

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.027

生物基聚酯弹性体材料的应用研究进展

方奥^{1,2}, 王天都^{1,2}, 李洪雨³, 金玉顺^{1,2}, 刘若凡^{1,2}, 陈绍洲³, 胡光彦³, 丁伟^{1,2}, 伍一波^{1,2}

(1. 北京石油化工学院新材料与化工学院, 北京 102617; 2. 特种弹性体复合材料北京重点实验室, 北京 102617;

3. 北京化学工业集团有限责任公司, 北京 100176)

摘要:介绍了生物基聚酯弹性体(BPE)的生物基单体来源、种类以及BPE的结构与性能。同时,阐述了BPE共混物或复合材料的主要制备工艺,如熔融共混、溶液共混、原位聚合法等。进一步,分析了BPE及其复合材料在环境友好性、可持续性、理化性能可调性、力学性能及跨领域应用方面的显著优势,并系统地总结了其在车用材料、电子器件、3D打印、医用材料等多个领域的应用现状与潜力。最后,探讨了当前BPE材料在生物基单体种类开发、分子结构与性能调控、成本控制、加工稳定性等方面所面临的挑战,并对BPE材料未来的发展方向提出了展望。

关键词:生物基单体;聚酯弹性体;复合材料;制备技术;可降解性

中图分类号: TQ314.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0214-07

Research progress on application of bio-based polyester elastomer materials

FANG Ao^{1,2}, WANG Tiandu^{1,2}, LI Hongyu³, JIN Yushun^{1,2}, LIU Ruofan^{1,2}, CHEN Shaozhou³, HU Guangyan³,DING Wei^{1,2}, WU Yibo^{1,2}

(1. College of New Materials and Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Beijing Key Laboratory of Special Elastomer Composites, Beijing 102617, China; 3. Beijing Chemical Industry Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The sources and types of bio-based monomers for bio-based polyester elastomer (BPE), as well as the structure and properties of BPE, were introduced. The primary fabrication techniques for BPE-based blends or composites, including melt blending, solution blending, in-situ polymerization, were comprehensively elucidated. Furthermore, the notable advantages of BPE and its composites were critically analyzed with respect to environmental friendliness and sustainability, tunable physicochemical performances, mechanical properties, and cross-domain applications. A systematic summary was provided on the current application status and future potential of BPE and its composites in key industrial sectors such as automotive materials, electronic devices, 3D printing, and medical materials. Finally, the existing challenges faced by BPE materials in terms of the development of bio-based monomer types, molecular structure and performance regulation, cost control, and processing stability were discussed, and the future development direction of BPE materials was prospected.

Keywords: bio-based monomers; polyester elastomer; composite; preparation technology; biodegradability

当前,以石油基合成高分子材料的广泛应用为标志的“塑料时代”,正面临其废弃物衍生的环境与健康双重危机的严峻挑战。研究数据揭示,全球海洋生态系统每年需承受高达800万t塑料废弃物的侵入。这些废弃物的化学结构极其稳定,在自然环境中完全降解往往需要数百年之久,其在降解过程中产生的微塑料颗粒能够通过食物链逐级传递并富集,最终进入人体,诱发多重健康隐患^[1-2]。随着全球环保意识的提高和可持续发展目标的推进,开发具有环境友好、资

源可再生、生命周期可控特性的新型材料,已成为维系生态系统稳定与保障公众健康的战略必然。因此,发展可规模化替代传统塑料的可持续生物基材料,已成为高分子材料科学界与产业界共同的战略选择^[3-4]。

作为应对上述挑战的核心解决方案之一,可持续生物基橡塑材料,特别是生物基聚酯弹性体(BPE),因其源于可再生生物质原料,展现出巨大的潜力。特别是,BPE显著降低了对不可再生化石燃料的依赖性^[5-6]。并且,在其全生命周期

基金项目: 北京化学工业集团有限责任公司“揭榜挂帅”项目(H2024-282)

通信作者: 金玉顺,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为高分子材料合成

收稿日期: 2025-10-27

引用格式: 方奥,王天都,李洪雨,等.生物基聚酯弹性体材料的应用研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(2):214-220.

FANG Ao, WANG Tiandu, LI Hongyu, et al. Research progress on application of bio-based polyester elastomer materials[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 214-220.

