

# 生物基原料合成热塑性聚氨酯弹性体及其薄膜的性能研究

程雷

浙江凯阳新材料股份有限公司 314200

**【摘要】**热塑性聚氨酯弹性体(TPU)因独特性能在多领域应用广泛,但其传统石油基原料依赖与环境问题日益凸显。本文聚焦生物基原料在TPU合成中的应用,系统探讨生物质资源转化路径、聚合反应机制及薄膜制备工艺,分析生物基组分对材料化学结构、微相分离行为、热稳定性与力学性能的调控作用,阐明生物基TPU薄膜的结构-性能关联规律。研究为可再生资源基高分子材料的绿色设计与高性能化提供理论支撑,拓展生物基弹性体材料的应用场景。

**【关键词】**生物基原料;热塑性聚氨酯弹性体;薄膜制备

Research on the Properties of Thermoplastic Polyurethane Elastomers and Their Films Derived from Bio-based Raw Materials

Cheng Lei

Zhejiang Kaiyang New Materials Co., Ltd. 314200

**【Abstract】** Thermoplastic polyurethane elastomers (TPUs) have found extensive applications across various fields due to their unique properties. However, the increasing reliance on traditional petroleum-based raw materials has raised significant environmental concerns. This study focuses on the application of bio-based raw materials in TPU synthesis, systematically exploring the conversion pathways of biomass resources, polymerization reaction mechanisms, and film preparation processes. It analyzes the regulatory effects of bio-based components on the chemical structure, microphase separation behavior, thermal stability, and mechanical properties of the materials, elucidating the structure-property correlation in bio-based TPU films. The research provides theoretical support for the green design and high-performance development of renewable resource-based polymer materials, expanding the application scenarios of bio-based elastomer materials.

**【Key words】** bio-based raw materials; thermoplastic polyurethane elastomers; film preparation

## 1 引言

全球资源短缺与环境恶化问题的加剧,推动材料科学领域向绿色可持续方向转型。传统热塑性聚氨酯弹性体依赖石油基多元醇与异氰酸酯原料,其生产过程与废弃处置均面临资源消耗与环境污染的双重挑战。生物基材料以可再生生物质为原料,具备环境友好、可降解等固有优势,成为替代石油基材料的理想选择。热塑性聚氨酯弹性体兼具橡胶的高弹性与塑料的加工性,在柔性电子、包装材料、生物医用等领域具有不可替代的地位。将生物基原料引入TPU合成体系,不仅能降低对化石资源的依赖,还可赋予材料生物降解性等特性<sup>[1]</sup>。因此,开展生物基原料合成热塑性聚氨酯弹性体及其薄膜的性能研究,具有重要的

学术价值与工业应用前景。

## 2 生物基原料的种类与特性

### 2.1 天然生物质资源的分类与转化

生物基原料来源于自然界可再生生物质,涵盖植物油脂、多糖类物质、木质素及微生物合成产物等类别。植物油脂作为储量丰富的天然资源,其分子结构中的不饱和键与官能团为化学改性提供基础,通过酯交换、氢化、氧化等反应可转化为多元醇单体,成为TPU合成中多元醇组分的重要替代来源。多糖类物质包括淀粉、纤维素、壳聚糖等,经水解、发酵等工艺处理后,可制备得到具有特定官能度的多元醇或二酸类单体,其分子结构中的羟基与羧基能够参与聚氨

酯的聚合反应。木质素作为 lignocellulosic 生物质的主要成分之一,具有芳香族结构与丰富的羟基官能团,通过降解与改性处理可转化为芳香族多元醇,为合成高性能生物基 TPU 提供结构基础。微生物合成产物如微藻油,无需耕地与淡水资源即可大量培养,通过特定转化路径可制备得到多元醇与异氰酸酯单体,实现全生物基 TPU 的合成目标。

