PLA协同纳米$CaCO_3$、BF增韧PP复合材料性能研究

龙勇益[1,2],杨 婷[2],叶有明[1,2]*

(1.广西无机材料绿色制备与应用重点实验室,广西 来宾 546199;
2.广西科技师范学院化学与材料工程学院,广西 来宾 546199)

摘 要:以聚丙烯(PP)为基体,加入改性后的甘蔗渣纤维(BF)、纳米$CaCO_3$和聚乳酸(PLA),通过共混挤出制备PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料,探究加入PLA、BF和纳米$CaCO_3$后复合材料内部结构及其性能的关系。结果表明:添加PLA可提高复合材料的相容性,添加BF可提高材料的结晶度,添加纳米$CaCO_3$可增强材料的热稳定性。当BF质量分数为10%、PLA质量分数为20%、纳米$CaCO_3$质量分数为5%时,PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料的力学性能最佳,拉伸强度为25.59 MPa,冲击强度为9.822 9 kJ/m^2。加入PLA、BF和纳米$CaCO_3$制备的复合材料力学性能均有不同程度的提高。研究所提出的新型复合材料兼具低碳属性与成本优势,可应用于汽车制造、绿色包装等可持续发展需求迫切的产业领域。

关键词:木塑复合材料;聚乳酸;甘蔗渣纤维;纳米碳酸钙;聚丙烯
中图分类号:TQ317.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0126-07
DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.022

Study on Properties of PLA Synergistic Nano-$CaCO_3$ and BF Toughened PP Composites

LONG Yongyi[1,2], YANG Ting[2], YE Youming[1,2]*
(1. Guangxi Key Laboratory of Green Preparation and Application of Inorganic Materials, Laibin 546199, China; 2. College of Chemical and Materials Engineering, Guangxi Science and Technology Normal University, Laibin 546199, China)

Abstract: Polypropylene (PP) -based PP/PLA/BF/$CaCO_3$ composites were prepared by melt-blending extrusion with modified bagasse fiber (BF), nano-$CaCO_3$, and polylactic acid (PLA). The relationship between the internal structure and properties of the composites after the addition of PLA, BF, and nano-$CaCO_3$ was investigated. The results showed that the addition of PLA improved the compatibility of the composites, the addition of BF increased the crystallinity of the material, and the addition of nano-$CaCO_3$ enhanced the thermal stability of the material. When the mass fraction of BF was 10%, the mass fraction of PLA was 20%, and the mass fraction of nano-$CaCO_3$ was 5%, the mechanical properties of the PP/PLA/BF/$CaCO_3$ composites were optimal, with a tensile strength of 25.59 MPa and an impact strength of 9.822 9 kJ/m^2. The mechanical properties of the composites prepared with the addition of PLA, BF, and nano-$CaCO_3$ were improved to varying degrees. The novel composite material proposed in this study combines low-carbon attributes with cost advantages, and can be applied in industrial sectors with urgent sustainability demands such as automotive manufacturing and green packaging.

Keywords: Wood-plastic composite; PLA; BF; Nano-$CaCO_3$; PP

木塑复合材料(WPC)泛指以植物纤维与热塑性或热固性塑料为原料复合而成的一类材料,具有环境友好、可持续利用等特点,不需要使用有毒化学品即可获得良好的使用耐久性[1]。从工程应用角度看,这类生物基复合材料有助于提高机械强度与声学性能,减轻制件质量与燃料消耗,降低生产成本,实现资源循环利用,缓解因塑料及天然纤维废弃物不当处理带来的环境压力[2]。

聚丙烯(PP)因密度低、强度高、性价比优良而成为重

收稿日期Submitted date 2025-03-10;修回日期Revised date 2025-04-08;录用日期Accepted date 2025-05-12
基金项目:广西重点实验室运行补助项目(21-220-09);广西科技师范学院重点科研项目(GXKS2025ZD020)
*联系人,15077221255@163.com
引用本文:龙勇益,杨婷,叶有明.PLA协同纳米$CaCO_3$、BF增韧PP复合材料性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):126-132.
Citation:LONG Y Y, YANG T, YE Y M. Study on properties of PLA synergistic nano-$CaCO_3$ and BF toughened PP composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 126-132.

