

## 一种含柱形空腔结构橡胶层的吸声机理及优化\*

赵宏刚<sup>†</sup> 温激鸿 杨海滨 吕林梅 温熙森(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 装备综合保障技术重点实验室声学及振动组, 长沙 410073)  
(2013年12月27日收到; 2014年2月16日收到修改稿)

采用有限元法, 分析了含单层柱形空腔橡胶层(厚度 20 mm) 的吸声性能, 表明其吸声峰频率比相同尺寸的球形空腔低, 这与单个柱形和球形空腔的单极共振频率相对应, 通过谐波散射分析证实了空腔单极共振引起的能量耗散增强了声波的吸收。采用能量耗散功率及位移场分布, 对柱形空腔结构的吸声机理进行了深入分析。其次, 在钢背衬条件下分析了横波损耗因子对橡胶层吸声特性的影响, 并采用遗传算法对含不同尺寸柱形空腔橡胶层在 1.5—10 kHz 频段上的吸声特性进行了优化, 获得了较好的宽频吸声效果。

关键词: Mie 散射, 有限元法, 柱形空腔, 吸声

PACS: 43.30.Ky, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.63.134303

## 1 引言

橡胶吸声层广泛应用于潜艇等水下装备, 用于吸收干扰声波或噪声, 长期受到各国持续研究。吸声层通常是含有各种散射粒子以及声学结构的黏弹复合橡胶材料。散射粒子尺度通常为微米级, 如微空腔(发泡材料)<sup>[1,2]</sup>、实心微珠<sup>[3,4]</sup>、空心微珠等<sup>[5-7]</sup>。声学结构通常指各种声学空腔及重质散射体, 如柱形/球形/锥形空腔<sup>[8-10]</sup>以及局域共振结构<sup>[11-20]</sup>等。其中, Zhao 等分析了局域共振声子晶体的吸声性能<sup>[13,14]</sup>, 并将该结构引入橡胶吸声设计中, 实验验证了局域共振吸声现象<sup>[15]</sup>, 进而分析了钢背衬对局域共振吸声特性的影响<sup>[16]</sup>。Wen, Lü 等采用有限元法比较了不同形状局域共振结构的吸声特性及吸声规律, 并分析了不同结构的位移场图<sup>[17,18]</sup>。姜恒等则发展了木堆<sup>[19]</sup>及互穿网络<sup>[20]</sup>局域共振结构实现了宽频吸声。在这一领域, 利用薄层结构实现低频、宽带声波的吸收耗散是一技术难题。低频声波的耗散通常需借助声学结构得以改善。声学空腔产生的单极共振散射<sup>[1,6]</sup>以及局域共振结构产生的偶极共振散射<sup>[14,15]</sup>均能提升橡胶层的低频吸声性能。最近, Ivansson<sup>[8]</sup>将圆柱空

腔单周期嵌入橡胶层(空腔轴线与声波入射方向垂直, 而与橡胶层平行), 其研究工作表明, 在刚性背衬条件下, 同样半径的圆柱空腔要比球形空腔的单极共振频率低, 为了提升 8—22 kHz 频段的吸声性能, 采用圆柱形空腔可以使橡胶层设计得更薄。然而, 柱形空腔结构的吸声机理尚需深入分析, 且尚未开展钢背衬应用条件下的柱形空腔的低频、宽带吸声设计工作。

受 Ivansson 工作的启发, 本文引入有限元法<sup>[11,17]</sup>, 分析了含单层柱形空腔结构橡胶层的吸声性能, 进而采用 Mie 散射谐波分析揭示了单个空腔共振散射与橡胶层吸声峰的因果关系, 并与球形空腔相比较。其次, 采用能量耗散功率及位移场分布对空腔结构的吸声机理进行了深入分析。最后, 在钢背衬条件下讨论了横波损耗因子对橡胶层吸声特性的影响, 并采用遗传算法对橡胶层在 1.5—10 kHz 频段上的吸声性能进行了优化。

