

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.03.006

PBAT/4-三氟甲基苯甲酰氯酯化秸秆粉制备及性能

葛铁军^{1,2}, 张力^{1,2}, 文起东³, 文博³, 刘沛含³, 唐恺鸿^{1,2}

(1. 沈阳化工大学塑料工程研究中心, 沈阳 110142; 2. 辽宁省高分子材料工程技术研究中心, 沈阳 110142;

3. 辽宁东盛新材料研发中心有限公司, 辽宁营口 115004)

摘要: 为提高秸秆粉与聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)的相容性及力学性能, 以4-三氟甲基苯甲酰氯(PTF-BOC)为酯化剂, 4-二甲氨基吡啶(DMAP)为催化剂, 三乙胺为缚酸剂制备酯化秸秆粉。利用转矩流变仪熔融共混制备PBAT和不同PTF-BOC用量秸秆粉的复合材料, 采用差示扫描量热仪、转矩流变仪、微机控制电子拉伸试验机和冲击试验机测试了复合材料的热性能、流变性能和力学性能。探究了PTF-BOC用量对秸秆粉中羟基取代度的影响, 并对酯化前后秸秆粉进行了傅里叶变换红外结构表征及接触角测试。结果表明, PTF-BOC与秸秆粉成功发生酯化反应, 酯化后秸秆粉接触角与PBAT的接触角相近, 且较未改性秸秆粉接触角提高70.4%, 疏水性提高。酯化秸秆粉与PBAT呈现较好的相容性, 当PTF-BOC为秸秆粉质量的55%时, PBAT/酯化秸秆粉复合材料的力学性能最佳, 其拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度较PBAT/未改性秸秆粉复合材料分别提高28.8%, 319%和41.8%。

关键词: 4-三氟甲基苯甲酰氯; 酯化改性; 秸秆粉; 复合材料

中图分类号: TQ352.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)03-0034-06

Preparation and Properties of PBAT/4-Trifluoromethylbenzoyl Chloride Modified Straw Powder Composite

Ge Tiejun^{1,2}, Zhang Li^{1,2}, Wen Qidong³, Wen Bo³, Liu Peihan³, Tang Kaihong^{1,2}

(1. Research Center of Plastics Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. Liaoning Province Polymer Engineering Technology Research Center, Shenyang 110142, China;

3. Liaoning Dongsheng New Material Research and Development Center Co. Ltd., Yingkou 115004, China)

Abstract: In order to improve the compatibility and mechanical properties of straw powder and polyadipic acid/butylene terephthalate (PBAT), the esterified straw powder was prepared with 4-trifluoromethylbenzoyl chloride (PTF-BOC) as esterification agent, 4-dimethylaminopyridine (DMAP) as catalyst and triethylamine as acid binding agent. The composites of PBAT and straw powder with different amounts of PTF-BOC were prepared by melt blending with torque rheometer. The thermal properties, rheological properties and mechanical properties of the composites were tested with differential scanning calorimeter, rotary rheometer, computer-controlled electronic tensile tester and impact tester. The effect of the amount of PTF-BOC on the degree of hydroxyl substitution in straw powder was investigated, and the infrared structure and contact angle of straw powder before and after esterification were characterized. The results showed that PTF-BOC and straw powder were successfully esterified. After esterification, the contact angle of straw powder was similar to that of PBAT, and the contact angle was 70.4% higher than that of unmodified straw powder, and the hydrophobicity was improved. Esterified straw powder has good compatibility with PBAT. When the content of PTF-BOC (the percentage of straw powder mass) is 55%, the mechanical properties of PBAT/esterified straw powder composite are the best, and its tensile strength, elongation at break and impact strength are 28.8%, 319% and 41.8% higher than that of PBAT/unmodified straw powder composite.

