

# 一种镶嵌薄膜共振型材料的吸声性能研究

朱 庆,白鸿柏,路纯红,黄 凯,李 拓,杨朝舒

(机械工程学院 车辆与电气工程系,河北 石家庄 050003)

**摘 要:**为了解决现有吸声材料对低频噪声衰减弱及吸收差的现状,该文提出了一种镶嵌薄膜共振型材料结构。其中镶嵌到条形薄膜上的结构单元作为拍动物,此时结构单元与背衬薄膜之间存在一定耦合作用,使行波在两部分间的局域共振作用削弱或存在很少反射。通过有限元仿真分析得到吸收峰值下的模态振型,进一步证明了材料的吸声机理。实验表明,该结构对 100~1 000 Hz 内的声波具有很好的吸收效果,单层材料结构随着空腔距离的增大,吸收峰提前,而峰值基本不变。两层材料结构的吸声效果远大于单层材料结构,这解决了低频噪声问题。

**关键词:**结构单元;耦合作用;局域共振;模态振型;吸声机理

**中图分类号:**TB53

**文献标识码:**A

## Study on the Sound Absorption Property of an Resonance-type Material Decorated With Membrane

ZHU Qing, BAI Hongbai, LU Chunhong, HUANG Kai, LI Tuo, YANG Zhaoshu

(Dept. of Vehicle and Electric Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of small attenuation and not good absorption at low frequency sound noise, a resonance-type material structure decorated with membrane is proposed in this paper. The structure unit of elastic membrane decorated with relatively rigid platelets is used as the flapping body. The coupling action between the structure unit and the back-decorating membrane exists, thus the local resonance of the traveling wave between the two parts is weakened or hardly reflected. The complex structure is analyzed by finite element method(FEM) and the mode of vibration is obtained at absorption peaks, the sound absorption mechanism of material structure is further investigated. The experiments indicate that the structure shows the sound absorption property well in 100 ~ 1 000 Hz, the cavity distance is more and more increased, the single-layer material structure have advanced absorption peaks and the peak value is fundamentally not changed. The sound absorption property of the double-layer material is far better than that of the single-layer material, and the problem of low frequency sound noise is thoroughly solved.

**Key words:** structure unit; coupling action; local effect; mode of vibration; sound absorption mechanism

### 0 引言

无论是在工业领域上机器振动发出的嘈杂噪声,还是在军事应用上主动声呐为探测目标发出的声波,就目前的吸声技术,对低频声波的吸收还存在很大问题,主要是因为低频声波遇到硬相材料,使材料的能量密度改变,不能很好地将机械能转化为热能耗散掉。低频声波吸收的多少取决于通过的材料介质,对于一般的线性材料,低频声波的固有吸收微弱,为了增强低频区域的耗散,需要建立一种与入射声波进行弱耦合的共振机制,将高能量密度部分集

中在材料介质上,形成一种非线性系统。不论是具有局域共振带隙特性的声子晶体<sup>[1]</sup>,还是人工合成的薄板超材料<sup>[2]</sup>,都会使弹性波与质量-弹簧构成的振子系统发生共振,从而达到高效地吸收声波。

为了有效地吸收低频声波,本文提出一种具有镶嵌薄膜共振型材料结构,通过对复合材料的结构模型与吸声机理进行分析,由于硅橡胶薄膜中的行波特性与镶嵌结构振子的谐振特性相互耦合的结果,得出声波会在两部分结构间进行传播衰减。通过有限元仿真分析,得到高的能量密度聚集在金属片边界附近,其中结构单元振型中位移场变化的固

收稿日期:2016-03-24

基金项目:武器装备“十二五”预先研究基金资助项目(51312060404)

作者简介:朱庆(1992-),男(满族),吉林四平人,硕士生,主要从事吸声材料的研究。白鸿柏(1965-),男,博士生导师,教授,主要从事振动理论及金属橡胶材料的研究。

