

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.07.028

# 植物壳纤维增强塑料基复合材料研究进展<sup>\*</sup>

朱碧华,何春霞,石峰,王兴华,史金棉,陈扬

(南京农业大学工学院,江苏省智能化农业装备重点实验室,南京 210031)

**摘要:** 简要介绍了稻壳、椰壳、核桃壳、花生壳等植物壳纤维利用现状及其主要组成成分,阐述了稻壳、椰壳、核桃壳、花生壳等植物壳纤维增强塑料基复合材料的研究进展。针对植物壳纤维增强塑料基复合材料的发展现状,提出了植物壳纤维替代木粉、竹纤维等传统增强纤维制备木塑复合材料和大力发展新型植物壳纤维增强塑料基复合材料的发展方向,并展望了植物壳纤维增强塑料基复合材料的应用前景。

**关键词:** 植物壳纤维;复合材料;研究进展

**中图分类号:** TB332   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-3539(2016)07-0142-05

## Research Progress of Plant Husk Fibers Reinforced Plastic Based Composites

Zhu Bihua, He Chunxia, Shi Feng, Wang Xinghua, Shi Jinmian, Chen Yang

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing 210031, China)

**Abstract :** The utilization status and primary compositions of plant husk fibers were reviewed. Research progress of plant husk (i.e., rice-husk, coconut shell, walnut shell, peanut shell, etc.) fibers-reinforced plastic based composites were introduced respectively. Based on the development status of plant husk fibers-reinforced plastic based composite, the development trend (i.e., plant husk fiber replacing conventional reinforced fibers as reinforcements for manufacturing wood-plastic composite and striving to develop new plant husk fibers-reinforced plastic based composite) was proposed. Application prospects of plant husk fibers-reinforced plastic based composite were analyzed.

**Keywords :** plant husk fiber ; composite ; research progress

植物种壳、果壳属于天然植物纤维,来源广泛、价格低廉,常被当做农林废弃物进行焚烧处理,既浪费资源又污染环境<sup>[1-3]</sup>。近年来,一些科研工作者为实现农林废弃物高值利用和绿色环保复合材料研发,开展了将其用于填充制备植物壳纤维增强塑料基复合材料的相关研究,为植物种壳、果壳的资源化利用提出了新的研究方向。笔者综述了近年来稻壳、椰壳、核桃壳、花生壳等植物纤维增强塑料基复合材料的研究进展,分析了其发展趋势及应用前景。

### 1 稻壳及其增强塑料基复合材料

我国是世界上最大的水稻生产国和消费国,稻壳资源非常丰富。稻壳硅含量高,表面坚硬,不易被细菌分解,且堆积密度小,目前主要将其作为饲料应用于养殖业,但稻壳饲用营养含量很低<sup>[4]</sup>。稻壳经打碎制成稻壳粉,可用于制备稻壳纤维增强塑料基复合材料。表 1 为稻壳的主要组成成分<sup>[5]</sup>。

表 1 稻壳的主要组成成分

| 纤维素   | 半纤维素  | 木质素   | 灰分    |
|-------|-------|-------|-------|
| 34.72 | 15.30 | 25.18 | 16.61 |

杨科研等<sup>[6]</sup>研究了高密度聚乙烯 (PE-HD)/ 稻壳粉复合材料的等温结晶行为。研究发现,稻壳粉对复合材料具有明显的异相成核作用,可以促进复合材料的结晶,稻壳粉的

加入使得 PE-HD/ 稻壳粉复合材料结晶速率增大。同时,在结晶温度范围内,PE-HD/ 稻壳粉复合材料的结晶速率随着结晶温度升高有所下降、结晶时间有所延长。

张丽等<sup>[7]</sup>研究了稻壳粉经表面改性后填充制备聚丙烯 (PP)/ 稻壳粉复合材料的力学性能。研究表明,经碱处理改性后的稻壳粉松散且存在空隙,表面比较粗糙,在与 PP 混合时,熔融的 PP 很容易渗入稻壳间隙中并形成良好的结合界面,有利于提高 PP 与稻壳粉之间的界面相容性,从而提高 PP/ 稻壳粉复合材料力学性能;经硅烷偶联剂处理后,稻壳粉表面的羟基基团易与硅烷分子发生反应,形成稳定的共价键,降低稻壳粉表面极性,达到改善稻壳粉与 PP 相容性的效果,从而提高 PP/ 稻壳粉复合材料的力学性能。

