# 水下目标吸声材料和结构的研究

石 勇, 朱 锡, 李永清, 李海涛

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 武汉 430033)

**摘要**: 全面了解和掌握水下吸声材料及结构在应用频率范围内其不同温度、压力等环境下的声学性能,对于水下目标结构的声隐身设计具有重要意义。结合近年来水下目标吸声材料和结构的应用及研究,从材料声学设计的角度,讨论了水下吸声材料的声学特性和研究进展。还对水下吸声结构的形式、吸声机理和应用情况进行了归纳和评述。最后预测了水下目标吸声材料和结构的发展趋势。

**关键字**: 吸声材料; 声学机理; 高分子结构; 吸声结构

**中图分类号**: O427 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2006)-05-0505-08

## Overview of new materials and structures for underwater sound absorption

SHI Yong, ZHU Xi, LI Yong-qing, LI Hai-tao

(Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For designing sound stealth, it is important to study characteristics of underwater sound-absorbing materials and structures in different ranges of frequency, temperature and pressure. In this paper, research of acoustic characteristics and developments of underwater sound-absorbing material are surveyed in view of material acoustics. Configuration, sound absorbing principles, and applications of structures are analyzed and summarized. Prospects of various materials and their configurations are previewed.

Key words: underwater sound absorption; acoustical material; acoustical structure

## 1 引 言

声隐身性能是目前潜艇最重要的战斗力指标之一。在潜艇外壳上覆盖一层具有吸声能力的材料,能使主动声纳的回波信号减弱,也减小了潜艇向外辐射的噪声,这相当于敌方水中兵器的作用距离下降,而本艇自身噪声的降低,又提高了对敌水中目标的探测距离,达到在战术上先敌发现,取得主动。

水下目标结构声隐身的研究领域十分活跃,出现了大量的吸声材料和吸声结构[1-3]。本文对水下目标吸声用材料的吸声机理和分子结构的声学设计、水下吸声结构的形式、声学特性的研究和应用情况进行了分析综述,并对未来的发展进行了预测。

收稿日期: 2005-06-10; 修回日期: 2005-10-31

作者简介: 石勇(1977-),男,吉林人,博士生,主要从事水下声隐身结构的研究.

## 2 水下目标吸声材料的研究与应用

水下吸声材料其特性声阻抗一般是接近于水的声特性阻抗,并且具有较大的声能损耗。目前最常用的该材料主要是橡胶类[4]和聚氨酯类材料[5],如丁苯橡胶、丁基橡胶、氯丁橡胶、聚氨酯弹性体等。

### 2.1 水下吸声材料的吸声机理

水下吸声材料属于粘弹性体类材料, 它对声波的损耗作用主要是通过材料的粘性内摩擦作用和弹性弛豫过程完成的。粘性内摩擦作用的原理就是阻

尼损耗。弹性弛豫过程的吸声机理是:弹性吸声材料会变形,主要是由于每个分子由球形变为椭圆形,而分子链本身并无变化,这种变形的特征是有明显的弹性滞后现象,即分子链由原来各链段紊乱排列的球形构象,向各链段接近同向排列的构象过渡需要一个过程,而使一个分子链的各链段完全进入与外力大小相应的新构象分布时, 需要更长的时间。同理, 除去外力作用时恢复原状也需要一个过程。在这一过程中,变形落后于应力的变化,使得声能转变为热能而损耗。通过对吸声材料分子结构进行设计,可以达到增加粘性内摩擦和弛豫吸收的目的。

2.2 水下吸声材料分子结构的声学设计

水下吸声材料的声学性能与材料的高分子结构(如分子链的长短、构形、缠绕方式等)是密不可分的,利用高分子材料的分子结构的可设计性,对材料进行吸声设计,使其达到最佳吸声性能,这就是分子结构的声学设计。从材料研制的角度讲,分子结构的声学设计是提高水下吸声材料声损耗研究的主要内容。一般通过嵌段、接枝、共聚和 IPN 等方法对分子结构进行设计,增加材料声损耗的性能[6,7]。

文献[8]解释了丁基橡胶的分子结构与阻尼性能的关系:丁基橡胶是异丁烯和少量异戊二烯的共聚物,其中聚异丁烯组分在 97%以上,正是由于聚异丁烯结构中致密的侧甲基的作用,使得丁基橡胶具有优异的阻尼性能。文献[9]通过自由基聚合在丁基橡胶主链上接第二种聚合物的支链聚甲基丙烯酸甲酯,拓宽了阻尼峰值。文献[10,11]研究了聚氨酯分子链的侧基的数量、接枝链和扩链剂对声学损耗的影响。可见,增加主链的长度、侧基数量和体积,增大了分子运动链段变形的阻力和弛豫效果,从而加大了声损耗。

