几何参数和声虹吸效应对薄膜声学 超材料低频吸声性能的影响

张伟光,闫宛茹,张 健,罗钰尭

兰州交通大学数理学院,甘肃 兰州

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月19日; 发布日期: 2024年7月31日

摘要

针对低频噪声防治问题,本文设计了一种薄膜型声学超材料,质量块选用圆形质量块,分析几何参数对 其吸声性能的影响,同时利用阻抗匹配原理解释了产生吸声峰的原因。研究结果表明:吸收峰主要来源 于薄膜弹性振动;改变薄膜及附加质量的几何参数均会显著改变吸收峰的幅频特征,因此,可针对目标 频谱特性,通过优化薄膜和附加质量的几何参数,有效改善薄膜声学超材料的吸声性能。引入声虹吸效 应能提升了声学超材料低频吸声效果,为声学超材料结构设计与优化方面提供了解决思路。

关键词

膜型声学超材料,吸声特性,声虹吸效应,低频宽带

The Effects of Geometric Parameters and Acoustic Siphon Effect on the Low-Frequency Sound Absorption Properties of Thin Film Acoustic Metamaterials

Weiguang Zhang, Wanru Yan, Jian Zhang, Yuyao Luo

School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 19th, 2024; published: Jul. 31st, 2024

Abstract

Aiming at the problem of low-frequency noise prevention and control, a thin-film acoustic metama-

Hans汉斯

terial is designed in this paper. The circular mass block is selected as the mass block, and the influence of geometric parameters on its sound absorption performance is analyzed. At the same time, the impedance matching principle is used to explain the cause of the sound absorption peak. The results show that the absorption peak mainly comes from the elastic vibration of the film; changing the geometric parameters of the film and the additional mass will significantly change the amplitude-frequency characteristics of the absorption peak. Therefore, the sound absorption performance of the film acoustic metamaterial can be effectively improved by optimizing the geometric parameters of the film and the additional mass for the target spectral characteristics. The introduction of acoustic siphon effect can improve the low-frequency sound absorption effect of acoustic metamaterials, which provides a solution for the structural design and optimization of acoustic metamaterials.

Keywords

Membrane-Type Acoustic Metamaterials, Sound Absorption Characteristics, Sound Siphon Effect, Low Frequency Broadband

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> © Open Access

1. 引言

为解决噪声问题,研究学者针对薄膜声学超材料做了大量研究[1]-[4]。吸声型薄膜声学超材料的研究 始于2012年,梅军等[5]提出了"暗"声学超材料,通过在薄膜上镶嵌新的金属片,可在低频区域100~1000 Hz 有效地吸收低频声波。2014年, Chen 等[6]通过理论分析得出吸声单元上布置的金属片数量会影响吸 收峰的数目,但是单层薄膜吸声超材料的吸声系数不会超过0.5。因此提高吸声系数成为研究的重点,同 年马冠聪等[5]提出了一种杂化共振薄膜型声学超材料结构,通过引入的空腔与黏弹性薄膜上附加质量块 形成杂化共振,使得结构能够在152 Hz 低频处实现声波完美吸收。2019年,Liu 等[7]设计了多元薄膜型 宽频带吸声超材料结构首次提出了多单元薄膜式超材料中的声学虹吸效应,基于声虹吸效应在400~650 Hz 的低频范围内平均吸收系数达到80%,最大吸收系数接近100%,在不增加单位厚度的情况下,提升 了低频吸声效果。本文基于阻抗匹配原理,初步分析吸声型薄膜超材料低频吸声性能的产生机理;并且 利用有限元法,建立声固耦合模型,通过吸声系数、振动模态、比表面阻抗的计算,探究吸收峰的出现 原因和几何参数如何影响结构的幅频特性;最后本文将在膜类声学超材料结构设计中,引入虹吸效应, 以期获得低频宽带的良好吸声效果。

