

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.010

压力下软段含量对聚氨酯材料动态力学性能的影响

王伟^{1,2}, 王健龙³, 魏浩³, 李永清¹

(1. 海军工程大学舰船与海洋学院, 武汉 430033; 2. 海军驻葫芦岛地区军事代表室, 辽宁葫芦岛 125004;

3. 哈尔滨工程大学青岛创新发展基地, 山东青岛 266000)

摘要: 聚氨酯材料内部存在特有的微相分离结构, 受到外力作用时其链段及分子之间会发生相对运动, 产生内摩擦, 消耗能量, 为材料提供阻尼特性。而在水下环境中, 静水压力会导致材料表现出与常压不同的动态力学特性, 从而影响材料的阻尼性能。针对这一问题, 通过两步法工艺合成不同软段含量的聚氨酯材料, 对其进行了一系列的结构与热性能表征, 同时, 通过施加 0.5 MPa 的预应力进行了常规的压缩力学性能测试与压缩模式下的动态热机械分析, 表征材料在压力环境下的静态与动态力学性能。结果表明, 软段含量的增加会对聚氨酯的玻璃化转变温度和压缩强度产生规律性的下降影响, 同时降低了聚氨酯材料在变温模式下的储能模量参数, 而损耗因子的峰值呈现规律性增大, 证明了软段含量的增加加强了压力下聚氨酯材料对温度的响应; 变频模式下软段含量的增加与变温模式下的变化规律相吻合, 即软段含量的增加同样加强了压力下聚氨酯材料对频率的响应, 这些规律的揭示为探究压力下不同软段含量聚氨酯材料的温度和频率响应特性, 以及为水压下高耗能聚氨酯材料设计提供了有效的理论依据。

关键词: 聚氨酯; 动态力学性能; 阻尼; 压力; 软段含量

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0064-06

Effects of soft segment content on dynamic mechanical properties of polyurethane materials under pressure

WANG Wei^{1,2}, WANG Jianlong³, WEI Hao³, LI Yongqing¹

(1. College of Naval Architecture and Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Military Representative Office of the Navy in Huludao District, Huludao 125004, China; 3. Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China)

Abstract : There is a unique microphase separation structure in polyurethane material, when polyurethane materials are subjected to external forces, relative motion occurs between the chain segments and molecule, producing internal friction and dissipating energy, thus providing damping characteristics to the material. In an underwater environment, the hydrostatic pressure alters the material's dynamic mechanical properties compared to those at atmospheric pressure, affecting its damping performance. Addressing this issue, polyurethane materials with varying contents of soft segments were synthesized using a two-step process. A series of structural and thermal characterizations for the materials were done. Additionally, by applying a pre-stress of 0.5 MPa, conventional compressive mechanical tests and dynamic mechanical analysis under compression were conducted to characterize the static and dynamic mechanical properties of the material under pressure. It is found that increasing the content of soft segments systematically lowers the glass transition temperature and compressive strength of the polyurethane materials, and reduces the storage modulus parameters in temperature-sweep mode, with a regular increase in the peak values of the loss factor, proving that a higher content of soft segments enhances the temperature responsiveness of polyurethane under pressure. Similarly, in frequency-sweep mode, the increase of soft segments content corresponds with the changes observed in temperature-sweep mode, indicating that a higher content of soft segments also enhances the frequency responsiveness of polyurethane under pressure. These findings provide insights into the study for temperature and frequency response characteristics of polyurethane materials with different soft segment contents under pressure, serving as a basis for the design of high-energy-dissipating polyurethane materials for use in hydrostatic environments.

Keywords : polyurethane ; dynamic mechanical property ; damping ; pressure ; soft segment content

通信作者: 李永清, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为船用材料与应用工程

收稿日期: 2024-06-28

引用格式: 王伟, 王健龙, 魏浩, 等. 压力下软段含量对聚氨酯材料动态力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 64-69.

