

突变截面穿孔板复合吸声结构的声学特性

李志勇^{1,2}, 陈必发^{1,2}, 于洪亮^{1,2}, 廖建彬^{1,2}, 邱泓钢¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建省海工装备检测与再制造产业技术创新研究院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对船舶噪声吸声构件的不足, 结合变截面穿孔板与多孔材料, 提出由突变截面穿孔板、三聚氰胺多孔材料和空气分层串联组合的复合吸声结构。对所提出的吸声结构建立声学模型递推公式, 进而推导吸声结构的吸声系数, 通过阻抗管测试与有限元仿真验证了理论模型的正确性。通过对比不同结构的吸声系数表明, 在突变截面穿孔板背腔填充多孔材料可使吸声结构获得更优的低频宽带吸声效果。同时开展不同吸声结构的声压与声能耗散密度仿真模拟, 阐明吸声结构的吸声机制, 并基于多吸声单元耦合设计方法, 进一步优化设计八单元串并联吸声结构, 实现了在 800~1900 Hz 和 610~1900 Hz 频段的连续准完美吸声。

[关键词] 船舶噪声; 突变截面穿孔板; 三聚氰胺; 复合吸声结构

[中图分类号] TB 533

Acoustic Characteristics of Compound Sound Absorption Structures of Perforated Plates with Abrupt Cross-Section

LI Zhiyong^{1,2}, CHEN Bifa^{1,2}, YU Hongliang^{1,2}, LIAO Jianbin^{1,2}, QIU Honggang¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Institute of Innovation for Marine Equipment Detection and Remanufacturing Industrial Technology, Xiamen 361021, China)

Abstract: In view of the shortage of marine noise absorbing components, a composite sound absorbing structure, which consists of an abrupt cross-section perforating plate, melamine perforating material and air layer in series was proposed by combining variable section perforating plate and porous material. The acoustic model recurrence formula was established for the proposed sound absorption structure, and then the sound absorption coefficient was derived. The correctness of the theoretical model was verified by impedance tube test and finite element simulation. By comparing the sound absorption coefficients of different structures, it was shown that filling the back cavity of the perforated plate with porous material could make the sound absorption structure obtain better low-frequency broadband sound absorption effect. The sound pressure and energy dissipation density of different sound absorption structures were simulated to clarify the sound absorption mechanism of the sound absorption structures. The eight-unit series and parallel sound absorption structure was further optimized based on the multi-element coupling design method, and the continuous quasi-perfect sound absorption in the frequency band of 800-1900 Hz and 610-1900 Hz was realized.

[收稿日期] 2024-09-10

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2023Y0028)

[通信作者] 廖建彬 (1976—), 博士, 教授, 硕士生导师, 从事机械噪声振动控制研究。E-mail:18950185198@126.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

Keywords: ship noise; abrupt cross-section perforated plate; melamine; composite sound absorption structure

0 引言

国际海事组织 (IMO) 通过的《船上噪声等级规则》^[1] 对船舶减振降噪性能提出了更高的要求, 这导致减振降噪技术在船舶行业高质量发展中变得至关重要。马大猷首创的微穿孔板^[2-3]作为噪声被动控制方法的代表已成为吸声领域的经典设计。经典理论表明, 孔径越小, 吸声性能越好, 但这也要求板材更薄^[4], 否则较大的声阻将削弱板与空气的匹配能力^[5]。例如, 孔径为 0.2 mm 的穿孔板在板厚取 0.1 ~ 0.3 mm 时, 吸声性能较好, 而当板厚取 0.8 mm 时, 吸声性能却下降 50%。薄弱的物理结构限制了穿孔板在船舶领域的应用, 同时每平方米穿孔板需有上万个穿孔, 加工难度和成本也显著增加。因此, 在传统的减振降噪技术基础上, 如何进一步降低船舶振动噪声成为亟待解决的核心技术问题。

突变截面穿孔板通过增加多余部分孔径来减小因板厚导致的高声阻, 其轴向孔径在特定位置发生突变。近年来, Jiang 等^[6]基于 176 组数值模拟, 提出了与突变截面比相关的经验阻抗校正模型; Li 等^[7]通过 3D 打印技术制作阶梯孔模型并进行实验, 结果表明, 在低频时, 阶梯孔穿孔板能适度增加声质量; Mei 等^[8]设计了一种穿孔板、管束和多孔吸音材料构成的超宽频复合声吸收器, 在 400 ~ 10 000 Hz 的超宽频范围内, 其平均吸收系数达到了 0.93; Li 等^[9]通过组合多孔板和吸声材料, 实现了在两种材料耦合处的声阻抗匹配, 从而达到有效的宽带吸声; Zhang 等^[10]提出了一种由多孔材料和亥姆霍兹谐振腔组成的宽带低频吸声材料, 研究结果表明, 多孔材料有助于满足阻抗匹配和临界耦合条件。以上研究均针对吸声体的降噪效果进行了改良, 而对背腔嵌入多孔材料的突变截面穿孔板复合吸声结构尚未见报道。因此, 本文通过加工截面突变的穿孔结构, 并嵌入三聚氰胺吸声材料, 对其吸声机理和宽带吸声进行研究, 以期获得优良的吸声性能, 拓展穿孔吸声结构在船舶行业的应用范围。