2. 结构设计与计算方法

图 1 所示为单胞薄膜声学超材料的吸声结构,其中图 1(a)中灰色部分为充满空气的背腔,淡黄色部分为矩形硅脂膜、绿色部分为两个半空心圆形铝块。图1(b)是薄膜超材料结构的俯视图,薄膜的长度 W = 36 mm,宽度 L = 30 mm,和厚度 t = 0.2 mm,两个半空心质量块的厚度为 h = 0.2 mm,质量块得半径 r = 7 mm,两个质量块的间距 d = 2 mm,背腔深度 H = 30 mm。薄膜和质量块的材料物理特性参数如表 1 [8]所示。

本文利用 COMSOL Multiphysics 软件中几何非线性单元的声固耦合模块计算吸声系数。薄膜的上侧 区域和背腔被定义为空气介质,空气的密度为 $\rho_0 = 1.255 \text{ kg/m}^3$,声速为 $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 。入射波沿 z 轴的负 方向以平面波的形式从上部空气层垂直进入所设计结构再投射到下部空气背腔,入射波的振幅为 1 Pa。 膜、半空心质量块和框架被定义为固体域,而空气背腔被定义为空气域。



Figure 1. Structure of thin film acoustic metamaterial: (a) front view, (b) top view 图 1. 薄膜声学超材料的结构: (a)正视图, (b)俯视图

Table	1. Structural material parameters of thin film metamaterials [8]	
表1.	薄膜超材料结构材料参数[8]	

材料	杨氏模量/10 ¹⁰ Pa	密度/kg·m ⁻³	泊松比 μ
硅脂膜	1.9	980	0.48
铝质量块	72000	2700	0.35

膜的外边缘设置为固定边界条件,初始张力设置为 $\sigma = 0.12$ MPa,硅胶薄膜这类黏弹性材料,其复 弹性模量设置为 $E = 1.9 (1 + 4.2 \times 10^{-4} \omega_i)$ MPa [8]。吸声系数的定义为声学系统损耗的能量除以入射能量。 基于能量守恒定律,损耗的能量等于总能量减去反射声波能量和透射声波能量之和,但是由于背腔是刚 性材料与空气阻抗相差较大所以被设置为硬声场边界,使得声波无法透射,所以在计算过程中将计算区 域设置为单口端共振体,即透射能量为 0,故损耗能量 W_{diss} 为:

$$W_{\rm diss} = W_{\rm i} - W_{\rm r} \tag{1}$$

式中 W_i为入射声波能量(J); W_r为反射声波能量(J)。以平面辐射边界为积分平面,入射声波总能量 W_i以及反射声波能量 W_r可表示为:

$$W_{\rm r} = \int_{\Omega} \frac{\left|p_{\rm r}\right|^2}{2\rho_0 c_0} \mathrm{d}S \tag{2}$$

$$W_{i} = \int_{\Omega} \frac{|p_{i}|^{2}}{2\rho_{0}c_{0}} dS$$
(3)

式中 p_i 为激励简谐波,其表达式为 $p_i = P_i e^{-ikz}$, p_i 为入射声压幅值(Pa)这里为1Pa; p_r 为反射声压,其表达式为 $p_r = p_s - p_i$ (Pa), p_s 为平面波辐射边界附近总声压(Pa); ρ_0 为空气密度(kg/m³); c_0 为声波在空气中传播速度(m/s); Ω 为积分平面面积,即超材料表面积(m²)。

则吸声系数 α 可表示为:

$$\alpha = \frac{W_{\text{diss}}}{W_{\text{i}}} = \frac{1 - W_{\text{r}}}{W_{\text{i}}} = 1 - R \tag{4}$$

式中为 α 吸声系数, R 为反射系数, 反射系数表达式为: $R = \frac{W_r}{W}$ 。

3. 单胞结构的吸声性能计算

单胞薄膜声学超材料的吸声系数如图 2 蓝色曲线所示,红色五角星为吸声峰值点,绿色菱形为吸声谷。在 200~1000 Hz 声波研究范围内,从低频向高频过渡,共出现了 4 个高吸声峰,所处频率分别为 350 Hz (第一吸声峰)、440 Hz (第二吸声峰)、780 Hz (第三吸声峰)、890 Hz (第四吸声峰),吸声系数分别为 0.95、0.90、0.94 和 0.95。



