

含玻璃微球的黏弹性复合材料覆盖层的水下吸声性能分析

于利刚 李朝晖[†] 王仁乾 马黎黎

(北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

(2012年6月28日收到; 2012年9月15日收到修改稿)

水下吸声覆盖层对潜艇的隐身具有重要的意义, 因此得到了广泛的关注. 本文对含有玻璃微球的黏弹性复合材料覆盖层的水下吸声性能进行了理论分析. 采用等效参数法计算了玻璃微球的体积含量对复合材料的力学和声学性能的影响. 应用声波在多层介质中传播的一维模型, 计算了不同玻璃微球体积含量的单层复合材料覆盖层的吸声性能. 结果表明, 增加玻璃微球的体积含量可以提高覆盖层的低频吸声性能, 但是其高频吸声性能降低. 采用遗传算法对玻璃微球在覆盖层厚度方向上的体积含量分布进行优化. 优化的多层结构可以在一定的频带内改善覆盖层的表面与水的声阻抗匹配, 在保证覆盖层的高频吸声系数大于某一限值(0.7)的前提下, 提高其低频吸声性能. 另外, 多层优化结构覆盖层不含宏观的空腔结构, 不影响覆盖层的耐压性能. 其结构简单, 对制备工艺的要求不高. 因此, 本文形成的理论方法适用于水下吸声覆盖层的设计.

关键词: 水下吸声, 黏弹性复合材料, 玻璃微球, 遗传算法

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.62.064301

1 引言

水下吸声覆盖层在水声学领域的应用比较广泛, 特别是对潜艇的隐身具有重要的意义, 因此, 相关的研究一直得到了广泛的关注. 如何提高低频吸声性能, 是水下吸声覆盖层研究的难点. 为了提高低频吸声性能, 传统的吸声覆盖层中通常含有宏观的空腔结构^[1,2], 但是宏观的空腔结构的引入会降低覆盖层的高频吸声性能和耐高压性能. 近年来, 一些新兴的声学理论和材料在水下吸声覆盖层方面的应用研究得到了发展. 声子晶体理论是近年来声学领域研究的热点, 该理论在水下吸声覆盖层的应用得到了尝试^[3-7]. 声子晶体覆盖层中含有周期性结构, 其共振吸声可以提高覆盖层的低频吸声性能. 随着压电聚合物材料性能的不不断提高, 压电聚合物材料成为发展智能型水下吸声覆盖层的理想材料. 聚合物压电材料不仅可以通过机械阻尼吸声, 还可以通过压电效应将声波转换为电能, 由分流电

路损耗掉^[9-11]. 另外, 充满黏滞流体的多孔金属板也是一种新型的水下吸声材料. 研究表明, 选择合适的黏滞流体, 采用较薄的多孔金属板就可以获得很好的低频吸声性能^[12]. 虽然新兴声学理论和材料在水下覆盖层方面的应用研究取得一定的进展, 但是满足到实际应用的要求, 还需要较长的时间.

相比较而言, 较为传统的理论和材料在水下吸声覆盖层的应用研究仍具有一定的潜力. 含有微小空气腔体的黏弹性复合材料一直是水声领域的研究热点^[13-24]. 微小的空气腔体的引入可以改变黏弹性聚合物复合材料的特性声阻抗, 也可以提高材料的机械阻尼. 为了保持复合材料的耐压性能, 微小空气腔体由玻璃球壳包覆. 玻璃微球的直径一般为几十微米, 远远小于入射声波的波长, 因此认为复合材料的性质均匀. Baird等^[19]指出利用含玻璃微球的黏弹性复合材料, 采用等效参数的方法, 优化设计多层结构的水下吸声覆盖层, 但是到目前为止相关的研究并不多见.

本文对含有玻璃微球的黏弹性复合材料

[†] 通讯作者. E-mail: lizhcat@pku.edu.cn

覆盖层的水下吸声性能进行了理论分析. 采用 Haberman^[20] 的等效参数方法分析了玻璃微球的体积含量对复合材料力学和声学性能的影响. 采用声波在多层介质中传播的一维模型, 分析了玻璃微球体积含量对复合材料覆盖层吸声性能的影响, 以提高覆盖层的低频吸声性能, 同时保证高频吸声系数大于某一限值 (0.7) 为优化目标, 采用遗传算法对玻璃微球体积含量在覆盖层厚度方向上的分布进行优化. 从声阻抗匹配的角度分析了多层优化结构提高吸声性能的机理. 另外, 借鉴橡胶行业的生产技术, 简单分析了以含玻璃微球的复合材料为原材料, 制备多层优化结构覆盖层的生产工艺.

2 黏弹性复合材料的力学和声学参数与玻璃微球体积分量的关系

2.1 等效参数模型

Haberman 等^[20] 采用自洽理论推导出含玻璃微球的黏弹性复合材料的等效力学参数公式 (1)—(8), 计算了不同玻璃微球体积分量的复合材料板对水下声波的传输损耗, 但是没有计算复合材料的力学和声学参数. 为了更好地了解玻璃微球对复合材料力学和声学性质的影响, 本文采用 Haberman 的公式分析了玻璃微球体积分量对复合材料力学和声学性质的影响.

$$\lambda^{\text{eff}} = \lambda^{\text{M}} + f^{\text{I}} \left\{ \left[(\lambda^{\text{I}} - \lambda^{\text{M}}) M^{\text{I}} + \frac{2}{3} (M^{\text{I}} - N^{\text{I}}) (\mu^{\text{I}} - \mu^{\text{M}}) \right] + 3 \frac{\Delta a}{a} \left[(\lambda^{\text{C}} - \lambda^{\text{M}}) M^{\text{I}} \phi^{\text{C}} + \frac{2}{3} (M^{\text{I}} - N^{\text{I}} \psi^{\text{C}}) (\mu^{\text{C}} - \mu^{\text{M}}) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\mu^{\text{eff}} = \mu^{\text{M}} + f^{\text{I}} N^{\text{I}} \left\{ (\mu^{\text{I}} - \mu^{\text{M}}) + 3 \frac{\Delta a}{a} (\mu^{\text{C}} - \mu^{\text{M}}) \psi^{\text{C}} \right\}, \quad (2)$$

