

基于框架式板型声学超材料低频隔声模型设计

翟秋辉

兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年7月3日; 发布日期: 2024年7月16日

摘要

与传统隔声材料相比, 声学超材料具有更好的低频隔音性能, 因此广受欢迎。针对低频声波的控制, 本文提出了一种圆形孔洞的框架式板状声学超材料。该结构由周期性方形超材料单元的大型板式声学超材料和带有相同圆孔的双面框架组成。根据有限元法研究了框架型板状声学超材料的声传输损失, 计算了其等效质量密度和振动位移, 并结合其在隔声峰和隔声谷处的振动模态进一步验证了所设计的超材料结构的局域共振特性。所设计的超材料结构能够在100~500 Hz频率范围内有效隔离低频噪声, 最大可得到43 dB的声衰减, 从而达到良好的低频隔声效果。随后, 讨论了单一几何参数和材料参数对传声损耗的影响。所提出的框架型板声学超材料结构可能有助于声学超材料的工程应用。

关键词

声学超材料, 框架, 低频, 隔声性能

Design of Low-Frequency Sound Insulation Model Based on Framed Plate Acoustic Metamaterials

Qiuhui Zhai

School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 28th, 2024; accepted: Jul. 3rd, 2024; published: Jul. 16th, 2024

Abstract

Acoustic metamaterials are popular because they have better low-frequency sound insulation properties than conventional sound insulation materials. For the control of low-frequency sound waves, a framed plate acoustic metamaterial with circular holes is proposed in this paper. The structure consists of a large plate-type acoustic metamaterial with periodic square metamaterial

cells and a double-sided frame with identical circular holes. The acoustic transmission loss of the frame-type plate acoustic metamaterial is investigated based on the finite element method, and its equivalent mass density and vibration displacement are calculated, which are combined with its vibration modes at the peak and valley values of acoustic isolation to further verify the local resonance characteristics of the designed metamaterial structure. The designed metamaterial structure can effectively isolate low-frequency noise in the frequency range of 100~500 Hz with a maximum sound attenuation of 43 dB, thus achieving good low-frequency sound insulation. Subsequently, the effects of single geometrical and material parameters on the sound transmission loss are discussed. The proposed frame-type plate acoustic metamaterial structure may be useful for engineering applications of acoustic metamaterials.

Keywords

Acoustic Metamaterial, Frame, Low-Frequency, Sound Insulation Performance

Copyright © 2024 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

低频噪声的声波较长,传播距离远,衰减较慢,容易发生绕射,而且具有强大的穿透能力,可以轻易地透过障碍物进入室内,对人们的正常生产、生活、学习和身体健康造成严重的影响。通过传统方法有效地控制低频振动和噪声是富有巨大的挑战性。例如,均匀板主要用于衰减噪声,而其隔声能力服从质量密度定律,与频率和表面密度成正比[1]-[3]。在实际应用中,结构的质量和空间受到约束时,均质板很难有效地衰减低频声波。传统隔声结构不足以符合生产轻量化和小型化的机械设备以及工程应用发展的要求。

目前,针对低频噪声控制的隔声型声学超材料的研究比较广泛,国内外研究者基于表面辐射相位相消机制设计的隔声型声学超材料可以实现低频反共振。通常将声学超材料置于声源与接收者之间,当声波通过声学超材料结构时,会产生反射和吸收,其中隔声型的超材料是以反射为主。隔声型的声学超材料是利用薄结构实现低频噪声和振动的降低,同时可以满足轻量化的要求,是实际应用中很需要的[4]。隔声型的声学超材料可以分为薄膜型[5][6]和薄板型[7]-[10]声学超材料。

