doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.024

预处理对麦秸/聚丙烯复合材料摩擦磨损性能影响实验*

于　旻[1,2]　何春霞[1,2]　张　还[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(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 溶液浸泡、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/PP 复合材料。用体视显微镜观察了不同处理后的麦秸秆纤维微观结构,采用红外光谱技术(FTIR)研究了不同表面处理麦秸秆纤维的红外光谱,用 M-2000A 型磨损实验机测试了麦秸秆不同表面处理方法制备 PP 复合材料摩擦磨损性能,并通过扫描电子显微镜(SEM)观察分析复合材料磨损表面形貌。结果表明,NaOH、水热和蒸汽爆破处理对麦秸秆纤维表面化学成分有明显的影响;复合处理麦秸秆制备的复合材料摩擦磨损性能均优于单纯使用偶联剂处理麦秸秆制备的复合材料;复合材料的主要磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损,水热处理和蒸汽爆破的复合材料耐磨性能较好。

关键词:秸秆　聚丙烯　复合材料　表面处理　摩擦磨损性能

中图分类号:TH117.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2013)07-0138-06

Effect of Different Pretreatments on Tribological Properties of Wheat Straw/Polypropylene Composites

Yu Min[1,2]　He Chunxia[1,2]　Zhang Huan[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 combining treatment. The surfaces of fibers were pretreated by five methods, such as NaOH, soaked in acetic acid solution, hydrothermal treatment, steam explosion treatments and microwave treatment. Then, they were compounded with coupling agent treatment. The wheat straw/PP composites were prepared by melt blending and molding. The microstructure of wheat fibers after different surface treatments was observed by stereo microscope. The infrared spectroscopy of wheat straw fibers after different surface treatments was examined by Fourier transform infrared (FTIR) technology. The tribological properties of PP composites filled with different surface treated wheat straw fibers were investigated by using M-2000A abrasion testing machine. The results showed that NaOH, hydrothermal treatment and steam explosion treatments had significant impact on the chemical composition of wheat straw fiber. The tribological properties of PP composites filled with combined treated fibers excelled than that of the composites filled with coupling agent treated fibers. The main wear mechanisms of worn surfaces were abrasive wear and adhesive wear. It was found that the composites filled with hydrothermal treatment and steam explosion treatment had good tribological properties.

Key words: Straw　Polypropylene　Composite materials　Surface treatment　Tribological properties

收稿日期:2012-07-25　修回日期:2012-08-13

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B03)

作者简介:于旻,博士生,主要从事新型工程材料应用研究,E-mail: abigwizard@sohu.com

通讯作者:何春霞,教授,博士,主要从事高分子及复合材料研究,E-mail: chunxiahe@tom.com

引言

目前，木塑复合材料（WPCs）已广泛应用于建筑铺板、园林景观、栈道和木板路等，行人、车辆与复合材料反复相对运动，同时二者表面常伴有沙粒等杂物，木塑复合材料在反复摩擦中易发生磨损，造成安全隐患，且磨损后的材料不美观，故木塑复合材料耐磨性的研究非常必要。天然木质纤维是 WPCs 的主要原料，相关研究表明，天然纤维化学成分组成对复合材料的性能影响较大[1~12]，纤维表面处理可以提高纤维和基体间结合力，从而改善复合材料性能。NaOH 能去除稻壳表面的二氧化硅，改善稻壳与苯酚甲醛树脂之间的界面结合性[1~2]。酸处理能改变秸秆表面的 pH 值，提高纤维表面的自由基浓度，形成有利于脲醛树脂胶黏剂固化的环境，改善秸秆与脲醛树脂胶黏剂的胶结界面强度，提高秸秆纤维板的性能[3~4]。蒸汽爆破可有效降低天然纤维中纤维素、半纤维素和木质素的含量[5]，对麦秸板的内结合强度、静曲强度、弹性模量和吸水厚度膨胀率都有显著改善[6]。微波辐射能引起秸秆纤维表面形貌的变化，增大纤维表面粗糙度，形成大量微隙和孔洞，从而有利于与非极性高分子基材料的复合[7~8]。秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，其灰分中 SiO_2 含量较高[9]，SiO_2 在纤维表面形成非极性结构，影响有效吸附和氢键的形成，降低秸秆复合材料的强度[7,10]，因此有必要对秸秆进行表面预处理。目前有关秸秆纤维处理多是单一的偶联剂处理或物理化学处理，文献[11~12]研究表明，复合处理比单一处理木纤维的复合材料性能更好。聚丙烯塑料膜被广泛应用于农膜、包装、化工等领域，它的大量使用造成了严重的白色污染，危及人类的健康和生存。因此探索聚丙烯塑料膜的再利用对环境保护具有现实意义[13~14]。本文对麦秸秆纤维进行复合处理，即分别用 NaOH、乙酸溶液浸泡，水热处理，蒸汽爆破和微波等方法对麦秸纤维表面进行预处理，再对预处理的麦秸纤维进行偶联剂复合处理，将复合处理的麦秸秆纤维与聚丙烯（PP）制备的复合材料进行摩擦磨损性能研究，并对其微观结构进行观察。

