

用于协同隔声与吸声的膜型声学超材料 - 亥姆霍兹谐振器复合结构

李佳宁*

兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年6月4日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年9月10日

摘 要

本文提出了一种新型膜型声学超材料框架结构, 该结构结合环形质量块与亥姆霍兹谐振腔设计, 并在谐振腔底部引入薄膜, 从而在实现优异降噪性能的同时有效减轻整体重量。基于集总质量法推导并计算了膜型声学超材料的共振频率, 并通过数值模拟系统分析了该结构的声传输损失(STL)、吸声系数(SAC)、动态响应及振动模态。结果表明, 在30~1200 Hz范围内的平均STL可以达到69 dB, 在700~1060 Hz范围内出现连续的吸声峰, 其平均SAC可以达到0.784。该研究为实现声学超材料的轻量化与多功能集成提供了新思路, 为实际工程中的宽频降噪应用提供了参考。

关键词

声学超材料, 局域共振, 隔声和吸声, 宽带低频, 有限元法

A Membrane-Type Acoustic Metamaterial Combined with a Helmholtz Resonator for Synergistic Sound Insulation and Absorption

Jianing Li*

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

Received: June 4, 2026; accepted: July 9, 2026; published: September 10, 2026

Abstract

This paper proposes a novel membrane-type acoustic metamaterial framework structure, which integrates an annular mass block with a Helmholtz resonator design and introduces a thin film at the

*通讯作者。

文章引用: 李佳宁. 用于协同隔声与吸声的膜型声学超材料-亥姆霍兹谐振器复合结构[J]. 仪器与设备, 2026, 14(3): 359-371. DOI: 10.12677/iae.2026.143041

bottom of the resonator cavity, thereby achieving excellent noise reduction performance while effectively reducing overall weight. The resonant frequency of the membrane-type acoustic metamaterial is derived and calculated using the lumped mass method. Through numerical simulations, the sound transmission loss (STL), sound absorption coefficient (SAC), dynamic response, and vibration modes of the structure are systematically analyzed. The results show that the average STL can reach 69 dB in the frequency range of 30~1200 Hz, and continuous sound absorption peaks appear in the range of 700~1060 Hz, with an average SAC of 0.784. This study provides new insights into achieving lightweight and multifunctional integration of acoustic metamaterials, and offers a reference for broadband noise reduction applications in practical engineering.

Keywords

Acoustic Metamaterials, Local Resonance, Sound Insulation and Absorption, Broadband Low-Frequency, Finite Element Method

Copyright © 2026 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

在工程应用和实际生活中,噪声污染一直是研究人员关注和努力解决的热点问题[1][2]。噪声控制技术主要分为隔声和吸声两大领域,吸、隔声作为降噪的具体手段,若将两种性能相结合,可以进一步提高降噪效果。从吸声和隔声机理可知,透射的声波越少隔声效果越好;反射的声波越少吸声效果越佳。而传统降噪结构受限于单一设计机制,难以同时实现声波透射与反射的双重抑制。因此,传统的降噪技术通常需要在这两者之间作出妥协,难以同时满足隔声与吸声的高效性能[3]。

声子晶体和声学超材料的出现为噪声治理提供了革命性的解决方案[4]。声学超材料是一种人工设计的周期性复合结构,其结构单元尺寸远小于声波波长。通过对结构单元及其排布方式进行调控设计,可以实现对声波或弹性波的人为操控,从而产生低频弹性波带隙、负等效质量密度、负弹性模量等一系列自然材料所不具备的特殊性质[5]-[7]。对于降噪领域,目前主要的声学超材料有薄膜型、薄板型、亥姆霍兹谐振腔型、多孔型、折曲空间型等[8]-[11]。为了同时实现良好的吸、隔声效果,多数研究将不同类型声学超材料相结合组成复合结构,这种特殊的结构配置通常通过局部共振机制和能量耗散机制来衰减低频振动和减少噪声[12]。其中,2018年Wang等[13]设计一种层状声学超材料,在临界频率声波激励下,层状声学超材料能有效地将声能集中到两种临界耦合的薄膜式声学超材料之间,再通过填充的多孔材料将声能转化为热能耗散,实现了在312 Hz频率SAC大于98%,同时在200~1000 Hz频段内,结构隔声性能无明显峰谷波动,且具备较好的隔声效果。2024年,Li等[14]设计了一种带有复合偏心块和亥姆霍兹腔的膜型声学超材料夹层结构,采用集成设计方法,通过不同孔径的亥姆霍兹腔的耦合获得宽吸收峰,创建了一个在400~1000 Hz具有吸声和隔声的集成频带,平均SAC为0.5平均隔声量为101 dB。同年,Almeida等[15]设计了一种声学超材料结构,其单元胞由单一主波导构成。主波导周期性地装载着迷宫状的管。该结构在频率为520 Hz的SAC超过85%,在频率为1287 Hz的SAC可达99%,且通过增加结构周期性可实现吸声峰的叠加积累;在隔声性能方面,其STL表现优异,465 Hz时达30 dB,750 Hz时更是高达70 dB。Liu等[16]设计了一种吸声、隔声的螺旋超材料来降低噪声。经过有限元模拟和实验验证,该结构在2200~2480 Hz时的隔声效果均在40 dB以上,最佳隔声效果为73 dB。在100~2500 Hz频段内

存在多个吸声峰，多频段 SAC 大于 0.5。

尽管基于声学超材料的吸隔声一体化研究已取得丰硕成果，但在 1000 Hz 频率范围内，现有结构仍存在明显局限：吸声峰呈离散分布，吸声带宽较窄且平均 SAC 偏低；同时，从实际工程应用需求来看，结构的厚度与重量仍需进一步优化。针对上述问题，本文提出一种薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料框架式复合结构，框架式结构不仅能够有效保护薄膜，同时也增强了整体结构的力学性能[17]-[19]。本文首先介绍了复合结构各部分在降噪性能中的作用，又基于集总质量法计算了膜型声学超材料的共振频率。然后利用有限元分析软件对入射声波作用下的结构进行仿真模拟，计算了结构的 STL 和 SAC，通过振动模态、法向位移、动态参数等方面分析了结构降噪的原因。

2. 结构设计

图 1 为薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构的模型示意图，该结构由三种声学超材料单元与框架共同组成，具体结构与参数如下：