## 2 模型及分析方法

## 2.1 模型

在笛卡儿坐标系下, 图 1 给出含单层柱形空腔橡胶吸声层的局部结构模型。圆柱空腔半径为  $r_1$ ,

\* 国家自然科学基金(批准号: 11004249, 51275519)资助的课题。

<sup>†</sup> 通讯作者。E-mail: zhhg9603@sina.com

位于橡胶层厚度方向的对称中心面上, 其轴线沿  $z$  轴方向, 并沿  $y$  轴方向单周期排列, 相邻空腔间距 (晶格常数) 为  $a$ . 橡胶层厚度为  $d$ . 为防止声波边界绕射并简化分析, 假设橡胶层沿  $yo$  平面无限延伸, 即圆柱空腔无限长, 且沿  $y$  方向无限周期排列. 橡胶层前端 (左侧) 为半无限水介质, 一列平面纵波垂直于  $z$  轴入射. 橡胶层后端 (右侧) 为背衬, 在理论分析中, 背衬常采用水背衬、空气背衬和钢背衬. 钢背衬通常为有限厚度钢板后伴随半无限空气介质. 边界  $S^-$  和  $S^+$  为有限元计算区域.

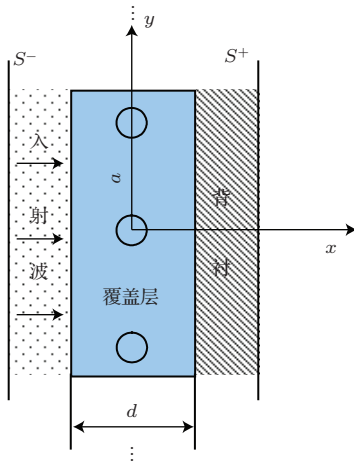


图1 含有周期排列柱形空腔的橡胶层吸声结构

## 2.2 分析方法

考虑入射平面波垂直于  $z$  轴, 声学性能分析转化为与  $z$  轴无关的二维问题. 略去时间谐波因子  $\exp(-j\omega t)$ , 入射波为

$$p_{in}(x, y) = p_0 e^{j(k_x x + k_y y)}, \quad (1)$$

其中,  $k_x = k \cos \theta$ ,  $k_y = k \sin \theta$ ,  $k = \omega/c$ ,  $c$  为入射端介质声速,  $\theta$  为入射波与  $x$  轴夹角. 由于散射体在基体中呈周期排列, 根据 Bloch 定理, 固体中的位移  $\{u\}$  和液体中的声压  $\{p\}$  均具有下列二维声波方程 (式中  $\chi$  代表位移和声压):

$$\chi(x, y + a) = \chi(x, y) e^{ja k_y}, \quad (2)$$

其中,  $a$  为  $y$  方向的晶格常数, 这样可简化为针对单个周期单元进行有限元分析. 在入射声波域截面  $S^-$  上, 总波场包括入射波和反射波, 并将反射波平面波展开, 得

$$p_{tot}(x, y) = p_{in}(x, y) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} R_n e^{j[-k_{xn}x + (2n\pi/a + k_y)y]}. \quad (3)$$

$$\text{令 } k_{yn} = 2n\pi/a + k_y,$$

$$k_{xn} = \sqrt{k^2 - k_{yn}^2}. \quad (4)$$

类似地, 在声波透射域截面  $S^+$  上, 透射声平面波展开为

$$p_t(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} T_n e^{j[k'_{xn}x + (2n\pi/a + k'_y)y]}, \quad (5)$$

其中,  $k'_{xn}$ ,  $k'_y$  定义同前, 分别是透射声波在截面  $S^+$  上沿  $x, y$  轴的波矢分量, 与透射端 (背衬) 介质声速  $c'$  有关. 整个结构的流固耦合方程为 [11,17]

$$\begin{bmatrix} [R]^T & [K^s] - \omega^2 [M^s] \\ [K^P] - [C_\Phi] - \omega^2 [M^P] & -\rho_0 \omega^2 [R] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \{p\} \\ \{u\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F^m\} \\ \{C_0\} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,  $\rho_0$  为流体介质密度,  $[M^P]$  为流体质量矩阵,  $[K^P]$  为流体刚度矩阵,  $[R]$  为流固耦合矩阵;  $[M^s]$  为固体质量矩阵,  $[K^s]$  为固体刚度矩阵,  $\{F^m\}$  为固体结构所受机械激励的节点载荷矩阵.  $[C_\Phi]$ ,  $\{C_0\}$  为边界等效节点载荷矩阵. 根据周期边界条件 (2) 式和边界  $S^-, S^+$  上的压力及速度连续条件, 可求出反射波和透射波平面波展开系数, 即 (3) 式和 (5) 式中  $R_n$  和  $T_n$ . 根据声功率计算公式