中,尤其是在原料生产与材料合成阶段,通常表现出显著的碳减排优势,契合了绿色低碳发展的核心要求。然而,尽管BPE在可持续性方面优势明显,其商业化应用的步伐却长期受制于关键性能的固有缺陷。与成熟的石油基聚酯弹性体相比,BPE在关键性能指标(如强度、模量、耐热性及稳定性)等方面仍存在显著差距。通过将其他聚合物、功能性填料或增强体引入BPE基体中,制备BPE共混物或复合材料不仅能够显著提升BPE的综合性能,还能赋予其特定的功能性,从而有望突破上述性能局限。正因BPE原料的可再生性、降解特性的可设计性以及广阔的应用前景,BPE共混物或复合材料正迅速崛起为材料科学、高分子工程与环境技术交叉领

域的前沿研究热点之一,通过创新的分子结构设计与先进的复合加工技术,BPE共混物或复合材料有望实现性能提升,为全球塑料废弃物污染治理提供兼具理论价值与实践意义的解决方案^[7]。

目前,尽管围绕BPE共混物或复合材料的研究较为广泛,但其产业化进程滞后。鉴于此,如图1所示,本文系统总结和分析了BPE共混物或复合材料的基体材料体系和熔融共混、溶液共混、原位聚合等共混物或复合材料主流制备方法,以及其在车用材料、电子器件、3D打印、医用材料领域的产业化应用现状;最后归纳了当前挑战与未来方向,以期为后续研究及技术转化提供参考与展望。

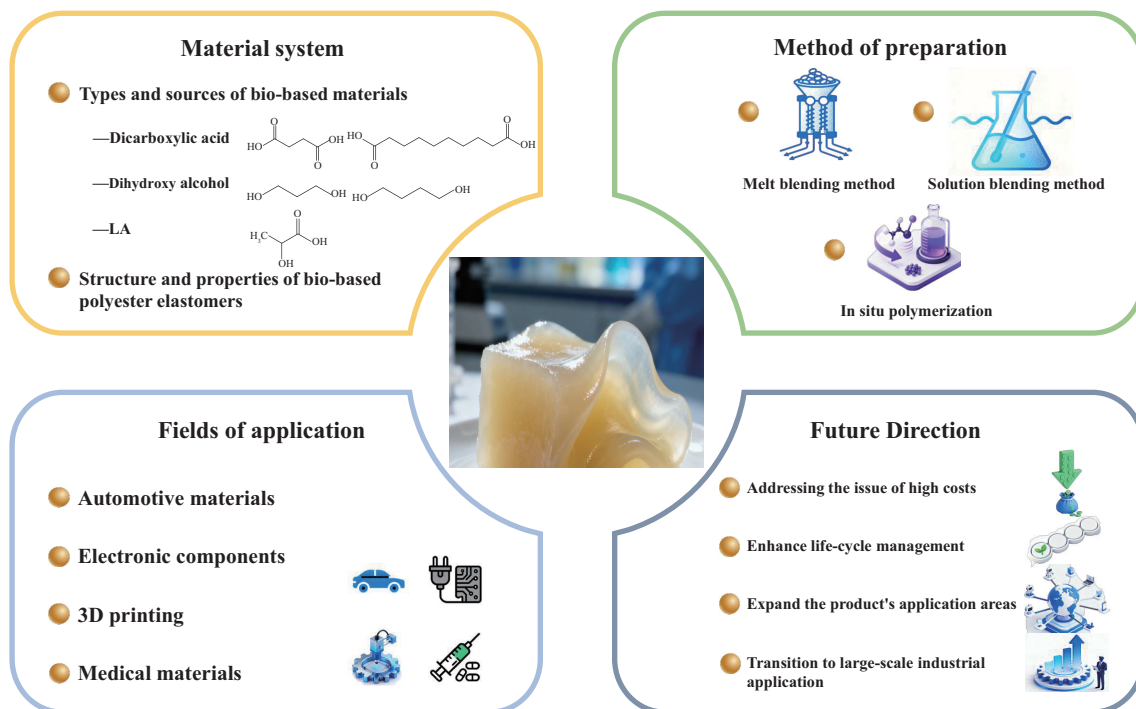


图1 BPE共混物或复合材料的基体材料体系、制备方法、应用领域与未来发展方向

Fig. 1 Matrix material systems, preparation methods, application fields, and future direction of development of BPE blends or composites

1 BPE的生物基单体及BPE的结构与性能

1.1 生物基单体的来源与种类

生物基单体是构建高性能BPE的基石,其来源的可持续性和结构的多样性直接决定了最终材料的性能与环境足迹。与传统石油基单体相比,生物基单体通常源于可再生的生物质资源,通过生物发酵等途径获得。这些单体不仅提供了实现“碳中和”目标的路径,其独特的化学结构还为设计具有特殊性能的聚合物提供了更广阔的空间。

1.1.1 常用的生物基二元酸单体

(1)丁二酸。

丁二酸是一种重要的平台化合物,可作为1,4-丁二醇、四氢呋喃以及生物可降解聚丁二酸丁二酯的生产原料。生物基丁二酸与石油基丁二酸化学结构相同但来源与纯度有较大差异。石油基丁二酸通过石油化工催化加氢等方式制得,其中杂质主要有金属催化剂、中间体等;而生物基丁二酸

