

引用格式: 胡泊, 吴崇建, 何其健, 等. 高强度聚氯乙烯泡沫水声模量参数反演修正 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 107–113.

HU B, WU C J, HE Q J, et al. Parameter inversion and amendment of underwater acoustic modulus of high-strength PVC foam[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 107–113.

高强度聚氯乙烯泡沫 水声模量参数反演修正



扫码阅读全文

胡泊¹, 吴崇建¹, 何其健¹, 肖伟¹, 李磊鑫¹, 李想²

1 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

2 洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471023

摘要: [目的] 旨在基于复合材料试样水声插入损失实测值, 通过反演算法获得高强度聚氯乙烯(PVC)泡沫的水声模量值, 进而提高复合材料水声插入损失计算精度。[方法] 首先, 通过压缩、平拉等力学试验, 得到高强度 PVC 泡沫材料的静弹性模量, 再利用传递矩阵方法计算得到夹芯复合材料的插入损失, 并分析得出插入损失计算值与基于脉冲声管法的实测值存在较大差异的原因是芯材弹性模量输入值偏低。然后, 基于插入损失实测值, 采用遗传算法反演计算出 5 组泡沫材料的水声模量值。[结果] 定量计算结果表明, 高强度 PVC 泡沫的水声模量值高于静弹性模量值, 水声模量对压缩模量比值的平均值为 1.24, 对拉伸模量比值的平均值为 1.36。[结论] 在对基于高强度 PVC 泡沫的夹芯复合材料水声性能进行计算时, 材料弹性模量输入值应在静力模量实测值基础上正向修正, 从而降低误差。

关键词: 聚氯乙烯泡沫; 插入损失; 遗传算法; 弹性模量; 纵波声速

中图分类号: U668.5

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02588

Parameter inversion and amendment of underwater acoustic modulus of high-strength PVC foam

HU Bo¹, WU Chongjian¹, HE Qijian¹, XIAO Wei¹, LI Leixin¹, LI Xiang²

1 China Ship Develop and Design Center, Wuhan 430064, China

2 Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China

Abstract: [Objective] The purpose of this paper is to obtain the hydro-acoustic modulus of high-strength polyvinyl chloride (PVC) foam through an inversion algorithm based on the measured underwater acoustic insertion loss values of the composite samples, then improve the calculation accuracy of the insertion loss of the composites. [Methods] First, the static elastic modulus of high-strength PVC foam is obtained through mechanical tests such as compression and tension, and then the insertion loss of the sandwich composite is calculated using the transfer-matrix method. The reason for the large difference in the calculated values and the measured values obtained by the acoustic pulse-based tube method is that the input value of the elastic modulus of the core material is low. Based on the measured insertion loss values, the underwater acoustic modulus values of five PVC foam samples are then calculated via genetic algorithm inversion. [Results] The quantitative calculation results indicate that the hydro-acoustic modulus value of high-strength PVC foam is higher than the measured static elastic modulus values. The average ratio of hydro-acoustic modulus to compressive modulus is 1.24, and that to tensile modulus is 1.36. [Conclusion] When calculating the hydro-acoustic performance of sandwich composites containing high-strength PVC foam, the error can be reduced by positively correcting the input value of the material's elastic modulus on the basis of the measured value of the static modulus.

Key words: PVC foam; insertion loss; genetic algorithm; elastic modulus; longitudinal wave velocity

收稿日期: 2021-11-11

修回日期: 2022-03-01

网络首发时间: 2023-03-31 15:06

作者简介: 胡泊, 男, 1993 年生, 博士生, 工程师

吴崇建, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 博士生导师

何其健, 男, 1983 年生, 硕士生

*通信作者: 吴崇建

0 引言

高强度聚氯乙烯(PVC)泡沫是一种基于异氰酸酯和酸酐水解反应原理生成的交联闭孔型高性能泡沫,因具备了优良的力学理化性能和良好的水下隔声能力^[1],被作为芯层大量应用于承载型夹芯复合结构中,可契合水下航行器的特定声隐身需求。

借助理论、数值仿真方法(例如波传递理论^[2]、分层介质传递矩阵法^[3]、回传射线矩阵法^[4]、有限元/边界元数值仿真方法^[5]等)准确预报该类夹芯复合材料的水声插入损失性能对于水下航行器声学精细化设计意义重大。各类计算方法均需要准确输入弹性模量、密度、厚度等关键材料参数,其中密度、厚度参数物理意义明晰,测试误差小,但考虑到PVC泡沫是一种具有内部孔隙结构的非均质材料,基于力学试验获得的“静弹性模量”可能与计算中所需的“水声模量”有所区别,而复合材料水声插入损失计算结果事实上常与实测值存在较大差别^[6],因此需要掌握更为准确合理的泡沫水声模量参数。

