

玻璃纤维的偶联/接枝改性及其对HDPE/竹粉复合材料性能的影响

张炜鹏, Santosh Khanal, 徐世爱

(华东理工大学材料科学与工程学院, 上海市先进聚合物材料重点实验室, 上海
200237)

摘要: 通过熔体共混制备了玻璃纤维 (GF) 增强的高密度聚乙烯 (HDPE)/竹粉复合材料。为了增强GF与基体之间的相互作用, 先用 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷对GF进行处理, 在GF表面引入双键, 然后在熔体共混中加入少量过氧化二异丙苯, 引发双键与基体之间的接枝反应, 使两相间产生化学键合。通过弯曲和冲击实验测试了复合材料的力学性能, 通过热失重和维卡软化点表征了复合材料的热性能, 并用扫描电子显微镜观察了复合材料的形貌结构。结果表明, 通过偶联/接枝的协同改性, 大大强化了GF与基体之间的界面相互作用, 使得HDPE/竹粉复合材料的力学性能和热性能得到大幅提高。

关键词: HDPE/竹粉复合材料; 玻璃纤维; KH570; 偶联/接枝改性

中图分类号: TB324

文献标志码: A

Coupling/Grafting Modification of Glass Fiber and Its Effect on the Properties of HDPE/Bamboo Flour Composites

Zhang Wei-peng, Santosh Khanal, Xu Shi-ai

(Shanghai Key Laboratory of Advanced Polymeric Materials, School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The reinforced high-density polyethylene (HDPE)/bamboo flour (BF) composites were prepared by melt blending using maleic anhydride grafted HDPE (HDPE-g-MAH) as a compatibilizer and glass fiber (GF) as a reinforcing filler. In order to improve the interfacial adhesion between GF and HDPE and the dispersion of GF in the matrix, a silane coupling agent 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane (KH570) with unsaturated double bonds was used to modify GF. Moreover, dicumyl peroxide (DCP) was used to initiate the grafting reaction between the double bonds in KH570 and HDPE. The modified GF was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and energy dispersive

收稿日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U1507123)

作者简介: 张炜鹏 (1994-), 男, 安徽亳州人, 硕士生, 主要研究方向为木塑复合材料。E-mail: weipengsh@163.com

通信联系人: 徐世爱, E-mail: saxu@ecust.edu.cn

spectroscopy (EDS), and the morphology and properties of HDPE/BF composites reinforced by GF were characterized by scanning electron microscopy (SEM), mechanical testing, Vicat softening temperature (VST) measurement and thermogravimetric analysis (TGA). The results indicate that KH570 modification can improve the interfacial adhesion and the dispersion of GF, resulting in great improvement of the mechanical properties of the composite, and the impact strength, flexural strength and flexural modulus of the HDPE/BF composite with 10 % of GF-KH570 are increased by 48 %, 21 %, and 25 % respectively, compared with HDPE/BF composite. The interfacial interaction between GF-KH570 and the matrix can be further enhanced by the chemical bonding resulting from the grafting reaction initiated by DCP, thus the resultant composite exhibits excellent balance properties, and the impact strength, flexural strength and flexural modulus of the resultant HDPE/BF composite is increased by 69 %, 40 % and 43 %, respectively, compared with the corresponding HDPE/BF composite.

Key words: HDPE/BF composites, glass fiber, KH570, coupling/grafting modification

木塑复合材料 (WPCs) 是指以热塑性树脂 (聚乙烯PE、聚丙烯PP、聚氯乙烯PVC等) 和天然植物纤维 (木粉、竹粉、果壳粉、锯末、稻壳粉等) 为主要原料, 经成型加工而得到的一种新型生物质复合材料^[1-5]。WPCs具有原料来源广泛、价格低廉、可重复使用、性能优异、符合国家循环经济政策等优点, 具有源于木而优于木的特点, 是替代传统木材的新一代绿色环保型材料^[6], 目前广泛应用于建筑、汽车、园林以及家具行业^[7-9]。

但是, 天然植物纤维属于亲水性极强的极性材料, 而PE、PP等热塑性树脂为疏水型非极性材料, 植物纤维掺混到这类树脂基体中, 两者相容性较差, 所制备的木塑制品性能难以满足使用要求^[10-13]。为了提高WPCs中植物纤维与基体树脂相容性, 进而提高木塑制品的综合性能, 聚烯烃接枝马来酸酐 (POE-*g*-MAH)^[14]、聚烯烃接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯 (POE-*g*-GMA)^[15]作为相容剂已广泛应用于WPCs的改性, 然而它们对WPCs性能提升的效果十分有限。

玻璃纤维 (Glass fiber, GF) 是一种机械强度高、刚度大、耐热性能好且价格低廉的无机材料, 是目前用于塑料增强最常见的纤维材料之一^[16-18]。为了提高HDPE/竹粉复合材料的性能, 可选择GF对其进行增强改性。然而, GF与HDPE/竹粉等热塑性树脂基体之间的相容性较差, 复合时容易在界面上形成空隙和缺陷, 界面强度低, 使增强相与基体材料难以形成有效粘结, 不能充分发挥GF的增强作用^[19, 20]。Supreeda等^[20]研究了GF对PVC基WPCs机械性能与耐磨性的影响, 选用3-(甲基丙烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷对GF进行预处理。研究表明, GF经处理后, 能够提高其与PVC基体之间的相容性, 显著改善了PVC基WPCs的机械性能, 同时WPCs的耐磨性也得到一定程度提高。

