

分类号: TQ32
学号: 20232107047

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



生物炭结构调控及其对 PBAT 复合材料性能 影响研究

学位申请人	黄岐
指导教师	王自庆教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	材料工程
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子
2026年6月

分类号: TQ32
学号: 20232107047

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



生物炭结构调控及其对 PBAT 复合材料性能 影响研究

学位申请人	黄岐
指导教师	王自庆教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	材料工程
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2026年6月

**Study on the structural regulation of biochar properties and its effects
on the properties of PBAT composites**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Materials and chemicals

By

Huang Qi

(Material chemical industry)

Dissertation Supervisor: Assoc. Prof. Wang Zi-qing

June, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：黄岐

时间：2026年5月28日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：黄岐

时间：2026年5月28日

导师签名：王自庆

时间：2026年5月28日

摘要

针对聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT) 力学强度不足、耐热性和阻隔性能差的缺陷本文以棉秆为原料, 通过限氧热解法制备生物炭 (BC) 作为绿色增强填料, 经熔融共混工艺制备 PBAT/BC 复合材料。通过调控炭化温度、化学活化改性和微观形貌设计来实现生物炭结构与界面特性的调控, 采用 FT-IR、XRD、SEM、DSC、TG-DTA、流变性能和阻隔性能等表征手段探究 BC 结构性能对 PBAT/BC 复合材料应用性能的影响规律, 为 PBAT 的高性能化和 BC 应用领域的拓展提供参考, 获得的具体结论如下:

(1) 炭化温度可有效调控 BC 的孔隙结构、表面化学组成及石墨化程度。当炭化温度为 600 °C 时, 所得生物炭 BC600 具有最优的介孔发育 (比表面积 171.48 m²/g, 孔容 0.0519 cm³/g) 和适中的表面极性 (C/O 原子比较高, 含氧官能团含量适宜), 其发达规整的介孔可为 PBAT 分子链提供高效物理缠结与锚定位点, 同时适宜的含氧官能团显著增强界面氢键作用, 二者协同作用强化了界面结合与异相成核效应, 有效延长气体扩散路径。在 3 wt% 添加量下, TBC600 综合性能最优, 拉伸强度与断裂伸长率较纯 PBAT 分别提升 18.4% 和 21.9%, 初始热分解温度提升了 21.7 °C; 同时, 氧气透过率与水蒸气透过率较纯 PBAT 分别降低了约 11.7% 和 38.0%, 实现力学、热学与阻隔性能的同步优化。

(2) 采用 H₃PO₄、HCl、ZnCl₂/AlCl₃ 复合盐、NaOH 及 KOH 五种化学活化剂对 BC 的结构改性, 其中 H₃PO₄ 活化活化效果最为突出: 其强造孔与催化芳香化作用使所得 BC-P 比表面积高达 939.51 m²/g, 形成发达介孔网络, 同时其高芳香碳、低极性的表面特性与 PBAT 基体表现出良好的界面相容性。BC-P 的高比表面积与介孔结构构建了强机械互锁界面, 协同优化的表面化学特性, 强化了应力传递与气体阻隔, 使 TBC-P 拉伸强度和断裂伸长率较纯 PBAT 分别提升了 29.5% 和 55.2%, 初始热分解温度提升了 23.1 °C, 氧气与水蒸气透过率分别降低了约 11.7% 和 38.0%。而 NaOH、KOH 活化因过度刻蚀导致生物炭碳骨架坍塌、界面相容性劣化, 对复合材料性能的提升作用有限。

(3) 通过优化工艺制备多孔状、片状、球状、棒状四种特征 BC, 探究其微观形貌对 PBAT 复合材料性能的差异化影响。研究发现, 多孔状 BC 凭借其发达的三维孔隙结构实现力学、热学与阻隔性能的均衡优化; 片状 BC 通过二维片层的“迷宫效应”, 使复合材料氧气与水蒸气透过率较纯 PBAT 分别降低 13.5% 和 41.1%, 阻隔性能最优; 球状 BC 以规整形貌与优异分散性作为应力分散中心, 赋予复合材料最优增韧效果, 断裂伸长率提升 60.4%; 棒状生物炭则通过一维纤维结构高效传递应力, 使复合材料弹性模量提升至 54 MPa, 刚性增强效果显著。

