

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.005

## 聚丙烯 / 麦秸秆木塑复合材料的力学性能<sup>\*</sup>

焦学健<sup>1</sup>, 李丽君<sup>1</sup>, 董抒华<sup>2</sup>, 魏春城<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 淄博 255000; 2. 山东理工大学材料科学与工程学院, 淄博 255000)

**摘要:** 采用转矩流变仪混合造粒, 通过注射成型方法制备了聚丙烯 (PP) / 麦秸秆木塑复合材料, 研究了 NaOH 浓度、增容剂的含量和麦秸秆含量对 PP / 麦秸秆木塑复合材料力学性能的影响, 采用扫描电子显微镜对麦秸秆表面及复合材料的断面形貌进行分析。结果表明: 8% NaOH 溶液处理麦秸秆时, PP / 麦秸秆木塑复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度达到最大; 马来酸酐接枝 PP 增容剂的加入使得麦秸秆与 PP 的界面相容性提高, 复合材料的力学性能增加; 在一定范围内麦秸秆的添加降低了 PP 材料的拉伸强度和冲击强度, 而提高了其弯曲强度, 并且 PP / 麦秸秆复合材料的弯曲强度随着麦秸秆含量的增加而增加, 在麦秸秆含量为 30% 时弯曲强度达到最大值为 43.4 MPa。

**关键词:** 麦秸秆; 聚丙烯; 木塑复合材料; 力学性能

**中图分类号:** TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)07-0025-04

### Mechanical Properties of Wheat Straw Reinforced Polypropylene Wood-plastic Composites

Jiao Xuejian<sup>1</sup>, Li Lijun<sup>1</sup>, Dong Shuhua<sup>2</sup>, Wei Chuncheng<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** The wheat straw and polypropylene (PP) were mixed to granulation by torque rheometer. Then the wheat straw reinforced polypropylene wood-plastic composites were prepared by injection molding. The effects of NaOH concentration, compatilizer content and fiber content on the mechanical properties of wheat straw reinforced PP wood-plastic composites were investigated. The wheat straw surface and fracture morphology of the composites were analyzed by scanning electron microscope. The results show that tensile strength, and bending strength as well as impact strength of the wheat straw reinforced PP wood-plastic composites reach a maximum when NaOH concentration is 8%. Interface compatibility of the wheat straw and PP is improved as well as the mechanical properties are increased due to adding the compatilizer of maleic anhydride grafted PP. Compared with pure PP, the tensile strength and impact strength of the wheat straw reinforced PP composites decrease while the bending strength increases within a certain range. The bending strength of wheat straw reinforced PP wood-plastic composites increases with the increase of wheat straw content, up to maximum value of 43.4 MPa when the wheat straw content is 30%.

**Keywords:** wheat straw; polypropylene; wood-plastic composite; mechanical property

将植物纤维填入热塑性塑料可制备出新型环保木塑复合材料, 因其原材料来源广泛并且具有优良的加工性能、强度和耐水、耐腐蚀性能而被广泛应用于户外地板、垃圾桶、栅栏及汽车内饰等领域<sup>[1-4]</sup>。我国是小麦种植大国, 因而麦秸秆资源丰富, 但麦秸秆利用率很低, 目前除了主要用于工艺品、肥料、饲料和能源材料外, 大多数是通过掩埋、焚烧等方法处理而造成了环境污染, 因此麦秸秆的处理和有效利用一直被广泛关注<sup>[5-6]</sup>。开发并应用麦秸秆木塑复合材料是变废为宝的重要途径, 可以保护环境、降低成本, 产品可回收再生产, 从而实现可持续发展, 这将具有重要的经济效益和社会效益。

目前, 国内外在秸秆木塑复合材料研究方面已经开展了相关工作。一些学者采用了不同方法制备

秸秆木塑复合材料。张东辉等<sup>[7]</sup>应用模压成型工艺, 将稻秸秆粉与聚丙烯 (PP) 混合制得木塑复合材料, 研究了稻秸秆粉的粒径、处理方法和其质量分数对复合材料力学性能的影响。陈淙洁等<sup>[8]</sup>提取了高纯度的秸秆纤维, 运用纺织技术及热压成型技术制备了 PP / 秸秆复合板材, 实验证明所制得的板材具有良好的成型性和弯曲性能。C. R. Reddy 等<sup>[9]</sup>采用熔融共混挤出制备麦秸秆 / 黏土增强 PP 复合材料, 实验结果表明, 麦秸秆的加入提高了 PP 复合材料的弯曲弹性模量并降低了其抗吸水性。麦秸秆是