文献[12]研究了聚氨酯分子链交联密度和软硬段种类和数量对声能损耗的影响。研究表明:交联密度降低,分子链的运动阻力减少,当材料受到外力作用时,就会有更多的分子参与构型转化,使分子链段内磨擦运动增加,从而吸收外界能量;同时,由于链段运动的自由度增大,也加剧了聚合物分子与填料之间的相互作用, 使材料的声能损耗大为提高。另外,软段含量增加,材料声能损耗也增加。

单一材料的阻尼温域窄,通过共聚和共混的方法连接多个阻尼材料组分的玻璃化转变温度(Tg),从而实现材料的宽温域、高阻尼。文献[13]制备了氯化丁基橡胶和聚(甲基)丙烯酸酯共混复合物,将有效阻尼功能区移向高温。文献[14]通过丙烯酸酯橡胶和聚氯乙烯共混,得到的共混物在-10℃~80℃呈现两个阻尼峰,并使两峰间的阻尼值提高。文献[15]采用聚氨酯和聚酯共混、共聚体系,通过调节恰当的组分比例,制成了宽温域、高阻尼的聚氨酯材料。

互穿网络(聚合物 IPN)[16,17]是一种新型的高阻尼材料,交联网络之间的相互贯穿、缠结而产生强迫互溶和协同效应,使 IPN 材料具有宏观上的不分相和微观上的相分离的特点,相容性大大提高,制备的阻尼材料具有宽温域和宽频域。目前 IPN 高阻尼材料主要有聚氨酯/环氧树脂 IPN 和聚氨酯/乙烯基聚合物 IPN 两种聚氨酯互穿网络聚合物。

文献[18]提出高分子与有机小分子杂化的概念,通过相分离构造的动态控制和氢键的积极利用,得到极性高分子与小分子的杂化材料,具有高的阻尼值。

以上研究表明:分子链上侧基的体积和数量,交联密度和聚合物网络的互穿等高分子结构,都对声能损耗有很大的影响,通过进一步明确分子结构与吸声机理之间的关系,会又有数量更多、性能更好的水下吸声材料出现。

2.3 水下吸声材料的应用与分析

橡胶类材料作为水下吸声材料,其研究始于二战间期,当前俄罗斯制造的潜艇使用了橡胶材料作为吸声覆盖。橡胶吸声覆盖层的厚度一般在 8mm~70mm,甚至有达到 100mm左右的,单纯采用实心橡胶材料的吸声效果并不理想,为提高声学性能,多数需要复合其它声学填料或结构。而聚氨酯类吸声材料的研究和应用始于上世纪七八十年代,北约国家大都采用此种材料作为潜艇水下吸声用,通过选择合适的配方,加入适当的填料,在一定的范围内解决了潜艇的消声问题。

聚氨酯弹性体与橡胶类吸声材料相比,聚氨酯分子链的活性大,分子结构可设计性强,可以通过改变软硬段的比例、接枝、共聚等方法,控制主链的长度、支链的数量和体积、以及交联度,进一步设计材料的声学性能;聚氨酯材料粘结性好,有利于与填料的混合,从而制成的复合吸声材料能增加声波的损耗;而且聚氨酯材料的制作工艺相对简单,常温条件即可进行,不像橡胶材料的混炼工艺那么复杂。聚氨酯类材料继橡胶之后被称为第二代水下吸声材

料，虽然其价格稍贵、水容性差，但其具有优异的水下吸声性能和极强的分子结构，在声学有可设计性，将成为未来水下吸声材料研究的主要方向。

## 3　水下目标吸声结构的研究与应用

吸声结构的表面等效阻抗应与周围水介质的阻抗匹配，并且要尽量增加材料的声能损耗，这样才能减少声能的第一次和第二次反射，如图 1 所示。图中 R1 通过吸声材料与海水的声阻抗匹配减少，R2 通过吸声材料内部损耗减少。

上述水下吸声材料要满足的两个条件是矛盾的，在阻抗匹配的条件下，材料的反射系数与损耗系数成正比，损耗越大，则反射系数也越大。所以就必须在材料内部加入声学结构，一方面保证与水的阻抗匹配，另一方面增强覆盖层消声效果。常用的复合吸声结构有：(1) 空腔式吸声结构；(2) 耐压复合吸声结构；(3) 阻抗渐变式吸声结构；(4) 微粒复合吸声结构；(5) 三明治夹层吸声结构；(6) 压电式复合吸声结构。

