

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.05.025

不同填料增强 PBS 复合材料的力学性能

程蹈,朱诗留,柯骆,刘盛全,陈玉霞,郭勇

(安徽农业大学,合肥 230036)

摘要:以聚丁二酸丁二酯(PBS)为基体,竹粉(BF)、竹炭(BC)及 CaCO_3 为填料,经注塑成型法分别制备了PBS/BF, PBS/BC, PBS/ CaCO_3 复合材料,对比分析填料种类及用量对复合材料弯曲性能与冲击性能的影响。结果表明,随填料含量的增加, PBS/BF 复合材料的弯曲强度逐渐提高,冲击强度先提高后降低; PBS/BC 及 PBS/ CaCO_3 复合材料的弯曲强度与冲击强度均呈先提高后降低的趋势。为获得较好综合力学性能的复合材料,建议填料的较佳用量为 10%~30%。综合来看,添加 BC 改性综合效果最好, PBS 熔体与 BC 间可形成较深的界面扩散和机械互锁, PBS 复合材料得以有效地增强增韧。

关键词:聚丁二酸丁二酯;共混改性;弯曲强度;冲击韧性

中图分类号: TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)05-0131-06

Mechanical Properties of Different Filler Reinforced PBS Composites

Cheng Dao, Zhu Shiliu, Ke Luo, Liu Shengquan, Chen Yuxia, Guo Yong

(Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China)

Abstract : With poly (butylene succinate) (PBS) as the matrix, bamboo fiber (BF), bamboo charcoal (BC) and CaCO_3 as fillers, PBS / BF, PBS / BC, and PBS / CaCO_3 composites were prepared by injection molding. The effects of filler kind and content on the bending and impact properties of the composites were analyzed and compared. The results indicated that with the increase of filler content, the bending strength of PBS / BF composites increases gradually, and the impact strength increases first and then decreases. The bending strength and impact strength of PBS / BC and PBS / CaCO_3 composites both show a trend of increase first and then decrease. In order to obtain better comprehensive mechanical properties, it is recommended that the optimum amount of filler will be 10%–30%. The combined effect of adding BC is the best, where a deep interfacial diffusion and mechanical interlocking can be formed between PBS melt and BC, and PBS composite can effectively enhanced and toughened.

Keywords : poly (butylene succinate) ; blending modification ; bending strength ; impact toughness

聚丁二酸丁二酯(PBS)作为一种完全可生物降解塑料,其制品展现了优异的热塑性、分子柔韧性和完全可生物降解性,其废弃制品可被自然界中各种微生物或动植物体内的酶完全分解、代谢为 CO_2 和 H_2O ,是一种具有很大发展潜力的脂肪族聚酯产品^[1-3]。但 PBS 产品存在生产成本低、结晶度高、强度低、热变形温度低等问题,限制了其推广使用^[4-5]。为降低生产成本,改善 PBS 产品性能,扩大应用范围,可对其进行改性处理生产相应的复合材料。其

中物理共混改性凭借其低成本,操作简单易实现的独特优势已成为聚合物复合材料改性的主要方法。

PBS 共混改性主要通过向聚合物基体中添加无机粉体^[6]、淀粉^[7-9]、天然植物纤维^[10-14]等低成本填料,并使各组分均匀混合以达到提高材料性能的目的^[15]。影响 PBS 复合材料共混改性效果的因素主要有加工条件、填料种类、含量及粒径,加工助剂等,不同的选择会直接影响复合材料的产品性能^[16-17]。为探究不同改性填料间的作用差异,笔者分别以竹

基金项目:安徽省自然科学基金项目(1708085MC56),安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2016A220),安徽省大学生创新创业训练计划项目(201710364067)

通讯作者:郭勇,副教授,博士,主要研究方向为生物质材料加工及利用 E-mail: fly828828@163.com

收稿日期: 2019-03-04

引用格式:程蹈,朱诗留,柯骆,等.不同填料增强 PBS 复合材料的力学性能[J].工程塑料应用,2019,47(5):131–136.

