



# 硅烷偶联剂对咖啡渣的表面改性及其对咖啡渣/聚丙烯木塑复合材料性能的影响

宋文敏,陈晨,江明明,李世奇,蔡玉荣

(浙江理工大学材料科学与工程学院,杭州 310018)

**摘要:**为解决咖啡渣(Spent coffee grounds, SCG)与聚丙烯(Polypropylene, PP)界面相容性差的问题,研究3种不同类型的硅烷偶联剂改性SCG及其对SCG/PP木塑复合材料性能的影响。以3-氨基丙基三甲氧基硅烷(3-aminopropyl trimethoxy-silane, KH540)、3-氨基丙基三乙氧基硅烷(3-aminopropyl triethoxy-silane, KH550)和乙烯基三甲氧基硅烷(vinyl trimethoxy-silane, A171)这3种硅烷偶联剂作为表面改性剂,分别对SCG进行表面改性处理,并将改性SCG作为填料,通过熔融共混法制备了SCG/PP木塑复合材料;采用场发射扫描电子显微镜、傅里叶红外光谱仪和视频接触角仪对SCG的微观形貌、官能团特征和亲疏水性进行分析,并通过万能试验机、场发射扫描电子显微镜、热重分析仪、差示扫描量热仪、X射线衍射仪测试SCG/PP复合材料的力学性能、界面相容性、热稳定性、熔融结晶性能。结果表明:这3种硅烷偶联剂均成功接枝到SCG上,并有效提高了SCG的疏水性,增强了与PP之间的界面结合能力。3种硅烷偶联剂均可提高复合材料的拉伸强度,同时降低断裂伸长率;其中硅烷偶联剂A171改性的复合材料综合性能最好,拉伸强度比未经改性处理的SCG/PP复合材料提高48.6%,断裂伸长率仅下降4.4%。该研究可为解决SCG与PP界面相容问题及制备高性能SCG/PP复合材料提供参考。

**关键词:** 硅烷偶联剂;咖啡渣;聚丙烯;熔融共混;木塑复合材料;力学性能

**中图分类号:** TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2023)09-0560-06

**引文格式:** 宋文敏,陈晨,江明明,等. 硅烷偶联剂对咖啡渣的表面改性及其对咖啡渣/聚丙烯木塑复合材料性能的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2023, 49(5): 560-565.

**Reference Format:** SONG Wenmin, CHEN Chen, JIANG Mingming, et al. Surface modification of spent coffee grounds by the silane coupling agent and its effect on the properties of spent coffee grounds/polypropylene wood-plastic composites [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(5): 560-565.

## Surface modification of spent coffee grounds by the silane coupling agent and its effect on the properties of spent coffee grounds/polypropylene wood-plastic composites

SONG Wenmin, CHEN Chen, JIANG Mingming, LI Shiqi, CAI Yurong

(School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To solve the poor interface compatibility between spent coffee grounds (SCG) and polypropylene (PP), we studied the effects of three different coupling agents on the properties of SCG/PP wood-plastic composites. The three coupling agents, i.e. 3-aminopropyl trimethoxy-silane (KH540), 3-aminopropyl triethoxy-silane (KH550) and vinyl trimethoxy-silane (A171), were used as surface modifiers for surface modification of SCG, and the surface-modified SCG as filler to prepare SCG/PP wood-plastic composites by melt blending. The microscopic morphology, functional groups, hydrophilicity and hydrophobicity of the modified SCG were analyzed by SEM, FTIR and video contact angle instrument. The

收稿日期: 2022-11-30 网络出版日期: 2023-04-10

基金项目: 浙江省国际科技合作项目—双边产业联合研发计划项目(2022C04027)

作者简介: 宋文敏(1998—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事复合材料方面的研究。

通信作者: 蔡玉荣, E-mail: caiyr@zstu.edu.cn

mechanical properties, interface compatibility, thermal stability and melt crystallization properties of SCG/PP composites were analyzed by universal testing machine, SEM, TGA, DSC and XRD. The results show that the three coupling agents are all successfully connected to SCG, which effectively improves the hydrophobicity of SCG and enhances the interfacial binding ability with PP. The three coupling agents can improve the tensile strength and reduce the elongation at break of the composites. Specifically, the composite prepared by A171 treatment has the best comprehensive properties, the tensile strength is 48.6% higher than that of untreated SCG/PP, and the elongation at break is only 4.4% lower. This study provides reference for solving the interface compatibility problem of SCG and PP and preparing high-performance SCG/PP composites.

