

# 新型界面相容剂的合成及其在玉米秸秆/PP 复合材料制备中的应用

王成仟<sup>1</sup>, 刘先哲<sup>2</sup>, 张 龙<sup>1\*</sup>

(1. 长春工业大学吉林省石化资源与生物质综合利用工程实验室, 长春工业大学化学工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 公主岭市工业与信息化局, 吉林 四平 136000)

**摘要:**合成了一种聚酯多元醇异氰酸酯预聚体界面相容剂,并成功用于以玉米秸秆粉和废聚丙烯为原料的生物质-废塑料复合材料制备中。考察了界面相容剂的适宜合成工艺条件及性能。通过扫描电镜(SEM)、力学性能分析、热重分析(TG)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)等手段对复合材料的形貌、力学性能和热性能等进行了表征。结果表明,相容剂能有效改善生物废弃物粉末和PP间的相容性,当相容剂的添加量为5.0%时,玉米秸秆粉和PP复合材料的最大弯曲强度为43.26 MPa(未添加时为34.83 MPa)和抗拉强度为23.06 MPa(未添加时为15.70 MPa)。同时相容剂的加入提高了木质纤维素-塑料复合材料的热稳定性和耐水性。研究表明,新型相容剂具有价格适中、加入量少、增容效率高等特点,解决了目前使用的相容剂制备过程复杂、成本高的问题。

**关键词:**界面相容剂;生物质废塑料复合材料;聚丙烯;玉米秸秆

中图分类号:TQ32

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)04-0141-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.04.030

## Synthesis of new interface compatibilizer and its application in preparation of corn stalk powder/PP composite

WANG Cheng-qian<sup>1</sup>, LIU Xian-zhe<sup>2</sup>, ZHANG Long<sup>1\*</sup>

(1. Jilin Provincial Engineering Laboratory for Comprehensive Utilization of Petrochemical Resources and Biomass School of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Bureau of Industry and Information Technology of Gongzhuling City, Siping 136000, China)

**Abstract:** A kind of polyester polyol isocyanate prepolymer interface compatibilizer is synthesized and successfully used in the preparation of biomass-waste plastics composites from corn straw meal and spent polypropylene. Suitable synthetic process conditions are explored, and the morphology, mechanical properties and thermal properties of the interface compatibilizer are characterized by scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TG), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), etc. It is shown that the compatibilizer can effectively improve the compatibility between biological waste powder and PP. As compatibilizer content is 5.0 wt%, the maximum bending strength of the composites reaches 43.26 MPa, compared with the 34.83 MPa of the composites without the compatibilizer; and the tensile strength of the composites reaches 23.06 MPa, compared with the 15.70 MPa of that without the compatibilizer. Addition of the compatibilizer improves the thermal stability and water resistance of the composites. It is shown that this new type of compatibilizer exhibits moderate price, less dosage add higher compatible efficiency and other characteristics, which can solve the problems of current compatibilizers available.

**Key words:** interface compatibilizer; biomass waste plastic composites; polypropylene; corn stalk

木塑复合材料(WPC)是指木粉填充的聚合物复合材料,是一种近年来应用广泛的新型环保复合材料。因为大多数聚合物基质是疏水性的,而木粉是亲水性的,导致2种组分之间的相互作用很差,因此制备出的复合材料的力学和热性能均较差<sup>[1-2]</sup>。为了改善木粉和非极性聚合物基体的界面相容性,人们已经开发出各种方法<sup>[3-6]</sup>,其中方法之一是对木粉填料进行化学修饰,从而改变其极性,使之易于与树脂相容<sup>[7-9]</sup>。但这些方法存在改性工艺复杂、

过程需要废水处理、改性效果提升有限等实际问题。另一种普遍的改性方法是使用相容剂,相容剂是一种既含有极性基团又含有非极性基团的助剂,起着有效连接木粉和聚合物的桥梁作用<sup>[10-11]</sup>。近年来,新型木塑复合材料相容剂的开发集中在接枝共聚型相容剂和偶联剂型相容剂。然而这些新的相容剂制备复杂、生产成本低,限制了其应用领域和范围,因此高性价比的新型界面相容剂是木塑复合材料领域的研究重点之一<sup>[12-14]</sup>。而聚酯多元醇异氰酸酯预