最上层为含环形质量块的薄膜，薄膜厚度 $t_4 = 0.2\text{ mm}$ ；位于薄膜中心的环形质量块厚度 $t_1 = 1\text{ mm}$ ，内外半径分别为 $d_3 = 5\text{ mm}$ 、 $d_4 = 4\text{ mm}$ 。中间层由穿孔板与底部含薄膜的亥姆霍兹谐振器构成：其中薄膜与上层薄膜材质相同、厚度一致，其正中心设有半径 $d_5 = 2\text{ mm}$ 、厚度 $t_2 = 0.5\text{ mm}$ 的质量块；穿孔板半径 $d_1 = 25.3\text{ mm}$ ，外侧孔洞直径 $D_1 = 4\text{ mm}$ （孔洞中心至穿孔板中心点距离 $d_2 = 20\text{ mm}$ ），中心孔洞直径 $D_2 = 2\text{ mm}$ （即亥姆霍兹谐振器颈径）；谐振器腔内径 $D_3 = 13\text{ mm}$ ，腔内插入的延长颈高度 $h_5 = 1\text{ mm}$ ，且延长颈厚度与谐振器侧壁厚度均为 $t_3 = 0.3\text{ mm}$ 。最下层为多孔材料，以半包围形式包裹谐振器，材料厚度 $h_2 = 10\text{ mm}$ 。三种结构由上到下依次堆叠，最后结合框架和厚度为 $t_1 = 1\text{ mm}$ 的底板，组成了薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构，其他几何参数如表 1 所示。

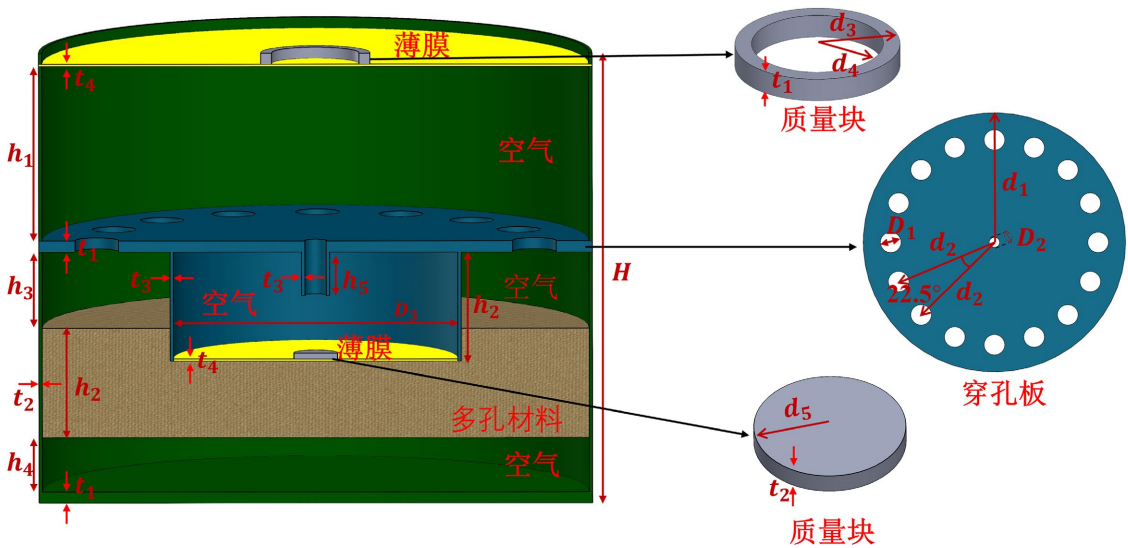


Figure 1. Schematic diagram of the thin-film-Helmholtz resonator-type acoustic metamaterial composite structure
图 1. 薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构示意图

Table 1. Geometric parameters of the thin-film-Helmholtz resonator-type acoustic metamaterial composite structure
表 1. 薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构几何参数

h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h_4 (mm)	H (mm)
16	10.2	7	5	41.2

框架、穿孔板和谐振腔的材料均为铝，质量块采用钢材，薄膜则选用 EVA 材质，具体材料参数见表 2。

Table 2. Material properties of the thin-film-coupled Helmholtz resonator acoustic metamaterial structure
表 2. 薄膜 - 亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构材料参数

材料	杨氏模量(Pa)	密度(kg/m ³)	泊松比
EVA	6.4×10^8	980	0.49
铝	70×10^9	2800	0.33
钢	200×10^9	7850	0.30

3. 计算方法与机理分析

本节将简要说明本研究涉及的基本机理和相关公式。为了实现吸隔声性能相结合，本文设计了由三种不同声学超材料相结合的复合结构，分别为亥姆霍兹谐振器、薄膜和多孔材料。当激励声波的频率与谐振器的共振频率相接近时，此时颈部空气分子的振动达到最大，作用在这些空气分子上的力造成的相关粘滞损失和热损失也达到最大，从而耗散了声能量，达到了一个优异的吸声和隔声效果[20]。谐振器的共振频率 f_r 由结构的几何形状决定。

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l_e}} \quad (1)$$

其中 c_0 是空气中的声速， S 是颈径的截面积， V 是声腔的体积， l_e 为修正后的颈长等于实际颈长 l_1 加延长颈的长度 h_2 加修正参数 $0.85D_2/2$ （单独亥姆霍兹谐振器的校正长度）。

薄膜属于柔性材料，容易被声波激励而发生振动，其振动过程可将入射声能转化为自身运动的动能，进而实现声能的耗散[21]。利用贝塞尔函数可以求解薄膜的振动方程，固定边界条件可以用零阶贝塞尔函数的根来定义。可求出其固有频率：

$$f_n = \mu_n \frac{c}{2\pi a} = \frac{\mu_n}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (2)$$

式中 a 为膜振动的有效半径， μ_n 为零阶贝塞尔函数的根， T 为薄膜的表面张力， σ 为膜的表面密度。

根据集中质量法，将圆膜的振动等效为圆中心的等效集中质量 M_{en} 在等效集中弹簧 K_{en} 的作用下的振动。等效质量表达式为[22]：

$$M_{en} = mJ_1^2(\mu_n) \quad (3)$$

其中 $m = \pi a^2 \sigma$ 是膜的实际质量。

通过集中质量法可以得到结构的固定频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \quad (4)$$

