

# 含空腔的功能梯度声学覆盖层水下吸声特性\*

师康康<sup>1</sup> 靳国永<sup>1†</sup> 叶天贵<sup>1</sup> 王雪仁<sup>2</sup> 缪旭弘<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 哈尔滨 150001)

(2 中国人民解放军 92578 部队 北京 100161)

2020 年 1 月 3 日收到

2020 年 7 月 26 日定稿

**摘要** 针对传统的声学覆盖层吸声频带窄的问题,基于功能梯度材料的特点提出了一种含空腔结构的水下功能梯度声学覆盖层结构,引入梯度有限元法建立了功能梯度型声学覆盖层的水下声学计算模型,研究了功能梯度声学覆盖层结构的水下吸声特性。与传统的功能梯度结构声学建模方法相比,在保证计算精度和计算效率的基础上,文中所建立的功能梯度结构声学计算模型可适用于更复杂的功能梯度声学结构声学性能评估。研究表明,功能梯度声学覆盖层能够有效改善中高频段的吸声性能,获得较好的宽频吸声效果。此外,空腔形状采用锥型空腔结构或者组合型空腔结构可以有效地拓宽功能梯度声学覆盖层的吸声频带。

PACS 数: 43.20, 43.30, 43.50

## Underwater sound absorption performance of functionally graded anechoic coating with cavities

SHI Kangkang<sup>1</sup> JIN Guoyong<sup>1</sup> YE Tianguai<sup>1</sup> WANG Xueren<sup>2</sup> MIAO Xuhong<sup>2</sup>

(1 College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University Harbin 150001)

(2 Naval Academy of Armament Beijing 100161)

Received Jan. 3, 2020

Revised Jul. 26, 2020

**Abstract** In order to overcome the drawback that the sound absorption band of traditional cavity resonance anechoic coating is narrow, the functionally graded anechoic coating with periodic voids is designed in this paper according to the characteristics of Functionally Graded Materials (FGMs), and the Graded Finite Element Method (G-FEM) is employed to establish the underwater acoustic calculation model for functionally graded anechoic coating, and then the underwater sound performance of functionally graded anechoic coating is investigated. Compared with the traditional method for establishing the acoustic model of functionally graded structure, the proposed method can be extended to establish the acoustic model for much more complex functionally graded structures on the basis of ensuring calculation accuracy and efficiency. Numerical results indicate that, the functionally graded anechoic coating can improve the sound absorption performance in the middle and high frequency bands and wideband sound absorption can be achieved. In addition, the absorption frequency band of functionally graded anechoic coating can be effectively broadened by embedding the conical cavity or the combined cavity compared with the cylindrical cavity.

## 引言

功能梯度材料通常是指材料参数沿厚度方向或

者面内某方向呈连续梯度变化的新型材料。功能梯度材料的主要特点是通过连续改变其组成相的体积分数,使其材料属性在空间上呈梯度变化。由于能同时满足耐热以及承载等要求,并且具有缓和热应力、避

\* 国家自然科学基金项目(51822902, 51775125, 51709066)和中央高校基本科研业务费专项资助

† 通讯作者: 靳国永, guoyongjin@hrbeu.edu.cn

免或降低应力集中等特点, 功能梯度材料起初是作为热障涂层材料提出的<sup>[1]</sup>。随着许多学者对功能梯度材料的特性进行深入的研究, 其在工程领域的应用已不再局限于航空航天领域, 在船舶海洋工程, 机械工程以及生物医学领域也得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。

近些年来, 功能梯度材料由于其较强的可设计性在船舶设计制造领域得到的广泛应用, 其中, 在船舶设计制造中功能梯度材料的声学特性也受到了许多学者的关注和研究<sup>[3-6]</sup>。Aksoy 等<sup>[7]</sup>利用时空间断伽辽金方法研究了功能梯度材料中的波传播, 并且验证了基于此方法建立该分析模型的正确性。陈美霞等<sup>[8]</sup>采用回传射线矩阵法建立了半无限弹性基衬上功能梯度材料层的水下声学计算模型, 并且验证了所建模型的正确性, 在此基础上还进一步探讨了功能梯度材料层的水下声学性能。杨德森等<sup>[9-10]</sup>采用传递矩阵法研究了声波在阻抗连续梯度变化介质中的传播问题, 并且讨论了阻抗分布对阻抗梯度变化介质声学性能的影响。Seyyed 等<sup>[11]</sup>基于二维弹性理论研究了任意厚度各向同性无限大功能梯度板在斜入射声波作用下的声传播特性。Qian 等<sup>[12]</sup>根据三维弹性理论研究了声波在功能梯度材料层状结构表面的传播特性。

尽管传统的有限元方法 (FEM) 可以解决功能梯度结构的动力学问题, 但是由于结构内部的材料属性是呈连续变化的, 要想保证计算的精度, 计算过程中需要大量的网格。为了解决这一问题, Santare 等<sup>[13]</sup>基于功能梯度材料的特点提出了梯度有限元法 (G-FEM), 与常规有限元方法区别在于, 梯度有限元法中采用的是梯度单元网格可以更精确地模拟功能梯度材料内部材料属性连续性变化规律。曹志远等<sup>[14]</sup>结合半解析有限元法与梯度有限元法, 形成一种半解析梯度有限元法用来求解功能梯度材料板件问题。关于水下声学覆盖层方面的研究, 汤涓霖等<sup>[15]</sup>根据 Kelvin-Voigt 模型的二维解析理论, 建立了含有周期性空腔的吸声覆盖层的声学计算模型。白国锋等<sup>[16]</sup>基于多重散射法建立了声学覆盖层的半解析模型, 研究了轴对称空腔结构声学性能的主要耗能机制。何世平等<sup>[17]</sup>采用传递矩阵法和模态分解法建立了敷设去耦覆盖层的四端简支矩形板水下振动与声辐射理论计算模型。马晓晨等<sup>[18]</sup>利用最小二乘求逆计算提出了一种声学覆盖层吸声系数多通道逆滤波测量方法。而目前, 采用梯度有限元法对水下功能梯度声学结构的声传播问题研究尚少。

本文根据功能梯度材料的特点设计了一种含有空腔的水下功能梯度声学覆盖层结构, 然后基于梯

度有限元法建立了水下功能梯度声学覆盖层的声学模型, 并且验证该方法的可行性和所建立声学计算模型的正确性。基于所建立的功能梯度声学覆盖层的声学计算模型, 开展功能梯度声学覆盖层结构的水下吸声特性研究。此外, 通过数值计算研究材料属性沿厚度方向梯度变化形式、材料参数、结构孔隙率以及空腔形状等因素对声学覆盖层吸声性能的影响规律。

## 1 基本理论

### 1.1 模型建立

如图 1(a) 所示, 含有空腔的功能梯度声学覆盖层结构由阻抗匹配层、梯度渐变层以及钢板背衬组成, 其中, 阻抗匹配层和钢板背衬是由均质材料构成, 梯度渐变层是由功能梯度材料构成。梯度渐变层内部含有周期性分布的圆柱型空腔结构, 空腔分别沿着  $x$  和  $y$  方向呈周期性排列, 相邻空腔的间距 (晶格常数) 为  $a$ 。图 1(b) 为声学覆盖层结构的单元示意图, 其中阻抗匹配层、梯度渐变层和钢板的厚度分别为  $h_1$ ,  $h_2$  和  $h_3$ , 圆柱型空腔的半径和高度分别为  $r_c$

