

包含共振机理的声子晶体声屏障设计与降噪性能测试

秦晓春^{1*},倪安辰¹,陈正昊¹,马保龙²,孟范彤¹ (1.北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044; 2.北京市高速公路交通工程有限公司,北京 100000)

摘要: 针对轮胎-路面噪声,基于U型理论模型探究并优化了3种腔体形式声子晶体的能带结构,最终设计出一种“宽频多带”的沙漏型声子晶体,并以此为基础建立了新型交通声屏障,且进行了降噪性能测试.结果表明:对于噪声特征频段覆盖率,沙漏型>锥型>直线型,且禁带范围可通过腔体尺寸进行有效调整;对于声子晶体声屏障降噪效果,将Bragg散射与腔体共振效应耦合、增加排数均可有效提升禁带内降噪效果0.9~3.5dB(A),且作为不连续型周期结构,屏障后声场分布不均,特别是在散射体间隔处,因此测量时需增加测点数并考虑间隔处影响;沙漏型相较于传统声屏障与Bragg型声子晶体声屏障在500~1000Hz目标禁带内降噪效果提升0.9~14dB(A).

关键词: 交通噪声; 声子晶体; 声屏障; 能带结构

中图分类号: X707 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)01-0474-09

Design and experimental research of sonic crystal noise barrier with resonance mechanism. QIN Xiao-chun^{1*}, NI An-chen¹, CHEN Zheng-hao¹, MA Bao-long², MENG Fan-tong¹ (1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.Beijing Expressway Traffic Engineering Co., Ltd, Beijing 100000, China). *China Environmental Science*, 2022,42(1): 474-482

Abstract: In order to reduce the tire-road noise, this study optimized the band structure of the three cavity forms based on the U-shaped model. A “broadband and multi-band” hourglass sonic crystal was designed, then a new type of noise barrier was established and tested for noise reduction performance. The results showed that for the noise characteristic frequency band coverage, hourglass>taper in>straight, and the band gap range can be effectively adjusted by changing the cavity size. For the noise reduction performance of sonic crystal noise barrier, Bragg scattering and cavity resonance effect were coupled and the number of rows can be increased to improve the noise reduction effect in the band gap by 0.9~3.5dB(A). As a discontinuous periodic structure, the noise reduction effect after the barrier was unevenly distributed, especially between the scatters, therefore, when measuring, the number of measuring points should be increased and the influence of the interval should be considered. Compared with the traditional noise barrier and the Bragg-type sonic crystal noise barrier, the noise reduction effect of hourglass type was improved by 0.9~14dB(A) in the 500~1000Hz target frequency band gap.

Key words: traffic noise; sonic crystal; noise barrier; band structure

噪声污染是城市发展中面临的主要环境问题之一^[1],其中交通运输又是噪声产生的主要原因,我国规范规定在道路干线两侧,夜间噪音水平不得超过55dB(A),白天不得超过70dB(A),以确保公民正常的生产生活^[2-3].据欧盟的统计显示,超过30%的欧盟公民在白天及夜晚受到沿线车辆高噪声水平的影响^[4].长期暴露在高噪音环境下,可能会引发一系列的健康问题,比如睡眠障碍、疲劳、心血管疾病等^[5].

一般来说,噪声控制有3种途径:(i)声源处、(ii)传播途径中、(iii)人耳接收处,其中在声传播途径中设置声屏障是使用频率最高,且公认最行之有效的方​​式^[6].但是随着交通的进一步发展,传统声屏障的缺陷也逐渐显露:(1)降噪缺乏针对性,不同交通方式噪声特征频谱不同,比如地铁噪声主要以低频为主,

而高速公路噪声则为中频,且传统材料遵循“质量定律”,降噪效果随着频率的升高而逐渐增强,但对中低频噪声控制效果有限;(2)声屏障连续封闭,受风荷载影响较大,屏体容易受损,从而导致声泄露及使用寿命减短,同时养护维修成本也比较高.因此对于声屏障的革新急需新理念与新材料.

声子晶体作为一种新型人工周期性材料,具有显著的弹性波带隙特征,对特定频率范围内的声传播可以起到良好的抑制作用,这为交通噪声防治提供了新的思路,具有广阔的应用前景^[7-8].声子晶体根据作用机理可分为Bragg散射型与局域共振型^[9],前

收稿日期: 2021-05-14

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(2019JBM407);国家自然科学基金资助项目(51873089)

* 责任作者, 教授, xqcqin@bjtu.edu.cn

者主要依靠散射体间声波的相消干涉,而后者在于散射体自振与基体行波间的相互作用^[10].目前限制声子晶体实际应用的最主要原因在于其禁带宽度、数量有限,仅靠单一的 Bragg 散射、局域共振机理不足以保证声子晶体具有良好的减振降噪性能,因此如何通过设计优化,使其做到“宽频多带”是目前研究的热点^[10-12].优化的路线一般有 2 种,一种是在散射体的设计过程中,将多重降噪机理(共振、吸声)进行耦合^[13-17],增加禁带的数量与类型;另一种则是通过构造散射体的新型排布方式,以扩大禁带作用范围^[18-19],研究发现两者均具有良好的优化效果.

将声子晶体与声屏障应用相结合,可以克服传统声屏障的 2 种主要缺陷,有望实现更高效的降噪.对于声子晶体型声屏障,国内外进行了诸多有益的探索,国外针对高速铁路、地铁城轨以及发电机噪声等分别进行了相应设计,并通过有限元仿真与室内实验结合进行了效果验证^[20-22],而国内对于声子晶体声屏障的应用研究,尚处于起步阶段,仅在地铁城轨的全封闭、半封闭声屏障,高速公路声屏障上有所报道^[23-24],且以往对于声子晶体型声屏障的设计多存在控制机理单一,占地面积大的缺点.

