

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.020

THEIC的液化及在PUE中的应用

程新泰, 宋文生, 王俊锴, 刘继纯

(河南科技大学化工与制药学院, 河南洛阳 471023)

摘要: 三羟乙基异氰尿酸酯(THEIC)因其溶解性差、熔点高,不适合直接用于聚氨酯弹性体(PUE)的制备。通过改性降低THEIC熔点,制得THEIC液化物(L-THEIC)是克服其使用限制的路径之一。选用己内酯为液化剂,钛酸四丁酯为催化剂,优化THEIC液化条件,制备了常温下呈液态的L-THEIC,并用红外、核磁对其结构表征。进一步,以L-THEIC为交联剂,利用预聚体法和一步法制备PUE,通过力学分析与极限氧指数(LOI)测试初步探究了L-THEIC用量对PUE力学和阻燃性能的影响。以乙二醇(EG)为扩链剂,一步法制备PUE试样,通过力学分析探究了与L-THEIC等羟基物质的量时,EG与L-THEIC对PUE力学性能的影响差异。研究表明,在羟基相同物质的量用量下,同EG相比,L-THEIC可提高PUE试样的拉伸强度,证明L-THEIC可用于PUE的制备,且随L-THEIC用量的增加,PUE的拉伸强度、硬度、比强度、LOI值均有提高。当L-THEIC质量分数为32.5%时,PBA-MDI预聚物体系的综合性能相对更好,其中,拉伸强度10.5 MPa,断裂伸长率102%,LOI值为24.8%。

关键词: 三羟乙基异氰尿酸酯;己内酯;液化;聚氨酯弹性体;性能

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0122-06

Liquefaction of THEIC and Its Application in Polyurethane

Cheng Xintai, Song Wensheng, Wang Junkai, Liu Jichun

(School of Chemical Engineering and Pharmaceutics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract : Trihydroxyethyl isocyanurate (THEIC) is not suitable for the preparation of polyurethane elastomer (PUE) due to its poor solubility and high melting point. Therefore, by reducing the melting point of THEIC, one of the ways to overcome the limitation of its application is to prepare liquefied THEIC (L-THEIC). Caprolactone (ϵ -CL) was selected as the liquefaction agent, and tetrabutyl titanate (TBT) was used as the catalyst to explore the better liquefaction conditions of THEIC. L-THEIC was prepared which can be liquid at room temperature, and its structure was characterized by infrared spectrum and nuclear magnetic spectra. Furthermore, L-THEIC was used as the cross-linking agent, and the prepolymer method and one-step method were used to prepare PUE. The effect of L-THEIC amount on the mechanical properties and flame retardation of PUE was studied by mechanical analysis and limit oxygen index(LOI)test. Using ethylene glycol (EG) as a chain extender, PUE samples were prepared by a one-step method. The differences in the effects of EG and L-THEIC on the mechanical properties of PUE were investigated by mechanical analysis under the same amount of substance of hydroxyl groups as L-THEIC. The results show that compared with EG, L-THEIC can increase the tensile strength of PUE sample at the same amount of substance of hydroxyl group. L-THEIC could be used for the preparation of PUE, and the tensile strength, hardness, specific strength and limit oxygen index of PUE increase with the increase of L-THEIC amount. When the amount of L-THEIC is 32.5 wt%, the comprehensive performance of PBA-MDI prepolymer system is much better, among which, the tensile strength is 10.5 MPa, the elongation at break is 102%, and LOI is 24.8%.

Keywords : trihydroxyethyl isocyanurate ; caprolactone ; liquefaction ; polyurethane elastomer ; performance

基金项目: 国家自然科学基金河南省联合基金项目(U1704144)

通信作者: 宋文生, 副教授, 主要从事高分子材料合成与应用研究

收稿日期: 2023-02-25

引用格式: 程新泰, 宋文生, 王俊锴, 等. THEIC的液化及在PUE中的应用[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 122-127, 158.

Cheng Xintai, Song Wensheng, Wang Junkai, et al. Liquefaction of THEIC and its application in polyurethane[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 122-127, 158.

