

综述

天然植物纤维增强热塑性复合材料的研究进展

杨人元¹, 周腾¹, 王宏伟¹, 龙雪彬², 张道海^{1,2*}, 秦舒浩^{1,2*}

(1. 贵州民族大学 化学工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550014)

摘要: 由石油化工原料制备的纤维材料的广泛应用导致环境污染问题日益严峻, 研发绿色环保的新型纤维材料迫在眉睫。天然植物纤维具有可再生和可降解的特点, 在当前强调绿色发展的背景下备受关注, 在增强热塑性复合材料领域具有广阔的应用前景, 使用天然植物纤维复合热塑性高分子聚合物制备性能优异的复合材料已经逐步发展为一项成熟的技术。该文总结了天然植物纤维结构和改性对复合材料性能的影响, 综述了近年来天然植物纤维增强可降解和不可降解热塑性复合材料性能的应用进展, 展望了天然植物纤维与可降解塑料复合材料的工业化前景。

关键词: 植物纤维; 热塑性复合材料; 高分子聚合物; 可降解

中图分类号: TQ34 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2024) 08-1658-07

Research progress in plants fiber reinforced thermoplastic composites

YANG Renyuan¹, ZHOU Teng¹, WANG Hongwei¹, LONG Xuebin²,
ZHANG Daohai^{1,2*}, QIN Shuhao^{1,2*}

(1. School of Chemical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. National Engineering Research Center of Composite Modified Polymer Materials, Guiyang 550014, Guizhou, China)

Abstract: The environmental pollution problem caused by wide application of fiber materials synthesized from petrochemical industry is becoming more and more serious, which makes development of new green and environmentally friendly fiber materials urgent. Natural plant fibers have attracted much attention due to the emphasis on green development, especially in the field of reinforced thermoplastic composites due to their renewable and degradable properties. The use of plant fibers and thermoplastic polymers to obtain composites with excellent properties has gradually developed into a mature technology. Herein, the influencing factors of natural plant fibers structure and modification on the properties of composites were summarized. The application progress of natural plant fibers reinforced biodegradable and non-biodegradable thermoplastic composites in recent years was reviewed. Finally, the industrialization prospect of natural plant fibers and biodegradable plastic composites was discussed.

Key words: fiber plants; thermoplastic composites; polymer; biodegradation

随着科技的发展, 人们对环境安全的要求越来越高, 传统的石油化工产品由于大多具有不可降解性, 在环境方面存在着无法忽视的污染问题。为了解决这一难题, 人们不断研发可替代石油化工产品

的绿色新型材料。天然植物纤维因具有较低的密度、显著的材料特性、非凡的成型灵活性而备受关注, 可回收再生、可生物降解和环境友好的天然植物纤维正逐步取代不可再生和难降解的人工合成纤维

收稿日期: 2023-09-20; 定用日期: 2023-11-14; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230791

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52163001); 贵州民族大学科研平台资助项目 (GZMUGCZX[2021]01); 贵州省省级科技计划资助项目 (黔科合平台人才-CXTD[2021]005, 黔科合平台人才-GCC[2022]010-1); 贵州省省级科技计划资助项目 (黔科合成果 (2019) 4022 号); 贵阳市专家工作站 (ZJGZZ2021-07); 贵阳市白云区科技计划项目 (白科合同[2020]28 号); 中央引导地方科技发展资金项目 (黔科合中引地[2023]035)

作者简介: 杨人元 (1998—), 男, 硕士生, E-mail: yryuan1998@163.com。联系人: 张道海 (1981—), 男, 博士, 研究员, E-mail: zhangdaohai6235@163.com; 秦舒浩 (1975—), 男, 博士, 研究员, E-mail: pec.shqin@gzu.edu.cn。

(芳纶纤维、玻璃纤维、碳纤维等)^[1-3]。

目前, 在建筑施工、家具、汽车等行业中对天然植物纤维替代人工合成纤维的应用已有一些研究。BITTNER 等^[4]在超高性能混凝土中添加了竹纤维, 可显著提高混凝土的承载性能。天然植物纤维制品也在日常生活中逐渐增多, 这将促进开发更低碳环保的生产工艺和产品。LIU 等^[5]发现, 使用大麻纤维制成的家居用品有利于减少碳排放。单纯的天然植物纤维在实际应用中的适用范围存在局限性, 而热塑性聚合物作为优良的基体材料, 其复合材料应用广泛^[6]。尝试将天然植物纤维掺入热塑性聚合物中作为增强助剂, 是植物纤维取代合成纤维作为添加材料的一种探索。BALOGUN 等^[7]使用黄麻纤维和非洲核桃壳颗粒, 与聚丙烯一起制备的复合材料机械性能得到很大的提升, 可作为廉价、可持续和生态高效材料应用于汽车零部件的生产。SURAJARUSARN 等^[8]发现, 如果采用高长径比的植物纤维复合材料, 可以获得比合成纤维更好的增强效果。随着近年来的不断探索, 天然植物纤维替代人工合成纤维的应用研究得到了飞速发展, 具有足够的强度、可绿色加工和降解的植物纤维复合材料, 在工业、日常生活等领域中均有广泛的应用。