根据上式可以推出等效弹性系数：

$$K_{en} = 4\pi^2 f_n^2 M_{en} \quad (5)$$

当薄膜上放置质量块时，附加质量为 M_m ，则结构的一阶固有频率为：

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{el}}{M_{el} + M_m}} \quad (6)$$

本研究采用陶瓷纤维作为多孔材料，其声能耗散机制具体体现为声波作用下材料孔隙内空气产生振动，而纤维表面或孔隙壁附近的空气不容易振动，因此产生摩擦和粘滞力的作用，促使声波能量不断损耗，进而达成降噪目的[23]。

本文基于有限元方法，采用多物理场仿真分析软件 COMSOL Multiphysics 对薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构的吸、隔声性能开展研究。仿真模型由固体域、压力声学域及热粘性声学域构成。为保证计算精度，网格单元的尺寸设置为小于最短工作波长的 1/10 [24]；几何模型采用四边形网格进行划分，其中两侧空气域通过扫掠方式生成网格，并对关键分析的膜部件网格进行细化。如图 3(a)所示，利用声固耦合模块对超材料的隔声性能进行了仿真，在固体力学中对薄膜设置了固定约束边界条件。在压力声学域的两端面设置为平面波辐射，图中的上端面(平面波入射面)为声波入口，添加垂直于单胞入射、声波幅值为 1 Pa 的入射压力场以模拟声激励，图中的下端面为声波出口。使用压力声学模块中多孔介质声学模拟了多孔材料的吸声性能，多孔材料选取陶瓷纤维，根据等效介质理论采用 JCA 模型进行表征。表 3 中列出了所需的孔隙率 ϕ_m 、曲折因子 α_∞ 、流阻率 σ 、粘滞特征长度 Λ 和热特征长度 Λ' 五个参数。热粘滞声学模块被用来模拟腔体和颈部空气的声学行为。在计算吸声时，去掉了框架和穿孔板以及亥姆霍兹谐振器的固体域，如图 3(b)所示。声波在空气中传播速度为 $c_0 = 340 \text{ m/s}$ ，空气密度为 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

Table 3. Acoustic properties of the porous matrix material

表 3. 多孔材料基体的声学参数

	ϕ_m	α_∞	$\sigma (\text{Ns/m}^4)$	$\Lambda (\mu\text{m})$	$\Lambda' (\mu\text{m})$
陶瓷纤维	0.89	3.70	305767	21.6	53.6

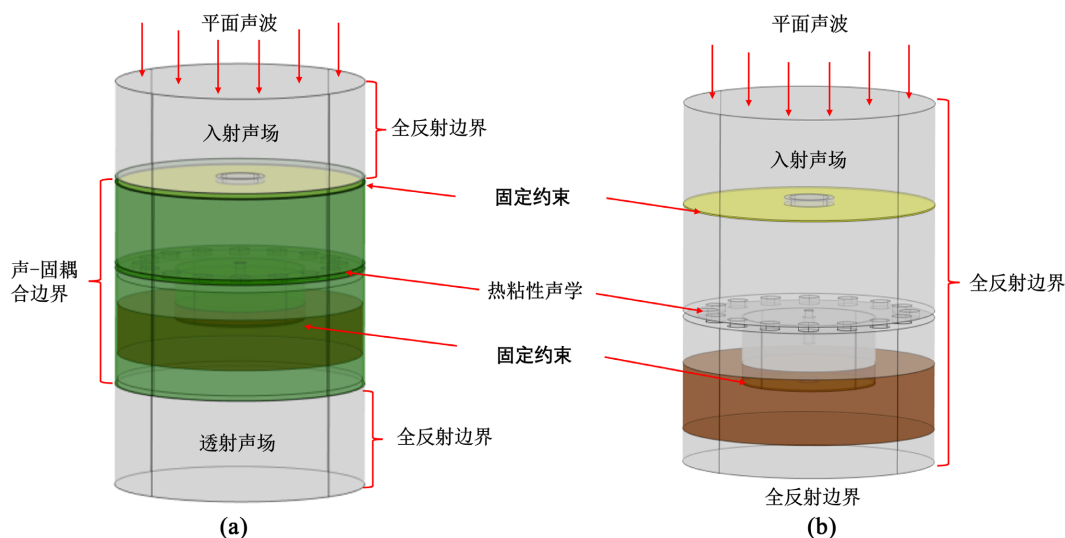


Figure 2. Finite element model and its boundary conditions: (a) sound insulation calculation model; (b) sound absorption calculation model

图 2. 有限元模型及其边界条件：(a) 隔声计算模型；(b) 吸声计算模型

通过在入射声场和透射声场两端设置积分算子，对两侧声场中能量进行积分，入射声场的积分形式为：

$$W_i = \int_s \frac{P_i^2}{2\rho_0 c_0} ds_i \quad (7)$$

透射声场的积分表达式为[3]:

$$W_t = \int_s \frac{p_0^2}{2\rho_0 c_0} dS \quad (8)$$

P_i 为入射声压, p_0 为透射声压, S 为声场表面积。当声波入射到结构表面时, 声功率透射系数可以表示为:

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (9)$$

则正入射条件下的 STL 为:

$$STL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (10)$$

声功率反射系数为[25]:

$$R = \frac{W_r}{W_i} = \frac{\int_s \frac{P_r^2}{2\rho_0 c_0} ds_r}{\int_s \frac{P_i^2}{2\rho_0 c_0} ds_i} \quad (11)$$

其中 W_i 和 W_r 分别为入射声功率和反射声功率, 反射声压 P_r 可以根据有限元法计算。则正入射条件下的 SAC 为:

$$\alpha = \frac{1 - W_r}{W_i} = 1 - R \quad (12)$$

4. 结果与讨论

对图 2(b)有限元仿真模型的吸声性能进行计算, 薄膜所施加的预应力均为 1 MPa。SAC 计算结果如图 3 所示, 并与同厚度多孔材料的计算结果进行了对比分析。

通过图 3 可以看出, 复合结构在 220~270 Hz 与 690~1070 Hz 两个频段内的吸声性能均高于同等厚度的陶瓷纤维材料。尤其在 700~1060 Hz 范围内, 结构表现出良好的宽频吸声特性, SAC 始终高于 0.5, 平均 SAC 为 0.784, 且峰谷波动较小。在 920 Hz 处, SAC 达到 0.98, 接近完美吸声。