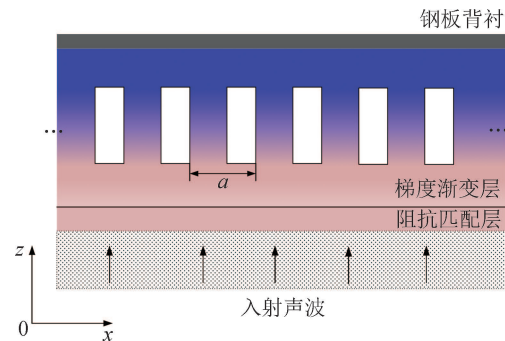


图 1(a) 含有周期分布柱型空腔的功能梯度声学覆盖层结构示意图

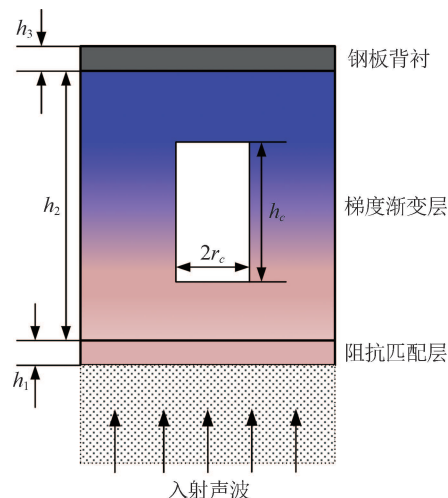


图 1(b) 声学覆盖层结构的单元示意图

和  $h_c$ 。阻抗匹配层的前端为半无限流体域, 流体为水介质。平面声波由流体域沿  $z$  方向垂直入射。

### 1.2 梯度有限元方法

本文中流体域满足均匀、不可压缩等理想条件, 因此流体域中声波波动方程为:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0, \quad (1)$$

式中,  $c$  为流体介质中声速,  $p$  为声压,  $t$  为时间。对流体域进行有限单元离散, 经过一系列推导, 最后得到流体域的有限元方程<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_f \mathbf{p} + \rho_0 \mathbf{R} \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{f}. \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{K}_f$  和  $\mathbf{M}_f$  分别表示流体的刚度矩阵和质量矩阵,  $\mathbf{R}$  为流固耦合矩阵,  $\mathbf{p}$  为流体域的声压向量,  $\mathbf{u}$  为结构域的位移向量,  $\mathbf{f}$  为施加在流体域的激励,  $\rho_0$  表示流体的密度。

如图 2 所示, 在结构域中, 阻抗匹配层与钢板都是均匀介质, 梯度渐变层是由功能梯度材料构成, 由于功能梯度结构的材料属性沿着  $z$  方向呈梯度变化, 因此在对结构域进行有限单元离散时, 所离散的网格单元的材料属性也是沿着  $z$  方向呈连续梯度变化的。本文中所研究的功能梯度材料属于两相功能梯度材料, 是由两种不同材料属性的黏弹性材料按一定工艺合成, 使其材料属性沿着  $z$  方向呈连续梯度变化, 根据混合定律, 由 Voigt 模型建立材料功能参数, 即<sup>[20]</sup>:

$$\xi_f = \xi_1 V_1 + \xi_2 V_2 = (\xi_1 - \xi_2) V_1 + \xi_2, \quad (3)$$

式中,  $\xi$  表示材料参数, 即密度  $\rho$ 、模量  $E$ 、泊松

比  $\nu$  以及损耗因子  $\eta$ , 其中体积分数  $V_1$  可以采用如下两种形式表示为:

FGM<sub>I(a/b/c/P)</sub>:

$$V_1 = \left[ 1 - a \left( \frac{z}{h} \right) + b \left( \frac{z}{h} \right)^c \right]^P, \quad (4)$$

FGM<sub>II(a/b/c/P)</sub>:

$$V_1 = \left[ 1 - a \left( 1 - \frac{z}{h} \right) + b \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^c \right]^P. \quad (5)$$

其中,  $h$  为功能梯度材料的厚度, 梯度指数  $P$  和分布参数  $a, b, c$  共同决定了组分材料的空间分布规律。

在常规等参有限元网格单元中, 首先是一组假定的插值函数, 这样单元内的位移就可以写成如下:

$$u(x, y, z) = \sum_{l=1}^n N_l(x, y, z) U_l, \quad (6)$$

式中,  $u(x, y, z)$  表示单元内某点的位移,  $N_l$  为形函数,  $U_l$  为各节点的位移值,  $n$  为单元的节点数。

应变函数与位移之间的关系可以写成:

$$\varepsilon(x, y, z) = \sum_{l=1}^n B_l(x, y, z) U_l, \quad (7)$$

式中,  $B_l(x, y, z)$  是形函数  $N_l(x, y, z)$  的空间导数。

假设结构材料属于线性弹性材料特性, 材料的应力与应变之间的关系可以表示为:

$$\boldsymbol{\sigma}(x, y, z) = \mathbf{C}_f \boldsymbol{\varepsilon}(x, y, z), \quad (8)$$

$\mathbf{C}_f$  矩阵是反应材料本构关系的弹性矩阵, 对于传统的均质材料,  $\mathbf{C}_f$  矩阵通常为常数矩阵, 但是如果是梯度渐变材料, 则  $\mathbf{C}_f$  中的元素是描述实际材料特性梯度的显式函数。  $\mathbf{C}_f$  矩阵可以表示为:

$$\mathbf{C}_f = \begin{bmatrix} \lambda(z) + 2\mu(z) & \lambda(z) & \lambda(z) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(z) & \lambda(z) + 2\mu(z) & \lambda(z) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(z) & \lambda(z) & \lambda(z) + 2\mu(z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu(z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(z) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中,  $\lambda(z)$  和  $\mu(z)$  表示材料的拉梅常数, 与杨氏模量  $E$  泊松比  $\nu$  的关系为:

$$\lambda(z) = \frac{E(z)\nu(z)}{(1+\nu(z))(1-2\nu(z))}, \quad \mu(z) = \frac{E(z)}{2(1+\nu(z))}. \quad (10)$$

