

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170509.004

表面改性纳米 SiO₂ 增强木质纤维/聚氯乙烯 复合材料性能

谭林朋¹, 袁光明^{*1, 2}, 罗卫华^{1, 2}, 胡云楚^{1, 2}, 牟明明¹, 陈世尧¹

(1. 中南林业科技大学 材料科学与工程学院, 长沙 410004; 2. “木竹资源高效利用”湖南省高校 2011 协同创新中心, 长沙 410004)

摘要: SiO₂ 粒子经偶联剂 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)表面改性后, 与木质纤维、聚氯乙烯(PVC)及其它助剂通过熔融混炼制备改性 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料, 用 FTIR、SEM 和同步热分析仪(STA)对 SiO₂ 粒子和 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的结构与性能进行测试与表征。FTIR 分析表明, SiO₂ 粒子表面接枝了 KH550 的特征官能团, KH550 成功地接枝到 SiO₂ 粒子表面; SEM 分析表明, 改性纳米 SiO₂ 粒子能在木质纤维/PVC 复合材料中均匀分散, 其粒径在 100 nm 左右; 添加改性的 SiO₂ 粒子后, 木质纤维和 PVC 结合更加紧密, 孔洞间隙减少。纳米 SiO₂ 质量分别占木质纤维质量的 10%、8% 和 10% 时, SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的弹性模量、拉伸强度、冲击强度分别达到最优值 4.66 GPa、31.12 MPa 和 4.11 kJ/m², 与未添加 SiO₂ 的复合材料相比分别提高了 50.29%、28.91% 和 16.65%。

关键词: 表面改性; 纳米 SiO₂; 力学性能; 复合材料; 结构表征

中图分类号: S781.2, TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)03-0501-07

Properties of wood fiber/polyvinyl chloride composites reinforced by surface modified nano SiO₂

TAN Linpeng¹, YUAN Guangming^{*1, 2}, LUO Weihua^{1, 2}, HU Yunchu^{1, 2},
MOU Mingming¹, CHEN Shiyao¹

(1. College of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China; 2. Hu'nan Collaborative Innovation Center for Effective Utilizing of Wood & Bamboo Resource, Changsha 410004, China)

Abstract: The surface modification of nano SiO₂ particles with γ -aminopropyl triethoxysilane(KH550) was carried out. The SiO₂-wood fiber/polyvinyl chloride(PVC) composites were prepared by melt-mixing with wood fiber, PVC and other additives. The structure and properties of SiO₂ particles and SiO₂-wood fiber/PVC composites were tested and characterized by FTIR, SEM and STA. FTIR analysis shows that the surface of SiO₂ particles bond KH550 characteristic organic functional group, KH550 successfully grafts to the surface of SiO₂ particles. SEM analysis shows that the modified nano-SiO₂ particles can be dispersed uniformly in the SiO₂-wood fiber/PVC composites with a particle size of about 100 nm; After adding the modified SiO₂ particles, the combination of wood fiber and PVC is more tight, the hole gap is reduced. When the mass ratio of nano SiO₂ to wood flour mass is 10%, 8%, 10%, the mechanical property of the SiO₂-wood fiber/PVC composites will reach the optimal state; elastic modulus, tensile-strength and impact-strength are 4.66 GPa, 31.12 MPa and 4.11 kJ/m², increased by 50.29%, 28.91% and 16.65%, respectively.

Keywords: surface modification; nano-SiO₂; mechanical property; composites; structure characterization

收稿日期: 2017-03-07; 录用日期: 2017-04-17; 网络出版时间: 2017-05-09 10:28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170509.1028.008.html>

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项资助项目(201504503); 国家自然科学基金(31770606); 湖南省科技重大专项(2017NK1010)

通讯作者: 袁光明, 博士, 教授, 研究方向为生物质复合材料 E-mail: ygm1237@163.com

引用格式: 谭林朋, 袁光明, 罗卫华, 等. 表面改性纳米 SiO₂ 增强木质纤维/聚氯乙烯复合材料性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 501-507.

TAN Linpeng, YUAN Guangming, LUO Weihua, et al. Properties of wood fiber/polyvinyl chloride composites reinforced by surface modified nano-SiO₂[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 501-507 (in Chinese).