可再生的天然植物纤维作为石油基材料的替代品, 可减少二氧化碳的产生以延缓全球变暖, 这对全球气候环境的改善具有重要意义。天然植物纤维来增强复合材料是具有发展潜力的领域。天然植物纤维作为轻质、经济的产品, 能应用在复合材料的核芯结构上, 以此满足当今消费者对聚合物的机械性能和功能特性日益提高的需求^[9]。本文将总结天然植物纤维结构和改性对复合材料性能的影响, 综述近年来天然植物纤维用于增强可降解和不可降解热塑性复合材料的应用进展, 最后展望天然植物纤维与热塑性可降解塑料制备的全绿色复合材料的工

业化生产道路。以期新型绿色环境友好型复合材料的开发设计提供有益的启示, 加快绿色材料工业化的发展进程。

1 天然植物纤维结构和改性对复合材料性能的影响

天然植物纤维的结构和改性直接影响了复合材料的性能^[10]。了解天然植物纤维的结构和改性方式是探究其增强复合材料的基础, 在了解天然植物纤维结构上存在的优劣势后, 可对其进行后续改性处理来调控纤维材料的性能, 以获得更好的天然植物纤维复合材料。

1.1 天然植物纤维的结构

为了深入了解天然植物纤维增强复合材料, 有必要了解天然植物纤维的基本聚合物体系。天然植物纤维主要由纤维素、半纤维素、木质素等成分构成^[11], 图 1 是它们的化学结构式示意图^[12]。其中, 纤维素(图 1a)是所有天然植物纤维的基本化学成分, 也是提高植物纤维强度和模量的主要成分^[13]; 半纤维素(图 1b)主要分布在初生细胞壁中, 具有生物降解和热降解能力^[14]; 木质素(图 1c)能够为天然植物纤维提供一定强度的刚性和韧性, 具有抗菌、抗紫外线、抗氧化、抗水蚀和生物侵害等功能^[15]。纤维素由无定形区和结晶区组成。结晶区域包含大量被称为强分子内氢键的键, 这些键能够产生纤维素嵌段, 增加其他化学物质进入的难度, 导致纤维与聚合物结合非常困难。因此, 需要对天然植物纤维进行一系列的化学改性, 使结晶区域膨胀, 去除亲水性羟基基团, 并消除蜡质成分等表面污染物^[16]。木质素的降解温度小于纤维素和半纤维素, 因此, 可通过使用不同的化学方法去除大量的木质素成分, 以提高纤维材料的热稳定性^[17]。

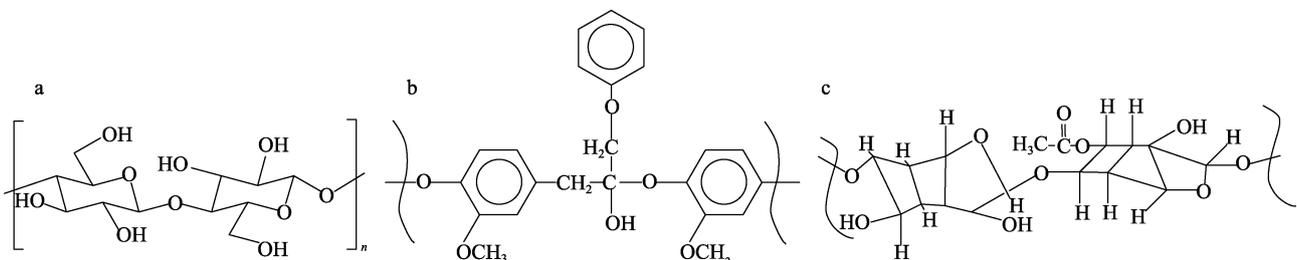


图 1 纤维素 (a)、半纤维素 (b)、木质素 (c) 的化学结构式示意图^[12]

Fig. 1 Schematic diagram of chemical structure of cellulose (a), hemicelluloses (b) and lignin (c)^[12]

1.2 天然植物纤维的改性

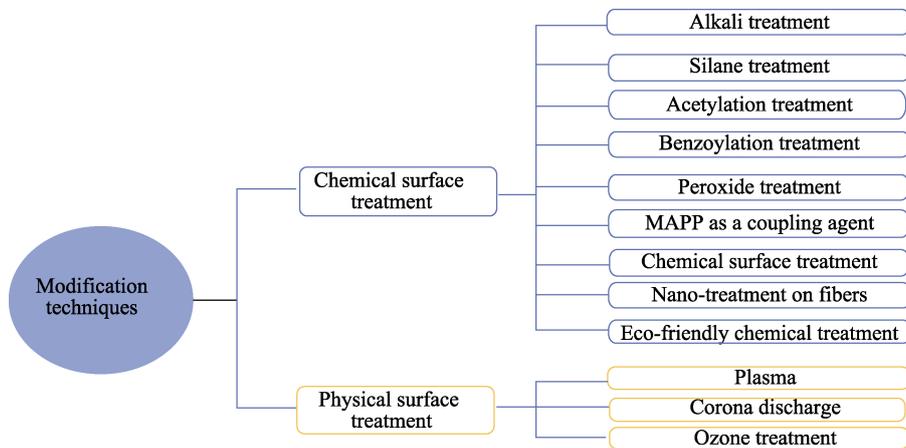
天然植物纤维因为自身的特性, 存在质量参差不齐、机械性能弱、水分含量低、抗冲击强度差、与疏水性聚合物基质难相容等缺点^[18], 因此, 在实

