

表面张力对薄膜型声学超材料隔声性能的影响^{*}

姬艳露,吕海峰,刘继宾

(中北大学 机械工程学院,太原 030051)

摘 要: 目前许多对于薄膜型声学超材料隔声性能的研究仅限于数值方法,其结构参数可以很方便的调节,但缺乏必要的实验验证。因此,从有限元仿真和实验验证两个角度出发,主要研究了弹性薄膜的表面张力对由它和质量块组合而成的薄膜型声学超材料的隔声性能的影响。采用 COMSOL Multiphysics 软件对薄膜型声学超材料进行声学仿真研究,通过所得到的传递损失曲线能够更直观和方便地分析声波通过薄膜型声学超材料后对声音衰减的效果,并采用驻波管法对薄膜型声学超材料的隔声性能进行实验验证。结果表明,随着薄膜表面张力的增大,其传递损失峰值所对应频率向高频移动,且吸声系数峰值增多,所对应的频率范围增大。

关键词: 薄膜型声学超材料;隔声;有限元分析

中图分类号: TB535

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2019.01.018

0 引 言

薄膜型声学超材料(MAMs)是一种新型的人工复合型材料,能够在低频范围内有效阻隔声音的传播^[1]。传统的隔声材料,由于遵循质量作用定律,其在噪声频率较高、材料厚度较大时,才会产生较大的隔声量^[2]。而薄膜型声学超材料,其厚度不到 1 mm 即可实现较大的低频隔声量,为低频噪声问题开启了一条新的研究方向^[3]。在汽车以及航空航天等领域中,对隔声材料的尺寸以及大小、重量等要求都非常严格,因此薄膜型声学超材料具有广泛的应用前景^[4-5]。薄膜型声学超材料是由一个或多个微小中心质量块粘结在薄膜上组成的一个呈二维周期性排列的阵列结构^[6-8]。目前的研究表明,用于衡量隔声降噪效果的传递损失(TL)一般和薄膜型声学超材料的若干种参数有关,主要包括几何尺寸、质量块的分布、中心质量块的质量,薄膜厚度和薄膜预应力大小等微结构参数特征。同时对附加质量块非中心布置和多质量块布置对薄膜型声学超材料的声学传递特性的影响也有了一些研究成果^[9],但缺乏实验验证,本文在现有成果基础之上,通过有限元仿真和实验对比来研究由弹性薄膜和质量块构成的薄膜型声学超材料的隔声特性。

1 理论介绍

1.1 薄膜的振动方程

为探究薄膜的振动特性,需要对薄膜进行受力分析。薄膜所受的内力只有薄膜张力,设单位长度上的薄膜张力为 T ,薄膜单位面积上的质量为 ρ 。取薄膜上平衡位置在 xy 平面内的一个微元体,对其进行受

力分析,该微元体的受力分析如图 1 所示。

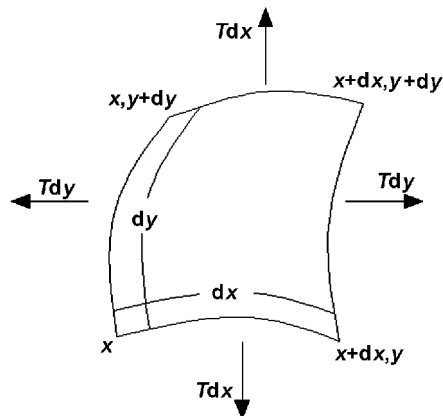


图 1 微元体受力分析图

Fig 1 Analysis of microelement stress

设薄膜处于张紧状态并处于平衡位置。在薄膜上划一条直线,则薄膜会在直线两边受到相互牵引的作用力,薄膜张力即为每单位长度直线所受的牵引力。设张力在整个薄膜上为常数 T ,单位为 N/m。当薄膜受到一个与 xy 面相垂直方向的外力扰动后,薄膜就会凸起或者凹陷,在张力 T 作用下产生垂直方向的横向振动,其恢复平衡的力主要为张力。在薄膜上取一个微元 $dx dy$,如图 1 所示。当该微元发生形变时,在其边缘都要受到相应的张力作用^[10]。作用在微元上的张力与其切线方向一致,张力 T 与 x 坐标成 α 角,因此在 x 端作用在该微元上的张力垂直分量为 $T \sin \alpha$,由于其为对小振动情形, α 较小,取