薄膜型声学超材料是在2008年由Yang等人[6]首次提出,将质量块附加在张紧的弹性薄膜上,以轻量化的结构在低频段下突破质量定律的限制,将声波全反射。Naify等人[11]设计了一种由圆柱状的振子分布在膜的正中间且框架约束的薄膜型声学超材料,明确了张力对声传输损失的影响。之后,提出单个薄膜由刚性框架支撑拉伸,并将不同质量大小的谐振子分布在每个膜的中心组成膜型声学超材料,对其进行声传输损失测量[5]。Yan等人[12]设计了一种在薄膜上分布月牙形状和椭圆形状的非对称薄膜型声学超材料结构,利用结构的不对称性拓宽了低频隔声频带。膜型声学超材料在低频均能实现良好的隔声特性,但是薄膜需要张力来拉伸。随后,研究者使用板来代替薄膜,利用板的刚度来控制板的振动。Xiao等人[7]提出一种由薄板和二维周期阵列的圆柱谐振子构成的板型声学超材料,该超材料结构也具有反共振特性,还系统地研究了结构参数对隔声峰频带的影响,并进一步制备大样品进行实验测试和验证。Langfeldt等人[13]提出了一种带环形附加质量的大尺寸的板型声学超材料,对有限声学超材料结构和无限声学超材料结构的声传输损失进行对比,随着有限声学超材料单胞个数的增加,声传输损失逐渐趋向于无限声学超材料结构的声传输损失。Zhang等人[14]提出将外部电路连接到板状型声学超材料的方谐振

振子的两端，通过改变电路的电感和电阻来调控隔声频率。

然而，以上所述的附着在薄膜、薄板上的谐振器都是离散的，每平方米分布成千上万离散的谐振器，这导致了昂贵的制造成本，并且加工制造上也带来了一定的难度[15]。为了减少谐振器的数量，Langfeldt和 Gleine [16]在保持改进后的传输损失的同时，设计了一种简单的长条状谐振器的板型声学超材料。Wang等人[17]计算了长条状板型声学超材料结构的声传输损失、负等效质量面密度和振动模态，并将其与实验进行对比，揭示了该超材料的低频隔声机理，但此类型的谐振器仍是离散的。

为了改进加工过程中谐振子的离散性，本文设计了一种框架式薄板型声学超材料，将框架放置于超材料板的上下的一种框架式薄板型声学超材料，用框架来代替谐振单元，框架将板加紧既可以减小超材料板的弯曲振动，也便于加工制造和应用，同时还能增加超材料结构的使用年限。

2. 结构设计

如图 1 所示，提出了一种圆孔框架式声学超材料板来有效的控制低频噪声的传播。此超材料板由三部分组成，中间是一层薄板，在上下放置带圆孔的方形支撑框架，使其紧密的结合在一起。其中单胞的晶格常数 $a = 70 \text{ mm}$ ，薄板的厚度为 $h_p = 0.2 \text{ mm}$ ，支撑框架的厚度 $h_f = 5 \text{ mm}$ ，圆孔的直径 $d_p = 64 \text{ mm}$ 。超材料板和框架使用的材料分别是铝和环氧树脂，具体的材料参数如表 1 所示。通过调整结构各部分的几何尺寸和材料参数，可以得到超材料结构的局部反共振频率和共振频率。

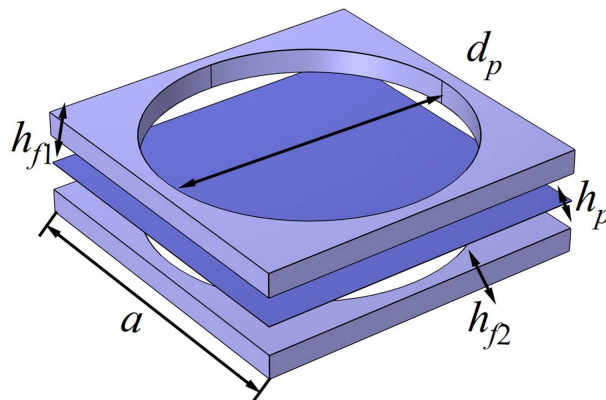


Figure 1 The structure of double-sided framed plate-type acoustic metamaterials

图 1. 双面框架式板型声学超材料结构

Table 1. Material parameters of double-sided framed plate-type acoustic metamaterial

表 1. 双面框架式板型声学超材料的材料参数

| 材料 | 密度 | 杨氏模量 | 泊松比 | 阻尼 |
|------|-----------------------|--------------------|-------|------|
| 亚克力 | 1100 kg/m^3 | 2.00 GPa | 0.389 | 0.07 |
| 光敏树脂 | 1180 kg/m^3 | 4.35 GPa | 0.370 | / |

