

黏弹性材料的动态力学特性及其对覆盖层吸声性能的影响^{*}

吕林梅 温激鸿 赵宏刚 温熙森[†]

(声学振动组, 装备综合保障技术重点实验室, 机电工程与自动化学院, 国防科学技术大学, 长沙 410073)

(2014年1月21日收到; 2014年3月7日收到修改稿)

本文利用标准化动态力学测量手段获得了某种高分子聚合物的动态杨氏模量, 并根据时温等效原理对动态杨氏模量与声学测量在频段上的差异加以分析和转换, 得到了500—7500 Hz频率范围内该黏弹性材料杨氏模量随频率变化的特性. 基于所测得动态杨氏模量, 采用有限元方法分析了均匀黏弹材料的吸声性能, 并将仿真结果与样品声管实验数据进行对比, 验证了测试所得参数的准确性. 进一步仿真分析了含有局域共振结构的声学覆盖层吸声性能, 并讨论了黏弹性材料的动态特性对其吸声性能的影响, 提出了改进水声覆盖层低频宽带吸声特性的建议.

关键词: 水下声吸收, 局域共振结构, 动态力学性能

PACS: 43.30.Ky, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.63.154301

1 引言

水声吸声材料是指含有各种声学结构以及散射粒子的在水下能吸收水声声波的功能复合高分子材料^[1-5]. 随着材料科学的进步, 新型功能材料在水声领域的应用日益广泛, 尤以黏弹性高分子材料发展迅速, 广泛应用在如隔声减振、吸声降噪、水声设备与工程等方面. 因此, 针对该类材料的声学性能研究和声学参数测量愈发重要. 同时, 水声学研究向低频(百赫兹—几千赫兹)发展的趋势越来越明显, 而材料低频声学性能测量与设计在水声领域一直是个难题.

局域共振声子晶体水声吸声材料概念的提出为低频水声吸声材料的研究与设计提供了一条新的技术途径. 刘正猷等基于局域共振声子晶体理论出发, 利用层多重散射法研究了内部包含散射体的黏弹性层的声学特性^[6]. 赵宏刚等完善了声子晶体能带分析中的层多重散射法, 并将其引入到水声吸

声材料的理论研究中, 初步揭示了局域共振低频吸声机理^[7,8]. 温激鸿、吕林梅等采用有限元法比较了不同形状局域共振结构的吸声特性及吸声规律, 并分析了不同结构的位移场图, 给出了低频吸声性能优化的建议^[9,10]. 姜恒等采用实验研究方法, 将木堆结构引入局域共振水声吸声材料的设计中, 并设计了一种互穿网络局域共振吸声, 取得较好的宽频吸声效果^[11,12]. 由于在理论计算中, 作为基体的橡胶材料的力学参数采用的是静态力学参数, 而在实际测试中橡胶材料的力学性能会随着频率、温度等测试环境的改变而变化. 为了减小理论计算与实验测试结果间的误差, 必须准确掌握水声吸声材料力学参数随频率、温度等变化的规律及其对覆盖层吸声性能的影响.

获取准确的黏弹性材料动态力学特性是准确预报水声吸声材料吸声性能的重要前提. 目前, 获取黏弹材料动态力学参数主要有分别基于声学、力学原理的两类方法. 通过声管测量声学参数(吸声系数、阻抗等)获得黏弹性材料动态力学参数, 是通

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 11004249, 51275519)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wenxs@vip.sina.com

过建立材料力学参数与声管实验所得声学参数之间的联系, 然后根据声波传播理论和声管测量数据反演材料的力学参数. 由于该方法沿用传统的声管等设施进行水声材料参数的测量, 要实现日趋重要的水声低频段(百赫兹—几千赫兹)测试, 往往需要更大规模的声管和相关设备, 实施难度较大. 基于强迫振动理论, 动态黏弹谱仪可以用来测量材料的复杨氏模量、复剪切模量等动态力学参数^[13]. 经多年发展, 对于黏弹性高分子材料力学性能的测量方法和工具已经标准化, 通过仪器可方便地测量高分子材料的低频(百赫兹以下)动态力学参数, 如杨氏模量、剪切模量及其相应的损耗因子等^[14,15]. 因此, 应该综合利用声学 and 力学手段以获取更精确的材料动态力学参数和声学参数, 为水下低频声学的发展提供重要依据.

