

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0801

超材料屏障的低频减振性能研究

马梦蕾, 袁丽莉*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对城市轨道交通引发的低频振动问题, 提出一种浅埋式小尺寸声学超材料屏障用于抑制表面波传播。首先, 基于有限元法 (Finite Element Method, FEM) 计算该结构的频散特性, 并结合模态分析阐明其对表面波的调控机理。其次, 进一步定量探究超材料结构的晶格常数、内层振子半径、外约束层厚度等几何因素和材料因素对表面波带隙的调控规律, 同时通过正交实验探讨各因素对带隙宽度和频率的影响程度。最后, 通过有限周期的频域分析进一步验证该结构在轨道隔振中的实际减振性能。结果表明: 该超材料屏障对 Rayleigh 波的完全带隙范围为 34.1~48.3 Hz, 对 Love 波的完全带隙范围为 20.8~62.3 Hz。研究结果为超材料屏障的实际应用提供了理论基础, 同时也展示了其在表面波衰减领域的工程应用潜力。

关键词: 声学超材料; 局域共振; 低频带隙; 表面波

中图分类号: TU352.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2026) 02-0018-10

Research on low-frequency vibration reduction performance of metamaterial barriers

MA Menglei, YUAN Lili*

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To mitigate the low-frequency vibration caused by urban rail transit, this study proposes a shallow-buried compact acoustic metamaterial barrier to suppress the propagation of surface wave. The dispersion characteristics of the structure were calculated based on the finite element method (FEM), and the regulation mechanism of surface waves was clarified in combination with modal analysis. The regulation laws of the surface wave band gap by geometric factors and material factors such as the lattice constant of the metamaterial structure, the radius of the inner oscillator, and the thickness of the outer constraint layer were further explored quantitatively. Through orthogonal experiments, the influence of each factor on the bandgap width and frequency were explored. Further on, through frequency-domain analysis with a finite period, the actual vibration reduction performance of this structure in track vibration isolation was verified. The results show that the metamaterial barrier has a complete band gap of 34.1–48.3 Hz for Rayleigh waves and 20.8–62.3 Hz for Love waves. The research results provide a theoretical basis for the practical application of metamaterial barriers and demonstrate their engineering application potential in the field of surface wave attenuation.

Keywords: acoustic metamaterials; local resonance; low-frequency bandgap; surface waves

收稿日期: 2025-08-01

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省基础公益项目 (LTGS23E080005)

第一作者: 马梦蕾, 硕士研究生, 主要研究方向为智能材料与结构设计。E-mail: 1607569731@qq.com

*通信作者: 袁丽莉, 博士/副教授, 主要研究方向为智能材料与结构设计。E-mail: yuanlili@nbu.edu.cn

随着现代交通系统的快速发展,高速铁路和城市轨道交通已成为连接城市与区域的重要纽带,极大地促进了人员流动与物资运输的效率。然而,其伴随产生的振动与噪声问题也日益凸显,不仅严重影响着沿线居民的健康与生活质量,还对古建筑的文化遗产保护、建筑物结构安全及精密仪器正常运行构成了不可忽视的威胁^[1-2]。轨道交通的振动与噪声已成为局部环境主要扰动源^[3-4],因此,如何有效地隔离与控制其低频振动已成为当前亟待解决的关键问题。

振动主要以弹性波形式在介质中传播,主要分为体波和表面波两类。其中,由 Rayleigh^[5]首次提出的 Rayleigh 波约占轨道振动总能量 67%,具有沿地表传播、能量高度集中、振幅大且难以衰减的特性;由 Love^[6]提出的 Love 波能量占比超 30%,其沿地表浅层传播时呈现水平偏振、能量横向扩散性强等特点。这两种表面波协同主导轨道振动能量传递,且能量占比远超其他弹性波,是振动能量的主要成分。因此,开发能同步阻隔 Rayleigh 波与 Love 波的新型减振技术,对削减轨道带来的振动危害具有重要意义。

基于声学超材料^[7-9]原理设计的轨道隔振屏障已逐渐成为该领域的研究热点。声学超材料通过人工设计微结构单元,利用布拉格反射原理^[10]和局域共振机理^[11-13]在特定频段形成弹性波带隙,从而高效抑制弹性波传播。相较于空沟、填充沟、隔振墙、波阻块和周期排桩等传统隔振措施^[14-15],超材料屏障依托亚波长局域共振单元能精准调控带隙特性,在轨道隔振中可实现更高效率、更宽频的隔振性能,为相关技术升级提供了可能。

已有学者^[16-17]采用地表或半埋入式设计超材料隔振屏障。如厉超等^[18]通过理论推导与实测验证,提出混凝土-橡胶复合地表屏障,不仅揭示带隙参数调控机制,还实现轨道交通振动 70%~80% 的衰减。然而地表屏障存在维护成本高、视觉环境影响显著等局限,促使研究转向更契合城市需求且长期经济性更优的地下埋入式方案。高盟等^[19]提出地下三维周期屏障,突破土层截止频率限制,实现 74~156 Hz 目标频率的可调隔振。王海洋等^[20]提出单胞尺寸为 2 m 的组合周期十字减振沟,并结合有限元参数优化与模型试验验证了其减振性能。葛倩倩等^[21]、赵春风等^[22]研究进一步表明,周期数等参数可优化性能,但埋入深度严重制约了浅层工程应用。因此,当前轨道超材料屏障研究面临低频带宽不足与浅层工程应用之间的矛盾:80 Hz 以下难以突破 30% 相对带宽限制,无法覆盖轨道振动 20~60 Hz 的主频需求;地上屏障视觉污染严重,埋入式屏障需超 2 m 埋深,制约了浅层应用^[23-25]。