关键词: PBAT; 生物炭; 结构特性; 界面作用; 复合材料性能

Abstract

To address the shortcomings of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), such as insufficient mechanical strength, poor heat resistance, and inadequate barrier properties, this study utilized cotton stalk as a raw material to prepare biochar (BC) via confined-oxygen pyrolysis as a green reinforcing filler. PBAT/BC composites were subsequently fabricated using a melt-blending process. The structure and interfacial properties of the biochar were tailored by regulating the carbonization temperature, applying chemical activation, and designing its microstructure. Characterization techniques including FT-IR, XRD, SEM, DSC, TG-DTA, rheological analysis, and barrier property measurements were employed to investigate the influence of BC's structural characteristics on the performance of the PBAT/BC composites. This research provides a reference for the performance enhancement of PBAT and the expansion of BC's application fields. The main conclusions are as follows:

(1) The carbonization temperature effectively regulated the pore structure, surface chemical composition, and graphitization degree of BC. Biochar prepared at 600°C (BC600) exhibited optimal mesoporous development (specific surface area: 171.48 m²/g, pore volume: 0.0519 cm³/g) and moderate surface polarity (high C/O ratio, appropriate oxygen-containing functional group content). Its well-developed and ordered mesopores provided efficient sites for physical entanglement and anchoring of PBAT molecular chains, while the suitable surface functional groups significantly enhanced interfacial hydrogen bonding. The synergistic effect of these two aspects strengthened the interfacial adhesion and heterogeneous nucleation, effectively prolonging the gas diffusion path. At a 3 wt.% loading, the TBC600 composite demonstrated optimal overall performance: its tensile strength and elongation at break increased by 18.4% and 21.9%, respectively, and its initial decomposition temperature increased by 21.7 °C compared to neat PBAT. Simultaneously, its oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR) decreased by approximately 11.7% and 38.0%, respectively, achieving simultaneous optimization of mechanical, thermal, and barrier properties.

(2) Five chemical activating agents (H₃PO₄, HCl, ZnCl₂/AlCl₃ composite salt, NaOH, and KOH) were used to modify BC's structure. Among them, H₃PO₄ activation yielded the most pronounced results. Its strong pore-forming and catalytic aromatization effects produced BC-P with a high specific surface area (939.51 m²/g) and a developed mesoporous network. Concurrently, its surface characteristics—high aromatic carbon content and low polarity—exhibited good compatibility with the PBAT matrix. The high surface area and mesoporous structure of BC-P established a strong mechanical interlocking interface. Coupled with its optimized surface chemistry, this synergistically enhanced stress transfer and gas barrier properties. Consequently, the TBC-P composite showed a 29.5% increase in tensile strength, a 55.2% increase in elongation at break, a 23.1 °C rise in initial decomposition temperature, and reductions in OTR and WVTR

of approximately 11.7% and 38.0%, respectively, compared to neat PBAT. In contrast, NaOH and KOH activation, due to excessive etching, led to the collapse of the BC carbon skeleton and deterioration of interfacial compatibility, resulting in limited performance enhancement for the composites.

(3) Porous, sheet-like, spherical, and rod-like BC with distinct morphologies were successfully prepared via optimized processes to investigate the differential impact of microstructure on composite performance. Studies revealed that: Porous BC, leveraging its developed three-dimensional pore structure, achieved balanced optimization of mechanical, thermal, and barrier properties. Sheet-like BC, utilizing the "labyrinth effect" of its two-dimensional lamellar structure, enabled its composite to achieve the optimal barrier performance, with OTR and WVTR decreasing by approximately 13.5% and 41.1%, respectively, compared to neat PBAT. Spherical BC, benefiting from its regular morphology and excellent dispersion, acted as a stress dispersion center, providing the best toughening effect—the composite's elongation at break increased by 60.4%. Rod-like BC effectively transferred stress through its one-dimensional fibrous structure, significantly enhancing the composite's rigidity, with the elastic modulus reaching 54 MPa.