Keywords: 4-trifluoromethylbenzoyl chloride; desertification modification; straw powder; composite material

基金项目: 基于分子设计的高性能生物质降解材料PBAT-X合成关键技术项目[辽科发(2022)41号]

通信作者: 葛铁军, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子材料的加工与改性研究

收稿日期: 2023-01-25

引用格式: 葛铁军, 张力, 文起东, 等. PBAT/4-三氟甲基苯甲酰氯酯化秸秆粉制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3): 34-39.

Ge Tiejun, Zhang Li, Wen Qidong, et al. Preparation and properties of PBAT/4-trifluoromethylbenzoyl chloride modified straw powder composite[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 34-39.

大量使用传统不可降解塑料给环境带来了污染,这违背了国家绿色可持续发展的理念,因此,生物可降解塑料的研究是未来塑料行业发展的重要领域^[1]。其中聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)是一种热塑性可降解塑料,其同时具备聚丙烯酸丁酯(PBA)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)的特性,具有良好的耐热性能、柔韧性,但昂贵的价格限制了其使用范围^[2-4]。我国秸秆粉来源广泛且年产量巨大,但其易吸水、不具备热塑性且不易被加工,使秸秆粉未得到充分利用^[5]。如果利用秸秆粉来填充PBAT,熔融共混成生物质复合材料,此方法可降低生产成本、减少污染,还可以解决资源短缺问题^[6]。然而PBAT和秸秆粉存在界面相容性差的问题^[7]。目前,研究人员已经开发出一些提高两者相容性的方法^[8-11],其中对生物质填料进行酯化改性是一种工艺简单,改性效果显著的方法^[12-13]。

为了提高PBAT/秸秆粉复合材料的相容性、力学性能等,葛铁军课题组^[14-15]从秸秆粉表面改性着手,选用棕榈酰氯、苯甲酰氯等酯化改性剂对秸秆粉进行改性,改性后复合材料的相容性、力学性能等均得到提高。笔者使用4-三氟甲基苯甲酰氯(PTF-BOC)作为酯化剂,与秸秆粉进行酯化反应,得到表面含有一CF₃的秸秆粉,从而提高秸秆粉的疏水性,并且PTF-BOC也通过 π 电子与PBAT片段相似的芳香基团相互作用,改善秸秆粉与PBAT的相容性。在此基础上制备了PBAT/酯化秸秆粉复合材料,并考察了复合材料的热性能、流变性能和力学性能。

1 实验部分

1.1 原材料

秸秆粉:18.75 μm (800目),辽宁东盛塑业有限公司;

PBAT:TH801T,新疆蓝山屯河聚酯有限公司;

PTF-BOC:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

4-二甲氨基吡啶(DMAP):纯度99%,上海麦克林生化科技有限公司;

三乙胺:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

二甲基亚砷:分析纯,天津市恒兴化学试剂制造有限公司。

1.2 仪器与设备

电动搅拌器:RW20型,德国IKA公司;

转矩流变仪:XSS-300型,上海科创橡塑机械设备有限公司;

注塑机:WZS10D型,上海新硕精密机械有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:NEXUS-470型,美国Thermo Fisher公司;

接触角测量仪:2017JC127型,上海中辰数字技术设备有限公司;

微机控制电子拉伸试验机:H10KS型,深圳瑞格尔仪器检测有限公司;

冲击试验机:GT-7045-MDL型,深圳高铁检测仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6360LV型,日本电子株式会社;

旋转流变仪:DHR-2型,美国TA公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q-200型,美国TA公司。

1.3 试样制备

酯化秸秆粉制备:称取30 g秸秆粉,以二甲基亚砷为溶剂,配制秸秆粉溶液(质量分数为25%),将其倒入三颈烧瓶并在水浴锅中升温、不断搅拌,升温至反应温度,加入一定量催化剂(DMAP)、缚酸剂(三乙胺),用滴液漏斗15 min内完成PTF-BOC滴加。当反应结束,将反应物冷却至室温后用无水乙醇多次洗涤并抽滤,直至滤液透明且pH为中性。将滤饼在60 $^{\circ}\text{C}$ 下真空干燥8 h得到产物。酯化反应的基本条件为:反应时间2.5 h、反应温度40 $^{\circ}\text{C}$ 、缚酸剂为秸秆粉质量分数的5%、催化剂为秸秆粉质量分数的55%。在基本条件基础上改变PTF-BOC占秸秆粉的质量分数分别为10%,25%,40%,55%,70%。

