

DOI: 10.7652/xjtuxb201912011

微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理

刘崇锐, 吴九汇
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统材料难以有效吸收低频噪声且带宽较窄的问题,提出了一种微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理,并设计了多元胞超表面结构,其中每个元胞由微穿孔板和折叠背腔组成。首先利用有限元仿真和理论公式计算单个元胞的吸声性能,并与传统亥姆霍兹共振器结构进行对比,发现该结构具有优异的高阶峰值,而且峰值带宽增加约 1 倍,基于此提出了实现低频和宽带的机理;然后分析了典型结构参数对吸声特性的影响规律,如吸声面积比、小孔直径及背腔深度等;最终通过多单元峰值间严格耦合,设计了由 8 个元胞组成的宽带吸声超表面。结果表明:吸声超表面厚度仅为 6 cm,在频段 550~2 500 Hz 范围内实现连续优异的吸声带宽,平均吸声系数高达 90% 以上。该结构具有厚度薄、频带宽且强度好等特点,在消声室、工厂和航空等场合具有广泛的应用前景。

关键词: 声学超表面;低频宽带吸声;微穿孔板;空间折叠

中图分类号: TB34;O424 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0080-07

Low-Frequency Broadband Absorption Mechanism of Micro-Perforated Lossy Metasurface

LIU Chongrui, WU Jiuhui
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at poor efficiency of the traditional materials in absorption of low-frequency sound and its narrow bandwidth, a low-frequency broadband absorption mechanism of the micro-perforated lossy metasurface is presented, and a multi-cell metasurface is designed, in which each cell is comprised of a micro-perforated panel and a coiled-up cavity. The absorption coefficient of a single cell is firstly calculated by finite element simulation and theoretical formulas. Compared with the traditional Helmholtz-resonator structures, the present metasurface structure can gain multiple excellent higher-order peaks besides the first peak, and each peak bandwidth is nearly doubled. Hence the mechanism is proposed to achieve low-frequency and wide-band absorption. The specific effects of the typical parameters on the absorption performance are then investigated, including absorption area ratio, hole diameter, cavity depth, and so on. By strictly coupling the peaks of the cells, an 8-cell metasurface is finally obtained. The results show that the metasurface can achieve continuous and excellent sound absorption in the range of 550-2 500 Hz with a deep-subwavelength thickness of only 6 cm, and the average absorption coefficient reaches above 90%. The proposed structure is characterized by the thin thickness, wide bandwidth and high strength, and it can be widely applied to the noise reduction of anechoic chambers, plants

and aircrafts.

Keywords: acoustic metasurface; low-frequency broadband sound absorption; micro-perforated panel; coiled-up space

低频噪声由于穿透力强、不易衰减的特点,已经成为日常生活中的重要污染之一,对人们的身心健康造成了严重的影响^[1]。由于低频噪声能量耗散率较低,传统的吸声材料难以有效吸收低频声波^[2-4]。

近年来,声学超材料^[5-6]的快速发展为解决低频噪声问题提供了新的途径,如薄膜型超材料^[7-11]、耦合共振型超材料^[12-13]和空间折叠型声学超材料^[14-21]等。其中,空间折叠型超材料凭借优异的低频特性、100%吸声、亚波长厚度及较好的强度等特点引起了众多研究人员的关注。Li 等首先提出了深度亚波长的空间折叠亥姆霍兹共振器结构^[16],其结构厚度为 12 mm,可在 125 Hz 处实现 100%吸声,厚度仅为相应波长的 1/223,但是由于共振特性的限制,其峰值带宽较窄,难以进行工程应用。

随后,不少学者通过采用多单元耦合的方式进行了宽带结构的设计,以基本单元 1/4 波长谐振腔和亥姆霍兹共振器(HR)为主。以谐振腔为基本单元,Hu 等设计了由 6 个单元组成的 18 cm 厚的折叠式结构^[17],可在 100~200 Hz 范围内实现连续优异吸声。以 HR 为基本单元,Zhao 等提出了简单可调的两单元耦合结构^[18],厚度为 2.8 cm 时在 230~330 Hz 范围内实现宽带吸声。但是,在以上工作中,吸声频带仅由各单元的一阶峰值组成。

