

◇ 研究报告 ◇

内置谐振器的轻薄宽频吸声器结构设计与分析*

李贺铭 吴锦武[†] 兰晓乾 孙海航

(南昌航空大学飞行器工程学院 南昌 330063)

摘要: 微穿孔板吸声器的吸声频带相较于亥姆霍兹谐振器更宽,但其低频吸声的实现需要较大的空气背腔,难以应用在空间有限的场合。该文设计了一种轻薄吸声降噪结构(内置亥姆霍兹谐振器的微穿孔板吸声器,简称MPPHR),将微穿孔板吸声器与亥姆霍兹谐振器进行了结合,提升吸声器的低频吸声性能的同时兼具了微穿孔板宽带吸声的优点。首先基于微穿孔板和亥姆霍兹谐振理论建立了等效电路模型并计算了结构的声阻抗。然后通过有限元对MPPHR的吸声特性进行了参数研究。最后验证了MPPHR的声阻抗模型和有限元仿真的准确性。研究结果表明:MPPHR结构拥有更宽吸声频带,厚度仅为30 mm的MPPHR的半吸收频带可达1294 Hz,相较于同等厚度下的微穿孔板吸声器宽约500 Hz。此外,MPPHR拥有更好的低频吸声效率。

关键词: 微穿孔板;亥姆霍兹谐振器;宽频吸声

中图法分类号: TN132

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2024)02-0359-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.02.014

Structural design and analysis of thin broadband absorber with built-in resonator

LI Heming WU Jinwu LAN Xiaoqian SUN Haihang

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Micro-perforated panel (MPP) sound absorber has a wider absorption band compared to Helmholtz resonator (HR), but its low-frequency sound absorption implementation requires a larger air back cavity, it is difficult to apply in space-limited environments. A thin type of noise reduction sound absorber that combines MPP with HR (MPPHR) is designed in this paper, which not only improves the low-frequency sound absorption performance, but also has the advantages of wide-band sound absorption of MPP. Firstly, based on the theory of MPP and Helmholtz resonator, the equivalent circuit model is established and the acoustic impedance of the structure is calculated. Then, the MPPHR sound absorption characteristics were analyzed by finite elements method. Finally, the acoustic impedance model and the finite element simulation results of MPPHR were verified through experiments. The results show that the MPPHR absorber has a wider absorption band. The MPPHR with a thickness of 30 mm have a half absorption band of up to 1294 Hz, which is nearly 500 Hz wider than the equal thickness MPP. In addition, the MPPHR has better low-frequency absorption efficiency.

Keywords: Micro-perforated panel; Helmholtz resonator; Broadband frequency sound absorption

2022-10-31 收稿; 2022-12-25 定稿

*国家自然科学基金项目(51965041), 南昌航空大学创新基金项目(YC2021-053)

作者简介: 李贺铭(1997-), 男, 河南汝南人, 硕士研究生, 研究方向: 结构振动与声控制。

[†]通信作者 E-mail: wujinwu@nchu.edu.cn

0 引言

自马大猷教授提出微穿孔板 (Micro-perforated panel, MPP) 吸声结构及其理论以来^[1], MPP 吸声降噪结构在国内外得到了广泛的关注与研究。而亥姆霍兹谐振器 (Helmholtz resonator, HR) 是最有效的低频噪声被动控制结构之一, 但单个 HR 的吸声带宽太窄, 很大程度限制了其应用。尽管 MPP 相较于 HR^[2] 拥有更宽的吸收带宽, 但仍不足以应对复杂噪声, 且其低频声吸收也存在困难。

为解决以上问题, 许多学者提出了解决方案。在 MPP 的背腔内置其他结构是一种常见的方法^[3-8], 例如: 邢拓等^[3] 提出一种背腔内置板形声超材料的 MPP 吸声结构, 通过改变内置的板型声超材料参数可实现对低频声波的调控, 该结构是解决低频吸声问题的一种新颖的手段。类似地, 陈亮等^[4] 将微穿孔的聚氨酯薄膜置于 MPP 结构的背腔中, 通过改变聚氨酯微孔薄膜的流阻也实现了更好的低频吸声性能。相似地, Sakagami 等^[5] 将多孔介质层置于 MPP 背腔中, 发现吸声器的吸收频率范围可更宽, 但吸收峰有所降低。然而这种效应取决于多孔层的声阻抗率。张慧杰等^[6] 提出的一种聚脂钎纤维板、铝纤维板和 MPP 的复合吸声结构也是一种改善低频吸声性能的一种方法。吴飞等^[7] 提出了一种组合式 MPP, 利用折叠背腔和内置穿孔隔板减小了结构厚度, 并提升了结构的低频宽带的吸声性能。Park^[8] 把 HR 置于 MPP 结构后腔中, 结果表明: 该结构兼具 HR 低频吸声以及 MPP 中高频宽带吸声的优点, 拥有更好的宽带低频吸声效果。但在背腔后连接一个谐振器会增加结构厚度, 不便于在空间有限制的场合应用。