受 Ghinet 等^[25]关于 Helmholtz 共振腔研究的启发,本文针对轮胎-路面噪声的特点,基于 U 型理论模型,优化设计出一种具有超宽禁带的沙漏型声子晶体,同时探究了几何参数对其能带结构的影响规律以及带隙内的降噪性能.最后基于沙漏型声子晶体建立了足尺声屏障模型,并进行了降噪性能的室内实验研究,探讨了声子晶体声屏障的降噪特点,证明了其优势及可行性.

1 模型及方法

1.1 理论模型

以高速公路噪声为例,车辆在高速运行中轮胎-路面噪声将占主要部分,其噪声频段分布在 800~1250Hz^[6,24],将 1000Hz 作为完全禁带的设计中心频率.U 型散射体的理论模型如图 1 所示^[26],通过 Bragg 散射与腔体共振相结合以实现“宽频多带”的目的.

Bragg 散射源于相邻原胞间反射波的同相叠加,Bragg 带隙中心频率计算如公式 1 所示.

$$a = \frac{c}{2f} \quad (1)$$

式中: a (m)为晶格常数; c (m/s)为基体中声速; f (Hz)为带隙中心频率.

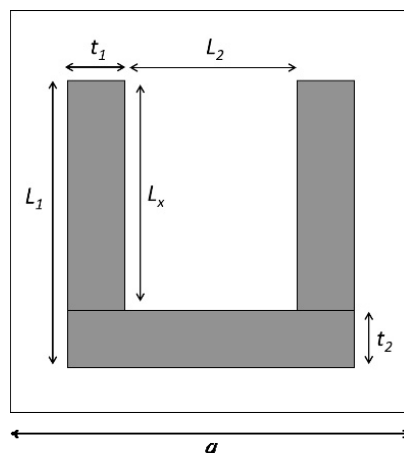


图 1 U 型散射体简化模型

Fig.1 Simplified model of U-shaped scatterer

腔体共振源于开口处内外声压的急剧变化,会使声波在腔体内发生共振,从而消耗能量.假设散射体壁为完全刚性,施加 Neumann 边界条件,且在 U 型开口处设置 Dirichlet 条件,腔体共振频率可由公式 2 计算所得,然而由于腔体端部的空气也参与了声振,所以腔体实际长度应长于几何尺寸,导致共振峰会有所偏移^[26].因此有必要对腔体有效长度进行修正,类比以往 Norris 等^[27]关于开口圆环的工作,对 U 型散射体进行端部修正.

$$f_r = \frac{c_{\text{air}}}{(4L_x)} \quad (2)$$

式中: f_r (Hz)为腔体共振频率, L_x (m)为腔深,空气声速 c_{air} 取 343m/s.

$$f_r = \frac{c_{\text{air}}}{4(L_x + \delta)} \quad (3)$$

式中: δ 为末端修正值,Norris 关于开口圆环的末端修正如公式(4)所示.

$$\delta \approx \frac{2a\alpha}{\pi} \log\left(\frac{2}{\alpha}\right) \quad (4)$$

式中: α 是开口圆环圆心角, a 是腔体半径,考虑到 U 型散射体与开口圆环的几何异同,等效腔体半径(a_e)与圆心角(α_e)可改写为公式 5、6,故 U 型散射体末端修正如公式 7 所示.为了保证圆心角有实际意义,腔体几何尺寸应保证 $|\sin(\alpha_e/2)| \leq 1$, $L_2 \leq 4L_x/\pi$.

$$a_e = \sqrt{\frac{L_x L_2}{\pi}} \quad (5)$$

$$\alpha_e = 2 \arcsin\left(\frac{L_2}{2a_e}\right) \quad (6)$$

$$\delta \approx \frac{2a_e \alpha_e}{\pi} \log_{10}\left(\frac{2}{\alpha_e}\right) \quad (7)$$

为了增大带隙覆盖范围,分别考虑 3 种不同的腔体形式,如图 2a~c 所示,同时探究腔深 L_x 、腔口宽 L_2 、颈口深度 L_3 对于能带结构的影响效果.根据公式 1 计算所得相应晶格常数 $a=0.17\text{m}$ (1000Hz 作为带隙中心频率),3 种散射体几何尺寸如表 1 所示,其中

主腔口圆角半径为 0.01m,沙漏型子腔口圆角半径为 0.02m.

表 1 散射体几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of scatterers

类型	L_x (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)	L_4 (m)	β (°)	t_1 (m)	t_2 (m)
直线型	0.06	0.1	0.05	0	0	0	0.04	0.04
锥型	0.06	0.1	0.09	0	0	27	0.04	0.04
沙漏型	0.06	0.1	0.09	0.04	0.03	0	0.04	0.04

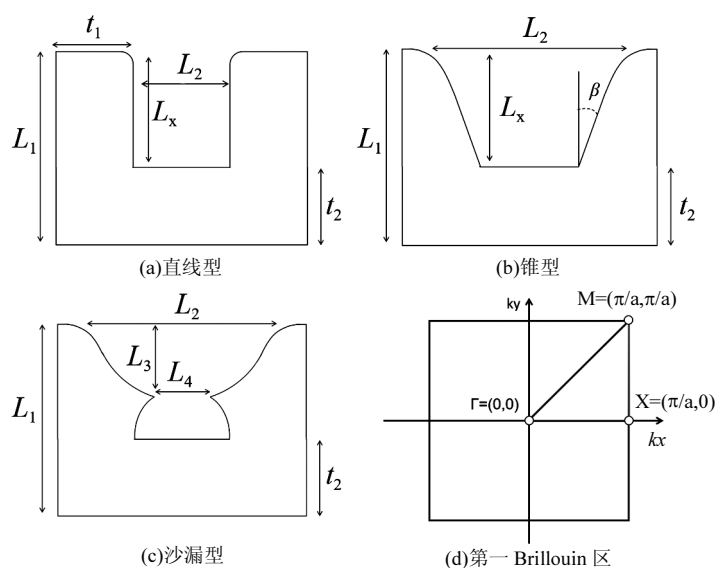


图 2 三种散射体及第一 Brillouin 区

Fig.2 Three types of scatters and the first Brillouin zone

1.2 计算方法

对于二维声子晶体,根据周期结构中波传播的 Bloch 定理^[24],位移场 $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ 可以写为下式:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ 是与声子晶体具有相同周期性的周期矢量函数; $\mathbf{k}=(k_x, k_y)$ 为波矢且被限制在第一布里渊区内; $\mathbf{r}=(x, y)$ 为位置矢量.

