

氧化石墨烯改性苧麻及聚丙烯复合材料的制备与力学性能

欧阳凯翔¹, 陈凯君¹, 孟洪量², 黄如新², 吴炎², 贺国文^{1,2*}

¹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

²湖南省新基源新材料科技有限公司, 湖南 岳阳

收稿日期: 2026年8月15日; 录用日期: 2026年9月11日; 发布日期: 2026年9月22日

摘要

为了提高苧麻纤维(RF)与基体材料的相容性, 本文采用碱预处理和氧化石墨烯(GO)表面改性相结合的方法处理苧麻纤维。改性苧麻与聚丙烯(PP)经双螺杆挤出机挤出、注塑成型制成复合材料, 过程中加入适量的相容剂马来酸酐(MAH)。对复合材料进行冲击、拉伸、硬度、维卡软化点等测试, 对比研究了不同碱处理时间、GO浓度及成份配比对复合材料性能的影响。结果表明, 适量GO改性可显著改善纤维与PP基体的界面结合力, 促进纤维均匀分散, 材料的相关性能均得到了一定程度的改善。如加入经碱预处理3 h及3.0 mg/mL GO浓度改性方法下得到的苧麻5%时, 相较纯PP材料, 复合材料冲击强度从7.8 kJ/m²提升至35.3 kJ/m², 拉伸强度从15.8 MPa提升至37.9 MPa, 硬度增加57%, 维卡软化温度提高了16%。

关键词

苧麻纤维, 聚丙烯, 氧化石墨烯, 复合材料, 力学性能

Preparation and Mechanical Properties of Polypropylene Composites Reinforced by RF Modified with GO

Kaixiang Ouyang¹, Kaijun Chen¹, Hongliang Meng², Ruxin Huang², Yan Wu², Guowen He^{1,2*}

¹Key Laboratory of Low Carbon and Environmental Functional Materials of College of Hunan Province, School of Materials and Chemical Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

²Hunan Xinjiyuan New Material Technology Co., Ltd., Yueyang Hunan

Received: August 15, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 22, 2026

*通讯作者。

文章引用: 欧阳凯翔, 陈凯君, 孟洪量, 黄如新, 吴炎, 贺国文. 氧化石墨烯改性苧麻及聚丙烯复合材料的制备与力学性能[J]. 材料科学, 2026, 16(9): 60-70. DOI: 10.12677/ms.2026.169182

Abstract

To enhance the compatibility between ramie fibers and the matrix material, this study combined alkali pretreatment with graphene oxide (GO) surface modification to treat ramie fibers. The modified ramie fibers were then compounded with polypropylene (PP) via twin-screw extrusion and injection molding, with an appropriate amount of maleic anhydride (MAH) added as a compatibilizer. The resulting composites were subjected to impact, tensile, hardness, and Vicat softening point tests, and the effects of different alkali treatment times, GO concentrations, and component ratios on the composite properties were comparatively investigated. The results indicate that an appropriate GO modification can significantly improve the interfacial adhesion between the fibers and the PP matrix, promote uniform fiber dispersion, and lead to notable improvements in the relevant properties. For example, when 5% ramie fibers pretreated with alkali for 3 h and modified with 3.0 mg/mL GO were incorporated, compared with pure PP, the impact strength of the composite increased from 7.8 kJ/m² to 35.3 kJ/m², the tensile strength from 15.8 MPa to 37.9 MPa, the hardness increased by 57%, and the Vicat softening temperature increased by 16%.

Keywords

Ramie Fiber, Polypropylene, Graphene Oxide (GO), Composite Material, Mechanical Properties

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

随着环境污染和资源枯竭问题的日益突出, 开发高性能绿色复合材料已成为材料领域重要的研究方向[1]。植物纤维具有可降解、可再生、成本低等优点, 被视为合成纤维的理想替代品, 展现出巨大应用潜力[2]。其中, 苧麻纤维具有优良的比强度和比模量, 且我国苧麻资源丰富, 是极具开发价值的天然增强体。聚丙烯(PP)作为通用热塑性树脂, 是制备植物纤维增强复合材料的常用基体[3][4]。但是, 苧麻纤维表面含有大量亲水性羟基, 与疏水性的聚丙烯界面结合很差, 从而使得所制备的复合材料在受力时易发生纤维拔出与脱粘, 从而显著降低材料的力学性能[5]。因此, 怎样有效改善苧麻与聚丙烯基体相容性, 是制备高性能复合材料的关键[4][6]-[8]。近年来, 性能优异的氧化石墨烯(GO)表面富含羟基、羧基、环氧基等官能团[9], 且具有很大的比表面积和独特的褶皱结构[10], 使其既能与苧麻纤维表面的极性基团形成氢键和共价键, 又能与聚丙烯基体产生桥梁互锁和 π - π 堆积作用, 成为理想的媒介[11][12]。本研究, 通过 GO 对苧麻纤维进行表面改性, 可望提升纤维与基体间的界面结合强度, 以制备力学性能优良的复合材料, 为天然纤维增强热塑性塑料的高值化应用提供实验依据和技术参考。