1　实验

1.1　原料

麦秸秆，产于江苏省扬中市油坊镇，高速粉碎机粉碎，粒径 0.18 mm，105℃ 干燥；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；聚丙烯（PP）塑料膜，苏州洁利来电器有限公司。

1.2　麦秸秆的表面处理及 PP 复合材料制备

1.2.1　麦秸秆的表面处理

（1）偶联剂处理：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，边搅拌边喷入偶联剂溶液，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 处理：用质量分数为 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，干燥，再用偶联剂处理。

（3）乙酸处理：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，干燥，再用偶联剂处理。

（4）水热处理：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℃ 干燥 24 h，再用偶联剂处理。

（5）蒸汽爆破处理：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℃ 干燥，高速粉碎机粉碎，粒径 0.18 mm，再用偶联剂处理。

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

1.2.2　PP 复合材料制备

根据混炼机滚轴的尺寸，将 PP 膜剪裁成 300 mm × 200 mm 的片状，取处理后的麦秸秆和剪裁后的 PP 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 复合材料。麦秸秆/PP 复合材料中，麦秸秆质量分数为 50%，PP 的质量分数为 50%。

1.3　摩擦磨损性能测试及表征

按照 GB/T 3960—83 在 M－2000A 型磨损实验机上测试麦秸秆/PP 复合材料的摩擦磨损性能。实验在室温条件下进行，滑动速度 200 r/min，载荷 100 N。对偶件为表面喷涂金刚砂（碳化硅）砂轮，粒径为 75 ~ 106 μm，砂轮外径 30 mm，条件为干摩擦。采用 SMZ1000 型体视显微镜观察麦秸秆纤维的微观结构，采用感量为 0.1 mg 的光电分析天平测定试样的磨损质量损失；采用 Nicolet iS－10 型傅里叶变换红外光谱仪（Fourier-transform infrared spectroscopy，FTIR）扫描预处理前后的麦秸秆；采用 JSM－6300 型扫描电子显微镜（SEM）观察复合材料磨损表面形貌。