在此基础上,Yang 等设计了 16 个单元的谐振腔结构^[19],引入了单元高阶峰值,其厚度为 10.36 cm 时可在 400~3 000 Hz 范围内获得 100%吸声频带。Liu 等提出了多阶 HR 吸声机理^[20-21],在保持 HR 结构原来一阶峰值不变的情况下,引入高阶峰值,进一步增加带宽,设计了多单元耦合结构,可在 4 00~2 800 Hz 范围内实现连续优异的宽带吸声。但是,在这些宽带结构中,HR 结构和谐振腔结构的单个峰值带宽依然较窄,当峰值数量一定时,总体吸声带宽也因此受限。

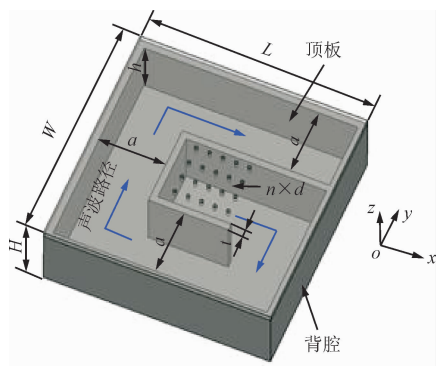
本文提出了一种微穿孔黏性超表面(MPL)结构,元胞由微穿孔板和折叠式背腔组成,相比于 HR 结构和谐振腔结构,不仅具有多阶的高吸声峰值,而且每个峰值具有更宽的带宽,因此多单元超表面结构就可以获得更宽的吸声频带。最终,通过峰值间的严格耦合,设计了厚度为 6 cm 的多单元超表面,可在 550~2 500 Hz 频率范围内实现连续优异的低

频宽带吸声,平均吸声系数高达 90%以上。

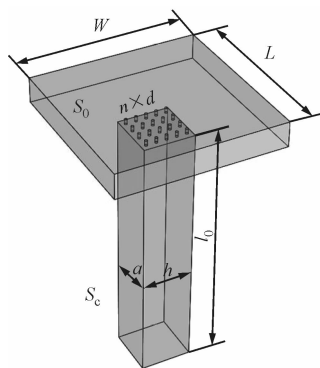
1 超表面低频宽带吸声机理

1.1 超表面元胞结构

MPL 元胞结构由顶板和折叠背腔组成,如图 1a 所示,总体尺寸 $W \times L \times H = 34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。顶板的厚度 $t_0 = 1 \text{ mm}$,中间部分是微穿孔板(10 mm×10 mm 范围内均匀分布有 $n = 20$ 个直径 $d = 0.6 \text{ mm}$ 的小孔)。为了使单元具有较低频率的吸声峰值,背腔采用折叠设计,声波路径的截面尺寸 $a \times h = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,中间隔板的厚度 $t = 1 \text{ mm}$ 。计算结构性能时,将结构中曲折声波路径拉直,等效成图 1b 中的简化结构,入射面积 $S_0 = WL$,路径长度为 $l_0 = 98 \text{ mm}$,路径截面积 $S_c = ah$,定义吸声面积比 $\eta = S_c/S_0$ 。



(a) 元胞结构三维视图



(b) 声学等效结构(空气域)

图 1 超表面元胞结构图

1.2 吸声系数计算

结构的吸声系数 α 由表面声阻抗率 Z_s 求得,即

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s/\rho_0 c_0 - 1}{Z_s/\rho_0 c_0 + 1} \right| \quad (1)$$

式中: $Z_s = Z_a/S_0$, Z_a 为结构表面声阻抗; ρ_0 和 c_0 分别为空气的密度和声速。结构表面声阻抗 Z_a 由微穿孔板阻抗 Z_h 和空腔阻抗 Z_c 组成, 即

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

微穿孔板阻抗 Z_h 可由欧拉方程计算得出^[2]

$$Z_h = \frac{j\omega\rho_0}{nS_h} \left\{ t_0 \left[1 - \frac{2B_1(\chi\sqrt{-j})}{(\chi\sqrt{-j})B_0(\chi\sqrt{-j})} \right]^{-1} + 0.85d \right\} + \frac{\sqrt{2}\mu\chi}{nS_h d} \quad (3)$$