近年来,石油资源短缺以及生态环境问题日益严峻,因此开发新型绿色环保材料显得尤为重要^[1]。木质纤维/聚氯乙烯(PVC)复合材料由具有高强度、高弹性的木质纤维等植物纤维和具有高韧性、耐疲劳性的 PVC、聚乙烯、聚丙烯等热塑性树脂复合制备而成,植物纤维与树脂可在材料性能上取强补短;木质纤维/PVC 复合材料性能优良,成本低廉^[2-3],具有耐腐蚀、耐虫蛀、耐候性、尺寸稳定、易于加工、可循环利用、易于自然降解等优点,作为一种绿色环保材料,广泛应用于建筑装饰材料、汽车工业等领域^[4-5],具有很好的发展前景。

图 1 为木质纤维素的化学结构。其表面具有大量活性羟基,因此纤维素与 PVC 树脂的界面结合弱,降低了木质纤维/PVC 复合材料的力学性能。增强了木质纤维/PVC 复合材料的力学性能,有利于拓展其在工程领域的应用,增强植物纤维与树脂的界面相容性成为技术关键。

纳米粒子可提高木质纤维/PVC 复合材料的性能,如在复合材料中加入少量纳米 SiO₂,能大幅度提高复合材料的力学性能^[6-7]。图 2 为 SiO₂ 的化学结构示意图,纳米 SiO₂ 容易吸附空气中的水分子,使 SiO₂ 表面带有羟基,导致 SiO₂ 具有很强的亲水疏油性,很难在木质纤维/PVC 复合材料中分散开。解决纳米 SiO₂ 比表面大、表面活性强而产生的颗粒容易团聚问题,有利于充分发挥 SiO₂ 的优势^[8-11]。

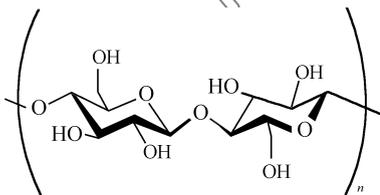


图 1 木质纤维素的分子结构

Fig. 1 Molecular structure of cellulose

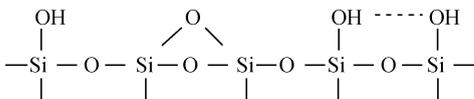


图 2 SiO₂ 的化学结构

Fig. 2 Chemical structure of SiO₂

1 实验材料及方法

1.1 原材料

杨木质纤维: 250 μm, 浙江临安银厚木粉厂; 纳米 SiO₂: 标称粒径 20 nm±5 nm, 南京海泰纳米

材料有限公司; PVC-SG5: 聚合度为 107~118, 新疆天业集团有限公司; γ-氨丙基三乙氧基硅烷(KH550): 纯度≥98%, 广州亿璋盛化工有限公司; 无水乙醇: 衡阳凯信化工试剂股份有限公司, 分析纯; NaOH: 湖南汇虹试剂有限公司。

1.2 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料制备及表征

1.2.1 纳米 SiO₂ 分散改性

将适量纳米 SiO₂ 放入 100℃ 恒温干燥箱中干燥 12 h, 然后溶于一定量的无水乙醇, 形成悬浮液, 在高速剪切分散仪(FA25 型, 上海弗鲁克机电)中高速剪切分散 30 min; 配置 KH550 与无水乙醇及去离子水的混合溶液, 其中 KH550 质量分数为纳米 SiO₂ 的 3%, 混合均匀后加 NaOH 使其 pH=9, 后静置 30 min; 将 KH550 水解后的溶液与含纳米 SiO₂ 的悬浮液按照体积比 1:1 混合, 在 80℃ 恒温水浴锅中高速剪切 30 min, 用超声波清洗仪(SB-5200DP, 宁波新芝生物科技)超声分散 30 min 后得到改性纳米 SiO₂ 溶液。经抽滤、干燥、研磨, 得到表面接枝改性的纳米 SiO₂ 粒子, 用于表征官能团的变化。

1.2.2 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的制备

木质纤维与 PVC 等热塑性树脂界面相容性差, 用 KH550 对木质纤维进行预处理可改善其与树脂的相容性, 增强 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的力学强度。用质量分数为 8% 的 NaOH 溶液预处理木质纤维 36 h, 将改性纳米 SiO₂ 溶液与预处理后的木质纤维充分混合, 然后干燥至绝干, 其中纳米 SiO₂ 质量依次为木质纤维质量的 0%、2%、4%、6%、8%、10%、12%; 将干燥后的含改性纳米 SiO₂ 的木质纤维和 PVC 在双辊开炼机(XK160, 青岛盛华隆)上混炼、挤捏, 在 160℃、10 MPa 条件下在热压机(Y33-50, 萍乡九州精密压机有限公司)上热压成板。

