

引用格式: 李贺铭, 吴锦武, 兰晓乾, 等. 变截面背腔结构的微穿孔板吸声器的设计与研究[J]. 声学技术, 2023, 42(1): 81-87. [LI Heming, WU Jinwu, LAN Xiaoqian, et al. Design and study of variable cross-section back cavity typed micro-perforated panel absorber[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(1): 81-87.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.01.014

变截面背腔结构的微穿孔板吸声器的设计与研究

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, 江西南昌 330063)

摘要: 如何实现微穿孔板吸声结构的宽频吸声是近年来的研究热点之一。针对微穿孔板吸声结构的宽频吸声问题, 本文设计了一种不规则背腔结构, 并将其应用到单层和双层微穿孔板的吸声器上, 对其吸声性能进行了研究。利用声电类比模型获得吸声器各部分的阻抗关系, 然后通过理论计算得到吸声结构的阻抗和吸声系数。理论、仿真和实验结果表明: 在不增加结构厚度的情况下, 通过内层变截面隔板对背腔进行不等体积分割, 可拓宽微穿孔板吸声带宽, 且结构相对简单。该研究为微穿孔板吸声器的宽带低频吸声及其应用提供了新的设计思路。

关键词: 微穿孔板; 声电类比; 变截面背腔; 宽频吸声

中图分类号: TB132

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-01-0081-07

Design and study of variable cross-section back cavity typed micro-perforated panel absorber

LI Heming, WU Jinwu, LAN Xiaoqian, SUN Haihang

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

Abstract: How to achieve the broadband sound absorption of the micro-perforated panel (MPP) sound absorber is one of the research hotspots in designing low-frequency absorber. To solve this problem, a design of irregular back cavity structure is proposed and applied to the single-layer and double-layer micro-perforated panel absorber, and their sound absorption performances are studied in this paper. The impedance relationship of each part of the micro-perforated panel absorber is obtained by the equivalent circuit model (ECM), and their impedance and sound absorption coefficient are calculated by theory. The theoretical, simulated and experimental results show that without increasing the thickness of the structure, the sound absorption bandwidth of MPP can be broadened by unequal volume segmentation of the back cavity through the inner variable cross-section partition, and the structure is relatively simple. This study provides a design idea for broadband low-frequency sound absorption and its application of MPP absorbers.

Key words: micro-perforated panel; equivalent circuit; variable cross-section back cavity; broadband sound absorption

0 引言

作为传统多孔吸声材料的替代品, 微穿孔板吸声结构被大量运用广泛应用于到了噪声控制领域。选择合适的材料来制作微穿孔板吸声体, 可将其应用于各种复杂恶劣的环境, 并且设计方便、构造简单、成本低、加工方便。此外相比较传统的多孔吸声材料, 它有更好的结构强度且不会有材料不耐用、造成二次污染等缺点^[1-3]。

20 世纪马大猷先生首次提出了微穿孔板及其理

论, 微穿孔板吸声结构虽然被称为宽频吸声结构, 但是在实际应用时考虑到复杂的噪声环境, 传统的单层微穿孔板(Single Layer Micro-Perforated Panel, SL-MPP)吸声结构难以满足实际应用需求^[4]。同时由于制作较小孔径的微穿孔板存在一定的困难并且实际应用时也会存在其他困难, 因而传统的单层微穿孔板吸声体的吸声带宽会被噪声环境、自身参数等限制, 使其难以成为一个通用的吸声降噪结构。因此, 如何实现微穿孔板的宽带吸声是近些年来的研究热点之一。很多学者提出了解决方案: 如利用双层、多层微穿孔板设计的吸声结构^[5-7]、对微穿孔板的孔径进行设计制作成非均匀孔径的单层和双层分割背腔的微穿孔板吸声结构^[8-9]、对背腔进行不等深度设计的同时控制微穿孔板的孔径和穿孔率制作成的单层和双层微穿孔板(Double Layer Miro-

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(51965041)。

作者简介: 李贺铭(1997—), 男, 河南汝南人, 硕士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。

通信作者: 吴锦武, E-mail: wujinwu@nchu.edu.cn

perforated Panel, DL-MPP)吸声结构^[10]、通过L型隔板分割背腔设计的微穿孔板吸声结构^[11]等,这类方法的本质是通过结构设计来实现串联或并联双共振或多共振结构,以实现拓宽吸声带宽的目的。还有学者通过将微穿孔板结构和其他结构结合来实现微穿孔板宽带低频吸声的目的,例如:将曲折或螺旋背腔结构与微穿孔板结合组成的低频吸声结构^[12-13]、利用柔性面板打孔制作的单层和多层柔性微穿孔板吸声结构^[14-16]、将微穿孔板结构与亥姆霍兹谐振器相结合制作的吸声结构^[17-20]、将薄膜和微穿孔板结构相结合设计的吸声结构^[21]、利用机械结构设计的机械可调蜂窝微穿孔板吸声结构^[22-23]、以及利用聚偏氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)压电薄膜制作的电致可调柔性微穿孔吸声结构^[24]、还有将微穿孔板与分流阻尼扬声器结合制作的吸声结构^[25]等。

