

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.07.006

纳米 TiO_2 含量对 PVC/稻壳粉末木塑复合材料性能的影响^{*}

王宣博,陈小丹,陈佳伟,刘玉涛,姚雪霞

(南京农业大学工学院,江苏省智能化农业装备重点实验室,南京 210031)

摘要:将纳米 TiO_2 、稻壳粉、聚氯乙烯(PVC)和稳定剂等按一定比例混合,用挤出成型法制备 PVC/稻壳粉末木塑复合材料。考察纳米 TiO_2 添加量对 PVC/稻壳粉末木塑复合材料性能的影响。实验结果表明,随着纳米 TiO_2 含量的增加,木塑复合材料的力学性能、防水性能和热稳定性呈现先增加后降低的趋势,但木塑复合材料的表面颜色却随着纳米 TiO_2 含量的增加而逐渐变浅。当纳米 TiO_2 含量为 1.00 份时,木塑复合材料的综合性能最好,与未添加纳米 TiO_2 的木塑复合材料相比,其拉伸强度、冲击强度和弯曲强度分别提高了 40.6%、62.2% 和 19.7%,8 d 的吸水率从 2.5% 降低为 1.6%,表面接触角从 78.5° 增加到 82.1° ,800℃时的残炭率从 21.1% 提高到 29.5%。

关键词: 纳米 TiO_2 ; 稻壳; 聚氯乙烯; 力学性能; 吸水性能; 热性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)07-0031-06

Effects of Nano TiO_2 Content on Properties of PVC/Rice Husk Powder Wood-Plastic Composites

Wang Xuanbo, Chen Xiaodan, Chen Jiawei, Liu Yutao, Yao Xuexia

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract : Nano TiO_2 , rice husk powder, poly(vinyl chloride) (PVC) and stabilizer and so on were blended according to certain proportion to prepare PVC/rice husk powder wood plastic composites with the extrusion. The effects of nano TiO_2 content on the properties of the wood plastic composites were examined. The experimental results show that the mechanical properties, waterproof performance and thermal stability of the wood plastic composites first increase then decrease, but surface colors become shallow gradually along with nano TiO_2 content increasing. The wood plastic composite which the content of nano TiO_2 is 1.00 phr has best comprehensive properties, compared with non-adding nano TiO_2 wood plastic composite, the tensile strength, impact strength, and bending strength are increased by 40.6%, 62.2% and 19.7% respectively, the water absorption rate for 8 days is reduced from 2.5% to 1.6%, the contact angle is increased from 78.5° to 82.1° , and the content of remaining carbon at 800℃ is increased from 21.1% to 29.5%. The surface color of the wood plastic composites become shallow gradually along with nano TiO_2 content increasing.

Keywords : nano TiO_2 ; rice husk; poly(vinyl chloride); mechanical property; water absorption property; thermal property

木塑复合材料主要由生物质纤维和塑料两种基材通过模压或者挤出等成型方式制备而成。由于木塑复合材料同时具备了木材和塑料的双重特性,其显著的优点导致其发展异常迅速^[1]。在各种木塑复合材料中,聚氯乙烯(PVC)基木塑复合材料发展尤其迅速^[2]。但是由于木塑复合材料由亲水性的植物纤维(如:木粉、竹粉、稻壳粉和稻麦秸秆粉等)和疏水性的高分子材料构成,导致两者之间的界面相容性较差,因此很多文献都对如何改善植物纤维和高分子材料之间的界面相容性进行了研究^[3]。此外,相比于其它木塑复合材料,PVC基木塑复合材料的热稳定性较差,在较高的温度下,PVC容易分解出HCl等有毒气体。因此改善PVC基木塑复合材料的界面相容性和热稳定性对于木塑复合材料的

