

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.025

蒙脱土改性剂结构对 PBS 复合材料性能的影响

田琴¹, 曹蒙¹, 谢本亮², 黄伟江¹, 王奎¹, 涂春云¹, 杨春林¹, 严伟¹

(1. 贵阳学院, 贵阳 550005; 2. 贵州大学, 贵阳 550025)

摘要: 为改善聚丁二酸丁二酯 (PBS) 的性能, 分别以三苯基羟乙基溴化膦改性的蒙脱土 (OMMT1)、十六烷基三苯基溴化膦改性的蒙脱土 (OMMT2) 为添加相制备了 PBS 复合材料, 着重考察了改性剂结构对 PBS 复合材料性能的影响。微观结构表明, OMMT2 较 OMMT1 在 PBS 基体中分布分散均匀。差示扫描量热 (DSC) 仪测试结果表明, PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料具有更高的结晶温度和熔融温度。动态流变结果表明, 低频区 PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料具有更高的储能模量、损耗模量和复数黏度。力学性能测试结果表明, PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料具有更高的缺口冲击强度、拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量。

关键词: 改性剂结构; 蒙脱土; 聚丁二酸丁二酯复合材料; 性能

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0141-06

Effects of Modifier Structure of Montmorillonite on Performance of PBS Composite

Tian Qin¹, Cao Meng¹, Xie Benliang², Huang Weijiang¹, Wang Kui¹, Tu Chunyun¹, Yang Chunlin¹, Yan Wei¹

(1. Guiyang University, Guiyang 550005, China; 2. Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to improve the performance of poly(butylene succinate) (PBS), PBS composites were prepared respectively with organic montmorillonite (OMMT2) modified by cetyl triphenyl phosphonium bromide and organic montmorillonite (OMMT1) modified by triphenylhydroxyethyl phosphonium bromide as additive phase. The influence of modifier structure on the performance of PBS composites was investigated. The microstructure results show that OMMT2 is distributed on PBS matrix more evenly than that of OMMT1. The results of differential scanning calorimeter (DSC) show that PBS/OMMT2 composite has higher crystallization temperature and melting temperature than PBS/OMMT1 composite. The dynamic rheological results show that the PBS/OMMT2 composite has higher energy storage modulus, loss modulus and complex viscosity than PBS/OMMT1 composite in low frequency region. The mechanical properties test results show that the PBS/OMMT2 composite has higher notched impact strength, tensile strength, bending strength and bending modulus than PBS/OMMT1 composite.

Keywords: modifier structure; montmorillonite; poly (butylene succinate) composite; performance

为减少塑料制品带来的白色污染, 全生物降解高分子材料作为塑料品的替代物而备受关注。全生物降解高分子材料的降解产物主要为对环境无污染的 CO₂, H₂O 和生物质^[1-2], 这一材料的开发与应用对缓解塑料制品污染具有重要意义。目前已开发的全生物降解高分子材料较少, 主要包括聚羟基脂肪酸酯 (PHA)^[3]、聚乳酸 (PLA)^[4-6]、聚丁二酸丁二酯 (PBS)^[7-9]、聚己内酯 (PCL)^[10-11]、聚己二酸 / 对苯二

甲酸丁二酯 (PBAT)^[12-14] 等, 其中 PBS 因生产工艺简单、成本较低、来源较广, 且具有较高的耐热温度 (高于 100℃)、优异的可加工性能、接近聚乙烯 (PE) 的力学性能^[8-9, 15] 等优于其它全生物降解高分子材料的性能而有望成为全生物降解高分子材料中应用最广的材料。

由于 PBS 自身分子结构的特点, 其使用中存在强韧性不足的问题, 而优异的强韧性能是拓展 PBS

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合成果 [2019]4022 号), 贵州省教育厅特色领域项目 (黔教合 KY 字 [2020]056), 贵阳市科技局贵阳学院专项资金 [GYU-KY- [2021]], 2020 年国家级大学生创新创业计划训练项目

通信作者: 严伟, 博士, 教授, 主要研究方向为聚合物复合材料的制备

收稿日期: 2022-01-22

引用格式: 田琴, 曹蒙, 谢本亮, 等. 蒙脱土改性剂结构对 PBS 复合材料性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3):141-146.

