

植物纤维增强 PHBV 和 PBAT 可降解复合材料研究进展

魏风军, 杨雪

(河南科技大学 艺术与设计学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: **目的** 植物纤维在增强可降解复合材料中的应用日益广泛, 探讨植物纤维作为增强材料, 在提升聚 3-羟基丁酸-3-羟基戊酸共聚酯 (PHBV) 和聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯 (PBAT) 2 种可降解复合材料综合性能中的优势与潜力。**方法** 综述不同种类植物纤维增强 PHBV 和 PBAT 可降解高分子材料的研究进展, 对各种复合材料的综合性能进行分析比较, 并对其应用性能和前景进行总结与展望。**结果** 植物纤维作为增强材料在 PHBV 和 PBAT 可降解高分子材料中的应用具有显著的优势和潜力, 通过合理的纤维选择和表面改性技术, 可制备出综合性能优异的可降解复合材料, 满足不同应用领域的需求。**结论** 未来, 植物纤维增强 PHBV 和 PBAT 可降解复合材料的研究应针对抗菌抗氧化、水气阻隔、阻燃抑燃等领域展开系列研究, 制备集高强度、耐水性和功能性于一体的可降解复合材料, 以推动植物纤维增强可降解复合材料在更多领域的广泛应用。

关键词: 植物纤维; 增强改性; 可降解材料; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2025)01-0028-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.01.004

Research Progress in Plant Fibre Reinforced PHBV and PBAT Degradable Composites

WEI Fengjun, YANG Xue

(College of Art and Design, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: Since the plant fiber has been widely used in reinforcing degradable composites, the work aims to investigate the advantages and potential of plant fiber as reinforcing material in improving the comprehensive properties of poly(3-hydroxybutyrate-3-hydroxyvalerate) (PHBV) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) degradable composites. The progress of research on the reinforcement of two biodegradable polymers, PHBV and PBAT, with various types of plant fibers was reviewed. The comprehensive performance of the composites was analyzed and compared, and their application properties and prospects were summarized. The application of plant fibers as reinforcement in biodegradable polymers such as PHBV and PBAT had significant advantages and potentials. By selecting suitable fibers and applying surface modification techniques, biodegradable composites with excellent comprehensive performance could be prepared to meet the needs of different applications. In conclusion, future research should focus on the development of biodegradable composites with high strength, water resistance, and functionalities such as antimicrobial and antioxidant properties, water and gas barrier properties, and flame retardant properties, so as to promote the wide application of plant fibre-reinforced biodegradable composites in more fields.

KEY WORDS: plant fibre; reinforced modification; degradable materials; composites; mechanical properties

近年来,随着石油化石燃料等不可再生资源的日益枯竭,人们对环境、资源、低碳等问题的关注度持续攀升,在积极践行“碳中和”目标的时代背景下,绿色可降解材料因其环保特性被大量应用于交通、一次性用品、食品包装等领域^[1],是国家重大战略产业支持的新兴领域^[2]。为解决塑料废弃物污染问题,各国加大了对可降解材料的研究力度,其中聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)、聚 3-羟基丁酸-3-羟基戊酸共聚酯(Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate), PHBV)、聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯(Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate), PBAT)和淀粉基材料等可降解材料发展迅速,应用广泛,有望取代聚乙烯、聚丙烯等通用塑料^[3-4]。PHBV 具有优异的生物降解性和生物相容性,但热稳定性较差,生产成本相对较高;PBAT 具有良好的柔韧性和加工性能,但阻隔性能较弱,水蒸气和氧气的透过率高。因此,可降解材料的复合增强改性得到广泛关注。

复合材料是指由 2 种或 2 种以上不同性质的材料,通过物理或化学方法组成具有新性能的材料,其在工农业领域发挥着至关重要的作用^[5]。植物纤维作为来自大自然的环境友好型增强纤维,具有密度低、比力学性能高、阻尼降噪、吸声隔热等优势,有望替代当前大量应用的玻璃纤维等人工纤维,用以制备先进复合材料^[6],并应用于交通、医疗、包装、农业等领域^[7-9],是当前各国学者研究的热点。本文以 PHBV 和 PBAT 为研究对象,介绍了 2 种材料的特性及优缺点,归纳了数类植物纤维作为增强体对复合材料性能的影响,综述了多种优化性能的改性方案,以期为复合材料相关研究提供参考;同时总结了复合材料发展所面临的挑战,展望了复合材料未来的发展前景。

1 植物纤维增强 PHBV 基复合材料

聚羟基脂肪酸酯(Poly Hydroxyalkanoates, PHAs)是一类广泛存在于微生物细胞内且高度聚合的高分子生物聚酯^[10]。在碳源、氮源等养分失衡的情况下,微生物会将外在碳源转化成为 PHAs,并将其作为自身所需的碳源和能量储存起来,其化学结构通式如图 1a 所示,其中 m 表示聚合度, $n=1, 2$ 或 3,通常 $n=1$ 时,即为聚-3-羟基脂肪酸酯, R 为可变基团,可以是饱和或不饱和、直链或含侧链及取代基的烷烃等。

不同的单体组成赋予了 PHAs 不同的性能。目前,

PHAs 生物可降解高分子材料的研究对象主要是聚羟基丁酸酯(Poly-3-Hydroxybutyrate, PHB)和 PHBV。PHB 是 PHAs 的第一代产品,结构式如图 1b 所示,作为环境友好型热塑性塑料,其具有和聚丙烯相似的性能,分子链结构规整,但结晶度高达 80%,导致其强度虽高,但韧性差;同时它还有热稳定性差、加工窗口窄等缺点^[11]。为克服 PHB 脆性大的致命缺点,在发酵过程中通过与羟基戊酸(Hydroxyvaleric Acid, HV)等单体的共聚合成了 PHAs 的第二代产品 PHBV,结构式如图 1c 所示,弹性得到了很大程度的提高。PHBV 随共聚物中 HV 含量的变化而展示出独特的性质, HV 含量较低时(<12%),其断裂伸长率<6%^[12]。相比于 PHB, PHBV 结晶度减小,硬度降低,成型加工性能变好,力学强度和韧性都优于 PHB,但热稳定性差、加工窗口窄的问题仍未解决,仍无法作为一种实用塑料使用,将植物纤维用于 PHBV 的增强改性可有效改善其缺陷并提高其强度^[13]。

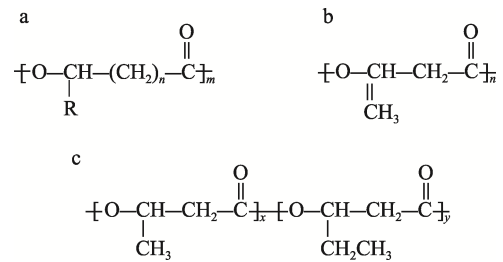


图 1 PHAs (a)、PHB (b)、PHBV (c) 的结构式^[14]

Fig.1 Structural formula of PHAs (a), PHB (b), PHBV (c)^[14]

1.1 植物纤维增强 PHBV 基复合材料的力学性能

复合材料的力学性能不仅取决于其组分材料的性质,还取决于其微观结构特征,植物纤维不同于人工纤维独特的微观结构和化学组成,必然会为其增强的复合材料力学性能带来不同的影响。常见的用于增强 PHBV 的植物纤维包括麻纤维、竹纤维、木纤维等,这些纤维通常具有较高的比强度和比模量,以及良好的可降解性和可再生性,在不增加生产成本的同时能增强 PHBV 基复合材料的力学性能,从而增强其市场竞争力,不同植物纤维的物理性能和成本如表 1 所示。

表 1 植物纤维的物理性能和成本

Tab.1 Physical properties and cost of plant fibers

纤维种类	长度/mm	直径/ μm	生长周期/月	成本/元	优点
剑麻纤维	1~1.5	20~25	24~36	14	高弹性、高强度
蔗渣	0.65~2.17	21~28	10~15	20	耐久性、稳定性
木粉	60~200	8~12	12~48	20~30	柔韧性、耐湿性
竹纤维	60~200	6~10	3~6	1.3~2	抗菌、抗紫外线
玉米秸秆纤维	2~7	20~45	4~8	10~12	高强度、柔韧性

