



陕西师范大学
SHAANXI NORMAL UNIVERSITY

本科生交叉实验论文(设计)

题目: 复合材料的吸声隔声性能测试分析

| | |
|----------|-----------------|
| 作者单位 | 陕西师范大学 |
| 作者姓名 | 陈杰、张庆、艾昕岳、张秋艳 |
| 专业班级 | 2017级物理学(创新实验班) |
| 指导教师(职称) | 高洁 |

2021年1月

摘 要

噪声防治是现代工程建设的重点，在噪声防治中，低频噪声因其波长较长，在介质中传播的过程中难以衰减，使其成为噪声防治的难点。本文基于相关文献调研，将薄膜共振吸声特性与Helmholtz腔相结合，形成一种复合结构腔，利用腔体内共振吸声特性，实现低频、高效、宽带的吸声性能，在实验测试中，发现以下规律：1. 可在Helmholtz腔表面开小孔，降低本身共振频率。2. 在组合型结构表面施加一定吸声棉，可使结构兼具吸声特性与共振吸声。3. 在薄膜表面附加偏心质量块，可在一定程度上促使吸声峰值频率向低频移动。4. 对于薄膜的类型、层数、薄膜的张紧程度也存在一定的影响，当薄膜较松弛，弹性模量较小，层数越多时，结构具有更好的性能。相应规律可为进一步探究复合结构的共振吸声提供一定的指导。

关键词：隔声，吸声，声学超材料，亥姆霍兹腔

目录

| | |
|------------------------|----|
| 摘要..... | I |
| 1 绪论..... | 5 |
| 1.1 背景介绍..... | 6 |
| 1.2 相关领域研究概述..... | 6 |
| 1.3 本文研究的内容..... | 7 |
| 2 复合材料及其吸声机理..... | 7 |
| 2.1 吸声材料..... | 7 |
| 2.2 亥姆霍兹腔和超材料相关特性..... | 8 |
| 3 复合材料及其隔声降噪机理..... | 13 |
| 3.1 隔声材料..... | 13 |
| 3.2 复合材料隔声机理..... | 14 |
| 4 吸声隔声性能的测试..... | 15 |
| 4.1 吸声测试原理..... | 15 |
| 4.2 隔声测试原理..... | 17 |
| 5 复合材料吸声隔声性能的测试分析..... | 21 |
| 5.1 吸声性能测试..... | 23 |
| 5.2 隔声性能测试..... | 24 |
| 5.3 实验测量样品及性能..... | 25 |
| 6 研究结论..... | 27 |
| 参考文献..... | 28 |
| 附录..... | 29 |

1. 绪论

1.1 背景介绍

环境噪声污染被认为是现代城市的四大公害之一，其对人类的神经系统，听觉系统，心理等方面均有不同程度的负面影响，轻则造成头晕、听力下降、心情烦躁等影响，若长期处于高强度噪声环境中可造成神经衰弱，神经功能紊乱，失聪等影响。目前我国大约有 70% 的城市人口受到高噪声的危害，在全国监测的 70 个城市中仅有 60% 的主要城市达标，而一般城市仅有 33% 达到噪声控制标准。在我国城市噪声源中有 30% 以上来自交通噪声，27% 来自工业噪声，生活噪声在城市噪声源中占比约 40% 以上，且不断有上升的趋势，我国城市区域环境噪声达标率不到 50%，90% 的城市道路交通噪声超过 70 dB(A)，社会生活噪声呈显著上升趋势。因此噪声防治成为工程建设中的一项重要任务。在噪声防治中，对低频噪声，因其波长较长，在介质中传播过程中难以衰减，使其成为噪声防治的难点。

目前常用于实现低频吸声的结构是亥姆霍兹共振腔，与亥姆霍兹共振腔组合的复合结构的材料在隔声吸声性能方面表现出优越的性能；对带背腔的材料，由于声波在空腔内能形成共振，因而能提升材料的吸声性能和隔声性能。此外，声学超材料，由于它结构尺寸单元远小于声波波长，这种特点使得波在超材料中传播时，无法分辨它的结构，可将超材料视为均匀介质，并利用等效参数(等效介电常数，等效质量密度等)来进行描述，且能够实现声波的负折射，声聚焦，超透镜，隐身等许多新奇特性，此外声学超材料：具有负等效质量密度, 负等效弹性模量, 可以有效控制低频噪声，因而其极大地扩展了声学材料的内涵及其应用领域。

1.2 相关研究概述

2000 年，Liu 等人通过研究局域共振声子晶体，首次实现了声学超材料

2011年, Zhang等人利用设计出了一种基于一系列波导腔制作的二维声隐身材料结构, 它能实现在水底明显降低声波并隐藏物体的目的。

2011年, Popa等人设计出了一种地毯式声隐身超材料, 他们交替排列两种不同的片层结构以实现密度的各向异性, 通过改变声波的传播路径实现了声波在空气中隐身的目的。

2012年, Mei等人将0.2 mm厚的矩形薄膜固定在刚性方格上, 并在膜上固定多块半圆形的小板, 形成的薄膜超材料的结构, 这样的薄膜超材料在100~1000 Hz的低频范围具有优越的吸声特性。2019年, Zhang等人在传统的吸声型薄膜声学超材料结构的基础上引入质量非对称结构, 优化了不同厚度质量片的排布方式, 并根据优化结果制备了能够实现低频宽带吸声效果的薄膜声学超材料样品。

1.3 本文研究内容

本文用亥姆霍兹腔和薄膜材料组合设计了一种复合结构, 目的是使其实现低频、宽带吸声; 测试气球膜与亥姆霍兹腔体组合复合结构的吸声隔声性能; 对气球膜与亥姆霍兹腔体组合复合结构加背腔, 优化其声学性能; 将气球膜与亥姆霍兹腔体组合的复合结构与吸声棉进行组合形成新的复合结构, 优化复合结构的声学性能; 在复合结构的气球膜表面附上具有一定质量的负载, 优化其声学性能。

2. 复合材料及其吸声机理

2.1 吸声材料

大多数材料都有一定的吸声性能, 我们工程上通常取125Hz、250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz六个中心频率的吸声系数平均值作为材料吸声性能的一般性衡量, 平均吸声系数大于0.2的材料, 可称为吸声材料, 平均吸声系数大于0.56的材料, 称为高效吸声材料。

从材料的吸声机理上可以将吸声材料分为多孔类吸声材料和共振类吸声结构材料。多孔类吸声材料比重小，在高频时材料的吸声系数较大，低频时材料的吸声系数小，而共振吸声结构类材料在低频时吸声系数较高。

(1) 多孔类吸声材料

多孔吸声材料的分类：纤维材料和泡沫材料，按其选材的物理特性和外观主要分为有机纤维吸声材料、无机纤维吸声材料、泡沫吸声材料、金属纤维吸声材料、泡沫金属吸声材料和高分子吸声材料等。

(2) 共振类吸声材料

工程中常用的共振吸声材料主要要空气层吸声、薄膜共振吸声、板材共振吸声、微穿孔吸声等。声学性能易控制，结构简单，装饰效果好，制品强度高是由赫姆霍兹共振吸声器构成的吸声结构的主要特点。

2.2 亥姆霍兹腔和超材料相关特性

(1) 亥姆霍兹腔

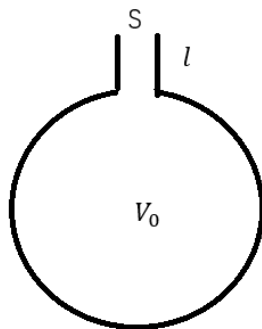


图 2-1 亥姆霍兹腔示意图

声波传到颈部，产生振动，在这个过程中，由于颈壁对空气柱的阻尼作用，使声能转变为热能被耗散。若入射波的频率与共振腔的固有频率相等，就会产生共振现象。此时空气柱振动的振幅最大，相应的声能耗散也最大。从而达到消除噪声的目的。声波是介质中由于每一局部的周期性压缩、膨胀在空气中形成的疏密相间的纵波。那么，可以将之抽象为活塞运动（声源振动）引起其中