Key words: PBAT; Biochar; Structural properties; Interfacial interaction; Composite properties

目录

摘要.....	I
Abstract	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 可降解高分子材料概述.....	2
1.2.1 生物基可降解材料.....	2
1.2.2 石油基可降解材料.....	2
1.3 PBAT 改性研究.....	3
1.3.1 PBAT 性能缺陷.....	3
1.3.2 共混改性.....	4
1.3.3 共聚改性.....	5
1.3.4 填充改性.....	5
1.4 生物炭概述.....	6
1.4.1 生物炭的性质及制备工艺.....	6
1.4.2 生物炭性能调控.....	7
1.4.3 生物炭填料特性与优势.....	8
1.5 生物炭/可降解聚合物复合材料的研究现状.....	10
1.6 课题研究意义及内容.....	12
第 2 章 实验部分.....	14
2.1 实验原料.....	14
2.2 实验设备及仪器.....	14
2.3 生物炭及复合材料的制备.....	15
2.3.1 不同炭化温度生物炭的制备.....	15
2.3.2 不同活化剂生物炭的制备.....	15
2.3.3 不同形貌生物炭的制备.....	16
2.3.4 复合材料的制备.....	16
2.4 生物炭的结构表征.....	17
2.4.1 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR).....	17
2.4.2 X 射线衍射 (XRD).....	17
2.4.3 拉曼光谱 (RAMAN).....	17

2.4.4 X 射线光电子能谱 (XPS)	17
2.4.5 全自动比表面及孔隙度分析 (BET)	17
2.4.6 扫描电子显微镜 (SEM)	18
2.5 复合材料的性能测试及结构表征	18
2.5.1 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)	18
2.5.2 扫描电镜分析 (SEM)	18
2.5.3 X 射线衍射 (XRD)	18
2.5.4 差示扫描量热测试 (DSC)	18
2.5.5 热失重 (TG)	19
2.5.6 流变性能测试	19
2.5.7 力学性能测试	19
2.5.8 亲水性测试	19
2.5.9 水蒸气阻隔性能测试	19
2.5.10 气体阻隔性能测试	20
第 3 章 炭化温度对生物炭结构及 PBAT 复合材料性能的影响	21
3.1 引言	21
3.2 炭化温度对 BCX 结构的影响	22
3.2.1 官能团结构	22
3.2.2 物相结构	22
3.2.3 石墨化程度	23
3.2.4 表面化学状态	24
3.2.5 孔隙结构	25
3.2.6 微观形貌	26
3.3 PBAT/BCX 复合材料表征	27
3.3.1 化学结构与界面	27
3.3.2 微观形貌	28
3.3.3 物相结构	29
3.3.4 热行为与结晶性能	29
3.3.5 热稳定性	32
3.3.6 流变行为	33
3.3.7 力学性能	34
3.3.8 表面接触角	35
3.3.9 阻隔性能	36

3.4 BC600 含量对 PBAT/BC600 复合材料性能的影响	37
3.4.1 微观形貌	37
3.4.2 热行为	37
3.4.3 热稳定性	38
3.4.4 力学性能	39
3.4.5 阻隔性能	40
3.5 小结	41
第 4 章 活化剂对生物炭结构及 PBAT 复合材料性能的影响	42
4.1 引言	42
4.2 活化剂对 BC-M 结构的影响	43
4.2.1 官能团结构	43
4.2.2 物相结构	44
4.2.3 石墨化程度	44
4.2.4 表面化学状态	45
4.2.5 孔隙结构	47
4.2.6 微观形貌	48
4.3 PBAT/BC-M 复合材料的表征	49
4.3.1 化学结构与界面	49
4.3.2 微观形貌	50
4.3.3 物相结构	50
4.3.4 热行为与结晶性能	51
4.3.5 热稳定性	54
4.3.6 流变行为	55
4.3.7 力学性能	56
4.3.8 表面接触角	57
4.3.9 阻隔性能	57
4.4 BC-P 含量对 PBAT/BC-P 复合材料性能的影响	58
4.4.1 微观形貌	58
4.4.2 热行为	59
4.4.3 热稳定性	60
4.4.4 力学性能	61
4.4.5 阻隔性能	62
4.5 小结	63