因此,本文提出一种小尺寸超材料轨道屏障,基于有限元频散曲线与模态分析揭示其带隙形成机理,深入研究几何、材料参数对带隙的调控规律,并结合频域响应分析,最终验证该结构在浅层敷设场景下实现小尺寸与宽带隙特性的协同突破,为相关技术的工程推广提供新方案。

1 模型与理论分析

1.1 模型设计

为了有效抑制表面波传播,本文基于局域共振原理设计了一种浅埋式小尺寸声学超材料屏障,如图 1 所示。它们以周期性的排列方式布置在轨道或

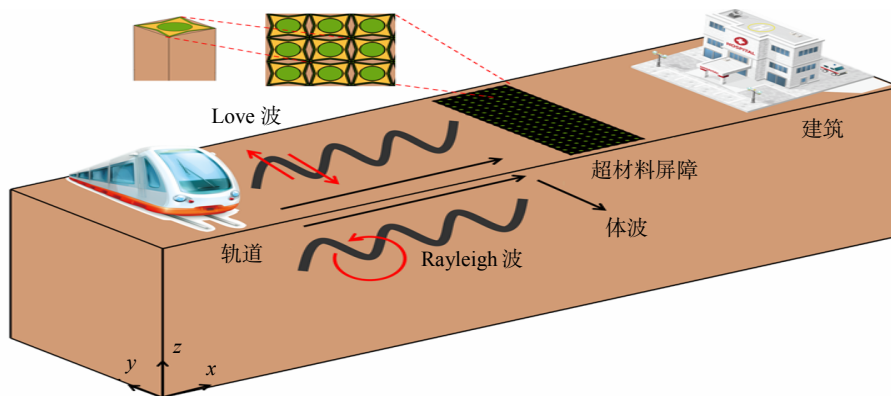


图 1 屏障布置示意图

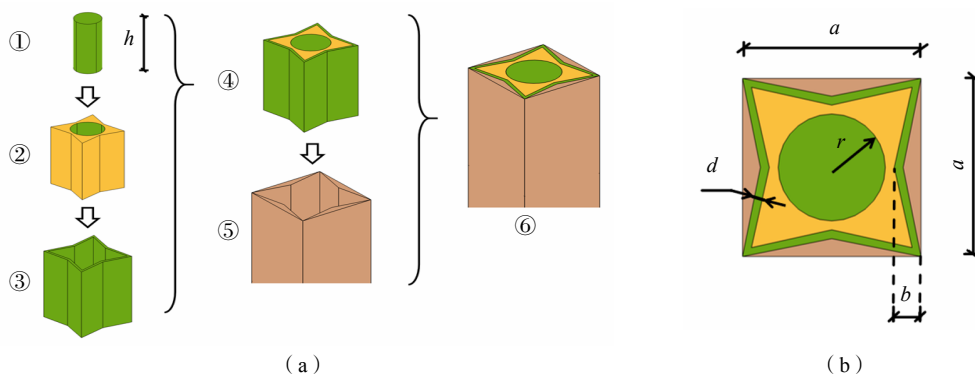


图2 结构分解及单胞结构俯视图

建筑物周围,其结构如图2所示。超材料屏障是一个双向内凹型结构,构件①为内层振子,构件②为中间弹性层,构件③为外约束层,构件①~③按照编号顺序依次层层嵌套成构件④,并将构件④埋入基体⑤,最终形成构件⑥。其中,构件①、③(绿色部分)采用钢材,构件②(黄色部分)采用橡胶,基体⑤(棕色部分)为土壤。图2(a)为结构分解图,图2(b)为单胞结构的俯视图,图中, a 为单胞晶格常数, r 为内层振子半径, d 为外约束层厚度, b 为内凹深度, h 为单胞高度。

1.2 理论分析

基于 Floquet-Bloch 定理,弹性波在周期性结构中的位移场可表示为

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ 为位移向量; $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 是以晶格常数 a 为周期的位移调制函数; $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 为位置向量; $\mathbf{k}$ 为波矢; ω 为角频率。

在 COMSOL 多物理场软件的固体力学模块中,控制方程为描述固体中弹性波传播的 Navier 方程,在忽略体力后可表示为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \omega^2 \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

式中: ∇ 为 Hamilton 算子; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量,与应变张量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 通过材料的本构关系相关联; ρ 为质量密度。

将式(2)代入式(1),并利用 $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 的周期性,可将问题转化为单胞上以波矢 $\mathbf{k}$ 为参数的特征值问题,因此,特征频率方程表示为

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别为刚度矩阵和质量矩阵,两者均为波矢函数; $\mathbf{U}$ 为典型单胞的节点位移。

通过参数化扫描控制波矢 $\mathbf{k}$ 沿如图3所示的第一不可约布里渊区高对称性 $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ 方向进行扫描,逐一求解特征频率,最终绘制出频率与波矢的关系图(即能带结构),其中相邻能带之间若出现无解频率区间,即被识别为带隙。

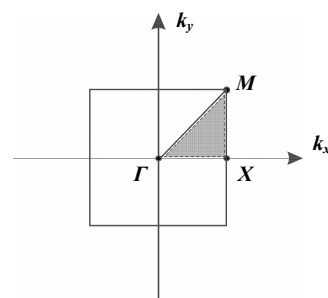


图3 第一不可约布里渊区

1.3 能带结构和振动模式

根据前述理论分析,采用 COMSOL 6.2 多物理场软件的固体力学模块进行数值计算。为保证传播波为表面波,土体厚度 H 应设定为晶格常数 a 10倍以上。因此,文中设定土体厚度 $H = 25a$ 。超材料屏障材料参数详见表1,几何参数详见表2。