在水声学中常利用声学测试值反演得到材料参数。例如,张天航等^[7]基于脉冲声管测得的水声材料的复反射系数、声波动方程理论算法,通过迭代算法反演出浸水松木、尖劈^[8]的纵波声速参数。宋扬^[9]利用遗传算法从橡胶球散射场数据反演得到了橡胶球参数。但值得注意的是,无论是行波管^[10]还是脉冲声管测试,一般都推荐选用声特性阻抗与水相近的材料样品^[11],而对于高强度PVC泡沫这类特性阻抗与水严重失配(约为水的特性阻抗的1/5)的泡沫材料,其声管测试难度相对更大,相应的参数反演研究也较为有限。

本文将首先介绍分层介质传递矩阵理论、材料静弹性模量测试方法,再基于静弹性模量实测值,通过传递矩阵理论计算复合材料的水声插入损失,并与基于脉冲声管测试所得测试值进行对比。最后,基于插入损失实测值,反演计算得到高强度PVC泡沫水声模量,并与静力试验所得静弹性模量进行对比。研究结果可为基于高强度PVC泡沫的夹芯复合材料和同类非均质水声材料的参数反演问题提供参考。

1 原理

1.1 插入损失正向计算方法

基于分层介质传递矩阵理论^[12],可计算得到

任意 n 层固态介质的水声插入损失。从正交各向异性材料的应力-应变关系着手,建立单层固体介质上、下表面矩阵形式的应力、振速传递关系,如图1所示。假设在不同固体介质分界面的应力-应变连续一致完全传递,则可由矩阵的连乘关系得到多层介质透射端界面到入射端界面的应力、振速的总传递矩阵 T 。图中, d_n 代表不同介质层的厚度, Z_n 代表对应各介质层的特性阻抗, θ_n 代表对应介质层的入射声波与法向夹角。

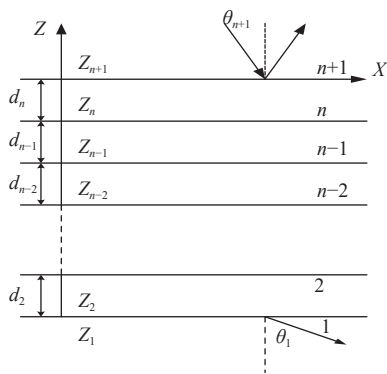


图1 多层介质传递矩阵原理

Fig. 1 Transfer matrix theory of multi-layer medium

假设入射声波为平面波,总声场由入射波和反射波累加得到,分别用势函数 ϕ 和 ψ 表示,如式(1)和式(2)所示。其中:定义 k_t 为入射声波沿板切向的波数; k_{13} 是沿厚度方向的压缩波波数; k_{23} 是沿厚度方向的剪切波波数; ω 为圆频率; R_1, R_2, R'_1 和 R'_2 为待定系数; x_1 为沿板切向的坐标; x_3 为沿板厚度方向坐标。

$$\phi = R_1 \exp[j(\omega t - k_{13}x_3 - k_{t1}x_1)] + R'_1 \exp[j(\omega t + k_{13}x_3 - k_{t1}x_1)] \quad (1)$$

$$\psi = R_2 \exp[j(\omega t - k_{23}x_3 - k_{t1}x_1)] + R'_2 \exp[j(\omega t + k_{23}x_3 - k_{t1}x_1)] \quad (2)$$