何春霞等<sup>[8]</sup>研究了稻壳粉的粒径和含量对 PP/ 稻壳粉复合材料力学性能影响,并分析了复合材料的破坏机理。研究发现,稻壳粉粒径为 245 μm、含量为 PP 质量

<sup>\*</sup> 国家级大学生创新训练计划项目 (SRT)(201510307090)

联系人:何春霞,博士,教授,博士生导师,研究方向为生物质复合材料

收稿日期:2016-04-18

30% 时, PP/ 稻壳粉复合材料力学性能最佳,其拉伸强度为 23.69 MPa,弯曲强度为 36.54 MPa; 稻壳粉含量较低时,稻壳粉与 PP 有较好的界面结合, PP/ 稻壳粉复合材料的破坏为韧性破坏; 稻壳粉含量较高时,稻壳粉与 PP 界面相容性较差, PP/ 稻壳粉复合材料的破坏为脆性破坏。

沈钰程<sup>[9]</sup>研究了 PP/ 稻壳粉复合材料的吸水性和热稳定性。通过研究比较相同条件制备的四种 PP/ 天然植物纤维(稻草、松木、蔗渣、稻壳)复合材料,结果表明, PP/ 稻壳粉复合材料的耐水性和热稳定性最好,水分扩散系数为  $0.96 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{h}$ ,热解残余率为 31.2%; 马来酸酐(MAH)接枝聚丙烯(PP-g-MAH)和苯乙烯-乙炔-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)增韧剂的添加使得 PP/ 稻壳粉复合材料的吸水性降低。

周吓星等<sup>[10]</sup>研究了 PE-HD/ 稻壳粉复合材料的老化性能。研究发现,在阳光曝晒环境和户外阴面自然环境中, PE-HD/ 稻壳粉复合材料的弯曲性能均有所下降,且户外阴面自然环境比阳光曝晒环境对 PE-HD/ 稻壳粉复合材料的弯曲性能影响更大,在阳光曝晒环境和户外阴面自然环境中放置 6 个月后, PE-HD/ 稻壳粉复合材料弯曲强度分别下降了 15.75% 和 23.77%。

胡圣飞等<sup>[11]</sup>研究了聚氯乙烯(PVC)/ 稻壳粉复合材料的力学性能。研究表明,采用经甲基丙烯酸甲酯(MMA)和硅烷偶联剂改性后的稻壳粉填充制备 PVC/ 稻壳粉复合材料,可以提高复合材料的力学性能,经 MMA 改性可较大幅度地提高复合材料的拉伸强度,用硅烷偶联剂改性则对提升材料的冲击韧性效果更佳,而在材料中加入弹性体增韧剂氯化聚乙烯(PE-C)可进一步提高材料的冲击强度。采用 100 份 PVC、6 份 PE-C、40 份稻壳粉、1 份硅烷偶联剂,制得的复合材料的力学性能最好,其冲击强度为 13 kJ/m<sup>2</sup>,拉伸强度为 23 MPa。

Yeh Shu-Kai 等<sup>[12]</sup>研究了 PP-g-MAH, MAH 接枝 SEBS (SEBS-g-MAH) 和 2% 的 PP-g-MAH 与 1% 的 SEBS-g-MAH 组合三种界面增容剂对 PP/ 稻壳粉复合材料性能的影响。结果表明,2% 的 PP-g-MAH 与 1% 的 SEBS-g-MAH 组合作为增容剂对提高复合材料的冲击强度和降低复合材料的吸湿性作用效果最为显著,其处理制备的复合材料的冲击强度为 50.42 J/m,比未处理制备的复合材料提升了 40.72%; 吸湿率为 9.38%,比未处理制备的复合材料降低了 17.6%。Yeh Shu-Kai 等还用氢氧化钠、硅烷偶联剂以及氯化氢+氢氧化钠+硅烷偶联剂组合三种处理方式分别对稻壳进行表面处理,采用处理后的稻壳粉填充制备 PP/ 稻壳粉复合材料,结果发现,三种处理方式均能提高复合材料的冲击强度,但对拉伸性能影响不大;碱性处理会提高复合材料