则是通过生物质微生物发酵法得到,原料可再生,生产过程理论上碳足迹更低,这是其最根本的环保价值。并且通过高纯度的单体合成的聚合物材料能完全达到石油基产品的力学与热学性能。采用微生物发酵法生产丁二酸不仅具有更高的经济可持续性,同时也展现出更佳的环境友好性。酵母具有良好的耐酸性,能够实现丁二酸的低pH发酵,从而大幅降低产物提取成本。因此,通过代谢工程改造构建高产丁二酸酵母菌株受到越来越多的关注。基于酵母的微生物发酵生产丁二酸时,采用基因工程手段可以引入特定的代谢途径并强化参与丁二酸合成的关键酶;其次,酵母对酸性条件有很高的耐受性,这有利于低pH下丁二酸的生产,这种特性同时也减少了发酵过程中pH调节的需要,具有简化生产过程并降低成本的优点^[8]。

(2)癸二酸。

癸二酸是生产化妆品、添加剂等化工产品的原料,主要

以蓖麻油为原料在高温且强碱条件下裂解得到。石油基的癸二酸是以正癸烷或环戊烯为原料制得。化学法生产癸二酸是对原料蓖麻油通过高温化学裂解得到癸二酸,缺点在于生产过程中能耗较高、效率低,并且纯度及颜色稳定性较差。生物基癸二酸则除了采用蓖麻油裂解的方式获取外也可通过利用特定微生物的发酵制得,相对于石油基癸二酸和化学法生产减少了碳排放,原料利用率更高,同时具有高温下颜色稳定的特点。但有些蓖麻油裂解制备癸二酸工艺中使用了有毒的稀释剂,会产生污染严重的问题。针对这个问题,周万嵛^[9]采用浸渍沉淀法制备了活性炭负载的氧化铁催化剂:以硝酸处理过的活性炭为载体、硝酸铁溶液为浸渍液、氢氧化钠为沉淀剂,经过滤、洗涤、干燥、焙烧等步骤得到活性炭负载氧化铁催化剂。研究发现,将该活性炭负载的氧化铁作为蓖麻油裂解制备癸二酸的催化剂能够显著降低产品中的铁含量,从而制得高品质的癸二酸。

1.1.2 常用的生物基二元醇单体

(1)1,3-丙二醇(PDO)。

PDO是一种重要的化工原料。石油基PDO来源于石油化工原料(如环氧乙烷)的化学催化,技术体系较为成熟,但它存在着环保压力大以及含有不同化学合成路径的特定微量杂质的缺陷。生物基PDO则通过可再生生物质的微生物发酵方法得到,生产过程条件温和,能耗较低,并且其关键杂质更少。两者化学结构相同从而导致合成的聚合物材料并无太大差异,但生物基PDO合成的材料降低了产品的碳足迹,更加符合绿色材料的发展趋势^[10]。

(2)1,4-丁二醇(BDO)。

BDO作为一种重要的基本有机化工原料和精细化工产品,用途广泛,尤其其它的衍生物更是附加价值高的精细化工产品。BDO生产工艺主要有 Reppe 法、丁二烯法、顺酐法、环

氧丙烷法等^[11]。生物基BDO与石油基BDO的核心差异依然是生物基法生产的单体更符合“双碳”目标,但目前因为成本较高的原因总体产能较小。无论来源是否有差异,BDO的化学本质还是决定着其在高分子合成中的独特作用。作为四个碳的直链二醇,BDO是合成聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)等高性能材料的重要单体,赋予材料优异的力学性能、耐热性和尺寸稳定性。当使用生物基BDO来合成聚合物时,能在完全不牺牲材料性能的前提下显著降低产品的全生命周期碳足迹。

1.1.3 乳酸

乳酸,化学名为2-羟基丙酸,它主要通过玉米、甘蔗等富含糖类的可再生生物质经微生物发酵制得,完美体现了绿色化学与可持续发展的理念。作为聚乳酸(PLA)的核心单体,乳酸通过缩聚反应可转化为这种性能优异的生物可降解材料。PLA不仅具有与传统石油基塑料相媲美的强度和加工性能,还拥有其不可比拟的生物相容性和可堆肥降解性,被广泛应用于医用材料乃至3D打印等领域^[12]。因此,乳酸不仅是连接农业与高端高分子材料制造业的关键纽带,更是推动塑料工业走向绿色、循环未来的核心驱动力之一。

综上所述,如表1所示,生物基二元酸、二元醇、乳酸这三类单体来源不同且具有不同的作用。在生物基二元酸单体方面,以微生物发酵法生产的丁二酸和以蓖麻油为原料的癸二酸为代表,其生产工艺正通过不同的手段不断向低成本、低污染方向优化。在生物基二元醇单体方面,PDO和BDO作为调节聚合物链段长度与柔韧性的关键组分,其生物基制备路线虽已打通,但降低生产成本仍是推动其广泛应用的核心挑战。此外,乳酸可以合成出PLA这种生物降解性能优异的聚酯,它是实现高分子材料绿色可持续发展的重要技术路径。

表1 生物基单体的种类、主要来源、主要作用

Tab. 1 Types of bio-based monomers, primary sources, and primary functions

Monomer species	Main sources	Primary function
Dicarboxylic acid	Sugar fermentation, castor oil	Providing strength and hardness
Dihydroxy alcohol	Sugar fermentation, starch	Flexibility adjustment, crystallinity
Lactic acid	Corn, sugarcane, and other sugar-rich materials	Composition of biodegradable segments

