

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.005

木质纤维和滑石粉混合填充 PBS 的制备及性能

苗蔚¹,程文喜^{1,2},张天羽¹,宋伟强^{1,2},王宏森²,安顺利²

(1. 河南工业大学材料科学与工程学院,郑州 450001; 2. 河南海瑞祥科技有限公司,河南平顶山 467199)

摘要:采用熔融共混法制备了聚丁二酸丁二酯(PBS)/木质纤维/滑石粉复合材料,其中 PBS 的质量分数固定为 70%,其它为木质纤维和滑石粉。流变性能测试结果显示,木质纤维含量越高,复合材料的加工扭矩越大,并在木质纤维质量分数为 25% 时达到最高值。扫描电子显微镜分析结果表明,木质纤维和滑石粉均匀分散在 PBS 基体中。X 射线衍射测试结果显示,木质纤维的加入降低了基体树脂的结晶度,复合材料中滑石粉的层间距变小。差示扫描量热分析结果显示,滑石粉有利于复合材料的冷结晶,PBS/木质纤维/滑石粉复合材料的熔融峰和结晶峰比 PBS/木质纤维复合材料和 PBS/滑石粉复合材料的尖锐。力学性能测试结果显示,加入木质纤维可以提高复合材料的力学性能,当木质纤维质量分数为 25% 时,复合材料的力学性能达到最佳,此时复合材料的拉伸强度为 11.1 MPa,断裂伸长率和缺口冲击强度达到最大值,分别为 93.3%,3.56 kJ/m²。土壤降解数据表明,木质纤维的加入显著提高了复合材料的降解速率,说明合适用量的木质纤维和滑石粉具有协同效应,能使 PBS/木质纤维/滑石粉复合材料拥有更好的降解性能。

关键词:聚丁二酸丁二酯;木质纤维;滑石粉;力学性能;降解

中图分类号:TQ321.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)04-0026-05

Preparation and Properties of PBS Filled with Wood Fiber and Talc Powder

Miao Wei¹, Cheng Wenxi^{1,2}, Zhang Tianyu¹, Song Weiqiang^{1,2}, Wang Hongsen², An Shunli²

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Hairuixiang Technology Co., Ltd., Pingdingshan 467199, China)

Abstract: Polybutylene succinate (PBS)/wood fiber/talc powder composites were prepared by melt blending, in which the content of PBS was fixed at 70wt%, and the others were wood fiber and talc powder. The rheological test results show that the higher the wood fiber content, the higher the processing torque of the composite, and reaches the highest value at 25wt% wood fiber. Scanning electron microscope analysis results show that wood fiber and talc powder are evenly dispersed in PBS matrix. The X-ray diffraction test results show that the addition of wood fiber reduces the crystallinity of matrix resin and the layer spacing of talc powder in the composite became smaller. Differential scanning calorimeter results show that talc powder is conducive to the cold crystallization of the composites, the melting and crystallization peaks of PBS/wood fiber/talc powder composite is sharper than those of PBS/wood fiber composite and PBS/talc powder composite. The mechanical test results show that adding wood fiber can improve the mechanical properties of the composites, and reaches the best at 25wt% wood fiber, at this time, the tensile strength of the composites is 11.1 MPa, the elongation at break and notch impact strength reach the maximum, which are 93.3%, 3.56 kJ/m², respectively. The soil degradation datum show that the addition of wood fiber significantly improves the degradation rate of the composites. This shows that the appropriate amount of wood fiber and talc have synergistic effect, which can make PBS/wood fiber/talc composite have better degradability.