要的通用塑料，但也存在成型收缩率大、力学性能不足、断裂韧性差及不可降解等缺点，限制其应用领域的拓展。共混、共聚及填充增强等方法被广泛用于改善PP的综合性能[3-4]。聚乳酸(PLA)是一种生物可降解聚合物，价格较高，韧性及热稳定性偏低，其加工温度窗口与应用领域与PP相近[5]，将PLA与PP共混有望提升PP的综合性能。然而，两相的结晶行为对复合材料的变形与降解行为具有显著影响，可通过引入成核剂进行调控。甘蔗渣作为制糖工业副产品，是一种经济、可降解的天然植物纤维[6]，传统上多用于肥料和燃料，近年来其高值化利用受到关注。采用甘蔗渣纤维(BF)改性PP既可实现资源再利用，又能改善PP的力学性能。由于BF表面富含亲水性氢键基团，与非极性聚合物基体相容性较差，经改性处理可以提高界面结合力[7]。纳米碳酸钙($CaCO_3$)作为一种无机纳米颗粒，粒径小、比表面积大，可作为无机成核剂，经表面改性后可填充于有机基体，降低复合材料孔隙率[8]，调节PLA结晶行为，改善BF与聚合物基体的相容性[9-10]，从而协同提升复合材料的热性能与力学性能。近年来，利用改性BF、纳米$CaCO_3$及PLA与PP共混制备高性能复合材料的研究日益受到关注[2,11]。SNOWDON等[12]研究了生物基碳填料对PP/PLA/羟基丁酸-羟基戊酸生物复合材料性能的影响，发现引入生物基碳与PLA填料后，复合材料的力学性能优于PP。BARTCZAK等[13]报道，高密度聚乙烯与硬脂酸钙改性白垩复合材料的韧性得到显著提高。在PP/BF与PP/纳米$CaCO_3$复合材料方面，LASHGARI等[14]在PP中添加高含量的BF，发现材料的热学性能和力学性能得到改善。LUZ等[9]通过压缩与注塑成型制备了BF/PP复合材料，发现BF的添加提高了弯曲模量与刚度，但纤维与基体间界面黏附性较差。ASSAEDI等[15]将不同含量纳米$CaCO_3$掺入地质聚合物浆体，结果表明：纳米$CaCO_3$的加入显著提高了地质聚合物复合材料的抗弯强度、抗压强度、硬度及冲击性能。MAO等[16]采用微孔注塑成型技术制备了微孔PP/纳米$CaCO_3$复合材料，研究发现随着纳米$CaCO_3$含量增加(最高至6%)，复合材料的热稳定性、结晶度及力学性能均有所提高。

已有研究较多关注碱处理BF、纳米$CaCO_3$及PLA与PP共混制备二元或三元复合材料，但以4种原料同时构建四元复合材料的研究尚未见报道。本文在前期研究基础上，以PP为基体，引入改性BF、PLA与纳米$CaCO_3$，开发具有良好力学性能、可降解性及成本效益的WPC，系统研究改性BF、PLA及纳米$CaCO_3$对复合材料力学性能的影响，探讨添加BF、纳米$CaCO_3$及PLA后PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料内部结构与性能之间的关联，以期为BF与$CaCO_3$的高值化利用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

甘蔗渣，广西来宾湘桂糖业有限责任公司；PP，100目，东莞市华创塑胶制品有限公司；PLA，100目，东莞市华创塑胶制品有限公司；纳米$CaCO_3$，100目，广西汇宾钙业科技有限公司；钛酸酯偶联剂，HY311，淮安和元化工有限公司；铝酸酯偶联剂，HYA2，淮安和元化工有限公司；氢氧化钠(NaOH)，分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

多功能粉碎机，800A，永康市玖蓝五金制品有限公司；强力搅拌机，H2010G，上海越众仪器设备有限公司；Wellzoom桌面挤出机，B型，深圳市米思达科技有限公司；精密注塑机，TY-7003，江苏天源试验设备有限公司；实验电子万能试验机，TY8000B，江苏天源试验设备有限公司；悬臂梁冲击试验机，TY-4021，江苏天源试验设备有限公司；电热鼓风干燥箱，101-5A，鹤壁市华泰仪器仪表有限公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，IRAffinity-1S，岛津企业管理(中国)有限公司；热重分析仪(TG)，STA 2500 Regulus，耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司；X射线衍射仪(XRD)，Miniflex600，日本Rigaku公司；扫描电子显微镜(SEM)，GeminiSEM300，德国Carl Zeiss公司。

1.3 样品制备

1.3.1 原料预处理

BF预处理：利用多功能粉碎机将BF进行粉碎，过80目筛，放入80 ℃电热鼓风干燥箱中，干燥备用。按照固液比1∶20称取BF和0.8% NaOH溶液，利用强力搅拌机搅拌使碱液与BF充分接触反应。于25 ℃连续搅拌反应2 h。反应结束后，用蒸馏水将碱处理后的BF洗至中性[pH值为(7.0±0.5)]，置于电热鼓风干燥箱中干燥2 h后，加入1%钛酸酯偶联剂对碱处理后的BF进行表面改性。

纳米$CaCO_3$的预处理：将纳米$CaCO_3$放入电热鼓风干燥箱中进行干燥，干燥后取出备用。加入1%铝酸酯偶联剂进行表面处理，可以有效改善复合材料的力学、光学、老化等特性。

1.3.2 复合材料制备

原料预混：将预处理后的BF、纳米$CaCO_3$、PLA和PP按照一定比例进行混合。采用强力搅拌机在1 300 r/min下搅拌均匀。使各原料充分混合，以便后续充分反应。