验或者实际生产中, 都需要对天然植物纤维进行界面改性来克服上述不足, 以获得界面结合能力优异的纤维材料^[19]。

天然植物纤维的界面改性技术主要分为物理改

性法和化学改性法，图 2 总结了目前主流的界面改性技术^[20]。使用物理改性法，天然植物纤维的形态会发生变化，纤维的表面微孔增加，在制备复合材料过程中，纤维与聚合物会有更多的接触，导致结合程度增强。INSEEMEESAK 等^[21]采用蒸汽爆破法处理椰壳纤维，再与聚乳酸（PLA）复合，研制可生物降解的纤维增强生物复合材料。研究发现，此复合材料的弯曲模量较纯 PLA 提高了 21%~29%，冲击强度提高了 8.5%，结果表明，蒸汽爆破处理椰壳纤维能提升复合材料的机械强度。化学改性法则是对天然植物纤维进行化学处理，使其自身结构和性质发生改变，经过化学处理的天然植物纤维，在与聚合物复合的过程中发生更多基团的结合，来增强复合材料的各项性能。WU 等^[22]以未处理的竹条为对照，研究了经碱处理后竹纤维的微观结构、化

学成分、形态的变化，以及拉伸和弯曲性能变化。结果表明，所有经碱处理的竹纤维的拉伸和弯曲性能均有显著提高，这主要归因于碱处理去除了竹纤维中的木质素和半纤维素，增加了大量的竹纤维内氢键，导致纤维素分子紧密聚集。不同的化学处理会产生不同的化学性质的改变，HE 等^[23]使用氨基硅油（ASO）改性苧麻纤维，ASO 分子中的极性氨基可以与苧麻纤维的羟基相互作用，在其表面形成疏水性氨基硅油膜，增强了复合材料的静态和动态机械性能，满足了复合材料轻量化和特定性能的要求，有望应用于汽车行业。对天然植物纤维进行界面改性是为了提升其机械性能，降低水分含量，改善纤维与基体的相容性，从而得到性能更加优异的纤维复合材料，可以对天然植物纤维增强热塑性复合材料进行更加深入的探索。



MAPP 为马来酸酐接枝聚丙烯

图 2 天然植物纤维的界面改性技术^[20]

Fig. 2 Surface modification techniques of plant fibers^[20]

2 天然植物纤维复合材料的制备和应用

天然植物纤维复合材料基体的选择对于聚合物本身性能的提升有着至关重要的作用^[24]。常用的聚合物分为热塑性和热固性聚合物，两者主要的区别在于它们在受热时的表现不同。热塑性聚合物可以再加热、重塑和再加工成新的形状，且不会发生化学变化；而热固性聚合物加热后就会固化，并且不能重塑或溶解在溶剂中^[25]。这 2 种现象是由聚合物链之间相互作用的强弱不同导致的。热固性聚合物主要的作用力由强共价键主导，导致聚合物链之间存在高度交联的结构^[26]。因此，热固性聚合物，如环氧树脂、聚酯树脂和聚酰胺等，具有优异的尺寸稳定性和耐高温性，且稳定保留其结构完整性^[27]。热固性聚合物初始成型后几乎不可能进行回收和再加工^[28]，这在大规模工业生产中不占优势，也是热固性聚合物产业化生产中的致命缺点。而热塑性聚合物具有

非共价键（即长链分子之间相对较弱的范德华力），具有较低的相互作用力和可逆变化的特性，因此，热塑性聚合物易于加工成为各种形状，具有可回收性较强、成本较低、易于大批量和高精度制造等优点。可以看出，热塑性聚合物更适宜作为天然植物纤维增强聚合物复合材料的基体^[29]。热塑性聚合物可分为不可降解和可降解两类，在实际应用中可根据对复合材料不同的性能要求选择合适的加工基体。

2.1 不可降解基复合材料

聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）和聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等不可降解树脂基体具有易回收，便于通过溶剂黏合和焊接进行修复，可后成型以及可形成坚韧的材料等特性，广泛应用于天然植物纤维复合材料的制备中^[30]。