WANG Wei, WANG Jianlong, WEI Hao, et al. Effects of soft segment content on dynamic mechanical properties of polyurethane materials under pressure[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 64-69.

振动和噪声会对机械设备、建筑结构以及人体健康^[1-2]产生不利影响,使用阻尼材料是控制振动和噪声的有效措施之一^[3-5]。相对于传统的早期金属基阻尼材料及陶瓷基阻尼材料^[6-7],具有高分子特性的黏弹性阻尼材料可通过内部的特殊结构和性质将来自外部的机械能转化为其他形式的能量(通常是热能)消散掉,在有效减少各种有害振动和噪声的同时又保证了材料的各项力学性能不受较大影响。而在黏弹性阻尼材料中,聚氨酯材料凭借自身独特微相分离结构和多级分子内相互作用等特点具有优异的能量耗散能力,其内部的软硬链段的相互作用表现出的微相分离现象为其提供了优异的能量耗散机制,在减振降噪领域得到了广泛的应用^[8-9]。

1975年Pae等^[10]发现静水压力可以显著改变聚氨酯材料的力学性能,此后,研究人员对海洋作业下的聚氨酯材料开展相关研究。Zhang等^[11]通过引入氟化二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI),制备了不含亲水基团的疏水性氟化聚氨酯(FPU),含氟体系为材料提供了优异的抗压能力。Zhao等^[12]通过石墨烯与聚氨酯的界面复合工艺,设计出具有减振吸声能力的3D多孔泡沫结构,有效解决了水下声噪问题。Oh等^[13]研究了可变压力条件对软质聚氨酯泡沫物理力学性能和结构的影响,通过变压发泡技术实现软质聚氨酯泡沫良好的力学性能与耐久性。郭书君等^[14]采用浇注法制备了具有优良阻尼性能的聚氨酯弹性体,其在深海环境具有减振降噪性能。Weber等^[15]通过压力依赖非线性模型实验证明了黏度对压力的依赖性,压力依赖性可以极大地改变材料的响应特性。综上,针对聚氨酯材料在水下环境中结构与性能的关系研究仍不够系统,材料内部不同分子结构对聚氨酯材料阻尼性能的影响不明确^[16-18],这在很大程度上影响了水下聚氨酯基阻尼材料的探索与发展。

对此,笔者研究了压力条件下软段含量对聚氨酯材料动态力学性能的影响规律,通过对聚氨酯材料软段含量进行调节,设计并合成了一系列的聚氨酯材料,并通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析、差示扫描量热(DSC)分析、热重(TG)分析以及动态热机械分析(DMA)等表征手段,揭示了压力下不同软段含量对聚氨酯材料阻尼性能的影响规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI-50)与端羟基聚丁

二烯(HTPB-2000,羟基含量为54%~58%):工业级,武汉克米克生物有限公司;

1,4-丁二醇(BDO):分析纯,康迪斯化工(湖北)有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAC):分析纯,济宁铭威化工有限公司;

二月桂酸二丁基锡(DBTDL):分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

消泡剂550:工业级,济宁三石生物科技公司。

1.2 主要仪器与设备

电子天平:FA1004N,上海精若科学仪器有限公司;

加热磁力搅拌器:IKA RCT Basic,德国IKA公司;

真空反应釜:AIR-5L,上海欧河机械设备有限公司;

真空干燥烘箱:DZF-6021,上海沪芮仪器厂;

FTIR仪:Bruker Vertex 70,德国Bruker公司;

悬臂搅拌器:EUROSTAR 60 digital,德国IKA公司;

自动电位滴定仪:ZDJ-600,北京先驱威锋技术开发公司;

顶置式电子搅拌器:EUROSTAR 20数显型,德国IKA公司;

万能拉力试验机:3365,美国INSTRON公司;

DMA仪:DMA+1000,法国Metravib公司;

DSC仪:Q200,美国TA公司;

