

微穿孔板迷宫结构消声器的设计与研究

李林峰^{1,2}, 陈 杰¹, 吴锦武¹

¹南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌

²国立航空大学航空航天学院, 乌克兰 基辅

Email: celilinfeng@163.com

收稿日期: 2021年7月26日; 录用日期: 2021年8月23日; 发布日期: 2021年8月30日

摘 要

本文应用微穿孔板吸声体理论, 结合卷曲空间迷宫型结构, 设计了一种满足宽频带降噪的微穿孔板迷宫结构消声器, 并仿真分析了不同结构参数对消声器传递损失的影响。研究表明, 消声器传递损失随着迷宫半径的增加而增加, 而迷宫单胞面积比和层数对消声器的传递损失无明显影响; 消声器低频传递损失随着微穿孔隔板孔径和穿孔率增大而下降, 高频变化不大, 但背腔深度增加其随之增加, 传递损失共振频率由高频向低频移动。最后优化设计的消声器在200~6000 Hz的传递损失平均达到20 dB左右, 且在200 Hz~2000 Hz频段消声效果尤为明显, 最高可达57 dB。

关键词

微穿孔板, 迷宫型结构, 消声器, 传递损失

Design and Study of Micro-Perforated Plate Labyrinth Structure Muffler

Linfeng Li^{1,2}, Jie Chen¹, Jinwu Wu¹

¹School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

²Aerospace Faculty, National Aviation University, Kiev Ukraine

Email: celilinfeng@163.com

Received: Jul. 26th, 2021; accepted: Aug. 23rd, 2021; published: Aug. 30th, 2021

Abstract

In this article, based on the theory of microperforated plate sound absorber and the labyrinth structure within curling space, a microperforated plate labyrinth structure muffler is designed to meet the wide range noise reduction, and the influence of different structural parameters on the transmission loss of the muffler is simulated and analyzed. The results show that the muffler

文章引用: 李林峰, 陈杰, 吴锦武. 微穿孔板迷宫结构消声器的设计与研究[J]. 声学 & 振动, 2021, 9(3): 101-111.

DOI: 10.12677/ojav.2021.93011

transfer loss increases with the increase of the maze radius, but the area ratio of single cell and the number of layers of the maze have no significant effect on the muffler transfer loss. The muffler's low frequency transmission loss decreases with the increase of the aperture and perforation rate of the micro-perforated partition. The high frequency transmission loss changes slightly, but rises with the increase of the back cavity depth. The resonance frequency of transmission loss moves from high frequency to low frequency. The average transmission loss of the final optimized muffler is about 20 dB in the range of 200~6000 Hz, and the muffler effect is specifically significant in the frequency range of 200 Hz~2000 Hz, up to 57 dB.

Keywords

Micro-Perforated Plate, Labyrinth Structure, Muffler, Transmission Loss

Copyright © 2021 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

微穿孔板吸声结构及其理论在 20 世纪 70 年代由我国著名声学家马大猷院士首次提出[1], 在此基础上方丹群等人设计了微穿孔板消声器[2], 微穿孔板消声器具有无污染, 耐高温、防火和防腐蚀等特点被广泛运用于排气系统[3] [4] [5], 但微穿孔板消声器存在在高频的降噪表现不佳的问题。

另一方面, 声学超材料近年来发展迅速, 其中迷宫型声学超材料一直是研究的热点。迷宫型吸声结构是通过增加声波的传播路径的方式, 增加声波在空气中的损耗, 反射波与频率相同相位相反的入射波相互叠加抵消, 达到消声的效果。刘金春等人[6]通过迷宫结构实现了具有低频、宽带吸声系数的共振消音箱的设计。Cheng 等人[7]设计了一种基于米氏共振单元的高对称性折叠空间结构, 实现负等效体积模量效果。Kumar 等人[8]提出了一种兼顾通风和吸声的亚波长迷宫声学结构, 具有优越的高带宽吸声性能。Liu 等人[9]通过卷曲空间设计了一种螺旋盘绕型声学超材料, 并对其隔声性能进行了分析研究。

