

高活性蓖麻油基聚醚多元醇的合成及应用研究

李剑锋, 林 壮, 李月坤

(山东一诺威新材料有限公司, 山东 淄博 255075)

摘要: 以蓖麻油为起始剂, 环氧烷烃为聚合单体, 磷腈盐为催化剂, 合成高活性蓖麻油基聚醚多元醇, 研究催化剂种类和含量对聚合反应的影响, 利用傅里叶变换红外光谱仪、核磁共振仪对聚醚多元醇的结构进行表征。采用自制蓖麻油基聚醚多元醇制备聚氨酯高回弹泡沫, 研究其对泡沫性能的影响。结果表明, 当磷腈盐催化剂质量分数为 0.20% 时, 合成的蓖麻油基聚醚多元醇综合性能较佳。将其应用于聚氨酯高回弹泡沫中, 当添加量为 50 phr 时, 泡沫表现出优异的力学性能; 将其应用于聚氨酯防水涂料时, 与传统甘油基聚醚多元醇相比, 自制蓖麻油基聚醚多元醇在力学性能方面优势显著。

关键词: 蓖麻油; 高活性聚醚多元醇; 磷腈盐; 聚氨酯高回弹泡沫; 聚氨酯防水涂料

中图分类号: TQ328.3; TQ334.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0081-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.015

Research on Synthesis and Application of High-activity Castor Oil-based Polyether Polyols

LI Jianfeng, LIN Zhuang, LI Yuekun

(Shandong INOV New Materials Co., Ltd., Zibo 255075, China)

Abstract: Ricinoleic oil was used as the initiator, epoxylated alkanes as the monomers for polymerization, and phosphazene salt as the catalyst to synthesize high-activity polyether polyol. The impact of the type and concentration of the catalyst on the polymerization reaction was studied, and the structure of the polyether polyol was characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy and nuclear magnetic resonance spectroscopy. Polyurethane high-resilience foam was prepared using the synthesized castor oil-based polyether polyol, and the effect on the foam properties was investigated. The results demonstrated that when the mass fraction of the phosphazene salt catalyst was 0.20%, the synthesized castor oil-based polyether polyol exhibited optimal comprehensive properties. When incorporated into polyurethane high-resilience foam at a loading of 50 phr, the foam demonstrated excellent mechanical properties. When applied in polyurethane waterproof coating, the self-made castor oil-based polyether polyol showed significant advantages in mechanical properties compared to traditional glycerol-based polyether polyol.

Keywords: Castor oil; High-activity polyether polyol; Phosphazene salt; Polyurethane high-resilience foam; Polyurethane waterproof coating

在全球积极践行减碳减排可持续发展的大背景下, 寻求石油基材料的绿色替代方案已然成为化学化工领域的核心任务之一。在聚氨酯领域, 生物基多元醇凭借其可再生、环境友好等特性崭露头角, 成为研究与开发的焦点^[1-5]。在聚氨酯材料的合成中, 生物基多元醇作为关键原料能够有效提升材料的生物降解性与环境相容性, 在聚氨酯弹性体、

泡沫、胶黏剂等领域展现出广阔的应用前景^[6-10]。从原料视角来看, 蓖麻油作为世界十大油料作物之一, 因其种植面积大、出油率高、性能优势强等特点, 在聚氨酯领域日益受到研究学者的高度关注^[11-17]。高活性聚醚多元醇通常以环氧乙烷封端, 伯羟基含量为 60%~90%, 常用于合成冷熟化高回弹泡沫塑料、半硬质聚氨酯泡沫塑料、聚氨酯胶黏剂、聚

收稿日期 Submitted date 2025-02-09; 修回日期 Revised date 2025-03-05; 录用日期 Accepted date 2025-04-11

基金项目: 无机合成与制备化学国家重点实验室开放课题基金项目 (2024-42)

联系人, 931993068@qq.com

引用本文: 李剑锋, 林壮, 李月坤. 高活性蓖麻油基聚醚多元醇的合成及应用研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 81-85.

Citation: LI J F, LIN Z, LI Y K. Research on synthesis and application of high-activity castor oil-based polyether polyols[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 81-85.

