



基于多孔材料的圆柱空腔声学覆盖层优化设计

张博涵 荣吉利 程修妍

Optimization design of an acoustic cover layer for a cylindrical cavity based on porous materials

ZHANG Bohan, RONG Jili, CHENG Xiuyan

引用本文:

张博涵, 荣吉利, 程修妍. 基于多孔材料的圆柱空腔声学覆盖层优化设计[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(3): 468–479. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.06.07.002

ZHANG Bohan, RONG Jili, CHENG Xiuyan. Optimization design of an acoustic cover layer for a cylindrical cavity based on porous materials[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(3): 468–479. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.06.07.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.06.07.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多目标粒子群优化算法研究综述

Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm

工程科学学报. 2021, 43(6): 745 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.10.31.001>

基于粒子群算法的转炉用氧节能优化调度

Optimal scheduling of converter oxygen based on particle swarm optimization

工程科学学报. 2021, 43(2): 279 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.02.002>

基于多目标粒子群优化的污水处理系统自适应评判控制

Adaptive critic control for wastewater treatment systems based on multiobjective particle swarm optimization

工程科学学报. 2024, 46(5): 908 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.15.001>

改性多孔钢渣/橡胶复合材料的制备及其性能

Preparation of modified porous steel slag/rubber composite materials and its properties

工程科学学报. 2019, 41(1): 88 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.01.009>

生物质多孔碳基复合相变材料制备及性能

Preparation and properties of biomass porous carbon composite phase change materials

工程科学学报. 2020, 42(1): 113 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.06.002>

茄子衍生多孔碳负载聚乙二醇相变复合材料

Eggplant-derived porous carbon encapsulating polyethylene glycol as phase change materials

工程科学学报. 2020, 42(1): 106 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.06.001>

基于多孔材料的圆柱空腔声学覆盖层优化设计

张博涵, 荣吉利[✉], 程修妍

北京理工大学宇航学院, 北京 100081
✉通信作者, E-mail: rongjili@bit.edu.cn

摘要 在发射及飞行过程中外部环境产生的声学 and 振动激励易对运载火箭内部有效载荷产生威胁, 多孔材料作为一种轻质吸声材料被广泛运用于运载火箭整流罩的降噪减振相关研究中. 本文基于多孔材料物理模型和多流体阻抗传递理论, 结合声学阻抗管实验以及声学有限元, 利用粒子群优化算法开展了多孔材料参数拟合以及声学性能优化研究. 利用三聚氰胺、聚酯纤维和玻璃棉三种多孔材料设计了一种多层多孔材料声学覆盖层, 对其厚度分配以及排布方式等因素进行了优化设计, 并设置了对照组, 通过阻抗管实验验证了优化后的声学覆盖层的吸声系数得到了显著提升; 基于整流罩圆柱段圆柱空腔实验平台验证了多层多孔材料声学覆盖层的降噪减振性能, 通过声学有限元对多孔材料在圆柱空腔内的敷设位置以及敷设率对降噪减振的影响开展了仿真分析, 并为敷设位置以及敷设率的选取给出了工程建议, 能对多孔材料的实际应用提供设计指导.

关键词 多孔材料; 粒子群算法; 降噪; 减振; 圆柱空腔

分类号 TB535+.1

Optimization design of an acoustic cover layer for a cylindrical cavity based on porous materials

ZHANG Bohan, RONG Jili[✉], CHENG Xiuyan

School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
✉Corresponding author, E-mail: rongjili@bit.edu.cn

ABSTRACT During the launch and flight of carrier rockets, the acoustic and vibrational excitations generated by the external environment pose significant threats to their internal payloads. These disturbances, if not mitigated, can lead to structural fatigue or damage to sensitive equipment. To address this problem, porous materials, renowned for their lightweight and sound-absorbing properties, have been widely investigated and applied to noise reduction and vibration damping for payload fairings. In this study, a comprehensive investigation into the parameter fitting and acoustic performance optimization of porous materials is conducted, utilizing advanced physical models, multifluid impedance transfer theory, and particle swarm optimization algorithms. This research combines experimental approaches, including impedance tube experiments, with numerical methods, such as acoustic finite element analysis, to enhance the noise control capabilities of porous materials. This study employs three distinct porous materials, namely, melamine, polyester, and fiberglass, which are integrated into a multilayer porous acoustic coating. The design of this coating is based on the optimization of key parameters, including the thickness distribution and the arrangement of different layers. Various configurations were explored, and control groups were established to assess the improvements brought by the optimization process. Impedance tube experiments were conducted to measure the sound absorption coefficients of the multilayer porous acoustic coatings before and after optimization. Results showed a significant enhancement in the absorption performance, with a marked increase in the absorption coefficient across a broad frequency range. The underlying sound absorption mechanisms of the porous materials were analyzed to

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 基础加强计划技术领域基金资助项目(2020-JCJQ-JJ-029)

explain these improvements. To further validate the performance of the optimized multilayer porous acoustic coating, a cylindrical cavity experiment was conducted. This experimental setup simulated the cylindrical section of a carrier rocket payload fairing, providing a controlled environment to evaluate the noise reduction and vibration-damping effects of the coating. The findings showed that, after applying the optimized coating, the overall sound pressure level at various measurement points within the cavity decreased by at least 7.4 dB. The power spectral density of acceleration measured on the cylindrical wall was also significantly suppressed, particularly in the mid-to-high frequency ranges. Vibration suppression is critical for protecting the structural integrity of the payload fairing and the equipment housed within it. In addition to the experiments, acoustic finite element simulations were conducted to analyze the effects of the placement and coverage rate of porous materials on the noise reduction and vibration-damping performance within the cylindrical cavity. The simulation results showed that placing the porous materials closer to the sound source yielded better noise reduction results. However, increasing the coverage rate of the porous material did not lead to proportional improvements in noise reduction or vibration damping. This finding indicates that the design of the acoustic coating must carefully maintain a balance between noise protection and weight and space efficiency. In conclusion, this research highlights the significant potential of porous materials in enhancing noise and vibration protection for carrier rocket payload fairings. The optimized multilayer porous acoustic coating not only improves sound absorption but also delivers effective noise reduction and vibration suppression, providing valuable insights for aerospace applications. The findings indicate that the optimal placement and coverage design of porous materials are essential for achieving the desired protective effects while minimizing material usage and overall mass. These results contribute to the ongoing development of more efficient and lightweight noise control solutions for carrier rockets.

KEY WORDS porous materials; particle swarm algorithm; noise reduction; vibration damping; cylindrical cavity

运载火箭在发射和飞行过程中, 环境气动噪声^[1]以及发动机喷流噪声^[2]等极易导致运载火箭内有效载荷被破坏, 在起飞段和跨音速段两个阶段, 整流罩的外部噪声甚至能够高达 160 dB^[3], 可靠高效的降噪技术能够改善整流罩内动力学环境, 有利于提升有效载荷的安全性及可靠性^[4]。目前, 主要有两种方法用以保证整流罩内有效载荷在恶劣的噪声环境中的安全性, 一是加固其局部结构以增加有效载荷的抗声振能力, 例如设计特别的防振构型^[5], 二是利用噪声缓减技术改善整流罩内噪声环境以保证有效载荷的可靠性, 包括敷设吸声层^[6-7]、亥姆霍兹共鸣器^[8-9]、分布式吸振器^[10]、自适应主动降噪^[11]等方法, 相较于前者加固结构的方法, 后者既能起到降噪功效, 还具备轻质优点。多孔材料工程应用广泛, 多孔金属因其良好导热性被用于新能源开发研究中^[12], 多孔陶瓷则被用于高温、腐蚀性介质、摩擦磨损等工业环境中^[13], 以多孔泡棉为基础设计的声学覆盖层已被广泛用于运载火箭的噪声控制中^[14], 例如美国 Delta-IV 系列火箭^[15]、欧洲 Arian5 系列运载火箭^[16]等。