将平面简谐波的形式代入正交各向异性薄板的应力-应变关系,整理后可得到矩阵形式的应力、振速与势函数的关系,如式(3)所示。

在某层板的入射端边界上 $x_3 = d$,存在如式(3)所示关系。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = \mathbf{M}|_{x_3=d} \begin{bmatrix} R_1 + R'_1 \\ R_1 - R'_1 \\ R_2 + R'_2 \\ R_2 - R'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 + R'_1 \\ R_1 - R'_1 \\ R_2 + R'_2 \\ R_2 - R'_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \omega k_t \cos(k_{13}d), \quad a_{12} = -j\omega k_t \sin(k_{13}d) \\ a_{13} &= j\omega k_{23} \sin(k_{23}d), \quad a_{14} = -\omega k_{23} \cos(k_{23}d) \\ a_{21} &= \omega k_t \cos(k_{13}d), \quad a_{22} = \omega k_{13} \cos(k_{13}d) \\ a_{23} &= \omega k_t \cos(k_{23}d), \quad a_{24} = -j\omega k_t \sin(k_{23}d) \\ a_{31} &= -(C_{13}k_t^2 + C_{33}k_{13}^2) \cos(k_{13}d) \\ a_{32} &= j(C_{13}k_t^2 + C_{33}k_{13}^2), \quad a_{33} = j(C_{33} - C_{13})k_t k_{23} \sin(k_{23}d) \\ a_{34} &= -(C_{33} - C_{13})k_t k_{23} \cos(k_{23}d) \\ a_{41} &= 2jC_{55}k_t k_{13} \sin(k_{13}d), \quad a_{42} = -2C_{55}k_t k_{13} \cos(k_{13}d) \\ a_{43} &= C_{55}(k_{23}^2 - k_t^2) \cos(k_{23}d) \\ a_{44} &= -jC_{55}(k_{23}^2 - k_t^2) \sin(k_{23}d) \end{aligned}$$

式(3)中: v_1, v_3 分别为沿板切向和法向的振速; σ_{33}, σ_{13} 分别为正应力和切应力; C_{ij} 是材料刚度矩阵 $\mathbf{C}$ 的组成元素。

在某层板透射端边界上 $x_3 = 0$, 存在如式(4)所示关系:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = \mathbf{M}|_{x_3=0} \begin{bmatrix} R_1 + R'_1 \\ R_1 - R'_1 \\ R_2 + R'_2 \\ R_2 - R'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & b_{14} \\ 0 & b_{22} & b_{23} & 0 \\ b_{31} & b_{32} & 0 & b_{34} \\ 0 & b_{42} & b_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 + R'_1 \\ R_1 - R'_1 \\ R_2 + R'_2 \\ R_2 - R'_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \omega k_t, \quad b_{14} = -\omega k_{23}, \quad b_{22} = \omega k_{13}, \quad b_{23} = \omega k_t \\ b_{31} &= -(C_{13}k_t^2 + C_{33}k_{13}^2), \quad b_{32} = j(C_{13}k_t^2 + C_{33}k_{13}^2) \\ b_{34} &= -(C_{33} - C_{13})k_t k_{23}, \quad b_{42} = -2C_{55}k_t k_{13} \\ b_{43} &= -2C_{55}k_t k_{13} \end{aligned}$$

所以, 可以得到如式(5)所示每层介质的上、下端面处的位移、应力的相互传递关系:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} \Big|_{x_3=d} = \mathbf{M}|_{x_3=d} \mathbf{M}|_{x_3=0}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} \Big|_0 = \mathbf{TT}_i \begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} \Big|_0 \quad (5)$$

根据矩阵的连乘关系, 可以得到从多层介质的透射端界面到入射端界面的应力、振速的总传递矩阵 $\mathbf{T}$, 如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} \Big|_D = \prod_{i=1}^n \mathbf{TT}_i \begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} \Big|_0 = \mathbf{T} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_3 \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} \Big|_0 \quad (6)$$

结合流固交界面上的边界条件: 固体的法向振速、法向应力与流体的法向振速、应力相一致, 以及流固交界面上没有剪切应力, 可求解声压的反射系数 V 和透射系数 D 及插入损失 L , 如式(7)~式(9)所示。

$$V = \frac{j k_{13}^{n+1} (j m_{32} k_{13}^1 + m_{33} \rho_1 \omega^2) - (j m_{22} k_{13}^1 + m_{23} \rho_1 \omega^2) \omega^2 \rho_{n+1}}{j k_{13}^{n+1} (j m_{32} k_{13}^1 + m_{33} \rho_1 \omega^2) + (j m_{22} k_{13}^1 + m_{23} \rho_1 \omega^2) \omega^2 \rho_{n+1}} \quad (7)$$

$$D = \frac{\rho_1}{\rho_{n+1}} \frac{j k_{13}^{n+1} (1 - V)}{j k_{13}^1 m_{22} + m_{23} \rho_1 \omega^2} \quad (8)$$

$$L = 20 \lg \left(\frac{1}{D} \right) \quad (9)$$

式(7)~式(9)中: k_{13}^1 代表透射端流体(第1层)的沿厚度方向的压缩波波数; k_{13}^{n+1} 代表入射端流体(第 $n+1$ 层)的沿厚度方向的压缩波波数; ρ_1 和 ρ_{n+1} 分别对应第1层和第 $n+1$ 层的流体的密度; m_{pq} 为中间过程参数, $m_{pq} = T_{pq} - T_{p1} T_{4q} / T_{41}$ 。