1.2.3 力学强度测试与结构表征

在万能力学实验机(MWD-50, 济南试金集团有限公司)上测试试件的拉伸强度, 拉伸样条切割成 80 mm×10 mm×4 mm。采用简支梁冲击试验机测试试样的无缺口冲击强度。试件拉伸断面镀金, 通过 SEM(Quanta450, 美国 FEI 公司)观察木质纤维/PVC 复合材料中纳米 SiO₂ 粒子的形貌与分布、木质纤维形态及木质纤维/PVC 复合材料的界面情况。为确定 KH550 是否成功接枝到 SiO₂ 表面, 对改性前后的纳米 SiO₂ 进行 FTIR 分析, 采用

KBr 压片法, 用红外光谱仪 (IRAffinity-1, 日本 SHIMADU) 对改性前后纳米 SiO₂ 进行表征, 分析纳米粒子表面官能团的变化, 波数范围: 400 ~ 4 000 cm⁻¹。用同步热分析仪 (STA 449C, 德国 NETZSCH) 分析 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的热力学性能。

2 结果与讨论

2.1 纳米 SiO₂ 结构

图 3 为 SiO₂ 改性前后的红外光谱图。3 431 cm⁻¹ 与 1 645 cm⁻¹ 处附近的峰分别是—OH 的伸缩振动峰与弯曲振动峰, 表明在 SiO₂ 表面有游离的羟基。改性后, 3 431 cm⁻¹ 处—OH 伸缩振动吸收峰的强度明显变小, 说明纳米 SiO₂ 改性后表面的部分羟基与 KH550 反应而消失。改性纳米粒子在 1 739 cm⁻¹ 处的峰为 C=O 基团的特征吸收峰, 1 531 cm⁻¹ 处为伯胺类—NH 键弯曲振动峰, 而 C=O 基团来自 KH550, 以上表明 KH550 已经成

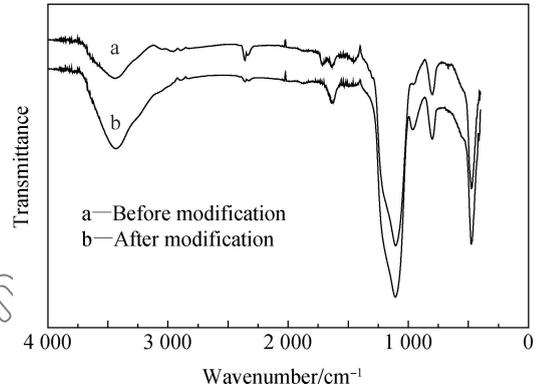


图 3 表面改性前后纳米 SiO₂ 红外光谱
Fig. 3 FTIR spectrum of nano SiO₂ before and after surface modification

功接枝到纳米粒子表面。

2.2 SiO₂-木质纤维/PVC 微观结构

图 4 为 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料断面的微观结构形貌。从图 4(a) 可看出, 试件断面非常不光滑, 具有较多孔洞和间隙, 这些孔洞是由于 PVC

