

# 消声瓦声参数匹配与水下目标的回波消声效果

赵 洪, 徐海亭

(中国科学院北海研究站, 青岛 266023)

摘要: 覆盖消声瓦是水下目标隐身的一个主要方法, 对敷瓦消声效果的预报是敷瓦工程的一个重要环节。预报的关键是对消声瓦吸声效果的数值分析和目标回波强度的计算方法。本文分析了消声瓦的吸声机理, 据此, 采用传递矩阵法和参数匹配方法求得敷瓦多层结构在任意方向的反射系数, 再通过物理声学方法计算目标回波强度, 给出预报值, 并同实验结果进行了比较。

关键词: 消声瓦; 多层结构; 传递矩阵; 目标

中图分类号: TB564

文献标识码: A

## Parameter matching of a silent tile and anechoic effect of underwater targets

ZHAO Hong, XU Hai-ting

(Qingdao Acoustics Laboratory, The Chinese Academy of Science, Qingdao 266023, China)

**Abstract:** It is a useful method to cover an underwater target with silent tiles for silence. Therefore the predict of anechoic effect is important. In this paper, the absorbed mechanism of the silent tile is analyzed, the transmission matrix method and parameter matching method are used to compute reflecting coefficient of multiple-layer structure by covered the silent tile in any direction. At last, we get the values of target strength(TS) and compare them with experimental results.

**Key words:** silent tile; multiple-layer structure; transmission matrix; target

### 1 引言

隐身技术是武器系统发展中出现的一项高新技术<sup>[1]</sup>。对于水下主动目标, 其隐身技术主要是表面覆盖消声材料和优化线型设计。国外一些海军大国在常规动力和核动力潜艇表面上都覆盖消声瓦, 如英国的特拉法尔加级, 俄罗斯的阿尔法级, 美国的鲟鱼级等。

目标表面覆盖吸声材料达到的隐身效果是回声隐身技术水平的标志。

确定目标的敷瓦隐身效果通常有3种方法, 即海上实舰测量、目标模型缩比实验和理论建模后做数值计算, 每种方法都有其优劣。理论建模方法用数值方法计算目标的反射特性, 具有经济、周期短、不受环境和实验条件限制等优点, 一些国家已开发出通用建模软件。我国的回波建模工作也取得了一些成果, 其软件 TESSYS 已在水声工程中初步得到应用。

关于水声吸声材料的研究国内外已经做了大量工作, 但至今还没有建立严格、统一的理论<sup>[2-4]</sup>, 对于结构吸声材料, 由于其不规则性, 则只能采用近似计算方法。对此, 有的工作是将问题在一定条件下做近似后再求解, 有的是将结构材料近似为渐变的多层结构再进行求解。本文采用的是后一种方法, 通过分析消声瓦的吸声机理, 将其作为分层均匀高粘性弹性介质, 用传递矩阵法和参数匹配法求得等效参数, 获得敷瓦多层结构任意频率、任意方向的复反射系数, 将其用于敷瓦目标 TS 值的计算, 由此预报目标覆盖消声瓦的实际隐身效果。最后对一模拟体目标覆瓦后的消声效果进行了预报。

### 2 结构消声瓦与传递矩阵

#### 2.1 消声瓦的吸声机理

消声瓦是带结构的丁苯橡胶层, 见图 2-1, 有些还掺有一定的杂质颗粒, 所以它的吸声机理是十分复杂的, 涉及到声学、热力学、动力学、弹性力学及化学等诸多学科。国内关于消声机理研究基本上有两种观点, 一种认为橡胶类材料属高粘性弹性介质, 在常温下是固态, 但其某些力学性质与金属不同, 可以忽略切变效应, 因此, 结构消声瓦的吸声机理主要是

收稿日期: 2000-07-06; 修订日期: 2000-09-25

庆祝上海市声学学会成立 20 周年征文

作者简介: 赵 洪(1973-), 男, 青岛市人, 研究员, 从事目标散射等研究。

在材料的粘性内摩擦作用和弹性弛豫作用下, 声能转变热能的损耗以及空腔的谐振吸收<sup>[5]</sup>; 另一种观点认为丁苯橡胶为粘弹性材料, 不能忽视横波的影响, 空腔的消声机理主要是波形变换, 把纵波变换成具有高吸收因子的横波而达到较大吸声作用。

