

不同表面处理麦秸秆对木塑复合材料性能的影响

于 旻^{1,2}, 何春霞^{1,2*}, 刘军军^{1,2}, 侯人鸾^{1,2}, 薛 娇^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘 要: 为提高麦秸秆纤维与聚丙烯(polypropylene, PP)基体的界面结合力, 采用复合处理法对麦秸秆纤维进行表面处理: 先分别用 NaOH、乙酸溶液浸泡、水热处理、蒸汽爆破和微波等方法对麦秸秆纤维进行预处理, 再复合偶联剂法处理麦秸秆纤维; 用熔融共混、模压成型方法制备麦秸秆/废弃 PP 木塑复合材料, 探讨了麦秸秆不同表面处理方法制备 PP 木塑复合材料力学性能和吸湿吸水性能; 用体视显微镜对不同处理的麦秸秆及木塑复合材料拉伸断面进行观察。结果表明: 经复合处理的麦秸秆与 PP 木塑复合材料力学性能和吸湿吸水性能均优于单纯使用偶联剂处理的麦秸秆与 PP 木塑复合材料; NaOH 和乙酸复合处理的复合材料力学性能和抗吸湿吸水性能较好, 水热和蒸汽爆破复合处理的复合材料次之。麦秸秆经复合处理后, 表面变粗糙, 秸秆纤维和 PP 基体的界面黏合性得到改善。该文研究结果对通过麦秸秆纤维表面处理提高麦秸秆/废弃 PP 木塑复合材料的性能有重要的实际意义。

关键词: 秸秆, 聚丙烯, 复合材料, 表面处理, 复合处理, 力学性能

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.09.029

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-09-0171-07

于 旻, 何春霞, 刘军军, 等. 不同表面处理麦秸秆对木塑复合材料性能的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 171-177.

Yu Min, He Chunxia, Liu Junjun, et al. Effects of different surface treatment for wheat straw on performances of wood-plastic composites[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 171-177. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

木塑复合材料作为一种低碳环保型材料对中国走低碳之路具有重要意义^[1]。国内外对木塑复合材料已有较多报道, 研究表明, 天然纤维化学成分组成对复合材料的力学性能影响显著^[2-16], 纤维表面处理可以提高纤维和基体间结合力, 提高制备复合材料的性能。氢氧化钠能去除稻壳表面的二氧化硅, 改善稻壳与苯酚甲醛树脂(PF)之间的界面结合性, 提高酚醛树脂复合板的弹性模量^[5-6]。草酸处理稻秸秆可显著提高稻秸秆刨花板的内结合强度、机械性能和尺寸稳定性^[7]。蒸汽爆破处理小麦秸秆, 能使纤维束增加, 麦秸秆表面接触角变小, 润湿性得到改善^[8]。丁基丙烯酸盐处理稻秸秆纤维, 可提高稻秸秆纤维/乳酸复合材料的抗拉强度和防水性能^[9]。蒸汽处理稻壳可提高稻壳复合板的弯曲性能和内结合强度^[10]。微波辐射松木粉制备的 PVC/木粉复合材料冲击强度和拉伸强度显著提高^[11]。麦秸秆是一种天然纤维, 界面特性比较复杂, 含有大量极性的羟基和酚羟基官能团, 表现出较强的化学极性^[12], 而聚丙烯是非极性材料, 二者界面相容性较差。有关秸秆纤维处理的研究报道多数是仅加入偶联剂进行表面处理, 或仅对秸秆表面进行物理化学处理, 但由于秸秆纤维结构和化学成分的复杂性, 偶联剂在秸

秆纤维和基体间无法起到良好的桥梁作用, 不利于与基体的浸润和复合, 对复合材料的力学性能提高不大^[6,13]。复合处理方法是综合运用 2 种或 2 种以上处理方法进行木纤维处理^[14], 研究表明复合处理比单纯使用一种方法对木纤维表面处理的复合材料性能好。钟鑫^[15]比较了木纤维经硅烷偶联剂和 NaOH 溶液两步表面处理与只用硅烷偶联剂进行处理的聚氯乙烯(PVC)/木纤维复合材料拉伸强度; 研究发现, 单纯使用偶联剂对木纤维表面进行处理达不到最佳效果, 加入 NaOH 处理可提高复合材料的力学性能。刘荣榕^[16]将丙烯酰胺(AM)溶于水后浸润木纤维, 然后再进行微波处理, 制备 PVC/木纤维复合材料, 结果表明, 经过 AM 水溶液浸润和微波处理的木纤维较只经过微波处理的木纤维复合材料的冲击强度和拉伸强度都有明显提高。目前国内外文献对复合处理的研究报道较少, 本文采用物理和化学 2 种方法对麦秸秆纤维进行复合处理: 先分别用 NaOH、乙酸溶液浸泡、水热处理、蒸汽爆破和微波处理等方法对麦秸秆纤维表面进行预处理, 通过物理或化学反应减少纤维表面羟基数目; 再复合偶联剂法, 在纤维与基体之间建立物理和化学键交联, 从而提高纤维与基体的相容性并促进纤维在基体中的均匀分散; 将所得的麦秸秆纤维与 PP 复合制备麦秸秆/废弃聚丙烯(PP)木塑复合材料, 分析其力学性能及吸湿吸水性能, 并对其微观结构进行了观察。麦秸秆纤维进行表面复合处理制备的木塑复合材料在性能上优于单纯使用偶联剂处理的木塑复合材料, 为麦秸秆等木质纤维的预处理研究和木塑复合材料的生产提供理论参考。