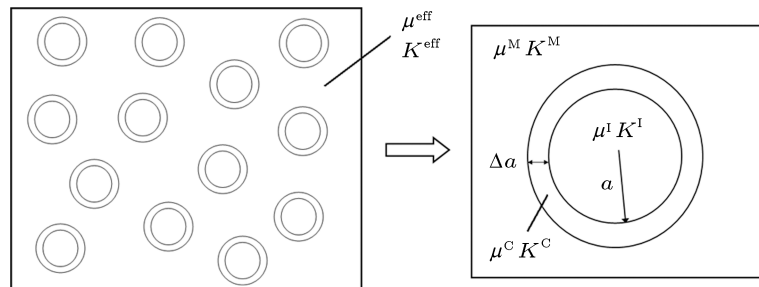


图 1 含玻璃微球的黏弹性复合材料的微观结构示意图

$$M^{\text{I}} = K^{\text{eff}} \cdot \left\{ K^{\text{eff}} + \alpha^{\text{eff}} (K^{\text{I}} - K^{\text{eff}}) + 3 \frac{\Delta a}{a} \left[\frac{1}{K^{\text{C}}} \left[\alpha^{\text{C}} K^{\text{eff}} (1 - \alpha^{\text{eff}}) - \alpha^{\text{eff}} K^{\text{C}} (1 - \alpha^{\text{C}}) \right] \right] (K^{\text{I}} - K^{\text{C}}) \right\}^{-1}, \quad (3)$$

$$N^{\text{I}} = \mu^{\text{eff}} \cdot \left\{ \mu^{\text{eff}} + \beta^{\text{eff}} (\mu^{\text{I}} - \mu^{\text{eff}}) + 3 \frac{\Delta a}{a} \times \left[\frac{\beta^{\text{C}} \mu^{\text{eff}} (1 - \beta^{\text{eff}}) - \beta^{\text{eff}} \mu^{\text{C}} (1 - \beta^{\text{C}})}{\mu^{\text{C}}} \right] \times (\mu^{\text{I}} - \mu^{\text{C}}) \right\}^{-1}, \quad (4)$$

$$\phi^{\text{C}} = \frac{K^{\text{C}} - \alpha^{\text{C}} (K^{\text{I}} - K^{\text{C}})}{K^{\text{C}}}, \quad (5)$$

$$\psi^{\text{C}} = \frac{\mu^{\text{C}} - \beta^{\text{C}} (\mu^{\text{I}} - \mu^{\text{C}})}{\mu^{\text{C}}}, \quad (6)$$

$$\alpha^x = \frac{1}{3} \left(\frac{1 + \sigma^x}{1 - \sigma^x} \right), \quad (7)$$

$$\beta^x = \frac{2}{15} \left(\frac{4 - 5\sigma^x}{1 - \sigma^x} \right). \quad (8)$$

图 1 为含玻璃微球的黏弹性复合材料的微观结构示意图. μ, λ, K 为拉梅常数、剪切模量和体积压缩模量, 上标 eff, M, C, I 分别为复合材料、聚合物基材 (Matrix)、玻璃球壳 (Coating)、球壳内包含的 (Inclusion) 空气. f^{I} 为玻璃球壳中的空气在复合材料中占的体积比, $\Delta a/a$ 为球壳的厚度和半径之比. σ 为泊松比, 上标 x 在具体计算中将会被 eff, M, C, I 代替. 本文采用了文献 [19] 给定的聚合物基材、玻璃和空气的参数. 表 1, 2 分别为黏弹性聚合物的和玻璃微球的参数.

表 1 黏弹性聚合物的力学参数

体积压缩模量 /Pa	3×10^9
密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1100
剪切模量的绝对值/Pa,	$\lg \mu^{\text{M}} = 6.67569 + 3.954 \times 10^{-2} \lg f$
f 为频率	$+9.39 \times 10^{-3} (\lg f)^2 + 3.85 \times 10^{-3} (\lg f)^3$
剪切模量的损耗角	$\lg \delta^{\text{M}} = 9.792 \times 10^{-2} + 5.9 \times 10^{-4} \lg f$
	$+6.89 \times 10^{-2} (\lg f)^2 - 9.25 \times 10^{-3} (\lg f)^3$

采用迭代法可以计算出含玻璃微球的黏弹性复合材料的体积模量 K^{eff} 和剪切模量 μ^{eff} , 而复合材料的密度、纵波波速分别为

$$\rho^{\text{eff}} \approx \rho^{\text{M}}(1 - f^{\text{I}}) + \rho^{\text{C}} f^{\text{I}} \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^3, \quad (9)$$

$$c^{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\frac{2}{3}K^{\text{eff}} + \mu^{\text{eff}}}{\rho^{\text{eff}}}}. \quad (10)$$

表 2 玻璃微球的力学参数

玻璃的密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1700
玻璃的体积模量/Pa	2.1×10^9
玻璃的剪切模量/Pa	1.26×10^9
玻璃的剪切模量损耗因子	0.1
球壳内含空气的体积模量/Pa	1.4×10^5
球壳内含空气的密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.28
球壳和球壳内含空气的体积之比 $\frac{V^{\text{C}}}{V^{\text{I}}}$	2.5×10^{-2}