在结构单元中, 单元的刚度矩阵可以表示为节点位移  $U_l$  映射到单元的节点力  $f_l$  的线性函数:

$$\mathbf{f}_l = \mathbf{K}_s^e U_l, \quad (11)$$

通过利用虚功原理, 可得出单元的刚度矩阵为:

$$\mathbf{K}_s^e = \iiint_{V_e} [B_l]^T [C_f(z)] [B_l] dV_e. \quad (12)$$

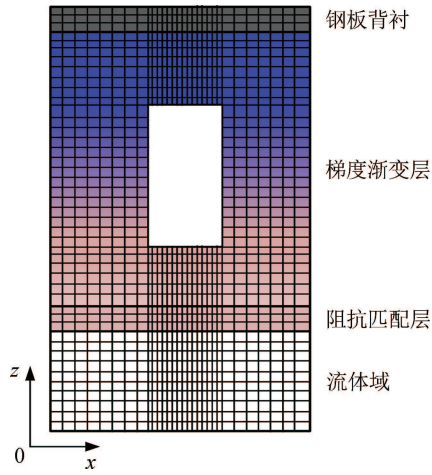


图 2(a) 覆盖层结构与流体有限单元网格划分

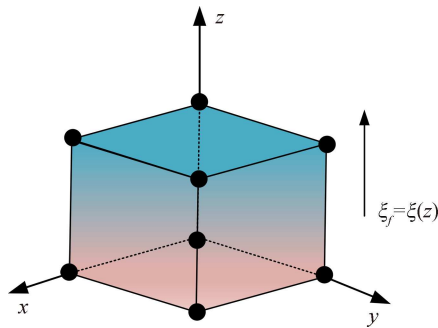


图 2(b) 六面体梯度单元

对于功能梯度的弹性材料, 质量密度通常是位置以及材料参数的函数。因此, 在的梯度渐变单元中, 质量密度分布应以与材料参数相同的方式并入元素中, 单元的质量矩阵可以表示为:

$$\mathbf{M}_s^e = \iiint_{V_e} [N_i]^T \rho_f(z) [N_i] dV_e. \quad (13)$$

因此, 结构振动的有限元方程为:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} - \mathbf{R}^T \mathbf{p} = \mathbf{F}_m, \quad (14)$$

式中,  $\mathbf{F}_m$  为施加在结构边界的机械载荷,  $\mathbf{K}_s$  和  $\mathbf{M}_s$  分别表示结构的刚度矩阵和质量矩阵,

$$\mathbf{M}_s = \sum_1^e \mathbf{M}_s^e = \sum_1^e \iiint_{V_e} [N_i]^T \rho_f(z) [N_i] dV_e, \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_s = \sum_1^e \mathbf{K}_s^e = \sum_1^e \iiint_{V_e} [B_i]^T [C_f(z)] [B_i] dV_e,$$

其中,  $e$  表示结构网格单元数,  $\rho_f(z)$  表示功能梯度结构单元的等效密度。

联合式 (2) 和式 (14), 系统的流固耦合方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \\ -\rho_0 \omega^2 \mathbf{R} & \mathbf{K}_f - \mathbf{C}_\phi - \omega^2 \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_m \\ \mathbf{f} \end{Bmatrix}. \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{C}_\phi$  和  $\mathbf{f}$  为施加在流体边界的等效载荷矩阵。

考虑到圆柱型空腔在覆盖层内部呈均匀周期性分布, 根据 Bloch 理论, 结构中节点的位移  $\mathbf{u}$  和流体域中节点声压  $\mathbf{p}$  均满足如下方程:

$$\chi(x + d_x, y + d_y, z) = \chi(x, y, z), \quad (17)$$

式中,  $\chi$  表示某节点位移  $u$  或者某节点声压  $p$ ,  $d_x$  和  $d_y$  分别表示相邻晶胞单元中空腔之间沿  $x$  和  $y$  方向的距离。

结合流固耦合方程式 (16) 以及周期性边界条件式 (17), 可以求解出流体域节点的声压  $\mathbf{p}$  和结构域节点的位移  $\mathbf{u}$ 。在反射端, 建立反射端节点坐标与反射声压关系的方程, 如果透射端为水介质, 建立透射端节点坐标与透射声压关系的方程:

$$\begin{aligned} p_i(x_i, y_i) &= \sum_m \sum_n R_{mn} e^{-j(k_{mx}x_i + k_{ny}y_i - k_{mn}z_-)}, \\ p_t(x_i, y_i) &= \sum_m \sum_n T_{mn} e^{-j(k_{mx}x_i + k_{ny}y_i + k_{mn}z_+)}, \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $R_{mn}$  和  $T_{mn}$  分别表示各阶平面波的反射系数与透射系数,  $k_{mx} = m\pi/d_x + k_x$ ,  $k_{ny} = n\pi/d_y + k_y$ ,  $k_{mn}^2 = k^2 - k_{mx}^2 - k_{ny}^2$ ,  $j = \sqrt{-1}$ 。

求解上述方程即可得到各阶平面波的反射系数与透射系数。在各阶反射波与透射波中, 远场反射或者透射系数仅由满足  $k^2 > k_{mx}^2 + k_{ny}^2$  (即  $k_{mn}^2 > 0$ ) 条件各阶传播波决定, 即<sup>[21]</sup>:

$$R = \sqrt{\sum_{k_{mn}^2 > 0} |R_{mn}|^2}, \quad T = \sqrt{\sum_{k_{mn}^2 > 0} |T_{mn}|^2}. \quad (19)$$

由于本文中所研究的覆盖层的背衬为钢板背衬, 钢板背后为半无限空气介质, 考虑到空气阻抗与钢板背衬阻抗失配, 透射系数几乎为零, 即  $T=0$ , 因此本文中关于覆盖层吸声系数的计算不考虑声波的透射, 覆盖层的吸声系数为:

$$\alpha = 1 - R^2. \quad (20)$$

## 2 数值结果与分析

### 2.1 准确性验证

首先, 研究无空腔功能梯度声学覆盖层的水下声学特性, 利用梯度有限元法计算所建模型的声学系数。图 3(a) 为不含空腔结构的功能梯度声学覆盖层的模型示意图, 其中阻抗匹配层的厚度  $h_1=0.005$  m, 梯度渐变层的厚度  $h_2=0.04$  m, 钢板背衬的厚度  $h_3=0.005$  m。阻抗匹配层是由与水阻抗相近的聚氨酯制成, 梯度渐变层是由聚氨酯和无机填料按照工艺合成的梯度聚氨酯<sup>[22]</sup>。各部分的材料属性如表 1 所示。

表 1 声学覆盖层中各部分的材料参数

材料		密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	杨氏模量 (Pa)	泊松比	损耗因子
阻抗匹配层	聚氨酯	1100	$1.4 \times 10^8$	0.49	0.6
梯度渐变层	聚氨酯	1100	$1.4 \times 10^8$	0.49	0.6
	无机填料	1700	$3.4 \times 10^8$	0.49	0.6
背衬层	钢	7800	$2.07 \times 10^{11}$	0.30	0

