

内置穿孔隔板的微穿孔结构吸声性能研究

揭俊星, 兰晓乾

南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2022年5月6日; 录用日期: 2022年6月6日; 发布日期: 2022年6月13日

摘要

微穿孔板结构因其质轻、抗氧化、易加工等优点在降噪领域被广泛应用, 为了提高单层微穿孔结构的吸声效果, 本文在微穿孔板结构内添加垂直上面板的穿孔隔板, 利用隔板上的微孔改善结构的降噪效果。研究表明, 添加适当参数的穿孔隔板之后, 结构的降噪效果有所提升, 随后分析了添加穿孔隔板的孔径、穿孔率以及板厚对结构吸声效果的影响, 最后利用驻波管试验验证了利用穿孔隔板提高微穿孔板结构吸声性能的可行性, 为提高微穿孔板结构的吸声性能提供新思路。

关键词

微穿孔板, 穿孔隔板, 孔径, 穿孔率, 板厚

Study on Sound Absorption Performance of Micro-Perforated Structure with Built-In Perforated Baffle

Junxing Jie, Xiaoqian Lan

School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: May 6th, 2022; accepted: Jun. 6th, 2022; published: Jun. 13th, 2022

Abstract

Micro-perforated plate structure is widely used in the field of noise reduction because of its advantages such as light weight, oxidation resistance and easy machining. In order to improve the sound absorption performance of single-layer micro-perforated plate, a perforated baffle which is vertical to the upper panel is added into the micro-perforated plate structure, and the micro-holes in the baffle plate are used to improve the noise reduction effect of the whole structure. Studies

show that, through adding proper parameters of perforated baffle, the noise reduction effect of structure is improved, then the effects of perforated baffle's aperture, perforation rate and thickness of plating are analyzed. Finally, the feasibility of using perforated baffle to improve the sound absorption performance of the structure is verified by impedance tube experiment, these provide a new idea to improve the sound absorption performance of micro-perforation plate structure.

Keywords

Micro-Perforated Plate, Perforated Baffle, Aperture, Perforation Rate, Thickness of Plating

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微穿孔板(MPP)结构是马大猷先生提出的一种共振降噪结构。该结构利用亥姆霍兹共振腔吸声原理,当声波入射到微穿孔面板时,孔中的各层质点速度会产生摩擦,进而将声能转化为热能,最终达到降噪的目的[1]。由于微穿孔板结构简单、对环境无害、质轻价低等诸多优点,在降噪领域被大量应用[2] [3] [4]。

近些年,为了改善和提高微穿孔板吸声体的降噪效果,研究人员从多角度进行了深入研究,并取得了不错的效果。部分学者从影响微穿孔板结构的因素出发来提高微穿孔板结构的吸声性能,如赵晓丹[5]将微穿孔板结构设计为多层结构,极大程度上提高了微穿孔板结构的吸声带宽;Qian [6]利用优化算法设计了多孔径的微穿孔板吸声体来拓宽微穿孔板的吸声带宽;Jiang [7]、Qian [8]和Mosa [9]分别设计了变截面孔、超微孔、非均匀孔等结构来提高微穿孔板的吸声性能;Wang [10]和Kim [11]设计的不等腔深结构使得微穿孔板吸声结构的带宽大大增加。

而随着制造工艺的提升,将微穿孔板结构与其他结构复合形成新结构也成为了一种比较新颖的思路,如杨军伟[12]将轻质蜂窝结构和微穿孔板结构结合起来,形成复合结构来提高结构的降噪效果;Zhang [13]和Yan [14]基于微穿孔板结构,提出了可调吸声性能的蜂窝微孔板复合结构;Xie [15]在微穿孔板背腔内部内置吸声材料,进一步提高了微穿孔板吸声体的降噪效果;Zhao [16]通过添加机械阻抗进一步提高了微穿孔板结构的吸声性能;Tang [17]基于微穿孔板设计的波纹复合结构拥有良好吸声性能的同时也兼有良好的力学性能。此外,将微穿孔板结构和薄膜[18]、超材料[19]、超表面[20]等结构结合形成的吸声结构,极大程度上拓宽了微穿孔板结构的应用范围。

单层微穿孔板结构的吸声效果并不突出,为了提高其吸声性能,本文在微穿孔板结构的背腔中垂直上面板内置穿孔隔板,利用隔板上的微孔改善整体结构的降噪效果,通过研究内部穿孔隔板的板厚、穿孔率和孔径,得到穿孔隔板的参数对结构降噪效果的影响规律。