Figure 2. Sound absorption coefficient of thin film metamaterials 图 2. 薄膜超材料吸声系数

而在频率为 400 Hz、580 Hz 和 825 Hz 处为三个吸声谷的位置,其吸声系数为 0.51、0.21 和 0.82, 仍能对声波进行一定的吸收。本文所设计结构展现出的 4 个吸声峰对应的振动模态分别如图 3 所示,3 个吸声谷对应的振动模态分别如图 4 所示,为了进一步分析单胞薄膜结构的吸声机理,我们对振动模态 进行分析,图中不同颜色代表振动位移幅值的变化。首先,在第一个吸声峰附近,振动主要集中在质量 块与薄膜得耦合处,表现为扭转振动模式[9] [10],此后随着吸声峰的降低,振动呈现以质量块得扭转振 动为主,同时伴随着振动幅值的逐渐变大,最大振动幅值从 3 × 10⁻³ mm 增加到了 3.5 × 10⁻³ mm,在 400 Hz 处振动模式在质量块上下外侧发生明显增大,此时出现第一个吸声谷。

随着频率的进一步增加,振动向质量块左右两侧得薄膜区域进行转移,在440 Hz 处,即第二个吸声 峰位置处,振动集中在质量块与薄膜耦合的中心区域,之后随着频率的增加,主要振动区域主要集中在 质量块左右两侧得薄膜区域的中心区域伴随着振动幅值的增加,在580 Hz 处再次出现吸声谷。此后在高 频位置处出现两个连续吸声峰(780 Hz 和 890 Hz),振动模态进一步发生变化,在 760 Hz 附近以质量块左 右两侧的薄膜的中心区域的整体振动为主,伴有四个角的轻微振动,表现为多阶振动模式[8] [11]。随着 频率的增加,四个角的振动逐渐增加,使得结构出现第三个吸声谷(825 Hz)。在 860 Hz 处振动区域集中 在质量块左右两侧的薄膜的中心区域并且与第三个吸声峰相比薄膜振动的中心区域变大,表现为二阶振 动模式[12] [13]。





780 Hz

Figure 3. Vibration mode diagram at the sound absorption peak frequency of thin film metamaterials 图 3.薄膜超材料吸声峰频率处的振动模态图

890 Hz



Figure 4. Vibration modal diagram of thin film metamaterials at the sound absorption valley frequency 图 4. 薄膜超材料吸声谷值频率处的振动模态图

为了解释上述的情况,我们采用声阻抗吸声理论,从阻抗吸声的角度分析声系统的共振频率,将声系统的吸声系数表示为[8]:

$$A = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2$$
(5)

式(5)中 ρ_0 为背景介质密度 c_0 为背景介质的声速。在本文中,默认的背景介质为空气,因此背景介质 的密度和声速为空气密度和空气声速。共振发生的频率处共振吸声峰的高度取决于声系统的表面阻抗部 分与空气阻抗的匹配程度,只有阻抗匹配完美发生,消除反射的声波,系统才能达到完美的吸收,使吸 声系数达到最大值。公式(5)表明,只有当声系统的表面阻抗与空气阻抗完全匹配时,即 $Z = \rho_0 c_0$,系统才 能完全吸收,使得吸声系数为 1。实际上结构的声阻抗在数学形式上存在实部和虚部,其实部部分代表 能量的"损耗",虚部部分表示能量转化。要想得到完美的吸声就需要将所有的声能进行有效"损耗" 因此阻抗匹配的条件可以进一步表示为:

$$\operatorname{Im}(Z) = 0 \tag{6}$$

$$\operatorname{Re}(Z) = \rho_0 c_0 \tag{7}$$

对本文的结构而言,当吸声系数达到峰值时,结构阻抗虚部为零,也就是能量全部进入结构中进行 了"耗散",没有能量的储存使得声压不产生变化即反射声波的反射为 0。为了更好的表示结构与空气 阻抗的匹配关系我们采用比表面阻抗 Z_{ana} 来表示,表面阻抗可以通过表面声压和声速来定义,因此系统 的比表面阻抗可以表示为[10]:

$$Z_{ana} = \frac{Z}{Z_0} = \frac{P/v}{\rho_0 c_0}$$
(8)

