

造纸污泥/PVC木塑复合材料的制备工艺

覃宇奔¹, 郑云磊¹, 胡华宇¹, 张燕娟², 蒋婷¹, 黄祖强¹

(1. 广西大学, 南宁 530004; 2. 广西化工研究院, 南宁 530001)

摘要: **目的** 研究造纸污泥/PVC木塑复合材料的制备工艺。**方法** 以造纸污泥为原料, PVC为塑料基体, 采用热压成形技术制备木塑复合材料, 探讨污泥填充量、热压时间、温度、压力和偶联剂用量等因素对复合材料力学性能的影响, 并采用扫描电镜和红外光谱对复合材料和造纸污泥进行表征。**结果** 造纸污泥填充量为50%, 偶联剂占污泥用量的2%, 热压时间为10 min, 热压温度为180 ℃, 热压压力为6 MPa时, 所制备复合材料弯曲强度为35.73 MPa, 拉伸强度为12.75 MPa, 具有良好的力学性能。扫描电镜显示, 经硅烷偶联剂改性后污泥与PVC制备的复合材料, 界面相容性明显改善, 材料力学性能明显提高。红外光谱分析证明, 偶联剂与造纸污泥发生了交联反应, 形成了化学键接。**结论** 采用造纸污泥与PVC共混制备木塑复合材料的工艺是可行的。

关键词: 造纸污泥; 木塑复合材料; 偶联改性

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)03-0010-06

Preparation Technology of Paper Mill Sludge/PVC Wood Plastic Composites

QIN Yu-ben¹, ZHENG Yun-lei¹, HU Hua-yu¹, ZHANG Yan-juan², JIANG Ting¹, HUANG Zu-qiang¹

(1. Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Research Institute of Chemical Industry, Nanning 530001, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the preparation technology of paper mill sludge/polyvinyl chloride (PVC) wood plastic composites (WPC). **Methods** The WPC were prepared by hot press molding technology with paper mill sludge as reinforced material and PVC as plastics matrix, and the effects of paper mill sludge content, hot pressing time, temperature, pressure, and dosage of coupling agent on the mechanical properties of the composites were investigated, respectively. In addition, the composites and paper mill sludge were characterized by scanning electron microscope (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), respectively. **Results** Under the conditions of a paper mill sludge content of 50%, a weight percent of coupling agent/paper mill sludge of 2%, a hot pressing time of 10 min, a temperature of 180 ℃, and a pressure of 6 MPa, the bending strength and tensile strength of the paper mill sludge/PVC composite were 35.73 MPa and 12.75 MPa, respectively, indicating the favorable mechanical properties of the composite. SEM analysis showed that the interfacial compatibility of the composite prepared by silane coupling agent-modified paper mill sludge and PVC was significantly improved, resulting in the enhancement of its mechanical properties. FT-IR analysis indicated that crosslinking reaction had occurred between the coupling agent and the paper mill sludge, forming chemical bonding. **Conclusion** It is feasible to prepare WPC with the blend of paper mill sludge and PVC.

KEY WORDS: paper mill sludge; wood plastic composite; coupling modification

收稿日期: 2013-10-04

基金项目: 广西自然科学基金重点项目(2013GXNSFDA019004); 广西大学科研基金资助项目(XJZ110619)