PBAT/秸秆粉复合材料的制备。利用转矩流变仪将改性和未改性秸秆粉分别与PBAT混合均匀,其中转矩流变仪一区~三区温度都为140 $^{\circ}\text{C}$,转速为60 r/min,固定秸秆粉与PBAT质量比为30:70。将混合物料切成颗粒后,放入注塑机。注塑机模具温度设为60 $^{\circ}\text{C}$,料筒温度设为160 $^{\circ}\text{C}$,保压时间15 s。在此条件下,通过注塑成型获得拉伸和冲击试验样品。

1.4 性能测试与表征

秸秆粉中羟基取代度测定。称取150 mg干燥的酯化秸秆粉,倒入10 mL丙酮水溶液(体积比为1:

1)中,室温静置2 h。接着加入5 mL 0.1 mol/L 氢氧化钾溶液,40 °C反应2 h。再按照同样的方式制备第2组未改性的秸秆粉试样,多余的氢氧化钾用0.5mol/L 盐酸溶液滴定到pH至7。随后参照岳小鹏等^[16]所述的酯化秸秆粉羟基取代度计算方法进行计算。

FTIR 表征:测试范围为4 000 ~ 500 cm^{-1} ;

接触角按照GB/T 30693-2014测试;

DSC按照GB/T 19466.3-2004测试;

流变性能测试:在氮气气氛下,固定应变为0.5%,固定温度为170 °C,剪切速率范围为0.1~100 rad/s;

拉伸性能按照GB/T 1040-2018测试,拉伸速率20 mm/min;

冲击性能按照GB/T 1843-2008测试,摆锤冲击能量为2.75 J;

SEM 表征:取冲击样条的断裂面进行喷金,使用SEM观察断裂面的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 PTF-BOC 用量对取代度影响

取代度(D_s)测定结果见图1。当PTF-BOC用量为55%, D_s 最高可达0.088 2 mmol/g。随PTF-BOC用量的增加,取代度呈现先增大后减小的趋势。

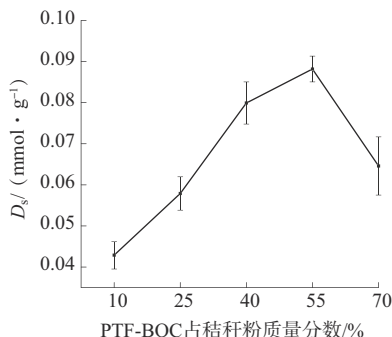


图1 PTF-BOC 用量对酯化秸秆粉 D_s 的影响

酯化过程如图2所示。秸秆粉可作为亲核试剂进攻PTF-BOC的羰基C,由于PTF-BOC中氯离子

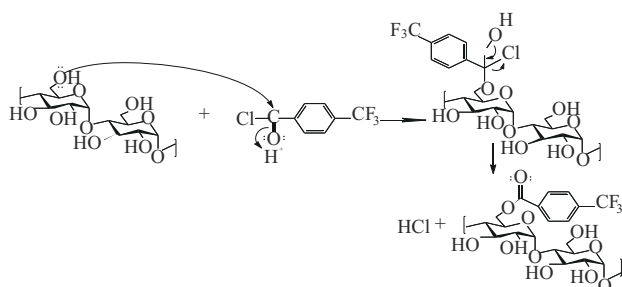


图2 酯化反应机理

电负性大,可发生电荷转移而离去,与秸秆粉中羟基发生取代反应形成双键。故而随着PTF-BOC用量的增加,酯化几率随之增加, D_s 增大。但用量增大至55%时,PTF-BOC分子链之间会出现相互拥挤和缠绕的现象,反应的空间位阻随之增大,导致酯化效率降低, D_s 降低。