式中: S_h 是单个小孔的面积; $\chi = d\sqrt{\rho_0\omega/4\mu}$ 是穿孔板常数; B_0 和 B_1 分别是 0 阶和 1 阶的第一类贝塞尔函数; μ 是空气的动力黏度系数。

折叠空腔的阻抗 Z_c 可由阻抗转移公式得到

$$Z_c \approx -jZ_0^e \cot(k_0^e l_0) \quad (4)$$

式中: $Z_0^e = \sqrt{\rho_0^e/C_0^e}$ 和 $k_0^e = \omega\sqrt{\rho_0^e/C_0^e}$ 分别是空腔内空气的有效特征阻抗和有效传递常数, 其中 ρ_0^e 和 C_0^e 分别是空气的有效密度和有效体积压缩系数, 可由下式求得

$$\rho_0^e = \rho_0 \frac{\nu a^2 h^2}{j4\omega} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_m^2 \beta_n^2 \left(\alpha_m^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega}{\nu} \right) \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (5)$$

$$C_0^e = \frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{j4\omega(\gamma-1)}{\nu a^2 h^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_m^2 \beta_n^2 \left(\alpha_m^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega\gamma}{\nu} \right) \right]^{-1} \right\} \quad (6)$$

其中 $\alpha_m = (m+1)\pi/a$ 和 $\beta_n = (n+1)\pi/h$ 是中间计算系数, $\nu = \mu/\rho_0$ 是空气的运动黏度, $\nu' = \kappa/\rho_0 C_v$, 其中 κ 是热传导率, C_v 是比定容热容, P_0 和 γ 分别是空气的压力和比热率。

为了验证理论公式的正确性, 利用商业有限元软件 COMSOL Multiphysics™ 5.2 中的热黏性模块建立了结构仿真模型, 在模型中充分考虑了狭窄区域内的黏性损失和热损失的影响。入射声波为平面波, 入射压力幅值为 1 Pa, 沿 z 轴负方向入射到结构表面。结构外侧的入射区域定义为压力声学域, 结构内部的空气定义为热黏性区域, 考虑到结构相对空气介质的刚度很大, 为简化计算空腔边界可设置绝对硬边界条件, 整个基本单元是周期性布置的, 因此在其 4 个边界上设置周期性边界条件。为了尽可能表征热黏性的影响, 网格划分时, 在小孔和空腔的边界处设置了 6 层边界层网格, 每层网格的厚度为总体黏性边界层厚度的 1/5。空气介质的参数:

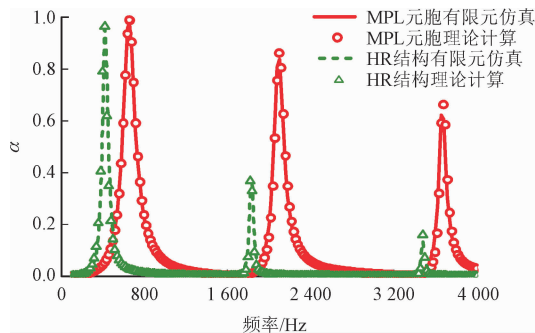
温度 $T = 293.15$ K, 密度 $\rho_0 = 1.21$ kg/m³, 声速 $c_0 = 343$ m/s, 声压 $P_0 = 101\,325$ Pa, 动力黏度 $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$ Pa·s, 热传导率 $\kappa = 0.0258$ W/(m·K), 比定容热容 $C_v = 718$ J/(kg·K), 比热率为 $\gamma = 1.4$ 。