收稿日期:2020-05-12;修回日期:2021-02-17

基金项目:吉林省科技厅科技发展计划资助项目(20170309016GX)

作者简介:王成仟(1990-),男,博士研究生,主要从事新型环保材料的研究与开发,wangchengqian1992@126.com;张龙(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事生物质高效转化研究,通讯联系人,zhanglongzhi@163.com。

聚体类界面相容剂的合成及应用尚未见研究报道。

笔者以易得的化工原料合成了一种含 C=C 键和异氰酸酯基团的新型界面增容剂,并成功地用于废 PP 与玉米秸秆粉复合材料制备中,获得了品质优良的木质纤维素-塑料复合材料。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和设备

回收聚丙烯(工业级,80~100目),扬州利达树脂有限公司生产;玉米秸秆粉(80~100目),自制;乙二醇、顺丁烯二酸酐(工业级),天津广福科技发展有限公司生产;对甲苯磺酸(工业级),天津光复精细化工研究所生产;2,4-二苯基甲烷二异氰酸酯(工业级),烟台万华化工有限公司生产。

分析天平(TG328A);带真空的反应系统(1 000 mL);真空干燥箱;平板硫化机;微量水分测定仪;万能力学实验机;JSM-6510 扫描电子显微镜(SEM),日本 JEOL 公司生产;SDT-Q600 型热重仪,美国 Perkin-Elmer 生产;FT-IR 傅里叶变换红外光谱测试仪, Nicolet iS10 型,美国赛默飞世尔科技公司生产。

### 1.2 聚酯多元醇的制备

向装有温控器、搅拌器、回流装置的 1 000 mL 四口烧瓶反应器中按一定摩尔比加入乙二醇、顺丁烯二酸酐搅拌混合均匀,先在 80℃ 氮气保护下反应 0.5 h,然后加热至 140~145℃ 下反应 4 h,再加入配比量的对甲苯磺酸催化剂,加热至 190~200℃ 再反应 4 h,产物在真空度 -0.08 MPa 下脱水 2.5~3.0 h,使其含水质量分数小于 0.03%,冷却至室温备用。

### 1.3 相容剂的制备

在装置中按一定摩尔比加入合成的聚酯多元醇,加热至 70℃,然后加入二异氰酸酯 MDI、扩链剂、抗氧剂、催化剂,在氮气保护下反应,每隔 0.5 h 测定反应物中游离异氰酸酯的质量分数,当质量分数为 3.3% 左右时停止反应,降温得到界面相容剂产品。

### 1.4 玉米秸秆粉-PP 复合材料的制备

玉米秸秆粉用质量分数 5.0% 氢氧化钠浸泡 5 h,105℃ 干燥。在高速混合器(1 000 r/min)中按一定质量比加入再生聚丙烯粉、自制相容剂、增塑剂、引发剂,搅拌 30 min 后将混合料注入 140 mm×120 mm×4 mm 的模具中。将模具置于平板硫化机上,在 140~160℃、10.0 MPa 下成型 20~30 min,试

样冷却至室温后进行性能分析。

### 1.5 吸水率的测定

根据 GB/T 24508—2009 标准所述方法对玉米秸秆粉/PP 复合材料的吸水率进行了测试。将木塑复合材料切成 10 mm×10 mm×4 mm 的试样,5 个试样在 20℃ 蒸馏水中浸泡 72 h。吸水率( $M_1$ )计算式为:

$$M_1 = [(M - M_0) / M_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M$  为浸没后的样品质量, g;  $M_0$  为浸没前的初始质量, g。