2.2 秸秆粉FTIR 分析

未改性秸秆粉与酯化改性秸秆粉的FTIR谱图如图3所示。在酯化改性秸秆粉中,1 108 cm^{-1} 出现了一 CF_3 的特征吸收峰,710 cm^{-1} 处为苯环单取代C—H面外弯曲振动吸收峰,在1 735 cm^{-1} 和1 031 cm^{-1} 处出现了酯键内的C=O特征吸收峰和C—O—C特征吸收峰。故而PTF-BOC与秸秆粉成功发生了酯化反应。

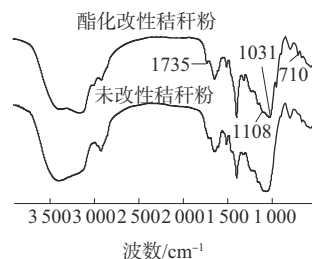
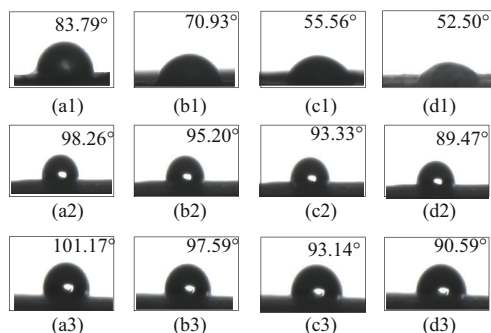


图3 秸秆粉改性前后的FTIR谱图

2.3 接触角分析

图4为未改性秸秆粉、PTF-BOC酯化秸秆粉($D_s=0.0882$)、PBAT的接触角随时间变化测试结果。由图可知,未改性秸秆粉的接触角浸润速度较快,在静置120 s后,接触角为52.5°,接近完全浸润。而酯化秸秆粉与PBAT接触角相近,分别为89.47°和90.59°,且远大于未改性秸秆粉。这是由于酯化反应后,未改性秸秆粉中部分亲水性羟基基团被苯甲酰基基团所取代且在秸秆粉分子链上引入了一 CF_3



未改性秸秆粉:a1—30 s;b1—60 s;c1—90 s;d1—120 s

酯化秸秆粉:a2—30 s;b2—60 s;c2—90 s;d2—120 s

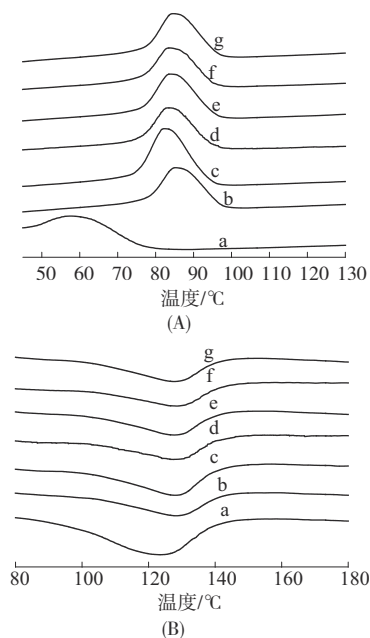
PBAT:a3—30 s;b3—60 s;c3—90 s;d3—120 s

图4 秸秆粉改性前后接触角变化图

基团, $-\text{CF}_3$ 中的 F 原子极性较大, 是一种疏水性基团, 故而酯化秸秆粉的疏水性提高, 可以与 PBAT 更好的相容。

2.4 复合材料 DSC 分析

图 5 为不同 PTF-BOC 用量秸秆粉和 PBAT 复合材料的熔融结晶曲线。表 1 列出复合材料的 DSC 数据。由图 5 与表 1 可知, 秸秆粉的填充导致复合材料结晶温度 (T_c) 提高, 对 PBAT 的熔融曲线影响较小, 呈现了良好的相容性。随着 PTF-BOC 用量的增加, 复合材料 T_c 有增加的趋势, 表明 PTF-BOC 的添加会使 PBAT 结晶的阻碍作用减小, 复合材料的结晶曲线向高温方向偏移。因此秸秆粉的加入能起到异相成核剂的作用, 使 PBAT 的结晶温度升高。但由于 PTF-BOC 中含有酰氯基团, 在加工过程中和