$$I = \int_0^T \text{Re}(p)\text{Re}(v) dt / T, \quad (7)$$

其中,  $\text{Re}$  代表取实部,  $p$  为介质声压,  $v$  为质点速度, 计算得出声波能量反射系数

$$r = \sum_{n=-N'}^{N'} |R_n|^2 k_{yn} / (|p_0|^2 k_y), \quad (8)$$

其中,  $N'$  为反射平面波传播阶数, 能量透射系数为

$$t = \rho \sum_{n=-N''}^{N''} |T_n|^2 k'_{yn} / (\rho' |p_0|^2 k_y), \quad (9)$$

其中,  $N''$  为透射平面波传播阶数,  $\rho$  和  $\rho'$  分别为入射端和透射端介质密度. 根据能量守恒, 吸声系数为  $\alpha = 1 - r - t$ .

## 3 分析与讨论

### 3.1 吸声特性及机理

取柱形空腔半径  $r_1 = 3 \text{ mm}$ , 空腔间距  $a = 100 \text{ mm}$ , 橡胶层厚度  $d = 20 \text{ mm}$  (如无说明, 下文同). 首先, 图 2 给出空气背衬条件下橡胶

层的声学性能. 分析中各材料参数见表 1, 其中体模量损耗因子  $\eta_l$  取 0.05, 而剪切模量损耗因子  $\eta_t$  取 0.1(如无说明, 全文同). 从图 2 中可以看出, 在空气背衬条件下, 由于空气背衬和橡胶层阻抗失配, 透射系数几乎为零(图中略去),  $\alpha + r \approx 1$ . 吸声峰频率为 4.62 kHz, 相应地反射系数在吸声峰频率处存在最小值.

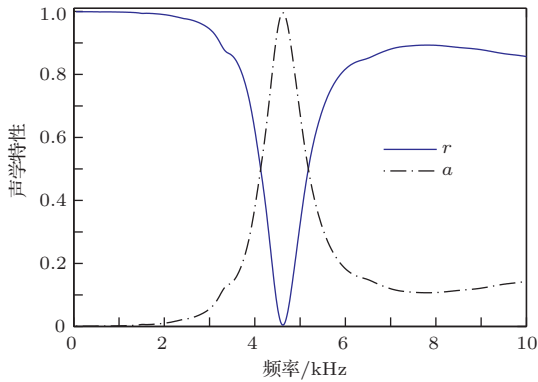


图 2 空气背衬条件下橡胶层声学性能

表 1 论文分析中所用的材料参数

材料	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$c_l/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
钢	7890	5780	3220
橡胶	1100	1470	95
水	1000	1480	
空气	1.29	340	

由于橡胶层声学特性与单个空腔声散射特性密切相关, 为了说明上述吸声峰的产生原因, 下面分析平面波入射到单个圆柱空腔的 Mie 散射特性, 即  $T$ -矩阵分析.  $T$ -矩阵表示散射场系数  $b_{Pn}$  与入射场系数  $a_{Pn}$  之间的线性关系 [21,22]:

$$b_{Pn} = \sum_{P'n'} T_{Pn P'n'} a_{P'n'}, \quad (10)$$

其中,  $P = L, M$ , 分别表示柱坐标系下的纵波和横波模式.  $n$  为谐波阶数, 从  $-\infty$  到  $+\infty$ , 一般取  $n \leq N_{\max}$ . 每阶谐波散射矩阵  $T_l$  中含四个非零元素, 分别为 LL, LM, ML, MM. 各元素含义是第一个字母表示入射波模式, 而第二个字母表示散射波模式, 如 LL 表示 Mie 散射过程中纵波入射同时以纵波散射的系数. 由于空腔在低频段主要发生单极 ( $l = 0$ ) 散射, 因而首先考查其入射纵波的单极散射特点. 因橡胶中单个柱形空腔  $T_0$  散射矩阵中  $LM = 0$ , 图 3 仅给出 LL 幅值随频率的变化(点划线).  $T_0$  散射矩阵中仅 LL 非零, 这意味着柱形空腔在零阶谐波散射中未发生波型转化, 呈径向

