◇ 研究报告 ◇

复合材料级联结构宽频吸声性能研究

张俊超1† 陈龙虎2

(1 郑州工业应用技术学院机电工程学院 郑州 451100)

(2 南京大学现代工程与应用科学学院 南京 210000)

摘要:为了有效地抑制宽频强噪声的声辐射,该文设计了多孔材料与亥姆霍兹共振吸声结构的级联吸声结构,声波通过多孔材料后进入低频宽带吸声超材料结构(SHRs),会降低结构的吸声效果,然后对多孔材料与SHRs吸声孔的对应位置进行穿孔,可以在不影响多孔材料高频吸声效果的同时,提升SHRs结构的低频吸声能力。首先,通过理论分析、COMSOL数值模拟与实验测试相结合的方法研究了SHR吸声机理及关键参数对吸声性能的影响规律,设计的低频宽带吸声结构(厚度 60 mm)的仿真与实验结果显示在120~160 Hz频段内的吸声值均大于 0.9。然后设计了多孔材料复合吸声结构(厚度 260 mm),实现了在 100~10000 Hz 频带内的平均吸声系数至 0.97,为工业降噪领域提供了新的解决方式。

关键词:螺旋内插管;多孔材料;复合结构;宽频吸收

中图法分类号: O42 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2024)06-1236-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.006

The broadband sound absorption and insulation properties of composite materials

ZHANG Junchao¹ CHEN Longhu²

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451100, China)

(2 College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to effectively suppress the acoustic radiation of broadband noise, the paper designed a cascade acoustic structure of porous material and Helmholtz resonance acoustic structure. The acoustic wave passes through the porous material and then enters the low-frequency broadband acoustic absorbing metamaterial structures (SHRs), which will reduce the acoustic absorbing holes of SHRs are perforated, which can enhance the low-frequency sound-absorbing ability of the SHRs structure without affecting the high-frequency sound-absorbing effect of the porous materials. Firstly, the sound absorption mechanism of SHR structure and the influence of key parameters on the sound absorption performance were studied through theoretical analysis, COMSOL numerical simulation and experimental test. The simulation and experimental results of the designed low-frequency broadband sound absorption structure (thickness 60 mm) show that the sound absorption value is greater than 0.9 in the frequency band of 120–160 Hz. Then the sound absorption coefficient is 0.97 in the frequency band of 100–10000 Hz, which provides a new solution for industrial noise reduction field. **Keywords:** Spiral intubation; Porous material; Composite structure; Broadband absorption

2023-07-31 收稿; 2023-10-14 定稿

作者简介: 张俊超 (1991-), 男, 河南郑州人, 硕士, 研究方向: 工业材料。

[†]通信作者 E-mail: 004586@zzuit.edu.cn

0 引言

噪声污染无处不在。其中,工业噪声严重影响 着居民区的居民正常生活,危害着人们的生活环境。 噪声包含的高频噪声波长较短,易衰减,但低频噪声 穿透力强,很难进行降噪处理。针对中高频噪声的 吸收,研究学者提出了亥姆霍兹共振腔(Helmholtz resonator, HR)、1/4波谐振器、微穿孔板、弹性膜结 构等吸声结构,主要通过在谐振频率处的强黏性和 热耗散实现噪声的耗散^[1-3]。对于多层微穿孔板型 吸声结构, Ruiz 等^[4-6]利用多级微穿孔板与空腔之 间的串联耦合实现宽频吸声。对于薄膜型声学超材 料, Mei 等^[7] 通过膜结构与空腔之间的声振耦合原 理实现共振频率附近的高效吸声。Yang等^[8]根据 1/4波长原理,设计了不等高波长管阵列结构,在 不同的频带内实现了声波的完美吸收。对于HR结 构, Stinson等^[9-11]对声波在不同谐振腔中损耗影 响因素进行系统的分析,通过对多个不同结构类型 的共鸣腔耦合调控,最终实现了宽频带的高效吸声。 Bi等^[12]通过空间划分和腔室分组来增强插入管型 亥姆霍兹共鸣腔的吸声性能,在400~800 Hz频带 内平均吸声系数达到了0.8,结构厚度为40 mm。Qu 等^[13]提出了一种带有延长颈的耦合亥姆霍兹谐振 器,可有效吸收低振幅和高振幅的宽带声波,设计并 制造了具有多个耦合谐振器的宽带声学超表面,在 700~1100 Hz频带内140 dB条件下平均吸收系数 大于 0.91 (a > 0.97 at 100 dB)。Zhang 等 ^[14] 提出 了一种具有粗糙嵌入颈部的六边形蜂窝夹层板作 为宽带低频吸声的新结构,通过调整颈部的相对粗 糙度来增强颈部的能量耗散,使得结构的吸声峰值 增加并且峰值频率向低频移动。