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha$$

设 η 为膜上一点离开平衡位置的垂直方向位移,有

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305409);山西省青年科技研究基金资助项目(2013021020-2)

收到初稿日期:2018-07-30

收到修改稿日期:2018-11-29

通讯作者:吕海峰,E-mail: lvhaifeng@nuc.edu.cn

作者简介:姬艳露 (1993-),女,山西高平人,在读硕士,师承吕海峰副教授,从事振动与噪声控制研究。

$$\tan \alpha = T \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_x$$

于是作用在整个 dy 边缘上的垂直方向的力为 $T \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_y dy$, 而在 $x + dx$ 端的垂直方向力应为 $T \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{x+dx} dy$, 由此得作用在该微元的 x 与 $x + dx$ 边缘上垂直方向的合力为

$$T \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{x+dx} dy - T \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_x dy = T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) dx dy \quad (1)$$

同理可得, 作用在另外两边的垂直合力为

$$T \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)_{y+dy} dx - T \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)_y dx = T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (2)$$

所以作用在整个面元上的总垂直力为

$$F_z = T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (3)$$

设 σ 为薄膜的面密度, $\sigma dx dy$ 为微元的质量, 由牛顿第二定律可得微元的运动方程

$$T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) dx dy = \sigma dx dy \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}$$

经整理可得薄膜的振动方程^[10]

$$\nabla^2 \eta = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中

$$c = \sqrt{\frac{T}{\sigma}}, \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

1.2 圆膜振动的等效集中参数

圆膜的振动位移与径向位置有关。圆膜振动时, 不同径向位置的位移是不同的。

$$\overline{E_{kn}} = \int \overline{dE_{kn}} = \frac{1}{2} \pi \sigma \omega_n^2 A_n^2 J_0^2 \left(\frac{\mu_n}{\alpha} r \right) r dr = \frac{1}{4} (\pi \alpha^2 \sigma) \omega_n^2 A_n^2 J_1^2(\mu_n) \quad (8)$$

其中, $J_1(\mu_n)$ 为一阶柱贝塞尔函数。

把膜的振动等效为圆心处有一等效的集中质量 M_{en} 在等效集中弹簧 K_{en} 作用下进行振动, 在 $r=0$ 处的振动位移为

$$\eta_{n(r=0)} = A_n \cos(\omega_n t - \varphi_n) \quad (9)$$

振速为

$$v_{n(r=0)} = \left(\frac{\partial \eta_n}{\partial t} \right)_{(r=0)} = -A_n \omega_n \sin(\omega_n t - \varphi_n) \quad (10)$$

等效平均动能为

$$\overline{E_{kn}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{M_{en}}{2} \left(\frac{\partial \eta_n}{\partial t} \right)_{(r=0)}^2 dt = \frac{1}{4} M_{en} \omega_n^2 A_n^2 \quad (11)$$

有式(7)=式(11), 可得圆膜的等效质量为

$$M_{en} = m J_1^2(\mu_n) \quad (12)$$

其中

$$m = \pi \alpha^2 \sigma$$

为膜片的实际质量。

对于不同的振动方式其等效质量并不相同

$$M_{e1} = m J_1^2(2.045) = 0.27 m$$

等效集中参数, 是指一个分布参数系统的动能和位能与另一个与其等效的集中参数相等, 因此其质量和弹性系数即为该分布参数系统的等效参数^[11]。因此需要计算分布系统的动能或位能。在圆膜上取一个径向距离为 $(r, r+dr)$ 的一个微元, 如图2所示。