1.3 低频宽带吸声机理

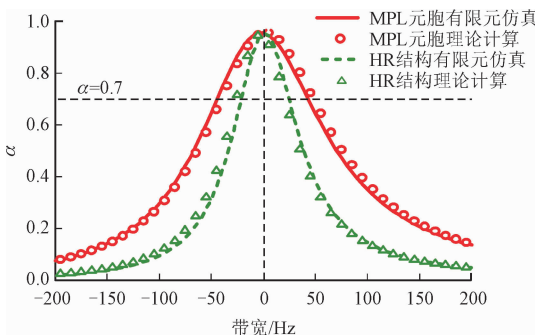
MPL 结构的吸声机理为共振吸声, 可以等效为质量弹簧系统, 背腔里的空气视为弹簧, 小孔内的空气为质量, 小孔壁产生的黏滞作用为声阻。当入射频率与共振频率一致时, 系统发生共振, 此时消耗能量最大, 产生吸声峰值; 当相对声阻为 1 时, 入射能量全部被吸收, 吸声系数达到 100%。

为了实现低频吸声, 将结构背腔进行折叠式设计, 增长声波传播路径, 降低其等效弹簧刚度, 最终使得峰值向低频移动。MPL 元胞吸声系数如图 2a 所示, 可以看到, 结构厚度为 12 mm 时, 在 650 Hz 左右实现 100% 吸声, 此时厚度仅为相应声波波长的 1/45 左右, 显示出优异的亚波长低频吸声能力。

对于该共振吸声超表面结构来说, 要实现更宽的频带, 主要有以下 3 种方式: 增加单个峰值带宽; 增加单元数量; 增加每个单元提供的峰值数量, 即引入高阶吸声峰值。由图 2a 可以看出, MPL 结构存在两个高阶峰值, 其峰值吸声分别达到了 90% 和 70% 左右。为了方便对比研究, HR 结构的吸声系数也在图 2a 中一同给出, 其中 HR 结构的小孔参数



(a) 吸声系数对比



(b) 带宽对比

图2 MPL元胞结构与HR结构吸声性能对比

为 $n \times d = 1 \times 1.5 \text{ mm}$, 其他参数与 MPL 结构一致。可以看出, HR 结构仅具有 1 个频率较低的高吸声峰值, 但其他两个高阶几乎可以忽略不计, 从宽带吸声的角度可知, MPL 结构显然更具有优势。为了更清晰地对比峰值带宽, 将两种结构的第 1 阶峰值放在一起, 如图 2b 所示, 两种结构在其峰值频率处均实现了几乎 100% 的吸声, 但是 MPL 结构的带宽为 92 Hz (吸声系数大于 0.7), 是 HR 结构带宽 (47 Hz) 的 2 倍左右。

由以上分析可知, 该元胞结构通过空间折叠设计实现结构的低频吸声; 通过增加单个峰值宽度和引入高阶峰值, 来初步实现元胞结构的宽带吸声。在此基础上, 通过耦合多个不同的单元, 引入更多的峰值, 就可以实现超表面结构的连续宽带吸声。

2 结构参数对吸声特性的影响

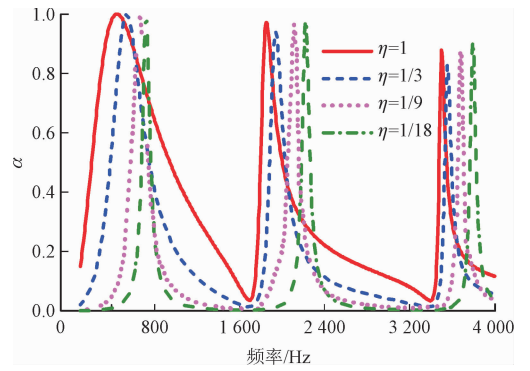
2.1 吸声面积比 η 的影响

如前面所述, 有效增加超表面结构吸声带宽的方法就是将多个具有不同峰值的单元进行耦合, 使得不同频率的峰值紧凑排列, 最终得到一个多峰吸声宽带。由图 1b 可以看出, 吸声面积比 η 越小, 在 S_0 入射面积内就可以布置更多不同的吸声单元, 从而获得更多的吸声峰值, 单元数量可以近似认为 $n_0 = 1/\eta$, 但是面积比的变化会影响峰值的吸声性能。

