

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.10.012

联合工艺对聚乳酸 / 椰壳复合材料力学性能的影响

杨莉, 陈耀, 张波, 胡黄飞

(安徽工程大学纺织服装学院, 安徽芜湖 241000)

摘要: 为了提高椰壳纤维与聚乳酸 (PLA) 的界面粘结性能, 改善复合材料的力学性能, 采用碱处理和纤网-层叠复合模压成型联合工艺制备 PLA/椰壳复合材料。通过对椰壳纤维表面形态、线密度及力学性能表征, 以及 PLA/椰壳复合材料拉伸性能和弯曲性能的测试, 分析联合工艺对 PLA/椰壳复合材料力学性能的影响。结果表明, 联合工艺有助于 PLA/椰壳复合材料力学性能的提高, 特别是对复合材料弯曲强度的改善, 最大提高了 4.7 倍。碱处理对 PLA/椰壳复合材料拉伸强度的影响最大, 而对弯曲强度影响最小; 复合成型工艺对 PLA/椰壳复合材料弯曲强度有较大影响, 其中复合成型压力影响最大。

关键词: 椰壳纤维; 聚乳酸; 复合工艺; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)10-0063-06

Effect of Combined Process on Mechanical Properties of Polylactic Acid / Coir Composites

Yang Li, Chen Yao, Zhang Bo, Hu Huangfei

(Department of Textiles and Apparel, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract : In order to improve the interfacial bonding property between coir fiber and polylactic acid (PLA), and the mechanical properties of PLA/coir composites, the PLA/coir composites were prepared by alkali treatment combined fiber mesh-laminated composite molding process. Through the characterization of surface morphology, linear density and mechanical properties of coir fiber, and the tests of tensile and bending properties of PLA/coir composites, the effects of combined process on mechanical properties of PLA/coir composites were analyzed. The results show that the combined process can improve the mechanical properties of PLA/coir composites, especially the bending strength of the PLA/coir composites, with a maximum increase of 4.7 times. Alkali treatment has the greatest influence on the tensile properties of PLA/coir composites, while has the least effect on the bending strength. The composite forming process has a great influence on the bending strength of PLA/coir composites, and the forming pressure has the greatest influence.

Keywords : coir fiber ; polylactic acid ; composite process ; mechanical property

聚乳酸 (PLA) 因具有优良的生物性和良好的力学性能而被作为极具潜力的热塑性材料开发使用, 但 PLA 存在韧性差、成品较脆等缺点。利用纤维对 PLA 进行性能改善是一种便捷有效的改性手段。天然纤维增强 PLA 复合材料比强度和比模量高, 加工灵活, 且具有可降解性、环保性和价格低廉等特点, 被广泛用于包装、汽车、生物医学等领域^[1-2]。目前常用的增强天然植物纤维主要有竹纤维、麻纤维及木纤维等^[3-5], 关于 PLA/椰壳复合材料的研究

及应用相对还较少^[6-7]。

椰壳纤维是以椰子果实为来源的一种低成本纤维原料。虽然每年全世界都有大量椰壳纤维产量, 但由于椰壳纤维难以成纱、不易织造等原因, 仅有一小部分椰壳纤维用于小地毯、绳索和垫席的生产^[8-9]。与其它天然植物纤维相比, 椰壳纤维不但具有优异的力学性能, 还具有较好的热学性能。将椰壳纤维作为 PLA 增强纤维原料使用不但有助于椰壳纤维利用率的提高, 还有利于 PLA 复合材料经济效

基金项目: 安徽省智慧课堂试点项目 (2017zhkt039)

通讯作者: 杨莉, 副教授, 主要研究方向为纺织复合材料 E-mail: tianmaxingyang@sohu.com

收稿日期: 2019-07-12

引用格式: 杨莉, 陈耀, 张波, 等. 联合工艺对聚乳酸 / 椰壳复合材料力学性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10):63-68.

Yang Li, Chen Yao, Zhang Bo, et al. Effect of combined process on mechanical properties of polylactic acid / coir composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):63-68.