2. 穿孔隔板提高微穿孔结构吸声性能

微穿孔板结构的降噪效果主要受腔深、穿孔率、孔径、板厚四个参数的制约,而单层的微穿孔板结构因易受参数的制约,降噪效果往往不太理想,常与其他结构搭配在一起使用,例如吸声材料、蜂窝、超材料等。本文通过在微穿孔板结构的背腔中添加垂直上面板的穿孔隔板,从而提高单层微穿孔板结构的降噪效果,结构示意图如图1所示。

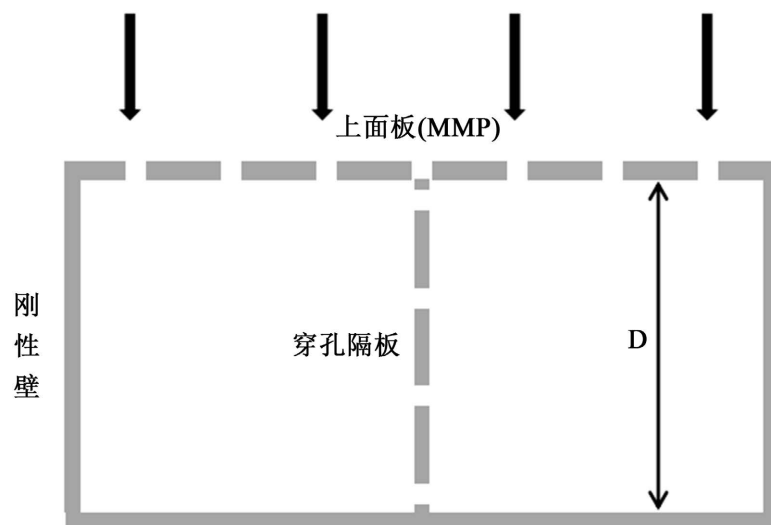


Figure 1. Schematic diagram of adding perforated baffle inside the micro-perforated plate structure
图 1. 微穿孔板结构内部添加穿孔隔板示意图

添加穿孔隔板之后的新结构主要由上面板, 刚性壁和穿孔隔板三部分组成。为了研究微穿孔板结构添加隔板后吸声性能的提高是否具有偶然性, 本文选取了三种不同参数的微穿孔板结构, 在背腔中添加不同参数的穿孔隔板, 将未加隔板和添加隔板之后的吸声效果进行对比。微穿孔板参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of micro-perforated plates

表 1. 微穿孔板参数

| 上面板 | 孔径 | 穿孔率 | 板厚 |
|-----|--------|-------|--------|
| MPP | 0.8 mm | 0.03% | 1.5 mm |

利用 COMSOL Multiphysics 软件压力声学(频域)模块对微穿孔板结构进行有限元分析, 结构的腔深统一设为长 100 mm、宽 100 mm、高 50 mm 的立方体, 添加穿孔隔板前后的吸声系数曲线如图 2 所示。

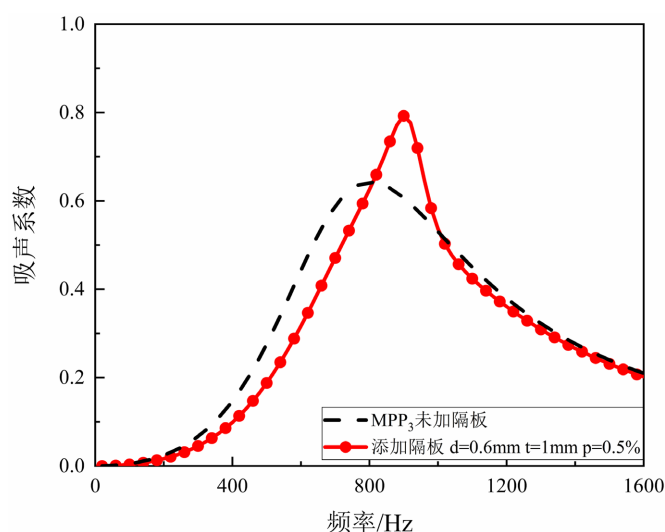


Figure 2. Sound absorption results of micro-perforated plates before and after adding perforated baffle
图 2. 微穿孔板结构添加穿孔隔板前后的吸声结果