聚氨酯弹性体(PUE)是一种重要的高分子合成材料,因其原料组成和加工工艺的不同,其性能可随意调控,所以PUE在诸多领域都有着广泛的应用。多元醇、多异氰酸酯、扩链剂(或交联剂)作为影响PUE应用广泛性的内在因素,三者的种类、规格、用量至为关键。研究表明,通过原料的优化组合,可使PUE性能在一定程度上有所改善或提升,但若要从根本上改善PUE性能,应主要从原料自身结构考量。因此,开发并探索新原料在聚氨酯中的应用一直是聚氨酯研究领域关注的焦点。三羟乙基异氰尿酸酯(THEIC),其结构如图1所示,其伯羟基可与多异氰酸酯—NCO基反应起交联作用,理论上THEIC应能适于PUE的制备,而分子中独特的三嗪环结构可提高PUE的强度与阻燃性。

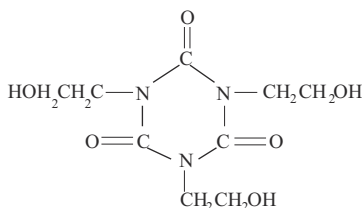


图1 THEIC结构式

THEIC可由氯乙醇法、碳酸亚乙酯法、异氰酸酯法、环氧乙烷法等制得^[1-5],室温为白色结晶性粉末,熔点为136~140℃。作为一种功能性单体,THEIC目前主要用于涂料工业中聚酯亚胺漆包线漆和醇酸树脂漆的改性,也可作为塑料加工用增塑剂^[6]、热稳定剂^[7]、固化剂^[8]、阻燃剂^[9]等。

尽管THEIC有着上述诸多用途,但其仅在某些强极性溶剂如 N,N -二甲基甲酰胺和水中溶解,而在乙醚、乙醇、苯及四氯化碳等溶剂中溶解度低甚至难溶。在聚氨酯聚醚多元醇中,THEIC即使在加热状态下也无法溶解,结合其熔点较高,使得THEIC直接用于PUE制备的报道很少,仅见陈由亮等^[10]报道了THEIC与3,3'-二氯-4,4'-二氨基二苯基甲烷混合物扩链聚四氢呋喃二醇(PTMG)/甲苯二异氰酸酯(TDI)预聚体。若采用液化技术,降低THEIC的熔点,使其在室温时呈液态,则可极大拓展THEIC在PUE制备中的应用。

笔者以己内酯(ϵ -CL)为液化剂、钛酸四丁酯(TBT)为催化剂,与THEIC反应,制得常温下呈液态的液化物L-THEIC。进一步,以L-THEIC为交联剂,分别采用预聚体法和一步法制备PUE,考察L-THEIC用量对PUE制备工艺及性能的影响,并比较L-THEIC与乙二醇(EG)对一步法所制PUE力学性

能的影响差异。

1 实验部分

1.1 主要原料

ϵ -CL:化学纯,上海麦克林生化科技有限公司;

THEIC:化学纯,郑州希派克科技有限公司;

TBT:化学纯,天津市光复精细化工研究所;

EG:分析纯,天津申泰化学试剂有限公司;

PTMG:数均分子量(M_n)=2 000,工业级,德国BASF公司;

聚己二酸丁二酯二醇(PBA), M_n =2 000:工业级,洛阳吉明化工有限公司;

高活性聚醚多元醇(330 N):工业级,上海高桥石化公司;

TDI:分析纯,成都艾科达化学试剂有限公司;

二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)、液化MDI(—NCO含量29.3%):工业级,Huntsman聚氨酯公司;

二月桂酸二丁基锡:T-12,工业级,上海阿拉丁生化公司;

叔胺催化剂:33EG,自制。

1.2 主要仪器与设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IRTracer-100型,日本岛津公司;

核磁共振波谱仪:Bruker Avance III型,德国Bruker公司;

拉力试验机:WDW-S型,济南法恩试验仪器有限公司;

邵氏硬度计:XHS-A型,营口材料试验机有限公司;

极限氧指数(LOI)仪:JF-3型,南京江宁分析仪器有限公司。

1.3 实验过程

(1) THEIC的液化。

在TBT量为THEIC用量0.75%恒定情况下,将干燥后的THEIC, ϵ -CL与TBT按计量依次加入三口烧瓶中,置于带有加热、搅拌、冷凝管、温度计的装置中,通入 N_2 ,升温至100℃反应20 h,之后于120℃、真空度>0.09 MPa下脱除游离 ϵ -CL单体,制得室温呈液态、可稳定存储的无色黏稠THEIC液化物,并筛选出较佳液化物L-THEIC。