Keywords: poly(butylene succinate); wood fiber; talc powder; mechanical property; degradation

随着世界环境的复杂变化和我国经济的快速发展,能源短缺和环境污染问题受到越来越多的关

注。开发具有竞争力的环保材料,取代不可降解的石油基材料迫在眉睫,因而生物可降解高分子材料

基金项目:国家自然科学基金项目(52003075),河南省科技厅攻关项目(172102210228)

通信作者:程文喜,副教授,主要从事环境友好高分子材料的加工与改性

收稿日期:2022-01-11

引用格式:苗蔚,程文喜,张天羽,等.木质纤维和滑石粉混合填充 PBS 的制备及性能[J].工程塑料应用,2022,50(4):26-30,40.

Miao Wei, Cheng Wenxi, Zhang Tianyu, et al. Preparation and properties of PBS filled with wood fiber and talc powder[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):26-30, 40.

的研究日益受到青睐^[1-2]。聚丁二酸丁二酯(PBS)由于具有良好的力学性能、加工性能、耐热性、耐化学腐蚀性和完全生物降解性,现已成为包装领域快速发展的可降解聚酯品种之一^[3-4]。但是相对于常用的聚乙烯、聚氯乙烯等石油基聚合物来说,PBS的价格偏高,需要对其进行填充改性,可在保持或者稍微降低性能的前提下,大幅度降低成本^[5-6]。

共混改性是一种常见的降低高分子材料成本的方法。滑石粉、CaCO₃等无机填料具有成本低、来源广泛、耐热性好等优点,已被广泛用于制备PBS复合材料^[7-9]。刘晓艳等^[10]制备了不同偶联剂处理的CaCO₃填充PBS,研究发现,当PBS和CaCO₃质量配比为7:3、铝酸酯质量分数为CaCO₃质量的1.5%时,复合材料的综合性能较好。田琴等^[11]以乙烯-丙烯酸共聚物(EAA)为增容剂,制备了一系列不同EAA用量的PBS/有机蒙脱土(OMMT)复合材料,发现EAA的添加提高了PBS与OMMT的相容性和界面结合强度,从而有效提高了其储能模量和力学性能,在EAA的质量分数为7%时综合力学性能最佳。孙炳新等^[12]将钛酸酯偶联剂表面改性后的滑石粉用于制备PBS复合材料,发现PBS复合材料的热稳定性得到显著提高,结晶度下降。

近年来,许多科研工作者将植物纤维用于PBS共混改性,除了能有效降低成本之外,还能有效提高复合材料的降解速率^[13-14]。Islam等^[15]对不同的植物纤维表面处理方法和作用机理进行了总结,并分析了它们与复合材料力学性能的关系。付瑶等^[16]制备了PBS/竹粉复合材料,发现KH-560偶联剂对竹粉的表面处理效果优于其它偶联剂,生物降解速率明显大于纯PBS树脂。陈杰^[17]用4,4'-亚甲基双(异氰酸苯酯)(MDI)改性木薯渣和PBS为主要原料,制备了PBS/木薯渣复合材料,发现MDI对木薯渣改性可改善木薯渣在复合材料中的分散性,进而有效提高复合材料的力学强度和生物降解性。

从上述文献发现,加入填料和纤维时再加入偶联剂或增容剂等改性剂有利于提高复合材料的性能,但是增加了工序或高价物料,不利于成本降低。因而,笔者将木质纤维和滑石粉干燥后直接与PBS共混制备复合材料,固定PBS质量分数为70%,研究混合填料组成对复合材料结构与性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBS:5001MD,熔体流动速率为3.3 g/(10 min)

(190℃,2.16 kg),日本昭和电工株式会社;

滑石粉:8 μm(1 000目),纯度为98%,武汉吉业升化工有限公司;

木质纤维:长度小于6 mm,工业级,无锡绿建科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

转矩流变仪:RM-200C型,哈尔滨哈普电气技术有限责任公司;

平板硫化机:XLB-400型,武汉市新洲区昌盛轻工机械设备厂;

电子万能试验机:WDW-10型,济南川佰仪器设备有限公司;

冲击试验机:XJ-300A型,吴忠市材料试验机有限公司;