研究具有非常重要的意义^[4-5]。

纳米微粒一般具备尺寸小、比表面积大和热稳定性好等优点。通过在一些材料中添加无机纳米粒子往往可以获得优于普通材料的优异性能。在各种纳米粒子中,纳米 TiO_2 由于其化学性质非常稳定、无毒、抗紫外线和抗菌等优点,已被广泛应用于PVC、聚丙烯等高分子材料的增韧、抗老化和抗菌等性能的改善^[6-11]。文献[12-15]报道了纳米无机材料在木塑复合材料中的应用,如,B. K. Deka等^[13]考察了纳米粘土和 TiO_2 的加入量对高密度聚乙烯、

^{*} 国家自然科学基金项目(41301261),江苏省自然科学基金项目(BK20130680),中国博士后基金项目(2015M571765)

联系人:姚雪霞,讲师,主要从事新型复合材料的研究

收稿日期:2016-04-14

低密度聚乙烯、聚丙烯和 PVC 基本塑复合材料性能的影响。当粘土和 TiO_2 的用量分别为 3 份时,木塑复合材料在热稳定性方面有一定的改善,同时,掺入粘土/ TiO_2 纳米粉体后的木塑复合材料在力学性能、抗紫外线和阻燃性能方面也都有所增强,吸水性能和水蒸气的吸收量都有所减少。R. R. Devi 等^[15]研究了改性的纳米填充剂对苯乙烯-丙烯腈基本塑复合材料性能的影响,发现改性纳米填充剂改善了木塑复合材料的力学性能、阻燃性能、抗水性能、抗膨胀效率,并且 TiO_2 的存在使得木塑复合材料具有一定的抗菌活性和抗降解性能。但是对于纳米 TiO_2 在纯 PVC 基本塑复合材料方面的应用未见文献报道。

为了改善 PVC 基本塑复合材料的界面相容性和热稳定性等性能,笔者在 PVC 基本塑复合材料中添加一定量的纳米 TiO_2 ,探讨纳米 TiO_2 的添加量对木塑复合材料力学性能、吸水性能和热稳定性等的影响,为制备性能更加优越的木塑复合材料提供相应的理论基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

稻壳:连云港地区;
无水乙醇:分析纯,天津大茂化工厂;
PVC:SG-5,粒径为 250 μm ,市售;
钙锌复合稳定剂:石家庄东臻化工有限公司;
聚乙烯(PE)蜡:江阴和隆新材料科技有限公司;

硅烷偶联剂:KH-550,南京道宁化工厂;
纳米 TiO_2 :金红石型,粒径为 100 nm,市售。

1.2 主要仪器与设备

多功能粉碎机:800Y 型,金华铂欧五金厂;
电热恒温鼓风干燥箱:9070 型,上海华连医疗器械有限公司;

三维运动混合机:SYH-5 型,南京万申干燥设备有限公司;

电子分析天平:ME204E 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

锥形双螺杆挤出机:RM-200C 型,哈尔滨哈普电气技术有限公司;

微机控制电子万能试验机:CMT6104 型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

简支梁冲击试验机:XJJ-5 型,承德市金建检测仪器有限公司;

接触角测量仪:JC2000D1 型,上海中晨数字技术设备有限公司;

同步热分析仪:STA449F3 型,耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;

分光测色仪:NS800 型,深圳三恩时科技有限公司。

1.3 PVC/稻壳粉复合材料的制备

首先用粉碎机将稻壳加工成粒径 250 μm 的稻壳粉,然后分别添加各种含量的纳米 TiO_2 至稻壳粉中。将偶联剂 KH-550 和乙醇按照体积比 1:5 配成溶液后,均匀喷洒至含有纳米 TiO_2 的稻壳粉上,室温下放置 12 h,然后放入干燥箱中,在 105℃ 烘干 4 h,将预处理过的稻壳粉、PVC、钙锌复合稳定剂和 PE 蜡按表 1 配方称量,放入混合机内搅拌 20 min,然后在 105℃ 时干燥 0.5 h,采用双螺杆挤出机挤出成型(挤出工艺参数见表 2),成型样品尺寸为 20 mm $\times$ 5 mm $\times$ 800 mm。