## 2 结果和讨论

### 2.1 界面相容剂的合成与表征

#### 2.1.1 相容剂合成工艺条件的优化

酸酐与醇的摩尔比对聚酯多元醇产率及酸值的影响如表 1 所示。

表 1 酸酐醇摩尔比对聚酯多元醇产率及羟、酸值的影响

酸酐醇 摩尔比	羟值/ [mg(KOH)·g <sup>-1</sup> ]	酸值/ [mg(KOH)·g <sup>-1</sup> ]	产率/ %
1:1.5	182.6	7.69	85.0
1:2.0	170.4	5.32	90.0
1:2.5	157.1	2.03	95.0
1:3.0	145.0	1.95	93.0
1:3.5	140.2	1.91	92.0

注:反应条件:80℃ 下反应 0.5 h,升温到 190℃ 反应 8 h,催化剂质量分数为 0.05%。

催化剂质量分数对反应过程的影响如表 2 所示。

表 2 催化剂质量分数对产品性能的影响

实验 编号	催化剂质量 分数/%	羟值/ [mg(KOH)·g <sup>-1</sup> ]	酸值/ [mg(KOH)·g <sup>-1</sup> ]	产率/ %
1	0.1	2.88	187.8	88.0
2	0.2	2.45	173.4	91.0
3	0.3	2.29	165.3	93.0
4	0.4	2.14	158.1	95.0
5	0.5	2.00	156.4	95.0

注:反应条件:80℃ 下反应 0.5 h,升温到 190℃ 反应 8 h。

界面相容剂的合成条件对界面相容剂—NCO 游离质量分数的影响如表 3 所示。

表 3 界面相容剂—NCO 的质量分数随反应条件的变化情况

预聚温度/℃	预聚时间/h	理论—NCO/%	实测—NCO/%
70	3.5	3.3	4.10
80	3.5	3.3	3.25
90	3.5	3.3	3.22

### 2.1.2 产物的红外光谱分析

合成的新型相容剂的 FT-IR 光谱图如图 1 所示。

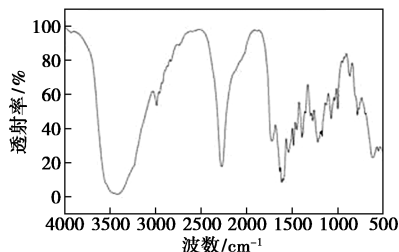


图1 界面相容剂的红外光谱图

由图 1 中可以看出,  $3344\text{ cm}^{-1}$  为 N—H 键的强拉伸振动峰, 在  $2925\sim 2851\text{ cm}^{-1}$  处为 C—H 键的拉伸振动峰,  $1735\text{ cm}^{-1}$  为酯羰基吸收峰,  $1590\sim 1528\text{ cm}^{-1}$ 、 $1453\text{ cm}^{-1}$  为苯环特征吸收峰,  $1217\text{ cm}^{-1}$  为 C—N 拉伸振动吸收峰,  $1051\text{ cm}^{-1}$  为 C—O—C 特征吸收峰。  $2274\text{ cm}^{-1}$  为 —NCO 基团强吸附峰,  $1631\text{ cm}^{-1}$  处为 C=O 的强吸收峰,  $1736\text{ cm}^{-1}$  处为 C=C 的特征吸收峰。通过上述分析可知, 所合成界面相容剂含有双键和异氰酸酯基。

### 2.1.3 热重分析

合成的界面相容剂的热失重曲线如图 2 所示。

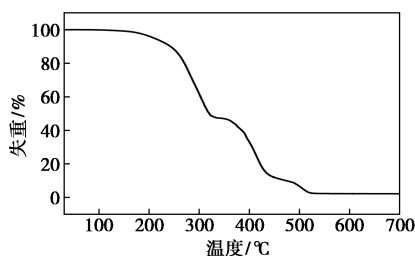


图2 界面相容剂的热重曲线

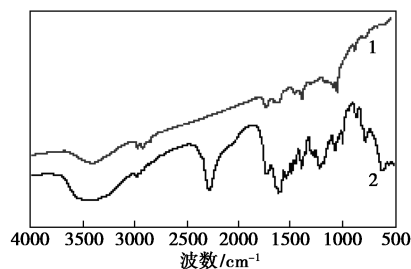
从图 2 中可以看出, 加热过程中其热失重降解主要分 2 个阶段, 开始于  $230^{\circ}\text{C}$ , 结束于  $550^{\circ}\text{C}$ 。合成的相容剂在  $230^{\circ}\text{C}$  以下是稳定的。因为制备生物质废塑料复合材料的最高温度为  $200^{\circ}\text{C}$ 。因此多合成的相容剂能够保证在复合材料制备过程的稳定性。