为了解决传统单层微穿孔板吸声结构吸声频带较窄的问题,本文基于串并联思想设计了一种变截面背腔结构,通过变截面隔板对常规背腔进行分割,建立了并联双共振结构。利用微穿孔板理论和等效背腔概念对提出的吸声结构进行了研究,结果表明:该结构可拓宽微穿孔板结构吸声带宽,且结构较简单,后续可与蜂窝结构组成吸声性能更佳的吸声体复合结构。

1 理论模型

1.1 背腔结构

常规微穿孔板吸声体的背腔为等截面的规则形状,其高度固定后吸声体只有单一的吸收峰,虽然适当减小微穿孔板孔径可一定程度上增大吸声频带,但依然难以满足实际应用需求。

图1所示为圆台隔板构成的变截面背腔示意图,其结构与圆台类似。具体尺寸如下:壁厚为1 mm、变截面背腔的顶部半径为 r_1 、底部半径为 r_2 、高度为 D 。

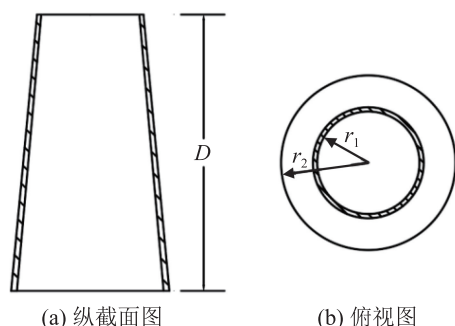


图1 变截面背腔示意图

Fig.1 Schematic diagram of variable cross-section back cavity

将常规的等截面圆柱形背腔与变截面隔板结合,通过内层的变截面隔板将常规背腔分割为内、外两层背腔,构成了一种新型背腔结构(本文称为结构背腔)。结构背腔如图2所示,背腔高度为 D ,内层顶半径为 r_1 、内层底部半径为 r_2 、内外层壁厚均为1 mm。顶部截面内层圆面积为 a_1 、外层圆环面积为 a_2 、内层空腔体积为 V_1 、外层空腔体积为 V_2 。

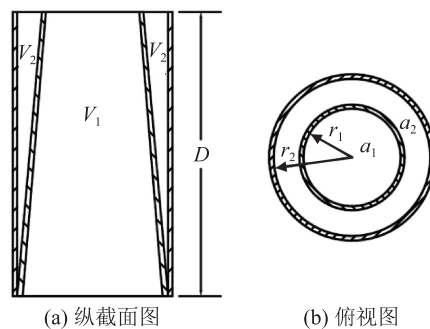


图2 结构背腔示意图

Fig.2 Schematic diagram of the structural back cavity

1.2 声阻抗理论模型

微穿孔板吸声体的结构及其理论最初由马大猷教授提出,吸声体基本结构由顶部的微穿孔板、板后的背腔和底部壁面构成。本文设计的两种吸声结构如图3所示。

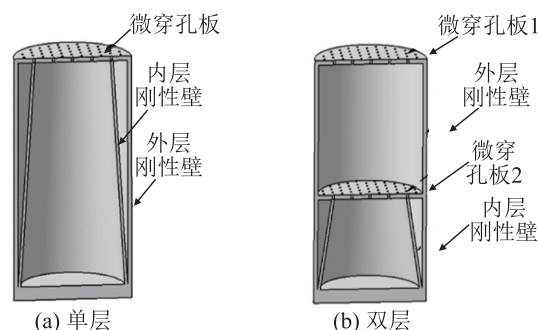


图3 结构背腔微穿孔板吸声器示意图

Fig.3 Schematic diagram of MPP absorber with structural back cavity sound absorber

根据微穿孔板理论,图3所示的单层和双层微穿孔板结构的声电类比模型如图4所示。

单层微穿孔板的相对声阻抗由实部声阻率与虚部声抗率组成,分别表示空气与孔内壁面的粘滞效应和空气在微孔内的惯性运动。单层微穿孔板的相对声阻抗可表示为

$$z_{mmp} = r + j\omega m \quad (1)$$

其中:

$$r = \frac{32\mu t}{pcd^2} \left[\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{xt\sqrt{2}}{8d} \right] \quad (2)$$