**Key words:** silane coupling agent; spent coffee grounds; polypropylene; melt-blend method; wood-plastic composites; mechanical properties

## 0 引 言

生物质废料具有来源丰富、成本低、生物降解性好等优点,利用生物质废料制备木塑复合材料已被广泛研究<sup>[1]</sup>。咖啡渣(Spent coffee grounds, SCG)是咖啡提取过程中产生的生物质废料,它富含纤维、天然色素、油脂及蛋白质等<sup>[2]</sup>,可应用于纺织品<sup>[3]</sup>、染料<sup>[4]</sup>、有机肥<sup>[5]</sup>和药物<sup>[6-7]</sup>等领域。全球 SCG 年产量可达百万吨<sup>[8]</sup>,若将 SCG 应用于木塑复合材料,有望解决大量 SCG 的回收利用问题。然而 SCG 含有大量羟基<sup>[9]</sup>,亲水性强,易团聚,在与疏水性塑料共混时相容性差,由其制备的复合材料力学性能差。因此采用 SCG 制备高性能木塑复合材料,首先要改善 SCG 与塑料的界面相容性。

改善 SCG 与塑料的界面相容性的方法众多,最为常见的方法是使用硅烷偶联剂对 SCG 进行表面疏水改性。其原理是硅烷偶联剂的羟基与 SCG 的羟基脱水形成氢键,使得 SCG 表面的亲水基团减少、疏水性提高<sup>[10-11]</sup>,从而增强 SCG 与塑料基体的相容性,有效促进两相界面的黏合。研究表明,通过调节硅烷偶联剂用量<sup>[12-13]</sup>或改变硅烷偶联剂种类<sup>[14-15]</sup>可以对木塑复合材料的性能进行优化。例如,陆颖昭等<sup>[16]</sup>探究了 3-氨基丙基三甲氧基硅烷(3-aminopropyl triethoxy-silane, KH550)用量对微纳纤维素/PLA 复合材料性能的影响,发现当 KH550 的用量为 1%(相对于微纳纤维素质量)时,可改善微纳纤维素与 PLA 的界面相容性,制备的复合材料机械性能最佳;Liu 等<sup>[17]</sup>对比了两种偶联剂 KH550 和乙烯基三甲氧基硅烷(vinyl trimethoxy-silane, A171)对木质纤维/高密度聚乙烯的黏结效果,发现硅烷偶联剂 A171 处理后的黏结效果比 KH550 处理好,复合材料的力学强度更优。

本文主要研究了不同类型的硅烷偶联剂改性 SCG 及其与聚丙烯(Polypropylene, PP)制备的 SCG/PP 木塑复合材料的性能。首先利用硅烷偶联剂 3-氨基丙基三甲氧基硅烷(3-aminopropyl trimethoxy-silane, KH540)、KH550 和 A171 分别对 SCG 进行疏水改性,然后将改性后的 SCG 作为填料,PP 作为塑料基体,采用熔融共混法制备改性 SCG/PP 木塑复合材料。分析不同类型硅烷偶联剂对 SCG 的改性效果和对应的 SCG/PP 复合材料的力学性能、界面相容性、热稳定性、结晶行为等性能。本文可为制备高性能的 SCG/PP 木塑复合材料提供一定参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂与仪器

#### 1.1.1 实验试剂

SCG,购自当地一家咖啡店;PP(密度 0.905 g/cm<sup>3</sup>),购自中国石油化工集团有限公司;KH540(纯度 98%)和 KH550(纯度 98%),购自萨恩化学技术有限公司;A171(纯度 98%),购自阿拉丁试剂有限公司;甲醇和乙醇(分析纯),购自杭州高晶精细化工有限公司。