有频率与实验中吸收峰值附近的频率相接近。同时利用仿真计算探讨了结构单元对四周固定薄膜法向振幅的约束位移,进一步说明了镶嵌结构对薄膜法向位移起到抑制作用,从而削弱了薄膜与入射声波的耦合强度。通过对复合结构的反射系数、背腔尺寸及双层结构的实验研究,从多角度分析复合材料的吸声特性。

## 1 吸声结构设计及吸声机理的分析

### 1.1 吸声结构设计

本文利用薄膜的物理属性和金属片与薄膜之间的耦合机制,提出了一种镶嵌薄膜共振型的材料结构。镶嵌结构由宽 2 mm 的条形 PET 薄膜上镶嵌半径为 8 mm 的半圆金属片与尺寸为 18 mm × 15 mm 的硅橡胶薄膜组成,其中硅橡胶薄膜位于镶嵌结构背后,且留有一定距离。硅橡胶薄膜本身具有良好的透气性和伸长性,属于物理特性较强的橡胶复合材料,而 PET 薄膜具有较强的抗张强度,是一种耐高温的聚酯薄膜。因此,根据薄膜的物理属性,一方面,PET 薄膜以条形的形式增加镶嵌物的扰动;另一方面,硅橡胶薄膜可与声波辐射模式进行耦合机制的调节。

结构单元由金属片与矩形薄膜组成,镶嵌在条形薄膜上的拍动物,厚为 1 mm,不同形态的金属片分布在矩形薄膜上,其中镶嵌条形薄膜的结构单元如图 1 所示。当入射声波对复合吸声结构产生激励时,结构单元存在大幅度的拍击现象,高能量密度聚集在金属片与矩形薄膜边界附近。同时,结构单元背后的硅橡胶薄膜受其拍击作用影响,法向振幅减小,与声波存在微弱的耦合形式。

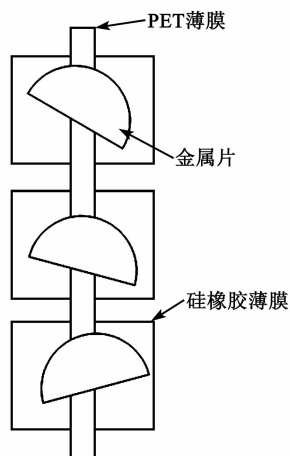


图 1 镶嵌条形薄膜的结构单元

本文采用法向入射的随机白噪声,在吸声材料背后留有一定距离的空腔,声波传播方式如图 2 所示。

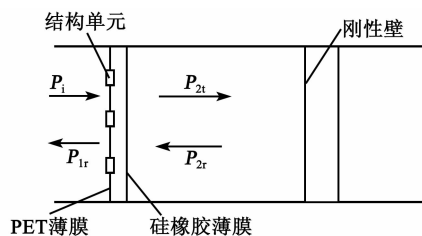


图 2 声波在媒质中的传播方式

$$P_i = P_{ia} e^{-jkx} \quad (1)$$

$$P_{1r} = P_{1ra} e^{+jkx} \quad (2)$$

$$P_{2t} = P_{2ta} e^{-jkx} \quad (3)$$

$$P_{2r} = P_{2ra} e^{+jkx} \quad (4)$$

式中: \$P\_i\$ 与 \$P\_{2t}\$ 分别为入射声波与透射声波; \$P\_{1r}\$ 与 \$P\_{2r}\$ 为反射声波; \$k\$ 为波矢。考虑到各列波的时间因子都是简谐变化,故因子 \$e^{j\omega t}\$ 可略。

### 1.2 吸声机理

现阶段通过改变传播介质的热传导、粘滞性内摩擦和弛豫作用等形式可造成声波能量的损耗,这 3 种形式都是在声波传播过程中将声能转化为其他形式的能量<sup>[3]</sup>。本文提出的薄膜共振型吸声结构是金属片与矩形薄膜形成的结构单元,在声波激励下,受条形薄膜作用,进行垂直方向的平动与绕质心的拍动,通过薄膜材料的弹性波与每个结构单元的共振特性相互作用,可以产生局域共振带隙,从而使薄膜中的行波不能进行传播。