Cheng Dao, Zhu Shiliu, Ke Luo, et al. Mechanical properties of different filler reinforced PBS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):131–136.

粉(BF)、竹炭(BC)、碳酸钙(CaCO_3)作为填料改性PBS,通过注塑成型法制备出相应的试样。探究不同种类、不同含量的填料对PBS复合材料的弯曲及冲击性能的影响,并结合扫描电子显微镜(SEM)分析其影响机制。以期为PBS复合材料的进一步开发与应用提供科学依据和理论支持。

1 实验部分

1.1 主要原料

BF: 150 μm , 江门市新会区双水镇木江伟华香料厂;

BC: 48 μm , 遂昌县神龙谷炭业有限公司;

碳酸钙粉末(CaCO_3): 150 μm , 深圳市龙华新区大浪中盛塑胶化工厂;

PBS: 注塑级, 东莞市凯茜利塑胶原料有限公司;

润滑剂: STR-530, 上海光裕化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱: DHG-9070 型, 上海三发科学仪器有限公司;

高速混合机: SHR-25A 型, 张家港市嘉华塑料机械有限公司;

转矩流变仪: XSS-300 型, 上海科创橡塑机械设备有限公司;

强力塑胶粉碎机: PC-400A 型, 龙河塑胶机械有限公司;

注塑机: HYF-500 型, 宁波海鹰塑料机械制造有限公司;

电子万能力学试验机: AG-X Flux 型, 日本岛津公司;

悬臂梁冲击试验机: DR-802B 型, 东莞市东日仪器有限公司;

SEM: S-4800 型, 日本日立公司。

1.3 试样制备

所有原料置于 80℃ 电热恒温鼓风干燥箱中干燥 24 h 后, 将 BF、BC 及 CaCO_3 粉末分别与 PBS 进行高速共混处理。共混转速 50 r/min, 共混时间 20 min。为改善加工条件, 向每个配比组分中添加含量为 PBS 和填料混合物总量 2% 的润滑剂。将共混后的混合料置于转矩流变仪中进行密炼制备 PBS 复合材料, 温度为 130℃, 时间为 10 min。将 PBS 复合材料放入塑胶粉碎机进行粉碎处理得到均匀颗粒, 再将复合颗粒置于注塑机中注射成型, 注射温度为 130℃, 压力 10 MPa, 样条尺寸为

100 mm × 10 mm × 3.5 mm。试验中同时制备纯 PBS 样条作为空白对照, 纯 PBS 样条的平均密度为 1.202 g/cm³, 添加 BF、BC 及 CaCO_3 的 PBS 复合材料平均密度分别为 1.216 ~ 1.292, 1.233 ~ 1.379, 1.234 ~ 1.511 g/cm³。

1.4 性能测试

弯曲性能按 GB/T 1449-2005 用电子万能力学试验机于三点弯曲模式下测试, 试样尺寸为 100 mm × 10 mm × 3.5 mm, 加载速度为 2 mm/min, 跨距为 52 mm。

冲击强度按 GB/T 1843-2000 用悬臂梁冲击试验机测试, 试样尺寸为 80 mm × 10 mm × 3.5 mm, 每组试样重复 10 次取平均值。

SEM 测试: 将试样置于液氮中淬断, 断面喷金后利用 SEM 观察断面形貌, 加载电压 3.0 kV。

2 结果与讨论

2.1 不同填料增强 PBS 复合材料的弯曲性能

图 1 给出了不同填料增强 PBS 复合材料在三点弯曲模式下的应力-应变曲线。由图 1 可见, 不同填料均对 PBS 基体具有一定的增强作用, 且应力-应变曲线斜率随填料含量的增加而逐渐增大, 即 PBS 复合材料的刚性逐渐增强。其中 BF 对 PBS 基体的增强作用最为明显, 随着 BF 含量的增加, PBS/BF 复合材料所能承受的最大应力越来越大, 应变逐渐减小。至 BF 含量高于 30% 时, PBS/BF 复合材料呈现明显的脆性断裂特征。而对于 PBS/BC 复合材料, 仅当 BC 含量高于 40% 时, 才呈现明显的脆性断裂特征, 但 PBS/BC 复合材料所能承受的最大应力明显小于 PBS/BF 复合材料。随 CaCO_3 含量增加, PBS/ CaCO_3 复合材料的最大承载应力得以轻微提升。