(2) PUE试样的制备。

以L-THEIC为交联剂,分别采用预聚体法、一步法制备PUE。

①预聚体法:在脱水PTMG中加入计量TDI,升

温至 (80 ± 5) °C反应2 h,真空脱泡后,制得—NCO封端PU预聚体;然后,于预聚体中加入计量L-THEIC和微量T-12,快速混匀并注模,在100 °C下熟化2 h,制得L-THEIC量不同的PUE-A系列试样,编号A1~A5。由PBA替代PTMG,MDI替代TDI,依据同样过程,制得L-THEIC量不同的PUE-B另列试样,编号为B1~B5。

②一步法:在塑料杯中准确称取计量聚醚多元醇330 N,L-THEIC,滴加微量胺锡复配催化剂,预混后,加计量液化MDI,快速混匀并注模,固化成型后制得L-THEIC的量不同的PUE-C系列试样,编号为C1~C5,试样室温放置7 d后测其性能。由与L-THEIC相同—OH基团物质的量的EG为扩链交联剂,依据同样过程,制得的PUE-D另列试样,编号为D1~D5。

1.4 测试与表征

(1) FTIR表征:采用溴化钾压片法和涂膜法,由FTIR仪分别表征 ϵ -CL,THEIC及L-THEIC的结构特性,分辨率 4 cm^{-1} 。

(2)核磁表征:以氘代二甲基亚砜(DMSO- d_6)为溶剂,由核磁共振波谱仪表征液化物L-THEIC氢谱。

(3)力学性能测试:参照GB/T 528-2009,测试PUE试样拉伸强度与断裂伸长率;参照GB/T531.1-2008,测试PUE试样硬度;PUE试样的比强度,由试样拉伸强度与其密度之比计算而得。

(4)密度测试:由排水法测量PUE试样体积,天平称量其质量,计算求得PUE试样密度,单位 g/cm^3 。

(5)阻燃特性分析:参照GB/T 2406.2-2009,由LOI仪测试PUE试样的LOI值。

2 结果与讨论

2.1 THEIC液化工艺

考察反应温度、反应时间、原料配比等因素对液化物表观特性的影响,目的是尽可能减少液化剂的使用量,即可在适宜条件下制得较佳液化物L-THEIC。

(1) 温度。

当THEIC/ ϵ -CL物质的量比为1:2.5、反应20 h、催化剂TBT量一定时,反应温度与液化物表观特性见表1。

从表1可知,反应温度对液化物色泽影响很大,

表1 反应温度与液化物表观特性

反应温度/°C	初始液化物室温 表观特性	放置30 d液化物室温 表观特性
210	深棕色,均匀透明, 黏度极小	同左
180	棕色,均匀透明,黏度小	同左
160	浅棕色,均匀透明, 黏度小	同左
140	黄色,均匀透明, 黏度较大	色泽、黏度同左,有絮状物
120	浅黄色,均匀透明, 黏度较大	色泽、黏度同左,有少量絮状物
100	无色,均匀透明, 黏度较大	同左
80	体系不均一,尚存固体 颗粒	同左

80 °C时,温度相对较低,此时液化物中存在固体颗粒,这与设定的反应时间有关,为液化物中残存未反应THEIC所致;随着温度升高,液化物色泽逐步加深,尤其是反应温度高于140 °C时现象愈加明显,这与当THEIC在高于150 °C时热解后生成2-恶唑烷酮有关^[1],而且因THEIC结构破坏,未获得预期的THEIC液化物;而当温度为100 °C时,液化物呈无色、透明状且可长时间存放,是制备THEIC液化物较佳反应温度。

(2) 反应时间。

当THEIC/ ϵ -CL物质的量比为1:2.5、反应温度100 °C、催化剂TBT量一定时,反应时间与液化物表观特性见表2。

表2 反应时间与液化物表观特性

反应时间/h	初始液化物室温 表观特性	液化物室温存放一定时间 表观特性
8		1 d体系整体不透明,有固体颗粒
12	无色,体系清澈	2 d体系整体透明性增加
16	透明	2 d体系整体几乎透明
20		30 d体系仍清澈透明

由表2可知,液化物初始状态无变化,但随着反应时间的延长,室温存放一定时间后液化物开始发生变化,且反应时间越短,液化物状态变化愈加明显,当反应时间 $>16\text{ h}$ 时液化物可室温长时间存放并保持其初始状态。此现象应与THEIC完全液化程度有关,时间短导致THEIC并不能完全参与反应。