2 模型

2.1 模型

在笛卡儿坐标系下, 图1(a)给出了包含圆柱形局域共振单元的吸声结构模型. 令一个水声吸声体的底面(即声波入射端面)所在平面 Q 上任一顶点为原点 O , 通过 O 点的两条相互垂直的边分别为 x 和 y 方向; N 个水声吸声体在平面 Q 上沿 x 方向周期排列, 相邻水声吸声体之间无间隔构成水声吸声体整体; M 个水声吸声体整体沿 y 方向周期排列, 相邻水声吸声体整体之间无间隔, 得到局域共振水声吸声层. 局域共振水声吸声层的吸声效果与水声吸声体的个数无关, 仅与水声吸声体的内部构造有关. 单个水声吸声体如图1(b)所示, 由一个橡

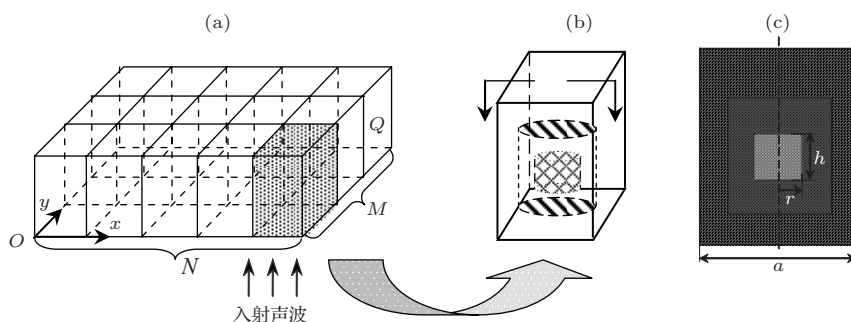


图1 (a) 含圆柱形局域共振单元吸声材料的吸声结构; (b) 单个共振单元示意图; (c) 单个共振单元剖面图

胶包覆的圆柱形散射子及周边基体组成. 水声吸声材料内局域共振单元呈正方形周期排列, 其横截面如图1(c)所示, 局域共振单元中圆柱形芯体底面半径为 r , 高度为 h , 包覆层为一定厚度的软硅橡胶. 单个元胞边长 a 与相邻单元间的最短距离, 即晶格常数相等.

2.2 基体材料动态杨氏模量获取

采用动态黏弹谱仪(型号: TA-Q800)测量基体材料的动态杨氏模量. 采用拉伸应变模式, 所用样品的尺寸为: 长度22.5 mm, 宽度5.6 mm, 厚度2 mm. 该仪器测量的频率范围是0.01—200 Hz, 与声学关注频段(100—10000 Hz)相差较大, 需要通过时温等效原理对频域进行拓展. 时温等效原理即通过平移的方式, 将聚合物在较低温度和较低频率下的力学参数叠加拓展到较高温度和较高频率下的力学参数^[14,15].

针对基体所采用的高聚物, 先后截取两块相同的样品进行重复测试, 并对结果取平均值. 分别在30—30 °C温度下测试了0.1—100 Hz范围内杨氏模量数值, 然后利用时温等效原理, 获取了15 °C条件下基体杨氏模量随频率的变化曲线, 如图2所示.

从图2中看到, 在500—7500 Hz频率范围内, 杨氏模量从25.58 MPa增大到38.15 MPa. 利用曲线拟合的方式得到杨氏模量随频率变化的趋势满足公式

$$E = 2.403 \times 10^7 + 3178f - 0.1727f^2. \quad (1)$$

从图2可以看出, 材料杨氏模量随着频率的升高而呈非线性增大, 频率越高, 杨氏模量数值越大, 即基体硬度越大、刚度越强.

在本文分析中, 除基体杨氏模量外所采用的其他声学参数如表1所示.

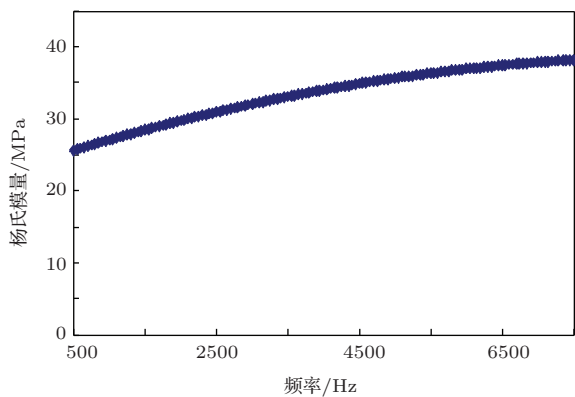


图2 基体材料杨氏模量随频率变化关系

表1 文章中材料的物理性能参数

材料	杨氏模量/Pa	泊松比	损耗因子	密度/kg·m ⁻³
钢	2.16×10^{11}	0.35	0	7780
铝	7.76×10^{10}	0.28	0	2730
聚合物	测试所得	0.49	0.6	1100
硅橡胶	2×10^5	0.495	0.3	1300