氨酯弹性体等,是聚氨酯工业领域极为重要的原料之一。

本研究以蓖麻油为起始剂,磷腈盐为催化剂,环氧乙烷和环氧丙烷为聚合单体,合成一种环氧乙烷封端、高伯羟基含量的高活性蓖麻油基聚醚多元醇,探讨催化剂种类和用量对聚合反应的影响,并对其结构进行表征。同时,还探讨自制的蓖麻油基聚醚多元醇在聚氨酯两大主要应用领域聚氨酯泡沫与弹性体中所呈现出的性能优势。本研究成果进一步丰富了聚氨酯原料的种类,与当下追求环保与卓越性能的发展趋势高度契合。

1 实验部分

1.1 主要原料

蓖麻油,分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;聚醚多元醇, INOVOL C220、INOVOL F330N, 山东一诺威新材料有限公司; 聚合物多元醇, CHPOP-H30, 长华化学科技股份有限公司; 改性异氰酸酯, DG5412, 山东一诺威聚氨酯股份有限公司; 环氧丙烷、环氧乙烷, 工业级, 金岭化工股份有限公司; 磷腈盐, 工业级, 上海奇克氟硅材料有限公司; 氢氧化钾(KOH), 工业级, 成都华融化工有限公司; 硅酸铝吸附剂, 700目, 浙江洁华新材料股份有限公司; 磷酸, 质量分数75%, 山东凯米科新材料有限公司; 乙二醇胺, 工业级, 美国陶氏化学公司; 有机硅匀泡剂, AK7703, 南京德美世创化工有限公司; 有机硅匀泡剂, DC6070, 美国空气化工产品公司; 复合催化剂, BL-11、33LV、P225, 赢创特种化学(上海)有限公司; 开孔剂, INOVOL S350T, 山东一诺威新材料有限公司。甲苯二异氰酸酯(TDI), T80, 山东烟台巨力异氰酸酯有限公司; 二月桂酸二丁基锡(DBTDL), T12, 天津科密欧化学试剂有限公司; 潜固化剂, WHA-208, 工业级, 山西太原耀宇伟业有限公司; 氯化石蜡, 52#, 衡水帝亿石油化工有限公司; 高岭土、重质碳酸钙, 分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 对苯二酚二羟乙基醚(HQEE), XYlink HQEE, 苏州湘园新材料股份有限公司; 碳酸二甲酯, 工业级, 石大胜华新材料集团股份有限公司

表1 蓖麻油基聚醚多元醇的理化指标

Tab.1 Physical and chemical indicators of castor oil-based polyether polyol

羟值/(mg KOH·g ⁻¹)	酸值/(mg KOH·g ⁻¹)	水分/%	黏度(25℃)/(mPa·s)	pH值	钾含量/(mg·kg ⁻¹)	外观
33~35	≤0.10	≤0.05	600~800	7~9	≤5	透明液体, 无悬浮物

1.3.2 聚氨酯高回弹泡沫的制备

表2为聚氨酯高回弹泡沫的发泡配方。A组分充分搅拌混合, 恒温至25℃备用, 然后将预热的A组分、B组分按配方量混合, 采用高速搅拌机快速搅拌4~5s, 混合均匀后迅速注入200mm×200mm×40mm的泡沫模具中, 熟化后测试性能。

1.3.3 聚氨酯防水涂料的制备

表3为聚氨酯防水涂料的配方。首先将混合聚醚多元醇、氯化石蜡、高岭土、重钙投入反应釜中, 高速搅拌, 确保原料充分分散并混合均匀。然后抽真空至-0.095MPa

并升温至100℃开始脱水, 控制水分低于0.05%。合格后降温至60℃, 加入计量的TDI, 缓慢升温至80℃反应2h, 加入HQEE、碳酸二甲酯、溶剂油, 继续反应1h。随后降温至70℃, 加入潜固化剂、DBTDL, 搅拌反应0.5h。冷却至60℃以下, 放料, 氮气密封, 以确保产品的稳定性和安全性。