另一方面, 将 MPP 结构与 HR 谐振结构、薄膜等结构并联或采用多通道的 HR 阵列结构也是一种实现宽带低频吸声的有效手段^[9-13]。Gai 等^[9] 将 MPP 与薄膜并联结合, 研究结果表明: 带有薄膜单元的 MPP 比普通 MPP 可提供更宽的吸声频带。此外 Gai 等^[10] 还将 MPP 与 HR 进行了并联结合, 研究发现: 将单个或多个 HR 与 MPP 并联可获得两个及更多吸收峰, 此种结构可提升吸声器的吸收带宽和低频的吸声性能。值得注意的是, 并联结构会涉及背腔空间体积分配问题, 背腔相对大小如何影响结构的吸声特性有待研究。Mahesh 等^[11] 从理论上

对 MPP 与 HR 串联和并联形式的吸声结构进行了研究, 其中并联相较于串联可在改善低频吸声性能的同时有效减少吸声结构的厚度, 但其未对此进行实验验证。Ren 等^[12] 提出了一种多个 HR 结构并联组合的轻薄声学超结构用于准完美的低频宽带吸声, 且结构厚度仅为 30 mm。Zhu 等^[13] 设计了一种多层重叠 HR 吸声结构用于低频宽带吸声, 研究表明该结构在低频拥有较好的吸声性能, 通过增加重叠的 HR 数量可产生更多吸收峰。

由于结构谐振单元之间的不同程度耦合效应, 结构的吸声特性并不能按照原参数下的各个单元的吸声性能进行匹配叠加。因此, 优化算法常被应用到设计中, 例如: Palani 等^[14] 设计了带穿孔隔板的微穿孔宽带吸声结构, 通过优化后获得了较宽频率范围内的高效吸声。Yan 等^[15] 设计了一种具有不同空气背腔深度的 MPP 吸声器并对其进行了优化设计也获得了较宽频率范围内的高效吸声。

此外, 可调吸声频率结构由于能够灵活应对复杂变化的噪声环境, 也是一种实现宽频吸声的新颖方法, 例如: Yan 等^[16]、Zhang 等^[17] 提出了机械可调吸声频率的蜂窝 MPP 吸声降噪结构, 此类吸声器对于复杂的噪声环境有较好的适应能力, 可有目标地针对相应频率噪声进行吸收。

本文设计了一种内置谐振器的轻薄宽频吸声降噪结构, 将 MPP 吸声结构与 HR 进行了结合 (简称 MPPHR), 目的在于解决宽带低频吸声问题。首先通过 MPP 和 HR 理论模型对吸声器的吸声性能进行了预测。然后利用有限元进行了参数研究, 讨论了 MPPHR 在不同结构参数下的吸声性能, 探索了背腔空间体积分配对结构吸声特性的影响。最后, 对理论模型和有限元的预测进行了验证。结果表明: 该吸声结构拥有更宽的吸声频带和优秀的低频吸声效率, 且具有轻薄和丰富可调谐自由的优势。后续将多个不同参数的 MPPHR 吸声单元阵列成蜂窝结构并进行优化可获得更佳的吸声性能。

1 MPPHR 吸声器结构与声阻抗模型

1.1 结构设计模型

在圆柱型蜂窝微穿孔板结构的单元基础上, 在空气背腔内部引入渐变截面隔板, 并对穿孔板特定区域进行加厚打孔处理即本文提出的 MPP 与 HR 组合的吸声结构: MPPHR。其截面视图如图 1 所示。

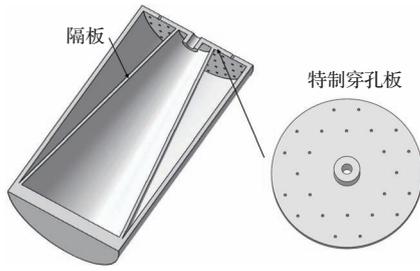


图1 MPPHR吸声器截面视图

Fig. 1 Cross-section views of MPPHR sound absorbers

1.2 声阻抗模型

MPP的声阻抗可表示为

$$Z_{MPP} = r + j\omega m, \quad (1)$$

式(1)中, r 和 m 分别为声阻和声质量^[1], 可表示为

$$r = \frac{32\mu t}{\sigma c d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{xd\sqrt{2}}{8t} \right), \quad (2)$$

$$m = \frac{t}{\sigma c} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + x^2/2}} + 0.85 \frac{d}{t} \right), \quad (3)$$

其中, $x = d/2\sqrt{\omega/\delta}$ 为穿孔板常数, σ 为MPP的穿孔率, d 为MPP的孔直径, t 为MPP的厚度, $c = 343 \text{ m/s}$ 为声速, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, $\mu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 为15 °C下空气的运动黏滞系数。

深度或等效深度为 D 的空气背腔的相对声抗率可表示为

$$Z_D = -j \cot(\omega D/c), \quad (4)$$

式(4)中, $D = V_2/a_2$ 为MPP吸声单元的等效背腔深度。在本文中, 它表示为MPP结构对应的空气背腔体积与相应MPP面积的比值。

单层MPP吸声器的声阻抗可写为

$$Z_{MPA} = Z_{MPP} + Z_D = r + j(\omega m - \cot(\omega D/c)). \quad (5)$$

HR的声阻抗定义如下:

$$Z_{HR} = p_0/v_{HR}. \quad (6)$$

考虑将谐振器视为一个集总参数系统后, 则颈部的声质量可视为一个可移动的质量块。颈部空气与颈部壁面的黏性作用可视为阻尼, 而共振器的较大的空腔可视为一个弹簧。谐振器可视为一个具有单自由度的质量-弹簧-阻尼系统。在外部声压激励下, 颈部空气的速度 v_{HR} 通过式(7)计算:

$$\left(j\omega m_{HR} + c_{HR} + \frac{k_{HR}}{j\omega} \right) v_{HR} = S_{HR} p_0, \quad (7)$$