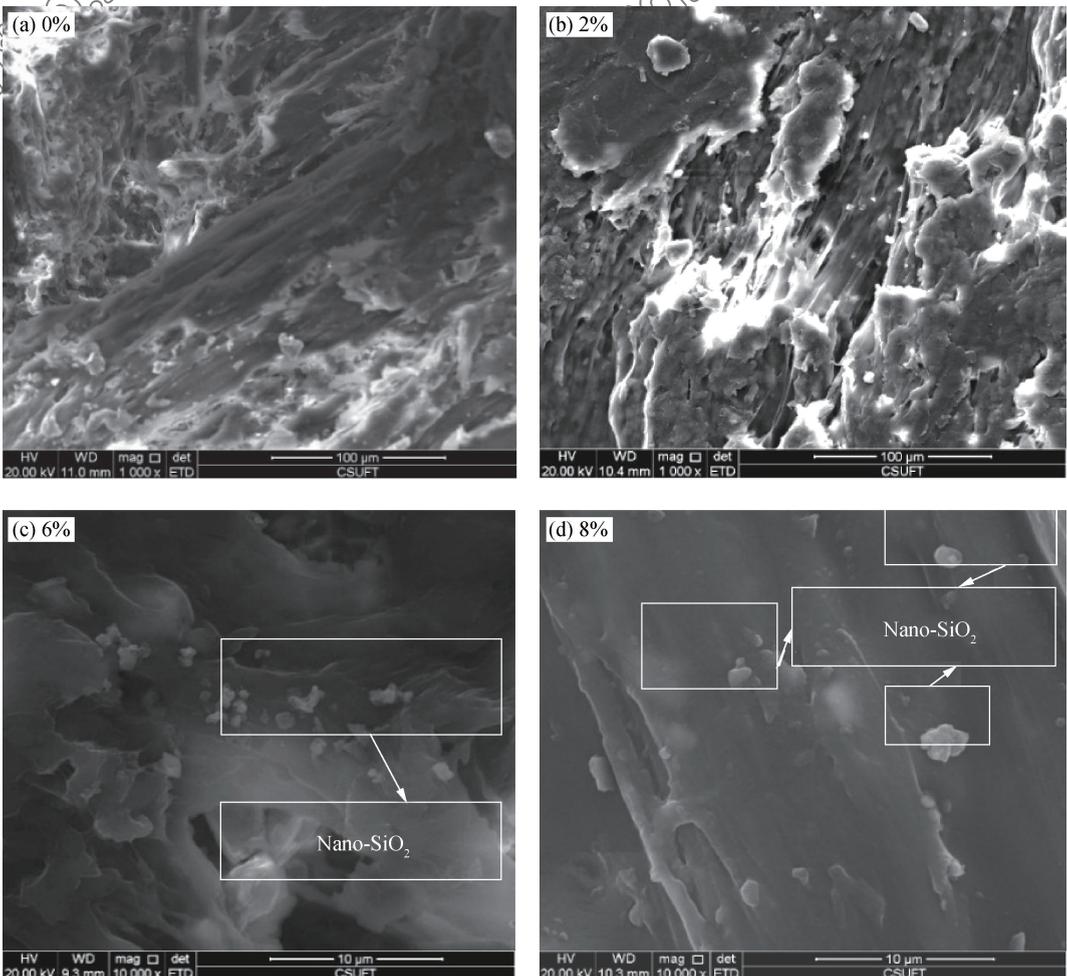


图 4 不同 SiO₂ 含量(SiO₂ 与木质纤维质量比)的 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of SiO₂-wood fiber/PVC composites with different mass ratios of SiO₂ to wood fiber

和木质纤维之间界面相容性较差、结合不稳固,木质纤维从基体拉出时留下的,对比图 4(b)可见,当加入少量纳米粒子时,孔洞变少,说明粒子填充到了孔洞间隙中。由图 4(c)和图 4(d)可知,改性后的纳米 SiO₂ 粒径在 100 nm 左右,纳米粒子很好地填充到了木质纤维中,没有明显的孔洞,说明 SiO₂ 经过分散改性后, SiO₂ 在 PVC 与木质纤维之间充当了桥梁作用,增加了 PVC 与木质纤维之间的界面相容性,二者结合力提高,从而使木质纤维很难从基体中拉出及 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的耐冲击性能得到提高。同时,由于纳米粒子的添加, SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的间隙减少。还可以看到,纳米 SiO₂ 与木质纤维质量比为 6% 时, SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料试件的部分区域还是有孔洞,且 SiO₂ 粒子分散区域有限而导致部分区域并没有 SiO₂ 粒子的分布;纳米 SiO₂ 与木质纤维质量比为 8% 时,粒子分布更加均匀。虽然随着 SiO₂ 量的增加,木质纤维与 PVC 的结合更加紧密、孔洞间隙减少,粒子分布更加均匀,但当纳米 SiO₂ 粒子占木质纤维比例超过 10% 时,粒子开始发生一定程度的团聚,而使其纳米特性不能充分发挥出来。

2.3 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料力学性能

图 5 为 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的弹性模量与纳米 SiO₂ 含量的关系。可以看出,添加了纳米 SiO₂ 的木质纤维/PVC 复合材料比未添加 SiO₂ 的木质纤维/PVC 复合材料的弹性模量都有所增加。纳米 SiO₂ 质量为木质纤维质量的 0% 到 10% 时,随着含量的增加, SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料弹性模量变大,当质量比为 10% 时,达