目前, 很多研究者通过加入GF提高木塑制品的力学性能, 但基本上都是采用偶联剂对GF表面进行预处理, 达到提高界面相容性的目的。通过化学键增强GF与基体树脂之间的相互作用, 从而最大限度地发挥GF

的增强效应, 则鲜有文献报道。本文首先用含有双键的硅烷偶联剂 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570)对GF进行表面处理(GF-KH570), 在GF表面引入双键。同时, 在GF-KH570与HDPE/竹粉复合材料熔融混合过程中, 引入少量引发剂过氧化二异丙苯(DCP), 引发GF-KH570中的双键与基体树脂HDPE之间的反应, 形成化学键合, 进一步增强GF与基体之间的界面相容性和界面粘结强度, 从而最大限度地发挥GF对HDPE/竹粉复合材料的增强作用。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

高密度聚乙烯(HDPE), 熔融指数为 8.5 g/10 min (190 °C, 2.16 kg), 抚顺石化有限公司; HDPE 接枝马来酸酐(HDPE-g-MAH), 接枝率约为 2.25 %, 自制; 竹粉, 60-80 目, 安徽丰乐竹业有限公司; 玻璃纤维(GF), 工业级, 直径为 13 μm , 长度为 3~4.5 mm, 江苏康达夫新材料科技有限公司; γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570), 工业级, 南京品宁偶联剂有限公司; 无水乙醇、过氧化二异丙苯(DCP)、冰醋酸, 分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司; 溴化钾(KBr), 光谱纯, 国药化学试剂有限公司。

1.2 KH570 改性 GF (GF-KH570) 的制备

先配制质量分数为 95 % 的乙醇水溶液, 再用冰醋酸调节溶液 pH 至 4~5, 随后边搅拌边加入 KH570 (用量为 GF 质量的 3 %), 室温下超声水解 30 min。将称量好的 GF (预先在温度为 400 °C 的马弗炉中灼烧 4 h, 以除去表面的有机物) 放入上述配置好的溶液中, 80 °C 下机械搅拌 30 min, 取出 GF, 室温晾置, 使乙醇挥发, 随后在 80 °C 的真空烘箱中放置 12 h, 使得水解 KH570 中的硅羟基与 GF 表面的羟基充分反应。用无水乙醇、去离子水交替清洗改性后的 GF 数遍, 除去未反应的 KH570 及副产物, 得到 KH570 改性的 GF, 记为 GF-KH570, 未改性 GF 记为 U-GF。

1.3 GF-KH570 增强 HDPE/竹粉复合材料的制备

将竹粉置于温度为 100 °C 的真空烘箱中干燥 24 h, 除去竹粉中的水分。将 HDPE、干燥后的竹粉、相容剂 HDPE-g-MAH (HDPE/竹粉/相容剂的质量之比为 33/60/7)、GF-KH570 (用量为 HDPE/竹粉总质量的 0、3 %、5 %、7 %、10 %、13 %、15 %) 和引发剂 DCP (用量为 GF 质量的 0.3 %) 在高速混合机中机械混合 2 min。将上述混合料置于 HAAK 转矩流变仪中熔融混合, 熔融混合温度为 170 °C, 转子转速为 50 rpm, 熔融混合时间约为 10 min。随后将熔融混合物用粉碎机粉碎, 再用平板硫化机压制成 150 mm×100 mm×4 mm 的板材, 温度为 170 °C, 压力为 10 MPa。最后, 用万能制样机制成标准样品共测试用。制备的样品包括: 不含 GF 的 HDPE/竹粉复合材料 (HDPE/BF)、添加 U-GF 的复合材料 (U-GF/HDPE/BF)、添加 GF-KH570 的复合材料 (GF-KH570/HDPE/BF) 以及同时添加 GF-KH570 和引发剂 DCP 的复合材料 (C/G-GF/HDPE/BF)。

1.4 测试与表征

美国 Thermo Fisher 公司 Nicolet 6700 型傅立叶变换红外光谱仪, 扫描范围为 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$; 深圳三思公司 CMI4024 型万能试验拉力机, 按 GB/T 9341-2008 标准测试, 拉伸速度为 2 mm/min , 样品尺寸为 $80\times 10\times 4\text{ mm}^3$ (长度 \times 宽度 \times 厚度), 跨距为 64 mm ; 意大利 CEAST 公司 CEAST 9050 型摆锤冲击试验机, 缺口冲击试验按 GB/T 9341-2008 标准进行, 样品缺口深度为 2 mm , 选用 5.5 J 摆锤; 中国美特斯工业系统有限公司 ZWK1302-B 型维卡软化点测量仪, 升温速率为 $120\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, 载荷为 10 N ; 日本日立公司的 S-4800 型扫描电子显微镜, 加速电压为 15 kV , 测试前样品表面进行喷金处理; 德国 NETZSCH 公司 STA409PC 型综合热分析仪, N_2 气氛保护, 流速为 50 mL/min , 温度范围为室温至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 。