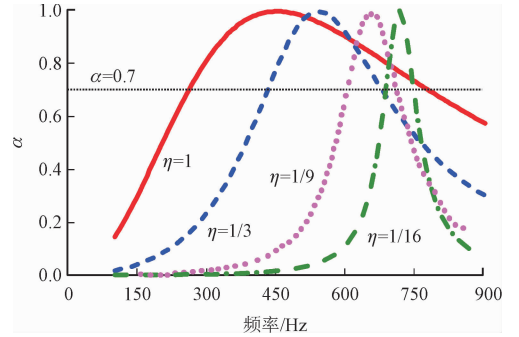
图 3a 研究了面积比 η 引起的吸声系数的变化 (面积比的变化是通过改变 S_0 实现的), 同时调节小孔直径 d , 使不同情况下的峰值都保持几乎 100% 吸声。从图中可以看出, 随着面积比的减小, 3 个峰值都逐渐向高频移动, 而且第 1 阶峰值的带宽明显减小, 其他峰值带宽变化不明显。图 3b 单独给出了第 1 阶峰值的具体变化, 从单个峰值看来, 随着 η 的减小, 其带宽 ΔB 从 480 Hz 减小到 75 Hz 左右, 不利于宽带吸声; 但从多单元结构来看, 虽然其单个峰值变窄了, 单元数量却是增加的, 因此最终的带宽 ($B = n_0 \Delta B$) 从 480 Hz 增加到 1 380 Hz。同时, 第 2 阶和第 3 阶峰值的带宽基本不变的特性更加有利于结构宽带的实现。另一方面, 峰值向高频移动的现象主要是在声阻满足阻抗匹配条件的过程中, 声质量在逐渐下降, 因此其峰值频率逐渐升高。

为了解释带宽和频率的变化, 将结构的阻抗进行简化, 只考虑小孔内的阻尼和热传导损失, 不考虑背腔的损失, 结构的相对阻抗率可以表示为

$$z_s = z'/\eta = (r' + j(\omega m' - \cot(\omega l_0/c_0)))/\eta \quad (7)$$



(a) 吸声系数变化



(b) 第 1 阶峰值变化

图 3 面积比 η 对结构吸声特性的影响

式中

$$r' = \frac{128\mu S_c}{n\rho_0 c_0 \pi d^4} k_r; \quad k_r = \sqrt{1 + \frac{\chi^2}{32} + \frac{\sqrt{2}}{32} \frac{\chi d}{t}} \quad (8)$$

$$m' = \frac{4S_c}{nc_0 \pi d^2} k_m; \quad k_m = 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \chi^2/2}} + \frac{\Delta t}{t} \quad (9)$$

因此, 吸声系数由下式求得

$$\alpha = \frac{4r'/\eta}{(1 + r'/\eta)^2 + (\omega m' - \cot(\omega l_0/c_0))^2/\eta^2} \quad (10)$$

根据余切近似, 便可得到峰值带宽和峰值频率的表达式

$$\Delta B = \frac{\sqrt{3/7}}{2\pi} \frac{1 + r'/\eta}{(m' + l_0/3c_0)/\eta} \quad (11)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{l_0}{c_0} \left(m' + \frac{l_0}{3c_0} \right) \right)^{-1/2} \quad (12)$$

在面积比 η 从 1 减小到 1/18 时, 为了使 $r'/\eta = 1$ 保持不变, 必须使 r' 成比例减小。根据式 (8), 在其他条件不变的情况下, 直径 d 便需要相应增大; 由式 (9), m' 会逐渐减小, 而 m'/η 逐渐增大。因此, 由式 (11) (12) 可知, 峰值带宽 ΔB 会逐渐变窄, 而峰值频率 f_0 向高频移动。

2.2 小孔直径 d 的影响

图 4 研究了不同的小孔直径对单个峰值带宽的具体影响,小孔的直径分别为 1.5、1.0、0.5 和 0.1 mm,小孔数量 n 需要随之调整,分别是 1、5、35 和 1 800(板厚 $t=0.1$ mm),其在 ah 的面积内的穿孔率分别为 1.8%、4%、6.9%和 14%。为了使峰值始终保持在 100%,小孔的穿孔率随着直径的减小而增大。由图 4 可以看到,随着小孔直径 d 减小,峰值带宽可以显著增加,而峰值频率向高频移动。这是因为随着 d 减小, n 不断增大,从而保持声阻不变。由式(9)可知,此时 m' 逐渐减小,因此其峰值带宽 ΔB 逐渐增大,而峰值频率 f_0 向高频移动。需要注意的是,当小孔直径 $d=0.1$ mm 时,单纯地增加小孔的数量不能满足阻抗匹配条件,同时还需要将板厚降低至 $t=0.1$ mm,但是这种参数配置会增大加工难度,同时降低结构的承载强度,一定程度上限制了其工程应用。

