

专题：超材料

基于微孔板与折曲通道的亚波长宽带吸声结构设计*

吴飞¹⁾²⁾ 黄威²⁾ 陈文渊²⁾ 肖勇¹⁾ 郁殿龙¹⁾ 温激鸿^{1)†}

1) (国防科技大学智能科学学院, 装备综合保障技术重点实验室, 长沙 410073)

2) (西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

(2020年3月12日收到; 2020年6月24日收到修改稿)

本文设计了一种由微穿孔板与折曲通道组成的亚波长宽带复合吸声结构, 对该复合吸声器低频宽带吸声机理进行了详细分析, 建立了该复合吸声结构的理论吸声解析模型与有限元数值分析模型, 完成了吸声理论解和数值解的相互验证. 该吸声结构在整体厚度为 60 mm 时, 理论上实现了在 200—500 Hz 频段内平均吸声系数达 0.8 的低频高效吸声. 同时在整体厚度为 90 mm 时, 理论上实现了 180—350 Hz 频段内多处峰值达 0.95 的准完美吸声. 该复合吸声结构在低频噪声控制工程中具有一定的应用前景.

关键词: 微穿孔板, 折曲通道, 复合吸声结构, 低频降噪

PACS: 43.90.+v, 02.60.Cb, 02.60.Pn

DOI: 10.7498/aps.69.20200368

1 引言

中低频噪声具有很强的穿透能力, 一直是舱室噪声污染的主要来源. 目前, 传统的吸声材料如多孔材料^[1]已经被证明能对中高频噪声 (>1000 Hz) 进行有效地吸收, 但在低频范围内, 则需要与波长相当的结构厚度, 这阻碍了其在实际工程中的应用, 低频噪声的吸收问题亟待解决^[2].

近年来, 深亚波长声学超材料在低频噪声 (<500 Hz) 控制工程中受到了极大的关注. 声学超材料 (acoustic metamaterials, AMMs) 概念的提出为解决低频噪声问题提供了新思路^[3-5]. 目前, 大量学者基于共振吸声原理设计了许多深亚波长吸声材料和结构, 例如薄膜型共振吸声器^[6-8] (decorated membrane resonator, DMRs), 亥姆霍兹共振吸声器^[9,10] (Helmholtz resonators, HRs) 和

Fabry-Pérot (FP) 通道共振吸声器^[11,12]. 这些吸声结构能在低频范围内展示出良好的吸声性能, 但相对吸声带宽较窄. 目前, 已有研究人员对基于微穿孔板与折曲通道的低频宽带复合吸声结构^[13-15]进行了研究, 其有效吸声带宽为 232—533 Hz, 但该吸声结构的整体厚度达到了 100 mm. 基于微穿孔板与折曲通道的低频宽带复合吸声器^[16,17]厚度较小, 但其仍然存在吸声带宽较窄的问题, 实际应用场景受限.

基于此, 本文设计了一种由微穿孔板与多个折曲通道组合而成的复合吸声结构, 能够有效解决在限制吸声结构厚度的条件下 200—500 Hz 噪声难以吸收的问题.

2 复合吸声结构的吸声理论分析

减小吸声结构厚度的有效方法是引入空间盘绕或迷宫式结构^[18]. 本文设计并验证了一种由微

* 中国博士后基金 (批准号: 2018M643827)、国家自然科学基金 (批准号: 11702226)、中央高校基金 (批准号: XDJK2020B020) 和国家自然科学基金重大项目 (批准号: 11991032, 11991034) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenjihong@vip.sina.com

穿孔板 (穿孔直径小于 1 mm) 和折曲 FP 通道组合而成的复合声学超材料. 该结构在传统微穿孔板的基础上, 将背腔进行折曲处理, 使其可以不增加总厚度而大大增强对低频噪声的吸收性能. 同时, 将共振频率不同的吸声单元结构并联设计, 使其能在不添加其他吸收性材料 (吸声棉等)^[19,20] 的情况下获得较宽的吸收带宽.