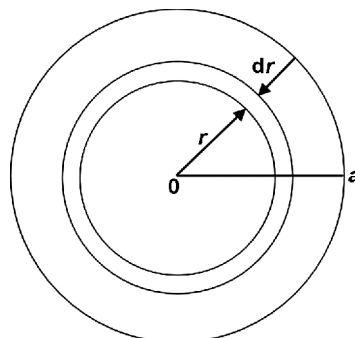


图2 等效集中参数示意图

Fig 2 Equivalent set parameter

该微元的质量 $2\pi\sigma r dr$, 第 n 次振动方式的振动动能为

$$dE_{kn} = \frac{1}{2} (2\pi\sigma r dr) \left(\frac{d\eta_n}{dt} \right)^2 \quad (5)$$

进行一个周期时间的平均可得

$$\overline{dE_{kn}} = \frac{1}{T} \int_0^T \pi \sigma \left(\frac{d\eta_n}{dt} \right)^2 r dr dt \quad (6)$$

将圆膜自由振动的位移方程代入式(6)可得

$$\overline{dE_{kn}} = \frac{1}{2} \pi \sigma \omega_n^2 A_n^2 J_0^2 \left(\frac{\mu_n}{\alpha} r \right) r dr \quad (7)$$

其中, A 为常数, J_0 为零阶柱贝塞尔函数, η_n 为函数的根, α 为薄膜的周界半径。因而整个圆膜的第 n 次振动的平均动能就等于

$$M_{e2} = m J_1^2(5.520) = 0.12 m$$

已求出圆膜的等效质量 M_{en} , 也可求得等效弹簧的等效弹性系数 K_{en} , 对于集中参数系统振动的固有频率可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}}$$

由此可以类比得到等效的弹性系数为

$$K_{en} = \omega_n^2 M_{en} = m \omega_n^2 J_1^2(\mu_n) \quad (13)$$

设在圆心处等效质量为 M_{e1} , 等效弹性系数为 K_{e1} , 在该处附加一质量 M_m , 因而等效总质量为 $M_{e1} + M_m$, 利用集中参数系统的固有频率关系可得

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{e1}}{M_{e1} + M_m}} \quad (14)$$

由式(14)可知, 可通过在圆心处附加质量来使系统固有频率降低。

2 薄膜型声学超材料单胞结构仿真分析

2.1 材料参数及制备方法

本文所采用的薄膜型声学超材料模型如图3所示。

薄膜型声学超材料的弹性薄膜使用匀胶机 100~240VAC 进行制备。匀胶机的工作原理:接通电源,匀胶机旋转并产生离心力,使胶液均匀甩开并平铺到基

底表面上。匀胶机主要包括控制器和甩胶处理腔体两部分,甩胶处理腔体用于放置胶液托盘,控制器是通过电控调速技术来控制托盘的转速,从而带动匀胶机产生不同的旋转速度。本文使用匀胶机的高、低两个档位,低速档用于甩开胶液,用 500 r/min。高速档用于均匀涂布,用 1 000 r/min,设置时间均为 30 s 得到的弹性薄膜厚度为 0.4 mm。