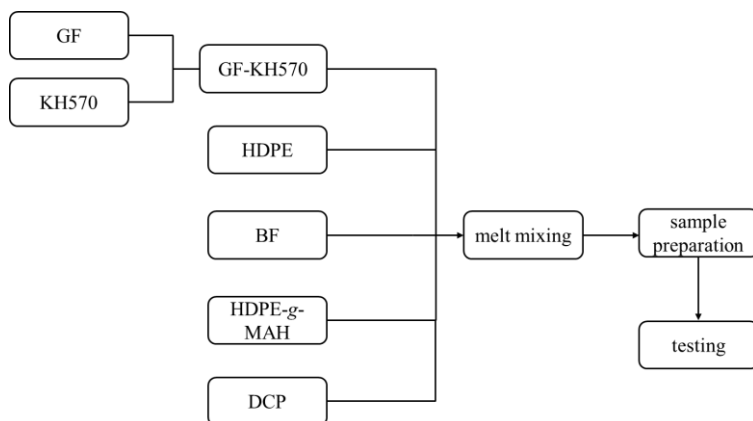


图 1 HDPE/竹粉复合材料的制备流程

Fig. 1 Experiment process of HDPE/BF composites

2 结果与讨论

本文中用 HDPE-g-MAH 作为相容剂, 目的在于提高竹粉与 HDPE 之间的界面相容性^[14], HDPE-g-MAH 也是木塑复合材料配方中常用的相容剂。本文的重点在于比较 GF 的表面处理方法对复合材料性能的影响, 由于所有的复合材料中均加入了 HDPE-g-MAH (质量分数均为 7%), 其作用也完全一样, 因此, 对相容剂的作用不做讨论和比较, 而是重点关注表面处理的效果。

2.1 GF 表面的红外光谱 (FTIR)

图 2 为 KH570 改性前后 GF 的 FTIR 图。对于 U-GF, 3471 cm^{-1} 处的吸收峰为 O-H 的伸缩振动峰, 1100 cm^{-1} 附近的宽吸收峰为 Si-O 基团吸收峰。相比于 U-GF, GF 经 KH570 改性后 (GF-KH570) 出现明显的 KH570 特征吸收峰: 2956 cm^{-1} 和 2895 cm^{-1} 处为 KH570 中的 $-\text{CH}_3$ 不对称伸缩振动和 $-\text{CH}_2-$ 对称伸缩振动吸收峰, 1720 cm^{-1} 处为 C=O 的伸缩振动吸收峰, 1637 cm^{-1} 处为 C=C 伸缩振动吸收峰, 1456 cm^{-1} 处为 C-H 弯曲振动吸收峰, 1298 cm^{-1} 处为 C-O-C 的伸缩振动吸收峰^[21, 22]。FTIR 测试前, 对 U-GF 与 GF-KH570 均经过乙醇与去离子水的反复洗涤, 除去了未反应的 KH570、副产物及杂质。因此, FTIR 结果表明 KH570 被成功地接枝到 GF 表面。

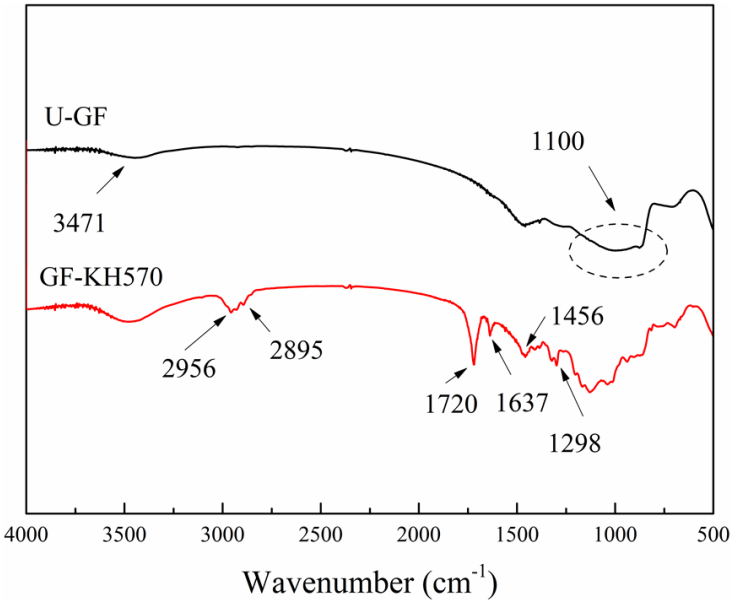


图 2 U-GF 与 GF-KH570 的红外光谱

Fig. 2 FTIR spectra of U-GF and GF-KH570

2.2 GF的表面组成

为了讨论 GF 经 KH570 改性前后表面性质的变化，通过 EDS 对它们的表面进行定量分析，结果如表 1 所示。表 1 为 U-GF 与 GF-KH570 表面碳、氧和硅三种元素的质量百分比及原子个数百分比。从表 1 可知，GF 经 KH570 偶联处理后（GF-KH570），碳含量增加，而氧和硅含量减小，说明 GF 表面组成已发生变化，KH570 分子被接枝到 GF 表面。

表 1 U-GF 和 GF-KH570 表面元素组成

Table 1 EDS data of U-GF and GF-KH570

Sample	U-GF		GF-KH570	
	Weight (wt.%)	Atom (at.%)	Weight (wt.%)	Atom (at.%)
C	15.29±1.23	22.30±0.54	32.51±1.53	42.70±2.42
O	52.82±3.52	57.82±1.47	45.66±2.10	45.03±1.04
Si	31.88±0.51	19.88±0.55	21.83±1.34	12.26±0.96