广角X射线衍射(WAXD)仪:Ultima IV型,日本理学株式会社;

电子扫描显微镜(SEM):Inspect F50型,美国FEI公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC200F3型,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 样品制备

将PBS、木质纤维和滑石粉在烘箱中于60℃烘干12 h,接着按照表1配方混合后加入转矩流变仪(机筒各段温度分别设置为145,145,145℃)中,在80 r/min转速下共混10 min即可制得PBS复合材料。将干燥好的复合材料使用电动热压机进行压片,热台温度为150℃,保压时间为5 min,然后置于冷压机上保压冷却至室温得到复合材料薄片,其规格为100 mm×100 mm×2 mm。表1列出了复合材料各组分的质量分数。

表1 复合材料各组分质量分数

代号	PBS	木质纤维	滑石粉
PBS0%	70	0	30
PBS5%	70	5	25
PBS10%	70	10	20
PBS15%	70	15	15
PBS20%	70	20	10
PBS25%	70	25	5
PBS30%	70	30	0

1.4 性能测试与结构表征

拉伸强度和断裂伸长率按照GB/T 1040.1-2006进行测试,试样规格为10 mm×5 mm×2 mm,拉伸速率为20 mm/min,每组测试7个试样,结果取平均值。

冲击性能按照GB/T 1843-2008进行测试,A

型缺口,摆锤能量为 1 J,每组测试 7 个试样,结果取平均值。

XRD 测试: Cu 靶 K_{α} 射线,波长为 0.154 nm,电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描范围为 $5^{\circ} \sim 50^{\circ}$,扫描步进速度为 $4^{\circ}/\text{min}$ 。

DSC 测试: 称取几毫克样品置于铝盒中,放入 DSC 仪中,在 N_2 气氛下测量,温度范围为 $25 \sim 200^{\circ}\text{C}$,先升温后降温,升温和降温速率均为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

形貌分析: 将样品在液氮中折断,采用 SEM 观察断面,观察前样品需先进行喷金处理,加速电压 5 kV。

土壤降解性能测试: 将复合材料分别剪成 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的矩形样条,称重。随后将样条放入土壤中,保持相同的埋入深度 (3 cm),埋藏 10, 20, 30, 40, 60 d 后,将样条取出,超声清洗干净,在真空干燥箱中干燥至恒重,根据质量损失率分析复合材料的降解性能。

2 结果讨论

2.1 共混过程分析

纯 PBS 及其复合材料的转矩流变曲线如图 1 所示。

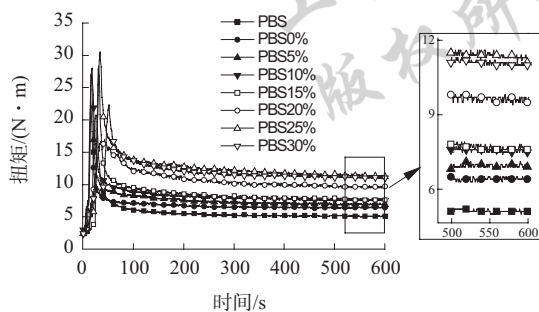


图1 纯 PBS 及其复合材料的转矩流变曲线

从图 1 可以看出,纯 PBS 的平衡转矩最小,仅为 $5.07 \text{ N} \cdot \text{m}$;当用质量分数 30% 的滑石粉与 PBS 共混时,复合材料 (PBS0%) 的平衡转矩提高到 $6.43 \text{ N} \cdot \text{m}$;当填料为木质纤维时,其复合材料 (PBS30%) 的平衡转矩大幅度提高到 $11.03 \text{ N} \cdot \text{m}$,这是因为纤维状填料在聚合物熔体中互相缠绕所致;当填料为木质纤维和滑石粉混合时,可以发现,随着混合填料中木质纤维含量的增加,其填充 PBS 复合材料的平衡转矩不断增大,在木质纤维质量分数为 25% 时,其平衡转矩达到 $11.35 \text{ N} \cdot \text{m}$,高于 PBS30% 的 $11.03 \text{ N} \cdot \text{m}$,说明此时木质纤维和滑石粉具有协同作用,有效地降低了复合材料的流动性。