3. 有限元模型

在文中采用有限元法计算的无限周期框架式薄板型声学超材料的原理图如图 2 所示。数值模拟使用 COMSOL Multiphysics 5.6 的声学 - 结构相互作用界面。多物理耦合区域分为两个空气域和一个固体域。为了防止声波的多次混响，在空气域的两侧添加了完美匹配层(PML)。由于框架式薄板型声学超材料是无限周期的，因此在固体域、两个空气域和两个完美匹配层的横向边界添加 Floquet-Bloch 边界条件。

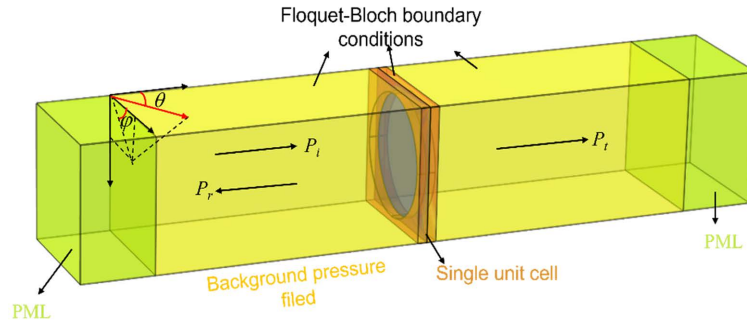


Figure 2. Finite Element Method model for calculating the sound transmission loss of double-sided framed plate-type acoustic metamaterials

图 2. 双面框架式板型声学超材料声传输损失的有限元模型

声波入射到框架式薄板型声学超材料时，其传播方向与 z 方向的夹角称为仰角(θ)，与 x 方向的夹角称为方位角(φ)。入射声波的振幅(P_i)设为 1 Pa，并在入射声域中加入背景压力场。入射到框架式薄板型声学超材料上的声波将产生透射声压(P_t)和反射声压(P_r)。入射声压表示为

$$p_{in}(x, y, z, t) = p_{in}(x, y, z)e^{-i\omega t} = p_i e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

其中， k_x 、 k_y 、 k_z 由声波的波矢量 k_0 分解而来，可以用仰角和方位角表示：

$$k_x = k_0 \sin \theta \cos \varphi, k_y = k_0 \sin \theta \sin \varphi, k_z = k_0 \cos \theta, k_0 = \omega/c_0, \quad (2)$$

入射声功率(W_{in})和透射声功率(W_{out})是通过对声波在实体域中的入射面和出射面的声压进行面积积分得到的。

$$W_{in} = \int \frac{P_0^2 \cos \theta}{2\rho_0 c_0} dS_{in}, \quad (3)$$

$$W_{out} = \int I_z dS_{out}, \quad (4)$$

其中， ρ_0 和 c_0 分别为入射空气的密度和声速， I_z 代表 z 方向透射平面的声能。 S_{in} 和 S_{out} 分别代表声波入射面和出射面的面积。因此，可以得到 FPAM 的 STL：

$$STL = 10 \lg(W_{in}/W_{out}), \quad (5)$$

同时，公式(6)和(7)也可用来表示框架式薄板型声学超材料的法向位移和等效质量密度。

$$d_z = \bar{x}, \quad (6)$$

$$m_{eff} = \frac{\int P_i dS_{in} - \int P_r dS_{out}}{\int a dV}, \quad (7)$$

其中， x 和 a 分别表示薄板在 z 方向上的位移和加速度，“ $\bar{\quad}$ ”表示薄板域内的体积平均算子， dV 是单元格结构的体积积分[7] [18]。

4. 超材料结构的隔声特性分析

本文研究的是低频隔声性能，所以设置扫描频带为 100~1000 Hz，步长为 1 Hz，仿真计算超材料板的声传输损失如图 3 所示。对于大尺寸的超材料板，在 416 Hz 和 624 Hz 处分别存在反共振峰值频率和共振谷值频率，它与基于辐射相位相消机制的圆柱形谐振子的板型声学超材料的声传输损失的隔声性能是相似的[19] [20]。由于超材料结构的反共振，在 A 点处的隔声量比质量定律给出的隔声量高 18.2 dB，