TG分析仪:Q50,美国TA公司。

1.3 不同软段含量聚氨酯材料合成

先将低聚物多元醇加入三颈烧瓶中进行抽真空除水操作,利用真空泵将瓶内的压力抽至负压状态,然后加热至120℃保持2h,确保含水量不高于0.05%。

不同软段含量聚氨酯材料采用两步法^[19]合成:先将除过水的多元醇与一定比例的异氰酸酯密封混合,目前是使异氰酸酯(—NCO)基团与羟基(—OH)基团发生反应;使用油浴锅先加热到50℃反应1h,再升温至80℃加热2h充分反应制备成预聚体;将计算好的预聚体和扩链剂BDO倒入烧杯中,充分搅拌使BDO上的双羟基基团与预聚体反应完成扩链,随后用真空烘箱真空抽泡25min至体系无气泡,将体系倒入聚四氟乙烯模具中,继续真空抽

泡 15 min 后放入 80 °C 的烘箱中自然流平;将流平的聚氨酯材料在 80 °C 的烘箱中固化 24 h,随后取出并在室温下放置 7 d 使其完全反应,然后测试各种性能。不同软段含量聚氨酯材料的样品编号及配方见表 1,合成流程图如图 1 所示。

表 1 不同软段含量聚氨酯材料的样品编号及配方

Tab. 1 Sample numbers and formulation of polyurethane materials with different soft segment contents

Samples	Isocyanate	Polyol	Chain extender
PU-1	MDI-50 (2.05 mol)	HTPB (0.7 mol)	BDO (1.3 mol)
PU-2		HTPB (0.8 mol)	BDO (1.2 mol)
PU-3		HTPB (0.9 mol)	BDO (1.1 mol)
PU-4		HTPB (1.0 mol)	BDO (1.0 mol)
PU-5		HTPB (1.1 mol)	BDO (0.9 mol)

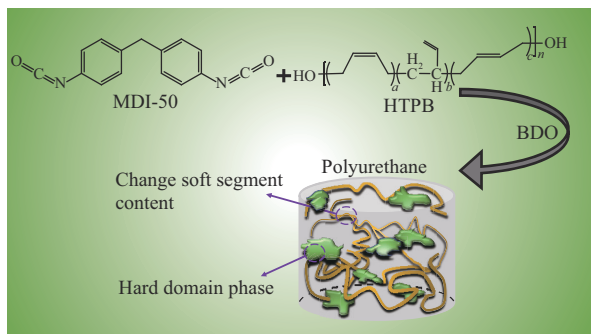


图 1 聚氨酯材料的合成流程图示意图

Fig. 1 Schematic diagram of synthesis process for polyurethane materials

1.4 测试与表征

结构表征:采用 FTIR 仪在 400~4 000 cm^{-1} 波数范围内表征材料的化学结构。

DSC 测试:所用的样品为 2 mg 左右小块,测试 N_2 的吹扫流量为 50 mL/min,先降温至 -80 °C 后保温 5 min,再以 10 °C/min 的升温速率升温至 80 °C,记录 DSC 曲线。

TG 分析:所用的样品为 5 mg 的块状样品, N_2 气氛下吹扫流量为 60 mL/min,以 20 °C/min 的升温速率由 30 °C 升温至 800 °C,得到 TG 曲线。

DMA 测试:所用样品尺寸为 50 mm×10 mm×2 mm,测试温度范围为 -80~60 °C,升温速率为 3 °C/min,静态力 -5 N,动态力 1 N,给予样品 0.5 MPa 的预应力,测试频率为 10 Hz。

压缩性能测试:测试温度为 20 °C,根据 GB/T 1041-2008 对材料进行压缩性能测试,压缩速率为 0.02 mm/s,测试 5 次取平均值,测试时施加预应力 0.5 MPa。