表 1 PVC/稻壳粉木塑复合材料配方

份	份	份	份	份	份
纳米 TiO_2 含量	PVC	稻壳粉	KH-550	钙锌复合稳定剂	PE 蜡
0.00	50	50	1	4	2.5
0.25	50	50	1	4	2.5
0.50	50	50	1	4	2.5
0.75	50	50	1	4	2.5
1.00	50	50	1	4	2.5
1.25	50	50	1	4	2.5
1.50	50	50	1	4	2.5

表 2 挤出工艺参数

温度/℃				进料转速/(r $\cdot$ min $^{-1}$)
一区	二区	三区	四区	
150	155	160	165	400

1.4 性能测试及表征

(1) 力学性能测试。

拉伸强度按照 GB/T 1040.4-2006 测试,拉伸速率为 2 mm/min;

弯曲强度按照 GB/T 9341-2008 测试,加载速率为 2 mm/min;

冲击强度按照 GB/T 1043.1-2008 测试。

以上测试均在室温条件下进行,实验结果为 6 次实验结果的平均值。

(2) 吸水性能测试。

吸水率按照 GB/T 1934.1-2009 测试。

吸水率按照公式(1)进行计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: t ——样品在水中的浸泡时间,d;

m_t ——浸泡 t d 时样品的质量,g;

m_0 ——试样未浸泡之前的原始质量, g ;

M_t ——样品浸泡 t d 时的吸水率, %。

以上实验重复 6 次,实验结果为 6 次的平均值。

(3) 接触角测试。

采用接触角测量仪测定样品的表面接触角。测量时用微量进样器将蒸馏水滴加在样品表面,每次停留 10 s 后保存液滴图片,用五点拟合法求取每次测量的接触角。在每个样品的不同位置测试 6 次,结果取 6 次的平均值。

(4) 热失重 (TG) 测试。

测定之前,先将样品在 120℃ 干燥 12 h,放入密封袋中待用。采用同步热分析仪进行测定,升温速率为 20℃ / min,利用氩气保护,升温范围为 35 ~ 800℃。

(5) 颜色测试。

根据 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 表色系统^[16] 测试添加和未添加纳米 TiO₂ 时木塑复合材料的颜色变化。在每个样品表面的不同位置测试 6 次,结果取其平均值。颜色变化可用公式 (2) 表示:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

式中: ΔE_{ab}^* ——样品的总色差;

ΔL^* ——样品的明度差,为正值时表示样品变白,为负值时表示样品变黑;

Δa^* ——样品的色度差,为正值时表示样品变红,为负值表示样品变绿;