Mazur 等^[15]使用质量分数为 7.5%和 15%的木纤维 (Wood Fiber, WF), 通过注塑成型的方法制备了 PHBV 基可生物降解复合材料。结果显示, 木纤维的引入显著增强了 PHBV 的弹性模量, 且弹性模量的增加与木纤维含量成正比, 但拉伸强度和冲击强度略有下降。Robledo-Ortíz 等^[9]以甘蔗秸秆 (Sugarcane Straw, SCS) 作为填料, 采用干混后模压成型的方法制备 PHBV 基生物复合材料。结果表明, 当 SCS 的质量分数为 20%时, 复合材料的弯曲模量和拉伸模量增加, 但弯曲强度和拉伸强度都随着 SCS 的加入而降低。Chilali 等^[16]选用了 PLA、PHBV 和聚丁二酸丁二醇酯 (Poly(Butylene Succinate), PBS) 作为基体材料, 并引入了亚麻斜纹织物作为增强纤维。研究发现, 不同配比的生物基复合材料的拉伸模量和剪切模量均高于亚麻纤维增强环氧复合材料, 但拉伸强度较低。通过上述研究发现, 不同植物纤维 (包括木纤维、秸秆纤维、亚麻纤维等) 可显著增强基体材料的弹性模量、弯曲模量、剪切模量等力学性能, 但强度均有所下降, 这是由于植物纤维与聚合物基体之间的黏附性和相容性较差, 界面结合强度弱, 当受到外力作用时, 纤维与基体之间易发生脱黏或滑移, 从而导致复合材料的强度下降^[17]。因此, 利用植物纤维增强复合材料需进一步关注植物纤维的表面改性以及共混时纤维分布的均匀性, 才能更好地增强复合材料的力学性能。

Jin 等^[18]探讨了 3 种不同的偶联剂 (硅烷偶联剂 KH570、钛酸酯偶联剂 HY311 和铝酸酯偶联剂 HYA1) 分别处理竹纤维 (Bamboo Fiber, BF) 对 PHBV 生物复合材料性能的影响, 如图 2 所示。在断面微观形貌图中可清晰地观察到, 经 KH570 处理的 BF 紧密地包裹在基体中, 纤维与基体间的黏附性显著提高。该课题组还研究了不同酶处理 (果胶酶、纤维素酶、漆酶) BF 对 PHBV 生物复合材料性能的影响^[19], 其中果胶酶处理对 BF/PHBV 复合材料力学性能的改善效果最为显著。一方面, 酶处理增加了 BF 的表面粗糙度, 更有利于复合材料的应力传递; 另一方面, 经酶处理后, BF 中的羟基、木质素和游离纤维素减少, BF 的极性降低, 与弱极性的 PHBV 的相容性得到提升, 从而改善了 BF/PHBV 复合材料的界面相容性。此外, Frącz 等^[20]研究了碱处理亚麻和大麻纤维对 PHBV 基生物复合材料性能的影响, 被大麻纤维填充的复合材料中, 碱处理溶液浓度的增加改善了所获得生物复合材料的大部分测试性能, 而经质量分数为 10%的 NaOH 溶液表面改性的亚麻纤维的复合材料中, 测试的大部分力学性能均显著下降, 从扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图像来看, 经质量分数为 10%的 NaOH 溶液处理的亚麻纤维的几何形状发生了显著变化。对于不同的植物纤维和聚合物基体, 应单独选择适宜的纤维碱处理方法, 以改善生物复合材料的特定性能。

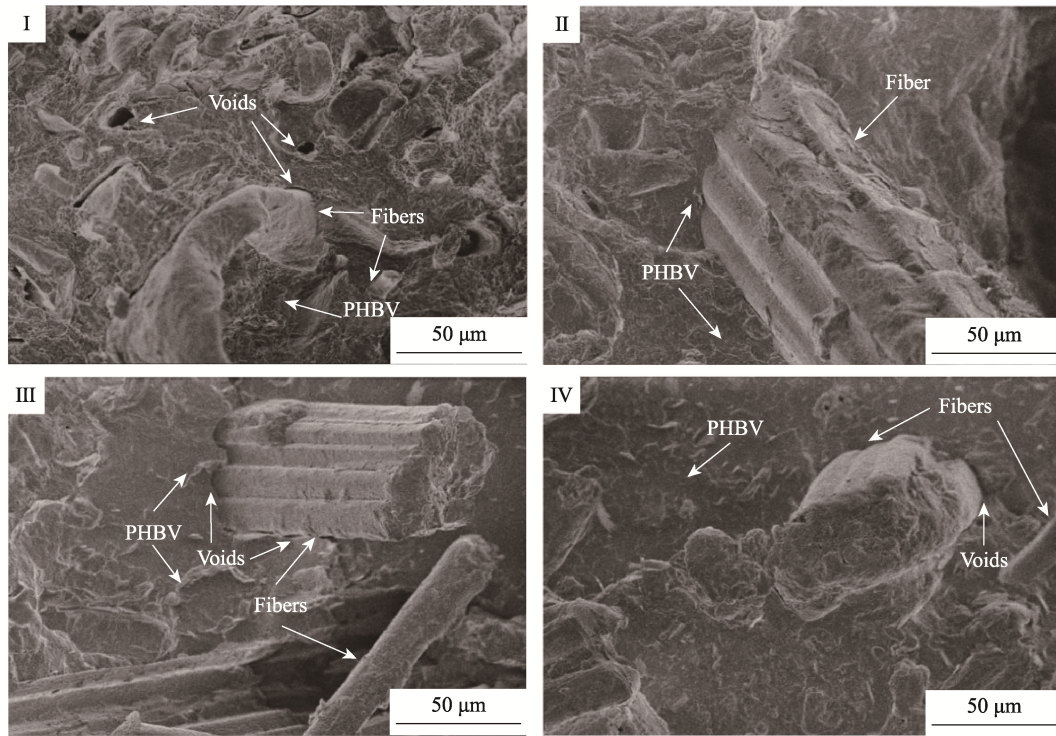
植物纤维的表面改性还可采用化学改性的方法来增强植物纤维与基体材料的相容性, 如 Kittikorn 等^[21]采用丙酰化改性的方法, 丙酸酐对剑麻纤维的羟基进行酯化取代, 显著提高了 PHBV 基复合材料的拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率。此外, 在加工过程中, 植物纤维可能会受到机械损伤或热损伤; 同时, 纤维与基体的混合均匀性也会直接影响复合材料的性能。Vandi 等^[22]探究了加工条件对 WF/PHBV 复合材料力学性能的影响, 通过调整螺杆转速、给料速率以及剪切速率和反应时间, 该复合材料的平均拉伸强度达到 (26.0 ± 2.8) MPa, 平均拉伸模量达到 (5.2 ± 1.2) MPa, 与纯 PHBV 相比, 拉伸模量提高了 73%, 拉伸强度保留了 80%。

1.2 植物纤维增强 PHBV 基复合材料的物理性能

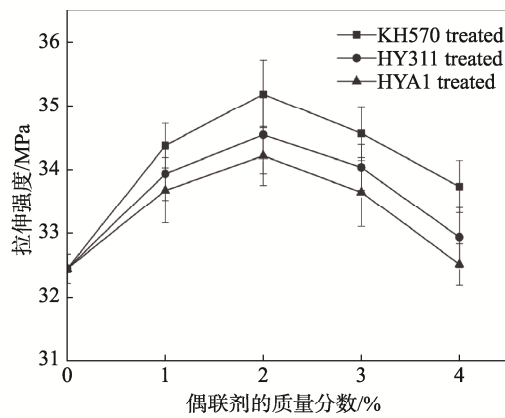
植物纤维增强 PHBV 基复合材料的物理性能是评估其实际应用潜力的重要方面, 植物纤维的引入可显著改善 PHBV 基复合材料的热性能。由于植物纤维通常具有较高的热稳定性和较低的导热系数, 能作为有效的热屏障, 降低复合材料的热传导速率, 从而提高其热阻和耐热性。Mazur 等^[15]的研究表明, 向 PHBV 中添加木纤维能有效提升 PHBV 的热稳定性, 且热膨胀系数随着纤维含量的增加而降低, 这有助于减少复合材料在高温环境下的尺寸变化, 保持结构稳定性。