收稿日期: 2011-10-19 修订日期: 2012-04-10

作者简介: 于 旻(1986-), 女, 博士生, 研究方向为新型工程材料应用。南京 南京农业大学工学院, 210031。

*通信作者: 何春霞(1960-), 女, 教授, 博士, 主要从事高分子及复合材料的研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: chunxiahe@tom.com

1 材料与方 法

1.1 原料及设备

麦秸秆, 江苏省扬中市油坊镇, 高速粉碎机粉碎, 80 目, 105℃烘干; KH550 硅烷偶联剂, 上海耀华有限公司; 乙醇、NaOH、乙酸均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 废弃聚丙烯 (PP) 塑料薄膜, 苏州洁利来电器有限公司。

G80F20CN2L-B8(SO) 格兰仕微波炉, 广州格兰仕集团有限公司; HH-1 电热恒温水浴锅, 上海精风仪器有限公司; QB-200 蒸汽爆破机, 鹤壁市正道重机厂; X-160 混炼机, 无锡创成橡塑机械有限公司; XLB-0 平板硫化机, 湖州顺力橡胶机械有限公司; JSM-6300 扫描电子显微镜, 日本电子株式会社。

1.2 麦秸秆的表面处理及 PP 木塑复合材料制备

麦秸秆主要由纤维素、木质素、半纤维素、蜡质以及果胶等成分组成^[17]。麦秸秆结构不均, 外层灰分含量比整秆高 17.2%, 而灰分中 SiO₂ 含量明显高于整秆的一倍多^[18], 麦秸表面的 SiO₂ 是人造板制造中麦草不易黏结的主要原因。麦秸秆苯-醇抽出物的主要成分是脂肪和蜡, 它们使麦秸表面致密、光滑, 形成一层高级脂肪族衍生物生成的疏水性角质蜡状膜^[19], 从而阻碍了 PP 基体浸润到麦秸纤维内部; 内表面由木质素、半纤维素及果胶等组成^[20], 这些组分与 PP 基体的相容性极差, 它们的存在会降低麦秸秆纤维与基体间的结合力。因此, 为了提高麦秸秆纤维和 PP 基体的相容性, 充分发挥麦秸秆纤维在基体中的增强作用, 首先要对麦秸秆进行适当的表面处理。

1.2.1 麦秸秆的表面处理

1) 偶联剂处理 (N1): 将 KH550 硅烷偶联剂和乙醇按照体积比 1:5 配成溶液, 将干燥后的麦秸秆粉放入高速混合搅拌机, 一边搅拌一边喷入偶联剂溶液, 至偶联剂溶液将麦秸秆粉充分均匀浸润后取出, 105℃干燥。

2) NaOH 复合处理 (N2): 用质量分数 5% 的 NaOH 溶液将麦秸秆粉浸泡 48 h, 再漂洗至 pH 试纸测试呈中性, 烘干, 再用偶联剂处理。

3) 乙酸复合处理 (N3): 用质量分数为 5% 的乙酸溶液将麦秸秆粉浸泡 48 h, 再漂洗至 pH 试纸测试呈中性, 烘干, 再用偶联剂处理。

4) 水热复合处理 (N4): 将麦秸秆粉置于去离子水的恒温锅内蒸煮, 温度 90℃, 时间 2 h, 取出晾干, 105℃烘干 24 h, 再用偶联剂处理。

5) 蒸汽爆破复合处理 (N5): 将麦秸秆截成 10~50 mm 截段, 置于汽爆罐中, 汽爆压力为 0.6 MPa, 维压 20 min, 105℃烘干, 高速粉碎机粉碎, 80 目, 再用偶联剂处理。

6) 微波复合处理 (N6): 将麦秸秆粉用去离子水浸泡 12 h, 放入微波炉内, 中火处理 5 次, 2 min/次。取出干燥, 再用偶联剂处理。

1.2.2 PP 木塑复合材料制备

取处理的麦秸秆和 PP 薄膜在混炼机中混炼, 混炼

温度 175℃, 混炼时间 5~7 min, 混合均匀后放入平板硫化机中热压成型, 热压温度为 180℃, 压力为 12.5 MPa, 时间为 12 min, 制备 PP 木塑复合材料。麦秸秆/PP 木塑复合材料: 麦秸秆质量分数为 50%, PP 的质量分数为 50%。

1.3 木塑复合材料性能测试及表征

1) 力学性能: 按 GB/T1447-2005 测试 PP 木塑复合材料拉伸强度, 拉伸速度为 5 mm/min; 按 GB/T17657-1999 测试 PP 木塑复合材料弯曲强度及弯曲弹性模量, 加载速度为 5 mm/min, 按照 GB/T17657-1999 测试 PP 木塑复合材料冲击强度, 以上试验均为室温条件, 结果为 3 次平均值。采用 SMZ1000 型体视显微镜观察木塑复合材料拉伸断面的微观结构。