熔融挤出：利用Wellzoom桌面挤出机挤出造粒。其中1区为190 ℃，2区为185 ℃，转速为70 r/min，剪切成颗粒，保持干燥以备用。

注塑成型：将制备好的颗粒通过精密注塑机进行混炼制样片。其中，1区温度为190 ℃，2区为185 ℃，3区为180 ℃。注塑位置为37 mm时，制备规格为150 mm×10 mm×4 mm的哑铃形样片。注塑位置为30 mm时，制备规格为80 mm×10 mm×4 mm的缺口型样片。

1.3.3 复合材料工艺优化方案设计

单因素试验设计：称取质量分数为0、5%、10%、15%、20%碱处理后的BF，分别加入1%的钛酸酯偶联剂，经过搅拌充分接触后对BF进行表面改性。再分别加入10%改

性后的纳米$CaCO_3$、20% PLA及余量的PP，确定最佳BF含量。称取10%碱处理后的BF，再分别加入质量分数为0、5%、10%、15%、20%改性后的纳米$CaCO_3$、20% PLA及余量的PP，确定最佳纳米$CaCO_3$含量。称取10%碱处理后的BF，再分别加入10%改性后的纳米$CaCO_3$、PLA（质量分数为0、10%、20%、30%、40%）及余量的PP，确定最佳PLA含量。利用强力搅拌机在1 300 r/min速度下搅拌混合均匀。混合物料通过“熔融挤出-注塑成型”工艺制备样板，测定其拉伸强度、冲击强度，探究PLA含量对复合材料力学性能的影响。

正交优化试验设计通过单因素试验，确定BF质量分数（*A*）、PLA质量分数（*B*）、纳米$CaCO_3$质量分数（*C*）对复合材料力学性能的较优配比。利用$L_9(3^4)$正交表进行正交试验，对复合材料配比进行优化分析。表1为$L_9(3^4)$正交试验因素水平设计。

表1 $L_9(3^4)$正交试验因素水平设计

Tab.1 Factor and level design of $L_9(3^4)$ orthogonal test

水平	*A*/%	*B*/%	*C*/%
1	5	0	5
2	10	10	10
3	15	20	15

1.3.4 表征分析

为了探究添加BF、PLA、纳米$CaCO_3$后四元复合材料内部结构与其性能的关系，结合单因素和正交试验结果，设计4组样品，对其进行测试表征。表2为表征试验分组。

表2 表征试验分组

Tab.2 Characterization test grouping 单位：%

样品	w_{PP}	w_{BF}	w_{PLA}	$w_{纳米CaCO_3}$
PP/BF/$CaCO_3$	85	10	0	5
PP/PLA/ $CaCO_3$	75	0	20	5
PP/PLA/BF	70	10	20	0
PP/PLA/BF/$CaCO_3$	65	10	20	5

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：根据GB/T 1843—2008进行冲击强度测试，采用标准的缺口型样片，规格为80 mm×10 mm×4 mm，测试5组平行样品，结果取平均值。根据GB/T 1040.2—2022进行拉伸强度测试，采用标准的哑铃形样片，规格为150 mm×10 mm×4 mm，拉伸强度测试速率设定为10 mm/min，测试5组平行样品，结果取平均值。

FTIR测试：将干燥后的样品与KBr，按照1∶100的比例置于玛瑙钵体中研磨至粉末状，用药匙移取适量混合后的粉末至模具中，利用压片机在13 MPa的压力下保持30 s，制成所需的样本片，研究复合材料内部结构变化。波数范围4 000~500 cm^{-1}。

XRD测试：铜靶反射模式，管电压为40 kV，管电流为40 mA，速度为5 (°)/min，广角扫描范围为5°~80°。采用X射线衍射仪表征复合材料内部微晶结构。

SEM分析：采用扫描电子显微镜结合能量色散光谱（EDS）技术，对PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料进行分析。复合材料用液氮脆断，对断面进行喷金处理，采用扫描电子显微镜观察断面的微观结构，使用EDS进行线扫描和元素分布分析。

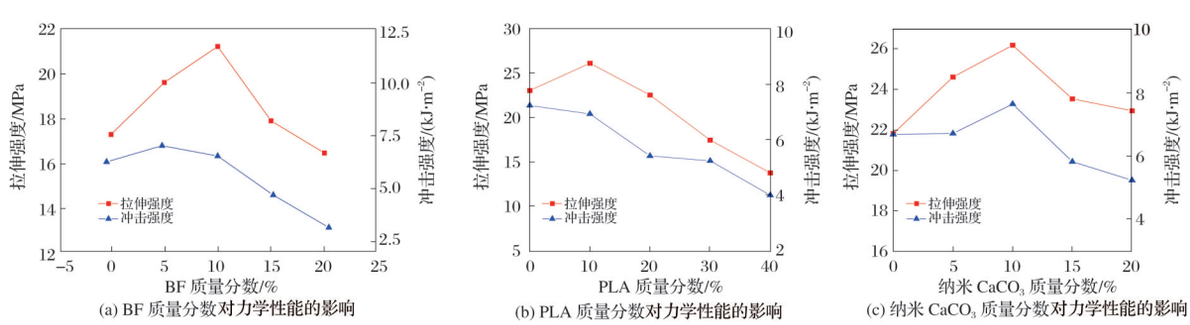
TG测试：分别准确称取4~5 mg样品和Al_2O_3，置于特定的坩埚中。在N_2气氛下，按照10 ℃/min的升温速率从室温升至800 ℃，研究复合材料内部结构与其热稳定性的关系。