1 复合结构模型与吸声理论

1.1 结构模型

图 1 给出了突变截面穿孔板结构及其剖面等效图, 可见, 同心轴线上的两个孔径突变, 两孔连接处将结构分成 2 块不同孔径的穿孔板, 可看作是这两部分的串联组合^[5]。图 1 中, 入射声波和反射声波分别以 Ae^{-jkx} 、 Be^{+jkx} 表示, A 、 B 为声压幅值; 左侧面的声压 P_1 和速度 U_1 表示系统输入; 板后背腔声压为 P_2 , 速度为 U_2 , 右侧面声压 P_3 和速度 U_3 表示系统输出; 空腔深度为 D , PP1 为靠近声源侧穿孔板, PP2 为远离声源侧穿孔板, PP1 的孔径和厚度分别为 d_1 、 t_1 , PP2 的孔径和厚度分别为 d_2 、 t_2 。三聚氰胺不同的填充方式形成突变截面穿孔板-空腔、突变截面穿孔板-三聚氰胺、突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔和突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺 4 种复合吸声结构 (见图 2)。

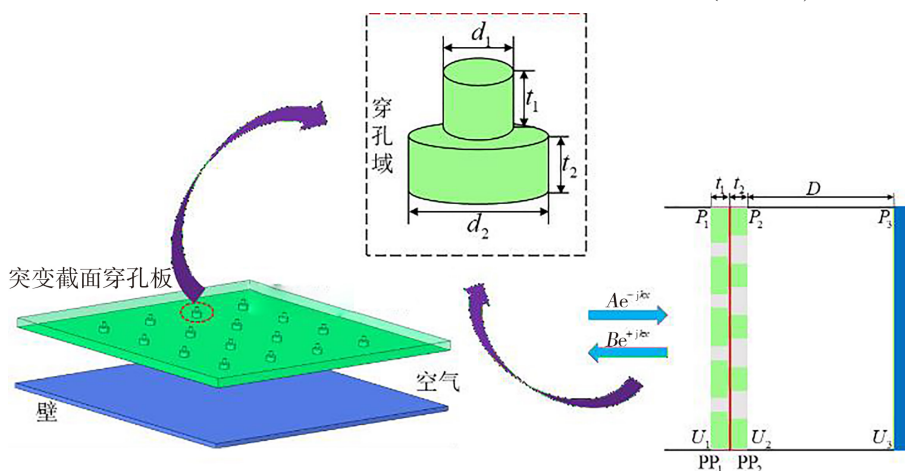


图 1 突变截面穿孔板结构及其剖面等效图

Fig.1 Structures of perforated plates with abrupt cross-section and its equivalent cross-sectional diagram

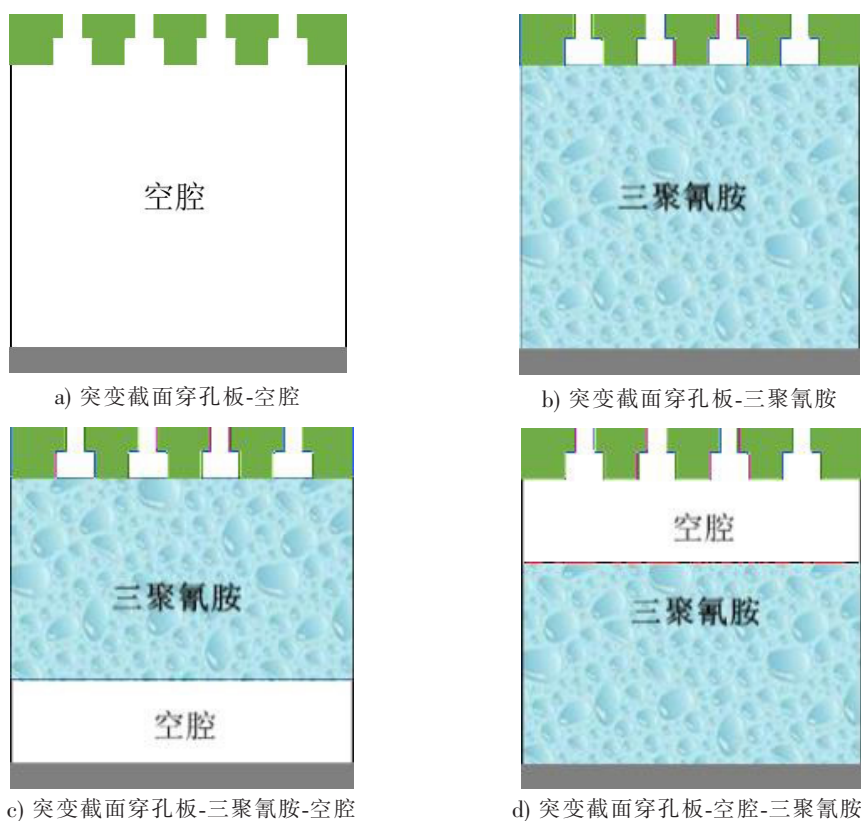


图2 突变截面穿孔板-三聚氰胺复合吸声结构

Fig.2 Abrupt cross section perforated plate-melamine complex sound absorption structure