## 2.2 生物基单体的结构特征与反应活性

生物基单体的结构特征直接影响其参与聚氨酯聚合反应的活性与反应产物的结构。植物油衍生多元醇通常具有较长的碳链结构,其分子中的羟基官能度与分布决定了聚合反应的交联程度与产物的网络结构。多糖衍生单体多具备线性分子结构,羟基密度较高,在聚合过程中易形成氢键相互作用,影响产物的结晶行为与微相分离结构。木质素衍生芳香族多元醇保留了芳香环结构,其刚性分子片段的引入可提升 TPU 材料的热稳定性与力学强度。生物基异氰酸酯单体通过绿色合成路径制备,避免了传统光气法的环境污染问题<sup>[2]</sup>。其分子结构中的异氰酸酯基团反应活性受取代基效应与空间位阻影响,直接调控聚合反应速率与产物的分子量分布。不同类型生物基单体的结构差异,为通过分子设计调控 TPU 材料性能提供了多样化的选择空间。

## 3 生物基热塑性聚氨酯弹性体的合成工艺

### 3.1 聚合反应原理与体系设计

生物基 TPU 的合成遵循聚氨酯聚合反应的基本原理,通过异氰酸酯基团与羟基基团之间的逐步加成聚合反应实现。聚合体系的设计需综合考虑生物基单体的反应活性、官能度、分子结构等因素,合理匹配异氰酸酯与多元醇的比例,调控反应条件以优化聚合过程。溶剂法与无溶剂法是生物基 TPU 合成的主要工艺路线,溶剂法通过选择合适的有机溶剂溶解反应单体,降低体系粘度,促进反应均匀进行;无溶剂法则避免了有机溶剂的使用,符合绿色化学理念,通过熔融聚合或本体聚合方式实现单体的高效聚合,但其反应体系粘度控制难度较大<sup>[3]</sup>。

### 3.2 聚合工艺参数的调控

聚合反应温度是影响生物基 TPU 合成的关键参数之一,温度过低会导致反应速率缓慢、单体转化率低,温度过高则可能引发副反应,破坏单体结构与产物性能。催化剂的选择与用量对聚合反应具有显著调控作用,常用的催化剂包括金

属有机化合物与胺类化合物,其作用机制是活化异氰酸酯基团与羟基基团,加速反应进程。反应时间的控制直接影响产物的分子量与分子量分布,需通过监测反应体系的粘度变化与官能团转化率,确定最佳反应时长。

## 4 生物基 TPU 弹性体的结构特征

### 4.1 化学结构与键合方式

生物基 TPU 的化学结构由软段与硬段交替连接形成,软段主要由生物基多元醇构成,硬段则由异氰酸酯与扩链剂反应生成,两者通过氨基甲酸酯键连接形成线性嵌段共聚物。傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 与核磁共振 (NMR) 表征结果表明,生物基 TPU 分子结构中存在特征性的氨基甲酸酯键、羟基、羰基等官能团,这些官能团的存在为分子间相互作用的形成提供基础。生物基单体的结构特征会在 TPU 分子结构中留下印记,植物油衍生软段的长碳链结构、木质素衍生硬段的芳香环结构,均会赋予 TPU 独特的化学结构特征。

### 4.2 微相分离结构的形成机制

微相分离结构是热塑性聚氨酯弹性体的典型特征,微相分离结构是由于软段和硬段在热力学上不相容而形成的。生物基 TPU 的微相分离程度由软段和硬段的化学结构、分子量、组成比例等因素来控制。软段和硬段的极性差异越大、分子量越高,相分离趋势就越明显;而适当的化学结构相似性和官能团相互作用可以改善两相的相容性,调节微相分离程度。生物基软段的分子链柔性与其硬段的刚性结构形成鲜明对比,在聚合过程和后处理阶段,分子链的自组装行为使软段和硬段分别聚集形成连续相或者分散相。

## 5 生物基 TPU 薄膜的制备工艺

### 5.1 薄膜成型方法的选择

生物基 TPU 薄膜的制备方法要根据材料特性和应用需求来选择,常见的成型工艺有溶液流延法、熔融挤出法、热压成型法和涂覆法等。溶液流延法是将生物基 TPU 溶解于特定的有机溶剂中,制备出均匀的铸膜液,经流延、干燥等步骤去除溶剂,得到薄膜材料。该方法适合制备厚度均匀、表面光滑的薄膜,并能对薄膜的微观结构进行调控。熔融挤出法采用无溶剂工艺,将生物基 TPU 原料熔融后通过挤出

