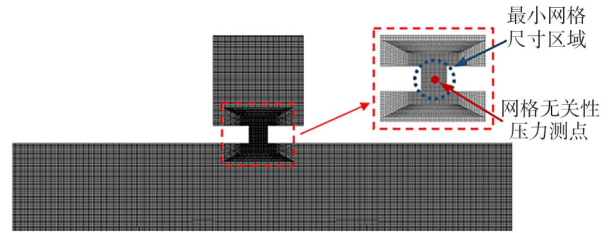


图3 局部网格

Fig. 3 Local grid

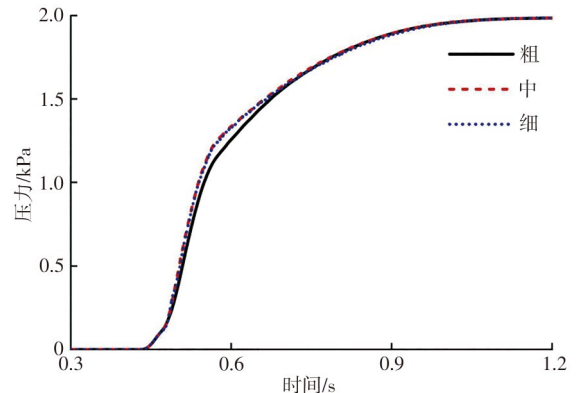
1.3 网格无关性

为验证网格无关性,按粗、中、细3种规格进行网格划分,网格信息如表1所示,3种网格下气室连接处压力和质量流量对比如图4所示。可以看出粗网格的计算结果偏差较大,中网格和细网格的计算结果相近。

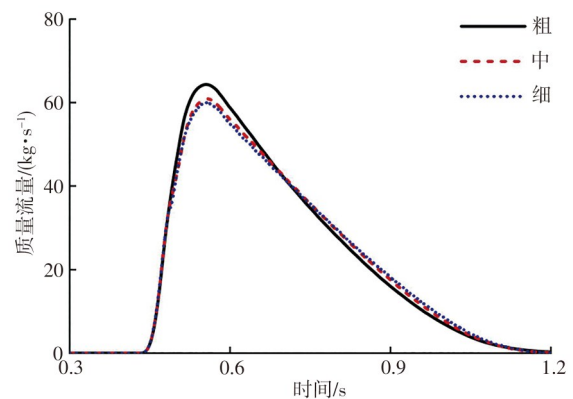
表1 网格划分规格及网格数对比

Table 1 Comparison of grid division specifications and grid counts

网格划分规格	最小网格尺寸/m	总网格数	与细网格偏差百分比/%
粗	0.10	6 743	7.4
中	0.05	25 172	1.5
细	0.02	63 524	



(a) 压力曲线



(b) 质量流量曲线

图4 网格无关性曲线

Fig. 4 Grid independence curves

由表1可见,细网格划分的总网格数远多于中网格,在保证计算精度的前提下提高计算效率,采用尺寸规格中等的网格进行后续研究。

1.4 数值计算方法验证

为验证本文数值计算方法的准确性,将模型试验(具体试验装置及方法详见第3.1节)中气室远端测点1的波形进行多项式拟合后通过ANSYS Fluent中的UDF加载到仿真计算的压力入口作为输入的初始压缩波,计算得到模型中测点1~4的压力数据。将试验和仿真对应测点的压力及求导后的压力梯度曲线结果进行对比如图5所示,计算结果与试验测得的曲线吻合较好,最大误差约为4.3%,验证了本文采用的计算方法可靠。

2 仿真计算结果分析

2.1 压缩波演化典型特征

为提高仿真计算采用的S形波在列车实际运营速度下的参数代表性,计算压缩波幅值 ΔP_c 如下

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{1 - (1 - \beta)^2}{(1 - Ma)[Ma + (1 - \beta)^2]} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; v 为列车行驶速度; β 为阻塞比; Ma 为马赫数。

根据式(1)计算得到,当列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度驶入净空面积为 70 m^2 的隧道时产生的初始波前幅值约为 1.7 kPa ,因此选用了幅值为 2 kPa 、波长为 50 m 的初始压缩波作为输入波形,其经过连接处尺寸 $D=1 \text{ m}$,气室尺寸 $H=5 \text{ m}$ 的气室前后压力和压力梯度的变化情况如图6所示,初始压缩波经过使得隧道内的压力增加,在压差作用的驱动下,隧道内的空气开始进入气室,导致气室内压力逐渐增加,未到达气室之前,压缩波的波前保持与隧道纵轴线垂直,隧道内的压力变化呈现一维特征;当压缩波波前抵达气室连接处时,受气室附近流动的影响,波前发生一定程度倾斜,呈现出显著的三维特征;压缩波经过气室继续向前传播一段距离后,又恢复为平面波。如图6(a)、(b)所示,经过气室前后压缩波的幅值没有明显变化,但从图6(c)、(d)中发现气室前后压力梯度减小,气室对于初始压缩波压力梯度的缓解十分明显。

2.2 气室连接处流动特征

2.2.1 压差与流量关系

根据动量守恒定律,隧道内压力和气室内压力及连接处质量流量满足式(2),当质量流量较大时,

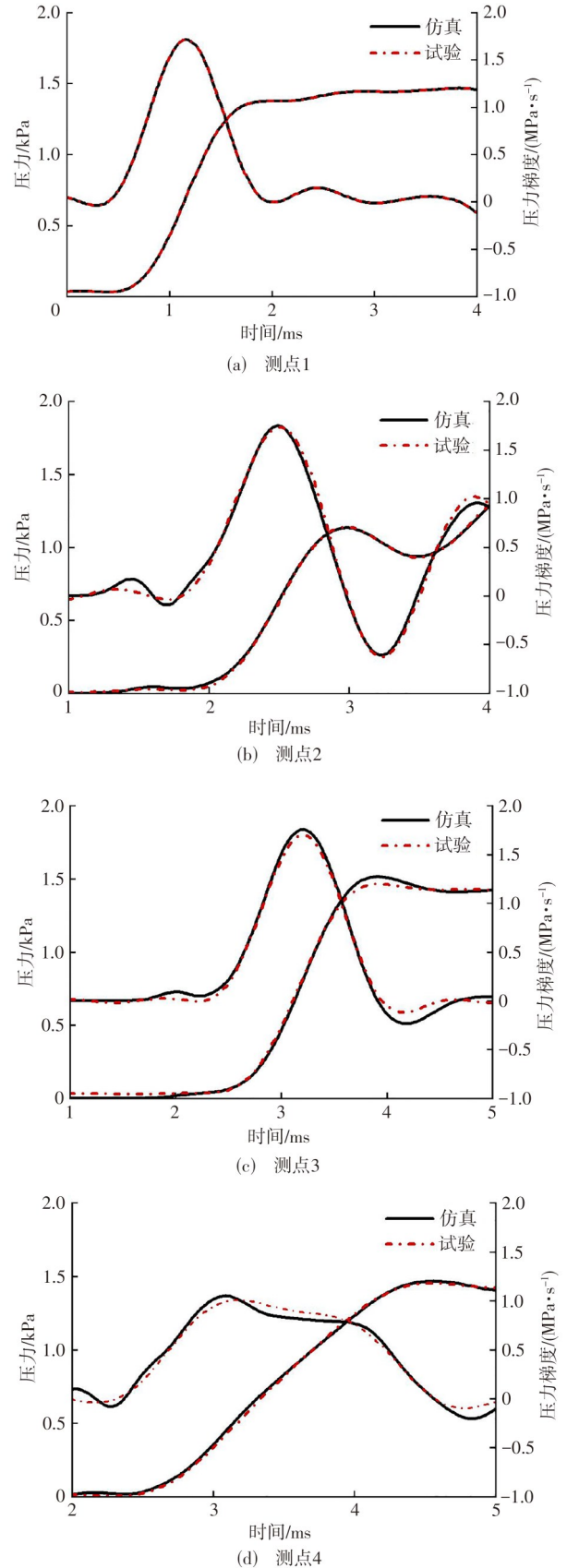


图5 仿真与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation and experimental results