Tian Qin, Cao Meng, Xie Benliang, et al. Effects of modifier structure of montmorillonite on performance of PBS composite[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):141-146.

应用领域的重要基础。蒙脱土(MMT)因价格低廉、来源较广、具有独特层状纳米结构及超大的比表面积和长径比^[16]等特点在改善PBS强韧性能方面有显著优势。但MMT呈亲水性且颗粒内片层间存在较大静电引力,不利于PBS分子链嵌入其层间,因此,MMT在PBS基体中易呈聚集体形式分布,难以均匀分布,而MMT在PBS中均匀分布对改善PBS的强韧性能有决定性的作用。MMT在PBS中能否均匀分布一方面受动力学因素影响,即熔融加工中剪切力的影响;另一方面受热力学因素影响,即MMT片层上的改性剂分子通过物理或化学作用对PBS分子链的“吸附”作用。因此,需对MMT进行有机改性以促进其在PBS中均匀分布。而改性剂的结构对MMT能否均匀地分布分散具有重要影响。为了改善PBS的强韧性能,笔者将自制的两种不同结构的改性剂分别改性的MMT分别添加到PBS中制备PBS复合材料,通过X射线衍射(XRD)分析、透射电子显微镜(TEM)分析、差示扫描量热(DSC)分析、动态流变性能测试和力学性能测试等研究MMT改性剂结构对PBS复合材料性能的影响,以便为拓展PBS的应用提供一定的依据和途径。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBS: TH803S, 新疆蓝山屯河聚酯有限公司;

MMT: PGN, 美国NANOCOR公司;

有机MMT1(OMMT1): 改性剂为三苯基羟乙基溴化磷 $[(C_6H_5)_3P(Br)(CH_2)_2OH]$, 自制;

有机MMT2(OMMT2): 改性剂为十六烷基三苯基溴化磷 $[CH_3(CH_2)_{14}CH_2P(Br)(C_6H_5)_3]$, 自制。

1.2 主要设备及仪器

HAAKE密炼机: Rheomix OS型, 美国赛默飞世尔科技公司;

微型注塑机: M1200型, 武汉启恩科技有限责任公司;

XRD仪: D/Max-2200型, 日本理学公司;

扫描电子显微镜(SEM): Quanta250 FEG型, 美国FEI公司;

热重(TG)分析仪: TG209F3型, 德国耐驰公司;

DSC仪: DSC214型, 德国耐驰公司;

哈克旋转流变仪: MARS III型, 德国HAAKE公司;

电子万能材料试验机: 5982型, 美国Instron公

司;

TEM: JEM200CX型, 日本JEOL公司。

1.3 样品制备

将烘干的质量分数为3%的MMT、自制的OMMT1, OMMT2(制备方法见参考文献[17])分别和干燥的PBS混合均匀后在140℃, 60 r/min条件下在HAAKE密炼机中搅拌6 min, 取样破碎, 随后在注塑时间10 s、合膜时间10 s、冷却时间10 s的条件下在微型注塑机中注塑测试样条。为了便于分析比较, 同时注塑一组纯PBS样条。

1.4 性能测试与表征

XRD测试: 在40 kV, 30 mA, 波长 λ 为0.154 nm的条件下, 以2°/min扫描样品, 借助布拉格方程 $n\lambda=2d\sin\theta$ 计算MMT的片层间距, n 为衍射级数, d 为晶面间距, θ 为入射X射线与相应晶面的夹角。

SEM分析: 将粉体样品经烘干喷金处理后进行形貌分析。

TEM分析: 将PBS复合材料样品制成冷冻超薄切片后在TEM中观察微观结构。

DSC测试: 在N₂氛围下, 先以10℃/min升温到160℃, 恒温3 min以消除热历史, 再以10℃/min降温到-40℃, 随后再以10℃/min升温到160℃测试样品的结晶熔融曲线。

