

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.005

针对风机降噪的新型夹芯结构与隔声性能研究

张水华^{1,2b}, 左宏伟^{2a,2b}, 杨莎莎³, 王新⁴, 沈承^{2a,2b}

- (1. 苏州顶裕节能设备有限公司, 江苏 苏州 215213;
- 2. 南京航空航天大学 a. 航空航天结构力学及控制全国重点实验室; b. 航空学院, 江苏 南京 210016;
- 3. 南京工业职业技术大学 机械工程学院, 江苏 南京 210023;
- 4. 威海克莱特菲尔风机股份有限公司, 山东 威海 264210)

摘要: 隔声罩是风机被动降噪最重要的方式之一, 然而传统蜂窝夹芯结构无法有效隔绝设备的低频噪声。为此提出一种新型的蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构。基于 Reissner 理论建立的夹芯结构的隔声理论模型, 并借助仿真软件预测和分析其结构的声学特性。结果表明: 新结构较原始蜂窝夹芯板结构在低频区域增加了一个新的声传输损失峰, 物理机制在于结构中间层的环形质量块可产生局域共振, 声能损耗区域主要集中在微穿孔通道的入口和出口。通过减小薄板厚度, 增加穿孔长度, 减小穿孔半径的方法, 可降低该结构的声传输损失峰谷值所在频率。此研究工作对设计性能更好的隔声罩具有一定的理论参考价值。

关键词: 风机降噪; 隔声性能; 夹芯结构; 局域共振; 结构设计; 微穿孔

中图分类号: TB535 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0025-06

New Sandwich Structure Design and Sound Insulation Performance Reserch of Wind Turbine Noise Reduction

ZHANG Shuihua^{1,2b}, ZUO Hongwei^{2a,2b}, YANG Shasha³, WANG Xin⁴, SHEN Cheng^{2a,2b}

- (1. SuZhou Dingyu Energy Saving Equipment Co., Ltd., Suzhou 215213, China; 2. a. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, b. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. School of Mechanical Engineering, Nanjing Polytechnic University, Nanjing 210023, China;
- 4. Weihai Kelaite Feier Fan Co., Ltd., Weihai 264210, China)

Abstract: Though sound insulation enclosure is one of the most important passive noise reduction methods for fans, the traditional honeycomb sandwich structure fails to isolate the low-frequency noise of the equipment effectively. This paper proposes a new honeycomb-micro-perforated thin plate acoustic metamaterial sandwich structure. Based on the Reissner theory, a sound insulation theoretical model of the sandwich structure is established, and the acoustic characteristics of the structure are predicted and analyzed by simulation software. The results show that the new structure has a new sound transmission loss peak in the low-frequency region compared with the original honeycomb sandwich plate structure. The physical mechanism lies in the annular mass blocks in the middle layer of the structure which can produce obvious local resonance, while the sound energy loss area is mainly concentrated at the entrance and exit of the micro-perforated channels. And by reducing the thickness of the thin plate, increasing the perforation length, and reducing the perforation radius, the frequency at which the peak and valley values of the sound transmission loss of the structure occur can be reduced. The proposed research work has certain theoretical reference value for designing sound insulation enclosures with better performance.

Keywords: fan noise reduction; sound insulation performance; sandwich structure; local resonance; structural design; micro perforation

0 引言

随着《新噪声法》的实施, 风机的噪声问题越

来越得到重视。风机噪声最常用也是最重要的控制方式是采用隔声罩方法, 这种处理方式类似于汽车领域的声学包。隔声罩箱体通常采用三明治

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12202183、12472089); 国家重点研发计划(2023YFB4604800)

第一作者简介: 张水华(1979—)男, 江苏海门人, 工程师, 本科, 研究方向为离心风机结构设计, zhangsh06@vip.126.com。

通信作者简介: 沈承(1986—), 男, 江苏南通人, 副教授, 主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发子课题, 发表SIC论文40余篇, cshen@nuaa.edu.cn。