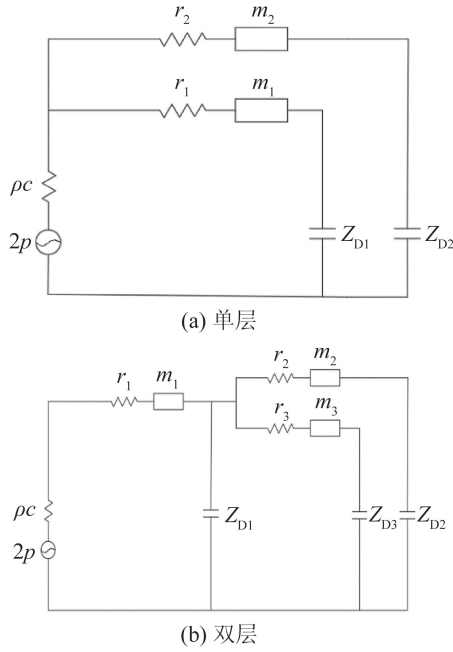


图4 结构背腔单层和双层微穿孔板吸声体的等效电路模型
Fig.4 The equivalent circuit models of SL-MPP and DL-MPP absorbers with structural back cavity absorbers

$$m = \frac{t}{pc} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (3)$$

式中： $x = d/2 \sqrt{\omega/\mu}$ 为穿孔板常数^[2]、 p 为穿孔率、 d 为微孔的直径、 t 为微穿孔板厚度、 $c = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为空气中的声速、 ω 为角频率、 $\mu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 为空气的动力黏度系数。

深度为 D 的空气背腔的相对声阻抗可表示为

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

单层微穿孔板吸声器总的相对声阻抗可表示为

$$Z = z_{\text{mmp}} + z_D = r + j[\omega m - \cot(\omega D/c)] \quad (5)$$

声波垂直入射时，吸声结构的吸声系数的计算公式为

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z)}{[1 + \text{Re}(Z)]^2 + [\text{Im}(Z)]^2} = \frac{4r}{(1+r)^2 + [\omega m - \cot(\omega D/c)]^2} \quad (6)$$

对于图3(a)所示的微穿孔板吸声体模型，内层变截面刚性隔板将背腔分割为两个部分，两部分阻抗为并联关系。根据图4(a)所示的声电类比模型，其相对声阻抗可表示为

$$Z_{\text{st}} = (a_1 + a_2) \left(\frac{a_1}{Z_1} + \frac{a_2}{Z_2} \right)^{-1} \quad (7)$$

其中：

$$Z_1 = r_1 + j[\omega m_1 - \cot(\omega D_1/c)] \quad (8)$$

$$Z_2 = r_2 + j[\omega m_2 - \cot(\omega D_2/c)] \quad (9)$$

式中： $D_1 = V_1/a_1$ 、 $D_2 = V_2/a_2$ ，分别为内、外层背腔的等效背腔深度^[11]， Z_{st} 为单层结构的总声阻抗。根据式(6)可计算得到该吸声结构的吸声系数。

对于图3(b)所示的结构背腔双层微穿孔板吸声结构，根据图4(b)所示的声电类比模型，其相对声阻抗可表示为

$$Z_{\text{sc}} = (a_1 + a_2) \left(\frac{a_1}{Z_{22}} + \frac{a_2}{Z_{23}} \right)^{-1} \quad (10)$$

$$Z_{\text{dt}} = Z_{\text{mmp1}} + \left(\frac{1}{Z_{D1}} + \frac{1}{Z_{\text{sc}}} \right)^{-1} \quad (11)$$

其中：

$$Z_{22} = r_2 + j[\omega m_2 - \cot(\omega D_2/c)] \quad (12)$$

$$Z_{23} = r_3 + j[\omega m_3 - \cot(\omega D_3/c)] \quad (13)$$

式中： Z_{sc} 为第二层微穿孔板和背腔的相对声阻抗之和， Z_{mmp1} 为第一层微穿孔板相对声阻抗， Z_{D1} 为第一层背腔的相对声阻抗， Z_{dt} 为双层结构的总相对声阻抗。将 Z_{dt} 代入式(6)可计算出双层结构的吸声系数。

2 有限元仿真分析

本文利用 COMSOL Multiphysics® 多物理场有限元仿真软件声学模块下的压力声学-频域接口对变截面背腔、结构背腔单层微穿孔板吸声体和结构背腔双层微穿孔板吸声体分别建模，进行了数值仿真分析。

2.1 数值验证

为确保后续仿真分析的有效，设置了一组数值验证实验。验证对象为无变截面隔板的微穿孔板结构，结构参数如下， $D = 30 \text{ mm}$ ， $t = 0.4 \text{ mm}$ ， $d = 0.5 \text{ mm}$ ， $p = 1\%$ 。实验结果如图5所示。从图5中的实验结果观察到，实际测试结果与理论计算结果、仿真结果有较好的一致性。结果表明，理论和仿真可较好地预测实验结果。

2.2 变截面背腔单层微穿孔板吸声结构

对如图1所示的结构背腔和单层微穿孔板构成的吸声结构进行仿真分析。模型底半径 $r_2 = 13.5 \text{ mm}$ 、高度 $D = 50 \text{ mm}$ ，顶半径 r_1 大小对结构背腔吸声结构的吸声性能的影响如图6所示。顶半径 $r_1 = 13.5 \text{ mm}$ 时，此时 $r_1 = r_2$ 背腔形状与常规的等截面圆柱形相同。