表1 材料参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
土壤	1 800	2.00×10^7	0.300
钢	7 780	2.10×10^{11}	0.300
橡胶	1 300	1.37×10^5	0.463

表2 几何参数

单位: m

参数	数值	参数	数值
a	0.40	b	0.06
h	0.60	d	0.02
r	0.12		

建模过程中, 设定 Bloch 周期边界作为单胞的左右边界条件, 基体底部则采用固定边界条件。通过有限元模拟分别得到 Rayleigh 波和 Love 波的能带结构, 如图 4 和图 5 所示, 其中, 声锥体外部(红色部分)对应体波模式, 声锥体内部对应表面波模式。由图 4 可见, Rayleigh 波的能带结构中不存在一条 34.1~48.3 Hz 的完全带隙, 带隙宽度为 14.2 Hz。由图 5 可见, Love 波的能带结构中同样存在完全带隙, 且该带隙宽度更大, 起始频率更低, 具体频率范围为 20.8~62.3 Hz, 宽度为 41.5 Hz。

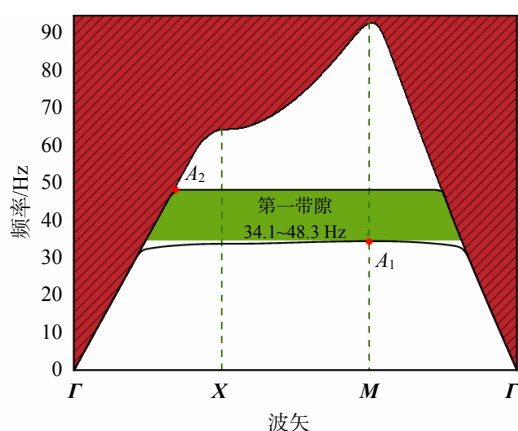


图4 Rayleigh 波能带结构

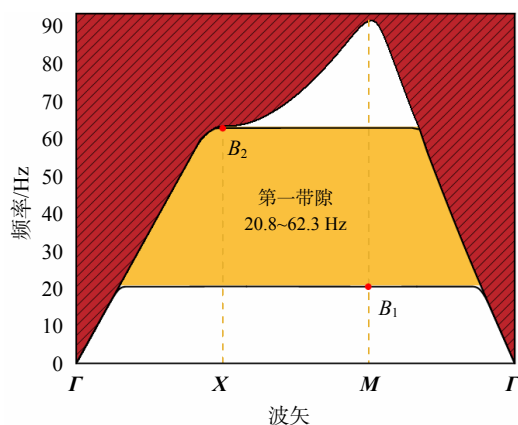
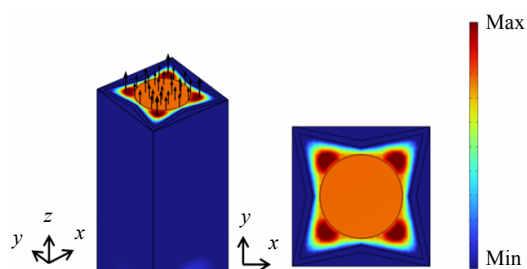
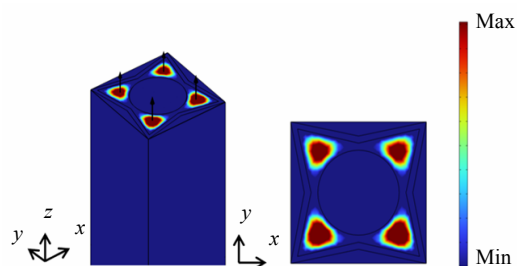


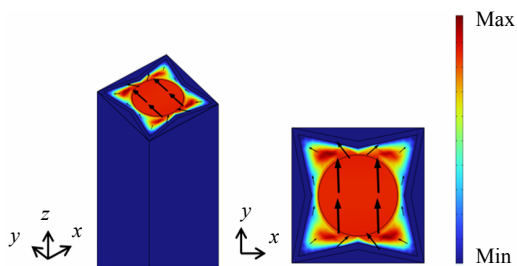
图5 Love 波能带结构

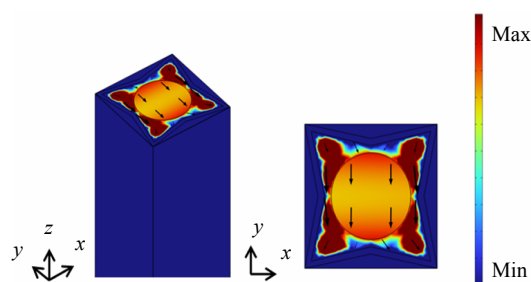
为分析超材料屏障的带隙形成机理, 图 6~9 分别给出了图 4 和图 5 中 A_1 点、 A_2 点、 B_1 点、 B_2 点的位移模态。对于 A_1 点, 超材料屏障引起的布拉格反射和干涉效应使 Rayleigh 波能量在结构内部分散, 降低了波对外界的影响。由图 6 可见, 位移主要集中在内层振子及其周围区域。当 Rayleigh 波频率接近振子的固有共振频率时, 振子会发生强烈共振, 将振动能量局限在自身附近, 而非在整个

结构中广泛传播, 起到吸收和消耗能量的作用。此时, 布拉格机理和局域共振机理相互配合, 共同实现减振功能。观察图 7 可知, A_2 点位移主要集中在超材料屏障的中间弹性层。橡胶材质具备良好的阻尼特性, 当内层振子发生共振时, 中间弹性层会发生变形并消耗能量, 将机械能转化为热能。这种能量耗散机制可以大量消耗 Rayleigh 波在传播过程中的能量, 从而减少传递到结构其他部分的能量, 最终实现减振效果。

