

综述·专论

橡胶材料在水声领域的应用进展

刘钦阳,张嘉喜,刘国鑫,张继川,刘力*

(北京化工大学 北京市先进弹性体工程技术研究中心,北京 100029)

摘要:橡胶材料具有阻尼性能优异、声阻抗可调、易于配方调整和加工成型的特点,在水声领域应用广泛。从橡胶材料的粘滞性吸收机理、热传导吸收机理和分子弛豫吸收机理出发,总结提高橡胶材料吸声性能的途径主要为制备填料填充或橡胶并用的共混改性型以及结构型吸声橡胶材料;基于理论设计和实际应用,阐述透声和反声橡胶材料的研究进展;指出水声橡胶材料目前面临的挑战和今后的发展方向。

关键词:橡胶材料;水声材料;吸声材料;透声材料;反声材料;声学性能

中图分类号:TQ330.1⁺2;TB564

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2023)02-0148-12

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.02.0148



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

水声材料是一种在水下对声波产生特定作用的材料,按照对声波的作用不同,水声材料大致可以分为吸声材料、透声材料和反声材料。同时,由于应用环境在水下,水声材料通常具有一定的耐压性能和耐海水腐蚀性能。目前,水声材料在民用领域主要应用于海底资源探测、海洋捕捞和海洋搜救等方面,而在特种领域主要用作潜艇的隐身层和声呐导流罩材料等^[1-3]。

橡胶材料具有优异的阻尼性能和易于加工成型的特点,更重要的是可以通过配方设计选取不同的橡胶和配合剂来改变其声学特性,因而在水声领域中得到广泛应用^[4-5]。水声橡胶材料可以通过消除或减小声波的反射来达到吸声和隐身作用,也可以保持声波传播不失真而达到透声的作用,还可以反射声波而达到反声的作用^[6-7]。

本文从橡胶材料的粘滞性吸收机理、热传导吸收机理和分子弛豫吸收机理出发,总结提高橡胶材料吸声性能的途径主要为制备填料填充或橡胶并用的共混改性型以及结构型吸声橡胶材料,并基于理论设计和实际应用,阐述透声和反声橡

胶材料的研究进展,以期通过橡胶材料的配方和结构设计提高其声学性能,制备出性能优异的水声橡胶材料。

1 橡胶材料声学性能的评价

1.1 声学参数

吸声因数(α)、透声因数(T)、反声因数(R)和插入损失(I)是表征材料声学性能最直接的参数,水声材料的声学参数可通过脉冲管法测得,该方法的装置由脉冲管、换能器、标准反射体和电子系统组成^[8]。在声学参数的脉冲管测试中,换能器向脉冲管发射正弦声波,声波被试样反射和透射,反射波被换能器接收,透射波经标准反射体二次反射再由换能器接收。通过测试样与反射波相对应的信号电压幅值(A_r)和与透射波相对应的信号电压幅值(A_t),并采集与标准反射体反射波相对应的信号电压幅值(A_0),利用以下计算式求得材料的 R 、 T 、 α 和 I 。

$$R = \frac{A_r}{A_0} \quad (1)$$

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFF0302)

作者简介:刘钦阳(1998—),男,山东日照人,北京化工大学在读硕士研究生,主要从事橡胶复合材料的研究。

*通信联系人(liul@mail.buct.edu.cn)

引用本文:刘钦阳,张嘉喜,刘国鑫,等.橡胶材料在水声领域的应用进展[J].橡胶工业,2023,70(2):148-159.

Citation: LIU Qinyang, ZHANG Jiayi, LIU Guoxin, et al. Application progress of rubber materials in underwater acoustic field[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(2): 148-159.

$$T = \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2)

$$I = 20 \lg \frac{1}{T}$$

(3)

$$\alpha = 1 - R^2 - T^2$$

(4)

1.2 损耗因子 (tanδ)

橡胶材料在受到交变外力作用下,形变将会落后于应力的变化,在这种情况下,应力和应变都是时间的函数。橡胶材料的动态力学性能通常用复数模量 (E^*) 和 $\tan\delta$ 表征,二者的定义见式 (5) 和 (6)^[9]:

$$E^* = E' + iE''$$

(5)

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}$$

(6)

式中, E' 和 E'' 分别为橡胶材料的弹性模量和损耗模量。

$\tan\delta$ 定义为材料 E'' 与 E' 的比值,可以用来衡量橡胶材料的阻尼性能, $\tan\delta$ 大是橡胶用于吸声材料的必要条件^[1]。各种橡胶的密度、纵波衰减系数 (纵波在材料中传播单位长度的声压幅值所衰减的奈培数) 和 $\tan\delta$ 如表 1 所示。

表 1 常用橡胶的密度、纵波衰减系数和 $\tan\delta$
Tab. 1 Densities, longitudinal wave attenuation coefficients and $\tan\delta$ of common rubbers

胶 种	密度/(Mg · m ⁻³)	纵波衰减系数/(Np · m ⁻¹)	$\tan\delta$
天然橡胶 (NR)	1.003	<0.6	0.45
丁基橡胶 (IIR)	1.005	1.6	1.70
氯丁橡胶 (CR)	1.080	0.6	0.50
丁苯橡胶 (SBR)	1.039	<0.6	0.49
丁腈橡胶 (NBR)	1.056	1.5	1.30

注:测试条件为温度 13℃,频率 20 kHz。

从表 1 可以看出, IIR 和 NBR 具有大的 $\tan\delta$, 通常被用于吸声材料, 而 NR, CR 和 SBR 具有小的 $\tan\delta$, 可以用于透声材料。

1.3 声阻抗 (Z)

声音的传播需要介质, 而 Z 是描述材料自身性质的重要物理量, 是判断材料是否可作为反声材料和透声材料的标志^[10]。当两种材料的 Z 相近或相同时称为阻抗匹配, 反之称为阻抗失配。当两种材料的阻抗匹配时, 声波在界面上才不会反射。 Z 可以简单地表示为材料密度 (ρ) 与声速 (c) 的乘积。

常用材料的 c , ρ 和 Z 见表 2^[11]。从表 2 可以看出,

表 2 常用材料的 c , ρ 和 Z
Tab. 2 c , ρ and Z of common materials

材 料	c /(m · s ⁻¹)	ρ /(Mg · m ⁻³)	$Z \times 10^2$ /(Pa · s · m ⁻¹)
空气	340	1.23	4.18
水	1 450	1.00	14.5
未填充填料的			
橡胶材料	30~70	0.95	0.28~0.67
铝	6 420	2.69	173
钢	5 950	7.86	468
玻璃	4 500~5 600	2.4~5.6	108~315

未填充填料的橡胶材料的 c 最小, 固体的 c 可以采用式 (7)^[12] 计算:

$$c = \sqrt{\frac{E^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{E'(1-\lambda)}{\rho(1-2\lambda)(1+\lambda)}}$$

(7)