结构或蜂窝夹芯布置形式。关于夹芯结构的隔声特性已有较多研究。从结构形式和变形特点上看,夹芯板的运动本质上可以退化成双层板的隔声问题。HONGISTO^[1]列举了近 50 年来计 20 种重要的双板隔声计算模型并加以比较和分析,发现大多模型集中于中间层为空气的双板结构,只有 5 种模型考虑了中间层带有连接的情况,LEGAULT 等^[2]针对连接的 5 种双板模型进行了实验和理论对比,认为 DAVY^[3]的模型与实验结果吻合最好,GALBRUN^[4]按照从简单到复杂结构的思路,比较清晰地综述了板梁组合系统的振动传输特性,分析了几种经典理论的适用性和局限性,指出点连接模型仅仅适用于低频阶段的单板系统。沈承等^[5]利用离散弹簧模型得到了夹芯结构的声振耦合特性,这种模型可以考虑不同板结构的相对运动,可以更准确地捕捉对称变形模式。SHEN 等^[6]进一步将金属蜂窝夹芯结构的隔声问题拓展到复合材料,通过复合材料理论得到了声振耦合分析的解析模型,这些工作对于理解蜂窝夹芯隔声罩的特性具有一定的理论指导价值。

然而,传统蜂窝夹芯结构对于中低频噪声控制效果较差,如何有效提升夹芯结构隔声特性是学术界和工业界非常关心的话题。最近有关声学超材料的相关研究^[7-9]为隔声罩设计提供了新的思路。总的来看,声学超材料可以分为反射型超材料和吸收型超材料。反射型超材料方面,2013 年,MA 等^[10]在附加质量块的薄膜超材料中开孔,发现开孔之后仍然可以获得较高的隔声量,而所开孔同时可以保证气流的通过。提出的这类薄膜加质量块的结构属于 Lorentz 效应,其最早由 MILTON^[11]开展了相关研究。不同的是,LEE 等^[12]研究了不含质量块的纯薄膜结构,其禁带效应可用 Drude 模型进行刻画,其负等效质量发生在截止频率以下。这种 Drude 模型最早是用于描述金属材料在光波频段的介电行为。YAO 等^[13]揭示了薄膜结构实现 Drude 效应的关键因素是薄膜外边界的约束条件,实验和数值结果均证实了截止频率下负质量密度的存在。VARANASI 等^[14]提出了一种蜂窝状的框架材料,其结构类似于 YAO 等提出的弹性板声学超材料结构,但他们的设计思路有所区别。吸收超材料方面,2012 年 MEI 等^[15]开创性地提出了一种具有宽频超强吸声性能的薄膜型声学超材料,2014 年 MA 等^[16]提出采用带后腔的弹性薄膜结构利用新型的混合共振实现阻抗匹配和对声波的完美吸收。

LANGFELDT 等^[17]研究了附加环形质量块并穿孔的薄膜型声学超材料。YANG 等^[18]提出了一种双膜结构,可以同时实现负质量和负模量。LI 等^[19]利用迷宫型的声学超表面结合穿孔面板实现了完美吸声,即吸声系数最多达到 100%。ABRAHAMS 等^[20]利用超薄超表面实现了很好的吸声效果。ZHANG 等^[21]利用曲折孔的设计改善了传统 Helmholtz 共振腔的吸声效果。

本文基于微穿孔薄板声学超材料概念提出了一种蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构。通过理论和数值研究方法,探究该复合结构在工作频率下的声学特性以及与原有结构相比隔声性能的变化,为蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构的调控设计提供了新的思路。

1 等效模型

蜂窝夹层板结构振动特性的主流理论模型分为 Reissner 理论, Hoff 理论和 Π pycakoB-杜庆华理论^[22]。本文基于 Reissner 理论建立蜂窝夹层板结构的振动控制方程,通过将蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构进一步等效为“弹簧-振子”系统,进行声学特性分析。

1.1 蜂窝夹层板结构的等效模型

蜂窝夹层板结构如图 1 所示,由上面板、下面板和正六边形蜂窝芯体结构构成。上、下面板的厚度为 d_p ,长度为 a_p ,宽度为 b_p ;蜂窝夹芯的厚度为 h_c ,六边形边长为 L_c ,壁面厚度为 t_p 。上、下面板皆为薄板,其厚度与蜂窝夹芯的厚度满足关系 $d_p \ll h_c$ 。

