

负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板的吸声性能

孔维凡 付涛

Sound absorption performance of concave hexagonal honeycomb sandwich panels with negative Poisson's ratio

KONG Weifan, FU Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231024.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

任意负泊松比超材料结构设计的功能基元拓扑优化法

Functional element topology optimal method of metamaterial design with arbitrary negative Poisson's ratio

复合材料学报. 2018, 35(4): 1014–1023 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170619.002>

负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能

In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete

复合材料学报. 2020, 37(8): 2005–2014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191207.001>

复合材料负泊松比格栅结构设计及力学性能评价

Structural design and mechanical characterization of an auxetic advanced grid structure composite

复合材料学报. 2021, 38(4): 1107–1114 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200623.002>

柔性吸声隔音降噪纺织复合材料

Sound-absorbing and sound insulation soft composite materials of textile for noise reduction

复合材料学报. 2018, 35(8): 1983–1993 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180410.002>

磁性聚氨酯泡沫的微观形貌及低频吸声性能

Micro topography and low frequency sound absorption performance of magnetic polyurethane foam

复合材料学报. 2018, 35(1): 24–29 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170417.003>

零泊松比超材料设计的多评价点功能基元拓扑优化方法

Functional element topology optimization method based on multiple evaluation points for metamaterial design with zero Poisson's ratio

复合材料学报. 2020, 37(12): 3229–3241 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200306.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20231024.003

负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板的吸声性能

孔维凡, 付涛*

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)



分享本文

摘要: 为了改善传统蜂窝夹层板结构的吸声特性, 提出了一种负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板结构, 该结构上面板为微穿孔板, 夹芯层为负泊松比内凹六边形蜂窝, 其由 19 个具有内延伸管的单元腔体谐振器构成。采用 COMSOL 仿真软件对负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板结构在 500~950 Hz 频率范围内进行吸声系数的计算, 并运用 B&K 驻波管测量系统对仿真结果的有效性进行了验证。在保持负泊松比内凹六边形蜂窝胞元结构不变的前提下, 研究了胞元参数对蜂窝夹层板结构吸声系数的影响, 研究结果表明: 当胞元倾角增大、内延伸管孔隙率减小、腔体壁厚减小时, 结构的吸声性能增强; 此外, 腔体深度的增加和内延伸管管长的增加都会导致共振频率向更低频方向移动, 其中腔体深度的改变更明显。在 500~950 Hz 频率范围内, 该结构比传统蜂窝夹层板结构的平均吸声系数提升了 5.64%, 表明负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板结构在低频范围内具有更优的吸声性能。

关键词: 负泊松比; 吸声结构; 吸声系数; 夹层板; 腔体谐振器

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)04-2157-10

Sound absorption performance of concave hexagonal honeycomb sandwich panels with negative Poisson's ratio

KONG Weifan, FU Tao*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the sound absorption characteristics of the traditional honeycomb sandwich panel structure, a negative Poisson's ratio concave hexagonal honeycomb sandwich panel structure was proposed, the upper panel of the structure was a micro-perforated plate, and the sandwich layer was a negative Poisson's ratio concave hexagonal honeycomb, which was composed of 19 units cavity resonators with internal extension tubes. The sound absorption coefficient of the concave hexagonal honeycomb sandwich plate structure in the frequency range of 500-950 Hz was calculated by COMSOL simulation software, and the validity of the simulation results was verified by the B&K standing wave tube measurement system. Under the premise of keeping the structure of negative Poisson's ratio concave hexagonal honeycomb cell unchanged, the influence of cell parameters on the sound absorption coefficient of honeycomb sandwich plate structure was studied. The results show that when the cell inclination angle increases, the porosity of the inner extension tube decreases, and the wall thickness of the cavity decreases, the sound absorption performance of the structure is enhanced. In addition, the increase of cavity depth and the increase of inner extension tube length will lead to the resonance frequency moving to lower frequencies, and the change of cavity depth is more obvious. In the frequency range of 500-950 Hz, the average sound absorption coefficient of the structure is increased by 5.64% compared with the traditional honeycomb sandwich panel structure, indicating that the negative Poisson's ratio has better sound absorption performance in the low

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-10-14; 录用日期: 2023-10-19; 网络首发时间: 2023-10-25 10:31:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231024.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (52205105); 云南省基础研究专项 (202101AU070160; 202201AT070145)

National Natural Science Foundation of China (52205105); Yunnan Fundamental Research Projects (202101AU070160; 202201AT070145)

通信作者: 付涛, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为智能材料与结构 E-mail: ftkmust@126.com

引用格式: 孔维凡, 付涛. 负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板的吸声性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 2157-2166.

KONG Weifan, FU Tao. Sound absorption performance of concave hexagonal honeycomb sandwich panels with negative Poisson's ratio [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 2157-2166 (in Chinese).

frequency range than the traditional honeycomb sandwich panel structure.

Keywords: negative Poisson's ratio; sound-absorbing structure; sound absorption coefficient; mezzanine panels; cavity resonator

当今隔/吸声复合材料的快速发展,出现了多种隔/吸声结构,蜂窝夹层板结构作为一种简单高效的隔/吸声结构,因其轻质性、高的比强度和比刚度,常被应用到航空航天、汽车、船舶和高速列车等各类载运设备的蒙皮结构中,以此来提升载运设备的隔/吸声性能。夹芯层的结构有多种形式,例如蜂窝形夹芯、波纹夹芯、点阵夹芯、正交加筋夹芯等^[1-6]。采用特定排布方式的夹芯层不仅能够解决噪声方面取得很好的效果,同时夹层板结构轻质化的特性减轻结构的质量和制造成本。