2.3 复合材料的力学性能

图3为GF-KH570添加量对HDPE/竹粉复合材料力学性能的影响。可见，加入GF-KH570后，HDPE/竹粉复合材料的力学性能得到一定程度的提高。这是由于GF-KH570在HDPE/竹粉复合材料中起到骨架结构式的增强作用，当材料受到外力时，应力通过界面传递给GF，GF承担了部分应力；此外，当裂纹遇到GF时，可能被终止^[23]。随着GF-KH570添加量的增加，HDPE/竹粉复合材料的力学性能均呈现出先增加后减少的趋势。

在GF-KH570添加量为10 %时,冲击强度、弯曲强度以及弯曲模量均达到最大值,分别为 5.71 kJ/m^2 、 62.5 MPa 以及 6008 MPa ,与未添加GF的HDPE/竹粉复合材料相比,分别提高了48 %、21 %以及25 %。当GF-KH570添加量过多时,GF-KH570可能互相搭接,甚至团聚,弱化了GF-KH570与基体之间的相互作用,界面粘合强度降低,复合材料内部的界面缺陷增加,导致复合材料的力学性能有不同程度地下降^[22, 23]。因此,对于HDPE/竹粉复合材料,最佳的GF-KH570添加量为10 %。

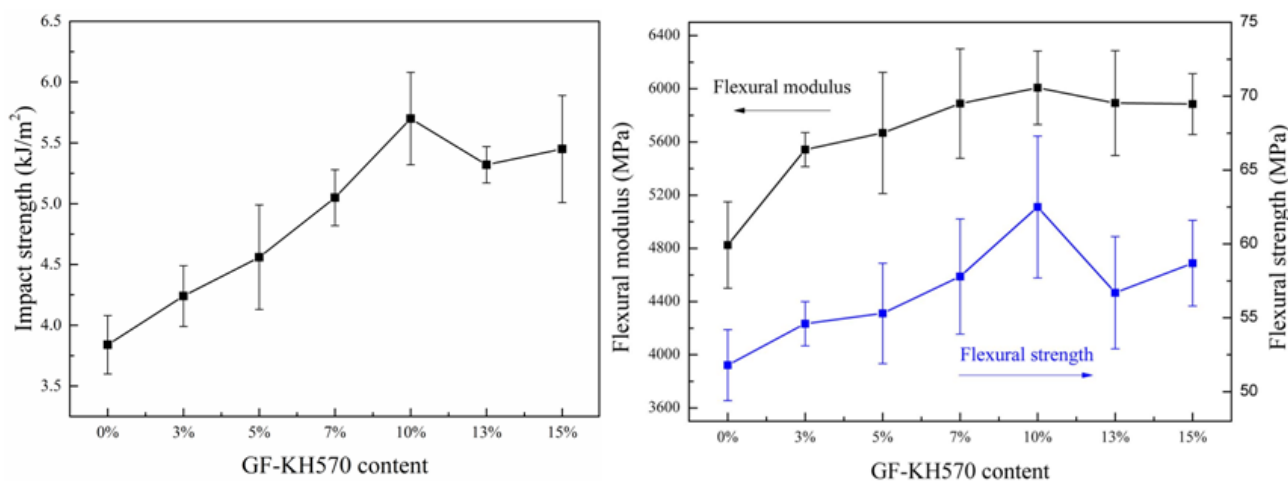


图 3 GF-KH570添加量对HDPE/竹粉复合材料力学性能的影响

Fig. 3 Effect of GF-KH570 content on the mechanical properties of HDPE/BF composites

选择GF添加量为10 %的复合材料,考察GF的偶联改性以及偶联/接枝协同改性对HDPE/竹粉复合材料力学性能的影响,结果如图4所示。从图中可以发现,U-GF对HDPE/竹粉复合材料的增强效果有限,相对于HDPE/竹粉复合材料,复合材料的冲击强度、弯曲强度以及弯曲模量仅分别提高了35 %、10 %以及19 %。主要原因是U-GF为极性无机物,且表面含有少量羟基,与非极性基体HDPE相容性较差,界面结合力弱,应力不能有效传递,难以充分发挥其增强作用^[24]。对于GF-KH570,KH570先通过水解生成硅醇(Si-OH),然后与GF表面羟基形成氢键或者发生缩合反应形成醚键,一方面可以降低GF表面羟基的数目,另一方面使得GF表面被非极性烷烃包覆,改善了其与基体树脂HDPE之间的相容性,从而提高了HDPE/竹粉复合材料的力学性能。引入DCP后,复合材料(C/G-GF/HDPE/BF)的冲击强度、弯曲强度以及弯曲模量均为最大值,相对于HDPE/竹粉复合材料,分别提高了69 %、40 %以及43 %。主要原因是KH570分子中含有双键,加入DCP后,熔体混合过程中DCP分解产生的自由基,能引发GF-KH570与HDPE之间的接枝反应,使得GF与基体之间产生化学键合,大大增强了GF与基体之间的界面粘合,使得GF的增强作用得以充分发挥,HDPE/竹粉复合材料的抗冲击性能及抗弯曲性能得到大幅度提高。GF的偶联/接枝改性机理如图5所示。