1.2 仪器与设备

高压反应釜, 2.5L, 烟台曙光仪器厂; 电子万能试验机, GT-7001-H, 高铁检测仪器有限公司; 平板硫化机, XLB-QD, 青岛化工机械厂; 数字显示黏度计, NDJ-8S, 上海精密科学仪器有限公司; 凝胶渗透色谱仪(GPC), 1260II, 安捷伦科技有限公司; 傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), Nicolet 6700, 赛默飞世尔科技公司; 核磁共振仪(NMR), AVANCE III 400 MHz, 德国布鲁克科技有限公司; 落球回弹仪, PMLQ-500, 北京冠测精电仪器设备有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 蓖麻油基聚醚多元醇的制备

将198g蓖麻油、磷腈盐催化剂加入2.5L高压反应釜中, 抽真空并用氮气充分置换釜内空气, 缓慢升温至115℃, 负压状态下逐渐滴加780g环氧丙烷进行反应, 控制反应压力≤0.4MPa。加料完毕后, 内压反应3h, 抽真空, 计时0.5h, 脱除小分子物质。然后缓慢滴加192g环氧乙烷, 滴加完毕后老化反应2h, 抽真空, 计时0.5h, 脱除小分子物质。反应结束后, 降温至80℃, 加入水和磷酸, 搅拌1h, 然后加入硅酸铝吸附剂, 升温至115℃, 抽真空, 计时3h, 过滤除去固体滤渣, 即得目标产物高活性蓖麻油基聚醚多元醇。图1为蓖麻油基聚醚多元醇的合成机理, 表1为蓖麻油基聚醚多元醇的理化指标。

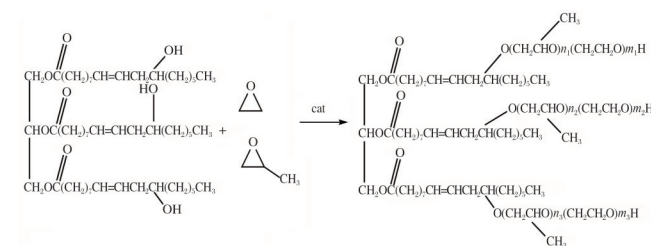


图1 蓖麻油基聚醚多元醇的合成机理

Fig.1 Synthesis mechanism of castor oil-based polyether polyol

将聚氨酯防水涂料混合均匀, 称取适量的样品, 用刮板均匀涂刷在涂好脱模剂的模具上, 涂膜厚度约为1.5mm, 在(23±2)℃、相对湿度(50±5)%的标准试验条件下养护7d, 备用。

表2 聚氨酯高回弹泡沫的发泡配方
Tab.2 Foaming formula of polyurethane high resilience foams

样品	A组分添加量/phr							B组分添加量/phr		异氰酸酯指数
	蓖麻油基聚醚多元醇	聚合物多元醇	发泡剂(水)	二乙醇胺	有机硅匀泡剂	复合催化剂	开孔剂	异氰酸酯		
配方1	20	80	3.6	2	0.7	0.6	3	86.2	1.1	
配方2	30	70	3.6	2	0.7	0.6	3	86.5	1.1	
配方3	40	60	3.6	2	0.7	0.6	3	86.8	1.1	
配方4	50	50	3.6	2	0.7	0.6	3	87.1	1.1	
配方5	60	40	3.6	2	0.7	0.6	3	87.4	1.1	

表3 聚氨酯防水涂料的配方
Tab.3 Formula of polyurethane waterproof coatings

多元醇种类	多元醇	INOVOL C220	氯化石蜡	高岭土	重钙	HQEE	TDI	碳酸二甲酯	溶剂油	潜固化剂	DBTDL
蓖麻油基聚醚多元醇	75	25	86.67	66.67	155.6	4.67	21.3	30.67	41.3	4.8	0.42
INOVOL F330N	75	25	86.67	66.67	155.6	4.67	21.3	30.67	41.3	4.8	0.42

1.4 性能测试与表征

聚醚多元醇理化指标测试:羟值按 GB/T 12008.3—2009 测试;黏度按 GB/T 12008.7—2010 测试;pH 值按 GB/T 12008.2—2010 测试;水分按 GB/T 22313—2008 测试;钾含量按 GB/T 12008.4—2009 测试;酸值按 GB/T 12008.5—2010 测试。