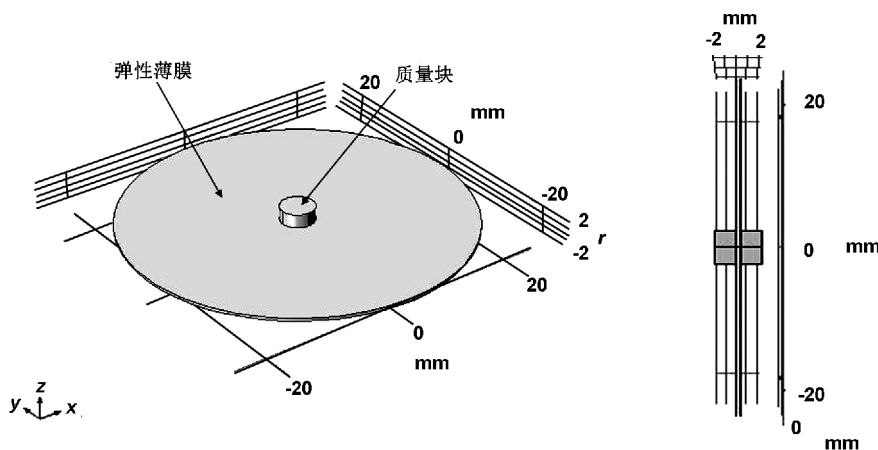


图3 薄膜型声学超材料结构示意图

Fig 3 The structure of membrane-type acoustic metamaterials

研究薄膜型声学超材料的声学性能,首先要保证薄膜必须完整,而且不能有大量气泡或者厚度不均匀的现象,因此就需要对薄膜制备环节进行严格控制。按硅胶固化剂配比 100 : 3 的质量比例称取硅胶和固化剂,倒入一次性纸杯中,并搅拌均匀并静置 5 min,取一张与所需制备薄膜大小相当或者较大的且平整无褶皱的硫酸纸作为基底,将静置好的胶液倒在硫酸纸基底上,分别设置低速档和高速档的转速和时间进行旋涂,达到设定时间后,静置 30 min,将旋涂层与硫酸纸剥离,即可得到实验所需弹性薄膜。

薄膜制备过程中在不同转速下可得到的薄膜厚度不同,由于本设备低速档最低为 500 r/min,设置时间均为 30 s,高速档的转速和时间不同则所制备的薄膜厚度不同如表1所示。

表1 不同转速所得薄膜厚度

Table 1 Membrane thickness obtained at different speeds

转速/ $r \cdot \min^{-1}$	高速档	
	时间/s	薄膜厚度/mm
1 000	30	0.4
1 200	40	0.3
1 300	40	0.25
1 400	60	0.2

在制备完成的弹性薄膜两个面中心各放置一个规格相同的小质量块就构成了本文所研究的薄膜型声学超材料。实验所采用薄膜型声学超材料各部分材料参数如表2所示。

表2 薄膜型声学超材料各部分材料参数表

Table 2 Parameters of each part of membrane-type acoustic metamaterials

材料参数	直径/mm	厚度/mm	弹性模量/Pa	泊松比	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
弹性薄膜(硅橡胶)	50	0.4	2×10^5	0.49	1 200
质量块(钕铁硼磁铁)	5	2	1.6×10^{11}	0.28	7 400

2.2 模态分析

对薄膜型声学超材料进行声固耦合模拟,必须要考虑到声波会对刚度较小的弹性薄膜产生一定的影响,因此在进行声场仿真之前需要对薄膜型声学超材料胞元结构的振动进行分析,得到其前几阶本征振动模态,以此来研究其在某些频段声波作用下的响应形态^[12]。

在 COMSOL 软件中建立薄膜型声学超材料单胞

模型,对其进行模态仿真分析,结果如表3所示,取前六阶振动模态进行分析,各阶振动模态图如图4所示。

从模态云图可以看出,在所有振动模态中,在薄膜固定位置处薄膜型声学超材料的振动都很小,由于质量块刚度较大,因此振动幅度较小。其薄膜固定位置内侧和质量块外围的弹性薄膜的振动幅度较大。现对前六阶振动模态进行分析,由仿真可知前六阶振动模态对应的各阶频率分别为 2.3632, 8.9879, 8.9905,