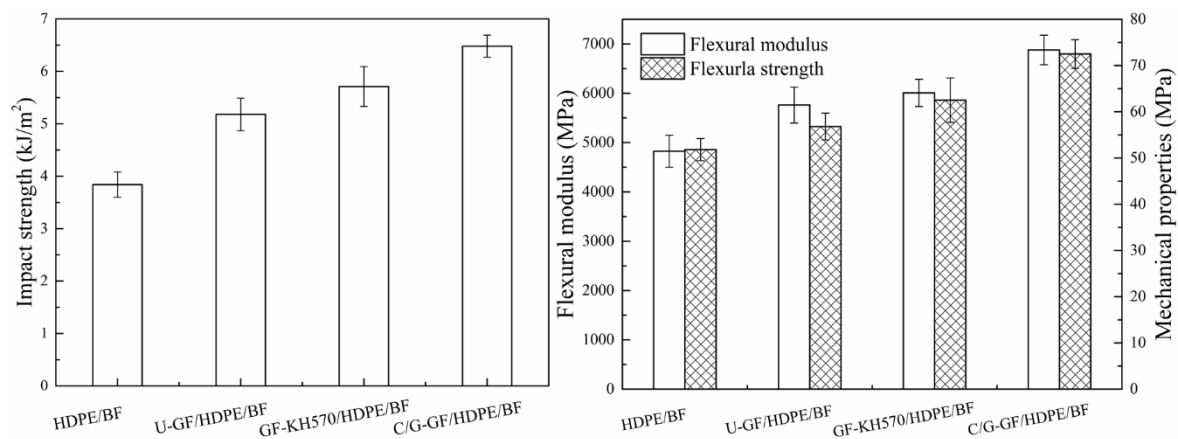


图 4 KH570改性GF及GF的偶联/接枝改性对HDPE/竹粉复合材料（GF含量均为10 wt.%）力学性能的影响

Fig. 4 Effect of coupling and coupling/grafting modification for GF on the mechanical properties of HDPE/BF composites with 10 wt.% of GF

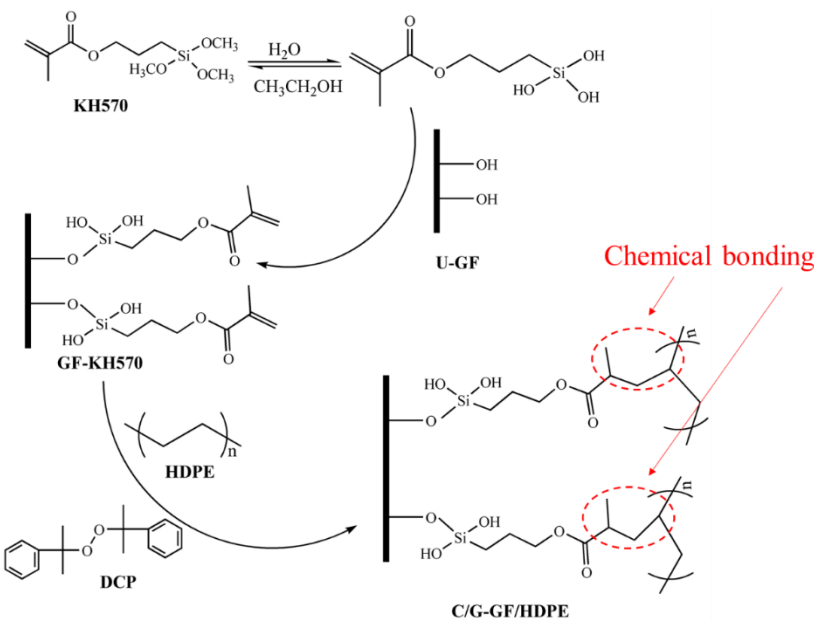


图 5 GF的偶联/接枝改性机理图

Fig. 5 Mechanism of coupling/grafting modification of GF

2.4 复合材料的冲击断面形貌

图6为GF增强HDPE/竹粉复合材料冲击断面SEM图。图6-a为未添加GF的HDPE/木粉（含相容剂）复合材料冲击断面的微观形貌。可以看出，相容剂HDPE-g-MAH的存在，使得基体与竹粉之间界面模糊，说明两者之间有良好的界面相容性^[12, 13]。对于U-GF增强的HDPE/竹粉复合材料（图6-b），GF表面光滑，GF与基体之间界面清晰，纤维被拔出后留下的凹槽也十分光滑（如箭头所示），表明GF与基体之间的界面结合很弱。对于GF-KH570增强的HDPE/竹粉复合材料（图6-c），GF与基体之间结合紧密（如圆圈所示），被拔出的GF表面不像图6-b中那么光滑（如箭头所示），说明GF-KH570与基体之间的界面粘合有所改善。引入引发剂DCP后（图6-d），GF与基体之间界面模糊，GF被紧紧包埋在基体中（如圆圈所示），被拔出的GF表面牢固地粘

附着树脂（如箭头所示）。这是因为通过偶联改性和DCP引发的接枝反应，GF与HDPE之间产生了强的化学键合，有效地改善了GF与基体之间的界面相容性。当复合材料受到外力时，基体受到的应力可以通过界面有效地传递给GF，从而最大限度地发挥出GF增强作用，这与力学性能的测试结果相吻合。