本文针对低频噪声设计了螺旋形亥姆霍兹共 振腔(Spiral Helmholtz resonance, SHR),采用螺旋 的形式提升插入管的有效传播路径长度,从而使 共振腔谐振频率向低频偏移,调节螺旋的长度和孔 的内径可以对频率进行调谐,最后通过9个共振腔 阵列组合建立了SHRs,并通过COMSOL仿真和阻 抗管测试证明了结构在低频区域具有良好的吸声 效果。在此基础上复合多孔材料,使得整体结构在 100~10000 Hz频带内的平均吸声系数达到0.97。

1 吸声原理分析

基于亥姆霍兹共振吸声原理,声波通过吸声孔 进入空腔,当入射空气与结构声阻抗相匹配时,产生 共振效应,声波在空腔内振荡,与内壁摩擦产生黏热 效应,声能转变为热能耗散掉。当入射声波达到共 振频率时,空腔内部声压的变化会引起空气柱的上 下振荡,大部分声能会被小孔处的黏性边界层所消 耗。因此,入射到结构表面的声能会很大程度上被 结构所吸收^[15-18],通过共鸣腔阵列结构耦合设计, 不同的腔体用于对应频率的吸收,腔体与腔体间相 互耦合可以实现宽频吸声效果。

传统的亥姆霍兹腔体结构对于中频段的噪声 具有优异的吸收效果,但对于低频噪声的吸声效果 较差,因此需要增大谐振腔体的容积或者增加插入 管等方式来调节结构对低频噪声的吸收能力。增大 腔体会很大程度增加结构的占用空间,使得材料失 去亚波长尺度的优势,因此通过调节插入管深入腔 体的长度可以调节谐振腔整体的共振频率。插入管 在有限空间长度时最多只能到达腔体底部,采用螺 旋式插入管可以有效提升插入管的长度,从而提升 低频的吸声效果。SHR结构单元如图1所示。



图 1 SHR 结构单元示意图 Fig. 1 Schematic diagram of SHR structural unit

SHR吸声结构的吸声系数 α 是由声阻抗Z决定^[19]:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - 1}{Z_s + 1} \right|^2,\tag{1}$$

式(1)中,*Z*_s为SHR表面声阻抗。共鸣腔采用嵌入 式颈部,插入管阻抗*Z*_n为

$$Z_n = j\omega\rho_0 l \left\{ \frac{v_0}{j\omega q_0} \left[1 - \chi + \chi \sqrt{1 + \left(\frac{8\alpha_\infty \mu_0}{3\Lambda\sigma}\right)^2 \frac{j\omega}{v_0}} \right] + \alpha_\infty \right\}, \quad (2)$$

式 (2) 中, j 为虚数单位, ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为 声波频率, ρ_0 为空气密度, $\rho_0 = 1.29$ kg/m³, l 为颈 部长度, ν_0 为空气黏度, $\nu_0 = \mu_0/\rho_0$, μ_0 为空气的运 动黏度, $\mu_0 = 1.81 \times 10^{-5}$ Pa·s, Λ 为黏性特征长度, $\Lambda = \sqrt{8\mu_0\alpha_{\infty}/\sigma}$, $\alpha_{\infty} = 1$ 为弯曲度, $\chi = 1$ 为弯曲 系数, σ 为静态流阻率, $\sigma = 32\mu_0/d^2$, q_0 为黏性渗透 值, $q_0 = 32\mu_0/\sigma$, 需对插入管末端的特征阻抗 Z'_n 进 行修正计算:

$$Z'_{n} = Z_{n} + \frac{4\sqrt{2\mu_{0}y}}{d} + 0.85dj\omega\rho_{0}, \qquad (3)$$

