

聚合物基水声材料的研究进展

付思伟¹, 王 琪¹, 苏 琳², 王 欣², 赵秀英^{1*}

(1. 北京化工大学 北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室, 北京 100029; 2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 综述国内外聚合物基水声材料的研究进展。阐述聚合物基吸声材料的吸声机理, 介绍填料类、泡沫类、结构类吸声聚合物的配方设计、结构设计和应用领域; 从吸声机理、配方设计和应用方面, 概述聚合物基透声材料、反声材料、去耦材料的研究现状。指出聚合物基水声材料的发展方向是宽频带、宽温域和耐深水压。

关键词: 聚合物; 水声材料; 吸声材料; 透声材料; 反声材料; 去耦材料; 研究进展

中图分类号: TQ336.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2019)12-0951-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.12.0951



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

水声材料是指在水下设备中使用的声学材料, 主要应用于潜艇、鱼群探测、海底资源勘探和水声测量设备。水声材料通常在水环境的外压作用条件下使用, 应具有足够的强度和刚度以承受外界压力、水流冲击和耐海水腐蚀。水声材料的品种很多, 有橡胶、塑料、木材、金属、陶瓷和粘滞液体等, 主要分为吸声材料、透声材料、反声材料和去耦材料^[1]。

聚合物基水声材料是一种常用的水声材料, 主要涉及橡胶、塑料等。橡胶材料具有优异的物理和化学性能, 选择不同的胶种和配合剂, 可以有效调节其声学性能及其他性能, 广泛应用于水声工程; 塑料质轻, 有一定比强度和结构刚度, 其特性阻抗(材料的密度与声速的乘积)与介质水匹配性好, 常用作声呐透声窗材料。与其他水声材料相比, 聚合物基水声材料凭借其易于发泡和结构改性、易于配方设计和加工成型, 在水声工程中得到广泛的应用^[2]。

1 吸声材料

吸声材料是指在水声工程中能够吸收或耗散声能的材料, 其特性阻抗与介质水匹配, 使声波能

够无反射或者低反射进入橡胶材料中, 并且材料有大的衰减常数, 使声波的振动机械能转换成橡胶大分子链间摩擦热能耗散掉, 从而达到吸声的效果^[3]。聚合物材料密度小, 其特性阻抗一般与介质水匹配, 此外聚合物材料, 特别是橡胶材料, 具有独特的粘弹性, 吸收或消耗声波能力强, 经过多年的发展, 已经成为吸声材料研究的主要方向^[4]。目前最常用的水声吸声材料有丁苯橡胶(SBR)、丁基橡胶(IIR)、氯丁橡胶(CR)、聚氨酯弹性体等^[5]。

吸声材料有3种吸声机理, 分别是18世纪由斯托克斯和克西科夫提出建立的粘滞吸收机理和热传导吸收机理, 以及19世纪基于前两种机理提出的分子弛豫吸收机理^[6]。对于聚合物基吸声材料来说, 主要是粘滞吸收和弛豫吸收。如果聚合物材料带有孔腔结构, 还存在波形转换吸声, 即入射纵波传入具有孔腔结构的粘弹性材料时, 孔腔体积产生形变, 从而产生纵波转换成横波的波形转换^[7]。横波在橡胶材料中的传播速度慢且更容易被消耗, 从而达到吸声作用。

单一聚合物材料通常难以同时兼顾特性阻抗匹配和良好的声衰减性能这两个条件。例如一般橡胶材料与介质水的特性阻抗相匹配, 但其声衰减性能不佳, 为提高声衰减性能通常将填料加入橡胶材料。声波传入具有孔腔或气泡的材料中可将周围介质的体积压缩形变转变为剪切形变, 存在波形转换吸声, 所以在用单一聚合物制备吸声

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0308701)

作者简介: 付思伟(1996—), 男, 山东济南人, 北京化工大学在读硕士研究生, 主要从事橡胶基阻尼材料的制备、结构与性能研究。

*通信联系人(zhaoxy@mail.buct.edu.cn)