气体密度变化形成疏密波。设一定面积的活塞在压强差 Δp 作用下以速度 v_0 运动，由之引起的气体密度变化的传播速度（即声速）为 C_s 。设受作用处气体密度为 ρ ，压强为 P ，则直接由力学规律可以证明，声速 C_s 可以由压强 P 和密度 ρ 为

$$C_s = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} \quad (1)$$

这就是说，声速 C_s ，依赖于压强 P 随密度变化的规律。按现代观点，声波传播过程中，疏区变密时，因受到压缩而温度升高；密区变疏时，因膨胀而温度降低；所以声音的传播过程不可能是等温过程，而是温度周期性变化的过程。由于空气的导热性能很差，则在温度变化的一个周期内，从原来温度较高的密区向原来温度较低的疏区传播的热量比把疏区气体压缩为密区所作的功小得多。所以密区膨胀和疏区被压缩都可认为是在绝热条件下进行的。这就是说声音传播的过程实际上可近似为绝热过程，即有过程方程 $PV^\gamma = \text{常量}$ ，即 $P = \text{常量} \cdot \rho^\gamma$ ，所以

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \text{常量} \cdot \gamma \rho^{\gamma-1} = \gamma \frac{p}{\rho}$$

带入 (1) 式得

$$C_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad (2)$$

在没有声波传入时，空气腔体内气体压强为 p_0 、体积为 V_0 。当声波传到孔颈中的空气柱，使空气柱下移 dx 孔颈下的空气腔体内气体将被压缩，压强由 p_0 变为 $p_0 + dp$ 体积的增量为 $dV = Sdx$ 。因为声波的波速比热传递的速度要快得多，所以气体状态的变化可看成绝热过程。把空气腔体内气体视为理想气体，由绝热过程方程

$PV^\gamma = \text{常数}$ ，对该式两边微分，有

$$dp = -\gamma p \frac{dV}{V} \quad (3)$$

把 (2) 式代入 (3) 式，有

$$dp = -\rho C_s^2 S \frac{dV}{V} \quad (4)$$

所以作用于颈部中那部分空气柱上的力为

$$F = Sdp = -\rho C_s^2 S \frac{dV}{V} \quad (5)$$

又孔颈中的空气柱可近似看成具有一定质量的、可压缩的流体，空气柱内气体质量为 $m = \rho LS$ ，所以，式(5)可写为

$$\rho LS \ddot{x} + \frac{\rho c_s^2 A^2}{V} x = 0$$

即
$$\ddot{x} + \frac{c_s^2 S}{VL} x = 0 \quad (6)$$

令
$$\omega_0^2 = \frac{c_s^2 S}{VL} \quad (7)$$

则式(6)为
$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

上述方程是典型的简谐振动方程，其固有频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c_s}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV_0}} \quad (8)$$

(2) 薄膜型超材料特性

超材料这种人工结构和普通自然材料有显著的区别，它的结构为亚波长尺寸，即其结构尺寸远小于波长尺寸。这种特点使得波在超材料中传播时，无法分辨它的结构，可将超材料视为均匀介质，并利用等效参数(等效介电常数，等效质量密度等)来进行描述。声学超材料和电磁超材料相对应，是指具有负等效质量密度和负等效模量的人工亚波长结构。它能够实现声波的负折射，声聚焦，超透镜，隐身等许多新奇特性。

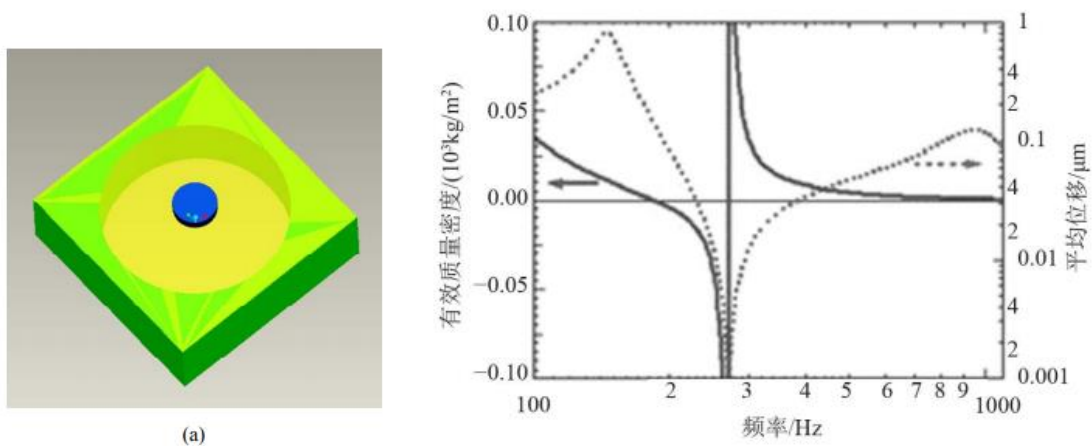


图 2-2 (a) 薄膜型超材料结构单元 (b) 计算得到有效质量密度

当声波垂直于薄膜平面入射时，只要入射频率和质量块在薄膜上的共振频率相匹配，就能够使得声波被完全反射，而不能透过。因此可以通过调整质量块和薄膜的弹性模量，就可以调整等效负质量密度出现的频率，实现对某个较窄频段

声波的衰减。然而，由于质量块的共振频率为单一频率，要想实现宽频的降噪，可根据条件设计多层的薄膜材料来共同实现。

3. 复合材料及其隔声降噪机理

3.1 隔声材料

隔声材料是指把空气中传播的噪声隔绝、隔断、分离的一种材料、构件或结构。对于隔声材料而言，要起到减弱透射声能，阻挡声音的传播的作用，就不能与吸声材料那样多孔、疏松、透气，相反它的材质应该是重而密实的，如钢板、铅板、砖墙等一类材料，隔声材料材质的要求是密实无孔隙或缝隙且有较大的比重。由于这类隔声材料密实，难于吸收和透过声能而反射能强，所以它的吸声性能相对较差。

3.2 隔声机理

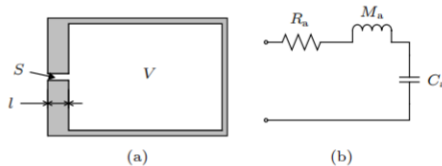


图 3-1(a)Helmholtz 腔 (b) 等效电路模型

由于声振系统与电振荡具有相同的微分方程,可以将 Helmholtz 腔转化为等效电路模型,其中 R_a 为声阻, M_a 为声质量, C_a 为声容,结构的共振频率 f_a 为

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_a C_a}} \quad \text{其中} \quad \begin{cases} M_a = \frac{\rho_0 l}{S}, \\ C_a = \frac{V}{\rho_0 c_0^2}. \end{cases} \quad (1)$$

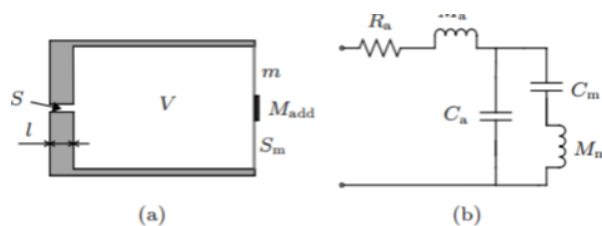


图 3-2(a)薄膜底面的 helmholtz 腔 (b) 其等效电路模型

模型中的总阻抗为

$$Z = R_a + j\omega M_a - j \frac{\omega M_m - 1}{\omega^3 M_m C_a C_m - \omega C_a - \omega C_m} \quad (2)$$