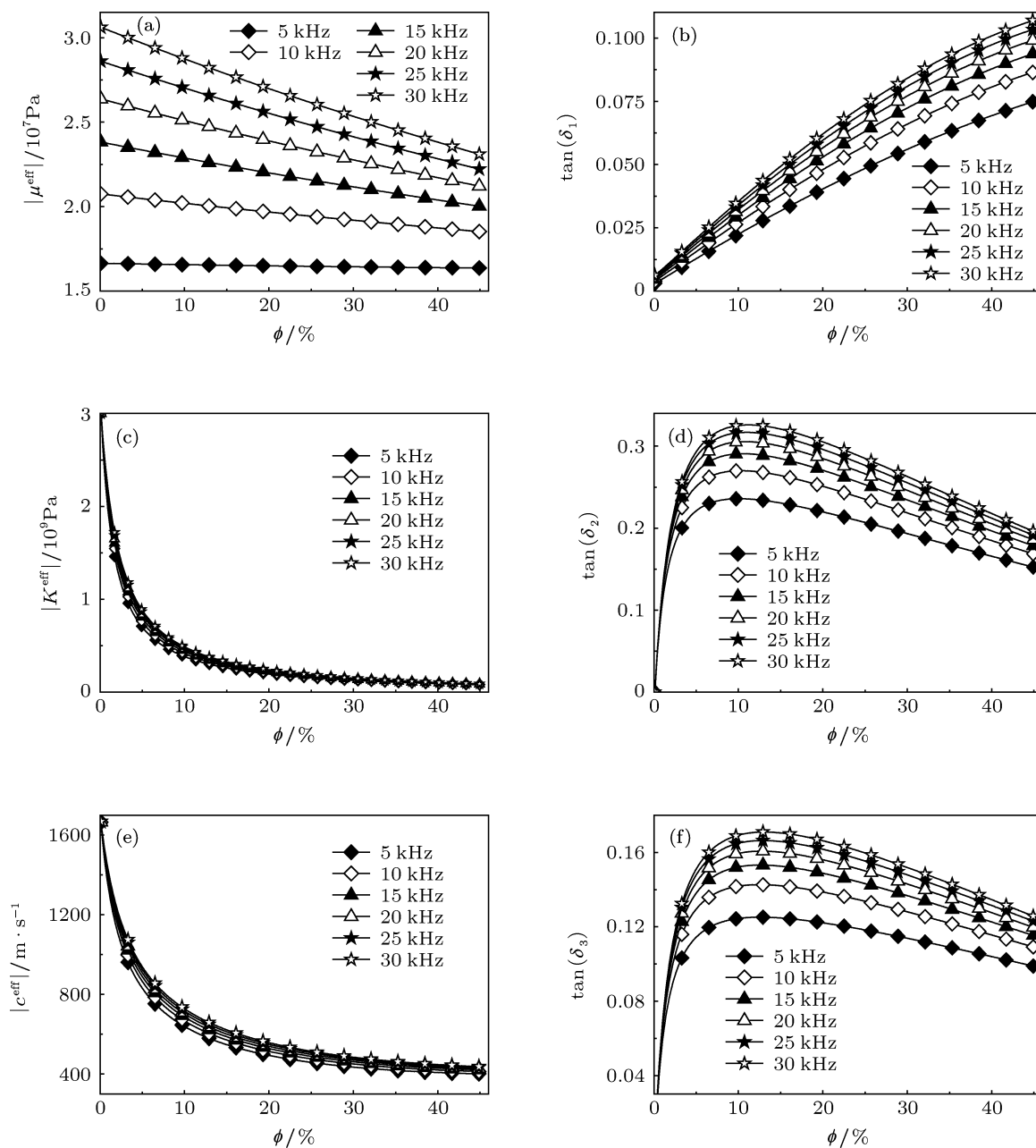


图 2 不同频率下 ($f = 5, 10, 15, 20, 25, 30 \text{ kHz}$) 复合材料的力学和声学参数随玻璃微球的体积含量的变化 (a), (b) 为剪切模量的绝对值 $|\mu^{\text{eff}}|$ 和损耗角的正切值 $\tan(\delta_1)$; (c), (d) 为体积模量的绝对值 $|K^{\text{eff}}|$ 和损耗角的正切值 $\tan(\delta_2)$; (e), (f) 为纵波波速的绝对值 $|c^{\text{eff}}|$ 和损耗角的正切值 $\tan(\delta_3)$

2.2 数值计算结果与分析

由于黏弹性聚合物材料的力学和声学参数是频率 f 的函数, 因此计算了不同频率 ($f = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ kHz) 下, 复合材料的力学和声学参数随体积含量 ϕ 的变化. 如图 2(a), (b) 所示, 复合材料的剪切模量的绝对值 $|\mu^{\text{eff}}|$ 和损耗角正切值 $\tan(\delta_1)$ 随频率的升高而增大, 增大的幅度随频率的升高而减小. 在 f 较低的情况下, $|\mu^{\text{eff}}|$ 随 ϕ 的变化不大; 在频率较高的情况下, $|\mu^{\text{eff}}|$ 会随 ϕ 的升高而减小, 近似线性变化. 而剪切模量损耗角的正切值 $\tan(\delta_1)$ 随 ϕ 的升高而增大, 在 ϕ 较大时近似线性变化. 如图 2(c) 所示, 不同频率的体积模量的绝对值 $|K^{\text{eff}}|$ 几乎是重合的, 说明 $|K^{\text{eff}}|$ 随频率的变化不大. 当 ϕ 较小时, $|K^{\text{eff}}|$ 随着 ϕ 的增加而显著减小; 而当 ϕ 较大时, $|K^{\text{eff}}|$ 随着 ϕ 的增大而缓慢减小. 如图 2(d) 所示, 复合材料的体积模量损耗角的正切值 $\tan(\delta_2)$ 随频率的升高而增大, 增大的幅度随频率的升高而减小. 当 ϕ 较小时, $\tan(\delta_2)$ 随着 ϕ 的升高而显著增大; 当 ϕ 较大时, $\tan(\delta_2)$ 随着 ϕ 的升高而缓慢增大; 当 $\phi \approx 10\%$ 时, $\tan(\delta_2)$ 到达最大值; ϕ 继续增大, $\tan(\delta_2)$ 逐渐减小. 对比图 2(a), (c) 可以看出, $|K^{\text{eff}}|$ 大约比 $|\mu^{\text{eff}}|$ 大两个数量级. 对比图 2(b), (d) 可以看出, 虽然当 $\phi = 0$ 时, $\tan(\delta_2) = 0$, 但是当 ϕ 增加, $\tan(\delta_2)$ 比 $\tan(\delta_1)$ 大很多. 例如 $\phi = 10\%$, $f = 10$ kHz 时, $\tan(\delta_1)$ 和 $\tan(\delta_2)$ 分别为 0.0275 和 0.270, 相差接近一个数量级. 因此, 如图 2(e), (f) 所示, 复合材料纵波声速随 ϕ 的变化趋势与体积模量相似. 总之, 由于玻璃微球的引入, 黏弹性复合材料的力学和声学阻尼会显著增加. 由于玻璃微球的体积含量 ϕ 在一定范围的变化可以显著影响复合材料的声学性质, 可以通过改变玻璃微球的体积含量形成多种声学性质不同的复合材料.