比表面阻抗是复数,当比表面阻抗是纯虚数,这意味着没有能量流入或流出结构,不能流入所预设 方向的部分能量必将散射到其他非预设的方向。如果要求吸声系数为1(即入射场和反射场的压力幅值相 同),则比表面阻抗的实部在整个结构上取正值为1而虚部为0,那就意味着能流将被结构完全吸收[11]。

我们分别画出了吸声峰位置处对应的比表面阻抗的实部和虚部随频率的变化关系,如图 5 所示,红 色线代表比表面阻抗的虚部,黑色线代表比表面阻抗的实部。从图中可以看出,吸声峰值与阻抗实部为 1 虚部为0 的频率位置存在较好的对应关系。但是不难看出,在 a、c、d、峰值位置处,阻抗的实部严格 为1,但是虚部偏离0,b峰值处实部偏离1,它的虚部也与理论分析的0值存在一定的偏离。而结构在 四个共振频率位置处阻抗并没有完全匹配,也揭示了我们所设计结构虽然产生了四个吸声峰,但吸声系 数都没有达到1的原因。

我们进一步探究了关键结构参数对该结构吸声性能的影响。质量块厚度 h 对结构吸声性能的影响如 图 6 所示。可以看出,随着 h 依次从 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm 变化为 0.8 mm,前三个吸声峰出现的频率逐渐向低频移动,吸声系数分别从 0.95 下降到 0.92,0.90 下降到 0.58,0.95 下降到 0.90,吸声系数与 质量块高度呈反比。

但是对第四个吸声峰影响较小。随着质量块厚度的增加,所设计薄膜超材料等效密度增加[11],结构的阻抗增加,进而导致结构与空气的阻抗匹配失调,吸声性能下降。*h* 的增加有利于低频吸声,但伴随着吸声系数的下降,所以 *h* 的选取应综合考虑这两方面因素,应选用适当厚度的质量块,本研究中研究单个单元结构时,选取 *h* = 0.2 mm。

薄膜张力 σ 对结构吸声性能的影响如图 7 所示。相较于质量块的影响,改变薄膜张力对吸声系数影 响较小,但对吸声峰出现频率的影响较大。当薄膜张力σ从 0.11 MPa 增加到 0.17 MPa 时,所有吸声峰



Figure 5. Specific surface acoustic impedance of unit cell structure 图 5. 单胞结构的比表面声阻抗



Figure 6. Sound absorption coefficient under different mass block thickness 图 6. 不同质量块厚度下的吸声系数

的频率同时向高频移动,这是因为随着薄膜张力增加,整个系统的等效刚度增加,系统的固有频率向高 频移动。第一吸声峰的吸声系数随着薄膜张力的增加,出现了先基本保持不变后迅速下降的趋势,这是 因为第一吸声峰的振动是以薄膜带动质量块的振动为主,薄膜张力的增加减弱了质量块部分的振动,整 体阻抗在共振频率下与空气阻抗不能较好地匹配,从而吸声系数下降。而其它三个吸声峰对应振动模态 主要是基于薄膜的振动。因此,适当地降低薄膜张力有利于低频吸声性能的提升。



Figure 7. Sound absorption coefficient under different film tensions 图 7. 不同薄膜张力下的吸声系数



Figure 8. Sound absorption coefficient at different back cavity depths 图 8. 不同背腔深度下的吸声系数