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (51173100, 51505261), 山东省自然科学基金项目 (ZR2014 JL032, ZR2015AM013)

联系人: 焦学健, 副教授, 主要从事汽车设计与制造研究

收稿日期: 2017-09-28

一种天然纤维,界面特性比较复杂,有很多学者针对如何提高植物纤维与树脂界面相容性开展了相关工作,研究表明采用偶联剂处理、接枝改性、增容剂处理等方法可以改善纤维与树脂界面间的粘结强度,复合材料力学性能被提高<sup>[10-13]</sup>。

笔者采用转矩流变仪混合造粒,通过注射成型方法制备 PP/麦秸秆复合材料,采用碱处理麦秸秆和引入增容剂的方法改善麦秸秆与 PP 界面相容性,研究 NaOH 浓度、增容剂含量和麦秸秆含量对 PP/麦秸秆复合材料力学性能的影响,从而为 PP/麦秸秆复合材料的实际应用提供依据和参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PP: 中国石化齐鲁股份有限公司;

麦秸秆: 河南濮阳;

氢氧化钠: 天津市科密欧化学试剂有限公司;

马来酸酐接枝 PP: 东莞市众全新材料科技有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

注塑机: SZ-45/400DC 型,宁波市金星塑料机械责任有限公司;

转矩流变仪: RM-200A 型,哈尔滨哈普电气技术有限责任公司;

电子万能试验机: instron596 型,美国英斯特朗公司;

摆锤冲击测试仪: XJJ-5 型,承德试验机有限责任公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Sirion200 型,荷兰 FEI 公司。

### 1.3 样条制备

将一定量的麦秸秆放入不同浓度 NaOH 溶液中,浸泡 10 h 后,用蒸馏水多次清洗,将其放入烘箱在 90℃ 恒温烘干,再将其剪碎以备用。将麦秸秆、PP 和增容剂分别按一定配比加入转矩流变仪中密炼造粒,流变仪的转速是 45 r/min,一至三区的温度均设定为 195℃。将 PP/麦秸秆复合材料粉碎,采用注塑机注射成型制备 PP/麦秸秆复合材料拉伸标准样条,并制备测试弯曲强度和冲击强度所用标准样条。

### 1.4 性能测试

弯曲强度: 按 GB/T9341-2008 测试; 拉伸强度: 按 GB/T1040-1992 测试; 冲击强度: 按 GB/T1843-2008 测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碱处理对麦秸秆表面形貌的影响

图 1 是未经碱处理和经过碱处理的麦秸秆 SEM 图。从图中可看出,未经碱处理的麦秸秆表面相对平整致密,表面较光滑,而经过碱处理后的麦秸秆沟壑和粗糙度加大,表面凹凸不平,这说明麦秸秆的表面蜡状硅质层部分已被去除,麦秸秆内部的纤维素分裂成更小的纤维,纤维长径比增加,麦秸秆与 PP 接触表面积增加,有利于麦秸秆与树脂基体进行更好地机械啮合,从而能大大提高麦秸秆与树脂界面相容性。