微穿孔板是一种典型的共振式吸声结构,是在穿孔板共振器基础上发展而来的新型吸声结构,其特点是孔径微小,从而具有更大的声阻^[7-13]。传统的蜂窝结构工艺简单,但吸声频宽和性能较不足。张丰辉等^[14]通过在蜂窝腔体内加入波纹结构,同时对面板和波纹结构进行微穿孔设计,实现了低频段的有效吸声降噪。刘志恩等^[15]针对传统微穿孔板吸声结构吸声带宽较窄的问题,基于微穿孔板串并联耦合机制,提出了3种不同结构形式的复合微穿孔板结构来进行改进。Liu等^[16]提出了一种智能微穿孔面板,该板由传统的穿孔板和表面粘合压电陶瓷组成,实现了在低频范围内的良好吸声。Rafique等^[17]提出了一种不同深度J形空腔的不均匀微穿孔板复合结构,该结构在低频范围内有优秀的吸声性能。Jiang等^[18]提出了一种具有N型混合芯的微穿孔夹层板结构,分析了该结构在宽频域内有出色的吸声性能。Zhang等^[19]研究了在低频范围内,声音通过多孔芯的双壁圆柱壳和内壳微穿孔结构比相应的非穿孔结构在吸声吸能方面更加优秀。Wang等^[20]提出了一种以面心立方为夹层芯的结构,该结构具有优秀的力学性能和声学性能。胡齐笑等^[21]基于体积流连续原理,采用改进型传递矩阵法,推导了多穿孔率复合微穿孔板吸声系数公式,探讨了多穿孔率对吸声性能的影响。王卫辰等^[22]针对不规则孔的微穿孔板几何参数无法直接获知,造成吸声性能计算困难的问题,提出一种微穿孔板几何参数估算方法。紧接着根据微穿孔板几何参数对高吸声性能区域的影响,探讨了马氏理论适用极限与微穿孔板几何参数的关系,及微穿孔板受粉尘污染后

吸声性能演变规律。

微穿孔板和薄板组成的空腔为夹芯层,夹芯层的合理设计可以使夹层板具有更好的吸声性能。负泊松比结构是一种常见的吸声结构,该结构具有轻质性、工艺简单、力学性能和吸声性能优异^[23-25]等优点。Kun等^[26]对比了4种负泊松比材料的吸能情况,得出了蜂窝六边形结构为最优结构,在这种结构下能够优秀的吸收冲击性能。Liu等^[27]对负泊松比蜂窝芯夹芯板进行屈曲和振动研究,得出了蜂窝芯层泊松比为负的板比正泊松比具有更高的承载能力。Qin等^[25]提出了一种具有负泊松比的新型凹形甲虫形结构的设计,该结构采用变密度拓扑优化方法开发,并调整设计参数从6个数据集中获得最佳结果,结果表明该结构具有优秀的能量吸收性能。Zhang等^[28]针对折返结构变形过程中应力集中和负泊松比的问题,提出一种余弦形折返结构负泊松比超材料。通过将折返结构单元中的斜梁优化为单余弦、串联余弦和多余弦屈曲梁,设计了不同配置的改进折返结构单元,得出了该结构能够使最大应力降低。虞科炯等^[29]提出了一种引入正弦函数曲线的负泊松比蜂窝结构,通过改变振幅、胞壁厚度等微结构几何参数,建立了参数化的正弦曲线负泊松比蜂窝结构模型,得出了该结构能够显著地降低峰值冲击力。在对负泊松比结构的研究中,大多数都是关于负泊松比结构力学性能的研究,有关负泊松比结构吸声性能的研究较少。

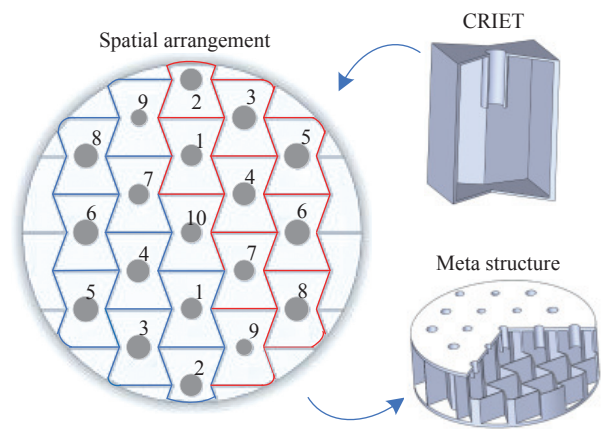
在此背景下,为了改善传统蜂窝夹层板结构的吸声特性,本文提出了一种负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板结构,该结构上面板为微穿孔板,夹芯层为负泊松比内凹六边形蜂窝,其由19个具有内延伸管的单元腔体谐振器构成,对该结构进行仿真,并通过实验验证了仿真结果的有效性。同时,研究了胞元参数对蜂窝夹层板结构吸声系数的影响。

1 实验与仿真分析

1.1 腔体谐振器的结构设计

图1为胞元的结构及空间排布方式。构件包含10个不同尺寸的内延伸管。各单元有序的对称排布,以标号为10的单元腔体谐振器为中心,单

元 1~9 围绕中心对称布置。图 2 为多个吸声构件组成的圆柱形负泊松比内凹六边形蜂窝结构图，可知，负泊松比内凹六边形蜂窝结构由 19 个具有内延伸管的单元腔体谐振器 (Cavity resonator with internal extension tube, CRIETs) 组成，各单元腔体结构有 7 个参数影响结构的尺寸。通过实验和仿真对胞元倾角、内延伸管孔隙率、内延伸管管长、腔体壁厚及腔体深度进行了调整 and 选择，从而得到了优秀的吸声性能。



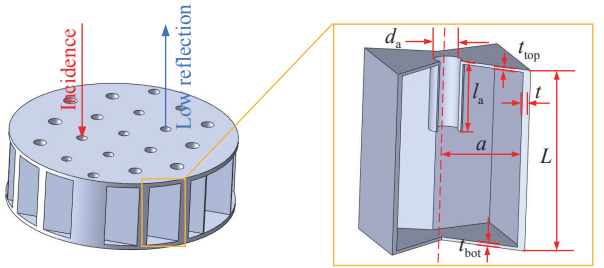
CRIET—Cavity resonator with internal extension tube

图 1 胞元的结构及空间排布方式

Fig. 1 Structure of cells and spatial arrangement

1.2 实验过程

图 3 为 B&K 驻波管测量设备及试件照片。如图 3(a) 所示，实验设备是 B&K 驻波管测量系统 (4206, 丹麦 Bruel & Kjaer Ltd.)，测试范围是 500~950 Hz。测量系统由 B&K 驻波管、扬声器、放大



d_a —Diameter of the inner extension tube; t_{top} —Thickness of the upper panel; l_a —Length of the inner extension tube; t —Wall thickness of the cavity; a —Distance from the central axis of the inner extension tube to the upper panel; L —Cavity depth; t_{bot} —Thickness of the lower panel