加入纤维后复合材料的吸水率增加, 且吸水能力随纤维含量的增加而上升。这是由于植物纤维本身含有一定的吸湿性官能团, 导致复合材料在潮湿环境中吸湿性增加。通过适当的表面处理, 可有效减少纤维表面的亲水性基团, 从而降低复合材料的吸湿性, 这对于需要良好尺寸稳定性的应用, 如精密仪器部件和建筑结构材料尤为重要。Guo 等^[23]利用碱溶液处理丝瓜纤维 (Luffa Fibers, LF), 有效去除了 LF 中的蜡质、油脂、半纤维素和木质素等杂质, 同时减少了纤维表面羟基的数量和种类, 与 PHBV 复合后吸水率大大降低, 复合材料的制备工艺如图 3a 所示。John 等^[24]通过海藻酸盐的羟基和羧基与亚麻纤维的羟基反应形成氢键, 成功制备了热稳定性更高的 PHBV 基复合材料, 制备工艺如图 3b 所示, 且海藻酸盐链之间形成了交联网络, 受热时炭化, 热分解后残炭量高, 有效改善了 PHBV 基复合材料的阻燃性能。

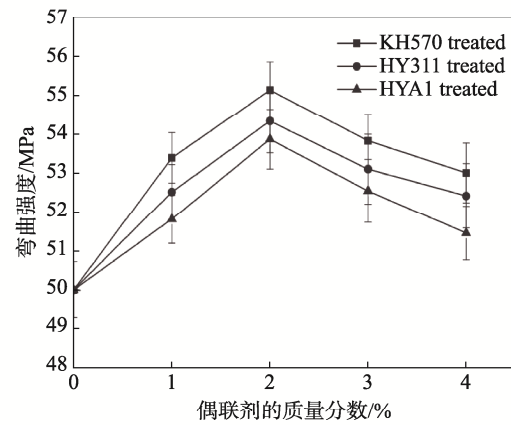
在植物纤维的种类选择上, Zhao 等^[25]创新性地选择了当地入侵植物 (芦苇和金银花) 的衍生纤维, 研究了纤维尺寸、纤维含量以及纤维种类对 PHBV 基复合材料力学和热学性能的影响, 提高 PHBV 热稳定性的同时降低了生产成本, 同时有助于解决生态问题, 实现生态效益和经济效益的双赢, 为植物纤维增强 PHBV 基复合材料提供了新思路。



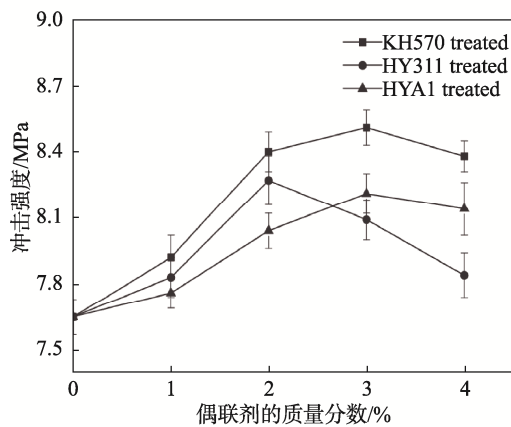
a PHBV/BF复合材料拉伸断面扫描电镜图



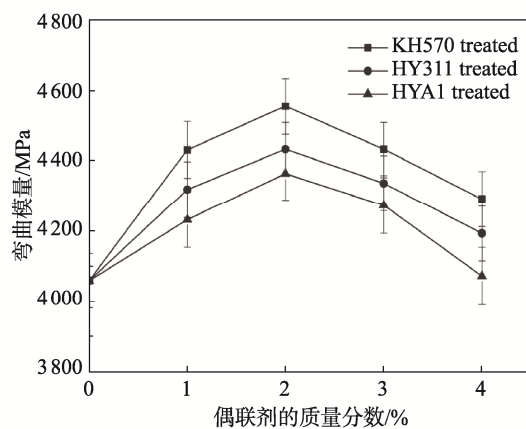
b 不同偶联剂种类和含量的PHBV/BF复合材料的拉伸强度



c 不同偶联剂种类和含量的PHBV/BF复合材料的弯曲强度



d 不同偶联剂种类和含量的PHBV/BF复合材料的冲击强度



e 不同偶联剂种类和含量的PHBV/BF复合材料的弯曲模量

图 2 不同偶联剂处理 BF 对 PHBV 生物复合材料性能的影响^[20]

Fig.2 Effects of different coupling agents treated BF on properties of PHBV biocomposites^[20]

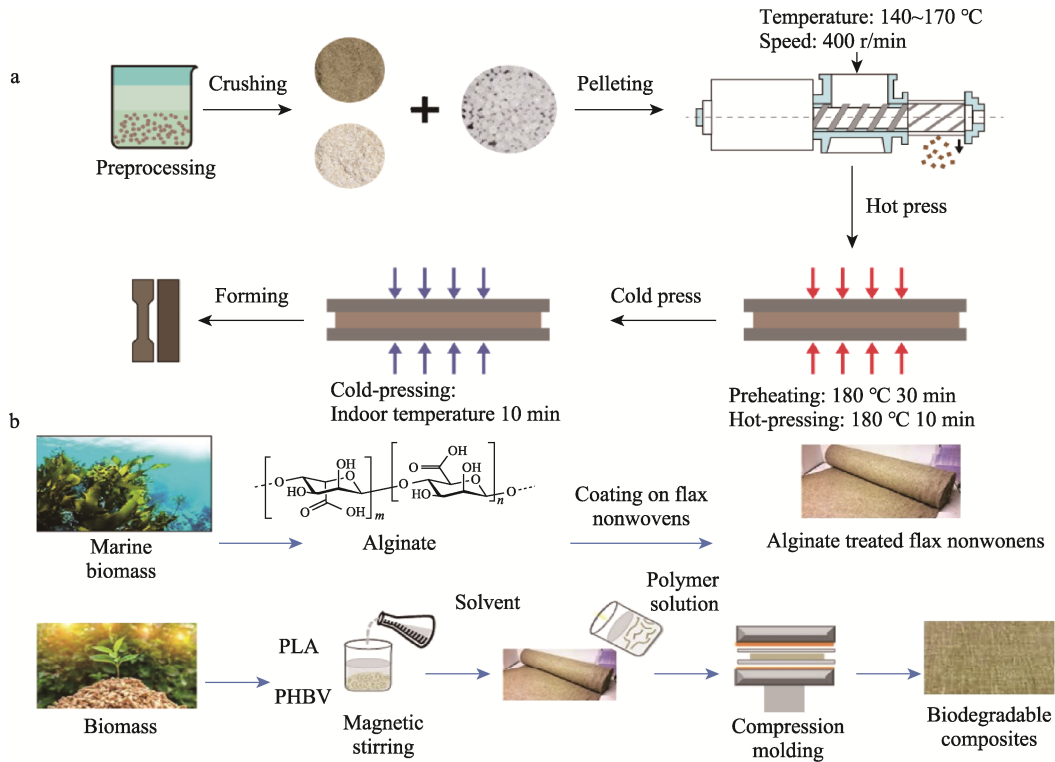


图 3 NaOH-H₂O₂ 处理丝瓜纤维增强 PHBV 制备工艺 (a)^[23],
海藻酸盐改性亚麻纤维增强 PHBV 制备工艺 (b)^[24]

Fig.3 Preparation process of luffa fiber reinforced PHBV through NaOH-H₂O₂ treatment (a)^[23],
preparation process of alginate-modified flax fiber reinforced PHBV (b)^[24]