2. 实验部分

2.1. 主要实验仪器设备

双螺杆挤出机, SHJ-20, 南京杰恩特机电; 微型注塑机, SZS-15, 武汉瑞鸣实验仪器; 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; 扫描电子显微镜, SEM500, 国仪量子。

2.2. 原料和药品试剂

苧麻, 麻秆纤维, 湖南麻升洞庭公司; 聚丙烯(PP), 宁夏宝丰能源集团; 马来酸酐(MA), 分析纯, 国药集团; 氧化石墨烯, 分析纯, 国药集团; 果胶复合酶, 淄博联特; 尿素, 分析纯; 国药集团; 乳化剂, op-10, 天津市恒兴化学试剂; 浓硫酸, 分析纯, 成都科隆化学; 氢氧化钠, 分析纯, 天津市恒兴化学试剂。

2.3. 苧麻预处理

聚丙烯为非极性结晶性热塑性高分子, 其分子链上缺乏可与植物纤维表面形成强相互作用的极性基团。而苧麻纤维表面富含极性的羟基, 其直接与 PP 共混会导致团聚和界面处存在明显的空隙和缺陷。当复合材料受到外力时, 应力无法有效从基体传递到纤维, 纤维容易从基体中拔出, 材料力学性能远低于理论预期[13] [14]。为改善苧麻与基体 PP 的相容性, 有必要对苧麻进行表面疏水改性。然而, 天然的苧麻纤维在提取过程中常残留的胶质(果胶、半纤维素、木质素等)会包裹纤维表面, 阻碍改性剂与纤维的有效结合。因此, 在改性前需要对苧麻纤维进行分段脱胶处理[14] [15]。

2.3.1. 裁剪与脱胶

将 1000 g 苧麻纤维裁剪为 1~1.5 cm 的短纤维, 于 100℃ 水煮 1 h 后清洗放入水中, 加入 50 g 尿素和 10 g 乳化剂 op-10 浸没 24 h 进行润滑。捞出清洗后放入 0.3% 的硫酸中浸泡 1 h, 捞出后清洗。再置入 2% 的果胶复合酶水溶液中, 在 50℃ 回流 10 h 后捞出敲打 400 次脱去残余果胶。最后用去离子水清洗 3~5 遍, 去除水溶性杂质后于 80℃ 干燥 10 h 至恒重, 冷却, 备用。

2.3.2. 碱处理

将上述苧麻短纤维放入适量的 0.5 wt% NaOH 溶液中室温浸泡 12 h 后, 于 80℃ 水浴下分别搅拌 1 h、2 h、3 h, 设置空白对照组; 搅拌完成取出纤维后用去离子水清洗 3~5 遍, 再次 80℃ 干燥 10 h 至恒重, 装袋备用。

2.4. 氧化石墨烯(GO)改性苧麻

取适量的最优碱预处理后制备的苧麻纤维, 分别浸入 0.5、1、2、3 mg/mL 的 GO 水溶液中, 搅拌 5 min 后静置 0.5 h 后烘干至恒重, 得到不同 GO 浓度改性的苧麻纤维。

2.5. GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料的制备

将 GO 改性的苧麻分别与 PP 按照质量分数(0、0.2、0.5、2、5 wt%)进行预混合加入质量分数为 1% 的马来酸酐(配方见表 1), 放入混合机高速混合 3~5 min, 确保分散均匀制备预混料。后将预混料投至挤出机进行挤出切粒, 设置一至五区温度分别为 165、175、180、180、185℃, 机头和筒体温度分别为 170、185℃, 螺杆转速 150 r/min。将挤出粒料干燥除去水分后进行注塑成型(设置模具温度 50℃, 料筒温度 185℃), 注塑成长为 85*6*10 mm 样条和及长 120 mm、颈长 24 mm、颈宽 3 mm、厚 2 mm 的样条。

Table 1. Raw materials formula of RF/PP composites

表 1. 苧麻纤维/聚丙烯复合材料的原料配方

试样编号	聚丙烯/%	GO 改性苧麻纤维/%	马来酸酐/%
0	99	0	1
1	98.8	0.2	1

续表

2	98.5	0.5	1
3	97	2	1
4	94	5	1

2.6. 测试与表征

- 1) 微观形貌表征：改性前后苧麻喷金后采用扫描电子显微镜进行观察。
- 2) 力学性能测定：拉伸强度按国标 (GB/T1040-1992) 测试，拉伸速率 2 mm/s。冲击强度按 GB/T1043-1993 采用简支梁方法测试。洛氏硬度按 GB/T 3398.2-2008 测试。
- 3) 维卡软化点温度的测定：按照 GB/T 1634-2019 检测，样条去毛边，载荷 50 N，升温速率 120℃/h。