由于结构的周期性,计算可以在代表性单元即单胞内进行.对单胞进行有限元网格划分,将其划分为有限个通过节点连接的单元.单个晶胞内特征方程的离散形式为:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0 \quad (9)$$

式中: $\mathbf{U}$ 是节点位移, ω 为角频率, $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别是刚度矩阵和质量矩阵.

如果单个晶胞边界上可以满足 Bloch 周期条件就能保证在整个周期结构上都可以满足.将式(3)沿

着周期方向施加在单个晶胞的边界上,则边界上的位移 $\mathbf{U}(\mathbf{r})$ 满足下式:

$$\mathbf{U}(\mathbf{r} + \mathbf{a}) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a})} \mathbf{U}(\mathbf{r}) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{a}$ (m) 为晶格常数, $\mathbf{r}$ 为边界上节点的位置矢量.

结合位移边界条件(10),利用 COMSOL Multiphysics 5.4©有限元分析软件求解式(9)表示的特征值方程,利用计算所得的特征值来绘制对应的能带结构,对于 3 种不同散射体,能带结构计算应依据 Bloch-Floquet 理论沿着第一不可约布里渊区(图 2d)的 3 个高对称方向 ΓX 、 XM 、 $M\Gamma$ 进行扫描,扫描频率范围 0~2500Hz,每个单胞均采用平面应变假设,并施加 Floquet 周期性边界条件,并采用自由三角形划分网格 $L_{FE\max} \leq \lambda/6$.

声子晶体的传输特性计算利用 COMSOL Multiphysics 5.4©的压力声学模块,计算模型如图 3 所示,其中宽度 $t_3=0.17\text{m}$,晶格常数 $a=0.17\text{m}$,背景压

力场位于散射体前 $d_1=1\text{m}$,设置幅值 $P_0=1\text{Pa}$ 且垂直入射,接收线位于散射体后 $d_2=0.25\text{m}$,传输模型上下均采用连续周期性边界,以模拟理想状态下 Y 方向的无限周期,散射体在 X 方向上布置 3 排,模型材料参数如表 2 所示,模型左右两端分别添加完美匹配层(PML)以模拟 Sommerfield 边界条件,防止回波干扰,传输特性采用传声损失(TL)评价,计算见公式 11.

$$\text{TL}=20\log_{10}\left|\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}\right|(\text{dB})$$

(11)

式中: P_{in} 、 P_{out} 分别为输入端与输出端的声压大小.

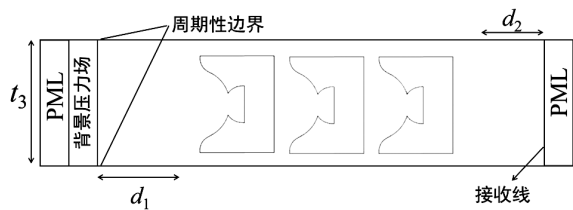


图 3 传输谱计算模型
Fig.3 Calculation model of transmission spectrum

表 2 材料参数

Table 2 Physical properties of air and PVC

材料	声速(m/s)	密度(kg/m ³)
空气	343	1.21
PVC	2140	1400

2 能带结构与传输特性

2.1 能带结构

3 种形式能带结构计算结果如图 4 所示,其中直线型存在 2 条完全禁带,范围分别是 774.1~1029Hz 与 1195~1217Hz,以及 3 条 ΓX 方向禁带,且目标频段禁带覆盖率 55.8%;锥型也存在 2 条完全禁带,范围分别是 774~1075Hz 与 1195~1256Hz,以及 5 条 ΓX 方向禁带;沙漏型同样存在 2 条完全禁带,范围分别是 817~1097Hz 与 1196~1252Hz,以及 5 条 ΓX 方向禁带.锥型相较于直线型,2 条完全禁带宽度分别增加 18.1%及 177.2%,且增加 2 条 ΓX 的方向禁带,位于 1075~1117.1Hz,目标频段禁带覆盖率可达 82.7%.而沙漏型相较于锥型,两条完全禁带宽度变化不大,但是 1097~1167Hz 的 ΓX 方向禁带宽度增加了 66.2%.从能带优化的角度来看,相较直线型与锥型,沙漏型声子晶体基本实现了噪声特征频谱的全覆

盖(89.8%),将腔体共振与 Bragg 散射相结合有利于禁带数量与宽度的增加,运用公式(1)计算相应的 Bragg 禁带中心频率,与有限元计算结果吻合良好,误差在 4.3%~7.5%.误差来源于散射体面积不同导致的晶格填充率差异;运用公式(3)计算共振禁带中心频率,并与直线型有限元结果对比误差为 4.7%,2 种禁带频率基本满足设计需求.