FTIR 测试:测试范围 4 000~500 cm^{-1} 。

核磁共振氢谱(H-NMR)测试:扫描频率 400 MHz,内标四甲基硅烷(TMS),10 mg 样品,溶剂是氘代氯仿(3 mL),测试前保证样品全溶。

GPC 测试:测定温度 40 $^{\circ}\text{C}$,以四氢呋喃为流动相,流速为 1.0 mL/min,以窄分布聚苯乙烯为标样。

力学性能测试:拉伸强度和断裂伸长率分别按 GB/T 6344—2008、GB/T 528—2009 进行测试,撕裂强度按 GB/T 529—2008 进行测试。样品尺寸参考相应标准。

回弹率测试:使用落球回弹仪,按 GB/T 6670—2008 进行测试。

聚氨酯防水涂料性能测试:按 GB/T 19250—2013 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 蓖麻油基聚醚多元醇结构表征

采用傅里叶红外光谱仪分析产物的官能团结构,通过官能团伸缩、摇摆振动来解析官能团结构,图2为蓖麻油与蓖麻油基聚醚多元醇的 FTIR 谱图。从图2可以看出,蓖麻油基聚醚多元醇在 1 090 cm^{-1} 处出现明显的脂族醚基—C—O—C—特征吸收峰,并且 3 470 cm^{-1} 处的—OH 的伸缩振动吸收峰和 1 740 cm^{-1} 处酯基中—C=O 吸收峰强度明显变弱。这说明环氧烷烃参与了蓖麻油聚合反应,随着蓖麻油基聚醚多元醇分子量的提高,分子结构中羟基和酯基含量降低,进而导致吸收峰强度变弱,初步证明聚合反应得到了高活性蓖麻油基聚醚多元醇^[18-19]。

利用核磁共振仪进一步确认产品的结构,图3为蓖麻

油与蓖麻油基聚醚多元醇的 H-NMR 谱图。从图3可以看出,a 区域对应甲基中的质子信号峰,b 区域对应环氧丙烷、环氧乙烷开环结构中亚甲基和次甲基上氢原子的信号峰,蓖麻油基聚醚多元醇 c 区域端羟基中质子的信号峰变弱^[20-22],侧面反映了环氧烷烃参与了聚合反应。通过 FTIR 谱图及 H-NMR 谱图分析可知,本研究成功合成了蓖麻油基聚醚多元醇。

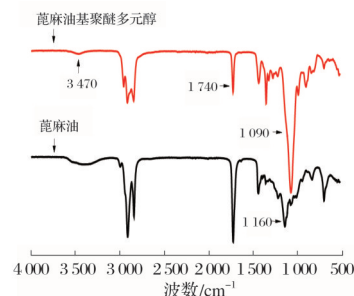


图2 蓖麻油与蓖麻油基聚醚多元醇的 FTIR 谱图
Fig.2 FTIR spectra of castor oil and castor oil-based polyether polyol

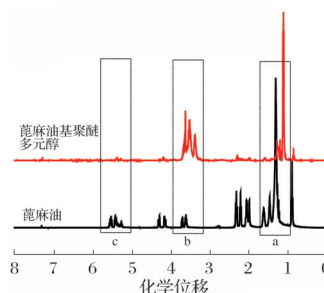


图3 蓖麻油与蓖麻油基聚醚多元醇的 H-NMR 谱图
Fig.3 H-NMR spectra of castor oil and castor oil-based polyether polyol

以四氢呋喃为流动相,聚苯乙烯为标准聚合物(温度为 40 $^{\circ}\text{C}$,流速为 1.0 mL/min),蓖麻油和蓖麻油基聚醚多元醇用凝胶渗透色谱法测定的分子量分布变化情况。图4

为蓖麻油与蓖麻油基聚醚多元醇的 GPC 谱图。从图 4 可以看出,经过环氧烷烃改性后的蓖麻油基聚醚多元醇分子量分布曲线呈单一分布对称峰,峰形规整,说明聚合过程副反应相对较少,分子量分布均匀,可应用于聚氨酯材料合成,有利于发挥其性能优势。