基于多孔材料的声学覆盖层改进设计能够提升其降噪能力, 针对在土星 IV/人马上发射的 Cassini 飞船, NASA 采用玻璃纤维隔声层对其吸声毯进行了改进^[17], 在平板结构上实验了 19 种不同的声毯设计, 结合整流罩结构开展了混响室实验, 在加强

电源的噪声防护的同时节省了大约三千万美元的开支; 美国空军研究实验室采用三聚氰胺泡沫为其研发的复合材料整流罩设计声毯^[18], 分别对不同厚度以及不同敷设率下的降噪效果进行了研究, 发现相比于 5 cm 和 10 cm 厚度的三聚氰胺泡沫, 2.5 cm 泡沫材料的单位质量降噪量更大, 这也间接说明了对多孔降噪结构进行优化设计的必要性; 程修妍等^[19]基于统计能量法对多孔材料声学性能进行了仿真研究, 从降噪角度对其敷设率和敷设位置进行了优化, 而多孔材料还具备减振性能, 开展降噪减振综合性能研究有利于进一步指导火箭整流罩的声学覆盖层设计。

多孔材料声学覆盖层设计设计一般包括多层结构^[20-21]、穿孔结构^[22]以及嵌入工字型板^[23]等, 由于其降噪性能受多个物理参数影响, 明确相关参数、选择合适的物理模型是开展多孔材料声学覆盖层设计的前提, 但多孔材料的框架结构几何形状极其复杂、孔隙差异较大, 从微观尺度上难以分析声波在多孔材料中的传播, 为从理论角度分析多孔材料声学性能需要采用等效模型或是经验模型。1956 年 Biot^[24]提出了饱和流体多孔介质理论, 开创了多孔材料声学基础, 该理论假设多孔材料框架为弹性, 既考虑了其结构参数又结合了声学参数, 能够分析考虑弹性影响的多孔材料声振性能; 1970 年 Delany 和 Bazley^[25]提出了 Delany-Bazley 模型, 是一类常用于分析多孔材料声学性能的经

验模型, 仅涉及流阻单个声学参数; 另一类常用模型为唯象模型, 相较于经验模型, 唯象模型能更准确预测多孔材料吸声性质, 典型的有 Johnson–Champoux–Allard (JCA) [26–27] 模型, 涉及多孔材料共五个声学参数, 考虑多孔材料为刚性框架, 能较为准确的描述其吸声性能. 为了高效并精确的进行声学覆盖层设计研究, 需要对不同模型进行对比, 选取预示精度高、计算效率高的物理模型作为理论基础, 首先需要对多孔材料的关键参数进行研究, 准确获取不同种类多孔材料的相关参数, 从而开展声学覆盖层的优化设计工作.

本文对比了常用的三种多孔材料模型, 通过理论、仿真与实验对比选取合适的多孔材料理论模型, 建立多层多孔材料降噪结构, 并采用粒子群优化算法对降噪结构进行优化, 并将之应用于整流罩圆柱段缩比模型中, 验证其降噪减振效果, 在此基础上对降噪、减振两方面性能展开了研究, 聚焦多孔材料敷设率以及敷设位置.

1 多孔材料物理模型

1.1 理论模型

多孔材料的主要参数包括孔隙率 ϕ 、流阻 σ ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)、曲率 α_∞ 、黏性特征长度 Λ (m)、热特征长度 Λ' (m) 以及几类力学参数: 剪切模量 N (Pa)、泊松比 ν 、多孔材料密度 ρ_s ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 和阻尼损耗因子 η_s . 由于这些参数需采用不同实验或理论手段获取, 往往较为复杂, 本文拟采用阻抗管实验结合多孔材料理论模型反演, 从而实现关键参数拟合, 并结合上述多孔材料参数对三类常用的多孔材料理论模型进行介绍.

Delany–Bazley 模型是通过大量实验得到了多孔材料的等效特征阻抗以及波数等效模型, 主要依赖于流阻 σ , 其表达式如式 (1) [25] (式中 $X = \rho_0 f / \sigma$ 为一个量纲一参数, 该模型在 X 满足 $0.01 < X < 1.0$ 时能起到较好地预测效果), 其中 ρ_0 、 c_0 为空气密度以及空气中声速, Z_c 为多孔材料特征阻抗, k 为波数, f 为频率, $\omega = 2\pi f$ 为角频率.

$$\begin{aligned} Z_c &= \rho_0 c_0 [1 + 0.057X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732}] \\ k &= \frac{\omega}{c_0} [1 + 0.0978X^{-0.7} - j0.189X^{-0.595}] \end{aligned} \quad (1)$$

JCA 模型考虑了多孔材料黏性效应和热耗散效应, 当材料的骨架为刚性的, 或是质量显著较大, 或是边界存在约束时, 能精准预测多孔材料的吸声特性. 基于 JCA 模型可以得到材料的等效密度 $\rho(\omega)$ 和压缩模量 $K(\omega)$ 计算公式如式 (2)、式

(3) [26], 其中 η 为空气黏度系数, P_0 为标准大气压, γ 为比热比, Pr 为普朗特数.

$$\rho(\omega) = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left[1 - j \frac{\sigma \phi}{\omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + j \frac{4\omega \rho_0 \eta \alpha_\infty^2}{\sigma^2 \phi^2 \Lambda^2}} \right] \quad (2)$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left\{ \gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8\eta}{\omega \rho_0 Pr \Lambda'^2} \sqrt{1 + j \frac{\omega \rho_0 Pr \Lambda'^2}{16\eta}} \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (3)$$

等效波数 k 以及等效特征阻抗 Z_c 表达式为 (4), 将 (2)、(3) 代入 (4) 可求得表面阻抗, 进而得到吸声系数.

$$\begin{aligned} Z_c &= (\rho K)^{1/2} \\ k &= \omega(\rho/K)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

JCA 模型主要基于刚性框架假设, 如果需要考虑多孔材料框架弹性的影响, 则需要利用 Biot 理论进行分析. 根据 Biot 理论, 一束平面波垂直入射饱和流体多孔材料时会产生两种纵波, 两类纵波复波数 δ_1 、 δ_2 表达式如 (5), 其中 P 、 Q 、 R 、 N 为多孔材料弹性参数, $\widetilde{\rho}_{11}$ 、 $\widetilde{\rho}_{12}$ 、 $\widetilde{\rho}_{22}$ 为框架与流体的耦合密度项. 两类纵波在流体组分中传播速度 (φ_i^f , $i=1,2$ 指代两类纵波) 与在框架中传播速度 (φ_i^s , $i=1,2$ 指代两类纵波) 的比值 μ_1 、 μ_2 如式 (6), 其中上标 f、s 分别代表流体中的传播速度和框架固体中的传播速度. 根据式 (5)、(6) 求得的复波数以及速度比可以得到特征阻抗表达式 (7) (两种纵波分别在框架和流体中传播, 因而可得四组特征阻抗 Z_1^s 、 Z_2^s 、 Z_1^f 、 Z_2^f), 若材料一侧与刚性壁面紧密相连, 可求得多孔材料表面声阻抗 Z_c 表达式 (8), 其中 l 为材料厚度.

$$\begin{cases} \delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} (P\widetilde{\rho}_{22} + R\widetilde{\rho}_{11} - 2Q\widetilde{\rho}_{12} - \sqrt{\Delta}) \\ \delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} (P\widetilde{\rho}_{22} + R\widetilde{\rho}_{11} - 2Q\widetilde{\rho}_{12} + \sqrt{\Delta}) \\ \Delta = (P\widetilde{\rho}_{22} + R\widetilde{\rho}_{11} - 2Q\widetilde{\rho}_{12})^2 - 4(PR - Q^2)(\widetilde{\rho}_{11}\widetilde{\rho}_{22} - \widetilde{\rho}_{12}^2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_i = \varphi_i^f / \varphi_i^s = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2 \widetilde{\rho}_{11}}{\omega^2 \widetilde{\rho}_{12} - Q\delta_i^2}, i = 1, 2 \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z_i^s = (P + Q\mu_i) \frac{\delta_i}{\omega} \\ Z_i^f = (R + Q/\mu_i) \frac{\delta_i}{\phi \omega} \end{cases} \quad (7)$$

$$Z_c = -j \frac{Z_1^s Z_2^f \mu_2 - Z_2^s Z_1^f \mu_1}{D} \quad (8)$$

其中, D 表达式如 (9):

$$D = (1 - \phi + \mu_2 \phi) [Z_1^s - (1 - \phi) Z_1^f \mu_1] \tan \delta_2 l + (1 - \phi + \mu_1 \phi) [(1 - \phi) Z_2^f \mu_2 - Z_2^s] \tan \delta_1 l \quad (9)$$