第 5 章 生物炭形貌对 PBAT 复合材料性能的影响	64
5.1 引言	64
5.2 BC-N 微观形貌	64
5.3 PBAT/BC-N 复合材料的表征	65
5.3.1 化学结构与界面	65
5.3.2 微观形貌	66
5.3.3 物相结构	66
5.3.4 热行为与结晶性能	67
5.3.5 热稳定性	69
5.3.6 流变行为	70
5.3.7 力学性能	71
5.3.8 表面接触角	72
5.3.9 阻隔性能	73
5.4 小结	74
第 6 章 结论与展望	75
6.1 结论	75
6.2 展望	75
参考文献	77
致谢	88
作者简介	89

第1章 绪论

1.1 引言

当前，全球塑料消费量持续增长，由此产生的“白色污染”已成为严峻的环境问题。常规石油衍生塑料在自然环境中的降解过程极为缓慢，导致其在土壤及水生系统中长期滞留。这种持续性存在不仅损害了生态系统的稳定，还可能通过微塑料颗粒的生成与迁移渗入食物网，从而对动植物乃至人类健康形成潜在风险^[1-4]。在这一背景下，开发可生物降解材料以替代传统塑料，成为解决塑料污染问题的关键途径^[5]。在寻求传统塑料的环保替代品过程中，聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯（PBAT）受到了广泛关注。该材料属于脂肪族-芳香族共聚酯，兼具生物可降解特性、突出的柔韧性以及良好的成膜能力，被视为替代聚乙烯（PE）地膜及各类包装应用的潜力材料。然而，PBAT在实际应用中仍存在明显不足：其一，其力学性能（如拉伸强度和弹性模量）与传统塑料相比仍有差距，熔体强度不足也影响加工稳定性；其二，原料成本较高制约了其市场竞争力；其三，对氧气和水蒸气的阻隔性能较差，难以满足食品包装和高性能农膜等领域的需求^[6-8]。因此，通过有效的改性技术突破PBAT的性能瓶颈，已成为当前可降解塑料研究的重要课题。

另一方面，我国作为农业大国，每年产生大量农作物秸秆等生物质废弃物。对这类废弃物采用露天焚烧、填埋等常规处置方法，不仅导致其资源化利用率低，造成资源浪费，还会向环境中排放污染物，进而引发空气污染与土壤质量下降等一系列问题^[9]。将农业废弃物通过热解技术转化为生物炭，是实现资源化利用的有效途径。生物炭是一种由生物质原料在无氧或低氧环境中，通过高温热化学转化而得到的富含碳元素的固态产物。该材料通常具有较大的比表面积、发达的孔隙网络以及优异的化学稳定性，使其在环境修复、碳封存等多个领域均显示出良好的应用价值^[10]。

将生物炭作为填料引入PBAT基体具有多重优势：在力学性能方面，生物炭的刚性骨架和表面官能团可通过物理锚定和应力传递机制增强复合材料的拉伸强度和模量；在阻隔性能方面，生物炭颗粒可形成曲折的渗透路径，延缓气体和水蒸气扩散；在经济性和环保性方面，以廉价农业废弃物制备生物炭可降低材料成本，并实现废弃物高值化利用^[11,12]。因此，系统研究生物炭/PBAT复合材料对开发高性能、低成本、环境友好的可降解材料具有重要科学意义和应用价值。

1.2 可降解高分子材料概述

可降解高分子材料，指的是在特定环境条件下，例如土壤、自然水体以及工业堆肥设施中可被自然界中的微生物（涵盖细菌、真菌与藻类等类群）逐步降解，最终完全转化为二氧化碳、水和矿物质等对环境无危害的小分子化合物。根据其单体制备的原料来源，这类材料可分为生物基可降解材料和石油基可降解材料两大类^[13,14]。它们在原料获取路径、合成工艺路线以及最终的性能表现上各有特点，分别适用于不同的应用场景。