#### 1.1.2 实验仪器

DHG-9030A 电热鼓风干燥箱(上海鳌珍仪器制造有限公司)、RM-200C 混炼式转矩流变仪(哈尔滨哈普电器技术有限责任公司)、QC-677T 桌上型手动热压成型机(上海谱展仪器科技有限公司)、NICOLET is50 傅立叶红外光谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)、JY-82A 视频接触角仪(承德鼎盛试验检测设备有限公司)、Hitachi S-4800 型场发射扫描电子显微镜(日本 Hitachi 公司)、NETZSCH TG 209 F1 型热重分析仪(德国

NETZSCH 公司)、Rigaku RU-200BVH 型 X 射线衍射分析仪(日本 Rigaku 公司)、DSC 25 差示扫描量热仪(美国 TA 仪器)和 5943 型万能材料试验机(美国 Instron 公司)。

## 1.2 样品制备

### 1.2.1 SCG 的改性

以 3 g 200 目的 SCG 为原料,用表面预处理法制备改性 SCG。具体方法如下:按 SCG 质量分数的 0.5 %称取偶联剂,并按体积比 78:20:2 分别量取 585  $\mu\text{L}$  醇、150  $\mu\text{L}$  去离子水和 15  $\mu\text{L}$  偶联剂,在室温下以 600 r/min 的转速搅拌 40 min,对硅烷偶联剂进行水解;水解完成后,加入 SCG 继续搅拌 15 min,抽滤,并将样品放在 60  $^{\circ}\text{C}$  下干燥 24 h,获得硅烷偶联剂改性处理的 SCG。

### 1.2.2 SCG/PP 复合材料的制备

称取 SCG、KH550-SCG、KH540-SCG 和 A171-SCG 各 2.5 g,分别与 7.5 g PP 进行机械混合;然后置于转矩流变仪中,以 60 r/min 的速度在 190  $^{\circ}\text{C}$  中混炼 15 min;混炼完成后用热压机在 190  $^{\circ}\text{C}$ 、10 MPa 下保压 5 min,得到厚度约为 0.18 mm 的 SCG/PP 复合材料。

## 1.3 测试与表征

### 1.3.1 SCG 原料表征

采用傅里叶变换红外光谱仪对改性前后 SCG 的官能团进行分析。SCG 粉末样品分别与 KBr 以 1:100 的质量比研磨并压成薄片,光谱范围为 2000~500  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描 32 次。用视频接触角仪对改性前后的 SCG 进行水接触角测试。

### 1.3.2 复合材料性能表征

采用万能试验机对 SCG/PP 复合材料进行拉伸测试,拉伸速率为 50 mm/min,每个样品平行测试 5 次。采用场发射扫描电子显微镜对 SCG/PP 复合材料拉伸断面的形貌进行观察。采用热重分析仪对 SCG/PP 复合材料进行热稳定性分析,具体方法如下:采样量为 3~5 mg,在氮气气氛下,以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率从 30  $^{\circ}\text{C}$  升到 600  $^{\circ}\text{C}$ 。采用差示扫描量热仪对 SCG/PP 复合材料的熔融结晶行为进行分析,具体方法如下:首先样品以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率从室温加热到 200  $^{\circ}\text{C}$ ,保温 5 min,消除热历史;以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的冷却速率冷却到室温,然后继续以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率从 30  $^{\circ}\text{C}$  加热到 200  $^{\circ}\text{C}$ ,保温 5 min。采用 X 射线衍射仪对 SCG/PP 复合材料的晶体形貌进行测试,X 射线源为 Cu-K $\alpha$ ,扫描角度为 5 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$ ,步长为 0.07( $^{\circ}$ )/s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SCG 的微观形貌

图 1 为 SCG 的 SEM 照片。从图 1(a)可以看出,SCG 呈现出规则的颗粒状,松散程度较高。放大后可以观察到图 1(b),SCG 表面附有更为微小的颗粒,这些颗粒可能是脂质等成分的固体物质。