结构背腔吸声体顶半径 $r_1 = 10 \text{ mm}$ 、 $D = 50 \text{ mm}$ ，底半径 r_2 对结构背腔吸声器吸声性能的影响如图7

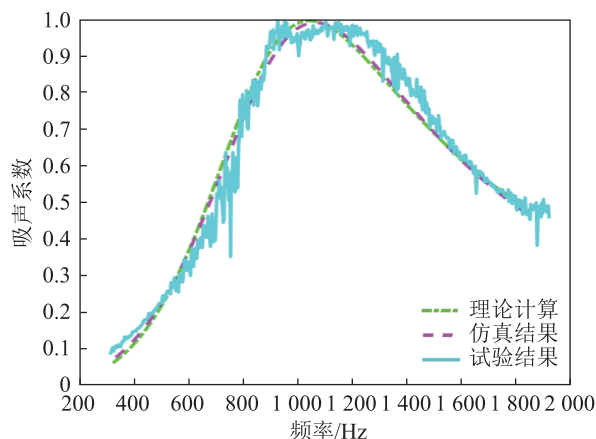


图5 无变截面隔板单层微穿孔板结构的吸声系数理论计算、仿真和测试结果对比

Fig.5 Comparison of the calculated, simulated and tested absorption coefficients for the SL-MPP structure without variable cross-section partition

所示。底半径设置为 $r_2=10\text{ mm}$ 时,此时有 $r_1=r_2=10\text{ mm}$,背腔形状与常规背腔相同,同为等截面的圆柱形。

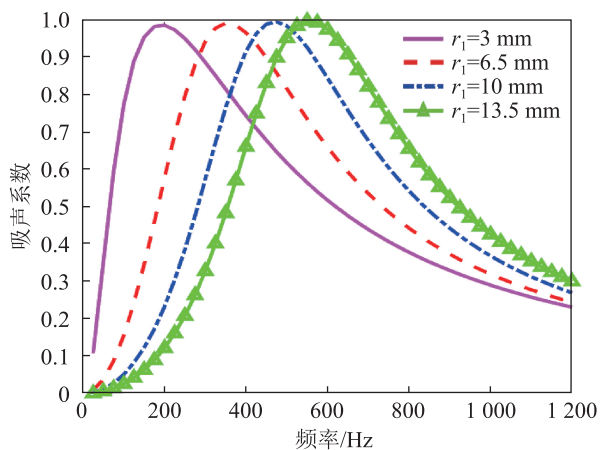


图6 顶半径 r_1 对变截面吸声结构吸声性能影响
Fig.6 Effects of the top radius r_1 on sound absorption performance of variable cross-section absorber

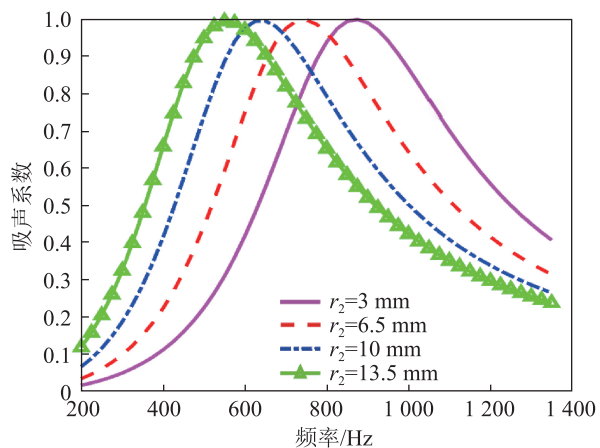


图7 底半径 r_2 对变截面吸声结构吸声性能影响
Fig.7 Effects of the bottom radius r_2 on sound absorption performance of variable cross section sound absorber

从图6和图7的仿真结果可观察到:变截面圆台背腔顶部或底部半径的改变会使被隔板分割的顶部微穿孔板面积与结构空气背腔体积发生变化,吸声峰值频率也跟随变化。

2.3 结构背腔单层微穿孔板吸声结构

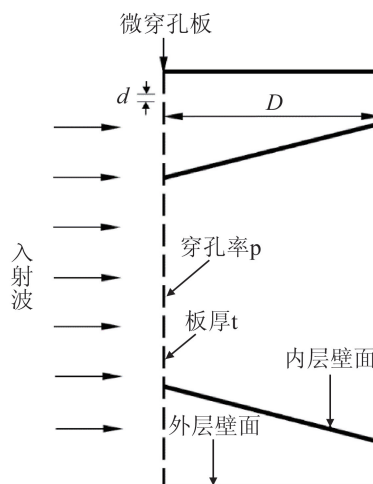


图8 结构背腔单层微穿孔板吸声器示意图
Fig.8 Schematic diagram of SL-MPP absorber with structural back cavity