至此, 推导了复合材料水声插入损失的正向计算原理。从计算公式可见, 材料弹性模量体现于刚度矩阵 $\mathbf{C}$ 中, 进而控制任意单层传递矩阵 $\mathbf{TT}_i$ 以及总传递矩阵 $\mathbf{T}$, 最终影响复合材料插入损失。

1.2 反演算法原理

映射算子将状态参数与测量数据联系起来为正演, 而由测量数据与映射算子反推状态参数的过程称为反演。对于本文而言, 通过传递矩阵理论计算插入损失即为正演, 而通过插入损失实测值反推材料参数的过程即为反演。考虑到水声插入损失实测值存在一定的误差, 因此, 反演计算本质上是一种优化问题, 即找到使插入损失计算值与实测值最接近的材料参数。具体的数学描述如下。

设计变量材料参数, 用 X 表示为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (10)$$

约束条件为上述各参数的波动范围, 用不同的波动系数 m_i 和 n_i 表征, 如式(11)所示。

$$n_i x_i \leq x_i \leq m_i x_i \quad (11)$$

目标函数为使插入损失计算值与实测值的差别最小。目标函数最小时所对应的最优设计变量即为材料参数反演值。获取最优设计变量的计算方法可选用具备较佳的全局寻优能力, 且不依赖初值的遗传算法^[13]。遗传算法的基本运算过程包括初始化、个体评价、选择运算、交叉运算、变异运算、终止条件运算等。

1.3 静弹性模量测试方法

主要通过万用试验机对试样开展压缩试验或拉伸试验来掌握材料的弹性模量。

参照规范 GB/T 8813—2008《硬质泡沫塑料压缩性能的测定》^[14] 或 ASTM D1621《硬质泡沫塑料压缩性能标准试验方法》^[15], 对试样垂直施加压

力,通过计算可得试样承受的应力 σ ,并测得试样的相对形变 ε (定义为试样厚度的缩减量与其初始厚度之比)。在线性比例极限内,压缩应力与相对形变的比值即为压缩弹性模量 E ,如式(12)所示。

$$E=\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

(12)

参照规范 ASTM D1623-17《刚性细胞塑料的拉伸和拉伸粘合性能》^[16],对拉伸试样的两端工装施加载荷,测量得到形变与应力的关系,根据相同原理可获得材料的拉伸弹性模量。

2 结 果

2.1 弹性模量测试结果

对多个高强度 PVC 泡沫试样(VS-1, VS-2, VS-3, VS-4, VS-5)开展密度、压缩模量、拉伸模量检测。其中,压缩试样规格为 100 mm×100 mm×40 mm (厚度),平拉试样规格为 60 mm×60 mm×20 mm (厚度)。图 2 所示为得到的材料应力-应变曲线。

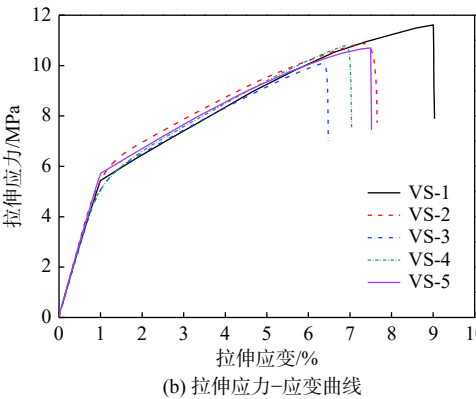
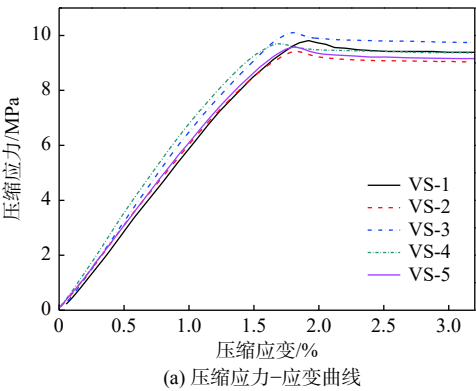