的吸湿率,经氢氧化钠和氯化氢+氢氧化钠+硅烷偶联剂两种处理方式改性处理后,制得的复合材料的吸湿率分别提高了 35% 和 9.7%,而经硅烷偶联剂处理后则降低了 6%。

## 2 椰壳及其增强塑料基复合材料

我国在 2000 年前开始种植栽培椰子,主要种植地区集中在海南省。椰子内果皮俗称椰壳,占整个椰子质量的 12%~15%。椰壳木质素含量高,质地坚硬,耐潮性好,主要用于雕刻加工成各种工艺品<sup>[13]</sup>。近年来也有一些关于将椰壳作为增强纤维制备木塑复合材料的研究报道。表 2 为椰壳的主要组成成分<sup>[14-15]</sup>。

|       |       |       | %   |
|-------|-------|-------|-----|
| 纤维素   | 半纤维素  | 木质素   | 灰分  |
| 20~40 | 20~30 | 35~45 | 0.8 |

杨尚毅等<sup>[16]</sup>研究了 PP/ 椰壳粉复合材料的增容改性。研究发现,聚丙烯接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物(PP-g-GMA)对椰壳粉和 PP 有较好的增容效果,其用量为椰壳粉质量的 15% 时效果最佳,与未进行增容处理制备的复合材料相比,采用增容处理制备的复合材料的拉伸强度和冲击强度分别提高了 28.4% 和 56.9%; 在 PP 中加入椰壳粉可显著提高 PP 的热稳定性,经 PP-g-GMA 增容改性后的 PP/ 椰壳粉复合材料的热稳定性进一步得到改善。

叶世荣<sup>[17]</sup>对 PP/ 椰壳粉复合材料进行了比较全面的研究。研究了椰壳粉用量对 PP/ 椰壳粉复合材料力学性能影响,结果发现,随着椰壳粉质量分数的增加, PP/ 椰壳粉复合材料的力学性能呈先增加后降低的趋势,其中当椰壳粉质量分数为 20% 时,椰壳粉对 PP 的增强效果最佳,其拉伸强度为 31.02 MPa,冲击强度为 8.05 kJ/m<sup>2</sup>。同时还研究了 PP-g-GMA 对 PP/ 椰壳粉复合材料加工流动性和热稳定性的影响,研究表明, PP-g-GMA 的加入可以改善椰壳粉的分散性,使 PP 的结晶温度降低,比纯 PP 的结晶温度降低了 11℃,显著地改善了 PP/ 椰壳粉复合材料的加工流动性。而且 PP-g-GMA 增容的复合材料具有优良的耐热分解性能,与纯 PP 相比,起始分解温度和分解 50% 时的温度分别提高了 50.4℃ 和 37.5℃。

赵连云<sup>[18]</sup>采用氢氧化钠溶液浸泡后的椰壳纤维填充共聚丙烯(IPC)制备复合材料,分别添加钛酸酯偶联剂、PP-g-GMA 增容剂和丙烯酸接枝熔融共聚丙烯(AA-g-IPC)增容剂,以增强椰壳粉和 IPC 之间的界面相容性,研究了不同增容剂对复合材料界面相容性的影响。研究表明,钛酸酯偶联剂、PP-g-GMA 增容剂和 AA-g-IPC 增容剂的加入都使 IPC/ 椰壳粉复合材料的抗变形能力有所提升,三种助剂对增强椰壳粉和 IPC 之间相容性的效果从大到小依次为: PP-g-GMA, AA-g-IPC 及钛酸酯偶联剂。

### 3 核桃壳及其增强塑料基复合材料

核桃广泛种植于我国南方,其中云南省为我国核桃产量最大的省份。核桃取仁后剩下的核桃壳为农林废弃物,多被农户当成燃料燃烧,利用价值远没有得到体现<sup>[19]</sup>。核桃壳可完全降解、比强度高,可用于填充塑料基体制备木塑复合材料。表3为核桃壳的主要组成成分<sup>[20]</sup>。