3. 结果与讨论

3.1. 苧麻形貌分析

图 1 为碱处理和 GO 改性前后苧麻纤维扫描电镜图。由图 1(a)和图 1(b)易见未改性的苧麻比较光滑，但仍存在一些杂质。由图 1(c)可见，经过氢氧化钠改性后的纤维表面明显更为粗糙，且出现裂痕和褶皱。由图 1(d)可知，经氢氧化钠与 GO 改性处理后，苧麻表面的裂纹和褶皱明显减少，可推断 GO 与苧麻纤维素分子上的多个羟基相连，促使形成了更为稳定的化学结构。

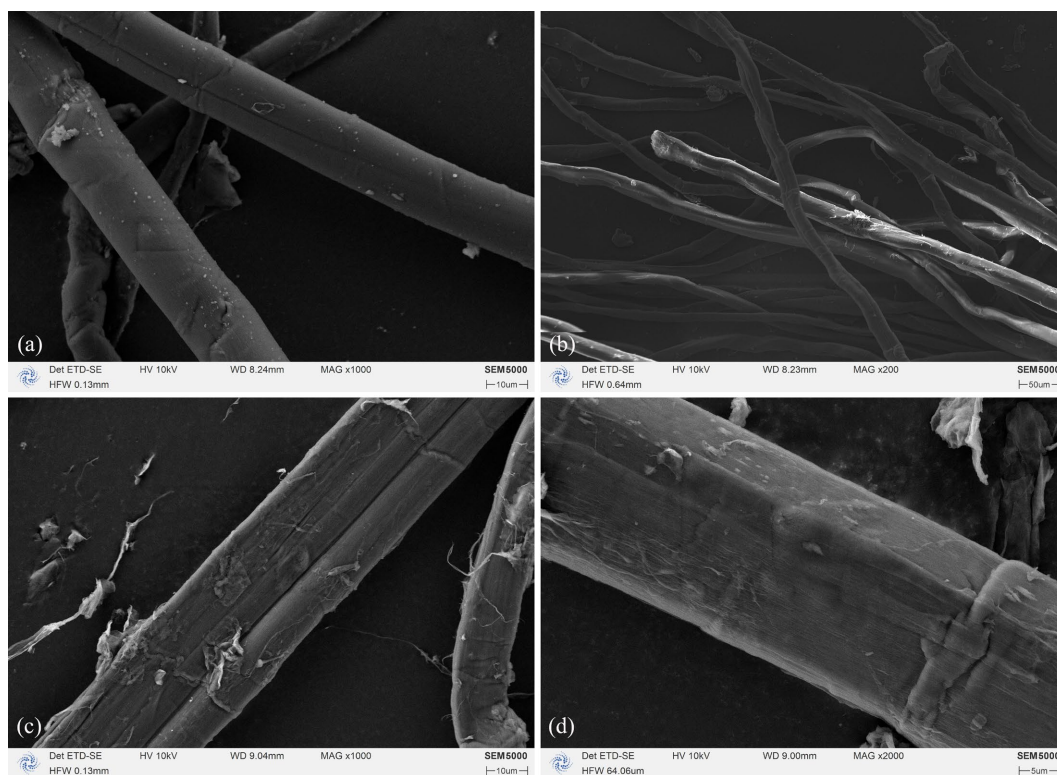


Figure 1. Scanning electron microscopy image of ramie fibers; (a) and (b) are unmodified ramie, (c) is alkali treated modified ramie, and d is sequentially alkali treated and GO modified ramie)

图 1. 苧麻纤维扫描电镜图；(a) (b) 为未改性苧麻，(c)为碱处理改性苧麻，(d)为碱处理 + GO 改性苧麻)

3.2. 复合材料力学性能分析

3.2.1. 复合材料的冲击性能

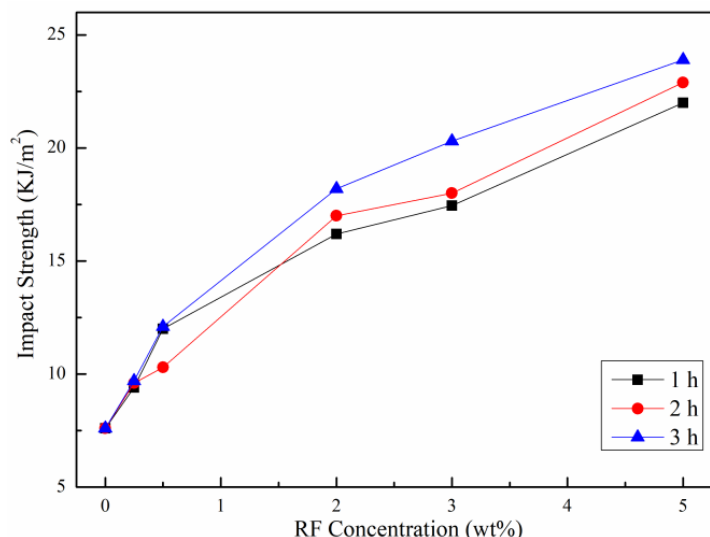


Figure 2. Impact strength of polypropylene composites reinforced by RF treated with alkaline for different periods of time
图 2. 经不同时间碱处理的苎麻增强聚丙烯复合材料的冲击强度

