

阶梯型微缝超表面低频宽带吸声特性

刘红星^{1,2}, 吴九汇^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对目前低频宽带吸声及通风吸声效果较差的问题, 提出了两种嵌套型阶梯微缝超表面。设计了阶梯型微缝吸声单元, 获得了较传统微缝吸声体更优的低频吸声效果; 将通风孔引入到阶梯型微缝单元中构建了通风型吸声单元, 在保证吸声性能的同时拥有了新的通风效果; 提出了一种嵌套式并联方式, 不仅能有效扩展吸声带宽, 还能克服传统并联方式表面积随单元数量线性增加的问题, 有效降低并联结构的吸声表面积; 结合阶梯型微缝单元和嵌套式并联方式, 设计了两种低频宽带吸声超表面。结果表明: 以 16 个单元嵌套形成的厚度仅为 70 mm 的超表面能实现 600~1 600 Hz 的吸声效果; 以 8 个单元嵌套形成的厚度为 39.1 mm 的超表面不仅能实现 470~657 Hz 的吸声效果, 还能获得较好的通风性能。这两种超表面具有结构紧凑、吸声带宽大、尺寸小且兼具通风的特点, 在实际中具有广泛的应用前景。

关键词: 声学超表面; 吸声; 微缝板; 嵌套式结构

中图分类号: O422.4; TB34 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202109008 **文章编号:** 0253-987X(2021)09-0071-09



OSID 码

Low Frequency Broadband Sound Absorption Characteristics of Stepped Micro-Slit Metasurface

LIU Hongxing^{1,2}, WU Jiuhui^{1,2}

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

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem of low frequency broadband sound absorption and ventilation, two kinds of nested stepped micro-slit metasurfaces are proposed. Firstly, a stepped micro-slit sound absorption unit is designed, which can obtain lower frequency sound absorption than traditional micro-slit absorber. Secondly, a ventilation hole is introduced into the stepped micro-slit unit to construct a ventilated unit, and it can achieve ventilation effect while ensuring the sound absorption performance in a certain frequency range. Thirdly, a nested parallel method is proposed, which can not only effectively broaden the sound absorption bandwidth, but also overcome the problem that the surface area of the traditional parallel structure increases linearly with the number of units, thus can make the nested structure has a smaller surface area. Finally, two metasurfaces, sound-absorbing type and ventilated type, are designed using the micro-slit units with the nested parallel method. The results show that the sound-absorbing type metasurface can achieve sound absorption from 600 Hz to 1 600 Hz with a thickness of only 70

mm formed by nesting 16 elements, while the ventilated type metasurface formed by nesting 8 units with a thickness of 39.1 mm can achieve sound absorption from 470 to 657 Hz and possess ventilation performance. These two kinds of micro-slit sound absorption metasurfaces can achieve low frequency broadband sound absorption with small size, and have promising applications in engineering practice.

Keywords: acoustic metasurface; sound absorption; micro-slit absorber; nested structure

噪声充斥在人们的日常生活和工作中。为了减少噪声的干扰,人们研究了多种方法,而利用吸声材料是最简单也是最常采用的一种。传统吸声材料对于中、高频段内的噪声有明显的抑制效果,但是对于大波长低频噪声的作用却很有限。声学超材料^[1]是近年来发展起来的一种能够以亚波长尺寸实现声波控制的人工功能材料,它在吸声^[2]、异常折射^[3]、全反射^[4]、声拓扑^[5]、声隐身^[6]等领域展现出了传统结构无法比拟的优势。其中,吸声型超材料受到了大量学者的关注,并已开发了多种结构形式,如赫姆赫兹共振腔型^[7-8]、薄膜质量块型^[9-11]和迷宫型^[12-15]等。这些结构对于低频噪声确实起到了前所未有的吸收效果,但它们也存在带宽窄、结构易损坏、尺寸大等问题,仍需进一步改进提升。

同时,吸声场合需要通风是实际应用中经常面临的问题,而普通的吸声结构为了实现良好的吸声通常采用密闭结构而避免声波向外透射。这也就导致了普通吸声结构是以牺牲空气流通为代价的,通风和吸声两个功能很难在一个结构中兼顾。随着声学超材料的发展,通风型吸声结构^[16-19]让二者同时实现成为了可能。文献[18]提出了6个迷宫单元组合结构,能实现400~1 400 Hz的吸声和通风,但是吸声系数只有0.5。文献[19]提出了一种超大通风孔的结构,能同时实现95%高效吸声和通风风速比达到80%以上的效果,但对于500 Hz以下声波,它的结构厚度几乎超过15 cm。对于共振型通风吸声结构,要想获得低频宽带高效吸声,所存在的结构尺寸大、吸声带宽窄及吸声效率低等问题仍需解决。

宽带吸声是吸声的另一个焦点问题,采用阻尼结构^[20-21]和多单元并联^[22-23]是最常采用的方案。在结构中使用阻尼结构,例如橡胶等,能够实现增大带宽的目的,然而要想获得令人满意的带宽,阻尼材料的性能仍需进一步改善。多单元并联结构是将多个具有连续吸声峰值的单元并联设置,通过单元之间的耦合在目标吸声频段内形成宽带。文献[22]利用6个单元的并联可以实现228~319 Hz的低频宽带吸声,且每个单元的结构尺寸较大;文献[24]利用