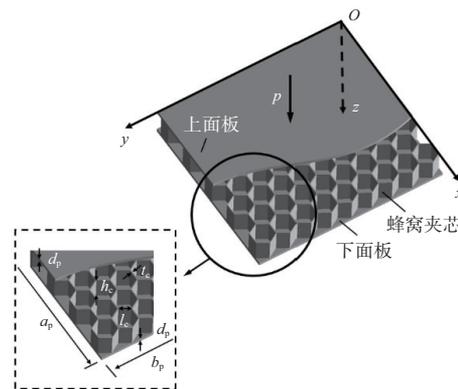


图 1 蜂窝夹层板结构的几何模型

当平面波垂直入射到上面板时,引起上面板的振动,该振动经由蜂窝夹芯传递至下面板,进一步引起下面板的振动,最终在下面板辐射声波。

基于 Reissner 理论,垂直于蜂窝夹层板结构中面的直线段,变形后在 xOz 平面和 yOz 平面内的转角分别为 φ_x 和 φ_y 。此时结构合力矩以及横向剪切力可表示为:

$$M_x = -E_1 \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \sigma_p \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$M_y = -E_1 \left(\sigma_p \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$M_{xy} = -\frac{1}{2} E_1 (1 - \sigma_p) \left(\frac{\partial \varphi_y}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$Q_x = G_A \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \varphi_x \right) \quad (4)$$

$$Q_y = G_A \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \varphi_y \right) \quad (5)$$

式中:蜂窝夹层板结构的弯曲刚度 $E_1 = E_p (h_c + d_p)^2 d_p / 2(1 - \sigma_p^2)$;蜂窝夹层板结构的剪切刚度 $G_A = G_e h_c$; E_p 和 σ_p 分别为上、下面板的弹性模量和泊松比。根据应变能等效原理,蜂窝夹芯的等效切变模量 $G_e = G_x = G_y = t_c G_p / \sqrt{3} l_c$, 式中 G_p 为上、下面板的切变模量。假设, $\varphi_x = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y}$, $\varphi_y =$

$\frac{\partial f}{\partial y} - \frac{\partial g}{\partial x}$, 经过一系列推导可得到该蜂窝夹层板结构的控制方程为

$$E_1 \nabla^2 \nabla^2 f + \rho_e \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(f - \frac{E_1}{G_A} \nabla^2 f \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{E_1}{2} (1 - \sigma_p) \nabla^2 g - G_A g = 0 \quad (7)$$

1.2 复合结构隔声理论模型

根据等效介质理论,将微穿孔薄板声学超材料夹芯等效为整体厚度相同的均质板材料,此时该均质板的等效密度可以表示为

$$\rho'_{eq} = \frac{M'_F}{V} + \rho_{eq} \quad (8)$$

式中 V_{eq} 为蜂窝夹层板等效后的体积。假设平面声波垂直入射到蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构上,入射声波、反射声波、透射声波和均质板的位移可以表示为

$$\begin{cases} p_{in} = p_{ia} e^{i(\omega t - kz)} \\ p_{re} = p_{ra} e^{i(\omega t + kz)} \\ p_{tr} = p_{ta} e^{i(\omega t - kz)} \\ w' = w_a e^{i\omega t} \end{cases} \quad (9)$$

式中: p_{ia} , p_{ra} , p_{ta} , w_a 分别为入射声压幅值、反射声压幅值、透射声压幅值和均质板的位移幅值; k 为

波矢。

声场在该小扰动下的运动方程为

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (10)$$

式中: ρ_0 为媒质的静态密度; p 为声压; v 为质点速度。

考虑均质板上下两侧的质点速度连续条件,得到位移幅值

$$w_a = \frac{2p_{ia}}{2i\omega\rho_0 c_0 - \omega^2 \rho'_{eq} h_{eq}} \quad (11)$$

并可求得透射声压幅值为

$$p_{ta} = \frac{2ip_{ia}\omega\rho_0 c_0}{2i\omega\rho_0 c_0 - \omega^2 \rho'_{eq} h_{eq}} \quad (12)$$