14.806, 18.435 和 18.44 Hz, 由于薄膜型超材料单胞结构对称, 所以第二阶与第三阶、第五阶与第六阶的本征频率非常接近, 并且振型也类似, 只是在振动方向上有所区别^[13]。第一阶模态, 弹性薄膜与质量块一起上下振动; 第二阶模态和第三阶模态, 质量块引起弹性薄膜沿着某一个方向上的振动, 此为弯曲振动; 第四阶模态, 质量块保持不动, 而薄膜固定位置内侧和质量块外侧的薄膜振动幅度较大; 第五阶模态和第六阶模态, 质量块引起弹性薄膜在两个方向上的振动, 与第二阶模

态和第三阶模态类似, 为弯曲振动。

表 3 前十阶振动模态频率

Table 3 The first ten vibrational modal frequencies

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
一阶	2.3632	六阶	18.44
二阶	8.9879	七阶	20.129
三阶	8.9905	八阶	20.148
四阶	14.806	九阶	25.512
五阶	18.435	十阶	25.522

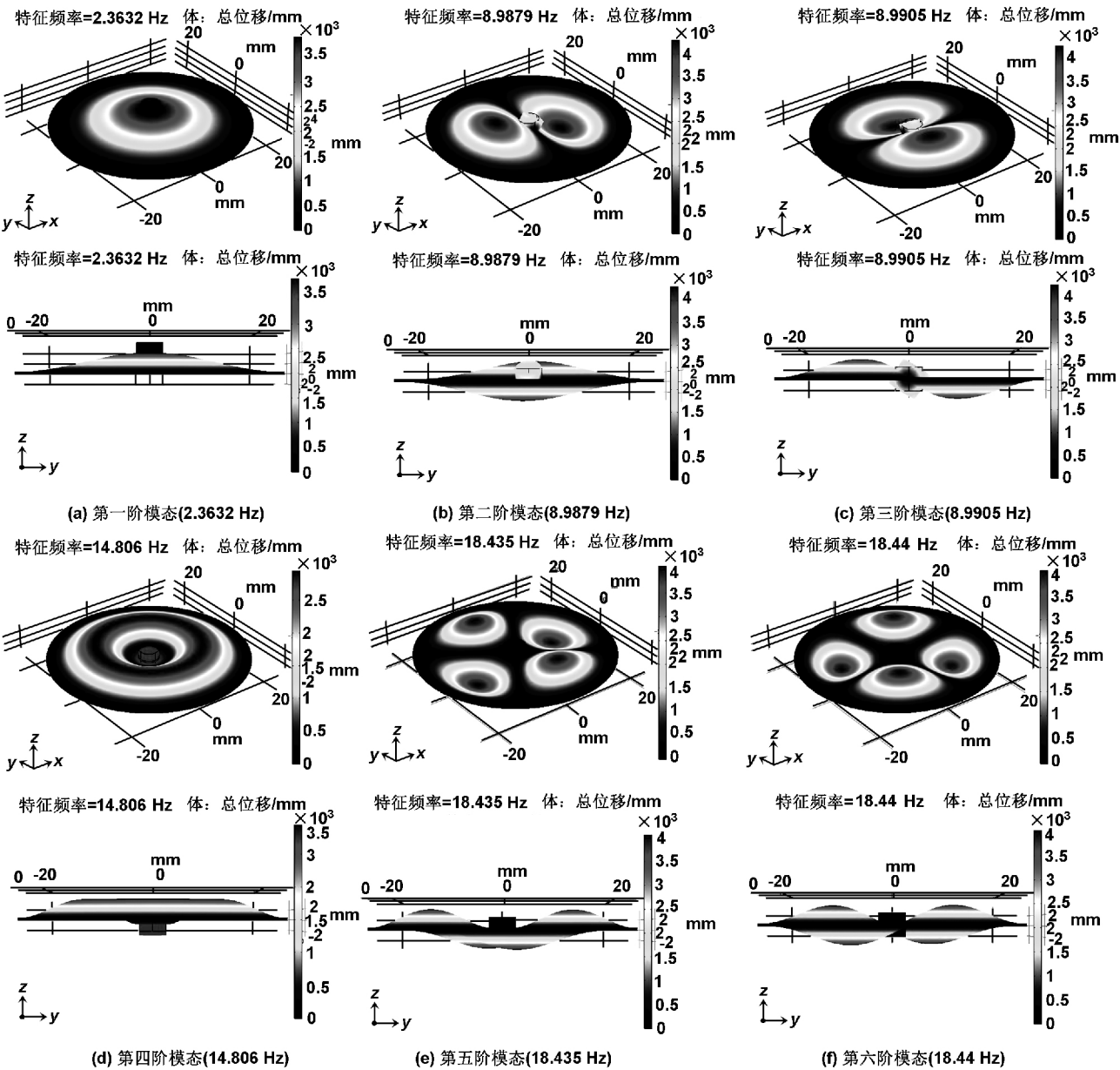


图 4 薄膜型声学超材料单胞前六阶振动模态云图

Fig 4 Six-order vibration mode cloud map for single cell of membrane-type acoustic metamaterials

2.3 单胞的隔声性能仿真

为验证该薄膜型声学超材料的隔声特性, 本文建立了薄膜型声学超材料胞元的仿真模型, 如图 5 所示。