作者简介: 覃宇奔(1977—), 男, 壮族, 广西金城江人, 硕士, 广西大学实验师, 主要从事纤维复合材料的实验与研究。

通讯作者: 胡华宇(1972—), 男, 广西南宁人, 广西大学副教授, 主要研究方向为纤维化学加工与利用。

造纸污泥是造纸生产的废弃物。制浆造纸废水处理后的污泥产量巨大,若不进行有效处理,将造成严重的二次污染^[1-2]。木塑复合材料(WPC)是一种以木纤维为增强材料,通过预处理使之与热塑性基体聚合物复合而成的一种新型材料^[3-4]。它同时兼有木材和塑料的优点,具有代木作用,可以减缓我国木材资源贫乏的情况,同时具有塑料的耐水、防腐、易着色等优势^[5-6]。国内外已对木塑复合材料进行了较深入的研究^[7-9],但以造纸污泥为原料制备木塑复合材料的研究报道较少。造纸污泥含一定量的纤维成分,并有大量的无机物,特别是含有较多的碳酸盐成分^[10],因此可考虑利用其纤维与热塑性基体制备木塑复合材料,并利用其无机成分的填充作用制备发泡包装材料。以造纸污泥为原料,PVC为塑性基体制备木塑复合材料,并进而研究其在包装、建筑、物流、园林城建等领域的应用,具有深远的意义。

热塑性聚合物和木纤维材料之间的复合还存在着许多问题,主要表现为亲水性的生物质纤维与疏水性的聚合物基体间的相容性差,导致应力不能有效传递,使复合材料性能下降^[11]。通过添加偶联剂来改变纤维和塑料表面性能,是改善复合材料界面相容性的方法之一。硅烷偶联剂是研究与应用最为广泛的一类偶联剂^[12-14]。笔者前期研究以造纸污泥为原料,探讨了造纸污泥/PVC木塑复合材料的制备工艺条件,并分析了硅烷偶联剂对复合材料界面微观结构及其力学性能的影响。

1 实验

1.1 原料

实验原料:造纸污泥(干污泥含水率为14.37%,纤维的质量分数为21.66%,pH值为8.05,灰分的质量分数为48.76%,污泥灰分中重金属离子含量低于GB 4284—84《农用污泥中污染物控制标准》),由南宁凤凰纸业有限公司提供;硅烷偶联剂(KH560),由南京杰舒化工有限公司提供;PVC(SG-5),由青海宜化化工有限责任公司提供。

1.2 仪器和设备

实验仪器和设备:101A-2B型电热鼓风干燥

箱,上海实验仪器厂有限公司;GF-1100高速混合机,莱州华润化机;XLB25-D平板硫化机,浙江双力集团湖州星力橡胶机械制造有限公司;DNS-100电子万能试验机,长春试验机研究所有限公司;S400型扫描电子显微镜,日本日立公司;MAGNA-IR 550型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR),日本日立公司。

1.3 方法

1.3.1 造纸污泥前处理

将造纸污泥晒干,用自制电磨机磨成细小颗粒,过60目筛,在105℃下烘干备用。

1.3.2 造纸污泥偶联改性

将硅烷偶联剂KH560配成稀释液,与污泥混合均匀后,置于105℃烘箱内2h,取出备用。

1.3.3 复合材料制备

将预反应过的造纸污泥与PVC及助剂,在高速混合机中1000 r/min条件下混合10 min,使共混均匀,将混合物料置于250 mm×250 mm×4 mm模具中,在平板硫化机上热压成形。

1.4 分析方法

1.4.1 力学性能分析

采用DNS-100电子万能试验机进行测试,测试速率为2 mm/min。弯曲强度按GB/T 9341—2000《塑料弯曲性能试验方法》进行测试。取热压成形的复合材料,每块板裁成5块长为150 mm、跨距为100 mm、宽为10 mm、厚为4 mm的试件,用于弯曲强度测试,结果取算术平均值。拉伸强度按GB/T 1040—92《塑料拉伸性能试验方法》进行测试。取热压成形的复合材料,每块板裁成5块长为150 mm、跨距为115 mm、宽为20 mm、厚为4 mm的试件,用于拉伸强度测试,结果取算术平均值。同样条件下平行试验3块板,最终结果取算术平均值。