应的改善。但由于椰壳纤维表面含有大量羟基,纤维表现出较强的极性和亲水性,使其不易与 PLA 形成良好的界面粘结效果^[10]。碱处理是目前植物纤维复合材料界面改性常用方法之一。通过碱处理不但可以去除椰壳纤维中的低分子杂质,还可以使纤维细度及表面形态发生变化,增加纤维与树脂之间的机械啮合和纤维与树脂基体之间的接触面积,有利于 PLA/椰壳复合材料界面性能的改善^[11-13]。

天然植物纤维增强 PLA 复合材料常用的制备方法主要有注塑成型、挤出成型和模压成型等方式^[14-16],在此基础上研究者们还开创了许多新的复合方式,其中纤网模压和层叠模压就是两种新的复合加工方式。纤网模压是通过将增强纤维与 PLA 混合成网复合成型,而层叠模压是将增强纤维织物与 PLA 层叠铺层方式复合成型,通过复合方式的改进,可进一步提高 PLA 复合材料的界面相容性和力学性能^[14]。由于椰壳纤维较长、质硬、不易纺纱等特点,笔者采用将椰壳纤维与 PLA 纤维混杂针刺成非织造布,再通过与 PLA 树脂膜层叠模压的方式复合成型^[17],分析碱处理工艺联合纤网-层叠复合模压成型工艺对 PLA/椰壳复合材料力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

椰壳纤维:主体长度 22 cm,平均线密度 435 dtex,产于印度,佛山市顺德区雨林进出口贸易有限公司;

PLA 纤维:长度 38 mm,线密度为 1.67 dtex,常熟市长江化纤有限公司;

PLA 母粒:工业级,浙江海正生物材料股份有限公司。

1.2 仪器及设备

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9070 型,上海三发科学仪器有限公司;

针刺机:DC800-01 型,常熟市明仁机械设备有限公司;

平板硫化机:XLB-400 型,青岛科高橡胶机械有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM):S-4800 型,日本日立公司;

电子单纤维强力仪:YG001D 型,温州方圆仪器有限公司;

电子万能试验机:CSS-88100 型,中机试验装

备股份有限公司。

1.3 试样制备

将经过振动清除表面杂质的椰壳纤维按 1 : 20 的浴比浸渍到质量分数分别是 2%、6% 和 10% 的氢氧化钠溶液中处理 24 h,然后用蒸馏水反复洗涤至中性,室温条件下晾干待用。将处理后的椰壳纤维和 PLA 纤维分别梳理成网,并将纤网按质量比为 9 : 1 的比例混合铺网,采用针刺工艺制成混杂 PLA/椰壳针刺非织造布。在平板硫化机上将 PLA 母粒加工成 PLA 树脂膜,将椰壳纤维与 PLA (PLA 纤维 + PLA 树脂膜) 按质量比为 3 : 7 的比例采用层叠方式铺放在自制模具中,采用层叠模压复合方式制备 PLA/椰壳复合材料,自然冷却成型。

为了同时分析碱处理和复合成型工艺对 PLA/椰壳复合材料力学性能的影响,采用正交分析法,分别以碱溶液浓度、复合成型温度和复合成型压力为影响因素。同时增加二组对比样,一组为既没经过碱处理,也未经复合模压成型工艺制备的 PLA/椰壳复合材料 (10[#]);另一组为未经碱处理,但经复合模压成型工艺制备的 PLA/椰壳复合材料 (11[#]),具体工艺参数见表 1。

表 1 试样编号及复合工艺参数

试样编号	碱溶液浓度 / %	复合成型温度 / °C	复合成型压力 / MPa
1 [#]	2	190	2
2 [#]	2	200	4
3 [#]	2	210	6
4 [#]	6	190	4
5 [#]	6	200	6
6 [#]	6	210	2
7 [#]	10	190	6
8 [#]	10	200	2
9 [#]	10	210	4
10 [#]	0	210	2
11 [#]	0	210	2

1.4 性能测试与表征

椰壳纤维的拉伸性能按 GB 5886-1986 和 GB / T 12411-2006 测试,上下夹距为 200 mm,拉伸速率为 200 mm / min,每组试样测试组数不少于 30 次,结果取其平均值。