2 结果与讨论

2.1 复合材料工艺优化方案

2.1.1 单因素试验

BF的质量分数分别为0、5%、10%、15%和20%。PLA的质量分数分别为0、10%、20%、30%和40%；纳米$CaCO_3$的质量分数分别为0、5%、10%、15%和20%。通过单因素试验得出最佳配比。图1为单因素试验结果。从图1可以看出，当BF质量分数为10%、PLA质量分数为10%、纳米$CaCO_3$质量分数为10%时，复合材料的力学性能最佳。



(a) BF质量分数对力学性能的影响 (b) PLA质量分数对力学性能的影响 (c) 纳米$CaCO_3$质量分数对力学性能的影响

图1 单因素试验结果

Fig.1 Results of single-factor test

2.1.2 正交试验

表3为$L_9(3^4)$正交试验拉伸强度结果。表4为拉伸强度方差分析（α=0.05）。从表3可以看出，各因素对拉伸强度影响的*R*值分别为：$R_B>R_C>R_A$，各因素对复合材料力学性能指标影响的主次顺序为：*B*>*C*>*A*，即PLA质量分数>纳米$CaCO_3$质量分数>BF质量分数。根据复合材料力学性能试验目的可知，试验指标越大越好，所以最优组合为$B_3C_1A_1$。从表4可以看出，因素*B*对复合材料的拉伸强度

影响极显著(P<0.01),因素A和因素C对复合材料拉伸强度的影响显著(P<0.05)。因此,当BF质量分数为5%、PLA质量分数为20%、纳米$CaCO_3$质量分数为5%时,PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料的拉伸强度为最佳。

表3 $L_9(3^4)$正交试验拉伸强度结果

Tab.3 Results of tensile strength of $L_9(3^4)$ orthogonal test

试验号	A	B	C	空列	拉伸强度/MPa
1	1	1	1	1	24.94
2	1	2	2	2	16.52
3	1	3	3	3	24.69
4	2	1	2	3	22.13
5	2	2	3	1	14.65
6	2	3	1	2	24.82
7	3	1	3	2	22.72
8	3	2	1	3	18.23
9	3	3	2	1	24.61
K_1	66.15	69.79	67.99	64.20	
K_2	61.60	49.40	63.26	64.06	
K_3	65.56	74.12	62.06	65.05	
k_1	22.05	23.26	22.66	21.40	
k_2	20.53	16.47	21.09	21.35	
k_3	21.85	24.71	20.69	21.68	
R	1.52	8.24	1.98	0.33	
较优水平	A_1	B_3	C_1		

表4 拉伸强度方差分析(α=0.05)

Tab.4 Variance analysis of tensile strength (α=0.05)

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
A	4.081	2	2.041	21.33	0.045	显著
B	116.175	2	58.088	607.12	0.002	极显著
C	6.553	2	3.277	34.25	0.028	显著
误差	0.191	2	0.096			
合计	127.001	8				

表5为$L_9(3^4)$正交试验冲击强度结果。表6为冲击强度方差分析(α=0.05)。从表5可以看出,各因素对冲击强度影响的R值分别为:R_B>R_C>R_A,各因素对复合材料力学性能指标影响的主次顺序为:B>C>A,即PLA质量分数>纳米$CaCO_3$质量分数>BF质量分数。从表6可以看出,PLA质量分数对复合材料的冲击强度影响显著(P<0.05)。因此,最佳组合为$B_3C_1A_2$。当BF质量分数为10%、PLA质量分数为20%、纳米$CaCO_3$质量分数为5%时,PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料的冲击强度为最佳。

由于正交试验为部分试验,为了确保试验的精确性,需要对最优配比的复合材料进行验证试验。表7为验证试验结果分析。从表7可以看出,当BF质量分数为10%、PLA质量分数为20%、纳米$CaCO_3$质量分数为5%时,即组合$A_2B_3C_1$,复合材料的力学性能为最佳。