本文以迷宫型卷曲空间结构为基础, 在其内部加入微穿孔隔板, 构成一种微穿孔板迷宫复合结构消声器。在保证降低压力损失的同时, 实现宽频带范围降噪。

2. 消声器声学理论分析

2.1. 微穿孔板传递矩阵

微穿孔板是由一种穿有许多微孔的薄板和背腔构成。图 1 为微穿孔板结构示意图, 其中 d 为微孔直径, t 为板厚, D 为背腔深度, a 为相邻两个微孔之间的孔心间距。

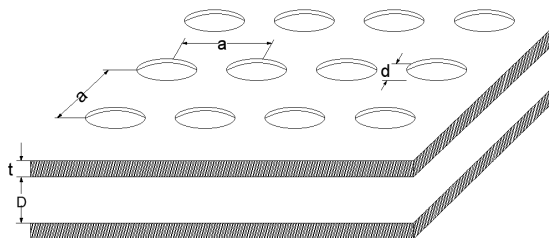


Figure 1. Structure diagram of micro-perforated plate
图 1. 微穿孔板结构示意图

首先可以将微穿孔板的传递矩阵 $[M]$ 写为

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, Z 为微穿孔板的声阻抗率, 等于

$$Z = \rho_0 c_0 (R + j\omega M) \quad (2)$$

$$R = \frac{32\eta t}{\sigma \rho_0 c_0 d^2} \left[\sqrt{1 + \frac{K^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}K d}{8 t} \right] \quad (3)$$

$$M = \frac{t}{\sigma c_0} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{K^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (4)$$

其中 ρ_0 和 c_0 分别为空气密度与声速, j 为虚数单位, ω 为角频率, η 为空气粘度系数, t 为微穿孔板厚度, d 为穿孔直径, σ 为穿孔率, $K = d\sqrt{\frac{f}{10}}$ 为微穿孔板常数。

2.2. 迷宫结构传递矩阵

迷宫型结构(如图2所示)是利用卷曲空间使声波沿弯折的通道传播, 相较直线传播其传播总路径增长, 因此声波的相位会发生相应的延迟, 反射波与频率相同相位相反的入射波相互叠加抵消, 可以等效为四分之一波长管如图3所示, 等效的过程实际上是把卷曲的管道“拉直”。

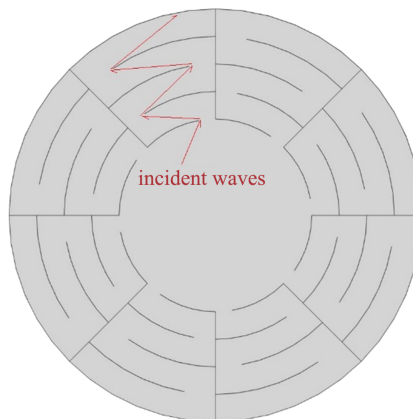


Figure 2. Diagram of labyrinth structure section

图2. 迷宫结构截面示意图

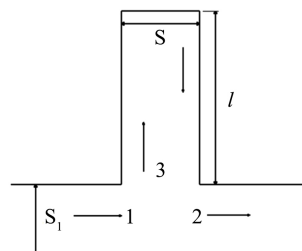


Figure 3. Labyrinth equivalent model

图3. 迷宫结构等效模型

由于四分之一波长管一端封闭, 则在管内传播的传递矩阵为

$$\begin{bmatrix} P_{in} \\ U_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & j \frac{\rho_0 c_0}{S} \sin kl \\ j \frac{S}{\rho_0 c_0} \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{out} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, P_{in} , U_{in} 分别为四分之一波长管管道口的声压和体积速度, P_{out} 为四分之一波长管封闭端壁面处的声压, S , l 分别是管道横截面积和长度, $k = \omega/c$ 为波数。

根据上式可得

$$U_{in} = j \frac{S}{\rho_0 c_0} \tan kl P_{in} \quad (6)$$

由声压和体积速度连续的边界条件可得, 位置 1 到位置 2 的传递矩阵

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j \frac{S}{\rho_0 c_0} \tan kl & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

P_1 , U_1 , P_2 , U_2 分别是位置 1, 位置 2 的声压和体积速度。

整个四分之一波长管结构的传递矩阵为

$$\begin{bmatrix} P_l \\ U_l \end{bmatrix} = [T_1] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j \frac{S}{\rho_0 c_0} \tan kl & 1 \end{bmatrix} [T_2] \begin{bmatrix} P_0 \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