PE 具有柔软易加工的特点，广泛应用于复合材料的产业化生产中。JIANG 等^[31]研究了添加氧化铝

(Al_2O_3) 对竹纤维与高密度聚乙烯 (HDPE) 复合材料的耐冲蚀磨损性能的影响, 结果表明, 纳米级 Al_2O_3 的加入可提升复合材料的结构强度和抗冲蚀磨损性能。这对后续的天然植物纤维改性探索了新的方向。新型的生物基材料也逐渐引起人们的关注, SECULI 等^[32]制备了蕉麻纤维增强的生物基 PE 和 HDPE 复合材料。研究发现, 2 种复合材料的拉伸强度与纤维含量呈正相关, 添加蕉麻纤维提高了它们的杨氏模量和拉伸强度。并且, 生物基 PE 复合材料的性能优于 HDPE 基复合材料, 同等纤维添加量下, 前者拉伸强度较后者提高了 4%, 表明用全生物基复合材料替代部分生物基复合材料的可能性, 这对于环境友好具有重要的意义。HE 等^[33]通过分子和原子水平的实验和分子动力学, 模拟考察了高锰酸钾 (KMnO_4) 改性苧麻纤维/聚丙烯 (RF/PP) 复合材料的性能, 图 3 展示了改性前后苧麻纤维的微观图和模拟形貌。与未改性的 RF/PP 复合材料相比, KMnO_4 的加入增加了苧麻纤维和 PP 的结合能力, 使 RF/PP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度和抗冲击强度分别最大提高了 27.80%、15.71% 和 38.64%。

到目前为止, 以热压成型工艺制备天然植物纤维增强的热塑性复合材料在许多方面仍存在着研究空白, BHUIYAN 等^[34]以黄麻纤维为增强材料, 使用热压成型工艺制备了黄麻-PP 和黄麻-PE 复合材料 (图 4), 并对其热性能和力学性能进行了研究。黄麻-PE 复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别为 55.62 和 74.53 MPa, 黄麻-PP 复合材料表现出更高的拉伸强度 (75.16 MPa) 和弯曲强度 (121.13 MPa), 这归因于 PP 比 PE 具有更好的拉伸强度及其与黄麻纤维有更好的界面结合能力。此外, 2

种复合材料还表现出令人满意的隔热性能, 其中, 黄麻-PE 复合材料的导热系数 [$0.269 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 比黄麻-PP 复合材料 [$0.185 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 的高 45.4%, 对传导热和辐射热具有较大的抵抗力。并且, 由于黄麻纤维的添加使材料界面的空隙减少, 而疏水性 PE 和 PP 的存在, 使复合材料样品表现出非常低的吸水率, 这表明它们有潜质用作建筑结构中的隔热耐久材料, 减少与建筑热能消耗相关的全球碳足迹, 并缓解塑料废物等环境问题的日益增长。

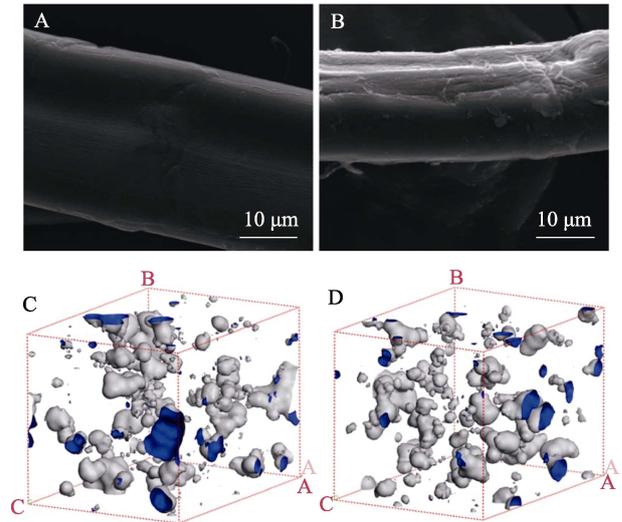


图 3 改性前 (A)、后 (B) 苧麻纤维的 SEM 图; KMnO_4 改性前 (C)、后 (D) 纤维素分子占据和自由体积的模拟形貌 (白色: 占用体积; 灰色: 范德华表面; 蓝色: 自由体积)^[33]

Fig. 3 SEM images of ramie fiber before (A) and after (B) modification; Simulated morphologies of cellulose molecule occupation and free volume before (C) and after (D) modification of KMnO_4 (White: occupy volume; Gray: Van der Waals surface; Blue: free volume)^[33]

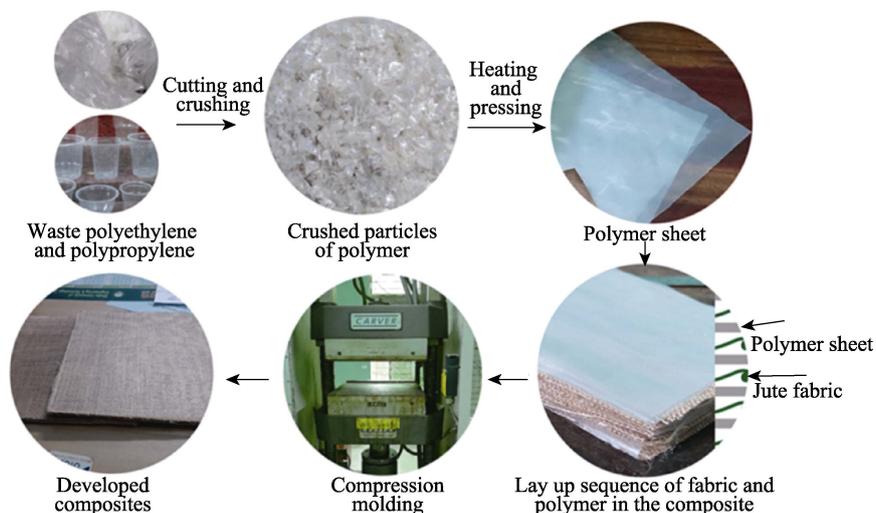


图 4 热压成型技术制造黄麻-PP 和黄麻-PE 复合材料的流程示意图^[34]