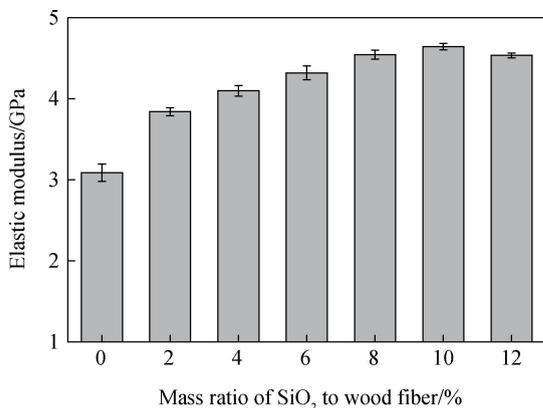


图 5 纳米 SiO₂ 的质量比对 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料弹性模量的影响

Fig. 5 Influence of mass ratio of nano-SiO₂ on elastic modulus of SiO₂-wood fiber/PVC composites

到最高值 4.66 GPa,相对于未添加纳米粒子的 3.10 GPa 提高了 50.29%。纳米 SiO₂ 质量为木质纤维质量的 2%~10% 时, SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的弹性模量相对于未添加纳米 SiO₂ 的复合材料逐渐增加。但并不是纳米 SiO₂ 质量比越高,弹性模量越大,当纳米 SiO₂ 质量比为 12% 时,反而有一定程度的降低。

这是由于分散改性后纳米粒子比表面积大,化学反应活性强,粒子表面带有的基团能够与纤维素形成化学结合。同时,经过 KH550 改性的粒子表面带有双反应官能团,与 PVC 具有较好的亲和力,通过 SiO₂ 的桥梁作用,增加了纤维素和 PVC 之间的相容性,形成了较好的界面结合,把相容性很差的纤维素和 PVC 间接的连结起来。而当 SiO₂ 粒子的质量比超过 10% 时,纳米粒子开始团聚,比表面积大幅度降低,反应活性下降,不能均匀的分布在复合材料中,从而降低了 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的弹性模量。

图 6 为 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的拉伸强度与纳米 SiO₂ 含量的关系。可知,添加纳米 SiO₂ 粒子的 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的拉伸强度比未添加的复合材料高。纳米 SiO₂ 质量为木质纤维质量的 2%~8% 时, SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料拉伸强度依次增大,质量比为 8% 时,提高幅度最大,为 31.12 MPa,提高了 28.91%,之后拉伸强度有一定程度的下降。这是由于粒子出现团聚现象,粒子的纳米特性不能充分发挥出来。

图 7 为 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的冲击强度与纳米 SiO₂ 质量比的关系。纳米 SiO₂ 质量分

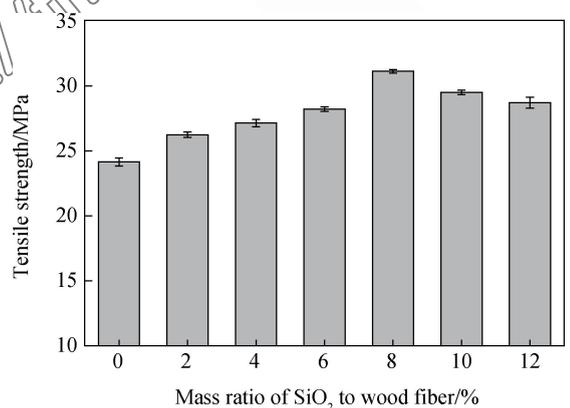


图 6 纳米 SiO₂ 的质量比对 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料拉伸强度的影响

Fig. 6 Influence of mass ratio of nano-SiO₂ on tensile strength of SiO₂-wood fiber/PVC composites

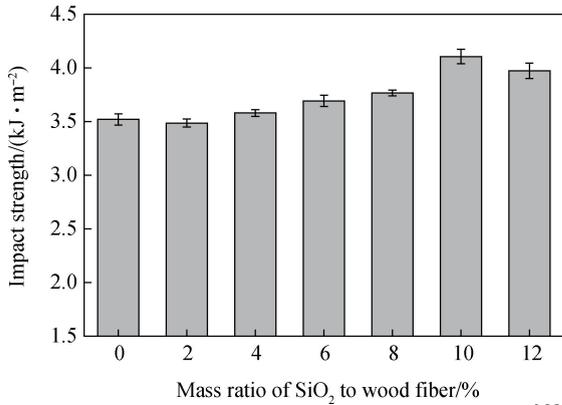


图7 纳米 SiO₂ 的质量比对 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料冲击强度的影响

Fig.7 Influence of mass ratio of nano-SiO₂ on impact strength of SiO₂-wood fiber/PVC composites

