

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.07.025

聚氨酯水声吸声材料及吸声机理研究进展

李校辉,邢素丽,杨金水,梁威,尹昌平

(国防科技大学空天科学学院,长沙 410073)

摘要:对声波损耗机理及聚氨酯(PUR)水声吸声材料的吸声机理进行了分析,综述了PUR水声吸声材料体系和声学结构设计的研究进展和应用,其中重点介绍了传统PUR水声吸声材料、微粒增强PUR水声吸声材料、发泡PUR水声吸声材料、空腔共振式吸声结构、阻抗渐变式吸声结构和耐压式吸声结构,最后指出了目前PUR水声吸声材料存在的不足并展望了其在未来的发展趋势。

关键词:聚氨酯;吸声机理;水下吸声;改性增强;声学结构

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)07-0127-06

Research Progress on Polyurethane Underwater Acoustic Absorption Materials and Acoustic Absorption Mechanism

Li Xiaohui, Xing Suli, Yang Jinshui, Liang Wei, Yin Changping

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract : The mechanism of sound wave loss and the acoustic absorption mechanism of polyurethane underwater sound-absorbing materials were analyzed. The research progress and application of polyurethane underwater sound-absorbing material system and acoustic structure design were summarized. The traditional polyurethane underwater sound-absorbing material, particle-enhanced polyurethane underwater sound-absorbing material, foaming polyurethane underwater sound-absorbing material, air cavity-resonance sound-absorbing structure, impedance-graded sound-absorbing structure and pressure-resistance sound-absorbing structure were mainly introduced. Finally, the problems and development directions of polyurethane underwater sound-absorbing material were pointed and summarized.

Keywords : polyurethane ; acoustic absorption mechanism ; underwater acoustic absorption ; modified reinforcement ; acoustic structure

水声吸声材料是一种可以吸收或者损耗声能的材料。为达到其声学目的,需要关注两个条件:一是传播介质水和材料的声特性阻抗要匹配;二是材料本身要有较大的阻尼,这样才能使入射到材料中的声波损耗进而达到吸声的目的^[1]。具有黏弹性的高分子材料常被用作水声吸声材料。在实际应用方面,聚氨酯(PUR)材料由于具有阻尼性能高、低渗水吸水性、泊松比接近0.5、可浇筑成型和室温固化^[2]等特点被广泛用于水声吸声材料,尤其北约国家应用较多。软段(主要指多元醇)和硬段(主要指异氰酸酯与扩链剂)构成了PUR分子链,其间有着大量的物理和化学交联。通过改变软硬段比例、共聚、接枝等方法可改变PUR材料的微观结

构,从而有效提升PUR材料的水声吸声性能。研究表明,材料的体系和结构是影响声学性能的主要因素^[3]。笔者综述了PUR水声吸声材料的吸声机理、材料体系及吸声结构设计在近年来的研究进展,并且展望了PUR水声吸声材料在未来的发展趋势。

1 PUR水声材料吸声机理

PUR水声材料是通过不断地损耗声波从而达到吸声的目的。要研究材料的吸声机理,首先要了解声波的本质及声波损耗机理。

1.1 声波本质及损耗机理

声波是一种机械波,是在介质(固体、液体和气体等弹

基金项目: 国防科技项目基金(3101013)

通讯作者: 邢素丽,教授,硕士生导师,主要从事树脂基复合材料技术研究 E-mail: happy_xing@nudt.edu.cn

收稿日期: 2018-05-05

引用格式: 李校辉,邢素丽,杨金水,等. 聚氨酯水声吸声材料及吸声机理研究进展[J]. 工程塑料应用,2018,46(7):127-132.

Li Xiaohui, Xing Suli, Yang Jinshui, et al. Research progress on polyurethane underwater acoustic absorption materials and acoustic absorption mechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):127-132.

