

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.009

柔性透明聚氨酯弹性体制备及性能

李海柱,徐勤福,仪海霞,张君,邓桃益,孙有利,臧家庆

(济南北方泰和新材料有限公司,济南 250033)

摘要:采用不同聚醚软段、醇扩链剂和胺扩链剂,分别与二环己基甲烷二异氰酸酯(HMDI)反应,用浇注工艺制备了系列透明聚氨酯弹性体,考察了不同软段和扩链剂对弹性体的透光性、力学性能、耐屈挠性和折叠恢复性的影响。结果表明,由数均分子量为 3 000 的聚氧化丙烯二醇软段制备的弹性体拉伸强度较低;而由数均分子量为 1 000 的聚四氢呋喃二醇软段制备的弹性体耐屈挠性较差;由数均分子量为 2 000 的聚四氢呋喃二醇软段制备的弹性体透光率显著下降;与醇扩链剂相比,由胺扩链的弹性体的拉伸强度更高、耐热性和折叠恢复性更好。当软段采用低不饱和度聚醚 223-060LM、扩链剂为二乙基甲苯二胺时,制备的透明聚氨酯弹性体综合性能最佳,其拉伸强度、断裂伸长率、透光率、耐屈挠循环次数和折叠恢复时间分别为 25.6 MPa,567%,91%,2 100 次和 20 s。

关键词:透明聚氨酯;弹性体;透光性;折叠恢复性;二环己基甲烷二异氰酸酯;扩链剂;聚醚软段

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0049-05

Preparation and Properties of Flexible Transparent Polyurethane Elastomer

Li Haizhu, Xu Qinfu, Yi Haixia, Zhang Jun, Deng Taoyi, Sun Youli, Zang Jiaqing

(Jinan North Taihe New Material Co. Ltd., Jinan 250033, China)

Abstract : Different polyether soft segments, alcohol chain extenders and amine chain extenders were respectively reacted with dicyclohexylmethane diisocyanate (HMDI), and a series of transparent polyurethane elastomers were prepared by casting process. The effects of different soft segments and chain extenders on light transmittance, mechanical properties, flexural resistance and folding recovery of the elastomers were investigated. The results show that the elastomer prepared from the soft segment of polyoxypropylene diol ($M_n=3\ 000$) has a low tensile strength, while the elastomer prepared from the soft segment of polytetrahydrofuran ($M_n=1\ 000$) has poor flexural resistance, the light transmittance of the elastomer prepared from the soft segment of polytetrahydrofuran ($M_n=2\ 000$) decreases significantly. Compared with an alcohol chain extender, the elastomer extended by amine has higher tensile strength, better heat resistance and folding recovery. When low unsaturation polyether 223-060LM is adopted as the soft segment and diethyltoluenediamine is selected as the chain extender, the prepared transparent polyurethane elastomer has the best comprehensive performance, tensile strength, elongation at break, transmittance, cycle times of flexural resistance and folding recovery time are 25.6 MPa, 567%, 91%, 2 100 times and 20 s, respectively.

Keywords : transparent polyurethane ; elastomer ; light transmittance ; folding recovery ; HMDI ; chain extender ; polyether soft segment

聚氨酯材料分子结构中含有大量氨酯键,氨酯键结构与聚醚或聚酯等结构极性差别较大,体系内形成硬软段微相分离,硬段起增强作用,提供物理交联,软段提供柔韧性能。因此,聚氨酯材料既有橡胶的高弹性,又有塑料的强度,具有耐磨、耐低温、高抗冲击、高回弹和良好的生物相容性等优点,在汽车、

建筑、机械、航空、军工等领域得到广泛应用。基于聚氨酯材料的良好性能,一些特殊领域对透明聚氨酯材料提出了需求,根据文献其在憎水透明材料^[1]、夹层防弹玻璃^[2-3]、透明防护制品^[4]、眼镜片^[5]、透明防护涂层^[6]、装饰材料、工艺品等领域研究较多,应用越来越广泛。

通讯作者: 李海柱,硕士,工程师,主要从事光学胶粘剂、聚氨酯材料等研发工作 E-mail : lihaizhu3@126.com

收稿日期: 2019-04-15

引用格式: 李海柱,徐勤福,仪海霞,等. 柔性透明聚氨酯弹性体制备及性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(7): 49-53,82.