如图 1 所示, 该复合吸声结构由微穿孔板和折曲 FP 通道组成, 入射声波沿 Z 轴进入垂直于微穿孔板的通道. 为探究其吸声机理, 本文首先建立一个如图 1(d) 所示的 5 通道单元的二维模型, 声波在盘绕通道内的传播路径如蓝色虚线箭头所示. 其中, 微穿孔板的主要结构参数有孔径 d 、板厚 t 和穿孔率 p , 周期性通道的主要结构参数包括长度 L 、宽度 W 和高度 H , 等效吸声长度 D , 内部隔板厚度 t . 在理论分析中, 折曲 FP 通道可简化为串联的多个直同轴连接子通道, 各子通道内的有效传播长度表示为 $L_{\text{eff}i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$).

具有刚性背板的吸声系统的吸声系数 α 可以根据阻抗理论计算公式得出^[18]:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{(Z'_s/Z_0 - 1)}{(Z'_s/Z_0 + 1)} \right|^2, \quad (1)$$

其中 Z'_s 指吸声结构的整体表面阻抗, $Z_0 = \rho_0 c_0$ 表示空气的特性阻抗, ρ_0 和 c_0 分别表示空气的质量密度和声速. 吸声结构的整体表面阻抗可由阻抗并联公式计算得出:

$$Z'_s = \frac{n}{(1/Z_{s1} + 1/Z_{s2} + \dots + 1/Z_{sn})}, \quad (2)$$

$$n = 3, 4, 5, \dots,$$

Z_{sn} 为第 n 个复合吸声结构的表面阻抗, 可以按下式计算:

$$Z_{sn} = Z_M + \xi \cdot Z_{C1}^L, \quad (3)$$

其中 Z_M 和 Z_{C1}^L 分别表示微穿孔板和单元第一通道入口处的表面阻抗. $\xi = S_0/S_1$ 为面积修正系数, $S_0 = W \times L$ 和 $S_1 = W_0 \times L_0$ 分别指吸声单元和单

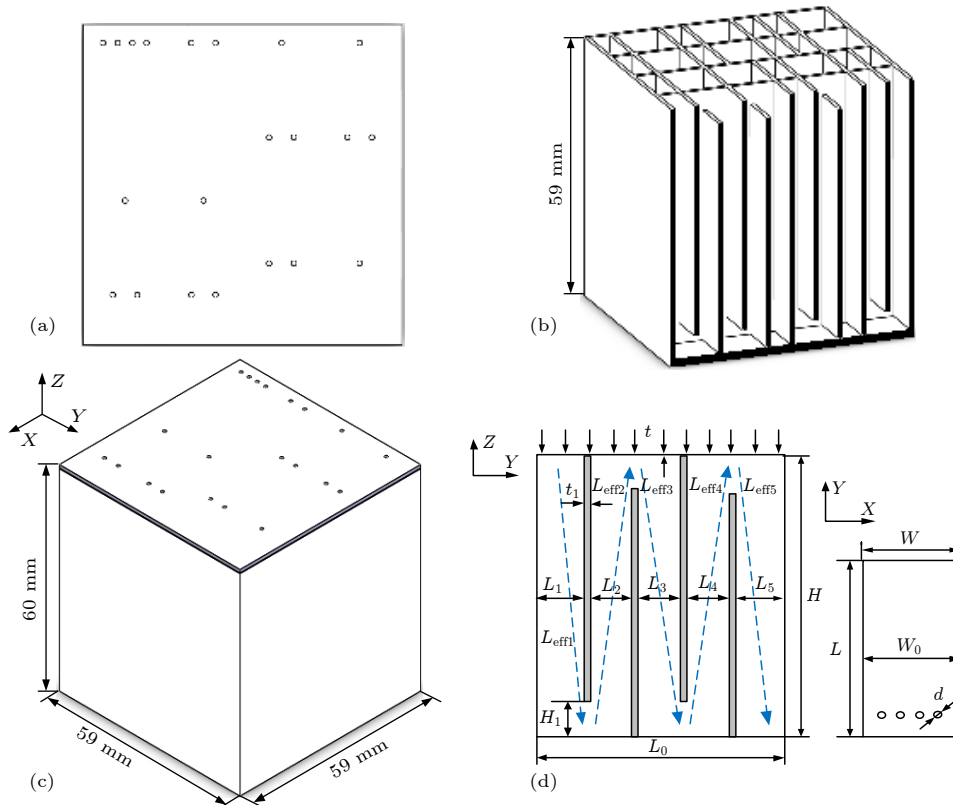


图 1 复合声学超材料的结构及理论模型 (a) 微穿孔板; (b) 折曲通道; (c) 吸声结构三维模型; (d) 吸声结构二维理论模型

Fig. 1. Structure and theoretical model of composite acoustic metamaterial: (a) The top micro-perforated panel (thickness t , diameter d , perforation rate p); (b) multiple coiled FP channels; (c) schematic of the hybrid metamaterial absorber composed of a microperforated panel (MPP) as a top face sheet and coiled-up Fabry–Pérot (FP) channels with folding number n ; (d) an approximate analytical two dimensional (2D) model of one unit cell of a space-coiled metamaterial. All the widths of the channels in the YZ plane are L . The height of the channel along the Z axis is H .