## 2.2 玉米秸秆粉/PP 复合材料性能制备参数

### 2.2.1 结构分析

玉米秸秆粉/PP 和界面相容剂的红外光谱图如图 3 所示。由图 3 中可以看出, 相容剂异氰酸酯基团在  $2274\text{ cm}^{-1}$  处有很强的吸收峰, 而在  $2274\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰在玉米秸秆粉/PP 复合材料中均消失, 表明异氰酸基团与填料中的羟基发生反应生成氨基甲酸酯。  $1720\text{ cm}^{-1}$  处 C=O 峰的存在证实了上述

结论。

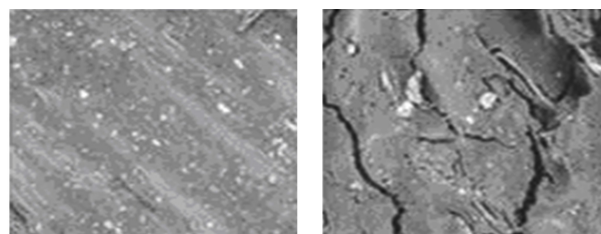


1—玉米秸秆粉/PP; 2—相容剂

图3 玉米秸秆粉/PP、相容剂的 FT-IR 光谱

### 2.2.2 表观形貌分析

添加或不添加界面相容剂的秸秆粉-PP 复合材料的形貌特征如图 4 所示。



(a) 添加界面相容剂

(b) 未添加界面相容剂

图4 不同工艺配方制备的玉米秸秆粉/PP 复合材料的扫描电镜图

由图 4(a) 中可以看出, 加入界面相容剂后, 由聚丙烯和秸秆粉制备的生物质废塑料复合材料表面光滑, 秸秆粉在聚丙烯中均匀分散; 由图 4(b) 中可以看出, 未添加界面相容剂的秸秆粉与聚丙烯的相容性较差, 表现出明显的裂痕。因此界面相容剂的加入可明显改善相间的相容性。

### 2.2.3 秸秆粉-PP 复合材料的制备参数对其性能的影响

(1) 相容剂质量分数对复合材料拉伸及弯曲强度的影响

相容剂质量分数对复合材料拉伸及弯曲强度的影响如图 5 所示。由图 5 可以看出, 当界面相容剂质量分数从 0% 增加到 5.0% 时, 玉米秸秆粉/PP 复合材料的拉伸强度由  $15.70\text{ MPa}$  提高到  $22.71\text{ MPa}$ , 弯曲强度从  $34.83\text{ MPa}$  增加到  $43.06\text{ MPa}$ 。界面相容剂作为木质素纤维与聚丙烯之间的桥梁, 界面相容剂中的双键接枝到聚丙烯上, 相容剂中的异氰酸酯基与木质纤维素中的羟基反应生成氨基甲酸酯, 从而大大提高了复合材料的力学性能。当界面相容剂质量分数超过 5.0% 时, 试样的拉伸强度和弯曲强度反而有所降低。

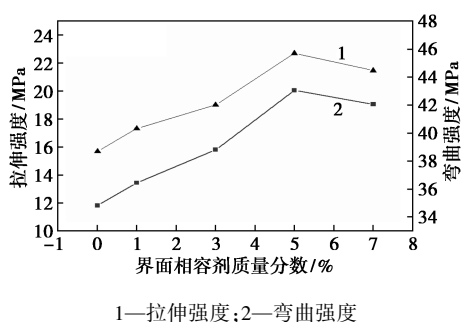


图 5 界面相容剂质量分数对秸秆粉—PP 复合材料拉伸强度及弯曲强度的影响  
注:制备条件: $m(\text{秸秆粉}):m(\text{PP})=4:6$ ,在  $140^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ MPa}$  下热压  $30\text{ min}$ 。