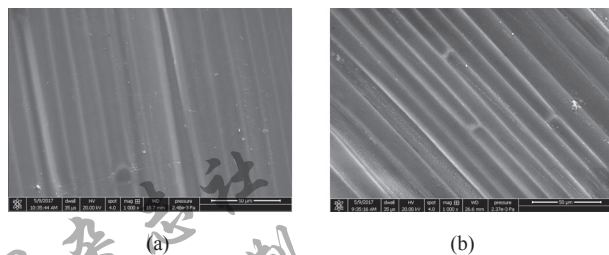


图 1 麦秸秆表面 SEM 图

### 2.2 NaOH 浓度对 PP 木塑复合材料力学性能的影响

图 2 和图 3 分别是不同 NaOH 浓度时 PP/麦秸秆复合材料的拉伸、弯曲和冲击性能。

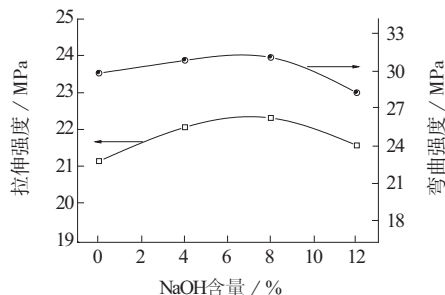


图 2 不同 NaOH 浓度时 PP/麦秸秆复合材料的拉伸及弯曲性能

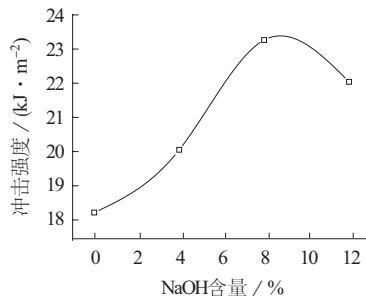
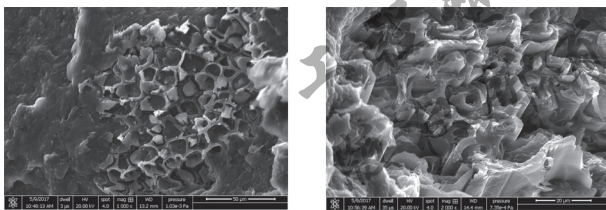


图 3 不同 NaOH 浓度时 PP/麦秸秆复合材料的冲击性能

从图 2 可看出, PP/麦秸秆的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度随着 NaOH 质量分数的增加先提高随后下降,当 NaOH 质量分数是 8% 时麦秸秆复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度达到最大,分别比表面未被处理的麦秸秆木塑复合材料拉伸

强度、弯曲强度和冲击强度提高了 5%,4% 和 28%。麦秸秆经过碱溶液处理后,表面的部分胶质被溶解掉,麦秸纤维被刻蚀而使粗糙度增加,麦秸纤维与基体的界面结合力也相应增加,并且界面粘结强度随着 NaOH 质量分数增加而改善,从而使得 PP/麦秸秆的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度得到提高;而随着 NaOH 质量分数的进一步增加,麦秸纤维表面缺陷增加,纤维被过量刻蚀且会产生大量空隙,纤维与树脂间界面强度降低,因此其力学性能降低。

PP/麦秸秆复合材料冲击断口的 SEM 图如图 4 所示。从图 4a 中可看出,麦秸秆没有被碱液处理的 PP/麦秸秆复合材料断面较平整,麦秸秆拔出后孔洞表面光滑,拔出的麦秸秆表面粘接树脂较少,说明 PP/麦秸秆复合材料的界面结合力较差,在其受到冲击时复合材料吸收能量较少。而从图 4b 中可看出,当碱液质量分数是 8% 时,PP/麦秸秆复合材料断面参差不齐,麦秸秆被树脂均匀包裹并有一定拔出长度,这说明麦秸秆与树脂基体之间的机械啮合力和粘结强度较大,在冲击时复合材料吸收了更多能量,从而使得其冲击强度大大增加。



(a) 未经碱处理; b—碱处理(碱液质量分数 8%)

图 4 PP/麦秸秆复合材料断面 SEM 图

### 2.3 增容剂对 PP 木塑复合材料力学性能的影响

图 5 和图 6 是不同马来酸酐接枝 PP 增容剂浓度时 PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度。麦秸秆表面处理是在 8% 碱液中处理 10 h,其含量为 10%。从图中可看出,由于增容剂的引入,PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均得到了提高,比没有引入增容剂的 PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度分别提高了 12%,28% 和 43%。麦秸秆表面含有大量羟基官能团,是一种极性较大的物质,而 PP 是非极性材料,因此两者界面相容性较差。马来酸酐可与麦秸秆和树脂同时发生界面化学反应,其含有的羧基可与麦秸上的羟基发生酯化反应,而不饱和键能与 PP 发生反应,使得 PP 与麦秸秆界面相容性大大增加<sup>[10,14]</sup>。马来酸酐的加入提高了麦秸秆与