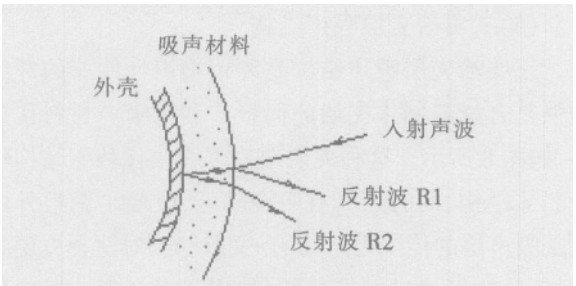



图 1　吸声覆盖层内声波的入射和反射

Fig.1　Acoustic echo reduction by external coating

(1) 空腔式吸声结构

空腔式吸声结构是在均匀吸声材料内部留有球形、圆柱形、圆锥形的声学空腔，具体结构如图 2、3 所示。

空腔式吸声结构的吸声机理是：利用入射声的频率与空腔的固有频率接近时，空腔发生共振，产生较大的变形，从而增加损耗来吸收声能[19-21]。通过设计空腔的尺寸可以消除所需频率范围内的声能[22]。目前使用的大都为圆锥形空腔，因为它不仅对较宽的频率产生共振，而且还有阻抗渐变的作用，能减小声能的反射。

这种声学结构主要用于增加低频段的声吸收，同时也可以在整个频段上改善材料的吸声效果，在技术上是成熟的。但是，随着水压力的增加，锥形空腔被压扁，上部的等效阻抗不再是渐变的了，与水阻抗失配的增加，使反射增强，另外，空腔的固有频率也会升高，低频吸声效果随之下降[23]。

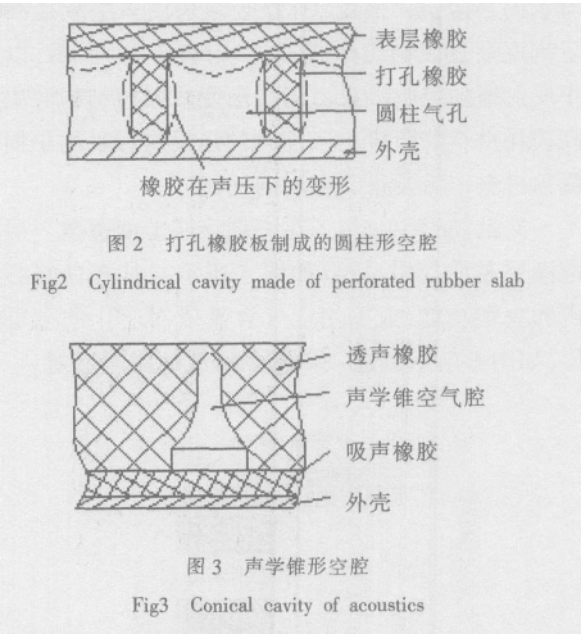



图 2　打孔橡胶板制成的圆柱形空腔

Fig2　Cylindrical cavity made of perforated rubber slab

图 3　声学锥形空腔

Fig3　Conical cavity of acoustics

(2) 耐压复合吸声结构

材料中的气泡或气孔可以大大增加吸声效果，但在几百米的水深压力下气泡被大大压缩，材料的弹性下降，使结构的吸声效果变差。耐压复合吸声材料要采用透声性能较好的刚性骨架与吸声材料结合的结构。

一般以金属铝薄壁结构作为耐压的外骨架[24-26]，因为它具有良好的透声性，材料吸声单元如图 4 所示。通过耐压吸声试验结果表明：在 3MPa 压力条件下，不带骨架的吸声材料已无工作能力，而装有铝外壳的吸声材料可达常压下吸声效果的 90%。

这种复合材料实质上是内部的吸声材料在低压条件下所起的吸声作用，但工艺要求较高，距实用尚需时日。

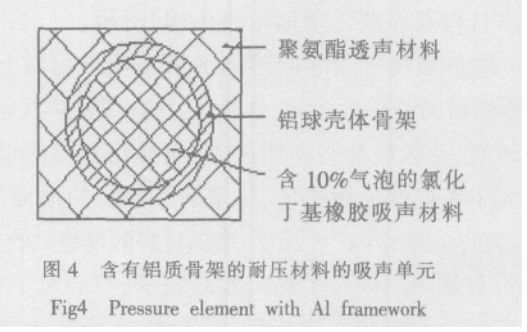



图 4　含有铝质骨架的耐压材料的吸声单元

Fig4　Pressure element with Al framework

(3) 阻抗渐变式吸声结构

采用高损耗材料吸声时，损耗的存在使得材料

与水的声阻抗不匹配，所以必须采用多层或连续的阻抗逐渐过渡结构形式[27]，如附表中(1)所示，以减小反射增加吸收效果。阻抗渐变式吸声结构解决了高损耗材料的阻抗不匹配时的强反射和采用小损耗覆盖材料但需要很厚材料的问题。