Li Haizhu, Xu Qinfu, Yi Haixia, et al. Preparation and properties of flexible transparent polyurethane elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7): 49-53, 82.

在透明聚氨酯原材料选择方面,异氰酸酯材料多选择二环己基甲烷二异氰酸酯 (HMDI) 或异佛尔酮二异氰酸酯 (IPDI),因脂肪族异氰酸酯不含苯环,耐光老化、耐黄变较好;软段以不结晶聚醚多元醇如聚氧化丙烯多元醇和低分子量聚四氢呋喃醚二醇 (PTMG) 研究较多,因聚酯多元醇易结晶,导致其制备的聚氨酯弹性体透光率较低,而聚醚多元醇玻璃化转变温度较低,为非晶结构,所以聚醚基聚氨酯透光性好、柔性好。甄建军等^[4]以低分子量的聚己二酸-1,4-丁二醇酯二元醇 (PBA) 和 HMDI,制备了高硬度透明聚氨酯弹性体,其具有较高的强度和极好的抗冲击性能。郭新涛等^[7]制备了 HMDI-PTMG 系列透明聚氨酯弹性体,以 1,4-丁二醇 (BDO) 和三羟甲基丙烷 (TMP) 为扩链剂,考察了原材料和扩链剂对比对弹性体力学性能的影响,并对其耐热性进行了分析。陈海良等^[8]考察了以聚醚多元醇、IPDI 和 BDO 为原料的透明聚氨酯弹性体的力学性能。程国华等^[9]研究了不同聚醚软段对 HMDI 基聚氨酯弹性体透明性、力学性能和动态力学性能的影响,结果表明由于聚乙二醇易结晶,其制备的聚氨酯透光度最差,PTMG 基聚氨酯力学性能和动态力学性能最好。叶耘峰等^[10]通过引入含硫扩链剂,制备了高透光率和高折射率的聚氨酯弹性体。姚小虎等^[11]和欧迎春等^[12]分别对透明聚氨酯胶片的动态力学性能和紫外辐照老化机理进行了研究。

然而,透明聚氨酯弹性体在可折叠透明器件、护目镜、防毒面罩、形状记忆功能透明材料等的应用方面,不但要求有良好透光度、力学性能,而且要求有较好柔韧性、耐屈挠性和折叠恢复性。对透明聚氨酯弹性体这方面性能研究的文献报道较少,笔者通过聚醚多元醇、HMDI、醇扩链剂和胺扩链剂等制备了系列柔性透明聚氨酯弹性体,并考察了不同聚醚软段和扩链剂对其力学性能、耐屈挠性、透光性和折叠恢复性等性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

HMDI: 万华化学集团股份有限公司;

聚醚二元醇 (低不饱和度聚醚): 223-060LM, 数均分子量 (M_n)=1 800, 陶氏化学集团;

聚氧化丙烯二醇: D2000, M_n =2 000, 山东东大一诺威聚氨酯有限公司;

聚氧化丙烯二醇: D3000, M_n =3 000, 山东东大

一诺威聚氨酯有限公司;

PTMG: PTMG2000, M_n =2 000, 巴斯夫公司;

PTMG: PTMG1000, M_n =1 000, 巴斯夫公司;

BDO: 分析纯, 纯度 $\geq 99.5\%$, 国药集团化学试剂有限公司;

三羟甲基丙烷 (TMP): 分析纯, 纯度 $\geq 99.5\%$, 国药集团化学试剂有限公司;

二乙基甲苯二胺 (DETDA): E100LC, 美国雅宝集团。

1.2 主要仪器及设备

平板硫化机: XLB-25 型, 邢台维斯特机械有限公司;