由图 2 可知 MPP 的吸声效果并不理想, 通过在内部添加一定尺寸的穿孔隔板之后, 结构的最大吸声系数有着明显的提升。微穿孔板结构添加穿孔隔板的研究表明, 穿孔隔板可以用来提高结构的吸声效果, 而且相对于吸声效果不佳的微穿孔板结构, 改良效果会更加显著, 添加微穿孔隔板能够额外增加空气在微孔中摩擦时间进而增加整体结构热粘性损耗, 从而提高吸声系数。

3. 穿孔隔板参数对结构吸声性能的影响

三种参数的微穿孔板在添加隔板后降噪效果会发生变化, 但穿孔隔板的参数对结构吸声性能的影响以及如何确定适当的穿孔隔板参数仍需进一步研究, 因此接下来针对穿孔隔板参数对结构吸声性能的影响做进一步研究。研究选取 9 种不同参数的穿孔隔板, 分别研究穿孔隔板孔径、穿孔率和板厚对结构吸声性能的影响, 穿孔隔板参数如表 2 所示。

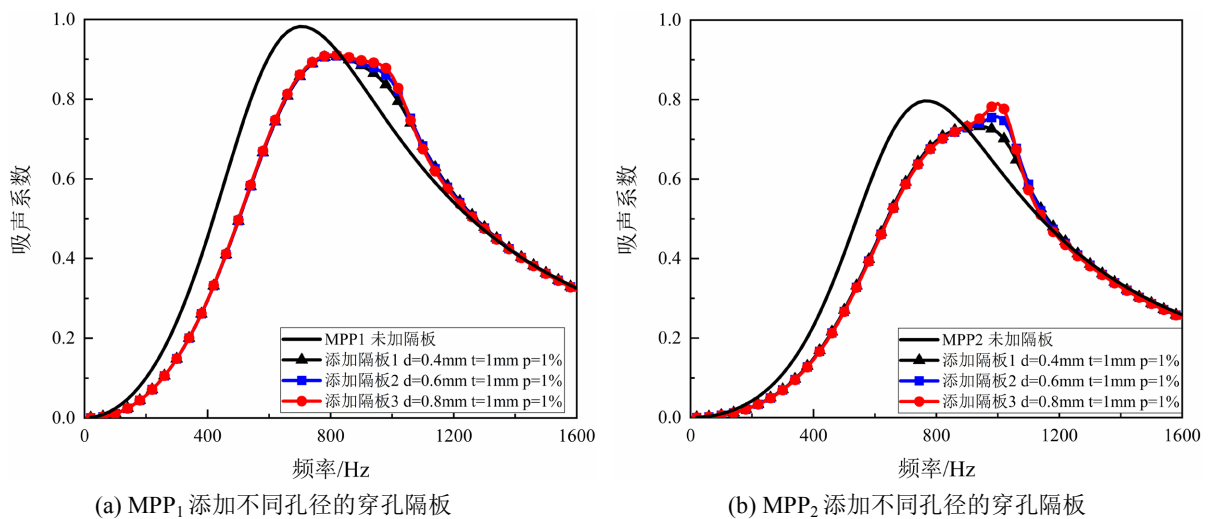
Table 2. Parameters of perforated baffles

表 2. 穿孔隔板的参数

| 隔板 | 孔径 | 穿孔率 | 板厚 |
|------|--------|------|--------|
| 隔板 1 | 0.4 mm | 1% | 1 mm |
| 隔板 2 | 0.6 mm | 1% | 1 mm |
| 隔板 3 | 0.8 mm | 1% | 1 mm |
| 隔板 4 | 0.6 mm | 0.5% | 1 mm |
| 隔板 5 | 0.6 mm | 1% | 1 mm |
| 隔板 6 | 0.6 mm | 1.5% | 1 mm |
| 隔板 7 | 0.6 mm | 1% | 0.5 mm |
| 隔板 8 | 0.6 mm | 1% | 1 mm |
| 隔板 9 | 0.6 mm | 1% | 1.5 mm |