2) 含水率: 按 GB/T17657-1999 测定木塑复合材料试件含水率, 含水率为干燥前后质量之差与干燥后质量之比。试件在温度 (103±2)℃ 条件下干燥至质量恒定。试件的含水率计算公式

$$H = \frac{m_v - m_o}{m_o} \times 100\% \quad (1)$$

式中, H 为试件的含水率, %; m_v 为试件干燥前质量, g; m_o 为试件干燥后质量, g。结果为 5 次平均值。

3) 吸水性能: 参照 GB/T17657-1999 测试 PP 木塑复合材料吸水性, 将 PP 木塑复合材料试件放入水槽完全浸泡 24 h, 水温为室温, 取出时用滤纸擦干。测量试样 24 h 吸水率, 按下式计算

$$W = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, W 为试件 24 h 吸水率, %; M_0 为试件浸水前的质量, g; M_1 为试件 24 h 浸水后的质量, g。结果为 5 次平均值

4) 吸湿性能: 将 PP 木塑复合材料试件放入恒温恒湿箱内容器隔板上, 按吸湿时间 6、18、42、66、114、282 h 取出称质量, 当质量几乎不变化时可视为吸湿平衡。某一时刻吸湿率按下式计算

$$Q = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中, Q 为某一时刻的吸湿率, %; m_1 为试件干燥时质量, g; m_2 为吸湿后试件质量, g。结果为 5 次平均值。

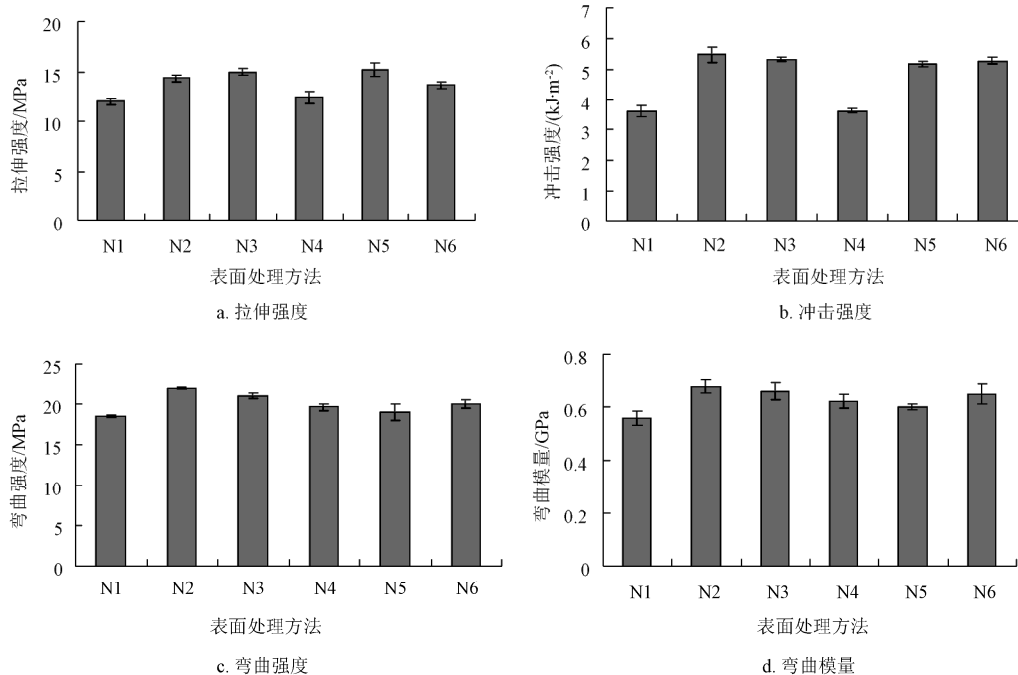
2 结果与分析

2.1 不同表面处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料力学性能

图 1 为不同表面处理麦秸秆制备的 PP 木塑复合材料力学性能。由图 1 可知, 复合处理麦秸秆制备的 PP 木塑复合材料力学性能均优于单纯使用偶联剂处理的麦秸秆 PP 木塑复合材料, 这是由于麦秸秆的硅质表面层不利于纤维和基体界面的黏合, 单纯使用偶联剂处理效果不明显。麦秸秆经不同表面预处理后, 其蜡质层受到不同程度去除, 在进行偶联剂处理时, 中层和内层的纤维素能直接与偶联剂作用, 纤维表面的羟基和偶联剂作用产生较强的氢键, 提高了麦秸秆与 PP 的相容性, 故不同表面

处理麦秸秆制备的PP木塑复合材料力学性能高于单纯使

用偶联剂处理的PP木塑复合材料。



注: N1 为偶联剂处理, N2 为 NaOH 复合处理, N3 为乙酸复合处理, N4 为微波复合处理, N5 为水热复合处理, N6 为蒸汽爆破复合处理

图 1 不同表面处理麦秸秆的聚丙烯木塑复合材料力学性能

Fig.1 Mechanical properties of wheat straw/polypropylene composites filled with different surface treated straw fibers