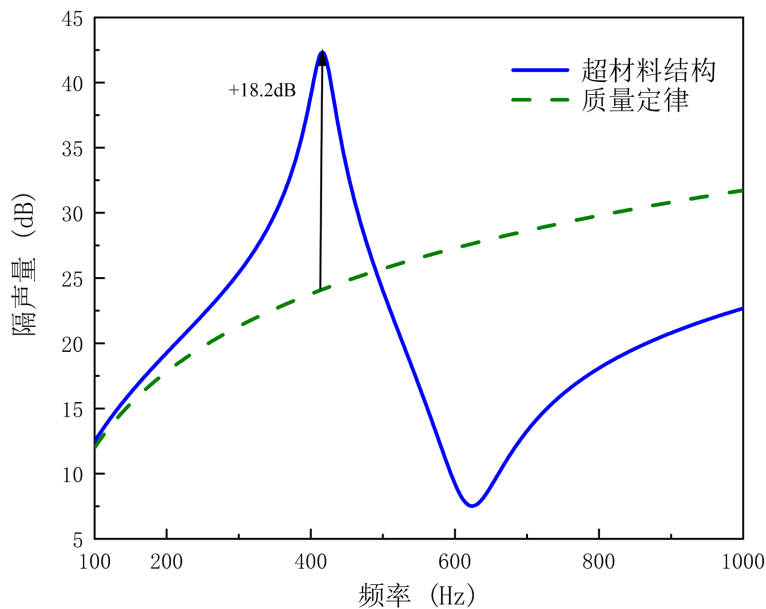


Figure 3. Sound transmission loss of metamaterial structures
图 3. 超材料结构的声传输损失

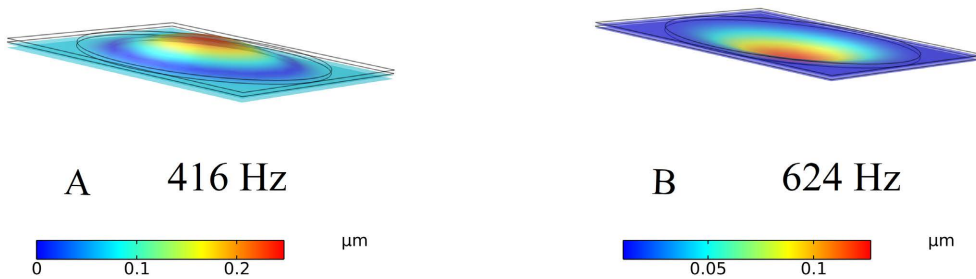


Figure 4. Vibration modes of the metamaterial structure at sound insulation peak and dip frequencies
图 4. 超材料结构在隔声峰和隔声谷频率的振动模式图

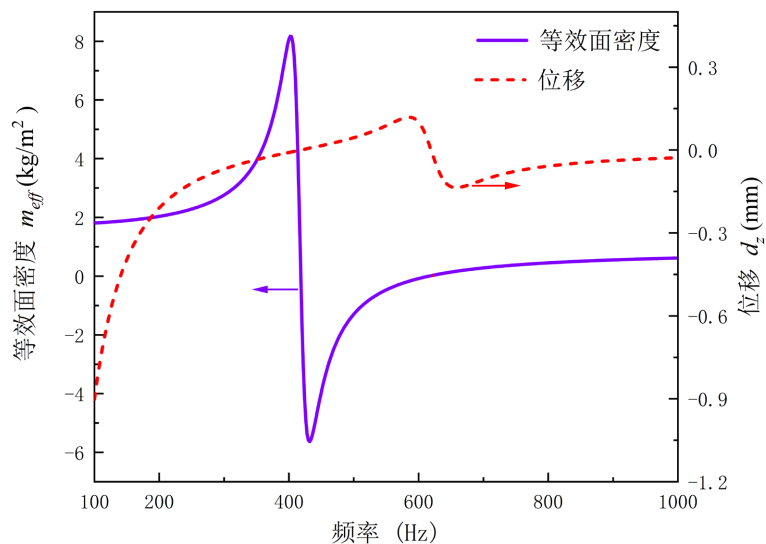


Figure 5. The equivalent surface mass density of metamaterial structures
图 5. 超材料结构等效质量面密度曲线

表现出良好的隔声性能。在声传输损失的峰值频率，该声学超材料结构的表面平均法向位移 d_z 为零，表明单胞振动的声能不会向远场辐射。如图 4 所示，A 点对应单胞模型峰值频率处的模态振型，可以看出，在 A 点处壳体与框架以相反的相位振动，这就是所谓的反共振。相反，在 B 点，框架几乎处于静止状态，壳体振动剧烈，此时位移最大，声波很容易通过薄板传播出去。并且证明该超材料结构具有反共振特性。

