

工业化进程的快速发展使得振动及噪声问题日益加剧,严重影响人们的日常生活。阻尼材料利用材料形变将机械动能转变成热能的基本原理,削弱结构的共振振幅,从而降低结构噪声带来的负面影响^[1-2]。聚氨酯(polyurethane, PU)作为目前常用的一种阻尼材料,是指由小分子多元醇、异氰酸酯以及小分子扩链剂通过加聚反应制备,主链上含有大量氨基甲酸酯基团($-\text{NHCOO}-$)的一种嵌段共聚物^[3-5]。在其分子链段中,通常将多元醇作为聚氨酯软段,而异氰酸酯和扩链剂(包括醇类、胺类)共同组成硬段,因软硬段结构分散聚集后呈现微相分离状态从而赋予了聚氨酯材料不同的机械与阻尼性能^[6-7]。但聚氨酯阻尼材料在使用过程中难以避免因磕碰或疲劳产生破损及微裂纹,缺陷的产生及扩展会大大降低材料的使用寿命,因此聚氨酯材料的自愈合成为延长材料使用寿命的重点研究方向,以极大程度地减少资源的浪费^[8-10]。与动态非共价键相比,聚氨酯材料中引入动态共价键,不仅可以实现自愈合,也能赋予材料较好的力学性能。闫欣悦等^[11]基于 Diels-Alder 反应合成了交联结构的热可逆聚氨酯材料,研究表明材料兼具了热固性树脂良好的成型工艺性及热塑性树脂的可多次加工性,可在 160 °C 左右完成可逆反应,且加工 3 次后拉伸强度能达到 20 MPa 以上。

在设计具有可逆共价键的材料时,最常用的动态键之一是动态二硫键。二硫键在一定条件下能够可逆地裂解、重整和交换,并且可以使用不同的交联剂或改变最终材料中存在的二硫键数量来调整材料的反应活性及力学性能^[12-15]。陈亮等^[16]用芳香二硫化物制备得到自愈合水性聚氨酯材料,研究表明样品在 80 °C 加热 3 h,力学性能可恢复至 81% 左右,拉伸强度可提高至 5.6 MPa。冯见艳等^[17]以 2,2-二硫二乙醇为扩链剂制备水性聚氨酯并与丙烯酸乳液共混得到复合材料,研究发现引入丙烯酸乳液可以提高材料的自修复性能。通过上述研究可以发现,聚氨酯阻尼材料自修复多需要较高的温度作为响应条件,在实际应用场景中几乎无法实现,因此研究在较低温度下实现自修复的聚氨酯材料显得尤为重要。本研究通过改变原料中二硫化物含量,合成了一系列聚氨酯弹性体,分析了二硫键含量对材料分子结构、阻尼、力学及自修复性能的影响,为制作自修复阻尼涂层提供借鉴。

1 实验部分

1.1 试剂

聚四氢呋喃多元醇(polytetramethylene ether glycol, PTMEG)、异佛尔酮二异氰酸酯(isophorone diisocyanate, IPDI),工业级,巴斯夫股份公司;4,4'-二羟基二苯二硫醚(4,4'-dihydroxy diphenyl disulfide, DHDPD)、二月桂酸二丁基锡(dibutyltin dilaurate, DBTDL)、N,N-二甲基甲酰胺(N,N-dimethylformamide, DMF),分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;盐酸标准溶液(0.1 mol/L)、二正丁胺、邻二甲苯,分析纯,天津市大茂化学试剂厂;异丙醇,分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 样品制备

1) 预聚物的合成。依据图 1 合成路线进行预聚物合成,称量数均分子量为 2 000 的 PTMEG 加入三口烧瓶中并加热至 120 °C 进行脱水处理,之后降温至 60 °C,在氮气环境中加入计量好的 IPDI,并加入适量二月桂酸二丁基锡作为催化剂搅拌 0.5 h,然后升温至 90 °C 继续搅拌反应 1.5 h,取适量预聚体采用盐酸-二正丁胺法测定反应进程,反应至 $-\text{NCO}$ 含量达到理论值反应结束。

2) 聚氨酯(PU)制备。将 DHDPD 溶于 DMF 中制成质量分数为 10% 的溶液,用恒压滴液漏斗向预聚物体系中滴加 DHDPD 扩链剂,并加入适量二月桂酸二丁基锡作为催化剂,混合均匀后得到淡黄色的聚氨酯溶液。将其倒入聚四氟乙烯模具中,放入 80 °C 真空干燥箱中干燥至恒重;然后将固化后材料脱模取出,于室温环境中放置 7 d 后进行测试,根据二硫化物含量由低到高将材料分别标记为 PU1~PU5。聚氨酯样品制备配方列于表 1。

1.3 测试与表征

结构表征采用美国 Thermo 公司的 Nicolet 380 型傅里叶变换红外光谱仪,测试温度 25 °C,测试波数范围为 4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描 32 次。采用 DRX2 型拉曼光谱仪,波长为 785 nm,扫描范围是 400~800 cm^{-1} 。动态机械性能分析采用瑞士 METTLER-TOLEDO 公司的 DMA1 型动态热机械分析