性介质)中传播的质点运动、压力、应力等的一种或多种变化^[4]。声波的传播实际是声压的传播,本质是能量在介质中的传播。

声波在传播过程中的耗损本质是能量的转换及耗散。主要有三种损耗方式:

①粘滞吸收。主要发生在相邻介质中,是不可逆的。质点的运动状态由于受到声波的影响会产生速度梯度。质点之间由于速度梯度而不断地相互作用,使声能不断地转化为热能而损耗。

②热传导吸收。由于质点在介质中分布的不均匀性,导致介质之间存在温度梯度,从而使相邻介质间产生热交换。声能随着机械能的耗损而逐渐地转化成热能。

③分子弛豫吸收。由于介质中质点振动和声波传播周期并非同步进行,两者相位相差了数个周期,从而导致声能的损耗。

其中,前两种分别由斯托克斯和克西科夫^[5]在18世纪提出,在此基础上,19世纪又出现了分子弛豫吸收损耗理论。这三种机理基本揭示了声波的能量耗损现象。

1.2 PUR 水声材料的吸声损耗机理

PUR 材料的吸声机理是建立在声波损耗基础上的。其吸声机理主要为黏弹性阻尼吸声机理^[6]。

PUR 属于高分子材料,具有黏弹性^[7]。当其处在应力作用下时,分子链间会产生内摩擦作用,且分子链本身会发生扭曲变形^[8]。这使得 PUR 材料的力学响应依赖于时间。虽然应力和应变都是周期性变化,但应变的变化落后于应力的变化。

高分子材料阻尼性能产生的原因为:由于分子链间的扭曲和滑移在应力变化周期内无法恢复完全,这易导致材料产生永久性变形而耗损能量,同时有部分做功以热能耗散。阻尼大小则取决于滞后现象、储存模量及损耗模量、合成工艺、填料等^[9]。

PUR 主链主要由硬段和软段构成,容易发生微相分离,因此有良好的阻尼性能^[10]。声波传递到材料表面上时,相当于压缩作用,即相当于给 PUR 材料施加外力。根据上述阻尼机理,外力一旦作用于 PUR 材料上,便会引起材料应变的变化落后于应力的变化现象,从而产生内摩擦,并发生能量转化,声能因此转化为热能。这就是 PUR 材料的阻尼吸声机理。

1.3 吸声性能表征方法

衡量材料吸声性能的参数有吸声系数和降噪系数,而前者是常用的考核指标。当声波到达材料界面时,除反射部分外,其余声波进入材料内部。入射到材料内部的声波,一部分透过材料继续传播,一部分被吸收,一部分被发射。吸

声系数的计算按式(1)。

$$\alpha = \frac{E_A}{E_o} = \frac{E_o - E_R}{E_o} \quad (1)$$

其中: α 为吸声系数; E_A 为吸收声能; E_o 为入射声能; E_R 为发射声能。

吸声材料的吸声系数一般高于0.2;而高效吸声材料的吸声系数则要求大于0.56^[11]。

2 PUR 水声吸声材料体系

PUR 分子主链可以根据不同的声学需求进行软硬段的设计,且 PUR 类材料粘结性能优异,易于与填料相混合和发泡。通过以上方式,可以改变材料的物理和声学性能,从而生产出符合声学性能要求的 PUR 水声吸声材料。

2.1 传统 PUR 水声吸声材料

传统的 PUR 水声吸声材料一般指 PUR 弹性体,其吸声机理主要是粘弹性阻尼吸声机理。

通过改变 PUR 分子链中软段硬段比例、共聚、接枝等^[12-14]方法可以调节主链长短、交联度及支链数量,进而提高材料的声损耗性能,最终得到具有优秀吸声性能的 PUR 材料。

PUR 弹性体的硬段包括异氰酸酯和扩链剂,软段则由多元醇构成。其中,硬段区域由于含有大量的氨基甲酸酯等极性基团和氢键而具有较大的分子间作用力,使得材料有较好的力学强度;软段部分则提供了较好的高弹性和低温性能^[15-16]。两者之间的结合及相容程度影响着 PUR 弹性体的微相分离程度^[17]。微相分离产生的主要原因是由于软硬段在热力学上不相容,软硬段各自分散聚集产生独立的区域,拥有各自的玻璃化转变温度。软段微区将硬段微区包覆在其中,后者可交联整个分子链体系,这利于增强 PUR 弹性体的阻尼性能^[18]。