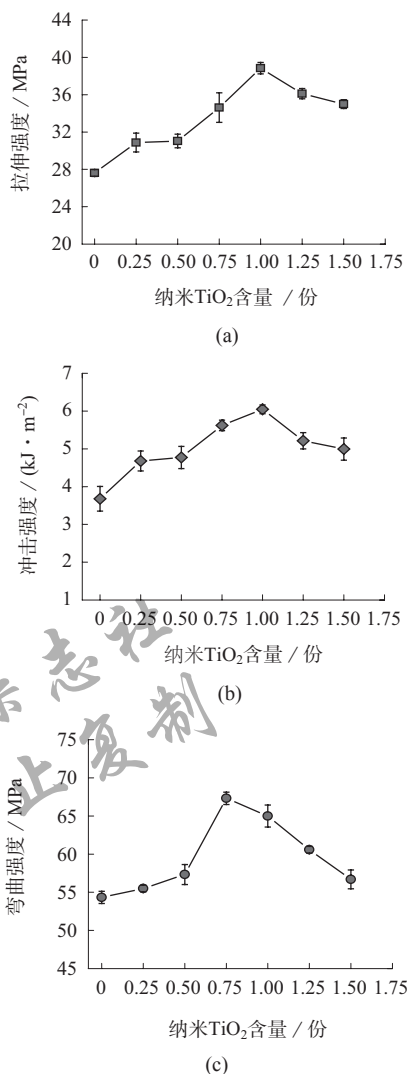
Δb^* ——样品的色度差,为正值时表示样品变黄,为负值时表示样品变蓝。

2 结果与讨论

2.1 对力学性能的影响

图 1 为纳米 TiO₂ 含量对 PVC / 稻壳粉末塑复合材料力学性能的影响。

分析图 1 可知,随着纳米 TiO₂ 含量的增加,木塑复合材料的力学性能均呈现先升高后降低的变化趋势。由图 1a 和图 1b 可知,当纳米 TiO₂ 含量为 1.00 份时,木塑复合材料的拉伸强度和冲击强度均达到最大值,分别为 38.8 MPa 和 6.0 kJ/m²,分别与未添加纳米 TiO₂ 时的拉伸强度 (27.6 MPa) 和冲击强度 (3.7 kJ/m²) 相比,提高了 40.6% 和 62.2%。由图 1c 可知,当纳米 TiO₂ 含量为 0.75 份时,木塑复合材料的弯曲强度达到最大值,为 67.3 MPa,与未添加纳米 TiO₂ 时的弯曲强度 (54.3 MPa) 相比,提高了 23.9%。当纳米 TiO₂ 含量为 1.00 份时,木塑复合材料的弯曲强度 (65.0 MPa) 略有回落,但其仍



a—拉伸强度; b—冲击强度; c—弯曲强度

图 1 纳米 TiO₂ 含量对 PVC / 稻壳粉末塑复合材料力学性能的影响
比未添加时增加了 19.7%。

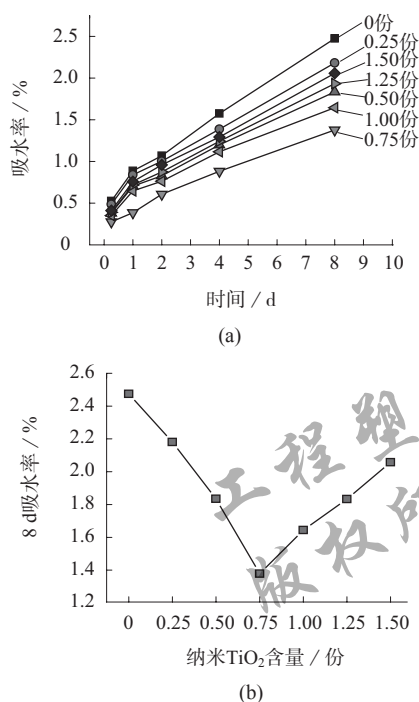
文献 [7] 认为,适量纳米 TiO₂ 粒子的掺杂有助于提高复合材料的力学性能。这可能是因为少量的纳米 TiO₂ 粒子的添加,可以在木塑复合材料中均匀分布,充当应力集中体的角色,从而提高了木塑复合材料的力学性能。但随着纳米 TiO₂ 粒子用量的进一步添加,无机纳米 TiO₂ 粒子间相互接触的机会也相应增加,容易出现无机纳米 TiO₂ 粒子的团聚现象,致使木塑复合材料粘流态时的流动性降低,成型相对比较困难,导致木塑复合材料的应力集中及产生缺陷的概率增大。宏观表现的结果是木塑复合材料的力学性能下降,尤其是木塑复合材料的弯曲强度显著降低。

因此,从力学性能角度看,纳米 TiO₂ 的适宜添加量为 1.00 份。

2.2 对吸水性能的影响

目前,木塑复合材料在户外的应用较多。由于长期暴露在室外,因此要求木塑复合材料的防水性能应较好,否则可能会带来由于吸水后的材料变形、力学性能和防腐抗菌性能的下降,最终导致木塑复合材料的使用寿命缩短等问题。为此,研究纳米 TiO_2 的添加量对木塑复合材料吸水性的影响很有必要。