单独的薄膜 - 质量块结构是无法实现完美吸声的,研究背腔深度对声波的吸收作用是有必要的。背腔深度 H 对结构吸声性能的影响如图 8 所示,图 8 为不同背腔深度下的吸声系数曲线,我们可以看出,当背腔深度大于 20 mm 时,随 H 的增加,吸声峰均明显向低频移动,但是峰值逐渐减小,结构展现出较好的吸声性能。这是因为随着背腔深度的增加结构的整体等效刚度减小,从而使频率向低频移动。在结构设计中,一方面我们应尽可能选择背腔深度较小的结构以降低结构厚度,但同时也应该考虑阻抗匹配

的维持结构良好的吸声性能,所以本文中研究单个单元结构时,选用H = 30 mm。

质量块半径对结构吸声性能的影响如图 9 所示,随着质量块半径的增大使得结构吸声峰向低频进行 移动,第二吸声峰逐渐产生,这是因为随着质量块半径的增加使得结构中薄膜划分的区域,单个区域越 来越小,使结构在低频处更容易产生振动,从而使得吸声峰向低频移动,同时在低频处增加了振动形式 从而使得第二峰出现了。





4. 扩胞结构设计和吸声机理讨论

鉴于吸声曲线中吸声峰与吸声谷总是相伴出现,波谷的存在不可避免地导致有效吸收频带变窄,从 而影响吸声效果。为了在低频范围内实现更佳的吸声性能,提升吸声谷的吸声系数成为亟待解决的关键 问题。本文旨在通过协同耦合机制激发的声虹吸效应,优化吸声谷的吸声效果。

我们将结构扩展为两个单元,通过引入声虹吸效应来探究其对结构吸声性能的影响,排列方式如图 10



Figure 10. Dual-unit membrane metamaterial structure 图 10. 双单元膜超材料结构

所示,每个单元的结构参数与上述单胞结构的参数一致,只将图中单元2的薄膜张力从0.12 MPa 改为0.16 MPa,质量块厚度从0.2 mm 改为0.4 mm,背腔深度从30 mm 改为40 mm 计算方式也与前文相同,计算下图的结构。

通过计算获得如图 11 的吸声系数,图中黑色曲线为单个单元的吸声系数,红色曲线为双单元结构的 吸声系数。图 11 的计算结果显示,在 1000 Hz 以下,双单元结构的吸声系数曲线产生了 6 个吸声峰,与 单胞相比增加了 2 个吸声峰整体吸声性能获得了提高。根据平行结构的思想,如果平行布置两个薄膜超 材料结构,每个单元设计的阻抗不同,将增加整体结构的振动模式,从而可以成功获得多个吸声峰。由 于薄膜具有一定的阻尼,并且每个吸声峰都有一定的带宽,当这些相邻吸声峰的带宽相互连接会使吸声 系数曲线在整个频带内更加平滑,从而拓宽了吸声带宽提升了结构的吸声性能。



Figure 11. Sound absorption coefficient of double unit membrane metamaterial structure 图 11. 双单元膜超材料结构的吸声系数

接着我们计算了双单元结构得比表面阻抗并于单个单元结构得比表面阻抗进行了对比如图 12 所示, 我们从图中可以看出,双单元结构比单个单元结构多获得吸声峰的频率处,A 点实部为1 从而有不错的 吸声系数,而 B 点通过观察四条曲线双单元结构的比表面阻抗整体与单个单元结构的比表面阻抗相比更 加匹配,所以获得了一个吸声峰。

这是因为我们设计的双单元结构中产生了声虹吸效应。当特定频率的平面波作用于多单元结构时, 因各单元阻抗各异,导致振动状态不一。相邻单元表面间产生的声压差,进而诱发声虹吸效应。在此效 应下,结构中某一单元能够有效地吸引并集聚大部分入射能量,导致其能量接收增加,质量块振动幅度 相应扩大。这使得整体结构表面的声阻抗与空气阻抗达到更佳的匹配状态,从而促使更多声能转化为弹 性应变能。在结构阻尼的作用下,结构的能量耗散能力得到显著增强。