元第一通道的横截面积. 微穿孔板的表面阻抗可通过下式计算:

$$Z_M = \frac{j\omega\rho_0 t}{\tilde{P}} \left[1 - \frac{2J_1(\gamma\sqrt{-j})}{(\gamma\sqrt{-j})J_0(\gamma\sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2}\eta\gamma}{\tilde{P}d} + j\frac{0.85\omega\rho_0 d}{\tilde{P}}, \quad (4)$$

其中, t , d , \tilde{P} 分别为微穿孔板的厚度、微孔直径和微穿孔板的总穿孔率, 且 $\tilde{P} = p \times S_p/S_{\text{tot}}$, p 为各单元微穿孔板的穿孔率, 其中 S_p 是穿孔部分的面积, S_{tot} 是微穿孔板的总面积. ω 为角频率, η 指空气的动力黏度.

$\gamma = d\sqrt{\rho_0\omega/4\eta}$ 指穿孔直径与黏性边界层的厚

度之比的 $\sqrt{2}/2$ 倍; J_1 和 J_0 指一阶和零阶 Bessel 函数. 第 n 个通道顶部入口的表面阻抗 Z_i^L 和通道内部声阻抗 Z_n^L 可由下式得出:

$$\begin{cases} Z_i^L = Z_{i+1}^c \frac{-jZ_{i+1} \cot(k_i L_{\text{eff}i}) + Z_{i+1}^c}{Z_{i+1} - jZ_{i+1}^c \cot(k_i L_i)}, \\ (i = 1, 2, 3, \dots, n-1), \\ Z_n^L = -j\sqrt{\rho_i^{\text{eq}}/C_i^{\text{eq}}} \cot\left(\omega\sqrt{\rho_i^{\text{eq}}C_i^{\text{eq}}}L_{\text{eff}i}\right), \\ (i = n), \end{cases} \quad (5)$$

式中 $Z_{i+1} = Z_{i+1}^L/\xi_i$, $\xi_i = S_{i+1}/S_i$, S_i 表示各通道的截面积, 最后的刚性壁的通道 ($i = n$) 可看作常规的 FP 通道; $\rho_i^{\text{eq}}, C_i^{\text{eq}}$ 分别指等效密度及可压缩性系数, 可由下式得出:

$$\begin{cases} \rho_i^{\text{eq}} = \rho_0 \frac{\nu L_i^2 W^2}{4i\omega} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_k^2 \beta_n^2 \left(\alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{i\omega}{\nu} \right) \right]^{-1} \right\}^{-1} \\ C_i^{\text{eq}} = \frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{4i\omega(\gamma-1)}{\nu' L_i^2 W^2} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_k^2 \beta_n^2 \left(\alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{i\omega}{\nu} \right) \right]^{-1} \right\} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\nu = \mu/\rho_0$ 及其导数 $\nu' = k/\rho_0 C_v$ 可由 μ , k 和 C_v (空气运动黏度、导热系数和恒容比热) 计算得出; $\alpha_k = (k+1/2)\pi/W$ 和 $\beta_n = (k+1/2)\pi/L$ 为常数, P_0 和 γ 分别为气压与比热值.