3 含玻璃微球的黏弹性复合材料吸声性能分析

3.1 声波在多层介质中传播的一维模型

本文参考声波在多层介质中的传播理论^[25] 针对水下覆盖层的边界条件, 建立声波在多层黏弹性复合材料中传播的一维模型. 如图 3 所示, 假设 N 层黏弹性复合材料粘贴在一层钢板上, 复合材料和空气接触, 而钢板和空气接触, 复合材料和钢板的横

向尺寸远大于其厚度, 水和空气为半无限大空间. 当声波由水中垂直入射到复合材料覆盖层上, 在各个界面上发生反射和透射. 设界面 1 的声压和质点振速为 P_1, U_1 界面 2 的声压和质点振速为 P_2, U_2 两个界面的声压和质点振速的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_1 l_1) & j\rho_1 c_1 \sin(k_1 l_1) \\ \frac{j \sin(k_1 l_1)}{\rho_1 c_1} & \cos(k_1 l_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 $\rho_1 c_1$ 为第一层复合材料覆盖层的特性声阻抗, l_1 为覆盖层的厚度, $k_1 = \omega/c_1$ 为波数, c_1 为复合材料中的纵波声速, B_1 为声压和质点振速的传递矩阵. 同理, 界面 1 与界面 3 的声压和质点振速的关系为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} \cos(k_2 l_2) & j\rho_2 c_2 \sin(k_2 l_2) \\ \frac{j \sin(k_2 l_2)}{\rho_2 c_2} & \cos(k_2 l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix} = B_1 B_2 \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

B_2 为第二层复合材料的声压和质点振速的传递矩阵. 同理, 界面 1 与界面 $N+2$ 的声压和质点振速的关系为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = B_1 B_2 B_3 \cdots B_N \begin{bmatrix} \cos(k_{N+1} l_{N+1}) & j\rho_{N+1} c_{N+1} \sin(k_{N+1} l_{N+1}) \\ \frac{j \sin(k_{N+1} l_{N+1})}{\rho_{N+1} c_{N+1}} & \cos(k_{N+1} l_{N+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{N+2} \\ U_{N+2} \end{bmatrix} = B_1 B_2 B_3 \cdots B_N B_{N+1} \begin{bmatrix} P_{N+2} \\ U_{N+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{N+2} \\ U_{N+2} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

B_{N+1} 为钢板的声压和质点振速的传递矩阵. 界面 1 的表面声阻抗为

$$Z_1 = \frac{b_{11} P_{N+2} + b_{12} U_{N+2}}{b_{21} P_{N+2} + b_{22} U_{N+2}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{P_{N+2} b_{11} + b_{12}}{U_{N+2}} \\
 &= \frac{P_{N+2} b_{21} + b_{22}}{U_{N+2}} \\
 &= \frac{\rho_{N+2} c_{N+2} b_{11} + b_{12}}{\rho_{N+2} c_{N+2} b_{21} + b_{22}}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

$\rho_{N+2} c_{N+2}$ 为空气的特性声阻抗. 界面 1 的反射系数为

$$\begin{aligned}
 R &= \left| \frac{P_{1r}}{P_{1i}} \right|^2 = \left(\frac{Z_1 - \rho_0 c_0}{Z_1 + \rho_0 c_0} \right) \left(\frac{Z_1 - \rho_0 c_0}{Z_1 + \rho_0 c_0} \right)^* \\
 &= \frac{(Z_{r1} - \rho_0 c_0 + jZ_{i1})(Z_{r1} - \rho_0 c_0 - jZ_{i1})}{(Z_{r1} + \rho_0 c_0 + jZ_{i1})(Z_{r1} + \rho_0 c_0 - jZ_{i1})}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

吸声系数为

$$\alpha = 1 - R, \quad (16)$$

P_{1i} , P_{1r} 为界面 1 的入射声压和反射声压. 界面 1 的表面声阻抗 Z_1 为复数, 可表示为: $Z_1 = Z_{r1} + jZ_{i1}$. $\rho_0 c_0$ 为水的特性声阻抗, 声波在水中的损耗很小, 水的特性声阻抗可以看作实数. 通常要达到好的吸声效果, 吸声材料要有较高的机械阻尼, 其特性声阻抗要与吸声体系中的其他介质相匹配.