从图 1 还可以看出, 在不同表面处理麦秸秆的方法中, NaOH (N2) 和乙酸 (N3) 复合处理的 PP 木塑复合材料拉伸强度、冲击强度、弯曲强度等力学性能均较高, 其拉伸强度比单纯使用偶联剂处理 (N1) 的分别提高了 19.4% 和 25%, 冲击强度分别提高了 52.1% 和 47.9%, 弯曲强度分别提高了 18.9% 和 13.5%。水热 (N5) 和蒸汽爆破 (N6) 复合处理的复合材料冲击强度提高较大, 水热复合处理 (N5) 的拉伸强度最大 (15.3 MPa)。微波复合处理 (N4) PP 木塑复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度提高不明显 (均小于 6%)。综上所述, NaOH (N2) 和乙酸 (N3) 复合处理的 PP 木塑复合材料力学性能较好, 水热 (N5) 和蒸汽爆破 (N6) 复合处理的 PP 木塑复合材料次之。这可能是由于: NaOH 能破坏麦秸秆中木质素的酯键, 打开部分秸秆纤维的羟基, 增加秸秆的孔隙度, 而不会导致纤维素的水解^[21], 硅烷偶联剂更容易与纤维表面的羟基发生反应, 增强了纤维和 PP 基体之间的黏合力。有研究表明, 碱处理可导致纤维原纤化, 即复合材料中的纤维束分裂成更小的纤维, 纤维直径降低, 长径比增加, 与基体的有效接触面积增加^[14]。乙酸能清除麦秸秆表面部分油和灰分等, 酸性物质可以改变秸秆表面的 pH 值, 在秸秆纤维和 PP 基体间形成很好的黏结界面。另有研究表明, 酸处理能增加纤维表面的自由基浓度, 提高木质材料的胶结强度^[22]。水热处理不改变秸秆细胞壁的纤维状结构, 溶解麦秸秆中少量脂肪类

物质和碳水化合物, 引起蜡质层的去除和部分半纤维素的降解; 蒸汽爆破处理是在物理和化学的作用下, 大部分半纤维素降解, 部分木质素溶解, 爆破使纤维束增加, 有利于改善秸秆纤维与基体的相容性; 在进行偶联剂处理时, 内层纤维与基体有较强界面结合力^[23]。微波处理麦秸秆后, 秸秆纤维表面仍很光滑, 变化不明显 (图 3d), 难以形成“胶钉”; 又由微波复合处理后木塑复合材料的吸水率明显高于其他 4 种复合处理方法的复合材料 (图 2b), 说明微波预处理对提高复合材料的性能效果不明显。

2.2 不同表面处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料吸湿吸水性能

图 2 为不同表面处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料的含水率、24 h 吸水率及吸湿率随时间的变化, 从图中可知, 单纯使用偶联剂处理麦秸秆 (N1) 的木塑复合材料含水率、24 h 吸水率及随时间的吸湿率均较大, 复合处理麦秸秆制备的木塑复合材料含水率、24 h 吸水率及随时间的吸湿率均比单纯使用偶联剂处理的木塑复合材料有不同程度改善。这可能是由于麦秸秆外表面的硅质层羟基浓度低, 偶联剂在麦秸秆纤维和 PP 间无法起到良好的桥梁作用, 不利于与基体的浸润和复合^[22], 制备的木塑复合材料的木质纤维不能有效的被不易吸水的 PP 包裹, 而秸秆纤维易吸水, 导致单纯使用偶联剂处理的木塑复合材料的含水率、24 h 吸水率及随时间的吸湿率均大于复合处理的木塑复合材料。

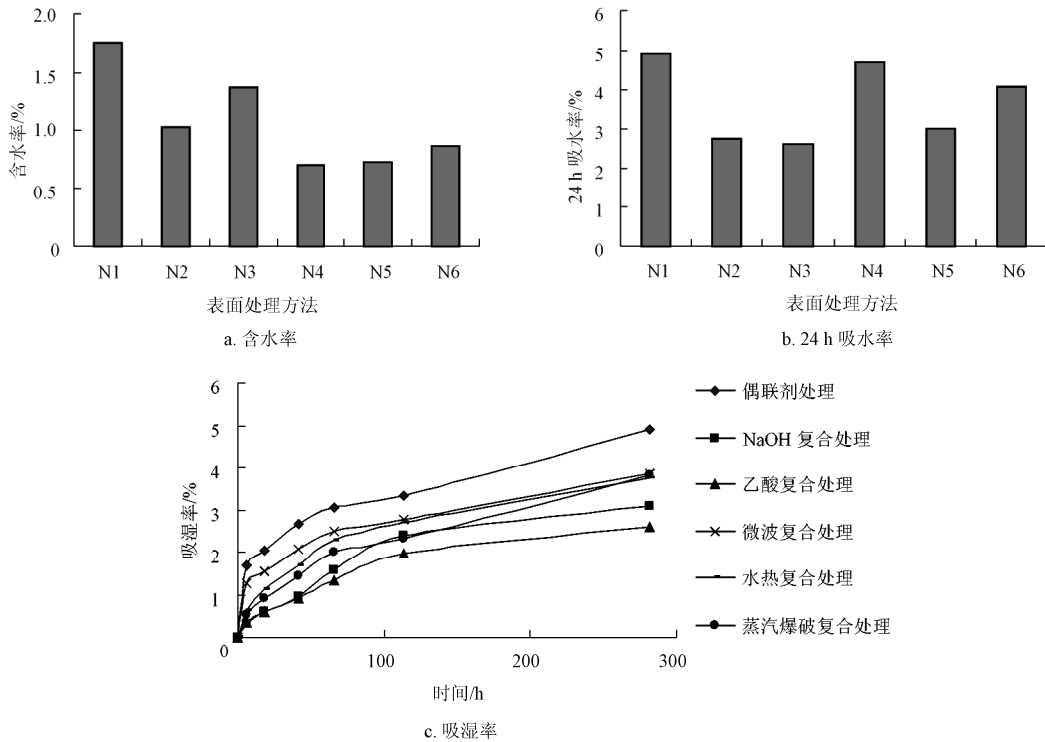


图 2 不同表面处理麦秸秆的聚丙烯木塑复合材料吸湿吸水性能

Fig.2 Moisture absorption of wheat straw/ polypropylene composites filled with different surface treated straw fibers