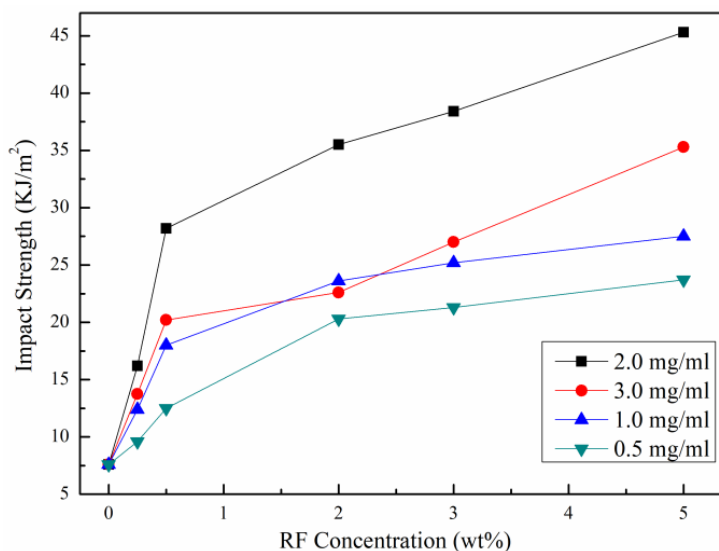


Figure 3. Impact strength of polypropylene composites reinforced by RF modified with different GO contents under alkaline treatment for 3 hours
图 3. 碱处理 3 h 下不同 GO 含量改性苎麻增强聚丙烯复合材料的冲击强度

图 6 为不同碱处理时间改性苎麻增强聚丙烯复合材料的冲击强度图，图 3 为碱处理 3 h 但不同 GO 含量改性不同含量苎麻所制备的聚丙烯复合材料的冲击性能图。冲击强度是评估聚丙烯材料冲击性能的指标，它表示聚丙烯材料在受到冲击和韧性力量所作用下，能够承受多大的冲击载荷而不破裂。评估聚丙烯材料的韧性和耐磨性能是否优异，主要用冲击强度来表示。由图可知，GO 改性苎麻/聚丙烯复合材料的冲击强度随着碱处理时间和苎麻含量的增加而增加，从而确定了最佳碱处理时间为 3 h。但

随着 GO 含量的增加, 冲击强度呈先增后减的趋势, 这是由于低浓度时氧化石墨烯的界面增强效应占主导, 而高浓度时其自身的团聚效应则引发缺陷并导致冲击强度下降; 在上升阶段: GO 表面富含羟基、羧基等极性官能团, 能与苧麻纤维上的极性基团形成强氢键网络; 同时, 其表面的褶皱结构能与 PP 基体产生“机械互锁”效应。这些作用充当了连接极性纤维与非极性 PP 基体的“桥梁”, 显著增强界面结合力, 而在下降阶段: GO 过量添加时可能从纤维表面脱离, 进入 PP 基体中形成独立的、结合较差的相分离区域。这不仅破坏了原本完整的界面结构, 破坏了应力的连续传递路径, 这些弱界面还会在冲击时成为裂纹源, 加速材料的破坏。纯聚丙烯材料的冲击强度为 7.8 KJ/m^2 , 在苧麻含量为 5%, 碱处理时间为 3 h, GO 浓度为 2.0% 时, 复合材料冲击强度为 45.3 KJ/m^2 , 而其他条件相同但 GO 浓度为 3% 时, 复合材料冲击强度为 35.3 KJ/m^2 。由此可以得出, 在碱处理 3 h 条件下, 2.0% GO 浓度改性苧麻复合材料的冲击强度更为优异。

3.2.2. 复合材料的拉伸性能

(1) 氧化石墨烯改性苧麻纤维/聚丙烯复合材料的拉伸强度

图 4 为不同碱处理时间改性苧麻增强聚丙烯复合材料的拉伸性能图, 图 5 为碱处理 3 h 但不同 GO 含量改性苧麻所制备的聚丙烯复合材料的拉伸强度图。由图看出, 碱处理时间和 GO 浓度及苧麻含量与 GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料的拉伸性能呈正相关趋势, 其中纯聚丙烯材料的拉伸强度为 15.8 MPa , 当苧麻含量为 5%, 碱处理时间为 3 h, GO 浓度为 3.0% 时, 复合材料拉伸强度为 37.9 MPa 。而对比随 GO 浓度增加复合材料冲击强度先增后减的趋势, 拉伸强度在 GO 浓度为 3.0% 时, GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料拉伸强度仍呈现上升趋势, 根本原因在于 GO 与苧麻纤维有较高的界面结合能, 在 GO 包覆下苧麻纤维与聚丙烯复合材料的脆性得到提升, 但此时过多的 GO 也使得材料发生团聚效应而降低了冲击强度。此外, 随着苧麻纤维含量的增加逐渐增大, 当苧麻纤维含量大于 2% 时, 增大趋势变缓, 这是由于苧麻纤维在复合材料界面发生团聚现象, 会出现应力集中, 因此在拉伸的过程中, 由于缺陷的产生进一步出现裂纹, 使得拉伸强度增大趋势变缓。综上, 经过碱处理和 GO 改性后的苧麻/聚丙烯复合材料的拉伸强度有较好的提升。