3 低频宽带吸声机理分析

为了对复合吸声结构的低频宽带吸声机理进行研究, 本文进一步使用 COMSOL Multiphysics 5.3 内嵌的声-热黏性声学耦合模块建立了该复合

吸声结构的有限元分析数值模型, 假设该复合吸声结构所有内壁都为硬声学边界. 建立如图 1(c) 所示的由微穿孔板和多个盘绕通道组成的复合声学吸声结构的有限元分析模型并进行数值计算. 为探究其低频吸声机理, 在图 2(a) 中绘制了频率为 230 Hz 的声波传入吸声器时通道内部的声粒子速度 (红色箭头) 分布情况. 在微穿孔板与第一通道入口处观察到较大的粒子速度, 可以判断出, 由于微孔处粒子振动速度较大, 入射波能量主要是由声

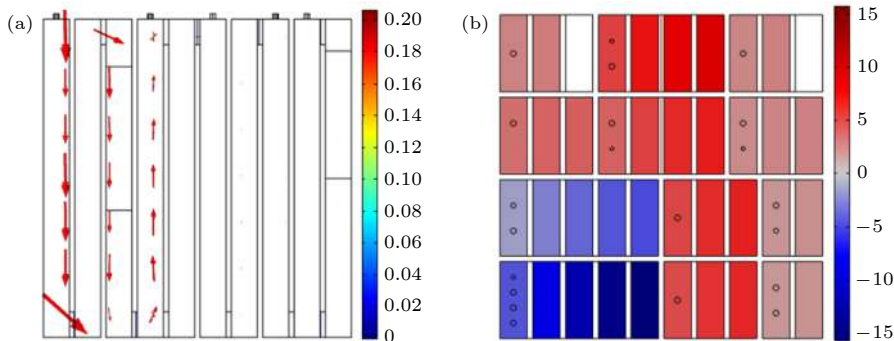


图 2 230 Hz 声波传入时吸声器内声速与声压 (a) 声速分布 (m/s); (b) 声压分布 (Pa)

Fig. 2. Sound velocity and sound pressure in a sound absorber when a 230 Hz sound wave is introduced: (a) Sound velocity distribution (m/s); (b) sound pressure distribution (Pa). The absorbers are constructed using the coiled-up channel with geometric parameters: $H = 59$ mm, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = 4.85$ mm and $W = 13.6$ mm and $d = t_0 = t_1 = 1$ mm.

波与小孔之间的较大摩擦而耗散的. 图 2(b) 中绘制了 230 Hz 声波传入吸声器时通道内部的多切面声压分布图, 可以观察到, 此时黑色虚线内的两个通道折叠数为 5 的吸声单元对声波的耗散作用最为明显, 即折叠通道数多的单元 (等效吸声长度大) 对低频声波起主要吸声作用, 而折叠通道数少的单元 (等效吸声长度小) 对相对高频声波起主要吸声作用.

为了进一步研究所设计的复合吸声结构的吸声机理, 使用图形法研究了该复合吸声结构在复频率表面内的反射系数 γ 的分布 [18]. 一般地, 在无损耗情况下, 反射系数包含共轭零点和极点, 如果在某一频率下达到完美吸声, 则零点将恰好位于实轴上.

图 3(a) 中绘制了该复合吸声结构在复频率表面内的 $\lg |r|^2$ 的分布情况, 可以看出, 200—250 Hz 范围内的零点都落在实轴附近, 因此, 在共振频率下可获得近乎完美吸收. 而高于 250 Hz 的零点偏移实轴较远, 并没有达到完美吸声. 零点和极点之间的距离也可以表征吸声带宽, 随着共振频率的降低, 零点和极点之间的距离逐渐减小的同时吸声带宽逐渐变窄.

图 3(b) 中绘制了复合吸声结构吸声系数的理论解、数值解及各主要单元吸声性能的理论解, 图中黑色虚线从左到右依次为等效吸声长度逐渐减小的单元的吸声系数理论解, 根据这一规律可通过调节折曲 FP 通道的等效吸声长度来实现期望频率声波的吸收. 同时发现, 通过调整等效吸声长度可以容易地调节吸声系数和吸声带宽. 图 3(c) 展示了相对阻抗的实部 $\text{Re}(Z_s/Z_0)$ 和虚部 $\text{Im}(Z_s/Z_0)$ 分布情况. 当阻抗匹配时, 可实现完美吸声, 这意味着相对阻抗的虚部等于 0, 而实部等于 1. 图中虚部曲线在 330 Hz 处过零点, 表明在图 3(b) 中的吸收峰存在共振状态. 相对阻抗的实部不严格等于 1, 吸收系数略小于 100%.