1.3 植物纤维增强 PHBV 基复合材料的生物降解性

PHBV 和植物纤维在自然环境中,特别是在土壤和堆肥条件下,都能被微生物(如细菌、真菌等)分解,最终转化为二氧化碳和水,从而实现生物降解^[26]。当植物纤维作为增强体加入 PHBV 基体中时,两者在复合材料中协同作用,提高力学性能的同时还保持了各自良好的生物降解性。作为天然可降解材

料,植物纤维和 PHBV 基体在降解过程中存在协同效应,植物纤维的降解会加速周围 PHBV 基体的降解。一般来说,植物纤维含量越高,复合材料的降解速率越快。Yaacob 等^[27]研究了 PHBV/水稻秸秆(Paddy Straw Powder, PSP)生物复合材料在热带气候条件下的自然风化降解行为,风化过程如图 4 所示。结果显示,PSP 的添加对复合材料的风化行为有显著影响,高 PSP 含量的复合材料在风化过程中性能下降更为显著。

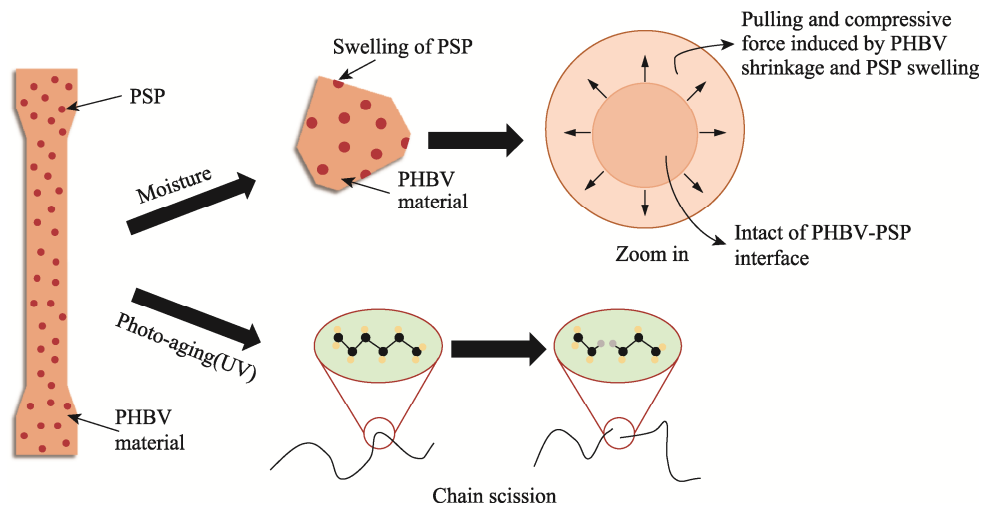


图 4 PHBV/PSP 生物复合材料自然风化机理^[28]

Fig.4 Mechanism of natural weathering of PHBV/PSP biocomposites^[28]

Feijoo 等^[28]以 PHBV 为基体材料, 分别引入纯化纤维素和木粉 2 种不同类型的纤维, 其中木粉含有较高含量的木质素, 研究发现, 木质素对 PHBV 的热稳定性和流变行为产生了影响。在降解初期, 木质素对微生物和水分进入 PHBV 基体存在阻碍作用, 表现为 PHBV/WF 的降解速率在初始阶段较慢; 随着降解的进行, 木质素逐渐被微生物降解, 释放出更多的纤维素供微生物生长和繁殖, 加快了 PHBV/WF 的降解速率。因此, 环境条件对 PHBV 降解过程的影响不可忽视。在实际应用中, 可通过调控环境条件和微生物种类来优化 PHBV 的降解性能。例如, 在需要快速降解 PHBV 的场合, 可选择在湿润且微生物丰富的环境中进行处理; 而在需要延缓 PHBV 降解速度的场合, 则可通过降低环境湿度、减少微生物数量或添加抑制剂等方式来实现。

与力学性能和物理性能类似, PHBV 的生物降解性也可通过植物纤维的表面改性得到改善。Muniyasamy 等^[29]通过海藻酸钠处理亚麻纤维并制备了 PHBV 复合材料, 研究了复合材料在堆肥介质中的热化学和生物降解行为。在 100 d 的堆肥降解实验中, PHBV/海藻酸钠处理亚麻纤维复合材料的降解率达到 88%, 而未处理的亚麻纤维复合材料和纯 PHBV 的降解率分别为 86% 和 63.2%。

综上所述, 植物纤维增强 PHBV 基复合材料在力学性能、物理性能及生物降解性方面均展现出显著的优势和巨大的应用潜力。通过合理的纤维选择和表面改性技术, 如偶联剂处理、酶解处理、碱处理及化学改性等方法, 可有效改善纤维与基体之间的界面结合, 综合提升复合材料的力学性能。此外, 植物纤维的引入还显著提高了复合材料的热稳定性, 降低了其热膨胀系数, 并通过减少纤维表面的亲水性基团降低了复合材料的吸湿性, 从而提升了其物理性能。在生物降解性方面, 植物纤维与 PHBV 基体之间的协同作用使得复合材料在自然环境中的降解速率加快, 且通过调控环境条件和微生物种类, 可进一步优化复合材料的降解性能, 以满足不同应用场景的需求。未来, 植物纤维增强 PHBV 基复合材料的研究将继续聚焦于以下几个方面: 一是探索更为高效的纤维表面改性技术和复合材料制备工艺, 以进一步提升复合材料的整体性能; 二是深入研究复合材料在不同环境条件下的降解机理和降解行为, 为实际应用提供理论指导; 三是拓展复合材料的应用领域, 特别是在包装材料、建筑材料、汽车工业及医疗等领域, 推动其商业化进程; 四是加强跨学科合作, 结合材料科学、环境科学、生物学等多学科的知识, 共同推动植物纤维增强复合材料的发展。

2 植物纤维增强 PBAT 基复合材料

PBAT 是一种可生物降解的脂肪族-芳香族共聚

酯, 由己二酸、对苯二甲酸以及丁二醇通过缩聚反应制得^[30]。作为环境友好型材料, PBAT 因其良好的加工性能和生物降解性, 在包装材料、农业地膜及生物医药等领域展现出广阔的应用前景。相较于传统塑料, PBAT 具有拉伸强度较低、紫外屏蔽性和水汽阻隔性较差等缺陷, 阻碍了 PBAT 的发展和应用^[31]。以植物纤维增强 PBAT, 可有效改善 PBAT 基复合材料的力学性能与阻隔性能, 扩大 PBAT 的应用范围。

2.1 植物纤维增强 PBAT 基复合材料的力学性能

不同类型的植物纤维对复合材料的力学性能有不同的影响。Ferreira 等^[32]制备了基于 PBAT 和 3 种来自亚马孙森林的不同天然纤维 (Croton Lanjouensis, Malvastrum Tomentosum, and Trema Micrantha) 的生物可降解复合材料, 使 PBAT 的弹性模量分别提高了 48%、70% 和 72%。Feng 等^[33]通过热压成型法制备了 4 种秸秆纤维 (高粱、水稻、玉米、大豆) 增强的 PLA/PBAT 基复合材料, 结果表明, 大豆秸秆纤维/PLA/PBAT 基复合材料的力学性能表现最佳。此外, 纤维含量也是影响复合材料力学性能的关键因素。Yu 等^[34]在力学性能测试中发现木粉/PBAT 生物复合材料的拉伸强度、拉伸模量、弯曲强度和弯曲模量随着木粉含量的增加而增加, 断裂伸长率和冲击强度则有所下降。Gupta 等^[35]发现随着汉麻纤维含量的增加, 复合材料的力学性能得到显著提升, 质量分数为 40% 的汉麻纤维/PBAT 复合材料的拉伸强度、韧性和抗冲击性分别提高了约 209%、300% 和 90%。