2.2 复合材料力学性能分析

图2为复合材料的力学性能。从图2可以看出,PP/PLA/BF/$CaCO_3$具有优异的力学性能,拉伸强度为25.29 MPa,冲击强度为9.822 9 kJ/m^2。与PP/BF/$CaCO_3$复合材料相比,拉伸强度提高2.80%,冲击强度提高33.36%。这种增强可归因于PP和PLA在纳米$CaCO_3$存在下的良好相容性。在这种情况下,PLA在PP基体中从分散相转变为连续相,与PP形成网状交联结构。因此,复合材料的力学性能得到了改善。添加BF的PP/PLA/BF/$CaCO_3$与未添加BF的PP/PLA/$CaCO_3$相比,拉伸强度提高46.18%,冲击强度提高56.49%。BF是一种有效的增强剂,主要起“填充”和“架桥”作用[17]。添加适量的BF可有效提高WPC的力学性能。含有纳米$CaCO_3$的PP/PLA/BF/$CaCO_3$与不含纳米$CaCO_3$的PP/PLA/BF相比,含纳米$CaCO_3$的复合材料拉伸强度提高15.85%,冲击强度显著提高47.02%。SUN等[18]也报道纳米$CaCO_3$对聚氯乙烯(PVC)共混体系有显著的增韧效果,对PP共混体系也有一定的增韧效果。纳米$CaCO_3$具有优异的分散性,能有效填充纤维和聚合物之间的间隙[19]。当受到外力时,它能分散外力,发生形变并吸收部分能量。因此,这种作用抑制了破坏性裂缝的形成。添加适量的纳米$CaCO_3$可大大提高复合材料的力学性能。

表5 $L_9(3^4)$正交试验冲击强度结果

Tab.5 Results of impact strength of $L_9(3^4)$ orthogonal test

试验号	A	B	C	空列	冲击强度/(kJ·m^{-2})
1	1	1	1	1	6.356 9
2	1	2	2	2	4.037 2
3	1	3	3	3	8.573 5
4	2	1	2	3	6.256 9
5	2	2	3	1	4.089 2
6	2	3	1	2	9.705 4
7	3	1	3	2	3.657 2
8	3	2	1	3	5.186 1
9	3	3	2	1	8.379 9
K_1	18.967 6	16.271 0	21.248 4	18.826 0	
K_2	20.051 5	13.312 5	18.674 0	17.399 8	
K_3	17.223 2	26.658 8	16.319 9	20.016 5	
k_1	6.323	5.424	7.083	6.275	
k_2	6.684	4.438	6.225	5.800	
k_3	5.741	8.886	5.440	6.672	
R	0.943	4.449	1.643	0.872	
较优水平	A_2	B_3	C_1		

表6 冲击强度方差分析(α=0.05)

Tab.6 Variance analysis of impact strength (α=0.05)

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
A	1.357 5	2	0.678 7	1.19	0.457	
B	32.753 6	2	16.376 8	28.62	0.034	显著
C	4.051 0	2	2.025 5	3.54	0.220	
误差	1.144 3	2	0.572 1			
合计	39.306 4	8				

表7 验证试验结果分析

Tab.7 Analysis of verification test results

组合	冲击强度/(kJ·m^{-2})	拉伸强度/MPa
$A_2B_3C_1$	9.822 9	25.59
$A_1B_1C_1$	6.357 9	24.93
$A_1B_3C_1$	7.453 0	24.97

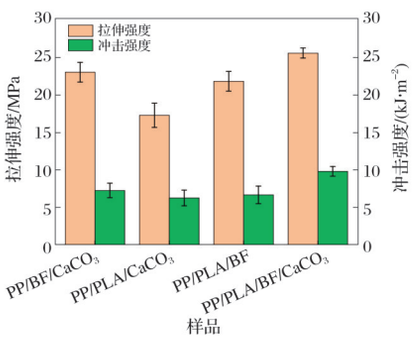


图2 复合材料的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of composites

以PP为基体，加入天然植物纤维(BF)、可降解PLA和纳米$CaCO_3$，可不同程度地改善复合材料的力学性能。其中，PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料的力学性能最为突出。

2.3 复合材料FTIR分析

图3为复合材料的FTIR谱图。从图3可以看出，3 425 cm^{-1}处的伸缩振动峰表明BF中存在O—H[20]。3 000 cm^{-1}和2 850 cm^{-1}之间的范围为PP的特征峰[21]，而1 720 cm^{-1}处为酯基中C═O的伸缩振动峰[22]。值得注意的是，PP/BF/$CaCO_3$在3 425 cm^{-1}处表现出明显的O—H伸缩振动峰。而在PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料中引入PLA后，3 425 cm^{-1}处峰几乎完全消失。这意味着加入PLA后，O—H峰会明显减弱甚至消失。PP/PLA/$CaCO_3$和PP/PLA/BF/$CaCO_3$的光谱基本上没有变化，表明预处理后BF中没有明显的O—H峰。预处理后，BF中羟基的减少有助于增强BF与聚合物之间的相容性，这与力学测试中适量BF可增强复合材料力学性能的结论相吻合。PP/PLA/BF和PP/PLA/BF/$CaCO_3$的光谱变化极小，表明添加纳米$CaCO_3$后复合材料的内部结构保持不变。总之，在PP中加入预处理过的BF、纳米$CaCO_3$和PLA可改善植物纤维与聚合物之间的相容性，从而提高复合材料的力学性能。