图 2 多个吸声构件组成的圆柱形负泊松比内凹六边形蜂窝结构图

Fig. 2 Cylindrical negative Poisson's ratio concave hexagonal honeycomb structure composed of multiple sound-absorbing components

器、信号处理器、传感器和测试软件组成，测试件是直径为 100 mm、高为 30 mm 的负泊松比内凹六边形蜂窝结构，放置于 B&K 驻波管中间。B&K 驻波管左端的扬声器产生声波信号，位于试件两侧的 4 个传感器收集管中的声波信息并反馈至系统，然后由软件计算出结构的吸声系数。如图 3(b) 所示，通过 3D 打印聚乳酸 (PLA) 材料制作了直径为 100 mm、高为 30 mm 的圆柱形试样。制备流程如下：首先通过 3D 打印出负泊松比内凹六边形蜂窝的壳体，然后打印出圆形面板，最后用胶水将壳体和圆形面板胶粘为一体。试件的各尺寸参数如表 1~表 3 所示。

1.3 仿真过程

采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 中的压力声学-频域模块进行仿真。试件模型上方

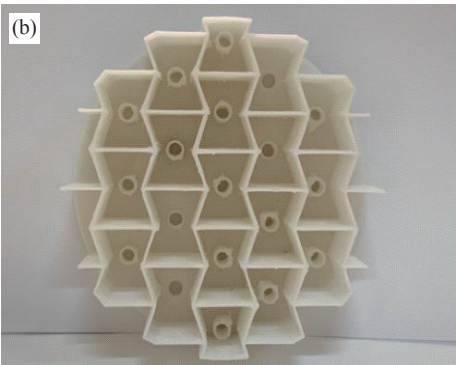
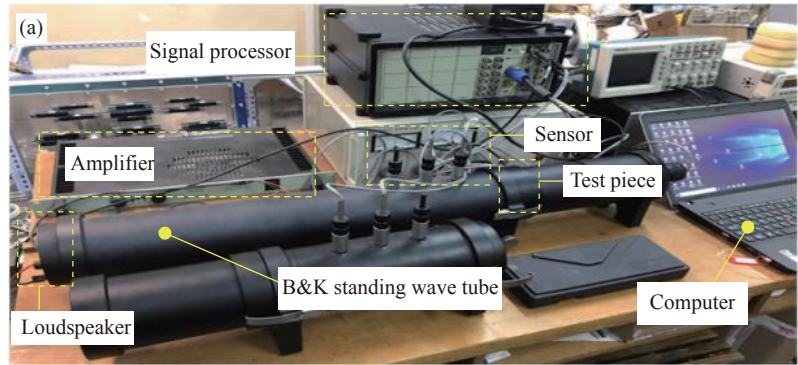


图 3 B&K 驻波管测量设备 (a) 及试件照片 (b)

Fig. 3 B&K standing wave tube measurement equipment (a) and photograph of the specimen (b)

表 1 胞元的参数

Table 1 Parameters of cells

Cavity depth L/mm	Center axis to upper panel distance a/mm	Concave inclination $\theta/(\circ)$	Cavity wall thickness t/mm	Upper panel thickness t_{top}/mm	Lower panel thickness t_{bot}/mm
30	11	70	0.5	2	2

表 2 10 个不同尺寸内延伸管的直径 d_a

Table 2 Diameter d_a of 10 different sizes of inner extension pipes

Unit	d_a /mm
1	4.6
2	4.9
3	5.6
4	5.2
5	6.0
6	6.0
7	4.7
8	5.6
9	4.5
10	4.7

表 3 内延伸管的管长 l_a

Table 3 Pipe length l_a of the inner extension pipe

Unit	l_a /mm
1, 2, 3, 4, 5, 10	11.5
6	8.9
7	1.4
8	5.3
9	0

层为空气层，下层为负泊松比内凹六边形蜂窝结构，如图 4 和图 5 所示，空气域定义为空气，在顶端给予一个端口入射声波 1 Pa，通过上层空气层到达下层，仿真模型与实验测量试件的参数相同，试件的边界为硬声场边界，考虑到黏滞效应和热效应对吸声效果的影响，设置了热黏性层阻抗。

系统整体的吸声系数：

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = \frac{E_i - E_r}{E_i} = 1 - r$$

(1)

式中： E_i 为入射声； E_a 为被材料或结构吸收的声能； E_r 为被材料或结构反射的声能； r 为反射系数。

阻抗 Z 为媒质在波阵面某个面积上的压强与通过这个面积的体积速度的复数比值，其中，体积速度是穿过一面积 S 的介质流动速度；利用软件中的网格函数，将模型划分为自由四面体网格，预定义为较细化，最小单元大小为 1×10^{-6} 。对试件模型进行仿真，可以得到结果及模型网格。

1.4 实验与仿真数据对比

图 6 为负泊松比内凹六边形结构实验和仿真的频率-吸声系数曲线。可知，实验和仿真结果吻合度较高，通过实验验证了仿真的有效性。在 500~750 Hz 之间存在的差异不显著，实验和仿真之间的误差在可接受范围内。在 500~950 Hz 内，仿真结果有 8 个吸声系数峰值且在 700~900 Hz 内有较高的吸声系数。实验与仿真存在误差是由于