其中, p_0 表示为外部的压力激励, S_{HR} 为颈部的横截面积, m_{HR} 、 c_{HR} 和 k_{HR} 分别为颈部内的空气质量, 由HR内的空气体积导致的刚度和由于空气与壁面的黏滞效应产生的阻尼^[18], 它们可分别表示为

$$m_{HR} = \rho_0 S_{HR} L_e, \quad (8)$$

$$c_{HR} = 2m_{HR} \zeta_{HR} \omega_{HR}, \quad (9)$$

$$k_{HR} = \frac{\rho_0 c_0^2 S_{HR}^2}{V_{HR}}, \quad (10)$$

其中, $S_{HR} = \pi(d_t/2)^2$ 为穿孔板颈部的横截面积; $L_e = L + L_\sigma$ 为修正后的颈部长度, L 为颈部长度, L_σ 为颈部长度修正项; $\zeta_{HR} = 1/\sqrt{2\omega\delta\rho}$ 为黏滞系数; $\omega_{HR} = \sqrt{S_{HR}/V_{HR}L_e}$ 为谐振器自然频率。

HR相对声阻抗率可通过式(11)计算:

$$Z_{SHR} = \frac{Z_{HR} S}{\rho_0 c_0}, \quad (11)$$

其中, $S = \pi[(r_2 + r_3)/2]^2$ 为等效空腔截面积, Z_{HR} 为HR相对声阻抗, Z_{SHR} 为相对声阻抗率。

MPPHR吸声结构的相对声阻抗率可通过式(12)计算:

$$Z_{total} = \frac{(Z_{MPP} + Z_D) Z_{SHR}}{Z_{MPP} + Z_D + Z_{SHR}}. \quad (12)$$

声波垂直入射时, 结构的吸声系数可通过式(13)计算:

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z_{total})}{[1 + \text{Re}(Z_{total})]^2 + [\text{Im}(Z_{total})]^2}. \quad (13)$$

MPPHR吸声器和特制MPP的结构参数如图2所示。值得注意的是, θ 表示隔板与垂直方向的夹角, 当 $\theta > 0$ 且隔板底半径与圆柱半径相同时, 隔板为倾斜; 当隔板底半径小于圆柱半径且 $\theta = 0$ 时, 隔板为垂直。结构参数注释如表1所示。MPPHR结构声阻抗等效电路如图3所示。

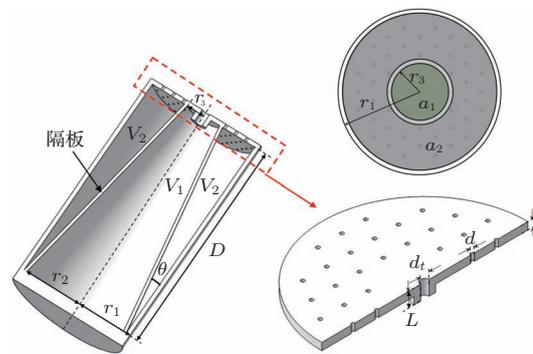


图2 MPPHR吸声器和特制MPP示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MPPHR absorber and customized perforated panel

表1 MPPHR结构参数注释

Table 1 MPPHR structural parameters annotation

腔体参数	注释	穿孔板参数	注释
r_1/mm	圆柱型背腔半径	d_t/mm	颈部穿孔直径
r_2/mm	隔板底半径	L/mm	颈部长度
r_3/mm	隔板顶半径	d/mm	微穿孔直径
D/mm	空气背腔高度	t/mm	微孔板厚度
V_1	单个穿孔HR区域对应的体积	a_1	单个穿孔HR区域面积
V_2	微穿孔区域MPP对应的体积	a_2	微穿孔MPP区域面积

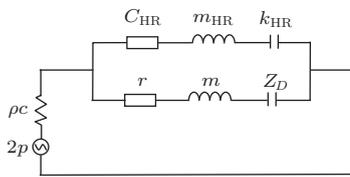


图3 阻抗等效电路

Fig. 3 Impedance equivalent circuits of MPPHR

HR与MPP理论模型吸声曲线如图4所示。HR和MPP模型各有一个特征明显的吸收峰；HR模型吸收峰较窄但在低频有很高的吸声效率，MPP模型吸收峰较宽但低频吸声效率较差。MPPHR模型通过引入隔板将HR与MPP并联结合，兼具两种结构模型的优点。同时与等厚度MPP模型相比，有更宽的吸声频带。其中，等效腔深MPP模型表示MPPHR中背腔深度为 $D = V_2/a_2$ 的MPP吸声组元， $D = V_2/a_2$ 表示MPPHR结构中MPP组元对应的空气背腔体积与相应MPP面积的比值。等厚度MPP模型表示为相同背腔深度和MPP参数下，无隔板的常规MPP吸声结构。