表3 核桃壳的主要组成成分

| 纤维素   | 半纤维素  | 木质素   | 灰分   |
|-------|-------|-------|------|
| 30.88 | 27.26 | 38.05 | 0.66 |

刘继云<sup>[21]</sup>采用硅烷偶联剂(KH-550)对核桃壳粉进行偶联处理,通过熔融共混的方式制备聚乳酸(PLA)/核桃壳粉复合材料,研究了填料对PLA/核桃壳粉复合材料力学性能和热稳定性的影响。研究表明,KH-550添加量为核桃壳粉质量的6%时,PLA/核桃壳粉复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度分别为42.09 MPa,63.89 MPa,1.69 kJ/m<sup>2</sup>,比未处理的复合材料分别提高了19.1%,20.6%,19.8%。核桃壳粉的加入使得复合材料的热降解活化能降低,促进了复合材料的热降解。同时,复合材料的热稳定性因为采用硅烷偶联剂对核桃壳粉处理而有所提高。

魏哲梅<sup>[22]</sup>研究了PP/核桃壳粉复合材料的制备及其力学性能。结果表明,PP-g-MAH界面增容剂有利于增强核桃壳粉与PP基体的界面结合,提升PP/核桃壳粉复合材料的力学性能,当添加量为7%时,复合材料的拉伸强度比未添加界面增容剂制得的复合材料提升了32%;三元乙丙橡胶(EPDM)可大幅度增强复合材料的韧性,在其它条件相同情况下,由60%核桃壳粉、30%EPDM和10%PP制备的复合材料的冲击强度与未添加EPDM的复合材料相比提高了262%。PP-g-MAH和EPDM混合使用会发生协同作用,可进一步提升PP/核桃壳粉复合材料的综合性能,而对材料的热稳定性和结晶性能影响不大。

高留意等<sup>[23]</sup>研究了废白土对低密度聚乙烯(PE-LD)/WSP复合材料性能的影响。研究发现,PE-LD/核桃壳粉复合材料的力学性能及加工流动性能随着废白土加入量的增加呈先增大后减小的趋势,当其添加量为1%时复合材料的力学性能和加工流动性均达到最佳值,复合材料的拉伸强度、冲击强度和熔体流动速率与未添加废白土制备的复合材料相比分别提高了54.3%,12.5%和63.5%。过量废白土的加入会降低核桃壳粉在PE-LD树脂中的分散性,从而减弱复合材料的力学性能及加工流动性能。

N. Ayrimis等<sup>[24]</sup>研究了PP/核桃壳粉复合材料的力学性能。研究发现,核桃壳粉填料的加入,可显著提高复合材料的拉伸弹性模量和弯曲弹性模量,但拉伸强度和弯曲强度却有所降低,当核桃壳粉添加量由PP质量的40%增加到

60%时,拉伸弹性模量和弯曲弹性模量分别提升了15.76%和18.19%,拉伸强度和弯曲强度分别降低了24.08%和31.96%。同时,增容剂PP-g-MAH的加入可以改善核桃壳粉和PP的结合界面,提高复合材料力学性能和尺寸稳定性,加入PP质量3%的PP-g-MAH后制得的PP/核桃壳纤维复合材料的弯曲强度和拉伸强度分别比未添加增容剂制得的PP/核桃壳纤维复合材料提高了33%和13%,断裂伸长率提高了7%。

### 4 花生壳及其增强塑料基复合材料

我国是世界三大花生生产国之一,花生壳资源丰富。来源丰富的花生壳除了少部分被用作燃料和饲料外,大部分都被扔掉或焚烧,造成环境污染和资源浪费。花生壳中含有大量的粗纤维<sup>[25]</sup>,可用于充当木塑复合材料的增强材料。近年来,开发利用花生壳已引起科研工作者的重视,并取得一定进展。表4是花生壳的主要组成成分。

表4 花生壳的主要组成成分

| 纤维素   | 半纤维素  | 木质素   | 灰分   |
|-------|-------|-------|------|
| 40.31 | 12.97 | 39.68 | 1.90 |