有效质量密度和有效容积模量等有效参数可用于更好地理解超材料结构的隔音机制。由于板非常薄，在受到低频声波作用时，声学超材料的体积变化非常小。如图 5 所示，根据公式(7)，有效质量密度定义为单元格两侧的压力差与单元格振动加速度的体积积分之比。当接近声传输损失峰值频率时，有效质量密度与法向加速度(即位移)有关，由正变负。在此频率下，有效质量密度达到最大值，A 点单元格的平均振动位移为零，隔音性能最佳。此超材料结构的有效质量密度在 B 点为零，这是因为此超材料结构振动剧烈，声波在此共振频率下几乎完全传播。这一发现与 Tan 等人的研究结果[21]相吻合，再次证明了此超材料结构与隔音材料之间的紧密联系。

5. 几何和材料参数对超材料隔声特性的影响

为了进一步探究框架式板型声学超材料隔声性能的形成机理和变化规律，对薄板和框架的尺寸、以及板和框架的材料对隔声量的影响进行了研究。

5.1. 几何参数对超材料隔声特性的影响

在图 6 中对声传输损失随结构几何参数的变化进行了数值研究。单一的改变超材料结构的几何参数，保持材料参数与 2 小节中一样。可以观察到声传输损失谷值频率几乎不受框架厚度和晶格常数增加的影响，这是因为等效成弹簧的板的形状和面积保持不变。反共振频率随着框架表面质量密度的增加向低频偏移，且随着框架高度的增加，反共振频率降低的速率更快。这是因为框架的面质量密度随其高度的变化比结构晶格常数的变化更强烈。同时，随着框架质量的增加，可以观察到相对隔声带宽[7]得到明显拓宽。随着薄板厚度 h_p 的增加，传输损失曲线整体向高频移动。这是由于薄板的厚度增加导致其等效刚度增大，所以超材料结构的共振频率变大，同时反共振频率也随之增大。并且当薄板的厚度增大时，声学超材料结构的隔声量有略微的提高。随着框架的圆形孔洞的直径 d_p 的增加，传输损失峰值和谷值的频率均减小，但是传输损失峰值频率减小的缓慢。这是因为随着框架的圆形孔洞的直径的增加，板的有效振动面积也增大，该超材料结构的共振频率向低频移动；而在反共振频率处，框架的圆形孔洞的直径的增加导致框架结构的质量变小，超材料结构的反共振频率会增大，由于框架质量的减小速率略小于圆板面积增加的速率，所以超材料结构反共振频率有略微的减小。随着框架的圆形孔洞直径的增大，超材料结构整体的面质量密度减小，会导致其隔声量降低，尤其是在传输损失峰值处。因此，拓宽隔声带宽的一种方法是减小框架孔的直径。

5.2. 材料参数对超材料结构隔声特性的影响

在保持超材料结构几何参数不变的情况下，只改变超材料结构的材料参数，分别计算了当板的材料为亚克力时，将框架的材料更换成环氧树脂、碳纤维和有机玻璃；以及框架的材料为环氧树脂时，使用亚克力、聚酰亚胺和 PET 作为板的材料时，该超材料结构的声传输损耗的变化情况。如表 1 和表 2 所示为板和框架的具体材料参数。

改变薄板的材质，该超材料结构的其他几何参数与 2 小节中一样。对于具有不同薄板材料的超材料结构声传输损耗如图 7 所示，薄板材料的改变对隔声频率的影响较大。随着薄板的杨氏模量的增大，隔声谷值频率增大；随着薄板密度的增大，隔声谷值频率减小。所以在图 7(a)中，主要是薄板的刚度影响超材料结构的隔声特性。保持该超材料结构的其他几何参数与 2 小节中相同，只改变框架的材料。超材

料结构的声传输损失曲线随着框架材料的变化如图 7(b)所示, 结果显示, 改变框架的材料对该超材料结构谷值频率的影响较小。这是由于超材料结构的一阶共振频率主要受薄板的影响。结合图 7(b)和表 2 中框架的材料参数可以发现, 随着框架密度的增大以及杨氏模量的减小, 隔声峰值频率逐渐降低; 由于隔声峰值频率降低的比较缓慢, 所以能够得出此超材料结构的隔声峰值频率降低是由框架的密度增加引起的。