为了约束薄膜反共振的波动形式,增强薄膜的共振特性,需要模式耦合将反射声波通过局域共振的方式进行一定程度上的衰减,使结构具有更宽的共振带隙。其模式耦合表现为局域共振与声波辐射模式之间的耦合。

结构单元中的矩形薄膜与四周固定的硅橡胶薄膜之间发生耦合拍击,这种拍击形式削弱了入射声波与四周固定薄膜间的耦合,根据薄板的大挠度理论<sup>[4]</sup>可推算出矩形薄膜的应变能

$$U = \frac{D}{2} \iint_A \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 \right] + 2\mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] dx dy \quad (5)$$

式中 \$D = Eh^3/12(1-\mu^2)\$ 为薄膜大挠度弯曲时的弯曲刚度, \$E\$ 为薄膜的杨氏模量, \$h\$ 为薄膜厚度, \$\mu\$ 为泊松比; \$w\$ 为位移。若 \$w\$ 的空间一阶导数在薄膜边

界区域不连续时,易推断出能量密度(积分号内)在这些区域内的数值很大,经过二阶导数和面积分后,薄膜曲率弹性能量更大。

## 2 结构单元与复合结构的振型分析

### 2.1 结构单元振型分析

因为只考虑结构单元在白噪声激励下的模态振型,故将模型进行简化。数值模拟了一个结构单元中金属片与矩形薄膜在  $xOy$  平面内的法向位移的变化,取图 3(a)为结构单元的平面图,3(b)~(d)分别为 300 Hz 后的第一~三阶固有频率处的位移场的变化(见图 4 所示的吸声特性曲线)。

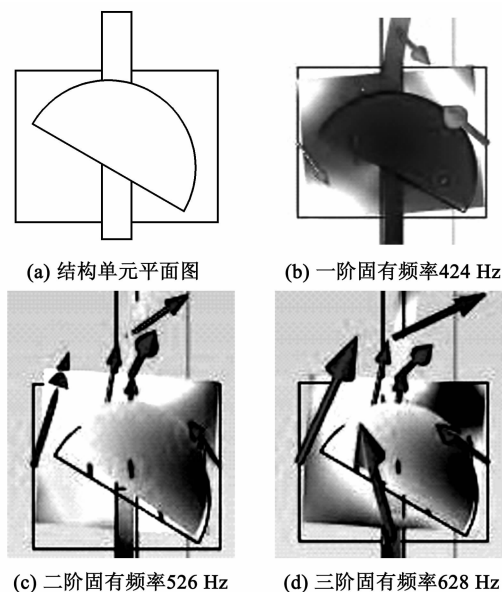


图 3 结构单元的位移场分布

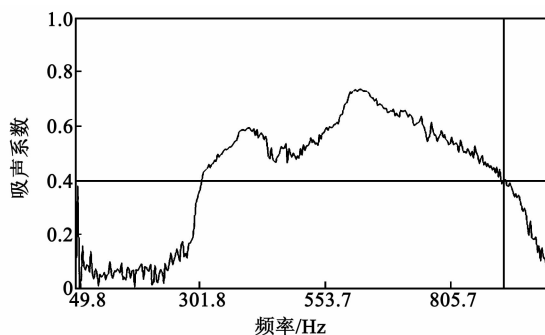


图 4 吸声特性曲线图

图 3(b)~(d)分别对应图 4 中吸收峰值附近位移场的变化,箭头表示结构单元受条形薄膜作用下的运动情况。由图 3(b)可见,一阶固有振型附近处的金属片受入射声波激励影响较小,条形薄膜受声波作用在法线方向上进行大角度的平动和小角度的转动,矩形薄膜边界存在较大形变,高

的能量密度分布在矩形薄膜边界。由图 3(c)、(d)可见,二、三阶固有振型的结构单元绕质心大幅转动,在 628 Hz 附近,结构单元具有很高的曲率能量密度,在金属片与矩形薄膜之间的细小空间储存着较高的能量密度。