3 讨 论

3.1 均匀吸声层仿真和实验结果对比

为了验证黏弹性参数测量结果的准确性, 采用该黏弹性材料制备了不含有任何声学结构的均匀层样品, 并与利用测得动态杨氏模量仿真的结果进行对比. 采用多物理场耦合分析软件平台 Comsol Multiphysics 进行仿真分析^[16], 有限元法的理论依据见参考文献^[9]和文献^[10]. 在计算中取晶格常数为 16 mm, 黏弹性覆盖层的厚度为 48 mm. 为方便与声管实验环境相匹配, 采取厚度为 30 mm 的钢板作为背衬条件. 计算频率范围从 1000 Hz 到 7000 Hz, 基体杨氏模量取图 2 中所测得的动态杨氏模量, 其他参数取值如表 1 所示.

样品吸声测试在中国船舶重工集团公司七〇二研究所(江苏无锡)的 Ø120 mm 双水听器声管进行.

图 3 所示的是该声管的结构示意图, 声管采用垂直布局的方式放置, 且换能器在声管底部, 声管的顶部用于放置被测样品, 可以加装不同背衬. 该声管的测试频段为 400—10000 Hz.

基于上述理论仿真和实验分析, 可以得到频变动态杨氏模量条件下的理论计算结果与实验测试

结果对比如图 4 所示, 图 4(a) 为进行测试的圆柱形声管样品图片.

截取 1—7 kHz 共 13 个频率点处的仿真和实验测试所得吸声系数进行比较, 误差分析如表 2 所示.

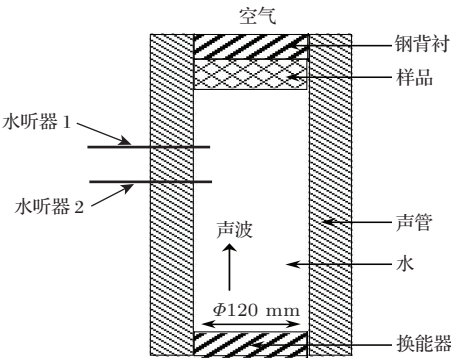


图3 双水听器声管结构示意图

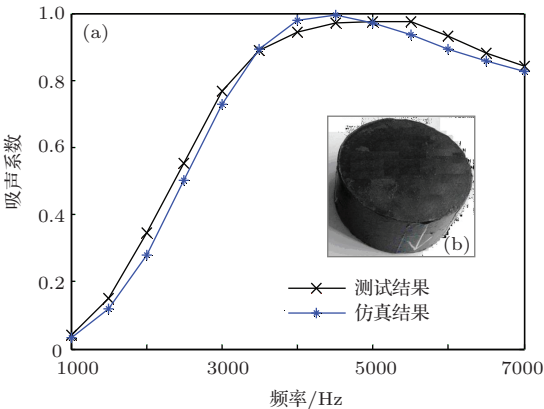


图4 (a) 均匀层吸声性能仿真与实验结果对比; (b) 测试样品

表2 钢背衬方式声管测量的吸声系数与仿真计算结果的比较

频率/kHz	测量结果	仿真结果	误差/%
1	0.0404	0.0338	16.3
1.5	0.1508	0.1182	21.6
2	0.3447	0.2779	19.4
2.5	0.5544	0.5006	9.7
3	0.7672	0.7279	5
3.5	0.8891	0.8945	-0.6
4	0.9440	0.9774	-3.5
4.5	0.9698	0.9938	-2.5
5	0.9729	0.9720	0.1
5.5	0.9728	0.9338	4
6	0.9328	0.8927	4.3
6.5	0.8823	0.8561	3
7	0.8437	0.8280	1.9

从图4和表2中可以看出,对于均匀吸声层,在1—2 kHz 频率范围内误差较大,但由于该频段内吸声系数较低,因此吸声性能绝对误差较小;在2—7 kHz 频率范围相对误差在10% 以内,这表明有限元仿真计算与声管测试得到的结构吸声性能重合较好,证明了通过动力学黏弹性仪测得的动态杨氏模量是准确的,可以作为分析复杂吸声结构的材料参数.

