

基于 virtual. lab 的粘弹性材料吸声性能计算研究

任伟伟, 李宏伟, 程 伟, 赵树磊

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 本文介绍了一种基于 virtual. lab 软件的粘弹性材料吸声性能计算方法。首先通过动态热机械仪 (DMA) 测量材料在不同温度下的低频动态力学性能, 依据温频等效 (WLF) 原理拓展得到材料在宽频范围内的动态力学性能, 进而计算出材料的声学参数。依据材料的声学参数便可由 virtual. lab 软件计算出材料的吸声性能。利用本方法计算了两种橡胶材料的吸声性能, 与声管实测结果进行了对比, 两者结果基本一致。

关键词: 吸声性能; 粘弹性材料; virtual. lab

中图分类号: TB 564 **文献标识码:** A

Sound Absorption Performance Calculation Research of Viscoelastic Materials Based on Virtual. lab

REN Wei-wei, LI Hong-wei, CHENG Wei, ZHAO Shu-lei

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: A sound absorption performance calculation method of viscoelastic materials based on virtual. lab is introduced in the article. Dynamic mechanical performances in low frequencies and different temperatures are measured by Dynamic Mechanical Analysis (DMA), wide frequency mechanical performances are obtained by WLF principle and sound parameters are calculated by dynamic mechanical parameters. Inputting the sound parameters to virtual. lab software, the material's sound absorption performance can be calculated by virtual. lab. Two rubber materials' sound absorption performances are calculated by the method. The calculated results are compared to the measure results. The two results are quite consistent.

Keywords: sound absorption performance; viscoelastic material; virtual. lab

在水声领域中, 橡胶等粘弹性材料作为吸声、隔声材料得到了广泛的应用。为了更好地了解水声材料的声学性能, 研究者们开展了大量的理论和仿真计算工作^[1-6]。理论计算方法大都是基于声波在分层介质中的传递模型, 利用传递矩阵法计算相应的反射系数。如王仁乾用传递矩阵法进行了空腔结构吸声材料声学性能的计算^[1], 何祚镛等用传递矩阵法研究了水下非均匀复合结构的吸声性能^[2], 姚磊等首先利用材料动态力学参数测量和声学测量相结合的方法获得材料的声学参数, 然后将获得的声学参数用于分层介质模型计算了橡胶材料的吸声系数^[4]。理论计算对于上述文章中研究的简

单结构, 可以获得比较理想的计算结果, 但是不太适用于复杂结构问题。在仿真计算研究方面, 陶猛、陈建平等分别通过有限元软件进行了吸声覆盖层声学性能研究^[5-6], 证明了有限元软件用于声学性能计算的可行性, 但是有待于进一步深入研究。

本文基于 virtual. lab 软件对粘弹性材料的吸声性能进行了计算。在利用该软件计算时, 需要输入材料的声速。本文首先借鉴文献 [4] 中的方法, 通过温频等效 (WLF) 原理获得粘弹性材料宽频范围内的杨氏模量, 由此计算得到粘弹性材料的声速。然后, 在 virtual. lab 软件中建立了样品在声管中测试时的计算模型, 输入材料的声速,

收稿日期: 2012-08-27

基金项目: 装备预研项目 (YK110303)

作者简介: 任伟伟, 男, 1987年生, 硕士, 助工, 从事水声材料研究。Email: 3641040824@163.com。

计算得到了粘弹性材料的吸声性能。同时,本文在声管中对粘弹性材料样品进行了实测,计算结果与实测结果基本一致。

1 粘弹性材料动态力学参数的频域拓展

粘弹性材料的动态力学参数一般用动态热机械仪(DMA)进行测试,DMA的测试频段通常在0.1 Hz~1 kHz内。然而,水声材料的应用频段主要在0.5~30 kHz内。依据粘弹性材料的温频等效原理,可以将其动态力学参数拓展到水声材料应用的频率范围。经典的WLF方程为^[4]:

$$f_s = f \times \alpha(T) \quad (1)$$

$$\lg \alpha_T = \frac{-c_1(T - T_s)}{c_2 + (T - T_s)} \quad (2)$$

式中 f_s 为折算频率 f 为实测频率, $\alpha(T)$ 为温度平移函数, T 为测试温度, T_s 为参考温度, c_1 、 c_2 为常数。

在数据拟合时,本文采用了准确性较好的HN模型进行拟合。HN方程为^[7]:

$$E^* = E_\infty + (E_0 - E_\infty) / [1 + (i\omega\tau)^\alpha]^\beta \quad (3)$$

$$E^* = E' + E'' \quad (4)$$

式中 E^* 为复杨氏模量, E' 、 E'' 为对应的弹性模量和损耗模量, E_0 为橡胶态模量, E_∞ 为玻璃态模量, ω 为角频率, τ 为松弛时间, α 为松弛宽度控制因子, β 为松弛不对称性控制因子。