### 2.2 复合结构与薄膜单元的振型及位移分析

硅橡胶薄膜本身存在一段带隙的吸收峰值。在外界声波激励作用下,薄膜具有共振特性和反共振特性,一部分频带内声波可以完全透过声波,另一部分可以完全反射声波<sup>[5]</sup>。当四周固支薄膜留有一定距离的背腔时,薄膜受到背腔后空气弹簧的影响,有一定的反作用,此时有较明显的吸收峰值,但平均吸声系数小于 0.3。

本文介绍的镶嵌薄膜结构采取硬相介质与软相介质相结合的方式,根据局域共振的吸声特性来提高低频声波的吸收。通过对硅橡胶薄膜和复合结构进行有限元仿真得到复合结构下的硅橡胶薄膜受多个结构单元作用,法向位移变小,与入射声波的耦合形式减弱,利用复合结构的局域共振模式,使一段低频范围内的噪声无法传播,从而对低频声波进行高效吸收。图 5 为 424 Hz 频率下的振型。

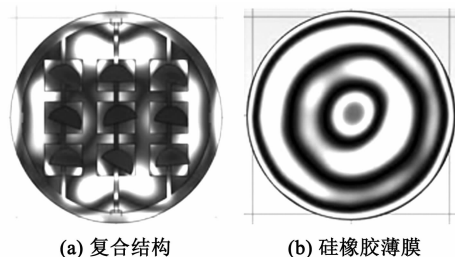


图 5 复合结构与硅橡胶薄膜振型比较

为了进一步分析镶嵌结构对薄膜的约束作用,采用二维仿真分析,不考虑结构单元绕质心的拍动,取单层薄膜与复合结构背衬薄膜相同的中间位置进行平面波入射,声压载荷设置为 122 Pa,得到两组随频率变化的法向位移曲线,如图 6 所示。

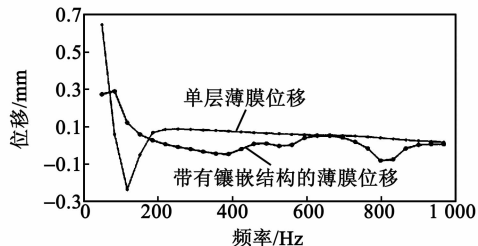


图 6 两种结构的法向位移

比较两种吸声结构的法向位移发现,带有镶嵌

结构的薄膜受到结构单元约束作用,位移在平衡位置处波动,在 200~1 000 Hz 内薄膜几乎不受入射声波影响,耦合形式较弱。从一定意义上讲,镶嵌结构限制了薄膜的反共振模式,将声波能量聚集在结构单元与薄膜附近,对薄膜中的行波进行削弱,使其存在更少的反射效果。

### 3 实验研究

#### 3.1 试验元件及系统

本次试验采用厚度为 0.2 mm 的硅橡胶薄膜和 PET 薄膜,由于薄膜刚性难以在阻抗管中进行声学测试,同时考虑到声波激励对薄膜产生纵向位移影响,因此,在条形薄膜与硅橡胶薄膜两侧分别使用宽度为 5 mm 的 PVC 圆环边框固定。两边框之间使用蓝胶粘结剂进行固接。

图 7 为试验元件及系统图。选取低频阻抗管进行吸声测试,其中试验使用 AWA8551 型阻抗管、AWA6290M 型信号发生器和 AWA5871 型功率放大器声学器件,入射声波设置为白噪声。

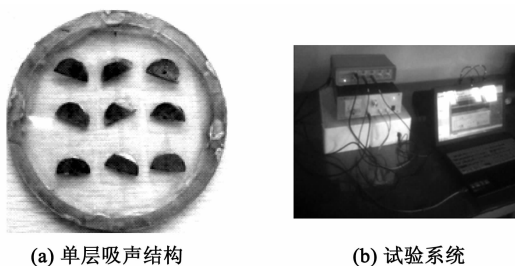


图 7 试验元件及系统

#### 3.2 吸声系数

测试时,在 50~1 000 Hz 内取频率与吸声系数为线性关系,得到的吸声特性曲线见图 4。由于结构单元不规则的拍击,使金属片与矩形薄膜存在边界上曲率能量的改变,拍击形式越剧烈,结构单元边界附近的能量密度越高,吸收效果越好。这种仅有 9 个结构单元的单层吸声结构,在 580~660 Hz 内吸声可达 70%~80%;在 390~850 Hz 内出现多个吸收峰值,平均吸声系数达 0.6。