流变性能测试: 在160℃, 0.01~100 Hz, 应变为0.5%的条件下测试复合材料的流变性能。

拉伸强度按GB/T 1040.3-2006测试, 速率为50 mm/min。

冲击强度按GB/T 1043-2008测试, 缺口深度2 mm。

弯曲强度按GB/T 9341-2008测试, 速率为2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 MMT的结构分析

MMT, OMMT1和OMMT2的XRD曲线如图1所示。从图1可以看出, 经有机化处理后MMT的(001)面对应的片层间距明显增大, 且OMMT2的片层间距较OMMT1大。图2的SEM图也表明, 经有机化处理后MMT颗粒由密实堆积结构变为较蓬松的结构, 且OMMT2颗粒较OMMT1颗粒更蓬松, 与XRD结果吻合。这可能是经有机化处理后由于改性剂分子与MMT层间的阳离子交换破坏了MMT层间的作用力, 使其片层间结合力减小, 片层

有机化处理前的密实堆积结构变为较松散堆叠的结构,且十六烷基三苯基溴化磷较三苯基羟乙基溴化磷更易嵌入 MMT 层间,与 MMT 层间的阳离子交换更充分,MMT 片层间作用力更易被破坏,从而表现为片层间距更大,片层堆叠更松散。

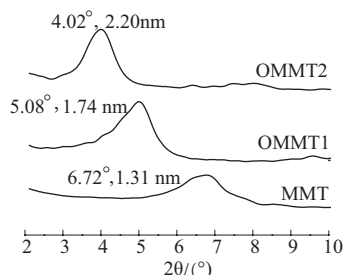
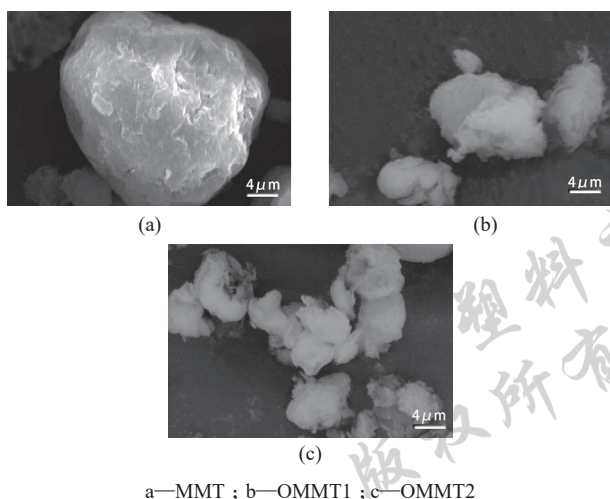


图1 MMT, OMMT1 和 OMMT2 的 XRD 曲线



a—MMT ; b—OMMT1 ; c—OMMT2

图2 MMT, OMMT1 和 OMMT2 的 SEM 图

2.2 MMT 改性剂结构对 PBS 复合材料结构性能的影响

纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的 XRD 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,复合材料中 MMT 的 (001) 面对应的层间距较图 1 中 MMT 的 (001) 面对应的层间距增大,表明 PBS 分子链已不同程度地扩散进入 MMT 层间。比较而言, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料中 MMT 的 (001) 面对应的层间距较 PBS/MMT 复合材料大, PBS/OMMT2 复合材料中 MMT 的 (001) 面对应的层间距较 PBS/OMMT1 复合材料大。这可能是由于经有机处理的 MMT 片层间距扩大,有利于 PBS 分子链迁入层间,且有机改性剂分子的吸附也促进了 PBS 分子链嵌入 MMT 层间,从而使其片层间距较原始 MMT 大。比较而言,十六烷基三苯基溴化磷较三苯基羟乙基溴化磷对 MMT 片层间距扩大更有效,使 PBS 分子更有利于链嵌入

MMT 层间,从而使 PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料中 MMT 的 (001) 面表现出更大的片层间距。