PUR 弹性体的微相分离程度会影响其阻尼吸声性能,而影响微相分离的主要因素有硬段及其含量、氢键等。

弹性体的模量主要由硬段决定。一般用扩链剂和二异氰酸酯的质量分数表明硬段含量。通过逐步增加硬段的含量, PUR 可以逐渐由橡胶变为高模量的硬质塑料。在聚酯类 PUR 体系中,硬段含量的增加会导致硬段微区结晶度提高,微相分离程度增加。从热力学角度考虑,微相分离程度的增加亦会得益于硬段长度的增加。此外,硬段的含量还影响着氢键化程度,进而影响微相分离。对于聚酯类 PUR,硬段含量的逐步增加,会导致氨基甲酸酯基中的一NH与软段中的一O—氢键化程度下降,而—NH与—C=O的氢键化程度却逐步提高,软硬段的相容性变差,导致微相分离程度增加。另外, PUR 嵌段的长度、极性、软段分子量及其分布、填料也影响着 PUR 微相分离的程度^[19-21]。

为了合成符合一定声学性能要求的 PUR 水声吸声材料,就必须筛选出相应的原料和工艺条件。

李浩等^[22]从阻尼吸声机理入手,研究了适合产生微相分离的硬段和软段原料。常用的异氰酸酯包括甲苯二异氰酸酯(TDI)、六亚甲基二异氰酸酯(HDI)、4,4'-二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)等。TDI 和 MDI 都含有苯环,与软段反应之后分子刚性更大;TDI 和 MDI 相比,前者对损耗因子峰值影响较大,因此较多选用。二醇类或二胺类扩链剂是常用的扩链剂。扩链剂的引入,可以调节材料的阻尼损耗因子及阻尼适用温域。二胺类扩链剂与异氰酸酯可构成含脲基的刚性链段,脲基的内聚能较大,容易形成塑料微区,从而易于发生微相分离。常用的二胺类扩链剂一般是 3,3'-二氯-4,4'-二氨基二苯基甲烷(MOCA)。软段主要由聚酯多元醇或聚醚多元醇构成。多元醇分子链越柔顺,微相分离越容易发生,吸声效果越好。聚酯类和聚醚类相比,后者在耐水解性、生产成本、链柔性^[23]等方面更胜一筹,因此常用聚醚类多元醇。常见的聚醚多元醇有聚环氧丙烷二醇(PPG)、聚己二酸乙二醇(PEAG)、聚乙二醇(PEG)等。

李浩等^[24]还探讨了 PUR 弹性体的固化工艺参数。软段采用 PPG,硬段选择 TDI 和 MOCA,采用预聚体法合成 PUR 弹性体。实验表明,在声频率 0~25 000 Hz 的范围内,随着固化温度的增高,吸声材料的吸声性能得到提升。固化温度为 25℃时,平均吸声系数在整个声频段内低于 0.6,而当固化温度升至 110℃时,平均吸声系数则超过了 0.6。在声频率 4 000~6 000 Hz 和 13 000 Hz~25 000 Hz 的范围内,平均吸声系数甚至到达了 0.9。

2.2 改性 PUR 水声吸声材料

为了进一步提高 PUR 水声吸声材料的声学性能,拓宽其吸声途径,研究者对 PUR 弹性体进行了增强改性处理。目前常采用的方式为微粒增强和发泡。微粒及气泡空腔可看作散射体,利用其与声波的相互作用实现对声波的损耗。声波在基体中传播时,遇到粒子结构(或气泡结构)时会产生散射作用,发生波形转换,使纵波转换为剪切波,后者的波形会更加容易地被吸收到黏弹性材料中。添加填料后,复合 PUR 弹性体中的温度梯度和声速梯度可以达到极大值,即热传导和粘滞性吸声性能增加^[25]。