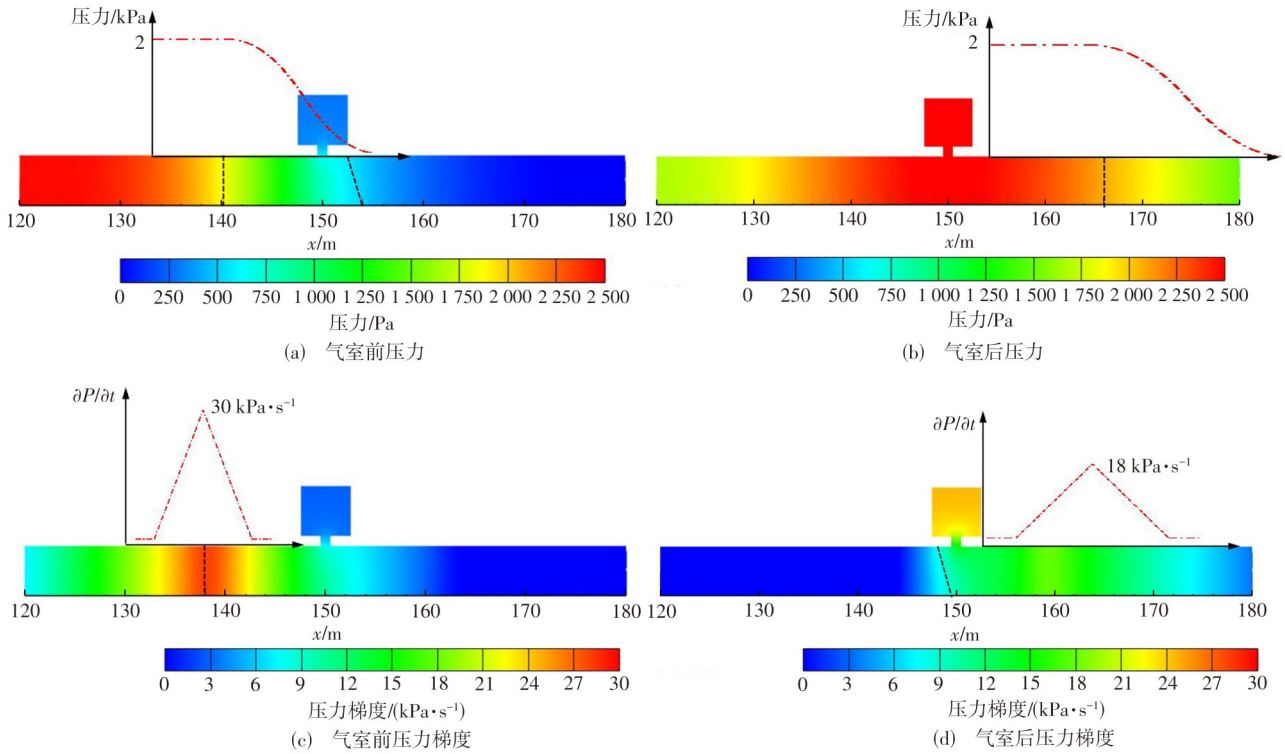


图6 初始压缩波经过气室的典型特征

Fig. 6 Typical characteristics of initial compression waves passing through air chamber

二次阻力项所占比重通常显著增加,定义惯性项与质量流量的关系为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = K_1 \dot{m} + K_2 \dot{m} |\dot{m}| + N \quad (2)$$

$$N = a_{acc} \left(\frac{d\dot{m}}{dt} \right) \quad (3)$$

式中: ΔP 为隧道和气室的压差,在其作用下气室与隧道进行气体交换; P_1 为隧道内压力; P_2 为气室内压力; $\dot{m}$ 为连接处质量流量; K_1 为一次阻力系数; K_2 为二次阻力系数; N 为气体流动时的惯性项。

图7对比了不同连接处尺寸对气室内外压差 ΔP 与连接处惯性项 N 的影响,字母下标I代表质量流量上升段,下标D代表质量流量下降段,惯性系数 a_{acc} 的取值由连接处的形状和尺寸决定,具体计算公式为

$$a_{acc} = (L_c + 2\Delta L_c) / A \quad (4)$$

$$\Delta L_c = (4W) / (3\pi) \quad (5)$$

式中: L_c 为连接处的长度; W 为连接处的宽度; A 为连接处的横截面积; ΔL_c 为法兰端情况下的长度矫正。

a_{acc} 具体数值需结合式(4)、(5)和本文连接处具体几何参数计算。

当初始压缩波经过气室连接处时,在压差作用下空气流入气室,受不同连接口特征尺寸 D 的影响,空气的流动呈现不同的特性。如图7(a)、(b)所示,当 D 取值较大时,连接口处的空气相对于气室内的

空气质量比值较大,因此空气流入气室时主要受惯性项主导,在流量的上升段,压差先增大后减小,在流量的下降段,压差先减小后增大;而如图7(c)、(d)所示,当 D 较小时,连接口处的空气质量较小,空气流入气室时主要受连接处尺寸的限制,但流速依然很大,式(2)中的二次项 $K_2 \dot{m} |\dot{m}|$ 占主导,流量与压差逐渐接近二次函数的关系。

2.2.2 流动阻力系数

从图7中可以看出,压力上升和下降阶段中 ΔP 和 $\dot{m}$ 间均可能呈现出显著的二次关系,因此定义 K_{2I} 、 K_{2D} 分别为流量上升和下降段时的二次阻力系数,计算公式为

$$K_2 = \Delta P / \dot{m}^2 \quad (6)$$

选择较大的气室体积和较小的连接处尺寸,根据式(6)对 ΔP - $\dot{m}$ 进行二次拟合,图8展示了 D 和 H 对阻力系数 K_2 的影响。随着 D 的减小, K_2 逐渐增大,如图8(a)所示,表明 D 越小,气室的阻力越大;当 $H \geq 1.875$ m时,如图8(b)所示,随着 H 的变化, K_2 没有发生明显变化,表明 H 的改变不会对气室的阻力产生明显的影响。