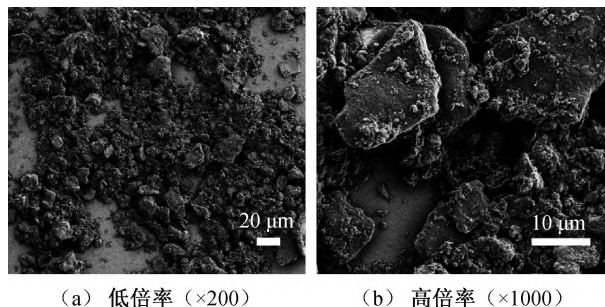


图 1 SCG 的 SEM 照片

### 2.2 SCG 的化学结构分析

对未处理的 SCG 及不同偶联剂处理后的 SCG 进行红外光谱测试,结果如图 2 所示。由图 2 可知:1750  $\text{cm}^{-1}$  处对应的峰为 SCG 中脂质类物质的羰基峰,1640  $\text{cm}^{-1}$  处的峰为咖啡因的特征峰;经过 3 种偶联剂处理后,SCG 均在 1390  $\text{cm}^{-1}$  处出现吸收峰,对应烷基的特征峰,1240  $\text{cm}^{-1}$  和 1130~1000  $\text{cm}^{-1}$  这两处的较强吸收峰对应 Si—O—Si 的特征峰,其中 Si—O—C 峰被遮蔽,890~870  $\text{cm}^{-1}$  的峰为 Si—OH 的伸缩振动峰;根据 A171 改性 SCG 后的红光光谱图,1320  $\text{cm}^{-1}$  处出现了有机官能团乙烯基中的 CH—的弯曲振动峰。Si—O—C 基团峰的出现,表明 3 种偶联剂已经分别成功接枝到 SCG 上。

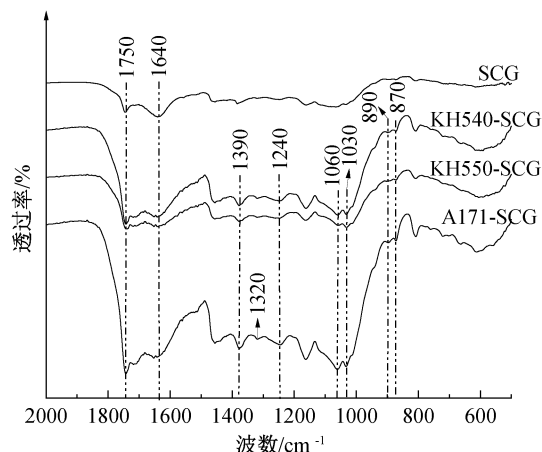


图 2 SCG 改性前后的红外光谱图

### 2.3 SCG 的接触角分析

用水接触角的大小表示硅烷偶联剂改性前后 SCG 疏水性的强弱,水接触角越大,疏水性越强<sup>[18]</sup>。



SCG、KH540-SCG、KH550-SCG、A171-SCG 这 4 种样品的水接触角测试的结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,未处理的 SCG 的接触角在  $101^{\circ}$ ,经过硅烷偶联剂处理后,的 SCG 的水接触角均提高约  $4^{\circ}$ ,表明 SCG 的疏水性在一定程度上有所增强。偶联剂经过水解后产生的羟基与 SCG 表面的羟基发生反应,这个过程会导致 SCG 表面羟基数量减少,从而使得疏水性增强。SCG 疏水性的增强有利于 SCG 与疏水性 PP 的界面相容。3 种偶联剂作用效果的差异来源于偶联剂自身的有机官能团。KH540 和 KH550 的有机官能团是氨基,A171 的有机官能团是乙烯基。氨基是亲水基,而乙烯基是疏水基,所以 A171 处理后的 SCG 疏水性更强一些。