针对 Delany-Bazley 模型、JCA 模型以及 Biot 模型, 需要进行对比选取合适的模型以开展研究. 首先从预示精度而言, Delany-Bazley 模型仅涉及多孔材料流阻 σ 一个参数, 相较于 JCA 模型与 Biot 模型预示精度较低; Biot 模型尽管涉及多孔材料孔隙率、流阻、曲率、黏性特征长度、热特征长度、剪切模量、泊松比、密度以及阻尼损耗因子等全部 9 个参数, 能够反映多孔材料的弹性框架特征, 然而过多参数在获取上较为困难, 并且计算时存在失稳的可能性^[28]; 本研究主要聚焦于多孔材料降噪优化以及敷设于圆柱空腔内的降噪效果, 选取的三类多孔材料(聚酯纤维、玻璃棉、三聚氰胺)尽管本身具备弹性, 但敷设于铝制圆桶壁面后被边界约束, 多孔材料弹性振动被显著抑制, 能够满足 JCA 模型的假设条件^[29]. 综上所述, 选取 JCA 模型既保证了精度也能提升计算效率, 因而以此为理论基础开展多孔材料降噪优化研究.

为计算多层多孔材料声学覆盖层吸声系数, 将其等效为热黏性流体, 设声波在这一介质中传播, 且另一端为刚性壁面, 如图 1 所示. M_1 与 M_2 间隔为 d , 设该介质特征阻抗为 Z_c , 则两个点的表面声阻抗如式 (10) 所示, 可知存在关系式 (11), 由 (10)、(11) 可得 M_2 表面阻抗的表达式 (12), 则由 M_1 表面阻抗以及媒质的特征阻抗可求出 M_2 表面阻抗. 因为两种媒质接触面声压、加速度连续, 则 $Z(M_2) = Z(M_2)$, 从而可以计算多流体层最外层表面声阻抗 $Z(M_i)$, 得到多层不同多孔材料叠加的吸声系数.

$$Z(M_i) = \frac{p_T(M_i)}{v_T(M_i)} = Z_c \frac{Ae^{-jkx(M_i)} + A'e^{jkx(M_i)}}{Ae^{-jkx(M_i)} - A'e^{jkx(M_i)}} \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

$$\frac{A'}{A} = \frac{Z(M_1) - Z_c}{Z(M_1) + Z_c} e^{-2jkx(M_1)} \quad (11)$$

$$Z(M_2) = Z_c \frac{-jZ(M_1) \cot kd + Z_c}{Z(M_1) - jZ_c \cot kd} \quad (12)$$

本文拟基于多孔材料 JCA 模型, 结合多流体

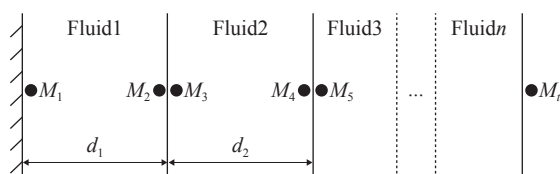


图1 多流体层阻抗计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of the multifluid layer impedance calculation

阻抗计算理论建立了多层多孔材料声学理论模型, 能够计算多层多孔材料吸声层的阻抗和吸声系数, 以此为理论基础能够开展多孔材料的降噪优化设计研究.

1.2 多孔材料参数拟合

本文结合多种多孔材料进行多层声学覆盖层设计, 因而需要获取每种材料的关键参数用以建模和仿真预示, 首先需要进行参数选取及拟合, 采用 JCA 模型以及阻抗管实验实现关键参数获取.

利用阻抗管法能够获取多孔材料的吸声系数以及表面声阻抗率, 如图 2 所示, s 为两传感器之间的距离, x_1 为传感器 1 到多孔材料表面的距离. 首先通过阻抗管法得到多孔材料的吸声系数实验数据, 基于 JCA 理论模型采用粒子群算法拟合得到多孔材料的 5 个声学参数. 以三聚氰胺泡沫为例, 首先通过阻抗管实验获得了 20、30、40、50 mm 等 4 个厚度三聚氰胺泡沫试件 100 ~ 1600 Hz 的吸声系数曲线, 试件如图 3 所示, 采取前三组数据 (20、30、40 mm) 作为学习迭代依据, 50 mm 样件实验数据作为对照. 利用 JCA 理论模型计算所得与实验所得吸声系数标准差最小的判断标准设计适应度函数, 对五个声学参数进行迭代寻优从而得到三聚氰胺泡沫声学参数.

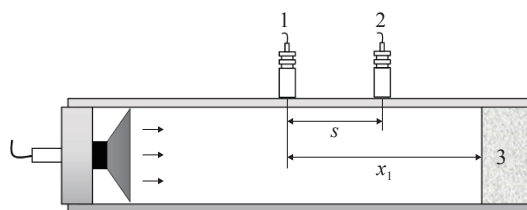


图2 阻抗管示意图

Fig.2 Impedance tube



图3 不同厚度三聚氰胺泡沫试件

Fig.3 Melamine foam specimens of different thicknesses

基于拟合所得参数和 JCA 模型得到 50 mm 三聚氰胺泡沫的吸声系数理论结果, 如图 4, 与实验结果吻合良好, 验证了拟合方法所得参数的可靠性.

分别开展聚酯纤维、玻璃棉两类材料的阻抗管实验, 并结合实验数据采用同样方法实现声学五参数拟合, 得到的三种多孔材料的各参数如表 1 所示.

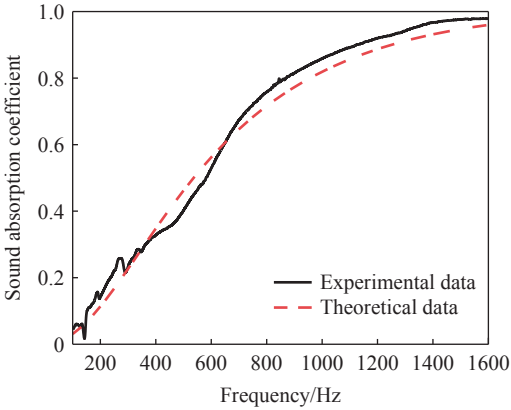


图 4 50 mm 三聚氰胺泡沫的吸声系数对比

Fig.4 Comparison of the sound absorption coefficients of 50 mm melamine foam

表 1 多孔材料声学参数

Table 1 Parameters of porous materials

	$\sigma/(\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$	ϕ	α_∞	Λ/mm	Λ'/mm
Melamine foam	10034	0.957	1.01	0.11	0.21
Polyester foam	4741	0.98	1.14	0.15	0.3
Fiberglass foam	9977	0.99	1.09	0.15	0.35

2 多层多孔材料降噪优化设计

2.1 多层多孔材料降噪优化设计方法

采用多层多孔材料降噪方法, 优化主要包含了两个部分, 一是三种多孔材料的排布方式, 二是在总厚度 d 不变的情况下三种多孔材料各自的厚度如何分配. 假设优化初始时刻, 与刚体相连接的多孔材料编号为 1, 厚度 d_1 ; 中间层编号为 2, 厚度 d_2 ; 与空气直接接触的最外层编号为 3, 厚度 d_3 , 总厚度满足 $d=d_1+d_2+d_3$, 随着优化迭代其排布顺序以及每层厚度会发生相应改变. 多层多孔材料结构示意图如图 5 所示, 排布方式则通过材料的编号顺序来表示, 设初始时三层多孔材料按编号排布方式为 1-2-3, 优化后假设原来位于中间层的 2 号多孔材料被转移到了紧贴壁面位置, 原来紧贴壁面的 1 号多孔材料放在了中间层, 3 号多孔材料不变仍位于最外层与空气直接接触, 则此时排布方式为 2-1-3, 本研究后续均采用此方法来描述多层

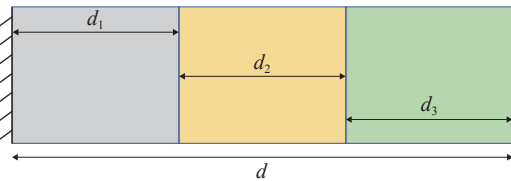


图 5 三种多孔材料分布

Fig.5 Distribution of three porous materials

多孔材料的排布方式.