从图 2 还可知, 单纯使用偶联剂处理麦秸秆 (N1) 制备的木塑复合材料的含水率为 1.75%, 其他几种木塑复合材料含水率均较小 (<1.4%), 微波 (N4)、水热 (N5) 和蒸汽爆破 (N6) 复合处理的木塑复合材料含水率均小于 1%。NaOH (N2) 和乙酸 (N3) 复合处理的木塑复合材料的吸水率和吸湿率较小, 其吸水率分别为 2.75% 和 2.58%, 吸湿率分别为 3.1% 和 2.6%。

2.3 不同表面处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料的方差分析

为研究不同表面处理方法对复合材料力学性能的影响, 以处理方法为因素, 6 种处理方法为水平, 将试验数据用 SPSS 软件进行单因素方差分析, 判断各组样本是否具有显著性差异, 结果见表 1 和表 2。

表 1 单因素方差分析
Table 1 Single factor analysis of variance

	平方和	df	均方	F	显著性 P	
拉伸强度	组间	27.110	5	5.422	12.263	0***
	组内	5.306	12	0.442		
	总数	32.415	17			
冲击强度	组间	11.740	5	2.348	467.394	0***
	组内	0.060	12	0.005		
	总数	11.800	17			
弯曲强度	组间	25.225	5	5.045	17.006	0***
	组内	3.560	12	0.297		
	总数	28.785	17			
弯曲模量	组间	0.039	5	0.008	11.312	0***
	组内	0.008	12	0.001		
	总数	0.047	17			

注: *, **, ***: 分别表示 10%, 5% 和 1% 的显著性水平。df 为自由度, F 为组间方差, P 为显著性水平。

表 2 均值多重比较
Table 2 Mean multiple comparisons

因变量	(I) 试验类型	(J) 试验类型	均值差 (I-J)	标准误	显著性 P
拉伸强度	偶联剂处理	NaOH	-2.33000*	0.54292	0.016**
		乙酸	-3.00000*	0.54292	0.002***
		微波	-0.40000	0.54292	1.000
		水热	-3.25000*	0.54292	0.001***
		蒸汽爆破	-1.67000	0.54292	0.144
冲击强度	偶联剂处理	NaOH	-1.87606*	0.05787	0***
		乙酸	-1.73960*	0.05787	0***
		微波	-0.02777	0.05787	1.000
		水热	-1.57148*	0.05787	0***
		蒸汽爆破	-1.67825*	0.05787	0***
弯曲强度	偶联剂处理	NaOH	-3.50000*	0.44472	0***
		乙酸	-2.50000*	0.44472	0.002***
		微波	-1.10000	0.44472	0.440
		水热	-0.50000	0.44472	1.000
		蒸汽爆破	-1.50000	0.44472	0.083*
弯曲模量	偶联剂处理	NaOH	-0.12000*	0.02134	0.002***
		乙酸	-0.12000*	0.02134	.0002***
		微波	-0.06000	0.02134	0.236
		水热	-0.02000	0.02134	1.000
		蒸汽爆破	-0.09000*	0.02134	0.018**

注: *, **, ***: 分别表示 10%, 5% 和 1% 的显著性水平。

通过对麦秸秆纤维进行不同表面处理，由表 1 复合材料的力学性能单因素方差分析可见，拉伸强度、冲击强度、弯曲强度和弯曲模量的检验统计量的显著性水平 P 均明显小于显著性水平 α ($\alpha=0.05$)，说明不同处理方法对复合材料的力学性能有显著影响。由表 2 复合材料的力学性能均值多重比较可见，乙酸和水热处理对拉伸强度有极显著的影响 ($P<0.01$)，NaOH 处理对拉伸强度有显著影响 ($P<0.01$)。冲击强度中，除微波处理，其他 4 种处理方法对冲击强度均有极显著的影响 ($P<0.01$)。NaOH 和乙酸处理对弯曲强度和弯曲模量有极显著的影响 ($P<0.01$)，蒸汽爆破处理对弯曲模量有显著影响 ($P<0.05$)。

综合分析表 1 和表 2 可知，NaOH、乙酸、水热和蒸汽爆破处理在不同的力学性能指标中各有显著性影响，

微波处理对复合材料的力学性能没有显著影响。

2.4 不同表面处理麦秸秆及其制备的 PP 木塑复合材料微观结构

图 3 为不同表面处理麦秸秆纤维的微观形貌图。由图 3 可以看出，未进行表面处理的麦秸秆纤维表面光滑，不利于与 PP 基体的黏合复合。经不同方法处理后的麦秸秆纤维表面粗糙，外表层受到不同程度破坏。NaOH 处理后麦秸秆纤维分裂成更小的纤维；乙酸处理后的麦秸秆纤维表面有裂纹和微隙；水热处理后麦秸秆纤维外层部分物质剥落；蒸汽爆破处理后的麦秸秆纤维出现分丝和细纤维化现象；微波处理的麦秸秆纤维表面变化不明显。从上可知，NaOH、乙酸、水热处理和蒸汽爆破处理的麦秸秆纤维表面变化较大，其秸秆纤维和 PP 基体界面的相互渗透和黏合较好，这也与前面试验结果相符。

