

高阶微穿孔型超材料低频宽带吸声机理

郭梦媛¹, 刘崇锐¹, 苏文斌¹, 范圣平²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 510080, 广州)

摘要: 针对现有低频噪声控制的迫切需要,提出了一种高阶微穿孔型超材料结构,解释了其低频宽带吸声机理,并设计了新型的高阶微穿孔型低频宽带吸声超材料,在300~3 000 Hz的频率范围内表现出连续优异的吸声特性。设计了单个单元的吸声结构,通过在传统的微穿孔超材料内部增加穿孔板的方式,激发高阶特性,对比发现,高阶微穿孔型超材料实现了对高阶峰值的灵活调整。使用理论公式和有限元仿真,建立单元结构的计算模型计算单元的吸声系数,对结构进行吸声机理分析,同时分析了典型结构参数对于吸声特性的影响规律;在此基础上,通过单元间的严格耦合,设计了一种9单元宽带吸声结构,并进行实验验证。实验结果表明,该材料总体厚度为106.1 mm,在300~3 000 Hz的频率范围内获得了连续优异的带宽,平均吸声系数达到90%以上。该结构具有亚波长厚度的低频宽带吸声特性,在汽车、飞机、轮船等噪声环境中,具有广阔的减震降噪的工程应用前景。

关键词: 声学超材料;低频宽带吸声;微穿孔板;折叠背腔

中图分类号: TB34;O424 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202404018 **文章编号:** 0253-987X(2024)04-0192-09

Low-Frequency Broadband Absorption Mechanism of High-Order Micro-Perforated Meta-Materials

GUO Mengyuan¹, LIU Chongrui¹, SU Wenbin¹, FAN Shengping²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Regarding the pressing need for low-frequency noise control, a high-order micro-perforated meta-material structure is proposed to elucidate its mechanisms of low-frequency broadband absorption. Furthermore, new high-order micro-perforated low-frequency broadband absorption meta-materials are designed, exhibiting a continuous excellent absorption spectrum within the frequency range of 300—3 000 Hz. Initially, the sound absorption structure of a single cell is designed to stimulate high-order characteristics through the addition of perforated plates inside the traditional micro-perforated meta-materials. The comparison reveals that such materials can flexibly adjust the high-order peaks. To calculate the sound absorption coefficient and analyze the sound absorption mechanism of the structure, a calculation model of the cell structure is

收稿日期: 2023-09-08。 作者简介: 郭梦媛(1999—),女,硕士生;刘崇锐(通信作者),男,助理教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105120);中国博士后科学基金资助项目(2021M692552);中央高校基本科研业务经费资助项目(xhj032021003-02)。

网络出版时间: 2023-11-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231121.1352.002>

established through the application of theoretical formulas and finite element simulations. The influence of typical structural parameters on sound absorption characteristics is analyzed. On this basis, a 9-cell broadband sound absorption structure is designed through strict coupling between cells. The experimental results show that the continuous excellent bandwidth is achieved within the frequency range of 300–3 000 Hz, with an average sound absorption coefficient of above 90% and a thickness of 106.1 mm. The structure is characterized by low-frequency broadband sound absorption with sub-wavelength thickness and enjoys promising prospects for shock absorption and noise reduction engineering applications in noisy environments, such as automobiles, aircraft, and ships.

Keywords: acoustic meta-materials; low-frequency broadband sound absorption; micro-perforated plate; fold back cavity

随着我国工业发展与人民日益增长的美好生活需要,噪声问题已成为目前亟待解决的问题。其中低频噪声由于波长较长、传播距离远、衰减缓慢,而传统吸声材料又难以有效实现在低频吸声的基础上实现小尺度的宽带吸声,因此引起了国内外学者的广泛关注^[1-4]。

近年来,超材料^[5-10]的出现打开了在亚波长厚度吸声体上实现低频吸声的研究方向,后来逐渐应用到声学领域,声学超材料^[11-14]利用人工设计的结构进行吸声,目前主要有局域共振型声学超材料^[15-16]、薄膜型声学超材料^[17-20]、空腔折叠型声学超材料^[21-26]等。许多学者对亚波长低频吸声进行了研究,Cai等^[22]基于局域共振思想建立了声子晶体,其呈现出的负弹性质量特性打破了传统质量密度定律,在2 cm厚度下实现了400 Hz处的吸声;将1/4波长的声阻尼管弯曲盘绕,形成一个共面吸声面板结构,共振状态等效于亥姆霍兹共振器,在400 Hz处取得90%以上的优异吸声效果。Li等^[23]提出了深度亚波长空间折叠亥姆霍兹共振器结构,其厚度仅为对应波长的1/223,可在125 Hz处实现优异吸声,克服了吸声体在低频处的限制。

为了拓展宽带,Liu等^[24]使用微穿孔型超表面,在低频的基础上与空间折叠亥姆霍兹共振器结构进行对比,拓宽了各阶峰值的带宽,但在实际工程应用中,连续宽带吸声对于稳定吸收噪声有着重要意义。