本研究拟采用粒子群优化算法对多层多孔材料吸声层的厚度分配以及排布方式进行降噪优化设计. 粒子群优化算法是一种根据鸟儿觅食行为衍生出的算法, 首先在给定的解空间中随机初始化粒子群, 优化问题的变量数决定了解空间的维数. 每个粒子给定初始位置与初始速度后开始迭代寻优, 每一次迭代中, 每个粒子通过跟踪两个极值来更新自己的解空间中的位置和速度, 一个是单个粒子本身在迭代中找到的最优粒子(个体极值), 一个是所有粒子在迭代过程中的最优解粒子(全局极值). 相较于传统的遗传算法、蚁群算法和模拟退火算法等, 粒子群优化算法概念简单、易于实现, 更适用于工程应用中的实际问题. 粒子群优化算法主要实现步骤如图 6 所示.

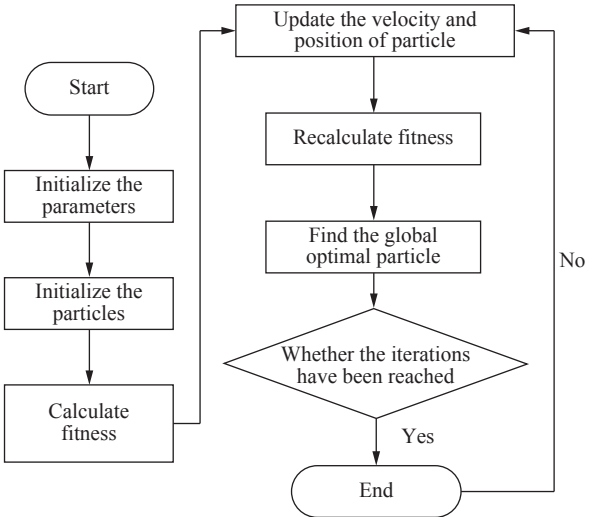


图 6 粒子群优化算法实现步骤

Fig.6 Implementation steps of the particle swarm optimization algorithm

采用聚酯纤维、玻璃棉、三聚氰胺三种多孔材料进行多层降噪优化, 设初始时刻聚酯纤维与刚体连接, 玻璃棉为中间层, 三聚氰胺为与空气直接接触的最外层, 则编号分别为聚酯纤维-1、玻璃棉-2、三聚氰胺-3, 并设总厚度 d 为 8 cm, 并且为让每种材料都参与降噪, 优化过程中保证每种厚度不小于 2 cm. 为使多层多孔材料应具备轻质优点, 将每单位质量多层多孔材料吸声系数作为评价指标, 首先基于式 (2) ~ (4) 以及式 (10) ~ (12) 计算多层多孔材料的吸声系数 $\alpha(f)$, 再根据优化后的不同多孔材料厚度计算总质量 m (密度: 聚酯纤维 $28.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、玻璃棉 $24.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、三聚氰胺 $8.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 继而以吸声系数 $\alpha(f)$ 与总质量 m 的比值作为评价指标, 这是一个随频率 f 变化的值, 计算某频段该

比值总和作为评价指标,可采用积分的形式表达,如下所示:

$$A = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \alpha(f)/m df \quad (13)$$

将上式离散化,可以衡量在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 频率范围多层吸声材料的吸声能力,将之作为优化适度函数,得到多层多孔材料的最优排布和厚度,优化目标为(14)式,得到最佳厚度分配以及排布方式如表2所示.

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha(f)\Delta f}{m} \rightarrow \max \quad (14)$$

表2 优化参数

Table 2 Optimized parameters

Item	Thickness/mm	Arrangement
1—Polyester foam	20.1	1-3-2
2—Fiberglass foam	20	
3—Melamine foam	39.9	

2.2 优化方法吸声系数实验验证

根据优化结果制备特定厚度的1-3-2排布多层多孔材料样件,如图7(a),可通过阻抗管实验获取吸声系数从而验证优化方法的有效性,如图7(b).首先获取样件吸声系数与理论计算结果进行对比,如图8(a),实验与理论计算结果较为一致,说明了理论方法的可靠性.为了验证优化后的多层多孔材料具备更好的降噪性能,设置了一组对照组,总厚度与样件一致为8 cm,设置厚度为聚酯纤维40 mm、玻璃棉20 mm、三聚氰胺20 mm,排布方式选为2-3-1,开展实验获取其吸声系数并与优化后结果进行对比,如图8(b)所示.

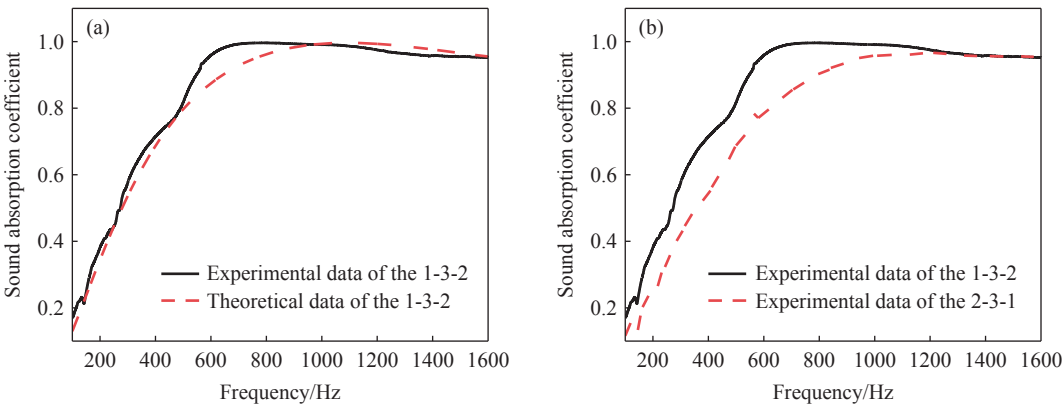


图8 多层多孔材料吸声系数. (a) 优化后样件实验与理论对比; (b) 优化前后样件吸声系数对比

Fig.8 Sound absorption coefficient of multilayer porous materials: (a) experimental and theoretical comparison of the optimized samples; (b) comparison of the sound absorption coefficient of the samples before and after optimization

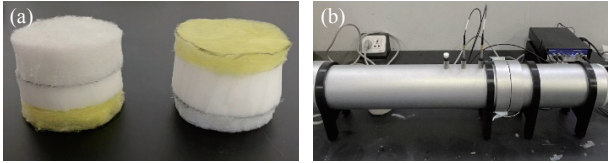


图7 多层多孔材料阻抗管实验. (a) 多层多孔材料试件; (b) 阻抗管实验系统

Fig.7 Impedance tube experiments with multilayer porous materials: (a) specimens of multilayer porous materials; (b) impedance tube experimental system

根据图8(b)所得优化前后两个试件的吸声系数实验值,计算其 $\alpha(f)/m$ 曲线如图9所示,直观的显示了优化后的1-3-2试件每单位质量具备更优的吸声效果,进一步验证了优化设计方法的准确性.