图 2 VS1~VS5 泡沫材料试样的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves for foam samples VS1-VS5

在压缩试验中,材料试样的压缩应力在较长时间内随应变先呈现出近似线性的变化关系,随后逐渐抵达平台区,这证明了材料已达到压缩极限。在拉伸试验中,材料应力-应变曲线出现了“三折”现象,即首段(应变约为 1% 以下时)处于线弹性范围;随着应力继续变大,进入弹塑性阶

段,曲线斜率有所降低;最后,材料拉伸破坏,曲线向下突变。选用压缩和平拉的线弹性阶段的斜率作为压缩模量及拉伸模量,相关测试结果如表 1 所示。

表 1 泡沫静弹性模量测试值

Table 1 Summary of test results for static elastic modulus of foam

试样	密度/(kg·m ⁻³)	压缩模量/MPa	拉伸模量/MPa
VS-1	303.0	635.2	558.9
VS-2	303.9	629.3	627.7
VS-3	297.2	614.3	577.2
VS-4	315.9	704.6	582.0
VS-5	310.2	626.8	593.7

2.2 插入损失计算值与实测值对比

夹芯复合材料结构如图 3 和图 4 所示。芯层为 40 mm 厚度的 PVC 泡沫,上、下面层为 5 mm 厚度的玻璃钢。面层玻璃钢密度取 1 800 kg/m³,弹性模量取 18.5 GPa。

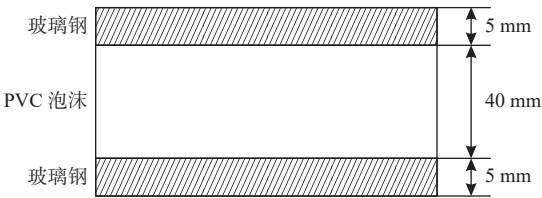


图 3 夹芯复合材料结构示意图
Fig. 3 Structure of PVC foam-core sandwich composite



图 4 VS-1~VS-5 夹芯复合材料试样
Fig. 4 Samples of sandwich composite with PVC foam-core VS-1-VS-5

以芯材为 VS-1 泡沫的复合材料为例,基于 VS-1 静弹性模量实测值,采用传递矩阵方法计算 2~30 kHz 频率范围内正入射插入损失,间隔为 1 kHz。另外,利用 Φ57 规格的脉冲声管测试得到复合材料的试样在 2~30 kHz 范围内的插入损失值,间隔为 1 kHz,采用 0.5 MPa 加压。图 5 示出了水声插入损失计算值和实测值的对比。

根据规范 GB/T 14369—2011《声学—水声材料样品插入损失、回声降低和吸声系数的测量方法》^[17],脉冲声管法测量装置由脉冲管、收发合置换能器、标准反射体、电子测量设备组成。其工作原理是:由位于脉冲管一端的换能器发射脉冲调制的正弦波,被管中的样品反射和透射。其中,样品反射波由收发合置换能器接收,样品的

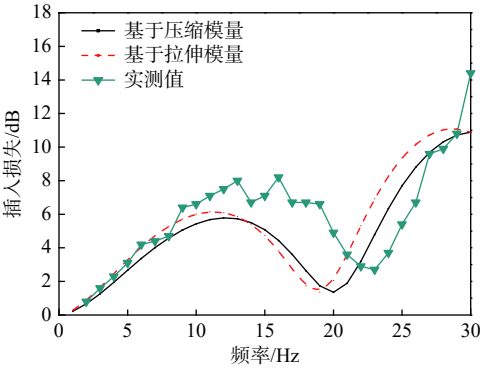


图 5 VS-1 夹芯复合材料插入损失计算值与实测值对比
Fig. 5 Comparison of calculated and measured insertion loss of VS-1 PVC foam-core sandwich composites

透射波在脉冲管末端由标准发射体反射,第 2 次透过样品再被收发合置换能器接收。根据规范规定的测量频率范围计算方法,可基于 Φ57 规格的试样测量获得 2~30 kHz 频率范围的插入损失值。

由图 5 可见,基于插入损失计算值的曲线与基于实测值的曲线均具备明显的“峰”、“谷”周期振荡特性,但前者较后者呈现出了向左压缩的变化。例如,计算值曲线在 20 kHz 附近出现谷,而实测值曲线在 23 kHz 附近出现谷。因此,各频率点插入损失值的计算误差较大。另外,通过基于压缩模量与基于拉伸模量的插入损失计算值曲线对比,可以发现,由于压缩模量高于拉伸模量,其插入损失曲线形态呈现出向右拉伸的变化。