结构背腔单层微穿孔板吸声器如图8所示。

有无变截面隔板的单层微穿孔板结构吸声性能仿真对比结果如图9所示,图9和表1中的结构背腔表示带有隔板的结构,普通背腔表示无隔板结构。其背腔参数为顶半径 $r_1=13.5\text{ mm}$ 、底半径 $r_2=9\text{ mm}$ 、高度 $D=30\text{ mm}$ 。微穿孔板参数如表1所示。

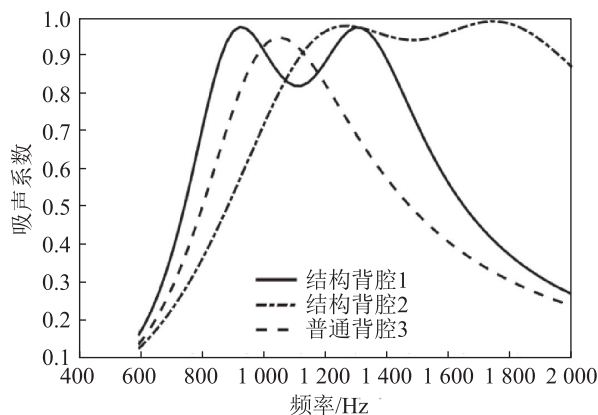


图9 结构背腔与普通背腔单层微穿孔板吸声器吸声性能对比
Fig.9 Comparison of sound absorption performances of SL-MPP absorber with structural back cavity and ordinary cavity

单层结构背腔吸声器与常规普通吸声器相比多了一个吸收峰,吸声频带得到了拓宽,同时吸声频带向低频偏移。减小微穿孔板孔径可适当拓宽吸收峰的宽度、提高反谐振波谷的吸声系数,但也会导

表1 图8中微穿孔板参数 Table 1 The parameters of MPP in Fig.8			
类型	d/mm	t/mm	$p/\%$
单层结构背腔1	0.5	0.5	1
单层结构背腔2	0.3	0.5	2
单层普通背腔3	0.5	0.5	1

致微穿孔板的阻抗变化，吸收峰向高频移动。

固定结构背腔的顶半径 $r_2=13.5\text{ mm}$ 、高度 $D=50\text{ mm}$ ，内层圆台壁的顶半径 r_1 对单层结构背腔微穿孔板吸声结构的吸声性能的影响如图10所示。当顶半径 $r_1=13.5\text{ mm}$ 时，吸声器的背腔结构为等截面圆柱形，可以作为研究对照。此外，在图10中补充了图6中相同结构尺寸下变截面背腔吸声结构的吸声性能曲线。

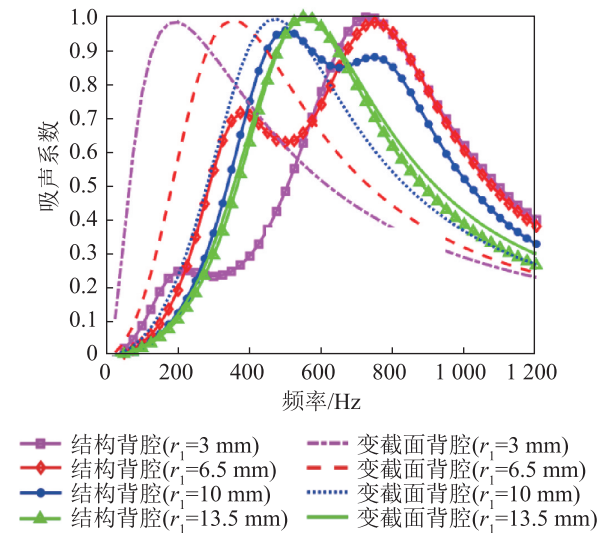


图10 顶半径 r_1 对结构背腔单层微穿孔板吸声器吸声性能的影响
Fig.10 Effects of the top radius r_1 on sound absorption performance of SL-MPP absorber with structural back cavity absorber

顶半径 r_1 会影响内层背腔体积和对应微穿孔板面积 a_1 的大小，仿真结果表明 r_1 变小会使得其等效空气背腔高度增高，因此获得一个向低频移动的吸峰。并且可看到，第一吸收峰峰值频率与同尺寸下的变截面吸声结构吸收峰的峰值频率相对应。

顶半径 r_1 改变时，第一吸收峰峰值频率和峰值大小都有明显变化。进一步研究了参数 r_1 对第一、第二吸收峰的峰值频率和峰值吸声系数的影响，结果如图11所示。

从图11中的仿真分析可观察到：顶半径 r_1 大小对第二峰值频率和吸声系数影响较小，而对第一峰值频率和吸声系数影响较大。当 $r_1=9\text{ mm}$ 时，第一峰值吸声系数和第二峰值吸声系数相当，此时有 $a_1/a_2\approx 1$ 。