式中, λ 为泊松比。

由式 (7) 可以看出, 固体的 c 与 E' 正相关。因此, 橡胶材料可以通过调整配合剂种类和用量来调节 E' , 进而改变橡胶材料的 c 。通过向橡胶材料中添加增塑剂或者软化剂, 就会使得 c 降低; 反之, 向橡胶中添加硬性填料如炭黑可以使 c 提高。由此可见, 橡胶材料可以通过配方设计, 改变其中的填料种类来调节 c , 从而实现与水的阻抗匹配^[4]。

2 吸声橡胶材料

要使吸声材料在水中具备一定的声波吸收和耗散能力, 通常需要满足以下几个条件^[13]: (1) 吸声材料与水的阻抗匹配, 从而使得声波以无反射或低反射地进入到材料内部而不发生反射; (2) 吸声材料要具有优异的声波耗散能力, 使得入射声波被耗散。

2.1 吸声机理

声波在橡胶材料中传播主要有 3 种损耗机理: 粘滞性吸收、热传导吸收和分子弛豫吸收, 除此之外, 声波波形的转换也会对声波的吸收产生影响^[14-15]。

(1) 粘滞性吸收机理。

当声波进入材料时, 引起相邻质点间的速度不同, 由相对运动而产生内摩擦, 使得一部分能量转变成成为热能耗散, 粘滞性吸收主要发生在相邻材料间, 为不可逆过程。

由材料粘滞性引起的吸声因数 (α_η) 可以由式 (8) 计算:

$$\alpha_{\eta} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left(\frac{4}{3} \eta' + \eta'' \right) \quad (8)$$

式中, ω 为声波的频率, ρ_0 为 $\omega=0$ 时材料的密度, η' 和 η'' 分别为材料的剪切粘滞系数和体积粘滞系数。

(2) 热传导吸收机理。

声波在进入材料后, 会引起材料发生压缩和膨胀变化, 使得压缩部分的温度升高, 膨胀部分温度降低, 从而在压缩与膨胀区域之间形成温度梯度, 热量从高温区流向低温区, 产生热传导, 使得声能转变为热能。热传导对声波吸收的贡献可以由式(9)表示:

$$\alpha_{\chi} = \frac{\omega^2 \chi}{2\rho_0 c^3} \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \quad (9)$$

式中, α_{χ} 为材料热传导引起的吸声因数, χ 为材料的热导率, C_V 和 C_P 分别为材料的恒容热容和恒压热容。

粘滞性吸收和热传导吸收为经典吸收理论, 是由 Stokes 和 Kirchhoff 于 19 世纪提出的。从上述计算式可以看出, α 与 ω 的平方成正比, 即 ω 越高, α 越大, 反之则 α 越小。

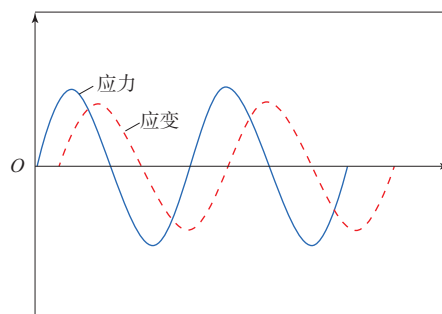
(3) 分子弛豫吸收机理。

橡胶材料具有弹性固体和粘性流体特征, 即为粘弹性体, 这使得橡胶分子链在交变外力作用下发生构象转变需要一定的时间, 即橡胶材料的应变落后于应力一个相位角 (δ), 其应力-应变曲线会形成一个滞后圈, 如图 1 所示。橡胶材料在外力作用下在一个周期内所做的功与滞后圈的面积成正比, 且所做的功最终转化为热能耗散。当声波入射到橡胶材料中时, 引起材料形变; 同时由于弛豫现象的存在, 材料产生的形变响应落后于声压变化一个 δ , 这使得声压变化和材料形变也会产生滞后圈, 滞后圈的面积正比于形变所做的功。所以, 经过橡胶分子弛豫过程, 部分声能转换为热能, 这种声能的耗散方式称为分子弛豫吸收。

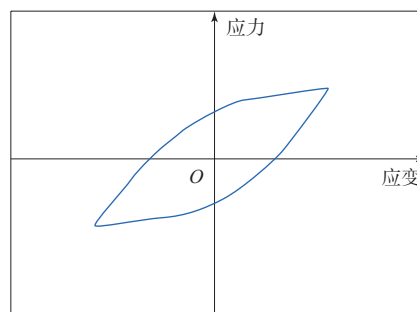
由分子弛豫过程对吸声的贡献可以由式(10)计算:

$$\alpha_R = \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \frac{\eta_i''}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (10)$$

式中, α_R 为材料分子弛豫引起的吸声因数, η_i'' 为第 i 种过程引起的体积粘滞系数, τ_i 为该过程所对应的弛豫时间。



(a) 应力和应变曲线



(b) 滞后环曲线

图1 橡胶材料的应力、应变及滞后环曲线

Fig. 1 Stress, strain and hysteretic cycle curves of rubber materials

橡胶材料对声波的吸收除上述3种形式外, 声波在传播过程中的波形转换也会对其吸收产生影响。声波在水等流体中是以纵波的形式传播的, 而在固体材料中可以以纵波和横波两种形式传播。声波的波形转换是指纵波进入到粘弹性材料时, 有一部分转换成横波。橡胶材料的弹性模量远大于剪切模量, 而剪切模量产生的损耗要远大于弹性模量产生的损耗, 因此可通过在橡胶中填充填料或者设计声学结构以促进声波的波形转换, 使声波得以衰减, 由此所产生的吸声作用即为波形转换吸收机理^[16]。

2.2 提高橡胶材料的吸声性能途径

通常内耗大、阻尼性能好的橡胶例如NBR和IIR被用于吸声材料。研究^[17]表明, 不具有声腔结构的纯橡胶材料在100~5 500 Hz频段内的吸声性能较差, α 小于0.2, 纯橡胶材料难以同时满足与水的阻抗匹配以及良好的声波衰减能力, 所以纯橡胶材料的吸声性能并不理想。为了提高橡胶材料的吸声性能, 通常从胶料配方设计以及声学结构设计角度出发, 采取以下措施: (1) 向橡胶中填充填料或者不同种类的橡胶并用; (2) 在橡胶材料

中设计特殊的声学结构。

2.2.1 共混改性型吸声橡胶材料

吸声橡胶材料主要有共混改性型和结构型两类,共混改性型又可以分为填料填充型和橡胶并用型。填料填充型吸声橡胶材料是在橡胶中加入各种无机或有机填料如玻璃微珠、蛭石粉、石墨烯和受阻酚类有机物等,利用声波在填料与橡胶基体的界面间发生波形转换或者是增强橡胶分子与有机小分子间的相互作用,从而实现提高吸声性能的目的;橡胶并用的目的是增大橡胶材料的模量和拓宽阻尼温域,提高在高压下的吸声性能。具有声学空腔结构的橡胶材料在空腔结构处产生声波共振或发生反射,增加声波的传播路径,从而提高吸声性能^[18-19]。