2　结果与讨论

2.1　不同表面处理方法对麦秸秆纤维的影响

图 1 列出了未处理、NaOH 处理、乙酸处理、水

热处理、微波处理、蒸汽爆破处理的麦秸秆纤维的红外图谱。不同处理方法后的麦秸秆纤维红外图谱与其化学性质关系密切。研究发现,未处理麦秸秆与经过 5 种表面处理的麦秸秆纤维红外吸收峰形状相似,差异在于某些特征峰消失或吸收强度减弱。经过 5 种表面预处理后,波数 3 300 ~ 3 500 cm^{-1} 处分子内羟基—OH(主要来自纤维素、半纤维素、多糖和单糖)伸缩振动谱带明显减弱,说明部分纤维素分子间氢键被破坏。波数 2 915 cm^{-1} 是纤维素中—CH_2反对称伸缩振动的吸收峰,麦秸秆外表面亲脂类物质碳链上的烃基结构在此有吸收峰[15],表明 5 种预处理后麦秸秆纤维素大分子中甲基、亚甲基发生了部分断裂[16]。在 2 852 cm^{-1} 处的肩峰,是碳甲基以及亚甲基中的—CH 对称伸缩振动吸收峰,这些基团主要来自碳水化合物和脂肪族化合物[17],未处理的麦秸秆纤维中此吸收峰较为明显,与之相比,经水热和蒸汽爆破处理后的麦秸纤维中该峰基本消失。波数 1 716 ~ 1 732 cm^{-1} 的吸收峰表征与木质素或半纤维素有关的羧酸脂类化合物以及酮类化合物中羰基 C ═O 伸缩振动[18],未处理麦秸纤维中此吸收峰较明显,蒸汽爆破处理后该峰的强度明显减弱,经水热和 NaOH 处理后,该峰基本消失,说明羰基C ═O受到了一定破坏。1 431 cm^{-1} 和 1 163 cm^{-1} 处是纤维素结构的特征吸收峰,此吸收峰在不同表面预处理后谱带减弱,但变化不大,说明不同表面预处理对纤维素大分子结构的影响不大[19]。波数 1 235 cm^{-1} 的吸收峰归因于乙酰酯键[20],经 NaOH 和水热处理后,该峰消失,说明 NaOH 处理和水热处理使木质素与碳水化合物之间的酯键发生了断裂,木质素与纤维素、半纤维素之间的部分连接键受到了破坏,这种破坏有利于让纤维素和半纤维素从木质素的包裹中释放出来。1 158 cm^{-1} 表征碳水化合物中C—O—C不对称伸缩振动的吸收峰,经过不同预处理后这些官能团吸收峰有所降低[21]。1 031 cm^{-1} 处的吸收峰为有机硅 Si—O—Si 反对称伸缩振动,经 NaOH、水热和蒸汽爆破处理后该峰强度明显降低。896 cm^{-1} 是 β-D 葡萄糖基特性和分子内的氢键吸收峰,经过 5 种表面预处理后,该峰吸收强度有不同程度的减弱,说明部分 β-(1,4)-糖苷键的断裂,纤维素发生了分子间结构的变化,这种变化表明 5 种表面预处理对分子内氢键产生了一定破坏作用。

从 FTIR 分析看出,5 种表面预处理能破坏麦秸秆纤维素分子间的氢键。经 NaOH、水热和蒸汽爆破处理的麦秸纤维能明显破坏纤维中的碳水化合物和脂肪族化合物,并降低有机硅 Si—O—Si 反对称伸缩振动。蒸汽爆破可明显破坏木质素或半纤维素有关的羧酸脂类化合物以及酮类化合物中的羰基。麦秸秆经 NaOH 和水热处理后,木质素与碳水化合物之间的酯键发生了断裂,使得木质素与纤维素、半纤维素之间的部分连接键受到了破坏,有利于纤维素和半纤维素从木质素的包裹中释放出来。