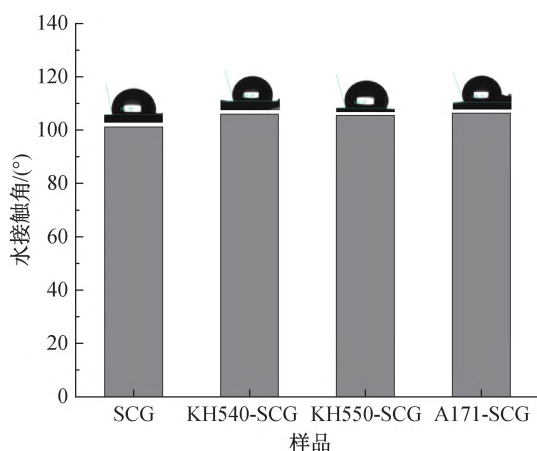


图 3 SCG 改性前后的接触角

## 2.4 SCG/PP 复合材料的力学性能分析

为了研究硅烷偶联剂改性 SCG 对 SCG/PP 复合材料力学性能的影响,对材料进行力学性能测试,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,KH540-SCG/PP 复合材料的拉伸强度比未处理的复合材料提高约 40.7%,A171-SCG/PP 复合材料提高了 48.6%,而 KH550-SCG/PP 复合材料的拉伸强度提高幅度未达到 30%;偶联剂提高了界面附着力,促进了应力从 PP 到 SCG 的跨界面转移,在拉伸的过程中不易脱节,因此复合材料的拉伸强度提高;加入偶联剂后,断裂伸长率均有所下降,其中以 KH550 和 KH540 改性所得的复合材料最为明显,分别下降 24.9%、17.6%,而 A171 下降趋势最小,仅为 4.4%。这表明硅烷偶联剂的添加会使材料界面结合增强,韧性下降。

## 2.5 SCG/PP 复合材料的形貌分析

SCG/PP 复合材料拉伸测试后的断面 SEM 照片如图 5 所示。图 5(a)可见,未经偶联剂处理的 SCG/PP 复合材料中纤维抽出的长度较长,纵向延伸性好,出现分层,而且抽出的纤维表面光滑,说明

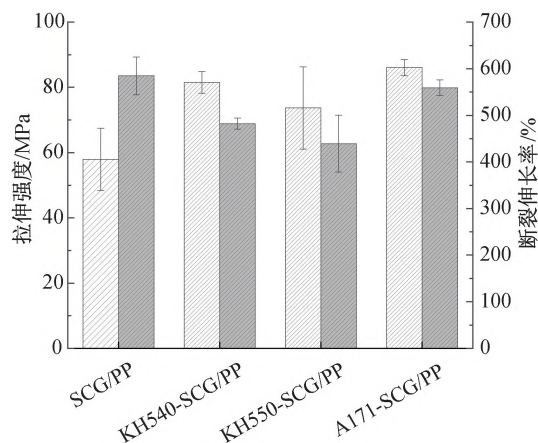


图 4 SCG 改性前后制备的 SCG/PP 复合材料的力学性能  
树脂黏附程度低。从图 5(b)~(d)可以看出,经过不同偶联剂处理后得到的复合材料极大地改善了这种情况,纤维拔丝程度明显下降,呈现出较短的绒毛状(图中白色圆圈内),说明两相界面黏附程度增大,结合更为紧密;偶联剂可以降低靠近纤维表面的 PP 流动性,在拉断时两相不易脱开。