别为木质纤维质量的 0% 和 10% 时, 木质纤维/PVC 复合材料的冲击强度分别为 3.52 kJ/m² 和 4.11 kJ/m²。质量比为 10% 时提高幅度最大, 提高了 16.65%。由于纳米 SiO₂ 的桥梁作用, 木质纤维/PVC 的界面相容性提高, 界面粘结力变大, 当材料受到冲击时, 木质纤维从基体中被拔出时阻力增大, 在拔出过程中能够吸收更多的冲击能量, 这些因素在宏观上表现为试件的冲击强度增大。

2.4 SO₂-木质纤维/PVC 复合材料耐热性能

图 8 为不同含量 SiO₂ (SiO₂ 与木质纤维质量比) 的 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的热重曲线。可以看出, SiO₂ 对 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的热稳定性没有明显影响。在 205.5~346.5℃ 时, 复合材料发生第一阶段降解, 木质纤维/PVC 复合材料在此阶段的 TG 曲线几乎重合; 在 405.3~548.6℃ 时复合材料发生第二阶段降解。SiO₂ 质量为木质纤维质量的 0% 时, 复合材料残炭量最少,

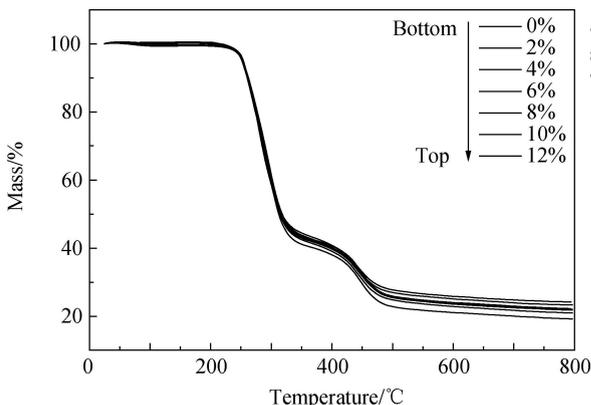


图8 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的 TG 曲线

Fig.8 TG curves of SiO₂-wood fiber/PVC composites

为 19.21%。

图 9 为木质纤维/PVC 复合材料及其组分 PVC、木质纤维的 TG 和 DTG 曲线。表 1 为 SO₂-木质纤维/PVC 热解过程中两个阶段的 TG 和 DTG 结果, 包含热解过程的主要参数, 几种样品具有不同的热解方式。干燥至绝干的木质纤维热降解过程中没有游离水的损失, 因此其 TG 曲线只存在一个阶梯, 木质纤维在 361.0℃ 时分解速率最大, 峰值速率为 10.48%·min⁻¹, 木质纤维最终损失 65.36%。在 260~294℃ 时, PVC 急速降解, 这一过程中 PVC 脱 HCl 并伴随着炭骨架的断裂, 生成的 HCl 对木质纤维具有酸催化作用, 加速了木质纤维的分解, 导致木质纤维/PVC 复合材料的分解温度低于纯木质纤维的分解温度, 说明热解过程中 PVC 与木质纤维存在相互作用。PVC 的 DTG 曲线在 405.3~548.6℃ 出现第二个峰, 这一阶段生成少量 HCl, 发生交联、芳香化及同分异构化, 这一阶段木质纤维/PVC 复合材料的分解速率低于 PVC, 说明 PVC 在复杂体系木质纤维/PVC 复合材料中, 交联、芳香化及同分异构化等过程得到抑制。

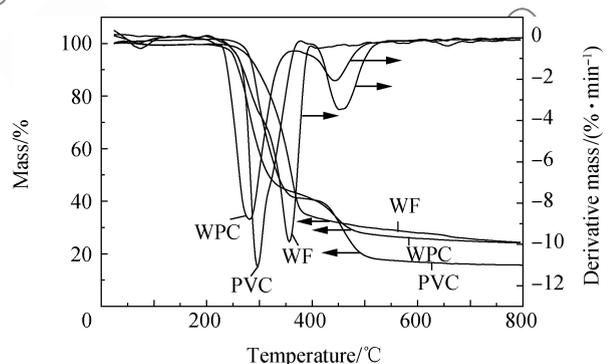


图9 木质纤维、PVC 和 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的 TG 和 DTG 曲线

Fig.9 TG and DTG curves of wood fiber, PVC and SiO₂-wood fiber/PVC composites

2.5 改性 SiO₂ 粒子与木质纤维/PVC 结合机制

图 10 为 KH550 对 SiO₂ 进行表面改性的示意图。SiO₂ 粒子表面有大量活性羟基, 羟基之间产生的范德华力和氢键使粒子处于不稳定的热力学状态, 容易发生团聚, 使纳米粒子的纳米特性不能充分发挥。此外, 粒子的表面羟基大量存在, 使 SiO₂ 粒子具有亲水疏油性, 不能在有机介质中很好的分散, 对木质纤维/PVC 复合材料的性能有较大影响。