理论解与数值解变化趋势基本相同, 但由于理论模型由一维理论公式推导得来而数值分析模型为三维模型, 故二者有一定误差. 相对带宽达到 143% (相对带宽指吸声系数最大值的一半处的整个带宽与共振频率的比值). 近完美吸声的峰值出现在 260, 390 和 470 Hz. 吸收峰随着折叠数 n 的增加而明显降低到更低的频率, 在共振频率 230 Hz 处, 该复合吸声结构厚度仅为工作波长的 1/28, 具有亚波长吸声特性.

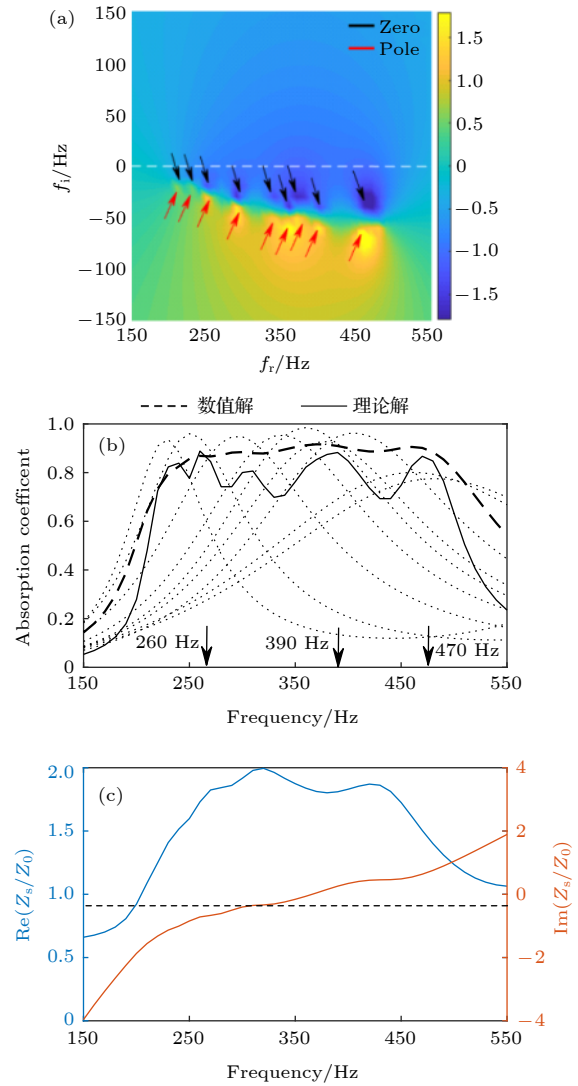


图 3 复合吸声结构的吸声特性 (a) 反射系数零、极点分布; (b) 吸声性能曲线; (c) 声阻抗的实部与虚部

Fig. 3. Sound absorption characteristics of composite sound absorption structure: (a) Zero and pole distributions of reflection coefficients on complex frequency plane; (b) sound absorption performance curve. The dotted line is the theoretical solution and the solid line is the numerical solution, the black dotted line is the theoretical solution of each unit (Gradually increase the equivalent sound absorption length from left to right); (c) real and imaginary parts of relative impedance.

4 复合吸声结构的准完美吸声

为了进一步提高该复合吸声结构的吸声性能, 对其结构参数进行调整, 调整后吸声结构总厚度为 90 mm, 具体结构参数见表 1, 进一步研究其低频吸声特性. 同样地, 运用 MATLAB, COMSOL 软件对该吸声结构的吸声系数进行了理论和数值计算分析. 图 4(a) 中绘制了参数调整后吸声结构

在复频率表面内反射系数的零点、极点分布情况, 可以观察到零点整体更加靠近 0 线, 吸声系数有所增大, 且工作频率相较于图 3(a) 有所下降, 表明调整后该吸声结构的低频吸声性能有明显提高.

图 4(b) 中绘制了该吸声结构的理论解与有限元分析结果. 可以看出, 理论解与有限元分析结果变化趋势基本保持一致, 在 170—340 Hz 的频率范围内理论平均吸声系数大于 0.85. 相对带宽为 121%, 相较于图 3(b) 中的结果, 有效工作频率范

围明显向低频移动, 且在 185, 235 和 315 Hz 等频响范围附近的吸声系数均大于 0.95. 图 4(c) 为相对阻抗的实部与虚部分布情况, 其中虚部曲线在 250 和 280 Hz 处过零点, 而实部曲线在 185 和 315 Hz 处达到 1, 与图 3(b) 中吸收峰值所对应声波频率一致, 达到准完美吸声.