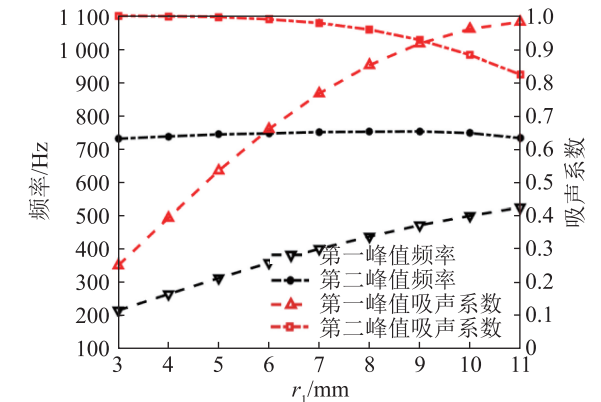


图11 顶半径 r_1 对峰值频率和吸声系数的影响
Fig.11 Effects of the top radius r_1 on peak frequency and sound absorption coefficient of peak

2.4 结构背腔双层微穿孔板吸声结构

图12为结构背腔双层微穿孔板吸声器示意图。有无变截面隔板的双层微穿孔板结构吸声性能仿真对比如图13所示。其背腔参数为 $r_1=13.5\text{ mm}$ 、 $r_2=9\text{ mm}$ 、 $D=30\text{ mm}$ 。上、下层微穿孔板的参数如表2所示。

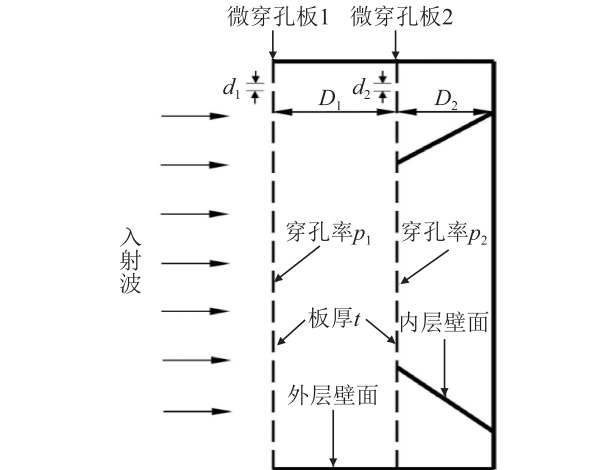


图12 结构背腔双层微穿孔板吸声器示意图
Fig.12 Schematic diagram of DL-MPP with structural back cavity

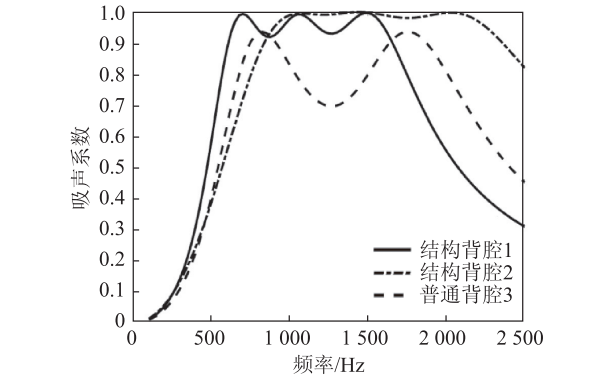


图13 结构背腔与普通背腔双层微穿孔板吸声体吸声性能对比
Fig.13 Comparison of sound absorption performances of DL-MPP absorber with structured back cavity and ordinary cavity

表2 图12中上层和下层微穿孔板参数
Table 2 The parameters of upper and lower MPPs in Fig.12

类型	d/mm	t/mm	$p_1/\%$	$p_2/\%$
双层结构背腔1	0.5	1	3	1
双层结构背腔2	0.3	1	6	2
双层普通背腔3	0.5	1	3	1

注：两层微穿孔板的孔径与厚度均相同，表中只给出了相同数据。

3 实验分析

微穿孔板试样材料为光敏树脂，利用3D打印机制作完成，内外层壁厚均为1 mm，壁面满足硬声场边界要求，试样a所用微穿孔板由铝板钻孔制作，试样b微穿孔板由3D打印制作。制作的试样实物如图14所示。实验使用AWA6290T型阻抗管测量系统，采用双通道传递函数阻抗管法对试样进行吸声系数测量。该系统由信号发生器、功率放大器、扬声器、阻抗管、分析仪等组成。

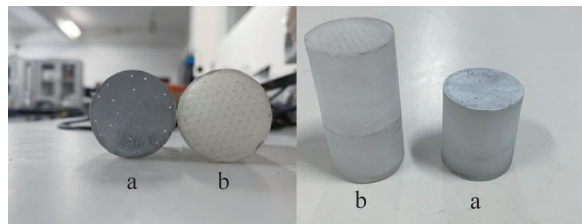


图14 实验试样a、试样b
Fig.14 The experimental sample a and sample b

试样a为单层微穿孔板吸声体，试样b为双层微穿孔板吸声体，内层变截面圆台壁的参数均为 $r_1=9\text{ mm}$ ， $r_2=13.5\text{ mm}$ ，试样其他参数如表3所示。其中 D_1 、 D_2 在试样b中分别表示上、下层背腔高度， p_1 、 p_2 为上、下微穿孔板的穿孔率。 D_1 、 p_1 在试样a中分别表示背腔高度和微穿孔板的穿孔率。 t 、 d 在试样a和试样b中表示微穿孔板的板厚和孔径。