2.2 力学性能分析

不同木质纤维含量的复合材料的拉伸性能如图 2 所示。

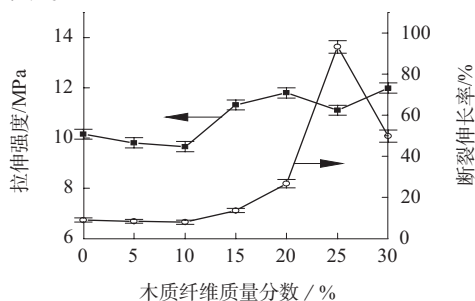


图2 不同木质纤维含量的复合材料的拉伸性能

从图 2 可以看出,加入木质纤维可以提高复合材料的拉伸性能。当木质纤维质量分数为 0%,即滑石粉质量分数为 30% 时,复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均较低,分别仅为 10.2 MPa 和 9.0% ;当木质纤维质量分数为 30%,即滑石粉质量分数为 0% 时,复合材料的拉伸强度和断裂伸长率较高,分别为 12.0 MPa 和 49.9% ;当复合材料中同时含有木质纤维和滑石粉时,随着复合材料中木质纤维含量的增加,复合材料的拉伸强度总体呈现先减小后增大的趋势,当木质纤维质量分数为 25% 时,复合材料的拉伸强度为 11.1 MPa ;而断裂伸长率呈现先增大后减小的趋势,并在木质纤维质量分数为 25% 时达到最大值,为 93.3% ,说明此时木质纤维与滑石粉起到了协同增韧作用,这与上述对扭矩的分析结果相符。

不同木质纤维含量的复合材料的缺口冲击强度如图 3 所示。

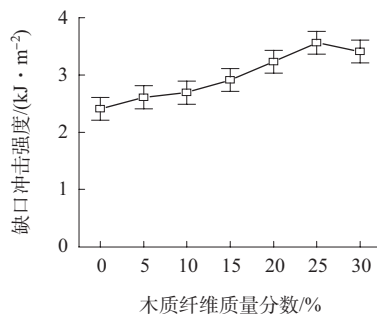


图3 不同木质纤维含量的复合材料的缺口冲击强度

从图 3 可以看出,加入木质纤维可以提高复合材料缺口冲击强度。当填料全为滑石粉时,复合材料的缺口冲击强度最小,仅为 2.41 kJ/m^2 。随着填料中木质纤维含量的增加,复合材料的缺口冲击强度呈现先增大后减小的趋势,并在木质纤维质量分数为 25% 时达到最大值,为 3.56 kJ/m^2 ,这是因为