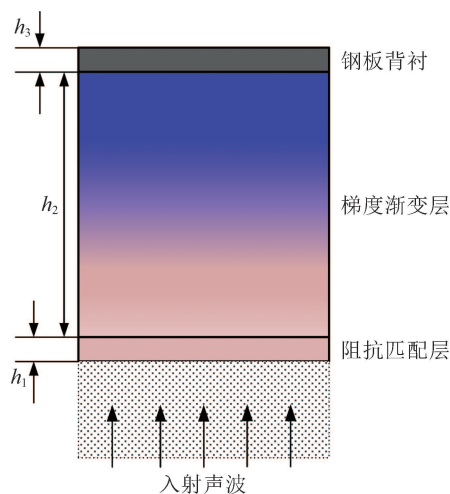


图 3(a) 无空腔功能梯度声学覆盖层模型示意图

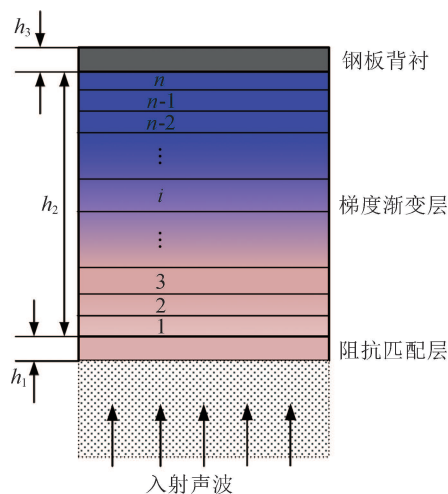


图 3(b) 梯度渐变层分层示意图

下面采用传递矩阵法 (TMM)<sup>[23]</sup> 验证本文基于梯度有限元法所建立声学计算模型的正确性。将梯度渐变层沿  $z$  方向均匀分成若干薄层, 如图 3(b) 所示, 当分层足够多时, 各层的材料参数变化较小, 可将各分层视为均质材料层<sup>[24]</sup>。各分层之间的材料属性呈梯度变化, 从而模拟功能梯度材料中材料属性呈梯度变化情况。本文采取  $\text{FGM}_{\text{I}}(a=1/b=0/c/P)$  描述梯度渐变层中组成相体积分数的分布规律, 然后分别基于传递矩阵法、传统有限元法以及梯度有限元法分别计算功能梯度声学覆盖层的声学系数。采用传递矩阵法时, 在结构的厚度方向划分 1000 份, 计算结果已收敛, 采用有限元法、梯度有限元法时, 为了比较二者的计算精度, 在结构厚度方向均划分 14 份, 并且单元网格划分遵循“每个单元长度均小于各自材料横波波长  $1/4$ ”的原则<sup>[21]</sup>, 符合有限元计算的网格要求。在计算过程中, 水的密度和声速分别取  $1000 \text{ kg/m}^3$  和  $1500 \text{ m/s}$ 。

为了说明本文基于梯度有限元法所建立的功能梯度声学覆盖层水下声学计算模型的优越性, 在保证单元网格尺寸以及单元数量相同的条件下, 分别采用梯度有限元法 (梯度单元网格) 与传统有限元法 (均质单元网格) 计算功能梯度声学覆盖层的声学系数。图 4 对比了各梯度指数条件下基于传递矩阵法与传统有限元法计算所得的声学系数, 图 5 对比了

各梯度指数条件下基于传递矩阵法与梯度有限元法计算所得的声学系数。通过对比图 4 和图 5 可以发现, 当梯度指数  $P=0$  时, 声学覆盖层中的梯度渐变层退化为均质结构, 两种有限元法计算得到的声学系数都与传递矩阵法计算得到的声学系数基本一致。但是随着梯度指数增大, 基于传统有限元法计算得到的声学系数与传递矩阵法计算得到的声学系数在高频段的误差越来越大, 而基于梯度有限元法计算得到的声学系数与传递矩阵法计算得到的声学系数基本一致。要想保证传统有限元法的计算精度, 就需要增加网格单元数量, 这样会使得整体的计算效率降低。因此, 在单元网格尺寸以及单元数量相同的条件下, 在计算功能梯度声学覆盖层性能方面, 本文基于梯度有限元法所建立的水下声学计算模型的精确度要优于传统有限元法。

图 5 对比了各梯度指数条件下基于传递矩阵法与梯度有限元法计算所得的声学系数, 从图中可以看出, 采用这两种方法计算得到的声学覆盖层的声学系数是基本一致的。因此可以说明梯度有限元法对于均质材料或者功能梯度材料都是适用的, 这也验证了本文中梯度有限元法的有效性和可行性。此外, 在处理含有空腔结构的功能梯度覆盖层或者含有局域共振单元的功能梯度覆盖层时, 只是在结构内部增加了自由边界或者不同材料之间的耦合边界, 对声-固