图2为纳米 TiO_2 含量对 PVC/稻壳粉木塑复合材料吸水率的影响。



a—不同纳米 TiO_2 含量下的吸水率;

b—不同纳米 TiO_2 含量下 8 d 的吸水率

图2 纳米 TiO_2 含量对 PVC/稻壳粉木塑复合材料吸水率的影响

从图 2a 可以看出, PVC/稻壳粉木塑复合材料的吸水率随着吸水时间的延长而逐渐增大。但是由于稻壳粉被 PVC 紧密包裹,导致木塑复合材料的总体吸水率很低,当吸水时间达到 8 d 时,未添加纳米 TiO_2 的 PVC/稻壳粉木塑复合材料的吸水率仅为 2.5%。

由图 2b 可知,随着纳米 TiO_2 含量的增加,木塑复合材料 8 d 的吸水率呈现先减少后增大的趋势。当纳米 TiO_2 含量为 0.75 份时,木塑复合材料的吸水率最低,只有 1.4%,表明该添加量时木塑复合材料的防水性能最佳。随着纳米 TiO_2 含量的进一步增加,木塑复合材料的吸水率逐渐增大。当添加量为 1.00 份时,吸水率仅为 1.6%。即使当纳米 TiO_2

含量达到 1.50 份时,吸水率仅为 2.1%,仍小于未添加纳米 TiO_2 的吸水率。这可能是因为少量纳米 TiO_2 的加入,可以提高木塑复合材料的强度和韧性,改善稻壳粉和 PVC 之间的界面相容性,导致木塑复合材料的吸水率降低。

2.3 对表面接触角的影响

接触角主要用于分析复合材料表面的润湿性。接触角越大,表明复合材料的表面疏水性越强。相反,接触角越小,表明复合材料表面的亲水性越强。图 3 为纳米 TiO_2 含量对 PVC/稻壳粉木塑复合材料接触角的影响。

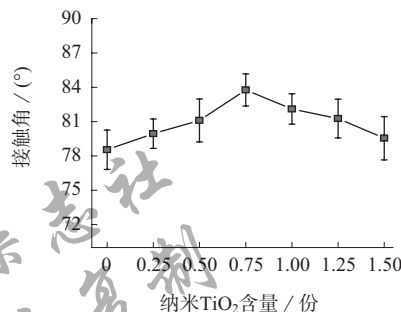
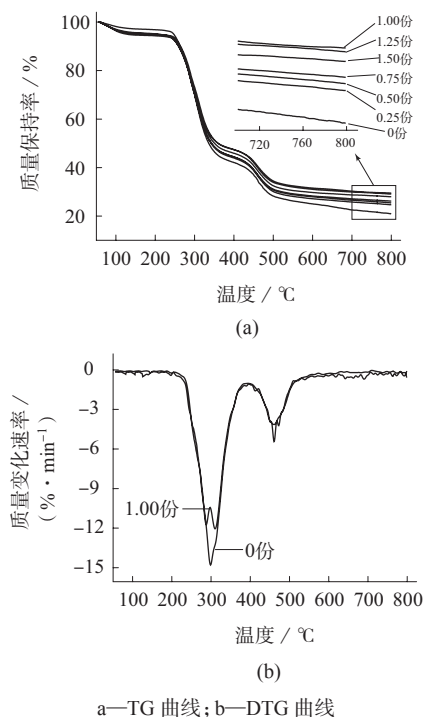