表3 试样a、b参数
Table 3 Parameters of sample a and sample b

试样	D_1/mm	D_2/mm	$p_1/\%$	$p_2/\%$	t/mm	d/mm
a	30	—	1	—	0.4	0.5
b	30	20	3	1	1	0.5

注：试样a为单层结构，试样b为双层结构。其中，试样b的两层微穿孔板的板厚、孔径相同，表中只给出了试样a、试样b相同的数据。

有无变截面隔板试样a的吸声效果对比如图15所示，试样a与试样b的理论、仿真和实验结果对比如图16所示。

从图16所示的实验结果可观察到：试样a，吸声系数大于0.8的频宽为820 Hz；试样b，吸声系数

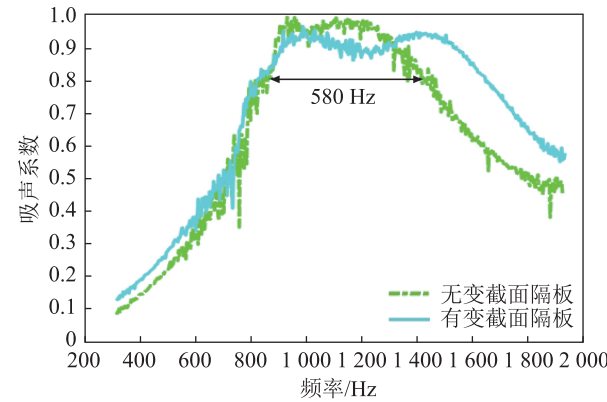


图15 单层微穿孔板有无变截面隔板吸声系数对比
Fig.15 Comparison between absorption coefficients of SL-MPP with and without variable cross-section partition

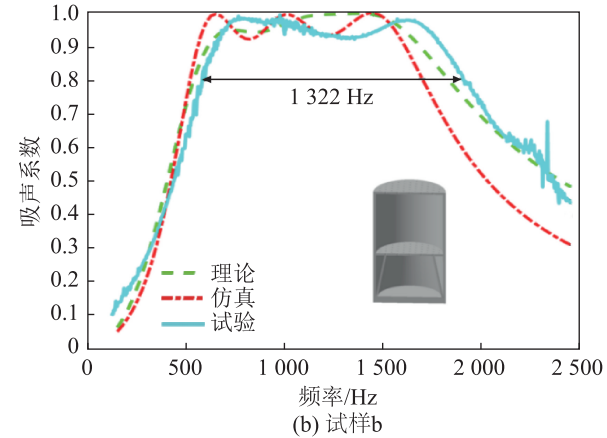
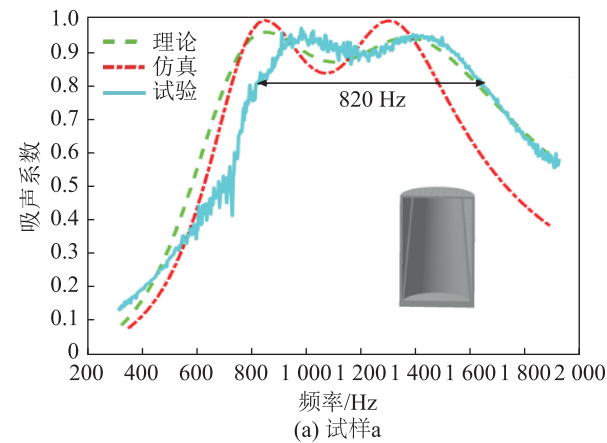


图16 试样a和试样b的吸声系数的理论计算、仿真和测量结果对比
Fig.16 Comparison of the theoretical, simulated and measured absorption coefficients for the experimental sample a and sample b

大于0.8的频宽为1 322 Hz。从图15的对比实验结果来看，利用变截面隔板对背腔进行不等体积的分割可达到拓宽吸声频带的目的。虽然实验结果与理论计算、仿真结果存在一些差异，但实验结果的整体趋势与理论计算、仿真结果相符。

试样a的微穿孔板是利用0.5 mm的钻头在铝板上打孔制作而成，试样b的微穿孔板是采用3D打

印制作, 后经钻头加工而成。制作的微穿孔板微孔的形状和尺寸均存在一定的误差, 这是导致实验结果误差的重要原因之一。此外, 最初设计的微穿孔板穿孔率为0.01, 在实验测试时发现除了壁厚挡住一些微孔外, 内层的变截面隔板将微穿孔板分为两个区域, 它们的微孔数量是不同的, 因此两区域的穿孔率也是不同的, 经计算外层实际穿孔率为0.009 11, 内层实际穿孔率为0.010 03, 这是导致实验结果误差的另一个原因。在穿孔率较小、孔径较大且吸声体结构较小时, 这种情况对实验结果影响较为明显。