椰壳纤维的线密度按 GB 5884-1986 和 GB / T 12411-2006 测试,取试样根数 100 根,每组试样测试 5 次,结果取其平均值。

SEM 测试:对经碱处理前后的椰壳纤维的表面形态进行表征,试样经喷金处理,加速电压 15 kV。

复合材料拉伸性能按 ASTM D638-2003 测试,试样尺寸为 165 mm × 20 mm × 3 mm,拉伸速率为

2 mm/min。

复合材料弯曲性能按 ASTM D790-2007 测试,试样尺寸为 127 mm × 12.7 mm × 3 mm,拉伸速率为 2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 椰壳纤维的性能

表 2 为椰壳纤维经碱处理后的线密度及强伸性能指标。椰壳纤维经碱处理后,线密度及断裂强力均随着碱溶液浓度的增加而逐渐下降。椰壳纤维中除含有大量纤维素外,还含有木质素、果胶及表面杂质等成分,经碱溶液表面处理后,椰壳纤维表面杂质被去除,同时,纤维中的果胶及木质素也有一定的去除,这使得由聚集态结构的椰壳纤维部分解体,纤维的线密度减小^[18]。椰壳纤维中的木质素起支撑和粘结纤维素、增强纤维力学强度的作用,随着碱处理的进行,纤维中木质素含量逐渐减少,椰壳纤维的断裂强力下降,椰壳纤维细度减小也是纤维断裂强力下降的主要原因之一。当碱溶液浓度为 2% 时,纤维被去除的物质以表面杂质为主,对纤维成分的影响很小,因此纤维细度的快速下降使纤维的断裂强度增大。但当碱溶液浓度不大于 6% 时,椰壳纤维的断裂强度和断裂伸长率都增大。纤维中木质素含量高,纤维的韧性差;纤维素含量增加,纤维柔韧性增强。纤维素具有较好的耐碱性,而木质素则会在碱溶液中发生降解反应,因此碱处理使椰壳纤维中木质素含量减少,纤维素相对含量增加,这有利于椰壳纤维断裂伸长率的增大。同时纤维在碱作用过程当中,纤维因碱溶液的溶胀作用而使晶区减小,也对椰壳纤维断裂伸长率的增大起到了积极作用。随着碱溶液浓度的持续增加,椰壳纤维中的纤维素发生碱性水解,纤维结构受到破坏,致使纤维拉伸性能下降。

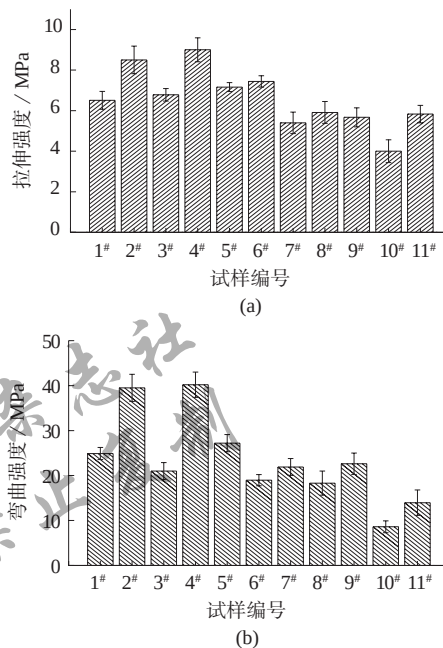
表 2 碱处理后椰壳纤维线密度及强伸性能指标

碱溶液 浓度 / %	线密 度 / dtex	拉伸断裂 强力 / CN	拉伸断裂强 / (CN · dtex ⁻¹)	拉伸断裂 伸长率 / %
2	381	595.69	1.56	21.45
6	353	496.90	1.40	18.81
10	328	366.86	1.11	17.92

2.2 PLA/椰壳复合材料的力学性能

图 1 为 PLA/椰壳复合材料的力学性能,表 3 为极差分析结果,其中 k_i 为 i 水平下的均值, R 为极差。通过对比可发现,经纤网-层叠复合模压成型工艺制备的 PLA/椰壳复合材料的拉伸强度和弯曲强度都较传统模压复合材料有了较大改善,拉伸强