图3 纳米 TiO_2 含量对 PVC/稻壳粉木塑复合材料接触角的影响

由图 3 可以看出,随着纳米 TiO_2 含量的增加,木塑复合材料的接触角呈现先增大后减小的趋势,且添加纳米 TiO_2 的木塑复合材料的接触角均比未添加时有所提高。这表明适量纳米 TiO_2 的添加,使得木塑复合材料表面的防水性略有增强,这与前面吸水性能测试得到的结论一致。未添加纳米 TiO_2 时,木塑复合材料的表面接触角为 78.5°。当纳米 TiO_2 的添加量为 0.75 份时,接触角达到最大值,为 83.8°。但随着纳米 TiO_2 含量的继续增加,木塑复合材料的接触角开始逐渐回落。当纳米 TiO_2 含量为 1.00 份时,接触角为 82.1°。这表明适量纳米 TiO_2 的添加,可以改善稻壳粉和 PVC 的界面相容性,使稻壳粉被 PVC 包裹得更加紧密,而裸露出来的稻壳粉减少,使得 PVC/稻壳粉木塑复合材料表面的防水性能得到增强。

2.4 对热降解行为的影响

纳米 TiO_2 含量对 PVC/稻壳粉木塑复合材料热降解行为的影响如图 4 所示。由于纳米 TiO_2 含量对 DTG 曲线的影响非常小,曲线非常相似,为了曲线的清晰性,故只给出未添加纳米 TiO_2 和添加 1.00 份纳米 TiO_2 的木塑复合材料 DTG 曲线。表 3 为木塑复合材料在不同阶段下的分解温度、峰值温度及 800℃ 下的残炭率。



a—TG 曲线; b—DTG 曲线

图4 纳米 TiO₂ 含量对 PVC / 稻壳粉木塑复合材料热降解行为的影响

表3 PVC / 稻壳粉木塑复合材料在不同失重速率下的分解温度、峰值温度和残炭率

TiO ₂ 含量 / 份	T ₁ / °C	T ₂ / °C	T ₃ / °C	T ₄ / °C	T ₅ / °C	800 °C 时的残炭率 / %
0.00	259.9	335.8	298.9	无	460.6	21.1
0.25	260.5	341.8	288.9	309.8	458.7	24.7
0.50	260.9	342.7	289.9	308.8	461.7	25.5
0.75	261.0	342.8	289.9	309.8	460.7	26.2
1.00	264.0	359.8	289.9	312.8	461.7	29.5
1.25	263.9	359.8	288.0	310.8	460.7	29.1
1.50	261.4	350.8	286.9	306.8	460.7	28.0

注: T₁, T₂ 分别为木塑复合材料失重率 10% 和 50% 时的分解温度, T₃, T₄ 和 T₅ 分别为木塑复合材料 DTG 曲线的第一峰值温度、第二峰值温度和第三峰值温度。

由图 4a 可知,木塑复合材料的热降解过程大致分为两个失重阶段,第一失重阶段为 250 ~ 350 °C,第二失重阶段为 400 ~ 500 °C。热降解过程的第一失重阶段主要来自于稻壳粉中纤维素和半纤维素的降解和 PVC 的快速脱除 HCl 的链式反应。在第一失重阶段,对于未添加纳米 TiO₂ 的木塑复合材料,其失重速率曲线只有一个大尖峰 (见图 4b)。但是对于加入纳米 TiO₂ 的木塑复合材料而言,在第一失重阶段多了一个尖峰 (见图 4b),并且第一尖峰的温度提前出现 (见表 3 中 T₃ 所对应的温度)。出现这种情况的原因可能是因为适量纳米 TiO₂ 的加入可以加速 PVC 的脱 HCl 过程,导致第一降解阶段最大热降解速率温度提前。而纳米 TiO₂ 的加入对于稻壳粉的失重速率影响较小,导致 PVC 的第一失重

阶段最大降解速率温度和稻壳粉的第一失重阶段最大降解速率温度产生了明显的差值,因此在 DTG 曲线中出现了两个尖峰。

第二失重阶段主要为稻壳粉中木质素的降解和 PVC 热降解脱 HCl 形成的共轭多烯内环化形成芳烃化合物。由表 3 中的 T₅ 可知,在第二失重阶段,纳米 TiO₂ 的含量对木塑复合材料最大热解速率的温度影响较小。