1.4.2 仪器分析

扫描电子显微镜(SEM):复合材料形态观察所需试样,由样条经液氮冷冻脆断所得,表面喷金,用SEM观察断面形貌。

红外光谱(FT-IR):取少量干污泥,用KBr压片、测试,经硅烷改性的污泥用乙醇反复洗,除去未反应的偶联剂,再烘干压片测试。

2 结果与讨论

2.1 污泥填充量对复合材料力学性能的影响

固定热压温度为 170 °C,热压压力为 5 MPa,热压时间为 10 min,研究造纸污泥填充量(质量分数)对复合材料力学性能的影响,结果见图 1。

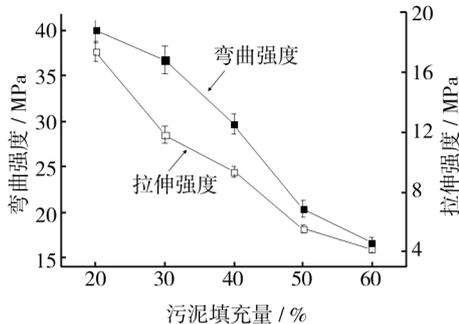


图 1 不同污泥填充量的木塑复合材料的力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of the composites with different paper mill sludge content

由图 1 可知,复合材料的弯曲强度和拉伸强度随污泥填充量的增加而降低。污泥与 PVC 相容性差,一方面,由于污泥中木纤维所含羟基等官能团的存在,在 PVC 中不易分散,表现为二者相容性差,容易发生团聚现象,产生应力集中^[15-16];另一方面,污泥作为分散相,在 PVC 基体中使得受力截面面积小于纯树脂材料,随着污泥含量的增加,在体系中所占体积增加,破坏了塑料基体的连续性,从而导致复合材料的力学性能下降。污泥含量的增加有助于降低生产成本,但是过量的污泥很难在 PVC 中均匀分散,污泥被塑料基体包覆的程度减小,导致在热压成形过程中,存在熔融温度下复合材料的流动性差,所制备的复合材料力学性能差、外观粗糙等缺点^[17]。当污泥用量占 50% 时,复合材料的弯曲强度为 20.38 MPa,符合 GB/T 24137—2009《木塑装饰板》的要求 (≥ 20 MPa),但其拉伸强度仅为 5.54 MPa,远远未达到标准要求 (≥ 10 MPa)。当污泥填充量进一步增加,制备的复合材料不成形,容易开裂。考虑后期将通过添加偶联剂等以改善产品力学性能,从尽可能利用污泥角度出发,选择污泥填充量为 50%。

2.2 热压时间对复合材料力学性能的影响

固定造纸污泥填充量为 50%,偶联剂占污泥用

量的 2%,热压温度为 170 °C,热压压力为 5 MPa,研究不同热压时间对复合材料力学性能的影响,结果见图 2。

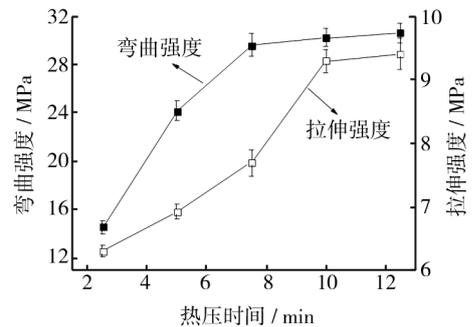


图 2 不同热压时间的木塑复合材料的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of the composites with different hot pressing time

对于复合材料来说,木纤维和塑料两相界面的形成过程,实质上就是塑料在木纤维表面的浸润和铺展过程。在相同温度下,相同性质塑料的流动性和粘接性是一致的,所以浸润时间是一个重要的因素。随着成形时间的延长,塑料在熔融状态下铺展和包覆纤维的效果越好,越有利于提高复合材料的弯曲强度和拉伸强度^[18]。压板时间在 10 min 后,材料的总体拉伸强度和弯曲强度增强不大,考虑实际生产中的成本因素和能源消耗,选择压板时间为 10 min。

2.3 热压温度对复合材料力学性能的影响

固定造纸污泥填充量为 50%,偶联剂占污泥用量的 2%,热压时间为 10 min,热压压力为 5 MPa,研究不同热压温度对复合材料力学性能的影响,结果见图 3。