最终求得声传输损失。

2 蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构的隔声性能

2.1 单元胞几何模型

蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构的单元胞如图 2 所示,

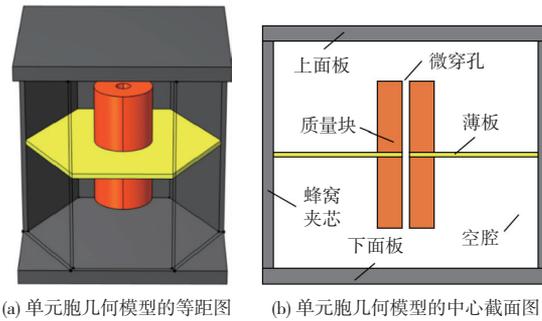


图 2 蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构单元胞的几何模型

该单元胞的基本模型包括一个正六边形蜂窝夹层板结构和粘结在其内部的微穿孔薄板声学超材料。微穿孔薄板的中央位置有一个微穿孔,在孔边缘的上下表面各附着着一个具有圆形微穿孔的环形质量块,三者有着同样的孔径。穿孔使蜂窝夹芯内微穿孔薄板两侧的空气得以连通,组成了处于蜂窝夹层板中间的夹芯层,同时,上下连通的空腔也为不同结构需求的改进设计提供了更多可能。

2.2 无限大蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构的隔声分析

本文采用 COMSOL Multiphysics 软件进行声学仿真,其中上、下面板的边长皆为 $a_1 = 12 \text{ mm}$,厚

度 $t_6 = 0.5 \text{ mm}$; 微穿孔薄板厚度 $t_1 = 0.1 \text{ mm}$; 具有圆形微穿孔的上、下环形质量块高度 $t_2 = 8 \text{ mm}$, 外径 $r_2 = 2 \text{ mm}$; 蜂窝夹芯厚度 $t_7 = 0.5 \text{ mm}$, 高度 $t_8 = 30 \text{ mm}$; 微穿孔半径 $r_0 = 0.5 \text{ mm}$ 。对于聚酰亚胺材质的微穿孔薄板, 弹性模量、泊松比和密度分别为 $E_1 = 2.5 \text{ GPa}$, $\nu_1 = 0.34$, $\rho_1 = 1\,420 \text{ kg/m}^3$; 对于黄铜材质的环形质量块, 弹性模量、泊松比和密度分别为 $E_3 = 90 \text{ GPa}$, $\nu_3 = 0.33$, $\rho_3 = 8\,530 \text{ kg/m}^3$; 对于铝材质的上、下面板和蜂窝夹芯, 弹性模量、泊松比和密度分别为 $E_4 = 69 \text{ GPa}$, $\nu_4 = 0.33$, $\rho_4 = 2\,700 \text{ kg/m}^3$ 。

声传输损失曲线如图 3 所示, 其中, 短划线和实线分别代表原始蜂窝夹层板结构合蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构。结果表明: 在 $50 \sim 500 \text{ Hz}$ 的低频范围内, 总体隔声量的变化趋势是随频率增大而增大, 而新结构较原始蜂窝夹层板结构增加了一个新的声传输损失峰, 该声传输损失峰出现在 140 Hz 处, 其峰值声传输损失达到 51.1 dB , 比原始蜂窝夹层板结构的声传输损失高出近 35 dB 。不仅如此, 在 $0 \sim 188 \text{ Hz}$ 的低频范围内, 蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构的隔声性能得到了显著的提升, 形成了一个较宽的隔声频带, 对于频率处于 $406 \sim 500 \text{ Hz}$ 范围内的噪声, 蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构也表现出了更好的隔声效果。