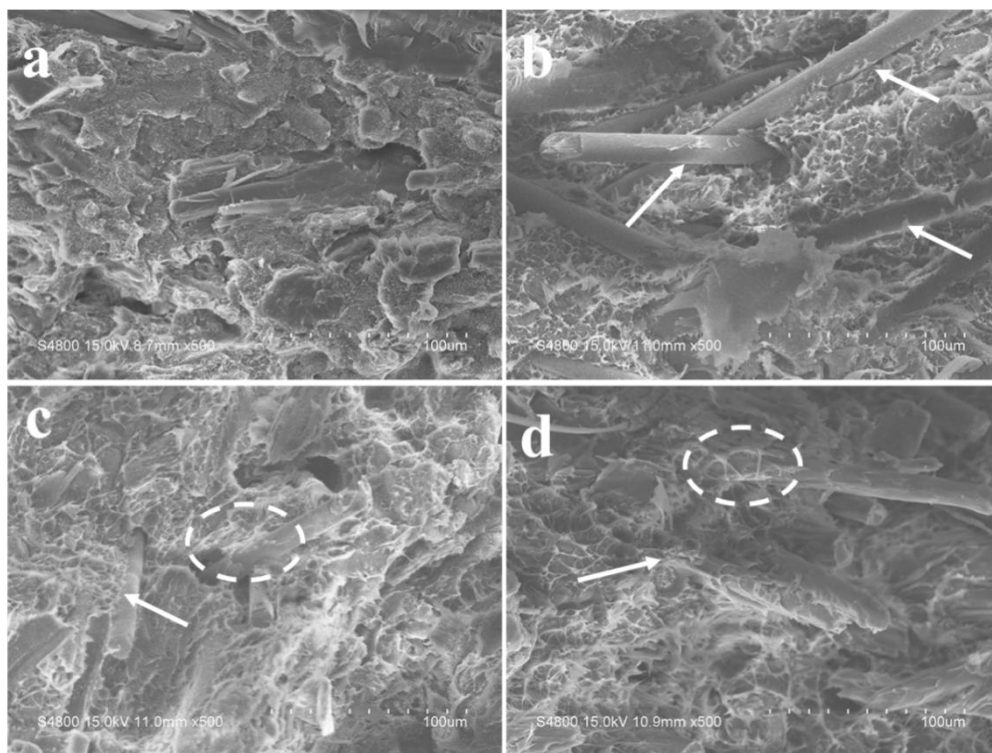


图 6 GF增强HDPE/竹粉复合材料（GF含量均为10 wt.%）冲击断面微观形貌的SEM图（a: HDPE/BF; b: U-GF/HDPE/BF; c: GF-KH570/HDPE/BF; d: C/G-GF/HDPE/BF）

Fig. 6 SEM of impact fracture surface of HDPE/BF composites with 10 wt.% of GF: a) HDPE/BF; b) U-GF/HDPE/BF; c) GF-KH570/HDPE/BF; d) coupled/grafted GF/HDPE/BF

2.5 复合材料的维卡软化点

表2是复合材料的微卡软化点（VST）测试结果。可以看出，GF的加入，使得HDPE/竹粉复合材料的VST得到不同程度的提高，这是由于分散在基体中的GF对基体HDPE的链段运动有一定的限制，从而改善了复合材料的耐热性能。但是，与HDPE/竹粉复合材料相比，U-GF/HDPE/竹粉复合材料的VST仅提高了1.9 °C，这是因为两相界面相互作用弱，界面间的间隙较大，GF对HDPE分子的链段运动限制有限。而GF-KH570/HDPE/竹粉复合材料以及偶联/接枝改性的GF/HDPE/竹粉复合材料，它们的VST与HDPE/竹粉复合材料相比，分别提高了2.5 %（即3.3 °C）和5.0 %（即6.7 °C）。这是由于GF经KH570改性后，与HDPE之间的界面作用增加，对基体HDPE分子链段运动的限制作用也增强，因此VST增加明显。加入DCP后，GF与HDPE之间产生强的化学键合，HDPE分子的链段运动受到与之键合的GF的强烈限制，进而VST提高的幅度最为显著。

表 2 GF增强HDPE/竹粉复合材料（GF含量均为10 wt.%）的维卡软化点（VST）

Table 2 Vicat softening temperature (VST) of GF reinforced HDPE/BF composites with 10 wt.% of GF				
Samples	HDPE/BF	U-GF/HDPE/BF	GF-KH570/HDPE/BF	C/G-GF/HDPE/BF
VST (°C)	133.5	135.4	136.8	140.2

2.6 复合材料的热稳定性

图7为HDPE/竹粉复合材料的热失重曲线。可以看出，HDPE/竹粉复合材料热失重主要分为两个阶段，第一阶段发生在200 °C~350 °C之间，主要是竹粉的分解；第二阶段发生在360 °C~480 °C之间，主要是基体树脂HDPE的分解^[14]。GF、尤其是GF-KH570的加入，提高了复合材料中基体树脂HDPE的分解温度。GF-KH570/HDPE/竹粉复合材料与C/G-GF/HDPE/竹粉复合材料中，基体树脂HDPE的最大分解速率对应的温度，由HDPE/竹粉复合材料的464 °C分别提高到469 °C、473 °C。这是因为分散在基体中的GF，不仅能够阻止热的传导，还能阻止分解产物的逸出，使得HDPE的热分解需要在更高的温度下进行。很显然，GF与基体树脂HDPE之间的相容性越好，界面相互作用越强，复合材料热稳定性提升幅度也越大，这与VST测试结果一致。