则

$$\omega M_a = \frac{\omega M_m - 1}{\omega^3 M_m C_a C_m - \omega C_a - \omega C_m} \quad (3)$$

材料中膜的振动方程为

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

其中, $c = \sqrt{T/\sigma}$, T 为薄膜张力, σ 为薄膜面密度

对于一般 helmholtz 腔来说, 当其腔体开孔处受到声压为 $p = p_a e^{j\omega t}$ 的声波作用时, 可以将其简化为一个进行阻尼受迫振动的弹簧-振子系统, 其中振子为一个进行阻尼受迫振动的弹簧振子系统, 其中振子为开孔处的气体, 弹簧为腔体内气体, 其振动方程可以表示为

$$\begin{cases} M_a \frac{dU}{dt} + R_a U + \frac{1}{C_a} \int U dt = p_a e^{j\omega t} \\ U = vS, \end{cases} \quad (5)$$

其中, M_a 为声质量, R_a 为声阻, C_a 为声容, v 为开孔处空气速度, S 为开孔面积, U 定义为体积速度。



图 3-3 在仪器中传播时的腔体结构

反射系数 R 与透射系数 L 的定义分别为

$$R = \frac{\int_{S1} p_{r0} dS}{\int_{S1} p_{i0} dS}, \quad T = \frac{\int_{S2} p_{t0} dS}{\int_{S1} p_{i0} dS}, \quad (6)$$

其中, p_{i0} 为 $S1$ 平面入射声压, p_{r0} 为 $S1$ 平面反射声压, p_{t0} 为 $S2$ 平面透射声压

传输损失 TL 的定义如下：

$$\begin{cases} w_{in} = \int_{s1} \frac{p_{t0}^2}{2\rho_0 c_0} dS \\ w_{out} = \int_{s2} \frac{p_{t0}^2}{2\rho_0 c_0} dS \\ TL = 10\log\left(\frac{w_{in}}{w_{out}}\right) \end{cases} \quad (7)$$

其中 w_{in} 与 w_{out} 分别为入射声能与出射声能，TL 单位为分贝

4. 吸声隔声测试原理

吸隔声性能是表征材料声学性能的两个基本参数，也是本课题重点研究的两个重要参数。材料的吸声性能体现的是材料吸收声能的特性，表现为反射声波能量的减小，用吸声系数（ α ）作为评价参量；而材料的隔声性能体现的则是阻隔声波传播的特性，表现为透射声能较小，其评价参数为隔声量（TL）。材料的吸隔声性能的测定主要有混响室法和驻波比法两种方法，前者适用于工程实践中大型材料或者结构声学性能的测定，后者适用于实验室小型样品声学性能的测定，因此本课题选用驻波比法来测定，实验设备选用 BK 阻抗管吸隔声测试系统（如图 4-1 所示，（a）、（b）分别为吸声测试和隔声测试系统示意图）阻抗管测试模块传递函数法测定，所有样品测试两次取平均值，数据记录用 1/3 倍频程数据记录。

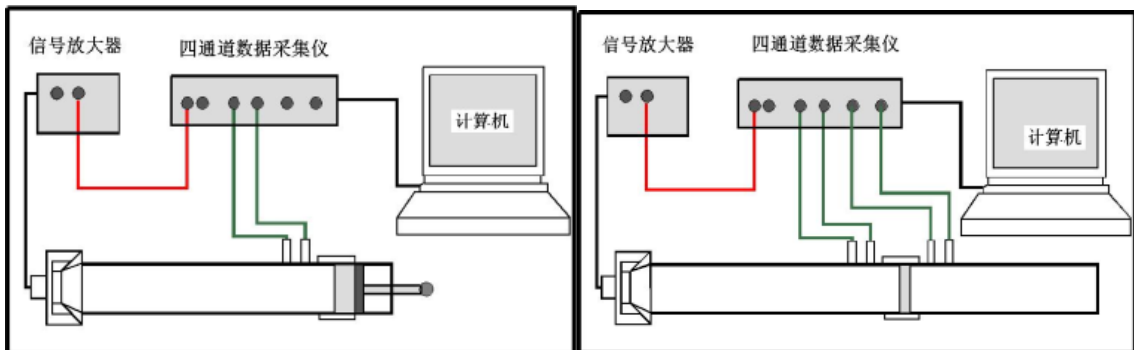


图 4-1 (a) 阻抗管材料吸声测量系统 (b) 阻抗管材料隔声测量系统

4.1 吸声测试原理

吸声测试所选用阻抗管组合如图 4-2 (a) 所示, SW030 阻抗管组合有两个传声通道, 管径 30 mm, 测定 1200-6300 Hz 范围内样品的吸声系数, SW100 阻抗管组合有三个传声通道, 管径 100 mm, 其中 0、1 两个通道用于测定 200-1500 Hz 频率段样品吸声系数, 而 0、2 组合测定范围为 63-250 Hz。平面波由入射管噪声源 (扬声器) 产生, 利用两个传声器信号进行干涉场的分析, 从而计算样品法向入射吸声系数 α 。以 SW030 管为例介绍其主要测试原理, 设传声器 1 和 2 之间距离为 s , 以样品靠发声管一面为 $x=0$, 传声器 1 处为 x_1 , 传声器 2 处为 x_2 , 传声器 1、2 处复声压值用 p_1 和 p_2 表示。

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (1)$$

式中 r 为反射系数, r_r 、 r_i 分别代表反射系数的实部和虚部。

$$r = |r| e^{j\Phi_r} = r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (2)$$

式中 H_{12} 对传声器 1 和 2 响应失配做校正后的传递函数, H_I 为入射波传递函数, H_R 为反射波传递函数。由于输入端和输出端均有噪声则:

$$H_{12} = \left[\frac{S_{12}}{S_{11}} \bullet \frac{S_{22}}{S_{21}} \right]^{1/2}$$