度提高了 1.45 倍,弯曲强度提高了 1.6 倍。经碱处理联合复合模压成型工艺制备的复合材料的拉伸强度和弯曲强度也较未经任何处理的复合材料有了较大提高,特别是弯曲强度,最大提高了 4.7 倍,最小也提高了 2.1 倍。但同时发现,经联合方法制备的复合材料当碱溶液浓度为 10% 时,拉伸强度小于只经复合模压成型工艺制备的复合材料的拉伸强度。



a—拉伸强度; b—弯曲强度

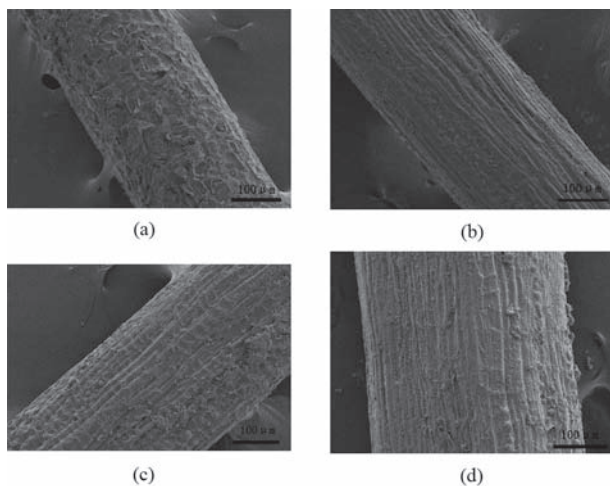
图 1 PLA/椰壳复合材料的力学性能

表 3 PLA/椰壳复合材料的力学性能极差分析 MPa

项目	拉伸强度			弯曲强度		
	碱溶液 浓度	复合成 型温度	复合成 型压力	碱溶液 浓度	复合成 型温度	复合成 型压力
k_1	7.26	6.97	6.62	28.46	29.0	20.72
k_2	7.87	7.91	7.72	28.79	27.34	34.1
k_3	5.66	6.63	6.45	20.94	20.86	23.37
R	2.2	0.56	1.27	7.85	8.14	13.38

增强体结构通过混杂针刺加工后,椰壳纤维与 PLA 纤维形成相互纠缠与穿插。复合成型时,熔融的 PLA 纤维有利于形成对增强体结构的浸透和对椰壳纤维的有效包覆,对 PLA/椰壳复合材料界面性能的改善起积极作用^[19]。图 2 为椰壳纤维表面形态 SEM 照片。椰壳纤维未经碱处理前,纤维表面被大量角质层杂质所覆盖,影响纤维与 PLA 树脂之间的界面粘结性能。经碱处理后,椰壳纤维表面杂质被去除,呈现大量的凹坑和沟槽,使椰壳纤维与树脂基体之间的机械啮合作用增强。同时,椰壳纤维线密度的减小增加了纤维与 PLA 树脂基体之间的接触面积,也有利于复合材料界面粘结性能的改

善。由表2数据分析可知,当碱溶液浓度达到10%时,椰壳纤维强伸性能下降,导致PLA/椰壳复合材料拉伸强度下降。



a—原纤维;b—2% 碱溶液处理;
c—6% 碱溶液处理;d—10% 碱溶液处理

图2 椰壳纤维表面形态 SEM 照片(放大倍数200倍)

图3为PLA/椰壳复合材料的拉伸应力-应变曲线。经纤网-层叠复合模压成型工艺制备的复合材料的拉伸弹性模量较未经任何处理的复合材料有较大提高。虽然经联合工艺3[#]制备的复合材料的拉伸弹性模量较未经改性的复合材料有一定程度的减小,但其拉伸断裂应变有较大提高,特别是拉伸吸收能有较大改进。经联合工艺6[#]制备的复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量都增大,经联合工艺9[#]制备的复合材料的拉伸断裂应变较小。PLA/椰壳复合材料拉伸性能的这种变化与碱处理后椰壳纤维的拉伸断裂伸长率变化规律相同,说明椰壳纤维的强伸性能对复合材料的拉伸性能有决定性影响。

