文章编号:1006-1355(2018)03-0225-04

基于水声透声性能的橡胶配方筛选研究

於珂睿，罗竹辉，李 远，贺湘伟，黄自华

（株洲时代新材料科技股份有限公司，湖南 株洲 412007）

摘 要:为减少水声橡胶开发过程中的测试费用,缩短开发周期,对利用橡胶材料基本性能参数进行声波透射系数计算方法进行研究,然后利用透射系数理论计算结果对橡胶配方进行筛选。为验证该筛选方法的可行性,设计了三种橡胶配方,对其透射系数进行理论计算和性能测试,结果表明:3种配方橡胶的透射系数频率特性理论计算结果与测试结果吻合较好,数值偏差在5 %以内,三种配方橡胶透声性能优劣排序理论计算结果与测试结果一致,证明了利用透射系数理论计算结果对橡胶配方进行筛选是可行的,透射系数理论计方法还可为橡胶配方设计提供指导。

关键词:声学;透射系数;透声材料;理论计算;初步筛选

中图分类号:TB56 **文献标志码**:A **DOI编码**:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.03.044

Analysis of Rubber Formula Selection based on the Transmission Property of Underwater Sound

YU Kerui , LUO Zhuhui , LI Yuan , HE Xiangwei , HUANG Zihua

(Zhuzhou Times New Material Technology Co. Ltd., Zhuzhou 412007, Hunan China)

Abstract : In order to save the testing expenditure during the development of a specific rubber used in underwater environment and speed up the development cycle, the calculation method of transmission coefficients is studied by analyzing the basic parameters of the rubber. Then, the rubber formula is selected based on theoretical results of the transmission coefficient analysis. For demonstrating the reasonability of the transmission coefficient calculation method, three kinds of rubbers with different formulas are designed and their transmission coefficients are calculated and tested. Comparing testing results with the calculation results shows that both results are in good agreement with a small difference (±5 %). And the sequences of the three kinds of rubbers according to their acoustic transmission performance order are identical for presented calculation method and test method. It implies that the presented method is reasonable and feasible for rubber formula selection and the method can be used to guide the development of specific rubbers.

Keywords : acoustics; transmission coefficient; acoustic transmission material; theoretical calculation; preliminary screening

随着水下探测技术的不断发展,对舰船材料的水声透声性能有越来越高的要求。橡胶具有较好的水下透声能力,常被用作声呐壳体的透声材料。在橡胶的开发过程中,会涉及多个配方,由于材料水声性能测试方法复杂、测试费用高[1-3],如果对每一种配方的橡胶进行水声性能的测试,然后根据测试结果来筛选出理想的橡胶配方,会使得整体开发周期变长、费用急剧增加。

水下透声材料的研究,孙好广[4]等对双层钢板的平面波透声性能进行了理论分析并给出了实验结果。张用兵等认为复合材料替代金属构件可降低其声反射,由此对透声复合材料进行了实验研究并给出了数据[5]。Hartmann等对高聚物松弛行为模型的研究和建立得到声速,声衰减系数与剪切模量,损耗因子以及密度之间的关系[6]。虽然水声材料的技术有了较大发展,但针对橡胶透声性能的理论研究较少,缺少快速分析橡胶材料透声性能的理论方法。本文目的是分析理论计算模型,用于水声橡胶的透声性能筛选。

1 橡胶水声性能理论模型

1.1 基本参数

水声材料参数主要包括三种类型:特征参数、构件功能参数和实物成品功能参数[3]。特征参数是材料本身的固有特征,如材料的密度ρ,材料的体积模

收稿日期:2017-10-19

作者简介:於珂睿(1993-),女,湖南省株洲市人,硕士研究生,工程师,主要研究方向为机电一体化,材料透声性能研究。

E-mail: yukr@csrzic.com

量K等；构件功能参数主要表征构件的性能，不仅与构件的结构有关，还与构件的厚度、形状、使用条件有关，如声压透射系数t_p和吸声系数α等；实物成品功能参数为在应用阶段实际测量的，如最终产品质量M等。三种参数的相互关系如图1所示。