$$H_I = \frac{P_{2I}}{P_{1I}} = e^{-j k s}$$

$$H_R = \frac{P_{2R}}{P_{1R}} = e^{j k s} \quad (3)$$

式中 S_{11} 为传感器 1 处的自谱, S_{12} 为传感器 1 和 2 的互谱。

$$S_{11} = p_1 \bullet p_1^*$$

$$S_{12} = p_1 \bullet p_2^* \quad (4)$$

式中*表示复数共轭。

由式 (1)、(2)、(3) 和 (4) 即可推出样品吸声系数 α 。

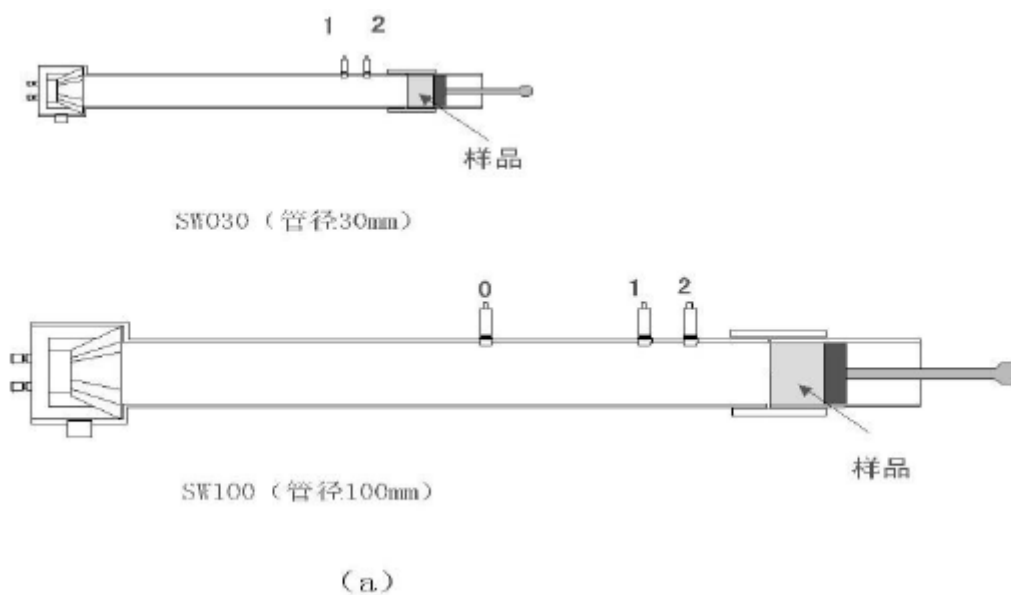


图 4-2 阻抗管吸声测试结构阻抗管结构

4.2 隔声测试原理

隔声测试中阻抗管组合如图 4-2 (b) 所示，同样以 SW030 阻抗管测试为例介绍其传输原理。在隔音测试中 SW030 有四个传声器，两个置于声源管，两个置于接收管中，材料的隔声量通过四个传声器之间的互谱函数得到。为了补偿由于阻抗管接收管末端不具有绝对吸声效果带来的测试误差，测试在两种不同边界条件下进行，即接收管末端未加后盖和加后盖两种条件，分别用小标 a 和 b 表示。声源管的声波由一个扬声器（宽域噪声信号激励）产生，四个传声器的测量正好将管中声波分解为平面波。声源管和接收管中入射和反射波的复声压幅值分别用 A、B、C、D 表示。设定样品安置点为 $x=0$ 处，则样品设置点到传声器 i 的距离为 x_i 。

假设在阻抗管中只有平面波传播，那么沿着声源管轴线方向四个传感器位置得声压值分别为：

$$\begin{aligned}
 P_1 &= A e^{-jkx_1} + B e^{jkx_1} \\
 P_2 &= A e^{-jkx_2} + B e^{jkx_2} \\
 P_3 &= C e^{-jkx_3} + D e^{jkx_3} \\
 P_4 &= C e^{-jkx_4} + D e^{jkx_4}
 \end{aligned} \tag{5}$$

解方程 (5) 可得到管中平面波的幅值:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{j P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}}{2 \sin(k(x_1 - x_2))} \\
 B &= \frac{j P_2 e^{-jkx_1} - P_1 e^{-jkx_2}}{2 \sin(k(x_1 - x_2))} \\
 C &= \frac{j P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3}}{2 \sin(k(x_3 - x_4))} \\
 D &= \frac{j P_4 e^{-jkx_3} - P_3 e^{-jkx_4}}{2 \sin(k(x_3 - x_4))}
 \end{aligned} \tag{6}$$

采用平均互谱代替瞬时谱, 需要使用一个参考信号, 一般取管中四个传声通道中信号的一个或者激励信号, 并用 0 表示此信号, 则参考信号和传声器信号间的互谱可由 0 的复共轭和式 (6) 相乘取平均得到:

$$\begin{aligned}
 \overline{O^* A} &= \frac{j G_{o1} e^{jkx_2} - G_{o2} e^{jkx_1}}{2 \sin(k(x_1 - x_2))} \\
 \overline{O^* B} &= \frac{j G_{o2} e^{-jkx_1} - G_{o1} e^{-jkx_2}}{2 \sin(k(x_1 - x_2))} \\
 \overline{O^* C} &= \frac{j G_{o3} e^{jkx_4} - G_{o4} e^{jkx_3}}{2 \sin(k(x_3 - x_4))} \\
 \overline{O^* D} &= \frac{j G_{o4} e^{-jkx_3} - G_{o3} e^{-jkx_4}}{2 \sin(k(x_3 - x_4))}
 \end{aligned} \tag{7}$$

式 (7) 中 G_{oi} 代表传声器 i 作为参考信号时的自功率谱。四个复声压值 A、B、C、D 之间的线性关系为:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} \quad (8)$$

在两种边界条件 (未加后盖和加后盖) 下测试, 则方程 (8) 可推得得出:

$$t_{11} = \frac{A_a D_b - A_b D_a}{C_a D_b - C_b D_a} \quad (9)$$

式 (5) (6) (7) 定义为两种边界条件, 则用 $O_a \cdot O_b$ 乘以式 (9) 分子和分母得到式 (10), 平均得以执行并且方程更加简化

$$t_{11} = \frac{\overline{(O_a^* A_a)} \overline{(O_b^* D_b)} - \overline{(O_b^* A_b)} \overline{(O_a^* D_a)}}{\overline{(O_a^* C_a)} \overline{(O_b^* D_b)} - \overline{(O_b^* C_b)} \overline{(O_a^* D_a)}} \quad (10)$$

定义传声损失为入射波幅值 A 和透射波幅值 C 的比值, 则在末端没有反射的条件下 ($D=0$), 传声损失量 TL 为:

$$TL = 20 \log \left(\left| \frac{A}{C} \right|_{D=0} \right) = 20 \log |t_{11}| \quad (11)$$

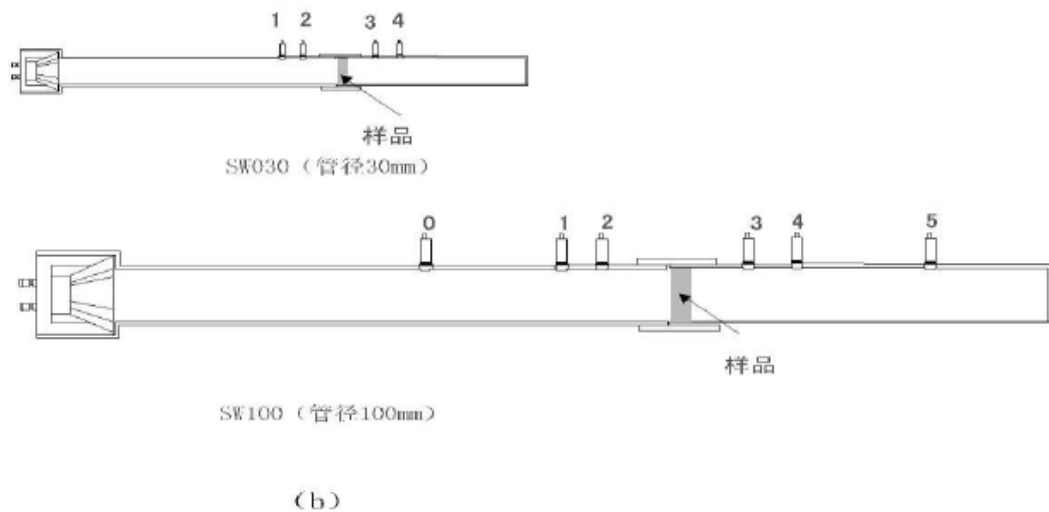


图 4-3 阻抗管隔声测试结构阻抗管结构

5 复合材料的吸声隔声性能测试

5.1 吸声性能测试

5.1.1 吸声有关概念

吸声是声波撞击到材料表面后能量损失的现象，材料吸收的声能与入射到材料上的总声能之比，称为材料的吸声系数，记为 α 。

则 α 满足 $\alpha = E_{\alpha}/E_i = (E_i - E_r)/E_i = 1 - r$ 其中： E_i —入射声能； E_{α} —被测材料或结构吸收的声能； E_r —被测材料或结构反射的声能； r —反射系数。