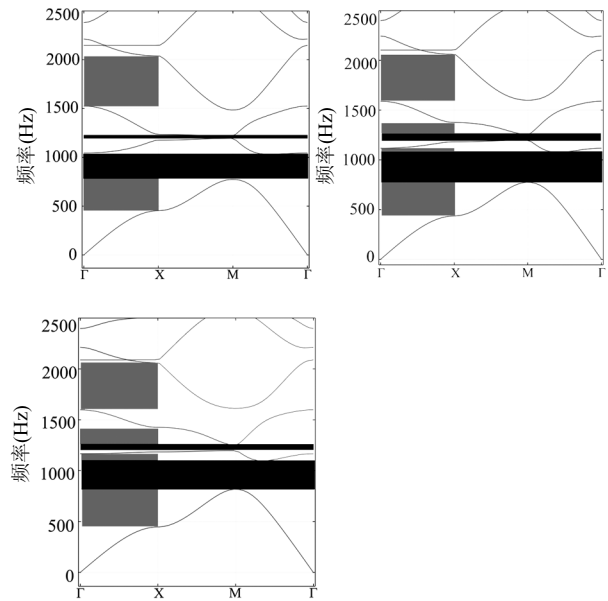


图 4 三种形式散射体的能带结构
Fig.4 Band structure of three types of scatters
黑色代表完全禁带,灰色代表 ΓX 方向禁带,曲线代表通带

2.2 腔体几何尺寸对能带结构的影响规律

2.2.1 腔深长度(L_x) 直线型腔深大小对于完全禁带的影响如图 5 所示,随着深度的增加,第 1 完全禁带的上下边界均逐渐降低,且带宽逐渐增加,深度 $\geq 0.04\text{m}$ 时,第 2、3 能带简并态分离,出现第 2 条完全禁带,且随着腔深的增加,禁带宽度逐渐变小,存在最优腔深 0.06m,此时完全禁带数量最多(2 条),且禁带总宽度最大(280Hz).结合共振机理有利于禁带数目的增加与控制范围的增大,腔深的影响规律与以往关于 1/4 谐振器的研究结果相似^[28],两者均向低频移动.将 Bragg 散射与腔体共振在同频段设计叠加,可以有效提高频段内降噪效果,分开设计也可以增加低频区的控制范围.

2.2.2 侧壁角度(β) 锥型不同侧壁角度对于完全禁带的影响如图 6 所示,随着侧壁角度 β 的逐渐增大,第 1、2 完全禁带的上边界逐渐上升,而第 1 完全禁

带下边界在 $\beta < 25^\circ$ 时保持稳定, $\beta > 25^\circ$ 以后略有上升, 而第 2 完全禁带下边界一直保持稳定, 直到最大侧壁角度 $\beta = 33.7^\circ$ 时, 第 1、第 2 禁带带宽分别增加 65 与 45 Hz。由此可知侧壁角度大小主要影响完全禁带的截止频率, 随着入口曲率减小, 入口过渡越均匀, 局部声阻抗会逐渐降低, 控制频率升高最终导致禁带范围增大, 存在最优侧壁角度 $\beta = 27^\circ$, 同时增加侧壁角度也有利于壁面的延长, 增强声波与空气之间的摩擦损耗, 对侧壁进行优化后, 噪声特征频段的覆盖范围达到了 82.7%。

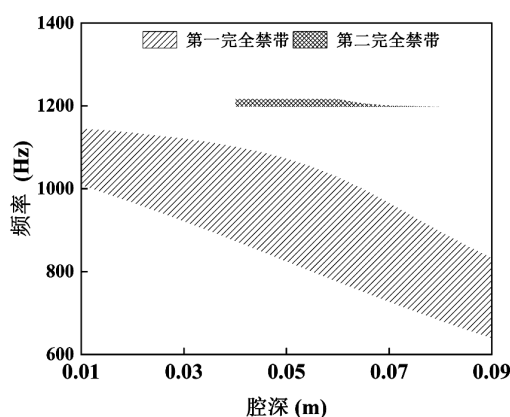


图 5 腔深对于能带结构的影响

Fig.5 Influence of cavity depth on the band structure

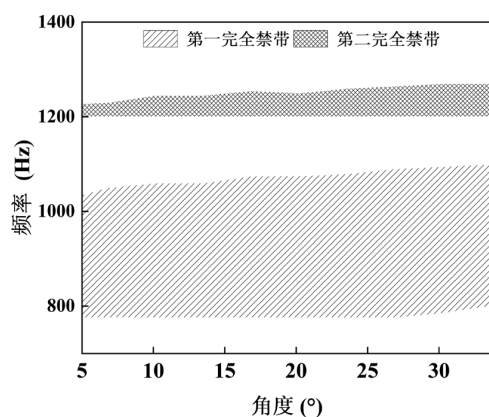


图 6 侧壁角度对于能带结构的影响

Fig.6 Influence of the sidewall angle on the band structure

2.2.3 颈口深度(L_3) 沙漏型颈口深度对于 GX 方向禁带的影响如图 7 所示, 随着颈口深度的逐渐增大, 第 1 禁带下边界保持不变, 而上边界逐渐上升, 禁带宽度逐渐增加至 730 Hz; 第 2 禁带下边界逐渐下降与第 1 禁带上边界几乎重合, 而上边界逐渐增加, 禁带宽度逐渐增加至 245 Hz; 第 3 禁带上边界保持稳定,

下边界逐渐升高, 禁带宽度逐渐减小至 425 Hz。将沙漏型与锥型能带进行对比, GX 方向禁带在 $L_3 \geq 0.03$ m 以后, 第 1、2 禁带上下边界几乎重合, 带隙宽度增加, 频谱覆盖率自 82.7% 上升 89.8%, 基本上实现了全覆盖, 起到了一定的优化作用。在腔体内增加颈口, 将腔体分为内外 2 部分, 声压在入口、颈口发生 2 次突变, 由于共鸣效应, 最终在腔体内发生共振并消耗能量。