仪,升温速率为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,振幅 $10\text{ }\mu\text{m}$,频率为 1 Hz ,空气气氛。热性能分析采用瑞士 Mettler 公司的 TGA/DSC1/1600LF 型热失重分析仪,测试温度范围为 $50\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,氮气气氛、流量 $50\text{ mL}/\text{min}$ 。机械性能测试依据 GB/T 528 裁切 3 型标准哑铃型试样,采用高铁检测仪器(东莞)有限公司生产的 AI-7000S1 型伺服拉力机,拉伸速率为 $500\text{ mm}/\text{min}$,测试 3 次取平均值。将混合后的聚氨酯溶液涂敷于一块光滑洁净的载玻片上,待其固化完全后用手术刀在上面划出两条交叉的划痕,将其放置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电热鼓风干燥箱中,利用显微镜对划痕进行自修复状态观察并评估其自修复性能。自修复效率是将裁好的哑铃状样条切断后粘结在一起,在一定温度环境下修复一定时间后测试其机械性能,对比修复前后拉伸性能的变化,拉伸强度自修复效率的计算方法:修复效率=修复后拉伸强度/未断裂时拉伸强度 $\times 100\%$ 。

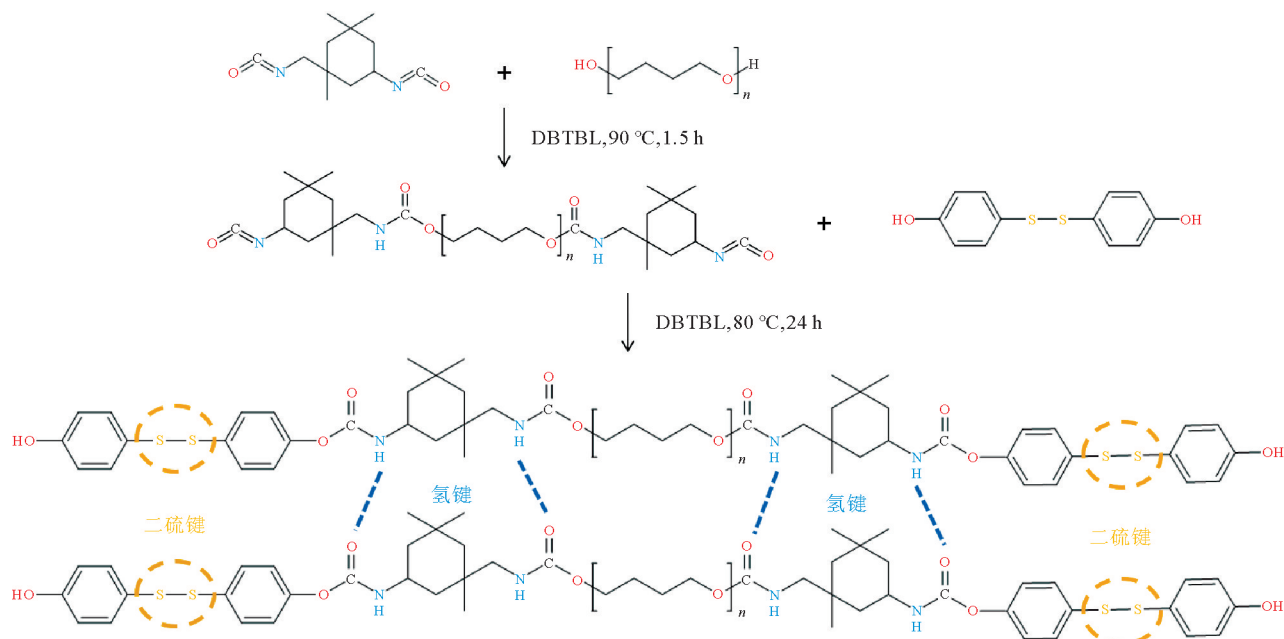


图 1 聚氨酯弹性体的合成路线

Fig. 1 Synthetic route of polyurethane elastomer

表 1 PU 样品的配方

Table 1 Formula of PU sample

样品名称	$n(\text{IPDI})/\text{mol}$	$n(\text{PTMEG})/\text{mol}$	$n(\text{DHPD})/\text{mol}$	DHPD 质量分数/%	硬段质量分数/%
PU1	6.0	4.8	0.8	1.80	13.67
PU2	6.0	4.4	1.2	2.92	15.58
PU3	6.0	4.0	1.6	4.19	17.76
PU4	6.0	3.6	2.0	5.67	20.28
PU5	6.0	3.2	2.4	7.30	23.15