文献[28]中介绍了在去耦涂层上面覆盖一层消声涂层制成双层涂层(如图5所示)，具有良好的消声和去耦功能，或采用空气含量依次变化的多层涂层(如图6所示)，进一步减少声波的回声反射。

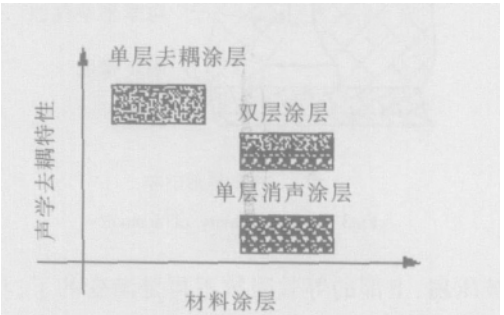



图5 双层涂层特性

Fig5 Characteristics of double coatings

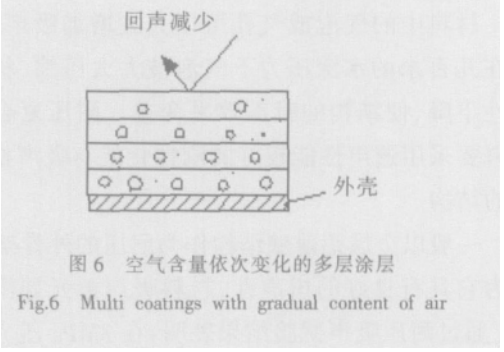



图6 空气含量依次变化的多层涂层

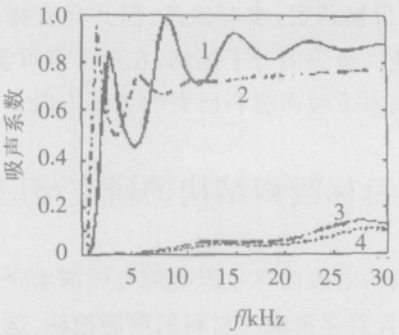
Fig.6 Multi coatings with gradual content of air

(4)微粒复合吸声结构

微粒复合吸声材料是在阻尼吸声材料内部混合微小粒子[29]，如玻璃微粒、铝粉，也有空心的。添加细小微粒会引起阻抗的变化，所以微粒的比例和分布必须保证入射声方向阻抗的逐渐过渡，微粒复合吸声材料及声波传播如附表中(4)所示。

它的吸声机理是：当声波作用到吸声材料上遇到球形微粒时会产生散射，分散入射的声能，并发生波形的转换，使纵波变为剪切波[30]，而剪切变形的损耗因子大于纵波的损耗因子，这增加了声波的损耗[31]；同时，会使金属粒子产生振动，增加材料的弛豫吸收效果。

文献[32]研究了加入实心粒子、空心粒子、空气球后复合材料的吸声性能，通过数值计算比较了含玻璃薄壁空气球、空气球、实心玻璃球和均匀材料的吸声系数，如图7所示，可见，玻璃薄壁空气球和空




1-空心玻璃球，2-空气球，3-实心玻璃球，4-均匀材料

图7 材料中掺入不同种类粒子对吸声性能的影响

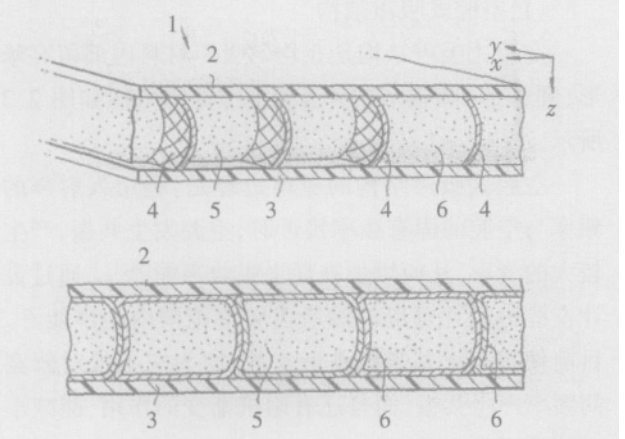
Fig.7 Absorption coefficients of material with different inclusion