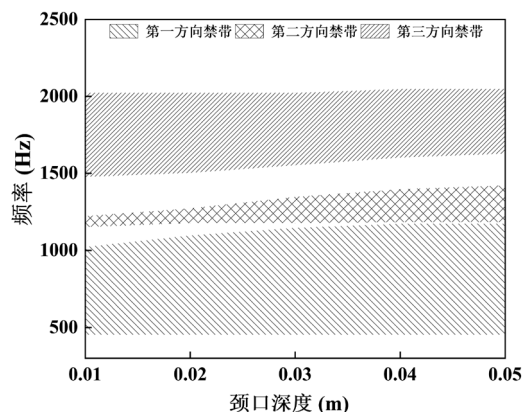


图 7 颈口深度对于能带结构的影响

Fig.7 Influence of neck depth on the band structure

2.3 传输特性

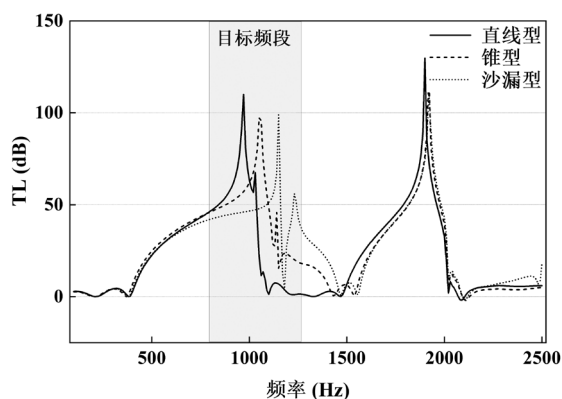


图 8 传输特性对比

Fig.8 Comparison of sound transmission performance

3 种散射体的传输特性如图 8 所示, 3 者均在带隙范围内产生了良好的降噪效果, 与 2.1 节带隙范围吻合良好, 这也从侧面验证了能带结构计算的正确性。如图 9 所示, 3 者在 1000 Hz 目标频率处均起到了有效的削峰作用, 传声损失分别为 63.4、61.9 与 46.6 dB, 且 3 者的共振频率依次升高。从作用范围来看, 直线型的降噪范围有限, 无法对 1040~1250 Hz 内的噪声做到有效控制, 而锥型、沙漏型的控制范围依

次增大;在 1600~2000Hz 范围内,3 种散射体的隔声曲线近乎重合,说明此范围内受腔体形状影响较小.本节的传输性能计算采用了散射体高度无限的假设,是一种理想状态,考虑有限高度的实际工程应用将在下节进行研究.

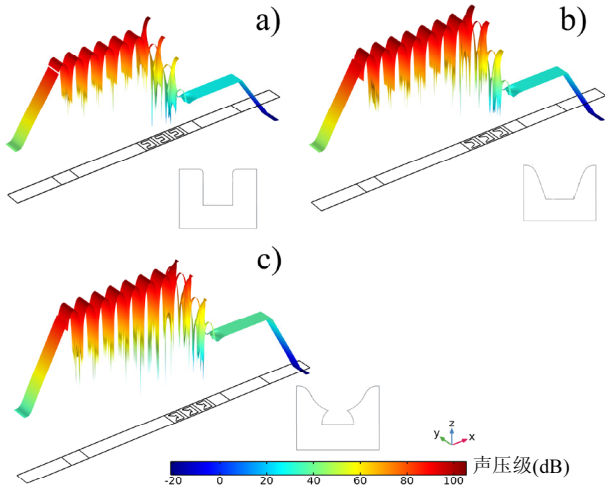


图9 1000Hz 时三种散射体形式的传输云图

Fig.9 Transmission map of three types of scatters in 1000Hz

3 沙漏型声子晶体声屏障实验及降噪性能比较

3.1 实验设计

将沙漏型声子晶体加工成有限高度的声屏障,周期阵列在道路两侧,可以对车辆行驶中的轮胎-路面噪声起到针对性控制.降噪性能测试在交通运输部半消声实验室内进行,实验室截止频率 50Hz,背景噪声 20dB.散射体采用 PVC 材质,每排布设 20 根;采用 MHY-14324 型声源与 HA12-AWA5870 功率放大器发射连续白噪声,采用 LMS Virtual.LabTM 振动噪声测试分析系统进行数据采集,为方便比较各类声屏障降噪性能间的差异,测试依据文献[29-30]进行布置,声源点位于屏障中心前 1m,高度为 1.5m 处,接收点位于屏障后 0.25m,高度为 1.5m 处,采用水平与竖向间距均为 0.4m 的 3×3 麦克风阵列(M1~M9),接收中线上点 M2/5/8 与声源点两者连线与屏障水平线垂直,分别测量接收点位于散射体后与散射体之间的 2 种情况,为方便描述称为实验一与实验二(实验一接收点 M1~9 均位于散射体后,而实验二接收点 m2/5/8 位于散射体之间,m1/4/7 及 m3/6/9 位于散射体之后),同时设置 45°的斜入射声源点,斜入射时为避免端部绕射影响,将声屏障靠近消声室

尖劈进行布置,设备及实验布置如图 10c 所示,采用接收阵列的 100~5000Hz 的 1/3 倍频程平均插入损失作为声屏障降噪性能的评价指标(式 12).

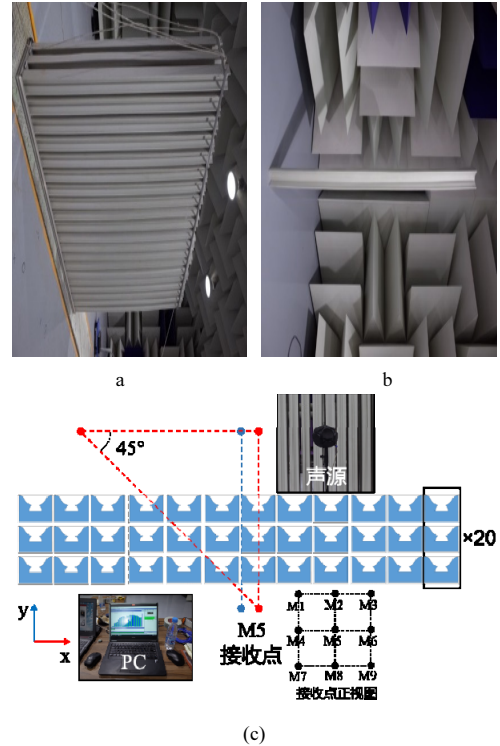


图10 实验设备及布置

Fig.10 Experimental equipment and layout

a 为声屏障整体, b 为单根散射体, c 为实验布置

$$\overline{IL} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (IL_{r,a} - IL_{r,b}) \quad (12)$$

式中: $L_{r,a}(\text{dB(A)})$ 与 $L_{r,b}(\text{dB(A)})$ 为受声点安装声屏障前后的声压级,均采用 A 计权等效声压级.