对于一块吸声材料或结构，在不同频率上会有不同吸声系数，因此采用吸声系数频率特性曲线描述材料在不同频率上的吸声性能。参照 ISO 标准和国家标准，吸声测试报告中吸声系数的频率范围是 100--5KHz，若将该频段内的吸声系数取平均值可为平均吸声系数，反映材料的总体吸声性能。降噪系数(noise reduction coefficient)，是在 250、500、1000、2000Hz 测得的吸声系数的平均值，算到小数点后两位，末位取 0 或 5。用作吸声材料的标称参数，其大小与材料本身的性质、材料的厚度以及材料的安装方法等均有关系。

工程中采用降噪系数 NRC 粗略地评价语言频率范围内的吸声性能，选取材料在 250、500、1K、2K 四个频率的吸声系数的算术平均值。若 $NRC < 0.2$ ，材料为反射材料；若 $NRC \geq 0.2$ ，材料为吸声材料。通过提高吸声系数可吸收大量声能，进而降低室内混响时间及噪声，同时可考虑室内空间大小，即反射声的强弱。通常使用高吸声系数材料如下离心玻璃棉、岩棉，对于 5cm 厚的 24kg/m^3 的离心玻璃棉的 NRC 可高达 0.95。



离心玻璃棉



玻璃棉卷毡

岩棉

图 5-1 典型吸声棉的工业产品

5.1.2 实验装置

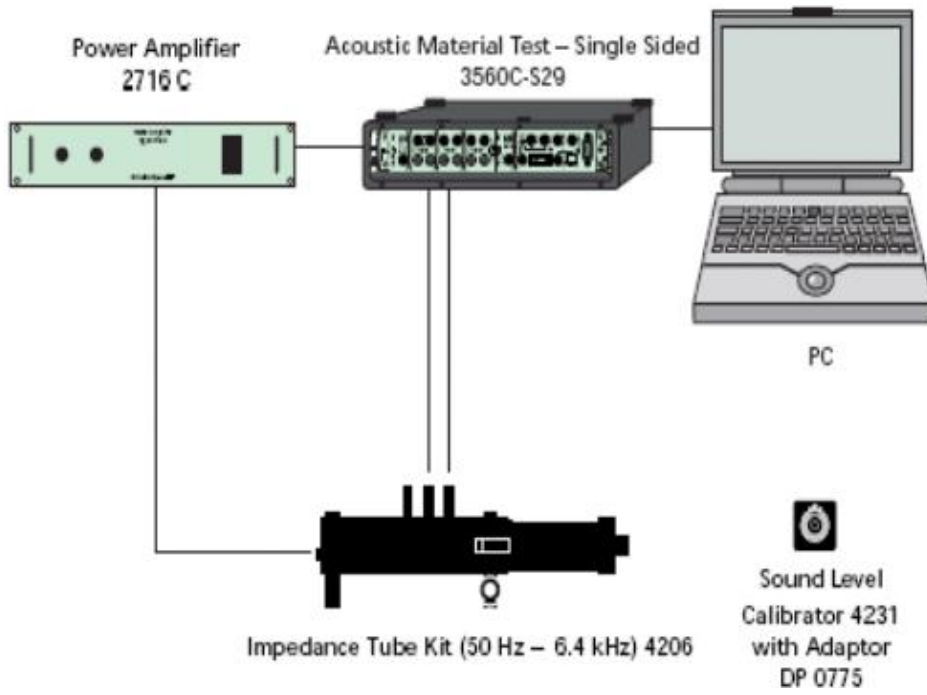


图 5-2 阻抗管测量吸声系数系统连接示意图

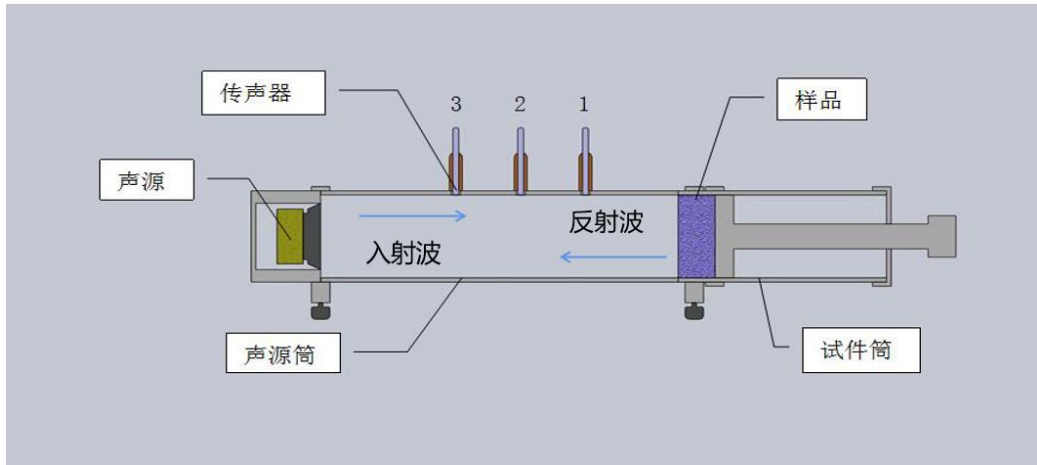


图 5-3 阻抗管内部结构示意图

5.1.3 仪器调试步骤:

3.1: 装置如图 2、3 正确连接

3.2: 应用程序的运行

在 Measurement 栏输入合适频率范围，在 Front End 栏中点击 Connect Signal 配置输入通道

3.3: 通道校准

使用 4231 声压级校准计进行校准

3.4: 信噪比测量

选择背景噪声测量和信号测量后，系统自动计算信噪比

3.5: 传递函数修正

互换麦克风的位置，正常麦克风位置测量后，自动修正

3.6: 样品测量

添加测量次数与样品名称

3.7: 数据后处理

取平均、组合大小管的测量数据

5.2 材料的隔声性能测试

5.2.1 隔声基本概念

隔声量，又可称为传声损失，即材料一侧的入射声能与另一侧的透射声能相差的分贝数。隔声量表示了材料的阻尼性能，其值越大，声音越容易被消减。

对于隔声量的测量传统上采用混响室法，两个混响室，材料样品放在两室之间的开口处，一室为声源室，声波从这里发射，另一室为接收室。通过测量两室的声压，在知道混响时间的情况下，可计算出隔声量。该方法的缺点是：测试样品面积大通常大 10m^2 且对实验室的建设和样品的制备要求较高。

5.2.2 实验测量

本实验采用阻抗管法测量小样品的垂直入射时的隔声量，主要介绍了使用四通道法对阻抗管中材料的垂直入射隔声量的测试原理，实际需进一步考虑到阻抗管非线性吸声末端需要补偿，以准确获得材料的隔声量。