(1) 微粒增强 PUR 水声吸声材料。

由于添加少量的微粒即可大幅度改进材料的声学特性,因此微粒增强 PUR 材料得到大量研究。常见的微粒种类有无机或者有机物粒子、玻璃微球、中空小球、金属粉末等。

微粒增强体的粒径分布从纳米级到毫米级。在 PUR 材料中填充不同粒径的微粒,会得到不同吸声效果的 PUR 水

声吸声材料。

王清华^[26]研究了不同粒径微粒增强 PUR 弹性体对吸声性能的影响。采用微米级的球形填料 TiO₂、ZrO₂ 及 Al₂O₃ 和毫米级的空心陶瓷填料对 PUR 弹性体进行声学改性。结果表明,填料的粒径越小,其样品的吸声性能越好,平均吸声系数可达到 0.6 以上。且微米级的填料比毫米级的填料吸声效果好。原因是粒径越小,材料界面面积越大,导致声波衰减多,吸声系数高。

为改善 PUR 材料在静水压下的吸声性能,添加硬质微粒结构,不仅可提高 PUR 材料的吸声性能,也会提高材料的抗压强度。

空心玻璃微珠具有轻质、耐水解、抗压性能强等优点^[27]。宋新月^[28]在 PUR 材料中加入了空心玻璃微珠。当玻璃微珠含量低于 15% 时,随着含量的增加,材料吸声系数逐渐增加,最高平均吸声系数可达到 0.89。含量达到 20% 时,材料吸声系数下降,下降的原因可能是空心玻璃微珠发生了团聚。李浩等^[29]将空心玻璃微珠 KH700 加入到 PUR 弹性体中,发现通过添加不同含量的空心玻璃微珠,可以使得材料的特征吸声峰频率改变。PUR 弹性体中含有一定的空心玻璃微珠可以使其低频声学性能得到提高。

云母是一种呈片状结构的无机填料,模量较高。在 PUR 材料中加入云母,可以使其阻尼性能和力学性能都有增强。李浩^[30]等采用 TDI, PPG, MOCA 合成了 PUR 弹性体。加入云母填料改善了材料的低声吸声性能。其平均吸声系数在 0.6 以上。

此外,蔡俊等^[31]将聚苯乙烯球分散于 PUR 基体中,发现此种增强材料在静水压下仍可以维持较好的吸声性能。

根据吸声机理,声能一般在材料内部转化为热能而损耗。添加具有优良导热性能的微粒,可以加快热量的传导,更有利于提高声学性能。

碳纳米管拥有极其优异的力学性能、导热性能和导电性能^[32]。R. Verdejo 等^[33]的工作表明,混有少量碳纳米管的 PUR 材料可以显著提升其声学性能,并且还可以提升其强度质量比。而相对于纯 PUR 材料,加入 0.1% 含量碳纳米管的复合材料可以使得吸声系数从 0.7 提高到 0.9。另外,王清华^[26]研究了片状石墨增强 PUR 弹性体的吸声性能。结果表明,增强后材料的吸声性能表现出与球形填料相反的特性,即尺寸越大,吸声性能越好。可能的原因是石墨导热系数较高,能及时将声能转化成的热能传递给外部环境。