已知传递矩阵法计算传声损失公式为

$$TL = 20 \lg \left| \frac{1}{2} \left(A + B \frac{S_l}{\rho_0 c_0} + C \frac{\rho_0 c_0}{S_0} + D \frac{S_0}{S_l} \right) \right| \quad (9)$$

其中, P_l , U_l , P_0 , U_0 分别为主管道上下游的声压和体积速度, S_l , S_0 分别为主管道上下游的横截面积。

假设进口管和出口管的横截面积相等, 即 $S_l = S_0 = S_1$, 将 A 、 B 、 C 、 D 代入求得四分之一波长管的传声损失公式为:

$$TL = 20 \lg \left| 1 + \frac{S}{2S_1} j \tan kl \right| \quad (10)$$

3. 迷宫结构参数对迷宫型消声器消声性能的影响

本文采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 压力声学频域模块计算迷宫型消声器的传递损失, 建立如图 4 所示的迷宫型消声器有限元计算模型。消声器由主管道和迷宫结构夹层构成, 消声器主管道出入口半径 r 为 7 cm, 主管道总长 60 cm; 迷宫结构半径 R 为 15 cm, 层数 N 为 4, 长度为 60 cm。本仿真计算的研究对象为空气域, 在划分网格时, 需考虑网格单元长度要小于最高计算频率点处波长的 1/6, 本模型研究的频域范围为 200 Hz~6000 Hz。

迷宫结构主要有 3 个参数, 分别是半径 R , 层数 N 以及迷宫单胞面积占圆环总面积的比例 S , 如迷宫结构示意图图 2 所示, 该结构迷宫单胞面积占圆环总面积的 1/8, 本文简称为迷宫单胞面积比。现通过 COMSOL 仿真软件讨论迷宫结构参数对传递损失的影响。

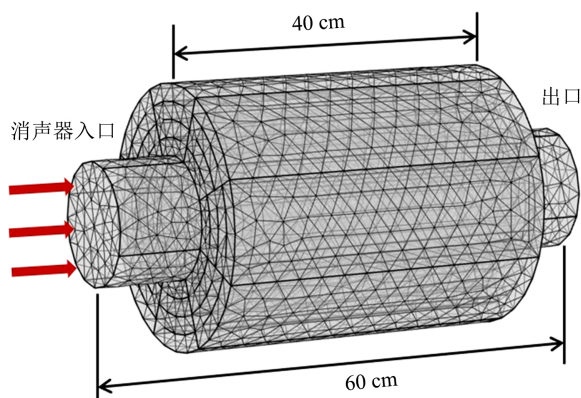


Figure 4. The finite element calculation model of labyrinth muffler
图 4. 迷宫型消声器有限元计算模型

3.1. 半径 R 对传递损失的影响

分析迷宫半径不同的迷宫型消声器对传递损失的影响。设置迷宫半径 S 分别为 12 cm、15 cm、19 cm，其他参数取值分别为层数 N 为 4，迷宫单胞面积比 S 为 $1/8$ 。不同半径的迷宫型消声器对应的传递损失曲线如图 5 所示。

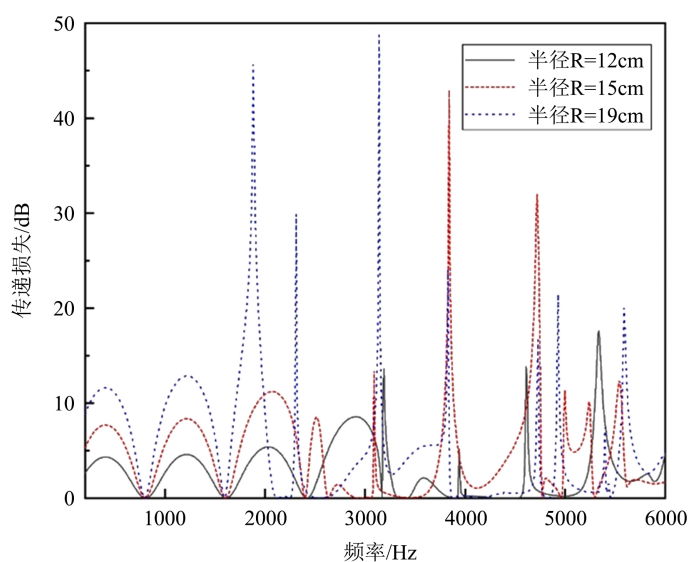


Figure 5. Transmission loss curve of different labyrinth radius
图 5. 不同迷宫半径的传递损失曲线