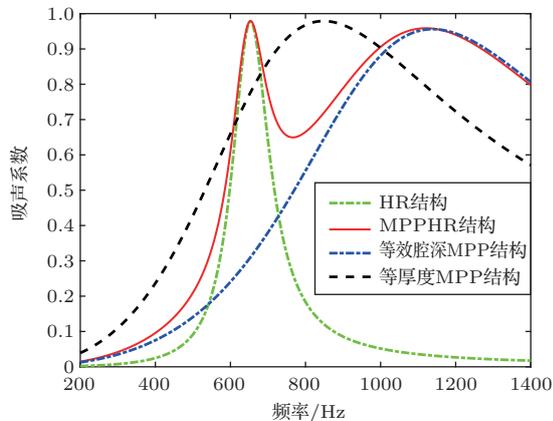


图4 MPP、HR和MPPHR吸声特性

Fig. 4 The sound absorption characteristics of MPP, HR and MPPHR

2 有限元仿真参数研究

本节利用多物理场有限元软件压力声学、狭窄区域声学和内置的MPP阻抗边界条件对如图5所示的MPPHR吸声单元进行了有限元分析与参数研究。首先验证了理论和有限元模型的准确性，结果如图6所示，实验结果与理论和有限元仿真结果取得了良好一致性，验证了有限元仿真预测结果的有效性。为了简化分析，MPPHR有限元分析模型的部分参数被设为常数，如下： $D = 50 \text{ mm}$ ， $t = 1 \text{ mm}$ ， $d = 0.5 \text{ mm}$ ， $\sigma = 1\%$ 。

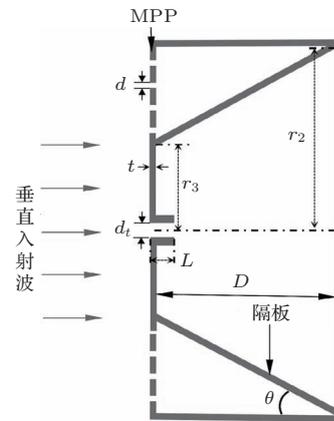


图5 MPPHR倾斜隔板吸声器示意图

Fig. 5 Schematic diagram of MPPHR with inclined partition

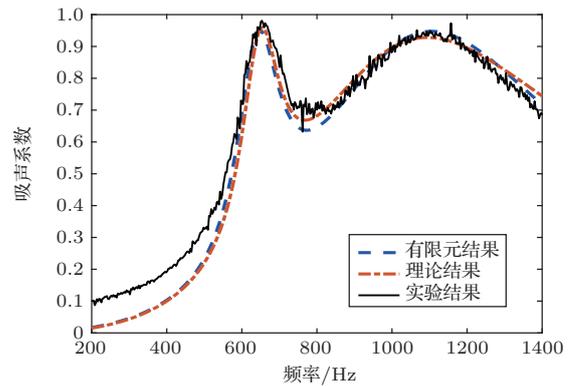


图6 理论、仿真预测与实验结果对比

Fig. 6 Comparison of theoretical, simulation predictions and experimental results

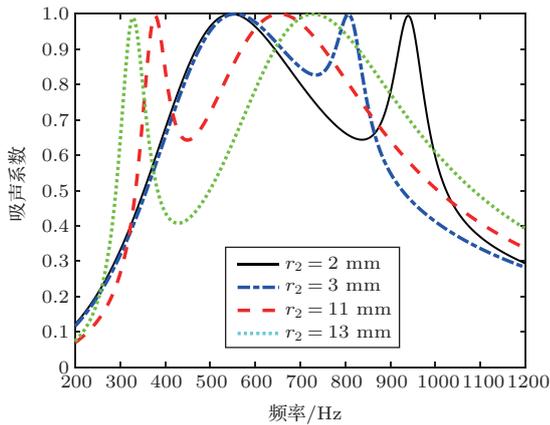
2.1 MPPHR参数研究

引入隔板使得一个整体的空气背腔被分割为两个不等体积的空间，HR与MPP分别产生了一个谐振峰。图7(a)、图7(b)给出了分别固定参数 r_3 和 r_2 ，并增大 r_3 和 r_2 对吸声器吸声性能的影响，可观

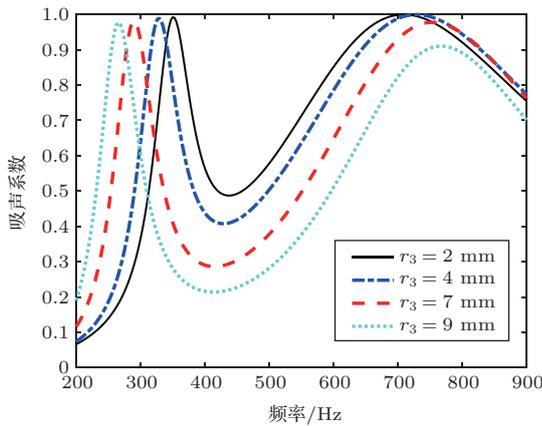
察到当 V_1 代表的体积增大时, 由 HR 产生的谐振吸收峰向低频移动, MPP 产生的谐振吸收峰向高频移动。两个空间的变化会影响到 MPP 或者 HR 阻抗与空气阻抗匹配程度, 其吸声系数进而受到影响。进一步研究了 V_1 和 V_2 的相对体积 (由图 7(c) 中的纵向坐标 $\ln(V_2/V_1)$ 表示) 对两个共振峰的频率的详细影响, 如图 7(c) 所示。空气腔的相体积对 MPP