3.1. 穿孔隔板孔径的影响

通过在三种参数的微穿孔板结构背腔内分别添加穿孔隔板, 研究穿孔隔板孔径对结构吸声性能的影响, 结果如图 3 所示。



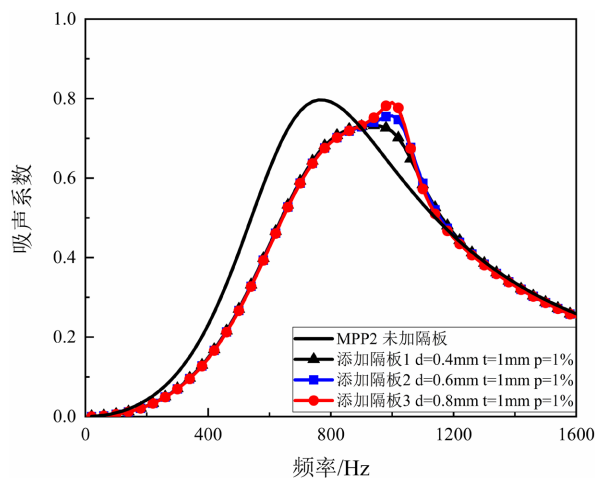
(c) MPP₃ 添加不同孔径的穿孔隔板

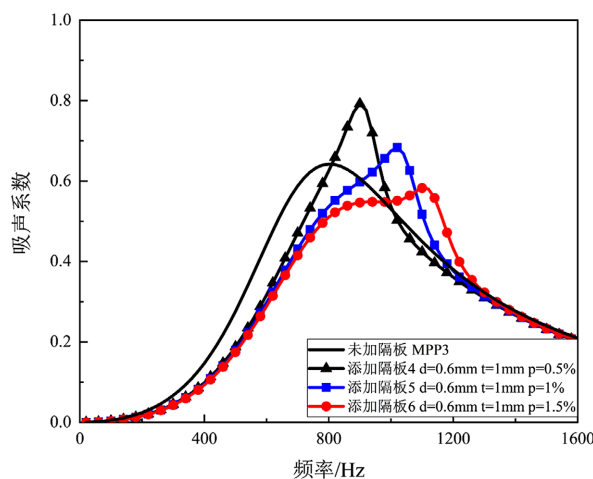
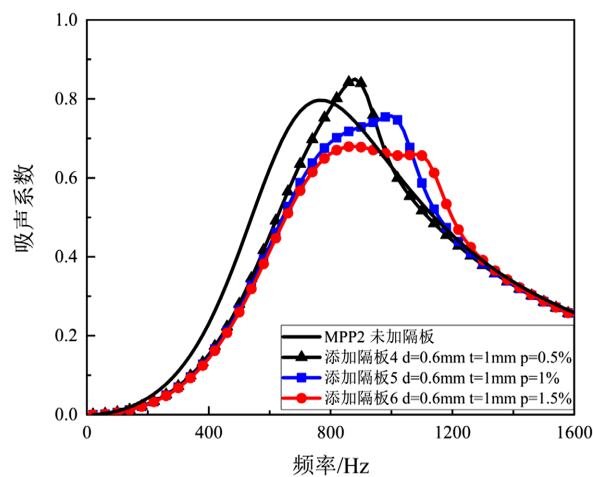
Figure 3. Sound absorption effect of adding perforated baffles with different apertures
图 3. 添加不同孔径的穿孔隔板的吸声效果

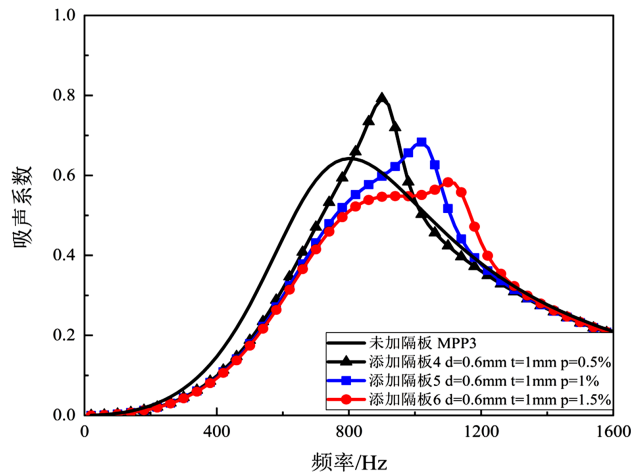
由图 3 可知, 通过添加三种参数的穿孔隔板, 结构的共振频率略向高频移动, 当穿孔隔板的孔径逐渐增大时, 结构的吸声系数也逐渐增大, 甚至出现了一个新的吸声系数峰值, 间接的拓宽了结构有效吸声频带, 降噪效果不佳的 MPP₃ 在添加穿孔隔板之后, 结构的吸声性能提升最大。因此, 在提高一些吸声效果不佳的微穿孔板结构吸声性能之时, 可以选用孔径略大的穿孔隔板提高结构的降噪效果。