镜面金属模具: 自制;

电子万能试验机: WDW-5KN 型, 济南翰森精密仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Spectrum 400 型, 美国 Perkin Elmer 公司;

紫外可见分光光度计: Lambda900 型, 美国 Perkin Elmer 公司;

橡胶疲劳龟裂试验机: MZ-4003C 型, 江苏明珠试验机械有限公司;

动态力学分析 (DMA) 仪: DMA 242C 型, 德国 Netzsch 公司。

1.3 预聚物制备及透明弹性体浇注

将聚醚多元醇加入烧瓶中, 120℃抽真空 2 h, 然后降温至 60℃, 加入称量好的异氰酸酯, 氮气保护, 于 90℃保温反应 4 h, 降温倒出, 即为预聚物。

取加热至 80℃的预聚物 100 g 倒入烧杯中, 加入称量好的扩链剂, 迅速用玻璃棒搅拌均匀, 倒入已经预热至 110℃的镜面金属模具中 (平面型腔, 厚度为 2 mm)。待浇注液开始拉丝时合模, 保压强度为 10 MPa、温度为 110℃, 1 h 后卸压, 开模取出透明聚氨酯弹性体片。将弹性体片放入 100℃烘箱保温 16 h, 然后室温放置 7 d, 待测试。

1.4 测试与表征

拉伸强度和断裂伸长率按 GB/T 528-2009 测试, 拉伸速度 500 mm/min;

透光率按 GB/T 2410-2008 测试;

耐屈挠性能按 GB/T 13934-2006 测试, 往复运动行程为 57 mm, 运动频率为 5.0 Hz, 记录试样断裂时的平均循环次数;

FTIR 分析: 扫描范围 550~4 000 cm^{-1} , 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数 16 次;

DMA 分析: 变形模式为拉伸, 频率 1 Hz, 温度范围 $-100 \sim 120^{\circ}\text{C}$, 升温速率 3 K/min ;

折叠恢复测试: 截取弹性体尺寸 $100\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 用小型长尾夹把对折的弹性体片夹住, 2 min 后, 取下夹子, 测量弹性体片由对折状态恢复到平伸状态所用的时间。

2 结果与讨论

2.1 聚醚软段对聚氨酯弹性体性能的影响

(1) 力学性能分析。

异氰酸酯为 HMDI, 加入不同聚醚软段, 以 $\text{NCO}:\text{OH}$ 物质的量之比 $=2.4$ 制备聚氨酯预聚物, 扩链剂为 DETDA, 扩链系数为 0.9, 制备的系列透明聚氨酯弹性体的力学性能如表 1 所示。223-060LM 为陶氏推出的低不饱和度聚醚, 属环氧乙烷与环氧丙烷共聚醚, 伯羟基封端, 活性高, 分子链规整, 比普通聚醚双官能含量高, 官能度更接近 2。由表 1 看出, 223-060LM 为软段制备的聚氨酯弹性体拉伸强度比普通聚醚 D2000 制备的聚氨酯弹性体更好, 两者的断裂伸长率相差较小, 耐屈挠循环次数都大于 2000 次, 柔性较好。软段为聚醚 D3000 时, 因软段分子量增大, 硬段含量降低, 拉伸强度下降幅度在 50% 左右, 但断裂伸长率保持在较高水平, 耐屈挠性也最好, 断裂前的循环次数达到 3500 次, 柔性最好。软段为聚醚 PTMG2000 时, 因 PTMG2000 有结晶性, 分子间力增强, 分子链柔性下降, 所以拉伸强度比软段为 D2000 时高, 但是断裂伸长率下降明显, 耐屈挠循环次数也明显降低, 降至 1600 次, 柔性变差。软段为 PTMG1000 时, 因软段分子量较低, 硬段含量升高, 所以弹性体拉伸强度升高, 在各个聚醚软段制备的聚氨酯弹性体中最高, 但断裂伸长率下降至 400% 以下, 而且耐屈挠最差, 断裂前的循环次数只有 500 次, 柔性最差。