复合材料受到冲击时,纤维状填料比颗粒填料更有利于传递能量。

2.3 XRD 分析

为进一步研究滑石粉、木质纤维对 PBS 结构,尤其是结晶度的影响,对木质纤维、滑石粉及相应 PBS 复合材料进行 XRD 分析,结果如图 4 所示。

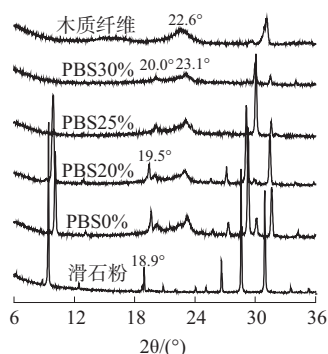


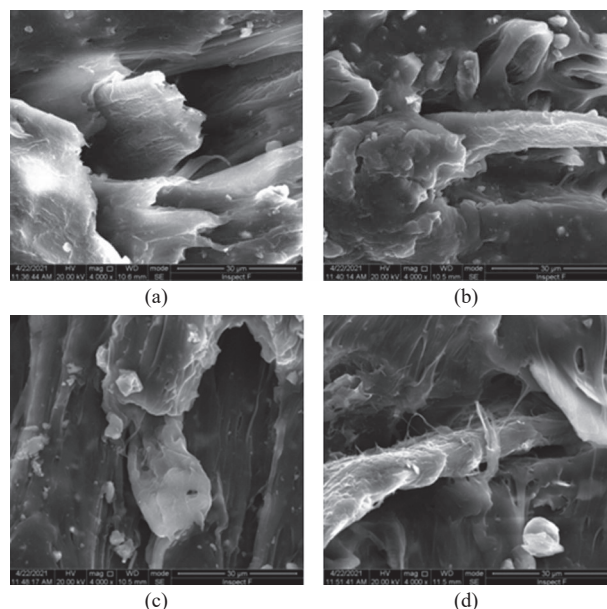
图 4 木质纤维、滑石粉及其 PBS 复合材料的 XRD 曲线

从图 4 可以看出,滑石粉在 9.5° , 18.9° , 26.6° , 28.5° 和 31.0° 处均有尖锐的峰。当滑石粉与 PBS 共混后,可以发现,复合材料 (PBS0%, PBS20% 和 PBS25%) 中滑石粉的主要特征峰均得到保留,只是峰值往右移动 $0.2^\circ \sim 0.7^\circ$,说明滑石粉在共混过程中,受到转矩流变仪的高压剪切应力作用,其片层间距变小,并在 20.0° 和 23.1° 处出现 PBS 的特征峰。木质纤维在 22.6° 处出现一个峰,这属于纤维素的无定型峰。当木质纤维填充 PBS 后,复合材料 (PBS30%, PBS25% 和 PBS20%) 在 22.6° 处的峰消失,说明木质纤维很好地分散在 PBS 中。对比不同木质纤维含量的复合材料 XRD 曲线,可以发现,随着木质纤维含量的降低,复合材料在 20.0° 和 23.1° 处的峰强度不断增加,说明木质纤维能够有效地降低 PBS 的结晶度,从而提高其韧性。

2.4 SEM 分析

不同木质纤维含量的 PBS 复合材料断面的 SEM 照片如图 5 所示。

从图 5a 可以看出, PBS/滑石粉复合材料 (PBS0%) 的断面为典型的层状脆性材料断面,滑石粉在 PBS 中分散较好,没有明显的聚集体。随着填料木质纤维的添加,相应的复合材料 (PBS20%, PBS25% 和 PBS30%) 断面不再光滑,出现了许多不平整的凸起,还可以看到木质纤维与 PBS 基体结合紧密,界面模糊 (图 5b~图 5d),说明木质纤维能对树脂起到良好的增强增韧作用,这与力学性能测试结果的分析是一致的。

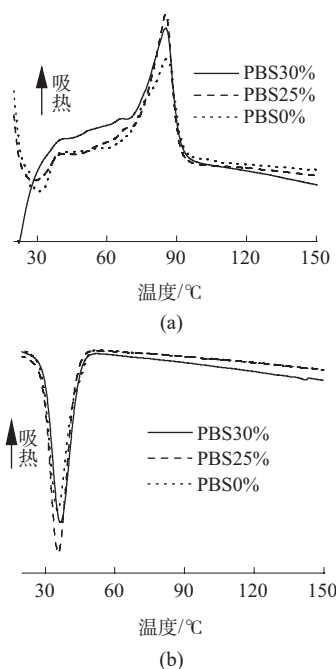


a—0% ; b—20% ; c—25% ; d—30%

图 5 不同木质纤维含量的复合材料断面的 SEM 照片

2.5 DSC 分析

木质纤维质量分数分别为 0%, 25% 和 30% 的复合材料的 DSC 曲线如图 6 所示。从图 6a 可知,在升温过程中,含有滑石粉填料的复合材料 (PBS0% 和 PBS25%) 在 30°C 处出现一个冷结晶峰,而无滑石粉的样品 (PBS30%) 没有。这一结果说明滑石粉有利于复合材料中 PBS 分子链的低温重排,提高其结晶度。三种复合材料均在 85°C 处出现一



