

苧麻增强回收聚丙烯复合材料的制备及其性能的研究

彭发庭, 陈紫琼, 贺国文*, 谢湘, 王子渝, 王璞

湖南城市学院材料与化学工程学院, 低碳与环境功能材料湖南省高校重点实验室, 湖南 益阳

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

本文分别使用碱法改性和柠檬酸改性两种方法对苧麻纤维进行改性, 制备了苧麻/回收聚丙烯复合材料, 对材料的冲击性能、硬度、拉伸性能、耐热性能等进行了研究。结果表明, 两种方法均能有效清除苧麻表面杂质, 用苧麻纤维增强回收聚丙烯复合材料, 可以提高废旧聚丙烯的力学性能。在苧麻纤维长度为1.5 cm, 苧麻含量为6%柠檬酸改性方法下, 冲击强度提升至8.222 kJ/m², 拉伸强度提升至38.2 MPa, 断裂伸长率降低136%, 硬度提升13.3%。在苧麻纤维长度为1.5 cm, 苧麻含量为6%碱法改性方法下, 冲击强度提升至6.854 kJ/m², 拉伸强度提升至29.5 MPa, 断裂伸长率降低139%, 硬度提升5%。

关键词

苧麻纤维, 回收聚丙烯, 改性, 复合材料, 力学性能

Preparation and Properties of Recycled Polypropylene Composites Reinforced by Ramie Fiber

Fating Peng, Ziqiong Chen, Guowen He*, Xiang Xie, Ziyu Wang, Pu Wang

Key laboratory of Low Carbon and Environmental Functional Materials of College of Hunan Province, School of Materials and Chemical Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: April 27, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

In this paper, Ramie fibers were modified using two methods, namely alkali modification and citric

文章引用: 彭发庭, 陈紫琼, 贺国文, 谢湘, 王子渝, 王璞. 苧麻增强回收聚丙烯复合材料的制备及其性能的研究[J]. 分析化学进展, 2026, 16(2): 159-167. DOI: 10.12677/aac.2026.162018

acid modification. Ramie/recycled polypropylene composites were prepared, and the impact properties, hardness, tensile properties, and heat resistance of the materials were investigated. The results showed that both methods were effective in removing the surface impurities of ramie, and the mechanical properties of used polypropylene could be improved by reinforcing the recycled polypropylene composites with ramie fibers. Under the method of ramie fiber length of 1.5 cm and ramie content of 6% citric acid modification, the impact strength was increased to 8.222 KJ/m², the tensile strength was increased to 38.2 MPa, the elongation at break was reduced by 136%, and the hardness was increased by 13.3%. Under the ramie fiber length of 1.5 cm, ramie content of 6% alkali modification method, the impact strength was increased to 6.854 KJ/m², the tensile strength was increased to 29.5 MPa, the elongation at break was reduced by 139%, and the hardness was increased by 5%.

Keywords

Ramie Fiber, Recycled Polypropylene, Modification, Composites, Mechanical Property

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

苧麻纤维作为一种具有中国特色的可再生资源，具有高拉伸强度等优点，在可持续材料领域展现出独特优势，在汽车内饰、建筑隔热等绿色材料领域得到广泛应用[1]-[3]。苧麻在聚合物复合材料中可得到更重要的应用。苧麻本身的亲水性使其加入到聚合物基体中前需要进行表面的疏水亲油改性。常见的苧麻改性方法如碱法改性、偶联剂改性、乙酰化、高锰酸钾、过氧化物、硅烷苯甲酰化、有机硅油改性和柠檬酸改性等[3]-[6]。聚丙烯是全球产量第二、应用最广泛的通用塑料之一。苧麻纤维制备的聚丙烯复合材料具有相较于基体更优异的力学性能，如模量、拉伸强度、冲击强度和弯曲强度得到明显的提升[1][2][5][7]-[9]。苧麻纤维在废旧高分子材料的高质化再生利用方面得到了重要的应用[6][10]。废弃塑料已成为我国第一大污染物，对于研究废弃塑料的降解与回收意义重大[11]。每年产生的巨量的废旧聚丙烯对环境产生了巨大的污染。本研究以苧麻纤维和废旧聚丙烯为基材，通过复合加工技术制备新型环保材料，对比研究了碱法改性和柠檬酸改性苧麻对材料力学性能的影响。该研究不仅解决了废旧塑料性能回升的问题，开辟了农业纤维与高分子废弃物协同利用的新途径，符合当前循环经济的发展需求。