表 1 不同聚醚软段的透明聚氨酯弹性体的力学性能

软段	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	耐屈挠循环次数 / 次
223-060LM	25.6	567	2100
D2000	22.4	585	2300
D3000	11.9	530	3500
PTMG2000	24.9	416	1600
PTMG1000	30.6	370	500

(2) 透光率分析。

影响聚氨酯弹性体透光率的主要因素是体系中是否有结晶生成, 如果有结晶, 而且晶体尺寸较大, 会折射或反射光线, 造成透明度下降。5 种弹性体材料的透光率如图 1 所示。由图 1 看到, 除

PTMG2000 为软段制备的弹性体透光率为 76% 外, 其它软段聚醚制备的弹性体透光率都超过 90%, 因为聚醚 223-060LM, D2000 和 D3000 均为非晶聚醚, 分子结构没有结晶倾向; PTMG1000 虽然有结晶倾向, 但软段分子链较短, 硬段的物理交联阻碍软段分子链的活动范围, 所以软段基本无法形成结晶; 而 PTMG2000 本体有结晶倾向, 软段分子链较长, 硬段部分的氢键交联不能完全阻止其软段的结晶活动, 导致软段部分结晶, 弹性体透光率下降。在浇注合模过程有多余料液通过溢料口流出, 料液流动的过程牵引 PTMG2000 软段部分形成取向结晶, 导致弹性体的透光率进一步降低。

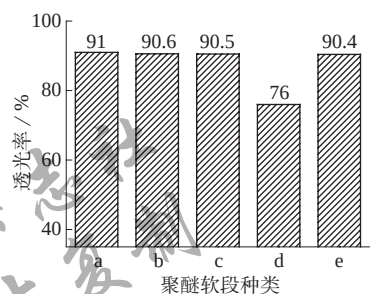


图 1 不同聚醚软段的聚氨酯弹性体的透光率
a—223-060LM; b—D2000; c—D3000;
d—PTMG2000; e—PTMG1000

2.2 扩链剂对聚氨酯弹性体性能的影响

(1) 力学性能和透光率分析。

根据以上分析, 选择软段为 223-060LM 可获得综合性能较好的聚氨酯材料, 因此以 HMDI 为硬段、223-060LM 为软段, 按照 $\text{NCO}:\text{OH}$ 物质的量之比 $=2.4$ 制备聚氨酯预聚物, 扩链系数为 0.9, 分别采用复配扩链剂 BDO8+TMP2 (BDO 的羟基物质的量分数为 80%, TMP 的羟基物质的量分数为 20%) 和 DETDA 制备了聚氨酯弹性体 (标记为 CPU1, CPU2), 其力学性能、耐热性和透光率如表 2 所示。

表 2 不同扩链剂的聚氨酯弹性体力学性能、耐热性和透光率

试样编号	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	耐热性	透光率 / %
CPU1	5.6	604	100℃表面发粘	90.8
CPU2	25.6	567	100℃基本无变化	91.0

由表 2 可知, 扩链剂为 BDO8+TMP2 时, 弹性体的拉伸强度很低, 断裂伸长率较高, 耐热较差; 扩链剂为 DETDA 时, 弹性体的拉伸强度明显提高, 而断裂伸长率相对 CPU1 只稍微下降, 依然保持在较高水平, 并且耐热较好。这是因为醇类扩链剂与—NCO 反应形成氨基醚键, 胺类扩链剂与—NCO 反应形成脲键, 脲键比氨基醚键的氢键数量几乎多一倍, 因

而分子间力较高,硬段极性大,硬软段微相分离更完善,表现在宏观方面就是力学性能较好,耐热好。

由透光率结果可知,两种扩链剂制备的弹性体透光率基本相似,变化很小。扩链剂影响硬段结构规整性和结晶性,BDO8+TMP2扩链剂中BDO结构较规整,TMP为非对称结构,打乱硬段规整排序,使其难以形成有序结晶结构;DETDA分子结构为非对称结构,而且有3,5-二乙基-2,4-甲苯二胺和3,5-二乙基-2,6-甲苯二胺两种分子结构,其硬段区域不易形成结晶。因此扩链剂BDO8+TMP2和DETDA对弹性体透光率的影响较小。