材料时,为提高其吸声性能通常对聚合物进行发泡、设计特殊结构或添加气泡性填料^[8]。下面分3类介绍聚合物基吸声材料:填料类、泡沫类和结构类吸声聚合物。

1.1 填料类吸声聚合物

填料类吸声聚合物主要探究填料形状、种类、用量对聚合物吸声性能的影响,常见的填料有金属粉末、蛭石粉、中空微珠等,其原理是声波传到聚合物与填料界面处产生波形转换,从而达到吸声效果。在聚合物中添加无机填料制备水声材料的方法简单且吸声性能优异,具有较好的应用前景^[3]。

M. K. Hinders等^[9]制备了一种添加微粉的消声涂层,该涂层与介质水的特性阻抗相匹配,保证声波能够无损耗的传入涂层,同时涂层的刚性微粒对传入的声波具有多重散射的作用,从而达到声衰减的效果。R. D. Corsaro等^[10]用含有不同种类和含量填料的通用硅橡胶树脂制备了一系列声学性能不同的橡胶复合材料,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。张海永等^[11]以聚氨酯为涂层基体,研究了石墨作为填料对涂层吸声性能的影响,结果表明,石墨改变了涂层的密度,提高了涂层的吸声因数,水压在3 MPa时,平均吸声因数达0.876。

郭万涛^[12]制备了以轻质碳酸钙、金属粉末和中空微珠作为填料的氯化丁基橡胶(CIIR)吸声材料,试验结果表明,该材料在50~500 kHz宽频范围内吸声性能良好。乔冬平等^[13]研究了蛭石粉用量对橡胶材料吸声件吸声性能的影响,研究发现,当蛭石粉用量为30~40份时,吸声系数比较理想,吸声制件的综合性能最好。赵秀英等^[14]通过在丁腈橡胶(NBR)中添加受阻酚AO-60制备了受阻酚/NBR阻尼材料,该复合材料的损耗因子-温度曲线出现3个损耗峰,第1个峰与纯NBR相当,峰的位置稍微向高温区移动,第2和第3个峰是由AO-60富集区分子间氢键裂解产生的,分别对应着AO-60无定形态和结晶态。由于复合材料内形成了氢键网络,表现出很好的阻尼性能。X. H. Zhang等^[15]在SBR和环氧化天然橡胶(ENR)并用胶中开炼添加三氯化铁(FeCl_3), FeCl_3 与ENR

有更高的亲和性,主要富集于ENR相,从而制备了富含 Fe^{3+} -O络合微区结构的橡胶。SBR,ENR, FeCl_3 三者用量比为80/20/1.5时,复合材料具有强的持续耗散能量的能力。

填料类吸声聚合物材料的制备工艺相对简单,且可以通过调控填料的种类和用量来调节材料的特性阻抗与介质水相匹配,提高吸声聚合物的声衰减性能。结构类吸声聚合物可将填料类吸声聚合物作为基材,两者相辅相成可制备吸声性能优异的水声材料。

1.2 泡沫类吸声聚合物

泡沫类吸声聚合物是一种多孔型吸声材料,具有适用频率较宽、成本低、质量小、工艺简单等优点,而且微孔的引入可改善材料的韧性和耐疲劳性能,延长材料使用寿命^[16]。目前主要有聚乙烯泡沫、聚丙烯泡沫、聚氯乙烯(PVC)泡沫、聚氨酯泡沫和酚醛泡沫等吸声材料。橡胶型泡沫吸声材料具有优异的粘弹吸声性能,橡塑型泡沫吸声材料的研究得到极大发展^[17]。

聚氨酯泡沫材料具有优良的阻尼特性,常用作水下吸声材料。周成飞等^[18]制备了一种开孔率为96%的阻燃聚氨酯泡沫吸声材料,在0.1~5 kHz频率下测得其平均吸声因数为0.51,将聚氨酯泡沫做成狭缝和尖劈结构进一步拓展了吸声频率。钱军民等^[19]对乙丙橡胶(EPR)改性PVC泡沫材料进行了研究,选取相对分子质量适中的EPR,实现了对较低频率声波的吸收,显著改善了PVC泡沫材料的吸声性能。

