



## 新型聚氨酯材料及其在舰船中的应用

鲍海阁<sup>a</sup> 王宇飞<sup>b</sup> 郇彦<sup>c</sup> 刘佳<sup>c</sup> 王杰<sup>c\*</sup> 杨小牛<sup>c\*</sup>

(<sup>a</sup>海军驻长春地区军事代表室 长春 130033; <sup>b</sup>上海海军装备研究院 上海 200235;

<sup>c</sup>中国科学院长春应用化学研究所 长春 130022)

**摘要** 综合评述了聚氨酯材料的特点,概括总结了聚氨酯高力学强度、低蠕变、宽温域模量稳定、阻尼可调等性能特点,介绍了聚氨酯材料在舰船中的使用概况,重点评述了聚氨酯在隔振器、消声瓦、水润滑轴承以及舰船防污涂料中的应用,并对其应用前景进行了展望。

**关键词** 聚氨酯, 阻尼, 减振, 隔振器, 水润滑轴承

中图分类号: O631

文献标识码: A

文章编号: 1000-0518(2013)10-1099-08

DOI: 10.3724/SP.J.1095.2013.30333

高分子材料以其优异的性能已经成为舰船上广泛应用的一种材料,各国纷纷投入大量的人力和物力开发新型高性能高分子材料。橡胶作为一种常规高分子材料已广泛应用于舰船,但是橡胶材料尚存在很多缺点,各国研发人员从未间断开发更适用于舰船的弹性体高分子材料。美国海军于1998年开展了舰船用高性能聚氨酯隔振器的研究工作<sup>[1]</sup>,英国W & J Tod公司也进行了阻尼聚氨酯材料的深入研究,并公布了最新研制的聚氨酯消声瓦的照片<sup>[2]</sup>。利用聚氨酯的高承载性和耐磨性特点,加拿大赛龙公司<sup>[3]</sup>和中国科学院长春应用化学研究所<sup>[4]</sup>制备了一系列基于聚氨酯的水润滑轴承产品。国内外大量的研究表明,聚氨酯是一种舰船用高性能高分子材料。结合本文作者工作,本文总结了聚氨酯材料典型的特点,并给出了其在舰船领域应用的最新进展。

### 1 聚氨酯材料的结构特点

聚氨酯是由硬段和软段组成的弹性体高分子材料,其硬段相主要是由异氰酸酯和小分子醇或者胺组成的极性很强的结晶型分子链组成的链段,在聚氨酯体相中主要以微晶的分散相存在,在材料中主要起物理交联点的作用,对材料的刚性、强度、耐高温等性能贡献极为突出。组成聚氨酯的软段相主要是由柔性的聚醚型或聚酯型高分子醇组成的,其相对分子质量一般在1000~3000,在聚氨酯体相中主要以连续相存在,主要决定材料的弹性和柔韧性,聚氨酯材料的硬、软相相互作用,使聚氨酯材料同时具备高分子材料的刚性和韧性。聚氨酯材料之所以能够在减振器中应用也离不开聚氨酯分子结构的特点,聚氨酯的阻尼减振的作用就是聚氨酯弹性体分子结构和微相结构共同作用产生的结果。

聚氨酯的微观结构形态决定了材料的性能。材料的微观形态的影响因素很多,主要包括组成聚氨酯的分子链构成、相对分子质量大小及分布、分子间相互作用力以及在退火处理后聚氨酯材料的亚显微结构,即聚氨酯体相材料中,硬段相和软段相及中间过渡相的大小及分布。在聚氨酯材料的分子链构成方面<sup>[5]</sup>,相对分子质量大小及分布、分子间相互作用力<sup>[6]</sup>是聚氨酯材料性能的主要影响因素。在材料设计和合成初期就要考虑的主要因素-分子链结构和分布确定以后,通过后期的热退火等后处理也能够影响材料的性能,但是只能在原有的基础上进一步优化材料的性能<sup>[7]</sup>。

2013-07-03 收稿,2013-09-02 修回

吉林省科技发展计划项目(20126002)

通讯联系人:王杰,副研究员; Tel:0431-85262416; Fax:0431-85262403; E-mail:jiawang@ciac.ac.cn; 研究方向:高分子物理

共同通讯联系人:杨小牛,研究员; Tel/Fax:0431-85262838; E-mail:xnyang@ciac.jl.cn; 研究方向:高分子物理

## 2 聚氨酯材料的静态力学性能

### 2.1 较高的力学强度

聚氨酯弹性体的力学性能主要取决于它的分子链结构、微相分离和硬软相之间的作用力,是聚氨酯材料力学性能的重要指标之一。聚氨酯中的软段赋予了其弹性,而硬段则起着物理交联点和增强的作用。聚氨酯的微相分离程度越高,越有利于材料力学性能的发挥。聚氨酯弹性体的实际拉伸强度随着微相分离的增加而升高,微相分离完全的材料与不发生微相分离的材料相比,二者的拉伸强度相差甚至可达5~10倍。李立民等<sup>[7]</sup>对材料进行了热退火处理,可以优化材料的微相结构,聚氨酯的力学强度达到52 MPa(见表1)。聚氨酯的拉伸强度远大于橡胶的拉伸强度,这是聚氨酯能够取代橡胶的重要原因。