(2) FTIR 分析。

聚氨酯弹性体CPU1和CPU2的FTIR谱图如图2所示。由图2可知,两种弹性体在 3324 cm^{-1} 均有吸收峰,此处为氢键化的N—H伸缩振动吸收峰,游离N—H伸缩振动吸收在 3500 cm^{-1} 左右,氢键化使其向低频移动。N—H可来自氨基或脲基,无论是氨基或脲基,无论是氨基或脲基,无论是氨基或脲基,均可与N—H形成氢键,使其吸收峰向低频移动。DETDA扩链的弹性体在波数 1711 cm^{-1} 为氨基羰基吸收峰, 1630 cm^{-1} 处的强吸收为氢键化的脲基^[13]伸缩振动吸收峰,此峰为脲基的特征峰,而且 1630 cm^{-1} 的峰强高于 1711 cm^{-1} 的峰强,说明弹性体中氢键化的脲基含量较多。 1549 cm^{-1} 为酰胺II带(N—H变形振动)吸收峰, 1451 cm^{-1} 为甲基、亚甲基的碳氢吸收峰。BDO8+TMP2扩链的弹性体在 1711 cm^{-1} 有氨基羰基特征吸收峰,在 1662 cm^{-1} 的吸收峰为氢键化氨基羰基吸收峰, 1526 cm^{-1} 为氨基酰胺II带(N—H变形振动)吸收峰。两种弹性体的红外吸收均在 2270 cm^{-1} 左右无一NCO的特征吸收峰,说明—NCO已完全参与反应。

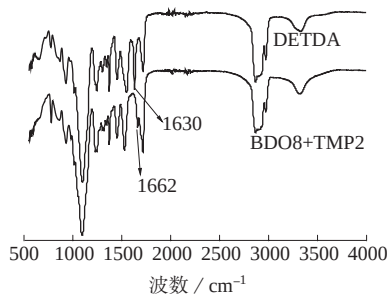


图2 扩链剂分别为DETDA和BDO8+TMP2的聚氨酯弹性体FTIR谱图

综上,DETDA扩链的聚氨酯弹性体在 1630 cm^{-1} 有脲基特征吸收峰;BDO8+TMP2扩链的聚氨酯弹性体在 1711 cm^{-1} 和 1526 cm^{-1} 有氨基

基特征吸收峰,表明浇注扩链反应成功完成,而且两种弹性体内都有大量氢键形成。

2.3 聚氨酯弹性体的DMA

CPU1和CPU2的DMA测试结果如图3所示。由图3可以看出,聚氨酯弹性体的储能模量(弹性模量)在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近的区间内表现为指数级下降,CPU1的弹性模量指数级下降的温度范围比CPU2更广,而且同一温度下,CPU1的弹性模量也比CPU2更低。因为CPU1只含有氨基键,CPU2除含有氨基键外还含有脲键,分子间作用力更强,宏观表现为弹性模量更高。CPU1弹性体在大于 $47.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,弹性模量又一次快速下降,因为氨基键耐热不好,温度升高后,氢键被破坏,分子间力急剧下降,所以弹性模量快速下降。两种弹性体的弹性模量随温度变化的显著差异进一步解释了不同扩链剂制备弹性体力学性能的较大差别。尤其在温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,CPU1的弹性模量小于 1 MPa ,基本无力学性能,耐热最差。