当频率小于500 Hz时,发泡材料的吸声性能明显下降。毛东兴等^[20]在聚氰胺酯泡沫材料的表面涂膜,使第一共振频率向低频方向移动,从而提高了材料低频吸声性能,研究发现当在聚氰胺酯泡沫表面涂上一层 $250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的薄膜时,其低频吸声性能可以得到明显改善。席莺等^[21]利用无机材料良好的低频吸声性能,制备了PVC-无机物混合发泡吸声材料,其平均吸声因数达到了0.5左右,并研究了吸声性能与材料厚度、容重、无机物含量及粒径分布的关系。

1.3 结构类吸声聚合物

聚合物材料压缩弹性模量比剪切弹性模量大,但剪切损耗更大,单一聚合物材料吸声性能较

差,为提高吸声性能除了添加填料和对聚合物进行发泡外,由于聚合物材料优异的加工性能,还可以将其做成特殊的吸声结构^[8]。通常将吸声结构设计成共振式、渐变式和夹芯式^[22]。

共振式吸声结构材料主要为亥姆霍兹共振结构,其原理是利用入射声波在结构内产生共振,从而耗散大量能量。陈建平^[23]建立了均匀圆柱腔中弹性波的计算模型,并利用该模型建立了复合过渡型声腔结构,研究表明,增大声腔体积、升高温度、增大材料密度均可提高材料的低频吸声性能。传统微穿孔板为圆形或狭缝穿孔,背面不带毛刺,其吸声性能和吸声频带宽度有待进一步提高。吴元军等^[24]对新出现的穿孔为三角形且背面带有毛刺的微穿孔板进行研究,试验结果表明,与圆孔微穿孔板相比较,新型微穿孔板的声阻有了较大幅度的提高,声抗基本保持不变,吸声因数有了显著的提升,吸声频带也得到一定程度的拓宽。

当聚合物材料具有高的声衰减性能时,其特性阻抗一般与介质水不匹配,因此需要设计成多层或渐变结构来减少材料的声波反射并提高其吸声性能。渐变式吸声结构一般为尖劈或圆锥状,其既具有高声衰减性能,又实现材料的特性阻抗与介质水匹配,同时拓展了聚合物的吸声频率。王红梅等^[25]制备了不同配方及结构的CIIR吸声圆锥,确定配方、圆锥结构及排布后,在频率2~80 kHz范围内,测得材料吸声因数达0.99。庞福振等^[26]模拟了尖劈结构对船舶声呐平台水下声学环境的影响,研究表明,尖劈结构可明显改变模拟声呐平台区的板柱组合结构的声场分布,降低板柱组合结构的自噪声,但其抑制效果随考核位置、声波频率、敷设密度的不同而各有变化。

为提高吸声性能,常将聚合物材料制备成特殊的气泡或气孔结构,当应用于水声领域时,聚合物基水声材料的孔腔结构因水压的逐步增大而产生变形,从而导致吸声性能变差,尤其是低频吸声性能急剧下降。为提高聚合物基水声材料的耐压性,实践中用吸声材料作夹心层、透声性能好的纤维增强复合材料作夹层面板,制备成三明治夹心层吸声结构。李浩等^[27]采用多种空心玻璃微珠混合填充环氧树脂和聚氨酯改性环氧树脂合成的高

分子吸声材料(PUEPM)作为芯材,玻璃钢作为表层材料,设计的25 mm厚PUEPM在5~30 kHz频段内平均吸声因数在0.6左右,具有较好的吸声性能;PUEPM相对密度仅为0.8,可大大减小潜艇质量。石勇等^[28]制备了玻璃钢/橡胶夹层复合材料,并探究了厚度、特性阻抗等因素对声学性能的影响,该材料与钢结构相比声隐身性能大大提高。P. H. Mott等^[29]运用有限元分析方法,建立了在静水压下应用的夹芯模型,以玻璃钢为表层,橡胶材料为夹芯,该模型测量挠度和应变在低压下与实际相吻合,但由于未设定缺陷,高压下准确性较差。