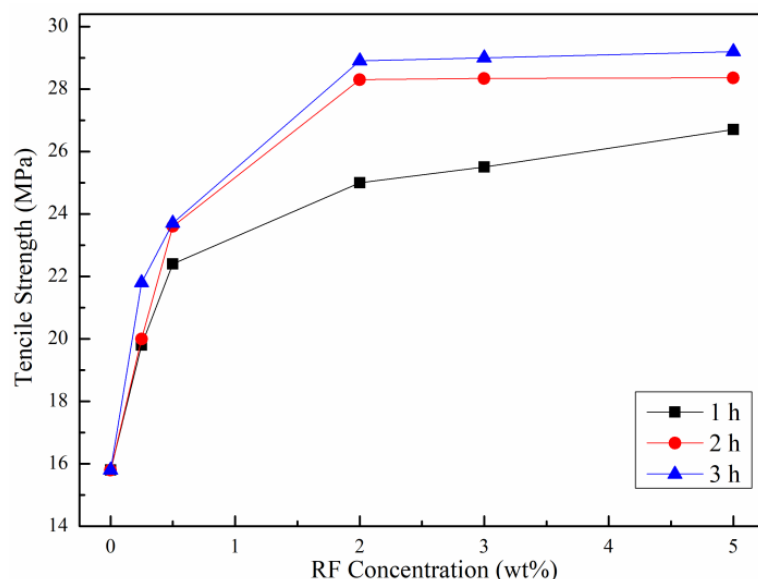


Figure 4. Tensile strength of polypropylene composites reinforced by RF treated with alkaline for different periods of time
图 4. 经不同时间碱处理的苧麻增强聚丙烯复合材料的拉伸强度

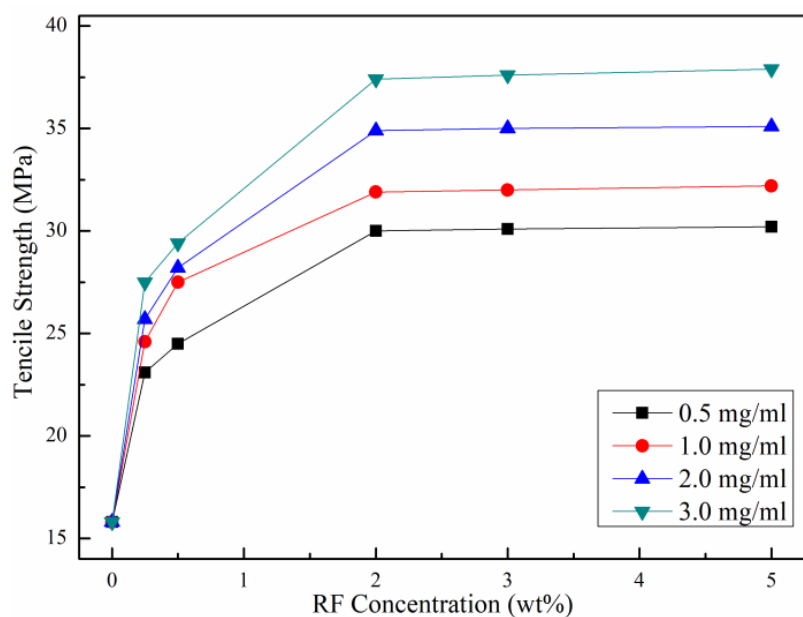


Figure 5. Tensile strength of polypropylene composites reinforced by RF modified with different GO contents under alkaline treatment for 3 hours

图 5. 碱处理 3 h 下不同 GO 含量改性苈麻增强聚丙烯复合材料的拉伸强度

(2) 复合材料的断裂伸长率

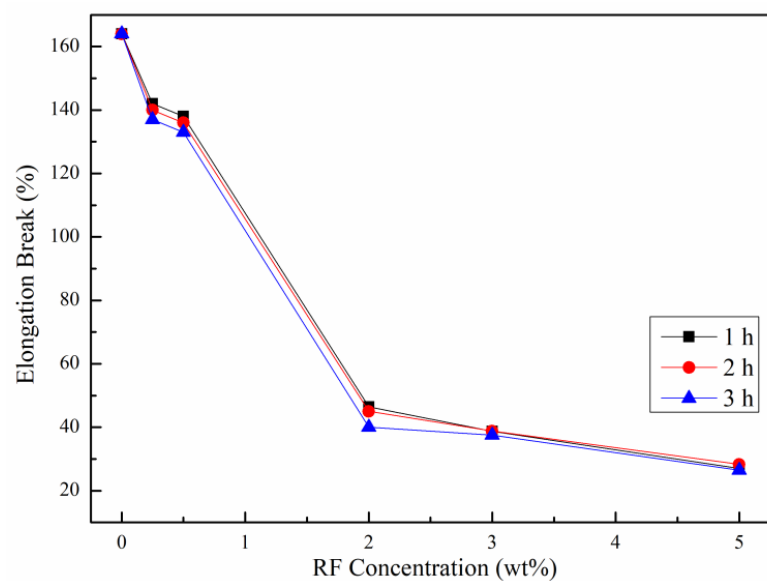


Figure 6. Breaking elongation of polypropylene composites reinforced by RF treated with alkaline for different periods of time