除了通过拓宽单个元胞的峰值外,各位学者还开始使用多单元耦合来实现宽带。Yang等^[25]提出多阶HR耦合结构,由16个Fabry-Pérot (FP)通道组成,将各阶HR耦合,引入高阶峰值,拓宽了工作带宽,在10.36 cm时实现了400~3 000 Hz的优异吸声,但高阶峰值受第一个峰影响,无法灵活调整高

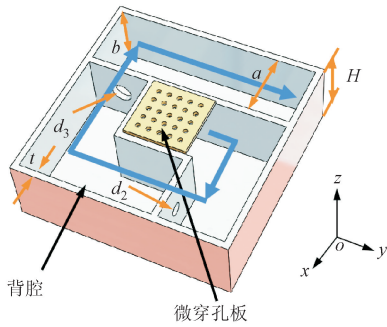
阶峰值的位置,无法被有效调整和利用。

本文提出一种高阶微穿孔型吸声超材料(HMPM)结构,这种结构可以激发高阶特性和拓宽整体带宽,并具有良好的灵活调整高阶峰值的能力,其基本单元由微穿孔板、折叠背腔及两个带小孔的隔板组成,每个谐振腔可以提供多个峰值。与相同尺寸的微穿孔板相比,高阶峰值的位置可灵活调整,且吸声峰值可以通过调整几何参数达到100%,并在最后通过严格的峰值耦合设计,获得了厚度为106.1 mm的吸声结构,在300~3 000 Hz范围内实现平均吸声系数达到90%以上的连续优异吸声带宽。

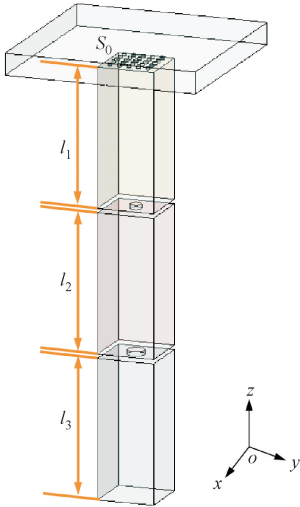
1 HMPM 低频宽带吸声机理

1.1 HMPM 元胞结构

HMPM元胞结构由微穿孔板和折叠背腔及两个带小孔的隔板组成,结构总体尺寸为 $W \times L \times H = 34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm} \times 11.6 \text{ mm}$,如图1所示。图1(a)中,厚度为 $t_1 = 0.6 \text{ mm}$ 的微穿孔板由穿孔数为 $N = 25$ 、直径为 $d_1 = 0.68 \text{ mm}$ 的小孔穿孔,穿孔率约为9.1%,厚度为 $t_2 = 1 \text{ mm}$ 的第一个隔板由一个直径为 $d_2 = 2 \text{ mm}$ 的小孔穿孔于隔板中心,厚度为 $t_3 = 1 \text{ mm}$ 的第二个隔板由一个直径为 $d_3 = 3 \text{ mm}$ 的小孔穿孔于隔板中心,将背腔盘曲折叠以获得更低频率的吸声峰值,声波路径截面面积为 $S_c = a \times b = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,框架壁厚为 $t = 1 \text{ mm}$,将结构等效简化后如图1(b)所示,总长度为 $L_0 = 98 \text{ mm}$,3个腔的长度分别为 $l_1 = 32 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 32 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 32 \text{ mm}$,声波沿 z 轴负方向入射到表面,吸声面积比定义为 $\eta = \frac{S_c}{S_0}$ 其中 $S_0 = W \times L$ 为入射表面面积。



(a) 元胞结构三维视图



(b) 空腔等效结构

图1 HMPM元胞结构图

Fig. 1 The diagram of HMPM cell structure

1.2 吸声系数计算

由表面相对声阻抗率 z_s , 可得结构的吸声系数

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - 1}{z_s + 1} \right|^2 \quad (1)$$

式中: $z_s = \frac{Z_s}{\rho_0 c_0}$, $Z_s = Z_a S_0$ 为表面声阻抗率, Z_a 为结构表面声阻抗, $\rho_0 = 1.25 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度, $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 为声速。结构表面声阻抗 Z_a 由微穿孔板阻抗 Z_M 和空腔阻抗 Z_c 组成^[12], 即

$$Z_a = Z_M + Z_c \quad (2)$$

微穿孔板阻抗由欧拉方程计算可得

$$Z_M = \frac{j\omega\rho_0}{S_{n1}} \left(t_1 \left(1 - \frac{2B_1(\chi\sqrt{-j})}{(\chi\sqrt{-j})B_0(\chi\sqrt{-j})} \right)^{-1} + 0.85d_1 \right) + \frac{\sqrt{2}\mu\chi}{S_{n1}d_1} \quad (3)$$

式中: $S_{n1} = N \frac{\pi d_1^2}{4}$ 为微穿孔板总体小孔面积; $\chi = d_1 \sqrt{\frac{\omega\rho_0}{4\mu}}$ 为穿孔板常数; B_0 、 B_1 分别为 0、1 阶第一类