2. 实验部分

2.1. 主要仪器设备

双螺杆挤出机，SHJ-20，南京杰恩特机电；微型注塑机，KD-1080，宁波市金星塑料机械；组合冲击试验机，XJJUD-50，承德市大加仪器；电子万能试验机，WDW-100C，上海华龙测试仪器；洛氏硬度计，XHR-150，北京时代山峰科技；维卡软化点温度测定仪，XRW-300B，承德市聚缘检测设备；傅里叶红外光谱仪，IRXROSS，日本岛津；场发射扫描电子显微镜，MIRA4LMH，捷克 TESCAN；热重分析仪，209F3NEVIO，德国 Netzsch。

2.2. 实验原料及试剂药品

苧麻(RF)，麻杆纤维，购自湖南麻升洞庭公司；回收聚丙烯(RPP)，优质再生料，纯度 ≥ 95 ，湖南新

基源新材料有限公司提供, 熔融指数 24.8 g/10 min; 氢氧化钠(NaOH), AR, 购自天津市恒兴化学试剂公司; 柠檬酸(CA), AR, 购自天津鼎盛鑫公司。

2.3. 原料的预处理

将苧麻用蒸馏水清洗并分别剪切为 0.5、1.0、1.5 cm 的短切苧麻纤维, 并将其放入干燥箱干燥 6 h, 备用。挑选细小回收聚丙烯颗粒, 用水清洗 3 遍去掉灰尘等杂质后晾干, 后将其于 85℃干燥 8 h, 备用。

2.4. 苧麻纤维的改性

2.4.1. 碱法改性

参考相关文献[12][13], 对苧麻进行碱处理。具体操作为: 在 30℃下用 170 g/L 的 NaOH 溶液对精干苧麻进行改性处理, 浸泡 3 h, 每 30 min 进行一次搅拌。溶胀后的苧麻纤维在硫酸中反应, 去除纤维素其中碱性物质。运用蒸馏水对苧麻冲洗至中性。在 50℃烘箱中恒温处理 12 h, 保存备用。

2.4.2. 柠檬酸改性

参考相关文献[14], 对苧麻进行碱处理。具体操作为: 苧麻用蒸馏水清洗后 100℃干燥 6 h。用 3.0 mol/L CA 溶液在 100℃条件下回流处理 5 h。取出后用蒸馏水洗涤至中性, 后在 50℃下干燥 12 h, 保存备用。

2.5. 复合材料制备

将 NaOH 与 CA 改性的苧麻分别与废旧聚丙烯按照质量分数 0%、2%、4%、6%进行高速混合, 挤出造粒, 干燥备用。再将粒料用注塑机制备拉伸、冲击等样条。复合材料制备流程见图 1。