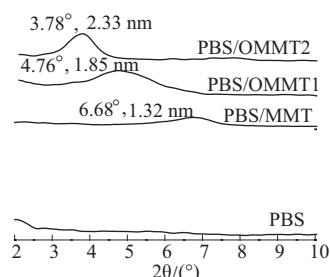
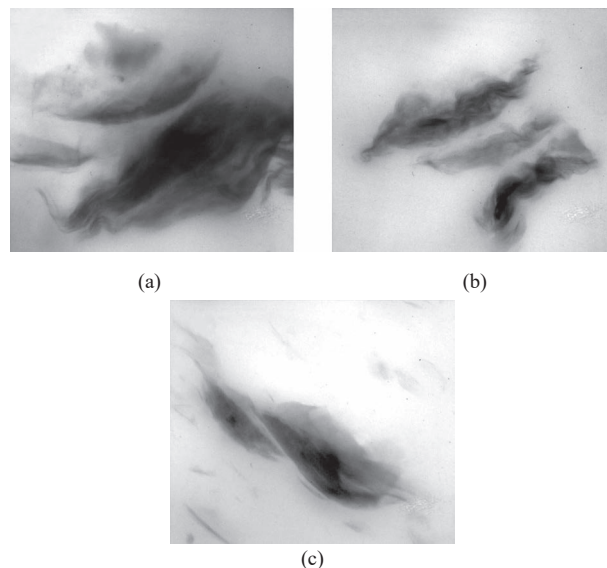


图3 纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的 XRD 曲线

PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的 TEM 图如图 4 所示,图中深色部分为 MMT 片层,其余为 PBS 基体。从图 4 可以看出, PBS/MMT 复合材料中的 MMT 片层主要呈聚集形式堆积在 PBS 基体中(图 4a),而经有机处理的 MMT 较原始 MMT 聚集体变小,分散片层增多(图 4b 和图 4c)。比较而言, PBS/OMMT2 复合材料中的 MMT 片层较 PBS/OMMT1 复合材料中的 MMT 片层更分散,与图 3 的 XRD 结果吻合。

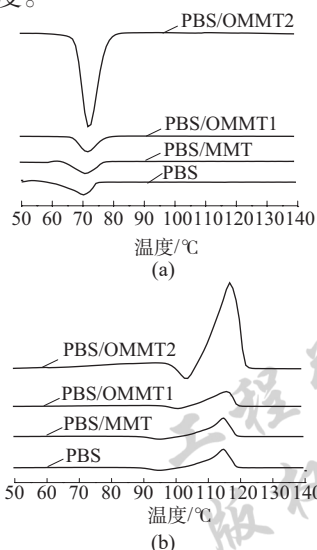


a—PBS/MMT ; b—PBS/OMMT1 ; c—PBS/OMMT2

图4 PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的 TEM 图

纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的结晶和熔融曲线如图 5 所示,对应的结晶温度 (T_c) 和熔融温度 (T_m) 见表 1。从图 5 和表 1 可以看出, PBS 基复合材料的结晶温度和熔融温度均高于纯 PBS,且 PBS/OMMT1, PBS/OMMT2 复合材料的结晶温度和熔融温度均高于

PBS/MMT 复合材料,比较而言,PBS/OMMT2 复合材料的结晶温度和熔融温度较 PBS/OMMT1 复合材料高。这可能是由于复合材料中的 MMT 和 OMMT1 和 OMMT2 在 PBS 结晶中充当了异相成核剂,使 PBS 在高温开始结晶,且促进了其结晶,MMT 分散片层越多,越有利于 PBS 在高温结晶,结晶度越高,熔融时所需的温度越高,由于 OMMT1 和 OMMT2 在 PBS 中较 MMT 分散均匀,其结晶温度更高,结晶度更高,熔融时所需的温度更高,表现出较高的熔融温度。同理,PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料表现出了更高的结晶温度和熔融温度。