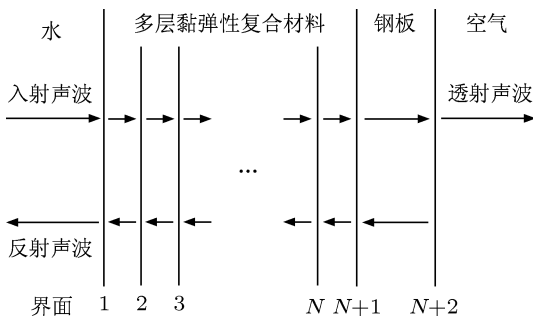


图 3 声波在多层黏弹性复合材料覆盖层中传播的示意图

3.2 玻璃微球体积含量对单层结构覆盖层的吸声性能的影响

应用声波在多层介质中传播的一维模型, 分析了玻璃微球的体积含量 ϕ 对单层结构覆盖层的吸声性能的影响. 单层结构覆盖层的厚度 $l = 10 \text{ mm}$, 而水和钢板的参数如表 3 所示. 为了突出覆盖层的低频吸声性能, 横坐标频率 f 采用对数坐标. 当聚合物中玻璃微球的体积含量 $\phi = 0\%$, 覆盖层的吸声系数 α 很小. 当 ϕ 增大到 5% , α 会显著提高. 随着 ϕ 的进一步增大, α 随频率变化的起伏较大. α 在低频的共振峰会移向更低频率, 带宽变窄, 高频的吸声系数降低. 当 ϕ 由 5% 增大到 10% 时, α 在低频共振峰值升高; 当 ϕ 由 10% 增大到 25% 时, 低频

共振峰值逐渐降低. 低频共振峰值随 ϕ 的变化, 与声速损耗角的正切值随 ϕ 的变化相一致. 随着 ϕ 的增大, 吸声系数峰值之间的极小值显著降低. 例如, $\phi = 25\%$ 时, 3450 Hz 对应的吸声系数只有 0.40 . 总之, 随着 ϕ 的增大, 吸声系数在低频的峰值会移向更低的频率, 峰值先升高, 然后逐渐降低. 随着 ϕ 的增大, 较高频率的吸声系数降低. 含玻璃微球的黏弹性复合材料覆盖层的低频和高频吸声性能存在一定的矛盾, 在应用过程中, 需要平衡低频和高频吸声性能.

表 3 水、钢板和空气的参数

	水	钢板	空气
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1000	7910	1.4
声速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1480	5775	340
厚度	半无限大	2 cm	半无限大

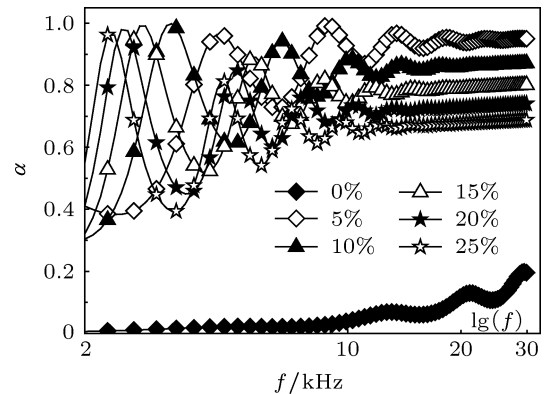


图 4 含不同玻璃微球体积含量 ($\phi = 0\%$, 5% , 10% , 15% , 20% , 25%) 的单层结构覆盖层的吸声性能

3.3 玻璃微球体积含量在覆盖层厚度方向的分布对吸声性能的影响

为了平衡复合材料覆盖层的低频和高频吸声性能, 本文将玻璃微球的体积含量在覆盖层厚度方向的分布进行了优化, 在一些关键的频段改善覆盖层表面和水的声阻抗匹配. 将复合材料根据玻璃微球的体积含量 ϕ 从 0 到 30% , 以 0.5% 的间隔形成 61 种不同复合材料. 将吸声覆盖层在厚度方向上等分成 N 层, 每一层所用的材料可以从 61 种不同的复合材料中选取. 虽然声学中对多层声阻抗匹配的问题已有较为成熟的理论^[26,27], 但是通常理论上要求的匹配材料在现实中不存在, 因此本文采用遗传算法对复合材料在厚度方向的分布进行了优化. 遗传算法优点是只须设定优化的目标, 可以避开具体的物理过程, 达到优化的目的.

