

高分子水声吸声材料的研究进展

余超 熊伟 文庆珍 朱金华 魏微 张一飞

樊龙龙

(海军工程大学化学与材料系,武汉 430033)

(海军驻晋东南地区军事代表室,太原 030027)

摘要 概述了水声吸声材料的吸声机理,综述了常用的吸声结构以及相应结构的国内外水声吸声材料的研究现状。指出具有优良吸声性能且耐水压、低频、宽频段的高分子水声吸声材料是高分子水声吸声材料的发展趋势。

关键词 水声吸声材料 高分子 声隐身

潜艇的最大特点就在于它具有良好的隐蔽性和突发攻击能力,降低潜艇的声目标特性可以缩短敌方发现我舰的距离,提高潜艇的生存能力,充分发挥其战斗力。目前主要采用在潜艇壳体上敷设吸声覆盖层来降低声目标强度。

作为水声吸声材料必须满足两个条件^[1]:(1)材料的特性声阻抗与传波介质水的特性声阻抗要匹配,使声波能够无反射地进入材料内部;(2)材料要有大的声衰减性能,使入射进来的声波能绝大部分被吸收。因此影响水声吸声材料吸声性能的主要因素是材料体系和声学结构。笔者综述了常用的吸声结构以及相应结构的国内外水声吸声材料的研究现状,并对未来的发展趋势进行了展望。

1 高分子水声吸声材料的吸声机理

高分子材料具有粘弹性及良好的内阻尼性能,这有利于将阻尼和其它吸声机制同时引入吸声材料中,改善其吸声性能。与其它吸声材料相比,高分子材料更容易通过发泡、模压和挤出等方法加工成型。而且高分子材料密度较小,其特性声阻抗和海水的特性声阻抗比较接近,二者容易实现匹配。因此高分子材料经常用作水声吸声材料。

水声吸声材料的吸声机理有3种^[2]:(1)材料的粘性内摩擦吸声,也称为阻尼损耗,是指声波进入材料后引起相邻质点运动速度不同,由相对运动而产生内摩擦,这可以使相当一部分声能转化为热能而引起声波衰减;(2)材料的弹性弛豫过程吸声,声波进入材料后使材料中的分子由球形变为椭圆形,而分子链本身并无变化,这种变形有明显的弹性滞后现象,使得材料在变形和恢复过程中,变形落后于应力的变化,使声能转变为热能;(3)波形转换,即入射纵波在粘弹性材料中引起的体积形变产生波形变换,使纵波变换成具有高损耗因子的剪切波而达到吸声作用。

2 高分子水声吸声材料的声学结构及应用

由于均匀材料通常难以同时满足阻抗匹配、良好的声衰减性能这两个条件,在工程实践中往往难以兼顾^[1]。例如一般橡胶材料的特性声阻抗与水相近,但其水声衰减性能不理想,加入填料可以提高其声衰减性能,但又会影响到阻抗匹配,所以均匀材料往往很难达到实际应用对吸声材料的要求。由于橡胶材料压缩弹性模量比剪切弹性模量大,而其压缩损耗比剪切损耗小,所以在用均匀材料制备吸声材料时,必须采用声学结构,即通过在材料中设置经过特殊设计的孔

腔或添加气泡性填料等方式来提高其吸声性能。常用的复合吸声结构有以下5种^[2]。

2.1 共振式吸声结构

共振吸声是噪声控制的重要手段之一,其基本原理来源于赫姆霍兹共振吸声器^[3],这种结构常设有空腔,当入射声波的频率与空腔的固有频率接近时,声波在空腔内就会发生共振,使腔体材料产生较大的变形,使声能转换为热能。

S. Ivansson^[4]认为有孔腔的薄橡胶层可以改变普通入射声波的横向传播方向,通过非弹性吸收造成声波的损耗,并以此作为无回声潜艇涂层的最初设计理念。S. Ivansson利用电子散射、光子晶体和声子晶体的带隙计算等手段设计无回声模型,并对模型进行了数学分析。发现橡胶材料的剪切特性和粘弹性至关重要,声波在孔腔内的多次反射也不能忽略。多层结构的反射与材料参数及几何形状有关,它们之间呈非线性关系。