当向橡胶中加入蛭石粉和空心玻璃微珠这类气泡型填料时,会引起其中的空气粘滞性吸收,同时声波在填料与橡胶基体的界面处会发生波形变换,由纵波变换成横波,从而使声波损耗。李康等^[20]研究了蛭石粉用量对粉末NBR复合材料吸声性能的影响,结果表明随着蛭石粉用量的增大,复合材料的中低频吸声性能先明显改善,当蛭石粉含量为35%时,复合材料的吸声性能最好。乔冬平等^[21]发现蛭石粉用量对橡胶材料的力学性能影响不大,但橡胶材料的吸声性能随着蛭石粉用量的增大而提升,当蛭石粉用量为30~40份时,橡胶材料的吸声性能优异。马永亮^[22]采用硅烷偶联剂KH-570对空心玻璃微珠进行改性,以提高其与SBR基体间的相容性。结果表明,与未填充空心玻璃微珠的SBR复合材料相比,填充改性空心玻璃微珠的SBR复合材料的力学性能和低频(3~4.5 kHz)吸声性能得到改善。

碳填料具有优异的力学性能和热性能,可以

赋予橡胶材料一定的功能性,在声学阻尼领域有着广阔的应用前景。王清华等^[19]研究了石墨的用量对硅橡胶涂层吸声性能的影响,结果表明石墨在橡胶基体中形成了空气层,该涂层利用空气粘滞性吸收和声波在石墨与橡胶基体界面处发生波形转换,使声波衰减;该涂层具有优异的吸声性能,在常压下的 α 均值可达0.93。

石墨烯具有出色的力学性能和大的比表面积,将其引入到橡胶材料中,可以改善橡胶材料的力学性能和阻尼性能。B. H. YUAN等^[15]将石墨烯纳米片填充到NBR复合材料中,随着石墨烯纳米片用量的增大,复合材料的 E' 和 E'' 增大,吸声性能显著提高;当石墨烯纳米片用量为10份时, α 均值增大至0.73。李伟清^[23]制备了氧化石墨烯(GO)/NBR复合材料,研究了GO用量对复合材料声学性能的影响,结果表明随着GO用量的增大,复合材料的吸声性能先提升后降低;当GO质量分数为7%时,复合材料在4~12 kHz频段内的 α 为0.7以上。分析认为:GO的表面含有许多含氧官能团(如环氧基和羟基等),其可与极性橡胶间产生较强的相互作用,促进GO在橡胶基体中的分散,同时GO还可提高橡胶材料的导热能力,促进声波的热传导损耗,使橡胶材料的吸声性能提升;但当GO的用量过大时,会引起GO的团聚,导致其与橡胶间的接触面积减小,使橡胶材料的吸声性能降低。为了改善石墨烯在橡胶中的分散情况,Y. LI等^[24]采用喷雾干燥法制备石墨烯/橡胶复合材料,该方法先将石墨烯以及其他助剂分散在SBR胶乳中,然后干燥成粉末,最后热压成型得到制品,具体制备过程见图2。结果表明:常压下,在6~30 kHz频段内,复合材料的 α 均值大于0.8;在2~3.5 kHz频段内,随着水压的升高,复合材料的吸声性能提高。

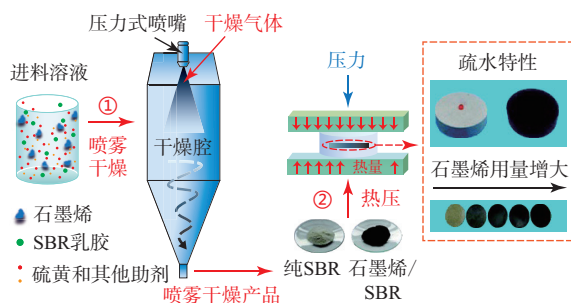


图2 石墨烯/SBR复合材料的制备流程示意

Fig. 2 Schematic of preparation process of graphene/SBR composites

有机小分子化合物填充到橡胶中制备的复合材料在宽温域和宽频域下具有优异的阻尼性能。郭长明^[18]制备了受阻酚(AO-80)/NBR复合材料,利用AO-80与橡胶基体—CN基团间形成的可逆氢键在交变的外力下不断破坏和再生,提高了复合材料的阻尼性能;当AO-80用量为10份时,复合材料的力学性能和在 ω 为4.5 kHz以上的吸声性能较好。

除了向橡胶中填充填料外,不同种类的橡胶并用也是改善橡胶材料吸声性能的有效方法。氯化丁基橡胶(CIIR)在常压下具有优异的吸声性能,在高压下其吸声性能迅速下降,这是由于在高压下,橡胶分子链可以自由活动的空间被压缩,分子链的运动能力降低。侯永振等^[25]对比了CIIR/SBR并用胶和CIIR/NBR并用胶的吸声性能,结果表明在0.5~6 MPa的静水压力下和1.5~7 kHz频段内,CIIR/SBR并用胶具有更为优异的吸声性能。从分子结构角度出发,SBR分子比NBR分子含有更多的顺式1,4-和1,2-或3,4-结构,链段的运动能力强,对吸声性能有利。

杜仲橡胶(EUG)的分子结构为反式-1,4-聚异戊二烯,其具有橡塑二重性,常温下为晶态,模量较高。EUG与其他橡胶并用可以拓宽橡胶材料的阻尼温域,提高材料在高压下的吸声性能。J. C. ZHANG等^[26]将EUG引入到CR/CIIR体系中,研究了CR/CIIR/EUG并用胶的阻尼性能、结晶性能和吸声性能,结果表明并用胶在40~60 °C下的阻尼性能得到提高,EUG在CR和CIIR中仍以晶态存在;当EUG用量小于50份时,并用胶在3~20 kHz频段内的吸声性能较CR或CIIR胶料有较大的提升。R. W. CAO等^[27]研究了EUG/SBR并用胶的相态和在高压下的吸声性能,结果表明当EUG用量小于30份时,EUG以纳米微晶分散在SBR相中,而EUG的晶型主要为 β 型;当EUG/SBR并用比为30/70时,并用胶不仅力学性能优异,且在压力为2.5 MPa时其 α 均值较SBR胶料增大24%。

填料填充型和橡胶并用型吸声橡胶材料的制备工艺简单,但在特定频段下吸声性能不佳,因此通常为其设计声学结构,以提高吸声性能。

2.2.2 结构型吸声橡胶材料

橡胶材料具有优异加工性能,除向其中加入

填料和采用橡胶并用以改善吸声性能外,还可以为橡胶材料设计不同的声学结构,这类声学结构主要以阻抗渐变式结构、共振式结构和声学超材料为主。

2.2.2.1 阻抗渐变式结构

阻抗渐变式吸声材料是使材料的 Z 在厚度方向上按一定梯度变化,两种典型的阻抗渐变式结构如图3所示^[28]。张文成等^[29]以阻抗渐变式多吸声层代替单层吸声层以提高材料的吸声性能,利用声传播理论和粘弹性理论计算了敷设多吸声薄层结构的回声特性,分析了高频阻抗渐变式多吸声薄层结构存在规律及其对模型吸声性能的影响,并以SBR复合材料和聚脲弹性体复合材料进行了仿真验证。结果表明,在相同层厚的情况下,多薄层吸声材料实现了阻抗渐变并控制了阻抗匹配,其吸声性能比单层吸声材料提高。