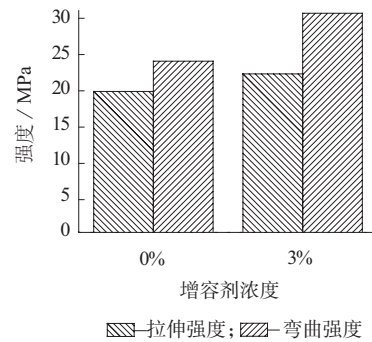


图 5 不同增容剂浓度时 PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度和弯曲强度

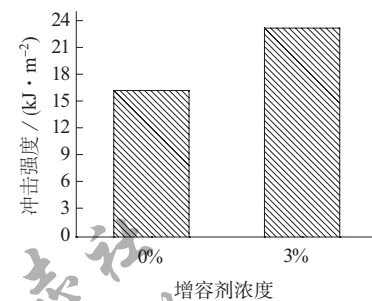


图 6 不同增容剂浓度时 PP/麦秸秆复合材料的冲击强度

PP 的界面粘结强度,从而很大程度改善了 PP/麦秸秆木塑复合材料力学性能。

### 2.4 麦秸秆含量对 PP 木塑复合材料力学性能影响

不同麦秸秆含量时 PP/麦秸秆木塑复合材料拉伸强度和弯曲强度如图 7 所示,其中麦秸秆经 8% NaOH 处理 10 h,增容剂含量为 3%。

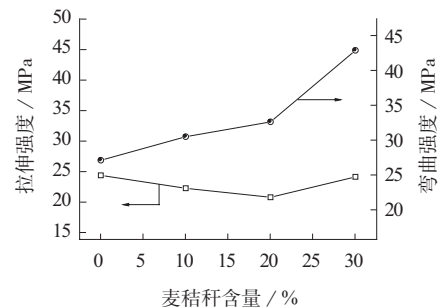


图 7 不同麦秸秆含量时 PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度和弯曲强度

从图 7 可看出,与纯 PP 相比,加入麦秸秆后拉伸强度降低;随着麦秸秆含量的增加,木塑复合材料的拉伸强度先降低而后增加,这是因为麦秸秆的加入稀释了 PP 基体,从而影响了基体的连续性,麦秸秆增多则 PP 基体相对减少,PP 粘结性能变差,在复合材料承受拉伸应力时即使麦秸秆与 PP 界面粘接性能良好但麦秸秆的承载性能较差,因此麦秸秆的加入降低了 PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度。随着麦秸秆含量的进一步增加,麦秸秆承担应力趋于均匀并加强,PP/麦秸秆复合材料的拉伸强度随之增加。从图 7 中还可看出,PP/麦秸秆木塑复合

材料的弯曲强度随着麦秸秆含量的增加而增加,且均高于纯 PP,当麦秸秆含量是 30% 时弯曲强度达到最大,为 43.4 MPa,比纯 PP 提高了 58%,这说明麦秸秆与 PP 界面结合良好,复合材料在受到弯曲应力时抗弯折能力随麦秸秆增多而增强。

麦秸秆含量对 PP/麦秸秆木塑复合材料冲击强度的影响如图 8 所示。从图 8 中可看出,麦秸秆增强 PP 的冲击强度随着麦秸秆含量的提高而降低,当麦秸秆含量是 30% 时冲击强度比纯 PP 降低了 72%。麦秸秆加入到 PP 中后,阻碍了复合材料中分子链的运动,随着麦秸秆含量的增加,PP 的连续性受到破坏,使得 PP 韧性降低而脆性增加;另一方面,PP/麦秸秆复合材料纤维末端处应力集中区增加,抗冲击韧性降低,从而使得 PP/麦秸秆复合材料冲击强度随着麦秸秆含量的增加而降低。