2 结果与讨论

2.1 结构表征

图 2 为 PTMEG、IPDI、DHPD 及 PU2 的红外光谱图。PTMEG 红外曲线在 $3\ 465\text{ cm}^{-1}$ 及 $2\ 779\sim 2\ 961\text{ cm}^{-1}$ 处分别出现—OH 键的伸缩吸收峰及亚甲基中 C—H 伸缩振动峰,证明 PTMEG 中存在羟基基团。DHPD 与 PTMEG 类似,在 $3\ 321\text{ cm}^{-1}$ 及 $1\ 430\sim 1\ 584\text{ cm}^{-1}$ 处分别出现—OH 键的伸缩吸收峰及苯环伸缩振动吸收峰,证明 DHPD 中同时存在羟基及苯环基团。IPDI 作为一种多异氰酸酯,其红外曲线在 $2\ 952\text{ cm}^{-1}$ 为甲基中 C—H 伸缩振动峰, $2\ 252\text{ cm}^{-1}$ 处为—NCO 特征吸收峰,证明 IPDI 中存在异氰酸酯基团。另外,在 PU2 的红外谱图中,未发现在 $2\ 252\text{ cm}^{-1}$ 处的—NCO 与 $3\ 465\text{ cm}^{-1}$ 处的—OH 特征峰,

新增 $1\,371\text{ cm}^{-1}$ 及 $1\,106\text{ cm}^{-1}$ 处的酯基中 C—O—C 键的伸缩振动峰。以上数据表明 PU 制备成功且 IPDI 反应完全。

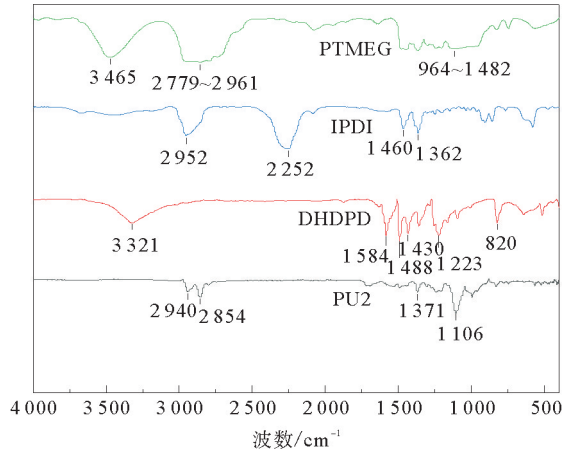


图2 PTMEG、IPDI、DHDPD及PU2的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectra of PTMEG, IPDI, DHDPD and PU2

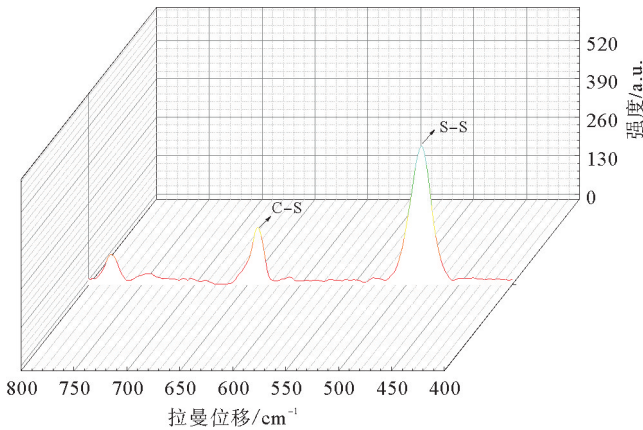


图3 PU2的拉曼光谱图

Fig. 3 Raman spectra of PU2

由于 PU2 中的二硫键(S—S)键能较小,无法在红外光谱中分辨出来,因此需要增加拉曼光谱(Raman)仪对 PU2 进行测试,以确认二硫键的存在。图 3 为拉曼光谱图,由图中可以明显看出,样品在 485 cm^{-1} 和 639 cm^{-1} 处各存在一个特征峰,分别为双硫键和碳硫键的吸收峰,以上结果证明 PU 分子链段中成功引入了二硫键。

2.2 动态机械性能分析

图 4 为 PU 的动态热机械分析曲线,由图可知,随着 DHDPD 含量的增加,PU 的玻璃化转变温度(T_g)呈现逐渐增加的趋势,而阻尼因子($\tan \delta$)则先增加后降低, $\tan \delta > 0.3$ 对应范围内的有效阻尼温域未发生明显变化。由表 2 可知,PU2 阻尼因子峰值($\tan \delta_{\max}$)最高为 0.79,其阻尼性能明显优于其他四组样品。这是因为 DHDPD 中含有大量的二硫键和苯环结构,二硫键键能较低,在低温条件下,PU 中的二硫键在分子链段运动中起主导作用。随着温度的升高,二硫键的动态交换作用也愈加明显;同时聚氨酯分子链段中本身含有大量的氢键,在高温条件下,氢键的断裂也会使能量损耗增大;因此阻尼因子的增加主要归功于 DHDPD 中二硫键及氢键的动态交换作用。但由于 DHDPD 中包含苯环结构,苯环会增加聚氨酯中链段的空间位阻,随二硫化物含量增加苯环与二硫键占比同步增加,在两者协同作用下,当 DHDPD 质量分数超过 2.92% 时,分子链段运动因受苯环阻碍作用而导致阻尼因子降低,且 PU 的玻璃化转变温度也随之提高,峰值温度向右(温度升高方向)偏移。