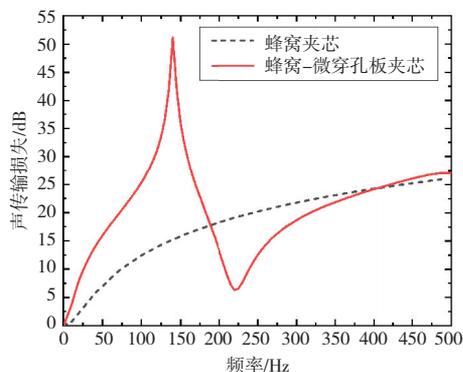


图 3 有无微穿孔的蜂窝夹层板结构声传输损失曲线比较

为进一步分析新结构的隔声机制, 对处于隔声峰值对应频率下的系统振动模态、声场分布和平面波功耗分布进行数值计算。

声传输损失峰值所处频率下的振动模态如图 4 所示(本刊为黑白印刷, 相关疑问请咨询作者)。在声传输损失峰出现时, 结构两侧面板及夹

芯的振动微乎其微, 而处于中间层的环形质量块产生明显的局域共振, 该共振有效抑制了蜂窝夹芯和两侧面板的振动, 阻碍了声波的进一步传播, 因而产生了隔声峰。不同的是, 在声传输谷值频率激励下, 面板连同夹芯结构与穿孔薄板接触部分周围区域发生明显振动, 因而难以抑制声波的传播, 产生隔声谷值。

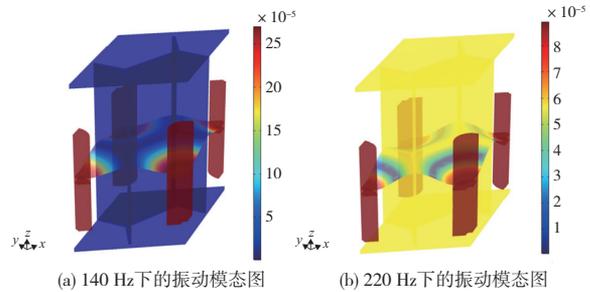


图 4 声传输损失峰值所处频率下的振动模态

声传输损失峰值所处频率下的声压分布和声能损耗如图 5 所示。此时, 能透射到夹芯结构另一侧的声波大幅减少, 声能损耗区域主要集中在微穿孔通道内, 尤其在微穿孔通道入口和出口处产生了巨大损耗。此时, 微穿孔圆形薄板和环形质量块发生强烈共振, 该共振引发了蜂窝夹芯和面板封闭着的空腔内部空气的压缩和膨胀。

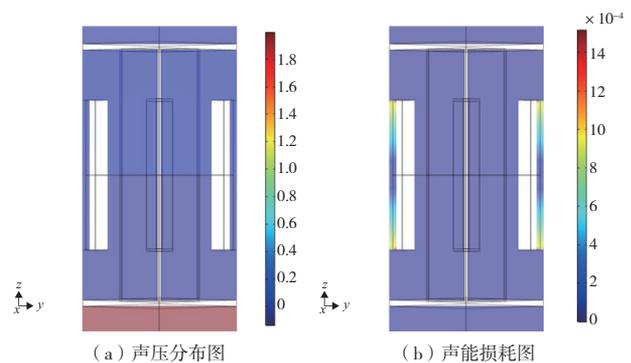


图 5 声传输损失峰值所处频率下的声压分布图和声能损耗图

2.3 参数讨论

本节选取薄板的厚度、穿孔的长度、穿孔的半径、质量块的外径这 4 个参数通过数值模拟的方法进行比较分析。

首先, 不改变薄板上的环形质量块以及连接薄板的蜂窝夹层板结构的情况下, 分别取薄板厚度 t_1 为 0.1 mm 、 0.11 mm 、 0.12 mm 、 0.13 mm , 结果如图 6 所示。

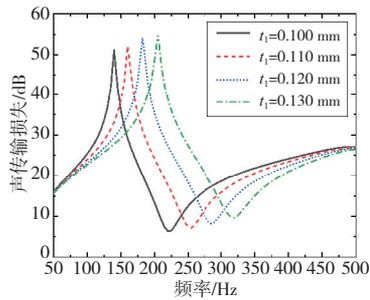


图6 不同薄板厚度结构的声传输损耗曲线图

结果表明:薄板厚度越大,声传输损失峰谷值所在频率越高,声传输损失提升的频带越宽,声传输损失有所降低的频带越窄。实际上,当其余参数不变时,随着薄板厚度的增加,微穿孔薄板声学超材料夹芯的共振频率升高,这与图6中声传输损失峰值所在频率的变化也一致,侧面验证了中间层微穿孔薄板声学超材料夹芯的局域共振对噪声是有效控制的。