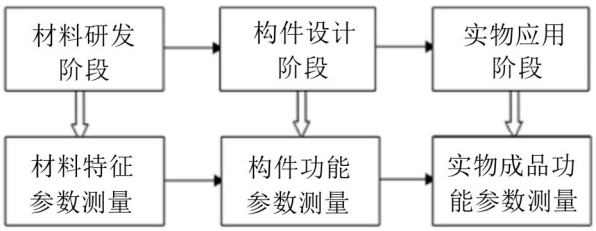

图1 水声材料参数按研制阶段分类测量

为能直接评价橡胶的透声性能，在该研究中，引入特征参数杨氏模量E、泊松比σ和密度ρ作为基本参数。

在基本参数确定的基础上，对声阻抗透声系数模型进行分析。其中，最直观的评价参数是橡胶透射系数，橡胶的透射系数值越接近1，透声性能越好。

1.2 声波透射系数

声波透射系数是指透射声压与入射声压之比。材料的透射系数越接近1，其透声性能越好。而声阻抗作为描述介质传播声波的一个重要物理量，对声波透射系数有所影响。

材料介质的声阻抗定义为介质密度与声波波速的乘积。根据电声类比引入声阻抗作为声学参数[7]，均匀理想介质中平面波声场的声阻抗率z是实常数，其计算公式为

$$z=\rho\times c \tag{1}$$

式中：ρ——密度，kg/m^3

c——声速，m/s

橡胶作为高弹性材料，动态力学行为表现出黏弹性[8]，固在声波通过该材料时只考虑纵波。在无限平面中纵波的传播波速为

$$c_l=\sqrt{\frac{(1-\sigma)E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho}} \tag{2}$$

式中：σ——泊松比

E——杨氏模量，MPa

根据弹性材料模量间的相互换算公式[8]，泊松比可根据杨氏模量和剪切模量换算得到

$$\sigma=\frac{E}{2\mu}-1 \tag{3}$$

式中：μ——剪切模量，MPa

通过在水中作垂直入射的测量，板浸入水中的透射系数T公式[8]为

$$T=\frac{1}{\left[\left(\frac{\rho_0c_0}{\rho_lc_l}+\frac{\rho_lc_l}{\rho_0c_0}\right)^2\left(\frac{\sin kd}{2}\right)^2+(\cos kd)^2\right]^{1/2}} \tag{4}$$

式中：d——板的厚度，m；

ρ_l——板的密度，kg/m^3；

c_l——纵波速度，m/s；

k——材料中传播声波波数，$k=\omega/c$，rad/s；

ρ_0c_0为水的声阻抗率，$z_0=1.54\times10^5$ g/cm^2·s。$\omega=2\pi\times f$，为角速度。在不考虑板厚度和透过波数前提下，根据公式(4)可知，当ρc趋近于ρ_0c_0时，可获得最大的透射系数。

2 实验验证

2.1 测试设备及方法

根据上述理论分析，声阻抗值可由杨氏模量和泊松比求得，而泊松比又与杨氏模量成正相关和剪切模量成负相关，见式(3)，因此，当已知橡胶的密度、杨氏模量、剪切模量和板的厚度时，能计算出橡胶的透射系数。

采用DMTA，依据时温等效原理，在高频短时间内对材料的力学松弛现象进行观察，依据转换因子，换算得到低温下的数据，测得橡胶的杨氏模量和剪切模量。实验的模式分别是拉伸和剪切模式，测试条件为温度范围：－60 °C/60 °C，升温速率：2.0 °C/min。实验所用仪器为NETZSCH DMA 242动态黏弹谱仪，德国NETZSCH。

密度测试采用排水法，依据的标准是ISO2781。实验仪器为天平、量筒和刻度尺等。

利用脉冲管法进行橡胶的透声性能测试，在常温常压下，将Φ56 mm，高为30 mm的圆柱样品放入声管中，测试的频率范围是2 kHz～10 kHz，每隔200 Hz取一点测试。依据的标准是GB-T 14369-2011。实验所用仪器为脉冲管，换能器和电子测试设备等。

2.2 橡胶配方

对于透声材料，在声学性能中，要满足材料的声阻抗与介质水的声阻抗值相匹配。橡胶的特性声阻抗与水的近似，而透声性能优劣的差异取决于胶料的组成(即胶种的选择和生胶外其他组成的选择)。根据文献[9-10]，常用橡胶中，天然橡胶的特性声阻抗与海水最匹配，声波衰减以天然橡胶最小，氯丁橡胶最大，其他介于中间。