表1 热处理对聚氨酯力学性能的影响<sup>[7]</sup>

Table 1 Heat treatment on mechanical properties of polyurethane<sup>[7]</sup>

	Tensile strength/MPa	Maximum elongation/%	Permanent deformation rate/%
Before heat treatment	38.4	498	50
After heat treatment	52.3	725	39

### 2.2 聚氨酯材料的模量可调性

聚氨酯材料的硬度可以通过分子链设计的方式使其硬度在邵式A10到邵式D80之间任意调节,这包含了橡胶材料的硬度范围和部分塑料的硬度范围。尤其难能可贵的是,即使在90A以上的条件下其仍具有良好的回弹性能和扯断伸长率,而传统橡胶材料需要大量填充或过度交联才可以制备出90A以上的材料,但高度填充或过度交联同时带来了材料弹性的损失。因此,橡胶材料很难制备出高承载材料,而聚氨酯材料则完全可以弥补这一不足,为设计人员提供更广阔的设计空间,使舰船中狭小空间内布置高性能隔振器成为可能。中船重工711所的吴恒亮等<sup>[8]</sup>利用聚氨酯高硬度下弹性维持特点,成功开发出了承载力可达300 kN的大载荷隔振器,赵传奇等<sup>[9]</sup>的测试证实了聚氨酯材料的承载能力优于橡胶材料。

### 2.3 聚氨酯材料的低蠕变性能

为减小设备振动噪声向舱外传播,舰船内的很多动力设备底座均需要安装隔振器。隔振器材料的蠕变特性是一个非常重要的技术指标,如果隔振器发生蠕变,安装于船舶动力装置下方的隔振器蠕变将会影响轴系对中,进而引起附加振动;而安装于船舶辅机隔振器的蠕变会给相邻的挠性连接件增添应力<sup>[10]</sup>。隔振器的蠕变性能由其基体材料的蠕变性能所决定。目前,舰船隔振器使用的材料主要以天然橡胶和丁腈橡胶为主,使用过程中发现此类材料的耐蠕变性能差,影响设备的正常运转精度。为此,中国科学院长春应用化学研究所杨小牛研究小组<sup>[5]</sup>利用聚氨酯分子结构可设计的特点,用刚性的对苯二异氰酸酯(NDI)取代传统的二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)作为硬段相,并辅以后续的微相调控手段,开发出一种低蠕变的聚氨酯弹性体,并将其与现役的橡胶材料进行了对比。由图1可以看出,在相同的测试条件下经过特殊设计,聚氨酯材料蠕变性迅速稳定,而橡胶材料即使经过2000 min仍没有达到平衡,蠕变还呈现继续增加的趋势,在试验测试时间内聚氨酯的蠕变指数为1%,远远低于橡胶材料的7%。

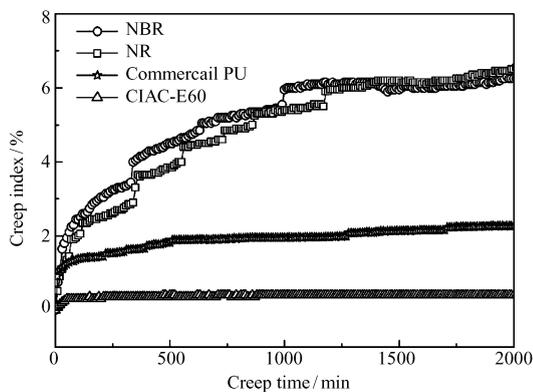


图1 聚氨酯材料与橡胶材料蠕变性能对比<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Creep performance of polyurethane and rubber materials<sup>[5]</sup>