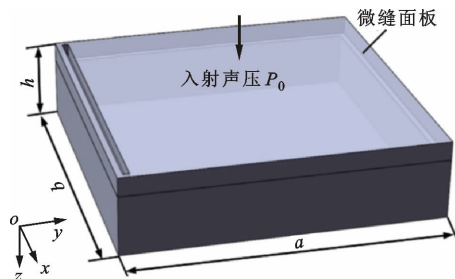
16个单元的并联,实现了400~3 000 Hz的宽带吸声。这种多单元并联必然带来吸声面板面积随单元数线性增加,致使结构表面阻抗变化,多单元耦合效果变差,吸声系数降低;同时,过大的面板面积也为实际应用带来了困难。

本文提出了一种阶梯型微缝吸声单元,能实现较传统微缝吸声体更低频的吸声效果。在此基础上,引入了允许空气流通的通风道,形成了通风型微缝吸声单元。通过理论和软件仿真对它们的吸声机理进行了研究,并将参数变化对吸声效果的影响进行了分析。为了拓宽吸声带宽,提出了嵌套式多单元并联耦合的方式,不仅能实现多单元并联拓宽带宽的目的,还能产生抑制总面板面积随单元数线性增加的效果。最终,设计了两种嵌套式微缝型宽带吸声超表面,不仅能实现宽带吸声的效果,还能满足通风的需求,为实际应用提供了新的思路和方法。

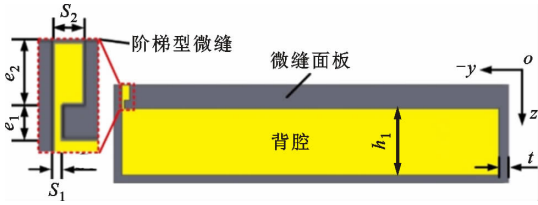
1 阶梯型微缝吸声单元

1.1 阶梯型微缝吸声单元结构

微缝型微缝吸声单元由含有阶梯型微缝的吸声面板和背腔组成,阶梯型微缝吸声单元结构如图1a所示,长 a 为50 mm,宽 b 为50 mm,高 h 为10.5 mm。图1b是单元结构在 $y-z$ 平面的剖面图。可以看出,吸声面板布置在背腔顶部,且在它的边缘布置了一个阶梯型微缝。上、下层微缝的宽度 s_2 、 s_1 分别为1、0.35 mm,深度 e_2 、 e_1 分别为2、1 mm;背腔厚度 h_1 为8.5 mm,背腔壁厚 t 为1 mm。当入射声波 P_0 沿 z 方向入射到顶部的吸声面板时,可沿着设计的阶梯型微缝进入到背腔中,形成共振完美吸声。



(a) 单元三维结构图



(b)单元 \$y-z\$ 平面剖面图

图1 阶梯型微缝吸声单元结构

Fig. 1 Structure of the stepped micro-slit unit

1.2 吸声系数计算

结构的吸声系数可以通过阻抗理论计算得到

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

式中: \$Z_s\$ 为结构表面的声阻抗率; \$Z_0 = \rho_0 c_0\$ 为空气的特性阻抗; \$\rho_0\$ 和 \$c_0\$ 分别为空气密度和声速。

对于阶梯型微缝吸声单元, 它的表面声阻抗率受吸声面板阻抗率 \$Z_p\$ 和背腔阻抗率 \$Z_c\$ 的影响, 关系如下

$$Z_s = Z_p + \lambda_1 Z_c \quad (2)$$

式中: 修正系数 \$\lambda_1 = S_0/S_1\$, 而 \$S_1\$、\$S_0\$ 分别为背腔的截面积和整个单元结构的截面积, \$S_1 = (a-2t)(b-2t)\$, \$S_0 = ab\$。

吸声面板的声阻抗率是由串联的阶梯型微缝所决定的, 因此 \$Z_p = Z_2 + \lambda_2 Z_1\$, \$Z_1\$ 和 \$Z_2\$ 分别为下层和上层微缝在入口处的声阻抗率。\$\lambda_2\$ 是下层微缝截面积和面板的面积比, \$\lambda_2 = S_0/S_3\$, 而 \$S_3 = S_1 b\$。

对于微缝的阻抗率 \$Z_1\$ 和 \$Z_2\$, 依据文献[25]可以得到

$$Z_i = \frac{1}{\sigma \rho_0 c_0} \left\{ j\omega \rho_0 g \left[1 - \frac{1}{k\sqrt{j}} \tanh(k\sqrt{j}) \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2\omega \rho_0 \eta}}{2} + j\omega \rho_0 \frac{dF(e)}{2} \right\}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中: \$\omega\$ 是角频率; \$g\$ 是微缝面板的厚度; \$\sigma\$ 为微缝在面板中的填充率; \$k = (d/2) \sqrt{\omega \rho_0 / \eta}\$, \$\eta\$ 为动态黏度; \$F(e)\$ 为全椭圆积分。

对于背腔, 它的表面声阻抗率可以由下式求得

$$Z_c = -j \sqrt{\rho^{eq}/C^{eq}} \cot(\omega \sqrt{\rho^{eq}/C^{eq}} h_1) \quad (4)$$