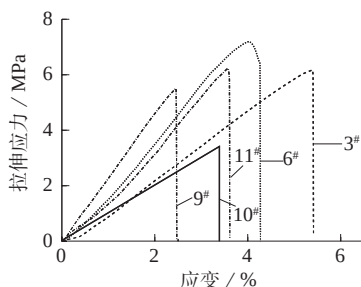


图3 PLA/椰壳复合材料拉伸应力-应变曲线

(1) 拉伸性能极差分析。

通过对PLA/椰壳复合材料拉伸强度的极差分析可知,碱溶液浓度是所选三种因素中对拉伸强度影响最大的,复合材料的拉伸强度随碱溶液浓度

的增加先增大后减小。这是因为,首先,椰壳纤维经碱溶液处理时,随着碱溶液浓度的增大,表面粗糙程度增加,纤维与基体树脂之间的界面机械啮合性能增强;其次,当碱溶液浓度不大于6%时,椰壳纤维的拉伸断裂强度增大,线密度减小,有利于复合材料界面性能的改善和拉伸强度的提高。当碱溶液浓度达到10%时,椰壳纤维本身强度损伤,影响了复合材料拉伸强度的持续增加。

复合成型压力对拉伸强度的影响大于成型温度的影响,且拉伸强度随复合成型压力的增大先增加后减小。复合成型压力的增大有利于熔融PLA树脂对椰壳纤维增强体结构的浸入和对椰壳纤维的有效包覆,有助于复合材料界面性能得到改善。但随着复合成型压力的增大,基体中的小分子物质运动加剧,使复合材料成型过程中产生大量气泡,影响复合材料的结构性能。同时,在复合层压过程中,受克莱帕伦效应影响,复合成型压力增大,使模具中基体树脂熔融所需温度升高,影响了PLA基体的熔融、渗透和包覆性能,阻碍了PLA/椰壳复合材料拉伸强度的提高。

复合成型温度对拉伸强度的影响最小,拉伸强度随复合成型温度的升高先增大后减小。复合成型温度升高,使基体树脂的熔融及流动性增强,有利于基体对增强体结构的深度渗透和扩散。但随着成型温度的持续升高,会使基体中的挥发性小分子溢出,且温度越高,固化反应越剧烈,使复合材料产生裂缝和分层等缺陷,最终影响PLA/椰壳复合材料拉伸强度的发挥。

(2) 弯曲性能极差分析。

通过对PLA/椰壳复合材料弯曲强度的极差分析可知,所选三种影响因素对弯曲强度的影响规律与对拉伸强度的影响规律不同。复合成型压力是对弯曲强度影响最大的因素,复合成型温度次之,碱溶液浓度对弯曲强度的影响最小。在增强复合材料中,增强纤维起承担载荷的主要作用,因此提高纤维拉伸性能,改善增强纤维与基体树脂之间的界面结合性能,可有效改善复合材料的拉伸性能。而增强复合材料的弯曲强度除受纤维与树脂之间界面性能影响以外,增强体材料和基体树脂本身柔韧性对复合材料弯曲性能的影响更大。椰壳纤维表面碱处理,一方面使复合材料的界面性能增强;另一方面,通过碱处理过程中椰壳纤维中木质素含量的下降和纤维断裂伸长率的增大使椰壳纤维的柔韧性增强,

使复合材料的弯曲性能得到改善。纤网-层叠复合模压成型可有效提高复合材料的弯曲强度,一方面复合模压成型工艺可以有效提高椰壳纤维与 PLA 树脂间的界面结合,另一方面也是因为 PLA 纤维较椰壳纤维有较好的柔韧性,复合成型工艺的控制对 PLA/椰壳复合材料中 PLA 纤维的熔融状态有较大影响,最终影响复合材料的弯曲强度。