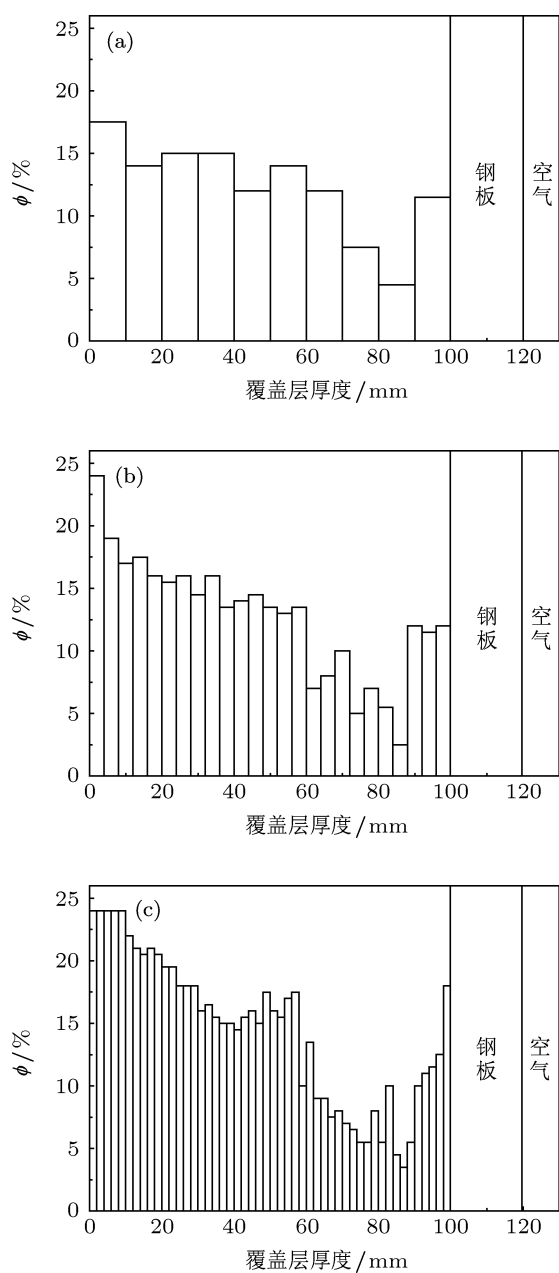


图5 不同层数(N)的多层优化结构的玻璃微球体积含量 ϕ 在覆盖层厚度方向上的分布 (a) $N=10$; (b) $N=25$; (c) $N=50$

定义吸声系数 $\alpha = 0.7$ 对应的最小频率为低频截止频率 f_c . 优化的目标是在满足 $f > f_c$, $\alpha \geq 0.7$ 的前提下, 使 f_c 尽可能小. 将吸声覆盖层在厚度方向上分别等分成 10, 25, 50 层进行了优化. 优化后 ϕ 在厚度方向上的分布如图 5 所示, 三种优化结构的平均玻璃微球体积含量 ($\bar{\phi} = (\sum_{i=1}^N \phi_i) / N$) 分别为 12.3%, 12.72%, 14.44%. 虽然分层不同, 但是 ϕ 的分布有一定的相同点: 由内向外 ϕ 先减小, 然后逐步增加, 增加的过程中有起伏. 虽然给定了 ϕ 从 0 到 30% 的 61 种复合材料, 但是优化算法只选择了

ϕ 从 2.5% 到 24% 之间的复合材料. 三种不同分层的优化结构的吸声系数谱图如图 6(a) 所示, 吸声系数的截止频率 f_c 分别为 2490, 2580 和 2670 Hz, 分层越多, f_c 越小. 当 $f > f_c$, 三种优化结构的吸声系数均大于 0.7. 分层越多, 越有利于提高覆盖层的低频吸声性能, 但是对制备工艺的要求会更高.

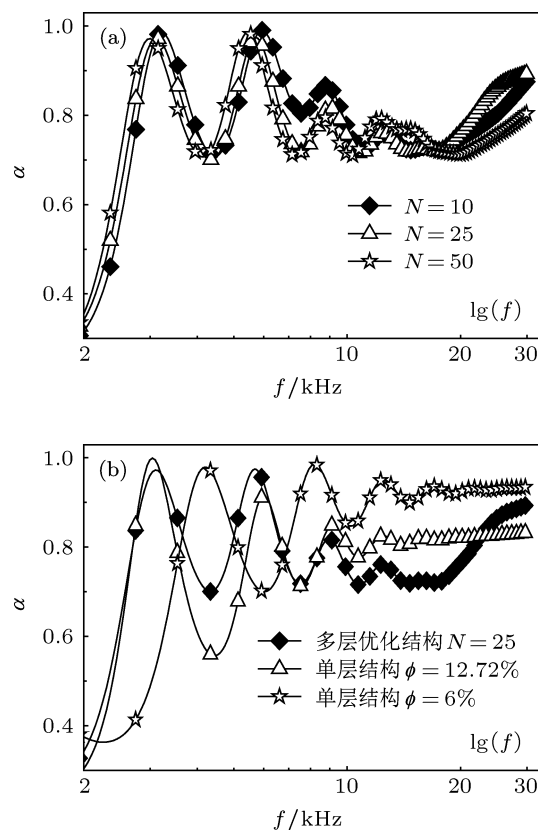


图6 (a) 不同层数的多层优化结构的吸声系数谱图; (b) 多层优化结构 ($N=25$) 与单层结构 ($\phi=12.72\%$ 和 $\phi=6\%$) 的吸声系数谱图

将多层优化结构 ($N=25$) 覆盖层的吸声性能与玻璃微球体积含量 $\phi=12.72\%$ 和 $\phi=6\%$ 的单层结构覆盖层做了比较. 如图 6(b) 所示, 多层优化结构和单层结构 ($\phi=12.72\%$) 的截止频率 f_c 相同, 均为 2580 Hz. 尽管多层优化结构的高频吸声系数相对较弱, 但是单层结构 ($\phi=12.72\%$) 在 4050—5230 Hz 之间的 α 小于 0.7, 最小值为 0.56. $\phi=6\%$ 是单层结构满足 $f > f_c$, $\alpha \geq 0.7$ 的前提下, 复合材料中的最大玻璃微球体积含量. 虽然单层结构 ($\phi=6\%$) 在 $f > 6730$ Hz 的频带范围的吸声性能优于多层优化结构, 但是其低频截止频率 f_c 为 3440 Hz, 比多层优化结构高出了 860 Hz.

将多层优化结构 ($N=25$) 覆盖层的玻璃微球体积含量 ϕ 在厚度方向上进行有序分布, 形成两种多层结构覆盖层, 如图 7(a), (b) 所示. 多层结构

图 7(a) 的玻璃微球体积含量 ϕ 在厚度方向上由内向外增加; 而多层结构图 7(b) 的 ϕ 由内向外减小. 如图 8 所示, 对比了多层优化结构与多层结构的吸声系数频谱. 尽管多层结构 (a) 在高频的吸声性能优于多层优化结构, 但是其低频截止频率 f_c 为 2750 Hz, 比多层优化结构高出 170 Hz, 而且在 4300—5300 Hz 之间的 α 小于 0.7. 多层结构 (b) 除了在 3100—3500 Hz 的吸声系数 α 略大于多层优化结构, 其他频带的 α 均小于多层优化结构.

通过以上的对比分析可以看出, 相对于单层结构和有序分布的多层结构, 多层优化结构的低频截止频率较低, 低频的吸声系数峰值之间的谷值较高. 虽然高频的吸声系数较低, 但是仍然大于 0.7.