### 3 聚氨酯的动态力学性能

#### 3.1 聚氨酯材料的宽温域模量稳定性

无论是舰艇用隔/减振材料还是吸声材料,均要求所用材料的模量对环境温度变化不敏感,以保证其固有频率和声阻抗不随温度发生变化,其隔振作用和吸声性能不受影响。因此,对于聚氨酯材料来说,需要具有宽的温度模量平台区,以满足隔振器或吸声的宽温域使用要求。本文作者发现(未发表),与天然橡胶等传统材料相比(图 2),商品化的聚氨酯材料在高温区模量对温度变化依赖性不强,呈现平台区,但在低温区,由于软段结晶行为的影响,模量随温度变化急剧上升。因此,聚氨酯材料的制备难点在于材料低温条件下宽模量平台区(低温柔顺性)的实现。聚氨酯的低温柔顺性主要由分子链的软段控制,要想在低温区构建出宽的模量平台区,首先,所使用的多元醇必须具有较低的玻璃化转变温度<sup>[11]</sup>;其次,软段在低温下不能存在结晶行为。高性能的商用聚氨酯一般以 PTMEG 作为软段,该材料的玻璃化温度为  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,理论上应该具有很好的低温柔顺性,但其在低温存在很强的结晶行为,致使模量温度平台区出现在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  之后。为解决这一问题,研究人员<sup>[12]</sup>将带有侧甲基新戊二醇与 PTMEG 进行嵌段抑制其结晶行为,从而提高了其低温柔顺性。除了多元醇分子结构外,微相分离尺度是影响低温柔顺性的另外一个重要因素,聚氨酯微观形态的典型特点为微相分离结构。硬段相和软段相的微相分离尺寸越完善,其在低温下力学行为越接近于多元醇本体行为,从而具有更好的耐低温性能。研究软段相对分子质量对聚氨酯的低温柔顺性的影响,结果表明,在相同硬段含量的情况下,软段相对分子质量越大,材料的玻璃化温度越低,低温柔顺性越好<sup>[13]</sup>。本文作者(未发表)采用分子结构设计和微相分离尺度调控多种手段可以实现在  $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  宽温域模量稳定性聚氨酯材料的制备,其材料的性能远远优于天然橡胶材料和商品化聚氨酯材料(CIAC-E60)。

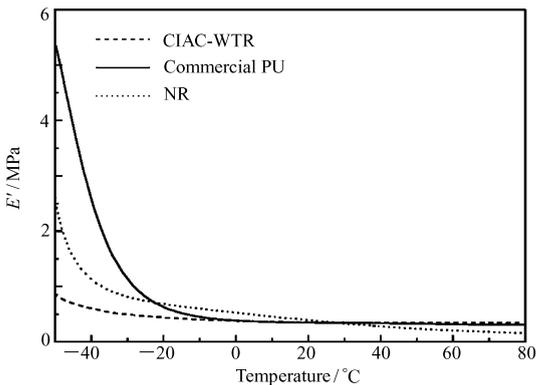


图 2 聚氨酯和天然橡胶动态模量随温度变化曲线(未发表)

Fig. 2 Dynamic modulus curves of polyurethane and natural rubber(unpublished data)

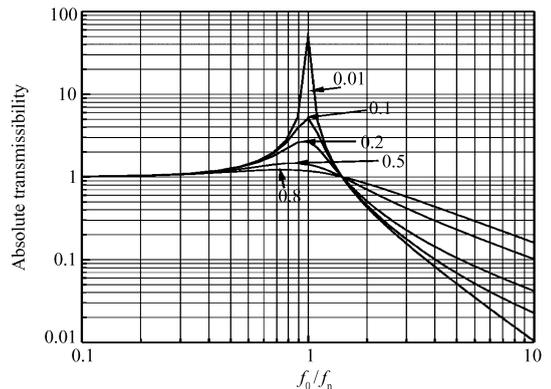


图 3 振动传递率与阻尼比和工作频率关系图<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Relationship of vibration transmissibility frequency and damping ratio<sup>[14]</sup>

#### 3.2 聚氨酯材料的阻尼可调节性

阻尼是减振降噪材料的重要性能指标,当用作隔振材料时,材料的阻尼性能直接关系到隔振器的隔振效率。从图 3 振动传递率曲线<sup>[14]</sup>可以看出,当阻尼比增加时,材料在共振频率附近的振动传递率增大,但在远离共振传递频率的隔振区,振动传递率迅速降低。一般隔振器件的设计均使器件的固有频率低于其工作频率的 2 倍以上,因此需要材料具有较小的阻尼,以保证最小振动传递率,从而实现最佳的隔振效果。对于吸声材料则恰恰相反,需要材料在工作频率或温度范围内具有最大的阻尼,以实现声波的最大损耗。聚氨酯分子结构的可设计性,为材料的阻尼调控提供了极大的便利。低阻尼聚氨酯材料的设计思路和宽温域模量稳定性存在必然的相互联系,即通过调控软段多元醇分子的化学结构、软硬相微相分离尺度以及软硬端比例,可使材料的阻尼峰远离工作温域或频域,从而可制备低阻尼材料。

对于用作吸声材料的聚氨酯,除了增加交联密度,采用具有支链结构的扩链剂<sup>[15]</sup>,降低微相分离尺

度、增加软硬段互溶性等分子设计手段外,还可以采用高阻尼的无机填料,如玻璃纤维<sup>[16]</sup>、二氧化硅<sup>[17]</sup>、片状云母和石墨<sup>[18-19]</sup>等材料来实现。采用与聚氨酯相容性差的另一种高分子材料和合成过程进行强迫互容,可以形成互穿网络结构<sup>[20-22]</sup>。秦川丽等<sup>[23]</sup>以环氧丙烯酸酯和甲基丙烯酸丁酯(二者质量比为 2:1)混合物为乙烯基酯树脂(VER),1,4-丁二醇为扩链剂,采用“同步互穿”工艺,室温下与聚氨酯(PU)预聚物固化,制备了低温至室温区阻尼温域近 70 °C、损耗因子大于 0.4 的 PU/VER 互穿聚合物网络(IPN)。需要特别指出的是 IPN 材料强迫互容特性是产生较好阻尼性能的重要原因之一,但这种特性同时也减弱了聚氨酯的微相分离尺度,而这种相分离正是聚氨酯材料具有较高力学性能的结构基础,工程上为了提高阻尼而降低其他方面的性能,如拉伸强度等,是不可取的。因此,在保证阻尼性能的同时,如何兼顾力学强度及动态疲劳性能是互穿网络聚氨酯材料设计制造需要克服的一个难题<sup>[24]</sup>。