Y. Y. Lee等^[5]研究了孔隙背衬的有限弹性微穿孔板的吸声性能,并根据经典平板方程的模式分析法及波动方程推导出了微穿孔板吸声材料的吸声方程。结果表明,板的共振效应可以耗散更多的能量,通过适当调整板的参数,如厚度、射孔直径、孔间距等,可以加宽微穿孔板的吸收带;不同的板共振形对吸声效果的影响不大;结构减震效应可以改善在结构共振频率与微穿孔板峰值频率范围内的吸声性能,并降低结构共振的峰值吸声。

F. C. Sgard等^[6]对多孔穿孔材料进行了研究,根据多微孔材料的粘滞性频率和压力扩散作用的特征频率之间的比率,建立了多孔穿孔吸声材料的设计准则。该准则可以通过微孔介质的电阻系数、孔隙、弯曲度及中观结构的集合参数来评估。结果表明,很多双重孔隙度材料的吸声性能可以在较宽频段上得到加强。

姚熊亮等^[7]对聚氨酯空腔尖劈结构的吸声性能进行了研究,讨论了尖劈吸声性能随静水压力、温度、频率的变化规律。结果表明,在几兆帕的压力下,空腔尖劈结构对低频段的吸声性能急剧下降,这说明空腔尖劈声结构不适于在高压下使用。

近年来,随着微穿孔板吸声结构理论的完善,微穿孔板

吸声结构得到了广泛的关注。王泽铎等^[8]将该理论应用到水声吸声中,得出了水下微穿孔板吸声结构的吸声公式,设计了单板层和双板层吸声结构,并对其进行了理论分析与仿真。结果表明,微穿孔板吸声结构在水中能获得良好的宽频带吸声效果,其在高压下的吸声性能有待进一步研究。

2.2 阻抗渐变式吸声结构

采用高损耗吸声材料时,损耗相材料的特性阻抗一般与水的特性阻抗不匹配,所以有必要采用阻抗渐变的结构形式^[2]。

P. A. Emery^[9]对水声吸声材料进行了研究,发现在高频时,阻抗匹配可以减小反射系数;低频时,通过采用不同厚度、阻抗的多层结构,可以解决因各层界面反射波的干涉而出现反射系数的峰值问题;也可采用各层填料含量逐渐变化来实现阻抗的多层渐变,以达到减小反射的目的。

杨雪等^[10-11]对梯度聚氨酯水声吸声性能进行了研究和优化,制备了由聚氨酯/无机填料组成的梯度聚氨酯,并在声管中测试其水声吸声系数。结果表明,梯度聚氨酯水声吸声性能随温度的变化较大,而随压力变化不大。

S. Beretti等^[12]研究了在去耦涂层上面覆盖一层吸声涂层而制成的双层涂层,在不增加吸声材料厚度的情况下,能极大提高材料的低频吸声性能。L. Forest^[13]选用粒度为80 μm 和3.5 mm的二氧化硅气凝胶颗粒,制成含阻抗匹配层和吸声层的双层吸声结构。结果表明,在低频范围内其吸声性能要高于相同厚度的均匀结构。

鲁先孝等^[14]以环氧树脂和蛭石粉为原料,采用微波固化制备了环氧树脂/蛭石粉水声功能梯度材料,研究了微波固化对试样的玻璃化转变温度、动态力学性能的影响,并着重对功能梯度材料的水声吸声性能进行了研究。研究表明,用微波固化制备功能梯度材料是可行的,微波固化对试样的玻璃化转变温度、动态力学性能影响不大,但能明显提高试样在低频区域的吸声性能。并发现声波从填料多的一端入射时,吸声系数明显比声波从填料少的一端入射时的吸声系数高。

2.3 夹芯层吸声结构

典型的夹芯层吸声结构是利用透声性能好的纤维增强复合材料制作夹层的面板,吸声材料作夹层。通过减小表层纤维复合材料的厚度,或者使其特性声阻抗与水接近,都可以降低夹层复合材料的声反射,同时夹层结构的吸声性能也因此得到改善^[2]。

朱金华等^[15]以三明治结构为研究对象,建立了分层高分子材料对水声吸收的数学模型,测试了分层高分子材料的水声吸收性能并与数学模型的计算结果进行了比较,发现应用该模型的计算结果与实测结果比较吻合,这表明该数学模型在较大程度上能够反映分层高分子水声吸收性能的特性。