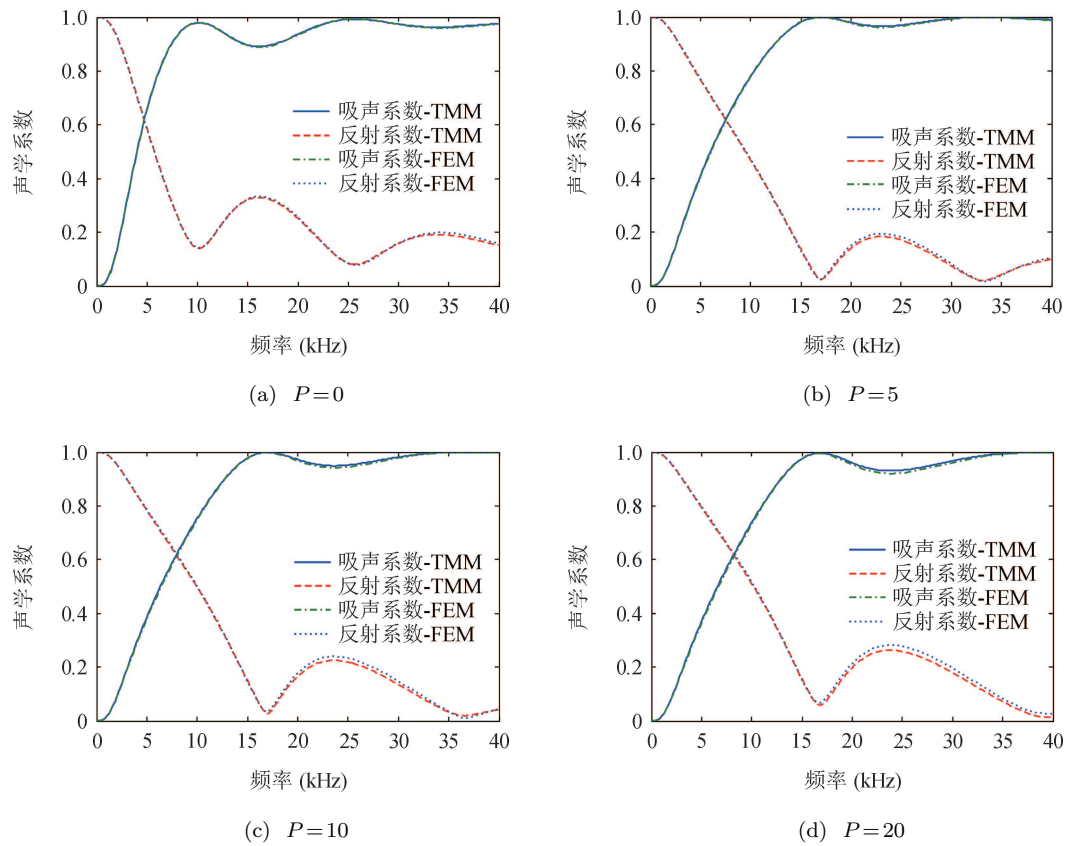


图 4 各梯度指数条件下传递矩阵法与传统有限元法计算声学系数对比

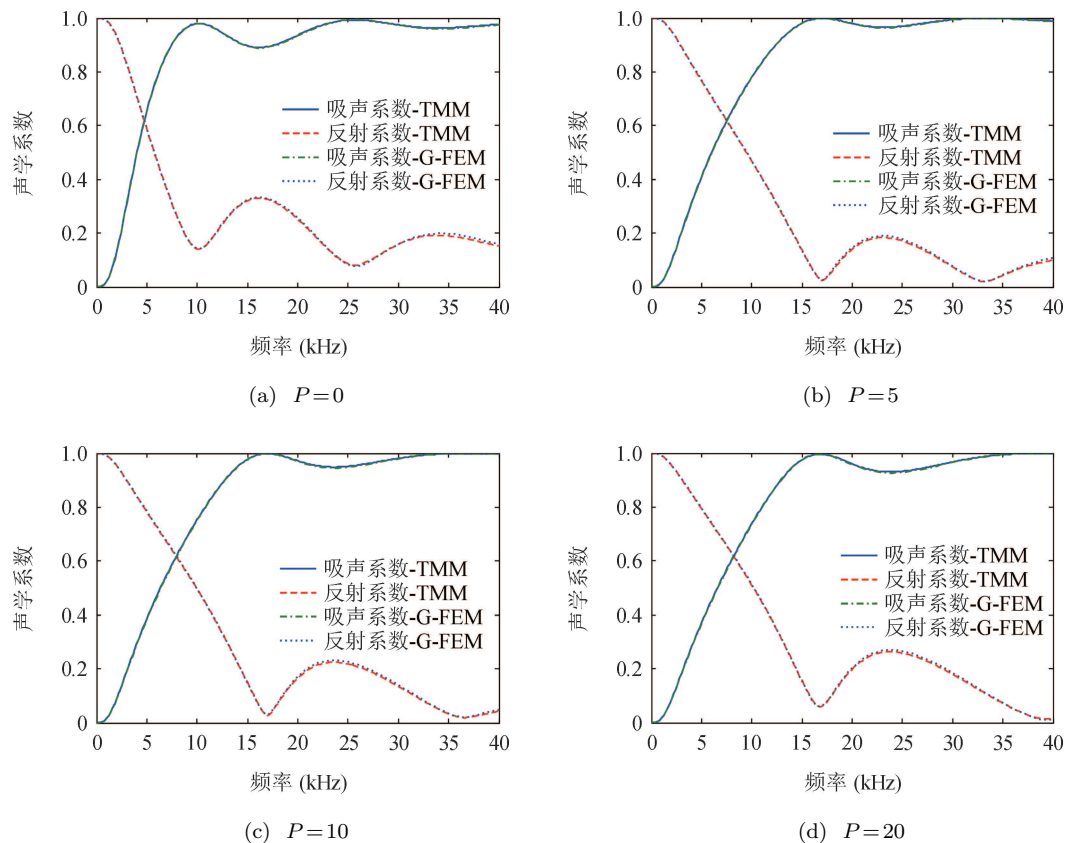


图 5 各梯度指数条件下传递矩阵法与梯度有限元法计算声学系数对比

耦合边界以及无反射边界不会产生影响,因此本文中的梯度有限元的准确性不受影响<sup>[25-26]</sup>。根据以上说明,相比于传统的分层介质传递矩阵法,本文所建立的功能梯度结构声学计算模型可适用于结构形式更为复杂的功能梯度声学结构的声学建模中。

## 2.2 材料属性对覆盖层吸声性能的影响

功能梯度声学覆盖层结构内部圆柱型空腔的半径以及高度分别为  $r_c = 0.008$  m,  $h_c = 0.03$  m, 各层的厚度以及各部分材料属性与 2.1 部分所述一致。结构的材料属性沿着厚度方向的梯度分布如图 6(a) 和图 6(b) 所示。

首先,以梯度指数  $P=10$  和  $P=20$  为例,分别采用传统有限元法和梯度有限元法计算含圆柱型空腔结构功能梯度声学覆盖层的声学系数,计算时所采用的结构网格单元尺寸以及网格数量相同。图 7(a) 和图 7(b) 分别对比了  $P=10$  和  $P=20$  时采用传统有限元法与梯度有限元法计算得到的声学覆盖层的声学系数。从图 7 可以看出,随着梯度指数增大,基于传统有限元法计算得到的声学系数与梯度有限元法计算得到的声学系数在高频段的误差较大,在采用相同结构网格单元尺寸以及网格数量的条件下,

梯度有限元法在计算功能梯度声学覆盖层声学系数时的收敛速度要优于传统有限元法。这也说明了,在保证计算精度和计算效率的基础上,本文基于梯度有限元法所建立的功能梯度声学覆盖层水下声学计算模型的精确度要优于传统有限元法。

图 8 对比了各梯度指数下含空腔与无空腔功能梯度声学覆盖层吸声性能,相比于无空腔功能梯度声学覆盖层结构,当在功能梯度声学覆盖层结构内部嵌入空腔结构时,由于功能梯度声学覆盖层的谐振效应,能够有效改善声学覆盖层低频范围的吸声性能。功能梯度声学覆盖层主要的特点是与流体接触的介质表面与流体的阻抗相匹配,使声波能够容易地进入覆盖层结构内部,同时沿着声波传播方向结构的阻抗增大使得声波的能量能够充分地衰减耗散。图 9 对比了在不同梯度指数条件下带有空腔的功能梯度声学覆盖层的吸声性能。从图 9 可以看出,相比于均匀材料属性 ( $P=0$ ),当声学覆盖层的材料属性沿着  $z$  方向呈梯度变化时,有效改善了声学覆盖层中高频段的吸声性能,并且随着梯度指数  $P$  增大,吸声峰向高频偏移,声学覆盖层中高频段的吸声系数越大。由于结构的共振吸声峰主要取决于覆盖