本文利用法国01-dB公司DMA+450动态热机械仪对两种橡胶材料A、B进行拉伸模式的测试。测试频率范围为1~200 Hz,依据材料的性质,材料A测试温度范围取为-10~40℃,不等间距选取9个温度点进行测试,材料B测试温度范围取为-60~30℃,温度间距为10℃,共10个温度点进行测试。材料A、B在不同温度下弹性模量和损耗模量的测试结果如图1—图4所示。

将测试数据按上述方法进行频域拓展,得到材料A、B在20℃时的宽频弹性模量和损耗模量,如图5、6所示。

2 粘弹性材料声学性能的计算及实测

根据弹性媒质中的运动方程,可以得出声在

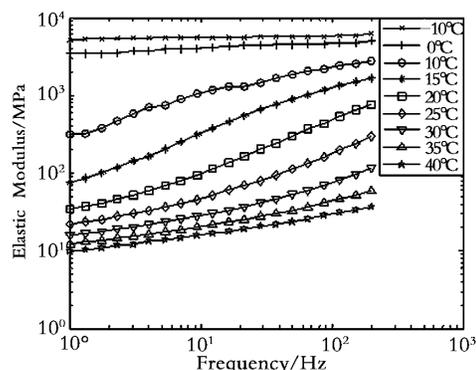


图1 材料A的弹性模量测试结果

Fig. 1 Measured elastic modulus of material A

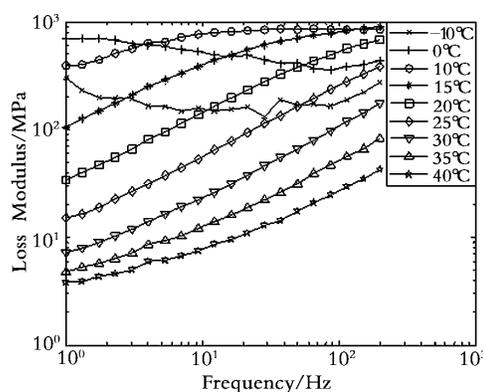


图2 材料A的损耗模量测试结果

Fig. 2 Measured loss modulus of material A

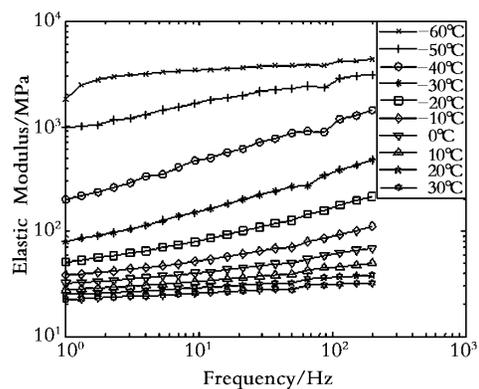


图3 材料B的弹性模量测试结果

Fig. 3 Measured elastic modulus of material B
媒质中的传播速度为^[8]:

$$\hat{c} = (\hat{M}/\hat{\rho})^{1/2} \quad (5)$$

式中 \hat{c} 为复声速, \hat{M} 为复模量, $\hat{\rho}$ 为复密度。对于水声材料,通常认为粘滞损耗可以忽略,因而式(5)中的复密度 $\hat{\rho}$ 可以用实数 ρ 代替。由式(5)可知,测得材料的模量和密度后,就可计算出与该模量相对应的声速。本文依据经温频等效