尖劈是阻抗渐变式结构的另一种形式,当声波达到尖劈的界面时会不断发生反射,多重反射增加了声波在材料中的传播路径,从而实现吸声。张权等^[30]利用仿真理论设计了一种带有空腔的尖劈,以蛭石粉/IIR复合材料制得试样,并对理论计算进行了验证,结果表明在 ω 为3 kHz以上尖

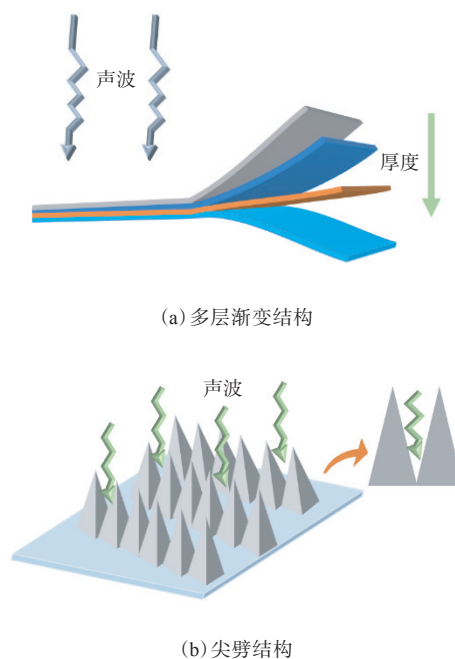


图3 两种阻抗渐变结构示意图
Fig. 3 Schematic of two gradient impedance structures

劈试样的 α 大于0.9。

阻抗渐变式结构可以解决高损耗吸声材料与水的阻抗失配问题,但阻抗匹配的阻抗渐变式吸声材料的设计和制作工艺较为复杂,这也是其发展受限的原因。

2.2.2.2 共振式吸声结构

共振式吸声结构是在橡胶材料中设计的不同结构空腔,其作用是使声波通过空腔时产生共振以及波形转换而耗散^[31]。共振式吸声结构材料最早出自德国潜艇加装的名为Alberich的吸声层,其依然是目前应用最广泛的结构型吸声材料。典型的Alberich吸声结构示意图4。

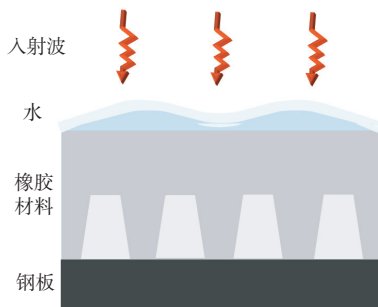


图4 Alberich吸声结构示意图

Fig. 4 Schematic of Alberich sound-absorbing structure

目前关于共振结构的研究集中在理论设计上,即对空腔的形状、尺寸和排布进行研究,并指导实践。C. Z. YE等^[32]利用有限元方法研究了橡胶材料中圆柱形、锥形和喇叭形的3种空腔结构,并构建了声波斜入射的三维有限元模型,分析了不同声波入射角下空腔形状对吸声性能的影响。结果表明:当空腔的尺寸固定时,喇叭形结构在低频下具有优异的吸声性能,这主要是由于喇叭口处存在快速的轴向和径向振动;在声波斜入射的情况下, α 曲线出现2个新的吸收峰,喇叭形结构依然具有优异的吸声性能。

S. M. IVANSSON^[33]使用多重散射法和差分进化算法对橡胶材料中空腔的尺寸进行了设计,结果表明橡胶材料中扁平的超椭圆形腔体可以在不增大橡胶层厚度的情况下,改善Alberich吸声材料的低频性能,同时若扩大腔体体积,则会使共振 ω 降低。在此基础上,S. M. IVANSSON^[34]进一步设计了不同尺寸的球形和圆柱形空腔,结果表明在橡胶材料中混合尺寸的空腔可以减小在8~22

kHz频段内的声波反射,而且具有横向轴的圆柱形空腔的吸声层厚度远小于球形空腔。陈竞超等^[35]采用有限元分析法研究了橡胶材料中单周期三角形截面柱形空腔的吸声性能,发现声波的耗散主要集中在空腔与橡胶材料界面之间;为了获得更好的吸声效果,采用差分进化算法对橡胶层和空腔的尺寸进行了优化,并将两种不同尺寸的空腔进行并联,在1~8 kHz频段内橡胶材料的吸声性能得到改善。D. ZHAO等^[36]将差分进化算法和有限元分析法结合,研究了不同覆盖方式的橡胶覆盖层对浸水钢板吸声性能的影响,结果表明在浸水钢板的两侧敷设不同的橡胶覆盖层,不但可以拓宽吸声频段,并且覆盖层的厚度还可以减小。陈国锋等^[37]研究了吸声圆锥空腔的排布对吸声性能的影响,在低频下增大排布密度,可以提高材料的吸声性能。

虽然共振式吸声结构橡胶材料在低频下具有优异的吸声性能,但是随着水压的增大,空腔结构在压力下发生变形,导致空腔固有频率发生变化,从而影响橡胶材料在低频下的吸声性能。

2.2.2.3 声学超材料

声学超材料是人工设计的具有周期结构的材料,由于其周期结构尺寸小于声波的波长,因而展现出一些天然材料所不具有的特性(负等效质量和负折射率等),在低频吸声方面具有广阔的应用前景。

向橡胶中填充填料和在材料中设计声腔结构的吸声材料如图5所示。N. S. GAO等^[38]设计了一种用于低频水声的声学超材料,在该橡胶材料中引入锥形空腔和圆柱形振子[见图5(a)],相对于未设置空腔结构的橡胶材料和传统空腔吸声结构的橡胶材料,该结构材料在 ω 为10 kHz以下表现出优良的宽频带吸声性能;当在均匀粘弹性橡胶材料中加入锥形腔和圆柱形振子时,增加了空腔和圆柱形振子界面处的剪切变形,入射平面纵波更多的转化为横波,从而增大了声波的损耗。G. S. SHARMA等^[39]用数值计算和模型分析两种手段研究了在橡胶材料中引入金属填充物和空腔的宽频吸声结构[见图5(b)],含1层或者2层空腔结构的橡胶材料的 α 曲线会出现吸收峰,吸收峰的产生源于声波通过空腔层在传播时与阻抗不匹配的

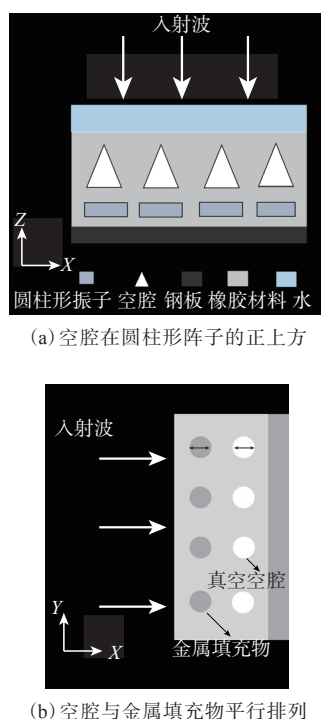


图5 组合型的声学超材料示意

Fig. 5 Schematic of combined acoustic metamaterials

钢板反射波构成干涉;由1层金属填充物再加1层小尺寸的空腔结构可在更高的 ω 内产生另一吸收峰,因此这种组合结构材料在宽频内有着优异的吸声性能。N. S. GAO等^[16]在橡胶材料中设计了一种螺旋结构,并对螺旋结构的参数进行优化,实现了在 ω 为1 000 Hz以下其 α 均值大于0.8。分析认为:螺旋结构的弯曲面有利于改变声波的传播方向,促进声波的波形转换,增大了声波的传播距离;通过对螺旋结构的内径、外径以及橡胶材料配方进行优化,可以得到性能优异的低频吸声材料。