把丁苯橡胶作为弹性体, 对水-丁苯橡胶两半无限介质中的声场进行计算, 反射和透射系数如图 2-2 所示。由于橡胶中纵波、横波与水的特性阻抗的匹配不同, 虽然横波的耗损系数很大, 但橡胶中横波分量很小, 对反射系数的影响也很小。此外, 在等效分层结构的计算中, 可以把横波的作用近似等效为纵波参数的变化。所以, 在本文的计算中认为橡胶类材料是高粘性弹性介质, 没有横波。空腔能够产生谐振吸收, 需要进一步研究。

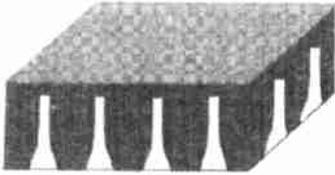
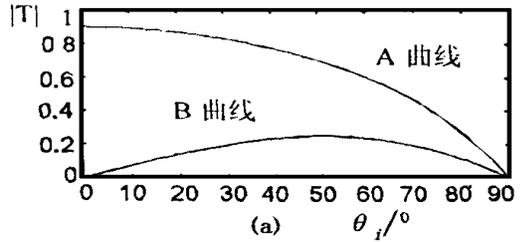


图 2-1 消声瓦结构示意图

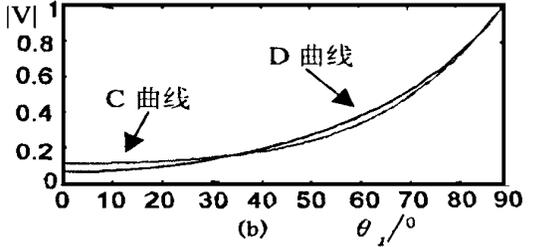
## 2.2 传递矩阵法和匹配法

消声瓦是有结构的, 在现有的数值分析中一般将其作为复合的多层材料, 每一层足够的薄, 从而可近似等效为一均匀介质层, 在此基础上, 对其进行各种计算。目前各种消声瓦分析理论基本上都是这种方式, 只是近似、等效的具体方法不同。根据 2.1 节所述, 本文中每一薄层等效为均匀高粘性弹性介质, 所需等效参数为密度、复声速。对于多层材料和敷瓦的多层结构, 反射系数的计算使用传递矩阵法比较合适。

对 10kHz 以下反射系数的计算, 把消声瓦分成  $N$  层, 再考虑弹性板和液体组成的  $M$  层结构, 总结构如图 2-3 所示, 对于各层需给定表观密度和等效



(a): 纵波 A, 横波 B 反射系数



(b): 橡胶为流体模型 C, 为弹性体模型 D

图 2-2 橡胶为弹性模型的透射系数  $f = 5\text{kHz}$

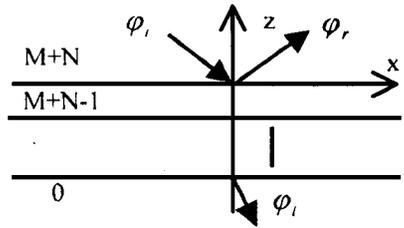


图 2-3 敷瓦结构等效为分层均匀介质

复声速。

反射系数的计算采用传递矩阵法<sup>[6]</sup>。忽略时间因子  $e^{-j\omega t}$ , 给定各层厚度、密度、复声速、水平波数, 可得复波数  $k_L = (\omega/c_L)$ , 以及各波数的水平和垂直分量。

层  $n$  是流体介质时, 传递矩阵为  $D_2^{(n)}$ ,

$$\begin{bmatrix} p^{(n+1)} \\ v^{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_z^{(n)} d^{(n)}) & -j \frac{1}{k_z^{(n)}} \sin(k_z^{(n)} d^{(n)}) \\ -j k_z^{(n)} \sin(k_z^{(n)} d^{(n)}) & \cos(k_z^{(n)} d^{(n)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^{(n-)} \\ v^{(n-)} \end{bmatrix} = D_2^{(n)} \begin{bmatrix} p^{(n-)} \\ v^{(n-)} \end{bmatrix}$$

其中上标  $n+$  和  $n-$  分别表示物理量在第  $n$  层介质的上、下边界处的值。

$$\text{弹性体的传递矩阵为 } D_4^{(n)}, \begin{bmatrix} v_x^{(n+)} \\ v_z^{(n+)} \\ z^{(n+)} \\ \frac{1}{2} \frac{1}{\rho^{(n)}} \frac{1}{x^{(n+)}} \end{bmatrix} = A_4^{(n)} B_4^{(n)} \begin{bmatrix} v_x^{(n-)} \\ v_z^{(n-)} \\ z^{(n-)} \\ \frac{1}{2} \frac{1}{\rho^{(n)}} \frac{1}{x^{(n-)}} \end{bmatrix} = D_4^{(n)} \begin{bmatrix} v_x^{(n-)} \\ v_z^{(n-)} \\ z^{(n-)} \\ \frac{1}{2} \frac{1}{\rho^{(n)}} \frac{1}{x^{(n-)}} \end{bmatrix}$$