式中: \$\rho^{eq}\$ 和 \$C^{eq}\$ 分别为空气的有效密度和有效体积压缩系数, 可以由下式求得[38]

$$\rho^{eq} = \rho_0 \frac{v L_i^2 W_0^2}{4j\omega} \left\{ \sum_{\kappa=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_{\kappa}^2 \beta_n^2 \left(\alpha_{\kappa}^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega}{v} \right) \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (5a)$$

$$C^{eq} =$$

$$\frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{4j\omega(\gamma-1)}{v' L_i^2 W_0^2} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_{\kappa}^2 \beta_n^2 \left(\alpha_{\kappa}^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega}{v} \right) \right]^{-1} \right\}$$

$$(5b)$$

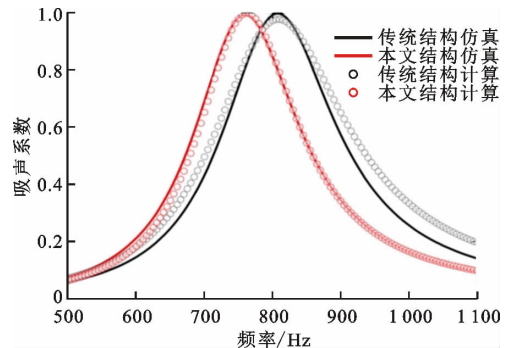
式中: 中间计算系数 \$\alpha_{\kappa} = (\kappa+1/2)\pi/(a-2t)\$, \$\beta_n = (\kappa+1/2)\pi/(b-2t)\$; \$v = \mu/\rho_0\$ 为空气的运动黏度, \$v' = \kappa/(\rho_0 C_v)\$ 为空气黏度; \$\kappa\$ 和 \$C_v\$ 分别为热传导率和比定容热容; \$P_0\$ 和 \$\gamma\$ 分别为空气的压力和比热率。

为了对理论计算结果进行验证, 利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5.3 的热声耦合模块对所设计的阶梯型微缝吸声单元进行仿真。采用 1 Pa 的平面波垂直入射到阶梯型微缝吸声单元的面板上; 由于结构所用材料和空气的阻抗差别特别大, 结构边界处均采用硬声场边界; 为了反映热黏性损失, 微缝和背腔处均采用了 6 层边界层网格, 每层网格的厚度为 \$d_v/4\$, 而 \$d_v = \sqrt{2\eta/\rho_0 \omega}\$ 为边界层的厚度。在仿真过程中, 所采用的其他空气参数是: 密度 \$\rho_0 = 1.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}\$, 声速 \$c_0 = 343 \text{ m/s}\$, 动态黏度 \$\eta = 1.814 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}\$, 空气温度 \$T = 293.15 \text{ K}\$, 热传导率 \$\kappa = 0.0258 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\$ 等。

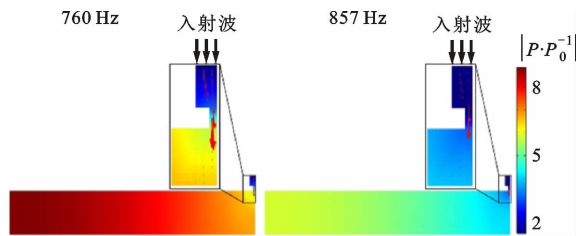
1.3 吸声机理

为了体现阶梯微缝吸声单元优良的低频吸声特性, 选择了具有相同外观尺寸和面板厚度的传统微缝吸声体作为对比。同时, 为了保证传统吸声单元获得近乎完美的吸声效果, 微缝宽度选为 0.45 mm。利用理论方法和软件仿真分别对两种结构的吸声系数进行了计算, 结果如图 2a 所示。从图 2a 中可以看出, 理论和仿真结果吻合较好, 传统微缝吸声体的吸声峰值在 810 Hz 取得, 而阶梯型微缝吸声单元在 760 Hz 处获得吸声峰值, 向低频移动了 50 Hz。可见, 阶梯型微缝单元具有更加优秀的低频吸声性能。

为了深入了解阶梯型微缝吸声单元的吸声机理, 分别计算了吸声峰值 (760 Hz) 和吸声系数为 0.5 (857 Hz) 处的声压和声场速度分布, 如图 2b 所示, 图 2b 中的插图 of 阶梯型微缝处的局部放大图。其中, 声压场分布由相对声压 \$|P \cdot P_0^{-1}|\$ 来表示, \$P_0\$ 为入射声压; 速度场分布由红色箭头来指示, 箭头方



(a) 传统微缝吸声体和阶梯型微缝吸声单元吸声系数对比



(b) 760 Hz 和 857 Hz 对应的阶梯型微缝吸声单元的声压及速度场分布

图2 阶梯型微缝吸声单元吸声效果及吸声机理

Fig. 2 Sound absorption performance and mechanism of the stepped micro-slit unit

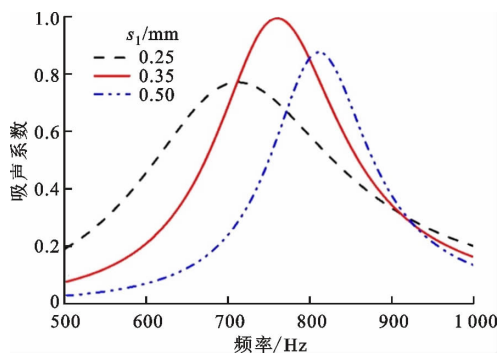
向和长度分别代表了声速的方向和大小。可以看出,在 760 Hz 处,结构的最大相对声压在背腔末端取得,幅值达到了入射声压的 9 倍。也就是说,阶梯型微缝的上、下端存在显著的声压差,这将驱动空气粒子快速流动,速度最大可达到 0.67 m/s,同时,快速流动的空气粒子和阶梯型微缝壁面之间产生强烈摩擦耗能而实现吸声。在 857 Hz 处,背腔中最大声压只有入射声压的 5.7 倍左右,在微缝处的最大速度也只有 0.41 m/s,速度的明显降低将导致摩擦耗能下降,吸声系数也只达到 0.5。