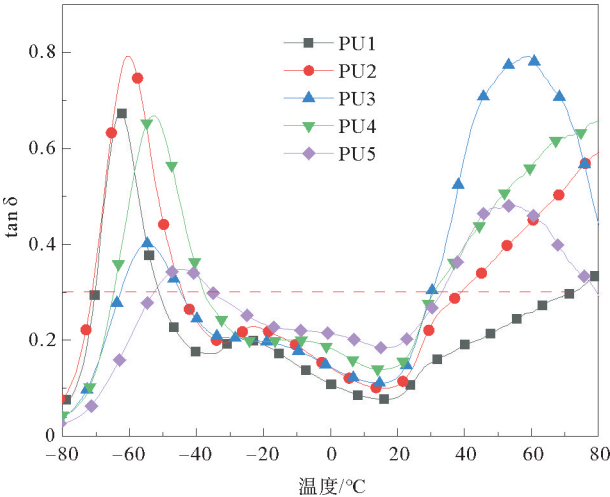


图4 PU的阻尼因子与温度的关系

Fig. 4 Relationship between $\tan \delta$ and temperature of PU

表2 PU的阻尼性能数据
Table 2 Damping performance data of PU

样品名称	$\tan \delta_{\max}$	$T_g/^\circ\text{C}$	有效阻尼温域/ $^\circ\text{C}$
PU1	0.67	-62.60	-70.40~ -51.11
PU2	0.79	-60.37	-71.02~ -44.23
PU3	0.67	-53.41	-66.10~ -37.68
PU4	0.40	-52.30	-59.75~ -42.75
PU5	0.35	-44.54	-52.38~ -34.95

2.3 热性能分析

热重分析是研究材料热稳定性的一种常用方法。通过观察不同阶段的热失重情况可以分析样品中不同组分含量对材料耐热性的影响。图5为不同DHDPD含量的PU材料的热重分析曲线,由图可知材料存在两个失重阶段。图5(a)为不同PU材料的热重分析(thermo-gravimetric analysis, TGA)曲线,在高分子材料分析中,通常用材料质量损失5%对应温度来表征材料的初始分解温度(T_{d5})。由图5可知,PU第一阶段失重的起始温度 T_{d5} ,即初始分解温度在292~314℃,且随着DHDPD含量的增加, T_{d5} 逐渐降低。这是因为材料第一阶段失重为二硫化物所在硬段结构失重,随DHDPD添加量增多,硬段结构中二硫键占比增加,分子链段中硬段结构的热稳定性降低, T_{d5} 从313.98℃降低至292.63℃,二硫化物含量最高的PU5在较低温度下开始分解失重。