薄膜型声学超材料被安放在空气腔的中央, 平面波从声波入口入射, 一部分声波由声学超材料单胞反射回来, 一部分声波能量局限在声学超材料单胞中, 还有一部分声波穿过声学超材料单胞继续向右传播^[14]。

由于主要研究薄膜型声学超材料对不同频率声波的隔声性能, 与声波强度无关, 因此设置入射平面波声压为 1 Pa。模型声波入口处采用平面波声波入射, 声波出口处设定为无反射边界条件。然后对薄膜型声学超材料单胞进行网格划分, 空气腔、中心质量块以及弹性薄膜的总单元个数为 22 000。利用声固耦合模拟方法, 在平面波入射边界和无反射边界分别对声波功率进行

面积积分,代入传递损失计算公式中,获得平面波通过薄膜型声学超材料的传递损失(即传输损耗),其仿真结果如图 6 所示。

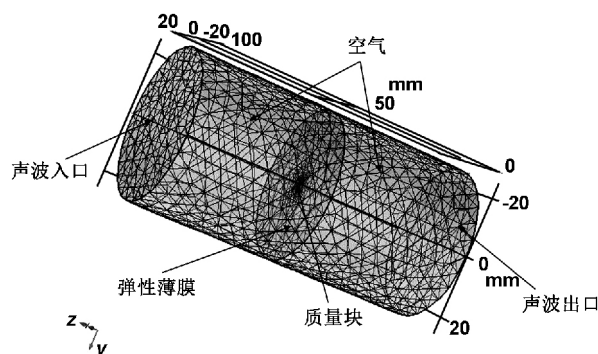


图 5 单胞仿真模型

Fig 5 Simulation model of single cell

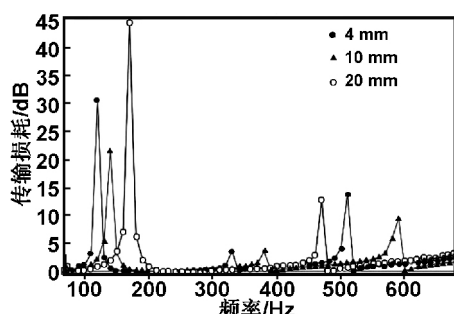


图 6 传递损失曲线图

Fig 6 Transmission loss curve

从图 6 可以看出,随着弹性薄膜的张紧程度越来越大,其主要的(第一个峰值)传递损失峰值对应的频率向高频移动,这是由于薄膜张力引起的共振频率的变化。

3 薄膜型声学超材料声学性能测试

本文采用阻抗管法对薄膜型声学超材料的声学性能进行测试,实验平台如图 7 所示。包括直流电源、扬声器、数据采集卡、阻抗管、传声器以及薄膜型声学超材料等部分。通过检测正弦波声源经过薄膜型声学超材料后的吸声系数大小,进而判断声音在通过薄膜型声学超材料时是否达到消声效果。