碱性条件下, SiO₂ 进行原位改性, 纳米 SiO₂

表 1 SiO₂-木质纤维/PVC 热解过程中两个阶段的 TG 和 DTG 结果

Table 1 TG and DTG results of pyrolysis process of SiO₂-wood fiber/PVC in two stages

Stage	Sample	Range of temperature/°C	T _{max} /°C	Mass/%	Derivative mass/(%·min ⁻¹)
First stage	Wood fiber	201.0-393.6	361.0	65.36	10.48
	PVC	220.1-370.8	294.5	58.71	11.94
	SiO ₂ -wood fiber/PVC	205.5-346.5	279.2	54.78	9.63
Second stage	Wood fiber	—	—	—	—
	PVC	405.3-548.6	457.1	22.85	3.55
	SiO ₂ -wood fiber/PVC	371.2-485.0	441.2	14.56	2.11

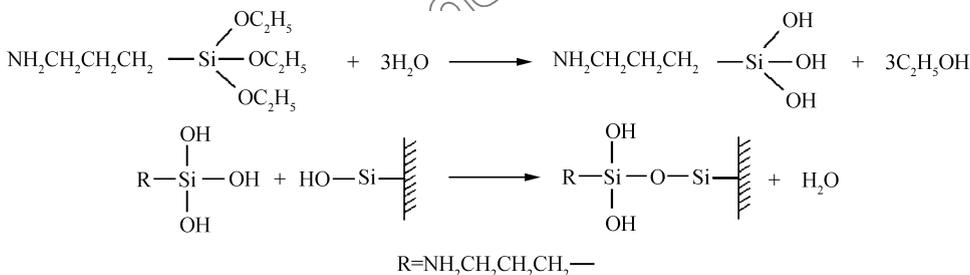


图 10 KH550 表面改性纳米 SiO₂ 的示意图

Fig. 10 Schematic illustration of the surface modification of SiO₂ with KH550

粒子的形成和 KH550 改性同步，能够获得较高密度的功能化基团。改性后，纤维素上的羟基可与硅醇基发生反应，改性纳米 SiO₂ 与纤维素形成相互交联的陶瓷化结构，通过偶联剂的作用形成了 Si—O—Si 键与 Si—O—C 键，相容性很差的纤维素和无机粒子 SiO₂ 的界面结合力得到提高，因此无机 SiO₂ 粒子能够更均匀地分散在木质纤维/PVC 基体中。木质纤维表面能高，具有很强的极性，而 PVC 有较低的表面能，极性低，因此二者具有较差的界面结合力，这不利于材料的力学性能。

经过改性的 SiO₂ 粒子既能够与木质纤维上的羟基、酚羟基形成氢键，也能与 PVC 分子链形成较强的分子间作用力，通过 SiO₂ 粒子的桥梁作用，相容性很差的木质纤维与 PVC 的表面结合力得到增强，从而增强复合材料的力学性能^[12-15]。

3 结论

(1) SiO₂ 粒子经分散改性后，红外光谱出现了 γ-氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)的特征峰，表明 KH550 已成功地接枝到 SiO₂ 表面。

(2) SiO₂ 粒子经分散改性后，未发生明显团聚，在 SiO₂-木质纤维/聚氯乙烯(PVC)复合材料基体中分散均匀，其平均粒径在 100 nm 左右。木质纤维和 PVC 的界面结合更加紧密。

(3) SiO₂ 粒子的加入对 SiO₂-木质纤维/PVC

复合材料热力学性能影响不大。PVC 裂解生成的 HCl 对木质纤维有酸催化作用，导致 SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料分解温度降低。

(4) 改性后的纳米 SiO₂ 与木质纤维质量比分别为 10%、8% 和 10% 时，SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料弹性模量、拉伸强度和冲击强度达到最大，分别为 4.66 GPa、31.12 MPa 和 4.11 kJ/m²。当继续加大含量时，由于纳米粒子开始发生团聚，SiO₂-木质纤维/PVC 复合材料的力学性能有所下降。

参考文献:

[1] 徐开蒙, 李凯夫, 曹馨蕾, 等. PVC 基木塑复合材料界面结合改性研究进展[J]. 塑料工业, 2014, 42(2): 9-14.
 XU K M, LI K F, CAO X L, et al. Research progress of interfacial bonding modification of PVC-based wood plastic composites[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(2): 9-14 (in Chinese).