这种镶嵌薄膜共振型材料结构的吸收率,取决于金属片与矩形薄膜间的共振模式和矩形薄膜与背衬薄膜间的耦合形式。前者因结构单元之间的微小空间存储着极高的曲率能量密度,后者导致声波辐射模式与背衬薄膜之间几乎没有耦合形式,类似于开放的共振系统。这两者使该吸声结构达到很好的吸收效果。

#### 3.3 反射系数

本实验根据阻抗管中法向入射条件下,入射平面波和从试件反射回来的平面波叠加后产生的驻波图而测定<sup>[8]</sup>。取材料表面为基准面  $x=0$ ,存在

$$Z_s = Z_0 \frac{1+r}{1-r} \quad (6)$$

式中:  $Z_0$  为空气中特性阻抗;  $Z_s = p/v$  为试件表面的声阻抗率,  $p$  为试件表面某点处的声压,  $v$  为质点速度;  $r$  为反射系数。由此可得  $r$  和平面波透射系数为

$$r = \frac{Z_s/Z_0 - 1}{Z_s/Z_0 + 1} \quad (7)$$

$$T = 1 - |r|^2 \quad (8)$$

根据式(7)、(8)可知,入射声波和材料结构耦合形式与吸声特性有关,越弱的耦合形式,反射系数越低,平面波透射系数越好。通过试验研究发现,在某一低频段内出现很低的反射系数,如图 8 所示。

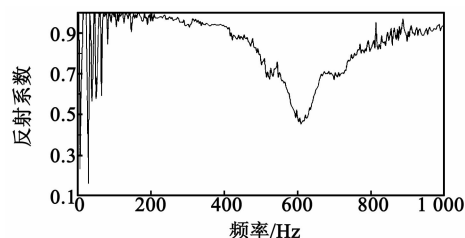


图 8 单层材料结构的反射系数

由图 8 可见,在约 600 Hz 时,反射系数仅 0.45;在 450~800 Hz 内反射系数弱,材料结构对入射声波能量吸收大,耦合形式弱,吸声效果好。

#### 3.4 背腔尺寸不同时透射系数对比

为了分析材料结构受空气腔厚度的影响,在安装试件时,试件后取一定距离的空腔,通过移动活动盖板来确定空腔距离。为便于试验分析,分别取 25 mm、30 mm、35 mm、40 mm、45 mm 的空腔距离,得到了 5 组吸声特性曲线,如图 9 所示。

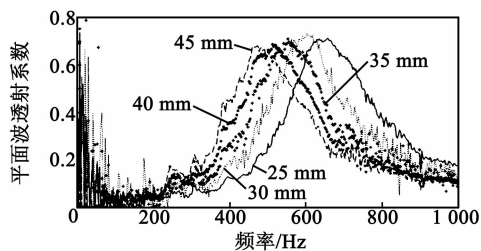


图 9 不同空腔距离的吸声特性曲线

由图 9 可看出,随着空腔距离的增加,共振型材料的吸收峰向左移,峰值基本上无变化,吸收频带宽

度几乎未变。这说明了空腔距离对材料在低频范围内的吸声效果影响很大,随着背衬空腔厚度的不同,可以引发不同吸收峰值的共振模式(即全透射形式)。

### 3.5 双层复合结构的吸声系数

当阻抗管中的声压用对数(分贝)计量时,声压极大值和极小值之间的极差为  $\Delta L$ ,得到驻波比

$$s = 10^{\Delta L/20} \quad (9)$$

则吸声系数

$$\alpha = \frac{4 \times s}{(s+1)^2} \quad (10)$$

此时,频率和吸声系数关系以对数的形式表示,通过对单层与两层薄膜共振型材料进行试验测试,得到了两组吸声特性曲线。图 10 为若干个频率点与吸声系数的对应关系,两层吸声结构与单层的相比,其吸收峰从 630 Hz 提前到 400 Hz,且峰值有较大提高,在 200~550 Hz 内,平均吸声系数提高了 1 倍。在很大程度上,两层结构可以很好地吸收随机低频白噪声。