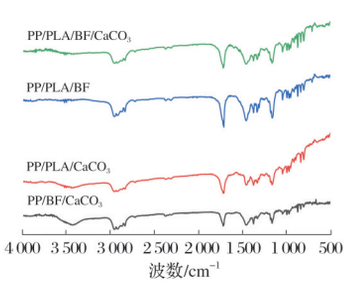
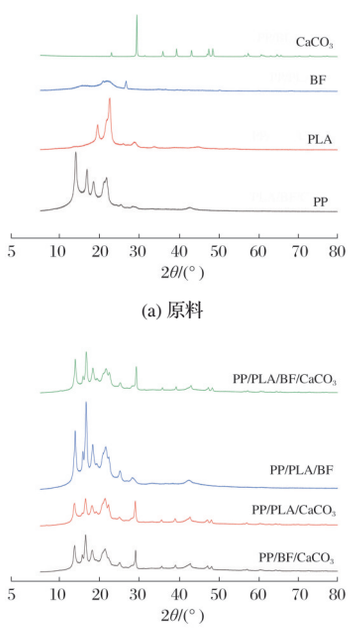


图3 复合材料的FTIR谱图

Fig.3 FTIR spectra of composites

2.4 复合材料XRD分析

图4为原料和复合材料的XRD谱图。从图4可以看出，XRD谱图中的尖峰和宽峰表明PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料中存在结晶相和非晶相。PP的特征峰出现在4.2°、17.1°、18.3°和21.5°，而PLA的特征峰出现在16.6°、19.3°、22.5°和14.9°[23-24]。此外，BF的特征峰在15°~35°范围内有多个可辨别的衍射峰[25]。与PP/PLA/BF/$CaCO_3$相比，PP/BF/$CaCO_3$在22.5°处多出了一个与PLA相对应的特征峰，复合材料成分未发生明显变化。相反，与PP/BF/$CaCO_3$相比，PP/PLA/BF/$CaCO_3$在14.2°、16.6°和18.2°处的峰值变得更加尖锐，表明BF的加入提高了复合材料的结晶度，从而改善了其整体性能。同样，与PP/PLA/BF相比，PP/PLA/BF/$CaCO_3$中14.2°、16.6°、18.2°、21.5°、25.3°和28.3°处的峰值大大减弱，表明纳米$CaCO_3$成功嵌入并均匀分散于复合材料基体中。总之，BF的引入提高了复合材料的结晶度，而纳米$CaCO_3$则更有效地融入其中，从而增强复合材料的力学性能。本研究结果与文献[25-26]报道的结果一致。



(a) 原料

(b) 复合材料

图4 原料和复合材料的XRD谱图

Fig.4 XRD patterns of materials and composites

2.5 复合材料SEM分析

图5为复合材料断面的SEM照片。从图5可以看出，不含PLA的复合材料断面明显光滑。然而，这种光滑度表明原材料之间的相容性很差，空隙很少。通过“混合”工艺，在PP中添加适量的PLA可提高相容性。相比之下，PP/PLA/$CaCO_3$和PP/PLA/BF/$CaCO_3$显示出更多的孔隙，并且在未含有BF的情况下会出现大量团聚。这主要是纳米$CaCO_3$容易团聚的固有特性造成的。相比之下，BF作为一种优异的增强剂，具有“填充”和“架桥”的双重作用，从而提高了原材料之间的相容性，改善了复合材料的力学

性能[17]。PP/PLA/BF与PP/PLA/BF/$CaCO_3$相比变化极小，表明纳米$CaCO_3$的引入不会对复合材料的内部结构产生显著影响。总之，PLA、BF和纳米$CaCO_3$的添加有助于改善复合材料界面之间的相容性。这种改善是复合材料力学性能提高的基础[27]。

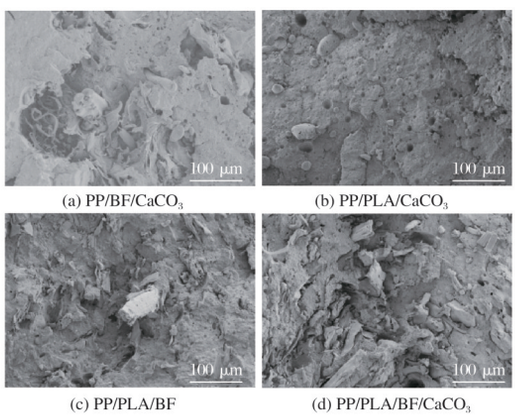


图5 复合材料断面的SEM照片

Fig.5 SEM images of cross-section of composites

图6为复合材料断面的EDS谱图。从图6可以看出，PP/PLA/BF/$CaCO_3$样品中C、O和Ca的分布最为均匀。这也说明PLA、BF和纳米$CaCO_3$的添加有助于改善复合材料界面之间的相容性。这种改善是复合材料力学性能提高的基础，与SEM分析的结果一致。