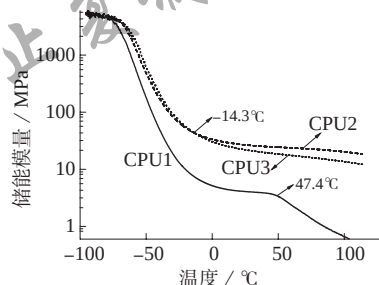


图3 聚氨酯弹性体的动态力学性能

鉴于表1中由D2000和223-060LM制备的聚氨酯弹性体在韧性和柔性方面相差不大,故在扩链剂都为DETDA时,通过改变软段聚醚(将223-060LM替换为D2000),制备了CPU3聚氨酯弹性体,对比CPU2和CPU3的DMA测试结果,探讨软段聚醚(223-060LM,D2000)对聚氨酯弹性体动态力学性能的影响,结果如图3所示。两种聚氨酯弹性体的储能模量(弹性模量)的变化趋势基本相同,随温度逐渐升高,弹性模量在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近的区间呈指数级下降,在其它区间变化缓慢。因为两种聚醚的玻璃化转变温度都在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,在此区间聚醚链段由玻璃态向高弹态转变,宏观表现为弹性模量指数级下降。在温度低于 $-14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域,CPU3的弹性模量略大于CPU2;温度高于 $-14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域,CPU2的弹性模量大于CPU3。因为低温时分子链段活动能力较差,CPU2软段是氧化乙烯与氧化丙烯的共聚物,CPU3软段是聚氧化丙烯,侧甲基

含量比 CPU2 高,分子链段更坚硬,表现为弹性模量偏高。温度升高后,分子链段活动能力增强,聚醚 D2000 比聚醚 223-060LM 含有更多的不饱和键,未参与反应的不饱和侧链有内增塑作用,所以弹性模量 CPU2 大于 CPU3。

2.4 聚氨酯弹性体的折叠恢复性分析

弹性体折叠恢复性在使用过程中具有重要的现实意义。CPU1 弹性体的拉伸强度太低,不具备实用性,保持 CPU1 原有配方体系,将 NCO:OH 物质的量之比提升为 3.2,制备的聚氨酯弹性体拉伸强度为 22 MPa,断裂伸长率为 480%,标记为 CPU1',其力学性能基本与 CPU2, CPU3 相似,然而它们的折叠恢复性却有非常大的差别,结果如图 4 和表 3 所示。

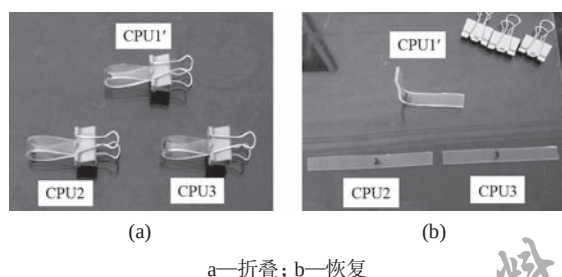


图 4 不同透明聚氨酯弹性体折叠恢复性测试

表 3 不同透明聚氨酯弹性体折叠恢复时间

项 目	弹性体		
	CPU1'	CPU2	CPU3
折叠恢复时间/s	120	20	25

由表 3 可以看出, DETDA 扩链的弹性体折叠恢复时间明显比 BDO8+TMP2 扩链的弹性体短。这是因为胺扩链,体系中生成脬基,脬基与聚醚软段极性差别大,所以体系微相分离程度更高;醇扩链时,体系中生成氨基,因为极性差别,体系也会有硬段与软段的微相分离,但是因为氨基极性不如脬基大,所以 CPU1' 微相分离程度不如 CPU2 和 CPU3。微相分离使得软段更纯粹,链段活动更自由,活动速度也更快。受力折叠后,分子链处于强迫伸展状态,外力除去后,分子链趋于恢复自由紊乱状态,微相分离程度更高的体系,软段分子链活动更自由,构象恢复更快。所以, CPU2 和 CPU3 的折叠恢复速度比 CPU1' 快。CPU2 弹性体因软段分子链更规整,室温条件下其储能模量比 CPU3 更高,微相分离程度更好,所以折叠恢复时间更短。