(2) 发泡 PUR 水声吸声材料。

通过发泡技术,可以使 PUR 材料内部拥有大量的气泡。具有泡孔的 PUR 不仅可以通过自身的阻尼损耗声波能量,还可以利用波形转换吸声机理、多孔材料吸声机理的方式

吸收声能。但目前关于 PUR 泡沫材料的研究大多集中在空气介质中,对于水下的研究比较少。

王清华^[26]制备了密度为 1.46 g/cm^3 的 PUR 弹性体。经发泡后,试样的密度变为 1.28 g/cm^3 (发泡率 12.3%) 和 1.10 g/cm^3 (发泡率 25.3%),其试样中气泡空腔大多数是封闭的,近似球形。吸声测试结果显示,未经发泡的试样吸声系数为 0.45,12.3% 的发泡率使得吸声系数增加了 0.09,25.3% 的发泡率使得吸声系数增加了 0.05。这种球形封闭式发泡结构,对于增强 PUR 基体吸声性能不是很理想。蔡贝克^[34]采用水作为发泡剂制备了 PUR 泡沫。通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察,这种 PUR 泡沫材料中的泡孔是连相互通的。在 $5000 \sim 10000 \text{ kHz}$ 的频率范围中,吸声系数大于 0.6。宋新月^[28]主要选取 TDI, PEG2000, TEA 反应合成了 PUR 微孔弹性体,采用水作为发泡剂。SEM 显示,试样中的泡孔呈现两种状态,既有相互连通状态,又存在封闭式泡孔状态。在 $2000 \sim 18000 \text{ Hz}$ 频率范围内,平均吸声系数在 0.6 左右。通过发泡制备的 PUR 材料,不仅通过高分子阻尼耗散机理吸声,亦利用了多孔材料的吸声方式,因此提高了吸声性能。

目前,气体发泡法仍然是 PUR 声学材料发泡普遍采用的方法。气体发泡法操作简单,成本较低,技术相对成熟,但产生的气孔无规律性,可控性不高。较为先进的发泡技术如静电纺丝法和快速成型法^[35],可通过程序调控设计不同参数进而获得需要的孔径,但操作较为复杂。未来可以结合先进发泡技术,对 PUR 材料进行发泡设计以获得更加优异的吸声性能。

在 PUR 基体中分散填料或发泡,会改变材料的特性阻抗,增大材料对入射声波的反射。为保证 PUR 材料与水的阻抗匹配,进一步增强材料对声波的损耗,有必要对材料进行声学结构设计^[29]。

3 声学结构设计

3.1 空腔共振式吸声结构

声学空腔的主要作用是使 PUR 材料在较低的频率下发生共振。空腔的制备,使得 PUR 材料的吸声方式从本征黏弹性吸收拓展到空腔谐振、波形转换等,大大提高了吸声效率。空腔的种类主要包括圆柱形、球形、圆锥形及喇叭形。

共振空腔源于二战中德国人发明的 Alberich 型覆盖层,其基本构型是将周期性分布的圆柱形空腔嵌入在高阻尼黏弹性材料中。G. Gaunard^[36]研究表明,假设短圆柱形空腔的直径远大于高度,则圆柱形空腔的共振主要是径向共振,材料的吸声性能高。然而,实际上大多数空腔的高度是大于直径的,因此此种理论不适用于实际应用。20 世纪 80 年代后期,有限元方法开始应用于消声覆盖层的理论计算^[37]。圆

柱形空腔的缺点是,共振吸声频率较窄,无法满足宽频吸声的要求。

渐变空腔是一种空腔半径随着材料厚度增加而增加的声学结构空腔。这种设计的原理在于,一是使水和材料的特性阻抗保持一致,减少声波在界面处的反射;二是倾斜的界面使得声波不断发生反射或散射,增加了传播路径。

声学空腔进一步改善了吸声材料低频吸声效果。但由于空腔的存在,材料强度大大降低,不能承受静水压力。对于大潜深的潜艇来说,此类吸声材料会由于水压而变形,共振和反共振频率移向高频位置,低频吸声性能变差。

3.2 阻抗渐变式吸声结构

阻抗渐变式吸声结构是一种把 PUR 材料构成具有一定梯度的复合结构。声波的损耗随着厚度的增加越来越大。采用阻抗渐变式吸声结构的 PUR 材料,其吸声机理主要是黏弹性阻尼吸声机理,这与均质的 PUR 材料的吸声机理一致。对于阻抗渐变式吸声材料,在高频时,为减少反射系数可以采用阻抗匹配的方式;在低频时采用调整各层材料厚度的方式,可较好地解决由于各界面反射波的干涉而产生反射系数的峰值问题^[38]。