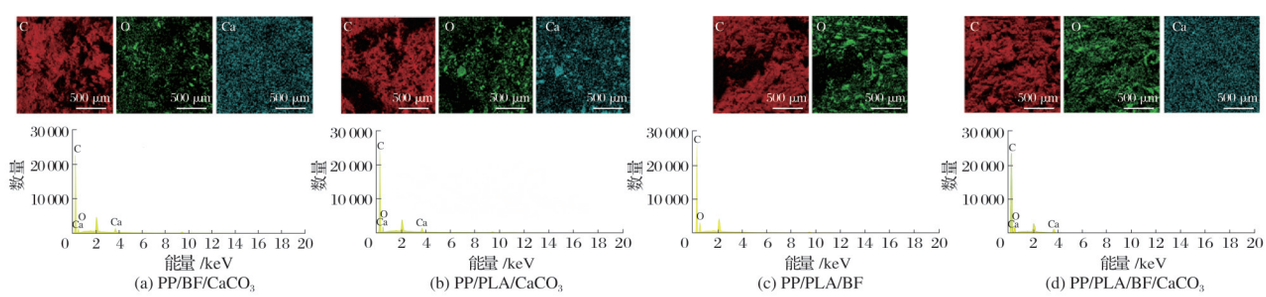


图6 复合材料断面的EDS谱图

Fig.6 EDS spectra of cross-section of composites

2.6 复合材料的TG分析

图7为复合材料的TG和DTG曲线，表8为复合材料的TG数据。从图7可以看出，在300 ℃以下，复合材料呈现出相对渐进的失重现象，这主要归因于复合材料中自由水和结合水的解吸作用。超过300 ℃后，随着温度的升高，质量会大幅减少，表现为TG曲线的急剧下降。在这一阶段，主要机制是复合材料中的半纤维成分、木质素和类似成分的热降解。此外，纤维分子中的C—O和C—C键断裂导致气体挥发，从而造成质量损失[28]。4种复合材料的最高热分解温度约为470 ℃，质量保留率分别为2.87%、6.91%、15.73%和22.96%。表8提供了质量损失5%、10%和50%时的失重温度($t_{5\%}$、$t_{10\%}$和$t_{50\%}$)。值得注意的是，BF和PLA的加入对复合材料的热稳定性有负面影响，而纳米$CaCO_3$的加入则对热稳定性有改善作用[29]。因此，PP/PLA/$CaCO_3$复合材料的热稳定性最高。

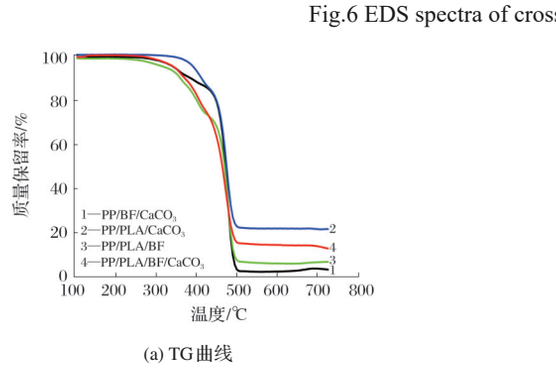


图7 复合材料的TG和DTG曲线

Fig.7 TG and DTG curves of composites

表8 复合材料的TG数据

Tab.8 TG data of composites 单位：℃

样品	$t_{5\%}$	$t_{10\%}$	$t_{50\%}$
PP/BF/$CaCO_3$	339.28	384.19	469.08
PP/PLA/$CaCO_3$	389.24	414.19	474.13
PP/PLA/BF	319.33	359.33	469.17
PP/PLA/BF/$CaCO_3$	341.79	369.29	464.15

3 结论

本文以PP为基体，添加BF、PLA、纳米$CaCO_3$等材料制备了PP/PLA/BF/$CaCO_3$复合材料。结果表明：添加BF、纳米$CaCO_3$和PLA的复合材料力学性能均有不同程度的提高。PLA可以降低BF的极性，提高复合材料的相容性。BF可以提高复合材料的结晶度，纳米$CaCO_3$可以很好地填充到复合材料中。四元复合材料各组分之间的相容性良好，可有效提高复合材料的力学性能。纳米$CaCO_3$的加入可提高复合材料的热稳定性。研究所提出的新型复合材料兼具低碳属性与成本优势，可应用于汽车制造、绿色包装等可持续发展需求迫切的产业领域。

参考文献

[1] 孙进, 刘启强. 木塑技术“变废为宝”助力绿色低碳循环发展[J]. 广东科技, 2025, 34(2): 27-30.

[2] 陈安柱, 倪飞. 车用聚碳酸酯木塑复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(1): 33-35.

[3] YU F, WU Y J, NIE X, et al. Study on bending properties of filled polypropylene composites at different temperatures[J]. Aging and Application of Synthetic Materials, 2022, 51(1): 16-17, 60.