气球的吸声性能远优于实心玻璃球和不掺入粒子均匀材料，而且含空气球的材料低频吸声效果更好。这种现象可能是前两种材料的声损耗大，而且与水的阻抗匹配性能好。

可见，微粒的含量及分布首先必须保证使吸声覆盖层与水具有良好的阻抗匹配，而对于粒子的材料、尺寸、形状对于吸声性能影响的规律还需进行深入的研究。

(5)三明治夹层吸声结构

三明治夹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，利用吸声材料作夹层，如图8所示。这种夹层结构可直接代替钢结构作为船体结构，同时还具有吸声功能，改变了钢板外面覆盖吸声层的传统吸声结构。文献[33]对这种夹层的材料、结构形式进行了介绍，指出通过合理选择内部吸声材料、及各层的配置，可以实现良好的吸声性能。此外，这种夹层结构还具有优异的振动阻尼性能。




1-复合材料结构，2、3-位上下玻璃钢层，4、6-位夹层间的支撑，5-为夹芯的吸声材料

图8 夹层纤维增强复合材料板两种形式的截面

Fig8 Two kinds of section of sandwich FRP

关于纤维增强复合材料在潜艇结构中的应用, 在国外已有 30 多年的历史[34], 应用部位也由原来的舵、翼附属结构, 发展到了潜艇非耐压外壳的主要结构上。目前利用纤维增强夹层复合材料的高的比强度、比刚度; 好的透声、隔声性能好; 优良的振动阻尼性能[35]; 好的成型工艺等优点, 随着技术的进一步成熟, 直接使用三明治夹层吸声结构代替原有的'钢结构+消声覆盖'的结构, 必然成为未来水下目标声隐身结构的发展趋势。

(6) 压电式复合吸声结构

压电式复合吸声结构是聚合物中加入导电微粒, 制成压电式吸声材料[36]。导电微粒在基质材料中形成微观局部的电流回路, 有效地将声能及振动能转换为电能再经压电作用以热的形式耗散掉, 达到吸声和减振的作用。此外, 聚合物的声阻抗很低, 易于与水匹配, 也可通过调节微粒的含量来改变复合材料的声阻抗, 从而实现阻抗的匹配。压电式吸声材料的原理如附表中(5)所示。

用导电微粒与聚偏二氟乙烯混合能制得压电吸声材料, 或以锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷微粒为填料, 分别与丙烯酸酯共聚物和环氧树脂复合制得 PZT/高分子复合吸声膜[37]。研究表明: 在聚合物中加入导电微粒并使其极化产生压电性, 可以使吸声性能大大提高。另外, 文献[38]研究了 chiral 复合材料用于水下消声材料, 获得了较好的消声效果, 数值计算结果表明: 正面入射声波的回声减少量达 12dB 以上。

从材料设计角度出发, 通过混和与填充填料等方式, 将高分子聚合物、弹性体、金属或无机填料等有机结合; 或者是从结构设计角度出发, 通过将阻尼与共振吸声机理及散射消声机理的合理匹配, 得到综合性能优异的复合吸声结构成为吸声覆盖层。无论采用上述哪种形式的吸声覆盖, 都必须考虑非耐压壳体、水层、耐压壳体和环肋等结构, 根据不同声波频段, 综合考虑声波在上述结构中的传播, 才能准确计算和评估吸声覆盖层的吸声和隔声效果。

## 4　水下目标吸声材料和结构发展的展望

经过半个多世纪的发展, 水下目标吸声材料和结构的研究已取得了相当大的成就, 形成了以橡胶类材料和聚氨酯类材料为基体的两大吸声材料体系, 通过各种声学结构, 有效地将声能转化为热能或转化为电能再转化为热能损耗掉, 亦或利用散射原理, 将集中的声能分散弱化, 减小回波的强度。对水下目标吸声覆盖层的吸声机理进行总结概括, 见附表。综上所述, 水下目标吸声覆盖朝着三个方向发展: 耐压(3MPa~5MPa)、低频(0.5kHz~2kHz)和宽频段。水下吸声材料高分子结构与声学性能的关系还须进一步研究。三明治夹层吸声结构, 集外壳结构与吸声功能于一体, 且具有振动阻尼性能好、浮力增加、磁信号降低、成型容易等一系列优点, 将成为未来水下目标声隐身结构的发展方向。

## 参　考　文　献


[1] 朱孝信. 舰船用高技术新材料的发展[J]. 材料的开发与应用, 1999, 14(1): 24-30.
ZHU Xiaoxin. Development of hi-tech and new materials for ship building[J]. Development and Application of Material, 1999, 14(1): 24-30.