对于阻抗渐变式吸声材料,一般采用传递矩阵法进行理论研究^[39]。这种方法基于分层介质系统,将材料近似为二维模型,通过获取每层介质的几何参数和动力学性能,构建相应的传递矩阵模型,进而求出材料的投射系数和反射系数。朱金华等^[40]建立了分层 PUR 材料对水声吸收的数学模型,发现实验测试结果和应用数学模型的计算结果吻合情况较好。这表明此数学模型在一定程度上可反映 PUR 材料的水声吸声特性。

阻抗渐变式吸声结构成型工艺简单,通过声学结构优化设计,可获得吸声性能优异的复合吸声材料。但其吸声机理相对单一,在低频范围内需要较大尺寸的材料吸收声能,因此有一定的应用局限性。

3.3 耐压式吸声结构

随着静水压的增大, PUR 水声吸声材料的吸声性能会逐渐变差。这是由于 PUR 水声吸声材料的吸声机理以黏弹性阻尼吸声机理为主, PUR 分子链之间需要足够的自由运动空间,而随着 PUR 水声吸声材料承受的压力增大,自由运动空间被逐渐压缩,导致吸声性能大幅度下降。为了解决水压对 PUR 水声吸声材料吸声性能的影响, PUR 材料包覆刚性骨架复合材料应用而生。

姜恒等^[41-43]提出了基于互穿网络结构的金属/等复合水下吸声材料,称为声子玻璃。这种材料采用金属骨架作为抗压结构,极大地提升了材料的抗压强度。除了在声子玻璃中覆盖等吸声材料外,研究者还在其中构建各种类局域共振

结构单元,这大大拓宽了材料的吸声途径。声子玻璃具有黏弹性阻尼吸声、共振吸声、界面损耗等吸声机理。多种吸声机理的结合,使得声子玻璃在静水压下仍保持了较高的吸声性能。在从常压到 2.0 MPa 静水压的压力范围内,声子玻璃的吸声系数维持在 0.7 以上。在抗压性能方面,声子玻璃承受 6.0 MPa 应力时,其应变只有 10%。声子玻璃水下吸声材料的出现,为未来新型水声吸声材料研究开辟了新思路。

4 结语

PUR 材料的吸声机理是建立在声波损耗基础之上的。传统的 PUR 水声吸声材料属于纯 PUR 高分子材料,吸声机理主要是黏弹性阻尼吸声机理。为了进一步增强材料的吸声性能,对纯 PUR 高分子材料进行改性处理,在材料中分散微粒或进行发泡。这种复合型 PUR 材料的吸声机理不仅有 PUR 基体的黏弹性阻尼吸声机理,还包括波形转换吸声机理等。为了更好地满足 PUR 材料与声阻抗匹配,进一步增强材料对声波的损耗,声学结构设计应用而生。由于综合了多种吸声机理,因此具有声学结构的 PUR 水声吸声材料的声学性能更为优异。PUR 水声吸声材料目前面临着在低频宽带、静水压下吸声效果差的关键技术问题。通过结合各种吸声机理、优化设计声学结构、借鉴声学超材料,合成制备具有阻抗匹配、静水压及低频下声学性能优异的 PUR 水声吸声材料是未来的研究方向。