2.3 气室参数的影响

2.3.1 对流动和压力的影响

初始压缩波经过气室时,由于气室的储气机理,在压差作用下隧道中的空气通过连接处流入气室,

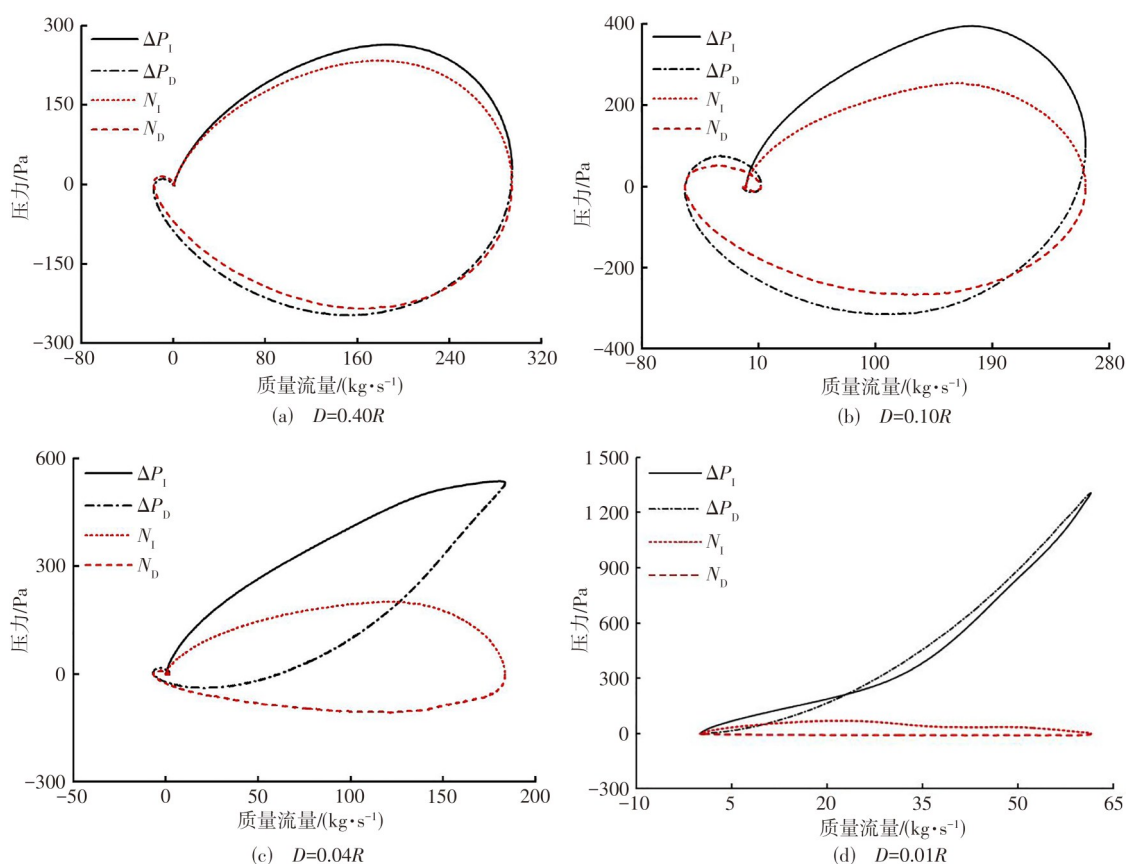


图 7 气室内外压差与质量流量关系

Fig. 7 Relationship between pressure difference inside and outside the chamber and mass flow rate

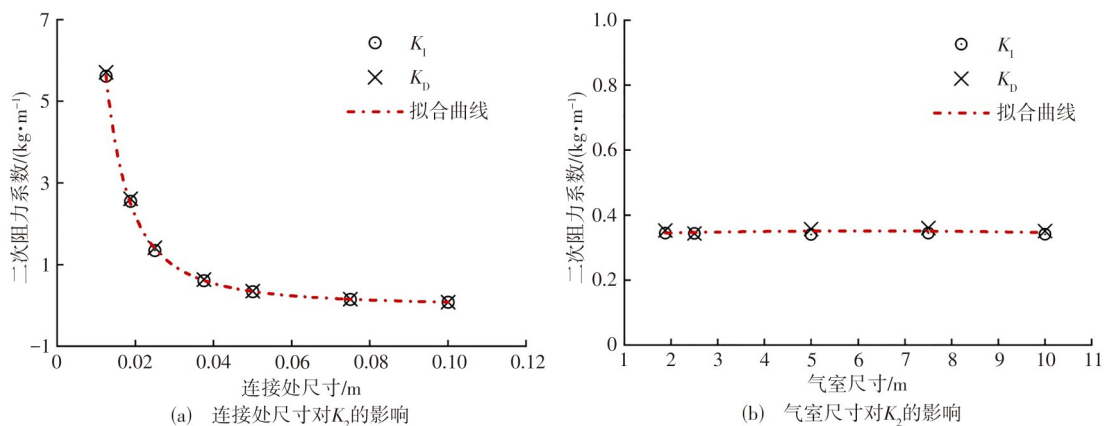


图 8 连接处尺寸和气室尺寸

Fig. 8 Influence of connection size and chamber size on K_2

受气室和连接处几何尺寸的影响,进入气室的空气流量和隧道断面的压力梯度表现为不同特征。图 9 为保持 $D=0.40R$ 不变,改变气室几何参数 H 得到的空气质量流量、隧道断面平均压力及压力梯度的关系曲线,其中隧道断面位于气室连接处正下方,即距离隧道入口 150 m 处。当气室尺寸 H 较小时,受限于气室体积,进入气室的空气质量流量峰值很小,且下降后会出现振荡的现象,但压力增长较快,压力梯度峰值较高,随着气室尺寸 H 的增大,空气质量流

量的峰值也在增大,并且气室尺寸越大,质量流量达到峰值后下降越缓慢,波尾段压力上升变缓,同时压力梯度的峰值也在进一步减小。

图 10 比较了不同连接处尺寸 D 对隧道进入气室内的空气质量流量、隧道断面平均压力及压力梯度的影响,保持 $H=R$ 不变,可以看出当 D 较小时,进入气室的质量流量较小,波尖处压力上升较快,隧道断面压力梯度较高,进入气室的质量流量在达到最大值后下降缓慢,压力梯度只有一个峰值,气室始

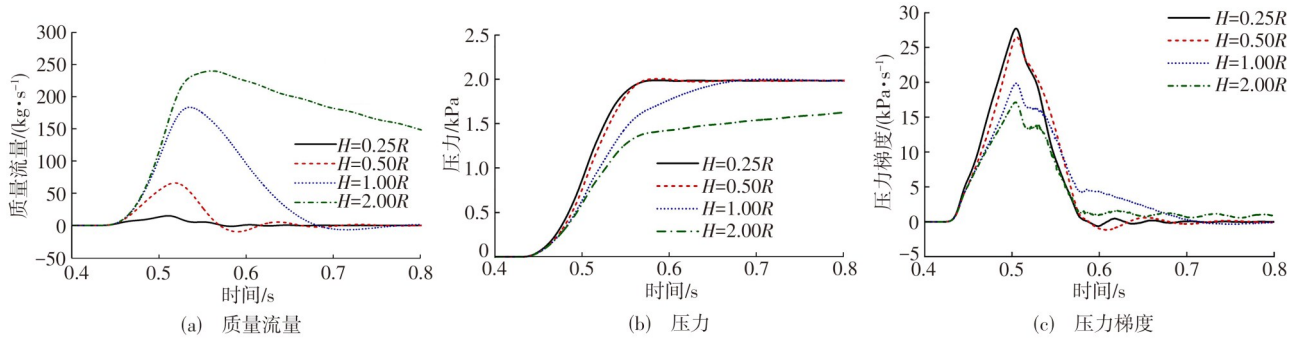


图9 气室尺寸对质量流量、压力、压力梯度的影响

Fig. 9 Influence of chamber size on mass flow rate, pressure, and pressure gradient