为验证理论筛选方法的有效性，设计了三组配方的橡胶，分别编号为1#、2#和3#，其基本性能参数见表1。

表1 橡胶物理机械及动态性能

基本参数	组号			标准
	1	2	3	
密度/(g·cm^{-3})	1.091	1.115 8	1.179 4	ISO 2781
E'(MPa),500～11 000 Hz	56.57～66.24	68.95～80.39	100.44～156.88	HB 7655
μ'(MPa),500～11 000 Hz	18.98～22.15	23.06～26.89	33.59～52.47	HB 7655

3 结果与讨论

3.1 理论计算值

测试样品是Φ56 mm,高为30 mm的圆柱。依据测试标准[9]和橡胶工作环境要求,计算频率为1 kHz～10 kHz情况下的三种样品的透射系数T理论值,将各个样品的杨氏模量(E)、剪切模量(μ)、密度(ρ)、声波频率(f)和样品厚度(d)代入透声系数公式(4)中,得到不同频率下的透射系数值,如表2所示。

表2 透射系数T

频率/Hz	组号		
	1	2	3
1 000	0.999 98	0.999 97	0.999 46
2 000	0.999 97	0.999 81	0.997 38
3 000	0.999 97	0.999 47	0.993 54
4 000	0.999 98	0.998 94	0.987 97
5 000	0.999 99	0.998 24	0.980 82
6 000	1.000 00	0.997 39	0.972 33
7 000	1.000 00	0.996 44	0.962 82
8 000	0.999 98	0.995 43	0.952 59
9 000	0.999 95	0.994 43	0.941 99
10 000	0.999 90	0.993 49	0.931 32
均值	0.999 97	0.997 36	0.972 02

由计算结果可知,样品的透声性能是:1#＞2#＞3#。

3.2 测试结果

在频率间隔为200 Hz常温常压的条件下,用脉冲管法测得1#、2#和3#样品的透射系数,如图2所示。

对比图2中三条曲线,整体而言,样品在低频的透射系数要高于高频的透射系数,单个样品测试结果而言,随着频率的变动,测试结果波动较小,测试的可靠性较高。1#、2#和3#三个样品测试的透射系数的均值分别是0.996 6,0.993 7和0.979 8,结合图2,样品的透声性能排序是:1#＞2#＞3#。

3.3 对 比

三种样品透射系数的理论计算和对应实验测试结果的对比如图3－图5,可以看出,理论计算的大体趋势和实验结果相同,理论计算和实际测试

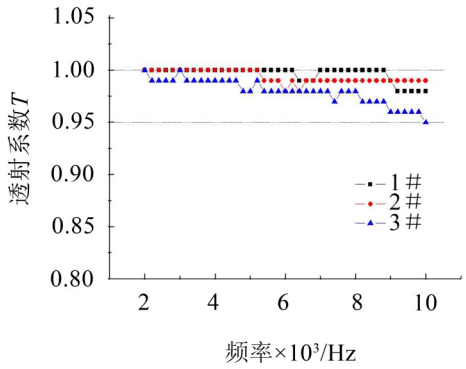

图2 常温常压下3种样品的透射系数

的误差在5 %以内,即理论计算中不同频率的透声系数结果是可信的。此外,理论计算的透射系数均值从大到小排序为:1#>2#>3#,该排序结果与测试结果一致,所分析的理论透射系数计算方法可以推算不同频率下橡胶的透射系数,从而验证理论模型筛选橡胶配方的合理性与可操作性。