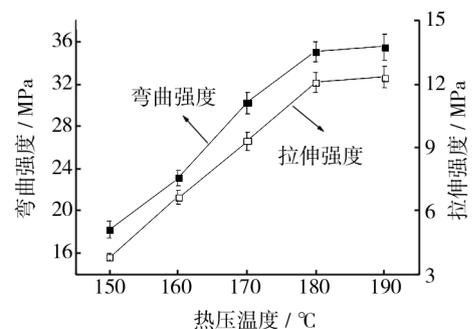


图 3 不同热压温度的木塑复合材料的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of the composites with different hot pressing temperature

木塑复合材料制备的热压温度,应该控制在 PVC 的可塑化加工温度与造纸污泥中纤维碳化温度之间。温度达到 120 °C 时,PVC 开始出现软化变形现象,在 150~210 °C 时 PVC 才可塑化加工。从图 3 可知,随着热压温度的升高,复合材料力学性能随之增加,这是由于热塑性 PVC 随着温度的升高而熔融,流动性提高,有利于 PVC 的铺展和对纤维的包覆。当温度达 180 °C 时,复合材料弯曲强度达 35.04 MPa,拉伸强度提高到 12.08 MPa。温度进一步增加,木塑复合材料的力学性能并没有明显增加。实验发现,当温度超过 200 °C 时,污泥中木纤维及低分子有机胶质物质有降解、烧焦的现象,不利于木塑复合材料力学性能的提高。

2.4 热压压力对复合材料力学性能的影响

固定造纸污泥填充量为 50%,偶联剂占污泥用量的 2%,热压时间为 10 min,热压温度为 180 °C,研究不同热压压力对复合材料力学性能的影响,结果见图 4。

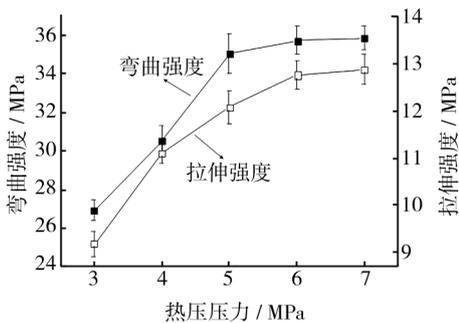


图 4 不同热压压力的木塑复合材料力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of the composites with different hot pressing pressure

随着热压压力的增加,复合材料的力学性能呈上升趋势。压力为 6 MPa 时,复合材料的弯曲强度和拉伸强度较之 3 MPa 时分别提高了 32.6% 和 38.8%。这是因为压力较小时,PVC 受到的促使其向污泥渗透的外部作用力小,不利于 PVC 对污泥的浸渍,并且不利于共混体系中残余空气的排除,造成热传导受到阻碍,使得复合材料不能充分成形^[19]。随着压力的不断增大,PVC 和污泥之间相互作用力增加,分子与分子之间不断地挤压,形成紧密的物理结合,内部空隙不断变小,交联密度随着逐渐增大,复合材料的弯曲强度和拉伸强度得到提高,复合材料的可压缩率逐渐

增大。当压力继续增加,两相结合压缩率达到极限,甚至由于压力过大导致纤维结构被破坏,造成复合材料增强效果下降,故选定热压压力为 6 MPa。

2.5 偶联剂用量对复合材料力学性能的影响

固定造纸污泥填充量为 50%,热压压力为 6 MPa,热压时间为 10 min,热压温度为 180 °C,考察偶联剂用量对复合材料力学性能的影响,结果见图 5。

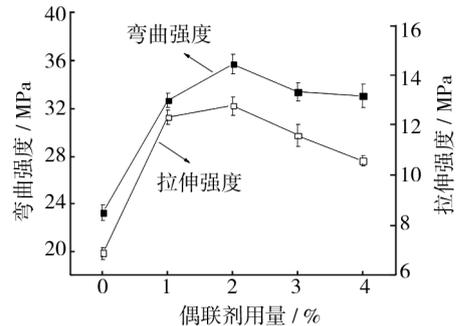


图 5 偶联剂用量对木塑复合材料力学性能的影响

Fig. 5 Mechanical properties of the composites with different dosage of coupling agent