图 6. 碱处理不同时间苈麻增强聚丙烯复合材料的断裂伸长率

图 7 为不同碱处理时间改性苈麻增强聚丙烯复合材料的断裂伸长率图, 图 7 为碱处理 3 h 但不同 GO 含量改性不同含量苈麻所制备的聚丙烯复合材料的断裂伸长率图。据图可看出, GO 改性苈麻/聚丙烯复合材料的断裂伸长率在宏观上随碱处理时长、GO 浓度及苈麻用量的提高而不断降低。其中, 纯聚丙烯的

断裂伸长率为 164%；当苧麻含量为 5%、碱处理时间为 3 h、GO 浓度为 3% 时，复合材料的断裂伸长率降至 18%。原因在于 GO 是刚性很高的二维纳米片层。均匀分散的 GO 会与 PP 分子链形成强界面结合(氢键等)强烈限制了 PP 分子链在受拉伸时的滑移、重排和取向，并且当 GO 浓度过高发生团聚时，团聚体本身是缺陷。在拉伸过程中，裂纹很容易在这些点萌生并快速扩展，导致材料发生脆性断裂，进一步降低断裂伸长率。苧麻在回收聚丙烯中分散不均，局部聚集易引发应力集中，削弱了基体的韧性和延展性，从而导致 GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料的断裂伸长率降低。同时，氢氧化钠过度刻蚀会在纤维表面形成深沟槽或缺陷，这些缺陷在拉伸时成为裂纹萌生点，促使纤维过早断裂，进一步减小断裂伸长率。

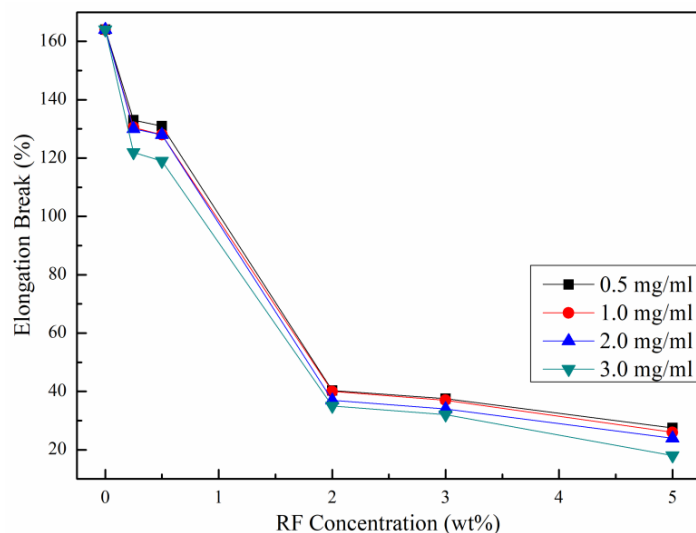


Figure 7. Breaking elongation of polypropylene composites reinforced by RF modified with different GO contents under alkaline treatment for 3 hours

图 7. 碱处理 3 h 下不同 GO 含量改性苧麻增强聚丙烯复合材料拉断时的断裂伸长率

3.2.3. 复合材料的硬度

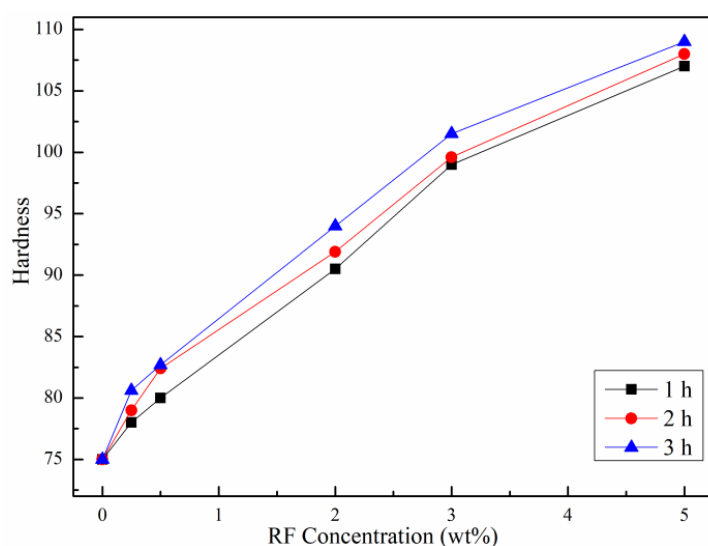


Figure 8. Hardness of polypropylene composites reinforced by RF treated with alkaline for different periods of time