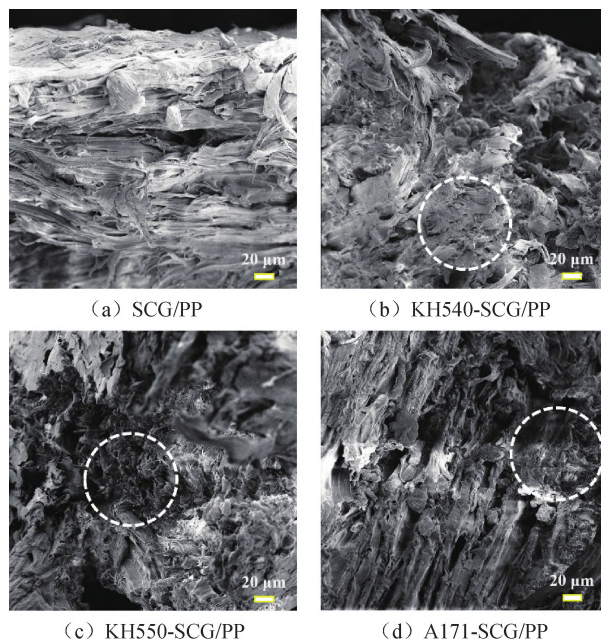


图 5 SCG 改性前后制备的 SCG/PP 复合材料拉伸断面的 SEM 照片

## 2.6 SCG/PP 复合材料的热稳定性分析

SCG/PP 复合材料的热重曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,材料的热降解趋势一致,第一部分失重是因为少量水分子的挥发,第二部分的失重归结于 SCG 中纤维等成分的热分解,第三部分的快速热降解是由于 PP 链的热降解,不同硅烷偶联剂改性后的热重曲线接近重合,都较未改性处理的复合材料有所后移。表 1 是 SCG/PP 复合材料的热重数据,从表 1 可知,在失重量为 5%、10%、50%时,经

KH540 和 A171 改性制备的复合材料热分解温度均比未改性复合材料高 14 ℃, KH550 改性较未改性的复合材料高 9 ℃; 当分解结束时, 3 种偶联剂改性处理的复合材料均为 505 ℃, 比未经处理的复合材料高 2 ℃, 热分解温度的升高表明复合材料的热稳定性在不同程度上有提高; 未改性的复合材料最终残碳量为 6.0%, 经 KH540、KH550 和 A171 改性制备的复合材料的残碳量分别为 7.9%、8.1% 和 8.4%。最终残碳量增加是因为加入硅烷偶联剂后会引 SCG 在高温下的成碳作用, 3 种偶联剂对复合材料热稳定性的影响效果不同, 相比于 KH540 和 A171, KH550 的对热稳定性的提高效果较差。

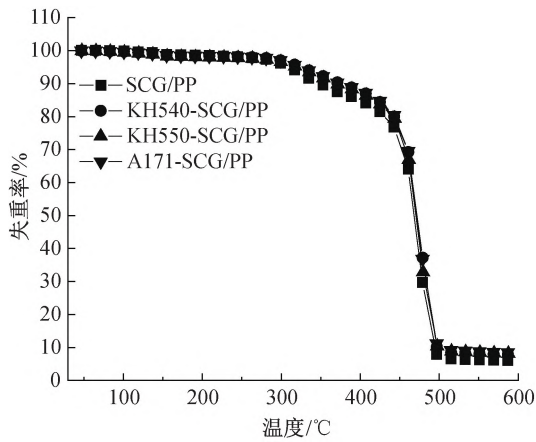


图 6 SCG 改性前后制备的 SCG/PP 复合材料的热重曲线

表 1 SCG/PP 复合材料的热重数据

样品	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{50\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_f/^{\circ}\text{C}$	$C_y/\%$
SCG/PP	309	347	469	503	6.0
KH540-SCG/PP	323	373	473	505	7.9
KH550-SCG/PP	318	369	471	505	8.1
A171-SCG/PP	323	373	473	505	8.4

注:  $T_{5\%}$  表示失重量为 5% 时的温度, 其余类似;  $T_f$  表示失重结束时的温度;  $C_y$  表示残碳量。

## 2.7 SCG/PP 复合材料的结晶结构分析

SCG/PP 复合材料的 XRD 图谱如图 7 所示。从图 7 可以看出:  $2\theta$  为  $14.29^{\circ}$ 、 $17.13^{\circ}$ 、 $18.78^{\circ}$ 、 $21.98^{\circ}$ 、 $25.62^{\circ}$  分别对应晶面 (110)、(040)、(130)、(140)、(060) 的结晶峰; 未加入硅烷偶联剂的复合材料结晶峰的位置与偶联剂改性后的一致, 表明硅烷偶联剂种类对复合材料的晶型并无影响, 硅烷偶联剂改性处理后的复合材料的结晶峰更加尖锐, 表明结晶完善程度提高。