贝塞尔函数; $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 为空气动力黏度系数。

折叠空腔的阻抗 Z_c 由传递阻抗法进行计算, 即

$$Z_c = \frac{p_1}{v_1 S_c} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{c1} \mathbf{T}_{n2} \mathbf{T}_{c2} \mathbf{T}_{n3} \mathbf{T}_{c3} \begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: p_1 、 v_1 为表面声压、声速; $p_0 = 1 \text{ Pa}$ 、 $v_0 = 0 \text{ m/s}$ 分别为第三阶空腔的底部声压、声速。第 i 层小孔和空腔的传递矩阵 $\mathbf{T}_{ni}$ 、 $\mathbf{T}_{ci}$ 分别为

$$\mathbf{T}_{ni} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{ni} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & jZ_i^e \tan k_i^e l_i \\ \frac{j \tan k_i^e l_i}{Z_i^e} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Z_{ni} = \frac{j\omega\rho_0}{\sigma_i} \left(t_i \left(1 - \frac{2B_1(\chi\sqrt{-j})}{(\chi\sqrt{-j})B_0(\chi\sqrt{-j})} \right)^{-1} + \Delta t \right) + \frac{\sqrt{2}\mu\chi}{\sigma_i d_i} \quad (8)$$

式中: Z_{ni} 为小孔 i 的声学阻抗; k_i^e 、 Z_i^e 为空腔 i 的有效传播波数和有效特征阻抗; $\sigma_i = \frac{S_{ni}}{S_c}$ 为小孔 i 在空腔截面处的穿孔率; S_{ni} 为小孔 i 的面积; Δt 为小孔末端阻抗修正。

小孔末端阻抗修正由两部分组成, 即 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, 其中 Δt_1 、 Δt_2 分别是小孔向空腔、小孔向外部波导辐射时压力不连续产生的, 即

$$\Delta t_1 = 0.41 \left[1 - 1.35 \frac{d_i}{d_c} + 0.31 \left(\frac{d_i}{d_c} \right)^3 \right] d_i \quad (9)$$

$$\Delta t_2 = 0.41 \left[1 - 0.235 \frac{d_i}{d_n} - 1.32 \left(\frac{d_i}{d_n} \right)^2 + 1.54 \left(\frac{d_i}{d_n} \right)^3 - 0.86 \left(\frac{d_i}{d_n} \right)^4 \right] d_i \quad (10)$$

式中: $d_c = 2 \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}$ 为空腔等效直径; $d_n = 2 \sqrt{\frac{S_0}{\pi}}$ 为外部波导等效直径。

$k_i^e = \omega \sqrt{\rho_i^e c_i^e}$ 、 $Z_i^e = \sqrt{\rho_i^e / c_i^e}$ 为空腔 i 的有效传播波数和有效特征阻抗, 其中 ρ_i^e 、 c_i^e 分别为空气的有效密度和有效体积压缩常数。 ρ_i^e 、 c_i^e 可由热黏性声学理论求得

$$\rho_i^e = \rho_0 \frac{\nu a^2 b^2}{4j\omega} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_m^2 \beta_n^2 \left(\alpha_m^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega}{\nu} \right) \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (11)$$

$$c_i^e =$$

$$\frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{4j\omega(\gamma-1)}{\nu' a^2 b^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_m^2 \beta_n^2 (\alpha_m^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega\gamma}{\nu'}) \right]^{-1} \right\} \quad (12)$$

式中: $\alpha_m = \frac{(m+0.5)\pi}{a}$, $\beta_n = \frac{(n+0.5)\pi}{b}$, $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$ 为空气的动力黏度; $\nu' = \frac{\kappa}{\rho_0 C_V}$, 其中 $\kappa = 0.0258 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 为热传导率; $C_V = 0.717 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 为比定容热容; $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$, $\gamma = 1.4$ 为空气的压力和比热率。

为验证理论公式正确性,利用商业有限元软件 COMSOL MultiphysicsTM 5.6 中的压力声学模块构建结构仿真模型,入射声波为平面波辐射,结构外侧入射区域为压力声学域,微穿孔板使用压力声学模块的内部穿孔板进行,各个隔板与空腔使用狭窄区域声学,由于模型没有复杂的边界层,相较于热黏性声学,使用压力声学的狭窄区域声学模拟狭窄区域内的黏性损失和热损失的计算成本更低。由于结构与空气介质相比刚度很大,将边界简化计算为绝对硬边界条件,由于整体单元为周期性排列,在周围 4 个边界上建立周期性边界条件。

1.3 HMPM 低频宽带吸声机理

HMPM 吸声机理为共振吸声,穿孔板的孔内包含一部分空气,由于小孔的长度远小于声的波长,故可将孔内空气视作活塞做整体振动,活塞质量为 M ,空气柱与孔壁存在摩擦,即存在力阻 R ,腔内空气随孔内空气柱的振动而压缩膨胀,可视为空气弹簧,弹性系数为 K ,力顺为 $C = \frac{1}{K}$,声振动和电振荡存在类比关系,活塞质量等效为声质量,力阻等效为声阻,力顺等效为声顺。穿孔板的声阻抗率是 $R_i + j\omega M_i$,空腔声阻抗率是 $Z_{li} = -j\rho_0 c_0 \cot(\frac{\omega l_i}{c_0})$,正入射时的结构表面相对声阻抗率 z_s 可写为

$$z_s = r_1 + j\omega m_1 - j\cot(\frac{\omega l_1}{c_0}) + \frac{\cot^2(\omega l_1/c_0)}{z_{23} - j\cot(\omega l_1/c_0)} \quad (13)$$

$$z_{23} = r_2 + j\omega m_2 - j\cot(\frac{\omega l_2}{c_0}) + \frac{\cot^2(\omega l_2/c_0)}{r_3 + j\omega m_3 - j\cot(\omega l_3/c_0) - j\cot(\omega l_2/c_0)} \quad (14)$$