植物纤维表面通常含有大量的羟基, 呈现亲水性, 而 PBAT 基体是疏水的, 界面相容性差会导致复合材料的力学性能下降。因此, 需对植物纤维进行表面改性以改善纤维与基体间的界面结合, 从而提高复合材料的力学性能。Liu 等^[36]通过乙烯基三甲氧基硅烷接枝木质素改善木质素在 PBAT 中的分散性。与纯 PBAT 相比, 复合材料的拉伸强度和弹性模量分别提高了 200% 和 151%。Xie 等^[37]以二异氰酸酯 (Methylenebis Phenyl Isocyanate, MDI) 作为相容剂改善竹粉与 PBAT 之间的界面结合。与未添加相容剂的竹粉/PBAT 共混物相比, MDI 质量分数为 2% 的复合材料的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度分别提高了 1.9、6.8 和 4.3 倍。不同改性植物纤维增强 PBAT 复合材料的力学性能如表 2 所示。

此外, 基体与填料的形态、尺寸以及制备工艺也影响着复合材料的力学性能。Rosdi 等^[38]使用颗粒状和粉末状的 2 种 PBAT, 确定玉米秸秆纤维在 2 种形态的基体中的分散情况。研究发现, 粉末形态的 PBAT 基复合材料表现出较高的拉伸强度和断裂伸长率, 而由于亲水性纤维的引入以及大尺寸颗粒聚合物基体与纤维之间的黏附性差, 添加质量分数为 30% 的玉米秸秆纤维的粒料 PBAT 的吸水率最高且力学性能衰减严重。

表 2 改性植物纤维增强 PBAT 复合材料的力学性能^[36-37]
 Tab.2 Mechanical properties of modified plant fiber-reinforced PBAT composites^[36-37]

复合材料成分	拉伸强度/MPa	拉伸模量/Pa	冲击强度/(kJ·m ⁻²)	断裂伸长率/%
PBAT	17.6±0.8	(37.2±0.8)×10 ⁶		618±62
PBAT/VL-10	31.2±0.4	(41.8±2.0)×10 ⁶		273±44
PBAT/VL-20	35.4±0.3	(54.2±1.3)×10 ⁶		228±32
PBAT/VL-30	52.6±1.2	(87.6±3.2)×10 ⁶		282±76
BF/PBAT	15±1.5	693.8±50	6.7±0.8	5.6±0.5
BF/MDI-1/PBAT	26.2±0.8	1021.5±120	36.6±1.5	16.3±0.3
BF/MDI-2/PBAT	28.6±1.6	1292.6±80	45.6±3.8	24.2±0.4
BF/MDI-3/PBAT	27.6±1.8	1208.7±110	51.2±7.5	22.7±1.8
BF/MDI-4/PBAT	27.3±2.1	1105.4±80	48.7±7.8	22±1.3

注: 复合材料成分中, PBAT 指纯 PBAT, PBAT/VL-10 指 90% PBAT/10% 木质素, PBAT/VL-20 指 80% PBAT/20% 木质素, PBAT/VL-30 指 70% PBAT/30% 木质素, BF/PBAT 指 50% 竹粉/50% PBAT, BF/MDI-1/PBAT 指 49.5% 竹粉/1% MDI/49.5% PBAT, BF/MDI-2/PBAT 指 49% 竹粉/2% MDI/49% PBAT, BF/MDI-3/PBAT 指 48.5% 竹粉/3% MDI/48.5% PBAT, BF/MDI-4/PBAT 指 48% 竹粉/4% MDI/48% PBAT。

2.2 植物纤维增强 PBAT 基复合材料的物理性能

PBAT 本身具有一定的阻隔性, 但相较于传统塑料, 其阻隔性能较弱, 主要表现为对水蒸气、氧气等气体的透过率较高, 不适用于一些对阻隔性能有较高要求的应用场景^[39]。木质素中的苯环结构和苯酚单元使其具有出色的紫外吸收能力, 且木质素本身具有一定的疏水性^[40], 将其均匀分散在 PBAT 基体中, 可有效降低紫外光对 PBAT 的破坏作用, 并阻碍水蒸气和氧气的运动, 从而提高复合材料的阻隔性能与使用寿命^[41]。Kim 等^[42]在 PBAT 中添加乙酰化改性木质素, 乙酰化处理可防止木质素自聚集引起的薄膜性能下降, 木质素提供了紫外线阻隔性能, 同时阻碍了浸

润分子在复合材料内的移动, 增强了复合材料对水蒸气和氧气的阻隔性。Olonisakin 等^[43]将木质素 (Lignin/Lig) 和单宁酸 (Tannic Acid, TA) 微胶囊化后加入环氧大豆油 (Epoxidized Soyabean Oil, ESO) 包埋在 PBAT 中, 木质素和单宁酸的酚羟基与 ESO 的环氧官能团之间发生聚合反应, PBAT 与 ESO-Lig-Ta 之间发生交联反应, 最终, ESO-Lig-Ta 形成的网络在 PBAT 基体中构成稳定相, 各组元间的相互作用如图 5 所示。经阻隔性能测试发现, 随着 ESO-Lig-Ta 质量分数从 1% 增加到 3%, 氧气和水蒸气的透过率逐渐降低, 且紫外光透过率大幅下降, 表明这种薄膜除用于包装和储存干燥产品之外, 还可用于中小型包装中的防潮和密封, 扩大了 PBAT 作为生物降解聚合物在食品包装领域的应用范围。

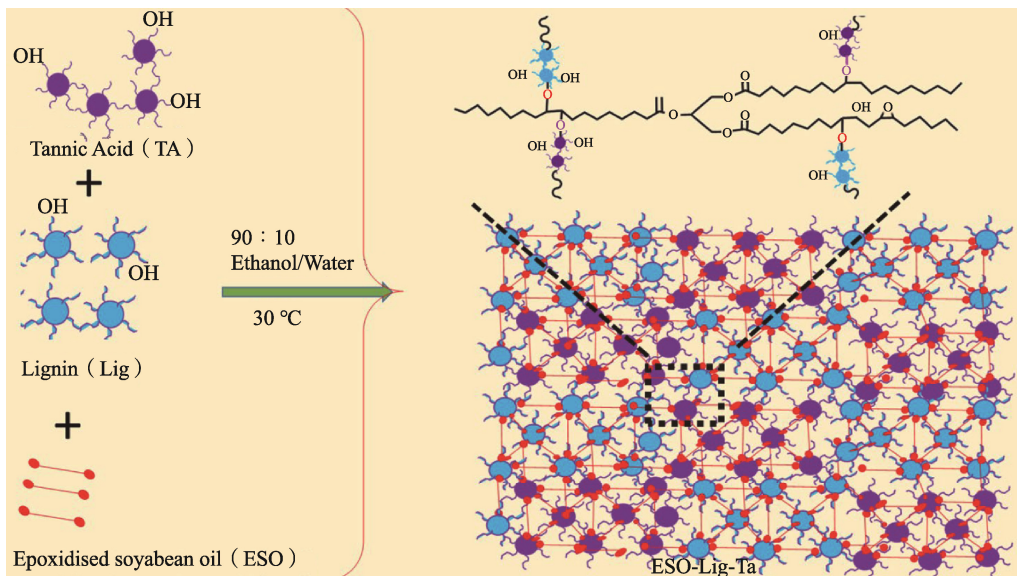


图 5 ESO-Lig-Ta/PBAT 复合材料各组成部分之间的相互作用^[44]
 Fig.5 Interaction among components of ESO-Lig-Ta/PBAT composites^[44]