终表现为过阻尼特性。随着 D 逐渐增大,进入气室的质量流量峰值逐渐增大,且到达峰值后下降速度变快,隧道断面上的最大压力梯度减小。当 D 进一步增大时,质量流量峰值更高的同时开始出现负值,空气出现回流现象,气室逐渐呈现欠阻尼特性,压力梯度曲线出现第2峰值。

图10中可以看出,当 D 增大到 $0.20R$ 时,隧道断面的平均压力梯度已经大幅降低。如图11所示,进一步增大 D ,分别选取 $D=0.20R$ 、 $0.40R$ 、 $0.60R$,对比进入气室质量流量和压力梯度,发现 $D=0.60R$ 时流量最先出现上升,说明气室的响应速度随着 D 的增大而加快,但气室响应过快或过慢都不利于最

大压力梯度的降低,当 $D=0.40R$ 时,气室反应速度适中,使气室有效作用在初始波长一半的位置,能够最大程度地降低压力梯度。

2.3.2 对压力梯度缓解率的影响

气室对于初始压缩波压力梯度的缓解率是衡量气室性能的主要指标,测点的位置如图1(a)所示,气室缓解率 G 的计算公式为

$$G = \frac{(\partial P_0 / \partial t)_{\max 2} - (\partial P_1 / \partial t)_{\max 4}}{(\partial P_0 / \partial t)_{\max 2}} \quad (7)$$

式中: ∂P_0 为初始压缩波经过测点2时的压力变化; ∂P_1 为初始压缩波经过测点4时的压力变化; ∂t 为压

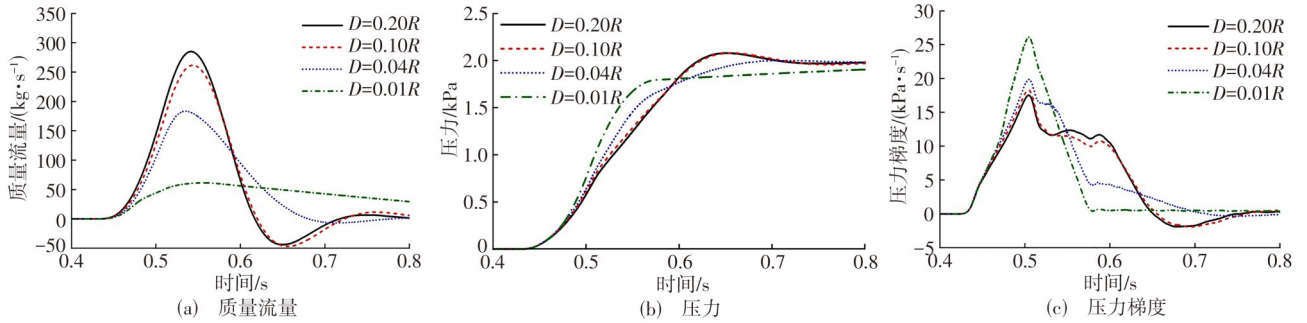


图10 连接处尺寸对质量流量、压力、压力梯度的影响

Fig. 10 Influence of connection size on mass flow rate, pressure, and pressure gradient

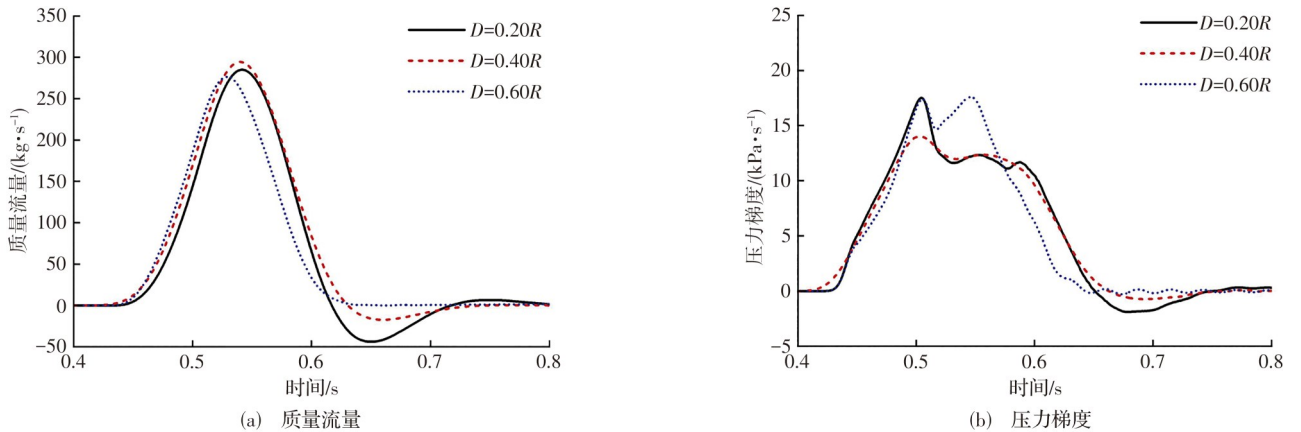


图11 连接处尺寸进一步扩大对质量流量和压力梯度的影响

Fig. 11 Influence of further expansion of connection size on mass flow rate and pressure gradient

力上升的时间间隔。

隧道与气室连接处的几何尺寸影响着气室的阻尼特性,即隧道中进入气室的空气流量变化。初始压缩波经过气室时,若隧道中的空气持续流入气室,连接处的空气流量始终为正值,此时的气室定义为过阻尼气室;若空气流入气室后存在回流,空气流量出现负值,则定义为欠阻尼气室。图12显示了连

接处尺寸与空气质量流量以及气室缓解率的关系,可以看出当 $H=R$,连接处尺寸大于 $0.02R$ 、小于 $0.60R$ 时会出现回流,气室表现欠阻尼特性。结合气室的阻尼特性以及质量流量的最大峰值随 D 的变化情况可以看出,要保证气室的缓解效果,首先要保证隧道进入气室需要足够多的空气并且产生适度的回流。