1.2 BPE 的结构与性能

BPE因其单体来源全面、环境友好等特点,近年来受到研究人员的广泛关注。BPE分子结构设计与性能表现之间存在着紧密的内在联系;其分子结构通常采用多嵌段共聚物设计,由高熔点的结晶性硬段和玻璃化转变温度较低的无定型软段构成。

独特的微相分离结构是BPE性能的基础。硬段赋予材料强度和热塑性加工性,而软段则负责提供高弹性和柔韧性。BPE的弹性性能直接取决于软段的运动能力和软硬段之间的相容性。通过精确调控软段长度、引入醚键或长链脂肪族结构可以有效增强链段柔顺性,从而获得更高的弹性回复率和优秀的断裂伸长率^[13]。

在生物降解性方面,BPE的表现是其化学结构的直接反映。柔软的链结构易于被生物降解,晶态结构阻碍生物降解。相对分子质量对聚合物的生物降解性能有很大影响,许多由微生物参与的聚合物降解都是由端基开始的,高相对分子质量的聚合物因端基数目少,降解速度较低。

近年来,通过分子结构与单体设计已成功开发出多种性能各异的BPE特色品种。例如,生物基热塑性聚酯弹性体(TPEE)是BPE中综合性能最为突出、产业化最为成熟的品种之一,其典型的多嵌段共聚物结构由PBT作为结晶性硬段和生物基无定型软段构成。在加工过程中,高熔点的PBT链段能够形成物理交联点,构成稳固的网状结构,赋予材料优异的强度、耐热性和热塑性加工性能,使其能够通过注塑、挤

出等常规方式便捷成型。与此同时,嵌入的柔性生物基软段则在室温下处于高弹态,负责提供卓越的柔韧性和回弹性^[14]。2,5-呋喃二甲酸(FDCA)基弹性体可赋予材料更好的强度与热稳定性,如Gao等^[15]引入了刚性更强的二醇单体,使用1,4-环己烷二甲醇与FDCA合成了聚呋喃二甲酸-1,4-环己烷二甲酯(PCF),其熔点高达294 °C,熔融焓为60.6 J/g,结晶速度也得到提升。这使得PCF作为一种高性能硬段,为弹性体提供了出色的热稳定性和物理交联点。Wang等^[16]设计合成并表征了一种由甘油和癸二酸等生物基单体通过缩聚并交联形成三维网络的聚癸二酸甘油酯(PGS)。该生物基弹性体具有良好的生物相容性和可降解性,并且力学性能可通过交联度调节。Halpern等^[17]报道了一种仅使用甘油和柠檬酸,通过无催化剂的熔融缩聚反应直接制备可生物降解的原位交联型聚柠檬酸甘油酯(PGLC)的方法,此生物基弹性体的交联密度高并且降解行为和力学性能可通过单体选择和比例进行调控。综上所述,BPE在未来的应用发展中具有显著优势,不同类型BPE的性能对比见表2。

表2 不同类型BPE的性能对比

Tab. 2 Performances comparison of different types of BPE

Different types	Performances
Bio-based TPEE	Excellent mechanical properties and good workability
FDCA-based elastomer	Enhanced strength and thermal stability
PGS	Crosslinking degree modulates mechanical properties
PGLC	High crosslink density with proportional regulation capability

2 BPE基共混物或复合材料制备技术

在BPE基共混物或复合材料的制备中,通过功能性材料的引入赋予基体材料原本不具备的特性或显著提升其性能,实现复合体系的多功能化与高性能化,如增韧、增强、提升加工稳定性。以下具体介绍目前主要的BPE共混物或复合材料制备技术。

2.1 熔融共混法

熔融共混法制备BPE共混物或复合材料的本质是借助热-力协同作用实现多相组分在熔融态下的均质化分散及界面耦合。同时因为它具有高效、连续以及易工业化的优势,也被广泛应用于不同场景。该过程分三阶段完成:(1)基体熔融塑化;(2)填料剪切解聚与界面耦合;(3)卸料与后处理^[18]。

马铁莲^[19]以热塑性淀粉、聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯和一系列新型羟基功能化离聚物为原料,采用熔融共混法制备了高性能绿色多相共混物。通过引入离子键提高分子间作用力,使离聚物具有较高的力学和热学性能。研究结果发现,该离聚物促进了分子链间的相互缠结,显著改善了体系的相容性,使得共混物在特定条件下仍能维持400%左右的断裂伸长率。

Kang等^[20]将BPE和聚己内酯(PCL)在交联剂存在下熔

融共混并发生相转化。大量的BPE可提供柔韧性和弹性,可快速交联并精细分散在PCL基体中,从而提高强度和加工性能。BPE/PCL质量比为70:30的材料表现出良好的拉伸性能,例如拉伸强度为11.2 MPa,断裂伸长率为414%,兼具可加工性和细胞相容性。