图6 A_1 点模态振型图图7 A_2 点模态振型图

Love 波能带结构上 B_1 点和 B_2 点的模态振型图如图 8 和图 9 所示。对于 B_1 点, 能量主要集中在振子周围, 此特征直接体现了局域共振的能量局域化效果, 可有效减少 Love 波向结构其他部分的传播。 B_2 点则因外约束层的高刚度和高声阻抗性能, 在约束橡胶变形的同时, 使 Love 波被约束在结构内部发生多次反射。当 Love 波接触到各材料界面时, 又会发生多次散射, 而每次散射都会使波能量

图8 B_1 点模态振型图

图9 B_2 点模式振型图

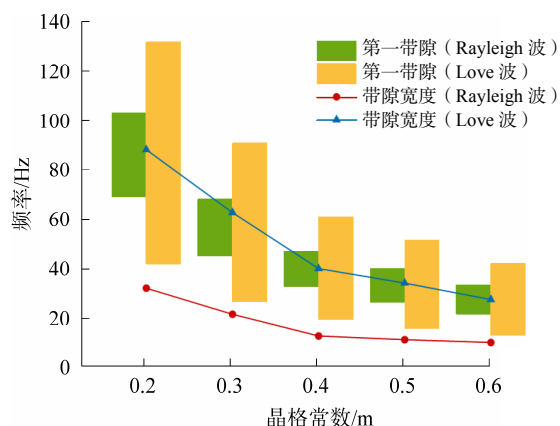
进行重新分配,其中的部分能量则被转化为热能等其他形式,或被中间弹性层吸收消耗,从而起到减振效果。

2 减振性能研究

2.1 几何因素对带隙的影响

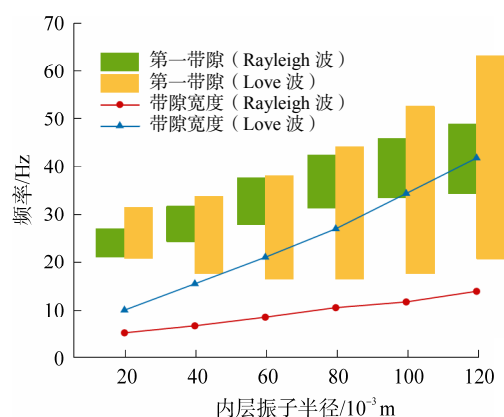
为分析几何因素对超材料屏障带隙特性的影响,本文研究了晶格常数 a 、内层振子半径 r 、外约束层厚度 d 等对带隙的影响。若无特别说明,材料及几何参数均保持不变(详见表1和表2)。

晶格常数 a 对带隙的影响曲线如图10所示。由图可见,随着晶格常数增大, Rayleigh波和 Love波带隙的上下边界均向低频方向移动,且带隙宽度逐渐减小。其影响机理在于晶格常数 a 的改变会直接影响表面波在振子间的传播相位以及各层材料间的耦合强度,同样,这些变化又进一步影响了表面波的散射相位和色散关系,最终导致带隙的宽度和位置发生变化。因此,在设计结构时,需要仔细考虑晶格常数 a 对带隙的影响,兼顾结构尺寸和带隙特性,实现所需的轨道隔振性能。

图10 晶格常数 a 对带隙的影响

由图11可知,总体趋势下,随着内层振子半

径 r 的增大, Rayleigh波和 Love波的第一带隙频率范围向高频移动,且带隙宽度逐渐增加。一方面,内层振子半径 r 增大改变了超材料屏障的几何尺寸与材料分布,使结构有效周期长度发生改变,高频波更易与结构相互作用产生散射和干涉,促使带隙向高频移动。另一方面,半径 r 增大改变了振子的质量、刚度等参数,使局域共振频率向高频偏移。同时,半径的增大增强了振子与周围橡胶层、钢外约束层以及土基体之间的耦合作用,使振子在共振时能更有效地耗散弹性波能量,进而拓宽带隙宽度,提升对弹性波的阻隔效果。值得注意的是, Love波带隙的下边界呈现先下降后上升的趋势。前期下降是因为内层振子半径的增加使各材料层之间的尺寸比例匹配程度逐步增大,局域共振效应更加显著,能够在更低频段与基体中的 Love波发生强烈的相互作用,从而开启更低频率的带隙;而后期上升趋势则是因为半径的增加使各材料层比例失衡,造成局域共振效应有所减弱。

图11 内层振子半径 r 对带隙的影响

外约束层厚度 d 对带隙的影响曲线如图12所示。由图可见,随着外约束层厚度 d 增大, Rayleigh波和 Love波带隙的上下两边界均向高频方向移动。外约束层厚度增加会改变结构整体的等效弹性参数和质量密度,刚度相对增大,造成波的截止频率升高,使带隙进一步向高频移动。值得注意的是, Rayleigh波和 Love波带隙宽度随外约束层厚度变化呈相反趋势,根源在于波的特性及结构影响机制差异。 Rayleigh波能量集中于固体表面,外约束层厚度较小时,振子与介质耦合作用强,局域共振效应显著,带隙较宽;随着厚度增加,耦合强度减弱,局域共振耗散波的能力降低,且结构刚度增大改变

了波的传播模式,使波更易在特定频率内传播,带隙覆盖频率范围减少,宽度变窄。Love 波在层状介质中传播,外约束层厚度增加改变了层状结构的层间界面条件,增强了层状结构对波的约束能力以及散射和干涉作用,使带隙覆盖频率范围扩大。