3.2 黏弹性材料的动态特性及其对覆盖层吸声性能的影响

针对图1(b)所示的含有圆柱形局域共振单元的覆盖层,讨论黏弹性材料的动态特性对其吸声性能的影响.在计算中我们取晶格常数为16 mm,黏弹性覆盖层的厚度为16 mm,圆柱形局域共振单元芯体是底面直径10 mm 高6 mm 的圆柱体,包覆层则是厚度为2 mm 的中空圆柱体.为消除钢背衬的影响,仅考虑局域共振对覆盖层吸声性能的影响,选用半无限空气作为背衬.

计算中仅考虑基体材料杨氏模量随频率的变

化,其他材料参数仍然以表1所列的静态参数.计算频率范围从1000 Hz 到7000 Hz,在起止频率点上对应的静态杨氏模量分别为27.04 MPa 和37.81 MPa,其他参数取值见表1.将(1)式中杨氏模量随频率变化的关系代入有限元计算程序中,图5对比了动态杨氏模量条件下和静态杨氏模量条件下的理论计算结果,图中黑色实线和红色点划线分别对应基体材料取静态杨氏模量为27.04 MPa 和37.81 MPa 时的吸声性能,蓝色虚线则对应基体材料取动态杨氏模量所得到的吸声系数.

从图5(a)中可以看出,随着基体材料杨氏模量的增大,第一共振吸声峰向高频移动,这主要是由于杨氏模量变大使得吸声覆盖层整体刚度变大,导致共振频率升高.因此在低频处采用具有较小杨氏模量的软基体,可以有效降低第一共振吸声峰的频率,从而实现对低频声波的有效吸收.从图5(b)中可以看出,第二共振峰随着杨氏模量的增大也向高频移动,且覆盖层吸声性能在高于第二共振峰的频段上得到增强,实现了对高频声波的有效吸收.

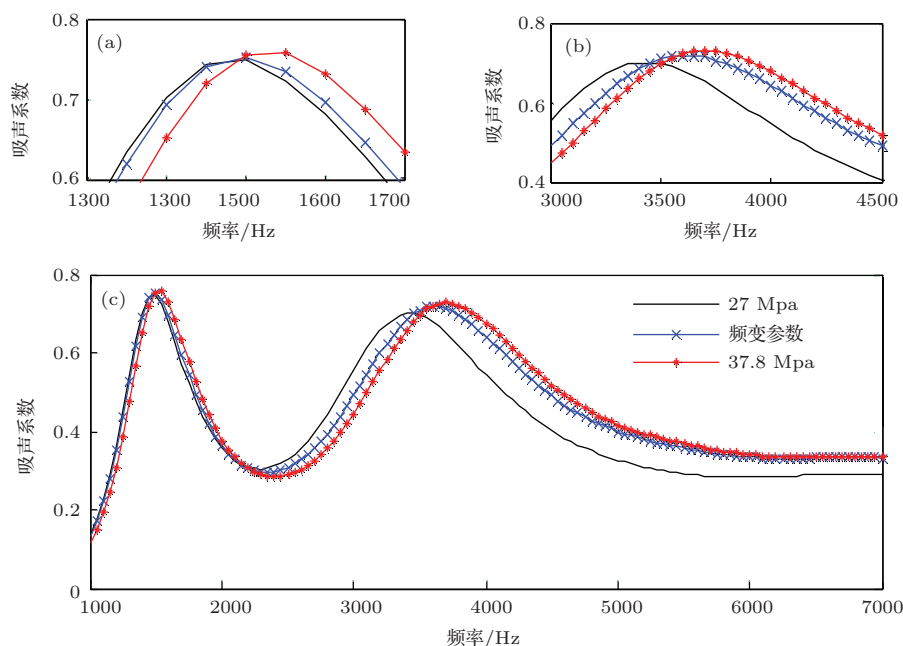


图5 (a) 基体动态杨氏模量对局域共振吸声结构吸声性能的影响; (b) 第一共振吸声峰局部; (c) 第二共振吸声峰局部

从图5(c)中可以看出,在1500 Hz 到3500 Hz 的频段上,即第一、二共振峰之间,吸声性能随杨氏模量与频率的变化比较复杂,吸声性能较低,可以通过在吸声覆盖层中引入宏观空腔以提升该频

段内的吸声谷或调节局域共振单元中包覆层和振子的结构、材料参数使两个共振峰产生耦合来提升该频段内的吸声性能,从而实现宽频段高效吸声的目的.