(3) 原料配比。

当反应温度100 °C、反应时间20 h、催化剂TBT量一定时,原料THEIC/ ϵ -CL物质的量比与液化物表观特性见表3。

由表3可知,随 ϵ -CL用量增加,液化物室温初

表3 THEIC/ ϵ -CL物质的量比与液化物外观特性

$n_{\text{THEIC}} : n_{\epsilon\text{-CL}}$	液化物室温初始外观特性	液化物室温存放一定时间外观特性
1:3.0		7 d有少量结晶析出
1:2.75		7 d有微量结晶析出
1:2.5	无色,体系均匀透明	30 d体系仍均匀透明
1:2.2		5 d体系不透明,但无结晶析出

注: $n_{\text{THEIC}}:n_{\epsilon\text{-CL}}$ 为THEIC/ ϵ -CL物质的量比。

始外观无变化,但存放时间延长,液化物外观变化呈现不同趋势,当THEIC/ ϵ -CL物质的量比为1:2.5时液化物存放30 d体系仍均匀透明。出现上述现象可能与液化物中易结晶成分多少有关,当THEIC/ ϵ -CL物质的量比为1:2.2时,液化物中会残存THEIC,THEIC的难溶性使得液化物存放一定时间出现不透明现象;THEIC/ ϵ -CL物质的量比为1:2.75和1:3.0时,液化物中会存在一个THEIC分子上三个—OH分别接枝一个 ϵ -CL分子,反而增加了液化物中的结构对称性成分,使得液化物存放时有结晶析出。

由上述THEIC液化条件可知:当THEIC/ ϵ -CL物质的量比为1:2.5、反应温度100 °C、反应时间20 h、催化剂TBT量一定时,可制得THEIC较佳液化物L-THEIC。

2.2 L-THEIC红外光谱表征

图2为L-THEIC与原料THEIC, ϵ -CL红外谱图。图2中3 380 cm^{-1} 处为端羟基(—OH)伸缩振动吸收峰;2 939 cm^{-1} 处双峰为亚甲基(—CH₂—)对称伸缩振动吸收峰和反对称伸缩振动吸收峰;1 691 cm^{-1} 处为羰基(C=O)伸缩振动吸收峰;1 466 cm^{-1} 处为C—N伸缩振动吸收峰,表明液化物存在三嗪环结构;1 167 cm^{-1} 处为酯基中的(C—O—C)非对称伸缩振动吸收峰;1 057 cm^{-1} 处为伯醇(C—O)伸缩振动吸收峰;768 cm^{-1} 处为4个以上亚甲基相连时平面摇摆振动吸收峰。由L-THEIC红外谱图可知,THEIC分子上接枝 ϵ -CL开环链段。

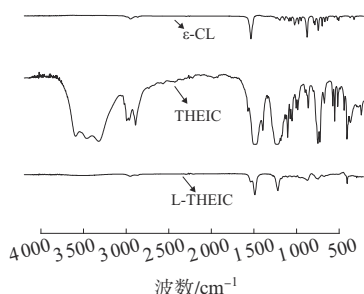
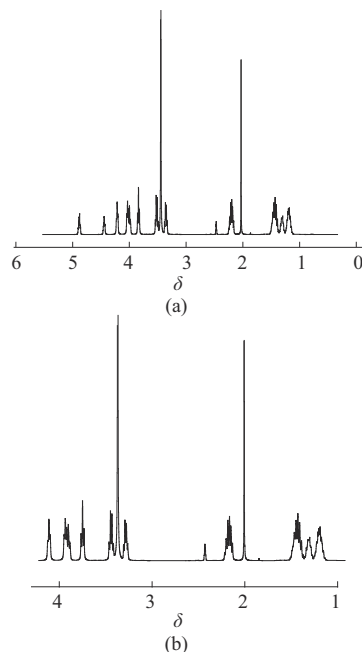