天然纤维增强聚合物复合材料由于其独特的优势,在材料市场上为客户提供了更多的选择。由于纤维基体在界面附着力方面的不足,导致亲水的天然纤维和非极性聚合物之间的不相容性,可能会对复合材料的力学性能产生负面影响^[20]。硅烷偶联剂作为一种高效的偶联剂,已经在玻璃纤维增强复合材料和矿物填充高分子复合材料中被成功利用^[21],因此针对具有纤维成分及矿物成分的造纸污泥的改性,有望获得良好效果。

从图 5 可知,随着硅烷偶联剂 KH560 的添加,偶联剂与污泥中纤维表面的羟基以及污泥中的无机成分形成包裹改性,使污泥具有疏水性,再和 PVC 结合形成桥联结构,增强了污泥与聚合物基体之间的相容性,力学性能也随之增加。当偶联剂用量 2% 时,其弯曲强度较未添加偶联剂时提高了 53.6%,拉伸性能提高了 84.9%。随着偶联剂量的继续增加,过多的偶联剂覆盖在污泥表面,影响了污泥中纤维与 PVC 的桥联,导致其力学性能下降。选择偶联剂用量为 2%。

综上所述,确定造纸污泥/PVC 木塑复合材料的最佳制备工艺条件为:造纸污泥填充量为 50%,硅烷偶联剂占污泥用量的 2%,热压压力为 6 MPa,热压时

间为 10 min,热压温度为 180 ℃,在此条件下重复试验 3 次,所制备复合材料的弯曲强度为 35.73 MPa,拉伸强度为 12.75 MPa。

2.6 扫描电镜分析

为了更清楚地观察硅烷偶联剂在木粉和基材之间所起的作用,利用 SEM 对样品进行扫描,分析偶联剂处理污泥对复合材料界面微观形态的影响,结果见图 6。

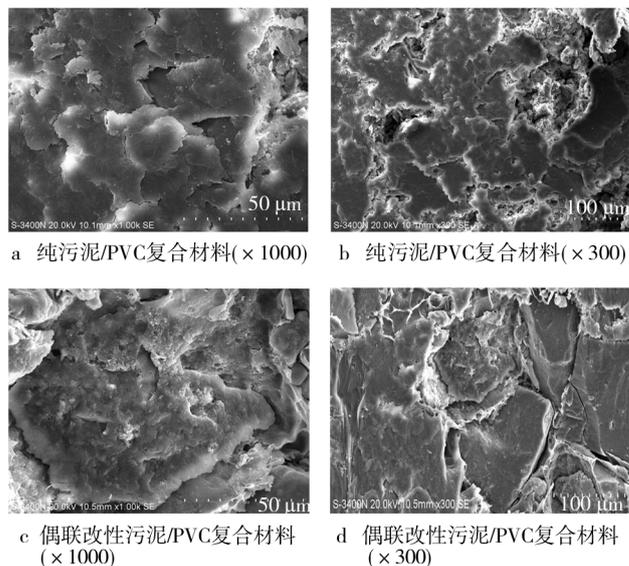


图 6 污泥/PVC 复合材料断面的扫描电镜图
Fig. 6 SEM micrographs of the fracture section of paper mill sludge/PVC composites

未处理的纯污泥/PVC 木塑复合材料,造纸污泥与 PVC 基体之间间隙明显,有明显的团聚现象^[22],说明造纸污泥与 PVC 之间的相容性差,造成了其力学性能比较差。经过 2% 偶联剂处理的污泥与 PVC 制备的木塑复合材料,两相界面变得比较模糊,污泥与 PVC 之间间隙减少,没有明显的团聚现象,污泥周围有明显 PVC 粘附现象,表明污泥经过硅烷偶联剂处理后,与 PVC 基体的相容性变好,界面相容性改善,两相结合力增强,因此复合材料力学性能得到了增强。