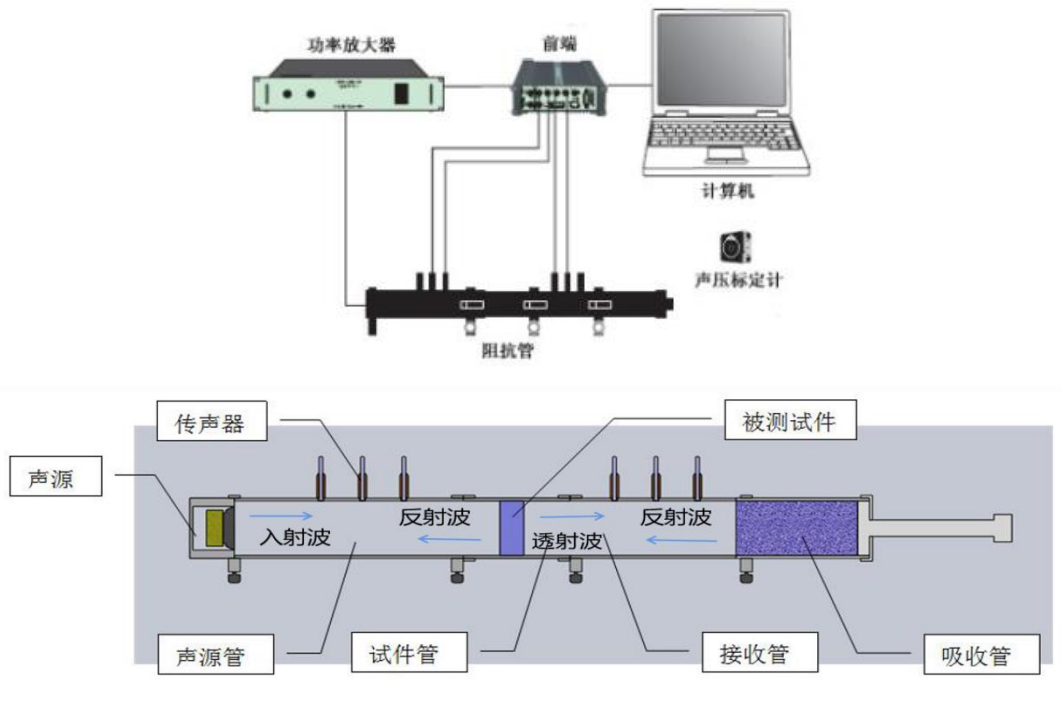


图 5-4 声学谐振腔结构的隔声性能测试

5.3 实验测量样品及性能

5.3.1 固定张紧程度的薄膜复合结构

对于固定张紧程度的薄膜，其组合结构的实物图见图 1，图 2 给出了对应的吸声特性测试结果图，图 2(a)中，可以发现月紧密的气球膜吸声峰值的系数越高，同时可显著向低频迁移，但最大吸声系数仅仅约为 0.6；相反，图 2(b)给出了组合结构的吸声特性，单纯的气球膜腔体可在 400Hz 实现高性能吸声(吸声系数接近 1)，这取决于薄膜的共振特性，但带宽相对较狭窄。对于薄膜型 Helmholtz 腔装置，吸声带宽范围约为 200~900Hz 的显著高性能吸声，若在腔体表面再结合一定的吸声棉，这可促进吸声峰向低频移动，进而增强低频吸声效果，对应图 2(b)中的绿线。以上实验测试结果说明，基于薄膜型 Helmholtz 腔装置具有良好的低频，高效，宽带的吸声性能，在解决低频噪声污染问题中，将具有一定的优势与潜能

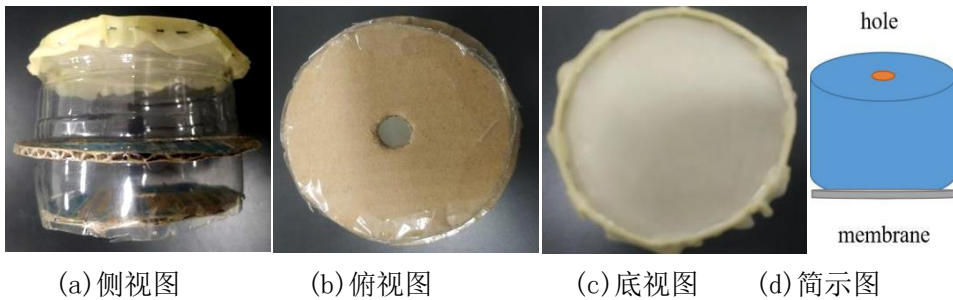


图 1: 薄膜型 Helmholtz 腔复合结构的简示图。

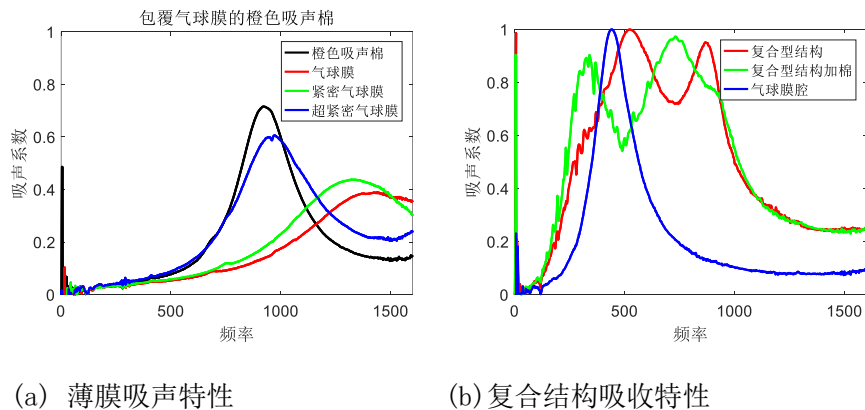


图 2: 薄膜型 Helmholtz 腔装置吸声

此外，我们探究了在薄膜表面附加质量块的大小与质量块的布局对气球膜吸声性能的影响。如图 3、4，通过附加磁铁质量块，气球膜的吸声性能峰值向高频移动，主要影响机理为提升薄膜的等效劲度系数大于等效质量，即 $f = 1/2\pi\sqrt{k/m}$ 。但附加偏心质量块的措施下，吸声峰值频率偏小，说明偏心附加质量块将会影响薄膜的共振模态，进而使吸声薄膜的共振模态频率降低。总结而言，在气球膜表面加磁铁块，吸声峰值频率略显高频偏移。在气球膜表面加磁铁块，反对称结构下气球膜共振模态发声改变，吸声峰值频率略显低频偏移。