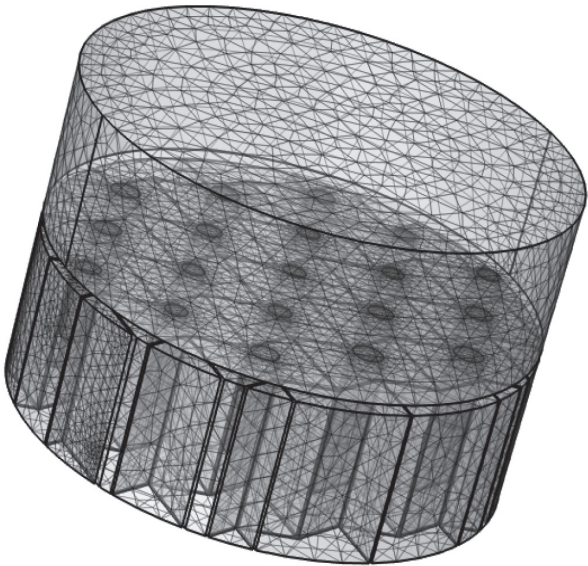


图 4 负泊松比结构模型的网格划分

Fig. 4 Meshing of negative Poisson's ratio structure model

试件制备时，微穿孔板和蜂窝夹芯结构及底板在胶接过程中，会在底面板上残留少量粘接剂。实验件用胶带缠绕放入 B&K 驻波管中，试件和 B&K 驻波管管壁之间会存在缝隙，这些因素都对吸声系数的测量存在影响。同时，由于在有限元计算过程中，建立的无壁厚空气域模型忽略了实际情况中较低频段中腔内声波因壁面反射对整体结构耦合效果的影响，因此实测结果会存在有一定的偏差。分别通过实验和有限元仿真得出了负泊松比内凹六边形蜂窝模型在 550~950 Hz 之间具

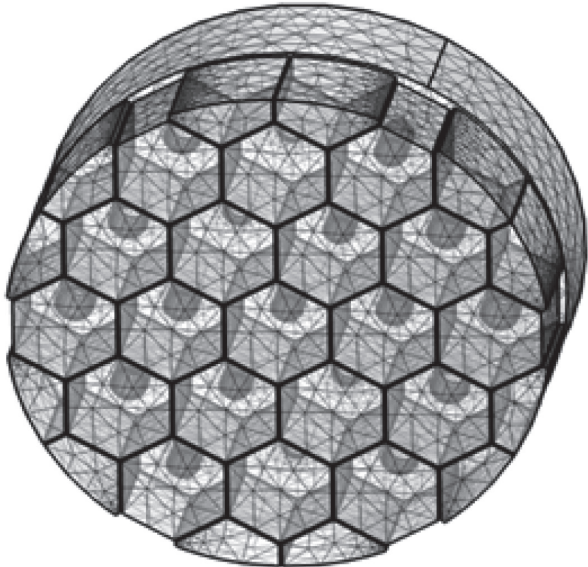


图 5 正六边形蜂窝结构模型的网格划分

Fig. 5 Meshing of regular hexagonal honeycomb structure models

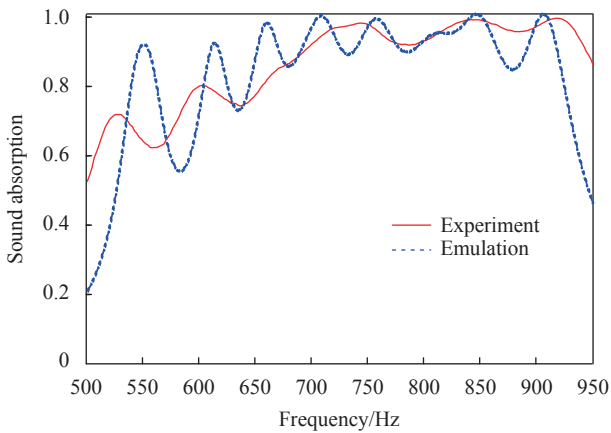


图 6 负泊松比内凹六边形结构实验和仿真的频率-吸声系数曲线

Fig. 6 Frequency-absorption coefficient curves for experiments and simulations of concave hexagonal structures with negative Poisson's ratio

有优秀的吸声特性。通过实验与仿真结果的对比，验证了该模型具有优秀的吸声特性。

1.5 负泊松比内凹六边形蜂窝结构与传统蜂窝结构吸声性能对比

图 7 为负泊松比内凹六边形蜂窝结构和传统六边形蜂窝结构的频率-吸声系数曲线。可以得出，在相同的结构尺寸下，负泊松比内凹六边形蜂窝结构对于传统蜂窝结构在吸声方面有更强大的性能，在 500~550 Hz 之间，负泊松比内凹六边形蜂窝结构的吸声系数大于传统蜂窝结构的吸声系数，在 550~600 Hz 之间，负泊松比内凹六边形蜂窝结构的吸声系数略小于传统蜂窝结构的吸声系数，在 500~950 Hz 之间，由图 4 和图 5 经过有限元计算可得，负泊松比内凹六边形蜂窝结构的吸声系数平均值为 0.824，传统蜂窝结构的吸声系数平均值为 0.78，在研究频率范围内的平均吸声系数提升了 5.64%。该结构实质上是以牺牲 810~820 Hz、860~890 Hz、920~950 Hz 频率下的性能来换取较低频率下的性能提升和整体频带的平衡。

2 结果与讨论

2.1 内凹倾角 θ 对吸声性能的影响

圆柱形吸声结构由 19 个负泊松比内凹六边形组成，内凹角度 θ 与结构力学性能密切相关，同时也影响着结构的声学性能，内凹倾角影响着空气腔的体积，由仿真结果可以得出内凹角度对吸声性能存在一定的影响。分别对 $\theta=65^\circ$ 、 67° 、 70° 的负泊松比内凹六边形蜂窝结构进行仿真，如图 8 所示，随着 θ 的增大，500~620 Hz 处的吸声系数也有增加，同时，在 600~900 Hz 之间， $\theta=70^\circ$

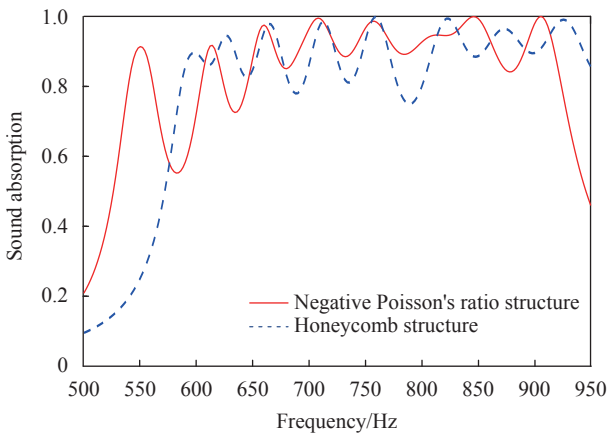


图 7 负泊松比内凹六边形蜂窝结构和传统六边形蜂窝结构的频率-吸声系数曲线

Fig. 7 Frequency-absorption coefficient curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal honeycomb structure and traditional hexagonal honeycomb structure