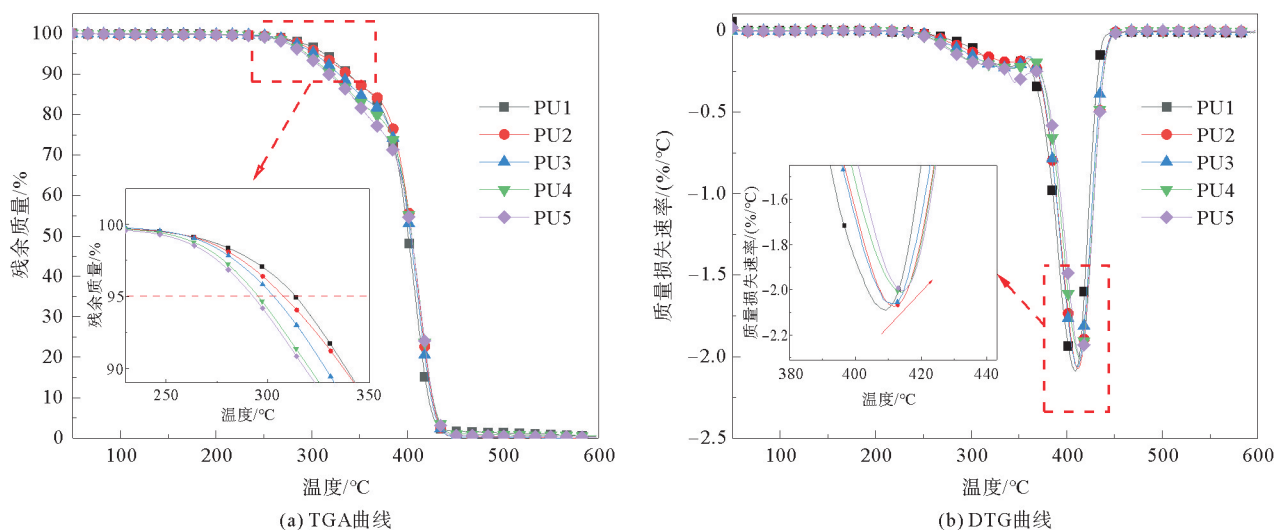


图5 PU的热重分析曲线

Fig. 5 Thermogravimetric analysis curves of PU

图5(b)为微商热重(derivativ thermogravimetry, DTG)曲线的对比图,可从中获得最大失重温度值,具体数据见表3(T_1 、 T_2 分别为不同失重阶段的最大分解温度)。由图可知,PU材料的热分解大概经历两个阶段,其中第一阶段为292~370℃,质量损失约20%;第二阶段为370~450℃,质量损失约80%。根据键能的大小, T_1 为氨基甲酸酯键所在硬段部分失重分解温度, T_2 为醚键和亚甲基所在软段的失重分解温度^[18-20]。温度升高至340℃左右时,分子链段中硬段结构开始大量分解失重, T_1 随DHDPD含量增加而增大,这是因为PU的硬段含量增加(13.67%~23.15%),硬段结构分解需要更高的温度。随温度的继续升高,达到醚键及亚甲基断裂所需温度,PU在410℃附近失重速度明显加快,但PU1~PU5的失重顺序发生改变,随DHDPD含量增加,PU第二阶段失重程度降低。这是因为当DHDPD含量增加时,分子链段中苯环含量增加,且氨基甲酸酯基团含量也随之增加,易形成更多的分子间氢键,材料的交联度得到了提高,形成了密集的三维网络结构,使其分解温度提高,材料热稳定性增强。因此说明二硫键的加入会使聚氨酯整体的热稳定性下降,而苯环及氢键则具有使聚氨酯热稳定性提高的作用,材料的热稳定性由二者协同作用决定。此外,PU的分解温度大于290℃,说明该聚氨酯材料在正常工作状态下具有良好的热稳定性。

表3 PU的热重分析数据

Table 3 TGA of PU				℃
样品	T_{d5}	T_1	T_2	
PU1	313.98	339.09	409.18	
PU2	307.71	339.42	410.85	
PU3	302.96	340.48	411.69	
PU4	295.36	342.49	413.91	
PU5	292.63	345.40	414.68	

2.4 机械性能

将 DHDPD 接入聚氨酯材料,利用二硫键键能低且动态可逆的特性赋予材料优异的自修复性能,同时二硫化物中含有苯环结构,其与氢键结合赋予材料不同的力学性能。由表 4 可知,随 DHDPD 含量增加,PU 的拉伸强度呈现先升高后降低的趋势,这是因为 DHDPD 可以和异氰酸酯生成氨基甲酸酯基团,其本身含有的大量羰基可以形成氢键,提高 PU 的力学性能^[21],但是 DHDPD 中的二硫键键能较低,易断裂,导致力学性能降低,在两者的共同作用下,PU 的力学性能表现出先增后降的趋势。其中 PU2 具有最高的机械性能,其拉伸强度及断裂伸长率分别为 4.61 MPa 和 1 123%。

2.5 自修复性能

图 6(a)和图 6(b)为 PU1~PU5 分别在 60 ℃和 80 ℃下修复 0、1 和 5 min 时的显微镜照片。通过图 6 可以发现,PU4 和 PU5 在 60 ℃修复 5 min 后划痕完全愈合,不存在明显的痕迹;PU3 在同样条件下划痕基本愈合,但仍存在较浅的痕迹。这是因为 PU 中含有动态二硫键,在加热条件下可以发生共价键的可逆交换作用,实现对划痕的修复。若将其放置于 80 ℃的电热鼓风干燥箱中并用显微镜进行观察,可以发现 PU1~PU5 在修复 5 min 后划痕均完全愈合,不存在明显的痕迹。PU5 在修复 1 min 后划痕基本愈合,仅存在较浅的痕迹。这说明修复温度对材料愈合具有明显的影响,随修复温度升高,划痕愈合速度加快。

表 4 PU 的机械性能

Table 4 Mechanical properties of PU

机械性能	PU1	PU2	PU3	PU4	PU5
拉伸强度/MPa	3.44	4.61	2.83	2.43	1.78
断裂伸长率/%	1 214	1 123	1 436	1 524	1 656