3.2. 穿孔隔板穿孔率的影响

通过在三种参数的微穿孔板结构背腔内分别添加穿孔隔板, 研究穿孔隔板穿孔率对结构吸声性能的影响, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 降噪效果不佳的 MPP₃ 在添加穿孔隔板之后, 结构的吸声性能获得了较大的提高, 穿孔隔板的穿孔率越小, 结构的最大吸声系数越大。当穿孔隔板的穿孔率逐渐增加时, 结构的第二个吸声系数峰值逐渐明显, 而且对应频率向高频移动。虽然较大的穿孔率使得结构拥有较宽的有效吸声频带, 但结构的最大吸声系数却随着穿孔率的增大而减小。因此, 要根据实际要求确定穿孔隔板的穿孔率, 当需要较大吸声系数时可选择较小穿孔率的穿孔隔板, 需要较宽有效吸声频带时可以选用穿孔率略大的穿孔隔板。

(a) MPP₁ 添加不同穿孔率的穿孔隔板(b) MPP₂ 添加不同穿孔率的穿孔隔板



(c) MPP₃ 添加不同穿孔率的穿孔隔板

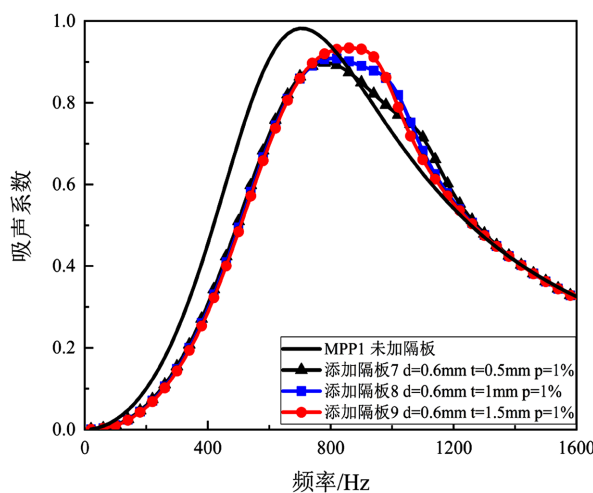
Figure 4. Sound absorption effect of adding perforated baffles with different perforation ratios
图 4. 添加不同穿孔率的穿孔隔板的吸声效果

穿孔隔板的孔径、穿孔率会影响结构的吸声效果, 较大孔径会有着较宽的吸声带宽, 较小穿孔率和较大板厚会提高结构的最大吸声系数, 因此在实际使用时可选用大孔径、小穿孔率的穿孔隔板, 但尺寸的选取并非越大越好, 也并非越小越好, 应根据实际需求确定恰当的结构参数。

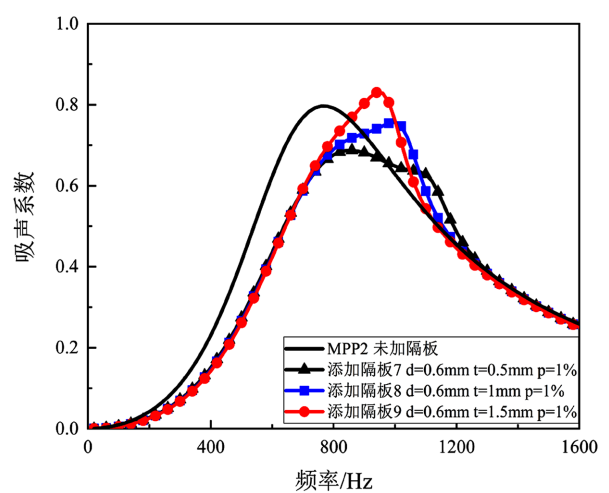
3.3. 穿孔隔板厚度的影响

通过在三种参数的微穿孔板结构背腔内分别添加穿孔隔板 7~9, 研究穿孔隔板板厚对结构吸声性能的影响, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 添加穿孔隔板之后, 结构的共振频率略向高频移动, 添加穿孔隔板的板厚越大, 结构的最大吸声系数越大。当穿孔隔板的板厚逐渐减小时, 结构的第二个吸声系数峰值逐渐明显, 而且对应频率向高频移动。虽然较大的板厚使得结构拥有较大的最大吸声系数, 但随着板厚的增加, 结构有效吸声频带却逐渐较小。因此, 要根据实际要求确定穿孔隔板的板厚, 当需要较大吸声系数时可选择较大板厚的穿孔隔板, 需要较宽有效吸声频带时可以选用板厚略小的穿孔隔板。