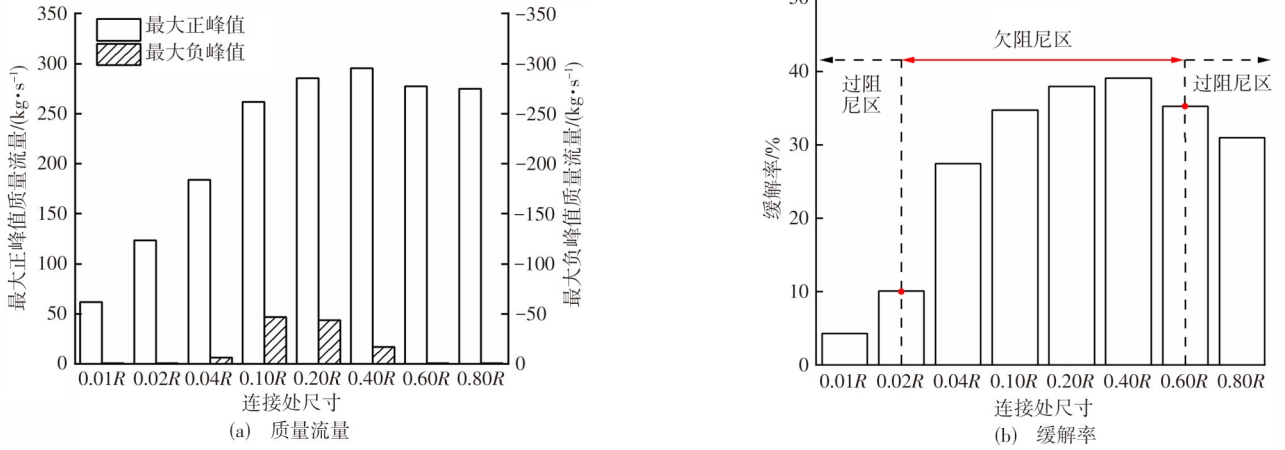


图12 连接处尺寸与质量流量和缓解率的关系

Fig. 12 Relationship between connection size, mass flow rate, and mitigation rate

保持初始压缩波参数和连接处尺寸 $D=0.04R$ 不变,改变气室几何参数 H ,得到气室的缓解率如图13所示,可以看出,当连接处尺寸 D 不变时,气室

的体积越大对于初始压缩波压力梯度的缓解效果越好。但当 H 过大时,缓解率增长缓慢,此时气室体积不再是影响缓解率的主要因素。

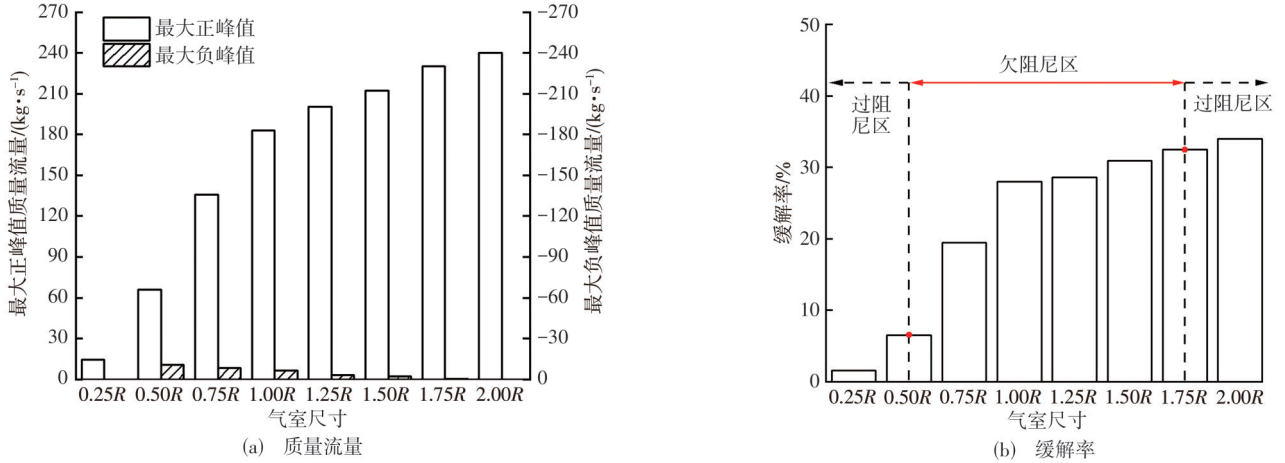


图13 气室尺寸与质量流量和缓解率的关系

Fig. 13 Relationship between chamber size, mass flow rate, and mitigation rate

2.4 初始压缩波参数对缓解率的影响

仿真计算采用的S形波有2个主要参数,分别是最大压力梯度 $(\partial P/\partial t)_{\max}$ 和幅值 $P_{\max}$,图14为最大压力梯度 $(\partial P/\partial t)_{\max}=30 \text{ kPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 不变,压力幅值不同的初始压缩波经过3种尺寸的气室后得到的缓解率曲线,可以看出当最大压力梯度不变时,气室的缓解率随压力幅值的升高而减小。

图15为采用压力幅值 $P_{\max}=2 \text{ kPa}$ 不变,压力梯度不同的初始压缩波经过3种尺寸气室后得到的缓解率曲线,可以看出当压力幅值不变时,气室的缓解率随最大压力梯度的升高而增大。综合考虑最大压力梯度和幅值与初始压缩波波长的关系,发现最大压力梯度 $(\partial P/\partial t)_{\max}$ 不变提高幅值意味着增加初始压缩波波长,保持幅值不变增大最大压力梯度意味

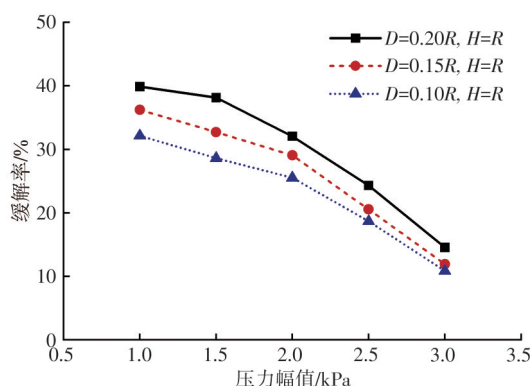


图 14 压力幅值对气室缓解率的影响

Fig. 14 Effect of pressure amplitude on chamber relief rate

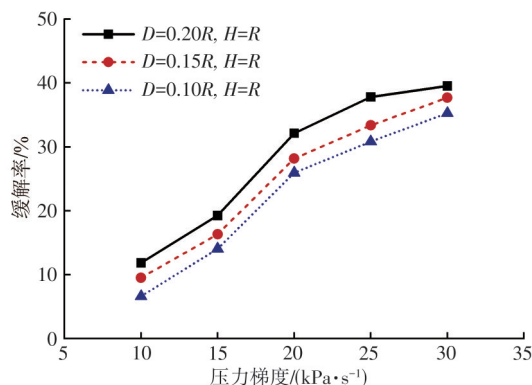


图 15 压力梯度对气室缓解率的影响

Fig. 15 Effect of pressure gradient on chamber relief rate

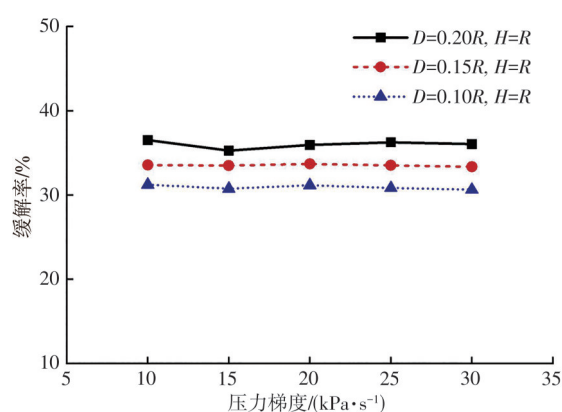
着减小波长,因此初始压缩波波长是影响气室缓解率的关键因素。

图 16 为相同波长、不同最大压力梯度及幅值的初始压缩波作用下,气室缓解率的数值仿真结果,可以看出,波长恒定时,相同几何尺寸气室的缓解率几乎不变,进一步验证了波长是影响缓解率的关键参数。