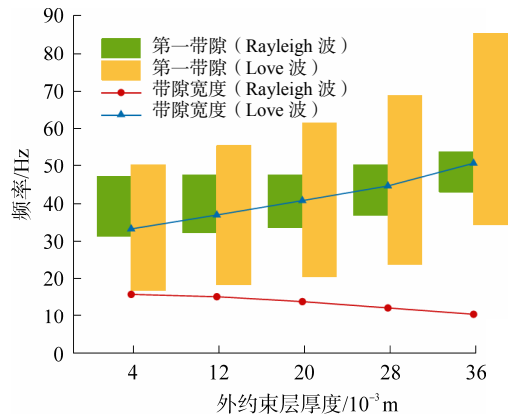


图 12 外约束层厚度 d 对带隙的影响

2.2 材料因素对带隙的影响

除几何因素外,改变材料因素同样会影响超材料屏障的带隙,其中弹性层材料和振子材料是超材料结构实现减振性能的关键因素。因此本研究分别选取几种材料进行替换,详细的材料参数见表 3 和表 4。研究结果希望能为实际工程应用中筛选出兼具经济可行性与理想的减振效果的材料搭配提供一定的理论支撑。

表 3 弹性层材料参数

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
橡胶	1 300	1.37×10^5	0.436
软木	710	0.50×10^6	0.190
可发性聚苯乙烯	12	0.14×10^6	0.130
黏土	1 800	1.00×10^6	0.300

表 4 振子材料参数

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
钢	7 780	2.10×10^{11}	0.300
铅	11 340	1.65×10^{10}	0.440
铜	8 950	1.20×10^{11}	0.350
钨	19 100	4.05×10^{11}	0.300

为筛选经济可行的弹性层材料,选取 3 种易得软材料(软木、可发性聚苯乙烯和黏土)与橡胶进行带隙性能的比较,结果如图 13 所示。各材料特性差异如下:(1)软木具备低密度、低弹性模量、

低泊松比且易获取特点,但阻隔 Rayleigh 波和 Love 波的能力略弱于橡胶,表现为带隙起止频率均高于橡胶,带隙宽度则窄于橡胶;(2)可发性聚苯乙烯对 Rayleigh 波阻隔能力稍逊一筹,但其对 Love 波阻隔能力在 4 种材料中表现最优,不仅起始频率低,且带隙宽度宽;(3)黏土取材便利,但其 Love 波带隙情况不佳,带隙宽度约为橡胶弹性层的三分之二,且起始频率高,其可取之处也仅在于 Rayleigh 波带隙宽度与橡胶弹性层带隙持平。因此,在实际应用中应考虑经济性,并根据所需阻隔的频率范围来选择合适的弹性层材料。

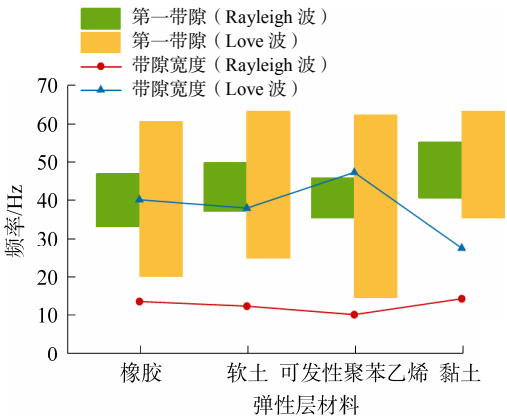


图 13 弹性层材料对带隙的影响

选取 4 种常见的高密度、高弹性模量金属材料(钢、铅、铜、钨)作为振子进行对比,带隙影响如图 14 所示。各材料特性差异如下:(1)钢作为工业中最常用的金属材料,对 Rayleigh 波阻隔能力略差,对 Love 波阻隔能力处于 4 种材料的中游水平,带隙起始频率适中;(2)铅的综合表现较为突出,对 Rayleigh 波和 Love 波阻隔能力均为最佳,且带隙宽度最宽,展现出良好的宽频带隔振潜力;

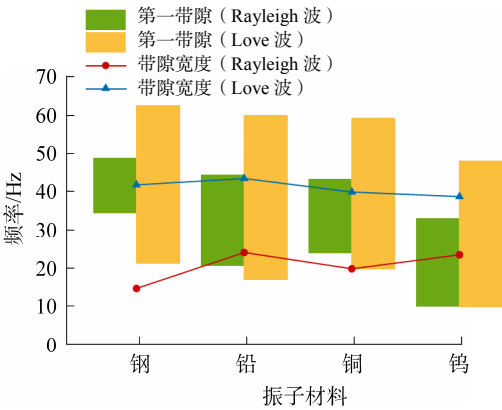


图 14 振子材料对带隙的影响

（3）铜对 Rayleigh 波阻隔能力稍逊一筹，仅略优于钢；（4）钨凭借其极高的密度和弹性模量，其带隙起止频率低于其他 3 种材料。因此在实际工程中，若目标为低频表面波控制，钨是优选；若需兼顾 Rayleigh 波与 Love 波的宽频带抑制，铜和铅则表现出优异的综合性能；若侧重经济性与加工便利性，钢仍是可行的候选材料。

2.3 各因素的影响程度分析

通过分析几何因素和材料因素对 Rayleigh 波和 Love 波带隙的影响规律可知，屏障的几何参数和材料参数都会对带隙产生一定影响，但各因素的具体影响程度尚待明确，因此本文采用正交实验法探究各因素在不同水平下对带隙的影响。选取带隙宽度和中心带隙频率作为评价指标，带隙宽度越宽，中心带隙频率越低，表明屏障的减振效果越佳。各因素选择的合理水平见表 5，其中，未纳入正交实验影响因素的参数详见表 1 和表 2。本次正交实验共涉及 5 个影响因素，每个因素设 4 个合理水平，采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表设计实验方案，共计 16 组实验，正交实验具体结果见表 6。