优化所得1-3-2多层多孔材料相较于对照组试件,其吸声能力显著得到提升,结合多孔材料降噪机理分析其吸声效果提升的原因.多孔材料吸声降噪的本质是声波进入多孔材料层后被吸收耗散,其中流阻反映了声波穿过多孔材料时的阻力大小,阻力越小越有利于声波进入多孔材料层被吸收耗散.本研究选取的三类多孔材料在考虑其密度(聚酯纤维 $28.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、玻璃棉 $24.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、三聚氰胺 $8.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)的情况下吸声能力上三聚氰胺与玻璃棉均优于聚酯纤维,三聚氰胺最优异,因此在厚度分配时三聚氰胺厚度最大,玻璃棉与聚酯纤维则几乎接近最低厚度;由表1可知三聚氰胺和玻璃棉的流阻接近,并且均大于聚酯纤维的流阻,为了使声波充分被吸收耗散,考虑排布方式时需要让具备更高吸声效率的三聚氰胺和玻璃棉在外侧.优化得到的1-3-2排布型多层多孔材料以及其厚度分配均满足综上所述的条件,所以才具备了更优吸声效果.

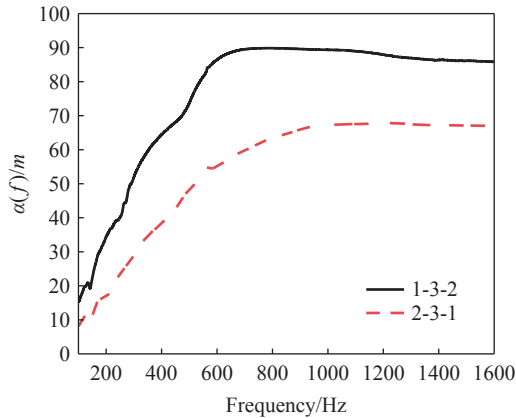


图 9 $\alpha(f)/m$ 曲线
Fig.9 $\alpha(f)/m$ curve

3 多孔材料声学覆盖层性能验证

3.1 降噪性能验证

以整流罩圆柱段缩比模型为降噪目标,加工了半径 300 mm、高 800 mm、厚度 1 mm 的铝制薄壁圆桶实验件,采用扬声器作为声源激励,在内部测点采集噪声信号,桶壁上布置测点采集振动信号,得到多层多孔材料的降噪减振效果.各测点位置如图 10 所示.

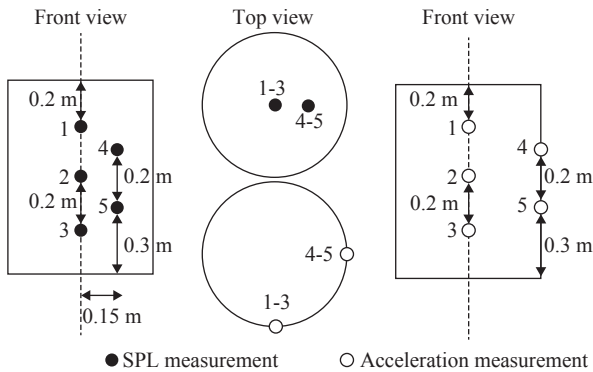


图 10 声压级测点与加速度测点布置示意图

Fig.10 Schematic diagram of the arrangement of sound pressure level (SPL) and acceleration measurement points

保持声源激励不变,首先开展空桶噪声实验,并建立相应仿真模型,对比声压测点响应情况,如图 11.首先得到了空桶情况下桶内不同位置测点的声压级 1/3 倍频程谱,能够作为后续敷设多孔材料后降噪情况的参考对象.

为验证多层复合多孔材料的减振与降噪特性,将优化后的多层多孔材料敷设于圆柱桶内部,保持扬声器激励与空桶情况一致,获取实验数据并与空桶情况进行对比,并计算各个测点总声压级,获取其降噪数据,如图 12 以及表 3.

由实验结果可知,封闭空腔内各个测点噪声

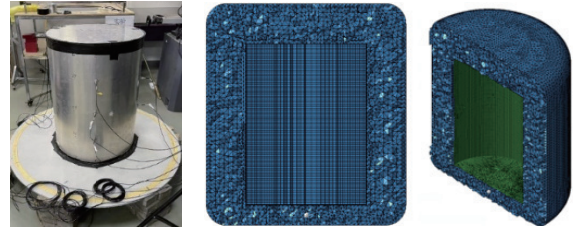


图 11 空桶噪声实验与仿真模型示意图

Fig.11 Schematic diagram of the empty barrel noise experiment and simulation model

至少降低 7.4 dB,呈现出了中高频段降噪更显著的特点,但低频峰值噪声对应的频率有向低频偏移的趋势,为进一步详细分析,根据实验数据绘制中低频段两类情况下的声压级线性频谱(100 至 400 Hz),以测点 1 为例,如图 13(a)空桶情况下时在 225.0 Hz 频率附近处测点声压级达到峰值,采用仿真模型开展耦合模态分析,发现该噪声峰由 223.7 Hz 处耦合模态主导,如图 13(b),这与实验得到的噪声峰值频率误差不超过 0.6%;敷设多层多孔材料后噪声响应幅值有一定下降,峰值向低频偏移,在低频段内降噪效果不如中高频段显著.

3.2 减振性能验证

除了良好的降噪性能外,多孔材料还具备对结构的减振性能,首先针对本文提出的多层多孔材料开展减振实验,获取结构振动响应得到其减振性能.为进行对比,分别得到在相同噪声激励下,敷设多层多孔材料前后圆柱柱壳上不同位置的加速度功率谱密度(PSD),其测点位置如图 10,结果对比如图 14,敷设了多层多孔材料后,圆桶柱壳的振动响应在中高频段显著降低,验证了多层多孔材料在显著降噪的同时也起到了抑制结构振动的作用.

3.3 敷设位置和敷设率对降噪减振性能的影响

选取多孔材料作为圆柱空腔声学覆盖层时,敷设位置与敷设率会对其降噪减振性能产生影响,分别针对两个因素开展仿真研究.采用三聚氰胺多孔材料作为研究对象,厚度不变设为 50 mm,仿真圆桶尺寸以及声压级测点、结构加速度测点均与前文一致,每种工况均采用同样的单极子声源作为激励.

首先研究敷设位置对其性能的影响.保证其敷设厚度以及敷设率不变,改变三聚氰胺泡沫在柱壳上的敷设位置,对比降噪量以及振动响应差异.敷设率为 50%(声学覆盖层面积占据柱壳壁面面积之比),分别对敷设于下层、中间、上层三种情况开展了仿真研究,如图 15 所示.