a—PBAT; b PBAT/未改性秸秆粉;
c—PBAT/酯化秸秆粉 (PTF-BOC 10%);
d—PBAT/酯化秸秆粉 (PTF-BOC 25%);
e—PBAT/酯化秸秆粉 (PTF-BOC 40%);
f—PBAT/酯化秸秆粉 (PTF-BOC 55%);
g—PBAT/酯化秸秆粉 (PTF-BOC 70%)

A—为第 1 次降温曲线; B—第 2 次升温曲线

图 5 不同 PTF-BOC 用量秸秆粉和 PBAT 复合材料的熔融结晶曲线

表 1 复合材料 DSC 数据

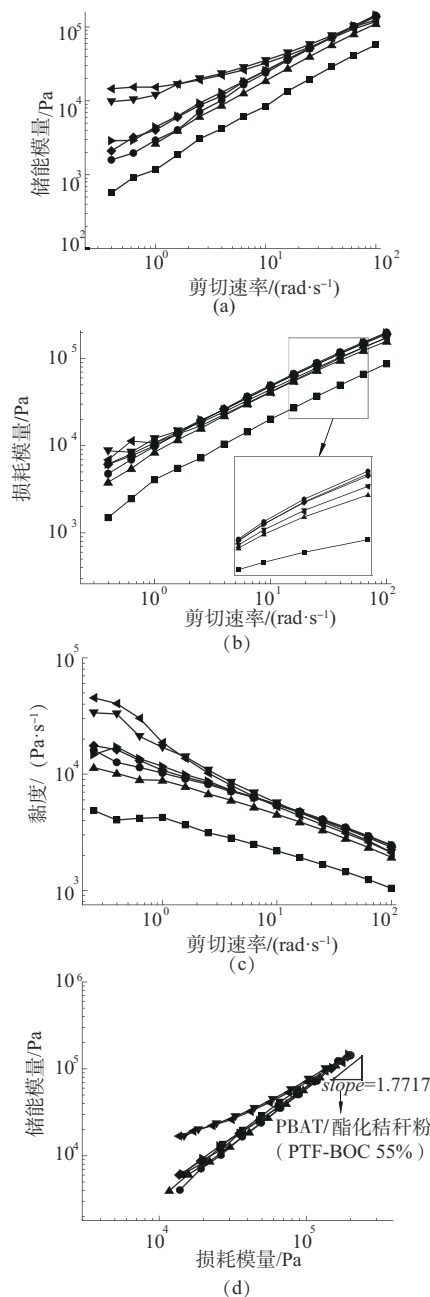
样品编号	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
a	58.0	122.9	13.9	12.2
b	85.9	129.7	5.2	6.5
c	82.1	129.3	7.8	9.7
d	83.8	130.6	6.5	8.1
e	84.5	130.7	6.2	7.8
f	85.1	133.1	6.1	7.6
g	86.9	130.8	5.7	7.1