图 8. 碱处理不同时间苧麻增强聚丙烯复合材料的硬度

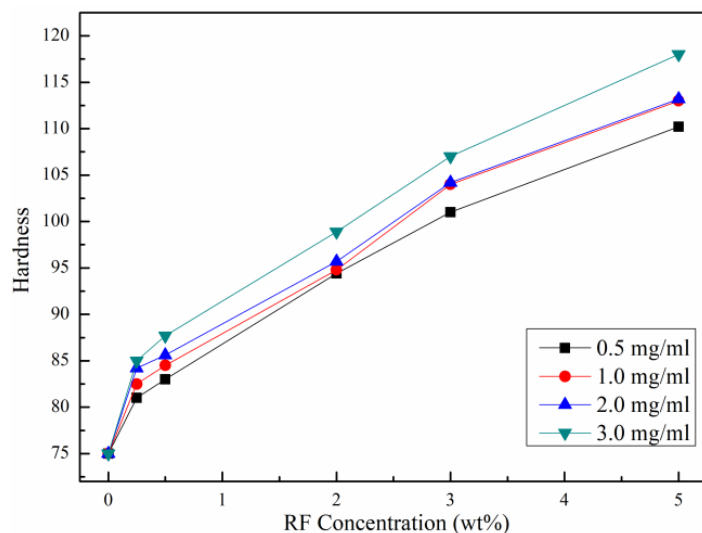


Figure 9. Hardness of polypropylene composites reinforced by RF modified with different GO contents under alkaline treatment for 3 hours

图 9. 碱处理 3 h 下不同 GO 含量改性苧麻增强聚丙烯复合材料的硬度

图 8 为不同碱处理时间改性苧麻增强聚丙烯复合材料的硬度图，图 9 为碱处理 3 h 但不同 GO 含量改性苧麻所制备的聚丙烯复合材料的硬度图。由图可知，宏观下 GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料的硬度随着碱处理时间和 GO 浓度及苧麻含量的增加而增加，纯聚丙烯材料的硬度为 75。苧麻含量为 5%，碱处理时间为 3 h，GO 浓度为 3.0% 时，复合材料的硬度为 118，对比纯聚丙烯材料硬度提升了 57%。苧麻含量是决定硬度的关键性因素，因为苧麻纤维是结晶纤维素，其硬度、模量显著高于 PP 基体。根据复合材料混合定律，增加高硬度相的体积分数会单调提高整体硬度，且在 GO 的辅助下，纤维与基体界面结合良好，应力能有效从基体传递到纤维，进一步放大了纤维对硬度的贡献。

3.3. 复合材料的耐热性能分析

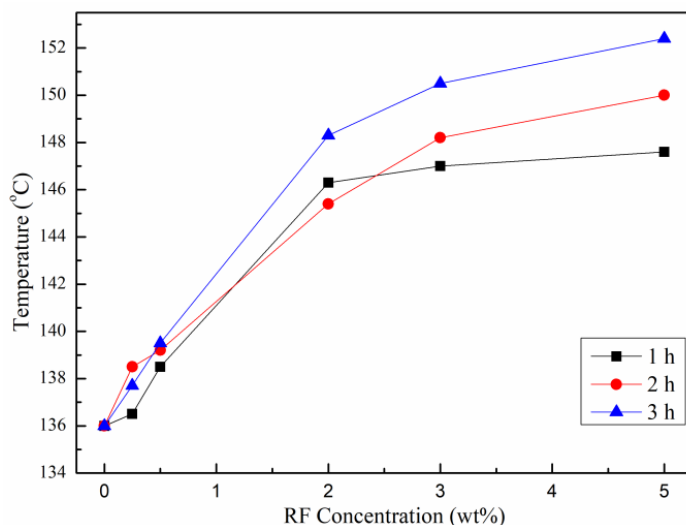


Figure 10. Vicat softening point temperatures of polypropylene composites reinforced by RF treated with alkaline for different periods of time

图 10. 碱处理不同时间苧麻增强聚丙烯复合材料的维卡软化点温度

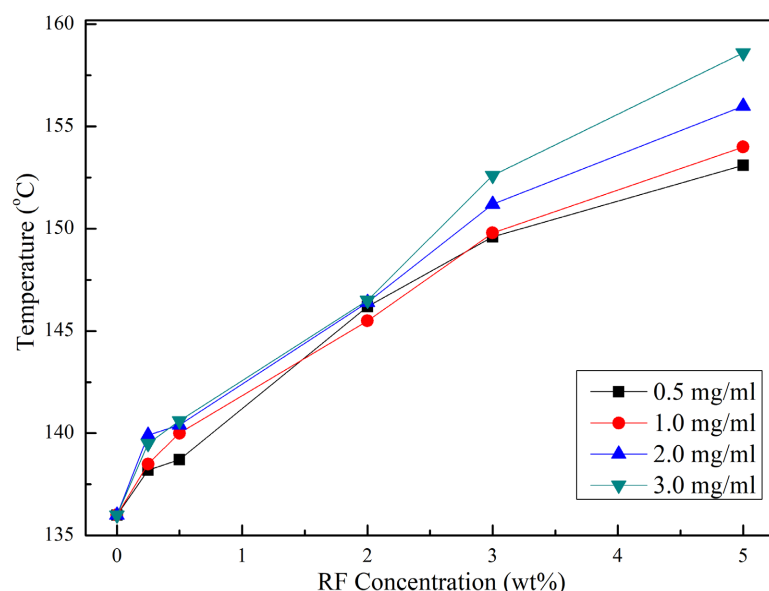


Figure 11. Vicat softening point temperatures of polypropylene composites reinforced by RF modified with different GO contents under alkaline treatment for 3 hours