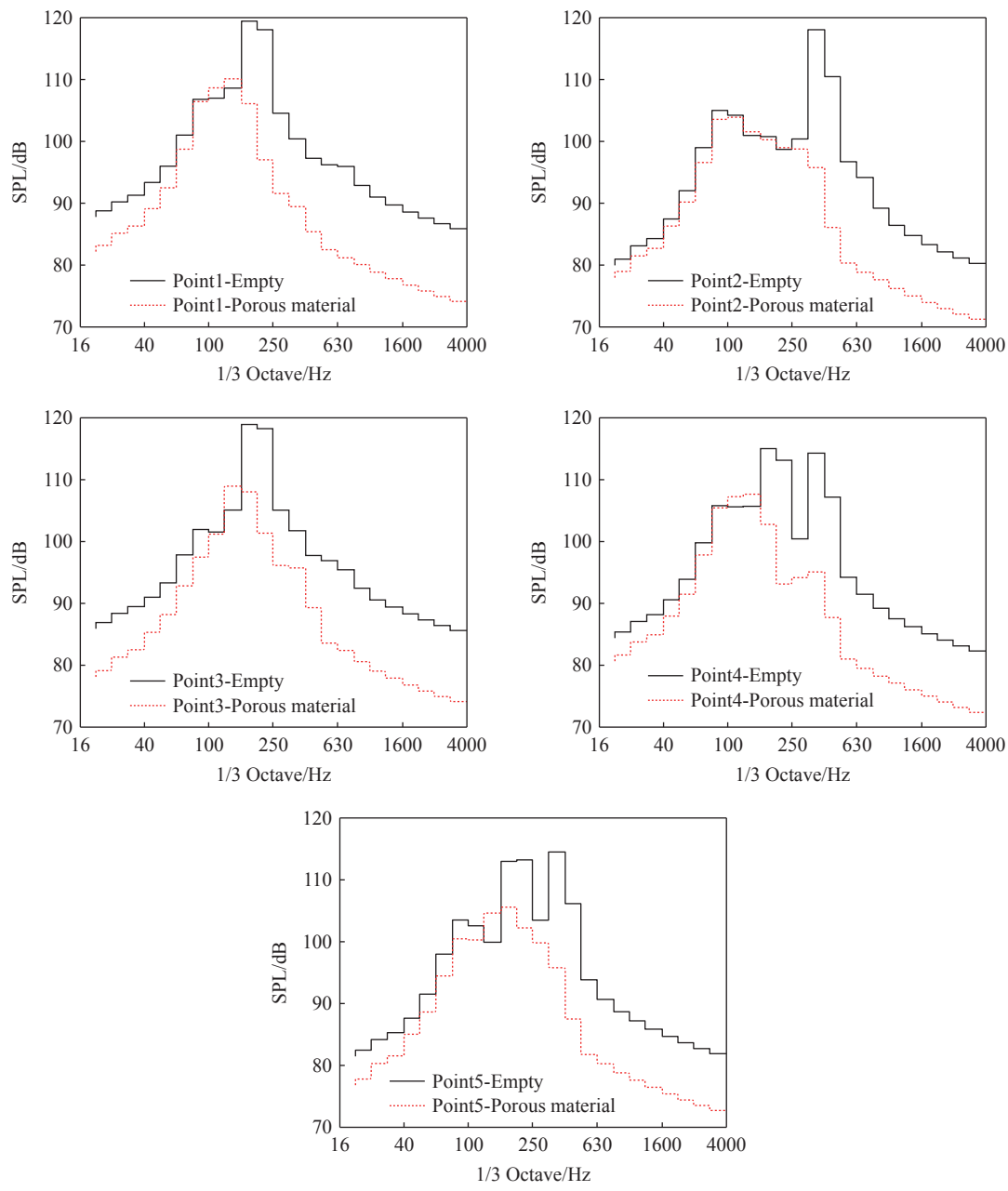


图 12 实验空桶与敷设多层多孔材料声压级频谱对比

Fig.12 Comparison of the sound pressure level spectra between the empty barrel and the barrel with multilayer porous materials

表 3 总声压级对比

Table 3 Comparison of the total sound pressure level

Point	Empty/dB	Porous material/dB	Noise reduction/dB
Point 1	122.5	114.5	8
Point 2	119.4	109.9	9.5
Point 3	122	112.7	9.3
Point 4	120	112.6	7.4
Point 5	119.2	110.9	8.3

通过仿真分别得到不同敷设位置下以及空桶情况,圆柱腔内 5 个声压级测点的 1/3 倍频程声压级频谱,计算 100 ~ 4000 Hz 频域内各测点总声压

级,由此得到每个测点在不同敷设位置情况下的降噪量,绘制折线图(如图 16)进行对比,发现敷设于底部以及中部时降噪效果明显由于敷设于顶部,这可能是由于前两个位置更加靠近声源,对声能的吸收作用更强.同样的,开展仿真分别得到不同敷设位置下结构加速度测点的加速度值,分别提取各测点峰值绘制折线图进行直观比较,如图 17.在保持相同敷设率的情况下,敷设于柱壳中部减振效果相对不好;当位于关于中间对称的位置时(底部和上部),位于底部敷设吸声层减振效果明显好于上部,这可能是由于吸声层靠近单极子声源导致的,因而在相同敷设率条件下,优先选择靠

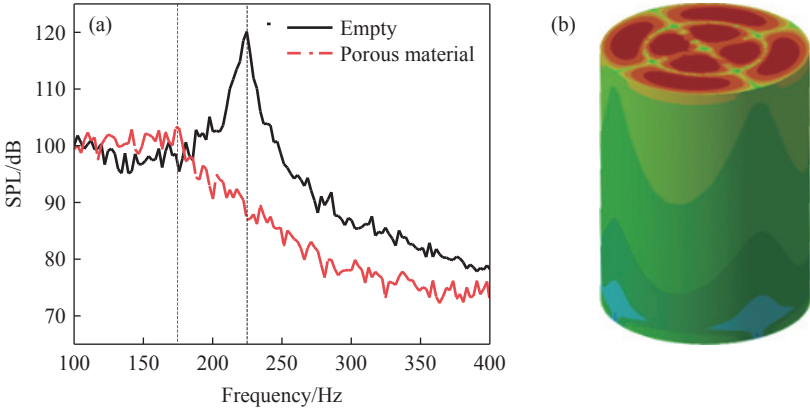


图 13 噪声特性分析示意图. (a) 单测点声压级线性频谱; (b) 223.7 Hz 耦合模式

Fig.13 Schematic diagram of the noise characterization analysis: (a) linear spectrum of sound pressure level at a single measurement point; (b) 223.7 Hz coupling mode