(2) 秸秆粉与 PP 质量比对复合材料拉伸及弯曲强度的影响

秸秆粉与 PP 质量比对复合材料拉伸及弯曲强度的影响如图 6 所示。从图 6 中可知,当秸秆粉与 PP 质量比从 3:7 变化到 5:5 时,玉米秸秆粉/PP 复合材料的拉伸强度由  $19.91\text{ MPa}$  提高到  $23.06\text{ MPa}$ ,弯曲强度由  $40.34\text{ MPa}$  提高到  $43.26\text{ MPa}$ ;当秸秆粉与 PP 质量比为 5:5 时达到最大值。这是由于玉米秸秆粉中含有增强的木质素组分,可以提高生物质废塑料复合材料的拉伸和弯曲性能,因此填料越多,拉伸和弯曲强度越强。随着填料加入量的增加,聚丙烯的拉伸强度降低,这是因为填料的加入量越大,导致聚丙烯的团聚,聚丙烯分散不均匀,从而降低复合材料的力学性能。结果表明,当玉米秸秆粉与 PP 质量比为 5:5 时,所制备的玉米秸秆粉/废 PP 复合材料的性能均优于木塑复合材料国家标准(GB/T 24508—2009)的指标要求。

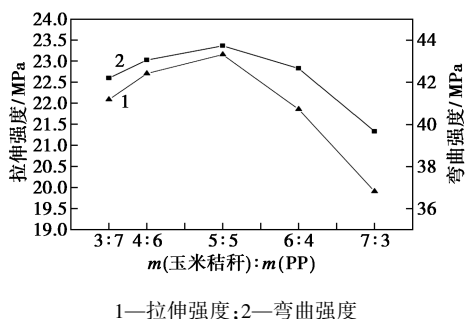


图 6 玉米秸秆粉:PP 质量比对复合材料拉伸强度和弯曲强度的影响  
注:制备条件:界面相容剂质量分数为  $5.0\%$ ,在  $140^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ MPa}$  下压  $30\text{ min}$ 。

### 2.2.4 复合材料热稳定性

相容剂对制备的秸秆粉—PP 复合材料热稳定

性如图 7 所示。

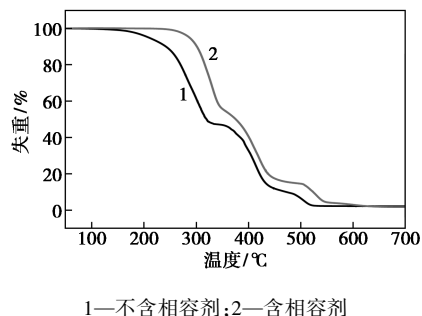


图 7 相容剂对制备的秸秆粉—PP 复合材料热稳定性的影响

从图 7 中可以看出,复合材料的两步分解,含相容剂的曲线的失重模式与不含相容剂的曲线相似,添加相容剂的玉米秸秆粉/PP 复合材料比未添加相容剂的玉米秸秆粉/PP 复合材料具有更高的热稳定性,加入界面相容剂的复合材料热稳定温度提高了  $60\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2.5 复合材料的吸水率

秸秆粉与聚丙烯的质量比对复合材料吸水率的影响如图 8 所示。由图 8 中可以看出,当复合材料中秸秆粉与聚丙烯的质量比由 3:7 增加到 7:3 时,吸水率从  $1.81\%$  增加到  $3.44\%$ 。这是因为一方面秸秆粉中含有亲水性基团,因而随着秸秆粉添加量的增大,导致材料的吸水率增大;另外,随着复合材料中玉米秸秆粉质量分数的增加,秸秆粉的团聚机会增大,也会导致复合材料吸水率的增加。