采用极差分析方法对上述 16 组正交实验各因素的影响程度因子 R 进行分析（ R 值越大，说明该因素的影响越重要），进而得到各影响因素的重要

性。由图 15 可知，各因素对 Rayleigh 波带隙宽度和中心带隙频率的影响程度排序为振子材料>晶格常数>内层振子半径>弹性层材料>外约束层厚度，其中，实验编号 13 和 16 分别为带隙宽度和中心带隙频率的最佳水平。各因素对 Love 波带隙宽度影响程度排序为晶格常数>弹性层材料>振子材料>内层振子半径>外约束层厚度，对 Love 波中心带隙频率影响程度排序为内层振子半径>弹性层材料>晶格常数>振子材料>外约束层厚度，其中，实验编号 15 和 9 分别为带隙宽度和中心带隙频率的最佳水平。若需兼顾 Rayleigh 波和 Love 波的带隙宽度

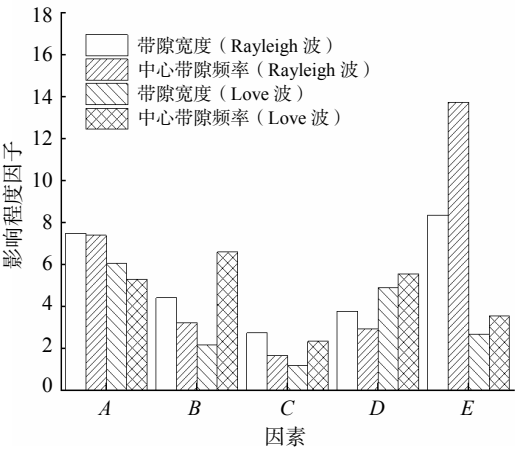


图 15 各因素影响程度因子

表 5 正交实验因素水平表

水平	因素				
	A/m	B/m	C/m	D	E
1	0.40	0.06	0.005	黏土	铜
2	0.45	0.08	0.010	可发性聚苯乙烯	钨
3	0.50	0.10	0.015	软木	铅
4	0.55	0.12	0.020	橡胶	钢

注：因素 A 为晶格常数；因素 B 为内层振子半径；因素 C 为外约束层厚度；因素 D 为弹性层材料；因素 E 为振子材料；表 6 相同。

表 6 正交实验结果

实验编号	因素					Rayleigh 波		Love 波		
	A/m	B/m	C/m	D	E	带隙宽度/Hz	中心带隙频率/Hz	带隙宽度/Hz	中心带隙频率/Hz	
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	13.5	40.2	31.9	44.3	
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂	12.0	27.2	42.3	39.4	
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	E ₃	21.6	42.0	42.9	39.7	
4	A ₁	B ₄	C ₄	D ₄	E ₄	12.2	43.2	39.5	40.6	
5	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	E ₄	8.7	45.2	30.4	37.5	
6	A ₂	B ₂	C ₁	D ₄	E ₃	15.9	36.8	43.3	37.5	
7	A ₂	B ₃	C ₄	D ₁	E ₂	15.9	29.7	37.8	36.7	

表 6 （续）

实验编号	因素					Rayleigh 波		Love 波	
	<i>A</i> /m	<i>B</i> /m	<i>C</i> /m	<i>D</i>	<i>E</i>	带隙宽度/Hz	中心带隙频率/Hz	带隙宽度/Hz	中心带隙频率/Hz
8	<i>A</i> ₂	<i>B</i> ₄	<i>C</i> ₃	<i>D</i> ₂	<i>E</i> ₁	18.6	37.5	44.9	34.9
9	<i>A</i> ₃	<i>B</i> ₁	<i>C</i> ₃	<i>D</i> ₄	<i>E</i> ₂	9.0	25.0	37.0	31.7
10	<i>A</i> ₃	<i>B</i> ₂	<i>C</i> ₄	<i>D</i> ₃	<i>E</i> ₁	17.9	30.5	40.5	35.7
11	<i>A</i> ₃	<i>B</i> ₃	<i>C</i> ₁	<i>D</i> ₂	<i>E</i> ₄	11.2	36.5	41.3	32.9
12	<i>A</i> ₃	<i>B</i> ₄	<i>C</i> ₂	<i>D</i> ₁	<i>E</i> ₃	23.5	36.9	37.9	39.4
13	<i>A</i> ₄	<i>B</i> ₁	<i>C</i> ₄	<i>D</i> ₂	<i>E</i> ₃	25.7	33.3	43.4	33.9
14	<i>A</i> ₄	<i>B</i> ₂	<i>C</i> ₃	<i>D</i> ₁	<i>E</i> ₄	21.2	36.4	42.1	40.2
15	<i>A</i> ₄	<i>B</i> ₃	<i>C</i> ₂	<i>D</i> ₄	<i>E</i> ₁	21.9	32.2	47.0	34.8
16	<i>A</i> ₄	<i>B</i> ₄	<i>C</i> ₁	<i>D</i> ₃	<i>E</i> ₂	20.2	24.7	45.0	32.7

和中心带隙频率，既可选择实验编号 16，也可根据不同的工况需求，选择其他更为合适的参数进行搭配。

2.4 频域分析

前述带隙特性分析时，假设超材料屏障为无限周期，但实际工程中结构周期通常是有限的。为验证前述带隙特性的准确性，本文构建含 10 个周期的超材料屏障的频域响应模型，如图 16 所示。该模型由土体和 10 个周期的超材料屏障组成，所用材料参数和几何参数详见表 1 和表 2。计算频域时，在 *y* 方向上施加周期性边界条件，并在土体两侧及底部施加低反射边界，以减少 P 波与 S 波的反射。低反射边界则默认采用相邻区域的基本材料数据，使模型计算的结果更符合实际情况。为确保超材料屏障只与表面波相互作用，在屏障与激励端之间假设存在一个长为 $25a$ 的土体。计算 Rayleigh 波的衰减时，拟在输入端沿 *z* 轴负方向施加一个位移为