为进一步分析结构的降噪机理, 本文还计算了复合结构中两层薄膜的法向位移与等效质量, 结果如图 4 所示。

在图 4(a)中频率点 A_0 处, 上层薄膜的法向平均位移从正极值跃迁为负极值, 极大的 dz 意味着薄膜被入射声波激励产生强烈的共振行为, 对应的图 4(b)中频率点 a_0 处的等效质量近似为零, 也即模态质量为零, 此时薄膜振动系统的二阶特征方程退化为一阶特征方程, 且因未考虑阻尼耗散作用, 整个薄膜振动系统可看作是一个仅有弹性元件的一阶系统, 所以导致声波几乎无反射无耗散地传播过去, 从而形成了图 3 中 SAC 曲线上的第一个吸声峰。

为了进一步分析复合结构在 690~1070 Hz 频率范围内的吸声性能, 首先对该结构中间的亥姆霍兹谐振腔进行了单独建模, 如图 5(a)所示。该模型简化去除了原复合结构中最上层的薄膜和下层的多孔材料, 并将中间穿孔板的外围孔洞封闭为实心结构, 仅保留中心孔洞作为谐振腔的颈部开口。通过这一简化模型, 我们能够单独分析以薄膜为背板的谐振腔的声学特性, 并计算了其 SAC 和薄膜的法向平均位移。

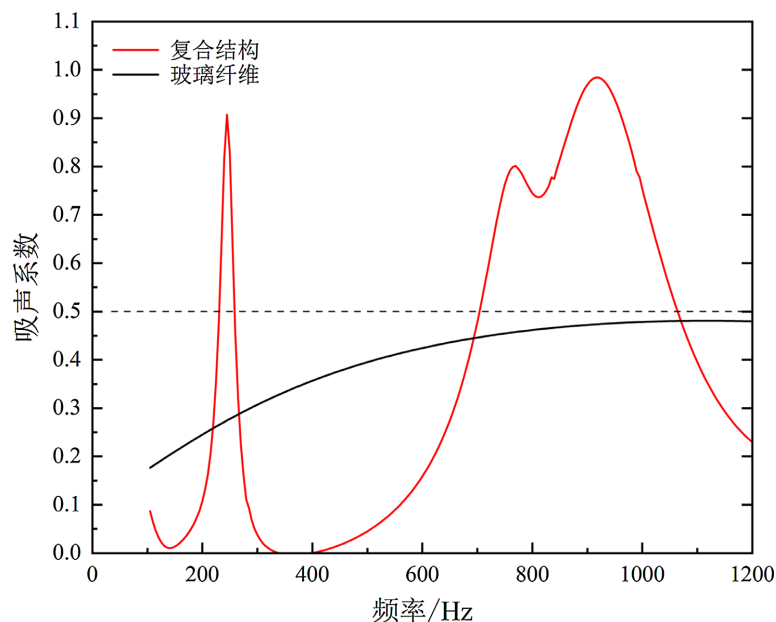


Figure 3. Sound absorption coefficient of the composite structure compared with that of ceramic fiber with the same thickness
图 3. 复合结构和与之同等厚度陶瓷纤维的吸声系数图

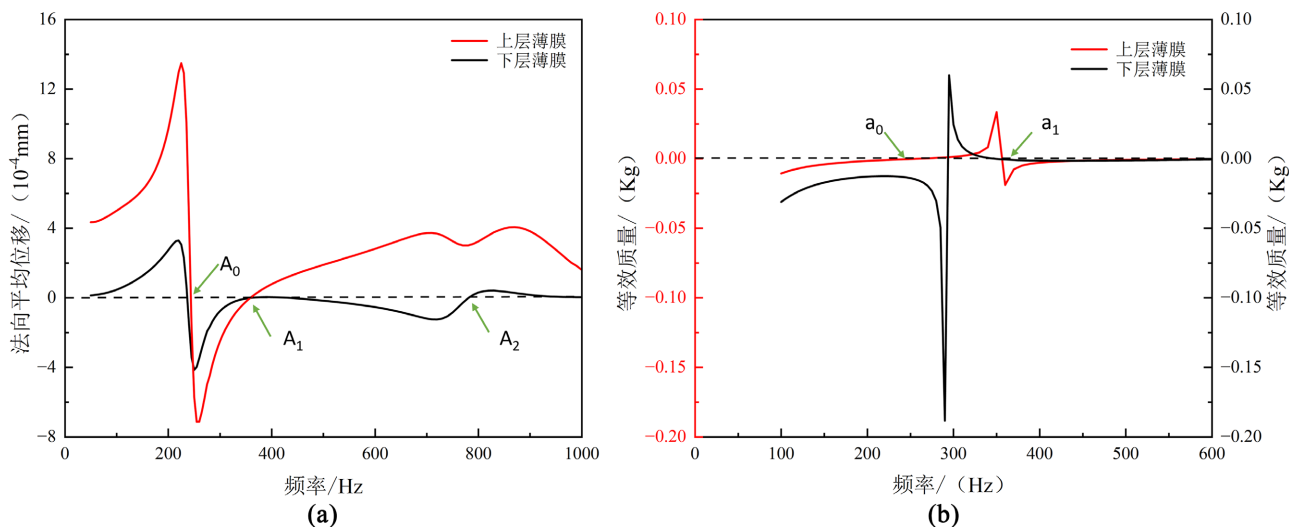


Figure 4. (a) Average normal displacement; (b) Equivalent mass
图 4. (a) 法向平均位移图; (b) 等效质量图

亥姆霍兹谐振腔的 SAC 如图 5(b)所示, 其中红线表示底部为薄膜结构的计算结果, 出现了两个峰值, 分别为 290 Hz 和 775 Hz。由于薄膜材料具有柔性特性, 在声波激励下会产生显著形变, 这种动态变形会改变腔体的有效体积, 从而使谐振腔的谐振频率也随之改变。为分析这一现象, 我们进一步计算了图 5(a)结构中的薄膜法向平均位移, 结果如图 6 所示。

从图 6 可知, 与图 4(a)中频率点 A_0 处解释相同, 在图 6 中频率点 b_0 处, 法向平均位移 d_z 从正极值跃迁为负极值, 薄膜被入射声波激励产生强烈的共振行为, 导致声波几乎无反射无耗散地传播过去, 从而形成了图 5(b)中频率点 B_0 处的吸声峰值。在图 6 中频率点 b_1 处, 法向平均位移 d_z 近似为零, 意味着此时薄膜处于准动态平衡状态, 薄膜的等效质量在此处有一个瞬间的极值跃迁(从正极值跃迁为负极值),