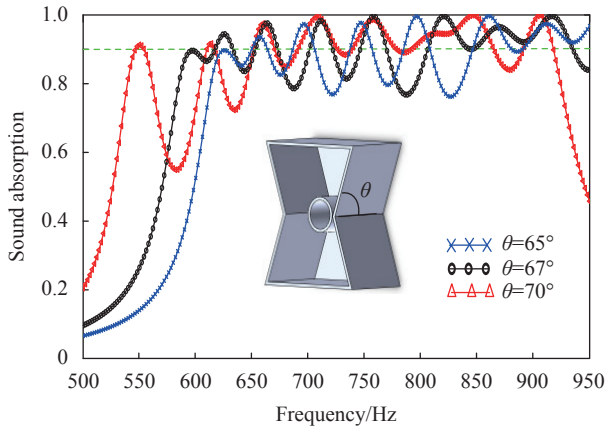


图 8 不同内凹倾角 θ 的负泊松比内凹六边形结构频率-吸声系数曲线

Fig. 8 Frequency-absorption coefficient curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal structures with different concave inclination angles θ

时的波谷高于另外两条曲线且平均值大于 0.9。随着倾角的增大，空气腔的体积增大，共振频率减小，使其在较低频范围内能够有效的吸声。

同时，阻抗比变化幅度也验证了内凹倾角 θ 对吸声性能的影响。如图 9 所示，纵坐标为阻抗比 Z/Z_0 ，其中， Z_0 为空气声阻抗， $Z_0=\rho_0 c_0$ ，空气密度 $\rho_0=1.29 \text{ kg/m}^3$ ，空气中的声速 $c_0=343 \text{ m/s}$ 。声阻抗的实部常称“声阻”，其虚部称为“声抗”。实部代表着损耗项，反映了声源能量的损耗，能量以声波的形式传播出去了，而虚部代表着能量的贮存。阻抗是机械波传导时介质位移需要克服的阻力，阻抗越大则推动介质所需要的力就越大，阻抗越小则所需力就越小。内凹倾角

$\theta=70^\circ$ 的情况下, 具有更平坦的阻抗特性。当结构声阻抗比的实部接近 0 时, 结构的最大吸声系数随着实部的变大而缓慢减小, 随着实部的减小而缓慢增大, 结构在此时的吸声系数变化率较小; 由图 9 声阻比的虚部和图 8 中频率-吸声系数的关系可知, 负泊松比内凹六边形蜂窝结构在 600 Hz、650 Hz、700 Hz、750 Hz、800 Hz、850 Hz、900 Hz 频率范围附近的结构声阻抗率的虚部都接近-1, 这使结构在此频率范围内的吸声系数均接近结构的极大吸声系数。

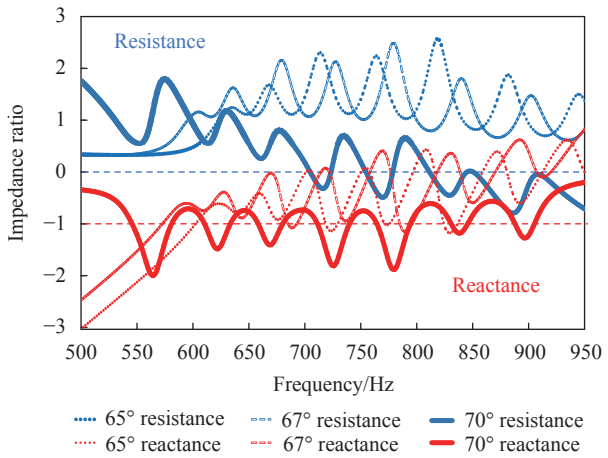


图 9 不同内凹倾角的负泊松比内凹六边形结构频率-阻抗曲线
Fig. 9 Frequency-impedance curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal structures with different concave inclination angles

2.2 内延伸管孔隙率 P 对吸声性能的影响

通过对管径大小的改变, 进而影响孔隙率的变化。管径作为内摩擦力产生的重要构件, 其结构参数 d_a 是影响吸声器共振和系统阻抗的关键因素。孔隙率是面板上管孔的面积与总截面的面积之比, 与单一管孔的截面积和管孔数量相关, 不同区域的孔隙率主要影响不同的吸声系数峰值。表 2 中管径尺寸依次增加 0.2 mm, 孔隙率分别为 $P_1=10.0416\%$ 、 $P_2=10.8544\%$ 、 $P_3=11.6992\%$, 同时, 全部管径都为表 2 中 10 个不同管径的平均值 $d_a=5.18\text{ mm}$ 时, 孔隙率 $P_4=10.73296\%$, 如图 10 所示, 从整体上来看, 当孔隙率变大时, 曲线往高频方向移动。在 500~600 Hz 时, 幅值逐渐升高, 在 550 Hz 时, P_2 的吸声系数最高, P_2 在 680~950 Hz 处吸声系数平均值在 0.9 以上。因此, 可以得出 P_2 在 500~950 Hz 频率范围内有着最为平稳的吸声系数曲线。内延伸管管径全部相同的结构在此频率范围内的吸声性能不理想, 吸声系数仅

有 3 个峰值, 且在 800~950 Hz 频率范围内的吸声系数小于 0.5。对比管径相同的负泊松比内凹六边形蜂窝模型, 由 10 个不同管径的胞元按照一定的排列顺序组成的结构吸声性能优于全部胞元管径相同结构的吸声性能。

减小管径会使孔隙率减小, 共振频率降低, 能够在低频范围内更好地吸声。通过合理地选择管径的尺寸, 可在一定的范围取得良好的吸声效果。不同的管径影响着不同的峰值。较小的管径可以在一定程度上增大结构的声阻, 从而获得较大的吸声系数, 但过小的管孔却不易制作而且会增加制造成本, 而管径过大会导致吸声性能较差, P_1 的吸声系数在 570~670 Hz 频率段内高于 P_2 , 而 P_2 在 500~950 Hz 中的大多频率段高于 P_1 , P_1 试件的制作难度和成本都比 P_2 高, 但整体吸声效果 P_2 却更好, P_2 在整体程度上优于 P_1 。因此应根据实际情况选择合适的管径。