咖啡渣作为生物质废料,具有来源广泛、可再生、环境友好等优点,也被应用于 PBAT 的疏水改性, Moustafa 等^[44]的研究证明了烘焙过的咖啡渣可用作 PBAT 的疏水增强剂。植物纤维增强 PBAT 的阻隔性能可使 PBAT 在食品包装领域具有广泛的应用前景,有望替代聚乙烯等传统塑料,实现环境友好和可持续发展。但在需要透气性以保持某些蔬菜和肉类新鲜度的包装中,水蒸气和氧气的透过率至关重要。Costa 等^[45]向 PBAT 中加入少量的有机黏土和玉米秸秆纤维改善复合材料的 O₂ 渗透性,这在生鲜食品和气调包装领域中有一定的应用前景。Lamsaf 等^[46]将工业废渣中的大麻纤维掺入 PBAT 中,通过浇铸法生产薄膜,并将 PBAT/大麻纤维复合材料应用于涂布纸,大麻纤维使 PBAT 的水蒸气渗透性略有增加,且纤维残留物(大麻素、生物碱和木质素等)仍具有抗菌和抗氧化能力,因此,这些薄膜和涂布纸在活性食品包装应用中具有巨大潜力。

PBAT 复合材料除在包装领域的应用外,在农业、建筑、医药等领域也有着不容小觑的应用潜力^[47]。Sun 等^[48]为提高建筑材料的传热和光热响应性,以木粉和 PBAT 为基体,将蜂窝状结构的氮化硼(BN)作为储能材料,制备了一种新型储能复合材料体系,复合材料的热导率、比热容及储能效率分别提高了 75.06%、87.06%、200%,与 PBAT 相比,木粉/PBAT/BN 的热响应速度较快,显著提高了复合材料的蓄热效率。李蕴哲^[49]通过添加多磷酸铵/可膨胀石墨阻燃体系对黄麻纤维/PBAT 复合材料进行阻燃改性,结果表明,该体系表现出优异的阻燃性能,热释放速率与热释放总量显著降低,不仅完美解决了熔滴问题,还兼具良好的抑烟功能。

2.3 植物纤维增强 PBAT 基复合材料的生物降解性

PBAT 是一种可生物降解的高分子材料,它结合了脂肪族聚酯优异的降解性能和芳香族聚酯良好的

力学性能,但由于芳香族链段的存在^[50],PBAT 的降解速度相对较慢,其分子量较大时难以被微生物直接利用。相较于纯 PBAT,复合材料中的植物纤维可破坏其结晶结构而降低结晶度,加快降解速率^[51]。不同降解条件下降解速率差异明显,堆肥降解属于人为控制的降解方式,相较于土壤降解其速率更快。Lamsaf 等^[46]对 PBAT 薄膜、PBAT 涂布纸、大麻纤维/PBAT 复合薄膜和大麻纤维/PBAT 复合涂布纸 4 种材料进行了堆肥降解实验(图 6)。8 周后,大麻纤维/PBAT 复合薄膜的失重率为 PBAT 薄膜的 2 倍;10 周后,大麻纤维/PBAT 涂布纸的堆肥效果远超 PBAT 涂布纸的 10 倍,说明大麻纤维可显著增强 PBAT 的生物降解性。Xu 等^[52]使用芦苇纤维(Reed Fiber, RF)作为增强材料,通过热压成型法制备 PBAT 基复合材料,探讨了芦苇纤维对 PBAT 基复合材料生物降解速率的影响。一方面,RF 的存在增加了 PBAT 的表面亲水性,从而增强了其降解能力;另一方面,SEM 分析表明,PBAT/RF 复合材料在降解过程中表面形成了较多的裂纹和孔洞,导致复合材料与微生物的接触面积增加,从而加速了 PBAT/RF 的降解。在堆肥实验中,PBAT/RF 的延滞期降低了 23.8%,生物降解速率在 90 d 内增加了 11.8%。随后该团队分别使用含有脂肪酶、纤维素酶、蛋白酶 K 和酯酶的 4 种不同酶液对 PBAT 和 PBAT/RF 进行了 15 d 的酶降解实验,发现脂肪酶对复合材料降解速率的影响最为显著。

综上所述,植物纤维增强 PBAT 基复合材料通过引入不同类型的植物纤维,不仅显著提升了复合材料的力学性能、物理性能,如阻隔性、隔热性与阻燃性,还有效增强了 PBAT 的生物降解性,展现了 PBAT 基复合材料在包装、农业、建筑及生物医药等领域的广泛应用潜力。植物纤维的多样性为 PBAT 基复合材料的性能优化提供了丰富的选择空间,而通过精细调控复合材料的组成、结构,优化其制备工艺,可进一步满足特定应用场景的需求。未来,随着对植物纤维与 PBAT 相互作用机制的深入研究,以及对新型功能化

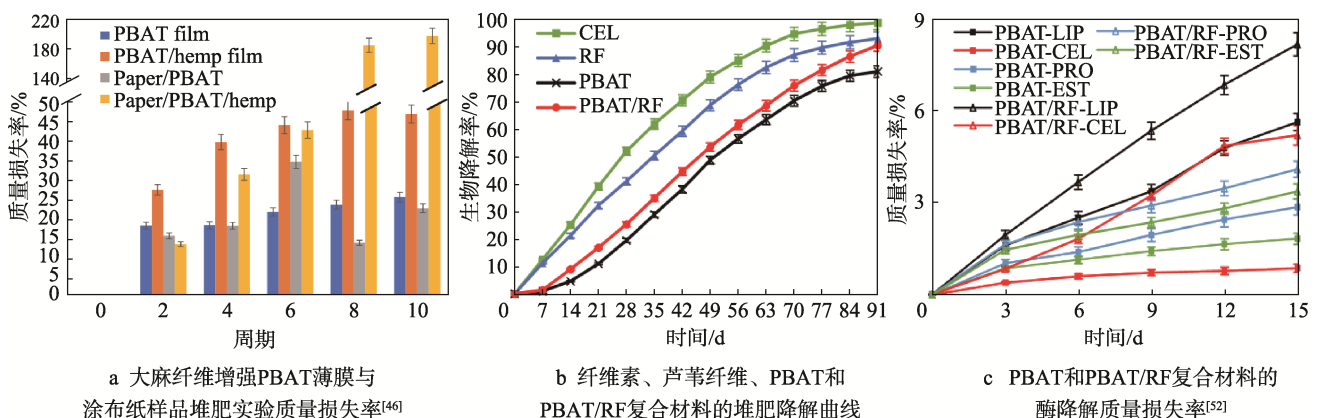


图 6 植物纤维增强 PBAT 基复合材料的生物降解性
Fig.6 Biodegradability of plant fiber-reinforced PBAT-based composites

纤维与相容剂的开发,植物纤维增强 PBAT 基复合材料有望实现更加高效、环保与多功能化的发展,为推动材料科学的可持续发展和环境友好型社会的构建贡献重要力量。

3 结语

植物纤维对 PHBV 和 PBAT 2 种可降解材料的增强机理主要基于纤维与基体之间的相互作用。由于植物纤维的高模量和高强度特性,植物纤维的引入在一定程度上能有效地承受外部载荷分散应力,防止材料在受力时发生破裂,从而提高复合材料的力学性能。尽管植物纤维对 2 种材料的增强机理存在共性,但由于 PHBV 和 PBAT 的化学结构和物理性质的差异,导致它们在增强效果上有所不同。PHBV 是一种高度结晶的聚合物,具有较高的硬度和刚性,但韧性较差,引入植物纤维可进一步增强其刚性和硬度,但也可能导致韧性进一步下降。因此,PHBV 的力学性能增强改性应尽量选择木纤维、秸秆纤维等柔韧性较好的韧性纤维;同时,通过偶联剂处理、酶处理及碱处理等表面改性技术改善纤维与基体的界面结合,可提升复合材料的弹性模量、弯曲模量及剪切模量等力学性能。相比之下,PBAT 具有较好的韧性和加工性能,但硬度和刚性较低。因此,植物纤维的选择范围更加宽泛,通过优化基体与填料的形态、尺寸以及制备工艺等,可更为显著地提高复合材料的综合性能。在物理性能方面,2 种可降解材料具有不同程度的缺陷,PHBV 热稳定性较差,在高温环境下易发生降解;而 PBAT 阻隔性能较差,对水蒸气和氧气的透过率高。因此,针对这 2 种可降解材料的物理性能缺陷,复合增强改性的侧重点并不相同。