## 2.8 SCG/PP 复合材料的结晶行为分析

SCG/PP 复合材料的 DSC 曲线如图 8 所示。

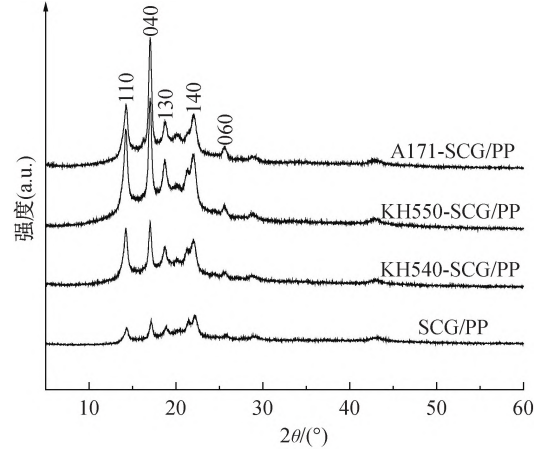
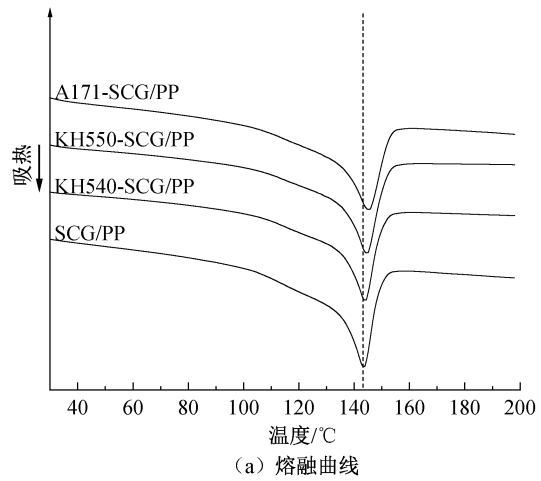
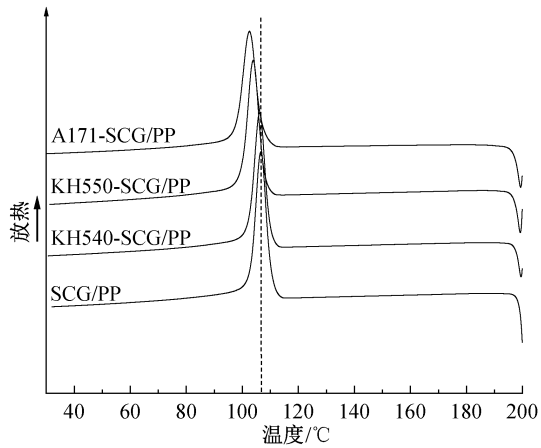


图 7 SCG 改性前后制备的 SCG/PP 复合材料的 XRD 图谱



(a) 熔融曲线



(b) 冷却曲线

图 8 SCG 改性前后制备的 SCG/PP 复合材料的 DSC 曲线从图 8(a) 熔融曲线可以看出: 未经硅烷偶联剂改性时, SCG 与 PP 的界面处无化学键, 当硅烷偶联剂改性后, SCG 与 PP 的界面附着能力增强, 熔融峰右移, 熔融温度提高; 不同的硅烷偶联剂改性效果有差异, 所以熔融温度各不相同, 但都较未改性复合材料有所提高, 是由于硅烷偶联剂促进了界面的连续性。从图 8(b) 冷却曲线可以看出: 复合材料的结晶温度下降, 结晶峰变宽, 其中 A171-SCG/PP 更为明显,

其原因是硅烷偶联剂的加入促进了分子链的运动,降低了复合材料的结晶能力,表明 SCG 与 PP 具有了良好的相容性,有利于更多的 SCG 进入到 PP 相,阻碍了 PP 的结晶。

### 3 结 论

本文采用不同硅烷偶联剂对 SCG 进行表面改性处理,并将改性得到的 SCG 作为 PP 的填料,采用熔融共混法制备改性 SCG/PP 复合材料;通过表征改性 SCG 的结构分析硅烷偶联剂对 SCG 的改性效果,并测试改性 SCG/PP 复合材料的性能,研究硅烷偶联剂 KH540、KH550 和 A171 对 SCG/PP 复合材料性能的影响。得出以下结论:

a)3 种硅烷偶联剂都被成功接枝到 SCG 表面,改性后的 SCG 表面亲水基团减少,水接触角可提高约 4°。

b)硅烷偶联剂的加入使 SCG 与 PP 之间的相容性增强,界面黏结程度提高;硅烷偶联剂使复合材料的晶型更加完整;硅烷偶联剂可有效促进分子链运动,使材料的熔融-结晶行为发生改变。

c)3 种硅烷偶联剂均可有效提高 SCG/PP 复合材料的性能。其中,当硅烷偶联剂为 A171 时,相比未处理的复合材料拉伸强度提高 48.6%;改性后的 SCG/PP 复合材料的热稳定性提高,经 A171 处理后的复合材料终止分解温度提高且残碳量增加最多。