2 透声材料

理想的透声材料是声波入射到材料表面,可以完全透过的材料。即材料的特性阻抗与介质水匹配,使声波完全透过材料;且衰减常数相当小,保证材料不吸收声波^[30]。

橡胶材料的特性阻抗与介质水匹配,满足声学性能要求,并且橡胶材料有良好的密封、防水性能,橡胶透声材料广泛应用于船舶水声装备、海底石油勘探、海洋捕捞、深井测地声等探测装置的包覆^[31]。1927年美国古特里奇公司最早以天然橡胶(NR)为基体,利用适当尺寸的玻璃空心微珠以特定填充密度制备了新型复合透声材料,该材料的特性阻抗与海水匹配,并且具有较高的强度,被美国海军采用^[32]。1965年我国开始对透声橡胶材料进行研究,经过50多年的研发,已经制备了NR、CR、IIR、CIIR、聚氨酯橡胶等透声产品。

范进良等^[33]制备了一系列不同并用比的顺丁橡胶(BR)/CR并用胶,研究了BR/CR并用比对胶料透声性能的影响,得到玻璃化温度低,透声性能和水密性能优异,在0~40 °C范围内储能模量稳定的CR/BR并用胶。王超等^[34]制备了一种透声因数高、粘接性能好且温度敏感性低的CR/NR并用胶,研究表明:CR/NR并用比为70/30时,并用胶透声因数超过0.90,且在-40~70 °C范围内取5个参数点,测得的透声因数变化率小于15%;该并用胶与金属材料碳钢、黄铜、铝合金和钛合金粘合性能较好,选取合适的硫化体系,可制备出满足某水声换能器覆盖层需要的密封透声材料。贺鹏^[35]制备

的聚脲透声材料随着水压的增大,透声因数有所提高,特性阻抗与介质水匹配,适合在水下使用,2 mm聚脲材料的平均透声因数达到了0.96。

目前国内常用的透声材料主要有橡胶材料和聚氨酯弹性材料。美国海军研究院与德克萨斯州大学采用氟化环氧树脂为基体材料,研制成功了一种硬质透声塑料,该材料具有足够的刚度,达到了声呐导流罩用材料的技术要求。赵东等^[36]制备了环氧硬质透声塑料和改性丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)透声塑料,相对密度为1.000~1.055 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,声速为1 450~1 520 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,且具有一定的刚性,特性阻抗与海水匹配,为我国水下传声器的选材提供了新途径。

通过调节配方和工艺,可以制备出透声性能优异的液体透声橡胶制品,当其应用于水声换能器时,透声性能优异且不影响换能器的灵敏度和方向性,因此液体透声橡胶同样得到人们的关注。

3 反声材料

反声材料是指声波入射到材料层上能够无损耗地全部反射回去的材料。即材料的特性阻抗与介质水严重失配,且衰减常数极小^[37]。反声材料一般为多孔泡沫材料,这是因为声速在空气中远低于在水或其他液体中,拥有大量空气的材料特性阻抗与介质水严重失配,表现出优良的反声性能。

反声材料常用于声呐设备,如反声障板,一方面可以隔离自身的噪声,提高声呐的信噪比和增益;另一方面可以消除非探测方向来的假目标信号干扰。聚碳酸酯具有优异的耐压性能,自20世纪60年代开始,国内外研究单位对聚碳酸酯反声材料进行了大量研究。聚氨酯阻尼性能优异、软硬段及配方可调、水声性能优异,通过预压缩法制备的发泡聚氨酯能耐300 m深水压力,可用作深潜艇反声障板材料。玉东生^[38]制备的聚氨酯硬质泡沫用于反声障板,在水深不超过300 m、频率为2~20 kHz的范围内,其声压反射因数超过0.8。为了拓宽频段,提高耐压性,俄罗斯采用钛合金板材与聚氨酯泡沫复合制成了高耐压反声障板^[2]。