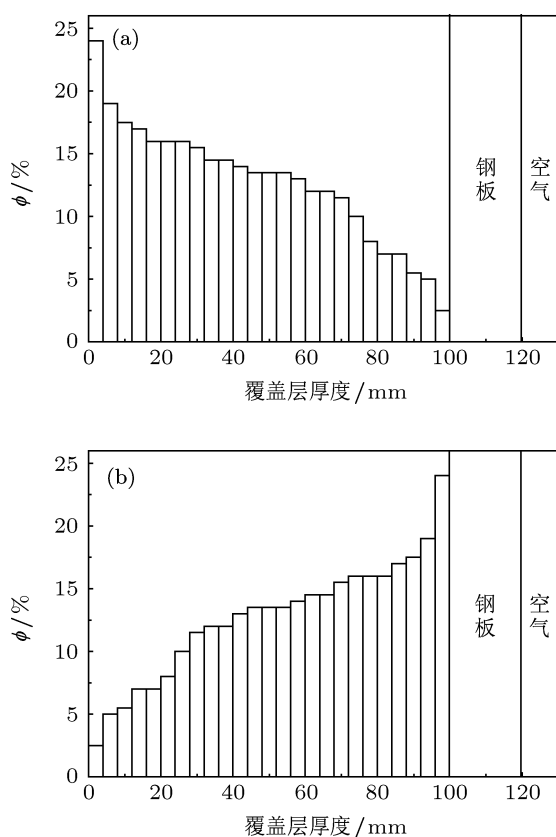


图 7 多层结构 (a) 和 (b) 的玻璃微球体积含量在厚度方向的分布

由 (15), (16) 式可以看出, 覆盖层的表面声阻抗和水的声阻抗匹配越好, 反射吸声越小, 吸声系数越大. 水的特性声阻抗近似为实数 ($\rho_0 c_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 因此表面的声阻抗的实部 Z_{r1} 要尽可能接近水的特性声阻抗, 而虚部尽快接近 0. 对比了多层优化结构 ($N = 25$)、多层结构 (a) 和单层结构 ($\phi = 12.72\%$) 覆盖层在 4000—6000 Hz

之间的表面声阻抗. 如图 9(a) 所示, 尽管三种结构的覆盖层的 Z_{r1} 均小于水的特性声阻抗, 但是多层结构在 4500—5700 Hz 之间的 Z_{r1} 较大. 如图 9(b) 所示, 对比三种结构的覆盖层的 Z_{m1} , 多层结构在 4300—5800 Hz 之间的 Z_{m1} 曲线更接近 $Z_{m1} = 0$. 因此, 多层优化结构覆盖层在低频的吸声系数峰值之间的谷值较高.

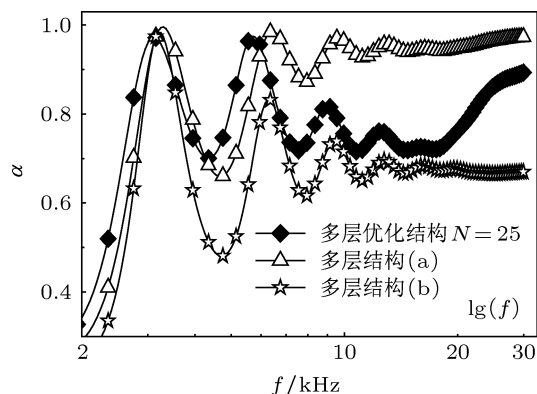


图 8 多层优化结构 ($N = 25$) 与多层结构 (a), (b) 的吸声系数谱图对比

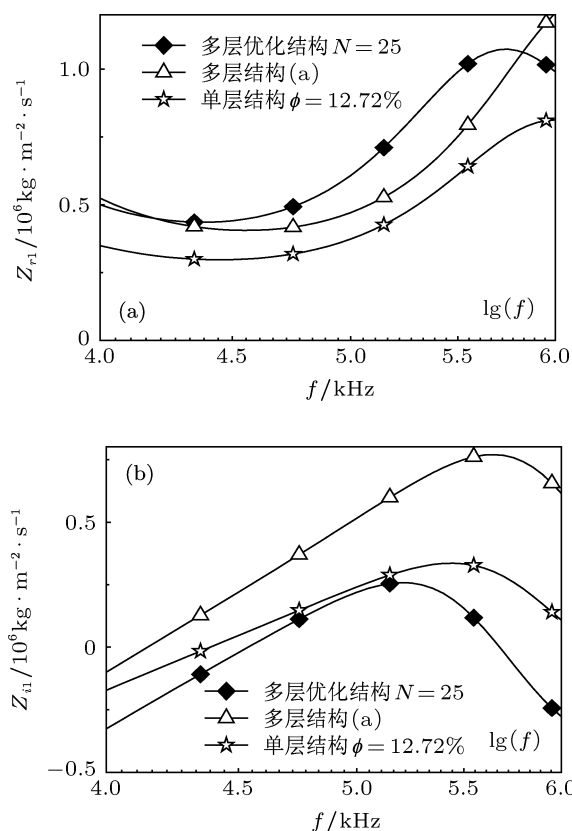


图 9 多层优化结构 ($N = 25$) 与多层结构 (a), 单层结构 ($\phi = 12.72\%$) 的覆盖层的表面声阻抗谱图 (a) 实部; (b) 虚部

4 多层优化结构吸声覆盖层的制备工艺分析

根据目前橡胶行业的技术条件, 制备黏弹性复合材料的多层优化结构并不复杂, 其制备工艺可以分为:

1) 将一定体积的玻璃微球粉末与黏弹性聚合物生胶混炼, 使得玻璃微球在聚合物中分散均匀, 并按照设计要求, 制备出不同玻璃微球体积分含量的生胶;

2) 将工序 1) 生成的不同玻璃微球体积分含量的生胶, 按照设计尺寸, 压延成一定面积和厚度的生胶片;

3) 将工序 2) 生成的生胶片按照优化的厚度分布叠在一起, 生胶片有一定的黏性, 各层胶片会自然粘贴到一起;

4) 将工序 3) 生成的多层生胶片进行硫化, 便可以生成多层优化结构的黏弹性复合材料覆盖层.