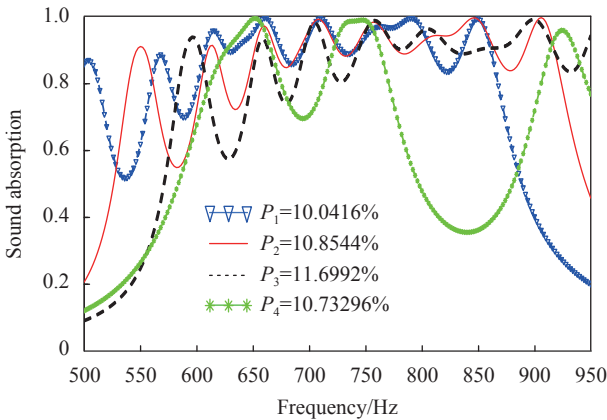


图 10 不同孔隙率 P 的负泊松比内凹六边形结构频率-吸声系数曲线
Fig. 10 Frequency-absorption coefficient curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal structures with different porosities P

2.3 内延伸管管长 l_a 对吸声性能的影响

随着管长的增加, 共振频率减小, 使吸声系数曲线往更低频方向移动, 能够有效消除在更低频范围内的噪声。如图 11 所示, 730~950 Hz 段内吸声性能的下降主要是由于在这段频率内管长的增加使内延伸管的体积增大, 空腔体积减小, 阻抗变大, 这些都会对吸声性能产生影响, 不同内延伸管管长吸声系数的降低幅度又有所不同, 管长越长, 吸声系数下降的越快。各胞元内延伸管管长相同时, 吸声频率范围缩小到 700~820 Hz 之间, 相比于负泊松比内凹六边形各胞元有着相同的管长值, 不等管长值的负泊松比内凹六边形蜂

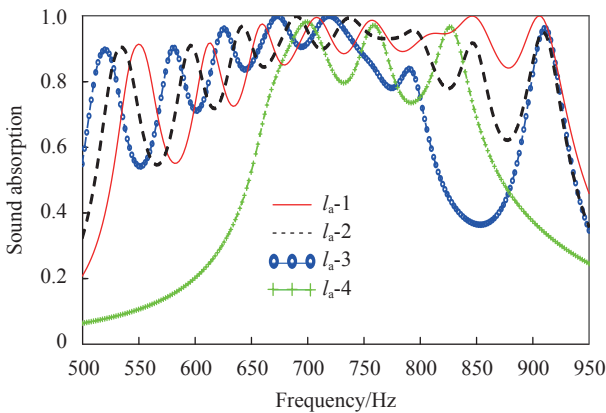


图 11 不同内延伸管管长 l_a 的负泊松比内凹六边形结构频率-吸声系数曲线

Fig. 11 Frequency-absorption coefficient curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal structures with different inner extension tube lengths l_a

窝结构有着更高的吸声系数。管长依次增加 1 mm, 如表 4 所示。

采用数值模拟对负泊松比内凹六边形蜂窝结构中的声波能量耗散进行分析, 可以得出内延伸管的尺寸在能量耗散方面有着较大的影响。图 12 给出了两种不同内延伸管管径 (从左到右管的直

表 4 负泊松比内凹六边形结构试件各胞元内延伸管管长 l_a

Table 4 Length of intracellular extension tube l_a in negative Poisson's ratio concave hexagonal structure specimen

Unit	1,2,4,5,10	6	7	8	9
l_a -1/mm	11.5	8.9	1.4	5.3	0
l_a -2/mm	12.5	9.9	2.4	6.3	1
l_a -3/mm	13.5	10.9	3.4	7.3	2
l_a -4/mm	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42

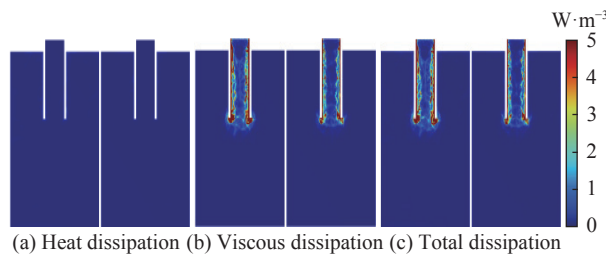


图 12 两种不同内延伸管管径的负泊松比内凹六边形结构蜂窝胞元结构内的能量耗散密度云图 (从左到右管的直径分别为 4.7 mm 和 4.6 mm)
Fig. 12 Energy dissipation density cloud in two different inner extension pipe diameter honeycomb cell cell structures in negative Poisson's ratio concave hexagonal structure (Tubes diameters from left to right are 4.7 mm and 4.6 mm, respectively)

2.5 腔体深度 L 对吸声性能的影响

改变负泊松比内凹六边形蜂窝结构的腔体深度对结构的最大吸声系数影响并不大, 却对共振频率有着较大的影响。由于该结构是亥姆霍兹谐

径分别 4.7 mm 和 4.6 mm) 蜂窝胞元结构内的声波能量耗散情况, 其中, 图 12(a)~12(c) 分别表示在入射声波频率为 550 Hz 时, 结构内部的热功耗密度、黏性功耗密度和总热黏性功耗密度。可以看出, 与黏性耗散相比, 单个蜂窝胞元内的热耗散很小, 黏性耗散主要集中在内延伸管处。当声音频率接近共振频率时, 内延伸管内的空气柱剧烈振荡, 并与管壁之间产生黏性摩擦, 从而大幅消耗声波的动能。

2.4 腔体壁厚 t 对吸声性能的影响

腔体壁厚是影响结构力学性能的重要参数, 同时也影响结构的吸声性能。改变腔体的壁厚也会影响结构的振动和声学性能, 腔体壁厚对频率-吸声系数的影响如图 13 所示, 可以看出, 在 500~600 Hz 和 900~950 Hz 之间吸声系数基本没有变化, 在 700~750 Hz 之间, 吸声系数随着壁厚的增加而增加, 在 650~700 Hz 和 750~900 Hz 之间, 吸声系数随着壁厚的增加而减小。当腔体壁厚增大时, 空腔体积减小, 共振频率增大, 吸声性能也会相应的减弱, 此时, 吸声峰值对应的频率向高频移动, 在不同频率附近, 减小的幅度又有所不同。