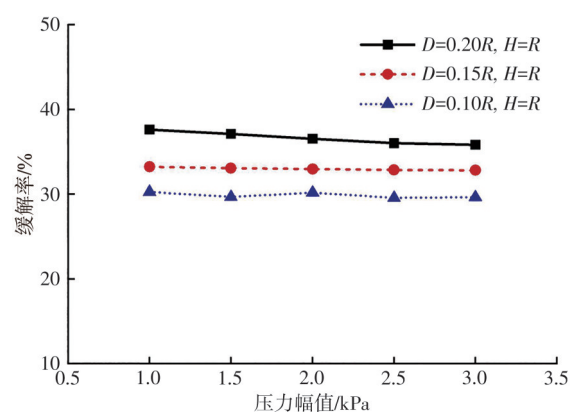
3 模型试验结果分析

3.1 试验装置工作原理

本文采用的试验装置由气源、数据采集系统和待测隧道气室模型组成,如图 17 所示隧道气室模型为 1:100 的缩比模型,其中高压腔、电磁阀与隧道模型三者之间通过 PU 管连接。初始压缩波的产生原理为:通过空压机对高压腔充气至预定压力后,电磁阀控制高压空气经 PU 管传至隧道入口即可形成初始压缩波。调节高压腔压力可改变幅值,调整电磁阀开启数量及开启顺序可控制最大压力梯度。试验前将如图 18 所示的气室模型安装至隧道模型中,在气室的远端(测点 1)和气室前后(测点 2、4)以及气室内(测点 3)均布置压力传感器。本文模型试验缩尺比例的可行性已被诸多学者证明,例如 Miyachi^[23]和 Bellenoue 等^[24]在其研究中分别采用了 1:100 及



(a) 压力梯度



(b) 压力幅值

图 16 最大压力梯度与压力幅值对气室缓解率的影响

Fig. 16 Influence of maximum pressure gradient and pressure amplitude on the air chamber relief rate

1:140 的缩比模型。尽管试验装置与实际尺寸的隧道在几何形状方面存在差异,但根据波前演化的相关理论,其内部流动及压力变化特性类似,该试验方法的准确性已经在多篇文献中得到了验证^[17-18]。

3.2 模型试验结果分析

压缩波发生装置通过控制电磁阀开启的个数和电压来控制波形,试验时高压腔充气压力至 200 kPa,分别改变电磁阀开启个数和开启电压,得到初始压缩波波形如图 19 所示。保持开启电压不变,增加电磁阀的开启个数可以提高初始压缩波的幅值;保持开启个数不变,提高电磁阀开启时的电压可以缩短初始压缩波的波长。

3.2.1 模型试验气室几何参数的影响

试验采用的气室模型尺寸参数及编号见表 2,气室在隧道中的安装位置与之前相同,采用开启 10 个电磁阀,开启电压分别为 28、30 V 两种初始压缩波进行试验,缓解率计算依然采用式(7),得到气室的缓解率如图 20 所示,可以看出将气室的边长 H 减半后,气室的缓解率大幅下降,下降幅度超过 40%,而