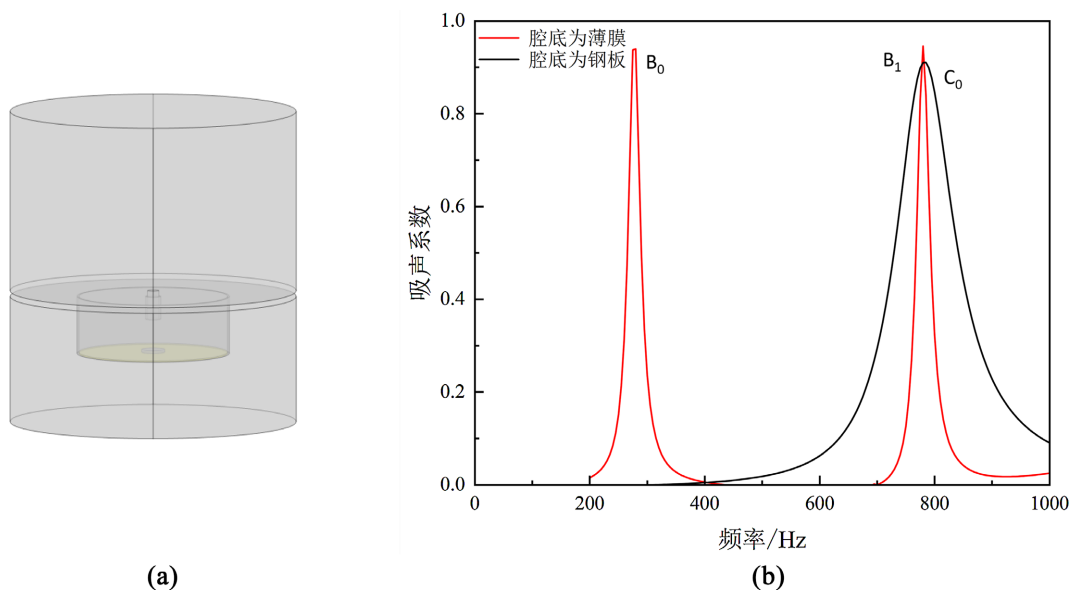


Figure 5. (a) Finite element model of the Helmholtz resonator cavity featuring a thin film at its base; (b) Corresponding sound absorption coefficient curve

图 5. (a) 底部为薄膜的亥姆霍兹谐振腔有限元模型; (b) 吸声系数图

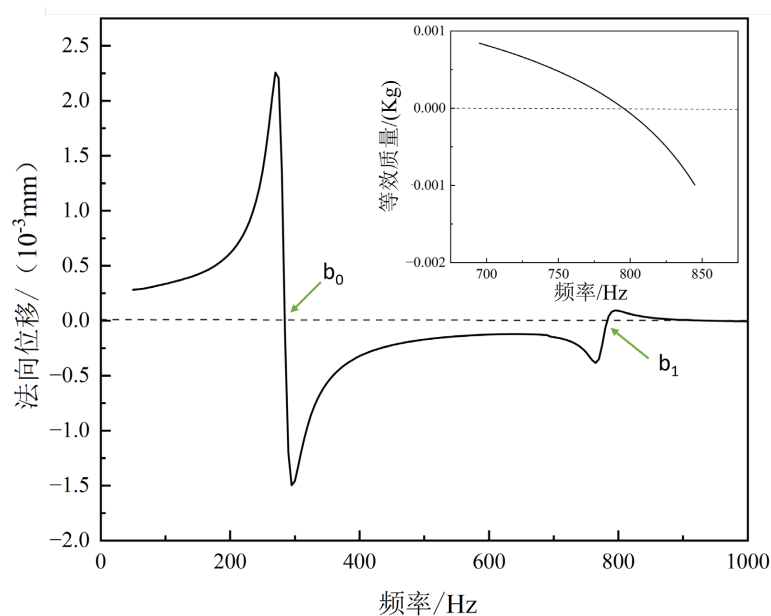


Figure 6. Normal average displacement diagram and equivalent mass diagram of the thin film

图 6. 薄膜的法向平均位移图和等效质量图

且跃迁后等效质量达极大值。这使得薄膜极难被声波激励振动，导致大部分入射声波被反射、仅少量透射，最终造成吸声效果显著变差。所以频率点 B_1 的吸声峰不是由薄膜产生的，而是由于谐振腔的共振产生的。此时的薄膜相当于刚性背板，与顶板和腔壁组成亥姆霍兹谐振腔。将薄膜换成同等厚度的钢板(质量块的体积忽略不计，约 0.27% 的体积变化)，计算了其 SAC，如图 6(b) 中黑线所示。 C_0 点的频率为 785 Hz， B_1 点的频率为 780 Hz，再次证明了频率点 B_1 处的隔声峰是由亥姆霍兹谐振腔产生的。将谐振腔的参数代入公式(1)中，得出 $f_r \approx 780 \text{ Hz}$ ，与仿真值差值在全频段范围内误差小于 2%，认为理论计算结果