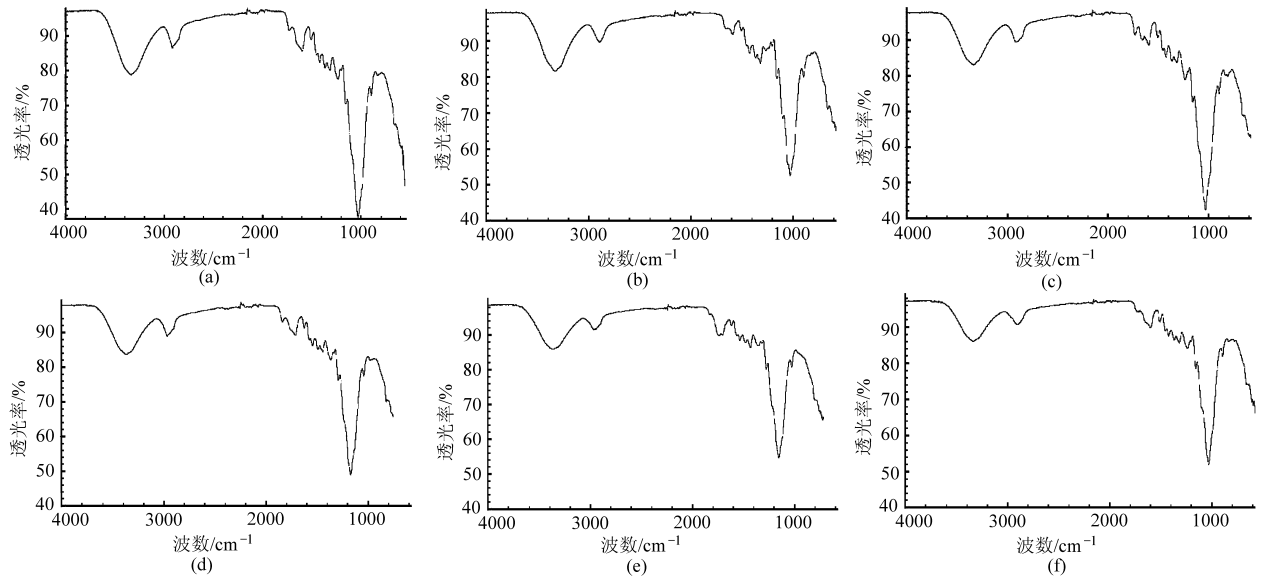

图 1 不同表面处理麦秸秆纤维的红外图谱

Fig. 1 FTIR of straw fibers with different surface treatments

(a) 未处理 (b) NaOH 处理 (c) 乙酸处理 (d) 微波处理 (e) 水热处理 (f) 蒸汽爆破处理

2.2 不同表面处理方法对麦秸秆/PP 复合材料摩擦磨损性能的影响

图 2 为不同表面处理麦秸秆制备的 PP 复合材料磨损质量损失和摩擦因数随转数变化的曲线。可以看出,复合材料的磨损质量损失和摩擦因数随着转数的增加而增大,基本呈线性上升趋势。0 ~

1 000 r 时，磨损质量损失和摩擦因数较平缓，为较软的 PP 基体先期磨损。2 000 ~ 6 000 r 时，麦秸纤维不断突起，在磨损表面形成纤维的“露头”（图 3d），同时少量剥落的纤维在外力作用下形成细小磨粒，磨损质量损失和摩擦因数都有较明显增加。7 000 ~ 10 000 r 时，不断剥落的麦秸纤维使磨损表面“粗糙”，进而摩擦界面的相对运动阻力不断增大，导致磨损质量损失和摩擦因数的增大。

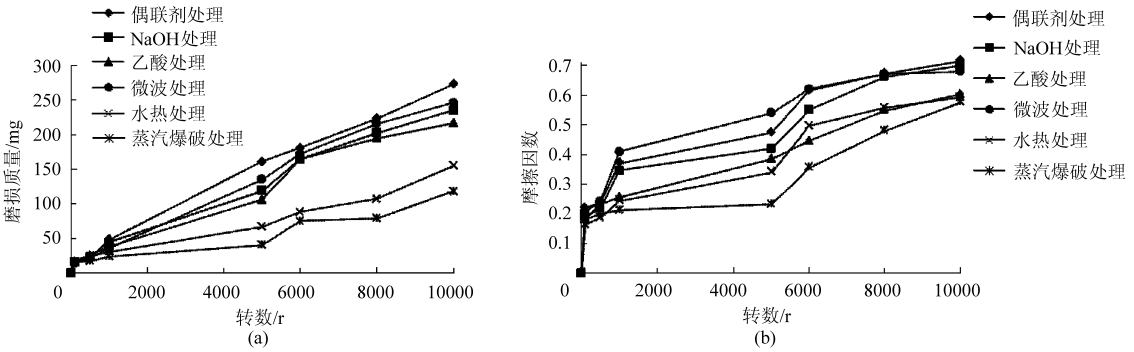

图 2　不同表面处理麦秸秆/PP 复合材料摩擦磨损性能曲线

Fig. 2　Tribological properties of PP composites with different surface treatments

（a）磨损质量损失　（b）摩擦因数

图 2 还可以看出，经复合处理的麦秸秆与 PP 复合材料摩擦磨损性能均优于单纯使用偶联剂处理的麦秸秆与 PP 复合材料，其中水热和蒸汽爆破复合处理的效果最佳。10 000 r 时，水热和蒸汽爆破处理的 PP 复合材料比单纯使用偶联剂处理的 PP 复合材料的磨损质量损失分别降低了 43.2% 和 56.7%，摩擦因数分别降低了 17.2% 和 19.4%。这可能是因为水热处理能在不改变秸秆细胞壁纤维状结构的情况下，溶解麦秸秆中少量脂肪类物质和碳水化合物（图 1e），引起了蜡质层的去除和部分半纤维素的降解；蒸汽爆破处理能使大部分半纤维素降解（图 1f），部分木质素溶解，爆破使纤维束增加，并改善润湿性，有利于改善秸秆纤维与基体的相容性。随后在复合偶联剂处理时，偶联剂能充分浸润麦秸秆内层纤维，与基体间形成较强的界面结合力，从而使秸秆纤维在一定载荷范围内起到承载作用，抑制犁沟的扩展和 PP 的塑性变形，减轻了磨粒的嵌入和切削作用（图 3e、3f），提高了 PP 复合材料的耐磨性。