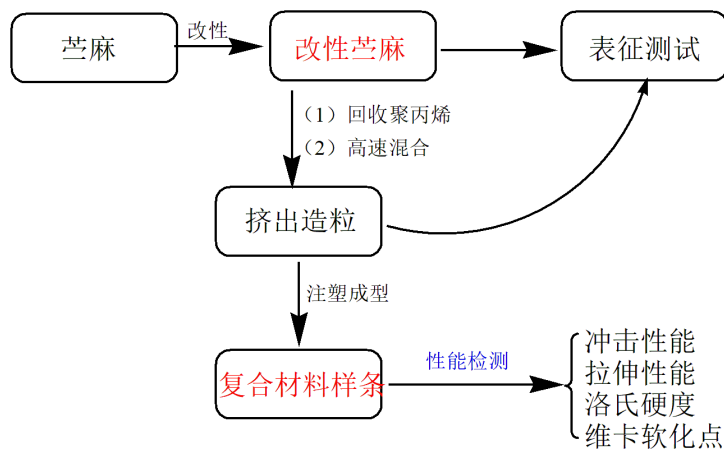


Figure 1. Process diagram for preparing composite materials

图 1. 复合材料制备流程图

2.6. 材料的表征和性能测试

本研究分别使用扫描电镜、傅里叶红外光谱仪对改性前后的苧麻及回收聚丙烯复合材料进行微观形貌和化学结构表征。对复合材料进行缺口冲击性能测试(简支梁模式)、拉伸性能测试和洛氏硬度分别按照 GB/T 1043.1-2008、GB/T 1040.1-2025 和 GB/T 3398.2-2008 进行测试, 研究其力学性能。测试复合材料的维卡软化点温度, 测定温度 230℃, 载荷 2.16 Kg, 探究其热稳定性。系统考察苧麻改性方法及其含量对材料性能的影响。

3. 结果与讨论

3.1. 苧麻纤维表面形貌分析

本文对比了未改性苧麻纤维、氢氧化钠改性后苧麻纤维、柠檬酸改性后的苧麻纤维的微观形貌，苧麻纤维扫描电镜图见图2。图2(a)、图2(b)易见，未改性苧麻纤维表面很粗糙，存在许多杂质。由图2(c)、图2(d)可以看出，经改性后的苧麻，表面的杂质被大量去除，表面光滑，出现了沟槽和裂纹，增大了比表面积。

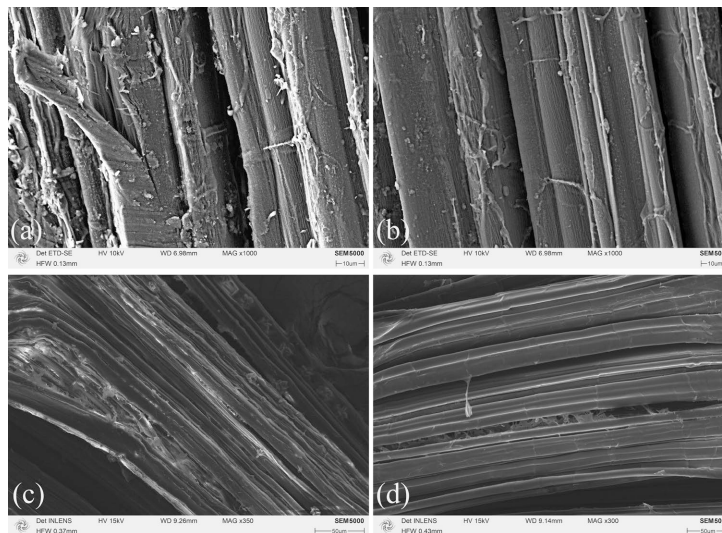


Figure 2. Scanning electron microscopy images of ramie fiber ((a) and (b) are unmodified ramie; (c) is alkali modified ramie; and (d) is citric acid modified ramie)

图 2. 苧麻纤维的扫描电镜图((a)、(b) 为未改性苧麻; (c) 为碱法改性苧麻; (d) 为柠檬酸改性苧麻)