表 1、表 2 及表 3 列出添加不同填料的 PBS 复合材料的弯曲强度与弯曲弹性模量。可以看出, 向 PBS 基体中引入三种填料均具有增强作用。其中, 随着 BF 含量的增加, PBS/BF 复合材料的弯曲强度与弯曲弹性模量逐渐提高, 并在 BF 含量为 50% 时分别达到了最大值 28.49 MPa 和 1886.69 MPa。相较于纯 PBS, 弯曲强度提高了 41.04%, 弯曲弹性模量提高了 5.12 倍。这主要是因为 BF 作为具有一定长径比和强度的纤维, 对复合材料的刚性具有增强作用。同时, BF 纤维在复合体系中可以有效承载载荷, 使应力得以传递和分散^[18], 进而提高了复合材料的弯曲性能。但当 BF 含量过高时, 较少的

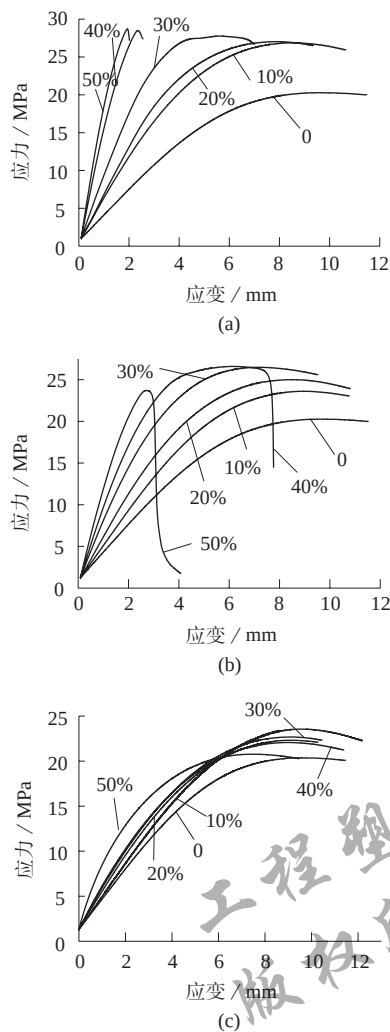
a—PBS/BF; b—PBS/BC; c—PBS/CaCO₃

图1 不同含量填料增强PBS复合材料应力-应变曲线

表1 PBS/BF复合材料的弯曲性能

BF 含量 / %	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模量 / MPa
0	20.20	308.44
10	26.22	514.88
20	26.72	629.96
30	27.52	797.26
40	28.07	1 540.04
50	28.49	1 886.69

表2 PBS/BC复合材料的弯曲性能

BC 含量 / %	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模量 / MPa
10	23.41	385.62
20	24.95	470.75
30	26.46	647.43
40	26.69	816.20
50	23.80	1141.03

PBS基体难以对BF形成有效包覆,且由于BF表面羟基的分子间作用使其易在基体上发生团聚,形成弱界面层,引起界面相容性的下降。同时,BF的增

表3 PBS/CaCO₃复合材料的弯曲性能

CaCO ₃ 含量 / %	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模量 / MPa
10	23.06	354.48
20	22.17	365.89
30	22.40	379.28
40	21.80	399.12
50	20.73	451.70