姚雪霞等<sup>[26]</sup>分别采用5%氢氧化钠,5%乙酸及高温和微波水浴四种方式对花生壳粉进行预处理,再用硅烷偶联剂(KH-550)处理花生壳粉,用模压方法制备PE-HD/花生壳粉复合材料,研究了预处理对PE-HD/花生壳粉复合材料性能的影响。研究发现,氢氧化钠预处理可增加花生壳粉中纤维素的含量,减少半纤维素和木质素的含量,增加纤维素的相对结晶度,从而较好地改善木塑复合材料的力学性能;用NaOH与KH-550复合预处理对增强PE-HD/花生壳粉复合材料的防水性能最为有效,其192 h的吸水率为4.1%,而只用KH-550处理制得的复合材料192 h的吸水率为14.9%。

高巧春等<sup>[27]</sup>研究了增容剂Bondyram 5108的加入对PE-HD/花生壳粉复合材料性能的影响。研究发现,Bondyram 5108的加入使得PE-HD表面的自由能增加,添加花生壳粉质量3%的Bondyram 5108,可使得PE-HD的表面极性和非极性分量分别增加2%和30.89%,花生壳粉在PE-HD基体中的分散性得以提高,另外还改善了两者的界面相容性,有利于提高复合材料的力学性能,加入3%的Bondyram 5108后复合材料的拉伸强度提高了31.9%。

崔靖等<sup>[28]</sup>研究了PP/花生壳粉复合材料的制备配方和工艺参数对复合材料力学性能的影响。研究发现,复合材料的拉伸强度、弯曲强度随着花生壳粉质量的增加而呈先增大后减小的趋势,当花生壳粉质量为PP质量的40%时取得最大值;而复合材料的冲击强度随着花生壳粉质量分数的增加反而变小。制备PP/花生壳粉复合材料的最优工艺

为:花生壳粉质量为PP质量的40%,热压温度为175℃,热压压力为12 MPa,热压时间为5 min,此时制得复合材料的弯曲强度、拉伸强度和冲击强度均较好,分别为18.73 MPa, 32.58 MPa 和 1.02 kJ/m<sup>2</sup>,满足一般家居填充物要求。

N. F. Zaaba 等<sup>[29]</sup>研究了聚乙烯醇(PVAL)对PP/花生壳粉复合材料性能的影响。研究表明,PVAL的加入可以改善花生壳粉和PP之间的界面相容性,表现在拉伸强度、断裂伸长率都有一定程度的提高,同时也提高了PP/花生壳粉复合材料的吸水性。

## 5 其它植物壳纤维及其增强塑料基复合材料

不同壳类材料具有不同的成分和结构,会直接影响以其为填充相、以塑料为基体的复合材料的性能<sup>[30-31]</sup>。为制备符合性能需求的木塑复合材料,还有一些植物壳纤维被用于填充塑料基体制备木塑复合材料,如杜仲翅果壳、腰果壳、板栗壳、榛子壳等。

李春霞等<sup>[32]</sup>研究了添加邻苯二甲酸二辛酯(DOP)对PVC/杜仲翅果壳粉复合材料性能的影响。发现DOP的加入能够明显改善复合材料的加工性能,但力学性能有明显降低。随着DOP用量的增加,复合材料的冲击强度、拉伸强度呈下降趋势,而弯曲强度呈先上升后下降趋势。

肖建平<sup>[33]</sup>通过采用经六次甲基四胺改性的腰果壳粉填充制备了PVC/腰果壳粉复合材料并研究了复合材料的力学性能、耐水性能和加工性能。研究表明,复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度随着腰果壳粉用量的增加呈先上升后下降的趋势,当腰果壳粉用量为5~10份时复合材料的力学性能最佳。同时,采用经六次甲基四胺改性的腰果壳粉制备PVC/腰果壳粉复合材料,可提高复合材料的耐水性,但会减弱复合材料的加工流动性。

Wu Chin-San 等<sup>[34]</sup>研究了GMA对聚羟基烷酸酯/板栗壳纤维复合材料性能的影响。研究表明,GMA的加入可以提高聚羟基烷酸酯/板栗壳纤维复合材料的力学性能和耐水性能,尤其是拉伸性能得到显著提高。