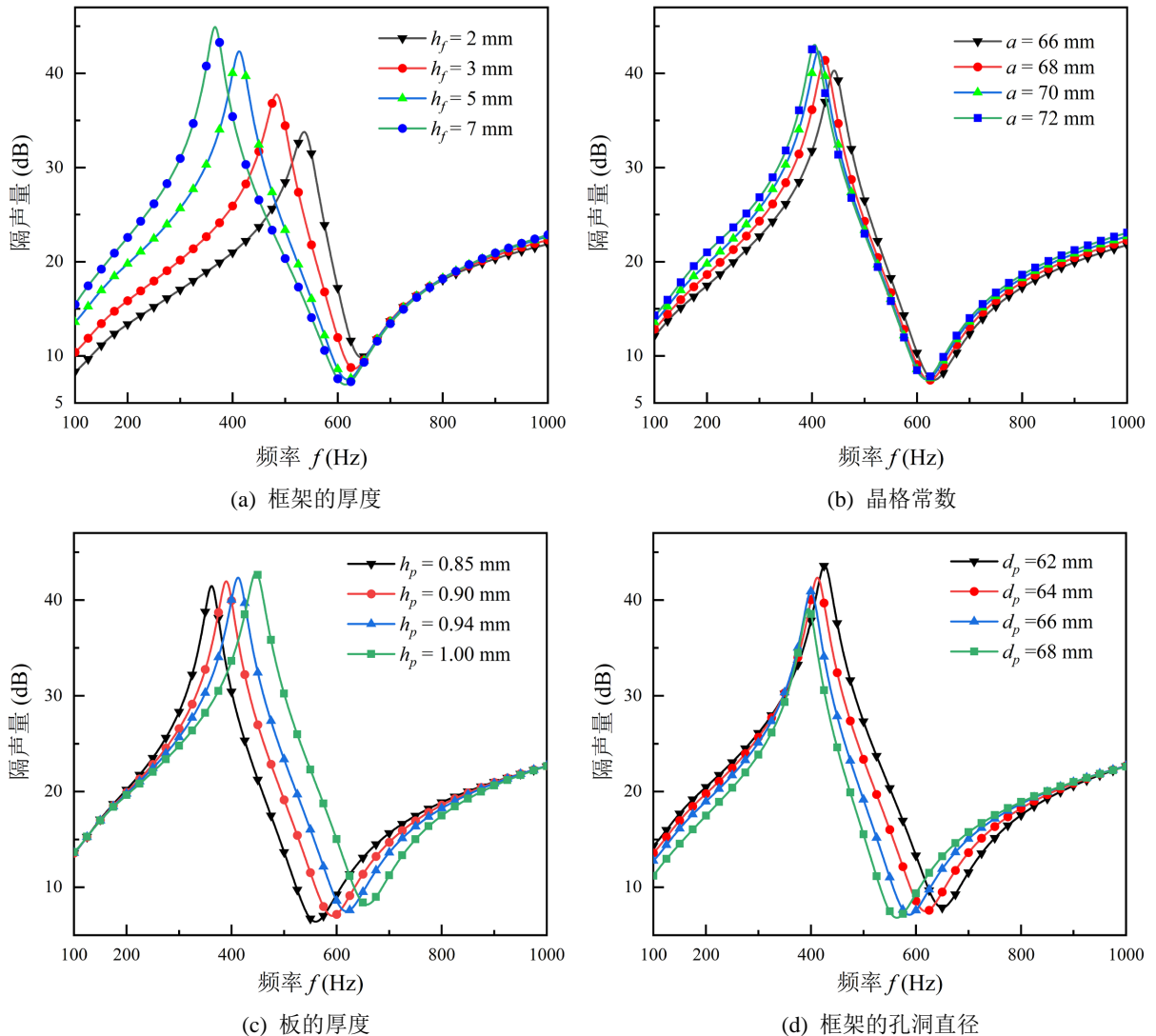


Figure 6. Effect of geometrical parameters on sound insulation performance of metamaterial structures