日常生活中常见的汽车轮胎就是一种黏弹性聚合物复合材料的多层结构, 多层优化结构的黏弹性复合材料覆盖层的制备可以借鉴轮胎的制造工艺.

5 结论

玻璃微球的引入可以提高黏弹性复合材料的机械阻尼, 影响黏弹性复合材料的力学和声学性能. 增加玻璃微球体积分含量可以使复合材料覆盖层的低频吸声系数的峰值移向更低频率, 但是高频的吸声系数会降低. 采用遗传算法对玻璃微球体积分含量在覆盖层厚度方向上的分布进行优化, 可以在保证覆盖层的高频吸声系数大于某一限值(例如 0.7)的条件下, 尽可能提高其低频吸声性能. 含玻璃微球的黏弹性复合材料多层优化结构覆盖层中不含有宏观的腔体, 其耐压性能有保证. 另外, 其结构简单, 对制备工艺的要求不高. 本文形成的理论方法可以实用于水下吸声覆盖层的设计.

- [1] He Z Y, Wang M 1996 *Appl. Acoust.* **9** 12 (in Chinese) [何祚铺, 王曼 1996 应用声学 **9** 12]
- [2] Ma L L, Wang R Q 2006 *Tech. Acoust.* **25** 175 (in Chinese) [马黎黎, 王仁乾 2006 声学技术 **25** 175]
- [3] Ivansson S M, 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **119** 3558
- [4] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *Phys. Lett. A* **367** 224
- [5] Chen H Y, Luo X D, Ma H R 2007 *Phys. Rev. B* **75** 024306
- [6] Ivansson S M 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 1974
- [7] Zhao H G, Liu Y Y, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4700 (in Chinese) [赵宏刚, 刘耀宗, 温激鸿, 郁殿龙, 温熙森 2007 物理学报 **56** 4700]
- [8] Jiang H, Zhang M L, Wang Y R, Hu Y P, Lan D, Wei B C 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 106202
- [9] Zhang J M, Chang W, Varadan V K, Varadan V V 2001 *Smart Mater. Struct.* **10** 414
- [10] Philip B, Abraham J K, Varadan V K, Natarajan V, Jayakumari V G 2004 *Smart Mater. Struct.* **13** N99
- [11] Yu L G, Li Z H, Ma L L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024301 (in Chinese) [于利刚, 李朝晖, 马黎黎 2012 物理学报 **61** 024301]
- [12] Wang X L 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 2626
- [13] Meyer E, Brendel K, Tamm K 1958 *J. Acoust. Soc. Am.* **30** 1116
- [14] Gaunaud G C, Überall H 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **63** 1699
- [15] Gaunaud G C, Überall H 1982 *J. Acoust. Soc. Am.* **71** 282
- [16] Gaunaud G C, Barlow J 1984 *J. Acoust. Soc. Am.* **75** 23
- [17] Kerr F 1992 *Int. J. Eng. Sci.* **30** 169
- [18] Cherkaoui M, Sabar H, Berveiller M 1994 *J. Eng. Mater. Technol.* **116** 274
- [19] Baird A M, Kerr F H, Townend D J 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 1527
- [20] Haberman M R, Berthelot Y H, Jarzynski J 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 1937
- [21] Liang B, Zhu Z M, Cheng J C 2006 *Chin. Phys.* **15** 412
- [22] Liang B, Zhu Z M, Cheng J C 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1607
- [23] Liang B, Zhu Z M, Cheng J C 2007 *Phys. Rev. E* **75** 016605
- [24] Qin B, Liang B, Zhu Z M, Cheng J C 2007 *Acta Acoust.* **32** 110 (in Chinese) [秦波, 梁彬, 朱哲民, 程建春 2007 声学学报 **32** 110]
- [25] Folds D L, Loggins C D 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1022
- [26] Tomas E Gomez A A 2004 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. and Frequency Control* **51** 624
- [27] Stephen P K, Gordon H, Tomas E, Gomez A A 2004 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. and Frequency Control* **51** 1314

Analysis of underwater sound absorption of visco-elastic composites coating containing micro-spherical glass shell

Yu Li-Gang Li Zhao-Hui[†] Wang Ren-Qian Ma Li-Li

(School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 28 June 2012; revised manuscript received 15 September 2012)

Abstract

Underwater sound absorption coating is significant to the stealth of a submarine, so it attracts a lot of attention. Underwater sound absorption of visco-elastic composites coating containing micro-spherical glass shell was investigated theoretically. The mechanical and acoustic properties of the composites in response to the volume of the micro-spherical glass shell were analyzed by the effective parameters method. Sound absorption of a single layer composites coating containing different volume of micro-spherical glass shell was calculated by the one-dimensional model, in which sound propagates in multi-layer media. The calculated results show that the sound absorption at low frequencies can be promoted by increasing the volume of micro-spherical glass shell, but the sound absorption at high frequencies is depressed. The volume distribution of the micro-spherical glass shells across the thickness of the coating was optimized by the genetic algorithm. The optimal multi-layer structure can promote the sound absorption at low frequencies, and keep the sound absorption coefficients above a limited value (0.7) at high frequencies. The optimal multi-layer composite coating can work at high pressure since it does not contain hollow macro-structure. Its structure is simple, so the technique of its fabrication should not be complicated. The theoretical method achieved in this paper can be applied in the design of underwater sound absorption coating.

Keywords: underwater sound absorption, visco-elastic composites, micro-spherical glass shell, genetic algorithm

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.62.064301

[†] Corresponding author. E-mail: lizhcat@pku.edu.cn