在 2 种复合材料的制备过程中,都需经过纤维预处理、混合、成型等工艺,确保纤维在基体中的均匀分布和纤维与基体之间的良好界面结合。在纤维预处理阶段,适当的表面处理可有效提高纤维与基体之间的相容性和结合力,减少界面缺陷,提高复合材料的整体性能,PHBV 常采用偶联剂处理、酶处理、碱处理等方法进行纤维预处理,PBAT 常采用化学改性方法,如使用丙酸酐、海藻酸钠、二异氰酸酯等不同的改性剂或相容剂改善复合材料的加工性能和界面结合性能。为获得性能优异的复合材料,还需对混合和成型工艺进行优化,过高的混合温度和过长的混合时间可能导致纤维断裂或基体降解,过低的温度和时间则影响复合材料的均匀性。PHBV 的熔点较高,需要较高的温度和压力才能确保纤维与基体之间的充分结合;而 PBAT 的加工温度较低且具有良好的流动性,因此在制备过程中需控制加工温度和压力以避免材料降解或纤维损伤。

综上所述,植物纤维作为天然绿色生物质纤维原

料,具有比强度高、可降解和可再生等优良特性,加之其在成本、碳排放和可回收方面具有显著优势,有望成为合成纤维的替代品以制备高性能复合材料,应用于包装、农业、医疗、建筑等领域,是当前各国学者研究的热点。通过合理的纤维选择和表面改性技术,可显著提升复合材料的综合性能,满足不同应用场景的需求。由本文综述的不同植物纤维增强 PHBV 和 PBAT 可降解复合材料研究进展可知:不同种类植物纤维如麻纤维、竹纤维、木纤维等可显著增强复合材料的力学性能、物理性能以及生物降解性能,但植物纤维的引入会增加复合材料的亲水性。为使各方面性能协同增强,需关注纤维表面改性和分布均匀性以避免其在基体中聚集;为改善纤维与基体间的界面相容性,通常采用碱处理、偶联剂处理、酯化反应等方法对植物纤维进行表面改性。值得注意的是,不同改性方法和剂量可能会对纤维形态及完整性造成损伤,影响其增强效果。未来的研究应针对抗菌抗氧化、水汽阻隔、阻燃抑燃等领域展开系列研究,制备集高强度、耐久性和功能性于一体的可降解复合材料,以推动植物纤维增强可降解复合材料在更多领域的广泛应用。

参考文献:

- [1] JOSHI S, PATEL S. Review on Mechanical and Thermal Properties of Pineapple Leaf Fiber (PALF) Reinforced Composite[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2022, 19(15): 10157-10178.
- [2] 侯冠一, 翁云宣, 刁晓倩, 等. 生物降解塑料产业现状与未来发展[J]. *中国材料进展*, 2022, 41(1): 52-67.
HOU G Y, WENG Y X, DIAO X Q, et al. The Current Development Situation and Future Development of Biodegradable Plastic Industry[J]. *Materials China*, 2022, 41(1): 52-67.
- [3] YU J M, XU S C, LIU B, et al. PLA Bioplastic Production: From Monomer to the Polymer[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 193: 112076.
- [4] ROY S, GHOSH T, ZHANG W L, et al. Recent Progress in PBAT-Based Films and Food Packaging Applications: A Mini-Review[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137822.
- [5] 黄茂财, 张效林, 常兴, 等. 不同植物纤维增强 PLA/PBAT/PBS 可降解复合材料研究进展[J/OL]. *复合材料学报*, 2024: 1-13[2024-12-03]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240515.001>.
HUANG M C, ZHANG X L, CHANG X, et al. Research Progress of PLA/PBAT/PBS Degradable Composites Reinforced by Different Plant Fibres[J/OL]. *Journal of Composite Materials*, 2024: 1-13[2024-12-03]. <https://doi.org/10.13801/>

- j.cnki.fhclxb.20240515.001.
- [6] 熊丽珍, 张效林, 杨紫怡, 等. 混合废纸纤维对发泡缓冲包装材料性能的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 71-79.
XIONG L Z, ZHANG X L, YANG Z Y, et al. Effects of Mixing Waste Paper Fibers on Properties of Foaming and Buffering Packing Material[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 71-79.
- [7] SUDHA G S, ASWATHY N R, BISWAL M C, et al. Investigating the Reinforcing Effect of Jute Fiber in a PLA & PBAT Biopolymer Blend Matrix for Advanced Engineering Applications: Enhancing Sustainability with Bioresources[J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109960.
- [8] GONG Z W, HUANG J C, XIE L K, et al. Water Absorption of Biomass Fillers to Impact the Degradation of Poly(Butyleneadipate-Co-Terephthalate) Composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(5): 3990-4001.
- [9] ROBLEDO-ORTÍZ J R, MARTÍNDEL-CAMPO A S, BLACKALLER J A, et al. Valorization of Sugarcane Straw for the Development of Sustainable Biopolymer-Based Composites[J]. Polymers, 2021, 13(19): 3335.
- [10] 卢承蓉, 张梦君, 郑维爽, 等. 生物基可降解材料 PHA 提取工艺研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2023, 43(11): 105-115.
LU C R, ZHANG M J, ZHENG W S, et al. Advances in Extraction Processes of Biodegradable Biomaterials PHA[J]. China Biotechnology, 2023, 43(11): 105-111.
- [11] 汤磊. 植物残渣基改性功能化材料的制备及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 3-5.
TANG L. Preparation and Properties of Plant Residue-Based Functionalized Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 3-5.
- [12] 张波波, 黄崇杏, 郭威, 等. 聚(3-羟基丁酸酯-co-3-羟基戊酸酯)改性研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 66-75.
ZHANG B B, HUANG C X, GUO W, et al. Research Progress on Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate) Modifications[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 66-75.
- [13] 杨雪, 魏风军. 基于 CiteSpace 的 PHA 研究进展与热点分析[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 81-90.
YANG X, WEI F J. CiteSpace-Based PHA Research Progress and Hot Spot Analysis[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 81-90.
- [14] 秦一晴. 改性蔗渣/PHBV/PBAT 包装材料的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 4-9.
QIN Y Q. Study on Modified Bagasse/PHBV/PBAT Packaging Material[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2022: 4-9.
- [15] MAZUR K, KUCIEL S. Mechanical and Hydrothermal Aging Behaviour of Polyhydroxybutyrate-Co-Valerate (PHBV) Composites Reinforced by Natural Fibres[J]. Molecules, 2019, 24(19): 3538.
- [16] CHILALI A, ASSARAR M, ZOUARI W, et al. Mechanical Characterization and Damage Events of Flax Fabric-Reinforced Biopolymer Composites[J]. Polymers and Polymer Composites, 2020, 28(8/9): 631-644.
- [17] ZHANG X L, DUAN J T, ZHUO G M, et al. Nano Silicon Carbide-Treated Wheat Straw Fiber Reinforced High-Density Polyethylene Composites[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 182: 114834.
- [18] JIN X, ZHANG X L, XU C, et al. Effect of Bamboo Fibers with Different Coupling Agents on the Properties of Poly(Hydroxybutyrate-Co-Valerate) Biocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(20): e47533.
- [19] ZHUO G M, ZHANG X L, JIN X, et al. Effect of Different Enzymatic Treatment on Mechanical, Water Absorption and Thermal Properties of Bamboo Fibers Reinforced Poly(Hydroxybutyrate-Co-Valerate) Biocomposites[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2020, 28(9): 2377-2385.
- [20] FRAŹCZ W, JANOWSKI G, BAŹ L. Influence of the Alkali Treatment of Flax and Hemp Fibers on the Properties of PHBV Based Biocomposites[J]. Polymers, 2021, 13(12): 1965.
- [21] KITTIKORN T, MALAKUL R, STROMBERG E, et al. Enhancement of Mechanical, Thermal and Antibacterial Properties of Sisal/ Polyhydroxybutyrate-Co-Valerate Biodegradable Composite[J]. Journal of Metals, Materials and Minerals, 2018, 28(1): 52-61.
- [22] VANDI L J, CHAN C M, WERKER A, et al. Extrusion of Wood Fibre Reinforced Poly(Hydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate) (PHBV) Biocomposites: Statistical Analysis of the Effect of Processing Conditions on Mechanical Performance[J]. Polymer Degradation and Stability, 2019, 159: 1-14.
- [23] GUO Y, WANG L, CHEN Y X, et al. Properties of Luffa Fiber Reinforced PHBV Biodegradable Composites[J]. Polymers, 2019, 11(11): 1765.
- [24] JOHN M J. Biobased Alginate Treatments on Flax Fibre Reinforced PLA and PHBV Composites[J]. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 2022, 5: 100319.
- [25] ZHAO X Y, LAWAL T, RODRIGUES M M, et al. Val-