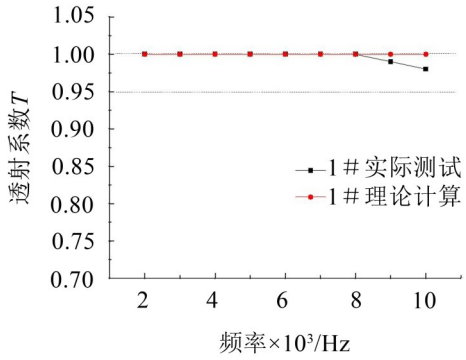

图3 1#样品透射系数实测值和理论值对比

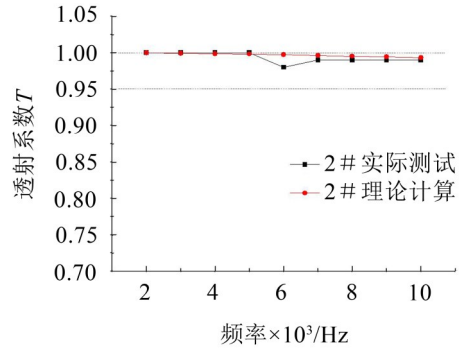

图4 2#样品透射系数实测值和理论值对比

4 结 语

分析材料基本参数和透射系数模型。设计了三

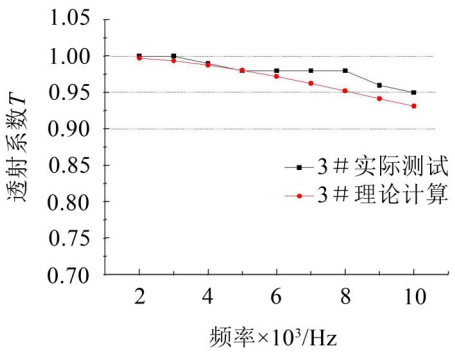

图5 3#样品透射系数实测值和理论值对比

种橡胶配方，对其透射系数进行理论计算和实验测试。结果表明：各个橡胶透射系数频率特性测试结果与理论计算结果吻合较好，偏差在5 %以内，三种橡胶透声性能排序理论计算结果与测试结果一致。

理论计算方法可以用来进行橡胶配方的筛选以及指导橡胶配方的设计和改进。

参考文献：

[1] 文庆珍，龚沈光，朱金华，等. 聚合物的水声吸声与动态力学性能关系的研究[J]. **武汉理工大学学报**，2006，28(10)：38-41.

[2] 吕世金. 水下材料声学性能宽频段测量方法[C]. 船舶水下噪声学术讨论会，2007：37-45.

[3] 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.

[4] 孙好广，李水. 水中双层金属板的透声性能分析[J]. **声学与电子工程**，2002(1)：34-36.

[5] 张用兵，于德梅，史俊虎. 高强玻璃纤维增强乙烯基酯复合材料及其构件的声性能研究[J]. **材料开发与应用**，2004，19(2)：7-9.

[6] HARTMANN B, LEE G F, LEE J D, et al. Sound absorption height and width limits for polymer relaxations [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1997, 101(4): 2008-2011.

[7] 朱蓓丽，黄修长. 潜艇隐身关键技术:声学覆盖层的设计[M]. 上海：上海交通大学出版社，2012.

[8] 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京：科学出版社，1983.

[9] 杨银初，邓明长，刘成起，等. 水声透声橡胶的研究和应用[J]. **特种橡胶制品**，1981(1)：60.

[10] 陈月辉. 声学功能橡胶[J]. **特种橡胶制品**，2004，25(1)：55-62.

（上接第220页）

（3）在523 Hz频率下综合声压级最大，最大值为85.23 dB，1 911 Hz频率下出现最小值，最小值为46 dB；500 Hz发动机辐射声功率较大，而高频段2 000 Hz相对较小。

（4）通过加载多种激励，得到发动机不同部件的振动情况，结合WBT发动机噪声分析理论，得到不同中心频率下发动机声场云图，为接下来发动机振动噪声优化设计提供了思路。

参考文献：

[1] 陆际清，沈祖京，孔宪清，等. 汽车发动机设计[M]. 北京：清华大学出版社，1993.

[2] 吴炎庭，袁卫平. 内燃机噪声振动与控制[M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[3] 曹树谦，张文德. 振动结构模态分析-理论、实验与应用[M]. 天津：天津大学出版社，2001.

[4] SUNNY NARAYAN. Effects of various parameters on piston secondary motion[C]. 2015, SAE 2015-01-0079.

[5] DOTATADADI N, LITTLEFAIR B, CRUZ M D L, et al. A transient tribodynamic approach for the calculation of internal combustion engine piston slap noise[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2015, 352: 192-209.

[6] NAMHOON LEE, WONSIK PARK. NVH development of EU5 2.0 L and 2.2 L diesel engine[C]. 2011, SAE 2011-01-0932.

[7] MASAHIRO AKEI, TAKAYUKI KOIZUMI. Prediction of vibration at operator position and transfer path analysis using engine multi body dynamics model[C]. 2014 SAE 2014-01-2316.

[8] 杨陈，郝志勇，郭磊，等. 单缸柴油机的噪声源诊断及其特性分析[J]. **农业机械学报**，2008，39(6)：198-200.

[9] 陈俊杰，李松林，张发雄，等. 基于阶次分析方法解决柴油机拍振问题[J]. **噪声与振动控制**，2016，36(5)：86-89.

[10] 林琼，郝志勇，贾维新，等. 发动机机体振动噪声的预测方法[J]. **江苏大学学报**(自然科学版)，2008，29(3)：210-213.