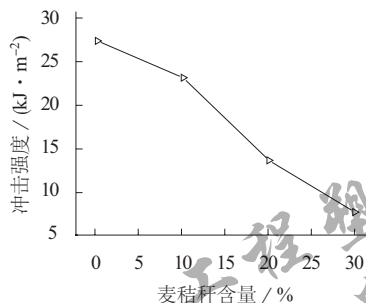


图 8 不同麦秸秆含量时 PP/麦秸秆复合材料的冲击强度

### 3 结论

(1) PP/麦秸秆木塑复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度随着 NaOH 的浓度的增加先提高后下降,在 8% NaOH 溶液处理麦秸秆时复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度达到最大,分别比未作处理的麦秸秆木塑复合材料拉伸强度、弯曲强度和冲击强度提高了 5%,4% 和 28%。

(2) 马来酸酐接枝 PP 增容剂的加入使得麦秸秆与 PP 的界面相容性提高,复合材料的力学性能大大增加。

(3) 麦秸秆的添加降低了 PP 材料的拉伸强度和冲击强度,而提高了其弯曲强度,PP/麦秸秆木塑复合材料的弯曲强度随着麦秸秆含量的增加而提高,在麦秸秆含量为 30% 时达到最大为 43.4 MPa。

#### 参考文献

[1] 付菁菁,何春霞,常萧楠,等. 麦秸秆/聚丙烯发泡复合材料的热稳定性与微观结构[J]. 复合材料学报,2016,33(3):469-476.  
Fu Jingjing, He Chunxia, Chang Xiaonan, et al. Thermo-stability and microstructure of wheat straw / polypropylene foamed composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3):469-

476.

- [2] 毕永豹,杨兆哲,许民. 3D 打印 PLA/麦秸粉复合材料的力学性能优化[J]. 工程塑料应用,2017,45(4):24-28.  
Bi Yongbao, Yang Zhaozhe, Xu Min. Optimization for Mechanical properties of PLA / wheat straw flour composites applied in 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4):24-28.
- [3] Elsabbagh A, Steuernagel L, Ring J. Natural fibre / PA6 composites with flame retardance properties: extrusion and characterization[J]. Composites Part B, 2017, 108:325-333.
- [4] 王珂,梅长彤,潘明珠,等. SDBS 对核壳结构木塑复合材料抗静电及热力学性能的影响[J]. 塑料科技,2017,45(8):95-99.  
Wang Ke, Mei Changtong, Pan Mingzhu, et al. Effect of SDBS on the antistatic and thermodynamic properties of core shell structure wood plastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(8):95-99.
- [5] Kern W T, Kim W, Argento A, et al. Mechanical behavior of microcellular, natural fiber reinforced composites at various strain rates and temperatures[J]. Polymer Testing, 2014, 37(8):148-155.
- [6] 常萧楠,何春霞,付菁菁,等. 竹炭和壳聚糖对聚氯乙烯基本塑复合材料界面性能的影响[J]. 复合材料学报,2016, 33(9):2 022-2 029.  
Chang XiaoNan, He Chunxia, Fu Jingjing, et al. Effects of bamboo charcoal and chitosan on interfacial property of polyvinyl chloride based wood-plastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(9):2 022-2 029.
- [7] 张东辉,何春霞,刘军军. 稻秸秆粉/聚丙烯复合材料力学性能[J]. 农业工程学报,2010,26(7):380-384.  
Zhang Donghui, He Chunxia, Liu Junjun. Mechanical properties of straw-powder / PP composites[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7):380-384.
- [8] 陈洁清,白肃跃,王春红. 聚丙烯/秸秆复合材料的成型工艺及性能探究[J]. 工程塑料应用,2012,40(1):39-42.  
Chen Congjie, Bai Suyue, Wang Chunhong. Study on molding technology and performance of polypropylene / straw composites[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(1):39-42.
- [9] Reddy C R, Sardashti A P, Simon L C. Preparation and characterization of polypropylene-wheat straw-clay composites[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70 (12):1 674-1 680.
- [10] 于旻,何春霞,刘军军,等. 不同表面处理麦秸秆对木塑复合材料性能的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(9):171-177.  
Yu Min, He Chunxia, Liu Junjun, et al. Effects of different surface treatment for wheat straw on performances of wood-plastic composites[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9):171-177.