原理拓展得到的复模量数据,计算出材料 A、B 在 20 °C 时宽频范围内的复声速。

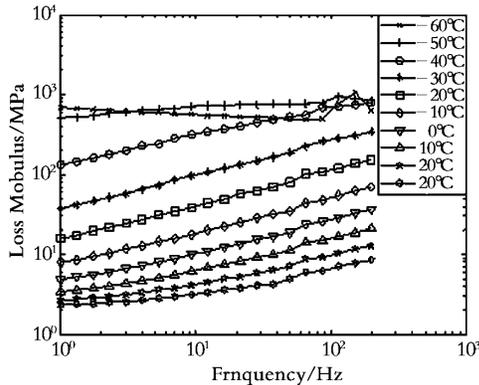


图 4 材料 B 的损耗模量测试结果

Fig. 4 Measured loss modulus of material B

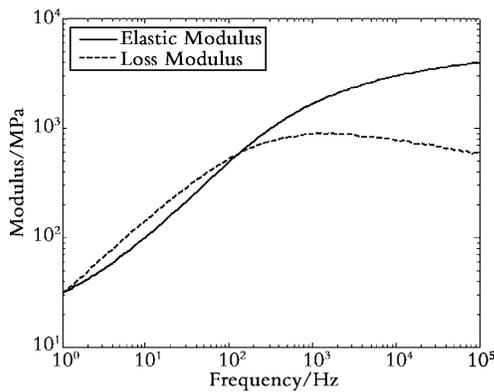


图 5 材料 A 在 20 °C 的弹性模量和损耗模量

Fig. 5 Elastic modulus and loss modulus of material A at 20°C

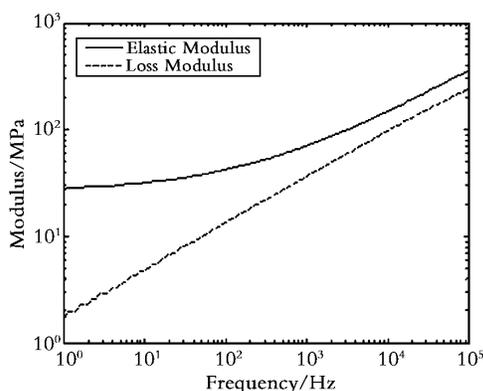


图 6 材料 B 在 20 °C 的弹性模量和损耗模量

Fig. 6 Elastic modulus and loss modulus of material B at 20°C

为了便于建立的模型与实际情况对比,本文选择声管吸声测试的工况进行建模。模型示意图如图 7 所示。

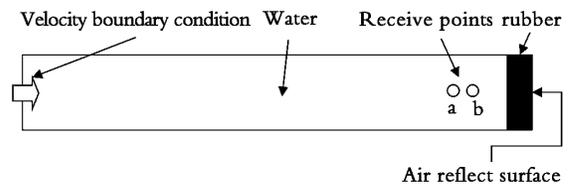


图 7 声管吸声测试模型示意图

Fig. 7 Sketch map of sound absorption measurement model in tube

在 virtual. lab 软件中,无需创建声管管道的模型,创建声管管道中水和被测橡胶样品的模型即可。为了尽量避免其他因素的影响,本文建立的被测橡胶样品模型为不带穿孔结构的实心圆柱样品模型。另外,需要在未放置样品端定义一个振动速度边界条件来模拟换能器发射声波,在橡胶端外侧定义一个空气的声学属性来模拟实际的空气反射面,在橡胶端内侧定义两个场点来模拟水听器。完成了模型的建立和上述边界条件的设定后,分别在 virtual. lab 软件中定义水和橡胶材料的密度和声速等相关参数,就可以进行计算,并最终计算出场点(图 7 中的 a、b)处的声压。

计算出场点 a、b 的声压后,利用传递函数法计算橡胶材料的反射系数,并由反射系数计算材料的吸声系数。反射系数及吸声系数的计算公式为^[9]:

$$H_{12} = P_b(t) / P_a(t) \quad (6)$$

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{2jkl} \quad (7)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

式中 $p_a(t)$ 、 $p_b(t)$ 分别为场点 a、b 处某一频率下的声压, H_{12} 为传递函数, k 为波数, s 为场点 a、b 的间距, l 为场点 a 与距橡胶材料表面的距离, R 为反射系数, α 为吸声系数。根据计算出的场点 a、b 处的声压及式(6)~式(8),计算得到材料 A、B 的吸声系数如图 8、9 所示。

为了检验本方法计算结果的准确性,对这两种橡胶材料在声管中进行了实测,测试条件为 20 °C、常压、空气背衬。材料 A、B 的吸声系数实测结果如图 8、9 所示。

从图 8、9 可以看出,材料 A、B 的吸声系数计算结果和实测结果基本一致,但是也存在一定的偏差。由于在 virtual. lab 软件中输入的声速是通过材料的复模量计算出的,而复模量在测试以及温频等效拓展的过程中,不可避免的会产生一系列的误差,这就导致计算的声速存在一定误差,从

而影响吸声系数的计算结果。而且,在 virtual. lab 软件中输入的材料参数仅有材料的密度和声速,仅这两个参数无法完全表征材料的全部声学性能,这也会导致计算结果与实际值存在一定误差。另外,实际测试中由于被测样品与管壁间存在间隙等因素的影响,实测结果也会稍有误差。这些因素导致了计算结果与实测结果的偏差。