产生的共振峰的频率影响很小, 而对 HR 有较大的影响。HR 产生的共振峰对腔体体积比 MPP 更敏感, 吸声频率的变化更显著。此外, 可观察到存在两个不同的 $\ln(V_2/V_1)$ 值使得 MPPHR 吸声结构具有相对较高的平均吸声系数的同时具有较宽的吸收频带。相应地, HR 的谐振峰分别在 MPP 共振峰的前方和后方。

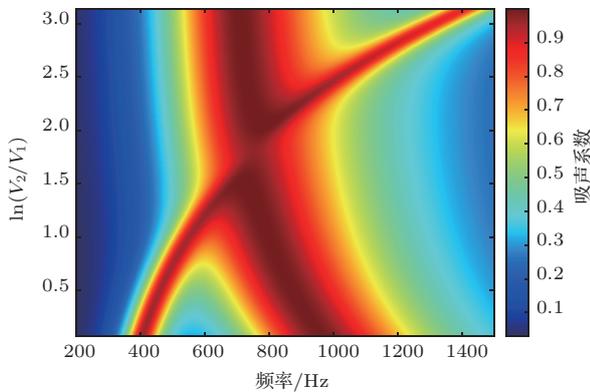
对比图 8 和图 7(c) 可观察到: 内置垂直与倾斜隔板 MPPHR 的吸声特性的相同点是由 HR 产生的谐振峰跟随 V_2/V_1 比值变化的趋势相同。不同点在于 V_2/V_1 比值对 MPP 产生的谐振峰对的影响不同, 倾斜隔板的 MPPHR 结构表现更为明显。由于垂直隔板 MPPHR 的有限元模型是 a_2 区域跟随隔板半径变化而改变, 且穿孔率保持不变, 因此由 MPP 结构产生的谐振吸收峰应和等截面无隔板的 MPP 应相同。当 $\ln(V_2/V_1)$ 变化时, MPP 的谐振频率没有改变。



(a) $r_3 = 9 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$

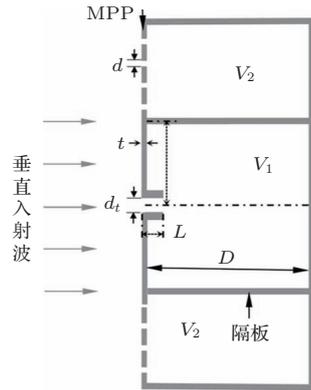


(b) $r_2 = 13 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$

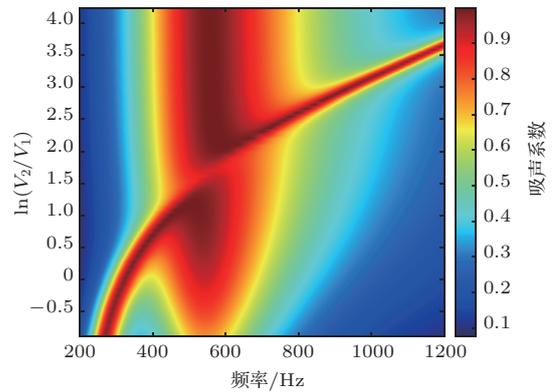


(c) $L = 5 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$

图 7 r_2 、 r_3 对 MPPHR 吸声器吸声性能的影响
Fig. 7 The effect of r_2 and r_3 on the sound absorption performance of MPPHR



(a) 内置垂直隔板MPPHR 示意图



(b) V_2/V_1 比值对内置垂直隔板MPPHR 吸声性能影响

图 8 内置垂直隔板的 MPPHR 和 V_2/V_1 比值对其吸声性能影响

Fig. 8 Schematic diagram of MPPHR with vertical partition and the effect of V_2/V_1 value on sound absorption performance

图9给出了在保证 V_2/V_1 相同的情况下,内置垂直隔板与内置倾斜隔板MPPHR的吸声性能对比。可观察到:由于隔板的类型不同,两种情况下第一谐振吸收峰频率几乎相同,而第二谐振吸收峰频率差距明显。内置垂直隔板MPPHR的第二谐振吸收峰频率与等厚度的无隔板MPP谐振频率几乎相同。相比之下内置倾斜隔板MPPHR有更宽的声吸收频带。