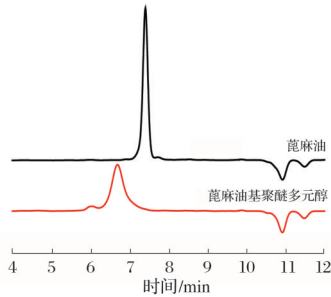


图4 蓖麻油与蓖麻油基聚醚多元醇的 GPC 谱图

Fig.4 GPC spectra of castor oil and castor oil-based polyether polyol

2.2 催化剂的选择

在聚醚多元醇领域,当前应用较为成熟的催化剂主要为碱金属催化剂(KOH)与双金属催化剂(DMC)。但是在用碱催化蓖麻油烷氧基化的反应过程中会发生皂化反应,有皂化物析出。这一现象不仅会改变多元醇的官能度,还会导致多元醇相容性降低,并且游离的油酸也会对聚氨酯制备过程中的反应活性产生不良影响。而 DMC 催化剂存在局限性,无法直接催化环氧乙烷进行聚合反应。与之相比,磷腈盐作为一种新型催化剂,具备催化效率高、能够合成伯羟基封端聚醚多元醇等诸多显著优势,在聚醚合成工业应用方面正逐渐趋于成熟并展现出广阔的应用前景^[23-24]。

本研究分别采用行业常用的 KOH、DMC 和磷腈盐 3 种催化剂进行合成,表 4 为催化剂种类对聚合反应的影响。从表 4 可以看出,只有采用磷腈盐催化剂才能制备出符合聚氨酯下游应用的无色透明且无悬浮物的聚醚多元醇,因此选择磷腈盐催化剂为宜。

表 4 催化剂种类对聚合反应的影响

Tab.4 Effect of catalyst type on polymerization reaction

催化剂种类	羟值/(mg KOH·g ⁻¹)	外观
KOH	39.1	有白色皂化物析出
DMC	—	乳白色液体
磷腈盐	34.2	透明液体,无悬浮物

注:“—”表示无相关数据。

2.3 磷腈盐催化剂含量对聚合反应的影响

在蓖麻油基聚醚多元醇设计数均分子量(M_n)为 6 200 g/mol、聚合反应温度为 115 °C 条件下,探讨不同催化剂含量对聚合反应的影响。表 5 为催化剂质量分数对聚合反应的影响。从表 5 可以看出,随着催化剂含量的增加,聚合反应周期大幅缩短,催化活性明显提高。同时,聚醚多元醇羟值降低,聚合反应进行更完全,分子量提高,副

反应减少,分子量分布指数(PDI)趋于平稳。值得注意的是,催化剂含量增加会造成催化剂去除工作难度加大且成本增加,导致催化剂残留增多的风险,进而影响聚醚多元醇外观、气味和使用性能等。因此,较佳的催化剂质量分数为 0.20%。

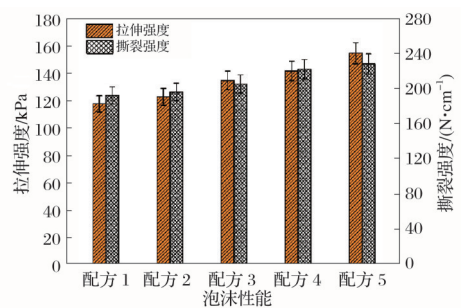
表 5 催化剂质量分数对聚合反应的影响

Tab.5 Effect of catalyst mass fraction on polymerization reaction

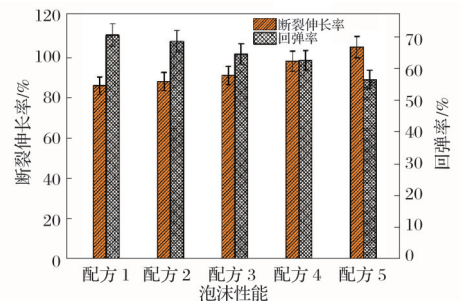
w _{催化剂} /%	羟值/(mg KOH·g ⁻¹)	PDI	反应周期/h
0.05	39.1	1.061	16.2
0.10	37.9	1.057	15.5
0.15	34.2	1.038	14.2
0.20	34.1	1.035	13.2
0.25	34.2	0.036	11.6