[2] 马玉璞. 舰用非金属隐身材料的发展[J]. 舰船科学技术, 2001, 2: 28-33.
MA Yupu. Development of nonmetal stealth material of ship[J]. Science and Technology of Ship, 2001, 2: 28-33.

[3] 张宏军, 邱伯华. 消声瓦技术的现状与发展趋势[J]. 舰船科学技术. 2001, 4: 6-14.
ZHANG Hongjun, Qiu Bohua. Status and development Trend of Anechoic Coating[J]. Science and Technology of Ship, 2001, 4: 6-14.

[4] 陈月辉. 声学功能材料[J]. 特种橡胶制品. 2004, 25(1): 55-62.
CHEN yuehui. Acoustical Material[J]. Special Rubber Products, 2004, 25(1): 55-62.

[5] 邓建国, 王建华, 贺传兰. 聚氨酯阻尼材料研究进展[J]. 聚氨酯工业. 2001, 16(2): 1-4.
DENG Jianguo, WANG Jianhua, HE Chuanlan. The research progress of polyurethane damping materials[J]. Polyurethane Industry, 2001, 16(2): 1-4.

[6] 王如义, 郑元锁. 橡胶阻尼材料研究进展[J]. 橡胶工业. 2003, 50(2): 88-93.
WANG Ruyi, ZHENG Yuansuo. The research progress of rubber damping materials[J]. Rubber Industry, 2003, 50(2): 88-93.

[7] 万里鹰, 肖凌. 高聚物力学阻尼材料的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程. 1999, 15(2): 1-5.
WAN liying, XIAO ling. Research progress of polymer damping materials[J]. Polymer Materials Science and En-

gineering, 1999, 15(2): 1-5.

[8] **陈兵勇, 马国富, 严宏洲. 阻尼丁基橡胶**[J]. **世界橡胶工业**. 2005, 32(2): 31-33.
CHEN Bingyong, MA Guofu, YAN Hongzhou. Study on the damping property of butyl rubber[J]. Rubber Industry of World, 2005, 32(2): 31-33.

[9] CHUNG T C, Janvikul W, Bernard R. Butyl rubber graft copolymers: synthesis and characterization[J]. Polymer, 1995, 36(8): 3565-3574.

[10] **黄微波, 杨宇润, 刘东晖. 聚醚氨酯结构与阻尼性能的研究**[J]. **高分子材料科学与工程**. 1995, 11(2): 102-105.
HUANG Weibo, YANG Yurun, LIU Donghui. Research of structure and damping property of polyether based polyurethanes[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 1995, 11(2): 102-105.

[11] **朱金华, 姚树人. 聚氨酯弹性体结构与动态力学性能研究**[J]. **高分子材料科学与工程**. 2000, 16(5): 106-108.
ZHU Jinhua, YAO Shuren. Study on the morphology and dynamic mechanical property of polyurethane elastomers[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2000, 16(5): 106-108.

[12] **文庆珍, 朱金华, 王源升, 等. 聚氨酯的阻尼性能和形态结构的研究Ⅰ. 硬段分布对** PPG TDI MOCA **体系的影响**[J]. **武汉大学学报**. 2003, 49(6): 705-708.
WEN Qingzhen, ZHU Jinhua, WANG Yuansheng. Study on the damping properties and morphologies of polyurethanes, Ⅰ. Effect of the hard segments arrangement On PPG TDI MOCA[J]. J Wuhan Univ, 2003, 49(6): 705-708.

[13] **何显儒, 黄光速. 氯化丁基橡胶聚丙烯酸酯共混物阻尼性能研究**[J]. **高分子学报**, 2005, 1(2): 108-112.
HE Xianru, Huang Guangsu. Investigation on the damping behavior of CⅡR/Pmac blends[J]. ACTA Polymerica Sinica, 2005, 1(2): 108-112.

[14] **郑诗建, 王聚渊. 丙烯酸酯橡胶和聚氯乙烯共混体系阻尼特性的研究**[J]. **特种橡胶制品**. 2000, 21(2): 8-10.
ZHENG Shijian, WANG Juyuan. Study on the damping properties of ACM/PVC blends[J]. Special Rubber Products, 2000, 21(2): 8-10.

[15] **秦东奇. 聚氨酯/聚酯共混体系阻尼性能研究**[J]. **吉林大学自然科学学报**. 1998, 2: 81-84.
QIN Dongqi. Studies of damping properties of PE/PU blends system[J]. Acta Scientiarum Natrualium Universityatis Jilinensis, 1998, 2: 81-84.

[16] Patri M, Annakutty M, Smui A B. Interpenetrating polymer networks for noise and vibration damping in marine environments[J]. UDT, 1998: 61-68.