对比分析可以发现，随着迷宫半径的增大，低频损失变化明显，传递损失增加，频带变宽，传递损失峰值向低频移动，但是高频部分传递损失有所增加但频带变窄。迷宫半径的增大使声传播路径变长，加大了声损耗。由此可知，想要提高迷宫型消声器的低频消声降噪能力，应设计较大的迷宫半径，但会牺牲高频的带宽，故可以通过变截面半径实现不同半径，达到宽频消声的目的。

3.2. 迷宫单胞面积比 S 和层数 N 对传递损失的影响

迷宫单胞面积比是指迷宫单胞面积占整个迷宫结构总面积的比例。为研究不同迷宫单胞面积比对迷

宫型消声器传递损失的影响, 设置迷宫单胞面积比 S 分别为 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$, 其余参数分别设置为层数 4, 半径 15 cm。计算结果如图 6 所示。

通过图 6 可以发现, 改变迷宫单胞面积比对消声器的消声性能无明显影响。同样的, 对不同层数的迷宫型消声器进行仿真计算, 对比传递损失结果发现迷宫层数对消声器消声性能没有明显影响。

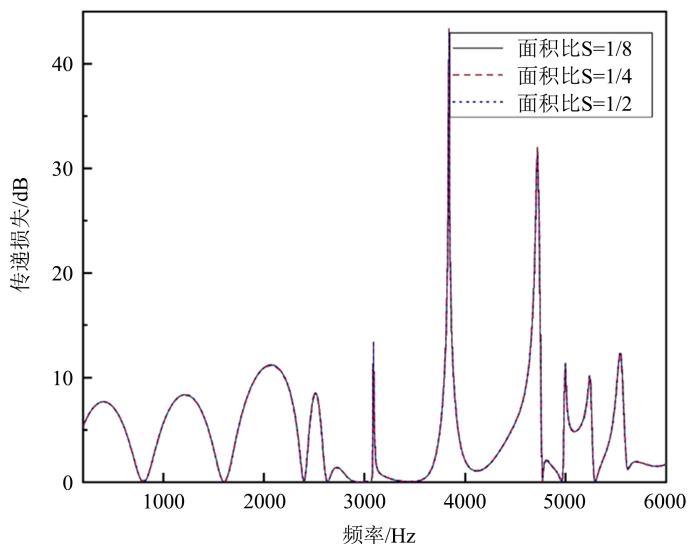


Figure 6. Transmission loss curve of different labyrinth cell area ratio
图 6. 不同迷宫单胞面积比的传递损失曲线

4. 微穿孔板迷宫结构消声器模型

微穿孔板迷宫结构消声器的示意图如图 7 所示, 该结构由主管道和迷宫结构夹层和微穿孔板隔板构成。在迷宫型消声器的内腔中心处加入微穿孔隔板, 对其传递损失进行计算, 计算结果如图 8 所示。

对比分析不难发现, 加入微穿孔隔板后, 消声器的中低频消声特性明显提升, 低频传递损失峰值增加, 频带变宽, 加入微穿孔隔板之前传递损失共振频率处频带极窄, 加入隔板后, 虽然共振频率峰值有所降低, 但频带明显加宽。产生差异的原因是声传播路径和结构声阻抗边界的变化。由此可见, 加入微穿孔隔板后将提升消声器的中低频消声特性。