2 结果与讨论

2.1 不同软段含量聚氨酯材料的结构表征

图 2 为不同软段含量聚氨酯材料的 FTIR 谱图。

2 240 cm^{-1} 处是 -NCO 基团的特征峰,从图 2 可以发现此处的峰消失,这代表了聚氨酯材料体系中的一 NCO 全部参与反应;2 880 cm^{-1} 处是聚氨酯软段结构中 C—H 伸缩振动特征峰;3 230 cm^{-1} 处是氨基甲酸酯基团中 N—H 的伸缩振动峰;1 535 cm^{-1} 处对应 N—H 弯曲振动峰;1 220 cm^{-1} 处是 C—N 伸缩振动峰;1 760~1 630 cm^{-1} 之间是 C=O 伸缩振动峰;736 cm^{-1} 处为 HTPB 特有的 1,4 顺式结构特征峰。由 1 720 cm^{-1} 处的特征峰可以看出,随着 HTPB 含量的升高,软段在样品中占比增大,导致硬段中氨基甲酸酯的数量减少,因此硬段产生氢键变少,最终导致 C=O 伸缩振动峰面积变小。

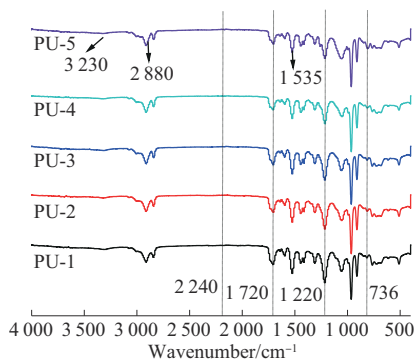


图 2 不同软段含量聚氨酯材料的 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectra of polyurethane materials with different segment contents

2.2 不同软段含量的聚氨酯材料的热性能表征

图 3 为不同软段含量聚氨酯材料的热性能分析曲线。具体的热性能参数见表 2。由图 3a 可以观察到,这 5 种聚氨酯材料随着温度提升在不同的范围内会出现相转变,对应的温度代表了样品的玻璃化转变温度 (T_g)。PU-1, PU-2, PU-3, PU-4, PU-5 的 T_g 分别为 -55.65, -58.21, -62.17, -69.34, -75.12 °C, 随着软段含量的增加, T_g 逐渐向低温移动,PU-5 软段含量较高,柔性增加,链段更易运动,升温所需的能量较小,因此 PU-5 的 T_g 相对较低。

图 3b 为不同软段含量聚氨酯材料的 TG 曲线,从曲线可以看出这 5 种聚氨酯材料均在 250 °C 左右开始分解,500 °C 基本停止分解。图 3c 为 DTG 曲线,从 DTG 曲线中能够反映出软硬段的失重变化,根据温度区间不同,失重包括 3 个区间:第一区间为 250~310 °C,在这个温度范围内氨基甲酸酯基团受热分解生成二异氰酸酯和低聚物二元醇;第二区间为 310~375 °C,在这个温度下异氰酸酯受热开始分解;第三区间为 375~500 °C,主要为软段低聚物二元