运动, 其峰值标志着空腔存在径向共振, 即单极共振 [1,6]. 从图 3 可看出, 单个柱形空腔单极共振频率为 4.08 kHz. 为便于比较, 图 3 给出相同尺寸球形空腔的单极 Mie 散射特性(实线), 其共振频率为 10.2 kHz, 这高于相同直径的圆柱空腔单极共振频率. 相应地, 球形空腔构成的橡胶层吸声峰频率为 11.3 kHz(见文献 [9]), 高于柱形空腔. 比较图 3 和图 2 可见, 橡胶层的吸声峰频率与单个空腔的单极共振频率间存在一定差异, 这主要由空腔间的多重散射效应引起. 图 4 给出柱形空腔一阶谐波 Mie 散

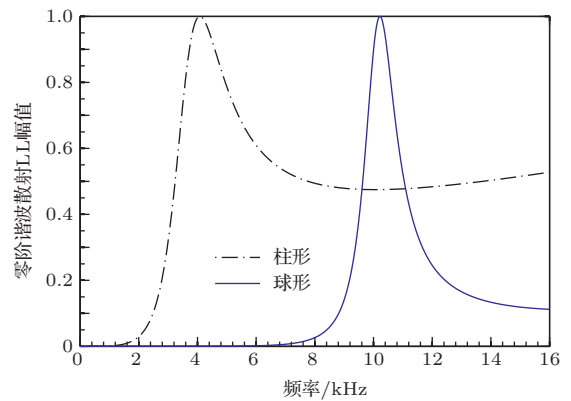


图 3 单个柱形和球形空腔零阶谐波散射比较

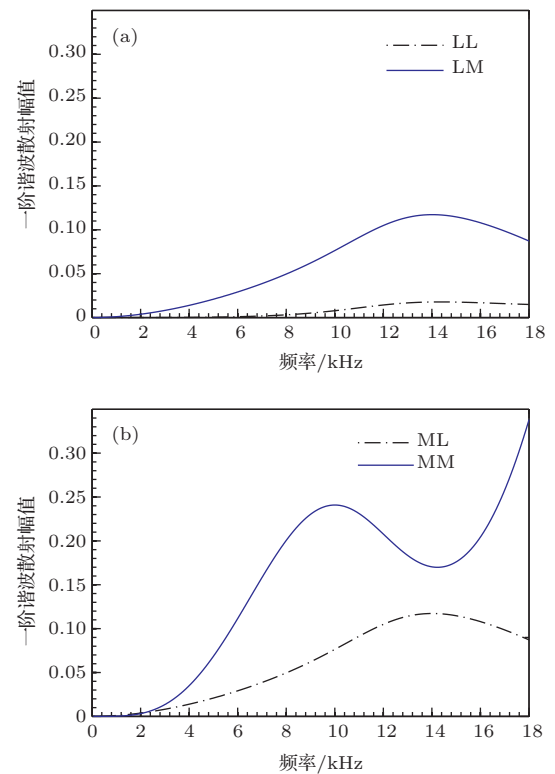


图 4 柱形空腔一阶谐波散射 (a) 纵波入射; (b) 横波入射

射幅值频谱, 从中可看出, 无论纵波还是横波入射, 均存在纵波和横波间的转化. 另一个显著特点是, 一阶散射矩阵各元素幅值的峰值频率均高于单极共振频率, 且其幅值比零阶谐波散射幅值小, 如一阶谐波散射中LM幅值最大仅为0.12. 进一步分析表明, 随谐波阶数增大, 空腔各阶谐波散射峰值频率均高于单极共振频率, 而谐波散射幅值进一步降低, 限于篇幅, 此处略去高阶谐波Mie散射特性. 比较图3和图4可看出, 在单极共振频率处, 一阶谐波Mie散射幅值小于零阶谐波散射幅值约两个数量级, 这说明在低频段上空腔单极共振决定了橡胶层的声学性能, 单极共振引起的能量耗散增强了声波的吸收.