3.2. 苧麻纤维的化学结构

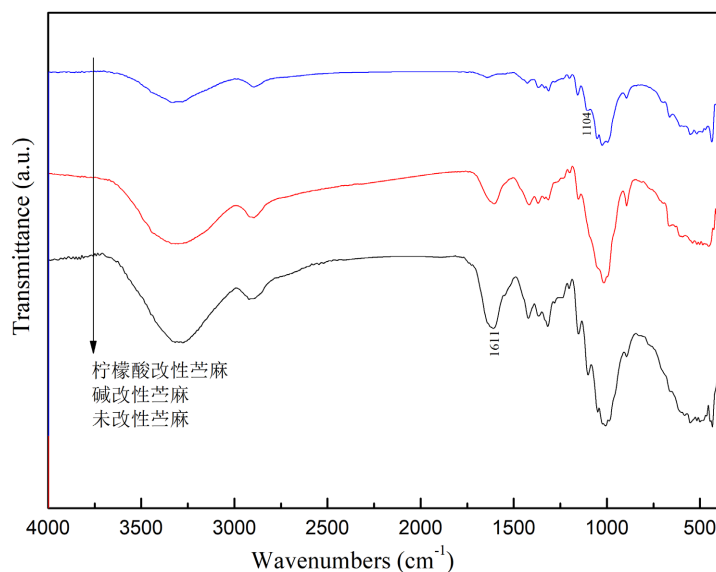


Figure 3. Infrared spectra of ramie fiber

图 3. 苧麻纤维的红外光谱图

图3为未改性苧麻及两种方法改性的苧麻纤维的红外光谱图。由图可知,在 $3400\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 的O-H的伸缩振动峰,两种改性苧麻在此处的红外吸收峰明显减弱,说明苧麻在改性下羟基明显减少。在 $1600\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ 的芳香骨架振动峰,两种改性的苧麻在此峰减弱,说明在改性下苧麻纤维中杂质(木质素等)被去除。可知,苧麻纤维在碱法改性下并未出现新的峰,即没有新的官能团出现。表明此种方法改性并没有对苧麻纤维的化学结构产生较大的破坏,对于苧麻的改性仅清除了表面的杂质。柠檬酸改性的苧麻出现 $1300\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 的酯基中C-O-C伸缩振动峰,说明苧麻纤维与柠檬酸发生大量酯化反应,使纤维间以化学键形成了牢固的网络结构。

3.3. 苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料力学性能分析

3.3.1. 苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料的冲击性能

图4为柠檬酸改性、碱法改性与未改性的不同含量、不同苧麻纤维长度的苧麻纤维/回收聚丙烯的冲击性能。冲击强度是衡量材料在高速冲击下抗断裂能力的关键指标[15]。由图可见,苧麻纤维/回收聚丙烯的冲击性能随着苧麻纤维长度、苧麻质量分数的增加而增加。废旧聚丙烯基体本身的冲击强度为 4.296 KJ/m^2 。苧麻纤维长度为 1.5 cm 质量分数为 6% 的碱法改性、柠檬酸改性材料的冲击强度分别为 6.854 、 8.222 KJ/m^2 。苧麻纤维长度增加可以增强苧麻纤维/回收聚丙烯冲击强度,长纤维通过桥接裂纹、拔出等机制吸收更多能量,提高抗冲击性能。纤维含量增加会直接提升材料的冲击强度。碱法改性材料随着苧麻纤维的质量分数增加,冲击强度的增加幅度减小,说明苧麻纤维发生团聚现象,而柠檬酸改性材料并未发生幅度减小,柠檬酸改性材料性能在此质量分数的冲击性能更为优异,与相关文献报道一致[14]。