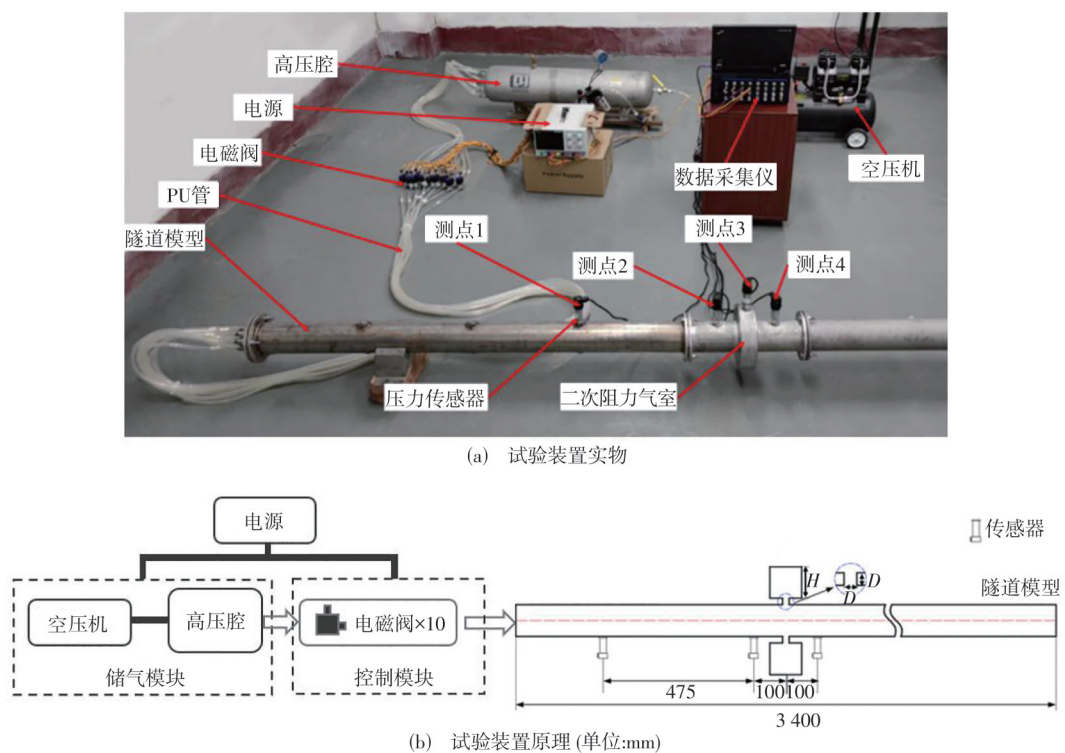


图 17 试验装置
Fig. 17 Experimental device

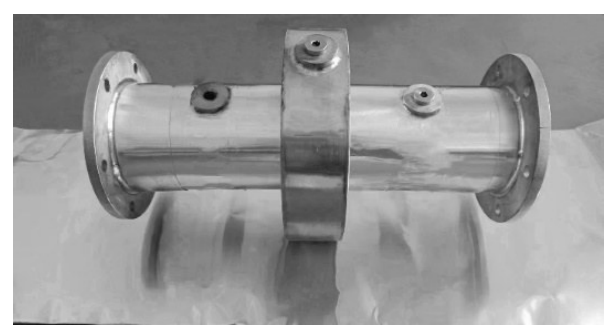


图 18 气室模型实物
Fig. 18 Physical image of air chamber model

将连接处尺寸 D 减半后,气室的缓解率下降了大约 8%,因此,要保证气室能够有效发挥作用,几何参数

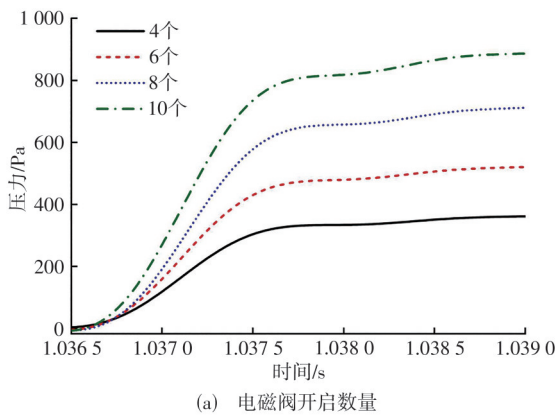


表 2 气室参数

Table 2 Chamber parameters				mm
气室	a	b	c	
D	10	10	5	
H	50	25	50	

H 是首要的考虑因素。

3.2.2 模型试验初始压缩波参数的影响

保持气室参数 $D=10\text{ mm}$, $H=50\text{ mm}$ 不变,第 1 组试验采用开启电压为 28 V,开启个数分别为 4、6、8、10 个电磁阀产生的波形,验证初始压缩波波长不变,改变幅值对气室缓解率的影响规律。气室的缓解率如图 21 所示,保持开启电压不变,增加电

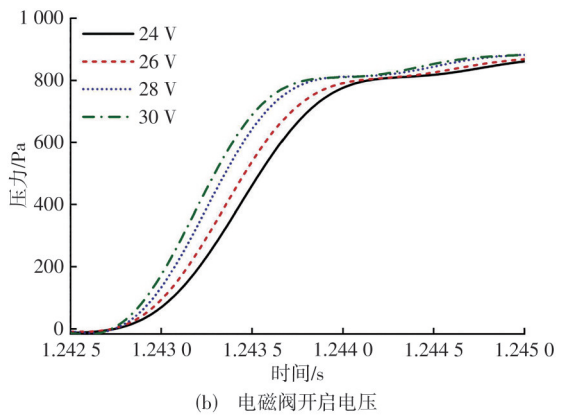


图 19 电磁阀开启数量和开启电压对波形的影响
Fig. 19 Influence of the opening numbers and voltage of solenoid valve on the waveform

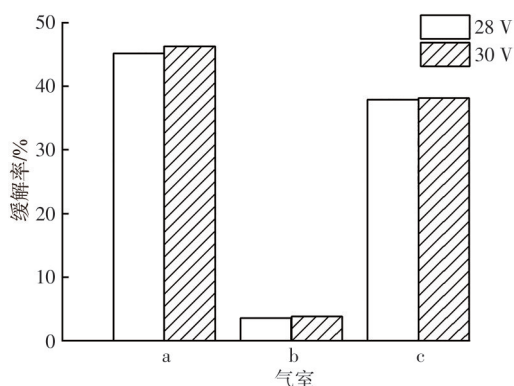


图 20 几何尺寸对气室缓解率的影响

Fig. 20 Influence of geometric dimensions on the relief rate of air chambers

磁阀开启数量,可以增大初始压缩波幅值但不改变波长,气室的缓解率基本不变,与第 2.4 节中数值仿真的结论一致。

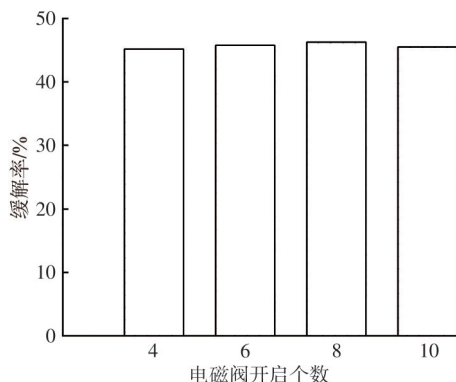


图 21 电磁阀开启数量对缓解率的影响

Fig. 21 Influence of solenoid valve opening numbers on the relief rate

同样保持气室参数为 $D=10\text{ mm}$, $H=50\text{ mm}$, 采用电磁阀开启个数为 10 个, 开启电压分别为 24、26、28、30 V 的初始压缩波进行试验, 得到气室的缓解率如图 22 所示, 增大电磁阀的开启电压能够产生相同幅值更短波长的初始压缩波, 随着波长的变短, 气室的缓解率逐渐提高, 与第 2.4 节中数值仿真得到的结论一致。

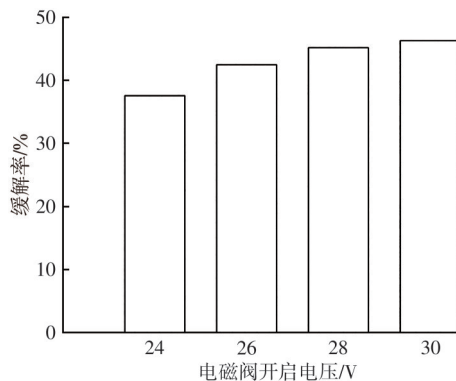


图 22 电磁阀开启电压对缓解率的影响

Fig. 22 Influence of solenoid valve opening voltage on the relief rate

4 结 语

(1) 本文数值仿真采用的计算方法能够有效模拟初始压缩波在隧道中的传播过程, 不同测点压力曲线以及压力梯度曲线与试验结果吻合良好。同时隧道中设置的集中式气室对降低初始压缩波幅值作用不明显, 但能够显著降低初始压缩波压力梯度。

(2) 连接处特征尺寸 D 较大时, 连接处的流动由惯性主导, 随着 D 逐渐减小, 连接处惯性及其峰值流量逐渐降低, 其流动主要受阻力影响, 压差与流量呈现二次关系; D 的改变对阻力系数 K_2 影响较大, H 的变化对气室的阻力没有明显的影响。

(3) 气室的几何参数 H 对初始压缩波压力梯度的缓解率有较大影响, 体现在必须保证 H 足够大使气室具有一定的储气能力, 当 H 较小时, 由于储气能力不足, 峰值流量过低, 缓解率大幅下降。连接处的尺寸 D 主要影响气室的阻尼和响应速度, 在增大质量流量峰值和保证适度回流的条件下选择合适的 D 能够进一步提高气室的缓解率, 当 $D=0.40R$ 、 $H=R$ 时气室的缓解率超过 40%。

(4) 集中式气室对初始压缩波压力梯度的缓解基本不受初始压缩波幅值的影响, 但初始压缩波的波长对缓解率影响较大, 初始压缩波波长越短, 气室的缓解率越高, 因此在实际工程应用中可以将气室布置在压缩波经过激化后波长最短的位置, 以便更好的发挥作用。

(5) 本文对集中式气室的缓解规律进行了初步探索, 但仍存在若干需深入研究的问题: 首先环形气室作为理想化的模型, 其与轨道结构的适配性需进一步明确, 未来将构建车-轨-气室耦合动力学模型, 系统分析无砟/有砟轨道等不同结构形式对气室缓解能力的影响规律; 其次, 理论模型与试验数据的偏差需通过实车试验获取数据修正模型边界条件; 最后, 针对气室可能引发的声学共振问题, 后续应结合声学相关理论评估其对隧道气动噪声的调控作用, 以完善气室结构的相关研究。

参 考 文 献:

Reference :