机模头挤出成型,再经过拉伸或者压延处理得到薄膜,具有生产效率高、环境友好等优点,适合大规模工业化生产。热压成型法通过加热生物基 TPU 原料使其熔融,在压力作用下成型为薄膜,工艺简单、操作方便,适合于实验室小批量制备。

### 5.2 薄膜制备工艺的优化

薄膜制备工艺参数的优化可以提高生物基 TPU 薄膜的性能。溶液流延法中铸膜液浓度、流延速度、干燥温度、干燥时间等参数影响薄膜的厚度均匀性、表面形貌、力学性能。铸膜液浓度过高容易产生薄膜上的气泡及缺陷,浓度过低则会减弱薄膜成膜性和力学强度;干燥温度、时间的合理控制可以防止溶剂残留和薄膜收缩变形。熔融挤出法中挤出温度、螺杆转速、牵引速度等参数影响材料的熔融状态及加工流动性,进而控制薄膜的结晶结构与力学性能。热压成型法的压制温度、压力和时间要精确控制,保证材料充分熔融成型,防止薄膜出现孔洞、裂纹等缺陷。

## 6 生物基 TPU 薄膜的性能特征

### 6.1 热稳定性

热稳定性是生物基 TPU 薄膜应用的重要指标,热稳定性主要是由分子结构中的化学键强度、交联程度以及微相分离结构决定的。生物基 TPU 薄膜的热分解过程一般表现为多步降解行为,硬段中的氨基甲酸酯键断裂为初始热分解的主要特征,随后软段分子链降解、断裂。生物基原料的结构特性对热稳定性有显著影响,木质素衍生硬段的芳香环结构可以提高材料的热分解温度,植物油衍生软段的长碳链结构可能会降低材料初始热分解温度。微相分离结构可以改变分子链的运动能力及相互作用,从而间接调节热稳定性,

完整的硬段微区结构可以起到物理屏障的作用,延缓热量传递以及分子链的降解。而热重分析(TGA)、差示扫描量热法(DSC)是表征生物基 TPU 薄膜热稳定性的主要手段,可以准确地反映材料的热分解温度、玻璃化转变温度和结晶行为。

### 6.2 力学性能

力学性能是生物基 TPU 薄膜能够被实际应用的关键保证,主要包含拉伸强度、断裂伸长率、弹性回复率以及硬度等各项指标。生物基 TPU 薄膜的力学性能受软段和硬段的结构特点、比例关系、微相分离程度共同影响。硬段含量增加会提高薄膜的拉伸强度、硬度,软段含量提高有利于提高薄膜的柔韧性、断裂伸长率。生物基软段分子链的柔性和长度会影响到薄膜的弹性回复能力,较长的软段分子链在受力的时候可以发生链段滑移和缠结,从而给材料带来优良的弹性。微相分离结构的优化可以实现力学性能的平衡,适度的相分离程度可以兼顾材料的强度和弹性,过度相分离会造成界面结合力降低,影响力学性能的稳定性的。

## 7 结论

生物基原料合成热塑性聚氨酯弹性体及其薄膜的研究,是绿色高分子材料领域的重要发展方向。本文系统阐述了生物基原料的种类与特性、生物基 TPU 的合成工艺、结构特征、薄膜制备方法与性能表现,阐明了材料的结构-性能关联规律与调控策略。生物基原料的多样化对 TPU 的绿色合成提供了丰富选择,通过合理的分子设计与工艺优化,可制备得到兼具优异热稳定性、力学性能与生物降解性能的生物基 TPU 薄膜。

## 参考文献

- [1]梁承旭,黄毅萍.基于生物基原料的湿固化 PUR 热熔胶制备与性能[J].中国胶粘剂,2025,34(10):26-33.
  - [2]徐玉文,刘良军.生物基原料用于电子行业用聚氨酯胶的研究进展[J].中国胶粘剂,2025,34(04):11-17.
  - [3]郭春花.生物基纤维产业进入新质发展新赛道 2024 生物基化学纤维及原料分会年会召开[J].纺织服装周刊,2024,(37):19.
- 作者简介:程雷,出生年月:1982年9月13日,男,汉族,籍贯:山东省菏泽市,学历:博士,研究方向:功能高分子材料的合成、改性及加工技术研究。