罗忠等^[16]对夹芯复合隐身结构的声学模型进行了改进,在夹芯层之间加入了附加弹性层,整个吸声结构由外表层、内表层、吸声芯层及附加弹性层组成。其中透声表层采

用玻璃钢,芯材采用互穿网络高分子聚合物。结果表明,附加弹性层阻抗对波型转化系数及抑制夹芯复合隐身结构中声波谐振效果影响显著,通过附加弹性层匹配设计,有效地抑制了夹芯复合隐身结构中的声波谐振。

S. Charles^[17]指出通过合理选择内部吸声芯料及各层的配置优化,可以同时获得良好的吸声性能和力学性能,这种夹芯复合吸声结构可直接代替钢结构作为水下目标壳体,改变了钢板外面敷设吸声覆盖层的传统吸声结构,从根本上解决了覆盖层脱落的问题。

2.4 微粒复合吸声结构

微粒复合吸声结构在阻尼吸声材料中混合微小粒子或含大量气泡的填料等。A. M. Baird等^[18]认为粘弹性材料中的微小空洞能够改变压力波的传播性质,空洞不仅使压力波在传播过程中产生散射,它的形变和共振也产生能量耗散。

Westinghouse电器公司报道了膨胀聚苯乙烯微球/聚氨酯泡沫吸声材料,其中聚苯乙烯微球的质量分数为1.5%~10%,无规分散于聚氨酯基体中。该材料孔隙率高,密度低,由微球提供的压缩刚性使材料在水压下可以保持声吸收特性^[19]。

张海永等^[20]以聚氨酯为涂层基体,以石墨作为填料制备了一系列吸声涂层。结果表明,石墨改变了涂层的密度,提高了涂层的吸声系数。合成的聚氨酯涂层随着水压的增大,其吸声系数增加,水压在3 MPa时,平均吸声系数达87.6%。

王清华等^[21]合成了硅橡胶基吸声涂层材料,通过加入炭黑对该吸声涂层进行了改性,获得了在常压下平均吸声系数达到92.6%的吸收涂层。

R. D. Corsaro等^[22]用含有不同填料的通用硅橡胶树脂(RTV-602)制备了一系列声学性能不同的橡胶复合材料,并测定了这些材料的声速、密度和衰减系数,找到了填料的种类和含量与材料声学性能之间的关系式,可以根据关系式设计具有特定要求的材料。试验发现,在400 kHz~7 MHz的频率范围内,这些材料作为消声涂层,可降低声反射20~35 dB。

2.5 压电式复合吸声结构

压电式复合吸声结构是通过向聚合物中加入导电微粒而形成的微观局部电流回路,将声能及振动能转换为电能,再经压电作用以热能的形式耗散掉,达到吸声和减振的目的。O. Lacour^[23]发明了一种吸声材料和消声涂层,这种材料是由未极化的压电高分子材料制成,材料中有无定形相和结晶相,结晶相至少占80%,无定形相通过添加炭黑或本征导电高分子使其具有导电性,这种材料特别适合水声吸声材料,可以将水声信号转化为电能而耗散,与添加金属粉的材料相比,它具有质量轻、易成型的优点。

蔡俊等^[24]以锆钛酸铅压电陶瓷微粉为填料,与聚氯乙烯复合制得压电复合材料,其在中、高频段具有良好的吸声效果。

Y. T. Robert 等^[25-26]研究了 1-3 压电复合板的声学性能与温度、压力和频率的关系。通过水下爆炸时对发射压电响应的测量,发现水下爆炸对材料的机械结构和声学性能没有不利影响。1-3 压电复合材料(陶瓷高分子复合材料)的驱动电平 and 压力呈线性关系。研究结果表明,这种新材料在水声传感器上有较好的应用前景。

3 高分子水声吸声材料的发展趋势

为了应对声纳的探测,各国都积极对水声吸声材料进行改性,在高频和增加频宽方面,采用的方法较多,且各国不尽相同。英国用开孔的聚氨酯泡沫作为水声吸声材料,使材料表面均匀分布着凹陷和突起,该材料在 50~500 kHz 的频率范围内使回声降低为 8~22 dB^[27]。日本采用多层橡胶的谐振结构具有较宽的吸声频带^[28]。郭万涛^[29]采用内耗较大、耐水性好且特性阻抗与海水匹配较好的氯化丁基橡胶作为高频吸声材料基体材料,用轻质碳酸钙、金属粉末、中空微珠作为填料,以高耐磨碳黑为主要补强体系,研制出一种在 50~500 kHz 宽频范围内吸声性能良好的吸声材料。