参考文献

- [1] 王轩,等. 高分子材料科学与工程,2017(12):36-41.
Wang Xuan, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2017(12):36-41.
- [2] Oceans 2003. Celebrating the past ...teaming toward the future (IEEE Cat.No.03CH37492)[C]// Oceans. IEEE, 2003.
- [3] 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.
Guo Changming. Study on high acoustic damping rubber composites and its application in underwater sound absorption[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [4] 马大猷. 现代声学理论基础 [M]. 北京:科学出版社,2004.
Ma Dayou. Modern acoustic theory[M]. Beijing:Science Press, 2004.
- [5] 杜华太,等. 特种橡胶制品,2013(6):78-81.
Du Huatai, et al. Special Purpose Rubber Products, 2013(6):78-81.
- [6] 时志刚. 声学及电子工程,2011(4):1-3.
Shi Zhigang. Acoustics and Electronics Engineering, 2011(4):1-3.
- [7] 李永清,等. 舰船科学技术,2012,34(5):7-12.
Li Yongqing, et al. Ship Science and Technology, 2012, 34(5):7-12.
- [8] 邓安仲,等. 材料导报,2017,31(5):165-171.
Deng Anzhong, et al. Materials Review, 2017, 31(5):165-171.
- [9] 杨玉华. 聚氨酯工业,2017,32(2):1-4.
Yang Yuhua. Polyurethane Industry, 2017, 32(2):1-4.
- [10] 赵春娥,等. 聚氨酯工业,2017,32(2):5-7.
Zhao Chune, et al. Polyurethane Industry, 2017, 32(2):5-7.
- [11] 孟晗,等. 中国科学:物理学力学天文学,2014(6):599-609.
Meng Han, et al. Chinese Science:Physics Mechanics Astronomy, 2014(6):599-609.
- [12] 冯建东,等. 表面技术,2017,46(10):9-14.
Feng Jiandong, et al. Surface Technology, 2017, 46(10):9-14.
- [13] 刘立洁,等. 聚氨酯工业,2017,32(5):63-65.
Liu Lijie, et al. Polyurethane Industry, 2017, 32(5):63-65.
- [14] 尹志红. 有机硅材料,2018(1):77-80.
Yin Zhihong. Silicone Material, 2018(1):77-80.
- [15] 张成彬,等. 塑料,2017(1):39-42.
Zhang Chengbin, et al. Plastics, 2017(1):39-42.
- [16] 赵廷午. 聚氨酯工业,2017,32(4):16-19.
Zhao Yanwu. Polyurethane Industry, 2017, 32(4):16-19.
- [17] Erekkath S, et al. Materials Today Communications, 2018(16):71-80.
- [18] 山西省化工研究所. 聚氨酯弹性体手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2012.
Shanxi Institute of Chemical Industry. Polyurethane Elastomer manual[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2012.
- [19] 刘娜,等. 聚氨酯工业,2015(2):15-19.
Liu Na, et al. Polyurethane Industry, 2015(2):15-19.
- [20] 任仰省,等. 广州化工,2017,45(5):19-22.
Ren Yangxing, et al. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(5):19-22.
- [21] 余翔,等. 高分子材料科学与工程,2013,29(7):101-105.
Yu Xiang, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(7):101-105.
- [22] 李浩,等. 舰船科学技术,2010,32(3):89-93.
Li Hao, et al. Ship Science and Technology, 2010, 32(3):89-93.
- [23] 傅明源,等. 聚氨酯弹性体及其应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2006.
Fu Mingyuan, et al. Polyurethane elastomers and applications[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2006.
- [24] 李浩,等. 塑料,2010,39(1):30-33.
Li Hao, et al. Plastics, 2010, 39(1):30-33.
- [25] Agounad S, et al. Journal of Sound & Vibration, 2018, 412:148-165.
- [26] 王清华. 高分子水声吸声材料的基础研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2009.
Wang Qinghua. Basic research on polymer acoustic sound absorbing materials[D]. Changsha:National University of Defense