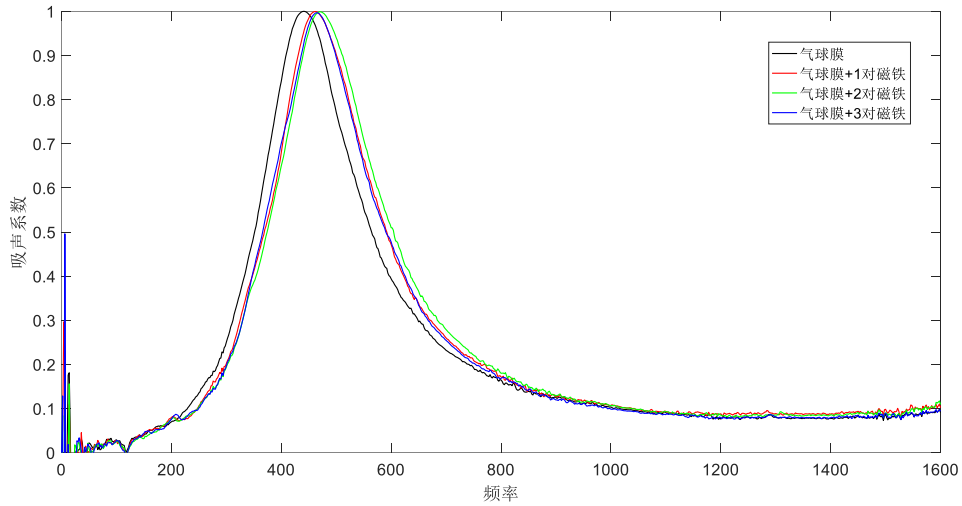


图 3: 附加质量块对气球膜吸声峰值的影响

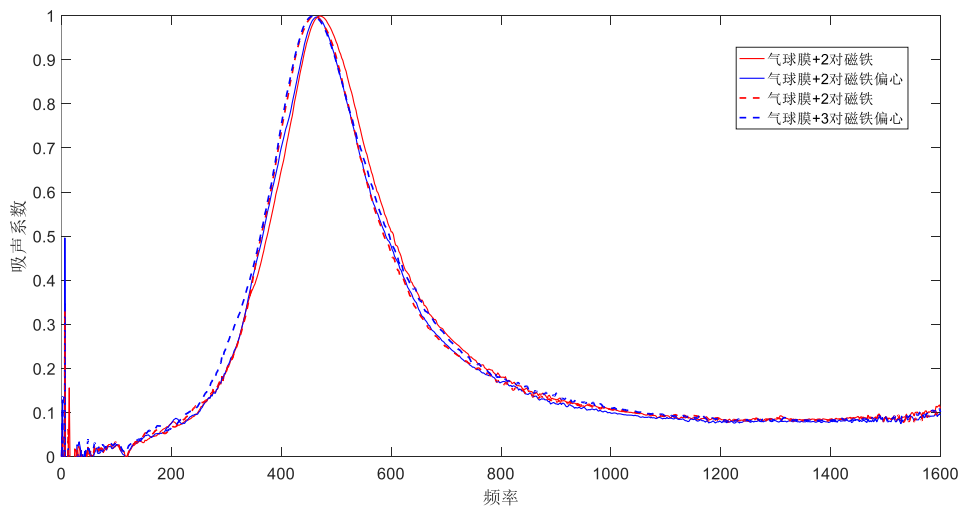


图 4: 附加偏心质量块对气球膜吸声峰值的影响

5.3.2 可调张紧程度的薄膜复合结构

为了进一步探究薄膜张紧程度对吸声性能的影响，设计了圈壳的嵌套结构，将薄膜嵌套在腔体的底部，通过调节薄膜张紧程度，进而分析对该组合型结构的共振影响。

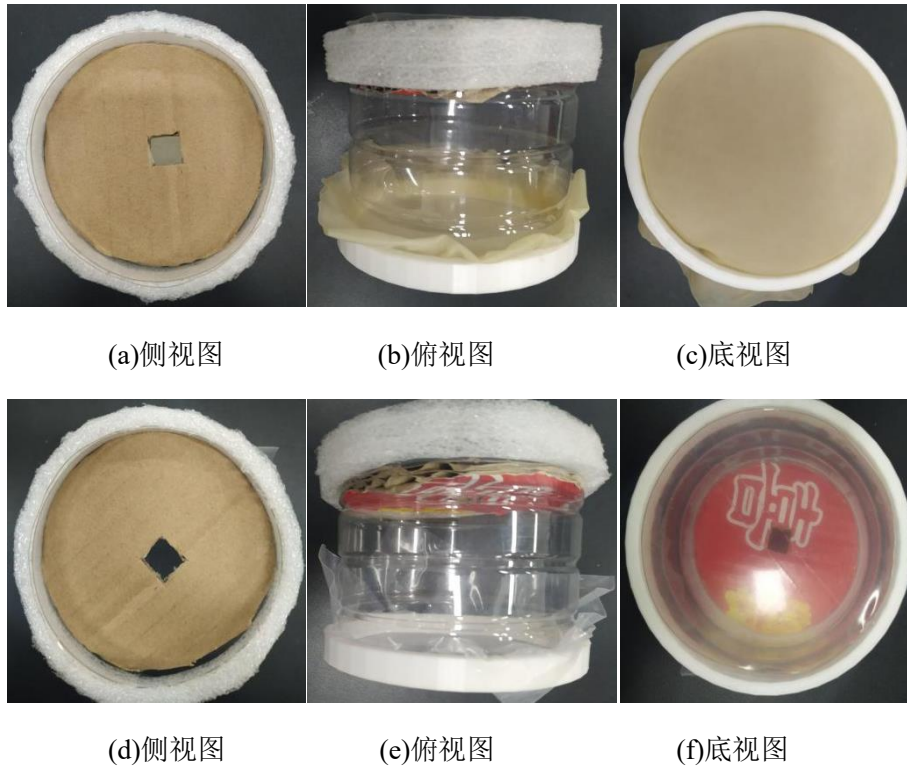


图 5: 附加偏心质量块对气球膜吸声峰值的影响.(a)~(c)气球膜; (d)~(f)白色膜

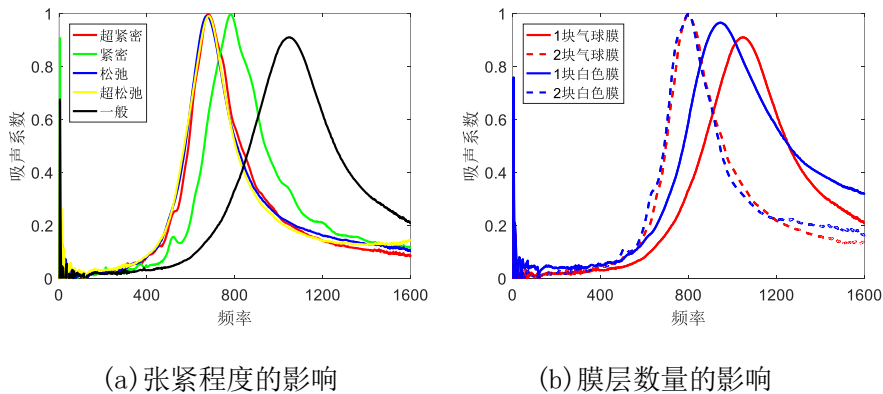
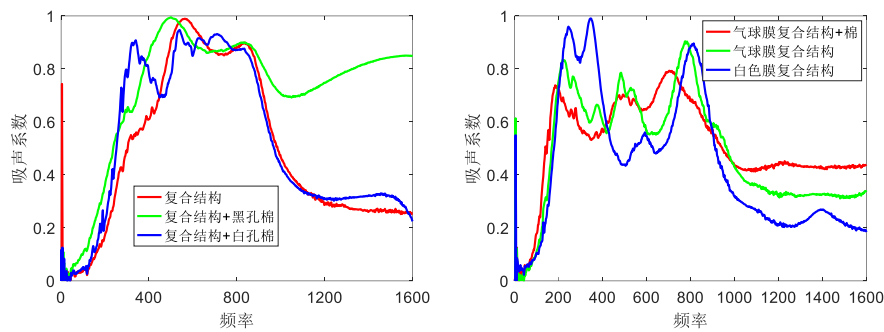


图 6: 张紧程度、膜层数量对气球膜吸声峰值的影响

调节薄膜的张紧程度，可以发现，对于很紧密和很松弛两种情况下，气球薄膜通过共振吸声对应的频率较低约为 650Hz，这说明薄膜的紧密程度对薄膜的共振吸声特性存在相应非线性效应。当然若增加薄膜的数量层数，可以发现图 6(b)中，因白色膜与气球膜的材质组成不同，造成各自杨氏模量存在差异，其中气球膜弹性性能优越于白色膜。在同样张紧程度下，发现白色膜的共振吸声峰对应的频率略低于气球膜，这主要是二者杨氏模量差异导致吸声峰性能的变化。同时，可以发现，若增加薄膜层的数量，这吸声峰向低频移动，二者因材料不同而导致的差异将减小。这说明，对于较松弛和膜层数量多的薄膜，其低频共振吸声效果更为优越。



(a) 加吸声棉的影响

(b) 不同类型膜的影响

图 7: 张紧程度、膜层数量对气球膜吸声峰值的影响

在薄膜型 Helmholtz 腔复合结构的圆孔薄板表面额外附加一块吸声棉，在图 7(a)中可以发现，附加不同吸声特性的吸声棉可以促使复合结构在低频待 200~300Hz 范围有良好的吸声响应，吸声系数得到一定的提高。这说明，可以进一步在 Helmholtz 腔孔板表面附加一层吸声棉，进而提升整个装置的吸声性能。7(b)中的另外一个同类型的装置中也表现出一定相似规律，但 400~600Hz 频带范围内出现一定的不稳定性，这可能与薄膜的特性有关。同时，若直接改变 Helmholtz 腔的开孔大小，这可以存在以下的影响关系，小孔对应的吸声峰对应的频率较大孔有一定的优势，即实现低频吸声可考虑带有小孔的 Helmholtz 腔。