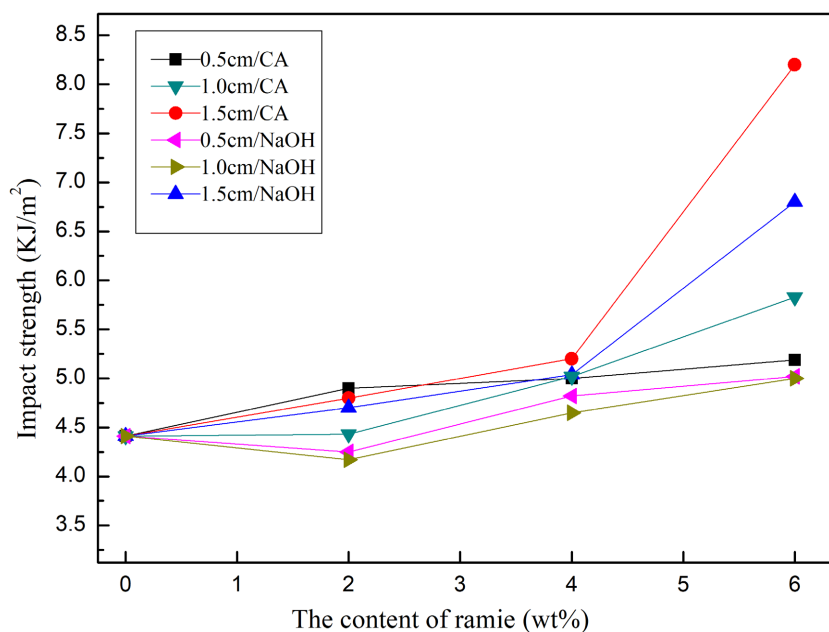


Figure 4. Impact properties of ramie fiber/recycled polypropylene
图4. 苧麻纤维/回收聚丙烯的冲击性能

3.3.2. 苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料的拉伸性能

(1) 苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料的拉伸强度

图5为柠檬酸改性、碱法改性与未改性的不同含量、不同苧麻纤维长度苧麻纤维/回收聚丙烯的拉伸性能图。拉伸强度是指在拉伸过程中材料能承受的最大拉伸力。苧麻纤维/回收聚丙烯的拉伸性能随着苧

麻纤维长度、苕麻质量分数的增加而增加。废旧聚丙烯基体本身的拉伸强度为 15.0 MPa。苕麻纤维长度为 1.5 cm 质量分数为 6% 的柠檬酸改性、碱法改性的材料的拉伸强度分别为 38.2、29.5 MPa。纤维长度增加能阻碍裂纹扩展,通过界面脱粘和纤维拔出吸收冲击能量,高含量纤维可形成密集的纤维-基体界面,通过多重界面失效耗能[16]。碱法改性的材料随着苕麻纤维的质量分数增加,拉伸性能增幅变小,而柠檬酸改性并未发生。这缘于柠檬酸改性能够有效减少苕麻纤维的团聚现象,使苕麻/回收聚丙烯材料的拉伸强度更优秀[14]。

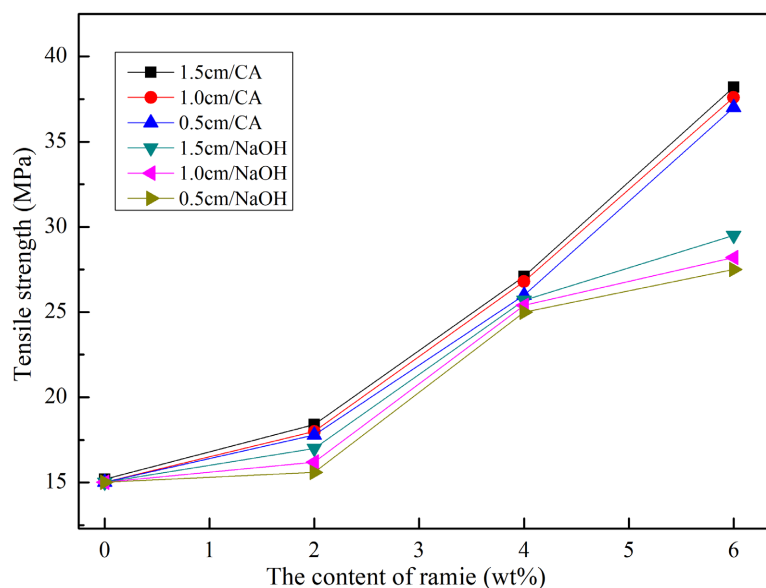


Figure 5. Tensile properties of ramie fiber/recycled polypropylene
图 5. 苕麻纤维/回收聚丙烯的拉伸性能