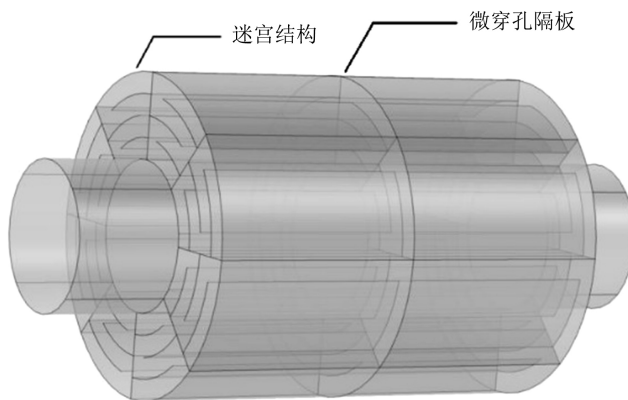


Figure 7. Diagram of micro-perforated plate labyrinth muffler
图 7. 微穿孔板迷宫结构消声器示意图

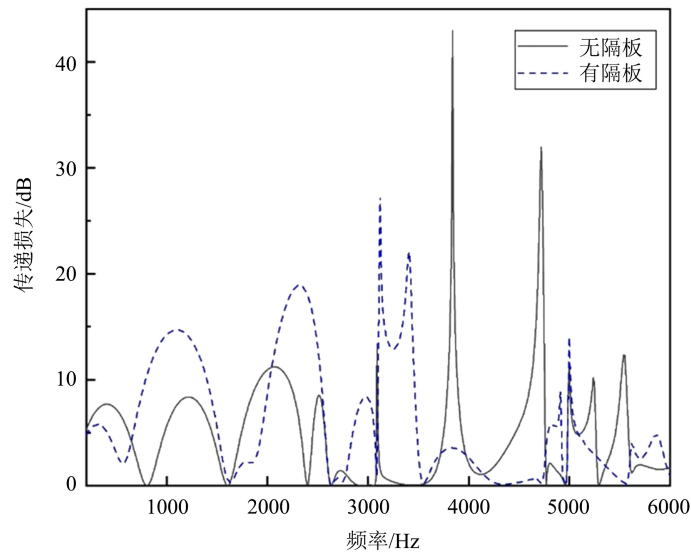


Figure 8. Influence of micro-perforated partition on muffler transmission loss

图 8. 微穿孔隔板对消声器传递损失的影响

5. 微穿孔板结构参数对消声性能的影响

现讨论微穿孔板结构参数对微穿孔板迷宫结构消声器的消声性能影响，下文将分别对微穿孔板结构四大参数：孔径 d 、板厚 t 、穿孔率 p 和背腔深度 D 进行探讨。

5.1. 孔径对传递损失的影响

分析微穿孔隔板穿孔半径不同对传递损失的影响。设置微穿孔隔板孔径 d 分别为 0.3 mm、1 mm、3 mm，其他参数取值分别为板厚 t 为 3 mm，穿孔率 p 为 3%，背腔深度 D 为 20 cm。不同孔径的微穿孔板迷宫结构消声器对应的传递损失曲线如图 9 所示。

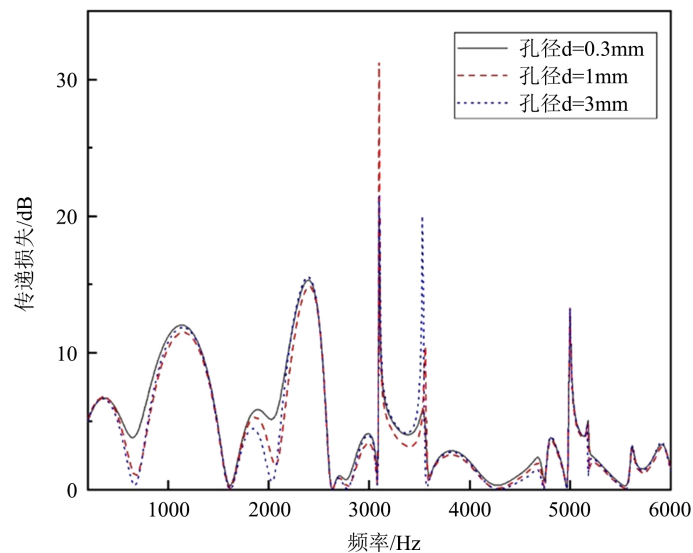


Figure 9. Transmission loss curves of different apertures

图 9. 不同孔径的传递损失曲线

对比分析可以发现,随着微穿孔隔板孔径的增大,低频传递损失略有下降,频带变窄,但最大传递损失峰值有所增加,高频变化不大。因为随着孔径的增大,声波透射量略有增大,同时空气在微孔中摩擦产生声阻。因此,在微穿孔板迷宫结构消声器的设计过程中,可以适当减小微穿隔板孔径,以获得更好的中低频消声性能。