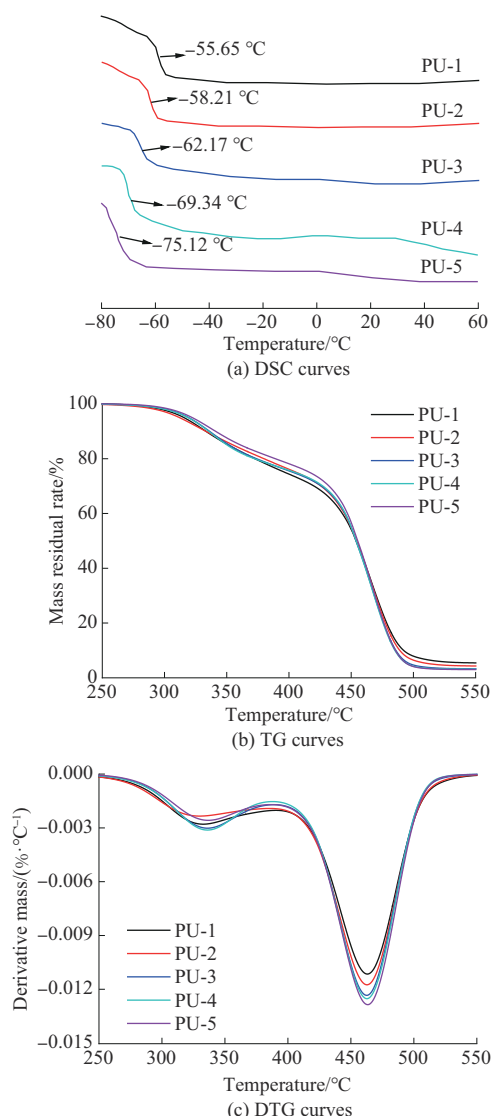


图3 不同软段含量聚氨酯材料的热性能分析曲线

Fig. 3 Thermal performance analysis curves of polyurethane materials with different soft segment contents

表2 不同软段含量聚氨酯材料的热性能参数

Tab. 2 Thermal performance parameters of polyurethane materials with different soft segment contents

Samples	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$
PU-1	-55.65	251
PU-2	-58.21	254
PU-3	-62.17	253
PU-4	-69.34	256
PU-5	-75.12	258

Notes: T_g is glass transition temperature; T_d is initial thermal decomposition temperature.

醇的分解,反应过程中生成胺类、烯烃等小分子,最终剩余少量炭化物残渣。

2.3 压力下不同软段含量的聚氨酯材料的力学性能表征

图4为压力下不同软段含量聚氨酯材料的压缩

应力-应变曲线,由图4可以看到随着软段含量的增加,聚氨酯材料样品的压缩强度逐渐减小,应变为30%时,PU-1样品的压缩强度约为1.6 MPa,PU-5样品的压缩强度约为0.75 MPa。

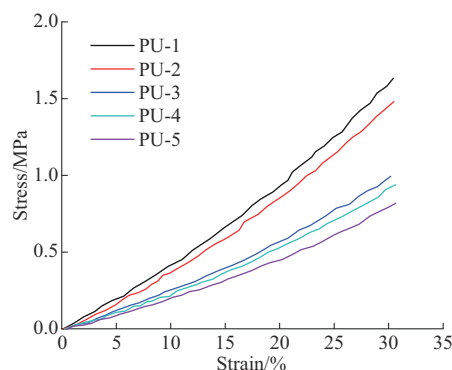


图4 0.5 MPa压力下不同软段含量聚氨酯材料的压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Compressive stress-strain curves of polyurethane materials with different soft segment contents under pressure of 0.5 MPa

由之前分析可知,PU-1的软段含量低,微相分离不明显,硬段区域大,易生成氢键,硬段与软段之间作用力更多,因此PU-1刚度较高,压缩强度也较高。随着软段含量的增加,硬段区域明显降低,氢键化程度大大降低,这会使硬段刚性降低,同时软硬段之间相互作用力变小,微相分离趋势变大,因此PU-5刚度较低,压缩强度较小。而PU-2,PU-3,PU-4也遵循这个趋势。

2.4 压力下不同软段含量的聚氨酯材料的动态力学性能表征

DMA是材料动态力学性能表征的重要手段,其中储能模量、损耗模量以及对应的损耗因子等参数都能反映出材料的动态力学性能,根据上述参数及其带来的变化规律,结合横坐标的温度或频率曲线,可以分析出材料是否具有好的阻尼性能。

不同软段含量聚氨酯材料在压缩状态下的DMA曲线如图5所示,采用0.5 MPa的预应力施加来模拟压力对材料带来的影响,控制静态力在-5 N,施加1 N的正交应力来进行温度与频率的响应测试。

图5a为温度扫描模式下的储能模量曲线,从曲线变化可以看出,软段含量越高,样品的储能模量越低,在-20 °C之后样品储能模量变化不大。储能模量作为样品受到外力做功时储存能量的能力,对于PU-1,由于样品软段含量较小,低温环境时硬段的聚集区域较大,硬段和软段之间的作用力多,软段刚性增加,而且硬段的含量较高也会提供较高的