与模拟值吻合较好。由此可知在图 4(a)中频率点 A_2 时, 薄膜相当于刚性背板, 复合结构在此频率附近的吸声性能是由谐振腔引起的。

又将复合结构中间的亥姆霍兹谐振腔去掉, 其他与复合结构保持一致, 如图 7(a)所示。

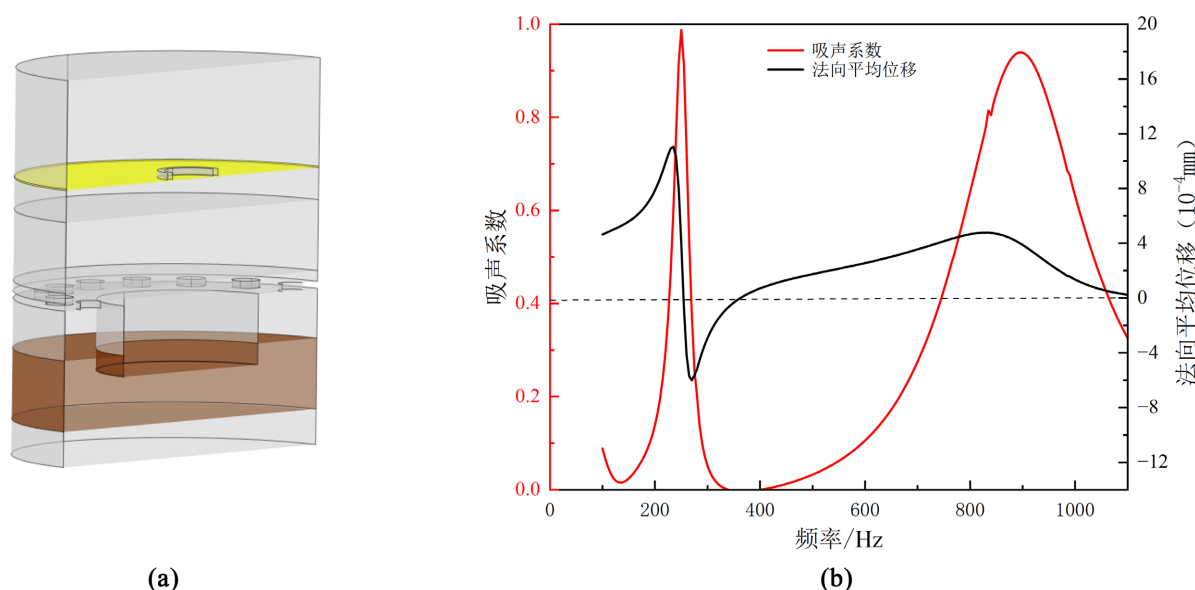


Figure 7. (a) FE model without the central resonator cavity; (b) Sound absorption coefficient and average normal displacement
图 7. (a) 无中间谐振腔有限元模型; (b) 吸声系数图和法向平均位移图

如图 7(b)所示, 移除谐振腔结构后, 仍能产生与复合结构 SAC 图中第一个吸声峰频率一致的峰值, 这一结果验证了复合结构的首个吸声峰由上层薄膜的共振产生的。在 SAC 表现优异的频段内, 薄膜的法向平均位移 d_z 不接近于零, 该频段内薄膜处于被激发状态, 声波透射过薄膜进入结构内部。然后声波经穿孔板继续向下传播, 在穿透多孔材料的过程中, 部分声能被多孔材料通过摩擦与粘滞效应耗散。

为探究多孔材料厚度对吸声性能的影响, 计算了该结构下不同厚度多孔材料的 SAC 图, 从图 8 可知, 在多孔材料与结构底部距离保持不变的条件下, 随着多孔材料厚度的增加, 吸声效果呈逐步优化趋势。图 8 中绿线代表图 8(a)结构中 10 mm 厚多孔材料移除背腔后的 SAC 曲线, 将其与代表含背腔结构的红线对比可知, 增设背腔的结构吸声性能优于无背腔结构[26]。由于结构底部为硬声场边界, 会对入射声波产生反射, 而背腔的引入可延长声波在结构内的传播路径、增强声能与多孔材料的作用时间, 从而提升声能耗散效率, 最终优化吸声效果。基于上述分析可推断, 图 8(b)中第二个吸声峰的形成源于多孔材料与背腔的协同声能耗散作用。

综上, 底部含薄膜的谐振腔与无中间腔的复合结构所产生的吸声峰存在耦合效应, 最终形成宽频吸声带; 在 700~1060 Hz 频率范围内, 该复合结构的 SAC 均稳定高于 0.5。

对图 2(a)有限元仿真模型的隔声性能进行计算, 通过计算结构在法向入射声波激励下的动态响应, 研究结构 STL 中反共振峰值和共振谷值产生的原因, 并通过薄膜的振动模态来解释其隔声的特性。复合结构的 STL 曲线如图 9 所示。

由图 9 可知, 复合结构在 30~1200 Hz 频段内具有宽频的 STL, 平均 STL 达 69 dB。结合图 4 中 A_0 和 a_0 频率点处的响应以及图 10(a)薄膜的振动模态可知, 上层薄膜上的质量块随薄膜一起同相振动, 形成整体耦合共振模式, 并且振动方向与入射声波同向, 入射声能未能被任何反向声波抵消, 声透射量最大, 会形成 STL 谷值。根据公式(6)计算得到附加质量块薄膜的一阶共振频率 $f_1 \approx 272$ Hz, 第一个 STL 谷值

对应的频率为 255 Hz，仿真与数值模拟的差值为 17 Hz。此时大量的声波透射过第一层薄膜进入到结构内部，下层薄膜也被激励发生振动。

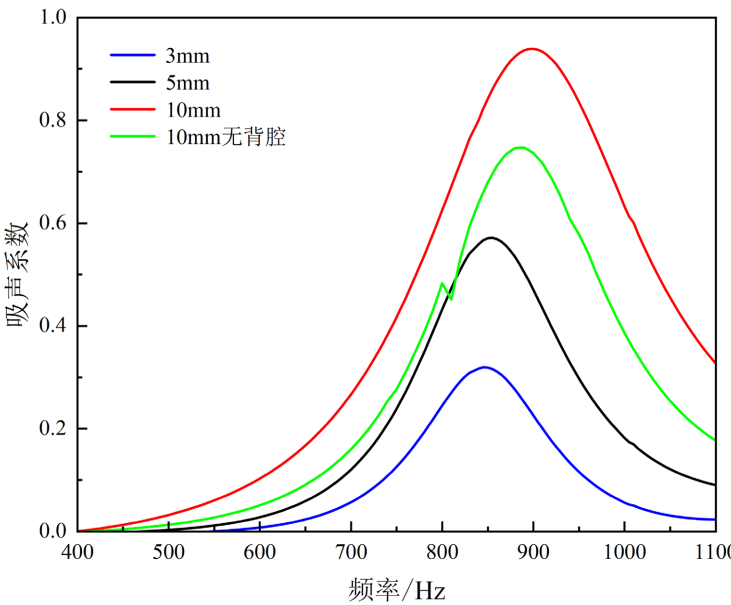


Figure 8. Sound absorption coefficient of porous materials with varying thicknesses and the structure without a back cavity
图 8. 不同厚度多孔材料及无背腔结构对应的吸声系数图