2.7 红外光谱分析

偶联剂改性前后的造纸污泥红外光谱见图 7。

由图 7 可知,未改性的造纸污泥在 3437 cm^{-1} 附近有吸收峰,这是—OH 的伸缩振动峰^[23],在 1635 cm^{-1} 附近的吸收峰为污泥吸附水的弯曲振动峰,在

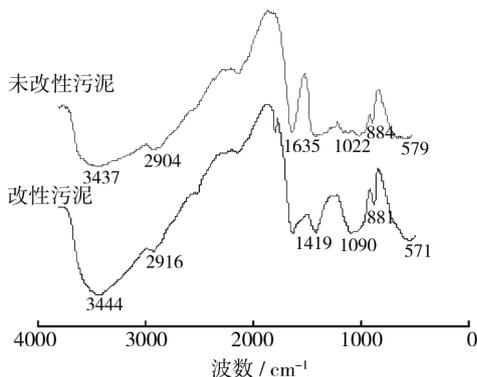


图 7 偶联改性前后造纸污泥的红外光谱图
Fig. 7 FT-IR spectra of paper mill sludge before and after coupling agent modification

1022 cm^{-1} 附近的吸收峰为 C—O 的伸缩振动峰。由于造纸污泥中含有高岭土成分,所以在 884 附近出现 Al—OH 伸缩振动峰,在 579 附近出现了 Si—O 的伸缩振动和弯曲振动峰。改性后的污泥在 1419 cm^{-1} 附近新出现的吸收峰为硅烷分子中的 CH_3 伸缩振动峰;同时由于纤维表面的羟基与硅烷偶联剂 KH560 发生交联反应生成 Si—O—C 键^[24],表现在红外光谱上为 1090 cm^{-1} 附近吸收峰增强并发生位移,说明硅烷偶联剂在改善木塑复合材料力学性能方面是有效的。

3 结语

通过对造纸污泥/PVC 木塑复合材料的热压工艺条件进行研究,综合考虑经济和工艺的因素,确定造纸污泥填充量为 50%,硅烷偶联剂占污泥用量的 2%,热压温度为 180 ℃,热压时间为 10 min,热压压力为 6 MPa,在此条件下所制备复合材料的弯曲强度为 35.73 MPa,拉伸强度为 12.75 MPa。

扫描电镜表明,经偶联剂处理改性的造纸污泥,与 PVC 的相容性明显改善,两相结合力增强,复合材料的力学性能有明显提高;红外光谱分析证明,偶联剂与造纸污泥发生交联反应,形成了化学键接。

文中仅对造纸污泥改性复合 PVC 制备木塑复合材料工艺进行了前期研究,今后将进一步探讨其在发泡包装材料上的应用。

参考文献:

- [1] 郑云磊,胡华宇,覃宇奔,等. 造纸污泥处理与资源化利用浅谈[J]. 大众科技,2012,14(11):73—75.
ZHENG Yun-lei, HU Hua-yu, QIN Yu-ben, et al. Discus-