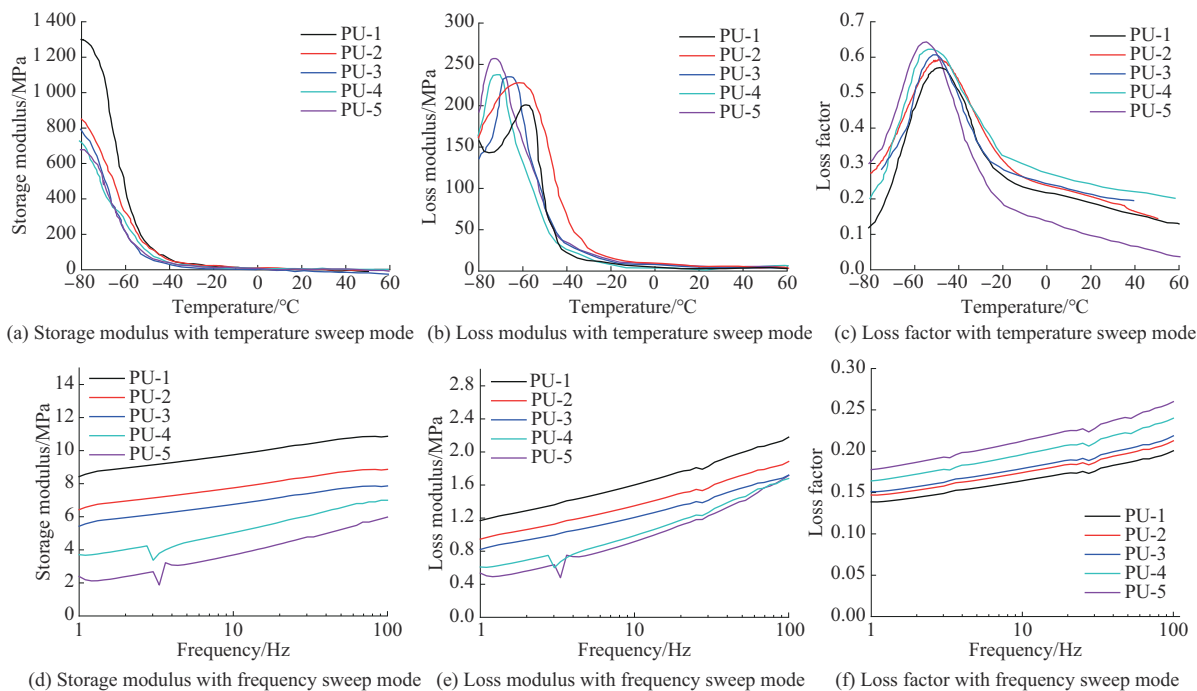


图5 0.5 MPa压力下不同软段含量聚氨酯材料的DMA曲线

Fig. 5 DMA curves of polyurethane materials with different soft segment contents under pressure of 0.5 MPa

刚性,因此储能模量相对较高。随着软段含量的增多,分子链中氢键作用程度下降,软硬段相分离程度增加,导致硬段和软段之间的作用变少,硬段柔性也在不断增加,因此储能模量会有所降低。

图5b为温度扫描模式下的损耗模量曲线,从图中可看出,软段含量越高,损耗模量峰值越大。损耗模量是样品做功时将能量变为热能的指标,两个链段之间的做功越多,耗能就越多,损耗模量就会得到提高;由于软链段区域的增加,使材料整体的内部结构发生较大的微相分离,导致样品内部较为松散^[20],在动态压缩环境中分子链之间摩擦的次数和范围更大,因此PU-5损耗模量峰值最大。随着硬段区域的变大,供氢基团变多,氢键数量随之增加并促进硬链段的取向和有序排列,微相分离程度减小,因此内部做功减少,损耗模量峰值随之变小。