## 参考文献

- [1] 王志霞. 船舶运输危险化学品水上泄漏应急处理研究[J]. 中国水运, 2013, 13(7):5-6.  
Wang Zhixia. Study on emergency treatment of hazardous chemicals leakage of marine transportation[J]. China Water Transport, 2013, 13(7):5-6.
- [2] 王海潮, 庞博. 长江危化品事故应急亟待加强[J]. 中国海事, 2016(6):10-13.  
Wang Haichao, Pang Bo. It is necessary to enhance emergency response on the dangerous chemical cargo accident at Yangtze River[J]. China Maritime Safety, 2016(6):10-13.
- [3] 范维澄. 公共安全科学导论[M]. 科学出版社, 2013.  
Fan Weicheng. Introduction to public safety science[M]. Science Press, 2013.
- [4] 陈兰芳, 王卿权. 船载危险化学品应急设备配备研究[J]. 中国水运, 2016, 16(11):159-161.  
Chen Lanfang, Wang Qingquan. Study on emergency equipment for shipborne hazardous chemicals[J]. China Water Transport, 2016, 16(11):159-161.
- [5] 邹云飞, 谢琛, 张德文. 溢油应急设备库现状及发展前景综述[J]. 环境工程, 2012(s2):427-429.  
Zou Yunfei, Xie Chen, Zhang Dewen. Status and prospect of oil spill equipment depots[J]. Environmental Engineering, 2012(s2):427-429.
- [6] 贺术, 张卫英, 翁森, 等. 苯类吸收树脂的制备及其吸收与释放动力学[J]. 石油化工, 2017, 46(3):338-343.  
He Shu, Zhang Weiying, Weng Sen, et al. Preparation of benzene-containing absorbent resins and their absorption and release kinetics[J]. Petrochemical Technology, 2017, 46(3):338-343.
- [7] 杨艳丽. 高吸油性树脂的研究进展[J]. 山东化工, 2015, 44(6):60-61.  
Yang Yanli. Research on high oil-absorbing resin[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(6):60-61.
- [8] 蒋军, 王刚, 路建美, 等. 高吸油性树脂的制备及其在环境污染处置中的应用进展[J]. 石油化工, 2012, 41(7):749-753.  
Jiang Jun, Wang Gang, Lu Jianmei, et al. Progresses in high oil absorption resin preparation and its application in environmental protection[J]. Petrochemical Technology, 2012, 41(7):749-753.
- [9] 王文华, 邱金泉等. 吸油材料在海洋溢油处理中的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(7):151-154.  
Wang Wenhua, Qiu Jinquan, et al. Research progress on oil spill cleanup by oil sorbent material[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(7):151-154.
- [10] Wei Q F, Mather R R, Fotheringham A F, et al. Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(6):780-783.
- [11] 陈顺杭. 水上危险化学品泄漏应急处置决策技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
Chen Shunhang. Research for emergency treatment decision-making technology in dangerous chemicals leaking on waterway[D]. Dalian University of Technology, 2007.
- (上接第28页)
- [11] 刘彬, 李彬, 王怀栋, 等. 木塑复合材料应用现状及发展趋势[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(1):137-141.  
Liu Bin, Li Bin, Wang Huaidong, et al. Application status and development trend of wood plastic composite[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1):137-141.
- [12] Zafar M T, Maiti S N, Ghosh A K. Effect of surface treatment of jute fibers on the interfacial adhesion in poly (lactic acid) / jute fiber biocomposites[J]. Fibers and Polymers, 2016, 17(2):266-274.
- [13] 李津, 王春红, 贺文婷, 等. 洋麻纤维的表面改性及其在聚丙烯基复合材料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(2):6-10.  
Li Jin, Wang Chunhong, He Wenting, et al. Surface modification of Kenaf fiber and application of it on polypropylene composite[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2):6-10.
- [14] 许民, 李帅, 王克奇, 等. 麦秸 / 聚丙烯复合材料的动态力学和微观性能分析[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4):61-63.  
Xu Min, Li Shuai, Wang Keqi, et al. Analysis of dynamic mechanics and micro-properties of wheat straw polypropylene composite[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(4):61-63.

## 欢迎订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2018 年定价 15 元/期, 全年 180 元。《化学分析计量》为双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版, 2018 年定价 15 元/期, 全年 90 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355