5.2. 板厚对传递损失的影响

分析微穿孔隔板板厚不同对传递损失的影响。设置微穿孔隔板板厚 t 分别为 1 mm、3 mm、5 mm,其他参数取值分别为孔径 d 为 1 mm,穿孔率 p 为 3%,背腔深度 D 为 20 cm。不同板厚的微穿孔板迷宫结构消声器对应的传递损失曲线如图 10 所示。

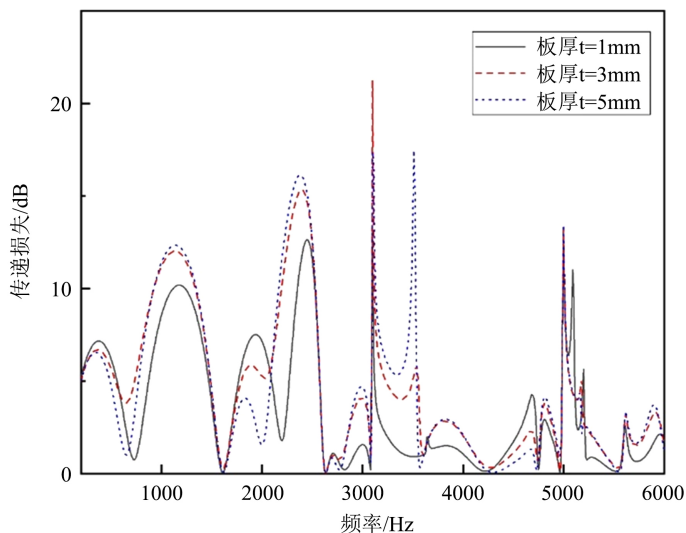


Figure 10. Transmission loss curves of different plate thickness

图 10. 不同板厚的传递损失曲线

从图中可以看出,随着板厚逐渐增加,传递损失也相应增大,频带加宽,最大传递损失峰值增加明显。板厚增加使声波透射难度加大,能实现更多的声反射消耗,从而增加传递损失。由以上可知,在微穿孔板迷宫结构消声器设计过程中,板厚可以适当加大,以获得更好的消声降噪性能。

5.3. 穿孔率对传递损失的影响

分析微穿孔隔板穿孔率不同对传递损失的影响。设置微穿孔隔板穿孔率 p 分别为 1%、2%、4%,其他参数取值分别为孔径 d 为 0.3 mm,板厚 t 为 5 mm,背腔深度 D 为 20 cm。不同穿孔率的微穿孔板迷宫结构消声器对应的传递损失曲线如图 11 所示。

从图中可以看出,随着穿孔率逐渐增加,传递损失减小,频带变窄,最大传递损失峰值减小。原因是穿孔率增加导致声阻抗变小,声透射增加,从而传递损失减小。由以上可知,在消声器设计过程中,应采取较小的穿孔率以获得更好的消声效果。

5.4. 背腔深度对传递损失的影响

微穿孔隔板背腔深度即微穿孔隔板离迷宫结构末端的距离,分析微穿孔隔板背腔深度不同对传递损失的影响。设置微穿孔隔板背腔深度分别为 5 cm、10 cm、20 cm,其他参数取值分别为孔径 d 为 0.3 mm,板厚 t 为 5 mm,穿孔率 p 为 3%。不同背腔深度的微穿孔板迷宫结构消声器对应的传递损失曲线如图 12 所示。