其中

$$r_i = \frac{32\mu_i}{\rho_0 c_0 d_i^3 \sigma_i \eta} k_r$$
$$k_r = \sqrt{1 + \frac{\chi_i^2}{32} + \frac{\sqrt{2}}{32} \frac{\chi_i d_i}{t_i}} \quad (15)$$

$$m_i = \frac{t_i}{c_0 \sigma_i \eta} k_m$$
$$k_m = 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \chi_i^2/2}} + 0.85 \frac{d_i}{t_i} \quad (16)$$

式中: r_i 为第 i 阶的相对声阻率; $j\omega m_i$ 为第 i 阶的相对声抗率; $-j\cot(\frac{\omega l_i}{c_0})$ 为第 i 阶的背腔的相对声阻抗率,当整体结构的相对声抗率 $\text{Imag}(z_s)$ 等于 0 时,结构存在吸声峰值,当相对声阻率 $\text{Real}(z_s)$ 为 1 时,吸声系数达到 100%。

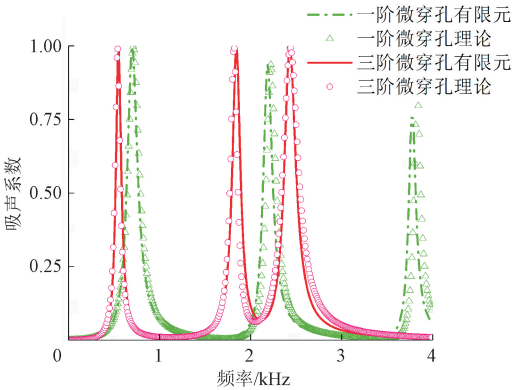


图 2 HMPM 与一阶微穿孔板吸声性能对比
Fig. 2 The comparison of sound absorption performance of HMPM and first-order micro-perforated plate

为实现低频吸声,将空气背腔进行折叠,增长了声波的传播路径,在更薄的结构下实现了更低的吸声频率;为实现宽带吸声,这里引入可灵活调整的高阶峰值,对几何参数进行调整可实现 100% 吸声。将没有隔板的一阶微穿孔型超表面(MPL)元胞^[12]与带两个隔板的 HMPM 元胞进行对比,如图 2 所示,可知没有隔板的 MPL 元胞高阶峰值会随着阶数的升高而逐渐降低,且高阶峰值的位置不可控,通过调整结构的参数只能准确的调整第一个峰值的位置与吸声系数,而两个隔板的 HMPM 高阶峰值都能达到 100%,并且峰值的位置可以通过更改结构参数来进行灵活调整。

综合上述分析,该元胞结构实现低频宽带吸声的机理是通过将空腔进行折叠获得低频吸声,将单孔结构变微穿孔结构增加单个峰值吸声带宽,引入可灵活调整的高阶峰值增加总体带宽,并通过多元胞耦合来引入更多峰值,实现连续优异宽带吸声。

2 典型参数对吸声系数的影响

2.1 小孔直径 d_i 的影响

孔径 d_i 是最为典型的结构参数,针对 d_i 对结构吸声性能的影响进行研究,小孔直径对吸声特性的影响如图 3 所示。以 d_1 为例,图 3 中, d_1 为 0.4、0.7、1.0、1.3 mm 时,小孔数量 N 和其他参数保持不变,穿孔率分别为 3.1%、9.6%、19.6%、33.2%。

随着小孔直径 d_1 的增加,3 个吸声峰都向高频移动,第 1、2 个峰值都升高到约 100%,第 3 个峰值先增加到 100%,再降低到 79%。当整体结构的相对声抗率等于 0 时,结构就产生了产生吸声峰值的条件,在相对声阻率为 1 时,吸声系数能够达 100%,

由图 3 可以看到,在每个峰值处的相对声抗率都为 0,位置随小孔直径的增加向高频移动。第 1 个峰值的相对声阻率分别为 2.78、0.98、0.78、0.73,第 2 个峰值的相对声阻率分别为 3.37、0.99、0.82、0.88,第 3 个峰值的相对声阻率分别为 5.91、1.06、0.49、0.32,吸声系数先增大,再减小。

由式(15)、(16)可知,随着 d_i 的增加,穿孔率增大,穿孔板的相对声阻率 r_i 和相对声质量率 m_i 降低, $\cot(\frac{\omega l_i}{c_0})$ 随 ω 的增加而降低,当 d_1 增加时,第 1 个腔、第 2、3 个穿孔板、腔的声阻抗不变, r_1 、 m_1 降低,相对声阻率与相对声抗率都降低,吸声峰值向高频移动。同理,当 d_2 、 d_3 增加时吸声峰值向高频移动。