1.2 理论模型

基于 JCA (Johnson-Champoux-Allard) 等效流体模型和传递矩阵法建立突变截面穿孔-三聚氰胺吸声结构的吸声系数理论模型, 其传递矩阵为:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{total}} \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{\text{total}} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

复合结构的传递矩阵记为 $\mathbf{T}_{\text{total}}^{a,b,c,d}$ 。根据声学边界连续性有

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{total}}^a &= \mathbf{T}_{\text{PP1}} \mathbf{T}_{\text{PP2}} \mathbf{T}_{\text{air}}, \\ \mathbf{T}_{\text{total}}^b &= \mathbf{T}_{\text{PP1}} \mathbf{T}_{\text{PP2}} \mathbf{T}_{\text{porous}}, \\ \mathbf{T}_{\text{total}}^c &= \mathbf{T}_{\text{PP1}} \mathbf{T}_{\text{PP2}} \mathbf{T}_{\text{porous}} \mathbf{T}_{\text{air}}, \\ \mathbf{T}_{\text{total}}^d &= \mathbf{T}_{\text{PP1}} \mathbf{T}_{\text{PP2}} \mathbf{T}_{\text{air}} \mathbf{T}_{\text{porous}}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{T}_{\text{PP1}(2)}$ 为穿孔域传递矩阵; $\mathbf{T}_{\text{air}}$ 、 $\mathbf{T}_{\text{porous}}$ 分别表示空气腔和三聚氰胺腔的传递矩阵。

根据 Ingard^[11] 和 Rayleigh 理论^[12], 考虑两层穿孔板之间的无间隙过渡, 减少一半的声阻抗修正值, PP1 和 PP2 的传递矩阵 $\mathbf{T}_{\text{PP1}(2)}$ 可表示为:

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{j\omega\rho_0 t_{1(2)} [1 - 2/(k_{1(2)}\sqrt{-j}) \times J_1(k_{1(2)}\sqrt{-j})/(J_0(k_{1(2)}\sqrt{-j}))]^{-1} + j\omega 0.425d_{1(2)} + \sqrt{2\omega\rho_0\eta}/4}{\sigma_{\text{PP1}(2)}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中: k 为穿孔常数; η 为动力黏度系数 ($1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$); J_0 为零阶贝塞尔函数; J_1 为一阶贝塞尔函数。空腔的传递矩阵 $\mathbf{T}_{\text{air}}$ 可由

$$\mathbf{T}_{\text{air}} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 D) & j\rho_0 c_0 \sin(k_0 D) \\ j\sin(k_0 D)/(\rho_0 c_0) & \cos(k_0 D) \end{bmatrix} \quad (4)$$

求得。其中: D 为空腔厚度; k_0 为空气域波数, $k_0 = \omega/c_0$, ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; c_0 表示声速 (343 m/s)。三聚氰胺腔室的传递矩阵 T_{porous} 基于 JCA 等效流体模型的表达式为:

$$T_{\text{porous}} = \begin{bmatrix} \cos(k_p h) & jZ_p \sin(k_p h) \\ jZ_p^{-1} \sin(k_p h) & \cos(k_p h) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: h 为三聚氰胺的厚度; k_p 为复波数, $k_p = \omega \sqrt{\rho(\omega)/K(\omega)}$; Z_p 为特征声阻抗, $Z_p = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)}$, $\rho(\omega)$ 、 $K(\omega)$ 分别表示三聚氰胺的等效动态密度和等效动态体积模量。

复合结构的表面声阻抗 Z^ψ 可表示为 $Z^\psi = T_{\text{total}11}^\psi / T_{\text{total}21}^\psi$, $\psi = a, b, c, d$ 。反射系数 β^ψ 和吸声系数 α^ψ 的表达式可分别表示为 $\beta^\psi = \frac{(Z^\psi - \rho_0 c_0)}{(Z^\psi + \rho_0 c_0)}$, $\alpha^\psi = 1 - |\beta^\psi|^2$ 。

2 阻抗管测试和仿真验证

2.1 阻抗管测试

通过 3D 打印光敏树脂制备测试样件, 测试样件如图 3 所示。测试样件 1~3 的孔径 $d_1 = 1.5$ mm、 $d_2 = 4$ mm; 板厚 $t_1 = t_2 = 1$ mm; 穿孔数分别为 12、10、8; 腔深分别为 25、50、100 mm。阻抗管测试系统如图 4 所示。本文采用 SW422 阻抗管声学测试系统来验证理论计算和数值模型, SW422 阻抗管的管径为 100 mm, 采用双传声器传递函数法选择 100 ~ 500 Hz 频率范围进行吸声特性测量。