(2) 苕麻纤维/回收聚丙烯复合材料的断裂伸长率

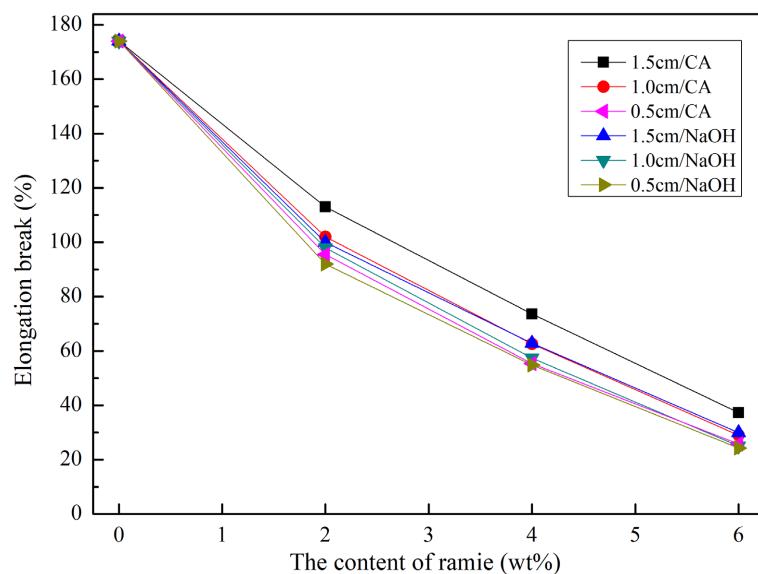


Figure 6. Fracture elongation of ramie fiber/recycled polypropylene
图 6. 苕麻纤维/回收聚丙烯的断裂伸长率

图 6 为柠檬酸改性、碱法改性与未改性的不同含量、不同苧麻纤维长度苧麻纤维/回收聚丙烯的断裂伸长率变化图。纤维增强复合材料的断裂伸长率通常随纤维含量增加而下降,需通过界面改性或混杂增韧平衡强度与韧性[17]。由图可知苧麻纤维/回收聚丙烯的断裂伸长率随着苧麻纤维质量分数、苧麻纤维长度增加而减小。回收聚丙烯基体自身的断裂伸长率为 160%,柠檬酸改性、碱法改性的苧麻,当长度为 1.5 cm、含量为 6%时,苧麻/回收聚丙烯材料的断裂伸长率分别为 24%和 21%。由此可知,苧麻纤维的加入对聚丙烯的抗拉伸性能起负面作用。其原因是高强度的苧麻纤维降低回收聚丙烯的韧性以及延展性,导致苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料断裂伸长率降低[18]。

3.3.3. 苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料的硬度

图 7 为柠檬酸改性、碱法改性与未改性的不同含量、不同苧麻纤维长度苧麻纤维/回收聚丙烯的硬度。废旧聚丙烯自身的硬度为 75。苧麻纤维长度为 1.5 cm,质量分数为 6%的柠檬酸改性、碱法改性得到的材料硬度分别为 85 和 79。由图可知,材料的硬度随着苧麻纤维质量分数、苧麻纤维长度增加而增加。碱法改性材料随着苧麻纤维质量分数的增加硬度的增幅逐渐变小。纤维增强体的增加通常提高复合材料的硬度,但效果受纤维-基体协同作用支配[19]。说明柠檬酸改性对于苧麻纤维-基体协同作用对比碱法改性更为优异。