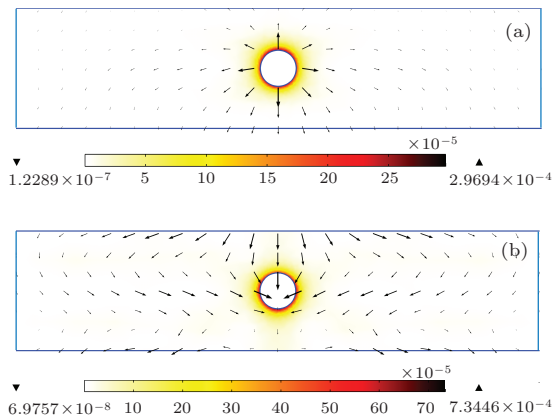


图5 (网刊彩色) 水背衬(a)和空气背衬(b)条件下橡胶层的能量耗散功率分布及位移场分布

为了给出柱形空腔吸声机理的直观理解, 我们计算了吸声峰频率处单空腔截面上的能量耗散功率分布和位移场分布, 如图5所示. 其中, 位移场分布中各箭头描述了其起点处介质的位移, 箭头方向为位移方向, 箭头长度为位移幅值, 蓝色实线外框表示橡胶层基体域. 考虑水和橡胶阻抗匹配, 两者界面对声波散射影响较小, 图5(a)首先给出水背衬条件下橡胶层在吸声峰频率处的能量耗散及位移场分布, 其位移场呈现出明显的柱对称径向分布特征, 位移峰值和介质能量耗散功率最大值出现在临近空腔/橡胶界面处, 且随着离柱心距离的增大能量耗散功率和位移逐步减弱, 这表明能量耗散主要发生在空腔/橡胶界面附近. 进一步, 为了说明背衬对能量损耗及位移场的影响, 图5(b)给出空气背衬条件下橡胶层的能量耗散及位移场分布, 可看出能量耗散功率分布与水背衬相似, 能量耗散主要发生在空腔/橡胶界面附近. 但位移场发生了变化, 在空气背衬条件下, 声波在背衬界面处反射强烈,

空腔形成的柱对称径向分布特征遭破坏, 背衬声反射增强了橡胶层对声波的耗散, 声波能量耗散功率峰值由水背衬条件下的  $3.0 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$  增大到  $7.3 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 3.2 影响因素及吸声优化

考虑橡胶层通常在钢背衬条件下使用且纵波损耗因子一般较小, 图6给出钢背衬条件下不同剪切模量损耗因子时橡胶层的吸声特性. 分析中剪切模量损耗因子分别为0.2, 0.5和1.0, 钢板厚度为30 mm. 从图中可看出, 在损耗因子为0.2时, 橡胶层的吸声峰频率为3.5 kHz, 这比空气背衬条件下的吸声峰频率(4.62 kHz见图2)低, 这是由于钢背衬的质量效应引起的<sup>[16]</sup>. 当损耗因子增大时, 吸声性能逐步增强, 吸声带宽增加, 吸声峰略向高频移动. 图7进一步给出不同阻尼条件下橡胶层的反射系数. 为了给出其反射特性细节, 纵坐标定义为  $10 \times \lg(r)$ , 单位为分贝. 从图7可看出, 随着橡胶损耗因子增大, 橡胶层反射系数呈指数量级减小, 其在较大阻尼条件下呈现良好的无反消声特性.