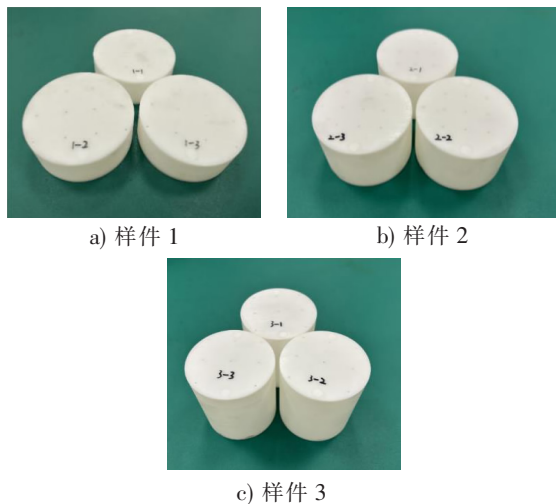


图 3 测试样件

Fig.3 Test samples



图 4 阻抗管测试系统

Fig.4 Impedance tube test system

2.2 有限元仿真

为验证理论模型, 基于阻抗管实验条件, 采用 COMSOL Multiphysics 软件中的压力声学模块和热黏性声学模块对阻抗管的空气腔及试件进行有限元建模 (见图 5)。与复合吸声固体模型不同, 本模型仅使用空气作为材料, 空气材料采用 COMSOL 内置材料。在实验条件下, 扬声器产生平面波和非平面波, 非平面波在距离管径超过三倍的位置显著衰减。因此, 在模拟声源时, 声源与传感器的距离需保持在管径的三倍以上^[13-15]。阻抗管采用压力声学建模, 管的边界被设定为声音硬边界, 以模拟无外部压力传递的壁面条件。穿孔壁面的力学条件和热条件分别设定为无滑移和等温, 其中无滑移边界类似于硬壁面。对于压力声学 and 热黏性声学 2 个模块, 初始的压力、速度和温度变化均设为 0。

图 6 为吸声样件 1~3 的理论、仿真、阻抗管测试的结果。可见, 在 100 ~ 500 Hz 频率范围内, 吸声系数曲线吻合较好。理论预测和数值仿真样件 1~3 的峰值频率分别位于 325、205、135 Hz 附近, 吸声峰值分别为 0.92、0.95、0.96。图 6 的曲线表明, 突变截面穿孔板通过在较厚的板材上加

工数量较少的穿孔获得了好的吸声性能。谷底处吸声系数曲线开始出现较小的偏差, 实验测得更高的吸声系数, 这是由于样件振动引起二次峰值, 而理论预测和数值仿真不考虑这一点。同时, 加工精度和样件安装等原因导致测试与预测结果存在不可避免的微小误差。总体而言, 所建立的理论模型和数值模型可以准确预测样件的吸声性能。