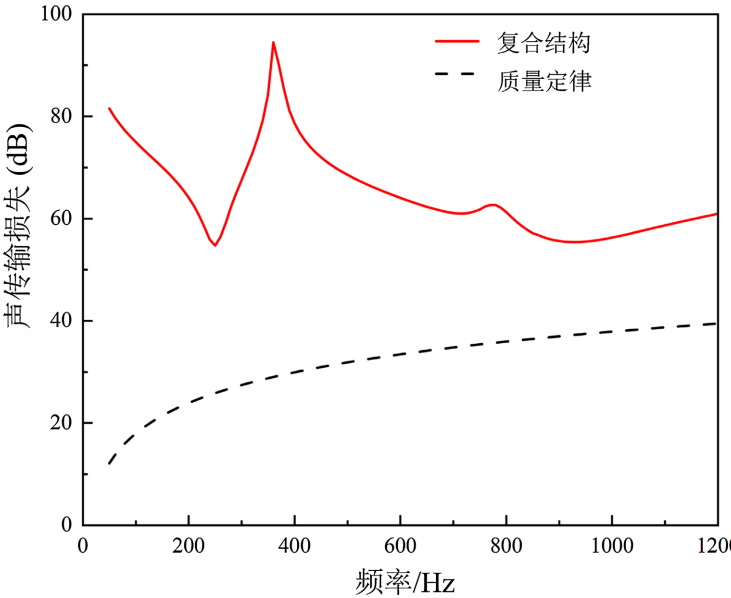


Figure 9. Sound transmission loss diagram of the composite structure
图 9. 复合结构的传声损失图

由于薄膜的反共振特性，复合结构在 355 Hz 处出现隔声峰值，对应着图 4(a)中的上膜法向平均位移的频率点 A_1 。频率点 A_1 为等效质量的极值跃迁点和法向平均位移 d_z 的零值转换点，此时等效质量为极大值，振动模态如图 10(b)所示。中心的环形质量块随着薄膜与四周的薄膜反相振动，薄膜在入射声波与反射声波的共同作用下处于准动态平衡状态，振动能量无法向前传播，从而产生了 STL 峰值。与此同时，

大量声波被反射导致对应频率的吸声效果最差,如图3所示,频率为355 Hz的SAC近乎为零。由于仅有极少的声波透射至结构内部,所以下层薄膜的法向平均位移亦近似为零,几乎未发生振动。

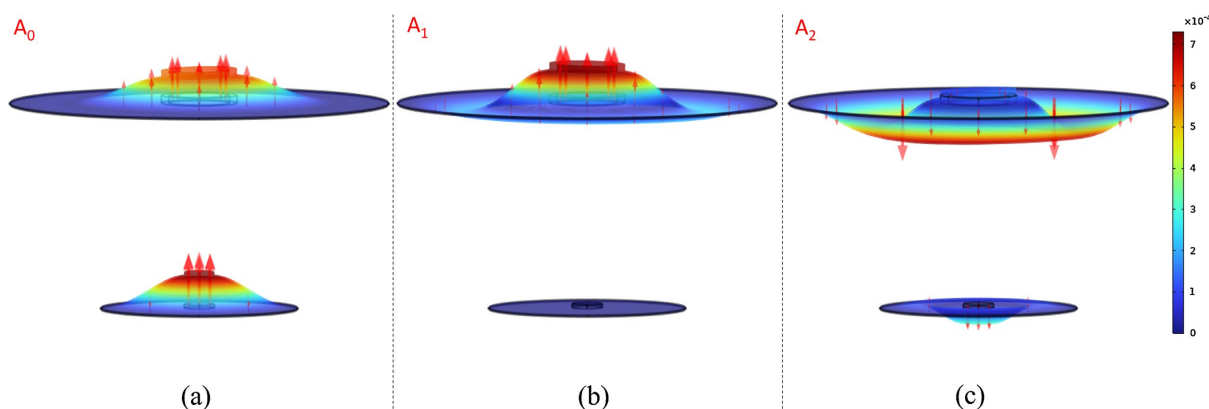


Figure 10. Vibration mode shapes of the thin film at various frequencies

图 10. 不同频率点的薄膜振动模态

由图10(c)可知,775 Hz 频率下,上层膜中间的环形质量块及对应区域薄膜无振动响应,而膜四周区域呈现向下振动特征,且振动方向与入射声波方向一致。此状态下,上层薄膜处于受激状态,导致大量入射声波透射进入结构内部,所以该峰值不是由上层薄膜导致的。同时观察到,该频率下下膜的振动模态与图10(b)中上层膜的振动规律相似:中心质量块呈向下振动趋势,膜四周区域则表现为反向振动,且下膜的法向平均位移趋近于零,表明下膜此时处于准动态平衡状态。同图5(b)中频率点B₁所分析的机理相同,STL图中第二个峰值(775 Hz)与谐振腔的共振频率相近;基于这一频率匹配特性及前述振动模态分析可知,该隔声峰的形成源于谐振腔的共振作用。

综上,复合结构在255 Hz处因上层薄膜的整体同相共振形成隔声谷值;而在355 Hz处,则因上层薄膜的反共振效应达到准平衡态,从而形成第一个隔声峰值;在775 Hz处,隔声峰值主要由下层谐振腔共振所主导。

5. 结论

本文提出了一种新型薄膜-亥姆霍兹谐振器型声学超材料复合结构,并系统研究了其隔声与吸声性能。结果表明,该结构在30~1200 Hz范围内实现了平均69 dB的宽频隔声效果,同时在700~1060 Hz频段内展现出稳定的宽带吸声特性(平均吸声系数0.784),吸声效果优于同厚度多孔材料。机理分析表明,薄膜共振、亥姆霍兹腔体耦合与多孔材料耗散的共同作用,是实现协同降噪的关键机制;其中,薄膜-质量块系统的振动模态可进一步揭示隔声峰谷的形成机理,负等效质量特性则能补充解释反共振峰的存在原因;利用薄膜的反共振特性,将其作为谐振腔的背板,在保持与刚性背板结构相当降噪效果的同时,减轻了结构的总重量。本研究为轻量化、多功能一体化的结构设计提供了新思路,并在交通、建筑及机械设备等工程领域展现出广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Xie, H., Li, H. and Kang, J. (2014) The Characteristics and Control Strategies of Aircraft Noise in China. *Applied Acoustics*, **84**, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.01.011>
- [2] Paschalidou, A.K., Kassomenos, P. and Chonianiaki, F. (2019) Strategic Noise Maps and Action Plans for the Reduction of Population Exposure in a Mediterranean Port City. *Science of the Total Environment*, **654**, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.048>