### 3.3 聚氨酯材料的耐环境性能

由于舰船一直在海洋的恶劣环境下工作,因此对聚氨酯材料的耐海洋环境性能有特殊的要求。其必须具有良好的耐盐雾、耐湿热、耐臭氧、耐辐射和耐老化等性能。一般来说,聚醚类聚氨酯具有良好的耐水性,但其耐氧化、力学性能相对较差;聚酯类聚氨酯耐油、耐氧化性能好,但耐水性能差。为将二者性能进行综合,近年来开发出聚碳酸酯型聚氨酯,依赖碳酸酯键的强极性作用,在保持聚酯类材料优异的力学和耐氧化、耐油性能的同时,还具有和聚醚型聚氨酯相当的耐水解性能,因而特别适合于舰船工作的苛刻环境。表 2 给出了本文作者(未发表)以聚碳酸酯为基材研制的 CIAC-E60 聚氨酯弹性体与丁腈橡胶在不同的试验条件下的性能对比,表中数据表明,CIAC-E60 的耐水解性能优于丁腈橡胶,耐油和耐臭氧老化略低于丁腈橡胶。

表 2 聚氨酯材料与丁腈橡胶的耐环境性能对比(未发表)

Table 2 Environmental resistance of polyurethane and nitrile rubber(unpublished data)

Test conditions	Variation of tensile strength/%		Modulus change rate/%	
	PU	NBR	PU	NBR
ASTM3# Oil(70 °C, 168 h)	6.1	0.7	-3.8	-11.2
Ozone aging(200 pphm,40 °C, 168 h)	-2.9	-0.7	12.3	-10.7
Seawater(50 °C, 7 d)	-2.9	-8.2	-3.9	-14.7
Salt aging(35 °C, 168 h)	-1.7	-4.8	-4.1	-14
Alternating heat aging <sup>!</sup> [(30 ± 5) °C × 95%, (60 ± 5) °C × 95%], 7 d	-4.2	-6.8	-8.8	-18.6

## 4 聚氨酯材料在舰船上的应用

我国海军舰船装备经过 40 多年的建设,已拥有由潜艇、舰艇、快艇、扫雷舰艇及各种辅助舰船等组成的具有一定作战能力的海上战斗力量。近年来,随着科技的进步,各国纷纷将高科技技术应用于舰船上,使海军装备水平不断提高。因此,在现代战争中谁的隐身水平越高谁就将掌握战争的主动权。舰船本身存在着诸多振源,而且在航行过程中会被激发而产生强烈的振动,从而产生较大的噪声。采用减振降噪技术降低舰艇噪声可以提高舰艇的隐蔽性,提高攻防能力。聚氨酯材料的优异的动静力学性能和良好的耐环境性能,决定了聚氨酯材料能够在减振隔振领域中应用。国际上已经开发了大量的舰船用聚氨酯材料,主要应用于减少舰船内设备振动和维持稳定性的隔振器产品以及智能磁流变弹性体产品,舰艇用减少主被动探测和抑制艇体噪声传播的消声瓦产品以及推进系统的耐磨低噪声水润滑轴承产品。

### 4.1 舰船用聚氨酯隔振器

为克服橡胶隔振器的隔振性能低、承载范围窄的问题,美国海军于 1998 年开展了以聚氨酯为基体的高性能隔振器研究工作<sup>[1]</sup>,分别完成了隔振器的设计、试验验证和实海试验,形成了 60 多个系列的产品,额定承载能力从 0.5b(0.23 kg)到 10000b(4536)。国内很多单位相继开展了聚氨酯隔振器的研究<sup>[25-27]</sup>。

目前,很多研究只单一针对聚氨酯隔振器进行,橡胶隔振器的系统对比试验报道较少。为此,本文作者(未发表)将开发的 CIAC-E60 弹性体材料制备成舰艇常用的 BE220 型号隔振器,并与现役的橡胶

BE220 和普通商品化聚氨酯制备的 BE220 隔振器进行了系统的对比,在相同工况条件下,研究器件的阻尼比、振动频率、振幅以及动态疲劳对隔振器的动态刚度的影响。研究表明(未发表),即使用普通商品化聚氨酯制备出的隔振器性能也优于目前使用的橡胶材料,且 CIAC-E60 材料性能更是大幅领先,主要体现在以下两个方面:

#### 1) 隔振效果好

聚氨酯隔振器具有较小的滞后回环面积,意味着其阻尼比小,由振动传递率曲线可以看出,在远离共振频段时的隔振效果好。

#### 2) 工况适应性强

无论是振动频率、振幅还是疲劳次数对聚氨酯隔振器动刚度的影响均小于橡胶隔振器,这意味着隔振器固有频率随工况的变化小,适合于复杂工况工作,这对于舰船用隔振器来说是一个非常重要的性能,可以随时适用舰船的复杂工况。

聚氨酯隔振器的隔振性能只有在工作频率远离其固有频率时才能得到体现,当工作频率小于共振频率的 $\sqrt{2}$ 倍时,由于共振放大作用,聚氨酯隔振效果反而不如橡胶隔振器。如能设计出一种阻尼可变的聚氨酯智能材料则可解决这一矛盾,从而扩展聚氨酯隔振器的使用范围。磁流变弹性体是有希望的这类材料,即通过外加磁场强度的改变,实现对聚氨酯阻尼调控。聚氨酯的优异的力学性能和浇注成型的工艺操作,特别适合作为磁流变弹性体的基体材料。对于聚氨酯磁流变弹性体的制备,关注点在材料的刚度调控,对于阻尼调节的研究相对较少。为验证这一思想的可行性,笔者等(未发表)做了一些原理性试验,以 CIAC-E40 为基体材料,羰基铁粉作为磁性粒子制备出磁流变弹性体样件,测试其磁流变效应,发现在 0.3 T 的磁场作用下,器件的阻尼比由 0.18 变为 0.51,增加了近 3 倍,说明该思路是可行的。

### 4.2 聚氨酯在消声瓦上的应用

消声瓦是敷设于潜艇表面的一层带有声学结构的高分子材料,它既可以吸收敌方主动声纳发出的探测声波,又可抑制艇体噪声向外传播,减少被被动声纳探测到的概率。消声瓦的应用是提高潜艇隐身性能、提高其战斗力和生存能力的最有效措施之一。

传统的消声瓦主要用橡胶材料制造<sup>[28]</sup>,由于产品厚度较大,在实际使用中易发生脱落。为解决这一问题英国海军开发出了浇注型聚氨酯材料<sup>[29]</sup>,摒弃了原来橡胶材料需要先预制成消声瓦再通过粘合剂在实艇敷设的施工工艺。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。METDO 公司通过实验室研究证实,聚氨酯材料如配方合适,精心选择合适的软硬区段,就有可能配制出从软质凝胶状材料到硬质塑料和韧性弹性体具有不同物理性能的材料,再辅以短链增强树脂、有机无机填料或空心微球等,可进一步改进材料的物理和声学性能,进而直接采用实艇现场浇注成型技术。采用聚氨酯材料替代橡胶作为消声瓦的基体材料已成为英、美舰船用消声瓦材料的发展主流趋势,采用 30 ~ 40 mm 聚氨酯发泡材料加多孔材料制成的吸声涂料,吸声率可达 70% ~ 90%。此外,美国还在积极开展了自控系统边界层控制方面的研究,类似于前苏联的蒙皮技术,也是采用聚氨酯材料<sup>[30]</sup>。与国外相比,国内消声瓦用聚氨酯材料研究较晚,急需针对其进行深入研究<sup>[30]</sup>。

### 4.3 聚氨酯在水润滑轴承上的应用

舰船的螺旋桨轴承目前基本采用水润滑轴承,大多数水润滑轴承由橡胶材料制备。橡胶材料具有良好的水润滑性能,但也存在着低速鸣音、承载力差等缺点,其低速鸣音主要由于材料本身的粘滑效应引起,提高材料模量可大幅降低其产生概率,同时提高了轴承的承载能力,可以将轴承设计的更短。聚氨酯材料恰恰符合这一要求,利用聚氨酯的高承载性和耐磨性特点,加拿大赛龙公司制备了一系列聚氨酯水润滑轴承产品<sup>[31]</sup>,使用效果良好。中国科学院长春应用化学研究所研究人员<sup>[4]</sup>也开展了相关研究,采用溶胶-凝胶法制备了有机-无机杂化的聚氨酯复合材料 PUI。由于硅氧网络的引入,使得该材料的热稳定性大大提高,而且 PUI 具有合适的硬度和极低的水润滑摩擦系数,可满足水润滑轴承产品对材料低摩擦、高承载、易加工的要求,为研发长寿命、高比压水润滑轴承提供了优良的高分子复合材料。Watanabe<sup>[32]</sup>采用聚碳酸酯多元醇为软段,氧化改性聚乙烯蜡为润滑剂,制备出了一种具有优异耐水解性能、可长期工作并具有自润滑性能的聚氨酯水润滑轴承,该轴承可作为舰船的桨轴承或舵轴承使用。

加拿大汤姆戈登公司采用硬度在邵氏 D60 以上聚氨酯为轴承材料,开发出一种具有优异耐磨性能的水润滑轴承。与橡胶轴承相比,该轴承具有工作寿命长、低摩擦系数、易更换等优点,目前已在舰船上获得广泛的应用<sup>[33]</sup>。