- ue-Added Use of Invasive Plant-Derived Fibers as PHBV Fillers for Biocomposite Development[J]. *Polymers*, 2021, 13(12): 1975.
- [26] 刘金宇, 贾勇星, 温变英, 等. 生物降解聚酯/秸秆纤维全生物降解复合材料研究进展[J]. *中国塑料*, 2022, 36(11): 183-191.
- LIU J Y, JIA Y X, WEN B Y, et al. Research Progress in Fully Biodegradable Polyester/Straw Plant Fiber Composites[J]. *China Plastics*, 2022, 36(11): 183-191.
- [27] YAACOB N D, SUNG T S, AZIZUL R A M. Natural Weathering Degradation Studies of the Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3 Hydroxyvalerate) (PHBV)/Paddy Straw Powder (PSP) Biocomposites[J]. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2024:1-17.
- [28] FEIJOO P, MARÍN A, SAMANIEGO-AGUILAR K, et al. Effect of the Presence of Lignin from Woodflour on the Compostability of PHA-Based Biocomposites: Disintegration, Biodegradation and Microbial Dynamics[J]. *Polymers*, 2023, 15(11): 2481.
- [29] MUNIYASAMY S, OFOSU O, THULASINATHAN B, et al. Thermal-Chemical and Biodegradation Behaviour of Alginate Treated Flax Fibres/ Poly(Hydroxybutyrate-Co-Valerate) PHBV Green Composites in Compost Medium[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019, 22: 101394.
- [30] FANG Y G, ZHOU Y J, LIN J Y, et al. Influences of Polycarboxylic Acid EDTA on the Compatibility and Physical Properties of Sandal Wood Flour Reinforced Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Biocomposites[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, 31(9): 3951-3964.
- [31] 孙文训, 钟文, 白永平, 等. 可降解阻隔包装的研究现状及发展趋势[J]. *包装工程*, 2024, 45(17): 27-41.
- SUN W X, ZHONG W, BAI Y P, et al. Research Status and Development Trend of Degradable Barrier Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(17): 27-41.
- [32] FERREIRA F V, PINHEIRO I F, MARIANO M, et al. Environmentally Friendly Polymer Composites Based on PBAT Reinforced with Natural Fibers from the Amazon Forest[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(8): 3351-3360.
- [33] FENG J N, ZHANG W X, WANG L, et al. Performance Comparison of Four Kinds of Straw/PLA/PBAT Wood Plastic Composites[J]. *BioResources*, 2020, 15(2): 2596-2604.
- [34] YU W W, QIU R, LI M Y, et al. Effects of Wood Content and Modification on Properties of Wood Flour/Polybutylene Adipate Terephthalate Biocomposites[J]. *Molecules*, 2023, 28(24): 8057.
- [35] GUPTA A, CHUDASAMA B, CHANG B P, et al. Robust and Sustainable PBAT-Hemp Residue Biocomposites: Reactive Extrusion Compatibilization and Fabrication[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 215: 109014.
- [36] LIU Y F, LIU S, LIU Z T, et al. Enhanced Mechanical and Biodegradable Properties of PBAT/Lignin Composites via Silane Grafting and Reactive Extrusion[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 220: 108980.
- [37] XIE X W, ZHANG C L, WENG Y X, et al. Effect of Diisocyanates as Compatibilizer on the Properties of BF/PBAT Composites by in Situ Reactive Compatibilization, Crosslinking and Chain Extension[J]. *Materials*, 2020, 13(3): 806.
- [38] ROSDI M H, AHAD N A. The Effect of Corn Stalk Fiber Loading on Tensile Properties and Absorption Ability on Polybutadiene Adipate Terephthalate Composite[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2053(1): 012014.
- [39] 王志文, 刘湘怡, 代希阳, 等. 可生物降解塑料 PBAT 改性进展[J]. *塑料*, 2023, 52(4): 178-182.
- WANG Z W, LIU X Y, DAI X Y, et al. Research Progress of Modification of Biodegradable Plastic PBAT[J]. *Plastics*, 2023, 52(4): 178-182.
- [40] XIE L F, HUANG J C, XU H, et al. Effect of Large Sized Reed Fillers on Properties and Degradability Of PBAT Composites[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(3): 1752-1761.
- [41] BOARINO A, SCHREIER A, LETERRIER Y, et al. Uniformly Dispersed Poly(Lactic Acid)-Grafted Lignin Nanoparticles Enhance Antioxidant Activity and UV-Barrier Properties of Poly(Lactic Acid) Packaging Films[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(7): 4808-4817.
- [42] KIM J, BANG J, PARK S, et al. Enhanced Barrier Properties of Biodegradable PBAT/Acetylated Lignin Films[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 37: e00686.
- [43] OLONISAKIN K, WEN A S, HE S P, et al. The Development of Biodegradable PBAT-Lignin-Tannic Acid Composite Film: Properties, Biodegradability, and Potential Barrier Application in Food Packaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(7): 1525-1540.
- [44] MOUSTAFA H, GUIZANI C, DUPONT C, et al. Utilization of Torrefied Coffee Grounds as Reinforcing Agent to Produce High-Quality Biodegradable PBAT

- Composites for Food Packaging Applications[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(2): 1906-1916.
- [45] COSTA L P J R, DE ALMEIDA T G, FALCÃO G A M, et al. Effect of Organoclay and Corn Straw on the Properties of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) Hybrid Composites[J]. Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review), 2023, 14(7): 11309-11332.
- [46] LAMSAF H, SINGH S, PEREIRA J, et al. Multifunctional Properties of PBAT with Hemp (Cannabis Sativa) Micronised Fibres for Food Packaging: Cast Films and Coated Paper[J]. Coatings, 2023, 13(7): 1195.
- [47] MAYER-LAIGLE C, FOULON L, DENOUAL C, et al. Flax Shives-PBAT Processing into 3D Printed Fluorescent Materials with Potential Sensor Functionalities[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 167: 113482.
- [48] SUN J M, ZHAO J Q, WANG B B, et al. Biodegradable Wood Plastic Composites with Phase Change Microcapsules of Honeycomb-BN-Layer for Photothermal Energy Conversion and Storage[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 448: 137218.
- [49] 李蕴哲. PBAT/黄麻纤维复合材料的制备与阻燃改性[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021: 43-50.
- LI Y Z. Preparation and Flame Retardant Modification of PBAT/Jute Fiber Composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021: 43-50.
- [50] 潘晓娣, 杨童童, 覃燕杰, 等. PBAT、PLA 和 PBAT/PLA 共混物的熔体流动性能研究及应用[J]. 合成技术及应用, 2022, 37(3): 32-37.
- PAN X D, YANG T T, QIN Y J, et al. Study on the Melt Flow Properties and Application of PBAT, PLA and PBAT/PLA[J]. Synthetic Technology & Application, 2022, 37(3): 32-37.
- [51] WANG Z G, DING J N, SONG X J, et al. Aging of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Blends under Different Conditions: Environmental Concerns on Biodegradable Plastic[J]. Science of the Total Environment, 2023, 855: 158921.
- [52] XU J, FENG K P, LI Y, et al. Enhanced Biodegradation Rate of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Composites Using Reed Fiber[J]. Polymers, 2024, 16(3): 411.