式(3)中,y为代表颈部半径与黏性边界厚度比值的 无量纲常数, $y = d\sqrt{\rho_0\omega/4\mu_0}$,孔直径 $d = 2r_1$,插入 管内半径为 r_1 ,腔体特征阻抗 Z_c 为

$$Z_c = -jZ_0 \cot(k_0\delta_1 h), \qquad (4)$$

其中, Z_0 为空气的特征阻抗, $Z_0 = \rho_0 c_0$, $\rho_0 与 c_0$ 分 别为空气密度与声速, k_0 为空气波数, h 为腔体内部 空气域高度, $k_0 = \omega/c_0$, $\delta_1 = (V_c - V_e)/V_c$, V_c 为 腔体部分的空气体积, V_e 为插入管部分的空气体积, $V_c = S_c (L - 2t_1)$, $V_e = S_e (l_e - t_1)$, t_1 为腔体厚度, l_e 为插入管的等效长度, 单个亥姆霍兹共鸣腔表面 声阻抗为

$$Z_s = \delta_2 \left(Z'_n / \phi + Z_c \right) / Z_0, \tag{5}$$

其中, δ_2 为考虑腔体厚度对于表面声阻抗影响的修 正系数, $\delta_2 = S_A/S_c$, S_A 为外部腔体截面积, S_c 为 内部空气腔体截面积, ϕ 为穿孔率, $\phi = S_e/S_c$, S_e 为 插入管截面积,并联后 SHRs 总表面阻抗 Z_u 为

$$Z_u = n\delta \cdot \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{Z_i}\right)^{-1},\tag{6}$$

其中,n为腔体个数,Zi为单个腔体的表面声阻抗。

2.1 SHR 单元结构影响因素分析

SHR单元结构主要参数有插入管内半径 r_1 、插入管外半径 R_1 、插入管的高度 h_1 及长方体谐振腔的长宽高。单个谐振腔的尺寸为50 mm × 33 mm× 33 mm,面板厚度为1.5 mm,底板厚度为1.5 mm, 壁和内插管壁厚均为1.2 mm。采用COMSOL的 压力声学模块进行频域分析,入射声波由空气域 垂直于SHR的表面入射,入射面设置为圆形端口 界面,声压为1 Pa,设置颈部和谐振腔和空气交 界面为热黏性阻抗边界。吸声系数求解公式为 $Ab = 1 - (w_{out}/w_{in}), w_{out}$ 为散射声功率。

插入管外半径受截面尺寸的限制,因此为了 保证插入管的深入长度较大,设定*R*₁为恒定值 12 mm。在谐振腔体尺寸、插入管外半径尺寸一定 的情况下,插入的高度随着螺旋匝数*n*₁的增加而增 高,*n*₁的值表示螺旋的匝数。图2(a)为螺旋插入管



图 2 SHR 单元结构影响因素分析 Fig. 2 Analysis of influencing factors of SHR unit

structure

的深入长度对吸声性能的影响,图2(b)为插入管半 径对吸声性能的影响。

从图2可以看出:随着匝数的增多,插入管深度 的也随之增加,整体共振频率向低频域移动,吸声 带宽变窄,但共振频率处对应的吸声峰值增加,频 率由178 Hz偏移到140 Hz。在 $n_1 = 0.5$ 时,共振峰 值频率为178 Hz,此时声能量主要集中在谐振腔体 内部。随着插入管内半径 r_1 的增加,吸声频率向高 频域移动,频率由114 Hz偏移到238 Hz,吸声带宽 逐渐增大,但共振频率处对应的吸声峰值逐渐下降。 在 $r_1 = 2$ 时,共振峰值频率为114 Hz,此时声能量 主要集中在谐振腔体内部。

2.2 SHRs 低频宽带吸声结构

依据结构属性对吸声频率值的影响规律,设 计了SHRs阵列的低频宽带吸声超材料结构,如 图3(a)所示,材料总厚度60 mm。该结构由9个谐 振腔组成,结构紧凑,每个谐振腔的插入深度不 一,共振频率不同,通过阵列组合成宽频吸声结构。 SHRs低频宽带吸声结构声阻抗如图3(b)所示,在 120~160 Hz频率范围内的声阻趋近于1、声抗趋 近于0时,其阻抗与空气阻抗相匹配,系统发生共 振,此时的吸声能力最强。

为了证明结构设计及仿真计算的准确性,利 用阻抗管法测试法向入射吸声系数,测试标准参 考《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)。测试材料采用3D打印技术制作,测试仪器为边长100 mm的方形阻抗管。COMSOL软件仿真及测试结果如图4