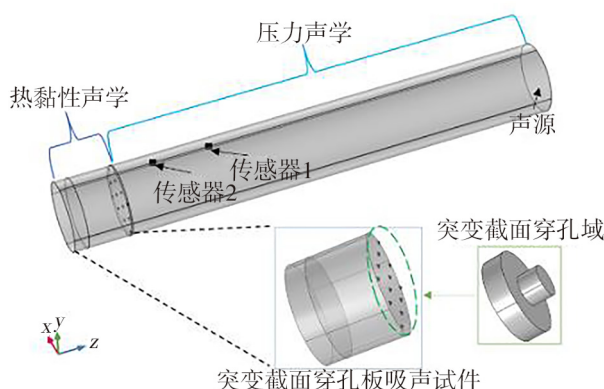


图5 仿真模型

Fig.5 Simulation model

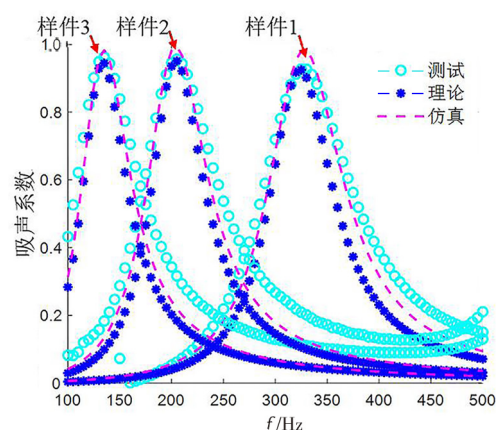


图6 理论、仿真和实验结果

Fig.6 Theoretical, simulation and experimental results

3 吸声性能和宽带吸声

3.1 吸声性能

为揭示突变截面穿孔板-三聚氰胺复合吸声结构的吸声特性及其机理, 利用多孔介质声学对三聚氰胺进行模拟, 同时与传统直通孔径穿孔板进行对比。几何结构参数如表1所示, 其吸声系数计算结果见图7。可见, 在相同条件下, 相比单一孔径穿孔板共振结构, 突变截面穿孔板展现出低频宽带吸声潜力。突变截面穿孔板-空腔、突变截面穿孔板-三聚氰胺、突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔和突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺4种结构的共振频率分别为246、238、240、240 Hz, 吸声峰值分别为0.92、0.71、0.72、0.99, 有效吸声频率宽度分别为82、166、166、132 Hz。相较于未填充三聚氰胺的突变截面穿孔板, 背腔填充三聚氰胺的复合结构展现出更优的低频宽带吸声特性。其中, 突变截面穿孔板-三聚氰胺、突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔在峰值频率和吸声带宽方面相近, 但后者能够减少三聚氰胺厚度。

表1 几何参数

Tab.1 Geometric parameters

吸声结构	孔径 /mm	腔深 /mm	三聚氰胺 厚度/mm	板厚 /mm	穿孔率 /%
传统穿孔板1	1.5	50	0	2	0.75
传统穿孔板2	2.0	50	0	2	0.75
突变截面穿孔板- 空腔	1.5/2.0	50	0	1/1	0.27/0.48
突变截面穿孔板- 三聚氰胺	1.5/2.0	0	50	1/1	0.27/0.48
突变截面穿孔板- 三聚氰胺-空腔	1.5/2.0	10	40	1/1	0.27/0.48
突变截面穿孔板- 空腔-三聚氰胺	1.5/2.0	40	10	1/1	0.27/0.48

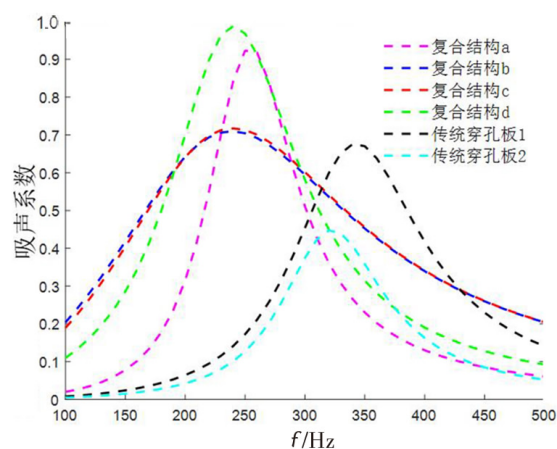


图7 吸声系数曲线

Fig.7 Sound absorption coefficient curve

图 8 给出了吸声结构的共振处声压场分布云图。可见, 突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构在共振吸声处声压显著减小, 而突变截面穿孔板-三聚氰胺和突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔复合结构的共振处声压较未添加三聚氰胺的材料有所增加, 揭示了这两种复合结构吸声峰值显著减小的原因。通过研究声能密度耗散分布, 可以较好地解释这一现象。