a—结晶曲线;b—熔融曲线

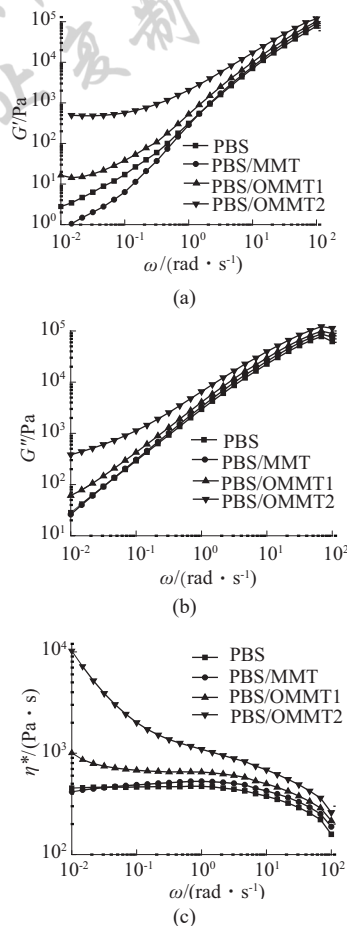
图5 纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的结晶和熔融曲线

表1 纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的熔融和结晶温度

样品	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$
PBS	70.20	114.21
PBS/MMT	70.76	114.55
PBS/OMMT1	71.12	115.13
PBS/OMMT2	71.87	115.91

纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 和复数黏度 (η^*) 与角频率 (ω) 关系曲线如图 6 所示。从图 6a 可以看出,随着 ω 的增大,纯 PBS 和 PBS 复合材料的 G' 均增大,低频区 PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的 G' 均高于纯 PBS,且 PBS/OMMT2 复合材料的 G' 高于 PBS/OMMT1 复合材料,这可能是 OMMT1, OMMT2 在 PBS 基体中充当了交联点,阻碍了 PBS 分子链的运动,使熔体的弹性增大,表现出较大的 G' ,而 OMMT2 较

OMMT1 在 PBS 基体中分布更均匀,对 PBS 分子链的运动阻碍更大,因而 PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料的 G' 大。图 6a 也表明,低频区 PBS/MMT 复合材料的 G' 较纯 PBS 小,这可能是由于 MMT 在 PBS 中主要呈聚集体分布,不利于 PBS 分子链的交联,使其 G' 反而低于纯 PBS。从图 6b 可以看出,随着 ω 的增大,纯 PBS 和 PBS 复合材料的 G'' 均逐步增大,低频区 PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的 G'' 均高于纯 PBS,且 PBS/OMMT2 复合材料的 G'' 高于 PBS/OMMT1 复合材料,这可能是由于 OMMT1, OMMT2 增加了 PBS 分子链的缠结和相互作用,其在 PBS 中分散越均匀越有利于 PBS 分子链的缠结和相互作用,因而表现出较高的 G'' 。比较而言, PBS/MMT 复合材料的 G'' 低于纯 PBS,这可能是由于以聚集体分布在 PBS 中的 MMT 不利于 PBS 分子链的缠结和相互作用,对 PBS 复合材料发生粘性形变时所需要的能



a— G' 与 ω 关系曲线;b— G'' 与 ω 关系曲线;
c— η^* 与 ω 关系曲线

图6 纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的动态流变性能

量影响较小,因而 G'' 较小。从图 6c 可以看出,随着 ω 增大, η^* 逐步减小,这是由于纯 PBS 和 PBS 复合材料均表现出了剪切变稀行为。在低频区, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料中由于 PBS 分子链的缠结和相互作用较纯 PBS 大, PBS 分子链的活动能力较弱,表现出较高的 η^* , 比较而言, PBS/OMMT2 复合材料中 PBS 分子链的缠结和相互作用较 PBS/OMMT1 复合材料大而表现出更大的 η^* 。PBS/MMT 复合材料中由于 MMT 对 PBS 分子链的缠结和相互作用影响较小因而其 η^* 与纯 PBS 接近。

纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的缺口冲击强度、拉伸强度、弯曲强度以及弯曲弹性模量如图 7 所示。从图 7a 可以看出, PBS/MMT 复合材料的缺口冲击强度较纯 PBS 低,而 PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的缺口冲击强度则高于纯 PBS,这可能是由于 PBS/MMT 复合材料中 MMT 主要以聚集体为主,这使样品在受到外界冲击时较易受到破坏,从而表现出较低的缺口冲击强度,而 PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料中由于有部分分散的 OMMT1 和 OMMT2,这些分散的 MMT 对基体具有良好的增韧作用,从而使复合材料表现出更高的缺口冲击强度,比较而言, PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料中分散的有机蒙脱土片层更多,从而使其