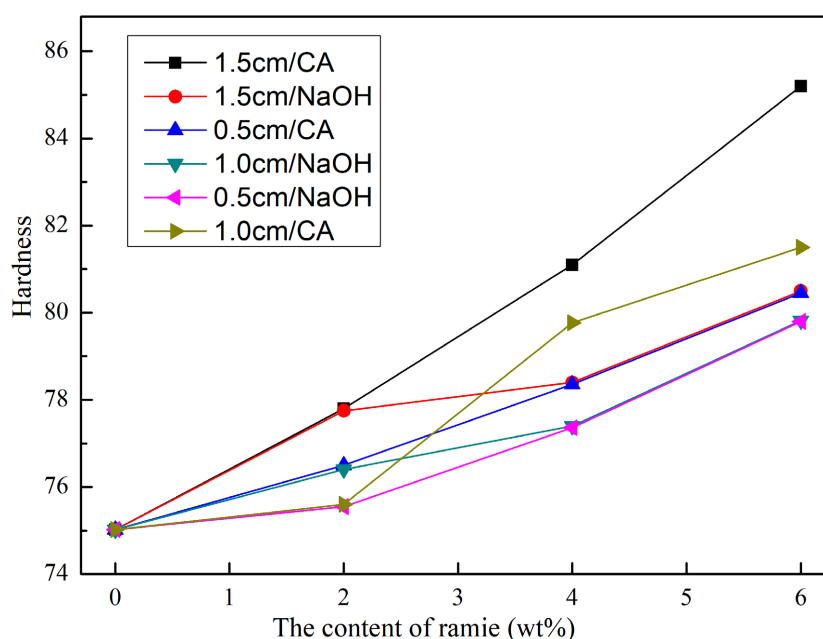


Figure 7. Hardness of ramie fiber/recycled polypropylene
图 7. 苧麻纤维/回收聚丙烯的硬度

3.4. 苧麻纤维/回收聚丙烯复合材料耐热性能分析

图 8 为柠檬酸改性、碱法改性与未改性的不同含量、不同苧麻纤维长度苧麻纤维/回收聚丙烯的维卡软化点变化图。维卡软化点代表材料的耐热性,可以反映出材料的最佳温度使用范围[20]。废旧聚丙烯自身的维卡软化点为 137℃,苧麻纤维长度为 1.5 cm,质量分数为 6%的柠檬酸改性、碱法改性得到的复合材料的维卡软化点分别为 153℃和 150℃。随着苧麻纤维/回收聚丙烯的维卡软化点随着苧麻纤维质量分数、苧麻纤维长度增加而增加,缘于当添加苧麻纤维后复合材料的刚度的增加。

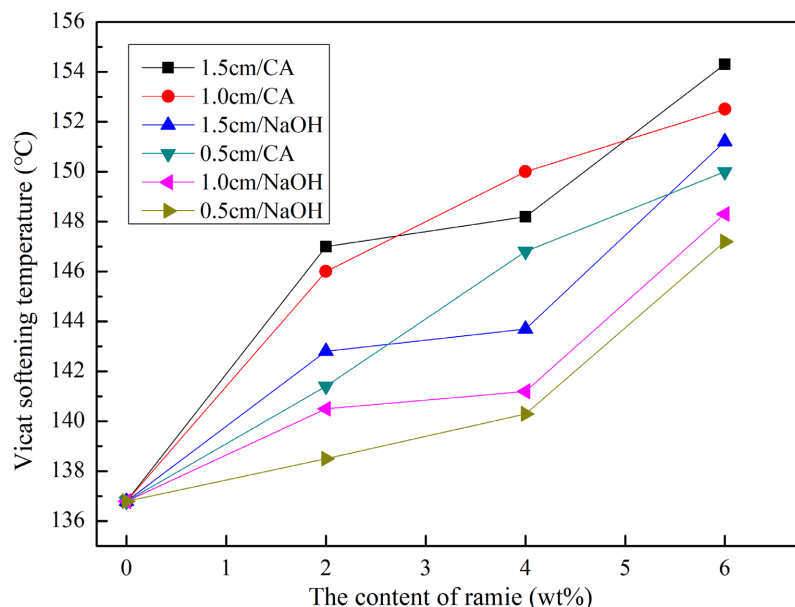


Figure 8. Vicat softening point of ramie fiber/recycled polypropylene
图 8. 苧麻纤维/回收聚丙烯的维卡软化点

4. 结论

(1) 苧麻纤维含量越高, 复合材料的抗冲击性能越高, 其抗拉伸性能越高, 维卡软化点升高, 力学性能和耐热性能有效提升。

(2) 苧麻纤维长度越长, 复合材料的抗冲击性能越好, 其抗拉伸性能越高, 维卡软化温度升高。纤维末端存在应力集中现象, 故而短纤维无法充分发挥增强作用, 长纤维中部能够充分承载, 末端效应降低, 应力传递更均匀, 能够更好地提高复合材料强度与模量。