3.2 降噪性能比较

3.2.1 散射体排数的影响 散射体排数对于降噪效果的影响如 11 所示,在带隙范围 400~1250Hz 与 1600~2000Hz 内 2、3 排布设均具有一定的降噪效果,其中在 800~1250Hz 目标频段内,插入损失为 3.5~17.9dB(A);且随着散射体排数的增加,带隙内降噪效果逐渐提升,目标频段内降噪效果提升在 0.9~3.5dB(A).分析可知降噪效果提升的原因有 2 个,一是排数的增加导致散射体间声波的相消干涉增强,二是散射体数目增多引起的腔体共振效应增强.将 Bragg 散射与腔体共振两者效果耦合可以有效提升目标频段内降噪效果,这对于缩小声屏障尺寸具有积极作用,以往研究中仅包含 Bragg 散射的声子晶

体声屏障布设在 3~5 排时才展现明显的带隙特征^[6]. 同时对比实验一与实验二的结果可知,当包含散射体之间的测量点位时,两次测量结果会产生一定差异,散射体的周期间隔布置可能会对声屏障背后声场分布产生影响,具体讨论见下文 3.2.3 节.

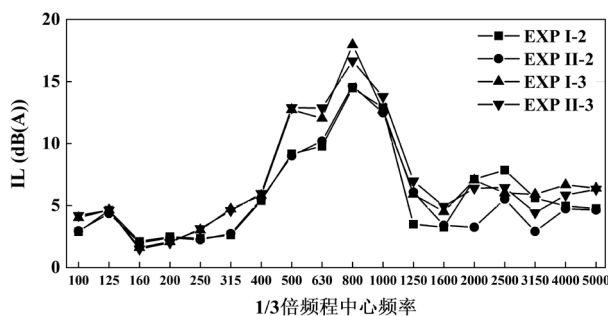


图 11 散射体排数的影响

Fig.11 Influence of the number of rows of scatterers

EXP I-2 为进行实验一时散射体两排布置的工况; EXP I-3 为进行实验一时散射体三排布置的工况; EXP II-2 为进行实验二时散射体两排布置的工况; EXP II-3 为进行实验二时散射体三排布置的工况

3.2.2 声源入射角度的影响 散射体 3 排布设下,不同入射角度下的影响如图 12 所示,完全禁带范围内,两者的差异很小,入射角度对完全禁带内降噪效果的影响不显著;而在方向禁带内,两者的差异在 1.8~3.0dB(A),入射角度对方向带隙内降噪效果影响明显.严格来说,完全禁带对于任意入射方向的声波均具有控制作用,而方向带隙仅针对特定入射方向的声波,这是产生差异的主要原因.即使两者均可以产生良好的降噪效果,在禁带设计时也应构造完全禁带为主,使其覆盖主要的噪声频段,而方向带隙作为辅助.同时对比实验一与实验二的结果可知,在不同声源入射角度下,间隔测点的存在同样会使 2 次结果产生差异,与 3.2.1 节结果相类似.

3.2.3 测点位置的影响 不同接收位置处所测降噪效果分布如图 13 所示,从整体效果来看,无论带隙内外,声屏障后的声场分布都不均匀,特别是同一水平高度下,降噪效果最大差值为 11.7dB(A);对比 M2/5/8 与 m2/5/8 的降噪效果可知,测点位于散射体后时结果增大 0.3~7.9dB(A),特别是在带隙范围内,差值会进一步增大 1.5~7.2dB(A).声子晶体声屏障作为不连续结构,散射体的周期间隔排布会造成背后声场分布不均,因此在测量其降噪效果时,应充分考虑散射体间隔处的影响,增加测点的数目综合两

者结果或许是有效的方法,实验结果可以为此类新型声学结构测量规范的制定提供一定参考.

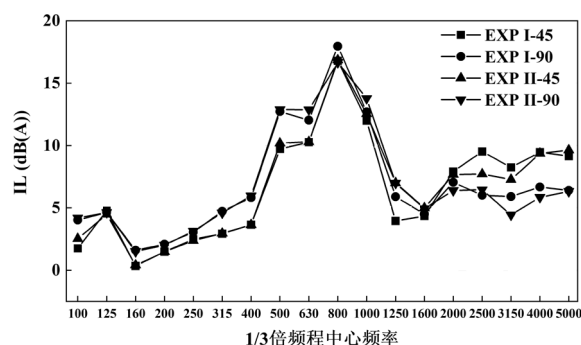


图 12 声源入射角度的影响

Fig.12 Influence of incident angle of sound source

45、90 代表入射角度

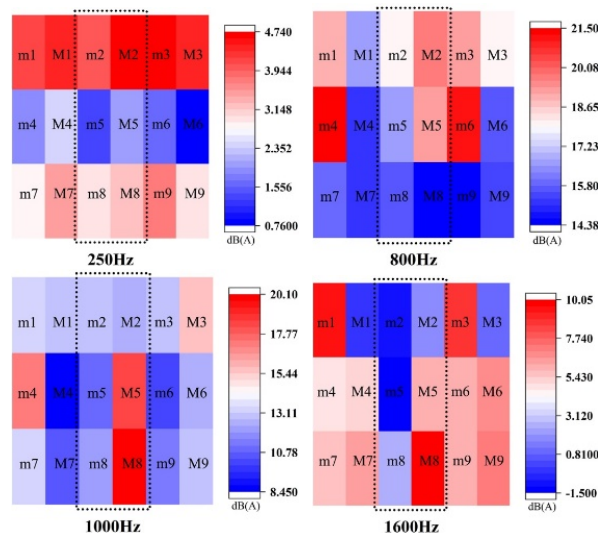


图 13 不同测点位置的影响

Fig.13 Influence of different measuring point locations.