1.2.1 生物基可降解材料

生物基可降解材料主要取自可再生生物质资源，淀粉、纤维素、木质素等天然高分子是其典型代表，同时也涵盖这些高分子的各类衍生物。这类材料因其原料可持续和环境相容性好而受到广泛关注。

淀粉基材料是最早实现工业化生产的生物基可降解材料之一。其原料来源广泛（如玉米、马铃薯、红薯等），成本较低，目前已应用于一些要求不高的包装和一次性制品领域。然而，淀粉分子结构中含有大量羟基，导致其具有较强的亲水性和吸湿性，这使得材料的力学强度和耐水性较差，限制了其在高端包装或农业地膜等领域的应用。为改善这些缺陷，研究者常采用塑化、酯化或与聚己内酯（PCL）、聚乳酸（PLA）等合成可降解高分子共混的方法进行改性增强^[15]。

聚乳酸（PLA）是当前生物基材料中研究较为深入、产业化应用较广的结晶型聚酯。其原料乳酸主要来自玉米、甘蔗等生物质的发酵产物，具有较好的生物相容性、力学强度和透明性，性能接近传统聚丙烯（PP）。PLA 在包装材料、医疗植入物及 3D 打印等领域展现出可观的应用潜力。但 PLA 本身存在脆性大、耐热性差（热变形温度约 60℃）及结晶速率慢等问题，加工时容易发生翘曲变形，因此不适用于高温或高韧性要求的场景^[16]。

与 PLA 的化学合成路径不同，聚羟基脂肪酸酯（PHA）通过微生物发酵制备，其性能可通过调控菌种和发酵条件进行调节，从而获得从硬而脆到软而韧的一系列不同性能的材料。PHA 具有良好的生物相容性、内在的生物可降解性（在海水、土壤等多种环境中均可降解），在医疗用品、高端包装等领域有独特价值。然而，PHA 的生产成本较高，发酵工艺复杂，提纯难度大，目前尚未实现大规模工业化应用^[17]。

1.2.2 石油基可降解材料

石油基可降解高分子材料以石油基单体为原料通过化学合成法制备，核心品类包括聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯（PBAT）、聚己内酯（PCL）及聚丁二酸丁二醇酯（PBS）

等。该类材料凭借成熟的合成工艺、易于规模化生产、性能稳定及成本相对较低等优势，成为当前可降解塑料市场的主流产品，在农业地膜、包装、医疗等领域的应用更广泛^[14]。

聚己内酯（PCL）是一种半结晶型聚合物，其玻璃化转变温度极低（约-60℃），在室温下呈高弹态，因此具有优异的柔韧性和延展性。同时，PCL的降解周期可以通过其分子量进行有效调控。这些特性使其适用于医疗植入物、组织工程支架、药物控释载体等对降解性能有特殊要求的领域。但PCL的熔点较低（约60℃），耐热性差，使用温度范围窄，难以满足农业地膜、通用包装等的使用需求^[18]。

相较于PCL，聚丁二酸丁二醇酯（PBS）通过丁二酸与1,4-丁二醇的缩聚反应合成，其熔点和热变形温度更高，力学强度与耐热性均有显著提升。PBS具备优异的生物降解性能，同时加工流动性能优良，能够广泛应用于包装材料、农用薄膜以及一次性餐具等多元化场景^[19,20]。但由于其核心合成原料丁二酸价格偏高，导致其整体成本相对较高，在一定程度上限制了其市场推广。

作为石油基可降解材料的核心代表，聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯（PBAT）的合成通常以己二酸、对苯二甲酸与1,4-丁二醇作为主要反应单体，通过共聚工艺制得。其分子链中同时包含柔性的脂肪链段（己二酸丁二醇酯，BA）和刚性的芳香链段（对苯二甲酸丁二醇酯，BT），二者协同作用使PBAT兼具突出的柔韧性、高断裂伸长率和适宜的力学强度，其性能接近低密度聚乙烯（LDPE）。同时，PBAT的生物降解性能优异，可在土壤、海水等多种环境中实现有效降解^[21]。此外，PBAT的加工兼容性极佳，不仅可与PLA、淀粉等生物基材料共混以改善脆性，还能通过填充改性等方式进一步优化性能，是目前应用范围最广、市场潜力最大的可降解塑料品类之一，尤其在农业地膜、包装材料等领域的应用前景最为广阔^[22-24]。