NaOH、乙酸和微波处理方法对 PP 复合材料的磨损质量损失和摩擦因数的改善作用次之。这可能是由于 NaOH 处理对麦秸秆微观结构和化学成分改变较大，降低了纤维的强度，使麦秸秆纤维承载作用不明显。乙酸处理不能完全去除麦秸秆的非极性表层，也有研究表明，用弱酸、弱碱处理秸秆，对原料表面的浸润性影响不大[4]，麦秸秆与 PP 基体相容性较弱，纤维在摩擦过程中易脱落。微波预处理后，秸

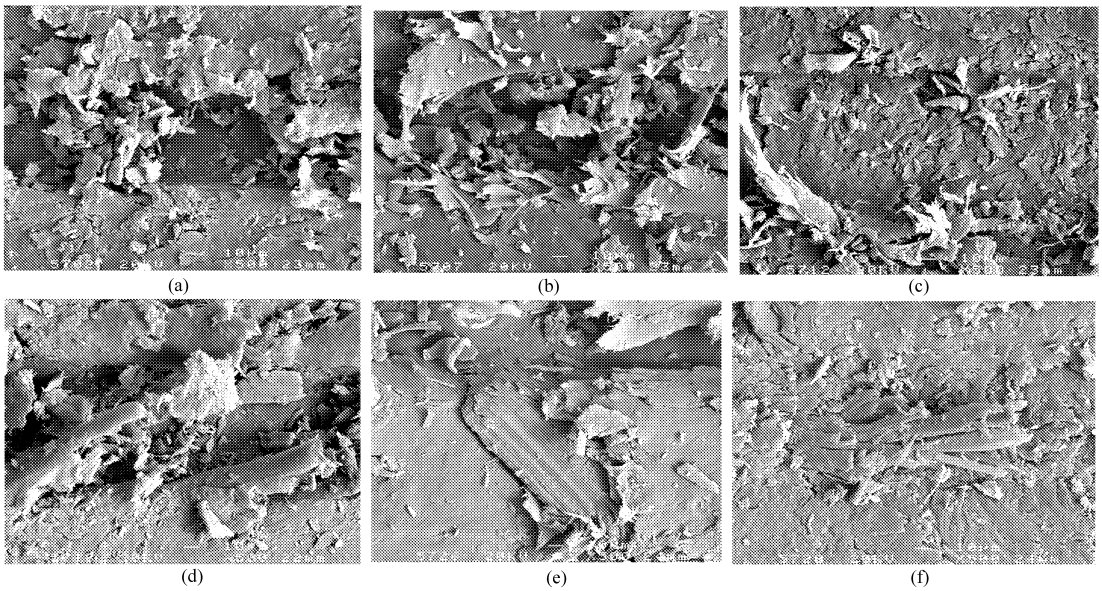

图 3　麦秸秆/PP 复合材料摩擦磨损表面形貌的 SEM 照片（×500）

Fig. 3　SEM images of tribological surfaces of wheat straw fibers/PP composites（×500）

（a）未处理　（b）NaOH 处理　（c）乙酸处理　（d）微波处理　（e）水热处理　（f）蒸汽爆破处理

秆纤维表面虽然出现裂纹和微隙(见文献[22]中图 3d),但对化学成分影响不大,秸秆表面仍比较光滑,在 PP 基体中难以形成“胶钉”,不利于提高复合材料的耐磨性。

2.3 麦秸秆/PP 复合材料磨损面的微观结构分析

图 3 和图 4 为 PP 复合材料摩擦磨损表面形貌的 SEM 照片,可以看出,NaOH、乙酸和微波处理麦秸秆的 PP 复合材料磨损表面粗糙,犁沟明显,有秸秆纤维从基体 PP 中拔出空洞和缺陷(图 3b、3c、3d)。PP 复合材料表面出现明显的犁沟和脊骨形态(图 4),这表明复合材料表面受到对偶件上磨粒的切削和犁沟作用,导致 PP 复合材料磨粒磨损和粘着磨损。犁沟的宽度和深度与麦秸秆处理方法有关。从图 4e、4f 可以看出,经蒸汽爆破和水热处理麦秸秆的 PP 复合材料磨损表面比较平整,犁沟和脊骨现象不明显,说明麦秸秆纤维和基体 PP 界面相容性较好,在摩擦过程中,麦秸秆纤维能承受载荷作用(图 3e、3f),并能吸收摩擦热,阻止 PP 变形和微观熔融,提高了 PP 复合材料的耐磨性。