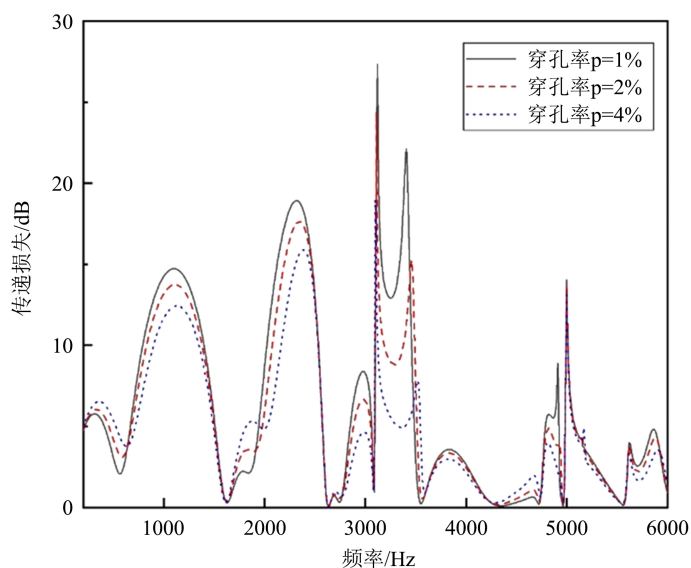


Figure 11. Transmission loss curves of different perforated percentage

图 11. 不同穿孔率的传递损失曲线

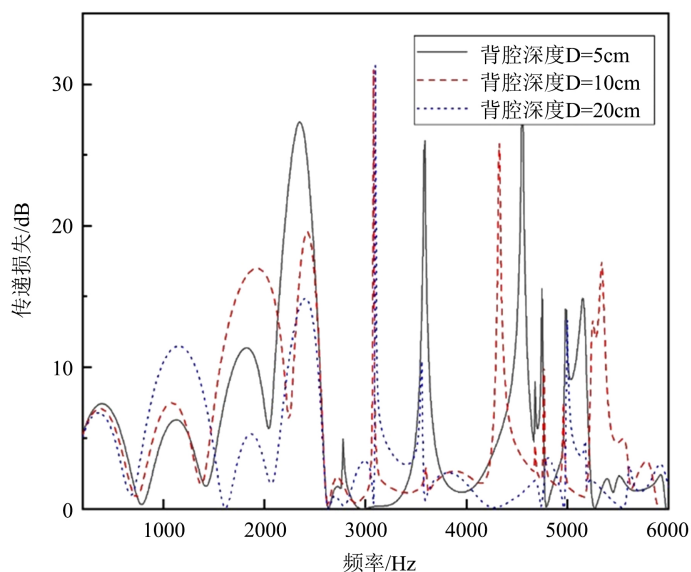


Figure 12. Transmission loss curves of different back cavity depths

图 12. 不同背腔深度的传递损失曲线

从图中可以看出,随着背腔深度逐渐加大,传递损失共振频率由高频向低频移动,低频传递损失明显增加,频带加宽,高频传递损失略有下降,频带变窄。背腔深度增加导致空气阻抗增加,从而使传递损失增加。由以上可知,在消声器设计过程中,可以设计多个不同背腔深度以拓宽消声频带。

6. 微穿孔板迷宫结构消声器优化

根据以上对微穿孔板迷宫结构消声器消声特性的研究,可通过变截面实现宽范围的迷宫半径,在迷宫结构中间插入3层微穿孔隔板将其分为4段,长度分别为2、6、12、20 cm,总长度40 cm,消声器主管道长60 cm,如图13所示。

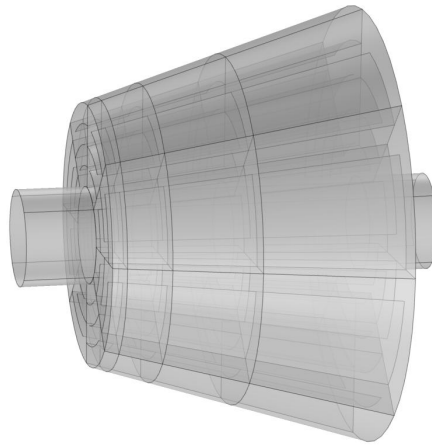


Figure 13. Micro-perforated plate labyrinth structure muffler structure diagram

图 13. 微穿孔板迷宫结构消声器结构图

设置第一层微穿孔板孔径为 0.3 mm，板厚为 3 mm，穿孔率 1%，第二层微穿孔板孔径为 0.2 mm，板厚为 4 mm，穿孔率 1%，第三层微穿孔板孔径为 0.1 mm，板厚为 5 mm，穿孔率 1%，通过 COMSOL Multiphysics 仿真软件测量消声器传递损失结果如图 14 所示。