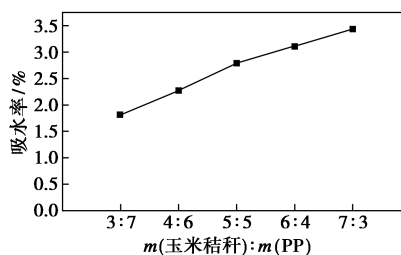


图 8 秸秆粉与聚丙烯的质量比对复合材料吸水率的影响

注:制备条件:界面相容剂质量分数为  $5.0\%$ ,在  $140^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ MPa}$  下压  $30\text{ min}$ 。

界面相容剂质量分数对复合材料吸水率的影响如图 9 所示。由图 9 可以看出,随着界面相容剂质量分数的增加,玉米秸秆粉/PP 复合材料的吸水率先减小后增大。当界面相容剂质量分数为  $5.0\%$  时,吸水率最小,相容剂的加入可以增加玉米秸秆粉和聚丙烯之间的相互作用,起到桥梁屏障的作用,减少羟基的数量,降低复合材料的吸水性能;当界面相

容剂的质量分数超过 5.0% 时,复合材料的吸水率增加,因为相容剂过多产生过度团聚,导致填料中孔隙的吸水率增加。当原料配比为 5:5 时,复合材料的吸水率符合国家标准(GB/T 24508—2009)的指标要求。

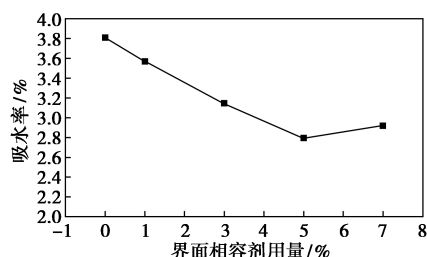


图 9 界面相容剂质量分数对复合材料吸水率的影响

注:制备条件:秸秆粉质量分数为 50%,在 140℃、10 MPa 下压 30 min。

### 2.3 复合材料综合性能与国家标准对比

在秸秆粉质量分数为 50%、相容剂质量分数 5.0%、热压温度为 140℃、压力为 10.0 MPa、时间为 30 min 的条件下,制得的玉米秸秆粉和废 PP 复合

材料的综合性能指标与木塑复合材料国家标准(GB/T 24508—2009)的指标要求对比如表 4 所示。

表 4 制备的复合材料性能与国家标准指标的对比

指标	样品测定值	标准值
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.10	≥0.85
拉伸强度/MPa	23.06	≥20
弯曲强度/MPa	43.26	≥20
吸水率/%	2.60	≤3.0%
游离甲醛质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.36	≤1.5

因此合成的复合材料的性能完全满足国标的要求,实现了将废弃物转化为附加值较高的产品。

### 2.4 秸秆粉-PP 复合材料中相容剂的偶联机理分析

生物质废塑料复合材料中相容剂的偶联机理如图 10 所示。在引发剂的作用下,新型界面相容剂中的双键接枝到聚丙烯上。界面相容剂中的异氰酸酯基与木质纤维素中的羟基反应生成氨基甲酸酯基。是连接木质纤维素和聚丙烯的桥梁。