加会起到交联点的作用,增加了分子链运动的阻力,也会影响弯曲强度^[19-20]。

对于PBS/BC复合材料,弯曲强度随BC含量的增加呈先提高后降低的趋势,但均高于纯PBS,并在BC含量为40%时提高了32.13%。弯曲弹性模量则随BC含量的增加而逐渐提高,于BC含量为50%时达到最大值1 141.03 MPa,较纯PBS提升了269.94%。BC凭借其较大的比表面积和高孔隙率,与PBS基体具有良好的界面相互作用,有助于提升复合材料的弯曲性能。但过量的BC粒子易在PBS基体上聚集,不利于PBS/BC的界面相容性,导致弯曲强度下降。此外,对比可发现BC对PBS复合材料弯曲性能的增强效果明显不如BF。这可能是因为BC炭化后,使得其中的纤维素成分急剧减少,而植物纤维的强度主要取决于纤维素的含量,纤维素含量越高,植物纤维的强度就越高^[21-23]。因而,BC的增强效果不如BF。

CaCO₃的引入轻微提升了PBS复合材料的弯曲强度与弯曲弹性模量。随CaCO₃含量的增加,弯曲强度呈先提高后降低的趋势,弯曲弹性模量则缓慢提高。在CaCO₃含量为10%时,弯曲强度达到最大值23.06 MPa,较纯PBS提高了14.16%;CaCO₃含量为50%时,弯曲弹性模量达到最大值451.70 MPa,较纯PBS提高了46.45%。CaCO₃作为无机刚性粒子,在PBS分子中可起到刚性骨架作用,承载部分载荷,但其本身强度有限,对PBS复合材料的增强效果有限。在保证材料强度要求的前提下,可加入适量的CaCO₃用以降低生产成本。

2.2 不同填料增强PBS复合材料的冲击性能

不同填料增强PBS复合材料的冲击性能如表4所示。可见PBS复合材料的冲击强度均随填料含量的增加而呈现先提高后降低的趋势。其中PBS/BF复合材料仅在BF质量分数为10%时,冲击强度较纯PBS得以增强,提高了15.22%。此后,随着BF含量增加,冲击强度逐渐降低,至BF含量为50%时,冲击强度下降了127.37%。BF含量较低时,对PBS/BF复合材料的界面相容性影响较小,

增强作用占主导地位。而随着 BF 含量越来越高,一方面由于 BF 的聚集成团导致不能均匀分散,破坏了 PBS 基体的连续性,使之不能良好地吸收和传递能量,抵御变形的能力下降;另一方面团聚的 BF 在 PBS 基体中易产生应力集中点,形成应力集中效应,而 BF 纤维具有一定的刚性,在瞬间冲击力的作用下易发生急剧破坏,且不能快速有效地分散外力,产生缺陷的几率增大,进而导致材料的冲击性能下降^[18,24-25]。

表 4 不同填料增强 PBS 复合材料的冲击强度

填料种类	填料含量 / %	冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	填料种类	填料含量 / %	冲击强度 / (kJ·m ⁻²)
无	0	29.445		30	37.187
	10	33.926	BC	40	19.633
	20	24.839		50	13.687
BF	30	21.317		10	31.906
	40	13.116		20	46.283
	50	12.950	CaCO ₃	30	46.706
BC	10	35.578		40	48.353
	20	39.486		50	47.922