复合成型压力是对弯曲强度影响最大的因素,弯曲强度随复合成型压力的增大先增加后减小。其影响原因与复合成型压力对拉伸强度的影响相同。复合材料的弯曲强度随复合成型温度的升高逐渐下降。复合成型温度的升高除对复合材料界面产生影响外,还由于当复合成型温度相对较低时,复合材料中的 PLA 纤维未完全熔融,PLA/椰壳针刺毡的结构也未完全解体,有利于复合材料弯曲性能的提高。随着复合成型温度的升高,当复合材料中的 PLA 纤维完全熔融后,复合成型温度的升高不再对复合材料中 PLA 纤维的熔融状态产生影响。

3 结论

碱处理联合复合成型工艺有利于 PLA/椰壳复合材料力学性能的改善,特别是对复合材料弯曲强度的影响,最大提高了 4.7 倍。碱溶液浓度是所选三因素中对 PLA/椰壳复合材料拉伸性能影响最大因素,碱处理可有效改善椰壳纤维与 PLA 树脂基体之间的界面结合性能,并通过椰壳纤维本身强伸性能的改善,使复合材料拉伸性能得到提高。PLA/椰壳复合材料的拉伸强度随碱溶液浓度的增加先增大后减小,当碱溶液浓度为 10% 时,由于椰壳纤维强伸性能的下降,使 PLA/椰壳复合材料的拉伸性能受到影响。复合成型温度对 PLA/椰壳复合材料拉伸强度的影响最小。但复合成型工艺对 PLA/椰壳复合材料弯曲强度有较大影响,复合成型压力是所选三因素中对弯曲强度影响最大的因素,复合成型温度的影响次之,弯曲强度随复合成型温度的升高逐渐减小,碱溶液浓度对复合材料弯曲强度的影响最小。

参考文献

- [1] 徐冲,张效林,丛龙康,等.天然纤维增强聚乳酸基可降解复合材料的研究进展[J].化工进展,2017,36(10):3 751-3 756.
Xu Chong, Zhang Xiaolin, Cong Longkang, et al. Progress of natural fiber reinforced polylactic acid biodegradable composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(10):3 751-3 756.
- [2] 晋慧斌.聚乳酸改性及在包装领域的应用[J].工程塑料应用,2017,45(12):135-138,142.
Jin Huibin. Modification of polylactic acid and its application in packaging[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):135-138, 142.
- [3] 赵雨晗,董丽莉,陈蕾,等.聚乳酸/植物纤维复合材料的研究进展[J].化工时刊,2018,32(8):39-42.
Zhao Yuhan, Dong Lili, Chen Lei, et al. Research development of PLA / plant fiber composites[J]. Chemical Industry Times, 2018, 32(8):39-42.
- [4] 陈颢,顾书英,任杰.天然纤维增强聚乳酸性能的研究进展[J].工程塑料应用,2014,42(8):101-104.
Chen Xie, Gu Shuying, Ren Jie. Research progress on natural fiber improving performance of PLA[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(8):101-104.
- [5] 张建,何春霞,唐辉,等.三种植物纤维填充聚乳酸复合材料性能对比[J].工程塑料应用,2016,44(11):12-17.
Zhang Jian, He Chunxia, Tang Hui, et al. Performance comparison of three kinds of plant fibers modified polylactic acid composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(11):12-17.
- [6] Balaji V, Senthil Vadivu K. Mechanical characterization of coir fiber and cotton fiber reinforced unsaturated polyester composites for packaging applications[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2017, 9:12-19.
- [7] Ramengmawii S, Mohammad J, Hidayah A, et al. Mechanical, dynamic, and thermomechanical properties of coir / pineapple leaf fiber reinforced polylactic acid hybrid biocomposites[J]. Polymer Composites, 2019, doi : 10.1002/pc.24978.
- [8] Wang Wenjie, Chou N. The behaviour of coconut fibre reinforced concrete(CFRC) under impact loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:452-461.
- [9] 王中珍,周镭,丁帅,等.可降解椰壳纤维格室的研究开发[J].上海纺织科技,2016,44(12):39-41.
Wang Zhongzhen, Zhou Lei, Ding Shuai, et al. Research and development of degradable coconut fiber cell[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2016, 44(12):39-41.
- [10] Mohit S, Gaurav D. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites:A review[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2017, 11:1-9.
- [11] 王春红,刘胜凯.碱处理对竹纤维及竹纤维增强聚丙烯复合材料