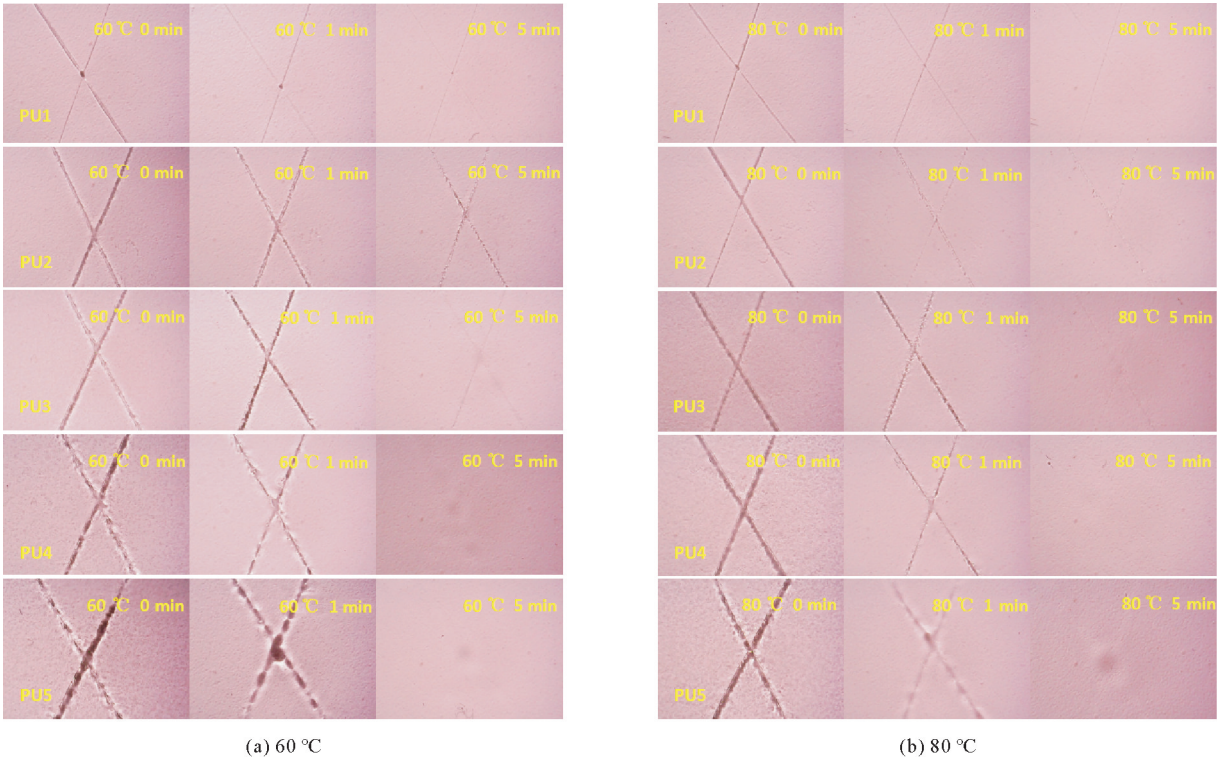


图 6 PU1~PU5 自修复显微镜照片

Fig. 6 Self-healing microscope photos of PU1~PU5

将 5 组 PU 裁剪为标准哑铃型试样,将其从中间狭窄部分切断后拼接起来,放置于 60 ℃的烘箱中保温,通过万能拉伸试验机测试经历不同保温时间的试样力学性能,计算得到自修复效率,以此表征其自修复性能。图 7 为 PU 自修复前后的应力应变曲线,结合表 5 中的数据可以看出,PU5 的自修复性能最佳,经过 60 ℃处理 2 h 后其拉伸强度和断裂伸长率可以恢复至原来的 93.3%和 97.9%;其次为 PU4,其拉伸强度和