为了探究声虹吸对我们结构的影响,对双单元膜超材料结构吸声系数曲线中所取的点的振动模态进行分析,如图 13 所示,图中振动模态图上看,吸声峰的位置振动主要集中在某个腔体中,可以明显的看出结构产生了声虹吸效应,使得结构在该点处的吸声系数没有明显的下降。



Figure 13. Vibration mode diagram corresponding to the point position of sound absorption coefficient curve of double unit membrane metamaterial structure

图 13. 双单元膜超材料结构的吸声系数曲线点位对应振动模态图

5. 结论

在本研究中,改变圆形质量块薄膜声学超材料结构的几何参数(质量块的厚度和半径、薄膜张力和背 腔深度)对结构的吸声性能进行了研究,结果表明,随着质量块厚度的增加能够使结构吸声系数前三个吸 声峰逐渐向低频移动,而随着薄膜张力的增加能够使结构整体的吸声系数向高频移动,随着背腔深度和 质量块半径的增加吸声峰均明显向低频移动,当背腔深度大于 20 mm 时,结构展现出较好的吸声性能。 充分考虑多个单胞之间的耦合效应,引入声虹吸效应,可以在理论上无限拓宽吸声带宽,就可以获得低 频宽频带的良好吸声效果,为噪声的控制方面提供了良好的思路。

参考文献

- [1] 吴宗汉, 徐世和. 声学超材料与结构工程应用前景展望[J]. 电声技术, 2017, 41(9): 16-27.
- [2] 吴九汇,马富银,张思文,等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述[J]. 机械工程学报,2016,52(13):68-78.
- [3] 曹尔泰, 延浩, 黄河源. 飞行器舱室内壁蛛网仿生薄膜声学超材料设计[J]. 航空科学技术, 2024, 35(3): 11-19.
- [4] 夏百战,杨天智. 声学超材料和声子晶体研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(7): 1-4.
- [5] Mei, J., Ma, G., Yang, M., Yang, Z., Wen, W. and Sheng, P. (2012) Dark Acoustic Metamaterials as Super Absorbers for Low-Frequency Sound. *Nature Communications*, **3**, Article No. 756. <u>https://doi.org/10.1038/ncomms1758</u>
- [6] Chen, Y., Huang, G., Zhou, X., Hu, G. and Sun, C. (2014) Analytical Coupled Vibroacoustic Modeling of Membrane-Type Acoustic Metamaterials: Membrane Model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136, 969-979. <u>https://doi.org/10.1121/1.4892870</u>
- [7] Ma, G., Yang, M., Xiao, S., Yang, Z. and Sheng, P. (2014) Acoustic Metasurface with Hybrid Resonances. *Nature Materials*, 13, 873-878. <u>https://doi.org/10.1038/nmat3994</u>
- [8] Liu, C.R., Wu, J.H., Lu, K., Zhao, Z.T. and Huang, Z. (2019) Acoustical Siphon Effect for Reducing the Thickness in Membrane-Type Metamaterials with Low-Frequency Broadband Absorption. *Applied Acoustics*, 148, 1-8. <u>https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.008</u>
- [9] 王家声, 刘艳, 李秋彤, 等. 材料与几何参数对薄膜超材料吸声性能的影响[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 54-59.
- [10] Li, Y. and Assouar, B.M. (2016) Acoustic Metasurface-Based Perfect Absorber with Deep Subwavelength Thickness. *Applied Physics Letters*, **108**, Article ID: 063502. <u>https://doi.org/10.1063/1.4941338</u>
- [11] 陈传敏, 乔钏熙, 郭兆枫, 等. 半主动式薄膜型声学超材料超低频隔声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 60-65.
- [12] 张健,周奇郑,王德石,等. 局域共振型薄膜材料隔声机理与调控规律研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 234-240.
- [13] 周国建,吴九汇,路宽,等.多态反共振协同型薄膜声学超材料低频隔声性能[J].西安交通大学学报,2020, 54(1):64-74.