[2] 伍波, 张求慧, 王永波. 木塑复合材料界面化学改性研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(5): 28-30.
 WU B, ZHANG Q H, WANG Y B. Research situation of interface chemical modification of wood plastics composites[J]. New Chemical Materials, 2010, 38(5): 28-30 (in Chinese).

[3] SAHEB D N, JOG J P. Natural fiber polymer composites: A review[J]. Advances in Polymer Technology, 1999, 18(4): 351-363.

- [4] 付文,王丽,刘安华. 木塑复合材料改性研究进展[J]. 高分子通报, 2010(3): 61-65.
FU W, WANG L, LIU A H. Modification research progress of wood-plastic composites [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2010(3): 61-65 (in Chinese).
- [5] 王磊,曹金珍. 偶联剂在木塑复合材料中的应用及研究[J]. 林产工业, 2008, 35(6): 9-14.
WANG L, CAO J Z. Application and research of the coupling agents for wood-plastic composite[J]. China Forest Products Industry, 2008, 35(6): 9-14 (in Chinese).
- [6] 单薇,廖明义. 纳米 SiO₂ 的表面处理及其在聚合物基纳米复合材料中的应用进展[J]. 高分子通报, 2006(3): 1-9.
SHAN W, LIAO M Y. Modification of nanosilica particles and research advances of polymer(silica nanocomposites)[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(3): 1-9 (in Chinese).
- [7] 李金玲,王宝辉,李莉,等. 纳米二氧化硅表面改性研究[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(2): 18-21.
LI J L, WANG B H, LI L, et al. Study on the surface modification of nano-SiO₂ powder[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(2): 18-21 (in Chinese).
- [8] 张云海,翟兰兰,王彦,等. 硅烷偶联剂 KH-570 表面改性 SiO₂ [J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(5): 752-756.
ZHANG Y H, ZHAI L L, WANG Y, et al. Surface modification of nano-SiO₂ by silane coupling agent 3-(methacryloyloxy)propyltrimethoxysilane[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2012, 30(5): 752-756 (in Chinese).
- [9] TOLNAI G Y, CSEMPESZA F, KABALL M, et al. Preparation and characterization of surface-modified silica-nanoparticles[J]. Langmuir, 2001, 17(9): 2683-2687.
- [10] JESIONOWSKI T, KRYSZTAKIEWICZ A. Influence of silane coupling agents on surface properties of precipitated silicas[J]. Applied Surface Science, 2001, 172(1-2): 18-32.
- [11] 苏瑞彩,李文芳,彭继华,等. 硅烷偶联剂 KH-570 对纳米 SiO₂ 的表面改性及其分散稳定性[J]. 化工进展, 2009, 28(9): 1596-1599.
SU R C, LI W F, PENG J H, et al. Surface modification of nano-sized SiO₂ with silane coupling agent and its dispersion [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(9): 1596-1599 (in Chinese).
- [12] 罗卫华,王正良,袁彩霞,等. 反应增容 HDPE 基木塑复合材料及增容机制[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 125-132.
LUO W H, WANG Z L, YUAN C X, et al. Reactive compatibilization of wood fibre/HDPE composites and its mechanism[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(1): 125-132 (in Chinese).
- [13] 袁光明,刘元,吴义强,等. 杉木-纳米 SiO₂ 复合材料结构表征及复合机理研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(9): 59-62.
YUAN G M, LIU Y, WU Y Q, et al. Study on structure characterization and combining mechanism of Chinese fir/nano-SiO₂ composite[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2009, 36(9): 59-62 (in Chinese).
- [14] 张洪文,张杨,姜彦,等. 大分子偶联剂的合成及其对 SiO₂/三元乙丙橡胶复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(4): 969-976.
ZHANG H W, ZHANG Y, JIANG Y, et al. Synthesis of macromolecular coupling agent and its effects on properties of SiO₂/ethylene-propylene-diene monomer composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(4): 969-976 (in Chinese).
- [15] 杨斌,章继峰,梁文彦,等. 玻璃纤维表面纳米 SiO₂ 改性对 GF/PCBT 复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 691-698.
YANG B, ZHANG J F, LIANG W Y, et al. Effects of glass fiber surface modified by nano-SiO₂ on mechanical properties of GF/PCBT composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 691-698 (in Chinese).