4 结论

本文基于串并联双共振结构提出了一种利用变截面隔板对空间进行不等分割的新型背腔结构, 将其应用到单层、双层微穿孔板结构并进行了研究。实验结果表明, 背腔带有隔板的单层和双层微穿孔板结构分别在794~1 614 Hz和632~1 954 Hz频率范围内至少具有80%吸声效率, 实验得到的吸声效果与仿真、理论计算得到的吸声效果的整体趋势有较好的对应。同时, 研究表明利用变截面隔板对背腔进行不等体积分割可有效拓宽微穿孔板吸声结构的吸声带宽。与蜂窝复合结构结合可进一步提升结构吸声性能与应用水平。

参 考 文 献

- [1] 马大猷. 微穿孔板结构的设计[J]. 声学学报, 1988, 13(3): 174-180.
- [2] 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.
- [3] 查雪琴, 康健, 张婷, 等. 微穿孔板的应用技术[J]. 声学学报, 1994, 19(4): 258-265.
- [4] 钱玉洁. 宽频带单层微穿孔板吸声体的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [5] SAKAGAMI K, NAKAMORI T, MORIMOTO M, et al. Double-leaf microperforated panel space absorbers: a revised theory and detailed analysis[J]. Applied Acoustics, 2009, 70 (5): 703-709.
- [6] SAKAGAMI K, YAIRI M, MORIMOTO M. Multiple-leaf sound absorbers with microperforated panels: an overview[J]. Acoustics Australia, 2010, 38(2): 76-81.
- [7] BUCCIARELLI F, FIERRO G M, MEO M. A multilayer microperforated panel prototype for broadband sound absorption at low frequencies[J]. Applied Acoustics, 2019, 146: 134-144.
- [8] MOSA A I, PUTRA A, RAMLAN R, et al. Theoretical model of absorption coefficient of an inhomogeneous MPP absorber with multi-cavity depths[J]. Applied Acoustics, 2019, 146: 409-419.
- [9] MOSA A I, PUTRA A, RAMLAN R, et al. Wideband sound absorption of a double-layer microperforated panel with inhomogeneous perforation[J]. Applied Acoustics, 2020, 161(C): 107167.
- [10] QIAN Y, ZHANG J, SUN N, et al. Pilot study on wideband sound absorber obtained by adopting a serial-parallel coupling manner[J]. Applied Acoustics, 2017, 124: 48-51.
- [11] GAI X-L, XING T, LI X H, et al. Sound absorption of micro-perforated panel with L shape division cavity structure[J]. Applied Acoustics, 2017, 122: 41-50.
- [12] MARCO B, FABRIZIO B, Malfense F G P, et al. Microperforated Panel and deep subwavelength Archimedean-inspired spiral cavities for multi-tonal and broadband sound absorption [J]. Applied Acoustics, 2021, 176(4):107901.
- [13] WU F, XIAO Y, YU D, et al. Low-frequency sound absorption of hybrid absorber based on micro-perforated panel and coiled-up channels[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(15).
- [14] LEE Y, SUN H, GUO X. Effects of the panel and Helmholtz resonances on a micro-perforated absorber[J]. International Journal of Applied Mathematics Mechanics, 2005, 4: 49-54.
- [15] LEE Y, LEE E. Widening the sound absorption bandwidths of flexible micro-perforated curved absorbers using structural and acoustic resonances[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(8): 925-934.
- [16] TERESA B, CÉDRIC M, CÉDRIC P. Enhancing sound absorption and transmission through flexible multi-layer micro-perforated structures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(5): 3663-73.
- [17] TERESA B, CÉDRIC M, CÉDRIC P. Vibroacoustic properties of thin micro-perforated panel absorbers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(2): 789-98.
- [18] GAI X L, XING T, LI X H, et al. Sound absorption of micro-perforated panel mounted with helmholtz resonators[J]. Applied Acoustics, 2016, 114: 260-265.
- [19] MAHESH K, MINI R S. Theoretical investigation on the acoustic performance of Helmholtz resonator integrated microperforated panel absorber[J]. Applied Acoustics, 2021, 178(1): 108012.
- [20] PARK S H. 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.
- [21] 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.
- [22] YAN S, WU J, CHEN J, et al. Design of Honeycomb Microperforated Structure with Adjustable Sound Absorption Performance[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1-12.
- [23] 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.
- [24] DUAN X H, WANG H Q, LI Z B, et al. Sound absorption of a flexible micro-perforated panel absorber based on PVDF piezoelectric film[J]. Applied Acoustics, 2015, 88: 84-89.
- [25] TAO J, JING R, QIU X. Sound absorption of a finite micro-perforated panel backed by a shunted loudspeaker[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(1): 231-238.