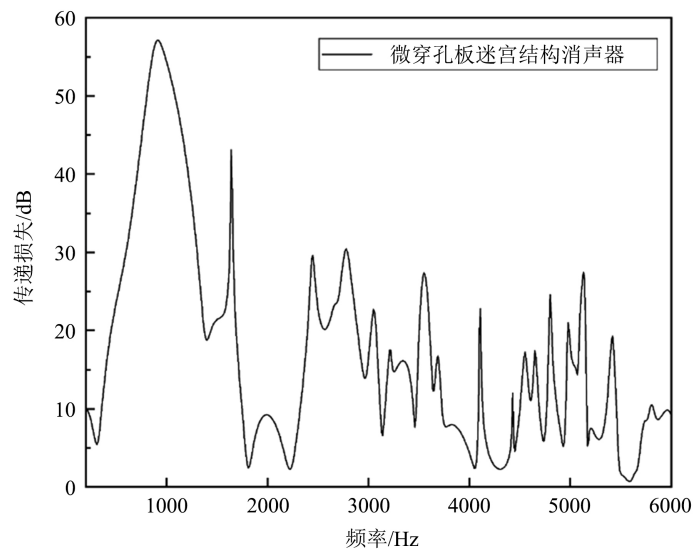


Figure 14. Transmission loss curves of micro-perforated plate labyrinth structure muffler

图 14. 微穿孔板迷宫结构消声器的传递损失曲线

从优化结果来看，微穿孔板迷宫结构消声器在 200~6000 Hz 的传递损失平均达到 20 dB 左右，实现了宽频带消声。且在 300 Hz~2000 Hz 频段，低频消声降噪效果尤为明显，传递损失最高可达 57 dB。

7. 结论

本文根据微穿孔板吸声体理论，结合卷曲空间迷宫结构，设计了一种新型复合消声器，即微穿孔板迷宫结构消声器，通过对迷宫结构变截面设计使消声器具有不同的迷宫半径，从而实现宽频带消声要求。

在此基础上,分析了迷宫结构和微穿孔隔板的结构参数对消声器传递损失的影响,研究表明:

1) 随着迷宫半径增大,消声器低频传递损失增加,频带加宽,传递损失峰值向低频移动。而迷宫层数和单胞面积比对消声器的消声性能无明显影响。

2) 中低频传递损失随着微穿孔隔板孔径增大而略微下降,但最大峰值有所增加,高频变化不大。传递损失随板厚增加而增加,频带加宽。随着穿孔率增加,消声器中低频传递损失减小,频带变窄。消声器传递损失随着背腔深度增加而增加,传递损失共振频率由高频向低频移动。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51965041)。

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.
- [2] 方丹群, 孙家其, 冯瑀正. 微穿孔板消声器及其在高速气流下的消声性能[J]. 物理, 1975(4): 200-203.
- [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(3): 331-335.
- [4] 侯献军, 田翠翠, 刘志恩, 颜伏伍. 双层串联微穿孔板消声器的设计与试验[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1094-1096.
- [5] 章莉, 杨臣. 核电通风系统双层微穿孔板消声器研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(11): 28-31.
- [6] 刘金春, 李勇. 迷宫式低频宽带消音箱在旋风除尘器排气降噪中的应用[J]. 污染防治技术, 1997(2): 94-96.
- [7] Cheng, Y., Zhou, C., Yuan, B.G., *et al.* (2015) Ultra-Sparse Metasurface for High Reflection of Low-Frequency Sound Based on Artificial Mie Resonances. *Nature Materials*, **14**, 1013-1019. <https://doi.org/10.1038/nmat4393>
- [8] Kumar, S. and Lee, H. (2020) Labyrinthine Acoustic Metastructures Enabling Broadband Sound Absorption and Ventilation. *Applied Physics Letters*, **116**, Article ID: 134103. <https://doi.org/10.1063/5.0004520>
- [9] Liu, C.M., Xia, B.Z. and Yu, D.J. (2017) The Spiral-Labyrinthine Acoustic Metamaterial by Coiling up Space. *Physics Letters A*, **381**, 3112-3118. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.07.041>