#### 4.4 聚氨酯在抑制舰船体上生物附着中的应用

舰船工作在海洋环境中,表面极易引起海洋生物吸附。海洋生物附着在船体表面,不仅会使舰船摩擦阻力增大,增加燃油消耗,而且会加剧水下设备的腐蚀,更严重时将会影响到设备功能以致于相关减阻技术无法实施。海生物防污一直是舰船防护中最重要的问题之一。对于海洋生物的防污问题,传统上主要通过刷涂含有机锡(TBT)的防污涂料来解决。近年来,随着环境保护意识的增强该方法已被禁止。因此,开发出具有高效防污且环境友好的高性能防污涂料成为舰船防污的研究重点。

低表面能防污涂料以其环境友好性和良好的防污性能逐渐受到人们的关注。低表面能防污涂料的防污机理是采用疏水性的分子构建低表面能表面,使海生物不易附着或即使附着后在水流或者外力的作用下也很容易脱落。其中,氟聚氨酯(FPU)和有机硅聚氨酯(SPU)是最有代表性的两类低表面能涂料<sup>[34-36]</sup>,该类涂料在采用含氟或有机硅基团降低材料表面能的同时,保留了聚氨酯软硬段结构微相分离形态结构和优异的粘接性能。该类材料防污是基于涂料表面的物理作用,不存在有毒物质释放,是一种绿色防污涂料,已在舰船防污方面获得了实际应用。

## 5 展 望

目前,聚氨酯材料已在舰船上得到广泛应用,相对于国外的规模化应用,国内还处于起步阶段。随着研究的深入和参研单位的增加及材料研究的突破,基于磁流变效应的智能型聚氨酯隔振器有望被开发出来;聚氨酯体系中添加无机粒子,充分利用了聚氨酯的吸声和透声的可设计性,将其与金属粒子复合制备成声子晶体,可大幅提高材料的吸声性能;利用聚氨酯的模量可设计性,设计具有模量梯度、对轴变形有自适应力能的水润滑轴承,可解决因轴的扰动激励的噪声问题;采用仿生结构设计和形态调控手段可以制备出更耐海洋生物附着的材料。总之,充分利用聚氨酯材料的性能优点进行新材料的开发和产品的结构设计,将会拓宽其在舰船上的应用空间。

### 参 考 文 献

- [1] HE Lin. Development of Submarine Acoustic Stealth Technology[J]. *Ship Sci Technol*,2006,**28**(2):9-17(in Chinese). 何琳. 潜艇声隐身技术进展[J]. 舰船科学技术,2006,**28**:9-17.
- [2] SHI Zhigang. Application Analysis of Underwater Acoustic Polyurethane Materials[J]. *Acoust Electron Eng*,2011,**4**:1-4(in Chinese). 时志刚. 聚氨酯水下声学材料应用分析[J]. 声学与电子工程,2011,**4**:1-4.
- [3] WANG Youqiang,LI Hongqi. Characteristics and Outline of the Water-Lubricated Thordon Bearing[J]. *Lubr Eng*,2003,(1):101-104(in Chinese). 王优强,李鸿琦. 水润滑赛龙轴承及其润滑性能综述[J]. 润滑与密封,2003,(1):101-104.
- [4] LI Fang,SHUAI Changgeng,HE Li,*et al.* Polyurethane Composites for Water-lubricated Bearings Application[J]. *Chinese J Appl Chem*,2012,**29**(1):14-17(in Chinese). 李方,帅长庚,何琳,等. 可用作水润滑轴承的聚氨酯复合材料的制备[J]. 应用化学,2012,**29**(1):14-17.
- [5] LIU jia,XUN Yan,WANG Jie,*et al.* Advanced Polyurethane Elastomer of Low Creep and Fatigue Resistance CPUA Conference[C]. Shenzhen,2012:350-353(in Chinese). 刘佳,郇彦,王杰,等. PPDl 型微孔聚氨酯材料的合成与性能表征[C]//中国聚氨酯工业协会第十六次年会暨国际聚氨酯技术研讨会论文集. 深圳,2012.
- [6] Tien Y I,Wei K H. Hydrogen Bonding and Mechanical Properties in Segmented Montmorillonite/polyurethane Nanocomposites of Different Hard Segment Ratios[J]. *Polymer*,2001,**42**:3213-3221.
- [7] LI Limin,LI Wengang,HUANG Xiang'an. The Studies of the Effect of Heat History on the Properties and Micro-phase Separation of the Thermoplastic Polyurethane[J]. *Polyurethane Ind*,2004,**19**(1):9-11(in Chinese). 李立民,李文刚,黄象安. 热处理对热塑性聚氨酯性能及微相分离影响的研究[J]. 聚氨酯工业,2004,**19**(1):9-11.
- [8] WU Hengliang,XIE Hua,CHE Zhendong. Study on Polyurethane Isolators Subjected to High Loading[J]. *Noise Vib Control*,2012,**32**(1):167-169(in Chinese).