图 11. 碱处理 3 h 下不同 GO 含量改性苧麻增强聚丙烯复合材料的维卡软化点温度

图 10 为不同碱处理时间改性苧麻增强聚丙烯复合材料的维卡软化点温度图，图 11 为碱处理 3 h 但不同 GO 含量改性苧麻所制备的聚丙烯复合材料的维卡软化点温度图。由图可知，从宏观层面看，GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料的维卡软化点随碱处理时间、GO 浓度和苧麻含量的增大而上升；纯聚丙烯的维卡软化点为 136℃，加入苧麻纤维后，复合材料的维卡软化温度急剧上升，且随纤维含量的增加而进一步升高。当苧麻含量为 5%、碱处理 3 h、GO 浓度 3.0% 时，维卡软化点达到 158.6℃，较纯聚丙烯提高了约 16%。这主要归因于苧麻纤维的引入使 GO 改性苧麻/聚丙烯复合材料的刚度显著增大，进而提升了材料的耐热性。

4. 结论

(1) 本研究成功地运用碱处理、氧化石墨烯改性相结合的方法将苧麻进行了表面化学改性，并以此制备了不同苧麻含量的聚丙烯复合材料，发现了随着苧麻含量的增加，材料的力学性能和耐热温度得到了改善。

(2) 研究了不同碱处理时间后苧麻对所制备的复合材料力学性能及热稳定性能的影响，确定了最佳处理时间为 3 小时。

(3) 对比研究了不同石墨烯浓度改性下苧麻对复合材料性能的影响。研究发现随着石墨烯浓度的增大，材料的拉伸性能、硬度、软化点温度得到了一定程度的提升。而对于冲击强度，则要求是浓度不能太大，硬度提升的同时，导致材料变脆性。

基金项目

国家级大学生创新训练项目(项目编号：202611527022)。

参考文献

- [1] 陈学君. 绿色复合材料发展现状与挑战[J]. 云南化工, 2025, 52(5): 26-29.
- [2] 陈留群. 注塑级 PP 基植物纤维增强材料开发[J]. 上海服饰, 2025, 26(5): 28-30.

- [3] 刘聪, 夏绍灵, 许纪贤, 等. 功能化氧化石墨烯改性酚醛树脂微发泡复合材料的制备与性能[J]. 复合材料科学与工程, 2025(4): 109-116.
- [4] 聂会捷, 林海滨, 杨晓慧, 等. 氧化石墨烯改性苧麻/聚丙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 纺织报告, 2017(11): 48-49.
- [5] 杨熙. 氧化石墨烯和石墨烯纳米材料制备及其重金属吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
- [6] 赵汪洋, 尹朝清, 苏尧天, 等. 苧麻增强 PP 复合材料的缠结结构与性能[J]. 塑料, 2018, 47(5): 59-63.
- [7] Banowati, L., Gita, Y. and Chitraningrum, N. (2025) Mechanical Characteristics of Shear Strength of Ramie Fiber/Epoxy and Ramie-E-Glass/Epoxy Hybrid Composites. In: *Advances in Engineering Research*, Atlantis Press International BV, 111-118. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-668-0_14
- [8] Abdurrahman, I., Wijaya, R., Asri, L.A.T.W. and Wirawan, R. (2025) Mechanical Properties of Ramie Fabric Reinforced Polypropylene Composites. *Materials Science Forum*, **1160**, 31-38. <https://doi.org/10.4028/p-1urwt0>
- [9] 杨卓. 纤维表面处理对苧麻增强聚丙烯复合材料界面性能及老化性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2016.
- [10] 张为军, 薛忠民, 王欣, 等. 纤维增强复合材料典型应用与前景展望[J]. 复合材料科学与工程, 2024(S1): 30-37.
- [11] Dang, C.Y., Shen, X.J., Nie, H.J., *et al.* (2019) Enhanced Interlaminar Shear Strength of Ramie Fiber/Polypropylene Composites by Optimal Combination of Graphene Oxide Size and Content. *Composites Part B: Engineering*, **168**, 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.080>
- [12] 霍琛, 陈欢, 杜伦. 氧化石墨烯-微波改性对麻纤维表面性质与应用性能的影响[J]. 印染助剂, 2025, 42(1): 23-28.
- [13] 王潇. 碳/苧麻混杂纤维增强复合材料力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2025.
- [14] 章倩. 苧麻增强聚丙烯复合材料界面性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 东华大学, 2015.
- [15] 贾满兰. 苧麻不同部位品质性状及脱胶工艺的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2016.