1.4 结构参数对吸声效果影响

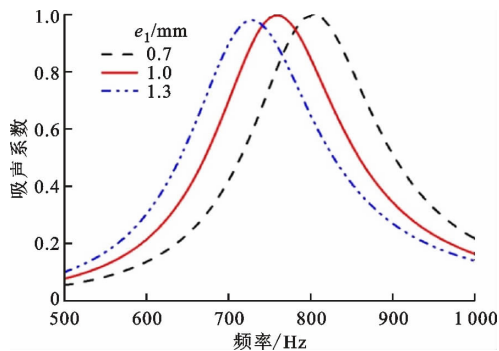
阶梯型微缝吸声单元的主要参数包括下层微缝宽度 s_1 和深度 e_1 、上层微缝宽度 s_2 和深度 e_2 以及背腔厚度 h_1 。下面将分别讨论对吸声效果的影响。

首先,分析了下层微缝宽度 s_1 对吸声效果的影响,如图 3a 所示。当 s_1 从 0.25 mm 增大到 0.5 mm 时,吸声峰值逐步向高频移动,但它的吸声系数先增大再减小。这意味着, s_1 的取值需要合理选择,太大或太小均将导致吸声效果变差。这主要是由于 s_1 对结构声阻的影响特别大, s_1 过大会导致声阻较小,空气流入过程摩擦耗能较低,吸声效果变差; s_1 过小会导致声阻较大,使结构阻抗过大,和空气阻抗难以匹配,声波难以进入到结构中实现吸声。下层微缝深度 e_1 变化对吸声效果的影响如图 3b 所示,可以看出随着 e_1 从 0.7 mm 向 1.3 mm 增大,它的吸声峰值向低频移动,但吸声系数变化不大。

图 4 给出了上层微缝参数变化对吸声系数的影响。对于上层微缝宽度对吸声效果的影响如图 4a 所示,当 s_2 从 0.7 mm 增大到 1.3 mm 时,吸声峰值逐步向高频移动,但吸声幅值变化相对较小。当 e_2 从 2 mm 增大至 18 mm 时,吸声峰值向低频移动较多,但是吸声带宽也明显降低,如图 4b 所示。



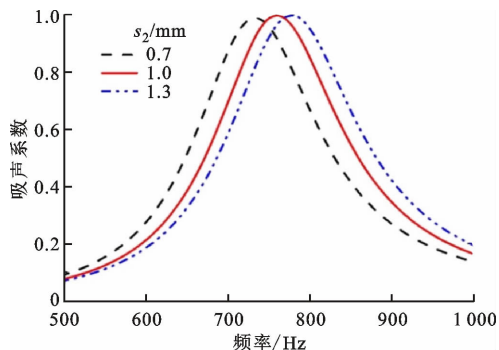
(a) 下层微缝宽度 s_1 变化对吸声效果影响



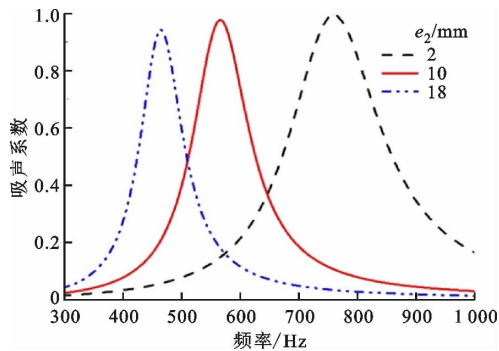
(b) 下层微缝深度 e_1 变化对吸声效果影响

图3 下层微缝参数变化对吸声系数的影响

Fig. 3 Sound absorption coefficient of the stepped micro-slit unit with different parameters



(a) 上层微缝宽度 s_2 变化对吸声效果影响



(b) 上层微缝深度 e_2 变化对吸声效果影响

图4 上层微缝参数变化对吸声系数的影响

Fig. 4 Sound absorption coefficient of the stepped micro-slit unit with different parameters

背腔厚度 h_1 对吸声效果也有较大的影响,如图 5 所示。当 h_1 从 5 mm 增大到 12 mm 时,吸声峰值向低频偏移较大,但吸声系数并未降低。利用增大背腔厚度可以将吸声频带向低频移动,但厚度增大在实际应用是不利的,因此在设计中应当根据实际需要谨慎选择厚度大小。

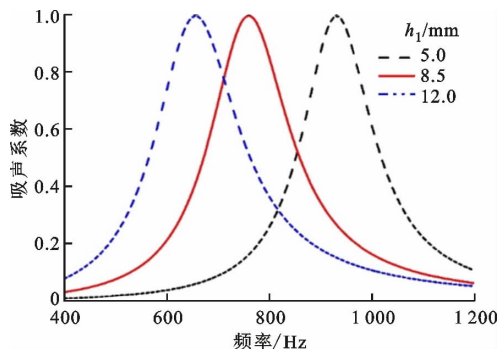


图 5 背腔厚度变化对吸声系数的影响

Fig. 5 Sound absorption coefficient of the stepped micro-slit unit with different h_1 values