图2 原料和L-THEIC红外谱图

2.3 核磁氢谱(¹H NMR)表征

图3a为L-THEIC的¹H NMR图,图3b为质子特征吸收峰局部放大图。图3a中质子吸收峰所处位置与液化物L-THEIC分子对应基团氢原子关系如下:化学位移 δ 为3.84,3.83,3.81处是与羟基(—OH)相连亚甲基(—CH₂—)上质子位移峰; δ 为3.53~3.35处为与N相连亚甲基上质子位移峰; δ 为2.26,2.24,2.23处为与羰基相连亚甲基上质子位移峰; δ 为1.55~1.27处多重峰为 ϵ -CL开环结构5个亚甲基中间3个相连亚甲基上的质子位移峰。液化物L-THEIC的¹H NMR图表明,L-THEIC分子中存在三嗪环结构,且其分子上接枝有 ϵ -CL分子开环链段。

a—L-THEIC的¹H NMR图;b—质子特征吸收峰局部放大图图3 L-THEIC的¹H NMR图

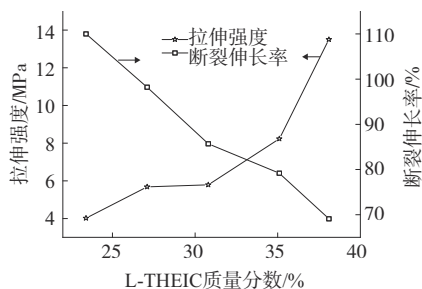
假设 ϵ -CL与THEIC实际反应的物质的量比 $n_{\epsilon\text{-CL}}:n_{\text{THEIC}}=R$,由图3b中质子特征位移峰积分面积,由式(1)计算可得 $R=2.4$,与反应初期投料时 ϵ -CL与THEIC物质的量比2.5相比,两者仅相差0.1,表明 ϵ -CL的接枝率高达96%。

$$\frac{1 \times 6}{R \times 2} = \frac{0.66 + 0.59}{1} \quad (1)$$

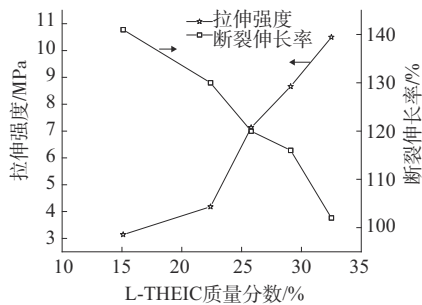
2.4 PUE的力学性能

以L-THEIC为交联剂,分别交联并扩链—NCO封端PTMG/TDI预聚体、PBA/MDI预聚体制PUE-A,PUE-B,以及一步法制PUE-C。L-THEIC用量(L-THEIC用量为制备PUE时其在原料中所占质量分数,%)分别对PUE-A,PUE-B,PUE-C的拉伸强度和断裂伸长率的影响如图4a~4c所示。EG用量对

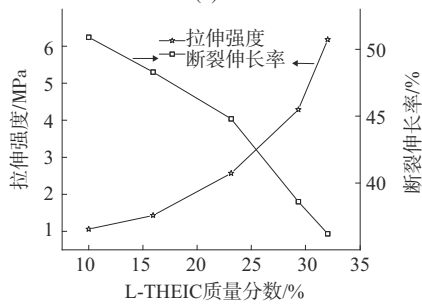
PUE-D的拉伸强度和断裂伸长率的影响如图4d所示。经图4c与图4d对比可知,在—OH基团物质的量用量相同时,PUE-D的拉伸强度略低于PUE-C,断裂伸长率则高于PUE-C,这是因为PUE-C和PUE-D中硬段含量的不同。在扩链交联剂羟基物质的量用量相等的条件下,EG在PUE中所占质量分数远低于L-THEIC的用量,相应地,PUE-D的硬段含量低于PUE-C的硬段含量,因而PUE-D较PUE-C有较低的拉伸强度和较高的断裂伸长率。



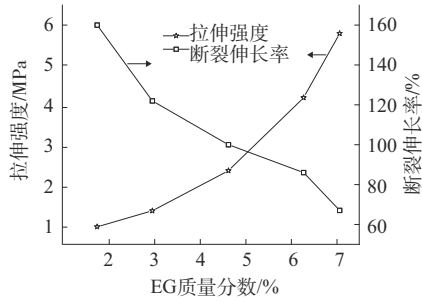
(a)



(b)



(c)