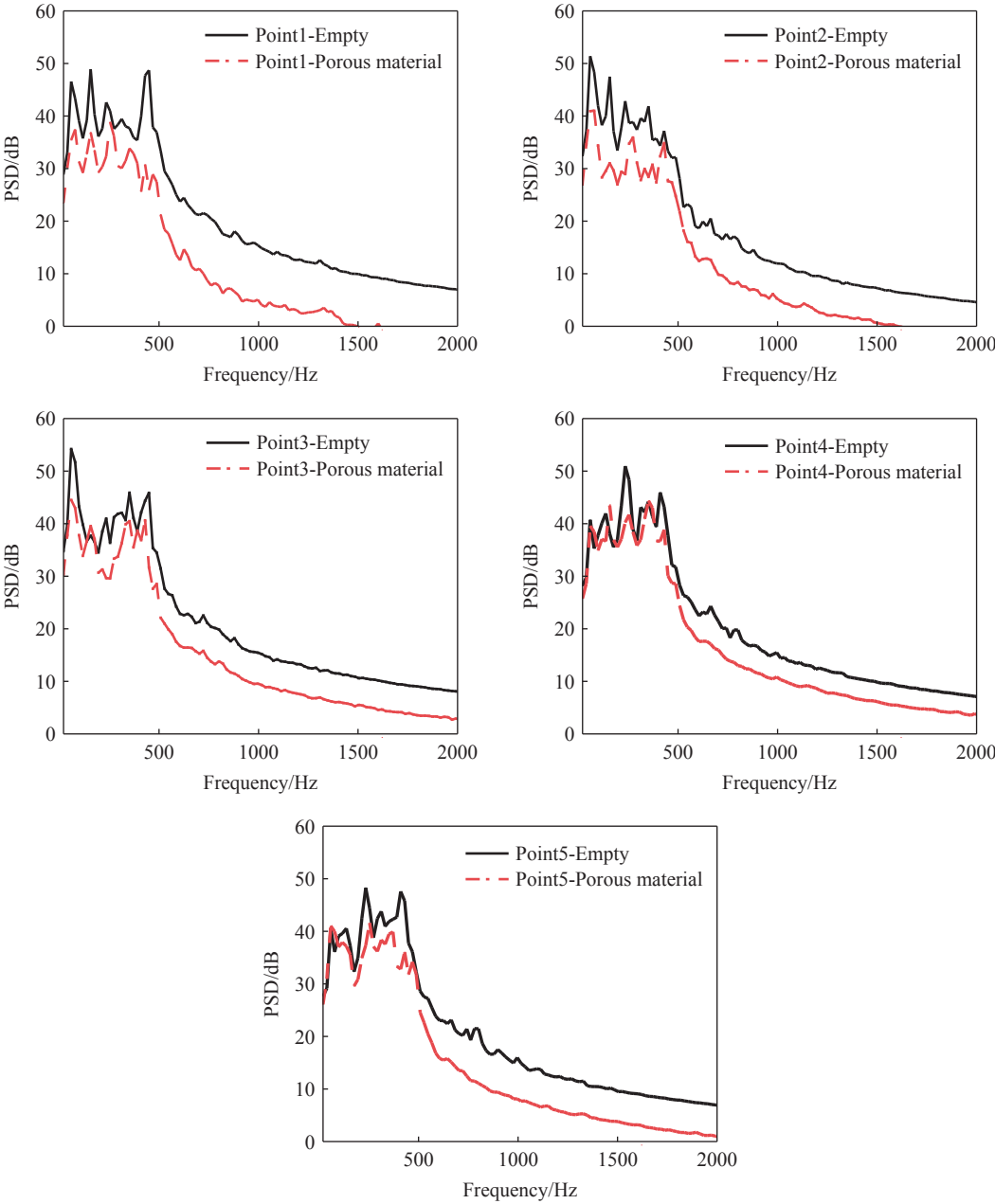


图 14 圆桶柱壳加速度响应对比

Fig.14 Comparison of the acceleration response of barrel cylindrical shells

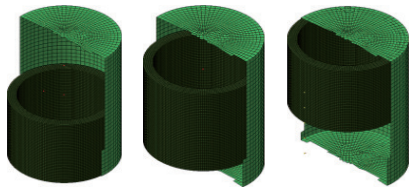


图 15 相同敷设率下不同敷设位置模型

Fig.15 Models of different laying positions at the same laying rate

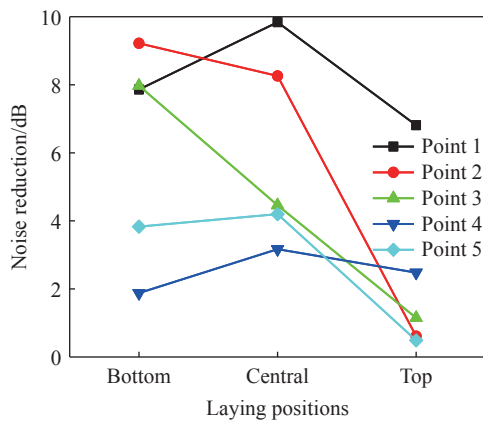


图 16 不同敷设位置下测点降噪量对比

Fig.16 Comparison of noise reduction at different laying positions

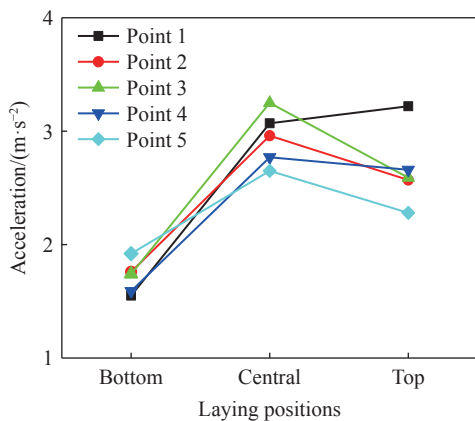


图 17 不同敷设位置下测点加速度峰值对比

Fig.17 Comparison of peak acceleration at different laying positions

近声源部位敷设多孔材料有利于增加减振效果。总的来说,相同敷设率下,在圆柱空腔内靠近声源一侧敷设声学覆盖层能取得更好的降噪减振效果。

保持其他条件不变,分别改变声学覆盖层敷设率为 25%、50%、75% 和 100%,基于前面研究结果,仍选用三聚氰胺泡沫作为敷设层,并且每一种情况都从底部开始敷设,靠近声源位置。开展多孔材料-柱壳结构耦合仿真,研究敷设率对降噪减振性能的影响,不同敷设率模型示意图如图 18 所示。

首先通过仿真得到各个声压级测点降噪量并绘制折线图(如图 19)进行对比,发现降噪效果并非随着敷设率的增大而显著提高的,例如 75% 敷

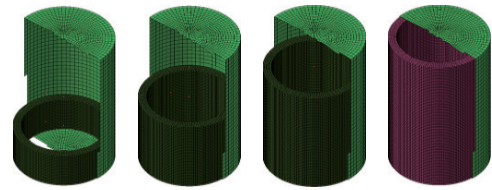


图 18 不同敷设率模型示意图

Fig.18 Schematic diagram of different laying rate models

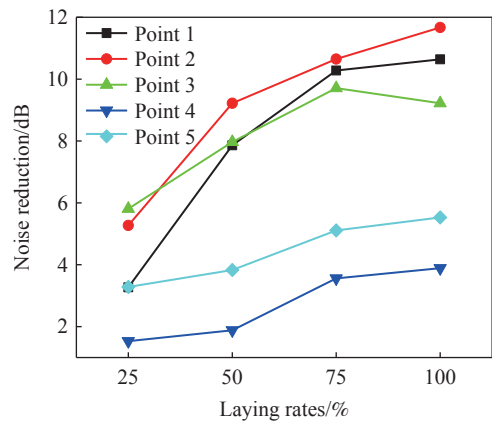


图 19 不同敷设率下测点降噪量对比

Fig.19 Comparison of noise reduction at different laying rates

设率与 100% 敷设率下降噪量没有明显提升,所以在实际应用中,为了尽可能降低声学覆盖层的质量占比,可以对其敷设率进行优化,使其在轻质的同时也能达到降噪要求。同样的,通过仿真得到 4 种情况下各个结构加速度测点的振动响应以及峰值,如图 20,发现与降噪情况相似,尽管随着敷设率增大,振动响应的峰值呈现下降趋势,且对高频段减振效果更为显著,但是随着敷设率的提升,减振性能的提升并非是更显著的,例如 50% 以及 75% 两种敷设率情况下,尽管高频振动响应峰值下降,但整体而言振动响应峰的幅值变化不及 25% 敷设率到 50% 敷设率显著。

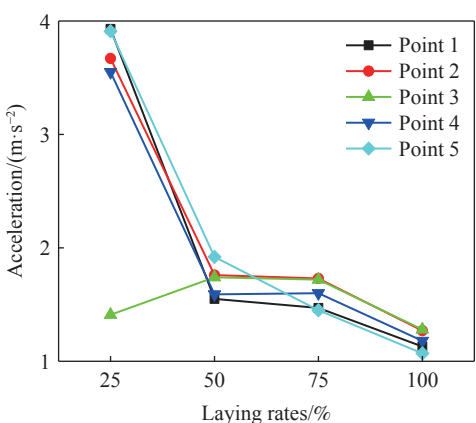


图 20 不同敷设率下测点加速度峰值对比

Fig.20 Comparison of peak acceleration at different laying rates

4 结论

本文基于多孔材料 JCA 模型, 采用粒子群优化方法设计了一种多层多孔材料降噪结构, 采用理论与实验验证了其降噪性能, 并将之用于圆柱空腔降噪中, 得到了理想的降噪以及减振效果, 并基于仿真开展了声学覆盖层的降噪与减振研究, 所得结论如下。

(1) 对比了三类不同的多孔材料模型, 采用粒子群优化算法提出了一类基于 JCA 理论模型的多孔材料参数拟合方法, 并通过实验验证了方法的准确性, 能够快速获取不同多孔材料的声学参数并应用于声学覆盖层设计中。

(2) 通过粒子群优化设计了一种包含三种不同多孔材料的多层多孔降噪结构, 开展了阻抗管实验获取了吸声系数, 并与同厚度但是不同排布的多层多孔结构进行对比, 吸声系数提升显著, 验证了其具备更好的吸声性能, 能为多种多孔材料的多层设计提供理论指导。