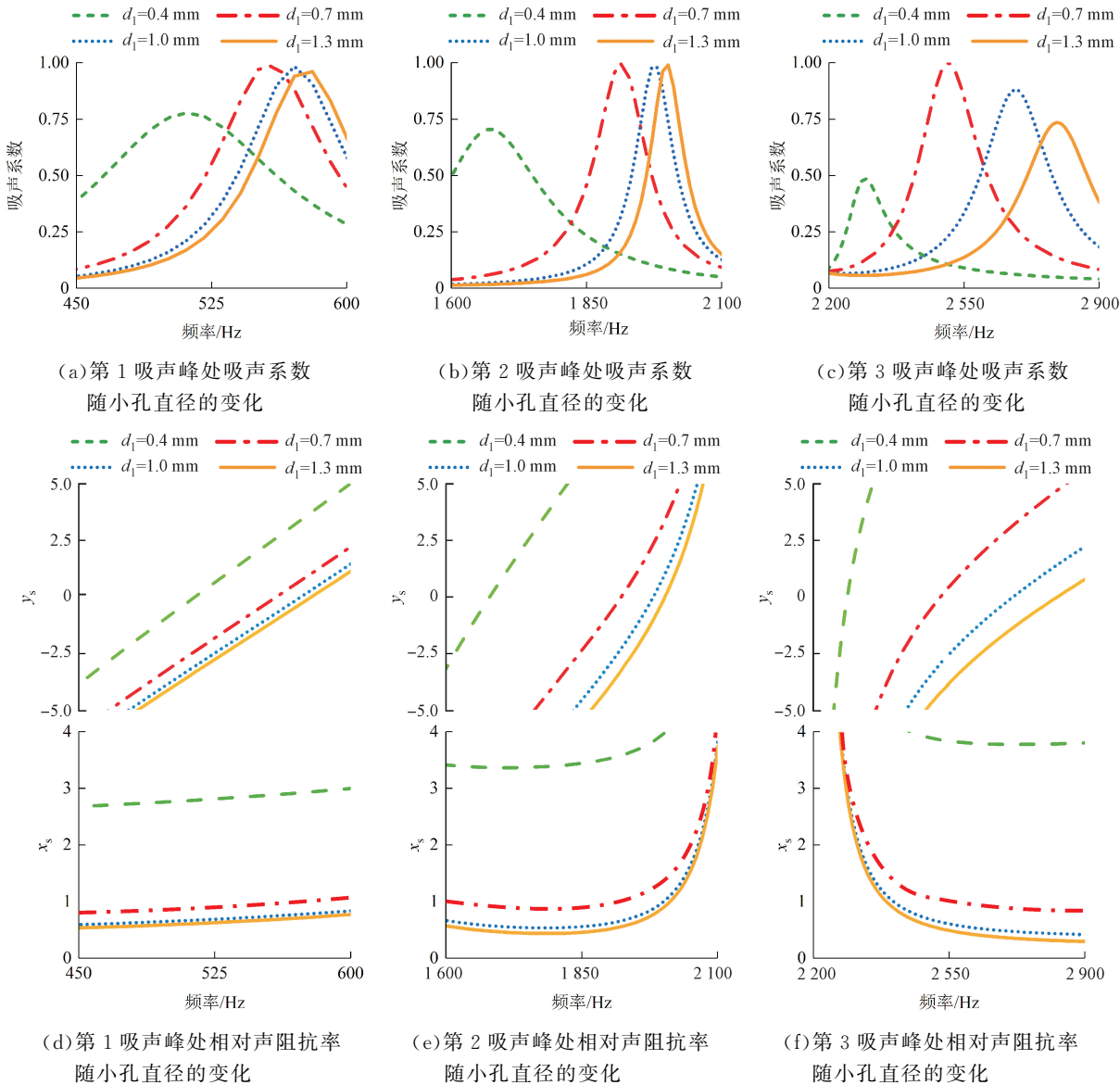


图 3 小孔直径对吸声特性的影响

Fig. 3 The effect of small hole diameter on sound absorption characteristics

2.2 腔深 l_i 的影响

随着整体空腔长度 l_0 的增加,吸声峰值的频率向低频移动。这里着重讨论多阶元胞中单层空腔深度 l_i 变化对吸声性能的影响,空腔深度对吸声特性的影响如图 4 所示。图 4 中 l_1 的取值为 22、32、42、52 mm 时,其他参数保持不变。为使图像更加清晰,隐藏部分与峰值无关的相对声抗率曲线。随着腔深 l_1 增大,所有峰值的频率都随着腔深的增加,逐渐向低频移动。

图 4 中,当腔深 l_1 变化时,第 1 个峰值对应的相对声阻率斜度较低,都接近于 1,故第 1 个峰系数变化不大,随着腔深 l_1 的增加,在第 2 阶峰值处,相对声阻率 x_s 从 1.72 逐渐降低到 0.72,故第 2 个峰值先升高,

后逐渐降低。在第 3 阶峰值处,相对声阻率 x_s 从 0.82 逐渐升高到 2.63,峰值先升后降。根据式(13)~(16)可知,腔深改变不影响声阻与声质量,主要影响的是空腔的声抗。当腔深 l_i 增加时,空腔声抗 $\cot\left(\frac{\omega l_i}{c_0}\right)$ 降低,结构相对声抗率升高,吸声峰值向低频移动。同理,当 l_2 、 l_3 增加时吸声峰值向低频移动。