2.4 蓖麻油基多元醇在聚氨酯高回弹泡沫中的应用

图 5 为聚氨酯高回弹泡沫的性能测试结果。从图 5 可以看出,随着蓖麻油基聚醚多元醇含量的增加,聚氨酯高回弹泡沫拉伸强度、断裂伸长率和撕裂强度呈上升趋势。这是因为蓖麻油基聚醚多元醇理论官能度为 2.7,实际聚合过程中由于副反应的发生,导致实际官能度更接近 2,分子结构中线性链段含量的提高使泡沫的柔韧性变好,拉伸强度和断裂伸长率提高。酯键的引入提高了材料的内聚能,表现为撕裂强度的上升^[25-26]。配方中蓖麻油基聚醚多元醇含量的增加降低了泡沫交联密度和交联点,影响了泡沫回弹,甚至会出现泡沫塌泡不成型的情况。综合考虑成本和泡沫的力学性能,选择配方 4 最佳。



(a) 拉伸强度和撕裂强度



(b) 断裂伸长率和回弹率

图 5 聚氨酯高回弹泡沫的性能测试结果

Fig.5 Performance test result of polyurethane high resilience foams

2.5 多元醇种类对聚氨酯防水涂料性能的影响

将自制蓖麻油基聚醚多元醇($M_n=5\ 000\ \text{g/mol}$)和传统甘油基聚醚 INOVOL F330N($M_n=5\ 000\ \text{g/mol}$)分别合成聚氨酯防水涂料,固化后测试性能。表6为聚醚多元醇种类对聚氨酯防水涂料性能的影响。从表6可以看出,与采用 INOVOL F330N 制备的聚氨酯防水涂料相比,采用蓖麻油基聚醚多元醇制备的聚氨酯防水涂料拉伸强度、

断裂伸长率、撕裂强度和黏接强度均大幅提高,吸水率明显降低。这主要是因为蓖麻油基聚醚多元醇主链中存在内聚能大的酯基,从而赋予材料优异的力学性能,且蓖麻油基聚醚官能度低于甘油基聚醚。同时,由于蓖麻油本身具有疏水性,将蓖麻油基聚醚多元醇用于制备防水涂料,其疏水性能方面要优于甘油基聚醚多元醇制备的防水涂料。

表6 聚醚多元醇种类对聚氨酯防水涂料性能的影响

Tab.6 Effect of polyether polyol type on properties of polyurethane waterproof coatings

多元醇种类	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	撕裂强度/(N·mm ⁻¹)	黏接强度/MPa	吸水率/%
自制蓖麻油基聚醚多元醇	4.1	689	31.3	1.9	0.9
INOVOL F330N	3.2	570	21.5	1.1	1.6

3 结论

以蓖麻油为起始剂,以磷腈盐为催化剂,以环氧丙烷、环氧乙烷为聚合单体,合成高活性蓖麻油基聚醚多元醇,综合考虑聚合效率和产物内在品质,较佳的催化剂质量分数为0.20%。将自制的高活性蓖麻油基聚醚多元醇应用于聚氨酯高回弹泡沫,其添加量为50 phr时,聚氨酯高回弹泡沫断裂伸长率为98%,回弹率为63%,拉伸强度为142 kPa,撕裂强度为223 N/cm,综合性能较佳。将自制的高活性蓖麻油基聚醚多元醇应用于聚氨酯防水涂料,与传统甘油基聚醚多元醇相比,自制高活性蓖麻油基聚醚多元醇在力学性能方面表现出显著优势,凸显其潜在的应用价值。