- [3] 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>
- [4] Yang, M. and Sheng, P. (2017) Sound Absorption Structures: From Porous Media to Acoustic Metamaterials. *Annual Review of Materials Research*, **47**, 83-114. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-124032>
- [5] Huang, H.H., Sun, C.T. and Huang, G.L. (2009) On the Negative Effective Mass Density in Acoustic Metamaterials. *International Journal of Engineering Science*, **47**, 610-617. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2008.12.007>
- [6] Man, X., Luo, Z., Liu, J. and Xia, B. (2019) Hilbert Fractal Acoustic Metamaterials with Negative Mass Density and Bulk Modulus on Subwavelength Scale. *Materials & Design*, **180**, Article ID: 107911. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107911>
- [7] 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>
- [8] Li, X., Zhao, J., Wang, W., Xing, T., Zhu, L., Liu, Y., *et al.* (2022) Tunable Acoustic Insulation Characteristics of Membrane-Type Acoustic Metamaterials Array with Compact Magnets. *Applied Acoustics*, **187**, Article ID: 108514. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108514>
- [9] Meng, H., Galland, M.A., Ichchou, M., Bareille, O., Xin, F.X. and Lu, T.J. (2017) Small Perforations in Corrugated Sandwich Panel Significantly Enhance Low Frequency Sound Absorption and Transmission Loss. *Composite Structures*, **182**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.103>
- [10] Xia, B., Li, L., Liu, J. and Yu, D. (2017) Acoustic Metamaterial with Fractal Coiling up Space for Sound Blocking in a Deep Subwavelength Scale. *Journal of Vibration and Acoustics*, **140**, Article ID: 011011. <https://doi.org/10.1115/1.4037514>
- [11] Li, Y. and Yan, J. (2023) Acoustic Transmission Characteristics Based on Coiled-Up Space Metamaterials. *Applied Acoustics*, **203**, Article ID: 109199. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109199>
- [12] Boztoprak, Y., Ünal, M., Özada, Ç., Kuzu, E., Özer, H., Ergin, F., *et al.* (2023) Sound Insulation Performance of Honeycomb Core Aluminum Sandwich Panels with Flexible Epoxy-Based Foam Infill. *Composite Structures*, **319**, Article ID: 117149. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117149>
- [13] Wang, X., Luo, X., Zhao, H. and Huang, Z. (2018) Acoustic Perfect Absorption and Broadband Insulation Achieved by Double-Zero Metamaterials. *Applied Physics Letters*, **112**, Article ID: 021901. <https://doi.org/10.1063/1.5018180>
- [14] Li, H., Yang, J., Liu, Q., Li, S., Liu, X., Yang, F., *et al.* (2024) A Novel Sandwich Structure for Integrated Sound Insulation and Absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, **279**, Article ID: 109526. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109526>
- [15] Almeida, G.D.N., Vergara, E.F., Barbosa, L.R., Lenzi, A. and Silva, O.M. (2024) On the Use of Metamaterials with Negative Effective Parameters for Dual Sound Energy Control. *Applied Acoustics*, **221**, Article ID: 110010. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110010>
- [16] Liu, S., Liu, P., Zhao, R., Lu, J., Yang, K., Zhou, H., *et al.* (2023) Study on Acoustic Performance of New Spiral Sound Absorbing and Insulating Metamaterial. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **43**, 939-955. <https://doi.org/10.1177/14613484231219150>
- [17] Gao, N., Hou, H. and Wu, J.H. (2018) A Composite and Deformable Honeycomb Acoustic Metamaterial. *International Journal of Modern Physics B*, **32**, Article ID: 1850204. <https://doi.org/10.1142/s0217979218502041>
- [18] Sui, N., Yan, X., Huang, T., Xu, J., Yuan, F. and Jing, Y. (2015) A Lightweight yet Sound-Proof Honeycomb Acoustic Metamaterial. *Applied Physics Letters*, **106**, Article ID: 171905. <https://doi.org/10.1063/1.4919235>
- [19] Wang, Y. and Ma, L. (2021) Sound Insulation Performance of Membrane-Type Metamaterials Combined with Pyramidal Truss Core Sandwich Structure. *Composite Structures*, **260**, Article ID: 113257. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113257>
- [20] Duan, H., Shen, X., Wang, E., Yang, F., Zhang, X. and Yin, Q. (2021) Acoustic Multi-Layer Helmholtz Resonance Metamaterials with Multiple Adjustable Absorption Peaks. *Applied Physics Letters*, **118**, Article ID: 241904. <https://doi.org/10.1063/5.0054562>
- [21] Mei, J., Ma, G., Yang, M., Yang, Z., Wen, W. and Sheng, P. (2012) Dark Acoustic Metamaterials as Super Absorbers for Low-Frequency Sound. *Nature Communications*, **3**, Article No. 756. <https://doi.org/10.1038/ncomms1758>
- [22] Li, H.Z., Liu, X.C., Liu, Q., Li, S., Yang, J., Tong, L., *et al.* (2023) Sound Insulation Performance of Double Membrane-Type Acoustic Metamaterials Combined with a Helmholtz Resonator. *Applied Acoustics*, **205**, Article ID: 109297. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109297>
- [23] Wang, S., Xiao, Y., Guo, J., Zhang, H. and Wen, J. (2021) Broadband Diffuse Field Sound Insulation of Double Layer Metamaterial Plates Lined with Porous Material. *Applied Physics Letters*, **119**, Article ID: 084103. <https://doi.org/10.1063/5.0060100>

-
- [24] Cheng, Y., Zhou, C., Yuan, B.G., Wu, D.J., Wei, Q. and Liu, X.J. (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>
- [25] Brandão, E., Lenzi, A. and Paul, S. (2015) A Review of the *in Situ* Impedance and Sound Absorption Measurement Techniques. *Acta Acustica United with Acustica*, **101**, 443-463. <https://doi.org/10.3813/aaa.918840>
- [26] Chen, W., Guo, Z., Feng, H., Hu, S., Lu, L., Chen, C., *et al.* (2022) Optimization of Sound Absorption and Insulation Performances of a Dual-Cavity Resonant Micro-Perforated Plate. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, **18**, 481-496. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.015746>