局域共振型的声学超材料是软橡胶包覆金属球或者圆柱在橡胶材料中以一定周期排列构成的。Z. Y. LIU等^[40]提出了一种基于局域共振原理的声子晶体结构,即用弹性材料包裹高密度质量体,具体而言是用软橡胶材料包裹铅块,橡胶材料与铅块形成周期排列的局域共振单元,可以实现小尺寸结构对低频声波的控制。结果表明,硅橡胶材料包覆金属球所形成的声学超材料在特定的频段会出现 α 曲线吸收峰,但是该频段十分狭窄。为了解决上述问题,K. K. SHI等^[41]设计了多层局域共振声子晶体并研究了材料的物理参数对吸声

性能的影响,结果表明这种声学超材料的多层结构产生耦合共振,使得 α 曲线的吸收峰向高频移动,材料的吸声性能明显提升;当层厚度增大时, α 曲线的吸收峰向低频移动;增加共振体层数可以增强共振效应。G. Y. JIN等^[42]研究了由吸声层和隔声层所组成的声学超材料的排布方式以及2层的结构参数对材料吸声性能的影响,其中吸声层由多层局域共振声子晶体组成,隔声层由圆柱形空腔组成。结果表明:随着共振体层数的增加, α 曲线的吸收峰向高频移动,多层共振体产生的耦合共振拓宽了吸声频带;随着圆柱形空腔的增大,增强了空腔的共振,使得材料的吸声性能提高;吸声层与隔声层分布在钢板的两侧时,可以与钢板产生共振,材料的吸声性能更优异。Y. H. GU等^[43]采用分层的方法制备以室温硫化硅橡胶为包覆层,12个钢质圆柱为核的声子晶体声学超材料,由于钢质圆柱作为声波的散射体,在测试的频段内产生局域共振,使声波耗散,同时由于圆柱体间的强耦合和散射作用,使得材料的吸声频段得到拓宽。结果表明,所设计的声学超材料在0.5 MPa压力下和600~2 000 Hz频段内, α 均值为0.78,而在1 MPa压力下和1 200~2 000 Hz频段内, α 均值大于0.6。

3 透声橡胶材料

透声材料是一种能将入射声波无损耗、无反射地透过的材料。在特种领域中,透声材料常用作舰艇的声呐导流罩和换能器水密包裹层等,以避免水声设备受到水下复杂环境的干扰;在民用领域中,透声材料常用于海底勘探和深井探测等方面。因此,透声材料的研究对提高国防力量、开发海洋资源有重要的意义^[44]。

3.1 透声材料特点

透声材料通常具有以下特点:(1)透声材料与水的阻抗匹配;(2)透声材料对声波的耗散能力要低,声波在材料中的衰减非常小;(3)具有一定的水密性能。

在实际应用中,声呐导流罩的外侧是水,内侧为换能器匹配层,声波正入射导流罩材料如图6所示^[12,45]。假设水[介质I,声阻抗(Z_1)]和换能器匹配层[介质III,声阻抗(Z_3)]为无限延伸,并且忽略声

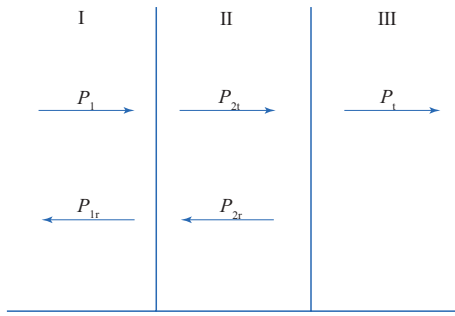


图6 声波入射中间层的过程示意

Fig. 6 Schematic of sound wave propagation in middle layer 波在它们中的损耗,导流罩材料[介质II(也称中间层),声阻抗(Z_2)]处于介质I与III之间;声压为 P_1 的声波正入射中间层材料时,反射声波声压为 P_{1r} ,而透过中间层的声波声压为 P_{2i} ;在中间层与介质III的界面上也存在反射和透射的情况,反射声波声压为 P_{2r} ,而越过界面的透射声波声压为 P_{1t} ,其不会继续反射。

经数学处理得到声波通过中间层的 T 的计算式:

$$T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi D}{\lambda_2}\right) + \left(Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi D}{\lambda_2}\right)} \quad (11)$$

式中, D 为中间层材料的厚度, λ_2 为入射中间层的声波波长。

从式(11)可以看出, T 除了与介质的 Z 有关外,还与 D/λ_2 有关。

3.2 透声橡胶材料的研究现状

透声材料主要应用于舰艇的声呐导流罩,早期舰艇及水下潜航器的导流罩曾采用金属材料,但是金属材料存在透声性能较差、成本高、安装困难和不耐腐蚀等问题,目前已逐渐被非金属材料所取代。橡胶材料的 Z 与水接近,其具有良好的密封性能和耐水性能,在透声领域中有着广泛的应用^[46]。

目前,常用的透声橡胶主要有NR、CR和聚氨酯(PU)。最早的透声橡胶材料是由美国Goodrich公司开发的玻璃微珠填充NR复合材料,该材料的 Z 与水相近,且强度较高,被广泛采用^[47]。范进良等^[48]研究了顺丁橡胶(BR)/CR并用胶的透声性能,当BR/CR并用比为30/70时,在温度为0~40℃下并用胶的 E' 稳定、耐寒性能较好,同时在

6~26 kHz频段内并用胶的 T 均值为0.98,大于CR胶料。刘娜等^[49]制备了NR/CR并用比为30/70的透声橡胶材料,材料的 T 均值为0.90以上,同时材料与金属粘合性能较好;通过调配硫化体系,材料具有较好的低温硫化特性。