(a) MPP₁ 添加不同板厚的穿孔隔板



(b) MPP₂ 添加不同板厚的穿孔隔板

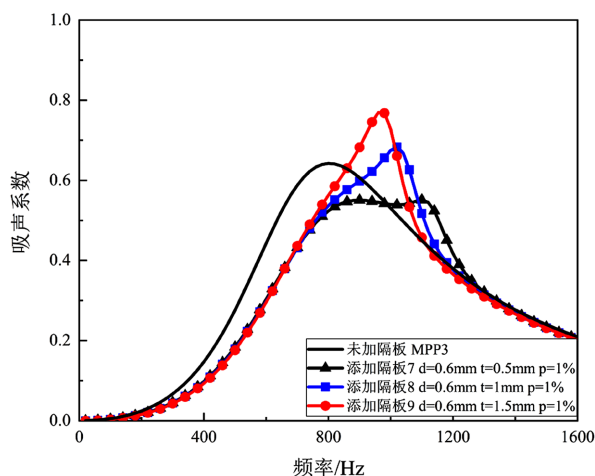
(c) MPP₃ 添加不同板厚的穿孔隔板

Figure 5. Sound absorption effect of adding perforated baffles with different thicknesses
图 5. 添加不同板厚的穿孔隔板的吸声效果

穿孔隔板的孔径、穿孔率和板厚会影响结构的吸声效果, 较大孔径会有着较宽的吸声带宽, 较小穿孔率和较大板厚会提高结构的最大吸声系数, 因此在实际使用时可选用大孔径、小穿孔率、大板厚的穿孔隔板, 但尺寸的选取并非越大越好, 也并非越小越好, 应根据实际需求确定恰当的结构参数。

4. 试验验证

本文使用透光性较好、表面光滑、易加工的亚克力板制作微穿孔板结构的背腔, 利用光敏树脂 3D 打印制作微穿孔板结构的微穿孔板, 如此制作的试样表面光滑、符合试验要求。试样的背腔为高 50 mm、长和宽均为 100 mm 的长方体。试样参数如表 3 所示, 示意图如图 6 所示:

Table 3. The parameters of sample
表 3. 试样参数

| 类型 | 孔径 | 穿孔率 | 板厚 |
|------|--------|--------|------|
| 上面板 | 0.5 mm | 2.137% | 1 mm |
| 穿孔隔板 | 1 mm | 4.145% | 1 mm |

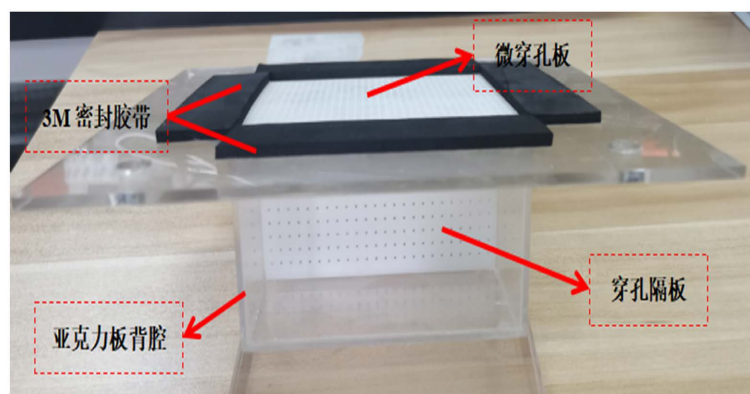


Figure 6. The experimental samples
图 6. 试验试样

本文采用传递函数测量吸声系数的方法对样品的吸声系数进行测量, 测量系统如图 7 所示。该系统主要由阻抗管、功率放大器、多通道采集分析仪组成。样品的吸声系数是通过交换通道的方法得到的, 即测量两个固定位置的声压和两个通道的传递函数。



Figure 7. Test measurement system
图 7. 试验测量系统

通过交换通道测量得到图 8 所示的结果, 相比于未添加穿孔隔板的微穿孔板结构, 添加穿孔隔板之后, 结构的共振频率向高频移动 85 Hz, 而且结构的最大吸声系数上升了 0.08, 结构的降噪效果得到了提升, 又如图 9 所示, 仿真与实验结果吻合较好, 结果表现出了一个较高的吸声系数。由于结构的上面板为边长 100 mm、厚度 1 mm 的正方形穿孔面板, 吸声系数曲线在 400~500 Hz 之间出现的吸声系数峰值便是此上面板振动所产生的。试验证明, 在添加适当尺寸的穿孔隔板之后, 微穿孔板结构的降噪效果得到提高, 因此可添加垂直上面板的穿孔隔板提高结构的降噪效果。