M1~9 代表实验一,m1~9 代表实验二

3.2.4 与其他声屏障的降噪性能对比 为方便现有声屏障间效果的对比,沿用规范^[29-30]下第一次实验结果,其他种类声屏障包括铝合金声屏障、水泥混凝土声屏障与 Bragg 散射型声子晶体声屏障^[6,21],声屏障高度均为 3m,铝合金、水泥混凝土声屏障厚度均为 0.15m,而 Bragg 散射型采用三排布置总厚度为 0.6m,对比结果如图 14 所示,在 500~1000Hz 禁带范围内,沙漏型较常用铝合金、水泥混凝土声屏障降噪效果提升 0.9~6.1dB(A),较以往设计的基于 Bragg 散射的声子晶体声屏障降噪效果提升 3.5~14.0dB(A);带隙范围外,沙漏型降噪效果不及常用的铝合金、水泥混凝土声屏障;需要说明的是沙漏型在 1250Hz 时

并没有展现出局部峰值,与图 8 中的预测峰有所差异,这可能是由于腔体加工尺寸的误差所导致;至于 1600~2000Hz 时降噪效果有限,可以归因于方向禁带的控制范围受限且测量结果采用的是阵列平均值,由图 13 可知在 1600Hz 时最大插入损失也能达到 10.1dB(A)。

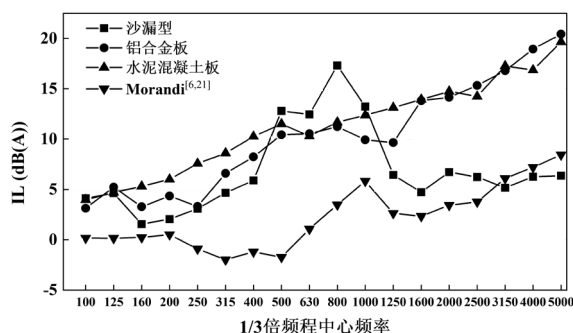


图 14 与其他声屏障降噪效果的对比

Fig.14 Comparison of noise reduction effects with other noise barriers

沙漏型声子晶体作为具有带隙特征的人工周期结构,可以通过设计禁带有效提升目标频段内降噪效果,禁带的可设计性强,可以针对不同对象进行调整,特别是对于中低频噪声,提升效果最为明显,更具有针对性,而铝合金、水泥混凝土作为传统遵循质量定律的材料,隔声效果随频率的升高而逐渐增强,对高频噪声控制效果优异,对于中低频噪声控制效果有限,这一定程度上造成了性能的冗余,材料、成本的浪费。值得一提的是,在现今的环保要求下岩棉已不可再作为吸声填充材料,因此需要大量更换,声子晶体声屏障为交通噪声控制提供了新的选择。

依靠单一机理的声子晶体声屏障称为一代,结合多种降噪机理的称为二代,不同机理控制不同的频带,实现可调谐是二代的基本特征^[29],在提升降噪效果的同时也有效减少了声屏障厚度,虽然二代声屏障相较于一代、传统声屏障性能上有了一定提高,但是构成必要周期仍需要一定数量的散射体,相应的在成本造价上也会有所增加。目前,已经有将高速公路改扩建工程中产生的废旧钢立柱用于搭建声子晶体声屏障的相应探索^[24],废旧材料的回收利用可能会有效解决声子晶体声屏障材料成本高的问题,随着性能、材料问题的逐一解决,声子晶体声屏障在未来将具有广阔的应用前景。

综上所述,沙漏型声子晶体可被用于交通噪声

的防控,为声屏障的革新提供了新的思路、方案,具有良好的应用前景。声子晶体声屏障作为新型声屏障尚未被列入声屏障的分类与测试规范,随着相关标准^[32]的制定,实验结果将为此类新型声学结构的测试标准制定提供参考。

4 结论

4.1 优化后的禁带覆盖率,沙漏型(89.8%)>锥型(82.7%)>直线型(55.8%),且传输损失曲线均与能带结构吻合良好,噪声特征频段内均起到良好的降噪效果;结合腔体共振可以有效增大禁带控制范围并增强降噪效果,通过改变腔深、侧壁角度与颈口深度可以对禁带起到有效的调控作用。

4.2 对于沙漏型声子晶体声屏障,增加散射体排数可以有效提高其带隙内降噪效果 0.9~3.5dB(A);声子晶体声屏障降噪效果分布不均,特别是在散射体间隔处差异可达 0.3~7.9dB(A),在带隙范围内差异会进一步增大 1.5~7.2dB(A),因此测量时需考虑间隔处的影响,可增加测点数目。

4.3 在 500~1000Hz 禁带范围内,沙漏型声子晶体声屏障相较于铝合金、水泥混凝土声屏障与 Bragg 散射型降噪效果提升 0.9~14dB(A)。

参考文献:

- [1] Oltean-Dumbrava C, Miah A. Assessment and relative sustainability of common types of roadside noise barriers [J]. Journal of Cleaner Production, 2016,135(11):919-931.
- [2] HJ 552-2010 建设项目竣工环境保护验收技术规范.公路 [S]. HJ 552-2010 Technical guidelines for environmental protection in highway projects for check and accept of completed construction project highway [S].
- [3] JT/T 646.5-2017 公路声屏障降噪效果检测方法 [S]. JT/T 646.5-2017 Detection method of noise reduction effect of highway sound barrier [S].
- [4] Alexander A, El-Aassar A, MacDonald J, et al. Technical approaches to developing a highway noise programmatic agreement [J]. Transportation Research Record, 2019,2673(1):102-109.
- [5] 黄婧,郭斌,郭新彪.交通噪声对人群健康影响的研究进展 [J]. 北京大学学报(医学版), 2015,47(3):555-558. Huang J, Guo B, Guo X B. Research progress on the impact of traffic noise on human health [J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2015,47(3):555-558.
- [6] Morandi F, Miniaci M, Marzani A, et al. Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties [J]. Applied Acoustics, 2016,114:294-306.
- [7] Cavalieri T, Cebrecos A, Groby J P, et al. Three-dimensional

- multiresonant lossy sonic crystal for broadband acoustic attenuation: Application to train noise reduction [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 146(3):1-8.
- [8] Peiró-Torres M P, Redondo J, Bravo J M, et al. Open noise barriers based on sonic crystals. *advances in noise control in transport infrastructures* [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016,18:392-398.
- [9] Assouar B, Liang B, Ying W, et al. Acoustic metasurfaces [J]. *Nature Reviews Materials*, 2018,3(12):460-472.
- [10] Ruan Y, Liang X, Hua X, et al. Isolating low-frequency vibration from power systems on a ship using spiral phononic crystals [J]. *Ocean Engineering*, 2021,225:108804.
- [11] 温熙森. 声子晶体 [M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
Wen X S, Phononic crystals [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2009.
- [12] Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2000,338(5485):201-205.
- [13] Pu X, Shi Z. Broadband surface wave attenuation in periodic trench barriers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020,468:115-130.
- [14] Gao N, Wu J H, Yu L. Large band gaps in two-dimensional phononic crystals with self-similarity structure [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2015,29(4):1550017.
- [15] Garcia-Chocano V, Cabrera S, Sanchez-Dehesa J. Broadband sound absorption by lattices of microperforated cylindrical shells [J]. *Applied Physics Letters*, 2012,101(18):2539.
- [16] Montiel F, Chung H, Karimi M, et al. An analytical and numerical investigation of acoustic attenuation by a finite sonic crystal [J]. *Wave Motion*, 2016,70:135-151.
- [17] Stefan M D, Victor M, Francisco C, et al. Sound insulation and reflection properties of sonic crystal barrier based on micro-perforated cylinders [J]. *Materials*, 2019,12(17):2806-2806.
- [18] 赵寰宇,严珠妹,盖晓玲,等. 复式晶格声子晶体的多带隙实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017,36(11):129-133.
Zhao H Y, Yan Z M, Gai X L, et al. Experimental study on multi-complete bandgaps of a complex lattice phononic crystal [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017,36(11):129-133.
- [19] 赵寰宇,骆岩红,陈阿丽. 类正方阿基米德格子声子晶体的声学能带结构特性 [J]. *人工晶体学报*, 2012,41(1):243-247,252.
Zhao H Y, Luo Y H, Chen A L. Properties of acoustic band structure of phononic crystal with square-like archimedean lattices [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2012,41(1):243-247,252.
- [20] Peiro-Torres M P, Parrilla Navarro M J, Ferri M, et al. Sonic crystals acoustic screens and diffusers [J]. *Applied Acoustics*, 2019,148(5):399-408.
- [21] Radosz J. Acoustic performance of noise barrier based on sonic crystals with resonant elements [J]. *Applied Acoustics*, 2019,155(12):492-499.
- [22] Castineira-Ibanez S, Rubio C, Vicente Sanchez-Perez J. Environmental noise control during its transmission phase to protect buildings. Design model for acoustic barriers based on arrays of isolated scatterers [J]. *Building and Environment*, 2015,93(11):179-185.
- [23] 易强,王宇航,高鑫,等. 轨道交通周期型声屏障带隙特性及其降噪性能 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019,50(5):1263-1270.
Yi Q, Wang Y H, Gao X, et al. Band gap properties and noise reduction performances of periodic noise barriers in rail transit [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2019, 50(5):1263-1270.
- [24] 秦晓春,倪安辰,韩莹,等. 声子晶体型高速公路声屏障的降噪性能 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(12):5493-5501.
Qin X C, Ni A C, Han Y, et al. Noise reduction performance of highway sonic crystals noise barrier [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(12):5493-5501.
- [25] Ghinet S, Bouche P, Padois T, et al. Experimental validation of acoustic metamaterials noise attenuation performance for aircraft cabin applications [C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Institute of Noise Control Engineering, 2020,261(6):222-232.
- [26] Romero-García V, Krynkina A, García-Raffi L M, et al. Multi-resonant scatterers in sonic crystals: Locally multi-resonant acoustic metamaterial [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2013,332(1):184-198.
- [27] Norris A, Wickham G. Elastic helmholtz resonators [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993,92(4):2454-2454.
- [28] Howard C Q, Craig R A. Noise reduction using a quarter wave tube with different orifice geometries [J]. *Applied Acoustics*, 2014,76(2):180-186.
- [29] EN 1793-6-2018 Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 6: Intrinsic characteristics - In situ values of airborne sound insulation under direct sound field conditions [S].
- [30] HJ/T 90-2004 声屏障声学设计和测量规范 [S].
HJ/T 90-2004 Norm on acoustical design and measurement of noise barriers [S].
- [31] Rubio C, Castineira-Ibanez S, Uris A, et al. Numerical simulation and laboratory measurements on an open tunable acoustic barrier [J]. *Applied Acoustics*, 2018,141(12):144-150.
- [32] T/CSPSTC x-2020 声学超构材料术语 [S].
T/CSPSTC x-2020 Terminology of acoustic metamaterials [S].

作者简介: 秦晓春(1982-),女,内蒙古包头人,教授,博士,主要从事交通环保与景观、绿色可持续交通等方面的研究工作.发表论文 40 篇.