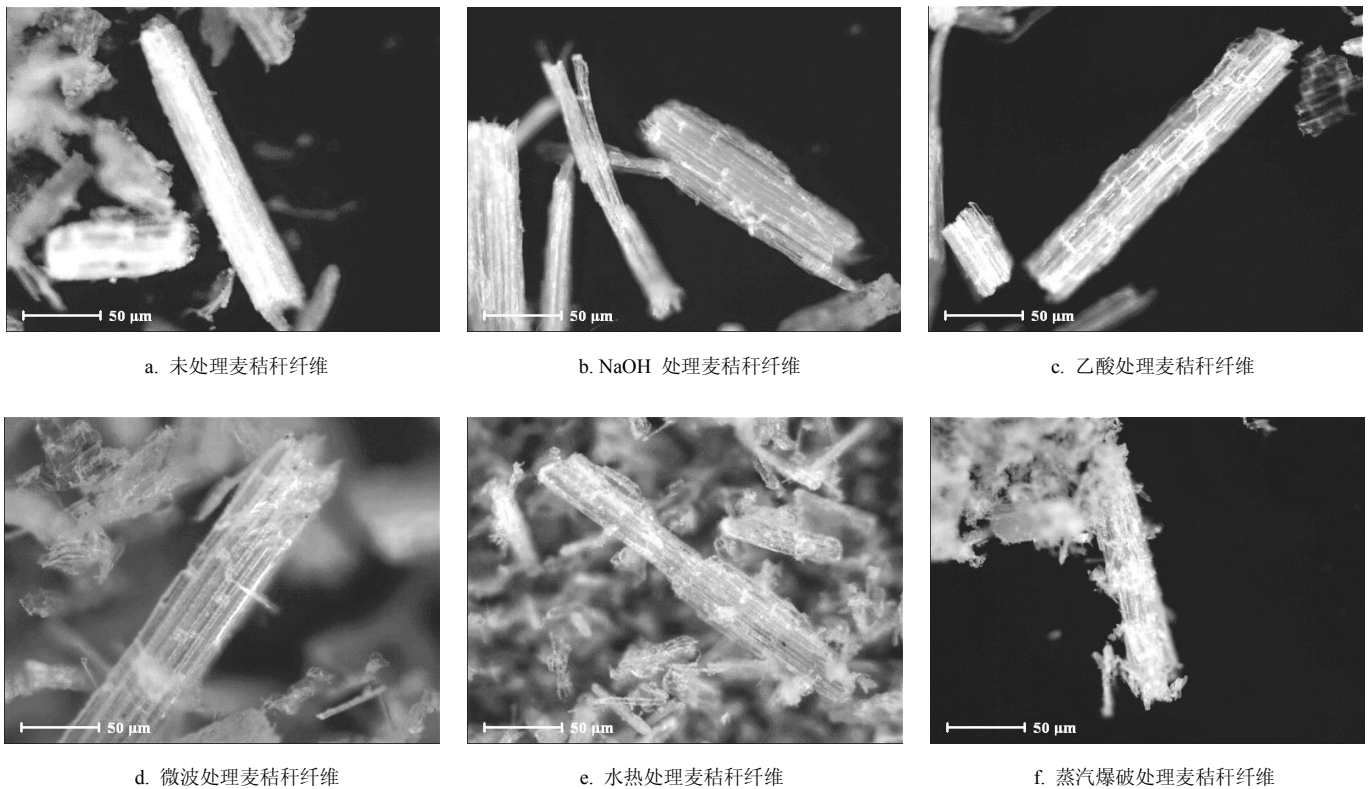


图 3 不同表面处理麦秸秆纤维的微观形貌图

Fig.3 Microstructure surface of straw fibers under different surface treatment

图 4 为不同表面处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料拉伸断面微观形貌图。由图 4a 可以看出，单纯使用偶联剂处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料的断面上拔出的麦秸秆纤维表面较光滑且端部较平整，没有 PP 黏结，麦秸秆纤维未发生断裂，只是在外力作用下从 PP 基体中拔出，PP 木塑复合材料的断裂主要是由于秸秆纤维从 PP 基体中拔出引起，说明麦秸秆纤维不能很好的被 PP 基体包裹，纤维和基体界面结合力较差。从图 4b、c、e、f 可以看出，麦秸秆经复合处理后，PP 木塑复合材料的断口参差不齐，

秸秆纤维有断裂的现象，且被拔出的麦秸秆纤维连有部分 PP 基体，表明麦秸秆经复合处理后，秸秆纤维和 PP 基体的界面黏合性得到改善，秸秆纤维在基体中起到了传递应力、消耗能量的作用，复合材料的力学性能得到了提高。从图 4d 中可以看出，微波复合处理的 PP 木塑复合材料断面有纤维拔出形成的空洞和缺陷，这是由于麦秸秆纤维与 PP 基体间扩散不够，两相结合力差，因此微波复合处理麦秸秆对改善复合材料的力学性能效果不明显。