腔体结构参数 r_2 、 r_3 确定时,被倾斜隔板分割的两个空间体积的相对大小固定。可从图10和图11观察到:由MPP产生的谐振峰频率和吸声

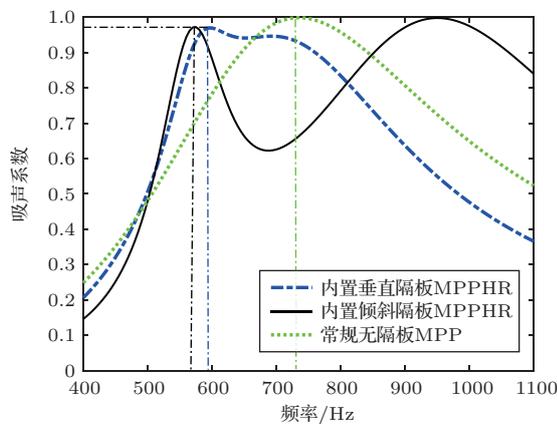


图9 V_2/V_1 相同下内置垂直和倾斜隔板吸声性能对比

Fig. 9 Comparison of absorption performance vertical and inclined partition under the same value of V_2/V_1

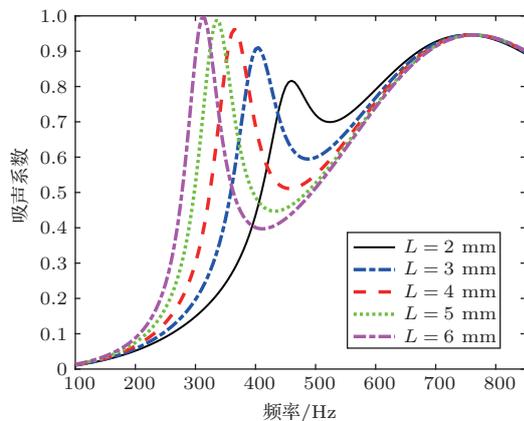


图10 参数 L 对吸声器吸声性能影响($r_2 = 13$ m, $r_3 = 4$ mm, $L = 5$ mm)

Fig. 10 The effect of L on the sound absorption performance of MPPHR ($r_2 = 13$ m, $r_3 = 4$ mm, $L = 5$ mm)

频带不会移动。而HR颈部长度 L 增加,HR产生的谐振吸收峰向低频偏移,谐振峰值吸声系数增大,但同时也增大了与MPP谐振峰的频带距离,反谐振波谷更为明显。HR颈部孔径 d_t 增大使HR产生的谐振吸收峰向高频偏移,谐振峰的吸声系数大小会有明显变化,这是由于颈部开孔的孔径变化会影响HR声阻抗与空气阻抗的匹配程度。

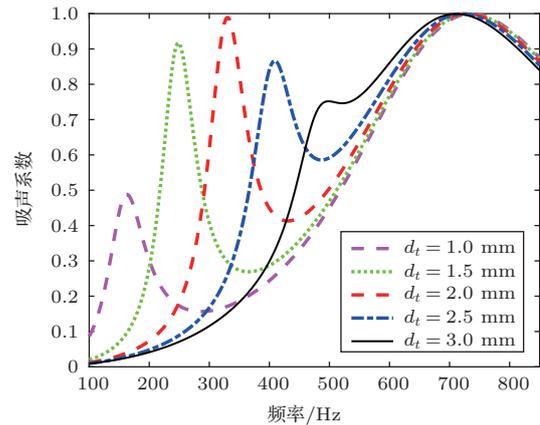


图11 参数 d_t 对吸声器吸声性能影响($r_2 = 13$ mm, $r_3 = 4$ mm, $L = 5$ mm)

Fig. 11 The effect of d_t on the sound absorption performance of MPPHR ($r_2 = 13$ m, $r_3 = 4$ mm, $L = 5$ mm)

3 实验与讨论

本节进行了实验验证。首先利用AWA6290T阻抗管对MPPHR进行吸声系数测量,然后将MPPHR与等厚度MPP结构的实验结果进行了对比,最后对不同隔板参数、颈部参数的MPPHR的吸声特性进行了讨论与分析。AWA6290T型双通道传递函数吸声系数测量系统由扬声器、功率放大器、传声器和信号分析仪等仪器组成,如图12所示。试样材料为光敏树脂,通过光固化3D打印制备,试样实物如图13所示。背腔框架的壁面厚度均设置为1 mm,经光固化后的树脂壁面满足硬声场的边界要求。所有实验试样部分参数设置如下:背腔高度 $D = 29$ mm,特制MPP微孔直径 $d = 0.5$ mm,厚度 $t = 1$ mm,微穿孔区域 a_2 的穿孔率 $\sigma = 1\%$ 。

MPPHR与等厚度MPP的吸声性能对比如图14所示,厚度为30 mm的MPPHR的半吸收频带宽度为1294 Hz (560~1854 Hz),而相同厚度下MPP半吸收频带宽度为795 Hz,相比之下MPPHR吸声器有更宽的吸收频带。此外,由HR产生的谐

振峰使得MPPHR在相对低频率下有更好的声吸收效率。因此，MPPHR结构相较于等厚度MPP结构拥有更宽的吸声带宽和更高的低频吸声效率。作为对比，Gai等^[10]提出的4个不同参数HR与MPP并联的吸声结构的半吸收频带为1150 Hz (250 ~ 1300 Hz)，穿孔板孔径为0.3 mm，结构总厚度为60 mm，而Mahesh等^[11]提出的多个HR与MPP并联的结构在318 ~ 880 Hz的频率范围内吸声效率为65%以上，且结构厚度为56 mm。