- sion of Paper Mill Sludge Treatment and Resource Utilization[J]. Popular Science & Technology, 2012, 14(11): 73—75.
- [2] LAURSEN K, WHITE T J, CRESSWELL D J F, et al. Recycling of an Industrial Sludge and Marine Clay as Light-weight Aggregates[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 80(3): 208—213.
- [3] 鲁礼娟. 我国木塑复合材料的生产现状及发展趋势[J]. 木材加工机械, 2008(6): 40—42.
LU Li-juan. The Current Production Status and Development Trend of Wood Polymer Composites in China[J]. Wood Processing Machinery, 2008(6): 40—42.
- [4] ICHAZO M N, ALBANO C, GONZALEZ J, et al. Polypropylene/Wood Flour Composites: Treatments and Properties[J]. Composite Structures, 2001, 54: 207—214.
- [5] 刘金花, 张蕾. 植物纤维在可降解包装材料中的研究进展[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 267—269.
LIU Jin-hua, ZHANG Lei. Research Progress of Plant Fiber for Biodegradable Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 267—269.
- [6] 高德, 周建伟, 张萍, 等. 植物秸秆绿色包装材料的研究现状与发展前景[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 30—34.
GAO De, ZHOU Jian-wei, ZHANG Ping, et al. Current Status and Prospect of Development of Plant Straw Green Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 30—34.
- [7] 丁芳芳, 张敏, 余栋才. 植物纤维复合材料综合性能的影响因素研究进展[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 107—110.
DING Fang-fang, ZHANG Min, YU Dong-cai. Research Progress in Influencing Factors on Comprehensive Performance of Plant Fiber Composite Material[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 107—110.
- [8] 侯新秀, 康勇刚. 麦草纤维复合材料的制备和性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 9—13.
HOU Xin-xiu, KANG Yong-gang. Preparation and Performance Study of Wheat Straw Based Composites[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 9—13.
- [9] 徐朝阳, 朱宇宏, 李大纲, 等. 木塑型材与木塑复合材料抗弯性能比较研究[J]. 包装工程, 2009, 30(3): 28—30.
XU Chao-yang, ZHU Yu-hong, LI Da-gang, et al. Comparative Study of the Bending Properties of Wood-plastic Composite Material and Its Profile[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 28—30.
- [10] CALACE N, CAMPISI T, IACONDINI A, et al. Metal-contaminated Soil Remediation by Means of Paper Mill Sludges Addition Chemical and Ecotoxicological Evaluation Cotoxicological Evaluation[J]. Environment Pollution, 2005, 136: 485—492.
- [11] 张天昊, 张求慧, 李建章. 木塑复合材料改性研究进展及应用前景[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 188—190.
ZHANG Tian-hao, ZHANG Qiu-hui, LI Jian-zhang. Research Progress and Application Prospect of Wood-plastic Composites[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 188—190.
- [12] ISMAIL M R, YASSENE A A M, ABD E I, et al. Effect of Silane Coupling Agents on Rice Straw Fiber/Polymer Composites[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19: 409—425.
- [13] 宋永明, 李春桃, 王伟宏, 等. 硅烷偶联剂对木粉/HDPE复合材料力学与吸水性能的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 122—127.
SONG Yong-ming, LI Chun-tao, WANG Wei-hong, et al. Coupling Effects of Silane on the Mechanical Properties and Water Absorption of Wood Flour/HDPE Composites[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(6): 122—127.
- [14] YANG J S, XIAO J Y, ZENG J C, et al. Matrix Modification with Silane Coupling Agent for Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. Fibers and Polymers, 2013, 14(5): 759—766.
- [15] ISMAIL M R, YASSEN A A M, AFIFY M S. Mechanical Properties of Rice Straw Fiber-reinforced Polymer Composites[J]. Fibers and Polymers, 2011, 12(5): 648—656.
- [16] 陈广汉. 改性木粉/PVC复合材料的应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
CHEN Guang-han. Application Research on Modified Wood-fiber/PVC Composite[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007.
- [17] 王玉环, 黄汉雄, 张婧婧. HDPE/木粉复合材料性能的研究[J]. 塑料科技, 2007, 35(9): 66—70.
WANG Yu-huan, HUANG Han-xiong, ZHANG Jing-jing. Investigation on Rheological Properties, Morphology and Mechanical Properties of HDPE-wood Flour Composites[J]. Plastics Science and Technology, 2007, 35(9): 66—70.
- [18] 崔勇, 陈磊, 许民. 改性稻草/高密度聚乙烯复合材料的工艺性能[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(12): 75—77.
CUI Yong, CHEN Lei, XU Min. Technological Properties of Modified Straw/HDPE Composites[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(12): 75—77.
- [19] 赫彝姗, 张紫茵, 刘彤, 等. 木粉增强木质素/环氧树脂复合材料的制备与力学性能[J]. 化学与粘合, 2013, 35(3): 26—28.