[17] TING R Y, Rodger N, Capps D. Klempner. Acoustical properties of some interpenetrating network polymers-Urethane-epox[R]. AD-A22188, 365-381.

[18] WU F C, Yamagishi T, Nakamoto Y. Viscoelastic properties of an organic hybrid of chlorinated polyethylene and a small molecule[J]. Journal of Polymer Science, 2000, (38): 2285-2295.

[19] **谭红波, 赵洪, 徐海亭. 有限元法分析空腔周期分布粘弹性层的声特性**[J]. **声学学报**, 2003, 28(3): 277-282.
TAN Hongbo, ZHAO Hong, XU Haiting. Sound characteristics of viscoelastic layer containing periodic cavities by FEM[J]. Acta Acoustica, 2003, 28(3): 277-282

[20] **安俊英, 陈建平, 徐海亭. 钢板-空气背衬上含空腔粘弹性材料层的声反射特性**[J]. **应用声学**, 2004, 23(2): 31-37.
AN Junying, CHEN Jianping, XU Haiting, Sound reflection characteristics of a viscoelastic coating with air cavities adhered to a steel plate between air and water [J]. Applied Acoustics, 2004, 23(2): 31-37.

[21] Easwaran V, Munjal M L. Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: finite element approach[J]. J Acoust Soc Am, 1993, 93(3): 1308-1118.

[22] **王仁乾, 马黎黎, 缪旭弘. 空腔尖劈吸声器吸声性能的研究**[J]. **声学技术**, 1999, 18(4): 146-148.
WANG Renqian, MA Lili, MIU Xuhong. A study on the absorbing performance of a wedge absorber with Cavity[J]. Technical Acoustics, 1999, 18(4): 146-148.

[23] **王仁乾. 空腔结构吸声器的吸声系数计算方法的研究. 声学学报**, 2004, 29(5): 393-397.
WANG Renqian. Methods to calculate an absorption coefficient of sound-absorber with cavity[J]. Acta Acoustica, 2004, 29(5): 393-397.

[24] **缪荣兴, 宫继祥. 水声无源材料技术概要**[M]. **浙江大学出版社**, 1995, 18-20.
MIU Rongxing, GONG Jixiang. Technology Summery of Underwater Sound Passive Material[M]. Zhejiang Univ. Book Concern, 1995, 18-20.

[25] Pieter S. Dubbelday. Elastic moduli of aluminum-polyurethane composites(ALUMERS)[R]. AD-A268582.

[26] **钟爱生. 耐压低频吸声方面的橡胶材料与结构**[J]. **制品与工艺**, 2001, 2: 21-30, 42.
ZHONG Aisheng. Rubber material and structure of poressure and low frequency[J]. Arts And Crafts, 2001,

2: 21-30, 42.

[27] Pederscn P C, Tretiak O. Impedance-matching properties of an inhomogeneous matching layer with continuously changing acoustic impedance[J]. J Acoust Soc Ame, 1982, 72(2): 327-336.

[28] Stephane Beretti, Martine Vassas. Multifunction coating and enhanced anechoic coating by using multilayer optimization[J]. UDT, 1996: 300-303.

[29] **马黎黎, 王仁乾, 含散射粒子的复合材料吸声性能研究**[J]. **声学技术**, 2002, 21(**增刊**): 113-114.
MA Lili, WANG Renqian. Study on sound absorbing properties of composites with scattering particals[J]. Acoustic Technology, 2002, 21113-114.

[30] **赵敏兰. 含球形空腔弹性体的声学性能研究**[D]. **上海交通大学**, 1997. 10-29.
ZHAO Minlan, Acoustical properties of elastomer with ball cavities[D]. Shanghai Jiaotong Univ, 1997. 10-29.

[31] Hinders M K, Rhodes B A, Fang T M. Particle-loaded composites for acoustic anechoic coatings[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185(2): 219-246.

[32] **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, 3(25): 288-294.
WANG Renqian, MA Lili. Effects of physical parameters of the absorption material on absorption capability of anechoictiles[J]. Journal of harbin engineering univ, 2004, 3(25): 288-294.

[33] SMITH, Charles. Composite Structure[P]. patent number: pct/gb98/01377, 1997. 5.

[34] Dietrich Wittekind. Reinforced Plastics for Submarine Structures[J]. UDT, 1997, 154-158.