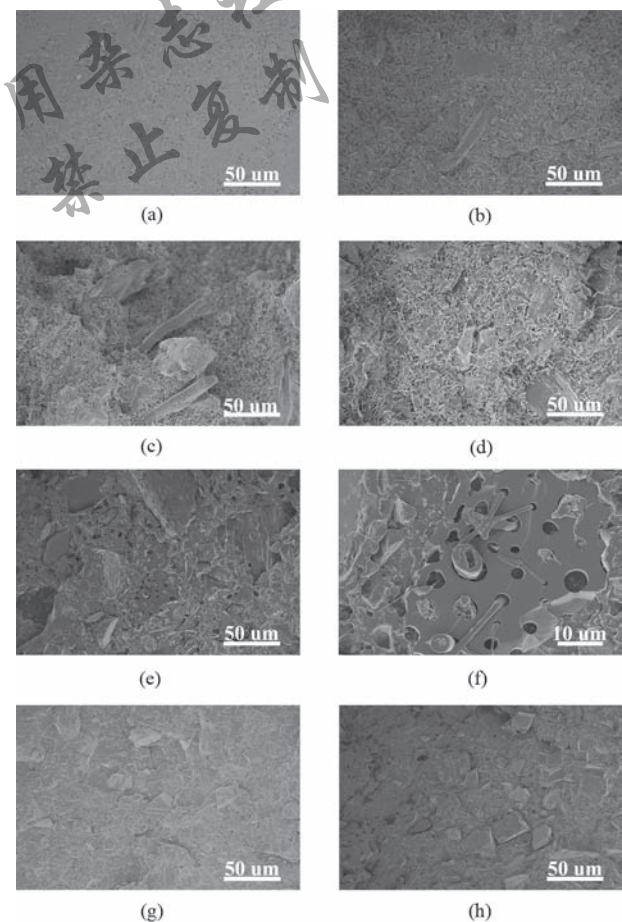
对于 PBS/BC 复合材料,其冲击强度随 BC 含量增加的变化趋势与 PBS/BF 复合材料基本一致。在 BC 含量为 30% 以内时, PBS/BC 复合材料的冲击强度均比纯 PBS 的大,并在 BC 含量为 20% 时达到最大值 39.486 kJ/m²,较纯 PBS 提高了 34.10%。之后随 BC 含量的增加而逐渐降低, BC 含量 50% 时,复合材料冲击强度仅为 13.687 kJ/m²,较纯 PBS 降低了 15.758 kJ/m²。此外,对比可发现, PBS/BC 复合材料的耐冲击性明显优于 PBS/BF 复合材料,这可能是因为 BC 粒径较小,具有较大的比表面积和孔隙率,与 PBS 基体具有较大的接触面积,可在界面形成较深的界面扩散和机械互锁效应,良好的界面相互作用使得 PBS/BC 的界面粘结强度提高,应力在界面上得以有效扩散,吸收大量的冲击能,产生增韧作用,提升了复合材料的冲击韧性。

向 PBS 中引入 CaCO₃ 可有效提高 PBS 复合材料的韧性,添加 CaCO₃ 的 PBS 复合材料的冲击强度均较纯 PBS 高,并在 CaCO₃ 含量为 40% 时达到最大值 48.353 kJ/m²,较纯 PBS 提高了 64.21%,之后逐渐减小。CaCO₃ 作为一种成熟的聚合物改性填料,在 PBS 基体中既有引发银纹的作用,促进基体产生剪切屈服和银纹化,增强 PBS 基体的能量吸收,使得复合材料对裂纹起始的扩展能力增加;又能够起到应力传导的作用,使冲击能量更加均匀地扩散、消耗,进而提高冲击韧性^[26]。但当 CaCO₃ 的

含量过高时,易发生聚集,受到瞬间冲击力作用时,在 CaCO₃ 粒子间易出现较大的裂纹引发快速破坏,使复合材料的冲击韧性降低。

2.3 不同填料增强 PBS 复合材料的 SEM 分析

图 2 给出了不同填料增强 PBS 复合材料断面 SEM 照片。可以看出,纯 PBS 的断面比较光滑,存在大量孔隙结构。添加填料后,复合材料的断面变得粗糙,填料粒子多以不均匀状态分布于 PBS 基体上。填料含量较低时, PBS 基体可对填料形成较好的包覆,填料粒子与 PBS 基体间具有较好的界面作用,如图 2b、图 2g,有助于复合材料性能的提升。而当填料含量较高时,填料粒子在 PBS 基体上发生聚集,如图 2c、图 2h,填料与 PBS 基体间的界面作用减弱,削弱了界面粘接强度。此外,由 PBS/BC 复合材料的断面 SEM 照片,发现 PBS 熔体进入了 BC



a—PBS; b—PBS/20% BF; c—PBS/50% BF;
d—PBS/20% BC; e—PBS/50% BC; f—PBS/50% BC;
g—PBS/20% CaCO₃; h—PBS/50% CaCO₃
f 图放大 2000 倍,其它图放大 500 倍