PU不仅可以在室温下成型,还可以通过改变分子软硬段比例和接枝等方式来控制其分子链结构,进而改变其阻尼性能。除此之外,PU中含有强极性与高化学活性的异氰酸根和氨基甲酸酯基,可以与大多数基材间实现良好粘接。因此PU常用于包覆换能器的水声透声材料。Z. H. LI等^[50]以二甲硫基甲苯二胺为扩链剂,经羟基氟硅油(FSO)、聚己内酯二醇和甲苯二异氰酸酯反应合成了含氟硅链段的聚氨酯(FSPU)。FSPU表现出优异的耐水性能和声学性能,当FSO的质量分数为50%时,与PU复合材料相比,FSPU复合材料的吸水率降低,与水的阻抗匹配较好;在 ω 为600和1 000 kHz下,FSPU复合材料的 I 分别为129.2和267.3 dB,均比PU复合材料降低了约20%。王哲等^[51]制备了混炼型PU透声复合材料并研究了其水密性能,采用促进剂PZ的复合材料在6~20 kHz频段内的 T 均值为0.75,且水密性能优异。李珺杰等^[52]分别研究了共聚酯型和一步法合成的端羟基聚丁二烯(HTPB)型PU改性的商用PU复合材料(EN-7)的透声性能,结果表明随着共聚酯PU预聚体含量的增大,复合材料的 Z 增大,其与海水的阻抗匹配变差,反射增强;而采用HTPB型PU改性复合材料的透声性能比共聚酯型PU改性复合材料优异,相应的 I 降低了40%。

橡胶材料虽然具有良好的透声性能,但由于强度和刚度低,不能单独用来制造舰艇声呐导流罩。为了解决上述问题,将橡胶材料与其他材料组合,可得到力学性能满足要求、透声性能优异的组合结构材料。美国AN/SQS-53声呐导流罩采用钢丝增强橡胶材料,即在橡胶材料中放置钢丝以提高材料的强度,且对材料透声性能影响很小^[53]。李科技等^[54]利用传递矩阵法建立了平板夹芯组合结构声学模型,并研究了其透声性能,其中设计的钛板夹心橡胶层结构材料是由钛板提供强度并提升材料整体的透声性能。结果表明:当 ω 相

同时,钛板越薄,材料的 T 越大, Z 与海水越接近,透声性能越优异;当声波入射角度增大时材料的 T 减小,当声波入射角度为 60° 时材料的 T 为0.98。

朱伟杰等^[55]设计了一种橡胶层-微穿孔钢板-橡胶层的3层夹芯结构材料(如图7所示),并研究了钢板的孔隙率 f 和厚度对材料透声性能的影响,其中 $f=\pi r^2/P^2$ (r 为微穿孔的半径, P 为周期长度)。结果表明:随着 f 的减小,水和钢板的 Z 更加接近,透声性能变好;钢板的厚度不会对材料的透声性能产生明显的影响。董云龙等^[56]从声波的传播理论出发,推导出夹层结构材料的 T ,并进行了验证,该夹层材料的上下层为碳纤维层,中间层为橡胶层,在夹层结构总厚度不变的情况下,橡胶层厚度占比越大,材料的透声性能越好。杨洁等^[57]对导流罩透声窗的结构强度进行仿真计算,根据计算结果,采用增强结构橡胶材料制备了不同曲率的透声窗。结果表明,在5~25 kHz频段内,材料的 T 均大于0.8,而 I 小于2 dB。

4 反声橡胶材料

反声材料是指声波入射到表层上能无损耗或较少损耗反射出去的材料,其作用是将外界声波

全部反射回去,保证材料内部完全不受外界声波的干扰。

4.1 反声材料的特点

反声材料通常满足以下两个特点:(1)材料与介质的 Z 不匹配,且失配程度要大;(2)材料的纵波衰减系数较小,使声波最大程度地被反射。

材料的反声性能通常采用 R 表示,平面波从介质 I 垂直入射到介质 II 的表面上时, R 可以用式(12)^[12]计算:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (12)$$

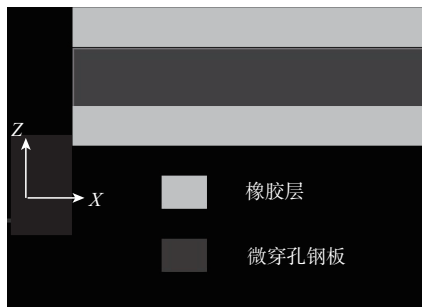
式中, Z_1 和 Z_2 分别为介质 I 和介质 II 的 Z 。

水声反声材料主要用于声呐反射罩以及声呐换能基阵的反射声障板上,它可以消除非探测方向来的假目标信号的干扰,同时隔离装备体自身噪声^[58]。

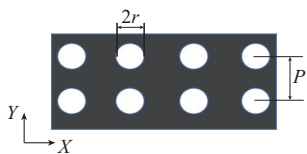
4.2 反声橡胶材料的研究现状

反声橡胶材料主要为带有通道结构的材料,这种材料以内置一定形状的空气层或空心通道来将材料的体积形变转化为剪切形变,从而减小 Z ,使材料与水的阻抗失配,以增强材料对声波的反射。陈磊等^[59]设计了一种包覆不锈钢管的CR反声材料,利用钢管中的空气进行反射,结果表明该材料在2~20 kHz频段内的 R 为0.85以上,这是一种有效的反声材料。张德志^[58]研究了一种具有圆柱形通道的SBR反声材料,通过配方调整,控制材料的动态剪切模量,使其横波 c 较小,并为之设计圆柱形通道来提高反声性能。结果表明,当 f 适当时,在2~10 kHz频段内材料的 R 均大于0.8。朱晓君等^[60]制备了NBR闭孔发泡反声障板,其 R 大于0.9,即障板具有优异的反声性能而质量又较小,是一种理想的反声材料。

杨洁等^[61]通过仿真计算了由圆柱形通道和橡胶材料组成的反声障板的反声性能。仿真结果表明,随着 ω 的增大,障板的 R 先逐渐增大后趋于平稳。在理论计算的基础上,设计了2层复合反声障板以对仿真结果进行验证,并研究了障板在高压下的反声性能。结果表明:在2~10 kHz频段内,障板的 R 随着 ω 的增大先增大后趋于平稳,这与理论计算结果趋势一致,但由于仿真计算未将橡胶材料的粘弹性参数引入计算式,故障板的理论与



(a) 三层夹芯结构



(b) 微穿孔钢板结构

图7 橡胶层-微穿孔钢板-橡胶层的3层夹芯结构材料示意

Fig. 7 Schematic of three-layer sandwich structure materials of rubber layer-micro perforated steel-rubber layer

实际 R 存在一定差异;随着水压的增大,障板的 R 降低,但障板的 R 始终大于0.9。

5 结语

水声橡胶材料的应用始于20世纪,经过不断地研究和发展,吸声橡胶材料、透声橡胶材料和反声橡胶材料的应用逐步推广,且随着水声探测技术的发展,对其提出了更高要求。目前,水声橡胶材料的应用仍存在诸多问题。

(1) 现有的吸声橡胶材料的吸声频段较窄,同时随着低频声呐技术的发展,要求吸声橡胶材料具有优异的低频吸声能力和宽的吸收频段。随着水压力的增大,吸声橡胶材料的自由体积减小,吸声性能下降,需要开发耐压的吸声橡胶材料。对于声波耗散机理的研究还需要深入,应从声波耗散的机理出发,有针对性的设计吸声橡胶材料。对于无机填料在橡胶基体中的分散状态与橡胶材料吸声性能之间的关系还需更深入的探索。声学超材料的出现,为宽频吸声橡胶材料的开发提供了新的思路,但声学超材料在结构设计、生产和应用方面都面临挑战。