图 6. 几何参数对超材料结构隔声性能的影响

Table 2. Material parameters for plates and frames

表 2. 板和框架的材料参数

| 材料 | 密度 | 杨氏模量 | 泊松比 | 阻尼 |
|------|------------------------|---------|------|------|
| 碳纤维 | 1700 kg/m ³ | 240 GPa | 0.33 | / |
| 有机玻璃 | 1900 kg/m ³ | 25 GPa | 0.33 | / |
| 聚酰亚胺 | 1420 kg/m ³ | 3.9 GPa | 0.34 | 0.01 |
| PET | 1450 kg/m ³ | 6.7 GPa | 0.39 | 0.01 |

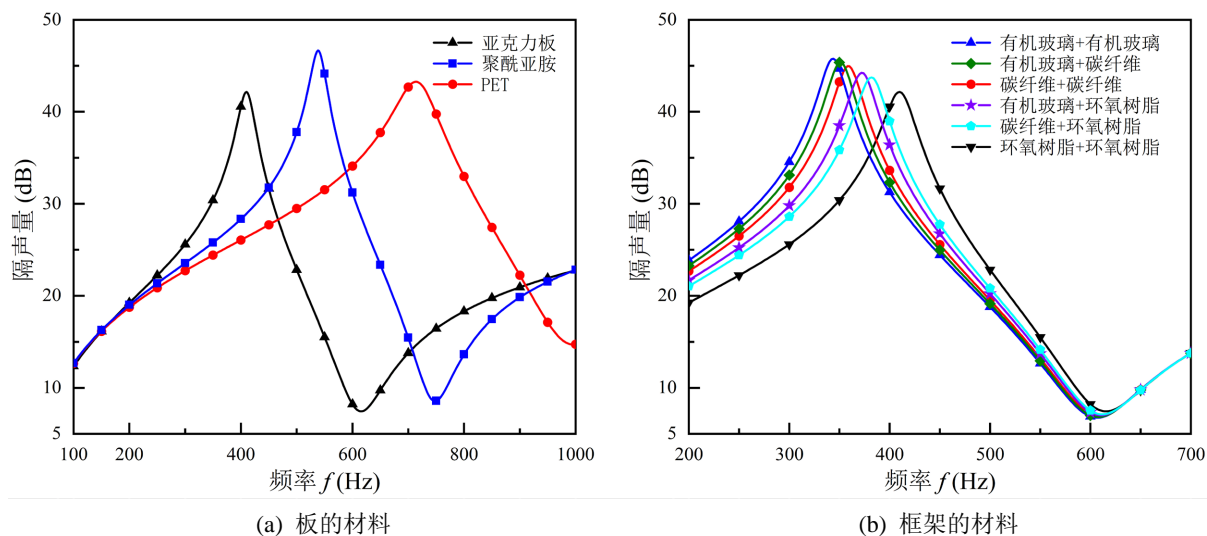


Figure 7. Influence of material parameters of plates and frames on sound insulation performance of metamaterial
图 7. 薄板和框架的材料参数对超材料结构隔声特性的影响

6. 结论

在本文中，提出了一种新型的双面框架式板型声学超材料，薄板和框架结构结合使超材料结构的复杂性大大降低，便于工程上的加工和应用。通过数值仿真，证明基于辐射相位相消机制的框架式板型声学超材料的隔音能力显著，并且在低频范围能够实现 100~500 Hz 频率范围内的声波的有效隔离，且在反共振频率处最高可达到 43 dB 的声衰减。结合等效质量密度和振动位移验证了该超材料结构的局域共振特性。进一步研究了各部分材料和几何参数对声传输损失的影响，框架和薄板共同影响反共振频率，薄板主要对共振频率起主要作用。因此，可以根据工程应用需求选择不同的材料和几何尺寸，从而达到隔声的目的。