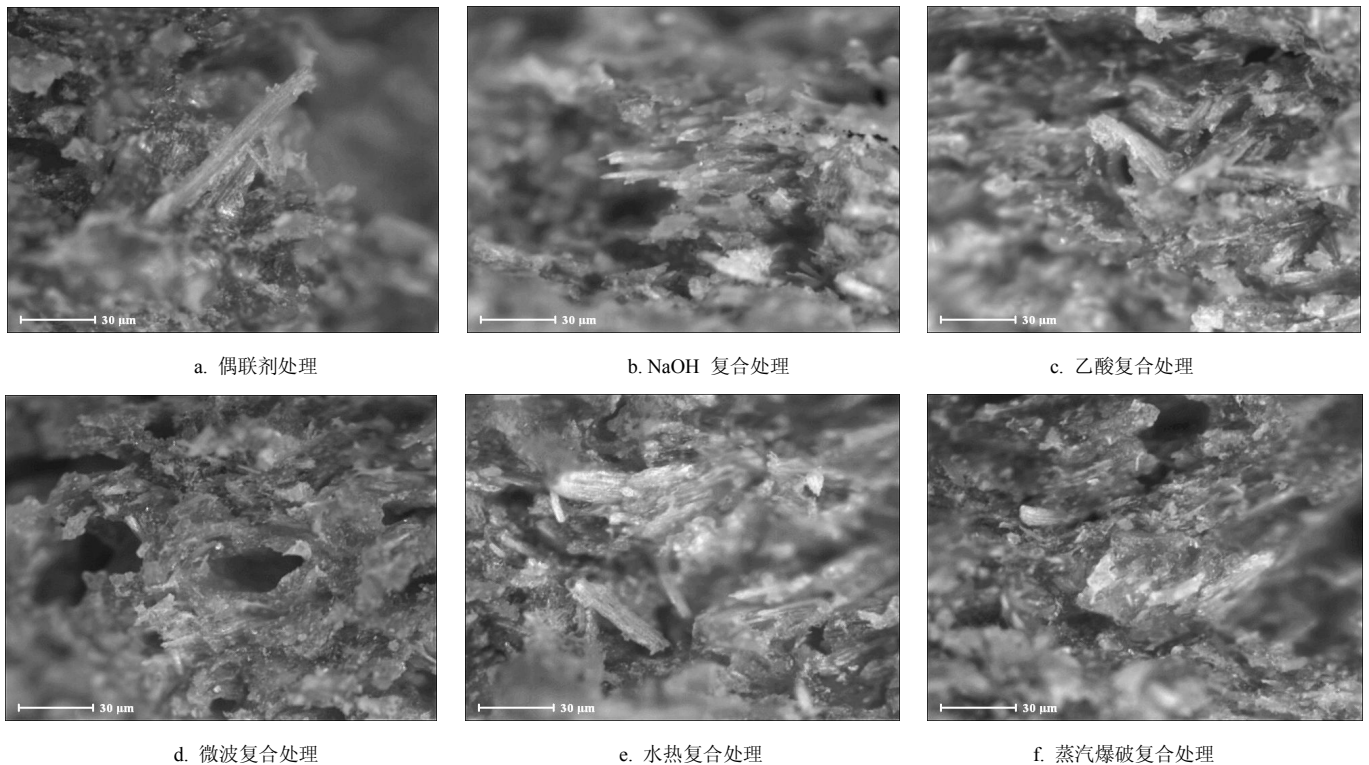


图 4 不同表面处理麦秸秆的 PP 木塑复合材料拉伸断面微观形貌图

Fig.4 Microstructure surface of wheat straw/PP composites filled with different surface treated straw fibers

3 结 论

1) 复合处理麦秸秆制备的木塑复合材料力学性能和吸湿吸水性能均优于单纯使用偶联剂处理麦秸秆制备的木塑复合材料, 麦秸秆经复合处理后, 秸秆纤维和 PP 基体的界面黏合性得到改善。

2) NaOH 和乙酸复合处理的 PP 木塑复合材料力学性能较好, 水热和蒸汽爆破复合处理的 PP 木塑复合材料次之, 微波复合处理麦秸秆对复合材料性能改善没有显著影响。

[参 考 文 献]

- [1] Liu Chuanjiang, Feng Ya. Low-carbon economy: Theoretical study and development path choice in China[J]. Energy Procedia 2011, 5: 487-493.
- [2] Youssef Habibi, Waleed K El-Zawawy, Maha M Ibrahim, et al. Processing and characterization of reinforced polyethylene composites made with lignocellulosic fibers from Egyptian agro-industrial residues[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(7): 1877-1885.
- [3] Andrzej K Bledzki, Abdullah Mamun, Jürgen Volk. Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites[J]. Composites: Part A, 2010, 41(4): 480-488.
- [4] Jun-Hee Song, Sang-Don Mun, Cheol-Sang Kim. Mechanical properties of sisal natural fiber composites according to strain rate and absorption ratio[J]. Polymer Composites, 2011, 32(8): 1174-1180.
- [5] Sreekumar P A, Kuruvilla Joseph, Unnikrishnan G. et al. Surface-modified sisal fiber-reinforced eco-friendly composites: Mechanical, thermal, and diffusion studies [J]. Polymer Composites, 2011, 32(1): 131-138.
- [6] Nadir Ayrilmis, Songklod Jarusombuti, Vallayuth Fueangvivat, et al. Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(5): 818-822.
- [7] Li Xianjun, Cai Zhiyong, Jerrold E, et al. Effect of oxalic acid and steam pretreatment on the primary properties of UF-bonded rice straw particleboards[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 33(3): 665-669.
- [8] Guangping Han, James Deng, Shuyin Zhang, et al. Effect of steam explosion treatment on characteristics of wheat straw[J]. Industrial Crops and Products, 2010, 31(1): 28-33.
- [9] Qin Lijun, Qiu Jianhui, Liu Mingzhu, et al. Mechanical and thermal properties of poly (lactic acid) composites with rice straw fiber modified by poly (butyl acrylate)[J]. Chemical Engineering, 2011, 166(2): 772-778.
- [10] Ndazi B S, Karlsson S, Tesha J V, et al. Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels[J]. Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(3): 925-935.
- [11] 刘荣榕, 王鹏, 刘建叶, 等. 微波处理与接枝对 PVC/木粉复合材料结构与性能的影响[J]. 中国塑料, 2007, 21(11): 22-26.
- [12] Liu Rongrong, Wang Peng, Liu Jianye, et al. Effect of microwave treatment and grafting on structure and mechanical properties of PVC/Wood-flour composites[J]. China Plastics, 2007, 21(11): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [12] 柴希娟, 孙可伟. 增容处理对废 PE 木塑复合材料性能和结构的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(4): 33-36.