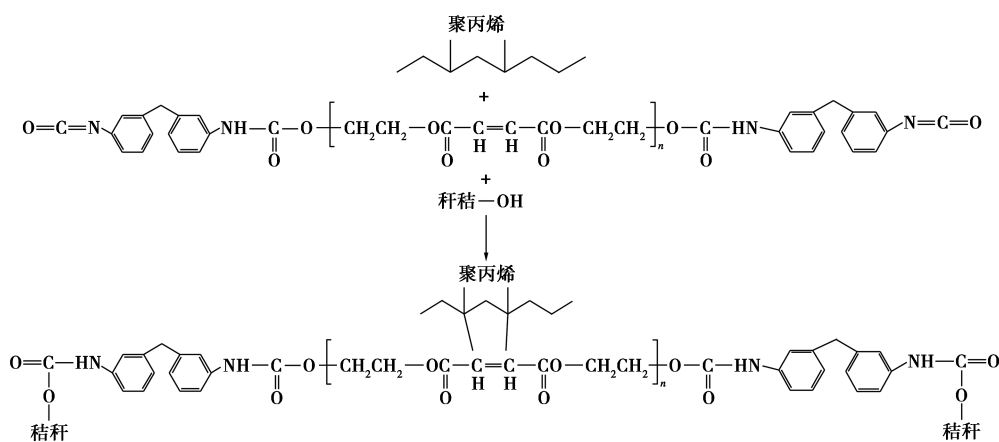


图 10 生物质废塑料复合材料中相容剂的偶联机理

## 3 结论

以聚酯多元醇和 MDI 为原料,成功合成了一种聚酯多元醇异氰酸酯预聚体界面相容剂,并成功用于制备秸秆粉-废 PP 复合材料。在引发剂的作用下,界面相容剂中所含的双键接枝到聚丙烯上,所含的异氰酸酯基与木质纤维素中的羟基反应生成氨基甲酸酯基,有效提高了废塑料与农林废弃物的界面相容性,获得了性能优异的生物质废塑料复合材料。当相容剂质量分数为 5.0%、秸秆粉质量分数为 50% 时,所制备的玉米秸秆粉和废 PP 复合材料的综合性能均优于 GB/T 24508—2009 的要求。这为

农林废弃物和废弃聚合物的回收利用提供了一条切实可行的途径。

### 参考文献

- [1] Mii Liikanen, Kaisa Grönman, Ivan Deviatkin, *et al.* Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites-Assessment of environmental impacts [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225(1): 716-727.
- [2] Liu Yanan, Guo Limin, Wang Weihong, *et al.* Modifying wood veneer with silane coupling agent for decorating wood fiber/high-density polyethylene composite [J]. *Construction and Building Material*, 2019, 224(1): 691-699.

(下转第 150 页)

### 3 结论

通过物理打泡法合成一种新型 DAMCC/CMCS/SDS/NGDE 泡沫多孔吸水材料,该吸水材料具有环保、经济等优点。实验结果表明,当 DAMCC、CMCS、SDS 和 NGDE 质量分数分别为 3%、4%、4% 和 4% 时,得到的吸水材料吸水效果最佳,能够吸收 120 g/g,在盐水中也能够达到 62 g/g。该吸水材料具有可重用性、生态交联和良好的液体吸收性能等优点,可在卫生、制药、食品和农业制造业等多个行业得到应用。