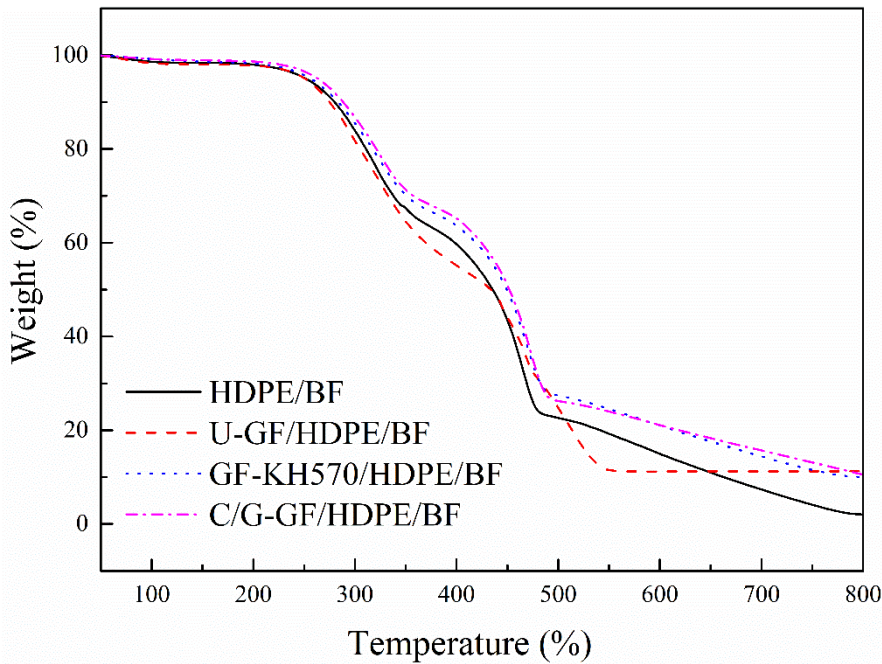


图 7 GF增强HDPE/竹粉复合材料（GF含量均为10 wt.%）的热失重曲线图

Fig. 7 TGA curves of HDPE/BF composites reinforced with 10 wt.% of GF

3 结 论

（1）随着GF-KH570含量的增加，HDPE/竹粉复合材料的力学性能呈现出先升高后降低的趋势，当GF-KH570的含量为10 %时，复合材料的力学性能最佳。相对于HDPE/竹粉复合材料，GF-KH570/HDPE/竹

粉复合材料的冲击强度、弯曲强度以及弯曲模量分别提高了48 %、21 %以及25 %。

(2) 引发剂DCP的加入, 使得GF-KH570与HDPE之间产生化学键合, 大大强化了GF与基体之间的界面粘合, 使得GF的增强作用得以充分发挥, 从而进一步提高了HDPE/竹粉复合材料的力学性能。相对于HDPE/竹粉复合材料, 经偶联/接枝改性GF/HDPE/竹粉复合材料冲击强度、弯曲强度以及弯曲模量分别提高了69 %、40 %以及43 %。

(3) 对GF进行偶联/接枝改性处理, HDPE/竹粉复合材料的热性能也得到不同程度的提高。相对于HDPE/竹粉复合材料, 经偶联/接枝改性的GF/HDPE/竹粉复合材料的VST由133.5 ℃提高到140.2 ℃, 基体树脂HDPE的最大热分解温度由464 ℃提高到473 ℃。

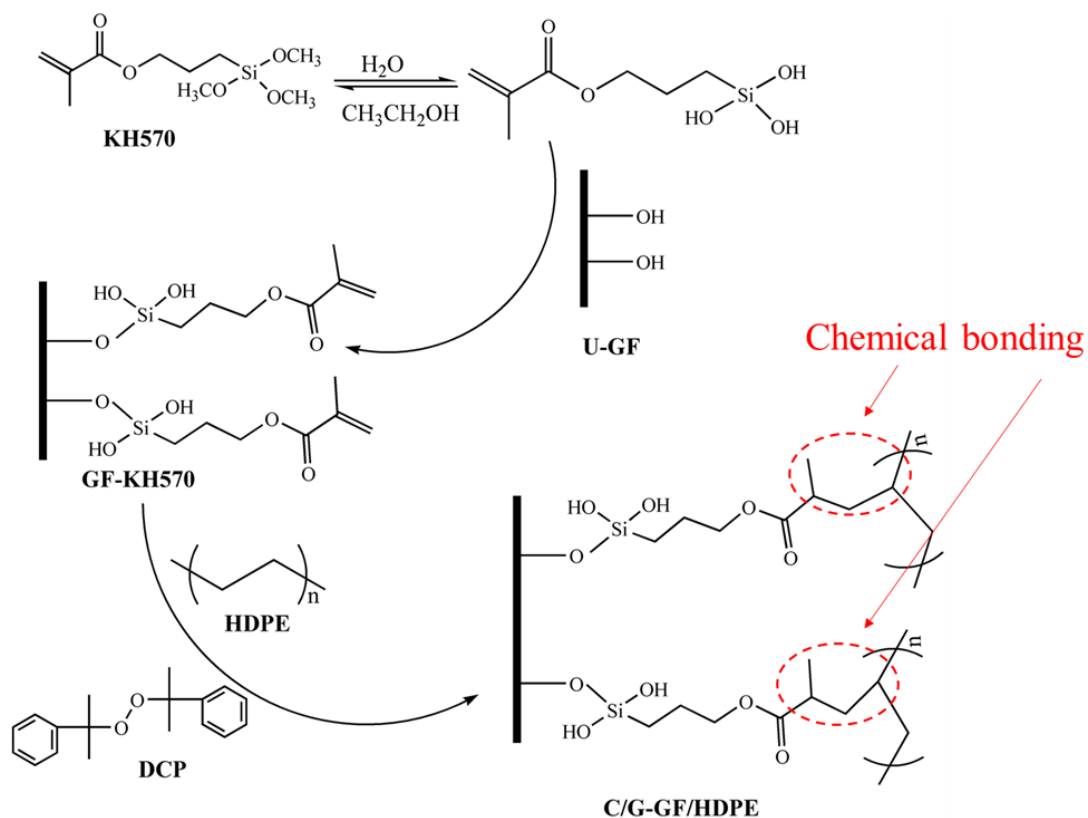
参考文献:

- [1] JYOTI S B, DAE S K. Recent development in thermoplastic/wood composites and nanocomposites: A review [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, 33 (11): 3035-3049.
- [2] KUMAR V, TYAGI L, SINHA S. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 110: 9-15.
- [3] 李志君, 魏福庆, 陈保安, 等. 橡胶木粉填充 LLDPE 复合材料的结构和力学性能 [J]. 功能高分子学报, 2004, 17(3): 487-492.
- [4] TANAKIT C H, WEAWBOON Y, BENJAPHORN P, *et al.* Flame retardancy, antifungal efficacies, and physical-mechanical properties for wood/polymer composites containing zinc borate [J]. Fire and Materials, 2017, 41(6): 675-687.
- [5] HONG H, LIAO H, ZHANG H, *et al.* Significant improvement in performance of recycled polyethylene/wood flour composites by synergistic compatibilization at multi-scale interfaces [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2014, 64: 90-98.
- [6] WINNANDY J E, MORRELL J J. Improving the utility, performance, and durability of wood- and bio-based composites [J]. Annals of Forest Science, 2017, 74(1): 25-36.
- [7] ILCE A C, BUDAKCI M, OZDEMIR S, *et al.* Analysis of Usability in Furniture Production of Wood Plastic Laminated Board [J]. Bioresources, 2015, 10(3): 4300-4314.
- [8] BALATINECZ J, SAIN M. Cars made of wood and hemp fibres? Why not? [J]. Forestry Chronicle, 2007, 83(4): 482-484.
- [9] ROHAN M B, ALLAN C M, WARNA K, *et al.* An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites [J]. Materials & Design, 2014, 62: 98-112.

- [10] 范嘉明,徐世爱. 改性氧化铝对 HDPE/PA6 复合材料导热性能的影响 [J]. 功能高分子学报, 2018, 31(2): 153-159.
- [11] 张桂新, 崔中纹, 任佳伟, 等. 超临界 CO₂ 对发泡 PP/木粉复合材料性能的影响 [J]. 华东理工大学学报, 2016, 42(1): 58-64.
- [12] ZHU L Z, CAO J Z, WANG Y, *et al.* Effect of MAPP on Interfacial Compatibility of Wood Flour/Polypropylene Composite Evaluated With Dielectric Approach [J]. Polymer Composites, 2014, 35(3): 489-494.
- [13] LOU C W, LIN C W, HUANG C H, *et al.* Compatibility and mechanical properties of maleicanhydride modified the wood plastic composite [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32(11): 802-810.
- [14] DAI B J, WANG Q, YAN W, *et al.* Synergistic compatibilization and reinforcement of HDPE/wood flour composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133 (8): 42958-42967.
- [15] YASEMIN A, MEHMET D, ERRDAL B. Comparative Study of Maleated and Glycidyl Methacrylate Functionalized Terpolymers as Compatibilizers for Low-Density Polyethylene–Wood Flour Composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 127 (2): 1010-1016.
- [16] 周晓东, 熊若华, 戴干策. 嵌段共聚偶联剂对玻璃纤维增强聚丙烯界面粘结的影响 [J]. 功能高分子学报, 2004, 17(3): 417-420.
- [17] 张杨, 沈春银, 李宾, 等. 玻纤分布层合热塑性复合材料的力学性能及其失效行为 [J]. 华东理工大学学报, 2017, 43(4): 465-473
- [18] CORNISH K, ROBERTS J E, SCERIF G. Mechanical characterization of E-chopped strand glass fiber reinforced Wood/PVC composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2007, 20 (6): 535-550.
- [19] Al-MAADEED M A, SHABANA Y M, KHANAM P N. Processing, characterization and modeling of recycled polypropylene/glass fibre/wood flour composites [J]. Materials & Design, 2014, 58: 374-380.
- [20] SUPREEDA J, APISIT K, TEERASAK M, *et al.* Effects of wood constituents and content, and glass fiber reinforcement on wear behavior of wood/PVC composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(7): 2721-2729.
- [21] 赵伟安, 侯万国, 孙德军, 等. 聚苯乙烯/硅烷偶联剂修饰蒙脱土纳米复合材料的制备与表征 [J]. 功能高分子学报, 2003, 16(1): 81-84.
- [22] LIU M, CHEN J S, HU X K, *et al.* Enhanced properties of fiberglass-reinforced photocurable resin pile by introducing different fiberglass surface treatments and their biological evolution [J]. RSC Advances, 2015, 5(85): 69690-69697.
- [23] 张娟, 宁莉萍, 杨红军, 等. 玻璃纤维含量对竹粉/高密度聚乙烯复合材料性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 477-485.
- [24] DENG S Q, TANG Y H. Increasing load-bearing capacity of wood-plastic composites by sandwiching natural and

glass fabrics [J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2010, 29(3): 3133-3148.

图文摘要



KH570 was used to modify GF (GF-KH570). Moreover, dicumyl peroxide (DCP) was used to initiate the grafting reaction between the double bonds in KH570 and HDPE.