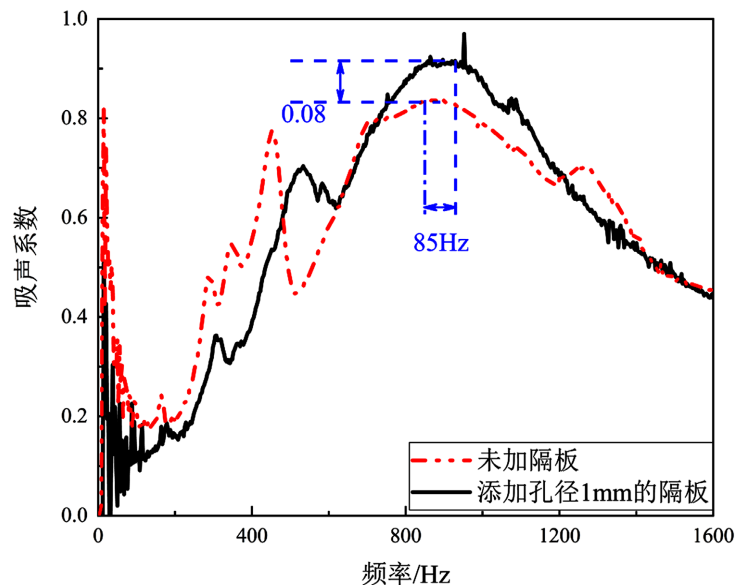


Figure 8. The experimental results after adding perforated baffle
图 8. 添加穿孔隔板试验结果

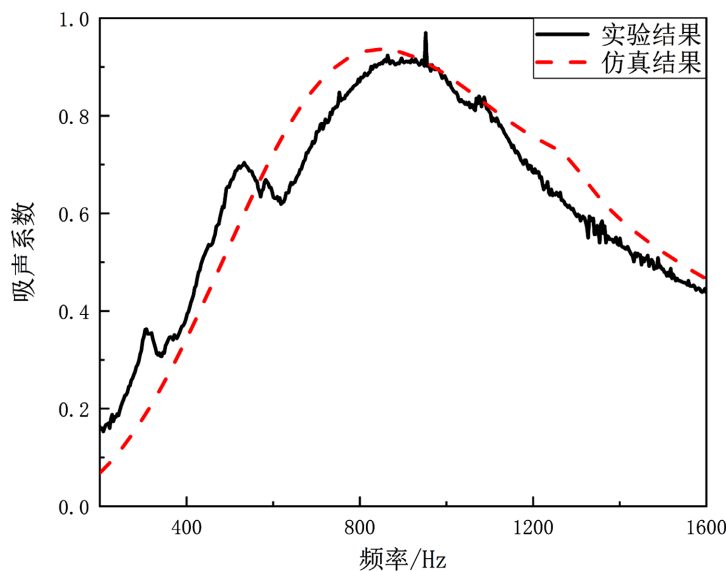


Figure 9. Comparison of experimental and simulation results

图 9. 实验与仿真效果对比图

5. 结论

为了提高微穿孔板结构的吸声性能, 本文在单层的微穿孔板结构内添加垂直上面板的穿孔隔板, 通过对三种参数的微穿孔板结构内部添加不同参数的穿孔隔板以及在阻抗管中进行试验测量, 得到以下的结论:

1) 三种参数的单层微穿孔板结构内部添加穿孔隔板之后, 结构共振频率均略向高频移动, 而且降噪效果不佳的微穿孔板结构在添加穿孔隔板之后, 吸声效果提高更为明显。

2) 穿孔隔板的孔径逐渐增大时, 结构的最大吸声系数也逐渐增大。

3) 穿孔隔板的穿孔率较小时, 结构有着较大的最大吸声系数, 但当穿孔隔板的穿孔率增大时, 结构出现第二个吸声系数峰值。

4) 穿孔隔板的板厚较大时, 结构有着较大的最大吸声系数, 但较小板厚的穿孔隔板使得结构有着较宽的有效吸声频带。

利用穿孔隔板提高结构的吸声性能时, 可选用大孔径、小穿孔率以及大板厚的穿孔隔板, 但应根据实际需求确定恰当的结构参数。

基金项目

国家自然科学基金项目(51965041)。

参考文献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22(5): 385-394.
- [2] Zhao, D. and Li, X.Y. (2015) A Review of Acoustic Dampers Applied to Combustion Chambers in Aerospace Industry. *Progress in Aerospace Sciences*, **74**, 114-130. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.12.003>
- [3] 王占学, 乔渭阳, 李文兰. 微穿孔板消声器在 MA60 飞机 APU 排气管的应用[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 331-335.
- [4] Beck, B.S., Schiller, N.H. and Jones, M.G. (2015) Impedance Assessment of a Dual-Resonance Acoustic Liner. *Applied Acoustics*, **93**, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.011>
- [5] 赵晓丹, 胡鹏, 孙平. 多层微穿孔板结构声学性能计算方法对比分析[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 196-201.