综合前文研究与式(13)~(14)对比可知,从第 1 层到第 3 层,各层的几何参数对表面的相对声阻抗率影响逐层递减,且对所有峰值都产生影响。增加小孔直径,相对声阻率与相对声抗率都降低,吸声峰值向高频移动;增加空腔深度,结构相对声抗率升高,吸声峰值向低频移动。

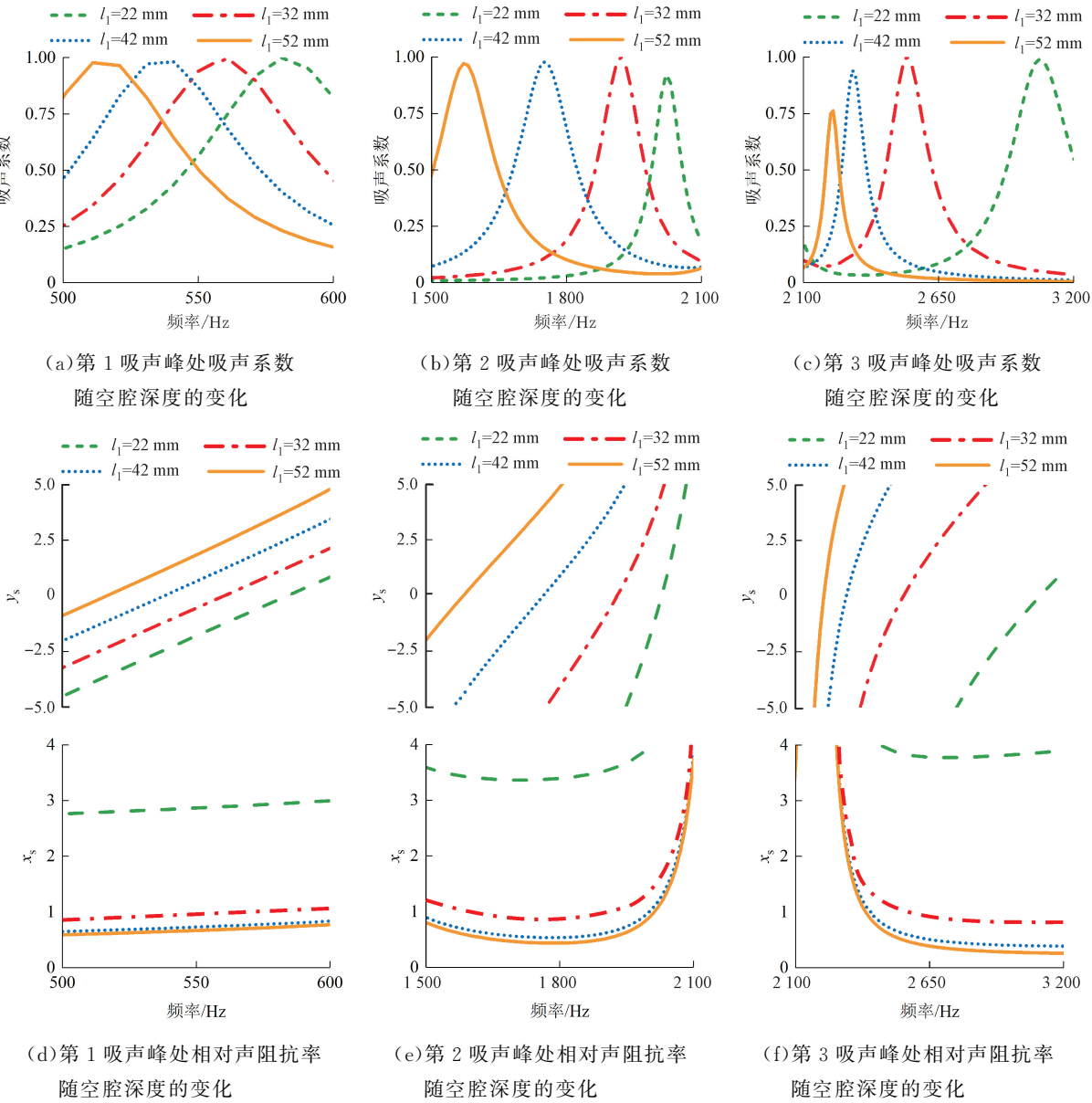


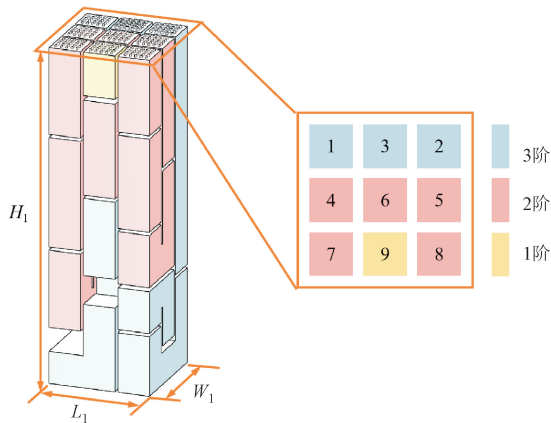
图 4 空腔深度对吸声特性的影响

Fig. 4 The effect of cavity depth on sound absorption characteristics

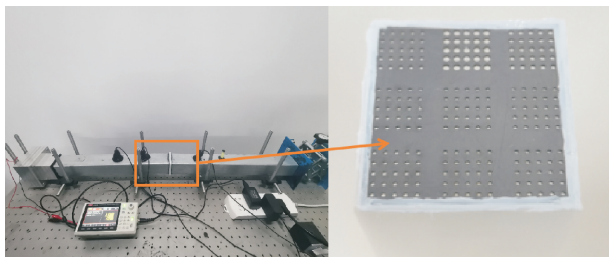
3 多元胞耦合宽带吸声结构

为实现 300~3 000 Hz 的连续宽带吸声,引入多个单元进行耦合,实现亚波长超表面的设计,提出的超表面由 9 个单元组成,单元名称与结构如图 5(a)所示,其中单元 1~3 是具有 3 阶吸收机制的 HMPM 单元,单元 4~8 是具有 2 阶吸收机制的 HMPM 单元,单元 9 是普通 MPL 单元,每个 HMPM 的 3 个峰同时受到结构参数的影响,无法通过控制单一参数来调整某一峰值,增加了实现连续优异吸声带的难度。并且由于表面倏逝波的影响,单元表面耦合时,会产生反共振现象,对单元的吸声性能产生影响。通过多个单元间的严格耦合,平衡单元的吸声性能,基本单元长宽高分别为 $W_1 \times L_1 \times H_1 = 34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm} \times 106.1 \text{ mm}$,各元胞截面为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方形,元胞间壁厚为 1 mm。如图 5(b)所示,实验在边长为 50 mm 的方形阻抗管中进行,样件安置在管道的末端,使用标准的双传声器传递阻抗法进行测量,使用光敏树脂,通过 3D 打印的方式得到样件并验证结果。样件具有优秀的结构刚度,尺寸与前面设计的基本单元保持一致。