图 2 不同填料增强 PBS 复合材料断面 SEM 照片

的孔隙中,与 BC 粒子形成了良好的界面渗透与机械互锁,界面作用力增强,有效提升了 PBS/BC 复合材料的性能。

3 结论

(1) 在填料用量适宜时, PBS 基体可对填料粒子形成有效包覆,填料与基体间形成了良好的界面相互作用,可有效提高 PBS 复合材料的抗弯曲与抗冲击性能。PBS/BF, PBS/BC 及 PBS/CaCO₃ 复合材料的最优弯曲强度较纯 PBS 分别提高了 41.04%, 32.13% 和 14.16%; 弯曲弹性模量分别提高了 511.69%, 269.94% 和 46.45%; 冲击强度分别提高了 15.22%, 34.10% 和 64.21%。

(2) 有利于提升 PBS 复合材料弯曲性能的填料依次为 BF, BC 及 CaCO₃, 有利于提高冲击韧性的填料依次为 CaCO₃, BC 及 BF。为提高 PBS 复合材料的综合力学性能, BF, BC 及 CaCO₃ 的建议用量为 10%~30%, 且 BC 的综合增强增韧作用最优。

参考文献

- [1] 解肖鹏,汪鹏,黄嘉荣,等.天然高分子/聚丁二酸丁二醇酯共混物研究进展[J].化学研究与应用,2015,27(9):1 225-1 231.
Xie Xiaopeng, Wang Peng, Huang Jiarong, et al. Review of the blend of natural polymers / poly(butylene succinate)[J]. Chemical Research & Application, 2015, 27(9): 1 225-1 231.
- [2] 胡洁,李东风,臧红霞,等. PBS 降解塑料降解性能的研究[J].化工新型材料,2016,44(3):175-177.
Hu Jie, Li Dongfeng, Zang Hongxia, et al. Study on the degradation property of poly(butylene succinate) degradable plastic[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(3): 175-177.
- [3] Lim S K, Jang S G, Lee S I, et al. Preparation and characterization of biodegradable poly (butylene succinate) (PBS) foams[J]. Macromolecular Research, 2008, 16(3): 218-223.
- [4] Hwang S Y, Yoo E S, Im S S. The synthesis of copolymers, blends and composites based on poly (butylene succinate)[J]. Polymer Journal, 2012, 44(12): 1 179.
- [5] Saeed U, Nawaz M A, Al-Turaif H A. Wood flour reinforced biodegradable PBS / PLA composites[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(19): 2 641-2 650.
- [6] 杨学莉,于磊,张秀成,等. 硫酸钙晶须填充 PBS 的力学性能与热稳定性[J]. 塑料, 2015, 44(2): 48-51.
Yang Xueli, Yu Lei, Zhang Xiucheng, et al. Mechanical and thermal stability properties of calcium sulfate whisker / PBS composite[J]. Plastics, 2015, 44(2): 48-51.
- [7] 江晓翔. 淀粉 / PBS 共混改性及降解塑料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2010.
Jiang Xiaoyi. Preparation and properties of starch / PBS blending modification and degradable plastics[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2010.
- [8] 李壮,李宁,何秀芝,等. PBS / 淀粉复合材料的研制[J]. 塑料科技, 2015, 43(7): 75-79.
Li Zhuang, Li Ning, He Xiuzhi, et al. Preparation and study of PBS / starch composites[J]. Plastics Science & Technology, 2015, 43(7): 75-79.