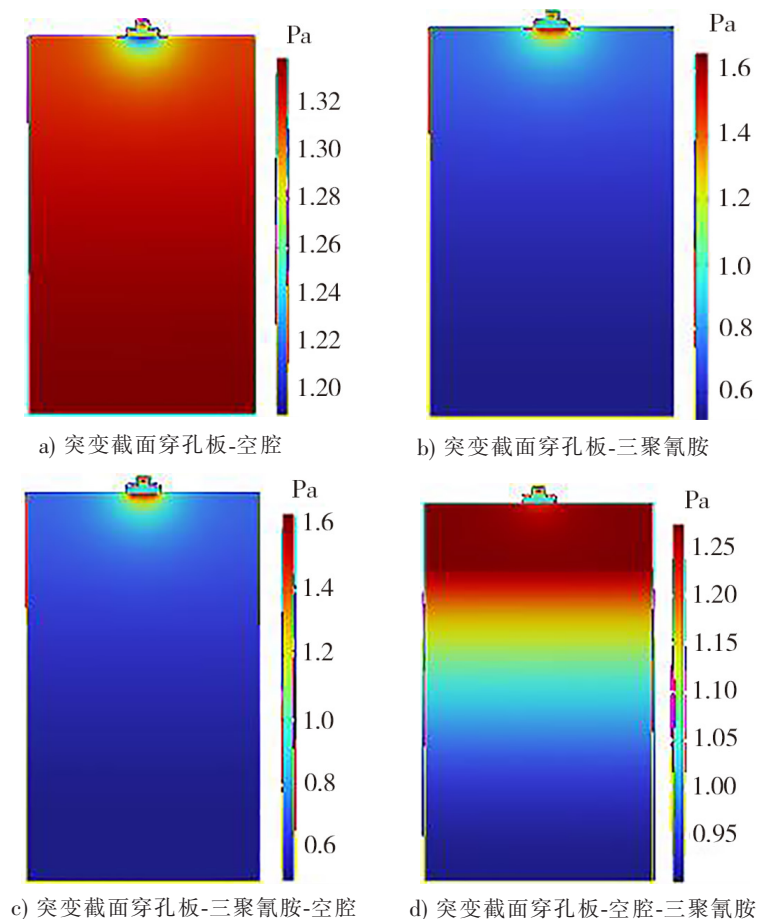


图 8 共振处声压场分布

Fig.8 Sound pressure field distribution at resonance

图 9 为嵌入三聚氰胺多孔材料复合结构的声能耗散密度云图。可见, 突变截面穿孔板-三聚氰胺和突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔复合吸声结构的耗散水平相近, 而突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构的穿孔域的功耗密度值较大, 声能耗散较小导致了三聚氰胺紧靠穿孔板的两复合吸声结构的吸声峰值下降。

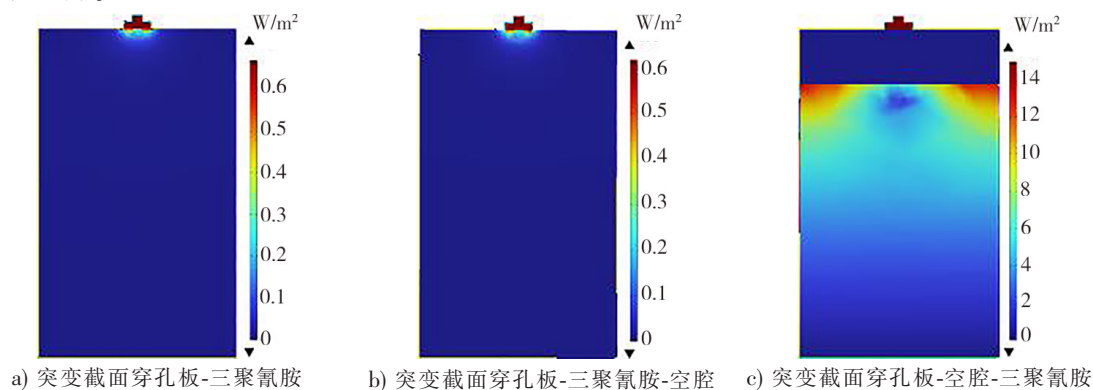


图 9 声能耗散密度分布

Fig.9 Acoustic dissipation density distribution

为比较各腔室的声能耗散能力, 对添加三聚氰胺的吸声结构进行腔室耗散能力的定量研究, 图 10 为腔室能量耗散曲线。可见, 在峰值吸收频率处, 各腔室的能量耗散均达到最大值。值得注意的是, 突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔和突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构在较宽频率范围内的声波耗散能力优于突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构, 这与其吸声系数的研究结果一致。突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构中穿孔域、三聚氰胺域耗散的声能量分别为 3.8×10^{-7} W、 1.1×10^{-7} W, 接近突变截面穿孔板-三聚氰胺、突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔结构的 4 倍和 2 倍。