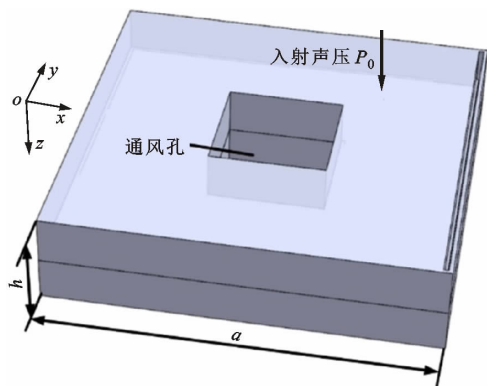
通过以上参数分析可以看出,下层微缝宽度 s_1 对吸声效果的影响最大,其次是上层微缝的深度 e_2 。因此可以将它们作为吸声效果调控的主要参数,背腔厚度 h_1 等作为调控的辅助手段。通过多参数的有机调控,便可以获得所需频段的微缝吸声单元。

2 通风型吸声单元

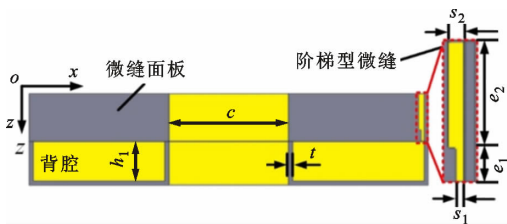
2.1 通风型吸声单元结构及吸声机理

在前面阶梯型微缝吸声单元的研究基础上,为了实现通风功能构建了一个通风型吸声单元,结构如图 6a 所示,图 6b 为 z - x 平面的剖面图。通过在阶梯型微缝吸声单元的中心增设一个供空气流通的通道而形成。结构总尺寸为长 $a=100$ mm,宽 $b=100$ mm,高 $h=28$ mm,上、下层微缝的宽度 s_2 、 s_1 分别为 1.3、0.7 mm,深度 e_2 、 e_1 分别为 9、3 mm;背腔的厚度 $h_1=15$ mm,背腔的壁厚 $t=1$ mm。对比图 6 和图 1 可以看出,通风型吸声单元和阶梯型微缝吸声单元结构非常类似,只是在结构中心增加了一个 c 为 30 mm 的正方形通风道。然而,结构的差异却使吸声能力发生了较大的变化。当声波 P_0 沿 z 方向入射到通风吸声结构上表面后,一部分声波进入到了微缝结构内部产生耗能吸声,另一部分声波会透过通风道产生透射声。对通风型吸声单元的吸声系数进行了计算,结果如图 6c 所示。可以看出,通风型吸声单元能够在 310~325 Hz 的频率范围内实现良好的吸声(吸声系数大于 0.8),而它的厚度

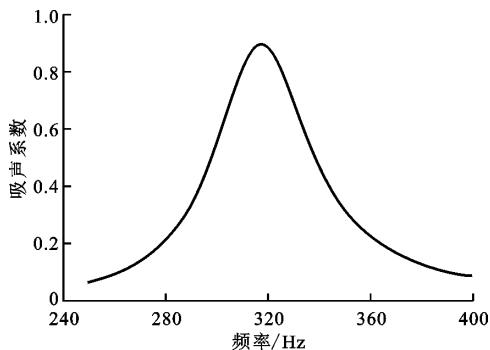
只有 28 mm,仅为对应最小波长的 1/40 (310 Hz)。同时,由于开孔的存在能够允许空气流通,实现通风效果。因此,这种结构能同时实现亚波长吸声及通风的效果。



(a) 单元三维结构图



(b) 单元 z - x 平面剖面图



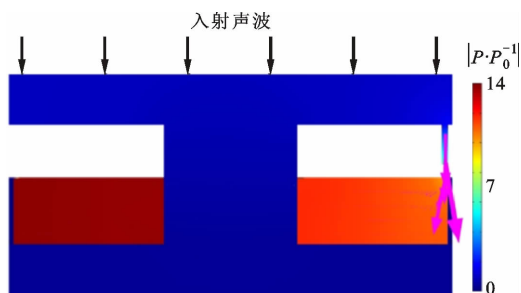
(c) 单元结构吸声系数

图 6 通风型微缝吸声单元结构及吸声系数图

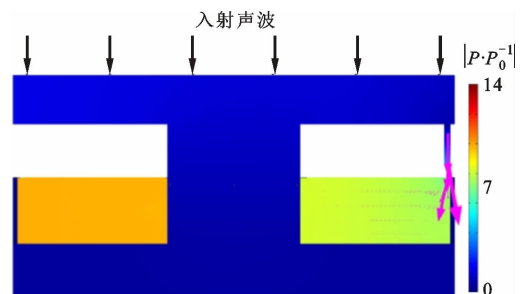
Fig. 6 Structure of the ventilated stepped micro-slit unit and its sound absorption coefficient

同样利用软件仿真对于平面波垂直入射到通风型微缝吸声单元表面时的声压场及速度场进行了计算,并将在共振频率(318 Hz)和非共振频率(338 Hz)的分布情况进行了对比,如图 7 所示。可以看出,在共振频率 318 Hz 时,声波入射到通风型吸声单元表面时,一部分声波直接透过了通风孔;另一部分则通过阶梯型微缝进入背腔内,在腔内形成共振,腔内相对声压绝对值急剧增大,最高处可达入射声压的 13.8 倍。腔体内、外存在的较大声压差将对腔