插入损失曲线的特征可通过声波动理论中经典的单层介质隔声问题予以解释。因玻璃钢特性阻抗与水接近,故夹芯复合材料的水声插入损失特性主要由芯层的阻抗与厚度决定。当声波垂直于平板所在平面入射且板两端液体介质相同时,声压的透射系数如式(13)所示,插入损失如式(14)所示。

$$D = \frac{4Z_1Z_2}{2(Z_1 + Z_2)e^{-ik_2d} - 2(Z_1 - Z_2)e^{ik_2d}} \tag{13}$$

$$L = 20\lg\left(\frac{1}{D}\right) \tag{14}$$

式中, k_2 为泡沫中的纵波波数。

根据 e^{ik_2d} 项的相位特性,进一步推导,如式(15)所示:当厚度为介质中 1/4 波长的倍数 N 为奇数时,存在插入损失峰值;而当厚度为介质中 1/4 波长的倍数 N 为偶数时,存在插入损失谷值。由此解释了夹芯复合材料插入损失的周期性振荡现象。

$$\frac{c}{4f}N = d \tag{15}$$

再基于纵波声速的定义(式 16),可推导出插入损失曲线特征与材料参数的关系,如式(17)所示。

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{16}$$

$$f = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{N}{4d} \tag{17}$$

式中: c 为纵波声速; f 为曲线中出现波峰、波谷所对应的频率。即材料弹性模量越大,则纵波声速越高,会使插入损失曲线形态向右拉伸。

2.3 泡沫材料参数反演计算

在正演计算的基础上,开展泡沫弹性模量参数定量反演计算。

首先,利用脉冲声管测量试验掌握基于 VS-1~VS-5 的同规格夹芯复合材料试样的插入损失实测值。然后,采用 Matlab 软件中遗传算法工具箱,对泡沫材料参数进行反演。设计变量为材料弹性模量 E 。遗传算法无需设置初值,设定弹性模量的参数范围为 $0.1E_0 \sim 3E_0$ (E_0 取 450 MPa)。目标函数 $g(X)$ 的设置如下:使 2~30 kHz 各个频率点下插入损失计算值 L 与实测值 L_0 的平均平方差的开方值最小,如式(18)所示。

$$g(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (L(f_i) - L_0(f_i))^2 / N} \Rightarrow \min \tag{18}$$

以 VS-1 泡沫的材料反演为例,从图 6 所示结果可见,优化初始时种群的目标函数平均值很大,意味着未达到最优。并且,随着代数的增加,目标函数平均值快速下降,当迭代至 10 代后,平均值趋于收敛,相应地可得到反演的水声模量值。

经过反演计算得到的 VS-1~VS-5 的材料水声模量,以及与静弹性模量值的对比,如表 2 所示。基于水声模量计算值的插入损失曲线与基于实测值的插入损失曲线对比,如图 7 所示。由结果可见,二者基本吻合,误差减小。另外,水声模量值普遍高于静弹性模量值。基于本文所述试样,

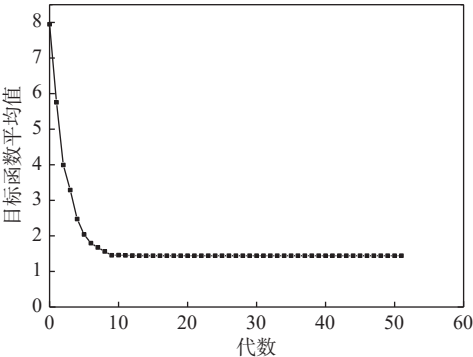


图 6 遗传算法种群迭代进化示意图
Fig. 6 Iterative evolution of genetic algorithm population

水声模量对压缩模量比值的平均值为 1.24, 对拉伸模量比值的平均值为 1.36。

表 2 材料模量的反演值与测试值对比

Table 2 Summary of inversion and measured values for material modulus

试样	水声模量 反演值/MPa	压缩模量 值/MPa	拉伸模量 值/MPa	水声模量与 压缩模量比值	水声模量与 拉伸模量比值
VS-1	806.8	635.2	558.9	1.270	1.444
VS-2	801.7	629.3	627.7	1.274	1.277
VS-3	704.5	614.3	577.2	1.147	1.221
VS-4	856.9	704.6	582.0	1.216	1.472
VS-5	813.4	626.8	593.7	1.298	1.370