钟东南等^[39]制备了一种低密度、高压压缩强度

的二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)型聚氨酯泡沫,并对其进行预压缩处理,得到了声压反射因数大于0.88的反声障板芯材。陈磊等^[40]制备了CR和不锈钢管复合硫化水声反声材料,试验结果表明,该材料在常压下、2~20 kHz的频率范围内声压反射因数均在0.85以上,最高达到了0.95。

4 去耦材料

去耦材料是一种特殊的多孔粘弹材料,经常应用于潜艇或水下航行器,以提升其隐身性能。其机理包括两方面:(1)去耦材料与传播介质水的特性阻抗失配,潜艇或航行器产生的振动及声波无法透过材料进入海水;(2)去耦材料具有高的声衰减性,阻尼性能优异,可以消耗大量潜艇或航行器的振动及声波能量。消声瓦侧重于吸声,该材料侧重于隔声、吸声、减振、去耦的综合作用,两者消声机理不同但可互为补充,共同提高潜艇或水下航行器的隐身性能^[41]。

缪旭弘^[42]以大尺度双层圆柱壳体结构为试验模型,通过比较全部敷设与不敷设隔声去耦材料等工况下的声辐射响应,研究双层圆柱壳体结构水下声辐射场特征和隔声去耦材料降噪效果。试验表明,隔声去耦材料能显著降低水下结构的辐射噪声,对200 Hz以上机械激振降噪效果明显,对低频的降噪效果较差。

姚熊亮等^[43]制备了装有隔声去耦材料的双层圆柱壳体结构,并对其进行了振动和声辐射试验,研究发现内外壳全部敷设隔声去耦材料对抑制振动和声辐射最有效,部分敷设隔声去耦材料试验对水下航行器敷设隔声材料的位置选择具有一定的参考价值。对水下非均匀阻尼板与多层介质组成的吸声结构的研究^[44]表明:隔声去耦瓦的隔声降噪性能与孔腔大小密切相关,孔腔大小是影响其声学特性的主要因素之一;随着水深的增大,隔声去耦瓦的低频吸声性能降低,在实际应用中,不可忽略静水压力对瓦体的影响。

王丽坤等^[45]制备了一种敷设去耦材料的三相多基元压电复合材料,基元间的去耦材料隔离了振动传递。试验结果表明,压电复合材料各基元间的频率偏差小于0.76%,声耦合较小,相邻基元的振动衰减94%,该压电复合材料适用于制作宽带

多波束发射换能器。

5 聚合物基水声材料的发展趋势

随着声呐技术的提高,声呐探测的频率向着低频和宽频方向发展,这对潜艇或水下航行器隐身性能提出新的挑战,制备宽吸声频率且低频吸声性能同样优异的水声材料意义重大。为提高隐身性能,潜艇下潜深度越来越大,这对水声材料的耐压性能也提出了新的要求。制备满足宽频带、宽温域和耐深水压的聚合物基水声材料,并进一步降低水声材料的生产成本,规模化水声材料的生产,延长水声材料的使用寿命成为下一步研究重点。

参考文献:

- [1] 徐其昌. 水声材料手册[J]. 应用声学, 1983 (4): 48.
- [2] 周成飞. 聚氨酯水声材料研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2004, 18 (6): 1-4.
- [3] 朱金华, 王源升, 文庆珍, 等. 水声吸声高分子材料的发展及应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 20 (4): 46-50.
- [4] 李永清, 朱锡, 孙卫红, 等. 高分子水声吸声材料的研究进展[J]. 舰船科学技术, 2012, 34 (5): 7-12.
- [5] 石勇, 朱锡, 李永清, 等. 水下目标吸声材料和结构的研究[J]. 声学技术, 2006, 24 (5): 505-512.
- [6] 朱世成, 钟爱升. 橡胶材料和结构在低频耐压吸声上的一些认识与设想[J]. 橡塑资源利用, 2006 (1): 10-18.
- [7] 石云霞, 奚正平, 汤慧萍, 等. 水下吸声材料的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24 (1): 49-52.
- [8] 余超, 熊伟, 文庆珍, 等. 高分子水声吸声材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2011, 39 (5): 103-105.
- [9] Hinder 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.
- [10] Corsaro R D, Klunder J D, Jarzynski J. Filled Rubber Bermaterials System: Application to Echo Absorption in Waterfilled Tanks[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1980, 68 (2): 655-664.
- [11] 张海永, 孟宪林, 闫海鹏, 等. 聚氨酯涂层的合成及其吸声性能研究[J]. 现代涂料与涂装, 2010, 13 (3): 13-14, 18.
- [12] 郭万涛. 高频吸声材料试验研究[A]. 重庆仪器材料研究所, 中国仪器仪表学会仪表材料分会、国家仪表功能材料工程技术研究中心. 第六届中国功能材料及其应用技术学术会议论文集 (10) [C]. 重庆: 重庆仪器材料研究所, 中国仪器仪表学会仪表材料分会、国家仪表功能材料工程技术研究中心, 2007: 3738-3740.
- [13] 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, 18 (6): 22-23.
- [14] 赵秀英, 向平, 张立群. 受阻酚/丁腈橡胶复合材料的结构与性能[J]. 复合材料学报, 2007, 23 (2): 44-49.
- [15] Zhang X H, Liu J, Zhang Z Y, et al. Toughening Elastomers Using Mussel-Inspired Multiphase Design[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2018, 10 (28): 23485-23489.
- [16] 王江, 刘占芳. 包装用泡沫材料的多孔弹性模型[J]. 包装工程, 2008, 28 (3): 27-29, 55.
- [17] 钱军民, 李旭祥. 橡塑型泡沫吸声材料的研究[J]. 功能高分子学报, 2000, 12 (3): 309-311.
- [18] 周成飞, 郭建梅, 翟彤, 等. 聚氨酯泡沫材料吸声频率特性研究[J]. 聚氨酯, 2008, 7 (5): 84-87, 6.
- [19] 钱军民, 李旭祥. EPR改性PVC泡沫材料吸声性能的研究[J]. 橡胶工业, 2001, 48 (8): 463-465.
- [20] 毛东兴, 洪宗辉. 聚氨酯泡沫材料吸声性能及其低频拓展[J]. 噪声与振动控制, 1999, 18 (2): 27-29.
- [21] 席莺, 李旭祥, 方志刚, 等. 聚氯乙烯基混合吸声材料的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2001, 16 (2): 129-132.
- [22] 刘云路, 曾竟成, 杨金水. 橡胶水下吸声材料的研究进展[J]. 橡胶工业, 2016, 63 (8): 506-510.
- [23] 陈建平. 消声瓦声学性能计算方法研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, 26 (4): 123-126.
- [24] 吴元军, 赵晓丹. 一种新型微穿孔板吸声特性研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (10): 118-121.
- [25] 王红梅, 张景亮. 低频吸声圆锥的研究[J]. 橡塑资源利用, 2005 (4): 3-5, 42.
- [26] 庞福振, 姚熊亮, 贾地, 等. 吸声尖劈对板柱组合结构水下声学特性影响的试验研究[J]. 船舶力学, 2011, 15 (5): 570-576.
- [27] 李浩, 梅志远, 朱锡. 轻质夹层复合吸声结构的水声性能实验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30 (4): 51-54.
- [28] 石勇, 朱锡, 毛亮, 等. 玻璃钢/橡胶夹层复合材料弯曲性能计算与实验[J]. 武汉理工大学学报, 2007 (2): 54-57.
- [29] Mott P H, Smallhorn J M, Campbell K W, et al. Comparison of Buckling of an Arched, Rubber-core Sandwich Composite Panel to Finite Element Modeling[J]. Composites Part A—Applied Science and Manufacturing, 2011, 42: 843-848.
- [30] 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 (S2): 140-142, 150.
- [31] 王东升. 橡胶在水声系统中的应用[J]. 橡胶工业, 1996, 43 (8): 494-496.
- [32] 刘素梅. 低透水透声橡胶在水声换能器上的应用[J]. 特种橡胶制品, 1981, 2 (3): 21-26.
- [33] 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.
- [34] 王超, 吴新国, 黄静. 低温度敏感性透声橡胶材料的研制[J]. 特种橡胶制品, 2015, 36 (2): 49-52.
- [35] 贺鹏. 聚脲透声材料的制备及性能[J]. 中国涂料, 2015, 30 (8): 57-60.
- [36] 赵东, 王小红, 宋安元. 水下硬质透声塑料的研制[J]. 塑料工业, 1994, 25 (6): 6-8.
- [37] 张文毓. 舰船用水声材料的发展和应用[J]. 舰船科学技术, 2004, 26 (4): 63-68.