(2) 透声橡胶材料主要应用于舰艇的声呐导流罩和换能器包覆层,应用环境严苛,这要求透声橡胶材料在具备优异透声性能、耐腐蚀性能和防污性能的同时,还要具备一定的水密性能。

(3) 反声橡胶材料内部多含有空气层,而反声橡胶材料的工作环境为高静水压,其内部结构变形会使反声性能下降,故可以通过设计耐压结构来提高反声橡胶材料的反声性能。

参考文献:

- [1] FU Y F, KABIR I I, YEOH G H, et al. A review on polymer-based materials for underwater sound absorption[J]. *Polymer Testing*, 2021, 96: 107115.
- [2] ROLAND C M. Naval applications of elastomers[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2004, 77(3): 542-551.
- [3] QIAN C, LI Y Q. Review on multi-scale structural design of submarine stealth composite[J]. *DEStech Transactions on Engineer and Technology Research*, 2017. DOI: 10.12783/dtetr/icaenm2017/7834.
- [4] JUNG K I, YOON S W, SUNG S J, et al. Carbon black effect on the acoustic properties of nitrile butadiene rubber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 94(2): 678-683.
- [5] JUNG K I, YOON S W, CHO K Y, et al. Acoustic properties of nitrile butadiene rubber for underwater applications[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 85(13): 2764-2771.
- [6] GARU P K. Acoustic & mechanical properties of neoprene rubber for encapsulation of underwater transducers[J]. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2012, 1(5): 383-394.
- [7] JAYAKUMARI V G, SHAMSUDEEN R K, RAJESWARI R, et al. Viscoelastic and acoustic characterization of polyurethane-based acoustic absorber panels for underwater applications[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(10): 47165.
- [8] 全国声学标准化技术委员会. 声学水声材料样品插入损失、回声降低和吸声系数的测量方法: GB/T 14369—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [9] 华幼卿, 金日光. 高分子物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [10] 刘乃亮, 齐暑华, 吴波, 等. 水声功能橡胶研究新进展[J]. *材料开发与应用*, 2008, 23(6): 93-98.
- [11] LIU N L, QI S H, WU B, et al. Progress in study on underwater acoustics functional rubber[J]. *Development and Application of Materials*, 2008, 23(6): 93-98.
- [12] 李法华. 功能性橡胶材料及制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [13] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础(第3版)[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [14] SUN W H, YAN X, ZHU X. Dynamic mechanical and underwater acoustic properties of the polyurethane/epoxy resin blend elastomers filled with macroporous poly(vinyl acetate-co-triallyl isocyanurate) resin beads[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 122(4): 2359-2367.
- [15] JARZYNSKI J. Mechanisms of sound attenuation in materials[J]. *Sound and Vibration Damping with Polymers*, 1990, 424: 167-207.
- [16] YUAN B H, JIANG W K, JIANG H, et al. Underwater acoustic properties of graphene nanoplatelet-modified rubber[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(9): 609-616.
- [17] GAO N S, ZHANG Y Y. A low frequency underwater metastructure composed by helix metal and viscoelastic damping rubber[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2019, 25(3): 538-548.
- [18] 徐宁, 徐颖, 丁宇翔. 橡胶材料的吸声特性曲线研究[C]. 2011中国西部声学学术交流会议论文集. 银川: 中国声学学会, 2011: 344-347.
- [19] 郭长明. 高声阻橡胶复合材料及其在水下吸声领域的应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [20] 王清华, 刘宏宇, 李效东, 等. 硅橡胶基涂层材料水下吸声性能的研究[J]. *特种橡胶制品*, 2008, 29(2): 23-25.
- [21] WANG Q H, LIU H Y, LI X D, et al. Study on sound absorption performance of silicone rubber coating material underwater[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2008, 29(2): 23-25.
- [22] 李康, 张维杰, 晏雄. 粉末丁腈橡胶复合材料吸声隔音性能的研究[J]. *天津纺织科技*, 2011(1): 5-7, 12.
- [23] LI K, ZHANG W J, YAN X. Research on sound absorption and sound insulation performance of powdered nitrile rubber

- composites[J]. Tianjin Textile Science & Technology, 2011 (1): 5-7, 12.
- [21] 乔冬平, 魏军光, 王利. 蛭石粉对橡胶吸声件性能影响[J]. 热固性树脂, 2004, 19(6): 22-23.
- QIAO D P, WEI J G, WANG L. Effect of vermiculites on properties of rubber sound-absorption structures[J]. Thermosetting Resin, 2004, 19(6): 22-23.
- [22] 马永亮. 改性空心玻璃微珠在水声吸声材料中的应用研究[J]. 橡塑资源利用, 2017(2): 1-5.
- MA Y L. Application of modified hollow glass microspheres in underwater sound absorbing materials[J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2017(2): 1-5.
- [23] 李伟清. 基于石墨烯复合材料的声学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [24] LI Y, XU F, LIN Z S, et al. Electrically and thermally conductive underwater acoustically absorptive graphene/rubber nanocomposites for multifunctional applications[J]. Nanoscale, 2017, 9(38): 14476-14485.
- [25] 侯永振, 王兵. 橡胶微观结构因素对声障板吸声性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(4): 81-88.
- HOU Y Z, WANG B. Influence of microstructure of rubber on acoustical absorption performances of acoustical baffle[J]. Development and Application of Materials, 2017, 32(4): 81-88.
- [26] ZHANG J C, XUE Z H. Study on under-water sound absorption properties of Eucommia ulmoides gum and its blends[J]. Polymer Bulletin, 2011, 67(3): 511-525.
- [27] CAO R W, DENG L H, FENG Z B, et al. Preparation of natural bio-based Eucommia ulmoides gum/styrene-butadiene rubber composites and the evaluation of their damping and sound absorption properties[J]. Polymer, 2021, 213: 123292.
- [28] 冯译文. 阻抗渐变梯度复合材料设计制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [29] 张文成, 周德华, 吴志东. 敷薄吸声层目标壳体高频吸声性能的改进方法[J]. 电声技术, 2012, 36(5): 78-81.
- ZHANG W C, ZHOU S H, WU Z D. High-frequency absorption performance improvement of target covered with thin absorption materials[J]. Audio Engineering, 2012, 36(5): 78-81.
- [30] 张权, 吴友亮. 一种水下低频吸声尖劈的研制[J]. 声学与电子工程, 2014(1): 38-40, 45.
- ZHANG Q, WU Y L. Development of an underwater low-frequency sound-absorbing wedge[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2014(1): 38-40, 45.
- [31] 王育人, 缪旭弘, 姜恒, 等. 水下吸声机理与吸声材料[J]. 力学进展, 2017, 47(1): 92-121.
- WANG Y R, MIAO X H, JIANG H, et al. Review on underwater sound absorption materials and mechanisms[J]. Advances In Mechanics, 2017, 47(1): 92-121.
- [32] YE C Z, LIU X W, XIN F X, et al. Influence of hole shape on sound absorption of underwater anechoic layers[J]. The Journal of Sound and Vibration, 2018, 426: 54-74.
- [33] IVANSSON S M. Numerical design of Alberich anechoic coatings with superellipsoidal cavities of mixed sizes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(4): 1974-1984.
- [34] IVANSSON S M. Anechoic coatings obtained from two- and three-dimensional monopole resonance diffraction gratings[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(4): 2622-2637.
- [35] 陈竞超, 赵宏刚, 钟杰, 等. 一种单周期柱形空腔的橡胶层吸声机理及优化[C]. 第27届全国振动与噪声应用学术会议论文集. 哈尔滨: 中国振动工程学会, 2016: 358-363.
- [36] ZHAO D, ZHAO H G, YANG H B, et al. Optimization and mechanism of acoustic absorption of alberich coatings on a steel plate in water[J]. Applied Acoustics, 2018, 140: 183-187.
- [37] 陈国锋, 徐肖锋, 汲长远. 吸声圆锥排布对声性能的影响[J]. 声学与电子工程, 2019(2): 44-45, 49.
- CHEN G F, XU X F, JI C Y. Influence of sound absorbing cone arrangement on sound performance[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2019(2): 44-45, 49.
- [38] GAO N S, LU K. An underwater metamaterial for broadband acoustic absorption at low frequency[J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107500.
- [39] SHARMA G S, SKVORTSOV A, MACGILLIVRAY I, et al. Sound absorption by rubber coatings with periodic voids and hard inclusions[J]. Applied Acoustics, 2019, 143: 200-210.
- [40] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [41] SHI K K, JIN G Y, LIU R J, et al. Underwater sound absorption performance of acoustic metamaterials with multilayered locally resonant scatterers[J]. Results in Physics, 2019, 12: 132-142.
- [42] JIN G Y, SHI K K, YE T G, et al. Sound absorption behaviors of metamaterials with periodic multi-resonator and voids in water[J]. Applied Acoustics, 2020, 166: 107351.
- [43] GU Y H, ZHONG H B, BAO B, et al. Experimental investigation of underwater locally multi-resonant metamaterials under high hydrostatic pressure for low frequency sound absorption[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107605.
- [44] 张春园, 孟庆杰, 闻婷婷, 等. 水声透声材料发展概述[J]. 材料导报, 2018, 32(z2): 140-142, 150.
- ZHANG C Y, MENG Q J, WEN T T, et al. Overview of the development of underwater acoustic materials[J]. Materials Review, 2018, 32(z2): 140-142, 150.
- [45] 张海澜. 理论声学(修订版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [46] 黄春龙, 杨秋龙, 杨坤德. 水声透声材料的研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1231-1235.
- HUANG C L, YANG Q L, YANG K D. Research progress in underwater acoustically transparent materials[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1231-1235.
- [47] 陶猛. 隔声覆盖层声学特性的若干问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