- [9] Yun I S, Hwang S W, Shim J K, et al. A study on the thermal and mechanical properties of poly (butylene succinate) / thermoplastic starch binary blends[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2016, 3(3): 289-296.
- [10] 冯正明,范哲懿,洪玉琢,等. PBS / 木粉复合发泡材料的制备及性能研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(10): 23-27.
Feng Zhengming, Fan Zheyi, Hong Yuzhuo, et al. Preparation and characterization of poly(butylene succinate) / wood flour composite foams[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(10): 23-27.
- [11] 魏小淦,卢翔,陈荣源,等. PBS / 蒲草纤维复合材料的制备与性能[J]. 塑料, 2015, 44(2): 36-39.
Wei Xiaosong, Lu Xiang, Chen Rongyuan, et al. Preparation and properties of PBS / typha fiber composite[J]. Plastics, 2015, 44(2): 36-39.
- [12] Frollini E, Bartolucci N, Sisti L, et al. Biocomposites based on poly (butylene succinate) and curaua: Mechanical and morphological properties[J]. Polymer Testing, 2015, 45: 168-173.
- [13] 宋洁,延小雨,张敏,等. PBS / 天然虎杖提取物复合材料的界面作用及其性能[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(8): 13-17.
Song Jie, Yan Xiaoyu, Zhang Min, et al. Interfacial interaction of PBS / natural polygonum cuspidatum siebet zucc extracts composite and its performances[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8): 13-17.
- [14] 王亚洁,吴进雪,公艳艳,等. 聚丁二酸丁二醇酯 / 椰壳纤维复合材料的界面改性研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(6): 59-64.
Wang Yajie, Wu Jinxue, Gong Yanyan, et al. Study on interface modification of coir-reinforced poly(butylene succinate) composites[J]. China Plastics, 2017, 31(6): 59-64.
- [15] 李长存,刘洪武,邓琼. 聚丁二酸丁二醇酯产业现状及技术进展[J]. 合成纤维工业, 2014, 37(2): 60-63.
Li Changcun, Liu Hongwu, Deng Qiong. Poly(butylene succinate) industry status and technological progress[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2014, 37(2): 60-63.
- [16] 张敏,强琪,李莉,等. 不同植物纤维 / PBS 复合材料的性能差异比较[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(3): 69-73.
Zhang Min, Qiang Qi, Li Li, et al. A performance comparison of different plant fiber / PBS composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, 29(3): 69-73.
- [17] Tian Q, Qin S, Zhou R, et al. Effect of compatibilizer and organoclay content on structure, thermal, and mechanical properties of poly (butylene succinate) / (ethylene acrylic acid) / organoclay nanocomposites[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2017, 23(3): 219-227.
- [18] 许建稳. PBS / 竹纤维与 PBS / 竹粉复合材料的制备与表征