Fig. 4 Schematic presentation of manufacturing jute-PP and jute-PE composites using compression molding technique^[34]

在此基础上, RAZA 等^[35]采用 PS 和椰枣纤维 (DSF) 通过挤出热压法制备成 DSF 增强型 PS 基复合材料, 结果显示, 此复合材料热性能优异, 具有低热导率 [0.053 W/(m·K)] 和低热扩散率 (0.045 mm²/s); 分析发现, PS-DSF 复合材料具有高热稳定性, 当分解温度 > 300 °C 后质量损失率仅约 6%, 而且在 30~120 °C 内暴露 10 年后仍能保持原有质量, 证明其适合长期作为绝缘材料使用。

在建筑行业中, 使用热塑性塑料和木质纤维素废料制作保温复合材料是一种经济、实用、环保的方法。在热压前涂覆高分子聚合物是一种增强天然植物纤维复合材料性能的有效手段。OWEN 等^[36]在红麻天然纤维 (KF) 与 PET 复合之前, 用丙酮稀释的环氧树脂涂覆红麻纤维 (CTKF), 显著提升了此复合材料 (CTKF-PET) 的性能, 其玻璃化转变温度 (T_g) 和熔融温度 (T_m) 分别达到 119.0 和 262.8 °C (图 5), 与未涂覆红麻纤维制备的复合材料 (KF-PET) 相比, 分别提高了 2.2% 和 3.0%。因此, 可以对天然纤维进行树脂涂层处理, 以提高天然纤维工程塑料复合材料的热稳定性, 拓展其应用范围至高温工程领域, 如: 汽车和建筑行业。天然植物纤维作为人工合成纤维的替代材料, 不仅具备优异的使用性能, 还具有绿色环保的特点, 因此, 在新时代的创新型材料发展中具有重要的地位。

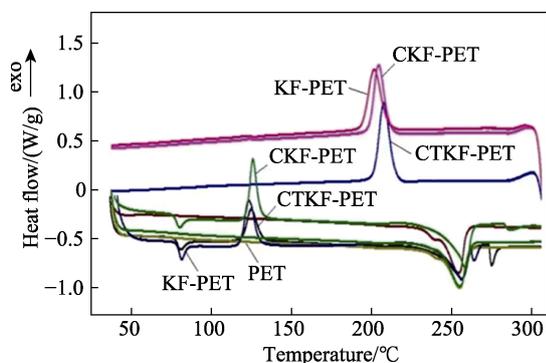


图 5 PET、红麻-PET(KF-PET)、包覆红麻-PET (CKF-PET) 和 CTKF-PET 复合材料的 DSC 曲线^[36]

Fig. 5 DSC curves of pure PET, kenaf(KF)-PET, alkali-treated kenaf(CKF)-PET and CTKF-PET composites^[36]

2.2 可降解基复合材料

随着人类社会经济的快速发展和交通基础设施规模的不断扩大, 石油作为典型的不可再生化石能源正以惊人的速度被日益消耗^[37], 不可避免地导致环境污染和资源短缺。当今世界各国都在致力于新型可再生能源的研发, 其中, 可生物降解材料是近年来的研究热点^[38], 聚乳酸 (PLA)^[39]、聚丁二酸丁二醇酯 (PBS)^[40]、聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT)^[41]等性能优良的热塑性可生物降解塑料