参考文献

- [1] Rettinger, M. (1974) Sound Insulation Design for Buildings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **56**, 1511-1514. <https://doi.org/10.1121/1.1903472>
- [2] Ljunggren, S. (1991) Airborne Sound Insulation of Thin Walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **89**, 2324-2337. <https://doi.org/10.1121/1.400971>
- [3] Ljunggren, S. (1991) Airborne Sound Insulation of Thick Walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **89**, 2338-2345. <https://doi.org/10.1121/1.400972>
- [4] Ma, F., Wang, C., Liu, C. and Wu, J.H. (2021) Structural Designs, Principles, and Applications of Thin-Walled Membrane and Plate-Type Acoustic/Elastic Metamaterials. *Journal of Applied Physics*, **129**, Article ID: 231103. <https://doi.org/10.1063/5.0042132>
- [5] Naify, C.J., Chang, C., McKnight, G., Scheulen, F. and Nutt, S. (2011) Membrane-Type Metamaterials: Transmission Loss of Multi-Celled Arrays. *Journal of Applied Physics*, **109**, Article ID: 104902. <https://doi.org/10.1063/1.3583656>
- [6] Yang, Z., Mei, J., Yang, M., Chan, N.H. and Sheng, P. (2008) Membrane-Type Acoustic Metamaterial with Negative Dynamic Mass. *Physical Review Letters*, **101**, Article ID: 204301. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.204301>
- [7] Xiao, Y., Cao, J., Wang, S., Guo, J., Wen, J. and Zhang, H. (2021) Sound Transmission Loss of Plate-Type Metastructures: Semi-Analytical Modeling, Elaborate Analysis, and Experimental Validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **153**, Article ID: 107487. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107487>
- [8] Zhou, X., Wang, L., Qin, L. and Peng, F. (2020) Improving Sound Insulation in Low Frequencies by Multiple Band-Gaps in Plate-Type Acoustic Metamaterials. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **146**, Article ID: 109606. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2020.109606>

-
- [9] Varanasi, S., Bolton, J.S., Siegmund, T.H. and Cipra, R.J. (2013) The Low Frequency Performance of Metamaterial Barriers Based on Cellular Structures. *Applied Acoustics*, **74**, 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.09.008>
- [10] Xiao, Y., Wen, J. and Wen, X. (2012) Sound Transmission Loss of Metamaterial-Based Thin Plates with Multiple Subwavelength Arrays of Attached Resonators. *Journal of Sound and Vibration*, **331**, 5408-5423. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.07.016>
- [11] Naify, C.J., Chang, C., McKnight, G. and Nutt, S. (2010) Transmission Loss and Dynamic Response of Membrane-Type Locally Resonant Acoustic Metamaterials. *Journal of Applied Physics*, **108**, Article ID: 114905. <https://doi.org/10.1063/1.3514082>
- [12] 闫文惠. 主动可调谐性薄膜型声学超材料低频特性仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [13] Langfeldt, F. (2024) On the Validity of Periodic Boundary Conditions for Modelling Finite Plate-Type Acoustic Metamaterials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **155**, 837-845. <https://doi.org/10.1121/10.0024619>
- [14] Zhang, H., Xiao, Y., Wen, J., Yu, D. and Wen, X. (2016) Ultra-Thin Smart Acoustic Metasurface for Low-Frequency Sound Insulation. *Applied Physics Letters*, **108**, Article ID: 141902. <https://doi.org/10.1063/1.4945664>
- [15] Langfeldt, F. and Gleine, W. (2020) Impact of Manufacturing Inaccuracies on the Acoustic Performance of Sound Insulation Packages with Plate-Like Acoustic Metamaterials. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, **3**, 1092-1100. <https://doi.org/10.4271/2020-01-1562>
- [16] Langfeldt, F. and Gleine, W. (2021) Plate-Type Acoustic Metamaterials with Strip Masses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **149**, 3727-3738. <https://doi.org/10.1121/10.0005112>
- [17] 王帅星, 勇肖, 汤晏宁, 等. 轻质超材料板结构的隔声机理及调控规律[J]. 机械工程学报, 2023, 59(15): 94-109.
- [18] 王亚琴, 徐晓美, 林萍. 薄膜型声学超材料的结构设计及隔声特性[J]. 应用声学, 2022, 41(6): 875-883.
- [19] Gu, J., Tang, Y., Wang, X. and Huang, Z. (2022) Laminated Plate-Type Acoustic Metamaterials with Willis Coupling Effects for Broadband Low-Frequency Sound Insulation. *Composite Structures*, **292**, Article ID: 115689. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115689>
- [20] Ma, G. and Sheng, P. (2016) Acoustic Metamaterials: From Local Resonances to Broad Horizons. *Science Advances*, **2**, e1501595. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501595>
- [21] Tan, K.T., Huang, H.H. and Sun, C.T. (2012) Optimizing the Band Gap of Effective Mass Negativity in Acoustic Metamaterials. *Applied Physics Letters*, **101**, Article ID: 241902. <https://doi.org/10.1063/1.4770370>