其中  $A, B$  是  $4 \times 4$  的矩阵,  $\gamma$  是拉梅常数,  $k$  是纵波波数,  $p, v, \sigma$  分别为压力、质点振速、应力。

通过选择初始独立量及各层之间的变量转换,求得总的输入阻抗  $Z = p^{(M+N, -)} / v^{(M+N, -)}$ , 则反射系数为  $V = (Z - Z_0) / (Z + Z_0)$ , 其中  $Z_0$  是水的特性阻抗。详细的计算步骤及公式在此省略。

对 10kHz 以上的计算, 由于反射主要是界面声阻抗不匹配引起的, 内层细微结构的影响不大, 也可以采用较简单的数学模型。

对于各分层的等效介质参数(密度、复声速), 目前的各种消声瓦分析方法中没有统一的理论, 各种方法的分析结果之间有差异, 同实验值也不完全一致。因此, 我们考虑通过可信的实验数据反演数学模型中的参数。采用匹配场算法进行反演, 简称为参数匹配法。采用声管实验所得的反射系数随频率的变化曲线作为匹配目标。根据物理规律, 等效参数应当符合一定的条件, 即随空腔截面的增大, 等效密度应当减小, 损耗因子应当增大, 同时相邻各层参数不应有突变。设定各等效参数的试探值, 求得反射系数曲线, 将其同实验值进行比较, 误差小于给定值, 就退出循环, 否则, 在当前值的基础上进行修正。每次修正, 在各参数的当前值上加一随机变化, 变化幅度随匹配程度的提高而减小, 并且修正后的参数应当符合上述条件。最终匹配得到消声瓦各层的等效参数如表 1 所示。图 3-2 将给出不同背衬情况下用此参数计算的等效反射系数。

表 1 各层的匹配参数( $C = C / (1 + j / 2)$ )

层号	( $\text{kg/m}^3$ )		$c$ (m/s)
1	1143	1.10	980
2	1143	1.15	940
3	1130	1.20	930
4	1128	1.35	960
5	1126	1.60	940
6	1120	1.85	970
7	1110	2.00	960
8	1080	2.10	970
9	1000	2.20	980
10	950	2.20	980

综上所述, 通过理论分析, 主要是基于橡胶材料的声吸收功能和声波波长远大于消声瓦内部结构的线度这一点, 建立消声瓦的等效数学模型——多层均匀高粘性弹性介质的复合结构, 采用可信的实验数据反演数学模型中的参数, 最终获得可用于实际计算的数学模型。

### 3 反射系数

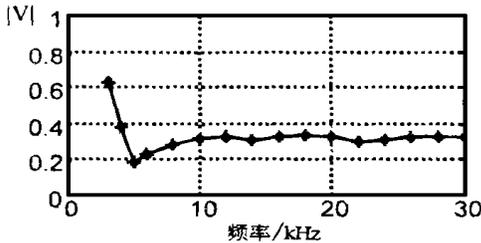
#### 3.1 反射系数的实验值

图 3-1 是两次反射系数的测量结果。

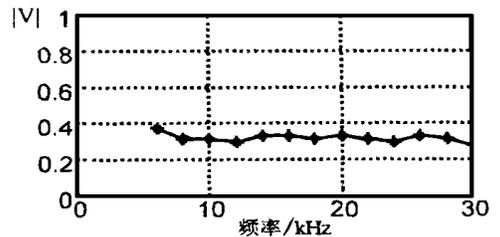
#### 3.2 反射系数的计算值

据求得的等效参数, 用传递矩阵法计算各种多层结构敷瓦后的反射系数, 结果见图 3-2, 由图表明:

(1) 频率低于 4kHz 时, 对于水背衬情况, 反射系数随频率的升高而增大, 对于空气背衬情况, 反射

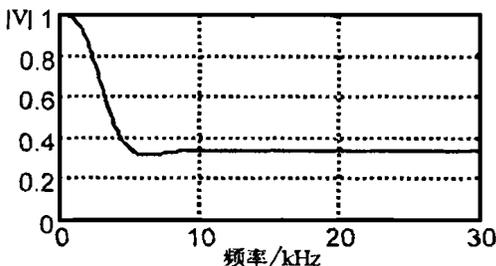


水-消声瓦-薄钢板-空气

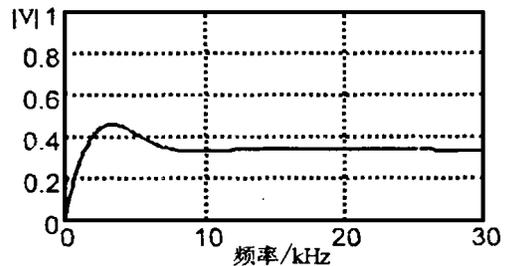


水-消声瓦-薄钢板-水

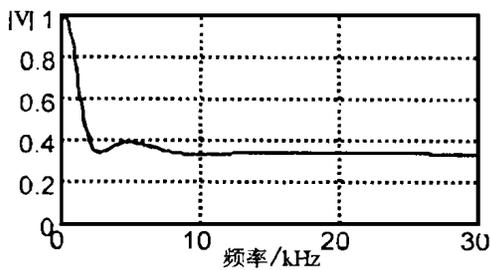
图 3-1 消声瓦声管垂直入射实验数据



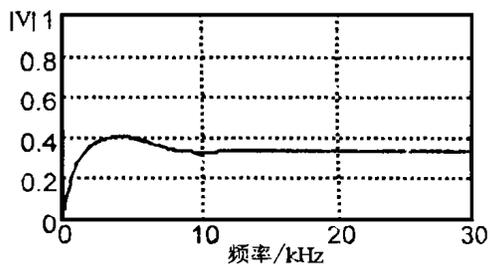
(a) 水-消声瓦-空气, 垂直入射



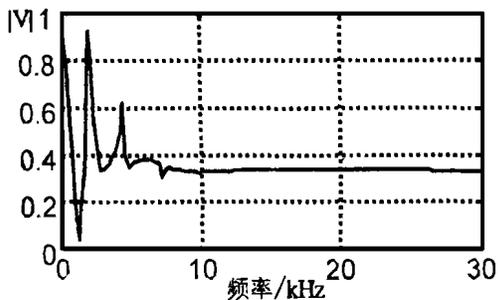
(b) 水-消声瓦-水, 垂直入射



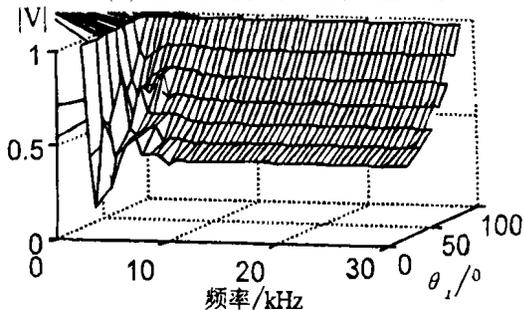
(c) 水-消声瓦-钢板-空气,垂直入射



(d) 水-消声瓦-钢板-水,垂直入射



(e) 水-消声瓦-钢板-水-钢板-空气,垂直入射时随频率的变化



(f) 随频率、入射角的变化

图 3-2 根据等效参数计算的各种敷瓦结构的反射系数

系数随频率的升高而减小;

(2) 频率高于 5kHz 时, 反射系数趋于一常数, 反射主要由水和消声瓦的声阻抗不匹配引起的;

(3) 图(e) 中低频段的起伏是由双层钢板间的谐振引起的。

比较图 3-1 和图 3-2, 可知同各种背衬情况下的计算结果同实验曲线基本吻合, 说明所得的匹配参数是有效的。

#### 4 模拟体敷瓦消声效果预报

下面根据传递矩阵方法和上文所得消声瓦等效参数, 通过数值计算给出一模拟体敷瓦效果的预报值, 并同实验结果进行比较。

模拟体是一双层球壳, 敷瓦后的模拟体结构示意图如图 4-1 所示。其中, 层 1 至层 6 分别为水介质、消声瓦、弹性薄板、水介质层、弹性板和空气。

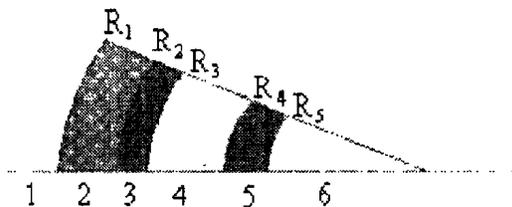
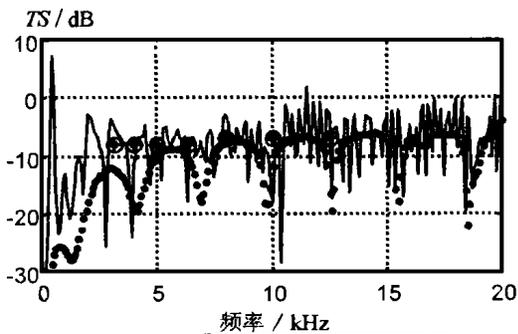
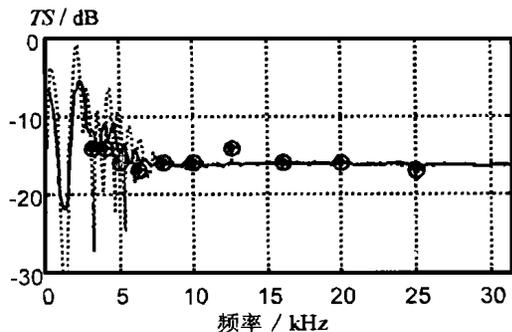