体外部的空气粒子产生明显的虹吸效果。当声波从较宽的入射面进入阶梯型微缝的上微缝时,由于缝隙缩小空气粒子的流速发生明显增大,继而流入下层微缝时对空气粒子形成了二次加速,最大速度达到了 0.68 m/s 。快速流动的空气粒子和微缝壁面产生了明显的摩擦耗能,从而实现了很好的吸声效果。对比非共振频率 338 Hz ,腔体中的相对声压绝对值的最大值只为入射声压的 9.8 倍,下层微缝处的空气粒子的速度仍然最大,却也只有 0.53 m/s ,这直接导致了空气粒子和微缝壁面的摩擦损耗明显降低,吸声效果变弱。



(a) 共振频率为 318 Hz



(b) 共振频率为 338 Hz

图7 通风型吸声单元在不同频率下的声压及速度场分布

Fig. 7 Intensity maps of the acoustic pressure and velocity at different frequencies

2.2 结构参数对吸声效果的影响

由于通风型吸声单元是在阶梯型微缝吸声单元基础上构建的,因此结构参数对吸声效果的影响较为类似,此处不再讨论,只对新添加的通风孔尺寸 c 变化对吸声系数的影响进行分析。当 c 分别为 10 、 30 和 50 mm 时,通风孔尺寸大小对吸声系数的影响如图8所示。当 c 为 10 mm 时,可以在 309 Hz 处实现近乎完美的吸声效果,但随着 c 持续增大至 50 mm 时,共振频率也逐步向高频移动至 340 Hz ,而对应的吸声系数却明显降低直至 0.68 。这主要是由于随着通风孔尺寸的增加,透射效果将显著增强。因此在实现过程中通风和吸声这两个功能需要

考虑实际需求,尽可能平衡它们之间的关系,确定合理的通风孔尺寸。

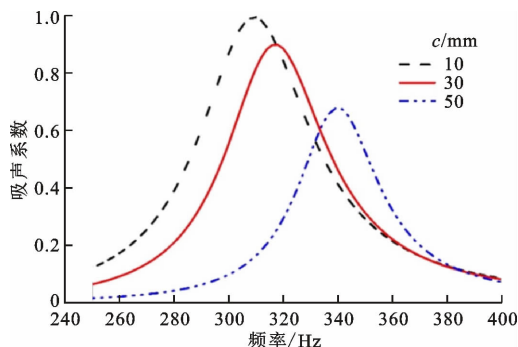


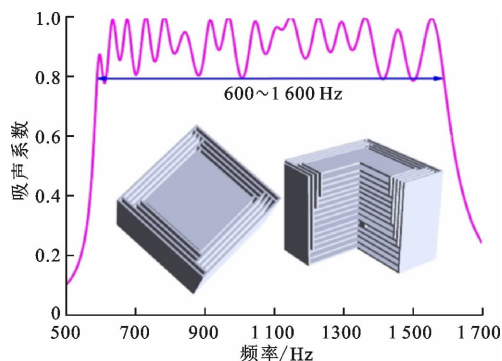
图8 通风孔尺寸大小对吸声系数的影响

Fig. 8 Sound absorption coefficient of the ventilated stepped micro-slit unit with different c values

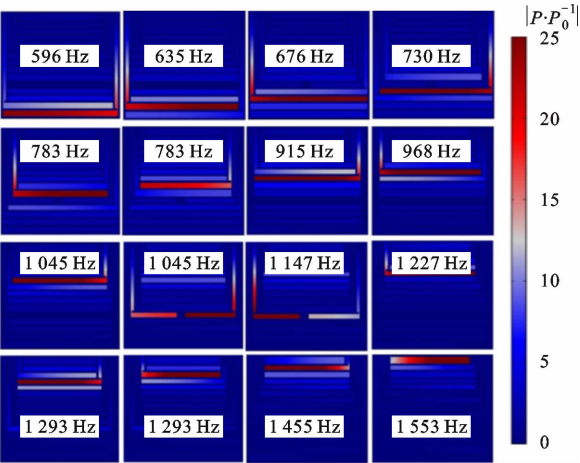
3 嵌套式宽带吸声超表面

3.1 宽带微缝吸声超表面

对于阶梯型微缝吸声单元,虽然具有很好的低频吸声效果,但依然未能摆脱共振结构带宽较窄的问题。为了实现宽带吸声,在对阶梯型微缝吸声单元参数研究的基础上,通过将 16 个具有不同参数的阶梯型微缝吸声单元并联,形成了一种嵌套式多单元并联结构,通过下层单元的上顶面作为上层单元的下底面,层层嵌套包围而成。同时,在对各阶梯型微缝吸声单元上层微缝高度调节后,保证并联单元最终形成一个平面。整个结构形成一个便于应用的长方体,尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$,如图9所示。通过软件仿真,得到了宽带微缝吸声超表面的吸声系数,如图9a所示。可以看出,通过 16 个单元并联耦合,嵌套式结构能在 $600 \sim 1600 \text{ Hz}$ 的宽频范围内实现较好的吸声效果,而每个吸声峰值正好对应了一个微缝单元的共振,如图9b所示。