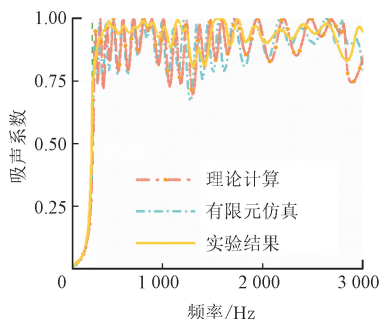
理论计算、数值仿真与实验测量的吸声系数如图 5(c)所示,可知在 300~3 000 Hz 的频率范围内获得了优异的连续吸声频谱,平均吸声系数超过 90%。吸声频带由 20 个吸声系数近乎为 1 的吸声峰组成,其中前 3 个峰由 3 个 3 阶 HMPM 单元的第 1 峰组成,接着的 5 个峰对应于 2 阶 HMPM 单元中的第 1 个峰,后接 3 阶 HMPM 的 3 个第 2 个峰和 3 个第 3 个峰,而后连着 5 个 2 阶 HMPM 的第 2 个峰和 1 个 MPL 单峰。在不增加整体结构尺寸的情况下,相对于全部使用 MPL,由于高阶峰值位置可灵活调控,高阶峰值可以被全部利用,峰值排列更加紧凑。



(a) 宽带超材料结构示意图



(b) 宽带超材料实验环境及结构样件



(c) 吸声系数理论仿真与实验对比

图5 宽带超材料

Fig. 5 Wide-band meta-materials

此外,理论和数值结果之间存在相当好的一致性,但由于制造误差,实验结果存在轻微差异。

4 结论

本文提出了一种新型高阶吸声超材料结构。通过在微穿孔超材料内部加入隔板激发了高阶特性,并具有良好的灵活调整高阶峰值的能力,进行了 9 元胞宽带吸声结构设计。吸声超材料厚度为 106.1 mm,在 300~3 000 Hz 频段范围内实现了连续的优异带宽,达到平均 90% 以上的吸声系数,在航空、水下、生活设施等易受到低频噪声干扰的领域可实现优异的低频宽带吸声。

(1) 与传统微穿孔板对比,该结构具有灵活调控高阶峰值位置的优越性,通过调整隔板的位置及隔板上小孔的大小可以灵活调整高阶峰值的位置并保持 100% 的吸声系数。

(2) 分析典型结构参数对吸声特性的影响规律,可通过调整结构参数实现吸声峰值的调整,当增大各阶的小孔直径与空腔深度时,结构吸声峰值向低频移动。

(3) 为了实现更宽的吸声宽带,激发高阶峰值并通过调整参数进行严格耦合,得到了一种低频宽带吸声的结构,实现了 300~3 000 Hz 频段范围内的平均 90% 以上的连续吸声宽带。

参考文献:

- [1] 马大猷. 亥姆霍兹共鸣器 [J]. 声学技术, 2002, 21(1): 2-3.
MA Dayou. Helmholtz resonator [J]. Technical Acoustics, 2002, 21(1): 2-3.
- [2] GLÉ P, GOURDON E, ARNAUD L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity [J]. Applied Acoustics, 2011, 72(5): 249-259.
- [3] 彭健, 肖新标, 李承城, 等. 微穿孔板在列车空调风道中的应用研究 [J]. 机械, 2022, 49(8): 24-29.
PENG Jian, XIAO Xinbiao, LI Chengcheng, et al. Application of micro-perforated plate in train air-conditioning duct [J]. Machinery, 2022, 49(8): 24-29.
- [4] SAKAGAMI K, MORIMOTO M, YAIRI M, et al. A pilot study on improving the absorptivity of a thick microperforated panel absorber [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(2): 179-182.
- [5] 师甜甜, 杜立飞, 张海锋, 等. 水基吸波超材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(18): 50-56.
SHI Tiantian, DU Lifei, ZHANG Haifeng, et al. Research progress on water-based metamaterial absorbers [J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 50-56.
- [6] 田宇泽, 金晶, 杨河林, 等. 微波电磁超材料设计与应用研究进展 [J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2023, 53(9): 290016.
TIAN Yuze, JIN Jing, YANG Helin, et al. Research progress on design and application of microwave electromagnetic metamaterial [J]. Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica), 2023, 53(9): 290016.
- [7] CAI Wenshan, CHETTIAR U K, KILDISHEV A V, et al. Optical cloaking with metamaterials [J]. Nature Photonics, 2007, 1(4): 224-227.
- [8] KIM G, KIM Y, YUN J, et al. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5920.
- [9] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [10] LAPINE M, GORLACH M. Current trends and non-linear effects in multilayered metamaterials: FF-1 IL01 [J]. Ceramics International, 2023, 49(14): 24422-24427.
- [11] CUMMER S A, CHRISTENSEN J, ALÙ A. Controlling sound with acoustic metamaterials [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(3): 16001.
- [12] 刘崇锐, 吴九汇. 微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 80-86.
LIU Chongrui, WU Jiuhui. Low-frequency broadband absorption mechanism of micro-perforated lossy meta-surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 80-86.
- [13] ASSOUAR B, LIANG Bin, WU Ying, et al. Acoustic metasurfaces [J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3(12): 460-472.
- [14] GAO Nansha, ZHANG Zhicheng, DENG Jie, et al. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review [J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(6): 2100698.
- [15] LIU Zhengyou, ZHANG Xixiang, MAO Yiwei, et al. Locally resonant sonic materials [J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [16] 黄安畏, 吴永鹏, 李忠盛, 等. 局域共振声学超材料技术进展及应用展望 [J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 45-50.
HUANG Anwei, WU Yongpeng, LI Zhongsheng, et al. Technical progress and application prospect of locally resonant sonic metamaterials [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 45-50.
- [17] YANG Z, MEI Jun, YANG Min, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 204301.
- [18] MEI Jun, MA Guancong, YANG Min, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 756.
- [19] CHEN Yangyang, HUANG Guoliang, ZHOU Xiaoming, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: plate model [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(6): 2926-2934.
- [20] 周国建, 吴九汇, 路宽, 等. 多态反共振协同型薄膜声学超材料低频隔声性能 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 64-74.
ZHOU Guojian, WU Jiuhui, LU Kuan, et al. Low-frequency sound insulation performance of membrane-type acoustic metamaterials with multi-state anti-resonance synergy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 64-74.
- [21] LIANG Zixian, LI J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(11): 114301.
- [22] CAI Xiaobing, GUO Qiuquan, HU Gengkai, et al. Ultrathin low-frequency sound absorbing panels based on coplanar spiral tubes or coplanar Helmholtz resonators [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(12): 121901.

(下转第 220 页)

- LI Nana, JI Hong, WEI Liejiang, et al. Analysis on main design parameters affecting response characteristics of high speed on/off valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(10): 78-86.
- [23] ASHIGWUIKE E, BALACHANDRAN W, THOMAS S, et al. Improving the Lorentz force amplitude of an EMAT using stacked coil configuration [J]. Sensors & Transducers, 2013, 155(8): 262-270.
- [24] KONG Xiaowu, LI Shizhen. Dynamic performance of high speed solenoid valve with parallel coils [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 816-821.
- [25] ASLAM J, LI Xinghu, SUN Hai. The design of hybrid electromechanical valve actuator: effects of construction parameters [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2017, 41(1): 51-64.
- [26] ASLAM J, LI Xinghu, JANJUA F K. Design of a hybrid magnetomotive force electromechanical valve actuator [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(10): 1635-1643.
- (编辑 李慧敏 刘杨)

~~~~~  
(上接第 199 页)

- [23] LI Yong, ASSOUAR B M. Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(6): 063502.
- [24] LIU Chongrui, WU Jiuhui, YANG Zhengrui, et al. Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microperforated panel metamaterial with multi-order resonance [J]. Composite Structures, 2020, 246: 112366.
- [25] YANG Min, CHEN Shuyu, FU Caixing, et al. Optimal sound-absorbing structures [J]. Materials Horizons, 2017, 4(4): 673-680.
- [26] LIU Chongrui, WU Jiuhui, CHEN Xu, et al. A thin low-frequency broadband metasurface with multi-order sound absorption [J]. Journal of Physics: Applied Physics, 2019, 52(10): 105302.
- (编辑 赵炜)