- [48] 范进良,赵秀英,谢哈,等. 新型水声透声橡胶材料的制备及性能研究[J]. 橡胶工业,2014,61(3):133-137.
FAN J L, ZHAO X Y, XIE H, et al. Preparation and performance of new underwater acoustic rubber material[J]. China Rubber Industry, 2014, 61(3): 133-137.
- [49] 刘娜,邹华,赵秀英,等. 深海电缆护套用橡胶材料的性能研究[J]. 橡胶工业,2020,67(4):267-271.
LIU N, ZOU H, ZHAO X Y, et al. Study on properties of rubber material for deep sea cable sleeve[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(4): 267-271.
- [50] LI Z H, SHEN Y T, GU X H, et al. A novel underwater acoustically transparent material: Fluorosilicone polyester polyurethane[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(34): 47894.
- [51] 王哲,谢哈,曹亚君. 混炼型聚氨酯透声橡胶低温硫化配方及性能[J]. 特种橡胶制品, 2015, 36(4): 13-16.
WANG Z, XIE H, CAO Y J. Low temperature vulcanizing formula and properties of millable polyurethane underwater acoustic rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 2015, 36(4): 13-16.
- [52] 李珣杰,顾晓红,高远. 水声换能器高频透声橡胶力学及声性能研究[C]. 中国声学学会2017年全国声学学术会议论文集. 哈尔滨: 中国声学学会, 2017: 761-762.
- [53] 费国强,沈文苗. 国外大舰导流罩概述[J]. 声学与电子工程, 2012(2): 1-5.
FEI G Q, SHEN W M. Overview of the dome of foreign ships[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2012(2): 1-5.
- [54] 李科技,陈志坚. 钛板夹芯结构透声窗设计方法[J]. 声学技术, 2010, 29(2): 198-201.
LI K J, CHEN Z J. Design of titanium sandwich sound transmission window[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(2): 198-201.
- [55] 朱伟杰,崔汉国,何世平. 声呐导流罩夹芯结构设计与声学性能[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(3): 131-135.
ZHU W J, CUI H G, HE S P. A sandwich structure design of sonar dome and acoustic performance[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(3): 131-135.
- [56] 董云龙,梅志远. 复合材料夹层板水下透声性能分析[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(z1): 121-125.
DONG Y L, MEI Z Y. Analysis on underwater sound transmission properties of composite sandwich plates[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(z1): 121-125.
- [57] 杨洁,张德志,张振,等. 新型复合结构橡胶透声窗材料[C]. 2020'中国西部声学学术交流会论文集. 酒泉:《声学技术》编辑部, 2020: 298-300.
- [58] 张德志. 橡胶声屏蔽性能的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- [59] 陈磊,马玉璞,林新志. 一种新型水声反声材料的研究[J]. 材料开发与应用, 2004, 19(2): 10-12.
CHEN L, MA Y P, LIN Z X. Study on a new kind of marine acoustic reflecting material[J]. Development and Application of Materials, 2004, 19(2): 10-12.
- [60] 朱晓君,郭万涛. 发泡橡胶反声障板的研制[C]. 船舶、海洋工程材料学术交流会论文集. 洛阳:中国造船工程学会, 2005: 118-119.
- [61] 杨洁,张德志,张振. 水声宽频复合结构声障板技术研究[J]. 声学与电子工程, 2019(3): 28-30, 45.
YANG J, ZHANG D Z, ZHANG Z. Research on the technology of underwater acoustic broadband composite structure acoustic baffle[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2019(3): 28-30, 45.

收稿日期:2022-10-11

Application Progress of Rubber Materials in Underwater Acoustic Field

LIU Qinyang, ZHANG Jiayi, LIU Guoxin, ZHANG Jichuan, LIU Li

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The rubber materials had the characteristics of excellent damping performance, adjustable acoustic impedance, easy formulation adjustment and simple processing, so it had a wide range of applications in the underwater acoustic field. Based on the viscous absorption mechanism, thermal conduction absorption mechanism and molecular relaxation absorption mechanism, it was concluded that the main approaches to improve the sound-absorbing properties of the rubber materials were to design filler-filled or rubber-blended sound-absorbing materials. Moreover, the research progress of the sound-transmitting and sound-reflecting rubber materials was discussed based on the theoretical design and practical applications. Finally, the challenges and future development directions of underwater acoustic rubber materials were pointed out.

Key words: rubber material; underwater acoustic material; sound-absorbing material; sound-transmitting material; sound-reflecting material; acoustic performance