(a) 微缝型吸声超表面结构及吸声效果



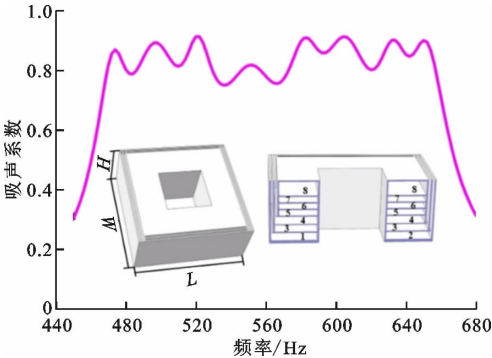
(b)微缝型吸声超表面各共振频率处声压分布
图 9 嵌套式微缝吸声超表面吸声效果

Fig. 9 Sound absorption performance of the nested micro-slit metasurface

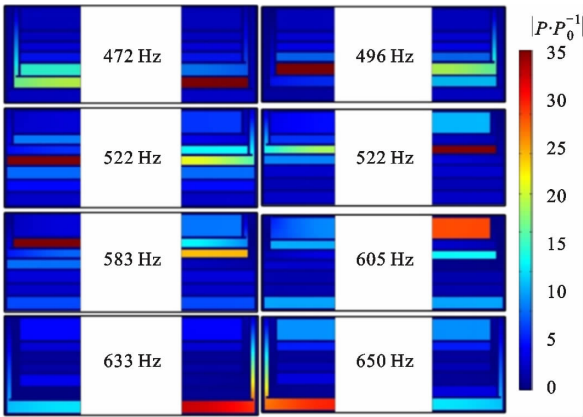
3.2 宽带通风吸声超表面

在对通风型吸声单元研究的基础上,为了扩展吸声带宽,同样采用嵌套式多单元耦合的方式来实现。设计了 8 单元嵌套式通风吸声超表面,结构如图 10a 所示。当声波入射到结构面板时,各个单元可以依据不同尺寸的上层微缝将声波导入,并通过下层微缝进入到背腔中,在所需的频率实现共振。8 个单元中间的通风孔尺寸相同,且连成一个整体,实现结构的通风需要。通过设计,便可让各并联单元的共振频率连续分布,实现宽带吸声。本文优化后的 8 单元嵌套式通风吸声超表面结构参数为:长 $L=100\text{ mm}$,宽 $W=100\text{ mm}$,高 $H=39.1\text{ mm}$ 。图 10a 为通风吸声超表面结构利用软件仿真得到的吸声效果图。从图 10 中可以看出,所设计结构能在 $470\sim657\text{ Hz}$ 的频率范围内实现较好吸声。所对应的各共振频率处的声压分布如图 10b 所示。

通过前面两种嵌套式吸声超表面设计,可以看出嵌套式并联结构能获得优良的宽带吸声效果,且



(a)通风吸声超表面结构及吸声效果



(b)通风吸声超表面各共振频率处声压分布

图 10 嵌套式微缝通风吸声超表面吸声效果

Fig. 10 Sound absorption performance of the ventilated metasurface

吸声面板尺寸小,结构紧凑。对比传统的并联吸声结构,吸声面板尺寸会随着单元数线性增加,而嵌套式并联结构吸声总面板尺寸随着单元数略有增加,这为更多单元并联形成大宽带吸声结构提供了新的思路。在现有的基础上,可以通过增加并联单元数实现吸声带宽的进一步扩大。然而,单元数也不能无限增加,单元数的增加必将导致吸声面板尺寸的增加而降低吸声系数。所以,单元数的选择应综合考虑结构表面阻抗率的变化情况。

4 结 论

本文以阶梯型微缝吸声单元和通风型吸声单元为研究对象,通过对吸声机理研究设计了两种采用嵌套式多单元耦合方式构建的宽带微缝吸声超表面。一种可以在 $600\sim1\,600\text{ Hz}$ 的范围内实现宽带吸声,另一种不仅能在 $470\sim657\text{ Hz}$ 的范围内实现吸声,还具有良好的通风效果。

(1)提出了一种具有低频吸声效果的阶梯型微缝吸声单元,能利用阶梯型微缝有效引导低频声波进入刚性背腔,并通过摩擦耗能实现吸声。和相同外形尺寸的传统微缝吸声体相比,阶梯型微缝吸声单元具有更好的低频吸声效果。

(2)在阶梯型微缝吸声单元的基础上,通过增加通风孔设计了一种通风型吸声单元,不仅能实现低频吸声,同时兼具通风效果。

(3)提出了嵌套式多单元并联耦合方式,和传统并联结构的面板尺寸随单元数量线性增加相比,嵌套式多单元并联结构面板尺寸随单元数量增加非常有限,有助于实现多单元大宽带吸声结构,且结构紧