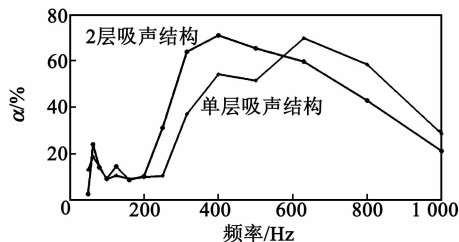


图 10 吸声特性曲线图

### 3.6 镶嵌薄膜结构与单层薄膜结构的吸声特性分析

为了进一步说明镶嵌薄膜共振型材料的低频吸声机理,对单层硅橡胶薄膜进行了吸声测试,同时对两种结构的吸声特性进行了比较,如图 11 所示。

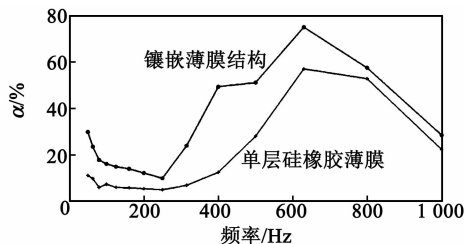


图 11 两种结构吸声特性曲线

通过 2.2 节中单层薄膜结构的仿真分析,得到单层薄膜存在共振与反共振两种模式。具有共振模式的单层薄膜在一段频带内吸声较好,低频声波可进行很好的透射,但反共振模式的薄膜几乎无吸声效果。为此,镶嵌薄膜结构中结构单元的法向运动

与拍击形式抑制了薄膜的反共振模式,使吸声效果明显增强,具有更宽的吸声频带,且平均吸声系数由单层薄膜的 0.25 增加到 0.45,实现了对低频声波的高效吸收。

## 4 结论

本文提出一种具有镶嵌薄膜共振型材料结构,对于随机低频声波可以很好地消耗吸收。通过理论与试验研究,得到以下几点:

1) 在单层结构材料中,由于金属片与矩形薄膜形成结构单元的拍击作用,使得薄膜材料的弹性波与每个结构单元的共振特性相互作用,产生局域共振带隙,从而使薄膜中的行波不能进行传播,实现了很好地吸收效果。通过仿真分析得到了固有振型下的固有频率与实验吸声特性测试中吸收峰值的频率吻合较好。

2) 对于单层结构材料,在不同空腔距离下得到不同位置的吸收峰所对应的吸声特性曲线。其中空腔距离越大,吸声峰越提前,但峰值影响较小,吸收带宽变化不大。

3) 在 230~900 Hz 内,两层材料结构的平均吸声系数约为 0.55,最大吸声系数可达 0.85。一段频带内可以进行 60%~80% 的吸收,这很好地解决了低频噪声给我们生活带来的困扰。

## 参考文献:

- [1] 白国锋,刘碧龙,隋富生,等. 多重散射方法研究轴对称空腔覆盖层的声学特性[J]. 声学学报, 2012, 37(3): 263-270.
- [2] BAI Guofeng, LIU Bilong, SUI Fusheng, et al. An investigation on acoustic performance for viscoelastic coating containing axisymmetric cavities using multiple scattering method[J]. Acta Acustica, 2012, 37(3): 263-270.
- [3] 郑晓静. 圆薄板大挠度理论及应用[M]. 长春: 长春科学技术出版社, 1989.
- [4] 肖勇. 局域共振型结构的带隙调控与减振降噪特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [5] MEI J, MA G, YANG M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. Nature Communication, 2012, 3: 756.
- [6] 刘喜武. 弹性波场论基础[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2007.
- [7] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础(上)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.