不断地被研发出来^[42], 成为生产技术较成熟、产业化程度较高的工业产品。

将这种绿色材料与植物纤维结合, 制备天然植物纤维增强热塑性可降解复合材料, 顺应了当前节能环保的发展趋势, 成为绿色复合材料领域的研究热点^[43]。此外, 植物短纤维类型、添加量以及预处理工艺对天然植物纤维增强热塑性可降解复合材料性能的影响各有不同。MU 等^[44]采用碱和硅烷偶联剂处理纤维 (亚麻、黄麻和苧麻), 制备了具有不同纤维含量的天然植物纤维增强 PLA 复合材料 (PFRP)。研究发现, 碱处理可以有效地去除纤维表面的杂质、果胶和蜡, 从而提高纤维表面的粗糙度; 硅烷偶联剂处理可以在纤维和 PLA 之间形成化学键。碱和硅烷偶联剂处理的联合作用改善了纤维和 PLA 界面连接性, 从而提高了 PFRP 的机械性能。结果表明, 与苧麻和黄麻纤维相比, 亚麻纤维增强 PLA 的效果最好, 更适用于绿色复合材料的制备。AGUADO 等^[45]使用二乙二醇二甲醚作为分散剂, 用漂白大麻纤维 (SBHF) 增强 PLA (图 6)。这种方法不同于通常的化学修饰羟基的方法, 在没有使用任何相容剂的情况下, 添加质量分数 30% 大麻纤维增强 PLA 的复合材料与具有相同纤维添加量的传统 PP/玻璃纤维材料相比, 其拉伸强度得到了一定的提升 (55.7 MPa 提升至 77.8 MPa)。该研究避免了相容剂和过量试剂的使用, 降低了制造过程对环境的影响, PLA 和天然植物纤维都可生物降解, 这种全绿色复合材料符合绿色化学的原则, 适用于绿色发展背景下的当今社会。YUE 等^[46]通过注塑成型工艺制备了二氧化钛 (TiO₂) 掺杂稻草纤维 (RS)/PBS 的生物复合材料。当 TiO₂ 质量分数为 1% 时, TiO₂ 掺杂 RS/PBS 复合材料的力学性能最好, 其弯曲强度和模量分别比无 TiO₂ 掺杂的 RS/PBS 材料提高 30.34% 和 28.39%。通过分析纯 PBS、RS/PBS 复合材料和加入 TiO₂ 的 RS/PBS 复合材料的非等温结晶数据发现, 质量分数 1% 的 TiO₂ 掺杂 RS/PBS 复合材料显示出最好的结晶性能, 表明 RS 和 TiO₂ 的加入可显著改善 PBS 复合材料的结晶和力学性能, 提升其应用范围。

为了填补大粒径、高含量、富含天然植物纤维的生物质填料填充 PBAT 复合材料的性能和降解性的研究空缺, XIE 等^[47]将大尺寸 (纤维结构接近毫米级) 芦苇引入 PBAT 中, 采用无增容剂的高速共混法制备了高性能可生物降解复合材料, 研究发现, 占 PBAT 质量 60% 的大尺寸芦苇纤维与 PBAT 共混加工后, 其弯曲强度、弯曲模量和热变形温度分别达到 23.9 MPa、1237 MPa 和 71.8 °C。与 PP 和 PE 相比, 该复合材料具有更好的弹性模量和更多绿色环保的成分。在降解过程中, 较纯 PBAT 相比, 复合材料的熔点增加, 热稳定性和结晶度显著降低。

不同的可降解聚合物也能应用于同一复合材料中, WANG 等^[48]将 PBAT 引入到 PLA/木纤维复合材料中, 通过超临界 CO₂ 间歇发泡技术制备了 PLA/PBAT/木纤维复合泡沫。结果表明, PBAT 的引入降低了 PLA/木纤维复合材料的储能模量, 加快了复合材料的结晶速率, 扩大了复合材料的结晶温度范围, 提高了复合材料的结晶度, 从而提升了复合

材料的发泡性能。PLA/PBAT/木纤维复合材料优异的发泡性归因于柔性 PBAT 的引入改善了结晶动力学和熔体弹性, 其复合泡沫也显示出优异的抗压强度(1.66 MPa), 比纯 PLA 泡沫高 7.97 倍。PLA/PBAT/木纤维复合泡沫在绿色可持续包装、吸声和隔热材料等方面具有广阔的应用前景, 为开发高性能 PLA/木纤维生物复合泡沫探索了新的方向。

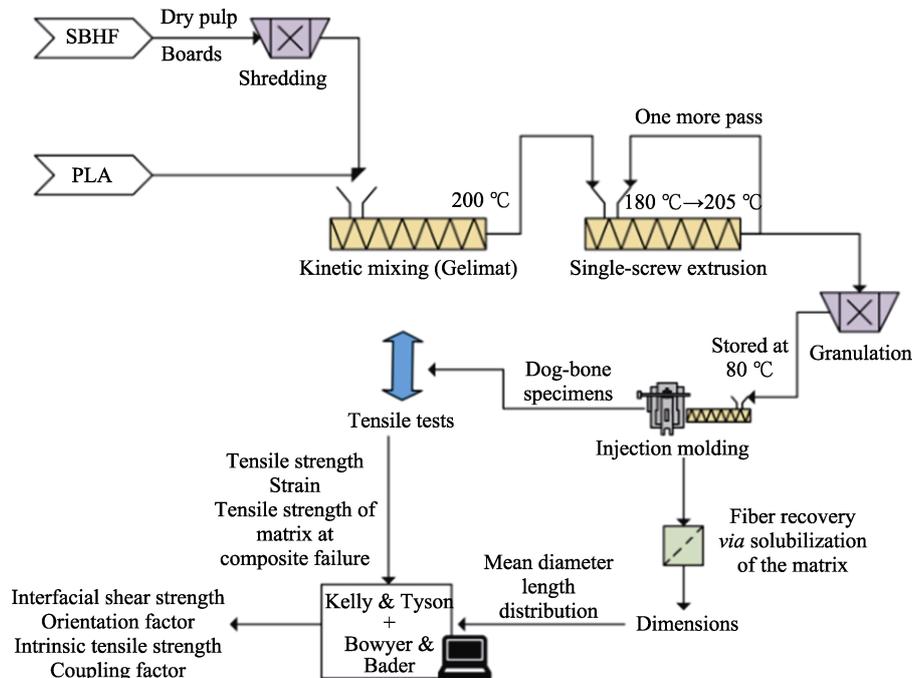


图 6 漂白大麻纤维增强 PLA 流程示意图^[45]