(3) 将本文设计的多层多孔结构用于圆柱空腔降噪中, 在相同的声源激励下, 桶内各测点总声压级至少降低 7.4 dB; 圆桶壁面上各加速度测点的加速度功率谱密度也在中高频段显著降低, 并基于仿真研究了多孔材料敷设位置和敷设率对降噪减振性能的影响。

本研究能够对航天领域的噪声防护提供应用指导, 针对运载火箭在飞行过程中的严酷噪声环境, 敷设多层多孔材料声学覆盖层后, 能够在低质量占比的前提下起到良好的降噪减振效果。此外, 相较于传统的整流罩吸声层采用单一多孔材料, 多层的声学覆盖层还能考虑引入具备隔热、防尘等功能的多孔材料, 通过本研究提出的设计方法对其厚度分配及排布方式进行优化设计, 在保证吸声能力的同时实现多功能集成, 对提升运载火箭的抗声振能力、保障内部有效载荷的安全性具备较高应用价值。

参 考 文 献

- [1] Rong J L, Chen X Y, Zhao R, et al. Simulation on the low-frequency acoustic performance of noise attenuation device in launch vehicle fairings. *Trans Beijing Inst Technol*, 2016, 36(10): 991
(荣吉利, 谌相宇, 赵瑞, 等. 火箭整流罩内降噪装置低频声学性能仿真. 北京理工大学学报, 2016, 36(10): 991)
- [2] Rong J L, A N S, Cheng X Y, et al. Numerical study of free jet noise considering solid particles. *Trans Beijing Inst Technol*, 2020, 40(8): 826
(荣吉利, 阿尼苏, 程修妍, 等. 考虑固体颗粒的自由喷流噪声的数值研究. 北京理工大学学报, 2020, 40(8): 826)
- [3] Gass M C, Karas J C, Dunbar D R, et al. Atlas launch system mission planner's guide Atlas V addendum. *Inter Launch Serv*. 1999
- [4] Wang B Y, Gao K, Zhang Z H, et al. Sound field analysis method for noise reduction in fairing materials and structures. *Aerosp Mater Technol*, 2023, 53(6): 9
(王博尧, 高坤, 张兆恒, 等. 整流罩用降噪材料与结构及声场分析方法. 宇航材料工艺, 2023, 53(6): 9)
- [5] Ouyang X, Wang D Z, Fu X J, et al. Research of out-pressure capacity numeration of the foam-sandwich-structure with the von-carman cone. *Missiles Space Veh*, 2015(4): 74
(欧阳兴, 王端志, 傅学军, 等. 泡沫夹层冯·卡门曲面锥段结构外压承载计算方法研究. 导弹与航天运载技术, 2015(4): 74)
- [6] Hughes W O, McNelis A M. Acoustic testing of the Cassini spacecraft and Titan 4 payload fairing. Part 2; results. *J NASA Techn Memor*, 1997, 107475: 10.
- [7] Wang K, Wang G, Zhao C. Noise-reduction of launch vehicle using sound-absorbing material. *J N China Inst Aerosp Eng*, 2023, 33(4): 12
(王坤, 王刚, 赵川. 运载火箭整流罩吸声降噪特性研究. 北华航天工业学院学报, 2023, 33(4): 12)
- [8] Reddi C S N V, Padmanabhan C. Enhancing noise control in a cavity using Helmholtz resonators. *J Acoust Soc Am*, 2013, 133(5): 3546
- [9] Cheng X Y, Chen X Y, Rong J L, et al. Low-frequency noise reduction of rocket fairings using horn-shaped-neck Helmholtz resonators. *J Spacecr Rockets*, 2018, 56(1): 273
- [10] Li H X, Hu D K, Wu S Q. Optimization design of dynamic vibration absorbers for vibration and noise reduction of composite fairing. *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2022, 43(5): 225249
(李航行, 胡迪科, 吴邵庆. 复合材料整流罩减振降噪的动力吸振器设计. 航空学报, 2022, 43(5): 225249)
- [11] Wu J Q, Wu S, Wang W Z, et al. Active noise cancellation control technology in launch vehicle fairing. *Aerosp Shanghai (Chin Engl)*, 2023, 40(2): 144
(吴家琦, 吴松, 王文哲, 等. 运载火箭整流罩内主动降噪控制技术. 上海航天(中英文), 2023, 40(2): 144)
- [12] Wang J J, Xu X L, Liang K Y, et al. Thermal conductivity enhancement of porous shape-stabilized composite phase change materials for thermal energy storage applications: A review. *Chin J Eng*, 2020, 42(1): 26
(王静静, 徐小亮, 梁凯彦, 等. 多孔基定形复合相变材料传热性能提升研究进展. 工程科学学报, 2020, 42(1): 26)
- [13] Zhang L, Pang X L, Gao K W. Preparation of porous carbides by reactive sintering. *Chin J Eng*, 2015, 37(6): 751.
(张雷, 庞晓露, 高克玮. 利用反应烧结法制备多孔碳化物陶瓷. 工程科学学报, 2015, 37(6): 751.)
- [14] Rastegar N, Ershad-Langroudi A, Parsimehr H, et al. Sound-

- absorbing porous materials: A review on polyurethane-based foams. *Iran Polym J*, 2022, 31(1): 83
- [15] Hu Y S. *Vibration and Noise Reduction of Porous Sound Absorbing Materials and its Application in Fairing* [Dissertation]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
(胡永松. 多孔吸声材料的减振降噪分析及其在整流罩中的应用[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022)
- [16] Huang Z X. Foam in outer space. *World Plast*, 2007, 25(12): 54
(黄泽雄. 三聚氰胺泡沫用于火箭整流罩. *国外塑料*, 2007, 25(12): 54)
- [17] Hughes W, McNelis A, Himelblau H. Investigation of acoustic fields for the Cassini spacecraft—Reverberant versus launch environments // *5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*. Bellevue, 1999: 1985
- [18] Lane S A, Kennedy S, Richard R. Noise transmission studies of an advanced grid-stiffened composite fairing. *J Spacecr Rockets*, 2007, 44(5): 1131
- [19] Cheng X Y, Rong J L, Chen X Y, et al. Analysis and optimization for medium and high frequency noise attenuation of rocket fairings with porous material. *J Astronaut*, 2018, 39(4): 383
(程修妍, 荣吉利, 谌相宇, 等. 多孔材料在整流罩内中高频降噪的应用与优化研究. *宇航学报*, 2018, 39(4): 383)
- [20] Feng Y Y, Zong D D, Hou Y J, et al. Gradient structured micro/nanofibrous sponges with superior compressibility and stretchability for broadband sound absorption. *J Colloid Interface Sci*, 2021, 593: 59
- [21] Cheng Y X, Xiong X Z, Llu X W, et al. Design and sound performance analysis of porous materials with gradient airflow resistivity. *J Appl Acoust*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.O4.20240423.1700.006.html>
(程宇翔, 熊鑫忠, 刘学文, 等. 梯度流阻率多孔材料设计与声学性能分析. *应用声学*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2121.O4.20240423.1700.006.html>)
- [22] Liu X W, Ma X W, Yu C L, et al. Sound absorption of porous materials perforated with holes having gradually varying radii. *Aerosp Sci Technol*, 2022, 120: 107229
- [23] Gao N S, Tang L L, Deng J, et al. Design, fabrication and sound absorption test of composite porous metamaterial with embedding I-plates into porous polyurethane sponge. *Appl Acoust*, 2021, 175: 107845
- [24] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28(2): 168
- [25] Delany M E, Bazley E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl Acoust*, 1970, 3(2): 105
- [26] Allard J F, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(6): 3346
- [27] Johnson D L, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J Fluid Mech*, 1987, 176: 379
- [28] Raymond P. Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media. *J Acoust Soc Am*, 2007, 122(6): EL217
- [29] Xie X X. *A Study of Sound Absorption and Insulation Performance of Multi-layer Kapok Felt Composite Material* [Dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023
(谢新星. 多层木棉毡复合材料吸隔声特性的研究[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023)