a—升温曲线; b—降温曲线

图 6 木质纤维质量分数分别为 0%, 25% 和 30% 的复合材料的 DSC 曲线

个熔融峰,其中 PBS25% 的半峰宽明显小于 PBS0% 和 PBS30%,说明 PBS25% 中 PBS 分子链的状态比较均一。从图 6b 可知,三种复合材料都在 35℃ 左右结晶,而且 PBS25% 的结晶峰高度最大,这与其熔融分析结果一致。

2.6 土壤降解性能

纯 PBS 及其复合材料在土壤中降解不同时间后的质量损失率如图 7 所示。

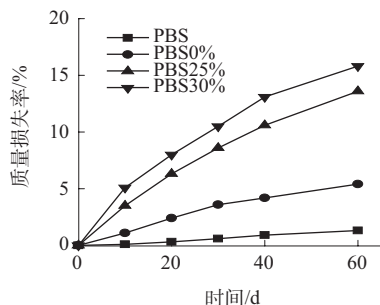


图 7 纯 PBS 及其复合材料在土壤中降解不同时间后的质量损失率

从图 7 可以发现,纯 PBS 在土壤中降解的速率非常低,经过 60 d 降解,质量损失率仅为 1.3%。当 PBS 和滑石粉共混后,复合材料 (PBS0%) 的降解速率有所提高。而当复合材料中含有木质纤维时,复合材料 (PBS25% 和 PBS30%) 的降解速率进一步提高,这是因为木质纤维孔隙率大,吸水率高,容易膨胀,使得微生物容易接触到更多的 PBS 分子链,从而提高了其降解速率。

3 结论

(1) PBS/ 木质纤维 / 滑石粉复合材料的扭矩随着木质纤维含量的增加不断增大,不利于复合材料的加工。

(2) 添加滑石粉有利于提高 PBS 的结晶度,而木质纤维阻碍了 PBS 分子链的重排,显著降低了其结晶度,但是具有良好的相容性和增强作用;当木质纤维质量分数为 25% 和滑石粉质量分数为 5% 时,两种填料对 PBS 发挥协同效应,所得复合材料的综合力学性能最佳,断裂伸长率和缺口冲击强度达到最大值,分别为 93.3%, 3.56 kJ/m²。