2.2 溶液共混法

溶液共混法通过溶剂溶解聚合物基体,形成均一溶液后加入填料或改性剂,经分散混合后去除溶剂,实现组分均匀复合。但对于生物基材料而言溶液共混法也有一定的缺点,如易热降解、不够环保等。

Han等^[21]开发了一种微晶纤维素接枝超支化聚酯,用于聚(3-羟基丁酸酯-co-3-羟基戊酸酯)(PHBV)/BPE复合材料的增韧增强。该研究使用溶液共混法,将PHBV和BPE溶于氯仿制成均匀溶液,然后加入该微晶纤维素接枝超支化聚酯,超声分散后浇铸成膜。研究表明,采用溶液共混法可提升复合材料的韧性。

王浩宇等^[22]针对BPE力学性能较差的问题,采用PCL作为BPE的增强相,通过溶液共混法及橡胶传统硫化工艺,制备了具有较高力学性能的生物基BEE/PCL硫化胶。结果表明,硫化胶的拉伸强度能达到5.1 MPa,同时断裂伸长率达到292%。

Wang等^[23]利用溶液共混法将PLA与聚丁二烯(PB)的多嵌段共聚物弹性体(PLA-b-PB-b-PLA)和左旋聚乳酸(PLLA)溶于二氯甲烷,后对其进行溶液浇铸。研究了合成的PLA-b-PB-b-PLA对PLLA薄膜的增韧效果。研究表明将质量分数15%的PLA-b-PB-b-PLA与PLLA共混后可在几乎不损失拉伸强度的情况下提升韧性。

2.3 原位聚合法

原位聚合法是一种将聚合物单体和增强相混合后,在加工过程中直接引发单体聚合形成复合材料的技术^[24]。这种方法避免了传统熔融共混中填料团聚、界面相容性差等问题,尤其适用于BPE复合材料的制备。

Tang等^[25]报道了一种通过原位构建细菌纤维素互穿网络显著增强力学性能的可生物降解聚(乙二醇-甘油-衣康酸酯-癸二酸酯)共聚酯弹性体。作者特别指出主要通过“原位二次网络构建”策略形成互穿网络,起到力学性能显著提升的作用。

2.4 不同制备方法的优势对比

以上介绍了BPE共混物或复合材料的三种主要制备方法:熔融共混法、溶液共混法和原位聚合法。实际上,上述三种方法的最终目标是一致的,即将具有不同特性的聚合物组分、填料或增强体结合在一起,制备出具有微相分离结构、兼具良好弹性和一定强度的BPE。方法核心都是致力于解决多组分之间的相容性问题,以实现性能的优化。三者最主要的区别在于实现这一目标的物理化学过程、混合尺度及组分间的相互作用。三种制备方法的优势见表3。其中,熔融共混法工艺简单、高效、成本低,且可直接对接成熟的工业设

备,容易实现大型的工业生产;溶液共混法的混合均匀度高,非常适合于实验室的研究;原位聚合能够实现分子水平上的复合,形成微观相分离最精细、热力学最稳定的结构,能赋予材料最优异的综合力学性能。

表3 不同制备方法的优劣

Different preparation methods	Advantages
Melt blending	Simple, efficient, and low-cost process
Solution blending	High mixing uniformity
In-situ polymerization	Endow materials with the most outstanding comprehensive mechanical properties

3 BPE及其复合材料的应用

BPE作为一种源于可再生资源的高分子材料,凭借其独特的环保属性、可调控的力学性能、良好的生物相容性及可降解性,正成为推动多个领域绿色与高性能化发展的关键材料。BPE材料分子结构的可设计性赋予了其性能的多样化。通过单体的选择、共聚改性或与纳米填料的复合,能够精确调控BPE材料的强度、韧性、耐油性及功能特性,从而满足不同工业场景的苛刻需求。目前,BPE材料已在车用材料的轻量化与绿色轮胎制造、电子器件的柔性环保基板、3D打印的高性能耗材以及生物医学领域的先进医用材料中展现出巨大的应用潜力和 market 价值。例如,车用材料中,行业的轻量化和节能趋势推动了BPE的应用。它们可以用于制造轮胎、软管和密封件,有助于提高燃油效率、减少排放;在医用材料方面,BPE因其生物相容性、灵活性和耐用性,在医疗器械中应用广泛。全球生物可吸收聚合物市场不断扩大,其中医疗设备是主要应用。根据QYResearch的调研统计,可生物降解聚酯弹性体行业在2024年的全球市场规模约为24.5万t,预计到2031年,市场销售额将达到148.7亿元,2025年至2031年间的年复合增长率预计为8.2%^[26]。

下文将分别从车用材料、电子器件、3D打印及医用材料四个具体领域,系统阐述BPE及其复合材料的最新研究进展与产业化应用前景。

3.1 车用材料

近年来,汽车行业的快速发展对材料性能提出了更高要求,特别是对轻量化、可持续性和高性能材料具有迫切需求。BPE及其复合材料作为一类具有环保特性和优异性能的高分子材料,在汽车行业绿色转型和技术升级中扮演着日益重要的角色^[27-29]。