冲击韧性也更高。图 7a 和图 7b 表明, PBS 基复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量均高于纯 PBS,且 PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料高于 PBS/MMT 复合材料, PBS/OMMT2 复合材料高于 PBS/OMMT1 复合材料。这可能是由于 MMT 和有机蒙脱土的刚度较高且在 PBS 中的诱导结晶促进了 PBS 基体中有更多的结晶区,从而使 PBS 基复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量提高,比较而言,经三苯基羟乙基溴化磷和十六烷基三苯基溴化磷分别改性的 MMT 在 PBS 基体中有更多的分散层,使 PBS 基体中的结晶区域更多,从而表现出更高的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量,而 PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料中有机蒙脱土分散更均匀,因而拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量更高。

3 结论

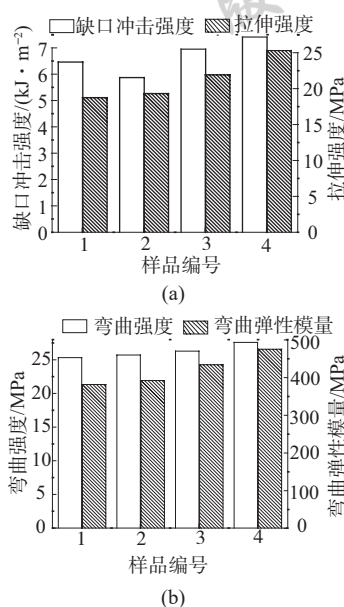
系统研究了 MMT 改性剂结构对 PBS 复合结晶性能、流变性能和力学性能的影响,获得了以下主要结论:

(1) PBS/OMMT1, PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/MMT 复合材料中 MMT 分散均匀,且 PBS/OMMT2 复合材料中 MMT 较 PBS/OMMT1 复合材料分散均匀。

(2) DSC 测试结果表明, MMT 在 PBS 中分散越均匀,越有利于促进 PBS 在高温结晶,比较而言, PBS/OMMT1, PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/MMT 复合材料具有更高的结晶温度和熔融温度, PBS/OMMT2 复合材料较 PBS/OMMT1 复合材料具有更高的结晶温度和熔融温度。

(3) 动态流变结果表明,随着 ω 的增大,纯 PBS 和 PBS 复合材料的 G' 和 G'' 均增大, η^* 降低,在低频区, PBS/OMMT1, PBS/OMMT2 复合材料的 G' , G'' 和 η^* 高于 PBS/MMT 复合材料和纯 PBS,而 PBS/OMMT2 复合材料的 G' , G'' 和 η^* 高于 PBS/OMMT1 复合材料。

(4) 力学性能测试表明, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的缺口冲击强度、拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量均高于 PBS/MMT 复合材料和纯 PBS,且 PBS/OMMT2 复合材料的缺口冲击强度、拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量均高于 PBS/OMMT1 复合材料。