- 吴恒亮,谢华,车振东. 大载荷聚氨酯隔振器的分析[J]. 噪声与振动控制,2012,**32**(1):167-169.
- [9] ZHAO Chuanqi, HE Lin, SHUAI Changgeng, *et al.* Experimental Study on the Performance of Polyurethane Isolators[J]. *Ship Ocean Eng*, 2006, **38**(4):111-113 (in Chinese).  
赵传奇,何琳,帅长庚,等. 聚氨酯隔振器性能试验研究[J]. 船海工程,2006,**38**(4):111-113.
- [10] SHU Lihong, HE Lin. Mechanical Model for Creep Performance Testing and Analysis of Polyurethane Isolator[J]. *Noise Vib Control*, 2012, **32**(2):147-150 (in Chinese).  
束立红,何琳. 聚氨酯隔振器蠕变特性力学模型试验研究[J]. 噪声与振动控制,2012,**32**(2):147-150.
- [11] Gaymans R J. Segmented Copolymers with Monodisperse Crystallizable Hard Segments: Novel Semi-crystalline Materials [J]. *Prog Polym Sci*, 2011, **36**(6):713-748.
- [12] Kojio K, Furukawa M, Nonaka Y, *et al.* Control of Mechanical Properties of Thermoplastic Polyurethane Elastomers by Restriction of Crystallization of Soft Segment[J]. *Materials*, 2010, **3**(12):5097-5110.
- [13] Sheth J P, Unal S, Yilgor E, *et al.* A Comparative Study of the Structure-property Behavior of Highly Branched Segmented Poly(urethane urea) Copolymers and Their Linear Analogs[J]. *Polymer*, 2005, **46**(23):10180-10190.
- [14] ZHU Shijian, LOU Jingjun, HE Qiwei, *et al.* Vibration Theory and Vibration Isolation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006:148-187 (in Chinese).  
朱石坚,楼京俊,何其伟,等. 振动理论与隔振技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006:148-187.
- [15] Lin S P, Hart J L. Composites of UHMWPE Fiber Reinforced PU/epoxy Grafted Interpenetrating Polymer Networks[J]. *Eur Polym J*, 2007, **43**:996-1008.
- [16] WANG Jianhua, LUO Chenlei, YANG Wei, *et al.* Advance in the Resaerch of Polyurethane Damping Materials[J]. *Eng Plast Appl*, 2002, **30**(10):51-53 (in Chinese).  
王建华,罗陈雷,杨伟,等. 聚氨酯阻尼材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2002,**30**(10):51-53.
- [17] QU Jiale, WANG Quanjie, WANG Shanshan, *et al.* Waterborne Polyurethane Modified by Nano-SiO<sub>2</sub> [J]. *Leather Chem*, 2013, **30**(1):1-7 (in Chinese).  
曲家乐,王全杰,王闪闪,等. 纳米二氧化硅改性水性聚氨酯[J]. 皮革与化工,2013,**30**(1):1-7.
- [18] HUANG Weibo, YANG Yurun, LIU Donghui. Study on the Structure and Vibration Damping Properties of Polymer Based Polyurethane Material[J]. *Polym Mater Sci Eng*, 1995, **11**(2):102-105 (in Chinese).  
黄微波,杨宇润,刘东晖. 聚氨酯酯结构与阻尼性能研究[J]. 高分子材料科学与工程,1995,**11**(2):102-105.
- [19] WANG Baozhu, HUANG Weibo, HUANG Baochen, *et al.* Damping Properties of Polyether-based Polyurethanes[J]. *Synth Rubber Ind*, 2004, **27**(5):309-313 (in Chinese).  
王宝柱,黄微波,黄宝琛,等. 聚醚型聚氨酯的阻尼性能[J]. 合成橡胶业,2004,**27**(5):309-313.
- [20] Klemptner D C, Berkowski L, Frisch K C, *et al.* Energy Absorption of Interpenetrating Polymer Networks [J]. *Rubber World*, 1985, **192**(6):16.
- [21] LI Hui, ZHANG Yongbing, MA Yupu. Recent Advance in Vibration Damping Property of Polyurethane Interpenetrating Polymer Networks[J]. *Dev Appl Mater*, 2008, **23**(6):85-88 (in Chinese).  
李辉,张用兵,马玉璞. 聚氨酯 IPN 阻尼性能研究进展[J]. 材料开发与应用,2008,**23**(6):85-88.
- [22] YANG Yurun, HUANG Weibo, DING Defu. Recent Advances in Vibration Damping Properties of Polyurethane Interpenetrating Polymer Networks[J]. *Polym Bull*, 2000, (1):53-60 (in Chinese).  
杨宇润,黄微波,丁德富. 聚氨酯互穿聚合物网络阻尼性能研究进展[J]. 高分子通报,2000,(1):53-60.
- [23] QIN Chuanli, CAI Jun, ZHANG Jusheng, *et al.* Structure and Properties of Interpenetrating Polymer Networks Materials with Wide-temperature Range and Excellent Damping Properties [J]. *China Synth Rubber Ind*, 2004, **27**(6):374-378 (in Chinese).  
秦川丽,蔡俊,张巨生,等. 宽温域高阻尼互穿聚合物网络材料的结构与性能[J]. 合成橡胶工业,2004,**27**(6):374-378.
- [24] ZHANG Lijun, ZHANG Yong, CHEN Zhanyou. Research Progress on Casting Polyurethane Damping Materials[J]. *Chem Propelants Polym Mater*, 2010, **8**(5):24-31 (in Chinese).  
张利军,张永,陈战有. 浇注型聚氨酯阻尼材料研究进展[J]. 化学推进剂 高分子材料,2010,**8**(5):24-31.
- [25] DING Zhenlin. Advance in the Research of Polyurethane Vibration Isolator[J]. *Noise Vib Control*, 2011, **31**(4):152-154 (in Chinese).  
丁振林. 聚氨酯隔振器研究的新进展[J]. 噪声与振动控制,2011,**31**(4):152-154.
- [26] SHU Lihong, HE Lin, WANG Yufei. Nonlinear Mechanical Model and Character Research on Polyurethane Isolator[J]. *J Vib Eng*, 2010, **23**(5):530-536 (in Chinese).  
束立红,何琳,王宇飞. 聚氨酯隔振器非线性力学模型与特性研究[J]. 振动工程学报,2010,**23**(5):530-536.
- [27] XIE Hua, WU Hengliang, CHE Zhendong. Study on Vibration Isolation Performance of Polyurethane Elastomer[J]. *Noise Vib Control*, 2012, (1):154-156 (in Chinese).  
谢华,吴恒亮,车振东. 聚氨酯弹性体隔振性能分析[J]. 噪声与振动控制,2012,(1):154-156.