图5c为温度扫描模式下的损耗因子曲线,可以看出,软段占比越多, T_g 越小,损耗因子峰值越大, T_g 的变化规律与DSC测试结果一致。由损耗模量与储能模量比值可知,随软段含量增加,前者越大,后者越小,因此损耗因子峰值变大。PU-5软段含量高,柔性大,软段之间摩擦较大,因此损耗因子峰值最大,但 T_g 较低。这也说明了在压力状态下,随温度升高软段的含量越多耗能越多,对温度的响应也越明显。

图5d至图5f为自由压缩模式下不同软段含量

聚氨酯材料的频率扫描曲线,图5d、图5e、图5f分别为频率扫描模式下的储能模量、损耗模量以及损耗因子曲线。从图5d、图5e可以看出,储能模量和损耗模量都随着频率的升高而升高,但整体来看,在1~100 Hz时软段含量高的样品储能模量和损耗模量均低于软段含量较低的样品。这是因为软段含量高,样品柔性高,微相分离程度大,因此在1~100 Hz频率下的刚性也低,故PU-5的储能模量在1~100 Hz频率范围内均低于其他样品。在10~100 Hz范围内,可以发现,PU-5的储能模量和损耗模量数值随频率上升的趋势较快,对于储能模量来说,滞后现象带来了更剧烈的运动,而软段占比大,在同一时间内刚性增加得更快,因此随频率上升,PU-5储能模量上升趋势更明显;对于损耗模量来说,软段含量高时样品在受压过程中会产生较大的形变,随着频率的上升,这种变形也会更加明显,而由于软段长,弹性体的柔性大,并且增加了滞后效应,样品的应变跟不上应力,在频率升高时,会比硬段含量高的样品要更加明显,因此损耗模量上升也比较明显。

从图5c看出,对于损耗因子而言,损耗因子随频率上升而上升,这与前面的分析一致^[21]。在10~100 Hz范围内,由于频率的增加软段占比大的内耗增加更快,因此损耗因子的数值上升速率比软段含量小的样品快,这也就表明了软段数量较多会提升

样品的分子流动性,从而使损耗因子对频率的响应程度也就越高。

3 结论

(1)控制软段含量可以有效改变聚氨酯内部的相分离状态,从而规律化的改变样品的热性能和压缩性能,聚氨酯的 T_g 和预载压力下的压缩强度随着软段含量的提高而呈现规律化的下降,与结构的改变相对应。

(2)软段在聚氨酯中的含量会对聚氨酯材料在温度与频率下的动态力学性能产生较大的规律性影响,压力下软段含量越高,硬软段之间的作用越小,储能模量降低,有效温域下损耗因子峰值升高,对温度的响应会更高。而软段含量较高时样品在受压过程的变形也会更加明显,增加了滞后效应,随频率变化需要的能量更多,因此对频率的响应较高。以上规律为后续开展有关静水压力下聚氨酯材料的合成设计与应用提供了关键的理论基础与数据支撑。