进一步分别选取环形质量块的高度 t_2 为 8 mm、10 mm、12 mm、14 mm,结构在不同穿孔长度下的声传输损失变化曲线如图7所示。

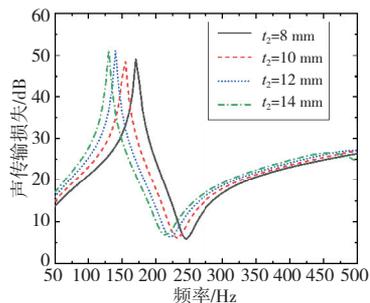


图7 不同穿孔长度的结构的声传输损耗曲线图

随着穿孔长度的增加,微穿孔薄板声学超材料夹芯的共振频率降低,致使蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构的工作频率降低,同时由于与空气粒子因为黏性而产生摩擦的通道长度增加,整体的平面声波损耗增加,因而结构表现出的声衰减能力得以提升。

穿孔半径的对声学特性影响显著,半径过大会削弱孔壁与空气粒子之间的摩擦作用,而半径过小又会因为黏性边界层的存在而使得孔两端腔体内的空气难以流通。分别取穿孔半径为 r_0 为 0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm,不同穿孔半径的结构声传输损失变化曲线如图8所示。

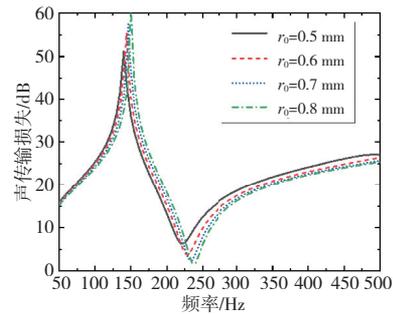


图8 不同穿孔半径夹芯结构的声传输损耗曲线图

结果表明:穿孔半径增加使得声传输损失峰值所在频率升高,声传输损失谷值所在频率也随之升高,但升高幅度都不大。这是因为随着穿孔半径的增加,当穿孔半径达到一定大小后,穿孔以及受穿孔影响的质量块对微穿孔薄板等效刚度的影响逐渐减弱,故声传输损失峰值所在频率升高的幅值有限。由于受到微穿孔基于的假设和结构大小的限制,穿孔半径的调整对这种局域共振型结构的隔声峰值频率的调控作用相较于其他参数而言显著弱许多,更适合对工作频率在小范围上进行精准调控。

3 结语

为改善传统蜂窝夹层结构的隔声特性,本文提出了一种新的蜂窝-微穿孔薄板声学超材料夹芯结构,基于 Reissner 理论研究了蜂窝夹层板结构的声振耦合方程,通过数值计算和理论分析相结合的方式,从振动模态、模拟物理场和能量损耗的角度探究了低频范围内新增声传输损失峰的形成机制。

参数讨论表明:将微穿孔薄板声学超材料夹芯添加到蜂窝夹层板结构中,可以在一定频段内引起微穿孔薄板声学超材料夹芯强烈的局域共振而抑制蜂窝夹层板结构的弯曲振动,在低频范围内实现宽频带隔声,有效提升蜂窝夹层板结构的低频隔声性能。通过减小薄板厚度,增加穿孔长度,减小穿孔半径,可以降低结构的声传输损失峰谷值所在频率。

参考文献:

- [1] HONGISTO V. Sound insulation of double panels - comparison of existing prediction models [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2006, 92(1): 61-78.
- [2] LEGAULT J, ATALLA N. Numerical and experimental investigation of the effect of structural links on the sound transmission of a lightweight double panel structure [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 324 (3/4/5):