(d)

a,b,c—L-THEIC用量对PUE-A,PUE-B,PUE-C拉伸性能影响;

d—EG用量对PUE-D拉伸性能影响

图4 L-THEIC(或EG)用量对PUE试样拉伸性能的影响

L-THEIC用量对三种PUE硬度、密度、比强度的影响见表4。

表4 THEIC用量对三种PUE硬度、密度和比强度的影响

编号	L-THEIC 用量/%	硬度 (邵A)	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比强度/ [$\text{MPa}\cdot(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})^{-1}$]
PUE-A1	23.4	68	1.02	3.94
PUE-A2	27.1	78	1.07	5.31
PUE-A3	30.8	82	0.95	6.09
PUE-A4	35.1	86	1.09	7.55
PUE-A5	38.1	94	1.02	13.2
PUE-B1	15.1	66	1.07	2.93
PUE-B2	22.4	70	1.11	3.77
PUE-B3	25.8	74	1.13	6.31
PUE-B4	29.1	84	1.12	7.73
PUE-B5	32.5	92	1.19	8.82
PUE-C1	9.96	54	0.82	1.29
PUE-C2	15.9	64	0.83	1.72
PUE-C3	23.1	75	0.84	3.06
PUE-C4	29.3	86	0.81	5.30
PUE-C5	32.0	90	0.85	7.27

由图4a~4c、表4可知,随L-THEIC用量的增加,三种PUE试样的拉伸强度、硬度、比强度增大,断裂伸长率降低,而密度变化不大;在L-THEIC用量相同时,PUE-A(或PUE-B)的拉伸强度、比强度和断裂伸长率明显高于PUE-C,且其中PUE-B略高于PUE-A。具体表现在,PUE-A3中L-THEIC质量分数为30.8%时,试样拉伸强度达5.79 MPa、比强度6.09 MPa、断裂伸长率达85.7%;PUE-B4中L-THEIC质量分数为29.1%时,试样拉伸强度达8.66 MPa、比强度7.73 MPa、断裂伸长率达116%;PUE-C4中L-THEIC质量分数为29.3%时,试样拉伸强度达4.29 MPa、比强度5.3 MPa、断裂伸长率达38.6%。当L-THEIC用量为32.5%时,L-THEIC交联PBA-MDI预聚物体制得的PUE-B力学性能综合表现较好,其拉伸强度、断裂伸长率分别达10.5 MPa,102%。这表明,L-THEIC既可用于预聚体制PUE,又可用于一步法制PUE,且预聚体制PUE力学性能优于一步法制PUE。上述现象与含刚性三嗪环结构和酯基的L-THEIC的用量有关,L-THEIC用量增加时会增加PUE硬段含量,相应使PUE大分子硬段含量增加,使得PUE试样拉伸强度、硬度和比强度增加,而断裂伸长率减小。预聚体制PUE性能优于一步法制PUE,是因为预聚体法可提高PUE大分子链的规整性和有序性,相应使PUE性能优异。

据先前的研究,EG作为一种常见的PUE扩链交联剂,可以赋予PUE较好的拉伸强度,并与EG的用量呈正相关^[12]。笔者进行了相似的研究,使用与PUE-C系列L-THEIC等—OH物质的量数的EG并一步法制备了PUE-D系列试样。结果表明,PUE-D试样的拉伸强度随着EG用量的增加而增加,但断裂伸长率则反之。进一步,在L-THEIC作为扩链交联剂的研究中,也具有同样效果,即随着L-THEIC用量的增加,可强化PUE的拉伸强度,且随着L-THEIC用量的增多,拉伸强度持续增加,但同时也降低了其断裂伸长率。由此可见,L-THEIC的使用符合一般聚氨酯扩链交联剂的使用规律。此外,在相同扩链剂羟基用量下,PUE-C的拉伸强度优于PUE-D的拉伸强度。这表明,三嗪环的引入可以改善PUE试样的拉伸强度。

2.5 PUE试样的阻燃性能

以LOI值评价L-THEIC用量对PUE试样阻燃特性的影响,上述试样的LOI测试值见表5。由表5可知,随L-THEIC用量增加,三类PUE试样的LOI均有所提高。主要原因在于L-THEIC分子含阻燃性三嗪环结构,随L-THEIC用量的增加,三嗪环在PUE分子链中含量越多,使得PUE试样LOI值越大,相应PUE试样阻燃性越高。当L-THEIC用量为32.5%时,L-THEIC交联PBA-MDI预聚物体制得的PUE-B阻燃性能表现较好,其LOI值达24.8%。类似地,据Lin等^[13]报道,三嗪环的引入可以有效增强PUE的阻燃性,而且还可以降低PUE的总释放热与热释放速率峰值,对抑烟性能方面的改善同样非常明显,并与三嗪环的含量呈正相关。一般来说,PUE的使用温度不宜超过80℃,短期使用温度不宜超过120℃,阻燃性能和耐热性能的增强,对其在更高温度场景的应用提供了更多可能性。