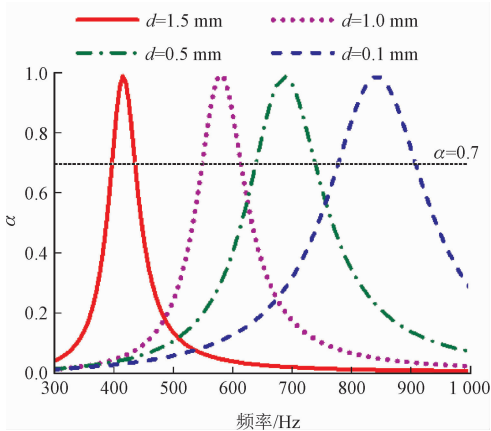


图 4 小孔直径 d 对吸声特性的影响

2.3 背腔深度 l_0 的影响

图 5 为背腔深度 l_0 对吸声特性的影响,其深度分别为 60、100、150 和 200 mm。从图中可以看到,随着背腔深度的增加,吸声峰值向低频移动,这主要是因为背腔的等效刚度在逐渐减弱,在等效质量基本不变的情况下,其共振频率逐渐降低,式(12)也可以解释这种现象。特别的是,随着峰值向低频移动,更多的高阶峰值出现在目标频率范围以内,当深度为 200 mm 时,结构具有 5 个吸声峰值,这对于拓宽结构吸声频带非常重要。

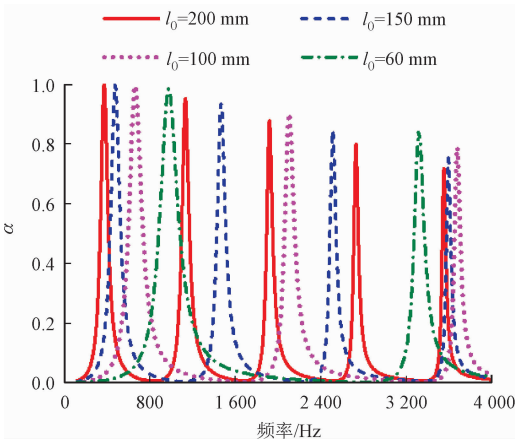


图 5 背腔深度 l_0 对吸声特性的影响

多个严格耦合的吸声峰值组成的连续吸声宽带。通过严格的参数设计,最终得到超表面基本单元,如图 6 所示,单元基本外形尺寸 $W_1 \times L_1 \times H_1=23$ mm $\times 45$ mm $\times 60$ mm,含有 8 个不同的吸声元胞,其横截面面积为 10 mm $\times 10$ mm,微穿孔板厚度为 1 mm,具体元胞结构参数见表 1。

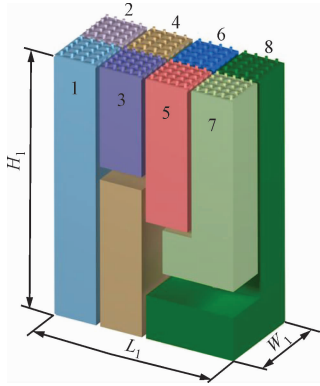


图 6 超表面单元三维结构图

表 1 元胞的具体结构参数

单元	l_0/mm	n/mm	d/mm
1	70	20	0.6
2	42	25	0.6
3	23	25	0.6
4	95	20	0.6
5	33	25	0.6
6	17	25	0.6
7	51	20	0.6
8	120	20	0.6