- 料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3):683-690.
- Wang Chunhong, Liu Shengkai. Effects of alkali treatment on properties of bamboo fiber and bamboo fiber reinforced polypropylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3):683-690.
- [12] Hu Zaman, Mdh B. Effect of coir fiber content and compatibilizer on the properties of unidirectional coir fiber / polypropylene composites[J]. Fibers and Polymers, 2014, 15(4):831-838.
- [13] 杨莉, 王孝峰, 季城, 等. 界面改性对椰壳增强聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2019, 33(2):18-23.
- Yang Li, Wang Xiaofeng, Ji Cheng, et al. Effect of surface modification on properties of coir-fiber-reinforced polypropylene composites[J]. China Plastics, 2019, 33(2):18-23.
- [14] 陈颢, 顾英书, 任杰. 聚乳酸 / 天然纤维复合材料成型加工研究进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(9):102-105.
- Chen xie, Gu Shuying, Ren Jie. Research progress on processing of PLA / natural fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(9):102-105.
- [15] 严文聪, 曾金芳, 王斌. 纤维混杂复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2011(6):30-33.
- Yan Wencong, Zeng Jinfang, Wang Bin. The progress in fibers hybrid composites[J]. New Chemical Materials, 2011(6):30-33.
- [16] 万明, 方立, 周晓东. 聚丙烯自增强复合材料层压板的制备和性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):40-45.
- Wan Ming, Fang Li, Zhou Xiaodong. Study on preparation and properties of self-reinforced polypropylene composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):40-45.
- [17] 杨莉, 徐文正. 聚乳酸 / 玄武岩纤维复合材料的制备及性能研究[J]. 中国塑料, 2016, 30(11):48-52.
- Yang Li, Xu Wenzheng. Study on preparation and properties of poly(lactic acid) / basalt fiber composite[J]. China Plastics, 2016, 30(11):48-52.
- [18] 王威, 黄故. 碱处理对椰壳纤维形态结构的影响[J]. 上海纺织科技, 2008, 36(10):20-22.
- Wang Wei, Huang Gu. The influence of alkali processing on coconut fiber performance[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2008, 36(10):20-22.
- [19] 徐珍珍, 汪浩, 杨莉, 等. 混杂复合方式对聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2018, 32(3):27-32.
- Xu Zhenzhen, Wang Hao, Yang Li, et al. Effect of hybrid modes on properties of PP composites[J]. China Plastics, 2018, 32(3):27-32.
-
- (上接第 62 页)
- [10] 田小永, 刘腾飞, 杨春成, 等. 高性能纤维增强树脂基复合材料 3D 打印及其应用探索[J]. 航空制造技术, 2016(15):26-31.
- Tian Xiaoyong, Liu Tengfei, Yang Chuncheng, et al. 3D printing for high performance fiber reinforced polymer composites and exploration on its applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(15):26-31.
- [11] Liu L, Jia C, He J, et al. Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2015, 121:56-72.
- [12] 刘晓军, Dillon L, James F L, 等. 3D 打印碳纤维增强 PLA 试件的力学性能分析[J]. 塑料, 2017(3):47-50.
- Liu Xiaojun, Dillon L, James F L, et al. Analysis of mechanical properties of 3D printing pla specimens reinforced by carbon fiber[J]. Plastics, 2017(3):47-50.
- [13] 黎宇航, 董齐, 邵清安, 等. 熔融沉积增材制造成形碳纤维复合材料的力学性能[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(3):225-230.
- Li Yuhang, Dong Qi, Tai Qingan, et al. Mechanical properties of carbon fiber composite in fused deposition modeling of additive manufacturing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(3):225-230.
- [14] Ning F, Cong W, Qiu J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B:Engineering, 2015, 80:369-378.
- [15] Tian X, Liu T, Wang Q, et al. Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:1 609-1 618.
- [16] Jeon H, Lee M, Yun S, et al. Fabrication and characterization of 3D-printed biocomposite scaffolds based on PCL and silanated silica particles for bone tissue regeneration[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 360:519-530.