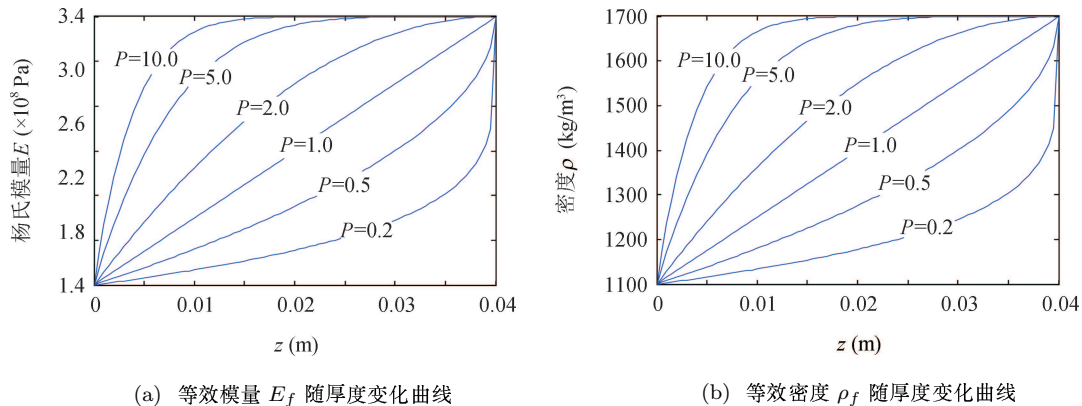


图 6 结构的材料属性沿着厚度方向的梯度分布

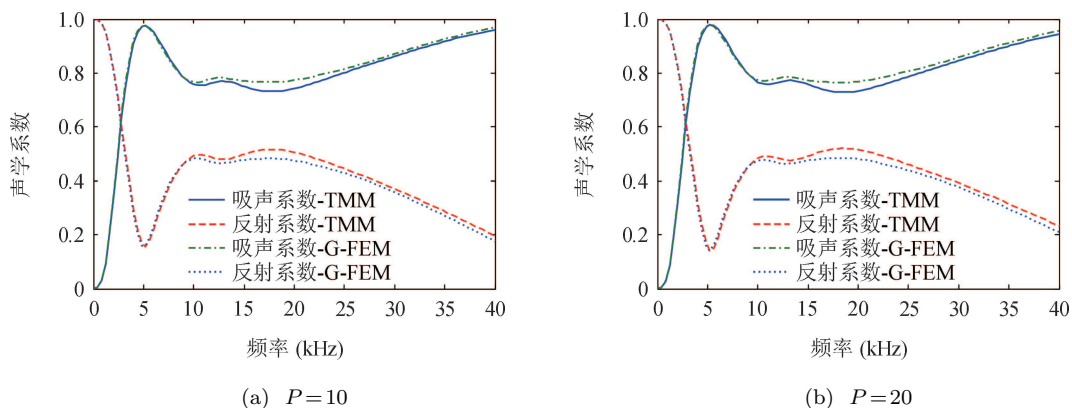


图 7  $P=10$  和  $P=20$  时传统有限元法与梯度有限元法计算声学系数对比

层结构的谐振特性，并且从图 6(a) 等效杨氏模量沿着厚度方向的梯度分布可以看出，随着梯度指数  $P$  的增大，结构在任何某一厚度的等效杨氏模量均增大，使得覆盖层结构的谐振频率增大，因此使得结构的共振吸声峰向高频移动。在中高频段的非共振吸声峰处，结构的吸声性能主要取决于材料对声波的能量耗散效应，梯度指数  $P$  的增大，结构在任何某一厚度的特性阻抗沿着厚度方向增大，增强了声波能量的衰减，使得声学覆盖层中高频段的吸声系数增大。因此，随着梯度指数  $P$  的增大，有效改善了声学覆盖层中高频段的吸声性能。

图 10 给出了各梯度指数条件下无机填料的模量对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响规律。从图 10 可以看出，在相同的梯度指数条件下，随着无机填料的杨氏模量的增大，吸声峰向高频偏移，声学覆盖层中高频段的吸声系数增大。此外，随着梯度指数的增大，无机填料的模量对功能梯度声学覆盖层中高频段吸声性能的影响效果越来越显著。在一定的梯度指数条件下，随着无机填料杨氏模量的增大，结构在任何某一厚度的等效杨氏模量均增大。由于结构的共振吸声峰主要取决于覆盖层结构的谐振特性，

因此无机填料杨氏模量的增大，使得覆盖层结构的谐振频率增大，因此使得谐振吸声峰向高频移动。另外，在中高频非共振吸声峰频率处，结构的吸声特性主要取决于材料对声波的能量耗散效应，因此，增大无机填料杨氏模量使得覆盖层结构等效杨氏模量增大，使得覆盖层结构的等效阻抗增大，增强了声波在结构内部的耗散，因此使得声学覆盖层中高频段的吸声系数增加。此外，随着梯度指数的增大，声学覆盖层结构的模量沿着厚度方向增大的速率加快，这使得无机填料的模量对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响效果越来越明显。

图 11 给出了各梯度指数条件下无机填料的密度对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响规律。从图 11 可以看出，在相同的梯度指数条件下，无机填料的密度的变化对覆盖层结构低频段的吸声性能以及吸声峰频率几乎没有影响，但是随着无机填料密度的增大，使得覆盖层结构中高频段吸声系数增大。此外，随着梯度指数的增大，无机填料密度对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响效果越来越明显。这主要是由于在一定的梯度指数条件下，随着无机填料密度的增大，结构在任何某一厚度处的等效密度均增

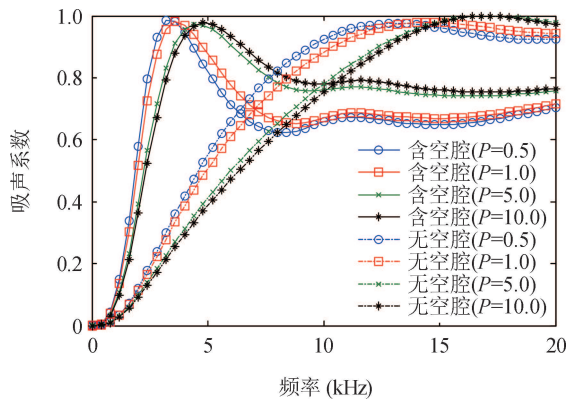


图 8 各梯度指数下含空腔与无空腔功能梯度声学覆盖层吸声系数对比

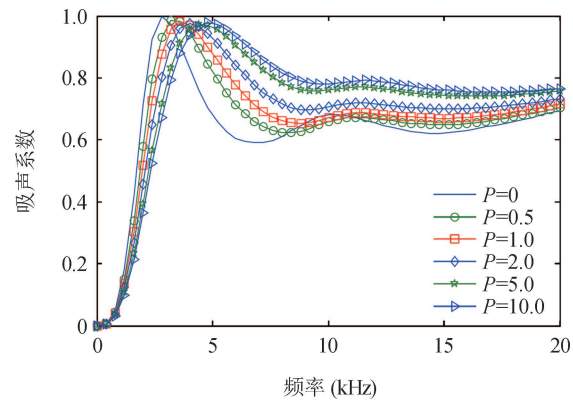
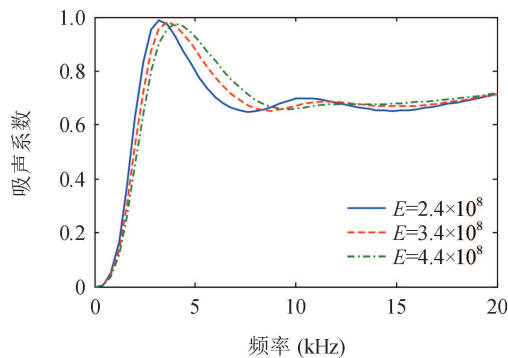
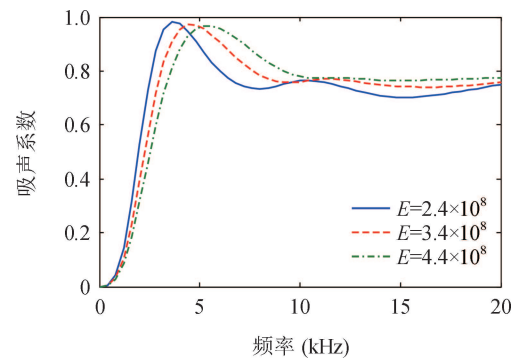


图 9 各梯度指数下带有空腔的功能梯度声学覆盖层吸声系数对比



(a)  $P=1.0$



(b)  $P=5.0$

图 10 各梯度指数下无机填料的模量对功能梯度声学覆盖层吸声系数的影响



大,因此,增大无机填料的密度使得覆盖层结构等效密度增大,使得覆盖层结构的等效阻抗增大,增强了声波在结构内部的耗散,因此使得声学覆盖层中高频段的吸声系数增加。此外,随着梯度指数的增大,材料的密度沿着厚度方向增大的速率加快,因此使得无机填料的密度对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响效果越来越明显。