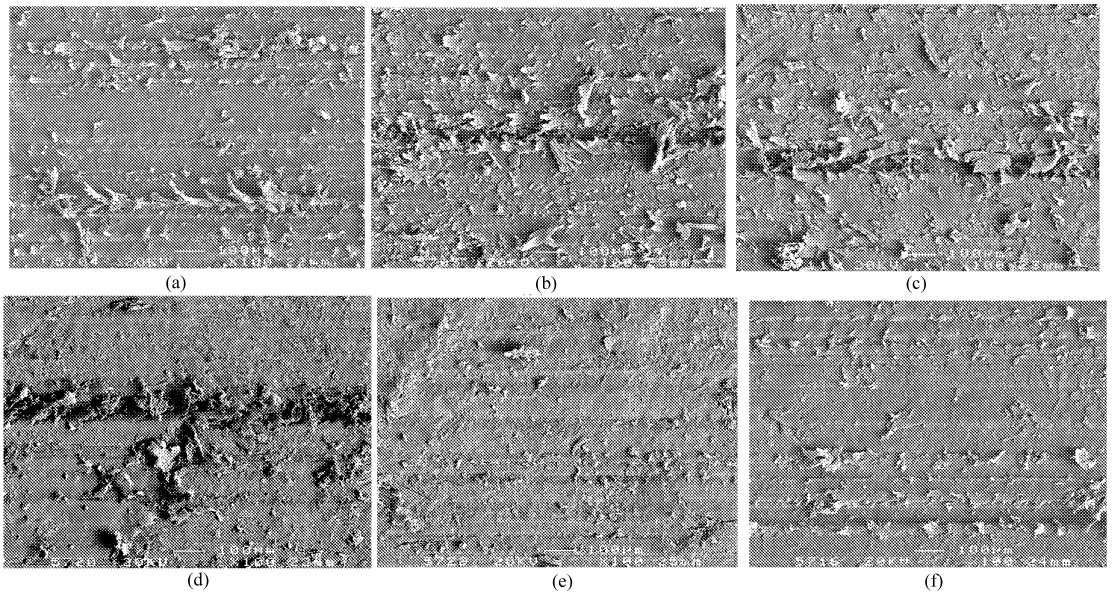

图 4 麦秸秆/PP 复合材料摩擦磨损表面形貌的 SEM 照片(×100)

Fig. 4 SEM images of tribological surfaces of wheat straw fibers/PP composites (×100)

(a) 未处理 (b) NaOH 处理 (c) 乙酸处理 (d) 微波处理 (e) 水热处理 (f) 蒸汽爆破处理

3 结论

(1)5 种表面预处理能破坏麦秸秆纤维素分子间的氢键,但对纤维素大分子结构影响不大。NaOH、水热和蒸汽爆破处理能明显破坏麦秸秆纤维的脂肪族化合物,并降低有机硅含量。NaOH 和水热处理有利于让麦秸秆的纤维素和半纤维素从木质素的包裹中释放出来。

(2)复合处理麦秸秆纤维制备的 PP 复合材料摩擦磨损性能均优于单纯使用偶联剂处理麦秸秆制备的复合材料摩擦磨损性能,麦秸秆经复合处理后,PP 复合材料的耐磨性得到改善。

(3)PP 复合材料的主要磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损,水热处理和蒸汽爆破的 PP 复合材料耐磨性能较好,乙酸和微波处理麦秸秆对复合材料性能没有显著改善。

参 考 文 献

1 Daniel P Pfister, Richard C Larock. Green composites from a conjugated linseed oil-based resin and wheat straw[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010,41(9):1 279 ~ 1 288.

2 Reddy C R, Sardashti A P, Simon L C. Preparation and characterization of polypropylene-wheat straw-clay composites[J]. Composites Science and Technology,2010,70(12): 1 674 ~ 1 680.