凑,便于实际应用。

(4)所提出的嵌套式宽带结构,有助于实现办公场所内的通风降噪。同时,可根据实际需求,通过调整结构参数实现如汽车、旋转设备等应用场景的降噪。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] LIU X J, ZENG X W, GAO D B, et al. Experimental realization for abnormal reflection caused by an acoustic metasurface with subwavelength apertures [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2017, 50(12): 125303.
- [4] ZHAI S L, DING C L, CHEN H J, et al. Anomalous manipulation of acoustic wavefront with an ultrathin planar metasurface [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2016, 138(4): 041019.
- [5] XUE H, GE Y, SUN H X, et al. Observation of an acoustic octupole topological insulator [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2442.
- [6] JI W Q, WEI Q, ZHU X F, et al. 3D acoustic metasurface carpet cloak based on groove structure units [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2019, 52: 325302.
- [7] MA F Y, CHEN J Y, WU J H. Time-delayed acoustic sink for extreme sub-wavelength focusing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 141: 106492.
- [8] TANG Y F, XIN F X, HUANG L X, et al. Deep subwavelength acoustic metamaterial for low-frequency sound absorption [J]. Europhysics Letters, 2017, 118: 44002.
- [9] 吴晓, 刘崇锐, 王珂, 等. 声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 122-127.
WU Xiao, LIU Chongrui, WANG Ke, et al. Low-frequency broadband synergistic coupling mechanism of acoustic metamaterials with high efficiency absorption [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 122-127.
- [10] 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.
- [11] YANG M, MENG C, FU C X, et al. Subwavelength total acoustic absorption with degenerate resonators [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107: 104104.
- [12] 刘波涛, 刘崇锐, 吴九汇, 等. 低频大宽带声学超结构的多阶共振高效吸声机理 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 149-156.
LIU Botao, LIU Chongrui, WU Jiuhui, et al. Multi-order resonance and high-efficiency sound absorption mechanism of low-frequency large-band acoustic metamaterials [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(8): 149-156.
- [13] ZHAO H G, WANG Y, YU D L, et al. A double porosity material for low frequency sound absorption [J]. Composite Structures, 2020, 239: 111978.
- [14] 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 metasurface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 80-86.
- [15] 侯明明, 吴九汇. 迷宫型声学超表面可调参数及其全相位调节 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(5): 29-37.
HOU Mingming, WU Jiuhui. Tunable parameters of labyrinth acoustic metasurface and all-phase regulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(5): 29-37.
- [16] YANG J, LEE J S, LEE H R, et al. Slow-wave metamaterial open panels for efficient reduction of low-frequency sound transmission [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(9): 091901.
- [17] KUMAR S, LEE H P. Labyrinthine acoustic meta-structures enabling broadband sound absorption and ventilation [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116: 134103.
- [18] DUPONT T, LECLAIRE P, PANNETON R, et al. A microstructure material design for low frequency sound absorption [J]. Applied Acoustics, 2018, 136: 86-93.

[19] XIANG X, WU X X, LI X, et al. Ultra-open ventilated metamaterial absorbers for sound-silencing applications in environment with free air flows [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 39: 100786.

[20] LI J Q, FAN X L, LI F M. Numerical and experimental study of a sandwich-like metamaterial plate for vibration suppression [J]. *Composite Structures*, 2020, 238: 111969.

[21] LIU H X, WU J H. Viscoelastic multi-resonator mechanism for broadening low-frequency band-gap of acoustic metamaterials [J]. *The European Physical Journal: Applied Physics*, 2019, 86(1): 10901.

[22] ZHAO H G, WANG Y, YU D L, et al. A double porosity material for low frequency sound absorption [J]. *Composite Structures*, 2020, 239: 111978.

[23] LONG H Y, SHAO C, LIU C, et al. Broadband near-perfect absorption of low-frequency sound by subwavelength metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(10): 103503.

[24] YANG M, CHEN S, FU C, et al. Optimal sound-absorbing structures [J]. *Materials Horizons*, 2017, 141(5): 3575-3575.

[25] 马大猷. 微缝吸声体理论 [J]. *声学学报*, 2000, 25: 481-485.

MA Dayou. Theory of microslit absorbers [J]. *Acta Acustica*, 2000, 25: 481-485.

等效参数. 2021, 55(1): 1-9. [doi:10. 7652/xjtuxb202101001]

夏博阳, 邵卫东, 李军. 三维间断伽辽金玻尔兹曼方法的完全匹配层吸收边界条件研究. 2020, 54(7): 113-120. [doi:10. 7652/xjtuxb202007014]

刘波涛, 张海龙, 王轲, 等. 声学黑洞轻质超结构的低频宽带高效隔声机理及实验研究. 2019, 53(10): 128-134. [doi:10. 7652/xjtuxb201910018]

史尧臣, 陈国平, 李占国, 等. 三轮一带传动系统噪声仿真与试验验证. 2019, 53(8): 76-81. [doi:10. 7652/xjtuxb201908010]

张俊, 陈卫华, 任树伟, 等. 迷宫型声学超表面可调参数及其全相位调节. 2018, 52(1): 29-37. [doi:10. 7652/xjtuxb201801021]

邵卫东, 李志刚, 李军. 二维时间发展混合层噪声的直接数值模拟. 2017, 51(1): 38-44. [doi:10. 7652/xjtuxb201701007]

包振忠, 秦国良, 耿艳辉, 等. 谱元法应用于涡声传播问题的研究. 2016, 50(11): 110-114. [doi:10. 7652/xjtuxb201611017]

邵卫东, 李军. 计算气动声学中的伽辽金玻尔兹曼方法研究. 2016, 50(3): 134-140. [doi:10. 7652/xjtuxb201603021]

方源, 章桐, 陈霏霏, 等. 电动车噪声品质心理声学主客观评价模型. 2015, 49(8): 97-101. [doi:10. 7652/xjtuxb201508016]

侯明明, 吴九汇, 姜宁. 旋转封闭薄壁球壳辐射噪声的多极展开方法. 2014, 48(7): 102-108. [doi:10. 7652/xjtuxb201407018]

张哲, 王小鹏, 陈天宁, 等. 适用于高温阻抗管的修正传递函数法. 2014, 48(5): 118-122. [doi:10. 7652/xjtuxb201405021]

[本刊相关文献链接]

徐宜才, 吴九汇. 非对称声学超材料的各向异性反射特性及

(编辑 武红江)