图 12 阻抗管测量系统

Fig. 12 Impedance tube measurement system



(a) 特制穿孔板 (b) 带有隔板的背腔 (c) MPPHR

图 13 3D 打印试样

Fig. 13 3D printed samples

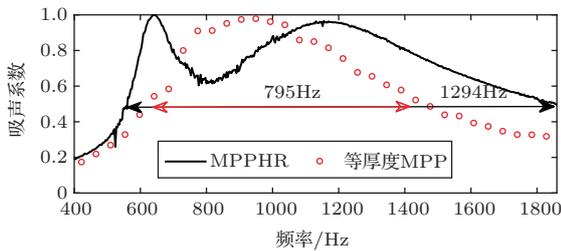
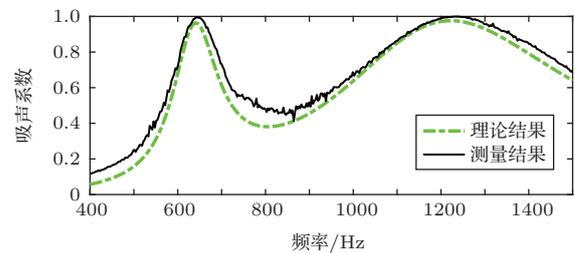


图 14 MPPHR 与等厚度 MPP 吸声系数测量结果对比 ($r_2 = 12.5 \text{ mm}$, $r_3 = 4 \text{ mm}$, $L = 2 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$)

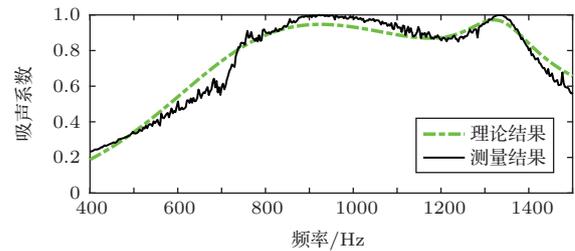
Fig. 14 Comparison of measurement results of absorption coefficient between MPPHR and equal thickness MPP absorber

不同参数下MPPHR的吸声系数测量结果如图15所示。本组实验中，除图15中标注参数不同外，其他参数均相同。将图15(a)、图15(b)对比分析，

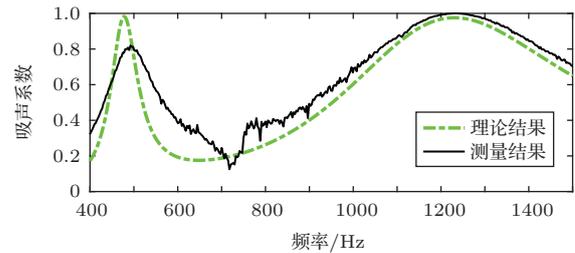
可观察到：在其他参数相同的情况下，改变隔板参数 r_2 使由隔板分割成的两个空腔体积 V_1 、 V_2 相对大小发生变化，因此吸声器产生的吸收峰有所不同，图15(a)中由HR产生的声吸收峰在前(相对低频)，由MPP产生的吸收峰在后；而图15(b)试样的测量结果则相反。此测量结果与图7(a)有限元预测结果相符。将图15(a)、图15(c)对比分析，可观察到：在其他参数相同的情况下，增大HR颈部厚度 L 可使HR产生的吸收峰向低频移动，且峰值吸声系数有所降低，这是由于 L 变化导致结构阻抗与空气阻抗匹配程度发生变化。这与有限元预测图10结果相符。



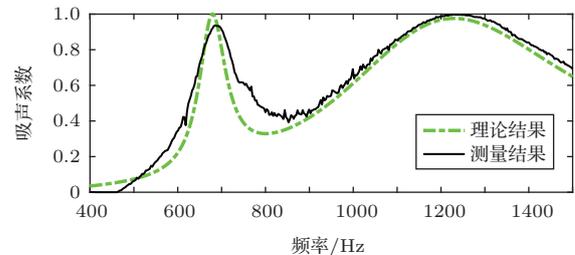
(a) $r_2 = 12.5 \text{ mm}$, $r_3 = 4 \text{ mm}$, $L = 2 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$



(b) $r_2 = 4 \text{ mm}$, $r_3 = 4 \text{ mm}$, $L = 2 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$



(c) $r_2 = 12.5 \text{ mm}$, $r_3 = 4 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$, $d_t = 2 \text{ mm}$



(d) $r_2 = 12.5 \text{ mm}$, $r_3 = 4 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$, $d_t = 3 \text{ mm}$

图 15 不同结构参数下MPPHR吸声系数测量结果
Fig. 15 Sound absorption coefficient measurement results of MPPHR with different structural parameters

将图 15(c)、图 15(d) 对比分析, 可观察到: 在其他参数相同的情况下, 增大 HR 颈部开孔孔径 d_t 可使 HR 产生的吸收峰向高频移动, 符合图 10 有限元预测结果。此外, 分析图 15(a)、图 15(c) 和图 15(d) 发现: 3 个试样隔板参数相同, 被分割的两部分空腔体积 V_1 、 V_2 大小固定, 因此可观察到它们由 MPP 产生的吸收峰的峰值频率基本相同, 此特性同样与有限元预测结果图 10、图 11 符合。