图 4-1 球形模拟体的结构、几何和材料参数



o: 实验值; —: 理论值; \*: 预报值

图 4-2 未敷瓦模拟体的目标强度



o: 实验值; —: 预报值; —: 预报值的平均

图 4-3 敷瓦模拟体的目标强度

## 4 结 语

研究表明, 适当的超声辐照可以增强蛋白酶的活性; 激活固定化蛋白酶, 促进酶的固定化过程; 提高多肽的两相酶合成产率及加速在蛋白酶催化下发生的酰化反应。

研究也表明, 声场作用会给蛋白酶的构象带来一定程度的变化。适宜的声场强度和频率会使蛋白酶分子构象发生变化, 使其折叠得更合理, 更容易与底物结合成中间产物, 从而提高其催化活力。

声场对酶催化过程新的变革将对酶化工领域产生积极的影响, 其结果有可能找出一种简单而价廉、靠外力场促进酶催化过程的新的方法, 使酶法生产工业带来新的飞跃。

### 参考文献:

- [1] 李再资. 生化工程与酶催化[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995.
- [2] Evgeni N Vulfson, Dotglas B Sareg and Barry A Law. Enhancement of subtilisin-catalyzed inter-

esterification in organic solvents by ultrasound irradiation[J]. *Enzyme Microb. Technol.*, 1991, 13(2): 123-126.

- [3] Ishimori Y, Karube I, Suzuki S. Acceleration of immobilized  $\alpha$ -chymotrypsin activity with ultrasonic irradiation[J]. *J. Mol. Catal.*, 1981, 12(2): 253-259.
- [4] Tadasa K, Yamamoto Y, Shimoda I, Kayahara H. The influence of mixing conditions of reaction medium on proteinase-catalyzed peptide synthesis; The use of sonication [J]. *Shinshu Daigakubu Kiyo*, 1990, 26(1/2): 21-26.
- [5] David H Bremner, Recent advances in organic synthesis utilizing ultrasound [J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 1994, 1(2): s119-s124.
- [6] 陈陶声. 酶制剂生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994: 24
- [7] Atequad N, Iqbal J. Effect of ultrasound on papain [J]. *Indian J. Biochem. Biophys.*, 1985, 22(3): 190-192.
- [8] 薛雄志等. 次声对几种生物酶的生物效应初探[J]. *厦门大学学报(自然科学学报)*, 1995, 34(3): 421-425.

(上接第 225 页)

敷瓦前目标强度实验值与预报值见图 4-2, 敷瓦后目标强度实验值与预报值见图 4-3。

结果表明, 频率高于 5kHz 时三种结果基本一致, 说明此计算方法是有效的。

## 5 结 论

敷瓦消声效果预报的关键是对消声瓦的数学建模。本文采用等效多层均匀介质模型, 通过匹配方法获得等效参数。在此基础上用传递矩阵法和物理声学方法计算出水下目标敷瓦后的隐身效果预报值, 构成了一个完整的处理框架。通过对一个模拟球的计算, 说明了方法的正确性。对低频的预报方法需做进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 航天隐身技术预研文集[R]: 第七册. 航空航天工业部科学技术司, 1991.
- [2] 尚尔昌. 渐变吸收层反射率的近似式[J]. *声学学报*, 1965, 3(4).
- [3] C. Audoly. Prediction of the efficiency of a decoupling coating partially covering a cylindrical hull using the SEA method[J]. *UDT*, 1997; 293-297.
- [4] 王仁乾等. 带空腔尖劈吸声器吸声性能的研究[J]. *声学技术*, 1999, 18(4): 146-148.
- [5] 何作镛, 王曼. 水下非均匀复合层结构吸声的理论研究[J]. *应用声学*, 1996, 15(5): 12-19.
- [6] 布列霍夫斯基赫. 杨训仁译. 分层介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1960: 43-57.