但随着声纳技术的发展,探测声纳的工作频率越来越低(低于 5000 Hz)。美国、英国、法国潜艇和水面舰艇的主动声纳和吊放声纳的工作频率大约在 1~11 kHz,这使得低频宽带的吸声材料及消声瓦成为发展趋势。

同时,出于隐蔽性考虑,现在潜艇的潜航深度越来越大,因此开发在高压下具有优良吸声性能的水声吸声材料势在必行。开发耐水压、低频、宽频段的高分子水声吸声材料将是高分子水声吸声材料的发展趋势。

参考文献

- [1] 朱金华,等. 高分子材料科学与工程,2005,21(4): 46-50.
- [2] 石云霞,等. 材料导报,2010,24(1): 49-52.
- [3] 张会萍. 新型声学结构及其宽带降噪机理研究[D]. 西安: 西北工业大学,2007.
- [4] Ivansson S. Nonlinear Analysis, 2005, 63: 1541-1550.
- [5] Lee Y Y, et al. Journal of Sound and Vibration, 2005, 287: 227-243.

- [6] Sgard F C, et al. Applied Acoustics, 2005, 66: 625-651.
- [7] 姚熊亮,等. 振动与冲击,2010,29(1): 88-93.
- [8] 王泽铎,等. 应用声学,2008,27(3): 161-166.
- [9] Emery P A. New cladding material[C]. UDT, 1995: 527-531.
- [10] 杨雪,等. 高分子材料科学与工程,2007,23(1): 169-172.
- [11] 杨雪,等. 武汉理工大学学报,2006,28(10): 35-37.
- [12] Beretti S, et al. Multifunction coating (anechoic-decoupling) and enhanced anechoic coating by using multiplayer optimization[C]. UDT, 1996: 300-303.
- [13] Forest L, et al. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 28(5): 230-235.
- [14] 鲁先孝,等. 材料开发与应用,2007,22(4): 22-26.
- [15] 朱金华,等. 高分子材料科学与工程,2001,17(2): 34-38.
- [16] 罗忠,等. 华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(2): 63-67.
- [17] Charles S. Composite structure: Britain, PCT/GB98/01377[P]. 1997-05-19.
- [18] Baird A M, et al. Acoustic Soc A M, 1999, 105: 1527-1537.
- [19] Bolton R, et al. Sound absorbing and decoupling syntactic foam: US, 5422380[P]. 1995-06-06.
- [20] 张海永,等. 现代涂料与涂装,2010,13(3): 13-18.
- [21] 王清华,等. 特种橡胶制品,2008,29(2): 23-25.
- [22] Corsaro R D, et al. Journal of Acoustical Society of America, 1980, 68(2): 655-664.
- [23] Lacour O. Absorbant acoustic material, anechoic coating using same: FR, W09103808[P]. 1991-03-21.
- [24] 蔡俊,等. 压电与声光,2005,27(3): 294.
- [25] Robert Y T, Thomas R H, Richard L G. SPIE, 1996, 2721: 214-222.
- [26] Thomas R H, et al. Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(4): 886-894.
- [27] Burton S A. Maritime Defence, 1994, 19(2): 26-28.
- [28] 朱绍文. 舰船知识, 1997(10): 13.
- [29] 郭万涛. 高频吸声材料试验研究[C] // 第六届中国功能材料及其应用学术会议. 武汉, 2007.

PROGRESS OF UNDERWATER ACOUSTIC ABSORBING POLYMER MATERIALS

Yu Chao, Xiong Wei, Wen Qingzhen, Zhu Jinhua, Wei Zheng, Zhang Yifei

(Chemistry and Materials Department, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Fan Longlong

(Navy Military Representative Office in Southeastern, Taiyuan 030027, China)

ABSTRACT The acoustic absorbing mechanism of underwater acoustic absorbing material was introduced, and the structures of underwater acoustic absorbing material and the development of the corresponding underwater sound absorbing materials at home and abroad were summarized. It was pointed out that developing the underwater acoustic absorbing polymer materials with excellent acoustic absorbing performance under high pressure in water, low frequency and wide frequency rang was the development tendency.

KEYWORDS underwater acoustic absorbing material, polymer, acoustic stealth