在汽车轮胎制造方面,Ji等^[30]基于衣康酸酯橡胶的特点,研发了相适配的混炼配方及生产工艺,制备了双B级生物基午线轮胎。Wei等^[31]将BPE与纳米二氧化硅复合后,发现由此制备的复合材料拉伸强度可达14~20 MPa,具备良好的耐油性和低滚动阻力,可作为绿色轮胎的良好材料。在耐油密封件方面,Gao等^[32]指出了BPE因其酯基而具有很大的电极性,对非极性油类具有较好的耐受性,可用于替代传

统耐油橡胶如丁腈橡胶,因此也成为制备耐油密封件的优秀材料之一。

因此,BPE及其复合材料凭借其可调的力学性能、固有的环境友好性及卓越的耐油性,在车用材料领域展现出巨大的替代潜力与应用价值。从绿色轮胎到耐油密封件,BPE的应用不仅是简单的材料替换,更是汽车产业实现轻量化、低碳化与可持续发展的关键技术路径之一。未来,随着合成与改性技术的不断突破,BPE材料有望在耐高温性、长期耐久性等方面取得更大进展,从而拓展至更广泛的高端领域,进一步推动汽车工业的绿色革新。

3.2 电子器件

BPE及其复合材料凭借优异的环保性能、卓越的力学性能以及可完全生物降解等显著优势,在电子电器领域的产业化应用正持续深化。尽管当前部分相关研究尚处于技术开发或商业化初期阶段,但其广阔的应用前景已得到充分验证^[33-35]。

柔性电子产品的快速发展导致电子垃圾的产生激增,刺激了对环保聚合物基板的强劲需求。开发高强度且可回收的聚合物基材是一种很有前途的方法,但可回收性所需的弱非共价键导致材料强度变差,因此这种方法仍然面临较多挑战。为此,Lu等^[36]设计了一种动态硬相区域策略,开发基于纤维素/蓖麻油衍生的全生物来源的BPE。该BPE具有优异的机械稳健性、可回收性和生物降解性能,适用于柔性电子基板。相分离结构的构建实现了高强度(25.6 MPa)和韧性(43.5 MJ/m³),而动态硬相区域的可重构性实现了优异的可回收性,回收后的拉伸强度性能保持率高达88.2%。Yang等^[37]将BPE与高介电常数二氧化钛(TiO₂)粉末结合形成介电弹性体复合材料。研究了TiO₂填料对聚酯介电弹性体的弹性模量、介电性能和机电响应的影响,在低电场(9.8 kV/mm)下实现11.8%的驱动应变,可用于介电弹性体驱动器。

综上所述,BPE及其复合材料在电子器件领域的突破,核心在于其独特的动态可逆化学结构与可设计的生物基骨架,这为破解柔性电子中强度、自修复性与可回收性之间的矛盾提供了创新性的解决方案。上述研究通过构建动态硬相区域与多重动态网络等策略,成功地将高强度、高韧性与环境可持续性集于一体,超越了传统石油基弹性体的性能范畴。未来,随着对动态化学的深入理解和精密调控,BPE材料有望在可重构电路、瞬态电子等前沿领域扮演关键角色,为从根本上解决电子垃圾问题、实现电子器件的全生命周期绿色化奠定材料基础。

3.3 3D打印

随着3D打印技术的飞速发展,对高性能、多功能和可持续性打印材料的需求日益增加。传统的3D打印聚合物,如PLA,常面临韧性不足、功能单一等挑战,限制了其在高端制造和功能器件领域的应用。在此背景下,BPE作为一种新兴的可持续材料,正展现出巨大的应用优势^[38-39]。

Koo等^[40]设计了一种通过原位聚合方法制备可3D打印

的生物基弹性体,它的理论生物质质量分数可达88%,并且使用纤维素纳米晶进行了增强。同时,纤维素纳米晶在聚合物基体中的良好分散促进了材料力学性能的提升,其拉伸强度达到了67 MPa,断裂伸长率达到了860%。此外,该弹性体的缓慢凝固速率和延迟的分相分离使得打印层之间能够相互扩散并黏合。Gao等^[41]基于聚(1,4-丁二醇/2,3-丁二醇/琥珀酸/衣康酸)(PBBST)和PLA制备的弹性体显示出较高的韧性,它们适合3D打印,并具有出色的尺寸稳定性。

上述研究案例表明,通过引入高生物质含量的单体与纳米纤维素增强相,BPE材料不仅能实现传统打印材料难以企及的高强度与高伸长率组合,其独特的流变行为与相分离动力学更确保了打印制品优异的层间融合质量与尺寸稳定性。这标志着BPE已从一种单纯的环保材料,演进为能够赋予3D打印结构以卓越力学性能和复杂功能集成能力的先进制造基元。未来,随着对BPE材料打印工艺-结构-性能关系的深入研究,其有望在定制化柔性器件、生物医学支架及轻量化复杂结构等高端制造领域发挥不可替代的作用。