(3) 经过柠檬酸改性的苧麻/聚丙烯复合材料的抗冲击性能、抗拉伸性能和耐热性能较碱法改性的苧麻制备的复合材料都更加优异。经过两种方法改性均能有效提升复合材料的硬度。

基金项目

国家级大学生创新训练项目(S202311527073), 湖南省自然科学基金区域联合基金项目(2025JJ70380)。

参考文献

- [1] Yuan, Q.H., Yang, W., Ma, Z.W., *et al.* (2022) Tobacco Stalk Flour/Magnesium Oxysulfate Whiskers Reinforced Hybrid Composites of Recycled Polypropylene: Mechanical and Thermal and Antibacterial Properties. *Polymers*, **52**, 52-61.
- [2] 皮超雄. 车用苧麻纤维增强聚丙烯复合材料力学与阻尼性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [3] Maurya, K.L., Kumar, M., Sonwani, R.K., Jaiswal, V.K., Verma, A. and Singh, R.S. (2023) Enhancement of Azo Dye Bioremediation Using Chemically Modified Polypropylene Biocarrier: Comparative Analysis and Kinetic Modeling. *Bioresource Technology Reports*, **21**, Article ID: 101375. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101375>
- [4] Yu, M., He, C., Huang, R., Liu, J. and Lu, D. (2016) Accelerated Weathering of Recycled Polypropylene Packaging Bag Composites Reinforced with Wheat Straw Fibers. *Forest Products Journal*, **66**, 485-494. <https://doi.org/10.13073/fpj-d-14-00107>
- [5] 张勇, 鄢勇气. 苧麻纤维化学改性研究进展[J]. 化学研究, 2021(3): 277-282.
- [6] 孟承翰, 罗皓文, 刘昊, 等. 柠檬酸改性苧麻纤维增强聚丁二酸丁二醇酯的性能研究[J]. 中国塑料, 2024, 38(12): 54-59.

- [7] 张扬, 温变英, 李晓媛, 等. 苧麻纤维表面修饰对聚丙烯/苧麻纤维复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2014, 28(8): 47-51.
- [8] Kumar, S.K., Siva, I., Jeyaraj, P., Winowlin Jappes, J.T., Amico, S.C. and Rajini, N. (2014) Synergy of Fiber Length and Content on Free Vibration and Damping Behavior of Natural Fiber Reinforced Polyester Composite Beams. *Materials & Design* (1980-2015), **56**, 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.039>
- [9] 吕泽瑞, 黎征帆, 江惠林, 等. 苧麻纤维制备研究进展[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(11): 68-72.
- [10] 王勋林. 废旧聚乙烯膜回收料的改性应用[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 608-612.
- [11] 洪钧, 毕松梅, 朱钦钦. 苧麻纤维增强聚丙烯复合材料的性能研究[J]. 塑料科技, 2012, 40(2): 45-47.
- [12] 吕陈. 苧麻纤维的柔软处理研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2017.
- [13] Pratiwi, H., Kusmono, K. and Wildan, M.W. (2025) The Effect of Sodium Hydroxide and Oxalic Acid Treatments on Water Absorption, Thickness Swelling, and Hardness of Polyester/Ramie Fiber Composites. *Solid State Phenomena*, **372**, 33-39. <https://doi.org/10.4028/p-cj3xi1>
- [14] 陈林. 柠檬酸改性的苧麻纤维掺杂 PBS 复合材料制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [15] 展江湖, 王迎宵, 杨志浩, 等. 苧麻纤维增强聚乳酸复合材料性能研究[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 952-959.
- [16] 段炼. 苧麻纤维材料热处理后的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2022.
- [17] 王倩. 苧麻纤维改性环氧树脂复合材料及应用性能[J]. 化学与粘合, 2024, 46(3): 240-243.
- [18] 李文军. 苧麻纤维/聚丙烯车用复合材料的制备及改性机理研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [19] 齐杭杭. 酶法探究苧麻纤维的超微结构及织物改性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2020.
- [20] 房晓萌. 三维正交苧麻机织物增强聚丙烯复合材料的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2011.