3 结论

(1) 软段对聚氨酯弹性体力学性能影响较大,在相同 NCO:OH 物质的量之比值和 DETDA 扩链情况下,由软段 223-060LM 制备的弹性体,力学性能

和耐屈挠好、透光率高,综合性能最好。

(2) 醇扩链制备的聚氨酯弹性体形成氢键化的氨基键,胺扩链制备的聚氨酯弹性体形成氢键化的脬键,因脬键中与 N 连接的活性氢数量比氨基键多一倍,所以形成的氢键数量较多,胺扩链弹性体的拉伸强度更高,耐热也明显增强, DMA 测试结果也验证了这一点。

(3) 胺扩链的聚氨酯弹性体折叠恢复性较好,醇扩链的聚氨酯弹性体折叠恢复性相对较差。胺扩链后弹性体内生成脬结构,其微相分离程度相对氨基结构更完善,软段分子链活动更自由,构象恢复更快,即折叠恢复性较好。

参考文献

- [1] 张英强,徐微,李焯等. 侧链含氟聚氨酯透明弹性体的制备与性能研究[J]. 化工新型材料,2012,40(10):27-31.
Zhang Yingqiang, Xu Wei, Li Ye, et al. Study on preparation and properties of transparent side-chain fluorinated polyurethane elastomers[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(10):27-31.
- [2] 欧阳效明. 夹层玻璃用高透明性聚氨酯热熔胶的研制[J]. 化学推进剂与高分子材料,2011,9(5):55-57.
Ouyang Xiaoming. Research and preparation of high transparency polyurethane hot-melt adhesive for laminated glass[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(5):55-57.
- [3] 侯俊先,厉蕾,刘伟东,等. 扩链剂对基于氢化 MDI 的透明聚氨酯弹性体性能的影响[J]. 航空材料学报,2011,31(4):74-80.
Hou Junxian, Li Lei, Liu Weidong, et al. Effect of chain extender on properties of transparent thermoplastic polyurethane elastomers[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4):74-80.
- [4] 甄建军,李英建,翟文. 高硬度透明聚氨酯弹性体的合成与性能研究[J]. 弹性体,2017,27(3):29-32.
Zhen Jianjun, Li Yingjian, Zhai Wen, et al. Properties and synthesis of high hardness and transparent polyurethane elastomer[J]. China Elastomers, 2017, 27(3):29-32.
- [5] 袁翼,曹根庭. 光学树脂材料的开发前景分析[J]. 自然科学,2015,3(1):1-4.
Yuan Yi, Cao Genting. Prospect analysis of development of optical resin materials[J]. Open Journal of Nature Science, 2015, 3(1):1-4.
- [6] 李旭. 航空透明件抗风砂冲蚀聚氨酯防护涂层研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院,2017.
Li Xu. Study on the wind-blown sand erosion resistant polyurethane coatings for aerospace transparency[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2017.
- [7] 郭新涛,厉蕾. HMDI-PTMEG 系列透明聚氨酯弹性体的合成与性能[J]. 塑料工业,2010,38(10):6-8,12.