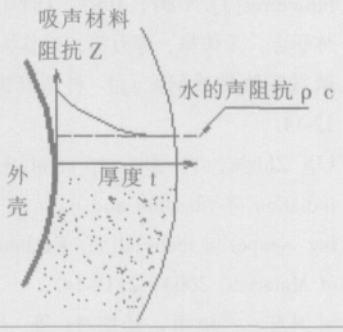
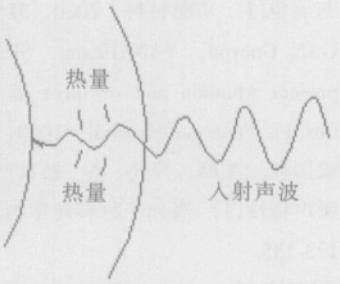
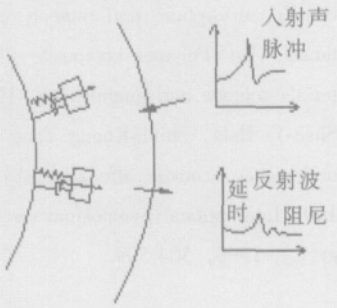
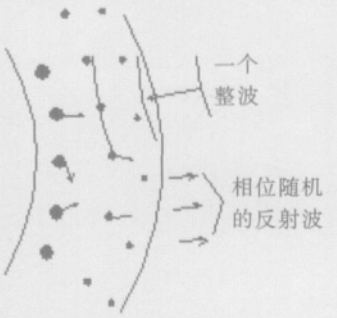
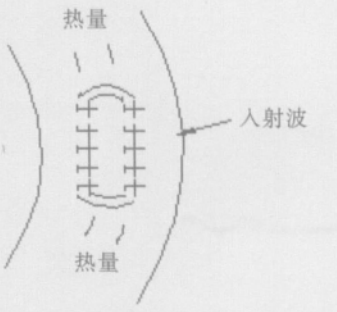
[35] **林新志, 于德梅, 郭万涛, 闫作为. 阻尼复合材料舵板减振降噪试验研究**[J]. **材料开发与应用**, 2004, 2: 12-14.
LIN Zhixin, YU Demei, et al. Experimental study on radiation of vibration and noise of helm made of damping composite material[J]. Exploitation and Application of Material, 2004, 2:12-14.

[36] **甘国友, 严继康, 孙加林, 等. 压电复合材料的现状与展望**[J]. **功能材料**, 2000, 31(5): 456-459.
GAN Guoyou, YAN Jikang, SUN Jialin, et al. The present situation and prospect of piezoelectric composites[J]. Function Material, 2000, 31(5): 456-459.

[37] **成国祥, 沈峰, 卢涛, 等. 锆钛酸铅/高分子复合膜的吸声特性**[J]. **高分子材料科学与工程**, 1999, 15(7): 133-135.
CHENG Guoxiang, SHEN Feng, LU Tao, et al. Acoustic absorption performance of lead zirconate titanate (Pzt)/Polymer composite films[J]. Polymer materials science and engineering, 1999, 15(7): 133-135.

[38] Shao-Yi Hsia, Shiuh-Kuang Yang. Chiral composites as underwater acoustic attenators[A]. Proceedings of the 1998 International Symposium on Underwater Technology[C]. 1998, 504-509.

**附表**:

| | 示意图 | 吸声机理说明 | 缺陷 |
|---|---|---|---|
| (1)阻抗匹配 |  | 采用多层或连续的阻抗逐渐过渡结构形式，解决了大阻尼材料的阻抗不匹配的强反射和采用小阻尼覆盖材料需要很大厚度的问题。 | 低频吸声性能差 |
| (2)阻尼损耗 |  | 利用材料阻尼将声能转化为热能损耗掉。因为大阻尼会引起阻抗失配，一般采用阻抗过渡式的结构，或在材料中加小气泡或孔，一方面增加损耗；两一方面在声波入射的方向气泡的密度、大小改变，达到阻抗的过渡。 | 温度和压力对吸声性能影响大 |
| (3)共振 |  | 在材料内设置圆柱形或锥形空腔，当入射声的频率与空腔的固有频率接近时，空腔发生共振，产生较大的变形，从而增加损耗来吸收声能。 | 吸声频带窄，压力影响大 |
| (4)散射 |  | 声波遇到球形微粒时会产生散射，分散入射的声能；另外纵波转变为剪切波，而剪切变形的损耗因子大于纵波的损耗因子，这增加了声波的损耗。 | 低频吸声效果差( 粒子尺寸≥1/3 波长 ) |
| (5)压电式主动控制 |  | 声波入射时，压电材料中形成微观局部的电流回路，有效地将声能及振动能转换为电能再经压电作用以热的形式耗散掉。 | 只是处于试验阶段 |