3 宽带吸声超表面

为了实现连续宽带吸声,设计了一种多单元的微穿孔黏性吸声超表面,在保证元胞峰值带宽和某些高阶峰值的基础上,增加不同单元的数量,获得由

超表面结构的吸声系数如图 7 所示。该结构在低频 550~2 500 Hz 范围内具有一个连续的超宽吸声频带,平均吸声系数在 90%以上,其中理论计算和有限元仿真的结果吻合较好,验证了计算方法的

正确性。通过尽可能增加单个峰值的带宽,最终该结构通过 10 个几乎 100% 的吸声峰值,实现了约 2 000 Hz 的吸声宽带,其中第 7 和第 9 个峰值是 8 号和 4 号元胞的 2 阶吸声峰值,可以看到,引入 2 阶吸声峰值的将吸声频带拓宽了 400 Hz 左右,对于实现宽带吸声具有重要意义。

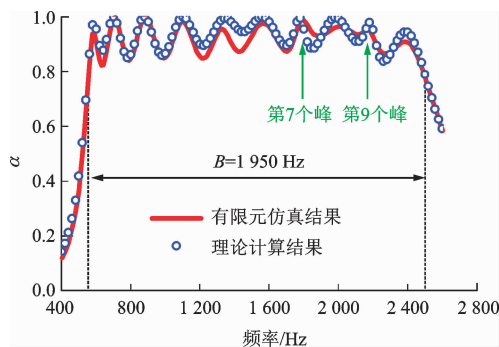


图 7 超表面单元吸声系数

4 结 论

本文研究了微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理,并设计了相应的宽频吸声超表面结构,其在 550~2 500 Hz 范围内具有 90% 以上的平均吸声系数,而其厚度仅为 60 mm,显示出深度亚波长的吸声能力。该结构具有频带宽、厚度薄、强度好、环境友好且适应性强等特点,在消声室、工厂、汽车和航空工业都具有非常好的应用前景和潜力。

(1)提出了微穿孔黏性超表面的元胞结构,利用理论和有限仿真的方法计算吸声系数并与亥姆霍兹共振器结构进行对比,发现该结构具有更宽的带宽和更多的吸声峰值,在此基础上研究其低频宽带吸声机理。

(2)增加背腔的深度是实现吸声峰值向低频移动的最有效的办法,其次减少元胞的数量(即增加吸声面积比)和增大小孔直径也可在一定程度上降低吸声峰值频率。

(3)增加不同元胞的数量可以获得更多的吸声峰值,显著增加吸声带宽;其次减小小孔直径可以在一定程度上增加单个峰值的带宽,增加背腔深度可以在不减小单个带宽的情况下,增加峰值数量,最终皆可使得频带加宽。

(4)降低峰值频率和增加吸声带宽有时是矛盾的,需要结合具体的应用指标来协调结构参数,最终通过严格耦合设计,使得所有峰值均匀分布,便可得到满意的连续吸声频带。

参考文献:

- [1] HAMMER M S, SWINBURN T K, NEITZEL R L. Environmental noise pollution in the United States: developing an effective public health response [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(2): 115-119.
- [2] MAA D Y. Potential of microperforated panel absorber [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 104(5): 2861-2866.
- [3] FUCHS H V, ZHA X Q. Micro-perforated structures as sound absorbers-A review and outlook [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2006, 92(1): 139-146.
- [4] GUAN D, WU J H, WU J L, et al. Acoustic performance of aluminum foams with semiopen cells [J]. *Applied Acoustics*, 2015, 87: 103-108.
- [5] 吴九汇, 马富银, 张思文, 等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(13): 68-78.
WU Jiuhui, MA Fuyin, ZHANG Siwen, et al. Application of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13): 68-78.
- [6] CUMMER S A, CHRISTENSEN J, ALÙ A. Controlling sound with acoustic metamaterials [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(3): 16001.
- [7] YANG Z, MEI J, YANG M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 204301.
- [8] MEI J, MA G C, YANG M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 756.
- [9] MA G C, YANG M, XIAO S W, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 873-878.
- [10] LIU C R, WU J H, LU K, et al. Acoustical siphon effect for reducing the thickness in membrane-type metamaterials with low-frequency broadband absorption [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 148: 1-8.
- [11] MA F Y, HUANG M, WU J H. Acoustic metamaterials with synergetic coupling [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(21): 215102.
- [12] LONG H Y, CHENG Y, TAO J C, et al. Perfect absorption of low-frequency sound waves by critically coupled subwavelength resonant system [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(2): 023502.
- [13] LI J F, WANG W Q, XIE Y B, et al. A sound absorbing metasurface with coupled resonators [J]. *Ap-*