4 结 论

本文利用标准化动态力学测量手段获得了某种高分子聚合物的动态杨氏模量, 根据时温等效原理得到了该黏弹性材料杨氏模量随频率变化的特性, 而后采用该材料制备了不含任何声学结构的均匀层吸声样品. 在此基础上, 基于有限元方法采用测得动态杨氏模量仿真了均匀层吸声样品的声学性能, 并与在标准水声声管中对该样品测试得到的实验结果进行对比, 理论结果与实验结果比较符合, 验证了所测动态杨氏模量的准确性. 然后, 通过对含有局域共振结构的声学覆盖层吸声性能的仿真, 讨论了基体杨氏模量随频率变化对声学覆盖层的影响, 结果表明在低频段采用较低的杨氏模量有利于第一共振峰向低频移动从而实现低频吸声, 而在高频段较高的杨氏模量则利于高频声波的吸收. 因此可以通过合理的配方设计增大基体杨氏模量随频率变化的范围, 为实现局域共振声学覆盖层低频宽带吸声提供一种新的技术途径.

参考文献

- [1] Hinders M K, Rhodes B A, Fang T M 1995 *J. Sound Vib.* **185** 219
- [2] Ivansson S M 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 2622
- [3] Baird A M, Kerr F H, Townend D J 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 1527
- [4] Feng Y L, Liu X Z, Liu J H, Ma L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3909
- [5] Yu L G, Li Z H, Wang R Q, Ma L L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064301 (in Chinese) [于利刚, 李朝晖, 王仁乾, 马黎黎 2013 物理学报 **62** 064301]
- [6] Liu Z Y, Zhang X, Mao Y W, Zhu Y Y, Yang Z, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [7] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, Yu D L, Wen X S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4700 (in Chinese) [赵宏刚, 刘耀宗, 温激鸿, 郁殿龙, 温熙森 2007 物理学报 **56** 4700]
- [8] Zhao H G, Liu Y Z, Yu D L, Wang G, Wen J H, Wen X S 2007 *J. Sound Vib.* **303** 185
- [9] Wen J H, Zhao H G, Lv L M, Yuan B, Wang G, Wen X S 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 1201
- [10] Lü L M, Wen J H, Zhao H G, Meng H, Wen X S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214302 (in Chinese) [吕林梅, 温激鸿, 赵宏刚, 孟浩, 温熙森 2012 物理学报 **61** 214302]
- [11] Jiang H, Wang Y R, Zhang M L, Hu Y P, Lan D, Zhang Y M, Wei B C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 104101
- [12] Jiang H, Wang Y R, Zhang M L, Hu Y P, Lan D, Wu Q L, Lu H T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 026202
- [13] Guo M L 2002 *Dynamical Mechanical Analysis of Condensed Matter and Composite Material* (Beijing: Chemical Industry Press) (in Chinese) [过梅丽 2002 高聚物与复合材料的动态力学热分析 (北京: 化学工业出版社)]
- [14] Li R Z 1999 *Materials Science and Engineering A* **278** 36
- [15] Joseph P V, Mathew G, Joseph K 2003 *Compos Part A-Applied Science and Manufacturing* **34** 275
- [16] COMSOL Inc. 2013 COMSOL Multiphysics 43a

Dynamical mechanical property of viscoelastic materials and its effect on acoustic absorption of coating^{*}

Lü Lin-Mei Wen Ji-Hong Zhao Hong-Gang Wen Xi-Sen[†]

(Vibration and Acoustics Research Group, Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 21 January 2014; revised manuscript received 7 March 2014)

Abstract

Viscoelastic macromolecular materials are widely used in underwater acoustic fields because of their favorable acoustic performance. Dynamical mechanical properties of viscoelastic materials, such as Young's modulus, shear modulus, and relevant loss factors, are important in the forecast of acoustic properties, which connect acoustical design of underwater coating with materials prescription design. Dynamic Young's modulus of some macromolecular materials is measured with dynamic mechanical apparatus (DMA), and then the basic acoustic parameters are expanded from a narrow band to a broad band by using principles of time-temperature superposition (TTS). When applying the basic parameters to calculating characteristics of the uniform layer sample by using the finite element method, a reasonable agreement of sound absorption coefficients is obtained between the calculations and measurements in the acoustic pipe. Furthermore, the underwater acoustic absorption properties of the coating with a local resonant structure are discussed. Finally, some suggestions are given about how to improve the underwater absorption performance at low frequencies.

Keywords: underwater acoustic absorption, local resonant structure, dynamical mechanical properties

PACS: 43.30.Ky, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.63.154301

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11004249, 51275519).

[†] Corresponding author. E-mail: wenxs@vip.sina.com