表 1 准完美吸声结构各吸声单元结构参数
Table 1. Structural parameters of each sound absorption unit of quasi-perfect sound absorption structure.

序号	t/mm	d/mm	D/mm	p
1	1	1	360	0.048
2	1	1	360	0.048
3	1	1	360	0.048
4	1	1	360	0.048
5	1	1	270	0.035
6	1	1	270	0.035
7	1	1	270	0.060
8	1	1	240	0.030
9	1	1	180	0.023
10	1	1	180	0.038
11	1	1	180	0.035
12	1	1	180	0.040

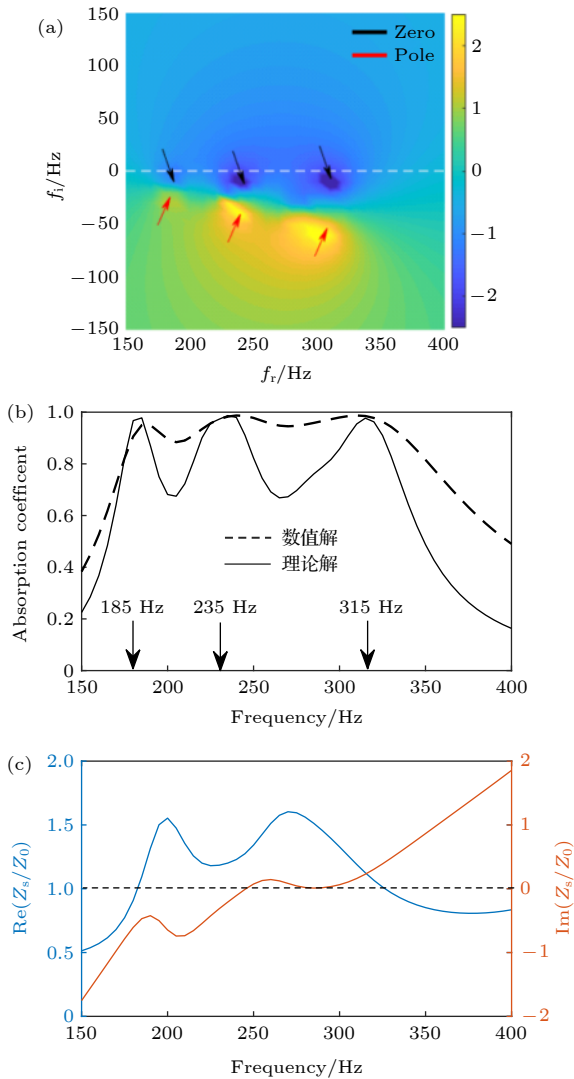


图 4 复合吸声结构的准完美吸声特性 (a) 反射系数零、极点分布; (b) 吸声性能曲线; (c) 声阻抗的实部与虚部
Fig. 4. Quasi-perfect sound absorption characteristics of composite sound absorption structure: (a) Zero and pole distributions of reflection coefficients on complex frequency plane; (b) sound absorption performance curve, The dotted line is the theoretical solution and the solid line is the numerical solution; (c) real and imaginary parts of relative impedance.

5 结 论

本文设计了一种由微穿孔板与多个折曲通道组合而成的复合吸声结构, 对该复合吸声器低频宽带吸声机理进行了详细分析, 并据此建立了理论解析模型与有限元数值分析模型, 完成了理论解和数值解的相互验证. 该复合吸声结构的吸声机理主要是声波与微穿孔板开孔处内壁的摩擦损耗. 据此, 本文并联设计多个不同等效长度的复合吸声结构, 并分析了其声波吸收的高效性及可调吸收特性. 结果表明, 该复合吸声结构与传统吸声结构相比, 设计结构简单, 具有深亚波长特性, 对低频噪声 (小于 500 Hz) 的吸收性能显著提高, 且吸声频带更宽, 在噪声控制工程当中具有很大的应用潜力. 实现了以下工程设计目标: 在复合吸声结构整体厚度为 60 mm 时, 实现了在 200—500 Hz 频段内, 理论平均吸声系数达到 0.8 的低频高效吸声. 在复合吸声结构整体厚度为 90 mm 时, 实现了在 180—350 Hz 频段内, 多处理论吸声峰值达到 0.95 的准完美吸声.