振器的组合, 因此可看作是由质量和弹簧组成的一个共振系统。当入射声波的频率和系统的共振

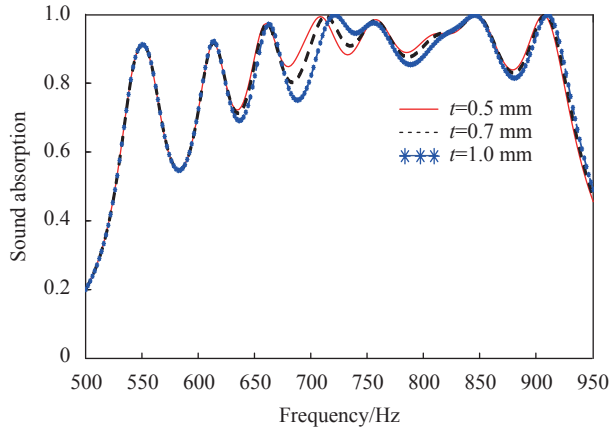


图 13 不同腔体壁厚 t 的负泊松比内凹六边形结构频率-吸声系数曲线
Fig. 13 Frequency-absorption coefficient curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal structures with different cavity wall thicknesses t

频率一致时,腔体内的空气产生激烈振动摩擦,加强了吸收效应,形成了吸收峰,使声能显著衰减。由图 14 可以看出腔体深度越大,共振频率越低,负泊松比内凹六边形蜂窝结构的吸声峰就越往更低频方向移动,因此可以通过较大的腔体深度消除穿透性比较强的低频噪声。但腔体深度的增加又会带来结构体积的增加,试件 $L=30\text{ mm}$ 在 $500\sim 950\text{ Hz}$ 中已有较好的吸声系数,同时阻抗的变化率小,对吸声性能的测量不会产生过大的干扰,因此腔体深度的尺寸选择仍需结合实际情况。

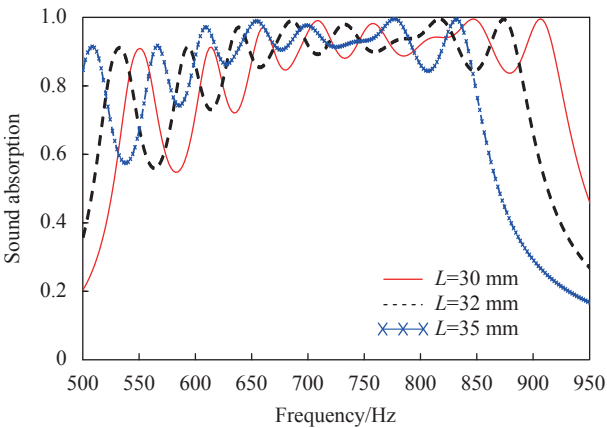


图 14 不同腔体深度 L 的负泊松比内凹六边形结构频率-吸声系数曲线
Fig. 14 Frequency-absorption coefficient curves of negative Poisson's ratio concave hexagonal structures with different cavity depths L

3 结论

(1) 通过 COMSOL Multiphysics 仿真软件对蜂窝夹层板结构在目标频率范围内进行吸声系数的计算,并运用 B&K 驻波管测量系统进行验证,得出了蜂窝夹层板结构在 $500\sim 950\text{ Hz}$ 低频范围内吸声系数的实验结果基本符合有限元计算的结果。

(2) 负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板结构相较于传统的蜂窝夹层板结构有着更优异的吸声性能。夹芯层为负泊松比内凹六边形胞元结构能够有效地减小共振频率,使在更低频的范围内有着优秀的吸声性能。在 $500\sim 950\text{ Hz}$ 频率范围内,负泊松比内凹六边形蜂窝结构比传统蜂窝夹层板结构的平均吸声系数提升了 5.64%。达到了低频高效降噪的目的。

(3) 采用 COMSOL 仿真软件研究了胞元参数对蜂窝夹层板结构吸声系数的影响,当胞元倾角增大、内延伸管孔隙率减小、腔体壁厚减小时,结构的吸声性能增强。腔体深度的增加和内延伸管管长的增加都会导致共振频率向更低频方向移动,

其中腔体深度的改变更明显。这种内部多腔体结构使其在吸声方面具有巨大的潜力和出色的可设计性。针对不同的应用需求,可以通过合理设计和优化,取得良好的吸声性能。

参考文献:

[1] 潘晋,李娜,方涵,等. 桥梁防船撞夹层板结构形式耐撞性比较研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2019, 43(6): 1027-1032.

PAN Jin, LI Na, FANG Han, et al. Comparative study on the crashworthiness of bridge anti-ship collision sandwich plate structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Traffic Science and Engineering), 2019, 43(6): 1027-1032(in Chinese).

[2] BIRMAN V, KARDOMATEAS G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 221-240.

[3] 董福祥,李丽君,张宪旭,等. 对多孔材料夹层板的隔声性能进行试验及仿真分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4660-4664.

DONG Fuxiang, LI Lijun, ZHANG Xianxu, et al. Experimental and simulation analysis of sound insulation performance of porous sandwich panel [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4660-4664(in Chinese).

[4] 李维鑫. 微穿孔板低穿孔率条件下的吸声特性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.

LI Weixin. Study on sound absorption characteristics of microperforated plate under low perforation rate [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021(in Chinese).

[5] 魏斌,张冠军,陈足君,等. 多孔夹芯层组合方式对夹层板隔声特性影响研究 [J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 228-233.

WEI Bin, ZHANG Guanjun, CHEN Zujun, et al. Study on the influence of porous sandwich layer combination on sound insulation characteristics of sandwich panel [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(3): 228-233(in Chinese).

[6] 吴孝巡. 颗粒增强蜂窝轻质夹层板隔声特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

WU Xiaoxun. Study on sound insulation characteristics of particle reinforced honeycomb lightweight sandwich panel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022(in Chinese).

[7] 高玉魁. 负泊松比超材料和结构 [J]. 材料工程, 2021, 49(5): 38-47.