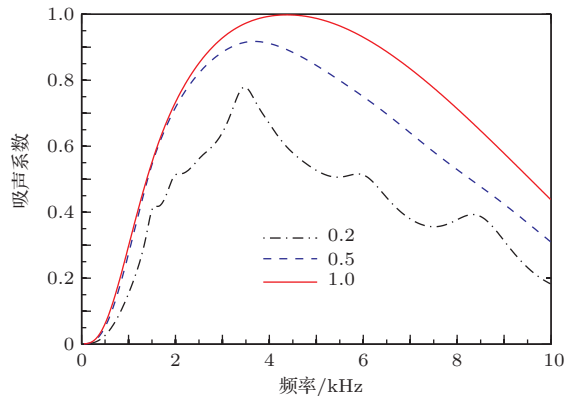


图6 剪切模量损耗因子对橡胶层吸声特性的影响

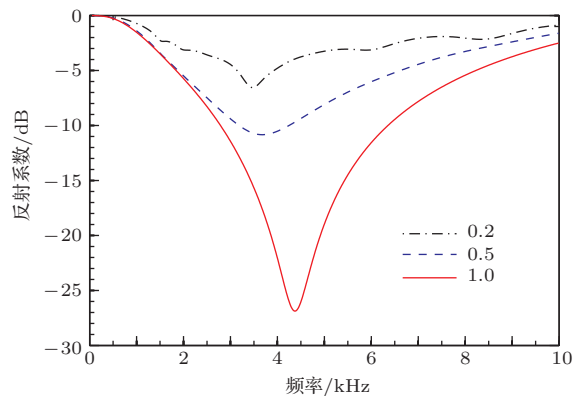


图7 剪切模量损耗因子对橡胶层声反射特性的影响



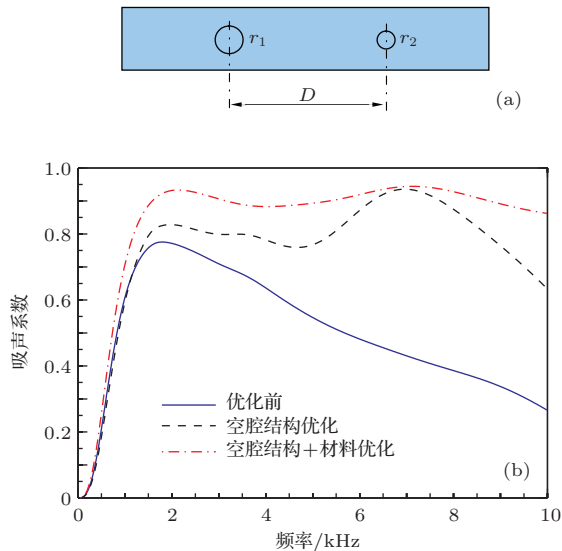


图8 (a) 并联空腔结构; (b) 吸声优化结果比较

从以上讨论可以看出, 单一尺寸空腔结构的吸声带宽随着损耗因子的增大逐步增大, 但其吸声带宽仍有限, 采用不同空腔并联, 在不增加橡胶层厚度的条件下有望获得较宽频吸声. 采用图8(a)所示两种柱形空腔并联结构, 其中空腔半径分别为 $r_1, r_2$ , 空腔间距为 $D$ , 保持橡胶层厚度20 mm不变. 在钢背衬条件下, 图8(b)比较了橡胶层吸声优化结果. 优化前参数取值见表2, 优化前橡胶层吸声频谱如图中实线所示, 与图1相比, 由于空腔间距减小, 橡胶层吸声峰出现在1.79 kHz处, 低于图1中空腔间距较大时橡胶层的吸声峰频率, 这主要是由于此时空腔填充率增大, 减小了橡胶层等效弹性模量, 导致钢背衬条件下橡胶层吸声峰频率降低<sup>[16]</sup>. 首先取空腔结构参数 $r_1, r_2$ 以及 $D$ 为优化变量, 采用遗传算法对橡胶层在1.5—10 kHz频段的吸声性能进行优化, 优化目标函数 $F = \max(\lg r)$ ,  $r$ 为反射系数. 参数优化结果见表2, 优化吸声系数如图8(b)虚线所示, 从中可看出, 通过两种尺寸的空腔并联, 可实现宽频吸声, 吸声带宽较单一尺寸空腔的吸声带宽大幅增加. 进一步, 将空腔结构参数( $r_1, r_2, D$ )以及橡胶参数( $c_t, c_l, \eta_t$ )选为优化变量, 对橡胶层在1.5—10 kHz频段的吸声性能进行优化, 参数优化结果见表2, 橡胶纵波和横波速度优化结果分别为 $1259.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $114.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 橡胶层吸声优化结果如图8(b)中点划线所示, 可看出通过结构和材料参数优化, 橡胶层的吸声性能和带宽得到进一步提升. 比较两次优化结果可看出, 橡胶材料参数不同, 相应地空腔结构参数随之不同(反之亦然), 这说明通过橡胶材

料和声学空腔结构的最佳匹配, 才能获得最佳吸声效果.

表2 吸声优化参数结果比较

	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$\eta_t$
优化前	3.0	3.0	50	0.5
空腔优化	3.8	1.4	47.4	0.5
空腔、材料优化	4.9	1.4	47.4	0.85

## 4 结 论

本文采用有限元法, 分析了含单层柱形空腔橡胶层的吸声性能, 表明其吸声峰频率低于相同尺寸的球形空腔, 这与单个柱形和球形空腔的单极共振 Mie 散射频率相对应, 采用谐波散射分析证实了橡胶层的吸声峰主要由空腔单极共振引起. 其次, 对橡胶层能量耗散功率及位移场分布进行了分析, 深入分析了空腔结构的吸声机理, 表明声波能量耗散集中在空腔/橡胶界面处, 空气背衬声反射增强了声波能量耗散. 最后, 在钢背衬条件下讨论了横波损耗因子对橡胶层吸声特性的影响, 损耗因子增大, 吸声性能增强. 为改善吸声带宽, 利用不同尺寸空腔并联结构, 采用遗传算法对橡胶层在1.5—10 kHz频段上的吸声特性进行了优化, 获得了较好的宽频吸声效果.