参考文献

- [1] Chen W J, Liu S T 2012 *Noise Vibra. Contrl.* **032** 177 (in Chinese) [陈文炯, 刘书田 2012 噪声与振动控制 **032** 177]
- [2] Maa D Y 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 2861
- [3] Huang S B, Li S M, Wang X, Mao D X 2017 *Appl. Acoust.* **126** 114
- [4] Ma G C, Sheng P 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501595
- [5] Long H Y, Cheng Y, Tao J C, Liu X J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 023502
- [6] Ma G C, Yang M, Xiao S W, Yang Z Y, Sheng P 2014 *Nat. Mater.* **13** 873
- [7] Wu X X, Fu C X, Li X, Meng Y, Gao Y B, Tian J X, Wang L, Huang Y Z, Yang Z Y, Wen W J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 043501
- [8] Cheng Y, Zhou C, Yuan B G, Wu D J, Wei Q, Liu X J 2015 *Nat. Mater.* **14** 1013
- [9] Wang Y, Zhao H G, Yang H B, Zhong J, Wen J H 2017 *Europhys. Lett.* **120** 54001
- [10] Wang Y, Zhao H G, Yang H B, Zhong J, Zhao D, Lu Z L, Wen J H 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 185109
- [11] Yang M, Chen S Y, Fuab C X, Sheng P 2017 *Mater. Horiz.* **4** 673
- [12] Jiang X, Liang B, Li R Q, Zou X Y, Yin L L, Cheng J C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 243505
- [13] Yang M, Sheng P 2017 *Annu. Rev. Mater. Res.* **47** 83
- [14] Zhu Y F, Fan X D, Liang B, Cheng J C, Jing Y 2017 *Phys. Rev. X* **7** 021034
- [15] Huang S B, Zhou Z L, Li D T, Liu T, Wang X, Zhu J, Li Y 2020 *Sci. Bull.* **65** 373
- [16] Zhu Y F, Donda K, Fan S W, Cao L Y, Assouar B 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 114002
- [17] Chen W Y, Wu F, Wen J H, Ju Z G, Yao L Y, Zhao H G, Wang Y, Xiao Y 2020 *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** 045503
- [18] Wu F, Xiao Y, Yu D L, Zhao H G, Wang Y, Wen J H 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 151901
- [19] Zhang H, Liang B, Zou X Y, Yang J, Cheng J C 2017 *Appl. Phys. Express* **10** 027201
- [20] Liu L, Chang H T, Zhang C, Hu X H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 083503

SPECIAL TOPIC—Metamaterials

Design of subwavelength broadband hybrid sound absorption structure based on micro-perforated plate and coiled channels*

Wu Fei¹⁾²⁾ Huang Wei²⁾ Chen Wen-Yuan²⁾ Xiao Yong¹⁾
Yu Dian-Long¹⁾ Wen Ji-Hong^{1)†}

1) (*Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Science and Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*College of Engineering and Technology, Southwest university, Chongqing 400715, China*)

(Received 12 March 2020; revised manuscript received 24 June 2020)

Abstract

In this paper, we propose a hybrid subwavelength broadband sound absorber based on micro perforated plate and multiple coiled channels. And the mechanism of low frequency broadband sound absorption of the hybrid sound absorber is analyzed in detail. Based on this, the theoretical analysis model and the finite element numerical analysis model are established, and the mutual verification of theoretical and numerical solutions is completed. The structure can theoretically achieve the low-frequency and high-efficiency sound absorption with an average absorption coefficient of 0.8 in a frequency band of 200–500 Hz when the overall thickness of the sound absorbing structure is 60 mm. At the same time when the overall thickness is 90 mm, quasi-perfect sound absorption with peaks up to 0.95 in a frequency range of 180–350 Hz is realized theoretically. The composite sound absorption structure has a certain application prospect in engineering low frequency noise in future.

Keywords: micro-perforated plate, coiled channels, hybrid sound absorber, low frequency sound absorption

PACS: 43.90.+v, 02.60.Cb, 02.60.Pn

DOI: [10.7498/aps.69.20200368](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200368)

* Project supported by China Postdoctoral Fund (Grant No. 2018M643827), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11702226), Central University Fund of China (Grant No. XDJK2020B020), and the Major Project of Natural Science Foundation (Grant Nos. 11991032, 11991034).

† Corresponding author. E-mail: wenjihong@vip.sina.com