- compounder: Experimental procedures for a reliable polymer melt viscosity measurement[J]. *Polymer Testing*, 2014, 40: 207–217.
- [10] 徐斌, 王敏杰, 于同敏, 等. 微尺度效应对聚合物熔体壁面滑移的影响研究[J]. *材料工程*, 2008(10): 16–20, 24.
Xu Bin, Wang Minjie, Yu Tongmin, et al. Study on micro-scale effect on the impact of polymer melt wall Slip[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(10): 16–20, 24.
- [11] Zhao Danyang, Jin Yifei, Wang Minjie. Study on viscosity of polymer melt flowing through micro channels considering the wall-slip effect[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2012, 52(8): 1806–1814.
- [12] Meng L, Wu D, He X, et al. Effect of surface tension on filling flow of carboxymethyl cellulose solution in microchannel[J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 19(2): 1034–1039.
- [13] Xu Bin, Wang Minjie, Yu Tongmin, et al. Viscous dissipation influencing viscosity of polymer melt in Micro Channels[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(7): 1417–1423.
- [14] Yang W M, Yokoi H. Visual analysis of the flow behavior of core material in a fork portion of plastic sandwich injection molding[J]. *Polymer Testing*, 2003, 22(1): 37–43.
- [15] 陈静波, 申长雨, 横井俊秀. 多型腔注射模充填不平衡试验[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 170–174.
Chen Jingbo, Shen Changyu, Yokoi Hidetoshi. Experimental study on filling imbalance in multi-cavity injection mold[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 170–174.
- [16] 姜开宇, 横井俊秀. 注射成型过程熔体前沿充填不平衡现象的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 294–300.
Jiang Kaiyu, Yokoi Hidetoshi. Experiment study on filling imbalance phenomenon of melt front during injection molding process[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 294–300.
- [17] Knights M. What to do when the mold just won't fill right[J]. *Plastics Technology*, 2004, 50(2): 41–42.
- [18] Chen C S. Determination of the injection molding process parameters in multi-cavity injection molds[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, 25(13): 1367–1373.
- [19] Park S R, Kim J H, Lyu M Y. A novel runner design for flow balance of cavities in multi-cavity injection molding[J]. *Polymer Korea*, 2009, 33(6): 561–568.
- [20] Yao D G, Kim B. Scaling issues in miniaturization of injection molded parts[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(4): 733–738.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿邮箱为 www.epa1973.net。本刊未委托任何机构和从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿邮箱网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)

(上接第53页)

- Guo Xintao, Li Lei. Synthesis and property of transparent polyurethane elastomers based on HMDI-PTMEG[J]. *China Plastics Industry*, 2010, 38(10): 6–8, 12.
- [8] 陈海良, 张芳, 陈伟, 等. IPDI 在透明聚氨酯弹性体中的应用研究[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2005, 3(5): 26–27, 31.
Chen Hailiang, Zhang Fang, Chen Wei, et al. Application of IPDI in transparent polyurethane elastomer[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2005, 3(5): 26–27, 31.
- [9] 程国华, 刘学鹏, 徐瑞祥, 等. 聚醚软段对 HMDI 基透明聚氨酯弹性体性能的影响[J]. *聚氨酯工业*, 2016, 31(4): 40–43.
Cheng Guohua, Liu Xuepeng, Xu Ruixiang, et al. Effect of polyether soft segments on the properties of HMDI based transparent polyurethane elastomers[J]. *Polyurethane Industry*, 2016, 31(4): 40–43.
- [10] 叶耘峰, 李乐, 唐果东, 等. 高折射率透明聚氨酯弹性体的制备及性能研究[J]. *聚氨酯工业*, 2018, 33(6): 9–11.
Ye Yunfeng, Li Le, Tang Guodong, et al. Preparation and properties of transparent polyurethane elastomers with high refractive index[J]. *Polyurethane Industry*, 33(6): 9–11.
- [11] 姚小虎, 张龙辉, 张晓晴, 等. 航空透明聚氨酯胶片动态力学性能实验研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2236–2242.
Yao Xiaohu, Zhang Longhui, Zhang Xiaoqing, et al. Experimental study on dynamic mechanical behavior of aerospace-transparent polyurethane interlayer[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2015, 36(7): 2236–2242.
- [12] 欧迎春, 马晓娜, 张延芳等. 紫外辐照下透明聚氨酯胶片老化机理[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(1): 93–98.
Ou Yingchun, Ma Xiaona, Zhang Yanfang, et al. Degradation Mechanisms of Transparent Polyurethane Interlayer under UV Irradiation[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(1): 93–98.
- [13] 刘丹, 袁永朝, 曹红宝. 红外光谱法研究聚氨酯脲氢键[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2009, 7(6): 60–63.
Liu Dan, Yuan Yongchao, Cao Hongbao. Study on hydrogen bond in polyurethane urea by FT-IR[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2009, 7(6): 60–63.