[4] LI D X, YOU Y L, LI R F, et al. Effects of nanometer-TiO_2 surface modification and concentration on the mechanical performances of polypropylene/polyamide maleic anhydride-grafted polypropylene composite[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32 (23): 1807-1820.

[5] 王红全, 严尉之. 新能源车辆通用植物纤维增强复合材料力学及阻燃性研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(8): 54-57.

[6] LIU Y Q, LIU Y H, LI P W, et al. Research progress of several tropical plant fibers in the field of composite materials [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(3): 39-44.

[7] 李洋. 表面改性剂增强玻纤/木塑复合材料力学性能研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(6): 32-36.

[8] 熊磊, 郑化安, 宁小钢, 等. 纳米碳酸钙制备技术及其在塑料领域应用的中国专利分析[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 172-176.

[9] LUZ S M, GONÇALVES A R, DEL'ARCO A P. Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fibers reinforced polypropylene composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(6): 1455-1461.

[10] 李博雅, 章小慧, 胡克莱, 等. 甲酸预处理对聚乳酸/甲酰化蔗渣纤维素复合膜性能的影响[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(3): 115-122.

[11] 林飞帆, 李瑞雪, 史博, 等. 蔗渣纤维素的功能化改性及其应用进展[J]. 当代化工研究, 2022(22): 126-128.

[12] SNOWDON M R, MOHANTY A K, MISRA M. Miscibility and performance evaluation of biocomposites made from polypropylene/poly(lactic acid)/poly(hydroxybutyrate-*co*-hydroxyvalerate) with a sustainable biocarbon filler[J]. ACS Omega, 2017, 2(10): 6446-6454.

[13] BARTCZAK Z, ARGON A S, COHEN R E, et al. Toughness mechanism in semi-crystalline polymer blends: II . High-density polyethylene toughened with calcium carbonate filler particles[J]. Polymer, 1999, 40(9): 2347-2365.

[14] LASHGARI S, GARMABI H, LASHGARI S, et al. Improving the interfacial adhesion of highly filled PP: Bagasse composites designed by taguchi method[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2011, 24(4): 431-446.

[15] ASSAEDI H, ALOMAYRI T, KAZE C R, et al. Characterization and properties of geopolymer nanocomposites with different contents of nano-$CaCO_3$[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119137.

[16] MAO H J, CHENG Y, GUO W, et al. Effect of POE on mechanical properties and cellular structure of PP/Nano-$CaCO_3$ composites in IMD/MIM process[J]. Materials Research Express, 2020, 7(9): 095308.

[17] SANVEZZO P B, BRANCIFORTI M C. Recycling of industrial waste based on jute fiber-polypropylene: Manufacture of sustainable fiber-reinforced polymer composites and their characterization before and after accelerated aging[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 168: 113568.

[18] SUN W Q. Preparation of multistage porous polymer nanocomposites and its application in architectural design[J]. Measurement: Sensors, 2024, 34: 101269.

[19] LI J T, WANG M, SHAO B G, et al. Preparation and characterization of fiber-reinforced CFP/PPS composites [J]. China Plastics Industry, 2021, 49(3): 50-53.

[20] LUZ S M, DEL TIO J, ROCHA G J M, et al. Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites: Effect of acetylation on mechanical and thermal properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(9): 1362-1369.

[21] PLOYPETCHARA N, SUPPAKUL P, ATONG D, et al. Blend of polypropylene/poly(lactic acid) for medical packaging application: Physicochemical, thermal, mechanical, and barrier properties[J]. Energy Procedia, 2014, 56: 201-210.

[22] 张涛, 曹明, 苗继斌, 等. PET4A改性PP/PLA复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(10): 167-172.

[23] MOTSA M M, MSAGATI T A M, THWALA J M, et al. Polypropylene-zeolite polymer composites for water purification: Synthesis, characterisation and application[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(10): 2604-2612.

[24] 吴珊, 吴凯. 竹纤维对聚乳酸复合材料结晶性能与力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 127-131.

[25] 唐玉梅, 叶有明, 马皓皓. PBS协同纳米$CaCO_3$/BF增强ABS复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 19-24.

[26] RAMASAMY V, ANAND P, SURESH G. Synthesis and characterization of polymer-mediated $CaCO_3$ nanoparticles using limestone: A novel approach[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(3): 818-834.

[27] 郝小非, 刘文涛, 李国泰, 等. 碳酸钙加工应用现状与产业发展趋势[J]. 中原工学院学报, 2025, 36(4): 56-65.

[28] 王晓梅, 陈才深. 聚乳酸/聚丙烯共混纺粘纤维的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2017, 38(1): 13-16.

[29] AHN Y, JEON J H, PARK J H, et al. Effects of modified LDPE on physico-mechanical properties of HDPE/$CaCO_3$ composites[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, 33(11): 3258-3266.