注: T_c —结晶温度; T_m —熔融温度; ΔH_m —熔融焓; X_c —结晶度

PBAT 的端羟基发生化学反应, 产生支化聚合物, 使分子链的活动性降低, 导致结晶度逐渐降低^[17]。

2.5 流变性分析

复合材料以及 PBAT 的模量随剪切速率 (ω) 变化的关系曲线如图 6 所示, PBAT 及复合材料的储能模量 (G') 与损耗模量 (G'') 逐渐增加。这是因为秸秆



a— G' 随剪切速率的变化; b— G'' 随剪切速率的变化;

c—黏度 (η) 随剪切速率的变化; d—Han 曲线

图 6 PBAT 及其复合材料的流变性能

粉拥有刚性杂环骨架结构及较高分子量,可以诱导更多的链发生纠缠,导致聚合物熔体加强,所以复合材料的 G' 和 G'' 显著增加。

如图6c所示,当 ω 变大时黏度(η)降低,复合材料呈现剪切变稀行为,这是因为剪切力破坏了秸秆粉与PBAT间的相互作用力,而剪切变稀是由于当剪切速率加快时分子链的解缠也加快,分子链之间产生了相对流动,因此表现出表观黏度降低的现象。

G' 和 G'' 之间的关系被称为Han曲线,可用于评价聚合物复合材料的相容性和界面相互作用。图6d显示,曲线高频区呈现较好的重合。理论上,对于无相分离的均聚物,高频区域的Han曲线斜率应该接近2。样品的斜率接近理论值,说明酯化秸秆粉与PBAT的相容性较好^[18]。

2.6 力学性能分析

图7为不同PTF-BOC用量的秸秆粉对复合材料力学性能的影响。PBAT/未改性秸秆粉拉伸强度为11.8 MPa,断裂伸长率为135.6%,冲击强度为15.0 kJ/m²。随着PTF-BOC用量的增加,复合材料的拉伸强度、断裂伸长率及冲击强度随之增加,当PTF-BOC质量分数为55%时,PBAT/酯化秸秆粉复合材料比PBAT/未改性秸秆粉复合材料拉伸强度提高28.8%,断裂伸长率提高319%,冲击强度提高41.8%。这是由于酯化秸秆粉的 D_s 随着PTF-BOC

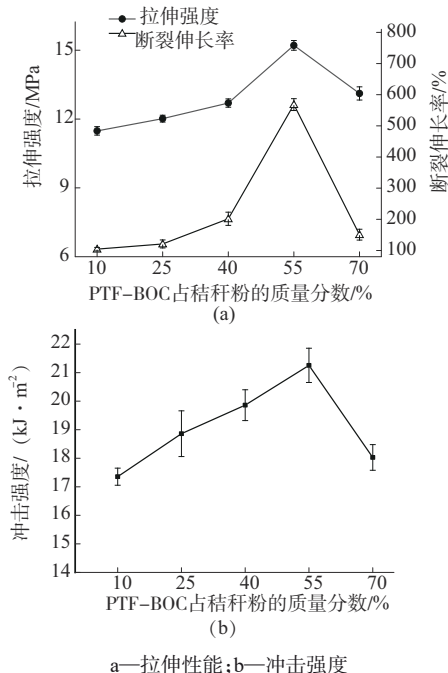
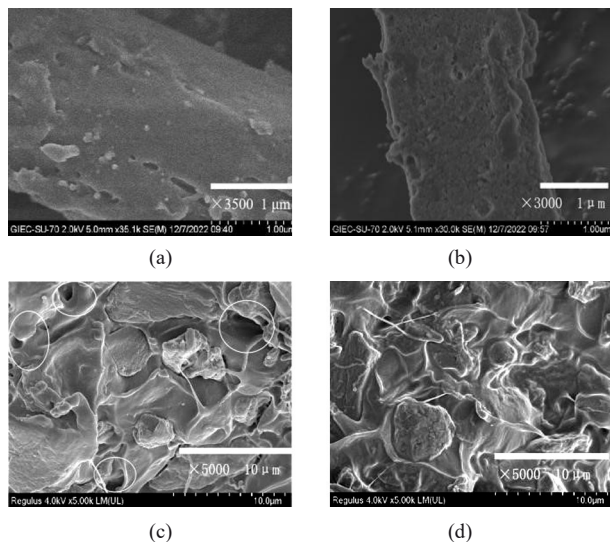