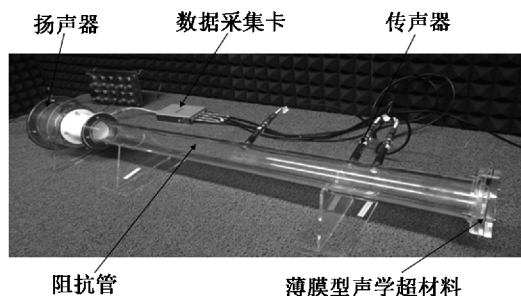


图 7 薄膜型声学超材料隔声性能测试实验平台

Fig 7 Experimental platform for testing acoustic insulation performance of membrane-type acoustic metamaterials

为便于安装,实验中采用 10 mm 的后腔,将半径为 30 mm 的弹性薄膜分别拉伸 0, 4, 10, 20 mm, 在弹

性薄膜中心加一直径为 5 mm, 厚度为 2 mm 的质量块,测量薄膜型声学超材料的声学特性,结果如图 8 所示。研究发现,在对弹性薄膜进行拉伸后,由于膜上的不同张力和相应的结构改变,膜的共振发生了变化^[15]。没有预拉伸的情况下只有一个共振峰,增加了薄膜上的预应力,会出现更多的共振峰。然而当拉伸长度增加时,主共振峰区域由低频移至高频(与声学仿真相吻合)。这一现象表明,通过改变薄膜的张紧程度可以控制薄膜型声学超材料,而且,不同的拉伸长度意味着弹性薄膜不同的内应力,因此对弹性薄膜内应力的改变都会导致相应的共振频率的变化。

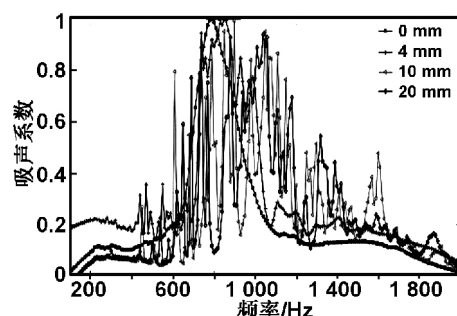


图 8 吸声系数实验结果图

Fig 8 Experimental results of sound absorption coefficient

薄膜拉伸长度与对应的频率范围如表 4 所示。

表 4 薄膜拉伸长度与吸声系数 > 0.6 所对应的频率范围表

Table 4 Frequency range of membrane with tension length and sound absorption coefficient greater than 0.6

薄膜拉伸长度/mm	频率范围/Hz	频率/Hz
0	700~920	220
4	730~1 020	290
10	760~1 090	330
20	770~1 110	340

4 结 论

以薄膜型声学超材料为研究对象,通过有限元方法分析了弹性薄膜表面张力对其消声特性的影响,通过 COMSOL 进行有限元仿真,并采用阻抗管法进行实验。得到结论如下:

(1) 随着薄膜张力增大,传递损失峰值对应的频率向高频移动;

(2) 弹性薄膜在没有施加预拉伸的情况下,只有一个共振峰,随着弹性薄膜拉伸长度的增加,吸声系数峰值增多,主共振峰值区域由低频移向高频。

参考文献:

- [1] Ye Chao, Su Jilong. Effect of microstructure parameters of membrane-type acoustic metamaterials on acoustic insulation performance [J]. Journal of Noise and Vibration Control, 2017, 37(1): 163-166(in Chinese).