- plied Physics Letters, 2016, 109(9): 091908.
- [14] MA F Y, CHEN J Y, WU J H. Three-dimensional acoustic sub-diffraction focusing by coiled metamaterials with strong absorption [J]. Journal of Materials Chemistry: C, 2019, 7(17): 5131-5138.
- [15] GUAN D, WU J H, JING L, et al. Application of a Helmholtz structure for low frequency noise reduction [J]. Noise Control Engineering Journal, 2015, 63(1): 20-35.
- [16] LI Y, ASSOUAR B M. Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(6): 063502.
- [17] ZHANG C, HU X H. Three-dimensional single-port labyrinthine acoustic metamaterial: perfect absorption with large bandwidth and tunability [J]. Physical Review Applied, 2016, 6(6): 064025.
- [18] WANG Y, ZHAO H G, YANG H B, et al. A tunable sound-absorbing metamaterial based on coiled-up space [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(18): 185109.
- [19] YANG M, CHEN S Y, FU C X, et al. Optimal sound-absorbing structures [J]. Materials Horizons, 2017, 4(4): 673-680.
- [20] LIU C R, WU J H, CHEN X, et al. A thin low-frequency broadband metasurface with multi-order sound absorption [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2019, 52(10): 105302.
- [21] LIU C R, WU J H, MA F Y, et al. A thin multi-order Helmholtz metamaterial with perfect broadband acoustic absorption [J]. Applied Physics Express, 2019, 12(8): 084002.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 62 页)

- [14] GANGSAR P, TIWARI R. Taxonomy of induction-motor mechanical-fault based on time-domain vibration signals by multiclass SVM classifiers [J]. Intelligent Industrial Systems, 2016, 2(3): 269-281.
- [15] ZIANI R, FELKAOU A, ZEGADI R. Bearing fault diagnosis using multiclass support vector machines with binary particle swarm optimization and regularized Fisher's criterion [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(2): 405-417.
- [16] LEI Y G, HE Z J, ZI Y Y, et al. New clustering algorithm-based fault diagnosis using compensation distance evaluation technique [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2008, 22(2): 419-435.
- [17] 王国威, 常春, 曾锐利, 等. 基于 LMD 和模糊 C 均值聚类算法的发动机连杆轴承故障诊断 [J]. 军事交通学院学报, 2014, 16(9): 31-35.
- WANG Guowei, CHANG Chun, ZENG Ruili, et al. Fault diagnosis of connecting rod bearing based on LMD and fuzzy C mean clustering algorithm [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2014, 16(9): 31-35.
- [18] 张立国, 康乐, 金梅, 等. 一种基于 EEMD-SVD 和 FCM 的轴承故障诊断方法 [J]. 计量学报, 2016, 37(1): 67-70.
- ZHANG Liguang, KANG Le, JIN Mei, et al. A bearing fault diagnosis method based on EEMD-SVD and FCM clustering [J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(1): 67-70.
- [19] 张玲玲, 任金成, 封会娟, 等. 基于对称极坐标方法和图像识别的柴油机曲轴轴承故障诊断 [J]. 内燃机工程, 2015, 36(4): 144-149.
- ZHANG Lingling, REN Jincheng, FENG Huijuan, et al. Diagnosis of diesel engine crankshaft bearing fault based on symmetric polar coordinates and image recognition [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(4): 144-149.
- [20] 张威, 肖云魁. 基于小波包-模糊 C 均值聚类算法诊断曲轴轴承故障 [J]. 军事交通学院学报, 2009, 11(2): 45-46.
- ZHANG Wei, XIAO Yunkui, et al. Diagnosing crankshaft bearing fault based on the wavelet packet-fuzzy C mean clustering arithmetic [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2009, 11(2): 45-46.

(编辑 刘杨)