- [D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- Xu Jianwen. Preparation and characterization of PBS / bamboo fiber and PBS / bamboo powder composites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [19] 丁芳芳, 张敏, 王景平, 等. 玉米秸秆纤维 / PBS 复合材料的制备及性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(10):158-161.
- Ding Fangfang, Zhang Min, Wang Jingping, et al. Preparation and performance of corn straw fiber / PBS composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(10):158-161.
- [20] 付瑶, 李壮, 曹国喜. PBS / 竹粉复合材料的力学性能研究 [J]. 化工新型材料, 2016(4):134-136.
- Fu Yao, Li Zhuang, Cao Guoxi. Research on PBS / bamboo powder composite material[J]. New Chemical Materials, 2016(4):134-136.
- [21] Mwaikambo L Y, Ansell M P. The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok for composite reinforcement[J]. Die Angewandte Makromolekulare Chemie, 1999, 272(1):108-116.
- [22] 刘如, 曹金珍, 彭尧. 木粉组分对木塑复合材料性能的影响研究进展 [J]. 化工进展, 2014, 33(8):2 072-2 083.
- Liu Ru, Cao Jinzhen, Peng Yao. Influences of wood components on the property of wood-plastic composites[J]. Chemical Industry & Engineering Progress, 2014, 33(8):2 072-2 083.
- [23] Luo Z, Li P, Cai D, et al. Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk[J]. Industrial Crops & Products, 2017, 95:521-527.
- [24] 宋丽贤, 张平, 姚妮娜, 等. 木粉粒径和填量对木塑复合材料力学性能影响研究 [J]. 功能材料, 2013, 44(17):2 451-2 454.
- Song Lixian, Zhang Ping, Yao Nina, et al. Study on effect of particle diameter and filling quantity of wood flour on mechanical properties of wood-plastics composite[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(17):2 451-2 454.
- [25] Li T Q, Wolcott M P. Rheology of wood plastics melt, part 2: Effects of lubricating systems in HDPE / maple composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2006, 46(4):464-473.
- [26] 李东明, 漆宗能. 碳酸钙增强聚丙烯复合材料的断裂韧性 [J]. 高分子材料科学与工程, 1991(2):18-25.
- Li Dongming, Qi Zongneng. The fracture toughness CaCO_3 reinforced polypropylene composite[J]. Polymeric Materials Science & Engineering, 1991(2):18-25.
- (上接第 130 页)
- [3] Auras R, Harte B, Selke S. An overview of polylactides as packaging materials[J]. Macromolecular Bioscience, 2004, 4(9):835-864.
- [4] Wang Y, Wang D, Wang X, et al. A novel phosphorus-containing poly(lactic acid) toward its flame retardation[J]. Polymer, 2011, 52(2):233-238.
- [5] Rasal R M, Janorkar A V, Hirt D E. Poly(lactic acid) modifications[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(3):338-356.
- [6] Chen X, Zhuo J, Jiao C. Thermal degradation characteristics of flame retardant polylactide using TG-IR[J]. Polymer Degradation & Stability, 2012, 97(11):2 143-2 147.
- [7] Lin H J, Liu S R, Han L J, et al. Effect of a phosphorus-containing oligomer on flame-retardant, rheological and mechanical properties of poly(lactic acid)[J]. Polymer Degradation & Stability, 2013, 98(7):1 389-1 396.
- [8] Yuan X Y, Wang D Y, Chen L, et al. Inherent flame retardation of bio-based poly(lactic acid) by incorporating phosphorus linked pendent group into the backbone[J]. Polymer Degradation & Stability, 2011, 96(9):1 669-1 675.
- [9] Gaan S, Neisius M, Mercoli P, et al. Synthèse de nouveaux phosphonamides et utilisation comme ignifuge[P]. WO 2013 / 020696 A2.2013-02-14.
- [10] Buczko A, Stelzig T, Bommer L, et al. Bridged DOPO derivatives as flame retardants for PA6[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 107:158-165.
- [11] Chang Q, Long L, He W, et al. Thermal degradation behavior of PLA composites containing bis DOPO phosphonates[J]. Thermochimica Acta, 2014, 639:84-90.
- [12] Zhan J, Song L, Nie S, et al. Combustion properties and thermal degradation behavior of polylactide with an effective intumescent flame retardant[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(3):291-296.
- [13] Jing J, Zhang Y, Fang Z. Diphenolic acid based biphenylate on the properties of polylactic acid: Synthesis, fire behavior and flame retardant mechanism[J]. Polymer, 2017, 108:29-37.
- [14] 张阳, 代培刚, 陈英杰, 等. 基于锥形量热仪试验的典型聚合物材料燃烧性能研究 [J]. 广东化工, 2015, 42(7):53-54.
- zhang Yang, Dai Peigang, Chen Yingjie, et al. Study on combustion performance of typical polymeric materials based on cone calorimeter test[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(7):53-54.
- [15] Zhang F, Gao W, Jia Y, et al. A concise water-solvent synthesis of highly effective, durable, and eco-friendly flame-retardant coating on cotton fabrics[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 199:256-265.
- [16] 司明明, 丁率, 郝建薇, 等. 纳米 Sb_2O_3 与次膦酸铝阻燃聚对苯二甲酸乙二醇酯协同作用研究 [J]. 高分子学报, 2013(12):1 483-1 491.
- Si Mingming, Ding Shuai, Hao Jianwei, et al. Synergistic effect of nano- Sb_2O_3 and aluminium phosphinate on flame retardancy of PET[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013(12):1 483-1 491.