- [28] YU Qiming. Anti Sonar Anechoic Tiles for Submarine;CN,200920161941.8[P],2009(in Chinese). 余启明. 潜艇抗声纳消声瓦:中国,200920161941.8[P],2009.
- [29] Ramotowski T. Oceans 2003 MTS/IEEE Proceeding. Celebrating the Past-Teaming Toward the Future[C]. Sam Diego, California,2003;227-230.
- [30] LI Yongqing, ZHU Xi, SUN Weihong. Advance in Underwater Sound Absorption Polymer[J]. *Ship Sci Technol*,2012, **34**(5):7-12(in Chinese). 李永清,朱锡,孙卫红. 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.
- [31] DUAN Haitao, WANG Xuemei, WU Yimin. Present Research Status of Water Lubricated Bearings[J]. *Lubr Eng*,2012, **37**(9):109-116(in Chinese). 段海涛,王学美,吴伊敏. 水润滑轴承研究进展[J]. 润滑与密封,2012,**37**(9):109-116.
- [32] Watanabe T. Water-lubricated-type Bearing Material for Sliding Bearings of Screw Shaft of Boats and Ship, Comprises Polyurethane Elastomer Consisting of Diisocyanate, and Polycarbonate Diol and Polyethylene Wax, in Weight Ratio of Preset Range;JPN,JP2013007006-A[P],2013-A43159.
- [33] Thomson G. A Sleeve Bearing for Mounting in Cylindrical Housing-is of Hard Elastomeric Polyurethane Machined to be Forced Interference Fit in Bore;US,US4319790-A[P],1982-02-13;CA1120982-A 1982-26183E[69].
- [34] Buskens P, Wouters M, Rentrop C, *et al.* A Brief Review of Environmentally Benign Antifouling and Foul-release Coatings for Marine Applications[J]. *J Coat Technol Res*,2013, **10**(1):29-36.
- [35] Lejars M, Margaillan A, Bressy C. Fouling Release Coatings A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings[J]. *Chem Rev*,2012, **112**(8):4347-4390.
- [36] Rajan B, Stalslien S J, Webster D, *et al.* Polyurethanes with Amphiphilic Surfaces Made Using Telechelic Functional PDMS Having Orthogonal Acid Functional Groups[J]. *Prog Org Coat*,2012, **75**(1/2):38-48.

## Novel Polyurethane Materials and Their Applications in Warship

BAO Haige<sup>a</sup>, WANG Yufei<sup>b</sup>, HUAN Yan<sup>c</sup>, LIU Jia<sup>c</sup>, WANG Jie<sup>c\*</sup>, YANG Xiaoniu<sup>c\*</sup>

(<sup>a</sup>Office at Changchun, People's Liberation Army Navy, Changchun 130033, China;

<sup>b</sup>Naval Academy of Armament, Shanghai 200235, China;

<sup>c</sup>Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract** This comprehensive review summarized the characteristics of high performance polyurethane, including high tensile strength, low creep resistance, stable modules in wide range of temperature, and tunable damping properties. The potentials of this kind of material in real applications, for example, in ship industries, were also presented, with emphasis on polyurethane vibration isolator, anechoic tile, water lubricated bearings, and anti-fouling coatings.

**Keywords** polyurethane, damping, vibration damping, vibration isolator, water lubricated bearings