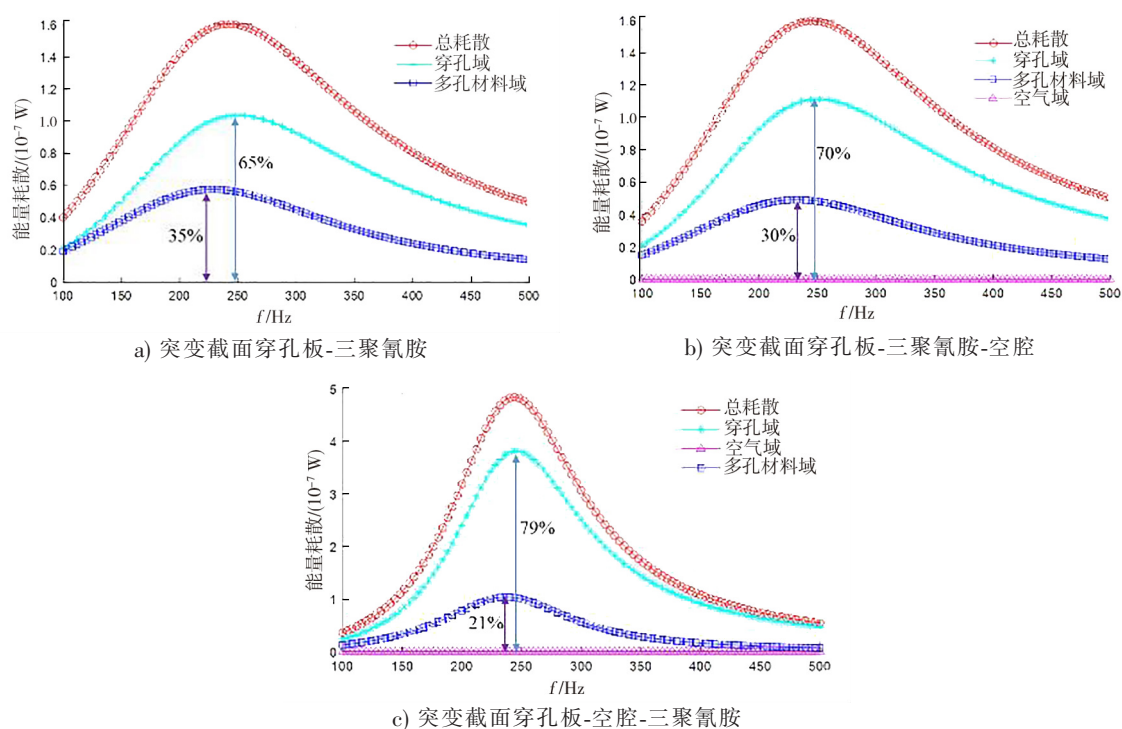


图 10 能量耗散曲线

Fig.10 Energy dissipation curve

上述结果表明, 嵌入的三聚氰胺多孔材料有效参与了声能耗散。与传统穿孔板不同, 嵌入三聚氰胺的复合吸声结构能够实现良好的可调吸声效果。穿孔板与三聚氰胺通过空气隔开的突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构显著提升了吸声系数。突变截面穿孔板-三聚氰胺-空腔和突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构则表现出更为出色的宽带吸声性能。为减少三聚氰胺的嵌入量, 后续将重点研究突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构。因此, 下文针对吸声性能较好的突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺和突变截面穿孔板-空腔-三聚氰胺复合结构开展宽带吸声研究。

3.2 宽带吸声

多吸声单元耦合是一种宽带吸声设计的高效方法。本文以八单元并联突变截面-三聚氰胺-空气、突变截面-空气-三聚氰胺复合吸声结构为例, 两并联结构的示意图分别如图 11、图 12 所示。通过线性微分策略的粒子群优化算法^[16-17], 在 2000 Hz 频率范围内, 优化目标设定为平均吸声系数 $\int_{f_1}^{f_2} \alpha(f) df / (f_2 - f_1)$ 并进行宽带吸声寻优。考虑实际生产及安装应用, $d_1^{1 \sim 8}$ 取 1 ~ 4 mm, $d_2^{1 \sim 8}$ 大于小孔孔径同时小于 5 mm, $d_1^{1 \sim 8}$ 、 $d_2^{1 \sim 8}$ 分别表示 1 ~ 8 单元的小孔孔径和大孔孔径, 各单元 PP1、PP2 板厚均设为 1 ~ 5 mm, 最大穿孔数量为 50, 最大空腔深度为 50 mm。

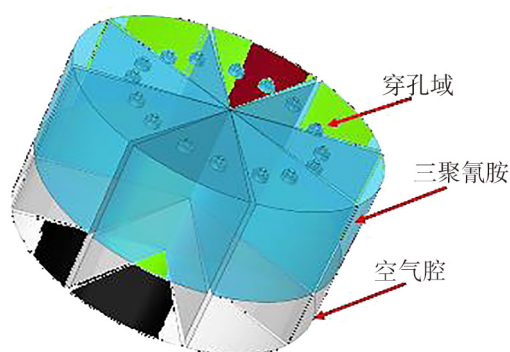


图 11 八单元并联突变截面-三聚氰胺-空气复合吸声结构

Fig.11 Eight-unit parallel mutation section perforated plate-melamine-air structure

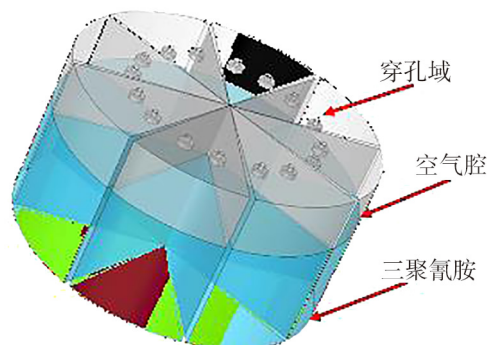


图 12 八单元并联突变截面-空气-三聚氰胺复合吸声结构

Fig.12 Eight-unit parallel mutation section perforated plate-air-melamine structure

八单元并联突变截面穿孔板-三聚氰胺-空气和突变截面穿孔板-空气-三聚氰胺复合吸声结构的吸声系数分别如图 13、图 14 所示。优化结果显示, 两者的平均吸声系数均接近 0.768, 亚波长厚度为 50 mm。八单元并联突变截面穿孔板-三聚氰胺-空气复合吸声结构的吸声系数在 800 ~ 1900 Hz 实现连续的强吸声 ($\alpha > 0.9$), 小于声音波长的 1/9; 八单元并联突变截面穿孔板-空气-三聚氰胺复合吸声结构的吸声系数在 610 ~ 1900 Hz 实现高效吸声 ($\alpha > 0.9$), 小于声波长的 1/11。经优化设计后的多单元并联结构各子单元处于弱共振状态, 而各吸声单元间的强耦合使并联结构实现连续准完美吸声。