1 mm 的激励信号，并在输出端拾取响应信号；计算 Love 波衰减时，拟在输入端沿 *y* 轴正方向施加一个位移为 1 mm 的激励信号，并在输出端拾取响应信号。此外，定义响应信号的传输谱为

$$T = 20\log(|u_1|/|u_2|)$$

式中： u_1 为接收处的位移； u_2 为激励处位移。

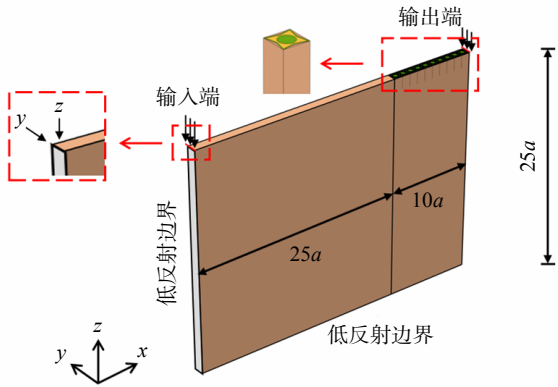
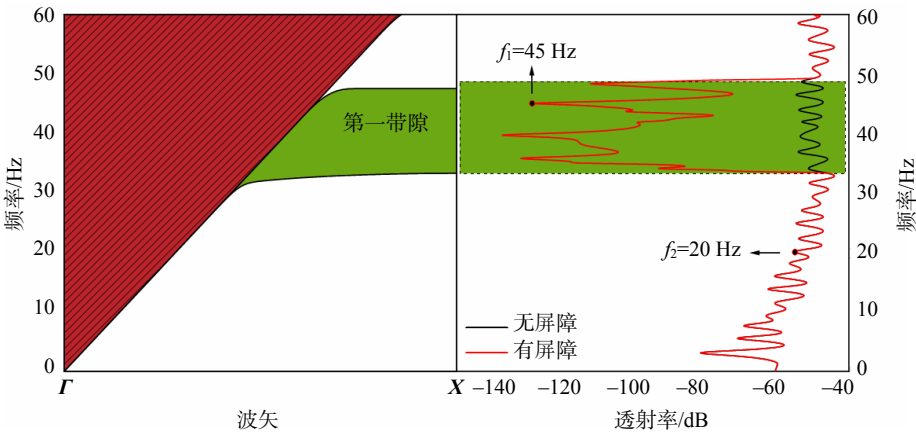


图 16 频域响应分析模型



(a) Rayleigh 波在 $\Gamma \rightarrow X$ 方向的频散曲线和频响曲线

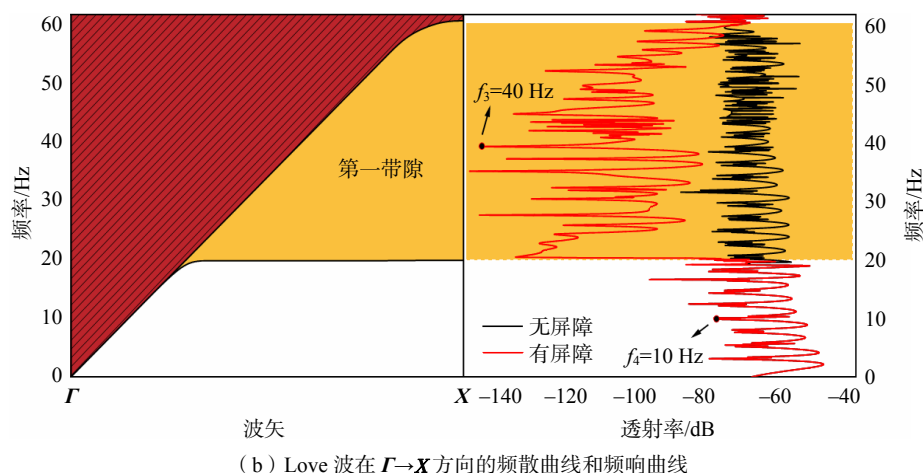


图 17 表面波的频散曲线和频响曲线

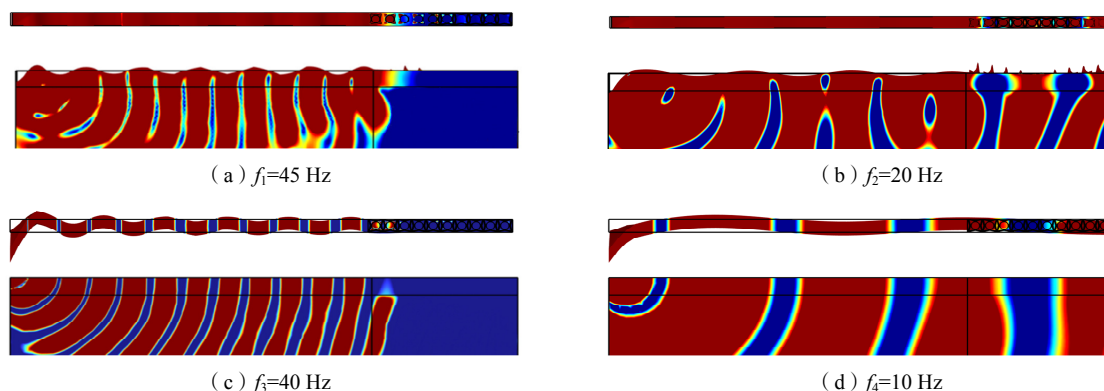


图 18 位移云图

图 17 (a) 和 (b) 分别为 Rayleigh 波和 Love 波在 $\Gamma \rightarrow X$ 方向的频散曲线与频响曲线。由图可见, Rayleigh 波在 34~49 Hz 区域存在明显衰减域, 而 Love 波则在 20~62 Hz 区域存在明显衰减域, 并且这些衰减域与 $\Gamma \rightarrow X$ 方向的频散曲线带隙位置基本吻合。