- 712-732.
- [3] DAVY J L. Predicting the sound insulation of walls[J]. *Building Acoustics*, 2009, 16(1): 1-20.
- [4] GALBRUN L. Vibration transmission through plate/beam structures typical of lightweight buildings: Applicability and limitations of fundamental theories [J]. *Applied Acoustics*, 2010, 71(7): 587-596.
- [5] 沈承, 辛锋先, 金峰, 等. 对边简支加筋三明治板隔声性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(7): 22-29, 117.
- [6] SHEN C, XIN F X, LU T J. Sound transmission across composite laminate sandwiches: influence of orthogonal stiffeners and laminate layup [J]. *Composite Structures*, 2016, 143: 310-316.
- [7] 胥强荣, 沈承, 韩峰, 等. 一种准零刚度声学超材料板的低频宽频带隔声行为 [J]. *物理学报*, 2021, 70(24): 157-168.
- [8] 胥强荣, 朱洋, 林康, 等. 一种具有动态磁负刚度薄膜声学超材料的低频隔声特性 [J]. *物理学报*, 2022, 71(21): 223-238.
- [9] 马冠聪, 张柏乐, 刘正猷, 声学超材料的发展及展望 [J]. *科学通报*, 2025, 70(12): 1697-1698.
- [10] MA G C, YANG M, YANG Z Y, et al. Low-frequency narrow-band acoustic filter with large orifice [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(1): 011903.
- [11] MILTON G W. New metamaterials with macroscopic behavior outside that of continuum elastodynamics [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(10): 359.
- [12] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, et al. Acoustic metamaterial with negative density [J]. *Physics Letters A*, 2009, 373(48): 4464-4469.
- [13] YAO S S, ZHOU X M, HU G K. Investigation of the negative-mass behaviors occurring below a cut-off frequency [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(10): 103025.
- [14] VARANASI S, BOLTON J S, SIEGMUND T H, et al. The low frequency performance of metamaterial barriers based on cellular structures [J]. *Applied Acoustics*, 2013, 74(4): 485-495.
- [15] MEI J, MA G C, YANG M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 756.
- [16] MA G C, YANG M, XIAO S W, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 873-878.
- [17] LANGFELDT F, KEMSIES H, GLEINE W, et al. Perforated membrane-type acoustic metamaterials [J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(16): 1457-1462.
- [18] YANG M, MA G C, YANG Z Y, et al. Coupled membranes with doubly negative mass density and bulk modulus [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(13): 134301.
- [19] LI Y, ASSOUAR B M. Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(6): 063502.
- [20] ABRAHAMS M P, OUDICH M, REVALOR Y, et al. Hybrid ultrathin metasurface for broadband sound absorption [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(15): 151702.
- [21] ZHANG S Y, SONG A L, WANG S, et al. A compact low-frequency sound absorption metastructure realized by resonators with wavy bending necks [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2024, 57(3): 035302.
- [22] 任树伟, 辛锋先, 卢天健. 蜂窝层芯夹层板结构振动与传声特性研究 [J]. *力学学报*, 2013, 45(3): 349-358.

收稿日期: 2025-06-13

(上接第 24 页)

参考文献:

- [1] WU C H. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial, and mixed-flow types [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1952, 74(8): 1363-1380.
- [2] 周正贵. 压气机/风扇叶片自动优化设计的研究现状和关键技术 [J]. *航空学报*, 2008, 29(2): 257-266.
- [3] GALLIMORE S J. Axial flow compressor design [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 1999, 213(5): 437-449.
- [4] BIOLLO R, BENINI E. Recent advances in transonic axial compressor aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, 56: 1-18.
- [5] 胡骏. 航空叶片机原理 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 57-59.
- [6] SENTHIL KUMARAN R, KAMBLE S, SWAMY K M M, et al. Effect of axial velocity density ratio on the performance of a controlled diffusion airfoil compressor cascade [J]. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2015, 32(4): 36.
- [7] 马亚男, 周正贵. 密流比对压气机叶栅性能影响研究 [J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(2): 13-17.
- [8] 刘龙龙, 周正贵, 陶胜. 基于遗传算法的 2 维叶型优化设计 [J]. *航空发动机*, 2014, 40(5): 50-56.
- [9] 张金环, 周正贵. 基于并行遗传算法的向心涡轮气动优化设计 [J]. *航空发动机*, 2015, 41(3): 39-43.

收稿日期: 2023-12-28