1.3 PBAT 改性研究

1.3.1 PBAT 性能缺陷

尽管PBAT在生物降解性和加工性能方面表现突出，但作为石油基可降解材料，其存在的若干固有缺陷显著制约了其在高端领域的推广应用。这些性能缺陷主要体现在力学性能、热稳定性、经济性及阻隔性能等方面，构成了其替代传统石油基塑料的主要技术障碍。

在力学性能方面，PBAT的拉伸强度和刚性明显不足，这导致其在需要较高机械强度的应用场景中表现不佳^[25]。例如，在食品包装领域，PBAT薄膜的撕裂强度较低，在运输和使用过程中容易发生破损；而在农业地膜应用中，其抗冲击性能不足，难以承受强风等恶劣天气条件的考验。

除力学性能存在不足外, PBAT 耐热性能也存在明显不足, 在高温环境中(例如夏季户外暴晒、食品热灌装等工况)易出现软化、形变现象, 进而丧失其原有使用性能^[26]。如采用纯 PBAT 制备的一次性餐具在盛装热食时, 会发生明显变形, 难以保持形态的完整性; 而在包装领域, 纯 PBAT 薄膜经过高温杀菌、热灌装等处理后, 易产生收缩、起皱等问题, 这直接限制了其在高温灭菌食品包装场景中的应用。

从经济性角度分析, PBAT 的生产成本较高且波动较大。这主要源于其合成过程中所需的关键单体(己二酸、对苯二甲酸和 1,4-丁二醇)价格受石油市场影响显著。目前 PBAT 的市场价格约为传统聚乙烯材料的 1.5~2 倍, 这种成本差异在很大程度上限制了其在大规模民用领域的推广应用。

在阻隔性能方面, PBAT 对氧气和水蒸气的阻隔效率较低, 难以满足包装材料、农业地膜等应用场景对阻隔性能的核心要求^[27]。在食品包装领域, PBAT 薄膜无法有效阻隔外界氧气渗入, 难以延缓食材氧化变质、风味散失的进程, 无法满足肉类、糕点等食品对保鲜周期的基本要求; 在农业地膜应用中, 薄弱的阻隔性能既难以精准调控土壤湿度, 又无法合理把控土壤与大气间的气体交换效率, 易造成土壤水分过快蒸发或根系呼吸不畅, 进而影响作物生长。

为克服 PBAT 在力学性能、耐热性及阻隔性等方面的固有缺陷, 研究者开发了多种改性技术, 主要包括共混改性、共聚改性、表面改性和填充改性等方法。这些方法各具特色, 在改性机理、操作复杂度和应用效果上存在显著差异。

1.3.2 共混改性

共混改性因其操作简单、成本较低且与现有加工设备兼容性好, 成为目前应用最广泛的技术路径。该方法通过将 PBAT 与 PLA、淀粉、PHA 等可降解聚合物或传统塑料进行熔融共混, 利用组分间的协同效应提升材料综合性能。例如, 当 PBAT 与 PLA 以适当比例共混后能有效提升材料的拉伸强度与刚性, 同时保持生物降解性。然而, 由于 PBAT 与 PLA 的极性差异较大, 共混体系易发生相分离, 需添加马来酸酐等相容剂以改善界面粘结, 强化两相之间的结合力, 进而保障改性体系的结构稳定性与性能一致性^[28]。为同时提升材料的柔韧性与阻隔性, Ellingford 等^[29]在 PGA/PBAT (50/50 wt%) 体系中引入 20 wt% 的 EMA-GMA 作为反应性增容剂, 该共混体系的断裂伸长率由 10.7% 大幅提升至 145%, 氧气透过率由 125 下降至 103($\text{cm}^3 \cdot \text{mm})/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{atm})$), 水蒸气阻隔能力较改性前提升了约 47%。同样, 针对 PBAT/PPC (75/25 wt%) 体系, Gao 等^[30]设计了一种三元共聚物增容剂, 仅添加 1 wt% 即显著优化了两相相容性与分散性, 从而使复合材料获得协同增强的力学与阻隔性能: 氧气渗透率从 146 $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0.1\text{MPa}^{-1}$ 降至 97 $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0.1\text{MPa}^{-1}$, 水蒸气渗透率从 424 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 降至 204 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 拉伸强度从 24.7