- Technology, 2009.
- [27] 黄赤,等. 复合材料学报, 2016, 33(8):1630-1637.
Huang Chi, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8):1630-1637.
- [28] 宋新月. 水下吸声聚氨酯材料制备及其吸声性能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Song Xinyue. Study on preparation and sound absorption properties of underwater sound-absorbing polyurethane materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [29] 李浩,等. 材料科学与工程学报, 2009, 27(6):865-869.
Li Hao, et al. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(6):865-869.
- [30] 李浩,等. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(7):26-30.
Li Hao, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(7):26-30.
- [31] 蔡俊,等. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(4):215-218.
Cai Jun, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2007, 23(4):215-218.
- [32] Coleman J N, et al. Carbon, 2006, 44(9):1624-1652.
- [33] Verdejo R, et al. Composites Science and Technology, 2009, 69(10):1564-1569.
- [34] 蔡贝克. 聚氨酯发泡材料的制备及吸声结构优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Cai Beike. Preparation of polyurethane foam material and optimization of sound absorption structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [35] 李帅,等. 化学推进剂与高分子材料, 2018(1):34-39.
Li Shuai, et al. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2018(1):34-39.
- [36] Gaunard G. Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(2):298-307.
- [37] Hennion A C, et al. Application of the finite element method to analyze the scattering of a plane acoustic wave from doubly periodic structures[M]. Springer US, 1991.
- [38] 王育人,等. 力学进展, 2017, 47:92-121.
Wang Yuren, et al. Advances in Mechanics, 2017, 47:92-121.
- [39] Bustillo J, et al. Ndt & E International, 2014, 62(2):93-98.
- [40] 朱金华,等. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(2):34-38.
Zhu Jinhua, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2001, 17(2):34-38.
- [41] Jiang H, et al. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(2):694.
- [42] Jiang H, et al. Applied Physics Letters, 2009, 95(10):1734.
- [43] Jiang H, et al. Chinese Physics B, 2010, 19(2):367-372.

帝斯曼为汽车行业带来柔性增压热进气管新标准

活跃于健康、营养和材料领域的全球科学公司荷兰皇家帝斯曼集团,其耐高温材料家族又添新成员——Arnitel® HT TPC 热塑性弹性体,将耐高温 TPC 的长期工作温度提升至 175℃,峰值温度提升至 190℃。帝斯曼利用 Arnitel® HT TPC 材料方案,实现生产工艺一步成型,不仅极大地提高了生产效率,还可将生产成本减少约 50%,减重达 40%。同时,大幅降低了发动机运行中热增压管变形、泄漏和脱开的风险,为汽车行业带来柔性增压热进气管新标准。

如今,汽车行业为了实现更高的能效,对发动机系统的要求也日渐苛刻,尤其是对增压进气管的耐温性、耐压性和稳定性提出了新的挑战。现行增压热进气管的制造工艺多采用三节组装结构,即用金属接头将橡胶配件与工程塑料(或金属)配件进行组装,不仅生产工艺繁杂、生产成本低,还存在易变形、易泄漏、易脱开等风险,使用寿命也难以保证。作为领先的创新材料解决方案供应商,帝斯曼通过长期与汽车厂商的紧密合作,并依托研发和技术团队的专业材料经验和结构设计经验,帮助汽车行业打造出极具创新性的一体式柔性热增压管。

热增压管需要长时间承受高温环境,其两端分别连接的发动机和中冷器(固定在汽车底盘上)在汽车行驶过程中会

不断产生相对运动,并且还要考虑热增压管的易安装性,因此,要求应用的材料兼具较高的耐温性和柔韧性。以橡胶和工程塑料为材质的三节式结构虽然可满足上述要求,但由于橡胶的性能相对较差,需要较大的壁厚才能满足热增压空气管的要求,因而组件质量较大。此外,热固性橡胶无法回收利用,因此大大降低了组件的环境友好性。

然而,普通的热塑性弹性体显然无法满足热增压管对材料耐温性的苛刻要求。作为 Diablo 耐高温技术的发明者,帝斯曼凭借其在空气进气系统材料领域超过 25 年的专业经验,成功发明了 Arnitel® HT TPC 耐高温热塑性弹性体,重新定义了热塑性弹性体的耐温标准,将耐热级 TPC 的长期工作温度从 150℃提升至 175℃。同时,Arnitel® HT TPC 的热老化性能也得到大幅改进,并具有卓越的高温耐油性。不仅如此,Arnitel® HT TPC 是一种热塑性材料,因此在组件报废后其材料还可回收再利用。

帝斯曼的技术人员还帮助客户对涡轮增压器出气口的消音结构进行改进,从而避免由于采用 TPC 材料而带来额外的辐射噪音,充分考虑了乘客的舒适性要求。

在增压冷管方面,帝斯曼可提供 Akulon® PA6 和普通级别的 Arnitel® 材料方案,通过吹塑和注塑工艺,实现增压冷管以塑代钢的转换。(汽材网)