为分析超材料屏障对表面波的衰减效果, 图 18 展示了图 17 中 4 个代表性频率的位移云图。由图可见, 在 Rayleigh 波和 Love 波的带隙区间内, 表面波传播得到了有效遏制; 而在带隙区间之外, 该超材料屏障则无法有效阻碍表面波的传播。

3 结论

本文提出的超材料屏障结构简单、制作方便, 能有效阻隔表面波传播。主要研究结论如下:

(1) 超材料屏障对 Rayleigh 波的完全带隙范围为 34.1~48.3 Hz (带隙宽度 14.2 Hz), 对 Love 波

的完全带隙范围为 20.8~62.3 Hz (带隙宽度 41.5 Hz)。该设计突破了传统隔振屏障“尺寸-带宽”的矛盾, 为城市轨道浅层埋设场景提供了高效解决方案。

(2) 超材料结构的几何因素(晶格常数、内层振子半径、外约束层厚度等)和材料因素均对表面波带隙的宽度与频率产生不同程度的影响。因此, 通过合理选择几何和材料因素可实现预期的减振效果。

(3) 采用有限周期的频域分析方法, 更贴近实际工程条件, 确保了该超材料屏障在带隙范围内对表面波有显著的衰减效应。

为进一步验证该屏障的减振效果, 下一步的研究工作将采用缩尺实验, 拟通过信号发生器和功率放大器对实验装置一端进行激励, 在另一端利用激光测振仪接收振动, 并采用 CP 端进行分析验证。本文研究结果可为轨道屏障的实际应用提供一定

的技术支撑,同时也证实了该结构在表面波衰减方面的应用价值。

参考文献:

- [1] 邓文彬,孙常康,杨丽,等. 地铁盾构下穿古建筑振动监测与保护研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3):75-81.
- [2] FANG S D, WANG Z T, GUO X D, et al. Experimental study on seismic performance of ancient wooden buildings considering the influence of geshan[J]. Structures, 2024, 70:107720.
- [3] LING Y H, ZHANG Y Z, LUO Q, et al. Field measurement and simplified numerical model for vibration response of subway superstructure[J]. Structures, 2023, 47:313-323.
- [4] LIU X L, XU G Y, YE X J. Prediction of structural vibration induced by subway operations using hybrid method based on improved LSTM and spectral analysis [J]. Symmetry, 2025, 17(1):75.
- [5] RAYLEIGH L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London mathematical society, 1885, 17:4-11.
- [6] LOVE A E H. Some problems of geodynamics[J]. Nature, 1912, 89(2228):471-472.
- [7] 项兴华,雷怡俊,胡志明,等. 局域共振声学超材料耦合效应研究[J]. 压电与声光, 2024, 46(4):586-590.
- [8] 陈彪,孔祥希,陈长征. 宽频带薄膜型声学超材料隔声性能研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(5):62-68.
- [9] 孙萍,徐思齐,王晓乐. 多带隙机理融合声学超材料及其低频宽带抑振特性[J]. 振动与冲击, 2024, 43(23):250-259.
- [10] 葛峰,别雄波,武惠华,等. 基于光纤 Bragg 光栅超声复合检测金属腐蚀与振动状态方法研究[J]. 激光杂志, 2024, 45(2):78-84.
- [11] 孙旭阳,王中,周景军,等. 悬臂梁式局域共振单元的弹性波带隙特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(4):643-651.
- [12] 张敏,温晓东,孙小伟,等. 复合柱局域共振声子晶体的超宽带隙与可调性研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(4):96-102.
- [13] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289:1734-1736.
- [14] 王海洋,尹洪山,许汝杭,等. 几何参数对周期性波阻块连续屏障带隙特性的影响[J/OL]. 重庆大学学报, [2025-06-25]. <https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2024.278>.
- [15] 于可辉,何旭辉,邹云峰,等. 周期性波阻块对高架桥临近场地的减振分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1):88-92, 104.
- [16] 李丽霞,李鹏国,贾琪,等. 新型半埋入式地震超材料超低频带隙机理及性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(1):103-110.
- [17] BAI J, LI L X, SU K, et al. Split-type seismic metamaterials with pseudo-surface wave weakening mechanism[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2024, 184:108858.
- [18] 厉超,庄培芝,李利平. 局域共振超材料表面波屏障带隙特性与隔振性能[J]. 岩土力学, 2024, 45(3):750-75, 787.
- [19] 高盟,张硕,孔祥龙,等. 三维周期结构波阻板的带隙特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(6):1651-1660.
- [20] 王海洋,翟春鑫,王珠,等. 组合周期十字减振沟带隙特性及减振性能[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2):118-126.
- [21] 葛倩倩,于桂兰. 有覆层土体中部分埋入式表面波屏障[J]. 工程力学, 2020, 37(增刊 1):249-253.
- [22] 赵春风,高志伟,王胤植. 点振型埋地超材料带隙机理及地震波衰减性能研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(5):179-191.
- [23] 余奇,赵才友,张鑫浩,等. 铁路超材料波阻垫设计与低频减振降噪应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(12):5221-5231.
- [24] 胡晶晶,赵良,罗忆. 蜂窝状波阻块用于铁路高架桥环境振动的隔振效果研究[J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(2):57-63.
- [25] JOANNOPOULOS J D, VILLENEUVE P R, FAN S H, et al. Photonic crystals: putting a new twist on light[J]. Nature, 1997, 386:143-149.

(责任编辑 章践立)