(3) 木质纤维的加入大幅度提高了 PBS 复合材料的降解速率。

参考文献

- [1] Kotiba H, Mosab K, Ko Y G, et al. Biodegradable polymer blends and composites: An overview[J]. Polymer Science Series A, 2014, 56(6):812-829.
- [2] 邹文奇,陈通,叶海木,等.可生物降解聚酯的制备及性能研究进展[J].化工学报,2021,72(12):6216-6231.
- [3] Zou Wenqi, Chen Tong, Ye Haimu, et al. Research progress on the preparation and properties of biodegradable polyester[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2021, 72(12):6216-6231.
- [4] Gigli M, Fabbri M, Lotti N, et al. Poly(butylene succinate)-based polyesters for biomedical applications: A review[J]. European Polymer Journal, 2016, 75:431-460.
- [5] 王军,刘素侠,欧阳平凯.聚丁二酸丁二醇酯的研究进展[J].化工新型材料,2007,35(10):25-27.
- [6] Wang Jun, Liu Suxia, Ouyang Pingkai. Recent research progresses in poly(butanediol succinate)[J]. New Chemical Materials, 2007, 35(10):25-27.
- [7] 陈丽萍,王煦怡,张蕾,等.国内聚丁二酸丁二醇酯改性研究进展[J].纺织科技进展,2018(12):1-6, 11.
- [8] Chen Liping, Wang Xuyi, Zhang Qiang, et al. Research progress of modification of polybutylene succinate in China[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2018(12):1-6, 11.
- [9] 李泽天,张欣华,韩释剑,等.聚丁二酸丁二醇酯的改性研究进展[J].石油化工高等学校学报,2016,29(6):1-5, 17.
- [10] Li Zetian, Zhang Xinhua, Han Shijian, et al. Research progress on the modification of poly(butylene succinate)[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2016, 29(6):1-5, 17.
- [11] 王蕾. PBS 共聚物与层状硅酸盐复合材料的制备及结构与性能的研究[D].西安:陕西科技大学,2019.
- [12] Wang Lei. Preparation, structure and properties of PBS copolymer and layered silicate composite[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2019.
- [13] 王瑶,何连诚,柴菁珊,等.纳米 SiO₂ 包覆微晶纤维素对 PLA/PBS 复合材料性能的影响[J].中国塑料,2018,32(8):25-32.
- [14] Wang Yao, He Liancheng, Chai Jingshan, et al. Effect of nano-SiO₂ wrapping on microcrystalline cellulose on the properties of PLA/PBS composites[J]. China Plastics, 2018, 32(8):25-32.
- [15] 王福春,王万坤,刘伟,等.生物降解 PBS/MMT 共混体系结晶行为研究[J].塑料科技,2018,46(4):80-88.
- [16] Wang Fuchun, Wang Wankun, Liu Wei, et al. Study on crystallization behavior of biodegradable PBS/MMT blends[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(4):80-88.
- [17] 刘晓艳,赵素芬,张莉琼,等. PBS/CaCO₃ 复合材料的制备与性能[J].塑料,2017,46(4):26-28.
- [18] Liu Xiaoyan, Zhao Sufen, Zhang Liqiong, et al. Preparation and properties of PBS/CaCO₃ composite[J]. Plastics, 2017, 46(4):26-28.
- [19] 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,2017,45(9):13-17.
- [20] 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, 2017, 45(9):13-17.