### 2.3 空腔结构对覆盖层吸声性能的影响

为了研究空腔结构形式对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响规律,本文分别选取了锥型以及柱锥组合型空腔结构,结构形式如图 12 所示。在保证相同孔隙率条件下,圆锥型空腔上下半径分别设定为  $r_{c1}=0.003\text{ m}$ ,  $r_{c2}=0.0121\text{ m}$ ,空腔的高度  $h_c=0.03\text{ m}$ ,与前文圆柱型空腔高度保持不变;组合型空腔半径分别为  $r_{c1}=0.006\text{ m}$ ,  $r_{c2}=0.0114\text{ m}$ ,空腔高度分别为  $h_{c1}=0.01\text{ m}$ ,  $h_{c2}=0.02\text{ m}$ ,总高度保持不变。

图 13 分别对比了带有圆锥型空腔和组合型空腔的功能梯度声学覆盖层的吸声性能。从图 13 可以看

出,随着梯度指数的增大,功能梯度声学覆盖层的吸声性能的变化规律与前文图 9 所呈现的规律一致,随着材料梯度指数的增大可以有效改善覆盖层中高频段的吸声性能。这主要由于梯度指数  $P$  的增大,材料的密度和弹性模量沿着厚度方向增大的速率越大,使得结构的阻抗增大,增强了声波在结构内部的能量衰减。此外,材料梯度指数  $P$  的增大,使得结构的等效弹性模量增大,从而覆盖层结构的谐振频率增大,使得吸声峰向高频移动。

图 14 对比了 3 种不同的空腔形式对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响。从图 14 可以看出,在低频段 3 种不同的空腔形式对功能梯度声学覆盖层吸声性能几乎没有影响,并且对空腔的谐振频率也几乎没有影响。但是,在中高频段,空腔的结构形式对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响较为明显,锥型空腔以及组合型空腔均优于圆柱型空腔结构。因此,在结构孔隙率相同的条件下,相比于单一圆柱型空腔结构,采用锥型空腔结构或者组合型空腔结构