分析表 3 中的数据可知,纳米 TiO₂ 的加入对木塑复合材料的初始分解温度 (以分解 10% 作为初始分解温度) 提高有限。但是随着纳米 TiO₂ 含量的增加,800 °C 时的残炭率呈现先增大后减小的趋势。当纳米 TiO₂ 添加量为 1.00 份时,残炭率达到最大值 (29.5%),比未添加纳米 TiO₂ 时的残炭率 (21.1%) 有较大提高。这表明纳米 TiO₂ 的加入可以提高木塑复合材料的热稳定性。但是随着纳米 TiO₂ 含量的进一步增大,木塑复合材料的残炭率略有减少,但仍比未添加时的残炭率高很多。这可能是因为随着木塑复合材料中纳米 TiO₂ 的增加,导致纳米 TiO₂ 团聚的概率增大,降低了木塑复合材料的界面结合力,使得热降解气体更易逸出,导致木塑复合材料的热稳定性略有下降^[14]。

2.5 对颜色的影响

表 4 为纳米 TiO₂ 含量对 PVC / 稻壳粉木塑复合材料表面颜色的影响。

表4 纳米 TiO₂ 含量对 PVC / 稻壳粉木塑复合材料表面颜色的影响

TiO ₂ 含量 / 份	ΔE_{ab}^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
0.00	0	0	0	0
0.25	7.2	1.8	-2.3	-6.6
0.50	9.8	6.1	-2.6	-7.2
0.75	11.3	7.7	-3.1	-7.6
1.00	15.5	13.0	-3.2	-7.8
1.25	17.1	14.8	-3.3	-7.9
1.50	19.8	17.8	-3.4	-8.1

分析表 4 可知,加入纳米 TiO₂ 后,木塑复合材料的颜色变化非常明显。总色差 ΔE_{ab}^* 随着纳米 TiO₂ 用量的增加而逐渐增大,且总色差 ΔE_{ab}^* 的增加主要来自于 ΔL^* 的增加。这主要是因为纳米 TiO₂ 本身就是一种非常好的白色颜料,所以在 PVC / 稻壳粉木塑复合材料中添加一定含量的纳米 TiO₂,会导致木塑复合材料的颜色变浅。另外,纳米 TiO₂ 的添加,导致色差 Δa^* , Δb^* 均为负值。但是随着 TiO₂ 含量的增加, Δa^* , Δb^* 的变化幅度较小,表明 PVC / 稻壳粉木塑复合材料尽管有变绿和变蓝的倾向,但是颜色变化趋势不太明显。

3 结论

通过对PVC/稻壳粉末塑复合材料力学性能、防水性能、热稳定性和颜色变化的分析结果表明,随着纳米TiO₂含量的增加,木塑复合材料的力学性能、防水性能和热稳定性呈现先增加后降低的趋势,但是木塑复合材料表面的颜色却随着纳米TiO₂含量增加而逐渐变浅。综合考虑各方面的影响因素,以纳米TiO₂的添加量为1.0份时PVC/稻壳粉末塑复合材料的综合性能最好,与未添加纳米TiO₂的木塑复合材料相比,其拉伸强度、冲击强度和弯曲强度分别提高了40.6%、62.2%和19.7%,8 d的吸水率从2.5%降低到1.6%,表面接触角从78.5°增加到82.1°,800℃时的残炭率从21.1%提高到29.5%,表面颜色显著变浅。