MPa 增至 30.3 MPa，断裂伸长率从 858%提升至 1142%。

1.3.3 共聚改性

共聚改性通过调整共聚单体的种类与比例实现对 PBAT 分子链结构的精准设计。引入乙二醇、丙二醇等柔性单体时，可有效降低材料结晶度，进一步提升其柔韧性，若引入间苯二甲酸这类刚性单体，则能针对性增强材料的拉伸强度与耐热性能^[31-33]。但该方法对聚合工艺控制要求严格，反应条件苛刻，导致生产成本较高，因此难以实现规模化的工业化生产与应用。近年来，研究者致力于通过共聚策略在维持 PBAT 基本性能的前提下增强其环境降解性。例如，Luan 等^[34]通过引入少量草酸单体参与共聚过程，成功合成了聚(己二酸丁二醇酯-共-草酸丁二醇酯-共-对苯二甲酸丁二醇酯)三元共聚物，并将其简称为 PBAOT。该共聚酯在保持与 PBAT 相近的熔点（约 135 °C）及良好力学性能的同时，结晶速率显著加快，其等温结晶半时间 <20 s，且在海水、河水与土壤中均表现出比纯 PBAT 更快的降解速率，而热分解温度（ $T_{d,5\%}$ ）仍高于 329 °C，热稳定性良好。类似地，Xu 等^[35]通过引入 ϵ -己内酯（ ϵ -CL）单元合成了 PBATCL 共聚酯，系统考察其在堆肥、土壤、海水及淡水中的降解行为。研究发现， ϵ -CL 链段的引入增强了聚合物链的水解敏感性，促进了微生物酶解作用，从而在不同自然环境中均实现了降解性能的显著提升，为开发兼具实用性能与可控降解特性的 PBAT 材料提供了有效途径。

1.3.4 填充改性

在各类改性方法中，填充改性凭借其操作简便、成本可控且可同时改善多项性能的特点，显示出良好的应用前景。该方法通过引入无机填料（如纳米碳酸钙、蒙脱土）、有机填料（如淀粉、纤维素）或生物质衍生填料（如生物炭、木质素），利用填料与基体间的界面相互作用提升材料性能。例如，Kim 等^[36]为改善 PBAT 薄膜的阻隔性能，采用乙酰化木质素作为增强相，通过溶液浇铸法制备了复合薄膜。研究发现，乙酰化处理有效改善了木质素在 PBAT 基体中的分散性与界面相容性，当添加量为 5 wt%时，复合薄膜的水蒸气透过率（WVTR）与氧气透过率（OTR）均显著下降，阻隔性能获得最佳提升，且拉伸强度与模量同步提高，断裂伸长率仍保持较高水平。同时，复合薄膜保持了良好的生物降解性。Xiong 等^[37]为制备兼具良好综合性能与经济性的全生物基可降解复合材料材料，系统研究了木质素甲基化及增容剂对 PBAT/木质素复合材料的影响。结果表明，甲基化处理增强了木质素的疏水性，使其在 PBAT 中分散更均匀，界面结合更紧密；进一步加入增容剂后，材料的力学性能与热稳定性均得到有效提升。由于木质素价格低廉、来源广泛，该复合材料在保持良好性能的同时具备显著成本优势，显示出规模化应用的可行性。这些研究说明，通过对生物质填料进行适当的表面改性并与基体进行界面设计，