### 参考文献:

- [1] 孟洵,李利芬,余丽萍,等.木质纤维结构对木塑复合材料力学性能的影响[J].塑料科技,2022,50(5):103-107.
- [2] 施金杰,乔慧,欧阳水平,等.咖啡渣高值化利用研究进展[J].生物加工过程,2022,20(5):521-529.
- [3] Kalebek N A. Fastness and antibacterial properties of polypropylene surgical face masks dyed with coffee grounds [J]. The Journal of the Textile Institute, 2022, 113(7): 1309-1315.
- [4] 易帆,王雪梅,洪国英,等.咖啡渣的研究进展及其在纺织印染领域的应用展望[J].染整技术,2021,43(10):1-4.
- [5] Santhanarajan A E, Han Y H, Koh S C. The efficacy of functional composts manufactured using spent coffee ground, rice bran, biochar, and functional microorganisms [J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7703.
- [6] Jamari S S, Vennu S V, Ghazali S, et al. Effect of spent coffee grounds and rice husk amount towards the swelling properties of hydrogel using graft polymerization [J].

Materials Today: Proceedings, 2021, 41: 140-143.

- [7] Nurman S, Yulia R K, Irmayanti I, et al. Optimizing anti-inflammatory activities of Arabica coffee ground (Coffee arabica L.) nanoparticle gel [J]. Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products, 2021, 16(2): e102673.
- [8] Franca A S, Oliveira L S. Potential uses of spent coffee grounds in the food industry [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022, 11(14): 2064.
- [9] Zarrinbakhsh N, Wang T, Rodriguiz-Urbe A, et al. Characterization of wastes and coproducts from the coffee industry for composite material production [J]. BioResources, 2016, 11(3): 7637-7653.
- [10] 李利芬,胡福,李秋玲,等.偶联剂与相容剂协同处理对马尾松木粉/PE 复合材料性能的影响[J].塑料工业,2022,50(11):167-173.
- [11] Ludovici F, Hartmann R, Liimatainen H. Aqueous bifunctionalization of cellulose nanocrystals through amino and alkyl silylation: functionalization, characterization, and performance of nanocrystals in quartz microflotation [J]. Cellulose, 2023, 30(2): 775-787.
- [12] 李白,石大为,魏家辉.汽车内饰用胡麻纤维增强环氧树脂复合材料的制备及其性能[J].毛纺科技,2022,50(7):13-17.
- [13] 杨燕宁,孟家光,程燕婷,等.硅烷偶联剂表面改性 UHMWPE 纤维的工艺优化[J].合成纤维工业,2018,41(1):31-34.
- [14] Li X P, Qiang M L, Yang M W, et al. Combining fiber enzymatic pretreatments and coupling agents to improve physical and mechanical properties of hemp hurd/wood/polypropylene composite [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(21): 6384.
- [15] Gao X, Lin L, Pang J Y, et al. Effects of impulse-cyclone drying and silane modification on the properties of wood fiber/HDPE composite material [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 207: 343-351.
- [16] 陆颖昭,徐军飞,陈宇杰,等.KH550 改性对微纳纤维素/聚乳酸复合 3D 打印材料性能的影响[J].中国造纸学报,2019,34(2):14-19.
- [17] Liu Y N, Guo L M, Wang W H, et al. Modifying wood veneer with silane coupling agent for decorating wood fiber/high-density polyethylene composite [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 691-699.
- [18] Wang X, Fu C, Zhang C L, et al. A comprehensive review of wetting transition mechanism on the surfaces of microstructures from theory and testing methods [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2022, 15(14): 4747.

(责任编辑:张会巍)