叶 超, 苏继龙. 薄膜型声学超材料微结构参数对其隔声

- 性能的影响[J].噪声与振动控制, 2017, 37(1):163-166.
- [2] Cao Rui. Study on acoustic insulation properties of membrane-type acoustic metamaterials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
曹 瑞. 薄膜型声学超材料隔声性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] Jia Yuqi, Feng Tao, Yang Menglu, et al. Study on acoustic insulation measurement of silicon film acoustic metamaterials single cell structure [J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(01):1108-1111(in Chinese).
贾玉麒, 冯 涛, 杨梦露, 等. 硅胶薄膜声学超材料单胞结构的隔声测量研究[J]. 功能材料, 2018, 49(01):1108-1111.
- [4] Zhou Zhuohui, Huang Daqing, Liu Xiaolai, et al. Advances in the application of metamaterials in broadband microwave attenuation absorbing materials [J]. Journal of Material Engineering, 2014(5):91-96(in Chinese).
周卓辉, 黄大庆, 刘晓来, 等. 超材料在宽频微波衰减吸收材料中的应用研究进展[J]. 材料工程, 2014(5):91-96.
- [5] Zhou Qiang. Research on acoustic active control technology based on metamaterials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
周 强. 基于超材料的声波主动控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [6] Chen Y, Huang G, Zhou X, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: plate model[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(3):2926.
- [7] Xu Yayuan. Low frequency noise reduction technology based on membrane-type acoustic metamaterials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016(in Chinese).
徐亚运. 基于薄膜型声学超材料的低频降噪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] Yang Z, Dai H M, Chan N H, et al. Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50-1000 Hz regime [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(4):1833.
- [9] Zhang Jing. Study on mechanical properties of membrane-type acoustic metamaterials plates [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
张 晶. 薄膜声学超材料板的力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] Xu Xiaomei. Fundamentals of acoustic [M]. Beijing: Science Press, 2013(in Chinese).
许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [11] Du Gonghuan, Zhu Zhemin, Gong Xiufen. Fundamentals of acoustic [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012(in Chinese).
杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [12] Ang L Y L, Yong K K, Lee H P. Sound transmission loss of a large-scale meta-panel with membrane acoustic metamaterial[C]. Australia: The Australasian Acoustical Societies Conference, 2016.
- [13] Zhang Weiquan, Wu Jiuhui, Ma Fuyin, et al. Tension dependence of low frequency sound insulation performance of thin membrane [J]. Journal of Vibration Engineering. 2016, 29(4):616-622(in Chinese).
张炜权, 吴九汇, 马富银等. 薄膜低频隔声性能的张力依赖性[J]. 振动工程学报, 2016, 29(4):616-622.
- [14] Yu X, Lu Z, Cui F, et al. Tunable acoustic metamaterial with an array of resonators actuated by dielectric elastomer[J]. Extreme Mechanics Letters, 2016, 12:37-40.
- [15] Lu Z, Cui Y, Zhu J, et al. Acoustic characteristics of a dielectric elastomer absorber [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(5):4218.

Effect of surface tension on acoustic insulation performance of membrane-type acoustic metamaterials

Ji Yanlu, LYU Haifeng, LIU Jibin

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: At present, many researchers on the sound insulation performance of membrane-type acoustic metamaterials are limited to numerical method, and its structural parameters can be adjusted conveniently, but lack necessary experimental verification. Therefore, in this paper, the influence of surface tension on the acoustical properties of elastic membrane, composed of elastic membrane and mass blocks, was mainly studied. The finite element simulation and experimental verification of membrane-type acoustic metamaterials are studied. COMSOL Multiphysics software was used to conduct acoustic simulation research on membrane-type acoustic metamaterials, and the transmission loss curve obtained could more directly and conveniently analyze the sound attenuation effect of sound waves after passing membrane-type acoustic metamaterials. The sound insulation performance of membrane-type acoustic metamaterials was experimentally verified by standing wave tube method. The results show that with the increase of the tension of the membrane, the peak of transmission loss moved towards high frequency, and the peak of sound absorption coefficient and the corresponding range of sound attenuation frequency increased.

Key words: membrane-type acoustic metamaterials; sound insulation; finite element method