4 结论

本文将 MPP 与 HR 并联合, 提出了一种具有丰富可调谐自由度的轻薄吸声单元: MPPHR, 并研究了 MPP 与 HR 的空间分配和 HR 颈部参数对结构吸声特性的影响。最后, 设计了实验并进行了验证, 吸声系数测量结果与理论和有限元预测结果取得了良好的符合。结论如下:

(1) 基于 MPP 与 HR 理论建立了 MPPHR 的理论模型并给出了其等效电路, 该理论模型很好地预测了 MPP 与 HR 并联结构的吸声特性。

(2) 由隔板分割成两个空气背腔的相对大小可显著影响 MPP、HR 产生声吸收峰频率, HR 产生的声吸收峰频率对空腔体积改变的反应更为灵敏。且存在两个不同的 V_2/V_1 值使得 MPPHR 吸声单元具有相对较高的平均吸声系数的同时具有较宽的吸声频带。

(3) MPPHR 结构相较于等厚度 MPP 结构有更宽的吸声频带和更高的低频吸声效率。厚度仅为 30 mm 的 MPPHR 的半吸声带宽为 1294 Hz (560 ~ 1854 Hz), 相较于等厚度 MPP 半吸声频带 (795 Hz) 宽 499 Hz。

参考文献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975(1): 38-50.
Ma Dayou. Theory and design of micro-perforated panel sound absorbers[J]. Science in China, 1975(1): 38-50.
- [2] 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.
- [3] 邢拓, 李贤徽, 盖晓玲, 等. 微穿孔板复合板型声学超材料的低频吸声[J]. 声学学报, 2020, 45(6): 878-884.
Xing Tuo, Li Xianhui, Gai Xiaoling, et al. Low-frequency sound absorption of microperforated panel composite plate-type acoustic metamaterial[J]. Acta Acustica, 2020, 45(6): 878-884.
- [4] 陈亮, 沈敏, 何为, 等. 微穿孔板-聚氨酯微孔薄膜复合结构吸声特性[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 36-41.
Chen Liang, Shen Min, He Wei, et al. Sound absorption characteristics of micro-perforated panel and polyurethane micro-porous membrane composed structures[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(3): 36-41.
- [5] Sakagami K, Kobatake S, Kano K, et al. Sound absorption characteristics of a single microperforated panel absorber backed by a porous absorbent layer[J]. Acoustics Australia, 2011, 39(3): 95-100.
- [6] 张慧洁, 刘超, 李翔, 等. 低频吸声复合结构的研制与性能研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(5): 236-240.
Zhang Huijie, Liu Chao, Li Xiang, et al. Study on the development and performance of low frequency sound absorption composite structures[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(5): 236-240.
- [7] 吴飞, 陈文渊, 巨泽港, 等. 基于组合微穿孔板的低频宽带吸声超材料研究[J]. 中国材料进展, 2021, 40(1): 29-33, 21.
Wu Fei, Chen Wenyuan, Ju Zegang, et al. Research on low frequency broadband sound absorption metamaterials based on combined micro-perforated plate[J]. Materials China, 2021, 40(1): 29-33, 21.
- [8] Park S. Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by Helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(20): 4895-4911.
- [9] Gai X L, Li X H, Zhang B, et al. Experimental study on sound absorption performance of microperforated panel with membrane cell[J]. Applied Acoustics, 2016, 110: 241-247.
- [10] Gai X L, Xing T, Li X H, et al. Sound absorption of microperforated panel mounted with Helmholtz resonators[J]. Applied Acoustics, 2016, 114: 260-265.
- [11] Mahesh K, Mini R. Theoretical investigation on the acoustic performance of Helmholtz resonator integrated microperforated panel absorber[J]. Applied Acoustics, 2021, 178: 108012.
- [12] Ren Z, Cheng Y, Chen M, et al. A compact multifunctional metastructure for low-frequency broadband sound absorption and crash energy dissipation[J]. Materials & Design, 2022, 215: 110462.
- [13] Zhu J, Qu Y, Su H, et al. A multi-layer overlapping structure for continuous broadband acoustic wave absorption at lower-frequencies[J]. Applied Acoustics, 2022, 187: 108496.
- [14] Palani S, Murray P, Mcalpine A, et al. Slanted septum and multiple folded cavity liners for broadband sound absorption[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2021, 20(5-7): 633-661.
- [15] Yan S, Wu J, Chen J, et al. Optimization design and analysis of honeycomb micro-perforated plate broadband sound absorber[J]. Applied Acoustics, 2022, 186: 108487.
- [16] Yan S, Wu J, Chen J, et al. Design of honeycomb microperforated structure with adjustable sound absorption performance[J]. Shock and Vibration, 2021: 6613701.
- [17] Zhang X, Wu J, Mao Q, et al. Design of a honeycomb-microperforated panel with an adjustable sound absorption frequency[J]. Applied Acoustics, 2020, 164: 107246.
- [18] Mao Q, Pietrzko S. Control of noise and structural vibration[M]. London: Springer, 2013.