图7 不同PTF-BOC用量秸秆粉的复合材料力学性能

用量的增加而增大,增加了秸秆粉与PBAT的界面相容性,所以力学性能增加。当PTF-BOC用量占秸秆粉质量分数超过55%时,PTF-BOC分子链之间相互拥挤缠绕,空间位阻效应增大,致使秸秆粉与PBAT混合不均,因此PBAT/酯化秸秆粉复合材料的力学性能下降。

2.7 SEM分析

图8为秸秆粉、复合材料冲击试样断面SEM照片。由图8可见,未改性秸秆粉因静电效应仅附着了一些微小颗粒,所以表面完整且光滑。而酯化秸秆粉表面出现破损,变得粗糙,有明显的沟壑与裂纹,从而避免秸秆粉在PBAT基体中发生团聚。图8c明显地看到孔洞。由于未改性秸秆粉在PBAT基体中发生团聚,受力后发生脱落,形成大量孔洞^[19]。由图8d可见,酯化秸秆粉均匀分散在PBAT中,很大程度改善了两相的相容性,未出现孔洞。



a—未改性秸秆粉;b—酯化秸秆粉;c—PBAT/未改性秸秆粉复合材料;d—PBAT/酯化秸秆粉复合材料

图8 秸秆粉、复合材料冲击试样断面SEM照片

3 结论

(1)通过对PTF-BOC酯化秸秆粉进行红外结构表征,结果表明,成功制备出PTF-BOC酯化秸秆粉,取代度最高为0.088 2 mmol/g,酯化后的秸秆粉疏水性得到了明显提高。

(2)酯化秸秆粉随着PTF-BOC用量的增加, T_g 增加,结晶度减小,损耗模量和储能模量都逐渐增大,并且复合材料表现出的剪切变稀的行为随着剪切速率增加而更加明显。

(3)秸秆粉的酯化改性增加了其与PBAT的界面

相容性,PBAT/酯化秸秆粉复合材料未出现孔洞,减弱了两相的分相分离现象。

(4) PTF-BOC 占秸秆粉质量分数为 55% 时, PBAT/酯化秸秆粉复合材料比 PBAT/未改性秸秆粉复合材料拉伸强度提高 28.8%, 断裂伸长率提高 319%, 冲击强度提高 41.8%。