朱碧华等<sup>[35]</sup>分别采用榛子壳、椰壳、稻壳和PVC经同一方案制备了三种PVC/植物壳纤维复合材料并比较了其力学性能、吸水性能和热稳定性。研究发现,三种植物壳纤维中稻壳的纤维素含量最高,PVC/稻壳纤维复合材料具有较好的界面结合和力学性能,其弯曲强度、拉伸强度和冲击强度分别比PVC/椰壳纤维复合材料提高4.34%,12.78%和7.32%,比PVC/榛子壳纤维复合材料提高24.87%,28.42%和34.37%。三种PVC/植物壳纤维复合材料中,PVC/椰壳纤维复合材料的吸水性较小,其24 h吸水率为0.6005%;PVC/榛子壳纤维复合材料的热稳定性较好,从30℃加热到800℃过程中,初始分解温度为261.3℃,质量残余率为

31.6%。

## 6 发展趋势及应用前景

### (1) 植物壳纤维替代传统木塑复合材料增强纤维。

植物种壳、果壳属于农林废弃物,相比于传统的木塑复合材料增强纤维(木粉、竹粉、麻纤维等)利用率更低,利用途径更少,利用方式较为粗放,故将植物壳纤维用于填充塑料基体制备木塑复合材料既实现了对农林废弃物的高值利用,也减少了人们对木材、竹材等利用途径广泛的森林资源的依赖。

### (2) 大力发展新型植物壳纤维增强塑料基复合材料。

从上述植物壳纤维增强塑料基复合材料的研究进展可以看出,对植物壳纤维进行改性处理和提高壳类纤维和塑料基体之间的界面相容性以期得到性能更加优良的木塑复合材料依然是目前的研究热点。但随着木塑复合材料的应用领域不断扩展,在不同的领域,人们希望木塑复合材料具有更出色的特色性能,例如:用于户外景观地板、护栏的木塑复合材料长期经受日晒雨淋,故需要具有更好的防水性能和防腐、防老化性能。通过增添相应的助剂,优化复合材料的结构设计,使得木塑复合材料具有更出色的特色性能以满足具体工程应用的需求是植物壳纤维增强塑料基复合材料的未来发展方向,即应大力发展更具特色性能的新型植物壳纤维增强塑料基复合材料。

### (3) 应用前景。

目前植物壳纤维增强塑料基复合材料还没有得到广泛的应用,随着相关研究的增多、制备工艺与方法的成熟,植物壳纤维增强塑料基复合材料将会代替部分传统的木塑复合材料被应用到家居装饰、户外地板、景观护栏、汽车内饰、物流包装等领域。随着研究的深入,新型植物壳纤维增强塑料基复合材料的制备及其性能研究会进一步拓宽其应用领域,有望在汽车制动、冷链输送、隔音隔声、抑烟阻燃等领域得到更广泛的应用。

## 参考文献

- [1] 张璐. 园林绿化废弃物堆肥化的过程控制及其产品改良与应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2015.  
Zhang Lu. The process control of green waste composting and the improvement and application of compost product[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2015.
- [2] 索琳娜. 几种农林生物质废弃物再利用生产无土栽培基质技术及应用[D]. 北京:北京林业大学,2012.  
Suo Linna. The conversion and application of several agro-forestry biomass residues into growing media[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2015.
- [3] 夏星兰. 秸秆纤维/PVC发泡材料的研究[D]. 南昌:江西农业大学,2013.  
Xia Xinglan. Study on straw-fiber/PVC foaming material[D].

- Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013.
- [4] 沈梦烨,等. 粮食与饲料工业, 2014(8):27-31.  
Shen Mengye, et al. Cereal & Feed Industry, 2014(8):27-31.
- [5] 杜华. 稻壳粉/高密度聚乙烯复合材料紫外老化降解机理研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.  
Du Hua. UV accelerate degradation of rice-hull / HDPE composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [6] 杨科研,等. 塑料科技, 2015(10):29-33.  
Yang Keyan, et al. Plastics Science and Technology, 2015(10):29-33.
- [7] 张丽,等. 塑料科技, 2013(1):84-88.  
Zhang Li, et al. Plastics Science and Technology, 2013(1):84-88.
- [8] 何春霞,等. 高分子材料科学与工程, 2010(1):62-65.  
He Chunxia, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2010(1):62-65.
- [9] 沈钰程. 四种天然纤维增强聚丙烯复合材料的性能研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.  
Shen Yucheng. Study on properties of four natural fibers reinforced polypropylene composites[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2014.
- [10] 周吓星,等. 建筑材料学报, 2011(3):350-356.  
Zhou Xiexing, et al. Journal of Building Materials, 2011(3):350-356.
- [11] 胡圣飞,等. 工程塑料应用, 2009(4):55-58.  
Hu Shengfei, et al. Engineering Plastics Application, 2009(4):55-58.
- [12] Yeh Shu-Kai, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 68:313-322.
- [13] 郑侃,等. 广东农业科学, 2013(5):175-177.  
Zheng Kan, et al. Guangdong Agricultural Sciences, 2013(5):175-177.
- [14] 李玲. 椰壳半纤维素的提取及表征 [D]. 海口: 海南大学, 2012.  
Li Ling. Extraction and characterization of hemicelluloses from coconut shell[D]. Haikou: Hainan University, 2012.
- [15] 刘玉德. 椰壳活性炭负载金属氧化物的制备及用于处理染料废水的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.  
Liu Yude. Study on dye wastewater treatment using metallic oxide loaded on coconut shell activated carbon[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [16] 杨尚毅,等. 塑料科技, 2014(2):45-48.  
Yang Shangyi, et al. Plastics Science and Technology, 2014(2):45-48.
- [17] 叶世荣. 聚丙烯 (PP)/ 废弃椰壳粉复合材料的研究 [D]. 海口: 海南大学, 2012.  
Ye Shirong. Studied on the composites polypropylene(PP)/wasted coconut shell powder[D]. Haikou: Hainan University, 2012.
- [18] 赵连云. 椰壳纤维 / IPC 复合材料的界面改进研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.  
Zhao Lianyun. Study on interfacial modification of coir / IPC composites[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2011.
- [19] 秦微微,等. 食品工业, 2012(11):138-140.  
Qin Weiwei, et al. The Food Industry, 2012(11):138-140.
- [20] 郝慧娟. 核桃壳提取物的成分分析及其抗氧化活性研究 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2013.  
Hao Huijuan. The composition analysis and antioxidant activity of walnut shell extraction[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [21] 刘继云. NS/PLA 复合材料的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.  
Liu Jiyun. Study on preparation and properties of nutshell / PLA composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [22] 魏哲梅. WSP/PP 复合材料的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.  
Wei Zhemei. Study on preparation and properties of WSP / PP composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [23] 高留意,等. 塑料, 2012(6):26-28.  
Gao Liuyi, et al. Plastics, 2012(6):26-28.
- [24] Ayilmis N, et al. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(3):908-914.
- [25] 岳青. 粮油食品科技, 2013(5):40-42.  
Yue Qing. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013(5):40-42.
- [26] 姚雪霞,等. 工程塑料应用, 2015(9):19-25.  
Yao Xuexia, et al. Engineering Plastics Application, 2015(9):19-25.
- [27] 高巧春,等. 塑料科技, 2012(7):68-71.  
Gao Qiaochun, et al. Plastics Science and Technology, 2012(7):68-71.
- [28] 崔靖,等. 塑料工业, 2011(S1):76-78.  
Cui Jing, et al. China Plastics Industry, 2011(S1):76-78.
- [29] Zaaba N F, et al. Procedia Chemistry, 2016, 19:763-769.
- [30] Mukherjee T, et al. Journal of Polymer Environment, 2011, 19(3):714-725.
- [31] 侯人鸾,等. 复合材料学报, 2013(5):86-93.  
Hou Renluan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013(5):86-93.
- [32] 李春霞,等. 塑料包装, 2014(3):15-18.  
Li Chunxia, et al. Plastics Packaging, 2014(3):15-18.
- [33] 肖建平,等. 塑料, 2013(1):58-60.  
Xiao Jianping, et al. Plastics, 2013(1):58-60.
- [34] Wu Chin-San, et al. Polymer Degradation and Stability, 2014, 99:274-282.
- [35] 朱碧华,等. 复合材料学报, <http://www.cnki.net/kcms/de-tail/11.1801.TB.20160411.1637.010.html>.  
Zhu Bihua, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, <http://www.cnki.net/kcms/de-tail/11.1801.TB.20160411.1637.010.html>.