Fig. 3 SHRs low frequency wideband sound absorption structure and impedance characteristics



Fig. 4 Comparison curve between SHRs test sample and experimental simulation results

所示,实验与仿真结果曲线基本一致,在120~ 160 Hz频段内的吸声系数均大于0.9,实现了40 Hz 带宽的低频高效吸收,可以有效吸收掉此频率范围 内的低频宽带噪声。

2.3 SHRs 与多孔材料级联复合吸声结构

SHRs结构在低频内的吸收能力较强,而多孔 材料具有中高频宽带的强吸收效果,于是将SHRs 与多孔材料相结合形成了更加宽频带的吸声材料, 如图5所示。由于多孔材料与SHRs结构之间会存 在阻抗失配的效果,因此分析了不同多孔材料厚度 对吸声曲线的影响,并且对多孔材料进行穿孔,使 得声波更容易通过多孔材料进入谐振腔体内部,从 而提升结构的整体吸声性能。图5(a)为SHRs结构, 图5(b)为穿孔的多孔材料结构,多孔材料类型为三 聚氰胺棉,图5(c)为COMSOL软件仿真模型,最下 层为平面波入射区域,图5(d)为网格划分示意图, 完整网格包含414722个域单元。

三聚氰胺棉的 JCA 模型参数如表1 所示。



(b) 含通孔的多孔材料 (c) COMSOL仿真模型 (d) 网格划分示意图

Fig. 5 SHRs and its porous material cascade structure

	表1	三聚氰胺棉 JCA 模型			
Table 1	JCA	model of melamine cotton			

JCA 模型	流阻率/ (N·s·m ⁻⁴)	孔隙率	曲折度	黏性特征 长度/μm	热特征 长度/μm
三聚氰胺	6414	0.983	1.05	168.9	201.7

2.3.1 通孔直径的影响及阻抗特性分析

保持SHRs结构和三聚氰胺厚度(200 mm)不变,对三聚氰胺棉进行穿孔,仿真结果如图6所示。 相对于只含多孔材料吸声工况,复合结构在SHRs 吸声频段内的吸收效果明显提升。当孔径为0时,吸 声棉会影响 SHRs 结构的低频性能,在120~160 Hz 频带内的吸声值跌至0.8以下。随着穿孔直径的增 加,棉材料对SHRs结构吸声的影响就越小,观察曲 线可以看到穿孔半径由0增大至4 mm时,吸声效 果为整体的提升,但由4 mm 增加到8 mm 时,小于 120 Hz频带内吸声效果会变差,大于120 Hz 频段 吸声性能增强。根据声电类比原理,声阻抗的实部 与虚部分别对应于能量的耗散与存储,想达到完美 声吸声需要在能量耗散与存储中达到平衡,声阻抗 实部和虚部需快速接近1和0。从阻抗曲线也可以 看出声阻在大于100 Hz范围基本稳定在1处,声抗 基本稳定在0处,说明优化后的结构与阻抗匹配,声 波能够很好地进入耦合结构内部,同时能量转换效 率较高,入射声能消散损耗几乎罄尽,证明了SHRs 与多孔吸声材料耦合结构设计的准确性。





Fig. 6 Influence of the diameter of the through hole and impedance curve of cascade structure

2.3.2 多孔材料厚度的影响及实验验证

保持SHRs结构和棉穿孔半径(6 mm)不变,改 变吸声棉厚度,吸声曲线如图7所示。相对于无 多孔材料SHRs结构,厚度增加提升了120 Hz以

图5 SHRs及其多孔材料级联结构

下的吸声效果,同时160 Hz以上的谷位置也逐 渐被填平。其中,在穿孔半径6 mm、吸声棉厚度 200 mm、SHRs结构厚度60 mm、总厚度260 mm时, 在100~10000 Hz频带内的平均吸声系数为0.97,在 100~200 Hz频带内平均吸声系数为0.91。对此结 构进行打样测试,三聚氰胺棉的单块厚度为50 mm, 共计四块层叠,总厚度为200 mm,棉上穿有9个直 径6 mm的通孔,最后一层为60 mm厚度的SHRs 结构。自研阻抗管的测试频率范围为64~3000 Hz, 频率在3 kHz以上的时对应的吸声系数基本为1,在 64~3 kHz频段内仿真与实验曲线的吻合度误差在 ±0.1之间,因此证实了该结构设计的准确性。