- [6] Qian, Y.J., Cui, K., Liu, S.M., *et al.* (2014) Optimization of Multi-Size Micro-Perforated Panel Absorbers Using Multi-Population Genetic Algorithm. *Noise Control Engineering Journal*, **62**, 37-46. <https://doi.org/10.3397/1/376204>
- [7] Jiang, C., Li, X., Cheng, W., *et al.* (2019) Acoustic Impedance of Microperforated Plates with Stepwise Apertures. *Applied Acoustics*, **157**, Article ID: 106998. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.106998>
- [8] Qian, Y.J., Kong, D.Y., Liu, S.M., *et al.* (2013) Investigation on Micro-Perforated Panel Absorber with Ultra-Micro Perforations. *Applied Acoustics*, **74**, 931-935. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.01.009>
- [9] Mosa, A.I., Putra, A., Ramlan, R., *et al.* (2020) Absorption Coefficient of a Double-Layer Inhomogeneous Micro-Perforated Panel Backed with Multiple Cavity Depths. *Acoustics Australia*, **48**, 69-78. <https://doi.org/10.1007/s40857-020-00176-4>
- [10] Wang, C.Q. and Huang, L.X. (2011) On the Acoustic Properties of Parallel Arrangement of Multiple Micro-Perforated Panel Absorbers with Different Cavity Depths. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **130**, 208-218. <https://doi.org/10.1121/1.3596459>
- [11] Kim, H.S., Ma, P.S., Kim, B.K., *et al.* (2019) Low-Frequency Sound Absorption of Elastic Micro-Perforated Plates in a Parallel Arrangement. *Journal of Sound and Vibration*, **460**, Article ID: 114884. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114884>
- [12] 杨军伟, 蔡俊, 邵骢. 微穿孔板——蜂窝夹芯复合结构的隔声性能[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(4): 122-125.
- [13] Zhang, X., Wu, J.W., Mao, Q.B., *et al.* (2020) Design of a Honeycomb-Microperforated Panel with an Adjustable Sound Absorption Frequency. *Applied Acoustics*, **164**, Article ID: 107246. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107246>
- [14] Yan, S., Wu, J.W., Chen, J., *et al.* (2021) Design of Honeycomb Microperforated Structure with Adjustable Sound Absorption Performance. *Shock and Vibration*, **2021**, Article ID: 6613701. <https://doi.org/10.1155/2021/6613701>
- [15] Xie, S., Yang, S., Yang, C., *et al.* (2020) Sound Absorption Performance of a Filled Honeycomb Composite Structure. *Applied Acoustics*, **162**, Article ID: 107202. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107202>
- [16] Zhao, X.D., Wang, X. and Yu, Y.J. (2018) Enhancing Low-Frequency Sound Absorption of Micro-Perforated Panel Absorbers by Combining Parallel Mechanical Impedance. *Applied Acoustics*, **130**, 300-304. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.10.001>
- [17] Tang, Y.F., Ren, S.W., Meng, H., *et al.* (2017) Hybrid Acoustic Metamaterial as Super Absorber for Broadband Low-Frequency Sound. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 43340. <https://doi.org/10.1038/srep43340>
- [18] Duan, X.H., Wang, H.Q., Li, Z.B., *et al.* (2015) Sound Absorption of a Flexible Micro-Perforated Panel Absorber Based on PVDF Piezoelectric Film. *Applied Acoustics*, **88**, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.08.009>
- [19] Romero-García, V., Krynkin, A., Garcia-Raffi, L.M., *et al.* (2013) Multi-Resonant Scatterers in Sonic Crystals: Locally Multi-Resonant Acoustic Metamaterial. *Journal of Sound and Vibration*, **332**, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.08.003>
- [20] Xie, S., Wang, D., Feng, Z., *et al.* (2020) Sound Absorption Performance of Microperforated Honeycomb Metasurface Panels with a Combination of Multiple Orifice Diameters. *Applied Acoustics*, **158**, Article ID: 107046. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107046>