参考文献

- [1] KORDMIRI S H M, ALLIABADI M, GOLMOHAMMADI R, et al. Effect of noise and hand-transmitted vibration exposure on hearing and equilibrium under a simulated work environment with building tools[J]. *Work*, 2024, 77. DOI:10.3233/wor-220662.
- [2] SMITH M G, CROY I, ÖGREN M, et al. Physiological effects of railway vibration and noise on sleep[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(5):3 262–3 269.
- [3] ZHONG W M, ZHU A D, BAI X X, et al. Integrated shock absorber with both tunable inertance and damping[J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7. DOI:10.3389/fmats.2020.00204.
- [4] ZHU L H, HAO J Y, LU L. Research on influence of damping on the vibration noise of transformer[J]. *IEEE Access*, 2022, 10. DOI: 10.1109/access.2022.3201646.
- [5] 董光超,邵春妍,姬依婷,等.一种基于亚胺键的兼具阻尼和自修复性能的聚氨酯材料[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(5): 11–21.
DONG Guangchao, SHAO Chunyan, JI Yiting, et al. A Polyurethane material with both damping and self-healing properties based on imine bonds[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2024, 40(5):11–21.
- [6] 王敬丰,魏文文,潘复生,等.金属阻尼材料研究的新进展及发展方向[J]. *材料导报*, 2009, 23(13):15–19.
WANG Jingfeng, WEI Wenwen, PAN Fusheng, et al. Recent progress and future directions in research on metal damping materials [J]. *Materials Review*, 2009, 23(13):15–19.
- [7] 周越松,梁森,孔佳利,等.陶瓷/纤维/阻尼复合靶板抗冲击性能及优化[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(10):179–187.
ZHOU Yuesong, LIANG Sen, KONG Jiali, et al. Impact resistance and optimization of ceramic/fiber/damping composite target plates [J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(10):179–187.
- [8] NOUREDDINE B, ZITOUNI S, ACHRAF B, et al. Development and characterization of tailored polyurethane foams for shock absorption[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4). DOI: 10.3390/app12042206.
- [9] NING J, ZHAO G P, HE X P. Non-acoustical parameters and sound absorption characteristics of porous polyurethane foams[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(3). DOI:10.1063/1.5079486.
- [10] PAE K D, BHATEJA S K. The effects of hydrostatic pressure on the mechanical behavior of polymers[J]. *Journal of Macromolecular Science*, 1975. DOI:10.1080/15321797508068145.
- [11] ZHANG R Z, REN Y Y, YAN D K, et al. Synthesis of hydrophobic fluorinated polyurethanes and their properties of resistance to cavitation and wear[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 104: 11–19.
- [12] ZHAO H, MA X, XU X, et al. Lightweight, superhydrophobic, lignin-based polyurethane foam composites for underwater pressure sensing[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(9): 3 203–3 209.
- [13] OH J H, KIM J S, NGUYEN V H, et al. Auxetic graphene oxide-porous foam for acoustic wave and shock energy dissipation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 186. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107817.
- [14] 郭书君,尹昌平,赵秀辉,等.聚氨酯弹性体分子结构对阻尼及力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2023, 51(9):192–199.
GUO Shujun, YIN Changping, ZHAO Xiuhui, et al. Influence of molecular structure of polyurethane elastomers on damping and mechanical properties[J]. *Materials Engineering*, 2023, 51(9): 192–199.
- [15] WEBER W. Über die druckabhängigkeit der viskosität von alkohol-wasser-gemischen[J]. *Rheologica Acta*, 1975, 14: 1 012–1 025.
- [16] RISTIĆ I, CAKIĆ S, VUKIĆ N, et al. The influence of soft segment structure on the properties of polyurethanes[J]. *Polymers*, 2023, 15(18). DOI:10.3390/polym15183755.
- [17] CUI Y Y, WANG H R, PAN H W, et al. The effect of mixed soft segment on the microstructure of thermoplastic polyurethane[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(45). DOI:10.1002/app.51346.
- [18] PUSZKA A, KULTYS A. The influence of soft segments on some properties of new transparent segmented polyurethanes[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2017, 28(12):1 937–1 944.
- [19] COUSIN K, QUIENE B, PINAUD J, et al. One-pot two-step synthesis of hydroxymethylated unsaturated VHOSO and its application to the synthesis of biobased polyurethanes[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2020, 122(12). DOI: 10.1002/ejlt.202000158.
- [20] TAO C, LUO Z, BAO J J, et al. Effects of macromolecular diol containing different carbamate content on the micro-phase separation of waterborne polyurethane[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(11):8 639–8 652.
- [21] SUN P X, YANG H, ZHAO Y. Time-domain calculation method of improved hysteretic damped system based on frequency-dependent loss factor[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 488. DOI:10.1016/j.jsv.2020.115658.