### 参考文献

- [1] Kabiri K, Omidian H, Zohuriaan-Mehr M J, *et al.* Superabsorbent hydrogel composites and nanocomposites: A review [J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(2): 277-289.
  - [2] Laftah, Waham Ashaier, Hashim, *et al.* Polymer hydrogels: A review [J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2011, 50(14): 1475-1486.
  - [3] Liu J, Qin Z, Cheng M, *et al.* Bifunctional roles of dialdehyde cellulose nanocrystals in reinforcing and cross-linking electrospun chitosan nanofibrous membranes [C]. *Chinese Materials Conference*. Springer, Singapore, 2018, 23(4): 247-254.
  - [4] Xu Kaimeng, Liu Can, Kang Kunyong, *et al.* Isolation of nanocrystalline cellulose from rice straw and preparation of its biocomposites with chitosan: Physicochemical characterization and evaluation of interfacial compatibility [J]. *Composites Science & Technology*, 2017, 154(91): 8-17.
  - [5] Yang Y, Wang H, Huang L, *et al.* Effects of superabsorbent polymers on the fate of fungicidal carbendazim in soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 328(12): 70-79.
  - [6] Zhang X, Liu Y, Lu P, *et al.* Preparation and properties of hydrogel based on sawdust cellulose for environmentally friendly slow [J]. *Green Process Synth*, 2020, 9(18): 139-152.
  - [7] 赵洪凯, 陈健. 纤维素基可降解吸水材料的研究与发展 [J]. *化工新型材料*, 2019, 47(4): 245-248.
  - [8] 赵洪凯, 张克含, 陈健. 纤维素和壳聚糖共混吸水材料的研究与发展 [J]. *化工新型材料*, 2019, 47(3): 32-36.
  - [9] Yang J, Dahlstrom C, Edlund H, *et al.* PH-responsive cellulose-chitosan nanocomposite films with slow release of chitosan [J]. *Cellulose*, 2019, 26(6): 3763-3776.
  - [10] Yang L, Hsiao W W, Chen P. Chitosan-cellulose composite membrane for affinity purification of biopolymers and immunoadsorption [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 197(1): 185-197.
  - [11] Wei D D, Liu Q X, Liu Z D, *et al.* Modified nano microfibrillated cellulose/carboxymethyl chitosan composite hydrogel with giant network structure and quick gelation formability [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 135(6): 561-568.
  - [12] Shahmohammadi F, Almasi H. Morphological, physical, antimicrobial and release properties of ZnO nanoparticles-loaded bacterial cellulose films [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 149(13): 8-19.
  - [13] Guerrero P, Muxika A, Zarandona I, *et al.* Crosslinking of chitosan films processed by compression molding [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 47(8): 1298-1317.
  - [14] Khamrai M, Lal S, Patit P, *et al.* Modified bacterial cellulose based self-healable polyelectrolyte film for wound dressing application [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 46(7): 203-219. ■
- 
- (上接第 145 页)
- [3] Xu Boren, Deng Cong, Li Yingming, *et al.* Novel amino glycerin decorated ammonium polyphosphate for the highly-efficient intumescent flame retardance of wood flour/polypropylene composite via simultaneous interfacial and bulk charring [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 172(1): 636-648.
  - [4] Andrea Wechsler, Josefa Molina, Romina Cayumil, *et al.* Some properties of composite panels manufactured from peach (*Prunus persica*) pits and polypropylene [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175(1): 107-152.
  - [5] Daniel Belchior Rocha, Derval dos Santos Rosa. Coupling effect of starch coated fibers for recycled polymer/wood composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 172(1): 1-8.
  - [6] Jan Luedtke, Marc Gaugler, Warren J Grigsby, *et al.* Understanding the development of interfacial bonding within PLA/wood-based thermoplastic sandwich composites [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 127(1): 129-134.
  - [7] Omid Hosseinaei, Wang Siqun, Ali Akbar Enayati, *et al.* Effects of hemicellulose extraction on properties of wood flour and wood-plastic composites [J]. *Composites: Part A*, 2012, 43(1): 686-694.
  - [8] Wei L, McDonald A G, Freitag C, *et al.* Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodegradability of wood plastic composites [J]. *Polym Degrad Stab*, 2013, 98(1): 1348-1361.
  - [9] Dominkovics Z, Danyádi L, Pukánszky B. Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites [J]. *Composites, Part A*, 2007, 38(1): 1893-1901.
  - [10] Ismail H, Mega L. The effects of a compatibilizer and a silane coupling agent on the mechanical properties of white rice husk ash filled polypropylene/natural rubber blend [J]. *Polym Plast Technol*, 2001, 40(4): 463-478.
  - [11] Nitz H, Reichert P, Romling H, *et al.* Influence of compatibilizers on the surface hardness, water uptake and the mechanical properties of poly (propylene) wood flour composites prepared by reactive extrusion [J]. *Macromol Mater Eng*, 2000, 276(1): 51-58.
  - [12] Saba N, Paridah M T, Jawaid M. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 76(1): 87-96.
  - [13] Han Y H, Han S O, Cho D, *et al.* Kenaf/polypropylene biocomposites; Effects of electron beam irradiation and alkali treatment on kenaf natural fibers [J]. *Compos. Interfaces*, 2007, 14(1): 559-578.
  - [14] Kengkhetkit N, Amornsakchai T. Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement; A novel extraction method for short pineapple leaf fiber [J]. *Ind Crops Prod*, 2012, 40(1): 55-61. ■