3 结论

(1) 基于亥姆霍兹共振结构的吸声原理设计了 SHR型吸声结构,并研究了插入管内半径及插入管 插入深度对吸声性能的影响规律,插入深度越大,插 入管内半径越小,频率向低频偏移。

(2) 通过组合不同吸声频率的谐振腔设计了低频宽带吸声超材料,阻抗管实验结果与COMSOL

数值模拟证明了结构在120~160 Hz 频段内的吸声 值均达到 0.9 以上。

(3)为了提高高频吸声效果,将SHRs与三聚氰 胺吸声材料相结合,对多孔材料进行穿孔解决了吸 声棉对SHRs结构的阻碍,当孔径为6mm的时候整 体的性能最佳,最终实现了在100~10000 Hz频带 内的平均吸声系数至0.97。



- Olsson J, Linderholt A. Low-frequency impact sound pressure fields in small rooms within lightweight timber buildings- suggestions for simplified measurement procedures[J]. Noise Control Engineering Journal, 2018, 66(4): 324–339.
- [2] Groby J P, Huang W, Lardeau A, et al. The use of slow waves to design simple sound absorbing materials[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(12): 124903.
- [3] Jimenez N, Huang W, Romero-Garcia V, et al. Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(12): 121902.
- [4] Ruiz H, Cobo P, Jacobsen F. Optimization of multiplelayer microperforated panels by simulated annealing[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(10): 772–776.
- [5] 闵鹤群, 郭文成. 具有并联不等深度子背腔序列的微穿孔板吸 声体吸声特性 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2017, 47(1): 177–183.

Min Hequn, Guo Wencheng. Absorption characteristics of micro-perforated panel sound absorbers with array of parallel-arranged sub-cavities with different depths[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2017, 47(1): 177–183.

- [6] 刘崇锐, 吴九汇. 微穿孔黏性超表面的低频宽带吸声机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 80-86.
 Liu Chongrui, Wu Jiuhui. Low-frequency broadband absorption mechanism of micro-perforyed lossy metasurface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 80-86.
- [7] Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound[J]. Nature Communications, 2012, 3(3): 756.
- [8] Yang M, Chen S Y, Fu C X, et al. Optimal soundabsorbing structures[J]. Materials Horizons, 2017, 4(4): 673–680.
- [9] Stinson M R, Champoux Y. Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 91(2): 685–695.
- [10] Farzad T, Majid A, Negin S, et al. Low-frequency metamaterial absorber using space-filling curve[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(10): 6451–6459.

- [11] Zhou Z, Huang S, Li D, et al. Broadband impedance modulation via non-local acoustic metamaterials[J]. National Science Review, 2022, 9(8): 171.
- [12] Bi S, Wang E, Shen X, et al. Enhancement of sound absorption performance of Helmholtz resonators by space division and chamber grouping[J]. Applied Acoustics, 2023, 207: 109352.
- [13] Qu R, Guo J, Fang Y, et al. Broadband quasi-perfect sound absorption by a metasurface with coupled resonators at both low-and high-amplitude excitations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 204: 110782.
- [14] Zhang L, Zhang W, Xin F. Broadband low-frequency sound absorption of honeycomb sandwich panels with rough embedded necks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 196: 110311.
- [15] Xie S H, Fang X S, Li P Q, et al. Tunable double-band perfect absorbers via acoustic metasurfaces with nesting helical tracks[J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(5): 76–80.

- [16] 李东庭,黄思博,莫方朔,等.基于微穿孔板和卷曲背腔 复合结构的低频宽带吸声体 [J].科学通报,2020,65(15): 1420-1427.
 - Li Dongting, Huang Sibo, Mo Fangshuo, et al. Lowfrequency broadband absorbers based on coupling microperforated panel and space-curling chamber[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(15): 1420–1427.
- [17] Shao H B, He J C, Zhu J, et al. Low-frequency sound absorption of a tunable multilayer composite structure[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(17–18): 2279–2287.
- [18] Cui H Y, Hu Z P, Hu H M. Research on the low-frequency sound absorption characteristics of coiled Helmholtz cavity acoustic metamaterials[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(8): 1–19.
- [19] Mahesh K, Mini R S. Theoretical investigation on the acoustic performance of Helmholtz resonator integrated microperforated panel absorber[J]. Applied Acoustics, 2021, 178(1): 108012.