- Non-holonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization [J]. International Journal of Robotics Research, 1995, 14(6): 543—559.
- [4] 张明,何庆中,郭帅. 酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 83—87.
ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.
- [5] 李晓刚,刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 96—102.
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Pallet Robot Research and Application Present Situation, Problems and Countermeasures [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [6] 耿武帅,齐元胜,王晓华,等. 平压平模切机驱动机构创新设计及理论分析[J]. 包装工程, 2011, 32(11): 61—64.
GENG Wu-shuai, QI Yuan-sheng, WANG Xiao-hua, et al. Creative Design and Theoretical Analysis of Drive Mechanism of Plane Die-cutting Machine [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11): 61—64.
- [7] 李发展,卢章平. 基于 Adams 模切机肘杆机构特性分析[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 24—26.
LI Fa-zhan, LU Zhang-ping. Characteristic Analysis of the Elbow-bar Mechanism of Die-cutting Machine Based on Adams [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 24—26.
- [8] 洪波,包能胜. 包装机械的概念设计图例软件的设计及应用[J]. 包装工程, 2010, 31(4): 78—81.
HONG Bo, BAO Neng-sheng. Design and Application of Conceptual Design Legend Software for Packaging Machinery [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(4): 78—81.
- [9] FU Hong-shuan, ZHAO Heng-hua, YANG Hui. Inverse Solutions Dynamics of the Parallel Machine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 94—95.
- [10] 李增刚. Adams 入门详解与实例 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
LI Zeng-gang. Detailed Introduction and Examples of Adams [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2006.
- [11] LIU Chao-ying, DU Qi-xin, et al. Design and United Simulation of 3 DOF NC Machining Experimental Platform Based on Virtual Prototyping Technology [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 130—132.
- [12] GUO Bo-lin, HU Zheng-yi. The Trajectory Planning & Simulation of the Handling Manipulator Based on ADAMS [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(4): 37—39.
- [13] RUI Zhi-yuan, LIU Tao. Kinematics Analysis and Simulation of the Palletizing Robot [J]. Machinery Manufacture, 2010, 48(4): 7—10.
- [14] SUN Zhong-gui. A Fitting Method for Space Curve [J]. Journal of East China Geological Institute, 2003, 26(2): 153—154.
- [15] HU Xiao-ping, PENG Tao, ZUO Fu-yong. A Trajectory Planning Method Based on Newton Interpolation and Polynomial For Manipulator [J]. The Chinese Mechanical Engineering, 2012, 23(24): 2947—2949.

(上接第 15 页)

- HE Shan-shan, ZHANG Zi-yin, LIU Tong, et al. Preparation and Mechanical Properties of Lignin-epoxy Resin Composite Reinforced by Wood Flour [J]. Chemistry and Adhesion, 2013, 35(3): 26—28.
- [20] XIE Y J, CALLUM A S H, XIAO Z F, et al. Silane Coupling Agents Used for Natural Fiber/Polymer Composites [J]. Composites, 2010, 41: 806—819.
- [21] 刘荣榕. PVC/木粉复合材料的制备及其性能的研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2008.
LIU Rong-rong. A Study on the Preparation and Properties of PVC/Wood Flour Composites [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [22] 刘玉慧,白鸿博,温安华,等. 改性木纤维 PVC/复合材料界面及性能的研究 [J]. 当代化工, 2007, 36(4): 438—442.
LIU Yu-hui, BAI Hong-bo, WEN An-hua, et al. Interfacial Interactions on Properties of Modified Wood-fiber/PVC Composite [J]. Contemporary Chemical Industry, 2007, 36(4): 438—442.
- [23] 刘约权. 现代仪器分析 [M]. 北京:高等教育出版社, 2001: 143—163.
LIU Yue-quan. Modern Instrumental Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 143—163.
- [24] 刘贤森,费本华,江泽慧. 偶联剂对玻璃纤维增强造纸污泥纤维板的影响 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 423—426.
LIU Xian-miao, FEI Ben-hua, JIANG Ze-hui. Effect of Coupling Agent on Paper Sludge Fiberboard Reinforced by Fiberglass [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3): 423—426.