Fig. 6 Schematic diagram of bleached hemp fiber reinforced PLA process^[45]

3 结束语与展望

随着环境污染问题日益严重, 社会环保意识逐渐提高, 向自然取材利用的趋势也日渐成熟。天然植物纤维因具有环境友善、轻量化、低能耗与可再生等特性备受关注。天然植物纤维增强热塑性复合材料是顺应时代绿色发展需求的产品。目前, 宝马、丰田、奥迪等车厂均已在汽车外壳中使用天然植物纤维复合材料^[49], 尤其是在欧洲工业区, 2010 年天然植物纤维使用量达 2 万 t, 到 2015 年增至 5 万 t^[50]。现在, 世界各国都在大力发展产业绿色化创新, 天然植物纤维复合材料环保和可持续的特性正顺应时代潮流。在中国绿色可持续发展的战略要求和产业布局下, 绿色天然植物纤维复合材料在国内汽车行业中也蓬勃发展, 五菱等车厂正着力进行产品创新, 在汽车门板等零部件中使用天然植物纤维复合材料。天然植物纤维复合材料还可用于家具、建材、军工、飞机零件、食品包装、运动器材、电气部件、生物医学材料等行业, 在多行业中展现出其蕴含的巨大应用潜力。

目前, 天然植物纤维与热塑性聚合物结合方式仍存在可改进的地方, 天然植物纤维的预处理方式和纤维粒径大小的选择、绿色环保的相容剂或者复合处理方式的选择, 这些在复合材料制备全过程中的节点选择, 对天然植物纤维增强热塑性复合材料的各项性能具有决定作用。最重要的是, 目前大部分工业生产的复合材料基体均为不可降解塑料, 需要在后期研究中加大对可降解塑料与天然植物纤维复合材料的工业化加工的探索, 生产全绿色复合材料, 满足国家的绿色产业发展要求。

参考文献:

- [1] PA P, SASIKUMAR M. Viscoelastic and mechanical behaviour of reduced graphene oxide and zirconium dioxide filled jute/epoxy composites at different temperature conditions[J]. *Materials Today Communications*, 2019, 19: 252-261.
- [2] JARIWALA H, JAIN P. A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38: 441-453.
- [3] ZHAN J H, WANG J C, LIN J, *et al.* Flame-retardant, thermal, and mechanical properties of PLA/ramie fiber composites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43: 4244-4254.
- [4] BITTNER C M, OETTEL V. Fiber reinforced concrete with natural plant fibers-investigations on the application of bamboo fibers in