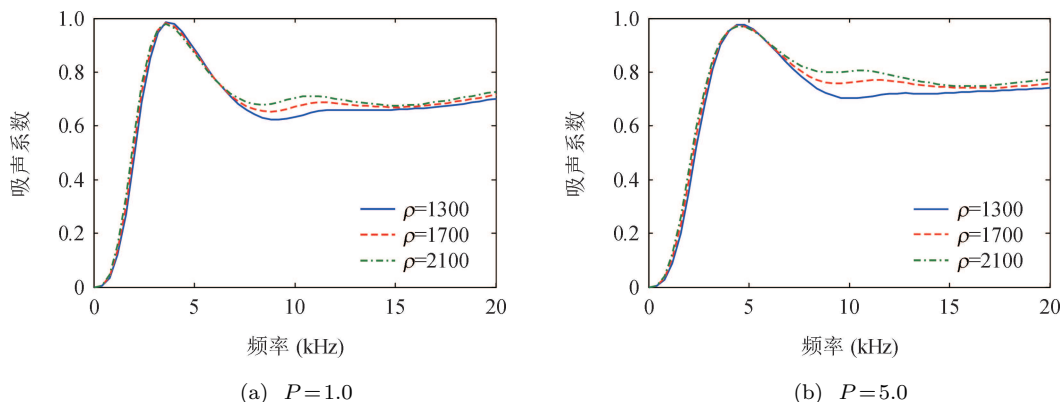


图 11 各梯度指数下无机填料的密度对功能梯度声学覆盖层吸声系数的影响

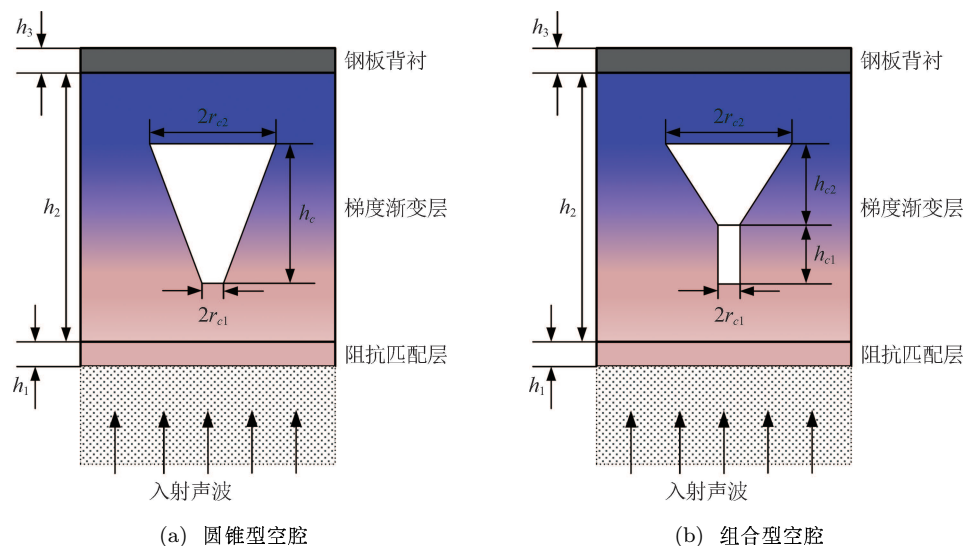


图 12 含有圆锥型空腔和组合空腔的功能梯度声学覆盖层结构示意图

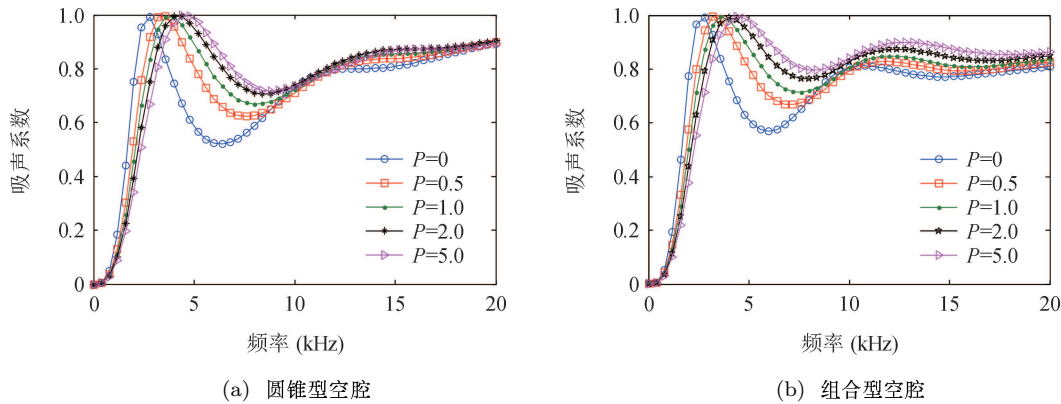


图 13 各梯度指数下分别带有圆锥型和组合型空腔的功能梯度声学覆盖层吸声系数对比

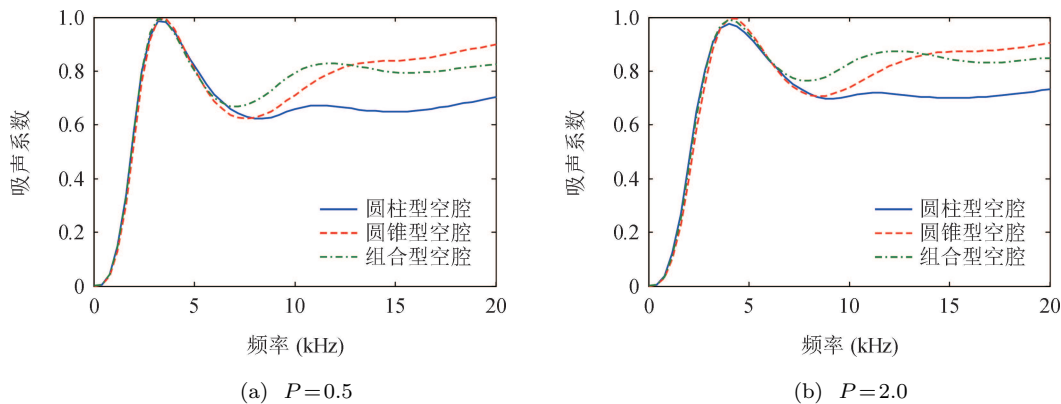


图 14 各梯度指数下 3 种空腔结构功能梯度声学覆盖层吸声系数对比

不仅能够保证原有的谐振吸声峰附近频率范围内的高效吸声, 还可以有效改善中高频段的吸声性能, 因此采用锥型空腔结构或者组合型空腔结构可以有效地拓宽功能梯度声学覆盖层的吸声频带。

### 3 结论

本文基于梯度有限元法建立了功能梯度声学覆盖层水下吸声性能的计算模型, 采用分层介质的传递矩阵法验证了本文所建模型的有效性以及正确性, 与传统的功能梯度结构声学建模方法相比, 在保证计算精度和计算效率的基础上, 本文所建立的功能梯度结构声学计算模型可适用于更复杂的功能梯度声学结构。基于所建立的功能梯度结构声学计算模型, 研究了带有空腔结构的功能梯度声学覆盖层的水下吸声特性。另外, 分析了功能梯度声学覆盖层的材料属性、材料分布梯度指数、结构的孔隙率以及空腔结构形式对功能梯度声学覆盖层吸声性能的影响规律。研究表明, 相比于无空腔功能梯度声学覆盖层, 含空腔的功能梯度声学覆盖层谐振效应能够降低结构的吸声峰频率; 功能梯度声学覆盖层能够有效改善中高频段的吸声性能, 并且随着梯度指数的增大, 吸声峰向高频偏移, 结构中高频段的吸声性

能越好; 在结构孔隙率相同的条件下, 相比于单一圆柱型空腔结构, 采用锥型空腔结构或者组合型空腔结构不仅能够保证原有的谐振吸声峰附近频率范围内的高效吸声, 还可以有效改善中高频段的吸声性能, 因此, 在不改变结构孔隙率的条件下, 采用锥型空腔结构或者组合型空腔结构可以有效地拓宽功能梯度声学覆盖层的吸声频带。

### 参 考 文 献

- 1 Koizumi M. FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, 1997; **28**(1-2): 1—4
- 2 Miyamoto Y, Kaysser W A, Rabin B H *et al.* Functionally graded materials: design, processing and applications. New York: Springer Science & Business Media, 2013: 248—284
- 3 杨雪, 王源升, 余红伟. 多层高分子复合结构斜入射声波吸声性能. *复合材料学报*, 2006(6): 21—28
- 4 石勇, 陈鹤. 夹层复合材料水下声隐身性能研究. *声学技术*, 2014; **33**: 34—38
- 5 罗忠, 朱锡, 简林安等. 斜入射下水中隐身夹芯复合材料附体结构声学设计. *振动与冲击*, 2009; **28**(5): 49—54
- 6 朱金华, 刘巨斌, 姚树人等. 分层高分子介质中的声吸收. *高分子材料科学与工程*, 2001; **17**(2): 34—38
- 7 Aksoy H G, Senocak E. Wave propagation in functionally graded and layered materials. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2009; **45**(12): 876—891

- 8 陈美霞, 徐坤, 谢坤. 半无限基衬上功能梯度材料层结构声学性能研究. 船舶力学, 2018; **22**(8): 1028—1038
- 9 孙玉, 杨德森, 胡博. 声阻抗梯度变化介质的吸声性能研究. 声学技术, 2013; **32**(6): 89—90
- 10 杨德森, 孙玉, 胡博等. 阻抗梯度变化介质的声学特性. 哈尔滨工程大学学报, 2014; **35**(12): 1458—1466
- 11 Seyyed M H, Maysam S. Sound insulation characteristics of functionally graded panels. *Acta Acoustica United with Acoustica*, 2008; **94**(2): 290—300
- 12 Qian Z H, Jin F, Lu T. Transverse surface waves in a FGM layered structure. *Acta Mechanica*, 2009; **207**(3-4): 183—193
- 13 Santare M H, Thamburaj P, Gazonas G A. The use of graded finite elements in the study of elastic wave propagation in continuously nonhomogeneous materials. *International Journal of Solids and Structures*, 2003; **40**(21): 5621—5634
- 14 曹志远, 程国华. 功能梯度材料板件三维分析的半解析梯度有限元法. 计算力学学报, 2007; **24**(6): 865—868
- 15 汤渭霖, 何世平, 范军. 含圆柱形空腔吸声覆盖层的二维理论. 声学学报, 2005; **30**(4): 289—295
- 16 白国锋, 刘碧龙, 隋富生, 刘克, 杨军. 多重散射方法研究轴对称空腔覆盖层的声学特性. 声学学报, 2012; **37**(3): 263—269
- 17 何世平, 何元安, 张文群, 刘桂峰, 闫孝伟. 去耦覆盖层降噪性能评价指标的理论探讨. 声学学报, 2014; **39**(2): 177—184
- 18 马骁晨, 李建龙, 宋昊, 李鋆. 声学覆盖层吸声系数的多通道逆滤波测量. 声学学报, 2019; **44**(4): 726—734
- 19 李华东, 朱锡, 梅志远, 等功能梯度板壳的力学研究进展. 材料导报, 2012; **26**(1): 110—118
- 20 王曼. 水声吸声覆盖层理论与实验研究. 博士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004: 14—18
- 21 吕林梅, 温激鸿, 赵宏刚等. 内嵌不同形状散射子的局域共振型黏弹性覆盖层低频吸声性能研究. 物理学报, 2012; **61**(21): 291—298
- 22 杨雪, 王源升, 朱金华等. 梯度聚氨酯水声吸声性能的研究. 高分子材料科学与工程, 2007; **23**(1): 169—172
- 23 何祚镛, 王曼. 水下均匀材料复合层吸声特性研究. 应用声学, 1996; **15**(5): 6—11
- 24 Chen W Q, Wang H M, Bao R H. On calculating dispersion curves of waves in a functionally graded elastic plate. *Composite Structures*, 2007; **81**(2): 233—242
- 25 Duhamel D, Mace B, Brennan M. Finite element analysis of the vibrations of waveguides and periodic structure. *Journal of Sound and Vibration*, 2006; **294**(1-2): 205—220
- 26 Vigran T. Sound transmission in multilayered structure-introducing finite structural connections in the transfer matrix method. *Applied Acoustics*, 2010; **71**(1): 39—44