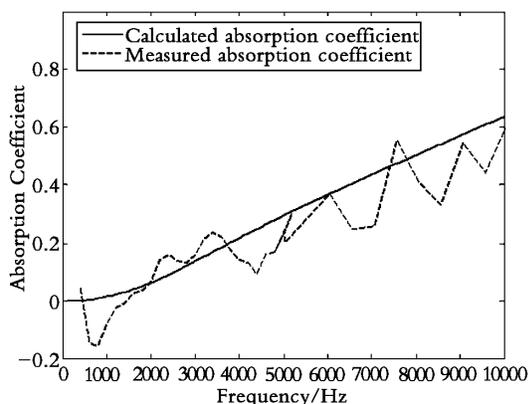


图 8 材料 A 的吸声系数

Fig. 8 Sound absorption coefficient of material A

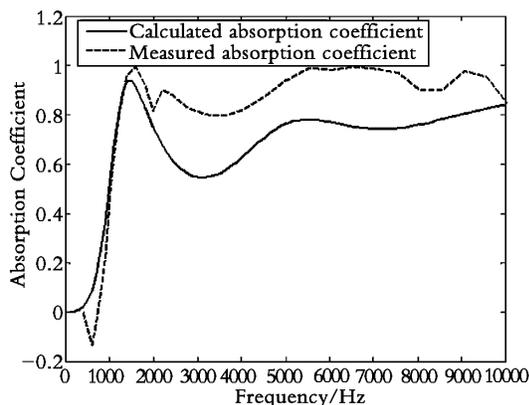


图 9 材料 B 的吸声系数

Fig. 9 Sound absorption coefficient of material B

总体来说,基于 virtual. lab 的吸声系数计算结果与实测结果比较接近,利用本方法可以较好地预测水声材料的吸声性能。这样,在水声材料的研究过程中,只需利用 DMA 测试材料的动态力学性能,就可以大致预测材料在不同频率、不同温度下的吸声性能,从而避免了大量的声学测试工作,对水声材料的研究有积极的推动作用。

3 结论

本文针对两种粘弹性材料,利用温频等效原

理获得了材料在宽频范围内的复模量,并由此得到材料的声学参数。之后,用 virtual. lab 软件对这两种材料的吸声性能进行了计算,计算结果与实测结果基本一致。利用本方法可以更简便的获得水声材料的吸声性能,对水声材料的研究有一定的积极意义。

参考文献:

[1] 王仁乾. 空腔结构吸声器的吸声系数计算方法的研究[J]. 声学学报, 2004, 29(5): 393—397.
Wang Ren-qian. Sound absorption coefficient calculation method research of cavum structure absorber[J]. Journal of Acoustics of China, 2004, 29(5): 393—397.

[2] 何祚镛, 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.
He Zuo-yong, Wang Man. Sound absorption theory research of under-water non-uniformity composite layers. [J]. Applied Acoustics, 1996, 15(5): 12—19.

[3] 王仁乾, 马黎黎. 吸声材料的物理参数对消声瓦吸声性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(3): 288—294.
Wang Ren-qian, Ma Li-li. Effects of physical parameters of the absorption material on absorption capability of anechoic tiles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(3): 288—294.

[4] 姚磊, 刘宏伟, 赵洪, 等. 一种测量高分子材料低频声学性能的混合方法[J]. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2008, 38(5): 546—554.
Yao Lei, Liu Hong-wei, Zhao Hong et al. One method for measuring low frequency sound performance of viscoelastic materials [J]. Journal of Science of China, 2008, 38(5): 546—554.

[5] 陶猛, 卓琳凯. 基于 ANSYS 的吸声覆盖层声学性能计算与分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 87—90.
Tao Meng, Zhuo Lin-kai. Simulation and analysis for acoustic performance of a sound absorption coating using ANSYS software [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 87—90.

[6] 陈建平, 何元安, 卢少杰. 消声瓦吸声特性有限元分析[J]. 舰船论证参考, 2004(1): 40—44.
Chen Jian-ping, He Yuan-an, Lu Shao-jie. FEM analysis of anechoic tile acoustical characteristic [J]. Ship Demonstration, 2004(1): 40—44.

[7] Walter M Madigosky, Gilbert F Lee, Jan M Niemiec. A method for modeling polymer viscoelastic data and the

- temperature shift function[J]. *J Acoust Soc Am*, 2006, 119(6): 3760—3765.
- [8] 袁文俊. 声学计量 [M]. 北京: 原子能出版社 2002.
Yuan Wen-jun. *Acoustics Calibration and Measurement* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002.
- [9] 陈克安, 曾向阳, 李海英. 声学测量 [M]. 北京: 科学出版社 2005.
Chen Ke-an, Zeng Xiang-yang, Li Hai-ying. *Acoustics Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2005.
(编辑: 房威)