3 Wayne Wasylciw, Sunguo Wang. Straw-based composite panels: attributes, issues and UF bonding technology[C]// Proceedings of the 35th International Particle board Composite Materials Symposium,2001:24 ~ 33.

4 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)

5 Ramos Luiz Pereira. The chemistry involved in the steam treatment of lignoeellulosie materials[J]. Quimica Nova,2003,26(6):

863 ~ 871.

6 付顺鑫,韩广萍,程万里. 蒸汽爆破改性处理对麦秸板性能的影响[J]. 东北林业大学学报,2011,39(4):99 ~ 101.
Fu Shunxin, Han Guangping, Cheng Wanli. Effect of steam explosion modification on properties of strawboard[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(4):99 ~ 101. (in Chinese)

7 邓华,李淳,曾秋苑,等. 微波辐射下秸秆纤维微观结构的变化[J]. 分析测试学报,2010,29(4):336 ~ 340.
Deng Hua, Li Chun, Zeng Qiuyuan, et al. Variation of microstructure of straw fiber irradiated by microwave[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2010,29(4):336 ~ 340. (in Chinese)

8 Mo Xiaoqun, Cheng Enzhi, Wang Donghai, et al. Physical properties of medium-density wheat straw particle board using different adhesives[J]. Industrial Crops and Products, 2003, 18(1): 47 ~ 53.

9 Khulbe K C, Feng C Y, Matsuura T, et al. Characterization of surface-modified hollow fiber polyethersulfone membranes prepared at different air gaps[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104(2): 710 ~ 721.

10 Deepanjan Bhattachary, Louis T Germiaro, William T Winter. Isolation, preparation and characterization of cellulose microfibers obtained from bagasse[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 73(3): 371 ~ 377.

11 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)

12 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)

13 马占峰,张冰. 2008 年中国塑料回收再生利用行业状况[J]. 中国塑料,2009, 23(7):1 ~ 5.
Ma Zhanfeng, Zhang Bing. 2008 China plastic recycling industry conditions[J]. China Plastics, 2009, 23(7):1 ~ 5. (in Chinese)

14 朱道平. 塑料包装废弃物回收处理及进展[J]. 上海塑料,2009(3):25 ~ 29.
Zhu Daoping. Plastic packaging waste recycling and progress[J]. Shanghai Plastic, 2009(3):25 ~ 29. (in Chinese)

15 王雪飞. 脂肪酶改善麦秸表面浸润性能的研究[D]. 南京:南京林业大学,2009:31 ~ 33.
Wang Xuefei. The improvement in the wettability of wheat straw surface by lipases[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009:31 ~ 33. (in Chinese)

16 庞云芝. 基于提高麦秸厌氧消化性能的碱预处理方法研究及工程应用[D]. 北京:北京化工大学,2010:60 ~ 61.
Pang Yunzhi. The study on technology and mechanism of wheat straw alkali pretreatment for enhancing biogas production and the engineering application[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2010:60 ~ 61. (in Chinese)

17 邢莹. 乙酰化和苄基化稻草的结构表征[D]. 沈阳:东北大学,2008:31 ~ 35.
Xing Ying. Structural characterization of acetylated and benzaylated rice straw[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 31 ~ 35. (in Chinese)

18 Gastaldi G, Capretti G, Focher B, et al. Characterization and proprieties of cellulose isolated from the *Crambe abyssinica* hull [J]. Industrial Crops and Products, 1998,8(3): 205 ~ 218.

19 鲁杰,石淑兰,杨汝男,等. 纤维素酶酶解苇浆纤维微观结构和结晶结构的变化[J]. 中国造纸学报,2005,20(2):85 ~ 90.
Lu Jie, Shi Shulan, Yang Runan, et al. Modification of reed cellulose microstructure and IT change in enzymatic hydrolysis of reed pulp[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2005,20(2):85 ~ 90. (in Chinese)

20 何建新,唐予远,王善元. 醋酸纤维素的结晶结构与热性能[J]. 纺织学报,2008,29(10):12 ~ 16.
He Jianxin, Tang Yuyuan, Wang Shanyuan. Crystalline structure and thermal property of cellulose acetate[J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(10):12 ~ 16. (in Chinese)

21 Xiao B, Sun X F, Sun R C. Chemical, structural, and thermal characterization of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001,74(2):307 ~ 319.

22 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 CSAE, 2012, 28(9):171 ~ 177. (in Chinese)