- ultra-high-performance concrete[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12011.
- [5] LIU J R, LIU S Y, ZHU L S, *et al.* Carbon neutrality potential of textile products made from plant-derived fibers[J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7070.
- [6] NING H B, LU N, HASSEN A A, *et al.* A review of long fibre thermoplastic (LFT) composites[J]. International Materials Reviews, 2019, 65: 164-188.
- [7] BALOGUN O A, DARAMOLA O O, ADEDIRAN A A, *et al.* Investigation of Jute/Tetracarpidium conophorum reinforced polypropylene composites for automobile application: Mechanical, wear and flow properties [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 65: 327-341.
- [8] SURAJARUSARN B, HAJJAR-GARREAU S, SCHRODJ G, *et al.* Comparative study of pineapple leaf microfiber and aramid fiber reinforced natural rubbers using dynamic mechanical analysis[J]. Polymer Testing, 2020, 82: 106289.
- [9] MAHMUD S, HASAN K M F, JAHID M A, *et al.* Comprehensive review on plant-fiber reinforced polymeric biocomposites[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56: 7231-7264.
- [10] OLADELE I O, ABIODUN M I B, AGBEBOH N I, *et al.* Thermal stability, moisture uptake potentials and mechanical properties of modified plant based cellulosic fiber-animal wastes hybrid reinforced epoxy composites[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(12): 4427-4442.
- [11] KUBICKI J D, YANG H, SAWADA D, *et al.* The shape of native plant cellulose microfibrils[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 13983.
- [12] GURUNATHAN T, MOHANTY S, NAYAK S K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 77: 1-25.
- [13] VINOD A, SANJAY M R, SUCHART S, *et al.* Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 258: 120978.
- [14] LIU Y C, LYU X M, BAO J L, *et al.* Characterization of silane treated and untreated natural cellulosic fiber from corn stalk waste as potential reinforcement in polymer composites[J]. Carbohydrate polymers, 2019, 218: 179-187.
- [15] HAMID N H, HISAN W S I W B, ABDULLAH U H, *et al.* Mechanical properties and moisture absorption of epoxy composites mixed with amorphous and crystalline silica from rice husk[J]. BioResources, 2019, 3: 7363-7374.
- [16] SUN Z. Hyperbranched polymers in modifying natural plant fibers and their applications in polymer matrix composites-A review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(32): 8715-8724.
- [17] ANKIT M, PRAMENDRA K B. Analysis of natural fiber constituents: A review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 455(1): 012115.
- [18] LIANG Z F, WU H W, LIU R P, *et al.* Preparation of long sisal fiber-reinforced polylactic acid biocomposites with highly improved mechanical performance[J]. Polymers, 2021, 13: 1124.
- [19] AKTER M, UDDIN M H, ANIK H R. Plant fiber-reinforced polymer composites: A review on modification, fabrication, properties, and applications[J]. Polymer Bulletin, 2023, 81(1): 1-85.
- [20] MUNDE Y S, INGLE R B, SIVA I. A comprehensive review on the vibration and damping characteristics of vegetable fiber-reinforced composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(17): 822-832.
- [21] INSEEMEESAK B, SIRIPAIBOON C, SOMKEATTIKUL K, *et al.* Biocomposite fabrication from pilot-scale steam-exploded coconut fiber and PLA/PBS with mechanical and thermal characterizations[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379: 134517.
- [22] WU J Y, ZONG Y X, ZHONG T H, *et al.* Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature[J]. Journal of Wood Science, 2023, 69(1): 1-12.
- [23] HE L P, XIA F, WANG Y, *et al.* Mechanical and dynamic mechanical properties of the amino silicone oil emulsion modified ramie fiber reinforced composites[J]. Polymers, 2021, 13(23): 4083.
- [24] BALLA V K, KATE K H, SATYAVOLU J, *et al.* Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174: 106956.
- [25] YAN L B, KASAL B, HUANG L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 92: 94-132.
- [26] MURAWSKI A, DIAZ R, INGLESBY S, *et al.* Polymer nanocomposites in biomedical engineering[M]. Berlin: Berlin Springer, 2019.
- [27] WANG B B, WANG Y, DU S, *et al.* Upcycling of thermosetting polymers into high-value materials[J]. Materials Horizons, 2023, 10(1): 41-51.
- [28] MA S Q, LI T T, LIU X Q, *et al.* Research progress on bio-based thermosetting resins[J]. Polymer International, 2016, 65: 164-173.
- [29] RODRIGUEZ C W, RODRIGUEZ D. Composites from renewable and sustainable materials[M]. London: London Intech Open, 2016.
- [30] MAHMUD S, HASAN K M F, JAHID M A, *et al.* Comprehensive review on plant fiber-reinforced polymeric biocomposites[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56: 7231-7264.
- [31] JIANG L P, YANG Y, FU J J, *et al.* Erosive wear analysis of bamboo fiber-reinforced high-density polyethylene composites: Effect of aluminum oxide[J]. Polymer Composites, 2022, 43(6): 3823-3830.
- [32] SECULI F, ESPINACH F X, JULIAN F, *et al.* Comparative evaluation of the stiffness of abaca-fiber-reinforced bio-polyethylene and high-density polyethylene composites[J]. Polymers, 2023, 15: 1096.
- [33] HE L P, LI W J, CHEN D C, *et al.* Investigation on the microscopic mechanism of potassium permanganate modification and the properties of ramie fiber/polypropylene composites[J]. Polymer Composites, 2018, 39(9): 3353-3362.
- [34] BHUIYAN M A R, DARDA M A, ALI A, *et al.* Heat insulating jute-reinforced recycled polyethylene and polypropylene bio-composites for energy conservation in buildings[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 106948.
- [35] RAZA M, AL ABDALLAH H, KOZAL M, *et al.* Development and characterization of polystyrene-date palm surface fibers composites for sustainable heat insulation in construction[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 75: 106982.
- [36] OWEN M M, ACHUKWU E O, SHUIB S B, *et al.* Effects of high-temperature optimization and resin coating treatment on the mechanical, thermal, and morphological properties of natural kenaf fiber-filled engineering plastic composites[J]. Polymer Composites, 2023, 44(4): 2512-2529.
- [37] SAKTHIVEL A R, KANDASAMY J. A case study of 3D printed PLA and its mechanical properties[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5: 11219-11226.
- [38] LIU J Q (刘嘉铨), LI S H (李孙辉), GUO X T (郭熙桃), *et al.* Preparation of PLA-g-GMA and its effect on crystallization properties of PBAT/PLA blends[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2023, 40(3): 665-672.
- [39] BAO D M (宝冬梅), QI Y Z (祁钰昭), WANG J H (王建航), *et al.* The effect of flame-retardant HAP-DOPS with double functional groups on the thermal stability of poly(lactic acid)[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences) (贵州师范大学学报: 自然科学版), 2022, 40(5): 11-18.
- [40] JIANG S C, YANG Y F, GE S B, *et al.* Preparation and properties of novel flame-retardant PBS wood-plastic composites[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2018, 11(6): 844-857.
- [41] LYU Y (吕瑶), PAN X L (潘晓丽), WU X L (吴雪林), *et al.* Study on service life regulation and mechanism of biodegradable antibacterial Ag₂Si₂O₇-TiO₂/cellulose/PBAT composites[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences) (贵州师范大学学报: 自然科学版), 2023, 41(5): 62-67.