参考文献

- [1] 张玉萍,肖光洋,王丹,等.可降解塑料的降解机理及影响降解过程的因素[J].绿色包装,2021(11):17-21.
Zhang Yuping, Xiao Guangyang, Wang Dan, et al. Degradation mechanism of degradable plastics and factors affecting the degradation process[J]. Green Packing, 2021(11):17-21.
- [2] 涂鸿轶,张云飞,黄安平,等.硅灰石填充 PLA/PBAT 复合材料制备及性能[J].工程塑料应用,2020,48(9):24-31.
Tu Hongyi, Zhang Yunfei, Huang Anping, et al. Preparation and properties of wollastonite filled PLA/PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9):24-31.
- [3] 颜颖达,赵珊,阳范文,等. PLA/PBAT 共混体系的制备与性能[J].工程塑料应用,2019,47(11):36-41,46.
Yan Yingda, Zhao Shan, Yang Fanwen, et al. Preparation and properties of PLA/PBAT blends[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):36-41, 46.
- [4] 刘振涛,严伟,王奎,等. PBAT/磷石膏复合薄膜的制备与性能[J].工程塑料应用,2021,49(1):25-29.
Liu Zhentao, Yan Wei, Wang Kui, et al. Preparation and properties of PBAT/PG composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):25-29.
- [5] 李文龙,马孝博,张金波,等.农作物秸秆综合处理及有效利用[J].中国科技信息,2021(16):41-42.
Li Wenlong, Ma Xiaobo, Zhang Jinbo, et al. Comprehensive treatment and effective utilization of crop straw[J]. China Science and Technology Information, 2021(16):41-42.
- [6] 李金汤,夏发明,王晓广,等.水溶性聚酯与甘油对淀粉/PBAT 复合材料增容效果研究[J].工程塑料应用,2022,50(10):125-130.
Li Jintang, Xia Faming, Wang Xiaoguang, et al. Study of compatibilization effect of water-soluble polyester and glycerol on starch/PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10):125-130.
- [7] 许梦瑶,温舒珺,孙创,等.木塑复合材料界面改性研究进展[J].林业机械与木工设备,2021,49(5):10-15.
Xu Mengyao, Wen Shujun, Sun Chuang, et al. Research progress in interfacial modification of wood-plastic composites[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(5):10-15.
- [8] Bu Boner, Deng Cong, Li Mingting, et al. Novel amino glycerin decorated ammonium phosphate for the coefficient cementum flame reactance of wood flour/polypropylene composite via simultaneous inter facial and bulk charring[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 172(1):636-648.
- [9] Andrea C, Josefa M, Nominal C, et al. Some properties of composite panels manufactured from peach(prunes persist) pits and polypropylene[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 175(1):107-152.
- [10] Belchior R D, Smantos R A. Coupling effect of starch coated fibers for recycled polymer/wood composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 172(1):1-8.
- [11] Jan L, Marc B, Grisly W J, et al. Understanding the development of inter facial bonding within PLA/wood-based thermoplastic sandwich composites[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 127(1):129-134.
- [12] 尹玉霞,楚云松.改性植物纤维增强 PBAT 复合材料的性能研究[J].塑料科技,2021,49(10):17-20.
Yin Yuxia, Chu Yunsong. Study on properties of modified plant fiber reinforced PBAT composites[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(10):17-20.
- [13] 吴灿清.纤维素纳米晶表面酯化改性及其增强聚丁二酸丁二醇酯研究[D].杭州:浙江理工大学,2019.
Wu Canqing. Study on surface esterification modification of cellulose nanocrystals and its reinforcement effect on poly (butylene-succinate)[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.
- [14] 葛铁军,赵婉晴,刘啸凤. PBAT/棕榈酰氯酯化改性秸秆粉复合材料制备与性能[J].工程塑料应用,2022,50(1):6-13,65.
Ge Tiejun, Zhao Wanqing, Liu Xiaofeng. Preparation and properties of PBAT/palmitoyl chloride esterified straw powder composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):6-13, 65.
- [15] 葛铁军,赵婉晴,刘晓洋,等.秸秆粉的酯化改性研究与 PBAT/秸秆粉复合材料拉伸性能的初步探讨[J].化工新型材料,2022,50(11):188-192.
Ge Tiejun, Zhao Wanqing, Liu Xiaoyang, et al. Study on esterification modification of straw powder and preliminary study on tensile properties of PBAT/straw powder composites[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(11):188-192.
- [16] 岳小鹏,刘鹏杰,雷丹.酯化淀粉改性木薯渣纤维(PBS 复合材料性能研究[J].林产化学与工业,2017,37(5):119-125.
Yue Xiaopeng, Liu Pengjie, Lei Dan. Properties of cassava dregs fiber/PBS composites modified by starch ester[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2017, 37(5):119-125.
- [17] 张永恒. PBAT/淀粉复合材料的制备及性能研究[D].兰州:西北师范大学,2021.
Zhang Yongheng. Study on the preparation and performance of PBAT-starch composite[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [18] 漆娟,罗钟琳,王标兵.扩链剂增容 PLA/PBAT 共混物流变性能[J].工程塑料应用,2021,49(2):123-128,135.
Qi Juan, Luo Zhonglin, Wang Biaobing. Rheological properties of PLA/PBAT blends compatibilized by chain extender[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2):123-128, 135.
- [19] 葛铁军,刘晓洋,李瑞雄.界面相容剂对生物质复合材料性能的影响[J].塑料科技,2020,48(1):105-108.
Ge Tiejun, Liu Xiaoyang, Li Ruixiong. Effect of interfacial compatibilizer on properties of biomass composites[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(1):105-108.