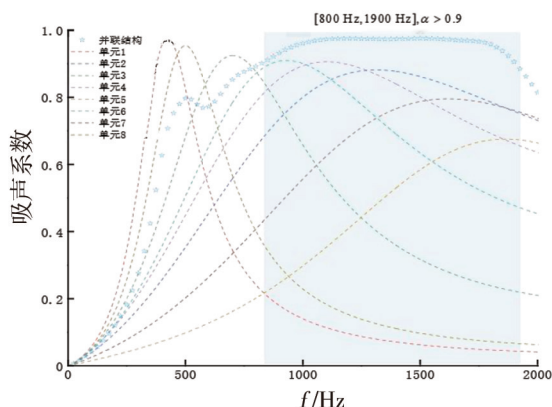


图 13 并联突变截面穿孔板-三聚氰胺-空气结构优化结果

Fig.13 Optimization results of parallel mutation section perforated plate-melamine-air structure

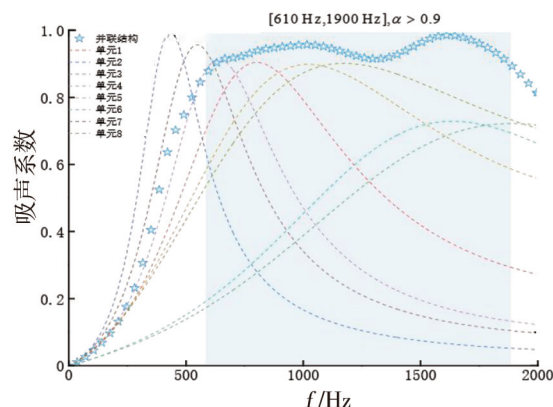


图 14 并联突变截面穿孔板-空气-三聚氰胺结构优化结果

Fig.14 Optimization results of the structure of perforated plate with parallel mutation section-air-melamine

4 结论

本文提出了由突变截面穿孔板、三聚氰胺和空气串联而成的 4 种复合结构, 采用阻抗管测试系统、COMSOL 数值仿真和理论推导进行了复合结构的声学特性研究。结果表明, 突变截面穿孔板可以实现在较厚的板材上加工数量较少的穿孔, 并保持良好的吸声性能; 嵌入的三聚氰胺参与了声能耗散, 提高了结构的吸声可调性, 使吸声结构更具低频宽带吸声优势; 八单元并联的突变截面穿孔板-三聚氰胺-空气和突变截面穿孔板-空气-三聚氰胺复合吸声结构分别实现了 800 ~ 1900、610 ~ 1900 Hz 的连续准完美吸声。

[参考文献]

- [1] International Maritime Organization (IMO). Code on noise levels on board ships[S]. London: International Maritime Organization, 2012.
- [2] 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.
- [3] 马大猷. 微穿孔板结构的设计[J]. 声学学报, 1988(3): 174-180.
- [4] 马大猷. 微穿孔板的实际极限[J]. 声学学报, 2006(6): 481-484.
- [5] 卢伟健, 张斌, 李孝宽. 变截面微穿孔板吸声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(2): 147-150.
- [6] JIANG C S, LI X H, CHENG W Y, et al. Acoustic impedance of microperforated plates with stepwise apertures[J]. Applied Acoustics, 2020, 157: 106998.
- [7] LI X, LIU B, QIN C. A perforated plate with stepwise apertures for low frequency sound absorption[J]. Applied Sciences, 2021, 11(13): 6180.
- [8] MEI Z J, YANG H W, DING Y, et al. Ultra-broadband sound absorption via a parallel composite structure consisting of perforated panel resonators with tube bundles and porous material[J]. Applied Acoustics, 2024, 222: 110071.
- [9] LI X, LIU B L, CHANG D Q. An acoustic impedance structure consisting of perforated panel resonator and porous material for low-to-mid frequency sound absorption[J]. Applied Acoustics, 2021, 180: 108069.
- [10] ZHANG W T, XIN F X. Broadband low-frequency sound absorption via Helmholtz resonators with porous material lining[J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 578: 118330.
- [11] INGARD U. On the theory and design of acoustic resonators[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(6): 1037-1061.
- [12] RAYLEIGH J W S B. The theory of sound[M]. London: Macmillan, 1896.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 声学阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分 传递函数法: GB/T 18696.2—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [14] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 255-391.
- [15] LI X W, YU X, ZHAI W. Additively manufactured deformation-recoverable and broadband sound-absorbing microlattice inspired by the concept of traditional perforated panels[J]. Advanced Materials, 2021, 33(44): 2104552.
- [16] ZHU J, LIU J H. A simple and scalable particle swarm optimization structure based on linear system theory[J]. Memetic Computing, 2024, 16: 219-231.
- [17] CHOUDHARY S, SUGUMARAN S, BELAZI A, et al. Linearly decreasing inertia weight PSO and improved weight factor-based clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14: 6661-6679.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)