- [38] 玉东生. 低阻抗耐压反声障板的研制[J]. 特种橡胶制品, 1989, 10(2): 21-25.
- [39] 钟东南, 石晓, 乔冬平, 等. 水声耐压反声材料的研制[J]. 热固性树脂, 2004, 18(1): 20-22.
- [40] 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(2): 10-12.
- [41] 缪旭弘, 王仁乾, 顾磊, 等. 去耦隔声层性能数值分析[J]. 船舶力学, 2005, 9(5): 125-131.
- [42] 缪旭弘. 敷设去耦材料的双壳结构水下振动声辐射试验初步分析[A]. 中国造船工程学会船舶力学学术委员会. 第十一届船舶水下噪声学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国造船工程学会船舶力学学术委员会、中国船舶科学研究中心《船舶力学》编辑部, 2007: 4.
- [43] 姚熊亮, 张阿漫, 钱德进, 等. 去耦瓦敷设方式对双层壳声振动的影响[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(2): 33-37.
- [44] 姚熊亮, 刘文贺, 刘庆杰, 等. 水深与腔型对隔声去耦瓦吸声系数的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 27(6): 605-610.
- [45] 王丽坤, 董天晓, 秦雷, 等. 多基元压电复合材料的制备及性能[J]. 压电与声光, 2010, 32(3): 433-436.

收稿日期: 2019-08-01

Research Progress on Polymer-based Underwater Acoustic Materials

FU Siwei¹, WANG Qi¹, SU Lin², WANG Xin², ZHAO Xiuying¹

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. China Shipbuilding Industry Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: The research progress of polymer-based underwater acoustic materials at home and abroad was summarized. The sound absorption mechanism of polymer-based sound absorbing materials was introduced, and the formulation, structure design and application fields of fillers, foams and structural sound absorbing polymers were highlighted. From the aspects of sound absorption mechanism, formulation design and application, the research status of polymer-based sound-permeable materials, anti-sound materials and decoupling materials were reviewed. Finally, the development trend of polymer-based underwater acoustic materials with wideband, wide-temperature range and high hydraulic pressure resistance was explored.

Key words: polymer; underwater acoustic material; sound absorbing material; sound-permeable material; anti-sound material; decoupling material; research progress

大陆推出“智能”建筑轮胎生产线 美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com) 2019年9月30日报道如下。

大陆轮胎美洲有限公司发布了其第1条全系列建筑轮胎, 这些面向北美市场的轮胎带有工厂内置的传感器, 用于监控轮胎的充气压力和温度。

该系列轮胎包括Conti HSC 3转向/全轮位轮胎(见图1)、Conti HDC 3驱动轮胎和Conti HAC 3全轮位轮胎。

新系列“智能”轮胎和翻新轮胎专为公路/越野应用而设计, 应用范围包括建筑、水泥、多用途、应急、林业和伐木车辆。

“第3代”轮胎旨在延长行驶里程, 提高耐久性、牵引力和可翻新性, 而这些性能是在公路/越野领域实现最低总驾驶成本的关键方面。



图1 大陆Conti HSC 3转向/全轮位轮胎

大陆公司载重轮胎技术总监Marco Rabe表示, 传感器技术使大陆公司、轮胎经销商和客户可以跟踪轮胎的性能, 通过轮胎捕获的监视数据最终降低总驾驶成本。

(吴淑华摘译 吴秀兰校)