样品编号: 1—PBS; 2—PBS/MMT; 3—PBS/OMMT1; 4—PBS/OMMT2

a—缺口冲击强度及拉伸强度; b—弯曲性能

图7 纯 PBS, PBS/MMT, PBS/OMMT1 和 PBS/OMMT2 复合材料的力学性能

参考文献

- [1] Xu Jun, Guo Baohua. Poly(butylene succinate) and its copolymers: Research, development and industrialization[J]. *Biotechnology Journal*, 2010, 5(11):1 149–1 163.
- [2] 刁晓倩, 翁云宣, 宋鑫宇, 等. 国内外生物降解塑料产业发展现状[J]. *中国塑料*, 2020, 34(5):123–135.
- Diao Xiaoqian, Weng Yunxuan, Song Xinyu, et al. Current development situation of biodegradable plastic industry in China and abroad[J]. *China Plastics*, 2020, 34(5):123–135.
- [3] Li Dongna, Ma Xiaojun, Li Jianing, et al. Insights into enhanced polyhydroxyalkanoate production by the synergistic use of waste wood hydrolysate and volatile fatty acids by mixed microbial cultures[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337. DOI:10.1016/j.biortech.2021.125488.
- [4] 高雪雨, 闫莉. 磷系阻燃剂阻燃聚乳酸及其增韧改性研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(12):162–166.
- Gao Xueyu, Yan Li. Research progress on phosphorus flame retardant polylactic acid and its toughening modification[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(12):162–166.
- [5] 陈荣源, 杨晓壮, 安佳豪, 等. 多壁碳纳米管改性 PLA/PE 复合材料的结构与性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(12):1–7.
- Chen Rongyuan, Yang Xiaozhuang, An Jiahao, et al. Structure and properties of PLA/PE composites modified by multi-walled carbon nanotube[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(12):1–7.
- [6] 薛丹, 李丽华, 张恒, 等. 聚乳酸遥爪聚合物合成及改性[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(11):27–32.
- Xue Dan, Li Lihua, Zhang Heng, et al. Synthesis and modification of polylactic acid telechelic polymer[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(11):27–32.
- [7] 田琴, 秦舒浩, 杨明, 等. EAA 对 PBS/OMMT 复合材料结构和性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2016, 45(9):13–17.
- Tian Qin, Qin Shuhao, Yang Ming, et al. Effects of ethylene–acrylic acid copolymers on structure and performance of poly (butylenes succinate)/organic montmorillonite composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 45(9):13–17.
- [8] Tian Qin, Qin Shuhao, Zhou Rong, et al. Effect of reaction medium on clay dispersion and mechanical properties in poly(butylene succinate)/organoclay nanocomposites[J]. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2016, 22(4):423–432.
- [9] Tian Qin, Qin Shuhao, Zhou Rong, et al. Effect of compatibilizer and organoclay content on structure, thermal and mechanical properties of poly (butylenes succinate)/ethylene acrylic acid/organoclay nanocomposites[J]. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2017, 23(3):219–227.
- [10] Labet M, Thielemans W. Synthesis of polycaprolactone: A review[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(12):3 484–3 504.
- [11] 陈海莲, 梁宇熙, 阳范文, 等. PCL 抑菌改性及其在肿瘤放疗体位固定器 3D 打印中的应用[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(5):29–33, 45.
- Chen Hailian, Liang Yuxi, Yang Fanwen, et al. Antibacterial modification of PCL and its application on 3D printing for tumor radiotherapy fixator[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(5):29–33, 45.
- [12] 宋伟强, 刘箫华, 王宏森, 等. PBAT/PLA 共混物薄膜的辐射效应及形状记忆研究[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(12):27–31, 37.
- Song Weiqiang, Liu Xiaohua, Wang Hongsen, et al. Study on radiation effects and shape memory of PBAT/PLA blend membrane[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(12):27–31, 37.
- [13] 晏永祥, 贺哲, 张跃飞, 等. 可生物降解塑料 PBAT 共混改性研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(5):158–161.
- Yan Yongxiang, He Zhe, Zhang Yuefei, et al. Research of blending modification of biodegradable plastic PBAT[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(5):158–161.
- [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] 姜英勇, 任亮, 任重, 等. 生物可降解 PBS 聚酯合金的制备与性能调控[J]. *材料导报*, 2021, 35(22):22 151–22 171.
- Jiang Yingyong, Ren Liang, Ren Zhong, et al. Preparation and performance control of biodegradable PBS polyester alloy[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(22):22 151–22 171.
- [16] Zhu Tingting, Zhou Chunhui, Kabwe F B, et al. Exfoliation of montmorillonite and related properties of clay/polymer nanocomposites[J]. *Applied Clay Science*, 2019, 169:48–66.
- [17] 田琴. 超临界条件下蒙脱土颗粒微观形态的调控及其对 PBS、PP 性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- Tian Qin. Regulation of microstructure of montmorillonite particles under supercritical condition and its effect on properties of PBS and PP[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.