GAO Yukui. Negative Poisson's ratio metamaterials and structures [J]. Materials Engineering, 2021, 49(5): 38-47(in

- Chinese).
- [8] 杨德庆, 吴秉鸿, 张相闻. 星型负泊松比超材料防护结构抗爆抗冲击性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 124-135.
- YANG Deqing, WU Binghong, ZHANG Xiangwen. Study on anti-explosion and impact resistance of star negative Poisson's ratio metamaterial protective structure[J]. Explosion and Shock, 2019, 39(6): 124-135(in Chinese).
- [9] 马芳武, 梁鸿宇, 赵颖, 等. 内凹三角形负泊松比材料的面内冲击动力学性能[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 81-87.
- MA Fangwu, LIANG Hongyu, ZHAO Ying, et al. Dynamic properties of in-plane impact of concave triangular negative Poisson's ratio material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 81-87(in Chinese).
- [10] GAI X L, GUAN X W, CAI Z N, et al. Acoustic properties of honeycomb like sandwich acoustic metamaterials[J]. Applied Acoustics, 2022, 199: 109016.
- [11] 赵心悦, 孙献娥, 杨小军, 等. 蜂窝与微穿孔声学结构研究进展及其在木结构建筑中的应用[J]. 林产工业, 2021, 58(2): 31-35.
- ZHAO Xinyue, SUN Xian'e, YANG Xiaojun, et al. Research progress of honeycomb and micro-perforated acoustic structure and its application in wood structure building[J]. Forest Products Industry, 2021, 58(2): 31-35(in Chinese).
- [12] 吴佳康, 柳政卿, 王秋成. 复合微穿孔板吸声结构声学性能预测[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 203-208.
- WU Jiakang, LIU Zhengqing, WANG Qiucheng. Acoustic performance prediction of sound-absorbing structure of composite microperforated plate[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(3): 203-208(in Chinese).
- [13] 徐稳, 王知杰, 朱雯雯, 等. 微穿孔板-聚合物层状结构材料的制备和吸声性能[J]. 材料研究学报, 2021, 35(7): 535-542.
- XU Wen, WANG Zhijie, ZHU Wenwen, et al. Preparation and sound absorption performance of microperforated plate-polymer layered structural materials[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(7): 535-542(in Chinese).
- [14] 张丰辉, 唐宇帆, 辛锋先, 等. 微穿孔蜂窝-波纹复合声学超材料吸声行为[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 120-130.
- ZHANG Fenghui, TANG Yufan, XIN Fengxian, et al. Sound absorption behavior of microperforated honeycomb-corrugated composite acoustic metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(23): 120-130(in Chinese).
- [15] 刘志恩, 袁金呈, 陈弯, 等. 复合微穿孔板吸声结构吸声特性分析及优化[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 515-520.
- LIU Zhi'en, YUAN Jincheng, CHEN Wan, et al. Analysis and optimization of sound absorption characteristics of composite microperforated plate sound-absorbing structure[J]. Acoustic Technology, 2021, 40(4): 515-520(in Chinese).
- [16] LIU X, WANG C Q, ZANG Y M, et al. Investigation of broadband sound absorption of smart micro-perforated panel (MPP) absorber[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 199: 106426.
- [17] RAFIQUE F, WU J H, LIU C R, et al. Low-frequency sound absorption of an inhomogeneous micro-perforated panel with J-shaped cavities of different depths[J]. Acoustics Australia, 2022, 50(2): 203-214.
- [18] JIANG Y F, CHENG S, HAN M, et al. Design and optimization of micro-perforated ultralight sandwich structure with N-type hybrid core for broadband sound absorption[J]. Applied Acoustics, 2023, 202: 109184.
- [19] ZHANG Q L. Sound transmission through micro-perforated double-walled cylindrical shells lined with porous material[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 485: 115539.
- [20] WANG D W, WEN Z H, CHRIST G, et al. Sound absorption of face-centered cubic sandwich structure with micro-perforations[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108344.
- [21] 胡齐笑, 丁善婷, 刘获. 改进型传递矩阵法的多穿孔率复合微穿孔板吸声性能研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(11): 1774-1781.
- HU Qixiao, DING Shanting, LIU Di. Study on sound absorption performance of multi-perforation rate composite micro-perforation plate by improved transfer matrix method[J]. Mechanical Science and Technology, 2020, 39(11): 1774-1781(in Chinese).
- [22] 王卫辰, 邢邦圣, 顾海霞, 等. 微穿孔板几何参数估算及其对吸声性能的影响[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 369-375.
- WANG Weichen, XING Bangsheng, GU Haixia, et al. Estimation of geometric parameters of micro-perforated plate and its influence on sound absorption performance[J]. Acta Acoustica Sinica, 2019, 44(3): 369-375(in Chinese).
- [23] 沈佳熔, 吴懋亮, 王齐盛, 等. 材料负泊松比结构研究综述[J]. 机械制造, 2023, 61(8): 47-56.
- SHEN Jiarong, WU Maoliang, WANG Qisheng, et al. Review of negative Poisson's ratio structure of materials[J]. Machinery Manufacturing, 2023, 61(8): 47-56(in Chinese).
- [24] 王义平, 李凤莲, 吕梅. 波纹-负泊松比蜂窝混合芯夹层板的自由振动[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5963-5969.
- WANG Yiping, LI Fenglian, LYU Mei. Free vibration of corrugated-negative Poisson's-ratio honeycomb hybrid sandwich panel[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5963-5969(in Chinese).

[25] QIN D C, LI M C, WANG T T, et al. Design and mechanical properties of negative Poisson's ratio structure-based topology optimization[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(13): 7728.

[26] KUN Y, FEI T, BO W Y, et al. Study on impact energy absorption performance and optimization of negative Poisson's ratio structure[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(6): 328.

[27] LIU S, WANG K F, WANG B L. Buckling and vibration characteristic of anisotropic sandwich plates with negative Poisson's ratio based on isogeometric analysis[J/OL]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023: 1-16[2022-03-25]. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2222280>.

[28] ZHANG Z J, ZHANG L, DONG Y Y. Mechanical properties of negative Poisson's ratio metamaterial units and honeycomb structures with cosine-like re-entrant structure[J]. *Materials Letters*, 2023, 331: 133451.

[29] 虞科炯, 徐峰祥, 华林. 正弦曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 51-59.

YU Kejong, XU Fengxiang, HUA Lin. Study on in-plane impact performance of sinusoidal curved side negative Poisson's ratio honeycomb structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 51-59(in Chinese).