表5 L-THEIC用量对PUE试样LOI值影响

PTMG-TDI预聚体法 制PUE			PBA-MDI预聚体法 制PUE			330 N-MDI一步法 制PUE		
样号	L- THEIC/%	LOI/ %	样号	L- THEIC/%	LOI/ %	样号	L- THEIC/%	LOI/ %
A1	23.4	21.5	B1	15.1	21.3	C1	9.96	19.5
A2	27.1	22.7	B2	22.4	22.3	C2	15.9	20.3
A3	30.8	23.4	B3	25.8	23.1	C3	23.1	21.1
A4	35.1	24.1	B4	29.1	24.2	C4	29.3	21.2
A5	38.1	24.6	B5	32.5	24.8	C5	32.0	22.9

3 结论

(1) 制备出常温下可呈液态的L-THEIC,液化工艺条件为THEIC/ ϵ -CL物质的量比1:2.5,反应温度100℃和反应时间20 h。

(2) L-THEIC作交联剂,可用于预聚体法和一步法制备PUE。随着L-THEIC用量的增加,PUE的拉伸强度、硬度、比强度和LOI值均有增强;且当L-THEIC用量相同时,预聚体法制得的PUE在拉伸强度、比强度和断裂伸长率方面高于一步法。

(3) 当L-THEIC质量分数为32.5%时,L-THEIC交联PBA-MDI预聚物制得的PUE-B力学性能与阻燃性能表现较好,其拉伸强度、断裂伸长率、LOI值分别达10.5 MPa,102%,24.8%。

参考文献

- [1] 刘忠卫.三(2-羟乙基)异氰尿酸酯的合成研究[J].精细石油化工,2019,36(2):31-34.
Liu Zhongwei. Study on synthesis of tri(2-hydroxyethyl) isocyanurate[J]. Speciality Petrochemicals,2019,36(2):31-34.
- [2] Lavallec F A. Preparation of tris(2-hydroxyethyl)isocyanurate (THEIC):US,6046326[P].2000-04-04.
- [3] 张亨.三羟乙基异氰尿酸酯的应用及合成研究进展[J].塑料助剂,2018(1):14-20,23.
Zhang Heng. Application survey and research progress on synthesis of tris(2-hydroxyethyl)isocyanurate[J]. Plastics Additives,2018(1):14-20,23.
- [4] 柯建君.三羟乙基异氰尿酸酯的合成方法:CN100526302C[P].2009-08-12.
Ke Jianjun. Synthesis method of tri(2-hydroxyethyl)isocyanurate:CN100526302C[P].2009-08-12.
- [5] 王彦林,张志刚,于君.三(2-羟乙基)异氰尿酸酯的合成研究[J].化学世界,2008,49(4):241-243.
Wang Yanlin, Zhang Zhigang, Yu Junsan. Study on the synthesis of tri(2-hydroxyethyl)isocyanate[J]. Chemical World,2008,49(4):241-243.
- [6] 贾普友.蓖麻油基磷酸酯类阻燃型塑料增塑剂的合成和性能研究[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
Jia Puyou. Synthesis and performance of castor oil-based flame retardant plastic plasticiz[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2016.
- [7] 李钟宝.三(2-羟乙基)异氰尿酸酯的合成及其在含氯聚合物稳定剂中的应用研究进展[J].塑料助剂,2012,94(4):6-10.
Li Zhongbao. Research progress on synthesis and application as stabilizer for chlorine-containing polymers, of tris(2-hydroxyethyl) isocyanurate[J]. Plastics Additives,2012,94(4):6-10.
- [8] 赵祖兵,张旭玲,曾繁涤.含三嗪环的酸酐固化剂合成及其环氧固化物性能研究[J].中国胶粘剂,2007,16(10):17-19.
Zhao Zubing, Zhang Xuling, Zen Fandi. Synthesis for a anhydride curing agent of THEIC contained and properties research on epoxy hardener[J]. China Adhesives,2007,16(10):17-19.

(下转第158页)