参考文献

- [1] 李东方,李黎,李建章.木塑复合材料概述[J].林业机械与木工设备,2013,41(7):7-16.
Li Dongfang, Li Li, Li Jianzhang. Overview of wood/plastic composites[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2013, 41(7):7-16.
- [2] 吴波,齐晔华,王鑫.聚氯乙炔/木粉复合材料研究进展[J].中国塑料,2010,24(6):6-12.
Wu Bo, Qi Shuhua, Wang Xin. Research progress in PVC/wood flour composites[J]. China Plastics, 2010, 24(6):6-12.
- [3] 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):9-14,19.
Xu Kaimeng, Li Kaifu, Cao Xinlei, et al. Research progress of interfacial bonding modification of PVC-based wood plastic composites[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(2):9-14, 19.
- [4] 徐建中,宿磊,谢吉星,等.PVC木塑复合材料热解动力学[J].化学工程师,2010(1):68-71.
Xu Jianzhong, Su Lei, Xie Jixing, et al. Pyrolysis kinetics of wood-plastic composite materials about PVC[J]. Chemical Engineer, 2010, (1):68-71.
- [5] 白晓艳,王清文,隋淑娟.CuO对木粉/PVC复合材料热解和燃烧过程中烟释放行为的影响[J].燃烧科学与技术,2010,16(1):35-39.
Bai Xiaoyan, Wang Qingwen, Sui Shujuan. Influence of CuO on smoke release behavior in pyrolysis and combustion of wood-flour/polyvinyl chloride composite[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(1):35-39.
- [6] 潘晓勇,杜岩岩,陈伟,等.载银纳米二氧化钛在抗菌塑料中的应用研究进展[J].工程塑料应用,2012,40(11):101-105.
Pan Xiaoyong, Du Yanyan, Chen Wei, et al. Applied properties of Ag/TiO₂ in antibacterial plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(11):101-105.
- [7] 王冲,南辉,王刚,等.纳米TiO₂包覆改性研究及其对PVC性能影响[J].工程塑料应用,2015,43(1):108-111.
Wang Chong, Nan hui, Wang Gang, et al. Modification research of nanometer TiO₂ coating and its effect on properties of PVC[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):108-111.
- [8] 梅文杰,熊玉竹,刘振宇.TiO₂在PP抗老化中的机理及其研究进展[J].中国塑料,2013,27(1):17-21.
Mei Wenjie, Xiong Yuzhu, Liu Zhenyu. Mechanism and development of TiO₂ in the PP aging resistance[J]. China Plastics, 2013, 27(1):17-21.
- [9] 孙丰波,余雁,江泽慧,等.竹材的纳米TiO₂改性及抗菌防霉性能研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(4):1056-1060.
Sun Fengbo, Yu Yan, Jiang Zehui, et al. Nano TiO₂ modification of bamboo and its antibacterial and mildew resistance performance[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(4):1056-1060.
- [10] Tuong V M, Chu T V. Improvement of color stability of acacia hybrid wood by TiO₂ nano sol impregnation[J]. Bioresources, 2015, 10(3):5417-5425.
- [11] Harandi D, Ahmadi H, Achachluei M M. Comparison of TiO₂ and ZnO nanoparticles for the improvement of consolidated wood with polyvinyl butyral against white rot[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 108:142-148.
- [12] Devi R R, Maji T K. Interfacial effect of surface modified TiO₂ and SiO₂ nanoparticles reinforcement in the properties of wood polymer clay nanocomposites[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2013, 44:505-514.
- [13] Deka B K, Maji T K. Effect of TiO₂ and nanoclay on the properties of wood polymer nanocomposite[J]. Composites:Part A, 2011, 42(12):2117-2125.
- [14] Devi R R, Gogoi K, Konwar B K, et al. Synergistic effect of nano TiO₂ and nanoclay on mechanical, flame retardancy, UV stability, and antibacterial properties of wood polymer composites[J]. Polymer Bulletin, 2013, 70(4):1397-1413.
- [15] Devi R R, Maji T K. Effect of nanofillers on flame retardancy, chemical resistance, antibacterial properties and biodegradation of wood/styrene acrylonitrile co-polymer composites[J]. Wood Science Technology, 2013, 47(6):1135-1152.
- [16] 周吓星,陈礼辉,黄舒晨,等.竹粉-聚丙烯发泡复合材料加速老化性能的研究[J].农业工程学报,2014,30(7):287-292.
Zhou Xiaxing, Chen Lihui, Huang Shusheng, et al. Performance of bamboo flour/polypropylene foamed composite under accelerated weathering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7):287-292.