- Chai Xijuan, Sun Kewei. The effect of capacity increase treatment on the property and structure of waste PE wood-plastic composite[J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2009, 37(4): 33–36. (in Chinese with English abstract)
- [13] Jae Gyoung Gwon, Sun Young Lee, Sang Jin Chun, et al. Effects of chemical treatments of hybrid fillers on the physical and thermal properties of wood plastic composites[J]. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(10): 1491–1497.
- [14] 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 Wen, Wang Li, Liu Anhua. Modification research progress of wood-plastic composites[J]. *Polymer Bulletin*, 2010(3): 61–65. (in Chinese with English abstract)
- [15] 钟鑫. PVC/木纤维复合材料结构与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
Zhong Xin. Research on the Structure and Performance of Composites of Poly(Vinyl Chloride)/Wood-Flour[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘荣榕. PVC/木纤维复合材料的制备及其性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Liu Rongrong. A Study on the Preparation and Properties of PVC/wood Flour Composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孟召辉. 麦秸纤维、废旧塑料与聚丙烯树脂相容性的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 2–4.
Meng Zhaohui. Study on Compatibility of Wheat Straw Fiber, Wasted Plastic and Polypropylene[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 2–4. (in Chinese with English abstract)
- [18] 连海兰, 周定国, 尤纪雪. 麦秸秆成分剖析及其胶合性能的研究[J]. *林产化学与工业*, 2005, 25(1): 69–72.
Lian Hailan, Zhou Dingguo, You Jixue. Studies on layer composites of wheat stalk and the IR adhesion properties[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2005, 25(1): 69–72. (in Chinese with English abstract)
- [19] Liu Ruigang, Yu Hui, Huang Yong. Structure and morphology of cellulose in wheat straw[J]. *Cellulose*, 2005, 12(1): 25–34.
- [20] Sun Runcang, Lawther J M, Banks W B. A tentative chemical structure of wheatstraw[J]. *Industrial Crops and Products*, 1997, 6(1): 1–8.
- [21] 黄玉龙, 庞中存, 崔治家, 等. 小麦秸秆木质纤维素预处理技术研究[J]. *酿酒科技*, 2009 (7): 21–23.
Huang Yulong, Pang Zhongcun, Cui Zhijia, et al. Research on the pretreatment for the degradation of lignocelluloses from wheat straw[J]. *Liquor-Making Science and Technology*, 2009 (7): 21–23. (in Chinese with English abstract)
- [22] 潘明珠, 周定国. 不同预处理方法对稻秸纤维表面性质的影响[J]. *纤维素科学与技术*, 2007, 15(3): 9–13.
Pan Mingzhu, Zhou Dingguo. Effects of different pretreatment on surface characteristics of rice straw fiber[J]. *Journal of Cellulose Science and Technology*, 2007, 15(3): 9–13. (in Chinese with English abstract)
- [23] Han Guangping, Deng James, Zhang Shuyin, et al. Effect of steam explosion treatment on characteristics of wheat straw[J]. *Industrial Crops and Products* 2010, 31(1): 28–33.

Effects of different surface treatment for wheat straw on performances of wood-plastic composites

Yu Min^{1,2}, He Chunxia^{1,2*}, Liu Junjun^{1,2}, Hou Renluan^{1,2}, Xue Jiao^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to improve the interfacial bonding strength of wheat straw fibers and polypropylene (PP), the wheat straw fibers were treated by combined treatment. The surfaces of fibers were pretreated by 5 methods, such as NaOH, acetic acid, hot water, steam explosion and microwave, and then compounded by coupling agent treatment. The wheat straw/PP wood-plastic composites were prepared by blending with PP and wheat straw through melt blending and molding. The mechanical properties, water absorption and moisture absorption performance of the PP wood-plastic composites filled with different surface treated wheat straw fibers were investigated. The tensile sections of the composites were observed by the stereo microscope. The results showed that the mechanical properties, water absorption and moisture absorption performance of PP composites filled with combined treated fibers were excellent that the composites filled with coupling agent treated fibers. It was found that the composites with wheat straw treated by NaOH and acetic acid had good mechanical properties and anti-water absorption and anti-moisture absorption performance, followed by the composites with wheat straw fibers treated by hydrothermal and steam explosion. After combined treatment, the surface of wheat straw became rough, so that the interfacial adhesion of straw fibers and PP matrix was improved. The results of this paper had great practical significance on improving the properties of wheat straw/waste PP wood-plastic composite by straw fiber surface treatment.

Key words: straw, polypropylene, composite materials, surface treatment, combining treatment, mechanical properties