断裂伸长率可以恢复至原来的 81.9% 和 94.8%, 这主要是受二硫键含量影响, 二硫键占比越高, 可动态交换的动态键越多, 材料的自修复性能越强。

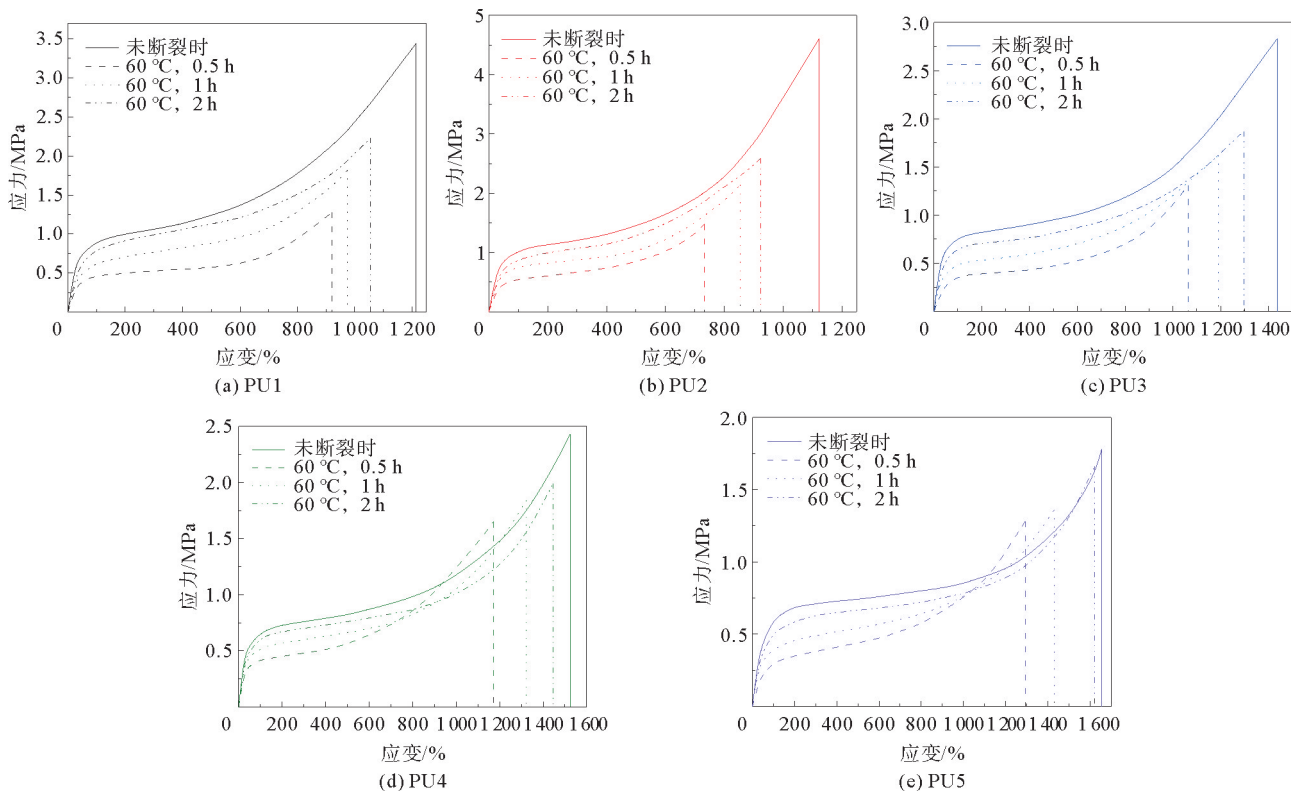


图 7 PU 自修复性能的应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of PU self-healing properties

表 5 PU 的自修复力学性能特征数据

Table 5 Data on self-healing mechanical properties characteristic of PU

样品名称	修复条件	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	修复效率/%	
				拉伸强度	断裂伸长率
PU1	未断裂时	3.44	1 214	—	—
	60 °C, 0.5 h	1.28	921	37.2	75.9
	60 °C, 1 h	1.82	974	52.9	80.2
	60 °C, 2 h	2.23	1 055	64.8	86.9
PU2	未断裂时	4.61	1 133	—	—
	60 °C, 0.5 h	1.48	732	32.1	65.2
	60 °C, 1 h	2.14	855	46.4	76.1
	60 °C, 2 h	2.59	924	56.2	82.3
PU3	未断裂时	2.83	1 436	—	—
	60 °C, 0.5 h	1.31	1 063	46.3	74.0
	60 °C, 1 h	1.62	1 189	57.2	82.8
	60 °C, 2 h	1.87	1 296	66.1	90.3
PU4	未断裂时	2.43	1 524	—	—
	60 °C, 0.5 h	1.65	1 170	67.9	76.8
	60 °C, 1 h	1.84	1 323	75.7	86.8
	60 °C, 2 h	1.99	1 445	81.9	94.8
PU5	未断裂时	1.78	1 656	—	—
	60 °C, 0.5 h	1.28	1 293	71.9	78.1
	60 °C, 1 h	1.36	1 431	76.4	86.4
	60 °C, 2 h	1.66	1 621	93.3	97.9

3 结论

以异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、聚四氢呋喃多元醇(PTMEG)和二羟基二苯二硫醚(DHDPD)作为原料,成功制备出了含有不同二硫化物含量的聚氨酯弹性体。研究表明,动态二硫键的引入,为该材料带来了出色的自修复性能及阻尼性能,当二硫化物质量分数为 2.92% 时,聚氨酯材料综合性能最佳。因二硫键键能低,随二硫键含量增大,分子链段断裂与重组频繁,二硫键动态交换速度加快,材料的阻尼及自修复性能提高,但当 DHDPD 质量分数超过 2.92% 时,苯环产生空间位阻阻碍分子链段运动,导致阻尼因子降低。较前期研究,引入羟基二硫化物后,实现经 60 °C 较低温度下处理 2 h,聚氨酯材料自修复效率超过 80%,避免 Diels-Alder 反应等高温响应条件,节省环境资源,极大的延长聚氨酯阻尼材料的使用寿命。后续研究可以结合聚氨酯自身分子结构设计,通过分子链段调控进一步提高聚氨酯材料的阻尼及自修复性能,从而拓宽有效温域范围,扩展材料的应用场景。

参考文献:

- [1] 杨玉华. 聚氨酯阻尼减振材料的研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2017, 32(2): 1-4.
YANG Yuhua. The research progress of polyurethane vibration-damping materials[J]. Polyurethane Industry, 2017, 32(2): 1-4.
- [2] 刘亚豪, 王源升, 杨雪, 等. 聚氨酯阻尼材料研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(增 1): 522-528.
LIU Yahao, WANG Yuansheng, YANG Xue, et al. A review of progress on polyurethane damping materials[J]. Materials Reports, 2023, 37(S1): 522-528.
- [3] WANG H R, LI T, LI J, et al. Structural engineering of polyurethanes for biomedical applications[J/OL]. Progress in Polymer Science, 2024, 151: DOI:10.1016/j.progpolymsci. 2024. 101803.
- [4] CUI M H, CHAI Z, LU Y, et al. Developments of polyurethane in biomedical applications: A review[J]. Resources Chemicals and Materials, 2023, 2(4): 262-276.
- [5] YU N, AN Z W, ZHANG J L, et al. Recent advances in tailored fabrication and properties of biobased self-healing polyurethane[J]. Biomacromolecules, 2023, 24(13): 4605-4621.
- [6] XU Q R, GUO Z W, HUANG Q R, et al. Effects of soft chain materials on the tribological performances of thermosetting polyurethane under water-lubrication[J/OL]. Tribology International, 2024, 196. DOI:10.1016/j.triboint. 2024. 109692.
- [7] 区洁, 田立颖, 王新灵. 软硬段对聚氨酯弹性体结构性能的影响[J]. 功能高分子学报, 2010, 23(2): 160-165.
OU Jie, TIAN Liying, WANG Xinling. Effect of hard and soft segment on structure-property of thermoplastic polyurethane elastomer[J]. Journal of Functional Polymers, 2010, 23(2): 160-165.
- [8] 周成飞. 聚氨酯自愈合材料的研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2018, 33(1): 1-4.
ZHOU Chengfei. Research progress of polyurethane self-healing materials[J]. Polyurethane Industry, 2018, 33(1): 1-4.
- [9] CERDAN K, THYS M, CORNELLÀ A C, et al. Sustainability of self-healing polymers: A holistic perspective towards circularity in polymer networks[J/OL]. Progress in Polymer Science, 2024, 152. DOI:10.1016/j.progpolymsci. 2024. 101816.
- [10] ZHANG Z P, RONG M Z, ZHANG M Q. Self-healable functional polymers and polymer-based composites[J/OL]. Progress in Polymer Science, 2023, 144. DOI:10.1016/j.progpolymsci. 2023. 101724.
- [11] 闫欣悦, 丁楠洋, 王成忠. 基于 D-A 反应的热可逆聚氨酯合成及其碳纤维复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1914-1922.
YAN Xinyue, DING Nanyang, WANG Chengzhong. Synthesis of thermoreversible polyurethane based on D-A reaction and preparation and properties of its carbon fiber composites[J]. Acta Material Compositae Sinica, 2024, 41(4): 1914-1922.
- [12] LIU M C, ZHONG J, LI Z J, et al. A high stiffness and self-healable polyurethane based on disulfide bonds and hydrogen bonding[J/OL]. European Polymer Journal, 2020, 124: DOI:10.1016/j.eurpolymj. 2020. 109475.
- [13] SÁIZ L M, PROLONGO M G, BONACHE V, et al. Self-healing materials based on disulfide bond-containing acrylate networks[J/OL]. Polymer Testing, 2023, 117. DOI:10.1016/j.polymertesting. 2022. 107832.
- [14] AZCUNE I, ODRIOZOLA I. Aromatic disulfide crosslinks in polymer systems: Self-healing, reprocessability, recyclability and more[J]. European Polymer Journal, 2016, 84: 147-160.

- [15] LYU L, WANG Z G, JI J, et al. Investigating rheological and healing properties of asphalt binder modified by disulfide-crosslinked poly (urea-urethane) elastomer[J/OL]. Construction and Building Materials, 2022, 347. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128546.
- [16] 陈亮, 张萍波, 蒋平平, 等. 基于二硫键的自修复水性聚氨酯的制备与性能研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(6):46-53.
CHEN Liang, ZHANG Pingbo, JIANG Pingping, et al. Preparation and properties of self-healing waterborne polyurethane based on disulfide bonds[J]. China Plastics, 2022, 36(6):46-53.
- [17] 冯见艳, 王园园, 王学川. 基于二硫键的水性聚氨酯/聚丙烯酸酯自修复材料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(8):83-92.
FENG Jianyan, WANG Yuanyuan, WANG Xuechuan. Preparation and properties of waterborne polyurethane/polyacrylate self-healing materials based on disulfide bond[J]. Polymer materials science and engineering, 2021, 37(8):83-92.
- [18] 滕金伟. 基于席夫碱的自愈合聚(醚-氨酯)的制备及性能研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2022:36-38.
TENG Jinwei. Preparation and properties of self-healing poly(ether-urethane)s based on schiff-base groups[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2022:36-38.
- [19] 董光超, 赵丽芬, 田秀娟. 硬段调控对PPG-MDI型阻尼聚氨酯力学和热稳定性能的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5):75-81.
DONG Guangchao, ZHAO Lifen, TIAN Xiujuan. Effect of hard segment regulation on mechanical property and thermal stability of PPG-MDI polyurethane[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5):75-81.
- [20] 李灿刚, 常源智, 张磊, 等. NCO含量对潜固化型单组分聚氨酯材料性能的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4):85-91.
LI Cangang, CHANG Yuanzhi, ZHANG Lei, et al. Effect of NCO content on properties of latent curing one-component polyurethane[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(4):85-91.
- [21] 向臻. 动态二硫键与氢键协同作用的多功能聚氨酯脲的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021:45-46.
XIANG Zhen. Study of multifunctional polyurethane based on synergy of dynamic disulfide bonds and hydrogen bonds [D]. Chengdu: South China University of Technology, 2021:45-46.

(责任编辑: 吕海亮)