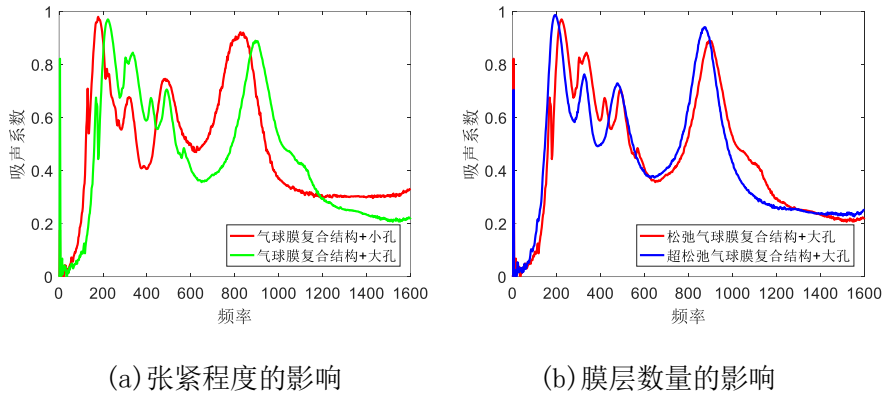


图 8: Helmholtz 腔开孔大小对吸声峰值的影响

在参考文献[1]中，薄膜型 Helmholtz 腔的强烈低频隔声效果与薄膜的低频共振有关，附加质量块可影响薄膜的本征共振模态，进而影响吸声效果。针对本文的设计结构，随着附加质量块质量的增加，其隔声性能发声一定下降，在 200Hz 左右范围和 800Hz 存在对应隔声峰，这可能与吸声的特性有关，即与附加质量块的薄膜发生局域共振有关。

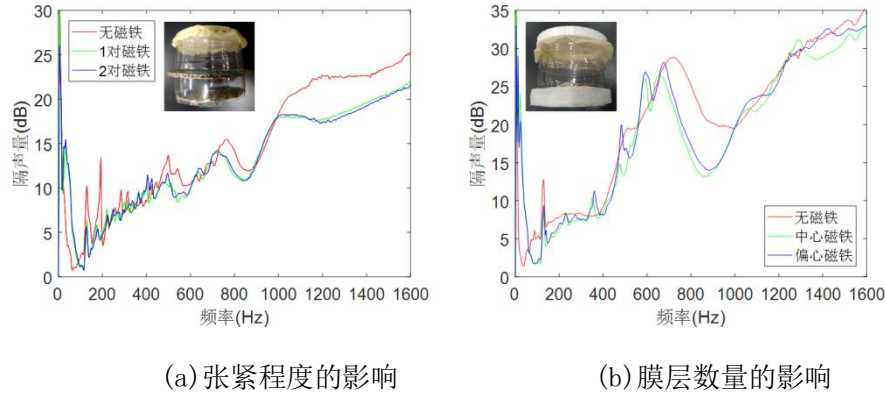


图 9: 张紧程度、膜层数量对气球膜吸声峰值的影响

6. 实验研究结论

对于薄膜底面 Helmholtz 腔，为提升其低频吸声性能，通过实验测试分析，相关规律归纳如下：1.可在 Helmholtz 腔表面开小孔，降低本身共振频率。2.亥姆霍兹腔与气球薄膜组合的复合结构可以实现良好的低频、宽带吸声性能。3.在组合型结构表面施加一定吸声棉，可使结构兼具吸声特性与共振吸声。4.在薄膜表面附加偏心质量块，可在一定程度上促使吸声峰值频率向低频移动。5.对于薄膜的类型、层数、薄膜的张紧程度也存在一定的影响，当薄膜较松弛，弹性模量较

小, 层数越多时, 结构具有更好的性能。6.复合结构带一定长度的背腔可以使吸声峰向低频移动, 优化其声学性能。

参考文献

- [1] 贺子厚, 赵静波, 姚宏, 等. 薄膜底面 Helmholtz 腔声学超材料的隔声性能[J]. 物理学报, 2019, 68(21).
- [2] 耿军军. 基于废弃物资源化和声子晶体的轻薄隔声复合材料[D]. 南昌航空大学, 2014.
- [3] 蒋文明. 基于废弃物资源化的新型复合隔声板设计及其性能[D]. 南昌航空大学, 2013.
- [4] 刘海. 隔吸声复合式蜂窝夹层板结构的设计与实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] 刘少刚, 赵跃超, 赵丹. 基于磁流变弹性体多包覆层声学超材料带隙及传输谱特性[J]. 物理学报, 2019, 68(23).
- [6] 杭锐. 基于磁场控制的可调谐薄膜声学超材料及其低频隔声性能[D]. 2019.
- [7] 闻轶凡, 吴卫国, 杭锐. 基于磁流变薄膜的可调谐主动声学超材料[J]. 声学技术, 2019(3):248-252.
- [8] 夏方弈, 杭志宏. 利用阻抗管测量复合声学超材料特性[J]. 声学与振动, 2016, 4(3): 19-26.
- [9] 吕海峰,王普浩,叶俊杰,张文辉,张晓光,李静.局域共振型声学超材料及其噪声控制[J].航空动力学报,2020,35(07):1369-1375.
- [10] 刘波涛,刘崇锐,吴九汇,张奇志.低频宽带声学超结构的多阶共振高效吸声机理[J].西安交通大学学报,2020,54(08):149-156.
- [11] Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynsky L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites[J]. Physical Review Letters, 1993, 71(13): 2022–2025.
- [12] Han-Bo Shao,Huan He,Yan Chen,Guo-Ping Chen. A novel multi-cavity Helmholtz muffler Project supported by Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant No. KYCX18_0249).[J]. Chinese Physics B,2019,28(5).

- [13] 陈龙虎.声学超材料对低频噪声的消声特性[J].应用声学,2020,39(03):438-444.
- [14] 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.
- [15] 贺子厚,赵静波,姚宏,陈鑫.薄膜底面 Helmholtz 腔声学超材料的隔声性能[J].物理学报,2019,68(21):148-159.
- [16] 张忠刚,朱浩宇,罗剑,马炳和.吸声型薄膜声学超材料低频宽带吸声性能研究[J].应用声学,2019,38(05):869-875.
- [17] 李宏伟,王鹏.吸声超材料研究进展[J].材料开发与应用,2019,34(03):6-15.
- [18] 吴晓,刘崇锐,王轲,蔡永庆,吴九汇.声学超结构低频宽带协同耦合高效吸声机理[J].西安交通大学学报,2019,53(10):122-127.
- [19] 刘忠远.声学超材料隔声性能研究[D].青岛理工大学,2019.
- [20] 康玉莹.薄膜声学超材料隔声特性研究和优化设计[D].哈尔滨工业大学,2019.
- [21] 方晓明.噪声污染的危害及防治措施[J].科学技术创新,2019(15):41-42.
- [22] 王正敏.亥姆霍兹共振器的优化理论及其实验验证[D].华南理工大学,2017.
- [23] 陈怀军,赵文霞,郝长春.可调谐的宽频带负体弹模量吸声超构材料[J].液晶与显示,2015,30(02):234-239.
- [24] 盖晓玲,李贤徽,张斌,谢鹏,马智慧.薄膜材料吸声性能数值模拟[J].噪声与振动控制,2014,34(05):110-113.
- [25] 张立,盛美萍.低频宽带共振吸声结构与原理[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2005(02):59-61.

附录：

测试软件界面截图