3.4 医用材料

BPE材料的特性符合医疗包装材料的严格要求,比如具有高弹性、良好的密封性能、较低的透气性、优良的物理和化学性能,故BPE材料在生物医用材料上得到广泛的应用^[42-44]。

Liu等^[45]研究发现,BPE通过纳米二氧化硅填料复合,其拉伸强度可达20 MPa,与石油基弹性体相当。同时,通过调整单体类型可增强BPE柔韧性和强度,并赋予压电性能,此外,该BPE还具有优异的生物相容性与降解性,对应了医用材料核心要求:无毒、无致敏、不引起炎症或排异反应,并且降解产物安全可代谢。因而该BPE可应用在短期植入物、组织工程支架、药物缓释载体等医用方向。Kang等^[46]研究了BPE的形状记忆性能,发现由BDO、异山梨醇、衣康酸和癸二酸制成的生物基弹性体的形状恢复率接近100%,其玻璃化转变温度接近37℃。这种性能特点可以实现微创植入并且减少手术创伤和复杂度的目标,在微创手术器械如自膨胀血管支架、神经导管、骨钉中有着良好的应用前景。

总体而言,BPE及其复合材料可以应用在组织工程支架、药物传递系统、压电生物材料等医用材料方向,并且具有的完全生物基、可降解且降解产物生物相容性好、力学性能可调、具备功能化潜力的一系列特点使BPE及其复合材料在医用材料中有着显著的应用优势。

4 总结与展望

BPE及其共混物或复合材料作为一种绿色低碳的高分子材料体系,在多个领域展现出显著的应用价值与可持续发展潜力。其核心优势主要体现在以下三个方面。(1)环境友好与资源可持续性:该材料部分或全部来源于可再生生物质资源,显著降低对化石资源的依赖,多数材料体系具有良好的生物可降解性,能够从源头缓解“白色污染”问题,符合循环经济与碳中和战略需求;(2)多功能性与性能可调性:通过

分子结构设计、共聚改性、纳米复合等技术手段,可系统调控BPE力学性能、阻隔性、降解行为及功能特性,从而满足多样化应用场景中的定制化需求;(3)跨领域应用适配性:该类材料在车用材料、电子器件、3D打印、生物医用领域以及高端工业领域中均表现出良好适用性,兼具优良使用性能与全生命周期环境相容性。

尽管BPE发展迅速,但与石油基聚酯弹性体相比,在生物基单体种类开发、分子结构与性能调控、成本控制、加工稳定性等方面仍面临着一系列更为特殊的挑战。

(1)在BPE的发展中,生物基单体种类的相对匮乏是制约其分子设计与性能突破的核心因素之一。当前,商业化的生物基单体种类远少于成熟、庞大的石油基单体库,这种结构性短缺在关键单体上尤为突出,未来突破不仅依赖于生物炼制技术开发新单体,更需通过创新的共聚、复合及动态网络设计等分子工程策略,最大化发掘现有生物基单体的性能潜力。

(2)在分子结构与性能调控的挑战方面,存在的问题有硬段结构局限、软段与降解性的矛盾。石油基单体对苯二甲酸形成的芳香环结构规整,易于结晶,能为弹性体提供稳定且牢固的物理交联点。而目前主流的生物基替代品,如FDCA,其呋喃环具有更高的刚性,但对称性较差,导致其结晶速率较慢,结晶度也相对较低。这使得以此为硬段的弹性体在高温下的耐热性和初始模量可能不及石油基产品。

(3)在成本控制方面也存在较大的挑战,大多数生物基单体的生产成本目前远高于成熟的石油基化学品,直接导致了最终弹性体产品缺乏价格竞争力。

(4)在加工稳定性方面,部分BPE链段在熔融加工时,对高温和剪切力更为敏感,可能存在更窄的加工窗口。过热或长时间停留容易导致材料发生热降解或水解,使得分子量下降,颜色变黄,影响产品外观和性能。

综上所述,BPE及其共混物或复合材料的发展虽然面临不少难题,但仍有望成为推动绿色低碳转型的核心材料体系之一。通过跨学科技术融合与产业链上下游协同创新,该材料将逐步实现从实验室研发向规模化产业应用的跨越,为可持续材料领域提供关键支撑。

参考文献

- [1] MACLEOD M, et al. *Science*, 2021, 373(6550):61-65.
- [2] AL-KHAIRY D, et al. *Microorganisms*, 2022, 10(12). DOI:10.3390/microorganisms10122320.
- [3] 王艳珍. *山东化工*, 2024, 53(18):104-105, 108.
WANG Yanzhen. *Shandong Chemical Industry*, 2024, 53(18):104-105, 108.
- [4] 袁丽,等. *广东化工*, 2024, 51(20):70-73.
YUAN Li, et al. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, 51(20):70-73.
- [5] Zhang Q N, et al. *Progress in Polymer Science*, 2021, 120. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101430.
- [6] FAYYAZBAKHS A, et al. *Sustainable Materials and Technology*