参考文献

- [1] 陈勇,官建国,谢洪泉. 导电塑料的研究进展[J]. 弹性体,2008(2):75-81.
Chen Yong, Guan Jianguo, Xie Hongquan. Development advances of conductive plastics[J]. China Elastomerics, 2008(2):75-81.
- [2] 张忠峰,王克俭. 电磁屏蔽及抗静电包装塑料及应用[J]. 塑料包装,2019,29(3):1-5,10.
Zhang Zhongfeng, Wang Kejian. Electromagnetic shielding and antistatic packaging plastics and their applications[J]. Plastics Packaging, 2019, 29(3):1-5, 10.
- [3] Dr Amarasekera J. Conductive plastics for electrical and electronic applications[J]. Reinforced Plastics, 2005, 49(8):38-41.
- [4] 王光华,董发勤,司琼. 电磁屏蔽导电复合塑料的研究现状[J]. 材料导报,2007(2):22-25.
Wang Guanghua, Dong Faqin, Si Qiong. The Present research state of electromagnetic shielding and conductive composite plastic[J]. Materials Review, 2007, 21(2):22-25.
- [5] 薛书凯. 高分子材料抗静电技术与应用[J]. 化学推进剂与高分子材料,2005(6):18-22,26.
Xue Shukai. Antistatic technique and application of the polymer materials[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2005(6):18-22, 26.
- [6] 杨明锦,陆长征. 结构型与复合型导电塑料研究进展[J]. 塑料,2005(3):15-18.
Yang Mingjin, Lu Changzheng. Developing advances of electrical conductive polymers and composites[J]. Plastics, 2005(3):15-18.
- [7] Sharma D, Sharma R C. Advances in conductive polymers[J]. Plastics, 1998, 34(8):1 053-1 060.
- [8] 荀学斌. 基于碳纳米管的抗静电工程塑料的性能[D]. 深圳:深圳大学,2018.
Gou Xuebin. The properties of antistatic engineering plastics modified by carbon nanotube[D]. Shenzhen:Shenzhen University, 2018.
- [9] de Volder M F L, Tawfik S H, Baughman R H, et al. Carbon nanotubes:Present and future commercial applications[J]. Science, 2013, 339(6119):535-539.
- [10] 何益艳,吴雪艳,杜仕国. 复合型导电塑料中导电填料的开发现状与发展[J]. 塑料科技,2004(3):50-53.
He Yiyang, Wu Xueyan, Du Shiguo. Status quo and development of conductive filler in conductive composite plastics[J]. Plastics Science and Technology, 2004(3):50-53.
- [11] 向萌,舒颖,刘佳鸿,等. 高含量碳纳米管母粒在PA6中的应用[J]. 塑料工业,2014,42(5):103-106,111.
Xiang Meng, Shu Ying, Liu Jiahong, et al. Application of high content carbon nanotube masterbatches in PA6[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(5):103-106, 111.
- [12] 李振宇,薛闵,刘晓东,等. 导电塑料的研发及应用进展[J]. 塑料科技,2013,41(2):96-101.
Li Zhenyu, Xue Min, Liu Xiaodong, et al. Progress on research and development of conductive plastic and its application[J]. Plastics Science and Technology, 2013, 41(2):96-101.
- [13] 叶振兴. 高性能玻璃纤维增强PA10T/PA66复合材料的制备及其性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
Ye Zhenxing. Study on preparation and properties of high performance glass fiber reinforced PA10T/PA66 composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2020.
- [14] Zhang H L, Zhang Y, Zhang X G, et al. Urchin-like nano/micro hybrid anode materials for lithium ion battery[J]. Carbon, 2006, 44(13):2 778-2 784.
- [15] 施明,杨育农,郑成. 抗静电剂在塑料制品中的研究应用进展[J]. 合成材料老化与应用,2012,41(1):42-47.
Shi Ming, Yang Yunong, Zheng Cheng. Research and application of antistatic agent in plastic[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2012, 41(1):42-47.
- [16] 何金名. 基于母粒法制备抗静电聚乙烯/炭黑/尼龙6复合材料的研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2017.
He Jinming. Preparation of polyethylene (PE)/carbon black(CB)/nylon 6 (PA6) antistatic composites based on masterbatch method[D]. Xiangtan:Xiangtan University, 2017.
- [17] Islam M S, Talib Z A, Azad A K, et al. Chemical modifications and properties of coir fibers biocomposites[M]//Agricultural Biomass Based Potential Materials. [S. l.]:Springer, Cham, 2015:491-505.
- [18] 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,2016,44(4):134-136.
Fu Yao, Li Zhuang, Cao Guoxi. Research on PBS/bamboo powder composite material[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(4):134-136.
- [19] 陈杰. 木薯渣/PBS可生物降解复合材料的制备与性能研究[D]. 南宁:广西大学,2018.
Chen Jie. Preparation of cassava residues/PBS biodegradable composites and its performance research[D]. Nanning:Guangxi University, 2018.
- [20] 孙炳新,韩春阳,张佰清,等. 聚丁二酸丁二醇酯滑石粉填充改性研究[J]. 包装工程,2018,39(5):105-109.
Sun Bingxin, Han Chunyang, Zhang Baiqing, et al. The modification of PBS by talc filling[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5):105-109.
- [21] 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.
- [22] 曹贤武,金圣桥,何光建. PBS/咖啡渣生物可降解材料的研究[J]. 现代塑料加工应用,2021,33(3):5-7.
Cao Xianwu, Jin Shengqiao, He Guangjian. Study on PBS/coffee grounds biodegradable material[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(3):5-7.

(上接第30页)