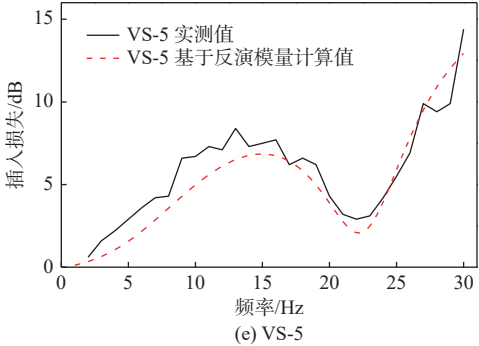


图 7 VS1~VS5 试样基于反演模量的插入损失计算值与实测值对比

Fig. 7 Comparison of insertion loss between inverse modulus based calculation and measurement for samples VS-1~VS-5

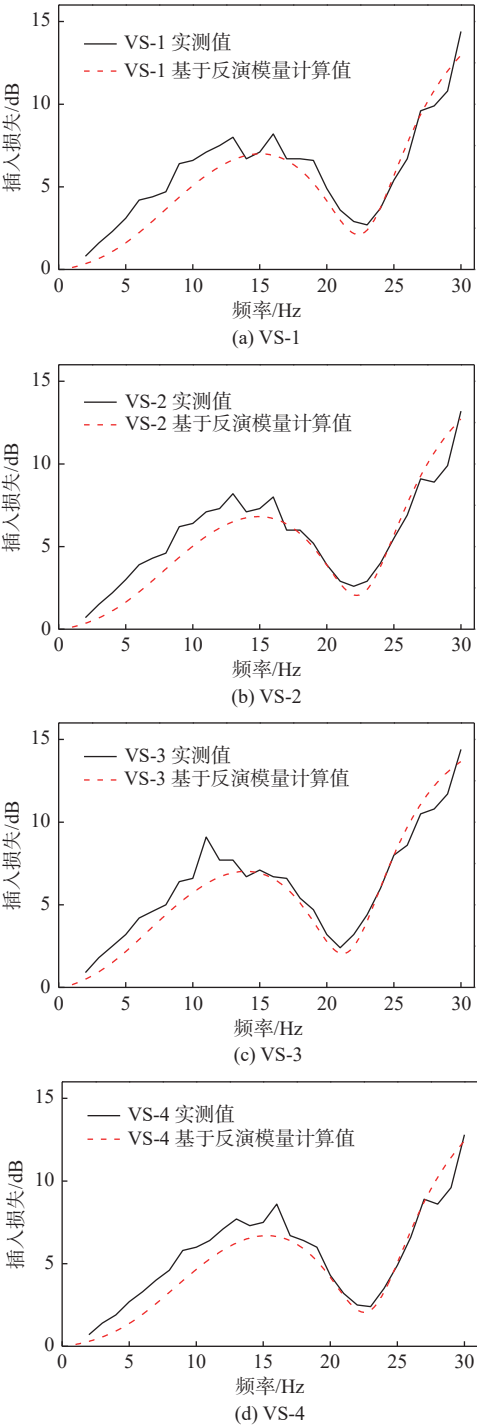
3 结 语

本文基于分层传递矩阵理论、遗传算法, 构建了高强度 PVC 泡沫的水声模量反演计算方法。通过夹芯复合材料试样脉冲声管测试所得的插入损失实测值, 反演计算得到了多个材料试样的水声模量, 并与基于材料力学试验所得的静弹性模量值进行了对比。结果表明, 水声模量明显高于静弹性模量, 前者对压缩模量比值的平均值为 1.24, 对拉伸模量比值的平均值为 1.36。

高强度 PVC 泡沫是一种具有复杂泡孔结构的非均质聚合物材料, 其静弹性模量与水声模量存在差异。因此, 在计算复合材料的水声插入损失时, 可在泡沫材料的静弹性模量的基础上适当予以正向修正, 以降低误差, 从而有利于水下航行器的声学精细化设计。同时, 本文提出的高强度 PVC 泡沫材料参数反演方法也可以作为同类型反演问题的参考。本文的主要局限性在于未从高强度 PVC 泡沫材料的微观泡孔结构出发, 深入探讨材料静弹性模量和水声模量存在显著差异的原因, 后续可进一步开展研究。

参考文献:

[1] 马志超, 张用兵, 郭万涛, 等. 泡沫夹芯复合材料力学性能与水声性能综合设计初探 [J]. 材料开发与应用, 2013, 28(3): 55-61 .
MA Z C, ZHANG Y B, GUO W T, et al. An overall design of foam-core sandwich composite on mechanical and underwater acoustic properties[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(3): 55-61 (in Chinese).
[2] 董云龙, 梅志远. 复合材料夹层板水下透声性能分析 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(增刊 1): 121-125.
DONG Y L, MEI Z Y. Analysis on underwater sound transmission properties of composite sandwich plates[J].



Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(Supp 1): 121–125 (in Chinese).

[3] 吕志强. 声学材料斜入射吸声性能测试方法研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2018.

LV Z Q. Measurement method of sound absorption properties of acoustic materials with oblique incidence[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2018 (in Chinese).

[4] 徐坤. 功能梯度材料平板力学与声学特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

XU K. Research on mechanical and acoustic properties of functionally graded material Panels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).

[5] 柯李菊, 刘成洋, 方智. 基于 COMSOL 的组合空腔结构声学覆盖层的声学性能分析 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 167–175,182.

KE L J, LIU C Y, FANG Z. COMSOL-based acoustic performance analysis of combined cavity anechoic layer[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 167–175,182 (in Chinese).

[6] 胡泊. 反声复合材料指挥室围壳声目标强度研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2017.

HU B. Research on target strength of submarine sails made by sound-reflecting composites[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2017 (in Chinese).

[7] 张天航, 朱广平, 孙辉, 等. 脉冲声管系统中反演水声材料声学参数的软件研制 [J]. 应用科技, 2018, 45(2): 6–10.

ZHANG T H, ZHU G P, SUN H, et al. Research on the software of calculating parameters of the underwater acoustic materials in the pulse acoustic tube system[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(2): 6–10 (in Chinese).

[8] 张天航. 基于反射声的材料参数反演研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

ZHANG T H. Research of material parameters inversion based on reflection[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017 (in Chinese).

[9] 宋扬. 中高频下粘弹性材料声学参数测量 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

SONG Y. Acoustic parameter measurement of viscoelastic material at intermediate and high frequency[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007(in Chinese).

[10] 李水, 罗马奇, 范进良, 等. 水声材料低频声性能的行波管测量 [J]. 声学学报, 2007, 32(4): 349–355.

LI S, LUO M Q, FAN J L, et al. Traveling wave tube measurements for low-frequency properties of underwater acoustic materials[J]. Acta Acustica, 2007, 32(4): 349–355 (in Chinese).

[11] 陈建平, 何元安, 黄爱根. 水声材料声学参数及其声管测量方法 [J]. 声学技术, 2015, 34(2): 109–114.

CHEN J P, HE Y A, HUANG A G. Summarization of acoustic parameters of underwater materials and the acoustic tube measurement method[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(2): 109–114 (in Chinese).

[12] 布列霍夫斯基赫 И М. 分层介质中的波 [M]. 杨训仁, 译. 北京: 科学出版社, 1960: 34-37.

BREKHOVSKIKH I M. Wave in layered medium[M]. YANG X R, trans. Beijing: Science Press, 1960: 34-37 (in Chinese).

[13] 许杨剑, 李翔宇, 王效贵. 基于遗传算法的功能梯度材料参数的反演分析 [J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 170–176.

XU Y J, LI X Y, WANG X G. Genetic algorithm based inverse analysis for functionally graded material parameters [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 170–176 (in Chinese).

[14] 全国塑料制品标准化技术委员会. 硬质泡沫塑料压缩性能的测定: GB/T 8813—2008 [S]. . 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Technical Committee on Plastic Products of Standardization Administration of China. Rigid cellular plastics—determination of compression properties: GB/T 8813–2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).

[15] ASTM. Standard test method for compressive properties of rigid cellular plastics: ASTM D1621-16 [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM), 2016 .

[16] ASTM. Standard test method for tensile and tensile adhesion properties of rigid cellular plastics: ASTM D1621-17 [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017.

[17] 全国声学标准化技术委员会. 声学—水声材料样品插入损失、回声降低和吸声系数的测量方法 : GB/T 14369—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012

National Technical Committee on Acoustics of Standardization Administration of China. Acoustics—measurement methods of insertion loss, echo reduction and sound absorption coefficient for underwater acoustical material samples : GB/T 14369-2011 [S]. Beijing: China Standard Press, 2012 (in Chinese).