参考文献

- [1] 吉研博,尚倩倩,张猛,等.生物基非异氰酸酯聚氨酯的合成和应用研究进展[J].聚氨酯工业,2024,39(5):1-5.
- [2] PARASKAR P M, PRABHUDESAI M S, HATKAR V M, et al. Vegetable oil based polyurethane coatings: A sustainable approach: A review[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 156: 106267.
- [3] 宋康佳,张斐斐,刘洁,等.生物基聚氨酯的合成、改性及展望[J].皮革科学与工程,2025,35(2):48-53.
- [4] ZHANG Y, LIU B Y, HUANG K X, et al. Eco-friendly castor oil-based delivery system with sustained pesticide release and enhanced retention [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(33): 37607-37618.
- [5] SHAIK M R, ALAM M, ALANDIS N M, et al. Development of castor oil based poly(urethane-esteramide)/TiO₂ nanocomposites as anticorrosive and antimicrobial coatings[J]. Journal of Nanomaterials, 2015, 16(1): 176.
- [6] 汪雷,黄磊.生物基聚氨酯胶黏剂的研究进展[J].聚氨酯工业,2024,39(3):6-10.
- [7] CHAKRABORTY I, CHATTERJEE K. Polymers and composites derived from castor oil as sustainable materials and degradable biomaterials: Current status and emerging trends[J]. Biomacromolecules, 2020, 21(12): 4639-4662.
- [8] 樊佳磊,陈悦,张宇凡,等.生物基聚氨酯材料研究进展[J].河南化工,2025,42(2):1-3.
- [9] 汪小穹,余瑶琪,李瀚,等.生物基多元醇的研究进展[J].化工时刊,2024,41(5):34-38.
- [10] 姚哲,杜俊超,孙海欧,等.蓖麻油基聚氨酯材料研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2024,22(4):15-21.
- [11] MOHANTY S, BORAH K, KASHYAP S S, et al. Development of hydrophobic polyurethane film from structurally modified castor oil and its anticorrosive performance[J]. Polym Adv Technol, 2023, 34(1): 351-362.
- [12] 王汝康,曾艳茹,徐长安,等.蓖麻油基聚氨酯光固化薄膜的制备及自修复性能[J].广州化学,2023,48(4):7-15.
- [13] OPREA S. Synthesis and properties of polyurethane elastomers with castor oil as crosslinker[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2010, 87: 313-320.
- [14] LEE J H, KIM S H. Shape memory polyurethanes crosslinked with castor oil-based multifunctional polyols[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 14983.
- [15] 康杰分,刘静莹,肖莉.生物基聚氨酯涂料研究进展[J].聚氨酯工业,2025,40(1):6-9.
- [16] 岳昌海,黄益平,方正,等.植物油基多元醇研究进展[J].聚氨酯工业,2024,39(6):6-9.
- [17] 蒙治光.蓖麻油生物沥青/聚氨酯复合改性沥青流变性能研究[J].西部交通科技,2024(12):97-100.
- [18] 李剑锋,公维英,杜金彤,等.高性能聚酯-醚二醇的合成及应用[J].塑料科技,2024,52(7):79-83.
- [19] 殷宁,元茂青,冯月兰,等.聚醚-酯嵌段共聚物改性微孔聚氨酯弹性体性能的研究[J].弹性体,2006,16(3):17-21.
- [20] 李剑锋,戈欢,孙兆任,等.双酚A基高性能聚醚多元醇的合成及应用[J].聚氨酯工业,2022,37(3):10-13.
- [21] 刘厚钧.聚氨酯弹性体手册[M].2版.北京:化学工业出版社,2012.
- [22] 孙兆任,戈欢,陈庆柏,等.用于MS胶的超高分子量聚醚多元醇合成研究[J].塑料科技,2024,52(6):89-93.
- [23] 于剑坤.磷腈类催化剂及其在聚醚多元醇合成中的应用[J].聚氨酯工业,2004,19(5):10-13.
- [24] 关淞云,郝敬颖,陈伟,等.磷腈盐催化剂合成高活性聚醚多元醇及其应用[J].聚氨酯工业,2021,36(3):38-40.
- [25] 张莉,张利国,李博,等.反应型催化剂对聚氨酯高回弹泡沫的影响[J].聚氨酯工业,2021,36(6):16-19.
- [26] 张利国,赵修文,李博,等.汽车座椅用高回弹泡沫撕裂强度影响因素研究[J].聚氨酯工业,2018,33(6):24-27.