- [1] 熊嘉阳, 沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 6-29.
XIONG Jia-yang, SHEN Zhi-yun. Rise and future development of Chinese high-speed railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 6-29.
- [2] 丁叁叁, 陈大伟, 刘加利. 中国高速列车研发与展望[J]. 力学

- 学报,2021,53(1):35-50.
- DING San-san, CHEN Da-wei, LIU Jia-li. Research, development and prospect of China high-speed train [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 35-50.
- [3] 梅元贵,赵汗冰,陈大伟,等.时速600 km磁浮列车驶入隧道时初始压缩波特征的数值模拟[J].交通运输工程学报,2020,20(1):120-131.
- MEI Yuan-gui, ZHAO Han-bing, CHEN Da-wei, et al. Numerical simulation of initial compression wave characteristics of 600 km/h maglev train entering tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 120-131.
- [4] VARDY A E. Generation and alleviation of sonic booms from rail tunnels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Engineering and Computational Mechanics, 2008, 161(3): 107-119.
- [5] 梅元贵,王志钧,吕博,等.高速列车隧道车内外压力变化的实车试验[J].交通运输工程学报,2023,23(2):183-198.
- MEI Yuan-gui, WANG Zhi-jun, LV Bo, et al. Full-scale experiment on pressure changes inside and outside high-speed trains in tunnels [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 183-198.
- [6] 蔺童童,杨明智,张雷,等.高速磁浮列车流线型头部拱形结构对列车与隧道耦合气动特性的影响[J].铁道科学与工程学报,2022,19(9):2515-2523.
- LIN Tong-tong, YANG Ming-zhi, ZHANG Lei, et al. Influence of streamlined head arch structure of high-speed maglev train on aerodynamic characteristics of train and tunnel coupling [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2515-2523.
- [7] 宋军浩,郭迪龙,杨国伟,等.高速列车隧道通过中的气动效应模型实验研究[J].实验流体力学,2017,31(5):39-45.
- SONG Jun-hao, GUO Di-long, YANG Guo-wei, et al. Experimental investigation on the aerodynamics of tunnel-passing for high speed train with a moving model rig [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(5): 39-45.
- [8] 姚拴宝,陈大伟,林鹏,等.单线高速铁路隧道入口缓冲结构几何外形优化设计[J].中国铁道科学,2018,39(5):80-87.
- YAO Shuan-bao, CHEN Da-wei, LIN Peng, et al. Geometric shape optimization design for buffer structure at tunnel entrance of single track high speed railway [J]. China Railway Science, 2018, 39(5): 80-87.
- [9] 孙浩程,王英学,古理全,等.400 km/h高铁隧道出入口缓冲结构开口率对微压波影响研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2):433-443.
- SUN Hao-cheng, WANG Ying-xue, GU Li-quan, et al. Study on the effect of buffer structure opening rate on micro-pressure wave at the exit and entrance of 400 km/h high-speed railway tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(2): 433-443.
- [10] 钟登朝,李奎,胡啸,等.开孔型缓冲结构减缓高速磁浮列车隧道初始压缩波的特征研究[J].兰州交通大学学报,2023,42(4):91-98.
- ZHONG Deng-chao, LI Kui, HU Xiao, et al. Study on characteristics of initial compression wave retarded by open-pass buffer structure in high-speed maglev train tunnel [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2023, 42(4): 91-98.
- [11] 王英学,常乔磊,任文强,等.无缝式开口隧道缓冲结构气动特性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(1):17-23.
- WANG Ying-xue, CHANG Qiao-lei, REN Wen-qiang, et al. Seam opening tunnel buffer structure aerodynamic characteristic research [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 17-23.
- [12] 梅元贵,李锦辉,胡啸,等.时速600公里磁浮列车隧道初始压缩波洞内传播特征和洞口微气压波特征[J].交通运输工程学报,2021,21(4):150-162.
- MEI Yuan-gui, LI Mian-hui, HU Xiao, et al. Propagation characteristics of initial compression wave in cave and portal micro-pressure waves characteristics when 600 km/h maglev train entering tunnels [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(4): 150-162.
- [13] 张洁,王雨舸,韩帅,等.空腔结构对高速磁浮隧道压力波的影响研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(5):1555-1564.
- ZHANG Jie, WANG Yu-ge, HAN Shuai, et al. Influence of cavity structure on pressure waves in a high-speed maglev tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1555-1564.
- [14] 宋军浩,姚拴宝,陈大伟,等.谐振腔结构减缓高速磁浮列车隧道出口微气压波研究[J].实验流体力学,2023,37(3):1-8.
- SONG Jun-hao, YAO Shuan-bao, CHEN Da-wei, et al. Mitigation of micro-pressure wave at high-speed maglev tunnel exit by resonant cavity structure [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(3): 1-8.
- [15] 王田天,冯朝阳,陆意斌,等.400 km/h高铁隧道联通式缓冲结构对微气压波的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1618-1630.
- WANG Tian-tian, FENG Zhao-yang, LU Yi-bin, et al. Effect of connected buffer structure on micro-pressure waves in 400 km/h high-speed railway tunnel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(4): 1618-1630.
- [16] LIU F, VARDY A E, POKRAJAC D. Influence of air chambers on wavefront steepening in railway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117(5): 104120.
- [17] 雷海洋,刘峰,姚拴宝,等.基于特征线法的车隧压缩波演化数值分析[J].科学技术与工程,2023,23(18):7969-7975.
- LEI Hai-yang, LIU Feng, YAO Shuan-bao, et al. Numerical analysis of tunnel wavefront evolution based on the method of characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(18): 7969-7975.
- [18] ZHANG Y T, LIU F, SUN H W, et al. Flow characteristics of an air chamber in a rail tunnel [J]. Journal of Central South

- University, 2023, 30(9): 3083-3096.
- [19] WANG K W, XIONG X H, WEN C Y, et al. Formation and propagation characteristics of a weak shock wave in maglev tube [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(3): 036120.
- [20] 何 洪, 杨伟超, 赵 伦. 基于动模型试验的 400 km/h 隧道缓冲结构对微气压波的影响[J/OL]. *交通运输工程学报*, 2026-07-23. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.185>.
HE Hong, YANG Wei-chao, ZHAO Lun. Influence of the 400 km/h tunnel buffer structure on the micro-pressure wave based on a moving model tests[J/OL]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026-07-23. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.185>.
- [21] 魏子龙, 孙宪夫, 杨 飞, 等. 多源动态检测数据驱动的高速铁路轨道板周期性不平顺诊断方法[J]. *交通运输工程学报*, 2026, 26(7): 15-26.
WEI Zi-long, SUN Xian-fu, YANG Fei, et al. Diagnosis method for periodic irregularity of track slab on high-speed railway driven by multi-source dynamic inspection data [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(7): 15-26.
- [22] 李 杨, 刘友梅. 地铁列车关键气密部件对车内压力舒适性的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(3): 227-237.
LI Yang, LIU You-mei. Impact of key airtight components on pressure comfort in metro train [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(3): 227-237.
- [23] MIYACHI T. Acoustic model of micro-pressure wave emission from a high-speed train tunnel [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 391: 127-152.
- [24] BELLENOUE M, AUVITY B, KAGEYAMA T. Blind hood effects on the compression wave generated by a train entering a tunnel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2001, 25(6): 397-407.