感谢武汉大学物理科学与技术学院刘正猷教授的有益讨论.

## 参考文献

- [1] Gaunaud G C, Barlow J 1984 *J. Acoust. Soc. Am.* **75** 23
- [2] Liang B, Zou X Y, Cheng J C 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 1419
- [3] Hinders M K, Rhodes B A, Fang T M 1995 *J. Sound Vib.* **185** 219
- [4] Zhao H G, Liu Y Z, Yu D L, Wang G, Wen J H, Wen X S 2007 *J. Sound Vib.* **303** 185
- [5] Baird A M, Kerr F H, Townend D J 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 1527
- [6] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 123518
- [7] Yu L G, Li Z H, Wang R Q, Ma L L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064301 (in Chinese)[于利刚, 李朝晖, 王仁乾, 马黎黎 2013 物理学报 **62** 064301]
- [8] Ivansson S M 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 2622

- [9] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, and Wen X S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4700 (in Chinese) [赵宏刚, 刘耀宗, 温激鸿, 郁殿龙, 温熙森 2006 物理学报 **55** 4700]
- [10] Tang W L, He S P, Fan J 2005 *Acta Acoust.* **30** 289 (in Chinese)[汤渭霖, 何世平, 范军 2005 声学学报 **30** 289]
- [11] Hladky-Hennion A C, Decarpigny J N 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **90** 3356
- [12] Liu Z Y, Zhang X, Mao Y W, Zhu Y Y, Yang Z, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [13] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wang G, Wen X S 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2132
- [14] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *Phys. Lett. A* **367** 224
- [15] Zhao H G, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 023519
- [16] Zhao H G, Wen J H, Yang H B, Lv L M, Wen X S 2014 *Appl. Acoust.* **76** 48
- [17] Wen J H, Zhao H G, Lv L M, Yuan B, Wang G, Wen X S 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 1201
- [18] Lü L M, Wen J H, Zhao H G, Meng H, Wen X S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214302 (in Chinese)[吕林梅, 温激鸿, 赵宏刚, 孟浩, 温熙森 2012 物理学报 **61** 214302]
- [19] Jiang H, Wang Y R, Zhang M L, Hu Y P, Lan D, Zhang Y M, Wei B C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 104101
- [20] Jiang H, Wang Y R, Zhang M L, Hu Y P, Lan D, Wu Q L, Lu H T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 026202
- [21] Mei J, Liu Z Y, Qiu C 2005 *J. Phys.: Condens. Matter* **17** 3735
- [22] Yang H B, Li Y, Zhao H G, Wen J H, Wen X S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154301 (in Chinese)[杨海滨, 李岳, 赵宏刚, 温激鸿, 温熙森 2013 物理学报 **62** 154301]

## Acoustic absorption mechanism and optimization of a rubber slab with cylindrical cavities\*

Zhao Hong-Gang<sup>†</sup> Wen Ji-Hong Yang Hai-Bin Lü Lin-Mei Wen Xi-Sen

(Vibration and Acoustics Research Group, Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

( Received 27 December 2013; revised manuscript received 16 February 2014 )

### Abstract

The finite element method is introduced to investigate the absorption of a rubber slab (20 mm thick) with one layer of cylindrical cavities. It has a lower frequency absorption peak than that with spherical cavity in the same size, which is determined by the monopole resonance of cavities. Analysis of partial wave scattering verifies that the absorption peak is induced by the monopole resonance. Power dissipation density and displacement pattern of one unit cell is used to clarify intuitively the absorption mechanism of the cavity. Then the effect of damping of transverse modulus on the absorption is investigated under the condition of a steel backing. Both the physical and structural parameters of the rubber slab are optimized by a genetic algorithm for favorable absorption from 1.5 to 10 kHz.

**Keywords:** Mie scattering, finite element method, cylindrical cavity, acoustic absorption

**PACS:** 43.30.Ky, 43.20.+g

**DOI:** 10.7498/aps.63.134303

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11004249, 51275519).

† Corresponding author. E-mail: zhhg9603@sina.com