- gies, 2025, 44. DOI:10.1016/j.susmat.2025.e01395.
- [7] ATILAL E, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2025, 36 (7). DOI:10.1002/pat.70271.
- [8] OOKUBO A, et al. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2008, 72(11):3 063–3 066.
- [9] 周万嵋. 活性炭负载氧化铁催化裂解蓖麻油制备癸二酸的研究[D]. 西安:西北大学, 2014.
ZHOU Wanji. Study on the preparation of decanedioic acid from castor oil via catalytic cracking of iron oxide loaded on activated carbon[D]. Xi'an:Northwest University, 2014.
- [10] 付雪晴, 等. *燃料化学学报*, 2025, 53(1):24–39.
FU Xueqing, et al. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2025, 53(1):24–39.
- [11] LI X Y, et al. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 25(13): 9 445–9 453.
- [12] GŁOWIŃSKA E, et al. *Molecules*, 2023, 28(1). DOI: 10.3390/molecules28010436.
- [13] MAGAÑA I, et al. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10 (10):5 019–5 043.
- [14] HUANG J, et al. *Polymer Testing*, 2016, 55:152–159.
- [15] GAO R X, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 210. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2023.110292.
- [16] WANG Y D, et al. *Nature Biotechnology*, 2002, 20(6):602–606.
- [17] HALPERN J M, et al. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2014, 102(5):1 467–1 477.
- [18] 陈靖, 等. *塑料科技*, 2025, 53(9):121–127.
CHEN Jing, et al. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(9): 121–127.
- [19] 马铁莲. 功能化离聚物构造高性能生物聚酯共混体系研究[D]. 天津:天津大学, 2022.
MA Yilian. Study on biobased polyester and functionalized elastomeric ionomers multiphase blend[D]. Tianjin:Tianjin University, 2022.
- [20] KANG H L, et al. *Polymer International*, 2023, 72(9):832–840.
- [21] HAN X L, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.124608.
- [22] 王浩宇, 等. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(10):62–69.
WANG Haoyu, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(10):62–69.
- [23] WANG Z Y, et al. *RSC Advances*, 2022, 12(46):29 777–29 784.
- [24] ZHU K, et al. *Polymer Composites*, 2025, 46(7):6 083–6 098.
- [25] TANG L S, et al. *Scientific Reports*, 2024, 14. DOI: 10.1038/s41598-024-56534-z.
- [26] 北京恒州博智国际信息咨询有限公司. 2025年全球可生物降解聚酯弹性体行业总体规模、主要企业国内外市场占有率及排名: 6366753[R/OL]. (2025-11-17) [2025-12-02]. <https://www.qyresearch.com.cn/reports/6366753/biodegradable-polyester-elastomer>. QYResearch. Biodegradable polyester elastomer report 2025, global revenue, key companies market share & rank: 6366753[R/OL]. (2025-11-17) [2025-12-02]. <https://www.qyresearch.com.cn/reports/6366753/biodegradable-polyester-elastomer>.
- [27] ZHANG W, et al. *Materials & Design*, 2022, 221. DOI:10.1016/j.matdes.2022.110994.
- [28] HE D, et al. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(28): 12 297–12 303.
- [29] WANG D, et al. *Polymer Chemistry*, 2022, 13(4):485–491.
- [30] JI H J, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11 (44):15 826–15 840.
- [31] WEI T, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2012, 14(1/2): 112–118.
- [32] GAO S H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133 (1). DOI:10.1002/app.42855.
- [33] NURHAMIYAH Y, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(6). DOI:10.1002/mame.202270025.
- [34] CHENG J H, et al. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(25). DOI:10.1002/adfm.202200444.
- [35] CHEN S, et al. *Advanced Science*, 2022, 9(13). DOI: 10.1002/advs.202105146.
- [36] LU C W, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 700. DOI:10.1016/j.jcis.2025.138605.
- [37] YANG D, et al. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(15). DOI: 10.1063/1.4824805.
- [38] YEAZEL-KLEIN T R, et al. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(23). DOI:10.1002/admt.202201904.
- [39] KOUTSAMANIS I, et al. *Journal of Controlled Release*, 2021, 335:290–305.
- [40] KOO J M, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 185. DOI:10.1016/j.compscitech.2019.107885.
- [41] GAO Y, et al. *Polymers*, 2017, 9(12). DOI: 10.3390/polym9120694.
- [42] TANG L S, et al. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(2). DOI:10.3390/ijms26020727.
- [43] KHATAMI M, et al. *Fibers and Polymers*, 2024, 25(8): 3 061–3 077.
- [44] WEN Y, et al. *Materials Today Sustainability*, 2023, 21. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100328.
- [45] LIU Q S, et al. *Advanced Materials*, 2025, 37(22). DOI:10.1002/adma.202417193.
- [46] KANG H L, et al. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014, 2(45): 7 877–7 886.